



La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

La gravitation

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

Réunion de réflexions cosmologiques de l'AAA du
26/11/2018



La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

A la mémoire de Georges Di Donna.



La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

La gravitation dans l'histoire des sciences



Avant Copernic et Galilée : Aristote et Ptolémée

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

On attribue à Aristote (-384 / -322) la synthèse, sinon la génèse, des « connaissances » les plus fondamentales qui font alors autorité en physique.

- Sur le front de la chute des corps, Aristote écrit que plus un objet est lourd, plus il tombe vite.
- Sur le front de la mécanique céleste, on est sur le modèle d'un Univers **géocentrique** : l'univers se limite à ce que l'on connaissait alors de ce que l'on appelle aujourd'hui le système solaire, la Terre en est le centre et tous les autres corps célestes tournent autour d'elle.

Ce modèle géocentrique sera ensuite défendu avec ferveur par Ptolémée (~90 / ~168).

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



Figure 1: Système géocentrique de Ptolémée



Copernic (1473 / 1543) et Kepler (1571 / 1630)

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Copernic décèle des incohérences dans le modèle géocentrique, fait les calculs et abouti à une **mécanique céleste héliocentrique**, très fortement inspirée par des théories de l'astronome grec Aristarque de Samos (~ -310 / ~ -230) rapportées par Archimède (-287 / -212) et Plutarque (~ -46 / ~ 125). Prudemment, il attendra d'être sur son lit de mort avant de permettre la publication de sa théorie.

Son travail sur la mécanique céleste héliocentrique sera ensuite peaufiné par Kepler, dont les trois lois permettent de calculer les orbites elliptiques des planètes, que Copernic avait gardées circulaires en partant du système de Ptolémée. Cependant ces lois restent alors purement empiriques et nullement démontrées.



Galilée (1564 / 1642)

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

On considère souvent Galilée comme le père de la science moderne. Il le doit en particulier à son adoption du principe d'expérimentation systématique.

- Sur le front de la mécanique céleste, en s'appuyant sur les observations réalisées avec la lunette astronomique qu'il a mise au point, Galilée est un fervent partisan de l'héliocentrisme de Copernic. Ceci lui vaudra d'être inquiété par les autorités (notamment religieuses) pour lesquelles le géocentrisme d'Aristote demeure un dogme indépassable.
- Sur le front de la chute des corps, par l'expérimentation, Galilée démontre que deux corps de poids différents, toutes choses étant par ailleurs égales (notamment leurs formes), tombent à la même vitesse.



Newton (1642 / 1727)

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

En 1685, en s'appuyant sur les lois de Kepler, Issac Newton publie sa célèbre **théorie de la gravitation universelle**. Cette théorie unifie pour la première fois les champs d'étude, auparavant distincts, de la mécanique céleste et de la chute des corps. Elle permet la démonstration par le calcul des lois de Kepler.

Les formules de Newton servent encore aujourd'hui d'approximation suffisamment précise pour la plupart des cas pratiques de la technologie humaine sur Terre.

Newton décrit la gravitation comme une force d'attraction entre des objets en raison de leurs masses respectives et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. L'effet de cette force est instantané et sa portée infinie. Elle n'a d'effet ni sur l'espace, ni sur l'écoulement du temps.



Einstein (1879 / 1955)

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Michael Faraday (1791 / 1867) n'a pas travaillé spécifiquement sur la question de la gravitation. Mais il a conçu la notion de champ de force en physique, qui trouvera une application féconde dans la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Avec Einstein et sa théorie de la relativité générale, la gravitation prend donc la forme non plus d'une force, mais d'un **champ** de courbure de l'espace temps par la distribution de la masse / énergie. En découlent de nombreuses prédictions, dont certaines ont été confirmées, dont certaines restent à confirmer, mais dont aucune n'a encore été démentie : synchronisation GPS, trous noirs, effet de lentille, ondes gravitationnelles, expansion de l'Univers ... trous de ver, trous blancs ...

Principe d'équivalence : l'effet d'un champ gravitationnel est identique aux effets d'une accélération.



Les interactions fondamentales

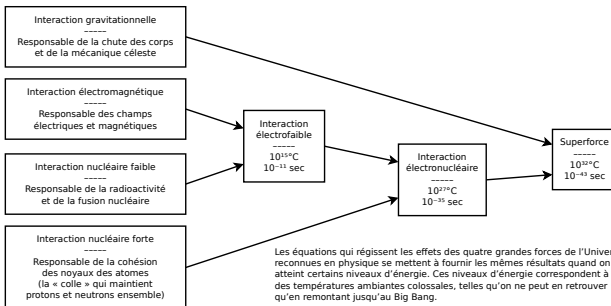
La gravitation

La gravitation dans l'histoire des sciences

L'étude de la gravitation aujourd'hui

Idées reçues

Le modèle standard de la cosmologie identifie 4 interactions fondamentales :





La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

L'étude de la gravitation aujourd'hui



Une théorie avec 95% de mystère

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Aucune prédiction de la théorie de la relativité d'Einstein n'a, à ce jour, été contredite.

Néanmoins, quand on observe d'une part la répartition de la matière « ordinaire » (baryonique) dans l'Univers observable et que l'on réalise les calculs avec les équations d'Einstein d'autre part, l'on s'aperçoit que le compte n'y est pas. Les galaxies ne devraient pas se tenir comme elles se tiennent, la vitesse de rotation de leurs systèmes périphériques ne devrait pas être ce qu'elle est et l'accélération de l'expansion de l'Univers est un mystère.

On a donc du « sortir du chapeau » deux notions pour équilibrer tout cela :

- Matière noire : 27% de la densité d'énergie de l'Univers
- Energie noire : 68% de la densité d'énergie de l'Univers



Gravitation quantique

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Même en se cantonnant aux 5% de l'Univers que l'on parvient à expliquer, le défi majeur de la physique, depuis des décennies et encore aujourd'hui, est la difficulté à concilier la théorie de la relativité d'Einstein avec la physique quantique. La première explique bien la gravitation, la seconde les trois autres interactions fondamentales.

Il manque donc à la physique quantique la capacité à expliquer la gravitation. On appelle donc théories de la gravitation quantique les candidates à combler ce manque. Deux pistes sérieuses :

- La théorie M (théorie des cordes)
- La théorie de la gravitation quantique à boucles



Théorie M

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

La théorie M est une unification des différentes théories des cordes qui se sont succédées, de la théorie initiale des cordes à la théorie des supercordes en passant par la théorie des cordes bosoniques.

Elle intègre également la super-symétrie, élément de la théorie « jouet » de la super-gravité, confirmant la représentation de la gravitation par un champ (apparenté à un champ de Maxwell), c'est à dire comprenant des ondes de longueurs et fréquences différentes et se déplaçant à une vitesse invariante (celle de la lumière), indépendamment du référentiel.

Dans cette théorie, toutes les propriétés des particules et les lois de la physique qu'elles impliquent découlent de la façon dont les cordes constitutives de ces particules vibrent dans 11 dimensions d'espace.



Théorie de la gravitation quantique à boucles

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Là aussi la place de choix accordée à la notion de champ gravitationnel postulé par la théorie d'Einstein est confirmée.

Un tel champ peut être parcouru par des lignes de force (comme les fameuses lignes de Faraday que l'on peut mettre en évidence avec de la limaille de fer à proximité d'un aimant).

Quand ces lignes de force sont fermées, comme le suggère cette théorie, on les appelle **boucles**. Aux intersections entre ces boucles se matérialisent des quanta du champ gravitationnel qui sont des « grains » d'espace (conférant à ce dernier une nature discrète, en rupture avec le continuum décrit par Einstein).

Théorie intéressante à plus d'un titre : constante cosmologique, franchissement du mur de Planck (Big Bounce), équilibrage des équations du modèle standard des particules, nouvelle explication du temps et ... graviton.



A la recherche du graviton

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

La mécanique quantique s'appuie sur la description d'un Univers constitué de particules de toutes sortes et se composant les unes les autres à la manière d'une jeu de construction microscopique.

On recherche activement le **graviton**, particule subatomique qui serait responsable de la gravitation.

Son existence n'est pas prédite par la théorie d'Einstein (mais rien de ce qui constitue la physique quantique ne l'a été). Elle est, en revanche, prédite aussi bien par la théorie M que par la théorie de la gravitation quantique à boucles. Elle reste, pour l'heure, hypothétique, mais on a quelques bonnes raisons de soupçonner sa confirmation un jour prochain.



Le graviton pour compléter le tableau du champ gravitationnel

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Une notion que les différentes théories de la gravité quantique ne remettent pas en cause est l'idée que la gravitation prend la forme d'un champ. Parallèlement à la relativité restreinte s'est développée la physique quantique et la théorie quantique des champs qui appartient à son modèle standard.

Les bons résultats dans ce domaine de l'électrodynamique quantique ont conduit à une remodelisation de l'électromagnétisme, qui associe une onde (la lumière) et une particule (le photon). On a donc une construction physique qui associe **un champ, une onde et une particule**.

En 2016, l'existence des ondes gravitationnelles est confirmée. On a donc un champ gravitationnel et des ondes gravitationnelles.

Que manque t'il alors pour que le tableau soit complet ?



Le graviton pour compléter la photo de famille des bosons

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Dans la théorie quantique des champs, chacune des interactions fondamentales autres que la gravité est associée à des particules médiatrices (bosons).

Interaction	Boson(s)
Electromagnétisme	Photon
Interaction nucléaire faible	Bosons W^+ , W^- et Z^0
Interaction nucléaire forte	Gluon

Ce serait une singularité que la gravitation soit la seule interaction fondamentale à ne pas avoir son boson, le graviton.



Ne pas confondre graviton et boson de Higgs

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

On a entendu dire que le boson de Higgs est la particule qui donne sa masse à la matière. Or la gravitation se manifeste notamment par une attraction entre objets massifs, ou une déformation de l'espace temps autour des objets massifs. On pourrait donc être tenté de faire l'association suivante :

Boson de Higgs → *masse (donc poids)* → *gravitation*

Mais la gravitation **ne provoque pas** la masse, pas plus que la masse provoque la gravitation. La gravitation **interagit** avec la masse.

Le boson de Higgs (H^0) est le boson de l'**interaction électrofaible** (donc pas celui de la gravitation), résultant de l'union (à 10^{15}°C) des interactions électromagnétique et nucléaire faible.



La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

Idées reçues



Pourquoi les spacionautes flottent-ils dans la station spacia internationale ?

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idees reçues

La station spatiale internationale n'orbite « qu'à » 400 kilomètres de la surface de la Terre (si elle passait à la verticale de Paris, elle en serait plus proche que ne l'est Strasbourg). A cette distance, le champ gravitationnel de la Terre est à peine moins puissant qu'à sa surface.

Les spacionautes ne flottent donc pas du fait d'une diminution du champs gravitationnel (microgravité), comme beaucoup de gens le croient. Si c'était le cas, on observerait également une grosse distorsion du temps tel qu'il s'écoule pour eux et pour nous ; or nous parvenons à converser normalement avec eux.

Ils flottent du fait qu'ils sont en « chute » autour de la Terre à la même vitesse que la station spatiale internationale elle même. Ont reproduit ce phénomène en avion sans se mettre en orbite autour de la Terre (vol parabolique).



Qui tourne autour de qui ?

La gravitation

La gravitation
dans l'histoire
des sciences

L'étude de la
gravitation
aujourd'hui

Idées reçues

L'observation du système solaire donne l'impression que les gros corps produisent un effet exclusif sur les petits, que les petits corps tournent autour des gros et pas l'inverse.

La réalité est un peu plus complexe. L'effet de la gravitation entre deux corps est mutuel. Mais il est proportionnel à la masse de chacun des objets. Deux corps, sous l'effet de la gravité, entrent en rotation autour d'un centre qui est situé sur la ligne reliant leurs barycentres, à une distance inversement proportionnelle au rapport de leur masses.

Pour deux corps de masses égales, ce centre de rotation se situera à égale distance des deux corps. Quand la masse d'un corps est suffisamment supérieure à celle de l'autre, ce centre de rotation peut se retrouver en son sein. Sa rotation prendra alors plutôt la forme d'une oscillation.