

# *De la nature du vide: de Galilée à l'énergie noire*

irfu



saclay

Jean Zinn-Justin

Université Paris-Saclay, CEA/IRFU  
([irfu.cea.fr](http://irfu.cea.fr))  
Centre de Saclay  
91191 Gif-sur-Yvette

et

上海大学

# Notion et existence du vide

irfu



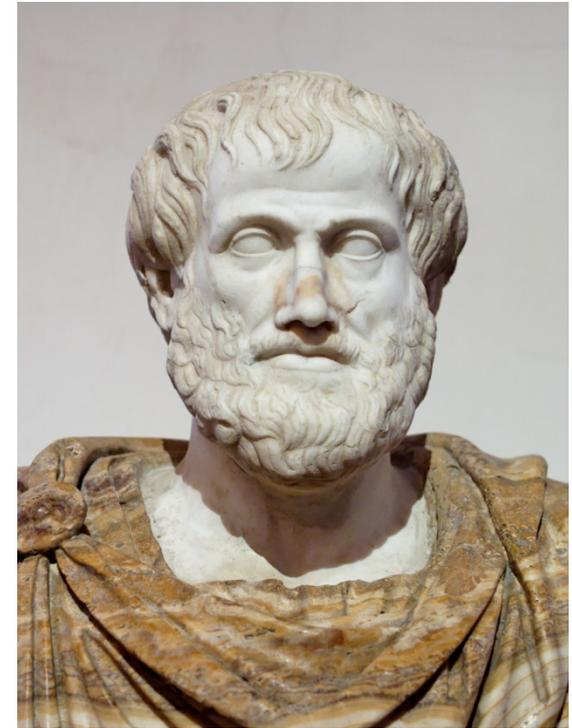
saclay

Nous avons tous une notion intuitive du vide au sens d'absence d'objets matériels visibles: une pièce est vide. Cependant nous savons que **tout espace vide est encore rempli d'air**, un des quatre éléments avec la terre, le feu et l'eau de la civilisation grecque. En fait, la notion de vide dépend de l'état de nos connaissances: **le vide est l'absence de ce que nous savons pouvoir exister.**

On attribue à Aristote (384 BC - 322 BC), sans doute à tort, l'expression **la nature a horreur du vide** (*horror vacui* en latin).

Mais il a affirmé **la notion de vide est vide.**

Aux quatre éléments classiques, il a prudemment proposé d'en rajouter un cinquième, **l'éther ou quintessence**, la substance des choses immuables comme le ciel et les astres.



# La nature a horreur du vide

irfu

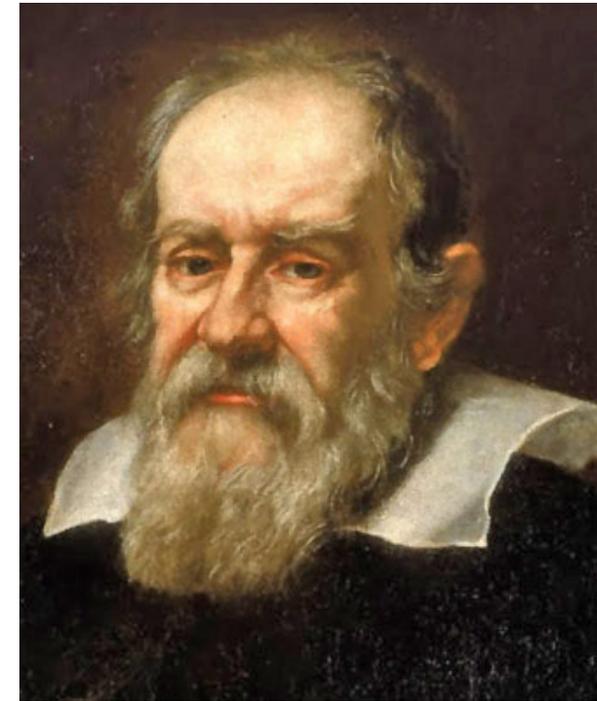


saclay

Cette affirmation, parce qu'Aristote l'aurait énoncé et parce qu'elle semblait correspondre à une réalité empirique, a ensuite été considérée comme une **vérité absolue** au Moyen Âge et même jusqu'à la Renaissance.

Galilée (1564-1642), un des premiers à l'époque moderne, imagine l'existence du vide dans son étude de la chute des corps.

Dans son ouvrage *Discorsi* (1638), le personnage Salviati, considéré généralement comme le porte parole de Galilée, **affirme que tous les corps tomberaient à la même vitesse dans le vide.**



**La nature a horreur du vide; alors, elle le remplit avec n'importe quoi.**  
(Thomas de Koninck)

# La nature a horreur du vide

Descartes (1596-1650) rejette lui la théorie du vide, car il n'est pas possible que ce qui n'est rien ait de l'extension (1644).

Ainsi, selon Descartes, si un vase est vide d'eau, il est plein d'air, et s'il était vide de toute substance, ses parois se toucheraient.

Descartes est donc amené à rejeter les théories de Galilée sur la chute des corps dans le vide, et écrit de ce dernier : Tout ce qu'il dit de la vitesse des corps qui descendent dans le vide, etc... est bâti sans fondement; car il aurait dû auparavant déterminer ce que c'est que la pesanteur; et s'il en savait la vérité, il saurait qu'elle est nulle dans le vide.

Excluant en effet toute action à distance, Descartes explique la pesanteur et donc le mouvement des planètes, par l'action de tourbillons d'éther agissant sur les corps pesants.



# La nature a-t-elle vraiment horreur du vide ? Ou vers une première mort de l'éther

irfu



saclay

À Florence, en voulant construire une fontaine de 12m de haut, on découvrit qu'une pompe aspirante ne pouvait pas faire monter l'eau à plus de 32 pieds (environ 10m30).

Torricelli (1608-1647) reproduit l'expérience avec du mercure dans un tube de 1,30 m (vers 1643), trouve une hauteur de 76cm et conclut à l'existence d'un vide dans la partie supérieure (il invente ainsi le baromètre).



Vers cette époque, la notion de **pression atmosphérique** émerge.

Dans une lettre fameuse Torricelli écrit: **nous vivons immergés dans un océan d'air.**

# La nature a-t-elle vraiment horreur du vide ? Ou vers une première mort de l'éther

irfu



saclay

Pascal (1623-1662) joue un rôle expérimental et théorique très important. Il reproduit les expériences de Torricelli. En 1648 il envoie son beau frère mesurer la pression au sommet du Puy de Dôme pour la comparer à celle de Clermont-Ferrand.

Contre les critiques, il **argumente pour l'existence d'un vrai vide** dans le haut du baromètre. Il publie deux ouvrages *Nouvelles expériences touchant le vide* et un *Traité du vide*.

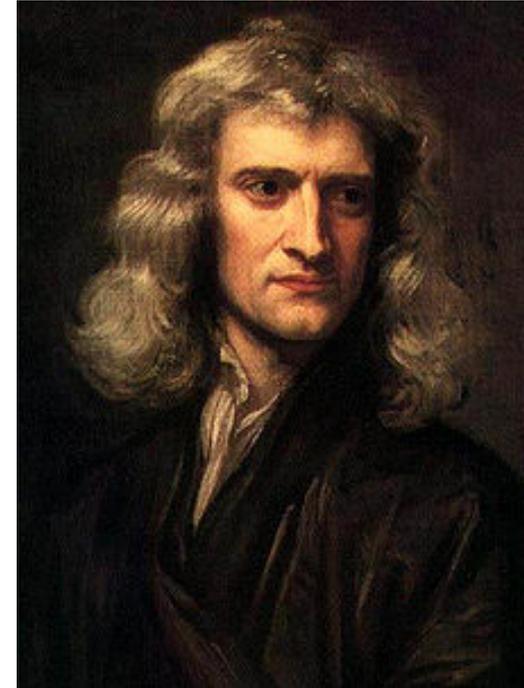


# Première mort de l'éther

L'idée que l'atmosphère a une épaisseur finie au delà de laquelle règne le vide se développe.

Par exemple, Newton (1643-1727) soutient, contre Descartes, l'existence d'un vrai vide matériel entre les planètes: **les planètes ne sont pas freinées dans leur course.**

Cela ne l'empêche, cependant pas, dans son traité d'optique, de supposer aussi l'existence d'un éther différent pour expliquer les phénomènes de réfraction et diffraction, difficilement compréhensibles dans sa **théorie corpusculaire de la lumière.**



# L'électromagnétisme et le retour de l'éther

irfu

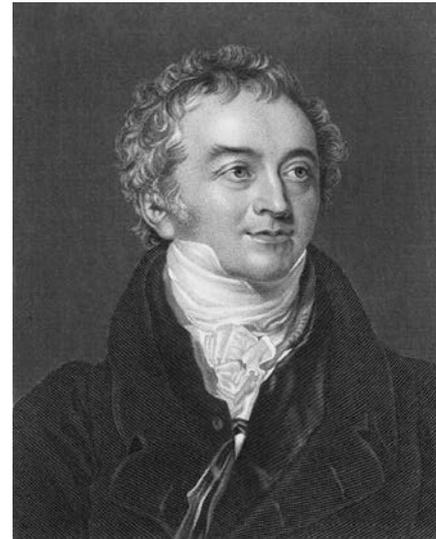


saclay

Au contraire, Huygens (1629-1695) affirme que la lumière est un phénomène ondulatoire (1690) et semble être le premier à avoir introduit la notion **d'éther luminifère**: les ondes doivent correspondre à la vibration d'un milieu (comme les ondes sonores dans l'air).



Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, les travaux de Young (1773-1829) et Fresnel (1788-1827) confirment le caractère ondulatoire de la lumière avec ses deux polarisations transverses.



# L'électromagnétisme et le retour de l'éther

irfu



saclay

Enfin, Maxwell (1831-1879) unifie l'optique et l'électromagnétisme (1864) dans une **théorie ondulatoire**.

Comme toutes les ondes semblent nécessiter un support matériel, la théorie de Maxwell semble conforter l'existence d'un éther lumineux.

Dans la mesure où les équations de Maxwell font intervenir explicitement la vitesse de la lumière, l'éther définit le référentiel dans lequel les équations de Maxwell sont valables.



# Vers la mort de l'éther luminifère

irfu

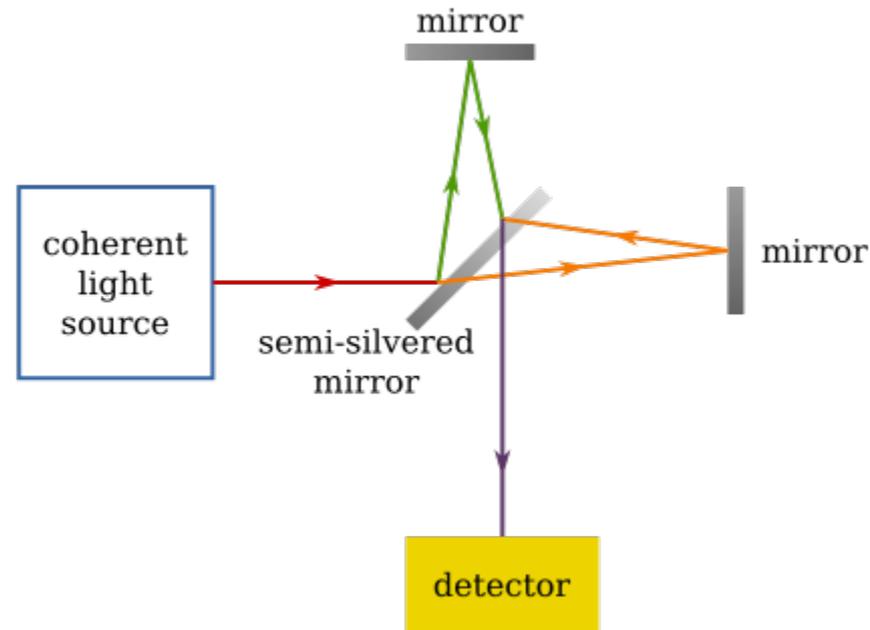


saclay

Cet éther, cependant, a des propriétés paradoxales, devant être **très ténu** pour ne pas freiner les planètes dans leur mouvement (Newton) mais aussi **très rigide** pour être capable de propager des ondes de très haute fréquence.

Avec l'expérience de la mesure de la lumière par interférométrie (1887) de Michelson et Morley, venant après toute une série d'autres expériences dont l'expérience de Fizeau (1851), s'annonce la deuxième mort de l'éther.

Il faut expliquer pourquoi la vitesse de la lumière ne dépend pas du mouvement de la terre par rapport à l'éther.



# Mort de l'éther luminifère et renaissance du vide

irfu



saclay

Dans un premier temps, de nombreux modèles sont proposés où l'éther est entraîné partiellement ou totalement par les objets massifs. À cause de toutes les contraintes expérimentales (comme l'aberration stellaire), ces modèles avec éther deviennent de plus en plus compliqués.

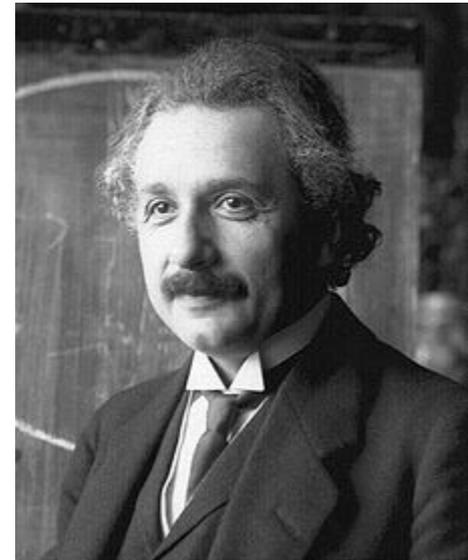
Pour expliquer tous les résultats, Lorentz et Fitzgerald (1895) proposent la contraction des longueurs, puis Lorentz la contraction du temps (1899).

Ces travaux prolongés par Poincaré (1905), conduisent à un éther **essentiellement inobservable** et donc sans contenu physique.

Einstein (1905) avec sa théorie de la

**Relativité Restreinte**

abandonne définitivement la théorie de l'éther .



# Le triomphe du vide

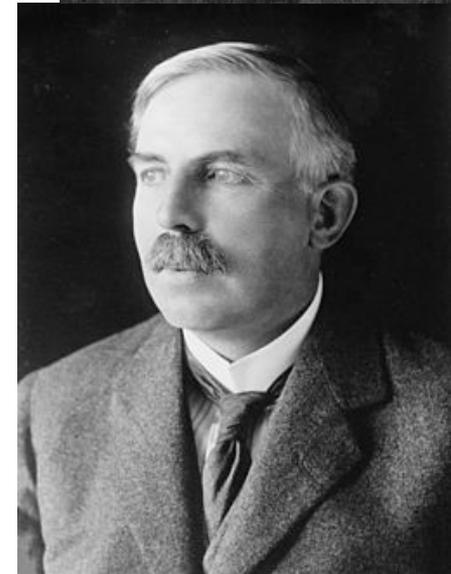
irfu



saclay

Bien sûr, l'Univers même loin de toute galaxie, n'est pas totalement vide, s'y propage des ondes électromagnétiques comme les rayons cosmiques ou le rayonnement fossile à 2.7 K, des neutrinos... mais on peut dès lors par la pensée imaginer une enceinte suffisamment protégée où le vrai vide (un vide de toute particule y compris photons et neutrinos) règne.

D'ailleurs, après la première expérience de J.J.Thompson (1856-1940) sur l'atome (1897), E. Rutherford (1871-1937) déduit de nouvelles expériences que presque toute la masse de l'atome est concentrée dans un noyau (1909) : **les atomes eux-mêmes paraissent être essentiellement vides.**



# Mécanique Quantique et vide

irfu



saclay

Avec la Mécanique Quantique, apparaît la notion d'état, qui caractérise un système physique.

À un état est associée une énergie.

L'état d'énergie minimale (appelé état fondamental) joue un rôle particulier et correspond au vide classique.

Notons qu'en l'absence de gravitation, même dans une théorie relativiste, l'énergie du fondamental n'est pas une observable physique, seules les différences d'énergie sont physiques.



# Théorie quantique des champs et vide

irfu



saclay

À l'échelle microscopique, la physique est décrite par une **forme relativiste de la mécanique quantique**: la **Théorie Quantique des Champs**. C'est une **théorie des champs** (comme les champs électrique ou magnétique) et non une théorie de particules individuelles. À toutes les particules sont associés des champs.

Un champ existe en tout point de l'espace. Il a un nombre infini de degrés de liberté car il est défini par sa valeur en chaque point de l'espace, à la différence d'un ensemble fini de particules non-relativistes qui est défini par les positions correspondantes (et les nombres quantiques internes).

Mais à la **différence d'un champ classique**, un champ quantique **fluctue**. Le vide n'est donc jamais réellement vide.

Ceci permet de comprendre qu'une théorie quantique des champs ait des propriétés peu intuitives.

# Théorie quantique des champs et vide

irfu



saclay

L'état d'énergie la plus basse est le vide quantique.

En effet, dans la théorie relativiste, à cause de la relation

$$E = M c^2$$

rajouter de la matière au vide augmente l'énergie.

L'état d'énergie minimale est donc un état sans particules et donc vide.

La théorie quantique des champs donne au vide quantique des propriétés quelque peu surprenantes.

Ainsi, à haute énergie le nombre de particules n'est en général pas conservé dans des collisions entre particules: la collision ajoute de l'énergie au vide qui se dissipe en produisant des particules.

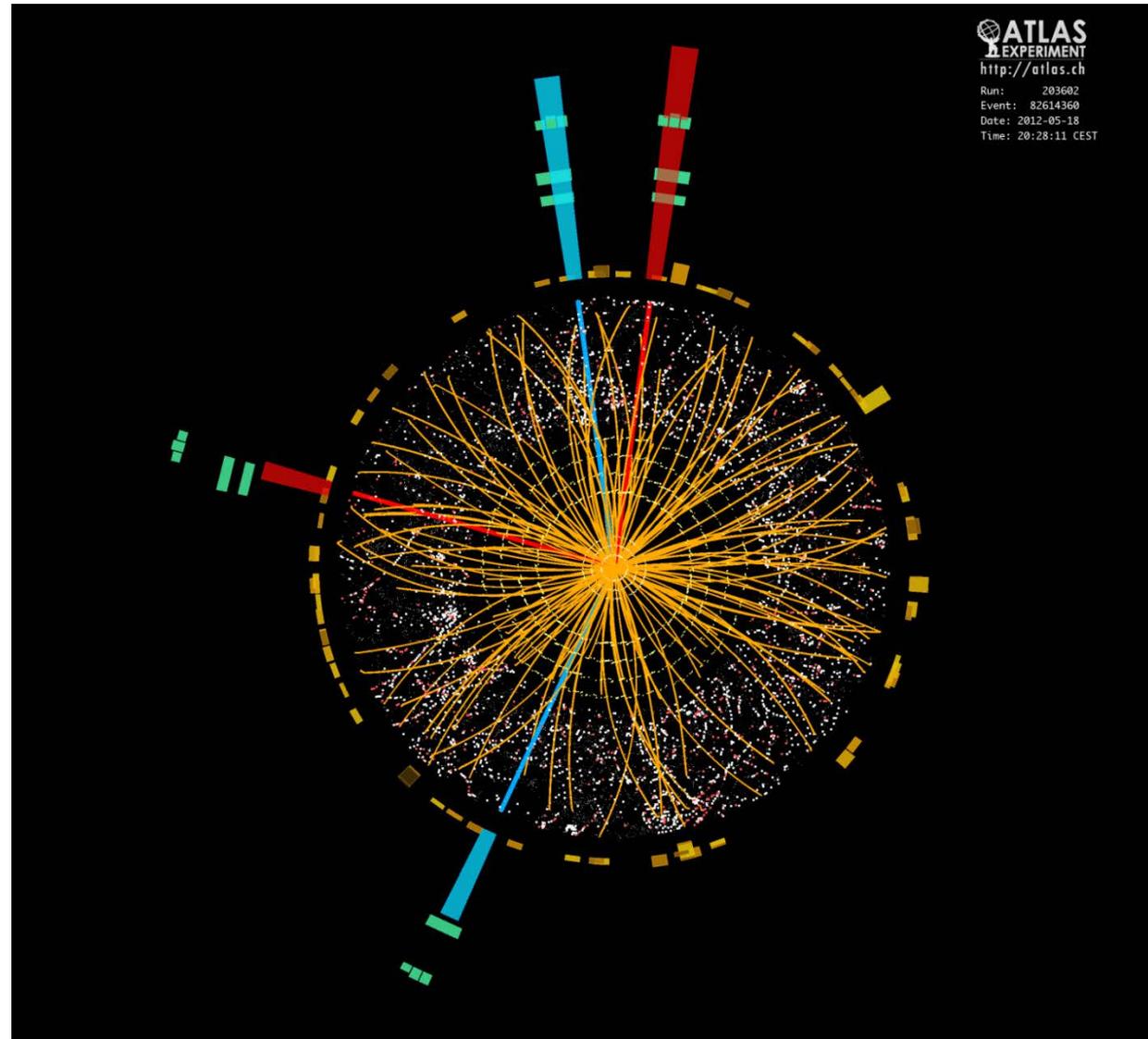
# Théorie quantique des champs et vide

irfu



saclay

Collision proton-proton au Large Hadron Collider (CERN, Genève)  
Création de particules parmi lesquelles une particule candidate à être un **boson de Higgs** se désintégrant en 4  $e^{\pm}$



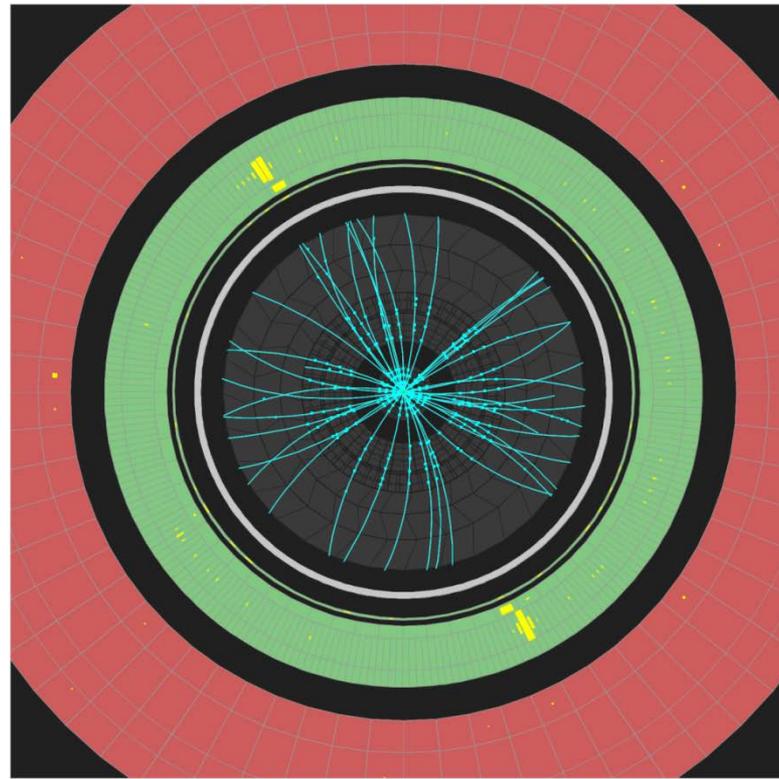
# Théorie quantique des champs et vide

irfu

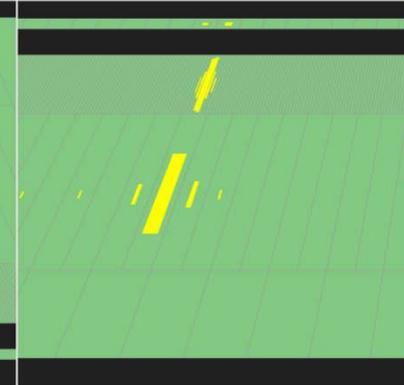
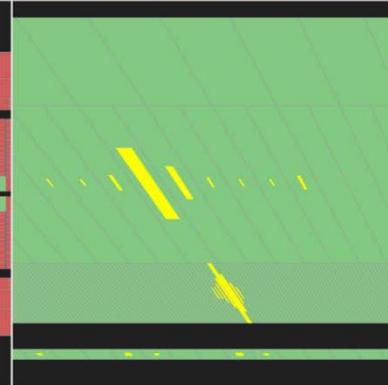
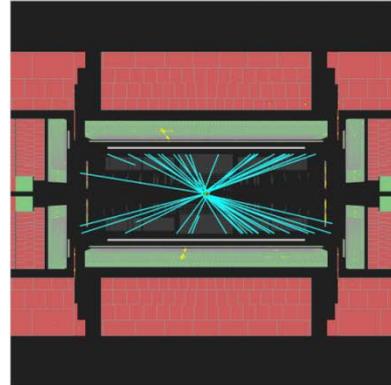


saclay

Collision proton-proton au **L**arge **H**adron **C**ollider (CERN, Genève)  
Création de particules parmi lesquelles une particule candidate à être un **b**oson de **H**iggs se désintégrant en 2 photons



Run Number: 191426, Event Number: 86694500  
Date: 2011-10-22 15:30:29 UTC



# Théorie quantique des champs: Brisure spontanée de symétrie et vide dégénéré

irfu



saclay

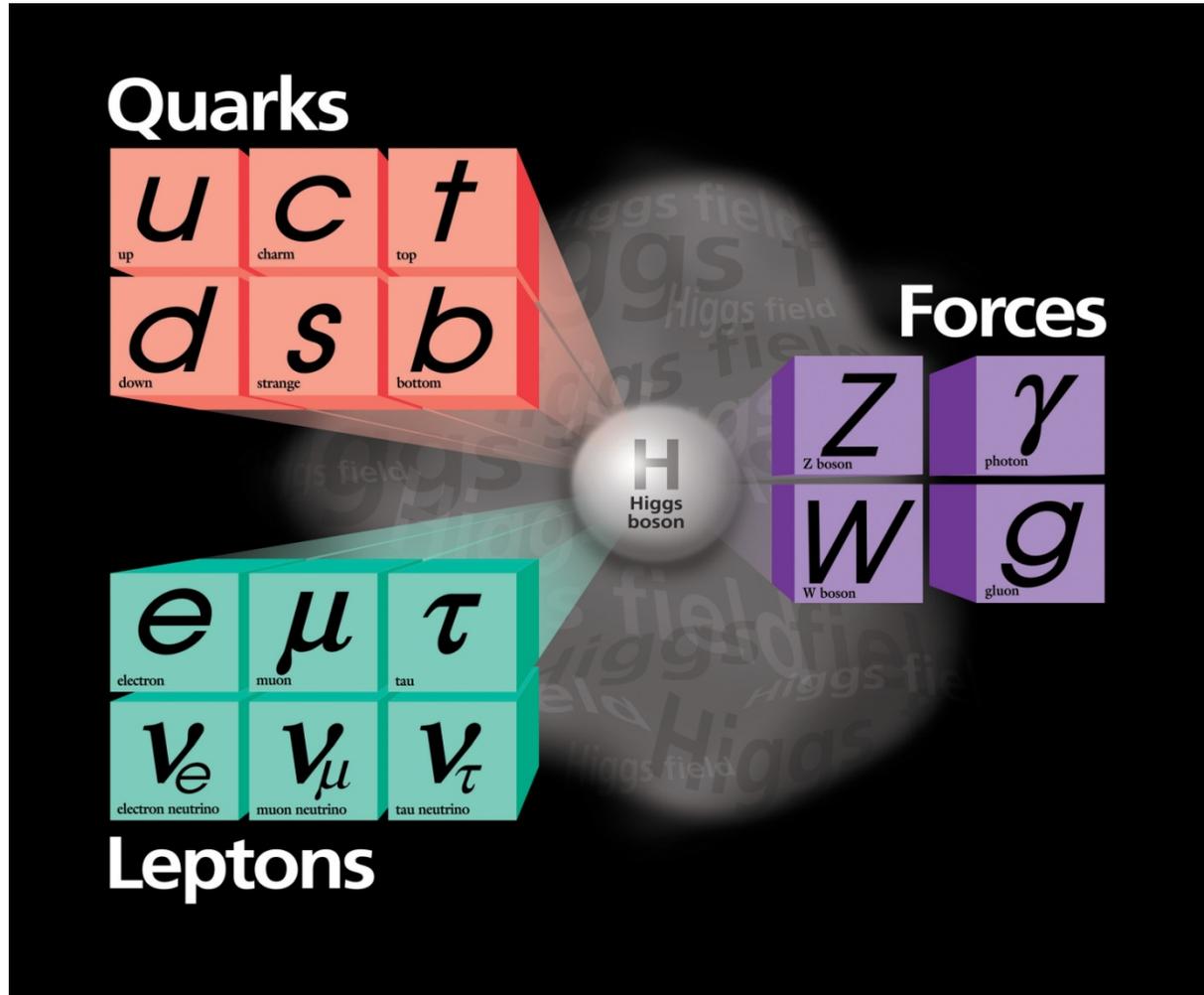
Une des propriétés importantes du Modèle Standard qui décrit la physique à l'échelle microscopique, et qui donne **une masse à toutes les particules fondamentales** : quarks, leptons, bosons vecteurs, est l'existence d'une **brisure spontanée de symétrie**, (de même nature que dans les systèmes ferromagnétiques à basse température) qui est directement liée à une **propriété du vide quantique**: **le vide quantique est dégénéré**. Cette brisure spontanée de symétrie est le résultat d'une transition de phase qui a produit une particule relique: **le boson de Higgs dont la découverte au LHC a été annoncée en juillet 2012**.

# Les particules fondamentales en 2015

irfu



saclay

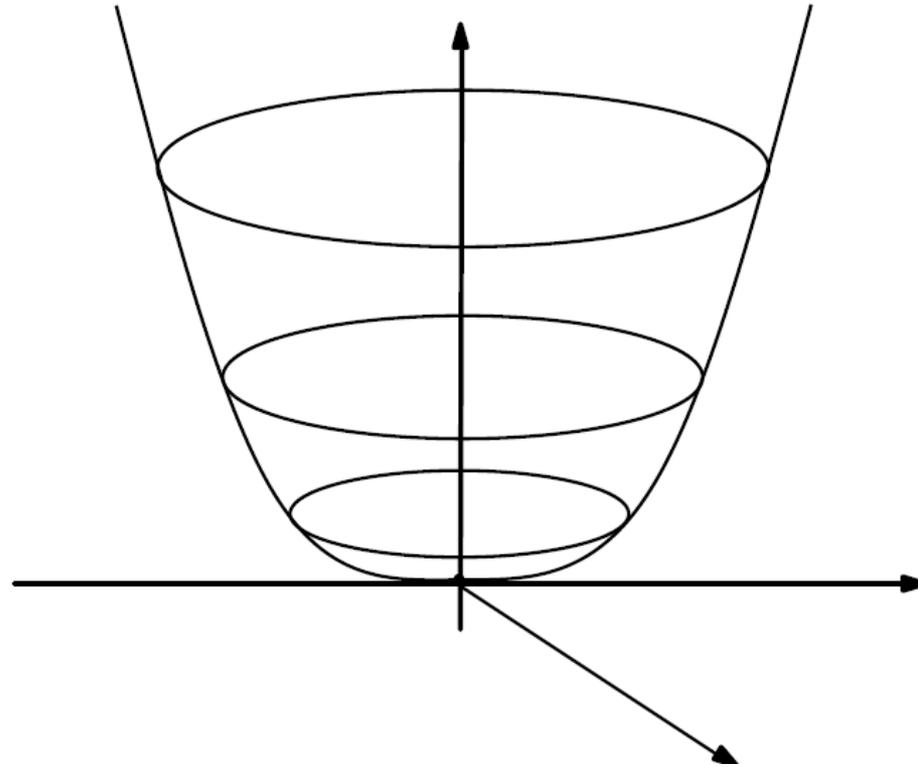


# Transitions de phase: Phase symétrique ( $T > T_c$ ), vide unique

irfu



saclay



Surface d'énergie: limite classique

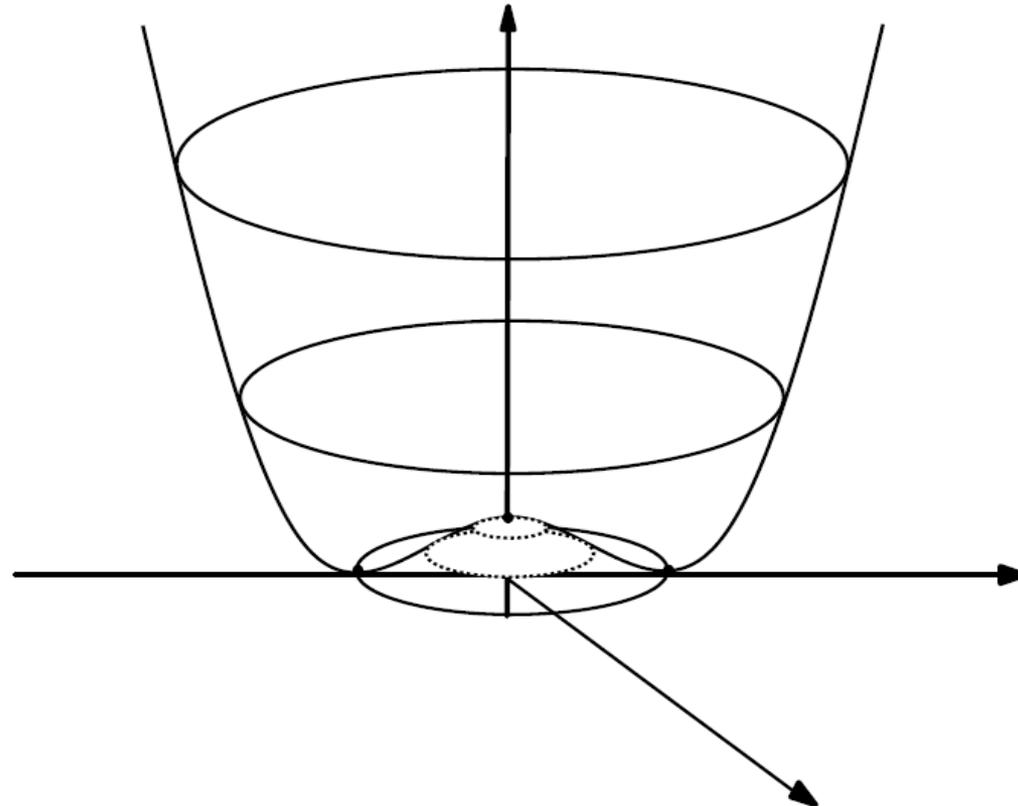
À cause de l'invariance par rotations autour de l'axe vertical, le minimum de la surface d'énergie, quand il est unique, est situé à l'origine.

# Transitions de phase: Brisure spontanée de symétrie, vide dégénéré ( $T < T_c$ )

irfu



saclay



Surface d'énergie: limite classique

À cause de l'invariance par rotations autour de l'axe vertical, la surface d'énergie a un cercle de minima: le vide est dégénéré.

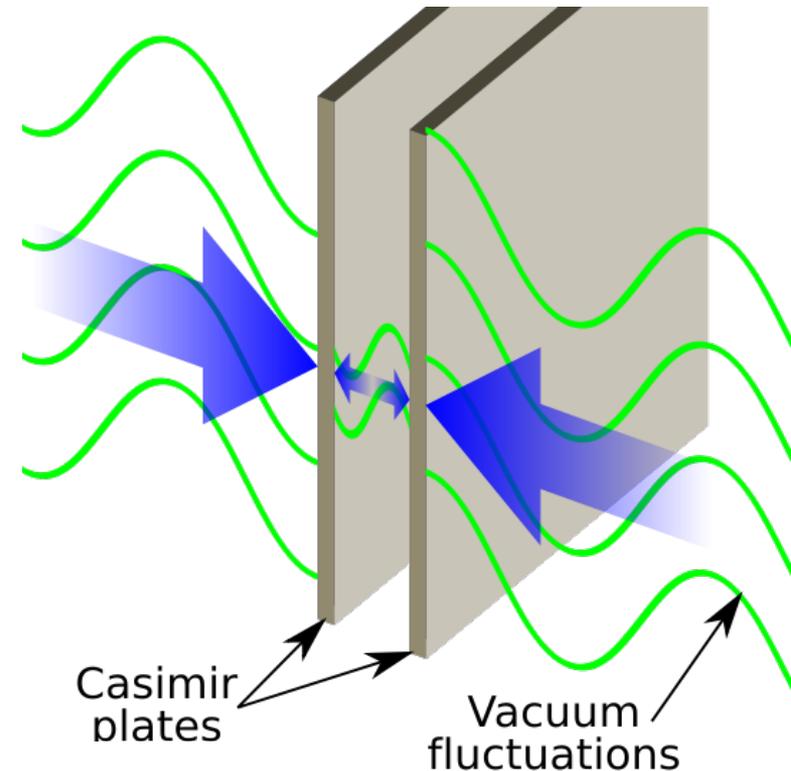
# Quelques étrangetés du vide de la théorie quantique des champs: L'effet Casimir

irfu



saclay

Dans la théorie quantique sans gravitation, l'énergie du vide n'est pas une observable physique, par contre, une variation de l'énergie du vide peut l'être, comme l'a noté Casimir (1948). On considère la théorie quantique du champ électromagnétique libre



$$\mathcal{S}(A) = \int d^4x \sum_{\mu,\nu} F_{\mu\nu}^2(x), \quad F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu,$$

en présence de deux plans infinis parallèles parfait conducteurs.

# L'effet Casimir

irfu



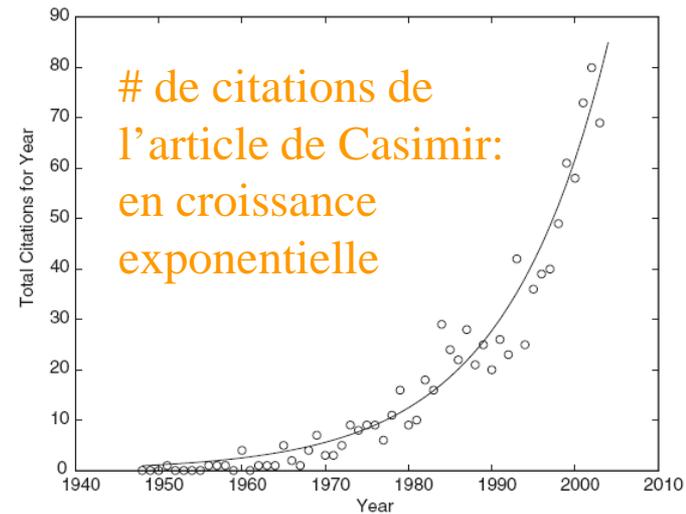
saclay

Un calcul simple permet de montrer que la présence des deux plans modifie l'énergie du vide et engendre une force d'attraction par unité de surface entre les plans. Le calcul donne (à température nulle)

$$\frac{F_{\text{Casimir}}}{A} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 \ell^4},$$

où  $A$  est l'aire de la surface et  $\ell$  la distance entre les plans. L'effet Casimir a été mis en évidence expérimentalement par Sparnay (1958) puis mesuré plus précisément par Lamoreaux (1997). L'accord entre la théorie et l'expérience est actuellement de l'ordre de 1%.

L'article de Casimir totalise plus de 3500 citations.



# Quelques étrangetés du vide de la théorie quantique des champs: Création de paires dans le vide par un champ électrique intense

Schwinger (1951) a été le premier à estimer la probabilité de la création de paires de particules chargées dans le vide par un champ électrique intense constant. On trouve

$$w_F = \frac{\alpha E^2}{\pi^2} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n\pi m^2}{eE}\right),$$

Ce calcul a été généralisé au cas d'un champ électrique oscillant par Brézin et Itzykson (1970). La possibilité de créer des paires électron-positon peut maintenant être envisagée avec les nouvelles générations de laser ultra-intenses.

# Vide et Relativité Générale

irfu

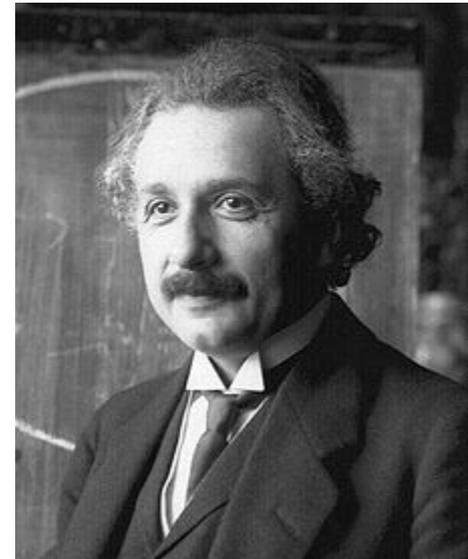


saclay

Avec la théorie de la Relativité Générale d'Einstein, la notion de **vide classique** devient elle aussi très complexe.

En Relativité Générale, la force de gravitation est remplacée par un concept géométrique: les objets massifs courbent l'espace-temps autour d'eux et c'est cette courbure qui explique les mouvements décrits par la théorie de Newton.

Ainsi le vide devient dynamique et sa structure dépend des objets qu'on y rajoute et de leurs mouvements.



# Vide et matière noire

irfu



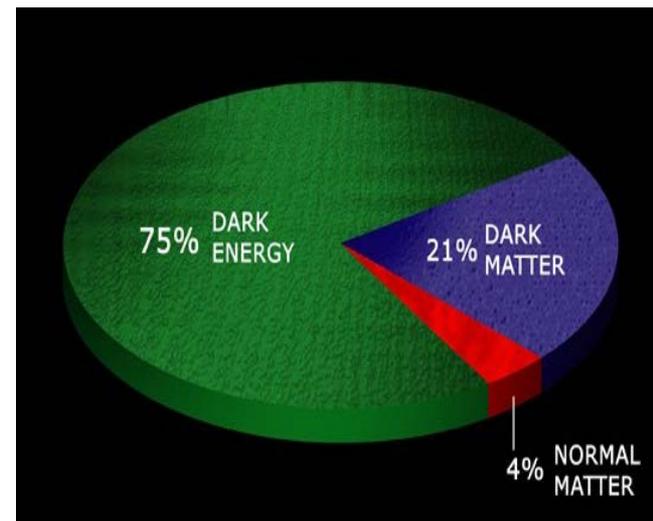
saclay

Nous savons maintenant que les courbes de rotation des étoiles dans les galaxies, le mouvement des galaxies dans les amas, ne peuvent pas être expliqués par la seule matière ordinaire observée.

Si l'on suppose que ces effets sont dues à de la matière de nature inconnue, appelée matière noire car non lumineuse, alors la matière noire représente **plus de 80% de la matière contenue dans l'Univers.**

De nombreuses expériences cherchent à détecter cette matière noire mais pour l'instant sans succès.

Mais certains théoriciens proposent pour expliquer ses phénomènes des **modifications à grande distance de la Relativité Générale**, c'est à dire une modification de la relation entre matière et géométrie.



# Vide et Gravitation Quantique: le mystère de l'Énergie sombre

irfu



saclay

Des observations récentes (distribution des supernovae lointaines, rayonnement fossile, platitude de l'espace) indiquent l'existence d'une énergie sombre **responsable de 74% du contenu en énergie de l'univers**. Elle se traduit par une accélération de l'expansion de l'univers (comme due à une pression interne) à partir d'environ 5 milliards d'années (l'univers a 13,7 milliards d'années), alors que la matière qui dominait l'expansion depuis le Big Bang, conduisait à un ralentissement de l'expansion.

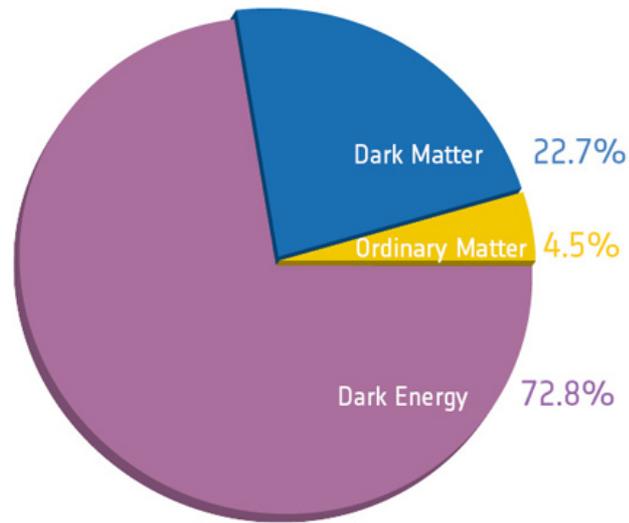
L'univers ne semble donc pas vide même en l'absence de matière, puisqu'il est rempli de façon homogène par cette énergie sombre.

# Vide et Gravitation Quantique: le mystère de l'Energie sombre

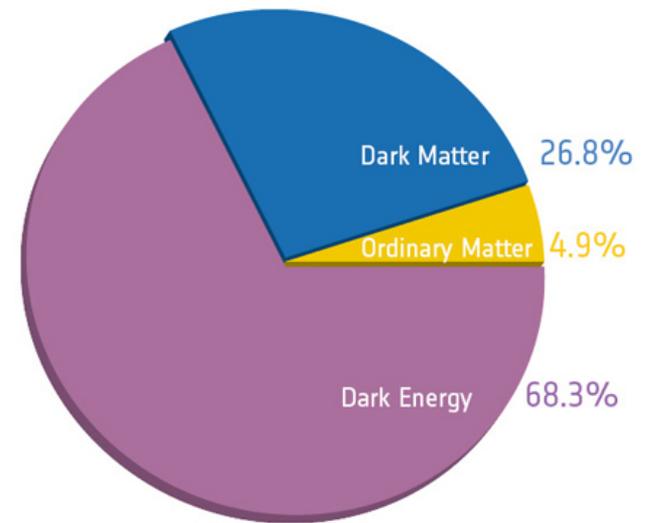
irfu



saclay



Before Planck



After Planck

# Vide et Gravitation Quantique: le mystère de l'Énergie sombre

irfu



saclay

Quand on combine la théorie de la Relativité Générale classique d'Einstein avec la Théorie Quantique des Champs, (la Relativité Générale détermine la géométrie de l'espace-temps dans laquelle les champs se propagent) on découvre que l'énergie du vide devient une observable et engendre l'apparition d'une constante cosmologique.

Or les propriétés actuellement connues de l'énergie sombre sont compatibles avec une constante cosmologique. Toutefois, la valeur mesurée semble alors, suivant des modèles très simples, de 60 (avec SUSY) à 120 ordres de grandeurs plus petite qu'attendue!!!

# Conclusion ?

La nature n'a peut-être pas horreur du vide, mais cependant un vide absolu ne semble pas pouvoir exister. En fait, il est probablement vain de parler du Vide. Opérationnellement, il vaudrait mieux parler du vide classique, du vide quantique... Cependant, il faut prendre soin de ne pas de remplir le vide avec n'importe quoi (pour citer un humoriste), pour résoudre des problèmes qu'on ne comprend pas.

Mes remerciements à Wikipedia pour certains documents anciens