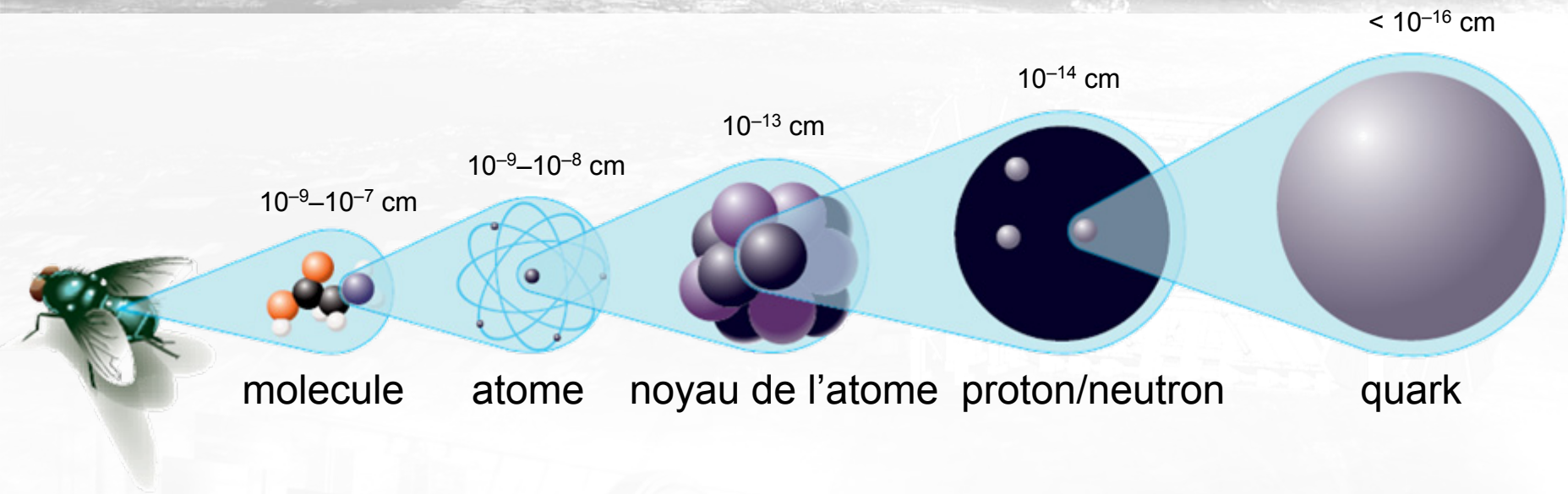


Revenons an arrière ...

Les **constituants de la matière**, les
forces et le **Modèle Standard** de la
physique des particules.



Les électrons et les quarks sont les
constituants élémentaires de la matière



Le Modèle Standard (MS)

Le MS comporte 24 particules de matière et 3 forces

Fermions

Particules de matière

Organisées en 3 familles

$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

6 Leptons

ℓ

6 Quarks

q

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

Bosons

Quanta de force

Distinguant 3 forces

Photon

Force électro-
magnétique

γ

3 Bosons faibles

Force faible

$W^\pm$

Z^0

8 Gluons

Force forte

g

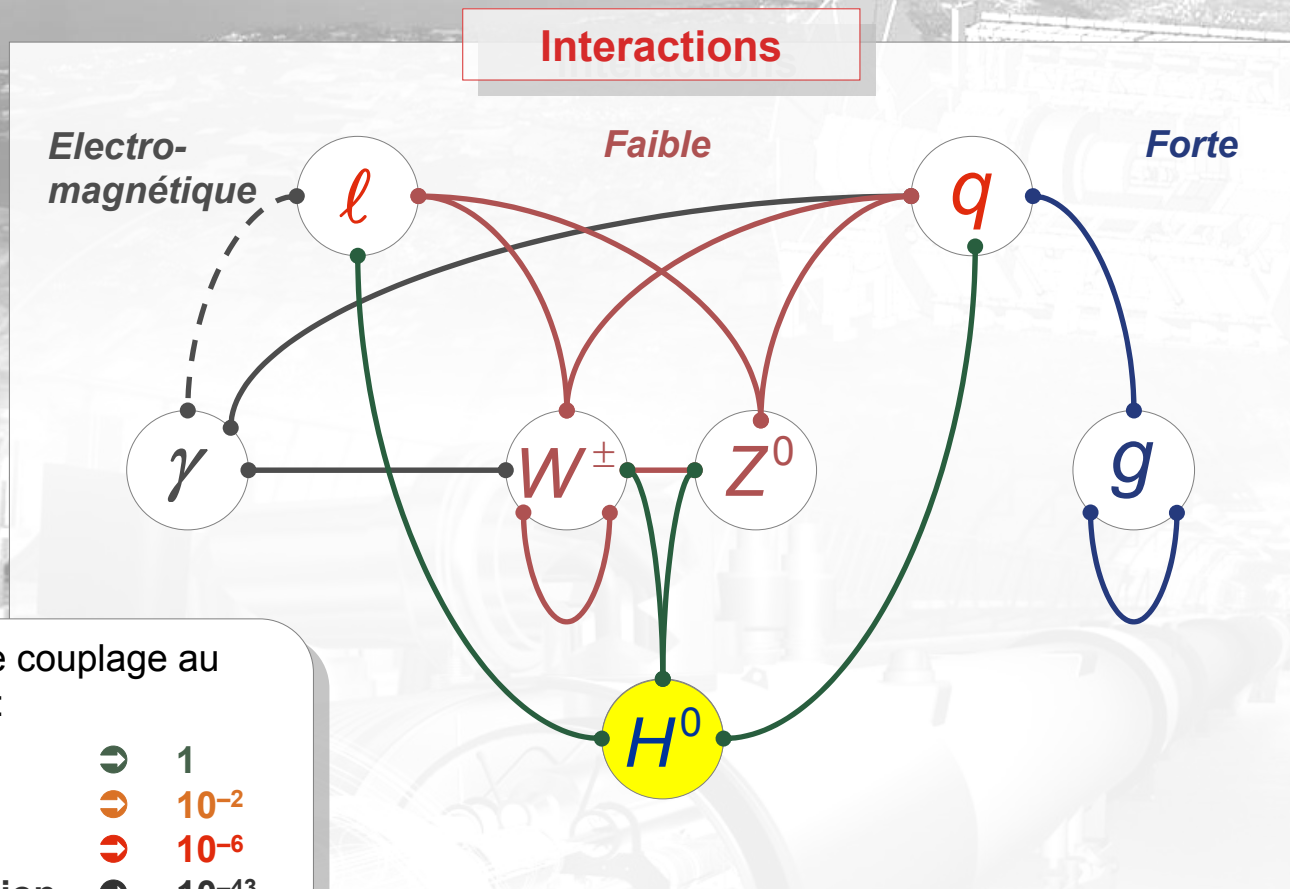
Boson de Higgs

H^0

Brise la symétrie électrofaible
Génère les masses des particules

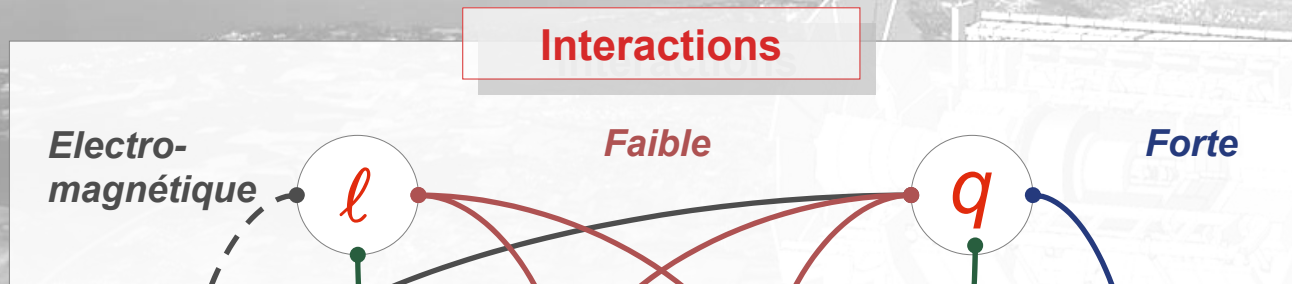
Le Modèle Standard (MS)

Le MS comporte 24 particules de matière et 3 forces

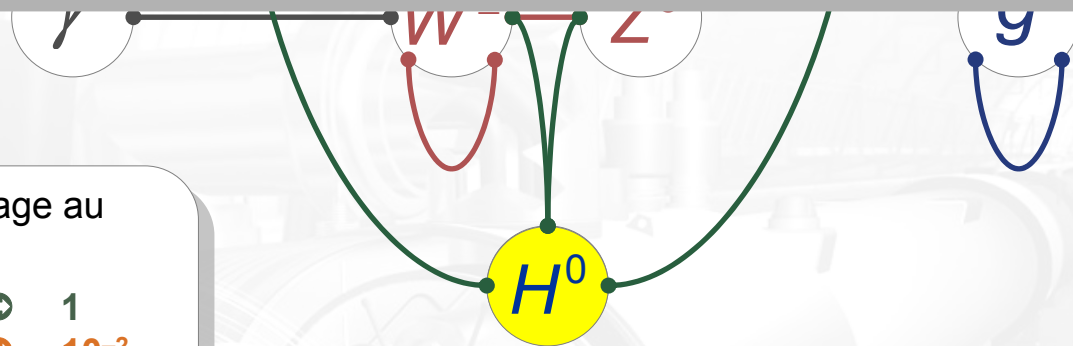


Le Modèle Standard (MS)

Le MS comporte 24 particules de matière et 3 forces



Le MS n'inclue pas la gravité !

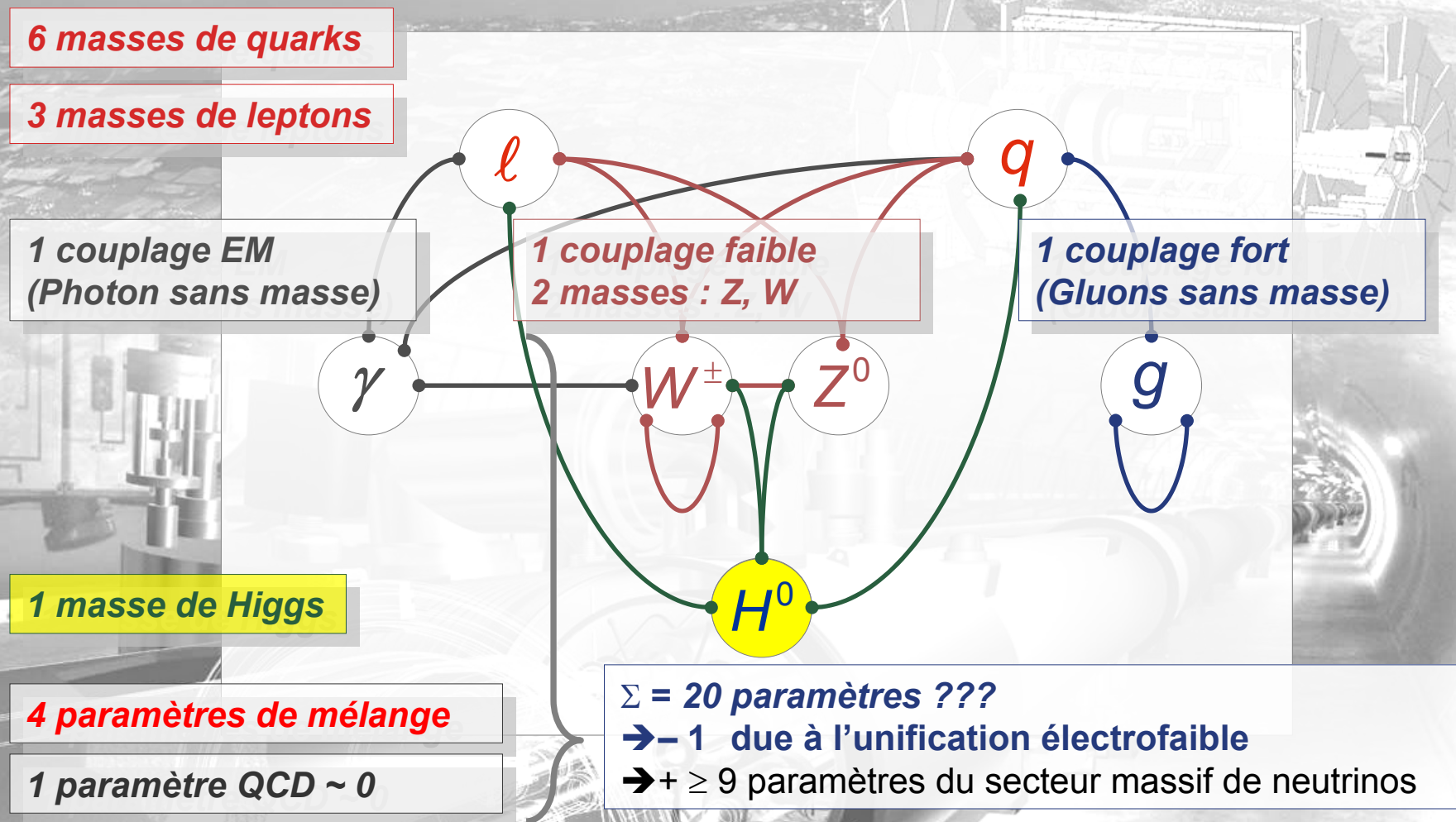


Force de couplage au quark u :

Forte	↪	1
EM	↪	10^{-2}
Faible	↪	10^{-6}
Gravitation	↪	10^{-43}

Le Modèle Standard (MS)

Le MS décrit tous les phénomènes observés avec 19 paramètres libres



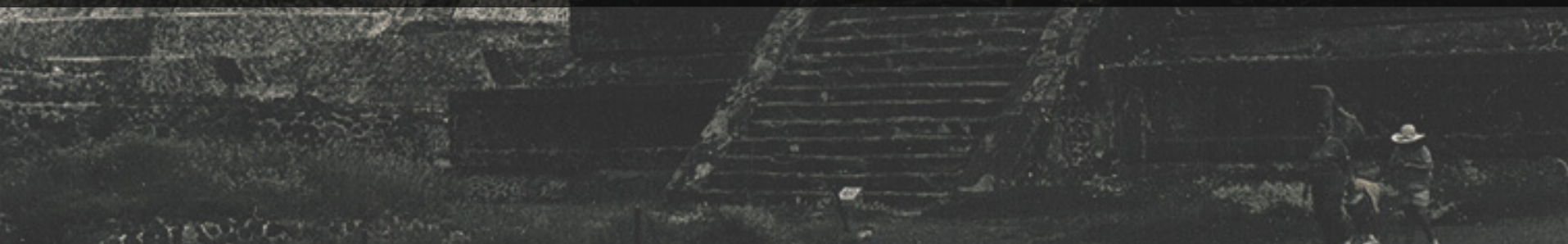
Les 3 interactions fondamentales (hors gravitation)

- ☀ La **Matière** est formée de particules élémentaires de spin $\frac{1}{2}$ (fermions)
- ☀ Les **Forces** sont générées par l'échange de particules de spin 1 (bosons)
- ☀ Principe commun « géométrique »: **invariance de jauge** / transformations liées à un groupe de symétrie
- ☀ Les interactions **électromagnétique** et **faible** sont décrites dans un cadre théorique commun: **la théorie électrofaible**
- ☀ **Unification** des interactions EM & faible & forte attendue à très haute énergie



L'interaction (nucléaire) faible

- ☀ Radioactivité β des noyaux : émission d'une paire électron–neutrino
- ☀ Découverte des « courants neutres » : échange de bosons Z^0
[CERN-Gargamelle (A. Lagarrigue, 1974)]
- ☀ Découverte des bosons W et Z : $M_W = 80$ GeV, $M_Z = 91$ GeV
[CERN-UA1/2 (A. Rubbia, S. Van Der Meer, 1983)]
- ☀ L'interaction est naturellement faible, et à très courte portée ($\sim M^{-1} = 2 \times 10^{-16}$ cm) à cause de la masse élevée des bosons $W^\pm$ échangés
- ☀ **Universalité**: toutes les paires lepton-neutrino et quarks up-down sont produites avec la même force



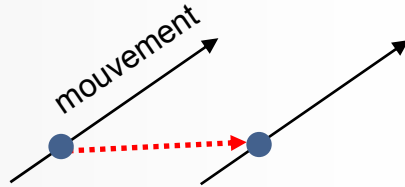
Nuclear fusion in sun uses weak interaction $pp \rightarrow (pn = d)e^+ \nu$

Temple du soleil, San Juan Teotihuacán, Mexico

Symétries de jauge (1)

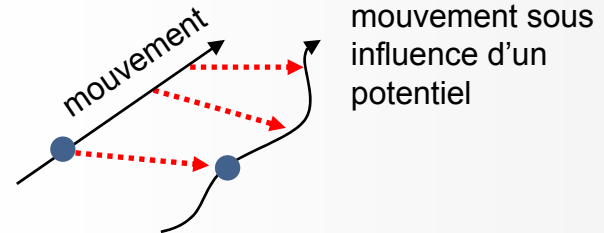
- ☀ Origine géométrique des interactions fondamentales
- ☀ Invariance des équations du mouvement par rapport à des transformations locales appartenant à un groupe de symétrie
- ☀ Exemple (1) : groupe des **translations**, particule / mouvement uniforme

Symétrie
globale :



$$\vec{x} \mapsto \vec{x} + \vec{a}$$

Symétrie
locale :



$$\vec{x} \mapsto \vec{x} + \vec{a}(\vec{x}, t)$$

Nouvelle trajectoire possible si des **forces** s'exercent sur la particule : un potentiel qui restaurerait la symétrie de la dynamique sous cette transformation de jauge

Symétries de jauge (2)

- ☀ La question d'annuler les transformations locales via l'introduction d'un potentiel (force) paraît dépourvue de signification ...
- ☀ « Néanmoins, le résultat surprenant est que la dynamique qu'on trouve n'est pas une dynamique quelconque, mais **une des quatre forces fondamentales** de la Nature, la force de gravitation. Les équations qui restent invariantes sous des translations locales sont les équations de la relativité générale d'Einstein. La gravitation a une origine géométrique. » [citation tirée de J. Iliopoulos, 2005]
- ☀ Au niveau quantique, on peut chercher le mécanisme qui rendrait invariant une transformation locale de phase – groupe $U(1)$:

$$\psi(\vec{X}, t) \mapsto e^{i\theta(\vec{X}, t)} \cdot \psi(\vec{X}, t)$$

La solution de ce problème « mathématique » conduit à l'électrodynamique !

Le problème : la masse des bosons

- ✱ Propriété générale des théories de jauge : masse des bosons et fermions = 0
- ✱ Bien vérifiée pour l'électrodynamique quantique :
Portée infinie, masse du photon = 0, vitesse de propagation c
- ✱ Mais les bosons W et Z sont massifs (~ 100 GeV) ...
- ✱ La symétrie par laquelle l'invariance de jauge était introduite apparaît « brisée »
- ✱ Peut-on malgré tout construire une théorie symétrique par rapport à des transformations du groupe de jauge dans ces conditions ?

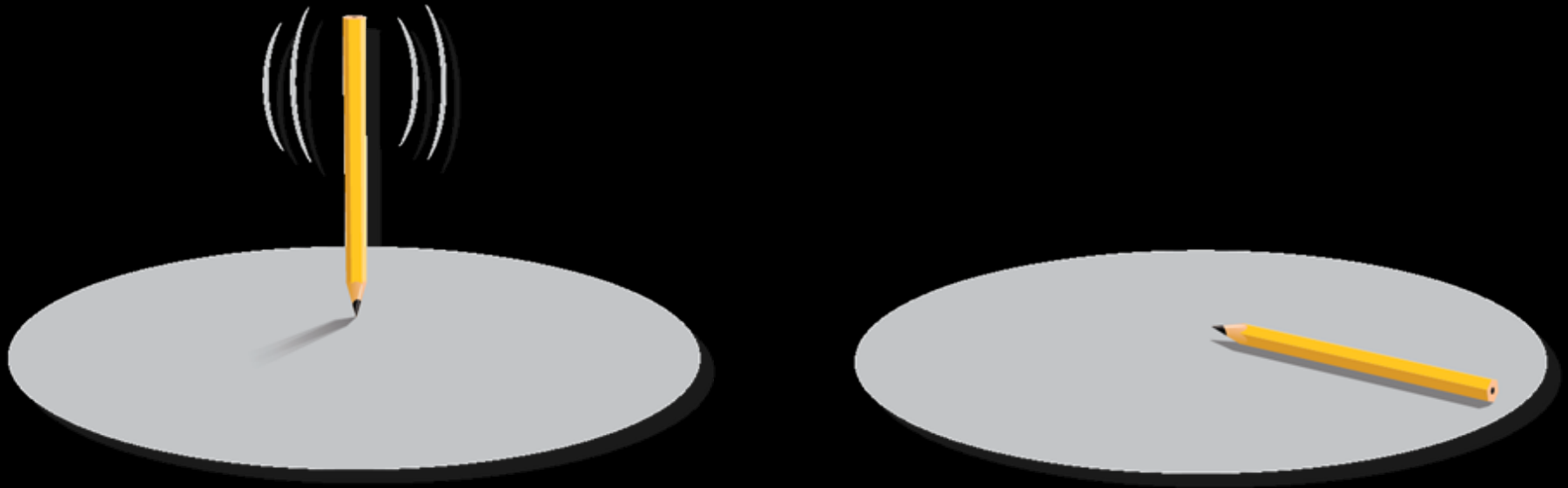
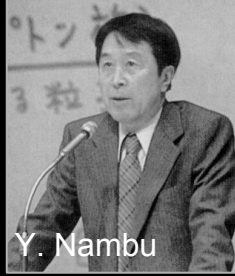
Le concept de brisure spontanée de symétrie (BSS)

- ☀ Beaucoup de systèmes physiques possèdent des symétries
- ☀ Les états possibles du système doivent respecter la symétrie, ceci n'est pas forcément possible état par état
- ☀ Exemple d'un solide ferromagnétique (aimant) :

A température $T > T_c$ (T_c – Curie température)	• spins dirigés au hasard $\rightarrow B = 0$ • symétrie / rotations spatiales
En dessous de T_c	• phase ordonnée où les spins s'alignent • direction privilégiée $\rightarrow$ brisure spontanée de symétrie (BSS) • infinité de solutions possibles dont l'ensemble obéit à la symétrie (symétrie cachée serait un meilleur terme)

- ☀ Ceci n'est pas à confondre avec une brisure explicite (provoquée), par ex. par l'application d'un champ magnétique extérieur (aimantation)

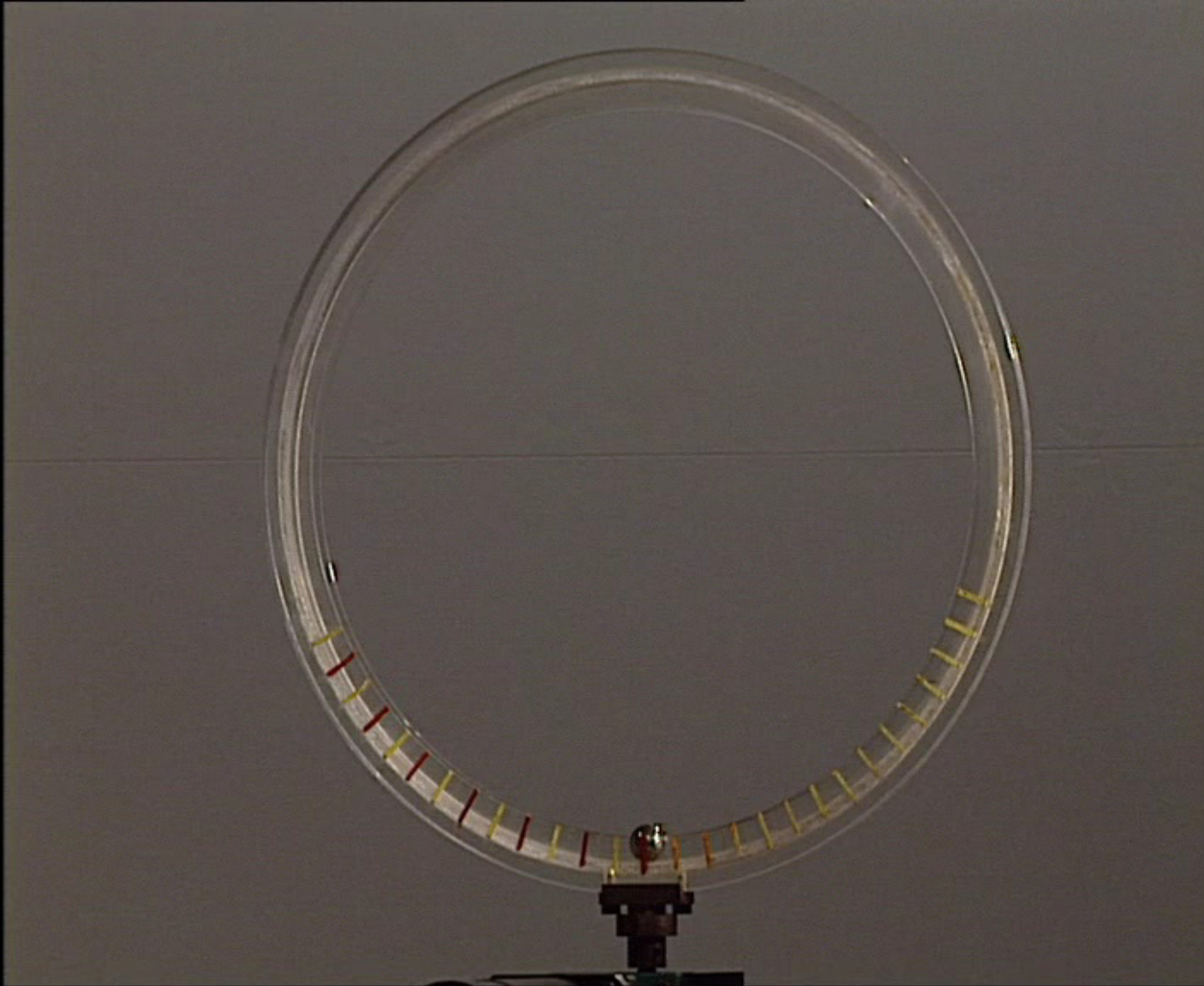
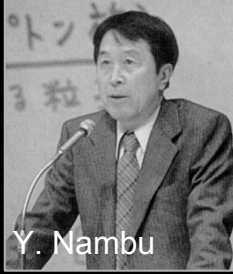
La brisure spontanée de symétrie



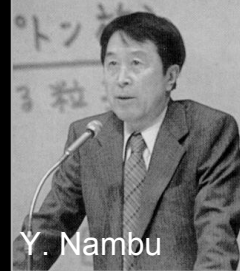
Le monde de ce crayon est entièrement symétrique. Toutes les directions latérales sont égales. La symétrie est brisée quand le crayon tombe : une unique direction est retenue.

La symétrie qui existait avant est cachée : on ne peut pas prédire le sens dans lequel le crayon tombe → l'état brisé est dégénéré !

La brisure spontanée de symétrie



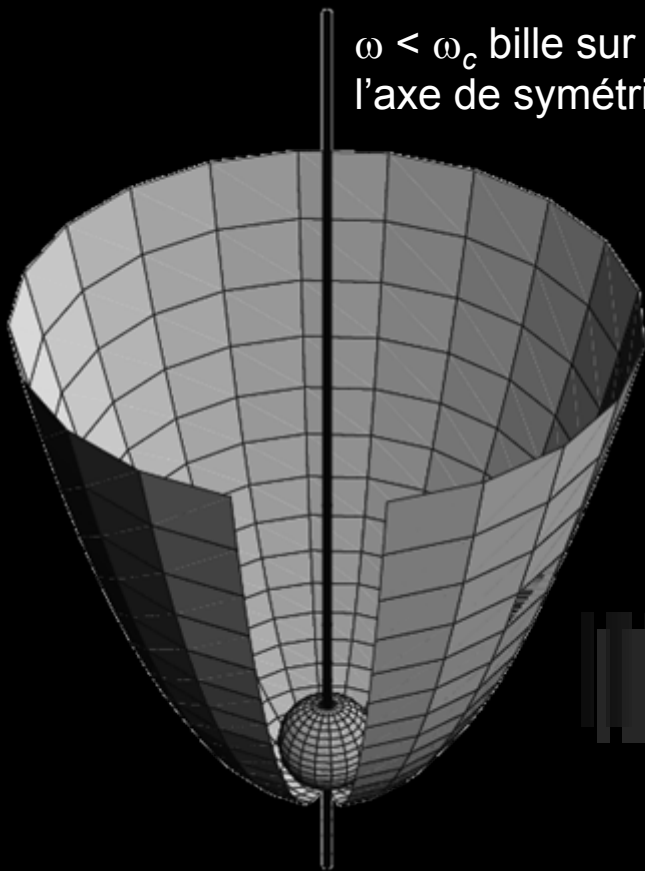
Le potentiel de la brisure de symétrie



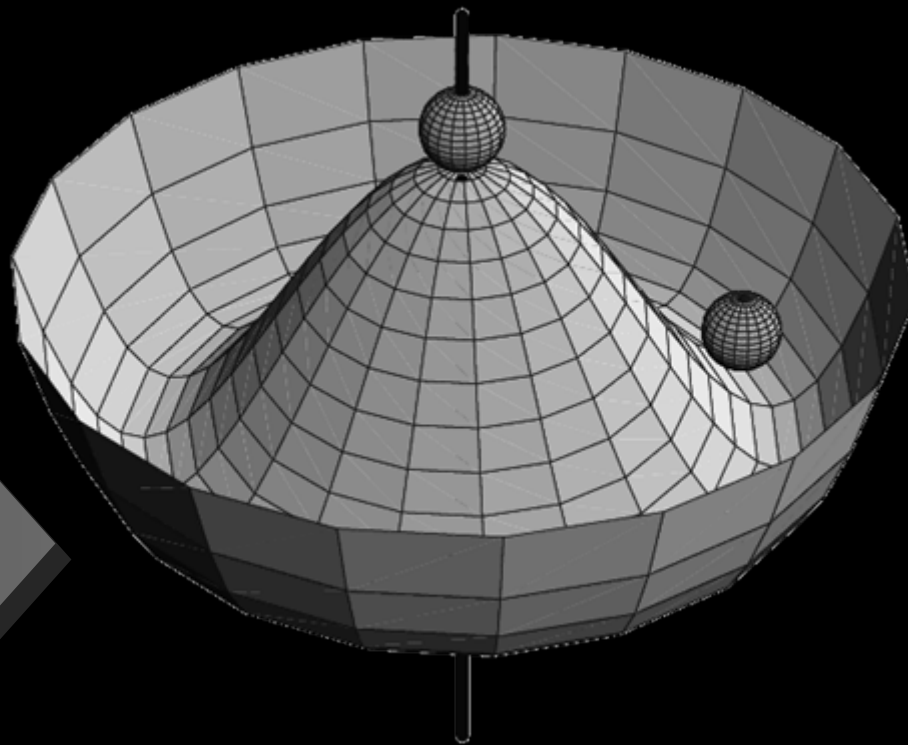
Y. Nambu

Vitesse angulaire de rotation $\omega \rightarrow$ vitesse critique ω_c

$\omega < \omega_c$ bille sur
l'axe de symétrie



$\omega > \omega_c$ positions stables la bille doit « choisir »
une des deux $\rightarrow$ brisure spontanée de symétrie



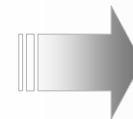
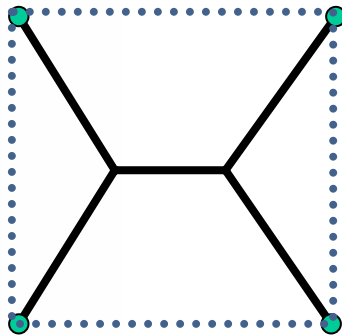
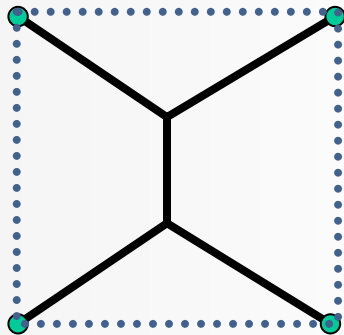
transition de
phase à ω_c

Comment se produit la transition de phase ?

- ☀ Il ne faut pas s'imaginer que le choix vers un état physique qui ne respecte pas la symétrie initiale résulte d'une « imperfection » (sinon la symétrie serait déjà brisée au départ !)

- ☀ Exemple mathématique:

- 4 points aux sommets d'un carré (symétrie du carré, en particulier symétrie / diagonale)
- On veut minimiser la longueur du chemin reliant les 4 points



2 solutions qui possèdent une symétrie moindre

- ☀ Transition de phase induite par des fluctuations infinitésimales
→ états finals équiprobables

Le mécanisme de Higgs

- ✿ La BSS peut apparaître dans des systèmes plus complexes
- ✿ Par ex. dans la transition de phase d'un métal : états normal → supraconducteur
- ✿ Dans les théories de jauge : introduction d'un nouveau champ [Higgs; Englert-Brout, 1964] qui réduit la portée effective de l'interaction → les bosons W et Z acquièrent une masse
- ✿ Le champ de Higgs déplace le minimum d'énergie et brise la symétrie de jauge (potentiel analogue à celui de notre exemple mécanique simple)
- ✿ La théorie contraint tous les couplages entre les bosons et les quarks / leptons
- ✿ Le mécanisme de Higgs peut être généralisé: toutes les particules acquièrent des masses en respectant la symétrie de jauge
- ✿ Les masses des particules, y compris celle du boson de Higgs, restent des paramètres arbitraires, non prédites par la théorie

Comment visualiser l'acquisition des masses

- ✱ Imaginons que toutes les particules aient une masse nulle, en particulier les bosons de jauge → la symétrie de jauge est respectée
 - ✱ Un champ de Higgs rempli tout l'espace-temps
 - ✱ Les particules interagissent avec ce champ ce qui ralenti leur mouvement (vitesse $< c$, donc effet d'une masse)
 - ✱ L'action du champ de Higgs est l'équivalente d'une sorte de *viscosité du vide*
 - ✱ Dans l'histoire de l'Univers depuis le Big Bang, le champ de Higgs a du apparaître lors d'une transition de phase (se rappeler l'exemple de l'anneau tournant)
- [Ceci ne s'applique qu'aux masses des particules élémentaires: la masse des objets macroscopiques provient à 98% de l'énergie de confinement des quarks dans les protons/neutrons]



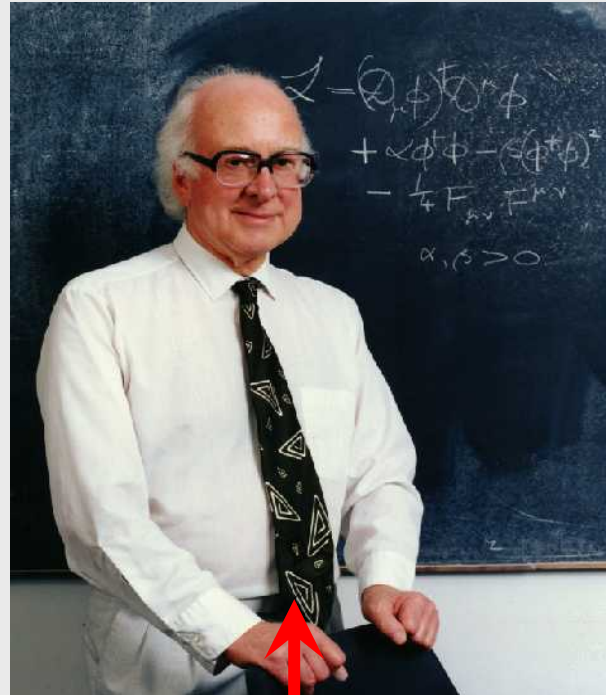
Explication quasi-politique du mécanisme de Higgs pour le ministre de science anglais en 1993

Le boson de Higgs est donc un élément **fondamental** du **Modèle Standard**

Seulement !

Le Higgs n'est pas encore découvert !

P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132



Seule observation non ambiguë de Higgs

[Blague plagiée de D. Froidevaux, CERN]

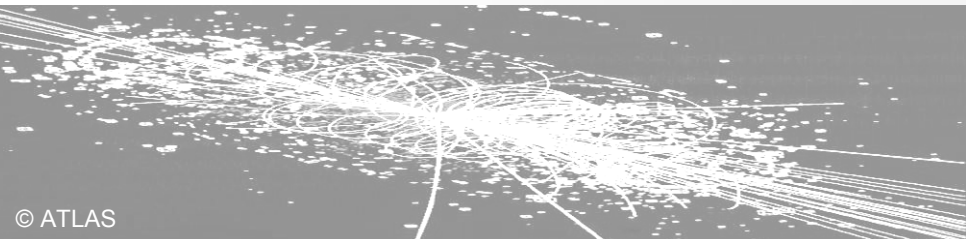
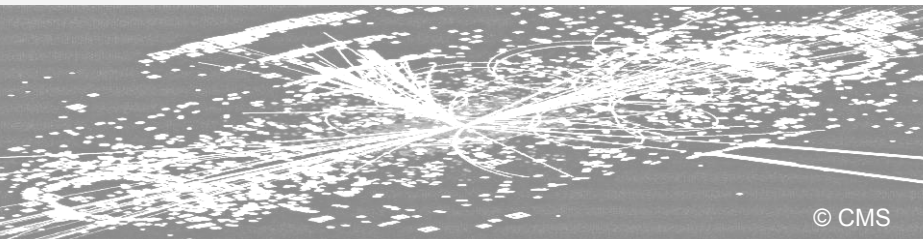
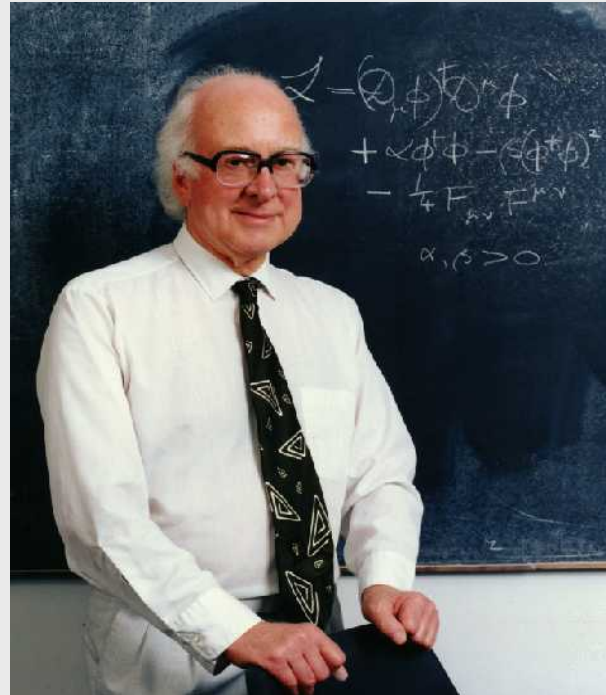
« Le Higgs »

Suivons Daniel Froidevaux un peu plus loin :

Le Higgs nous a accompagné depuis 4 décennies en tant que ...

- Concept théorique
- Incarnation du « parti communiste car il contrôle les masses »
[L. Alvarez-Gaumé à l'école d'été du CERN à Alushta]
- Partie pénible de l'introduction de thèse de tous les étudiants en physique de particules

P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132



La recherche du boson de Higgs est un des défis scientifiques des expériences ATLAS et CMS auprès du nouvel accélérateur LHC du CERN.

