

JEAN-PIERRE MOUGIN

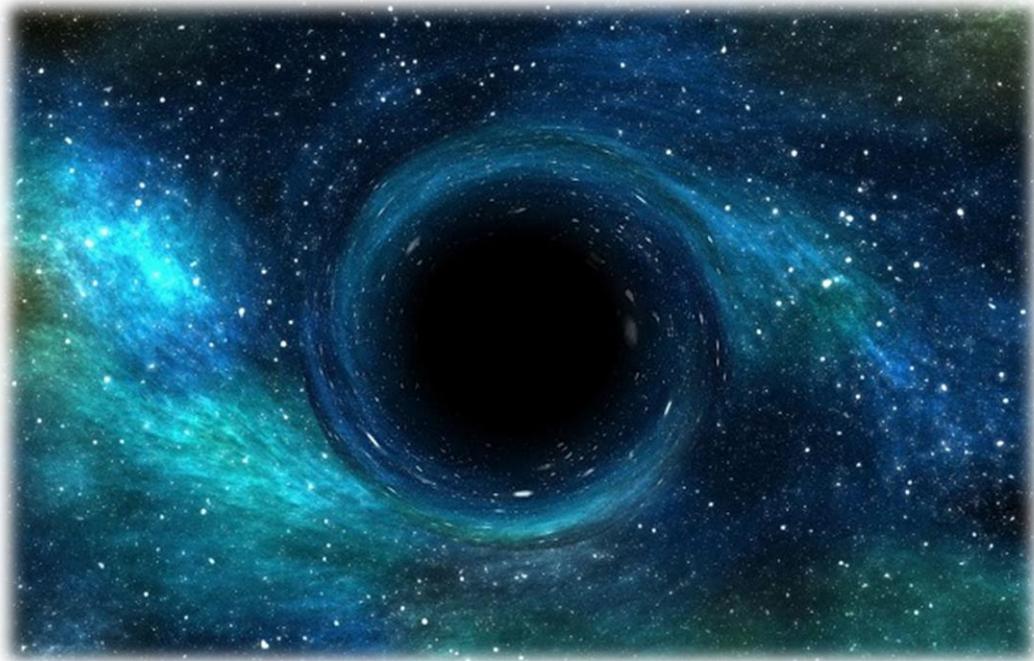
QUELQUES MOTS

SUR LA

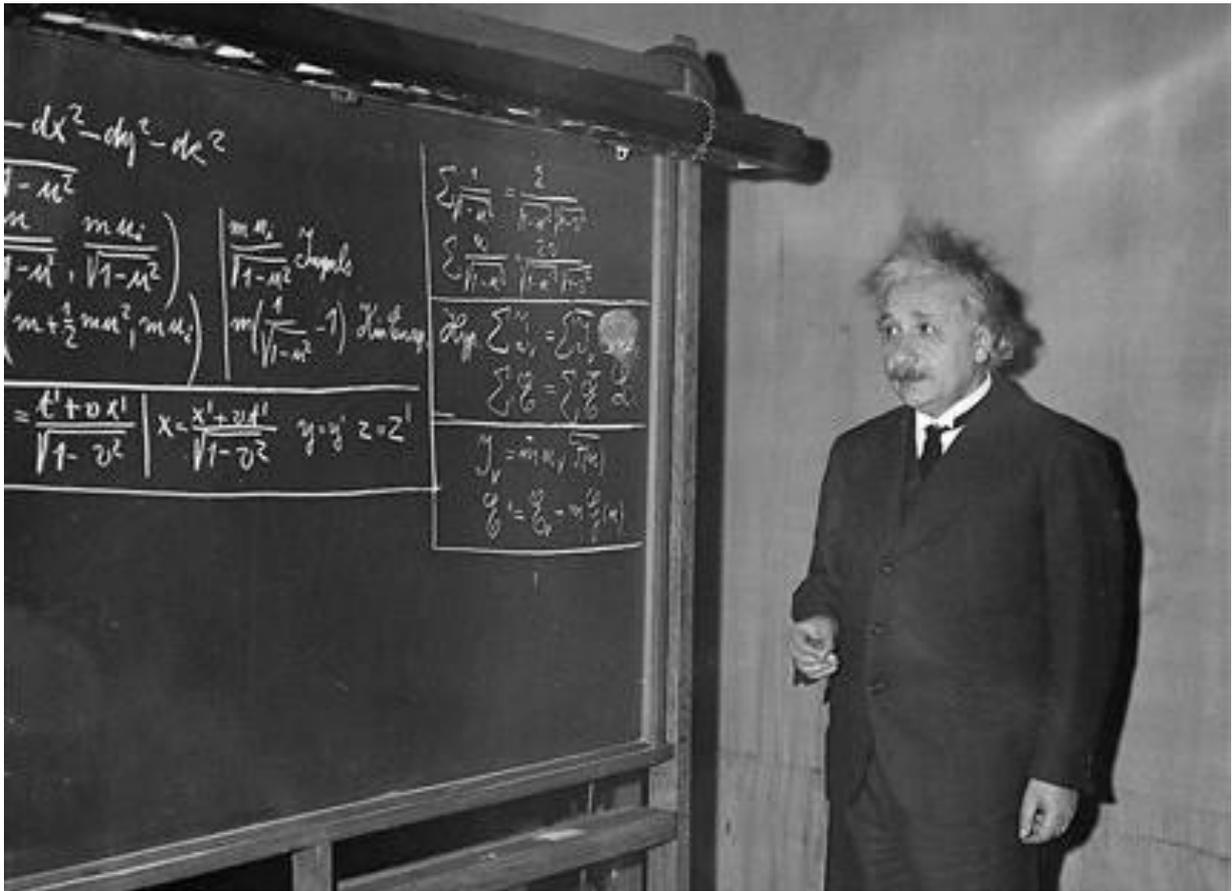
THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

ET LA

MÉCANIQUE QUANTIQUE



Texte rédigé à partir des ouvrages d'Aurélien Barrau et Carlo Rovelli cités dans la bibliographie et des cours d'Aurélien Barrau à l'université de Grenoble disponibles sur l'Internet. Les biographies sont principalement issues de Wikipédia.



INTRODUCTION GÉNÉRALE

La physique du XX^e siècle et du début du XXI^e siècle, c'est-à-dire en fait la façon dont aujourd'hui nous comprenons le monde, repose sur deux grandes théories : la théorie de la relativité et la mécanique quantique (qui fut longtemps appelée mécanique ondulatoire).

De fait, il faudrait presque dire trois théories puisque la théorie de la relativité comprend deux volets relativement distincts, présentés par Albert Einstein respectivement en 1905 et 1915 : la relativité restreinte puis la relativité générale.

S'il est facile d'associer la théorie de la relativité à un nom, celui d'Einstein, c'est bien parce qu'il en est l'auteur quasi-unique ; évidemment, elle est née après les travaux et surtout les questions de ses prédécesseurs et d'autres y ont largement contribué après lui, mais on peut affirmer que c'est bien lui qui a imaginé cette immense révolution.

La théorie de la relativité nous parle de la physique du monde à grande échelle ; le système solaire, voire même la Voie lactée, c'est une petite échelle pour elle...

À l'inverse, la mécanique quantique s'intéresse à l'infiniment petit : à l'atome et à tout ce qui est plus petit que l'atome ; à l'inverse encore de la relativité, on ne peut pas attacher un nom à la mécanique quantique : elle est le résultat des travaux de très nombreux physiciens ; pour citer quelques noms parmi les plus importants : Ludwig Boltzmann, Max Planck, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Wolfgang Pauli et Richard Feynman ; et même Einstein, qui ne l'aimait pas beaucoup, mais a reçu le prix Nobel de physique 1921, non pas pour la théorie de la relativité, mais pour son explication de l'effet photo-électrique qui est principalement une question de mécanique quantique.

Certains des lecteurs de ce texte savent peut-être que ces deux théories sont incompatibles dans les domaines où elles se croisent, par exemple dans les grands accélérateurs de particules, ou au moment du Big Bang. C'est le grand problème de la physique d'aujourd'hui (depuis une grosse quarantaine d'années) ; beaucoup y travaillent, mais...

Pour commencer, je voudrais vous remercier d'entamer la lecture de cette présentation d'un sujet qui a une certaine tendance et même une tendance certaine, à effrayer un « amateur standard » ; je voudrais le rassurer sur deux points :

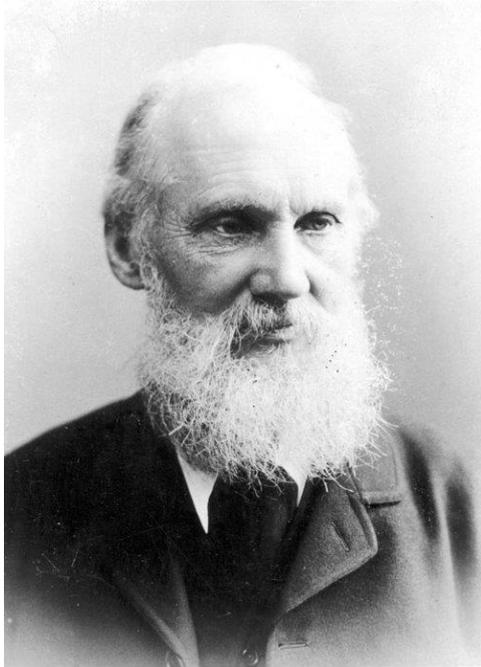
- d'abord – mais cela va-t-il vous rassurer ? – sachez qu'une personne peu familière de ces questions, même avec une bonne culture scientifique, aura quelques difficultés à aborder ces domaines : la relativité restreinte, le plus souvent, ça va ; la relativité générale, ça se corse quelque peu ; la physique quantique... là... vous jugerez à la fin ;
- ce qui va pouvoir vous rassurer, c'est le contenu de ce que je vais vous raconter : je vais faire de la vulgarisation (scientifique cependant, sans tricher avec les concepts) et de la vulgarisation descriptive, qualitative : d'où cela vient-il ? Comment en tire-t-on des lois et des théories ? Et, surtout, à quelles conclusions conduisent-elles ? J'ai dit « qualitative » ? Ah non ! Il nous faudra bien faire des maths !

Pourquoi des maths ? Toutes ces théories, mis à part le tout début de la relativité restreinte, nécessitent un arsenal mathématique très complexe et, rassurez-vous, qui dépasse très largement mes faibles capacités en ce domaine.

Je vous présenterai cependant trois équations :

- deux, la célèbre $E = m c^2$ et les équations d'Einstein parce que leur simple observation permet de comprendre bien des choses ;
- et puis je présenterai la démonstration de la première formule de la relativité restreinte dont les conséquences sont incroyables. L'outil mathématique indispensable pour cela ? Le théorème de Pythagore.

Avant de commencer, revenons aux derniers jours du XIX^e siècle, en 1900 précisément, devant l'Académie Royale des Sciences, à Londres.



Un vieux monsieur, d'une carrure imposante et à la barbe blanche, s'exprime ; tout le monde écoute avec la plus grande attention ce physicien très respecté : il s'agit de William Thomson, connu sous le nom de Lord Kelvin depuis son anoblissement en 1892. Il fait un bilan des avancées de la physique depuis quelques décennies et que dit-il au détour d'une phrase ?

« There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement. »

« Il n'y a aujourd'hui plus rien à découvrir en physique. Il ne reste plus qu'à faire des mesures de plus en plus précises. »

Et il ajoute un peu plus tard qu'il reste bien deux ou trois petits points qui empêchent d'être complètement satisfait, mais qu'il ne fait pas de doute que c'est une question de temps avant de les comprendre.

Et effectivement en peu de temps, ces « détails » vont être compris, mais à chaque fois les conséquences seront quelque peu inattendues...

LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

La théorie de la relativité est la grande révolution de la physique du début du XX^e siècle ; elle comprend deux volets :

- la relativité restreinte, présentée par Einstein en 1905,
- la relativité générale, présentée par Einstein en 1915.

Ces deux grandes théories ont été conçues par Einstein uniquement par la pensée, sans aucune expérience de physique.

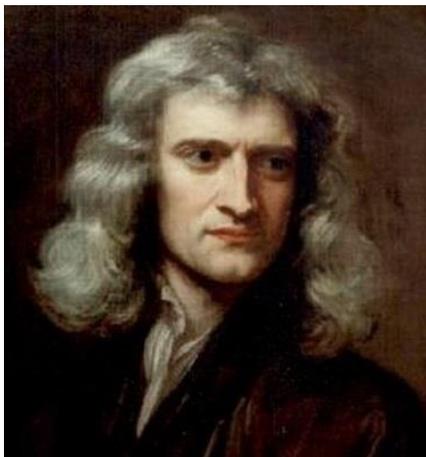
Sont-elles exactes ?

En sciences, une théorie exacte, cela n'existe pas ! Une théorie ne peut pas être prouvée ; elle doit seulement être réfutable c'est-à-dire pouvoir être soumise à l'épreuve des faits.

La théorie d'Einstein impose que l'Univers est né d'un état infiniment petit (tout ce qui existe tenait dans une sphère de quelques millimètres) extrêmement dense et chaud, qui s'est développé d'abord à une vitesse vertigineuse, puis continue de croître plus lentement aujourd'hui : c'est la notion de Big Bang et d'expansion de l'Univers. La théorie prévoit l'existence de trous noirs, d'ondes gravitationnelles, etc. Tout cela a été vérifié au cours du temps.

En revanche, si quelqu'un affirme que « Dieu existe et a créé l'Univers », ce n'est pas une théorie scientifique, mais une croyance (ce à quoi chacun a droit), car c'est une affirmation non réfutable.

Une théorie physique ne peut être prouvée donc déclarée exacte ; elle ne peut être retenue que si elle constitue à un instant donné le moyen le plus fiable pour expliquer la Nature que l'on peut observer. En ce sens, la théorie de la relativité peut être considérée comme un moyen extrêmement fiable pour comprendre l'ensemble de nos observations.



Prenons un contre-exemple : sa théorie de la gravitation, exposée par Isaac Newton dans *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publié en 1687, a été considérée pendant plus de deux siècles comme LA théorie universelle de la mécanique.

Or, elle pose de nombreuses questions irrésolues :

Newton affirmait que deux corps de masses m et m' situés à une distance d s'attirent avec une force :

$$F = G \frac{m m'}{d^2}$$

et cela même dans le vide. Newton avait bien conscience du problème : comment les deux corps peuvent-ils s'attirer

sans aucun médiateur, et cela instantanément, s'il n'y a rien entre les deux masses ? Il disait d'ailleurs que « Cette façon de considérer la force [*d'attraction*] est purement mathématique et je ne prétends point en donner la cause physique. » ; cela n'était pas très grave en soi ; on

peut parfaitement, à un moment donné, ne pas comprendre le pourquoi d'un phénomène qui semble évident et irréfutable et continuer à travailler en postulant que c'est un fait avéré ; si les conclusions que l'on en tire sont bonnes, pourquoi se priver de le faire ?

Mais, car il y a un « mais »...

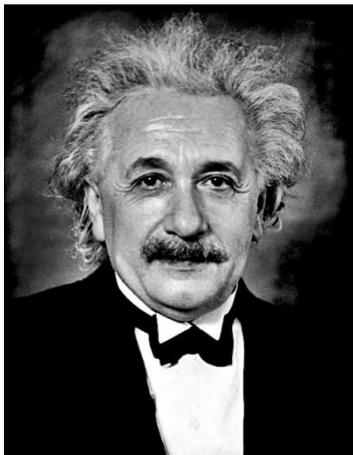
La théorie de Newton permet de rendre compte de la trajectoire des planètes du système solaire.

Première difficulté : au début du XIX^e siècle, l'astronome Alexis Bouvard met en évidence que la trajectoire d'Uranus n'est pas conforme à ce qui découle de la théorie ; le jeune Urbain Le Verrier est chargé de résoudre cette difficulté ; en 1846, après de longs et complexes calculs, il met en évidence l'existence d'une planète inconnue qui sera aussitôt vue par l'observatoire de Berlin : Neptune. Dans ce cas, la théorie ne fonctionnait pas car la connaissance de la Nature était insuffisante...

Deuxième difficulté : comme pour l'ensemble des planètes du système solaire, l'orbite de Mercure connaît une très lente précession du périhélie autour du Soleil (en simplifiant, l'orbite elle-même se déplace au cours du temps en tournant lentement autour du soleil). Cependant, contrairement aux autres planètes, la période de précession du périhélie de Mercure ne concorde pas avec les prédictions de la mécanique newtonienne. On avait même pensé découvrir la « coupable », baptisée Vulcain... mais en fait personne ne la trouva jamais et il fallut attendre la théorie de la relativité pour expliquer ce phénomène.

La théorie de la relativité peut-elle donc être considérée comme « totalement fiable » ?

Eh bien non !



Il y a beaucoup de raisons à cela ; je n'en citerai qu'une.

Il existe un deuxième « pilier » de la science du XX^e siècle : la mécanique quantique ; au moins aussi fiable que la relativité, elle décrit la Nature à l'échelle de l'infiniment petit, des particules.

Mais il existe des domaines dans lesquels les deux théories se rencontrent, par exemple dans les accélérateurs de particules où la mécanique quantique est reine, mais où les hautes vitesses induisent des phénomènes relativistes, ou au moment du Big Bang, etc. Eh bien, la plupart du temps, ces deux théories sont incompatibles. Comment résout-on cette difficulté ? Les chercheurs cherchent...

LA RELATIVITÉ RESTREINTE

La relativité restreinte est une métathéorie : elle s'applique à tout.

Elle est en quelque sorte une syntaxe qui permet d'exprimer une physique douée de sens.

Elle permet en particulier de dire si une quelconque théorie est fautive (sans recours) ou a de bonnes chances d'être admissible. Et cela sans avoir à faire la moindre expérience.

Elle bénéficie ainsi d'un statut particulièrement enviable dans la physique.

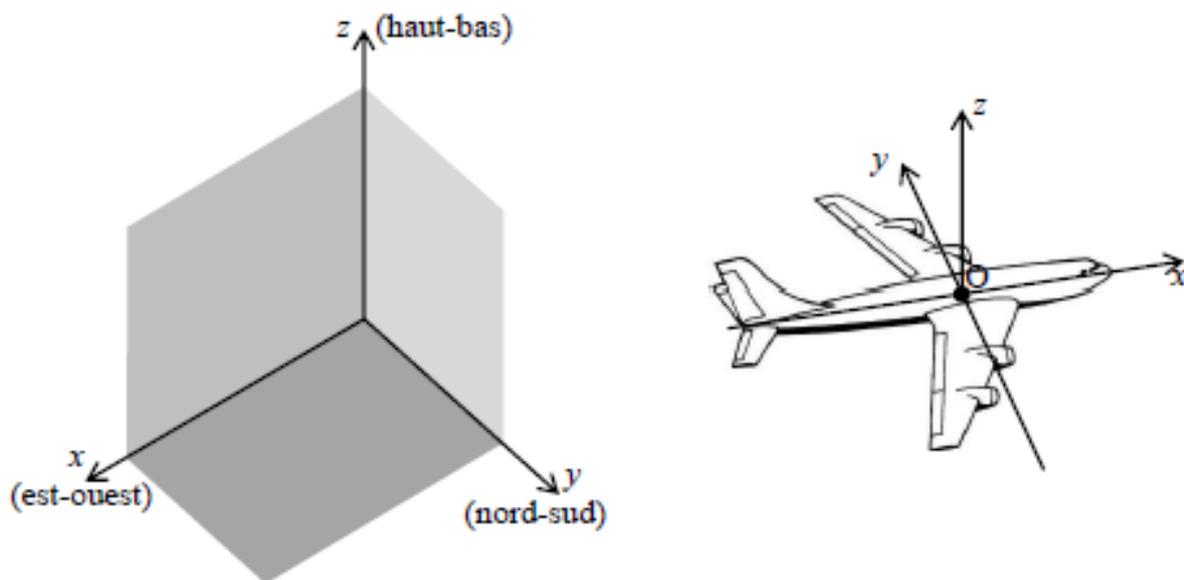
Postulat « définitoire » :

Il existe des référentiels galiléens (ou inertiels) dans lesquels le mouvement libre des corps s'effectue à vitesse constante (vectoriellement).

C'est la définition du référentiel galiléen et c'est un postulat car on suppose que cela existe.

Dire qu'un corps est « libre » signifie qu'il n'est soumis à aucune force.

Qu'est-ce qu'un référentiel ? C'est un ensemble de 3 axes liés à un objet, qui permet de se repérer par rapport à cet objet.



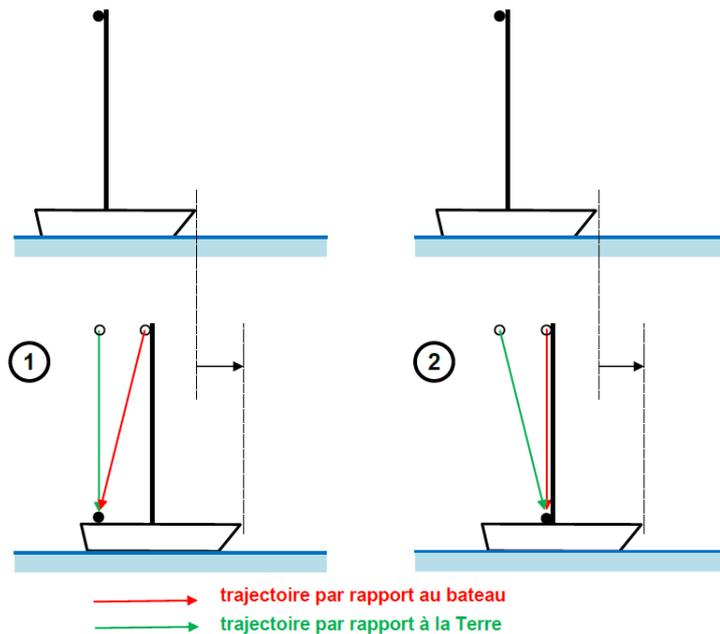
Un référentiel est galiléen s'il est immobile ou se déplace à vitesse constante (vectoriellement c'est-à-dire en direction et en intensité)

Exemple 1 : une bille lancée pour rouler sur une table horizontale :

Elle n'est soumise à aucune force :

- verticalement, elle est soumise à son poids exactement équilibré par la réaction de la table,
- horizontalement, une fois lancée (et donc lâchée), elle n'est soumise à aucune force (si on néglige les frottements).

Elle roule donc sur la table à vitesse constante et indéfiniment, tant que les frottements restent négligeables... et qu'il y a une table.



Exemple 2 : un bateau avance à vitesse constante ; on lâche une pierre du haut du mât. Où tombe-t-elle ?

Elle tombe au pied du mât (situation 2) : au moment où elle est lâchée, elle avance à la vitesse du bateau ; en l'absence de force horizontale, sa vitesse horizontale reste constante donc égale à celle du bateau : elle suit donc le mât et tombe à son pied.

De même, si vous êtes dans le TGV et si vous sautez en l'air, pendant votre saut, le TGV avance d'environ 100 m. Vous écrasez-vous au fond du wagon ?

Cela illustre la grande découverte newtonienne : l'état naturel des corps, c'est de continuer de faire ce qu'ils sont en train de faire contrairement à l'idée d'Aristote pour qui l'état naturel des corps était le repos.

Principe de relativité (galiléenne) :

Les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens.

Pourquoi ? Parce que sans cela on ne sait rien faire. C'est la traduction de la condition de la possibilité d'une physique. Une loi doit être une loi : elle doit être universelle.

Ajout d'Einstein :

La lumière (et plus généralement les objets sans masse) se déplace à une vitesse finie notée c (voisine de 300 000 km/s).

On peut se demander pourquoi, d'où cela vient. Il y a une infinité d'expériences de pensée (dont Einstein était le grand spécialiste) qui justifient cette hypothèse. Il y a aussi les expériences réelles qui le prouvent.

En réalité, on n'a pas besoin de cette hypothèse.

Historiquement c'est ce qui fut fait.

En fait, l'existence de cette vitesse limite et finie se démontre mais la démonstration est à la fois très longue et mathématiquement complexe.

Ce qui précède est l'arsenal théorique qui sera complété, dans ses développements (que je ne présenterai pas) par quelques notions de symétrie.

Conclusion fondamentale

Menons une expérience de pensée : elle consiste à observer l'émission et la détection d'un flash de lumière.

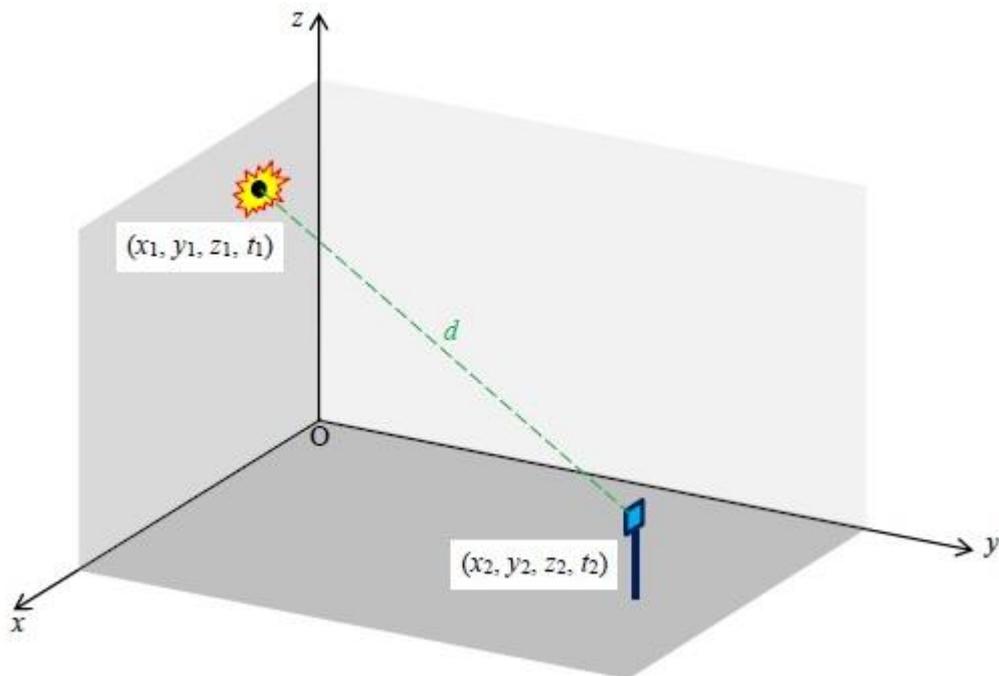
Un émetteur est placé au mur de la pièce au point de coordonnées x_1, y_1 et z_1 .

Un récepteur est placé dans la pièce au point de coordonnées x_2, y_2 et z_2 .

Un dispositif physique quelconque mesure le temps des différents évènements suivants :

Évènement 1 : émission du flash, au point de coordonnées x_1, y_1 et z_1 et à l'instant t_1 .

Évènement 2 : détection du flash, au point de coordonnées x_2, y_2 et z_2 et à l'instant t_2 .



Décrivons la situation dans le référentiel galiléen R de la pièce en écrivant des choses très simples.

La distance au carré entre les 2 points $(x_1, y_1$ et $z_1)$ et $(x_2, y_2$ et $z_2)$ est égale à la somme des carrés des distances selon les trois axes du référentiel ; c'est l'extension à 3 dimensions du théorème de Pythagore.

$$d^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

La distance est égale à la vitesse multipliée par le temps de parcours :

$$d = c(t_2 - t_1)$$

soit, en élevant au carré :

$$d^2 = c^2(t_2 - t_1)^2$$

Nous travaillons avec les expressions au carré pour éviter l'emploi des racines carrées qui alourdissent les calculs.

De même, nous remplacerons les différences $(x_2 - x_1)$ par des formes équivalentes Δx signifiant « écart des abscisses x » :

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad \Delta y = y_2 - y_1 \quad \Delta z = z_2 - z_1 \quad \Delta t = t_2 - t_1$$

La distance (au carré) d^2 est donc :

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

et

$$d^2 = c^2 \Delta t^2$$

Ces deux expressions de d^2 représentent la même quantité ; leur différence, appelée intervalle (au carré) et notée Δs^2 , est donc égale à 0 :

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = 0$$

Nous n'avons dit et fait que des choses parfaitement banales.

Regardons le même évènement mais en nous plaçant dans un autre référentiel galiléen R' : je marche dans la pièce à une vitesse constante v ; ce nouveau référentiel est lié à moi ; les coordonnées dans ce nouveau référentiel sont écrites comme précédemment mais avec des « ' » :

$$d'^2 = \Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2$$

$$d'^2 = c'^2 \Delta t'^2$$

$$\Delta s'^2 = c'^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2 = 0$$

Faisons deux choses non triviales :

- 1) en mettant des « ' » au temps on laisse la porte ouverte à la possibilité que les intervalles de temps ne soient pas les mêmes ;
- 2) mais c' est le même que c : $c' = c$: on suppose que la vitesse de la lumière est la même dans les deux référentiels. On pourrait dire que c' est l'application du principe de relativité à l'ajout d'Einstein, mais ce n'est pas vrai. La vitesse de quelque chose n'est pas la même dans tous les référentiels ! On érige ici la propagation de la lumière au rang de loi et ce n'est pas un phénomène contingent comme un autre. Cela se démontre comme nous l'avons déjà dit.

Il est bien évident, comme écrit ci-dessus, que si $\Delta s^2 = 0$ alors, sans aucun doute, $\Delta s'^2 = 0$ également :

$$\Delta s'^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2 = 0$$

Demandons-nous maintenant comment se transforme l'intervalle quand il n'est pas nul.

Que signifie le fait que l'intervalle n'est pas nul ?

Faisons les deux expériences suivantes :

Expérience 1 : je tape sur la table (évènement 1) et, une seconde plus tard, vous, observateur dans la pièce, souriez (évènement 2) :

$\Delta t = 1$ s, $\Delta x, \Delta y, \Delta z =$ quelques mètres ; avec $c = 3.10^8$ m/s, Δs^2 est de l'ordre de 10^{17} donc très grand et positif.

Expérience 2 : je tape sur la table (évènement 1) et, une seconde plus tard, une étoile explose à 100 milliards de km (10^{14} m) d'ici (évènement 2) :

$\Delta t = 1$ s, $\Delta x = 10^{14}$ m ; Δs^2 est de l'ordre de -10^{28} donc très grand et négatif.

Conclusion : il est impossible que l'explosion de l'étoile soit liée au fait que je tape sur la table (exp. 2) alors qu'il est tout-à-fait possible que vous souriez parce que j'ai tapé sur la table (exp. 1) ; ce n'est pas obligatoire (vous pouvez sourire pour une autre raison) mais c'est possible.

Un intervalle positif correspond à des évènements qui peuvent être corrélés, un intervalle négatif à des évènements qui ne le peuvent pas.

Question centrale : comment se transforme l'intervalle quand on change de référentiel galiléen ?

Cela semble être du calcul pour le calcul, mais le résultat est... vous allez voir !

Dans le référentiel R on mesure Δs^2 .

Dans le référentiel R' on mesure $\Delta s'^2$.

Que vaut le 2^e intervalle $\Delta s'^2$ par rapport au 1^{er} Δs^2 ?

Supposons que la relation soit de la forme suivante où a et b sont des constantes :

$$\Delta s'^2 = a \Delta s^2 + b$$

Pourquoi linéaire ? C'est une approximation tout-à-fait admissible au moins dans un premier temps ; si elle conduit à une absurdité, on peut revenir en arrière et la modifier. (*Un mathématicien pourrait dire que les deux quantités sont des formes quadratiques des mêmes grandeurs, donc que la relation entre elles doit être de cette forme.*)

Comme vu précédemment, les 2 intervalles sont nuls en même temps : $b = 0$.

Que vaut a ? *A priori* il dépend de x , y et z . En fait non ! Parce que les lois de la physique sont toujours indépendantes du lieu : les choses ne sont pas les mêmes partout, mais les lois oui !

C'est un argument très fort ; c'est la première fois dans l'histoire que cela fonde une théorie.

De même par rapport au temps : le temps passe, nous vieillissons mais pas les lois qui régissent le monde ou simplement le fonctionnement de notre corps.

a est donc une constante (il faudrait ajouter quelques vérifications complémentaires, qui ont été faites).

Il suffit d'un cas particulier pour la calculer : considérons $R' = R$ (cas inintéressant mais légal) :

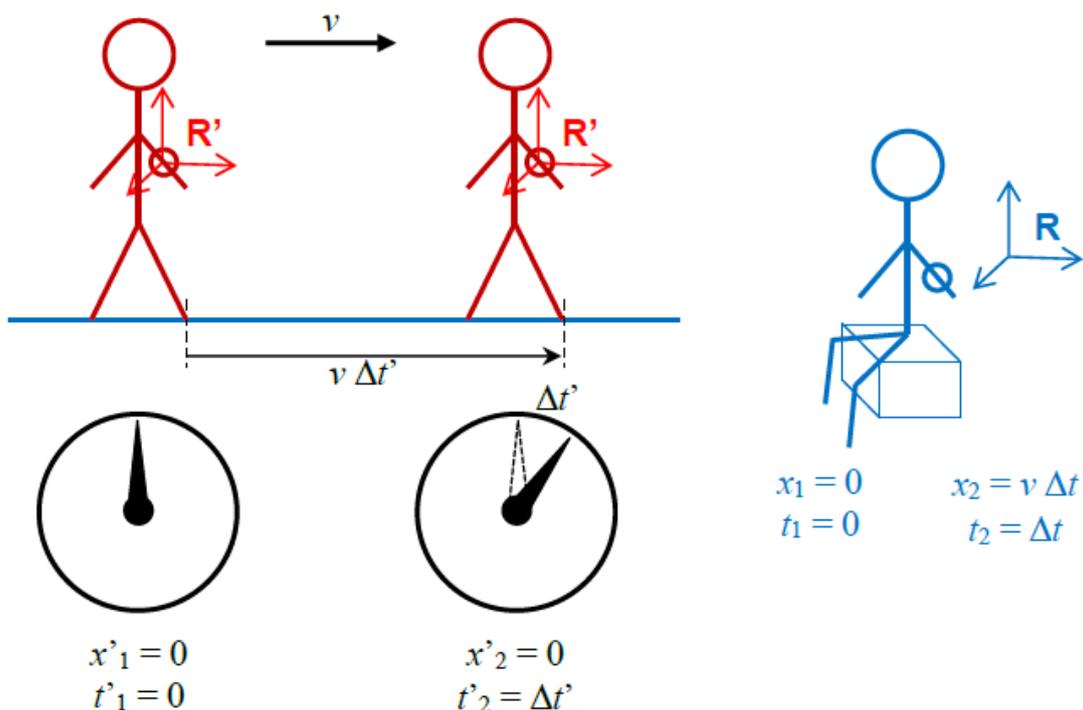
$$\Delta s'^2 = a \Delta s^2 = \Delta s^2$$

d'où $a = 1$:

$$\Delta s'^2 = \Delta s^2$$

C'est le résultat fondamental de la théorie ; ce qui est important, ce sont les conséquences !

Faisons l'expérience de pensée suivante :



Je me déplace devant vous à vitesse constante v et je considère 2 instants successifs marqués par 2 positions successives de la trotteuse de ma montre. Je suppose que les axes x et x' des abscisses dans les 2 repères galiléens sont parallèles à mon déplacement, ce qui n'a pour conséquence que de simplifier les calculs car $\Delta y = \Delta y' = \Delta z = \Delta z' = 0$.

Nous allons calculer l'intervalle dans deux repères galiléens différents :

- dans le repère R lié à vous, immobile sur votre chaise : Δs ,
- dans le repère R' lié à ma montre se déplaçant (par rapport à vous) à la vitesse v : $\Delta s'$.

Sur ma montre, les deux instants successifs sont séparés de $\Delta t'$. Pour vous, les deux instants successifs sont séparés de Δt .

$$\text{Calcul dans R : } \Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$$

$$\text{Calcul dans R' : } \Delta s'^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta x'^2$$

Or $\Delta x' = 0$ puisque c'est le déplacement de la montre dans le référentiel lié à la montre qui, bien évidemment ne se déplace pas par rapport à elle-même.

Écrivons que les deux intervalles sont égaux :

$$c^2 \Delta t'^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2$$

$\Delta x = v \Delta t$ puisque cela représente la distance que vous me voyez parcourir à la vitesse v pendant le temps Δt .

En remplaçant, en divisant tout par c^2 et en prenant la racine carrée puisque ce qui nous intéresse, c'est le temps et non son carré, on trouve :

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

C'en est fini avec les calculs !

Ce résultat est intéressant : vous et moi ne mesurons pas le même temps !

La différence est-elle grande ?

Comme ma vitesse est faible (de l'ordre de 1 m/s) la différence est minuscule.

Si je vais à la moitié de c : 1 s pour vous représente 1,155 s pour moi

Si je vais à 75 % de c : 1 s pour vous représente 1,52 s pour moi

Si je vais à 99 % de c : 1 s pour vous représente 7,1 s pour moi

Si je vais à 99,99 % de c : 1 s pour vous représente 71 s pour moi

C'est vraiment ce que prédit la théorie de la relativité restreinte. **À chacun son temps !**

Les voyages dans le futur sont possibles (la technologie pour qu'un corps humain puisse atteindre de telles vitesses n'existe pas encore).

On le fait couramment pour des particules élémentaires : dans le LHC, des particules qui vivent des 10^{-6} s au repos peuvent vivre 1 s.

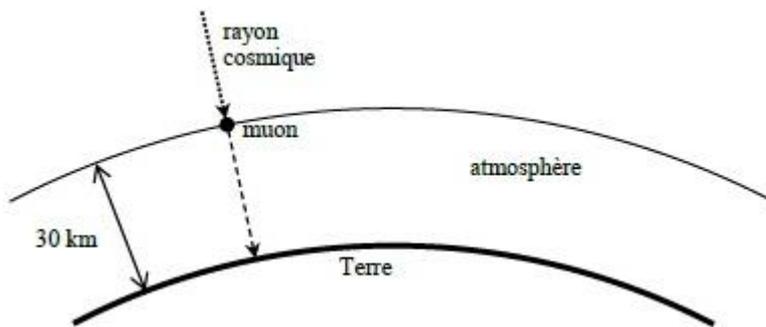
Les horloges astronomiques le mesurent avec précision : une horloge placée dans un avion de ligne qui fait une fois le tour de la terre à 1 000 km/h est décalée de 62 milliardièmes de seconde par rapport à une horloge restée au sol ; c'est parfaitement mesurable et mesuré.

Cela signifie-t-il que l'on peut augmenter sa durée de vie en voyageant très vite ? Non, évidemment : si je suis dans une fusée très rapide pendant 1 an à ma montre ou à mon horloge biologique, je ne me déplace pas par rapport à moi-même et je vieillis exactement d'une année ; mais vous, restés sur terre, aurez à mon retour vieilli de plus d'une année. Je ne peux que vous rendre jaloux car vous aurez l'impression que je vieillis moins vite que vous...

En conclusion, je peux aller dans votre futur mais pas aller dans mon propre futur.

Notez que cet effet de dilatation du temps s'accompagne d'un effet de contraction des longueurs : quand je marche devant vous, mon temps se dilate, disons de 5 %, et mon espace se contracte de ces mêmes 5 % ; mon épaisseur, dans le sens de la marche, diminue de 5 %.

Expérience courante



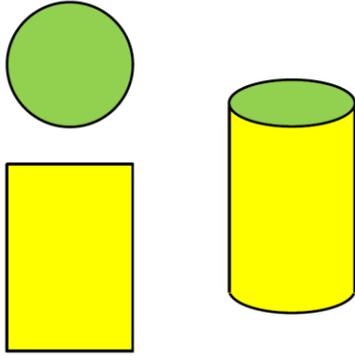
Certains rayons cosmiques (principalement issus d'explosions d'étoiles) frappent la haute atmosphère et par réaction nucléaire avec certains de ses atomes, créent des particules nommées muons dont le temps de vie est de l'ordre de 2 milliardièmes de seconde (au bout de ce temps, ils se désintègrent) ; certains de ces

muons se déplacent vers la surface de la Terre avec une vitesse très proche de la vitesse de la lumière ; à cette vitesse, le temps nécessaire pour parcourir par exemple 30 km est de $30 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/s} = 100$ milliardièmes de seconde soit 50 fois leur temps de vie ; aucun ne devrait donc atteindre le sol. Or de nombreux laboratoires les détectent (on observe une moyenne de 200 muons par m^2 et par seconde) : par rapport à nous, observateurs terrestre, leur temps propre est multiplié suffisamment (au moins par 50) et leur temps de vie (pour nous) dépasse leur temps de parcours jusqu'à nous.

Paradoxe des jumeaux (paradoxe de Langevin) : deux jumeaux ont évidemment le même âge ; l'un reste sur Terre et l'autre fait un long voyage en fusée ; à son retour sur Terre, le voyageur est donc plus jeune que le sédentaire. OUI, mais... On peut aussi considérer que le voyageur est resté immobile dans sa fusée, c'est ce qu'il voit, et que le sédentaire et la Terre ont fait le voyage symétrique dans l'espace ; c'est toujours ce que voit le voyageur. Lorsque le sédentaire retrouve son frère, c'est donc lui qui est le plus jeune.

Alors, qui a des cheveux blancs ? C'est l'un ou l'autre, pas l'un et l'autre !

Eh bien, de fait, c'est le voyageur qui a moins vieilli et le sédentaire qui a acquis des cheveux blancs. Pourquoi ? Tout simplement parce que la fusée du voyageur doit subir une forte et longue accélération pour atteindre une vitesse élevée et que pendant ce temps, son repère n'est plus galiléen ; d'autres symétries nécessaires à la relativité restreinte, mais trop complexes à exposer, sont en outre violées.



La relativité restreinte nous montre qu'il n'est plus possible de distinguer fondamentalement l'espace et le temps : seul l'espace-temps fait sens. Pour le dire de façon imagée, regardons un cylindre : de dessus, l'observateur dira que c'est un cercle, de face que c'est un rectangle. De même, selon ses préoccupations, un observateur dira qu'il y a principalement des questions de temps dans tel problème ou principalement des questions d'espace. *In fine*, seule la compréhension globale en termes d'espace-temps permettra de traiter le problème.

Conséquence évidente : n'importe quelle théorie physique qui distinguerait l'espace et le temps serait fautive !

Par exemple, l'équation de Schrödinger, équation centrale de la physique quantique (physique des particules, de l'infiniment petit) s'écrit :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

Je n'ai pas besoin de vous dire de que représentent i , etc. ; ψ est l'entité mathématique qui décrit le système, la fonction d'onde ; dans le 1^{er} membre apparaît sa dérivée par rapport au temps et dans le 2nd sa dérivée seconde par rapport à l'espace ; le temps et l'espace y sont traités différemment et de façon indépendante, cette équation ne respecte donc pas la « grammaire » de la relativité restreinte ; elle est donc intrinsèquement fautive.

Alors pourquoi l'utilise-t-on depuis plus de trois quarts de siècle ? Parce qu'elle est une très bonne approximation permettant de résoudre de nombreux problèmes. Mais l'équation « exacte », rigoureusement respectueuse de la relativité restreinte a été établie par Paul Dirac.

$E = m c^2$

Cette formule, la plus connue (la seule connue ?) de la relativité restreinte, c'est l'archétype d'une certaine frustration : très peu de personnes savent ce qu'elle signifie. Certains savent que E , c'est l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière. Mais que signifie cette formule ?

D'abord, d'où vient-elle ? C'est un peu moins évident que les conséquences précédentes.

Elle se démontre simplement du point de vue conceptuel, mais avec un outil mathématique trop complexe pour être présenté ici.

C'est quelque chose d'un peu bizarre : qu'y a-t-il dans cette équation ?

Le 1^{er} membre, c'est l'énergie : l'énergie est une propriété, pas la nature d'un objet. Je suis à l'arrêt devant vous : je n'ai pas d'énergie cinétique ; je me mets en mouvement : j'ai de l'énergie cinétique. Or, je n'ai pas changé moi-même. L'énergie est susceptible de varier : elle est contingente.

Au contraire, la masse, qui est à droite, n'est pas une propriété secondaire ; elle est fondamentalement liée à l'« être » du corps : un proton a la même masse partout et toujours, sur Terre et au fin fond de l'Univers.

À gauche (énergie), on a un avoir, un acquis, un accidentel ; à droite (masse), un être, un inné, un essentiel.

La vitesse de la lumière est ici un simple facteur multiplicatif numérique.

Or, si cette équation présente une égalité entre énergie et masse, cela signifie que l'on peut transformer l'une en l'autre. On pourrait presque dire transmuter...

Changer une propriété en existence, ce serait comme regarder la Tour Eiffel, qui a une propriété, par exemple sa hauteur, et utiliser cette hauteur pour créer, au sens propre, une seconde Tour Eiffel.

Dans la réalité physique, c'est bien ce qui se passe par exemple dans un accélérateur de particules : on a des particules lancées à grande vitesse, qui ont donc une grande énergie cinétique et on les fait se percuter ; qu'obtient-on après le choc, un ensemble de particules beaucoup moins rapides, mais avec une masse totale supérieure à celle des particules initiales. Un accélérateur de particules est une machine à transformer du mouvement en existence : ce n'est pas virtuel ; c'est matériellement réel. Certaines particules créées peuvent avoir une durée de vie très courte, mais certaines peuvent vivre très longtemps, voire éternellement.

Donc, contrairement à ce que pensait Lavoisier à propos des corps matériels, « rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme », eh bien, dans l'Univers, c'est le contraire, les particules se créent ou disparaissent en permanence.

Dans notre vie quotidienne, l'application directe de ce phénomène est l'énergie nucléaire : quand un atome d'uranium se désintègre (fission nucléaire), la masse totale des produits de désintégration est inférieure à celle de l'atome d'uranium ; la différence est transformée en énergie dont l'usine nucléaire tente de transformer le maximum en électricité.

De même, dans une étoile, la fusion nucléaire (que l'on rêve de domestiquer dans un avenir lointain) utilise de l'hydrogène pour le transformer en hélium avec une perte de masse beaucoup plus importante proportionnellement que dans la fission, d'où l'énergie gigantesque produite.

Je pourrais aborder quelques aspects complémentaires des conséquences de la relativité restreinte, telles que l'existence avérée de l'antimatière, découverte théoriquement par Dirac vers 1930 et expérimentalement par Andersen un an plus tard. L'antimatière n'est donc pas une chimère, mais une réalité maintes fois observée.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

La relativité générale : c'est génial mais ce n'est pas difficile (si l'on reste dans le domaine conceptuel).

Deux cailloux de masses très différentes tombent à la même vitesse, quelle que soit leur masse. La gravitation est « démocratique » ! Tous les corps chutent de la même manière.

Comment cela se fait-il ?

En physique :

la force, ici le poids, est égale à la masse multipliée par l'accélération :

$$\vec{F} = m\vec{g} = m\vec{a}$$

en simplifiant par la masse : $\vec{a} = \vec{g}$ l'accélération est la même pour tous les corps.

C'est tout de même bizarre : le 2^e m est la masse inertielle, qui n'a rien à voir avec la gravité ; elle témoigne du fait qu'un corps très massif est plus difficile à mettre en mouvement ou à arrêter qu'un corps peu massif.

Le 1^{er} m est la masse gravitationnelle qui dit quelle est la force créée par la gravitation appliquée au corps.

Par miracle, ces deux masses sont égales ! Mais on ne croit pas au miracle en physique ; il y a quelque-chose de plus profond.

Einstein se dit que cette coïncidence n'est pas là par hasard. Il se dit que « les forces, ce n'est pas terrible ».

Newton a dit que deux masses m et m' s'attirent avec une force :

$$F = G \frac{m m'}{d^2}$$

et cela même dans le vide.

Newton avait bien conscience du problème : comment les deux corps peuvent-ils s'attirer sans aucun médiateur, et cela instantanément, s'il n'y a rien entre les deux masses ? Il disait d'ailleurs que « tout se passe comme si... »

Nous parlons de force comme si nous savions ce que cela signifie...

Einstein en conclut que, si l'on pouvait parler de tout cela sans utiliser les forces, cela serait peut-être mieux.

Pourquoi le peut-on ? Pour la raison suivante :

L'intérêt des forces, c'est qu'elles dépendent de ce à quoi elles s'appliquent : par exemple, dans un champ électrique E , une charge q est soumise à une force $F = q E$; elle dépend bien d'une propriété variable (au moins pour certains objets) de l'objet, sa charge électrique.

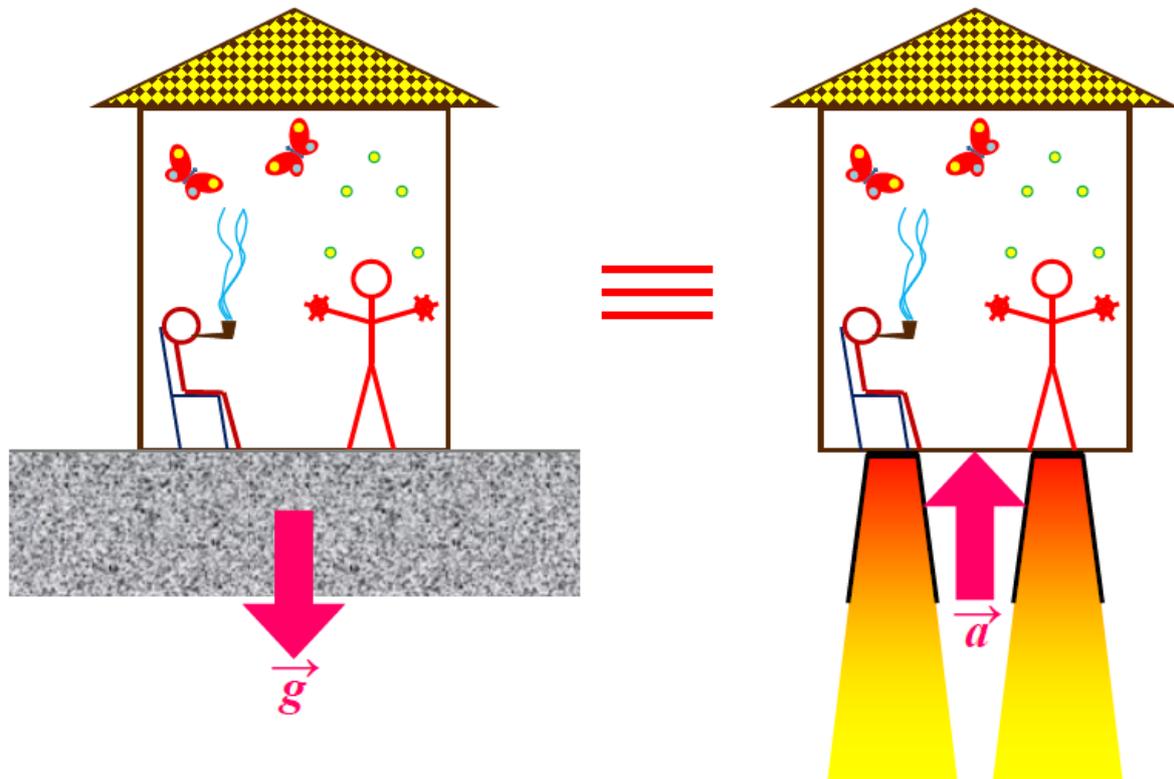
Quand je regarde un corps qui tombe, je ne peux pas savoir s'il tombe parce qu'il est attiré par la Terre ou si, une main de géant ayant retiré la Terre, nous sommes en ce moment soumis à une accélération vers le haut de $9,8 \text{ m/s}^2$ (valeur de l'accélération de la pesanteur). Cela ferait exactement la même chose.

Imaginons que nous soyons dans l'espace, loin de la Terre et que nos moteurs de fusée nous accélèrent vers le haut à $9,8 \text{ m/s}^2$; nous ressentirions exactement la même chose qu'actuellement.

Les mouvements sont relatifs !

Aucune expérience de physique locale ne me permet de savoir dans quel cas je me trouve.

C'est le cœur de ce qu'Einstein appelle le principe d'équivalence :



Principe d'équivalence : un champ gravitationnel est équivalent à une absence de champ gravitationnel mais avec un mouvement accéléré du référentiel dans lequel on se trouve.

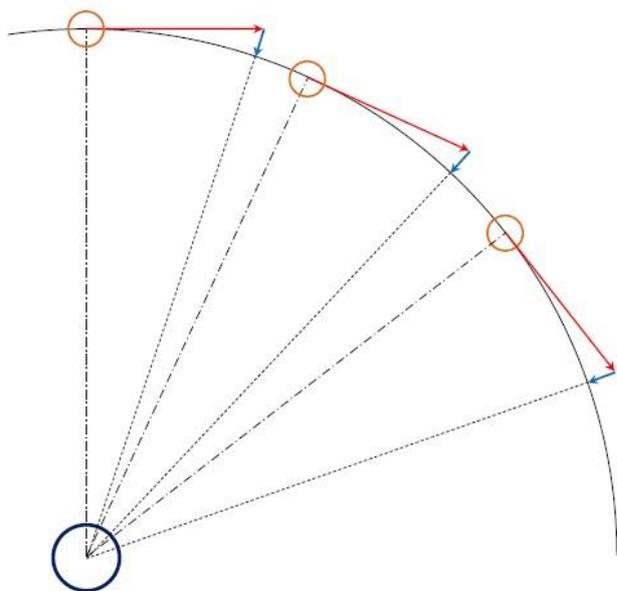
À ce stade, on peut se dire que cela correspond à ce que l'on savait déjà et que cela n'apporte rien de bien nouveau. Mais on ne va pas le dire car on sait qu'Einstein n'était pas n'importe qui et que cela va nous réserver des surprises.

Ce type de raisonnement peut s'appliquer à la gravitation, mais pas à d'autres types de « forces » : par exemple, dans un champ électrique, des objets de charges q différentes et/ou de masses m différentes ne sont pas accélérés de la même façon sauf si elles ont le même rapport q / m . L'équivalence devient ainsi impossible.

Nous avons vu en relativité restreinte que l'intervalle Δs^2 est invariant par changement de référentiel galiléen.

Si maintenant l'on passe à un référentiel accéléré, donc non galiléen, l'intervalle n'a plus aucune raison d'être conservé.

L'intervalle change : mais l'intervalle, c'est la géométrie de l'espace (théorème de Pythagore). En conclusion, nous venons de montrer que la géométrie change.



Nous avons tous ouvert un livre de vulgarisation où il est dit que Newton explique que la Lune tourne autour de la Terre en raison de la force d'attraction exercée sur elle par la Terre ; sinon, la Lune « aurait envie » de continuer sa route en ligne droite et à vitesse constante. « La Lune n'arrête pas de tomber sur la Terre » disait Newton.

Chez Einstein, il n'y a plus de force ; la Lune avance « en ligne droite » dans l'espace courbé par la gravité terrestre.

Figure : la Lune avance en ligne droite (flèche rouge) mais, pendant le même temps, tombe sur la Terre (flèche

bleue) ; elle suit donc une trajectoire elliptique quasi-circulaire.

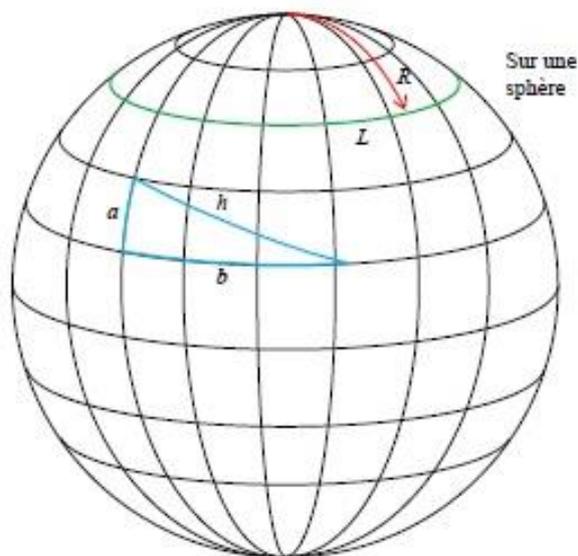
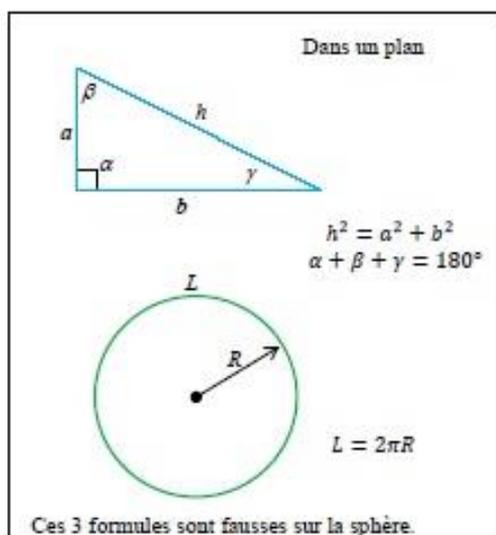
Tout le monde tombe de la même manière, donc il y a bien un mouvement uniformément accéléré.

L'intervalle Δs^2 , constant dans le cadre de la relativité restreinte, ne l'est plus puisque le référentiel est accéléré donc non galiléen.

L'intervalle prend une nouvelle forme ; la géométrie qu'il représente est déformée.

Dans un espace à 4 dimensions courbé, le théorème de Pythagore devient faux ; le carré de l'hypoténuse n'est plus égal à la somme des carrés des côtés ; la somme des angles d'un triangle ne vaut plus 180° , le périmètre d'un cercle de rayon R ne vaut plus $2\pi R$.

Il est facile de s'en rendre compte en comparant 2 espaces à 2 dimensions : un plan et la surface d'une sphère (si la sphère est grande, on ne s'aperçoit pas que la surface est courbée, comme sur Terre). Voir figure ci-après.



On traduit cela en disant que « la masse crée de la courbure ».

Je n'entrerai pas dans les développements mathématiques qui découlent de tout cela car ils impliquent des notions dont la difficulté n'est pas majeure, mais tout de même hors d'atteinte de non-mathématiciens.

On aboutit à des équations, dites équations d'Einstein, qui prennent la forme :

$$G = \frac{8\pi\mathcal{G}}{c^4}T$$

\mathcal{G} est la constante de Newton et c la vitesse de la lumière,

G est le tenseur d'Einstein et T le tenseur énergie-impulsion.

Un tenseur est un objet mathématique complexe qui comprend un certain nombre de grandeurs physiques et des opérateurs mathématiques. Nous n'essayerons absolument pas de savoir de quoi il s'agit.

Ce qui est important est de comprendre ce que représentent ces équations.

Le tenseur d'Einstein G représente la géométrie de l'espace-temps.

Le tenseur énergie-impulsion T représente ce que contient l'espace : matière et énergie.

Les équations d'Einstein permettent donc de calculer la géométrie de l'espace-temps lorsque l'on sait ce qu'il contient. Leur résolution est en général particulièrement complexe, voire même impossible pour de nombreux cas. Ce sont en effet des équations aux dérivées partielles non linéaires dont la résolution est en général « cauchemardesque » selon Aurélien Barrau.

Deux cas simples permettent une résolution aisée :

- le cas où l'on s'intéresse globalement à l'ensemble de l'Univers : c'est sa solution qui permet de connaître l'évolution de l'Univers entre sa naissance (le Big Bang, dont l'existence est imposée par ces équations) et aujourd'hui ;
- et le premier cas qui a été résolu (par Schwarzschild), celui des trous noirs.

Ce qu'il est essentiel de retenir, c'est qu'avant Einstein le monde était constitué d'objets qui vivaient dans l'espace et dans le temps ; avec la nouvelle vision d'Einstein, l'espace-temps n'est plus un contenant (forme pure indépendante de toute chose comme le pensaient Newton et Kant), mais il est lui-même un phénomène dynamique en évolution.

Également, si l'on revient aux équations d'Einstein, le coefficient de proportionnalité entre les tenseurs d'Einstein G et d'énergie-impulsion T peut être calculé : la constante de Newton \mathcal{G} est égale à $6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et la vitesse de la lumière c vaut $2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. On obtient ainsi :

$$\frac{8\pi\mathcal{G}}{c^4} \sim 2 \cdot 10^{-43} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ce nombre est extrêmement petit : cela signifie que l'espace-temps est un milieu particulièrement rigide très difficile à déformer.

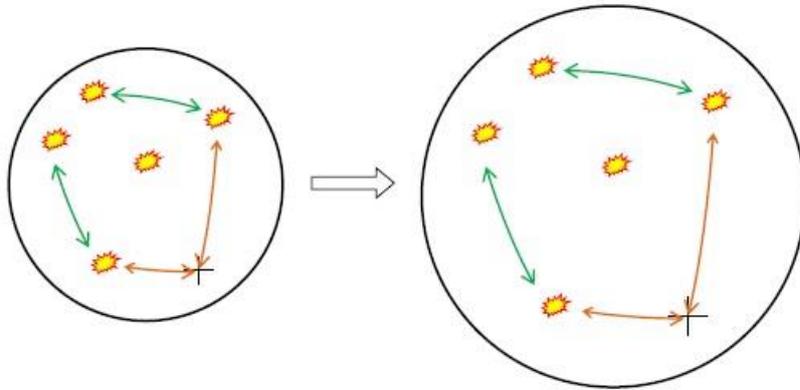
Histoire de l'Univers

Lorsqu'il a conçu cette théorie, présentée en 1915, Einstein, comme une majorité de scientifiques, pensait que l'Univers était statique : immuable depuis un temps infini. Mais il s'est rapidement rendu compte que ses équations conduisaient à un Univers dynamique, dont les distances internes varient. On ne peut pas dire que la taille de l'Univers varie car on ignore si l'Univers est fini ou infini.

Einstein a donc modifié ses équations pour permettre d'arriver à un Univers statique ; il a pour cela introduit un terme complémentaire contenant ce que l'on appelle aujourd'hui la constante cosmologique.

Hubble, en 1925, à l'aide du télescope Hooker de l'observatoire du Mont Wilson, découvre que l'Univers est en expansion, ce que Lemaître confirme en 1927.

Qu'est-ce que l'expansion de l'Univers ? Hubble observe que toutes les galaxies s'éloignent de nous et s'éloignent les unes des autres et cela à une vitesse proportionnelle à leur distance. Ce phénomène ne peut absolument pas s'expliquer par un déplacement des galaxies dans l'espace, mais par un gonflement de l'espace dans lequel les galaxies restent fixes.



Cela se comprend aisément avec l'image d'un Univers fictif à deux dimensions représenté par un ballon de baudruche sphérique. Lorsque l'on gonfle ce ballon, toutes les dimensions de la surface augmentent de la même valeur relative. La distance entre deux galaxies (en vert) augmente proportionnellement à

leur distance et toutes les galaxies s'éloignent d'un point donné (un observateur terrestre par exemple) proportionnellement à leur distance à ce point (en orange).

Difficilement convaincu, Einstein a donc supprimé son terme correctif contenant la constante cosmologique. Il a déclaré ensuite que cet épisode avait été la plus grande erreur de sa vie ; mais contrairement à ce que l'on croit habituellement, cette erreur n'était pas d'avoir ajouté puis retiré ce terme, mais de ne pas avoir vu assez vite que son terme correctif ne pouvait pas conduire à l'Univers statique auquel il croyait.

(Ce terme avec la constante cosmologique a été réintroduit aujourd'hui ; il permet entre autres de comprendre l'accélération actuelle de l'expansion.)

Que nous disent les équations d'Einstein de l'histoire de l'Univers ?

Leur résolution permet de connaître l'évolution de l'Univers entre un âge de 10^{-43} s et aujourd'hui.

Des considérations sur l'homogénéité et l'isotropie quasi-parfaites à très grande échelle, facilement observables, permettent de simplifier les équations d'Einstein et de les résoudre pour l'Univers dans son ensemble.

On obtient une expression de l'intervalle qui vaut (en première approximation) :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t) dr^2$$

t est le temps cosmique qui est le temps indiqué par une horloge qui n'est pas en mouvement par rapport à l'Univers ; c est le temps usuel.

dr est la distance élémentaire.

$a(t)$ est le facteur d'échelle ; c'est la grandeur par laquelle les distances internes à l'Univers (distances entre les galaxies par exemple) sont multipliées au cours du temps ; c'est une fonction inconnue du temps.

Le calcul de cette fonction est assez simple conceptuellement, mais plutôt lourd mathématiquement ; il aboutit aux équations de Friedmann qui sont de la forme :

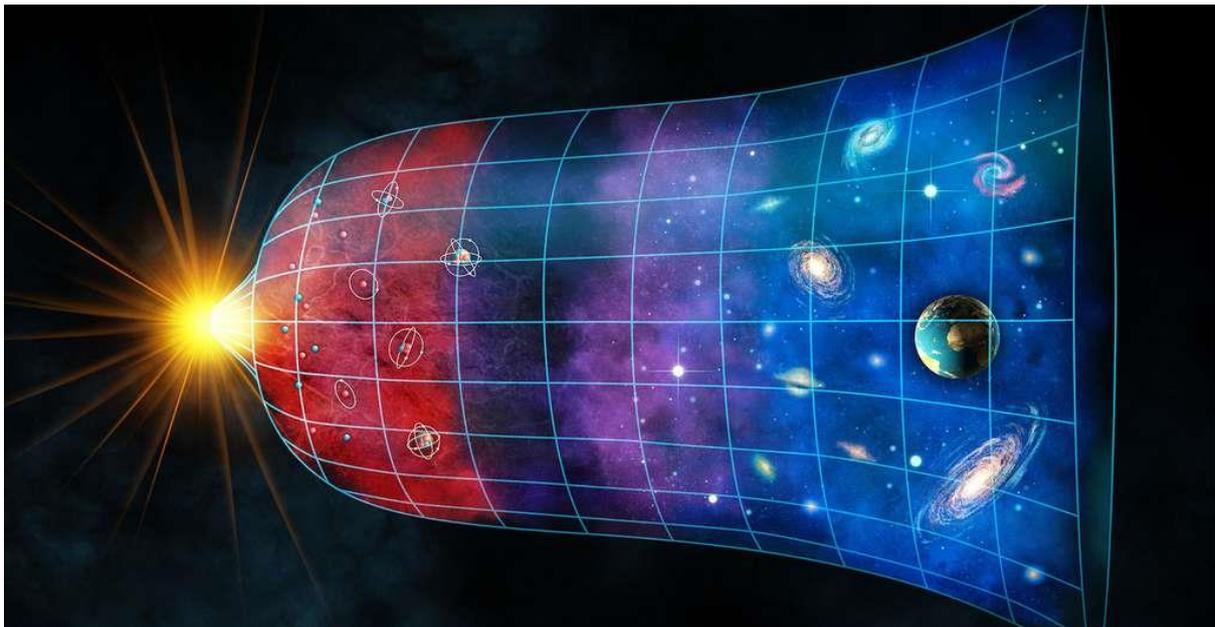
$$\left[\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right]^2 = H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

expression dans laquelle $\dot{a}(t)$ représente la dérivée par rapport au temps de la fonction $a(t)$, H la constante de Hubble qui représente la vitesse d'expansion de l'Univers et ρ la densité d'énergie de l'Univers par unité de volume.

Il faut donc connaître cette dernière grandeur pour calculer la fonction a .

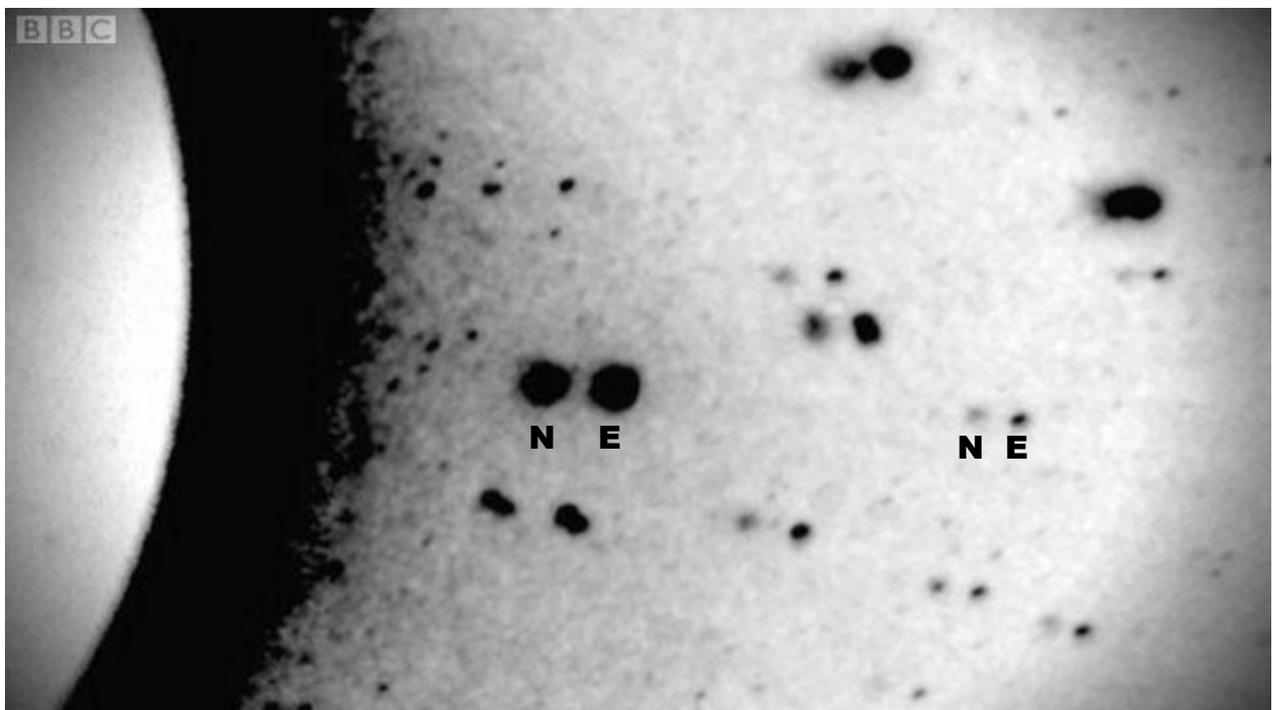
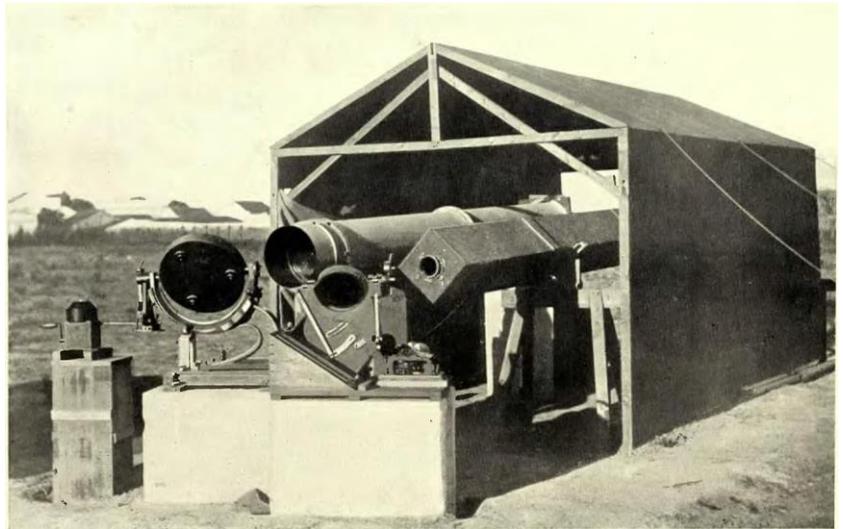
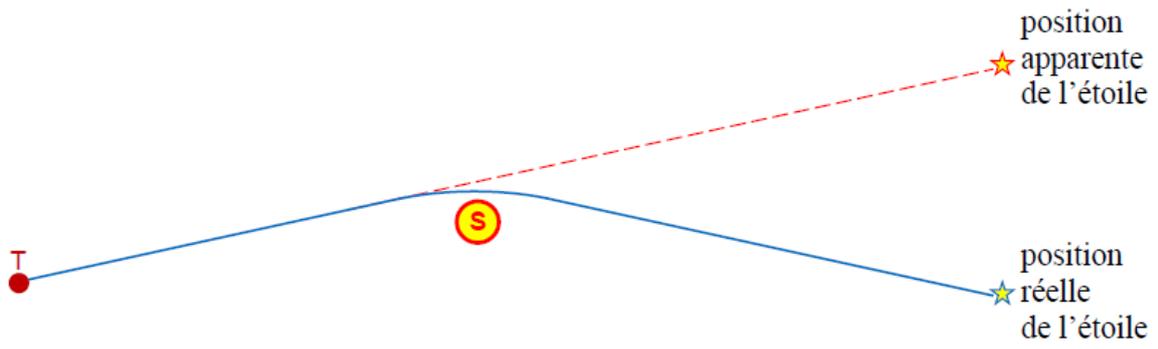
L'histoire de l'Univers qui en découle se décompose ainsi en 4 périodes :

- entre la fin de l'ère de Planck (10^{-43} s) et 10^{-33} s, donc pendant un temps très court, l'Univers a subi ce que l'on nomme l'inflation, une expansion gigantesque qui a multiplié ses dimensions propres par 10^{26} !
- pendant environ 100 000 ans (ce qui reste court par rapport à son âge de 13,8 milliards d'années) l'Univers, dominé par la lumière, a eu une expansion proportionnelle à la racine carrée du temps : $a(t) \propto t^{1/2}$;
- puis, presque jusqu'à aujourd'hui, l'Univers, dominé par la matière, a eu une expansion proportionnelle à la puissance 2/3 du temps, donc un peu plus rapide : $a(t) \propto t^{2/3}$;
- enfin, aujourd'hui, l'Univers est dominé par la constante cosmologique et il a de nouveau une expansion exponentielle : $a(t) \propto e^{kt}$.



Une belle « preuve » de la relativité générale : l'éclipse d'Einstein

Einstein avait suggéré qu'une éclipse totale de Soleil pourrait permettre de photographier des étoiles proches (vues de la Terre) du Soleil, puis de faire de nuit la même photographie de cette zone de ciel. Le physicien anglais Arthur Eddington monte ainsi une expédition sur l'île de Principe (à 350 km des côtes du Gabon) pour profiter de l'éclipse totale du 29 mai 1919. Ses photographies confirment sans le moindre doute (pour la communauté scientifique) l'existence du phénomène prédit par Einstein : la courbure de l'espace-temps fait que des rayons lumineux passant à proximité d'une masse sont déviés. Pour que la déviation soit observable, il faut que la masse soit importante, d'où le choix du Soleil ; et pour que les étoiles proches soient photographiables, il faut que le soleil soit occulté, d'où la nécessité de l'éclipse. Les moyens dont disposait Eddington étaient trop imprécis pour confirmer les valeurs numériques prévues par la théorie, mais le phénomène a bien été observé.



En haut : Arthur Eddington et son matériel.

En bas : superposition des photographies (négatifs) prises de nuit (N) et pendant l'éclipse (E) ; les étoiles apparaissent bien décalées.

NOTRE MODÈLE COSMOLOGIQUE

DONNÉES OBSERVATIONNELLES

EN FAVEUR DU BIG BANG

Le modèle cosmologique du Big Bang dit que l'espace et le temps sont apparus et donc qu'ils ont une histoire ; pas les constituants, mais l'espace et le temps qui sont bien ainsi des phénomènes physiques. Ceci est totalement en désaccord avec notre intuition fondamentale.

I. LES DISTANCES

Pour pouvoir aborder ces questions, nous avons besoin de raisonner sur la taille de l'Univers : quelle est-elle ? Quelle est au moins sa taille minimale ?

Pour répondre à cette question, nous cherchons à savoir à quelle distance de nous se trouvent les étoiles. Donc, dans un premier temps, il nous faut savoir comment l'on mesure les distances auxquelles se trouvent les étoiles.

C'est un point fondamental : la taille change tout ! Et pour beaucoup de questions.

L'apparition de la vie a-t-elle eu lieu une fois seulement ou souvent ? Si l'Univers est fini et pas très grand, penser qu'elle n'est apparue que sur la Terre n'a rien d'absurde ; si l'Univers est infini, elle ne peut être apparue qu'un nombre infini de fois.

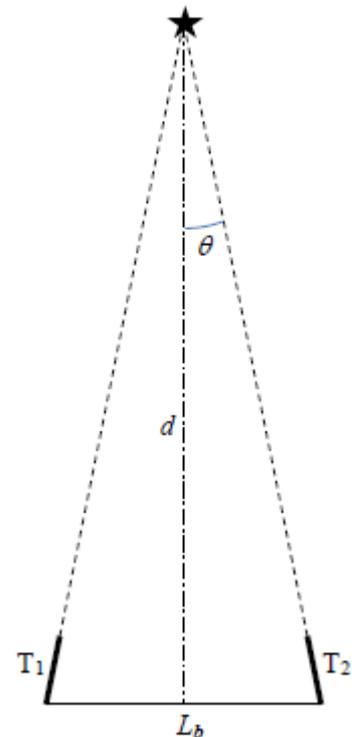
L'image des étoiles ne nous permet absolument pas d'avoir la moindre idée de leur distance ; il faut donc utiliser des méthodes techniques pour y parvenir.

1. La méthode de la parallaxe

En visant une étoile avec deux télescopes T_1 et T_2 situés à une distance L_b (ligne de base), la mesure de l'angle θ permet de connaître la distance d : $d = L_b / 2 \tan \theta$.

La plus grande ligne de base possible en restant sur Terre est égale à 300 millions de kilomètres : le diamètre de l'orbite terrestre ; il suffit pour cela de faire deux visées à 6 mois d'intervalle.

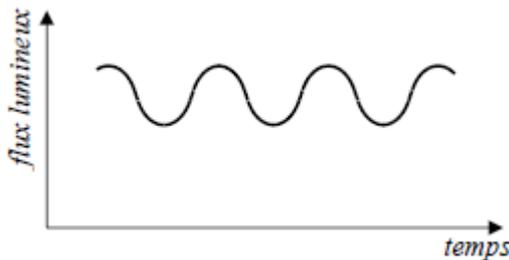
La méthode permet de mesurer la distance d'étoiles situées jusqu'à 100 AL (années-lumière). Au-delà, l'angle θ est trop petit pour être mesuré.



Cette distance est considérable : 1 AL est la distance parcourue par la lumière en un an, soit environ 10^{13} km (10 000 milliards de km) ; à titre de comparaison, la Lune est à 1 sL de la Terre et le Soleil à 8 mnL.

Dans cette sphère de 100 AL de rayon qui nous entoure, les étoiles sont peu nombreuses : l'espace est essentiellement vide ; cette observation est également vraie à l'échelle de l'infiniment petit : la matière est essentiellement constituée de vide.

2. La méthode des céphéides



Les céphéides (étoiles de type Céphée) sont des étoiles variables : leur flux lumineux varie de façon périodique (ces étoiles rebondissent sur elles-mêmes). Ce flux lumineux (la quantité de lumière émise) L_e est directement corrélé à la période de l'émission. Si l'on mesure la quantité L_r de lumière reçue par le télescope, on détermine la distance d de l'étoile, le rapport L_r / L_e étant inversement proportionnel à d^2 . Il

existe suffisamment d'étoiles variables pour appliquer utilement cette méthode qui permet de mesurer des distances jusqu'à 1 million d'années-lumière.

10^6 AL, soit environ 10 milliards de milliards de km : l'Univers commence vraiment à être immense !

Au-delà de cette limite, la méthode ne fonctionne plus car on ne voit plus d'étoiles.

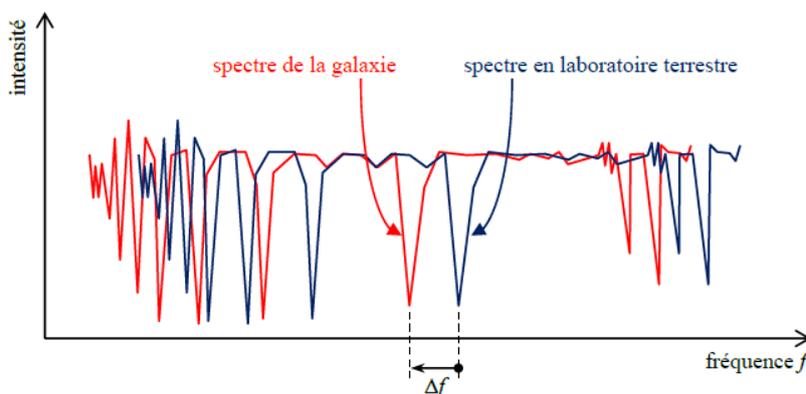
3. La méthode du redshift (décalage spectral vers le rouge)

Dans un milieu en expansion, la vitesse v de séparation de 2 points est proportionnelle à leur distance d :

$v = H d$, expression dans laquelle H est la constante de Hubble ; l'histoire de sa détermination a été assez complexe mais elle est connue aujourd'hui avec une précision de 2 %.

Pour déterminer la distance des galaxies, on mesure donc la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous.

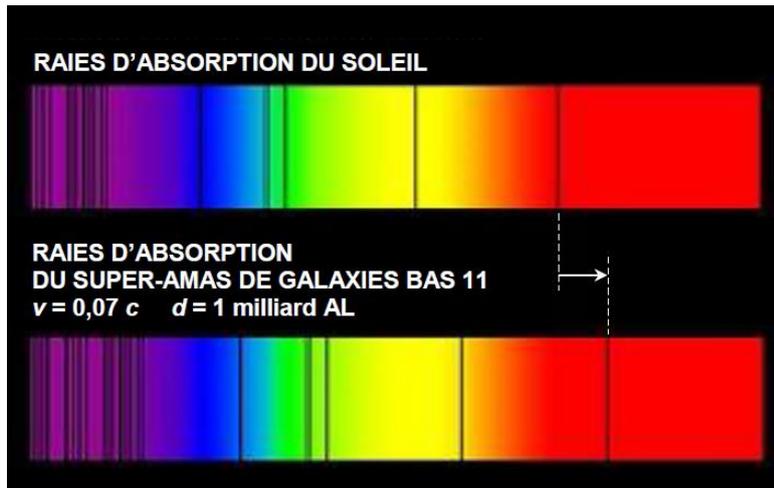
Cela est très facile grâce à l'effet Doppler que tout le monde connaît dans le domaine sonore. Lorsqu'un objet en mouvement émet une onde, la fréquence perçue augmente lorsque l'objet se rapproche et diminue lorsqu'il s'éloigne ; d'où le son caractéristique d'un véhicule qui s'approche, passe, puis s'éloigne de nous.



La lumière étant une onde, on peut appliquer ce principe à la lumière émise par les galaxies.

Comment connaît-on la fréquence d'émission de cette lumière. Les constituants de la matière sont tous connus (du moins le pense-t-on avec une certaine fiabilité) et l'on connaît parfaitement leur

spectre d'émission qui présente des pics caractéristiques à certaines longueurs d'onde ou fréquences (les deux sont directement liées).

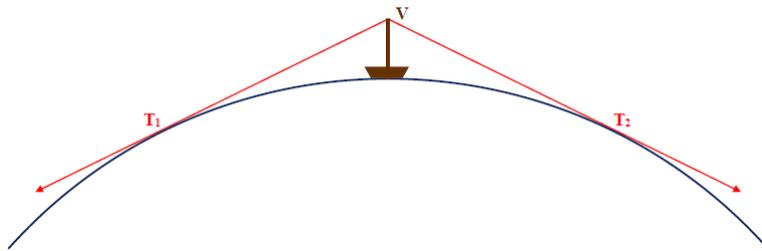


Le spectre d'émission d'une galaxie (en rouge) montre ainsi un décalage vers le rouge par rapport à ce que serait ce spectre sur Terre (en noir)

On est donc capable de déterminer la distance de galaxies jusqu'à une valeur limite de 10 milliards d'années-lumière soit 10 000 fois plus loin que par la méthode des céphéïdes.

10 milliards d'années-lumière correspondent à 100 000 milliards de milliards de km : l'Univers devient vraiment gigantesque !

Est-ce la fin de l'Univers ? Il semble bien qu'au-delà de cette limite il n'y ait plus rien à voir : peut-être n'y a-t-il plus rien à voir.... Mais on peut également montrer qu'il se produit un effet d'horizon du fait que l'Univers a eu un début. Ce serait très complexe à expliquer, mais on peut montrer ce qu'est l'effet d'horizon sur tout autre chose.



Imaginez une vigie V au sommet du mât d'un bateau ; à l'œil nu, elle peut voir des petits bateaux à quelques centaines de mètres ; donnez-lui une longue-vue, elle les verra à 3 ou 4 km ; donnez-lui la meilleure longue-vue du monde, elle ne pourra pas les voir au-delà de 16 km si le mât mesure 20 m et 25 km si le mât mesure 50 m. Pourquoi ?

Simplement parce que son axe de visée ne peut passer sous l'horizon qui correspond aux points de tangence T.

II. DONNÉES OBSERVATIONNELLES EN FAVEUR DU BIG BANG

On n'a évidemment pas prouvé le modèle cosmologique du Big Bang, mais il est de loin la meilleure théorie dont nous disposons pour expliquer l'Univers ; son niveau de fiabilité est tel qu'il est extrêmement probable que, s'il doit être modifié et amélioré, il ne sera jamais totalement déconstruit. Cela au même titre que la rotondité de la Terre...

Il n'existe pas d'argument-choc décisif en sa faveur mais un très large faisceau de présomptions fortes.

Présentons les six principales.

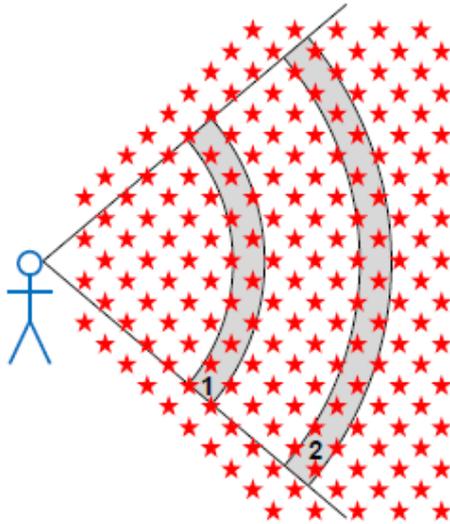
1. Le paradoxe de Olbers

Ce n'est pas un argument en faveur du Big Bang, mais un argument qui montre que l'image simple, naïve mais intuitive (et pensée souvent comme la plus rationnelle) d'un Univers éternel, infini et statique n'est pas admissible.

On suppose donc que c'est le cas : à grande échelle, l'Univers est éternel, infini et statique ; s'il est éternel, son âge est aujourd'hui infini et les lois de la thermodynamique imposent qu'il soit parfaitement homogène (à très grande échelle) et qu'il ne s'y passe pas de transformations majeures.

Considérons le cône d'espace issu des yeux d'un observateur terrestre ; il est homogène, la répartition des étoiles y est homogène.

Dans ce cône, considérons la calotte sphérique n° 1 de rayon moyen r_1 et d'épaisseur e ; elle contient un nombre n_1 d'étoiles qui émettent vers l'observateur un flux lumineux S_1 .



Considérons ensuite la calotte sphérique n° 2 de rayon moyen r_2 et de même épaisseur e ; elle contient un nombre n_2 d'étoiles qui émettent vers l'observateur un flux lumineux S_2 .

Peut-on comparer ces deux flux S_1 et S_2 ?

Sans difficulté.

On peut évidemment dire que, dans un Univers homogène, le flux lumineux moyen s des étoiles d'une grande zone donnée est le même : $S_1 = n_1 s$ et $S_2 = n_2 s$.

Le nombre d'étoiles dans une calotte est proportionnel à son volume ; comme les calottes ont même épaisseur, le nombre d'étoiles est proportionnel au carré du rayon r : $n_1 = k r_1^2$ et $n_2 = k r_2^2$.

La dilution du flux entre la calotte sphérique de rayon r et l'œil de l'observateur est également proportionnelle au carré du rayon (propriété géométrique élémentaire) : le flux reçu par l'œil de l'observateur R est donc proportionnel au flux émis divisé par le carré du rayon : $R_1 = k' S_1 / r_1^2$ et $R_2 = k' S_2 / r_2^2$. En calculant les flux reçus des deux calottes avec ce qui vient d'être dit :

$$R_1 = k' \frac{S_1}{r_1^2} = k' \frac{n_1 s}{r_1^2} = k' \frac{k r_1^2 s}{r_1^2} = k' k s = R_2 = R$$

La quantité de lumière reçue par l'œil de l'observateur provenant d'une calotte de rayon r et d'épaisseur e est la même pour toutes les calottes sphériques car elle ne dépend pas du rayon r .

Quelle est la totalité de la lumière reçue de tout le volume d'espace situé dans le cône d'Univers ? Bien évidemment la quantité R multipliée par le nombre de calottes sphériques d'épaisseur e situées dans ce cône. Comme l'Univers est infini, ce nombre de calottes est infini ; une infinité de fois R (sauf si R était nul, ce qui n'est pas le cas), cela fait l'infini. Le flux lumineux reçu par l'œil de l'observateur est infini.

Lorsque nous regardons le ciel nocturne (non perturbé par la singularité que représente le Soleil situé juste à côté de la Terre – à l'échelle de l'Univers), ce ciel n'est pas infiniment brillant.

L'Univers ne peut pas être éternel, infini et statique !

On peut aisément objecter que ce résultat n'est pas correct car l'Univers peut ne pas être parfaitement transparent et donc qu'une partie de la lumière peut être absorbée sur son parcours, par exemple par des gaz ou de la poussière. Cette objection ne tient pas : si le flux de lumière qui nous parvient est infini sans absorption et fini avec absorption, c'est donc qu'une quantité infinie de lumière doit être absorbée. Cela n'est évidemment pas possible car l'absorbant, quel qu'il soit, réémet de la lumière dès qu'il a absorbé une certaine quantité d'énergie lumineuse. C'est un fait aisément vérifié sur Terre. (Cette solution a été apportée par Edgar Poe.)

2. La récession des galaxies

C'est un argument très fort, qui n'est pas une preuve mais s'en approche. Nous avons plusieurs fois parlé de cette observation que les galaxies (donc tous les points de l'Univers observable) s'éloignent les unes des autres d'autant plus vite qu'elles sont éloignées. Ces observations sont incontestables, comme est quasi-incontestable la conclusion que l'Univers ne peut qu'être en expansion.

Remarque 1 : cela est faux ! Chacun sait que la galaxie d'Andromède se rapproche de notre galaxie, la Voie lactée, qu'elle atteindra dans environ 4 milliards d'années avant (très vraisemblablement) qu'elles ne fusionnent. C'est vrai, mais !... À l'échelle de l'Univers, la galaxie d'Andromède est très proche de la Voie lactée ; ces deux galaxies se rapprochent l'une de l'autre en raison des forces gravitationnelles qui, très localement, l'emportent sur le phénomène d'expansion ; cela se passe à toute petite échelle pour l'Univers.

Remarque 2 : le modèle est réfutable ; il suffira de trouver une seule galaxie lointaine qui se rapproche de la Terre pour que le modèle s'effondre. Aujourd'hui, on a mesuré le mouvement de presque un milliard de galaxies ; le télescope LSST actuellement en construction pourra faire de même pour plusieurs milliards de galaxies. Attendons ! Mais la probabilité de réfuter ainsi le modèle paraît aujourd'hui négligeable.

3. Les âges

Prenons le modèle de l'expansion au sérieux. À partir de la vitesse d'expansion mesurée, remontons le temps. Jusqu'à quand faut-il remonter pour que l'Univers soit très petit ? Avec des calculs approximatifs, car nous avons peu de données sur l'évolution de la vitesse d'expansion, on aboutit à environ 10 milliards d'années (tiens ! C'est à peu près la limite au-delà de laquelle on n'observe plus grand-chose dans l'Univers. Coïncidence ?). Cette valeur de 10 milliards d'années est-elle vraisemblable ou absurde ?

On doit, si c'est correct, trouver que l'âge des objets situés dans l'Univers n'est pas supérieur à cette valeur ; et on doit surtout trouver que l'âge de ces objets est à peu près régulièrement réparti entre 0 et 10 milliards d'années ; on devrait en effet se poser beaucoup de questions si l'on découvrait que tous les objets de l'Univers ont un âge très faible, par exemple 1 million d'années au maximum.

On sait parfaitement mesurer l'âge d'un grand nombre d'objet ; nous ne présenterons pas les méthodes, souvent complexes, qui sont parfaitement validées expérimentalement sur Terre et dont la plupart reposent sur des vitesses de désintégration d'éléments. Chacun connaît la technique du carbone 14 qui permet de dater les restes d'êtres vivants jusqu'à quelques milliers d'années.

4. L'évolution des radiogalaxies

Cet argument est très important historiquement.

Faisons un petit rappel sur le rayonnement électromagnétique.

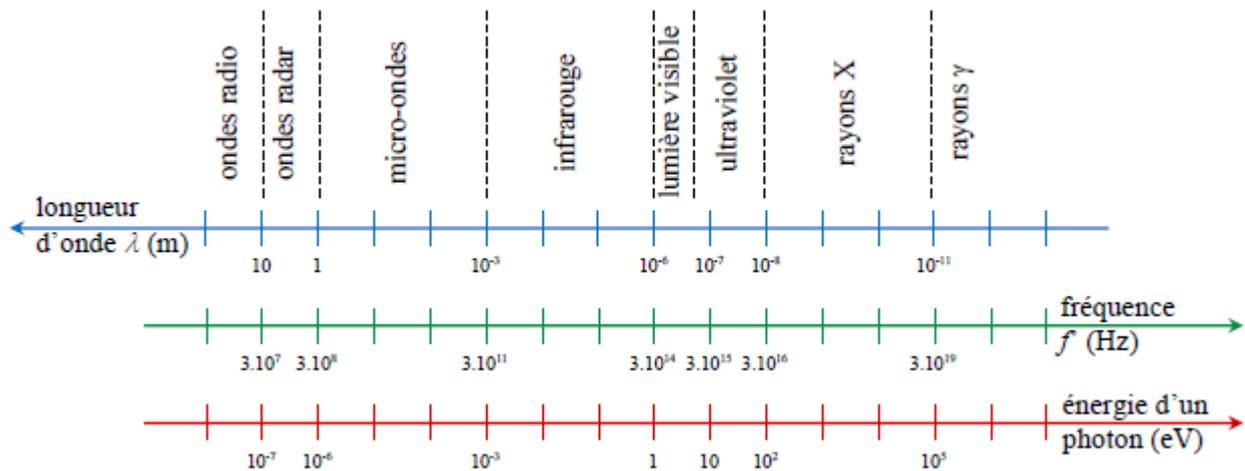
Dans de multiples circonstances, les corps émettent un rayonnement électromagnétique caractérisé par la dualité onde-corpuscule. Si nous nous intéressons aux ondes, elles sont caractérisées par leur fréquence f (nombre de vibrations par seconde) exprimée en hertz (Hz), leur longueur d'onde λ (distance entre deux maxima – par exemple) exprimée en mètres (m) ; le corpuscule associé, le photon, a une énergie exprimée en électron-volts (eV) ; l'électron-volt est l'énergie acquise par un électron accéléré par un potentiel électrique de 1 volt ;

$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$.

L'ensemble des ondes électromagnétiques (de toutes les longueurs d'ondes ou fréquences possibles) constitue le spectre électromagnétique représenté ci-après.

Il est constitué de différentes catégories : lumière visible, ondes radio, etc. Le rayonnement électromagnétique en provenance de l'Univers fournit des renseignements utiles et différents dans toutes les catégories.

Malheureusement, seules les ondes optiques (visible, infrarouge et ultraviolet) et radio pénètrent suffisamment l'atmosphère pour être utilisables. C'est pourquoi, historiquement, après l'optique, ce sont les ondes radio qui ont été utilisées, les autres rayonnements nécessitant de sortir de l'atmosphère.



Les radiogalaxies sont des galaxies qui émettent un important rayonnement radio.

Lorsque l'on observe les radiogalaxies de l'Univers, on voit de notables différences selon qu'elles sont proches ou éloignées de nous ; dire que ces radiogalaxies sont proches ou éloignées géométriquement, c'est aussi dire qu'elles sont éloignées dans le temps puisque « regarder loin, c'est regarder tôt ». Cela signifie qu'il y a donc une évolution temporelle des radiogalaxies.

Cela implique que l'Univers n'est pas éternel : si l'Univers était éternel, un temps infini aurait précédé notre époque et l'Univers aurait atteint un équilibre thermodynamique où plus rien ne se passe à grande échelle ; sinon comment expliquer que, dans ce temps infini d'immobilité, nous nous trouvons exactement dans le court laps de temps où les radiogalaxies évoluent ; la phase d'évolution a en effet une durée négligeable par rapport à l'éternité...

On peut prendre l'exemple d'une goutte de lait versée dans un bol de café : elle se dilue rapidement (quelques minutes) puis le mélange reste stable aussi longtemps que le liquide ne s'évapore pas.

L'Univers est donc toujours en train d'évoluer, son début n'est pas infiniment loin dans le temps.

C'est un argument faible *a priori* : « ça marche mieux avec que sans le Big Bang » ; mais c'est historiquement l'argument qui a convaincu une majorité de scientifiques.

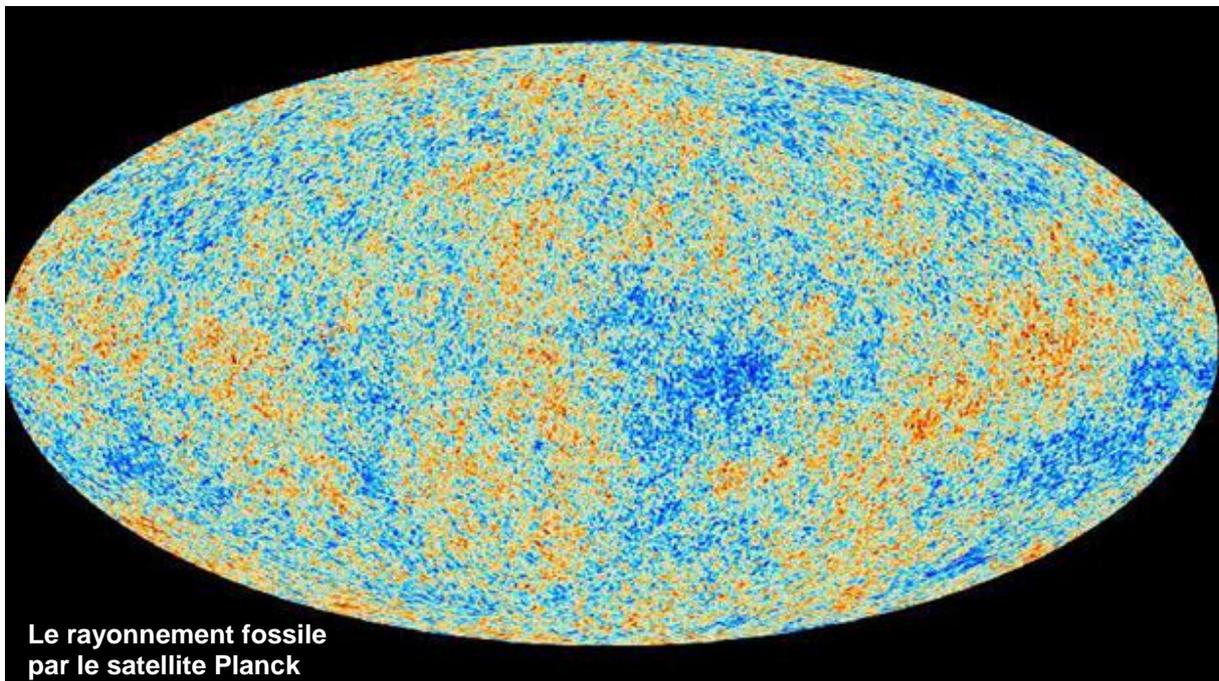
5. Le rayonnement fossile

Le rayonnement fossile, c'est un peu le graal de la cosmologie ; c'est lui qui renferme l'information la plus complète et la plus précise sur l'Univers primordial et son évolution. De quoi s'agit-il ?

Considérons le modèle cosmologique du Big Bang et de l'expansion.

L'état initial est un Univers concentré dans quelques millimètres, d'une densité et d'une température extrêmement élevées. L'Univers grandit, sa température décroît (c'est une loi physique incontournable et bien vérifiée sur Terre). Tant que la température reste élevée, la lumière et la matière interagissent : les photons sont sans cesse absorbés et réémis par la matière ; on dit que lumière et matière sont couplées. La température continuant de décroître, vient un moment où la lumière n'a plus assez d'énergie pour interagir avec la matière et les noyaux atomiques commencent à se former. N'interagissant plus avec la matière, la lumière conserve alors une image inaltérable de l'Univers à ce moment-là. Cette disparition de l'interaction lumière-matière s'appelle le découplage ; il s'est produit environ 380 000 ans après le Big Bang ; 380 000 ans, c'est très peu dans la vie de l'Univers : 1 / 36 000 de son âge actuel, moins de 20 heures dans la vie d'un homme).

En observant aujourd'hui cette lumière, on voit l'Univers comme il était 380 000 ans après le Big Bang, comme si le rayonnement fossile représentait la dernière photographie prise à cette époque.



**Le rayonnement fossile
par le satellite Planck**

Depuis lors, l'Univers s'est très largement étendu et l'énergie de ce rayonnement s'est largement diluée ; on dit que sa température est de 3 kelvins (3 degrés au-dessus du 0 absolu) ; l'interaction de cette lumière avec la matière est devenue très faible mais non nulle ; cela permet de la détecter et de la mesurer, mais il faut pour cela des instruments particulièrement complexes et précis, des bolomètres. Ce fut la tâche de 3 satellites successifs : Kobé, Wmap (américains) et Planck (européen).

Dans une première étape, avant l'entrée en service de ces satellites, il a fallu vérifier que cette lumière prédite par le modèle du Big Bang existait bien ; cela a valu à Arno Penzias et Robert Wilson le prix Nobel de physique en 1978. Il fut vérifié que ce rayonnement baignait la totalité de l'Univers.

Dans une seconde étape, les satellites ont permis de mettre en évidence beaucoup des caractéristiques de ce rayonnement fossile :

- sa distribution en température correspond exactement à ce que l'on attendait ;
- il est à peu près le même dans toutes les directions de l'espace ; mais il présente de toutes petites irrégularités : au moment du découplage, en raison de fluctuations quantiques, la matière n'était pas parfaitement homogène ; elle présentait de petits grumeaux

qui donnèrent ultérieurement naissance aux galaxies ; ces petites fluctuations sont très significatives quant au contenu de l'Univers primordial.

Avec les mesures du satellite Planck, deux choses sont « magiques » :

- on connaît l'Univers avec une très grande précision (de l'ordre de 1 %) ; on n'est plus dans la qualitatif mais dans le quantitatif précis ;
- les résultats des mesures de Planck sont définitifs : on ne pourra jamais faire mieux ; la limite de précision atteinte n'est en effet pas liée à la précision des détecteurs mais aux propriétés de l'objet lui-même.

Cela confirme que le modèle cosmologique du Big Bang fonctionne très bien ; de ce point de vue, il n'y a pas de « nouvelle physique » à l'horizon.

De plus, on peut, dans ce rayonnement fossile, trouver des traces de ce qui s'est passé avant, très près du Big Bang ; cela permet d'avoir d'importants renseignements sur l'inflation (entre 10^{-43} et 10^{-33} s).

6. La nucléosynthèse primordiale

L'Univers primordial était très chaud ; cela a permis l'apparition de réactions nucléaires permettant la formation de noyaux atomiques légers. La physique nucléaire est ancienne et bien connue sur Terre : on sait très bien calculer ce qui doit être créé : connaissant l'état de l'Univers on peut savoir quels noyaux doivent être formés et en quelles proportions. Il y a une adéquation parfaite entre ces prévisions et les observations.

III. PETITE CONCLUSION

Qu'appelle-t-on modèle cosmologique du Big Bang ?

Si c'est dire que l'Univers est en expansion depuis le début de l'inflation et comment cela se passe, c'est très fiable, c'est acté.

Si c'est parler de ce qui s'est passé depuis l'instant $t = 0$, c'est-à-dire depuis... depuis quoi ? Personne n'en sait rien, personne ne sait même si cet instant a existé. Pour les physiciens c'est parfaitement secondaire ; ce qui compte, c'est ce qui s'est passé à partir du début de l'inflation ; c'est la description de l'histoire de l'Univers. Pour le début, si un instant $t = 0$ a existé, l'inflation a commencé à la fin de l'ère de Planck dont beaucoup de considérations permettent de penser qu'elle a duré 10^{-43} s.

Ce qui n'empêche pas nombre de chercheurs de réfléchir à ce potentiel instant 0 ou à ce qui pourrait s'être produit d'autre sans instant 0 : on est là dans le domaine spéculatif.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Chacun sait que la nouvelle physique, la physique du XX^e siècle, repose sur deux piliers : la théorie de la relativité et la physique quantique.

Cet exposé n'a concerné que la relativité et une de ses principales conséquences : l'histoire de l'Univers.

Cependant, peut-on traiter cette question sans recourir à la physique quantique ?

Oui et non.

Si l'on veut en rester à une description qualitative, la réponse est oui et c'est ce que nous avons fait uniquement à l'aide de mots malgré, par ci par là, quelques petites équations très simples permettant à celles et ceux qui ont gardé quelques souvenirs mathématiques scolaires de se fixer un peu les idées. Mais vous auriez tout aussi bien pu lire le même texte sans la moindre équation.

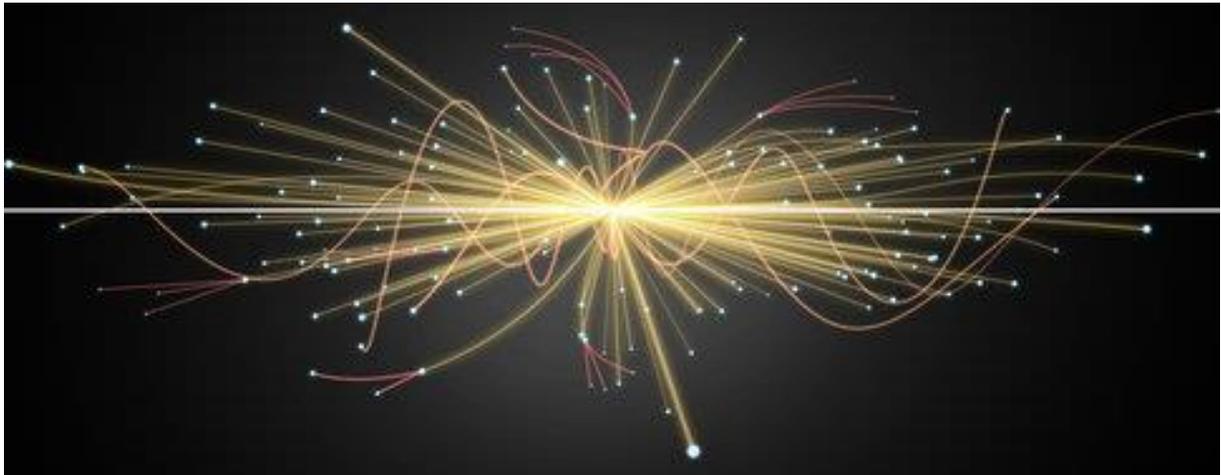
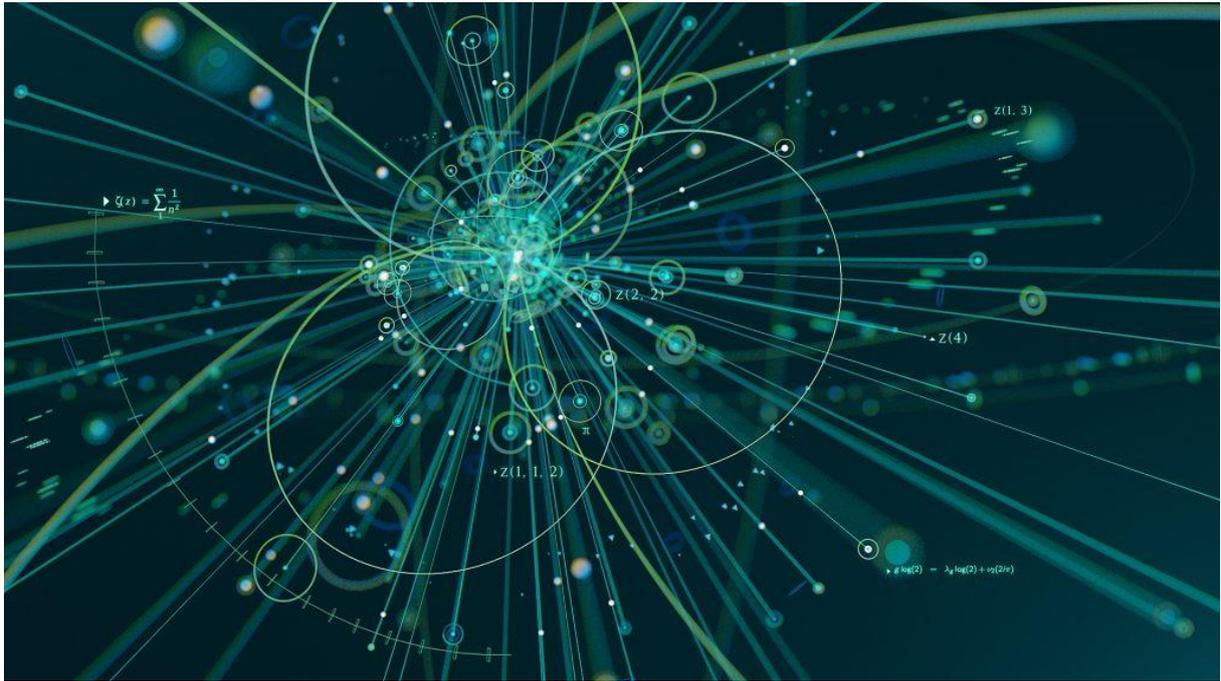
La mécanique quantique devient indispensable si l'on veut aborder certaines circonstances de l'aventure qui vient d'être contée. Oui, mais voilà : sans mathématiques compliquées, très compliquées, pas de mécanique quantique et, même avec ces mathématiques compliquées, les concepts manipulés sont à la fois d'une extrême abstraction et surtout semblent en opposition totale avec tout ce que l'on voit et sait de ce qui nous entoure. Si j'ai pu me sentir capable de vous présenter tout ce qui précède et espérer vous le rendre compréhensible, je vais être obligé de n'aborder que quelques points très simples pour parler de physique quantique ; sinon, c'est parler chinois pour la très grande majorité des lecteurs.

J'en dirai quelques mots plus loin.

Et puis, il faudrait aborder l'une des plus grandes difficultés de la physique du XX^e siècle : relativité et physique quantique, sont, sur de très nombreux points, parfaitement incompatibles ; les plus grands esprits de la physique se sont affrontés pendant des décennies sur cette difficulté qui, aujourd'hui, n'est toujours pas résolue. Depuis 40 ou 50 ans, bien des physiciens tentent une unification de la physique, c'est-à-dire tentent de fonder une théorie qui englobe ce que disent les deux sciences dans les domaines où chacune est quasi-incontestable et résolve les difficultés là où elles s'affrontent. Vous avez vraisemblablement entendu parler de théorie des cordes, de gravité quantique à boucles, de supersymétrie : ce ne sont à ce jour que spéculations, très sérieuses, certes, mais on est encore loin du compte, très loin du compte. Et pour corser le tout, la Nature n'est pas sympathique !

Certains aspects de la supersymétrie semblaient faire consensus pour pas mal de chercheurs ; on a construit, pour une dizaine de milliards (d'euros, pas d'années-lumière) une grosse machine, le LHC (grand accélérateur de hadrons) du CERN. On en attendait une confirmation de l'existence du boson de Higgs (c'est en réalité non pas une particule, mais un phénomène physique complexe) prédit depuis des décennies ; bravo ! c'est fait, la physique a fait un grand pas et deux des physiciens qui l'avaient prédit (François Englert et Peter Higgs) ont justement reçu le prix Nobel ; le troisième, Robert Brout, était malheureusement déjà décédé. Mais beaucoup en espéraient surtout la mise en évidence de ces fameuses supersymétries tant attendues : raté !

Alors, pour terminer, quelques mots, dans un certain désordre, sur la physique quantique. Tout cela est bien évidemment simplifié à l'extrême.



LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Le deuxième pilier de la nouvelle physique, la physique du XX^e siècle, c'est donc la mécanique quantique.

La mécanique quantique, qui fut longtemps appelée mécanique ondulatoire, est la meilleure théorie dont on dispose aujourd'hui pour expliquer le comportement de la matière au niveau microscopique, c'est-à-dire pour les atomes et tous les objets de taille inférieure.

Cette théorie fait appel d'une part à des notions très surprenantes et en contradiction totale avec notre intuition (qui découle de ce que l'on observe à notre échelle) et d'autre part, pour son utilisation scientifique, à des concepts mathématiques particulièrement complexes.

C'est la raison pour laquelle nous nous contenterons d'en présenter les aspects abordables pour tout un chacun : en premier lieu son histoire, en second lieu ses grands principes avec leurs éventuelles applications.

I. HISTOIRE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'histoire de la mécanique quantique débuta en 1838 lorsque Michael Faraday découvrit les rayons cathodiques.

Ces *rayons cathodiques* sont des faisceaux d'électrons observés dans un tube à vide, c'est-à-dire dans un tube de verre sous vide muni de deux électrodes – une cathode et une anode – entre lesquelles existe une forte différence de potentiel (tension électrique).

En 1860, Gustav Kirchhoff énonça le problème du corps noir : l'expression corps noir désigne un objet idéal qui absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique (toute la lumière quelle que soit sa longueur d'onde) qu'il reçoit. Cette absorption se traduit par une agitation thermique qui provoque l'émission d'un rayonnement thermique, dit rayonnement du corps noir.

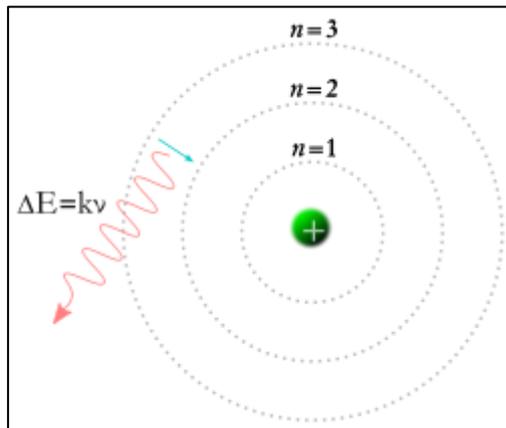
En 1877, Ludwig Boltzmann suggéra que les états d'énergie d'un système physique puissent être discrets (c'est-à-dire ne puissent prendre que des valeurs bien définies).



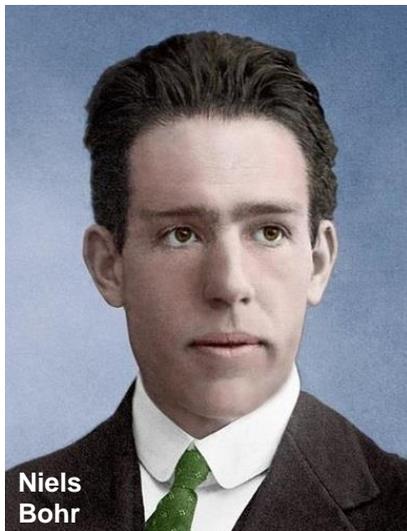
Max Planck

En 1900, le physicien Max Planck fit une hypothèse hardie : il postula que les échanges d'énergie lors d'un rayonnement à la fréquence f ne pouvaient se faire que par quantités finies d'énergie $\Delta E = nhf$. La constante h est appelée constante de Planck ; elle vaut $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s. Une hypothèse bien étrange, mais qui permettait de retrouver parfaitement le spectre expérimental d'émission électromagnétique du corps noir. Planck hésita à faire cette hypothèse et il semble qu'il ait parfois douté de sa propre théorie. Pourtant cette idée neuve allait déboucher sur la mécanique quantique. La relation de Planck permettait aussi de retrouver de manière indépendante le nombre réel d'atomes d'un corps par unité de masse moléculaire (par mole), ce qu'on appelle le nombre d'Avogadro. Ce résultat contribua aussi à valider l'effet photoélectrique découvert par Hertz. C'est en effet Albert Einstein qui, en 1905, expliqua cet effet photoélectrique en postulant que la lumière, ou plus généralement toute radiation

électromagnétique, peut être divisée en un nombre fini de « quanta d'énergie » qui sont des points localisés dans l'espace, les photons, terme introduit par Gilbert Newton Lewis en 1926.



Le modèle quantique d'atome, proposé en 1913 par Niels Bohr : il incorpore le modèle planétaire issu de la découverte du noyau atomique positif par Ernest Rutherford en 1907 et le postulat des quanta de lumière proposé en 1905 par Albert Einstein à partir de l'hypothèse quantique de Max Planck, énoncée en 1900, selon laquelle les radiations d'énergie atomiques ont des valeurs discrètes.



Niels Bohr

En 1913, Niels Bohr expliqua les raies spectrales de l'atome d'hydrogène, en utilisant de nouveau la quantification.

Ces théories, bien que pertinentes, étaient strictement phénoménologiques : il n'existait pas de justification rigoureuse pour la quantification ; elles sont connues sous la désignation d'*ancienne théorie quantique*.

En 1924, le physicien français Louis de Broglie proposa sa théorie d'ondes de matière en postulant que les particules pouvaient montrer des caractéristiques ondulatoires. Cette théorie valait pour toute matière, était directement issue de la théorie de la relativité restreinte, mais n'était pas algébriquement maniable, notamment dans le cadre d'une interaction entre la particule et un champ de force.

Construite sur l'approche

de de Broglie, la mécanique quantique moderne naquit en 1925, lorsque les physiciens allemands Werner Heisenberg et Max Born développèrent la mécanique matricielle et le physicien autrichien Erwin Schrödinger inventa la mécanique ondulatoire et proposa l'équation (qui porte son nom) non-relativiste comme approximation à la généralisation de la théorie de de Broglie.

Paul Dirac démontra par la suite que les deux approches étaient équivalentes.

Werner Heisenberg formula son principe d'incertitude en 1927, et l'interprétation de Copenhague commença à prendre forme à peu près à la même époque. À partir de 1926 environ, avec l'équation de Klein-Gordon, puis avec l'équation de Dirac (1927) pour l'électron, commença le processus d'unification de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. Cette dernière équation permit la description relativiste de la fonction d'onde électronique que Schrödinger avait échoué à obtenir. Elle prédisait le spin électronique et conduisit Paul Dirac à postuler l'existence du positron.



Louis de Broglie

En 1930, le mathématicien hongrois John von Neumann formula la base mathématique rigoureuse pour la mécanique quantique.



Werner Heisenberg



Erwin Schrödinger



Wolfgang Pauli

Dès 1927, des essais furent effectués pour appliquer la mécanique quantique à des champs plutôt qu'à de simples particules, donnant naissance à ce qui est connu sous le nom générique de théorie quantique des champs. Des chercheurs comme Paul Dirac et Wolfgang Pauli comptent parmi les pionniers de cette discipline.



Paul Dirac



Richard Feynman

Cette voie de recherche atteint son apogée avec la formulation de l'électrodynamique quantique principalement par Richard Feynman au cours des années 1940.

Enfin, la théorie de la chromodynamique quantique fut énoncée au début des années 1960.

La théorie que nous connaissons aujourd'hui fut formalisée par Politzer, Gross et Wilzcek en 1975.

II. PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

La mécanique quantique repose sur un certain nombre de principes ; certaines de leurs conséquences ont été également érigés au rang de principes.

1. Principe de superposition

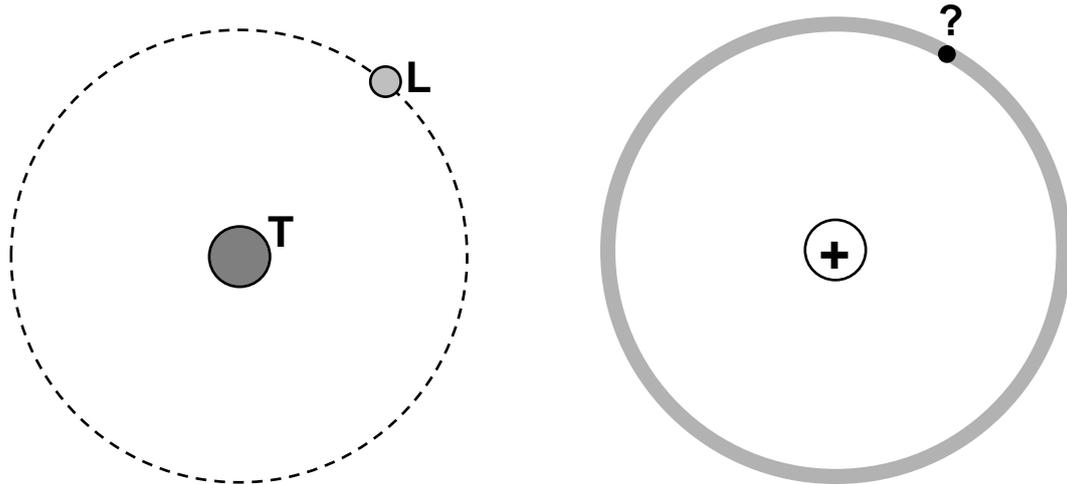
Un objet classique en mouvement, par exemple une balle, peut être caractérisé par sa position, sa vitesse, etc. L'observation de la balle, éventuellement avec des appareils de mesure précis, permet d'affirmer que, à chaque instant, la vitesse et la position de la balle sont parfaitement connus (à la précision de la mesure près).

Il n'en est strictement pas de même pour un objet quantique ; ses caractéristiques physiques constituent ce que l'on appelle son état : vitesse, position, et bien d'autres comme le spin, etc.

Par définition, un élément d'état quantique est représenté par la notation $|\text{état}\rangle$. On représentera donc l'état quantique d'un électron se déplaçant à 1 000 km/s par la notation $|1\ 000\ \text{km/s}\rangle$. Une particule quantique peut donc être simultanément dans plusieurs états quantiques.

Par exemple, l'électron que nous considérons peut se déplacer à la fois à 1 000 et à 2 000 km/s : son état sera alors noté $|1\ 000\ \text{km/s}\rangle + |2\ 000\ \text{km/s}\rangle$. Mais nous verrons également qu'il peut avoir une certaine probabilité d'être dans chacun de ces états, par exemple 10 % pour le premier et 90 % pour le second : cet état est alors noté : $0,1 |1\ 000\ \text{km/s}\rangle + 0,9 |2\ 000\ \text{km/s}\rangle$.

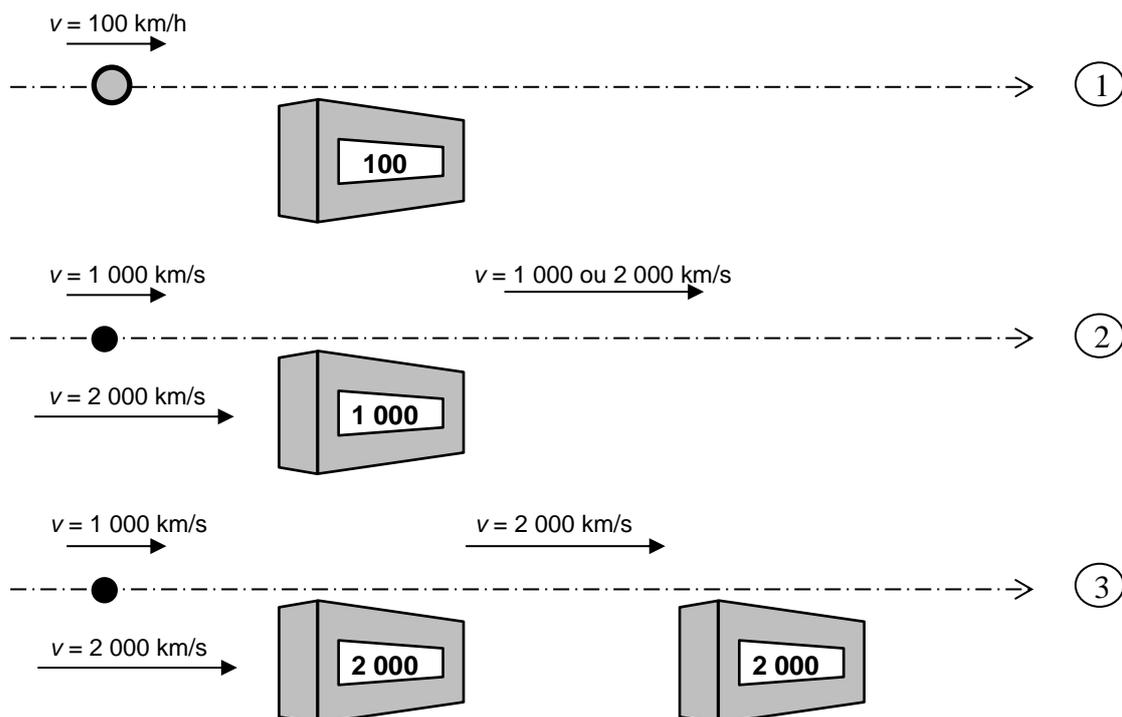
Mais, ce même électron, dans l'atome d'hydrogène, tourne autour du noyau (constitué d'un unique proton ; où se trouve-t-il ? Eh bien partout à la fois sur son orbite alors que la Lune, qui tourne autour de la Terre, est à chaque instant en un point unique et parfaitement déterminé.



2. Indéterminisme de la mesure

Imaginons (situation 1) une balle se déplaçant à 100 km/h qui passe devant un radar ; le radar affichera obligatoirement cette valeur 100.

Imaginons (situation 2) un électron se déplaçant à la fois à 1 000 km/s et à 2 000 km/s qui passe devant un « radar à électrons » ; quelle mesure va fournir ce radar ?



La réponse semble simple : si les deux vitesses de l'électron ont la même probabilité (50 %), le radar affichera 50% de fois 1 000 et 50 % de fois 2 000 km/s.

Cela semble correct vis-à-vis des probabilités, mais méfions-nous des apparences quant à la notion de probabilité. Tirons à pile ou face, en lançant la pièce chaque fois de la même manière (avec un appareillage physique précis), quel résultat obtiendrons-nous ? À l'évidence, 100 % de fois le même, par exemple pile.

Avec l'électron, si le lanceur envoie avec précision tous ses électrons avec le même état superposé à 50 % 1 000 et 2 000, le radar dira une fois sur deux 1 000 et une fois sur deux 2 000.

3. Réduction des états quantiques

Supposons enfin (situation 3) que le radar ait affiché 2 000 ; plaçons ensuite un second radar sur la trajectoire ; il indiquera toujours 2 000. Cela signifie que la première mesure a fixé la vitesse de l'électron à 2 000

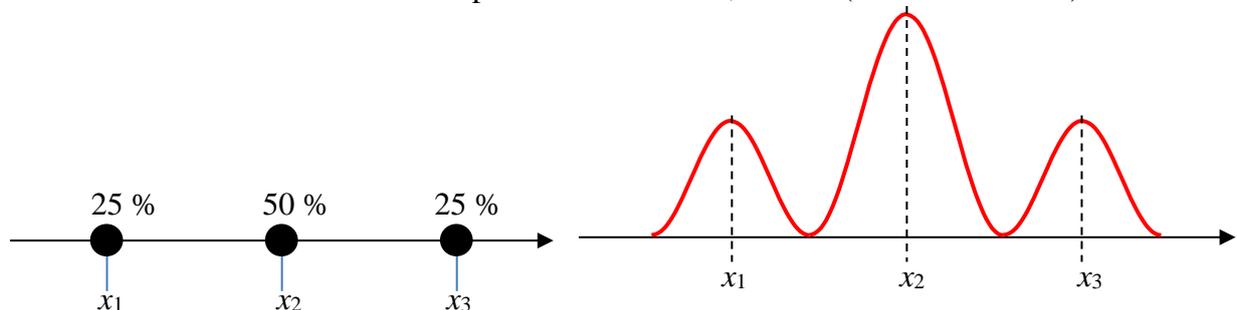
On dit que l'état quantique a été projeté ou réduit : la mesure a affecté l'état.

4. Dualité ondes-corpuscules

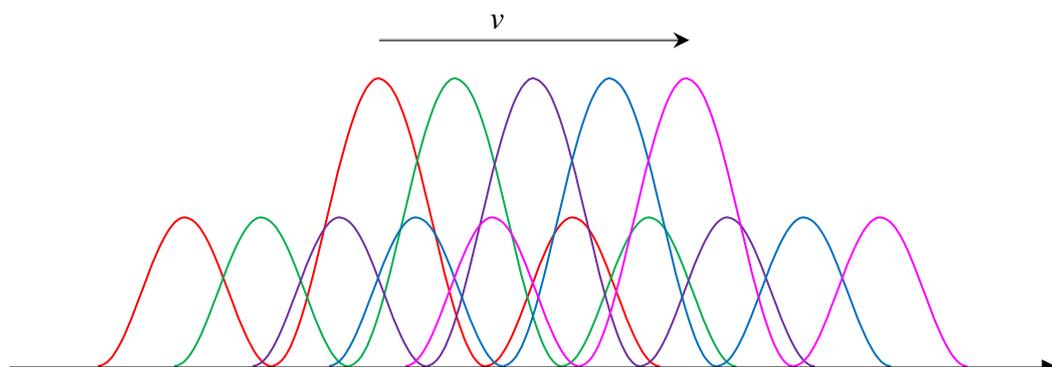
Considérons un électron dans une superposition de 3 états quantiques : il est en même temps (à l'instant t) aux abscisses $x = x_1$, $x = x_2$ et $x = x_3$ avec des probabilités respectives de 25, 50 et 25 % :

$0,25 |x = x_1\rangle + 0,5 |x = x_2\rangle + 0,25 |x = x_3\rangle$ (schéma de gauche).

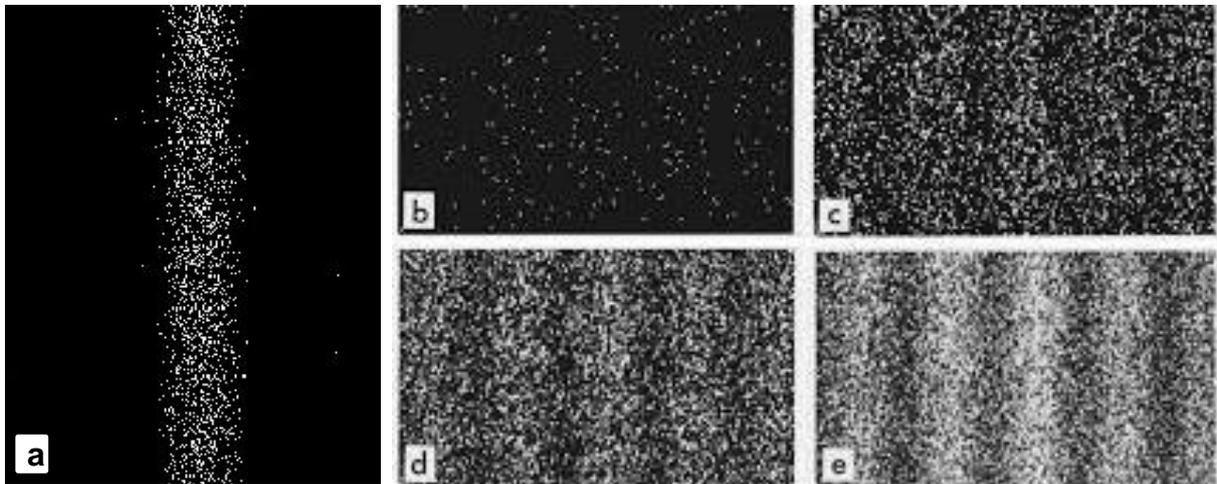
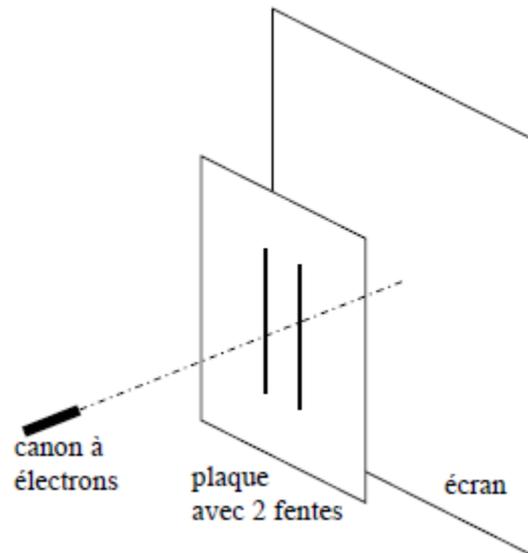
Rien n'interdit, et c'est même souvent le cas, que l'électron ait une probabilité de position sur son axe variant continûment avec 3 pics au niveau de x_1 , x_2 et x_3 (schéma de droite).



Lorsque le temps s'écoule, l'électron se déplace en « emportant avec lui » sa courbe de probabilité qui se déplace donc comme ci-dessous : on voit donc se propager une onde de probabilité. L'objet électron se comporte donc strictement comme une onde, d'où cette notion de dualité onde-corpuscule. Ce n'est pas uniquement une vue de l'esprit : de nombreuses propriétés découlent de cela, qui sont parfaitement vérifiées expérimentalement ; et ce que chacun sait plus ou moins pour la lumière.



Conséquence 1 : si on lance une balle contre un mur comportant 2 ouvertures, chaque balle qui est passée de l'autre côté du mur l'a traversé en passant par une fenêtre et une seule ; si on projette des électrons contre une plaque percée de deux trous, chaque électron qui passe de l'autre côté est passé par les deux trous à la fois. Aussi curieux qu'il puisse paraître, ce fait incontestable est parfaitement vérifié par l'expérience des fentes de Young. On projette des électrons sur une plaque métallique munie de deux fentes étroites parallèles, de taille et séparation adéquates, et derrière laquelle se trouve un écran muni de détecteurs qui enregistre les impacts selon que ces deux fentes sont ouvertes ou que l'une seulement l'est.



On fait l'expérience avec une seule fente ouverte ou les deux.

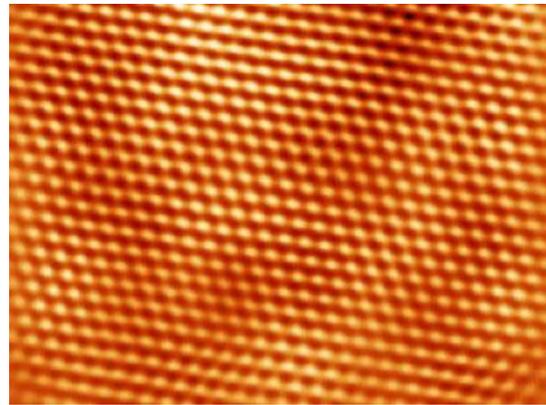
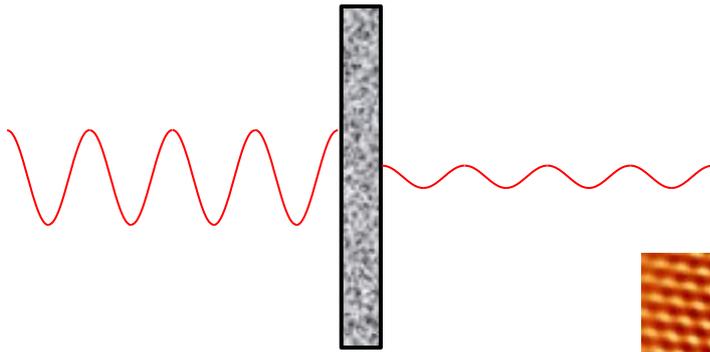
Si l'on ouvre une seule fente, la répartition obtenue, formée d'impacts individuels, ressemble à celle obtenue « avec des balles de mitrailleuse ». (a)

Si les deux fentes sont ouvertes, on voit les impacts individuels des électrons se rassembler en formant des franges d'interférence. (b, c, d, e)

Cette expérience traduit sans ambiguïté la double nature des électrons : corpusculaire (une seule fente) et ondulatoire (deux fentes qui donnent des interférences).

Conséquence 2, l'effet tunnel : si l'on envoie des balles contre un mur, elles rebondissent, aucune ne le traverse ; si l'on envoie une onde sonore contre un mur, une partie très atténuée est transmise : lorsque l'on écoute de la musique dans une pièce, on peut l'entendre, nettement moins fort, dans la pièce voisine.

De la même façon, envoyons un faisceau de particules contre un obstacle étanche à ces particules : une partie de ces particules seront détectées de l'autre côté, comme si un petit tunnel s'ouvrait pour les laisser passer ; cet effet est évidemment dû à la nature ondulatoire de ces particules.



Une application de ce phénomène est le microscope à effet tunnel, apparu dans les années 1980, premier appareillage ayant permis de « voir » les atomes (photographie d'atomes d'or).

La radioactivité s'explique par l'effet tunnel :

les protons et neutrons constituant un noyau atomique sont maintenus réunis dans ce noyau par une force dite force nucléaire forte que l'on peut de façon imagée représenter par une barrière infranchissable ; ces nucléons sont soumis à une très forte agitation qui tend à les faire se séparer. De temps à autre, un petit paquet de nucléons parvient à franchir la barrière : le noyau se désintègre.

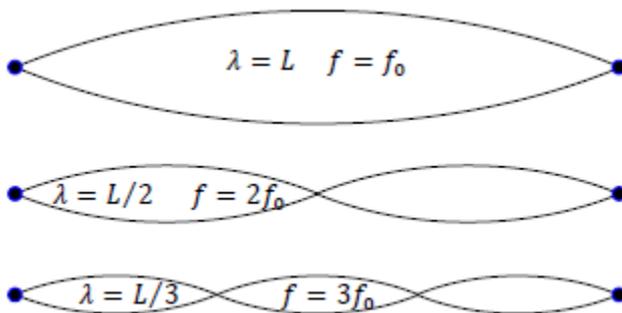


5. Quantification des grandeurs physiques

Certaines des grandeurs physiques caractéristiques des particules sont quantifiées, c'est-à-dire ne peuvent prendre que des valeurs discrètes.

Si l'on considère un satellite de masse m en orbite de rayon r autour de la Terre de masse M , il possède une énergie $E = mMG/2r$ où G est la constante de Newton. Il est facile d'imaginer qu'un dispositif de freinage ou d'accélération peut faire varier le rayon r , donc l'énergie E , de façon continue.

En revanche, un électron en orbite autour d'un noyau atomique (première figure de ce texte) ne peut se trouver que sur des orbites bien précises correspondant à des niveaux d'énergie discrets. L'électron ne peut sauter d'une orbite à la voisine qu'en recevant ou perdant un quantum d'énergie.



Il existe des phénomènes quantifiés à l'échelle macroscopique. Examinons les modes de vibration d'une corde tendue de longueur L (d'un instrument de musique par exemple). La longueur d'onde ne peut prendre que les valeurs $L, L/2, L/3$, etc. et la fréquence les valeurs $f_0, 2f_0, 3f_0$, etc.

(f_0 est la fréquence fondamentale – la note de base, les autres sont les harmoniques.)

6. Principe d'incertitude de Heisenberg

Une balle est lancée sur sa trajectoire ; à chaque instant, sa vitesse v et son abscisse x peuvent parfaitement être connues.

Il n'en va pas de même pour une particule quantique : il est impossible de connaître exactement et simultanément sa vitesse v et son abscisse x : mieux v est connue, plus mal x est connue et inversement.

7. Intrication quantique

Notion de spin :

Une balle qui parcourt sa trajectoire le fait généralement en tournant sur elle-même : c'est ce qui permet de lui donner ce que les sportifs appellent de l'effet.

Un électron peut-il se comporter de la même manière ? L'électron a une charge électrique : s'il tourne sur lui-même, il va se comporter comme un aimant ; cela se vérifie bien si on le place dans un champ électrique : sa trajectoire est modifiée. Mais, qu'est-ce que cela signifie de dire que l'électron tourne sur lui-même ? Il n'a pas de dimension spatiale, pas de volume ; il ne peut donc tourner sur lui-même. Mais en termes d'effets induits, tout se passe comme s'il tournait sur lui-même. On décrit cette propriété en disant que l'électron a un spin. L'électron peut « tourner sur lui-même » autour de son axe dans deux sens.

Le spin est une propriété intrinsèque de l'électron ; dans un champ électrique donné, tous les électrons sont déviés de la même quantité, dans un sens ou dans l'autre. Le spin vaut donc $+$ ou $-$ quelque chose ; c'est donc une grandeur quantifiée.

Les deux états quantiques correspondants sont représentés sur la figure ci-contre ; les deux notations sont utilisées avec une préférence pour la première.

Si l'on considère une paire d'électrons, son état quantique peut donc être :

$|++\rangle$ ou $|+-\rangle$ ou $|-+\rangle$ ou $|--\rangle$

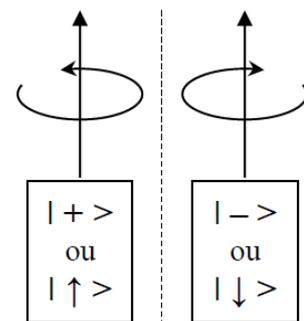
Si la paire d'électrons est dans l'état superposé $|+-\rangle + |-+\rangle$, on dit que les électrons sont intriqués.

Si l'on mesure le spin du premier électron (on trouve par exemple $+$), le spin du second électron prend automatiquement l'autre valeur ($-$). On peut éloigner de façon importante les deux électrons, d'une distance d , et faire les deux mesures de façon très rapprochée, d'un intervalle de temps t , de telle sorte que le rapport d/t soit supérieur à la vitesse de la lumière c . On trouve toujours le même résultat.

C'est pour le moins intrigant : comment l'information créée par la première mesure sur le premier électron a-t-elle pu passer au deuxième à une vitesse supérieure à celle de la lumière ?

Cette question fut l'objet d'un très vaste débat, initié par Einstein dans les années 30 et conclu (définitivement ?) en 1982 par les expériences d'Alain Aspect : c'est bien ainsi que cela se passe, mais il n'y a pas de transfert d'information entre les deux électrons : la paire d'électrons intriqués constitue un objet quantique unique.

Tout cela est valable pour toutes les particules et toutes leurs propriétés quantiques intrinsèques.



Petite bibliographie

La plupart des ouvrages sur ce qui vient d'être présenté sont en général d'un accès que je qualifierai de pas très évident, sauf pour qui a déjà une bonne culture dans ce domaine.

Les ouvrages de vulgarisation accessibles sont le fait de quelques rares auteurs.

Je vous suggère :

Jean-Marie Vigoureux, L'Univers en Perspective, Relativité restreinte, Ellipses (l'ouvrage le plus accessible de la liste)

Carlo Rovelli, L'ordre du temps, Flammarion

Carlo Rovelli, Par-delà le visible : la réalité du monde physique et la gravité quantique, Odile Jacob

Aurélien Barrau, Des univers multiples, Dunod

Aurélien Barrau, Au cœur des trous noirs, Dunod

Aurélien Barrau, Big Bang et au-delà - Les nouveaux horizons de l'Univers, Dunod

et, pour le plaisir des anecdotes de la « grande histoire » :

Richard Feynman, Vous voulez rire, Monsieur Feynman, Odile Jacob

Une petite histoire vraie avant d'aller dormir

Richard Feynman (1918-1988) est un physicien américain, l'un des plus influents de la seconde moitié du XX^e siècle ; il a obtenu le prix Nobel de physique en 1965.

Je vous recommande son livre de souvenirs : *Vous voulez rire, monsieur Feynman !* (Odile Jacob), très intéressant, sur une partie de l'histoire des sciences aux USA et surtout sur l'effort vers la bombe atomique pendant la guerre, mais également très agréable à lire pour son humour omniprésent.

À l'époque de son prix Nobel, l'Internet pour tous n'existait pas, donc il était difficile pour tout un chacun d'avoir des informations sur les travaux d'un tel personnage mais aussi tout simplement de connaître son visage.

Les universités américaines organisaient donc, pour leurs grands hommes, des tournées de conférences, internationales mais aussi et surtout nationales. Feynman n'y échappa pas. Pendant une longue période, il parcourut ainsi les USA, avec voiture de luxe et chauffeur bien évidemment.

Au bout d'un grand nombre de ces conférences, fatigué et lassé, il dit un jour à son chauffeur, en substance :

- ce soir, j'en ai assez, tu fais la conférence à ma place.
- vous n'y êtes pas, Monsieur Feynman, c'est vous qui savez de quoi vous parlez ; moi, pas du tout.
- allons, allons ! Cela fait bientôt 100 fois que tu l'entends, je dis chaque fois les mêmes choses ; et puis tu auras mes diapositives, pas moyen de te perdre. Et je serai au fond de l'amphi en train de lire mon journal, au cas où...
- oui mais, si on me pose des questions ?
- pas de problème, ce sont toujours les 5 ou 6 mêmes questions idiotes ; tu connais mes réponses par cœur...
- alors d'accord, Monsieur Feynman.

La conférence se passe parfaitement bien ; le chauffeur récite parfaitement... jusqu'aux questions où, malchance, un physicien pose une question inédite montrant en plus qu'il n'appréciait pas Feynman ; le ton était même agressif et désobligeant.

Le chauffeur a alors cette réponse :

- Monsieur, votre question est parfaitement triviale et ne mérite pas que je m'y arrête ; mon chauffeur, qui est dans la salle, est parfaitement capable de répondre à ma place, ce qu'il va faire.



Deux choses sont infinies : l'Univers et la bêtise humaine. Mais en ce qui concerne l'Univers, je n'en ai pas encore acquis la certitude absolue.

Albert Einstein

BIOGRAPHIES

ASHTEKAR

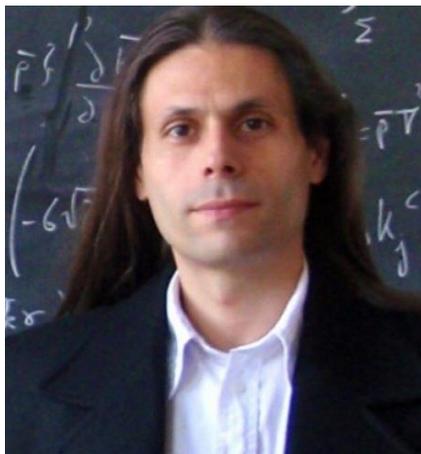


Abhay Ashtekar, né le 5 juillet 1949, est un physicien indien.

Après une licence en Inde, il a étudié sous la tutelle de Robert Geroch à l'université de Chicago, obtenant son doctorat en 1974 avec une thèse sur la *structure asymptotique du champ de la gravité à l'infini spatial*. Il est professeur de physique et directeur de l'institut pour la physique de la gravité et de la géométrie à l'université d'État de Pennsylvanie. En tant que créateur des variables d'Ashtekar, il est l'un des fondateurs de la gravitation quantique à boucles.

Vulgarisateur scientifique, il a également écrit un certain nombre de descriptions de la gravitation quantique de boucle accessibles aux non-physiciens.

BARRAU



Aurélien Barrau, né le 19 mai 1973, est un astrophysicien français spécialisé dans la physique des astroparticules et des trous noirs et en cosmologie. Il travaille au laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble et est professeur à l'université Grenoble-Alpes. Il enseigne également à l'Institute for Advanced Study de Princeton, à l'Institut des hautes études scientifiques (IHES) de Bures-sur-Yvette et à l'Institut Perimeter de physique théorique au Canada.

Ses activités expérimentales portent sur l'astronomie gamma et la recherche d'antimatière, de matière noire AMS et d'énergie noire.

Ses activités théoriques concernent les couplages entre les champs quantiques et les trous noirs. Dans le domaine de la cosmologie quantique, il a proposé un modèle de « Big Bounce » (grand rebond), issu de la gravitation quantique à boucles, où le

temps disparaîtrait à très haute densité et où la structure de l'espace-temps deviendrait euclidienne. Il travaille également, avec Carlo Rovelli, sur la possibilité que les trous noirs soient en réalité des objets en rebonds ou « étoiles de Planck ». Il a suggéré des moyens nouveaux pour observer des phénomènes qui auraient eu lieu avant le Big-Bang grâce aux ondes gravitationnelles. Il a émis différentes hypothèses originales sur le rôle de la constante cosmologique, la nature de la matière noire et l'interprétation de la mécanique quantique.

Il est également docteur en philosophie de l'université Paris-Sorbonne. Enfin, il est engagé dans la question écologique.

BOHR



Niels Henrik David Bohr (7 octobre 1885 – 18 novembre 1962) est un physicien danois. Il est surtout connu pour son apport à l'édification de la mécanique quantique, pour lequel il a reçu de nombreux honneurs dont le prix Nobel de Physique en 1922.

Il travaille dans un premier temps à l'université de Cambridge avec le professeur Joseph John Thomson dont le modèle atomique, sphère de charge positive dans laquelle sont plongés les électrons, ne le satisfait pas totalement. Bohr rencontre alors Ernest Rutherford qu'il rejoint à Manchester (Angleterre).

Se fondant sur les théories de Rutherford, il publie en 1913 un modèle de la structure de l'atome mais aussi de la liaison chimique dans une série de trois articles de la revue *Philosophical Magazine*. Cette théorie présente l'atome comme un noyau autour duquel gravitent des électrons, qui déterminent les propriétés chimiques de l'atome. Les électrons ont la possibilité de passer d'une couche à une autre, émettant un quantum

d'énergie, le photon. Cette théorie est à la base de la mécanique quantique. Albert Einstein s'intéresse de très près à cette théorie dès sa publication. Ce modèle est confirmé expérimentalement quelques années plus tard.

Bohr est aussi à l'origine du principe de complémentarité : des objets peuvent être analysés séparément et chaque analyse fera conclure à des propriétés contraires. Par exemple, les physiciens pensent que la lumière est à la fois une onde et un faisceau de particules, les photons.

Au congrès Solvay d'octobre 1927, il rencontre pour la première fois Albert Einstein avec qui il aura de très fréquents entretiens jusqu'en 1935. Einstein défend le caractère provisoire de la théorie quantique, ne se satisfaisant pas de cette dernière au niveau épistémologique. Bohr, au contraire, considère qu'il s'agit d'une théorie achevée. Ces réflexions et discussions sont l'une des sources de ses *Écrits philosophiques*, publiés en quatre volumes (dont deux à titre posthume en 1963 et en 1998), dont l'une des thématiques est l'utilisation du langage.

Lors d'un débat, Niels Bohr se disputait avec Albert Einstein à propos de la réalité de la physique quantique. À un moment donné Einstein, excédé, jeta à Niels Bohr : « Dieu ne joue pas aux dés ! », ce à quoi Bohr répondit : « qui êtes-vous, Einstein, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? ». Cet échange est devenu célèbre par la suite.

BOLTZMANN



Ludwig Eduard Boltzmann (20 février 1844 – 5 septembre 1906) est un physicien et philosophe autrichien. Il est considéré comme le père de la physique statistique et un fervent défenseur de l'existence des atomes. Validant l'hypothèse de Démocrite selon laquelle « la matière peut être considérée comme un ensemble d'entités indivisibles », Boltzmann, à l'aide de son équation cinétique dite *de Boltzmann*, a théorisé de nombreuses équations de mécanique des fluides et de théorie cinétique des gaz. Grâce à lui, la thermodynamique a pu faire d'immenses progrès.

L'apport révolutionnaire de Boltzmann a été l'utilisation la méthode statistique. Les résultats de Maxwell sur la distribution des vitesses dans un gaz en équilibre thermique ont été généralisés par Boltzmann et sont connus aujourd'hui sous le nom de distribution de Maxwell-Boltzmann.

BORN



Max Born (11 décembre 1882 – 5 janvier 1970) est un physicien allemand.

Physicien théoricien remarquable, il est principalement connu pour son importante contribution à la physique quantique. Il a été le premier à donner au carré du module de la fonction d'onde la signification d'une densité de probabilité de présence.

Il a partagé le prix Nobel de physique de 1954 avec Walther Bothe, pour ses travaux sur la théorie des quanta.

Max Born entame des études de sciences en 1901 à Breslau, qu'il poursuit ensuite à Zurich et Heidelberg, avant d'arriver à Göttingen où il prépare une thèse sur la *stabilité des lignes élastiques dans le plan et dans l'espace*, soutenue en 1906.

Il participe aux travaux sur la nouvelle théorie de la relativité restreinte, avec Hermann Minkowski ; puis sur la dynamique des atomes dans un livre en 1915. Réformé, il travaille à Berlin pendant la guerre avec

les cristaux, sur laquelle il publie un livre en 1927 avec Max Planck et Albert Einstein.

BROUT



Robert Brout, né le 14 juin 1928 et mort le 3 mai 2011, est un physicien belge d'origine juive américaine à qui l'on doit d'importantes contributions en physique des particules ainsi qu'en cosmologie. Il a obtenu son doctorat à l'Université Columbia en 1953 et a passé la plupart de sa carrière à l'Université libre de Bruxelles.

Robert Brout a, avec François Englert, proposé l'existence d'un mécanisme plus tard appelé mécanisme de Brout-Englert-Higgs pour expliquer la masse des particules élémentaires. Un tel mécanisme fut proposé simultanément par Peter Higgs ainsi que la particule à l'origine du mécanisme, le boson de Higgs.

Robert Brout est également associé au modèle d'inflation cosmique, qu'il a proposé en collaboration avec François Englert et Edgard Gunzig en 1978.

CHANDRASEKHAR

Subrahmanyan Chandrasekhar (19 octobre 1910 – 21 août 1995) est un astrophysicien et un mathématicien d'origine indienne. Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1983.

Ses travaux concernent l'évolution des étoiles.



Il est connu pour avoir déterminé au-delà de quelle limite une naine blanche devient instable sous certaines conditions et s'effondre en étoile à neutrons, initiant le processus de supernova. Cette limite, désormais connue sous le nom de limite de Chandrasekhar, lui vaut à l'époque une vive controverse avec l'astronome anglais Sir Arthur Eddington.

Il émigre ensuite aux États-Unis et obtient un poste à l'université de Chicago de 1937 jusqu'à sa mort en 1995, à l'âge de 84 ans. Il obtient la nationalité américaine en 1953.

Chandrasekhar est considéré comme le premier scientifique à avoir appliqué les lois de la relativité restreinte à l'astrophysique et en particulier à l'étude de la structure interne des étoiles.

CHARPAK



Georges Charpak, né le 8 mars 1924 en Pologne et mort le 29 septembre 2010 à Paris est un physicien français lauréat du prix Nobel de physique en 1992.

Chercheur à l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire près de Genève, il met au point la chambre proportionnelle « multifils » qui remplace rapidement les chambres à bulles en permettant un traitement informatique des données fournies par les accélérateurs de particules.

Membre de l'Académie des sciences, il reçoit le prix Nobel de physique en 1992 pour son invention et le développement de la chambre proportionnelle « multifils ».

DE BROGLIE

Louis Victor de Broglie, prince, puis duc de Broglie, né le 15 août 1892 et mort le 19 mars 1987, est un mathématicien et physicien français. À seulement 37 ans, il devient lauréat du prix Nobel de physique de 1929 « pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons ».

Sa théorie avait été totalement confirmée par deux expérimentateurs américains, Davisson et Germer qui ont observé la première diffraction d'électrons par un cristal.

Ses travaux sur la nature ondulatoire des électrons font de lui le physicien qui a associé une onde aux particules massives.



DIRAC



Paul Adrien Maurice Dirac, né le 8 août 1902 et mort le 20 octobre 1984, est un mathématicien et physicien britannique. Il est l'un des pères de la mécanique quantique et a prévu l'existence de l'antimatière. Il est colauréat avec Erwin Schrödinger du prix Nobel de physique de 1933 « pour la découverte de formes nouvelles et utiles de la théorie atomique ».

Il formule aussi une théorie quantique mathématiquement cohérente en rassemblant les idées de Schrödinger et Heisenberg. Il propose et étudie le concept de monopôle magnétique, une particule jamais observée jusqu'à aujourd'hui, comme moyen d'apporter encore davantage de symétrie aux équations de Maxwell. Dirac a publié onze articles dans la presse avant de soutenir sa thèse de doctorat. Après sa thèse, il part travailler avec Bohr à Copenhague. En septembre 1927, il est invité au cinquième congrès Solvay où il rencontre Albert Einstein.

En 1927, il publie des résultats sur la distribution statistique des fermions conduisant à la statistique de Fermi-Dirac.

En 1928, il déduit du travail de Pauli une équation relativiste décrivant l'électron, appelée aujourd'hui équation de Dirac qui lui permet de prédire en 1931 l'existence d'une particule appelée positron, l'antiparticule de l'électron : il faudra attendre 1932 pour qu'Anderson et Patrick Blackett l'observent.

Dans les *Principes de la mécanique quantique*, publié en anglais en 1930, il utilise l'algèbre des opérateurs linéaires comme une généralisation des théories de Heisenberg et de Schrödinger.

Il partage le prix Nobel de physique en 1933 avec Erwin Schrödinger. Cette même année, il publie un document sur le lagrangien en mécanique quantique qui inspirera Richard Feynman.

EDDINGTON



Arthur Stanley Eddington (28 décembre 1882 – 22 novembre 1944) est un astrophysicien britannique, l'un des plus importants du début du XX^e siècle. C'est lui qui mit en évidence la limite qui porte son nom, correspondant à la luminosité maximale que peut avoir une étoile d'une masse donnée sans commencer à perdre les couches supérieures de son atmosphère.

Il est surtout connu pour ses travaux sur la théorie de la relativité. C'est par l'intermédiaire de l'un de ses articles, *report on the relativity theory of gravitation*, que les scientifiques anglophones ont découvert la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. En effet, du fait de la Première guerre mondiale, les travaux allemands n'étaient pas ou peu diffusés dans le reste du monde.

Son expérience de « l'Éclipse d'Einstein » a apporté une preuve expérimentale éclatante de la validité de la théorie.

Alors qu'il était commun d'entendre dire que les calculs de la relativité d'Einstein étaient si compliqués que « seuls trois physiciens seraient capables de les effectuer », A. Eddington aurait alors déclaré : « je me demande qui est le troisième ».

EINSTEIN

Albert Einstein est né le 14 mars 1879 à Ulm et mort le 18 avril 1955 à Princeton. Il fut successivement allemand, apatride (1896), suisse (1901) et de double nationalité helvético-américaine (1940).



Il publie sa théorie de la relativité restreinte en 1905 et sa théorie de la gravitation dite relativité générale en 1915. Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et de la cosmologie et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique. Son travail est notamment connu du grand public pour l'équation $E=mc^2$, qui établit une équivalence entre la matière et l'énergie d'un système.

Il est aujourd'hui considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'histoire et sa renommée dépasse largement le milieu scientifique. Il est la personnalité du XX^e siècle selon l'hebdomadaire *Time*. Dans la culture populaire, son nom et sa personne sont directement liés aux notions d'intelligence et de savoir.

L'intérêt d'Albert pour la science est éveillé à l'âge de cinq ans par une boussole : l'existence d'une action à distance lui parut « miraculeuse » et l'étonna très vivement. À douze ans, un petit livre sur la géométrie euclidienne du plan, qu'il nommera plus tard le « livre sacré de la géométrie »,

le marqua fortement (« la clarté et la certitude des démonstrations eurent sur moi un effet indescriptible »). Son oncle Jakob, ingénieur associé dans l'entreprise de matériel électrique de son père, lui posait des problèmes mathématiques. Max Talmud, un étudiant en médecine qui dînait souvent chez les Einstein, lui offrit des livres de sciences et plus tard des œuvres de Kant, et ils avaient souvent de longues discussions.

De douze à seize ans, il apprendra en autodidacte le calcul différentiel et intégral.

Einstein présente un parcours scolaire relativement atypique par rapport aux éminents scientifiques qui furent plus tard ses contemporains. Très tôt, le jeune homme s'insurge contre le pouvoir arbitraire exercé par les enseignants et est donc souvent dépeint par ces derniers comme un mauvais élément, très étourdi. Il éprouve jusque tard dans son enfance des difficultés pour s'exprimer.

Il commence sa scolarité au Luitpold Gymnasium de Munich et en est renvoyé à l'âge de 15 ans (son professeur de grec jugeant sa présence incompatible avec la stricte discipline y régnant à l'époque). Il a d'excellents résultats en mathématiques. Il rejoint ses parents à Pavie, en Italie, en 1895 et renonce à sa nationalité allemande (cet abandon étant officialisé en 1896).

À 16 ans, il décide d'intégrer l'École polytechnique fédérale de Zurich (à laquelle on peut accéder sans avoir le bac). Il rate cependant l'examen d'entrée. Les examinateurs, ayant découvert son potentiel, l'incitent à se présenter une deuxième fois. Il entre alors à l'École cantonale d'Aarau en Suisse, et y passe une année pour mieux se préparer au prochain examen. Il y trouve une atmosphère plus ouverte

et favorable à son apprentissage, les étudiants étant davantage incités à penser par eux-mêmes qu'à réciter des leçons apprises. En 1896, il réussit l'examen et intègre donc l'école, où il se lie d'amitié avec le mathématicien Marcel Grossmann, qui l'aidera plus tard en géométrie non euclidienne. Il y rencontre aussi Mileva Marić, sa première épouse, une des toutes premières étudiantes de l'EPFZ, qui travaillera également avec lui sur la théorie de la relativité et mènera ses propres recherches. Il obtient de justesse son diplôme en 1900, s'avouant, dans son autobiographie, « incapable de suivre les cours, de prendre des notes et de les travailler de façon scolaire ».

Au cours de cette période, il approfondit ses connaissances en autodidacte par la lecture de livres de référence comme ceux de Kirchhoff, de Hertz, de Helmholtz et de Maxwell. Il obtient la nationalité suisse en 1901, qu'il gardera jusqu'à la fin de sa vie. Selon plusieurs biographies, cette période de 1900 à 1902 est marquée par la précarité de sa situation : il postule à de nombreux emplois sans être accepté. Sa misère préoccupe son père, qui tente en vain de lui trouver un poste. Albert se résigne alors à s'éloigner du milieu universitaire pour trouver un emploi dans l'administration.

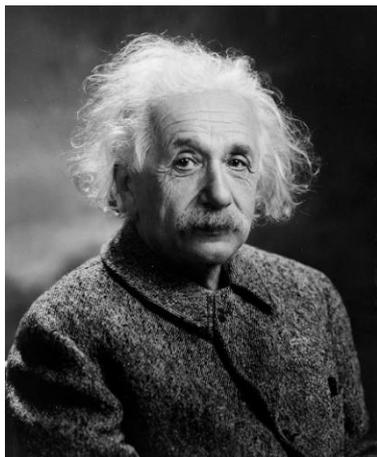
En 1901, il publie son premier article scientifique dans les *Annalen der Physik* et cet article est consacré à ses recherches sur la capillarité.

En juin 1902, il est embauché à l'Office des Brevets de Berne, ce qui lui permet de vivre correctement tout en poursuivant ses travaux. Einstein partage le résultat de ses travaux avec Conrad Habicht et lui envoie les articles qu'il publie pendant l'année 1905 (son *annus mirabilis*) concernant les fondements de la relativité restreinte, l'hypothèse des quanta de lumière et la théorie du mouvement brownien, qui ouvrent de nouvelles voies dans la recherche en physique nucléaire, mécanique céleste, etc. L'article portant sur le mouvement brownien prend appui sur des travaux qu'Einstein développe plus tard, et qui aboutissent à sa thèse, intitulée *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires), et à son diplôme de doctorat le 15 janvier 1906.

En 1909, Albert Einstein est reconnu par ses pairs, en particulier Planck et Nernst, qui souhaitent l'inviter à l'université de Berlin. Le 9 juillet 1909, il est nommé docteur *honoris causa* par l'université de Genève, il devient la même année professeur associé à l'université de Zurich. En 1911, il devient professeur à l'université allemande de Prague et il est invité au premier congrès Solvay, en Belgique, qui rassemble les scientifiques les plus connus. Il y rencontre entre autres Marie Curie, Max Planck et Paul Langevin. Revenu à Zurich en 1912, il devient en 1913 membre de l'Académie des sciences de Prusse.

En 1914, il déménage en Allemagne et habite à Berlin de nombreuses années. Il devient membre de l'Académie royale des sciences et des lettres de Berlin. Son poste à Berlin lui permet de se consacrer tout entier à ses travaux de recherche.

En 1916, il publie un livre présentant sa théorie de la gravitation, connue aujourd'hui sous le nom de *relativité générale*. En 1919, Arthur Eddington réalise la mesure de la déviation que la lumière d'une étoile subit à proximité du Soleil, cette déviation étant une des prévisions découlant de cette théorie. Cet événement est médiatisé, et Einstein entreprend à partir de 1920 de nombreux voyages à travers le monde. En novembre 1922, il reçoit le prix Nobel de Physique 1921, qui n'avait pas été attribué, « pour ses contributions à la physique théorique et, spécialement, pour sa découverte de la loi de l'effet photo-électrique ». Comme il est loin de la Suède en 1922, il reçoit son prix et prononce sa conférence Nobel à Göteborg le 11 juillet 1923. En 1925, il est lauréat de la médaille Copley, et en 1928 il est nommé président de la Ligue des droits de l'homme. Il participe en 1928 au premier cours universitaire de Davos, avec de nombreux autres intellectuels français et allemands. En 1935, il devient lauréat de la médaille Franklin.



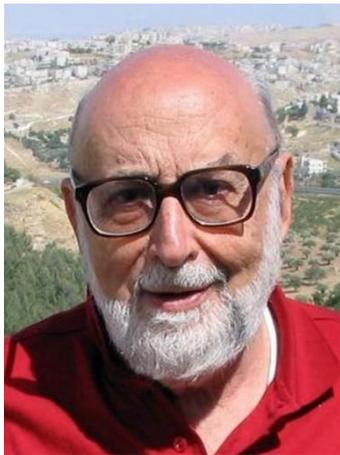
La situation s'assombrit en Allemagne dans les années 1920, et il subit des attaques visant ses origines juives et ses opinions pacifistes. Sa sécurité est menacée par la montée des mouvements nationalistes, dont celle du parti nazi. Peu après l'arrivée d'Hitler au pouvoir, au début de 1933, il apprend que sa maison de Caputh a été pillée par les nazis, et il décide de ne plus revenir en Allemagne. Après un court

séjour sur la côte belge, il s'installe aux États-Unis, sur invitation d'Abraham Flexner, le fondateur et directeur de l'Institute for Advanced Study de Princeton où il commence alors à travailler. Ses recherches visent à élaborer une théorie globale des champs, expliquant les quatre interactions élémentaires : la gravitation, l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte. Cette théorie est aujourd'hui au cœur de la recherche fondamentale.

Le 2 août 1939, sous la pression d'Eugene Wigner et de Leó Szilárd, physiciens venus d'Allemagne, il rédige une lettre à Roosevelt, qui contribue à enclencher le projet Manhattan.

Einstein meurt le 18 avril 1955 d'une rupture d'anévrisme. Une étude réalisée en 2013 sur son cerveau (qui a été subtilisé après sa mort sans son consentement) révèle tout au plus une hyper-connexion entre les deux hémisphères, ce qui est traditionnellement preuve d'une grande intelligence. Ses cendres sont éparpillées dans un lieu tenu secret, conformément à ses dernières volontés. Mais, en dépit de son testament, son cerveau et ses yeux ont été prélevés.

ENGLERT



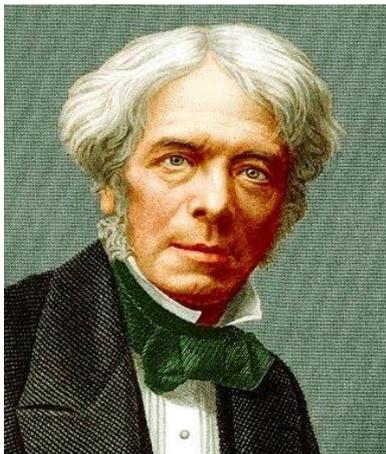
François, baron Englert, né le 6 novembre 1932, est un physicien théoricien belge. Il est professeur émérite à l'Université libre de Bruxelles (ULB) où il est membre du service de physique théorique dont il a été le codirecteur avec Robert Brout de 1980 à 1998. Ses principales contributions touchent à la physique des transitions de phase, physique des particules, à la théorie des cordes et à la cosmologie.

Il reçoit le 8 octobre 2013 le prix Nobel de physique, conjointement avec le Britannique Peter Higgs, pour ses travaux sur le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, un élément clé du « modèle standard » de la physique des particules.

En collaboration avec Robert Brout, il propose, le 26 juin 1964, le mécanisme de Brout-Englert-Higgs pour expliquer la masse de particules élémentaires. Un tel mécanisme est proposé presque simultanément (le 31 août) par Peter Higgs, au nom duquel est également associé le boson de Higgs, aussi appelé « boson de Brout-Englert-Higgs ».

Le nom de François Englert est également lié au modèle de l'inflation cosmique, une phase d'expansion accélérée qu'aurait connue l'Univers très tôt dans son histoire et qui permet d'expliquer pourquoi celui-ci est homogène et isotrope à grande échelle, conformément à ce qui est observé. Si Englert n'est certes pas associé à la mise en évidence explicite des avantages de ce scénario (dont la paternité est attribuée, entre autres, à Alan Guth en 1980), il a auparavant proposé, toujours avec Robert Brout ainsi que Edgard Gunzig, que des fluctuations quantiques macroscopiques puissent être à l'origine de la création d'espace comme c'est le cas lors d'une phase d'inflation.

FARADAY



Michael Faraday, né le 22 septembre 1791, mort le 25 août 1867, est un physicien et un chimiste britannique, connu pour ses travaux fondamentaux dans le domaine de l'électromagnétisme, l'électrochimie, le diamagnétisme et l'électrolyse. Il donne son nom à de multiples lois et phénomènes dans ces domaines, notamment la loi de Faraday (ou Lenz-Faraday) en induction électromagnétique, les lois de Faraday en électrochimie, l'effet Faraday, ou encore à des dispositifs expérimentaux comme la cage de Faraday et la cavité de Faraday. Le farad, unité de capacité électrique, est également nommée en son honneur.

Ses plus grands travaux concernent l'électricité. En 1821, après la découverte du phénomène de l'électromagnétisme par le chimiste danois Ørsted, Faraday inverse l'expérience du danois en construisant deux appareils pour produire ce qu'il appelle une *rotation électromagnétique* : lorsqu'un câble électrique, trempant dans un bain de

mercure au milieu duquel est placé un aimant statique, est traversé par un courant électrique, le câble se met alors à tourner autour de l'aimant. Par ce mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, Faraday fait la démonstration du moteur électrique.

Dix ans plus tard, en 1831, il commence une longue série d'expériences. Le 29 août 1831 il découvre l'induction électromagnétique. Ces expériences forment la base de la technologie électromagnétique moderne. Dans son travail sur le courant continu, Faraday démontre que la charge se situe seulement à l'extérieur d'un conducteur chargé, et que celle-ci n'a aucun effet sur ce qui peut être situé à l'intérieur : c'est l'effet de « blindage », utilisé dans la cage de Faraday.

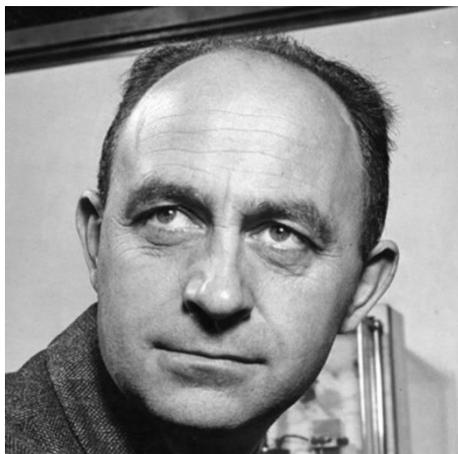
Il a été l'un des principaux fondateurs de l'électrochimie en tant que discipline scientifique. En 1833, il introduit les termes d'anode, de cathode, d'anion, de cation et d'ion (sans pour autant connaître la notion de courant électrique, découverte plus tard par André-Marie Ampère).

Il a donné son nom au farad, l'unité SI de capacité électrique, ainsi qu'à une charge électrique, la constante de Faraday. Son portrait figure sur certains billets anglais de 20 livres.

Il a également donné son nom à l'instabilité de Faraday, mise en évidence en 1831, déclenchée lorsqu'un bain liquide est vibré verticalement avec une amplitude suffisamment importante. Lorsque cette instabilité est déclenchée, la surface du liquide se réorganise et des ondes de surface sous-harmoniques apparaissent.

On lui doit également d'innombrables découvertes et progrès en chimie. Il est le premier à mentionner l'existence de ce qui sera connu sous le vocable de nanoparticules métalliques. En 1847, il observe que les propriétés optiques du colloïde d'or diffèrent de celles du métal pur, observation que l'on pourrait considérer comme la naissance des nanosciences.

FERMI



Enrico Fermi (29 septembre 1901 – 28 novembre 1954) est un physicien italien naturalisé américain. Ses recherches serviront de socle à l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1938 « pour sa démonstration de l'existence de nouveaux éléments radioactifs produits par bombardements de neutrons, et pour sa découverte des réactions nucléaires créées par les neutrons lents ». Il fut également lauréat de la médaille Hughes en 1942, de la médaille Franklin en 1947 et du prix Rumford en 1953. Il fut excellent, ce qui est rare, à la fois en physique expérimentale et en physique théorique.

En 1929, il fait partie des premiers membres, nommés par décret, de l'Académie d'Italie créée trois ans plus tôt par Mussolini. À partir de 1932, il se tourne plus précisément vers la physique nucléaire, et c'est cette même année qu'il rédige un article sur la radioactivité β .

En 1934, il développe sa théorie sur l'émission de rayonnement bêta en y incluant le « neutron » postulé en 1930 par Wolfgang Pauli, qu'il rebaptise neutrino (le nom neutron étant déjà utilisé pour une autre particule), et s'oriente vers la création d'isotopes radioactifs artificiels par bombardement de neutrons lents.

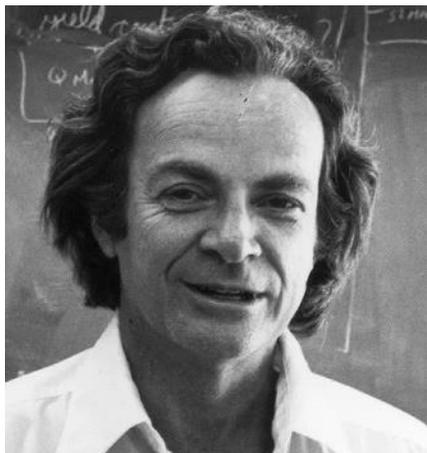
Touché par le décret royal, loi du 5 septembre 1938, fixant les « mesures pour la défense de la race dans les écoles fascistes », Fermi, dont la femme Laura était juive, émigre aux États-Unis le 2 janvier 1939 avec toute sa famille et enseigne à l'université Columbia avec son collègue Léo Szilárd.

Ils travaillent ensuite ensemble à l'université de Chicago à l'élaboration d'une pile atomique, le premier réacteur nucléaire. Le 2 décembre 1942 est obtenue la première réaction en chaîne contrôlée de fission. Il travaille ensuite au laboratoire national de Los Alamos jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale au sein du projet Manhattan. Il sera fait citoyen américain en 1945 en récompense de ses travaux sur la bombe atomique. Il donne également son nom au Fermilab de Batavia (Illinois).

En 1946, il accepte le poste de professeur au sein de l'INS (*Institute for Nuclear Studies*) qui deviendra plus tard l'Institut Enrico-Fermi créé par l'université de Chicago. C'est en son honneur que sera créé le prix Enrico Fermi, qui sera décerné à partir de 1954 en récompense de travaux ou d'avancées exceptionnelles dans le domaine de l'énergétique. Il passera la fin de sa vie à Chicago.

Au cours de l'été 1950, lors d'une conversation informelle avec trois collègues, Fermi soulève le paradoxe qui portera son nom et s'énonce ainsi : « s'il y avait des civilisations extraterrestres, leurs représentants devraient être déjà chez nous. Où sont-ils donc ? ».

FEYNMANN



Richard Phillips Feynman (11 mai 1918 – 15 février 1988) est un physicien américain, l'un des plus influents de la seconde moitié du XX^e siècle, en raison notamment de ses travaux sur l'électrodynamique quantique, les quarks et l'hélium superfluide.

Il reformula entièrement la mécanique quantique à l'aide de son intégrale de chemin qui généralise le principe de moindre action de la mécanique classique et inventa les diagrammes qui portent son nom et qui sont désormais largement utilisés en théorie quantique des champs (dont l'électrodynamique quantique fait partie).

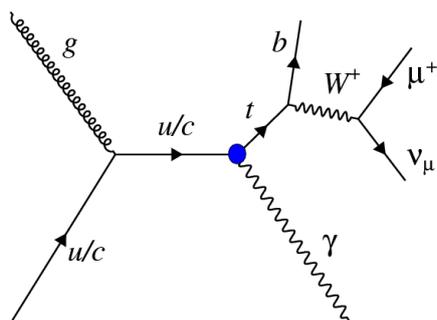
Pendant la Seconde guerre mondiale, il fut impliqué dans le développement de la bombe atomique américaine. Après la Seconde guerre mondiale, il enseigna à l'université Cornell puis au Caltech où il effectua des travaux fondamentaux notamment dans la théorie de la superfluidité et des quarks. Avec Hideki Yukawa, Julian Schwinger et lui sont colauréats du prix Nobel de physique

de 1965 pour leurs travaux en électrodynamique quantique. Vers la fin de sa vie, son action au sein de la commission d'enquête sur l'accident de la navette spatiale Challenger l'a fait connaître du grand public américain.

Pédagogue remarquable, il est le rédacteur de nombreux ouvrages de vulgarisation reconnus. Parmi ces livres, les *Feynman lectures on physics*, un cours de physique de niveau universitaire qui, depuis sa parution, est devenu un classique pour tous les étudiants de premier cycle en physique et leurs professeurs. Il raconte aussi ses nombreuses aventures dans plusieurs ouvrages dont *Surely You're Joking, Mr. Feynman !* (en français *Vous voulez rire, monsieur Feynman !*) est particulièrement remarquable.

L'essentiel de sa production concerne :

- L'électrodynamique quantique (relativiste), à savoir l'étude des interactions électromagnétiques entre particules (chargées) relativistes ;
- La physique de l'hélium superfluide : lorsque l'hélium est refroidi au-dessous d'une température critique (2,19 K), il semble perdre sa viscosité. Feynman parvint en particulier à montrer que la superfluidité est un phénomène quantique qui se manifeste à une échelle macroscopique.
- La théorie des interactions faibles, qui se manifestent par exemple dans la désintégration d'un neutron en un proton, un électron et un anti-neutrino. Feynman et Murray Gell-Mann proposèrent une nouvelle description des interactions faibles.



Il développa aussi les diagrammes de Feynman, un outil qui permet de conceptualiser et de faciliter le calcul des interactions entre particules dans l'espace-temps, notamment les interactions entre l'électron et son antiparticule, le positron. Ces diagrammes lui permettaient de travailler avec des concepts qui auraient pu être moins abordables sans ceux-ci : comme la réversibilité du temps ; ils sont aujourd'hui indispensables pour la théorie des cordes et la théorie M, et ils ont été étendus de façon topologique.

Enfin, Feynman attaqua le problème de la théorie quantique de la gravitation.

FRIEDMANN

Alexandre Friedmann (16 juin 1888 – 16 septembre 1925), est un physicien et mathématicien russe.

Âgé de dix-sept ans, il soumet au très célèbre et influent mathématicien allemand David Hilbert, un article portant sur les nombres de Bernoulli. Accepté par le maître, l'article fera l'objet d'une publication dans la prestigieuse revue scientifique les *Annales de mathématiques* (*Mathematische Annalen*) en 1906.



Quand Friedmann découvre la théorie de la relativité générale d'Einstein en 1922, il entreprend dès lors d'en chercher les solutions exactes. Il entrevoit le premier que cette théorie mêlant gravitation, temps et espace, permet l'étude de la structure de l'Univers dans son ensemble.

Il découvre que les équations d'Einstein permettent la description d'un univers en évolution et introduit pour la première fois l'idée d'un univers en expansion. L'article fondateur de la cosmologie non-statique est publié en juin 1922 : Friedmann y décrit trois types d'évolution dans le temps de l'Univers, impliquant notamment une singularité initiale. Il poursuit son raisonnement dans un deuxième article publié en 1924. Une violente controverse oppose à distance Friedmann à Albert Einstein, qui refusera longtemps un univers non-statique.

Alexandre Friedmann est l'un des trois « pères » de l'expansion de l'Univers, avec Georges Lemaître et George Gamow, un de ses élèves.

Il meurt précocement en 1925 de la fièvre typhoïde. Les équations de Friedmann, décrivant la dynamique de l'expansion de l'Univers dans le cas où celui-ci serait homogène et isotrope, sont nommées en son honneur.

GAMOW



George Gamow (4 mars 1904 – 19 août 1968), est un physicien théoricien, astronome, cosmologiste et vulgarisateur scientifique américano-russe. Il a proposé la théorie de la radioactivité α par l'effet tunnel quantique. Il a effectué des recherches sur la formation des étoiles, la nucléosynthèse stellaire, la nucléosynthèse primordiale à la suite du Big Bang, le fond diffus cosmologique de micro-ondes, et la génétique au niveau moléculaire.

Le 1^{er} avril 1948, avec son étudiant Ralph Alpher, il publie un article capital sur la formation des éléments au cours des premières phases de l'expansion de l'Univers, participant ainsi à l'élaboration de la théorie du Big Bang. Ils décrivent l'Univers d'origine, le ylem, comme une « soupe dense de neutrons et de protons » ; ils démontrent que les quantités actuelles d'hydrogène et d'hélium dans l'Univers peuvent être expliquées par les réactions nucléaires qui ont eu lieu durant le Big Bang.

Anecdotiquement, Gamow inclut dans les signataires Hans Bethe, qui n'a aucunement participé à la rédaction de l'article, juste pour faire un jeu de mot sur les auteurs : Alpher, Bethe et Gamow (alpha, bêta et gamma...), prouvant, une fois de plus, son caractère facétieux.

Peu après, Alpher et Robert Herman prédisent que la rémanence du Big Bang aurait refroidi après des milliards d'années pour remplir l'univers avec un rayonnement persistant vers 5 degrés au-dessus du zéro absolu. Finalement, l'observation effective de ce fond diffus cosmologique par Arno Penzias et Robert Wilson en 1964 fournit une confirmation de la théorie du Big Bang.

GELL-MANN

Murray Gell-Mann, né le 15 septembre 1929, est un physicien américain. Il est surtout connu pour ses travaux sur la théorie des quarks dont il a fait la découverte. Il a reçu le prix Nobel de physique de 1969.

Sa première contribution, en 1954, est l'introduction d'un nouveau nombre quantique, l'étrangeté, qui est associé aux nouvelles particules découvertes dans les réactions du rayonnement cosmique. L'étrangeté est conservée par l'interaction nucléaire qui est responsable de leur création par paires mais n'est pas respectée par l'interaction faible qui est responsable de leur désintégration. Cette notion fut également proposée indépendamment par le physicien Kazuhiko Nishijima.

Il établit en 1961 une classification des nouvelles particules découvertes à partir des années 1950 ; dans la classification, certaines places pour de nouvelles particules étaient encore libres. La découverte



annoncée le 20 février 1964 par un groupe de chercheurs de Brookhaven de la particule Ω , prévue dans cette classification, confirma la théorie de Gell-Mann ; elle lui permit de proposer l'existence de nouvelles particules, appelées quarks, particules constituant les neutrons, les protons et toutes les particules massives appelées hadrons. L'existence des quarks sera mise en évidence en 1969 par James Bjorken et Richard Feynman. La théorie de Gell-Mann devint une base fondamentale des théories actuelles de la physique quantique. Il obtint le prix Nobel de physique de 1969 « pour ses contributions et ses découvertes concernant la classification des particules élémentaires et leurs interactions ».

HAWKING

Stephen William Hawking (8 janvier 1942 –14 mars 2018), est un physicien théoricien et cosmologiste britannique.



Il a été professeur de mathématiques à l'université de Cambridge de 1980 à 2009 et chercheur distingué du Perimeter Institute for Theoretical Physics. Il est connu pour ses contributions dans les domaines de la cosmologie et la gravité quantique, en particulier dans le cadre des trous noirs. Son succès est également lié à ses ouvrages de vulgarisation scientifique dans lesquels il discute de ses propres théories et de la cosmologie en général, comme le best-seller *Une brève histoire du temps (Brief History of Time)*, qui est resté sur la liste des records des best-sellers du *Sunday Times* pendant 237 semaines consécutives.

La clé des principaux travaux scientifiques de Stephen Hawking est fondée, en collaboration avec Roger Penrose, sur l'élaboration des théorèmes des singularités dans le cadre de la relativité générale, et la prédiction théorique que les trous noirs devraient émettre un rayonnement, aujourd'hui connu sous le nom de rayonnement de Hawking. Physicien théoricien de renommée mondiale, ses livres et ses apparitions publiques ont fait de lui une célébrité.

Hawking a souffert d'une forme rare – de début précoce et d'évolution lente – de sclérose latérale amyotrophique (SLA) ; sa maladie a progressé au fil des ans et l'a laissé presque complètement paralysé. Les principaux domaines de recherches de Hawking sont la cosmologie et la gravité quantique.

À la fin des années 1960, lui et son ami et collègue de Cambridge, Roger Penrose, ont appliqué un nouveau modèle mathématique complexe, qu'ils ont créé à partir de la théorie d'Albert Einstein sur la relativité générale. Cela a conduit Hawking à prouver en 1970 le premier de nombreux théorèmes sur les singularités, tels les théorèmes capables de fournir un ensemble de conditions suffisantes à l'existence d'une singularité dans l'espace-temps. Ce travail a montré que, loin d'être une curiosité mathématique qui ne figure que dans des cas particuliers, les singularités sont assez génériques dans la relativité générale.

En 1971, Hawking avance l'hypothèse que le phénomène du Big Bang aurait dispersé dans l'espace des micro trous noirs d'une masse d'environ 10^9 tonnes et de la taille d'un proton ainsi que des trous noirs plus massifs et de la taille d'une montagne. Des trous noirs aussi massifs que dix millions de masses solaires pourraient également résider au centre des galaxies, ce qui expliquerait l'intense énergie émise par les radiogalaxies et les quasars.

Si un trou noir est capable de rayonner, ce n'est pas pour autant que ce rayonnement contient une information sur le trou noir. La particule émise peut être quelconque tant que sa longueur d'onde est supérieure au quart de la circonférence du trou noir (celle de l'horizon des événements). En fait, en

absorbant tout jusqu'à la lumière, le trou noir devient une censure cosmique comme le disait Penrose, ne libérant aucune information sur ses propriétés. Du moins Hawking le pensait-il à l'époque. Mais ceci n'étant qu'une solution théorique tirée de ses calculs, il fait le pari avec Kip Thorne contre John Preskill que les trous noirs constituent la phase terminale de l'Univers et emprisonnent à jamais tout ce qui passe à leur proximité sans libérer la moindre information. Le 21 juillet 2004, il reconnaît avoir perdu son pari et admet, avec Leonard Susskind, que l'information apparemment captive pourrait rester concentrée sur l'horizon d'un trou noir, donc sur une surface, par analogie avec un hologramme qui concentre une information sur une image à trois dimensions, également sur une surface.

Classiquement, on peut montrer que l'information qui passe par l'horizon d'un trou noir est perdue pour notre univers. Ce fait est connu sous le nom de théorème de calvitie. Le problème avec ce théorème est qu'il implique que le trou noir émet le même rayonnement quel que soit ce qui y rentre. Ainsi, si un état pur quantique est jeté dans un trou noir, un état mélangé en ressortira. Ceci va à l'encontre des règles de la mécanique quantique et est connu sous le nom de paradoxe de l'information perdue des trous noirs.

En 2014 Stephen Hawking déclare à la revue *Nature*, après sa conférence à l'Institut Kavli pour la physique théorique à Santa Barbara en Californie : « on ne peut rendre compte parfaitement de ces astres curieux tant que nous n'avons pas élaboré une théorie de la gravité unifiée, capable de concilier les lois de la physique quantique des échelles subatomiques avec la relativité générale qui rend compte de l'astronomie. »

Actuellement, deux théories sont en confrontation : la théorie des cordes et celle de la gravitation quantique à boucles.

HEISENBERG



Werner Karl Heisenberg, né le 5 décembre 1901 et mort le 1^{er} février 1976, est un physicien allemand qui fut l'un des fondateurs de la mécanique quantique. Il a obtenu le prix Nobel de physique en 1932 « pour la création de la mécanique quantique, dont l'application a mené, entre autres, à la découverte des variétés allotropiques de l'hydrogène ».

À 23 ans, il développe la première formalisation de la mécanique quantique publiée en 1925, en même temps qu'Erwin Schrödinger ; il utilise un formalisme mathématique, la « mécanique matricielle », alors que Schrödinger utilise une approche ondulatoire, par résolution de fonctions d'ondes en utilisant les équations différentielles ; Schrödinger établit l'équivalence des deux formulations.

Le principe d'incertitude, ou mieux le « principe d'indétermination », énoncé en 1927, affirme que la détermination de certains couples de valeurs de physique classique, par exemple la position et la quantité de mouvement, ne peut se faire avec une précision arbitraire. Ce principe

affirme simplement qu'une particule quantique n'est jamais un corpuscule décrit par la physique classique. Cette incertitude ou mieux cette indétermination n'est pas liée à une mesure caduque, mais marque la limite des propriétés réelles décrites ; améliorer la précision des instruments n'améliorera pas la précision de ces mesures. La même année, il participe au congrès Solvay qui oppose les physiciens sur l'interprétation de ce principe et de la mécanique quantique en général.

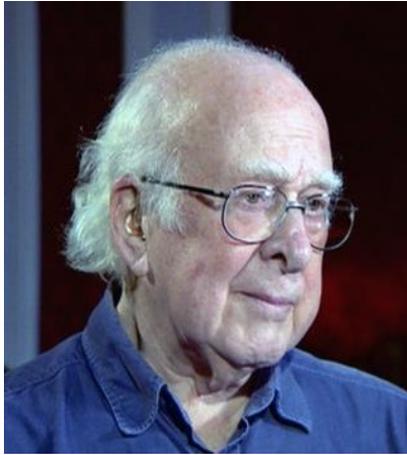
À partir de 1929, il travaille avec Wolfgang Pauli à l'élaboration de la théorie quantique des champs.

Après la découverte du neutron par James Chadwick en 1932, Heisenberg propose le modèle proton-neutron du noyau atomique, et s'en sert pour expliquer le spin nucléaire des isotopes.

HIGGS

Peter Ware Higgs, physicien britannique, est né le 29 mai 1929. Jusqu'en 1996, il occupait une chaire de physique à l'Université d'Édimbourg.

Il est surtout connu pour avoir proposé, dans les années 1960 et simultanément à d'autres chercheurs,



une rupture de symétrie dans la théorie des particules, concernant la force électrofaible, expliquant notamment l'origine de la masse des particules élémentaires, et plus particulièrement les bosons W et Z. Ce mécanisme, appelé mécanisme de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble, prédit l'existence d'une nouvelle particule, appelée par commodité le boson de Higgs, ou plus précisément le boson scalaire massif.

Détecté par le CERN, à Genève, en 2012 avec un excellent intervalle de confiance, le mécanisme de Higgs est essentiel au modèle standard des particules afin d'expliquer les phénomènes d'inertie et donc de masse.

Peter Higgs a reçu de nombreux prix, notamment le prix et la médaille Dirac, le prix Wolf de physique en 2004 et le 8 octobre 2013, le prix Nobel de physique conjointement avec le belge François Englert pour leurs travaux sur l'origine de la masse.

HUBBLE



Edwin Powell Hubble (20 novembre 1889 – 28 septembre 1953) est un astronome américain. Il a permis d'améliorer la compréhension de la nature de l'Univers en démontrant l'existence d'autres galaxies en dehors de notre Voie lactée. En observant un décalage vers le rouge du spectre de plusieurs galaxies, il a montré que celles-ci s'éloignaient les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance. Cette relation, connue sous le nom de « loi de Hubble », avait néanmoins été prédite précédemment par Georges Lemaître qui avait publié son travail dans un journal bien moins visible. Cette situation a entraîné une controverse sur la paternité de la loi. Les conditions de la parution en anglais de la version des travaux de Lemaître de 1927 ont été depuis clarifiées : en 2018 la loi a officiellement été dénommée Loi de Hubble-Lemaître ; elle constitue une des observations-clés de l'expansion de l'Univers.

Edwin Hubble a par ailleurs établi un système permettant de classer les galaxies qui est toujours utilisé aujourd'hui.

Il est lauréat de la médaille Franklin en 1939 pour ses travaux sur les nébuleuses. Il reçoit la médaille d'or de la Royal Astronomical Society en 1940. Le télescope spatial Hubble a été nommé en son honneur, ainsi que l'astéroïde (2069) Hubble. Il a découvert l'astéroïde (1373) Cincinnati le 30 août 1935.

KIRCHHOFF

Gustav Robert Kirchhoff, né le 12 mars 1824 et mort le 17 octobre 1887, est l'un des plus grands physiciens du XIX^e siècle, avec des contributions essentielles à l'électrodynamique, la physique du rayonnement et la théorie mathématique de l'élasticité.

Après un doctorat de physique obtenu en 1847 à l'université de Königsberg, il enseigne à l'université de Breslau de 1850 à 1854, puis à l'université de Heidelberg et enfin à l'université Humboldt de Berlin à partir de 1875. En 1886, sa santé défaillante le force à prendre sa retraite.

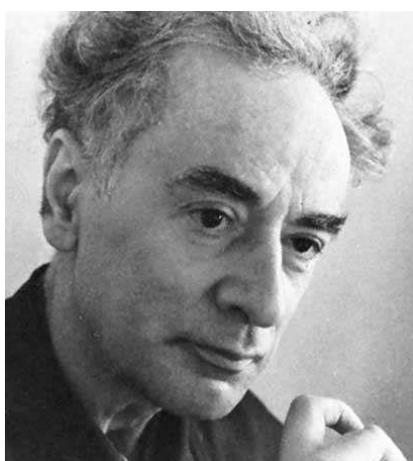
En 1862, pour formuler une loi universelle du rayonnement, Kirchhoff imagine un émetteur thermique idéal rayonnant dans le vide, le *corps noir*. Cette même année, la médaille Rumford lui est décernée pour avoir démontré l'existence de raies lumineuses fixes dans le spectre du rayonnement solaire (spectre de la « lumière naturelle »), et pour avoir mis en évidence une inversion des raies lumineuses dans la lumière artificielle. Il est également lauréat de la médaille Davy en 1877.



Kirchhoff est mondialement célèbre pour les lois électrotechniques relatives à la conservation des courants et des charges dans les circuits électriques, lois qu'il a établies alors qu'il était encore étudiant.

Il a apporté une immense contribution à la science, en tant que fondateur, avec Robert Bunsen, de la spectroscopie. Il établit que les raies spectrales de la lumière émise par un corps incandescent constituent une signature permettant d'identifier ce corps. En observant ainsi le spectre de la lumière solaire, il put reconnaître plusieurs éléments chimiques présents sur Terre. Cette technique nouvelle devait donner une nouvelle dimension à l'observation astronomique. Avec Robert Bunsen, il découvrit en 1860, grâce à l'analyse spectrale, le césium et le rubidium, ouvrant à l'Anglais Crookes, aux allemands Reich, Richter et à bien d'autres, la voie de la recherche de corps simples encore inconnus...

LANDAU



Lev Davidovitch Landau (22 janvier 1908 – 1^{er} avril 1968) est un physicien théoricien soviétique. Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1962 « pour ses théories pionnières à propos de l'état condensé de la matière, particulièrement l'hélium liquide »

À l'université de Léninegrad, Landau se lie rapidement d'amitié avec George Gamow. Il commence sa thèse en 1926 à l'institut physico-technique de Leningrad et publie son premier article consacré à l'analyse spectrale des molécules diatomiques. Sa réputation d'alors le fait passer pour un excentrique, volontiers rebelle, voire insolent mais toujours charmant, car à la fois maladroit et timide. Du point de vue politique, Lev est alors un révolutionnaire convaincu et enthousiaste, se considérant comme un authentique marxiste. Par ailleurs admirateur de Trotski, il s'inquiète de la montée au pouvoir de Staline et de l'émergence d'un pouvoir politique répressif et suspicieux.

Landau obtient en 1929 une bourse du gouvernement soviétique ainsi que de la fondation Rockefeller afin d'aller étudier la physique un an à l'étranger. Il n'a alors que 21 ans, mais peut se targuer d'une œuvre scientifique considérable, traitant notamment de physique statistique et quantique. Son séjour en Europe commence par Göttingen où il répond à une invitation de Max Born. Au bout de quelques semaines, il se rend à Leipzig pour suivre les cours de Werner Heisenberg et se fait vite remarquer pour son caractère intrépide et volontaire. Peu de temps après, il part pour Copenhague où il rencontre Bohr, dont il se considérera ensuite toujours comme un disciple. Il retournera à Copenhague en 1933 et 1934. Son périple le mène ensuite à Cambridge, où il travaille sous la direction de Paul Dirac et à Zurich avec Wolfgang Pauli. Un de ses condisciples à Zurich, Rudolf Peierls (qui était alors assistant de Pauli) dit de lui :

« Je me souviens très nettement de la grande impression que Landau fit sur nous tous quand il se présenta dans le laboratoire de Wolfgang Pauli en 1929, [...] Nous ne mîmes pas longtemps à découvrir avec quelle profondeur il comprenait la physique moderne, et quel talent il avait pour résoudre les problèmes fondamentaux. Il lisait rarement en détail un article de physique théorique, juste assez pour voir si le sujet était intéressant, et dans ce cas quelle était l'approche de l'auteur. Il se mettait ensuite à faire les calculs de son côté, et si ses résultats concordaient avec ceux de l'auteur, il approuvait l'article. »

Landau regagne Léninegrad en 1931 et constate alors un changement important dans l'attitude du gouvernement soviétique envers les savants.

En 1932, Landau s'installe à Kharkov, où on lui confie la direction du département théorique du nouvel Institut physico-technique d'Ukraine. Il est reçu docteur ès sciences en 1934 et est nommé à la chaire de physique générale de l'université de Kharkov en 1935. En 1937, à la demande de Piotr Kapitsa, il s'installe à Moscou, où il est nommé par celui-ci à la tête de la section théorique de l'institut des problèmes physiques.

Cette nomination tombe à point nommé pour Landau, Moscou ayant remplacé depuis quelques années Léninegrad comme centre de la science soviétique. Mais sa satisfaction ne dure qu'un temps, la fin des

années 1930 est une période difficile pour les Soviétiques, les purges staliniennes plongent la population dans la crainte et la suspicion.

Le matin du 28 avril 1938, il est conduit à la Boutyrskaja, une des nombreuses prisons politiques que compte Moscou. On lui annonce qu'il est condamné à dix ans de prison sous l'accusation courante à cette époque d'espionnage au profit de l'Allemagne nazie. Il reste un an en cellule. Piotr Kapitsa réussit à le faire libérer en avril 1939, en intervenant directement auprès de Molotov. Landau sort de prison émacié, gravement malade et mentalement détruit.

À partir de 1949, membre de l'Académie des sciences d'URSS, Landau s'attaque en collaboration avec Evgueni Lifchitz, à une œuvre monumentale : son réputé *Cours de physique théorique* en dix volumes. Le 7 janvier 1962, il est victime d'un grave accident de voiture, dont il ne se remettra jamais.

LEMAÎTRE



Georges Lemaître, né le 17 juillet 1894 et mort le 20 juin 1966, est un chanoine catholique belge, astronome et physicien, professeur à l'Université catholique de Louvain. Sa « théorie de l'atome primitif », visant à expliquer l'origine de l'univers, constitue le fondement de sa théorie du Big Bang.

Dès 1922, Alexandre Friedmann, à Léninegrad, avait le premier publié une théorie de l'expansion de l'Univers dans la prestigieuse revue de physique, la *Zeitschrift für Physik*. En 1927, indépendamment des travaux d'Alexander Friedmann, Georges Lemaître rédige un article dans les *Annales de la Société scientifique de Bruxelles* intitulé *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant* établissant que l'Univers est en expansion. De plus, en se fondant sur les mesures de vitesses d'éloignement des galaxies de Vesto Slipher et de leurs distances établies par Edwin Hubble, Georges Lemaître est le premier à établir le rapport constant entre distance

et vitesse d'éloignement. Il fournit une évaluation de cette constante, que l'on appelle communément la constante de Hubble.

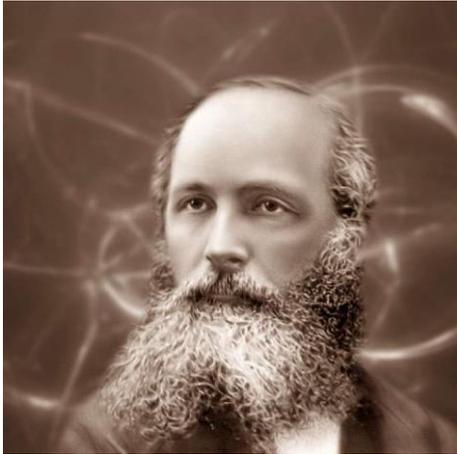
Lemaître émet ensuite une « théorie de l'atome primitif », début temporel de l'Univers. Cette théorie fut appelée ironiquement *Big Bang* par Fred Hoyle en 1949, au cours d'une émission de radio, nom qui resta. Il soupçonne également le rayonnement cosmique de porter la trace des événements initiaux. Il travaille à partir de 1933 sur un modèle d'Univers non homogène nommé, *a posteriori*, *modèle de Lemaître-Tolman* (Richard Tolman a travaillé avec lui à Pasadena), expliquant les condensations et la formation des galaxies. Il étudie à nouveau le rayonnement cosmique, notamment avec Carl Størmer, ce qui l'oblige à recourir aux machines à calcul qu'il va très vite maîtriser. Après la Libération, il reprend son travail et s'intéresse à la formation des nébuleuses. Pour cela, il devient l'un des pionniers belges des machines à calculer et s'intéresse à leur programmation en langage machine, puis en assembleur avant d'étudier d'autres langages comme l'Algol.

En 1965, Odon Godart annonça à son ancien collègue et mentor alors très malade, la découverte du fond diffus cosmologique par Arno Penzias et Robert Wilson. Cet « écho disparu de la formation des mondes », comme Lemaître l'avait poétiquement appelé, confirmait le scénario cosmologique dont Lemaître avait été l'un des premiers artisans.

MAXWELL

James Clerk Maxwell (13 juin 1831 – 5 novembre 1879) est un physicien et mathématicien écossais. Il est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction, en incluant une importante modification du théorème d'Ampère. Ce fut à l'époque le modèle le plus unifié de l'électromagnétisme. Il est également célèbre pour avoir interprété, dans un article en quatre parties publié dans *Philosophical Magazine* intitulé *On Physical Lines of Force*, la lumière comme étant un phénomène électromagnétique en s'appuyant sur les travaux de Michael Faraday. Il a notamment démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière.

Ces deux découvertes permirent d'importants travaux ultérieurs notamment en relativité restreinte et en mécanique quantique.



Il a également développé la distribution de Maxwell, une méthode statistique de description de la théorie cinétique des gaz.

Maxwell est considéré par de nombreux physiciens comme le scientifique du XIX^e siècle ayant eu le plus d'influence au XX^e siècle. Ses contributions à la science sont considérées par certains comme aussi importantes que celles d'Isaac Newton ou d'Albert Einstein. En 1931, pour le centenaire de la naissance de Maxwell, Einstein lui-même décrivait les travaux de Maxwell comme les « plus profonds et fructueux que la physique ait connus depuis le temps de Newton ».

Il est également connu pour avoir réalisé le 17 mai 1861 la première photographie en vraie couleur devant les membres de la Royal Institution de Londres

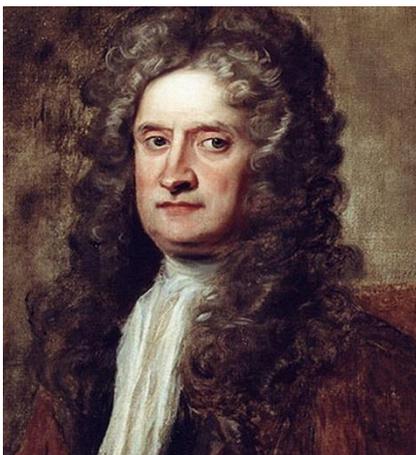
La plus grande partie de la vie scientifique de Maxwell a été consacrée à l'électricité. Sa plus grande contribution est le développement et la formulation mathématiques des travaux précédents sur l'électricité et le magnétisme réalisés par Michael Faraday et André-Marie Ampère notamment. Il en tire un ensemble de vingt équations différentielles à vingt variables, plus tard réduites à quatre. Ces équations, désormais connues sous le nom d'équations de Maxwell, sont présentées la première fois à la Royal Society en 1864 et décrivent le comportement et les relations du champ électromagnétique ainsi que son interaction avec la matière. Maxwell écrit :

« L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme. »

Cette prévision s'est révélée correcte et la relation entre lumière et électromagnétisme est considérée comme une des plus grandes découvertes du XIX^e siècle dans le domaine de la physique.

À ce moment Maxwell pense que la propagation de la lumière nécessite un milieu pour support des ondes : l'éther. Avec le temps l'existence d'un tel milieu, remplissant tout l'espace et apparemment indétectable par des moyens mécaniques, posera de plus en plus de problèmes pour être mise en accord avec les expériences telles que celle Michelson et Morley. De plus, cela semble imposer un référentiel absolu dans lesquelles les équations sont valides, mais impose également à celles-ci de prendre une expression différente pour un observateur en mouvement. C'est cette dernière difficulté qui amènera Albert Einstein à formuler sa théorie de la relativité restreinte pour laquelle l'existence de l'éther n'est plus nécessaire.

NEWTON



Isaac Newton (25 décembre 1642 – 20 mars 1727) est un philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste, astronome et théologien anglais, puis britannique. Figure emblématique des sciences, il est surtout reconnu pour avoir fondé la mécanique classique, pour sa théorie de la gravitation universelle et la création, en concurrence avec Gottfried Wilhelm Leibniz, du calcul infinitésimal. En optique, il a développé une théorie de la couleur fondée sur l'observation selon laquelle un prisme décompose la lumière blanche en un spectre visible. Il a aussi inventé le télescope à réflexion composé d'un miroir primaire concave appelé télescope de Newton.

En mécanique, il a établi les trois lois universelles du mouvement qui constituent les principes à la base de la grande théorie du mouvement des corps, théorie que l'on nomme aujourd'hui

« mécanique newtonienne » ou encore « mécanique classique ».

Il est aussi connu pour la généralisation du théorème du binôme et l'invention de la méthode dite de Newton permettant de trouver des approximations d'un zéro (ou racine) d'une fonction d'une variable réelle à valeurs réelles.

Newton a montré que le mouvement des objets sur Terre et celui des corps célestes sont gouvernés par les mêmes lois naturelles ; en se fondant sur les lois de Kepler sur le mouvement des planètes, il a développé la loi universelle de la gravitation.

Son ouvrage *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publié en 1687, est considéré comme une œuvre majeure dans l'histoire de la science. C'est dans celui-ci qu'il décrit la loi universelle de la gravitation, formule les trois lois universelles du mouvement et jette les bases de la mécanique classique. Il a aussi effectué des recherches dans les domaines de la théologie et de l'alchimie.

Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*) marque le début de la mathématisation de la physique. En effet, Newton y expose le principe d'inertie, la proportionnalité des forces et des accélérations, l'égalité de l'action et de la réaction, les lois du choc ; il y étudie le mouvement des fluides, les marées, etc. Mais il expose aussi et surtout sa théorie de l'attraction universelle. Les corps s'attirent avec une force proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. La simplicité et l'efficacité de cette théorie aura une très forte influence sur les autres sciences au XVIII^e siècle, particulièrement les sciences sociales. Toutefois, sur le moment, si le livre est bien accueilli en Grande-Bretagne, la réaction est hostile sur le continent. En France cependant, les travaux de Newton furent populaires grâce à la diffusion de ses idées par Voltaire.

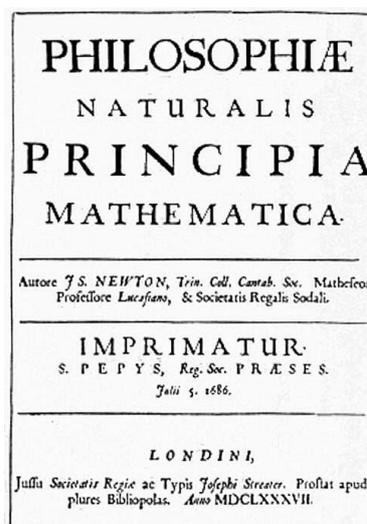
En 1687, il défend les droits de l'université de Cambridge contre le roi Jacques II. Cette action lui vaut d'être élu membre du parlement britannique en 1689 quand le roi, vaincu, doit s'exiler. Durant son mandat il est très actif dans les débats.

En 1704, il fait publier en anglais ses travaux concernant la lumière qu'il tenait cachés depuis vingt ans.

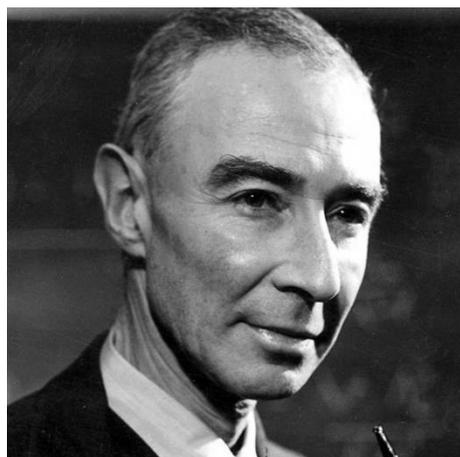
En 1705, il est anobli par la reine Anne.

Il meurt le 31 mars 1727, à l'âge de 84 ans. Son corps est porté en grande pompe et inhumé dans la nef de l'abbaye de Westminster aux côtés des rois d'Angleterre.

Newton est considéré comme l'un des plus grands génies et savants de l'histoire humaine.



OPPENHEIMER



Julius Robert Oppenheimer (22 avril 1904 – 18 février 1967) est un physicien américain qui s'est distingué en physique théorique puis comme directeur scientifique du projet Manhattan. À cause de son rôle éminent, il est régulièrement surnommé le « père de la bombe atomique ».

Élevé dans une famille fortunée, intellectuelle et libérale, il maîtrise l'allemand, l'anglais et le français au point qu'il peut lire les ouvrages des plus grands chimistes, mathématiciens et physiciens de l'époque dans leur langue maternelle. Profitant des enseignements des meilleurs physiciens européens, il publie des articles importants en mécanique quantique, en physique des particules et en physique nucléaire. Il est également reconnu par la communauté scientifique pour la publication d'une thèse concernant la naissance des trous noirs dans l'Univers. Pendant les années 1930, ses travaux théoriques et son prestige font de l'université de Californie à Berkeley l'un des plus importants centres de recherche en physique.

En février 1943, malgré l'opposition des services de sécurité de l'armée américaine due au passé gauchiste d'Oppenheimer, le général Leslie Richard Groves le nomme directeur scientifique du projet Manhattan. Sous sa direction efficace, le laboratoire national de Los Alamos met au point les trois premières bombes atomiques de l'Histoire. Même s'il juge que les États-Unis auraient dû transmettre plus d'avertissements au Japon avant de bombarder Hiroshima et Nagasaki, il reste partisan de l'usage des

bombes atomiques. Après la Seconde Guerre mondiale, il est nommé président du *General Advisory Committee* qui conseille la commission de l'énergie atomique des États-Unis.

En 1934, les astronomes Walter Baade et Fritz Zwicky ont émis l'hypothèse en 1934 qu'une supernova est une transition dans le processus qui amène une étoile ordinaire à se transformer en étoile à neutrons, d'un rayon très petit et d'une densité très élevée puisque les neutrons peuvent s'entasser plus étroitement que les protons et les électrons. En 1938, Oppenheimer se questionne sur la limite supérieure de taille pour les noyaux stellaires neutroniques. En octobre 1938, il publie avec Robert Serber un article (*On the Stability of Stellar Neutron Cores*) qui critique les résultats obtenus en 1938 par le physicien Lev Landau, puis, en février 1939, dans un article rédigé avec George Volkoff (*On Massive Neutron Cores*), il calcule les conditions d'équilibre entre l'état de la matière dans les étoiles et leur structure macroscopique. Il parvient ainsi à établir que la densité dans un tel type d'étoile est de l'ordre de 10^{14} à 10^{16} g/cm³ ; selon ce résultat, qui sera légèrement révisé plus tard, un dé à coudre d'une étoile à neutrons pèse environ un milliard de tonnes. L'existence de telles étoiles sera confirmée en 1967 lorsque les pulsars seront découverts. Par la suite, Oppenheimer et son étudiant Hartland Snyder réfléchissent à l'effondrement gravitationnel d'étoiles hyperdenses. Le chercheur américain écrit alors « l'une des pages majeures de l'astrophysique » en complétant la rédaction, en juillet 1939, de l'article *on Continued Gravitational Contraction* (« de la contraction gravitationnelle continue »). Les deux, en appliquant les principes de la relativité générale à la structure stellaire, avancent qu'une étoile suffisamment massive s'effondre sur elle-même quand toutes les sources d'énergie thermonucléaire sont épuisées, ce qui provoque une contraction qui se prolonge indéfiniment dans le temps. Le rayon de l'étoile s'approchant asymptotiquement de son rayon gravitationnel, la lumière de l'astre se décale progressivement vers le rouge et ne peut plus s'échapper que selon un nombre de plus en plus restreint d'angles. Si le rayon d'une étoile de forme sphérique et d'une certaine masse est plus petit que ce rayon gravitationnel, alors aucune lumière ne peut s'en échapper ; l'étoile est devenue un trou noir. Le concept existe depuis les travaux de Karl Schwarzschild (1916), mais est considéré comme une spéculation mathématique. Puisqu'ils laissent entendre qu'une telle structure peut exister dans l'Univers, Oppenheimer et Snyder ouvrent la voie à un nouveau champ d'investigation scientifique.

PAULI



Wolfgang Ernst Pauli (25 avril 1900 – 15 décembre 1958) est un physicien autrichien connu pour sa définition du principe d'exclusion en mécanique quantique, ou principe de Pauli, ce qui lui valut le prix Nobel de physique de 1945. Il est également lauréat de la médaille Franklin en 1952.

À partir de 1929, il travaille avec Werner Heisenberg à l'élaboration de la théorie quantique des champs, ouvrant la construction de modèles de description des particules élémentaires qui combinent les règles de la mécanique quantique avec celles de la relativité restreinte, y compris pour le modèle standard.

Pauli est aussi connu pour l'invention – soit la postulation théorique, en 1930, du neutrino, particule élémentaire surprenante et paradoxale puisqu'elle ne possède en principe ni charge ni masse, et qu'elle n'interagit que très faiblement avec la matière.

Mais Wolfgang Pauli n'est pas seulement un théoricien et un physicien majeur du XX^e siècle. Avec entre autres Einstein, Bohr, Heisenberg ou Schrödinger, il fait partie de ceux qui ont pensé la révolution relativiste et quantique de la physique moderne, l'ébranlement philosophique sans précédent qu'elle provoque. Dans un dialogue constant avec ces théoriciens importants, il a tenté de comprendre ce que cette révolution changeait dans notre représentation du monde, et quels étaient ses enjeux métaphysiques.

Pendant les années 1922 et 1923, il travaille aux côtés de Niels Bohr à Copenhague. Entre 1923 et 1928, il enseigne à Hambourg avant de partir à l'ETH de Zurich, où il obtient un poste de professeur de physique théorique.

À partir de 1935, il est aux États-Unis, où il occupe des postes de professeur invité, notamment à l'*Institute for Advanced Study* à Princeton durant les années 1935-1936, mais aussi à l'université du Michigan, en 1931 et 1941, et l'université Purdue, en 1942. En tant que citoyen allemand (en raison de l'*Anschluss*), il ne participe pas aux projets scientifiques de la guerre.

En 1946, il obtient la citoyenneté américaine, mais revient la même année à l'ETH de Zurich, où une place de professeur lui avait été gardée. En 1949, il devient citoyen suisse. Dans les années 1950, il retourne régulièrement à Princeton afin de donner des cours en tant que professeur invité. Dans les dernières années de sa vie, il participe à la fondation du CERN.

En 1930, Pauli reçoit la médaille Lorentz, et en 1945, le prix Nobel de physique « pour la découverte du principe d'exclusion, aussi appelé principe de Pauli ». Enfin en 1958, la médaille Max-Planck lui est remise, peu de temps avant son décès.

Pauli a apporté une contribution essentielle à la physique moderne, et plus spécialement au domaine de la mécanique quantique. Son perfectionnisme le limitait dans ses publications, mais il eut de nombreux échanges épistolaires, avec notamment Bohr, Jordan et Heisenberg, à qui il soumettait souvent son travail avant de le publier.

PENROSE



Roger Penrose, né le 8 août 1931, est un physicien et mathématicien britannique.

Il enseigne les mathématiques au Birkbeck College de Londres où, entre 1964 et 1973, il élabore la théorie décrivant l'effondrement des étoiles sur elles-mêmes et où il rencontre le célèbre physicien Stephen Hawking. Ils travaillent alors à une théorie de l'origine de l'Univers, Penrose y apportant sa contribution mathématique à la théorie de la relativité générale appliquée à la cosmologie et à l'étude des trous noirs.

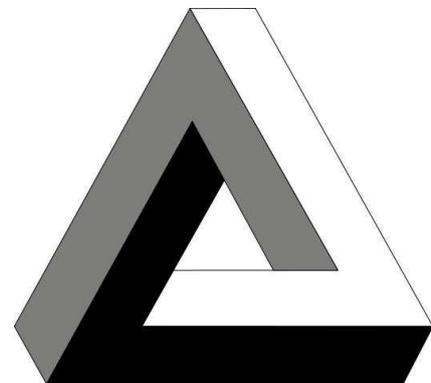
En 1974, il publie un article où il présente ses premiers pavages non périodiques : les pavages de Penrose. On lui doit quelques objets impossibles, tel le triangle de Penrose.

En 1965, à Cambridge, Penrose prouve que des singularités gravitationnelles (comme celles au centre des trous noirs) ne peuvent être formées à partir de l'effondrement gravitationnel d'étoiles massives en fin de vie.

En 1967, Penrose invente la théorie des twisteurs. En 1969, il conjecture l'hypothèse de la censure cosmique : celle-ci affirme que l'Univers nous protège des violations de causalité inhérentes aux singularités gravitationnelles, en les masquant systématiquement derrière un horizon des événements. Cette hypothèse constitue le *principe faible de censure cosmique*. Penrose formulera en 1979 une version plus forte appelée *principe fort de censure cosmique*. Ces hypothèses constituent un des problèmes actuels les plus importants de la relativité générale.

Penrose est connu pour sa découverte en 1974 des pavages de Penrose, qui sont constitués de deux formes ayant la propriété de couvrir intégralement un plan de manière non périodique. En 1984, des arrangements similaires ont été observés dans la disposition des atomes des quasi cristaux.

En 1971, Penrose découvrit les réseaux de spin qui devaient plus tard former la géométrie de l'espace-temps dans la théorie de la gravitation quantique à boucles. Il popularisa également, avec son étudiant Brandon Carter, l'usage de diagrammes représentant les relations causales dans l'espace-temps : les diagrammes de Penrose-Carter. Il a également mis en évidence la possibilité d'extraire de l'énergie d'un trou noir en rotation (dit trou noir de Kerr ou de Kerr-Newman), nommé en son honneur processus de Penrose. Avec Ezra Ted Newman, il mit au point un formalisme élégant pour étudier les espaces-temps à quatre dimensions dans le cadre de la relativité générale, en faisant appel à des objets appelés spineurs. Le formalisme est nommé formalisme de Newman-Penrose en l'honneur de ses deux découvreurs.



PENZIAS

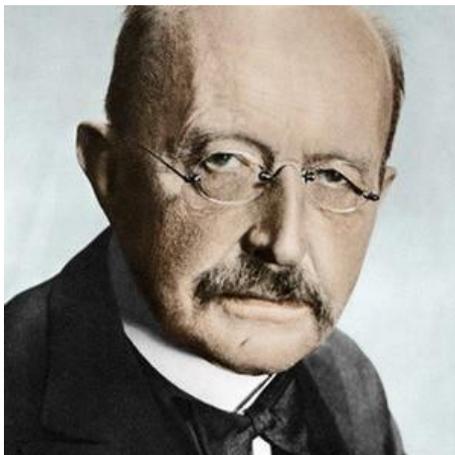
Arno Allan Penzias, né le 26 avril 1933, est un physicien américain. Lui et Robert Woodrow Wilson sont colauréats d'une moitié du prix Nobel de physique de 1978 (l'autre moitié a été remise à Piotr Kapitsa) « pour leur découverte du rayonnement thermique cosmologique ».



Leur découverte en 1965 du rayonnement thermique cosmologique fut accidentelle : en travaillant sur un nouveau type d'antenne aux laboratoires Bell, à Holmdel, ils trouvèrent une source de bruit dans l'atmosphère qu'ils ne purent expliquer. Ce bruit s'avéra un rayonnement micro-ondes cosmologique (uniforme dans toutes les directions), la partie du spectre détectée permettant de l'identifier comme le rayonnement thermique d'un corps noir à environ 3 K. Cette découverte constituait un argument important en faveur de la théorie du Big Bang.

Le fond diffus cosmologique (CMB en anglais) est le nom donné à un rayonnement électromagnétique très homogène observé dans toutes les directions du ciel et dont le pic d'émission est situé dans le domaine des micro-ondes. Anticipé dès 1948 et découvert par hasard en 1964, le CMB permet à la communauté scientifique de favoriser les modèles cosmologiques fondés sur l'idée de Big Bang, qui prédisent l'émission d'un tel rayonnement thermique à l'époque de l'Univers primordial.

PLANCK



Max Karl Ernst Ludwig Planck, né le 23 avril 1858 à Kiel et mort le 4 octobre 1947, est un physicien allemand. Il fut lauréat du prix Nobel de physique de 1918 pour ses travaux en théorie des quanta. Il a reçu la médaille Lorentz en 1927 et le prix Goethe en 1945. Max Planck fut l'un des fondateurs de la mécanique quantique. De ses travaux fut conceptualisée l'ère de Planck, période de l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les quatre interactions fondamentales étaient unifiées.

À Berlin, il poursuit des travaux en thermodynamique, en électromagnétisme et en physique statistique.

Dans les années 1890, lord Kelvin identifie le rayonnement du corps noir comme l'un des problèmes à résoudre. Jožef Stefan, Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wien s'y attaquent.

Travaillant à formuler avec exactitude le second principe de la thermodynamique, Planck s'intéresse dès 1894 au rayonnement électromagnétique du corps noir. Il adopte les méthodes statistiques de Boltzmann.

En octobre 1900, il détermine la loi de répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir en introduisant la constante de Planck, sans en maîtriser l'interprétation physique.

C'est à la fin de 1900 qu'il présente sa découverte à la société de physique de Berlin. C'est la naissance de la théorie des quanta, qu'il ne contribuera pas beaucoup à approfondir, laissant Albert Einstein l'étayer solidement. Planck a du mal à accepter sa propre hypothèse, rendant la matière « discontinue ».

Planck devint par la suite l'un des premiers soutiens d'Einstein, bien que ce dernier fût très critique vis-à-vis des théories de Planck avant de reconnaître ses positions novatrices.

Avec Walther Nernst, Planck organise en novembre 1911 à Bruxelles le premier congrès Solvay qui réunit les sommités de la physique de cette époque.

POINCARÉ

Henri Poincaré est un mathématicien, physicien, philosophe et ingénieur français, né le 29 avril 1854 et mort le 17 juillet 1912. Henri Poincaré est le cousin germain du président de la République française Raymond Poincaré.

Poincaré a réalisé des travaux d'importance majeure en optique et en calcul infinitésimal. Ses avancées sur le problème des trois corps en font un fondateur de l'étude qualitative des systèmes d'équations différentielles et de la théorie du chaos ; il est aussi un précurseur majeur de la théorie de la relativité restreinte et de la théorie des systèmes dynamiques.

Il est considéré comme un des derniers grands savants universels, maîtrisant l'ensemble des branches des mathématiques de son époque et certaines branches de la physique.

En 1902, Poincaré publie *La Science et l'Hypothèse*. Même si ce livre est plus un ouvrage d'épistémologie que de physique, il appelle à ne pas considérer comme trop réels



de nombreux artefacts de la physique de son époque : le temps absolu, l'espace absolu, l'importance de l'éther. Einstein s'était particulièrement penché sur ce livre et les idées contenues font de l'ouvrage un précurseur de la relativité restreinte.

On y trouve en particulier ce passage :

« Ainsi l'espace absolu, le temps absolu, la géométrie même ne sont pas des conditions qui s'imposent à la mécanique ; toutes ces choses ne préexistent pas plus à la mécanique que la langue française ne préexiste logiquement aux vérités que l'on exprime en français. »

En 1905, Poincaré pose les équations des transformations de Lorentz, et les présente à l'Académie des sciences de Paris le 5 juin 1905 ; ces transformations sont celles qui s'appliquent en relativité restreinte, et on emploie encore aujourd'hui les équations telles que les a écrites Poincaré.

Ces transformations vérifient l'invariance de Lorentz, achevant le travail d'Hendrik Lorentz (qui était un correspondant de Poincaré). Poincaré montre ainsi l'invariance des équations de Maxwell sous l'action de la transformation de Lorentz. Poincaré montre également que la transformation de Lorentz revient à une rotation entre espace et temps et qu'elle définit un groupe dont l'un des invariants est la vitesse de la lumière.

Poincaré a également proposé certaines idées sur la gravité, notamment la propagation des perturbations du champ de gravitation à la vitesse de la lumière, ce qu'il nomma « ondes gravifiques ».

Si les physiciens de l'époque étaient parfaitement au courant des travaux de Poincaré, le grand public l'a ensuite presque oublié, alors que le nom d'Einstein est aujourd'hui connu de tous. Récemment, quelques voix ont cherché à rappeler le rôle de Poincaré, mais d'autres sont allés plus loin, cherchant à faire de Poincaré l'auteur de la théorie de la relativité. Cette controverse sur la paternité de la relativité est d'autant plus délicate que les conflits politiques se mêlent aux questions de lecture des articles de physique.

En mathématiques, Poincaré est le fondateur de la topologie algébrique. La notion de continuité est centrale dans son travail, autant par ses répercussions théoriques que pour les problèmes topologiques qu'elle entraîne.

RAMÂN

Sir Chandrashekhara Venkata Ramân (7 novembre 1888 – 21 novembre 1970) est un physicien indien. Il a découvert et expliqué la diffusion Ramân. Il est lauréat du prix Nobel de physique de 1930 « pour ses travaux sur la diffusion de la lumière et pour la découverte de l'effet portant son nom ».

Il obtient ses licences et maîtrises de physique et d'anglais au *Presidency College Madras* de Chennai. Il rejoint ensuite l'*Indian Civil Service*, l'administration indienne, sur un poste à Calcutta.

Ramân est professeur de physique à l'université de Calcutta quinze années durant. C'est là que ses travaux en optique vont être reconnus. Il est

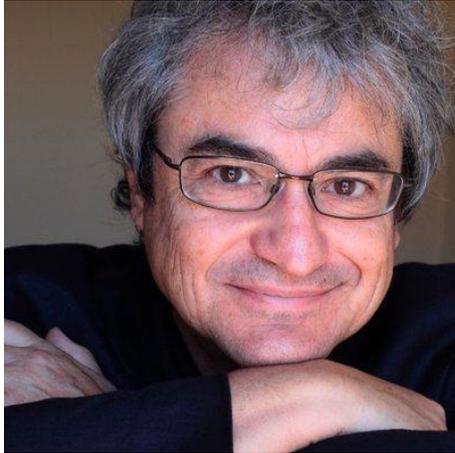


d'abord élu membre de la *Royal Society* en 1924, puis remporte le prix Nobel de physique en 1930 ; c'est la première fois qu'un chercheur indien qui a fait complètement ses études en Inde reçoit un prix Nobel. Cette même année, il est lauréat de la médaille Hughes, puis de la médaille Franklin en 1941.

En 1934, Ramân devient directeur de l'*Indian Institute of Science* à Bangalore, puis en 1949, il fonde le *Ramân Research Institute*.

Ramân est l'oncle de Subrahmanyam Chandrasekhar, lauréat du Prix Nobel de physique de 1983.

ROVELLI



Carlo Rovelli (né le 3 mai 1956) est un physicien italien qui a travaillé en Italie et aux États-Unis et qui travaille en France depuis l'année 2000. Son activité scientifique principale se situe dans le contexte de la gravité quantique : il a été l'un des initiateurs de la gravité quantique à boucles (loop quantum gravity).

Il s'est aussi occupé de philosophie des sciences et d'histoire des sciences, en particulier du rôle d'Anaximandre dans la naissance de la pensée scientifique, de la physique d'Aristote, et des relations entre philosophie et sciences.

Il a écrit plusieurs livres de vulgarisation scientifique, dont *Sept Brèves Leçons de Physique*, best-seller international, qui a été traduit en 41 langues et vendu à plus d'un million d'exemplaires.

Carlo Rovelli a obtenu son doctorat en physique à l'université de Padoue en Italie (1986).

Il a travaillé en Italie, aux États-Unis et en France. En 2007, il est professeur à l'université d'Aix-Marseille et dirige l'équipe de gravité quantique au centre de physique théorique de Luminy à Marseille (France). Il est *affiliated professor* du département d'histoire et de philosophie des sciences de l'université de Pittsburgh, aux États-Unis, et membre de l'Institut universitaire de France.

En 1988, Carlo Rovelli et Lee Smolin ont présenté la gravitation quantique à boucles. En 1995, ils ont obtenu une base explicite des états de la gravité quantique fondée sur les réseaux de spin de Roger Penrose et ont montré que la théorie prédit que surface et volume sont quantifiés. Ce résultat suggère l'existence d'une structure discrète de l'espace à très petite échelle.

En 1994, il a présenté une interprétation relationnelle de la mécanique quantique, fondée sur l'idée que tous les états quantiques dépendent de l'observateur.

Avec Alain Connes, il a formulé un modèle covariant de la théorie quantique des champs, fondé sur l'hypothèse du « temps thermique ». Selon cette hypothèse, le temps n'existe pas dans la théorie fondamentale, mais émerge seulement dans un contexte thermodynamique ou statistique. De plus, l'écoulement du temps serait une illusion due à une connaissance incomplète.

RUBBIA



Carlo Rubbia, né le 31 mars 1934, est un physicien italien, colauréat avec Simon van der Meer du prix Nobel de physique de 1984, sénateur à vie de la République italienne depuis 2013. Il obtient le prix Galilée en 2008.

En 1958, il partit aux États-Unis pour élargir son expérience et se familiariser avec les accélérateurs de particules. Vers 1960, il revint en Europe, attiré par le CERN, récemment créé, où il travailla à des expériences sur la structure des interactions faibles.

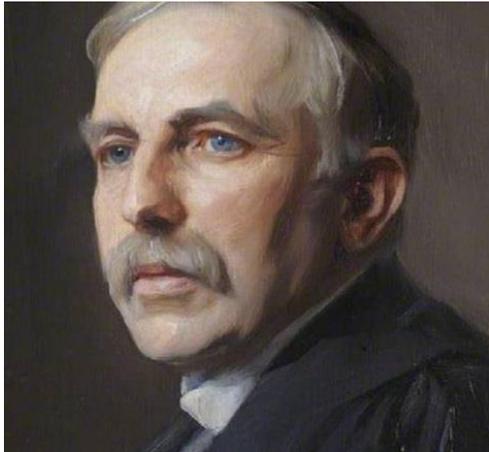
Il fut nommé professeur de physique à l'université Harvard en 1970, mais continua à se rendre fréquemment en Europe pour travailler au CERN. En 1976, il proposa de modifier le super synchrotron à protons (SPS) du CERN pour provoquer des collisions entre des protons et des antiprotons dans le même anneau. Ainsi fut construite la première fabrique d'antiprotons du monde. Le collisionneur commença à fonctionner en 1981 et, en janvier 1983, vint l'annonce que des

particules W avaient été créées. Quelques mois plus tard, des particules Z, encore plus fugaces, furent également observées. L'année suivante, en 1984, Carlo Rubbia et Simon van der Meer partagèrent le prix Nobel de physique « pour leurs contributions décisives au grand projet, ce qui a permis la découverte des particules W et Z, transmetteurs de l'interaction faible ». C'est l'un des délais les plus courts entre une découverte et cette récompense.

Carlo Rubbia devint directeur général du CERN en 1989, fonction qu'il a occupée jusqu'en 1993. En 2010, Rubbia enseigne à l'université de Pavie, en Italie, et préside l'ENEA.

L'astéroïde (8398) Rubbia a été nommé en son honneur.

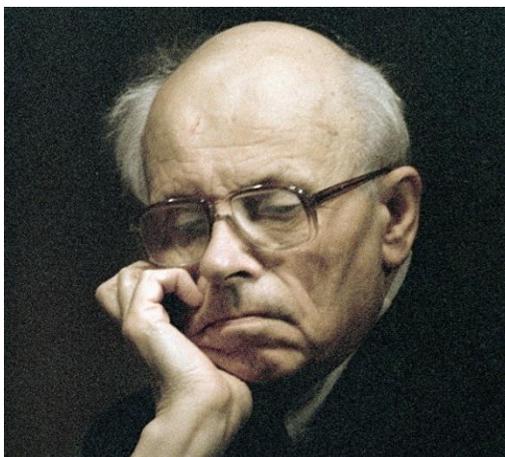
RUTHERFORD



Ernest Rutherford (30 août 1871 – 19 octobre 1937) est un physicien et chimiste néo-zélando-britannique, considéré comme le père de la physique nucléaire. Il découvrit les rayonnements alpha et bêta ; il découvrit aussi que la radioactivité s'accompagnait d'une désintégration des éléments chimiques, ce qui lui valut le prix Nobel de chimie en 1908. C'est encore lui qui mit en évidence l'existence d'un noyau atomique dans lequel étaient réunies toute la charge positive et presque toute la masse de l'atome.

Si, pendant la première partie de sa vie, il se consacra exclusivement à sa recherche, il passa la deuxième moitié de sa vie à enseigner et à diriger le laboratoire Cavendish à Cambridge, où fut découvert le neutron et où vinrent se former les physiciens Niels Bohr et Robert Oppenheimer. Son influence dans ce domaine de la physique qu'il a découvert fut donc particulièrement importante.

SAKHAROV



Andreï Dmitrievitch Sakharov, né le 21 mai 1921 et mort le 14 décembre 1989, est un physicien nucléaire soviétique d'origine russe, militant pour les droits de l'Homme, les libertés civiles et la réforme de l'Union soviétique. Il a obtenu le prix Nobel de la paix en 1975.

Né à Moscou, il est élevé dans une famille où la physique a déjà pris sa place avec son père Dmitri Ivanovitch Sakharov, auteur de plusieurs ouvrages de vulgarisation.

En 1938, il entre à la faculté de physique de l'université de Moscou, où il obtient son diplôme avec mention dès 1942.

À l'été 1943, il est envoyé au travail comme charpentier à Kovrov. Il y découvre la dure vie des travailleurs et paysans soviétiques en milieu rural.

En septembre 1943, il est envoyé dans une grande usine de munitions du bassin de la Volga, où il travaille comme ingénieur jusqu'en 1945.

Il commence alors son doctorat de physique à l'institut de physique Lebedev. Son professeur était le physicien Igor Tamm, prix Nobel de physique en 1958.

Il termine sa thèse en 1948 et est intégré à un groupe de recherche dont la tâche est de développer les armes nucléaires sous la direction de Tamm.

Le chef des services secrets, Beria, le contraint à délaisser la recherche fondamentale au profit du programme de recherche appliquée, Staline lui ayant confié cet objectif destiné à rattraper le retard sur les Américains : Joseph Staline sait, de la part du président américain Truman, que ces derniers détiennent l'arme suprême depuis la conférence de Potsdam et ont procédé à des tests.

La première bombe A soviétique est testée avec succès en 1949. Elle est conçue par Iouli Khariton. Sakharov confesse dans ses mémoires qu'elle a été conçue avec les moyens du bord, l'Union soviétique ne disposant pas, au sortir de la guerre contre les nazis, de l'infrastructure industrielle engagée par les

américains pour le projet Manhattan. Ces recherches stratégiques sont engagées dans un site militaire secret au périmètre ultra-sécurisé, dans lequel Sakharov va évoluer une vingtaine d'années.

Dès 1950, Sakharov et Tamm sont les initiateurs du travail soviétique sur la réaction thermonucléaire commandée (la réaction thermonucléaire des isotopes d'hydrogène pour la production d'énergie électrique ou pour la production du carburant pour les réacteurs nucléaires). En 1953, ils inventent la bombe à hydrogène soviétique. Jusqu'en 1962, leurs travaux seront utilisés pour la conception et la réalisation des futures armes nucléaires soviétiques.

En 1960, il travaille dans l'équipe d'Igor Kourtchatov à la conception de la tsar Bomba, une bombe H de 57 mégatonnes qui est à ce jour la plus importante bombe ayant explosé, l'équipe l'a conçue à la demande de Nikita Khrouchtchev en quatre mois. Son champignon s'éleva à 64 km d'altitude dans l'atmosphère, au-dessus de l'île de Nouvelle-Zemble située au-delà du cercle polaire arctique, et l'onde de choc produite se propagea trois fois à la surface du globe terrestre.

Il développe également les idées de base et teste le premier générateur magnéto-cumulatif à explosif.

En 1962, Andreï Sakharov prend conscience que le complexe militaro-industriel est devenu un pouvoir autonome en URSS, et s'en inquiète : il en a la preuve lorsque deux instituts de recherche atomiques veulent faire exploser la même bombe, strictement identique sur le plan technique, pour des raisons liées à la concurrence interne (et non pas à l'émulation) et l'attribution des crédits de fonctionnement ; Sakharov a eu de plus connaissance du discours de fin de mandat du président Eisenhower, prononcé un an auparavant, et avertissant des dangers que peut représenter le complexe militaro-industriel, émergent dans l'histoire des États-Unis.

Cette prise de conscience est considérée comme l'amorce de la posture critique et humaniste de Sakharov en Union soviétique.

C'est également à cette époque qu'il crée un « comité pour la défense des droits de l'Homme et la défense des victimes politiques », avec Valery Chalidzé et Andreï Tverdokhlebov, et plus tard avec Igor Chafarevitch et Podyapolski. Il épouse alors, en 1972, l'activiste pour la défense des droits de l'Homme, Elena Bonner.

En 1974, il accorde une interview à un journaliste canadien. Il est convoqué peu après au tribunal, où un procureur le sermonne sur ses agissements et l'avertit des conséquences de ses prises de position vis-à-vis de l'étranger compte tenu du contexte international. En guise de réponse, Andreï Sakharov organise à Moscou une conférence de presse en invitant les correspondants étrangers et prononce une phrase inédite : il entend avertir le monde des dangers que peut représenter pour lui une « URSS surmilitarisée entre les mains d'une bureaucratie officielle d'État », forme que semble prendre le régime à ce moment.

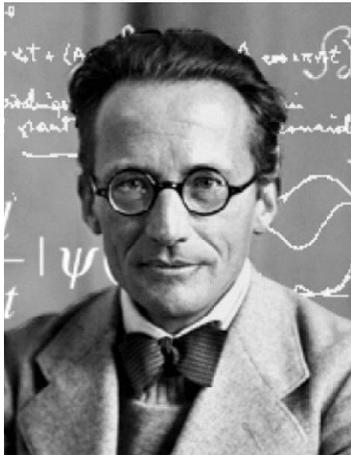
Ses efforts lui valent le prix Nobel de la paix en 1975. Les autorités lui ayant interdit de quitter le pays pour aller chercher son prix, en lui refusant son visa, c'est son épouse qui lit son discours de cérémonie du prix Nobel, où il évoque l'intelligence extraterrestre. Par deux fois dans sa prise de parole excusant l'absence de son mari lors de la remise du prix, elle évoque « *l'étrangeté* » des autorités de son pays, privant ses concitoyens de la liberté de traverser les frontières.

Son engagement en faveur des accusés pour opinions politiques devient gênant pour les apparatchiks. Le jour même où Elena Bonner reçoit le prix Nobel pour son mari à Oslo, ce dernier est à Vilnius pour assister dans ses droits Léonide Pliouchtch, mathématicien et biologiste jugé lors d'un procès qui serait resté à huis clos sans sa présence. Une fois Sakharov arrivé au tribunal, on apprend que la séance est ajournée parce que le juge est malade.

Réhabilité par Mikhaïl Gorbatchev, il est élu en 1988 au præsidium de l'Académie des sciences. En mars 1989, il est élu à la nouvelle Chambre de l'Union soviétique, le congrès des députés du peuple. Une scène extraordinaire a alors lieu au parlement soviétique, peu avant la disparition de Sakharov, qui semble faire trembler le promoteur de la glasnost qu'est Mikhaïl Gorbatchev : il réclame l'abrogation de l'article 6 de la constitution de l'URSS, sur la base duquel est instauré le régime de parti unique. Gorbatchev répond que cela n'est pas envisageable et qu'il ne saurait pas lui-même comment on peut faire cela. S'ensuit un échange où le maître du Kremlin, effaré, tente d'éteindre la polémique, les sessions du parlement étant retransmises à la télévision nationale.

Peu de temps avant sa mort, Andreï Sakharov fonde l'association Mémorial, luttant pour la reconnaissance des camps de travail forcé ou Goulag en Russie et à l'étranger.

SCHRÖDINGER



Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (12 août 1887 – 4 janvier 1961) est un physicien, philosophe et théoricien scientifique autrichien.

En imaginant l'équation d'évolution de la fonction d'onde associée à l'état d'une particule, il a permis le développement du formalisme théorique de la mécanique quantique. Cette équation d'onde, qui tient compte à la fois de la quantification et de l'énergie non relativiste, a été appelée par la suite équation de Schrödinger (pour laquelle il a reçu, en commun avec Paul Dirac, le prix Nobel de physique de 1933).

Il est également connu pour avoir soumis l'étonnante expérience de pensée, nommée plus tard expérience du *Chat de Schrödinger*, à la suite d'une importante correspondance avec Albert Einstein en 1935.

Né en 1887 à Vienne, Schrödinger obtient son doctorat en physique théorique à l'université de Vienne en 1910. Officier d'artillerie pendant la guerre, il est nommé professeur à Breslau en 1921.

En 1926, Schrödinger publie six articles fondateurs de la mécanique ondulatoire, dont un article dans les *Annales de Physique* sur la quantification comme problème des valeurs propres, ce qui devient l'équation de Schrödinger.

En 1927, il rejoint Max Planck à Berlin. En 1933, Schrödinger décide de quitter l'Allemagne, réprouvant le nazisme et l'antisémitisme. Il entre alors à l'université d'Oxford et reçoit le prix Nobel (en commun avec Paul Dirac). Il n'y reste pas longtemps, sa vie privée, peu conventionnelle, étant critiquée : Schrödinger vit alors avec deux femmes : sa femme officielle, Annemarie, et Hilde March, la femme de son collègue Arthur March (il aura un enfant de chacune). En 1934, Schrödinger donne alors des conférences à l'université de Princeton où on lui propose un poste permanent qu'il décline, sa volonté de fonder un foyer avec deux femmes posant sans doute problème. Il espère intégrer l'université d'Édimbourg mais son visa expire ; il retourne en Autriche, à l'université de Graz, en 1936.

En 1935, Schrödinger imagine le paradoxe du chat, qui met en évidence la fracture existant entre le *monde quantique* où un objet peut se trouver dans plusieurs états à la fois et le *monde macroscopique* déterministe.

En 1938, après l'annexion de l'Autriche, Schrödinger rencontre des problèmes en raison de son départ d'Allemagne en 1933 et de son opposition déclarée au nazisme. Il s'enfuit pour l'Italie d'où il rejoint Oxford puis Gand.

En 1940, il reçoit une invitation pour aider à établir un institut d'études avancées à Dublin, en Irlande. Il devient directeur de l'école de physique théorique où il reste en poste pendant 17 ans et se voit attribuer la nationalité irlandaise. Il publie quelque 50 nouveaux articles sur des sujets variés, dont son exploration de la théorie unifiée des champs. Il est élu membre étranger de la *Royal Society* le 12 mai 1949.

En 1944, il écrit *Qu'est-ce que la vie ?* qui contient une discussion sur la négentropie et le concept de molécule complexe avec le code génétique des organismes vivants. Selon les mémoires de James D. Watson, ce livre de Schrödinger a donné à Watson l'inspiration pour rechercher le gène, ce qui a conduit à la découverte de la structure en double hélice de l'ADN.

SMOLIN

Lee Smolin, né le 6 juin 1955, est un théoricien de la physique, écrivain et professeur américain. Il est un des principaux réalisateurs de la gravitation quantique à boucles (*loop quantum gravity*), une des principales approches d'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique, les deux grandes théories du XX^e siècle. Il est actuellement chercheur à l'Institut Perimeter (Waterloo, Ontario, Canada), institut consacré à la physique théorique. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages scientifiques, dont *The Life of The Cosmos* (qui traite de sa théorie sur les univers féconds) et *Three Roads to Quantum Gravity* (un ouvrage présentant les trois principales approches de la gravitation quantique, dont la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes) ainsi que d'un ouvrage où il développe ses vues sur la physique d'aujourd'hui *The trouble with Physics - The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What comes next*, traduit en français sous le titre *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes*.

Il a travaillé dans différents instituts et universités, en collaboration avec plusieurs physiciens, mais ses principaux emplois furent au *Pennsylvania State University* et à *Perimeter Institute for Theoretical*

Physics. Ses principaux travaux se concentrent sur la gravitation quantique à boucles, bien qu'il contribue aussi à l'avancement de la théorie des cordes, et sur les univers féconds (ou « sélection naturelle cosmologique »).



« La gravitation quantique à boucles décrit l'espace comme un réseau dynamique de relations » : *grosso modo*, l'espace-temps ne serait pas continu et uniforme, mais granulaire et discontinu. Il existerait un espace et un temps indivisibles. Cette théorie élégante et simple à se représenter a fait ses preuves sur plusieurs points de vue, comme l'explication des aires et des volumes en géométrie, mais laisse à désirer encore sur la dynamique.

Dans son livre *The Life of the Cosmos*, Smolin propose d'appliquer la sélection naturelle à la cosmologie, de sorte que l'Univers que nous connaissons serait le résultat de l'évolution par mutation d'univers plus anciens. C'est la théorie des univers féconds : Smolin avance qu'un univers pourrait en engendrer un autre lors de la formation d'un trou noir. Les constantes fondamentales de la physique, comme la célérité de la lumière dans le vide, seraient différentes d'un univers à l'autre. De telles variations pourraient entraîner une variation de la probabilité de formation des trous noirs dans un univers donné, c'est-à-dire sa fécondité. Pour Smolin, les univers les plus féconds, c'est-à-dire susceptibles de produire le plus de "bébé-univers", sont les univers riches en carbone et en oxygène, soit les univers qui sont également susceptibles d'abriter la vie telle que nous la connaissons. Une telle théorie est une réponse au principe anthropique fort.

Certaines critiques mettent en avant le fait que cette théorie n'est pas scientifique car elle ne peut être testée (aucune observation ou expérience ne pourrait la corroborer ni l'infirmer). Smolin réplique que l'étude des trous noirs de notre Univers pourrait conduire à réfuter sa théorie, qui fait un certain nombre de prédictions.

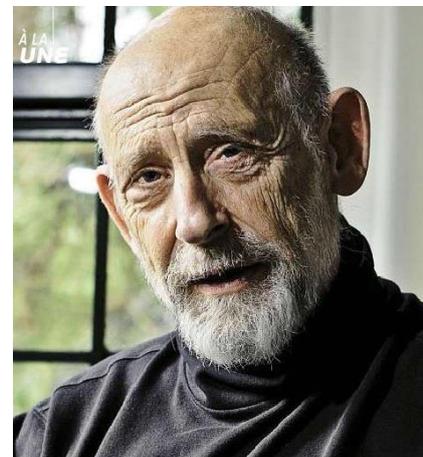
SUSSKIND

Leonard Susskind, né le 1^{er} janvier 1940, est un physicien américain qui occupe la chaire Felix Bloch de physique théorique à l'université Stanford et qui est directeur du *Stanford Institute for Theoretical Physics*. Ses domaines de recherche incluent la théorie des cordes, la théorie quantique des champs, la mécanique quantique statistique et la cosmologie quantique.

Il est membre de la National Academy of Sciences, de l'American Academy of Arts and Sciences, est membre associé du Perimeter Institute for Theoretical Physics de la Faculté du Canada et professeur distingué de la Korea Institute for Advanced Study.

Susskind est considéré comme l'un des pères de la théorie des cordes, ayant, avec Yoïchiro Nambu et Holger Bech Nielsen, présenté l'idée que les particules pouvaient être la manifestation des différents états d'excitation d'une corde relativiste. Il est le premier à avoir introduit l'idée de « paysage » dans la théorie des cordes, en 2003.

En 1998, il a reçu le prix Sakurai.



VENEZIANO

Gabriele Veneziano, né le 7 septembre 1942, est un physicien italien, considéré comme le père de la théorie des cordes.

Alors qu'il travaillait en 1968 à l'institut Weizmann à Rehovoth, en Israël, Veneziano découvrit que la fonction bêta (une fonction eulérienne) utilisée comme amplitude de dispersion, désormais appelée amplitude de Veneziano, possède de nombreuses propriétés pour expliquer les propriétés physiques de l'interaction forte entre les particules.

Le travail de Veneziano mena à d'intenses recherches pour tenter d'expliquer l'interaction forte au moyen d'une théorie des champs de cordes de longueur d'environ un femtomètre. L'avènement de la



chromodynamique, une explication concurrente de l'interaction forte, mena à un abandon temporaire de la théorie des cordes. L'intérêt pour cette théorie ressurgit dans les années 1980.

Depuis 1976 Gabriele Veneziano a été membre permanent du département de physique théorique du CERN à Genève dont il a été directeur (1994-2007). Membre de l'Accademia dei Lincei, membre de l'Accademia delle Scienze et associé étranger de l'Académie des sciences, il a obtenu plusieurs prix, dont le prix Pomeranchuk, le prix Dannie Heineman pour la physique mathématique de l'American Physical Society, et le prix Enrico Fermi de la Société italienne de physique. Il est aussi le lauréat 2006 de la médaille Albert Einstein, en 2007 de la médaille Oskar Klein remise après avoir délivré à Stockholm la conférence annuelle *In memoriam* et en 2009 du prix Pietro Felice Chiesi et Caterina Tomassoni et de la médaille Schola Physica Romana. Il est actuellement professeur au collège de France où il a donné sa leçon inaugurale en 2005.

VON NEUMANN



John von Neumann, né Neumann János Lajos le 28 décembre 1903 et mort le 8 février 1957, est un mathématicien et physicien américano-hongrois. Il a apporté d'importantes contributions tant en mécanique quantique qu'en analyse fonctionnelle, en théorie des ensembles, en informatique, en sciences économiques ainsi que dans beaucoup d'autres domaines des mathématiques et de la physique. Il a de plus participé aux programmes militaires américains.

En 1900, David Hilbert présente sa liste des 23 problèmes dont le sixième porte sur l'axiomatisation de la physique. Dans les années 1930, la mécanique quantique est peu acceptée par les physiciens, pour des raisons tout autant philosophiques que techniques. D'un côté, le non-déterminisme quantique n'a pas été réduit en dépit des efforts d'Albert Einstein, d'un autre côté, la théorie est sous-tendue par deux formalisations concurrentes et équivalentes avec, la formalisation matricielle de Werner Heisenberg et l'approche par les équations différentielles ondulatoires d'Erwin Schrödinger. Il manque une formulation

mathématique unique, unificatrice et satisfaisante de la théorie.

Von Neumann, en 1926, s'attaque avec succès à l'axiomatisation de la mécanique quantique. Cette formulation mathématique réconcilie Heisenberg et Schrödinger et von Neumann publie en 1932 son classique *Fondements mathématiques de la mécanique quantique*. Si cette axiomatisation plaît énormément aux mathématiciens pour son élégance, les physiciens lui préfèrent celle de Paul Dirac, publiée en 1930.

Il a également apporté d'importantes contributions aux mathématiques fondamentales et à l'économie scientifique.

WEINBERG

Steven Weinberg, né le 3 mai 1933, est un physicien américain. Il est le principal instigateur, avec Abdus Salam et Sheldon Glashow, de la théorie de l'interaction électrofaible, ce qui lui a valu de partager le prix Nobel de physique de 1979. En 2010, il occupe la chaire d'enseignement Josey-Welch du département de physique de l'université du Texas à Austin.

La contribution la plus remarquable de Weinberg est la théorie de l'interaction électrofaible. Cette théorie émet le postulat que l'électromagnétisme et l'interaction faible sont, sous certaines conditions, une seule et même interaction. Weinberg et Salam ont établi séparément les



bases de cette théorie. Glashow la généralise ensuite à toutes les familles de particules.

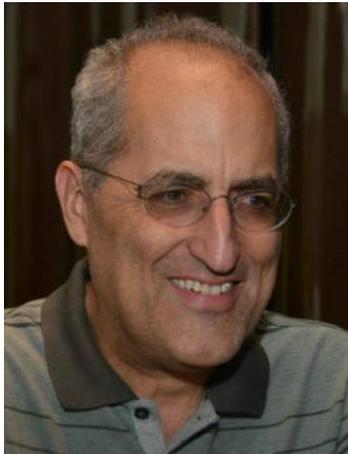
Weinberg a travaillé sur de nombreux sujets, notamment ce qui concerne les théories d'unification (dont la théorie des supercordes), l'astrophysique et la chromodynamique quantique.

Steven Weinberg est aussi connu pour son attrait pour la promotion de la science. Il a été un des scientifiques à plaider pour le Superconducting Super Collider devant le congrès des États-Unis.

WILSON

Robert Woodrow Wilson (né le 10 janvier 1936 à Houston) est un physicien américain. Lui et Arno Allan Penzias sont colauréats d'une moitié du prix Nobel de physique de 1978 (l'autre moitié a été remise à Piotr Kapitsa) « pour leur découverte du fond diffus cosmologique ». Voir l'entrée Penzias.

WITTEN



Edward Witten, né le 26 juillet 1951, est un physicien mathématicien américain, professeur de physique mathématique à l'*Institute for Advanced Study* de Princeton. En 1987, il était considéré comme l'un des plus éminents physiciens vivants.

Il effectue des recherches sur la théorie des supercordes. Il en est considéré comme l'un de ses plus importants participants, notamment grâce à l'élaboration de la théorie M, première théorie des cordes ouvrant un horizon mathématique non perturbatif.

Il est élu associé étranger à l'Académie des sciences en 2000.

Les nombreux travaux d'Edward Witten dans le domaine de la physique théorique ont aussi eu un certain nombre de conséquences mathématiques. Il a été essentiellement actif dans la théorie quantique des champs et celle des cordes, et dans les domaines connexes de la topologie et de la géométrie. Ses nombreuses contributions comportent une preuve simplifiée du théorème de l'énergie positive impliquant des spineurs dans la relativité générale, une étude portant sur la supersymétrie et la théorie de Morse, une introduction de la théorie topologique quantique des champs et des travaux sur la symétrie miroir et les théories supersymétriques de jauge, ainsi qu'une conjecture sur l'existence d'une théorie M.

Witten a été le premier physicien à gagner la médaille Fields (1990). À propos de Witten, Michael Atiyah a déclaré : « Bien qu'il soit avant tout un physicien, sa maîtrise des mathématiques surpasse de loin celle de la plupart des mathématiciens. Il a chaque fois surpris la communauté mathématique par la brillante application de sa perspicacité physique et a ainsi mené à de nouveaux et profonds théorèmes mathématiques... Il a eu un profond impact sur les mathématiques contemporaines. Entre ses mains la physique constitue à nouveau une riche source d'inspiration et de compréhension des mathématiques. »

Witten a été le premier physicien à gagner la médaille Fields (1990). À propos de Witten, Michael Atiyah a déclaré : « Bien qu'il soit avant tout un physicien, sa maîtrise des mathématiques surpasse de loin celle de la plupart des mathématiciens. Il a chaque fois surpris la communauté mathématique par la brillante application de sa perspicacité physique et a ainsi mené à de nouveaux et profonds théorèmes mathématiques... Il a eu un profond impact sur les mathématiques contemporaines. Entre ses mains la physique constitue à nouveau une riche source d'inspiration et de compréhension des mathématiques. »

ZWICKY



Fritz Zwicky est un astrophysicien américano-suisse né le 14 février 1898 et mort le 8 février 1974. Il est connu pour ses idées tantôt géniales, tantôt farfelues, mais aussi comme le plus grand découvreur de supernovæ. Brillant astrophysicien, il était admiré par certains pour ses idées, mais détesté par d'autres pour son caractère épouvantable, notamment par ses étudiants qu'il terrorisait. Il laissait peu d'astrophysiciens indifférents. Il est récompensé en 1972 par la médaille d'or de la Royal Astronomical Society. L'astéroïde (1803) Zwicky a été nommé en son honneur en 1967 par Paul Wild.

Après ses études, Zwicky s'intéresse rapidement à l'astronomie, notamment aux novæ.

En 1936, Zwicky travaille au Mont Palomar avec un télescope photographique à champ large d'un type très spécial. Il découvre plusieurs supernovæ qui seront analysées par Walter Baade, du Mont Wilson. C'est lui qui introduit avec l'astronome allemand Walter Baade le terme de *supernovæ* et suggère que celles-ci peuvent créer des étoiles à neutrons (dont il prédit l'existence) et émettre des rayons cosmiques. Pour étayer son hypothèse, il se met à chasser les supernovæ, et en découvre un total de 120 sur une période de 52 ans, un record qui a tenu 36 ans.

En 1933, il est le premier à suggérer la présence d'une matière invisible entre les galaxies, à la suite de ses observations à l'observatoire du Mont Wilson de sept d'entre elles dans l'amas de Coma, mais il ne convaincra guère ses confrères de l'importance de sa découverte, qui sera oubliée pendant près de quarante ans. L'existence de la matière noire sera à nouveau proposée en 1970 par Vera Rubin et Kent Ford à partir d'observations plus solides.

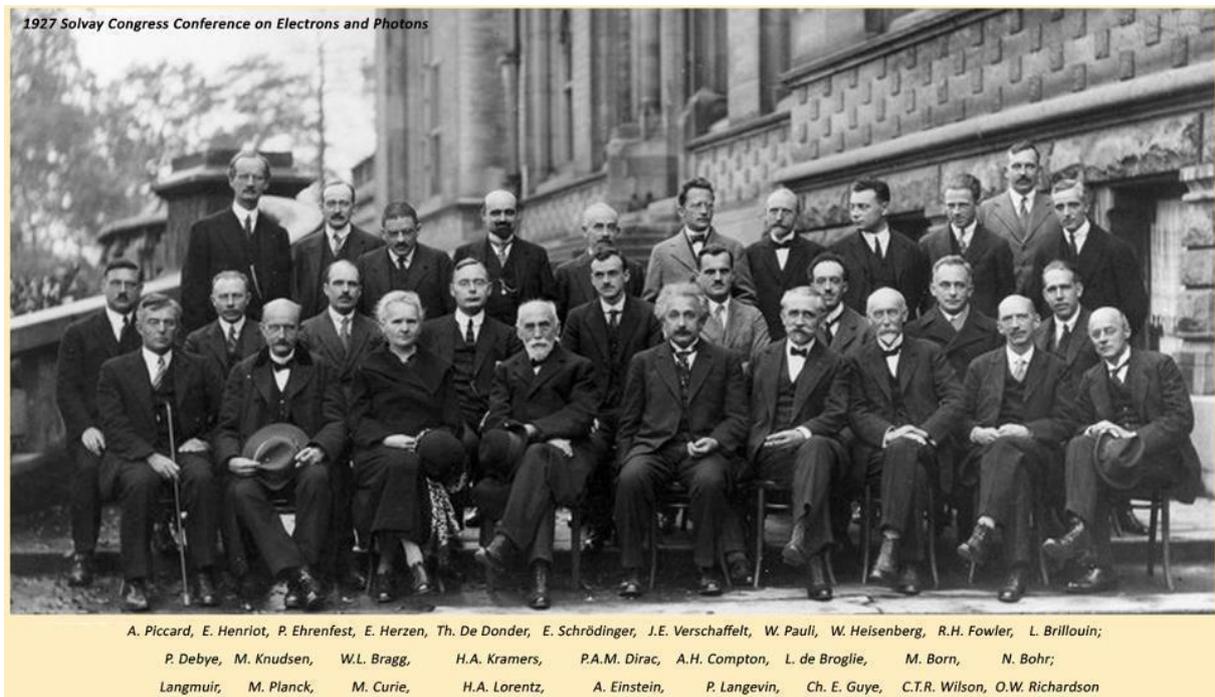


TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	3
LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ	5
LA RELATIVITÉ RESTREINTE	7
LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE	16
NOTRE MODÈLE COSMOLOGIQUE, DONNÉES OBSERVATIONNELLES EN FAVEUR DU BIG BANG	23
CONCLUSION GÉNÉRALE	31
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	33
HISTOIRE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	33
PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE	35
PETITE BIBLIOGRAPHIE	40
BIOGRAPHIES	43

