

# A la recherche du

# boson de Higgs



*Christophe Grojean*

CERN-TH

(Christophe.Grojean[at]cern.ch)



# Le long chemin de la connaissance...



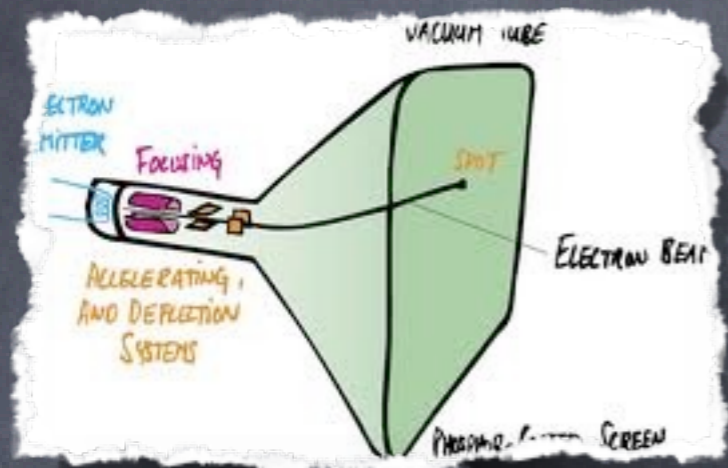
*Nos connaissances apportent des réponses mais nous permettent surtout de formuler de nouvelles questions.*

- ❖ poids du pingouin?
- ❖ son métabolisme?
  - ❖ ses besoins en nourriture?
    - ❖ quantité de poisson dans les environs?
    - ❖ température de l'eau de l'océan?
    - ❖ courants thermiques dans l'océan?
      - ❖ climat dans les prochains mois ou prochaines années?
        - ❖ abondance des futures récoltes de blé?
          - ❖ cours du blé à New-York?

# La physique des particules

"Dessine-moi un mouton"  $\Rightarrow$  "Dessine-moi une particule"

"voir" l'infiniment petit



un accélérateur et détecteur de  
particules dans la vie de tous les jours



# La physique des particules

"Dessine-moi un mouton"  $\Rightarrow$  "Dessine-moi une particule"

"voir" l'infiniment petit



$e^-$   
 $v=0$

$e^- \rightarrow$   
 $v \sim 700 \text{ km/s}$

$$E \approx 10^{-19} \text{ J} \approx 1 \text{ eV}$$

Grand Collisionneur de hadrons  
(Large Hadron Collider=LHC)

(27 km de long, éléments alignés avec une précision de quelques millièmes de mètre)

$$E \approx 10'000'000'000'000'000 \text{ eV}$$

(empilement de piles de 300 millions de km  
 $\sim 2$  fois la distance Terre-Soleil.

Le LHC est plus efficace que de simples piles électriques!)



# Pourquoi vouloir tjs plus d'énergie?

Plus d'énergie  $\Rightarrow$  possibilité d'étudier des détails de plus en plus fins

Mesurer la longueur du littoral corse...



Porto-Vecchio

$L = 500$  km  
(la corse des parisiens)



Cargèse

$L = 800 \pm 200$  km  
(la corse des physiciens)



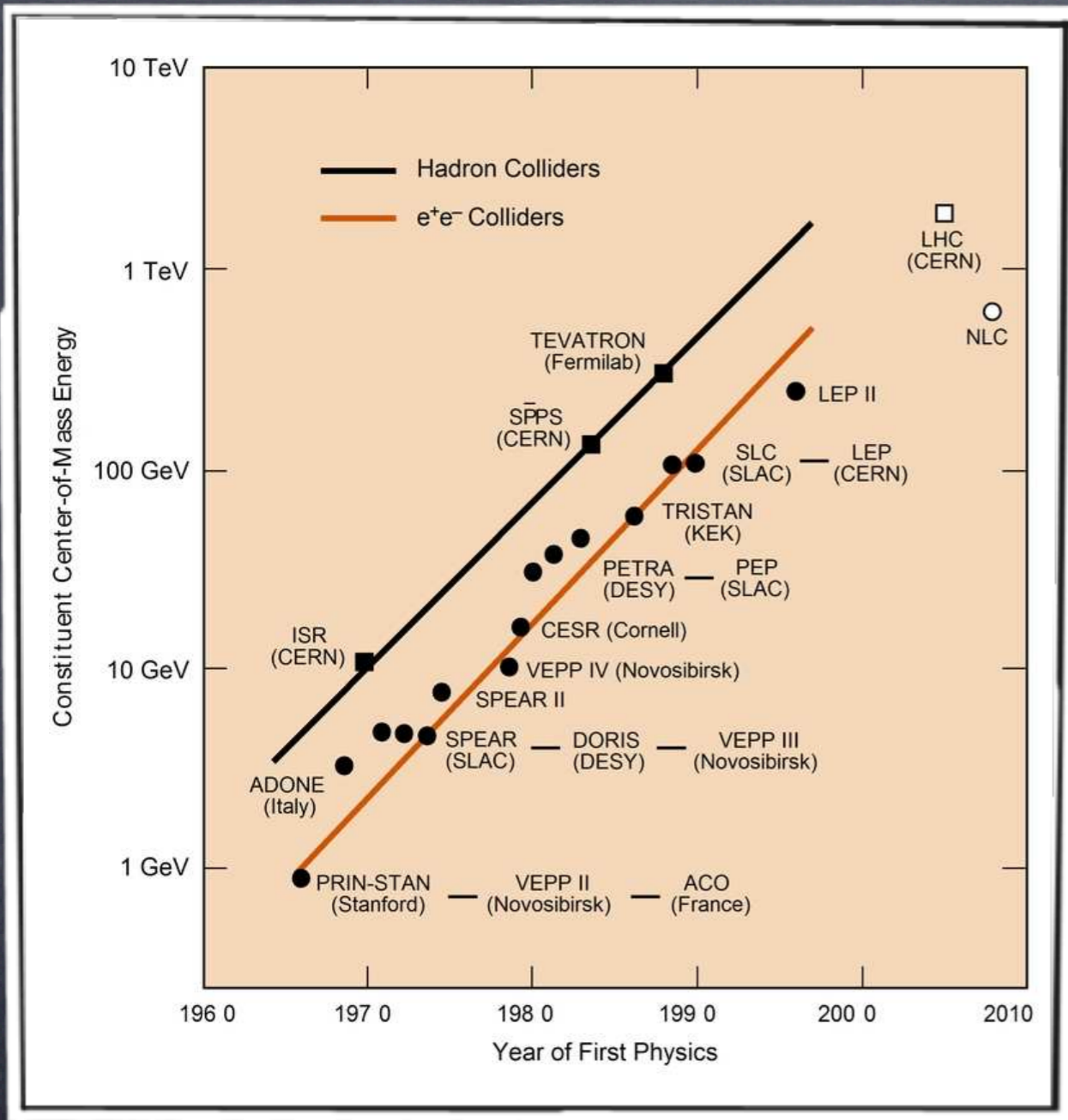
$L = 1000$  km  
(la corse des corses)

$L = \infty$  (la corse des mathématiciens)



# Pourquoi vouloir tjs plus d'énergie?

Plus d'énergie  $\Rightarrow$  possibilité d'étudier des détails de plus en plus fins



1 TeV ( $\approx$  1000 milliard de piles électriques):  
le boson de Higgs et ???

2012

x1000

1 GeV ( $\approx$  1 milliard de piles électriques):  
les noyaux atomiques sont constitués de  
quarks

1960

x1000

1 MeV ( $\approx$  1 million de piles électriques):  
Rutherford découvre les noyaux atomiques

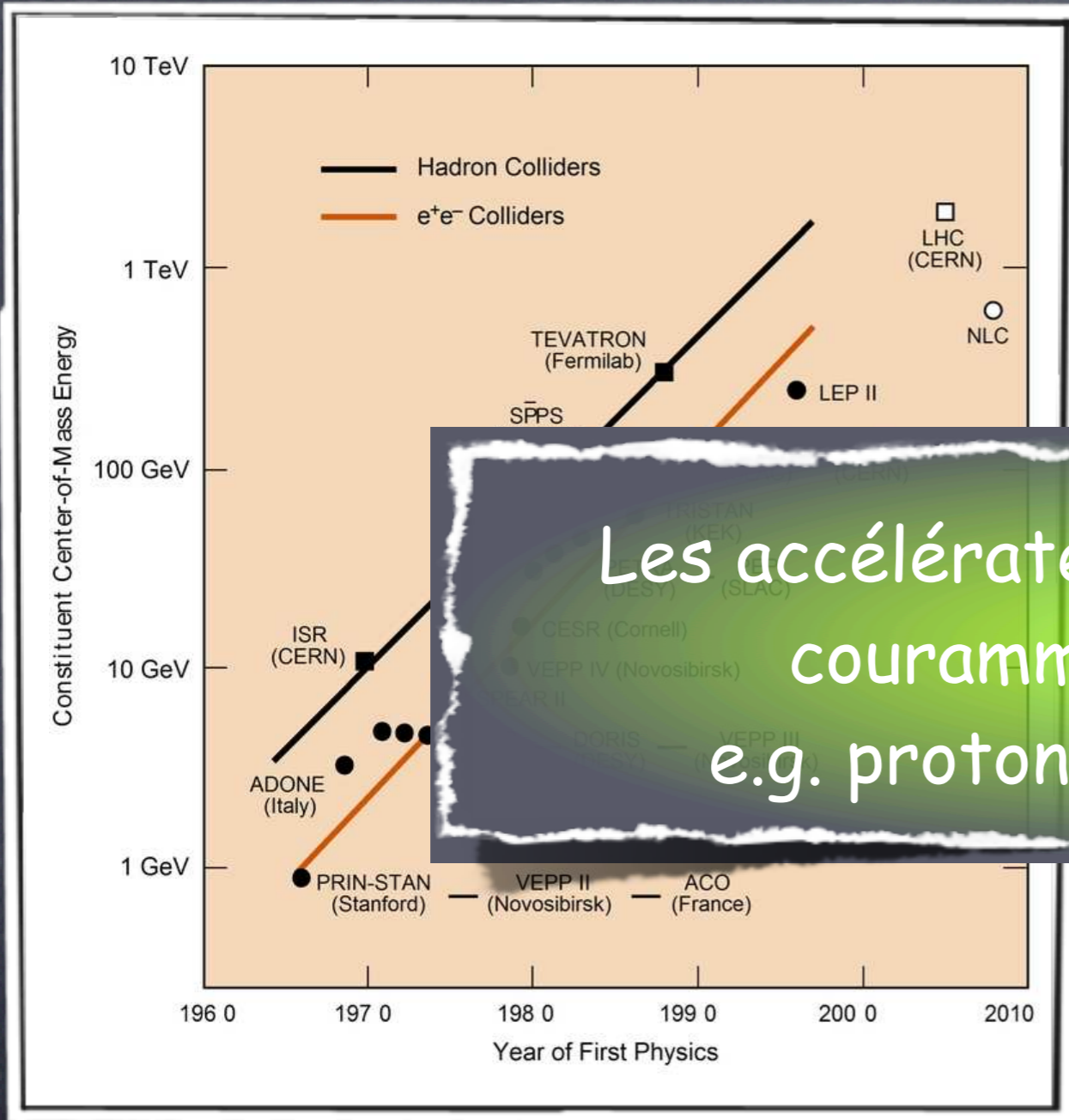
1911

Loi de Livingston (1960) : l'énergie maximale des accélérateurs double tous les 5 ans !  
(vraie au début mais plus tout à fait aujourd'hui... malheureusement)



# Pourquoi vouloir tjs plus d'énergie?

Plus d'énergie  $\Rightarrow$  possibilité d'étudier des détails de plus en plus fins



Les accélérateurs sont aussi utilisés couramment en médecine e.g. proton thérapie ~ 10 MeV

1 TeV ( $\approx$  1000 milliard de piles électriques): le boson de Higgs et ???  
 x1000  
 2012

piles électriques): situés de

1960

Rutherford découvre les noyaux atomiques

1911

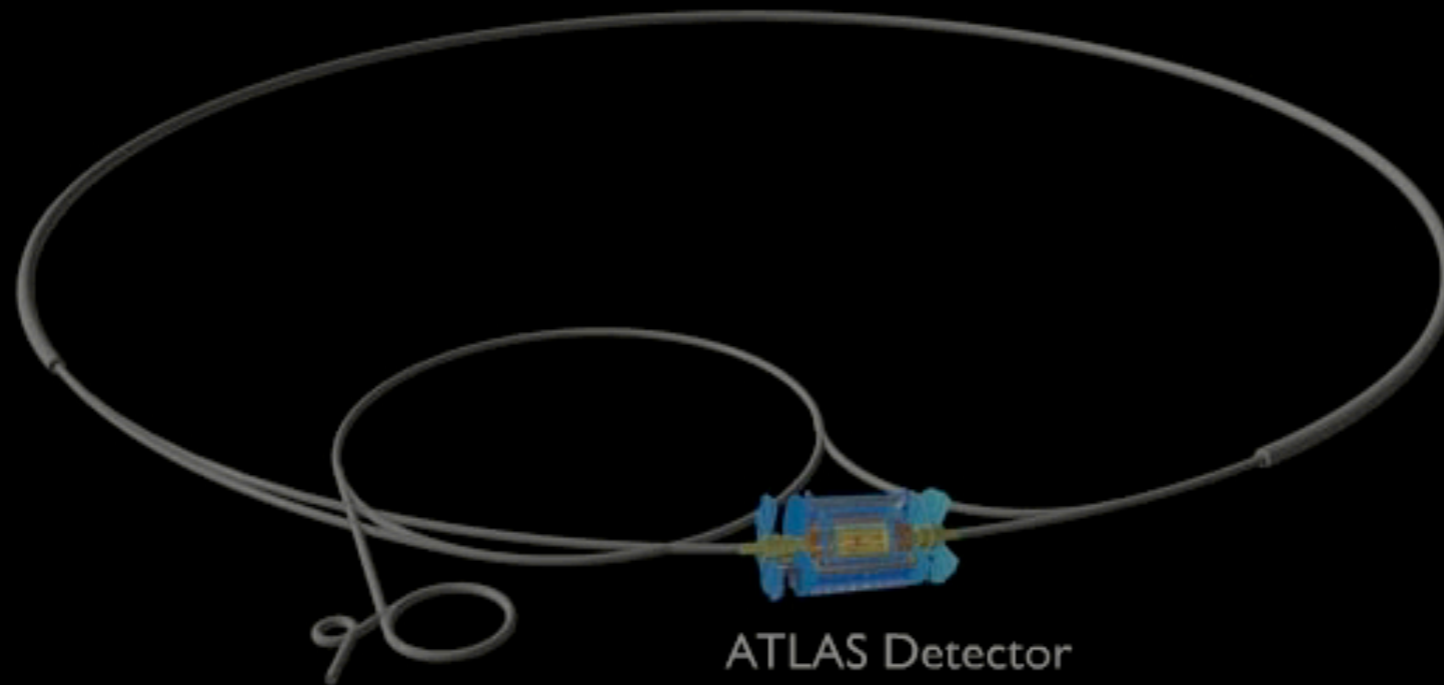
Loi de Livingston (1960) : l'énergie maximale des accélérateurs double tous les 5 ans !  
 (vraie au début mais plus tout à fait aujourd'hui... malheureusement)



# Le LHC

PLAY ▶

Large Hadron Collider



ATLAS Detector

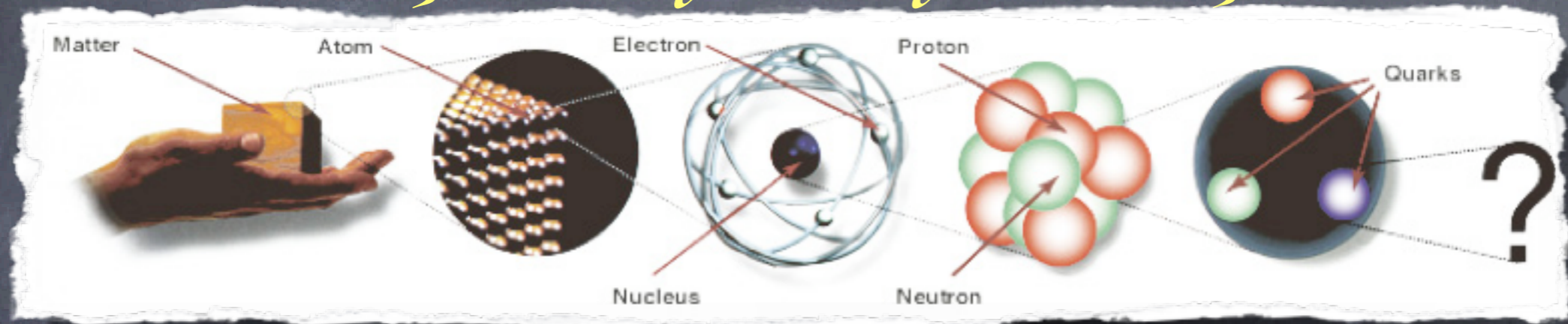
# Le LHC et ses détecteurs





# Qu'est-ce qu'une particule ?

*Un objet petit, quantique et rapide.*



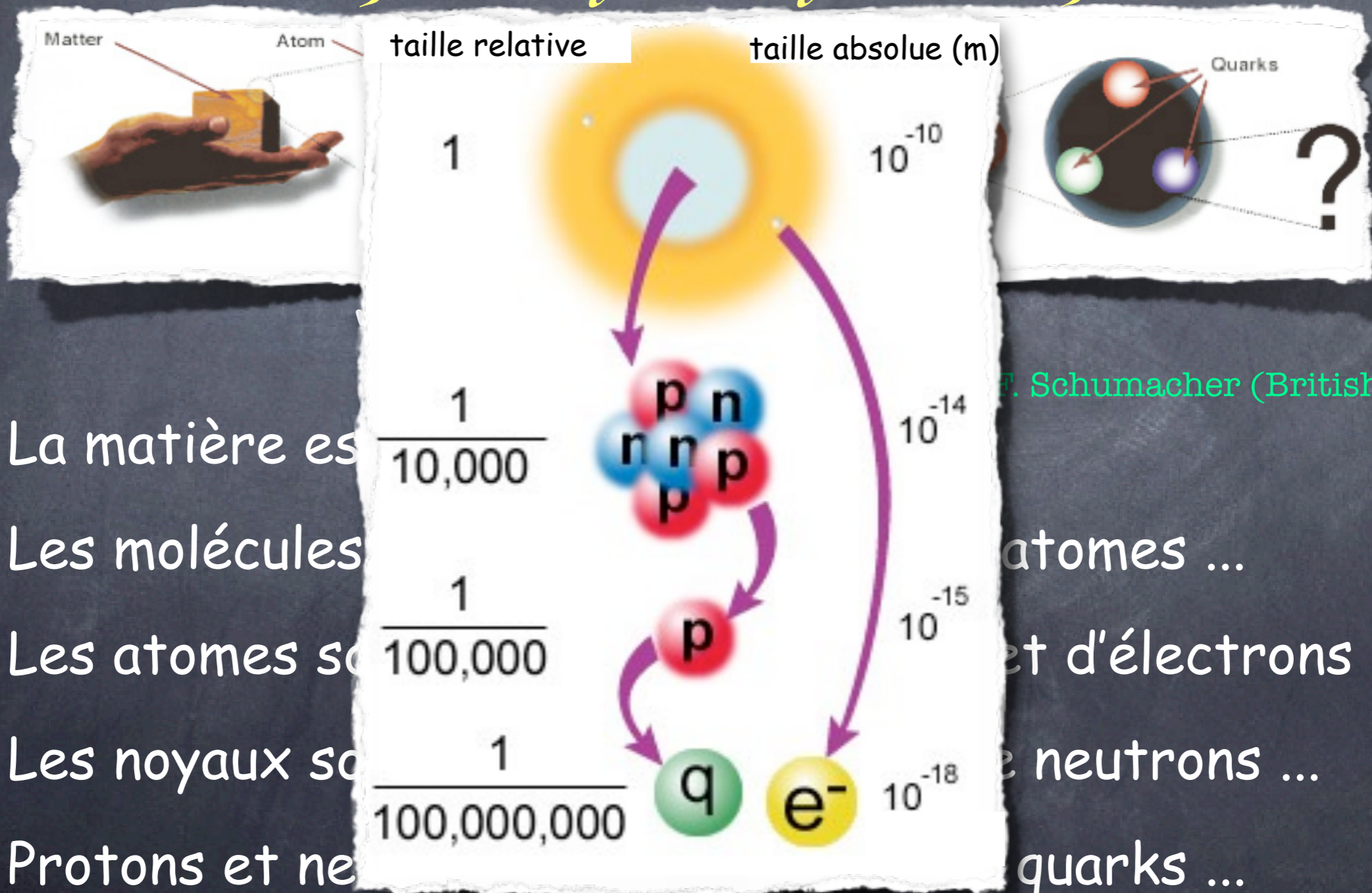
"Small is beautiful"

E.F. Schumacher (British economist)

- La matière est faite de molécules ...
- Les molécules sont des assemblages d'atomes ...
- Les atomes sont composés d'un noyau et d'électrons ...
- Les noyaux sont faits de protons et de neutrons ...
- Protons et neutrons sont composés de quarks ...

# Qu'est-ce qu'une particule ?

*Un objet petit, quantique et rapide.*



- La matière est
- Les molécules
- Les atomes sont
- Les noyaux sont
- Protons et neutrons

F. Schumacher (British economist)

atomes ...

et d'électrons ...

neutrons ...

quarks ...



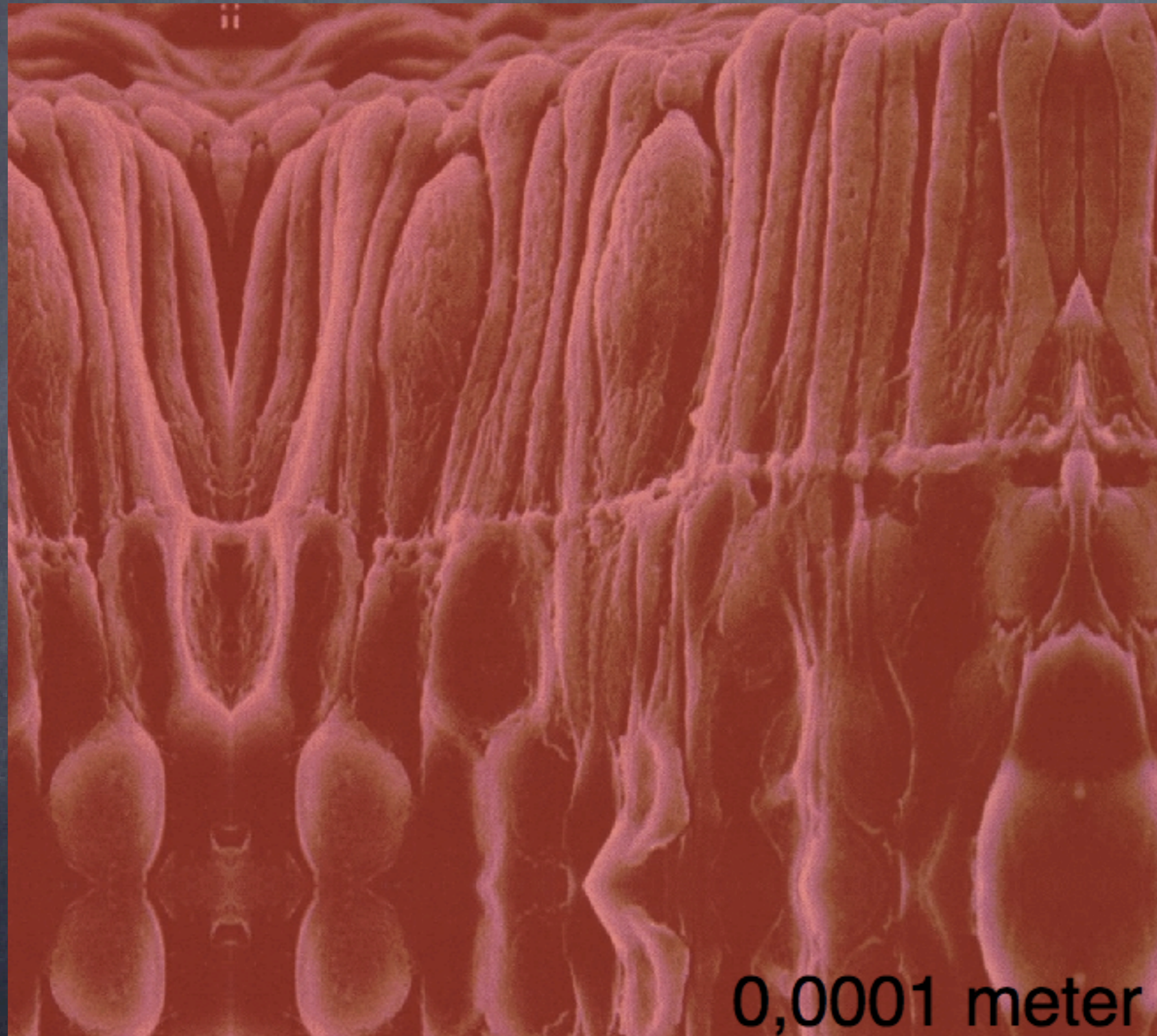
# Le monde selon Julia R.



Remco Brantjes  
(NIKHEF)



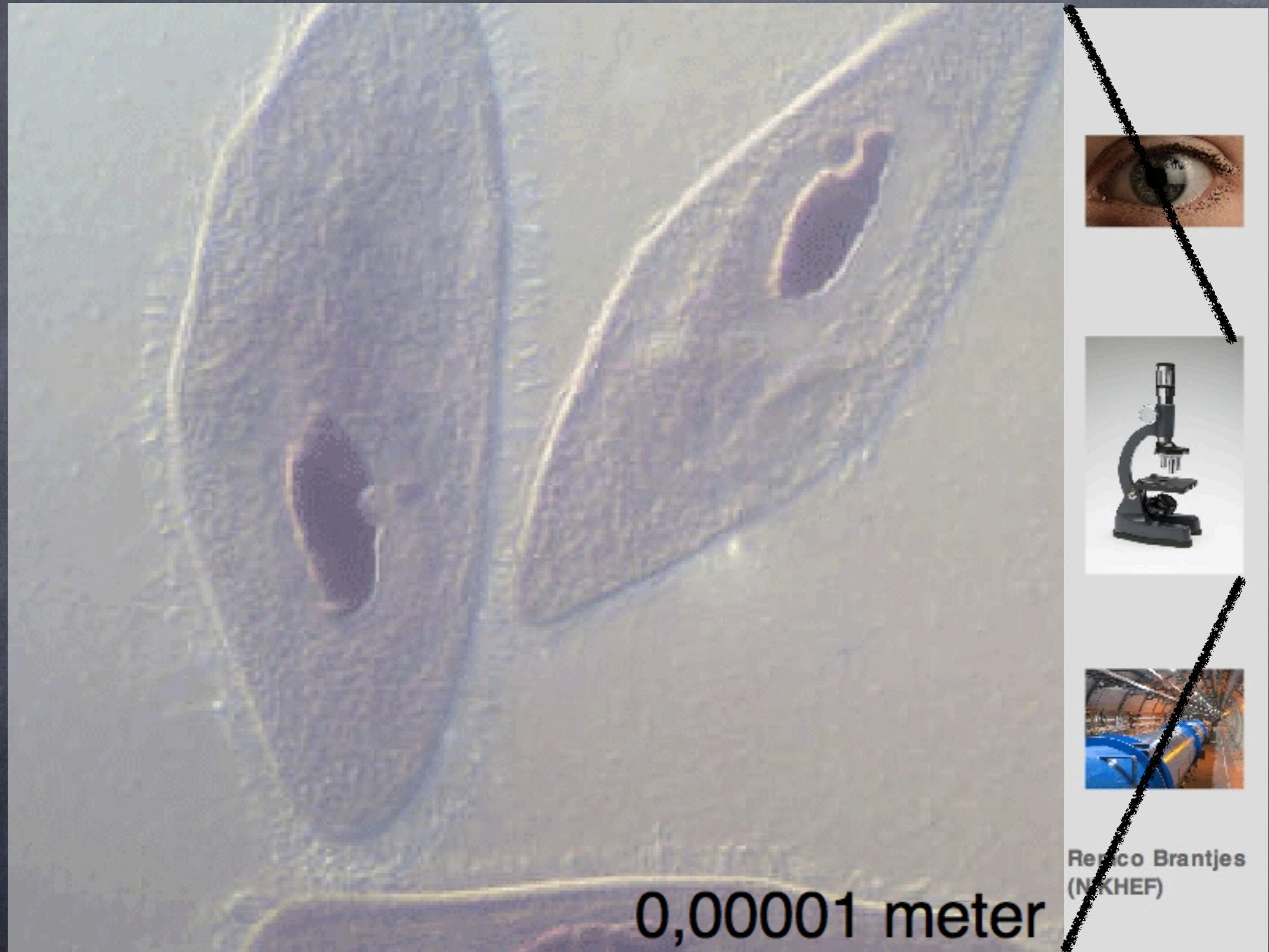
# Le monde selon Julia R.



Remco Brantjes  
(NIKHEF)



# Le monde selon Julia R.

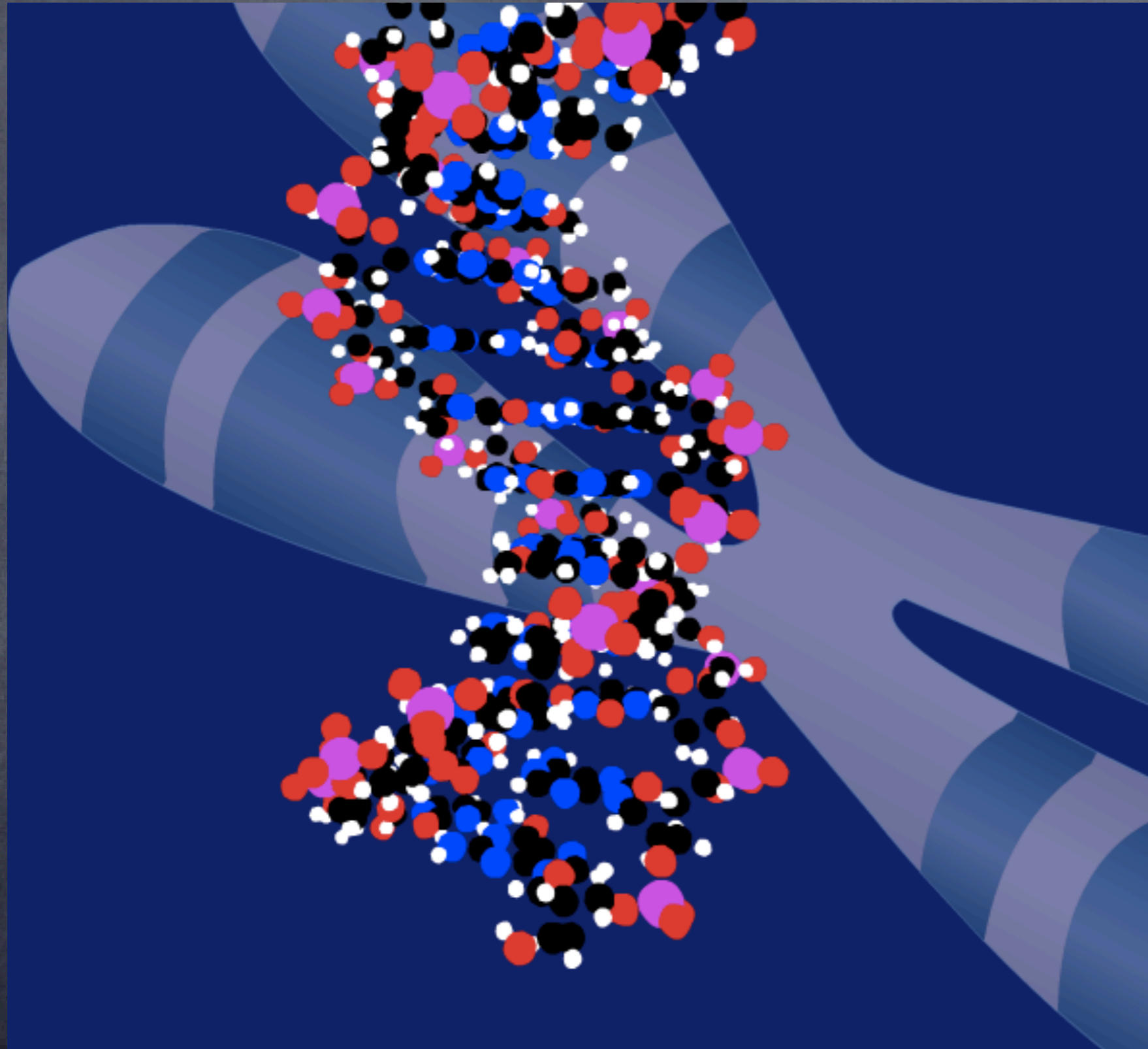


# Le monde selon Julia R.



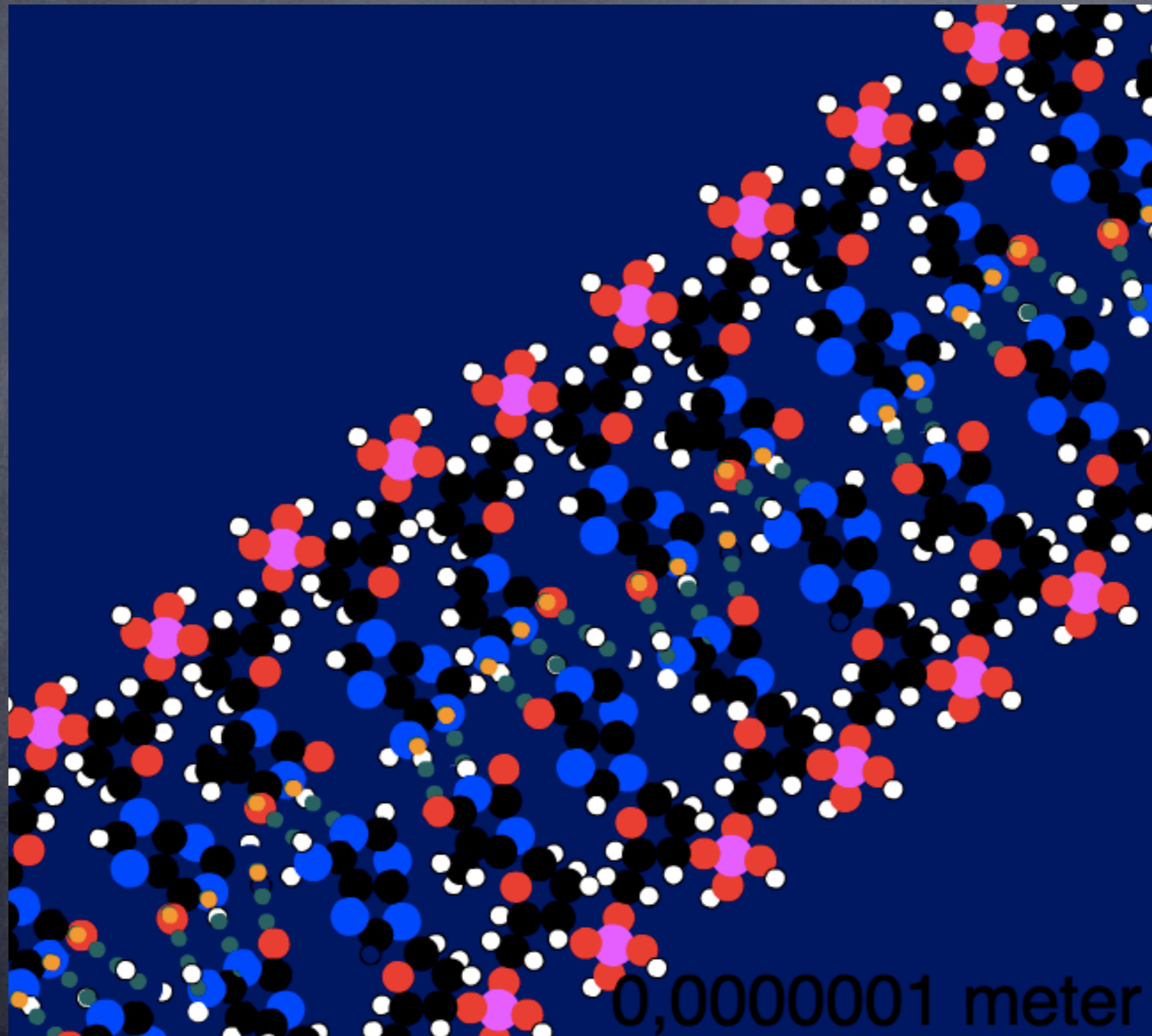


# Le monde selon Julia R.



Renco Brantjes  
(NIKHEF)

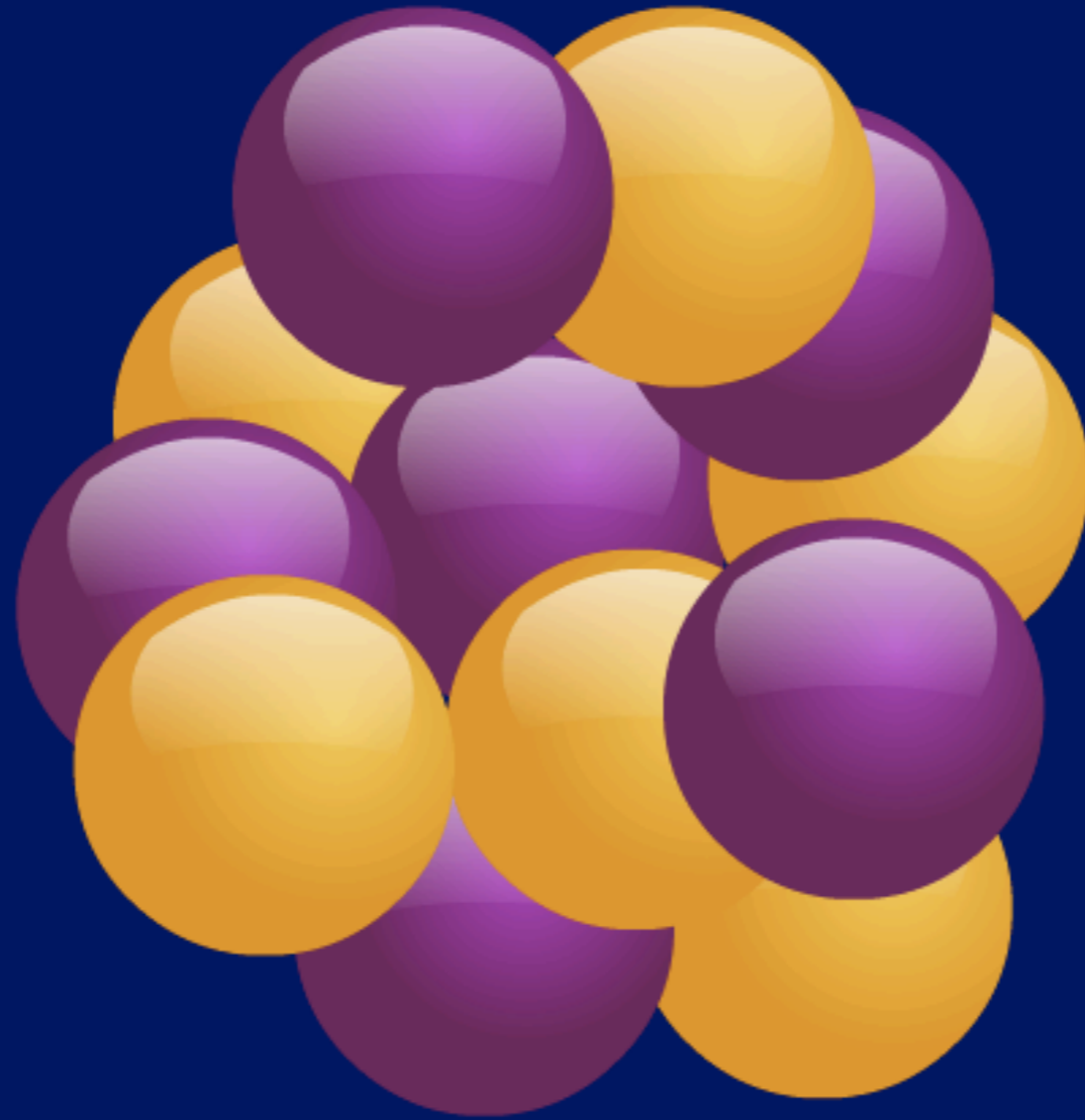
# Le monde selon Julia R.



Renco Brantjes  
(NIKHEF)



# Le monde selon Julia R.

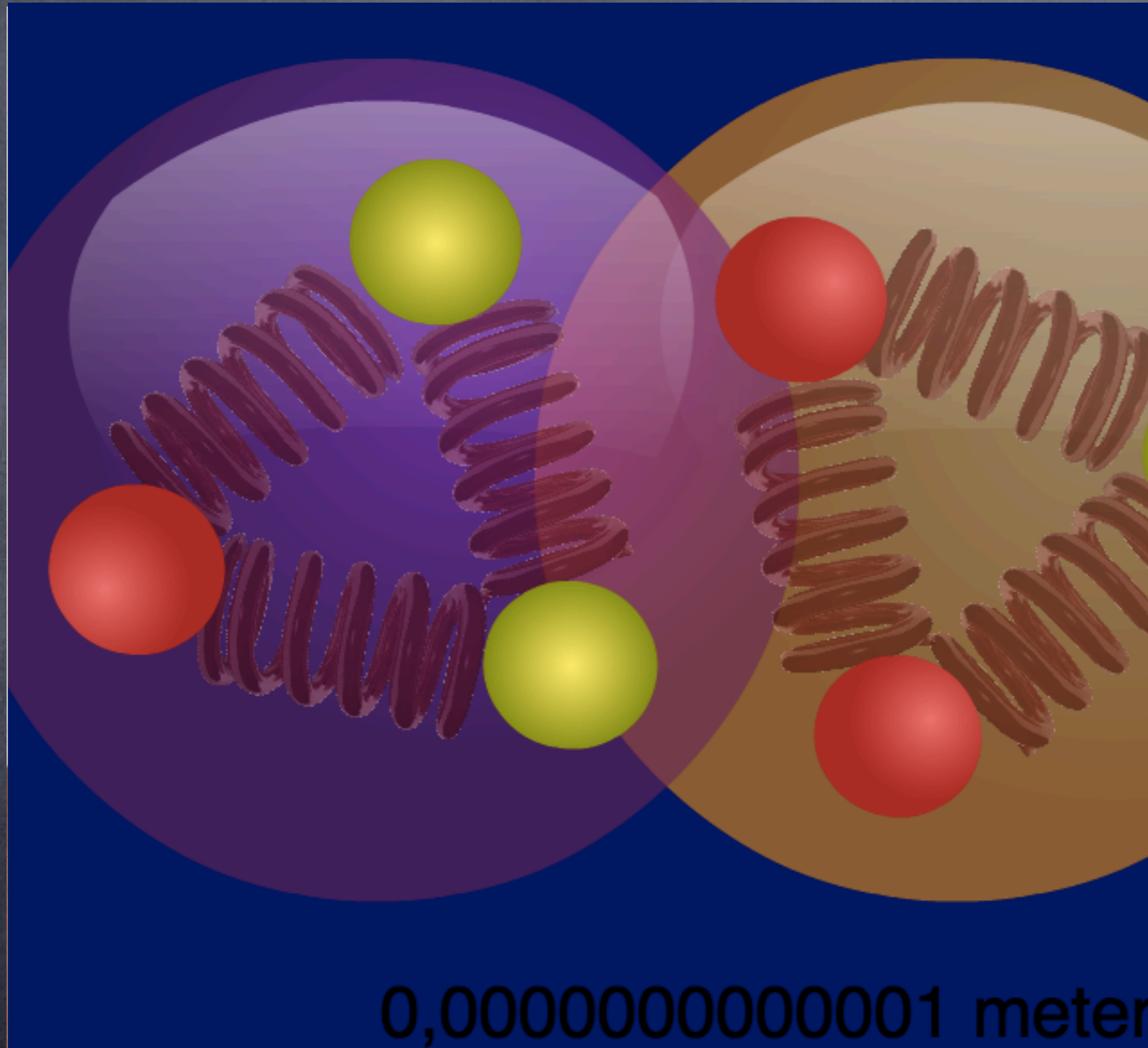


0,0000000000000001 meter



Remco Brantjes  
(NIKHEF)

# Le monde selon Julia R.



Remco Brantjes  
(NIKHEF)



# Qu'est-ce qu'une particule ?

*Un objet petit, quantique et rapide.*

## Mécanique Quantique

→ multi-trajectoires

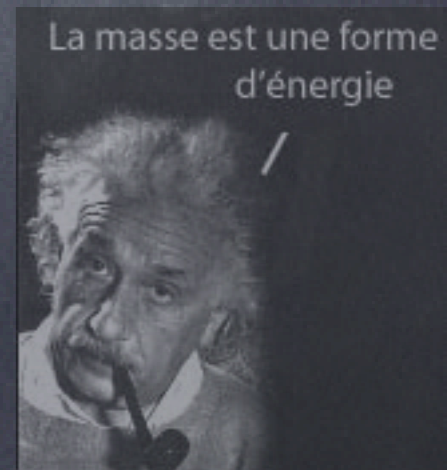
→ flou quantique  
(inégalités d'Heisenberg)

Si on sait où est une particule,  
on ne peut pas mesurer sa vitesse...

## Relativité Restreinte

→ espace-temps

→ énergie = masse



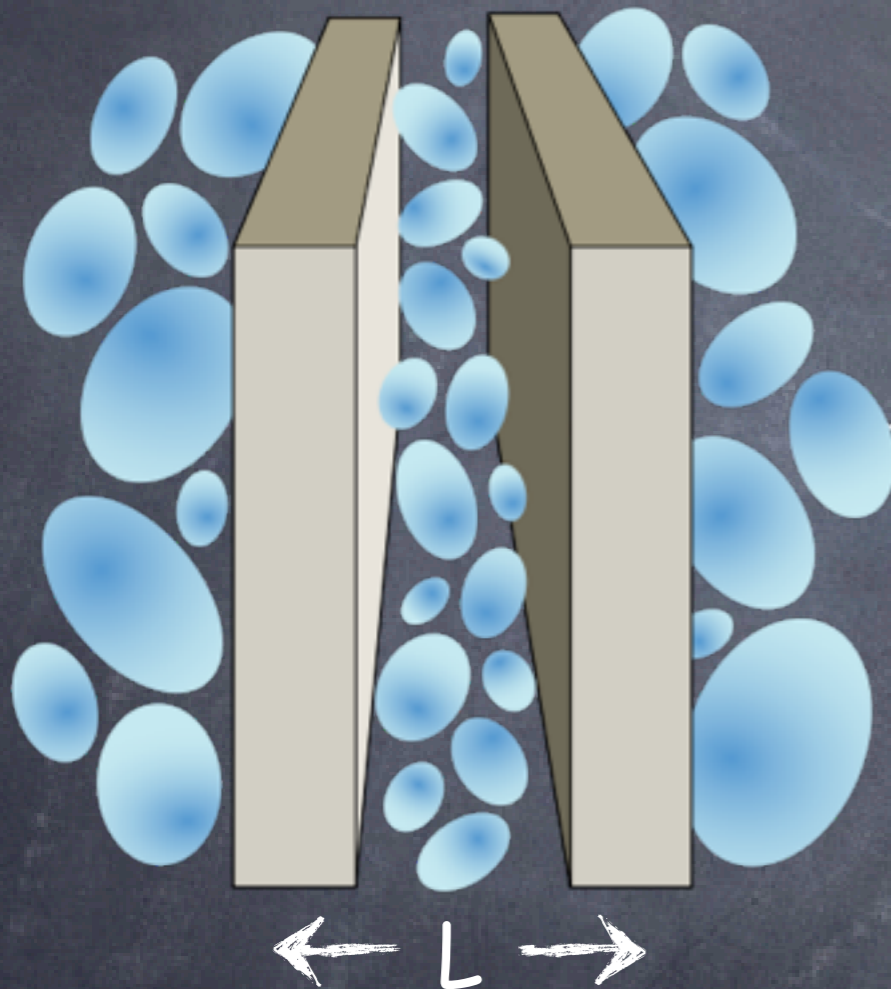
→  
particules  
virtuelles

# Fluctuations du vide

Le vide est un 'hyperactif'

force attractive entre deux plaques  
conducteurs parfaits (conductivité électrique  $\infty$ ) et non chargés

$E$  = énergie des photons virtuels entre les plaques  
 $E \searrow$  si  $L \searrow$   $\rightarrow$  force attractive



Casimir (1948)

( $S \gg L^2$ : pas d'effet de bord)

Force par unité de surface

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

The equation is presented on a piece of torn paper. The coefficient  $\frac{\pi^2}{240}$  is circled in white, with an arrow pointing to it from the text 'coefficient non-trivial' below. The term  $\frac{\hbar c}{L^4}$  is also circled in white, with an arrow pointing to it from the text 'analyse dim.' below. The  $\hbar c$  part of the fraction is highlighted in green, with arrows pointing to it from the labels 'MQ' and 'RR' above.

coefficient  
non-trivial

analyse dim.

force  $\sim 1$  atm pour une distance de l'ordre de 10nm

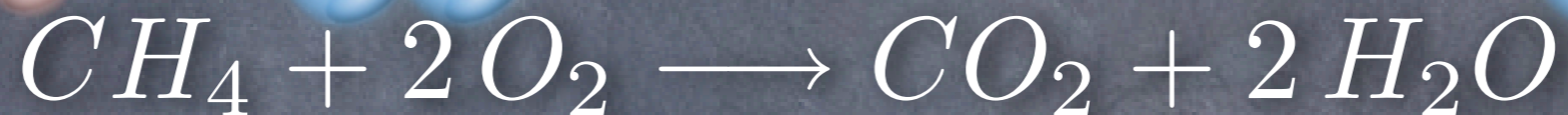
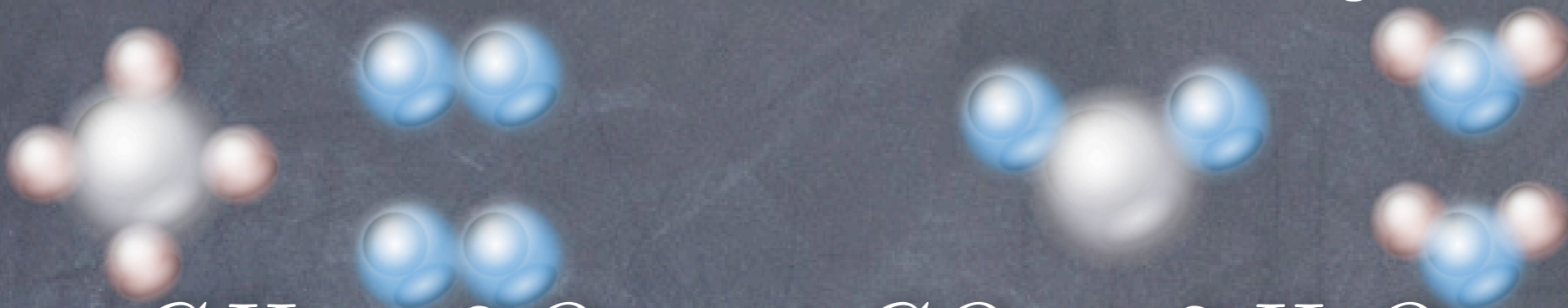
Le vide quantique n'est pas aussi morne que le vide classique



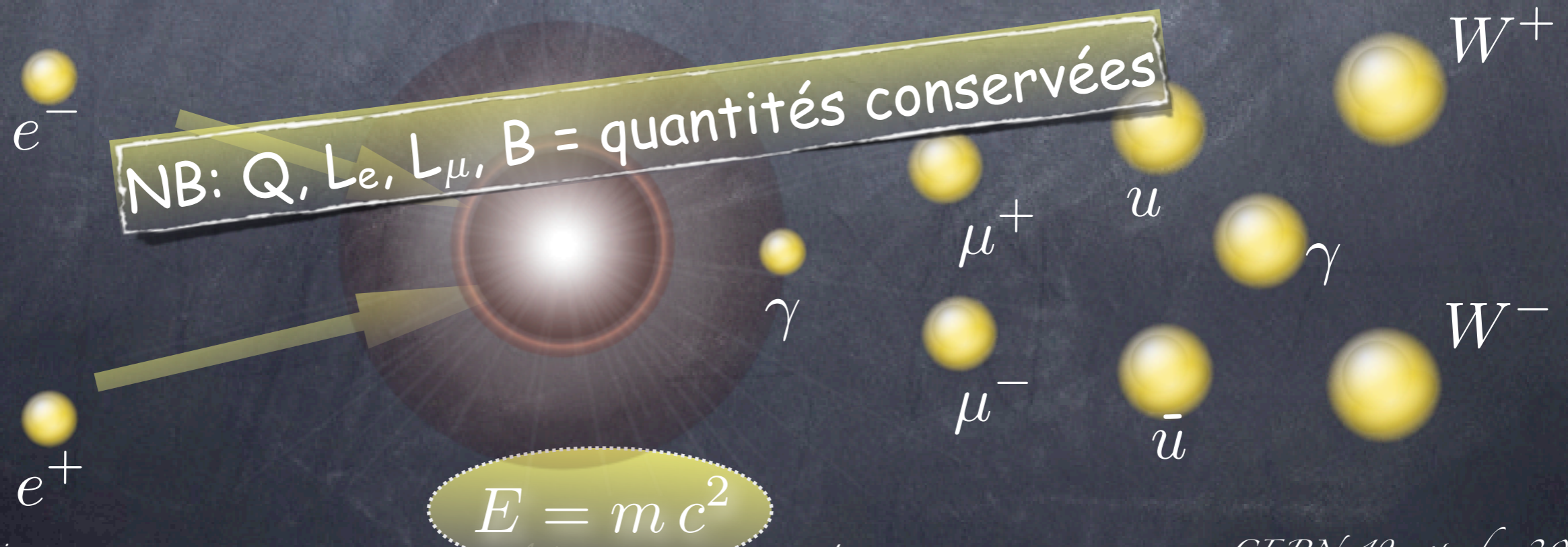
# Création de matière à partir d'énergie

## ○ Chimie : réarrangement de la matière

les différents constituants de la matière se réorganisent



## ○ Physique des particules : transformation énergie $\leftrightarrow$ matière





# Collision classique vs. quantique





# Collision classique vs. quantique



taille quantique  
d'un objet de masse  $m$   
(longueur d'onde de Compton)

$$\lambda = \frac{h}{mc}$$

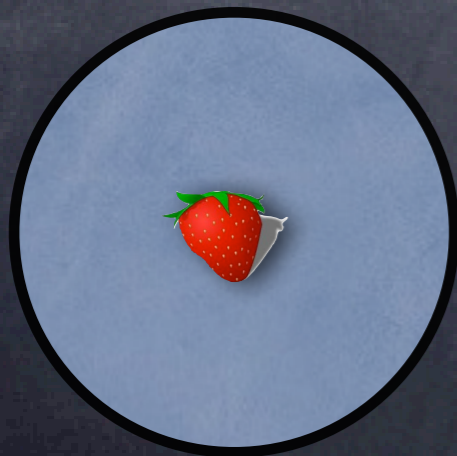
$h$  = constante de Planck =  $6.6 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$



fraise :  $m \sim 30 \text{ g} \Rightarrow \lambda \sim 10^{-40} \text{ m}$

classique :  $\lambda \ll R$

quantique :  $\lambda \gg R$



$e^-$  :  $m \sim 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} \Rightarrow \lambda \sim 10^{-12} \text{ m}$

$p$  :  $m \sim 1.6 \times 10^{-27} \text{ kg} \Rightarrow \lambda \sim 10^{-15} \text{ m}$

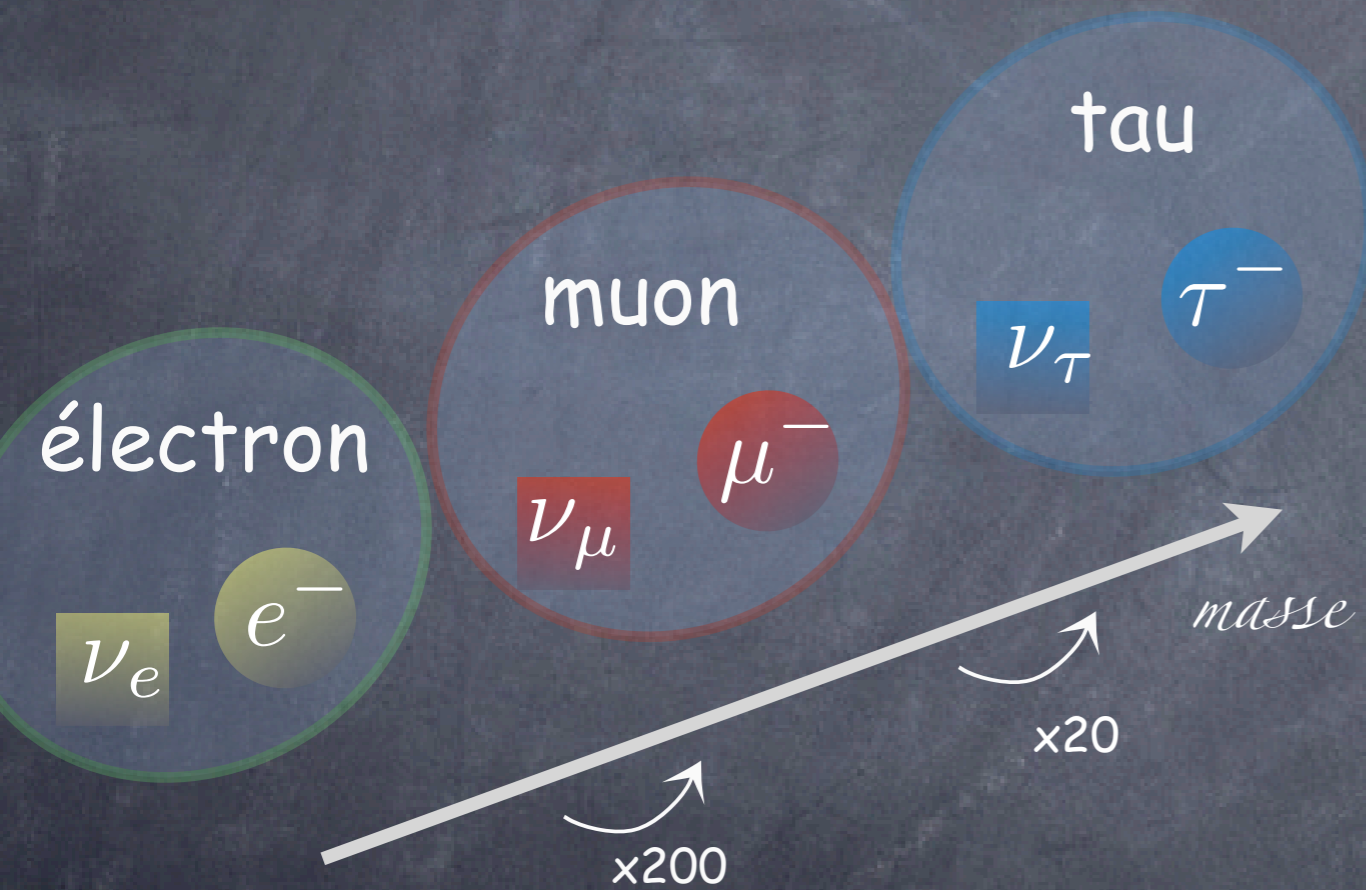


# Le Modèle Standard : la matière

*Le code génétique de la matière*

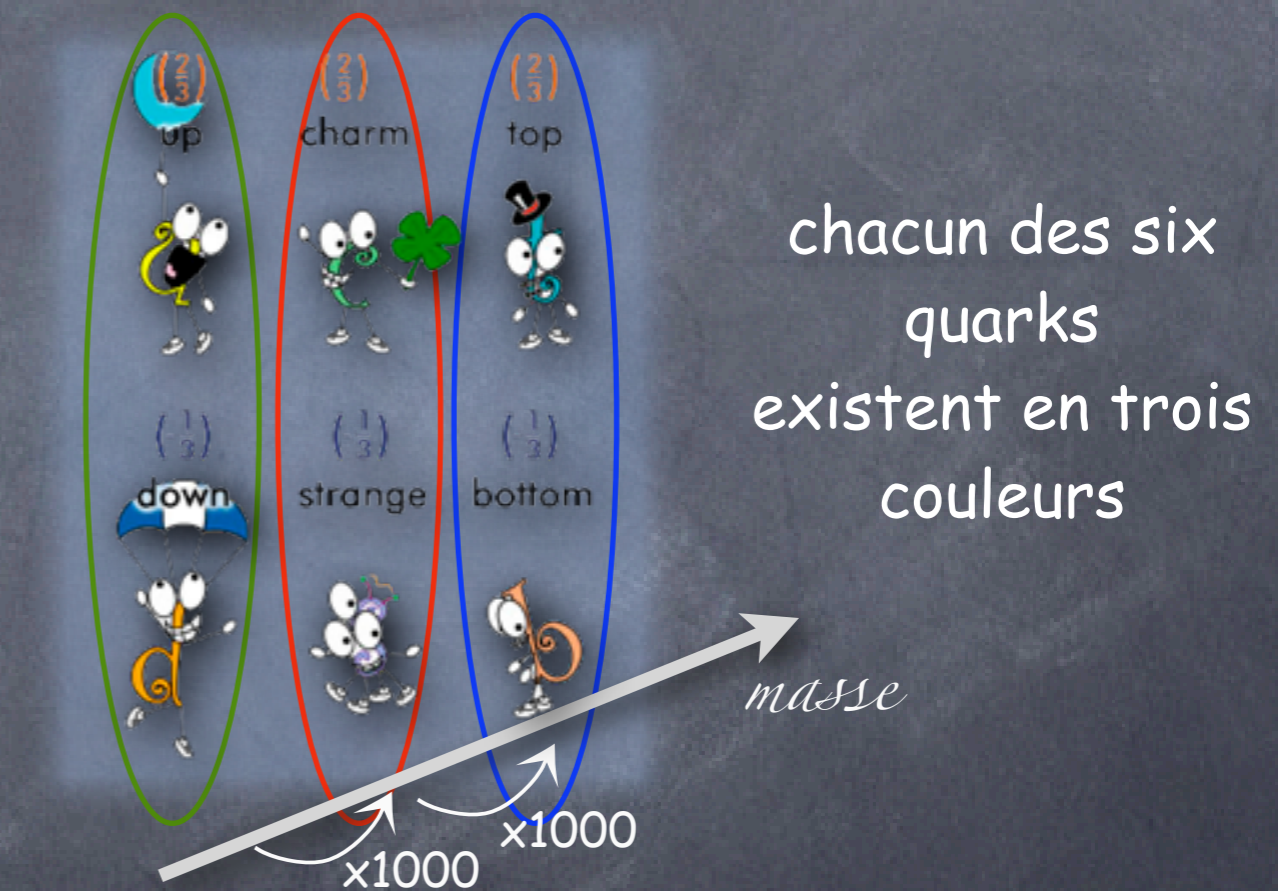
les briques élémentaires à partir desquelles sont faites toutes les autres particules

## LES LEPTONS



➔ pas d'états composites formés de leptons

## LES QUARKS



chacun des six quarks existent en trois couleurs

➔ états composites=hadrons

0 baryons    proton  $p = (u, u, d)$   
neutron  $n = (u, d, d)$

0 mésons

+ antiparticules

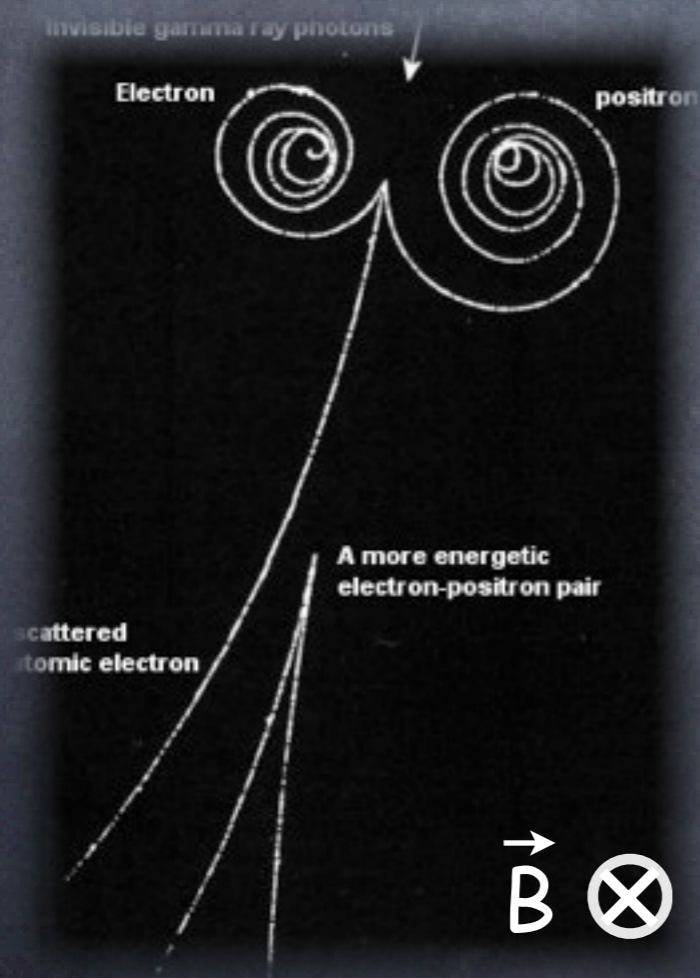
*A la recherche du Higgs*



# L'antimatière

mathématiquement, la cohérence de la mécanique quantique et de la relativité restreinte impose l'existence de l'antimatière (similaire aux solutions positives et négatives d'une équation du second degré)

prédite par un théoricien de génie, P. Dirac, en 1928  
observée en 1932 par C.D. Anderson



positron=anti-électron

même masse (spirales de même taille)  
charge opposée (tournent en sens contraire)

# L'antimatière

mathématiquement, la cohérence de la mécanique quantique et de la relativité restreinte impose l'existence de l'antimatière (similaire aux solutions positives et négatives d'une équation du second degré)

prédite par un théoricien de génie, P. Dirac, en 1928  
observée en 1932 par C.D. Anderson



positron=anti-électron

même masse (spirales de même taille)  
charge opposée (tournent en sens contraire)

Pourquoi l'Univers est-il formé de matière et non d'antimatière?



# Antimatière et équation de Dirac

l'équation de Schrödinger (1926) est non-relativiste  
(ne permet pas de rendre compte de la création/annihilation de particules)

Equation de Klein-Gordon (1927): 
$$\left( \frac{\partial^2}{c^2 \partial_t^2} - \Delta \right) \Phi = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \Phi$$

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2 + m^2 c^2$$

Equation de Dirac (1928): 
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \Psi = 0$$

$$E = \begin{cases} +\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} & \text{matière} \\ -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} & \text{anti-matière} \end{cases}$$

découverte du positron ( $e^+$ ) par C. Anderson en 1932

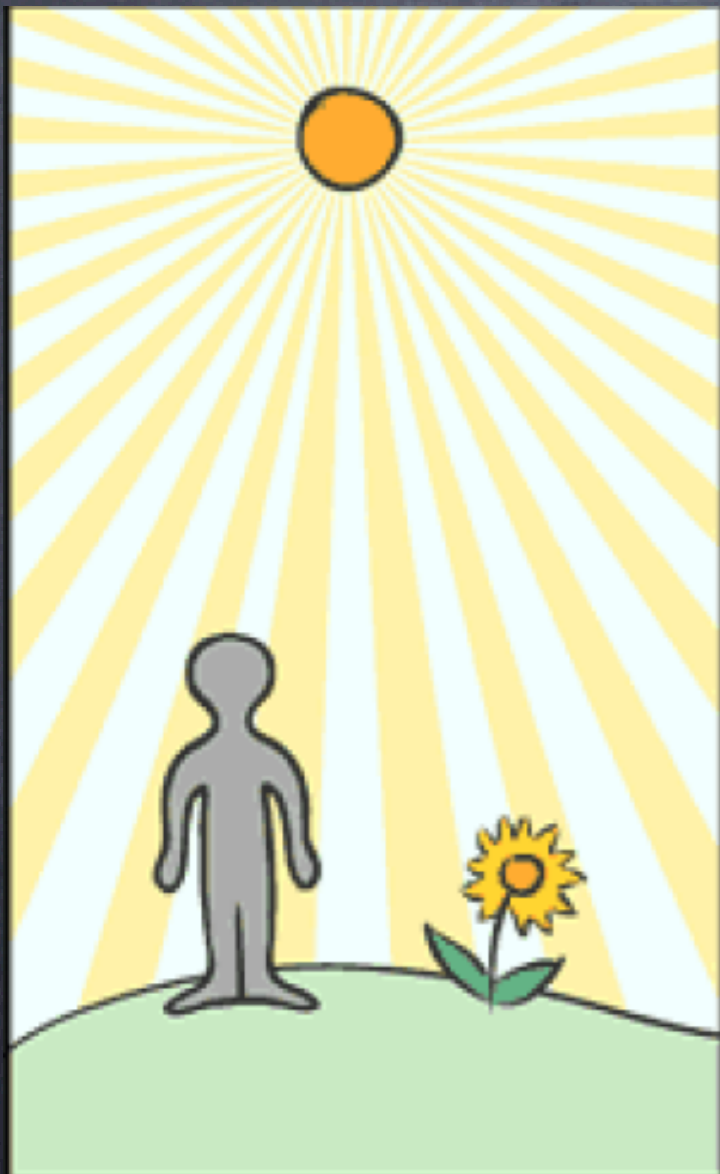
# Les interactions entre les particules

*Le simple fait que le Soleil brille depuis des millénaires nous indique qu'il existe plusieurs mécanismes de production d'énergie.*

Soleil = gigantesque source d'énergie

- 1 cm<sup>3</sup> de glace au Soleil en été fond en 40 minutes
- une calotte de glace de 1 cm d'épaisseur et de 300 millions de km de diamètre autour du Soleil fond en 40mn

énergie dégagée par la combustion de 10<sup>19</sup> litres d'essence  
(~ volume Soleil-Mercure/1000)

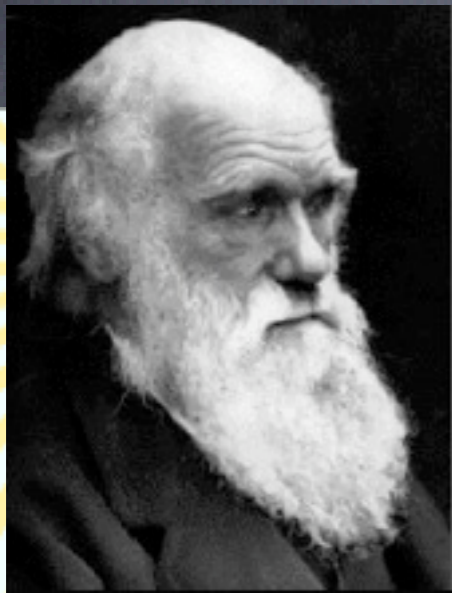




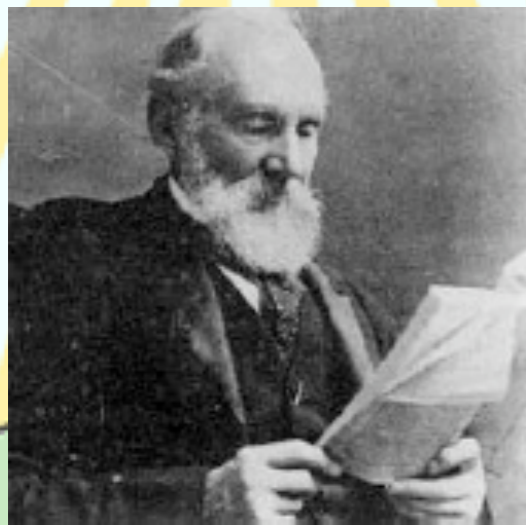
# Les interactions entre les particules

*Le simple fait que le Soleil brille depuis des millénaires nous indique qu'il existe plusieurs mécanismes de production d'énergie.*

Soleil = gigantesque source d'énergie



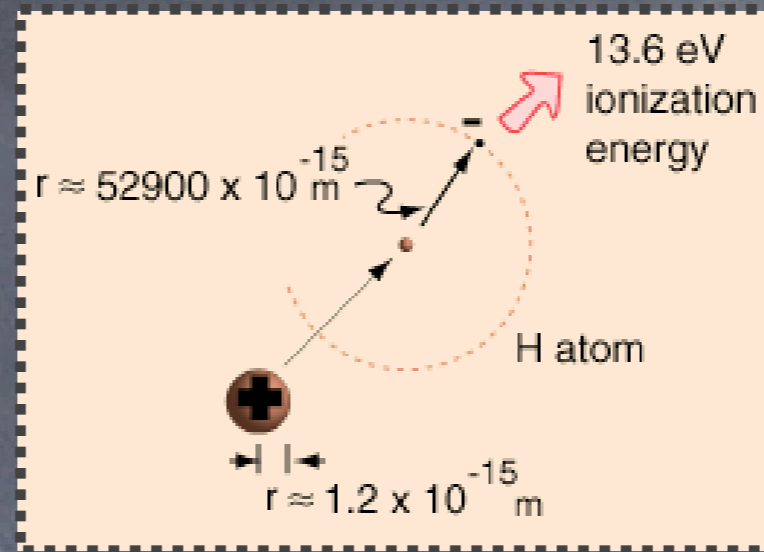
**Darwin** ("*L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle*", 1ère édition, 1859) estime que l'âge de la Terre et donc du Soleil doit être supérieur à 300 millions d'années pour permettre l'érosion de certaines montagnes



**Thomson, Lord Kelvin**, calcule l'énergie gravitationnelle du Soleil et en supposant que toute cette énergie est convertie en chaleur estime que le Soleil ne peut pas être plus vieux que 20 millions d'années (l'énergie d'origine chimique n'aurait permis de briller que pendant 3000 ans environ)

On sait aujourd'hui que le Soleil est âgé de plus de 4,5 milliards d'années !

# Différentes interactions



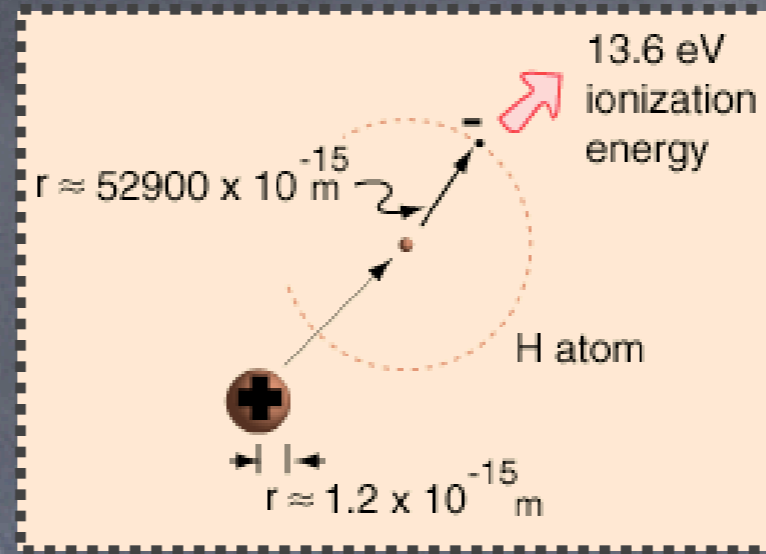
## ○ Physique atomique

masse d'un atome = masse du noyau + masses des électrons

exemple : atome d'**hydrogène**, masse  $\sim 1 \text{ GeV}$ , énergie de liaison  $\sim 13 \text{ eV} \Leftrightarrow 10^{-8}$



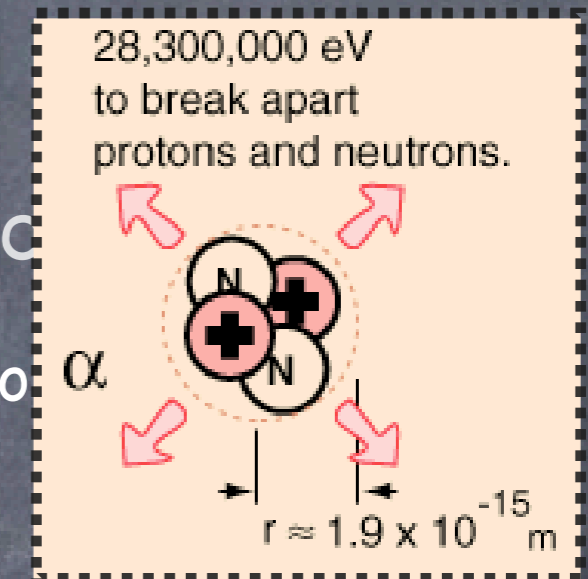
# Différentes interactions



## ○ Physique atomique

masse d'un atome = masse du noyau + masses des électrons

exemple : atome d'**hydrogène**, masse ~ 1 GeV, énergie de liaison ~ 13.6 eV



## ○ Physique nucléaire

masse d'un noyau < masse des protons et neutrons

exemple : noyau d'**hélium**, masse ~ 4 GeV, énergie de liaison ~ 28 MeV ⇒  $10^{-2}$

## ○ Physique des particules

masse du proton et du neutron ≫ masse des quarks

masse du **proton** ~ 1 GeV, masse des quarks ~ 12 MeV ⇒  $10^2$

# Le Modèle Standard : les interactions

les interactions fondamentales entre les particules élémentaires

## interactions électromagnétiques

(1873, Maxwell)

testé avec une précision de  $10^{-8}$

lumière  
atomes  
molécules

## interactions faibles

(1933, Fermi)

testé avec une précision de  $10^{-3}$

désintégration  $\beta$   
 $n \xrightarrow{W^{\pm}} p + e^{-} + \bar{\nu}_e$   
 $e^{+} + e^{-} \xrightarrow{Z^0} D^{+} + D^{-}$

## interactions fortes

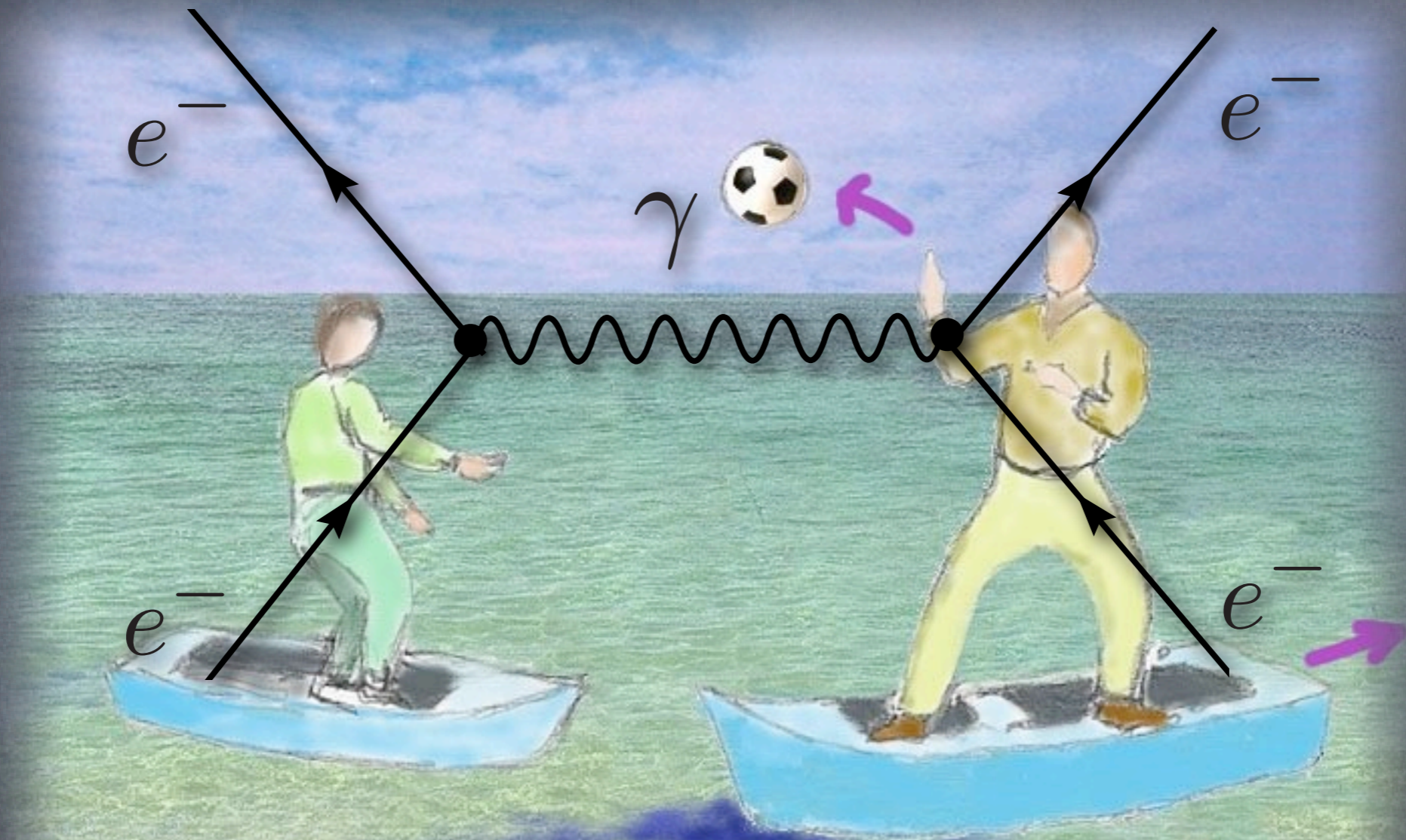
testé avec une précision de  $10^{-1}$

noyaux atomiques  
désintégration  $\alpha$   
 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$

(1911, Rutherford ; 1921, Chadwick et Biesler)

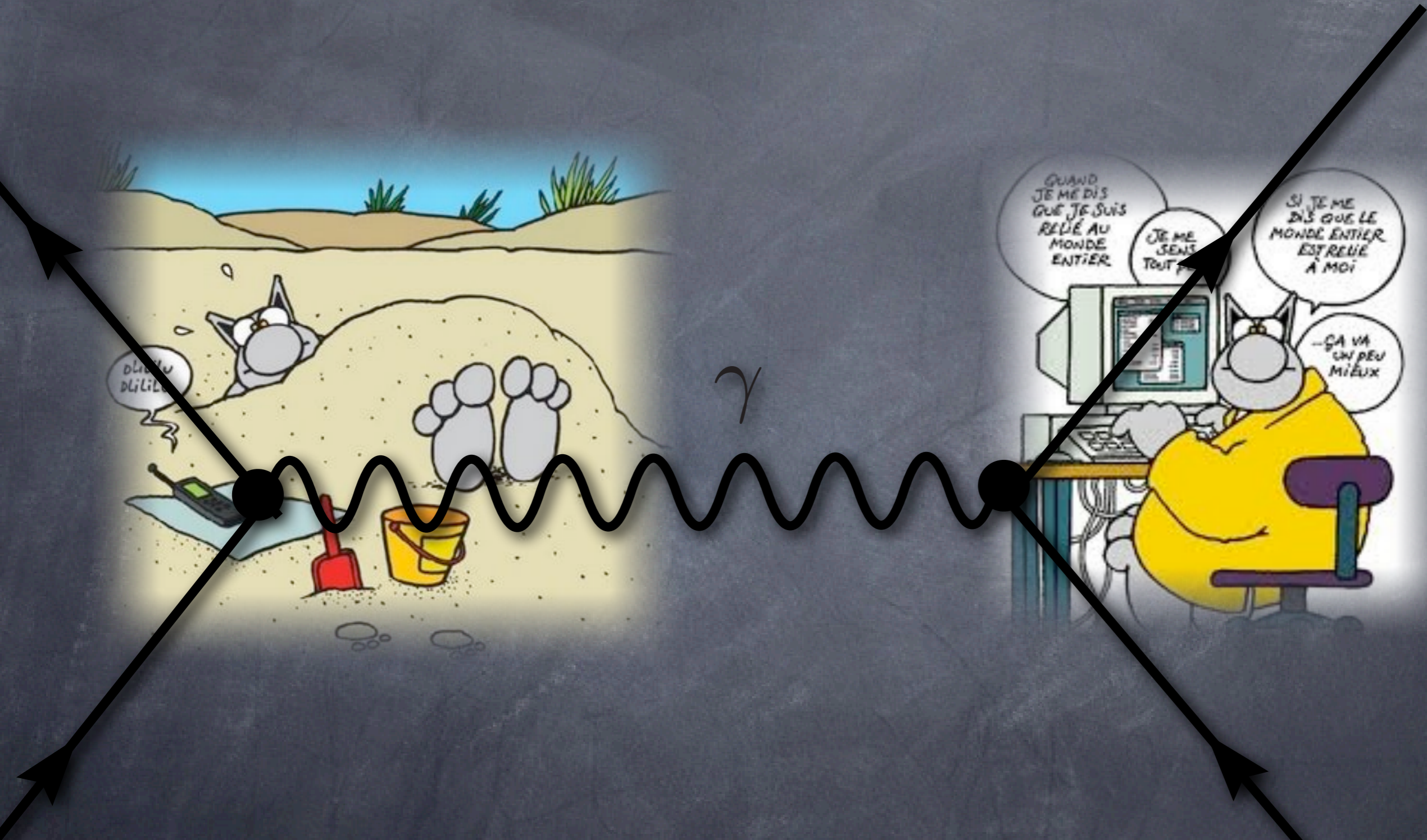


# Les interactions entre les particules



Les particules élémentaires agissent les unes sur les autres par l'échange de bosons de jauge



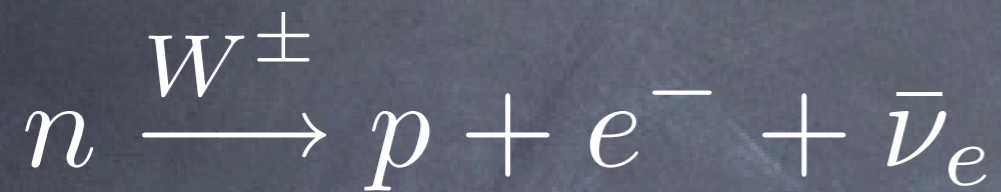




# Les théories de jauge

## Théorie de Fermi

(article rejeté par Nature car trop spéculatif !)



$$\mathcal{L} = G_{\mathcal{F}} n p e \bar{\nu}_e$$

$A \propto G_{\mathcal{F}} E^2$  pas de limite continue

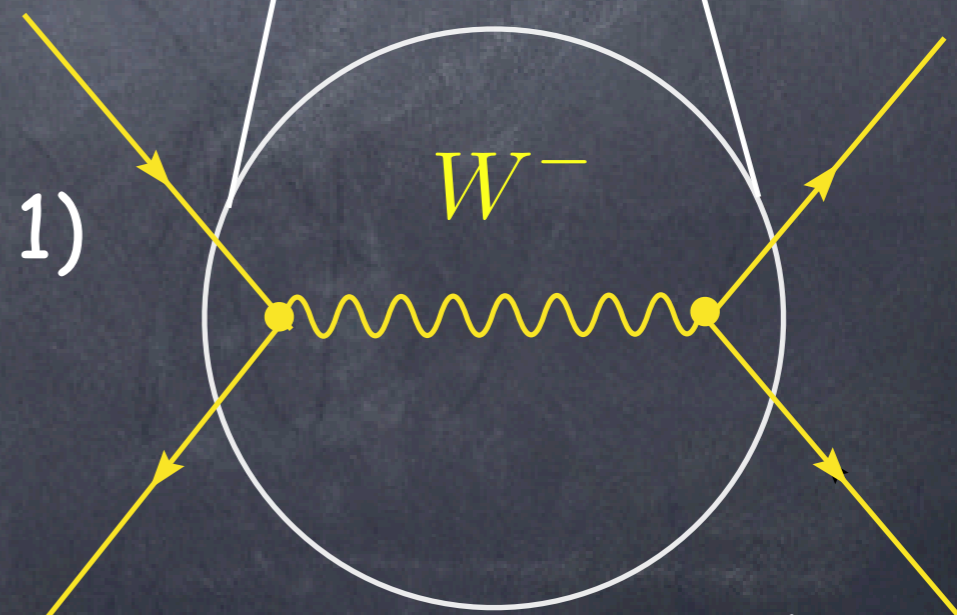
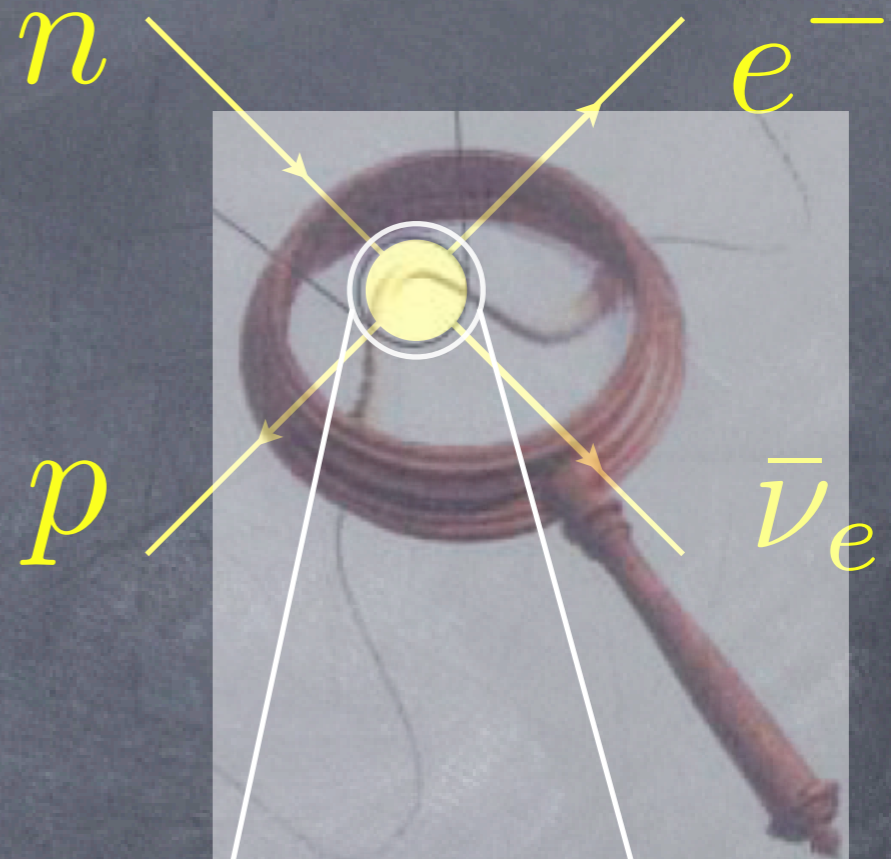
## Théorie de jauge

théorie microscopique

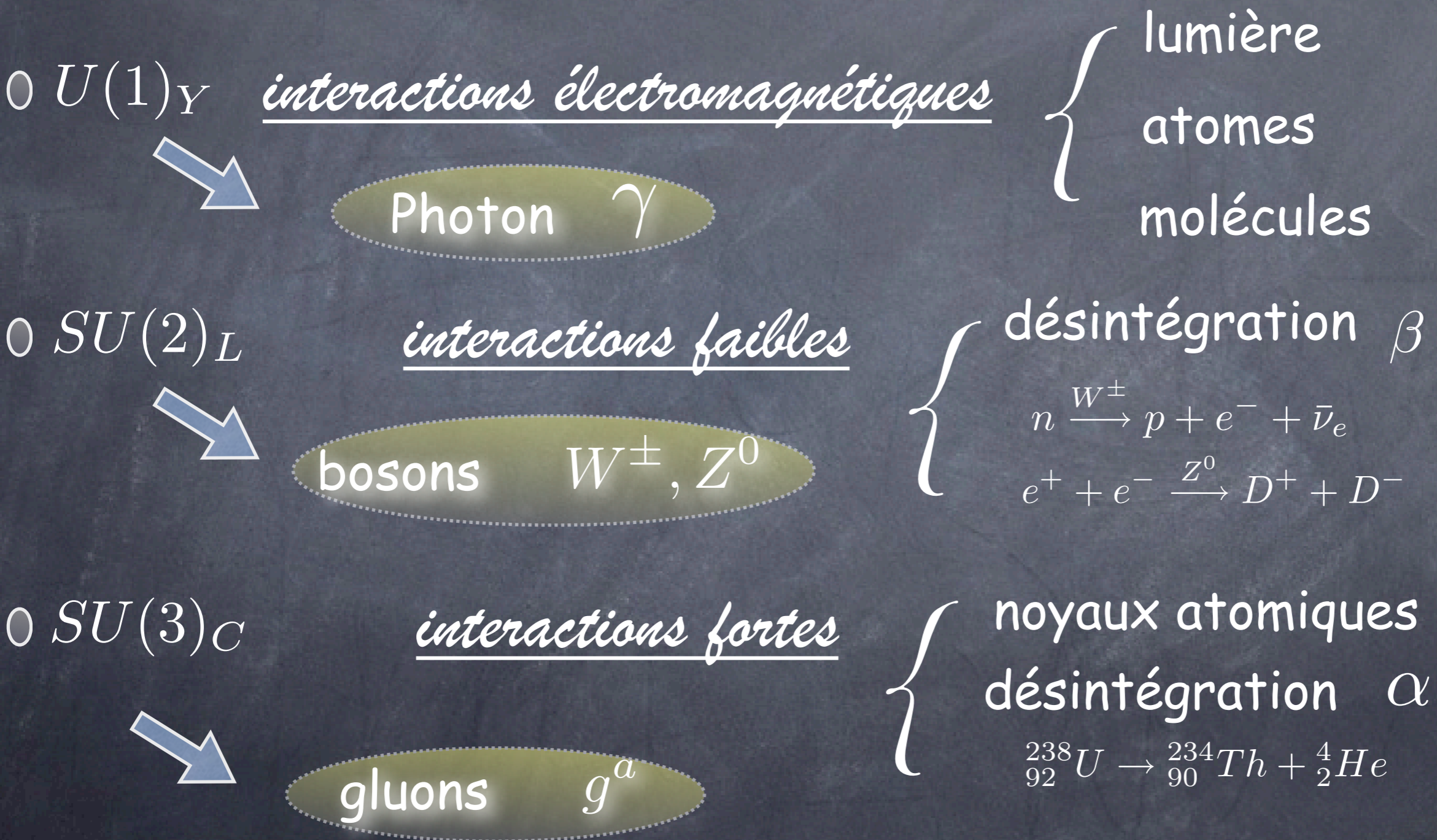
(échange d'une particule de spin 1)

$$G_{\mathcal{F}} = \frac{\sqrt{2} g^2}{4M_W^2}$$

SU(2)



# Le Modèle Standard : les interactions





# Où l'on a reparlé du boson de Higgs

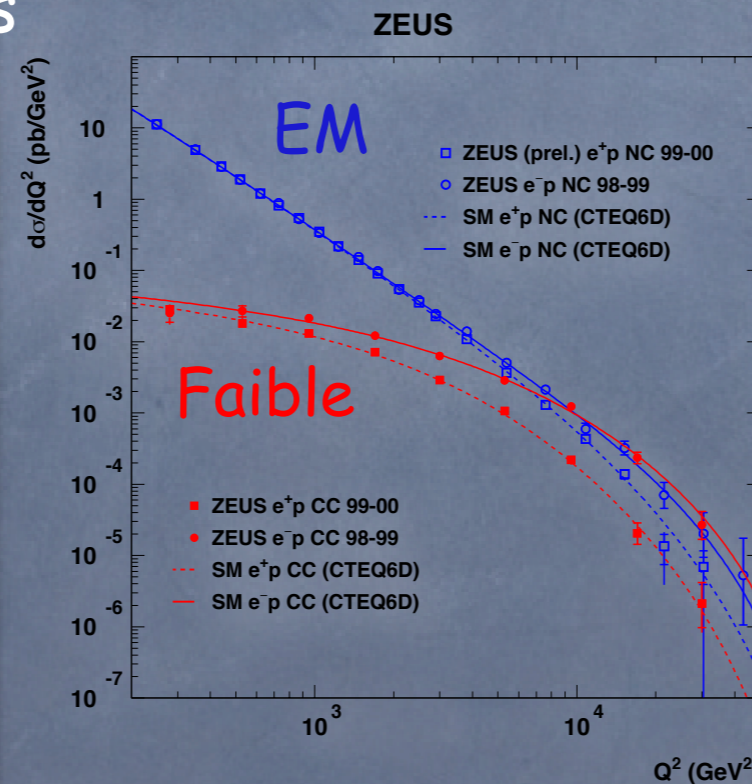
mathématiquement, les interactions fondamentales sont décrites le même type de théorie et pourtant elles sont bien différentes les unes des autres.

Haute énergie (> 100 GeV)

Basse énergie

à grande énergie, les forces électromagnétiques et faibles sont physiquement identiques

Cette pièce est pleine de photons ( $\gamma$ ) mais aucun W/Z  
La symétrie entre W, Z et  $\gamma$  est brisée à grande distance



# Où l'on a reparlé du boson de Higgs

La différence entre  $W$ ,  $Z$  et  $\gamma$   
est due à leurs interactions avec une nouvelle particule :  
le boson de Higgs !

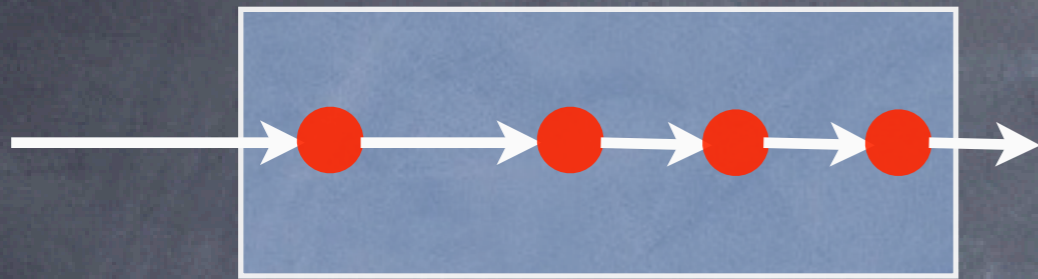


physiquement, ces interactions  
avec le boson de Higgs  
s'interprètent comme la masse  
des particules



# Particules massives @ boson de Higgs

la lumière se propageant dans un milieu est freinée par ses interactions avec ce milieu



$c = 299792$  km/s dans le vide  
 $\sim 3/4$   $c$  dans l'eau  
 $\sim 2/3$   $c$  dans un verre ordinaire  
 $\sim 125000$  km/s dans le diamant

Higgs = milieu continu remplissant l'univers (invariance de Lorentz).  
Les particules se propageant dans ce milieu sont ralenties et apparaissent comme massives

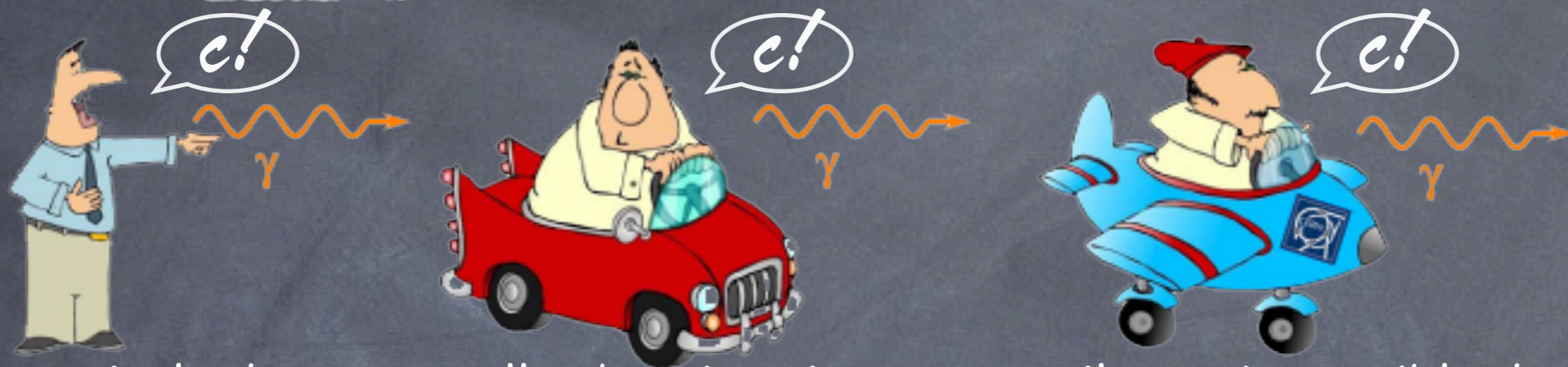
Les bosons W et Z interagissent avec le Higgs. Pas le photon.

**boson de Higgs = excitation du milieu continu et homogène**

besoin de beaucoup d'énergie pour exciter ce milieu

LHC

# Le problème de la masse de $W^\pm$ et $Z$



une particule de masse nulle n'est jamais au repos: il est tjs possible de distinguer (et donc d'éliminer) la polarisation longitudinale



la polarisation longitudinale est un objet physique pour un spin-1 massive

(pictures: courtesy of G. Giudice)

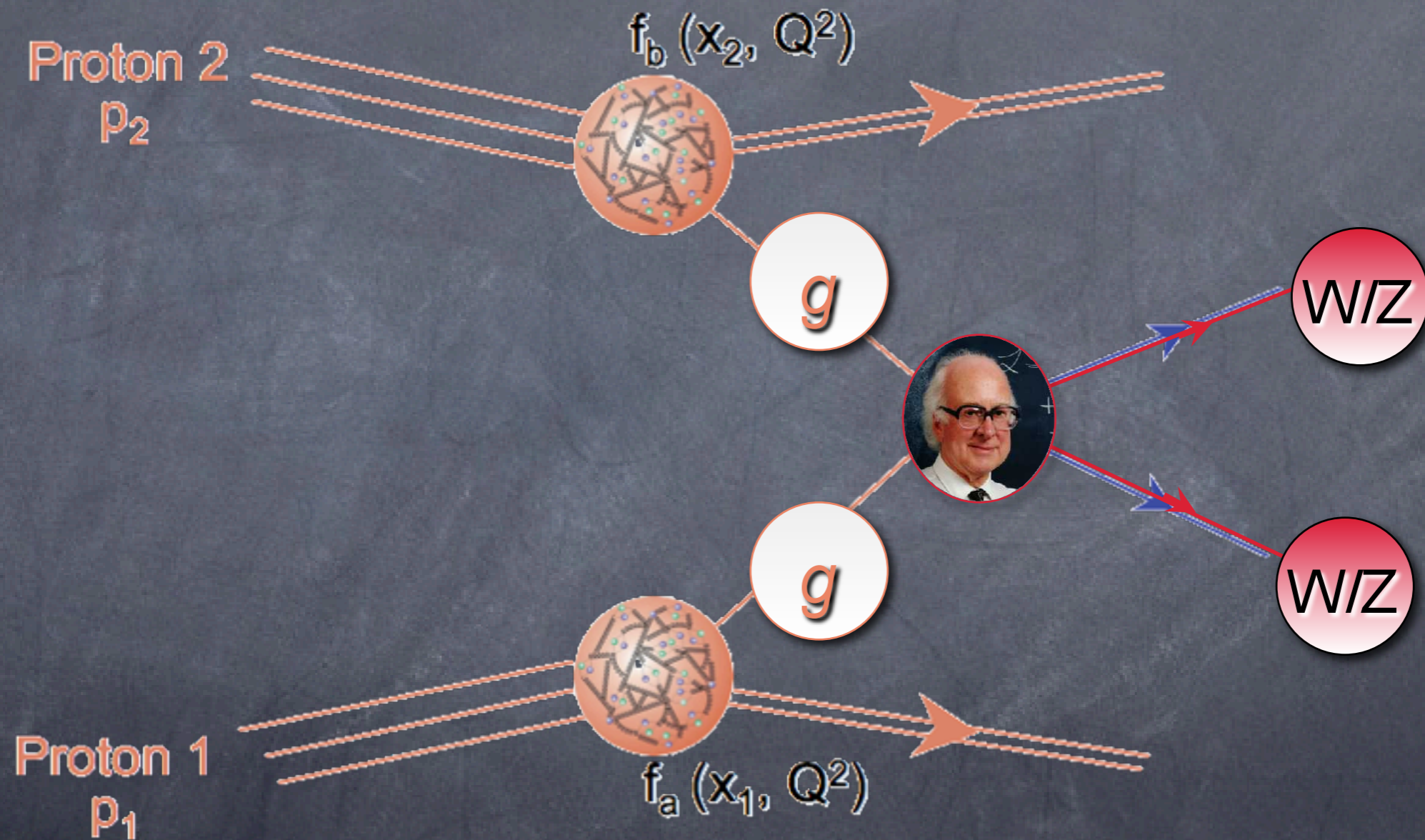
masse: nouvelle phase avec de nouveaux degrés de liberté

$$\epsilon_{\parallel}^{\mu} = \left( \frac{|\vec{p}|}{M}, \frac{E}{M} \frac{\vec{p}}{|\vec{p}|} \right)$$

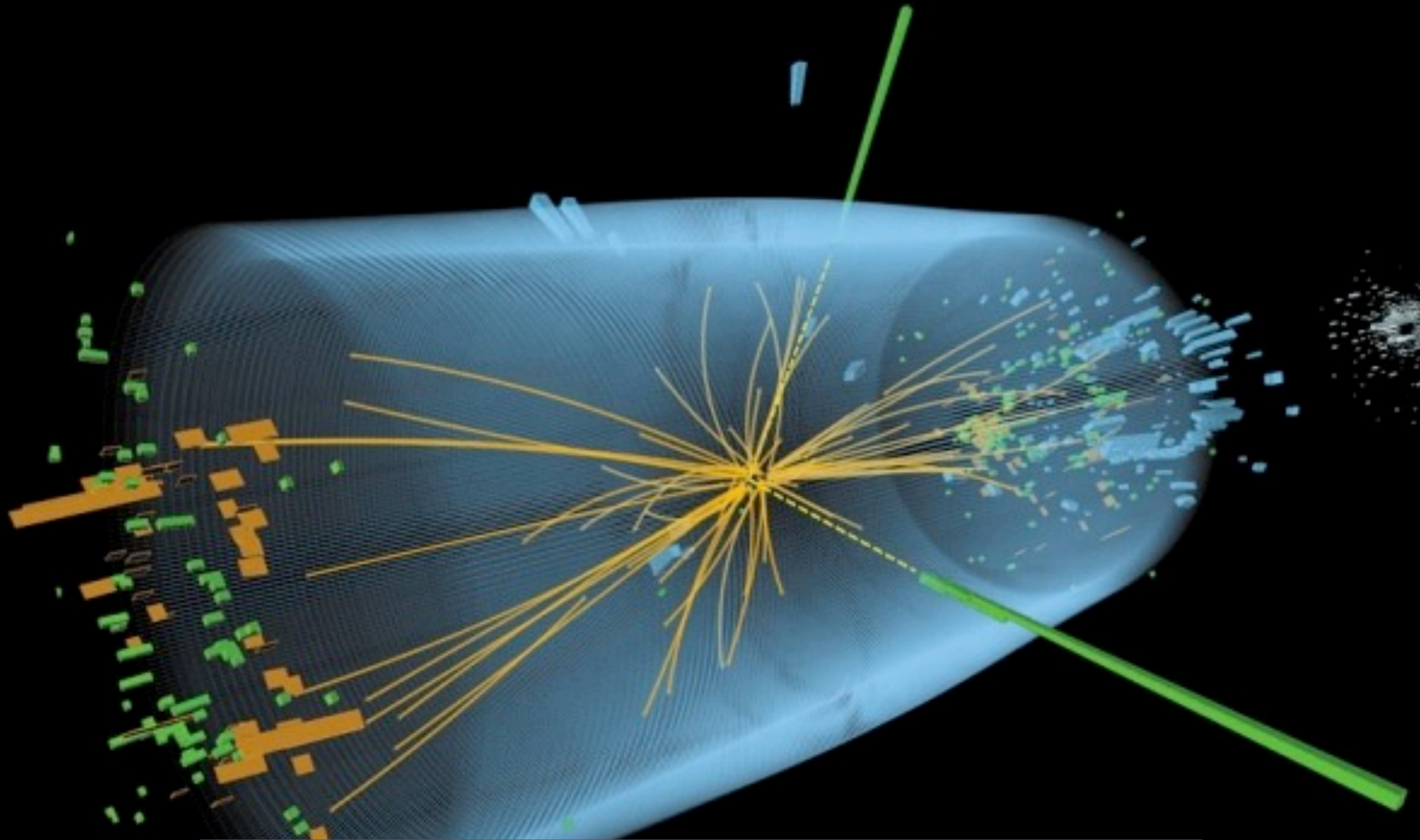
le vecteur de polarisation croit avec l'énergie



# Le boson de Higgs au LHC



# Le boson de Higgs au LHC

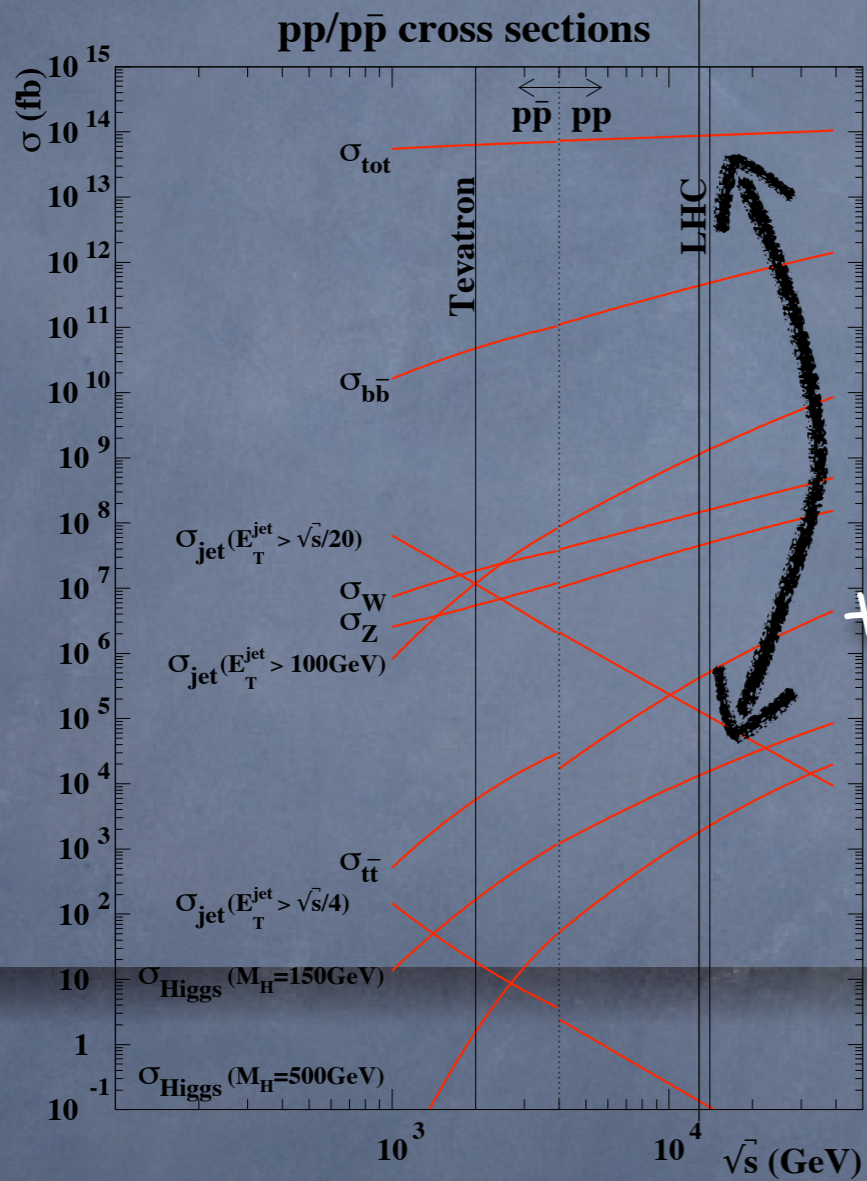


le LHC a déjà produit  $10^5$  bosons de Higgs



# La traque du boson

la production du boson de Higgs reste un événement rare,  
noyé dans un bruit de fond



seule 1 collision sur 10 milliards  
conduit à la production d'un  
boson de Higgs

et la plupart de ces collisions se ressemblent  
"voir" un boson de Higgs c'est...



# La traque du boson

la production du boson de Higgs reste un événement rare,  
noyé dans un bruit de fond



seule 1 collision sur 10 milliards  
conduit à la production d'un  
boson de Higgs

et la plupart de ces collisions se ressemblent

"voir" un boson de Higgs c'est...

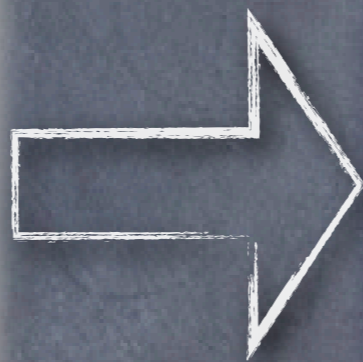
... comme chercher un article dans le  
bureau de John Ellis

... comme chercher un livre dans une  
bibliothèque 1000 fois plus grande que la  
Grande Bibliothèque de France alors que  
tous ces livres auraient la même  
couverture, le même nombre de pages...

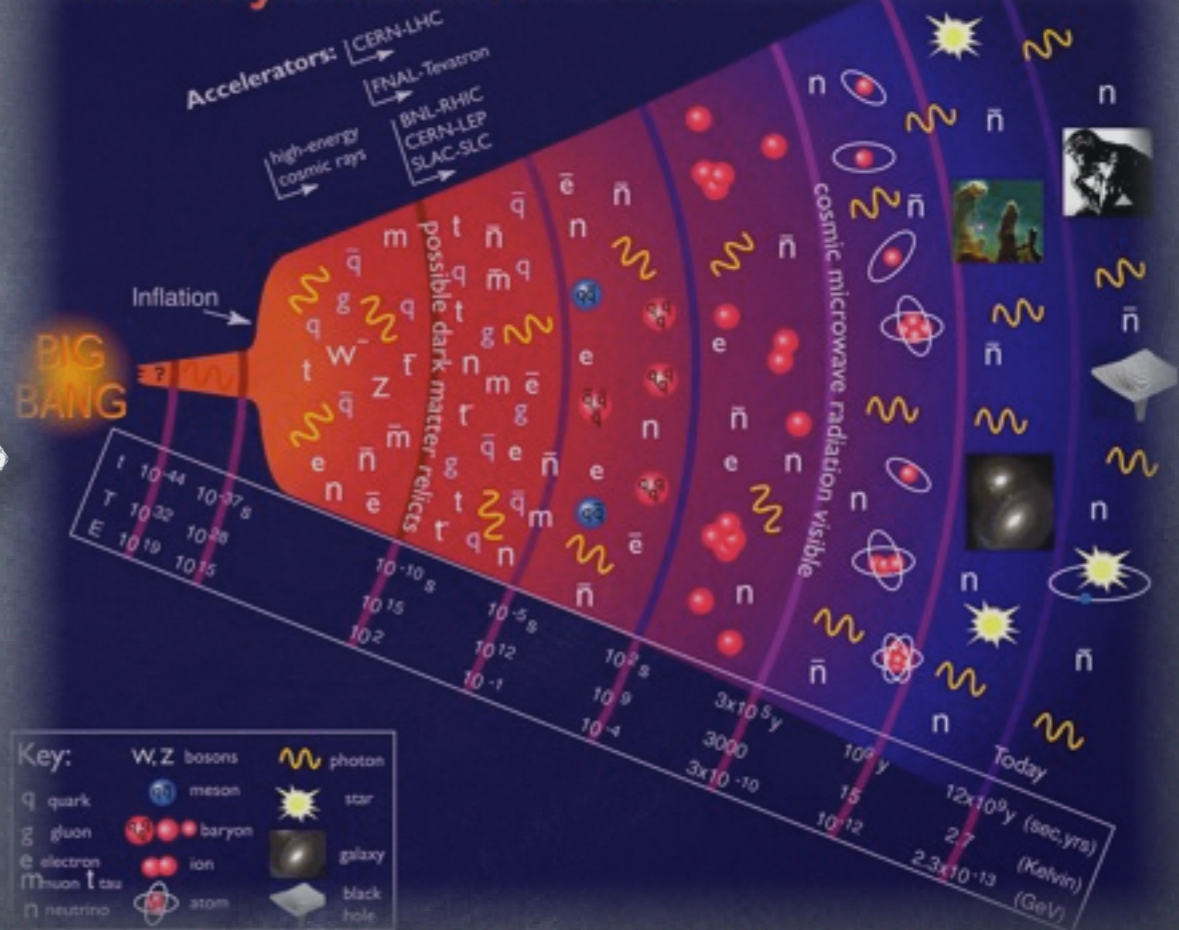


$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$$+ \sqrt{g} R(\mathcal{G})$$

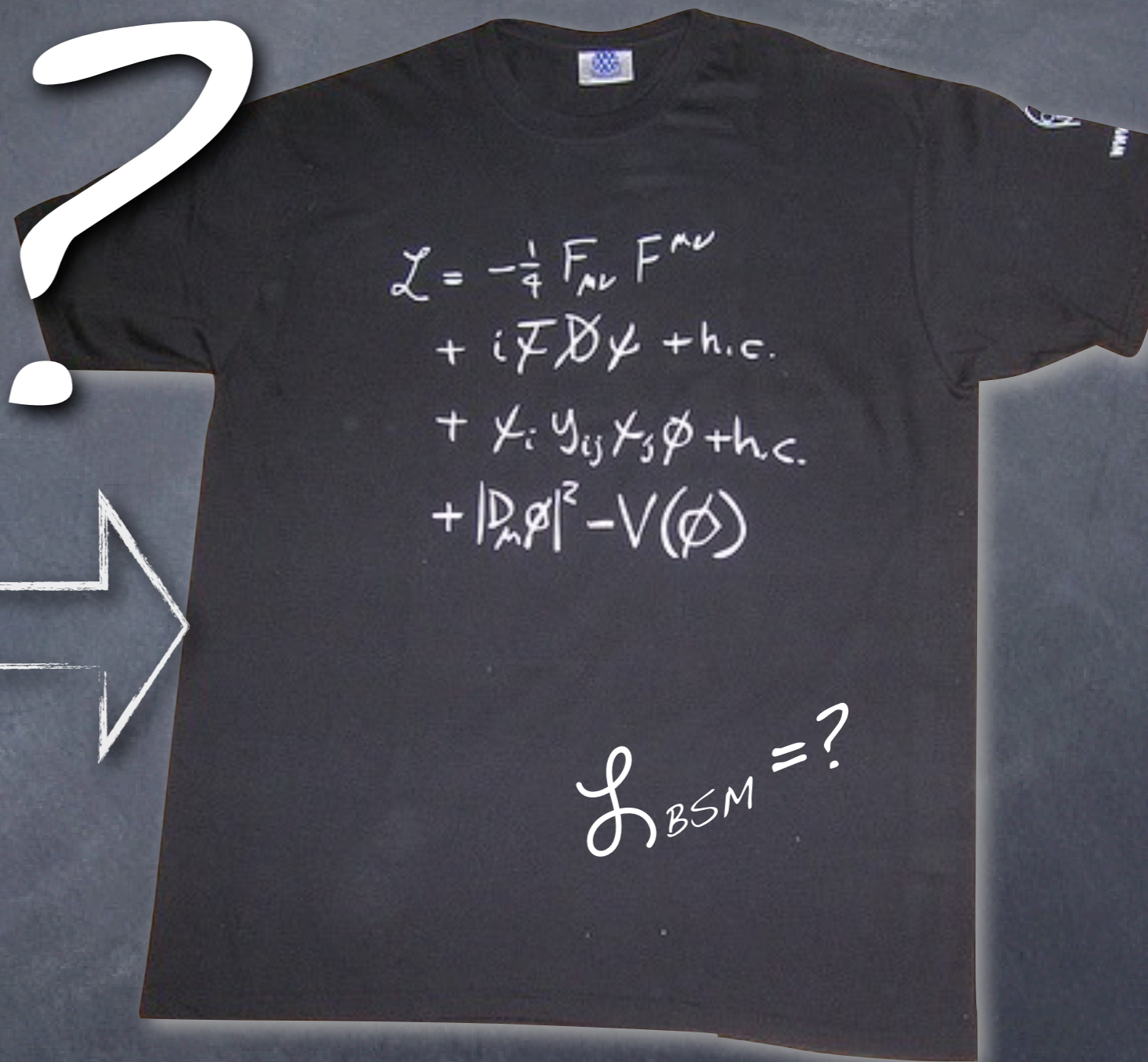
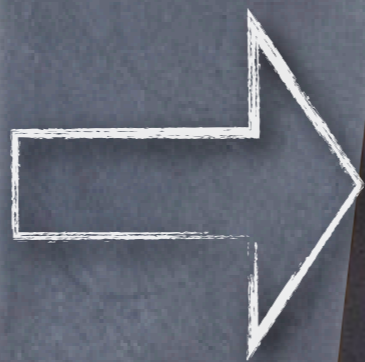


## History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF





$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_{\text{BSM}} = ?$$



# La fin d'une histoire ou le début d'une aventure?

quelques électrons suffisent pour soulever les cheveux

la force électrique entre deux  $e^-$  est  $10^{43}$  fois plus grande que la force gravitationnelle



un mystère demeure: pourquoi?

pourquoi les masses des particules sont-elles si faibles?

pourquoi les interactions avec le boson de Higgs sont si grandes par rapport aux interactions gravitationnelles entre les particules?

Plusieurs hypothèses théoriques:

nouvelle structure de l'espace-temps?

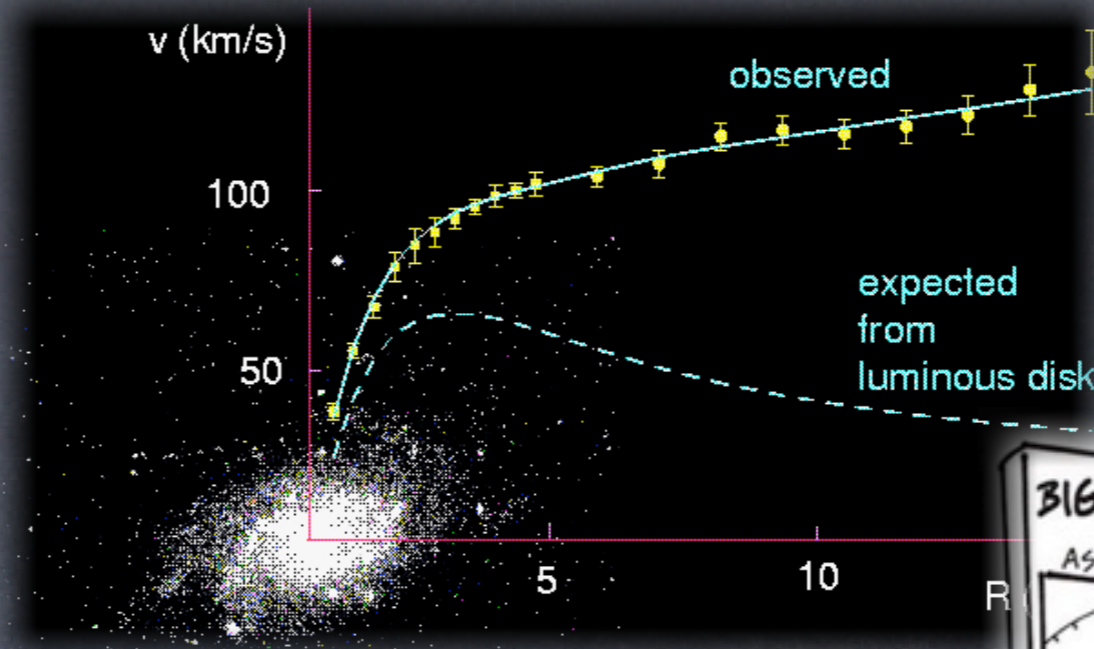
modification de la relativité? de la mécanique quantique?



# La physique électrofaible et la cosmologie

Le LHC n'est pas la seule fenêtre vers la nouvelle physique

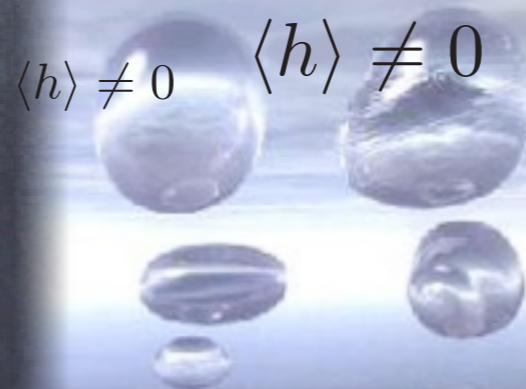
• La matière noire



• L'asymétrie matière anti-matière



• Des ondes gravitationnelles ?





# Des questions qui attendent des réponses

- Origine de la masse des particules élémentaires ?
  - boson de Higgs ?
- Pourquoi trois familles de quarks et leptons ?
- Pourquoi quelque chose plutôt que rien ?
  - asymétrie matière-antimatière ?
- Le vide est-il invariant sous les symétries du MS ?
- Pourquoi  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  ?
- Et la gravité ?
- Pourquoi 4 dimensions ?

# Supersymétrie

*Fermions*

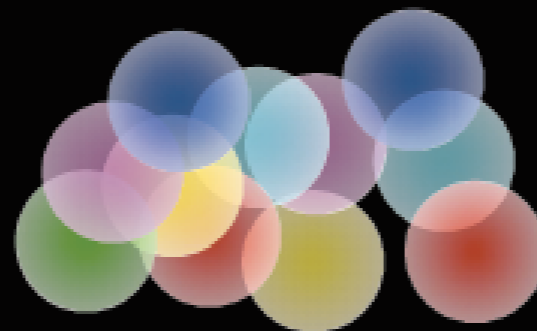
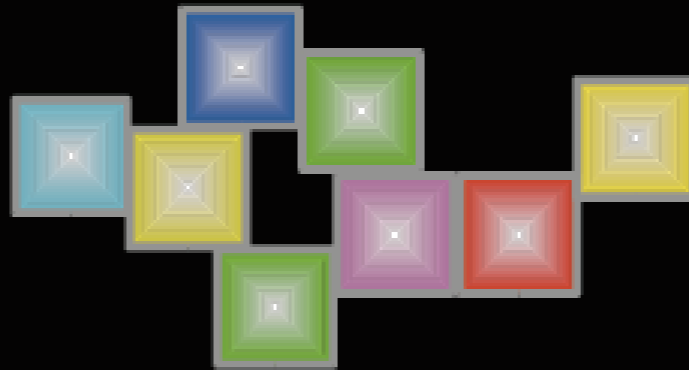
*particules de matière*

Les fermions se repoussent

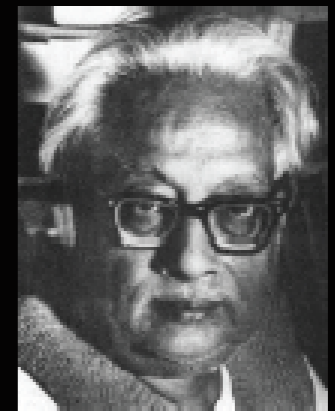
*Bosons*

*particules de forces*

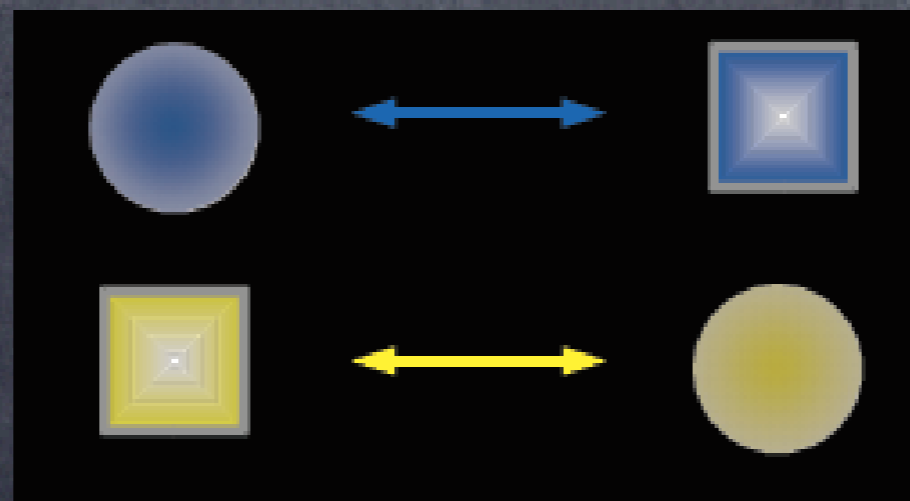
Les bosons peuvent s'empiler



Enrico Fermi

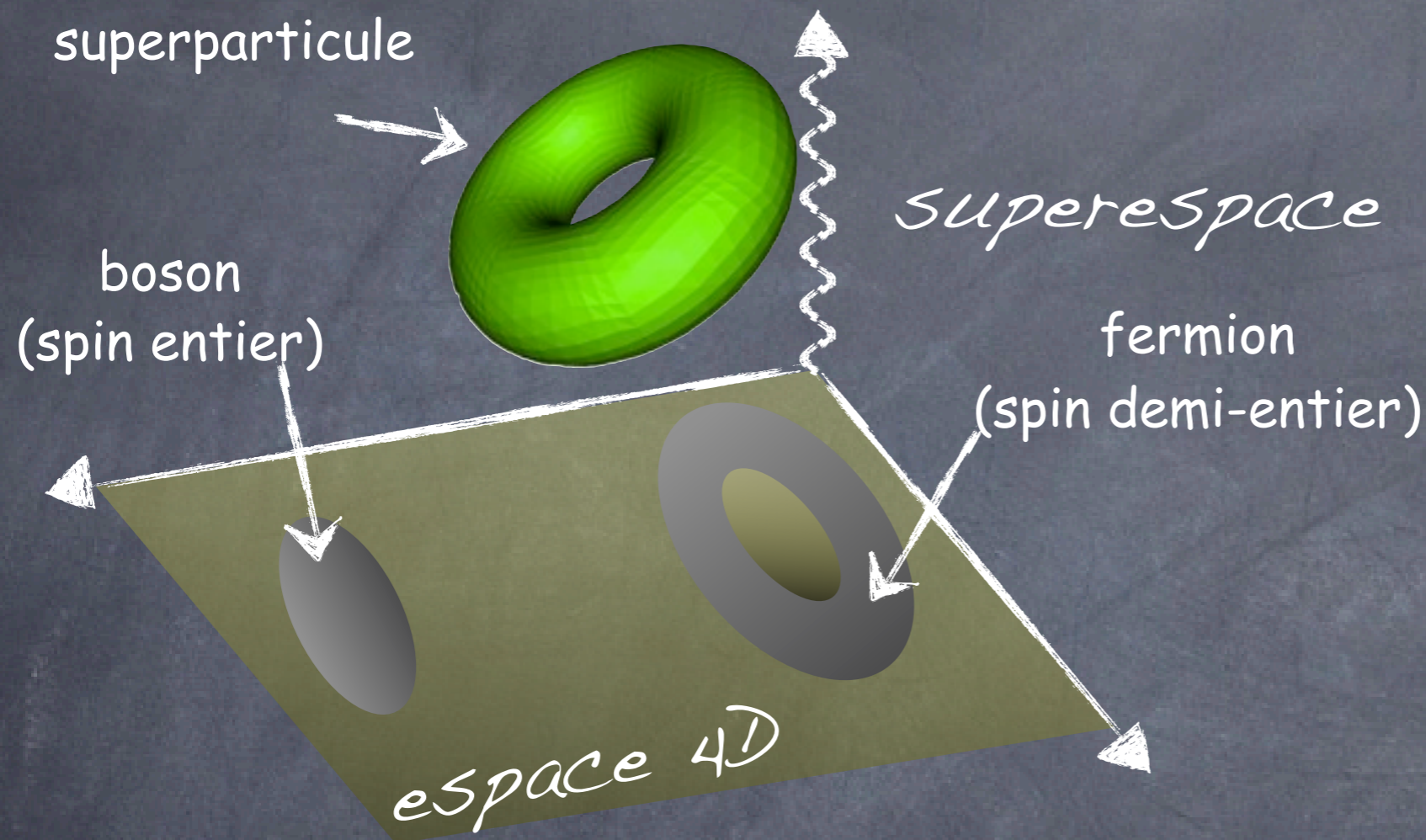


Satyendra Nath Bose





# Supersymétrie

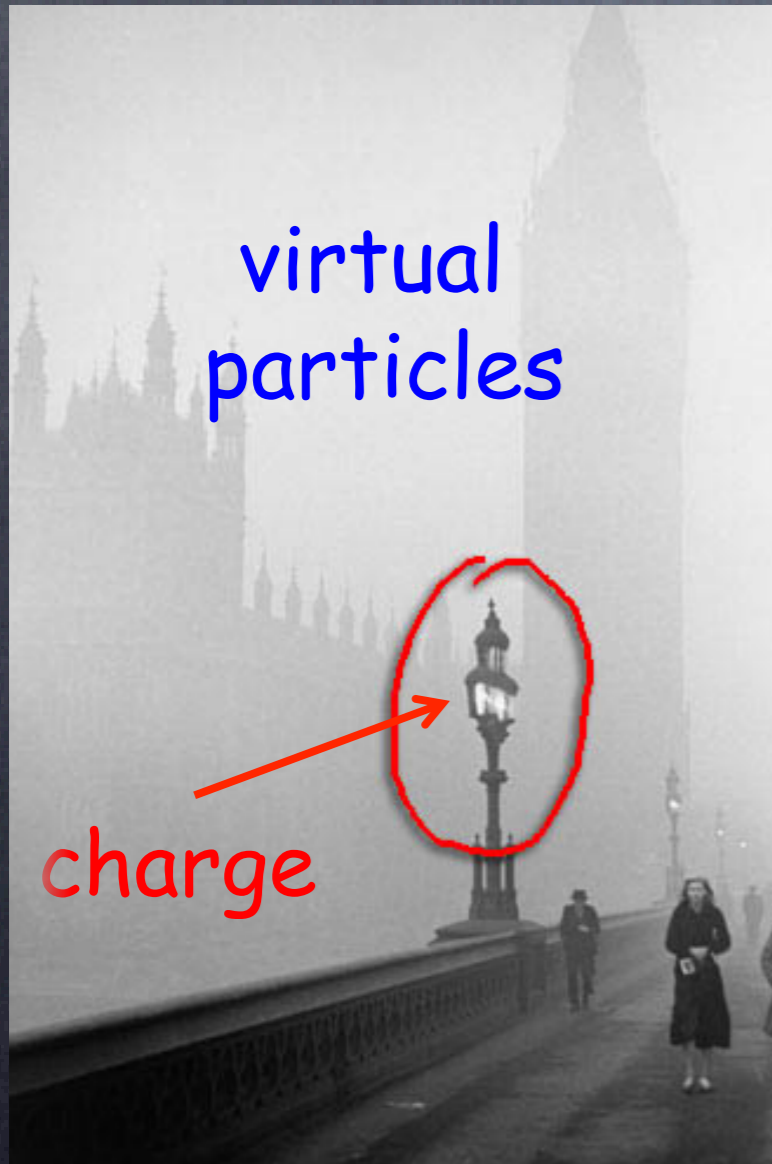


$x^2=1$   $\leftrightarrow$  matière et antimatière  
 $x^2=-1$   $\leftrightarrow$  matière et supermatière

# Evolution des constantes de couplage

*Physique classique* : les forces dépendent des distances

*Physique quantique* : les charges dépendent des distances



QED: particules virtuelles écrantent la charge électrique:  $\alpha \searrow$  avec  $d \nearrow$

QCD: particules virtuelles (quarks et \*gluons\*) écrantent la charge forte:  $\alpha_s \nearrow$  avec  $d \nearrow$

'liberté asymptotique'

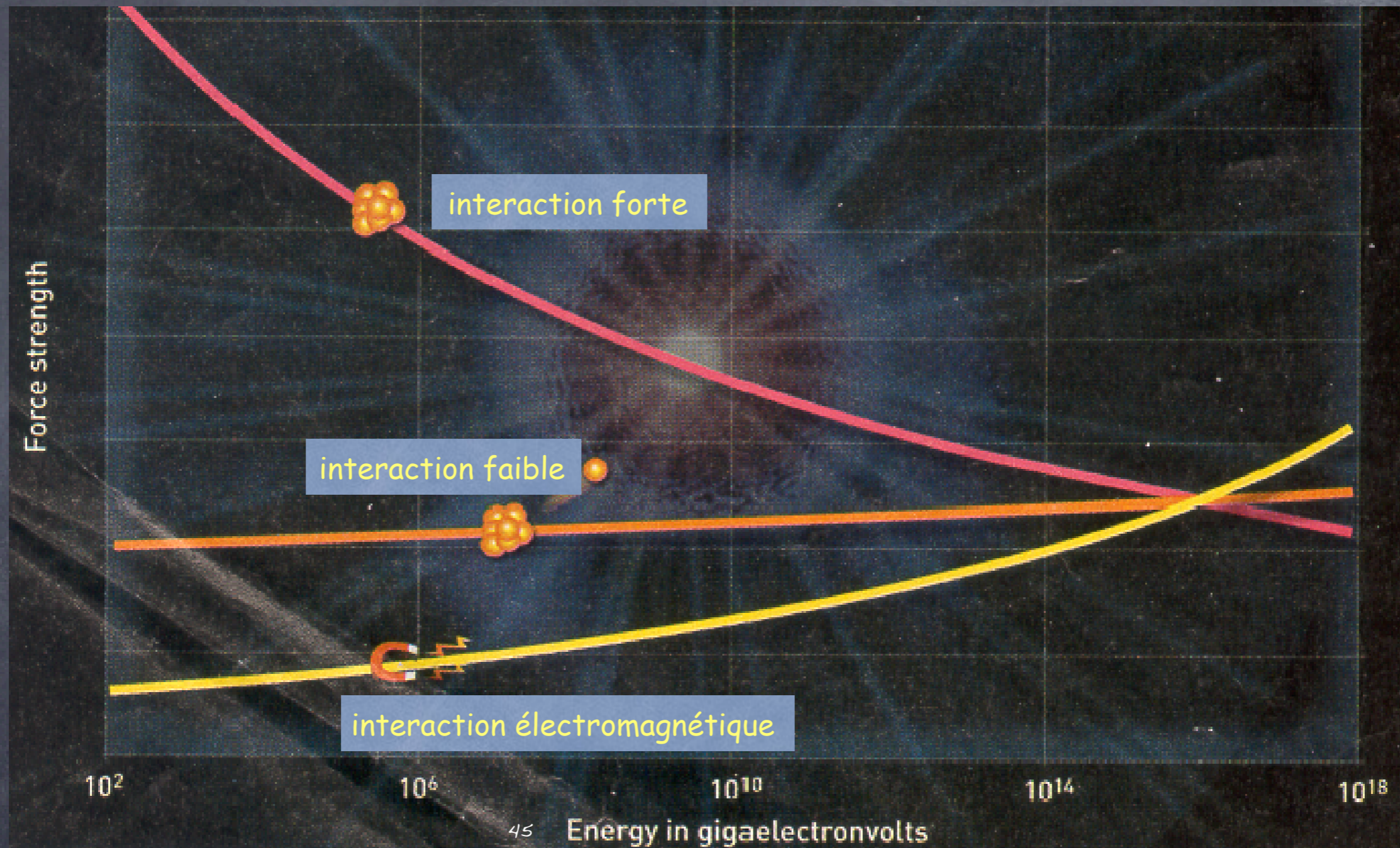
$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial \log \mu} = \beta(\alpha_s) = \frac{\alpha_s^2}{\pi} \left( -\frac{11N_c}{6} + \frac{N_f}{3} \right)$$



(pictures: courtesy of G. Giudice)

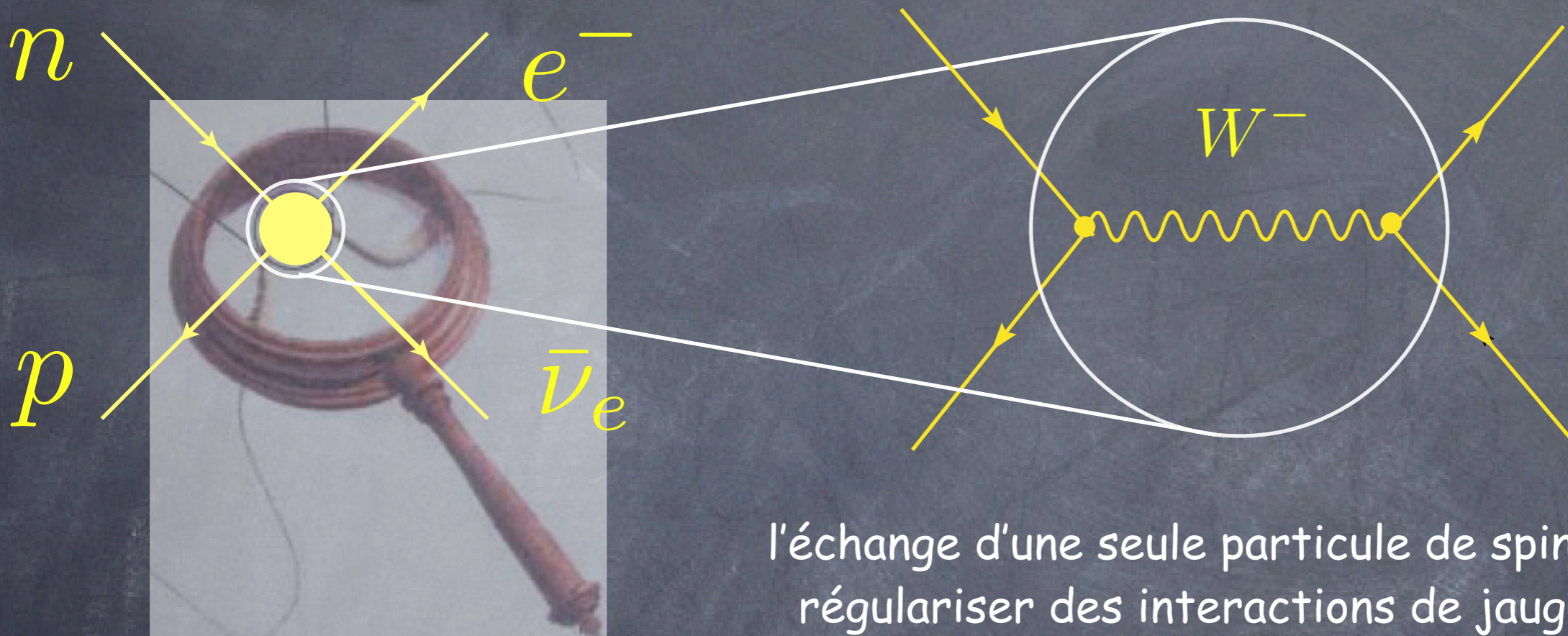


# Unification des forces



Un seul type de matière  
Une seule interaction fondamentale

# Vers une description microscopique de la gravité : théorie des cordes



l'échange d'une seule particule de spin 1 permet de régulariser des interactions de jauge dans l'UV.

Comment régulariser les interactions gravitationnelles dans l'UV ?

$$\mathcal{L} = \frac{1}{M_{Pl}} h_{\mu\nu} T^{\mu\nu}$$

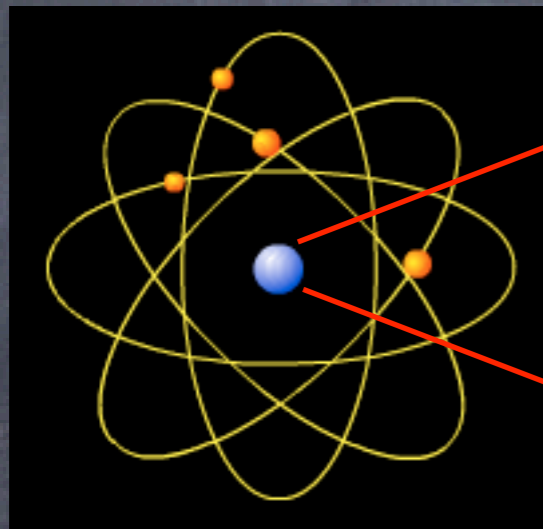
échange d'une infinité de particules de masse de plus en plus grande et avec un spin de plus en plus élevé.



# Théorie des cordes

(univers observable)

$10^{-10}$  m

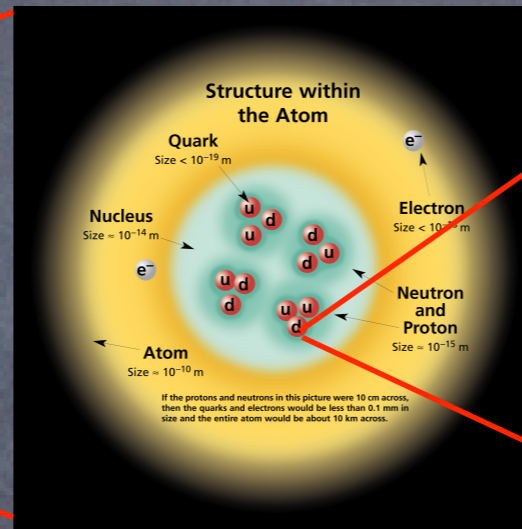


Atome

électrons + noyau

(Terre)

$10^{-17}$  m

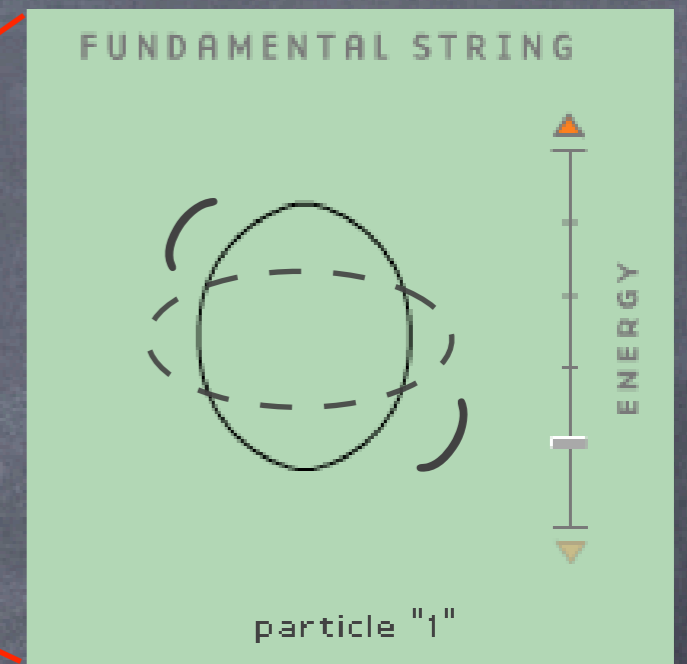


Noyau

quarks

(cheveu)

$10^{-35}$  m



(Super)Corde

"One day, Sir, you may tax it!"



Réponse de Faraday à Gladstone (1<sup>er</sup> ministre) qui s'interrogeait sur l'utilité de ses recherches sur ce qui allait devenir l'électricité

La recherche fondamentale peut déboucher sur des applications concrètes qui un jour changeront notre vie quotidienne