



Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

# Les Théories du tout

<http://aaa.guillaumeponce.org/>

Réunion de réflexions cosmologiques de l'AAA du  
30/03/2018



Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

# Histoire et état des lieux de la science physique



# Qu'est-ce que la science physique ?

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

Définition contemporaine (Wikipédia) :

*La physique est la science qui tente de comprendre, de modéliser, voire d'expliquer les phénomènes naturels de l'univers. Elle correspond à l'étude du monde qui nous entoure sous toutes ses formes, des lois de sa variation et de son évolution.*

Encore qu'on puisse trouver des définitions plus restreintes, comme celle du pourtant réputé Larousse :

*Science qui étudie par l'expérimentation et l'élaboration de concepts les propriétés fondamentales de la matière et de l'espace-temps.*



# Origines du terme

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

- **Grèce antique**

Le terme « physique » vient du grec « ê physikê », signifiant « connaissance de la nature ». Pour Platon, il s'agit d'une des trois composantes de la philosophie, aux côtés de l'éthique et de la logique.

- **Moyen-âge**

En vieux français, on trouve les termes « fusique » pour désigner la médecine et le terme « fisique » pour désigner la connaissance des choses de la nature.

- **XVII<sup>ème</sup> siècle**

Ce n'est qu'au XVII<sup>ème</sup> siècle, avec René Descartes et Isaac Newton que l'emploi du terme se généralise et conserve son sens de « sciences naturelles » la rendant alors encore indistincte de la biologie.

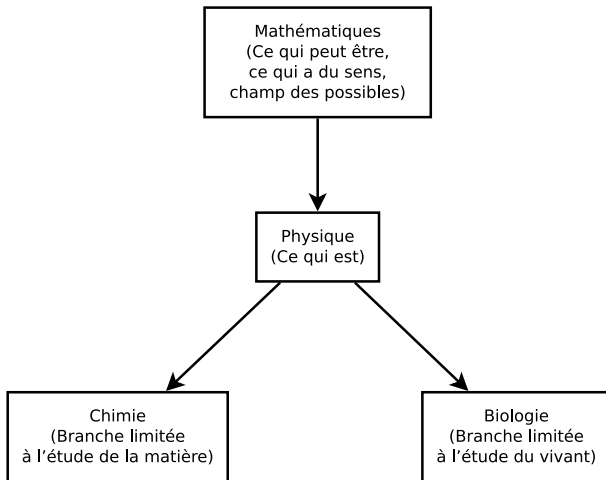


# Petite classification personnelle des sciences

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique





# Premier mouvement : découverte des champs d'étude

Des physiciens pionniers vont découvrir les différents champs d'étude et les premières lois physiques qui les régissent. On assiste donc à une diversification et à une augmentation du nombre des champs d'étude au cours de l'histoire.

Quoi ?	Quand ?	Qui ?
Optique	1021	Ibn al-Haytham (Alhazen)
Mécanique céleste	1619	Johannes Kepler
Chute des corps	1632	Galileo Galilei
Magnétisme	1634	René Descartes
Electricité	1785	Charles-Augustin Coulomb
Interaction faible	1934	Enrico Fermi
Interaction forte	1964	(Murray Gell-Mann, George Zweig)

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique



## Second mouvement : mouvement d'unification

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

Toute l'histoire de la science physique moderne va dans le sens d'une unification des théories :

- **1687 – Isaac Newton : Théorie de la gravitation universelle**

Unification des théories de la **chute des corps** (Galilée, 1632) d'une part et de la **mécanique céleste** (Kepler, 1619) d'autre part.

- **1873 – James Clerk Maxwell : Electromagnétisme**

Unification des théories permettant de décrire les phénomènes **électriques** d'une part et **magnétiques** d'autre part. Description de la lumière comme une onde électromagnétique, ce qui unifie également l'optique à l'électromagnétisme.

L'électromagnétisme en tant que phénomène a été découvert en 1821 par Hans Christian Ørsted.



- **1979 – Abdus Salam, Sheldon Glashow et Steven Weinberg : théorie électrofaible**  
Unification de l'interaction faible avec l'interaction électromagnétique.
- On a également une théorie unifiant l'interaction électrofaible et l'interaction forte, mais à des niveaux d'énergie la rendant inaccessible à la confirmation expérimentale ( $10^{15}$  GeV /  $10^{28}$ °K).  
On parle de théorie de la grande unification. La « théorie du tout » va encore plus loin.





# Point sur les interactions fondamentales

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La physique moderne considère quatre grandes forces de l'univers, aussi plus sobrement appelées « interactions fondamentales » :

- L'interaction gravitationnelle (champs gravitationnels)
- L'interaction électromagnétique (champs électriques et magnétiques)
- L'interaction nucléaire faible (radioactivité, fusion nucléaire)
- L'interaction nucléaire forte (cohésion interne des hadrons et entre eux aux sein des noyaux atomiques)



# Créature à deux têtes

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La physique moderne a abouti, pour l'instant, à deux théories distinctes satisfaisantes chacune dans son domaine :

- **La relativité générale** dans le domaine macroscopique, basée sur une représentation continue de l'univers. Fournit une bonne explication de l'interaction gravitationnelle, mais pas des trois autres interactions fondamentales. A prédit avec succès la découverte des ondes gravitationnelles (2015).
- **La mécanique quantique** dans le domaine microscopique (modèle standard des particules), basée sur une représentation discrète (quanta) de l'univers. Fournit une bonne explication des trois autres interactions fondamentales, mais pas de la gravitation. A prédit avec succès la découverte du boson de Higgs (2012).



# Point sur la relativité générale

Les Théories  
du tout

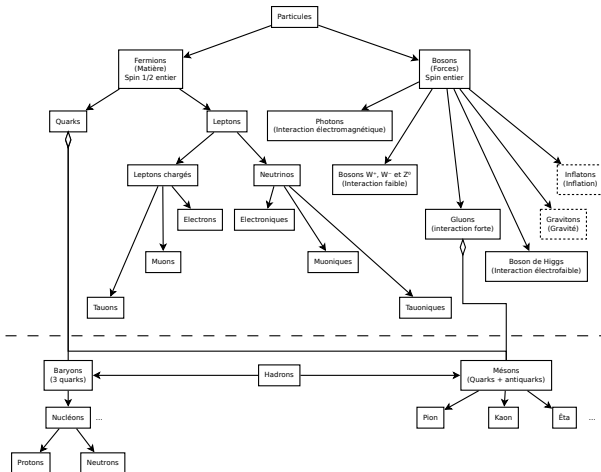
Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La relativité générale, élaborée principalement par Albert Einstein entre 1907 et 1915, est une théorie relativiste de la gravitation s'appuyant sur la relativité restreinte (qui ne traite pas de la gravitation mais des caractéristiques de l'espace-temps). Elle englobe et généralise la théorie de la gravitation universelle d'Isaac Newton.

Elle énonce notamment que **la gravitation n'est pas une force**, mais la manifestation de la courbure de l'espace-temps, courbure elle-même produite par la distribution de l'énergie, sous forme de masse ou d'énergie cinétique. Elle a permis de prédire des effets vérifiés depuis, comme l'expansion de l'Univers, les trous noirs et les ondes gravitationnelles.

L'aboutissement contemporain de la mécanique quantique est le modèle standard de la physique des particules.





L'hypothèse de la **supersymétrie** (Susy) est un ajout à la mécanique quantique qui postule une relation profonde et systématique associant deux à deux les fermions et les bosons.

Cette hypothèse permet, dans les équations, de stabiliser le boson de Higgs, et donc la hiérarchie des masses des particules élémentaires. Cette symétrie assure en effet que pour une particule de spin  $j$ , on peut avoir une particule de spin  $j \pm \frac{1}{2}$ , mais surtout que ces particules qui sont liées ainsi auront des contributions opposées, qui finissent donc par s'annuler.

Selon la **théorie quantique des champs**, autre extension de la mécanique quantique, les particules élémentaires, plutôt que des « grains » sont des ondes. La dualité onde/particule était déjà présente dans la mécanique classique. La théorie quantique des champs ajoute la possibilité de création ou d'annihilation de particules en tout point de l'espace.



# Ce qu'il reste à unifier : la gravité quantique

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

Il reste donc à unifier la relativité générale, qui explique bien l'une des quatre interactions fondamentales, et la mécanique quantique, qui explique bien les trois autres. Par le chemin le plus court, cela revient à ajouter à la mécanique quantique la seule interaction qui manque à son tableau de chasse. C'est pourquoi on appelle **gravité quantique** la branche de la physique théorique qui tente de réaliser cette unification.

On pourrait (beaucoup) résumer la quête de la gravité quantique à la quête du graviton, particule hypothétique (comme le fût le boson de Higgs) de la mécanique quantique censée assurer l'interaction qui lui manque.



Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

# Théories de la gravité quantique



# Théorie de la supergravité

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La théorie de la supergravité combine la supersymétrie (notion issue de la mécanique quantique) et la relativité générale.

La gravité y prend la forme d'un champ de Maxwell (comme l'est le champ électromagnétique). Un tel champ comprend des ondes de longueurs et fréquences différentes se propageant à une vitesse invariable (celle de la lumière), indépendamment du référentiel.

La particule (boson) qui correspond à ce champ est le graviton (spin 2) et la supersymétrie lui assure la présence d'un fermion superpartenaire : le gravitino (spin 3/2).

Les théories de supergravité ont été introduites à l'origine comme théories candidates à l'unification de la mécanique quantique avec la relativité générale. Elles sont à présent plutôt vues comme théories effectives des théories de supercordes.





# Les théories des cordes

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La théorie des cordes vise non seulement, comme toutes les théories de la gravité quantique, à réconcilier la relativité générale et la mécanique quantique, mais également unifier les quatre interactions fondamentales. En cela, elle est véritablement une théorie du tout.

Elle postule que les particules jusque là considérées comme élémentaires ne le sont en fait pas. Elles sont elles-même constituées de brins d'un diamètre minimal correspondant à l'échelle de Planck ( $1,616 \times 10^{-35}$  m).

Les propriétés (masse, charge électrique ...) de ce que nous percevons comme des particules découleraient de la façon dont vibrent les différents types de cordes qui les composent. Pour expliquer ces propriétés, les cordes doivent nécessairement vibrer dans plus de trois dimensions d'espace.



# Théorie des cordes bosoniques

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

Il s'agit de la première théorie des cordes (historiquement). Elle est basée sur des cordes évoluant dans 26 dimensions.

Dans cette théorie, tous les modes de vibration des cordes donnent des bosons. Elle ne permet donc pas de décrire tout ce qui relève des fermions.

De plus, elle comprend un tachyon, c'est à dire une particule dont l'énergie est une quantité réelle (plutôt qu'un quanta entier propre à la mécanique quantique) et la masse est un nombre imaginaire pur.

Ce modèle est donc impropre à décrire la réalité ; on parle de « modèle jouet ».



# Théorie des supercordes

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La théorie des supercordes est une déclinaison de la théorie des cordes faisant intervenir des brins supersymétriques vibrant dans « seulement » 11 dimensions spaciotemporelles. Cette théorie connaît elle même cinq déclinaisons : I, IIA, IIB, hétérotique O (HO) et hétérotique E (HE).

Chacune d'elle permet d'éliminer le problème du tachyon qui relègue la théorie de cordes bosoniques au rang de modèle jouet.

La théorie des cordes de type I est la seule à admettre des cordes ouvertes, en plus des cordes fermées admises par les autres déclinaisons. Pour le reste, ces différentes déclinaisons se distinguent les unes des autres par diverses propriétés mathématiques, comme le groupe de symétrie auxquelles elles appartiennent ou la notion de chiralité.



# Théorie M

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La théorie M vise à unifier les différentes théories des cordes (une unification de théories d'unification, en quelques sortes), y incorporant également une théorie des champs appelée supergravité à onze dimensions. Selon son principal promoteur, Edward Witten, le M peut signifier aussi bien « magie », que « mystère » ou encore « membrane ».

Il est apparu que les cinq déclinaisons de la théorie des supercordes, apparemment distinctes, pouvaient en fait être échangées par des transformations mathématiques appelées dualité S et dualité T. Elle requalifie les « cordes » en « branes » avec différents nombres de dimensions (2 à 5, mais pas les mêmes d'un type de branes à l'autre, si bien qu'il y en a 11 en tout).

La théorie M est encore loin d'être terminée et complète.



# La gravitation quantique à boucles

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

La démarche à l'origine de cette théorie est une tentative mathématiquement épique d'établir une quantification canonique de la relativité générale dans une formulation hamiltonienne. Une première proposition par Richard Arnowitt, Stanley Deser et Charles Misner en 1962 n'avait pas fourni de résultat concluant, les équations obtenues étant trop difficiles à résoudre. En 1988, Abhay Ashtekar découvre de nouvelles variables canoniques qui rendent possible cette quantification.

Depuis Einstein, l'espace n'est plus conçu comme l'entité en tant que telle décrite par Newton, mais plutôt comme un champ gravitationnel, analogue au champ magnétique mis en évidence par Maxwell.



Cet espace peut donc être parcouru de « lignes de force », à l'instar des lignes de Faraday. Quand ces lignes sont fermées, comme le suggère une reformulation mathématique de la relativité générale permise par Ashtekar, elles forment des « boucles ».

Il découle de cette théorie que l'espace se présenterait comme une structure discrète plutôt que continue, ce qui est en rupture avec le continuum d'espace temps décrit par la relativité générale. Il existe une quantité minimale d'espace, comme un grain ou un atome d'espace, le quanta du champ gravitationnel, matérialisé aux intersections des boucles.

Les boucles forment ainsi un réseau (ou graphe) dont les nœuds sont des quanta d'espace.



Sur un même lien joignant deux quanta, il est possible de trouver plusieurs lignes de champ (portions de boucles). Ce nombre de lignes de champ est un nombre entier associé à chaque lien appelé « spin du lien ».

Ce réseau de quanta peut donc également être représenté comme un réseau de spins. Le réseau de spins décrit la nature probabiliste (caractéristique en physique quantique) de l'entité formée. Ce nuage de probabilités de réseaux de spins est aujourd'hui appelé « mousse de spins » par les théoriciens, mais la représentation d'un espace constitué de boucles étant antérieur à ce développement, le terme est resté.



La théorie de la gravitation quantique à boucles a quelques implications intéressantes :

- Elle nécessite l'existence d'une constante cosmologique positive, ce qui est cohérent avec l'observation de l'accélération de l'expansion de l'Univers.
- Elle permet de remonter au-delà du Big Bang, transformant ce dernier en Big Bounce plutôt qu'en commencement de tout.
- Quand elle est couplée au modèle standard de la physique des particules, les infinis y apparaissant habituellement sont tous rendus finis.
- Pour des énergies basses, elle possède des gravitons, ce qui en fait une véritable théorie de la gravitation.
- Le temps ne forme plus une entité confondue avec l'espace, il naît des relations entre quanta.





# Roger Penrose est un génie

Les Théories  
du tout

Histoire et  
état des lieux  
de la science  
physique

Théories de la  
gravité  
quantique

Un certain nombre de noms de théoriciens ont été cités dans les diapositives précédentes. Cette liste ne saurait oublier de mentionner les importantes contributions de **Roger Penrose**, à la fois en ce qui concerne la théorie des cordes avec sa **théorie des twisteurs** et en ce qui concerne la théorie de la gravitation quantique à boucles avec les **réseaux de spins**.