

L'histoire de la réflexion sur l'existence et la nature du vide et sur l'existence d'un éther va servir de fil conducteur à Jean Zinn-Justin pour présenter les problèmes importants de la physique d'hier et d'aujourd'hui. Nous utilisons largement dans la suite les textes de ses transparents.

La question du vide a toujours interrogé. L'univers est-il "plein de vide", ou bien encore est-il rempli d'une matière invisible ? Que devient l'espace, si on lui retire toutes choses ? Au cours des âges, de nombreux philosophes ont essayé de répondre à de telles questions. Et depuis le 17^{ème} siècle, l'étude de nombreux faits expérimentaux, et les théories élaborées pour en rendre compte, ont apporté de nouvelles manières d'aborder le problème ; ces nouvelles approches, curieusement peut être, permettent parfois de réinterpréter les anciennes réponses, sans les effacer totalement.

Après avoir évoqué le point de vue d'Aristote, le conférencier, Jean Zinn-Justin, retrace, étape par étape, du 17^{ème} siècle à nos jours, le chemin mouvementé parcouru. Il termine par l'exposé du point de vue actuel des physiciens sur la nature du Vide, successivement sous deux angles : celui de la physique quantique, avec la théorie quantique des champs et celui de la cosmologie, avec la Relativité générale.

Premières approches, jusqu'au 17^{ème} siècle. Le vide peut-il être ?

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 ; le vide, c'est ce qui reste lorsque l'on a tout enlevé.

Aristote, "horror vacui"

On attribue à Aristote (384 BC –322 BC), sans doute à tort, l'expression " la nature a horreur du vide (horror vacui en latin) ". Il a aussi affirmé que " 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. L'affirmation prêtée à Aristote, la nature a horreur du vide, 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), l'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 ainsi que tous les corps tomberaient à la même vitesse dans le vide.

Descartes, le vide ne peut exister.

Descartes (1596-1650) rejette quant à lui la théorie du vide, car il n'est pas possible que ce qui n'est rien ait de l'extension (1644), autrement dit se transforme en un autre élément : ainsi, selon lui, 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 qu'est la pesanteur ; et s'il en connaissait 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 ? Première mort (17ème siècle) et résurrection de l'Ether (18ème siècle)

Torricelli et Pascal, le vide, un fait expérimental.

À Florence, en voulant construire une fontaine de 12m de haut, on découvre qu'une pompe aspirante ne peut pas faire monter l'eau à plus de 32 pieds (environ 10m30). Torricelli (1608-1647) reproduit l'[expérience \(vers 1643\)](#) avec du mercure dans un tube de 1,30 m, 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.

Pascal (1623-1662) joue un rôle expérimental et théorique très important. Il reproduit les expériences de Torricelli. En 1648 il envoie son beau-frère (accompagné d'un curé comme témoin) 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". On se dirige vers une première mort de l'éther, un effet inobservable ne devant pas avoir de réalité physique.

Newton, des observations difficiles à concilier

Une idée se développe, à savoir que l'atmosphère a une épaisseur finie, au delà de laquelle règne le vide. 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. Cette affirmation ne l'empêche pas cependant, 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.

Les ondes lumineuses, l'électromagnétisme et le retour de l'éther

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

début du 19ème siècle, les travaux de Young (1773-1829) et Fresnel (1788-1827) confirment le caractère ondulatoire de la lumière avec ses deux polarisations transverses. Enfin, Maxwell (1831-1879) unifie l'optique et l'électromagnétisme (1864), dans une théorie ondulatoire.

Puisque toutes les ondes observées jusqu'alors paraissent nécessiter pour se propager un support matériel, la théorie de Maxwell implique l'existence d'un éther luminifère. Les équations de Maxwell faisant intervenir explicitement la vitesse de la lumière, l'éther constitue le référentiel absolu par rapport auquel cette vitesse est mesurée ; c'est le référentiel dans lequel les équations de Maxwell sont valables.

Mort de l'éther luminifère et renaissance du Vide du 19ème au début du 20ème siècle

Cet éther de Maxwell, cependant, a des propriétés paradoxales : il doit être très ténu pour ne pas freiner les planètes dans leur mouvement (Newton), mais il doit être 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](#), qui vient après toute une série d'autres expériences, dont celle de [Fizeau \(1851\)](#), s'annonce la deuxième mort de l'éther. Il faut expliquer en effet pourquoi la vitesse de la lumière mesurée dans un observatoire terrestre ne dépend pas du mouvement de la terre par rapport à l'éther.

Fitzgerald et Lorentz, Poincaré, Einstein

Dans un premier temps, de nombreux modèles sont proposés où l'éther est entraîné partiellement ou totalement par les objets massifs ([Aether Drag Hypothesis](#)). 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

Bien sûr, l'Univers même loin de toute galaxie, n'est pas totalement vide : s'y propagent 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 règne (un vide de toute particule, y compris photons et neutrinos). Par ailleurs, après la première expérience de J.J.Thompson (1856-1940) sur l'atome (1897), E. Rutherford (1871-1937) déduit à partir 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.

Vide et Mécanique Quantique

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 de l'état fondamental n'est pas une observable physique, seules les différences d'énergie sont physiques.

Théorie quantique des champs et Vide

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, défini quant à lui 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 présente des propriétés peu intuitives.

un bref rappel :

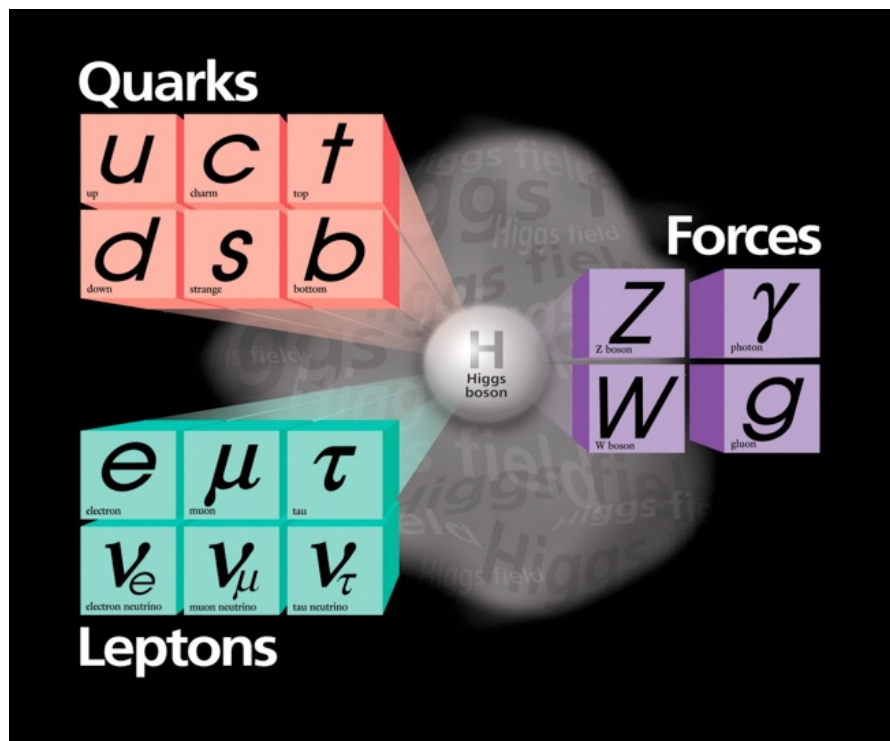
Pour un aperçu succinct et informel, mais éclairant concernant ces notions et mécanismes, on peut lire un texte qui leur est consacré dans les archives de l'Ecole Normale Supérieure (in [Voyage vers l'infiniment petit](#)). Dans le contexte de particules placées dans une enceinte fermée, ce texte rend compte de l'interprétation du nombre de particules d'un certain type - électrons, positrons, photons... - en terme de niveau (discret) d'excitation du champ associé à ce type de particule (niveau d'énergie) ; corrélativement, de l'interprétation des fluctuations du nombre de particules dans cette enceinte, en termes d'*opérateurs de champs* modifiant le champ, lesquels opérateurs le font passer d'un état d'énergie à un autre ; on les appelle les opérateurs de *création* et les opérateurs d'*annihilation*. Les notions et propriétés à retenir de cet aperçu sont : a) la notion de *mode d'oscillation d'un champ* ; b) le caractère discret, dans une enceinte finie, de l'ensemble des modes d'oscillation possibles, donc des fréquences possibles de ces oscillations ; c) *le caractère discret de l'ensemble des niveaux d'énergie* que peut prendre chaque mode d'oscillation (quantification des champs). Chaque mode d'oscillation j se trouve ainsi associé, dans un certain état physique de l'enceinte, à un nombre entier N_j repérant son niveau d'énergie et s'interprétant dans une vision classique comme un nombre de particules. Les opérateurs de création et d'annihilation, susceptibles d'intervenir dans l'enceinte, sont eux mêmes indexés par j et viennent modifier d'une unité en plus, ou en moins, les nombres N_j correspondants.

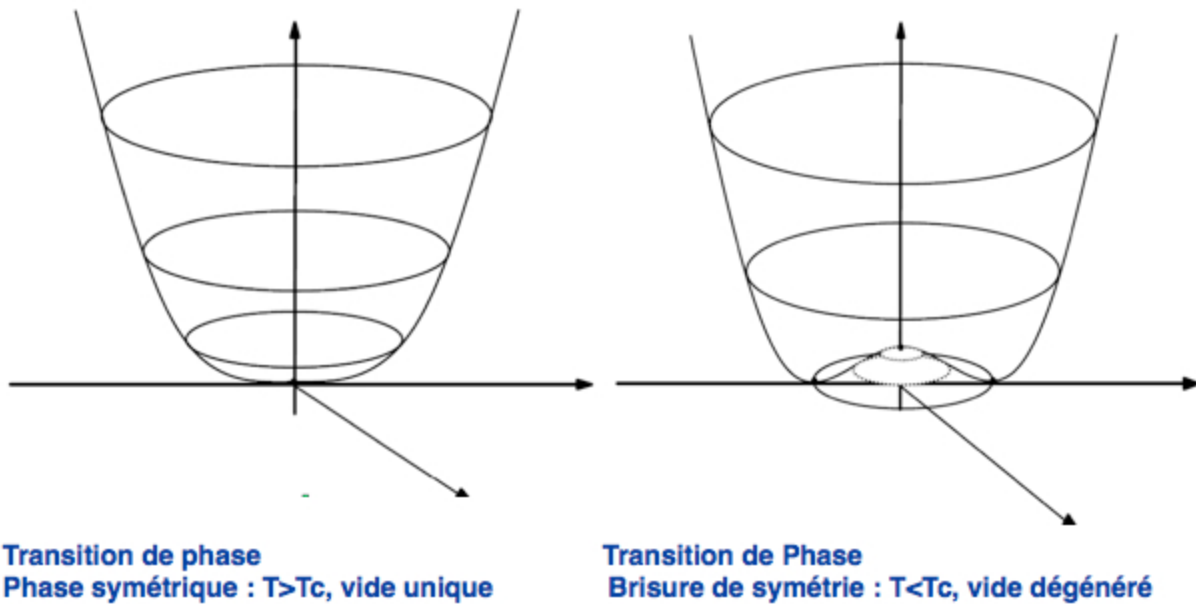
L'état d'énergie la plus basse est le vide quantique. En effet, dans la théorie relativiste, à cause de la relation $E = mc^2$ rajouter de la matière au vide augmente l'énergie. L'état d'énergie minimale est donc un état sans particules et donc vide. La théorie quantique des champs donne au vide quantique des propriétés quelque peu surprenantes. Ainsi, à haute énergie, le nombre de particules n'est en général pas conservé dans des collisions : la

collision entre particules ajoute de l'énergie au vide - l'énergie totale en jeu dans la collision -, énergie qui se dissipe en produisant de nouvelles particules. Jean Zinn-Justin évoque ainsi, comme exemple de ce processus, la collision entre deux protons, produisant un boson de Higgs (excitation du *champ de Higgs*), qui se déintègre en deux électrons et deux positrons (désexcitation du champ de Higgs, excitation des champs associés à ces types de particules), ou encore en deux photons.

Brisure spontanée de symétrie et vide dégénéré

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), brisure de symétrie 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





Quelques remarques sur ces figures

Rappelons d'abord brièvement la brisure de symétrie des systèmes ferro-magnétiques : à haute température, les aimants élémentaires composant le système changent constamment d'orientation sous l'effet de l'agitation thermique. Cette agitation empêche qu'ils puissent se bloquer mutuellement les uns les autres, entre voisins, dans une direction commune. L'aimantation globale est nulle en moyenne, même si l'on peut observer autour de cette valeur d'infimes variations. L'inversion, à un instant donné, de tous les aimants, laisse cette aimantation globale inchangée (propriété de *symétrie*). Lorsque la température s'abaisse et qu'elle franchit un certain seuil critique, la tendance à la mise en place de proche en proche d'une aimantation commune, qui agit en sens inverse de l'agitation thermique, l'emporte brusquement. Une aimantation globale apparaît, *la symétrie est brisée*. La littérature sur le sujet étudie dans les deux cas la fonction $F(T,m)$ liant *l'énergie libre du système*, pris dans un état quelconque, au paramètre d'ordre m de cet état, savoir l'aimantation moyenne, dans des conditions de température T données. Le ou les minima de cette fonction caractérise l'équilibre thermodynamique. L'allure de la fonction $F(m)$ change lorsque la température franchit le seuil critique : pour $T > T_c$, elle présente un seul minimum en $m=0$. Pour $T < T_c$, elle présente trois extrêmes : l'un en $m=0$, et deux valeurs non nulles représentant deux équilibres thermodynamiques possibles avec des aimantations globales opposées. C'est le même type de modification que l'on retrouve dans la brisure de symétrie du champ de Higgs. Dans les figures ci dessus, l'axe z des ordonnées est associé à une énergie potentielle. Le plan horizontal x,y des abscisses est celui de la valeur moyenne du champ, qui est dans ce contexte un nombre complexe, donc avec deux degrés de liberté. Dans la situation où la symétrie est brisée (figure de droite), donc dans la situation actuelle de l'univers, c'est un point arbitraire du cercle des minima qui représente l'état du Vide. Et c'est autour d'un tel état que les fluctuations du vide sont modélisées.

Quelques étrangetés du vide quantique : L'effet Casimir

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, en présence de deux plans infinis parallèles parfaits conducteurs. 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. *C'est l'effet Casimir.* Ce 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 ℓ la distance entre les plans.

[L'effet Casimir](#) est lié au spectre des fréquences des modes d'oscillations du champ électromagnétique en oeuvre dans l'enceinte entre les deux plans conducteurs. Les fréquences inférieures à c/ℓ sont éliminées. L'effet sera donc plus d'autant plus fort que ℓ sera faible. Il 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. C'est un effet sensible au niveau des nano-objets.

Quelques étrangetés.... : Création de paires 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 :

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

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

Vide et Relativité Générale 20ème siècle.

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-il dynamique et sa structure dépend des objets qu'on y ajoute et de leurs mouvements.

Pour alimenter la discussion, nous ajoutons ici quelques réflexions d'Einstein, à partir de 1916, sur le concept d'éther. En 1905, Einstein pense que l'existence de l'éther n'est pas utile pour expliquer la théorie de la relativité restreinte, mais Il change d'avis lors du développement de la théorie de la relativité générale. Dans une lettre à Lorentz du 17 juin 1916, il écrit en effet : *“Je suis d'accord sur le fait que la relativité générale admet une hypothèse d'existence d'un éther, tout comme la relativité restreinte. Mais cette nouvelle théorie de l'éther ne viole pas le principe de relativité. La raison en est que l'état de l'éther [...] n'est pas celui d'un corps rigide dans un état de mouvement indépendant”* (In A.I. Miller, Imagery in scientific thought : creating twentieth-century physics, MIT Press). C'est un éther d'un type nouveau auquel « *il faut se garder d'attribuer des caractéristiques propres analogues à celles de la matière (par exemple une vitesse déterminée à cet endroit)* ». Il nomme cet éther (pour un temps) ” *l'éther de Mach*” et justifie son existence avec les mêmes arguments développés par Newton, puis par Poincaré en 1902 : on a besoin de l'éther pour inclure les notions de rotation absolue et d'action à distance.

Le point de vue d'Einstein en 1918

Einstein développe plus longuement son point de vue dans de nombreux textes, dont les deux suivants, datés de 1918 et de 1920.

Le premier est l'extrait d'un article paru en 1918 dans le volume 6 de la revue Die Naturwissenschaftler (p. 697-702). Il se présente sous la forme d'un dialogue, allusion au célèbre Dialogue sur les deux grands systèmes du monde de Galilée. C'est la dernière question que pose Criticus (le critique de la relativité) au Relativiste :

Criticus : *Avant de nous séparer, une dernière question qui n'est pas une objection et que je pose par pure curiosité : qu'en est-il aujourd'hui de l'homme malade de la physique théorique, je veux parler de l'éther, que nombre d'entre vous ont déclaré définitivement mort ?*

Le Relativiste : *Il a connu un destin fluctuant, mais on ne peut absolument pas dire qu'il soit mort. Avant Lorentz, il existait en tant que fluide pénétrant toutes choses, ou bien en tant que fluide semblable à un gaz et encore sous bien d'autres formes d'existence les plus diverses, différentes d'un auteur à un autre. Avec Lorentz, il est devenu rigide et s'est mis à incarner le système de coordonnées « au repos », soit un état privilégié du monde. La théorie de la*

relativité restreinte a montré qu'il n'y a pas d'état de mouvement privilégié, ce qui revient à nier l'éther au sens où l'entendaient les théories antérieures. Car, s'il y avait un éther, il faudrait qu'il y ait en chaque point de l'espace-temps un état de mouvement déterminé, lequel devrait jouer un rôle en optique. Mais il n'y a pas d'état de mouvement privilégié, comme l'a montré la théorie de la relativité restreinte ; et il n'y a donc pas non plus d'éther au sens ancien du terme. La théorie de la relativité générale, elle non plus, ne connaît pas d'état de mouvement privilégié en un point, qu'on pourrait interpréter par exemple comme la vitesse d'un éther. Mais, tandis que, dans la théorie de la relativité restreinte, une portion de l'espace sans matière et sans champ électromagnétique apparaît comme tout simplement vide, c'est-à-dire apparemment dénué de toute grandeur physique, dans la théorie de la relativité générale, l'espace vide (sans grandeurs physiques) a lui aussi des qualités physiques qui sont définies mathématiquement par les composantes du potentiel de gravitation et qui déterminent le comportement métrique de cette portion de l'espace, ainsi que son champ de gravitation. On peut très bien concevoir cet état de choses en partant d'un éther dont l'état varie sans cesse d'un point à l'autre. À ceci près, qu'il faut se garder d'attribuer à cet « éther » des caractères propres, analogues à ceux de la matière (par exemple une vitesse déterminée à chaque endroit).

Récidive en 1920

Ainsi Einstein considère que, puisque le tenseur métrique dépend des coordonnées de l'espace-temps, on peut très bien concevoir « un éther dont l'état varie sans cesse d'un point à l'autre ». Le second texte, « L'éther et la théorie de la relativité », correspond à la conférence inaugurale du cours qu'il a donné à l'Université de Leyde (l'université de Lorentz) en 1920. Et il termine sa conférence ainsi:

Ce qu'il y a de particulièrement nouveau dans l'éther de la théorie de la relativité générale, quand on le compare à l'éther de Lorentz, consiste en ceci que l'état du premier est déterminé, en chaque lieu, par des connexions avec la matière qui obéissent à certaines lois, et par l'état de l'éther des lieux voisins sous forme d'équations différentielles, tandis que l'état de l'éther de Lorentz, en l'absence de champs électromagnétiques, n'est déterminé par rien en dehors de lui et est partout le même. L'éther de la théorie de la relativité générale peut être ramené par la pensée à celui de Lorentz, si l'on remplace les fonctions spatiales qui servent à le décrire, par des constantes, et si l'on fait abstraction des causes qui déterminent son état. On peut, par conséquent, aussi, dire que l'éther de la théorie de la relativité générale a été déduit de celui de Lorentz par le procédé relativiste.

Sur le rôle que le nouvel éther est appelé à jouer dans la conception du monde physique de l'avenir, nous ne sommes pas encore fixés. Nous savons qu'il détermine les relations métriques dans le continuum spatio-temporel, par exemple, les possibilités de configuration des corps solides ainsi que les champs de gravitation ; mais nous ne savons pas s'il joue un rôle essentiel dans la formation des particules élémentaires de l'électricité qui constituent la matière. Nous ne savons pas non plus si sa structure ne diffère essentiellement de celle de l'éther de Lorentz que dans le voisinage de masses pondérables, et si la géométrie des

espaces de dimensions cosmiques est approximativement euclidienne. Mais nous pouvons affirmer, en nous basant sur les équations relativistes de la gravitation, qu'un écart de la forme euclidienne doit se manifester dans les espaces de dimensions cosmiques, toutes les fois qu'une densité positive moyenne de la matière, si réduite soit-elle, existe dans le monde. Dans ce cas, l'univers spatial doit avoir nécessairement des bornes et être de grandeur finie, grandeur qui est déterminée par la valeur de cette densité moyenne. [...]

En résumant, de tels propos semblent dire : avec la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens, par conséquent un éther existe. Un espace sans éther est inconcevable, car non seulement la propagation de la lumière y serait impossible, mais il n'y aurait même aucune possibilité d'existence pour les règles et les horloges et, par conséquent aussi, pour les distances spatio-temporelles dans le sens de la physique. Cet éther ne doit cependant pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables, c'est-à-dire comme constitué de parties pouvant être suivies dans le temps ; la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée.

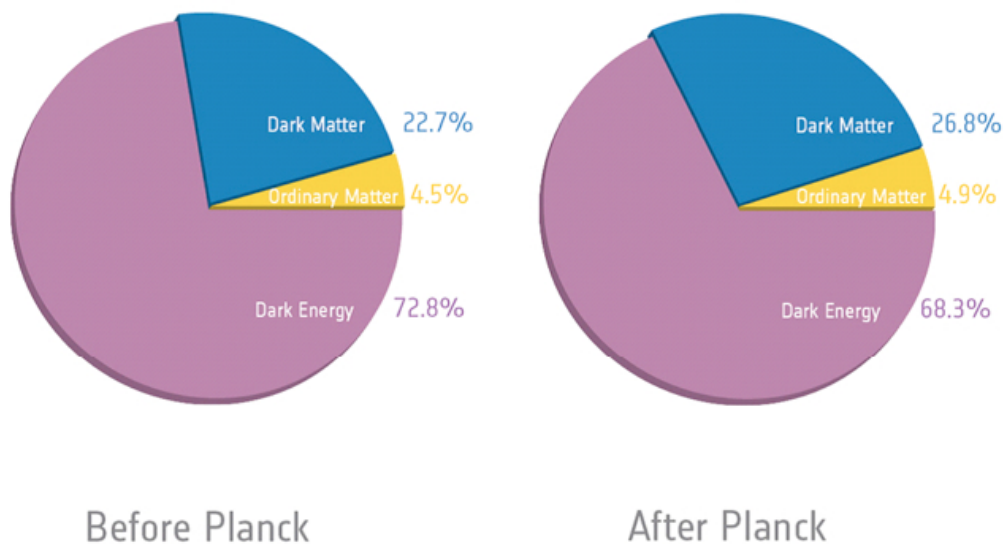
Vide, Matière noire, Energie Sombre fin du 20ème siècle

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 dus 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, pour l'instant sans succès. Mais certains théoriciens proposent pour expliquer ces phénomènes des modifications à grande distance de la Relativité Générale, c'est-à-dire une modification de la relation entre matière et géométrie.

Le mystère de l'Energie sombre

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 son expansion (par effet d'une pression interne négative), à partir d'environ 5 milliards d'années (l'univers a 13,7 milliards d'années), alors qu'auparavant 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.



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. Mais il y a un gros "hic" : la densité d'énergie du vide calculée à partir des modèles cosmologiques de l'univers et des observations à cette échelle (Wmap, Planck,...) est de 120 ordres de grandeurs plus *petite* que la densité d'énergie du vide calculée à partir du modèle standard des particules ! Et même si l'écart peut être ramené à 40 ordres de grandeurs avec d'autres hypothèses de calcul, il reste inexplicable.

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 le philosophe - et humoriste !- Thomas de Koninck), *sous le prétexte de* résoudre des problèmes qu'on ne comprend pas.

Ainsi, l'existence et la nature du vide ont-elles toujours été liées à des questions fondamentales de la science, par exemple autrefois à la présence de l'éther, aujourd'hui à la nature de la matière noire proposée pour expliquer la dynamique des galaxies ou de l'énergie noire qui influence l'expansion de l'univers.

Questions

Gilbert Belaubre : Vous avez dit que l'effet d'énergie sombre apparaissait il y a 5 milliards d'année. Est-ce que l'énergie sombre n'existait pas avant ?

Jean Zinn-Justin : Si, l'énergie sombre existait avant. Elle correspond à un effet de volume. La densité de l'univers est actuellement faible. Au début de l'univers, la densité de l'univers était forte : l'énergie sombre existait déjà, mais elle était négligeable. Aujourd'hui, l'univers est si peu dense que cette force l'a emporté. Une fois emporté, c'est définitif, c'est elle qui survivra.

Gilbert Belaubre : La matière noire serait-elle plus ou moins localisée, tandis que l'énergie sombre en somme représenterait l'espace ?

Jean Zinn-Justin : Oui, elle remplit de manière uniforme tout l'espace.

Gilbert Belaubre : Et l'espace n'existe que par l'énergie sombre?

Jean Zinn-Justin : Non, il existe avec l'énergie sombre.

Gilbert Belaubre : Est-ce qu'il peut exister sans?

Jean Zinn-Justin : Difficile de répondre. Cela devient métaphysique.

Jean Pierre Treuil : Dans l'histoire des conceptions de l'espace, Torricelli et Pascal semblent avoir une idée de ce qu'était le vide. Comment s'imaginaient-ils l'extension de l'espace? Réciproquement, comment Einstein s'imaginait-il l'espace? A-t-il imaginé que la densité pouvait être nulle? Et, si oui, dans les équations d'Einstein, la variété vide avait-elle pour lui une existence physique?

Jean Zinn-Justin : Jusqu'au 19^{ème} siècle, l'univers est composé de planètes, du soleil et de quelques étoiles. Ce n'est qu'au 20^{ème} siècle qu'il faut ajouter les galaxies composées d'étoiles; c'est avec Hubble que l'on commence à se poser la question : à quoi ressemble l'univers? En l'espace de quelques décennies, on en a appris sur l'univers plus qu'on en savait jusque là. On avait une idée vague. Maintenant on sait que l'univers a plus de 13,7 milliard d'années ; que le Big-Bang a commencé d'une certaine manière ; le vivant aussi ; on a une photo de l'univers à 380 mille ans ; on sait que l'univers est alors assez froid pour former des atomes d'hydrogène ; on a mesuré l'univers avec de nombreuses méthodes, autrefois on n'avait que l'optique, puis on a eu les radiotélescopes, maintenant on a des satellites et on voit dans les infra-rouges et de nombreuses longueurs d'onde. On a donc beaucoup appris en relativement peu de temps. Les choses qui maintenant paraissent évidentes et banales auraient surpris les gens il y a un siècle.

Gilles Cohen-Tannoudji : Voici une citation de Pascal très en avance sur son temps : *l'espace vide n'est pas le néant. Il y a autant de distance entre l'espace vide et le néant qu'entre la matière et l'espace vide. L'espace vide tient le milieu entre la matière et le néant.*

Jean Zinn-Justin : Point de vue très différent de Descartes pour qui ce qui n'est rien ne peut avoir d'extension. La réponse est que le vide n'est pas rien.

Ernesto Di Mauro : Peut-on appliquer les problèmes de dimension au vide? Es-ce qu'il y a du vide en dessous de la longueur de Planck?

Jean Zinn-Justin : C'est l'échelle de la gravitation quantique, là où la théorie de la relativité générale ne peut plus s'appliquer. C'est un sujet d'intenses spéculations, surtout mathématiques. Depuis plus de 30 ans, des théoriciens parmi les plus brillants ont développé la théorie des cordes. Il y a forcément une théorie quantique de la gravitation, mais elle nous est inconnue ; cette spéculation n'a pas conduit à proposer des expériences qui puissent tester un phénomène de gravitation quantique. C'est la grande difficulté. Or, pour tester chaque force jusqu'à présent, il faut chercher une particule. Si on quantifie la gravitation, il devrait exister un graviton. Il faudrait pouvoir le détecter. Malheureusement, à cause du fait que l'échelle microscopique de la gravitation est extrêmement faible, il faudrait un détecteur à l'échelle de la terre. On n'est donc pas prêt d'y arriver. Restent des spéculations sur les trous noirs ; mais eux-mêmes ne sont pas mesurés directement. On n'a actuellement aucun moyen de tester les prédictions que ferait une théorie de la gravitation quantique ; on peut quantifier la relativité générale, mais les équations ne sont valables qu'à grande distance comme pour la relativité classique. Tester à l'échelle de la longueur de Planck obligerait à des accélérateurs à 10¹⁹ GEV, alors qu'actuellement nous en sommes à quelques milliers de GEV.

Ernesto Di Mauro : Le vide quantique vous paraît-il absurde?

Jean Zinn-Justin : Non, mais si on spéculer un peu, il faut admettre que la gravitation quantique met en jeu des concepts étranges : l'idée que la géométrie, l'endroit où nous vivons, puisse être le siège de fluctuations quantiques est une chose bizarre, même si ces fluctuations sont très faibles ; l'idée d'une géométrie fluctuante, un support fluctuant en somme, est difficile à imaginer. Mais ce ne sont que des spéculations, comme celles de confrères qui considèrent que la métrique n'unifie pas l'espace et le temps. Un des frères Bogdanov (en se faisant passer pour un autre) a essayé de m'arracher des informations sur ce sujet.

Edith Perrier : Si la physique, c'est ce que l'on voit, alors le graviton ne devrait pas exister. L'existence ou non du néant est une question de base de la métaphysique ; Mais pour le matheux que vous êtes, qu'est-ce qu'un ensemble vide? Est-il un ensemble?

Jean Zinn-Justin : J'ai surtout parlé en physicien qui se base sur des expériences pour définir les propriétés du vide. Sinon, on revient dans la situation d'Aristote où l'on spéculer sur des concepts. Il y a un jeu de mots dans l'expression d'Aristote: la notion de vide est vide. Il pense en fait au néant.

Jean-Pierre Bessis : Notons qu'en théorie axiomatique des ensembles, on construit les ensembles uniquement avec l'ensemble vide.

Jean-Pierre Treuil : D'ordinaire dans le langage courant, il y a le contenant et le contenu. Peut-on interpréter votre conclusion comme si on ne pouvait pas penser un contenant sans qu'il y ait un contenu. C'est le contenu qui prime d'abord, après on s'arrange pour le décrire avec un contenant.

Jean Zinn-Justin : C'est un peu le message que j'ai essayé de faire passer. S'intéresser au vide, c'est s'intéresser à ce qu'il peut contenir. Sinon ce n'est pas un concept opératoire.

Gilles Cohen-Tannoudji : Sur la question concernant les ordres de grandeur très différents entre la constante cosmologique, bien mesurée maintenant, et les spéculations que les physiciens du quantique peuvent faire, je ne crois pas que ce soit un problème. Les équations d'Einstein autorisent la présence d'une constante cosmologique. Il faut même trouver des arguments pour qu'il n'y en ait pas ; Mais ce n'est pas aux physiciens quantiques de calculer cette constante, comme ce n'est pas aux relativistes de calculer h .

Jean Zinn-Justin : Ce n'est pas tout à fait exact. La constante cosmologique mesure les quantités d'énergie dans l'univers ; de son côté, la théorie quantique des champs prédit également une énergie dans l'univers. On pourrait se dire qu'au moment du Bing-Bang elle était très petite et peut-être nulle. On pourrait alors s'en tirer avec une petite fluctuation. Malheureusement, ce n'est pas une petite, mais une grosse fluctuation qui s'est produite. Celle qui a donné une masse aux particules, dans la transition de phase du premier ordre affectant le champ de Higgs. Les tentatives d'évaluation de cette énergie latente donnent des résultats fantastiques ; c'est pour cela qu'on est perplexe : l'énergie sombre n'est là que pour compenser l'énergie latente de la transition de phase, et il existe un trop grand écart, on l'a dit. Les physiciens n'aiment pas beaucoup par ailleurs, ce que l'on appelle l'ajustage fin des paramètres, lorsque la compatibilité avec les observations exige une fourchette excessivement étroite pour leurs valeurs possibles ; en l'occurrence l'ajustage de la valeur de la constante cosmologique.

Jean-Louis Bobin : je voudrais revenir à l'histoire de la création de paires. Il y a eu une expérience fin 90 à Stanford. Ils ont un peu triché, car ils avaient un laser puissant et pour réaliser la création de paires il fallait qu'il existe un effet Compton sur un faisceau d'électrons relativistes. Ils ont réussi à créer des paires de cette façon là, rien qu'avec des photons ; je ne sais pas comment cela s'interprète à partir des champs électriques. Cette création de paires, sans intervention d'objets matériels, correspond-t-il à ce dont vous nous avez parlé?

Jean Zinn-Justin : C'est un phénomène différent.

Jean-Louis Bobin : Le laser Apollon, s'il réalise les performances fabuleuses attendues, sera-t-il dans des conditions favorables pour permettre la création de paires ?

Jean Zinn-Justin : Je pense qu'on en est encore très loin, malgré l'optimisme de certains, et qu'il faudra encore une ou deux générations de lasers. mais je suis ici à ma limite de compétence.

Alain Cardon : Si on pose que tout vide physique contient de l'information, qu'en est-il de l'énergie ? S'il y a de l'énergie dans le vide physique, y-a-t-il aussi de l'information? Où serait-elle?

Jean Zinn-Justin : On ne peut pas extraire l'énergie sombre. On ne peut pas non plus en extraire de l'information.

Alain Cardon : Même si on ne peut pas extraire l'information, existe-t-elle?

Jean Zinn-Justin : Il faudrait pouvoir la manipuler. La théorie ne prévoit pas cette possibilité.

Claude Elbaz : D'après votre exposé, le changement s'est fait au 20ème siècle avec la mécanique quantique et la relativité : avant, l'approche était plus philosophique, avec des

concepts que l'on cherchait à vérifier ; après, on part des équations que l'on cherche à interpréter. C'est l'exemple de l'énergie sombre ou de l'énergie du vide.

Jean Zinn-Justin : Je ne dirais pas tout à fait cela. A partir de Newton, il y a des équations. Galilée est plus spéculatif car il ne peut pas faire le vide. Newton a la gravitation et peut expliquer le mouvement des planètes. Il peut même montrer que, sur une certaine période observable, l'univers (et au moins le système solaire) doit être essentiellement vide, car sinon les trajectoires ne seraient pas stables.

Claude Elbaz : Il y a le point de vue de propagation de particules de Newton, mais aussi celui des ondes de Huygens, pour qui ce sont des ondes qui se propagent et il faut alors un milieu qui soit plein. Et ce problème, se pose-t-il toujours ?

Jean Zinn-Justin : Il y a eu cette objection très forte : c'est un milieu très ténu qui propage des ondes de très hautes fréquences. Or pour propager des ondes de très hautes fréquences, il faut un milieu extrêmement rigide. C'est un milieu très difficile à concevoir. Ce n'est pas un argument scientifique définitif, mais qui compte, un argument fort, même s'il reste des personnes qui pensent encore à l'éther.

Ernesto Di Mauro : Il y avait un concept appelé apeiron, (ce que l'on ne peut pas mesurer) ; dans l'histoire de la philosophie du vide, il y a ce concept qui n'est pas mesurable et l'énergie noire n'existe pas.

Jean Zinn-Justin : Si, elle est mesurable indirectement. Nous avons maintenant trois mesures physiques qui *le permettent et* qui sont cohérentes entre elles : c'est d'abord la distribution des supernovae 1a sur la ligne de visée ; c'est ensuite l'existence de modèles permettant une paramétrisation des données du rayonnement fossile à 2,9°K, mesuré par le satellite Planck, lesquels modèles donnent des nombres pour l'énergie sombre, en bon accord avec celui des supernovae ; c'est enfin la cohérence avec les mesures sur les ondes baryoniques acoustiques. On accepte ces résultats sans enthousiasme, car ils mettent en cause, non les modèles, mais la compréhension des modèles. Trouver une quantité si petite par rapport à ce qui est raisonnable, c'est un problème qui est posé et dont nous ne connaissons pas la solution.

Jean Pierre Treuil : Comment est-on sûr que la densité de l'énergie sombre soit exactement la même partout ?

Jean Zinn-Justin : On ne regarde pas partout en même temps. Planck a couvert le ciel deux fois de suite. Puis on a fait une analyse de Fourier sur le ciel et on a trouvé les coefficients de Fourier prédits par les modèles. Cela a un côté global. Effectivement, pour les supernovae, c'est seulement la ligne de visée. L'interprétation du phénomène est non triviale. Ce n'est peut-être pas la bonne. La constante cosmologique a été prévue par la théorie, mais pas sa valeur. Son existence n'est pas choquante en soi. Par ailleurs, l'équation d'état dont on peut mesurer un paramètre - le rapport entre la pression et la densité - prédit que ce paramètre doit être -1 et dans trois expériences différentes ; c'est bien ce que l'on trouve et c'est cohérent avec la constante cosmologique.

Gilles Cohen Tannoudji : Ce qui est extraordinaire, c'est que la densité de l'énergie sombre s'écrit trivialement comme le rapport entre la constante cosmologique et la constante de

gravitation de Newton (avec les facteurs adéquats, c, \dots). Juste une autre information : Il y a quelque temps, l'expérience BICEPS2 avait annoncé une mesure directe des ondes gravitationnelles venant de l'univers primordial, donc peut-être liées à la gravitation quantique. L'expérience Planck vient de montrer que cette polarisation, ce n'est juste que de la poussière.