

Physique quantique aux très petites et très grandes distances:
Physique des particules, Cosmologie

Théorie Quantique des Champs: succès et mystères...

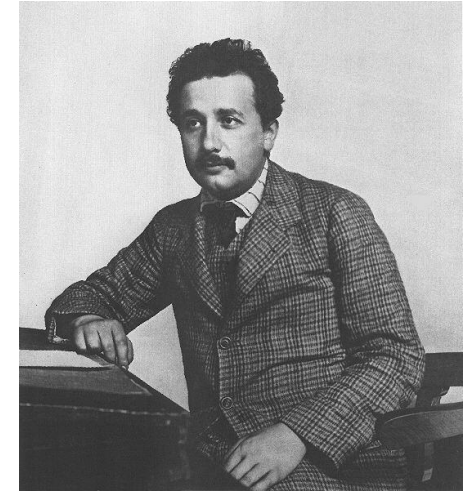
Bruno Mansoulié
Département de Physique des Particules CEA – Saclay
et CERN - Genève

Les révolutions du début du XX^e siècle

- **Relativité « restreinte »: Einstein 1905**
 - Vitesse de la lumière indépassable: c (300 000 km/s)
 - Indispensable pour décrire des vitesses comparables à c
 - $E = mc^2$

- « Mécanique » quantique (1905: Bohr, Pauli, Heisenberg, de Broglie, Einstein,...)
 - Spectre des atomes, couleurs des lampes et des objets!
 - Relations d'incertitude (tout est un peu flou...)
 - Paradoxes...

 - **NON relativiste: marche bien pour $V \ll c$**
 - **Donc décrit les photons de façon approximative**



Louis de Broglie

la Théorie Quantique des Champs (1930 – 1960,...)

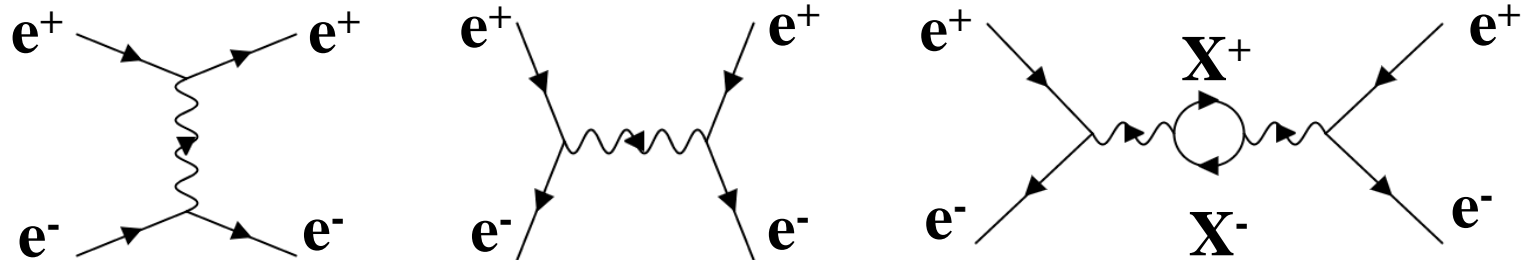
- Origine: comment prendre en compte la relativité (restreinte) ?
comment quantifier le champ électromagnétique (les photons)?
- Solution radicale:
 - « quantifier » la création d'une particule depuis le vide (et sa destruction).
Abandonner le nombre fixe de particules!

Une conséquence « naturelle » des deux théories:

- *Quantique: l'énergie peut fluctuer de ΔE pour un temps Δt tel que $\Delta E \cdot \Delta t \leq \hbar/2$*
- *$E = mc^2$: cette énergie peut être équivalente à la masse d'une particule*

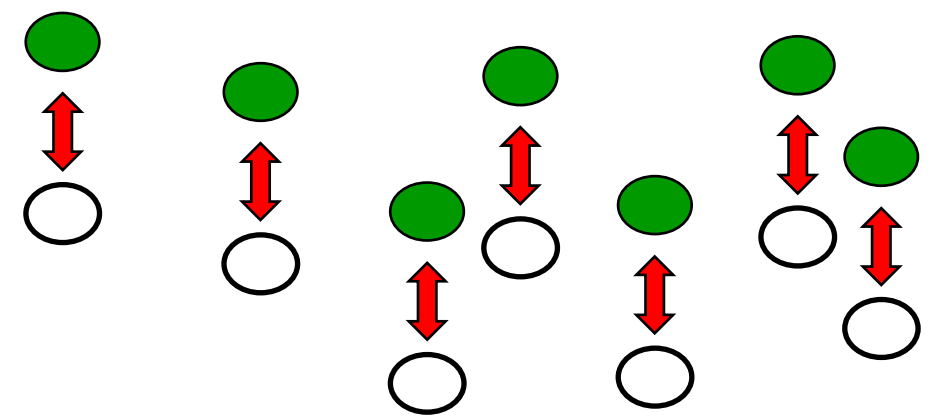
⇒ « particules virtuelles »

Ex:
Diffusion
électron - positon

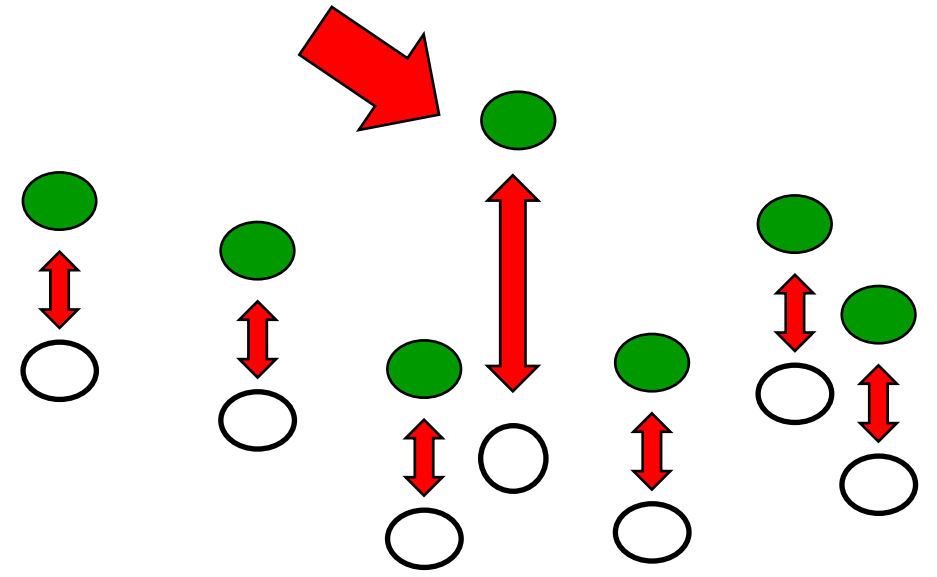


- Particule/Onde \Leftrightarrow « Champ »:

Vide : partout dans l'espace une sorte d'oscillation « particule/pas de particule »



- Si de l'énergie arrive à un point, il y a le « potentiel » pour utiliser une particule du champ

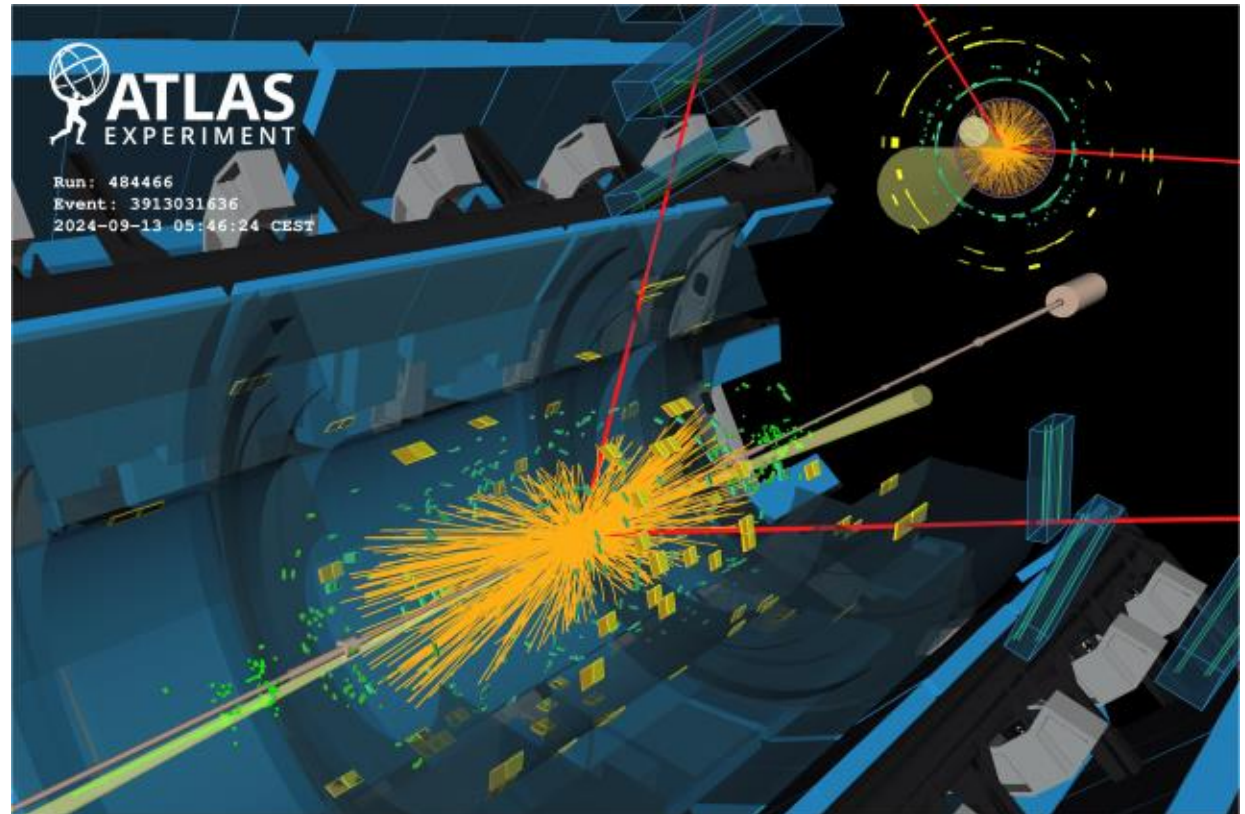


Interactions en Théorie Quantique des Champs

- Exemple: une collision proton-proton à haute énergie à LHC

- Les nombreuses particules issues de la collision *ne sont pas des fragments des protons*.

Ce sont de particules créées à *partir du vide* par l'énergie de collision (réalisation ultime de $E = m c^2$)

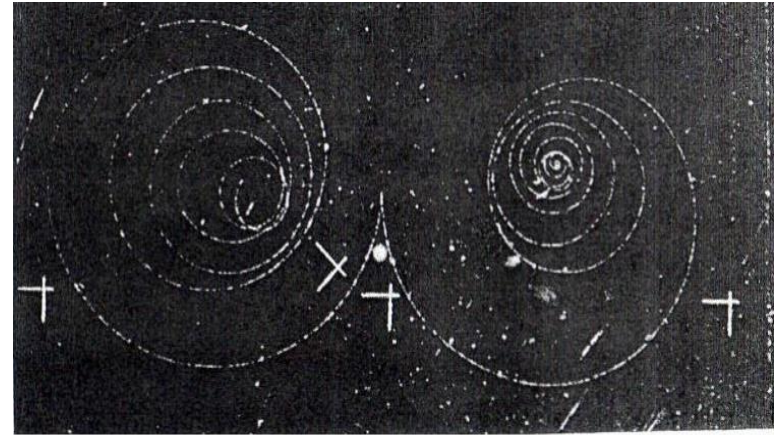


Les (grands) succès de la Théorie Quantique des Champs

- Premiers pas

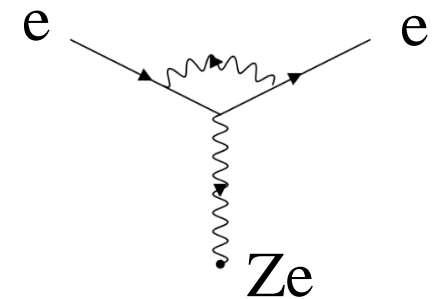
- *Prédiction de l'antimatière* : Dirac 1928, découverte du positon (Anderson 1932) (utilisé aujourd'hui en PET-scan...)

production paire $e^+ e^-$...



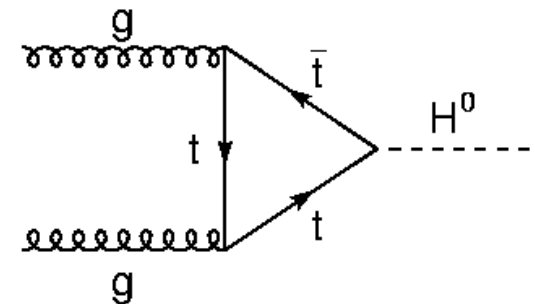
- Basse énergie: le domaine de la précision

- Niveaux atomiques, moment magnétique de l'électron, etc. accord théorie/expérience jusqu'à une partie par milliard!



- Haute énergie: tout le « Modèle Standard »

- Très nombreuses mesures, accord théorie excellent



Les (petits) problèmes de la Théorie Quantique des Champs...

- Ce vide plein de « potentialités » est un peu susceptible...



- Les infinis

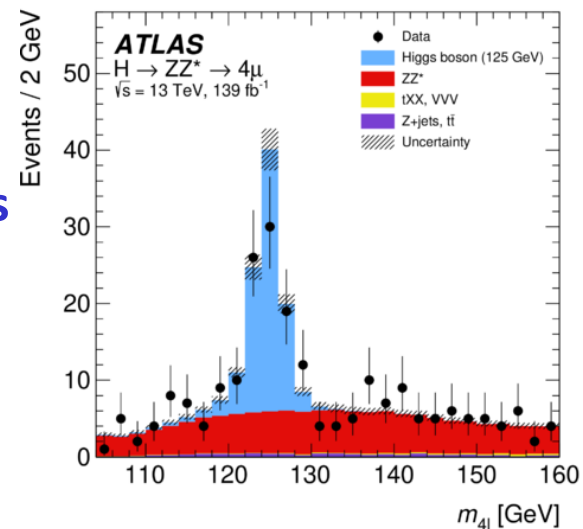
- Un électron qui se propage dans le vide interagit (virtuellement) avec le vide : prend/donne de l'énergie, émet/capture d'autres particules...
- Ce « cortège » de processus contribue à la masse de l'électron
- *Calcul simple \Rightarrow masse de l'électron infinie!*

- La renormalisation

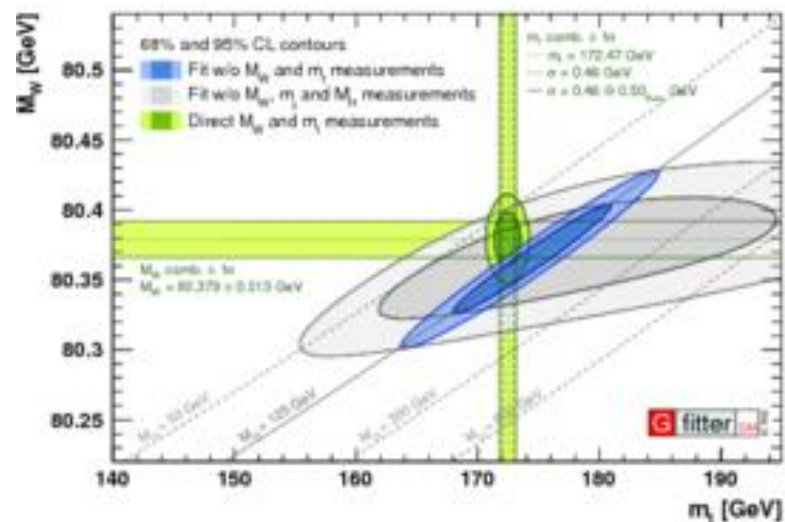
- procédé mathématique: regroupe tous ces processus « virtuels » dans une masse effective de l'électron: la masse mesurée (*paramètre*).
- clé du succès de la TQC

Le « Modèle Standard » de la physique des particules élémentaires

- ~ 1960 – 2012: établissement du **Modèle Standard**
 - Expérience + théorie:
nature des particules constituantes, structure des interactions
- Dernière pierre (clé de voûte):
 - Le boson de Higgs*
 - (prédit en 1964, découvert en 2012 au CERN)



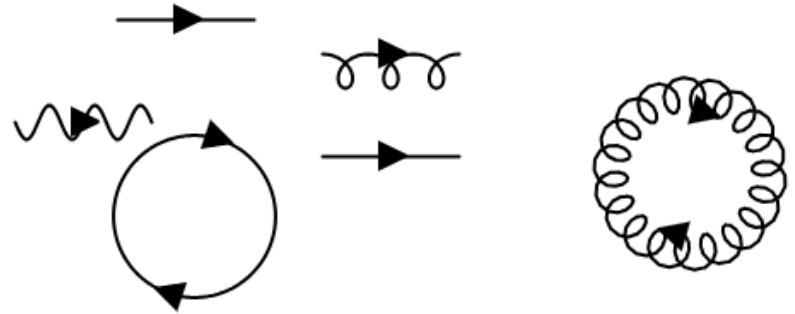
- Le **Modèle Standard** est « renormalisable »
=> on sait traiter tous les infinis de la théorie
- très nombreuses mesures: *confirmations*



Quelle est l'énergie du vide?

- **Energie de ce vide compliqué?**

- *Estimation à partir des champs des particules connues*



- *Difficile : plein d'infinis dans les calculs...
Renormalisation à la rescousse...*

Résultat des calculs (ordre de grandeur): 10^{46} Joules/m³

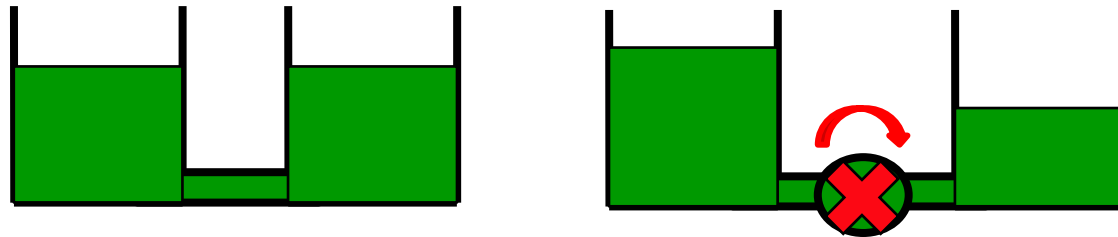
Rappel: 1 Joule = 1 Watt pendant 1 s; 1 calorie (+ 1° sur 1g d'eau) = 4,19 Joule

une valeur gigantesque! Exemple : fission 1m³ Uranium 235 \Rightarrow **$6 \cdot 10^{14}$ Joules**

Energie du vide quantique

- **Note:**

Le vide est le même partout \Rightarrow on ne peut pas « tirer de l'énergie » du vide!



Pour extraire de l'énergie d'un système, il faut une *différence* (de niveau, de potentiel, de charge...)

- Pour la physique microscopique, et même à l'échelle humaine, une (très) grande valeur de l'énergie du vide n'est pas un problème... = « niveau de base », invisible.

A l'échelle cosmologique

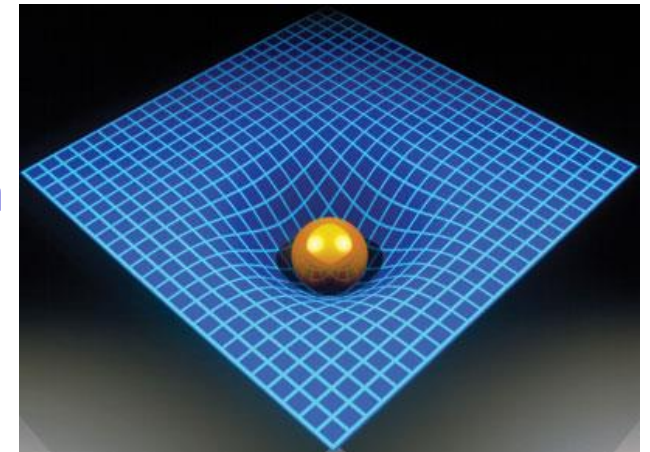
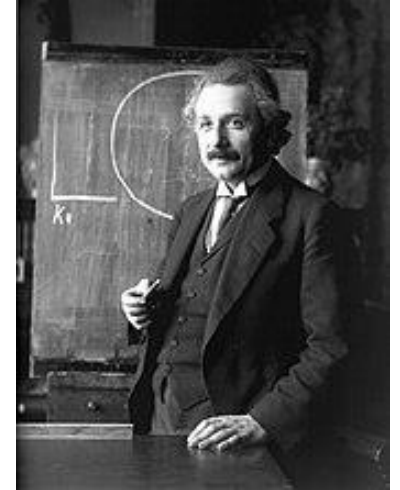
- **Théorie du cosmos, univers, etc: Relativité Générale**

Einstein 1915 – 1917

- **L'espace-temps peut être courbé**

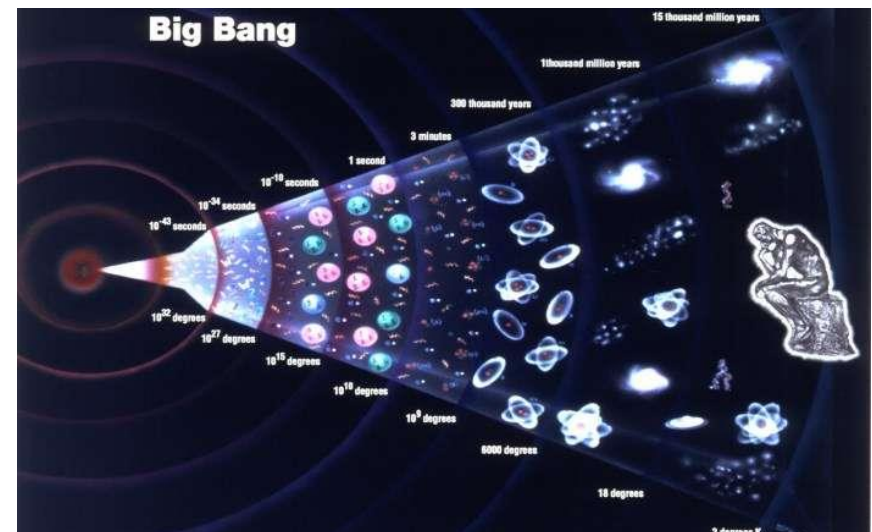
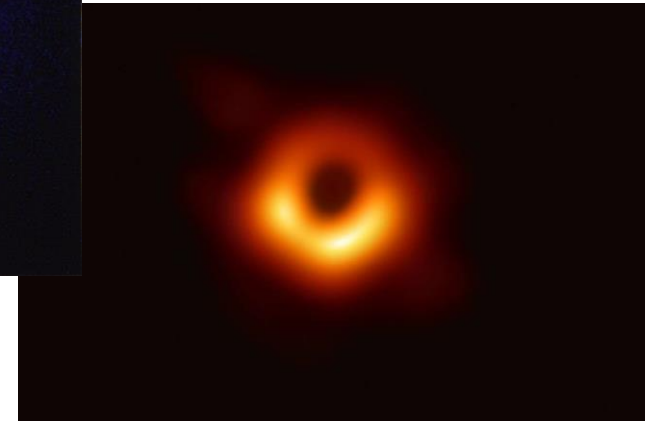
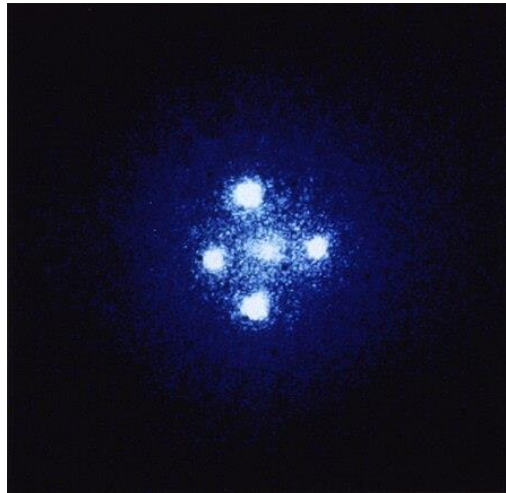
Courbure et matière/énergie sont équivalents.

Déformation de l'espace-temps \Rightarrow gravitation



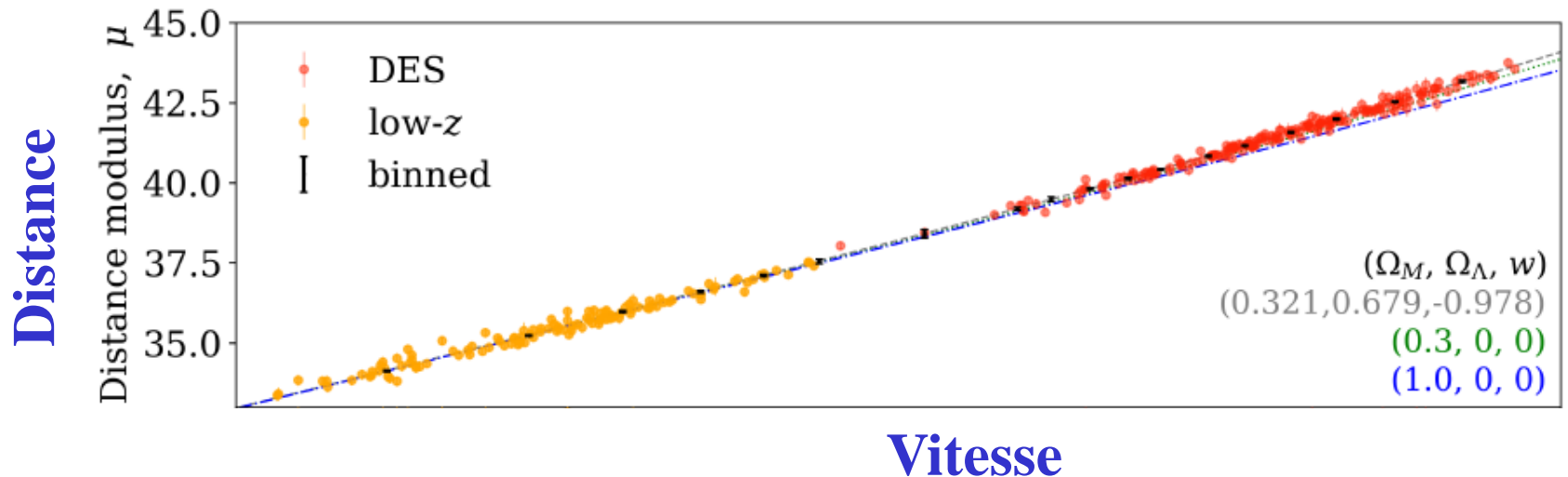
La Relativité Générale vue aujourd'hui

- Correction du GPS...
- Mirages gravitationnels
- Ondes gravitationnelles
- Trous noirs
- Univers en expansion
Big-Bang il y a 13.8 Mds années



L'univers en expansion

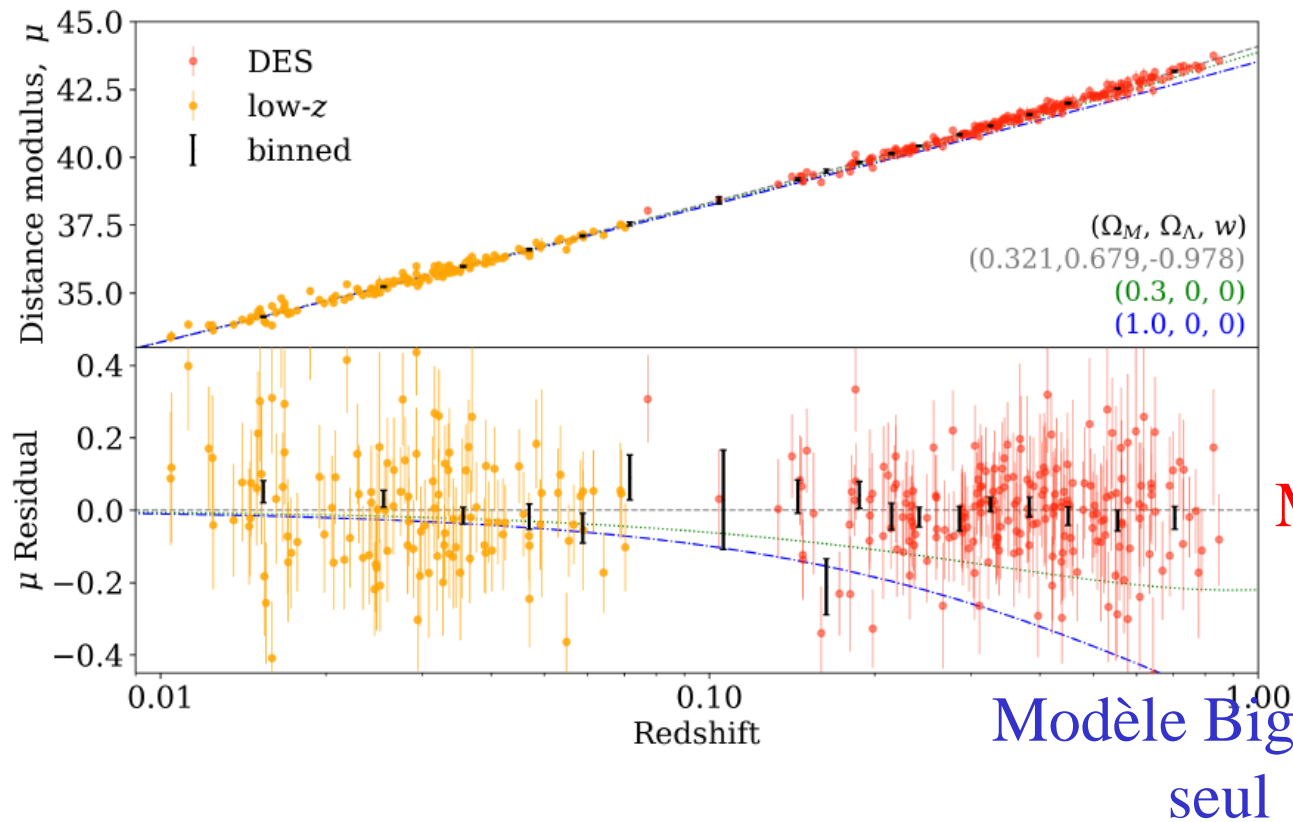
- **Relativité Générale: l'univers ne peut pas être statique**
 - Expansion ou contraction.
- **Mesures astronomiques, par exemple d'objets *très lointains* \Rightarrow Expansion (*dans lui-même!*)**



- ***En remontant le temps: Big Bang***

Expansion de l'univers: les mesures récentes (1998 - ...)

- **Mesure récentes (~ 20 ans) : l'expansion s'accélère!**
(au lieu de ralentir sous l'effet de la gravité)



Modèle expansion accélérée

Energie du vide en Relativité Générale

- L'accélération de l'expansion de l'univers peut s'interpréter en Relativité Générale comme due à l'énergie du vide
- Mesures astronomiques \Rightarrow valeur de l'énergie du vide dans l'univers
valeur aujourd'hui: **$0,5 \cdot 10^{-9}$** Joules/m³ . *Très petite !*
- Aucune conséquence observable à petite échelle.
- Grandes conséquences à grande échelle:
 - 70% de la densité d'énergie moyenne de l'Univers (aujourd'hui)
 - densité d'énergie constante, indépendante de la taille
 - dominera complètement l'univers dans le futur (lointain...)

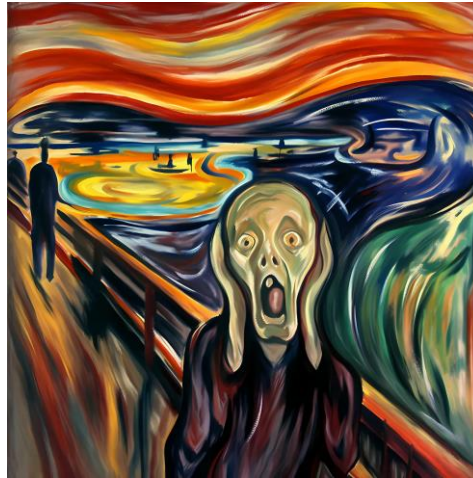
Le problème

Relativité Générale

Energie du vide

mesurée dans l'Univers

$$0,5 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$$



Théorie Quantique (des champs)

Energie du vide

calculée à partir du « Modèle Standard »

$$\sim 10^{46} \text{ J/m}^3$$

- **Plus de 55 ordres de grandeur de différence, un facteur :**
10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000
- *La pire incohérence jamais vue en physique entre théorie et mesure...*
- Mais difficile d'abandonner la Théorie des Champs qui marche si bien à petite échelle...

A-t-on des pistes?

- Pistes « Physique des particules »
 - Théories « au-delà du Modèle Standard »
Exemple « Supersymétrie »:
Nouvelles particules et interactions \Rightarrow compensations
Améliore le problème, sans le résoudre complètement
Recherchée, par exemple au LHC du CERN, jamais observée.



- Pistes « Gravitation »
 - Modifier la Relativité Générale?
Très difficile.
- Théories du tout
 - Cordes, dimensions supplémentaires...
 - Multivers (= résignation...)



Conclusion

- La Théorie Quantique est de mieux en mieux connue.

Sa version la plus poussée pour l'exploration des petites échelles de distance, la Théorie Quantique des Champs, est très prédictive en laboratoire, sur des échelles d'énergie allant du meV au TeV.

Au prix de nombreux paramètres qui doivent être mesurés (masses, couplages), et de difficultés pour extrapoler à de plus hautes énergies.

- La Relativité Générale est de mieux en mieux vérifiée. Les observations cosmologiques affinent la mesure de l'accélération de l'expansion de l'univers (la « Constante Cosmologique »)
- **Ces deux visions restent incompatibles. L'énergie du Vide est le symbole même de ce mystère au cœur des questions de la physique fondamentale depuis presque un siècle!**

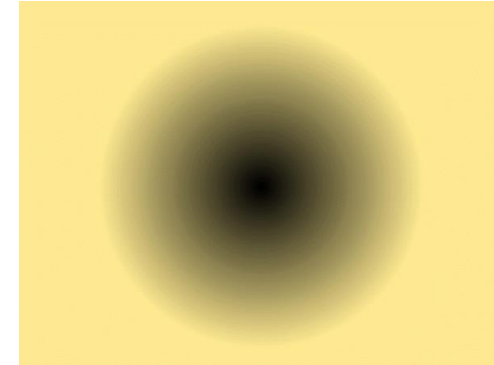
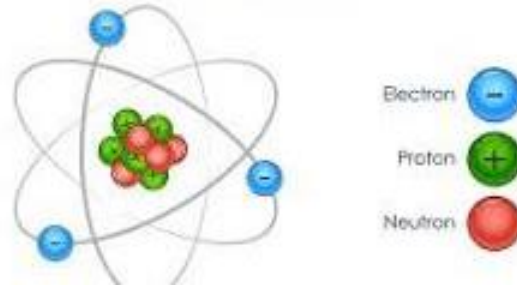
Merci à tous!

Un (tout petit) peu de théorie quantique des origines

- **Modèle de l'atome**

La position des électrons est floue

« nuage électronique »

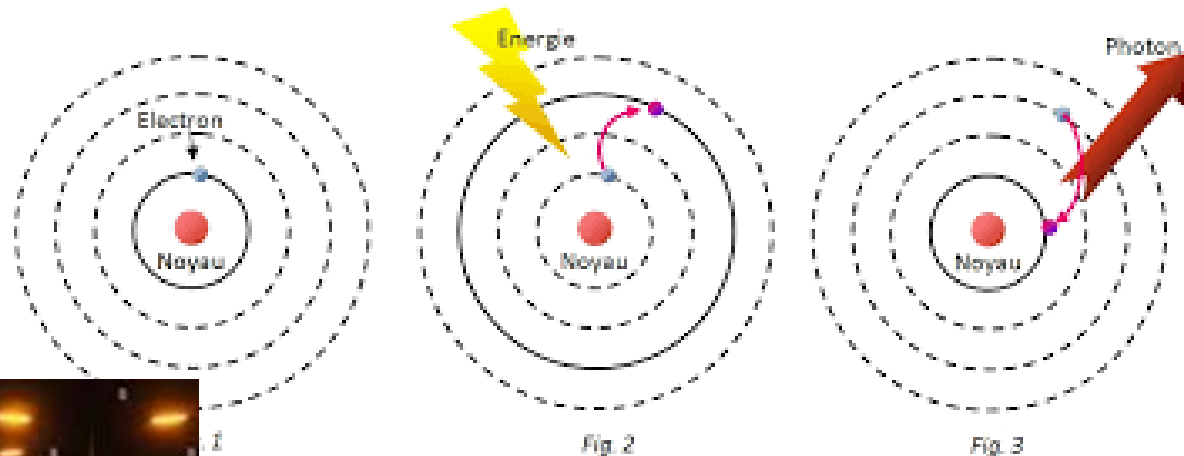


- **Mais leur énergie est déterminée**

sur des niveaux,

⇒ **transitions:**

Énergie photon précise: $E_2 - E_1$



⇒ **couleurs, etc...**

Ex: sodium



Bruno Mansoulié, 31

**Niveau
d'énergie le
plus bas:
état
fondamental**²⁰

L'état fondamental en théorie quantique

- Etat « fondamental »: « au repos », « énergie minimale », etc...

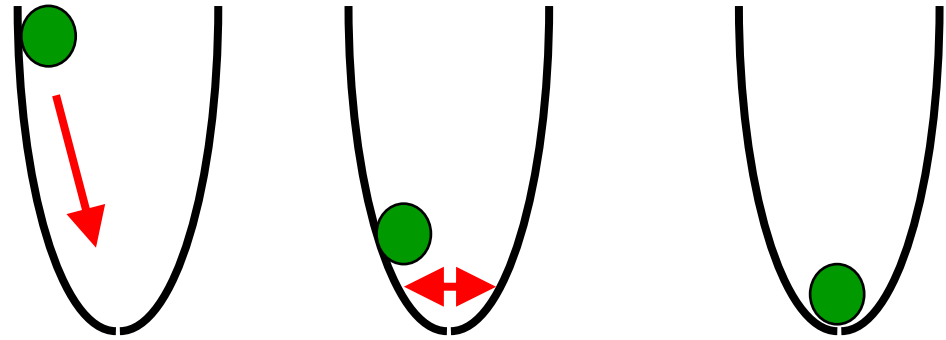
– Classique:

frottements, dissipation

⇒ plus rien ne bouge

État fondamental:

énergie minimale, position fixe .



– Quantique:

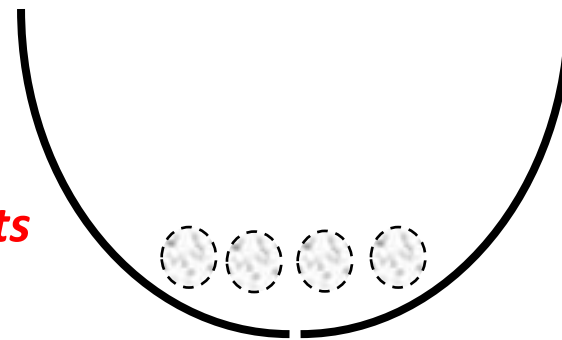
Dissipation, rayonnement, etc =>

Etat fondamental:

position (un peu) incertaine

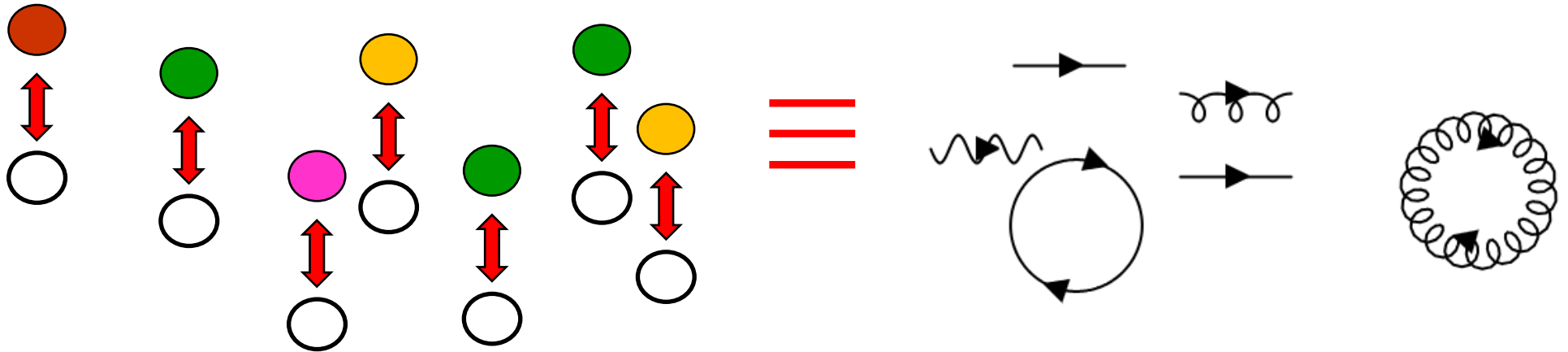
énergie minimale, mais *pas le fond du puits*

(relation d'incertitude: $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$)



Le vide en Théorie Quantique des Champs

- Vide : complexe!
 - contient *tous les champs possibles* à l'état « virtuel »

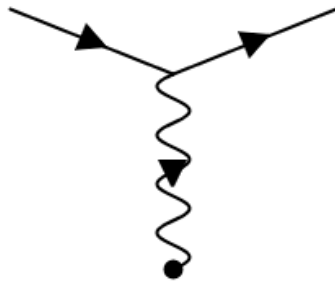


- Le vide est plein de potentialités!

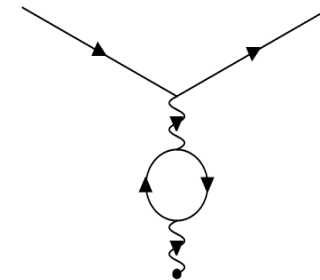
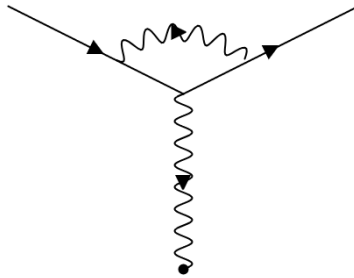
Basse énergie : mesures et calculs de précision

- Niveaux atome d'hydrogène (ex: « Lamb shift »):

Coulomb seul



Corrections TQC



etc.

- Accord théorie / expérience ~ 1 part / million (+ subtilités dues au rayon du proton)

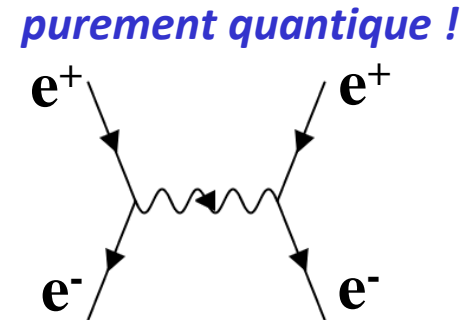
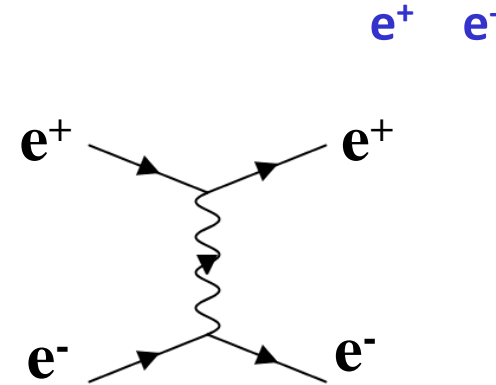
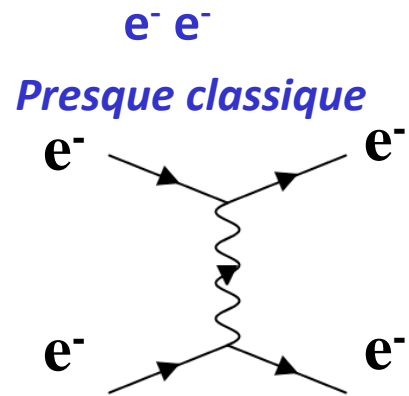
- Moment magnétique « anormal » de l'électron : $[a = (g-2)/2 \sim \alpha/2\pi]$

- Accord théorie / expérience ~ 1 part / milliard

$$a_{\text{th}} \simeq 0,001\,159\,652\,153\,5\,(24\,0)$$

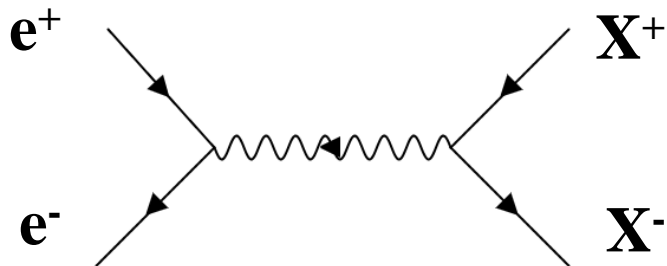
$$a_{\text{exp}} \simeq 0,001\,159\,652\,180\,85\,(76)$$

TQC: constituants et interactions, processus virtuels



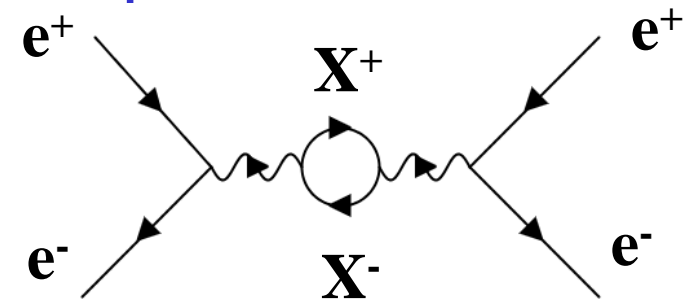
- Exploration avec un accélérateur : $e^+ e^- \rightarrow X^+ X^- ???$

processus direct: $E \text{ total} \geq 2 m(X) c^2$



spectaculaire, mais limité à $m(X) < E/2$

processus virtuel

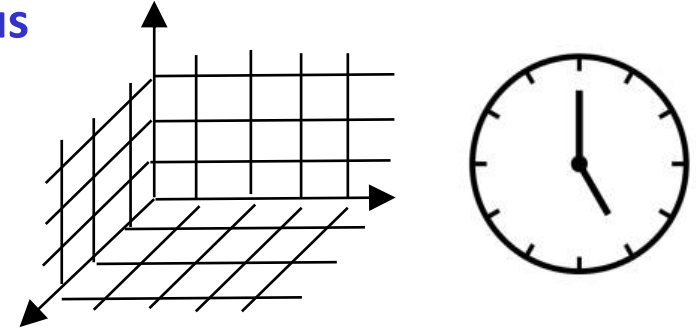


précision, d'autant plus que $m(X) > E/2$

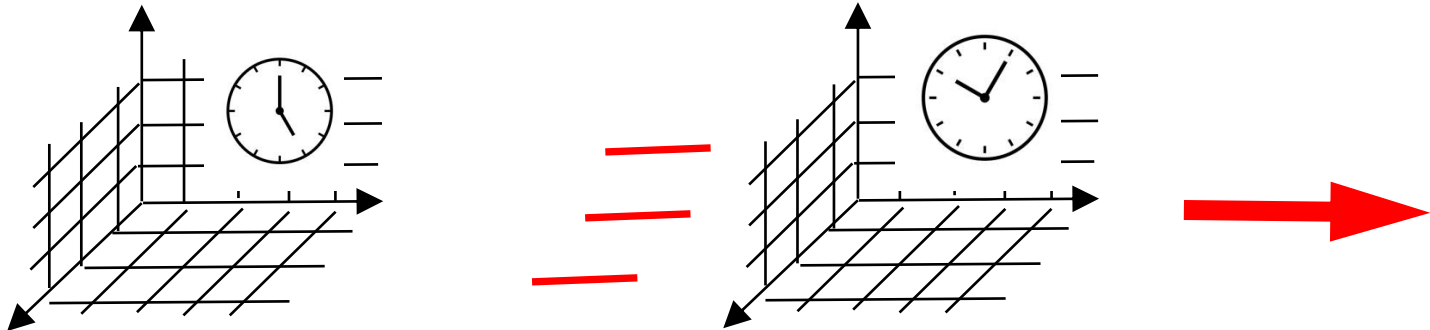
Espace-temps

- **La vision « classique » de l'espace-temps (Galilée, Newton):**

- Espace rigide et droit, temps uniforme pour tous
- Matière et énergie sont indépendants
- Espace et temps sont indépendants de ce qui se passe dedans



- **Relativité Restreinte Einstein 1905**



- Espaces rigides, mais le déroulement du temps dépend du mouvement du repère
=> « Espace-temps » .
- Matière \leftrightarrow Energie ($E = mc^2$)
- Espace-temps toujours indépendant de ce qui se passe dedans.

La Constante Cosmologique Λ (un grand malentendu...)

1917: Einstein réalise que $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
prédit un univers en expansion ou en contraction (une hérésie à l'époque...)

Il voit qu'on peut ajouter un terme $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$
et l'« ajuster » pour avoir un univers statique.

En réalité (vision actuelle):

- cet *ajustement* ne marche pas: solution *instable*
- le terme Λ est parfaitement naturel, au même titre que la constante κ .
- Il y a *deux* constantes naturelles dans la théorie
 - Pour retrouver la gravitation de Newton, il faut $\kappa = 8\pi G/c^4$; on mesure G (Cavendish)
 - Un peu plus difficile de mesurer Λ ! Mais c'est fait aujourd'hui
 - notre univers est bien en expansion (et non statique)
 - Λ accélère encore cette expansion (et non la freine...)

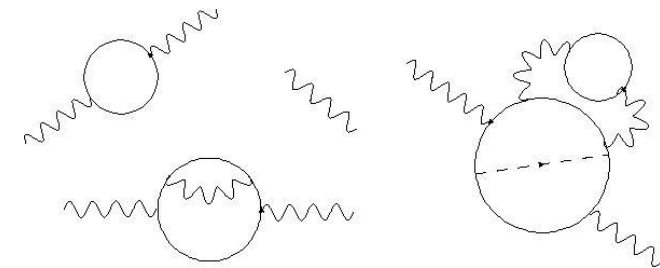
Théorie Quantique et Relativité Générale sont irréconciliables

- « vide quantique » : pas le « néant » :

- Processus « virtuels »

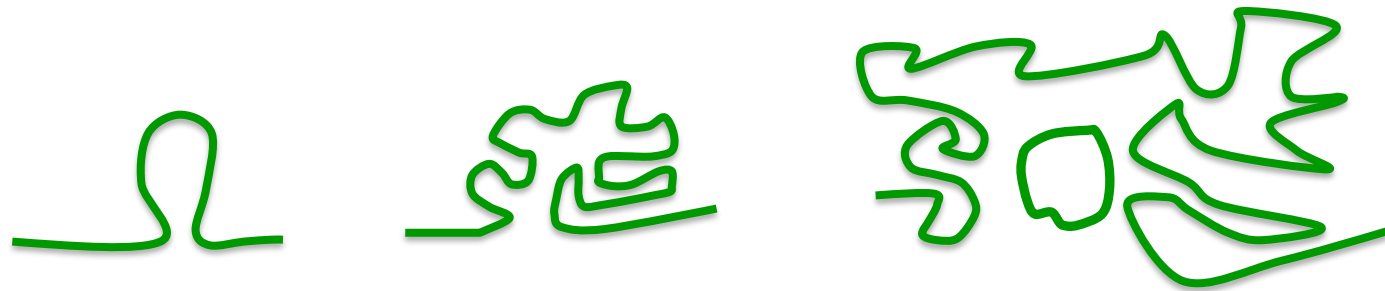
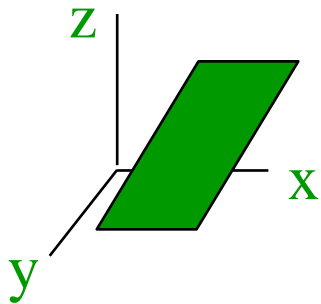
Décelables dans les atomes, dans les collisions...

Mais si on ne fait rien leur énergie est zéro en moyenne => « vide » OK.



- Relativité générale: la matière/énergie déforme l'espace-temps

Essayons de la rendre quantique:



Les processus virtuels ne se « moyennent » pas à zéro! Les fluctuations s'auto-amplifient, l'espace-temps perd son sens,... et la théorie aussi.

Dans la réalité, tout va bien... c'est la théorie qui ne marche pas!

Tentatives de réconciliation: « supercordes », etc., => en pratique: échec

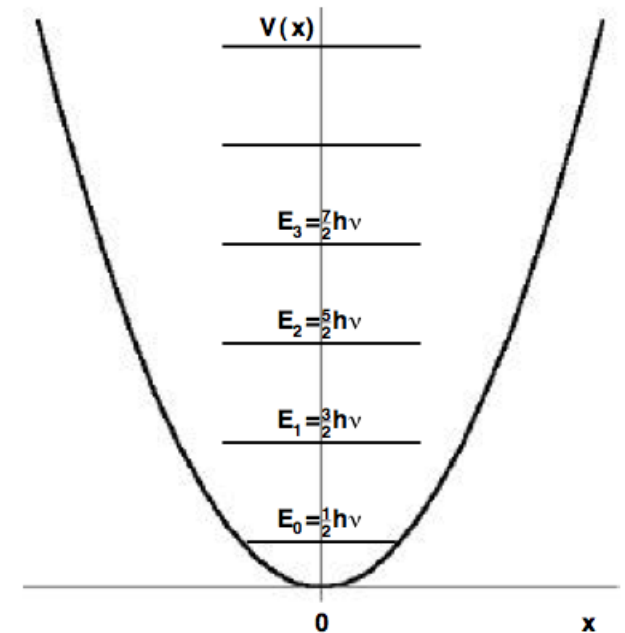
Tout se complique (un peu) : la Théorie Quantique

- **Théorie quantique non relativiste**

- La « mécanique quantique » des origines: effet photo, spectre des atomes...
- Électronique, chimie ...

Beaucoup de différences avec le « classique », en particulier:

- Particule \Leftrightarrow onde
 - Particule/onde dans un potentiel
 - (ex: électron autour d'un noyau)
 - Les niveaux d'énergie sont quantifiés
 - Le niveau le plus bas (« fondamental ») n'est pas d'énergie nulle
 - Il reste toujours une petite « vibration ».
- Incertitude de Heisenberg: $\Delta x \Delta p > \hbar$*
- Etat « fondamental » très agité...



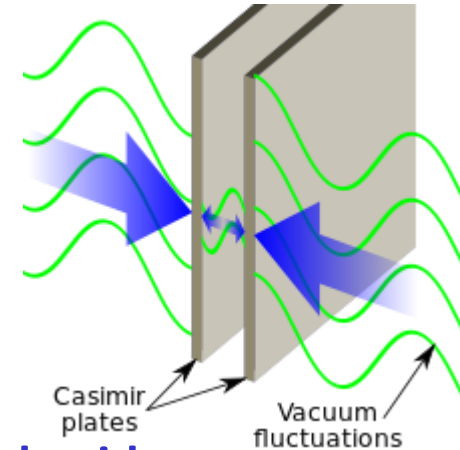
L'effet Casimir

- Très (trop?) souvent présenté comme conséquence/preuve du vide quantique.

- 2 plaques conductrices parallèles sont attirées par une force :

$$\frac{dF}{dS} = - \frac{\pi^2}{240} \frac{\hbar c}{L^4}$$

Force petite mais mesurable, et mesurée.



Généralement interprétée comme l'effet des fluctuations du vide.

Mais une autre interprétation possible (Jaffe et al.): interactions entre les charges mobiles dans les plaques conductrices. Calcul identique...

Expérience en cours de montage pour « peser » une cavité Casimir: Archimedes

- Peu de doute qu'elle donnera le résultat attendu ($P = E_{\text{Casimir}}/c^2$ g)
- Mais (à mon sens) ne prouve pas que le vide quantique gravite...

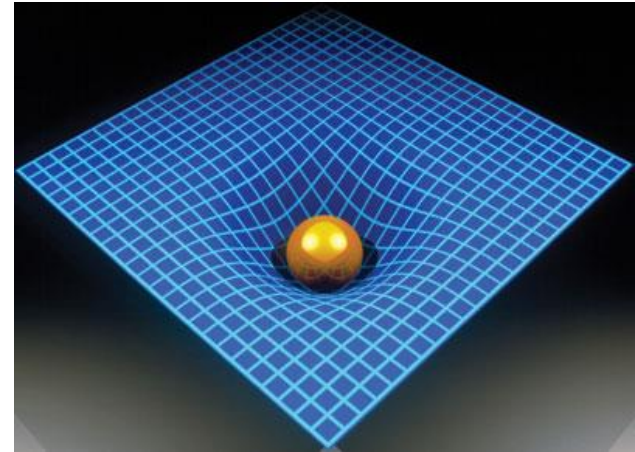
Vide classique

- **Physique classique**
- ***Hors gravité***
 - Pour toutes les interactions, le vide est « vide »
 - Pas de couplage entre une particule ou un champ ou etc. extérieur et le vide.
 - Pas de transformation du vide dans « autre chose »
=> Aucun moyen d'évaluer « l'énergie du vide »
- ***Gravité: Relativité Générale***
 - Couplage énergie \Leftrightarrow géométrie de l'espace-temps
 - La valeur absolue de l'énergie compte
 - Valeur arbitraire, non prédite par la théorie
 - « Constante cosmologique »



Einstein 1915

- L'espace-temps peut être courbé
- Courbure et matière/énergie sont équivalents.
 - Cette équivalence est une théorie de la gravitation.
- Les équations d'Einstein (1915-1917)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

La forme de l'espace temps

Une constante dite « Cosmologique »

La densité et le flux d'énergie/matière...

Energie du vide en Relativité Générale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

- CC interprétée comme « énergie du vide » : $\Lambda = \kappa \rho_{\text{vide}}$

Mesures cosmologiques => $\rho_{\text{vide}} = 0,53 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$

- 1 nJ : exemples:
 - énergie pour faire ~1000 additions dans un microprocesseur
 - 4 x M(proton) c²
- Aucune conséquence observable à petite échelle.
- Grande conséquence à grande échelle:
 - 0.7 x densité d'énergie moyenne de l'Univers (aujourd'hui)
 - densité d'énergie constante, indépendante de la taille
 - dominera complètement l'univers dans le futur (lointain...)

Ignorer le problème?

- ~ Ce qu'on a fait pendant 50 ans
 - Quantique: échelle microscopique, particules, atomes
 - Relativité Générale: échelle cosmique, galaxies, univers
- Mais aujourd'hui on ne peut plus!
 - Observations astronomiques de plus en plus précises
 - Théorie quantique ultra-prédictive
 - Modèle Standard (quantique) « complet » (avec la découverte du boson de Higgs)
 - Objets relativistes ET quantiques: trous noirs, étoiles à neutrons...



Solutions « Théorie du Tout »

- Probablement à l'origine du problème:

Nous n'avons pas de théorie quantique de la Gravitation.

- Très nombreuses propositions

- Théorie des Cordes
- Dimensions supplémentaires
- Invariance d'échelle
- Gravité émergente

- et mélanges...



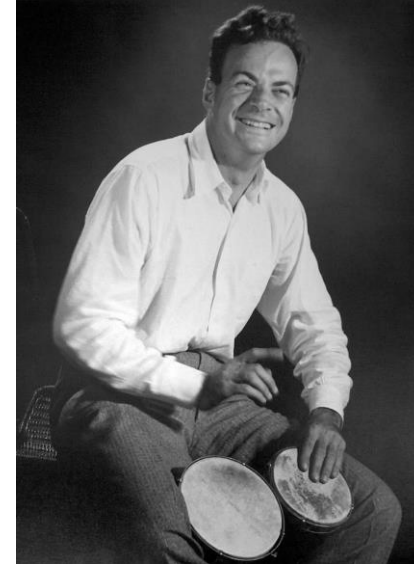
- Multivers

- certaines théories (de cordes) prédisent un très grand nombre d'univers

- 10^{500} à $10^{10^{10^7}}$ universs ?)

Bruno Mansoulié, 31 mars 2026

La confrontation: Relativité Générale versus Théorie Quantique



Richard
Feynman
1918-1988

(et autres...)

Relativité Générale

Energie du vide

mesurée dans l'Univers

$0,5 \cdot 10^{-9} \text{ J/m}^3$

Théorie Quantique (des champs)

Energie du vide

calculée à partir du « Modèle Standard »

$\sim 10^{46} \text{ J/m}^3$