

Combien de dimensions y a-t-il?

$$S = \int d^D x \sqrt{|g_D|} \mathcal{L}_D$$



Felix Brümmer, Laboratoire Univers et Particules de Montpellier

Q: Combien de dimensions y a-t-il?

R: Trois, évidemment

Q: Combien de dimensions y a-t-il?

R: Trois, évidemment

Merci de votre attention!

Pas si vite...

C'est quoi une dimension?

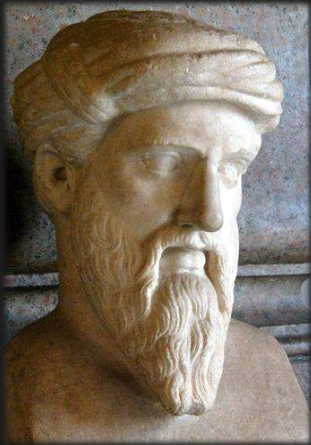
Dans D dimensions, on peut se déplacer en D directions indépendantes

Dans D dimensions, il faut D coordonnées pour caractériser un point

Coordonnées **dépendent du repère**:

Montpellier est à $3^{\circ}52'E$ (méridien de Greenwich) ou à $1^{\circ}32'E$ (méridien de Paris)





Pythagore

$$D = 3$$

Géométrie euclidéenne



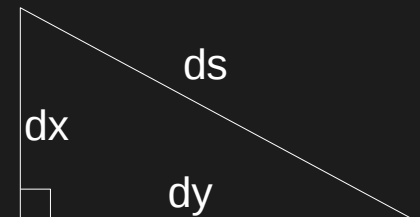
Euclide

Quantités **invariantes** qui ne dépendent pas du repère:

- angles
- **distances** euclidéennes:

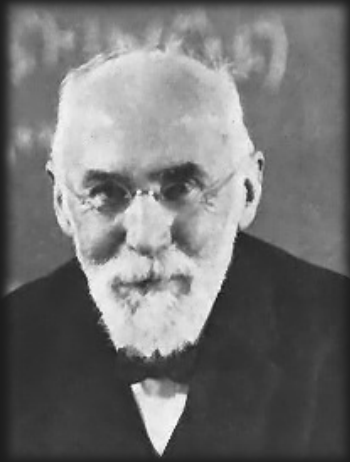
$d(\text{Toulouse, Montpellier}) = 200 \text{ km}$ pour un méridien quelconque!

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$$



différences de coordonnées dans un repère orthonormale quelconque

distance ne dépend pas du repère

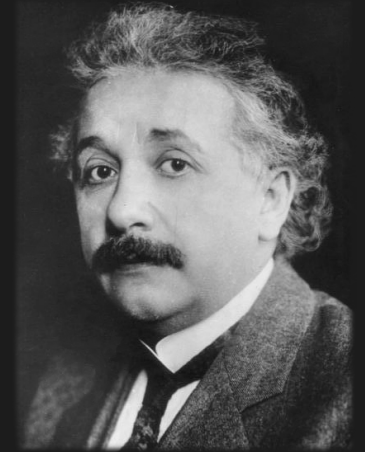


Lorentz



Poincaré

$D = 3?$



Einstein

Nous pouvons décrire la vitesse universelle de la lumière avec notre théorie de l'éther!

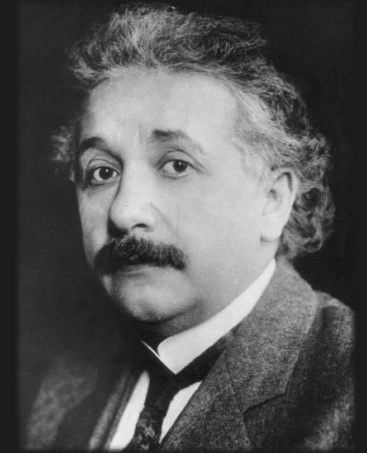
Hmmm... ne serait-il pas plus facile si la distance euclidienne n'était pas invariante...?



Minkowski

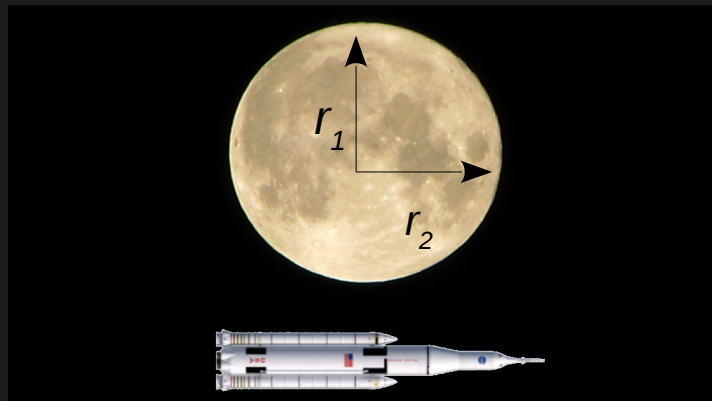
$$D = 4$$

Théorie de la relativité:
il faut compter **le temps**
comme 4ème dimension!



Einstein

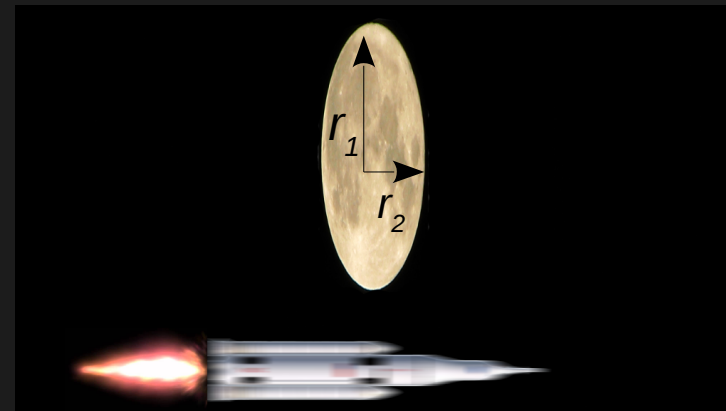
- La distance euclidéenne n'est pas indépendante du repère si le choix du repère dépend du temps (observateur en mouvement)
- La longueur d'un objet **dépend du mouvement de l'observateur**



$$v \ll c$$

Effets relativistes négligeables

$$r_2 = r_1$$



$$v \approx c$$

Contraction des longueurs

$$r_2 < r_1$$

$$D = 4$$

Distance invariante:

$$ds = \sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2}$$

vitesse de
la lumière

coordonnées spatiales (dépendent du repère)

coordonnée temporelle (dépend du repère)

distance invariante
entre deux événements
dans l'espace-temps

Quand les vitesses s'approchent à c , il faut compter
le temps comme 4ème dimension

$D = 4$ partout dans la physique des hautes énergies!

Exemple classique: Muons atmosphériques

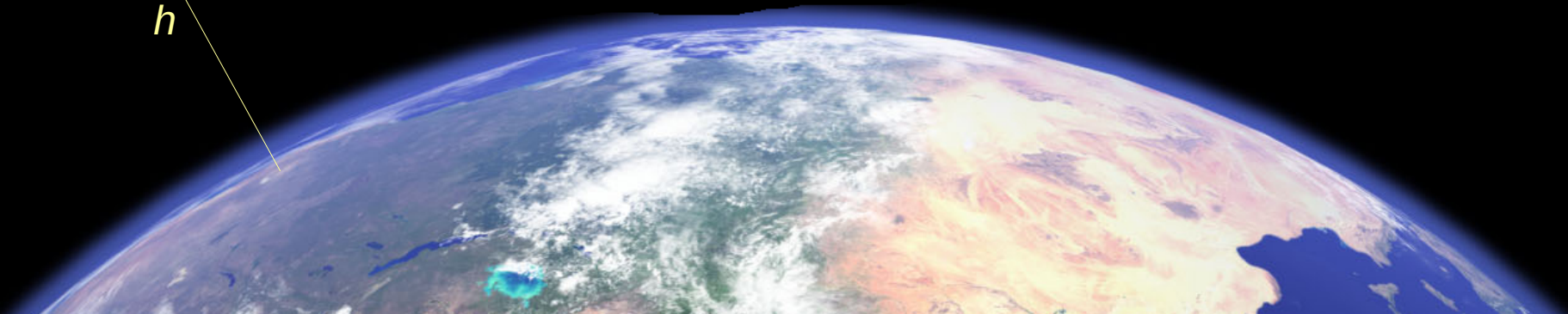
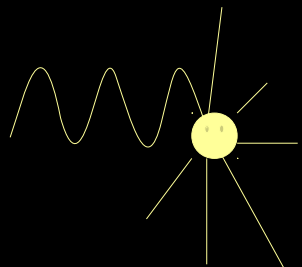
Muon crée à hauteur $h = 20$ km avec vitesse $v = 0.99999 c$
Temps de vie: $2 \mu\text{s}$: peut traverser 600 m avant de se désintégrer
Mais dans son repère la distance est contractée:

$$h \rightarrow h' = h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Avec juste $h' = 90$ m à traverser, le muon peut atteindre la surface

h

Véritable effet relativiste!





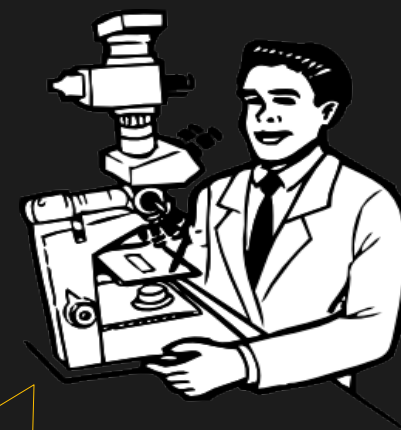
Kaluza



Klein

$D > 4 ?$

Et si on ajoutait une cinquième dimension?



Mais ce n'est pas ce qu'on observe!

Peut-être il faut un microscope plus puissant?

$D = 5$: Le funambule et la fourmi



La fourmi peut se déplacer en deux dimensions: le long de la corde et en travers

Le funambule ne voit qu'une dimension: il est trop grand pour pouvoir résoudre la deuxième

$D = 5$: Une dimension supplémentaire compacte

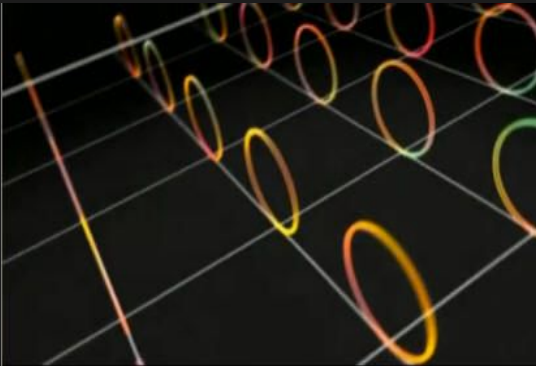
Cas le plus simple: attacher un cercle du rayon R à chaque point de l'espace-temps quadridimensionnel

$$ds = \sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 - R^2 d\phi^2}$$

signe: dimension spatiale

R = rayon de la 5ième dimension

coordonnée angulaire
(dimension compacte)
 $\phi \sim \phi + 2\pi$



$D = 5$: détecter une dimension supplémentaire

La résolution de mon microscope est limitée par la longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{f}$$



Planck

Alors elle est limitée par l'énergie puisque

$$E = hf$$

Pour résoudre une structure à l'échelle R
on a besoin au moins de l'énergie

$$E = \frac{hc}{R}$$

Prenons le microscope
le plus puissant du monde...



... le LHC!



$$E = 13 \text{ TeV} \Rightarrow \lambda \approx 10^{-19} \text{ m}$$

$D = 5$: Les modes de Kaluza-Klein

- **Particules** = excitations des **champs** quantiques
Champs = fonctions de l'espace-temps $\Psi(t, \vec{x})$
- En $D = 5$: Champs = fonctions de l'espace-temps
et de la 5ème dimension $\Psi(t, \vec{x}, \phi)$
- Dimension supplémentaire **compacte**: Ψ périodique en ϕ
Série de Fourier:

$$\Psi(t, \vec{x}, \phi) = \sum_n \psi_n(t, \vec{x}) e^{in\phi}$$

- Modes de Fourier $\psi_n(t, \vec{x})$: une **tour infinie de particules** 4-D
avec masses

$$m_n = \frac{n\hbar}{Rc}$$

que l'on peut **chercher à l'LHC!**

L'univers branaire

Un autre scénario pour les dimensions supplémentaires:

- La **gravité** existe en $D > 4$...
- ... mais la **matière** est confinée dans une **membrane** 4-D



Possible explication pourquoi la gravité est tellement faible: elle est **diluée** par les dimensions supplémentaires

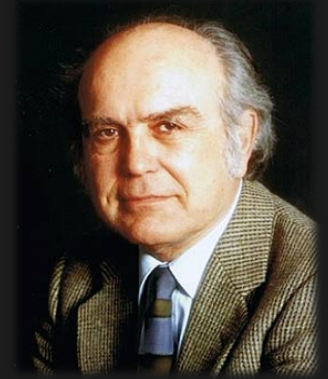
Les “dimensions fermioniques” : la supersymétrie



Wess

Nombres réelles: $xy = yx$

Nombres fermioniques: $\theta\eta = -\eta\theta$
(nombres de Grassmann)



Zumino

Élargir l'espace-temps quadridimensionnel
par des coordonnées fermioniques → **superespace**

Champs sur le superespace: **superchamps**
avec des composantes bosoniques ainsi que fermioniques

$$\Psi(t, \vec{x}) \rightarrow \Psi(t, \vec{x}, \theta, \bar{\theta})$$

$$\Psi(t, \vec{x}, \theta) = \phi(t, \vec{x}) + \theta \psi(t, \vec{x}) + \theta\theta F(t, \vec{x})$$

développement limité

boson

fermion

boson

Fermions, bosons et supersymétrie



Fermi

Fermions:
tous les constituants de la matière
(electrons, muons, quarks...)

Tout particule élémentaire est soit
un **boson**, soit un **fermion**



Bose

Bosons:
tous les médiateurs des forces
(photons, gluons...) + le boson de Higgs

La supersymétrie réunit des bosons et des fermions dans
un seul objet mathématique: le superchamp $\Psi(t, \vec{x}, \theta, \bar{\theta})$

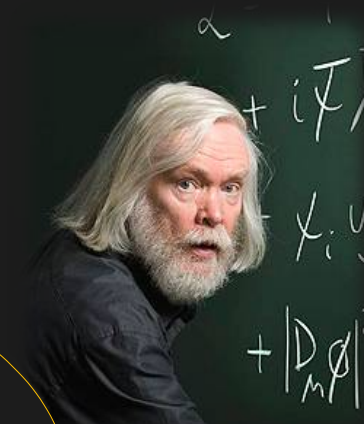
Selon cette théorie:

- tout boson possède un superpartenaire fermionique
- tout fermion possède un superpartenaire bosonique



Mach

Moi je soupçonne que ces “dimensions fermioniques” ne sont qu'un astuce mathématique...



Ellis



Dimopoulos

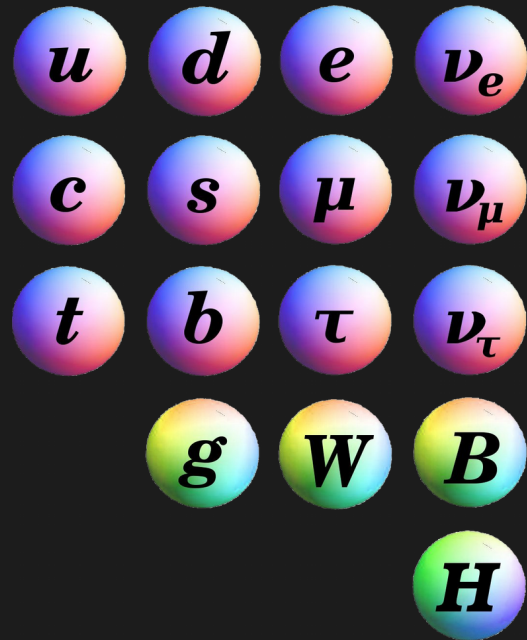
Et alors? Ça nous permet de résoudre des problèmes du modèle standard et obtenir des prédictions pour l'LHC!

Prédictions de la supersymétrie:

- les bosons de jauge ont des superpartenaires (“gauginos”)
- les quarks et leptons ont des superpartenaires (“squarks, sleptons”)
- il y a plusieurs bosons de Higgs + superpartenaires (“higgsinos”)

La supersymétrie au LHC

Les particules du modèle standard:



La supersymétrie au LHC

Les particules du modèle standard supersymétrique minimal:



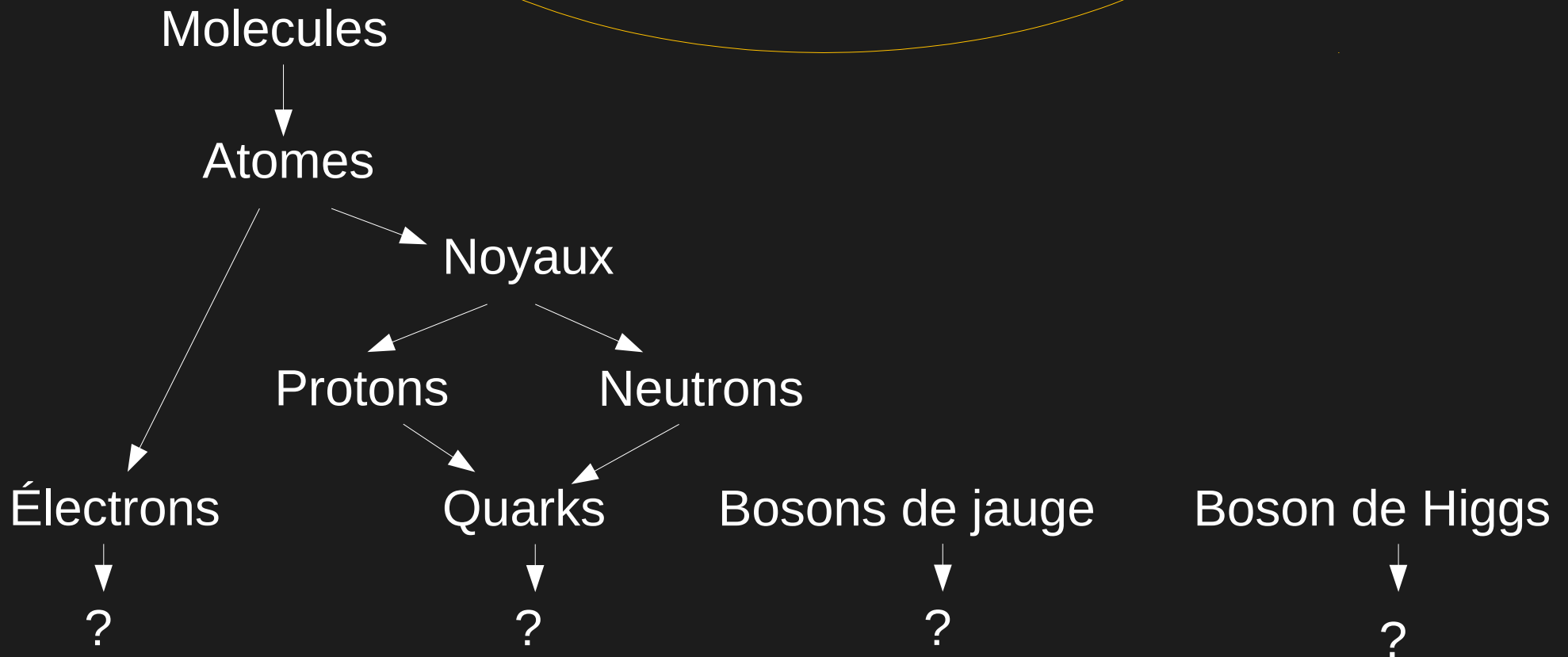
particules ordinaires

superpartenaires

- Si la supersymétrie est correcte, on attend la découverte des superpartenaires au LHC (ou peut-être aux futurs collisionneurs même plus puissants)
- La matière sombre dans l'univers pourrait se composer des superpartenaires des bosons de jauge ou de Higgs

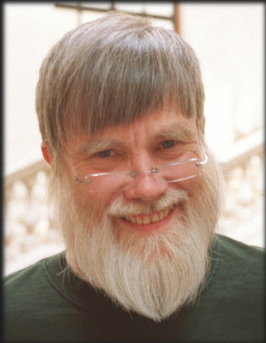


Je suis complètement confondu par toutes ces théories de dimensions supplémentaires, fermioniques ou pas. Si on simplement cherchait la nouvelle physique en gardant $D = 4$? Par exemple, des sous-structures pour certains particules "élémentaires"?



Le boson de Higgs composé:

une théorie au-delà du modèle standard en $D = 4$



Georgi



Kaplan

Selon notre modèle, le boson de Higgs n'est pas élémentaire – il est à une nouvelle force ce que le pion est aux interactions fortes



Higgs

Le pion: un boson composé des **quarks** tenus ensemble par l'**interaction forte**

Le Higgs: un boson composé des "**techni-quarks**" hypothétiques tenus ensemble par une **nouvelle force à très courte portée ?**

Le boson de Higgs composé:

une théorie au-delà du modèle standard en $D = 4$



Georgi



Kaplan

Le seul problème avec notre modèle c'est qu'on ne peut rien calculer avec précision: le couplage est trop fort...



Higgs

C'est parce que vous avez insisté sur $D = 4$! Regardez...



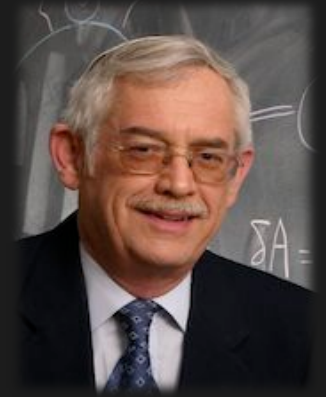
Maldacena

D à l'aide de $D-1$: l'holographie

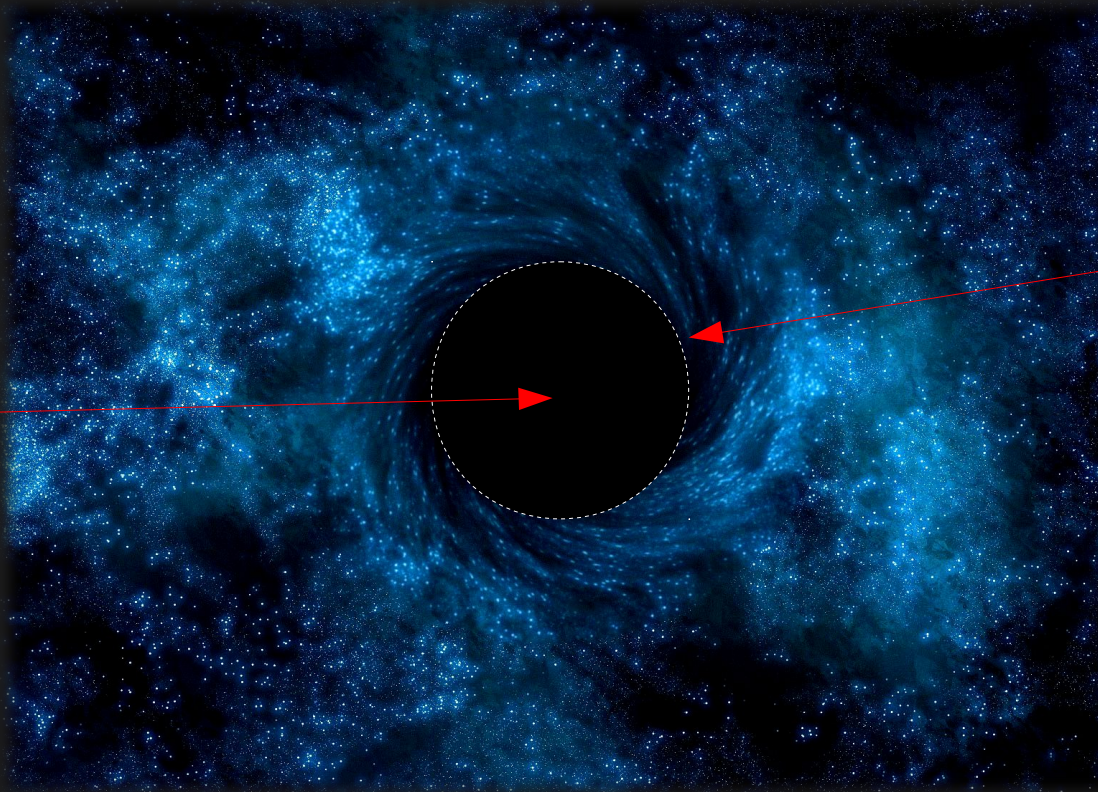
L'état quantique d'un **trou noir** est codé sur la surface de son **horizon**



Hawking



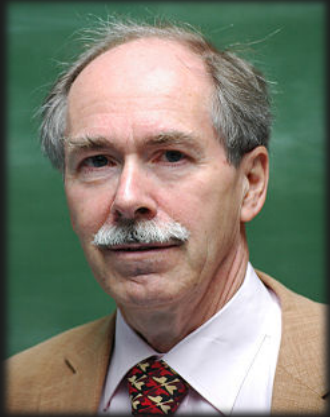
Bekenstein



un trou noir

toute la physique à l'intérieur de l'horizon peut en principe être décrite par des degrés de liberté sur la surface

D à l'aide de $D-1$: l'holographie

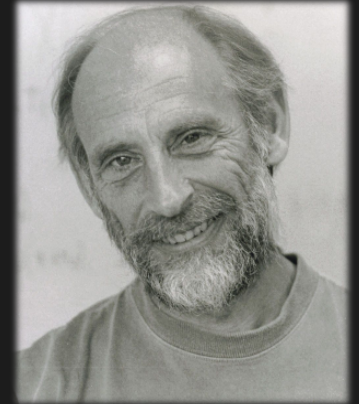


't Hooft

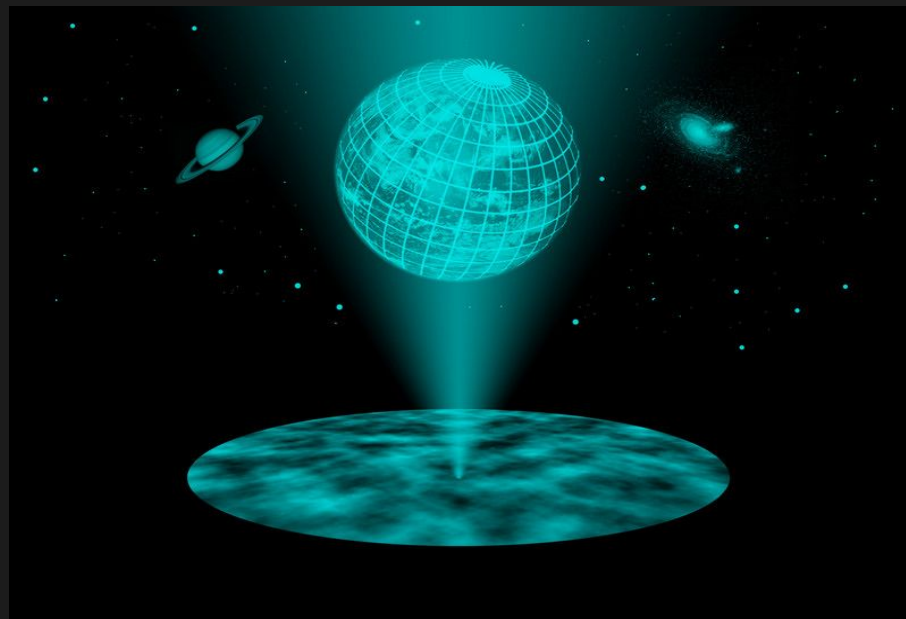
Peut-on généraliser le principe de Bekenstein-Hawking à tous espace-temps?

Conjecture (Principe Holographique):

La gravité quantique dans un espace-temps D -dimensionnel peut être décrite par une théorie quantique $(D-1)$ dimensionnelle sur la surface de son bord



Susskind





Maldacena

J'ai trouvé un exemple
d'une théorie gravitationnelle en $D = 5$
qui est équivalente
à une théorie quantique des champs
en $D = 4$ sur le bord

Dualité AdS/CFT:

Une théorie gravitationnelle:
des supercordes sur un
espace courbé en $D = 5 (+ 5)$

est **duale** à

une théorie qui est un cousin
éloigné de la QCD des
interactions fortes: la théorie
de Yang-Mills supersymétrique
maximale en $D = 4$

The Large- N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity

Juan Maldacena

Received September 15, 1998

We show that the large- N limits of certain conformal field theories in various dimensions include in their Hilbert space a sector describing supergravity on the product of anti-de Sitter spacetimes, spheres, and other compact manifolds. This is shown by taking some branes in the full M/string theory and then taking a low-energy limit where the field theory on the brane decouples from the bulk. We observe that, in this limit, we can still trust the near-horizon geometry for large N . The enhanced supersymmetries of the near-horizon geometry correspond to the extra supersymmetry generators present in the superconformal group (as opposed to just the super-Poincaré group). The 't Hooft limit of $3 + 1 \mathcal{N} = 4$ super-Yang-Mills at the conformal point is shown to contain strings: they are IIB strings. We conjecture that compactifications of M/string theory on various anti-de Sitter spacetimes is dual to various conformal field theories. This leads

La découverte la plus influente dans la physique
théorique des derniers 20 ans: 10 000+ citations

Retour au boson de Higgs composé:

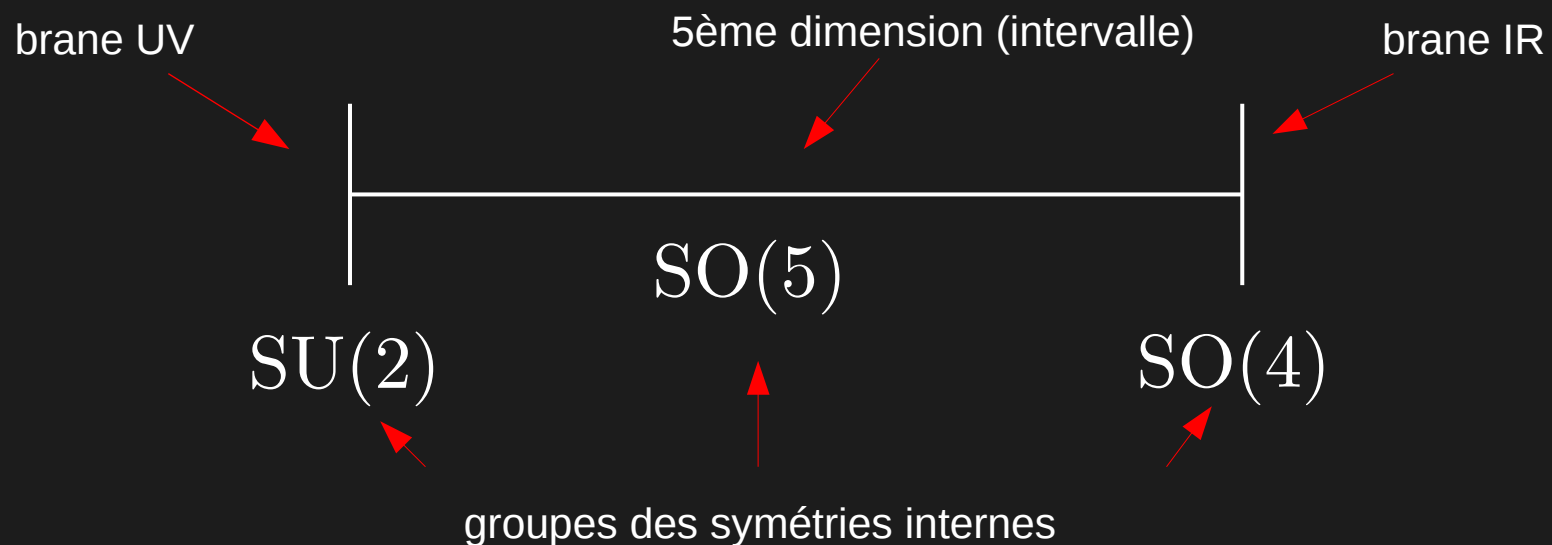
une théorie au-delà du modèle standard en $D = 4 \times 5$



Le boson de Higgs composé est une théorie 4-D à fort couplage qui est **équivalente** à une théorie gravitationnelle 5-D

En $D = 5$ on peut calculer ses propriétés

“Le Higgs composé holographique”



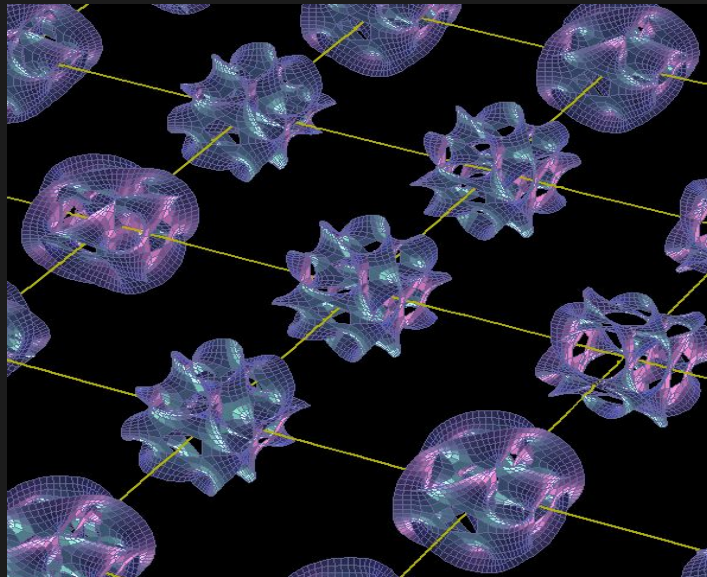
Même plus de dimensions: les supercordes

On a parlé des **particules** en forme du point dans des espace-temps multidimensionnels

Mais si les particules ils-mêmes avaient une extension?


→ Théorie des (super)**cordes**

Nécessitent **6** dimensions de l'espace-temps supplémentaires
($D = 10$)



Rayon probablement trop petit pour découvrir aux collisionneurs...

Premières indications pour la physique au-délà du modèle standard?

- Le modèle standard contient trois types de **lepton**:  e μ τ
- **Prédiction**: la **seule différence** entre eux sont leurs **masses**, 0.5, 106 et 1777 MeV/c²
- Autrement les trois “saveurs” de lepton sont **indiscernables**:
“Universalité leptonique”
- Mais il semble que, à l’LHC, certains **mesons** préfèrent se désintégrer plus en **electrons** qu’en **muons**....
- ... ou plus en **taus** qu’en électrons/muons

???



Violation de l'universalité leptonique?

- L'expérience LHCb étudie, entre autres, les désintégrations

$$\bar{B} \rightarrow \bar{K} \mu \mu \qquad \bar{B} \rightarrow \bar{K} e e$$

où le **meson B** se compose d'un quark d et un quark b et le **meson K** se compose d'un quark d et un quark s

- **Prédiction** du modèle standard: $\frac{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K} \mu \mu)}{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K} e e)} \approx 1$

- **Observation:** $\frac{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K} \mu \mu)}{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K} e e)} = 0.75 \pm 0.1$

- Accident ?

Violation de l'universalité leptonique?

- Autres désintégrations:

$$\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \mu\mu \qquad \bar{B} \rightarrow \bar{K}^* ee$$

les mesons K^* étant des excitations des mesons K

- **Prédiction** du modèle standard:

$$\frac{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \mu\mu)}{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* ee)} \approx 1$$

- **Observation:**
$$\frac{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \mu\mu)}{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* ee)} = 0.7 \pm 0.1$$

- Deuxième accident ?

Violation de l'universalité leptonique?

- Encore plus de désintégrations aux expériences LHCb, BaBar, Belle:

$$\bar{B} \rightarrow D\tau\bar{\nu}_\tau \qquad \bar{B} \rightarrow D\ell\bar{\nu}_\ell$$

avec ℓ soit un électron soit un muon

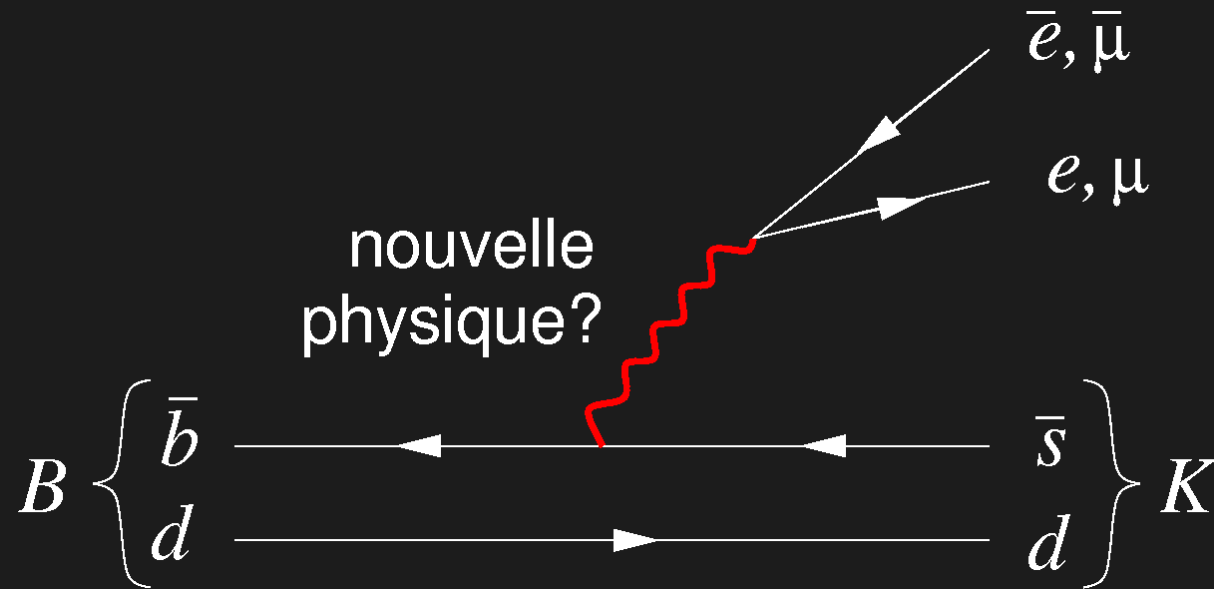
et avec les **mesons D** des états composés des quark c et d

- **Prédiction** du modèle standard: $\frac{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow D\tau\bar{\nu}_\tau)}{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow D\ell\bar{\nu}_\ell)} \approx 0.3$

- **Observation:** $\frac{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow D\tau\bar{\nu}_\tau)}{\text{BR}(\bar{B} \rightarrow D\ell\bar{\nu}_\ell)} = 0.4 \pm 0.05$

- Troisième accident ?

Violation de l'universalité leptonique?



Indication pour des **nouvelles particules** avec des couplages non universels aux leptons?



Mais qui a commandé ça?

- Les nouvelles particules (les intermédiaires de ces désintégrations) **peuvent-elles sortir de nos modèles** de nouvelle physique?
- Il faut qu'elles soient **suffisamment lourdes** pour échapper la détection directe à ATLAS et CMS (qui n'ont rien vu)
- Il faut rester **compatible avec d'autres mesures** bien compatibles avec les prédictions du modèle standard
- Parmi les scénarios proposés: une **excitation de Kaluza-Klein des bosons de jauge en 5D**, des **résonances dans des théories du boson de Higgs composé**, ...

Mise en garde

Décembre 2015: indications pour une **nouvelle particule à 750 GeV**
aux expériences ATLAS et CMS

Jusqu'à mi-2016: plus de **300 articles** soumis pour expliquer cette
observation avec des modèles de “nouvelle physique”

Juillet 2016: la “nouvelle particule” était une **fluctuation statistique** dans
les données + une erreur dans l'analyse

Ça arrive...

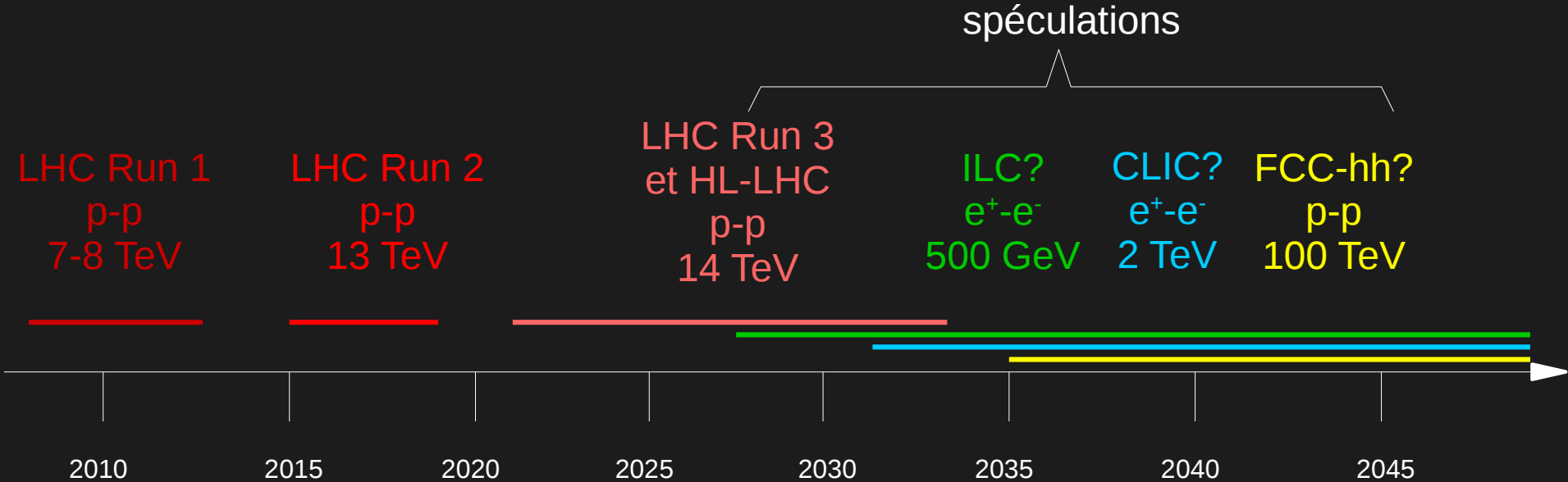


Il n'est pas impossible que l'observation de la violation de l'universalité
leptonique est en vérité aussi une coïncidence / un raté de mesure!



**KEEP
CALM
AND
COLLECT
MORE DATA**

La future exploration des dimensions supplémentaires, de la supersymétrie et du boson de Higgs composé



Le HL-LHC

“High-Luminosity Large Hadron Collider”

Mise à niveau du LHC pour amasser de vastes quantités de données

Financement déjà approuvé



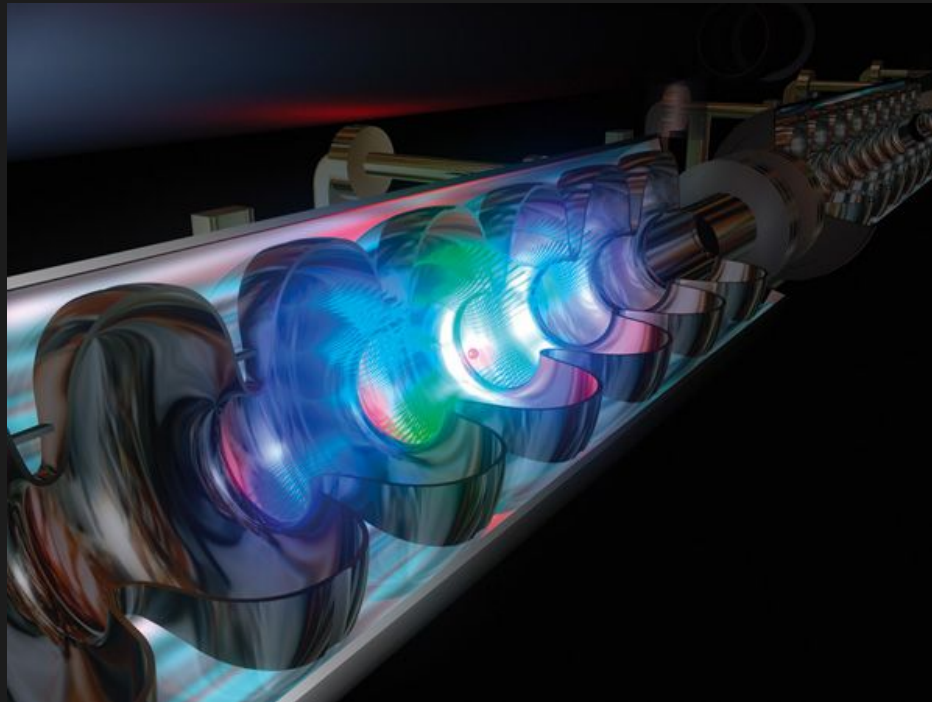
Le ILC

“International Linear Collider”

Collisionneur electron-positron: - énergie, + précision

Technologie bien développée, prête pour l'utilisation

Financement partiel important proposé par le Japon; partenaires?



CLIC

“Compact Linear Collider”

Collisionneur electron-positron à plus hautes énergies

Technologie sous développement



Le FCC

“Future Circular Collider”

Plusieurs versions en débat: hh, he, ee, énergie jusqu'à 100 TeV?

Technologie à développer



Conclusion

- Il y a au moins 3 dimensions
- En fait il y en a au moins 4 car il faut compter le temps
- Mais peut-être il y en a 5, ou 6, ou 10...?
Si oui: **plein de nouvelles particules**
- Parfois même la physique 4-D se comprend mieux en $D = 5$
- Peut-être il y a des “dimensions fermioniques” (la supersymétrie). Si oui: **plein de nouvelles particules**
- Le LHC semble avoir observé une **violation de l'universalité leptonique**: physique au-delà du modèle standard? Pourrait être lié aux dimensions supplémentaires?
- La nouvelle physique peut être cherchée avec les microscopes les plus puissants: les collisionneurs futurs.