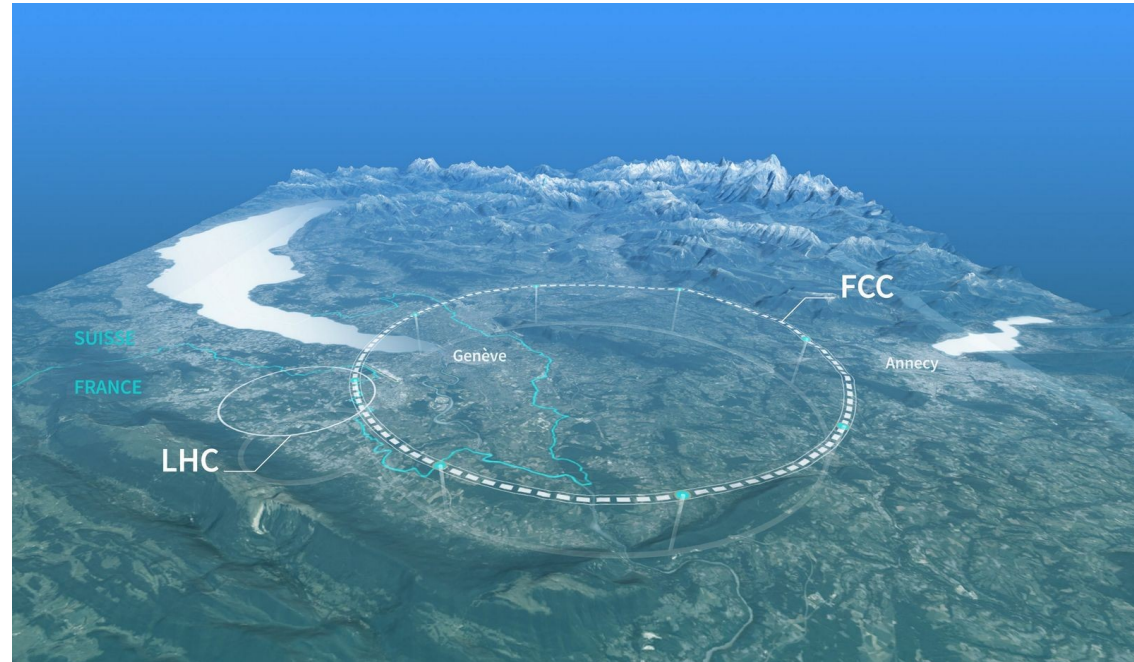


Au-delà de la physique actuelle

- Physique quantique, relativité générale et modèle standard
- Les unités de Planck
- Théorie des cordes et gravité quantique à boucles
- Temps, causalité, information, conscience

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

Images : Wikipédia ou Brian Greene, l'Univers élégant sauf mention contraire

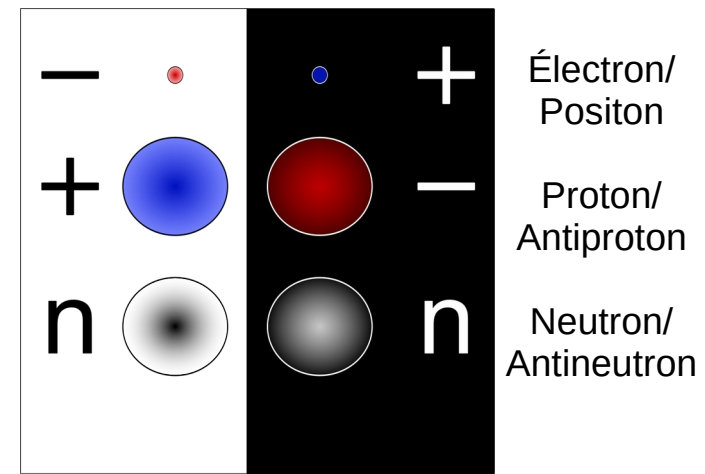


Future Circular Collider (CERN)
 $E = 100 \text{ TeV}$ (LHC : $E = 13 \text{ TeV}$)

Notions utilisées :
À peu près tout...

Le « modèle standard »

Particules élémentaires et bosons vecteurs qui composent toute la matière connue



	masse →	charge →	spin →																									
QUARKS	≈2.3 MeV/c ²	2/3	1/2	u	up	≈1.275 GeV/c ²	2/3	1/2	c	charm	≈173.07 GeV/c ²	2/3	1/2	t	top	0	0	1	g	gluon	≈126 GeV/c ²	0	0	0	H	boson de Higgs		
	≈4.8 MeV/c ²	-1/3	1/2	d	down	≈95 MeV/c ²	-1/3	1/2	s	strange	≈4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2	b	bottom	0	0	0	γ	photon								
	0.511 MeV/c ²	-1	1/2	e	électron	105.7 MeV/c ²	-1	1/2	μ	muon	1.777 GeV/c ²	-1	1/2	τ	tau	91.2 GeV/c ²	0	1	0	Z ⁰	boson Z ⁰							
	<2.2 eV/c ²	0	1/2	ν _e	neutrino électronique	<0.17 MeV/c ²	0	1/2	ν _μ	neutrino muonique	<15.5 MeV/c ²	0	1/2	ν _τ	neutrino tauique	80.4 GeV/c ²	±1	1	1	W [±]	boson W [±]							

BOSONS DE JAUGE

Ne sont pas représentés :

- Les **antiparticules** des quarks et des leptons (charge opposée)
- Le **graviton** (hypothétique)

Théorie :

- Théorie **électrofaible** (inclut électrodynamique quantique)
- **Chromodynamique** quantique = description des 3 forces par la **physique quantique**

Les forces fondamentales

Elles gouvernent les **interactions** entre les particules

Elles sont transmises par des « **bosons vecteurs** »

Interaction	Théorie courante	Médiateurs	Masse (GeV/c ²)	Puissance relative approximative	Rayon d'action (m)	Dépendance de distance
Forte	Chromodynamique quantique (QCD)	huit gluons	0	1	$2,5 \times 10^{-15}$	$\frac{1}{r^7}$
Électromagnétique	Électrodynamique quantique (QED)	photon	0	10^{-2}	∞	$\frac{1}{r^2}$
Faible	Théorie électrofaible	W^+ , W^- , Z^0	80, 80, 91	10^{-5}	10^{-18}	$\frac{1}{r^5}$ à $\frac{1}{r^7}$
Gravitation	Relativité générale	graviton (postulé)	0	10^{-40}	∞	$\frac{1}{r^2}$

La physique actuelle

La relativité générale

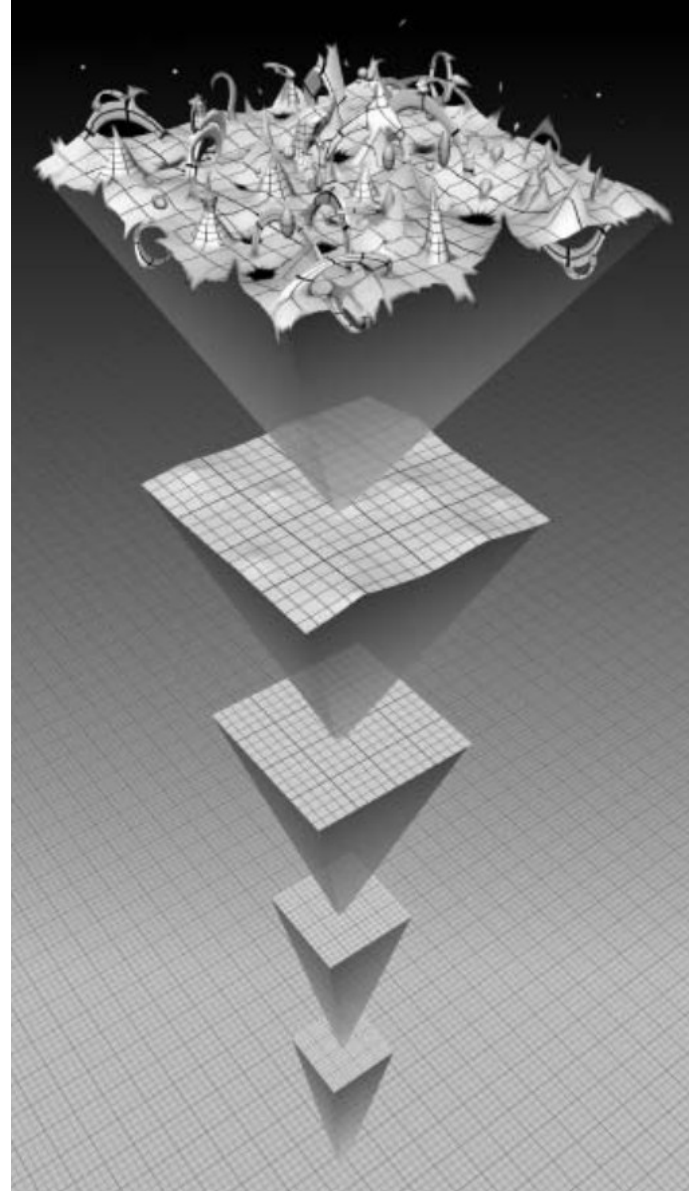
- Décrit la **gravité**
- S'applique à **grande échelle**
 - Planètes, étoiles, galaxies
- Espace-temps lisse et continu mais **courbe**
- Temps **relatif** et **malléable**
- Relativité causale, locale, **déterministe, continue**

La RG requiert la connaissance de la densité d'énergie/masse en chaque point de l'espace-temps.

Le principe d'incertitude de la MQ implique qu'on ne peut connaître avec précision l'énergie en un point donné à un instant donné.

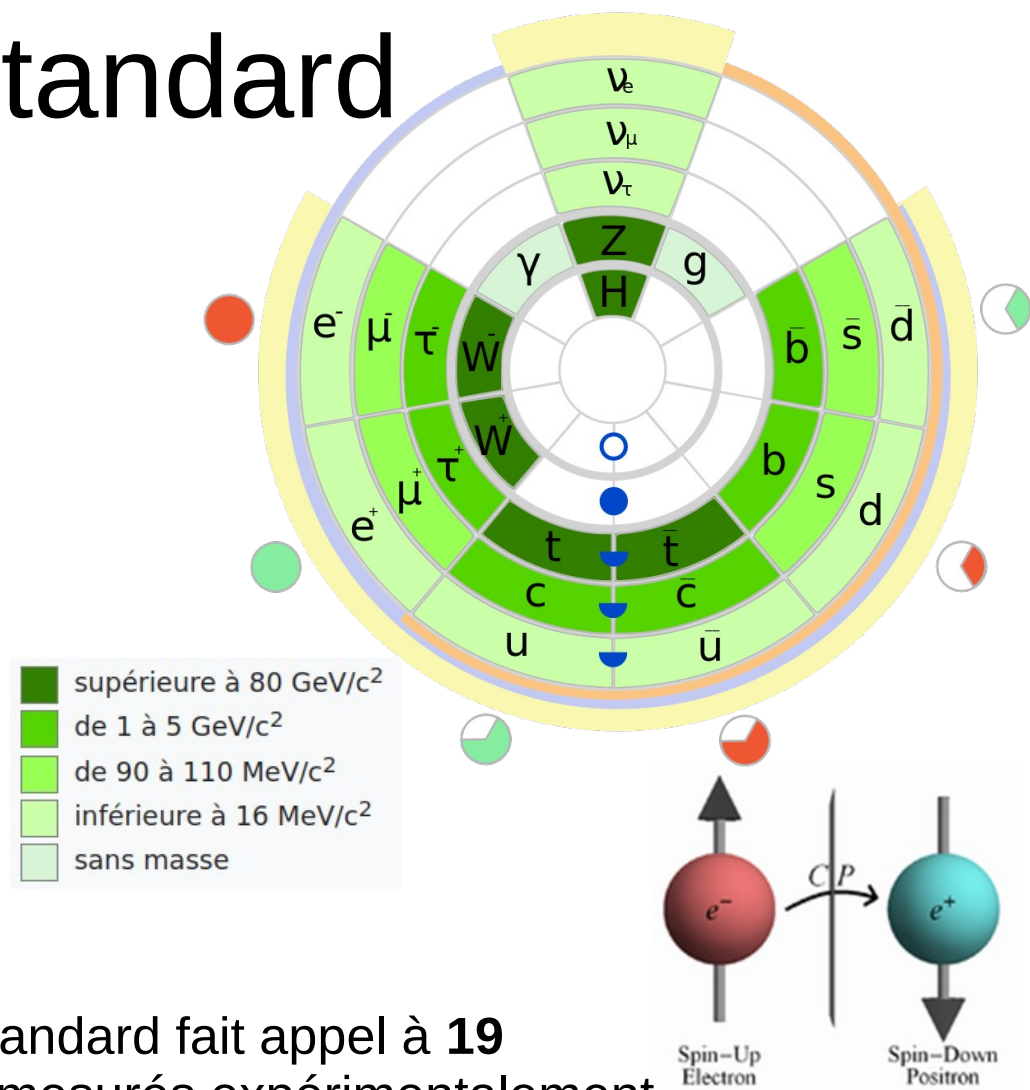
La mécanique quantique

- Décrit les **3 autres forces**
 - Électromagnétique, faible, forte
- S'applique à **petite échelle**
 - Particules (élémentaires)
- Espace-temps **plat** mais **fluctuations, incertitude**
- Temps **universel** et **absolu**
- **Quantifiée**, causale mais non locale, **probabiliste**



Limites du modèle standard

- **Incompatibilité entre MQ et RG**
 - « **Paradoxe de l'information** » (Hawking, 1976) : l'information portée par une fonction d'onde franchissant l'horizon d'un trou noir qui par la suite s'évapore est perdue – impossible en MQ (principe d'**évolution unitaire** – équation de Schrödinger)
 - Même si **théories couronnées de succès** !
- Intérieur d'un trou noir, Big Bang
- Accélération de l'expansion de l'Univers
- Matière/énergie noires
- Violation de la symétrie CP
- Oscillations des neutrinos
- Le modèle standard fait appel à **19 paramètres** mesurés expérimentalement (notamment les masses) → peu satisfaisant



Unités de Planck

- Longueur (ou échelle) de Planck = **limite d'indiscernabilité entre 2 points** :

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

- Temps de Planck = temps mis par un photon pour parcourir la longueur de Planck dans le vide (**plus petit temps ayant une signification**)

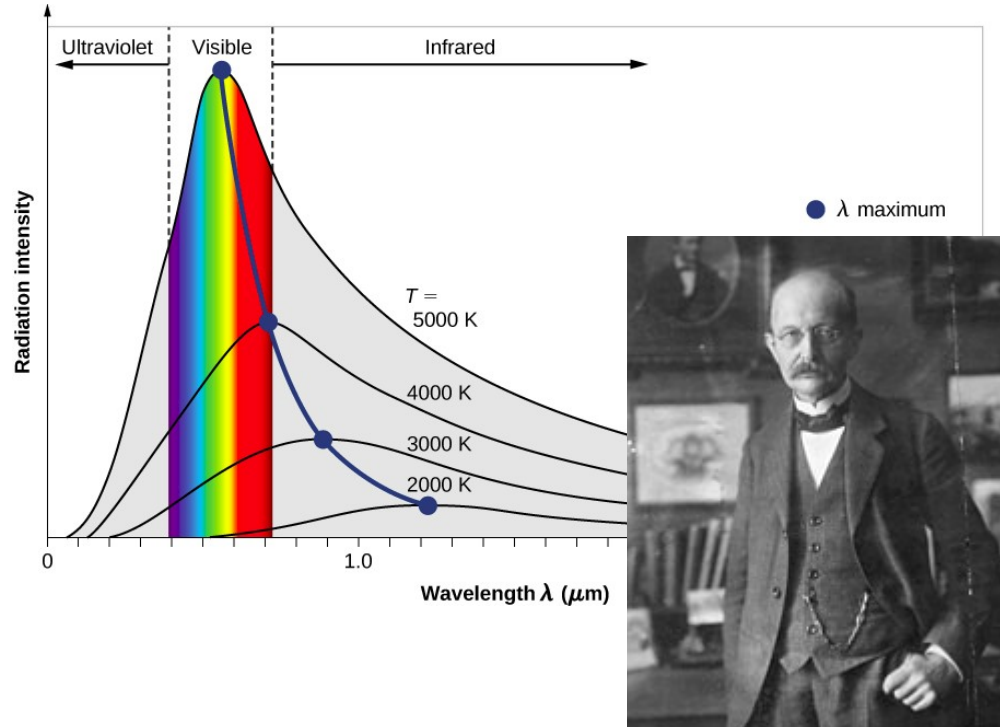
$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s} \approx 10^{-43} \text{ s}$$

- Énergie de Planck : **énergie d'un photon** dont $\lambda = l_P$

$$E_P = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} \approx 2 \times 10^9 \text{ J} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

- Température de Planck = T_P du **corps noir** dont le maximum d'émission a pour longueur d'onde $\lambda = l_P$

$$T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}} = 1,4 \times 10^{32} \text{ K}$$



Limites fondamentales des théories physiques actuelles :
plus petites/grandes valeurs ayant une signification physique

Noter la présence de \hbar (constante de Planck, MQ) et G (gravitation, RG)

La gravité quantique



- 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** »

La théorie des (super)cordes

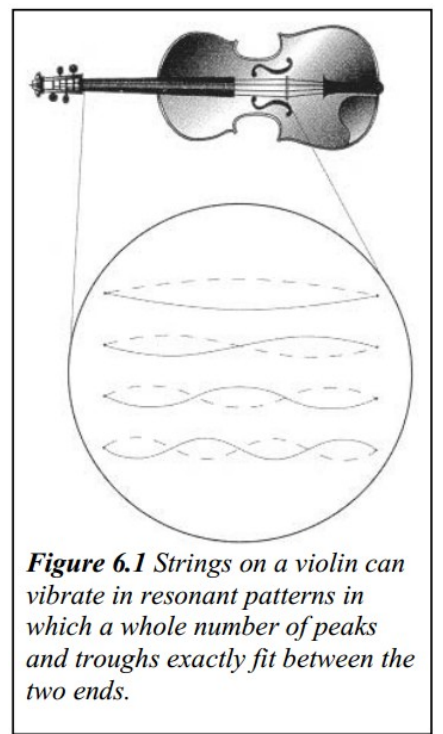
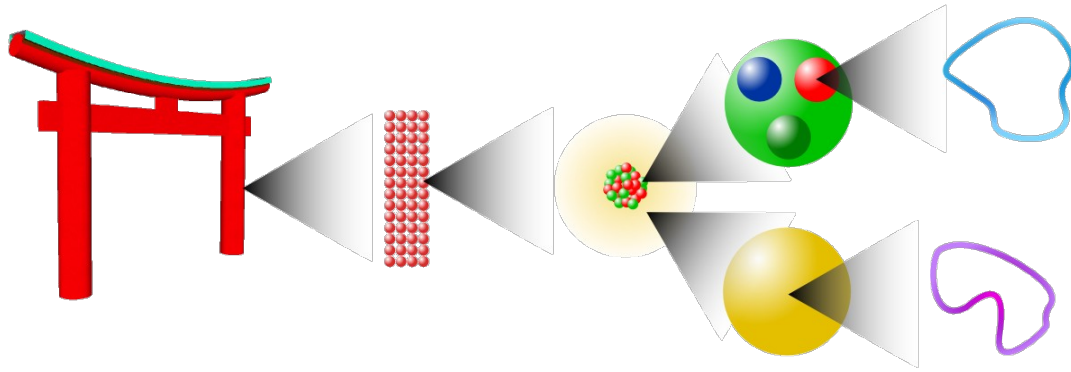


Figure 6.1 Strings on a violin can vibrate in resonant patterns in which a whole number of peaks and troughs exactly fit between the two ends.

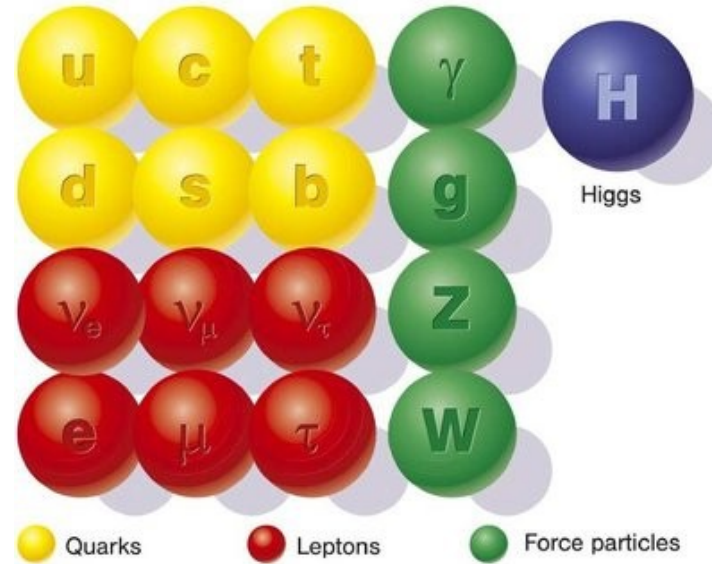
- Particules élémentaires **ponctuelles** représentées par des « **cordes** »
 - Leur **extension spatiale** prémunit les équations contre les **divergences** rencontrées avec les **particules ponctuelles**
 - Cordes **ouvertes** ou **fermées**
- **Un seul objet** dont les différentes **vibrations** représentent les particules du modèle standard (dont le **graviton** → **gravité quantique**)
- Propose des **scénarios** « **pré Big-Bang** »

Résonances des cordes ouvertes et fermées

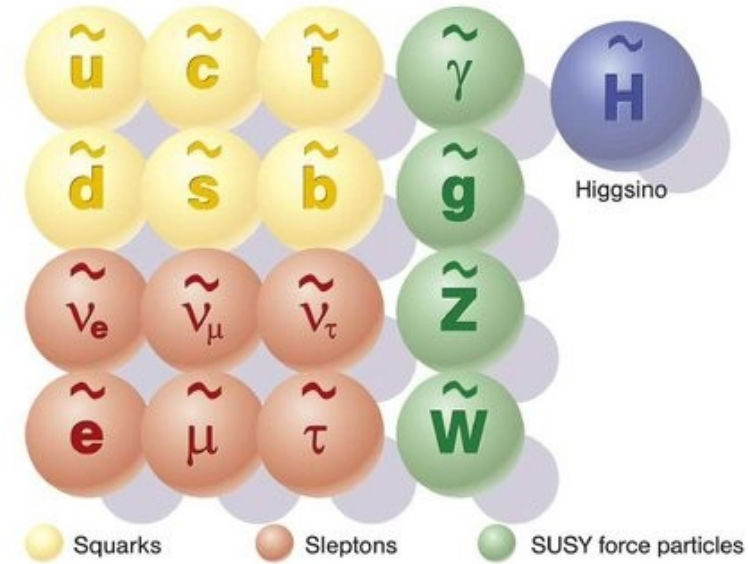


La supersymétrie (SuSy)

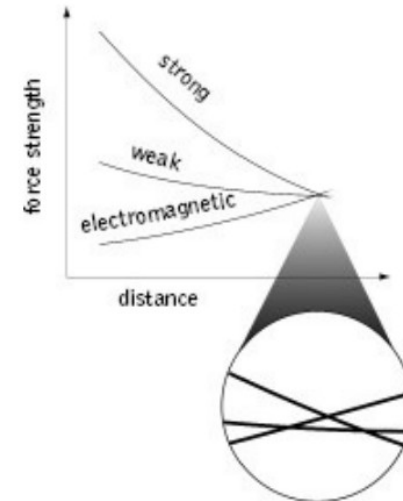
Standard particles



SUSY particles



- = symétrie entre **fermions** (spin $\pm 1/2$) et **bosons vecteurs** (spin 0, 1, 2 ?)
- Dans le cadre de la SuSy, chaque fermion est associé à un « **superpartenaire** » boson (**squark**, **slepton**, **sneutrino**) et chaque boson, à un **superpartenaire** fermion (**gluino**, **photino**, **wino** et **zino**)
- → **MSSM** (Minimal Supersymmetric Standard Model)
- **Nécessaire à une unification exacte des forces**

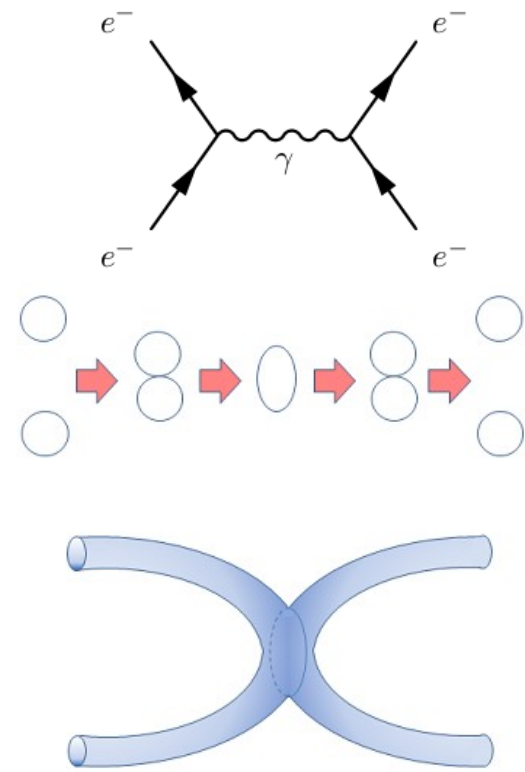


Les dimensions supplémentaires (1)

- Les cordes évoluent dans un **espace à 10 dimensions (9 spatiales + 1 temporelle)**
 - Premier modèle dans les années 60 : **théorie des cordes bosoniques** à 26D
 - Nous vivons dans un **univers « branaire »** (=tranche tridimensionnelle d'un univers à 9D)
- Ces dimensions supplémentaires ont **des effets sur la gravitation à leur échelle** (dimensions très petites, sinon effets mesurables)



Exemple d'un espace à 2D avec une dimension infinie et une dimension enroulée sur elle-même



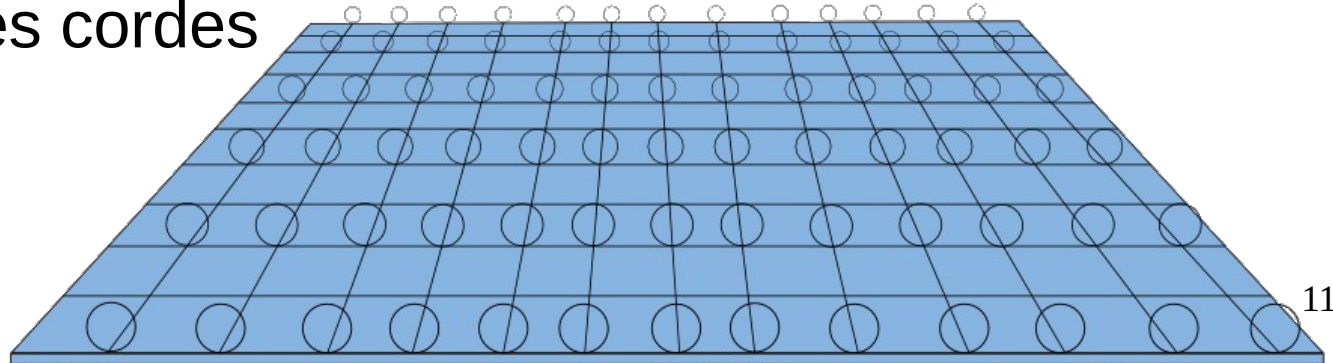
Interaction entre 2 cordes

En haut : en coupe

En bas : « **surface d'univers** » balayée par les deux particules dans un espace-temps à 2D d'espace et une de temps) : **pas de singularité** comme avec des particules ponctuelles

La « 5D »

- **Théorie de Kaluza-Klein** (années 1920)
- **But : unifier (classiquement) la gravitation et l'électromagnétisme**
 - « **Théorie du champ unifié** », « **théorie du tout** »
 - Kaluza : proposition d'un modèle de l'espace-temps en **5 dimensions**
 - Réécriture des équations d'Einstein et de Maxwell
 - Mais monde connu à 4 D → 5^{ème} dimension **enroulée sur elle-même en cercle** (**échelle de Planck** 10^{-35} m) = apport de Klein grâce à la MQ
- A inspiré la théorie des cordes



Les dimensions supplémentaires (2)

2 dimensions supplémentaires

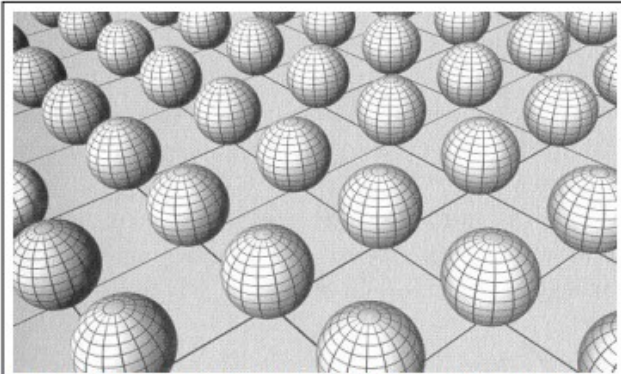


Figure 8.7 Two extra dimensions curled up into the shape of a sphere.

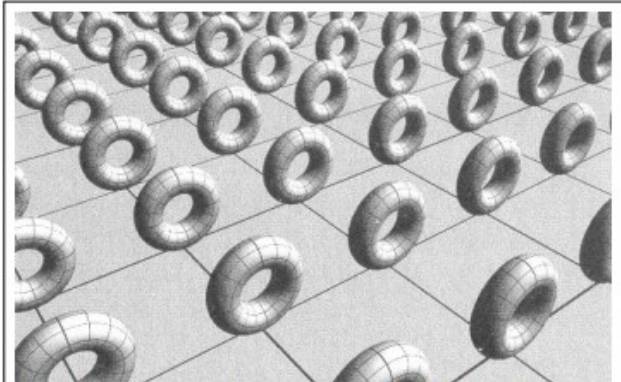


Figure 8.8 Two extra dimensions curled up in the shape of a hollow doughnut, or torus.

6D supplémentaires **compactifiées**
Un nombre immense de géométries possibles

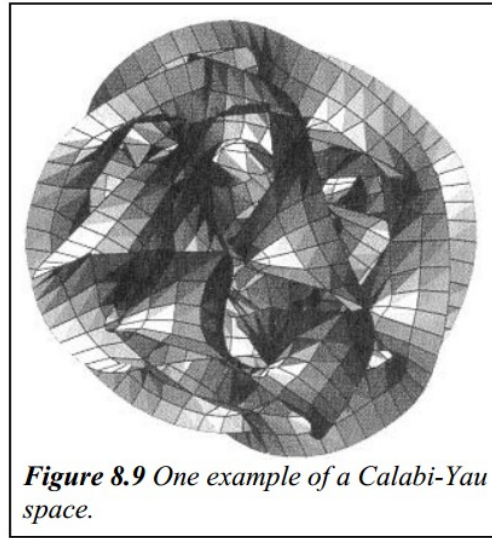


Figure 8.9 One example of a Calabi-Yau space.

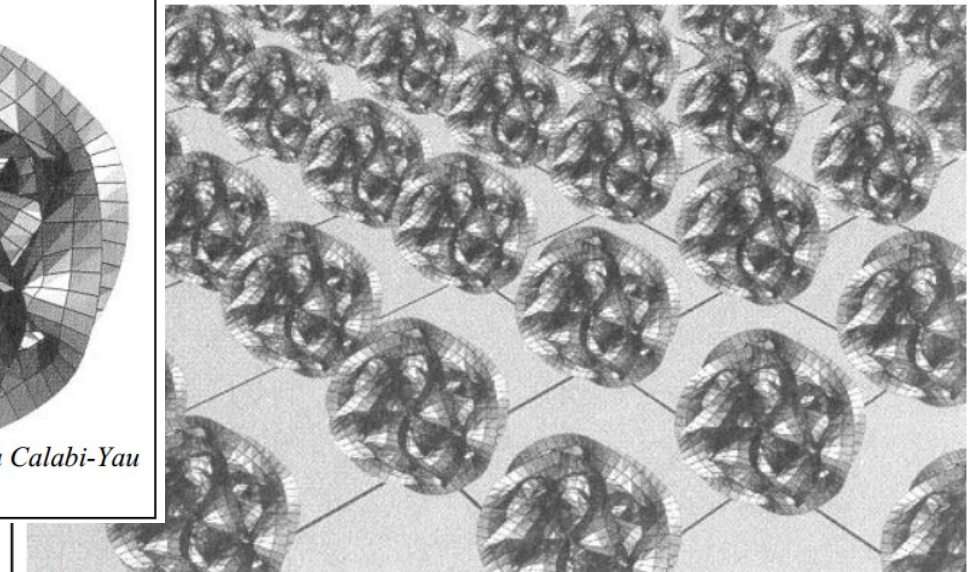
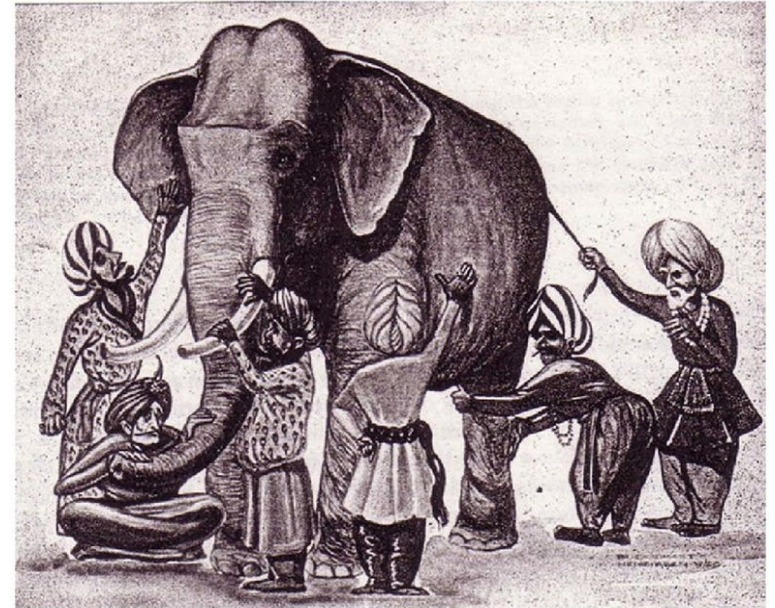
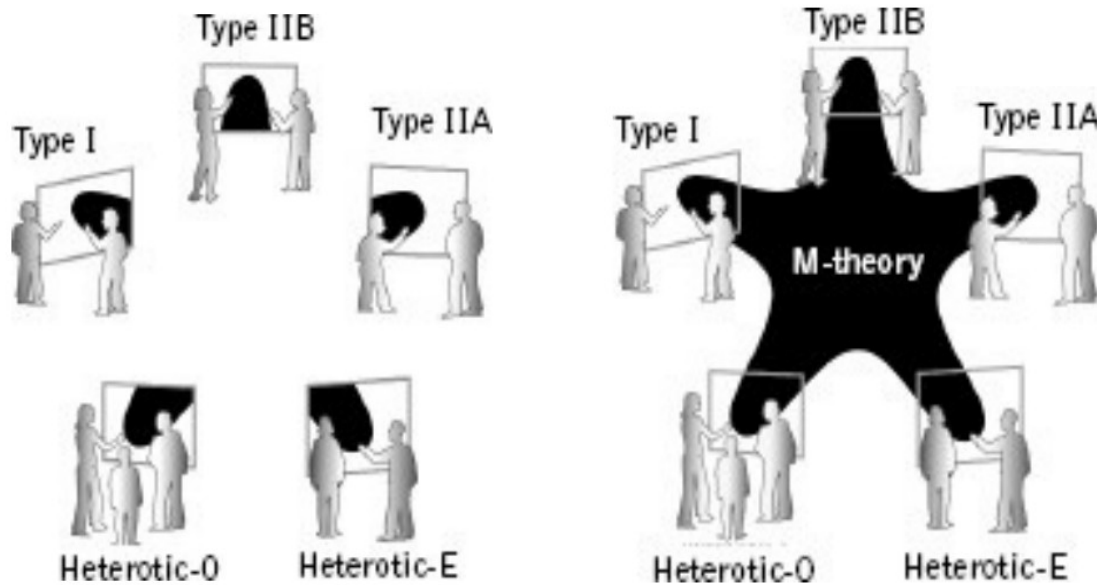


Figure 8.10 According to string theory, the universe has extra dimensions curled up into a Calabi-Yau shape.

La matière noire ne serait pas **invisible** mais **inobservable** car elle se « cacherait » dans une ou plusieurs de ces dimensions, qui nous sont inaccessibles.

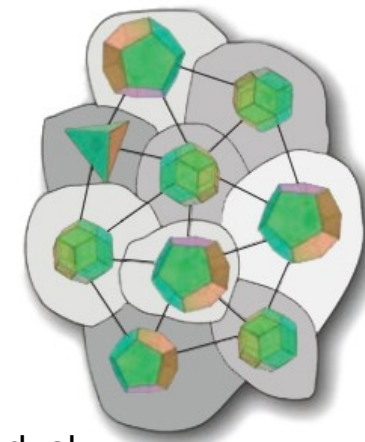
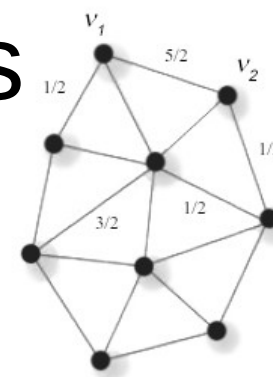
La théorie M

- En fait **5 théories des cordes**, **unifiées** à partir de 1995 par Edward Witten au sein de la **théorie M** en 11 dimensions
 - Cordes → branes
- Certains pensent qu'elle pourrait constituer la « **théorie du tout** »



Gravité quantique à boucles

- Ne décrit que la gravité → ≠ théorie du tout
- Hypothèse fondamentale :
l'espace-temps a une structure discrète
(par opposition au continuum de la RG)
→ longueurs, aires et volumes sont **quantifiés**
(échelle de Planck : l_P , l_P^2 , l_P^3)
- L'espace est constitué de « **grains d'espace** »
 - = **quanta du champ gravitationnel**, qui ne sont pas **dans** l'espace (comme les photons), mais **sont l'espace** (comme les fils qui composent un tissu)
 - **Liens** entre les quanta caractérisés par un « **spin** » (de lien) → « **réseau de spin** » = **état quantique de la courbure de l'espace**
 - Un état quelconque de l'espace est une **superposition linéaire de différents réseaux de spin**
 - C. Rovelli : « l'espace doit être décrit comme un "nuage de probabilités de grains d'espace" »

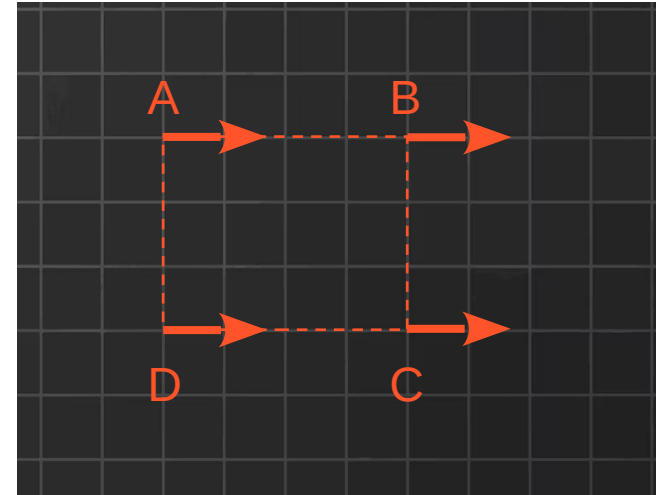
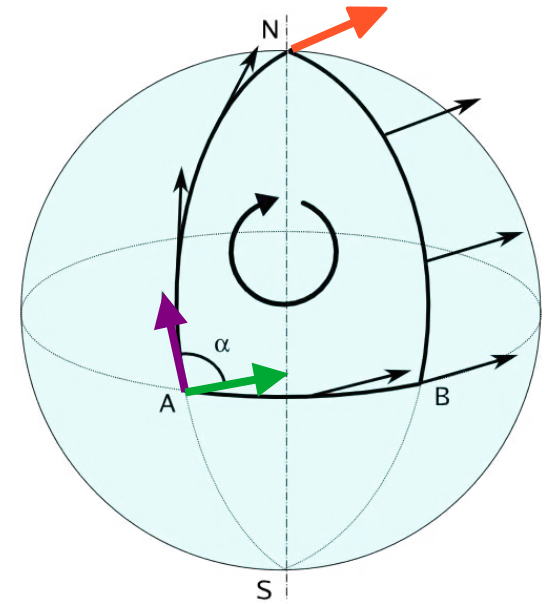


Réseau de spins et son « dual »
(cellules polyédriques = quanta d'espace)
(C. Rovelli)



Pourquoi « boucles » ?

- « **Boucles de Wilson** » : si on transporte le vecteur **orange** tangentiellement à la sphère selon **NA** ou **NBA**, on n'obtient pas le même résultat !
 - On parle de « **transport parallèle** »
 - **Angle α** entre les 2 états finaux
- **Le trajet $A \rightarrow N \rightarrow B \rightarrow A$ ne ramène pas à l'état initial**
- Dans un espace « **plat** », $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ ramène à l'état initial
- L'ensemble des boucles de Wilson caractérisent la **forme (courbure) de l'espace-temps**
- La gravitation quantique à boucles utilise le traitement quantique de ces boucles



Et le temps ?

- Propriété étonnante : les équations **ne font pas explicitement référence à une variable de temps** !

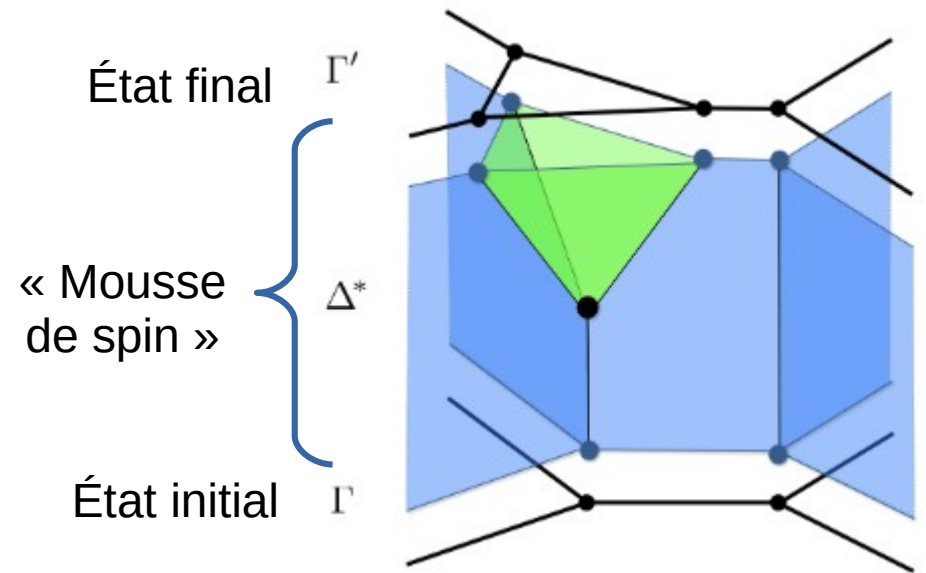
$$H_{\Gamma} = L^2 [SU(2)^L / SU(2)^N]$$

$$[L_a^i, L_b^j] = i \delta_{ab} l^2 \epsilon_k^{ij} L_a^k$$

$$W_V = \left(P_{SL(2,C)} \circ Y_{\gamma} \psi_{\nu} \right) (\mathbf{I})$$

- On ne parle que de **positions de quantités observables**
- Un **réseau de spin** décrivant l'état de l'espace **peut changer**
 - **Approche probabiliste de la MQ** (formalisme de Feynman) : passage par tous les états intermédiaires possibles

<https://arxiv.org/pdf/2104.04394.pdf>



- **Les quanta d'espace n'évoluent pas dans le temps : le temps naît de la succession des états des quanta du champ gravitationnel à l'échelle de temps de Planck $\sim 10^{-43}$ s = « mousse de spin »**
- **L'espace-temps n'est pas défini entre 2 états...**

Chaque centimètre cube d'espace et chaque seconde qui passe sont le résultat de cette mousse dansante de minuscules petits quanta.

C. Rovelli, « Par-delà le visible », 2014

Le temps n'existe pas...

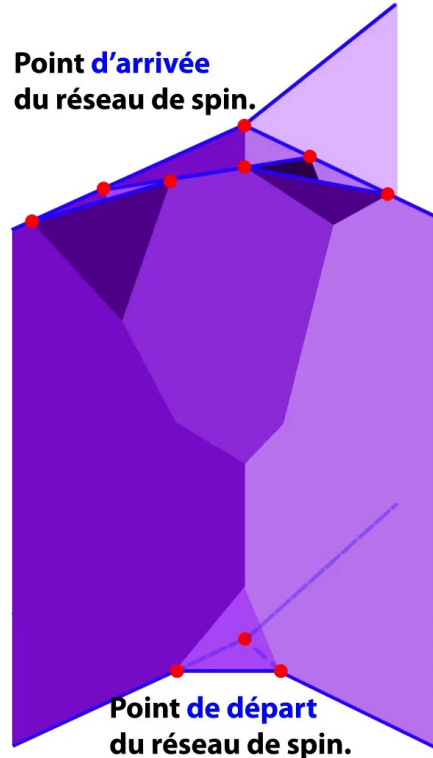


Quand vous dites que « le temps n'existe pas », voulez-vous dire : « À l'échelle de Planck, le temps ne s'écoule plus mais émerge de la succession des états superposés du réseau des quanta du champ gravitationnel grâce à une mousse de spin qui emprunte tous les chemins possibles entre ces états » ?

« L'espace-temps émerge de notre point de vue comme la surface d'un lac émerge de la myriade de molécules d'eau »

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

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



Point d'arrivée
du réseau de spin.

Point de départ
du réseau de spin.

états successifs



$$i \hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle$$

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

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

Nouvelle(s) conception(s) du temps

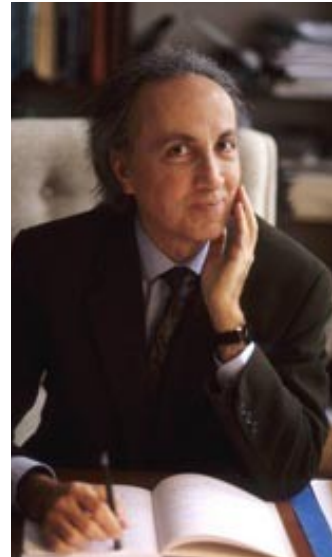
Einstein : « Pour nous, physiciens dans l'âme, cette séparation entre passé, présent et avenir ne garde que la valeur d'une illusion, si tenace soit-elle »

- Temps habituellement considéré comme :
 1. **Extérieur** à l'univers matériel
 2. **Commun** à toute la réalité
 3. **Irréversible**
 4. « **passant** » : passé – présent – futur
(**présentisme** : seul le présent existe, le futur n'est pas réalisé et le passé n'existe plus)
- Alors que, selon la physique :
 1. Le temps **n'est pas extérieur** à l'univers matériel
 2. Le temps ne peut être défini que **localement** (c)
 3. Le temps est fondamentalement **réversible**
 4. Le « passage du temps » est une **illusion**
- Hypothèse du « **temps thermique** » :
 - À l'échelle macroscopie, le **temps émerge du champ gravitationnel** comme la température émerge des mouvements des particules (Carlo Rovelli et Alain Connes)

• Théorie de l'Univers-bloc

- Conception du temps dans laquelle l'Univers entier évolue dans un espace-temps **où tous les événements** (passés, présents et futurs) **existent de la même façon**
 - Le passé est encore là, le futur est déjà là :
= « **éternalisme** » ≠ **présentisme** :
le « sentier est déjà là »
→ déterminisme, libre arbitre ?
- Le temps n'existe pas objectivement
→ lié à la conscience

Thibault Damour : « [La RG] nous dit qu'il faut voir les choses dans l'espace-temps qui est un bloc. Le futur existe autant que le passé et le présent. »

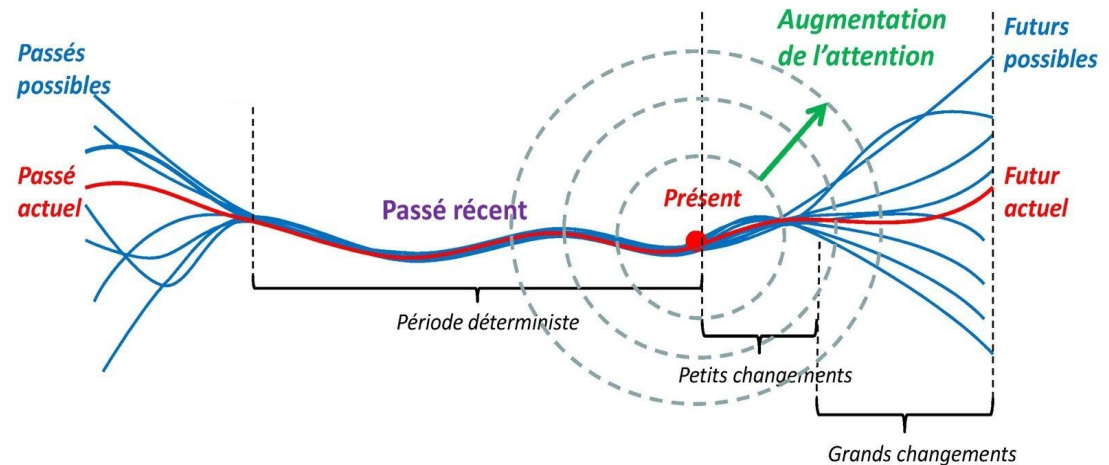
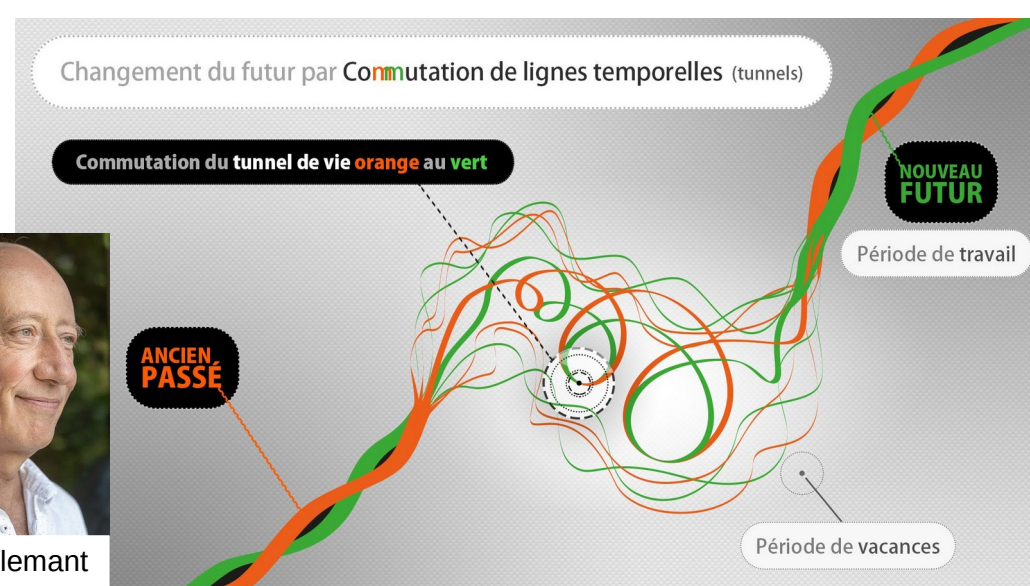


Double causalité

- **Non-déterminisme** → le futur peut changer
 - Plusieurs futurs (et passés !) sont possibles
 - → « **Commutations de lignes temporelles** »
- « [...] ma théorie dit que le futur se restructure et qu'un nouveau futur (déjà créé) se potentialise, en recevant plus de probabilités d'exister. Il provoque alors des coïncidences. [...] le retour dans le passé est « néguentropique », c'est-à-dire créateur d'ordre, par opposition à la causalité, qui est entropique, créatrice de désordre. Ainsi, la rétrocausalité crée de l'ordre ; elle a tendance à associer ce qui va ensemble, en créant des synchronicités. »
- **Coïncidences** : « ce qui n'est pas déterminé par le passé est déterminé par le futur »
- **Synchronicités** : « nos intentions causent des effets dans le futur qui rétroagissent dans le présent »

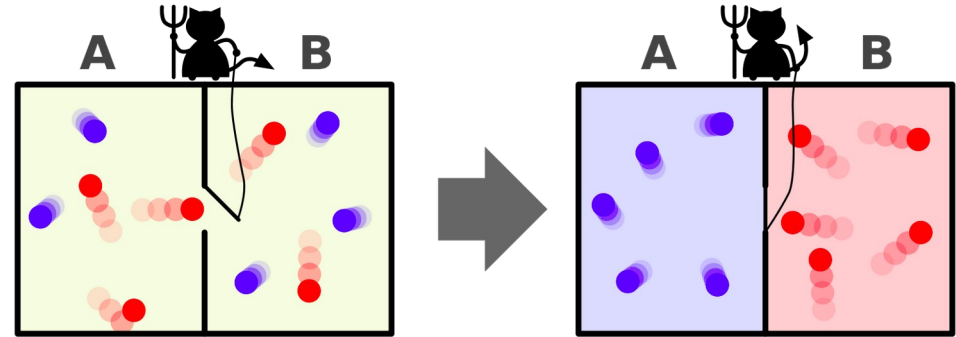


P. Guillemant



Physique de l'information et de la conscience

- Rappel : l'expérience du démon de Maxwell amène à la conclusion que l'information est une grandeur φ (préserve le 2ème principe de la thermo.)



- « Réalité faite d'**informations** plutôt que de **matière** » :
 - Informations **physiques** et informations **quantiques** (moins « denses ») car **superposition** de tous les états possibles (= **manque d'information**)
 - La **conscience** joue un rôle de **transition** entre les deux
- → besoin d'introduire la **cybernétique** (science de l'information)
 - Permet d'inclure dans le vide le multivers contenant **toutes les versions de moi-même** représentant tous les choix que j'ai faits
 - Mais problème de la quantité d'informations stockable dans le vide
 - besoin de **2 groupes de 3 dimensions supplémentaires** → **10 D** !
 - Changement des lignes temporelles (1) dans le présent (choix du chemin) et (2) dans le futur (choix de la destination)

Physique de l'information et de la conscience

- **Modèle de conscience** divisée en 3 parties :

- **Univers d'informations physiques 4D** :
Univers-bloc d'Einstein

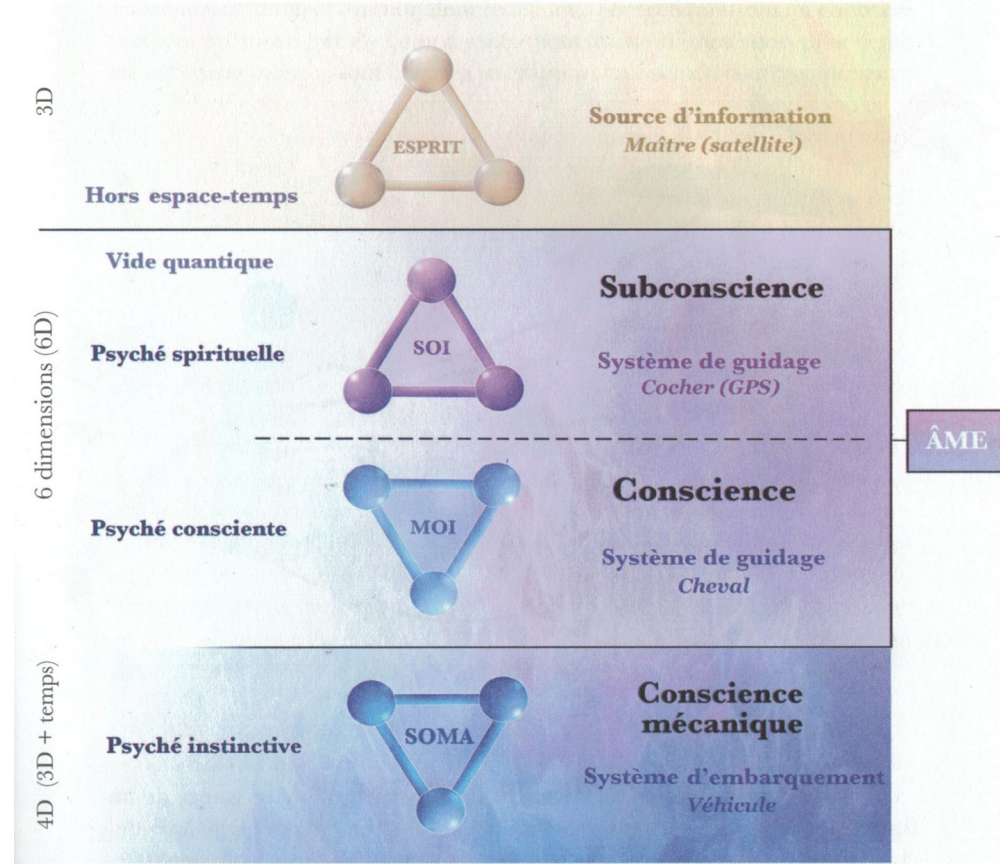
- **Univers d'informations quantiques**
qui détermine le cours des événements
s'il n'est pas déterminé par la mécanique
(dans les 6 dimensions supplémentaires)

- « **Esprit** » extérieur à ces 10D

- Chaque étage guide l'étage du dessous
dans le respect du libre arbitre...

**Physique de la conscience =
physique du libre arbitre**

Figure 14: Les quatre étages de la conscience,
avec l'âme comme interface entre l'esprit et la matière.



La connaissance du réel

Est-elle possible ?

- **Théorèmes de l'incomplétude de Gödel** : quel que soit le système d'axiomes utilisé, il existe des énoncés **vrais mais indémonstrables** (« **indécidables** »)
- **Principe d'incertitude**
- **Théorie du chaos** : même si on connaît les lois de l'Univers, on ne peut pas le connaître parfaitement
 - **Complexité** trop grande & connaissance des **conditions initiales** jamais **arbitrairement précise**
 - on ne peut pas prédire **précisément** son **évolution** sur une **grande échelle de temps**

Une théorie dit que, lorsque nous comprendrons l'Univers, il disparaîtra pour être remplacé par un autre plus compliqué. Et une théorie qui dit que c'est déjà arrivé.

Observe-t-on la création ou le/une partie du créateur ?



Pour aller plus loin

- Gravité quantique à boucles
 - Pépites de science :
 - <https://www.youtube.com/watch?v=i466IC-zAg8>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=S4PqRVpmR4Y>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=UIM9JKNeIKY>
 - Science étonnante :
 - <https://www.youtube.com/watch?v=3MJJvXGuDag>
 - <http://www.astrosurf.com/luxorion/gravite-quantique-boucles-lqg2.htm>
 - chaours.rv.pagesperso-orange.fr/physique/Quant/qgrav.htm
- Supersymétrie :
 - <https://youtu.be/fDeqvjgQ46s>
- Théorie des cordes
 - <https://www.youtube.com/watch?v=f0e-Soo1qFQ>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=rXhzeKh8yBk>
 - <http://chaours.rv.pagesperso-orange.fr/physique/Quant/string.htm>
- Temps :
 - Thibault Damour : <https://www.youtube.com/watch?v=CWEvkKszBBA>
 - Carlo Rovelli : https://youtu.be/K_CbybjYBxw
- Philippe Guillemant :
 - <http://www.guillemant.net/>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=IRHwl7J06KE>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=1NxJqaLJJjM>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=fdvEoDcVrEA>
- Film Tenet (2020), C. Nolan
 - Vidéo explicative : <https://www.youtube.com/watch?v=dIzhcM3KmDE>

Pour aller plus loin

