

FIL ROUGE: QU'EST-CE QU'UNE PARTICULE ÉLÉMENTAIRE ?

Camilla Maiani

10.08.2015

Festival d'Astronomie de Fleurance



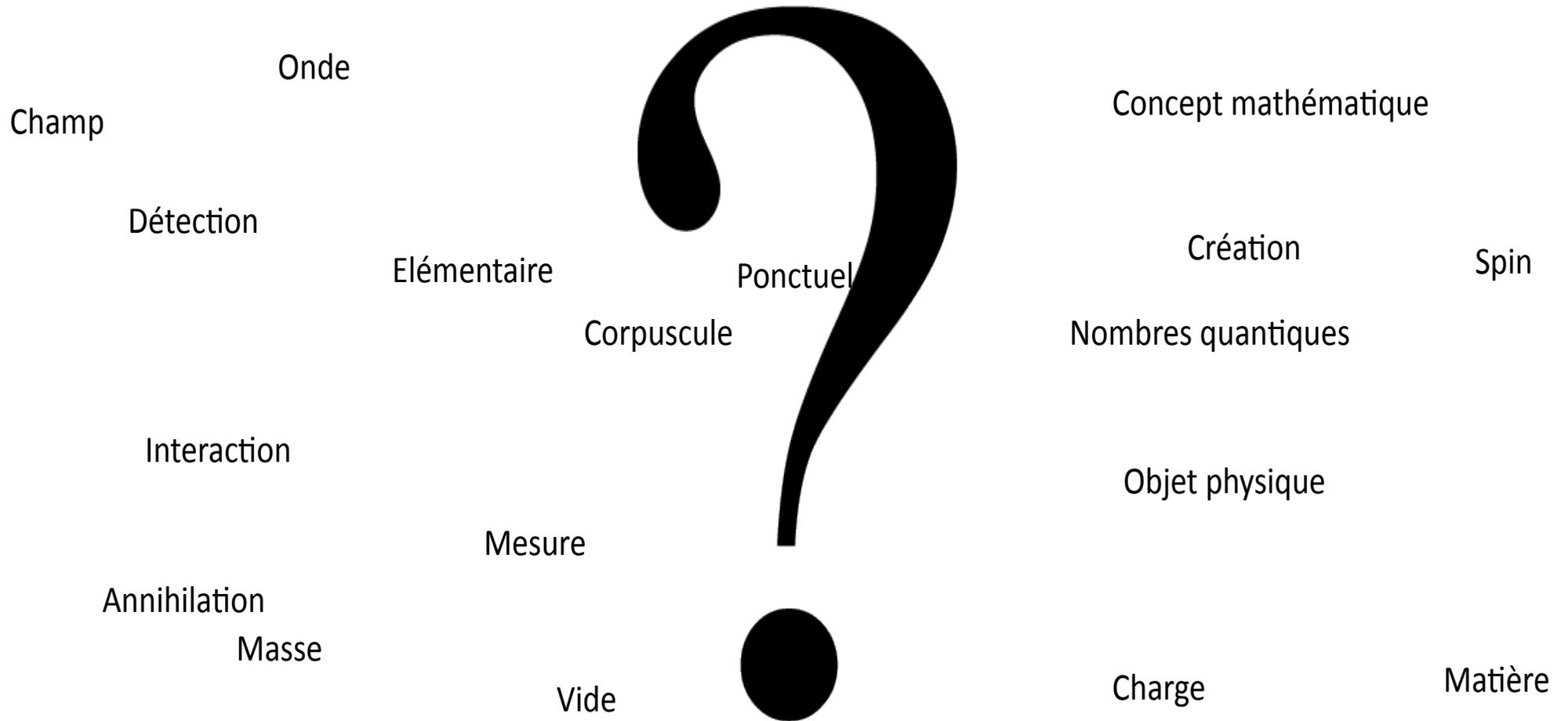
LA PHYSIQUE DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES EN (TRÈS) BREF

 Physique des particules élémentaires
étude de la nature petite partie qui constitue l'élément

- de quoi l'Univers est-il composé ?
- comment interagissent ses composants élémentaires ?

**on va recommencer des bases...qu'est-ce qu'un
particule élémentaire?**

BONNE QUESTION !



COMMENCONS AVEC UNE TABLE...

Définition (Larousse): meuble sur pieds
offrant une surface plane destiné à un
usage déterminé

de quoi c'est composé
et à quoi ca sert

mais l'important c'est aussi quand on pose la question !



XVIIe siècle



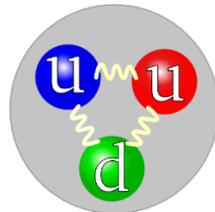
années 20



aujourd'hui

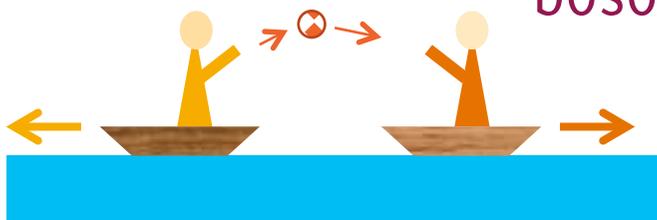
À QUOI 'CA SERT'?

- constituant fondamental
(à ce jour...)



fermion

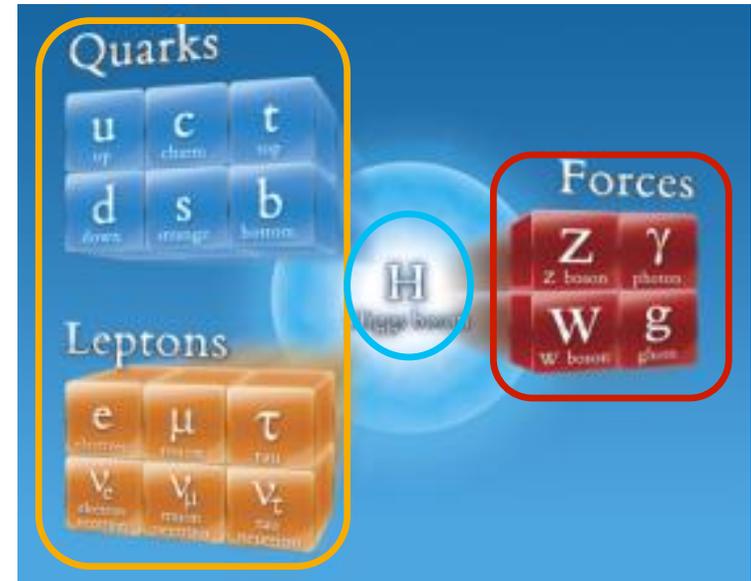
- médiateur d'interaction



boson vecteur

- masse inertielle

boson de Higgs



"Piled Higher and Deeper" by Jorge Cham
www.phdcomics.com

DE QUOI C'EST COMPOSÉ ?

ca dévient compliqué...
(merci d'attendre la suite)

QUAND?



QUAND?

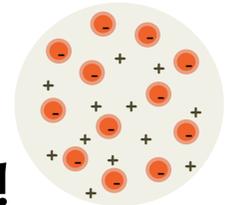
V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs



QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

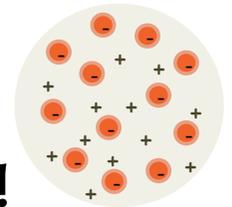


QUAND?

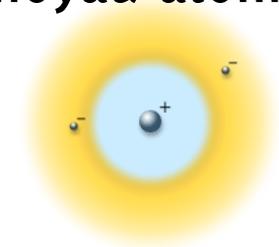
V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs



XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !



1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

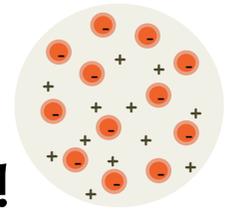


QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

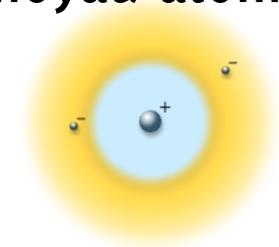


XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, “plum pudding model” → l'atome n'est plus élémentaire !



1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton



QUAND?

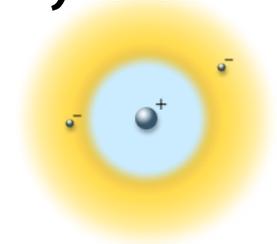
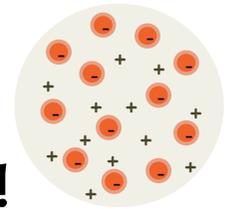
V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton

1932 ✦ Chadwick : découverte du neutron



QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

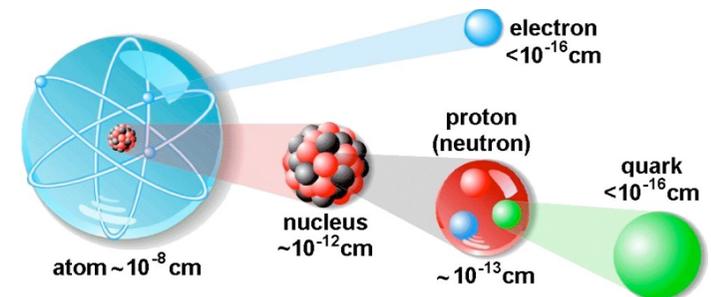
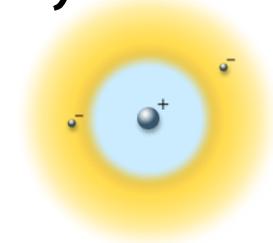
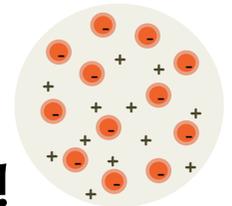
XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton

1932 ✦ Chadwick : découverte du neutron

1964 ✦ Gell-Mann, Zweig : quark model



QUAND?

V^{ème} siècle a.J.C. ✦ atomistes grecs

XIX^{ème} siècle ✦ J.J. Thompson : découverte de l'électron, "plum pudding model" → l'atome n'est plus élémentaire !

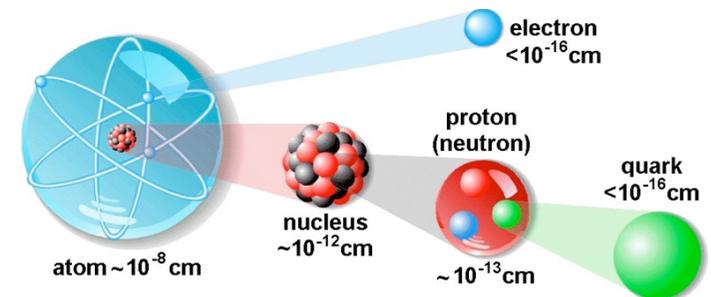
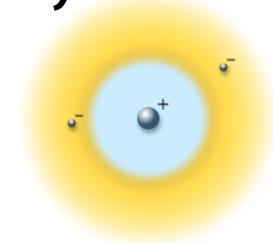
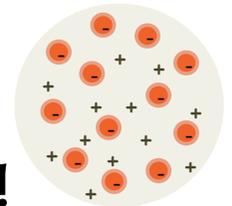
1911 ✦ Rutherford, Geiger, Mardsen : découverte du noyau atomique

1919 ✦ Rutherford : découverte du proton

1932 ✦ Chadwick : découverte du neutron

1964 ✦ Gell-Mann, Zweig : quark model

XXI^{ème} siècle ✦ ???



QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

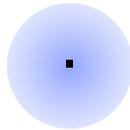
★ Objet élémentaire → pas de structure interne

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

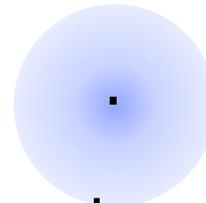
★ Objet élémentaire → pas de structure interne **“point matériel”**



distant



plus proche



plus proche encore

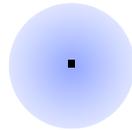
taille nulle
effets (quantiques) étendus

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

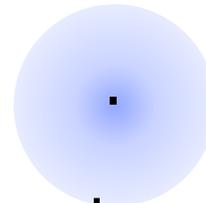
★ Objet élémentaire → pas de structure interne “point matériel”



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

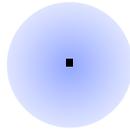
expérimentalement ?

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

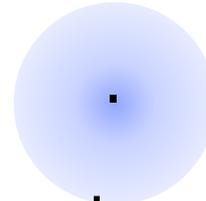
★ Objet élémentaire → pas de structure interne “point matériel”



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

expérimentalement ?

★ En mécanique classique: énergie transférée au point matériel = énergie cinétique du point matériel

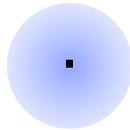
NB: si l'objet a des degrés de libertés internes, l'énergie peut exciter ceux-ci → sphère

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

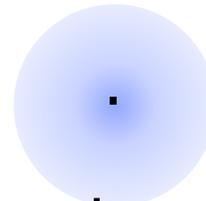
★ Objet élémentaire → pas de structure interne “point matériel”



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

expérimentalement ?

★ **En mécanique classique:** énergie transférée au point matériel = énergie cinétique du point matériel

NB: si l'objet a des degrés de libertés internes, l'énergie peut exciter ceux-ci → sphère

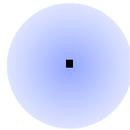
★ **En mécanique quantique:** l'énergie des degrés de liberté internes d'une particule n'est pas continue, ne peut assumer qu'une série discrète de valeurs: $E_0, E_1, E_2, ..$ → énergie de seuil $E_s = E_1 - E_0$

QUE VEUT DIRE ÉLÉMENTAIRE ?

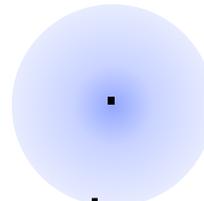
★ Objet élémentaire → pas de structure interne **“point matériel”**



distant



plus proche



plus proche encore

taille nulle

effets (quantiques) étendus

expérimentalement ?

★ **En mécanique classique:** énergie transférée au point matériel = énergie cinétique du point matériel

NB: si l'objet a des degrés de libertés internes, l'énergie peut exciter ceux-ci → sphère

★ **En mécanique quantique:** l'énergie des degrés de liberté internes d'une particule n'est pas continue, ne peut assumer qu'une série discrète de valeurs: $E_0, E_1, E_2, ..$ → énergie de seuil $E_s = E_1 - E_0$

→ **ca dépend de l'énergie à disposition !** → **“hautes énergies”**

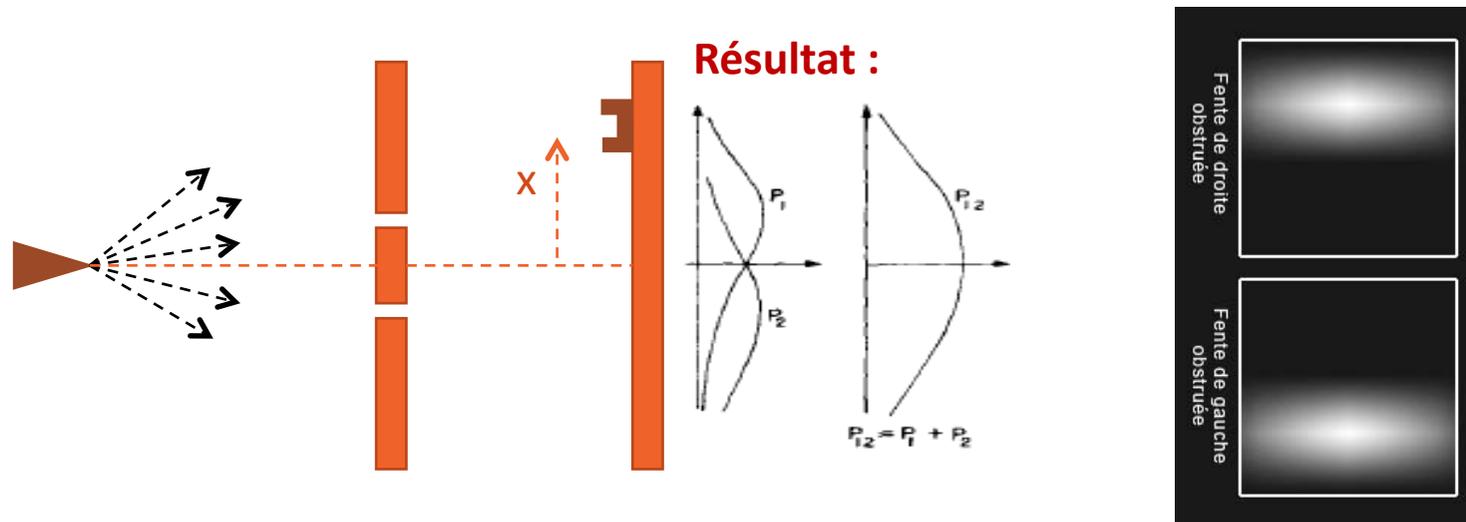
→ **on ne peut jamais démontrer qu'une particule est élémentaire**

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 1, CORPUSCULE

- ★ La source émet aléatoirement des billes identiques et incassables
- ★ Les deux fentes sont juste suffisamment larges pour laisser passer les billes
- ★ On compte le nombre de billes en x , on divise par le nombre total de billes passées par la fente → probabilité qu'une bille passée par la fente arrive en x

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 1, CORPUSCULE

- ★ La source émet aléatoirement des billes identiques et incassables
- ★ Les deux fentes sont juste suffisamment larges pour laisser passer les billes
- ★ On compte le nombre de billes en x , on divise par le nombre total de billes passées par la fente → probabilité qu'une bille passée par la fente arrive en x

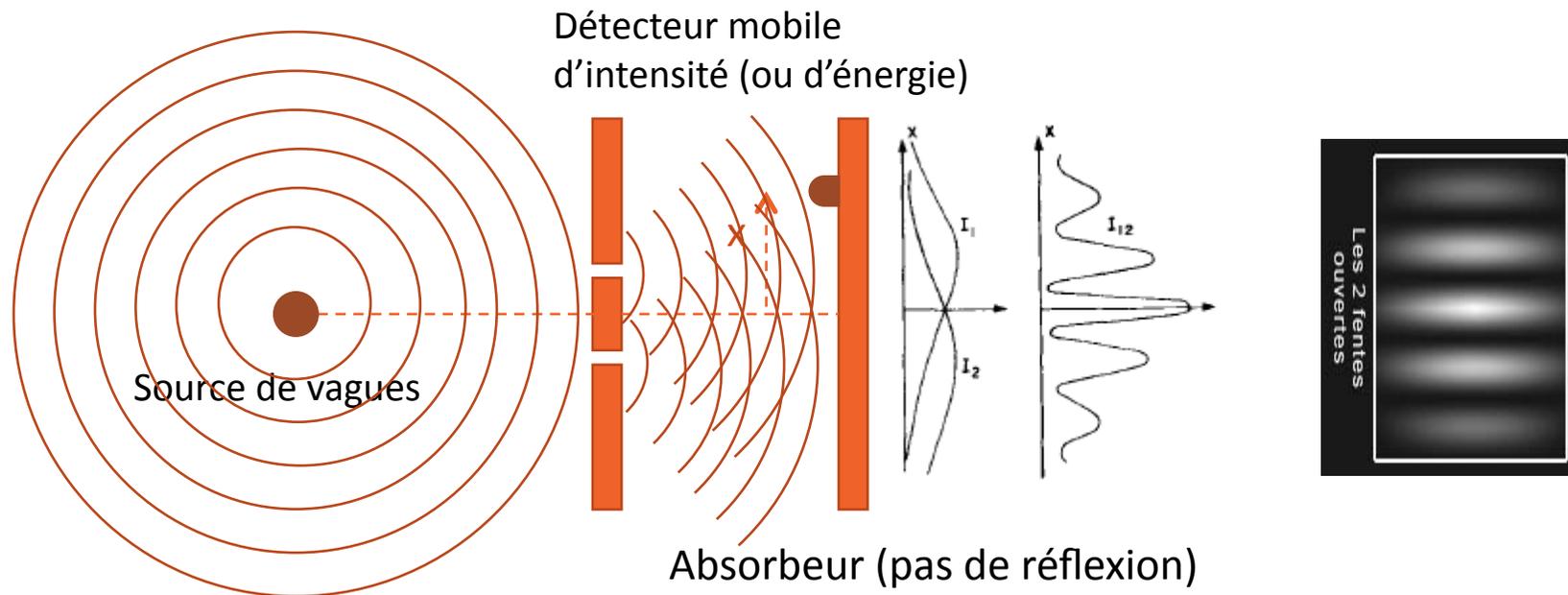


DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 2, ONDE

- ★ Meme exercice mais avec des ondes
- ★ Le détecteur est sensible à l'intensité des ondes
- ★ Si les deux fentes sont ouvertes → figure d'interférence

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 2, ONDE

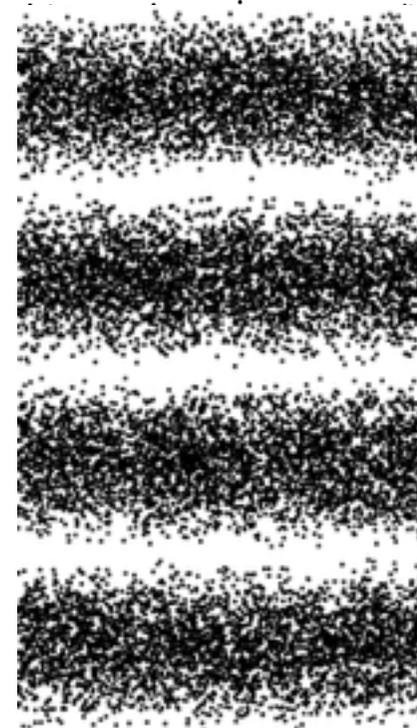
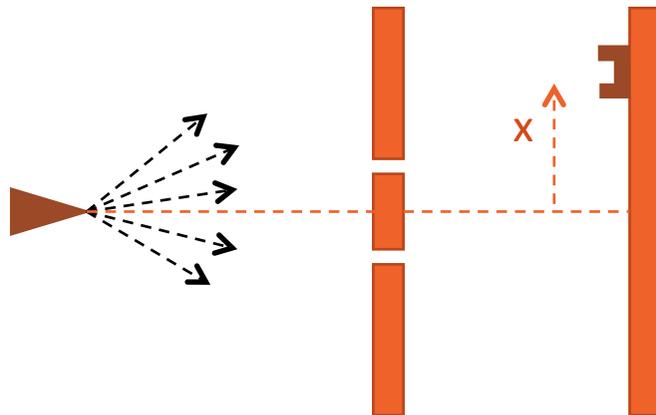
- ★ Meme exercice mais avec des ondes
- ★ Le détecteur est sensible à l'intensité des ondes
- ★ Si les deux fentes sont ouvertes → figure d'interférence



DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 3, DUALITÉ

maintenant on utilise des électrons

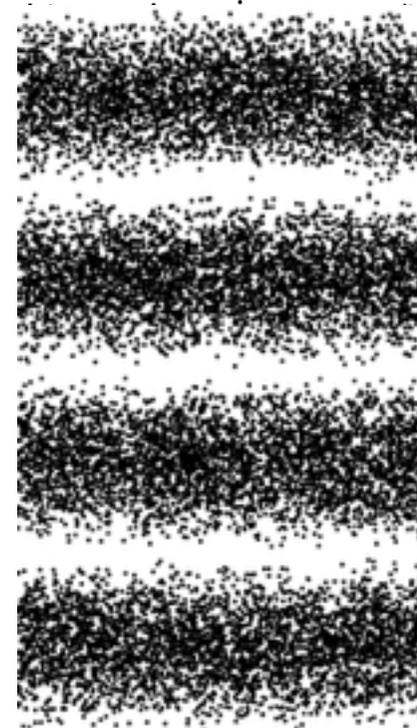
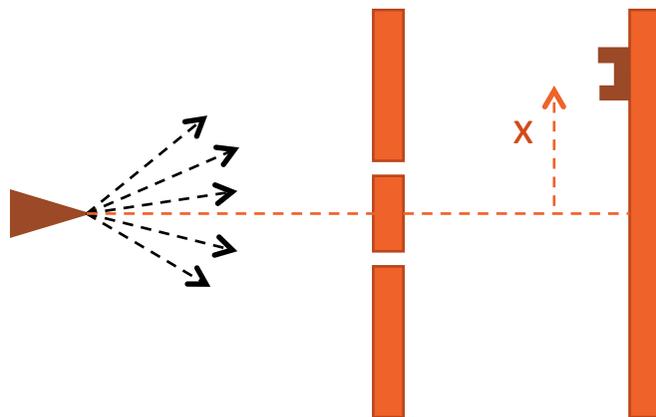
- ★ On compte bien les électrons unité par unité dans le détecteur **MAIS** on obtient une figure d'interférence si on calcule la probabilité
 - les électrons passent "par les deux fentes" (comme une onde) mais se révèlent corpusculaires dans le détecteur



DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 3, DUALITÉ

maintenant on utilise des électrons

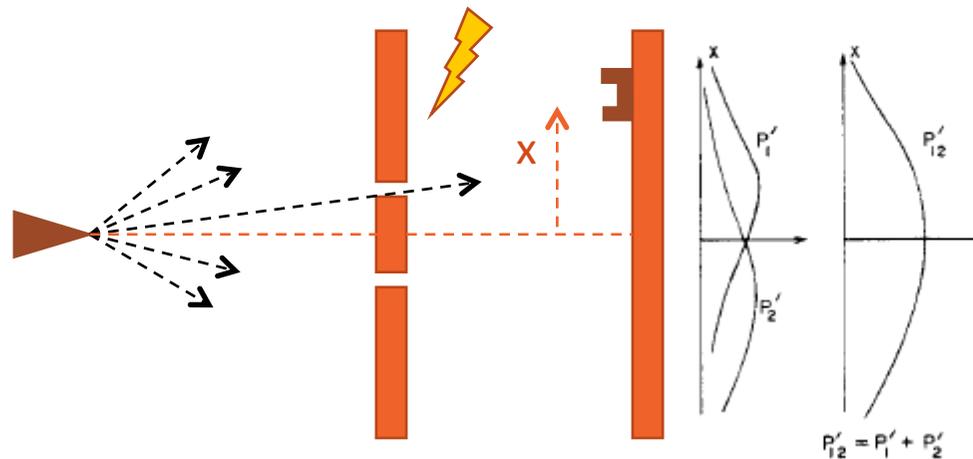
- ★ On compte bien les électrons unité par unité dans le détecteur **MAIS** on obtient une figure d'interférence si on calcule la probabilité
 - les électrons passent "par les deux fentes" (comme une onde) mais se révèlent corpusculaires dans le détecteur



DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: CAS 3, DUALITÉ

- ★ Si l'on éclaire (par exemple) la sortie des fentes avec une lumière d'une longueur d'onde susceptible d'être diffusée par les électrons

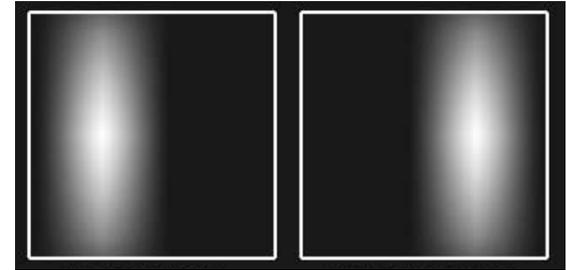
La figure d'interférence a disparu!



La mesure de la position de l'électron a révélé sa nature corpusculaire. Les franges réapparaissent quand on éteint le dispositif.

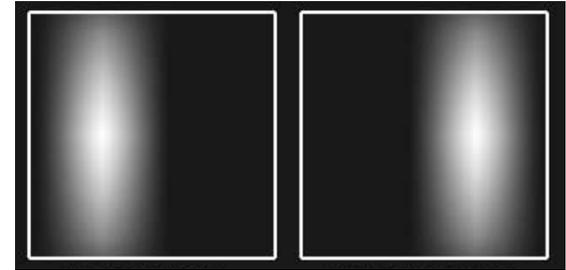
DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ca

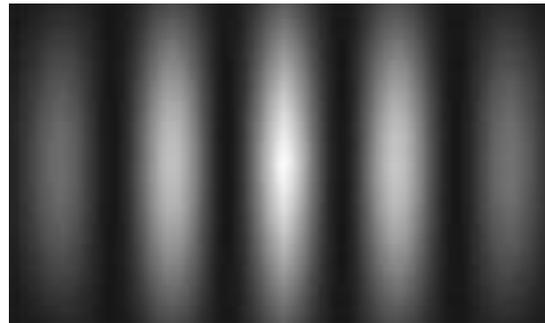


DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ça



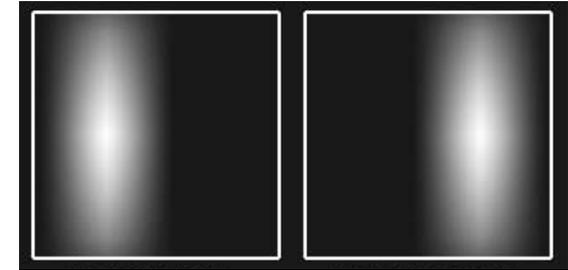
★ Quand on observe ça
passé le corpuscule



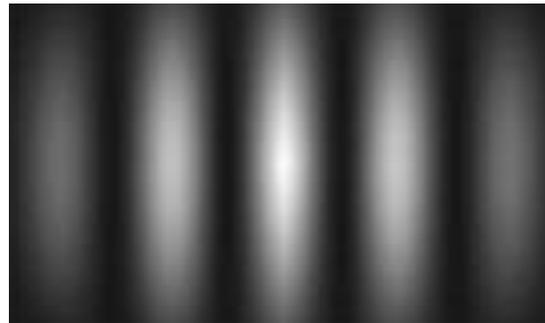
on ne sait pas par où est

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ca



★ Quand on observe ca
passé le corpuscule



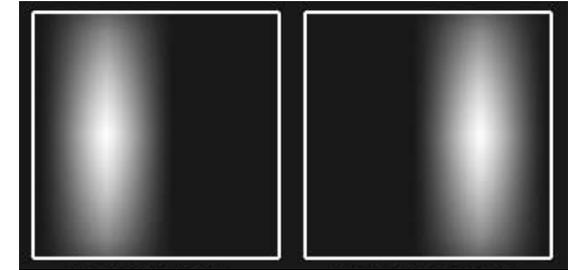
on ne sait pas par où est

★ On en déduit que:

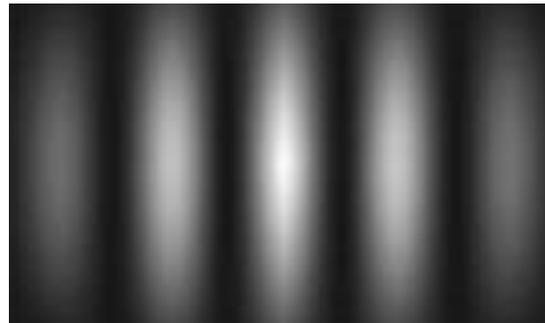
- ▶ une mesure perturbe le système
- ▶ pas de trajectoire classique ! l'électron passe par les deux fentes à la fois

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE: RÉCAPITULATIF

★ Quand on observe le corpuscule on voit ça



★ Quand on observe ça
passé le corpuscule



on ne sait pas par où est

★ On en déduit que:

- ▶ une mesure perturbe le système
- ▶ pas de trajectoire classique ! l'électron passe par les deux fentes à la fois

dualité onde et corpuscule: particule décrite par une **fonction d'onde** → densité de probabilité de l'**observable** (position, vitesse, ..)

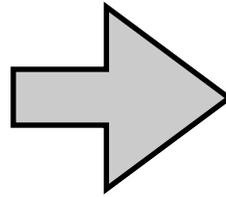
LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS EN 3 LIGNES

Mécanique Classique

particule (discret)

$$q(t)$$

$$L(q, \dot{q})$$



Théorie des champs

champ (continu)

$$\varphi(t)$$

← particule
de spin 0

$$\int \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi) d^3x$$

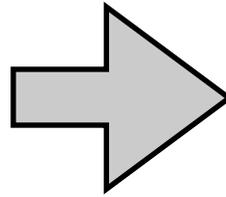
LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS EN 3 LIGNES

Mécanique Classique

particule (discret)

$$q(t)$$

$$L(q, \dot{q})$$



Théorie des champs

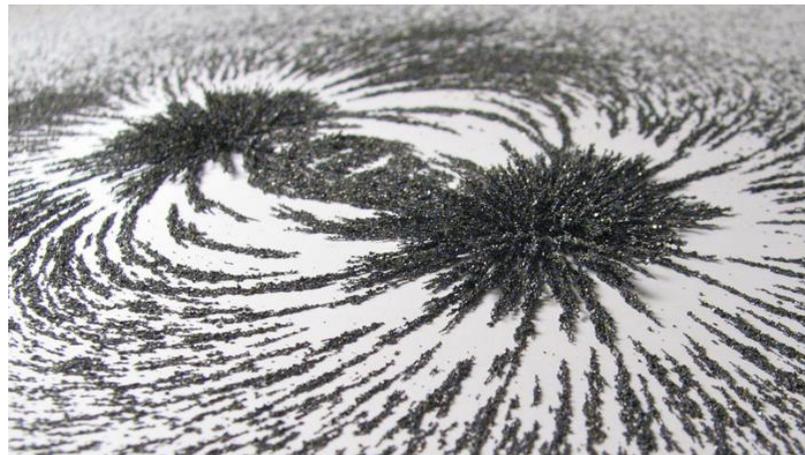
champ (continu)

$$\varphi(t)$$

← particule
de spin 0

$$\int \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi) d^3x$$

...qui a dit champ?



L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

si la phase dépend de l'espace-temps, la symétrie est brisée!

L'IMPORTANCE DES SYMÉTRIES



Théorème de Emmy Noether

symétrie



conservation

translation spatiale



impulsion

translation temporelle



énergie

phase



charge électrique

si la phase dépend de l'espace-temps, la symétrie est brisée!



il faut introduire un nouveau champs vectoriel → les particules interagissent ! en s'échangeant des bosons

...JUSQUE LA

- ★ On a essayé de définir
qu'est-ce qu'un
particule élémentaire
- ★ Dualité onde/particule
→ théorie quantique
des champs
- ★ Ces champs
interagissent !

...JUSQUE LA

- ★ On a essayé de définir qu'est-ce qu'une particule élémentaire
- ★ Dualité onde/particule → théorie quantique des champs
- ★ Ces champs interagissent !

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{mass}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} . \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = i\bar{e}_L^i \not{\partial} e_L^i + i\bar{\nu}_L^i \not{\partial} \nu_L^i + i\bar{e}_R^i \not{\partial} e_R^i + i\bar{u}_L^i \not{\partial} u_L^i + i\bar{d}_L^i \not{\partial} d_L^i + i\bar{u}_R^i \not{\partial} u_R^i + i\bar{d}_R^i \not{\partial} d_R^i ; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}} = -v \left(\lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_u^i \bar{u}_L^i u_R^i + \lambda_d^i \bar{d}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_W^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu ; \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} (G_{\mu\nu}^a)^2 - \frac{1}{2} W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} - \frac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_{WZA} , \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} G_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_3 f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ W_{\mu\nu}^\pm &= \partial_\mu W_\nu^\pm - \partial_\nu W_\mu^\pm \\ Z_{\mu\nu} &= \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu \\ F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu , \end{aligned} \quad (5)$$

and

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WZA} &= ig_2 \cos \theta_W \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu Z^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} Z^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu} Z^\nu \right] \\ &+ ie \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu A^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu} A^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu} A^\nu \right] \\ &+ g_2^2 \cos^2 \theta_W \left(W_\mu^+ W_\nu^- Z^\mu Z^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu \right) \\ &+ g_2^2 \left(W_\mu^+ W_\nu^- A^\mu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu \right) \\ &+ g_2 e \cos \theta_W \left[W_\mu^+ W_\nu^- (Z^\mu A^\nu + Z^\nu A^\mu) - 2W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu \right] \\ &+ \frac{1}{2} g_2^2 \left(W_\mu^+ W_\nu^- \right) \left(W^{+\mu} W^{-\nu} - W^{+\nu} W^{-\mu} \right) ; \end{aligned} \quad (6)$$

and

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} = -g_3 A_\mu^a J_{(3)}^{\mu a} - g_2 \left(W_\mu^+ J_{W^+}^\mu + W_\mu^- J_{W^-}^\mu + Z_\mu J_Z^\mu \right) - e A_\mu J_A^\mu , \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} J_{(3)}^{\mu a} &= \bar{u}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a u^i + \bar{d}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a d^i \\ J_{W^+}^\mu &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\bar{\nu}_L^i \gamma^\mu e_L^i + V^{ij} \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j \right) \\ J_{W^-}^\mu &= (J_{W^+}^\mu)^* \\ J_Z^\mu &= \frac{1}{\cos \theta_W} \left[\frac{1}{2} \bar{\nu}_L^i \gamma^\mu \nu_L^i + \left(-\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W \right) \bar{e}_L^i \gamma^\mu e_L^i + (\sin^2 \theta_W) \bar{e}_R^i \gamma^\mu e_R^i \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_L^i \gamma^\mu u_L^i + \left(-\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_R^i \gamma^\mu u_R^i \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_L^i \gamma^\mu d_L^i + \left(\frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_R^i \gamma^\mu d_R^i \right] \\ J_A^\mu &= (-1) \bar{e}^i \gamma^\mu e^i + \left(\frac{2}{3} \right) \bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left(-\frac{1}{3} \right) \bar{d}^i \gamma^\mu d^i . \end{aligned} \quad (8)$$

Lagrangien du Modèle Standard

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI

Matière

12 constituants élémentaires

→ et leur anti-particules !

	I	II	III
Quarks	u	c	t
	d	s	b
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

Three Generations of Matter

→ masse



→ fermions (spin semi-entier)

→ on ne sait pas pourquoi il y a 3 générations !

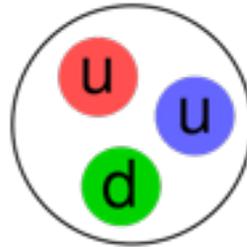
→ ils ont tous été observés expérimentalement

+ un boson de Higgs qui donne la masse aux particules

LE MODÈLE STANDARD AUJOURD'HUI

Interactions fondamentales

Forte ↔ gluons



Intensité 1

MS

Electromagnétique ↔ photon



Intensité ~ 0.01 [10⁻²]

Faible ↔ bosons W[±] Z⁰



Intensité ~ 0.0000001 [10⁻⁷]

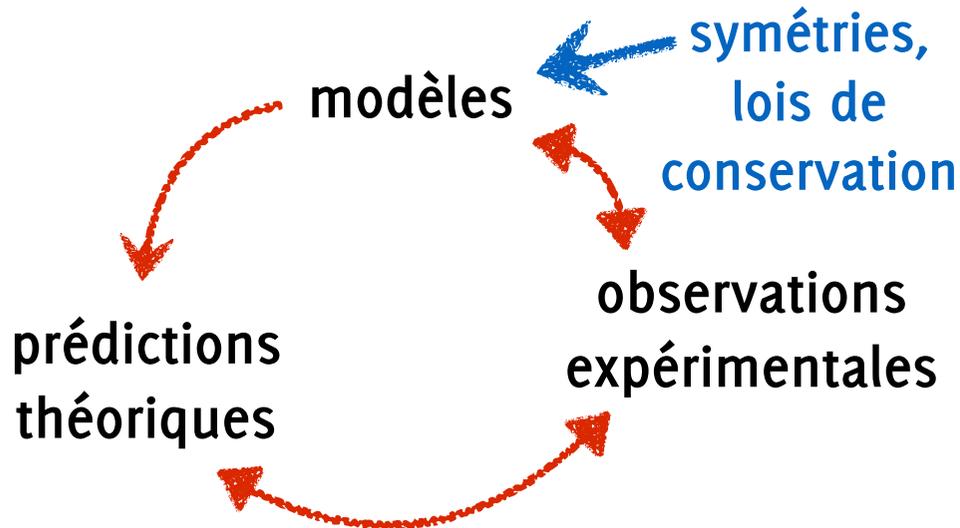
Gravitationnelle ↔ graviton?



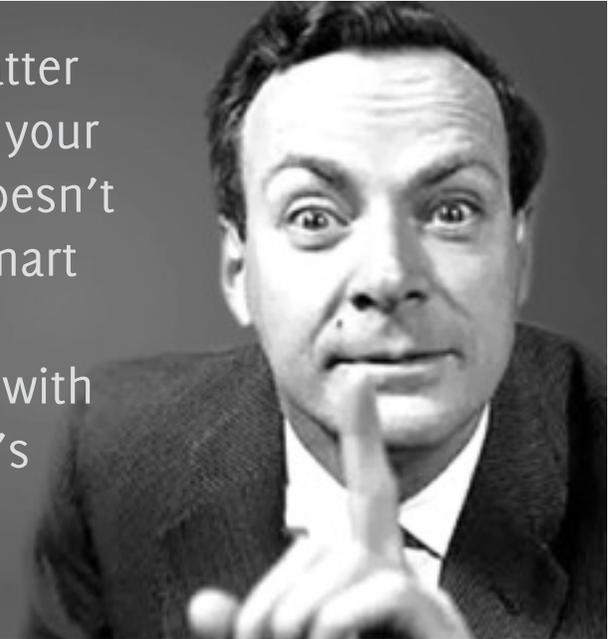
Intensité ~ beaucoup de zéros [10⁻⁴²]

COMMENT SAVOIR SANS VOIR?

Notre démarche

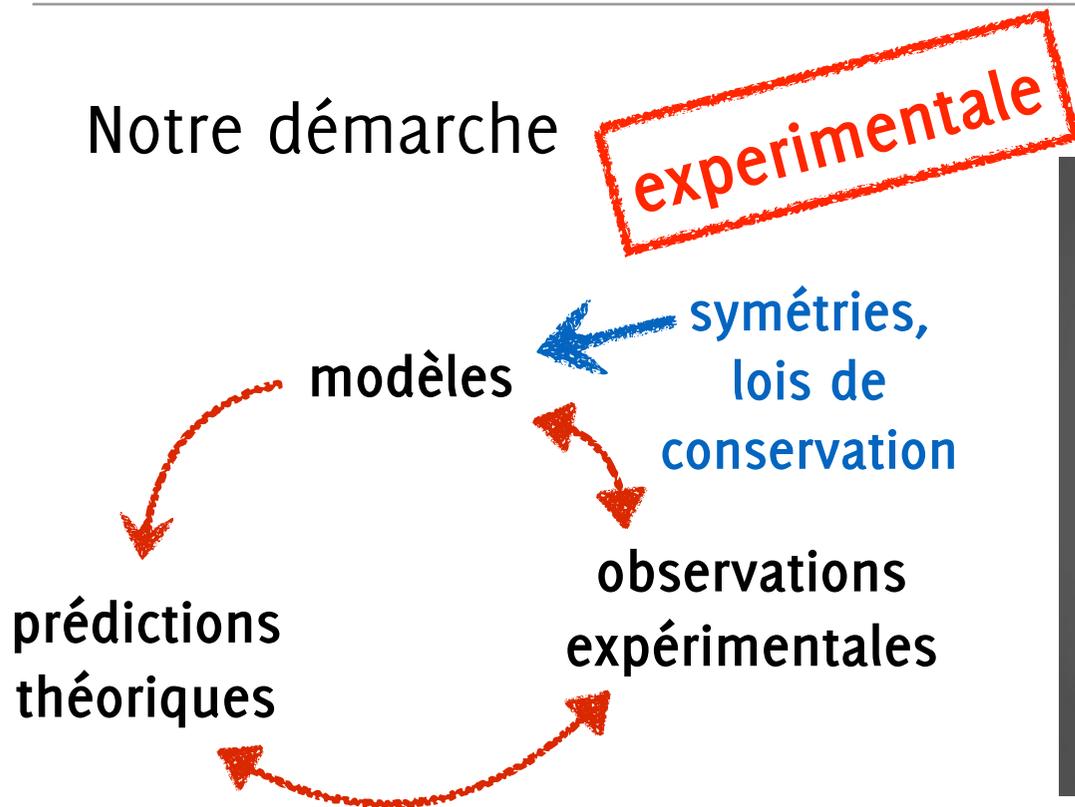


“It doesn’t matter how beautiful your theory is, it doesn’t matter how smart you are. If it doesn’t agree with experiment, it’s wrong.”
R. Feynman

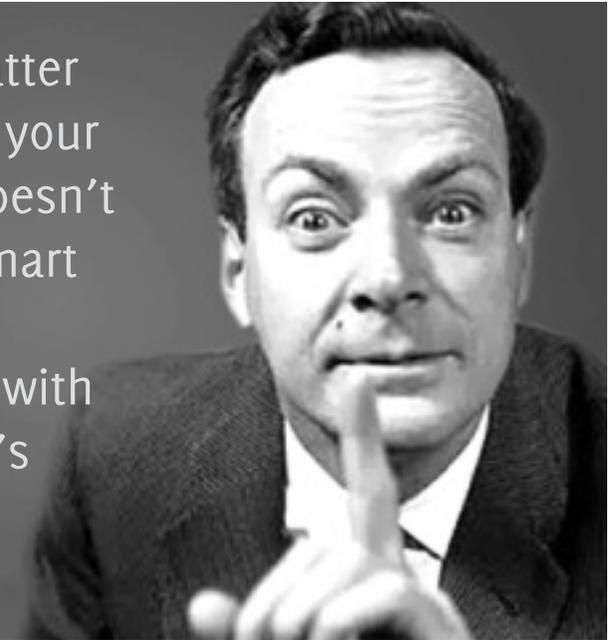


il ne faut pas perdre de vue que la physique est une science expérimentale !!

COMMENT SAVOIR SANS VOIR?



“It doesn’t matter how beautiful your theory is, it doesn’t matter how smart you are. If it doesn’t agree with experiment, it’s wrong.”
R. Feynman



il ne faut pas perdre de vue que la physique est une science expérimentale !!

L'ÉQUATION DE DIRAC ET L'ANTI-MATIÈRE



P.A.M. Dirac

En 1928 Dirac obtient une équation qui décrit de façon incroyablement fidèle les propriétés de l'électron (qu'il soit libre ou lié dans un atome)

L'ÉQUATION DE DIRAC ET L'ANTI-MATIÈRE



P.A.M. Dirac

En 1928 Dirac obtient une équation qui décrit de façon incroyablement fidèle les propriétés de l'électron (qu'il soit libre ou lié dans un atome)

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

L'ÉQUATION DE DIRAC ET L'ANTI-MATIÈRE



P.A.M. Dirac

En 1928 Dirac obtient une équation qui décrit de façon incroyablement fidèle les propriétés de l'électron (qu'il soit libre ou lié dans un atome)

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

L'équation de Dirac est la **seule équation** pour la fonction d'onde de l'électron à intégrer toutes les demandes de la mécanique quantique et relativiste → en fait ca décrit tout fermion !

lepton, quark

L'ÉQUATION DE DIRAC ET L'ANTI-MATIÈRE



P.A.M. Dirac

En 1928 Dirac obtient une équation qui décrit de façon incroyablement fidèle les propriétés de l'électron (qu'il soit libre ou lié dans un atome)

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

L'équation de Dirac est la **seule équation** pour la fonction d'onde de l'électron à intégrer toutes les demandes de la mécanique quantique et relativiste → en fait ca décrit tout fermion !

lepton, quark

Cependant l'équation de Dirac possède aussi des solutions à "énergie" négative → qu'est-ce que ca veut dire??

L'ÉQUATION DE DIRAC ET L'ANTI-MATIÈRE



P.A.M. Dirac

En 1928 Dirac obtient une équation qui décrit de façon incroyablement fidèle les propriétés de l'électron (qu'il soit libre ou lié dans un atome)

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

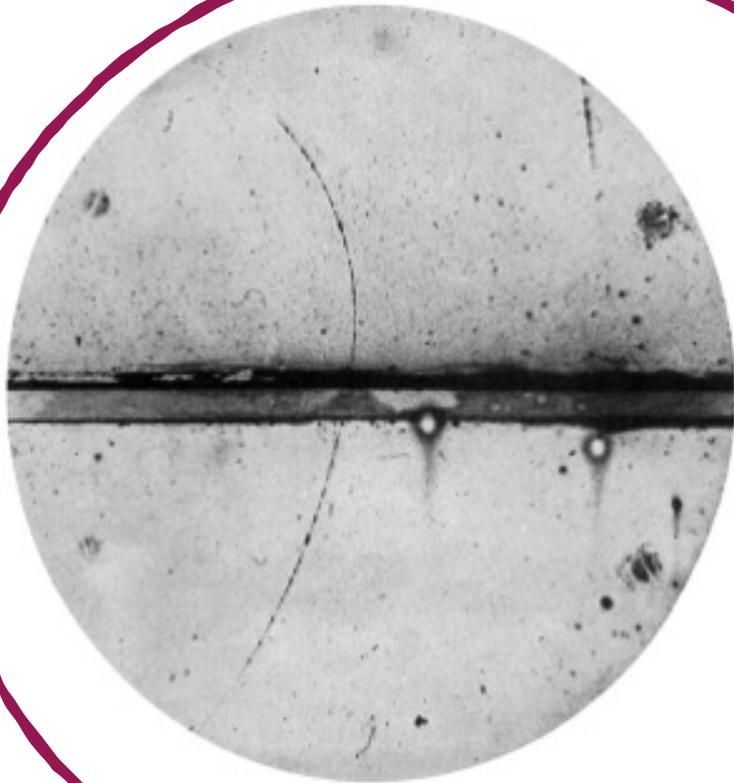
L'équation de Dirac est la **seule équation** pour la fonction d'onde de l'électron à intégrer toutes les demandes de la mécanique quantique et relativiste → en fait ca décrit tout fermion !

lepton, quark

Cependant l'équation de Dirac possède aussi des solutions à "énergie" négative → qu'est-ce que ca veut dire??

particules identiques à l'électron mais de charge opposée
→ en 1931 Dirac théorise l'existence du positron

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)

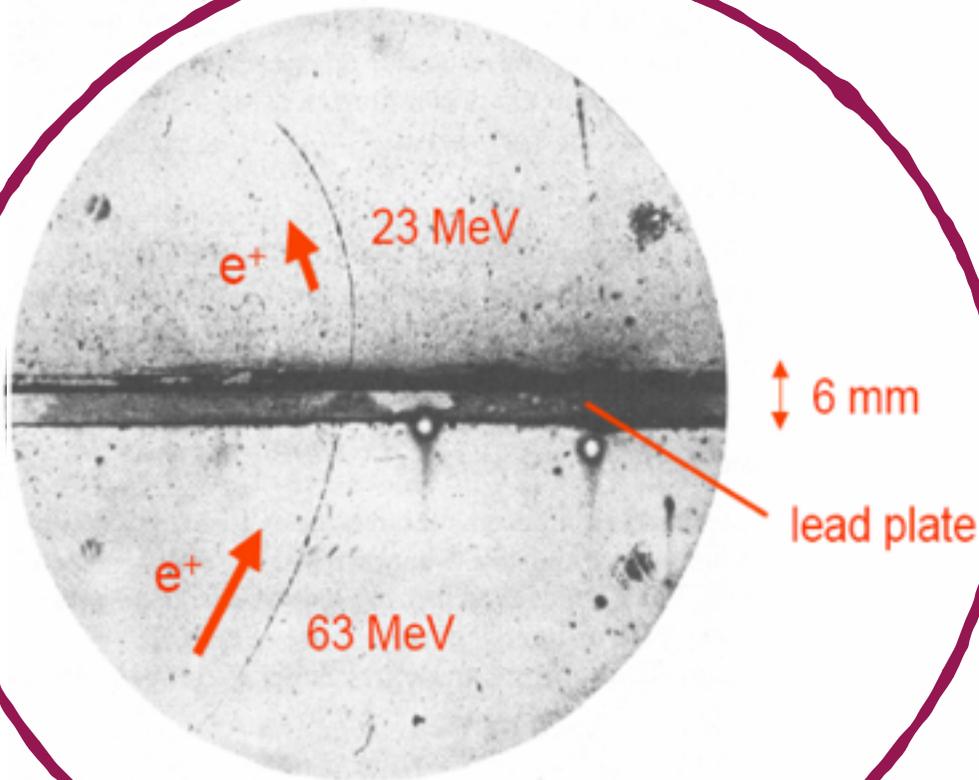


Anderson, Millikan

Chambre à brouillard: vapeur d'eau ou alcool sursaturé → particule chargée laisse une trainée de condensation

- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)

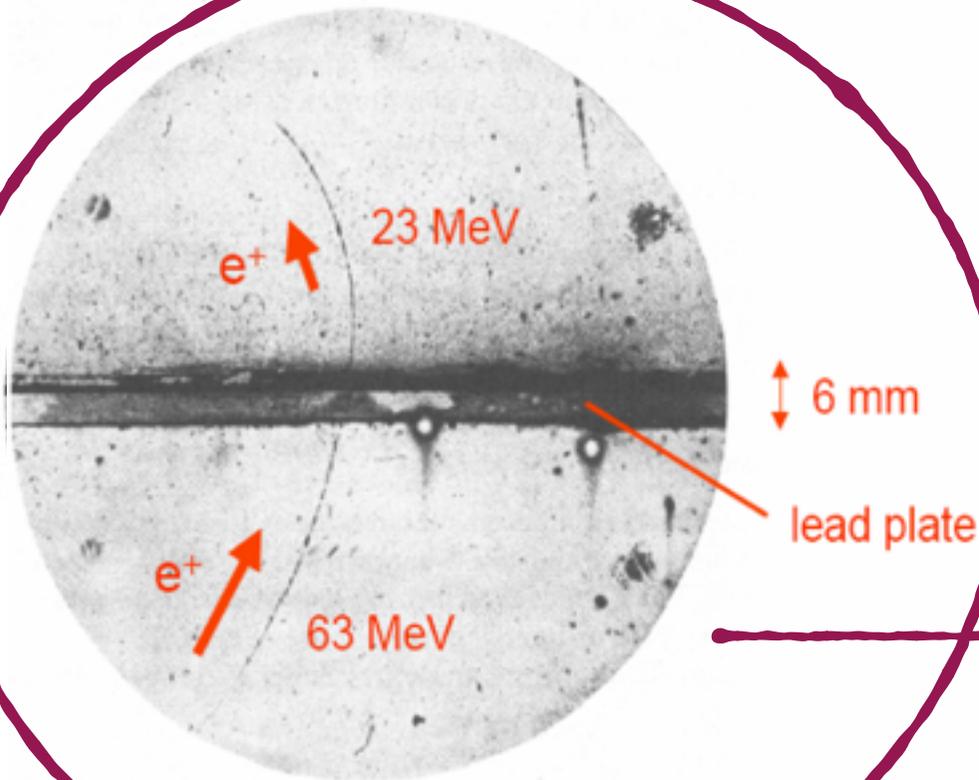


Anderson, Millikan

Chambre à brouillard: vapeur d'eau ou alcool sursaturé → particule chargée laisse une trainée de condensation

- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)

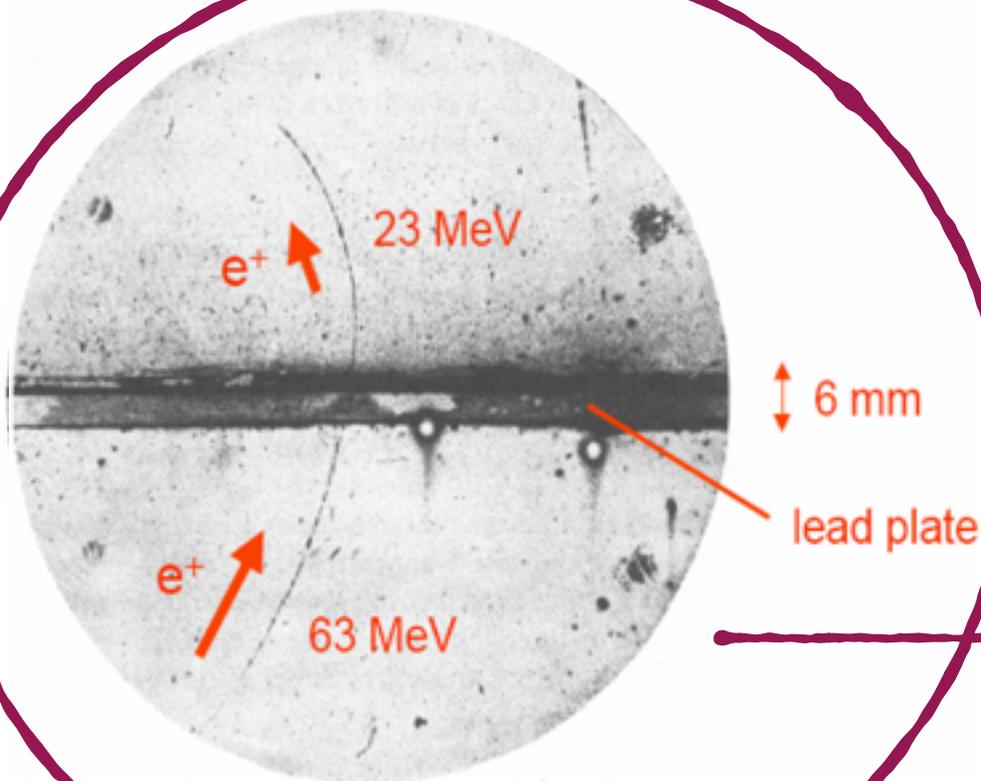


Anderson, Millikan

Chambre à brouillard: vapeur d'eau ou alcool sursaturé → particule chargée laisse une trainée de condensation

- ★ Source → rayons cosmiques
 - ★ Détecteur → chambre à brouillard
 - ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule
- particule de charge +
 - plus légère qu'un proton

LA DÉCOUVERTE DU POSITRON (1932)



Anderson, Millikan

Chambre à brouillard: vapeur d'eau ou alcool sursaturé → particule chargée laisse une trainée de condensation

- ★ Source → rayons cosmiques
- ★ Détecteur → chambre à brouillard
- ★ Champs magnétique → mesure de l'impulsion (et charge!) de la particule

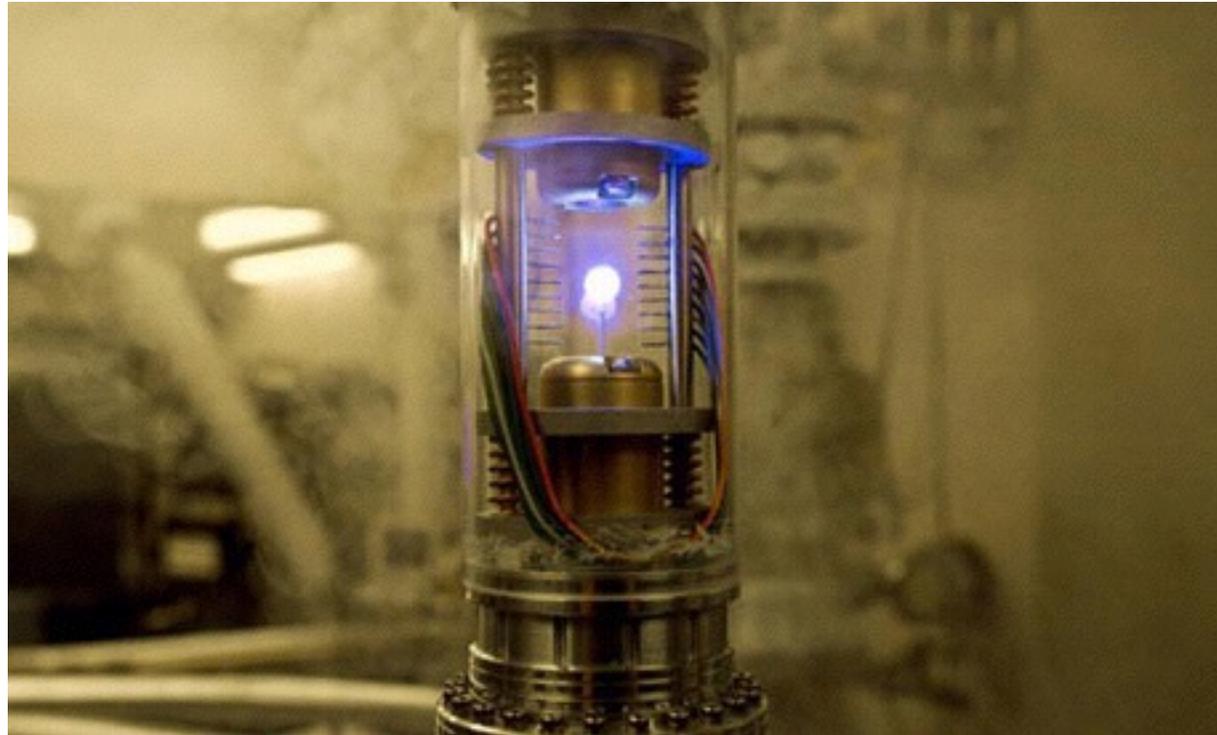
- particule de charge +
- plus légère qu'un proton



c'est le positron !
l'équation de Dirac marche !
→ QED

L'ANTI-MATIÈRE EXISTE !

on en produit quotidiennement au CERN...



[Ange et Démons, 2009]

**...mais pas autant qu'au cinéma
(en 40 ans on en a produit 10^{-8} g)**

L'ANTI-MATIÈRE EXISTE !

SINCE 1932

on en produit quotidiennement au CERN...



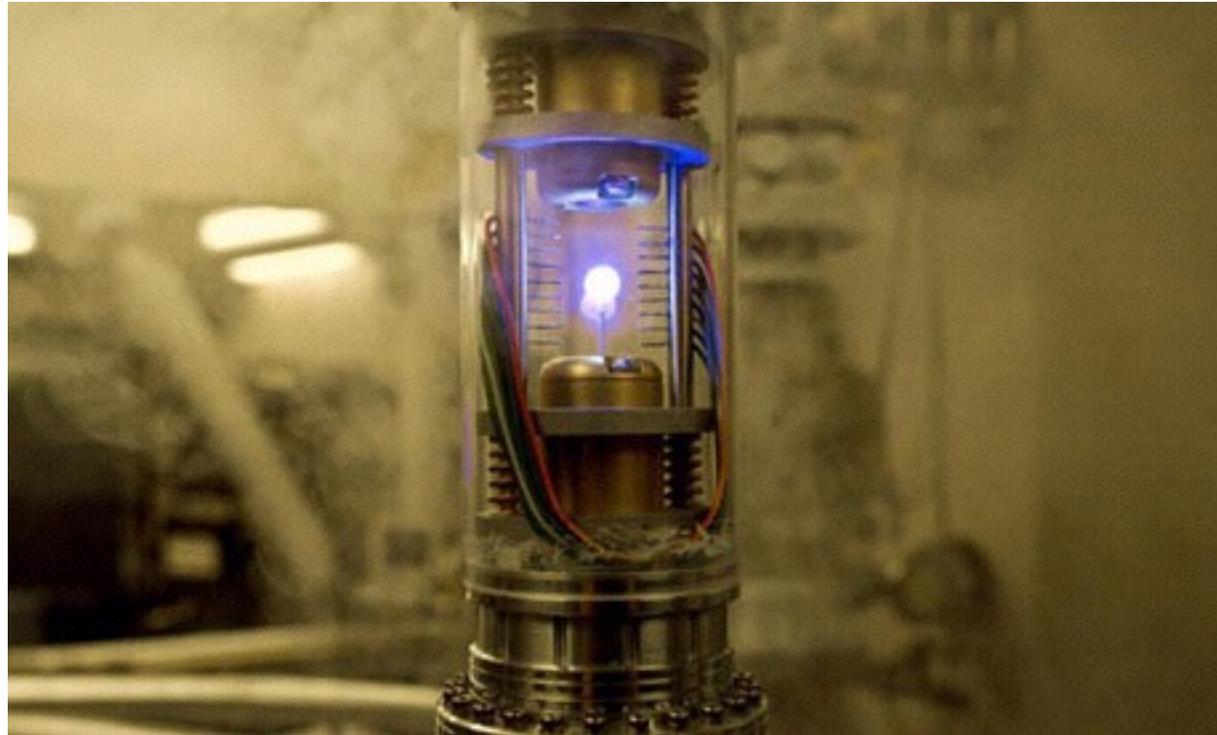
[Anges et Démons, 2009]

...mais pas autant qu'au cinéma
(en 40 ans on en a produit 10^{-8} g)

L'ANTI-MATIÈRE EXISTE !

SINCE 1932

on en produit quotidiennement au CERN...



[Ange et Démons, 2009]

...mais pas autant qu'au cinéma
(en 40 ans on en a produit 10^{-8} g)

très très très
approximatif

PARENTHÈSE SUR LE SYSTÈME D'UNITÉS NATURELLES

Les unités du SI (m, Kg, s) sont adaptées à notre échelle, pas aux particules relativistes → **très petites, très rapides !**

recette pour un nouveau système d'unités

- ★ Deux grandeurs fondamentales en physique des particules:
 - vitesse de la lumière dans le vide c
 - constante de Planck \hbar
- ★ On choisit une troisième quantité indépendante: l'électron-Volt (eV)
 - 1 eV = énergie cinétique d'un électron accéléré par un Volt
- ★ Si on veut revenir aux anciennes unités:

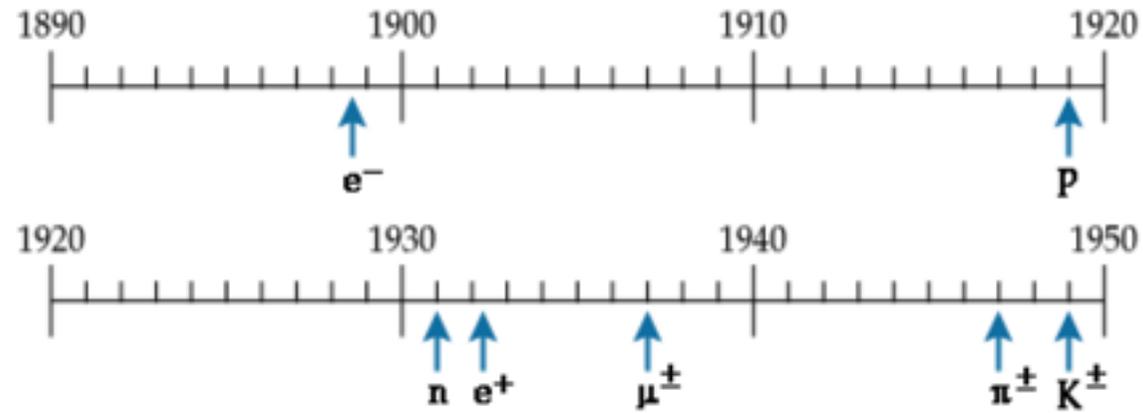
$$\hbar c = 197.3269631(49) \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\hbar = 6.58211899(16) \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

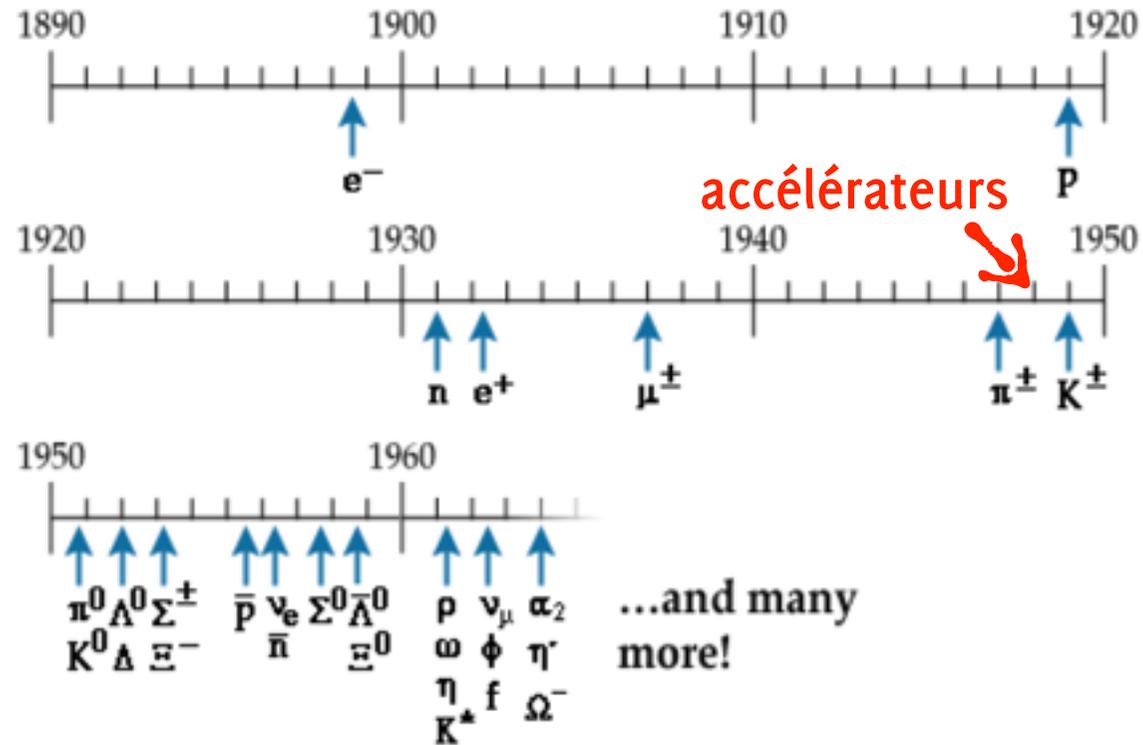
$$1/c^2 = 1.782661758(44) \times 10^{-36} \text{ kg/eV}$$

- ★ Petit rappel: $E = mc^2$, donc $E \sim \text{eV}$, $m \sim \text{eV} / c^2$
- ★ Souvent on impose $\hbar = c = 1$

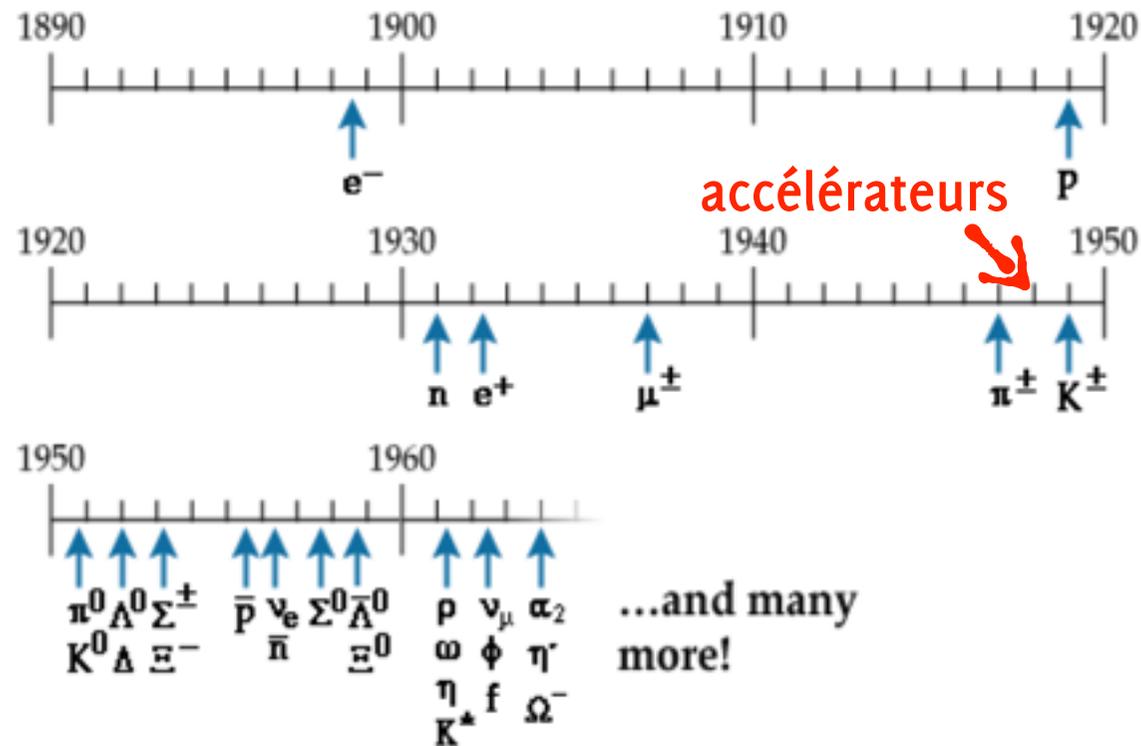
LE ZOO DE PARTICULES



LE ZOO DE PARTICULES

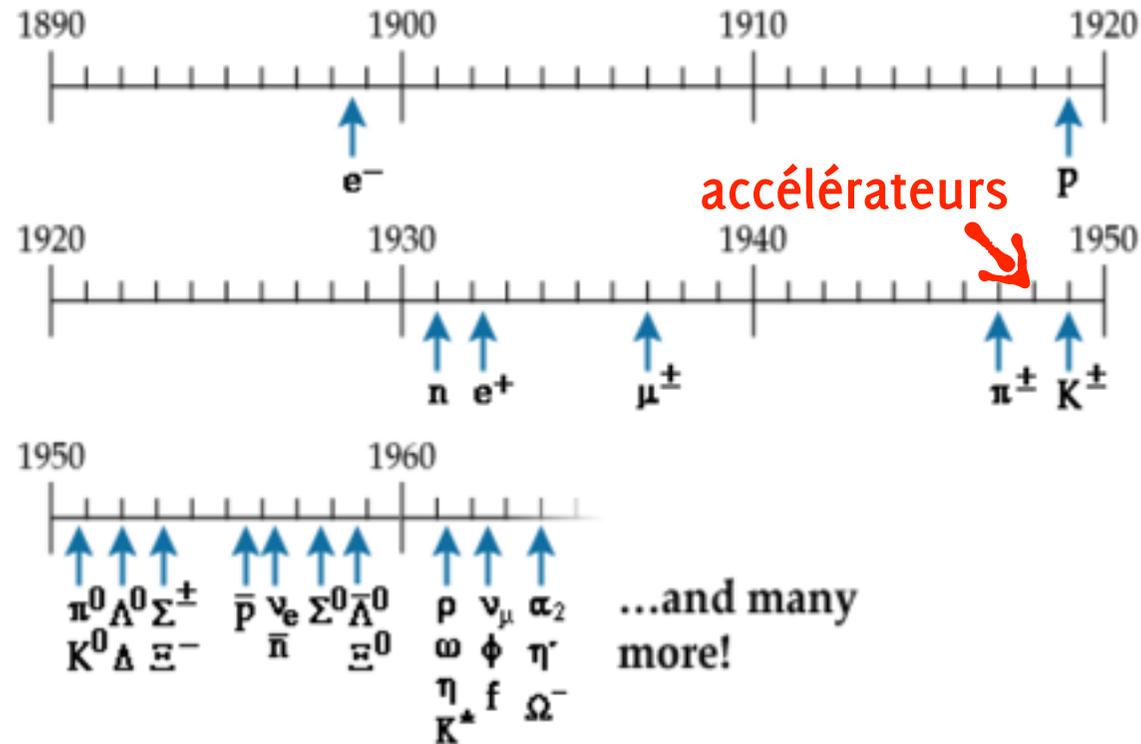


LE ZOO DE PARTICULES



→ nécessité de mettre de l'ordre en cherchant des "régularités"

LE ZOO DE PARTICULES



→ nécessité de mettre de l'ordre en cherchant des “régularités”

un peu comme pour la table des éléments de Mendeleev !

mais en les ordonnant par masse, charge, spin, durée de vie, ...

“THE EIGHTFOLD WAY”



M. Gell-Mann

Au début des années '60 Gell-Mann et Ne'eman ordonnent empiriquement ces particules selon leur caractéristiques... **masse, charge, spin, durée de vie, ...**

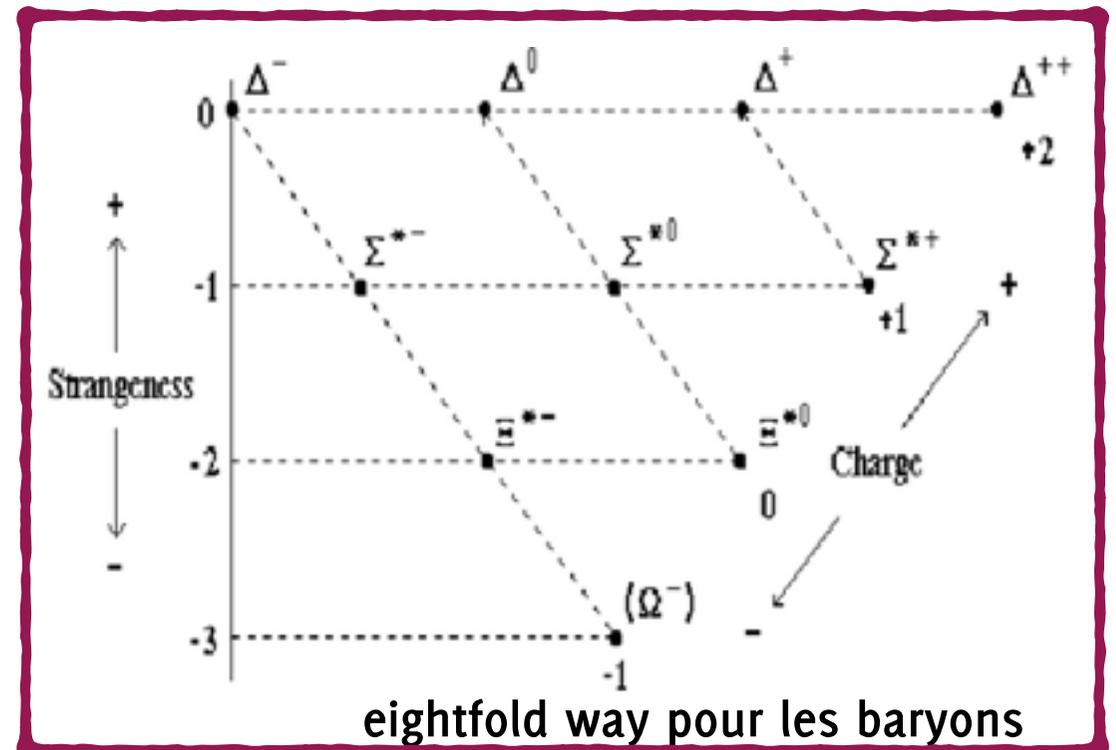
“THE EIGHTFOLD WAY”



M. Gell-Mann

Au début des années '60 Gell-Mann et Ne'eman ordonnent empiriquement ces particules selon leur caractéristiques... **masse, charge, spin, durée de vie, ...**

“la voie des octets” → découverte de l' Ω^-



“THE EIGHTFOLD WAY”



M. Gell-Mann

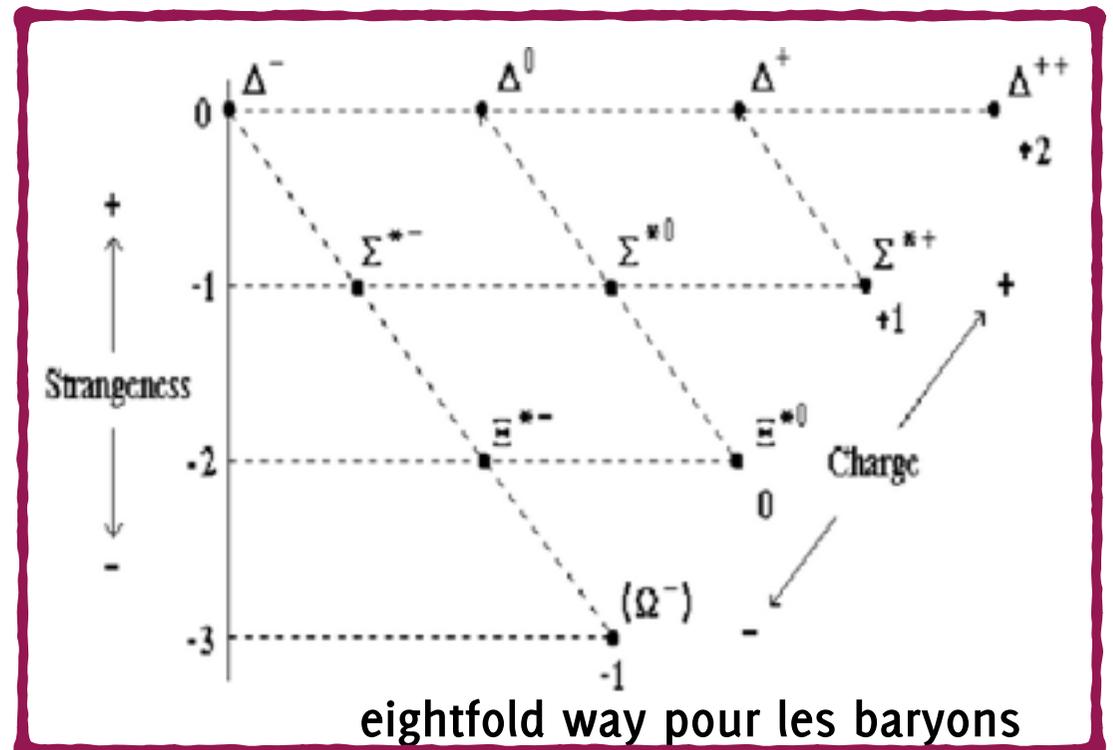
Au début des années '60 Gell-Mann et Ne'eman ordonnent empiriquement ces particules selon leur caractéristiques... **masse, charge, spin, durée de vie, ...**

“la voie des octets” → découverte de l' Ω^-

Classification **purement mathématique**

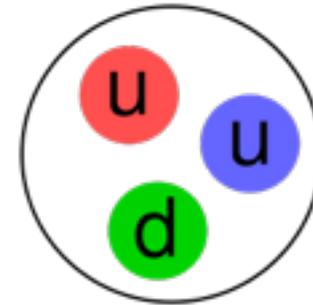
OU

Liée à la **structure des hadrons?**

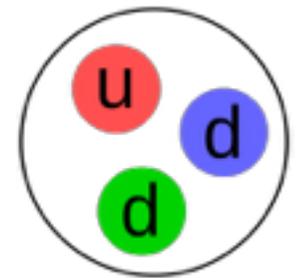


LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

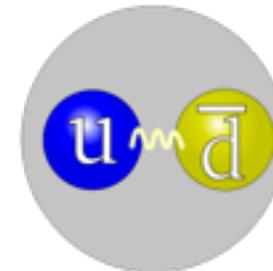
Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement 3+3 particules hypothétiques: les quarks **up, down, strange** et leurs anti-particules



proton



neutron

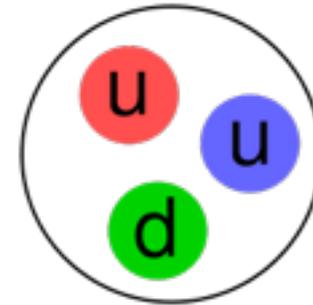


π^+

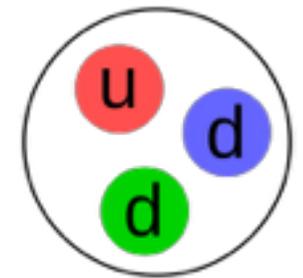
LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement 3+3 particules hypothétiques: les quarks **up, down, strange** et leurs anti-particules

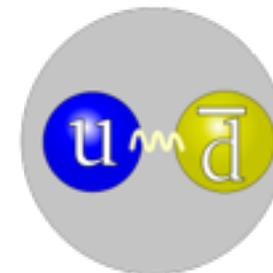
Première preuve expérimentale que le proton n'est pas une particule élémentaire → **1968 "deep inelastic scattering" à SLAC**



proton



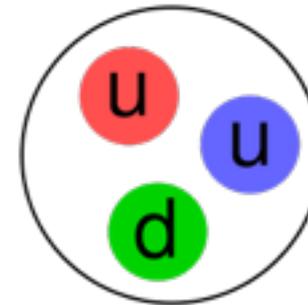
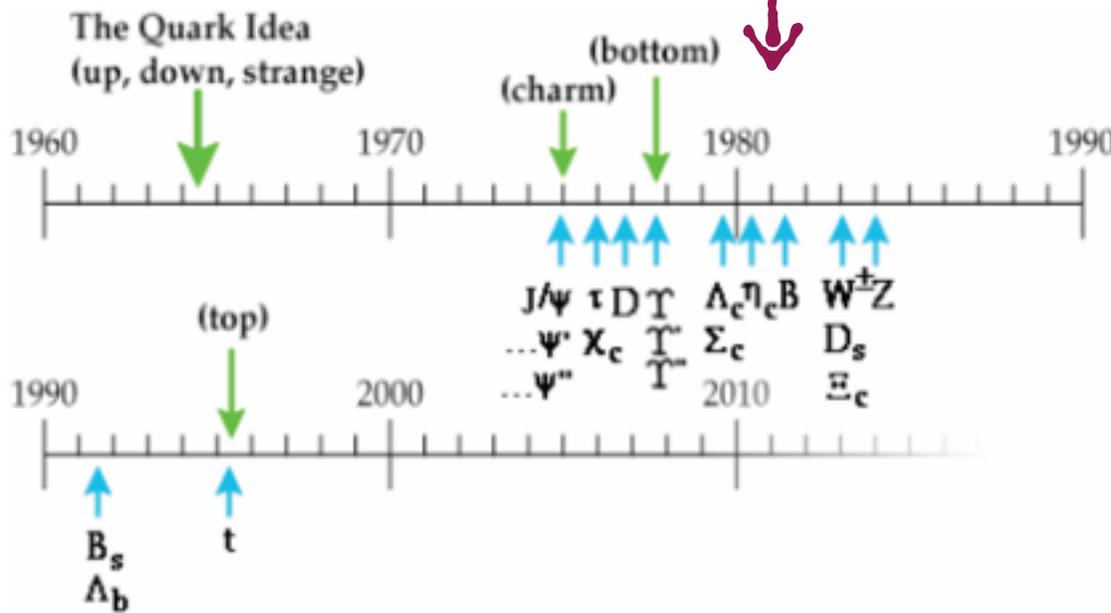
neutron



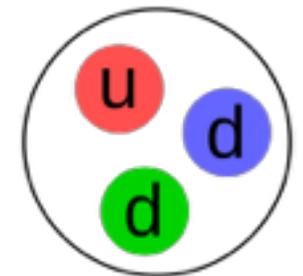
π^+

LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

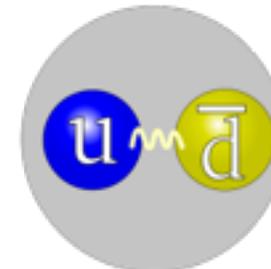
Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement 3+3 particules hypothétiques: les quarks **up, down, strange** et leurs anti-particules



proton



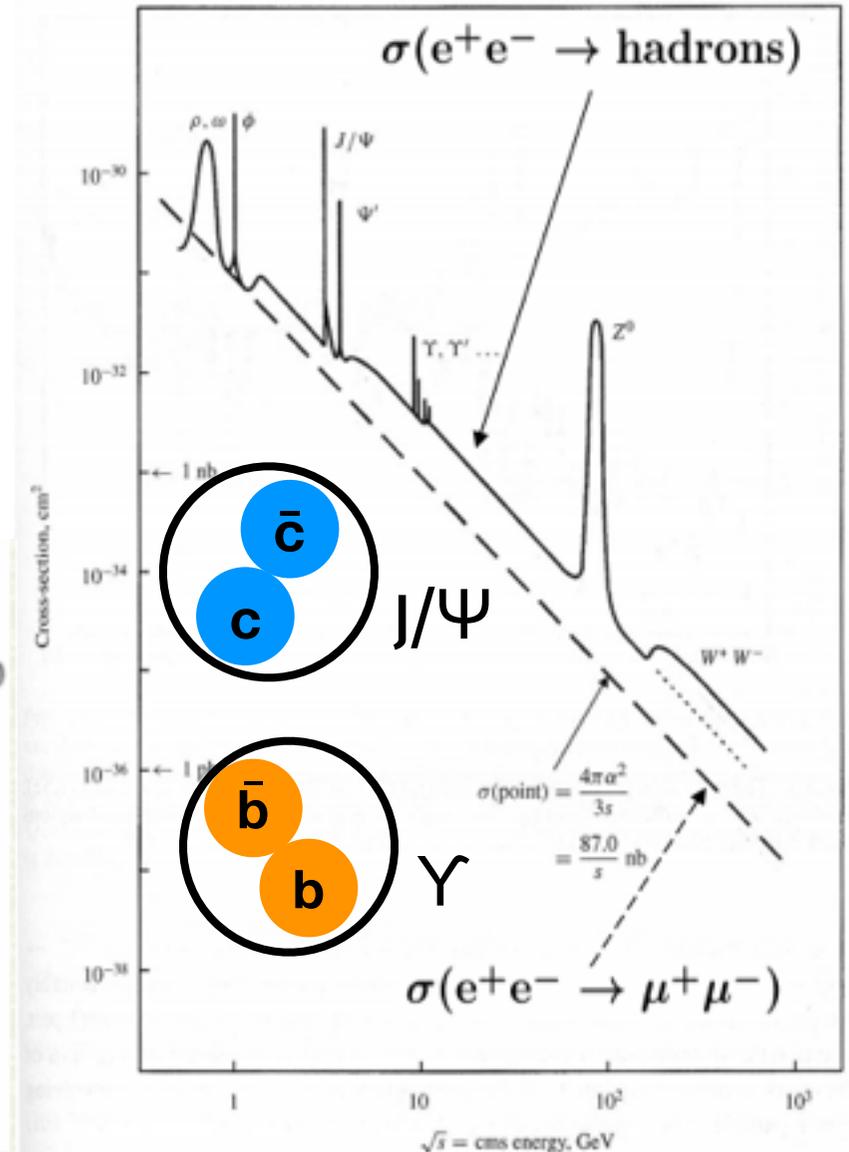
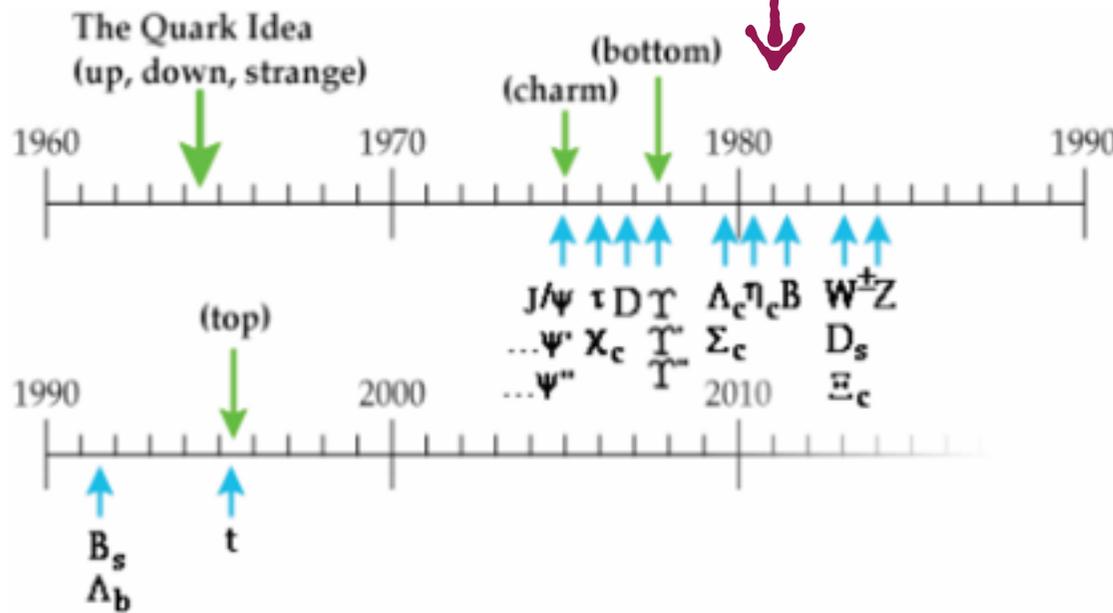
neutron



π^+

LA DÉCOUVERTE DES QUARKS

Gell-Mann et Zweig décrivent **toutes ces particules** avec seulement 3+3 particules hypothétiques: les quarks **up, down, strange** et leurs anti-particules



L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique théorie de Fermi de l'interaction faible

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique



théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (Schwinger)

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique



théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (**Schwinger**)

1961: théorie de jauge de l'interaction électro-faible (**Glashow**)

→ 3 bosons porteurs de l'interaction: γ , W, Z

→ problème: masses de W et Z mises 'à la main'

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (Schwinger)

1961: théorie de jauge de l'interaction électro-faible (Glashow)

- 3 bosons porteurs de l'interaction: γ , W, Z pas observés
- problème: masses de W et Z mises 'à la main' (à l'époque)

L'ÉPOPÉE DE L'UNIFICATION ÉLECTRO-FAIBLE

électro-dynamique quantique théorie de Fermi de l'interaction faible



1957: idée de l'unification électro-faible (Schwinger)

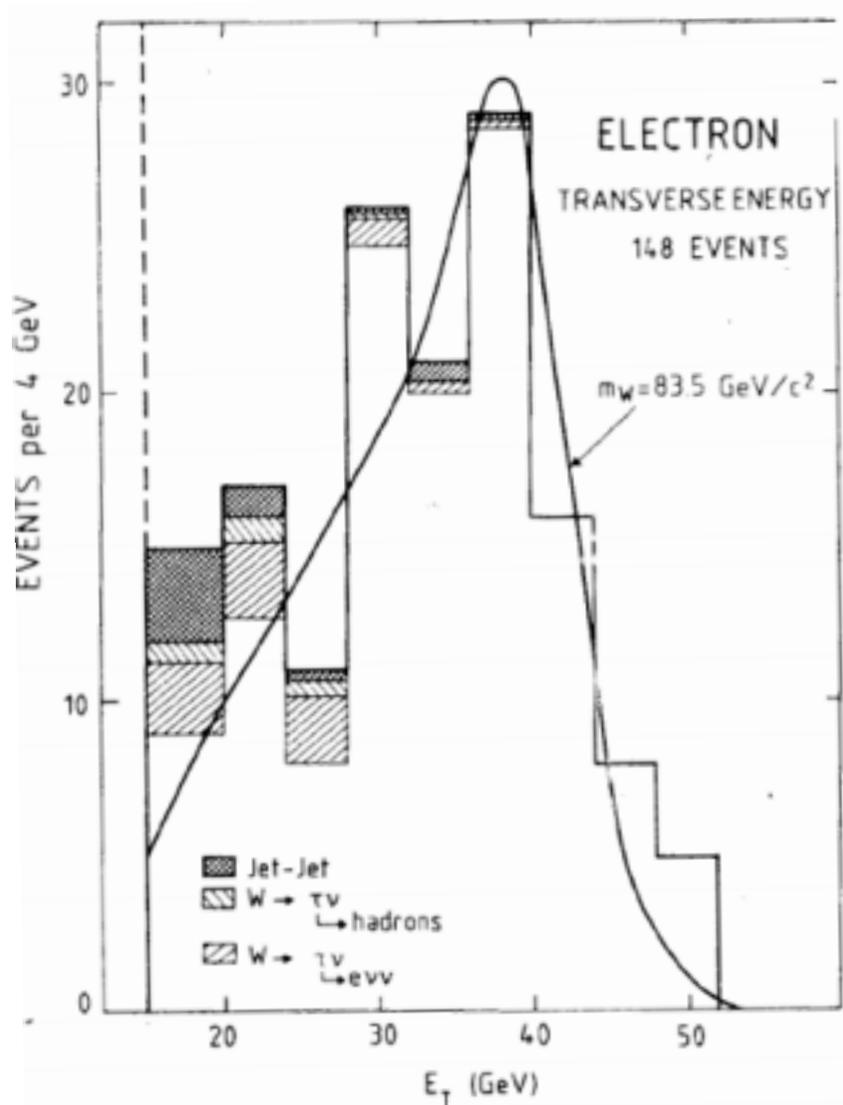
1961: théorie de jauge de l'interaction électro-faible (Glashow)

- 3 bosons porteurs de l'interaction: γ , W, Z pas observés
- problème: masses de W et Z mises 'à la main' (à l'époque)

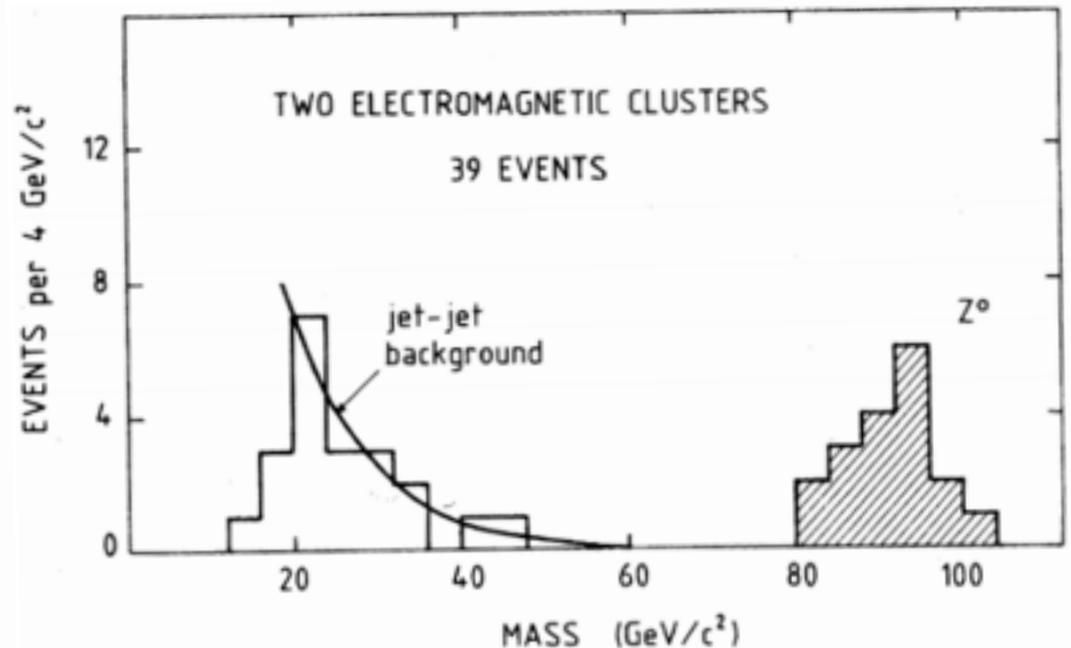
1967: introduction du champs de Higgs-Brout-Englert

- théorie mathématiquement 'solide'
- prediction d'une particule de plus (le boson de Higgs)

LA DÉCOUVERTE DU W ET DU Z



- ★ Expériences UA1 et UA2 au collisionneur $Sp\bar{p}S$ du CERN
- ★ 1983 observation du W, suivie rapidement par l'observation du Z



LE PROBLÈME DE LA MASSE DES PARTICULES

Les symétries constitutives du Modèle Standard ne prévoient pas de masse pour les bosons et fermions

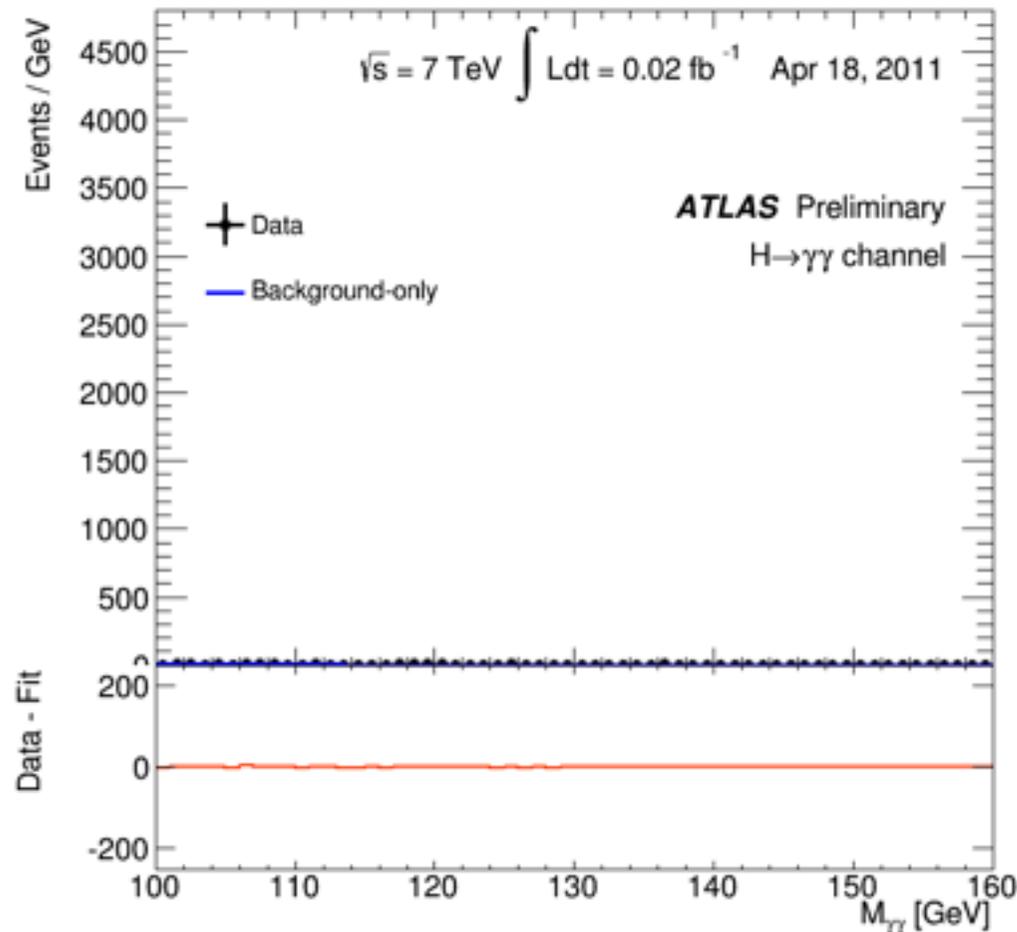
pourtant...



Il faut un mécanisme qui génère dynamiquement la masse de toutes les particules tout en conservant l'invariance de jauge

le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

LA DÉCOUVERTE DU BOSON DE HIGGS

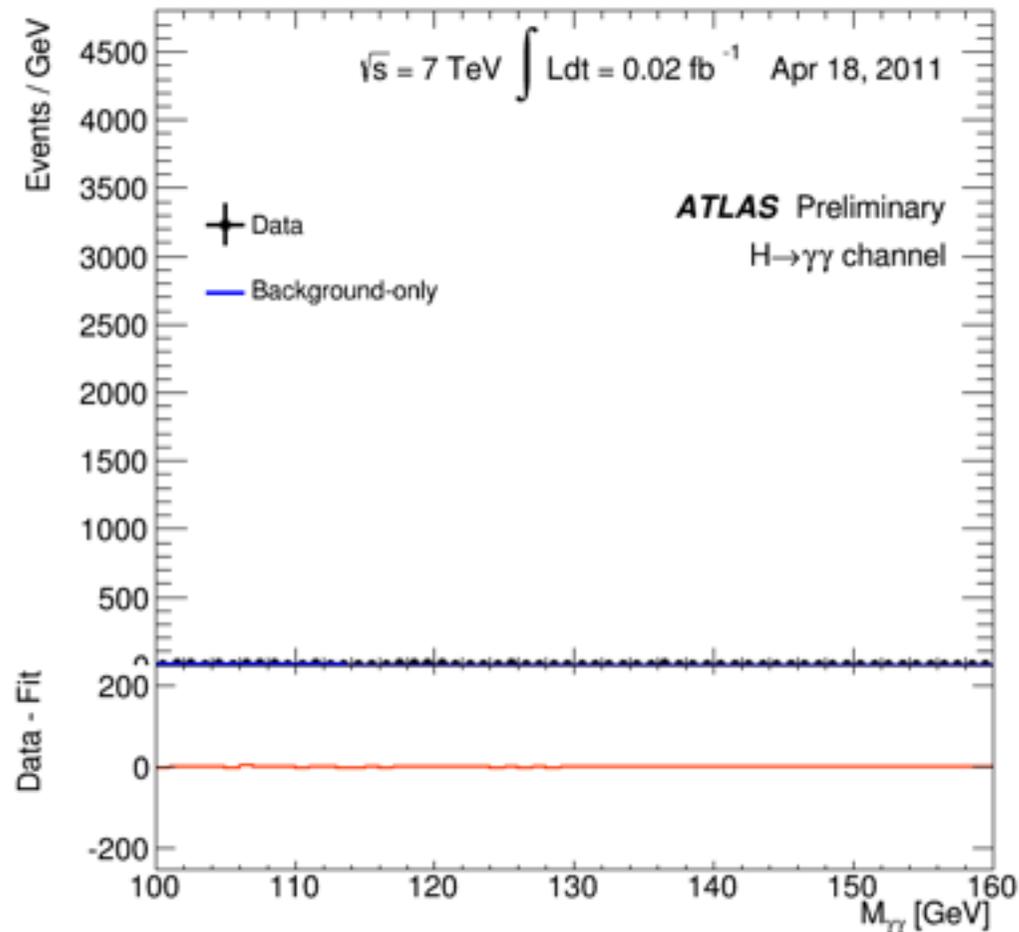


prédiction dans les
 années 60 par Brout,
 Englert et Higgs



découverte au LHC, par
 les expériences ATLAS et
 CMS, en 2012

LA DÉCOUVERTE DU BOSON DE HIGGS



prédiction dans les
 années 60 par Brout,
 Englert et Higgs



découverte au LHC, par
 les expériences ATLAS et
 CMS, en 2012

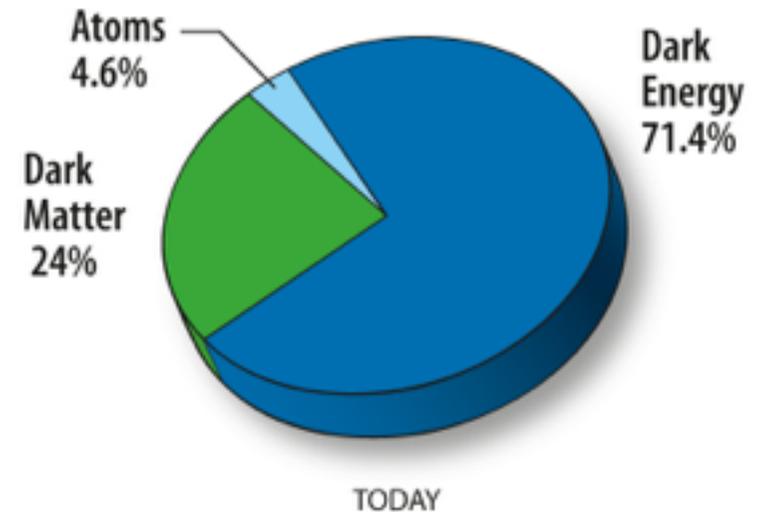
PERSPECTIVES

Résultats expérimentaux en très bon accord avec la théorie !

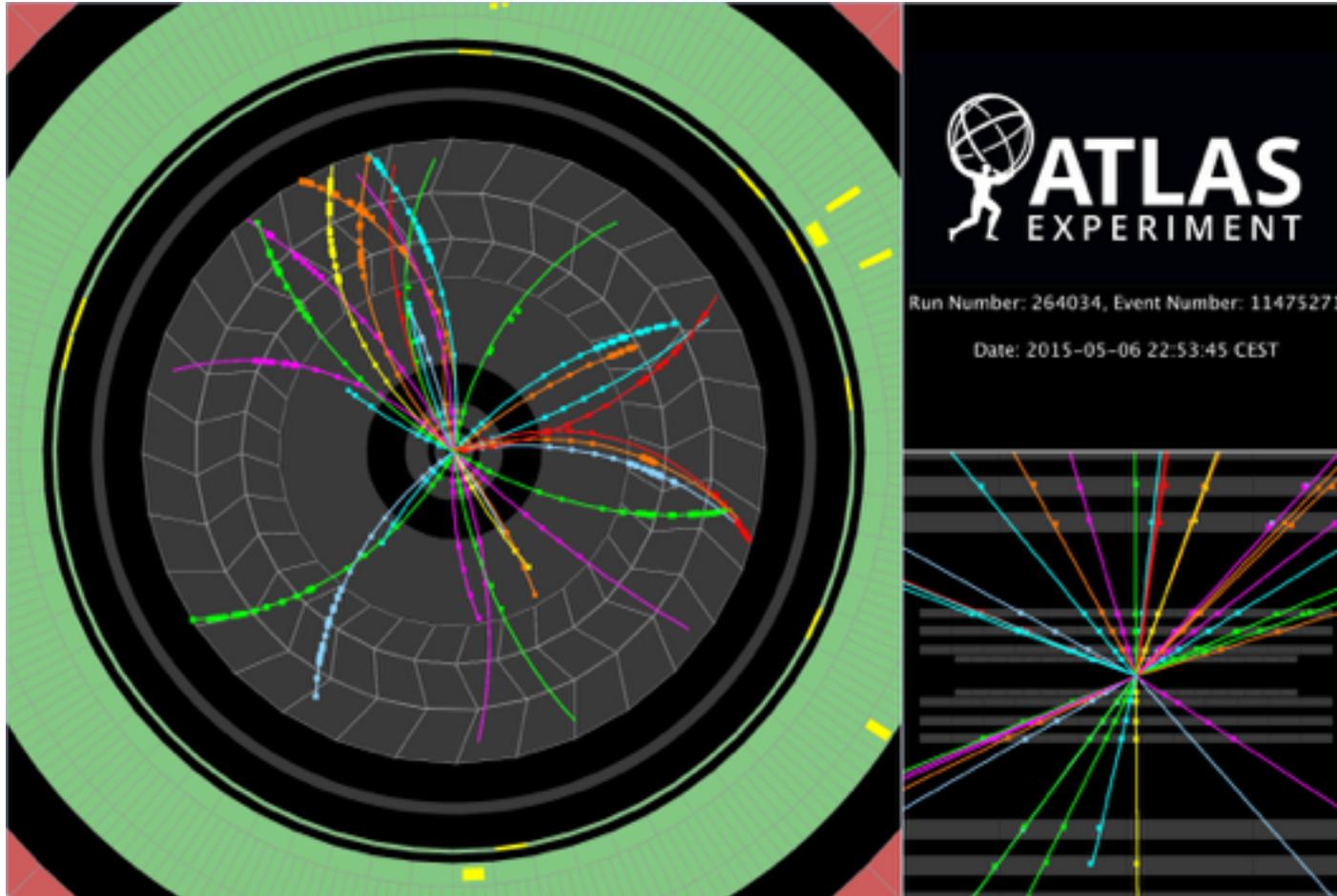
- La nouvelle particule est un boson de Higgs 'standard' ?
- Si oui, y a-t-il une réponse aux 'problèmes' théoriques du Modèle Standard (fine tuning, naturalness...)
→ Nouvelle physique?

Supersymétrie?

- Qu'est-ce que la matière noire? (sans parler de l'énergie noire..)
- Asymétrie matière-antimatière dans l'Univers?
- Grand Unification Theory ?
- ???



PERSPECTIVES



Une nouvelle phase de prise de données à plus haute énergie, plus haute luminosité (= échantillon plus grand) a commencé !!