

Le temps (6)

- Mécanique quantique, relativité générale et « problème du temps »
- Émergence
- Nature, dimensions et « existence »

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
7. Mécanique classique
8. Relativité restreinte
9. Relativité générale
10. Mécanique quantique
25. Au-delà de la physique actuelle
27. Vocabulaire (théorie quantique des champs)
31. Matière et rayonnement (théorie)
42. Temps (nature, 1), 43. Temps (nature, 2)



Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire

<https://pixabay.com/photos/nature-night-sky-stars-time-lapse-1836563/>

Le principe de Mach

- Principe philosophique du XIXe
- Les propriétés d'un objet en mouvement (notamment inertie) dépendent de **ses interactions avec le reste de l'Univers** et pas (uniquement) de **propriétés intrinsèques**
 - Un objet a une inertie en raison de l'influence gravitationnelle des autres objets de l'Univers
- Remet en question le fait qu'espace et temps soient **absolus**
 - Le mouvement d'un objet ne peut être décrit que par rapport aux autres objets

- → On ne s'intéresse plus à la **relation d'un objet avec l'espace-temps**, mais seulement à **ses relations avec les autres objets**

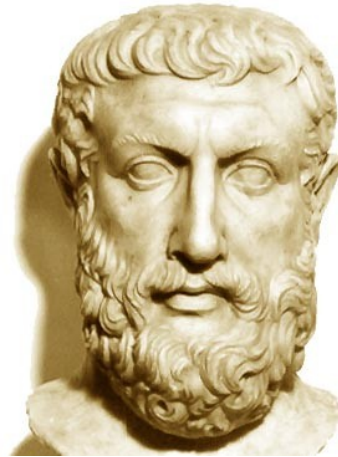
« Les objets ne se déplacent pas par rapport à l'espace-temps, ni par rapport à quoi que ce soit d'extérieur : ils se déplacent les uns par rapport aux autres. La relativité générale décrit le mouvement relatif d'entités dynamiques (champs, fluides, particules, planètes, étoiles) les unes par rapport aux autres. »
(Carlo Rovelli)

Héraclite vs. Parménide

- Philosophes présocratiques
- Héraclite d'Éphèse :
 - Partisan du mouvement, du « devenir » comme principe naturel
 - Caractère temporel de la réalité
 - « On ne se baigne jamais dans le même fleuve »
 - « Le Soleil est nouveau chaque jour »
- Parménide d'Élée :
 - « Philosophe de l'immuable »
 - Différence entre l'Être et le non-Être
 - « L'Être est, le non-Être n'est pas »
 - « Tu ne réussiras pas à couper l'Être de sa continuité avec l'Être, de sorte qu'il ne se dissipe au-dehors, ni il ne se rassemble. »



Héraclite



Parménide

Substantiel vs. relationnel



- Espace et temps « **substantiels** » ou « **relationnels** »
 - Controverse Leibniz / Clarke : c. 1715
 - **Deux conceptions radicalement opposées**
 - **Substantiel (Clarke / Newton) :**
 - L'espace existe en lui-même et **contient** des objets (**espace absolu newtonien**)
 - Le temps est absolu/newtonien, il n'est pas affecté par les événements ≈ grande horloge universelle, qui se poursuit même en l'absence de tout mouvement
 - = « la scène existe même sans les acteurs »
 - **Relationnel (Leibniz) :**
 - Différent de relativiste (lié aux théories de la relativité – la RR n'est pas relationnelle)
 - L'espace **est** la relation de contiguïté entre les objets = distance entre eux = « **ordre des coexistants** »
 - Le temps est créé par les événements = « **ordre des successions** »
 - Pas de valeur **ontologique**, seulement **logique** (« **relation d'ordre** »)

- « Si l'espace et le temps sont de nature relationnelle, cela signifie que **nous n'habitons pas l'espace** et que **nous n'évoluons pas dans le temps** »
- Dans ce cas, **comment réconcilier la science fondamentale et l'observation commune ?**

Larousse : Ontologie = « théorie de l'être »

LE PROBLÈME DU TEMPS



L'équation de Schrödinger



- Écrite en 1925

$$\hat{H} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle$$

- $H =$ « **hamiltonien** » :

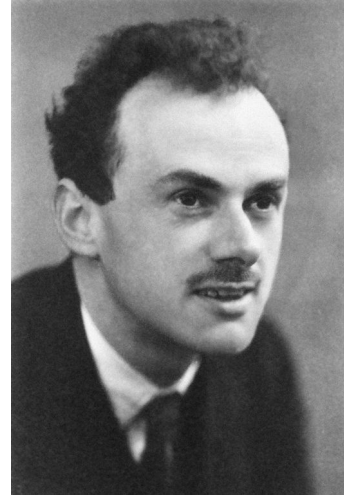
- Ex. : pour une particule de masse m dans un potentiel V scalaire

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \frac{\hat{\mathbf{P}}^2}{2m} |\Psi(t)\rangle + V(\hat{\mathbf{R}}, t) |\Psi(t)\rangle$$

$$i^2 = -1$$

- On reconnaît **énergie cinétique** et **potentiel** (cf mécanique classique i.e. non relativiste)
- **Équation non relativiste, incluant un temps extérieur, absolu, non lié à l'espace = temps newtonien**

L'équation de Dirac (1928)



- Invariance du quadrivecteur impulsion-énergie (propriété de la RR)

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

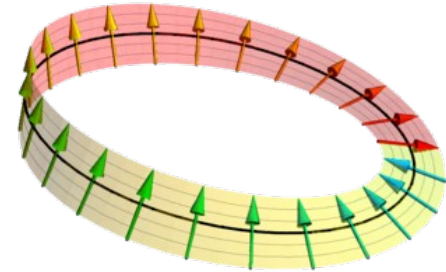
- Application à la mécanique quantique $E \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}$ et $\vec{p} \rightarrow -i \vec{\nabla}$

- → donne l'équation de Klein-Gordon $(\partial^\mu \partial_\mu + m^2) \psi = 0$

« notation covariante »
 $\mu = 0, 1, 2, 3$
0 : temps

- Dirac a eu l'idée de « prendre la racine carrée »

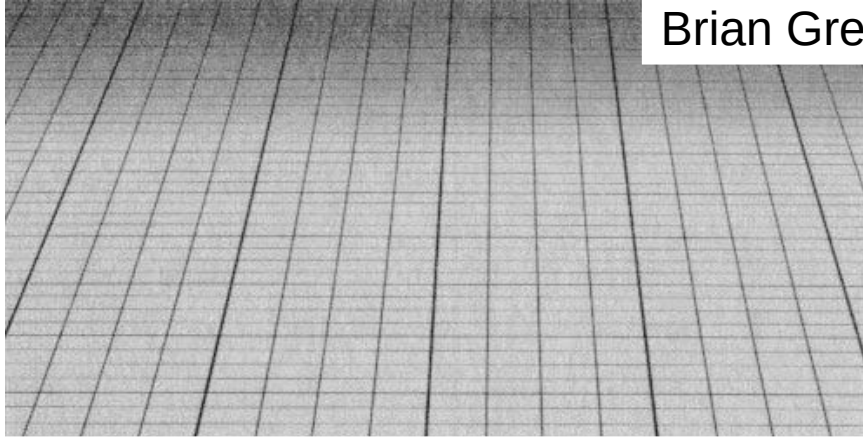
$$(i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = 0$$



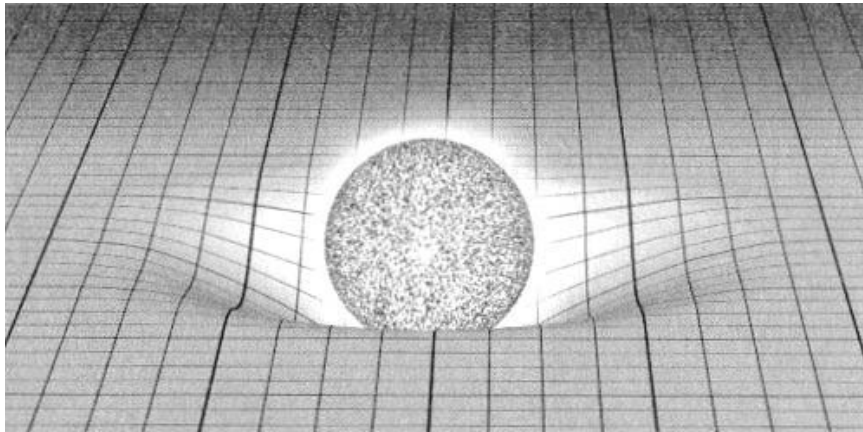
- Ψ : « **spinne(u)r** » de Dirac à 4D, décrivant une **particule de spin 1/2**
- **Donc l'équation de Dirac intègre bien un temps, mais un temps relatif (RR) !**

Représentation de l'espace-temps

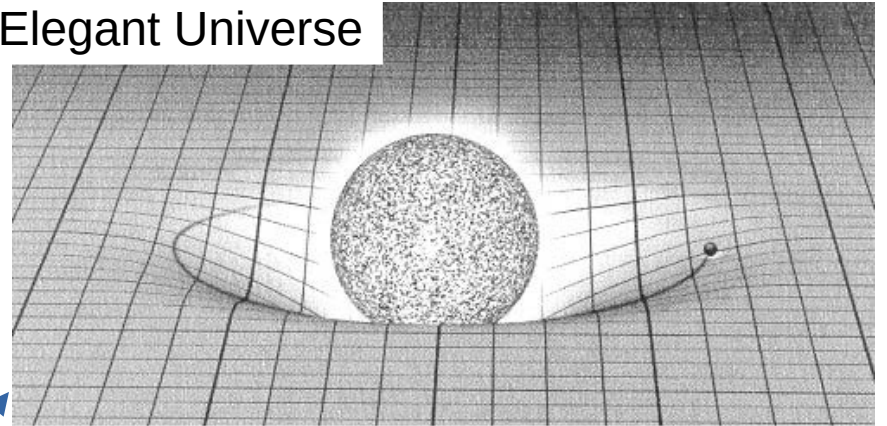
Brian Greene, The Elegant Universe



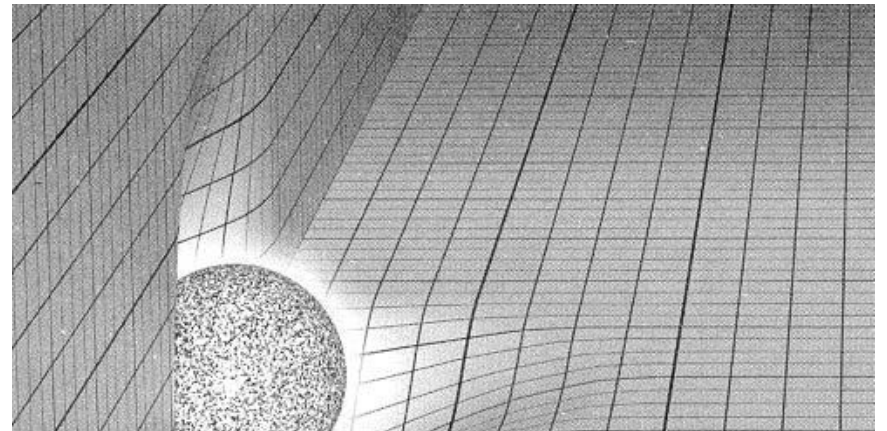
Espace-temps (plat) de Minkowski



Espace-temps (courbe) de la RG



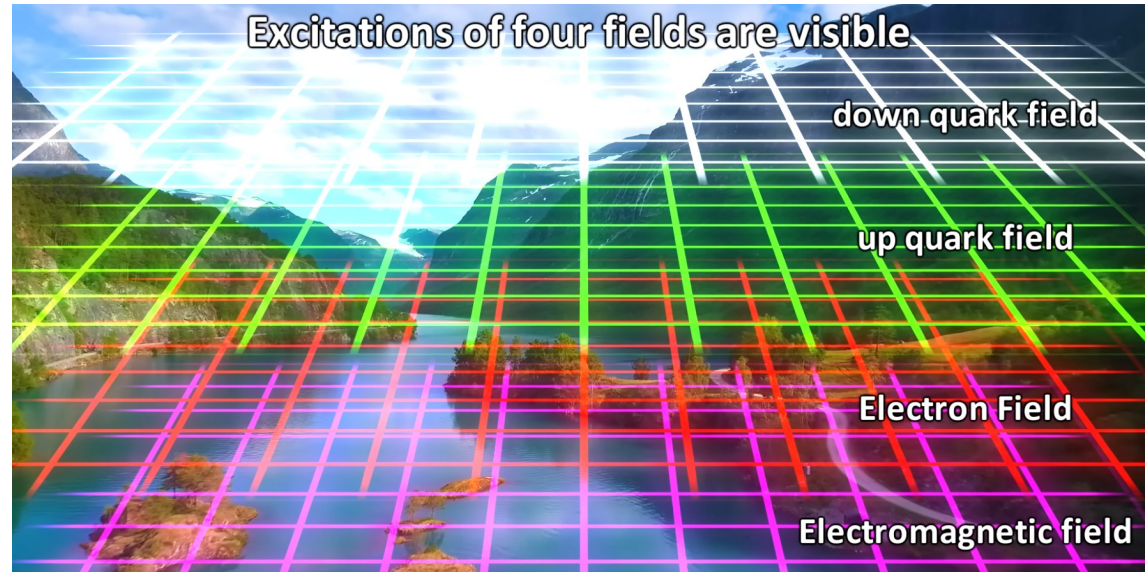
Rotation de la Terre autour du Soleil



Représentation plus réaliste en 3D

Le « problème du temps » (1)

- Temps absolu et universel : le même en tout point de l'Univers et indifférent au mouvement
 - (de même que l'espace)
 - Temps et espace = **trame de fond** dans laquelle se produisent les événements
- Utilisé en **mécanique classique** (« newtonienne ») et en **mécanique quantique** (« équation de Schrödinger »)
- **Théorie quantique des champs** : prise en compte d'une relativité « restreinte » de l'espace-temps, mais qui reste une **toile de fond extérieure**



Le « problème du temps » (2)

- En relativité générale, l'espace-temps n'est **plus un cadre distinct et fixe**, il devient un **paramètre dynamique** (à l'origine de la gravitation) → **ondes gravitationnelles**
- « **Covariance** » : la RG ne dépend pas du **choix des coordonnées** : coordonnées **interchangeables**
 - Impossible de distinguer l'**évolution temporelle** d'un **changement de coordonnées**
→ ~ plus de variable **identifiable** comme le temps
- Des mesures « **relationnelles** » donnent $a(b)$, $b(c)$, ... plutôt que $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$, ...
 - Un voyage en train dure 3h = la petite aiguille de ma montre s'est déplacée $3 \times 3\,600 = 10\,800$ fois : **on compare 2 phénomènes** (ou sabliers, jours, lunaisons, années, ...)
 - **Temps absolu** : un phénomène observable acquiert le statut de **variable indépendante** (définition de la seconde = 9 912 631 770 oscillations de l'onde émise lors de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé)
~ similaire à l'introduction d'une monnaie pour s'affranchir des limites du troc

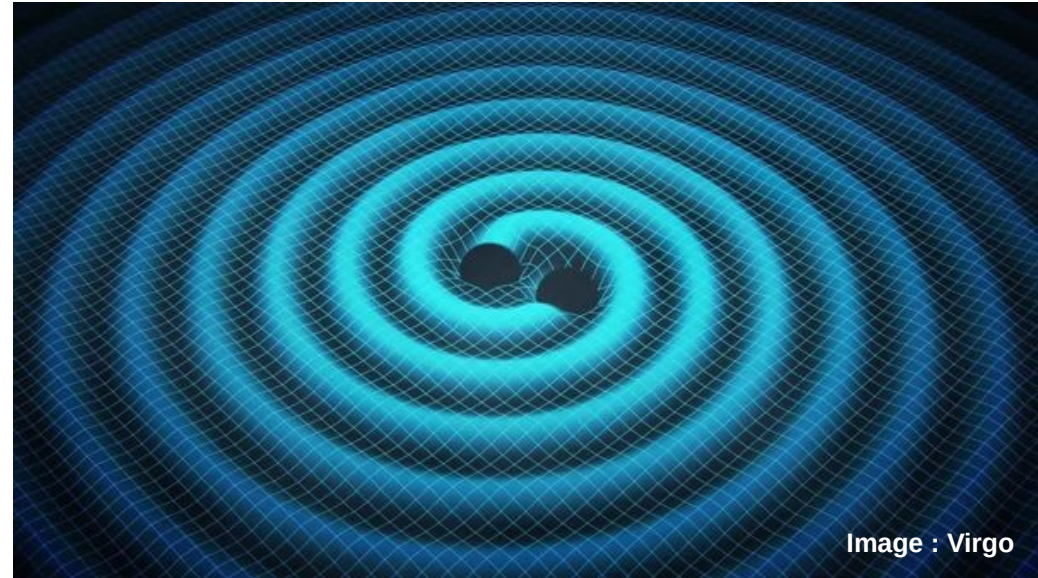


Image : Virgo

PROPRIÉTÉ INTRINSÈQUE OU ÉMERGENTE ?



La gravité quantique



Image : Interstellar, C. Nolan, 2014

- But : appliquer les principes de la **mécanique quantique** à la **relativité générale** (« **unifier** »)
 - Décrire les phénomènes impliquant de **grandes quantités de matière / d'énergie** sur de **petites dimensions spatiales**
 - → trous noirs, origine de l'Univers
- Principales théories candidates :
 - **Théorie des (super)cordes**
 - **Gravité quantique à boucles**
 - Mais beaucoup d'autres !

- Difficultés :
 - **Théoriques** : introduction du **graviton**, boson vecteur de la gravité
 - Mais il interagit avec la masse, donc l'énergie, donc avec lui-même, ce qui crée de nouveaux gravitons, etc.
 - → **valeurs infinies** non « **renormalisables** »
 - **Expérimentales** : énergies inaccessibles à l'heure actuelle (échelle de Planck)
 - théories non « **falsifiables** »

L'équation de Wheeler-DeWitt (1967)

- Tentative de réconcilier MQ et RG : quantification du champ gravitationnel
- Cadre de raisonnement similaire à celui utilisé par Dirac pour son équation et la théorie quantique du champ électromagnétique (« **quantification canonique** »)

$$\hat{H}(x) |\Psi\rangle = 0$$

$$\hat{H} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle$$

- Ressemble à l'équation de Schrödinger mais **interprétation très différente** !
 - $|\psi\rangle$ n'est plus la fonction d'onde spatiale d'un système, mais la **fonction d'onde de l'Univers qui décrit toutes les configurations de l'espace-temps** (« **super-espaces** »). Elle contient toute l'information sur la matière et l'énergie de l'Univers, ainsi que sa géométrie
 - \hat{H} est le hamiltonien (~énergie) du système
- Propriété fondamentale : **cette équation ne fait pas explicitement apparaître la variable temps (« =0 ») !**
- Mais résolution très complexe...

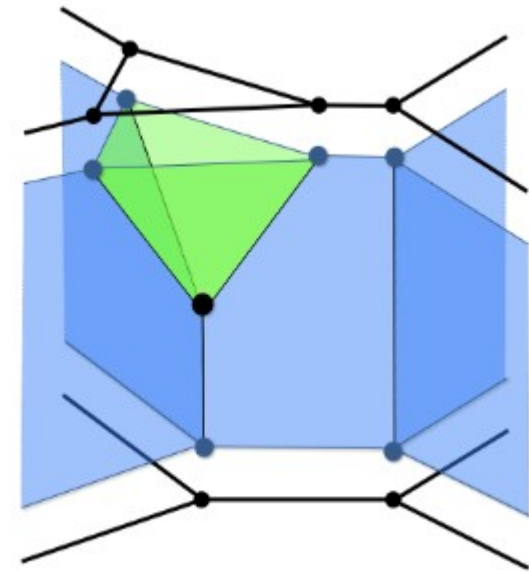
Gravité quantique à boucles

- But : quantifier la gravité, comme éq de WdW
- Hypothèse fondamentale : l'espace-temps a une structure **discrète** (contrairement à RG)
- L'espace est constitué de « **grains d'espace** » = **quanta du champ gravitationnel** → ne sont pas dans l'espace mais sont l'espace
 - Liens entre les quanta = « **réseau de spin** » = état quantique de la courbure de l'espace
- Et le temps ?
 - **Les équations de la GQB ne font pas intervenir de variable temporelle** → relations entre quantités observables sans faire appel à une notion sous-jacente de temps : « il n'y a pas de bonne horloge à l'échelle de Planck » (C. Rovelli)
 - Les quanta d'espace **n'évoluent pas dans le temps** → le temps naît de la succession des états des quanta du champ gravitationnel = « **mousse de spin** »
 - Espace-temps pas défini entre 2 états...

État final Γ'

« Mousse de spin » Δ^*

État initial Γ



www.youtube.com/watch?v=26PIHRRHGTo



Le temps est-il une propriété émergente ?

- Certaines théories impliquent que le temps est une **propriété « émergente »**, c'est-à-dire qu'il **naît avec le Big Bang et n'existait pas avant**.
- Le temps existe bien, mais « de manière dérivée, non fondamentale » : **il émerge mais ne préexiste pas**
 - Dans ce cas, qu'y a-t-il « derrière », de plus fondamental ?
 - Et quelle est la nature du fossé / de la transition entre les deux ?

- **Modèle de Hartle-Hawking** (« Univers sans bord ») :

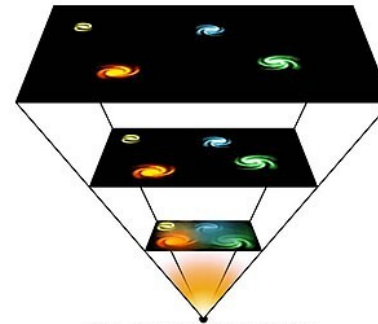
- Solution de l'équation de Wheeler-DeWitt
- **Le temps diverge de l'espace / d'une structure plus fondamentale** à la fin de l'ère de Planck
- Il était auparavant « **imaginaire** » (« **complexe** ») \approx espace

$$\Delta s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2$$

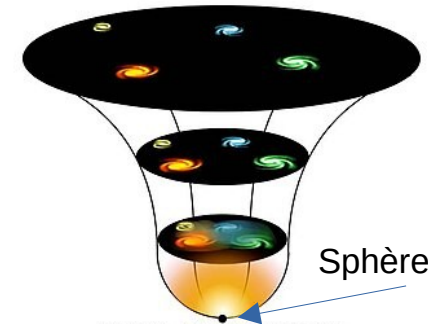
- Il **n'existait pas avant le Big Bang**, donc il n'y a rien avant...

- Est-ce un problème ? **Le temps est-il synonyme de changement ?**

- Si oui, une équation d'évolution sans temps est problématique
- Si non, pas forcément un problème : absence de temps \neq absence de changement



Big Bang Singularity



Hartle-Hawking State

Hypothèse du « **temps thermique** » : à l'échelle macroscopique, le **temps émerge du champ gravitationnel** comme la température émerge des mouvements des particules. (C. Rovelli et A. Connes)

« Il y a deux sortes de personnes dans la gravité quantique.

Ceux qui pensent que l'absence de temps est l'idée la plus belle et la plus profonde de la relativité générale, voire de la science moderne

et ceux qui ne peuvent tout simplement pas comprendre ce que peut signifier une absence de temps et qui voient partout dans la nature la preuve de l'existence du temps. »

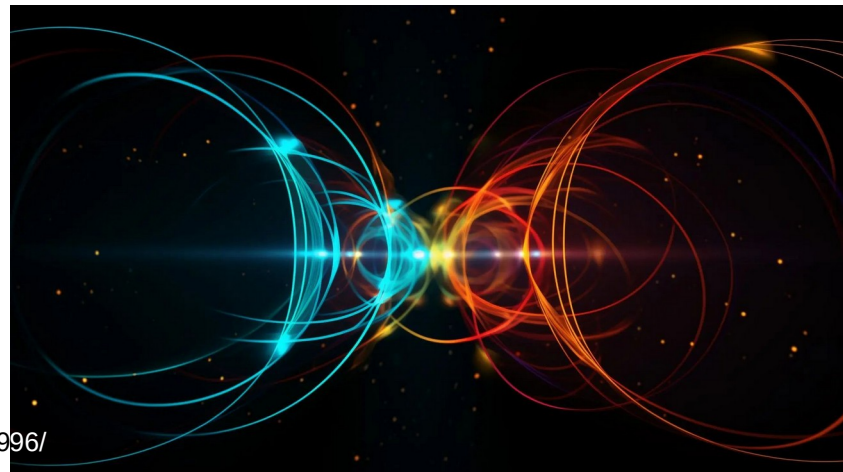
Fotini Markopoulou
« Space does not exist, so time can. »

Temps et intrication quantique

- Page-Wootters (1980's) : un système quantique intriqué **globalement statique** peut contenir des **sous-systèmes qui semblent évoluer pour un observateur interne**
- Le **rôle de l'observateur** et de ses instruments de mesure est fondamental et doit être pris en compte lorsque l'on s'intéresse aux propriétés d'un système
 - Les instruments utilisés pour mesurer l'écoulement du temps sont **intriqués** avec l'ensemble de l'Univers – impossible d'être « en dehors de l'Univers »
 - **Vu de l'extérieur, l'Univers apparaît comme statique mais, vu de l'intérieur, il évolue**
- Mécanisme de Page-Wootters confirmé expérimentalement avec des photons intriqués
 - Validation du principe, pas preuve définitive que c'est ce qui se produit à l'échelle macroscopique
- → **Le temps ne serait pas une variable, mais une conséquence de l'intrication**
- Notre perception de l'écoulement du temps montrerait que notre réalité est intriquée avec un autre système

« Je pense que nous comprenons maintenant que l'espace-temps n'est qu'une représentation géométrique de la structure d'intrication de ces systèmes quantiques sous-jacents »

Mark Van Raamsdonk



revolutionized.com/quantum-entanglement-explained/

arxiv.org/pdf/1310.4691v1

quantamagazine.org/quantum-gravitys-time-problem-20161201/

quantamagazine.org/tensor-networks-and-entanglement-20150428/

trustmyscience.com/temps-illusion-due-enchevetrement-quantique-selon-etude/

futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-effet-epr-fait-il-emerger-temps-cosmologie-quantique-49996/

DIMENSION(S) & NATURE DU TEMPS



Les dimensions supplémentaires

- La théorie des cordes est un cadre théorique à **10 dimensions (9 espace + 1 temps)**
 - Piste théorique d'unification de la RG et la MQ
 - Une interaction entre cordes **évite la singularité** qui se produit entre particules ponctuelles
 - Nous vivons dans un **univers « branaire »** (=tranche tridimensionnelle d'un univers à 9D), les 6 autres dimensions étant **repliées sur elles-mêmes** (à l'échelle de Planck) selon des géométries particulières (de Calabi-Yau)
- En fait, il existe plusieurs théories des cordes, unifiables en une « **théorie M** » à 11 D (10 d'espace + 1 de temps)
 - « **théorie du tout** » ?

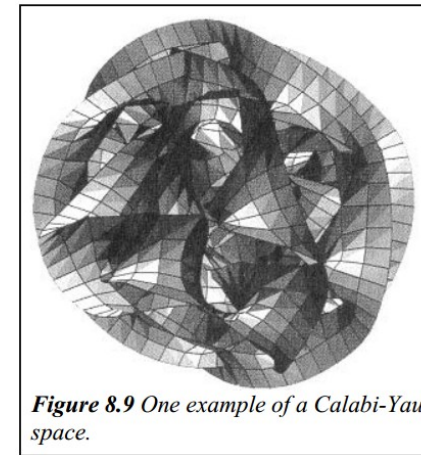
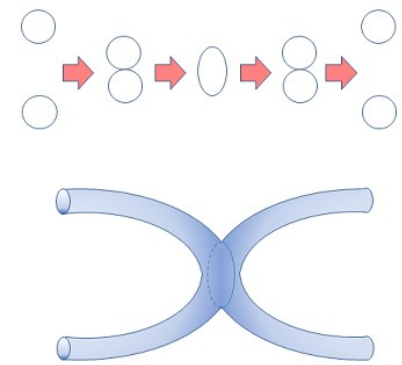
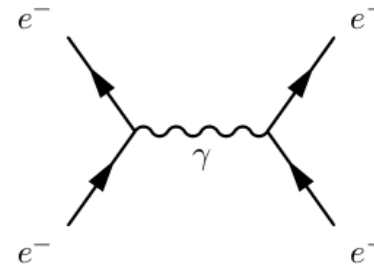
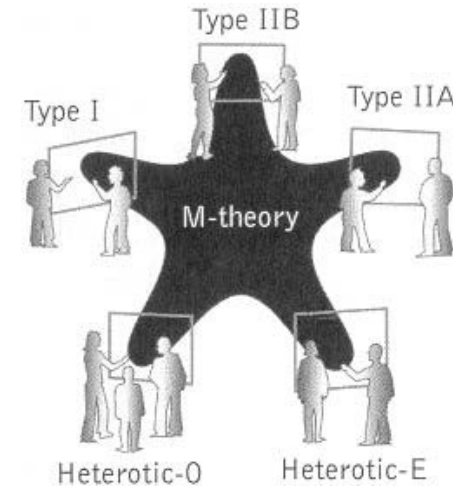
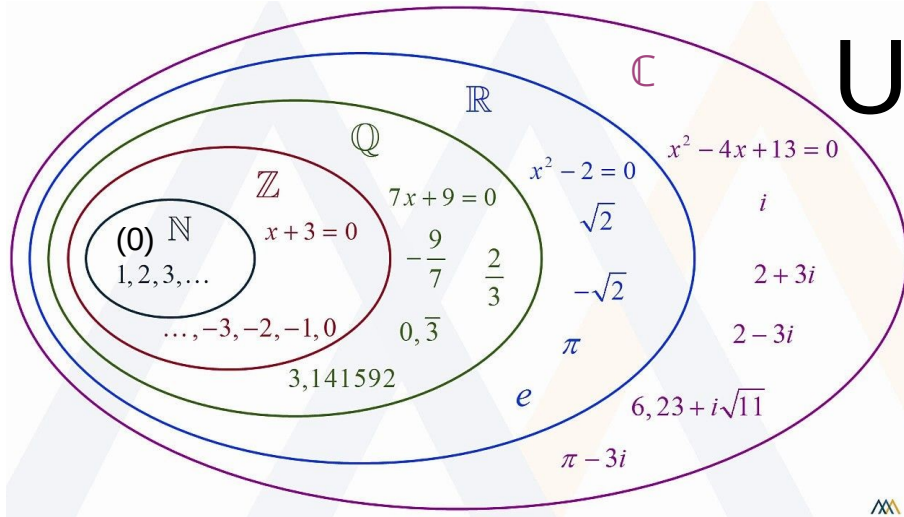


Figure 8.9 One example of a Calabi-Yau space.



Brian Greene, The Elegant Universe

Un temps « imaginaire » ?



$$\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$$

Entiers naturels, entiers relatifs, nombres rationnels, nombres réels, nombres complexes

- Les termes « **réel** » et « **imaginaire** » décrivant des nombres sont un « accident de l'histoire » des mathématiques, tout comme les termes « **rationnel** » et « **irrationnel** »
- « Les termes « **réel** » et « **imaginaire** » sont des reliques pittoresques d'une époque où l'on ne comprenait pas bien la nature des nombres complexes »

– H.S.M. Coxeter, The Real Projective Plane (1949)

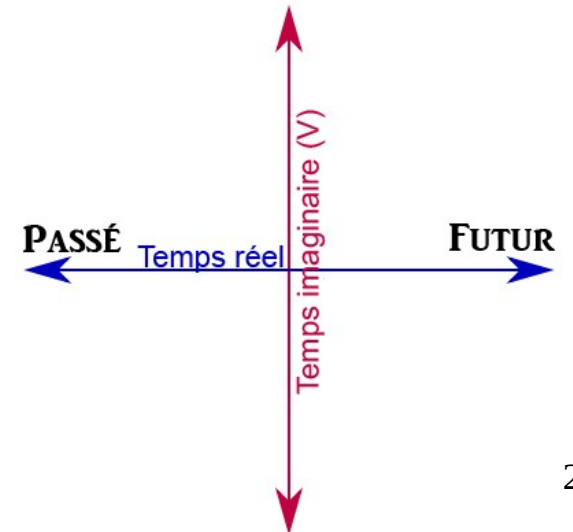
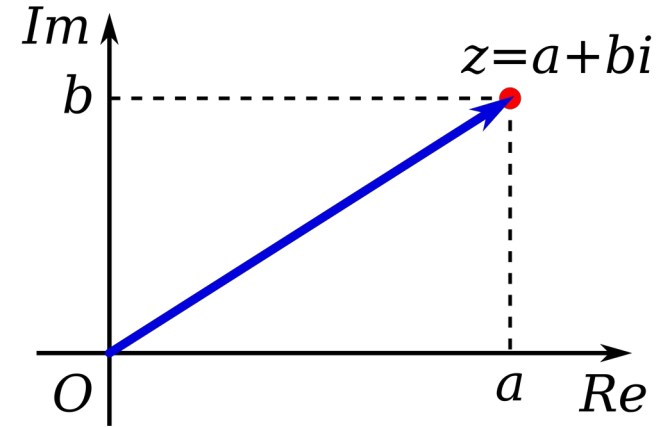
- « On pourrait penser que cela signifie que les nombres imaginaires ne sont qu'un **jeu mathématique décorrélé du monde réel**. Cependant, du point de vue de la philosophie positiviste, **on ne peut pas déterminer ce qui est réel**. Tout ce que l'on peut faire, c'est déterminer **quels modèles mathématiques décrivent l'univers dans lequel nous vivons**. Il s'avère qu'un **modèle mathématique impliquant un temps imaginaire** prédit non seulement des effets que nous avons **déjà observés**, mais également des effets que nous n'avons pas pu mesurer, mais auxquels nous croyons néanmoins pour d'autres raisons. Qu'est-ce qui est réel et qu'est-ce qui est imaginaire ? La distinction n'existe-t-elle que dans notre esprit ? »

– Stephen Hawking, L'Univers dans une coquille de noix, 2001

$$\Delta s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2 \quad 19$$

Plusieurs dimensions temporelles ?

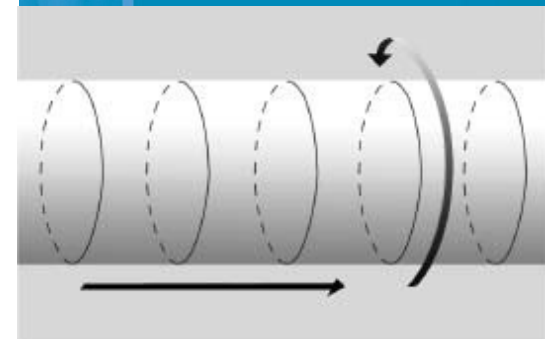
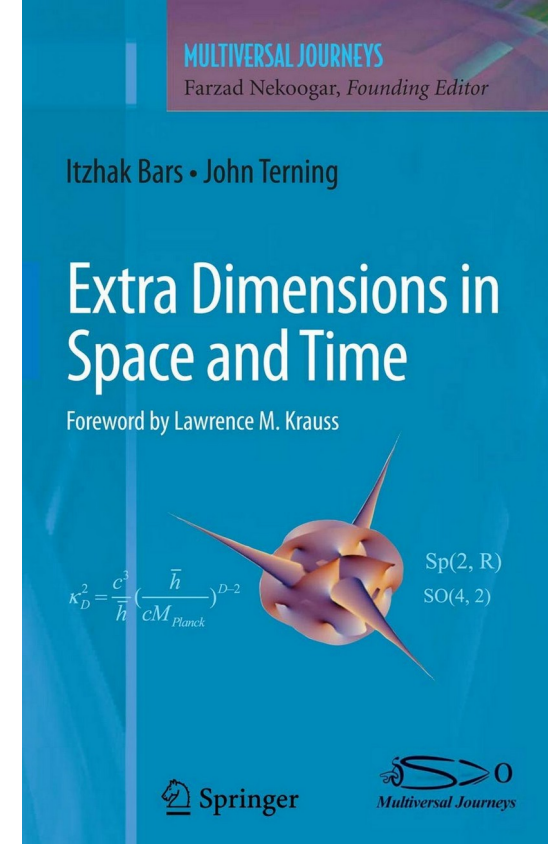
- Hypothétique, deux natures possibles
 1. « **conventionnelle** » mais **compactifiée** (comme en théorie des cordes)
 - → « **théorie F** » à 12 dimensions (10, 2)
 2. Temps « **imaginaire** » (= « complexe »)
 - « **perpendiculaire** » au temps « réel »
 - Permet de résoudre certains problèmes en **mécanique quantique**
 - Permet d'**éviter des singularités** (limites des théories), notamment **le Big Bang** (état de Hartle-Hawking)
- **Pas de relation d'ordre** pour les nombres complexes, contrairement aux nombres réels
Dans ce cas, **le temps ne serait plus linéaire**
 - → notions d'antériorité/postériorité ?



Voir toute sa vie d'un regard ?

- Combien de dimensions ?
- Dimensions repliées sur elles-mêmes ?
- Voyages dans le temps : raccourcis via des boucles/branches ?
- Relations / influences entre différentes dimensions temporelles
 - Liens avec la conscience ??
 - EMI ??
 - Transincarnations ???

Brian Greene, The Elegant Universe





POUR CONCLURE...

Une illusion ?

- Le temps est une illusion.
(Albert Einstein)
- Le temps est une illusion, seul l'éternel existe.
(Friedrich Hegel)
- Le temps est une illusion, seul le changement est réel.
(Héraclite)
- Le temps est une illusion, seule la conscience existe.
(Jean-Jacques Rousseau)
- Le temps est une illusion que nous entretenons.
(Arthur Schopenhauer)

Le temps n'existe pas...



Quand vous dites que « le temps n'existe pas », voulez-vous dire que :

« À l'échelle de Planck, le temps ne s'écoule plus mais émerge de la succession des états superposés du réseau des quanta du champ gravitationnel grâce à une mousse de spin qui emprunte tous les chemins possibles entre ces états » ?

Ou peut-être vous semble-t-il plus juste de dire que « la covariance de la relativité générale introduit la nature relationnelle de l'espace-temps et portait déjà en germe la formulation tridimensionnelle atemporelle des approches canoniques de la gravitation quantique, comme l'équation de Wheeler-DeWitt ou la gravité quantique à boucles » ?

Ou encore que « le temps est, comme l'explique le mécanisme de Page-Wootters, plutôt qu'une variable fondamentale indépendante, une conséquence émergente de l'intrication quantique de l'observateur avec une partie d'un système globalement statique vu de l'extérieur » ?

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle \quad (i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**« Le temps n'existe pas, dit Einstein.
Mais l'heure existe, a dit M.
Honorat. Et, ce soir, elle change. »**

La Justice, 25-26/03/1922 (cité par Thibault Damour)

Les Confessions de saint Augustin

- XI, 14 : Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais ; si on me demande de l'expliquer, je l'ignore. Pourtant je dis hardiment savoir que, si rien ne se passait, il n'y aurait point de temps passé et, si rien n'advenait, il n'y aurait point de temps futur et, si rien n'était, il n'y aurait point de temps présent.

Sénèque – De la brièveté de la vie

I.1 La plupart des mortels, Paulinus, se plaignent de l'injuste rigueur de la nature, de ce que nous naissons pour une vie si courte, de ce que la mesure de temps qui nous est donnée fuit avec tant de vitesse, tant de rapidité, que, à l'exception d'un très petit nombre, la vie délaïsse le reste des hommes au moment où ils s'apprêtaient à vivre. [...]

I.3 Nous n'avons pas trop peu de temps, mais nous en perdons beaucoup. La vie est assez longue ; elle suffirait, et au-delà, à l'accomplissement des plus grandes entreprises, si tous les moments en étaient bien employés.

Mais, quand elle s'est écoulée dans les plaisirs et dans l'indolence, sans que rien d'utile en ait marqué l'emploi, le dernier, l'inévitable moment vient enfin nous presser : et cette vie que nous n'avons pas vue marcher, nous sentons qu'elle est passée.

I.4 Voilà la vérité : nous n'avons point reçu une vie courte, c'est nous qui l'avons rendue telle : nous ne sommes pas indigents, mais prodigues. [...] notre vie a beaucoup d'étendue pour qui sait en disposer sagement.

Pour aller plus loin

