

RICHARD TAILLET | LOÏC VILLAIN | PASCAL FEBVRE

DICTIONNAIRE DE PHYSIQUE



5^e édition

> + de 7 000 termes

> Nombreuses
références historiques

> 3700 références
bibliographiques

DICTIONNAIRE DE **PHYSIQUE**

RICHARD TAILLET | LOÏC VILLAIN | PASCAL FEBVRE

DICTIONNAIRE DE PHYSIQUE

5^e édition

> + de 7 000 termes

> Nombreuses
références historiques

> 3 700 références
bibliographiques

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : **www.deboecksuperieur.com**

© De Boeck Supérieur s.a., 2023
Rue du Bosquet, 7 – B-1348 Louvain-la-Neuve

5^e édition

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :

Bibliothèque nationale, Paris : Septembre 2023

Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2023/13647/126

ISBN : 978-2-8073-4822-6

Sommaire

Avant-propos	iii
Liste des figures	797
Liste des tables	799
Quelques longueurs typiques	800
Quelques masses typiques	801
Quelques températures typiques	802
Alphabet grec	803
Symboles mathématiques	804
Formulaire mathématique	806
Vecteurs	808
Constantes physiques	809
Unités	810
Multiples et sous-multiples	813
Liste des éléments	814
Prix Nobel de physique	817
Quelques prix Nobel de chimie	825
Chronologie	826
Lexique anglais-français	837
Index	877

Avant-propos

Pourquoi ?

À l'heure des moteurs de recherche et des excellentes encyclopédies collaboratives en ligne, de la montée en puissance de l'intelligence artificielle conversationnelle, pourquoi consulter (et *a fortiori* pourquoi écrire) un dictionnaire de physique ? Nous posions cette question dans l'avant-propos de la première édition de cet ouvrage, en 2008, et les réponses, multiples, n'ont pas changé. D'une part, il est fréquent d'avoir besoin d'un ensemble de définitions synthétiques de termes ou de concepts, utilisant des notations homogènes. D'autre part, l'utilisation régulière des outils que nous venons de citer révèle qu'il est parfois difficile de faire le tri parmi les multiples résultats d'une requête sur un moteur de recherche, et qu'il est tout aussi difficile de trancher entre plusieurs définitions qui semblent contradictoires. Ensuite, ces outils ne permettent pas, en général, d'estimer l'autorité scientifique de l'auteur ni la pertinence de l'information trouvée. Enfin, on pourrait évoquer le simple goût du papier, le plaisir d'une page tournée, la promenade du regard et la possibilité de découvertes fortuites.

Pour qui ?

Cet ouvrage a été écrit pour des étudiants de premier cycle universitaire, en Licence ou en Classes préparatoires aux Grandes Écoles, avec quelques prolongements destinés à des étudiants de Master. Il devrait aussi pouvoir intéresser les étudiants préparant les concours d'enseignement (CAPES et agrégation de sciences physiques), ainsi que les enseignants et les chercheurs en physique. Les personnes désireuses de se rafraîchir la mémoire sur des concepts oubliés pourraient aussi lui trouver un intérêt. Enfin, nous espérons que le simple curieux puisse prendre quelque plaisir à sa lecture. L'intérêt que pourra y trouver le lecteur dépendra sans doute de sa formation, de son niveau et de ses goûts personnels, et nous avons choisi de ne faire figurer aucune indication de niveau de difficulté en regard des définitions, pour laisser ouvertes les perspectives de découvertes inattendues.

Nos choix

Cet ouvrage reflète en partie les biais thématiques des auteurs. Nous avons essayé de les minimiser et de présenter une vue équilibrée des différents domaines de la physique auxquels sont confrontés les étudiants en sciences au niveau de la licence. Toutefois, la physique s'étend vers de nombreuses autres disciplines – la chimie, l'électronique, l'ingénierie, les mathématiques, etc. – avec lesquelles les frontières sont parfois floues,

et nous avons dû décider arbitrairement des limites de ce dictionnaire. En particulier, l'électronique n'est que peu représentée, nous n'avons fait figurer que les concepts de base et quelques montages très classiques, passages obligés des cours d'introduction à la discipline. De même, la physico-chimie n'est abordée que dans les cas où un point de vue de physicien peut être adopté franchement. Quant aux mathématiques, les définitions s'y rapportant sont données pour leur utilité dans le cadre de la physique et ne prétendent pas remplacer un dictionnaire de mathématiques. Enfin, de nombreux termes techniques pointus ont été écartés, afin de garder à cet ouvrage une certaine légèreté et une certaine cohérence.

Voilà pour ce que ne contient pas ce dictionnaire. En revanche, nous avons délibérément choisi de faire figurer de nombreux concepts modernes, voire naissants, de la physique fondamentale. Des expériences en cours ou à venir sont décrites, afin de donner quelques clés au lecteur au moment où leurs résultats seront annoncés ou affinés. À l'inverse, ce dictionnaire comporte aussi des termes correspondant à des notions réfutées, appartenant plus à l'histoire des idées qu'à la physique telle qu'elle est généralement enseignée (théorie de Lesage, lumière fatiguée, Univers stationnaire, etc.). Nous pensons qu'il est tout aussi important (et intéressant) de comprendre comment ces notions ont pu naître, et pour quelles raisons elles ne sont aujourd'hui plus considérées. Enfin, nous avons aussi inclus quelques termes inclassables, qui nous ont amusés, étonnés ou intéressés à des titres divers.

Les définitions sont agrémentées de nombreuses précisions historiques. Il est parfois difficile d'attribuer une date précise et indiscutable à un événement, une découverte ou l'invention d'un concept, et le lecteur soucieux de rigueur historique est invité à ne prendre les dates mentionnées que comme des repères généraux.

Cet dictionnaire n'est pas une encyclopédie, et ne prétend pas décrire de façon exhaustive chacun des termes définis. Nous avons essayé d'indiquer le maximum de pistes permettant au lecteur désireux d'aller chercher des informations complémentaires. La contrainte de concision nous a obligés à faire des choix dans la présentation des concepts. Si ce dictionnaire pouvait conduire le lecteur au stade où il serait prêt pour remettre ces choix en cause, notre but aura été atteint.

Comment trouver ce qu'on y cherche ?

Cet ouvrage contient un index final très fourni et devrait permettre de localiser rapidement certains termes apparaissant dans des définitions mais ne constituant pas une entrée en eux-mêmes. Ensuite, les expressions composées de plusieurs mots sont placées dans l'ordre alphabétique normal de l'expression toute entière (*dynamo de Bullard* se trouve dans les D), sauf dans quelques cas où un ordre différent nous a semblé plus pertinent (par exemple pour les effets associés à des noms, *effet Peltier* se trouvant à « Peltier (effet) »).

Références bibliographiques

La rédaction de cet ouvrage a donné lieu à la constitution d'une vaste base de données bibliographiques (environ 13 500 entrées), accessible sur internet à l'adresse <http://www.dicodephysique.fr/index.php/bibliographie>. Les entrées concernées sont signalées

ici par le symbole ☞. Nous avons sélectionné une partie de ces références pour les faire apparaître à la suite des entrées concernées dans le présent ouvrage, lorsque nous avons estimé qu’elles offraient un complément intéressant aux définitions proposées. Elles peuvent offrir un éclairage pédagogique, disciplinaire ou relatif à l’histoire des sciences. Les références de livres sont repérées par le symbole ● et celles pointant vers des articles par ▷.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement Fabrice Chrétien, qui aux Éditions de Boeck Supérieur nous a accordé sa confiance et son soutien pendant toute la réalisation de ce projet, de l’idée initiale aux éditions qui se sont succédé. Pour leurs relectures, leurs remarques et leurs conseils, merci aussi à David Maurin, Marie Ginibre, Laurent Gallot, Luc Frappat, Éric Pilon, Frank Thuillier, Éric Ragoucy, Joaquín Fernández Rossier, Sean Bailly (merci et merci!), Alexandra Garrigue, Claire Dehos, Benjamin Golly, Elvire Bouvier, Sébastien Valat, Marie-Élisabeth Maury, aux étudiants de L1, de M1 et de préparation au CAPES de physique-chimie de l’université de Savoie Mont Blanc. Nous remercions chaleureusement Christophe Gay et Michel Mouly pour avoir relu et commenté le manuscrit de la première édition. Merci aussi à Robert Fleckinger pour ses nombreux commentaires pour la préparation de la deuxième édition. Nous avons abondamment consulté le superbe site P²EACH, aujourd’hui malheureusement disparu, et nous tenons à remercier leurs deux auteurs, Sean Bailly et Anthony Hillairet.

Plusieurs personnes ont eu la gentillesse de nous signaler des coquilles ou des erreurs, merci à eux, merci à Michel Rieutord, Silvano Bonazzola, Éric Gourgoulhon, Valérie Le Boulch, Amaury Mouchet et Kevin Morand. Loïc remercie spécialement Olivier Pène pour sa relecture et ses explications mésoniques (et pas seulement). Merci aussi au Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies (Jussieu) et en particulier à Pierre Astier, pour avoir fourni les ressources informatiques utilisées pour écrire les premières éditions de cet ouvrage (php, MySQL, stockage des bases et espace www). Au cours de l’écriture de cet ouvrage, Loïc Villain a bénéficié du soutien d’Ania, du LUTH (Observatoire Paris-Meudon/CNRS), du CAMK¹, du DFA² ainsi que de ses collègues du Département de Physique de l’Université de Tours et du LMPT. Pascal Febvre exprime toute sa gratitude à Biljana, Anastasia et Gabriela pour leur compréhension durant sa participation à la rédaction de cet ouvrage. Enfin, Richard Taillet remercie son entourage personnel et professionnel pour la liberté qui lui a été accordée pour mener à bien ce projet.

1. Polska Akademia Nauk, en particulier grâce au programme LEA Astro-PF.

2. Universidad de Alicante, grâce à une bourse Intra-Européenne Marie Curie sous le contrat MEIF-CT-2005-025498.

A

a ► 1. Symbole de l'année, unité de temps. ► 2. Symbole du préfixe atto (10^{-18}).

A ► 1. Symbole de l'ampère, unité de courant électrique. ► 2. Notation usuelle du nombre de masse. ► 3. Notation de l'énergie libre dans les ouvrages anglo-saxons. ► 4. Le vecteur $\vec{A}$ est traditionnellement utilisé pour désigner le potentiel vecteur en électromagnétisme.

Å Symbole de l'ångström, unité de longueur.

ab initio  (angl. *ab initio*) Qualifie un calcul qui repose uniquement sur les principes d'une théorie, et non sur certains paramètres ou modèles empiriques simplifiés issus de l'analyse de données expérimentales. Par exemple, un objectif important de la physique atomique est de calculer *ab initio* les niveaux d'énergie des atomes à plusieurs électrons à partir des lois de la physique quantique, alors qu'en physique nucléaire, on essaie d'expliquer de cette façon les propriétés des noyaux atomiques en utilisant celles des nucléons et de leurs interactions.

- ▷ *Computational Materials Science : The Era of Applied Quantum Mechanics*, Jerzy Bernholc, *Physics Today* **52** (1999) p. 30
- ▷ *Les matériaux virtuels*, Pablo Jensen & Xavier Blase, *La Recherche* **352** (2002) p. 40
- ▷ *Ab-initio study of the electromagnetic response and polarizability properties of carbon chains*, M. Bianchetti, P.F. Buonsante *et al.*, *Physics Reports* **357** (2002) p. 459
- ▷ *Les calculs ab initio en physique du solide*, X. Blase, *Images de la Physique* (2003) p. 11
- ▷ *Chemistry on the computer*, Martin Head-Gordon & Emilio Artacho, *Physics Today* **61** (2008) p. 58

abampère [abA] (angl. *abampere*) Unité d'intensité électrique (symbole **abA**) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (▷ *unités électromagnétiques*). Il est défini comme l'intensité qui doit parcourir deux fils séparés par une distance égale à 1 cm pour exercer l'un sur l'autre une force d'Ampère valant 2 dynes par cm, ce qui implique la correspondance

$$1 \text{ abA} = 1 \text{ g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

La relation entre l'abampère et l'ampère du Système International d'unités est $1 \text{ abA} = 10 \text{ A}$, mais il s'agit d'un abus de notation car l'intensité électrique n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités. L'abampère est aussi nommé **Biot** (symbole **Bi**).

abaque  (angl. *abacus* ; *chart* ; *nomogram*) Ensemble de courbes de référence dans lequel chaque courbe représente la relation entre deux grandeurs pour une va-

leur donnée d'un certain paramètre. Les abaques ont longtemps été utilisés pour déduire graphiquement une grandeur d'une autre, ou pour déterminer un paramètre par la mesure des deux grandeurs en question. De nos jours, on a plutôt tendance à utiliser un ordinateur qui permet également de faire des calculs dans des situations plus complexes, pour lesquelles plusieurs grandeurs et paramètres interviennent.

- ▷ *[Histoire des Sciences] Le mystérieux abaque de Gerbert d'Aurillac*, Alain Schärlig, *Pour la Science* **414** (2012) p. 88

abaque de Smith (angl. *Smith chart*) Diagramme permettant de représenter l'évolution de l'impédance complexe le long d'une ligne de transmission hyperfréquence. L'abaque de Smith permet d'identifier graphiquement de manière simple les zones pour lesquelles la ligne est inductive ou capacitive, ou encore pour lesquelles un point de la ligne se comporte comme un circuit ouvert ou un court-circuit, du fait des ondes stationnaires qui peuvent apparaître. Cet abaque permet également de visualiser graphiquement l'admittance, le coefficient de transmission ou le taux d'onde stationnaire en tout point de la ligne.

Abbe (Ernst)  (1840–1905) Physicien allemand, rendu célèbre par ses nombreux travaux en optique. Ceux-ci ont permis des avancées fondamentales, grâce notamment à la compréhension du lien entre la formation des images et la diffraction (▷ *théorie d'Abbe*) ou encore grâce à la formulation de la condition des sinus d'Abbe, pour qu'un système centré ne présente ni aberration de sphéricité ni de coma. Abbe a aussi fait progresser l'optique appliquée, ayant dirigé la société Zeiss et ayant mis ses compétences au profit de la construction de lentilles de meilleure qualité.

- ▷ *Ernst Abbe and the Foundation of Scientific Microscopes*, Barry R. Masters, *Optics and Photonics News* **18** (2007) p. 18

Abbe (expérience d') (angl. *Abbe experiment*) Expérience dans laquelle on modifie l'apparence de l'image d'un objet par une lentille, ou un système optique plus général, en altérant la distribution de lumière dans le plan focal de cette dernière. Dans ce plan, la lumière est en effet distribuée selon la transformée de Fourier spatiale de l'objet (▷ *optique de Fourier*) et l'on peut donc filtrer les basses fréquences (accentuer les contrastes, ▷ *strioscopie*) ou les hautes fréquences spatiales (détramage ou atténuation des contrastes) en masquant certaines zones du plan focal. Le filtrage des hautes fréquences spatiales est par exemple mis en œuvre dans certains objectifs photographiques, pour adoucir les images. On peut aussi effectuer ainsi de spectaculaires manipulations d'image,

comme transformer celle d'une grille, constituée de lignes horizontales et verticales, en une série de lignes obliques.

Abbe (nombre d') (angl. *Abbe number*) ▷ *constrigence*.

Abbe (théorie d')  (angl. *Abbe theory*) Il ne s'agit pas d'une théorie à proprement parler, mais d'une manière d'interpréter la formation de l'image d'un objet par un instrument d'optique. Cette approche, proposée en 1872 par Ernst Abbe (1840–1905), se concentre sur la diffraction de la lumière provoquée par la traversée du système optique, notamment au niveau de ses ouvertures. En raison de ce phénomène, il se forme une figure de diffraction en tout plan situé derrière l'instrument, en particulier dans le plan focal image. La théorie d'Abbe s'appuie sur le principe de Huygens-Fresnel, en considérant que l'image finalement produite par l'instrument résulte de l'interférence de tous les rayons issus de ce plan. Grâce à cette approche, et en étudiant les propriétés de la distribution de lumière dans leur plan focal image, Abbe mit clairement en évidence l'origine des limitations du pouvoir de résolution des microscopes optiques.

▷ *The Abbe Theory of Microscopic Vision and the Gibbs Phenomenon*, G. L. Rogers, *American Journal of Physics* **22** (1954) p. 384

▷ *An Elementary Theoretical Approach to the Abbe Theory of Optical Image Formation*, Anthony Gerrard, *American Journal of Physics* **31** (1963) p. 723

abcoulobomb [abC] (angl. *abcoulobomb*) Unité de charge électrique (symbole abC ou aC) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (▷ *unités électromagnétiques*), où on la définit à partir de l'abampère (symbole abA), par la relation

$$1 \text{ abC} = 1 \text{ abA} \cdot \text{s}.$$

La relation entre l'abcoulobomb et le coulomb du Système International d'unités est $1 \text{ abC} = 10 \text{ C}$, mais il s'agit d'un abus de notation car la charge électrique n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités.

abélien (angl. *Abelian*) ▷ *commutatif*.

aberration (angl. *aberration*) Dégradation de la qualité des images formées par un système optique, lorsque la condition de stigmatisme rigoureux n'est pas vérifiée. On distingue deux types d'aberrations. ► **1.** Le terme **aberration géométrique** désigne de façon générique les modifications des images résultant des écarts par rapport aux conditions de Gauss. Un pinceau lumineux issu d'un point objet B ne converge généralement pas exactement à la position de l'image paraxiale B'_0 , mais les rayons qui le composent interceptent le plan image en un ensemble de points B' qui forment une tache. La distribution des rayons lumineux autour de B'_0 et l'écart entre B' et B'_0 dépendent de la direction du rayon lumineux considéré et de la distance à l'axe de B , c'est-à-dire des paramètres h , r et θ indiqués sur la figure. L'expression générale de cet écart fait intervenir divers produits de puissances de r , h , $\cos \theta$ et $\sin \theta$, ce qui permet de définir plusieurs

types d'aberrations géométriques. On appelle **aberrations primaires** ou **aberrations de Seidel** les termes en $r^m h^n$ pour lesquels $m + n = 3$ (pour des raisons de symétrie il n'y pas de termes de degré plus bas). Dans le cas d'un système optique présentant la symétrie de révolution autour de l'axe optique, on distingue parmi celles-ci :

- l'**aberration de sphéricité** en r^3 . Elle dépend de la direction du pinceau lumineux, mais pas de h ; c'est donc une **aberration d'ouverture**. Cette aberration est la seule qui subsiste lorsque l'objet se trouve sur l'axe optique;
- l'**aberration de coma** en hr^2 . La tache lumineuse qui en résulte est constituée d'une superposition de cercles de rayons proportionnels à la distance à B . Elle ressemble donc à une comète, ce qui explique son nom. On l'appelle aussi **aigrette**;
- l'**astigmatisme** en $h^2 r$, une aberration surtout importante pour les objets assez éloignés de l'axe optique. En présence d'astigmatisme, il existe deux endroits où le faisceau lumineux se pince, et selon des directions orthogonales (pour une illustration, ▷ *astigmatisme*). En conséquence, le système optique n'est pas stigmatique de la même manière pour des rayons appartenant aux deux plans perpendiculaires contenant la direction moyenne du pinceau;
- la **courbure de champ** en $h^2 r$, qui se distingue de l'astigmatisme en ce qu'elle ne dépend pas de l'orientation de l'objet AB dans le plan perpendiculaire à l'axe optique. Cette aberration traduit le fait que la surface conjuguée au plan objet est courbe : l'image de B n'est pas située dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par A' ;
- la **distorsion** en h^3 . Cette aberration, qui ne dépend que de la position de B , se traduit par une déformation des images.

Les trois dernières sont dites **aberrations d'inclinaison** ou **aberrations de champ** car elles dépendent de h . Les termes $r^m h^n$ pour lesquels $m + n = 5$ sont quant à eux nommés **aberrations secondaires**. On peut limiter certaines de ces aberrations en ajustant les paramètres du système optique (notamment la courbure des dioptries et l'indice de réfraction des matériaux utilisés). Par définition, s'approcher des conditions de Gauss les limite toutes. Pour plus de détails : ▷ *aberration de sphéricité*, *coma*, *astigmatisme*, *courbure de champ*, *distorsion*, *image tangentielle*, *image sagittale*. ► **2.** Le terme **aberration chromatique** désigne le phénomène par lequel des rayons issus d'un même point objet, passant par les mêmes parties d'un système optique, mais correspondant à des fréquences différentes, c'est-à-dire à des couleurs distinctes, ne convergent pas au même endroit. Il découle du fait que la valeur de l'indice de réfraction du milieu qui constitue la lentille varie avec la fréquence de la lumière (▷ *dispersion*). En raison de cette aberration, la position du foyer image d'une lentille simple dépend de la fréquence de l'onde associée au rayon considéré. Les systèmes optiques sont généralement conçus pour

limiter cet effet gênant (▷ *doublet achromatique*, *oculaire de Huygens*).

- ▷ *Observational defects in eighteenth-century British telescopes*, A.J. Meadows, *Annals of Science* **26** (1970) p. 305
- ▷ *Refractive Surgery and Optical Aberrations*, Susana Marcos, *Optics and Photonics News* **12** (2001) p. 22
- ▷ *Chromatic aberration of eyepieces in early telescopes*, M. Eugene Rudd, *Annals of Science* **64** (2007) p. 1
- ▷ *Spherical aberration, coma, and the Abbe sine condition for physicists who don't design lenses*, Alex Small, *American Journal of Physics* **86** (2018) p. 487
- ▷ *[Idées de physique] De la profondeur avec du rouge et du bleu*, Édouard Kierlik & Jean-Michel Courty, *Pour la Science* **509** (2020) p. 88

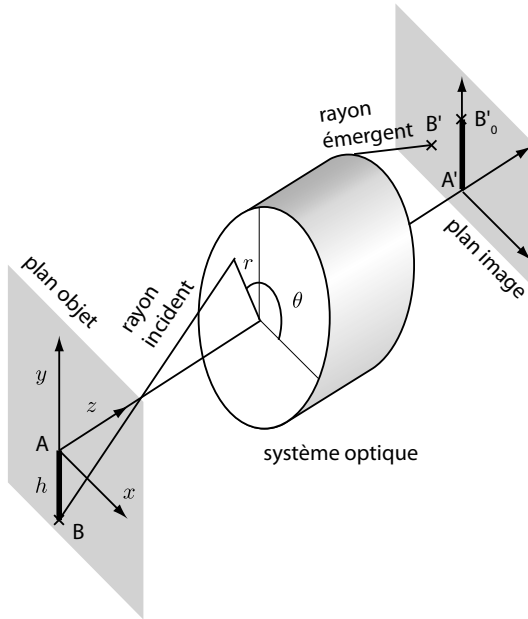


FIGURE 1 – aberration (1) – Marche d'un rayon lumineux issu d'un point B et atteignant le plan de l'image paraxiale en B'. On peut repérer la direction du rayon incident par les coordonnées (r, θ) du point auquel il entre dans le système optique.

aberration d'inclinaison Nom générique des aberrations géométriques qui dépendent de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport à l'axe optique (▷ *aberration*). Pour un système optique à symétrie de révolution, il s'agit essentiellement de l'aberration de coma, de la courbure de champ et de la distorsion.

aberration d'ouverture Nom générique des aberrations géométriques qui ne dépendent pas de la distance de l'objet à l'axe optique (▷ *aberration*). Pour un système optique à symétrie de révolution, il s'agit essentiellement de l'aberration de sphéricité.

aberration de sphéricité (angl. *spherical aberration*) Aberration géométrique qui ne dépend pas de la distance de l'objet à l'axe optique, mais seulement

de la direction des rayons lumineux formant l'image (▷ *aberration*); c'est donc une aberration d'ouverture. C'est la seule aberration qui peut subsister lorsque l'objet se trouve sur l'axe optique. Le niveau d'aberration de sphéricité dans le plan image est déterminé par la caustique externe formée par les rayons lumineux émergeant d'un système optique (▷ *nappe tangentielle*). On peut concevoir des systèmes optiques s'affranchissant de cette dégradation des images en combinant des éléments dont les défauts se compensent, ou en utilisant des éléments asphériques dont le profil est ajusté dans ce but. Par exemple, le miroir primaire du télescope spatial Hubble présentait une aberration de sphéricité importante, suite à une erreur d'usinage de l'ordre du micron. Celle-ci a été corrigée par l'adjonction d'un miroir asphérique supplémentaire (COSTAR pour « *Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement* ») dont l'aberration compensait celle du miroir primaire (▷ *télescope spatial Hubble*). Pour une lentille, on peut limiter cette aberration en l'utilisant selon la règle « plus plat plus près ». Cette aberration est aussi appelée **aberration sphérique**.

- ▷ *[Notes and Discussions] On the nature of spherical aberration*, P. W. Hawkes, *American Journal of Physics* **46** (1978) p. 433

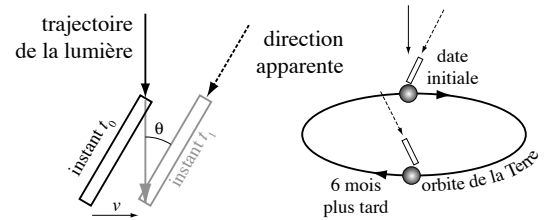


FIGURE 2 – aberration stellaire – Du fait de la vitesse de la Terre par rapport à celle d'une étoile qu'on observe, il faut pencher le télescope pour recueillir la lumière, qui semble provenir d'une direction légèrement différente (figure de gauche). Sur son orbite, la vitesse de la Terre prend des orientations différentes par rapport à celle de la lumière qui parvient de l'étoile, et la position apparente de l'étoile varie donc au cours de l'année (figure de droite).

aberration stellaire (angl. *stellar aberration*) Variation annuelle de la position apparente des étoiles dans le ciel, due à la modification continue de la direction de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil. La position apparente d'une étoile est déterminée par la direction dont nous parvient la lumière, qui, pour un observateur terrestre, résulte de la composition vectorielle de la vitesse de la lumière par rapport au Soleil, avec celle de la Terre autour de celui-ci. En toute rigueur cet effet doit être analysé dans le cadre de la relativité restreinte, mais, dans la limite des faibles vitesses, l'angle d'aberration est donné par $\theta = v/c$, où v désigne la vitesse de l'observateur dans la direction perpendiculaire à la direction de l'étoile observée et c la vitesse de la lumière dans le vide. La variation annuelle périodique

de la direction de la vitesse de la Terre induit un mouvement apparent de l'étoile, le long d'une ellipse dont le grand axe est orthogonal à celui de l'orbite terrestre : il y a un déphasage permanent de $\pi/2$ entre la position de la Terre sur sa trajectoire réelle et celle de l'étoile sur sa trajectoire apparente. Pour des étoiles situées dans une direction perpendiculaire au plan orbital de la Terre, le mouvement est quasiment circulaire, avec un rayon angulaire de 20,6 secondes d'arc. Ce phénomène ne doit pas être confondu avec celui de parallaxe, qui conduit aussi à un mouvement elliptique de la position apparente relative des étoiles, mais en opposition de phase avec celui de la Terre. La parallaxe est un effet géométrique qui ne dépend que de la position relative de la Terre et de l'étoile observée, alors que l'aberration stellaire est un effet cinématique qui dépend aussi de leur vitesse relative (il serait absent si la vitesse de la lumière était infinie). En outre, l'aberration ne dépend pas de la distance entre la Terre et l'objet observé, contrairement à la parallaxe. La découverte de l'aberration stellaire, vers 1728 par James Bradley (1693–1763), permit de confirmer le caractère fini de la vitesse de la lumière (> *expérience de Roëmer*), et de préciser sa valeur. Elle fournit aussi une preuve du mouvement de la Terre autour du Soleil et joua un rôle important pour faire admettre le modèle de Copernic.

- ▷ *Discovery of the Aberration of Light*, James Bradley, Edmond Halley *et al.*, *ISIS* **16** (1931) p. 233
- ▷ *Significance of the Discovery of Aberration*, W. H. McCrea, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **4** (1963) p. 41
- ▷ *The discovery of Aberration*, D. E. Blackwell, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **4** (1963) p. 44
- ▷ *Bradley's Model of Aberration*, H. R. Calvert, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **4** (1963) p. 53
- ▷ *Relativity and aberration*, Thomas E. Phipps, Jr., *American Journal of Physics* **57** (1989) p. 549
- ▷ [*Présence de l'histoire*] *L'aberration stellaire*, Roland Lehoucq & Denis Savoie, *Pour la Science* **299** (2002) p. 20

abfarad [abF] (angl. *abfarad*) Unité de capacité électrique (symbole **abF**) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (> *unités électromagnétiques*). On la définit comme la capacité d'un condensateur pour lequel l'apport d'une charge d'un abcoulomb augmente la différence de potentiel à ses bornes d'un abvolt, ce qui implique

$$1 \text{ abF} = 1 \text{ abC} \cdot \text{abV}^{-1}.$$

La relation entre l'abfarad et le farad du Système International d'unités est $1 \text{ abF} = 10^9 \text{ F}$, mais il s'agit d'un abus de notation car la capacité électrique n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités (elle est égale à l'inverse d'une accélération dans le système CGS-électromagnétique).

abhenry [abH] (angl. *abhenry*) Unité d'inductance (symbole **abH**) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (> *unités électromagnétiques*). On la définit comme l'inductance mutuelle de deux circuits dans lesquels une variation de courant d'un abampère par seconde conduit à une force électromotrice induite d'un abvolt, ce qui implique

$$1 \text{ abH} = 1 \text{ abV} \cdot \text{s} \cdot \text{abA}^{-1}.$$

La relation entre l'abhenry et le henry du Système International d'unités est $1 \text{ abH} = 10^{-9} \text{ H}$, mais il s'agit d'un abus de notation car l'inductance n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités (elle est égale à une longueur dans le système CGS-électromagnétique).

abmho [abΩ] (angl. *abmho*) Unité de conductance électrique (symbole **abΩ**) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (> *unités électromagnétiques*). On la définit comme la conductance permettant d'avoir, par effet Joule, une puissance d'un erg par seconde en présence d'un courant d'un abampère, ce qui implique

$$1 \text{ abΩ} = 1 \text{ abA}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{erg}^{-1}.$$

La relation entre l'abmho et le siemens du Système International d'unités est $1 \text{ abΩ} = 10^9 \text{ S}$, mais il s'agit d'un abus de notation car la conductance n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités (elle est égale à l'inverse d'une vitesse dans le système CGS-électromagnétique). L'abmho est aussi nommé **l'absiemens** (symbole **abS**).

abohm [abΩ] (angl. *abohm*) Unité de résistance électrique (symbole **abΩ**) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (> *unités électromagnétiques*). On la définit comme la résistance permettant d'avoir, par effet Joule, une puissance d'un erg par seconde en présence d'un courant d'un abampère, ce qui implique

$$1 \text{ abΩ} = 1 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{abA}^{-2}.$$

La relation entre l'abohm et l'ohm du Système International d'unités est $1 \text{ abΩ} = 10^{-9} \text{ Ω}$, mais il s'agit d'un abus de notation car la résistance n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités (elle est égale à une vitesse dans le système CGS-électromagnétique).

abondance (angl. *abundance*) Proportion dans laquelle on trouve un constituant donné dans un milieu, en particulier un isotope ou un élément chimique (> *abondance isotopique*). Cette définition englobe un grand nombre de situations distinctes, dans des domaines physiques très différents. Par exemple, l'abondance naturelle des isotopes dans la croûte terrestre donne des informations sur l'histoire de la formation de la Terre, alors que l'abondance chimique que l'on observe à la surface des étoiles nous renseigne sur la structure de ces étoiles et leur histoire.

abondance isotopique (angl. *isotopic abundance*) Rapport entre la quantité de l'isotope d'un élément et la quantité de tous les isotopes de cet élément présents dans un milieu. Par exemple, l'abondance de l'oxygène 18 serait $^{18}\text{O}/(^{16}\text{O} + ^{17}\text{O} + ^{18}\text{O})$. Cette notion est différente de celle de rapport isotopique.

Abraham–Lorentz (force d')  (angl. *Abraham-Lorentz force*) Selon les lois de l'électrodynamique classique non-relativiste, force électromagnétique que subit une particule chargée lorsque son mouvement est accéléré. Cette force, qui s'ajoute à une éventuelle force

de Lorentz, résulte de l'interaction de la particule avec le rayonnement électromagnétique qu'elle émet du fait de son accélération, et elle peut donc être interprétée comme la **force de recul** associée à cette émission. On la nomme parfois **force d'auto-interaction électromagnétique**. Pour des vitesses faibles par rapport à la vitesse de la lumière et quand l'échelle de distance spatiale est grande par rapport à la longueur d'onde de Compton de la particule, elle s'écrit

$$\vec{F} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{d\vec{a}}{dt},$$

où q désigne la charge électrique de la particule, $\vec{a}$ son accélération, ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide, c la vitesse de la lumière et d/dt la dérivée temporelle. C'est l'une des rares circonstances où l'on rencontre en physique une dérivée de l'accélération ($\triangleright$ *jerk*), ce qui a potentiellement des conséquences physiques *a priori* indésirables. Ainsi, il existe des solutions de l'équation du mouvement en présence de ce terme de force qui correspondent à un mouvement en auto-accélération continue et paraissent donc sans limite de vitesse, et d'autres où existe une pré-accélération, l'effet semblant précéder la cause. L'auto-interaction des charges électriques fut étudiée en 1904 par Hendrik Lorentz (1853–1928), puis en 1905 par Max Abraham (1875–1922). La généralisation relativiste de cette formule a été obtenue en 1938 par Paul Dirac (1902–1984) et porte donc le nom de **force d'Abraham-Lorentz-Dirac**.

- ▷ *A critical examination of the Abraham-Lorentz equation for a radiating charged particle*, J. L. Jiménez & I. Campos, *American Journal of Physics* **55** (1987) p. 1017
- ▷ *An approximate method for the direct calculation of radiation reaction*, Jacques D. Templin, *American Journal of Physics* **66** (1998) p. 403
- ▷ *Radiation reaction and runaway solutions in acoustics*, Jacques D. Templin, *American Journal of Physics* **67** (1999) p. 407
- ▷ *The self-force and radiation reaction*, F. Rohrlich, *American Journal of Physics* **68** (2000) p. 1109
- ▷ *Preacceleration without radiation : The nonexistence of pre-radiation phenomenon*, José A. Heras, *American Journal of Physics* **74** (2006) p. 1025
- ▷ *Tracking the radiation reaction energy when charged bodies accelerate*, Andrew M. Steane, *American Journal of Physics* **83** (2015) p. 703

Abrikosov (Alexeï)  (1928–2017) Physicien théoricien russe, prix Nobel de physique en 2003 (avec V.L. Ginzburg et A.J. Leggett) pour ses « contributions pionnières à la physique des superfluides et supraconducteurs ». Abrikosov démontra que la théorie de Ginzburg-Landau de la supraconductivité prédisait l'existence d'un type particulier de supraconducteurs ($\triangleright$ *supraconducteur de type II*), dans lesquels un champ magnétique n'est pas nécessairement complètement expulsé par effet Meissner ($\triangleright$ *réseau d'Abrikosov*).

- ▷ *[Nobel Lecture] Type-II superconductors and the vortex lattice*, A. A. Abrikosov, *Reviews of Modern Physics* **76** (2004) p. 975

abscisse (angl. *abscissa*) Nom donné à la coordonnée utilisée pour repérer un point le long de l'un des axes d'un repère cartésien, qu'on appelle **axe des abscisses**. On la note souvent x . Par extension, l'axe des abscisses désigne aussi l'axe horizontal d'un graphe représentant une quantité en fonction d'une autre.

abscisse curviligne (angl. *curvilinear abscissa*)

Grandeur souvent notée s qui permet de repérer un point quelconque d'une courbe en indiquant la distance algébrique, mesurée le long de la courbe, qui sépare ce point d'une origine elle-même située sur la courbe. Dans le cas d'une courbe de paramètre t tracée dans un espace euclidien, on peut écrire

$$s(T) = \int_{t_0}^T \left\| \frac{d\vec{r}}{dt} \right\| dt,$$

où $\vec{r}(t)$ est le vecteur position, où les barres verticales représentent la norme, et où $s(t_0) = 0$. En cinématique newtonienne, si t est le temps, le vecteur tangent à la courbe,

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right)$$

correspond à la vitesse. Dans ce cadre, on définit donc parfois l'abscisse curviligne par la relation infinitésimale $ds = v(t) dt$, où $v(t)$ est la norme de la vitesse à l'instant t ($\triangleright$ *paramètre, repère de Frenet*). En relativité, pour les courbes du genre temps qui correspondent à de possibles lignes d'univers de particules massives, l'abscisse curviligne est proportionnelle au temps propre, voire identique à celui-ci dans un système d'unités où la vitesse de la lumière dans le vide, c , est prise égale à 1.

absolu (angl. *absolute*) Par opposition à relatif, qualifie ce qui est défini en soi et non par rapport à une référence ou à un observateur ($\triangleright$ *température absolue, référentiel absolu*).

absorption (angl. *absorption*) ► **1.** Atténuation, partielle ou totale, d'une onde lorsqu'elle traverse un milieu. L'énergie absorbée par celui-ci peut se retrouver sous forme thermique, ou exciter ses constituants microscopiques. Cet effet est décrit quantitativement par le coefficient d'absorption. ► **2.** L'absorption est aussi le nom consacré d'un phénomène quantique élémentaire par lequel un photon disparaît en provoquant l'excitation d'un système auquel il cède son énergie, sa quantité de mouvement et son moment cinétique. Ce système peut par exemple être un atome, une molécule ou un noyau ($\triangleright$ *coefficients d'Einstein*). ► **3.** De manière plus générale, l'absorption est le phénomène par lequel une substance fluide se retrouve incluse dans le volume d'un corps solide. Elle se distingue en cela de l'adsorption, un phénomène de surface.

- ▷ *The Development of Research in Interstellar Absorption, c. 1900-1930*, D. Seeley & R. Berendzen, *Journal for the History of Astronomy* **3** (1972) p. 52
- ▷ *Absorption, emission, and linebreadths : A semihistorical perspective*, J. H. Van Vleck & D. L. Huber, *Reviews of Modern Physics* **49** (1977) p. 939

absorption négative (angl. *negative absorption*)

Augmentation du flux lumineux qui peut se produire par émission stimulée à la traversée de certains milieux, en particulier des milieux amplificateurs obtenus en y réalisant une inversion de population. Ce phénomène fut prédit en 1924 par Richard Tolman (1881–1948),

et observé pour la première fois en 1928 par Rudolf Ladenburg (1882–1952).

abvolt [abV] (angl. *abvolt*) Unité de potentiel électrique (symbole abV) dans le système d'unités CGS électromagnétiques (▷ *unités électromagnétiques*), où on la définit à partir de l'abampère (symbole abA), par la relation

$$1 \text{ abV} = 1 \text{ abA} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La relation entre l'abvolt et le volt du Système International d'unités est $1 \text{ abV} = 10^{-8} \text{ V}$, mais il s'agit d'un abus de notation car le potentiel électrique n'a pas la même dimension dans ces deux systèmes d'unités.

Ac Symbole de l'élément actinium ($Z = 89$).

AC Abréviation de « alternating current » (▷ *alternatif*).

Académie des sciences  (angl. *French Academy of Sciences*) Une des académies de l'Institut de France, créée en 1795. Elle rassemble des scientifiques de toutes nationalités, reconnus pour la qualité de leurs travaux, et regroupés en Membres, Associés étrangers et Correspondants. Sa mission générale consiste à :

- étudier les questions de société liées au développement des sciences et formuler des recommandations ;
- participer au développement des relations scientifiques internationales et de la représentation à l'étranger de la recherche faite en France ;
- veiller à la qualité de l'enseignement des sciences ;
- encourager la diffusion de la science dans le public ;
- veiller au maintien du rôle et de la qualité du langage scientifique français.

Pour cela :

- elle aide à définir la politique de la recherche scientifique et technique par l'établissement et la publication de rapports ;
- elle publie dans ses « comptes rendus » des articles brefs et des articles de synthèse ;
- elle attribue des prix aux chercheurs et auteurs qu'elle souhaite récompenser ou encourager ;
- elle décerne annuellement une grande médaille d'or internationale ;
- elle présente, lors de ses séances publiques, des travaux originaux ou des exposés de synthèse ;
- elle organise des colloques ou des conférences, sur des thèmes d'actualité, éventuellement en coopération avec d'autres Académies ;
- elle conserve des plis cachetés pouvant servir à établir l'antériorité d'une découverte ;
- elle assure, dans ses archives, la conservation de documents contribuant à la connaissance de l'histoire des sciences et des progrès de la pensée scientifique.

▷ *The genesis of the académie des sciences*, Albert J. George, *Annals of Science* **3** (1938) p. 372

- ▷ *Les Origines de L'Académie des Sciences de Paris*, E. Fauré-Fremiet, *Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science* **21** (1966) p. 20
 ▷ *Visite aux archives de l'Académie des Sciences*, Georges Paturel, *Cahiers Clairaut* **108** (2004) p. 25
 ▷ *[Histoire des Sciences] Innovations et secrets, les « plis cachetés » de l'Académie des sciences*, Edgardo D. Carosella & Pierre Buser, *Pour la Science* **432** (2013) p. 72

accélérateur circulaire  (angl. *ring accelerator*) Accélérateur de particules dans lequel le faisceau est circulaire. L'énergie maximale qu'un accélérateur circulaire de rayon fixé permet de fournir à une particule est limitée par deux phénomènes. D'une part, plus la vitesse de la particule est élevée, plus le champ magnétique qui permet de la maintenir dans l'anneau doit être intense ; or, on ne sait pas produire des champs magnétiques d'intensité arbitraire. D'autre part, l'augmentation de la vitesse de la particule s'accompagne d'une plus grande émission de rayonnement synchrotron, et, par conséquent, d'une perte d'énergie par tour accompli supérieure (▷ *cyclotron*, *synchrocyclotron*). Cet effet est d'ailleurs utilisé pour réaliser des sources de rayonnement synchrotron. Une sous-classe importante d'accélérateurs circulaires est celle des collisionneurs.

▷ *The SSC : A Machine for the Nineties*, Sheldon L. Glashow & Leon M. Lederman, *Physics Today* **38** (1985) p. 28

accélérateur linéaire  (angl. *linear accelerator* ; *linac*) Accélérateur de particules dans lequel le faisceau est rectiligne. On parle aussi de **linac** ou **lineac**, abréviation de « linear accelerator ». L'énergie maximale qu'un accélérateur linéaire permet de fournir à une particule est limitée par sa longueur totale. L'accélérateur linéaire de Stanford (Californie, USA), long de 3,2 km, permet d'accélérer des électrons à une énergie de 50 GeV. Le projet ILC (International Linear Collider à Fermilab, Chicago) envisage, dans sa première version, d'accélérer des électrons à une énergie de l'ordre de 125 GeV, grâce à une longueur d'environ 20 km. Le principe de l'accélérateur linéaire fut proposé en 1925 par Gustaf Ising et fut mis en œuvre en 1928 par Rolf Wideröe (1902–1996).

- ▷ *The Stanford Linear Collider*, John T. Seeman, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **41** (1991) p. 389
 ▷ *A TeV Linear Collider*, Ian Hinchliffe & Marco Battaglia, *Physics Today* **57** (2004) p. 49
 ▷ *Le développement des accélérateurs linéaires*, Élémentaire **4** (2006) p. 42
 ▷ *Le plus puissant faisceau de rayons X*, Nora Berrah & Philip Bucksbaum, *Pour la Science* **446** (2014) p. 54

accélérateur de particules  (angl. *particle accelerator*) Dispositif destiné à accélérer des particules chargées, par l'action d'un champ électromagnétique. Plusieurs types se sont succédé au fil de l'histoire (▷ *tube de Crookes*, *bevatron*, *accélérateur linéaire*, *générateur de van de Graaff*, *cyclotron*, *synchrocyclotron*, *synchrotron*), deux classes principales ayant toutefois émergé. Ainsi, dans un **accélérateur en anneau**, ou **accélérateur circulaire**, le faisceau reste confiné le long d'un cercle que les particules décrivent un grand nombre de fois, alors que dans un **accélérateur linéaire**, elles ne passent qu'une fois par chaque point. Les capacités de ces derniers sont donc fortement contraintes par leur longueur. En ce

qui concerne les accélérateurs circulaires, ils permettent certes d'accélérer les particules de façon plus graduelle et en leur apportant une énergie totale plus élevée, mais celle-ci se trouve également limitée en raison des pertes que les particules subissent par rayonnement synchrotron du fait de leur accélération centripète. Certains accélérateurs, appelés des **synchrotrons**, sont d'ailleurs dédiés à la production de ce rayonnement, dans le domaine des rayons X. D'autres accélérateurs sont quant à eux utilisés pour observer des réactions de physique des particules à haute énergie (pour une exception, $\triangleright$ *rhodotron*). En particulier, les **collisionneurs** permettent de produire deux faisceaux (de particules identiques ou différentes) accélérés qui se croisent en des points choisis où sont situés des détecteurs. Grâce aux progrès de la technologie, l'énergie disponible dans les accélérateurs est de plus en plus élevée ($\triangleright$ *diagramme de Livingston*). Un nouveau type d'accélérateur beaucoup plus compact commence ainsi à être exploité dans des gammes d'énergie allant du MeV au GeV, l'accélération y étant réalisée par une onde de choc dans un plasma ($\triangleright$ *accélérateur à plasma*).

- $\triangleright$ *Is There a Limit to the Energy Attainable by High Energy Colliders for Particle Physics ?*, Wolfgang K. H. Panofsky, Proceedings of the American Philosophical Society **133** (1989) p. 416
- $\triangleright$ *Les débuts des accélérateurs linéaires et circulaires*, Élémentsaire **2** (2005) p. 33
- $\triangleright$ [Resource Letter] *PBA-1 : Particle beams and accelerators*, Alexander W. Chao, American Journal of Physics **74** (2006) p. 855
- $\triangleright$ [Quick Study] *Accelerated ion beams for art forensics*, Philippe Collon & Michael Wiescher, Physics Today **65** (2012) p. 58
- $\triangleright$ [Resource Letter] *AFHEP-1 : Accelerators for the Future of High-Energy Physics*, William A. Barletta, American Journal of Physics **80** (2012) p. 102

accélérateur à plasma  (angl. *plasma wakefield accelerator*) Accélérateur de particules dans lequel l'accélération est due à un champ électrique intense créé par le sillage d'une onde de choc dans un plasma, elle-même générée par un faisceau laser puissant. Ce type d'accélérateur est très compact et connaît aujourd'hui un développement rapide. On peut ainsi obtenir des faisceaux d'électrons à une énergie de 1 GeV, avec un dispositif mesurant seulement 1 cm de longueur. On l'utilise aussi pour augmenter l'énergie d'un faisceau de particules issu d'un accélérateur conventionnel.

- $\triangleright$ *Électrons surfeurs pour mini-accélérateurs*, Victor Malka, Jérôme Faure *et al.*, La Recherche **385** (2005) p. 48
- $\triangleright$ *Surfer sur des ondes de plasma*, Chandrashekhhar Joshi, Pour la Science **341** (2006) p. 38
- $\triangleright$ *Accélération de faisceaux d'électrons par interaction laser-plasma*, Jérôme Faure, Images de la Physique (2007) p. 23
- $\triangleright$ *Laser-driven plasma-wave electron accelerators*, Wim Leemans & Eric Esarey, Physics Today **62** (2009) p. 44
- $\triangleright$ *Produire des rayons X et gamma sur une table*, Kim Ta Phuoc, Cédric Thaury *et al.*, Pour la Science **446** (2014) p. 46

accélération (angl. *acceleration*) $\blacktriangleright$ 1. Dans un référentiel $\mathcal{R}$ donné, dérivée temporelle du vecteur vitesse $\vec{v}$, ou, de façon équivalente, dérivée seconde par rapport au temps du vecteur position $\vec{r}$,

$$\vec{a} = \left. \frac{d\vec{v}}{dt} \right|_{\mathcal{R}} = \left. \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \right|_{\mathcal{R}}$$

($\triangleright$ *accélération normale*, *accélération tangentielle*). Les

accélération ont la dimension physique $\mathbf{LT}^{-2}$ et s'expriment en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ dans le Système International d'unités. En mécanique newtonienne, l'accélération dans un référentiel galiléen est une grandeur absolue, c'est-à-dire de valeur indépendante du référentiel, déterminée par les forces qui agissent sur le système ($\triangleright$ *relation fondamentale de la dynamique*). Dans un référentiel non galiléen, l'accélération dépend de ces forces, mais aussi du mouvement du référentiel par rapport à un référentiel galiléen ($\triangleright$ *composition des accélérations*). On parle également d'**accélération de la pesanteur** pour désigner l'accélération à laquelle est soumis un corps en chute libre dans un champ de pesanteur (terrestre en particulier). La notion d'accélération fut introduite en 1700 par Pierre Varignon (1654–1722), avec des différences finies plutôt qu'en terme de dérivée. $\blacktriangleright$ 2. Ce terme désigne aussi la norme du vecteur du même nom, et, par extension, parfois la dérivée seconde temporelle de toute grandeur et pas seulement celle du vecteur position. Par exemple, on appelle **accélération angulaire** la dérivée seconde $\dot{\theta} = d^2\theta/dt^2$ de la position angulaire ou la dérivée première $d\vec{\Omega}/dt$ du vecteur vitesse angulaire $\vec{\Omega}$. De même, l'**accélération de l'expansion de l'Univers** est définie comme la dérivée seconde $\ddot{a}$ du facteur d'échelle cosmologique a (le fait que $\ddot{a} > 0$ indique que cette expansion a lieu à un taux de plus en plus rapide, $\triangleright$ *énergie noire*). $\blacktriangleright$ 3. Action d'augmenter la norme de la vitesse d'un système, en particulier de fournir de l'énergie à une particule ($\triangleright$ *accélérateur de particules*). Antonyme : $\triangleright$ *décélération*.

- $\triangleright$ *Galileo's Rejection of the Possibility of Velocity Changing Uniformly with Respect to Distance*, I. Bernard Cohen, ISIS **47** (1956) p. 231

base	expression
cartésienne	$\ddot{x}\vec{e}_x + \ddot{y}\vec{e}_y + \ddot{z}\vec{e}_z$
cylindrique	$(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\vec{e}_r + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta})\vec{e}_\theta + \ddot{z}\vec{e}_z$
sphérique	$(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2\sin^2\theta)\vec{e}_r$ $+ (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\dot{\phi}^2\sin\theta\cos\theta)\vec{e}_\theta$ $+ (r\ddot{\phi}\sin\theta + 2\dot{r}\dot{\phi}\sin\theta + 2r\dot{\theta}\dot{\phi}\cos\theta)\vec{e}_\phi$
Frenet	$\dot{v}\vec{T} + \frac{v^2}{R}\vec{N}$

TABLE 1 – Expressions du vecteur accélération dans divers systèmes de coordonnées. La colonne de gauche indique à la fois la base et le système de coordonnées choisis.

accélération de Coriolis (angl. *Coriolis acceleration*) Dans le cadre de la mécanique newtonienne, terme intervenant dans la loi de composition des accélérations et qui n'existe que si le système étudié est en mouvement dans le second référentiel considéré ($\mathcal{R}'$), par opposition au terme d'accélération d'entraînement. Elle s'écrit

$$\vec{a}_C = 2\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} \wedge \vec{v}_{\mathcal{R}'},$$

où $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}$ est le vecteur rotation de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}$ et $\vec{v}_{\mathcal{R}'}$ la vitesse du système dans $\mathcal{R}'$. L'existence de ce terme dans la loi de composition des accélérations est responsable de l'apparition de la force de Coriolis lorsque l'on écrit la relation fondamentale de la dynamique dans un référentiel non-galiléen.

accélération d'entraînement Dans le cadre de la mécanique newtonienne, terme intervenant dans la loi de composition des accélérations et dû au mouvement relatif des deux référentiels $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ considérés, par opposition au terme d'accélération de Coriolis qui dépend aussi de la vitesse, dans le référentiel $\mathcal{R}'$, du corps étudié. L'accélération d'entraînement s'écrit de manière générale

$$\vec{a}_e = \vec{a}_{O'|\mathcal{R}} + \frac{d\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}}{dt} \wedge \overrightarrow{O'M} + \vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} \wedge \left(\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} \wedge \overrightarrow{O'M} \right),$$

où le premier terme est l'accélération de l'origine O' de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}$, le second terme dépend de la dérivée temporelle du vecteur de rotation $\vec{\Omega}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}$ de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}$ ainsi que du vecteur position, dans $\mathcal{R}'$, du point matériel M dont on étudie la vitesse, alors que le dernier terme est parfois appelé **accélération centrifuge**. Cette accélération d'entraînement est celle qu'a le point M dans $\mathcal{R}$ s'il est fixe par rapport à $\mathcal{R}'$. On distingue les cas particuliers suivants :

- lorsque les deux référentiels sont en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre, seul le premier terme subsiste, celui-ci étant même nul si la translation est uniforme ;
- lorsque le mouvement réciproque des deux référentiels est une rotation à vitesse constante (un manège par exemple), seul subsiste le dernier terme, dit centrifuge, que l'on écrit alors parfois sous la forme $-\Omega^2 \vec{P}\vec{M}$, où P est le projeté orthogonal du point M sur l'axe de rotation.

L'existence de ce terme dans la loi de composition des accélérations est responsable de l'apparition de la force d'inertie d'entraînement lorsque l'on écrit la relation fondamentale de la dynamique dans un référentiel non-galiléen.

accélération de Fermi (angl. *Fermi acceleration*) Ce terme rassemble deux types de processus d'accélération des particules chargées se propageant dans un plasma magnétisé. Tous deux reposent sur un mécanisme semblable à celui de l'effet miroir magnétique.

► **1. L'accélération de Fermi du premier ordre** désigne le gain d'énergie d'une particule qui diffuse de part et d'autre d'une onde de choc dans un plasma. Chaque interaction de la particule avec une inhomogénéité magnétique, présente d'un côté ou de l'autre de l'onde de choc, augmente son énergie d'un facteur linéaire en $\beta = v/c$, où v désigne la vitesse du choc et c la vitesse de la lumière, d'où le terme « premier ordre ». ► **2. L'accélération de Fermi du second ordre** désigne le gain

d'énergie d'une particule qui se réfléchit sur des inhomogénéités magnétiques en mouvement dans des directions aléatoires. Les chocs avec les inhomogénéités s'éloignant de la particule considérée sont moins fréquents que ceux avec les inhomogénéités se rapprochant, ce qui explique que la particule gagne de l'énergie au cours du temps. L'énergie gagnée est proportionnelle à v^2/c^2 , où v désigne la vitesse des inhomogénéités et c la vitesse de la lumière, d'où le terme « second ordre ». Ce mécanisme fut introduit en 1949 par Enrico Fermi (1901–1954) afin d'essayer d'expliquer l'origine des rayons cosmiques.

accélération normale (angl. *normal acceleration*) Composante de l'accélération qui est orthogonale au vecteur vitesse. On peut l'écrire

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{N},$$

où v est la norme de la vitesse, R le rayon de courbure de la trajectoire et $\vec{N}$ le vecteur unitaire normal à celle-ci (► *repère de Frenet*). Pour une trajectoire circulaire à vitesse constante, l'accélération est purement normale et centripète.

accélération de la pesanteur  (angl. *acceleration of gravity*) Force par unité de masse (une accélération, donc) subie par un corps placé dans le champ de pesanteur de la Terre (ou d'un autre objet massif). Elle est principalement due à l'attraction gravitationnelle de cette dernière, mais possède aussi une composante qui provient de la force centrifuge associée à la rotation de la Terre sur elle-même, ainsi qu'une autre qui résulte des effets de marée liés au Soleil et à la Lune. Si l'on modélise la Terre par une boule de masse $M_\oplus$ et de rayon $R_\oplus$ au niveau moyen de la mer, la première contribution g^* est donnée par

$$\vec{g}^* = \frac{G_N M_\oplus}{R_\oplus^2} \vec{u}_r,$$

où G_N désigne la constante de Newton et où $\vec{u}_r$ est un vecteur unitaire pointant vers le centre de masse de la Terre. La Terre n'étant ni parfaitement sphérique, ni parfaitement homogène (► *réplétion*), la valeur de g^* varie d'un point de la surface terrestre à l'autre. Du fait de l'aplatissement polaire, elle croît de 9,78 à 9,83 m · s⁻² environ, lorsqu'on passe de l'équateur aux pôles, ce qui représente une variation relative d'environ 0,5 %. L'accélération de la pesanteur totale $\vec{g}$ est obtenue en ajoutant à $\vec{g}^*$ la contribution due à la force centrifuge, correction qui dépend de la latitude mais n'excède jamais 10⁻³ en valeur relative, ainsi que les forces de marée dues à la Lune et au Soleil, dont la contribution est de l'ordre de 10⁻⁷ seulement, en valeur relative. La verticale, définie comme la direction de $\vec{g}$, ne passe donc en général pas par le centre de masse de la Terre. Les variations de g se manifestent notamment par des perturbations des corps en orbite autour de la Terre. La mesure de $\vec{g}$ en chaque point du globe constitue une discipline appelée **gravimétrie**. On définit une valeur de référence, appelée **accélération de la pesanteur normale**, qui est donnée

par

$$g_0 = 9,806\,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

et correspond à la valeur moyenne au niveau de la mer. C'est Jean Bernoulli (1667–1748) qui adopta la notation g pour l'accélération de la pesanteur.

- ▷ *Why is g larger at the poles ?*, Mario Iona, American Journal of Physics **46** (1978) p. 790
- ▷ *A rapid, convenient, and precise method for the absolute determination of the acceleration of gravity*, Emanuel P. Manche, American Journal of Physics **47** (1979) p. 542
- ▷ *The effect of the earth's density on g at the poles and equator*, C. Barratt, American Journal of Physics **47** (1979) p. 1096
- ▷ *Newton and the acceleration of gravity*, Richard S. Westfall, Archive for history of exact sciences **35** (1986) p. 255
- ▷ *Anatomy of a fall : Giovanni Battista Riccioli and the story of g* , Christopher M. Graney, Physics Today **65** (2012) p. 36

accélération tangentielle (angl. *tangential acceleration*) Composante de l'accélération qui est colinéaire au vecteur vitesse. On peut l'écrire

$$\vec{a}_t = \dot{v} \vec{T},$$

où $\dot{v}$ est la dérivée temporelle de la norme v de la vitesse et $\vec{T}$ le vecteur unitaire tangent à celle-ci défini dans le repère de Frenet.

accéléromètre  (angl. *accelerometer*) Dispositif permettant de mesurer une accélération. D'après le principe fondamental de la dynamique, il peut s'agir d'un système de masse connue mesurant la force à laquelle il est soumis. Une masse au bout d'un ressort constitue un exemple simple d'accéléromètre, certains d'entre eux étant toutefois plus complexes, tels ceux qui consistent en un dispositif piézoélectrique mesurant la contrainte subie lors d'une accélération à partir de la différence de potentiel à ses bornes. Les accéléromètres sont présents, par exemple, dans les disques durs et les ordinateurs, où ils servent à détecter une éventuelle chute et ranger la tête de lecture avant le choc. On les trouve aussi dans les systèmes de déclenchement des airbags des voitures, ou encore dans des expériences de physique fondamentale (▷ *Microscope*). Enfin, ils sont utilisés en géodésie comme gravimètres.

- ▷ *Gravimètres et accéléromètres*, Jean Hinderer & Martine Amalvict, Dossier Pour la Science **34** (2003) p. 80
- ▷ [*Idées de physique*] *Accéléromètres en mission*, Jean-Michel Courty & Édouard Kierlik, Pour la Science **357** (2007) p. 98
- ▷ *Modélisation d'un accéléromètre MEMS*, Bruno Velay, Bulletin de l'Union des Physiciens **920** (2010) p. 3
- ▷ *Étude d'un pendule (into the Wii !)*, Marcel Carrère & Thierry Chave, Bulletin de l'Union des Physiciens **937** (2011) p. 1051

acceptance (angle d') (angl. *acceptance angle*) Ouverture angulaire du cône à l'intérieur duquel un dispositif, en particulier un détecteur ou une fibre optique, peut recevoir un signal (des particules dans le cas d'un détecteur, de la lumière dans le cas de la fibre). Cet angle est aussi appelé plus simplement l'**acceptance**.

accepteur (angl. *acceptor*) Dans le cadre du dopage d'un semi-conducteur, on appelle **atome accepteur**, ou **impureté acceptrice**, un atome possédant sur sa couche externe moins d'électrons que ceux du semi-conducteur d'origine. La présence de ces atomes crée de nouveaux

niveaux d'énergie, nommés **niveaux accepteurs**. Les porteurs de charge majoritaires sont alors des trous, et l'on dit que le dopage est de type p (pour « positif »). Dans le cas de semiconducteurs tétravalents comme le silicium ou le germanium, des accepteurs possibles sont les atomes d'aluminium, de bore ou de gallium. Antonyme : ▷ *donneur*.

accès (théorie des)  (angl. *theory of fits*) Théorie proposée par Sir Isaac Newton (1643–1727) dans son ouvrage *Optiks* (1705) pour expliquer l'apparition de couleurs lorsque la lumière se réfléchit sur une lame mince ou la traverse. Dans le cadre de son approche corpusculaire des phénomènes lumineux, Newton fit l'hypothèse que les corpuscules de lumière possèdent une propriété intrinsèque périodique : des **accès** dits de « facile transmission » surviennent à intervalles de temps réguliers. Selon ce modèle, un corpuscule traverse complètement la lame s'il subit un de ces accès à la première et à la seconde interface, mais il est réfléchi s'il arrive sur la seconde interface au milieu de son cycle d'accès (il s'agit alors d'un accès de « facile réflexion »). Cette hypothèse fut ensuite abandonnée lorsque l'on comprit la nature ondulatoire de la lumière, Thomas Young (1773–1829) se disant néanmoins très influencé par la lecture de Newton. La notion de périodicité est ainsi au cœur de la compréhension moderne des phénomènes lumineux, mais sous une forme très différente de celle proposée par Newton (▷ *optique ondulatoire*).

- ▷ *Waves, Particles, and Newton's 'Fits'*, Norwood Russell Hanson, Journal of History of Ideas **21** (1960) p. 370
- ▷ *Was Newton's "Wave-Particle Duality" Consistent with Newton's Observations ?*, Roger H. Stuewer, ISIS **60** (1969) p. 392
- ▷ *La lumière selon Newton*, Michel Blay, Cahiers de Science et Vie **65** (2001) p. 4
- ▷ *Biot, la polarisation chromatique et la théorie des accès*, Frédéric Leclercq, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **64** (2011) p. 121

accommodation  (angl. *accommodation*) Modification des caractéristiques optiques d'un œil sous l'action de muscles dans le but de former sur la rétine l'image d'objets situés à distance finie, afin de les voir nets. Pour l'œil humain, il s'agit d'une déformation de la forme du cristallin, mais, pour certains autres organismes, l'accommodation s'effectue par une variation de la distance entre le cristallin et la rétine. L'accommodation n'est pas toujours parfaite, et les principaux défauts sont :

- la **myopie**, quand le punctum remotum se trouve à distance finie (▷ *myopie*). L'œil est trop convergent et ne peut pas voir nets les objets trop lointains ;
- l'**hypermétropie**, quand le punctum remotum est virtuel, situé derrière l'œil (▷ *hypermétropie*). L'œil n'est pas assez convergent, il doit faire un effort d'accommodation pour voir les objets lointains et ne peut pas voir nets les objets trop proches ;
- la **presbytie**, quand le punctum proximum est trop éloigné de l'œil (▷ *presbytie*). Dans ce cas aussi, l'œil n'est pas assez convergent ;
- l'**astigmatie**, due à une déformation non axisymétrique du cristallin, et qui conduit à la perte de la propriété de stigmatisme.

Le phénomène d'accommodation fut décrit pour la première fois en 1604 par Johannes Kepler (1571–1630).

▷ [Actualités] *L'œil du caméléon : un système optique particulièrement performant*, Matthias Ott, *La Recherche* **277** (1995) p. 682

accrétion (angl. *accretion*) Processus par lequel un système devient de plus en plus massif sous l'action continue d'un flux de matière entrant. En astrophysique, ce terme désigne plus particulièrement deux phénomènes physiquement distincts. ► **1.** Processus par lequel un système attire gravitationnellement de la matière initialement située dans ses environs. Lors de ce processus, l'énergie gravitationnelle de la matière est convertie en chaleur et incidemment en rayonnement. Du fait de la force centrifuge résultant de son moment cinétique, la matière entourant l'objet accrétant adopte une forme plane et axisymétrique située aux environs de l'équateur de ce dernier : on parle de **disque d'accrétion**. De tels disques sont observables autour de divers astres, en particulier à la mort d'une étoile (autour d'une naine blanche, d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir), ou bien encore dans un système binaire si l'une des étoiles est devenue une géante rouge et que ses couches externes dépassent de son lobe de Roche, tombant ainsi vers la seconde étoile. ► **2.** Agglomération de particules de poussière lorsqu'elles entrent en collision inélastique et restent solidaires, sous l'action de forces de contact. C'est ce qui se produit notamment dans les disques protoplanétaires, comme première étape de la formation des planètes à partir de ces poussières.

▷ *Accretion onto a rotating compact object in general relativity*, Vladimir Karas & Rastislav Mucha, *American Journal of Physics* **61** (1993) p. 825

▷ *Accretion processes on a black hole*, Sandip K. Chakrabarti, *Physics Reports* **266** (1996) p. 229

accumulateur électrique  (angl. *storage battery*) Dispositif servant à stocker de l'énergie électrique par accumulation de charges, sous forme électrochimique (piles) ou bien électrostatique (condensateurs). Son but principal étant de délivrer un courant quand on le branche aux bornes d'un circuit, on le remplace de nos jours dans certaines applications par des circuits supraconducteurs dans lesquels sont directement stockés des courants électriques, l'aspect supraconducteur permettant de limiter les pertes (▷ *SMES*).

▷ *Batteries and electrochemical capacitors*, Héctor D. Abruña, Yasuyuki Kiya et al., *Physics Today* **61** (2008) p. 43

▷ [Tout s'explique] *Les batteries des véhicules électriques*, Aude Ganier & Fabrice Mathé, *Défis du CEA* **153** (2010) p. 16

accutron (angl. *accutron*) Horloge développée dans les années 1950 par Max Hetzel (1921–2004) et qui repose sur le comptage des oscillations mécaniques d'un diapason. Ces oscillations sont entretenues à la fréquence de résonance du diapason (quelques centaines de hertz) par un circuit électronique, et sont comptées grâce à l'entraînement mécanique, par les vibrations du diapason, d'une roue dentée. Il existe plusieurs modèles de montres basés sur ce principe.

ACES Acronyme de « Atomic Clock Ensemble in Space ». Projet d'expérience spatiale visant à installer

sur la Station Spatiale Internationale (ISS) une horloge atomique à atomes de césium froids avec une précision relative de 10^{-16} , c'est-à-dire ne dérivant que de moins d'une seconde tous les 300 millions d'années. L'environnement de microgravité permettra en effet de mieux contrôler la vitesse individuelle des atomes dans l'horloge et de limiter les imprécisions dues à l'effet Doppler, ce qui devrait, par exemple, mener à des tests de la relativité générale (effet Einstein), à des tentatives de détection de matière noire, ainsi qu'à des mesures fines du potentiel gravitationnel terrestre. Initialement prévu en 2013 sous le nom **PHARAO**, ce projet connut divers retards liés à des difficultés techniques et à l'épidémie de COVID, et son développement n'a repris que récemment. Au moment de la rédaction de cet ouvrage (mai 2023), son installation dans l'ISS est prévue pour 2025.

achromat (angl. *achromat*) Association de lentilles dont les caractéristiques sont ajustées pour minimiser l'aberration chromatique (▷ *doublet achromatique*, *triplet apochromatique*, *achromat de Fraunhofer*).

achromat de Fraunhofer (angl. *Fraunhofer achromat*) Doublet achromatique constitué d'une lentille en crown biconvexe et d'un verre flint plan concave, et dont la constringence totale est nulle. Ce doublet permet de réaliser des objectifs et des oculaires limitant l'aberration chromatique.

achromatique  (angl. *achromatic*) Qualifie un phénomène dont les caractéristiques ne dépendent pas de la longueur d'onde. Par exemple, le phénomène de lentille gravitationnelle est achromatique. En optique, la réalisation de lentilles achromatiques, au moins de manière approchée, permet de s'affranchir des aberrations chromatiques. ▷ *apochromatique*.

▷ *'A Less Agreeable Matter' : The Disagreeable Case of Newton and Achromatic Refraction*, Zev Bechler, *The British Journal for the History of Science* **8** (1975) p. 101

▷ *New Light on the Invention of the Achromatic Telescope Objective*, R. Willach, Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science **50** (1996) p. 195

▷ *Dollond & Son's Pursuit of Achromaticity, 1758-1789*, Richard Sorrenson, *History of Science* **39** (2001) p. 31

▷ *Chromatic aberration of eyepieces in early telescopes*, M. Eugene Rudd, *Annals of Science* **64** (2007) p. 1

▷ *An investigation of the eighteenth-century achromatic telescope*, Duane H. Jaacks, *Annals of Science* **67** (2010) p. 149

acier  Alliage à base de fer et d'une faible quantité de carbone. L'ajout de carbone permet d'obtenir des propriétés de dureté et de résistance plus intéressantes que celles du fer pur. Il existe un très grand nombre d'aciers différents, selon le pourcentage de carbone et la méthode de fabrication. Quand ce pourcentage est supérieur à 2 %, on parle de **fonte**.

▷ *Au sujet de l'invention de l'acier rapide*, A. Garanger, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **20** (1967) p. 207

acoustique  (angl. *acoustics*) Domaine de la physique qui s'intéresse à la production et à la propagation du son. Le terme « acoustique » est utilisé dans des sens plus ou moins restreints, pouvant se limiter aux ondes sonores audibles, ou inclure les longueurs d'onde infrasonores ou ultrasonores. On parle par exemple

d'**acoustique industrielle** pour désigner les techniques de décapage et de découpe à l'aide d'ultrasons.

- ▷ [Colloquium] *Acoustical analogs of condensed-matter problems*, J. D. Maynard, *Reviews of Modern Physics* **73** (2001) p. 401
- ▷ *The acoustic origins of harmonic analysis*, Olivier Darrigol, *Archive for history of exact sciences* **61** (2007) p. 343
- ▷ *Music, Sound, and the Laboratory from 1750 to 1980*, Alexandra Hui, Julia Kursell et al., *Osiris* **28** (2013) p. 1
- ▷ *Design for acoustics*, Leo L. Beranek, *Physics Today* **67** (2014) p. 52
- ▷ [Resource Letter] *APPO-1 : Acoustics for Physics Pedagogy and Outreach*, Kent L. Gee & Tracianne B. Neilsen, *American Journal of Physics* **82** (2014) p. 825
- *Acoustique des instruments de musique*, Antoine Chaigne & Jean Kergomard, (Belin, 2013)

acre (angl. *acre*) (nom féminin) Unité de superficie, dont il existe plusieurs définitions et dont l'usage est fortement déconseillé en physique. L'**acre française** est définie comme un arpent carré (▷ *arpent*), ce qui conduit déjà à une ambiguïté, l'arpent ayant lui-même plusieurs définitions. L'**acre anglo-saxonne** est définie comme 43 560 pieds anglais carrés soit $4,046\,86 \times 10^3 \text{ m}^2$. L'acre se divise en quatre vergées.

acronyque  (angl. *achronychal*) Qualifie un astre situé à l'exact opposé du Soleil sur la voûte céleste. Un tel astre se lève lorsque le Soleil se couche.

- ▷ *The Error in Kepler's Achronychal Data for Mars*, Curtis Wilson, *Centaurus* **13** (1969) p. 263
- ▷ *Achronychal Risings in Babylonian Planetary Theory*, N. M. Swerdlow, *Archive for history of exact sciences* **54** (1999) p. 49
- ▷ *Achronychal Risings in Babylonian Astronomy*, Louise Hollywood & John M. Steele, *Centaurus* **46** (2004) p. 145

actinide  (angl. *actinide series*) Nom générique des 15 éléments chimiques ayant un numéro atomique Z compris dans l'intervalle $89 \leq Z \leq 103$ (de l'actinium au lawrencium). Tous les actinides sont radioactifs, et la plupart ont des demi-vies assez courtes. Ainsi, seuls le thorium (90) et l'uranium (92) sont naturellement présents de manière significative sur Terre, des traces de neptunium (93) et de plutonium (94) ayant toutefois été observées dans des mines d'uranium. Tous les autres actinides ont été produits artificiellement, soit dans des réacteurs nucléaires, soit dans des collisionneurs de particules. On distingue parfois les **actinides mineurs** des **actinides majeurs**, les seconds étant utilisables comme combustibles nucléaires. Les actinides mineurs sont des déchets radioactifs importants.

- ▷ *Chemistry of the Actinide Elements*, B. B. Cunningham, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **14** (1964) p. 323

actinium  (angl. *Actinium*) Élément de numéro atomique $Z = 89$, découvert en 1899 par André-Louis Debierne (1874–1949). Il est représenté par le symbole Ac. Structure atomique : $[\text{Rn}]7s^26d^1$. Il se présente sous la forme d'un métal blanc mou et radioactif qu'on utilise comme marqueur en radiothérapie ou bien comme source de neutrons. Il donne son nom aux actinides.

- ▷ *The Discovery of Actinium*, H. W. Kirby, *ISIS* **62** (1971) p. 290

actinomètre  (angl. *actinometer*) Radiomètre destiné à mesurer l'énergie du rayonnement émis dans la gamme des ondes visibles ou infrarouges par le Soleil, la surface de la Terre ou l'atmosphère. Il en existe différents types, basés sur des effets physiques différents.

Par exemple, le rayonnement peut chauffer une surface absorbante, dont la température d'équilibre est mesurée à l'aide de thermocouples ou d'autres dispositifs thermosensibles. On déduit le flux lumineux reçu de la température en utilisant la loi du rayonnement de corps noir. Le premier actinomètre fut conçu en 1825 par Sir John Herschel (1792–1871), qui lui donna également ce nom.

- ▷ *Recreating Herschel's actinometry : An essay in the historiography of experimental practice*, Adelheid Voskuhl, *The British Journal for the History of Science* **30** (1997) p. 337

action (angl. *action*) ► **1.** Grandeur dont la dimension physique est ML^2T^{-1} et qui peut s'exprimer en $\text{J} \cdot \text{s}$ dans le Système International d'unités. Il s'agit typiquement d'une impulsion multipliée par une longueur ou d'une énergie multipliée par une durée, mais également de l'unité physique dans laquelle s'exprime le moment cinétique (en particulier le spin). Cette dimension physique est probablement apparue pour la première fois suite à l'introduction, dans le cadre de la mécanique analytique, d'une quantité homonyme associée à la cinématique d'un système (voir deuxième sens), mais son importance va bien au-delà, surtout depuis l'avènement de la physique quantique. Ainsi, le rapport entre une valeur typique de l'action mise en jeu et la constante de Planck est un critère pertinent pour juger de la nécessité ou non d'avoir recours à une modélisation quantique d'un système physique : les effets quantiques sont importants si l'ordre de grandeur de l'action n'est pas très grand devant la constante de Planck. ▷ *voir encadré*.

► **2.** Quantité fondamentale souvent notée S (parfois I), initialement introduite en 1744 dans le cadre de la mécanique analytique par Pierre Louis de Maupertuis (1698–1759), et désormais utilisée dans presque tous les domaines de la physique. C'est une grandeur scalaire calculée en fonction du chemin suivi par un système au cours de son évolution entre un instant initial t_i et un instant final t_f . On la définit comme l'intégrale du lagrangien entre ces deux instants,

$$S = \int_{t_i}^{t_f} L dt,$$

ou bien, dans le cadre de la théorie des champs, comme l'intégrale, sur le volume d'espace-temps délimité par ces instants, de la densité lagrangienne $\mathcal{L}$,

$$S = \int \mathcal{L} d^4x.$$

Dans le cadre de la physique classique, le chemin effectivement suivi par le système est celui pour lequel S est stationnaire (▷ *principe de moindre action*). Notons que la reformulation de la physique quantique en termes d'intégrales de chemin par Richard Feynman (1918–1988) donne une importance nouvelle à cette quantité, en faisant l'élément-clé pour passer de la description classique à la description quantique. D'un point de vue mathématique, l'action est une fonctionnelle, l'intégrale de chemin étant quant à elle une intégrale fonctionnelle à valeurs complexes.

action Initialement introduite dans le cadre de la mécanique analytique, l'action est devenue un ingrédient fondamental de la physique moderne, en particulier par le rôle qu'elle a joué dans la généralisation du principe variationnel, énoncé dans le cadre de l'optique, non seulement à la mécanique, mais aussi par exemple à l'électrodynamique (▷ *principe de moindre action*). L'action est par ailleurs cruciale en physique quantique, celle-ci reposant en grande partie sur :

- l'existence d'un quantum d'action, la constante de Planck réduite $\hbar$. On peut ainsi juger de la pertinence d'une approche quantique d'un problème en comparant à $\hbar$ les valeurs typiques de l'action pour ce problème ;
- les relations d'indétermination d'Heisenberg qui font intervenir des grandeurs physiques dont le produit a la dimension d'une action, ce qui découle de la présence de la constante de Planck réduite dans les relations de commutation canoniques.

Ces dernières résultent d'ailleurs elles-mêmes du fait que les variables qui interviennent sont conjuguées dans le formalisme hamiltonien classique (▷ *moment conjugué*), ce qu'utilise la quantification canonique. L'action est d'autre part reliée au volume de l'espace des phases associé à un système, la dimension de ce volume étant égale à celle d'une action à la puissance n , où n désigne le nombre de degrés de liberté du système. Dans ce cadre, l'existence d'un quantum d'action s'interprète comme une quantification de l'espace des phases, les états occupant une cellule dont le volume dans l'espace des phases est inférieur à $\hbar^n$ étant indiscernables, au sens quantique du terme. Ce point de vue sur la nature quantique est le point de départ de l'une des procédures de quantification (▷ *quantification de Weyl*), la notion d'action jouant aussi un rôle central dans la formulation de Feynman de la physique quantique (▷ *intégrale de chemin*).

▷ *De l'électromagnétisme à la mécanique : Le rôle de l'action dans le "Mémoire" de Poincaré de 1905*, Christian Bracco & Jean-Pierre Provost, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **62** (2009) p. 457

▷ *Action physics*, Lachlan P. McGinness & C. M. Savage, American Journal of Physics **84** (2016) p. 704

▷ *Gravity and De gravitatione : the development of Newton's ideas on action at a distance*, John Henry, Studies in History and Philosophy of Science Part A **42** (2011) p. 11

action à distance  (angl. *action at a distance*) Action d'un système sur un autre se faisant de manière instantanée, les changements subis par le premier système se répercutant simultanément sur le second, indépendamment de la distance qui les sépare et sans qu'intervienne un agent intermédiaire. La théorie newtonienne de la gravitation en fournit un exemple, même si Newton n'en était pas satisfait. Cette façon de modéliser les interactions entre systèmes peut être pertinente dans certaines conditions, mais les lois de la relativité (restreinte ou générale) interdisent toute action à distance qui équivaut à un transfert d'information à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. En accord avec ce principe, toute interaction à distance se fait en réalité de proche en proche et à vitesse finie. En particulier, dans les théories modernes, des champs dynamiques véhiculent les interactions entre systèmes (▷ *champ électromagnétique*, *champ gravitationnel*). Le phénomène d'intrication quantique peut sembler permettre une action à distance instantanée, mais le caractère intrinsèquement aléatoire des phénomènes quantiques assure que tel n'est pas le cas et que, bien que remettant en cause la notion de localité, il ne permet pas un transfert supraluminique d'information (▷ *expérience d'Aspect*, *intrication quantique*, *paradoxe EPR*, *téléportation quantique*).

▷ *Descartes and the Problem of Action at a Distance*, Patrick Suppes, Journal of History of Ideas **15** (1954) p. 146

▷ *Action at a Distance in Classical Physics*, Mary B. Hesse, ISIS **46** (1955) p. 337

▷ *Action at a Distance in Nineteenth Century Electrodynamics*, A. E. Woodruff, ISIS **53** (1962) p. 439

▷ *Conceptual and experimental bases of Faraday's denial of electrostatic action at a distance*, David Gooding, Studies in History and Philosophy of Science Part A **9** (1978) p. 117

action euclidienne (angl. *Euclidean action* ; *Euclidean quantum gravity*) Action dans laquelle la métrique spatio-temporelle lorentzienne est remplacée par une métrique euclidienne obtenue *via* l'introduction d'un temps imaginaire pur (▷ *rotation de Wick*). Cette procédure est notamment l'outil fondamental d'une approche de la gravitation quantique (dite **gravitation quantique euclidienne**) dans laquelle les calculs sur une variété pseudo-riemannienne sont remplacés par des calculs sur une variété riemannienne. Cette approche, particulièrement développée par Stephen Hawking (1942–2018) et Gary Gibbons (1946–), est par exemple utile pour l'étude de la thermodynamique des trous noirs.

action mécanique (angl. *mechanical action*) Dans le cadre de la mécanique classique, nom donné à l'ensemble des causes capables de modifier ou de maintenir l'état de mouvement ou d'équilibre d'un système ou de certains de ses constituants. On distingue généralement les actions à distance des actions de contact, les actions surfaciques des actions volumiques, ainsi que les forces des moments, la notion de torseur permettant de traiter ces deux derniers concepts d'une manière unifiée. L'usage du terme « action » peut prêter à confusion, celui-ci étant aussi utilisé de manière plus précise dans un sens très différent.

activation  (angl. *activation*) Création d'un élément radioactif par transmutation, produite en bombardant un élément stable avec des projectiles (protons, neutrons, noyaux alpha, ions plus lourds, etc.). Lorsque les projectiles sont des protons ou des neutrons, on parle respectivement d'**activation protonique** et d'**activation neutronique**. Il peut s'agir d'un phénomène artificiel provoqué en laboratoire, ou naturel, résultant par exemple

de collisions avec des rayons cosmiques fortement énergétiques.

▷ *Methods and Applications of Activation Analysis*, Edward V. Sayre, Annual Review of Nuclear and Particle Science **13** (1963) p. 145
▷ *Analyse par activation*, N. Chevarier & J. Tousset, Bulletin de l'Union des Physiciens **665** (1984) p. 1173

activation neutronique  (angl. *Neutron activation analysis*) Méthode d'analyse consistant à bombarder un échantillon par un flux de neutrons pour y produire des réactions nucléaires, conduisant à la formation d'isotopes radioactifs que l'on peut ensuite identifier.

▷ *Modern physics concepts taught via a neutron activation analysis laboratory*, Stephen C. McGuire, David D. Clark *et al.*, American Journal of Physics **64** (1996) p. 1384
▷ *Neutron activation analysis of a penny*, Richard E. Stevens, American Journal of Physics **68** (2000) p. 385
▷ *A far-reaching project behind the discovery of neutron-induced radioactivity*, Alberto De Gregorio, Studies in History and Philosophy of Science Part B **37** (2006) p. 330

corps	activité (Bq · kg ⁻¹)
eau de mer	10
corps humain	100
substance dite « radioactive »	10 ⁵
minerai d'uranium	10 ⁷

TABLE 2 – Quelques valeurs de l'activité, exprimée en becquerels par kilogramme. L'activité du corps humain est principalement due à l'isotope ⁴⁰K du potassium contenu dans les os.

activité (angl. *activity*) ► **1.** Nombre de désintégrations ayant lieu dans un corps radioactif par unité de temps. Dans le Système International d'unités, l'activité s'exprime en becquerels, une activité d'un becquerel correspondant donc à une désintégration par seconde. On l'appelle aussi de manière impropre la **radioactivité**. ► **2.** Quantité sans dimension souvent notée *a* et définie à partir du potentiel chimique *μ* par

$$\mu(T, p) = \mu_0(T) + RT \ln a,$$

où *R* désigne la constante des gaz parfaits, *T* la température et *μ*₀ une valeur de référence du potentiel chimique. Pour un gaz, l'activité est reliée à la fugacité. ► **3.** On emploie aussi ce terme pour désigner la variation temporelle d'une caractéristique d'un système physique, par exemple pour une étoile dont la luminosité varie au cours du temps. En particulier, on parle d'activité solaire ou de l'activité d'un quasar (▷ **activité solaire**).

activité optique  (angl. *optical activity*) Propriété de certains milieux transparents anisotropes de faire tourner le plan de polarisation de la lumière qui les traverse. L'activité optique peut être due à une anisotropie intrinsèque du milieu ou induite par la présence d'un champ magnétique (▷ **effet Faraday**).

▷ *The discovery of the optical rotatory power of tartaric acid*, T.S. Patterson, Annals of Science **3** (1938) p. 431
▷ *Optical Rotatory Power in a Classical One-Electron Model*, G.

E. Desobry & P. K. Kabir, American Journal of Physics **41** (1973) p. 1350

▷ *The Discovery of Optically Active Coordination Compounds : A Milestone in Stereochemistry*, George B. Kauffman, ISIS **66** (1975) p. 38
▷ *On the natural optical activity in an isotropic medium : An exactly solvable model*, G. E. Vekstein, American Journal of Physics **64** (1996) p. 607
▷ *The Electrogyration Effect*, Orest G. Vlokh & Rostyslav O. Vlokh, Optics and Photonics News **20** (2009) p. 34

activité solaire  (angl. *solar activity*) Ensemble des phénomènes qui témoignent du caractère dynamique de la structure du Soleil, même si, à l'échelle d'une vie humaine, ses propriétés globales moyennes évoluent peu. L'activité solaire résulte d'interactions complexes entre l'atmosphère du Soleil et son champ magnétique. Elle est caractérisée par des événements relativement peu énergétiques associés à plusieurs cycles, dont le principal dure environ 11 ans (▷ **cycle solaire**), ainsi que par d'autres événements plus rares, brefs, aléatoires et violents (▷ **événement Carrington**, **événement Miyake**). On peut notamment constater l'activité solaire usuelle par

- l'observation de taches solaires en nombre variable, ou celle de protubérances solaires ;
- la mesure de l'émission électromagnétique de notre étoile, réalisée grâce à des héliostats, sur Terre ou embarqués à bord de satellites (▷ **SOHO**) ;
- l'étude du vent solaire, flux continu de particules chargées, parfois accompagné de sursauts de particules plus énergétiques (▷ **éjection de masse coronale**).

L'étude de l'activité solaire et de ses possibles conséquences pour l'humanité est l'objet de la météorologie spatiale.

▷ *The Origin of Solar Activity*, E. N. Parker, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **15** (1977) p. 45
▷ *Stellar Activity Cycles*, Sallie L. Baliunas & Arthur H. Vaughan, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **23** (1985) p. 379
▷ *Eruptions solaires et météorologie de l'espace*, Pierre Lantos & Tahar Amari, Pour la Science **284** (2001) p. 54
▷ *A history of solar activity over millennia*, Ilya G. Usoskin, Living Reviews in Solar Physics **14** (2017)

adaptation d'impédance  (angl. *impedance matching*) Modification de l'interface entre deux systèmes, au travers desquels se propagent des ondes ou des signaux, dans le but de limiter ou d'éliminer le phénomène de réflexion lors du passage d'un système à l'autre. Dans le domaine électrique, cette technique est utilisée pour transmettre efficacement l'énergie transportée par un signal entre deux dispositifs. L'impédance de sortie *Z*₁^e du premier doit alors être égale au complexe conjugué de l'impédance d'entrée *Z*₂^e du second, soit *Z*₁^e = (*Z*₂^e)^{*}. Quand elles sont réelles, cela revient à rendre égales les deux impédances. Ce principe est aussi mis en œuvre dans d'autres domaines et permet par exemple de comprendre l'intérêt des pavillons en acoustique et le principe des couches anti-reflets en optique.

▷ *Approche expérimentale de la notion d'adaptation d'impédance électrique*, J.-M. Baudé & Daniel Sache, Bulletin de l'Union des Physiciens **777** (1995) p. 1599

adiabaticité du son (angl. *adiabaticity of sound*)

Hypothèse selon laquelle les transformations thermodynamiques qui se produisent dans un gaz au passage d'une onde sonore sont adiabatiques. Cette hypothèse peut être testée expérimentalement par la mesure de la vitesse du son ($\triangleright$ *vitesse du son*). Elle se justifie par le fait que les transferts de chaleur entre les régions comprimées et les régions dilatées n'ont généralement pas le temps de se produire de façon appréciable pendant une demi-période. Cette hypothèse est d'autant mieux vérifiée que l'on considère des ondes sonores de basse fréquence. En effet, même si dans ce cas la période plus importante laisse *a priori* plus de temps pour que les échanges de chaleur se fassent, les gradients de température sont en revanche moins importants, ce qui conduit globalement à un transfert de chaleur par conduction moins efficace ($\triangleright$ *loi de Fourier*). On peut considérer que l'onde sonore est adiabatique pour des fréquences

$$f \ll \frac{nc_v v^2}{\lambda}$$

où n désigne le nombre de moles par unité de volume, c_v la capacité calorifique molaire, v la vitesse du son et λ la conductivité thermique du gaz. Pour de l'air à température ambiante, cette condition s'écrit $f \ll 4$ GHz. Cette hypothèse a été proposée et vérifiée en 1816 par Pierre-Simon Laplace (1749–1827), pour expliquer le désaccord entre la valeur mesurée pour la vitesse du son et la vitesse calculée en se basant sur l'hypothèse proposée par Sir Isaac Newton (1643–1727) selon laquelle les transformations de l'air sont isothermes au passage d'une onde sonore.

- $\triangleright$ *Adiabatic Assumption for Wave Propagation*, N. H. Fletcher, American Journal of Physics **42** (1974) p. 487
- $\triangleright$ [Notes and Discussions] *Adiabatic assumption for wave propagation*, N. H. Fletcher, American Journal of Physics **44** (1976) p. 486

adiabatique $\blacktriangleright$ **1.** Qualifie une transformation au cours de laquelle un système n'échange pas de chaleur avec l'extérieur. Une transformation adiabatique et réversible est isentropique. En général, une transformation rapide peut être considérée adiabatique si elle se fait sur une échelle de temps beaucoup plus courte que celle correspondant à l'échange de chaleur avec l'extérieur ($\triangleright$ *adiabaticité du son*). Un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible obéit aux lois de Laplace ($\triangleright$ *loi de Laplace*). $\blacktriangleright$ **2.** Qualifie une paroi ou un récipient qui ne permet pas les échanges de chaleur.

- $\triangleright$ *The Caloric Theory of Adiabatic Compression*, Thomas S. Kuhn, ISIS **49** (1958) p. 132
- $\triangleright$ *An adiabatic reversible process*, Raul Rechtman, American Journal of Physics **56** (1988) p. 1104
- $\triangleright$ *Thermodynamique : description microscopique des transferts énergétiques dans les transformations adiabatiques*, Yves Chanut & J.-C. Poizat, Bulletin de l'Union des Physiciens **767** (1994) p. 1329

adimensionné (angl. *non-dimensional*) Qualifie une quantité physique sans dimension obtenue en multipliant ou divisant une quantité initiale par des facteurs possédant les dimensions appropriées. Par exemple, on introduit plusieurs nombres adimensionnés en mécanique des fluides ($\triangleright$ *nombre de Reynolds*, *nombre de Strouhal*,

nombre de Prandtl, etc.). Leur utilisation permet d'étudier de manière générale des systèmes physiques dont les comportements sont semblables malgré des échelles qui peuvent être très différentes. Un autre intérêt est de mettre en évidence plus facilement les importances relatives des phénomènes physiques impliqués.

adjoint (angl. *adjoint*) Étant donné un espace vectoriel E muni d'un produit scalaire, l'adjoint d'un opérateur linéaire $\hat{A}$ de E dans E , noté $\hat{A}^\dagger$, est l'opérateur vérifiant, pour tous vecteurs $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ tels que l'action de ces opérateurs est définie,

$$|\psi_1\rangle \cdot (\hat{A}|\psi_2\rangle) = (\hat{A}^\dagger|\psi_1\rangle) \cdot |\psi_2\rangle,$$

où le symbole « $\cdot$ » désigne le produit scalaire. Dans le cas où l'espace est de dimension finie, l'opérateur est représenté par une matrice A , et l'on nomme **matrice adjointe** ou **hermitienne conjuguée** la matrice $A^\dagger$ qui représente $\hat{A}^\dagger$. Celle-ci s'obtient en prenant le nombre complexe conjugué de chaque élément de la transposée de A , soit $(A^\dagger)_{ij} = \bar{A}_{ji}$. Dans le cas d'une matrice réelle, il s'agit donc simplement de la transposée.

admittance (angl. *admittance*) Souvent représentée par la lettre Y , l'admittance est l'inverse de l'impédance Z , $Y = 1/Z$. C'est en général un nombre complexe ($\triangleright$ *conductance*, *susceptance*). Selon le domaine de la physique auquel on s'intéresse, on distingue l'admittance électrique, qui s'exprime en siemens dans le Système International d'unités, et l'admittance acoustique, qui s'exprime en $\text{m} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Les admittances de différentes parties d'un système montées en parallèle s'ajoutent. Ce terme fut introduit en 1887 par Oliver Heaviside (1850–1925).

adsorption (angl. *adsorption*) Fixation de molécules liquides ou gazeuses à la surface d'un solide. Le phénomène inverse se nomme la **désorption**. Quand le phénomène est volumique, on parle d'absorption.

advection (angl. *advection*) Transport d'une quantité dû à son entraînement par le mouvement d'un milieu. À ne pas confondre avec la diffusion et à distinguer de la convection. Par exemple, si l'on dépose une goutte d'encre dans un fluide en écoulement, son entraînement par le courant est de nature advective, tandis que l'étalement de la goutte est diffusif. D'autre part, on parle de **convection** quand l'advection est causée par une instabilité locale du milieu. Par exemple, le mouvement de masses d'air dans l'atmosphère se traduit par un transport convectif d'énergie thermique : les masses d'air emportent leur énergie thermique avec elles.

advection (équation d') (angl. *advection equation*) Nom traditionnellement donné à une équation aux dérivées partielles qui décrit le transport d'une quantité par advection. Dans le cas d'une grandeur scalaire ρ advectée par un courant de vitesse $\vec{v}$, elle s'écrit

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho = 0.$$

On peut l'obtenir à partir de l'équation de continuité avec l'hypothèse supplémentaire $\text{div } \vec{v} = 0$.

aérodynamique  (angl. *aerodynamics*) Domaine de la physique concernant le mouvement des corps dans l'air et celui de l'air autour d'obstacles. Cette discipline joue un rôle important dans la conception des avions, des fusées, mais aussi des voitures et des trains, ou encore celle des grands bâtiments architecturaux (tours ou barres d'immeubles). Elle s'appuie essentiellement sur la dynamique des fluides.

▷ *Le vol des insectes*, Michael Dickinson, Pour la Science **286** (2001) p. 42

aérolithe (angl. *aerolith*; *aerolite*) Terme autrefois employé pour désigner un météore et qui est désormais réservé pour parler des météorites pierreuses (moins de 35 % de métal), par opposition aux météorites métalliques.

aéronomie (angl. *aeronomy*) Domaine de la physique s'intéressant aux propriétés physico-chimiques de l'atmosphère terrestre et de celle des autres planètes.

aérosol (angl. *aerosol*) Fines particules (solides ou liquides) en suspension dans un gaz. C'est par exemple ce que produisent les vaporisateurs à parfum. Par extension le terme désigne dans le langage courant le dispositif servant à réaliser cette suspension.

affichage à cristaux liquides (angl. *Liquid Crystal Display*; *LCD*) Système permettant d'afficher des images sur une surface (l'écran), en utilisant les propriétés opto-électriques particulières de cristaux nématiques (ou cristaux liquides). Le principe est le suivant : un milieu nématique est placé entre deux polariseurs croisés. L'épaisseur du milieu est ajustée pour que, grâce à son activité optique, il fasse tourner de 90° la direction de polarisation de la lumière qui le traverse. L'ensemble polariseur-milieu-polariseur transmet alors une proportion appréciable de celle-ci. En revanche, lorsqu'on applique un champ électrique au milieu, ses propriétés optiques changent et l'activité optique ne permet plus la transmission correcte de la lumière : le dispositif devient opaque. Un ensemble de petites cellules de ce type, commandées par des tensions indépendantes, constitue des pixels qui permettent d'afficher une image.

affichage à diodes électroluminescentes (angl. *LED display*) Dispositif d'affichage constitué d'un ensemble de diodes électroluminescentes, contrôlées par un circuit électronique. Les afficheurs à 7 segments sont les plus célèbres, composés de 7 diodes dont les parties lumineuses dessinent un segment et sont organisées pour afficher tous les chiffres de 0 à 9. On rencontre aussi de plus en plus des écrans à LED, constitués d'une matrice de LED microscopiques formant des pixels. Ces dispositifs concurrencent les affichages à cristaux liquides. On trouve par exemple des afficheurs à diodes électroluminescentes organiques (OLED) dans certains écrans de téléphones portables ou de baladeurs mp3.

affinité (angl. *affinity*) En thermodynamique des processus irréversibles, grandeur qui décrit l'écart à l'équilibre, par rapport à une certaine propriété physique d'un système. L'affinité associée à une variable intensive γ dont la valeur doit être homogène à l'équilibre est définie de manière générale comme le gradient de cette variable, soit $\text{grad } \gamma$. Par exemple, dans le cas où une inhomogénéité de température existe au sein d'un milieu, l'affinité thermique est, par convention, le gradient de l'inverse de la température, $\gamma = 1/T$. Pour un conducteur électrique isotherme, il s'agit du gradient du potentiel électrique. La théorie de la réponse linéaire relie les affinités aux flux des quantités extensives dont le transport résulte d'un écart à l'équilibre (▷ *réponse linéaire*). Les affinités sont aussi nommées **forces généralisées**.

affinité électronique (angl. *electron affinity*) Pour un atome ou une molécule, énergie mise en jeu lors de la capture d'un électron menant à la formation d'un ion chargé négativement. Cette quantité peut être positive ou négative, selon que l'atome gagne ou perd de l'énergie lors de la capture. Les gaz rares ont tous une affinité électronique positive, en raison de leur couche électronique supérieure complète. Cette énergie est égale, au signe près, au premier potentiel d'ionisation de l'ion obtenu.

AFNOR Acronyme pour « Association Française de Normalisation ». Organisme chargé de normaliser au niveau national les unités et les symboles physiques, en veillant à leur conformité avec les normes internationales (▷ *ISO*). Par exemple, la normalisation des symboles des grandeurs physiques est donnée dans les normes françaises NF X 02.201 à 213.

afocal (angl. *afocal*) Qualifie un système optique qui transforme un faisceau de lumière parallèle en un autre faisceau de lumière parallèle. Comme le nom l'indique, les systèmes afocaux n'ont ni foyer objet, ni foyer image. C'est le cas par exemple d'une lunette astronomique réglée sur l'infini ou d'un élargisseur de faisceau.

Ag Symbole de l'élément argent ($Z = 47$).

AGAPE Acronyme de « Andromeda Galaxy Amplified Pixel Experiment ». Expérience française destinée à rechercher des objets compacts dans notre galaxie ou dans son entourage, grâce à l'effet de microlentille gravitationnelle. Cette expérience a été menée de 1994 à 1999, et reposait sur des observations faites depuis l'Observatoire du Pic du Midi (France) et celui de Kitt Peak, Arizona (États-Unis). Elle consistait à observer la galaxie d'Andromède et à détecter l'augmentation de lumière dans certains pixels qui serait due à l'effet de microlentille. Elle a détecté plusieurs événements.

âge du Soleil (angl. *age of the Sun*) Temps écoulé depuis la formation du Soleil. Au XIX^e siècle, on pensait que l'énergie rayonnée par le Soleil était d'origine gravitationnelle (▷ *contraction de Kelvin-Helmholtz*), ce qui permettait d'estimer l'âge du Soleil à quelques dizaines de millions d'années. Ceci était beaucoup plus court que

certaines estimations géologiques, sur lesquelles Charles Darwin (1809–1882) se reposait pour conforter sa théorie de l'évolution des espèces. La découverte de la radioactivité, au tout début du xx^e siècle, permit d'envisager que le Soleil ait pu briller pendant beaucoup plus longtemps que ce qu'on pensait. En 1938, la compréhension des cycles nucléaires par Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) et Hans Bethe (1906–2005) fournit une estimation correcte de l'âge du Soleil ($\triangleright$ *cycle proton-proton*, *cycle CNO*). La datation radioactive des météorites qui se sont formées en même temps que le Système solaire indique que l'âge du Soleil est de 4,6 milliards d'années.

âge sombre  (angl. *dark ages*) En cosmologie, désigne la période de l'histoire de l'Univers située après l'émission du rayonnement de fond cosmologique ($\triangleright$ *recombinaison*), mais avant l'allumage des premières étoiles. L'Univers était alors âgé de plus de 387 000 ans environ, mais avait un âge inférieur à une valeur comprise entre moins de 100 millions et 250 millions d'années (cette limite est encore mal connue).

- $\triangleright$ 'First light' in the universe : what ended the 'dark age' ?, Martin J. Rees, *Physics Reports* **333** (2000) p. 203
- $\triangleright$ In the beginning : the first sources of light and the reionization of the universe, Rennan Barkana & Abraham Loeb, *Physics Reports* **349** (2001) p. 125
- $\triangleright$ La fin de l'âge sombre, Michael Lemonick, *Pour la Science* **441** (2014) p. 38

âge de la Terre  (angl. *age of Earth*) Temps écoulé depuis la formation de la planète Terre, qui eut lieu peu après celle du Système solaire. Cet âge peut être estimé à partir des abondances de certains isotopes radioactifs (par exemple l'uranium 235) dans les roches terrestres, comme le suggérèrent en 1946 Arthur Holmes (1890–1965) et Friedrich Houtermans (1903–1966). En 1953, Clair Patterson (1922–1995) fournit la première mesure qui reposait sur la détermination d'abondances radioactives dans des météorites datant de l'époque de la naissance de notre planète. L'ensemble de ces méthodes, auxquelles s'ajoutent les études de roches lunaires, donnent un âge de 4,55 milliards d'années.

- $\triangleright$ Rutherford, Boltwood, and the Age of the Earth : The Origin of Radioactive Dating Techniques, Lawrence Badash, *Proceedings of the American Philosophical Society* **112** (1968) p. 157
- $\triangleright$ The age of the earth controversy : Beginnings to Hutton, Dennis R. Dean, *Annals of Science* **38** (1981) p. 435
- $\triangleright$ [Histoire de science] Mais quel âge a donc la Terre ?, Yves Gingras, *La Recherche* **434** (2009) p. 92
- $\triangleright$ Une simple question de températures, Fabienne Lemarchand, *La Recherche* **478** (2013) p. 33
- Lord Kelvin and the Age of the Earth, Joe D. Burchfield, (University of Chicago Press, 1990)
- Transmuted Past – The Age of the Earth and the Evolution of the Elements from Lyell to Patterson, Stephen G. Brush, (Cambridge University Press, 1996)

âge de l'Univers  (angl. *age of the Universe*) Durée, exprimée en temps cosmologique, qui sépare le moment présent de la singularité initiale dans le modèle du Big-Bang extrapolé à des densités arbitrairement grandes. La cosmologie donne une limite inférieure à l'âge de l'Univers, en fonction des paramètres cosmologiques. La comparaison des modèles théoriques avec l'âge des objets les plus vieux que l'on sait dater permet donc de mettre des contraintes sur les valeurs de

ces paramètres, et ainsi sur les modèles dont certains donnent des univers trop jeunes. Cette question a par exemple joué un rôle important aux débuts de la cosmologie, la valeur alors admise pour la constante de Hubble étant trop importante, ce qui conduisait à un univers plus jeune que la Terre. Aujourd'hui, l'âge de l'Univers est estimé à environ 13,8 milliards d'années, ce qui est en accord avec l'âge des populations d'étoiles les plus anciennes. Cette notion est toutefois à considérer avec précaution car, dans les instants les plus reculés de l'histoire de l'Univers, la gravitation doit être décrite de manière quantique, ce qui rend probablement caduc le concept usuel de temps.

- $\triangleright$ The age of the observable universe (*The Tenth Edward Arthur Milne Lecture*), W. A. Fowler, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **28** (1987) p. 87
- $\triangleright$ When did the universe begin ?, Joe Rosen, *American Journal of Physics* **55** (1987) p. 498
- $\triangleright$ Computing accurate age and distance factors in cosmology, Jodi L. Christiansen & Andrew Siver, *American Journal of Physics* **80** (2012) p. 367
- $\triangleright$ Halley and the eternity of the world revisited, Dmitri Levitin, *Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science* **67** (2013) p. 315

agilité fréquentielle Capacité d'un système électronique à fonctionner à différentes fréquences, par exemple grâce au changement de la tension de polarisation d'un des composants.

agitation thermique  (angl. *thermal motion*) Nom donné aux mouvements microscopiques désordonnés des constituants d'un système physique. L'énergie cinétique associée à ces mouvements est directement reliée à la température ($\triangleright$ *théorème de l'équipartition*, *température*). L'agitation thermique est par exemple responsable du mouvement brownien. On l'utilise pour mesurer la constante de Boltzmann dans l'expérience de Kappler. L'idée que la température puisse être associée à des mouvements microscopiques avait été formulée en 1678, de façon qualitative, par Robert Hooke (1635–1703), dans son ouvrage consacré aux ressorts et intitulé *Lectures De Potentia Restitutiva; or of Spring*. Elle fut oubliée, puis proposée de nouveau de façon plus quantitative en 1738 par Daniel Bernoulli (1700–1782), dans le cadre de ses travaux sur la théorie cinétique des gaz. Elle fut de nouveau oubliée, avant de renaître au XIX^e siècle avec les travaux de James Joule (1818–1889), Rudolf Clausius (1822–1888) et James Clerk Maxwell (1831–1879).

- $\triangleright$ A 13th Century Theory of Heat as a Form of Motion, Rose S. Marx, *ISIS* **22** (1934) p. 19
- $\triangleright$ Brownian Motors, R. Dean Astumian & Peter Hänggi, *Physics Today* **55** (2002) p. 33
- $\triangleright$ [Notes and Discussions] Paradoxical games and a minimal model for a Brownian motor, R. Dean Astumian, *American Journal of Physics* **73** (2005) p. 178

Aharonov–Bohm (effet)  (angl. *Aharonov-Bohm effect*) Dans l'étude d'une particule quantique chargée, phénomène qui permet de constater de manière expérimentale que la phase de la fonction d'onde dépend du potentiel vecteur électromagnétique $\vec{A}$, même lorsque le champ magnétique $\vec{B}$ associé est nul en tout point de l'espace accessible à la particule. Plus précisément, cet effet se manifeste lorsqu'il existe un « obstacle » interdi-

sant de rendre équivalentes par une déformation continue toutes les trajectoires classiquement possibles (▷ *lemme de Poincaré*), ce qui induit un déphasage entre certaines d'entre elles. On a ainsi pu le mettre en évidence par une expérience d'interférences de type trous d'Young, dans laquelle la particule se déplace dans des régions où $\vec{B} = \vec{0}$, les chemins autorisés se situant toutefois de part et d'autre d'une région à l'intérieur de laquelle le champ magnétique est non nul (par exemple un solénoïde infini). Le long d'un chemin $\mathcal{C}$ intervenant dans la détermination de la figure d'interférence, la phase est augmentée de

$$\phi = \frac{q}{\hbar} \int_{\mathcal{C}} \vec{A} \cdot d\vec{\ell},$$

où q est la charge de la particule et $\hbar$ la constante de Planck réduite. Le déphasage relatif pour des ondes de matière est donc donné par

$$\Delta\phi = \frac{q}{\hbar} \Phi,$$

où Φ désigne le flux magnétique à travers la surface délimitée par deux trajectoires $\mathcal{C}$ et $\mathcal{C}'$ de mêmes extrémités. Le résultat observable, directement lié à $\Delta\phi$, ne dépend pas du choix de jauge fait sur le potentiel vecteur, même si ce phénomène illustre l'importance de cette grandeur dans le cadre quantique. On peut observer l'effet Aharonov-Bohm de manière macroscopique dans le SQUID, où le courant électrique associé à des paires de Cooper qui circulent dans une boucle est modulé par la présence d'un champ magnétique, même si celui-ci n'est pas présent sur la boucle elle-même. L'effet Aharonov-Bohm fut prédit en 1949 par Raymond Eldred Siday (1912–1956) et Werner Ehrenberg (1901–1975), puis redécouvert en 1959 par Yakir Aharonov (1932–) et David Bohm (1917–1992). Il fut mis en évidence en 1960.

- ▷ *Misinterpretation of the Aharonov-Bohm Effect*, Timothy H. Boyer, American Journal of Physics **40** (1972) p. 56
- ▷ *Wavefront dislocations in the Aharonov-Bohm effect and its water wave analogue*, M. V. Berry, R. G. Chambers et al., European Journal of Physics **1** (1980) p. 154
- ▷ *Variations on the Aharonov-Bohm effect*, Barry R. Holstein, American Journal of Physics **59** (1991) p. 1080
- ▷ *The Aharonov-Bohm effects : Variations on a subtle theme*, Herman Batelaan & Akira Tonomura, Physics Today **62** (2009) p. 38

aigrette Autre nom donné à l'aberration de coma (▷ *aberration géométrique*).

aigrette de diffraction (angl. *diffraction spike*) Dans un télescope, figure de diffraction formée par les supports du miroir secondaire. Elle a la forme d'une croix dont les caractéristiques dépendent de la géométrie des supports.

aiguille de Buffon (angl. *Buffon needle*) Méthode de détermination expérimentale de la valeur du nombre π . Elle consiste à laisser tomber de manière aléatoire une aiguille de longueur ℓ sur un sol recouvert de droites parallèles espacées de la distance d . Lorsque l'on procède à un nombre de lancers N suffisamment élevé, il y aura

en moyenne $2N\ell/(\pi d)$ fois où l'aiguille aura intercepté l'une des droites. La relation entre la probabilité et le nombre π fut déterminée en 1777 par Georges-Louis Leclerc (1707–1788), comte de Buffon, et c'est Pierre-Simon Laplace (1749–1827) qui pensa à l'utiliser pour déterminer le nombre π . Il faut noter cependant que d'autres méthodes de calcul des décimales de π existaient déjà, et l'intérêt de l'idée de Laplace réside essentiellement dans le fait d'utiliser des tirages aléatoires pour déterminer un nombre.



FIGURE 3 – **aigrette de diffraction** – Exemples d'aigrettes de diffraction sur une image du télescope spatial Hubble (crédit : NASA, ESA, et H. Richter).

aimant  (angl. *magnet*) Système (généralement solide) possédant une aimantation (▷ *magnétisme*, *ferromagnétisme*). On distingue les aimants permanents des électro-aimants, dans lesquels l'aimantation, qui est produite par le phénomène d'induction, disparaît dès que le courant responsable de celle-ci ne circule plus.

- ▷ *Origine de la boussole II. Aimant et boussole*, Li Shu-hua, ISIS **45** (1954) p. 175
- ▷ *Le De magnete de Pierre de Maricourt. Traduction et commentaire*, D. Speiser & P. Radelet-de Grave, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **28** (1975) p. 193
- ▷ *Les aimants les plus puissants du monde*, Greg Boebinger, Al Passner et al., Pour la Science **214** (1995) p. 62
- ▷ *Everyone's Magnetism*, Andrey Geim, Physics Today **51** (1998) p. 36
- ▷ *Molecular magnets : the prehistory*, P. Day, Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science **56** (2002) p. 95

aimant permanent (angl. *permanent magnet*) Corps présentant une aimantation même en l'absence de champ magnétique appliqué. Un aimant permanent est constitué d'un matériau ferromagnétique dur dont l'aimantation rémanente est suffisamment importante pour qu'un champ magnétique externe notable soit produit et dont l'excitation coercitive est suffisante pour que l'aimantation ne soit pas réduite après application d'un champ externe. Les aimants sont utilisés pour faire régner un champ magnétique dans une région de l'espace ou pour exercer des forces. On en trouve dans de nombreux dispositifs, par exemple dans certains générateurs électriques, dans certains moteurs électriques, dans cer-

tains transducteurs électromécaniques (▷ *haut-parleur*). Les aimants les plus puissants sont constitués d'alliages, les aimants à néodyme pouvant par exemple avoir un champ rémanent de l'ordre du tesla et une excitation magnétique coercitive de $10^3 \text{ kA} \cdot \text{m}$.

aimantation (angl. *magnetization*) ► 1. Propriété qu'ont certains milieux d'acquies un moment magnétique macroscopique en présence d'un champ magnétique externe, ou de posséder un tel moment magnétique même en l'absence de champ externe. Dans ce dernier cas, on utilise aussi le terme d'**aimantation spontanée** ou d'**aimantation permanente** (▷ *magnétisme*). ► 2. L'aimantation désigne aussi la densité volumique de moment magnétique $\vec{M}$ dans un tel milieu. On la note souvent $\vec{M}$, et l'on a donc $\vec{M} = d\vec{\mu}/dV$. Dans le Système International d'unités, l'aimantation s'exprime en $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ et la quantité $\mu_0 \vec{M}$, appelée **polarisation magnétique**, en teslas (T). L'aimantation d'un échantillon dépend en général du champ magnétique externe appliqué, de la nature du milieu considéré et de la forme de l'échantillon (▷ *champ démagnétisant*).

- ▷ *Comment rendre à nouveau utilisable une aiguille aimantée qui a perdu son aimantation ; conservation des aimants*, M. Berenger, Bulletin de l'Union des Physiciens **73** (1979) p. 1310
- ▷ *The microscopic magnetization : concept and application*, L. L. Hirst, Reviews of Modern Physics **69** (1997) p. 607

aimantation rémanente (angl. *remanent magnetization*) Aimantation $\vec{M}$ acquise par un milieu magnétique après application d'un champ magnétique $\vec{H}$ externe et une fois ce dernier disparu. L'induction magnétique $\vec{B}_r$ associée à cette aimantation est nommée **champ rémanent**.

air ☞ (angl. *air*) Gaz formant l'atmosphère terrestre. Au niveau du sol, l'air sec (qui ne contient pas d'eau) est constitué d'environ 78 % de diazote, 21 % de dioxygène, 1 % d'argon, 0,035 % de CO_2 , ainsi que de diverses autres molécules en quantités beaucoup plus faibles. La masse molaire moyenne de l'air sec est de $28,966 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, et sa masse volumique vaut environ $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à 0°C et $1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à 20°C .

- ▷ *À propos de l'air : Quelques expériences simples*, Marie-Geneviève Séré, Bulletin de l'Union des Physiciens **75** (1981) p. 506

aire (angl. *area*) Mesure de l'étendue d'une surface. Les aires ont la dimension physique $[\text{L}^2]$ et s'expriment en m^2 dans le Système International d'unités. Par abus de langage, on utilise aussi le terme **surface** pour désigner l'aire.

aire de cohérence (angl. *coherence area*) Aire de la partie d'un front d'onde issu d'une source étendue sur laquelle l'onde peut être décrite en bonne approximation par une onde sphérique provenant d'un point source. Pour une onde quasimonochromatique de longueur d'onde λ , cette aire est donnée par

$$\mathcal{A} = \frac{R^2 \lambda^2}{S},$$

où S et R désignent respectivement la superficie de la source et la distance entre celle-ci et le front d'onde. L'aire de cohérence indique la taille maximale que doit avoir un dispositif interférentiel pour que la perte de cohérence spatiale ne se manifeste pas.

aires (constante des) Quantité conservée au cours du mouvement d'un corps soumis à une force centrale et qui intervient dans la loi des aires. Elle est définie par $C = r^2 \dot{\theta}$ où r et θ sont les coordonnées polaires du corps considéré par rapport au centre de force, et $\dot{\theta}$ désigne la dérivée temporelle de θ . Elle est reliée à la norme du moment cinétique $L = \|\vec{r} \wedge \vec{p}\| = m r^2 \dot{\theta}$ par $C = L/m$.

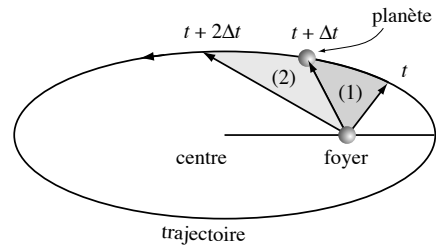


FIGURE 4 – aires (loi des) – Les aires grisées indiquées (1) et (2), délimitées par les rayons vecteurs séparés par des temps égaux, sont égales.

aires (loi des) ☞ (angl. *law of equal areas*) Loi relative au mouvement d'un corps sous l'action d'une force centrale. Il s'agit par exemple de la force gravitationnelle exercée par une distribution sphérique de masse ou de la force électrostatique exercée par une distribution sphérique de charge électrique. Cette loi, qui provient de la conservation du moment cinétique, indique que l'aire balayée par le rayon vecteur croît linéairement au cours du temps. Plus précisément, l'aire parcourue pendant un temps Δt vaut

$$\Delta S = \frac{r^2 \Delta \theta}{2} = \frac{C \Delta t}{2},$$

où C désigne la constante des aires et $\Delta \theta$ l'angle duquel a tourné le rayon décrivant la trajectoire pendant Δt . Elle fut énoncée de façon empirique en 1609 par Johannes Kepler (1571–1630) pour décrire le mouvement des planètes autour du Soleil (▷ *lois de Kepler*), puis démontrée en 1687 par Sir Isaac Newton (1643–1727) qui détermina la constante C en se basant sur l'expression de la force gravitationnelle.

- ▷ *The Mathematics of the Area Law : Kepler's Successful Proof in Epitome Astronomiae Copernicanae (1621)*, A. E. L. Davis, Archive for history of exact sciences **57** (2003) p. 355

Airy (expérience d') (angl. *water-filled telescope experiment ; Airy experiment*) Expérience réalisée par George Airy (1801–1892) en 1871 et 1872, consistant à mesurer l'aberration stellaire avec un télescope rempli d'eau. Cette expérience était destinée à mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau, à une époque où l'on considérait que la lumière se propageait dans l'éther.

Elle indiqua une aberration identique à celle obtenue avec des télescopes remplis d'air.

Airy (fonction d') (angl. *Airy function*) ► 1. Fonction intervenant dans le calcul de la diffraction d'une onde plane par une ouverture circulaire, et définie comme $(2J_1(x)/x)^2$ où J_1 désigne la fonction de Bessel d'ordre 1. ► 2. Fonction introduite en 1838 par George Airy (1801–1892) lors de son étude de l'arc-en-ciel. Elle est définie par

$$\text{Ai}(x) \equiv \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos\left(\frac{u^3}{3} + xu\right) du.$$

Elle est solution de $y'' - xy = 0$ avec $y(0) = (3^{2/3}\Gamma(2/3))^{-1}$ et $y'(0) = -(3^{1/3}\Gamma(1/3))^{-1}$, où Γ est la fonction gamma.

► *Nonspreading wave packets*, M. V. Berry & N. L. Balazs, *American Journal of Physics* **47** (1979) p. 264

Airy (George Biddell)  (1801–1892) Mathématicien et astronome anglais, il fut Astronome Royal de 1835 à sa mort. Il fut annobli en 1858 et devint alors Sir George Biddell Airy. En physique, il s'intéressa notamment à la forme du géoïde terrestre, à la gravimétrie, au magnétisme terrestre, à l'optique. Il fut le premier, en 1835, à expliquer de façon théorique pourquoi les étoiles apparaissent comme des disques lorsqu'on les observe au télescope, en faisant appel à la notion de diffraction de la lumière (► *disque d'Airy*). On lui doit également une expérience conduite avec un télescope rempli d'eau, destinée à tester la théorie de l'entraînement de l'éther (1871).

► *Sir George Biddell Airy, F.R.S. (1801-1892) and the Discovery and Correction of Astigmatism*, John R. Levene, *Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science* **21** (1966) p. 180

► *George Biddell Airy and his mechanical correction of the magnetic compass*, Charles H. Cotter, *Annals of Science* **33** (1976) p. 263

► *George Biddell Airy and horology*, J.A. Bennett, *Annals of Science* **37** (1980) p. 269

Airy (modèle d') (angl. *Airy model*) Description de la diffusion de la lumière par une goutte sphérique basée sur une approche ondulatoire, permettant de rendre compte de l'existence des arcs surnuméraires dans l'arc-en-ciel. L'intensité diffusée dans une direction donnée résulte de l'interférence des rayons diffractés par la surface de la goutte dans cette direction. On trouve que, lorsque la goutte est éclairée par un faisceau parallèle monochromatique de longueur d'onde λ , la distribution angulaire de l'intensité est donnée par la fonction d'Airy Ai (► *fonction d'Airy*),

$$I(\theta) \propto \text{Ai}^2\left(\sqrt{\frac{4D^2\pi^2}{3h\lambda^2}}(\theta - \theta_g)\right),$$

où θ_g désigne la position donnée par l'optique géométrique, D le diamètre des gouttes et $h \equiv 3\sqrt{(4-n^2)/(n^2-1)^3}$, n étant l'indice de réfraction de la goutte. Cette description fut introduite en 1838 par George Airy (1801–1892).

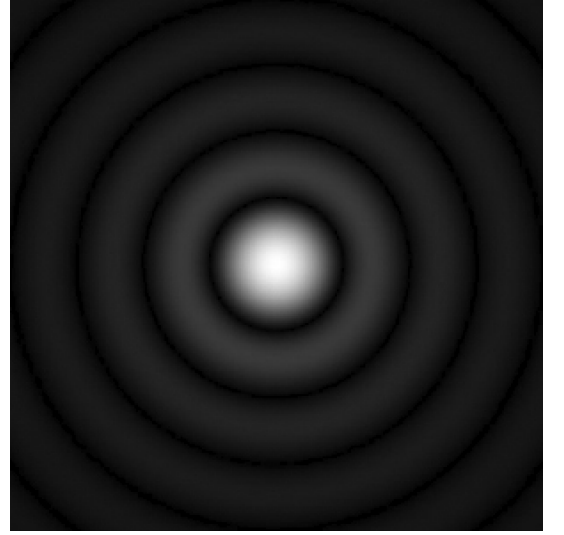


FIGURE 5 – Airy (tache d') – La tache d'Airy est constituée d'une succession d'anneaux sombres et brillants, de moins en moins visibles.

Airy (tache d')  (angl. *Airy disk*) Nom donné à la figure de diffraction d'une onde plane par une ouverture circulaire. Elle est constituée d'une tache brillante (le **disque d'Airy**, lui-même aussi nommé « tache d'Airy ») et d'une succession d'anneaux sombres et brillants. Le rayon angulaire du premier anneau sombre est donné par

$$\theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

où d est le diamètre de l'ouverture et λ la longueur d'onde de la lumière utilisée. La tache d'Airy intervient dans la formation des images par un instrument d'optique doté d'une ouverture circulaire, en particulier les télescopes, les lunettes astronomiques et les microscopes (► *critère de Rayleigh*). On peut voir le premier anneau de la tache d'Airy en observant de nuit un lampadaire lointain à travers un petit trou soigneusement percé dans un écran opaque (par exemple un couvercle plastique percé avec une épingle). Le nom fait référence à George Airy (1801–1892) qui calcula cette figure de diffraction en 1834.

► *Demonstration of the Airy disk using photography and simple light sources*, Kenneth Trantham & Timothy J. Reece, *American Journal of Physics* **83** (2015) p. 928

ajustement (angl. *fit*) Détermination des paramètres décrivant une courbe de manière à la rendre le plus proche possible d'un ensemble de points. Par exemple, la méthode des moindres carrés permet d'ajuster une droite à des points de données (► *méthode des moindres carrés*). Par extension, on parle aussi d'ajustement lorsque l'on cherche les paramètres d'un modèle ou d'une théorie qui permettent de rendre compte au mieux de données expérimentales. L'anglicisme **fit** est très couramment utilisé, ainsi que le verbe « fitter ».

Al Symbole de l'élément aluminium ($Z = 13$).

albédo (angl. *albedo*) Grandeur sans dimension qui caractérise la capacité d'un corps soumis à un rayonnement (en particulier de la lumière) à ré-émettre des ondes électromagnétiques, par réflexion spéculaire ou diffuse. Elle est définie comme le rapport entre le flux réémis et le flux incident, l'albédo d'un miroir parfait valant ainsi 1 alors que celui d'un corps noir est nul (l'émission thermique n'est pas considérée comme une réflexion). L'albédo dépend en pratique non seulement de la composition du corps, de sa régularité surfacique, mais également de l'angle d'incidence du rayonnement et de sa fréquence. Dans son utilisation courante, le terme albédo désigne souvent l'albédo moyenné sur la partie visible du spectre électromagnétique. Par exemple, l'albédo de la Lune est de 7 %. Pour les objets solides ou liquides, l'albédo ainsi défini est avant tout fonction de la composition chimique. La mesure de l'albédo d'une planète ou d'un autre corps céleste permet donc d'obtenir des informations sur la composition chimique de sa surface. Ce terme fut introduit en 1760 par Jean-Henry Lambert (1728-1777).

alcalin (angl. *alkali*) Nom générique des éléments situés dans la première colonne de la classification périodique des éléments (lithium Li, sodium Na, potassium K, rubidium Rb, césium Cs et francium Fr). L'hydrogène, avec son unique électron, jouit d'un statut particulier et on le considère plutôt comme un halogène.

alcalino-terreux (angl. *alkaline earth metals*) Nom générique des éléments de la seconde colonne de la classification périodique (béryllium Be, magnésium Mg, calcium Ca, ...).

aléatoire  (angl. *random*) Soumis au hasard. Dans le cadre de la physique, on rencontre divers processus aléatoires (> *marche au hasard*), dans la modélisation desquels interviennent des variables elles-mêmes aléatoires. De même, la notion de milieu aléatoire est très utile, par exemple pour représenter des systèmes désordonnés contenant des défauts répartis au hasard.

> *Throwing nature's dice*, Ricardo Aguayo, Geoff Simms *et al.*, American Journal of Physics **64** (1996) p. 752

Alfvén (Hannes Olof Gösta)  (1908-1995) Physicien théoricien suédois, prix Nobel de physique en 1970 pour « son travail fondamental et ses découvertes en magnéto-hydrodynamique ayant débouché sur d'importantes applications dans différents domaines de la physique des plasmas » (> *ondes d'Alfvén*).

> *[Obituaries] Hannes Alfvén (30 May 1908 - 21 April 1995)*, C.-G. Fälthammar, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society **37** (1996) p. 259

> *[Obituaries] Hannes Alfvén*, Carl-Gunne Fälthammar & Alexander J. Dessler, Proceedings of the American Philosophical Society **150** (2006) p. 649

Alfvén (onde d')  (angl. *Alfvén waves*) Ondes de déformation des lignes de champ magnétique dans un plasma, associées à une onde de densité du milieu ionisé. On les observe notamment dans le plasma électronique

présent dans les solides. Leur vitesse est de l'ordre de $v_a \sim B/\sqrt{\mu_0 \rho}$, où B désigne le champ magnétique, ρ la masse volumique du milieu et μ_0 la perméabilité magnétique du vide. Par exemple, la vitesse d'Alfvén associée au vent solaire est de l'ordre de $v_a \sim 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ au voisinage de la Terre. L'existence de ces ondes fut proposée en 1942 par Hannes Alfvén (1908-1995), et elles furent mises en évidence en 1949 par son étudiant-collègue Stig Lundquist (1922-2015) dans du mercure.

> *Interaction of Fast Particles with Waves in Cosmic Magnetoactive Plasma*, V. N. Tsytovich, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **11** (1973) p. 363

> *[Resource Letter] PWI-1 Plasma waves and instabilities*, Crockett L. Grabbe, American Journal of Physics **52** (1984) p. 970

> *[Search and Discovery] Magnetic waves pervade the Sun's corona*, Charles Day, Physics Today **62** (2009) p. 18

algèbre (angl. *algebra*) Espace vectoriel E (de corps de base K) muni d'une opération supplémentaire qui est une multiplication interne bilinéaire. Celle-ci associe donc, à deux vecteurs v et w de E , un troisième vecteur noté vw , et vérifie :

$$- \forall (v, w, x) \in E^3, (v + w)x = vx + wx ;$$

$$- \forall (v, w, x) \in E^3, v(w + x) = vw + vx ;$$

$$- \forall (v, w) \in E^2, \forall (a, b) \in K^2, (av)(bw) = (ab)(vw), \text{ où } (ab) \in K \text{ et } vw \in E.$$

Deux exemples courants d'algèbres rencontrées en physique sont celle des fonctions et celle des matrices carrées, toutes deux munies de leur loi de multiplication usuelle. Les algèbres ainsi définies sont parfois dites **associatives** pour caractériser le fait que la loi multiplicative est associative tout en les différenciant de structures assez semblables telles les algèbres de Lie.

algèbre de Lie  (angl. *Lie algebra*) Algèbre dont la loi de multiplication, souvent notée $[\cdot, \cdot]$, est antisymétrique ($[x, y] = -[y, x]$) et vérifie la relation de Jacobi

$$[x, [y, z]] + [y, [z, x]] + [z, [x, y]] = 0.$$

On démontre qu'à toute algèbre associative on peut associer une algèbre de Lie, le crochet de Lie étant alors défini comme l'anticommutateur par rapport à la loi de multiplication définie sur l'algèbre initiale. En physique, il est souvent suffisant de se représenter les algèbres de Lie comme des algèbres de matrices carrées. Les algèbres de Lie interviennent principalement, *via* la théorie des groupes, dans l'étude des symétries d'un problème physique : on montre en effet que près de son élément neutre, tout groupe de Lie est localement semblable à une algèbre de Lie dont les éléments sont appelés les générateurs du groupe (en termes plus techniques, l'algèbre de Lie est l'espace tangent au groupe de Lie au point associé à l'élément neutre). Les représentations des algèbres de Lie permettent ainsi de simplifier l'étude de diverses situations que ce soit en physique quantique (elles permettent de relier la notion de moment cinétique aux représentations du groupe des rotations), en matière condensée ou encore en physique des particules ou en relativité générale où apparaissent des algèbres de Lie pour décrire les interactions fondamentales mais

également les symétries de l'espace-temps (▷ *groupe de Poincaré, vecteur de Killing*).

- ▷ *Graded Lie algebras in mathematics and physics (Bose-Fermi symmetry)*, L. Corwin, Y. Ne'eman *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **47** (1975) p. 573
- ▷ *Wilhelm Killing and the structure of lie algebras*, Thomas Hawkins, *Archive for history of exact sciences* **26** (1982) p. 127

algébrique (angl. *oriented*) Qualifie une grandeur orientée, munie d'un signe (+ ou -) indiquant le sens de cette grandeur, relativement à un sens positif choisi de manière conventionnelle. Par exemple, les angles et les distances peuvent être mesurés de manière algébrique, une fois défini un sens de rotation positif ou une orientation positive sur une courbe (▷ *distance algébrique*).

Alhazen  (965–1039) Ibn al-Haytham, appelé Alhazen en Europe, est un mathématicien et physicien persan qui réalisa notamment de grandes avancées dans le domaine de l'optique, tant du point de vue expérimental que du point de vue théorique. Il montra que la lumière se propage en ligne droite et étudia en détail la chambre noire, sans toutefois en comprendre le fonctionnement (▷ *Kepler*). Il s'intéressa aux phénomènes de réflexion et de réfraction, et expliqua ce dernier par une analogie mécanique en supposant que la lumière se propage plus rapidement dans les milieux denses, une explication similaire à celle que fournira René Descartes (1596–1650) plusieurs siècles plus tard. En particulier, Alhazen énonça clairement le fait que, dans le phénomène de vision, la lumière se dirige des objets vers l'œil et non l'inverse. Ses travaux furent connus en Europe grâce à l'ouvrage « *Perspectiva* » de Vitellion, écrit vers 1275 mais publié en 1535, qui reprend plusieurs des travaux d'Alhazen.

- ▷ *The optical researches of Ibn Al-Haitham*, H. J. J. Winter, *Centaurus* **3** (1953) p. 190
- ▷ *Alhazen, Leonardo, and late-medieval speculation on the inversion of images in the eye*, Bruce Eastwood, *Annals of Science* **43** (1986) p. 413
- ▷ *Expectation, modelling and assent in the history of optics : Part I. Alhazen and the medieval tradition*, A.C. Crombie, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* **21** (1990) p. 605
- ▷ [*Présence de l'histoire*] Alhazen, un génie protéiforme au Moyen Âge, Roshdi Rashed, *Pour la Science* **315** (2004) p. 22

allées de von Karman  (angl. *von Karman streets*) Structures tourbillonnaires régulières se formant de manière périodique dans un écoulement à l'arrière d'un obstacle. Le mécanisme de leur formation fut décrit pour la première fois en 1911 par Theodore von Kármán (1881–1963).

- ▷ [*Quick Study*] *Vortices and tall buildings : A recipe for resonance*, Peter A. Irwin, *Physics Today* **63** (2010) p. 68

Allen–Jones (expérience d') (angl. *Allen-Jones experiment*) Expérience mettant en évidence l'effet fontaine dans l'hélium superfluide (▷ *effet fontaine*). Elle a été réalisée en 1938 par John F. Allen (1908–2001) et Harry Jones.

alliage (angl. *alloy*) Métal dans lequel on a ajouté un ou plusieurs autres éléments. Il peut s'agir d'une solution de plusieurs solides s'ils sont solubles, ou de l'ajout d'une faible quantité d'un élément dans un métal

pur. Par exemple, le **bronze** est un alliage de cuivre et d'étain, le **laiton** est un alliage de cuivre et de zinc, l'**acier** et la **fonte** sont des alliages de fer et de carbone. L'incorporation d'un élément dans un métal modifie la microstructure cristalline (notamment en introduisant des défauts cristallins), ce qui joue un rôle important sur ses propriétés mécaniques, chimiques et électriques.

allongement (angl. *extension*) Différence entre la longueur d'un corps élastique soumis à une contrainte et sa longueur au repos. On parle en particulier de l'**allongement d'un ressort**.

allotropie (angl. *allotropy*) Propriété de certains corps pouvant se trouver sous plusieurs formes cristallines distinctes. C'est le cas par exemple du carbone, que l'on peut trouver sous la forme de graphite ou de diamant. Ce terme fut introduit en 1840 par Jöns Berzelius (1779–1848).

ALMA  Acronyme de « Atacama Large Millimeter/submillimeter Array ». Télescope interférométrique situé au Chili. Ses 66 antennes sensibles aux micro-ondes permettent d'obtenir la même résolution angulaire qu'un télescope de 14 km de diamètre.

- ▷ *Un chantier pharaonique pour sonder l'Univers*, La Recherche **446** (2010) p. 50
- ▷ *ALMA déploie ses antennes*, Jean-Luc Dauvergne, *Ciel et Espace* **505** (2012) p. 56

Almageste  (angl. *Almagest*) Ouvrage de Claude Ptolémée (90–168) regroupant les connaissances astronomiques et cosmologiques du II^e siècle. Il contient notamment les seules références aux travaux du mathématicien grec Hipparque (-190–-120), par exemple sa découverte de la précession des équinoxes. Cet ouvrage fut perdu en Europe mais traduit en arabe, au Moyen Âge. Il fut ensuite redécouvert en Europe grâce à des traductions des versions arabes.

- ▷ *Problems Raised by Ptolemy's Lunar Tables*, S. J. Goldstein Jr., *Journal for the History of Astronomy* **13** (1982) p. 195
- ▷ *The Trouble with Ptolemy*, Owen Gingerich, *ISIS* **93** (2002) p. 70
- ▷ *Ptolemy's Treatment of the Outer Planets*, Dennis Duke, *Archive for history of exact sciences* **59** (2005) p. 169
- *Ptolemy's Almagest*, Ptolémée & G. J. Toomer (trad.), (Princeton University Press, 1998)

alpha [α] (angl. *alpha*) Première lettre de l'alphabet grec. Prononcer « alfa ». ► **1.** Nom originalement donné en 1900 par Ernest Rutherford (1871–1937) à un type de particules émises par certains éléments radioactifs. On sait depuis, grâce à ce même Rutherford, qu'il s'agit de noyaux d'hélium. Les particules alpha sont donc constituées de deux neutrons et deux protons. ► **2.** Symbole conventionnel pour la constante de structure fine. ► **3.** Notation usuelle pour le coefficient de dilatation isobare (▷ *coefficient thermoélastique*). ► **4.** Mode de désintégration radioactive dans lequel une particule alpha (c'est-à-dire un noyau d'hélium) est émise.

- ▷ *The scattering of α and β particles and Rutherford's atom*, John L. Heilbron, *Archive for history of exact sciences* **4** (1968) p. 247
- ▷ *Rutherford on the Alpha-Beta-Gamma Classification of Radioactive Rays*, Thaddeus J. Trenn, *ISIS* **67** (1976) p. 61

ALPHA  Expérience de physique des particules située au décélérateur d'antiprotons du CERN et dédiée à l'étude de l'antihydrogène. Elle a notamment permis d'obtenir une mesure grossière de son spectre, la précision n'étant cependant pas encore suffisante pour le comparer à celui de l'hydrogène. Cette comparaison constitue le but ultime de ce type d'expériences, afin de tester une éventuelle asymétrie des lois de la physique entre matière et antimatière. ▶ *ATRAP, ATHENA*.

▶ *ALPHA collaboration gets antihydrogen in the trap*, Jeffrey Hangst, (2011)

alternateur (angl. *alternator*) Dispositif produisant un courant électrique alternatif à partir d'une pièce rotative. Un alternateur est généralement composé d'une partie fixe, le **stator**, et d'une partie rotative, le **rotor**. L'un est muni d'aimants (ou d'électro-aimants) et l'autre de bobinages. La rotation provoque le mouvement relatif des bobinages par rapport aux aimants, ce qui crée, par induction électromagnétique, une force électromotrice induite, c'est-à-dire une tension électrique, qui permet ensuite de fournir un courant. On trouve des alternateurs dans les centrales électriques (les centrales nucléaires, les centrales thermiques, les centrales hydro-électriques, les éoliennes, etc.) et dans les moteurs automobiles, où ils servent à fournir une partie du courant utilisé dans les divers circuits électriques ainsi qu'à recharger la batterie. Les dynamos installées sur les bicyclettes sont également des alternateurs. Les alternateurs furent développés dans la seconde moitié du ^{xx}e siècle.

alternatif (angl. *alternating*) Qualifie une grandeur physique dont la valeur change de signe au cours du temps. On parle par exemple de courant alternatif (noté AC sur les appareils, abréviation de « alternating current ») ou de tension alternative, en électricité. Ces termes sous-entendent parfois que les grandeurs sont aussi périodiques. On oppose souvent le terme « alternatif » au terme « continu », en particulier en électricité.

alterné (angl. *alternating*) Qualifie une application multi-linéaire qui s'annule si deux des vecteurs pour lesquels on l'évalue sont identiques, $f(v_1, v_2, \dots, v_n) = 0$ s'il existe un couple (i, j) pour lequel $v_i = v_j$ ($i \neq j$). Dans les cas les plus pertinents pour la physique, cela signifie que la fonction est antisymétrique : elle change de signe si deux des vecteurs sont échangés. L'application peut alors être représentée par un tenseur antisymétrique.

altimètre  (angl. *altimeter*) Dispositif servant à mesurer l'altitude. Il s'agit généralement d'un baromètre, l'altitude étant déduite de la pression par la loi barométrique. Il existe cependant des altimètres basés sur des radars, comme ce fut le cas par exemple de ceux embarqués sur les modules lunaires des missions Apollo ou ceux utilisés dans les satellites d'observation de la Terre, comme TOPEX/POSEIDON et JASON.

▶ *The history of the altimetry of Mont Blanc*, Sir Gavin de Beer, *Annals of Science* **12** (1956) p. 3

altitude (angl. *altitude*) ▶ **1**. Distance entre un point et une surface de référence, par exemple le niveau moyen

de la mer. On peut mesurer l'altitude avec un altimètre.

▶ **2**. Pour un corps céleste donné, l'**altitude angulaire** désigne, en coordonnées horizontales, l'angle entre sa position sur la voûte céleste et l'horizon. L'altitude peut donc prendre des valeurs comprises entre 0° (le corps se trouve sur l'horizon) et 90° (il se trouve au zénith). On l'appelle aussi **hauteur** ou **élévation**.

aluminium  (angl. *Aluminum*) Élément de numéro atomique $Z = 13$, découvert en 1827 par Hans Christian Ersted (1777–1851). Il est représenté par le symbole Al. Structure atomique : $[\text{Ne}]3s^23p^1$. L'aluminium est un métal léger qui est extrait de la bauxite. Il est utilisé dans un très grand nombre de domaines, du fait de sa malléabilité, sa faible densité, sa résistance à la corrosion, son inertie chimique et ses excellentes propriétés mécaniques. Masse volumique : $2\,700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

▶ *Aluminium and its alloys for scientific instruments, 1855–1900*, Anita McConnell, *Annals of Science* **46** (1989) p. 611

▶ *Radioactive ^{26}Al in the galaxy : observations versus theory*, Nikos Prantzos & Roland Diehl, *Physics Reports* **267** (1996) p. 1

▶ *Quand l'aluminium était un métal rare*, Catherine Paquot, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **816** (1999) p. 1161

Alvaeger (expérience d') (angl. *Alvaeger experiment*) Expérience réalisée au CERN en 1964 par T. Alvaeger et ses collaborateurs, mettant en évidence le caractère universel de la vitesse de la lumière. Elle consiste à produire des mésons se déplaçant à une vitesse très proche de c , la vitesse de la lumière dans le vide, puis à mesurer la vitesse des photons gamma obtenus par désintégration de ces mésons. On mesure que cette vitesse est égale à c , dans le référentiel du laboratoire.

Alvarez (Luis)  (1911–1988) Physicien américain, dont les travaux en physique des particules lui valurent le prix Nobel de physique en 1968, pour « ses contributions décisives à la physique des particules élémentaires, en particulier ses découvertes d'un grand nombre d'états de résonance, rendues possibles grâce au développement de la technique de la chambre à bulles à hydrogène et de l'analyse de données ». Il découvrit le processus de capture électronique en 1937, mais est aussi connu pour des travaux originaux en marge ou hors de la physique des particules. Dans les années 1970 il inventa une méthode de datation au carbone 14 basée sur l'utilisation du cyclotron. Il chercha pendant longtemps des chambres secrètes dans les pyramides égyptiennes, en essayant notamment de les détecter par leur effet sur l'absorption du rayonnement cosmique par les édifices. Il participa aussi à la commission d'enquête sur l'assassinat du président américain John Kennedy, en analysant le film de l'événement d'un point de vue scientifique. Il déposa également une quarantaine de brevets dans des domaines très divers (télévision couleur, radar, système d'entraînement au golf, etc.). En 1980, avec son fils Walter il présenta une théorie expliquant l'extinction des dinosaures par l'apparition d'une grande quantité d'iridium, suite à l'impact d'un astéroïde.

▶ *A physicist examines the Kennedy assassination film*, Luis W. Alvarez, *American Journal of Physics* **44** (1976) p. 813

▶ *Mass Extinctions Caused by Large Bolide Impacts*, Luis W. Alvarez, *Physics Today* **40** (1987) p. 24

▷ *Scientist as detective : Luis Alvarez and the pyramid burial chambers, the JFK assassination, and the end of the dinosaurs*, Charles G. Wohl, *American Journal of Physics* **75** (2007) p. 968

Am Symbole de l'élément améri-cium ($Z = 95$).

amalgame (angl. *amalgam*) Alliage de mercure avec d'autres métaux, notamment l'argent, l'étain ou le cuivre. Les amalgames sont utilisés depuis très longtemps dans les « plombages » dentaires, du fait de leurs propriétés mécaniques (facilité de pose et durcissement) et chimiques (ils ne favorisent pas le développement des bactéries).

AMANDA  Acronyme de « Antarctic Muon and Neutrino Detector Array ». Expérience d'astronomie neutrinos située au pôle Sud. Il s'agit d'un télescope à neutrinos constitué de lignes de photodétecteurs enfoncées à plus de 1000 m de profondeur dans la glace (qui est très transparente à cette profondeur). Les photodétecteurs sont sensibles au rayonnement Cherenkov émis par les muons issus des rares interactions des neutrinos avec la glace, et permettent de reconstruire sa direction d'origine. L'expérience AMANDA, qui a débuté en 1993, a détecté plusieurs milliers de neutrinos et a permis de tracer des cartes du ciel en neutrinos. Depuis 2003, elle est englobée dans un projet plus vaste, IceCube.

▷ *[Search and Discovery] Deep Under the South Pole, a Novel Telescope Records Ultrahigh-Energy Astrophysical Neutrinos*, Bertram Schwarzschild, *Physics Today* **52** (1999) p. 19

amas (angl. *cluster*) ► 1. On appelle **amas d'étoiles** un ensemble d'étoiles formant dans le ciel un groupe clairement identifiable et consistant en un système lié par la gravitation. On distingue notamment :

- les **amas ouverts** composés d'au plus quelques milliers d'étoiles, toutes jeunes et issues du même nuage moléculaire, ce qui leur confère des compositions et âges voisins, rendant les amas ouverts fort utiles pour l'étude de l'évolution stellaire. On les rencontre dans le disque galactique et ils sont faiblement liés gravitationnellement, ce qui explique qu'ils ont une durée de vie assez brève ;
- les **amas globulaires**, contenant de 1000 à 10⁶ étoiles environ, dont la distribution possède un cœur dense et fortement lié. Ils font partie du halo galactique, étant gravitationnellement liés à la galaxie, et contiennent généralement des étoiles âgées.

▷ *The Dynamics of Star Clusters*, Richard W. Michie, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **2** (1964) p. 49
 ▷ *Des amas d'étoiles s'évaporent*, Georges Meylan & S. George Djorgovski, *La Recherche* **345** (2001) p. 38
 ▷ *Nebulae, Star Clusters and the Milky Way : From Galileo to William Herschel*, Michael Hoskin, *Journal for the History of Astronomy* **39** (2008) p. 363
 ▷ *The birth and death of star clusters in the Milky Way*, Steven W. Stahler, *Physics Today* **65** (2012) p. 46
 ▷ *La vie intérieure des amas stellaires*, Steven Stahler, *Pour la Science* **428** (2013) p. 50

► 2. De façon analogue, on appelle **amas de galaxies** un ensemble de galaxies liées gravitationnellement (lorsque l'on dénombre moins de 100 galaxies l'appellation **groupe** est favorisée bien que la frontière entre groupe et amas

ne soit pas très rigoureuse). La cohésion gravitationnelle de ces structures pose un problème important en astrophysique, car la masse des galaxies et du gaz qu'elles contiennent ne semble pas suffisante pour produire le potentiel gravitationnel que l'on y mesure indirectement. C'est l'une des facettes du problème de la matière noire. Certains amas de galaxies sont eux-mêmes regroupés dans des **superamas** (▷ *Groupe local, amas de la Vierge, superamas local*).

▷ *Les amas de galaxies*, Patrick Henry, Ulrich Briel *et al.*, *Pour la Science* **256** (1999) p. 44
 ▷ *Les amas de galaxies*, Florence Durret, *Cahiers Clairaut* **92** (2000) p. 2
 ▷ *Clusters and cosmology*, Neta A Bahcall, *Physics Reports* **333** (2000) p. 233
 ▷ *Cosmological Parameters from Observations of Galaxy Clusters*, Steven W. Allen, August E. Evrard *et al.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **49** (2011) p. 409
 ▷ *Formation of Galaxy Clusters*, Andrey V. Kravtsov & Stefano Borgani, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **50** (2012) p. 353

amas de la Vierge (angl. *Virgo cluster*) Amas de galaxies comprenant plusieurs centaines de membres et situé à environ 60 millions d'années-lumière de la Voie lactée. Il représente la composante dominante du superamas local (aussi nommé « superamas de la Vierge »), sa masse étant estimée à environ 10¹⁴ masses solaires et son diamètre à environ 9 millions d'années-lumière. Son membre le plus imposant est la galaxie M87 (parfois nommée Virgo A ou NGC 4486), galaxie elliptique dont la masse est environ 20 fois celle de la Voie lactée, qui possède un noyau galactique actif et qui est l'une des plus intenses sources radio proches de nous. L'amas de Virgo contient de nombreuses galaxies massives, potentiellement associées à des trous noirs supermassifs, ce qui en fait l'une des sources d'ondes gravitationnelles les plus prometteuses.

amas du Boulet (angl. *Bullet Cluster*) Amas résultant de la collision de deux galaxies, constituant un laboratoire de choix pour l'étude de la matière noire. Les observations dans différentes longueurs d'onde permettent d'y cartographier les étoiles ainsi que la distribution du gaz interstellaire. Par ailleurs, les mesures de *weak lensing* permettent de cartographier directement la masse, essentiellement due à de la matière noire. La collision des galaxies a conduit à une répartition atypique de ces trois composantes (gaz, étoiles, matière noire) qui a permis d'imposer des contraintes très fortes sur les hypothèses de gravité modifiée, alternatives à celle de la matière noire. Cette dernière est finalement confortée par l'étude détaillée de cet amas. Il porte aussi le nom « amas de la Balle » (*Bullet cluster* en anglais) et on s'y réfère par la nomenclature 1E 0657-56.

amas globulaire  (angl. *globular cluster*) Ensemble d'étoiles gravitationnellement liées entre elles pour former un amas sphérique de quelques dizaines d'années-lumière de rayon. On observe un peu plus de 200 amas globulaires dans notre galaxie et chacun contient de 1000 à 10⁶ étoiles. Ces objets se sont formés en même temps que les galaxies et leurs étoiles sont vieilles. L'étude de leur diagramme de Hertzsprung-

Russel permet de déterminer l'âge de l'amas. On trouve des âges de l'ordre de 10 milliards d'années. La limite inférieure sur l'âge de l'Univers ainsi obtenue a eu une grande importance dans l'évolution des idées en cosmologie.

- ▷ *The dynamical evolution of globular clusters*, Alan P. Lightman & Stuart L. Shapiro, *Reviews of Modern Physics* **50** (1978) p. 437
- ▷ *Globular Clusters in Galaxies*, William E. Harris & René Racine, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **17** (1979) p. 241
- ▷ *The Dynamics of Globular Clusters*, Ivan R. King, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **22** (1981) p. 227
- ▷ *The age of the galactic globular cluster system*, Don A. Vandenberg, Michael Bolte *et al.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **34** (1996) p. 461
- ▷ *The age of globular clusters*, Lawrence M. Krauss, *Physics Reports* **333** (2000) p. 33
- ▷ *L'étonnante jeunesse des amas globulaires*, Steven Zepf & Keith Ashman, *Pour la Science* **315** (2004) p. 36

américium (angl. *Americium*) Élément de numéro atomique $Z = 95$, découvert en 1944 par Glenn Seaborg (1912–1999), Ralph A. James, Stanley Thompson (1912–1976) et Albert Ghiorso (1915–2010). Il est représenté par le symbole Am. Structure atomique : $[\text{Rn}]7s^26d^05f^7$. C'est un élément artificiel, obtenu par bombardement du plutonium par des neutrons. Il est utilisé comme source de neutrons, de rayons gamma ou de particules alpha. On en trouve notamment dans certains détecteurs de fumée, comme source ionisante.

ami de Wigner (angl. *Wigner's friend*) Expérience de pensée proposée en 1964 par Eugene Wigner (1902–1995) pour illustrer certaines difficultés conceptuelles associées à la mesure en physique quantique. Dans cette expérience, un observateur demande à un ami de réaliser l'expérience du chat de Schrödinger dans une autre pièce, puis entre lui-même dans la pièce, une fois l'expérience terminée. Wigner demande alors à quel moment la superposition chat vivant/chat mort se transforme en état bien défini : la réduction de la fonction d'onde a-t-elle lieu quand l'ami ouvre la boîte contenant le chat ou quand l'observateur entre dans la pièce et voit lui-même le résultat ? Wigner voulait par ce scénario poser la question du rôle de la conscience dans la notion de mesure en physique quantique.

amont (angl. *upstream*) Dans un écoulement, désigne la zone située avant la région à laquelle on s'intéresse. Antonyme : ▷ *aval*.

amorphe (angl. *amorphous*) État solide dans lequel la structure microscopique de la matière est désordonnée à moyenne et grande distances, mais ordonnée à courte distance (sur une échelle de l'ordre de quelques dizaines d'atomes). Cet état est donc différent de l'état cristallin pour lequel un ordre existe à toutes les échelles de distance, et en ce sens, il s'apparente plus à un état liquide très visqueux qu'à un véritable état solide. L'état amorphe est généralement un état métastable du point de vue thermodynamique, avec un temps caractéristique d'évolution très grand devant les échelles de temps typiques des observations. Les verres en constituent un excellent exemple.

amortissement (angl. *damping*) ► **1.** Diminution de l'amplitude d'une oscillation, du fait d'un frottement ou d'une dissipation. ► **2.** Nom générique donné aux causes de dissipation qui diminuent l'amplitude d'un oscillateur. Par extension, on appelle « terme d'amortissement » le second terme de l'équation des oscillateurs (▷ *oscillateur amorti*)

$$\ddot{x} + 2\lambda\dot{x} + \omega_0^2 x = F(t).$$

- ▷ *Les mathématiques de l'amortissement*, Alain Oustaloup, *Pour la Science* **253** (1998) p. 80
- ▷ *[Idées de physique] Comment rouler sans être secoué*, Jean-Michel Courty & Édouard Kierlik, *Pour la Science* **498** (2019) p. 88

amortissement critique (angl. *critical damping*) Valeur de l'amortissement qui conduit au régime critique pour un système oscillant amorti. C'est la valeur pour laquelle le système initialement perturbé revient le plus rapidement à son état initial, sans osciller. Ceci explique l'importance pratique de cette notion, qui intervient entre autres dans les systèmes mécaniques (amortisseurs de voiture par exemple) ou électriques.

amortissement de Landau  (angl. *Landau damping*) Phénomène d'amortissement des ondes de plasma découvert en 1946 par Lev Landau (1908–1968). Cet amortissement est dû aux échanges d'énergie entre l'onde électromagnétique associée à l'onde de plasma et les charges se déplaçant avec une vitesse proche de la vitesse de phase de l'onde électromagnétique. Les charges peuvent perdre ou gagner de l'énergie par cette interaction, mais on peut montrer que le bilan global conduit à une dissipation de l'onde de plasma.

- ▷ *On the physics of Landau damping*, David Sagan, *American Journal of Physics* **62** (1994) p. 450
- ▷ *A new approach to linear Landau damping*, G. Brodin, *American Journal of Physics* **65** (1997) p. 66
- ▷ *A tutorial presentation of the two stream instability and Landau damping*, D. Anderson, R. Fedeles *et al.*, *American Journal of Physics* **69** (2001) p. 1262

ampère [A]  (angl. *ampere*) Unité (symbole A) dans laquelle s'exprime l'intensité du courant électrique dans le Système International d'unités dont elle est une unité de base. Comme indiqué en 2019 par le Bureau International des Poids et Mesures,

« Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e , égale à $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à 1 A·s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{Cs}$ »

où $\Delta\nu_{Cs}$ est la fréquence du césium, ce qui implique que l'on peut désormais définir l'ampère directement à partir des deux constantes e et $\Delta\nu_{Cs}$, sans référence à aucune autre dimension physique. Cette définition se distingue ainsi nettement de la version précédente qui reposait sur la force d'Ampère entre deux fils électriques parcourus par des courants. En quelque sorte, elle reconnaît le statut plus fondamental de la grandeur **charge électrique**, et ce sont uniquement des raisons pratiques et métrologiques qui font que l'on définit le coulomb à partir de l'ampère, et non l'inverse.

- ▷ *[Quick Study] Quantum electrical standards*, Neil M. Zimmer-

man, *Physics Today* **63** (2010) p. 68

- ▷ *Single-electron current sources : Toward a refined definition of the ampere*, Jukka P. Pekola, Olli-Pentti Saira *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **85** (2013) p. 1421
- ▷ *[Measure for measure] The electrical connection*, François Pi-quenal, *Nature Physics* **12** (2016) p. 284

Ampère (André-Marie)  (1775–1836) Physicien et mathématicien français. Fondateur de l'électrodynamique qu'il présenta en 1827 dans son ouvrage *Sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*, on lui doit notamment les avancées suivantes :

- l'explication de l'expérience d'Ersted dans laquelle une aiguille aimantée située près d'un courant électrique se trouve déviée ;
- la découverte en 1821 de l'interaction entre deux courants électriques (▷ *force de Laplace*) ;
- le galvanomètre, le solénoïde et l'électro-aimant ;
- les termes « courant », « tension » et « circuit électrique ».

L'unité de mesure de l'intensité électrique dans le Système International d'unités porte désormais son nom (▷ *ampère*).

- ▷ *L'activité scientifique d'Ampère*, Pierre Costabel, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **30** (1977) p. 105
- ▷ *Ampère et les lois de l'électrodynamique*, Alfred Kastler, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **30** (1977) p. 143
- ▷ *What Were Ampere's Earliest Discoveries in Electrodynamics?*, L. Pearce Williams, *ISIS* **74** (1983) p. 492
- ▷ *The key role of Oersted's and Ampère's 1820 electromagnetic experiments in the construction of the concept of electric current*, Christine Blondel & Abdelmadjid Bensegghir, *American Journal of Physics* **85** (2017) p. 369

Ampère (force d') (angl. *Ampère force*) Force par unité de longueur qu'exercent l'un sur l'autre deux fils conducteurs parcourus par des courants électriques constants. Dans le cas de deux fils localement parallèles, il s'agit d'une attraction quand les courants sont de même sens, et d'une répulsion s'ils sont de sens opposés. Dans la limite de deux fils rectilignes de section négligeable, séparés par une distance d petite par rapport à leur longueur, et parcourus par des courants d'intensités I_1 et I_2 , la force F par unité de longueur ℓ vérifie

$$\frac{F}{\ell} = 2k_m \frac{I_1 I_2}{d}$$

où, dans le Système International d'unités, la constante k_m est reliée à la perméabilité magnétique du vide μ_0 par $k_m = \mu_0/(4\pi)$. L'interprétation moderne de cette force est qu'elle résulte de l'action du champ magnétique créé par un fil, sur le second (▷ *force de Laplace*, *loi de Biot et Savart*). En raison des équations de Maxwell, la constante k_m peut par conséquent s'exprimer en fonction de la constante k_e , présente dans la force de Coulomb, et de c , la vitesse de la lumière. L'expression de la force d'Ampère était à la base de la définition de l'unité de courant électrique dans certaines versions du système d'unités CGS, ainsi que dans le Système International d'unités jusqu'en mai 2019 (▷ *Système International d'unités, unités électromagnétiques, unités gaussiennes*).

Ampère (théorème d') (angl. *Ampère theorem*)

► 1. Relation entre l'intensité du courant électrique total parcourant un ensemble de conducteurs électriques et le champ magnétique $\vec{B}$ créé par ce courant total. Cette relation, valable uniquement pour des courants constants dans le temps ou dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires, prend la forme

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu I,$$

où l'intégrale est à prendre le long de n'importe quelle courbe fermée au travers de laquelle passent les conducteurs transportant le courant électrique. Dans cette expression μ désigne la perméabilité magnétique du milieu (égale à la perméabilité magnétique du vide μ_0 pour les milieux non magnétiques ou dans le vide) et I la somme algébrique des courants traversant la courbe fermée. Ces courants sont comptés positivement s'ils sont dirigés dans le sens donné par la règle du tire-bouchon, et négativement dans le cas contraire. Sous sa forme locale, cette relation s'écrit

$$\vec{\text{rot}} \vec{B} = \mu \vec{j}$$

qui constitue un cas particulier d'une des équations de Maxwell. Cette loi ne fut pas découverte par André Ampère (1775–1836), mais par James Clerk Maxwell (1831–1879) qui l'écrivit pour la première fois en 1856. Elle est aussi appelée **loi de Maxwell-Ampère**. ► 2. Dans les milieux magnétiques, on l'écrit plutôt

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I,$$

où I désigne cette fois la contribution des courants libres, celle des courants liés étant prise en compte dans la définition de l'excitation magnétique $\vec{H}$. Sous sa forme locale, cette relation devient

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j}$$

où $\vec{j}$ désigne la densité de courant libre.

- ▷ *Contribution d'Ampère au « théorème d'Ampère »*, Pierre-Gérard Hamamdjian, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **31** (1978) p. 249
- ▷ *Sur le théorème d'Ampère*, Jean-Paul Mathieu, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **43** (1990) p. 333
- ▷ *[Questions and Answers] #18. Simple proofs of Ampère's law*, A. P. French, *American Journal of Physics* **63** (1995) p. 394
- ▷ *Ampère was not the author of "Ampère's Circuital Law"*, Herman Erlichson, *American Journal of Physics* **67** (1999) p. 448

ampère-heure [Ah] (angl. *ampere-hour*) Unité de charge électrique (symbole Ah) définie comme la charge transportée en une heure par un courant électrique d'un ampère. Elle est reliée au coulomb (C) du Système International d'unités par 1 Ah = 3 600 C. On l'emploie notamment pour exprimer la charge des piles et des batteries.

ampère-tour [At] (angl. *ampere-turn*) Unité (symbole At) dans laquelle s'expriment les forces magnéto-motrices dans le Système International d'unités.

ampèremètre (angl. *ammeter*) Appareil servant à mesurer l'intensité d'un courant électrique. Il en existe de différents types, basés sur la force de Laplace (▷ *galvanomètre à cadre mobile*), sur des mesures purement électriques (▷ *multimètre*) ou sur les phénomènes d'induction (▷ *pince ampèremétrique*).

amplificateur (angl. *amplifier*) Dispositif destiné à amplifier un signal, en particulier en électricité et électronique, ou une onde électromagnétique. Un amplificateur, alimenté à son entrée par un signal associé à une grandeur physique (courant électrique, tension, onde électromagnétique), délivre à sa sortie un signal dont la forme d'onde est identique mais d'amplitude plus élevée. Le rapport des amplitudes est appelé **gain de l'amplificateur**. En pratique, les performances d'un amplificateur ne sont jamais parfaites : la forme d'onde du signal de sortie peut différer de celle du signal d'entrée. Cette **distorsion** peut être due par exemple à un phénomène de saturation ou/et à une dynamique insuffisante de l'amplificateur. La plupart des amplificateurs sont des circuits électroniques, le signal à amplifier étant dans une première étape converti sous forme électrique, amplifié, puis finalement restitué sous sa forme initiale (acoustique par exemple). Il existe aussi des amplificateurs qui opèrent directement dans le domaine des ondes centimétriques (▷ *maser*) ou de l'optique (▷ *laser*), sans cette double conversion. Leur fonctionnement repose sur l'effet d'émission stimulée.

amplificateur opérationnel (angl. *operational amplifier*; *op-amp*) Composant électronique constitué de transistors, et servant à amplifier la différence de tension $\epsilon = V^+ - V^-$ entre ses deux bornes d'entrée, appelées entrées inverseuse (V^-) et non inverseuse (V^+). C'est un composant actif, alimenté par une tension externe (les bornes notées « alim » sur la figure). Pour les faibles différences ϵ de tension d'entrée, la tension de sortie varie linéairement avec ϵ , et l'on parle de régime linéaire. Plus précisément, la tension de sortie est alors donnée par

$$V_s = A_d(V^+ - V^-) + A_{mc} \frac{V^+ + V^-}{2},$$

où A_d est appelé le **gain différentiel** et A_{mc} le **gain de mode commun**. Pour les fortes différences de tension, la tension de sortie sature à la tension d'alimentation du dispositif. Ce régime est utilisé en commutation. On parle d'**amplificateur opérationnel idéal** ou **parfait** lorsque le gain différentiel A_d est infini, A_{mc} est nul, l'impédance d'entrée est infinie et l'impédance de sortie est nulle. Le terme « amplificateur opérationnel » fut introduit en 1947 par John Ragazzini (1912–1988), parce que ce composant permet de concevoir des circuits réalisant des opérations mathématiques élémentaires sur des signaux (▷ *montage additionneur*, *montage multiplicateur*, *montage dérivateur*, *montage intégrateur*, etc.). Les premiers amplificateurs opérationnels furent commercialisés en 1952, et étaient composés de tubes électroniques, qui furent remplacés par des transistors dans les années 1960. On parle souvent d'**ampli-op** ou d'**AO**.

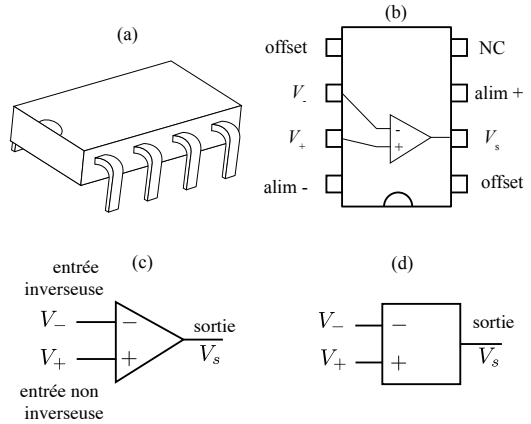


FIGURE 6 – amplificateur opérationnel – (a) Aspect externe d'un modèle courant. (b) Rôle des différentes bornes dans un modèle courant (le brochage peut varier d'un modèle à l'autre). NC signifie « non connecté », et les bornes « offset » permettent de compenser le mode commun $V^+ + V^-$ éventuellement présent. (c) Symbole américain de l'amplificateur opérationnel. L'alimentation du composant n'a pas été représentée, par souci de clarté. (d) Symbole européen.

amplificateur opérationnel parfait (angl. *ideal operational amplifier*) Modélisation de l'amplificateur opérationnel dans laquelle on considère que :

- le gain différentiel est infini ;
- le gain de mode commun est nul (▷ *amplificateur opérationnel*) ;
- l'impédance d'entrée est infinie ;
- l'impédance de sortie est nulle.

Pour que le signal de sortie soit fini, en fonctionnement linéaire, la borne inverseuse et la borne non inverseuse sont alors nécessairement à des potentiels égaux ($V^+ = V^-$).

amplification (angl. *amplification*) Augmentation de la valeur d'une grandeur physique, par exemple d'un signal ou de l'amplitude d'un oscillateur.

amplification paramétrique (angl. *parametric amplification*) Amplification de l'amplitude d'une oscillation résultant de la variation périodique d'un paramètre contrôlant cette oscillation (▷ *oscillation paramétrique*, *Botafumeiro*, *balançoire*).

amplitude (angl. *amplitude*) Valeur maximale que peut prendre une grandeur décrivant l'oscillation d'un système. Par exemple, c'est la quantité x_0 dans le cas de la position $x(t)$ d'un oscillateur harmonique $x(t) = x_0 \cos \omega t$. Dans ce sens, cette quantité est aussi nommée **valeur de crête**, en particulier dans le cas d'un signal électrique. Par extension, on nomme également parfois « amplitude » la valeur instantanée $x(t)$.

amplitude complexe (angl. *complex amplitude*) Dans la notation complexe, où à un signal sinusoïdal réel $S(t) = S_0 \cos(\omega t + \phi)$ on associe une grandeur complexe souvent notée avec une lettre soulignée et donnée par

$$\underline{S}(t) = \underline{S}_0 e^{i\omega t},$$

l'amplitude complexe est $\underline{S}_0 = S_0 e^{i\phi}$. Elle inclut donc à la fois l'amplitude réelle S_0 mais également le déphasage ϕ par rapport à la phase de référence.

amplitude de diffusion (angl. *scattering amplitude*) Pour un objet ponctuel éclairé par une onde plane, quantité introduite dans la description du comportement asymptotique de l'amplitude de l'onde diffusée à grande distance de cet objet. C'est la grandeur F qui intervient lorsqu'on écrit l'amplitude sous la forme

$$\psi(\vec{r}) \approx \frac{e^{ikr}}{r} F(\vec{k}, \vec{k}_0)$$

où $\vec{r}$ désigne la distance par rapport à l'objet, $\vec{k}$ le vecteur d'onde de l'onde diffusée dans la direction indiquée par ce vecteur et $\vec{k}_0$ celui de l'onde incidente. On définit aussi l'**amplitude de diffusion normalisée**

$$f(\vec{k}, \vec{k}_0) = \frac{F(\vec{k}, \vec{k}_0)}{\psi_0}$$

où ψ_0 désigne l'amplitude de l'onde incidente. L'amplitude de diffusion normalisée a la dimension d'une longueur, et on l'appelle également **longueur de diffusion**.

amplitude de probabilité (angl. *probability amplitude*) Quantité complexe dont le carré du module donne la probabilité (ou la densité de probabilité) qu'un événement se produise. Dans l'interprétation de Copenhague de la physique quantique, l'amplitude de probabilité de présence d'une particule est reliée à sa fonction d'onde normalisée. L'amplitude de probabilité d'une transition $\psi_i \rightarrow \psi_f$ entre les instants t_i et t_f vaut par exemple $\langle \psi_f(t_f) | \psi_i(t_i) \rangle$.

ampoule électrique (angl. *light bulb*) Dispositif émettant de la lumière suite au passage d'un courant électrique. Par exemple, dans les lampes à incandescence c'est l'effet Joule qui est responsable de l'émission de lumière, et dans les lampes à décharge c'est l'ionisation du milieu.

ampoule à incandescence  (angl. *light bulb*) Dispositif composé d'un filament de tungstène, porté à incandescence vers 1500–3000 K par passage d'un courant électrique et inséré dans une ampoule en verre contenant un gaz inerte, pour produire de la lumière par émission thermique. Le gaz inerte, souvent de l'argon ou du krypton, limite la sublimation du matériau dont est constitué le filament, ce qui augmente sa durée de vie. L'ampoule électrique a été inventée dans les années 1840-1860 par le chimiste et physicien anglais Joseph Swan (1828–1914) qui utilisa un filament de carbone

dans une ampoule sous vide. La qualité des pompes de l'époque n'étaient pas suffisante pour atteindre un vide poussé et la durée de vie de l'ampoule était faible. De plus, elle se noircissait du fait de la sublimation du filament en présence de l'oxygène résiduel. Plus tard, en 1879, l'américain Thomas Edison (1847–1931) améliora cette ampoule pour la rendre utilisable en pratique, d'une part en utilisant un filament de tungstène, dont le haut point de fusion permet de mieux résister aux hautes températures, et d'autre part en améliorant le vide dans l'ampoule. Des améliorations similaires furent présentées par Swan dans la même période. Ces deux inventeurs créèrent séparément leur propres entreprises dans leurs pays, la Swan Electric Light Company et la Edison General Electric Company, respectivement.

- ▷ *Le rôle du gaz dans les lampes à incandescence*, Marc Chapelet, Bulletin de l'Union des Physiciens **740** (1992) p. 3
- ▷ *Du télégraphe à l'ampoule : la puissance de l'analogie*, Paul Israel, Cahiers de Science et Vie **32** (1996) p. 50
- ▷ *Efficiency and efficacy of incandescent lamps*, D. C. Agrawal, Harvey S. Leff *et al.*, American Journal of Physics **64** (1996) p. 649
- ▷ *Étude d'une lampe à incandescence*, François Durand, Bulletin de l'Union des Physiciens **827** (2000) p. 1625

AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

Acronyme de « Alpha Magnetic Spectrometer » (et non de « AntiMatter Spectrometer » comme on le lit parfois). Expérience installée sur la Station spatiale internationale depuis mai 2011, elle est destinée à mesurer la composition et la distribution en énergie des rayons cosmiques au-dessus de l'atmosphère terrestre. Dans sa conception originale, le spectromètre de l'instrument devait être équipé d'un aimant supraconducteur. Pour des raisons de coût, il a finalement été décidé de le remplacer par un aimant permanent, ce qui allonge la durée de vie de l'instrument mais diminue les performances générales.

- ▷ *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station : Part I – results from the test flight on the space shuttle*, AMS Collaboration, Physics Reports **366** (2002) p. 331
- ▷ *Un détecteur de particules dans l'espace*, Aurélien Barrau & Laurent Derôme, La Recherche **450** (2011) p. 46

anacoustique  (angl. *anacoustics*) Un des noms autrefois donnés à l'étude des rayons lumineux réfléchis par des miroirs. De façon plus générale, il désignait également les conditions dans lesquelles on pouvait faire converger des rayons lumineux en un même point, par réflexion ou par réfraction.

- ▷ *A Pioneer in Anacoustics : Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses*, Roshdi Rashed, ISIS **81** (1990) p. 464

anagyre  (angl. *rattleback*) Système mécanique qui, lancé en rotation sur un support plan horizontal, peut changer spontanément de sens de rotation. Ce phénomène ne peut avoir lieu que lorsque la distribution de masse dans l'objet est asymétrique. Il met en jeu le couplage entre la rotation de l'objet et ses oscillations autour des axes perpendiculaires à l'axe de rotation.

- ▷ *L'anagyre*, Janick Simeray, Pour la Science **255** (1999) p. 108
- ▷ *The rattleback revisited*, William Case & Sahar Jalal, American Journal of Physics **82** (2014) p. 654
- ▷ *Rattlebacks for the rest of us*, Simon Jones & Hugh E. M. Hunt, American Journal of Physics **87** (2019) p. 699

analemme (angl. *analemma*) Figure en forme de 8 que décrit le Soleil en une année quand on relève sa position dans le ciel tous les jours à heure fixe et depuis la même position terrestre. On généralise parfois cette définition en imaginant le point de vue d'observateurs situés à la surface d'une autre planète.

quantité mécanique	quantité électrique
position x	charge q
vitesse v	courant I
force F	tension V
masse m	inductance L
raideur k	inverse de la capacité $1/C$
coefficient de frottement f	résistance R

TABLE 3 – *Grandeurs analogues entre les oscillateurs mécaniques et les oscillateurs électriques de type RLC.*

analogie  (angl. *analogy*) Correspondance entre deux situations physiques *a priori* très différentes, mais décrites par des équations similaires. Par exemple, on peut faire une analogie entre les oscillateurs mécaniques du type masse-ressort-frottement et les oscillateurs électriques du type RLC. Les équations sont identiques, pourvu que l'on fasse la correspondance indiquée dans le tableau. L'analogie permet de transposer à un type de système les résultats connus pour un autre.

▷ *Oscillateurs électriques : Simulation d'un frottement sec*, René Moreau, Bulletin de l'Union des Physiciens **75** (1981) p. 1027
▷ *[Colloquium] Acoustical analogs of condensed-matter problems*, J. D. Maynard, Reviews of Modern Physics **73** (2001) p. 401
▷ *The Uses of Analogies in Seventeenth and Eighteenth Century Science*, Yves Gingras, Perspectives on Science **19** (2011) p. 154
▷ *The uses of analogy : James Clerk Maxwell's 'On Faraday's lines of force' and early Victorian analogical argument*, Kevin Lambert, The British Journal for the History of Science **44** (2011) p. 61

analogique (angl. *analog*) Qualifie un signal ou une grandeur pouvant prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle, de façon continue. Ce terme s'oppose à « numérique » (▷ *convertisseur analogique-numérique*, *convertisseur analogique-numérique*, *quantification*).

analyse dimensionnelle  (angl. *dimensional analysis*) Méthode d'analyse d'un problème physique basée sur des considérations liées à la dimension physique des grandeurs qui interviennent dans ce problème. Il est possible, en général, de déterminer les quantités importantes intervenant dans un problème donné en construisant les combinaisons des constantes ou des paramètres à disposition qui ont la bonne unité physique. Par exemple, dans le cas d'un pendule simple de masse m (en kg) et de longueur ℓ (en m) soumis à l'accélération de la pesanteur g (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), on peut former une quantité homogène à un temps, $T = \sqrt{\ell/g}$. Sans résoudre les équations du mouvement, on peut alors deviner qu'il s'agit d'un temps caractéristique de l'évolution du système (en l'occurrence, ce temps est relié à la période du pendule et ne dépend pas de la masse m). Elle fut

exposée à plusieurs reprises, notamment en 1765 par Leonhard Euler (1707–1783) dans son traité sur la mécanique du solide, en 1822 par Joseph Fourier (1768–1830) dans son ouvrage *Théorie analytique de la chaleur* et en 1877 par Lord Rayleigh (1842–1919) dans *Theory of sound*. C'est James Clerk Maxwell (1831–1879) qui en 1863 introduisit les notations **L**, **T** et **M** pour les dimensions de base. Pour un exemple d'utilisation, ▷ *théorème de Buckingham*.

▷ *Dimensional Analysis and the Buckingham Pi Theorem*, John H. Evans, American Journal of Physics **40** (1972) p. 1815
▷ *Dimensional analysis : some suggestions for the modification and generalisation of its use in physics teaching*, M. Hulin, European Journal of Physics **1** (1980) p. 48
▷ *A class experiment in dimensional analysis*, A. B. Pippard, European Journal of Physics **2** (1981) p. 200
▷ *Applying dimensional analysis*, Wilfred J. Remillard, American Journal of Physics **51** (1983) p. 137
▷ *Suppression and restoration of constants*, Edward A. Desloge, American Journal of Physics **62** (1994) p. 216

analyse de Fourier  (angl. *Fourier analysis*) Technique consistant à étudier un problème théorique, une fonction ou le comportement d'un ensemble de valeurs (par exemple expérimentales) paramétrées par une ou plusieurs variables en utilisant des décompositions en séries de Fourier. Cette approche est très puissante et permet par exemple de repérer un signal dissimulé à l'intérieur d'un bruit ou encore de filtrer plus facilement des images pour les rendre moins floues. Lorsqu'elle est réalisée numériquement, il existe de plus des algorithmes sophistiqués, comme la transformation de Fourier rapide, Fast Fourier Transform (FFT) en anglais, qui peuvent permettre d'accélérer la convergence des calculs.

▷ *The acoustic origins of harmonic analysis*, Olivier Darrigol, Archive for history of exact sciences **61** (2007) p. 343
▷ *L'analyse de Fourier, pilier du numérique*, Patrick Flandrin, Stéphane Jaffard et al., Pour la Science **495** (2019) p. 54

analyseur (angl. *analyzer*) Polariseur destiné à étudier l'état de polarisation d'une onde. La variation de l'intensité transmise en fonction de l'orientation de l'analyseur permet de déterminer en partie l'état de polarisation d'une onde incidente.

analyseur à pénombre Dispositif permettant de déterminer la direction de polarisation d'une onde lumineuse polarisée linéairement. Il est constitué d'un polariseur linéaire, recouvert sur une moitié de sa surface par une lame demi-onde solidaire du polariseur. En faisant tourner le dispositif dans son plan, on cherche la position pour laquelle la lumière transmise par les deux moitiés a la même intensité, ce qui permet d'en déduire la direction de polarisation initiale. On obtient des résultats plus précis qu'en recherchant l'extinction ou le maximum de lumière avec un simple polariseur, car d'une part la différence de luminosité entre les deux moitiés varie plus rapidement avec l'angle, et d'autre part l'œil parvient beaucoup mieux à déceler une petite différence de luminosité entre deux taches lumineuses que le passage par un extremum.

anastigmat (angl. *anastigmat*) Objectif photographique constitué de deux doublets disposés de manière symétrique et séparés par un diaphragme. Il est complé-

tement corrigé de l'aberration sphérique, de la distorsion et de la coma. Il a été mis au point en 1890 par Paul Rudolph (1858–1935), sous l'impulsion d'Ernst Abbe (1840–1905).

anastigmatique (angl. *anastigmatic*) Qualifie les systèmes optiques corrigés de l'aberration d'astigmatisme. Ces systèmes sont généralement conçus pour que les cercles de moindre confusion soient situés à proximité du plan image déterminé selon les lois de l'optique paraxiale.

Anderson (Carl David) 🏠 (1905–1991) Physicien expérimentateur américain, prix Nobel de physique en 1936 pour « sa découverte du positon (1932) », laquelle confirma l'existence de l'antimatière prédite par Paul Dirac (1902–1984). Il découvrit aussi le muon en 1936.

▷ [Obituaries] Carl David Anderson, William A. Fowler & Eugene W. Cowan, Proceedings of the American Philosophical Society **136** (1992) p. 274

Anderson (Philip Warren) 🏠 (1923–2020) Physicien théoricien américain, prix Nobel de physique en 1977 (avec Sir N.F. Mott et J.H. van Vleck) pour « leurs travaux théoriques fondamentaux dans l'étude de la structure électronique des systèmes magnétiques et désordonnés » (▷ *localisation d'Anderson, mécanisme de Higgs-Anderson*).

▷ Philip Anderson : *Virtuoso of condensed matter*, Andrew Zangwill, Physics Today **75** (2022) p. 28

Anderson (localisation d') 🏠 (angl. *Anderson localization* ; *strong localization*) Propriété découverte en 1958 par Philip Anderson (1923–2020) dans le cadre de l'étude de la transition métal-isolant et selon laquelle il est possible qu'un milieu aléatoire contienne une densité de centres diffuseurs suffisamment forte pour qu'une onde y pénétrant ne soit pas diffusée, l'énergie associée se retrouvant localisée. On nomme aussi cet effet **localisation forte**, par opposition à la localisation faible dont il est effectivement une variante plus intense : comme cette dernière, la localisation d'Anderson trouve son origine dans le phénomène d'interférences entre plusieurs chemins possibles pour la particule quantique. En 1998, on observa pour la première fois la localisation d'Anderson d'une onde lumineuse qui s'est ainsi retrouvée piégée en un endroit précis du milieu où elle avait été émise.

▷ [Nobel Lecture] Local moments and localized states, P. W. Anderson, Reviews of Modern Physics **50** (1978) p. 191

▷ La localisation des ondes, Didier Sornette & Olivier Legrand, La Recherche **236** (1991) p. 1166

▷ A simple approach to Anderson localization in one-dimensional disordered lattices, F. Domínguez-Adame & V. A. Malyshev, American Journal of Physics **72** (2004) p. 226

▷ La localisation forte d'Anderson, Dominique Delande, Jean-Claude Garreau et al., Images de la Physique (2009) p. 70

▷ La localisation forte d'Anderson des ondes classiques, Sergey E. Skipetrov & Bart van Tiggelen, Images de la Physique (2009) p. 75

▷ Localisation d'Anderson d'atomes ultrafroids, Alain Aspect, Philippe Bouyer et al., Images de la Physique (2009) p. 87

▷ Fifty years of Anderson localization, Ad Lagendijk, Bart van Tiggelen et al., Physics Today **62** (2009) p. 24

Andromède (galaxie d') (angl. *Andromeda Galaxy*) Aussi connue sous le nom de **nébuleuse d'Andro-**

mède ou **M31**, d'après sa classification dans le catalogue de Messier, la galaxie d'Andromède fait partie du groupe local dont elle est le membre le plus important avec un diamètre de l'ordre de 150 000 années-lumières et une masse estimée entre 1, 5 et 3 milliards de masses solaires. Sa position s'écrit en coordonnées équatoriales

$$RA = 00^h 42^m 44,30'', \quad \text{dec} = +41^\circ 16' 10''.$$

Actuellement située à une distance d'environ 800 kpc (2,5 millions d'années-lumière) de la Voie lactée, ce qui en fait la galaxie spirale la plus proche de nous et la seule visible à l'œil nu, elle se dirige vers notre galaxie à la vitesse d'environ $125 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. La mesure de la distance nous séparant d'Andromède, par l'observation des céphéides qu'elle contient, permit en 1925 à Edwin Hubble (1889–1953) de mettre en évidence sa nature extra-galactique et de montrer que certaines nébuleuses sont des galaxies, au même titre que la Voie lactée.

Andronikashvili (expérience d') (angl. *Andronikashvili experiment*) Expérience réalisée en 1948 par Elepter Andronikashvili (1910–1989) pour déterminer la variation avec la température de la proportion de fluide normal et de superfluide dans l'hélium liquide. Elle consiste à mesurer la période des oscillations d'un pendule de torsion plongé dans l'hélium liquide. Cette période dépend de la viscosité du fluide, elle-même fonction de la proportion de fluide normal.

anéchoïque (angl. *anechoic chamber*) Qualifie une enceinte (en particulier une pièce) dont les parois sont totalement absorbantes pour le rayonnement acoustique ou électromagnétique : il n'y a pas d'écho. On parle indifféremment de **chambre anéchoïque** ou de **chambre anéchoïde**. Une telle enceinte permet de mesurer le signal issu d'une source sans qu'il soit affecté par les ondes réfléchies. Elles sont utilisées en particulier pour mesurer les caractéristiques des antennes, en émission ou en réception, dans le domaine des ondes radiofréquences et hyperfréquences.

anémomètre (angl. *anemometer*) Dispositif servant à mesurer la vitesse du vent à partir de la vitesse de rotation d'une pièce mobile.

angle de Brewster 🏠 (angl. *Brewster's angle*) Angle d'incidence sur un dioptre diélectrique pour lequel le coefficient de réflexion d'une onde électromagnétique polarisée rectilignement s'annule. Ce coefficient de réflexion dépend en effet de l'état de polarisation de l'onde, et pour une onde dont le vecteur champ électrique est situé dans le plan d'incidence, il existe un angle d'incidence i_B pour lequel le coefficient s'annule. Lorsque tel est le cas, on a la relation

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1},$$

où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction du milieu incident et de celui sur lequel se fait la réflexion, respectivement. La direction dans laquelle le rayon aurait

été réfléchi selon la loi de Snell-Descartes est orthogonale à celle du rayon transmis. On peut comprendre l'absence d'onde réfléchie par le fait que d'une part les dipôles microscopiques excités par l'onde incidente oscillent précisément dans la direction du rayon réfléchi, et que d'autre part l'émission électromagnétique d'un dipôle oscillant s'annule dans la direction d'oscillation. Ce phénomène est utilisé dans certains polariseurs car une onde non polarisée est transformée en onde polarisée après réflexion à l'angle de Brewster. Le phénomène fut découvert en 1809 par Étienne Louis Malus (1775–1812), mais la relation entre l'angle et l'indice de réfraction fut obtenue en 1811 par Sir David Brewster (1781–1868).

▷ *Simplistic explanations of Brewster's law*, M. Nitzan & J. S. Bodenheimer, *American Journal of Physics* **52** (1984) p. 660
▷ *Comment on "Simplistic explanations of Brewster's law"*, Eugen Merzbacher, *American Journal of Physics* **53** (1985) p. 916
▷ *Mesure de l'incidence de Brewster*, Pierre Prié, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **767** (1994) p. 1367
▷ *Polarization of light by reflection and the Brewster angle*, P. J. Ouseph, Kevin Driver *et al.*, *American Journal of Physics* **69** (2001) p. 1166
▷ *A LEGO Mindstorms Brewster angle microscope*, Jonathan Fernsler, Vincent Nguyen *et al.*, *American Journal of Physics* **85** (2017) p. 655

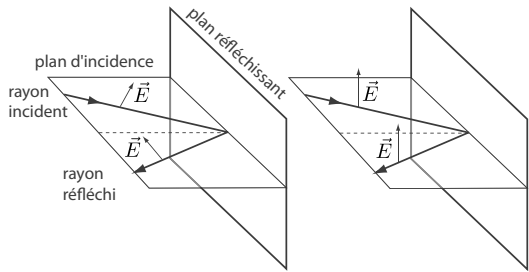


FIGURE 7 – angle de Brewster – À gauche, le champ électrique $\vec{E}$ de l'onde est contenu dans le plan d'incidence et l'amplitude de l'onde réfléchie est nulle si l'angle d'incidence est égal à l'angle de Brewster. À droite, $\vec{E}$ est perpendiculaire au plan d'incidence et l'amplitude de l'onde réfléchie n'est jamais nulle.

angle de Cabibbo (angl. *Cabibbo angle*) Angle de mélange entre particules introduit en 1963 par le physicien italien Nicola Cabibbo (1935–2010) dans la description de l'interaction faible. Dans sa formulation moderne, l'angle de Cabibbo θ_c mélange les quarks d et s selon

$$\begin{pmatrix} d_c \\ s_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix},$$

avec $\sin \theta_c \sim 0,25$. Cette équation indique que les états propres pour l'interaction forte (d_c et s_c) sont des superpositions des états propres pour l'interaction faible (d et s). Lorsque l'on prend en compte la troisième génération de quarks, les mélanges sont plus compliqués et font intervenir la matrice CKM (▷ *matrice de Cabibbo-Kabayashi-Maskawa*). Initialement, l'angle de Cabibbo

a été introduit entre particules appartenant à un octet donné afin d'expliquer diverses relations entre taux de transition, en particulier le fait que les transitions pour lesquelles l'étrangeté change d'une unité ont une amplitude environ 4 fois plus faible que d'autres transitions très semblables mais où l'étrangeté est conservée. Par exemple, dans l'approche de Cabibbo le rapport entre les taux des réactions $\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ et $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ résulte du fait que l'interaction faible ne couple pas le proton directement au neutron mais à une superposition quantique du neutron et du Λ^0 dont le mélange est paramétré par l'angle de Cabibbo.

angle Cherenkov (angl. *Cherenkov angle*) Angle d'émission du rayonnement Cherenkov, relié à l'indice n du milieu par

$$\cos \theta_c \equiv \frac{c}{nv} = \frac{v_\ell}{v},$$

où v désigne la vitesse de la particule émettrice, c la vitesse de la lumière dans le vide et $v_\ell = c/n$ la vitesse de la lumière dans le milieu.

angle de contact  (angl. *contact angle*) Angle entre deux interfaces liquide-air et solide-air à l'endroit où existe un contact simultané entre les trois corps (voir figure). Il peut aussi s'agir de l'angle entre deux interfaces liquide-air dans le cas de deux liquides non miscibles en contact. Sa valeur est déterminée par les forces de capillarité (▷ *tension superficielle, relation de Young*). Les notions d'angle de contact et de tension superficielle furent introduites en 1804 par Thomas Young (1773–1829).

▷ *Determination of contact angle from the maximum height of enlarged drops on solid surfaces*, F. Behroozi, *American Journal of Physics* **80** (2012) p. 284

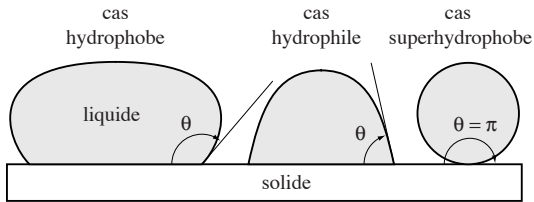


FIGURE 8 – angle de contact – Exemples de gouttes liquides posées sur un support solide, avec illustration des diverses possibilités pour l'angle de contact θ .

angle de déviation (angl. *deviation angle*) Angle que fait un rayon lumineux émergeant d'un système optique (par exemple un prisme) avec le rayon incident qui lui a donné naissance.

angle de diffusion (angl. *scattering angle*) Angle qui mesure la déviation de la trajectoire d'une particule incidente en raison de son interaction avec une cible (pour un exemple, voir la diffusion de Rutherford).

angles d'Euler (angl. *Euler angles*) Ensemble de trois angles introduits par Leonhard Euler (1707–1783) et servant à définir l'orientation spatiale d'un solide ou d'un référentiel par rapport à un trièdre cartésien de référence. L'angle ψ est appelé la **précession**, l'angle θ la **nutation** et l'angle ϕ la **rotation propre** [voir la figure, notamment la sous-figure (d) sur laquelle tous les angles apparaissent]. Les deux premiers permettent de décrire la direction d'un axe lié au solide, et le dernier représente la rotation du solide autour de cet axe. Il existe plusieurs conventions légèrement différentes quant à la définition précise des angles. En particulier, on peut les définir en imaginant que c'est le solide qui subit les rotations (comme ici) ou bien que ce sont les axes du référentiel.

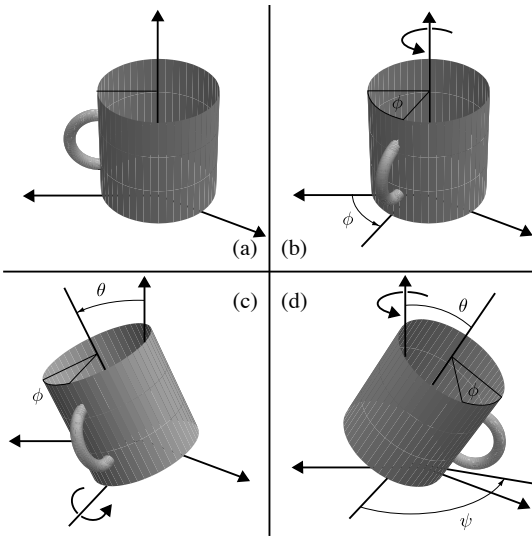


FIGURE 9 – angles d'Euler – Suite des rotations d'angle ϕ , θ et ψ qui permettent d'amener un solide (ici une tasse) d'une position de référence (a) à la position finale (d). Les angles d'Euler qui amènent le repère lié au solide au repère de référence valent alors $-\phi$, $-\theta$ et $-\psi$.

angle horaire (angl. *hour angle*) Longitude d'un astre dans un repère équatorial local en prenant comme direction d'origine celle du méridien local. L'angle horaire varie au cours du temps même pour un astre fixe, de par la rotation de la Terre. Il est compté positivement vers l'ouest. L'angle horaire d'un astre est égal à la différence entre l'angle horaire du point vernal et l'ascension droite de l'astre (▷ *coordonnées équatoriales*).

angle d'incidence (angl. *angle of incidence*) Angle entre un rayon incident arrivant sur une surface et la normale à cette dernière considérée au point d'incidence. Dans le cas d'une onde, il s'agit de l'angle entre le vecteur d'onde et la normale à la surface (▷ *lois de Snell-Descartes*).

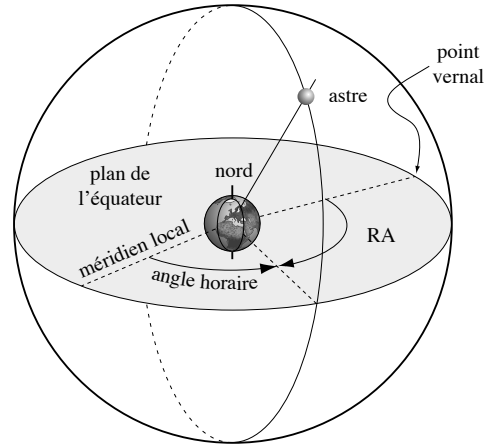


FIGURE 10 – angle horaire – Le méridien local passe par la position de l'observateur. L'angle horaire permet à ce dernier de repérer la position de l'astre dans le ciel. L'angle RA indique l'ascension droite.

angle isoplanaire (angl. *isoplanatic angle*) Angle sous lequel on voit, depuis le sol, les parties du ciel dont les images sont affectées de la même façon par les turbulences atmosphériques. Les images des objets séparés d'un angle inférieur à l'angle isoplanaire peuvent être corrigées par une même déformation du miroir en optique adaptative. Cet angle est de l'ordre de quelques secondes d'arc dans le visible et de la minute d'arc en infrarouge.

angle de Mach (angl. *Mach angle*) Angle θ défini par la relation $\sin \theta \equiv 1/M$ où M désigne le nombre de Mach associé à un mouvement ou un écoulement supersonique ($M > 1$). C'est l'angle d'ouverture du cône que forme l'onde de choc produite lors du mouvement supersonique d'un corps. Pour la figure, ▷ *cône de Mach*.

angle orienté Angle muni d'un signe positif ou négatif, après le choix d'une convention d'orientation. Ils sont représentés par un arc de cercle muni d'une flèche. Dans la **convention trigonométrique**, les angles sont positifs si la flèche pointe dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et négatifs sinon (▷ *sens trigonométrique*).

angle plan (angl. *plane angle*) Les mathématiciens fournissent de nombreuses définitions de la notion fondamentale d'angle plan (ou simplement **angle**), et nous allons ici n'en énoncer qu'une seule : l'angle α entre deux directions peut être défini comme le rapport $\alpha \equiv \ell/r$ entre la longueur ℓ d'un arc de cercle qu'elles délimitent et le rayon r de cet arc. Il s'agit donc d'une grandeur sans dimension physique que l'on mesure, compte tenu de la définition donnée ici, en radians (rad), un angle droit ayant une valeur de $\pi/2$ radians. On peut exprimer les angles en d'autres unités, notamment en degrés (°),

un angle droit valant 90° . Les angles sont définis à 2π rad près ou à 360 degrés près. En munissant le plan d'un sens de rotation positif, on peut définir le signe d'un angle, selon le sens de la rotation qui amène la première direction sur la deuxième. On parle alors d'**angle orienté**. Par convention, les angles sont comptés positivement s'ils sont associés à une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Pour un solide rigide ou un référentiel en rotation autour d'un axe, l'orientation par rapport à un référentiel fixe peut être définie par un angle, et l'on parle donc parfois de **position angulaire**. La variation temporelle de cette position est appelée vitesse angulaire, souvent notée ω ou Ω . Dans de nombreuses situations physiques pour lesquelles les angles sont petits, on peut avoir recours à une approximation importante : $\triangleright$ *approximation des petits angles*. Le concept d'angle se généralise pour les dimensions supérieures, en particulier dans l'espace tridimensionnel : $\triangleright$ *angle solide*.

angle de polarisation (angl. *polarization angle*) Pour une onde polarisée elliptiquement, angle que fait la direction du grand axe avec l'axe des abscisses, mesuré dans le sens anti-horaire. Pour une onde polarisée circulairement il n'est pas défini. Il est relié à l'une des coordonnées de la sphère de Poincaré.

angle de réflexion (angl. *reflection angle*) En optique géométrique, angle entre le rayon lumineux réfléchi par une surface et la normale à la surface au point où se produit la réflexion ($\triangleright$ *lois de Snell-Descartes*). Dans le cas d'une onde, il s'agit de l'angle entre le vecteur d'onde de l'onde réfléchie par une surface et la normale à cette surface.

angle de réfraction (angl. *refraction angle*) En optique géométrique, angle entre le rayon lumineux réfracté par un dioptré et la normale au dioptré au point où se produit la réfraction ($\triangleright$ *lois de Snell-Descartes*). Dans le cas d'une onde, il s'agit de l'angle entre le vecteur d'onde de l'onde réfractée et la normale au dioptré.

angle de réfraction limite (angl. *critical angle*) Dans le cas de la réfraction sur un dioptré plan, angle d'incidence maximal que peut avoir un rayon lumineux incident pour qu'il y ait réfraction si le milieu d'origine a un indice optique supérieur à l'autre milieu. On l'appelle aussi **angle limite** ou **angle de réflexion totale**. Il vérifie

$$\sin \theta_\ell = \frac{n_2}{n_1},$$

où n_1 et $n_2 < n_1$ désignent respectivement les indices du milieu incident et du milieu émergent. Un rayon ayant un angle d'incidence supérieur à θ_ℓ est totalement réfléchi. $\triangleright$ *réflexion totale*.

angle solide  (angl. *solid angle*) De la même façon qu'un arc de cercle de rayon r et de longueur ℓ sous-tend un angle $\alpha = \ell/r$ depuis le centre, une portion de sphère de surface S sous-tend un angle solide $\Omega = S/r^2$ depuis le centre. L'angle solide, exprimé en stéradians, est donc l'extension de la notion d'angle en deux di-

mensions, et caractérise la surface apparente d'un objet. Ainsi, une surface entourant totalement l'observateur occupe un angle solide $\Omega = 4\pi$, alors qu'un objet qui sous-tend un cône d'ouverture angulaire α occupe un angle solide $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$. Notons enfin que l'élément de volume en coordonnées sphériques peut s'écrire $d^3V = r^2 dr d\Omega$, où $d\Omega$ désigne l'angle solide élémentaire et vaut $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$.

$\triangleright$ *Les angles solides*, Hervé Lehning, Tangente **123** (2008) p. 22

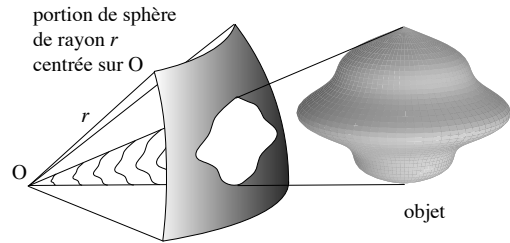


FIGURE 11 – angle solide – Depuis le point O , l'objet représenté a la même taille apparente que celui découpé sur la sphère de rayon r : ils correspondent au même angle solide, défini comme la surface sur la sphère divisée par r^2 .

angle de Thomson (angl. *Thomson angle*) Angle indiquant la direction dans laquelle une onde diffusée par un corps a un degré de polarisation maximal. Pour des sphères parfaitement conductrices et de diamètre très inférieur à la longueur d'onde, cet angle vaut 60° .

angle de Weinberg (angl. *Weinberg angle*) Angle θ_W , aussi nommé **angle de mélange électrofaible**, qui intervient dans la description de l'interaction électrofaible due à Glashow, Weinberg et Salam. Il s'agit de l'angle qui paramètre le mélange des champs de jauge électriquement neutres, W^3 l'un des générateurs du groupe $SU(2)$ et B le générateur du groupe $U(1)$, par la brisure de la symétrie initiale $U(1) \times SU(2)$, menant ainsi au photon et au boson Z^0 ($\triangleright$ *mécanisme de Higgs*). On a

$$\begin{pmatrix} Z^0 \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & -\sin \theta_W \\ \sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W^3 \\ B \end{pmatrix},$$

où A est le photon. Il apparaît également dans la relation entre les masses des bosons $W^\pm$ et Z^0 : $m_W = m_Z \cos \theta_W$. Comme pour toutes les grandeurs intervenant en théorie quantique des champs, la valeur précise de l'angle de Weinberg dépend de l'énergie des particules considérées, mais, aux énergies usuellement rencontrées, elle est de l'ordre de $\sin^2 \theta_W \approx 0,23$. $\triangleright$ *renormalisation*.

ångström [Å]  (angl. *angstrom*) Unité de longueur (symbole Å) égale à 10^{-10} m, nommée ainsi en l'honneur du physicien suédois Anders Jonas Ångström (1814–1874) qui le définit de cette manière en 1868 et qui l'utilisa dans le domaine de la spectroscopie, dont il

fut l'un des fondateurs. Une si petite distance caractéristique nécessitant autrefois une définition plus précise que celle du mètre (basée jusque 1960 sur le mètre-étalon), l'**ancien ångström** fut défini en 1906 de façon telle que la raie rouge du cadmium ait pour longueur d'onde dans le vide exactement 6438,4696 Å. La redéfinition (spectroscopique) du mètre en 1960 écarta cet ancien ångström de la valeur 10^{-10} m tout en devenant suffisamment précise pour que l'ångström moderne, soit exactement un dix-milliardième de mètre, puisse être adopté, ce qui fut fait à cette même date. En plus d'être adaptée à la spectroscopie (la partie visible du spectre électromagnétique s'étale d'environ 4000 à environ 7000 ångströms), c'est une unité également utile pour exprimer la taille des atomes, laquelle vaut entre quelques dixièmes d'ångström (hydrogène) à quelques ångströms pour les plus volumineux (▷ **rayon atomique**).

▷ *Biography of the X Unit—The X-Ray Wavelength Scale*, John S. Thomsen & A. F. Burr, *American Journal of Physics* **36** (1968) p. 803

anharmonique  (angl. *anharmonic*) Qualifie un potentiel ou un mouvement non harmonique. Par exemple, le pendule pesant est un oscillateur anharmonique. Ce n'est que dans la limite des oscillations de faible amplitude que l'on peut l'assimiler à un oscillateur harmonique. L'anharmonicité du potentiel auquel sont soumis les atomes d'un cristal est responsable du phénomène de dilatation thermique (▷ **dilatation thermique**).

▷ *Large amplitude simple pendulum : A Fourier analysis*, R. Simon & R. P. Riesz, *American Journal of Physics* **47** (1979) p. 890

▷ *Comments on Fourier analysis of the simple pendulum*, Donald E. Hall, *American Journal of Physics* **49** (1981) p. 792

▷ *Small oscillations which are not harmonic*, A. Ronveaux, *American Journal of Physics* **52** (1984) p. 618

▷ *Inharmonicité des modes d'oscillation des cordes vibrantes*, Christophe Hernandez & Claude Le Breton, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **904** (2008) p. 667

anion  (angl. *anion*) Ion chargé négativement. Il s'agit donc d'un atome ayant gagné un ou plusieurs électrons, par rapport à sa configuration neutre. Par exemple, l'ion Cl^- est un anion. Ce terme fut introduit par Michael Faraday (1791–1867), sur une suggestion de William Whewell (1794–1866).

▷ *On Faraday's Terminology in Electrolysis*, A. W. Richeson, *ISIS* **36** (1946) p. 160

▷ *Faraday Consults the Scholars : The Origins of the Terms of Electrochemistry*, S. Ross, *Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science* **16** (1961) p. 187

▷ *Atomic negative ions : structure, dynamics and collisions*, T. Andersen, *Physics Reports* **394** (2004) p. 157

anisotrope (angl. *anisotropic*) Qualifie une propriété d'un système physique ou d'une théorie qui n'est pas la même dans toutes les directions de l'espace (▷ **optique anisotrope**). Par exemple, une structure feuilletée, comme un empilement de feuilles de papier, est anisotrope. De même, un cristal nématique est anisotrope, car ses propriétés optiques et mécaniques sont différentes selon que l'on s'intéresse à une direction parallèle à celle des chaînes moléculaires qui le composent, ou à une direction perpendiculaire. À ne pas confondre avec « inhomogène ». Le cristal nématique et l'empilement de feuilles évoqués plus haut fournissent un exemple de milieux homogènes mais anisotropes.

anisotropie magnétique (angl. *magnetic anisotropy*) Alignement préférentiel de l'aimantation spontanée selon des axes ayant une orientation particulière par rapport au réseau cristallin. Cet effet a été mis en évidence dès 1896 par Pierre Weiss (1865–1940) dans la magnétite.

anneau de Du Noüy (angl. *Du Noüy ring*) Dispositif permettant de mesurer la tension superficielle γ d'un liquide. Il est constitué d'un anneau de platine, de rayon intérieur R_i et de rayon extérieur R_e , que l'on plonge dans le liquide puis que l'on retire. On mesure la force maximale F_m exercée par le liquide lors de cette seconde phase. On en déduit γ en utilisant la relation

$$F_m = \frac{2\pi\gamma(R_i + R_e)}{c},$$

où c désigne un facteur correctif dépendant de la géométrie détaillée de l'anneau utilisé.

anneau d'Einstein (angl. *Einstein ring*) Image circulaire obtenue par effet de lentille gravitationnelle lorsque l'objet observé et l'objet défecteur sont parfaitement alignés avec l'observateur. Leur existence fut prédite en 1924 par Orest Chowson, puis redécouverte en 1936 par Albert Einstein (1879–1955). Le premier d'entre eux fut observé en 1985.

anneaux de Newton  (angl. *Newton rings*) Figure de diffraction obtenue lorsqu'un dioptre sphérique est placé en contact avec un dioptre plan. Ces deux dioptres délimitent une lame d'air dont l'épaisseur augmente avec la distance au point de contact, ce qui produit des anneaux d'interférence (colorés si l'on éclaire en lumière blanche). C'est un exemple facilement observable de franges d'égale épaisseur. Ce phénomène fut observé pour la première fois en 1664 par Robert Hooke (1635–1703) puis étudié en détail par Sir Isaac Newton (1643–1727). Ces premières observations du phénomène d'interférence ont nourri les interrogations sur la nature de la lumière. Newton en proposa une explication, dans le cadre de sa théorie corpusculaire de la lumière (▷ **théorie des accés**). Celle-ci restant bien moins convaincante que sa mécanique, il fallut cependant attendre le développement de l'optique ondulatoire pour avoir une compréhension claire et précise du phénomène.

▷ *Isaac Newton's coloured circles twixt two contiguous glasses*, Richard S. Westfall, *Archive for history of exact sciences* **2** (1964) p. 181

anneau planétaire  (angl. *planetary ring*) Structure en anneau, constituée de particules solides, entourant certaines planètes du Système solaire. Le cas le plus spectaculaire est celui de Saturne (▷ **anneaux de Saturne**), dont la stabilité suscita des débats dès le XIX^e siècle. Les planètes Jupiter, Neptune et Uranus possèdent aussi des anneaux, beaucoup plus ténus et difficiles à observer.

▷ *The Dynamics of Planetary Rings*, Peter Goldreich & Scott Tremaine, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **20** (1982) p. 249

- ▷ *Historical Accretionary Events from 800-BC to 1750-AD - Evidence for Planetary Rings around the Earth*, K. L. Rasmussen, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society **32** (1991) p. 25
- ▷ *Les anneaux de Neptune*, Bruno Sicardy, La Recherche **261** (1994) p. 22
- ▷ *Les inattendus de l'astronomie*, André Brahic, Pour la Science **239** (1997) p. 8
- ▷ *Une exoplanète aux anneaux géants*, Matthew Kenworthy, Pour la Science **464** (2016)

anneaux de Saturne  (angl. *Saturn rings*) Structure spectaculaire et complexe entourant la planète Saturne dont une partie est visible avec une petite lunette depuis la Terre. La partie la plus dense des anneaux s'étend radialement de 70 000 km à 135 000 km du centre de la planète, dont le rayon est approximativement de 60 000 km. Dans cette principale région, l'épaisseur varie entre 5 et 30 mètres environ. Elle comporte 2 anneaux plus visibles, nommés A et B, et un troisième plus interne et un peu moins notable, ainsi que diverses **lacunes** et **divisions**. Ces anneaux sont composés en quasi-totalité de glaçons d'eau très légèrement impure de taille comprise entre quelques millimètres et au plus quelques mètres. L'ensemble de la structure inclut toutefois de nombreux autres anneaux moins brillants, certains étant plus proches de Saturne, et d'autres plus éloignés. Globalement, on peut distinguer une partie dominante qui s'étend de 7 000 km de la surface à plus de 400 000 km, et une autre bien plus discrète et lointaine, la **ceinture de Phœbé**, découverte en 2009 en infrarouge par le télescope spatial Spitzer. Commenant à plus de 4 000 000 de km de Saturne, à proximité de la lune du même nom, elle reste mal connue. L'existence d'une structure autour de Saturne fut découverte en 1610 par Galilée (1564–1642), mais, en raison de la résolution limitée des instruments optiques de l'époque, sa forme d'anneau ne fut observée qu'en 1659, par Christiaan Huygens (1629–1695). Nous disposons aujourd'hui de nombreuses photographies *in situ* des anneaux de Saturne, notamment grâce à la sonde Cassini. La question de leur nature et de leur stabilité a préoccupé de nombreux savants. En particulier, James Clerk Maxwell (1831–1879) montra en 1855 que ces anneaux devaient nécessairement être constitués de particules indépendantes, et non d'un solide ou d'un fluide, pour des raisons de stabilité. Cette étude le conduisit aux réflexions ultérieures sur la théorie cinétique des gaz, pour laquelle il est plus connu. Certaines questions liées à l'origine et à la stabilité des anneaux restent cependant encore ouvertes.

- ▷ *Pre-Huygenian Observations of Saturn's Ring*, Dora Shapley, ISIS **40** (1949) p. 12
- ▷ *Saturn and his Anses*, Albert van Helden, Journal for the History of Astronomy **5** (1974) p. 105
- ▷ *[Comprendre] Pourquoi Saturne a-t-elle des anneaux ?*, Fabrice Nicot, Ciel et Espace **433** (2006) p. 96
- ▷ *[Quick Study] Saturn's Dynamical Rings*, Carl D. Murray, Physics Today **60** (2007) p. 74

anneau de stockage (angl. *storage ring*) Anneau dans lequel des particules sont guidées sur des trajectoires circulaires grâce à des aimants de courbure. En raison des pertes d'énergie par rayonnement synchrotron, ces particules doivent être continuellement guidées pour garder la même trajectoire. L'intérêt de ces anneaux est

multiple puisqu'en plus de pouvoir servir de sources de rayonnement synchrotron, ils permettent de garder des particules disponibles en attente d'une injection dans un collisionneur ou un accélérateur de particules, ce qui explique le nom « anneau de stockage ».

année  (angl. *year*) Unité de temps correspondant à la durée d'une révolution de la Terre, et par extension de tout corps du Système solaire, sur son orbite autour du Soleil. Il existe une ambiguïté sur la façon de définir le retour de la planète à son point de départ, ce qui se traduit par plusieurs définitions de l'année :

- l'**année tropique**, **année solaire** ou **année des saisons**, désigne la durée qui sépare deux équinoxes de printemps. En 2000, elle durait environ 365,242 190 jours SI (soit 365 j 5 h 48 min 46 s) et s'allonge de 5 ms par an, car la position des équinoxes change d'une année à l'autre. Cette définition, introduite par Hipparque (-190–120) après sa découverte de la précession des équinoxes, reflète le retour périodique des saisons terrestres et est donc celle couramment utilisée ;
- l'**année anomalistique** désigne la durée écoulée entre deux passages d'une planète par son périhélie. Pour la Terre, elle durait en l'an 2000 environ 365,259 635 jours SI, soit 365 j 6 h 13 min 52 s ;
- l'**année éclipse**, ou **année draconitique**, désigne la durée entre deux passages du Soleil par un point appelé nœud lunaire ascendant. En 2000, elle valait 346,620 075 jours SI (346 j 14 h 52 min 54 s) ;
- l'**année sidérale** désigne la durée entre deux passages consécutifs du Soleil devant une étoile donnée. Elle dure environ 365,256 363 jours SI (soit 365 j 6 h 9 min 10 s).

Par souci de simplicité, on utilise donc souvent l'**année julienne**, définie comme exactement 365,25 jours durant chacun 86 400 secondes, soit un total de

$$31\,557\,600\text{ s} \approx 3,16 \times 10^7\text{ s}.$$

- ▷ *Astronomical meaning of a tropical year*, Reuben Benumof, American Journal of Physics **47** (1979) p. 685
- ▷ *Hipparchus's determination of the length of the tropical year and the rate of precession*, Noel M. Swerdlow, Archive for history of exact sciences **21** (1980) p. 291
- ▷ *Simple Formulae for Julian Day Numbers and Calendar Dates*, D. A. Hatcher, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society **25** (1984) p. 53
- ▷ *Mathematics of the Gregorian Calendar*, V. Frederick Rickey, The Mathematical Intelligencer **7** (1985) p. 53
- ▷ *Combien de temps dure une année ?*, Benoît Rittaud, Tangente **79** (2001) p. 8

année-lumière [al] (angl. *light-year*) Unité de distance (notée al) astronomique définie comme le produit entre la vitesse de la lumière c et la durée d'une année julienne (▷ *année*), $t = 31\,557\,600\text{ s}$. Elle est reliée au Système International d'unités par

$$1\text{ al} \approx 0,946 \times 10^{16}\text{ m}.$$

C'est la distance parcourue par la lumière en un an. Il s'agit bien d'une unité de longueur et non de temps,

même si le nom peut prêter à confusion. On utilise aussi parfois, de manière analogue, la seconde-lumière, la minute-lumière (plus rare), etc. On notera que pour parler de distances internes au Système solaire, il est courant d'employer l'unité astronomique, et que, pour repérer des objets situés hors de celui-ci, les astronomes préfèrent souvent une unité un peu différente, le parsec.

objet	distance
Lune	1,3 seconde-lumière
Soleil	8 minutes-lumière
Jupiter	35 minutes-lumière
Neptune	4 heures-lumière
Nuage d'Oort	0,8 al
étoiles proches	quelques al
centre galactique	25×10^3 al
galaxie d'Andromède	$2,4 \times 10^6$ al
Univers visible	$\sim 50 \times 10^9$ al

TABLE 4 – Quelques distances en années-lumière ou unités similaires. Dans le cas de Jupiter et Neptune les distances sont par rapport au Soleil.

annihilation  (angl. *annihilation*) Disparition d'une paire de particules (souvent une particule et son antiparticule) au cours d'une interaction qui conduit à la création d'autres particules. Par exemple, un électron et un positon peuvent s'annihiler pour donner des photons, deux ou trois selon l'état de spin de la paire initiale. Entre autres choses, ce phénomène est utilisé en physique des matériaux pour sonder les bandes d'énergie électroniques des solides et en imagerie dans les tomodgraphes à émission de positons. Il joue aussi un rôle fondamental en cosmologie, la matière constituant le monde qui nous entoure ayant survécu à l'annihilation d'une quantité beaucoup plus grande d'antimatière et de matière, cette dernière ayant apparemment été en très léger excès dans l'Univers primordial (▷ *baryogénèse*).

- ▷ *Electron-positron pairs in physics and astrophysics : From heavy nuclei to black holes*, Remo Ruffini, Gregory Vereshchagin *et al.*, Physics Reports **487** (2010) p. 1
- ▷ *The 511 keV emission from positron annihilation in the Galaxy*, N. Prantzos, C. Boehm *et al.*, Reviews of Modern Physics **83** (2011) p. 1001
- ▷ *Defect identification in semiconductors with positron annihilation : Experiment and theory*, Filip Tuomisto & Ilja Makkonen, Reviews of Modern Physics **85** (2013) p. 1583

anode  (angl. *anode*) Borne d'un dipôle électrique par laquelle entre un courant électrique, c'est-à-dire depuis laquelle des électrons sont envoyés vers l'extérieur. Il s'agit de la borne négative pour une pile servant de générateur dans un circuit, et de la borne positive pour une pile en train d'être rechargée. Dans un tube à vide, l'anode est l'électrode qui capte les électrons émis par le filament chauffé, à l'intérieur du dispositif. Vu depuis l'extérieur, il s'agit donc bien de la borne de laquelle sortent les électrons. L'autre borne du dipôle s'appelle la cathode. Le terme « anode » fut introduit en 1839 par Michael Faraday (1791–1867), sur une suggestion de

William Whewell (1794–1866), la racine du mot anode signifiant « vers le haut », ce qui évoquait l'est (la direction du soleil levant). En effet, Faraday et Whewell remarquèrent que le courant qui produirait le champ magnétique terrestre circulerait de l'est vers l'ouest. Dans une cuve à électrolyse, un courant circule de l'anode vers la cathode. Faraday adopta donc un terme évoquant la direction de l'est pour l'anode et un terme évoquant celle de l'ouest pour la cathode.

- ▷ *On Faraday's Terminology in Electrolysis*, A. W. Richeson, ISIS **36** (1946) p. 160
- ▷ *Faraday Consults the Scholars : The Origins of the Terms of Electrochemistry*, S. Ross, Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science **16** (1961) p. 187
- ▷ *[Notes and Discussions] Michael Faraday and His Words Anode and Cathode*, H. George Hammon, III, American Journal of Physics **42** (1974) p. 419

anomal (angl. *anomalous*) Terme employé pour désigner un phénomène lié à une anomalie. L'usage le remplace souvent par le terme « anormal ». Par exemple, on trouve dans la littérature mention du « moment magnétique anomal » de l'électron et de son « moment magnétique anormal », pour désigner la même quantité.

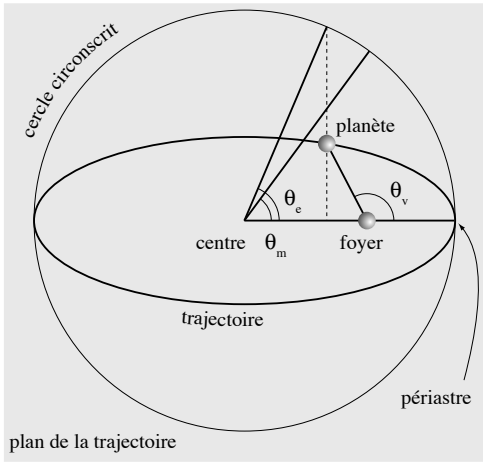


FIGURE 12 – **anomalie (3)** – Représentation de l'anomalie vraie θ_v , de l'anomalie excentrique θ_e et de l'anomalie moyenne θ_m . Attention, la figure est dessinée dans le plan de la trajectoire, il ne s'agit pas d'une vue en perspective.

anomalie (angl. *anomaly*) ► 1. En physique des particules, on appelle anomalie la quantité $(g - 2)/2$, où g désigne le facteur de Landé associé au spin d'une particule. C'est l'écart à la valeur « normale » $g = 2$ prédite par la théorie de Dirac (▷ *moment magnétique anormal*). Il a pour origine physique les fluctuations quantiques du champ électromagnétique, la contribution principale étant décrite par un diagramme de Feynman en triangle typique des « anomalies » au sens suivant du terme. ► 2. Situation dans laquelle une symétrie d'un système classique est perdue dans la description

quantique de son évolution. En particulier, dans les cas où la symétrie est associée à un courant (▷ *théorème de Noether*), la présence d'une anomalie indique que ce courant n'est pas conservé dans la théorie quantique. La pertinence physique des anomalies est illustrée par leur rôle dans l'explication de certains phénomènes, comme par exemple la désintégration du pion neutre selon la réaction $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, qui ne sont pas possibles en l'absence d'anomalie. Dans le cadre du modèle standard de la physique des particules, un certain type d'anomalie revêt un intérêt particulier : celles associées à de possibles violations quantiques des symétries de jauge (▷ *interaction de jauge*). Elles conduisent à l'apparition d'états de norme négative et à de possibles incohérences de la théorie. Il a toutefois été démontré que le modèle standard de la physique des particules vérifie certaines conditions, portant notamment sur le nombre de particules qu'il contient, qui assurent l'absence d'anomalies de jauge.

► **3.** Angle caractérisant la position d'un corps en orbite elliptique par rapport à son périastre. On distingue :

- l'**anomalie vraie** θ_v : c'est l'angle, mesuré au foyer, entre la direction du périastre et celle de la position actuelle ;
- l'**anomalie excentrique** θ_e : c'est l'angle mesuré depuis le centre de l'ellipse, entre la direction du périastre et le point obtenu en projetant la position actuelle sur le cercle circonscrit à l'ellipse (voir figure) ;
- l'**anomalie moyenne** θ_m : c'est l'angle que l'on mesurerait depuis le centre si l'orbite était parcourue à vitesse angulaire constante. Il ne repère donc pas la position observée mais exprime plutôt la fraction de la période écoulée depuis le passage au périastre.

En conclusion, les diverses anomalies sont des grandeurs qui caractérisent un déplacement réel (elliptique dans un modèle keplerien/copernicien) en fonction de ce qu'il aurait dû être s'il s'était avéré circulaire (ptoléméen). L'anomalie excentrique et l'anomalie moyenne sont reliées par l'équation de Kepler.

- ▷ *Attitudes towards Infinities : Responses to Anomalies in Quantum Electrodynamics, 1927-1947*, Alexander Rueger, Historical Studies in the Physical and Biological Sciences **22** (1992) p. 309
- ▷ *Anomalies for pedestrians*, Barry R. Holstein, American Journal of Physics **61** (1993) p. 142
- ▷ *On scale invariance and anomalies in quantum mechanics*, A. Cabo, J. L. Lucio et al., American Journal of Physics **66** (1998) p. 240
- ▷ *Anomalies in quantum mechanics : The $1/r^2$ potential*, Sidney A. Coon & Barry R. Holstein, American Journal of Physics **70** (2002) p. 513
- ▷ *Understanding an anomaly*, Barry R. Holstein, American Journal of Physics **82** (2014) p. 591

anomalie de Kohn (angl. *Kohn anomaly*) Discontinuité de la dérivée de la relation de dispersion $\omega(k)$ des phonons dans les métaux, plus particulièrement lorsqu'ils forment des systèmes de basse dimension. Elle résulte du couplage phonon-électron et fut prédite en 1959 par Walter Kohn (1923–2016).

anomalie Pioneer  (angl. *Pioneer anomaly*) Différence observée entre les trajectoires prédite et effective

des deux sondes Pioneer qui mena, entre 1998 et 2012, à de nombreuses discussions, certaines personnes suggérant qu'il pouvait s'agir de la mise en évidence d'une « nouvelle physique ». On la paramétra en effet souvent comme une composante non expliquée de l'accélération des sondes, dirigée vers l'intérieur du Système solaire et qui se superposait à l'accélération due à l'attraction newtonienne du Soleil. Différentes hypothèses furent envisagées pour en rendre compte, comme par exemple une mauvaise modélisation de l'influence des planètes externes, la sous-estimation de forces d'origine électromagnétique ou la manifestation d'une modification des lois de la gravité à grande distance. À partir de 2012, divers travaux indépendants prouvèrent que la différence était due à une sous-estimation de la pression de radiation exercée sur les sondes par leur propre émission thermique.

- ▷ *Study of the Pioneer anomaly : A problem set*, Slava G. Turyshev, Michael Martin Nieto et al., American Journal of Physics **73** (2005) p. 1033
- ▷ *The Pioneer Anomaly*, Slava G. Turyshev & Viktor T. Toth, Living Reviews in Relativity **13** (2010) p. 1
- ▷ *L'anomalie Pioneer enfin expliquée ?*, Julien Bourdet, La Recherche **466** (2012) p. 66

anomalie de Schottky (angl. *Schottky anomaly*) Maximum de la courbe représentant la capacité calorifique d'un corps paramagnétique en fonction de $k_B T / \mu_B B$ où B désigne le champ magnétique, T la température, μ_B le magnéton de Bohr et k_B la constante de Boltzmann. Ce maximum correspond aux énergies thermiques qui permettent des transitions entre les différentes orientations des moments magnétiques qui constituent le milieu paramagnétique.

anomalie de volume Brusque variation du coefficient de dilatation thermique d'un corps ferromagnétique à la traversée du point de Curie. Elle est due au fait que l'apparition de l'aimantation spontanée modifie l'équilibre des forces responsables de la cohésion du solide.

anomalie de Wood (angl. *Wood anomaly*) Augmentation importante de l'intensité lumineuse réfléchie par un réseau diffractant métallique pour certaines longueurs d'onde, d'une manière que n'explique pas la théorie usuelle des réseaux. Cet effet fut découvert en 1902 par Robert Wood (1868–1955), puis Lord Rayleigh (1842–1919) en proposa une explication en 1907, prenant en compte l'existence des ondes évanescentes. Il fallut attendre plusieurs décennies pour qu'il soit expliqué de manière totalement satisfaisante : en 1972, Daniel Maystre (1945–) présenta une théorie vectorielle complète du réseau diffractant qui rendit compte de ce phénomène. Cette explication fait appel à l'excitation de plasmons dans le métal.

ansatz (angl. *ansatz*) De l'allemand Ansatz, qui signifie « approche » ou « début ». Terme fréquemment utilisé en physique ou en mathématiques pour désigner le fait de chercher à résoudre une équation ou un système d'équations en se donnant une forme *a priori* pour la solution (▷ *ansatz de Bethe*).

ansatz de Bethe  (angl. *Bethe ansatz*) Ansatz introduit par Hans Bethe (1906–2005) dans l'étude d'un système quantique anti-ferromagnétique unidimensionnel et qui a depuis été généralisé à divers problèmes quantiques à N -corps.

- ▷ *Solution of the Kondo problem*, N. Andrei, K. Furuya *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **55** (1983) p. 331
- ▷ *The Bethe Ansatz After 75 Years*, Murray T. Batchelor, *Physics Today* **60** (2007) p. 36
- ▷ *Fermi gases in one dimension : From Bethe ansatz to experiments*, Xi-Wen Guan, Murray T. Batchelor *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **85** (2013) p. 1633

Antarès  Acronyme pour « Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research ». Expérience démarrée en 2006 dans la Méditerranée, à 40 km au large de Toulon et à environ 2500 mètres de fond. Elle est constituée de 12 lignes verticales de détecteurs Cherenkov (environ 1000 photomultiplicateurs), destinées à détecter des neutrinos de haute énergie d'origine extraterrestre et à mesurer leur direction de provenance, en analysant la lumière Cherenkov des muons qu'ils peuvent produire par interaction avec les électrons de l'écorce terrestre. En effet, bien que situé dans l'hémisphère nord, ANTARES pointe vers l'hémisphère sud, utilisant la Terre comme blindage contre la plupart des particules et complétant ainsi les observations d'autres expérience de détection de neutrinos (▷ *IceCube*, *Amanda*). Par ailleurs, ANTARES sert d'ores et déjà pour l'étude d'une partie de la faune sous-marine par détection de la bioluminescence de certaines espèces et pour la géophysique grâce à un sismographe.

- ▷ *À la pêche aux neutrinos*, Aude Ganier, *Défis du CEA* **113** (2006) p. 1
- ▷ *[En images] Un télescope à neutrinos*, Dossier Pour la Science **62** (2009) p. 58

antenne  (angl. *antenna*) Dispositif servant à émettre ou à recevoir des ondes électromagnétiques, en particulier dans le domaine des ondes radio, hertziennes et centimétriques (▷ *radar*). Les antennes émettrices sont généralement constituées d'un élément parcouru par un courant variable responsable d'une émission dipolaire. Elles sont alors reliées à un circuit électronique qui contrôle ce courant.

- ▷ *The receiving antenna*, Reuben Benumof, *American Journal of Physics* **52** (1984) p. 535
- ▷ *How an antenna launches its input power into radiation : The pattern of the Poynting vector at and near an antenna*, J. D. Jackson, *American Journal of Physics* **74** (2006) p. 280

antenne parabolique (angl. *parabolic antenna*) Antenne munie d'un réflecteur de forme paraboloidale. Celui-ci permet de faire converger le rayonnement reçu depuis une source lointaine au foyer de la parabole (▷ *miroir parabolique*), où l'on place le détecteur, c'est-à-dire l'antenne proprement dite. Ce type d'antenne est aussi appelé plus simplement **parabole**.

antenne Yagi (angl. *Yagi antenna*) Antenne directionnelle utilisée en réception dans le domaine des ondes hertziennes. On en voit de nombreuses sur le toit des habitations, pour capter les signaux de télévision. Elles sont constituées d'un ensemble de barres métalliques de différentes longueurs, chacune étant plus sensible à une

gamme de fréquences particulière. L'antenne Yagi-Uda fut inventée par en 1926 par Shintaro Uda (1896–1976) et Hidetsugu Yagi (1886–1976), ce deuxième jouant apparemment un rôle moins important.

antiatome  (angl. *antiatom*) Atome constitué d'antimatière, c'est-à-dire dans lequel un ou plusieurs positions sont liés à un antinoyau par la force électrostatique. L'étude de leurs propriétés physiques, en particulier spectroscopiques, permet de tester une éventuelle différence de comportement physique entre matière et antimatière. Des antiatomes d'hydrogène (aussi appelés **antihydrogène**) furent produits pour la première fois en laboratoire en 1995 par l'expérience LEAR au CERN. ▷ *ATRAP*, *ATHENA*, *ALPHA*.

- ▷ *Des antiprotons ultrafroids*, Gerald Gabrielse, *Pour la Science* **184** (1993) p. 80

antibruit  (angl. *noise cancellation*) Nom donné à un ensemble de techniques permettant de réduire le niveau sonore dans une pièce, ou au niveau des oreilles d'un utilisateur, en faisant interférer destructivement l'onde sonore incidente indésirable et une onde sonore générée par un haut-parleur, en opposition de phase avec la première.

- ▷ *[Repère] Les voies du silence passent par l'antibruit*, Bernard Banga, *La Recherche* **281** (1995) p. 32

antibunching  (angl. *antibunching*) Anglicisme couramment utilisé pour désigner le phénomène de diminution des probabilités de détection de plusieurs bosons (en particulier des photons) quand les mesures sont rapprochées dans le temps. Par exemple, pour certains systèmes bosoniques, la probabilité de détecter deux photons en un temps court est inférieure au carré de la probabilité d'en détecter un, ce qu'on obtiendrait pour des événements indépendants. Ceci montre que les détections ne sont pas indépendantes mais corrélées. Pour un ensemble de photons, cette notion est reliée à la fonction de corrélation du second ordre

$$g^{(2)}(\tau) \equiv \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle},$$

où I désigne l'intensité du rayonnement et τ un temps. On parle de bunching lorsque $g^{(2)}(0) > 1$ et d'antibunching lorsque $g^{(2)}(0) < 1$.

- ▷ *Photon antibunching*, H. Paul, *Reviews of Modern Physics* **54** (1982) p. 1061

anticommutateur (angl. *anticommutator*) L'anticommutateur de deux opérateurs $\hat{A}$ et $\hat{B}$, noté $\{\hat{A}, \hat{B}\}$ ou $[\hat{A}, \hat{B}]_+$ par analogie avec le commutateur, est défini par

$$\{\hat{A}, \hat{B}\} \equiv \hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A}.$$

Quand il est nul, on dit que $\hat{A}$ et $\hat{B}$ anticommulent. Cette notion intervient dans la quantification des systèmes fermioniques (▷ *équation de Dirac*, *relations d'anticommutation canoniques*).

anticyclone (angl. *anticyclone*) Dans le contexte de la météorologie, désigne une région de haute pression par

- ▷ *Classical antiparticles*, John P. Costella, Bruce H. J. McKellar et al., American Journal of Physics **65** (1997) p. 835
- ▷ *L'antimatière cosmique*, Gregory Tarlé & Simon Swordy, Pour

antimatière En 1931, Paul Dirac (1902–1984) résolut certains problèmes conceptuels de la mécanique quantique relativiste en introduisant une fonction d'onde à quatre composantes, dont deux décrivent l'électron (avec ses deux états de spin) et les deux autres une particule de charge positive (▷ *équation de Dirac*). Il supposa dans un premier temps qu'il s'agissait du proton, puis postula l'existence d'une nouvelle particule, de même masse que l'électron mais de charge opposée, appelée le **positon**, et observée dès 1932 par Carl Anderson (1905–1991). Cette particule, associée de façon intime à l'électron (ce sont deux parties du même spineur de Dirac), est qualifiée d'**antiparticule** de l'électron. On sait aujourd'hui qu'à toute particule est associée une antiparticule par la symétrie de conjugaison de charge C, certaines antiparticules étant toutefois identiques à la particule, comme c'est le cas pour le photon, et peut-être pour les neutrinos (▷ *particule de Majorana*). Les antiparticules sont collectivement appelées antimatière, et, dans le cadre de la théorie quantique des champs relativiste, on montre même que l'existence de l'antimatière a un lien crucial avec le principe de causalité. Notre Univers semble constitué principalement de matière, mais on y trouve une petite quantité d'antimatière, qui est produite par deux types de processus :

- la radioactivité β^+ qui génère des positons, les éléments radioactifs qui peuvent se désintégrer de cette façon étant eux-mêmes produits par activation ou par nucléosynthèse ;
- les interactions de haute énergie qui peuvent conduire à toutes sortes d'antiparticules, comme par exemple les collisions ou la conversion d'un photon en paire électron-positon.

Les positons découverts par Anderson provenaient de collisions entre des rayons cosmiques et des noyaux de l'atmosphère terrestre, mais, aujourd'hui, on détecte directement des positons et des antiprotons dans les rayons cosmiques au-dessus de l'atmosphère terrestre. Mises en présence l'une de l'autre, une particule et une antiparticule peuvent s'annihiler, c'est-à-dire disparaître en donnant naissance à d'autres particules, notamment des photons. On détecte ainsi la présence de positons par l'intermédiaire des photons gamma qu'ils émettent dans une raie à 511 keV lorsqu'ils s'annihilent avec des électrons. Par exemple, on a pu montrer que les éruptions solaires, les jets relativistes, mais aussi le centre de notre galaxie, contiennent des positons grâce à l'observation de cette raie qui a également une grande importance en imagerie médicale (▷ *tomographe à émission de positons*). Des expériences ont par ailleurs réussi à assembler des antiatomes d'hydrogène, constitués d'un antiproton (le noyau) et d'un positon, qui permettent de tester les lois physiques auxquelles obéit l'antimatière. En particulier, la mesure des raies spectrales de l'antihydrogène permet de tester la prédiction théorique selon laquelle l'antimatière et la matière obéissent aux mêmes lois électromagnétiques, ce qui semble vérifié. En revanche, alors qu'une particule d'antimatière a généralement la même stabilité que la particule de matière à laquelle elle est associée (par exemple l'antiproton et le positon sont stables alors que l'antineutron et l'antimuon sont instables), on observe une différence de comportement entre particules et antiparticules dans le domaine des interactions faibles, et on soupçonne qu'il en est de même pour les interactions fortes (▷ *violation de CP*). Ces questions intéressent vivement les cosmologistes, qui ne parviennent pas à expliquer le fait que notre Univers soit aujourd'hui principalement constitué de matière, alors que l'on a de nombreuses raisons de penser que l'équilibre matière/antimatière était réalisé à mieux que 1 pour 10^{10} dans l'Univers primordial (▷ *conditions de Sakharov*).

la Science **248** (1998) p. 86

▷ *The Asymmetry Between Matter and Antimatter*, Helen R. Quinn, Physics Today **56** (2003) p. 30

▷ *Origin of the matter-antimatter asymmetry*, Michael Dine & Alexander Kusenko, Reviews of Modern Physics **76** (2004) p. 1

▷ [Dossier] *La traque de l'antimatière*, La Recherche, La Recherche **450** (2011) p. 40

• *Antimatter*, Frank Close, (Oxford University Press, 2009)

antimoine  (angl. *Antimony*) Élément de numéro atomique $Z = 51$. Il est représenté par le symbole Sb. Structure atomique : $[\text{Kr}]5s^2 4d^{10} 5p^3$. La racine latine du mot « antimoine » signifie « qui n'est pas seul », cet élément se trouvant de fait généralement associé à d'autres, à l'état naturel. Son symbole provient quant à lui du mot *stimmi* qui désignait un composé contenant de l'antimoine. Masse volumique : $6\,697\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

▷ [Histoire des Sciences] *Confessions sur l'antimoine*, Raymond Bauduin & Olivier Fraisse, Bulletin de l'Union des Physiciens **907** (2008) p. 1197

antineutrino  (angl. *antineutrino*) Antiparticule associée au neutrino. Il existe trois saveurs d'antineutrinos, c'est-à-dire autant que de saveurs de neutrinos (élec-

tronique, muonique et tauique). La question de savoir si l'antineutrino est la même particule que le neutrino est encore ouverte. Plusieurs types d'expérience pourraient permettre de répondre à cette question (▷ *désintégration double bêta*).

▷ *Theoretical antineutrino detection, direction and ranging at long distances*, Glenn R. Jocher, Daniel A. Bondy et al., Physics Reports **527** (2013) p. 131

antineutron  (angl. *antineutron*) Antiparticule du neutron, notée $\bar{n}$. C'est un fermion (hadron) neutre de spin $1/2$ et de même masse que le neutron. On l'observa au LBL en 1956, soit un an après l'antiproton, grâce à des collisions proton-antiproton conduisant à des réactions

$$p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{n}.$$

L'antineutron est constitué de deux antiquarks $\bar{d}$ et d'un antiquark $\bar{u}$, ce qui lui confère un moment magnétique opposé à celui du neutron même si tous deux ont une charge électrique nulle : le neutron et l'antineutron sont bien des particules différentes.

- ▷ *Antinucleons*, Emilio Segrè, Annual Review of Nuclear and Particle Science **8** (1958) p. 127
- ▷ *Antineutron physics*, Tullio Bressani & Alessandra Filippi, Physics Reports **383** (2003) p. 213

antiparallèle (angl. *antiparallel*) Qualifie deux vecteurs colinéaires mais de sens opposés, en particulier dans le cas où ces vecteurs représentent un moment magnétique ou un moment cinétique. Dans ce sens, ce terme s'oppose à « parallèle ». On parle aussi de spins antiparallèles lorsque les composantes j_z de deux systèmes de spin $1/2$ sont opposées, c'est-à-dire valent $+1/2$ et $-1/2$.

antiparticule  (angl. *antiparticle*) Particule associée à une autre ayant des propriétés très similaires (même masse, même spin), mais dont certains nombres quantiques sont opposés, en particulier la charge électrique. Plus précisément, l'antiparticule se déduit de la particule par conjugaison de charge. Par exemple, l'antiparticule de l'électron possède une charge positive, on l'appelle positon. Dans certains cas, l'antiparticule et la particule sont rigoureusement identiques et il n'y a pas lieu de parler d'antiparticule. C'est le cas du photon, mais pas de l'antineutron. Les antiparticules peuvent se combiner (de la même façon que les particules) pour former de l'antimatière.

- ▷ *Classical antiparticles*, John P. Costella, Bruce H. J. McKellar et al., American Journal of Physics **65** (1997) p. 835

antiproton  (angl. *antiproton*) Antiparticule associée au proton. C'est un fermion (hadron) de spin $1/2$, de charge électrique négative et de même masse que le proton. Il est constitué de deux antiquarks $\bar{u}$ et d'un antiquark $\bar{d}$. Il fut découvert expérimentalement au bevatron en 1955, ce qui valut le prix Nobel de physique 1959 à Emilio Segrè (1905–1989) et Owen Chamberlain (1920–2006). La création d'antiprotons au sein des collisionneurs de particules est désormais devenue routinière, et des atomes d'antihydrogène dans lesquels les antiprotons sont associés à des positons ont même été produits au CERN à partir de 1995 (▷ *décélérateur d'antiprotons*). Des réactions à haute énergie ayant lieu dans l'Univers génèrent également des antiprotons, que l'on observe à l'état naturel dans certains rayons cosmiques. L'antiproton est une particule aussi stable que le proton, même si le temps de vie d'un antiproton dans un milieu contenant des protons (l'air ou même l'espace interstellaire) est limité par les interactions proton-antiproton qui peuvent conduire à l'annihilation de la paire. Des utilisations médicales de cette dernière réaction sont envisagées.

- ▷ *The negative proton : Its earliest history*, Helge Kragh, American Journal of Physics **57** (1989) p. 1034
- ▷ *[Search and Discovery] Antiprotons Cooled to 4 K and Weighed in a Penning Trap*, Bertram Schwarzschild, Physics Today **43** (1990) p. 17
- ▷ *Low Energy Antiproton Physics*, C. Amsler & F. Myhrer, Annual Review of Nuclear and Particle Science **41** (1991) p. 219
- ▷ *The Antiproton Sources : Design and Operation*, M. D. Church & J. P. Mariner, Annual Review of Nuclear and Particle Science **43** (1993) p. 253
- ▷ *Forty years of antiprotons*, J. Eades & F. J. Hartmann, Reviews of Modern Physics **71** (1999) p. 373
- ▷ *[Search and Discovery] Antiproton Research Resumes at CERN*, Barbara Goss Levi, Physics Today **53** (2000) p. 22

antisymétrique (angl. *antisymmetric*) Qui change de signe sous une certaine symétrie. Par extension, on dit qu'une matrice A est antisymétrique quand ses éléments vérifient $A_{ij} = -A_{ji}$. De manière plus générale, un tenseur T sera dit **antisymétrique par rapport aux indices j et k** si $T_{i_1 \dots j \dots k \dots i_n} = -T_{i_1 \dots k \dots j \dots i_n}$. Un tenseur vérifiant cette propriété pour tout couple d'indices est dit **totalelement antisymétrique** (▷ *symbole de Levi-Civita*).

anyon  (angl. *anyon*) État d'un système bidimensionnel pour lequel la fonction d'onde se comporte comme $\psi \rightarrow e^{i\theta}\psi$ lorsque l'on échange deux particules identiques, où θ désigne un angle pouvant prendre n'importe quelle valeur (▷ *plekton*) alors qu'en trois dimensions les seules valeurs permises sont $\theta = 0$ pour les bosons et $\theta = \pi$ pour les fermions (*théorème spin-statistique*). Le terme « anyon » a été proposé en 1982 par Frank Wilczek (1951–) car ils peuvent avoir n'importe quel (« any » en anglais) spin.

- ▷ *Les anyons*, Frank Wilczek, Pour la Science **165** (1991) p. 74
- ▷ *Quantum mechanics and field theory with fractional spin and statistics*, Stefano Forte, Reviews of Modern Physics **64** (1992) p. 193

apériodique (angl. *aperiodic*) Qualifie une évolution ne faisant pas intervenir de période. En particulier, le terme **régime apériodique** désigne le régime dans lequel un oscillateur amorti ne présente aucune oscillation, lorsque l'amortissement est supérieur à l'amortissement critique (▷ *oscillateur amorti*).

apesanteur (angl. *weightlessness*) ▷ *impesanteur*.

apex  (angl. *apex*) Point de la sphère céleste vers lequel est dirigé le mouvement du Système solaire par rapport aux étoiles lointaines. Ce mouvement a été découvert en 1783 par Sir William Herschel (1738–1822). L'apex, aussi appelé **apex solaire**, a pour coordonnées équatoriales

$$RA = 18^h 28' 0'', \quad \text{dec} = 30^\circ.$$

- ▷ *Herschel's Determination of the Solar Apex*, M. Hoskin, Journal for the History of Astronomy **11** (1980) p. 153

aphélie (angl. *aphelion*) Point le plus éloigné du Soleil dans la trajectoire elliptique d'un corps en orbite autour de celui-ci (▷ *apoastre*). La distance entre le corps et le Soleil (parfois appelée **distance aphélique**) vaut alors

$$r = a(1 + e),$$

où a désigne le demi-grand axe et e l'excentricité de l'orbite. La vitesse à l'aphélie est donnée par

$$v = \sqrt{\frac{G_N M_\odot (1 - e)}{a(1 + e)}},$$

où $M_\odot$ désigne la masse du Soleil et G_N la constante de Newton.

aplanat (angl. *rapid rectilinear*) Objectif photographique constitué de deux doubles identiques montés de manière symétrique. Cette configuration l'affranchit de la distorsion, tout en permettant un champ de vue important. Il a été mis en point en 1866 par John Henry Dallmeyer (1830–1883) et fut beaucoup utilisé pour la photographie d'architecture et la reproduction de documents.

aplanétisme  (angl. *aplanetism*) Propriété de certains systèmes optiques selon laquelle le stigmatisme est conservé, au moins de manière approchée, lorsque l'on déplace un objet dans un plan perpendiculaire à l'axe optique (▷ *condition des sinus d'Abbe*). Plus précisément, l'aplanétisme désigne l'absence d'aberration sphérique et d'aberration de coma (▷ *aberration*). Un système aplanétique permet de former des images de bonne qualité, même en s'écartant des conditions de Gauss. La qualité de l'image fournie par un système aplanétique présente aussi l'avantage d'être moins sensible aux défauts d'alignement des éléments optiques qui forment le système. On réalise des systèmes aplanétiques en associant des composants optiques dont les aberrations se compensent. Ce terme est aussi employé, de manière erronée, pour désigner le fait que dans les conditions de Gauss, l'image d'un objet contenu dans un plan perpendiculaire à l'axe optique est elle-même contenue dans un plan perpendiculaire à l'axe optique.

- ▷ *The Ritchey-Chrétien Aplanatic Telescope : Letters from George Willis Ritchey to Elihu Thomson*, Harold J. Abrahams, *Proceedings of the American Philosophical Society* **116** (1972) p. 486
- ▷ *The First Aplanatic Object Glass*, J. A. Bennett, *Journal for the History of Astronomy* **13** (1982) p. 206

aplatissement polaire (angl. *polar flattening*) Aplatissement au niveau des pôles des corps autogravitants en rotation. Cette déformation est due aux forces centrifuges qui augmentent la distance par rapport à l'axe de rotation aux latitudes faibles. Cet effet concerne notamment les planètes et les étoiles. Historiquement il joua un rôle important pour confirmer la théorie de Sir Isaac Newton (1643–1727) de la gravitation et pour invalider les idées de René Descartes (1596–1650), ce dernier ayant prédit que la Terre devait être plus large d'un pôle à l'autre qu'entre deux points de l'équateur diamétralement opposés. Afin de déterminer la forme de la Terre, deux expéditions furent organisées par l'Académie des Sciences française au cours de la première moitié du XVIII^e siècle, l'une vers le Pérou et l'autre en Laponie. Au retour de la seconde, Pierre Louis de Maupertuis (1698–1759), qui l'avait dirigée, annonça fin 1737 que la prédiction de Newton était correcte. La différence entre le rayon polaire et le rayon équatorial de la Terre est d'environ 20 km.

apoastre (angl. *apoapsis*) Pour un corps en orbite autour d'un autre, nom générique pour désigner le point où l'éloignement est maximal. On parle aussi d'apogée ou d'aphélie dans les situations particulières où le foyer est occupé par la Terre ou le Soleil, respectivement.

apochromatique  (angl. *apochromatic*) Qualifie un système optique, par exemple un ensemble de lentilles, permettant d'obtenir la même distance focale à trois longueurs différentes (au lieu de deux pour les achromats), ce qui diminue l'effet des aberrations chromatiques.

- ▷ *Apochromatic Telephoto Lens with a Diffractive Element*, J. Brian Caldwell, *Optics and Photonics News* **9** (1998) p. 38

apodisation (angl. *apodization*) ► **1.** Lors de la diffraction par une ouverture, suppression des maxima secondaires de la figure de diffraction obtenue en modifiant la fonction de transparence de l'ouverture. Le mot « apodisation » signifie littéralement « suppression des pieds ». Le principe de l'apodisation est le suivant : puisque tout instrument d'optique réel donne d'un point source une image étendue, à cause du phénomène de diffraction par l'ouverture de l'instrument, l'image formée possède généralement plusieurs maxima secondaires (▷ *tache d'Airy*) qui peuvent être gênants. En intercalant un objet diffractant dont la transparence est bien choisie (un masque), on peut limiter l'importance de ces maxima secondaires et améliorer les performances de l'instrument. On trouve des applications de l'apodisation pour les ondes électromagnétiques dans la plupart des longueurs d'onde. ► **2.** Technique de traitement du signal, appelée aussi pondération, consistant à multiplier un signal par un signal de fenêtre ayant une forme spécifiquement définie (▷ *fenêtrage*, *fenêtre*).

apogée (angl. *apogee*) Désigne le point le plus éloigné de la Terre qu'atteint un corps en orbite autour de celle-ci, la Lune ou un satellite artificiel, par exemple (▷ *apoastre*). Antonyme : ▷ *périgée*.

Apollo (missions)  (angl. *Apollo missions*) Missions spatiales ayant emmené des humains sur la Lune de 1969 à 1972 et posé du matériel scientifique sur son sol. On a ainsi pu ramener des échantillons de roches lunaires et montrer l'origine volcanique d'une partie d'entre elles. Lors de certaines de ces missions, des catadioptriques ont été installés qui permettent de suivre l'évolution de la distance Terre-Lune avec une précision de l'ordre du centimètre. De façon plus anecdotique, l'expérience de Galilée a été réalisée sur la Lune au cours de la mission Apollo 15, avec un marteau et une plume. Lâchés au même instant, on peut les voir toucher la surface lunaire en même temps, sur le film enregistré par les astronautes (que l'on peut facilement trouver sur internet). Il s'agissait davantage d'une démonstration pédagogique que d'une véritable expérience scientifique.

- ▷ *Elementary Analysis of Translunar Apollo Orbit*, R. W. Christy & M. R. Mayhugh, *American Journal of Physics* **37** (1969) p. 1103
- ▷ *L'héritage scientifique des missions vers la Lune*, Jeffrey Taylor, *Pour la Science* **203** (1994) p. 64
- ▷ *[Histoire] Une règle à calcul pour conquérir la Lune*, Hélène Frouard, *Ciel et Espace* **516** (2013) p. 56
- ▷ *The scientific legacy of the Apollo program*, Bradley L. Jolliff & Mark S. Robinson, *Physics Today* **72** (2019) p. 44
- ▷ *Le précieux butin des missions Apollo*, Erica Jawin, *Pour la Science* **501** (2019) p. 58

Apollon (angl. *Apollon*) Infrastructure de recherche du CNRS et de l'École Polytechnique consistant en un

laser de haute puissance dont la mise en service a débuté en 2019 pour une ouverture aux utilisateurs en 2020. Il délivre des impulsions d'une puissance de 10^{16} W sur une quinzaine de femtosecondes (10^{-15} s), permettant ainsi notamment d'étudier les interactions matière-lumière dans le régime ultra-relativiste. Cette expérience est donc complémentaire du laser Mégajoule, lequel délivre des impulsions beaucoup plus énergétiques, mais moins puissantes, étant étalées sur des durées plus longues (quelques nanosecondes).

apostilb [asb] (angl. *apostilb*) Unité de luminance notée **asb**, n'appartenant pas au Système International d'unités, et valant $1 \text{ asb} = (1/\pi) \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Elle est reliée au stilb par $1 \text{ asb} = 1/(\pi 10^4) \text{ sb}$ et au Système International d'unités par $1 \text{ asb} = (1/\pi) \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. On l'appelle aussi le **blondel**, après une proposition datant de 1942.

appareil photographique (angl. *camera*) Dispositif permettant d'enregistrer des images fixes, grâce à un système optique (un objectif) faisant une image sur une surface photosensible (pellicule argentique ou matrice CCD, par exemple). La position de l'objectif est réglable, ce qui permet de mettre au point sur des objets situés à différentes distances. La focale de l'objectif est parfois réglable aussi (dans les zooms). Enfin, un diaphragme permet de contrôler la quantité de lumière qui participe à la formation de l'image ainsi que la profondeur de champ.

appareil de 's Gravesande (angl. *'s Gravesande ring*) Appareil de démonstration conçu par Willem 's Gravesande (1688–1742) pour mettre en évidence de façon spectaculaire la dilatation thermique des corps. Une boule est placée au dessus d'un anneau ayant un rayon initial trop petit pour la laisser passer. Étant chauffé, l'anneau se dilate au point que la boule finit par le traverser.

Appleton (sir Edward Victor) (1892–1965) Physicien anglais, prix Nobel de physique en 1947 « pour ses recherches en physique de la haute atmosphère, en particulier pour sa découverte de la couche d'Appleton ». Ancien élève de l'Université de Cambridge, il y étudia en 1924 l'intensité des signaux radio qu'il recevait et qui avaient été émis par la BBC à Londres. Il observa qu'elle variait de manière régulière la nuit alors qu'elle était constante le jour. Il en déduisit que les ondes radios étaient réfléchies par une couche de l'atmosphère dont il détermina l'altitude à l'aide d'un émetteur de la BBC (▷ *couche de Kennelly-Heaviside*). Poursuivant ses recherches, il découvrit en 1926 une nouvelle couche d'altitude plus élevée qui porte désormais son nom (▷ *couche d'Appleton, ionosphère*).

- ▷ Wilhelm Altar, Edward Appleton, and the Magneto-Ionic Theory, C. Stewart Gillmor, Proceedings of the American Philosophical Society **126** (1982) p. 395
- ▷ Sir Edward Appleton and early ionosphere research, M. V. Wilkes, Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science **51** (1997) p. 281

application numérique Remplacement, dans une formule littérale, des différentes variables par des valeurs

numériques. Cela constitue souvent la dernière étape dans la résolution d'un problème physique, pour relier la solution formelle obtenue à des valeurs mesurables. Il est nécessaire d'exprimer toutes les grandeurs de manière cohérente, dans le même système d'unités.

approximant de Padé (angl. *Padé approximant*) Étant donnée une fonction d'une variable réelle $f(x)$, un approximant de Padé d'ordre (n, p) est une approximation de f sous la forme d'une **fonction rationnelle**

$$\frac{a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n}{b_0 + b_1 x + \dots + b_p x^p},$$

où n et p sont deux entiers. Une telle approximation est généralement meilleure que celles obtenues par troncation de la série de Taylor associée à f , en particulier parce qu'elle permet de décrire la fonction près de ses éventuels pôles.

- ▷ *Padé approximants via the continued fraction approach*, J. Sullivan, American Journal of Physics **46** (1978) p. 489
- ▷ *Application of Padé interpolation to stationary state problems*, C. N. Leung & Yvonne Y. Y. Wong, American Journal of Physics **70** (2002) p. 1020

approximation (angl. *approximation*) Remplacement de façon contrôlée d'une situation ou d'une quantité par une autre moins précise, mais plus simple. En effet, l'étude rigoureuse de la moindre situation physique conduit à des calculs généralement inutilement compliqués, voire inextricables, que l'on peut souvent simplifier en idéalisant la situation de départ ou en ne tenant pas compte de certains facteurs, de certaines causes, que l'on juge négligeables. Par exemple, en étudiant le mouvement d'un pendule simple dans le champ de pesanteur terrestre, on peut choisir de négliger les forces de frottement et les forces de Coriolis, ou encore supposer que la Terre est sphérique et homogène, ce qui en toute rigueur n'est pas le cas. De façon plus mathématique, faire une approximation consiste aussi parfois à remplacer des fonctions apparaissant dans les équations par d'autres plus simples, mais différant très peu de celles de départ (▷ *approximation des petits angles*). En physique, le choix délibéré d'un cadre théorique plus restreint peut également constituer une approximation. Par exemple, décrire le mouvement d'une particule de manière non-relativiste ou non-quantique est une approximation qui se justifie dans certaines conditions ou pour l'étude de certains systèmes. Il convient de toujours vérifier *a posteriori* que les hypothèses utilisées sont justifiées, de façon à connaître précisément le domaine de validité de l'approximation. Certaines de ces approximations portent des noms consacrés (▷ *approximation adiabatique*, *approximation de Born-Oppenheimer*).

- ▷ *How good are the common approximations used in physics?*, Steven A. Feller & Joseph E. Kasper, American Journal of Physics **50** (1982) p. 682

approximation adiabatique (angl. *adiabatic approximation*) Approximation consistant à supposer que l'évolution d'un système peut être décrite par une succession d'états d'équilibre. Considérons un système physique décrit par un paramètre α (par exemple, la

longueur d'un pendule simple). De façon générale, si α est constant, les équations physiques qui décrivent le système admettent des équations qui dépendent de la valeur de α ; notons-les $S_\alpha(t)$. Si maintenant la valeur du paramètre α varie au cours du temps, les solutions sont totalement différentes. Toutefois, quand les variations de α sont suffisamment lentes devant les temps caractéristiques sur lesquels le système évolue (pour l'exemple mentionné plus haut, il s'agirait de la période des oscillations), on peut supposer que le système peut être successivement décrit par les solutions $S_\alpha(t)$, en donnant à α sa valeur instantanée. Il s'agit de l'approximation adiabatique. Elle est d'autant mieux vérifiée que le paramètre α varie lentement. On utilise implicitement cette approximation lorsque l'on fait appel à l'approximation de Born–Oppenheimer pour décrire les fonctions d'onde électroniques dans les molécules.

- ▷ *Paul Ehrenfest : The Genesis of the Adiabatic Hypothesis, 1911–1914*, Luis Navarro & Enric Pérez, *Archive for history of exact sciences* **60** (2006) p. 209
- ▷ *Ehrenfest's adiabatic theory and the old quantum theory, 1916–1918*, Enric Pérez, *Archive for history of exact sciences* **63** (2009) p. 81

approximation de Born–Oppenheimer

(angl. *Born–Oppenheimer approximation*) Hypothèse simplificatrice dans le traitement quantique des orbitales moléculaires consistant à supposer que les noyaux atomiques sont immobiles. Cette hypothèse revient en fait à découpler le mouvement des électrons de celui des noyaux, beaucoup plus lent du fait de leur masse bien plus élevée. Le mouvement des noyaux peut ensuite s'étudier dans la distribution de charge électronique ainsi obtenue. Cette approximation fut proposée en 1927 par Max Born (1882–1970) et Robert Oppenheimer (1904–1967), et appliquée à la molécule de dihydrogène par Walter Heitler (1904–1981) et Fritz London (1900–1954) la même année.

- ▷ *Born–Oppenheimer Treatment of the Hydrogen Atom*, V. K. Deshpande & J. Mahanty, *American Journal of Physics* **37** (1969) p. 823
- ▷ *The Born–Oppenheimer approximation : A toy version*, Gautam Gangopadhyay & Binayak Dutta-Roy, *American Journal of Physics* **72** (2004) p. 389
- ▷ *[Search and Discovery] Nuclear and electronic motion in molecules can be computed separately*, Johanna Miller, *Physics Today* **61** (2008) p. 15

approximation de Gauss (angl. *Gauss approximation*) ▷ *conditions de Gauss*.

approximation orbitalaire (angl. *independent electron approximation*) Approximation consistant à découpler les mouvements des différents électrons dans un atome. On étudie le mouvement de chacun d'entre eux en traitant l'influence des autres par un champ moyen. La fonction d'onde multi-électronique se factorise alors en un produit, ou mieux en combinaisons convenablement symétrisées, des fonctions d'ondes mono-électroniques (▷ *déterminant de Slater*).

approximation des petits angles (angl. *small angle approximation*) Quand un angle θ est suffisamment petit, on peut assimiler sa valeur à celles de son sinus et de sa tangente, pourvu que l'angle soit exprimé en

radians :

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta .$$

Ces approximations introduisent une erreur inférieure à 1 % si $\theta \lesssim 0,17 \text{ rad} \sim 9^\circ$ et inférieure à 0,1 % si $\theta < 0,05 \text{ rad} \sim 2,9^\circ$. C'est une linéarisation qui permet de simplifier les calculs dans beaucoup de problèmes physiques (▷ *pendule simple*).

approximation post-minkowskienne (angl. *post-Minkowskian approximation*) Nom générique d'une approche perturbative de la gravitation, dans laquelle on considère que la métrique s'écarte faiblement de la métrique minkowskienne. Cette approximation est aussi appelée **limite de champ faible**.

approximation des régimes quasi-stationnaires Approximation consistant à négliger le temps que mettent des signaux variables dans le temps à se propager le long d'un circuit, à l'échelle du circuit considéré. On l'utilise par exemple lorsque l'on traite les phénomènes d'induction électromagnétique. Cela revient à considérer que la taille du circuit, ou la distance sur laquelle on effectue le calcul (par exemple celle séparant le point de l'espace où l'on calcule le champ magnétique et la spire de courant qui en est la source), est très faible devant la longueur d'onde associée aux variations temporelles des signaux. On la désigne souvent par les acronymes **ARQS** ou **ARQP** (pour « approximation des régimes quasi-permanents »).

approximation scalaire (angl. *scalar approximation*) Approximation consistant à supposer que les équations de Maxwell peuvent se décomposer en plusieurs équations indépendantes portant chacune sur une composante du champ électrique ou du champ magnétique. Dans cette approximation, on peut décrire le champ électromagnétique par des grandeurs scalaires, obéissant dans le vide à l'équation de Helmholtz. On peut en déduire l'intégrale de Fresnel-Kirchhoff qui justifie le principe de Fresnel-Huygens. L'approximation scalaire est notamment justifiée dans la plupart des situations rencontrées en optique.

approximation WKB  (angl. *WKB approximation*) Acronyme pour « Wentzel, Kramers et Brillouin », on emploie aussi JWKB en ajoutant le nom de Jeffreys. Cette approximation consiste à appliquer les méthodes de développement iconal issues de l'optique à des systèmes quantiques, en séparant l'évolution de la phase de celle de la norme, la première se faisant généralement sur des échelles de temps plus courtes que la deuxième. On écrit la fonction d'onde sous la forme

$$\psi(\vec{r}, t) = A(\vec{r}, t) e^{iS(\vec{r}, t)/\hbar} .$$

On montre alors que dans beaucoup de situations, la fonction S vérifie l'équation de Hamilton-Jacobi du problème classique correspondant, et peut s'interpréter comme une action classique.

- ▷ *Working with WKB waves far from the semiclassical limit*, Harald Friedrich & Johannes Trost, *Physics Reports* **397** (2004) p. 359

Ar Symbole de l'élément argon ($Z = 18$).

Arago (François)  (1786–1853) Physicien, astronome et politicien français, Arago commença sa carrière scientifique en 1806 au Bureau des Longitudes où, encore élève à l'École Polytechnique, il participa avec Jean-Baptiste Biot (1774–1862) à la mesure du méridien français. Pour ce faire, il partit avec lui en expédition géographique aux Îles Baléares, où il fut fait prisonnier par des pirates, la France le pensant mort. À son retour en 1809, il entreprit ses travaux sur la lumière qu'il poursuivit toute sa vie. En particulier, on lui doit des études de sa vitesse, de ses propriétés de polarisation et de ses interférences, au cours desquelles il collabora avec Augustin Fresnel (1788–1827). Arago joua aussi un rôle important à l'Académie des Sciences, à laquelle il fut nommé à l'âge de 23 ans à son retour des Baléares, et dont il fut secrétaire perpétuel puis président. Il dirigea également l'Observatoire de Paris à partir de 1834, où il habita longtemps et où il mourut près de 20 ans plus tard.

- ▷ *Arago et la naissance de la polarimétrie*, Jean Rosmorduc, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **41** (1988) p. 25
- ▷ *Editing out calorific : Fresnel, Arago and the meaning of light*, Theresa Levitt, The British Journal for the History of Science **33** (2000) p. 49
- ▷ [*Histoire des Sciences*] *Fresnel et Arago : aux origines de l'optique physique*, James Lequeux, Bulletin de l'Union des Physiciens **868** (2004) p. 1621
- ▷ *The daguerreotype's first frame : François Arago's moral economy of instruments*, John Tresch, Studies in History and Philosophy of Science Part A **38** (2007) p. 445
- ▷ *Arago et la vitesse de la lumière (1806-1810), un manuscrit inédit, une nouvelle analyse*, Jean Eisenstaedt & Michel Combes, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **64** (2011) p. 59
- *Arago – La jeunesse de la science*, Maurice Daumas, (Belin, 1987)
- *François Arago – Un savant généreux*, James Lequeux, (collection « Sciences et histoires », EDP Sciences, 2008)

Arago (appareil d') (angl. *Arago disk*) Dispositif de démonstration constitué d'un disque de cuivre et d'une aiguille aimantée montée sur pivot, un peu comme une boussole dont la base (le disque en cuivre) serait plus grande qu'usuellement. La rotation du disque de cuivre produit un changement de direction de l'aiguille. Ce phénomène est dû aux courants de Foucault induits dans le disque par l'aiguille qui agissent en retour sur elle.

Arago (expérience d') (angl. *Arago experiment*) Expérience imaginée en 1838 par François Arago (1786–1853) pour mesurer la différence entre la vitesse de la lumière dans l'eau et celle dans l'air. Elle fut réalisée en 1851 par Hippolyte Fizeau (1819–1896) et on l'appelle généralement **expérience de Fizeau** (▷ *expérience de Fizeau*).

arc électrique  (angl. *electric arc*) Ligne lumineuse irrégulière formée par le passage d'un courant électrique dans un milieu isolant, quand la tension devient localement supérieure à la tension de claquage du milieu. L'ionisation locale se traduit alors par une augmentation importante de la conductivité électrique, du courant

et de la température. La foudre est un exemple d'arc électrique à grande échelle.

- ▷ *An unwelcome discovery : The pole effect in the electric arc, a threat to early 20th century precision spectrometry*, Klaus Hentschel, Archive for history of exact sciences **51** (1997) p. 199

arc gravitationnel (angl. *gravitational arc*) Image d'une galaxie lointaine fortement déformée par le champ gravitationnel d'un objet, généralement un amas de galaxies, situé plus près, sur la même ligne de visée (▷ *lentille gravitationnelle*). Lorsque la déviation des rayons lumineux est importante, l'image est en effet considérablement allongée dans la direction orthoradiale et prend la forme d'un arc dont le centre de courbure coïncide avec la position de la lentille. Le premier fut découvert en 1987 par Geneviève Soucail (1962–) et ses collaborateurs.

arc de rupture Arc électrique qui se produit à l'ouverture brusque d'un circuit électrique, en particulier en présence d'une inductance élevée. Ce phénomène s'explique par le fait qu'une brusque variation de courant dans un circuit contenant une inductance se traduit par l'apparition d'une tension élevée, qui peut atteindre la tension de claquage de l'air (▷ *arc électrique*).

arc-en-ciel  (angl. *rainbow*) Phénomène optique causé par la dispersion de la lumière en raison de la réfraction d'un faisceau incident dans des gouttes d'eau, en particulier lors de pluies. Il se manifeste par l'apparition d'arcs colorés centrés sur la direction antisolaire et dont les rayons angulaires valent environ 42° et 51°. Une première explication en fut fournie en 1637 par René Descartes (1596–1650). L'**arc primaire** est dû aux rayons lumineux ayant effectué une réflexion interne dans la goutte. Les rayons incidents sont en effet déviés d'un angle qui dépend de l'angle d'incidence θ à l'entrée dans la goutte, mais cette déviation présente un maximum pour un angle

$$\alpha_1 = 2 \arcsin(x) - 4 \arcsin\left(\frac{x}{n}\right), \text{ où } x = \frac{\sqrt{4 - n^2}}{\sqrt{3}}$$

et où n désigne l'indice de réfraction de l'eau pour la radiation considérée et $x \equiv h/R$ représente le rapport entre le paramètre d'impact h correspondant au maximum de déviation et le rayon R de la goutte. On voit donc un maximum de lumière dans la direction α_1 , cette accumulation de rayons lumineux dans une direction donnée formant ce que l'on appelle une caustique. Comme l'indice n dépend de la longueur d'onde, α_1 en dépend aussi et on observe des arcs colorés à différents rayons angulaires, compris entre 40,5° (bleu) et 42° (rouge) par rapport au point antisolaire. L'**arc secondaire**, d'intensité plus faible, correspond aux rayons ayant effectué deux réflexions internes et pour lesquels on a

$$\alpha_2 = \pi + 2 \arcsin(x) - 6 \arcsin\left(\frac{x}{n}\right), \text{ où } x = \frac{\sqrt{9 - n^2}}{\sqrt{8}}.$$

Le rayon de cet arc vaut $\alpha_2 \approx 51^\circ$, et l'ordre des couleurs y est inverse de celui de l'arc primaire. Ces deux arcs sont séparés par une zone de ciel plus sombre (▷ *bande*

arc-en-ciel La compréhension de l'arc-en-ciel s'est affinée au fur et à mesure de l'évolution des idées concernant les phénomènes lumineux. La première explication physique de l'arc lumineux observé dans le ciel a été fournie en 1637 par René Descartes (1596–1650), qui fut capable de calculer la position angulaire de l'arc primaire et de l'arc secondaire, dans leur ensemble, en considérant que la lumière était réfractée dans les gouttes et y subissait une ou plusieurs réflexions internes. L'arc-en-ciel correspond à une accumulation de rayons lumineux dans une direction privilégiée, c'est-à-dire une caustique. Il fallut attendre la fin du XVII^e siècle pour que Sir Isaac Newton (1643–1727) explique les couleurs des arcs grâce au phénomène de dispersion : l'indice de réfraction de l'eau des gouttes de pluie dépend de la longueur d'onde et la position de l'arc lumineux n'est pas la même pour toutes les couleurs. Plusieurs phénomènes plus subtils sont longtemps passés inaperçus. Par exemple, l'existence des arcs surnuméraires, à l'intérieur de l'arc principal, ne fut clairement mentionnée qu'à partir de 1723, par Henry Pemberton (1694–1771), plusieurs années après la mort de Newton. C'est Thomas Young (1773–1829) qui, en 1804, comprit qu'il s'agit d'un phénomène d'interférences lumineuses. Il en proposa une description reposant sur des interférences à deux ondes : en calculant la différence de marche entre deux rayons qui émergent de la goutte dans la même direction, il put reproduire l'existence d'arcs surnuméraires à l'intérieur de l'arc primaire. Cette vision posait toutefois plusieurs problèmes : elle prédisait à tort que l'intensité devait être infinie dans la direction de l'arc et nulle à l'extérieur de celui-ci. De plus, la position des maxima de l'intensité ne correspondait pas aux observations. Les deux premiers points furent réglés en 1838 grâce à George Airy (1801–1892) qui s'appuya sur une véritable approche ondulatoire, en modélisant le front d'onde sortant de la goutte au voisinage de la caustique comme une surface cubique (dont le profil est décrit par une équation de la forme $y \propto x^3$). Il put ainsi rendre compte de la décroissance rapide de la distribution d'intensité à l'extérieur de l'arc. Cette théorie de l'arc-en-ciel cesse cependant d'être correcte si le rayon des gouttes est trop petit, c'est-à-dire lorsque la région sur laquelle le front d'onde peut être décrit par la surface précédente devient de l'ordre de la longueur d'onde. La théorie proposée en 1908 par Gustav Mie (1869–1957), qui repose sur la résolution des équations de Maxwell, fournit une solution plus générale, valable également pour les gouttes de petit diamètre.

sombre d'Alexandre). Il existe aussi un **arc tertiaire** et un **arc quaternaire**, situés du côté du Soleil, extrêmement ténus et difficiles à observer, ils ont été photographiés pour la première fois en 2011. Leur position angulaire est donnée par

$$\alpha_3 = 2 \arcsin(x) - 8 \arcsin\left(\frac{x}{n}\right), \text{ où } x = \frac{\sqrt{16 - n^2}}{\sqrt{15}}$$

et

$$\alpha_4 = \pi + 2 \arcsin(x) - 10 \arcsin\left(\frac{x}{n}\right), \text{ où } x = \frac{\sqrt{99 - n^2}}{\sqrt{98}}.$$

Par ailleurs, on peut aussi parfois observer des **arcs surnuméraires** vers l'intérieur de l'arc primaire ou vers l'extérieur de l'arc secondaire, comme le décrit en 1723 Henry Pemberton (1694–1771). La théorie de Descartes, qui repose sur l'optique géométrique, ne permet pas de rendre compte de ceux-ci : ce sont des franges d'interférence des rayons formant la caustique, comme l'expliqua partiellement en 1838 George Airy (1801–1892), et leurs caractéristiques dépendent de la taille des gouttes d'eau, contrairement aux arcs principaux (▷ *modèle d'Airy*).
▷ voir encadré.

- ▷ *The Tertiary Rainbow : An Historical Account*, Carl B. Boyer, ISIS **49** (1958) p. 141
- ▷ *From Alexander of Aphrodisias to Young and Airy*, J.D. Jackson, Physics Reports **320** (1999) p. 27
- ▷ *The mathematical physics of rainbows and glories*, John A. Adam, Physics Reports **356** (2002) p. 229
- ▷ *[Apparatus and Demonstration Notes] The "rainbow" in the drop*, Giovanni Casini & Antonio Covello, American Journal of Physics **80** (2012) p. 1027
- ▷ *Revisiting the round bottom flask rainbow experiment*, Markus Selmke & Sarah Selmke, American Journal of Physics **86** (2018) p. 14

- *The Rainbow – From Myth to Mathematics*, Carl B. Boyer, (Princeton University Press, 1987)
- *Histoire de l'arc-en-ciel*, Bernard Maitte, (collection « Science ouverte », Seuil, 2005)

archéomagnétisme  (angl. *archeomagnetism*) Étude des structures archéologiques ayant conservé la trace de la direction et de l'amplitude du champ magnétique ambiant au moment de leur formation. Ce type d'étude repose sur l'analyse de minéraux magnétiques présents dans les argiles ou les céramiques. L'archéomagnétisme permet de retracer l'évolution temporelle du champ magnétique terrestre sur des échelles de temps archéologiques.

- ▷ *Le champ magnétique de nos ancêtres*, Yves Gallet, Agnès Genevey et al., Dossier Pour la Science **42** (2004) p. 104

Archimède  (angl. *Archimedes*) (-287–-212) Savant grec, installé à Syracuse après plusieurs voyages. Mathématicien et géomètre, ses réflexions en physique furent aussi d'importance capitale. Il apporta des contributions en statique des fluides (▷ *poussée d'Archimède*), comprit le principe du levier, introduisit la notion de centre de gravité. Il mit son ingéniosité au service de la cité lors des guerres puniques en inventant de nouvelles machines de guerre. La légende raconte ainsi qu'au cours du siège de Syracuse, il mit le feu à des bateaux ennemis en concentrant les rayons du Soleil sur leurs voiles grâce à un ensemble de miroirs.

- ▷ *How Archimedes expected to move the Earth*, A. G. Drachmann, Centaurus **5** (1958) p. 278
- ▷ *The Impact of Archimedes on Medieval Science*, Marshall Claggett, ISIS **50** (1959) p. 419
- ▷ *Archimedes, Kircher, Buffon, and the Burning-Mirrors*, W. E. Knowles Middleton, ISIS **52** (1961) p. 533
- ▷ *Archimedes and the Science of Physics*, A. G. Drachmann, Centaurus **12** (1968) p. 1

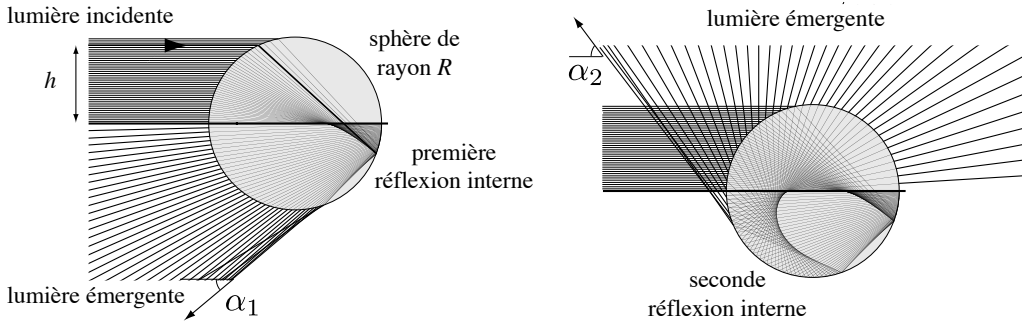


FIGURE 13 – arc-en-ciel – Des rayons incidents parallèles sont réfractés par la première interface, puis subissent une ou plusieurs réflexions internes avant d'être réfractés vers l'extérieur. Ces schémas indiquent la marche des rayons dans le cas d'une (a) ou de deux (b) réflexions internes, qui donnent respectivement l'arc primaire et l'arc secondaire. La flèche sortante indique la direction dans laquelle s'accumulent les rayons lumineux, ce sont des caustiques.

- ▷ *Archimedes on the Dimensions of the Cosmos*, Catherine Osborne, *ISIS* **74** (1983) p. 234
- ▷ *Archimedes' Weapons of War and Leonardo*, D.L. Simms, *The British Journal for the History of Science* **21** (1988) p. 195

Archimède (nombre d') (angl. *Archimedes number*) Nombre sans dimension intervenant dans l'étude du mouvement d'un corps immergé dans un fluide, et défini par

$$Ar \equiv \frac{gV\rho_l(\rho - \rho_l)}{\eta^2},$$

où g désigne l'accélération de la pesanteur, V le volume du corps, ρ sa masse volumique, ρ_l celle du fluide et η la viscosité dynamique du fluide. Il est relié au nombre de Galilée Ga par $Ga^2 = Ar$.

are (angl. *are*) Unité de superficie (symbole a), définie par 1 a = 100 m². On utilise principalement son multiple l'hectare.

aréomètre (angl. *areometer*) Dispositif servant à mesurer la densité d'un liquide. Son fonctionnement repose sur le principe d'Archimède : il est constitué d'une tige graduée fixée sur un flotteur lesté, lequel s'enfonce plus ou moins selon la densité du liquide dans lequel il est plongé. On l'appelle aussi **densimètre**. On emploie des termes spécifiques quand cet instrument est utilisé pour des liquides particuliers : le **mustimètre** pour le moût en vinification, le **galactomètre** pour le lait, l'**oléomètre** pour les huiles, par exemple.

argent (angl. *Silver*) Élément de numéro atomique $Z = 47$. Il est représenté par le symbole Ag. Structure atomique : [Kr]5s¹4d¹⁰. Masse volumique : 10 490 kg · m⁻³.

argon (angl. *Argon*) Élément de numéro atomique $Z = 18$, découvert en 1894 par William Ramsay (1852–1916) et Lord Rayleigh (1842–1919). Il est représenté par le symbole Ar. Structure atomique : [Ne]3s²3p⁶. Il se trouve à l'état gazeux dans les conditions normales. Ce gaz représente environ 1 % en volume de la composition de l'air.

- ▷ *A Conflict of Principles : The Discovery of Argon and the Debate over Its Existence*, Richard F. Hirsh, *Ambix* **28** (1981) p. 121
- ▷ [Histoire de science] L'argon, hôte indésirable du tableau périodique, Marie-Christine de la Souchère, *La Recherche* **456** (2011) p. 92

argument (angl. *argument*) ▷ **nombre complexe**.

Argus (projet) (angl. *Argus project*) Nom de code d'une expérience menée en 1958 par les scientifiques de l'US Air Force. Elle consiste en la détonation de trois bombes nucléaires dans la haute atmosphère, pour y étudier les propriétés du champ magnétique. Des électrons furent piégés pendant plusieurs semaines, créant une nouvelle ceinture de radiation et des aurores « polaires » au niveau de l'équateur (▷ **ceintures de Van Allen**, **Starfish Prime**).

- ▷ *Energetic Particles in the Earth's Magnetic Field*, Kinsey A. Anderson, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **16** (1966) p. 291
- ▷ *The Civilianization of a Nuclear Weapon Effects Test : Operation ARGUS*, Lisa M. Munday, *Historical Studies in the Natural Sciences* **42** (2012) p. 283

Aristarque de Samos (angl. *Aristarchus of Samos*) (-310–230) Mathématicien et astronome grec, ayant vécu aux alentours de 300 avant JC. Par des considérations géométriques astucieuses, il estima les tailles relatives de la Terre, de la Lune et du Soleil ainsi que les distances qui les séparent (rapportées à la taille de la Terre). Bien que ses mesures aient été assez imprécises, les ordres de grandeur obtenus le firent douter du géocentrisme, le fait d'avoir les objets plus petits en orbite autour du plus grand lui paraissant plus vraisemblable que l'inverse. Il semble ainsi avoir été le premier à proposer un modèle héliocentrique, idée qui resta cependant ignorée pendant plusieurs siècles. De ses réflexions, Aristarque prédit également l'existence de l'effet de parallaxe qui était toutefois inobservable à son époque.

- ▷ *Did Copernicus Owe a Debt to Aristarchus*, O. Gingerich, *Journal for the History of Astronomy* **16** (1985) p. 37
- ▷ *Aristarchos's Observation of the Summer Solstice*, B. L. van der Waerden, *ISIS* **77** (1986) p. 103

- ▷ *Having a Knack for the Non-intuitive : Aristarchus's Heliocentrism through Archimedes's Geocentrism*, J. Christianidis, D. Dialetis *et al.*, *History of Science* **40** (2002) p. 179
- ▷ *Aristarque de Samos*, Pierre Lerich, *Cahiers Clairaut* **106** (2004)
- ▷ *What We Can Learn from a Diagram : The Case of Aristarchus's On The Sizes and Distances of the Sun and Moon*, Nathan Sidoli, *Annals of Science* **64** (2007) p. 525
- ▷ *Determination of the Sun's and the Moon's sizes and distances : Revisiting Aristarchus' method*, F. Momeni, H. Papei *et al.*, *American Journal of Physics* **85** (2017) p. 207

Aristote  (angl. *Aristotle*) (-384–322) Philosophe de la Grèce Antique, élève de Platon et professeur d'Alexandre le Grand, Aristote s'intéressa à de très nombreux domaines dont il posa souvent les bases. Il est ainsi considéré comme le père de la logique, et beaucoup de ses théories scientifiques firent référence pendant de nombreux siècles, même si d'un point de vue moderne on dit parfois que sa science n'en était pas réellement. On lui reproche en effet de s'être limité au qualitatif tout en négligeant complètement l'importance de l'expérience. Selon lui, l'esprit et l'observation seuls sont nécessaires et suffisants pour déduire les lois de l'Univers, et ce par la raison (▷ *système d'Aristote, physique aristotélicienne*).

- ▷ *Aristotelian References to the Law of Reflection*, Carl B. Boyer, *ISIS* **36** (1946) p. 92
- ▷ *Aristotle's Conception of the Development and the Nature of Scientific Method*, Richard McKeon, *Journal of History of Ideas* **8** (1947) p. 3
- ▷ *Copernicus and Aristotle's Cosmos*, Henry Guerlac, *Journal of History of Ideas* **29** (1968) p. 109
- ▷ *Aristotle on Natural Place and Natural Motion*, Peter K. Machamer, *ISIS* **69** (1978) p. 377
- ▷ *Substances and space-time : What Aristotle would have said to Einstein*, Tim Maudlin, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* **21** (1990) p. 531
- ▷ *Aspects of Aristotelian statics in Galileo's dynamics*, J. De Groot, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* **31** (2000) p. 645

aristotélicienne (physique) (angl. *Aristotelian physics*) Nom donné à l'ensemble des idées sur la physique qu'a développées Aristote (-384–322) et qui ne furent remises en cause que peu à peu à partir du Moyen-âge. Les principales hypothèses de la physique d'Aristote sont les suivantes :

- l'Univers comprend deux mondes de natures différentes : le monde sublunaire et le monde céleste, la Terre étant immobile au centre ;
- tout objet du monde sublunaire est imparfait, changeant et composé uniquement de quatre éléments (eau, terre, feu, air), chacun d'entre eux ayant comme état naturel le repos (absolu) en un lieu naturel ;
- chaque élément a son propre lieu naturel, le plus bas étant celui de la terre, celui de l'eau venant ensuite, suivi de celui de l'air, le feu ayant un lieu naturel situé juste à l'interface entre les deux mondes ;
- le besoin de retour vers ces lieux naturels explique les mouvements verticaux (naturels) des objets, lesquels peuvent être dirigés vers le haut ou vers le bas selon la composition de l'objet ;
- lorsque les objets du monde sublunaire ont un mouvement qui n'est pas lié à leur retour vers leur lieu naturel de repos, il s'agit d'un mouvement dit

violent qui ne perdure que le temps qu'une force s'exerce sur l'objet en question ;

- tout objet céleste est parfait, composé d'un cinquième élément (la quintessence) immuable et a pour seul mouvement possible le mouvement parfait (circulaire uniforme) (▷ *système d'Aristote, système de Ptolémée*).

Chacune de ces idées sera remise en cause par la physique galiléenne puis newtonienne.

arpent ► **1.** Ancienne unité de longueur, utilisée avec plusieurs définitions différentes, selon les pays. Sous l'Ancien Régime, elle était définie comme 220 pieds-du-Roi, ce qui correspond à environ 71,465 m. Elle est aujourd'hui totalement désuète. ► **2.** Ce terme était aussi utilisé pour désigner l'**arpent carré**, unité de superficie.

arroseeur inverse  (angl. *reversed sprinkler*) Expérience consistant à placer un arroseur rotatif dans un fluide et à le brancher à une pompe qui aspire le fluide environnant (au lieu de l'éjecter comme le font les arroseurs en fonctionnement normal). La question de savoir la façon dont tourne l'arroseeur a fait couler beaucoup d'encre, depuis son étude en 1883 par Ernst Mach (1838–1916) et surtout sa description en 1985 par Richard Feynman (1918–1988). On comprend aujourd'hui qu'en régime permanent, pour un fluide parfait, l'arroseeur est mis en rotation lorsque la pompe est allumée mais que cette rotation n'est pas entretenue par l'aspiration du fluide (contrairement au cas de l'arroseeur normal utilisé dans les jardins).

- ▷ *Inverse sprinklers : A lesson in the use of a conservation principle*, A. Theodore Forrester, *American Journal of Physics* **54** (1986) p. 798
- ▷ *[Letters to the Editor] Comment on the inverse sprinkler problem*, Alton K. Schultz, *American Journal of Physics* **55** (1987) p. 488
- ▷ *Inverse sprinklers : Two simple experiments and the resolution of the Feynman-Forrester conflict*, Leonardo Hsu, *American Journal of Physics* **56** (1988) p. 307
- ▷ *The Feynman inverse sprinkler problem : A demonstration and quantitative analysis*, Richard E. Berg & Michael R. Collier, *American Journal of Physics* **57** (1989) p. 654
- ▷ *The Feynman inverse sprinkler problem : A detailed kinematic study*, Michael R. Collier, Richard E. Berg *et al.*, *American Journal of Physics* **59** (1991) p. 349
- ▷ *[Letters to the Editor] The Feynman sprinkler*, Alan Mironer, *American Journal of Physics* **60** (1992) p. 12
- ▷ *An elementary treatment of the reverse sprinkler*, Alejandro Jenkins, *American Journal of Physics* **72** (2004) p. 1276
- ▷ *[Letters to the Editor] Feynman's reverse sprinkler*, E. Creutz, *American Journal of Physics* **73** (2005) p. 198
- ▷ *The puzzle of the steady-state rotation of a reverse sprinkler*, Wolfgang Rueckner, *American Journal of Physics* **83** (2015) p. 296
- ▷ *New angles on the reverse sprinkler : Reconciling theory and experiment*, Joseph Beals IV, *American Journal of Physics* **85** (2017) p. 166

arsenic (angl. *Arsenic*) Élément de numéro atomique $Z = 33$. Il est représenté par le symbole As. Structure atomique : $[\text{Ar}]4s^23d^{10}4p^3$. Masse volumique : $5\,727\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

As Symbole de l'élément arsenic ($Z = 33$).

ascenseur d'Einstein (angl. *Einstein elevator*) Expérience de pensée proposée par Albert Einstein (1879–1955) pour introduire le principe d'équivalence. Dans cette expérience, un observateur est placé dans une cage d'ascenseur aux parois opaques (pour qu'il ne puisse pas voir l'extérieur) et peut être soumis à deux situations expérimentales différentes : l'ascenseur est au repos par rapport à la Terre sous l'action d'une force de gravité considérée homogène ; ou bien il est emmené loin de la Terre, dans un endroit où le champ gravitationnel est nul, et il est soumis à une accélération égale à l'opposé vectoriel de l'accélération associée au champ gravitationnel précédent. Einstein bâtit la relativité générale sur le postulat que l'observateur serait incapable de faire la différence entre ces deux situations à partir d'expériences de physique menées dans le volume réduit de la cage d'ascenseur (▷ *principe d'équivalence*), ce qui équivaut à une égalité stricte entre la masse inertielle et la masse grave passive. Du fait de cette égalité, l'observateur serait de la même façon incapable de faire la différence entre la situation où la cage est en chute libre sous l'action de la pesanteur, et celle où elle est isolée.

ascenseur spatial (angl. *space elevator*) Idée, n'ayant pas encore vraiment atteint le stade de projet, qui consiste à tendre un câble entre un point de la surface terrestre et un satellite en orbite géostationnaire (complété par un contrepoids situé au-delà du satellite pour compenser la tension du fil). Une fois ce câble installé, des ascenseurs pourraient y être fixés et l'utiliser pour se hisser vers le haut. Un tel dispositif, s'il s'avérait un jour réalisable, permettrait d'envoyer du matériel dans l'espace à moindre coût. Les obstacles techniques sont à ce jour trop importants (en particulier, les câbles actuels sont trop fragiles et trop lourds).

ascension droite  (angl. *right ascension*) Angle permettant, avec la déclinaison, de repérer la position d'un objet dans le ciel dans le système de coordonnées équatoriales. Elle est souvent notée RA, pour « right ascension » et est l'équivalent de la longitude pour les coordonnées terrestres. Plus précisément, c'est un angle horaire défini à partir du point vernal, augmentant vers l'est, qui s'exprime en heures, minutes et secondes et est compris entre 0 et 24 heures. Ce choix s'explique par le fait que la variation d'ascension droite due à la rotation de la Terre pendant un temps t est alors très proche de ce temps t exprimé en heures. Attention à l'utilisation des angles horaires : puisque 360° correspondent à 24 heures, une seconde d'angle horaire correspond à quinze secondes d'arc (▷ *coordonnées équatoriales*).

▷ [Questions and Answers] #35. *Right ascension*, David A. Cornell, *American Journal of Physics* **64** (1995) p. 203

Aspect (expériences d')  (angl. *Aspect experiments*) Série d'expériences réalisées au début des années 1980 par Alain Aspect (1947–), Philippe Grangier (1957–) et leur équipe à l'Institut d'Optique à Orsay, ayant mis en évidence la violation des inégalités de Bell. Ce résultat a marqué l'histoire de la physique quantique, en montrant que les phénomènes quantiques ne pouvaient pas être décrits par des théories locales à

variables cachées (▷ *paradoxe EPR*). Ces expériences utilisent des sources de photons corrélés (une cascade de désexcitation d'atomes de calcium dans l'expérience originale) et mesurent la corrélation de leur polarisation en deux endroits différents, à des intervalles de temps trop faibles pour que l'information relative au résultat d'une mesure puisse se propager jusqu'à l'autre, même à la vitesse de la lumière. Ces expériences ont depuis été reprises, et ont confirmé le résultat original, ce qui valut à Alain Aspect le prix Nobel de physique 2022.

▷ *Les photons inséparables*, C. Rühla, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **682** (1986) p. 541

▷ *Philosophy enters the optics laboratory : Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982)*, Olival Freire Jr., *Studies in History and Philosophy of Science Part B* **37** (2006) p. 577

associatif (angl. *associative*) Une loi mathématique * est associative si étant donnés trois éléments a , b et c quelconques, on a l'égalité

$$(a * b) * c = a * (b * c),$$

ce que l'on peut alors noter $a * b * c$. Par exemple, l'addition et la multiplication sont des lois associatives, mais pas la soustraction ni la division. Par extension, une structure algébrique munie d'une loi associative est elle-même dite associative.

astate  (angl. *Astatine*) Élément de numéro atomique $Z = 85$, découvert en 1940 par Emilio Segrè (1905–1989), Dale R. Corson et K.R. Mackenzie. Il est représenté par le symbole At. Structure atomique : $[\text{Xe}]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^5$. L'astate fait partie de la série des halogènes dans la classification périodique des éléments. Il est instable et on le produit artificiellement en bombardant du bismuth avec des particules alpha. L'ensemble de la croûte terrestre en contient moins de 30 grammes au total.

▷ *Technetium and Astatine Chemistry*, Edward Anders, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **9** (1959) p. 203

astérisme Ensemble d'étoiles qui dessinent dans le ciel nocturne une forme qui évoque un être humain, un personnage mythologique, un animal, un objet, etc. Le chariot de la Grande Ourse ou le W de Cassiopée sont parmi les exemples les plus célèbres du ciel de l'hémisphère nord. Les étoiles d'un astérisme peuvent se trouver à des distances très différentes de la Terre, et ce n'est parfois que par perspective qu'elles sont associées. Par abus de langage, on les nomme souvent « constellations », même si ce terme a un sens précis légèrement différent.

astéroïde  (angl. *asteroid ; planetoid*) Petit corps du Système solaire dont le diamètre est supérieur ou égal à quelques dizaines de mètres, par opposition aux météoroïdes, et dont l'orbite autour du Soleil est faiblement elliptique, ce qui est l'une de leurs caractéristiques qui les différencient des comètes. Les centaines de milliers d'astéroïdes qui existent, et dont la composition peut être assez variée, se regroupent principalement :

— dans la **ceinture d'astéroïde**, située entre les orbites de Mars et Jupiter, où Giuseppe Piazzi (1746–

1826) découvrit en 1801 Cérès, qui fut le premier astéroïde connu (après avoir tout d'abord été considéré comme une planète), et finalement reclassé en 2006 comme planète naine ;

- sur des orbites qui croisent celle de la Terre, donnant la catégorie des astéroïdes **géocroiseurs** ;
- sur la même orbite que Jupiter : ce sont les astéroïdes troyens ;
- entre Jupiter et Neptune : ce sont les Centaures ;
- dans la ceinture de Kuiper.

- ▷ *Asteroids and Comets*, Tom Gehrels, *Physics Today* **38** (1985) p. 32
- ▷ *The largest asteroids ever*, David W. Hughes, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **32** (1991) p. 133
- ▷ *La naissance des astéroïdes*, Richard Binzel, Antonietta Barucci *et al.*, *Pour la Science* **170** (1991) p. 98
- ▷ *The Historical Unravelling of the Diameters of the First Four Asteroids*, D. W. Hughes, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **35** (1994) p. 331
- ▷ *Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux*, Erik Asphaug, *Pour la Science* **273** (2000) p. 42



FIGURE 14 – astéroïde – Astéroïde 243 Ida (56 km de long), accompagné de Dactyl (à droite), un astéroïde plus petit (1,6 km de diamètre) en orbite autour du premier. Photographie prise par la sonde Galilée.

asthénosphère (angl. *asthenosphere*) Partie plastique du manteau terrestre, d'environ 600 km d'épaisseur et située à une centaine de kilomètres de profondeur.

astigmatisme (angl. *astigmatism*) ► 1. Propriété d'un système optique, en particulier l'œil, de ne pas être stigmatique (▷ *aberration*). Le système forme alors d'un objet ponctuel une tache allongée. L'astigmatisme de l'œil peut être corrigé par des verres correcteurs asymétriques. ► 2. Une des aberrations géométriques. En présence d'astigmatisme, le faisceau issu d'un point objet émerge du système en se focalisant sur deux segments et non plus en un point comme dans le cas paraxial. Ces segments définissent l'**image sagittale** et l'**image tangentielle** ou **image transverse** (voir la figure). L'endroit où le faisceau a une section circulaire définit le **cercle de moindre diffusion**. L'astigmatisme est étroitement

lié à la courbure de champ, et pour une position donnée du plan image, la surface S_T contenant les images tangentielles est trois fois plus éloignée de la surface de Petzval S_P que la surface S_S contenant les images sagittales (pour la figure, ▷ *surface de Petzval*). En l'absence d'astigmatisme, ces trois surfaces sont confondues.

- ▷ *Sir George Biddell Airy, F.R.S. (1801-1892) and the Discovery and Correction of Astigmatism*, John R. Levene, *Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science* **21** (1966) p. 180

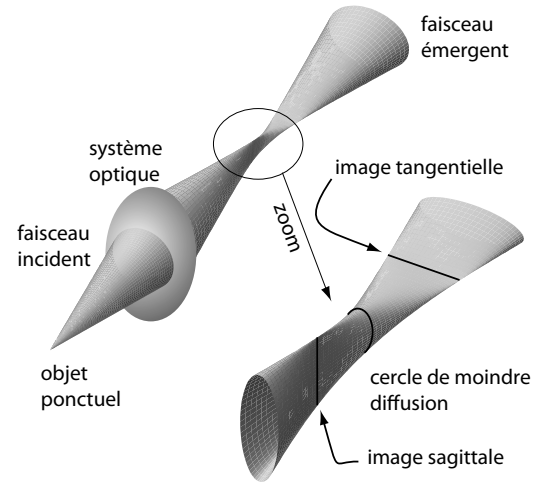


FIGURE 15 – astigmatisme (2) – Forme du faisceau lumineux issu d'une source ponctuelle, après traversée d'un système optique astigmatique.

Aston (courbe d') (angl. *Aston curve*) Courbe représentant l'énergie de liaison par nucléon E_ℓ/A des noyaux atomiques, en fonction du nombre de masse A . Elle présente un maximum pour le fer, les noyaux de plus faible A pouvant libérer de l'énergie en fusionnant, alors que ceux de A plus élevée le peuvent en fissionnant. Cette courbe porte le nom de Francis Aston (1877–1945) qui la détermina avec précision, grâce au spectromètre de masse qu'il avait conçu (▷ *spectromètre de masse*).

astre Nom générique des objets lumineux visibles dans le ciel nocturne, en particulier des planètes et des étoiles.

astroblème (angl. *astrobleme*) Traces résultant de l'impact d'une météorite. Cela peut inclure un cratère, avec lequel l'astroblème est parfois confondu, mais également diverses séquelles souterraines et des éjecta.

astrochimie (angl. *astrochemistry*) Domaine de l'astronomie qui étudie les réactions chimiques et la formation de molécules dans l'espace interstellaire.

- ▷ *Dying stars and reborn dust*, E. E. Salpeter, *Reviews of Modern Physics* **46** (1974) p. 433
- ▷ *Interstellar molecule reactions*, William D. Watson, *Reviews of Modern Physics* **48** (1976) p. 513
- ▷ *The applications of astrochemistry*, D. A. Williams & T. W. Hartquist, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **31** (1990) p. 593

▷ *La première molécule de l'Univers*, Ryan Fortenberry, Pour la Science **512** (2020) p. 22

astrolabe  (angl. *astrolabe*) Instrument de visée permettant de mesurer l'angle entre la position d'un objet sur la voûte céleste (en particulier une étoile) et l'horizon. Il est constitué d'un disque gradué sur lequel une pièce centrale, l'**alidade**, munie d'un viseur peut pivoter. Il a longtemps été utilisé par les astronomes, avant l'invention de la lunette astronomique, ainsi que par les marins qui déterminaient grâce à lui leur latitude.

- ▷ *The Early History of the Astrolabe. Studies in Ancient Astronomy IX*, O. Neugebauer, ISIS **40** (1949) p. 240
- ▷ *Méthode de Gauss et astrolabe à prisme*, Suzanne Débarbat, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **36** (1983) p. 249
- ▷ *L'astrolabe, un joyau mathématique*, Jean-Jacques Dupas, Tangente **139** (2011) p. 26

astrométrie  (angl. *astrometry*) Domaine de l'astronomie, aussi nommé **uranométrie**, qui se dédie à la mesure de la position des astres dans le ciel, en particulier afin de constituer des catalogues précis. Ces catalogues permettent dans certains cas de déterminer la distance à laquelle se trouvent les astres grâce au phénomène de parallaxe, mais aussi parfois de mesurer leur mouvement propre et donc d'en déduire leur vitesse tangentielle, l'effet Doppler ne donnant quant à lui accès qu'à leur vitesse radiale.

- ▷ *Fundamental Systems of Positions and Proper Motions*, Walter Fricke, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **10** (1972) p. 101
- ▷ *Recent Advances in Optical Astrometry*, David G. Monet, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **26** (1988) p. 413
- ▷ *Astrometry and geodesy with radio interferometry : experiments, models, results*, Ojars J. Sovers, John L. Fenselow et al., Reviews of Modern Physics **70** (1998) p. 1393
- ▷ *Microarcsecond Radio Astrometry*, M.J. Reid & M. Honma, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **52** (2014) p. 339
- ▷ 'Land-marks of the universe' : John Herschel against the background of positional astronomy, Stephen Case, Annals of Science **72** (2015) p. 417

astronautique  (angl. *astronautics*) Discipline de la physique qui s'intéresse à la mise en orbite et au mouvement des fusées, satellites et sondes spatiales. Elle fait intervenir des notions peu intuitives, les corps étudiés étant en permanence soumis à l'attraction des corps célestes (la Terre, le Soleil, etc.), ce qui se traduit par l'action de forces d'inertie lorsqu'on étudie le mouvement dans un référentiel tournant (le référentiel terrestre, par exemple).

- ▷ *Satellite Paradox*, Blake D. Mills Jr., American Journal of Physics **27** (1959) p. 115
- ▷ *Navigation-From Canoes to Spaceships*, Charles S. Draper, Proceedings of the American Philosophical Society **104** (1960) p. 113
- ▷ *Why do Earth satellites stay up ?*, Scott Tremaine & Tomer D. Yavetz, American Journal of Physics **82** (2014) p. 769
- *Understanding Space - An Introduction to Astronautics*, Jerry Jon Sellers, (McGraw-Hill, 2005)

astronomie  (angl. *astronomy*) Science dont l'objet est l'observation et la mesure des propriétés physiques des astres (et par extension de tous les phénomènes extra-terrestres). Elle se distingue de l'astrophysique qui s'intéresse à l'explication physique de ces phénomènes. On distingue plusieurs branches de l'astronomie, en fonc-

tion du type d'observation considéré. En particulier, on peut mentionner :

- l'**astronomie visible**, la plus ancienne de ces branches, qui repose sur l'observation dans le domaine des ondes visibles ;
- l'**astronomie infrarouge** qui permet de voir d'autres types d'objets (par exemple les poussières interstellaires ou les objets froids comme les naines brunes), ou de fournir des informations complémentaires sur les étoiles et les galaxies ;
- l'**astronomie radio** (▷ *radioastronomie*) ;
- l'**astronomie gamma**, qui ne peut pas se faire depuis le sol, les rayons gamma étant absorbés par l'atmosphère. C'est une branche assez jeune de l'astrophysique, qui a dû attendre le développement de la conquête spatiale ;
- l'**astronomie gravitationnelle**, une branche naissante qui pourrait permettre d'observer certains objets (par exemple des coalescences d'objets compacts ou des explosions de supernovæ) grâce aux ondes gravitationnelles qu'ils émettent ;
- l'**astronomie neutrino**, elle aussi naissante, qui permet déjà d'observer le cœur du Soleil et qui pourrait permettre d'observer d'autres types d'objets (par exemple les explosions de supernovæ) grâce aux neutrinos qu'ils émettent.

- ▷ *Celestial Navigation*, Philip Van Horn Weems, Proceedings of the American Philosophical Society **98** (1954) p. 270
- ▷ *The Effects of Defence Science on the Advance of Astronomy*, Sir Bernard Lovell, Journal for the History of Astronomy **8** (1977) p. 151
- ▷ *Towards an impressionist picture of the history of astronomy*, L. M. Celnikier, American Journal of Physics **49** (1981) p. 473
- ▷ *Amateurs versus Professionals : The Controversy over Telescope Size in Late Victorian Science*, John Lankford, ISIS **72** (1981) p. 11
- ▷ *Women Astronomers in Britain, 1780-1930*, Peggy Aldrich Kidwell, ISIS **75** (1984) p. 534
- ▷ *Kuhn, Paradigms, and Astronomy : Astronomy as a Case Study of Kuhnian Paradigms*, J. Bruce Brackenridge, Proceedings of the American Philosophical Society **129** (1985) p. 433

astrophysique  (angl. *astrophysics*) Domaine de la physique qui s'intéresse aux phénomènes se produisant dans l'espace. On distingue plusieurs branches, dont voici une liste non exhaustive :

- l'**astrophysique stellaire** porte sur les étoiles, leur structure, leur formation et leur évolution dans le temps ;
- l'**astrophysique galactique** étudie les galaxies, leur composition, leur formation et leurs propriétés ;
- l'**astrophysique relativiste** s'intéresse aux objets compacts comme les trous noirs ou les étoiles à neutrons, ainsi qu'aux phénomènes ayant lieu dans leur entourage ;
- l'**astrophysique nucléaire** traite des situations dans lesquelles la physique nucléaire joue un rôle, elle rejoint en partie la cosmologie (▷ *nucléosynthèse primordiale*), l'astrophysique stellaire (▷ *nucléosynthèse stellaire*) et l'astrophysique relativiste ;
- l'**astrophysique des particules** a pour objet d'étude les phénomènes de haute énergie, dont la description fait appel à la physique des particules ;

— la **cosmologie** s'intéresse à l'Univers dans son ensemble, son évolution au cours du temps, son histoire thermique et la formation des structures cosmiques.

- ▷ *Second-year introductory courses in astrophysics*, E. Schatzman, *European Journal of Physics* **1** (1980) p. 219
- ▷ [*Reference Frame*] *What Problems of Physics and Astrophysics Seem Now to be Especially Important and Interesting?*, Vitaly L. Ginzburg, *Physics Today* **43** (1990) p. 9
- ▷ *Space Astronomy and Astrophysics*, Claude R. Canizares & Blair D. Savage, *Physics Today* **44** (1991) p. 60
- ▷ *Theoretical Astrophysics*, Christopher F. McKee & William H. Press, *Physics Today* **44** (1991) p. 69
- ▷ *Astrophysics*, George Field, *Reviews of Modern Physics* **71** (1999) p. 33

astrophysique des particules  (angl. *astroparticle physics*) Domaine de l'astrophysique dans lequel on considère des phénomènes de haute énergie, dont la description nécessite de faire appel à la physique des particules. Il s'intéresse par exemple à la physique de l'Univers primordial, aux phénomènes astrophysiques violents comme les jets de quasars, aux rayons cosmiques de haute énergie, aux objets compacts ou au problème de la matière noire. Ce domaine est aussi appelé **astro-particule**.

- ▷ *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Andrei Linde, *Physics Today* **40** (1987) p. 61
- ▷ *Cosmology and Particle Physics - a New Synthesis (14th Milne Lecture)*, D. W. Sciama, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **34** (1993) p. 291
- ▷ *History of Astroparticle Physics and its Components*, Vanessa Cirkel-Bartelt, *Living Reviews in Relativity* **11** (2008) p. 1
- ▷ *On the contributions of astroparticle physics to cosmology*, Brigitte Falkenburg, *Studies in History and Philosophy of Science Part B* **46** (2014) p. 97
- ▷ *Particle physics and the cosmic microwave background*, John Carlstrom, Tom Crawford *et al.*, *Physics Today* **68** (2015) p. 28

astrophysique nucléaire  (angl. *nuclear astrophysics*) Branche de l'astrophysique qui s'intéresse aux phénomènes faisant appel à la physique nucléaire : ▷ *nucléosynthèse stellaire*, *nucléosynthèse explosive*, *nucléosynthèse primordiale*, *spallation*.

- ▷ [*Nobel Lecture*] *Experimental and theoretical nuclear astrophysics : the quest for the origin of the elements*, William A. Fowler, *Reviews of Modern Physics* **56** (1984) p. 149
- ▷ *Personal Comments on the History of Nuclear Astrophysics*, Fred Hoyle, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **27** (1986) p. 445
- ▷ *Nuclear Physics Needed for the Theory of Supernovae*, H. A. Bethe, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **38** (1988) p. 1
- ▷ *Nuclear astrophysics with radioactive beams*, C.A. Bertulani & A. Gade, *Physics Reports* **485** (2010) p. 195
- ▷ *Critical Reactions in Contemporary Nuclear Astrophysics*, M. Wiescher, F. Käppeler *et al.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **50** (2012) p. 165

astrosismologie  (angl. *asteroseismology*) Étude des oscillations des étoiles ou des planètes. Ces oscillations, qui peuvent être mesurées précisément grâce à l'effet Doppler, fournissent des informations précieuses sur l'intérieur de la planète ou de l'étoile, de la même manière que les ondes sismiques terrestres nous renseignent sur la structure interne de notre planète. L'astrosismologie du Soleil, nommée **héliosismologie**, a notamment permis de montrer que le « problème des neutrinos solaires » (▷ *neutrinos solaires*) n'était pas dû à une modélisation incorrecte de notre étoile, mais devait admettre

une solution intrinsèque à la physique des particules (▷ *oscillation des neutrinos*). Le satellite COROT, actif de décembre 2006 à juin 2013, était en partie dédié à l'astrosismologie. Il a réalisé les premières observations de nombreux modes d'oscillations d'étoiles autres que le Soleil. On emploie aussi parfois les termes **sismologie stellaire** et **astérosismologie**, mais l'usage de ce dernier n'est pas recommandé.

- ▷ *La sismologie des étoiles*, Sylvie Vaclair & Gérard Vaclair, *La Recherche* **237** (1991) p. 1280
- ▷ *L'astérosismologie : voir battre le cœur des étoiles*, Éric Michel, Michel Auvergne *et al.*, *Pour la Science* **409** (2011) p. 72
- ▷ *Asteroseismology*, Conny Aerts, *Physics Today* **68** (2015) p. 36
- ▷ *Asteroseismology of solar-type stars*, Rafael A. García & Jérôme Ballot, *Living Reviews in Solar Physics* **16** (2019)

asymptote (angl. *asymptote*) Une courbe en admet une seconde comme asymptote si toutes deux deviennent indistinctes lorsqu'une variable permettant de les décrire tend vers une valeur donnée ou vers l'infini. Plus formellement, la différence entre les deux fonctions représentées par ces courbes tend vers zéro quand la variable tend vers la valeur en question. De manière plus générale, on parle du **comportement asymptotique** d'un objet mathématique lorsque l'on s'intéresse à son comportement quand l'une des variables dont il dépend tend vers une valeur fixée ou vers l'infini, une situation fréquente dans le contexte de la physique (▷ *développement asymptotique*, *liberté asymptotique*).

At Symbole de l'élément astate ($Z = 85$).

at Symbole de l'atmosphère technique, unité de pression.

ATHENA  Expérience de physique des particules située au décélérateur d'antiprotons du CERN, de 2002 à 2005. Son objectif était de former des antiatomes d'hydrogène (▷ *antihydrogène*), et elle a effectivement permis d'en produire et d'en confiner plusieurs dizaines de milliers. L'étude de leurs propriétés spectrales avait pour but de chercher une éventuelle asymétrie entre matière et antimatière, en comparant les propriétés des antiatomes à celles des atomes d'hydrogène. La méthode de production des antiatomes est très similaire à celle d'ATRAP, mais les méthodes de détection sont différentes.

- ▷ [*Search and Discovery*] *CERN Group Detects More than 100 Antihydrogens*, Barbara Goss Levi, *Physics Today* **55** (2002) p. 17

ATLAS  Acronyme (un peu forcé) de « A Toroidal LHC Apparatus ». Expérience de physique des particules utilisant un détecteur installé sur le faisceau du LHC au CERN. Elle permet, avec CMS, la découverte du boson de Higgs en 2012. Un autre de ses objectifs scientifiques est la recherche de physique au-delà du modèle standard.

- ▷ *ATLAS, Élémentaire* **2** (2005) p. 58
- ▷ *La traque d'Atlas*, *La Recherche* **424** (2008) p. 36

atm Symbole de l'atmosphère, unité de pression.

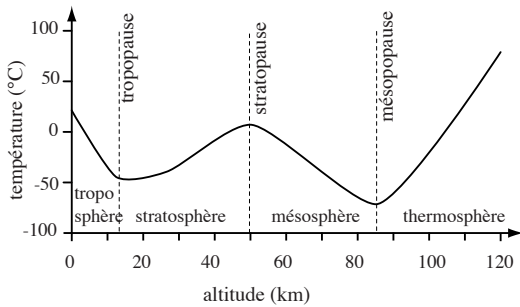


FIGURE 16 – atmosphère (2) – Représentation du découpage de l’atmosphère en régions remarquables.

atmosphère (angl. *atmosphere*) ► 1. Unité de pression (symbole atm) définie par

$$1 \text{ atm} \equiv 1013,25 \text{ hPa} = 1,013\,25 \times 10^5 \text{ Pa}$$

ce qui correspond à la pression exercée par une colonne de mercure de 76 cm au niveau de la mer, à 0 °C. On l’appelle aussi **pression atmosphérique standard**, **pression normale** ou **atmosphère normale**. ► 2. Couche de gaz entourant certains corps célestes, notamment les planètes et les étoiles. L’atmosphère terrestre est essentiellement composée d’air. Elle est divisée en quatre couches concentriques : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère, déterminées à partir du profil, en fonction de l’altitude, de la température et des phénomènes physiques sous-jacents. Au-delà de cette dernière couche atmosphérique, on parle d’exosphère. Dans la troposphère, la température diminue avec l’altitude, principalement en raison du rôle de réservoir thermique joué par la Terre. Dans la stratosphère, la température augmente à cause de l’absorption par l’ozone d’une partie du rayonnement solaire ultraviolet. Plus haut, au niveau de la mésosphère, la température diminue de nouveau en fonction de l’altitude : cela résulte des pertes radiatives non compensées par l’absorption du rayonnement solaire. Enfin, au niveau de la thermosphère, la température augmente jusqu’à 1000-2000 °C par absorption, par le milieu peu dense, du rayonnement solaire très énergétique. Certaines régions de l’atmosphère sont ionisées et forment l’ionosphère.

- *The Early Atmospheres of the Terrestrial Planets*, A. Henderson-Sellers, A. Benlow *et al.*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society **21** (1980) p. 74
- *La genèse de l’atmosphère*, Thomas Staudacher & Philippe Sarda, Pour la Science **168** (1991) p. 44
- *Structure verticale de l’atmosphère neutre - Morphologie de l’ionosphère*, M. Ayachi, Bulletin de l’Union des Physiciens **756** (1993) p. 1037
- *[Quick Study] A physicist’s tour of the upper atmosphere*, John T. Emmert, Physics Today **61** (2008) p. 70
- *Touring the atmosphere aboard the A-Train*, Tristan S. L’Ecuyer & Jonathan H. Jiang, Physics Today **63** (2010) p. 36

atmosphère technique (angl. *technical atmosphere*) Unité de pression (symbole at) définie comme $1 \text{ at} = 1 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$. C’est la pression exercée par une co-

lonne d’eau de 10 mètres de hauteur, au niveau de la mer. Elle est reliée au pascal (Pa) du Système International d’unités par $1 \text{ at} \equiv 98066,5 \text{ Pa}$.

atome  (angl. *atom*) Constituant microscopique de la matière, composé d’un noyau chargé positivement et d’un ou plusieurs électron(s) chargé(s) négativement de telle sorte que l’atome soit globalement de charge électrique nulle. Les atomes peuvent se lier pour former des molécules, ou devenir des ions s’ils perdent ou gagnent des électrons. Plusieurs modélisations classiques des atomes se sont succédées au cours de l’histoire (► *atome de Thomson*, *atome de Nagaoka*, *atome de Lenard*, *atome de Rutherford*), mais la description correcte ne peut se faire que dans le cadre de la physique quantique (► *atome de Bohr*, *atome hydrogénoïde*), le caractère ondulatoire des électrons jouant un rôle clef dans la structure et la stabilité des atomes (la longueur d’onde associée aux électrons est du même ordre de grandeur que la taille des atomes). Il existe différentes espèces d’atomes, une par élément chimique. Dans leur état fondamental, la taille typique des atomes est de l’ordre de l’ångström (10^{-10} m), mais ils peuvent s’étaler sur des distances bien plus grandes quand ils sont dans un état excité (► *atome de Rydberg*). ► voir encadré.

- *Sur la notion de rayon des atomes*, André Guinier, Bulletin de l’Union des Physiciens **74** (1980) p. 439
- *The theory of two-electron atoms : between ground state and complete fragmentation*, Gregor Tanner, Klaus Richter *et al.*, Reviews of Modern Physics **72** (2000) p. 497
- *Insights from the classical atom*, Petar Grujić & Nenad Simović, Physics Today **65** (2012) p. 40
- *Early atomic models – from mechanical to quantum (1904–1913)*, C. Baily, European Journal of Physics H **38** (2013) p. 1
- *Some reflections on the role of semi-classical atomic models in the teaching and learning of introductory quantum mechanics*, Colm O’Sullivan, American Journal of Physics **84** (2016) p. 211

atome de Bohr  (angl. *Bohr atom*) Modèle de l’atome proposé en 1913 par Niels Bohr (1885–1962) pour rendre compte de l’existence des raies d’émission et d’absorption observées dans les spectres atomiques. Il repose sur l’hypothèse selon laquelle les électrons atomiques ne peuvent se mouvoir autour du noyau que sur certaines orbites, parmi l’infinité de trajectoires qu’ils pourraient avoir selon les lois de la mécanique classique : des orbites circulaires ayant des rayons bien définis, qui forment un ensemble discret et correspondent à des valeurs du moment cinétique orbital qui sont des multiples de la constante de Planck réduite. Bohr émit l’hypothèse (qui restait à comprendre) que le long de ces trajectoires, l’électron, bien qu’accélééré, n’émettait pas de rayonnement électromagnétique. Chaque trajectoire étant associée à une énergie particulière, les raies spectrales correspondent à des transitions instantanées d’une trajectoire à une autre, qui s’accompagnent de l’émission ou de l’absorption de la différence d’énergie sous forme électromagnétique. Ce modèle constitue historiquement une transition entre les modèles planétaires et une description quantique des atomes (► *atome de Thomson*, *modèle planétaire de l’atome*). Il est aujourd’hui obsolète, présentant le défaut majeur de s’appuyer sur les lois de la physique classique, mais reste utilisé, malgré ses

atome L'atome, dont le nom vient du mot grec pour « insécable », a longtemps été considéré comme une hypothétique brique élémentaire et indivisible qui constituerait la matière, imaginée dans ce cadre de pensée comme un milieu discontinu. L'existence des atomes fut envisagée dès l'Antiquité, et elle fut une hypothèse de travail fondamentale dans le développement de la mécanique newtonienne (▷ *corpuscule*), permettant aussi d'expliquer divers résultats expérimentaux en chimie ou en physique des gaz à partir de la première moitié du XVIII^e siècle. Alors que l'on considère souvent que la reconnaissance indéniable de l'existence des atomes est due aux travaux d'Einstein datant de 1905 dans lesquels il explique le mouvement brownien à partir de leur supposée réalité, c'est ironiquement à la même époque que le mot atome a pris son sens moderne dans lequel il désigne un constituant de base de la matière, mais qui n'est plus envisagé comme étant élémentaire. À la fin du XIX^e siècle, la découverte des phénomènes d'ionisation des gaz lors de décharges électriques indiqua en effet que l'atome devait être constitué de charges positives et de charges négatives. Plusieurs modèles furent proposés au tournant du XIX^e siècle et du XX^e siècle, permettant de rendre compte du phénomène de résonance optique qui venait d'être mis en évidence (▷ *atome de Thomson*, *atome de Nagaoka*, *atome de Lenard*). Ensuite, dans une désormais célèbre expérience qu'il réalisa au début du XX^e siècle, le physicien néo-zélandais Ernest Rutherford (1871–1937) démontra que la charge positive des atomes et la majeure partie de leur masse sont concentrées dans un volume extrêmement faible (rayon typique de quelques fermis, $\sim 10^{-15}$ m), qu'on appelle depuis le « noyau atomique », chargé positivement et occupant le centre de l'atome. Les électrons sont distribués autour du noyau dans un volume beaucoup plus grand (rayon typique d'un angström, $\sim 10^{-10}$ m). Pour désigner l'ensemble des électrons qui constituent un atome donné, on parle de cortège électronique ou de nuage électronique, ce dernier terme traduisant le fait que les électrons ne peuvent pas être considérés comme décrivant des orbites autour du noyau, mais forment plutôt un ensemble flou aux propriétés quantiques, distribué autour du noyau. Toutefois, ce cortège électronique possède une certaine régularité (▷ *modèle de Bohr*) qui permet d'expliquer les propriétés chimiques des atomes, la distribution des électrons étant elle-même déterminée par la charge du noyau. Ainsi, à chaque charge de noyau correspond un élément chimique. ▷ *élément*, *isotope*, *atome hydrogénoïde*, *rayon atomique*.

imperfections, dans certains enseignements introductifs ou qualitatifs au sujet de la physique quantique.

- ▷ *Bohr's First Theories of the Atom*, John L. Heilbron, *Physics Today* **38** (1985) p. 28
- ▷ *Resisting the Bohr Atom : The Early British Opposition*, Helge Kragh, *Physics in Perspective* **13** (2011) p. 4
- ▷ *Early atomic models – from mechanical to quantum (1904–1913)*, C. Baily, *European Journal of Physics H* **38** (2013) p. 1
- ▷ *How Sommerfeld extended Bohr's model of the atom (1913–1916)*, Michael Eckert, *European Journal of Physics H* **39** (2014) p. 141
- ▷ *Bohr's molecular model, a century later*, Anatoly Svidzinsky, Marlan Scully *et al.*, *Physics Today* **67** (2014) p. 33
- *Niels Bohr and the Quantum Atom – The Bohr Model of Atomic Structure 1913–1925*, Helge Kragh, (Oxford University Press, 2012)

atome exotique  (angl. *exotic atom*) Atome dans lequel on substitue à un ou plusieurs électrons, voire au noyau, une autre particule de même charge électrique. L'électron peut ainsi être remplacé par un muon (▷ *atome muonique*), un pion π^- (▷ *atome mésonique*), un tau, ou un antiproton, par exemple, et le proton par un positon (▷ *positronium*), un antimuon (▷ *muonium*) ou un pion π^+ . Ces systèmes, en général très instables, ont l'intérêt de permettre d'étudier certains effets physiques difficilement observables dans les atomes normaux.

- ▷ *Muonic Atoms and Nuclear Structure*, C. S. Wu & Lawrence Wilets, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **19** (1969) p. 527
- ▷ *Pionic Atoms*, G. Backenstoss, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **20** (1970) p. 467
- ▷ *Kaonic and other Exotic Atoms*, Ryoichi Seki & Clyde E. Wiegand, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **25** (1975) p. 241
- ▷ *The energy levels of muonic atoms*, E. Borie & G. A. Rinker, *Reviews of Modern Physics* **54** (1982) p. 67
- ▷ *Des atomes éphémères, mais exotiques*, Stéphane Boucard & Paul Indelicato, *Pour la Science* **328** (2005) p. 42

atome d'hydrogène  (angl. *hydrogen-like atom*)

Système atomique à deux corps constitué d'un électron de charge $q_e < 0$ et d'un noyau de charge positive $q = -q_e > 0$ (un proton), maintenus en cohésion par attraction électromagnétique. On parle d'**atome hydrogénoïde** dans le cas plus général d'un noyau de charge $q = -Zq_e$, accompagné d'un unique électron. La physique quantique permet de calculer analytiquement ses niveaux d'énergie par un traitement non relativiste (équation de Schrödinger). Dans le référentiel du centre de masse, ils sont donnés par la formule

$$E_n = -\frac{Z^2 \alpha^2}{2n^2} \mu c^2 \approx -13,6 \text{ eV} \times \frac{Z^2}{n^2},$$

où α désigne la constante de structure fine, μ la masse réduite du système (très proche de la masse m_e de l'électron puisque celui-ci est beaucoup moins massif que le noyau), n un entier appelé nombre quantique principal et c la vitesse de la lumière. À chaque valeur de n sont associés $2n^2$ états différents ayant des nombres quantiques j , m_j et m_s distincts (▷ *sous-couche électronique*). On dit que les niveaux sont dégénérés. Le traitement relativiste, reposant sur l'équation de Dirac, donne une expression plus complète, prenant en compte le spin de l'électron,

$$E_{nj} = \frac{\mu c^2}{\sqrt{1 + \frac{(Z\alpha)^2}{\left(n - (j + 1/2) + \sqrt{(j + 1/2)^2 - (Z\alpha)^2}\right)^2}}},$$

où j est un entier appelé **nombre de moment cinétique total**. Les effets relativistes lèvent partiellement

la dégénérescence des niveaux d'énergie. Notons que cette expression n'est plus définie lorsque $Z\alpha > j + 1/2$, soit $Z > 137$ pour $j = 1/2$. Si l'on prend en compte l'extension spatiale du noyau, la limite est repoussée à $Z \gtrsim 180$. Il n'existe pas de formule analogue dans le cas où l'on ne néglige pas les interactions entre les moments magnétiques du noyau et de l'électron, et la nature quantique du champ électromagnétique. Il faut alors se tourner vers des méthodes perturbatives (▷ *déplacement de Lamb, structure hyperfine*). L'existence d'une valeur maximale pour Z semble liée à la possibilité d'une instabilité par création spontanée de paire électron-positon (▷ *polarisation du vide, feynmanium*).

- ▷ *Born-Oppenheimer Treatment of the Hydrogen Atom*, V. K. Deshpande & J. Mahanty, *American Journal of Physics* **37** (1969) p. 823
- ▷ [*Notes and Discussions*] *The relativistic hydrogen atom : A simple solution*, Paul R. Auvil & Laurie M. Brown, *American Journal of Physics* **46** (1978) p. 679
- ▷ *Hydrogen atom in two dimensions*, Jacob Wen-Kuang Huang & Allen Kozycki, *American Journal of Physics* **47** (1979) p. 1005
- ▷ [*Search for Simplicity*] *Quantum mechanics of atoms*, Victor F. Weisskopf, *American Journal of Physics* **53** (1985) p. 206
- ▷ *Theory of light hydrogenlike atoms*, Michael I. Eides, Howard Grotch, Valery A. Shelyuto, *Physics Reports* **342** (2001) p. 63

atome de Lenard (angl. *Lenard atomic model*) Modèle atomique proposé en 1903 par Philipp Lenard (1862–1947), selon lequel l'atome serait constitué de doublets (qu'il baptisa **dynamides**) de charges électriques positives et négatives, occupant chacun un volume beaucoup plus petit que l'atome entier. Ce modèle, élaboré à la suite des observations de Lenard sur l'interaction des rayons cathodiques avec la matière, fut abandonné au profit de celui de Rutherford, mais il introduisit l'idée que l'atome puisse être constitué essentiellement de vide.

atome mésonique (angl. *mesonic atom*) Atome exotique dans lequel un électron a été remplacé par un méson, en particulier un pion π^- ou un kaon K^- . Les mésons étant sensibles à l'interaction forte, contrairement aux électrons, les atomes mésoniques sont utilisés pour tester les théories décrivant cette interaction (▷ *chromodynamique quantique*).

- ▷ *Des atomes éphémères, mais exotiques*, Stéphane Boucard & Paul Indelicato, *Pour la Science* **328** (2005) p. 42

atome muonique (angl. *muonic atom*) Atome exotique dans lequel un électron est remplacé par un muon. La masse du muon étant environ 207 fois plus importante que celle de l'électron, le rayon de Bohr d'un atome muonique est 207 fois plus petit que celui d'un atome usuel. Son spectre est par conséquent plus sensible à la distribution de charge du noyau, ce qui permet par son analyse de mesurer plus précisément certaines propriétés de ce dernier et de tester notre compréhension des interactions fondamentales.

- ▷ *The energy levels of muonic atoms*, E. Borie & G. A. Rinker, *Reviews of Modern Physics* **54** (1982) p. 67
- ▷ *Des atomes éphémères, mais exotiques*, Stéphane Boucard & Paul Indelicato, *Pour la Science* **328** (2005) p. 42
- ▷ *Muonic Hydrogen and the Proton Radius Puzzle*, Randolph Pohl, Ronald Gilman *et al.*, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **63** (2013) p. 175

atome de Nagaoka (angl. *Nagaoka atom*) Modèle atomique de type planétaire proposé en 1904 par Hantaro Nagaoka (1865–1950). Dans ce modèle, les électrons orbitent autour d'un noyau positif, sous l'action de l'attraction électrostatique, et forment un anneau similaire à celui de Saturne. Cet anneau n'est stable que si le noyau est suffisamment massif, comme l'avait auparavant montré James Clerk Maxwell (1831–1879) dans le cas gravitationnel, pour Saturne. Ce modèle fut abandonné au profit de celui de Rutherford en 1911 (▷ *atome de Rutherford*).

- ▷ *Rutherford, Nagaoka, and the nuclear atom*, P.M. Heimann, *Annals of Science* **23** (1967) p. 299

atome primitif (angl. *primeval atom*) Scénario cosmologique proposé en 1931 par Georges Lemaître (1894–1966), selon lequel l'Univers serait né de l'explosion (ou plutôt de la désintégration quantique) d'un corps très dense et très chaud, constitué de tous les nucléons aujourd'hui présents dans l'Univers, et qu'il appela « atome primitif ». L'hypothèse d'un Univers initialement dense et chaud s'est avérée très fructueuse, mais on sait aujourd'hui qu'un noyau atomique géant ne décrit pas l'Univers primordial, celui-ci était trop chaud pour que les nucléons eux-mêmes puissent exister (▷ *Big-Bang*). D'autre part, l'expansion cosmologique n'est pas une explosion, et, comme l'avait bien compris Lemaître, l'évolution initiale de son atome primitif devait également correspondre à la « naissance » de l'espace et du temps, pour que l'idée soit compatible avec la relativité générale. Lemaître n'avait cependant pas les moyens de formaliser certaines de ses intuitions, qui devraient être décrites par une théorie quantique de la gravitation.

- ▷ *The Context of Discovery : Lemaître and the Origin of the Primeval-Atom Universe*, Helge S. Kragh & Dominique Lambert, *Annals of Science* **64** (2007) p. 445

atome de Rutherford (angl. *Rutherford atomic model*) Modèle de l'atome consistant en un noyau chargé positivement, autour duquel des électrons chargés positivement orbitent, sous l'action de la force électrostatique. Le noyau n'occupe qu'une très faible partie du volume de l'atome. Ce modèle fut soutenu à partir de 1911 par Ernest Rutherford (1871–1937), suite aux résultats des expériences de diffusion qu'il dirigea (▷ *expérience de Geiger-Marsden*), mais il avait déjà été envisagé par Jean Perrin (1870–1942) quelques années auparavant. Ce modèle n'est pas correct, car, d'après les lois de l'électromagnétisme, les électrons devraient perdre de l'énergie par rayonnement sur une échelle de temps très courte : l'atome de Rutherford est instable. Ce modèle classique doit être abandonné et l'atome doit être décrit par la théorie quantique (▷ *atome*).

- ▷ *Rutherford, Nagaoka, and the nuclear atom*, P.M. Heimann, *Annals of Science* **23** (1967) p. 299
- ▷ *The scattering of α and β particles and Rutherford's atom*, John L. Heilbron, *Archive for history of exact sciences* **4** (1968) p. 247
- ▷ *Rutherford's Satellite Model of the Nucleus*, Roger H. Stuewer, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **16** (1986) p. 321

atome de Rydberg (angl. *Rydberg atom*) Nom donné aux états atomiques dans lesquels un des électrons

occupe un niveau dont le nombre quantique principal n est élevé. La distribution électronique correspondante s'étendant sur une distance $n^2 a_0$ où a_0 désigne le rayon de Bohr, la taille de l'atome peut atteindre quelques microns pour $n \gtrsim 100$. Lorsque le nombre quantique orbital ℓ a la valeur maximale $\ell = n - 1$, la région dans laquelle la densité de probabilité de l'électron est appréciable prend alors la forme d'une couronne de rayon $r = n^2 a_0$, similaire à la trajectoire obtenue par les lois de la mécanique classique. L'étude des propriétés de cet atome permet de tester le principe de correspondance. L'état quantique associé est appelé **état de Rydberg**.

- ▷ [Resource Letter] *AHRs-1 : Atoms in high Rydberg states*, F. B. Dunning, American Journal of Physics **53** (1985) p. 944
- ▷ *Classical view of the properties of Rydberg atoms : Application of the correspondence principle*, T. P. Hezel, C. E. Burkhardt et al., American Journal of Physics **60** (1992) p. 329
- ▷ *Les frontières du monde quantique*, Michael Nauenberg, Carlos Stroud et al., Pour la Science **202** (1994) p. 44
- ▷ [Search and Discovery] *Experiments show blockading interaction of Rydberg atoms over long distances*, Bertram Schwarzschild, Physics Today **62** (2009) p. 15
- ▷ [Search and Discovery] *Neutral atoms are entangled in hyperfine states via Rydberg blockade*, Johanna Miller, Physics Today **63** (2010) p. 13
- ▷ *Quantum information with Rydberg atoms*, M. Saffman, T. G. Walker et al., Reviews of Modern Physics **82** (2010) p. 2313

atome de Thomson  (angl. *Thomson atomic model*; *plum pudding model*) Modèle atomique proposé en 1904 par Joseph Thomson (1856–1940) selon lequel l'atome serait constitué d'une distribution étendue de charge positive dans laquelle se répartissent des électrons de taille beaucoup plus petite. Ce modèle est aussi appelé, par analogie, **modèle du far aux pruneaux** ou **modèle du pain aux raisins**, la pâte et la garniture représentant respectivement la charge positive et les charges négatives des électrons. Les vibrations des électrons dans le potentiel créé par la charge positive permettaient de rendre compte de certaines observations spectrales. Ce modèle fut remplacé par celui de Rutherford, après la découverte du noyau atomique (▷ *expérience de Rutherford*).

- ▷ *Quantization of the Thomson atom*, Jean Sivardière, American Journal of Physics **52** (1984) p. 35
- ▷ *J. J. Thomson and the Chemical Atom : From Ether Vortex to Atomic Decay*, S. B. Sinclair, Ambix **34** (1987) p. 89
- ▷ *Scientific biographies revisited : Thomson's electrons and Bohr's quantum atoms*, Ana Simões, Ambix **61** (2014) p. 95

atomistique (angl. *atomistics*) Domaine de la physique s'intéressant aux propriétés des atomes (en particulier leurs niveaux d'énergie) en s'appuyant sur la physique quantique. On parle aussi de **physique atomique**.

ATRAP  Expérience de physique des particules située au décélérateur d'antiprotons du CERN, depuis 2002. Son objectif est de former des antiatomes d'hydrogène (▷ *antihydrogène*), et elle a effectivement permis d'en produire et d'en confiner plusieurs dizaines de milliers. L'étude de leurs propriétés spectrales a pour but de chercher une éventuelle asymétrie entre matière et antimatière, en comparant les propriétés des antiatomes à celles des atomes d'hydrogène. La méthode de production des antiatomes est très similaire à celle d'ATHENA,

mais les méthodes de détection sont différentes. Celles d'ATRAP permettent notamment de déterminer le niveau quantique dans lequel se trouvent les antiatomes.

- ▷ [Search and Discovery] *Second CERN Group Produces Cold Atoms of Antihydrogen*, Barbara Goss Levi, Physics Today **56** (2003) p. 14

atténuation (angl. *attenuation*) Diminution de l'intensité d'une onde ou d'un signal, suite à des phénomènes de pertes. On quantifie souvent l'atténuation en introduisant le rapport I_1/I_0 entre l'intensité finale I_1 l'intensité initiale I_0 , ou le rapport correspondant A_1/A_0 entre les amplitudes. Cette quantité est inférieure à 1, par définition. On l'exprime généralement en décibels :

$$\mathcal{A}_I = 10 \log_{10}(I_1/I_0) \quad \text{ou} \quad \mathcal{A}_A = 20 \log_{10}(A_1/A_0).$$

La première définition est utilisée lorsque le signal a la grandeur d'une énergie, tandis que la seconde est adaptée au calcul d'atténuations se rapportant à des amplitudes de signaux (tension, champ électrique, etc.).

atto- (angl. *atto-*) Préfixe (symbole **a**) indiquant le sous-multiple 10^{-18} d'une unité. Par exemple, une attoseconde (1 as) représente 10^{-18} s.

attoseconde  (angl. *attosecond*) Sous-multiple de la seconde, valant 1 as = 10^{-18} s. C'est l'échelle de temps sur laquelle se font les mouvements électroniques dans les atomes et les molécules.

- ▷ [Review] *Attosecond science*, P. B. Corkum & Ferenc Krausz, Nature Physics **3** (2007) p. 381
- ▷ *The Attosecond Revolution*, P.B. Corkum & Zenghu Chang, Optics and Photonics News **19** (2008) p. 24
- ▷ *Attosecond physics*, Ferenc Krausz & Misha Ivanov, Reviews of Modern Physics **81** (2009) p. 163

attracteur  (angl. *attractor*) Sous-espace de l'espace des phases vers lequel tendent les trajectoires de certains systèmes dynamiques dissipatifs. Il peut s'agir d'un simple point, d'une courbe à une dimension, ou d'une surface de dimension plus élevée. Le nom vient du fait que les trajectoires semblent « attirées » vers cette surface. Il s'agit de la trajectoire suivie une fois passé le régime transitoire (le rôle de la dissipation est essentiel pour que le régime transitoire puisse s'atténuer). Dans certains cas, l'attracteur est un objet fractal et non une courbe ordinaire. Il s'agit alors de systèmes chaotiques, dont l'évolution est très sensible aux conditions initiales, et l'on parle d'**attracteur étrange**. C'est le cas par exemple de l'attracteur de Lorenz, dont la découverte montra que l'on pouvait obtenir des comportements chaotiques avec des systèmes relativement simples, en l'occurrence avec trois degrés de liberté. On rencontre des attracteurs dans plusieurs situations physiques : l'attracteur de Hénon en dynamique gravitationnelle, l'attracteur de Rössler en thermodynamique, l'attracteur de Frey en cosmologie ou encore l'attracteur de Ruelle-Packard-Takens dans la fuite des robinets.

- ▷ *Strange attractors*, David Ruelle, The Mathematical Intelligencer **2** (1980) p. 126
- ▷ *Strange attractors and chaotic motions of dynamical systems*, Edward Ott, Reviews of Modern Physics **53** (1981) p. 655
- ▷ *Ergodic theory of chaos and strange attractors*, J.-P. Eckmann & D. Ruelle, Reviews of Modern Physics **57** (1985) p. 617

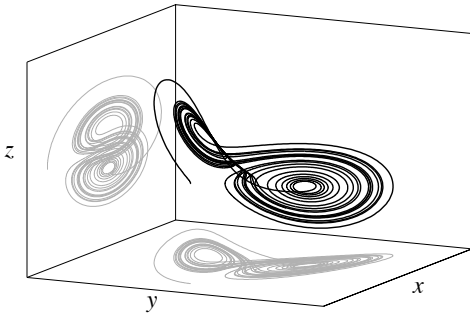


FIGURE 17 – **attracteur de Lorenz** – Représentation tridimensionnelle de l'attracteur de Lorenz. On a aussi indiqué les projections de la courbe sur deux plans (traits fins) pour aider à visualiser son aspect tridimensionnel.

attracteur de Lorenz (angl. *Lorenz attractor*)

Attracteur découvert par le météorologue Edward Lorenz (1917–2008) lors de ses modélisations du mouvement des masses atmosphériques. En étudiant l'évolution d'une couche de fluide (l'atmosphère dans son cas) en contact avec deux thermostats, le plus chaud sur la face inférieure (▷ *instabilité de Rayleigh-Bénard*), il parvint en 1963 à un système de la forme

$$\begin{cases} \dot{x} = -\beta x + yz \\ \dot{y} = \sigma(z - y) \\ \dot{z} = -xy + \rho y - z, \end{cases}$$

où la variable y représente la vitesse de convection du fluide, x et z les gradients horizontaux et verticaux de température, le paramètre σ est le nombre de Prandtl, ρ le nombre de Rayleigh et β un facteur géométrique. Résolvant ce système d'équations à l'aide d'un ordinateur, Lorenz découvrit qu'il pouvait présenter un comportement chaotique, l'évolution changeant grandement pour une faible différence dans les conditions initiales (liée aux erreurs d'arrondi dans sa découverte fortuite). Par ailleurs, quand le paramètre ρ a une valeur assez élevée, le système est attiré dans l'espace des phases par un attracteur étrange qu'on appelle depuis « attracteur de Lorenz ». Par exemple, les valeurs $\sigma = 10$, $\rho = 28$ et $\beta = 8/3$ conduisent à ce comportement (voir la figure).

- ▷ *What's new on Lorenz strange attractors*, Marcelo Viana, *The Mathematical Intelligencer* **22** (2000) p. 6
- ▷ *Crocheting the Lorenz manifold*, Hinke M. Osinga & Bernd Krauskopf, *The Mathematical Intelligencer* **26** (2004) p. 25
- ▷ [*Histoire des Sciences*] *Cinquante ans de chaos*, Adilson Motter & David Campbell, *Pour la Science* **433** (2013) p. 118

attraction (force d') (angl. *attraction force*)

Force que deux corps exercent l'un sur l'autre et qui tend à les rapprocher. Par exemple, la force gravitationnelle entre deux masses quelconques et la force électrique entre deux charges de signes opposés sont attractives. Antonyme : ▷ *force de répulsion*.

- ▷ *La mécanique de J.-A. Borelli et la notion d'attraction*, C. Serus, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **1** (1947) p. 9

Atwood (nombre d') (angl. *Atwood number*)

Nombre intervenant dans l'étude de l'instabilité de Rayleigh-Taylor entre deux fluides de densité ρ_1 et $\rho_2 < \rho_1$. Il est défini par

$$A \equiv \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}.$$

Au Symbole de l'élément or ($Z = 79$).

aube (angl. *dawn*) Phase de la journée précédant le lever du Soleil. Selon l'élévation e du Soleil sous l'horizon, on en distingue plusieurs phases :

- l'**aube astronomique**, lorsque $-18^\circ \leq e \leq -12^\circ$;
- l'**aube nautique**, lorsque $-12^\circ \leq e \leq -6^\circ$;
- l'**aube civile**, lorsque $-6^\circ \leq e \leq 0^\circ$.

audition (angl. *hearing*) Nom générique donné aux

phénomènes concernant la perception du son par l'oreille humaine. Ceux-ci font intervenir des phénomènes de résonance dans l'oreille interne, et des notions d'adaptation d'impédance au niveau de l'oreille et du tympan.

- ▷ *Le traitement du son dans l'oreille interne*, Rémy Pujol, *Pour la Science* **154** (1990) p. 20
- ▷ *Auditory physics. Physical principles in hearing theory. III*, E. de Boer, *Physics Reports* **203** (1991) p. 125
- ▷ *The Ear's Gears : Mechano-electrical Transduction by Hair Cells*, A. J. Hudspeth & Vladislav S. Markin, *Physics Today* **47** (1994) p. 22
- ▷ *The Logarithmic Ear : Pietro Mengoli's Mathematics of Music*, Benjamin Wardhaugh, *Annals of Science* **64** (2007) p. 327
- ▷ *Changeable Ears : Ernst Mach's and Max Planck's Studies of Accommodation in Hearing*, Alexandra Hui, *Osiris* **28** (2013) p. 119

Auger (effet) (angl. *Auger effect*) Émission d'un

électron lors de la désexcitation d'un atome. Plus précisément, l'ionisation d'un atome par un rayonnement très énergétique peut conduire à l'éjection d'un électron de cœur. L'ion ainsi obtenu est instable et subit rapidement une transition spontanée, un électron périphérique venant occuper l'orbitale de cœur vacante. La conservation de l'énergie impose que cette transition s'accompagne d'une émission. Il peut s'agir de rayonnement, mais aussi de l'émission d'un des électrons périphériques. C'est cette dernière situation qui constitue l'effet Auger. Le second électron émis est appelé **électron Auger**. La mesure de son énergie permet de caractériser l'atome dont il est issu, et cet effet est mis à profit dans la spectroscopie Auger, grâce à laquelle on analyse la composition des surfaces. Ce phénomène fut découvert en 1923 par Lise Meitner (1878–1968) puis redécouvert en 1925 par Pierre Auger (1899–1993).

Auger (expérience) Expérience de détection

de rayons cosmiques de haute énergie, située en Argentine. Elle combine deux types de détecteurs : d'une part, 1600 cuves remplies d'eau et réparties sur 3000 km² permettent de détecter la gerbe de particules amorcée par un rayon cosmique incident, grâce au rayonnement Cherenkov produit dans l'eau. D'autre part, quatre télescopes visualisent directement la trace fluorescence laissée par la particule incidente dans l'atmosphère. Cette ex-

piérence, qui a pris ses premières données en 2003, a pu mettre en évidence la coupure GZK.

- ▷ *L'Observatoire Pierre Auger à la quête des énergies extrêmes*, Cyril Lachaud, Tristan Beau *et al.*, Images de la Physique (2006) p. 35
- ▷ *AUGER, Élémentaire* **3** (2006) p. 22

aurore polaire ☞ (angl. *aurora*) Apparition de lueurs colorées, parfois très spectaculaires, dans la partie haute de l'atmosphère terrestre. Cette émission lumineuse est due à l'ionisation des molécules de l'air par des particules chargées, principalement des électrons et des protons, qui proviennent du Soleil ou de la magnétosphère (▷ *orage magnétique*, *sous-orage magnétique*). Ce phénomène complexe, encore imparfaitement compris, se produit la plupart du temps à des latitudes élevées et n'est que très rarement observé aux basses latitudes car les particules chargées sont déviées vers les pôles magnétiques de la Terre par son champ magnétique (▷ *coupure géomagnétique*). On parle d'**aurorales boréales** dans l'hémisphère nord, et d'**aurorales australes** dans l'hémisphère sud. Des aurorales peuvent aussi être observées sur la plupart des autres planètes du Système solaire ; leur répartition spatiale permet alors d'obtenir des informations sur le champ magnétique de ces planètes. Les aurorales polaires ont notamment été étudiées par Kristian Birkeland (1867–1917) à l'aide de sa terrella. L'expression « aurore boréale » est présente dans les écrits de Pierre Gassendi (1592–1655), mais il semblerait qu'elle ait été introduite auparavant par Galilée (1564–1642).

▷ voir encadré.

- ▷ *Les aurorales polaires*, Christian Larcher, Cahiers Clairaut **103** (2003) p. 2
- ▷ *[Quick Study] How do auroras form ?*, Robert J. Strangeway, Physics Today **61** (2008) p. 68
- ▷ *The Spectrum of the Aurora Borealis : From Enigma to Laboratory Science*, Helge Kragh, Historical Studies in the Natural Sciences **39** (2009) p. 377
- ▷ *Les aurorales martiennes*, Jean Liliensten, François Leblanc *et al.*, Cahiers Clairaut **127** (2009) p. 16
- ▷ *[Histoire des Sciences] Halley, Mairon et les aurorales boréales*, Stéphane Le Gars, Pour la Science **415** (2012) p. 80

auto-adjoint (angl. *self-adjoint*) Un opérateur linéaire est **auto-adjoint** s'il est égal à son adjoint, $\hat{A}^\dagger = \hat{A}$. Dans le cas d'un opérateur agissant sur un espace de dimension finie, et qui peut donc être représenté par une matrice, cette notion est équivalente à celle d'hermiticité (▷ *hermitien*). Cependant, si l'espace est de dimension infinie, la notion d'adjoint est plus restrictive que celle d'hermitien car elle requiert non seulement l'égalité de l'action des opérateurs, mais aussi celle de leurs domaines de définition. En physique quantique, on fait souvent l'abus de langage consistant à considérer comme synonymes les notions d'auto-adjoint et d'hermitien, ce qui est souvent sans grande conséquence, mais en toute rigueur, les **observables** sont associées à des opérateurs auto-adjoints, et non pas seulement hermitiens. Omettre cette nuance peut mener à des erreurs de raisonnement ou des pseudo-paradoxes, car, dans un espace de Hilbert de dimension infinie, ce sont les opérateurs auto-adjoints, et non pas seulement hermitiens, qui admettent des bases orthogonales associées à des valeurs propres réelles.

autocollimation ☞ (angl. *autocollimation*) Méthode expérimentale permettant de positionner une source lumineuse au foyer objet d'une lentille convergente à l'aide d'un écran et d'un miroir. Pour cela, on place un écran percé d'un trou au niveau de la source, puis on renvoie la lumière ayant traversé la lentille vers cette lentille, grâce au miroir. L'autocollimation consiste à chercher la position de la lentille telle que l'image du trou se forme sur l'écran de façon nette. Le foyer objet de la lentille se trouve alors à la position de la source lumineuse. La mesure de la distance entre la source et la lentille peut ensuite être utilisée pour évaluer la distance focale de cette dernière.

- ▷ *Quelques problèmes posés par la mesure des distances focales*, Roland Jouanisson, Bulletin de l'Union des Physiciens **75** (1981) p. 805

autocorrélation (angl. *autocorrelation*) Corrélation entre une grandeur stochastique A considérée à deux endroits ou deux instants différents. Le **coefficient d'autocorrélation** peut ainsi être défini comme

$$c(\vec{r}, \vec{r}') \equiv \langle A(\vec{r})A^*(\vec{r}') \rangle \quad \text{ou} \quad c(t, t') \equiv \langle A(t)A^*(t') \rangle,$$

où A^* désigne le complexe conjugué de A , dans le cas où A est une grandeur complexe, et où la notation $\langle \dots \rangle$ désigne la valeur moyenne, au sens statistique du terme. On définit aussi le coefficient d'autocorrélation pour un signal périodique, ou plus généralement pour un signal stationnaire (dont les propriétés statistiques ne dépendent pas du temps), selon

$$c(\vec{p}) \equiv \langle A(\vec{r})A^*(\vec{r} + \vec{p}) \rangle_{\vec{r}} \quad \text{ou} \quad c(\tau) \equiv \langle A(t)A^*(t + \tau) \rangle_t,$$

où la notation $\langle \dots \rangle$ indique cette fois la valeur moyenne, au sens de l'intégrale sur $\vec{r}$ ou t . Le coefficient d'autocorrélation intervient dans de nombreux contextes, par exemple en optique pour caractériser le degré de cohérence spatiale ou temporelle d'une onde lumineuse, ou en physique statistique pour décrire les fluctuations statistiques de grandeurs thermodynamiques. Sa transformée de Fourier est la **densité spectrale de puissance**.

auto-diffractant ☞ (angl. *self-diffracting*) Qualifie un faisceau lumineux de largeur finie et dont la distribution d'intensité est la même dans tous les plans perpendiculaires à la direction de propagation. La figure de diffraction obtenue en appliquant le principe de Huygens-Fresnel sur un de ces plans redonne, en aval, une distribution d'intensité identique. On utilise parfois le terme **non-diffractant**, déconseillé car il suggère à tort une absence de diffraction.

- ▷ *Metamaterial hyperlens demonstration of propagation without diffraction*, Simon Fleming, American Journal of Physics **85** (2017) p. 173

autofocalisation ☞ (angl. *self-focusing*) Modification de l'indice de réfraction d'un milieu par le passage d'une onde lumineuse (en particulier issue d'un laser), conduisant à une focalisation du faisceau. Il s'agit d'un phénomène non-linéaire, dans lequel la dispersion angulaire du faisceau est limitée par le passage même de ce faisceau dans le milieu.

aurore polaire Il existe deux grandes catégories d’aurores polaires qui se distinguent avant tout par leur nature globale ou locale, laquelle découle du phénomène à leur origine. Les premières sont associées à des orages magnétiques et sont donc provoquées par des particules directement issues du Soleil (▷ *vent solaire*, *éruption solaire*). Les aurores de ce type ont une dynamique relativement lente et durent en général plusieurs jours. Elles se produisent sur une région vaste, en forme d’anneau centré sur l’un des deux pôles magnétiques terrestres et situé à une latitude magnétique d’autant plus faible, c’est-à-dire d’autant plus près de l’équateur magnétique, que l’éruption solaire était intense. On peut même parfois en observer près des tropiques (▷ *événement Carrington*). La fréquence de telles aurores est naturellement directement corrélée à l’activité solaire : elles sont quasiment inexistantes lors des minima. Les aurores du second type sont associées à des sous-orages magnétiques et donc provoquées par des particules issues de la magnétosphère terrestre, notamment de la magnétoqueue. Elles sont bien plus fréquentes et leur apparition n’est pas corrélée à l’activité solaire. Elles évoluent en outre plus rapidement et durent quelques heures à peine. D’énergies très variables, elles se produisent dans une région bien moins étendue, quasiment toujours à l’intérieur de la **zone aurorale** de l’un ou l’autre des pôles magnétiques, c’est-à-dire quelque part dans un anneau large de quelques degrés de latitude magnétique, et situé à environ 10 à 20 degrés du pôle magnétique sur lequel il est centré. Le possible lien entre les deux types d’aurores est encore sujet à discussions chez les spécialistes.

- ▷ [Repère] *Concentré de laser dans un plasma*, Gérard Mainfray, Thierry Auguste *et al.*, La Recherche **280** (1995) p. 32
- ▷ [Search and Discovery] *Intense X-Shaped Pulses of Light Propagate Without Spreading in Water and Other*, Charles Day, Physics Today **57** (2004) p. 25

autogravitant (angl. *self-gravitating*) Qualifie un ensemble de corps liés par les forces gravitationnelles qu’ils exercent les uns sur les autres. Ces corps peuvent être répartis de manière discrète ou continue. Par exemple, le Système solaire, les amas globulaires, les galaxies, mais aussi les étoiles ou les planètes, sont des systèmes autogravitants, les premiers étant considérés comme discrets et les seconds comme continus.

auto-inductance (angl. *self-inductance*) Caractéristique d’un composant inductif, souvent notée *L* et définie comme le rapport entre le flux ϕ du champ magnétique à travers le composant et le courant *I* qui le parcourt (▷ *inductance*).

auto-induction  (angl. *self-induction*) Apparition d’une force électromotrice induite *e* dans une spire de courant, due à la variation du champ magnétique créé par le courant *I* qui circule dans cette spire. Ce phénomène est décrit par la loi

$$e = -L \frac{dI}{dt}$$

où *L* désigne une caractéristique de la spire nommée inductance. Il a été découvert en 1834 par Joseph Henry (1797–1878).

- ▷ D. E. Hughes *Self-induction and the Skin-Effect*, D. W. Jordan, Centaurus **26** (1982) p. 123
- ▷ *The adoption of self-induction by telephony, 1886–1889*, D.W. Jordan, Annals of Science **39** (1982) p. 433

aval (angl. *downstream*) Dans un écoulement, désigne la zone située après la région à laquelle on s’intéresse. Antonyme : ▷ *amont*.

avance du périhélie de Mercure  (angl. *perihelion advance of Mercury*) La trajectoire de Mercure autour du Soleil forme une courbe proche d’une ellipse, dont le périhélie avance d’un tour sur l’autre. Cette

avance fut mise en évidence en 1859 par Urbain Le Verrier (1811–1877), puis mesurée avec précision dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Cette mesure donne une valeur de 5600″/siècle (secondes d’arc par siècle), dont l’essentiel (environ 5026″/siècle) provient du mouvement du point de référence utilisé pour mesurer les angles (▷ *point vernal*). Le reste du décalage peut s’expliquer en partie par les perturbations gravitationnelles des autres planètes (pour environ 531″/siècle), mais cette explication laisse encore un excès de 43″/siècle. Quand ils le découvrirent, les astronomes tentèrent de trouver de nouveaux corps célestes (planète, astéroïdes, etc.) pour l’expliquer, mais sans succès (▷ *Vulcain*). C’est finalement l’avènement de la relativité générale qui résolut ce problème, au début du XX^e siècle : l’application de la mécanique newtonienne conduit à une erreur dans le calcul de la trajectoire, par rapport au résultat correct (en accord avec les observations) fourni par la relativité générale.

- ▷ *Nonrelativistic contribution to Mercury’s perihelion precession*, Michael P. Price & William F. Rush, American Journal of Physics **47** (1979) p. 531
- ▷ *Precession of the perihelion of Mercury*, Daniel R. Stump, American Journal of Physics **56** (1988) p. 1097
- ▷ *Precession of the perihelion of Mercury’s orbit*, M. G. Stewart, American Journal of Physics **73** (2005) p. 730
- *Mercury’s perihelion from Le Verrier to Einstein*, N. T. Roseveare, (Clarendon Press - Oxford, 1982)
- *The Hunt for Vulcan – How Albert Einstein destroyed a planet and deciphered the Universe*, Thomas Levenson, (Head of Zeus, 2015)

corps	secondes d’arc/siècle
Mercure	43,03
Vénus	8,6
Terre	3,8
Icare (astéroïde)	10,3

TABLE 5 – Contribution relativiste à l’avance du périhélie de quelques corps du Système solaire.

avance du périhélie  (angl. *perihelion advance*) Décalage au cours du temps du périhélie de la trajectoire elliptique d'un corps céleste, en particulier d'une planète autour du Soleil, du fait de la précession de leur orbite. On introduit généralement l'angle duquel a tourné le périhélie au bout d'un temps donné, en l'exprimant en secondes d'arc par siècle. Ce décalage a plusieurs origines dont les principales sont les perturbations dues aux autres planètes et le caractère non newtonien (au sens « pas exactement en $1/r^2$ ») du champ de gravité du Soleil, et ce du fait de sa non-sphéricité et d'effets relativistes. La contribution relativiste est très petite devant les autres, mais elle a joué un rôle important dans l'acceptation de la théorie de la relativité générale (▷ *avance du périhélie de Mercure*). Cumulée pendant une période, elle s'écrit

$$\Delta\phi = \frac{6\pi G_N M_\odot}{a(1-e^2)c^2} = \frac{3\pi R_s}{a(1-e^2)},$$

où a désigne le demi-grand axe de l'orbite, e l'excentricité, G_N la constante de Newton, $M_\odot$ la masse du Soleil, c la vitesse de la lumière et R_s le rayon de Schwarzschild du Soleil. Cette contribution relativiste est aujourd'hui vérifiée pour plusieurs corps célestes (voir la table).

- ▷ *Elementary theory of perihelion precession*, B. Davies, American Journal of Physics **51** (1983) p. 909
- ▷ *Precession of elliptic orbits*, Jean Sivardièrre, American Journal of Physics **52** (1984) p. 909
- ▷ *Periastron precession in general relativity*, N. Gauthier, American Journal of Physics **55** (1987) p. 85
- ▷ *Elementary derivation of the advance of the perihelion of a planetary orbit*, S. Cornbleet, American Journal of Physics **61** (1993) p. 650
- ▷ *Advance of perihelion*, Kin-Ho Lo, Kenneth Young et al., American Journal of Physics **81** (2013) p. 695
- ▷ *Einstein's perihelion formula and its generalization*, Maurizio M. D'Eliseo, American Journal of Physics **83** (2015) p. 324
- *Mercury's perihelion from Le Verrier to Einstein*, N. T. Roseveare, (Clarendon Press - Oxford, 1982)

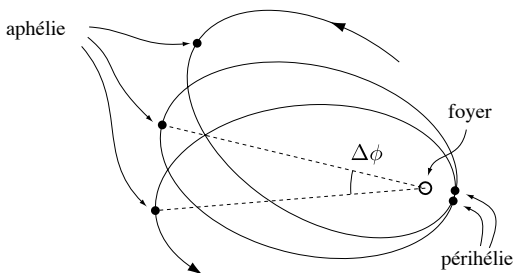


FIGURE 18 – avance du périhélie – Exemple de trajectoire sujette à l'avance du périhélie. L'aphélie a aussi été représenté car son avance, égale à celle du périhélie, est plus visible sur la figure.

Avogadro (loi d') (angl. *Avogadro's law*) Loi selon laquelle des volumes égaux de gaz, pris à la même température et à la même pression, contiennent le même nombre de molécules. Elle n'est valable que de manière approchée, dans la limite où les gaz peuvent être décrits

par la loi des gaz parfaits. Elle fut proposée en 1811 par Amedeo Avogadro (1776–1856), puis de façon indépendante en 1814 par André Ampère (1775–1836). On appelle parfois **loi d'Avogadro-Ampère**. Cette loi ne fut pas immédiatement acceptée par la communauté scientifique, la notion même de molécule étant alors assez confuse. Elle fut oubliée dans les années 1830 pour resurgir dans les années 1850, grâce notamment à Charles Gerhardt (1816–1856).

Avogadro (nombre d')  (angl. *Avogadro number*) Constante souvent notée N_A dont la valeur indique le nombre d'entités (électrons, atomes, etc.) contenues dans une certaine quantité de matière. En 2019, le Bureau International des Poids et Mesures lui a attribué par convention la valeur exacte $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, où mol est le symbole de la mole, unité de quantité de matière dans le Système international qui est donc désormais définie à partir de N_A . La valeur choisie pour cette constante l'a été de manière à assurer une continuité avec celle issue de sa précédente définition. En effet, la relation entre mole et nombre d'Avogadro était auparavant inversée puisque ce dernier était défini comme le nombre d'atomes contenu dans 12 grammes de l'isotope ^{12}C du carbone, quantité qui précisait ce qu'était une mole au sens précédent de cette grandeur. Cette ancienne définition impliquait que N_A était déterminé, en 2019, avec une incertitude relative de l'ordre de 4×10^{-10} . C'est à présent la masse d'une mole de ^{12}C qui est connue avec ce degré d'imprécision. Le nombre d'Avogadro, aussi nommé **constante d'Avogadro**, intervient en particulier

- comme facteur de conversion entre le gramme et l'unité de masse atomique : $1 \text{ g} = N_A \text{ u}$;
- comme lien entre la constante des gaz parfaits et la constante de Boltzmann ($N_A = R/k_B$) ;
- comme facteur de conversion entre la constante de Faraday et la charge électrique de l'électron (▷ *faraday*).

La notion même de nombre de constituants microscopiques dans un volume macroscopique est présente en 1811 (de manière confuse), lorsque le scientifique italien Amedeo Avogadro (1776–1856) énonce la loi qui porte son nom (▷ *loi d'Avogadro*). La valeur de ce nombre ne fut toutefois pas déterminée par Avogadro, mais fut estimée pour la première fois vers 1865 par le chimiste autrichien Josef Loschmidt (1821–1895), puis mesurée plus précisément en 1908 par le français Jean Perrin (1870–1942). C'est ce dernier qui proposa de donner le nom d'Avogadro à cette constante, mais l'antériorité des travaux de Loschmidt explique que dans la littérature scientifique germanophone (et dans certains écrits anglophones) elle est parfois représentée par le symbole $\mathcal{L}$, sous le nom de **constante de Loschmidt**. La définition de ce terme est cependant légèrement différente (▷ *constante de Loschmidt*).

- ▷ *Loschmidt, Stefan, and Stigler's Law of Eponymy*, John Crepeau, Physics in Perspective **11** (2009) p. 357
- ▷ *[Measure for measure] Counting atoms*, Enrico Massa & Giovanni Mana, Nature Physics **12** (2016) p. 522

axe central Ensemble des points où la résultante $\vec{R}$ et le moment d'un torseur sont colinéaires. On montre qu'il s'agit d'une droite, ce qui justifie le nom axe, sur laquelle la norme du moment est minimale, s'annulant dans le cas d'un glisseur. L'axe central joue un rôle particulier dans la décomposition d'un torseur $\mathcal{T}$ quelconque comme la somme d'un glisseur $\mathcal{G}$ et d'un couple $\mathcal{C}$. Le moment de ce couple $\mathcal{C}$ est en effet égal à celui du torseur $\mathcal{T}$ sur son axe central. La résultante de $\mathcal{T}$ est par ailleurs égale à celle du glisseur $\mathcal{G}$. Cette décomposition s'écrit donc au point P

$$\begin{aligned}\mathcal{T}(P) &= \mathcal{G}(P) + \mathcal{C}(P) \\ &= \left\{ \begin{array}{c} \vec{R} \\ \vec{R} \wedge \vec{OP} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ \vec{C} \end{array} \right\} \\ &= \left\{ \begin{array}{c} \vec{R} \\ \vec{R} \wedge \vec{OP} + \vec{C} \end{array} \right\},\end{aligned}$$

où O est un point de l'axe central. Quand le torseur est le torseur cinématique d'un solide rigide, l'axe est nommé **axe instantané de rotation** et la décomposition précédente signifie que l'on peut toujours écrire la vitesse d'un solide comme la somme d'une translation, associée à un torseur du genre couple, et d'une rotation, associée à un torseur du genre glisseur.

axe diélectrique (angl. *dielectric axis*) Nom donné à chacun des trois axes selon lesquels la matrice représentant le tenseur de susceptibilité diélectrique est diagonale. Quand une onde électromagnétique est polarisée selon un de ces axes, elle se propage comme dans un milieu homogène.

axe d'inertie  (angl. *axis of inertia*) Nom donné à chacun des axes qui permettent d'exprimer la matrice d'inertie d'un solide sous forme diagonale. On parle parfois d'**axe principal d'inertie**.

▷ *Stationary points of the rigid body kinetic energy and the principal axes of inertia*, Velimir Labinac, Marko Jusup et al., American Journal of Physics **81** (2013) p. 750

axe lent  (angl. *slow axis*) Ligne neutre de plus grand indice de réfraction dans une lame cristalline biréfringente, l'autre étant appelée axe rapide.

▷ *Identification des axes lents pour une paire de lames retardatrices identiques*, Jean-Pierre Lecardonnell, Bulletin de l'Union des Physiciens **889** (2006) p. 1565

axe optique  (angl. *optical axis*) Axe de symétrie d'un système optique à symétrie cylindrique. Il est matérialisé par le rayon lumineux qui n'est pas dévié par le système (ou qui est renvoyé sur lui-même, dans le cas d'un système réfléchissant).

▷ *Qu'appelle-t-on l'axe optique d'un système optique ?*, José-Philippe Pérez, Bulletin de l'Union des Physiciens **767** (1994) p. 1345

▷ *Méthodes de mesure de l'inclinaison de l'axe optique dans les lames de cristaux uniaxes*, Raymond Pelletier, Bulletin de l'Union des Physiciens **879** (2005) p. 105

axe rapide (angl. *fast axis*) Ligne neutre de plus petit indice de réfraction dans une lame cristalline biréfringente, l'autre étant appelée axe lent.

axe de rotation (angl. *rotation axis*; *axis of rotation*) Droite autour de laquelle on définit un mouvement de rotation et dont le vecteur directeur, orienté, est nommé **vecteur rotation**. Il est généralement noté $\vec{\Omega}$.

► **1.** En mécanique du point, la vitesse $\vec{v}$ vérifie alors $\vec{v} = \vec{\Omega} \wedge \vec{OP} = \vec{\Omega} \wedge \vec{AP}$, où O est un point quelconque de l'axe de rotation, P la position de la particule et A le projeté orthogonal de P sur l'axe. ► **2.** Ce résultat se généralise facilement au cas de la mécanique des solides indéformables où il est valable pour tout point du solide dans le cas d'une rotation. Dans ce cadre, on introduit cependant également la notion d'**axe instantané de rotation** pour un solide dont le mouvement n'est pas une rotation pure. L'existence de cet axe découle du fait que le mouvement quelconque d'un solide peut se décomposer, à tout instant, en une translation et une rotation (▷ **axe central**). Comme son nom l'indique, l'axe instantané de rotation est l'axe associé au mouvement instantané de rotation dont est muni le solide. Cet axe diffère donc d'un axe de rotation usuel par le fait qu'il est défini uniquement à un instant donné, qu'il a une direction qui peut varier au cours du temps (▷ **précession**) et que les points qui le constituent n'ont pas nécessairement une vitesse nulle puisqu'ils peuvent être en translation dans une direction parallèle à cet axe. Dans le formalisme des torseurs, on démontre que l'axe instantané de rotation n'est autre que l'axe central du torseur cinématique du solide. Pour un mouvement plan, on préfère utiliser la notion de centre instantané de rotation.

axicon  (angl. *axicon*) Système optique qui donne d'une source ponctuelle une image distribuée le long d'une ligne. Ce système n'est pas stigmatique, même dans les conditions de Gauss. Des exemples sont le disque diffractant et son point d'Arago, ou les lentilles coniques.

▷ *Axicon—the Most Important Optical Element*, Zbigniew Jaroszewicz, Anna Burvall et al., Optics and Photonics News **16** (2005) p. 34

axion  (angl. *axion*) Particule hypothétique dont l'existence serait liée à celle d'une nouvelle symétrie, introduite en 1977 par Roberto Peccei (1942–2020) et Helen Quinn (1943–), puis développée par Frank Wilczek (1951–) et Steven Weinberg (1933–2021), afin d'expliquer l'absence de violations de la symétrie CP reliées à la chromodynamique quantique (▷ **violation de CP**). L'astrophysique et les études en accélérateurs fournissent de nombreuses contraintes sur les propriétés de cette particule (masse et couplage) sans toutefois pouvoir leur donner une valeur précise. L'axion constitue un bon candidat pour résoudre le problème de la matière noire, si sa masse est comprise entre quelques μeV (microélectron-volt) et quelques meV (milliélectron-volt). Ce n'est pas un hasard si le nom axion évoque celui d'une marque de lessive : il a été choisi par Wilczek qui considérait qu'avec cet ajout la chromodynamique quantique se retrouvait dénuée de la moindre tache.

▷ *The Pool-Table Analogy with Axion Physics*, Pierre Sikivie, Physics Today **49** (1996) p. 22

▷ *Searches for invisible axions*, Leslie J Rosenberg & Karl A. van Bibber, Physics Reports **325** (2000) p. 1

- ▷ *Searches for Astrophysical and Cosmological Axions*, Stephen J. Asztalos, Leslie J. Rosenberg *et al.*, Annual Review of Nuclear and Particle Science **56** (2006) p. 293
- ▷ *Ultrasensitive Searches for the Axion*, Karl van Bibber & Leslie J. Rosenberg, Physics Today **59** (2006) p. 30

azéotrope (angl. *azeotrope*) Qualifie un mélange ayant la même composition dans les phases liquide et gazeuse, quand toutes deux sont en équilibre. La composition du mélange n'est alors pas modifiée au cours de sa condensation ou de sa distillation, et on ne peut donc pas utiliser ces méthodes pour séparer les constituants.

azimut (angl. *azimuth*) Un des angles permettant de définir la position d'un objet dans le ciel en coordonnées horizontales. L'azimut est l'angle que fait le plan vertical passant par l'objet et l'observateur avec le plan vertical passant par le nord géographique et l'observateur. Pour un même astre, il dépend donc de la position de l'observateur sur la surface de la Terre. La localisation sur

la voûte céleste est complètement définie en précisant l'autre coordonnée, la hauteur.

azote (angl. *nitrogen*) Élément de numéro atomique $Z = 7$, découvert en 1772 par Daniel Rutherford (1749–1819). Il est représenté par le symbole N. Structure atomique : $[\text{He}]2s^22p^3$. Par abus de langage, on utilise fréquemment le terme azote pour désigner le gaz de diazote qui est le composant principal de l'atmosphère terrestre.

azote liquide (angl. *liquid nitrogen*) Diazote sous forme liquide. Sous la pression ordinaire, le diazote ne se présente sous forme liquide que pour des températures inférieures à 77,2 K, soit environ -196°C . L'azote liquide est utilisé dans de très nombreuses applications cryogéniques, pour refroidir des systèmes à ces températures.

B

B ► 1. Le vecteur $\vec{B}$ désigne généralement l'induction magnétique. ► 2. Symbole de l'élément bore ($Z = 5$). ► 3. Symbole du bel. ► 4. Type de méson contenant un antiquark b (► *méson B*).

ba Symbole de la barye, unité de pression.

Ba Symbole de l'élément baryum ($Z = 56$).

BaBar Expérience de physique des particules située sur l'accélérateur linéaire SLAC, à Stanford (Californie, États-Unis), qui fut opérationnelle de 1999 à 2008 et permit de créer un grand nombre de mésons B par collisions d'électrons de 9 GeV avec des positons de 3,1 GeV. On lui doit notamment la découverte de certains mésons exotiques, ainsi qu'en 2002, celle du fait que le taux de désintégration du B est différent de celui du $\bar{B}$, son antiparticule (► *violation de CP*).

Babcock (Horace Welcome)  (1912–2003) Astronome et physicien américain. Durant sa thèse, il effectua la première mesure de la courbe de rotation de la galaxie d'Andromède (M31). Avec son père Harold Babcock (1882–1968), il réalisa de nombreuses mesures innovantes du magnétisme solaire, grâce notamment à des instruments qu'ils inventèrent. Il proposa en particulier un modèle des taches solaires qui devint classique et, en 1953, l'idée de l'optique adaptative.

► *Horace Welcome Babcock*, Allan Sandage, *Proceedings of the American Philosophical Society* **150** (2006) p. 151

Babinet (théorème de)  (angl. *Babinet's principle*) Théorème établi en 1837 par Jacques Babinet (1794–1872) et selon lequel l'amplitude d'une onde lumineuse diffractée par une ouverture, par exemple un trou circulaire dans un écran opaque, est complémentaire de celle diffractée par l'ouverture complémentaire, par exemple un disque opaque de même rayon que le trou précédent. Pour une onde incidente plane (et seulement dans ce cas), il s'ensuit que l'intensité diffractée a la même distribution spatiale $I(\theta)$ dans les deux cas (l'ouverture et son complémentaire), sauf au centre de la figure de diffraction.

► *Elemental derivation of the Babinet principle in electromagnetic form*, C. L. Andrews & D. P. Margolis, *American Journal of Physics* **43** (1975) p. 672

► *Diffraction around a fine wire : How good is the single-slit approximation ?*, Robert G. Greenler, Joel W. Hable *et al.*, *American Journal of Physics* **58** (1990) p. 330

► *Fraunhofer diffraction by a thin wire and Babinet's principle*, Salvatore Ganci, *American Journal of Physics* **73** (2005) p. 83

Baierlein (théorème de)  (angl. *Baierlein theorem*) Théorème selon lequel, dans le cadre de la physique statistique, l'entropie d'un système de particules libres est plus élevée que celle d'un système identique dans lequel les particules interagissent *via* des forces qui dépendent de la vitesse. Ce résultat a été démontré en 1968 par Ralph Baierlein (1936–).

► *Forces, Uncertainty, and the Gibbs Entropy*, Ralph Baierlein, *American Journal of Physics* **36** (1968) p. 625

► *[Notes and Discussions] Limitation on the quantum-mechanical extension of Baierlein's entropy theorem*, L. W. Bruch, M. Schick *et al.*, *American Journal of Physics* **44** (1976) p. 1007

balance  (angl. *scale*) Dispositif servant à comparer deux forces. Par extension, les balances sont aussi utilisées pour mesurer des masses, en comparant les forces de pesanteur auxquelles celles-ci sont soumises (► *balance de torsion*, *balance de Cotton*, *balance de pesée*).

► *The ritual origin of the balance*, A. Seidenberg & J. Casey, *Archive for history of exact sciences* **23** (1980) p. 179

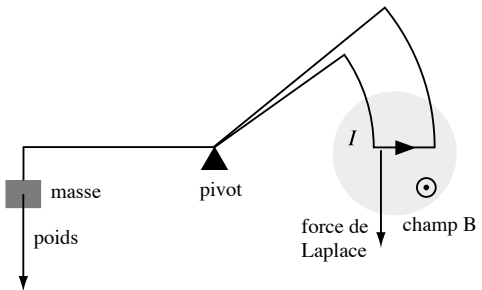


FIGURE 19 – balance de Cotton – La force de Laplace sur le bras de droite, parcouru par un courant I , est équilibrée par le poids de la masse suspendue au bras de gauche. La zone grisée représente la région dans laquelle règne le champ magnétique à mesurer.

balance de Cotton (angl. *Cotton balance*) Dispositif permettant de mesurer la valeur d'un champ magnétique $\|\vec{B}\|$. Il consiste en une balance dont l'un des bras est parcouru par un courant électrique d'intensité I , circulant dans une direction perpendiculaire au champ magnétique à mesurer. Le moment de la force de Laplace subie par ce bras est équilibré par celui du poids d'une masse m placée sur l'autre bras. Pour des bras de longueurs égales, le champ B est relié aux autres grandeurs par $B\ell I = mg$, où g désigne l'accélération de la pesanteur et ℓ la longueur de la portion de circuit contribuant au

moment de la force de Laplace. Ce dispositif a été mis au point en 1900 par Aimé Cotton (1869–1951), pour la mesure du champ magnétique au cours de ses recherches sur l'effet Zeeman.

balance de courant (angl. *current balance*) Dispositif inventé en 1882 par Lord Kelvin (1824–1907) et permettant de mesurer des courants électriques de façon précise. Il s'agit d'un électrodynamomètre consistant en une balance de pesée dont un des plateaux est remplacé par une bobine, elle-même placée au-dessus d'une seconde bobine fixe. Quand ces bobines sont parcourues par un courant, elles exercent entre elles des forces qui déséquilibrent la balance. Son rééquilibrage en disposant des masses de façon judicieuse permet de déduire la valeur du courant. Lorsque c'est le même courant qui traverse les deux bobines, on obtient ainsi une mesure de courant qui ne fait appel qu'à la définition de l'ampère et non à un étalon électrique.

balance de Kibble  Dispositif métrologique permettant de mesurer une masse par une méthode purement électrique, et, en particulier, de relier cette grandeur à la constante de Planck h . Dans la version traditionnelle de la balance de Kibble, la mesure s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, nommé phase statique, le poids mg de la masse m est équilibré par la force de Laplace créée dans un dispositif à induction où un fil de longueur ℓ et parcouru par un courant d'intensité I est plongé dans un champ magnétique B ($\triangleright$ *balance de Cotton*),

$$mg = B\ell I.$$

Le courant I peut être mesuré très précisément grâce à l'effet Josephson, mais ce n'est pas le cas de B et de ℓ . Dans un second temps, nommé phase dynamique, la valeur du produit de ces deux grandeurs est donc déduite de la mesure, encore par effet Josephson, de la force électromotrice $e = B\ell v$ induite lorsque le dispositif est mis en mouvement à vitesse constante v . La masse est alors donnée par

$$m = \frac{eI}{gv},$$

égalité que l'on peut également écrire $mgv = eI$, où chacun des deux termes a la dimension d'une puissance, ce qui explique le fait que ce dispositif était autrefois nommé balance du watt. Des versions modifiées de la balance de Kibble fonctionnant en une seule étape ont été développées au cours des dernières années et ont notamment permis, en 2020, de faire la première mesure de la masse du kilogramme-étalon qui servait, jusqu'au 19 mai 2019, à définir le kilogramme ($\triangleright$ *kilogramme*).

- $\triangleright$ *Mesure absolue de l'attraction terrestre par interférométrie atomique et application à la définition d'une nouvelle unité de masse*, Patrick Cheinet, Cahiers Clairaut **112** (2005) p. 16
- $\triangleright$ [Quick Study] *Quantum electrical standards*, Neil M. Zimmerman, Physics Today **63** (2010) p. 68
- $\triangleright$ *A LEGO Watt balance : An apparatus to determine a mass based on the new SI*, L. S. Chao, S. Schlamminger et al., American Journal of Physics **83** (2015) p. 913

balance d'Eötvös  Dispositif de précision utilisé en géodésie pour mesurer de très faibles variations locales

de la direction de la verticale. Dans la version initialement mise en œuvre par Roland Eötvös (1848–1919) à la fin du XIX^e siècle, il était constitué d'une tige horizontale d'une quarantaine de centimètres de long, munie à ses extrémités de deux boules de même masse et suspendue par son milieu à un fil vertical (c'est un pendule de torsion). Les mesures précises de l'angle formé par la tige à l'équilibre permettent d'en déduire la différence des directions de la verticale à la position des deux boules.

- $\triangleright$ *Lóránd Eötvös*, Gérard Vassails, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **6** (1953) p. 22

balance de Gouy (angl. *Gouy balance*) Dispositif expérimental permettant de déterminer la susceptibilité magnétique d'une substance en mesurant, grâce à une balance par exemple, la force subie lorsqu'on en place un échantillon dans un champ magnétique inhomogène. Dans le cas d'un échantillon liquide, le tube contenant la substance est appelé **tube de Gouy**. Ce dispositif fut introduit par Georges Gouy (1854–1926).

balance de pesée (angl. *weighing scale*) Dispositif permettant de comparer les poids de deux objets posés sur des plateaux disposés de part et d'autre d'un axe de rotation. Comme son nom l'indique, on peut utiliser une balance pour effectuer une pesée, en posant sur un plateau l'objet à peser et sur l'autre des masses calibrées. Sous une pesanteur uniforme, ce qui constitue généralement une excellente approximation, une balance de pesée permet donc de comparer des masses.

balance de torsion  (angl. *torsion balance*) Dispositif permettant de mesurer un couple de forces, en l'équilibrant avec un couple de torsion. Il s'agit d'un pendule de torsion soumis au couple de forces que l'on cherche à mesurer. La valeur de la constante de torsion du fil, nécessaire pour calculer le couple de torsion, peut être déduite de la pulsation des oscillations du dispositif. La balance de torsion fut construite par Charles Coulomb (1736–1806) qui l'utilisa pour établir la loi de l'interaction électrostatique en 1785 ($\triangleright$ *loi de Coulomb*). Plusieurs de ces balances ont joué un rôle historique important : $\triangleright$ *expérience de Cavendish*, *expérience d'Eötvös*.

- $\triangleright$ *Les florilèges de la torsion*, Paolo Brenni, Cahiers de Science et Vie **26** (1995) p. 80

balance du watt (angl. *Watt balance*) Nom donné jusqu'en juin 2016 à la balance de Kibble, qui fut ainsi renommée en hommage à son inventeur, Bryan Kibble (1938–2016), peu après son décès.

balancier de Newton  (angl. *Newton's cradle*) Système constitué de plusieurs billes initialement en contact, suspendues chacune par deux fils latéraux de façon à ce qu'elles se trouvent alignées à la même hauteur et en contact les unes avec les autres. Lorsqu'on déplace une des billes extrêmes de sa position d'équilibre, son mouvement pendulaire produit une collision avec la seconde bille. On observe que ceci met en mouvement la dernière bille du dispositif, les billes intermédiaires restant au repos. L'explication de ce phénomène est délicate et ne repose pas uniquement sur la conservation

de l'énergie et celle de la quantité de mouvement, qui ne fournissent pas un nombre suffisant de contraintes pour déterminer le mouvement de façon univoque. Ce dispositif est aussi nommé **pendule de Newton**.

- ▷ *La pétanque de Newton - partie 1*, Julien Barthes & Pascal Langlois, Bulletin de l'Union des Physiciens **926** (2010) p. 869
- ▷ *La pétanque de Newton - partie 2*, Julien Barthes, Bulletin de l'Union des Physiciens **926** (2010) p. 877
- ▷ *La pétanque de Newton - partie 3*, Julien Barthes & Pascal Langlois, Bulletin de l'Union des Physiciens **937** (2011) p. 1059

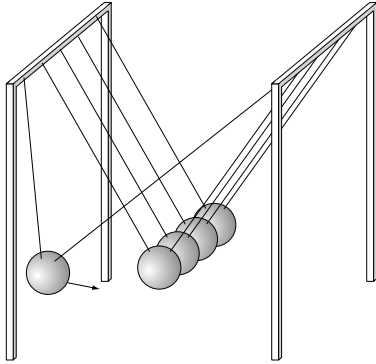


FIGURE 20 – **balancier de Newton** – La première bille est écartée de sa position d'équilibre puis lâchée.

balançoire (angl. *swing*) Barre ou planche dont les extrémités sont suspendues à deux cordes de longueurs égales, et libre d'osciller de façon pendulaire. On l'appelle aussi **escarpolette** ou **trapèze**. Une personne debout sur la planche peut amplifier les oscillations en modifiant périodiquement le moment d'inertie du système, par exemple en s'accroupissant puis en se relevant. Il s'agit d'un exemple d'oscillation paramétrique.

ballistique  (angl. *ballistics*) Domaine de la physique s'intéressant au mouvement des projectiles en mouvement dans l'air (▷ *trajectoire balistique*). Elle trouve de nombreuses applications dans le domaine militaire. La police scientifique et les concepteurs de scénarios policiers en font grand usage, dans l'étude du mouvement des balles de pistolet pour déterminer la position du tireur d'après les caractéristiques de l'impact.

- ▷ *Projectile Motion with Damping Proportional to Velocity*, Gérard Nadeau, American Journal of Physics **30** (1962) p. 619
- ▷ *Galileo's Theory of Ballistics*, Paul-Lawrence Rose, The British Journal for the History of Science **4** (1968) p. 156
- ▷ *Galileo's Theory of Projectile Motion*, R. H. Naylor, ISIS **71** (1980) p. 550
- ▷ *Galileo's early experiments on projectile trajectories*, R.H. Naylor, Annals of Science **40** (1983) p. 391
- ▷ *[Idées de physique] Les déagements du ballon rond*, Jean-Michel Courty & Edouard Kierlik, Pour la Science **416** (2012) p. 96
- *Ballistics in the Seventeenth Century*, A.R. Hall, (Cambridge University Press, 1952)

Ballot (expérience de) (angl. *Ballot experiment*) Expérience réalisée en 1845 par Buys Ballot (1817–1890) pour mesurer l'effet Doppler subi par des ondes sonores. Il compara la note jouée par un orchestre au repos à la note entendue lorsque l'orchestre est monté sur un

train en mouvement. Cette expérience fut rendue possible grâce à l'avènement de transports ayant des vitesses relativement élevées.

Balmer (formule de)  (angl. *Balmer formula*) Relation empirique établie en 1885 par Johann Balmer (1825–1898) et vérifiée par les longueurs d'onde λ_n de certaines raies observées dans le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène. Sous la forme introduite l'année suivante par Johannes Rydberg (1854–1919), la formule de Balmer s'écrit

$$\frac{1}{\lambda_n} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

où R_H désigne la constante de Rydberg et n un entier supérieur à 3, caractérisant la longueur d'onde en question. Cette découverte fut rapidement suivie de celles d'autres régularités dans le spectre de l'atome d'hydrogène, Walther Ritz (1878–1909) proposant que toutes les raies ainsi identifiées ont un nombre d'onde (grandeur inversement proportionnelle à la longueur d'onde) qui peut s'écrire comme la différence entre deux termes (▷ *formule de Rydberg*). Pour l'anecdote, on peut signaler que Balmer n'était pas physicien mais enseignant en mathématique (bien qu'il ait une thèse, il ne semble exister aucune trace de travaux de sa part), et que s'il découvrit la formule qui porte aujourd'hui son nom, c'est avant tout suite à son grand intérêt pour la numérologie.

- ▷ *On harmonic ratios in spectra*, J. MacLean, Annals of Science **28** (1972) p. 121

Balmer (série de)  (angl. *Balmer series*) Série de raies spectrales de l'atome d'hydrogène, découvertes en 1885 par Johann Balmer (1825–1898), et associées aux transitions d'un état excité $n > 2$ vers un état $n = 2$ (▷ *formule de Balmer*). Elles correspondent à des longueurs d'onde comprises entre 365 nm et 656,5 nm. Les quatre premières se situent dans le domaine des ondes visibles : $\lambda = 656,5$ nm dans le rouge, $\lambda = 486$ nm dans le bleu-vert, $\lambda = 434$ nm et $\lambda = 410$ nm dans le violet.

- ▷ *The fine structure of Hydrogen and Hydrogen-like lines*, A. Sommerfeld, European Journal of Physics H **39** (2014) p. 179

bande de conduction (angl. *conduction band*) Dans les solides, bande d'énergie partiellement remplie qu'occupent les électrons de conduction. Ces électrons sont faiblement liés aux atomes du réseau cristallin et sont très mobiles. Ils participent à la conduction électrique et à la conduction thermique.

bande d'énergie  (angl. *energy band*) Ensemble de niveaux d'énergie pouvant être décrits par un continuum. Quand on regroupe plusieurs atomes, leurs niveaux électroniques se perturbent mutuellement, et lorsque le nombre d'atomes est important, comme dans un solide macroscopique, ces niveaux forment des ensembles au sein desquels ils sont très rapprochés. On peut alors les assimiler à un continuum, qu'on appelle « bande d'énergie ». Il existe généralement plusieurs bandes, qui peuvent être séparées par des sauts en énergie, nommés **largeurs de bandes interdites** ou **gaps**, ou bien au contraire qui peuvent se recouvrir. Ces bandes peuvent

être partiellement ou entièrement occupées par des électrons ($\triangleright$ **bande de valence**, **bande de conduction**). Selon les valeurs des gaps et l'occupation des bandes, le milieu aura des caractéristiques électriques et optiques très diverses ($\triangleright$ **isolant**, **conducteur**, **semiconducteur**).

- ▷ *The development of the quantum-mechanical electron theory of metals : 1928—1933*, Lillian Hoddeson, Gordon Baym *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **59** (1987) p. 287
- ▷ *Finding the Energy Bands of Silicon*, Walter A. Harrison, *Physics in Perspective* **11** (2009) p. 198
- ▷ *An acoustic analog for a quantum mechanical level-splitting route to band formation*, Marissa D'Onofrio, Mitchell Crum *et al.*, *American Journal of Physics* **84** (2016) p. 841

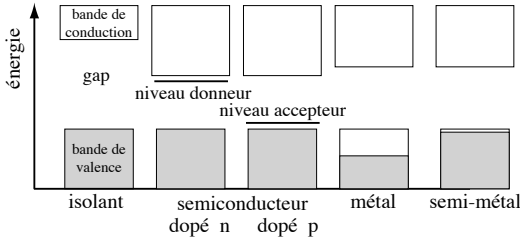


FIGURE 21 – bande d'énergie – Différentes configurations des bandes d'énergie dans un solide. Les zones grisées correspondent aux niveaux occupés par des électrons. Le métal et le semi-métal sont des conducteurs.

bande interdite (angl. *forbidden band*) Bande de fréquence ou d'énergie ne correspondant à aucun état d'un système physique. ► **1.** Dans le cas des vibrations des solides cristallins, la bande interdite est l'ensemble des fréquences interdites pour le spectre des phonons, séparant la branche acoustique de la branche optique ($\triangleright$ **cristal phononique**). ► **2.** Dans la structure électronique des semiconducteurs et des isolants, bande d'énergie composée des énergies interdites pour les électrons. Elle sépare la bande de valence de la bande de conduction ($\triangleright$ **bande d'énergie**). ► **3.** Il existe aussi des bandes interdites pour la propagation des ondes lumineuses dans certains milieux, c'est-à-dire les énergies que ne peuvent pas avoir les photons dans le milieu ($\triangleright$ **cristal photonique**).

bande passante (angl. *bandwidth*) Intervalle de fréquences Δf (ou de pulsations $\Delta\omega$) caractéristique de la fonction de transfert d'un système. Elle caractérise notamment la bande de fréquence qu'un détecteur peut recevoir avec une sensibilité raisonnable ou/et qu'un système électronique peut traiter. ► **1.** Pour un filtre, la bande passante désigne l'intervalle Δf caractérisant la gamme de fréquences sur laquelle la fonction de transfert du filtre est appréciable. ► **2.** Pour un amplificateur, gamme de fréquence sur laquelle le signal est amplifié de façon significative. La bande passante est alors reliée au gain G de l'amplificateur par $G\Delta\omega \sim 1$. ► **3.** Étendue de la gamme de fréquence sur laquelle un système de transmission (une ligne téléphonique, une antenne, etc.) est efficace.

- ▷ *Television Goes Digital*, Louis A. Bloomfield, *Physics Today* **52** (1999) p. 42

bande permise (angl. *allowed band*) Bande d'énergie contenant des niveaux accessibles aux électrons d'un solide. Les bandes permises sont séparées par des bandes interdites ($\triangleright$ **bande d'énergie**).

bande sombre d'Alexandre (angl. *Alexander's band*) Région située entre l'arc primaire et l'arc secondaire d'un arc-en-ciel. Cette bande circulaire est légèrement plus sombre que le reste du ciel, car relativement peu de rayons lumineux sont réfractés dans cette direction ($\triangleright$ **arc-en-ciel**). Le nom provient d'Alexandre d'Aphrodise (150–215), qui semble avoir décrit le phénomène pour la première fois au III^e siècle avant notre ère.

bande spectrale  (angl. *spectral band*) Synonyme de « gamme de fréquence ». On utilise ce terme dans plusieurs situations où ces gammes ont des définitions conventionnelles. En astronomie par exemple, le spectre lumineux est divisé en bandes spectrales associées à des filtres observationnels définis de manière précise et qui sont notés B, V, R, I pour ne citer que les plus courants.

- ▷ *A classical analogy for quantum band formation*, Parker Roberts, Alexandria Skinner *et al.*, *American Journal of Physics* **86** (2018) p. 609

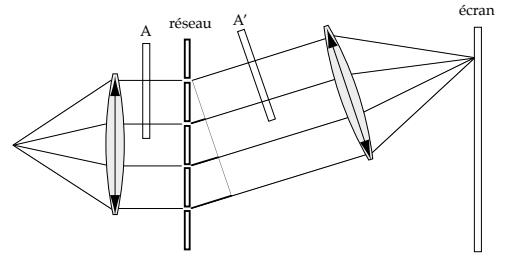


FIGURE 22 – bandes de Talbot – Les bandes sombres sont observées sur le spectre obtenu à l'écran si la lame transparente est placée en A ou en A'. Dans cette configuration, la lame retarde les rayons lumineux qui étaient en avance et l'ensemble des rayons peut interférer destructivement. Si la lame couvre l'autre moitié du faisceau, elle retarde encore davantage les rayons qui étaient en retard, et on peut montrer que la condition d'interférence destructive ne peut pas être réalisée.

bandes de Talbot  (angl. *Talbot's band*) Bandes sombres qui peuvent apparaître dans le spectre obtenu avec un prisme ou un réseau diffractant, quand on interpose une fine lame de verre sur la moitié du faisceau lumineux. Par exemple, si l'on observe la figure de diffraction dans la direction correspondant au premier ordre d'un réseau (voir la figure), ces bandes apparaissent si la lame est placée du côté correspondant à la partie rouge du spectre, mais elles sont absentes si elle est placée de l'autre côté. Ce phénomène, qui repose sur l'augmentation du chemin optique due à la lame, a été découvert en 1837 par Fox Talbot (1800–1877), étudié quelques

mois plus tard par Sir David Brewster (1781–1868), puis finalement expliqué par George Airy (1801–1892) en 1840.

- ▷ *The Curious Bands of Talbot*, Allen L. King & Randall Davis, *American Journal of Physics* **39** (1971) p. 1195
- ▷ *Talbot's bands*, M. Parker Givens, *American Journal of Physics* **61** (1993) p. 601
- ▷ *New considerations on Talbot's bands*, Zsolt Benkő, Margit Hilbert *et al.*, *American Journal of Physics* **68** (2000) p. 513
- ▷ *Simple Principles of the Talbot Effect*, Changhe Zhou, Wei Wang *et al.*, *Optics and Photonics News* **15** (2004) p. 46

bande de valence (angl. *valence band*) Dans les solides, bande d'énergie qu'occupent les électrons de valence. Ces électrons sont fortement liés aux atomes du réseau cristallin et sont très peu mobiles. Ils ne participent ni à la conduction électrique, ni à la conduction thermique. Ils peuvent être amenés dans la bande de conduction par un apport d'énergie (▷ *paire électron-trou*).

bandes (théorie des) (angl. *band theory*) ▷ *bande d'énergie*.

bang supersonique  (angl. *supersonic bang*; *supersonic boom*) Bruit sec causé par le passage d'un objet dont la vitesse est supérieure à la vitesse du son dans le milieu. Il se manifeste comme un bruit de claquement ou d'explosion, d'où le nom de « bang ». Cet effet fut découvert en 1887 par Ernst Mach (1838–1916) et Peter Salcher (1848–1928). Il est notamment responsable du bruit de claquement d'un fouet. Dans plusieurs cas (par exemple celui d'un avion passant le mur du son), ce bang est en fait constitué de deux claquements, l'un dû à la compression de l'air à l'avant de l'objet, l'autre à sa détente à l'arrière de l'objet. En général, l'oreille ne distingue pas les deux composantes de ce **double bang**.

- ▷ *Geophysical Effects of Concorde Sonic Boom*, F. H. Grover, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **14** (1973) p. 141
- ▷ *Le bang supersonique*, François Coulouvrat, *Pour la Science* **250** (1998) p. 100
- ▷ [*Idées de physique*] *Chevaucher les ondes*, Roland Lehoucq & Jean-Michel Courty, *Pour la Science* **286** (2001) p. 106
- ▷ *Le bang réduit des avions supersoniques*, François Coulouvrat, *La Recherche* **440** (2010) p. 60

bar (angl. *bar*) Unité de pression (symbole **bar**) définie par 1 bar = 10^5 Pa. Elle n'appartient pas au Système International d'unités.

Bardeen (John)  (1908–1991). Physicien théoricien américain. Il est le seul à avoir obtenu deux fois le prix Nobel de physique (Marie Curie a obtenu deux fois le prix Nobel aussi, mais une seule fois en physique). Il l'obtint pour la première fois en 1956 (avec W.B. Shockley et W.H. Brattain) pour « *leurs recherches sur les semiconducteurs et leur découverte de l'effet transistor* », puis une deuxième fois en 1972 (avec L.N. Cooper et J.R. Schrieffer) pour « *la théorie de la supraconductivité, depuis nommée théorie BCS, qu'ils ont conjointement développée* ».

- ▷ *Recollections From The Early Years of Solid-State Physics*, Conyers Herring, *Physics Today* **45** (1992) p. 26
- ▷ *John Bardeen and the Point-Contact Transistor*, Nick Holonyak, Jr., *Physics Today* **45** (1992) p. 36

- ▷ *John Bardeen and the Theory of Superconductivity*, J. Robert Schrieffer, *Physics Today* **45** (1992) p. 46
- ▷ *Consultant to Industry, Adviser to Government*, George Poke, *Physics Today* **45** (1992) p. 56
- ▷ *An Extraordinary Man : Reflections on John Bardeen*, David Pines, *Physics Today* **45** (1992) p. 64

baril (angl. *barrel*) Unité de volume (symbole **bl** ou **bbl**) utilisée pour les produits pétroliers et définie comme 42 gallons, soit 1 bl = $0,158\,987\text{ m}^3 \approx 159\text{ l}$.

barillet (angl. *barrel distortion*) ▷ *distorsion*.

Barkhausen (effet) (angl. *Barkhausen effect*) Crépitements produits dans l'expérience du même nom : on branche un haut-parleur sur une bobine placée au voisinage d'un corps ferromagnétique. Quand on approche un aimant, les domaines ferromagnétiques changent d'alignement, se regroupent ou se séparent, ce qui produit un effet magnétique provoquant un crépitements dans le haut-parleur. L'analyse de ce bruit permet d'étudier la structure microscopique des domaines magnétiques (▷ *domaine de Weiss*).

Barlow Nom usuel de la lentille de Barlow (▷ *lentille de Barlow*).

barn (angl. *barn*) Unité de section efficace (symbole **barn**) définie par 1 barn $\equiv 10^{-28}\text{ m}^2$. Un grand nombre de réactions nucléaires ont des sections efficaces de l'ordre de 0,1 à 10 barns. Ses sous-multiples sont couramment utilisés en physique des particules. Le terme « barn » fut proposé, non sans humour, par Marshall Holloway (1912–1991) et Charles Baker en 1942, au cours du projet Manhattan, d'après l'expression « big as a barn » qui signifie « très grand » en anglais.

Barnett (effet)  (angl. *Barnett effect*) Aimantation d'un corps ferromagnétique qui apparaît lorsqu'on le met en rotation. Cet effet fut observé en 1915 par Samuel Barnett (1873–1956) qui le cherchait explicitement, peu après la découverte de l'effet inverse (▷ *effet Einstein-de Haas*). Ce phénomène est intimement relié à la conservation du moment cinétique.

- ▷ *One century later : Remarks on the Barnett experiment*, Alexander L. Kholmetskii, *American Journal of Physics* **71** (2003) p. 558

baromètre  (angl. *barometer*) Appareil servant à mesurer la pression, en particulier la pression atmosphérique. Il en existe de nombreux types, basés sur des principes physiques différents. Dans le **baromètre à mercure**, inventé en 1643 par Evangelista Torricelli (1608–1647), la pression atmosphérique est indiquée par la hauteur de mercure dans un tube plongeant dans un bain de mercure et dont l'extrémité supérieure est fermée, la colonne étant surmontée de vide, ou plus précisément de vapeur de mercure à la pression de vapeur saturante (▷ *expérience de Torricelli*). La pression est directement indiquée par la hauteur de la colonne de mercure. Dans le **baromètre à gaz**, la pression est obtenue en mesurant le volume et la température d'un gaz dont on connaît l'équation d'état. Dans le **baromètre anéroïde**, la pression se déduit de la déformation (sous l'effet de la pression à mesurer) d'une

boîte ou d'une capsule dans laquelle on a fait le vide. Cette déformation peut être mesurée grâce à celle d'un ressort ou d'un cristal piézo-électrique solidaire de la capsule, mais aussi grâce à la mesure des changements de propriétés électriques (par exemple de capacité) qu'elles induisent. D'autres baromètres utilisent le phénomène de piézo-électricité.

- ▷ *The Place of Torricelli in the History of the Barometer*, W. E. Knowles Middleton, *ISIS* **54** (1963) p. 11
- ▷ *A Footnote to the History of the Barometer : An Unpublished Note by Robert Hooke, F.R.S.*, W. E. Knowles Middleton, *Notes & Records, the Royal Society Journal of the History of Science* **20** (1965) p. 145
- ▷ *L'entrée du temps dans la vie quotidienne*, Jan Golinski, *Cahiers de Science et Vie* **27** (1995) p. 84
- ▷ *Origins of the marine barometer*, Anita McConnell, *Annals of Science* **62** (2005) p. 83

barométrique (loi) (angl. *barometric formula*)

Loi donnant la variation de la pression p en fonction de l'altitude z dans un gaz parfait isotherme soumis à l'accélération de la pesanteur g supposée constante. Elle s'écrit

$$p(z) = p_0 e^{-z/z_0} \quad \text{avec} \quad z_0 \equiv \frac{RT}{Mg} = \frac{k_B T}{mg},$$

où p_0 désigne la pression à l'altitude $z = 0$, R la constante des gaz parfaits, T la température, M la masse molaire moyenne des constituants du gaz, m leur masse moyenne et k_B la constante de Boltzmann. À température ordinaire et pour de l'air, on trouve $z_0 \sim 8,5$ km.

- ▷ *Applied Mathematics and the Quantification of Experimental Physics : The Example of Barometric Hypsometry*, Theodore S. Feldman, *Historical Studies in the Physical Sciences* **15** (1985) p. 127
- ▷ *On the barometric formula*, Mario N. Berberan-Santos, Evgeny N. Bodunov *et al.*, *American Journal of Physics* **65** (1997) p. 404

barre de Searle (angl. *Searle's bar*) Dispositif permettant de mesurer la conductivité thermique des solides. Il consiste en une barre soumise à ses deux extrémités à un flux de chaleur constant. La mesure de la distribution de température le long de la barre permet d'en déduire la conductivité thermique du matériau.

barre de Weber  (angl. *Weber bar*) Dispositif conçu dans les années 1960 par Joseph Weber (1919–2000) pour détecter les ondes gravitationnelles de façon directe. Il consistait en une barre cylindrique d'une taille de quelques mètres et d'une masse typique de l'ordre de la tonne, que le passage d'une onde gravitationnelle, d'une fréquence de quelques kilohertz, devrait déformer en excitant un mode de vibration à un niveau mesurable. Les expériences réalisées par Weber n'ont conduit à aucune détection confirmée, mais elles ont permis de déduire des limites supérieures à l'amplitude des ondes gravitationnelles au niveau de la Terre. Depuis cette époque, diverses expériences inspirées par celles de Weber ont été menées, mais les efforts se sont surtout concentrés sur le développement de détecteurs interférométriques (Virgo, LIGO, LISA, etc.), dans lesquels le passage d'une onde gravitationnelle est observée par son influence sur la figure d'interférence associée à un interféromètre de Michelson. Ces détecteurs ont l'avantage d'avoir une

bande passante bien plus large que celle, très étroite, d'une barre résonnante. À partir de septembre 2015, les détecteurs LIGO et Virgo ont commencé à observer des ondes gravitationnelles émises par des systèmes binaires de trous noirs (▷ *GW150914*).

- ▷ *A review of gravitational wave detectors*, Fulvio Ricci & Alain Brillet, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **47** (1997) p. 111
- ▷ *Gravity Waves and Neutrinos : The Later Work of Joseph Weber*, Allan Franklin, *Perspectives on Science* **18** (2010) p. 119

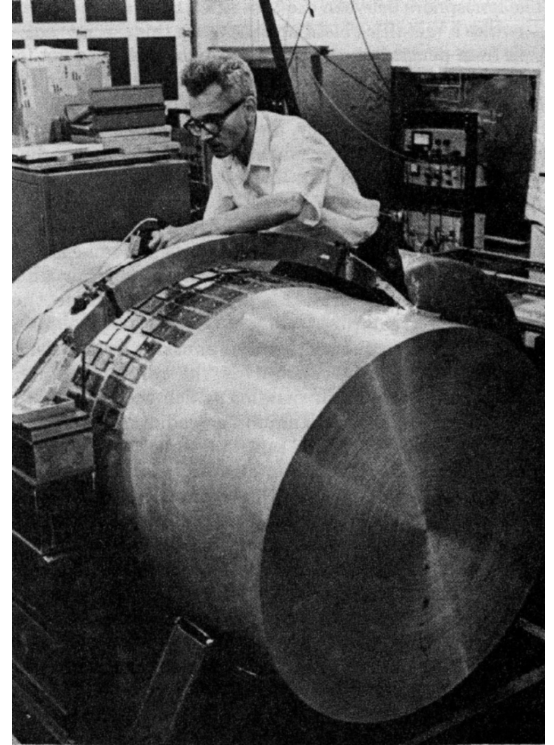


FIGURE 23 – barre de Weber – Joseph Weber auprès du dispositif qui porte son nom.

barrière coulombienne (angl. *Coulomb barrier*) Barrière de potentiel que doivent franchir deux noyaux atomiques de numéro atomique Z_1 et Z_2 pour s'approcher suffisamment et fusionner ou réagir par interaction forte. L'énergie correspondante est proportionnelle à $Z_1 Z_2$. C'est la raison pour laquelle on essaie d'utiliser des noyaux de faible Z pour réaliser de la fusion nucléaire en laboratoire.

barrière de potentiel  (angl. *potential barrier*) Variation importante, voire discontinuité, du potentiel entre deux régions dans lesquelles celui-ci varie de façon moins importante. Sa présence conduit aux phénomènes de transmission et de réflexion. Lorsqu'il s'agit d'une discontinuité entre deux régions de potentiel constant, on parle de **marche de potentiel**.

- ▷ *Measuring barriers to fusion*, M. Dasgupta, D. J. Hinde *et al.*, Annual Review of Nuclear and Particle Science **48** (1998) p. 401
- ▷ *Quantum scattering from cylindrical barriers*, Sean McAlinden & Janine Shertzer, American Journal of Physics **84** (2016) p. 764

barycentre (angl. *barycenter*; *centroid*) Position moyenne d'un ensemble de points M_i , affectés de coefficients c_i (chacun étant appelé le **poids** de M_i) donnant leur importance relative dans la moyenne. Le barycentre G est donné de manière générale par

$$\vec{OG} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N c_i \vec{OM}_i}{\sum_i c_i} \quad \text{ou} \quad \vec{OG} \equiv \frac{\iiint c(M) \vec{OM} d^3V}{\iiint c(M) d^3V},$$

où la seconde expression s'applique dans le cas d'une distribution continue c prenant alors parfois le nom de densité. Lorsque les poids sont égaux à l'unité, le point G est appelé **barycentre géométrique**; lorsqu'ils sont donnés par la masse attribuée au point M , G désigne le **centre de masse** aussi nommé **centre d'inertie**. La notion de barycentre intervient également dans la définition du centre de gravité, du centre de carène et du photocentre.

barye [ba] Unité de pression (symbole **ba**) dans le système d'unités CGS. Elle est reliée au Système International d'unités par $1 \text{ ba} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2} = 0,1 \text{ Pa}$.

baryogénèse  (angl. *baryogenesis*) En cosmologie primordiale, développement d'un excès de la quantité de matière par rapport à celle d'antimatière, à partir d'une situation d'équilibre entre matière et antimatière. Le mécanisme exact n'en est pas connu, mais plusieurs hypothèses faisant intervenir l'interaction électrofaible ou les théories de grande unification sont étudiées. La baryogénèse a pris place bien avant la nucléosynthèse primordiale et n'est donc pas cruciale dans les tests observationnels actuels du modèle cosmologique standard. Elle ne peut se développer que selon certaines conditions assez fortes (▷ *conditions de Sakharov*).

- ▷ *Grand Unified Theories and the Origin of the Baryon Asymmetry*, Edward W. Kolb & Michael S. Turner, Annual Review of Nuclear and Particle Science **33** (1983) p. 645
- ▷ *Non-GUT baryogenesis*, A.D. Dolgov, Physics Reports **222** (1992) p. 309
- ▷ *Recent progress in baryogenesis*, Antonio Riotto & Mark Trodden, Annual Review of Nuclear and Particle Science **49** (1999) p. 35
- ▷ *Electroweak baryogenesis*, Mark Trodden, Reviews of Modern Physics **71** (1999) p. 1463

baryon  (angl. *baryon*) Nom donné aux particules de la famille des hadrons constituées de trois quarks et portant en conséquence un nombre baryonique non nul. En toute rigueur, la structure des baryons est plus complexe et fait intervenir des particules virtuelles en plus des trois quarks de valence. Par exemple, le neutron, le proton et les hyperons sont des baryons.

- ▷ *The nonrelativistic three-body problem for baryons*, Jean-Marc Richard, Physics Reports **212** (1992) p. 1
- ▷ *Baryon spectroscopy*, Eberhard Klempt & Jean-Marc Richard, Reviews of Modern Physics **82** (2010) p. 1095

baryum (angl. *Barium*) Élément de numéro atomique $Z = 56$, isolé en 1808 par Sir Humphry Davy (1778–1829). Il est représenté par le symbole **Ba**. Structure atomique : $[\text{Xe}]6s^2$. Masse volumique : $3\,510 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

bascule (angl. *flip-flop*; *latch*) Dispositif électronique bistable dans lequel le potentiel sur une ou plusieurs bornes (les **sorties**) peut être modifié en agissant sur le potentiel d'autres bornes (les **entrées**). Ces potentiels peuvent généralement prendre deux valeurs pour représenter un signal logique (généralement notées 0 et 1 et appelés respectivement **état bas** et **état haut**). Une bascule est qualifiée d'**asynchrone** quand son état de sortie change en même temps que l'état d'entrée, et de **synchrone** quand le changement de la sortie est déclenché par un signal sur un troisième type de borne (souvent reliée à un signal d'horloge). Les bascules sont utilisées comme mémoire ou dans des compteurs. On en distingue plusieurs types : ▷ *bascule RS*, *bascule JK*, *bascule D*, *bascule T*. On les désigne aussi par l'anglicisme **flip-flop**.

bascule D (angl. *D flip-flop*; *D latch*) Bascule logique comportant une entrée D et une sortie Q, ainsi qu'une borne CK (pour « clock ») appelée horloge. Au signal d'horloge, la sortie Q se met dans le même état que l'entrée D, puis y reste tant que l'on ne lui impose pas une nouvelle valeur. Cette bascule est utilisée en électronique pour réaliser des registres (mémoires internes des microprocesseurs). Le D est l'initiale de « data », qui signifie « donnée » en anglais.

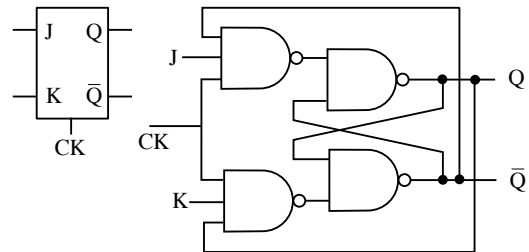


FIGURE 24 – *bascule JK* – Symbole de la bascule JK (à gauche) et exemple de réalisation à partir de portes « non et » (à droite)

bascule JK (angl. *JK flip-flop*; *JK latch*) Bascule logique comportant deux entrées J et K et deux sorties complémentaires Q et Q-bar (leurs valeurs sont toujours différentes), ainsi qu'une borne CK (pour « clock »). L'effet de J et K sur les sorties Q et Q-bar est indiqué dans la table suivante. La bascule ne peut changer d'état que lorsque la borne CK est à 1, cette borne sert donc à synchroniser les changements d'état, d'où son nom d'horloge. La bascule JK présente ainsi sur la bascule RS l'avantage d'être beaucoup moins sensible aux variations non désirées des entrées : l'état de J et K n'influe la sortie qu'au moment où l'horloge CK est dans l'état 1 (appelé **état haut**). Cette bascule est utilisée pour mettre un état en mémoire, en l'inversant éventuellement.

J	K	action au signal d'horloge
1	0	met Q à 1
0	1	met Q à 0
1	1	inverse Q
0	0	garde l'état précédent

TABLE 6 – Table de vérité de la bascule JK. L'action se produit au signal d'horloge CK.

bascule RS (angl. *SR flip-flop*; *SR latch*; *RS flip-flop*; *RS latch*) Bascule logique comportant deux entrées S (pour « set ») et R (pour « reset ») et deux sorties complémentaires Q et $\bar{Q}$. L'entrée S permet de mettre la sortie Q dans l'état 1 et l'entrée R la met dans l'état 0 (et la sortie complémentaire $\bar{Q}$ à 0 ou à 1 respectivement). L'état bas ($R = S = 0$) est un état mémoire, la valeur Q étant alors égale à celle de l'état précédent. L'état **reset** ($R = 1, S = 0$) met Q = 0 et l'état **set** ($R = 0, S = 1$) met Q = 1. L'état $R = S = 1$ conduit à un résultat indéterminé et n'est généralement pas utilisé dans ces bascules.

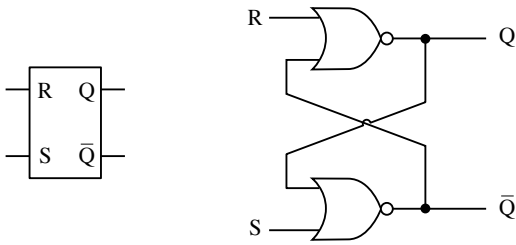


FIGURE 25 – **bascule RS** – Symbole de la bascule RS (à gauche) et exemple de réalisation à partir de portes « non ou » (à droite).

S	R	action
1	0	met Q à 1
0	1	met Q à 0
0	0	garde l'état précédent
1	1	non défini

TABLE 7 – Table de vérité de la bascule RS.

bascule T (angl. *T flip-flop*; *T latch*) Dispositif logique à deux entrées (notées T et CK) et deux sorties complémentaires l'une de l'autre, notées Q et $\bar{Q}$. L'entrée CK est généralement reliée à un signal d'horloge. L'état de sortie est modifié au signal d'horloge lorsque $T = 1$ et reste inchangé lorsque $T = 0$ (la lettre est l'initiale de « toggle » qui signifie « basculer » en anglais). Ceci peut être décrit par l'opération « ou exclusif » notée $\oplus$: la valeur de Q passe de Q_n à Q_{n+1} , donné par

$$Q_{n+1} = T \oplus Q_n .$$

Lorsque l'entrée T est maintenue à la valeur 1, la sortie Q donne un signal d'horloge à la fréquence moitié de celle de CK. On peut la réaliser avec une bascule JK dont on relie les entrées J et K, pour former l'entrée T. Une succession de bascules T permet ainsi de réaliser des compteurs numériques et des diviseurs de fréquence.

T	Q_n	Q_{n+1}	action au signal d'horloge
0	0	0	garde Q
0	1	1	garde Q
1	1	0	inverse Q
1	0	1	inverse Q

TABLE 8 – Table de vérité de la bascule T. L'action se produit au signal d'horloge CK.

base (angl. *base*) ► 1. Électrode qui contrôle le passage du courant entre le collecteur et l'émetteur dans un transistor bipolaire. ► 2. Un ensemble de vecteurs $(\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_d)$ forme une base d'un espace vectoriel si tout vecteur $\vec{v}$ de celui-ci peut s'écrire de manière unique comme une combinaison linéaire de ces vecteurs, soit

$$\vec{v} = \sum_{i=1}^d v^i \vec{e}_i = v^i \vec{e}_i$$

où les coefficients v^i sont les **composantes (contravariantes)** de $\vec{v}$ dans la base, et où la dernière expression utilise la convention de sommation d'Einstein. Dans celle-ci, le nombre d de vecteurs qui constituent la base, une caractéristique de l'espace vectoriel nommée sa **dimension** (> *base généralisée*), est sous-entendue. Par exemple, dans l'espace physique tridimensionnel, si l'on définit un système de coordonnées cartésiennes, les vecteurs unitaires associés à ces coordonnées, $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$ et $\vec{e}_z$, forment une base car tout vecteur $\vec{v}$ s'écrit

$$\vec{v} = v^x \vec{e}_x + v^y \vec{e}_y + v^z \vec{e}_z$$

où (v^x, v^y, v^z) sont ses composantes. Quand l'espace vectoriel est muni de structures supplémentaires, comme un produit scalaire, une orientation, etc., on peut définir des bases qui possèdent des propriétés particulières. Elles peuvent par exemple être normées, orthogonales, orthonormées, directes, etc. ► 3. Par abus de langage, on désigne en général par le terme base ce qui est devrait être nommé un « **champ de base** », c'est-à-dire une fonction qui associe une base à chaque point d'un espace, ou d'une courbe (> *base mobile*).

base de temps (angl. *time base*) Sur un oscilloscope, désigne le temps mis par le faisceau pour parcourir une division horizontale. Elle s'exprime comme une unité de temps par division (par exemple, 1 ms/division).

base généralisée Étant donné un espace de Hilbert H de dimension infinie, une base généralisée de cet espace est une famille d'objets $\vec{e}_\lambda$, où λ est un paramètre continu, qui permet d'écrire tout vecteur $\vec{v}$ de H sous la

forme

$$\vec{v} = \int v^\lambda \vec{e}_\lambda d\lambda$$

où v^λ et $\vec{e}_\lambda$ sont donc des fonctions de λ . Il s'agit ainsi d'une généralisation de l'expression indicée $\vec{v} = v^i \vec{e}_i$ (> *notation indicielle*) qui la remplace par une somme contenant un nombre indénombrable de termes, c'est-à-dire une intégrale. L'une des particularités importantes des objets qui constituent la base généralisée est qu'ils n'appartiennent pas nécessairement à H . Cette notion, directement reliée à celle de distribution, intervient notamment en analyse de Fourier, mais aussi en physique quantique, où on l'écrit souvent dans le formalisme de Dirac.

base mobile Base d'un espace vectoriel composée de vecteurs qui dépendent d'un ou de plusieurs paramètres. Un exemple usuel est la base de Frenet ($\vec{T}, \vec{N}$) associée à chaque point M d'une courbe, et dans laquelle les vecteurs $\vec{T}$ et $\vec{N}$ sont des fonctions de l'abscisse curviligne s du point M , ou encore de la date t à laquelle cette position est occupée si la courbe correspond à une trajectoire d'un point matériel. Les bases associées à des systèmes de coordonnées curvilignes, par exemple polaire ou sphérique, sont également mobiles car les vecteurs qui les constituent dépendent des coordonnées du point. Un cas particulier important de base mobile est celui de la **base naturelle** associée à un système de coordonnées x^i , notamment quand ces coordonnées sont curvilignes. Elle est définie comme étant composée des vecteurs $\hat{x}_i$ tels que le déplacement élémentaire s'écrit, à l'aide de la notation indicelle et de la convention d'Einstein, $d\vec{r} = dx^i \hat{x}_i$. Dans le cas des coordonnées polaires, on a par exemple $d\vec{r} = dr \hat{r} + d\theta \hat{\theta}$, à comparer avec l'expression $d\vec{r} = dr \vec{e}_r + r d\theta \vec{e}_\theta$, introduite en physique ou mathématique élémentaires, et dans laquelle apparaissent les vecteurs de la base polaire (mobile) orthonormée. Les vecteurs de ces deux bases sont reliés par $\hat{r} = \vec{e}_r$ et $\hat{\theta} = r \vec{e}_\theta$. La base naturelle intervient dans l'approche traditionnelle des champs tensoriels, par exemple en mécanique des milieux continus ou en relativité générale. L'utilisation d'une base mobile orthonormée est au cœur du formalisme de la tétrade, grâce auquel on peut définir des grandeurs fermioniques dans un espace-temps courbe, par exemple en relativité générale.

basse dimension (système à)  (angl. *low dimensions*) Système dont certains degrés de liberté peuvent être décrits dans un espace de dimension 2, 1 ou 0. Par exemple, des électrons confinés à l'interface entre deux milieux se comportent comme un système bidimensionnel. On peut aussi confiner les électrons sur une ligne (> *fil quantique, liquide de Luttinger*) ou au voisinage d'un point (> *point quantique*). Ces systèmes présentent des caractéristiques parfois radicalement différentes de celles de leur homologue tridimensionnel. C'est le cas par exemple de leurs transitions de phase, dans certaines situations physiques (> *modèle d'Ising*). Ceci s'explique par le fait que les effets collectifs dépendent du

nombre de voisins avec lequel un constituant donné peut interagir, ce nombre étant lui-même très sensible à la dimension du système. Dans les systèmes unidimensionnels, se rajoutent l'impossibilité pour les particules de se contourner et la nécessité de se traverser pour échanger leurs positions. L'étude théorique du comportement d'un système à basse dimension peut aussi constituer une première étape pour identifier les paramètres importants et les phénomènes physiques attendus en dimension plus élevée.

- ▷ *One-Dimensional Hydrogen Atom*, Larry K. Haines & David H. Roberts, American Journal of Physics **37** (1969) p. 1145
- ▷ *Electronic properties of two-dimensional systems*, Tsuneya Ando, Alan B. Fowler *et al.*, Reviews of Modern Physics **54** (1982) p. 437
- ▷ *The Differences Between One-Dimensional and Three-Dimensional Semiconductors*, Esther M. Conwell, Physics Today **38** (1985) p. 46
- ▷ *Des solides en moins de trois dimensions*, Jean Rouxel, Pour la Science **165** (1991) p. 64
- ▷ *The Planiverse : then and now*, A.K. Dewdney, The Mathematical Intelligencer **22** (2000) p. 46
- ▷ *La gravitation quantique en deux dimensions*, Steven Carlip, Pour la Science **415** (2012) p. 72

bassin d'attraction (angl. *basin of attraction*) Région de l'espace des phases dont les points évoluent vers un attracteur donné. Cette région définit donc aussi la stabilité d'un attracteur, puisque les perturbations qui éloignent le système de cet attracteur ne peuvent l'en déloger que si elles sont assez importantes pour emmener le système hors du bassin d'attraction.

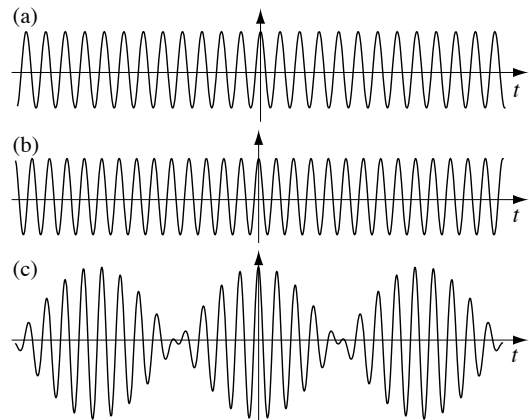


FIGURE 26 – battement – La courbe (c) montre le phénomène de battements : elle est obtenue en additionnant les sinusôides représentées par les courbes (a) et (b), la période de la sinusôide (a) étant 10 % plus élevée que celle de la sinusôide (b).

battement  (angl. *beat*) Modulation périodique d'un signal constitué de la superposition de deux signaux de fréquences proches. Plus précisément, la superposition de signaux de fréquences f_1 et f_2 donne un signal de fréquence $(f_1 + f_2)/2$ dont l'amplitude est modulée à la fréquence $|f_1 - f_2|/2$. Cet effet conduit à de nombreuses

applications, par exemple, la détection synchrone. De façon plus anecdotique, il est utilisé par les accordeurs d'instruments de musique (piano, guitare, etc.) pour s'assurer que deux cordes donnent la même note (les battements doivent alors disparaître).

▷ *Comment accorder une guitare ?*, Marc Legendre, Bulletin de l'Union des Physiciens **855** (2003) p. 903

baume du Canada (angl. *Canada balsam*) Liquide obtenu par distillation de résines de pin et traditionnellement utilisé en optique pour accoler des lentilles ou des prismes. Son indice de réfraction proche de celui du verre permet de limiter les réflexions multiples entre les différentes faces des composants optiques que l'on cherche à coller. De nos jours, on utilise aussi des colles optiques d'emploi plus aisé (séchage plus rapide).

BCS (théorie)  (angl. *BCS theory*) Théorie élaborée en 1957 par John Bardeen (1908–1991), Leon Cooper (1930–) et John Schrieffer (1931–2019), dont elle porte les initiales, et qui permet d'expliquer au niveau microscopique le phénomène de supraconductivité conventionnelle. Elle est basée sur l'existence d'une interaction faiblement attractive entre électrons et qui se traduit par la création de paires de Cooper. Dans les matériaux usuels, cette attraction est due à l'interaction entre les électrons et les phonons. L'apparition de la supraconductivité correspond à celle d'un état cohérent de paires de Cooper, lequel est associé à une fonction d'onde qui s'identifie au paramètre d'ordre complexe introduit dans la théorie de Ginzburg-Landau. La théorie BCS est toutefois plus générale que celle-ci, même si elle ne permet pas de rendre compte de tous les types de supraconductivité observés.

▷ *Le cinquantenaire de la théorie BCS de la supraconductivité*, Philippe Nozières, Reflets de la Physique **7** (2007) p. 14

Be Symbole de l'élément béryllium ($Z = 4$).

beauté  (angl. *beauty*) Autre nom donné au quark bottom et à la saveur qu'il porte.

- ▷ *Nonleptonic decays and lifetimes of charm and beauty particles*, Thomas E. Browder, Klaus Honscheid *et al.*, Annual Review of Nuclear and Particle Science **46** (1996) p. 395
- ▷ *Beauty physics in lattice gauge theory*, R. Sommer, Physics Reports **275** (1996) p. 1
- ▷ *Les oscillations des mésons beaux*, Marie-Hélène Schune & Achille Stocchi, Images de la Physique (1997) p. 45
- ▷ *Lifetimes of charm and beauty hadrons*, G Bellini, I.I Bigi *et al.*, Physics Reports **289** (1997) p. 1

Becquerel (Henri)  (1852–1908) Physicien expérimentateur français, prix Nobel de physique en 1903 en « reconnaissance des services extraordinaires qu'il a rendus par sa découverte de la radioactivité naturelle ». L'unité de mesure de la radioactivité porte désormais son nom (▷ *becquerel*).

- ▷ *The Window of Opportunity : Logic and Chance in Becquerel's Discovery of Radioactivity*, Nahum S. Kipnis, Physics in Perspective **2** (2000) p. 63
- ▷ *Il y a 100 ans, Henri Becquerel confirmait l'existence de la radioactivité qu'il découvrit en 1896*, Michel Barquins, Bulletin de l'Union des Physiciens **830** (2001) p. 3
- ▷ *Henri Becquerel et la découverte de la radioactivité naturelle couronnée, il y a cent ans, par le prix Nobel*, Michel Barquins, Bulletin de l'Union des Physiciens **859** (2003) p. 1563

becquerel [Bq] (angl. *becquerel*) Unité (symbole Bq) dans laquelle s'exprime l'activité d'un radionucléide dans le Système International d'unités. C'est une unité dérivée, reliée aux unités de base par $1 \text{ Bq} \equiv 1 \text{ s}^{-1}$. Pour des valeurs typiques, ▷ *activité*.

Beer–Lambert (loi de) (angl. *Beer-Lambert law*) Loi exprimant l'atténuation exponentielle de l'intensité d'un faisceau lumineux à la traversée d'un milieu du fait de la présence d'absorption ou de diffusion. Elle s'écrit

$$I(\ell) = I_0 e^{-a\ell},$$

où a désigne le **coefficient d'extinction**, qui a la dimension de l'inverse d'une longueur, et où ℓ désigne l'épaisseur traversée. L'intensité diminue donc d'un facteur e après traversée d'une épaisseur $1/a$. Dans le cas où l'extinction est due à l'absorption ou à la diffusion par un constituant en solution ou en suspension dans un milieu transparent, le coefficient a est proportionnel à la concentration de ce constituant. Cette loi fut énoncée en 1729 par Pierre Bouguer (1698–1758), elle est aussi appelée **loi de Bouguer** ou **loi de Beer-Lambert-Bouguer**.

Bekenstein (formule de)  (angl. *Bekenstein formula*) Expression donnant l'entropie S d'un trou noir en fonction de son aire A . Elle s'écrit

$$S = \frac{k_B c^3 A}{4G_N \hbar},$$

où k_B désigne la constante de Boltzmann, c la vitesse de la lumière, G_N la constante de Newton et $\hbar$ la constante de Planck réduite. L'existence de cette entropie a mené à la prédiction de celle du rayonnement d'Hawking, selon le principe suivant lequel toute entropie est associée à une température, et toute température à un rayonnement thermique. Son interprétation dans le cadre de la physique statistique reste cependant une question ouverte : par exemple, la théorie des cordes propose que cette entropie est reliée au nombre d'états possibles pour les cordes qui forment le trou noir. Cette formule fut obtenue en 1973 par Jacob Bekenstein (1947–2015). En unités de Planck, elle prend la forme plus simple $S = A/4$.

▷ *Informing Physics : Jacob Bekenstein and the Informational Turn in Theoretical Physics*, Israel Belfer, Physics in Perspective **16** (2014) p. 69

bel [B] (angl. *bel*) Unité (symbole B) dans laquelle on peut exprimer le rapport R de deux grandeurs V_1 et V_2 de même dimension, sous la forme

$$R(B) \equiv \log_{10} \left(\frac{V_1}{V_2} \right).$$

Cette forme convient particulièrement pour exprimer l'atténuation ou l'amplification d'un signal, que ce soit en terme de puissance ou de tension. On utilise plus souvent son sous-multiple, le décibel (▷ *décibel*, *neper*). Le nom honore la mémoire de Graham Bell (1847–1922).

bélier hydraulique (angl. *hydraulic ram*) Dispositif permettant de pomper un liquide à une hauteur assez élevée. Il consiste en un tuyau légèrement incliné et muni de deux valves : une valve latérale et une valve terminale nommée **soupape de choc** qui peut se fermer lorsque le fluide exerce dessus une force suffisamment importante (voir la figure). Les valves sont initialement fermées. On ouvre la valve terminale. Le liquide s'écoule de plus en plus vite dans le dispositif et la valve terminale finit par se refermer d'elle-même. L'écoulement s'arrête brutalement et une surpression se propage vers l'arrière. C'est l'effet « coup de bélier ». Cette surpression ouvre alors la valve latérale et le liquide, poussé par cette surpression, peut monter dans le second tuyau. Ceci fait décroître la surpression, jusqu'à ce que la valve terminale s'ouvre de nouveau, ce qui réamorçait le cycle. On atteint de cette manière des hauteurs de pompage de l'ordre de 100 m. Ce dispositif a été mis au point par les frères Montgolfier en 1796.

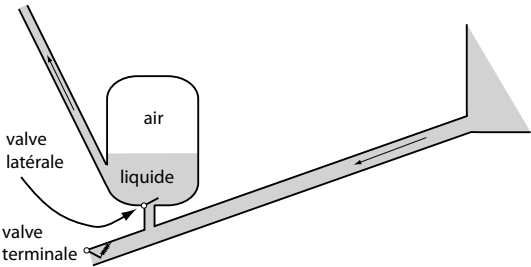


FIGURE 27 – bélier hydraulique – Représentation schématique du dispositif. L'air contenu dans le réservoir a pour rôle d'amortir les effets mécaniques des brusques variations de pression, jouant le rôle d'un ressort.

Bell (Jocelyn) (1943–) Physicienne irlandaise connue pour avoir découvert le premier pulsar radio au cours de sa thèse en 1968. Elle est au cœur d'une polémique, son responsable, Antony Hewish (1924–2021), ayant reçu le prix Nobel de physique 1974 pour son travail sur les pulsars, ce que certains considèrent comme une conséquence directe de l'observation faite par Jocelyn Bell.

Bell (John) (1928–1990) Physicien irlandais avant tout connu pour ses travaux en physique quantique (▷ *in-égalités de Bell*).

- ▷ *In Appreciation-The Depth and Breadth of John Bell's Physics*, Roman Jackiw & Abner Shimony, *Physics in Perspective* **4** (2002) p. 78
- ▷ *John Bell and the Identical Twins*, Jeremy Bernstein, *Physics in Perspective* **10** (2008) p. 269
- ▷ *John S. Bell's concept of local causality*, Travis Norsen, *American Journal of Physics* **79** (2011) p. 1261
- ▷ *Magic moments with John Bell*, Reinhold Bertlmann, *Physics Today* **68** (2015) p. 40

BELLA Acronyme de « Berkeley Lab Laser Accelerator ». Accélérateur à plasma situé au LBNL à Berkeley (Californie). Actif depuis 2009, il accélère des électrons initialement au repos jusqu'à leur donner des énergies

comprises entre 1 MeV et 1 GeV, à l'aide de structures magnétiques de tailles comprises entre quelques mm et quelques cm.

Belle Expérience de physique des particules située sur l'accélérateur KEK, au Japon, qui permettait, entre 1999 et 2010, de créer de nombreux mésons B afin d'étudier leurs propriétés (▷ *violation de CP, méson exotique*). Depuis 2019, l'expérience Belle II, plus performante, lui a succédé et devrait accumuler 50 fois plus de données.

BepiColombo Mission spatiale développée dans le cadre du programme scientifique de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), et destinée à l'étude de Mercure. Elle consiste en deux sondes, l'une dédiée à l'étude de la surface et de l'intérieur de la planète, l'autre à celle de son champ magnétique. Ces sondes, lancées le 20 octobre 2018, devraient atteindre Mercure le 5 décembre 2025, après plusieurs passages à proximité de cette planète, de Vénus et de la Terre.

Bergeron (effet) (angl. *Bergeron process*) Dans de l'air contenant des gouttes d'eau en surfusion et des cristaux de glace, croissance des cristaux au profit des gouttes d'eau. Cet effet est dû au fait que la pression de vapeur saturante de la glace est plus faible que celle de l'eau surfondue. Il fut décrit pour la première fois en 1935 par le météorologiste suédois Tor Bergeron (1891–1977).

- ▷ [*Idées de physique*] *Petite goutte deviendra grande*, Jean-Michel Courty & Édouard Kierlik, *Pour la Science* **409** (2011) p. 152

berkélium (angl. *Berkelium*) Élément de numéro atomique $Z = 97$, découvert en 1949 par Stanley Thompson (1912–1976), Albert Ghiorso (1915–2010) et Glenn Seaborg (1912–1999). Il est représenté par le symbole Bk. Structure atomique : $[Rn]7s^2 6d^0 5f^9$. Le nom fut donné en l'honneur de la ville de Berkeley, en Californie, qui a abrité plusieurs grands équipements de physique des particules, et où de nombreuses découvertes ont été effectuées.

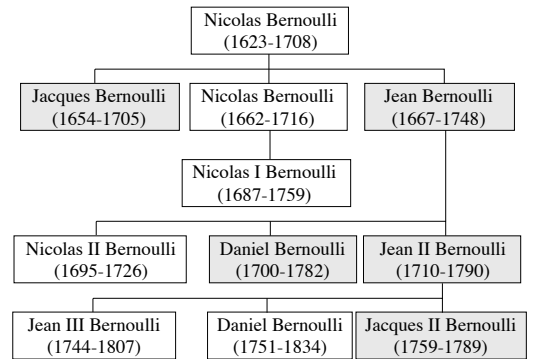


FIGURE 28 – Bernoulli (famille) – Arbre généalogique de la famille Bernoulli. Les cases grisées indiquent les personnages dont le rôle en physique est mentionné dans la définition.

Bernoulli (famille)  Célèbre dynastie scientifique suisse originaire de Bâle et dont ne seront mentionnés ici que cinq membres, les plus notables pour la physique, bien que d'autres aient laissé leurs noms dans l'histoire, en particulier pour des contributions importantes aux mathématiques. De la première génération de trois frères (voir l'arbre généalogique), on peut distinguer :

- Jacques Bernoulli (1654–1705), théologien par la volonté de son père, mathématicien et astronome par sa propre volonté, qui fonda le calcul des probabilités dans son ouvrage *Ars conjectandi*, publié après sa mort par son neveu Nicolas. Dans ce domaine, on lui doit en particulier la loi des grands nombres et la loi de Bernoulli. Il est aussi à l'origine des fameux nombres de Bernoulli, et s'intéressa au calcul différentiel (entre autres choses grâce à une intense correspondance avec Gottfried von Leibniz) qu'il appliqua à l'étude de l'élasticité ;
- Jean Bernoulli (1667–1748), médecin de formation et mathématicien malgré l'avis paternel, qui développa une vision mécaniste des muscles. Après avoir étudié les mathématiques auprès de son frère aîné, il travailla lui aussi sur le calcul infinitésimal et l'élasticité, ses relations avec Jacques n'étant pas des plus sereines une fois que l'élève eut atteint le niveau de son maître. Jean Bernoulli introduisit également le principe des travaux virtuels et fut un fervent détracteur de Sir Isaac Newton (1643–1727) en Europe continentale, ardent défenseur qu'il était de Gottfried von Leibniz.

Parmi les fils de Jean, le plus célèbre est Daniel Bernoulli (1700–1782), lui aussi médecin et qui lui aussi se consacra aux mathématiques contre la volonté de son père. Par la médecine, il fut conduit à s'intéresser à la notion de pression, l'étude de celle du sang lui permettant de formuler la loi de Bernoulli sur les fluides. Il inventa également le mot « *hydrodynamique* », énonça la loi du parallélogramme pour la composition des forces et découvrit la loi des gaz parfaits. Il fut également le premier à appliquer les principes du calcul probabiliste, fondé par son oncle Jacques, à l'astronomie, démontrant que certaines conjonctions entre planètes n'avaient que peu de chances d'être accidentelles. Dans la lignée des travaux de son père et de son oncle, il étudia l'élasticité, mais avec une approche dynamique, et posa d'une certaine façon les bases de l'analyse de Joseph Fourier (1768–1830) quand il remarqua que les oscillations d'une corde vibrante pouvaient toujours se ramener à des oscillations plus simples.

Les contributions de son frère, Jean II Bernoulli (1710–1790), sont moins notables, mais il est néanmoins à l'origine de la première théorie des oscillations de l'éther qui préfigure la théorie de Maxwell et qui lui valut un prix de l'Académie des Sciences de Paris. La thématique oscillatoire resta d'ailleurs encore quelques temps dans la famille puisque parmi les fils de Jean II, Jacques II Bernoulli (1759–1789) aborda le problème de la plaque vibrante, sa mort mettant toutefois un terme prématuré à ses études.

- ▷ *The contributions of Newton, Bernoulli and Euler to the theory of the tides*, E.J. Aiton, *Annals of Science* **11** (1955) p. 206
- ▷ *Savants français en Hollande*, Pierre Sergescu, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **9** (1956) p. 74
- ▷ *Planets and probability : Daniel Bernoulli on the inclinations of the planetary orbits*, Barry Gower, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* **18** (1987) p. 441
- ▷ *Johann Bernoulli (1667-1748) : his turbulent years in Groningen*, Gerard Sierksma, *The Mathematical Intelligencer* **14** (1992) p. 22
- ▷ *Quand l'astronomie devint un métier : Grandjean de Fouchy, Jean III Bernoulli et la « république astronomique », 1700-1830*, René Sigrist, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **61** (2008) p. 105

Bernoulli (loi de) ► 1. Loi de probabilité décrivant deux événements complémentaires, l'un avec une probabilité p et l'autre avec une probabilité $(1 - p)$. Elle tient son nom du mathématicien suisse Jacques Bernoulli (1654–1705). ► 2. Lors de l'écoulement stationnaire d'un fluide parfait incompressible dans lequel aucun échange de chaleur ne se produit, la quantité

$$C \equiv p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z$$

est constante le long d'une ligne de fluide, où p , v et ρ désignent respectivement la pression, la vitesse, la masse volumique du fluide, z l'altitude du point considéré et g l'accélération de la pesanteur. La quantité C , homogène à une pression, ou la quantité $C/\rho g$, homogène à une longueur, sont parfois appelées la **charge**. Cette loi, énoncée en 1738 par Daniel Bernoulli (1700–1782), s'interprète aujourd'hui comme traduisant la conservation de la densité d'énergie totale le long d'une ligne de fluide, la pression étant liée à la densité d'énergie interne par le premier principe de la thermodynamique, alors que les deux autres termes représentent les densités d'énergie cinétique et d'énergie potentielle gravitationnelle. Elle indique en particulier que, pour une altitude z fixée, la pression diminue quand la vitesse augmente, ce qui permet de comprendre l'effet Venturi et la force de Magnus. La loi de Bernoulli est une conséquence directe de l'équation d'Euler. Si le fluide est en écoulement irrotationnel, la quantité C est constante dans tout le fluide et pas seulement le long d'une ligne donnée. Cette quantité n'est plus constante lorsque l'une des hypothèses de départ n'est pas vérifiée, par exemple pour un fluide visqueux. On parle alors de **perte de charge**.

- ▷ *Bernoulli Effect and Kinetic Theory*, Francisco Glover, *American Journal of Physics* **36** (1968) p. 811
- ▷ *[Questions and Answers] #28. Bernoulli equation*, A. P. French, *American Journal of Physics* **63** (1995) p. 875
- ▷ *[Questions and Answers] #44. Bernoulli's principle*, Hans C. Ohanian, *American Journal of Physics* **64** (1996) p. 681
- ▷ *L'écoulement dans une trompe à eau vérifie-t-il l'équation de Bernoulli ?*, Xavier Chavanne, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **841** (2002) p. 59
- ▷ *The shape function of a free-falling laminar jet : Making use of Bernoulli's equation*, Taha Massalha & Rafael M. Digilov, *American Journal of Physics* **81** (2013) p. 733

Berthelot (équation de) (angl. *Berthelot equation*)
Équation d'état de la forme

$$\left(p + \frac{n^2 a}{TV^2}\right)(V - nb) = nRT$$

où a et b désignent des constantes analogues à celles qui apparaissent dans l'équation de Van der Waals. L'équation d'état de Berthollet possède sur cette dernière l'avantage de donner une capacité calorifique à volume constant C_v dont la valeur diffère de celle du gaz parfait à la même température, conformément à ce qui est mesuré. Elle a été proposée par Daniel Berthollet (1865–1927), fils de Marcellin Berthollet (1827–1907).

Berthollet (expérience de) (angl. *Berthollet experiment*) Expérience permettant de tester la loi de Dalton relative à la pression d'un mélange idéal de gaz. Elle consiste à mélanger deux gaz initialement à la même pression p_0 et à mesurer la pression finale. Lorsque la loi de Dalton est vérifiée, la pression finale p_1 est encore égale à p_0 . Le nom de cette expérience honore le chimiste Claude Berthollet (1748–1822) qui mena de nombreuses études sur les mélanges gazeux.

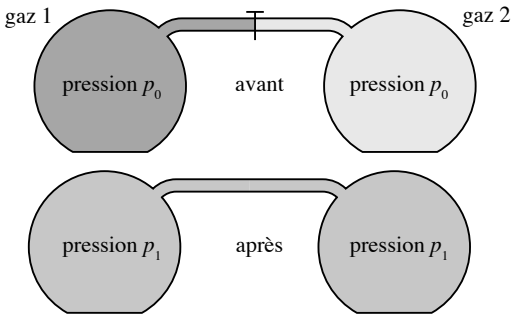


FIGURE 29 – Berthollet (expérience de)

Bertozzi (expérience de) (angl. *Bertozzi experiment*) Expérience consistant à mesurer la vitesse v et l'énergie cinétique E_c d'électrons accélérés par un champ électrique, pour vérifier la relation prédite par la relativité restreinte entre ces deux quantités,

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \left(\frac{m_e c^2}{E_c + m_e c^2}\right)^2$$

où c désigne la vitesse de la lumière et m_e la masse de l'électron. La vitesse est obtenue en mesurant le temps de vol sur une distance connue, et l'énergie cinétique grâce à un calorimètre. Elle permet aussi de vérifier que la vitesse des électrons est toujours inférieure à c , conformément aux prédictions de la relativité. Elle fut réalisée en 1964 par William Bertozzi, avec des électrons ayant une énergie comprise entre 0,5 et 15 MeV, dans un accélérateur linéaire du MIT.

Bertrand (théorème de) (angl. *Bertrand theorem*) Théorème énoncé en 1873 par le mathématicien Joseph Bertrand (1822–1900), selon lequel les seules forces centrales donnant des trajectoires fermées, quelles que soient les conditions initiales, sont la force de Newton $\vec{F} = -k\vec{u}_r/r^2$ (par exemple, la force gravitationnelle

entre deux masses et la force électrostatique entre deux charges de signes opposés) et la force de Hooke $\vec{F} = -k\vec{r}$ (par exemple, le ressort). On peut obtenir des trajectoires fermées pour d'autres types de forces, mais seulement pour des conditions initiales soigneusement choisies.

- ▷ *Forces giving no orbit precession*, Lowell S. Brown, American Journal of Physics **46** (1978) p. 930
- ▷ *A simplified proof of Bertrand's theorem*, Yoel Tikochinsky, American Journal of Physics **56** (1988) p. 1073
- ▷ *À propos du théorème de Bertrand relatif aux mouvements de Kepler et elliptique harmonique*, Claude Terrien, Bulletin de l'Union des Physiciens (1995) p. 125
- ▷ *The Bertrand theorem revisited*, Yair Zarmi, American Journal of Physics **70** (2002) p. 446
- ▷ *A truly elementary proof of Bertrand's theorem*, Siu A. Chin, American Journal of Physics **83** (2015) p. 320

béryllium (angl. *beryllium*) Élément de numéro atomique $Z = 4$, découvert en 1797 par Louis-Nicolas Vauquelin (1763–1829). Il est représenté par le symbole Be. Structure atomique : $[\text{He}]2s^2$. Masse volumique : $1\,850\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- ▷ *Lithium and Beryllium in Stars*, George Wallerstein & Peter S. Conti, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **7** (1969) p. 99
- ▷ *Lithium–beryllium–boron : origin and evolution*, Elisabeth Vangioni-Flam, Michel Cassé *et al.*, Physics Reports **333** (2000) p. 365

Bessel (Friedrich Wilhelm) (1784–1846) Astronome et mathématicien allemand. Il mesura la première parallaxe stellaire en 1838, celle de l'étoile 61 Cygni, apportant une preuve tardive du mouvement de la Terre autour du Soleil, à une époque où celui-ci n'était plus mis en doute. Cette mesure marqua la naissance d'une nouvelle méthode pour déterminer la distance qui nous sépare des étoiles. Bessel introduisit également les fonctions qui portent son nom pour résoudre des problèmes de mécanique céleste. Les fonctions de Bessel sont aujourd'hui omniprésentes en physique.

- ▷ *Constant differences : Friedrich Wilhelm Bessel, the concept of the observer in early nineteenth-century practical astronomy and the history of the personal equation*, Christoph Hoffmann, The British Journal for the History of Science **40** (2007) p. 333

bêta $[\beta]$ (angl. *beta*) ► 1. En relativité restreinte, notation usuelle pour le rapport v/c , où v est la vitesse d'un système ou d'un référentiel et c la vitesse de la lumière. Cette quantité sans dimension peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1. Quand v se rapporte à la vitesse d'une particule, la valeur de β est reliée à la quantité de mouvement p et à l'énergie totale E par $\beta = pc/E$. ► 2. Nom donné en 1900 par Ernest Rutherford (1871–1937) aux phénomènes faisant intervenir un électron ou un positon, avant l'élucidation de leur nature. On parle encore aujourd'hui de radioactivité bêta (► *radioactivité*).

- ▷ *The scattering of α and β particles and Rutherford's atom*, John L. Heilbron, Archive for history of exact sciences **4** (1968) p. 247
- ▷ *Action des champs magnétiques et électriques sur les radiations émises par les corps radioactifs*, Georges Guinier, Bulletin de l'Union des Physiciens **73** (1979) p. 1197
- ▷ *William Wilson and the Absorption of Beta Rays*, Allan Franklin, Physics in Perspective **4** (2002) p. 40

bêta-tron (angl. *betatron*) Accélérateur circulaire d'électrons constitué d'un électro-aimant auquel on ap-

plique un courant variable. Le champ magnétique variable induit par le courant crée un champ électrique qui accélère les électrons, la valeur moyenne du champ magnétique étant ajustée pour qu'au cours de cette accélération, le rayon de giration des électrons reste constant. L'idée en a été proposée dès les années 1920 puis continuellement améliorée, mais il fallut attendre 1940 pour qu'elle soit mise en œuvre dans un dispositif fonctionnel, construit par Donald Kerst (1911–1993). Le bêtatron a été utilisé comme source d'électrons jusqu'à des énergies d'environ 300 MeV, ainsi que comme source de rayons X ou gamma, ceux-ci étant obtenus en envoyant les électrons sur une cible matérielle. Ils ont ensuite cédé la place à des accélérateurs linéaires et à des synchrotrons, comme sources d'électrons et de rayonnement, respectivement. La mise au point du bêtatron a soulevé des problèmes techniques dont la résolution a largement contribué au développement des synchrotrons.

bethe [B] (angl. *bethe*) Unité d'énergie (symbole B) proposée en 2006 par Steven Weinberg (1933–2021) en l'honneur de Hans Bethe (1906–2005) et définie comme $1 \text{ B} \equiv 10^{44} \text{ J} = 10^{51} \text{ erg}$. Son ordre de grandeur est typique de l'énergie émise par les supernovæ, phénomènes auxquels Bethe s'est intéressé.

Bethe (formule de) (angl. *Bethe formula*) Expression donnant, dans le cas non relativiste, la perte d'énergie que subit, par unité de longueur traversée, un projectile de charge zq_e (où q_e désigne la charge élémentaire et où z peut être positif ou négatif) et de vitesse $v \ll c$ dans un milieu comportant une densité volumique d'électrons n_e . Elle s'écrit

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n_e}{m_e v^2} \left(\frac{z q_e^2}{4\pi \epsilon_0} \right)^2 \ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right),$$

où m_e désigne la masse de l'électron et ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide. Le terme I représente l'énergie moyenne d'ionisation des électrons dans le milieu, et vaut environ $I \approx Z \times 11,5 \text{ eV}$ où Z est le numéro atomique de l'élément dont est composé le milieu absorbant. Cette formule fut obtenue en 1930 par Hans Bethe (1906–2005). Dans le cas relativiste, l'expression adaptée est celle de Bethe-Bloch.

Bethe (Hans)  (1906–2005) Physicien américain d'origine allemande (né à Strasbourg), prix Nobel en 1967 pour « ses contributions à la théorie des réactions nucléaires, en particulier ses découvertes concernant la production d'énergie dans les étoiles ». Hans Bethe travailla en effet sur la nucléosynthèse stellaire (étudiant la formation d'hélium à partir d'hydrogène), sur la physique des supernovæ, ainsi que sur la nucléosynthèse primordiale. Sur ce dernier sujet, il réussit même l'exploit, grâce à George Gamow (1904–1968), de publier un célèbre article avant même de s'être penché sur la question : il s'agit du fameux article de 1948 présentant le travail de thèse de l'étudiant de Gamow, Ralph Asher Alpher (1921–2007), à la liste d'auteurs duquel Gamow tint à ajouter Bethe pour rendre hommage à la création de la matière originelle *via* l'alphabet grec. Les travaux

de Bethe concernant la physique nucléaire eurent également des applications moins pacifiques, puisqu'il fut par exemple directeur du service théorique de Los Alamos au cours du développement du projet Manhattan, dans lequel il joua un rôle important, et qu'il participa par la suite au développement de la bombe à hydrogène. Toute sa vie durant, il manifesta toutefois un soutien actif à l'utilisation civile de l'énergie nucléaire. En dehors de diverses autres contributions notables à la physique (*> ansatz de Bethe, formule de Bethe*), Bethe reste aussi dans les mémoires pour avoir publié dans les années 80, alors âgé de plus de 80 ans, un article important sur le problème des neutrinos solaires.

- ▷ *Nuclear Physics Needed for the Theory of Supernovae*, H. A. Bethe, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **38** (1988) p. 1
- ▷ *A Conversation with Hans Bethe*, Judith Goodstein, *Physics in Perspective* **1** (1999) p. 253
- ▷ *Fly with eagles*, G. E. Brown, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **51** (2001) p. 1
- ▷ *My Life in Astrophysics*, Hans A. Bethe, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **41** (2003) p. 1
- ▷ *Writing the Biography of Hans Bethe : Contextual History and Paul Forman*, Silvan S. Schweber, *Physics in Perspective* **16** (2014) p. 179

Bethe–Bloch (formule de) (angl. *Bethe-Bloch formula*) Nom que porte parfois l'expression donnant, dans le cas relativiste, la perte d'énergie que subit, par unité de longueur traversée, un projectile de charge $z q_e$ (où q_e désigne la charge élémentaire et où z peut être positif ou négatif) et de vitesse v dans un milieu comportant une densité volumique d'électrons n_e . Elle s'écrit

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n_e}{m_e v^2} \left(\frac{z q_e^2}{4\pi \epsilon_0} \right)^2 \times \left\{ \ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{c_k}{Z} \right\},$$

où m_e désigne la masse de l'électron et ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide. Le terme I représente l'énergie moyenne d'ionisation des électrons dans le milieu, $\beta = v/c$ est le paramètre relativiste habituel (*> bêta*) et c_k est un paramètre empirique prenant en compte la structure atomique du milieu dont le numéro atomique est Z . Cette expression fut obtenue en 1932 par Hans Bethe (1906–2005), Félix Bloch (1905–1983) en ayant introduit en 1933 une version simplifiée dans laquelle I est approximée par une fonction linéaire de Z . La version non relativiste est appelée formule de Bethe, pour la différencier.

bevatron (angl. *bevatron*) Nom d'un synchrotron situé à Berkeley (Californie) et ayant notamment permis, en 1954, d'accélérer des protons jusqu'à une énergie de 6,2 GeV. Il permit la découverte expérimentale de l'antiproton. Le nom provient de l'unité BeV (B pour le terme anglais « billion » signifiant « milliard »), aujourd'hui appelée le GeV.

Bezold–Brücke (effet)  (angl. *Bezold-Brücke phenomenon*) Phénomène physiologique, selon lequel la teinte d'une couleur que voit l'œil humain peut dépendre de l'intensité lumineuse.

▷ *The Bezold-Brücke phenomenon and Goethe's rejection of Newton's Opticks*, Michael Duck, *American Journal of Physics* **55** (1987) p. 793

Bh Symbole de l'élément bohrium ($Z = 107$).

Bi Symbole de l'élément bismuth ($Z = 83$).

biaxe (angl. *biaxial*) Se dit d'un milieu optiquement anisotrope dans lequel les trois directions de base ont des propriétés optiques différentes. Pour un tel milieu, l'ellipsoïde des indices ne présente pas de symétrie particulière, contrairement au cas des milieux uniaxes (▷ *uniaxe*).

biconcave (angl. *biconcave*) Qualifie une lentille dont les deux faces sont concaves. La lentille est alors plus mince au centre qu'au bord. Elle est divergente si elle est plongée dans un milieu d'indice plus faible que celui du verre qui la constitue (par exemple dans l'air).

biconvexe (angl. *biconvex*) Qualifie une lentille dont les deux faces sont convexes. La lentille est alors plus épaisse au centre qu'au bord. Elle est convergente si elle est plongée dans un milieu d'indice plus faible que celui du verre qui la constitue (par exemple dans l'air).

bifurcation  (angl. *bifurcation*) Dédoubllement des solutions des équations d'évolution d'un système dynamique, pour certaines valeurs des paramètres de ces équations. Ce terme fut introduit par Henri Poincaré (1854–1912) en 1885, dans son étude de la forme des corps en rotation (▷ *instabilité de Jacobi*). Dans l'espace des paramètres, le point où se produit cette bifurcation est appelé **point de bifurcation**.

- ▷ *Introduction to bifurcation theory*, John David Crawford, *Reviews of Modern Physics* **63** (1991) p. 991
- ▷ *Stability and Hopf bifurcations in an inverted pendulum*, James A. Blackburn, H. J. T. Smith *et al.*, *American Journal of Physics* **60** (1992) p. 903
- ▷ *Physique non-linéaire et bifurcations*, Vincent Bourges, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **804** (1998) p. 849

Big Bang  (angl. *Big Bang*) Nom souvent donné au modèle cosmologique actuellement favorisé (▷ *modèle standard de la cosmologie*) et selon lequel l'Univers, du fait de son expansion, est passé par des états plus denses et plus chauds. Le terme « Big Bang » (littéralement, le « gros boum ») a été introduit en 1949 par Fred Hoyle (1915–2001) pour désigner une explosion initiale que semblait impliquer le modèle proposé par George Gamow (1904–1968), et avant lui par Georges Lemaître (1894–1966), sous une forme différente et non connue de Hoyle. Cette connotation est aujourd'hui moins présente et le terme « Big Bang » devrait être réservé à un modèle d'évolution, sans aucune référence à l'instant initial ou à la « création » de l'Univers, et ce d'autant plus que dans ce modèle l'expansion n'est pas due à une explosion.

- ▷ *The Beginning of the World : Georges Lemaître and the Expanding Universe*, Helge Kragh, *Centaurus* **30** (1987) p. 114
- ▷ *Reflections on Early Work on "Big Bang" Cosmology*, Ralph A. Alpher & Robert Herman, *Physics Today* **41** (1988) p. 24
- ▷ *Gamow's Game : The Road to the Hot Big Bang*, Helge Kragh, *Centaurus* **38** (1996) p. 335
- ▷ *Discovery of the hot Big Bang : What happened in 1948*, Phillip James Edwin Peebles, *European Journal of Physics H* **39** (2014) p. 205

▷ *Naming the Big Bang*, Helge Kragh, *Historical Studies in the Natural Sciences* **44** (2014) p. 3

- *Essais de cosmologie – précédés de l'invention du Big Bang*, Jean-Pierre Luminet, (Seuil, 1997)

Big Crunch (angl. *Big Crunch*) Dans certains modèles d'évolution de l'Univers proposés par la cosmologie, l'expansion actuelle pourrait cesser et laisser la place à une contraction qui conduirait à une singularité future (la densité et la température tendant vers l'infini en un temps fini). Cet événement hypothétique est appelé « Big Crunch ». Ce scénario n'est pas favorisé par la cosmologie actuelle, dans laquelle l'expansion est au contraire accélérée et prendra une importance de plus en plus grande dans le futur, à moins d'un bouleversement ultérieur de l'évolution que rien ne laisse présager pour le moment (▷ *Big Rip*).

Big Rip (angl. *Big Rip*) Un des scénarios cosmologiques décrivant le futur très lointain de notre Univers, dont le nom signifie « grand déchirement » en anglais. Si l'accélération de l'expansion cosmologique ne s'arrête pas, celle-ci pourrait devenir si rapide qu'elle se ferait sentir à des échelles spatiales de plus en plus petites, ce qui aurait pour effet de disloquer les amas de galaxies, les galaxies, leurs étoiles, et même les atomes eux-mêmes.

biharmonique biharmonique (angl. *biharmonic*) Qualifie l'équation aux dérivées partielles du quatrième ordre

$$\nabla^4 f \equiv \Delta^2 f = 0,$$

où ∇ est l'opérateur « nabla » et Δ le laplacien. Par extension, qualifie également une fonction f qui en est solution. L'équation biharmonique intervient en particulier dans les problèmes d'élasticité : dans un corps élastique soumis à des forces volumiques nulles, les composantes du tenseur des déformations et celles du tenseur des contraintes sont des fonctions biharmoniques.

bilame  (angl. *bimetallic strip*) Dispositif permettant d'ouvrir un circuit lorsque la température d'un de ses éléments dépasse une valeur seuil. Il est constitué de deux lames métalliques de natures différentes, collées l'une contre l'autre. Le passage du courant chauffe ces deux lames, par effet Joule. Si les coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés sont différents, le dispositif se courbe en s'échauffant. On peut utiliser cette propriété pour ouvrir un circuit électrique, dans un disjoncteur. Une fois le circuit ouvert, les lames peuvent se redresser en se refroidissant et refermer le circuit : les bilames ont par exemple longtemps été utilisés pour commander les clignotants des automobiles. Ils ont été très largement remplacés par des dispositifs électroniques dans la plupart de leurs applications.

- ▷ *Dilatation et contraintes thermiques dans les solides : application aux bilames*, Jean-Pierre Michel & Gilbert Pitone, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **940** (2012) p. 77

bilan (angl. *balance*) Comptabilité des échanges avec l'extérieur auxquels participe un système physique, en relevant ce qui rentre et ce qui sort du système. On peut par exemple faire le bilan d'énergie d'une transformation,

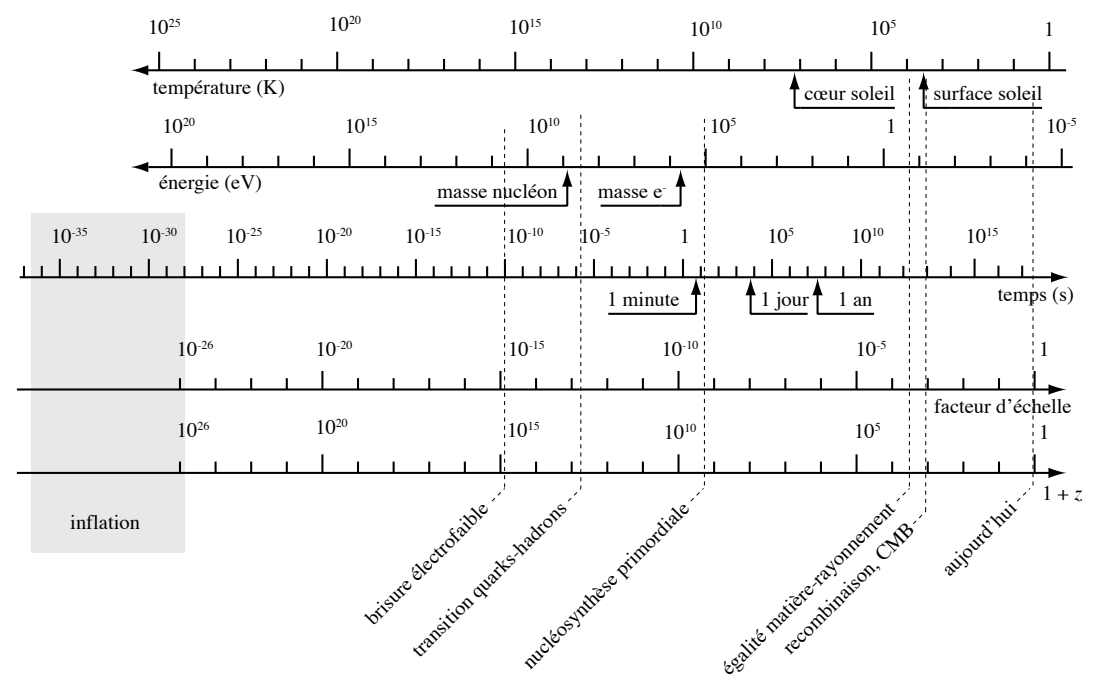


FIGURE 30 – Big Bang – Frise montrant plusieurs événements marquants de l'histoire thermique de notre Univers, en fonction du temps, de la température, de l'énergie moyenne des particules et du facteur d'échelle.

et déterminer ainsi si le système a finalement gagné ou perdu de l'énergie au cours de la transformation. On parle aussi de bilan de masse, de quantité de mouvement ou de moment cinétique, par exemple.

bilan détaillé (principe du)  (angl. *detailed balance*) Principe selon lequel, à l'équilibre thermodynamique, le taux de toute réaction élémentaire est égal à celui de la réaction inverse. De manière plus formelle, étant donné un système physique dont l'état est décrit par une variable aléatoire continue x qui suit une densité de probabilité à l'équilibre $p(x)$, le principe du bilan détaillé implique l'égalité

$$W(x_1, x_2) p(x_1) = W(x_2, x_1) p(x_2),$$

où $W(x_i, x_f)$ est la probabilité par unité de temps que le système passe de l'état x_i à l'état x_f . On utilise aussi parfois l'anglicisme **principe de la balance détaillée**.
▷ *équation maîtresse, équation de Fokker-Planck*.

▷ G. N. Lewis on Detailed Balancing, the Symmetry of Time, and the Nature of Light, Roger H. Stuewer, Historical Studies in the Physical Sciences 6 (1975) p. 469

bilan neutronique Dans le contexte de la physique nucléaire, bilan des productions et des pertes de neutrons dans un réacteur. Ce bilan permet d'analyser l'efficacité et la dangerosité du réacteur.

bilentille (angl. *split lens*) Système interférentiel constitué de deux demi-lentilles dont les positions sont décalées, ou bien le long de l'axe optique dans le cas des **bilentilles de Meslin**, ou bien transversalement à l'axe optique pour les **bilentilles de Billet**. Dans ces dispositifs, chaque demi-lentille crée une source secondaire décalée transversalement par rapport à l'axe optique (dans le cas de Billet) ou le long de l'axe optique (dans le cas de Meslin). Les **bilentilles de Zernike** sont des bilentilles de Billet dans lesquelles on laisse la lumière passer par l'interstice entre les lentilles ; la partie de l'onde qui traverse les demi-lentilles interfère alors avec celle qui passe dans l'espace libre laissé entre elles. Les bilentilles furent introduites en 1858 par Félix Billet (1808–1882) et Georges Meslin (1862–1918) introduisit la configuration qui porte son nom en 1893.

billard d'Anaïs (angl. *Anaïs billard*) Dispositif de démonstration d'un effet surprenant, proposé en 1986 par Jean-Marc Lévy-Leblond (1940–). Il consiste en un plan horizontal dont une partie est constituée d'un disque rotatif tournant à vitesse constante. Lorsque l'on fait rouler une bille sur le plan horizontal en direction du centre du disque, elle suit une trajectoire complexe au cours de son passage sur le disque tournant. Cependant, on observe que la trajectoire à la sortie du disque se trouve dans le prolongement de la trajectoire initiale, comme si le disque était absent.

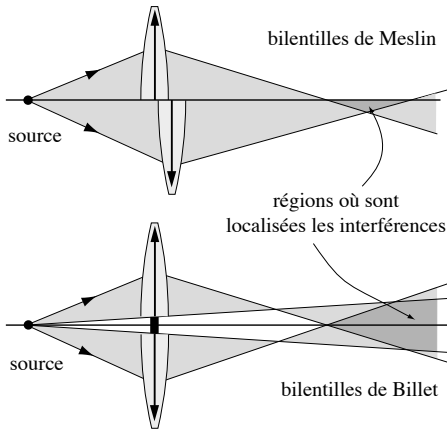


FIGURE 31 – bilentille – Différents types de bilentilles. Les régions claires matérialisent les faisceaux lumineux traversant le système. Ceux-ci se superposent dans la région plus foncée qui contient les interférences.

binaire (angl. *binary*) Ce terme, un adjectif, est également communément utilisé comme substantif, nous mêlons ici les deux emplois. ► **1. Un mélange binaire** est constitué de deux corps purs pouvant coexister dans la même phase ou dans des phases différentes, selon les conditions externes auxquelles il est soumis (température, pression, etc.). ► **2.** En informatique et en électronique, qualifie un codage en base deux, utilisant les symboles 0 et 1. ► **3. Une étoile binaire**, aussi nommée un **système binaire** ou une **binaire**, est un couple d'étoiles liées par la gravitation qui tournent autour du centre de gravité du système qu'elles forment. Ces étoiles sont en général nées de l'effondrement de la même région d'un nuage moléculaire (▷ *protoétoile*), et, quand elles sont très proches, peuvent échanger de la matière, voire posséder une enveloppe commune. Selon les méthodes qui permettent de mettre en évidence la co-existence des deux astres, on distingue plusieurs types de binaires, un même système pouvant par conséquent correspondre simultanément à plusieurs d'entre eux :

- dans une **binaire visuelle**, les deux étoiles peuvent être séparées avec un simple télescope. Il ne faut pas confondre binaire visuelle et **étoile double optique**, ce dernier terme désignant un ensemble de deux étoiles qui, vues depuis le Système solaire semblent être proches, mais ne le sont pas en réalité (▷ *étoile double*) ;
- dans une **binaire spectroscopique**, on ne parvient pas facilement à séparer les deux composantes, mais celles-ci sont mises en évidence par l'étude du spectre d'une des étoiles qui la constituent, ce spectre portant trace du mouvement orbital *via* l'effet Doppler. Le même principe a souvent été utilisé pour détecter des planètes extra-solaires ;
- dans une **binaire astrométrique**, les deux composantes ne sont pas résolues, et la nature binaire

est démontrée par une irrégularité périodique du mouvement propre du photocentre. Il s'agit de la trace d'un mouvement orbital ;

- dans une **binaire à éclipses**, le plan de révolution du système est peu incliné par rapport à la droite qui lie son centre de masse à la Terre, de sorte que l'une des composantes passe régulièrement entre l'observateur terrestre et la seconde. Cette dernière est donc périodiquement occultée par la première, la variation de luminosité totale étant un indicateur des deux luminosités individuelles (▷ *courbe de lumière*).

Une étoile binaire peut évoluer pour donner naissance à un pulsar binaire, à une binaire d'étoiles à neutrons ou encore à un trou noir binaire. Dans le cas où l'une des étoiles est devenue un objet astrophysique compact et que la seconde est encore une étoile usuelle ayant permis la formation d'un disque d'accrétion autour de son compagnon, le système peut se manifester comme une binaire X.

- ▷ *Beyond the planets : early nineteenth-century studies of double stars*, Mari Williams, The British Journal for the History of Science **17** (1984) p. 295
- ▷ *Les étoiles binaires émettrices de rayons X*, Edward van den Heuvel & Jan van Paradijs, Pour la Science **195** (1994) p. 60
- ▷ *Why Was the Companion of Sirius Not Seen Prior to 1862 ?*, François Wesemael & René Racine, Journal for the History of Astronomy **39** (2008) p. 161
- ▷ *Des mondes à deux soleils*, William Welsh & Laurance Doyle, Pour la Science **435** (2014) p. 36

binaire compacte (angl. *compact binary*) Système stellaire binaire dans lequel une au moins des étoiles est une naine blanche, une étoile à neutrons, ou un trou noir. Les binaires compactes sont associées à des phénomènes très énergétiques (▷ *binaire X*), mais aussi à l'émission d'ondes gravitationnelles (▷ *binaire d'étoiles à neutrons*, *pulsar binaire*, *trou noir binaire*).

binaire d'étoiles à neutrons Système stellaire composé de deux étoiles à neutrons. Si l'une de ces étoiles est visible comme un pulsar, on parle de *pulsar binaire* (▷ *pulsar binaire de Hulse et Taylor*). À ce jour (mai 2023), on ne connaît qu'un seul pulsar double (PSR J0737–3039), et l'on pense avoir observé, par l'intermédiaire d'ondes gravitationnelles, deux coalescences de binaires d'étoiles à neutrons (▷ *GW170817*).

binaire X Système binaire dont l'un des membres est une étoile à neutrons ou un trou noir entouré d'un disque d'accrétion formé de matière issue de l'autre étoile, laquelle est encore active. L'intense rayonnement X qu'émet la binaire provient de la chute de cette matière vers l'objet compact, et correspond à la conversion d'une énergie potentielle gravitationnelle en énergie électromagnétique. Selon la masse et le stade d'évolution de l'étoile non compacte, on distingue plusieurs catégories de binaires X, un cas particulier étant celui des microquasars.

Binet (formules de) Expressions cinématiques donnant la vitesse $\vec{v}$ et l'accélération $\vec{a}$ d'un corps en coordonnées polaires (r, θ). Elles sont souvent exprimées en

fonction de la variable $u = 1/r$ où r désigne la norme du vecteur position, sous la forme

$$v^2 = C^2 \left[u^2 + \left(\frac{du}{d\theta} \right)^2 \right]$$

et

$$\vec{a} = -C^2 u^2 \left[u + \frac{d^2 u}{d\theta^2} \right] \vec{u}_r,$$

où $C \equiv r^2 \dot{\theta}$ désigne la constante des aires. Ces formules sont particulièrement utiles pour l'étude du mouvement des corps soumis à une force centrale. Elles ont été obtenues en 1831 par Jacques Binet (1786–1856).

binoculaire (angl. *binocular*) Désigne un dispositif optique constitué de deux oculaires, afin d'utiliser les deux yeux (on parle alors de **vision binoculaire**). Ceci permet d'augmenter le confort visuel, notamment dans les jumelles, les lunettes astronomiques ou certains microscopes. Si les vues fournies par les deux oculaires sont suffisamment décalées latéralement l'une de l'autre, ce type de dispositif autorise de surcroît la vision stéréoscopique.

bioluminescence  (angl. *bioluminescence*) Luminescence d'origine biologique. Certains organismes vivants possèdent en effet la propriété d'émettre de la lumière. C'est le cas par exemple des lucioles et de certains organismes marins. Ce phénomène est notamment la source d'une lumière parasite dont doivent tenir compte les expériences sous-marines dédiées à la détection de neutrinos (▷ *Antarès*).

- ▷ *Bioluminescence et chimiluminescence*, C. Amsterdamsky, R. Panico et al., Bulletin de l'Union des Physiciens **694** (1987) p. 589
- ▷ *La lumière des océans*, Bruce Robison, Pour la Science **215** (1995) p. 68
- ▷ *Glowing with the Flow*, C. W. Thomas, Optics and Photonics News **16** (2005) p. 40

biot [Bi] (angl. *biot*) Autre nom de l'abampère, unité de courant électrique.

Biot (Jean-Baptiste)  (1774–1862) Physicien, mathématicien et astronome français. En physique, il s'est particulièrement intéressé à l'optique, l'électromagnétisme, la thermodynamique et la mécanique des fluides. En 1812, il a montré que la polarisation de la lumière peut être induite par des matériaux optiques, comme le quartz, et que cette polarisation est liée à la structure moléculaire du matériau. En 1820, il a établi avec Félix Savart (1792–1841) la loi qui permet de calculer le champ magnétique créé par une distribution de courant (▷ *Loi de Biot et Savart*). En 1821, il a découvert l'effet thermoélectrique qui porte aujourd'hui le nom d'effet Seebeck, indépendamment de Thomas Seebeck (1770–1831). Il a également été impliqué dans la mesure précise du mètre et a participé à l'expédition d'Égypte de Napoléon Bonaparte en tant que savant. Il a été élu à l'Académie des sciences en 1803.

- ▷ *J. B. Biot and the Mathematization of Experimental Physics in Napoleonic France*, Eugene Frankel, Historical Studies in the Physical Sciences **8** (1977) p. 33

- ▷ [*Présence de l'histoire*] *Biot et l'origine des météorites*, Marcel Weyant, Pour la Science **220** (1996) p. 12
- ▷ *Biot, la polarisation chromatique et la théorie des accès*, Frédéric Leclercq, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **64** (2011) p. 121
- ▷ *Arago, Biot et Fresnel expliquent la polarisation rotatoire*, Frédéric Leclercq, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **66** (2013) p. 395

Biot (loi de) (angl. *Biot law*) Loi donnant l'angle α duquel tourne la direction de polarisation d'un rayonnement polarisé rectilignement lorsqu'il traverse une épaisseur d de solution de concentration c d'un constituant optiquement actif. Elle s'écrit

$$\theta = [\alpha] \times d \times c,$$

où $[\alpha]$ est le **pouvoir rotatoire spécifique**, caractéristique du corps en solution. Cette loi fut découverte en 1815 par Jean-Baptiste Biot (1774–1862), Louis Pasteur (1822–1895) reliant en 1848 son origine à l'existence d'une chiralité des molécules formant la solution.

Biot (nombre de) (angl. *Biot number*) Nombre sans dimension caractérisant l'importance relative des échanges de chaleur en surface et en volume dans un corps. Il est défini par

$$\text{Bi} \equiv \frac{hL}{\lambda},$$

où h désigne le coefficient d'échange thermique, λ la conductivité thermique et L une longueur caractéristique, souvent obtenue comme le rapport entre le volume et la surface du corps. Lorsque le nombre de Biot est très supérieur à l'unité, les échanges de surface se font de manière beaucoup plus rapide que les échanges en volume. La distribution de température interne est alors déterminée par la distribution de température à la surface (les conditions extérieures).

Biot–Savart (loi de) (angl. *Biot-Savart law*) ► **1**. Loi donnant l'expression du champ magnétique $\vec{B}$ créé en tout point P de l'espace par une densité de courant $\vec{j}$ définie sur un domaine $\mathcal{D}$,

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{\mathcal{D}} \frac{\vec{j}(S) \wedge \vec{r}}{r^3} d^3V,$$

où le point S , tel que $\vec{r} = \overrightarrow{SP}$ et $r = SP$, est celui sur lequel porte l'intégration, d^3V étant un volume infinitésimal centré en ce point et μ_0 la perméabilité magnétique du vide. Dans le cas particulier d'un courant I circulant dans un circuit $\mathcal{C}$, on peut réécrire cette loi sous la forme

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\mathcal{C}} \frac{I d\vec{\ell}(S) \wedge \vec{r}}{r^3},$$

où $d\vec{\ell}$ désigne une portion infinitésimale du circuit et S la position du point courant dans l'intégration le long du contour $\mathcal{C}$. On la rencontre aussi sous une forme qui

donne le potentiel vecteur $\vec{A}$,

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{\ell}(S)}{r}.$$

On notera que, par abus de langage, on fait parfois référence à la loi de Biot et Savart sans intégration pour lui faire dire que le champ magnétique en P dû à l'élément $d\vec{\ell}$ du circuit est orthogonal à $d\vec{\ell}$ et $\vec{r}$. Cette formulation est utile d'un point de vue mnémotechnique, mais il ne faut pas la prendre trop à la lettre car le courant n'est défini que pour un circuit fermé complet. Cette loi fut établie en 1820 par Jean-Baptiste Biot (1774–1862) et Félix Savart (1792–1841). ► 2. En raison de l'analogie qui existe entre mécanique des fluides et électromagnétisme, on appelle également ainsi l'expression non-locale du champ de vitesse $\vec{v}$ en fonction de la vorticité $\vec{\omega}$,

$$\vec{v}(P) = \frac{1}{4\pi} \iiint_D \frac{\vec{\omega}(S) \wedge \vec{r} d^3V}{r^3},$$

avec les mêmes notations que dans le sens précédent.

- ▷ *Test of the Biot-Savart law to distances of 15 m*, George Ruppreiner, Michael Grossman *et al.*, American Journal of Physics **64** (1996) p. 698
- ▷ *The experiments of Biot and Savart concerning the force exerted by a current on a magnetic needle*, Herman Erlichson, American Journal of Physics **66** (1998) p. 385
- ▷ *Avec Ampère, le courant passe...*, Christine Blondel & Philippe Descamps, Cahiers de Science et Vie **67** (2002) p. 20

BIPM ▷ *Bureau International des Poids et Mesures*.

bipolaron (angl. *bipolaron*) Ensemble de deux polarons formant un système lié. Il s'agit d'un boson si l'extension de la paire est suffisamment faible. Des états cohérents de bipolarons pourraient être impliqués dans le phénomène de supraconductivité à haute température critique.

biprisme à électrons (angl. *electron biprism*) Dispositif constitué d'un fil conducteur placé entre deux plaques conductrices parallèles reliées à la masse. Lorsque le fil est porté à un potentiel électrostatique non nul, le dispositif se comporte comme un biprisme en optique, déviant les électrons dans la direction de l'axe du système. Le biprisme à électrons est notamment utilisé pour réaliser des interférences avec des électrons (▷ *expérience de Tonomura*).

biprisme de Fresnel (angl. *double prism*; *biprism*) Dispositif interférentiel constitué de deux prismes d'indice n et de faible ouverture angulaire α , accolés par leur petit côté. À partir d'une source lumineuse S située à une distance d , les deux prismes créent deux sources secondaires S_1 et S_2 , séparées d'une distance $S_1S_2 \approx 2\alpha(n-1)d$, la lumière issue de ces sources secondaire produisant des interférences. Celles-ci ne peuvent être observées que dans la zone où les images S_1 et S_2 sont visibles. À une distance L du biprisme, cette zone a une largeur

$$\ell \approx 2\alpha(n-1)L.$$

L'interfrange est donné par

$$i = \frac{\lambda}{2\alpha(n-1)}.$$

Ce dispositif fut introduit par Augustin Fresnel (1788–1827), puis en 1840 par Georg Ohm (1789–1864), de façon indépendante.

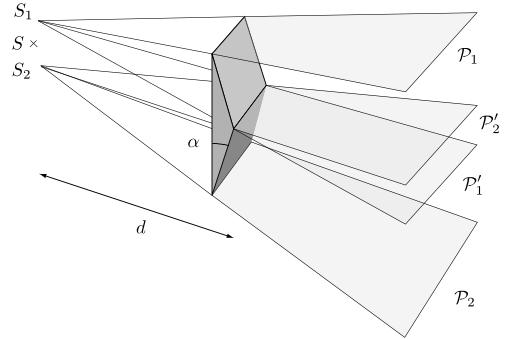


FIGURE 32 – biprisme de Fresnel – Représentation des deux prismes et des régions dans lesquelles ils forment des images des sources S_1 et S_2 . Ces régions sont délimitées respectivement par les paires de plans P_1 - P'_1 et P_2 - P'_2 . Les interférences ont lieu dans la zone commune, entre les plans P'_1 et P'_2 .

biréfringence (angl. *birefringence*; *double refraction*) ► 1. Propriété de certains milieux transparents anisotropes dont l'indice de réfraction est différent pour les deux composantes linéaires de la polarisation. Un rayon lumineux incident peut alors se séparer en deux rayons réfractés, l'un nommé **rayon ordinaire** car il suit la loi de Snell-Descartes et l'autre, **rayon extraordinaire**. On parle de **biréfringence naturelle** pour les milieux présentant spontanément cette propriété, et de **biréfringence induite** ou de **biréfringence accidentelle** quand elle est causée par l'application de contraintes mécaniques (▷ *photoélasticité*), d'un champ magnétique (▷ *effet Voigt*, *effet Cotton-Mouton*) ou d'un champ électrique (▷ *effet Kerr*). La biréfringence a été découverte en 1669 par Erasmus Bartholin (1625–1698), dans le spath d'Islande (▷ *double réfraction*), et une première explication en a été donnée en 1679 par Christiaan Huygens (1629–1695), qui supposa que la lumière se propage comme une onde, les fronts d'onde pouvant être ellipsoïdaux et non circulaires dans certains milieux. ► 2. Pour un milieu biréfringent uniaxe, différence $n_e - n_o$ entre l'indice extraordinaire n_e et l'indice ordinaire n_o . Le milieu est dit positif ou négatif, selon le signe de cette grandeur.

- ▷ *The Search for a Corpuscular Theory of Double Refraction : Malus, Laplace and the Price Competition of 1808*, Eugene Frankel, Centaurus **18** (1974) p. 223
- ▷ *Les Experimenta crystalli Islandici disdiacastici d'Erasmus Bartholin. Traduction française commentée*, Pierre Cuvelier, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **30** (1977) p. 193

- ▷ *Experimental investigations of double refraction from Huygens to Malus*, Jed Z. Buchwald, Archive for history of exact sciences **21** (1980) p. 311
- ▷ *Biréfringence du scotch*, Marc Chapelet, Bulletin de l'Union des Physiciens **78** (1983) p. 330
- ▷ *Once Snell Breaks Down : From Geometrical to Physical Optics in the Seventeenth Century*, Fokko Jan Dijksterhuis, Annals of Science **61** (2004) p. 165

milieu	n_o	n_e
quartz	1,544	1,553
calcite (spath)	1,658	1,486
émeraude	1,582	1,576
glace	1,309	1,337

TABLE 9 – Quelques valeurs de l'indice ordinaire n_o et de l'indice extraordinaire n_e dans des milieux biréfringents.

Birkhoff (théorème de) (angl. *Birkhoff theorem*)

► 1. Théorème établi en 1923 par George Birkhoff (1884–1944), selon lequel, pour un espace-temps à quatre dimensions, la métrique de Schwarzschild est la seule solution des équations d'Einstein décrivant le champ de gravitation engendré par une distribution de masse de taille finie à symétrie sphérique et dénuée de charge électrique dans le vide. Il implique en particulier que le champ gravitationnel à l'extérieur d'une étoile sphérique est nécessairement statique, et que la métrique à l'intérieur d'une coquille sphérique massive est nécessairement plate (minkowskienne). La première personne à avoir découvert ce théorème peu avant Birkhoff semble avoir été Jørg Tofte Jebsen (1888–1922), et on le nomme donc parfois aussi **théorème de Jebsen-Birkhoff**. ► 2. Théorème établi en 1931 par George Birkhoff (1884–1944), qui précise les conditions de validité de l'hypothèse ergodique. On le nomme aussi **théorème ergodique** ou **théorème ergodique de Birkhoff**.

- ▷ *Proof of "Birkhoff's theorem" in electrodynamics*, Richard C. Pappas, American Journal of Physics **52** (1984) p. 255

bismuth (angl. *Bismuth*) Élément de numéro atomique $Z = 83$, découvert en 1753 par Claude Geoffroy (1729–1753). Il est représenté par le symbole Bi. Structure atomique : $[\text{Xe}]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^3$. Masse volumique : $9\,780\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

bistable (angl. *bistable*) Qualifie un système possédant deux états stables distincts pour une même valeur des paramètres extérieurs. L'état effectivement occupé à un instant donné est déterminé par l'histoire antérieure (▷ *hystérésis*).

bit (angl. *bit*) Quantité élémentaire d'information en base deux, pouvant prendre les valeurs 0 et 1. Les circuits numériques et les ordinateurs (non quantiques, ▷ *q-bit*) traitent exclusivement des données codées sur un certain nombre de bits. Physiquement, les valeurs 0 ou 1 peuvent correspondre au fait qu'un condensateur soit chargé ou non, qu'un courant passe ou non dans une spire, qu'un moment magnétique pointe dans une direction de l'espace ou une autre, etc.

Bitter (méthode de) (angl. *Bitter method*) Technique d'observation des domaines magnétiques dans les échantillons ferromagnétiques. Elle consiste à déposer de fines particules magnétiques à la surface du matériau, par exemple sous forme d'une suspension dans un liquide. Ces particules sont attirées vers les régions de plus fort gradient de champ magnétique, c'est-à-dire vers les limites entre les domaines. L'observation au microscope des figures dessinées par le dépôt de particules permet alors de visualiser ces limites. On remplace aussi parfois les particules en suspension par un ferrofluide. Cette technique fut introduite en 1931 par Francis Bitter (1902–1967) et elle constitue encore aujourd'hui une méthode bon marché pour étudier les domaines magnétiques, dans des situations statiques ou lentement variables.

Bk Symbole de l'élément berkélium ($Z = 97$).

Black (expérience de) (angl. *Black experiment*)

Expérience historique réalisée en 1761 par Joseph Black (1728–1799), consistant à comparer le réchauffement de la glace à celui d'un mélange eau-sel de même masse et de même température initiale. Black observa l'existence d'un palier de température dans le premier cas mais pas dans le second. En supposant que dans les deux situations, le transfert de chaleur était le même, le fait que l'évolution en température soit différente l'amena à la déduction que la température et la chaleur étaient des concepts distincts.

- ▷ *Revival of Black's experiment*, Carlos D. Galles, American Journal of Physics **47** (1979) p. 1008

blanc d'ordre supérieur (angl. *high-order white*)

Lumière qui apparaît blanche, malgré l'absence de nombreuses longueurs d'onde dans son spectre. Un tel spectre est par exemple obtenu dans l'expérience des trous d'Young en lumière blanche. Au centre, le blanc est réel, mais après les premières raies colorées apparaît un blanc d'ordre supérieur (▷ *spectre cannelé*).

blazage (angl. *blazed grating*)

Anglicisme désignant le fait de concentrer la lumière diffractée par un réseau dans un ordre de diffraction autre que l'ordre zéro correspondant à la frange centrale, laquelle ne présente en général aucun intérêt lorsqu'on utilise un réseau. Ceci est réalisé en remplaçant les fentes du réseau par des prismes, dans le cas des réseaux par transmission, et en remplaçant les rainures par des miroirs prismatiques dans le cas des réseaux par réflexion (▷ *réseau échelette*). Ce terme est traduit en français par **miroitement**, mais cette traduction est beaucoup moins utilisée que le terme anglais. Le mot « blaze » signifie « éclat » en anglais.

blazar (angl. *blazar*)

Nom donné à une catégorie de galaxies actives dont la luminosité varie grandement (d'un facteur pouvant atteindre 100) sur l'échelle de la journée, et dont le spectre a la particularité de ne présenter aucune raie. Dans le modèle actuellement admis, les blazars sont des noyaux actifs de galaxie possédant un jet dirigé directement vers la Terre. Ils ont été découverts en 1991 par le satellite gamma CGRO (Compton Gamma Ray Observatory). Le terme « blazar » est un anglicisme

provenant du terme « blaze », signifiant « éclat ».

- ▷ *The BL Lacertae Objects*, W. A. Stein, S. L. O'Dell *et al.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **14** (1976) p. 173

bleu (angl. *blue*) Couleur associée à la lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 450 nm et 500 nm environ (▷ *couleur*, *spectre visible*). Elle est souvent utilisée avec le vert et le rouge en synthèse additive des couleurs.

Bloch (équations de)  (angl. *Bloch equations*) Équations décrivant l'évolution d'un système portant un moment magnétique $\vec{\mu}$ et placé dans un champ magnétique $\vec{B}$. En physique classique elles s'écrivent

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma \vec{\mu} \wedge \vec{B},$$

où γ désigne le rapport gyromagnétique du système considéré. En physique quantique, cette équation vectorielle devient un ensemble de trois équations couplées, portant sur les opérateurs associés aux composantes de $\vec{\mu}$.

- ▷ *The classical Bloch equations*, Martin Frimmer & Lukas Novotny, *American Journal of Physics* **82** (2014) p. 947

Bloch (théorème de) (angl. *Bloch theorem*) Théorème établi en 1928 par Félix Bloch (1905–1983) et selon lequel les états propres du hamiltonien à un électron dans un potentiel $V(\vec{r})$ périodique peuvent s'écrire

$$\psi(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} u(\vec{r}),$$

où la fonction $u(\vec{r})$ a la même périodicité que V . Il s'agit donc d'une onde plane de vecteur d'onde $\vec{k}$, modulée par la fonction périodique u . Ce théorème joue un rôle important en physique de la matière condensée, permettant par exemple de calculer les niveaux d'énergie électroniques d'un solide. Sa version unidimensionnelle est aussi appelée **théorème de Floquet**.

BNC Acronyme de « Bayonet-Neill-Concelman » (ou de « British Naval Connector », comme on le lit aussi). Nom d'une famille de connecteurs permettant de relier entre eux des câbles coaxiaux.

bobine  (angl. *coil*) Enroulement d'un fil électrique constituant une boucle de courant (ou plusieurs). Parcouru par un courant électrique, ce dispositif permet de créer un champ magnétique par induction (▷ *spire de courant*). Cet effet est mis en œuvre dans les électro-aimants. En retour, le champ induit perturbe le courant traversant le circuit, ce qui confère aux bobines des propriétés électrocinétiques intéressantes. Si le courant est variable, une bobine est caractérisée par son inductance L , qui peut se calculer en fonction de sa forme (▷ *solénoïde*). Son impédance complexe est alors donnée par

$$\underline{Z} = jL\omega + R,$$

où ω désigne la pulsation du courant sinusoïdal, R la résistance électrique de la bobine et $j^2 = -1$. On parle

de **bobine exploratrice** quand on l'utilise pour mesurer des champs magnétiques, par induction.

- ▷ *Les origines de la bobine d'induction*, Jacques Payen, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **18** (1965) p. 315
▷ *N. J. Callan inventor of the induction coil*, Niels H. de V. Heathcote, *Annals of Science* **21** (1965) p. 145

bobine d'arrêt (angl. *choke coil*) Bobine utilisée dans des montages électroniques pour affaiblir les hautes fréquences. On l'appelle aussi **bobine de choc**, une traduction erronée du terme anglo-saxon « choke coil ».

bobines de Helmholtz  (angl. *Helmholtz coils*) Couple de bobines circulaires de même rayon R disposées selon un axe commun pour créer un champ magnétique. Si les bobines sont parcourues par un courant I de même sens, le champ magnétique produit entre elles est relativement homogène lorsque leur espacement est égal à leur rayon. Le champ au centre du dispositif vaut alors

$$B = \frac{8\mu NI}{5\sqrt{5}R},$$

où N désigne le nombre d'enroulements dans chaque spire et μ la perméabilité magnétique du milieu. Une configuration à trois bobines permet d'augmenter l'homogénéité du champ magnétique (▷ *bobines de Maxwell*).

- ▷ *Helmholtz coils revisited*, Edward M. Purcell, *American Journal of Physics* **57** (1989) p. 18
▷ *An elementary derivation of the midplane magnetic field inside a pair of Helmholtz coils*, Richard C. Calhoun, *American Journal of Physics* **64** (1996) p. 1399

bobine de Masson  Transformateur de rapport de transformation élevé dans lequel l'interruption régulière du courant primaire, à l'aide d'un dispositif mécanique rotatif, permet d'obtenir de grandes tensions dans le circuit secondaire. On peut ainsi produire des étincelles. Ce dispositif fut construit en 1842 par Antoine Masson (1806–1860) et Louis Breguet (1804–1883) pour étudier le phénomène d'induction. Il fut amélioré par Heinrich Ruhmkorff (1803–1877) quelques années plus tard (▷ *bobine de Ruhmkorff*).

- ▷ *Enquête sur une bobine : appel à témoins*, Pierre Provost, G. Martin *et al.*, *Bulletin de l'Union des Physiciens* **812** (1999) p. 459

bobines de Maxwell (angl. *Maxwell coils*) Ensemble de trois bobines permettant de réaliser un champ magnétique spatialement très homogène dans une région de l'espace. Ces bobines sont des spires circulaires de même axe, la spire centrale de rayon R étant placée entre deux spires de rayon $\sqrt{4/7}R$, à une distance $\sqrt{3/7}R$ de chacune d'entre elles. Le champ magnétique créé est très homogène au centre du dispositif si le courant $N'I$ de la bobine du milieu est de même sens que celui NI de chaque bobine externe, avec $N'I' = (64/49)NI$.

bobine de Ruhmkorff  Transformateur conçu en 1851 par Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803–1877), en s'inspirant de la bobine de Masson. L'enroulement primaire y est constitué d'un petit nombre de spires, dans lequel le courant est interrompu de façon répétée. Ceci produit de grands courants induits dans le circuit secondaire, constitué d'un nombre de spires beaucoup

Ce dictionnaire définit plus de 7 000 termes de physique relevant aussi bien du vocabulaire général de la physique que de celui des différents domaines spécialisés :

- mécanique,
- optique,
- thermodynamique,
- électromagnétisme,
- physique quantique,
- physique des hautes énergies,
- relativité,
- astrophysique et astronomie, etc.

Il contient également de nombreuses entrées relevant de la culture scientifique : expériences marquantes, grands personnages historiques, théories oubliées, phénomènes de la vie courante.

- Les définitions sont agrémentées de nombreux repères historiques destinés à mieux cerner la place des concepts dans leur contexte.
- Plusieurs milliers de références bibliographiques soigneusement choisies dans des revues de qualité (*American Journal of Physics*, *Physics Today*, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, *Pour la Science*, *La Recherche*) complètent un grand nombre de définitions.

Ce dictionnaire de physique est destiné aux :

- étudiants de licence ou de classes préparatoires aux grandes écoles,
- étudiants de master ou d'écoles d'ingénieurs,
- étudiants préparant les concours d'enseignement (CAPES et agrégation) de sciences physiques.

LES PLUS

Plus de 7000 termes

Nombreux encadrés

Nombreux repères historiques

3700 références
bibliographiques

200 figures

RICHARD TAILLET, ancien élève de l'ENS de Lyon en Physique, professeur à l'université Savoie Mont Blanc (USMB) et chercheur en astrophysique au Laboratoire d'Annecy de physique théorique (LAPTh).

LOÏC VILLAIN, docteur en physique théorique de l'université Paris VII, dans le domaine de la gravitation relativiste, maître de

conférences à l'Université de Tours, chercheur à l'Institut Denis Poisson.

PASCAL FEBVRE, maître de conférences à l'USMB, et chercheur sur les dispositifs quantiques supraconducteurs au laboratoire de microélectronique, électromagnétisme, hyperfréquence, photonique et de caractérisation (IMEP-LAHC) au Bourget-du-Lac.

**CHEZ LE MÊME
ÉDITEUR**



39,90 €

ISBN : 978-2-8073-4822-6



9 782807 348226

www.deboecksuperieur.com