



POURQUOI LE MODÈLE STANDARD EST-IL STANDARD ?

Nathalie Besson

Chercheuse en physique des particules

Le but du jeu

Comprendre le contenu et la dynamique de l'Univers au niveau fondamental.
Comme le disent trois géants :

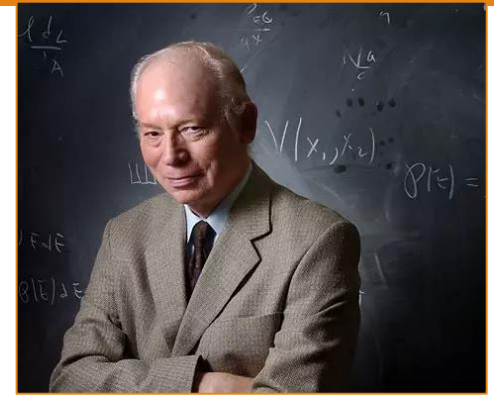
Notre travail est de voir les choses simplement, de comprendre un grand nombre de phénomènes compliqués d'une manière unifiée, en termes de quelques principes simples.

S. Weinberg

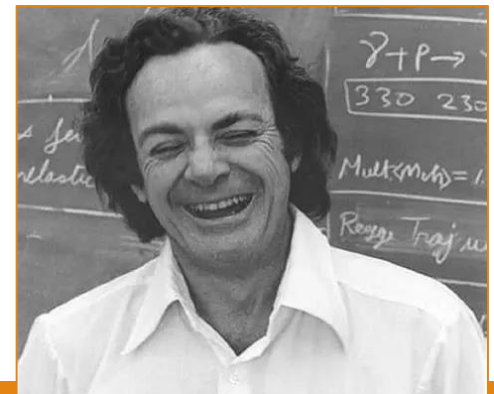
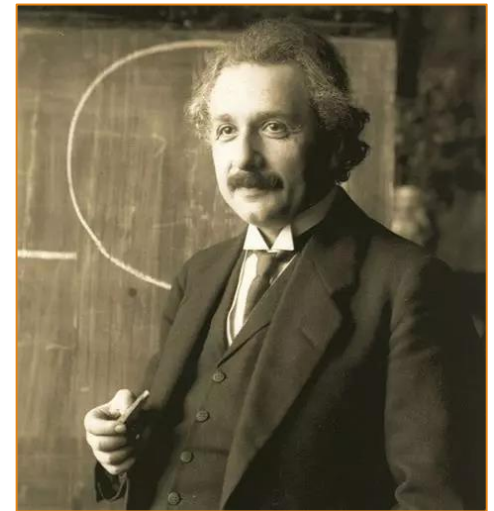
Tout doit être rendu aussi simple que possible, mais pas plus simple.

A. Einstein

*Peu importe la beauté de votre théorie, peu importe votre intelligence.
Si votre théorie n'est pas en accord avec l'expérience, elle est fausse.*
R. Feynman



<https://cns.utexas.edu/news/podcast/remembering-steven-weinberg>



California Institute of Technology, 1994

La méthode scientifique !

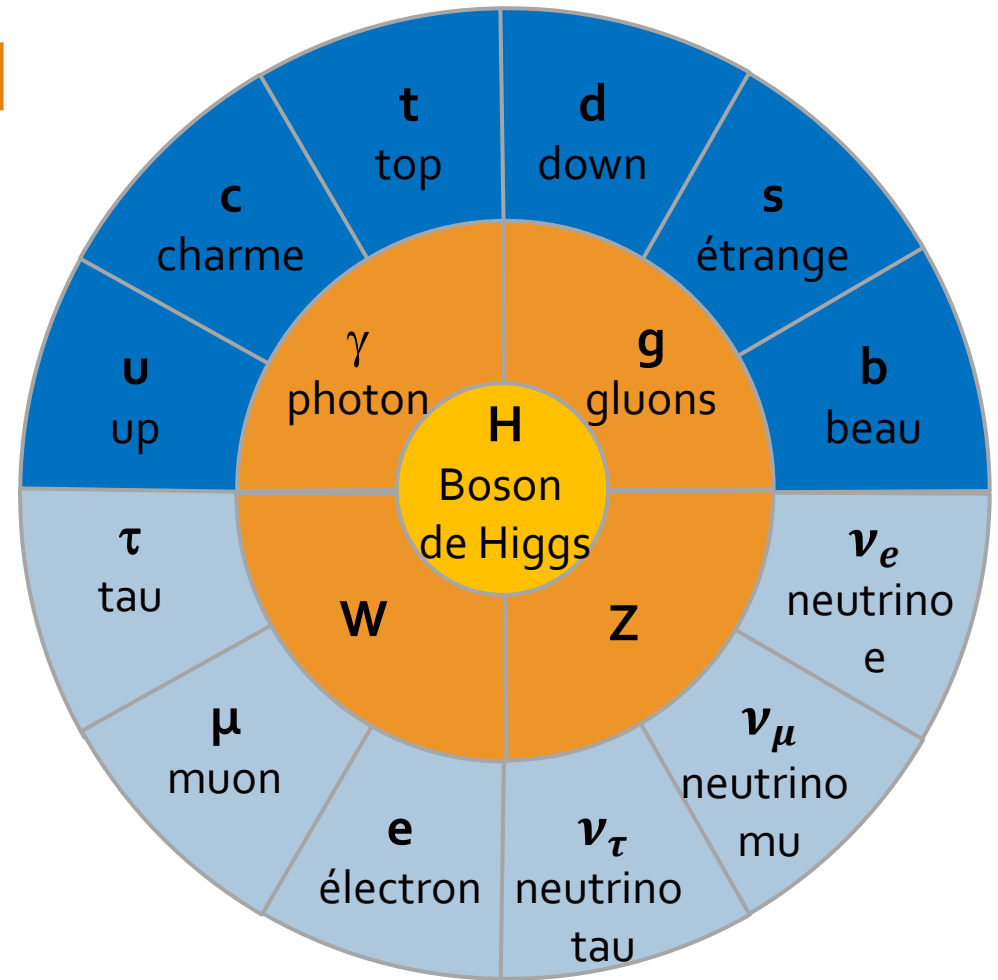


Plus de 100 ans d'aller-retour entre développements théoriques,
expérimentaux et technologiques pour arriver au

MODÈLE STANDARD

Le modèle standard

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} &= -\frac{1}{4} W_{\mu\nu} \cdot W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} \cdot B^{\mu\nu} \\
 &+ \bar{L} \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g \frac{1}{2} \tau \cdot W_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) L \\
 &+ \bar{R} \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) R \\
 &+ \left| \left(i\partial_\mu - g \frac{1}{2} \tau \cdot W_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \phi \right|^2 \\
 &- V(\phi) - (G_1 \bar{L} \phi R + G_2 \bar{L} \phi_c R + h.c.) \\
 &- g(\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^a - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}
 \end{aligned}$$

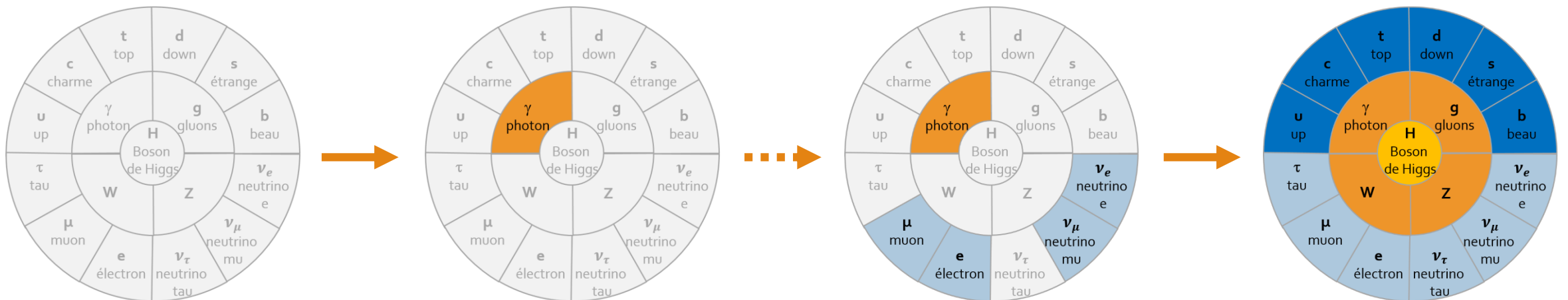


Les **particules de matière** (fermions)

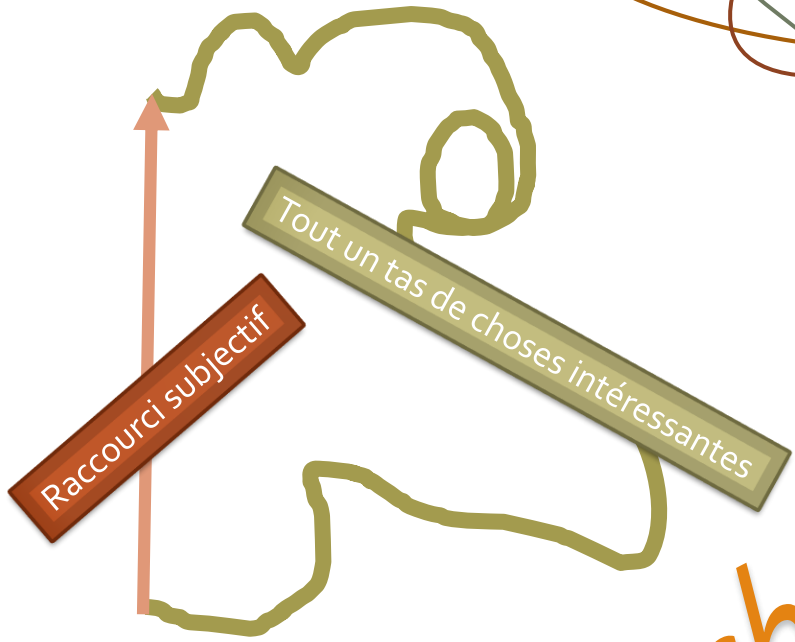
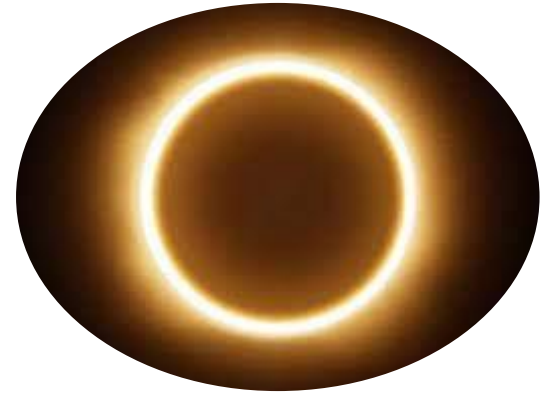
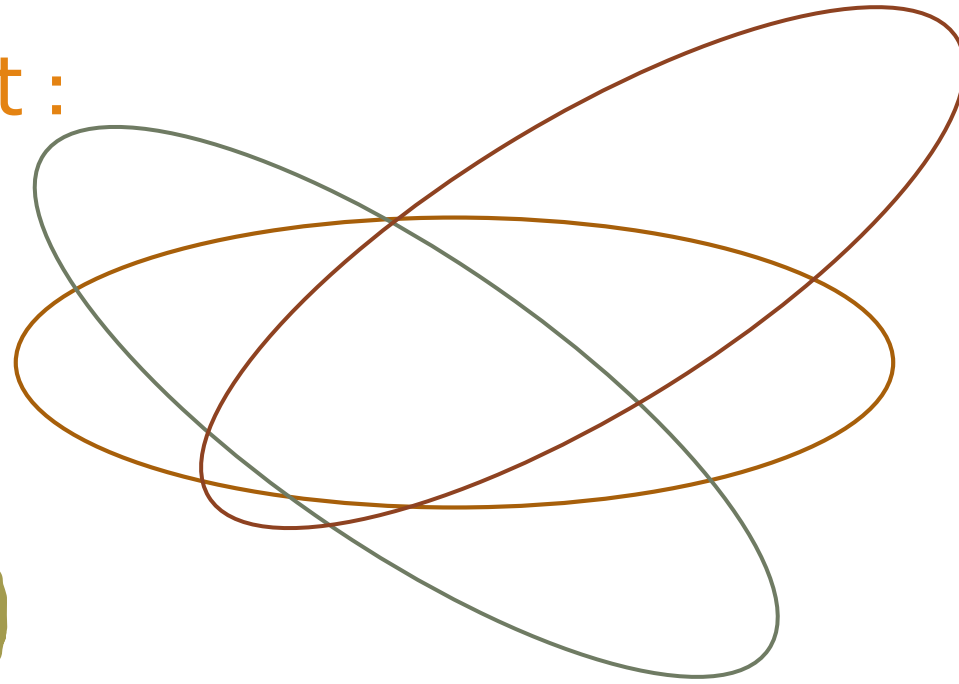
Les **interactions** (bosons vecteurs) : les particules interagissent en échangeant un messenger caractéristique de l'interaction

Pour se faire une idée de comment on a su tout ça et comment le modèle est devenu standard :

petite histoire de la découverte des particules élémentaires du modèle



Avertissement :



chrologiemo



Lumière !



J. C. Maxwell

A dynamical theory of electromagnetic field, 1865

L'accord des résultats semble montrer que lumière et magnétisme sont des formes de la même substance, et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois électromagnétiques.

Lumière !



J. C. Maxwell

A dynamical theory of electromagnetic field, **1865**

L'accord des résultats semble montrer que lumière et magnétisme sont des formes de la même substance, et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois électromagnétiques.



M. Planck

On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum, **1900**

Nous considérons cependant - c'est le point le plus essentiel de tout le calcul - que E est composé d'un nombre très défini de parties égales et nous utilisons pour cela la constante de la nature $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg - sec.

Lumière !



J. C. Maxwell

A dynamical theory of electromagnetic field, 1865

L'accord des résultats semble montrer que lumière et magnétisme sont des formes de la même substance, et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois électromagnétiques.



M. Planck

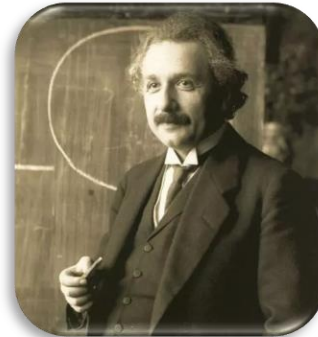
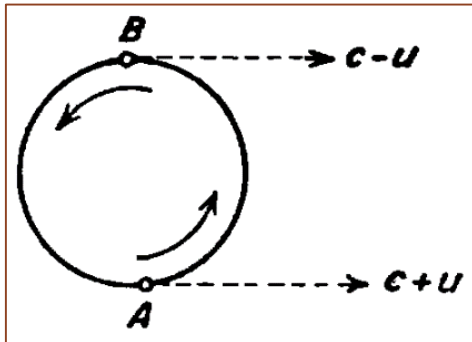
On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum, 1900

Nous considérons cependant - c'est le point le plus essentiel de tout le calcul - que E est composé d'un nombre très défini de parties égales et nous utilisons pour cela la constante de la nature $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg - sec.

[...] nous introduirons un autre postulat [...] à savoir que la lumière se propage toujours dans le vide avec une vitesse définie c qui est indépendante de l'état de mouvement du corps émetteur.

A. Einstein

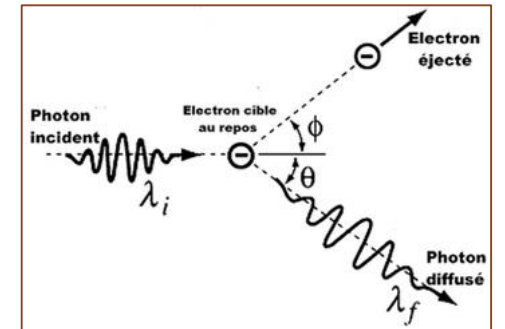
On the Electrodynamics of Moving Bodies, 1905



[...] l'énergie d'un rayon lumineux [...] n'est pas distribuée de façon continue [...], mais se compose d'un nombre fini de quanta d'énergie qui sont localisés en des points de l'espace, qui se déplacent sans se diviser, et qui ne peuvent être produits et absorbés que sous forme d'unités complètes.

A. Einstein

On a Heuristic Point of View concerning the Production and Transformation of Light, 1905



Lumière !



J. C. Maxwell

A dynamical theory of

L'accord des résultats a pu montrer que la lumière magnétis... des formes de la même nature, et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage à la vitesse de la lumière. (Maxwell, 1865)



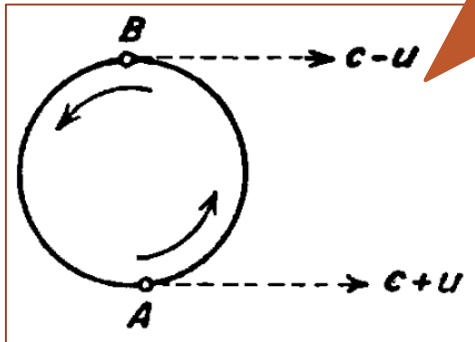
Nous considérons cependant - c'est le point le plus essentiel de tout le calcul - que E est composé d'un nombre très défini de parties égales et nous utilisons pour cela la constante de la nature $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg - sec.

On Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum, 1900

[...] nous introduisons un autre principe que la lumière se propage toujours dans l'espace à une vitesse définie c qui est indépendante de tout mouvement de mouvement du corps émetteur.

A. Einstein

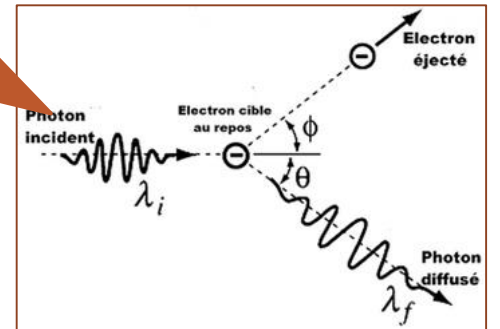
On the Electrodynamics of Moving Bodies, 1905



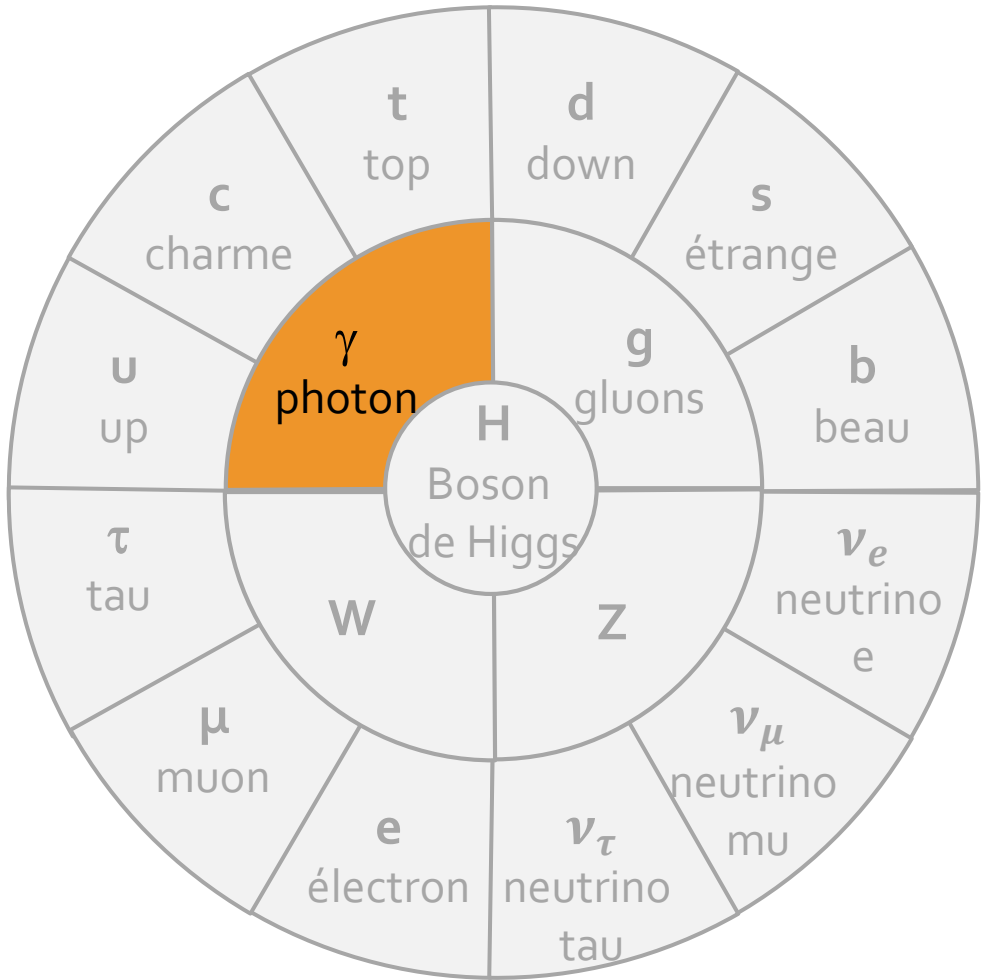
Le photon !

Un quantum d'un rayon lumineux [...] n'est pas une onde continue [...], mais se compose de quanta d'énergie qui sont localisés dans des points de l'espace, qui se déplacent à la vitesse de la lumière et qui ne peuvent être produits et absorbés que sous forme d'unités complètes.

On the Production and Propagation of Light, 1905



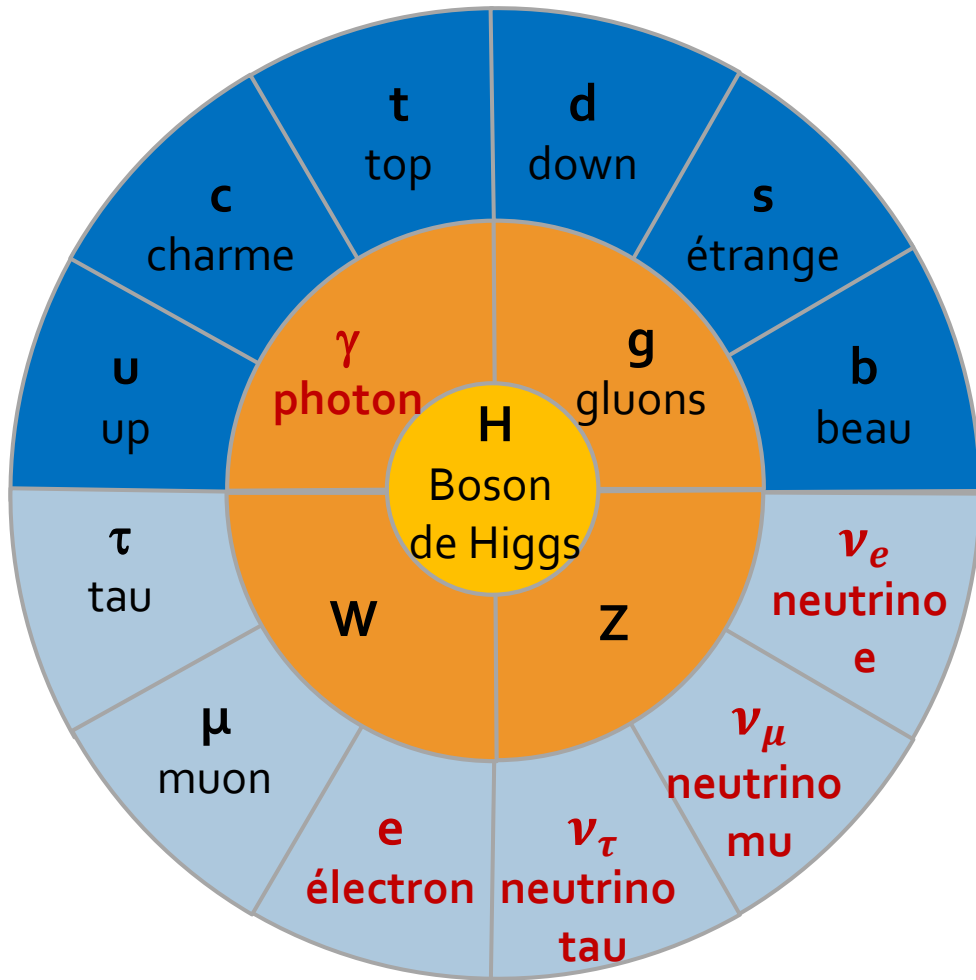
Onde électromagnétique et grain de lumière tout à la fois !



LIGHT IS A
WAVE!

Cadre théorique quantique et relativiste

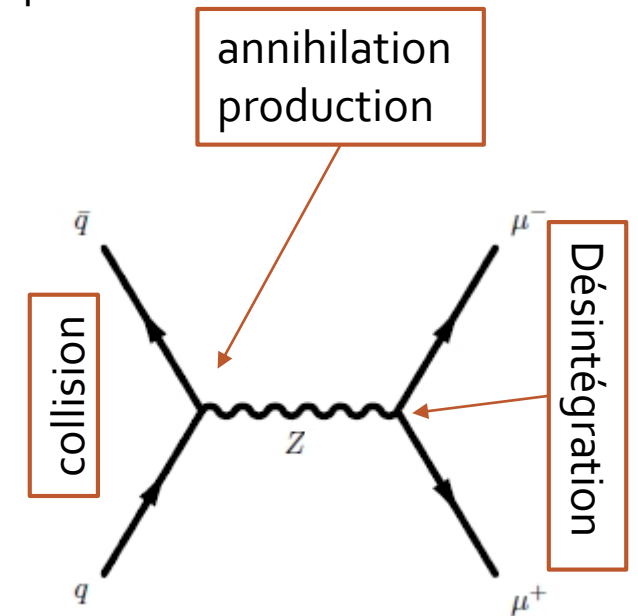
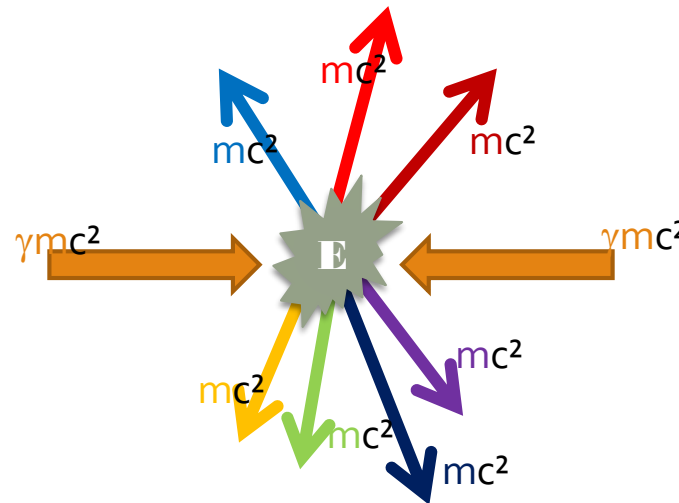
Relativité restreinte c
&
Mécanique quantique h



Particules stables
Particules instables

Création, annihilation, collisions, désintégrations...
On est dans le domaines des hautes énergies :

- la **relativité**, $E=mc^2$, décrit le taux de transformation de l'énergie en matière,
- la **mécanique quantique** donne les probabilités avec lesquelles cela se fait.



La bataille des rayons cathodiques

NYTimes 23/02/1896

THE TRUE CATHODE RAYS

Prof. Crookes's Celebrated Discovery as
Related by Himself.

ELECTRICITY IN HIGH VACUUM

Plea for Existence of Matter in a Ra-
diant State in Which It Differs
from Its Solid, Liquid,
and Gaseous Form.

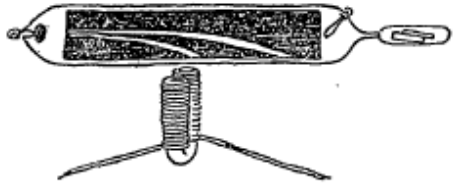


Figure 8.
To Show the Deflection of the Cathode Rays When
Near a Magnet.

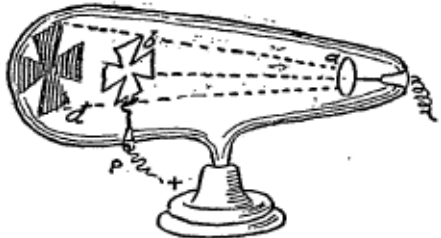


Figure 5.
Pear-Shaped Tube to Show the Shadow Cast by
a Maltese Cross of Aluminium.

La bataille des rayons cathodiques

NYTimes 23/02/1896

THE TRUE CATHODE RAYS

Prof. Crookes's Celebrated Discovery as Related by Himself.

ELECTRICITY IN HIGH VACUUM

Plea for Existence of Matter in a Radiant State in Which It Differs from Its Solid, Liquid, and Gaseous Form.

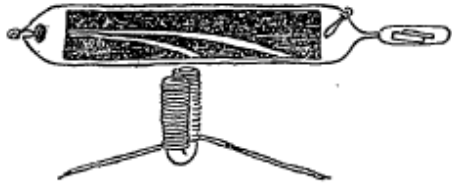


Figure 8.
To Show the Deflection of the Cathode Rays When Near a Magnet.

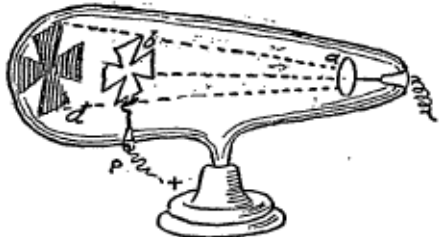


Figure 5.
Pear-Shaped Tube to Show the Shadow Cast by a Maltese Cross of Aluminium.



C'est une onde !



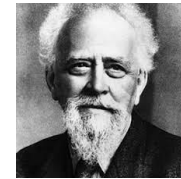
Lenard, Hertz



Ce sont des corpuscules !



Thomson, Kelvin



©Palais de la découverte

1895, Perrin Rayonnement matériel chargé négativement

La bataille des rayons cathodiques

NYTimes 23/02/1896

THE TRUE CATHODE RAYS

Prof. Crookes's Celebrated Discovery as Related by Himself.

ELECTRICITY IN HIGH VACUUM

Plea for Existence of Matter in a Radiant State in Which It Differs from Its Solid, Liquid, and Gaseous Form.

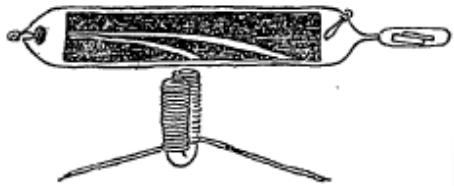


Figure 8. To Show the Deflection of the Cathode Rays When Near a Magnet.

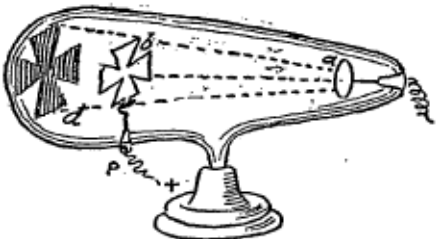


Figure 5. Pear-Shaped Tube to Show the Shadow Cast by a Maltese Cross of Aluminium.



J.J. Thomson
Cathode Rays, 1897



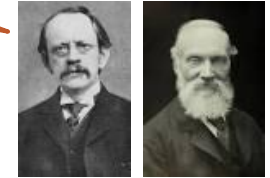
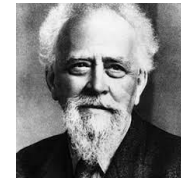
C'est une onde !



Lenard, Hertz

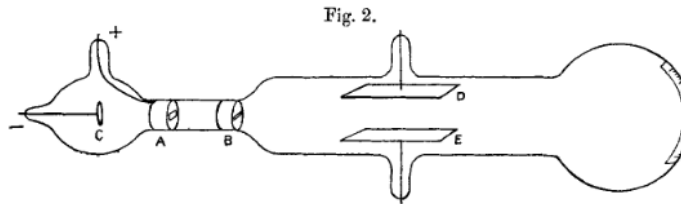


Ce sont des corpuscules !



Thomson, Kelvin

1895, Perrin Rayonnement matériel chargé négativement



Mesures des déviations magnétiques et électriques des rayons cathodiques
 \Rightarrow rapport charge/masse = x1000 le rapport pour l'ion H^+

La toute première particule élémentaire de matière détectée !

La bataille des rayons cathodiques

NYTimes 23/02/1896

THE TRUE CATHODE RAYS

Prof. Crookes's Celebrated Discovery as Related by Himself.

ELECTRICITY IN HIGH VACUUM

Plea for Existence of Matter in a Radiant State in Which It Differs from Its Solid, Liquid, and Gaseous Form.

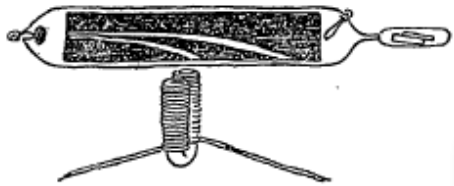


Figure 8. To Show the Deflection of the Cathode Rays When Near a Magnet.

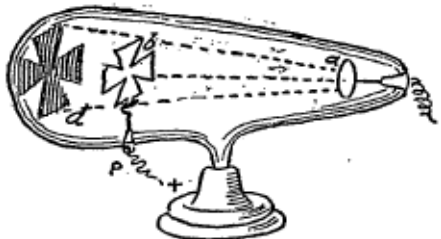


Figure 5. Pear-Shaped Tube to Show the Shadow Cast by a Maltese Cross of Aluminium.



J.J. Thomson
Cathode Rays, 1897

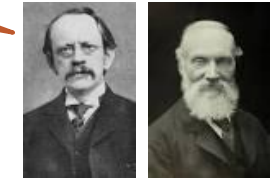
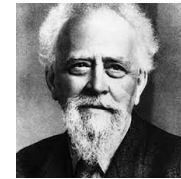


Lenard, Hertz

C'est une onde !

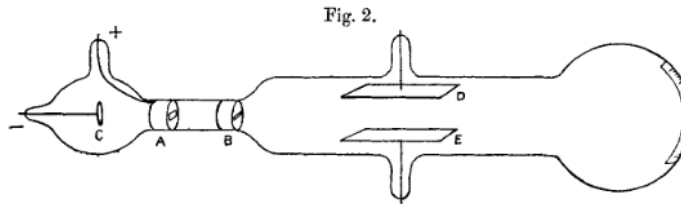


Ce sont des corpuscules !



Thomson, Kelvin

1895, Perrin Rayonnement matériel chargé négativement



Mesures des déviations magnétiques et électriques des rayons cathodiques
⇒ rapport charge/masse = x1000 le rapport pour l'ion H⁺

La toute première particule élémentaire de matière détectée !

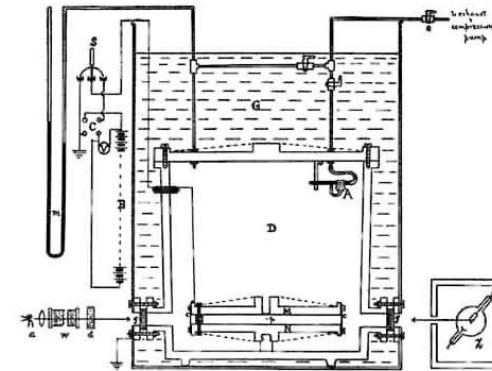


Fig. 1.

Charge de l'électron $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron : $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$



R.A. Millikan
On the elementary electrical charge and the Avogadro constant, 1913

La bataille des rayons cathodiques

NYTimes 23/02/1896

THE TRUE CATHODE RAYS

Prof. Crookes's Celebrated Discoveries
Related by Himself.

ELECTRICITY IN HIGH VACUUM

Plea for Existence of Matter in a Radiant State in Which It Differs from Its Solid, Liquid, and Gaseous Form.

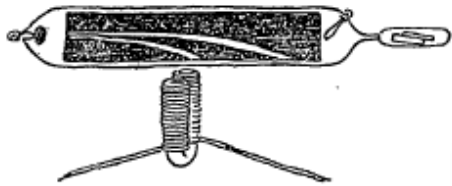


Figure 8. To Show the Deflection of the Cathode Rays When Near a Magnet.

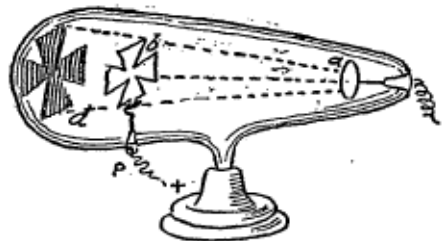


Figure 5. Pear-Shaped Tube to Show the Shadow Cast by a Maltese Cross of Aluminium.



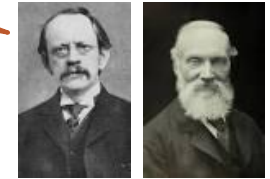
J.J. Thomson
Cathode Rays, 1897

Mesures des rayons cathodiques
et électrique
⇒ rapport charge/masse = x
rapport pour H^+

**La toute première particule
élémentaire de matière détectée**

C'est une onde !

Ce sont des corpuscules !



Thomson, Kelvin

matériel chargé négativement

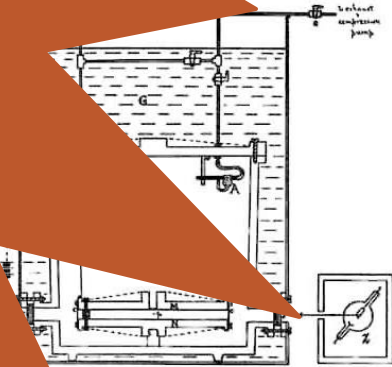


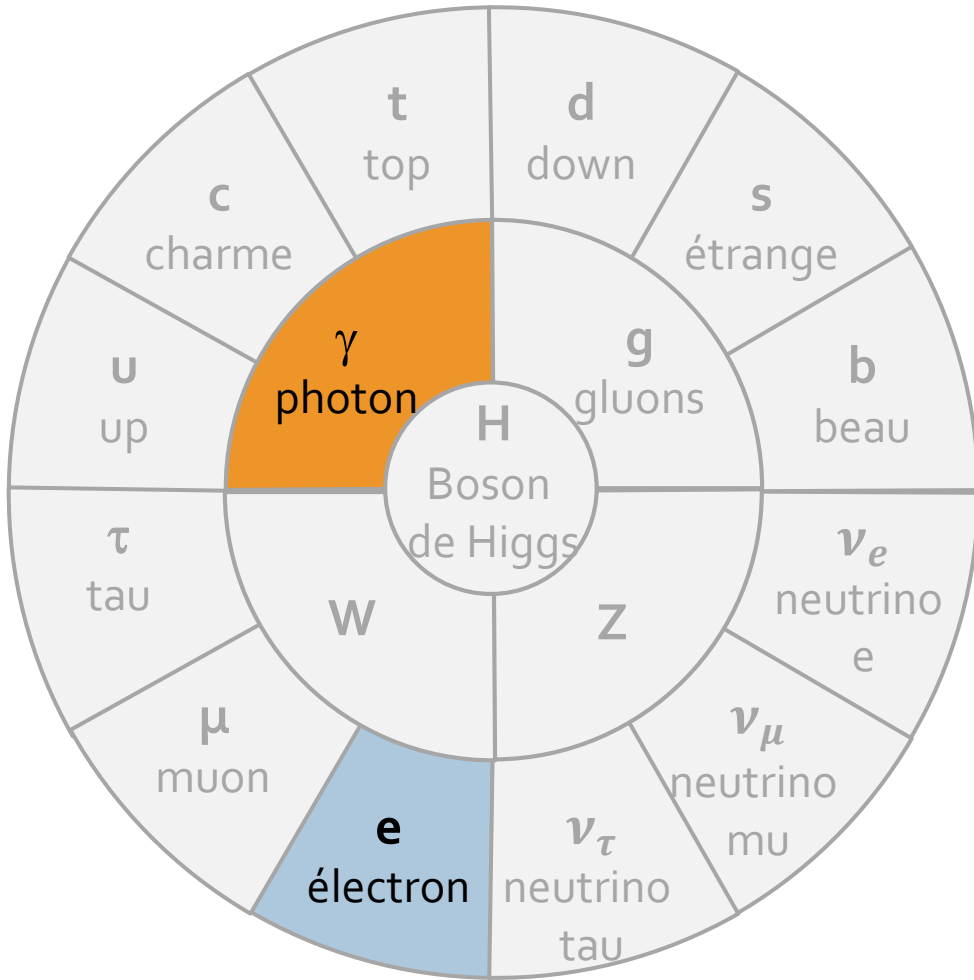
Fig. 1.

Charge de l'électron $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron : $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$



R.A. Millikan
On the elementary electrical charge and the Avogadro constant, 1913

L'électron !



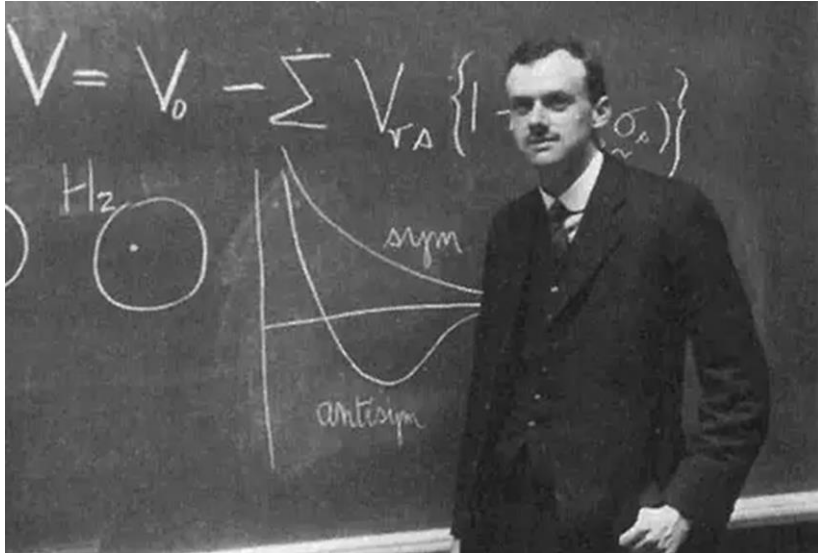
En fait, l'électron est à la fois une onde et un corpuscule !

En 1923, **Louis de Broglie** propose de généraliser le cas du photon. A toute particule d'énergie E est associée une longueur d'onde = hc/E



C.J. Davisson et G.P. Thomson : nature ondulatoire de l'électron (**1927**)
l'un par diffraction l'autre par transmission

Mon équation est plus intelligente que moi



P.A.M. Dirac

The Quantum Theory of the Electron, 1928

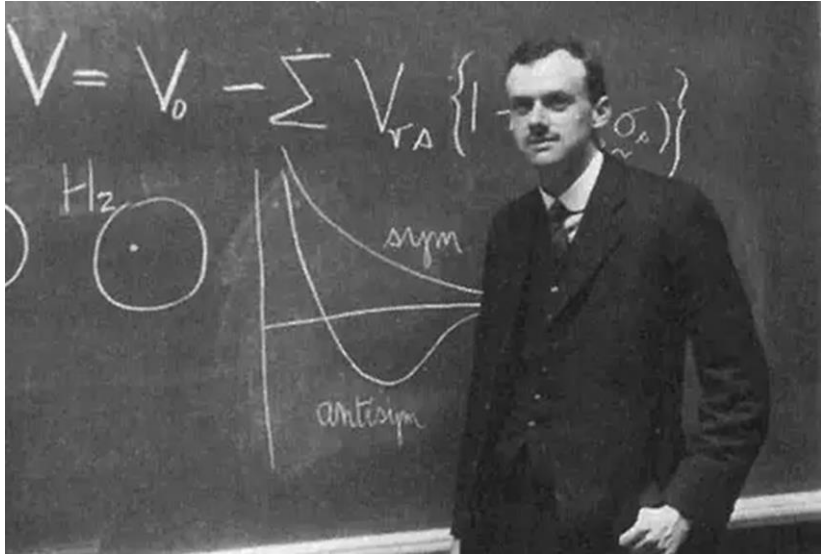
Description quantique et relativiste d'un électron libre :

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

Equation parfaitement efficace pour décrire l'électron plus un état inattendu d'énergie négative et qui « remonte le temps » :

Une antiparticule !!!

Mon équation est plus intelligente que moi



P.A.M. Dirac

The Quantum Theory of the Electron, 1928

Description quantique et relativiste d'un électron libre :

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

Equation parfaitement efficace pour décrire l'électron plus un état inattendu d'énergie négative et qui « remonte le temps » :

Une antiparticule !!!

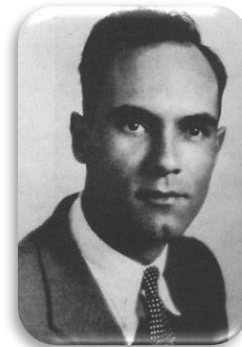
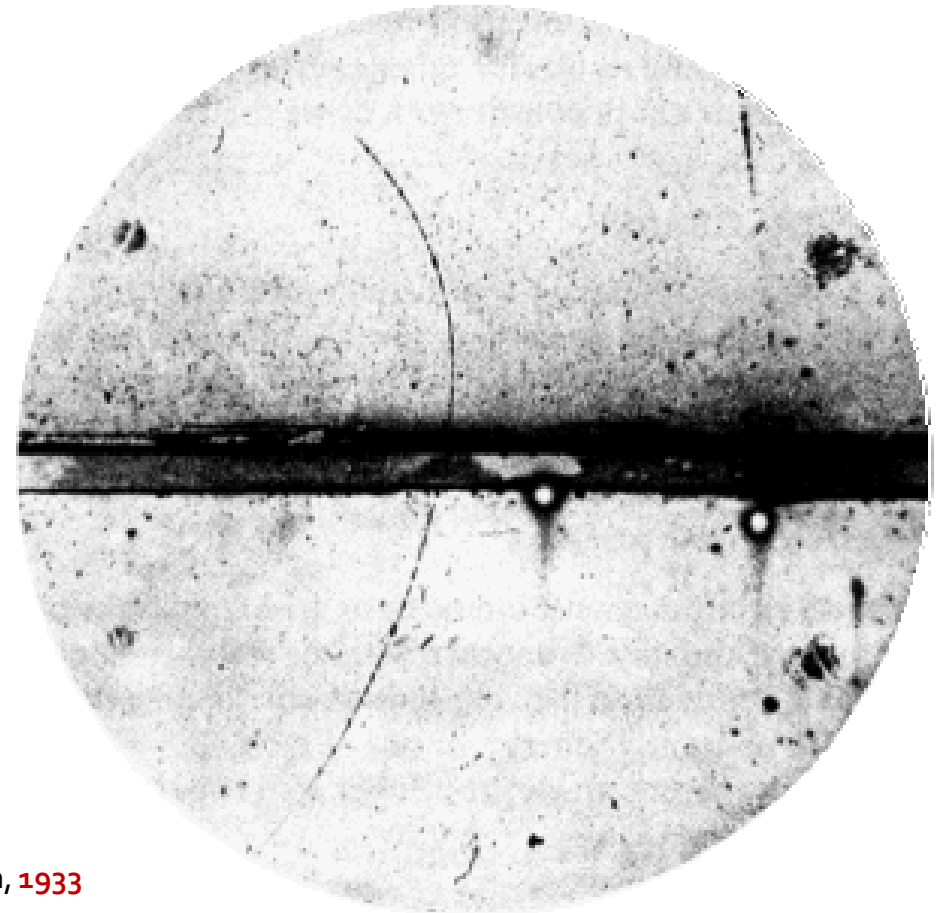


Photo from the Nobel Foundation archive

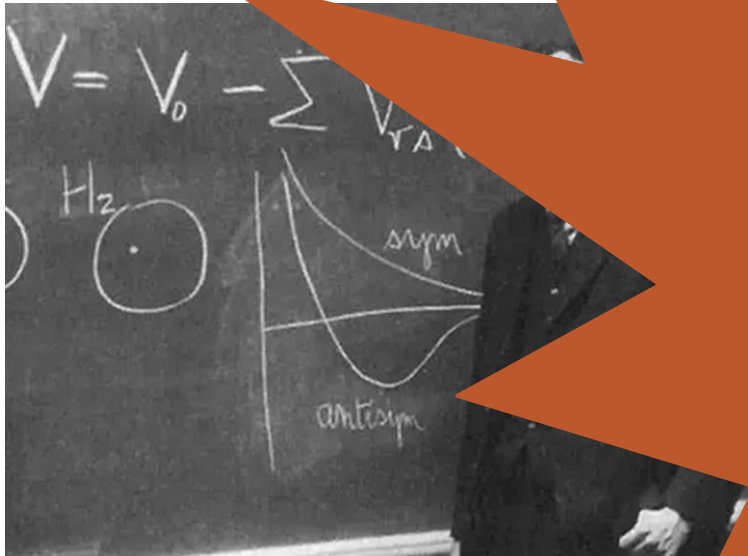
C.D. Anderson

The Positive Electron, 1933



$q < 2 q_e$ et $m < 20 m_e$

Mon équation est plus intelligente que moi



P.A.M. Dirac

The Quantum Theory of the Electron, 1928

Description quantique et relativiste de l'électron libre :

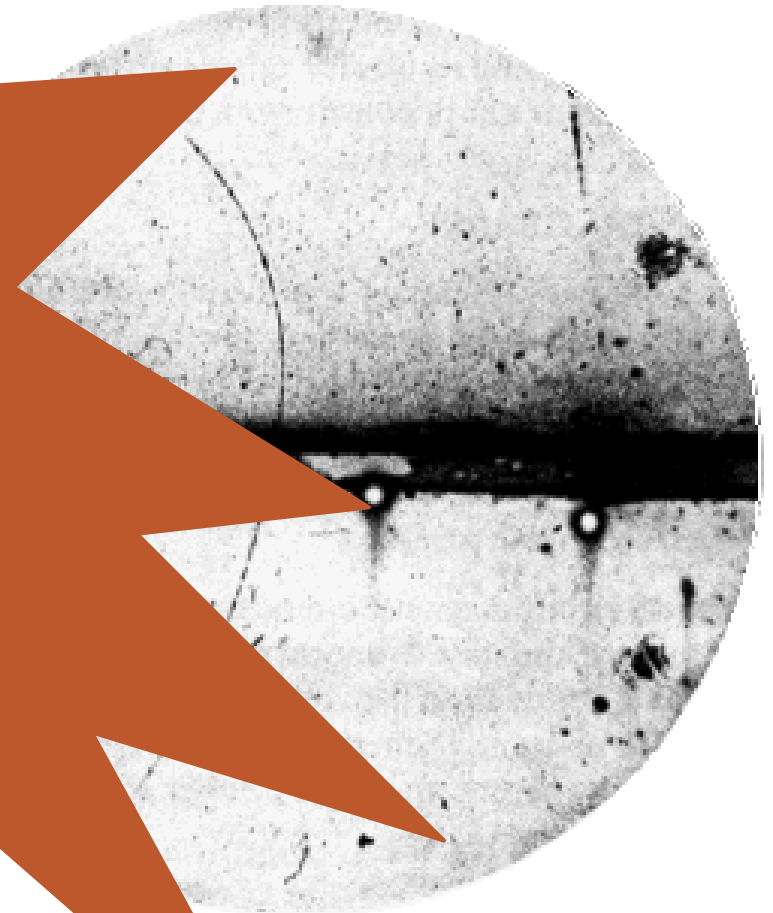
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Equation parfaitement efficace pour décrire l'électron plus un état inattendu d'énergie négative et qui « remonte le temps » :

Une antiparticule !!!

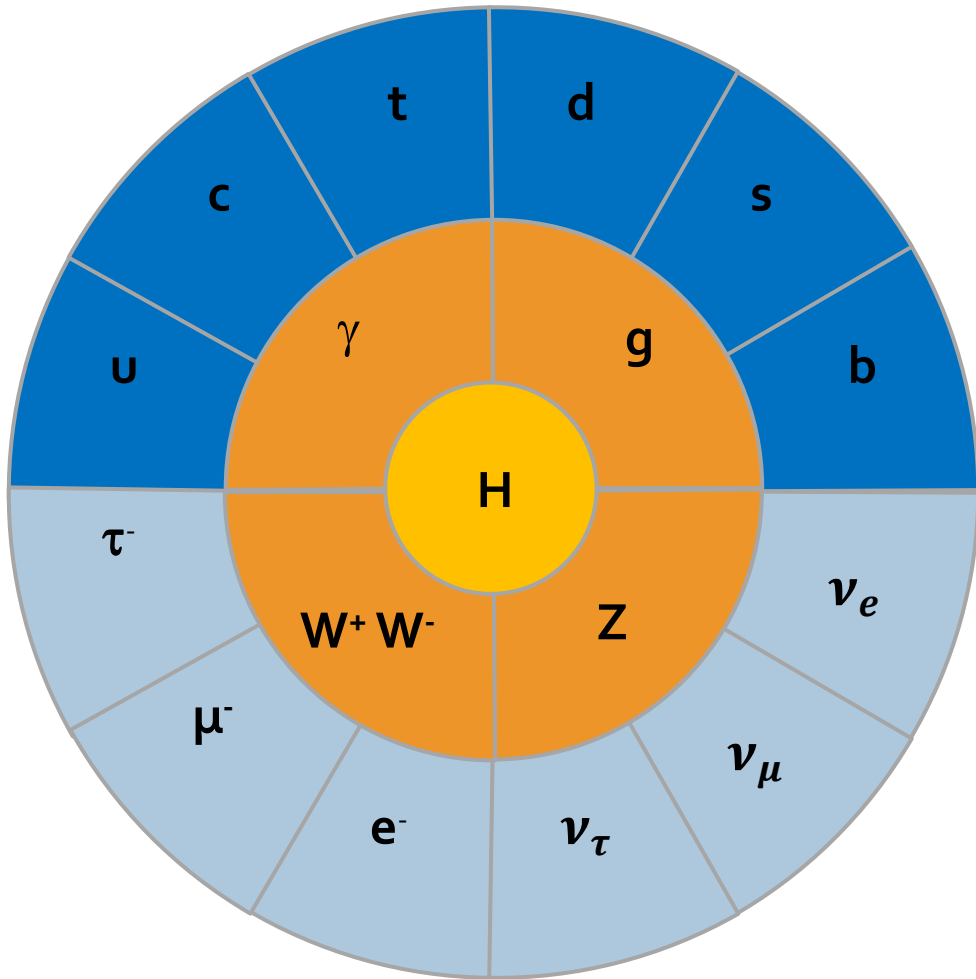
C.D. Anderson

The Positive Electron

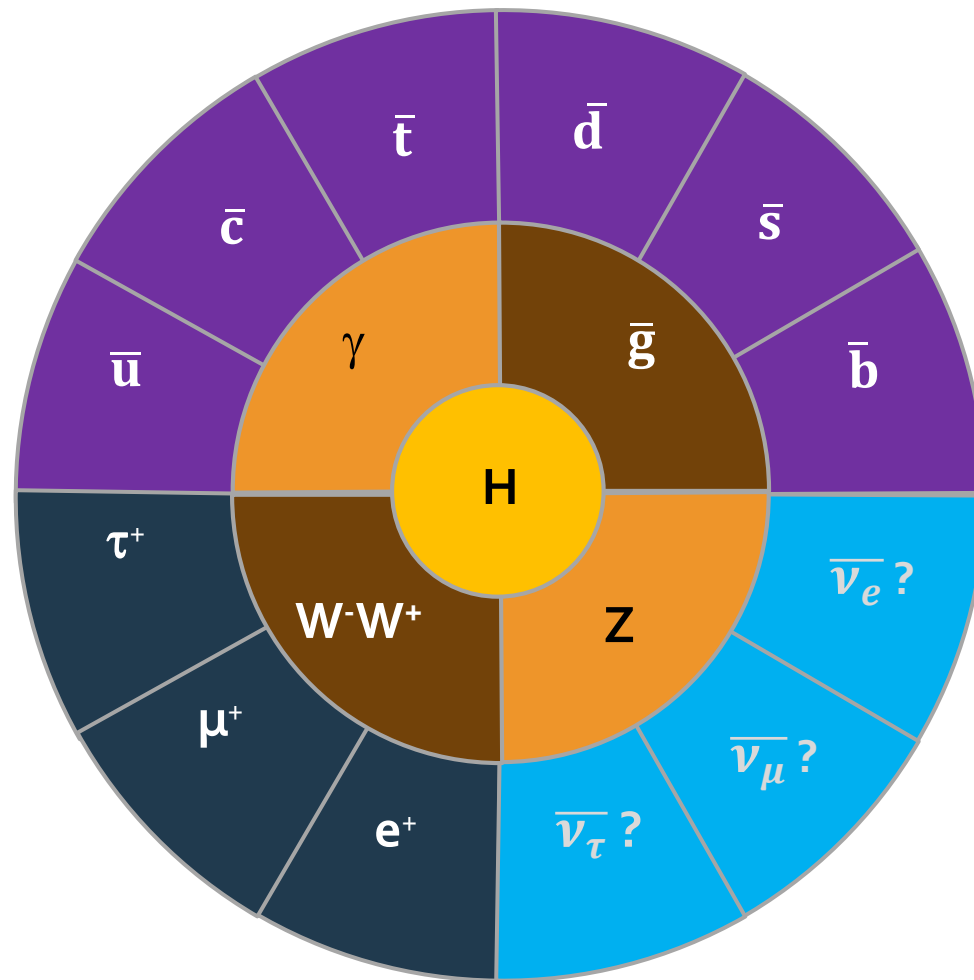


$q < 2 q_e$ et $m < 20 m_e$

Particules

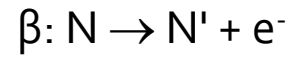


Anti-particules



Toute particule a une antiparticule, même masse, autres nombres quantiques opposés
Une particule peut être sa propre antiparticule (Z, H, γ , pour les trois neutrinos, on n'est pas sûr)

Alors, l'énergie, conservée ou pas conservée ?



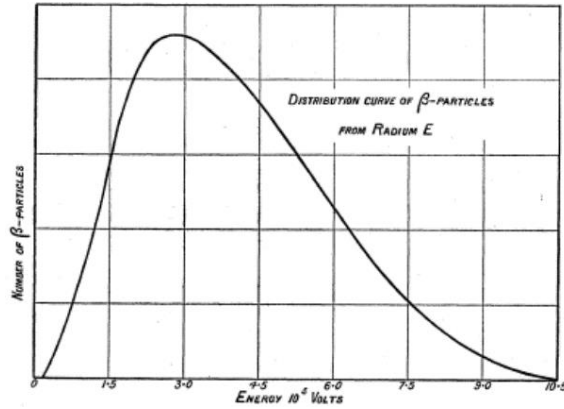
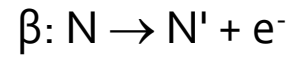
On attend

$$E(e^-) = \text{masse}(N) - \text{masse}(N')$$

donc fixée

1914, Chadwick

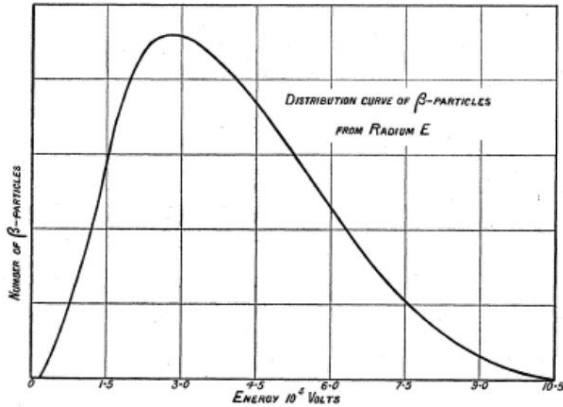
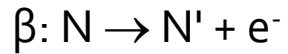
Alors, l'énergie, conservée ou pas conservée ?



Ellis & Wooster

The average energy of disintegration of radium E, **1927**

Alors, l'énergie, conservée ou pas conservée ?



Ellis & Wooster

The average energy of disintegration of radium E, 1927

Photograph by Erik Gustafson, courtesy of Alp Emilio Segre Visual Archives, Margrethe Bohr Collection

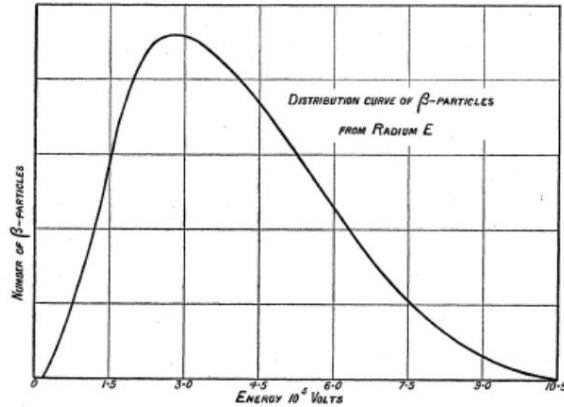
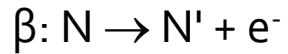


N. Bohr propose que l'énergie ne soit conservée que statistiquement dans le monde microscopique.
Faraday Lecture, 1930

4 décembre 1930

Chères dames et messieurs radioactifs,
[...] Le spectre bêta continu aurait alors un sens si l'on suppose que, dans la désintégration bêta, un **neutron** est émis en plus de l'électron, de sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante. [...] Malheureusement, je ne peux pas me présenter personnellement à Tübingen, car je suis indispensable ici à Zurich pour un bal dans la nuit du 6 au 7 décembre. [...] votre humble serviteur **W. Pauli**

Alors, l'énergie, conservée ou pas conservée ?



Ellis & Wooster

The average energy of disintegration of radium E, 1927



N. Bohr propose que l'énergie ne soit conservée que statistiquement dans le monde microscopique.
Faraday Lecture, 1930

Le juge de paix est l'expérience de Henderson de 1934

Le « neutron » de Pauli existe !

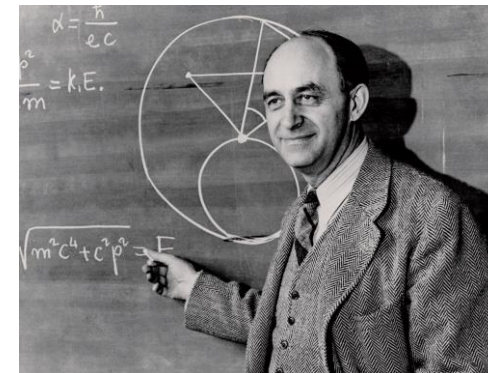
Il doit être de masse très faible.

Le « vrai » neutron est découvert par ailleurs par Chadwick.

The existence of a neutron, 1932

4 décembre 1930

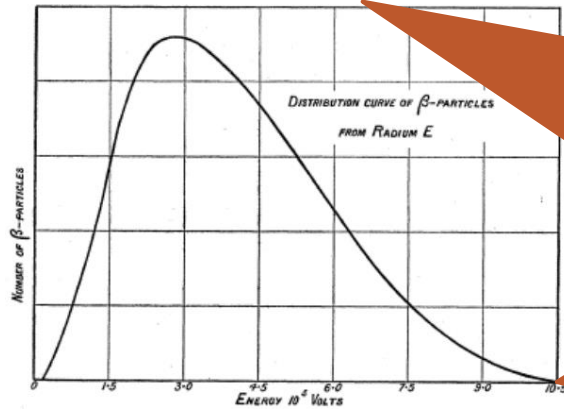
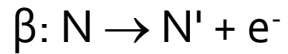
Chères dames et messieurs radioactifs,
[...] Le spectre bêta continu aurait alors un sens si l'on suppose que, dans la désintégration bêta, un **neutron** est émis en plus de l'électron, de sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante. [...] Malheureusement, je ne peux pas me présenter personnellement à Tübingen, car je suis indispensable ici à Zurich pour un bal dans la nuit du 6 au 7 décembre. [...] votre humble serviteur **W. Pauli**



© Atomic Archives

Enrico Fermi baptise le petit neutron de Pauli le **neutrino** !

Alors, l'énergie, est-elle ou pas conservée ?



Ellis & Wooster

The average energy of disintegration of radium E, 1927

Neutrinos !

N. Bohr propose que l'énergie ne soit conservée que statistiquement dans le monde microscopique.
Faraday Lecture, 1930

Cela est l'expérience de Henderson de 1934

de Pauli existe !

très faible.

couvert par ailleurs par

on, 1932

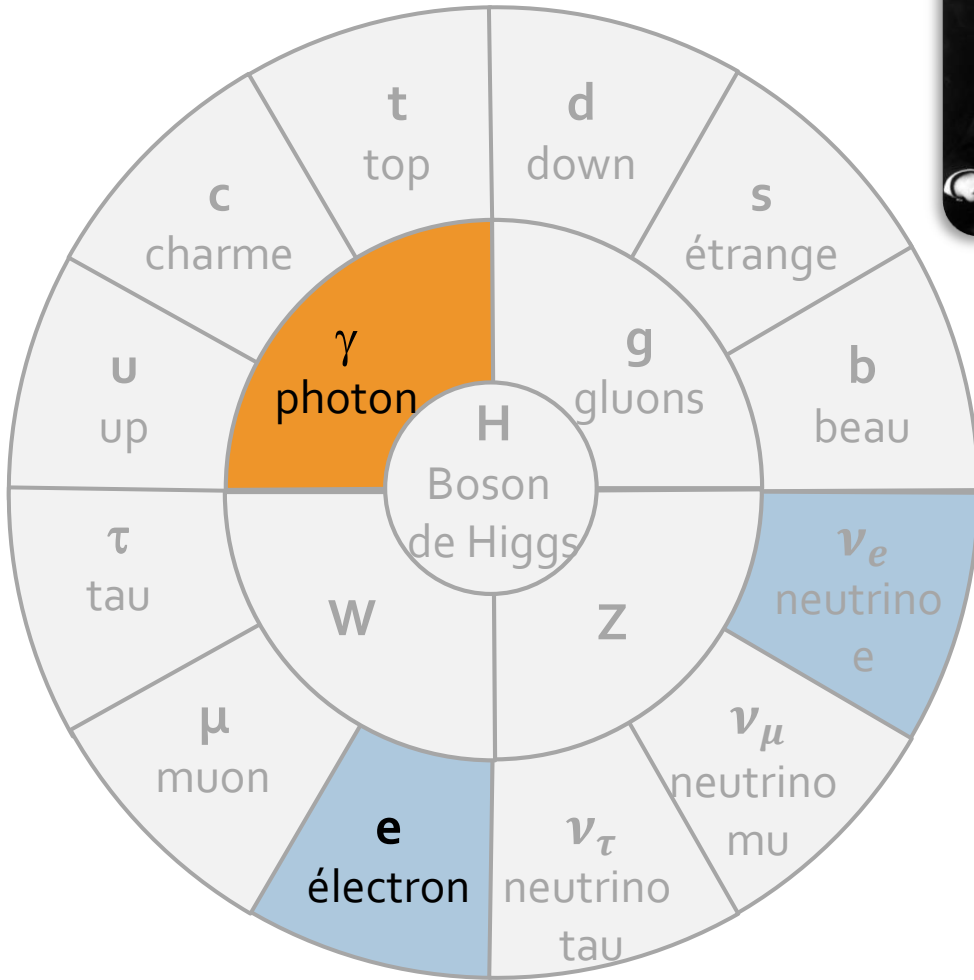
4 décembre 1930

Chères dames et messieurs radioactifs

[...] Le spectre bêta continu aurait alors son sens si l'on suppose que, dans la désintégration bêta, un neutron est émis en plus de l'électron, de sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante. [...] Malheureusement, je ne peux pas me présenter personnellement à Tübingen, car je suis indispensable ici à Zurich pour un bal dans la nuit du 6 au 7 décembre. [...] votre humble serviteur W. Pauli

Enrico Fermi baptise le petit neutron de Pauli le **neutrino** !





CC BY 4.0 DEED

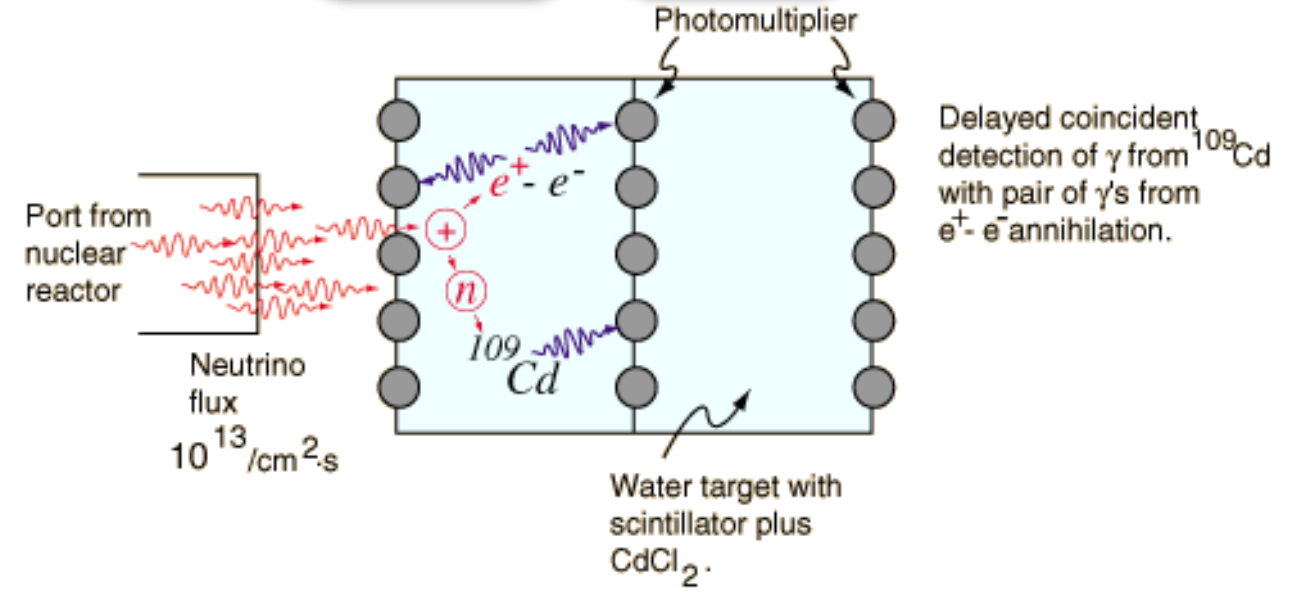
L'observation du neutrino attendra 1956 !

« J'ai fait une chose terrible. J'ai postulé l'existence d'une particule qui ne peut pas être détectée. » WP en visite à CalTech



© University of California Regents

C. Cowan & F. Reines, Detection of the Free Neutrino: a Confirmation, 1956



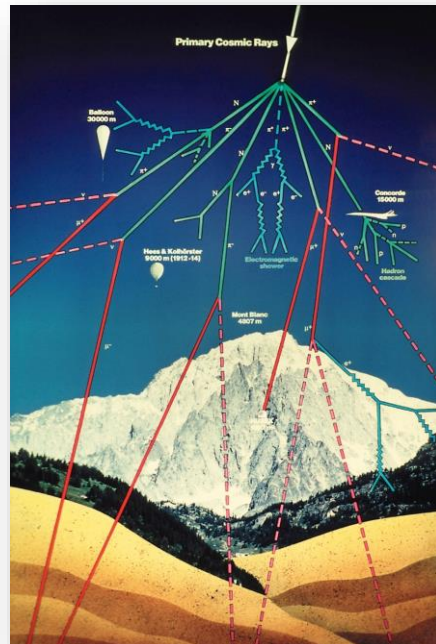
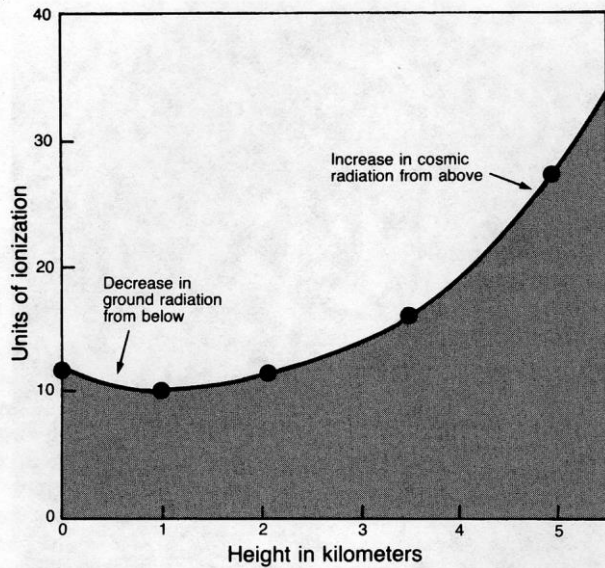
Mais qui a commandé cela ?



Image: Wikimedia commons



V. F. Hess, 1912

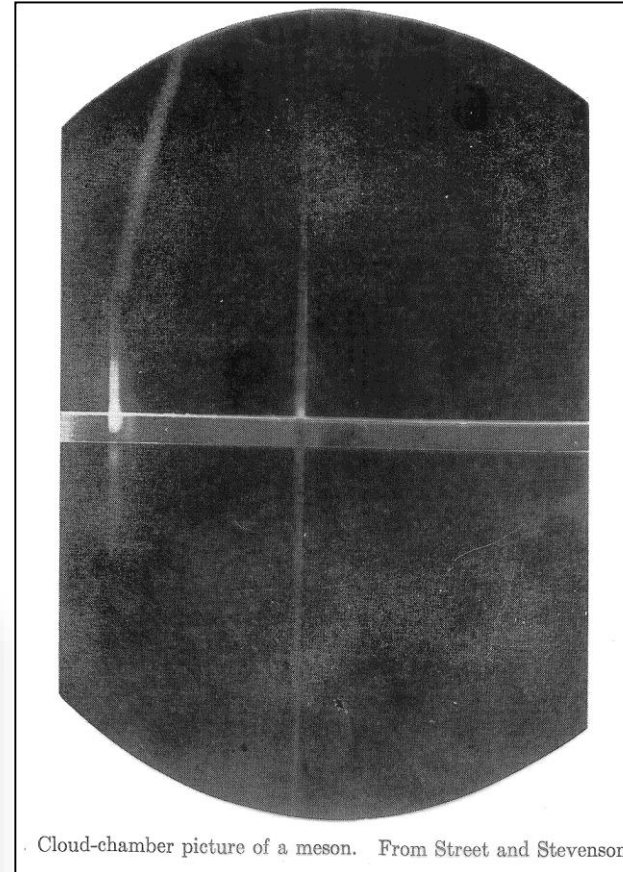
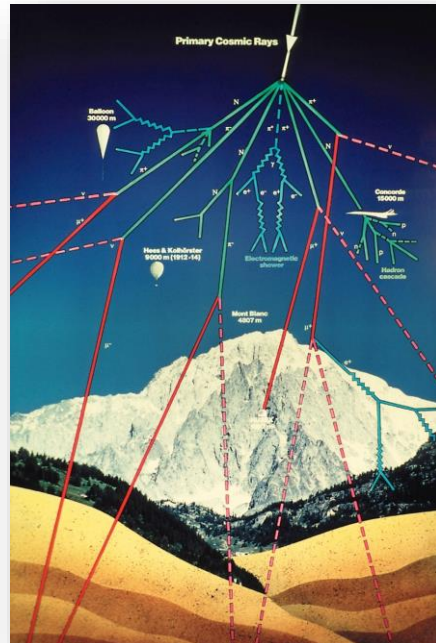
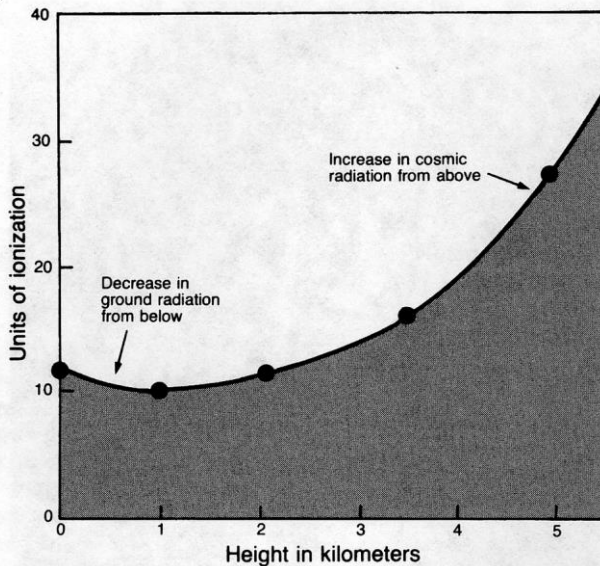


© CERN

Mais qui a commandé cela ?



V. F. Hess, 1912



1937 observation d'un nouveau type de radiation dans les rayons cosmiques de masse intermédiaire entre l'électron et le proton : **un méson** !

S. H. Neddermeyer & C. D. Anderson
Note on the Nature of Cosmic-Ray
Particles, **1937**

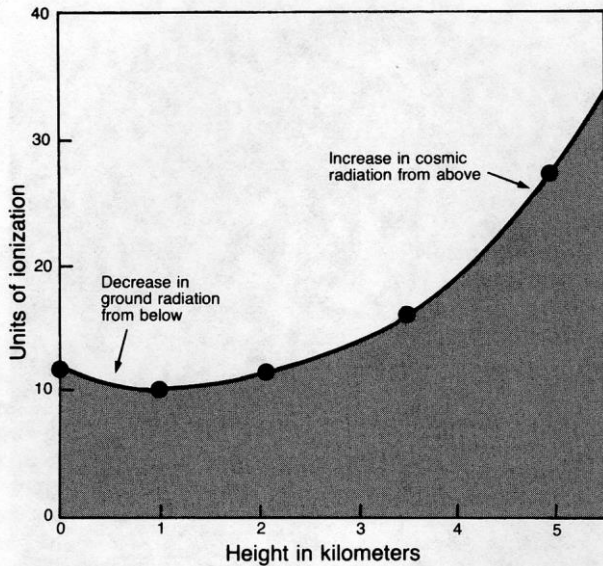
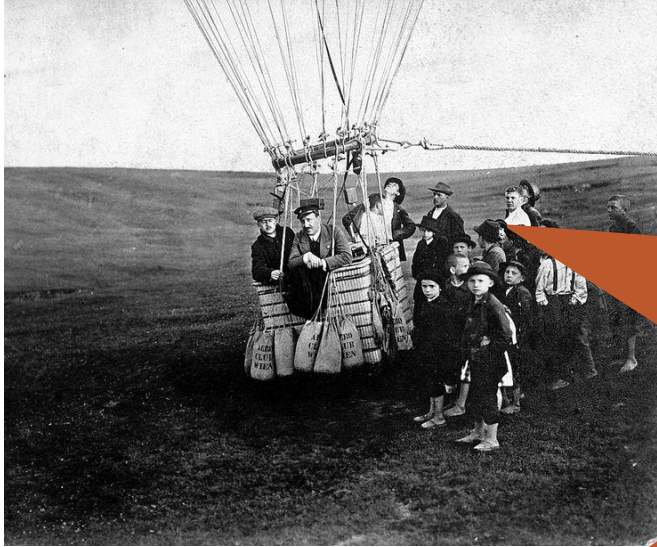
J. C. Street & E. C. Stevenson, New
Evidence for the Existence of a Particle of
Mass Intermediate Between the Proton
and Electron, **1937**

Who ordered that ?



I. Rabi

Mais qui a commandé cela ?



Muons !



1937 observation d'un nouveau type de radiation dans les rayons cosmiques de masse intermédiaire entre l'électron et le proton : **un mésotron !**

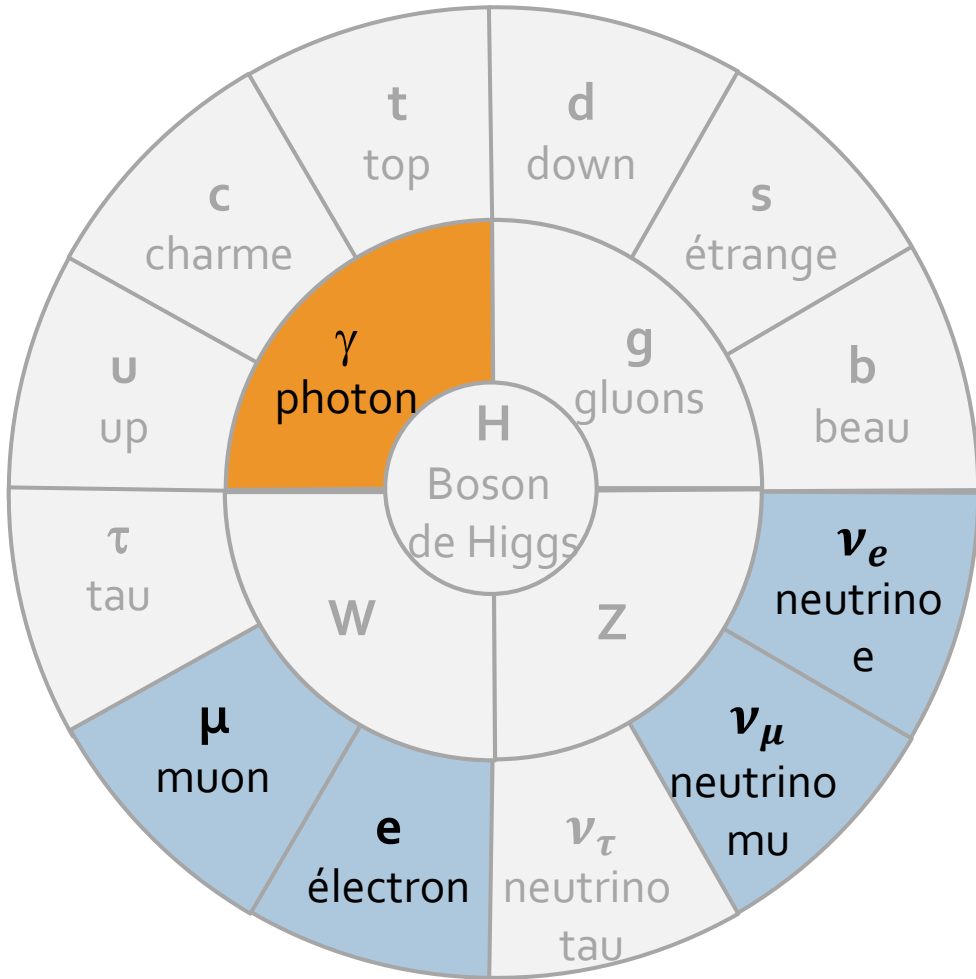
S. H. Neddermeyer & C. D. Anderson
Note on the Nature of Cosmic-Ray
Particles, **1937**

J. C. Street & E. C. Stevenson, New
Evidence for the Existence of a Particle of
Mass Intermediate Between the Proton
and Electron, **1937**

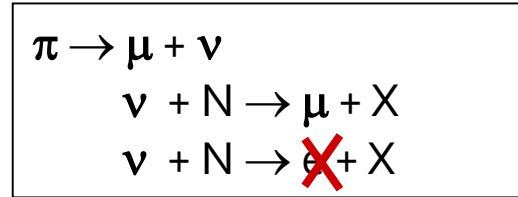
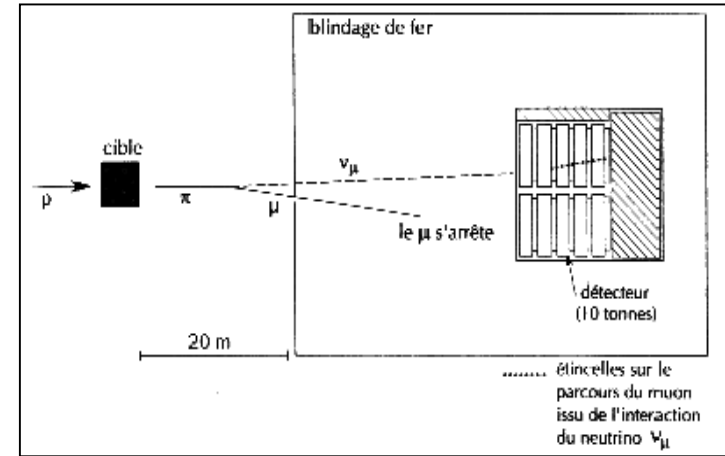
Who ordered that ?



I. Rabi

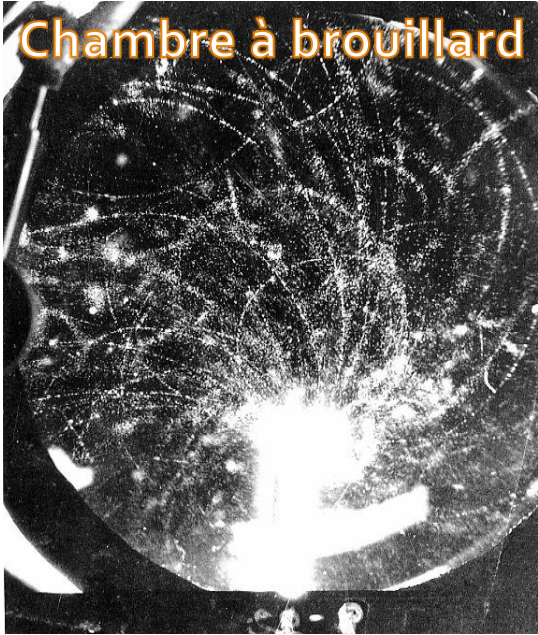


Chaque « lepton » a un neutrino qui lui est associé



G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, and J. Steinberger, Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos, 1962, Brookhaven

Des découvertes à la pelle

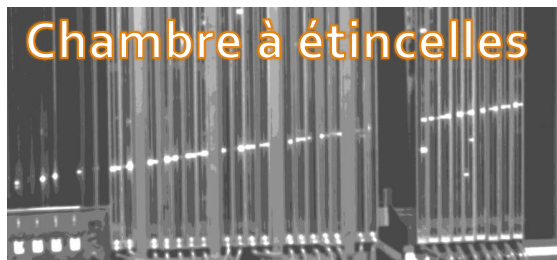


Chambre à brouillard



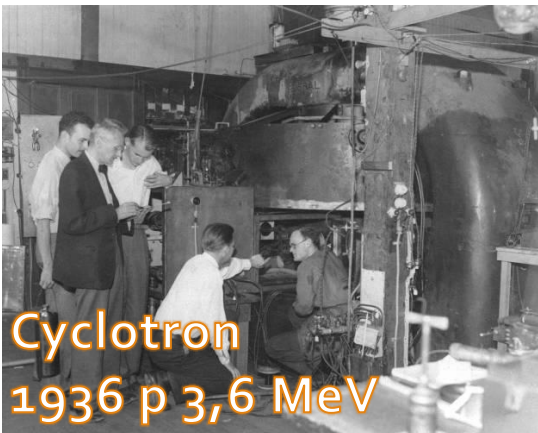
Chambre à bulles

Illustration courtesy of Fermilab



Chambre à étincelles

© 1963-2023 CERN



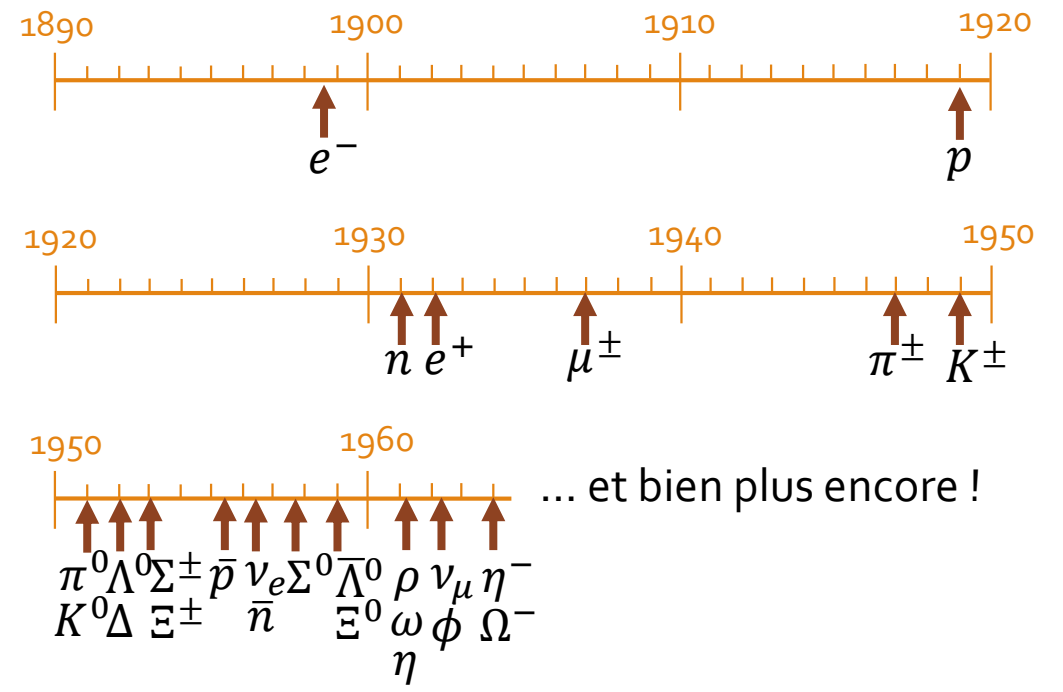
Cyclotron
1936 p 3,6 MeV

Image : LBNL

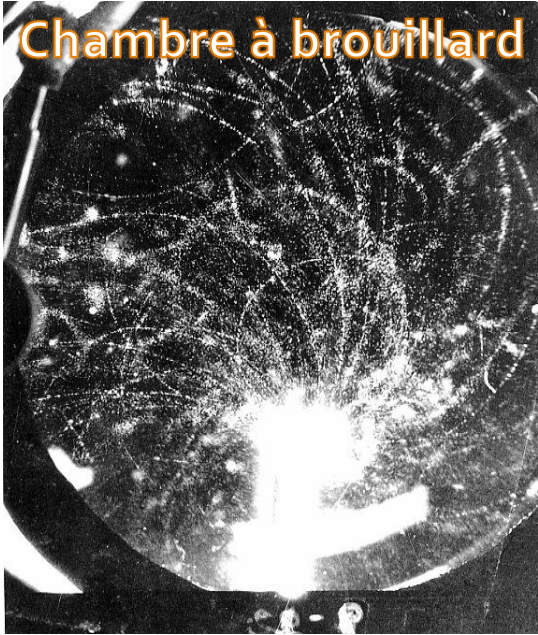


Synchrotron
1959 PS p 25 GeV

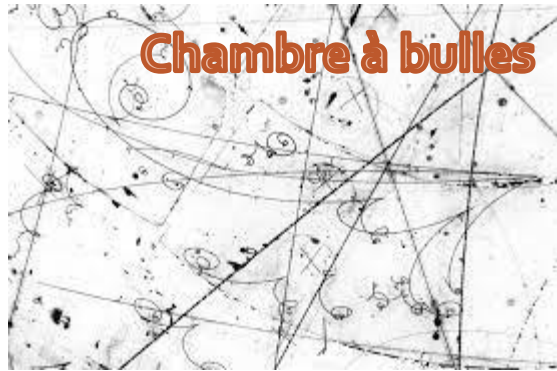
© 1966-2023 CERN



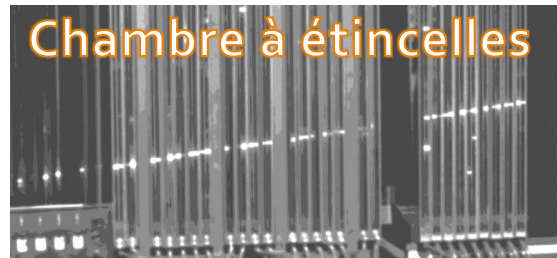
Des découvertes à la pelle



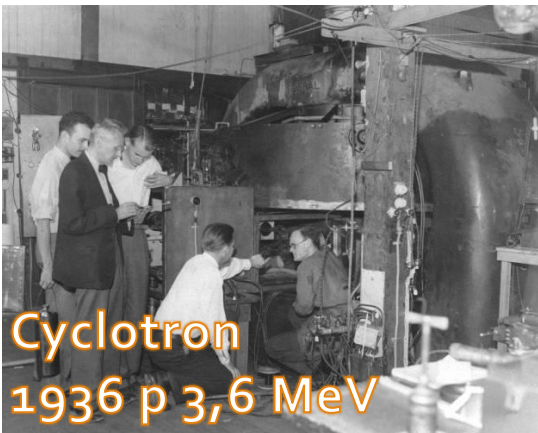
Chambre à brouillard



Chambre à bulles



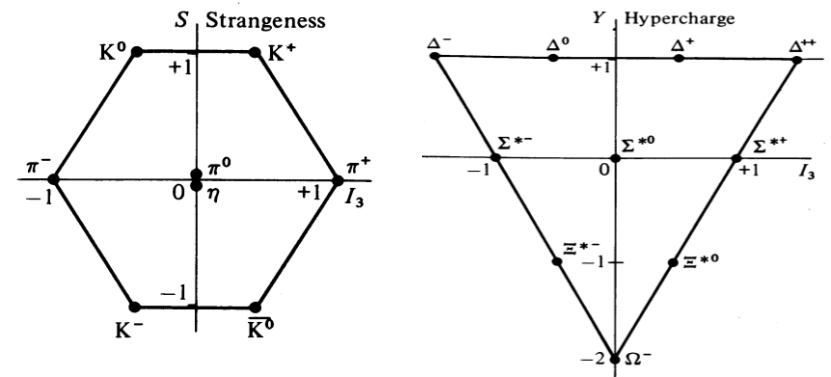
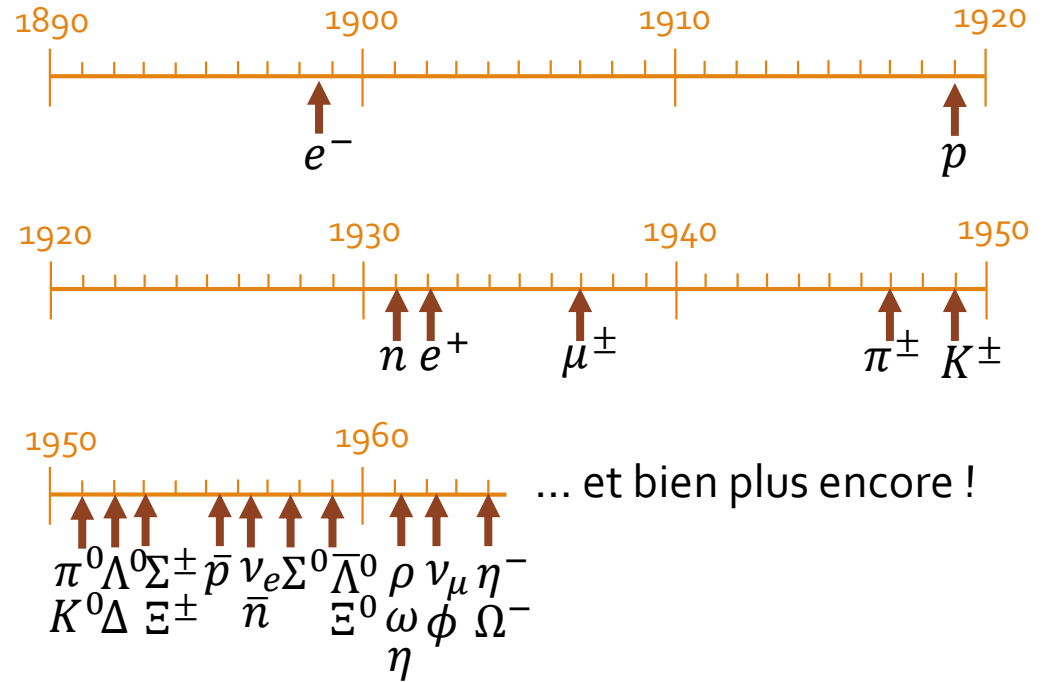
Chambre à étincelles



Cyclotron
1936 p 3,6 MeV

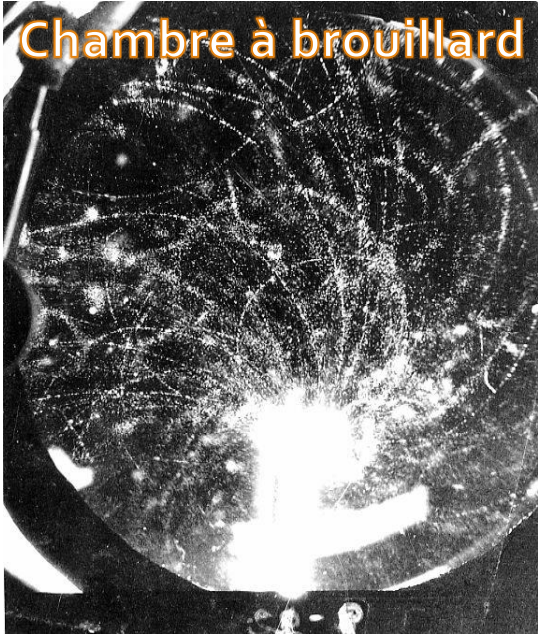


Synchrotron
1959 PS p 25 GeV



Hypercharge $Y = B + S$
 Isospin $= Q - Y/2$

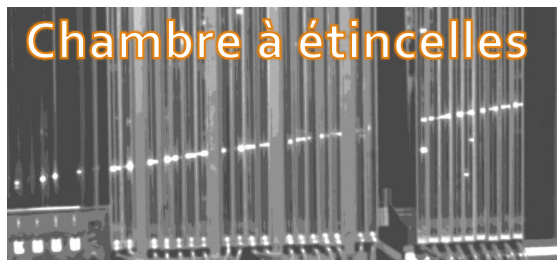
Des découvertes à la pelle



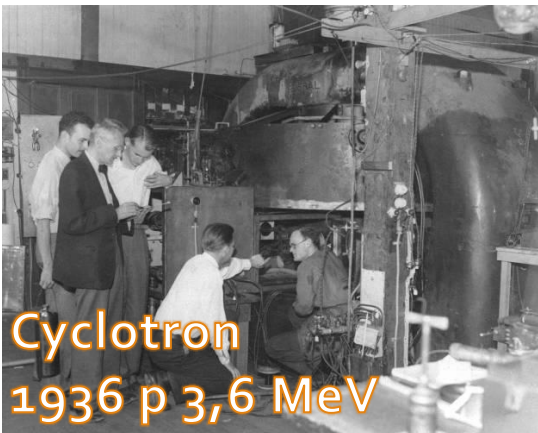
Chambre à brouillard



Chambre à bulles



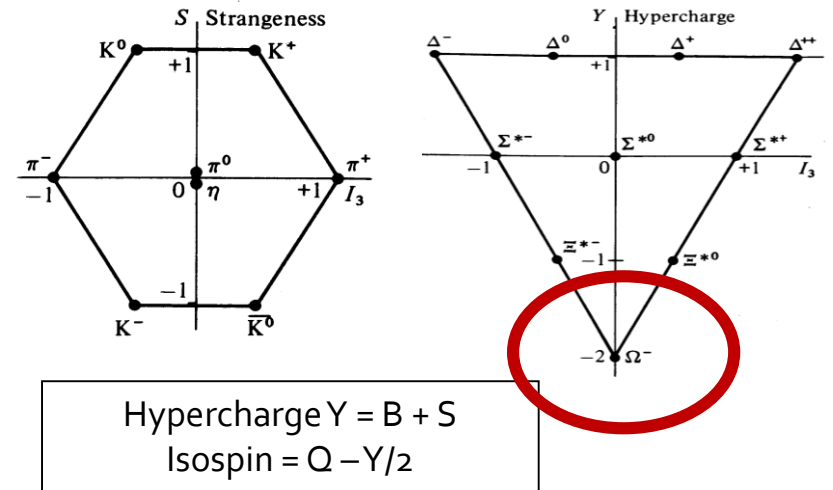
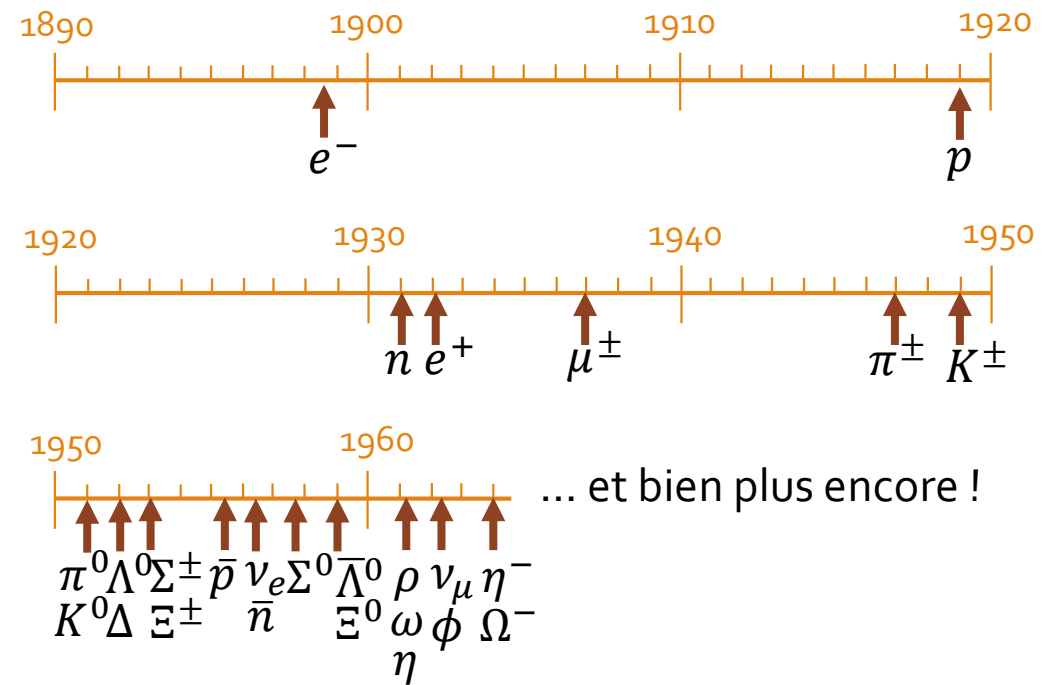
Chambre à étincelles



Cyclotron
1936 p 3,6 MeV



Synchrotron
1959 PS p 25 GeV



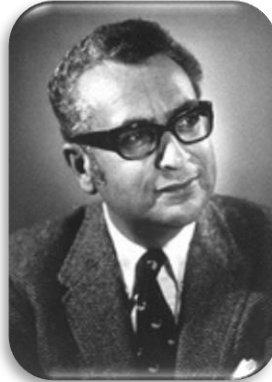
Three quarks for Muster Mark!

1964 : M. Gell-Mann et Zweig introduisent les quarks / aces

Up (u), down (d) et étrange (s)

mésos $q\bar{q}$

baryons qqq



nobelprize.org

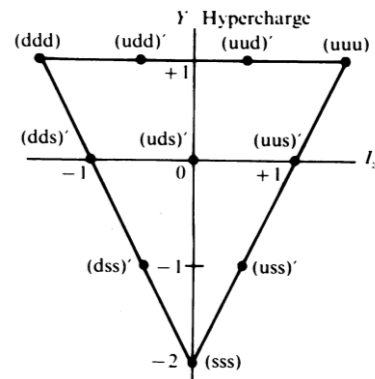
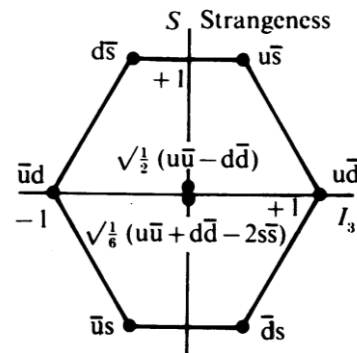


M. Gell-Mann,

A Schematic Model of Baryons and Mesons, 1964

G. Zweig,

An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking, 1964



Three quarks for Muster Mark!

1964 : M. Gell-Mann et Zweig introduisent les quarks / aces

Up (u), down (d) et étrange (s)

mésons $q\bar{q}$

baryons qqq

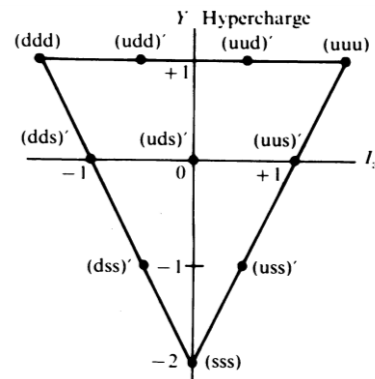
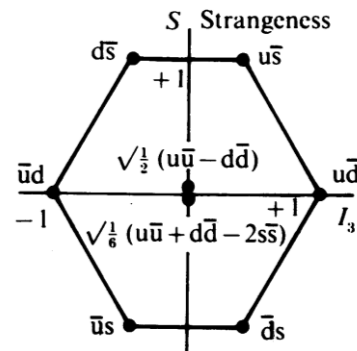


M. Gell-Mann,

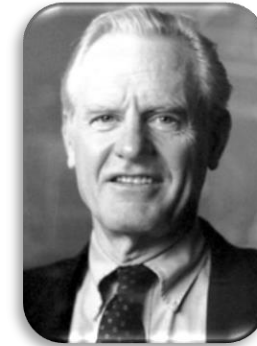
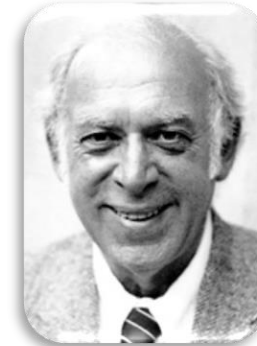
A Schematic Model of Baryons and Mesons, 1964

G. Zweig,

An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking, 1964



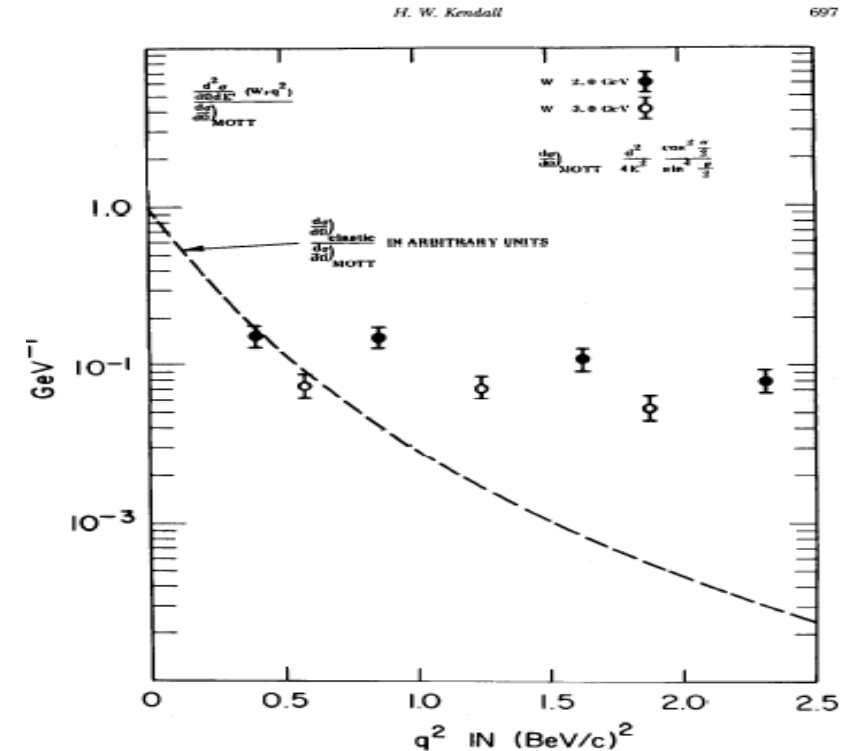
Photos from the Nobel Foundation archive



Friedman, Kendal, Taylor (et al.)

Observed Behavior of Highly Inelastic Electron-Proton Scattering, 1969, Stanford

Photo: T. Nakashima



Three quarks for Mustermark!

1964 : M. Gell-Mann et Zweig introduisent

Up (u), down (d) et étrange (s)

mésons $q\bar{q}$

baryons qqq

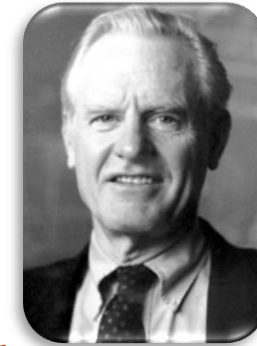
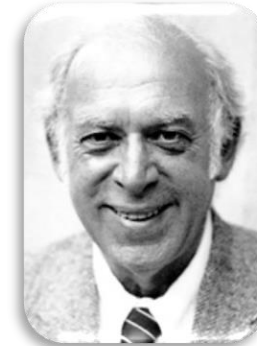
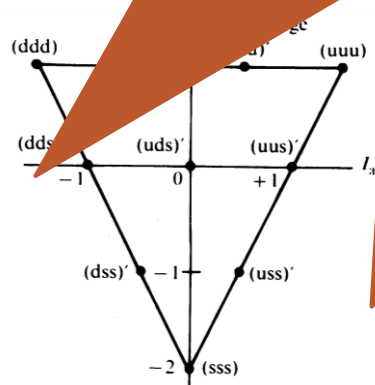
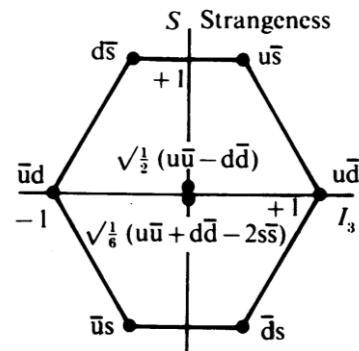


M. Gell-Mann,

A Schematic Model of Baryons and Mesons, 1964

G. Zweig,

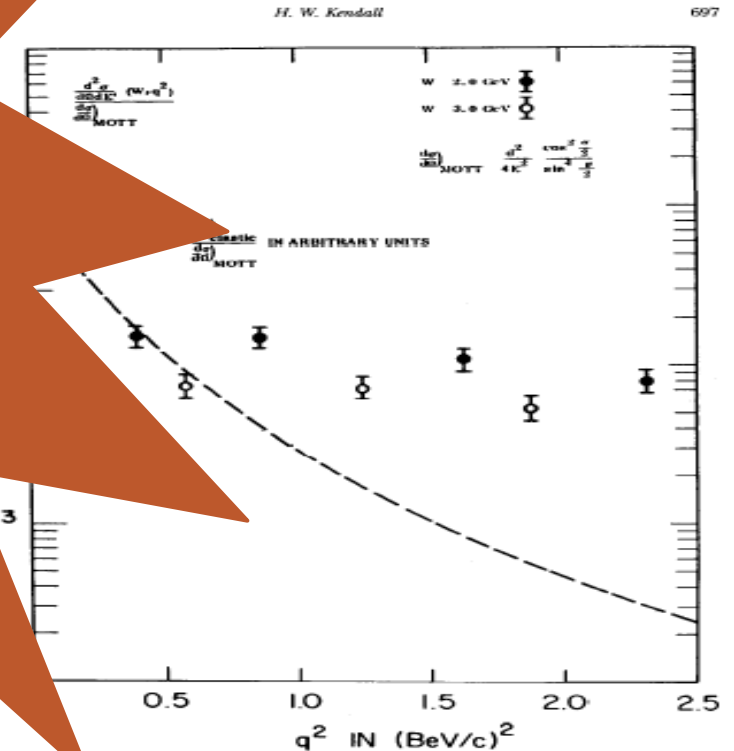
An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and its Predictions



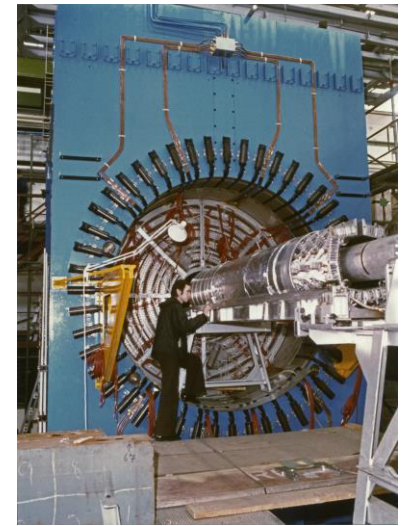
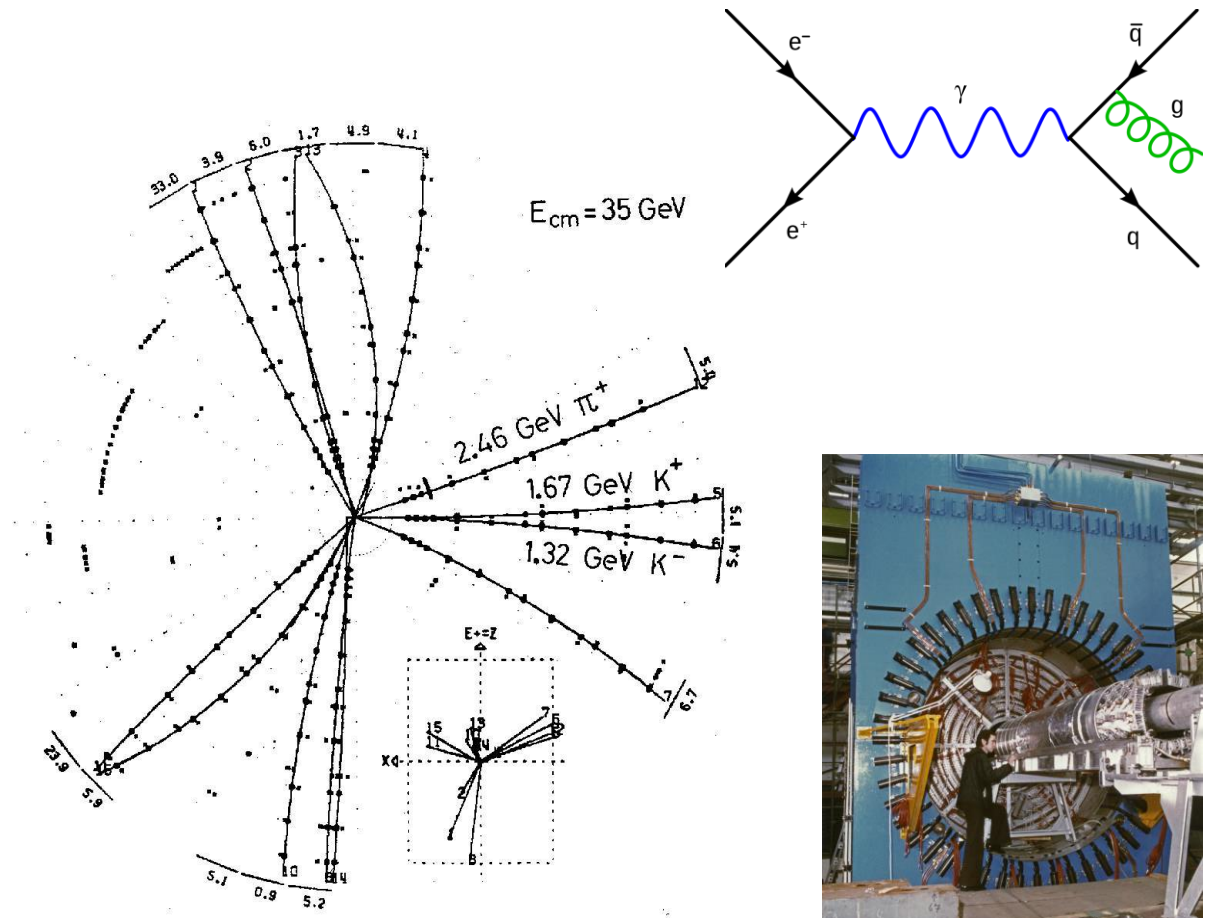
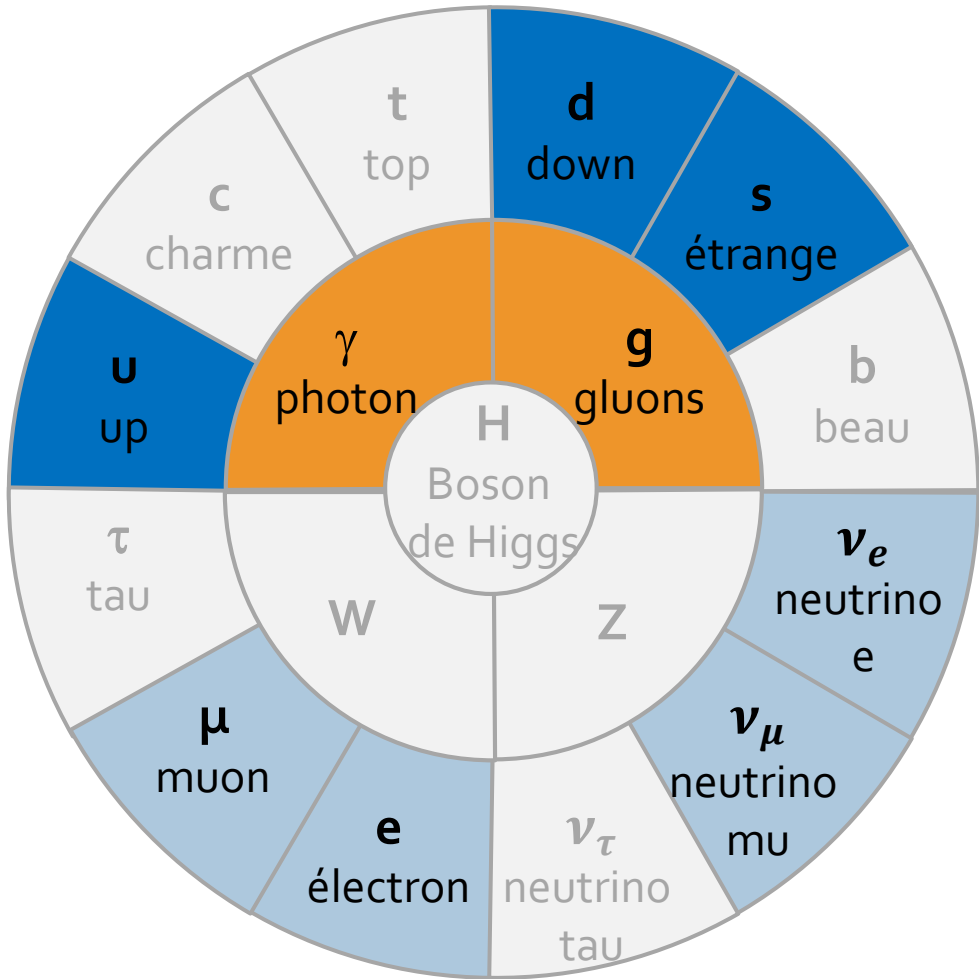
Friedman, Kendall, Taylor (et al.)

Observation of High Inelastic Electron-Proton Scattering, 1969

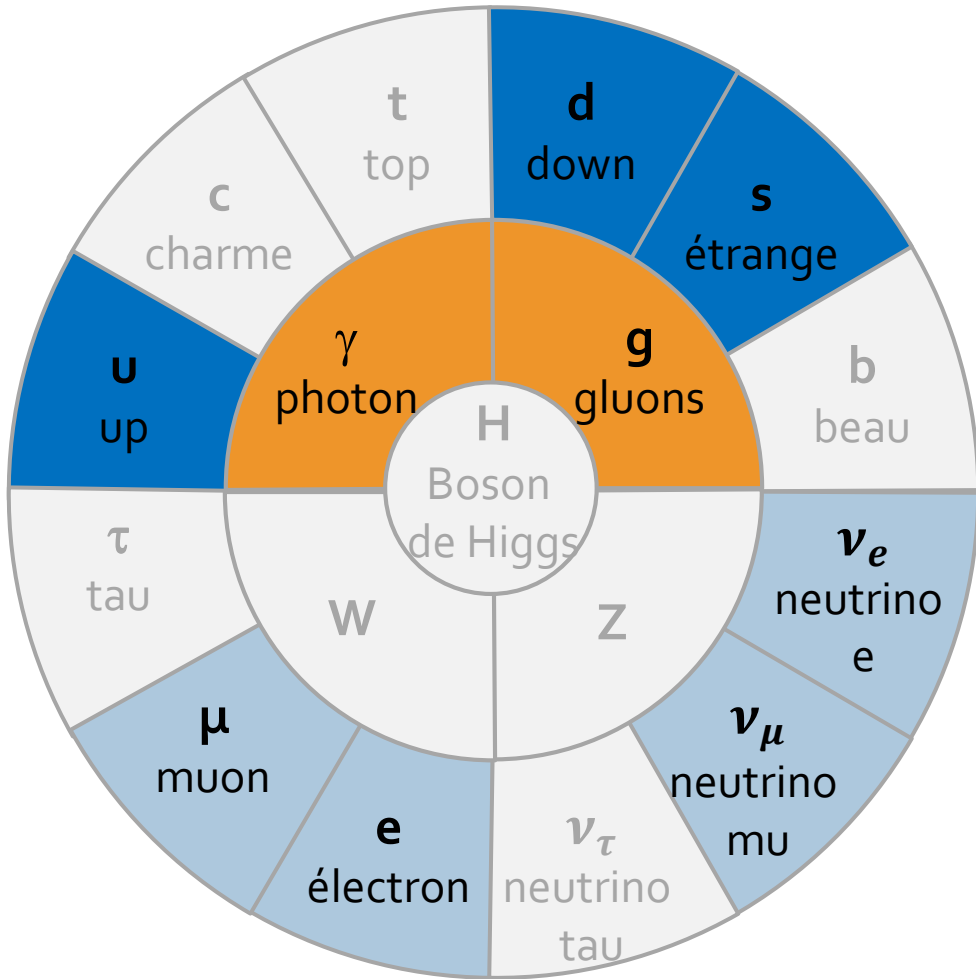
Quarks!



Des « jets » de quarks ... et de gluons !



22.9.80

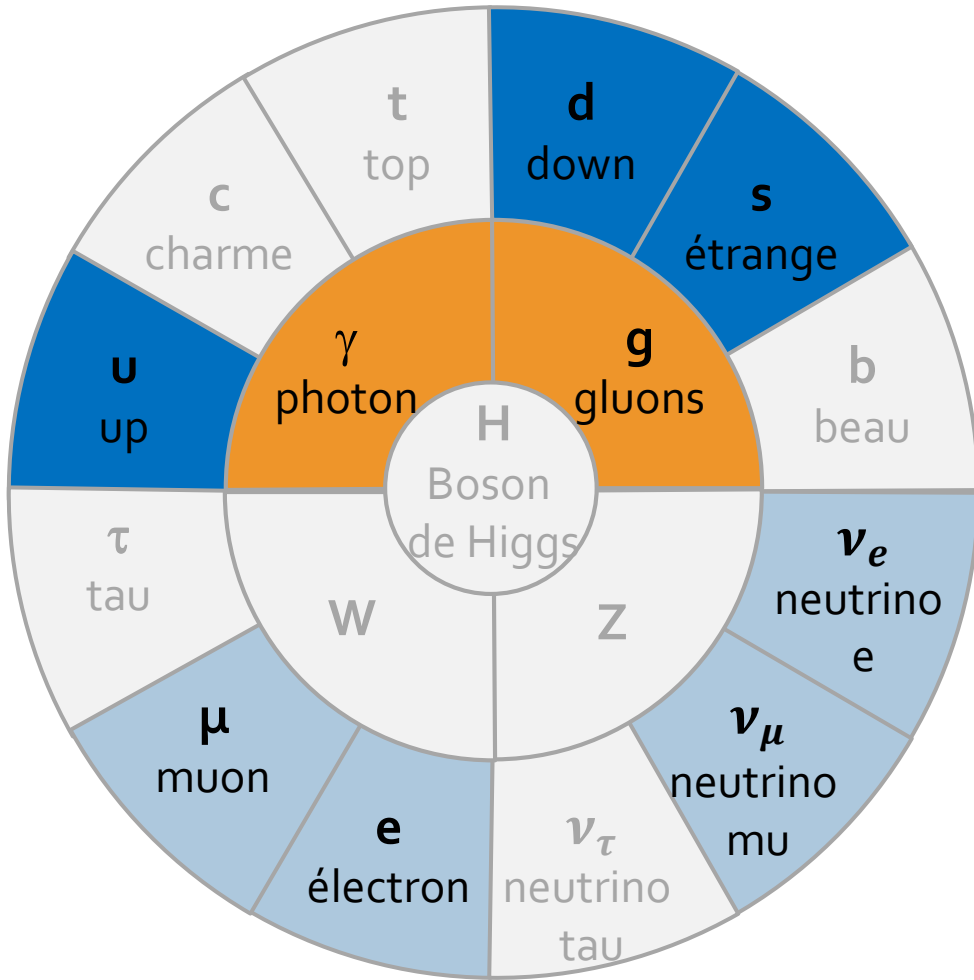


- 1.
- 2.

Lepton ch. -1	Neutrino 0
Électron	ν_e
Muon	ν_μ

Quark up $+2/3$	Quark down $-1/3$
Up	Down
???	Etrange

S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani,
Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry, **1970**

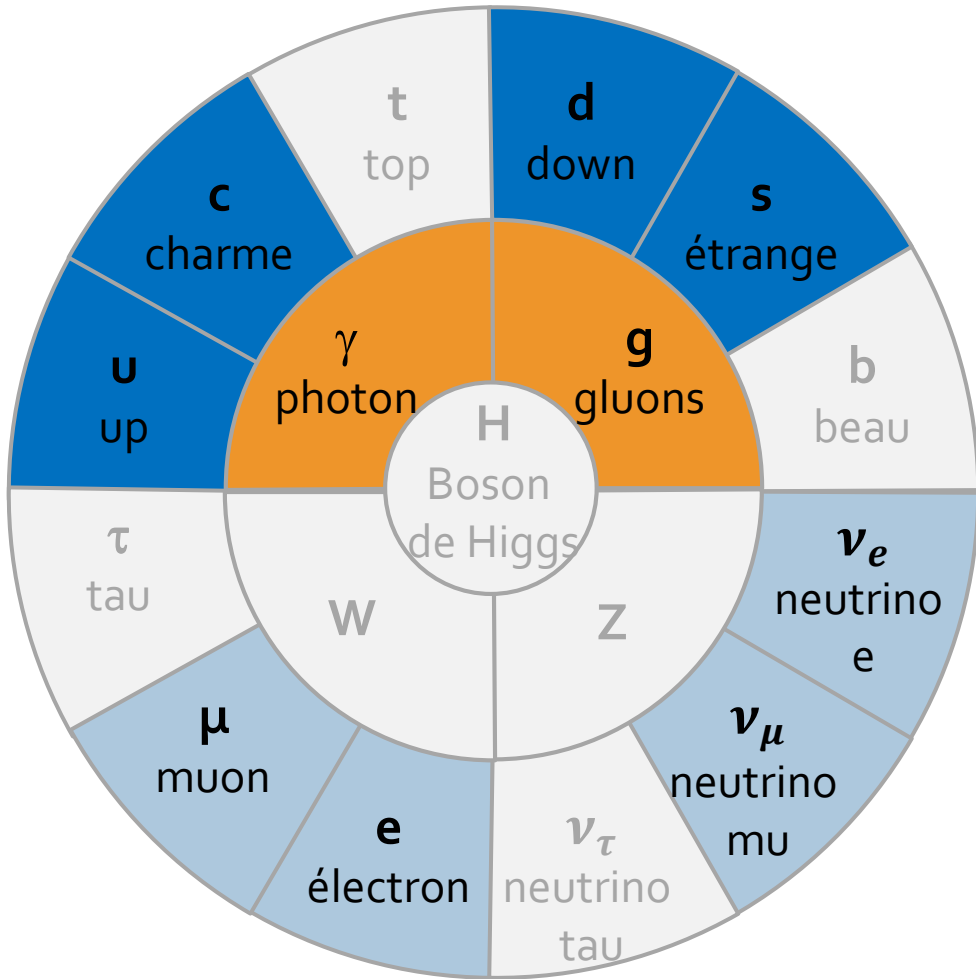


- 1.
- 2.

Lepton ch.	Neutrino
-1	0
Électron	ν_e
Muon	ν_μ

Quark up	Quark down
$+2/3$	$-1/3$
Up	Down
Charme	Etrange

S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani,
 Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry, 1970



- 1.
- 2.

Lepton ch.	Neutrino
-1	0
Électron	ν_e
Muon	ν_μ

Quark up	Quark down
$+2/3$	$-1/3$
Up	Down
Charme	Etrange

S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani,
Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry, 1970

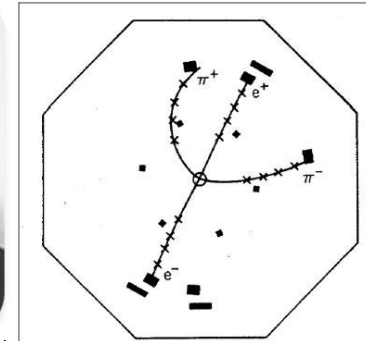
S. Ting
丁肇中



Photo Nobel Foundation archive

Le « J »

à Brookhaven
proton sur cible



$c\bar{c}$

$m = 3,105 \text{ GeV}$

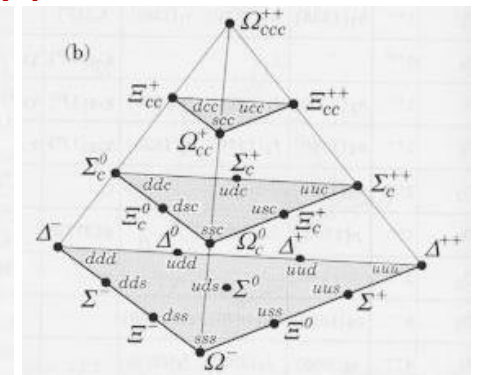
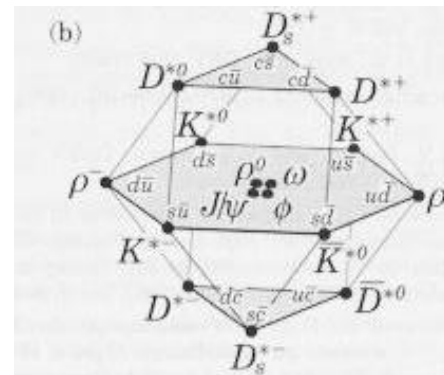
1974



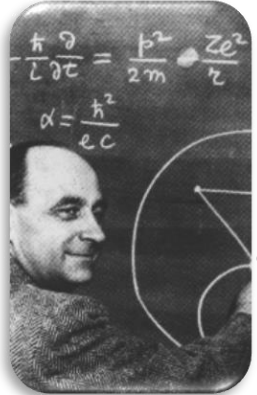
Photo Nobel Foundation archive

Le « Ψ »

at Stanford
Collisions $e^+ e^-$

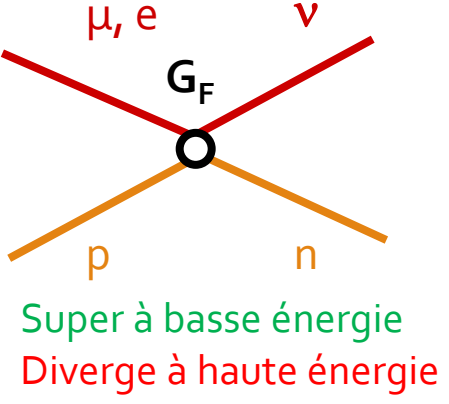


Faibles, mais c'est du lourd !

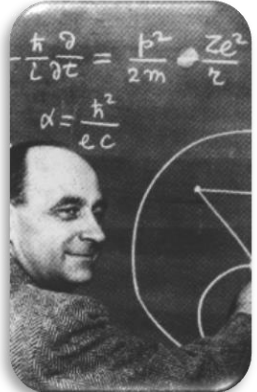


National Archives, Washington, D.C.

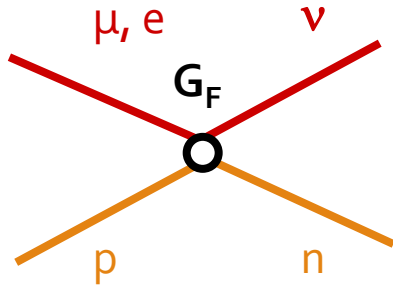
1934, E. Fermi



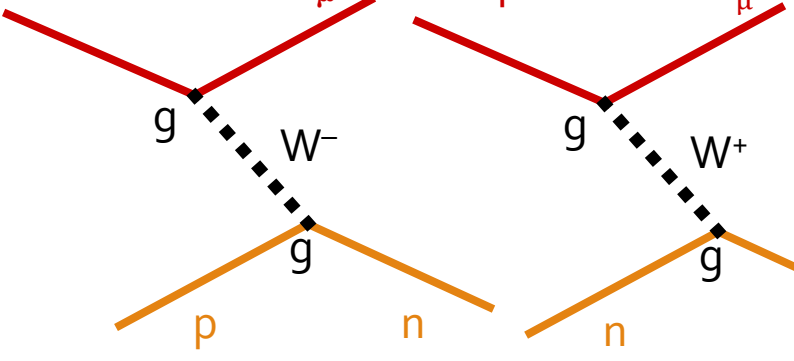
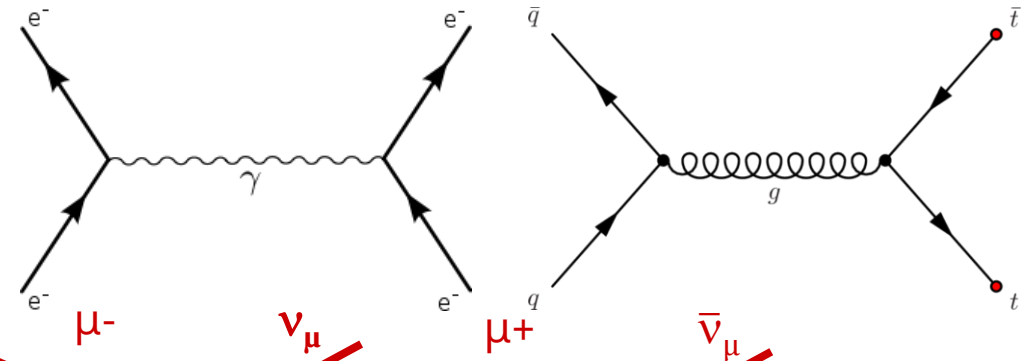
Faibles, mais c'est du lourd !



1934, E. Fermi



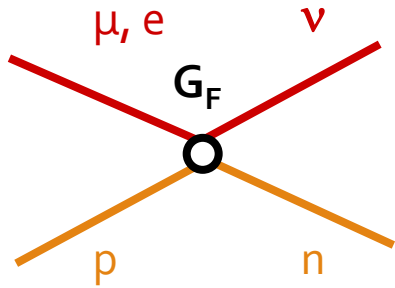
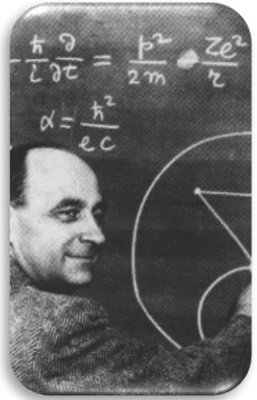
Super à basse énergie
Diverge à haute énergie



$M_W \sim 100 \text{ GeV}$

1957, J. Schwinger

Faibles, mais c'est du lourd !



Super à basse énergie
Diverge à haute énergie



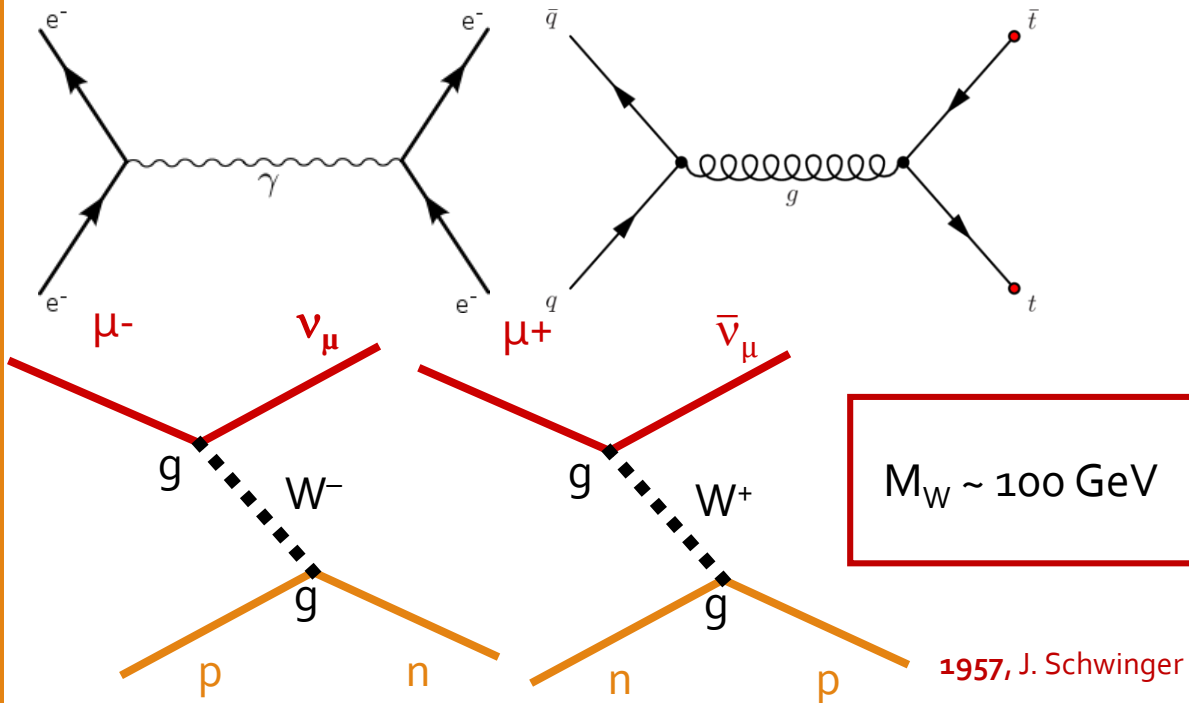
Glashow



Salam



Weinberg



PARTICULE ÉLÉMENTAIRE

Statistique : Boson



Nom : Boson vecteur de l'Interaction faible
Prénom : Z

Charge : 0
Spin : 1

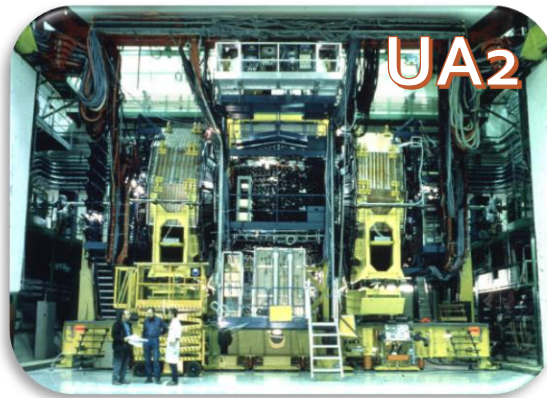
Masse : de l'ordre de 100 GeV

Signature du titulaire :

Faibles, mais c'est du lourd !

Trop massifs pour les collisionneurs e^+e^- de l'époque !

Photos Nobel Foundation archive



Solution cernoise : produire les W et les Z dans des collisions proton-antiproton.

Protons du SPS.
Accumulateur d'antiprotons (AA) construit tout exprès !

Collisions à 540 GeV dans les détecteurs nouvelle génération UA1 et UA2.



C. Rubbia



S. Van der Meer

Faibles, mais c'est du lourd !

Trop massifs pour les collisionneurs e^+e^- de l'époque !



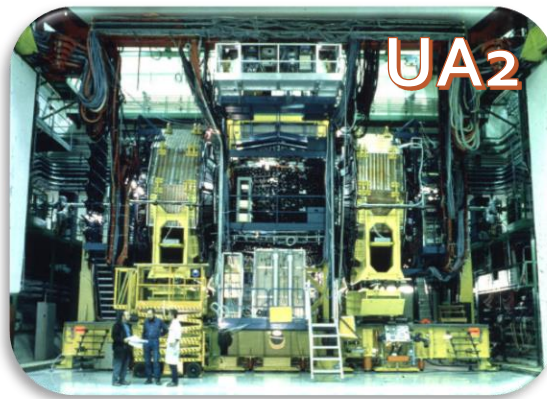
© 1976-2023 CERN



© CERN



© 1981-2023 CERN

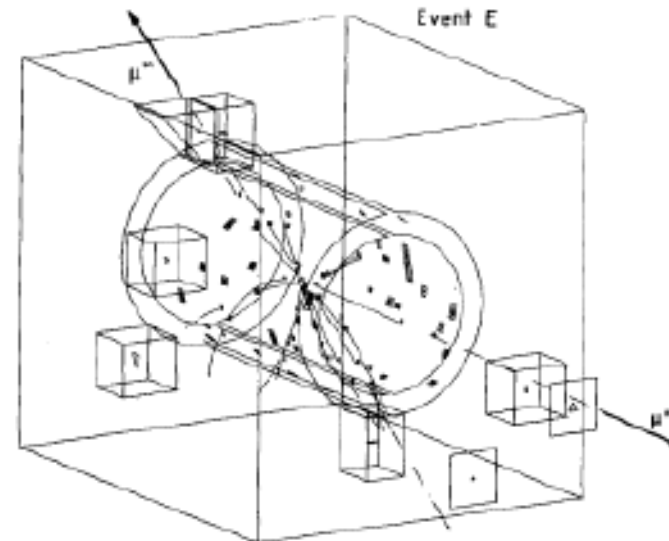


© CERN

Solution cernoise : produire les W et les Z dans des collisions proton-antiproton.

Protons du SPS.
Accumulateur d'antiprotons (AA) construit tout exprès !

Collisions à 540 GeV dans les détecteurs nouvelle génération UA1 et UA2.



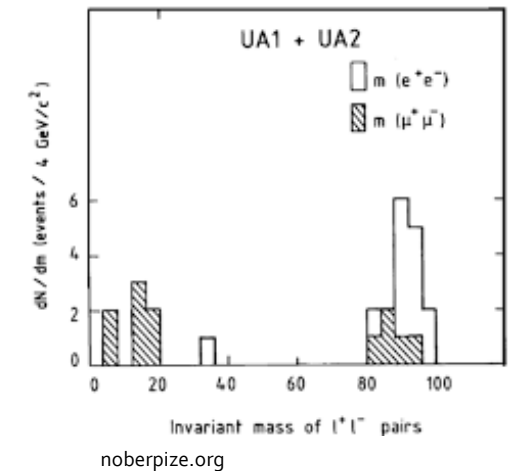
(Di Lella & Rubbia, 2015)



C. Rubbia



S. Van der Meer



$$m_Z = 93.0 \pm 1.7 \text{ GeV}$$

Faibles, mais...

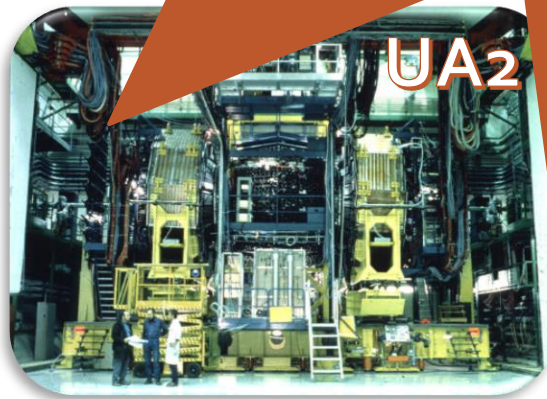
Trop massifs pour les collisionneurs e⁺e⁻ de l'époque !



SPS



UA1



UA2

Bosons Z et W[±]!

... : produire les W et les Z
... proton-antiproton.

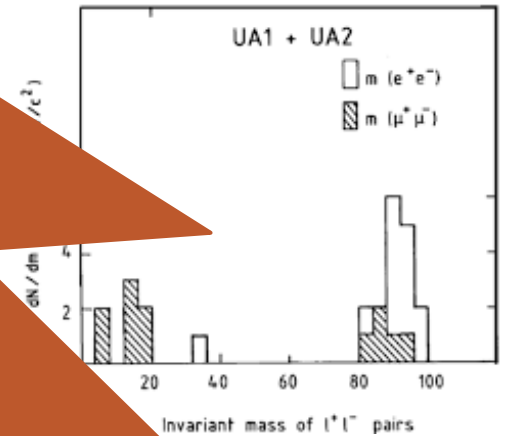


C. Rubbia



S. Van der Meer

...eurs



$$m_Z = 93.0 \pm 1.7 \text{ GeV}$$

L'une des particules les plus précisément connues !

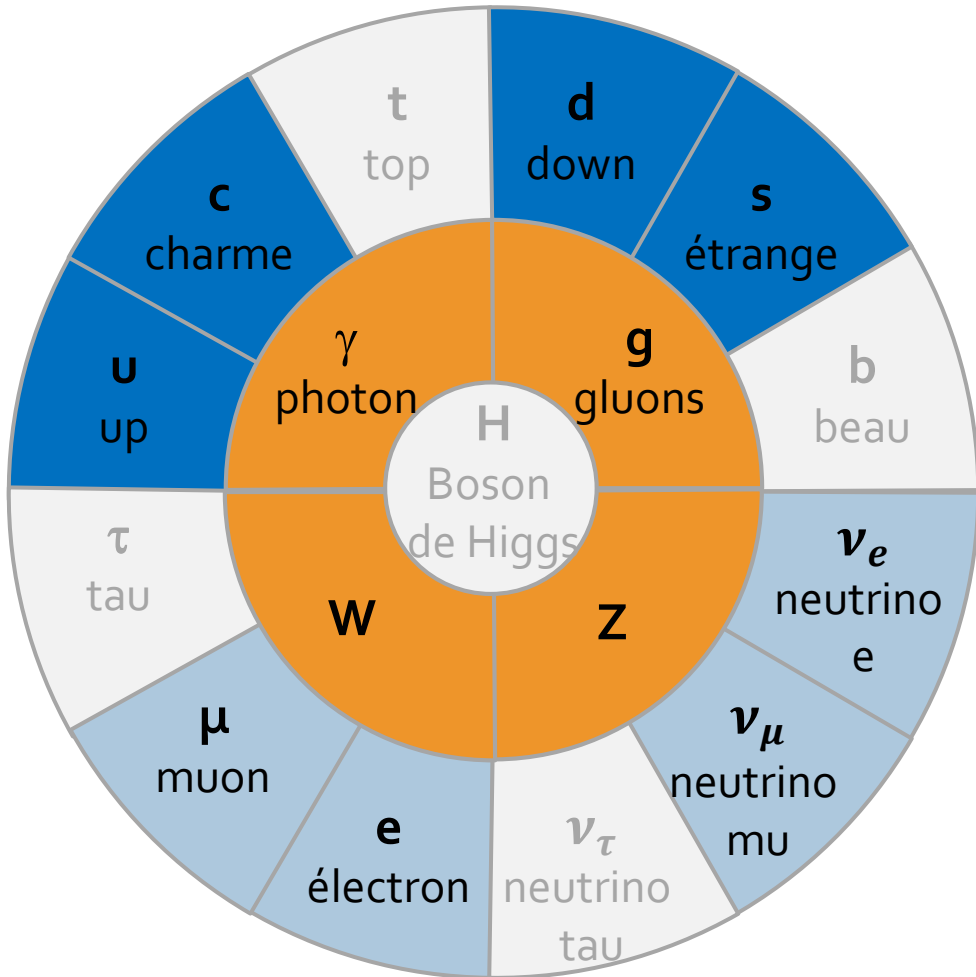
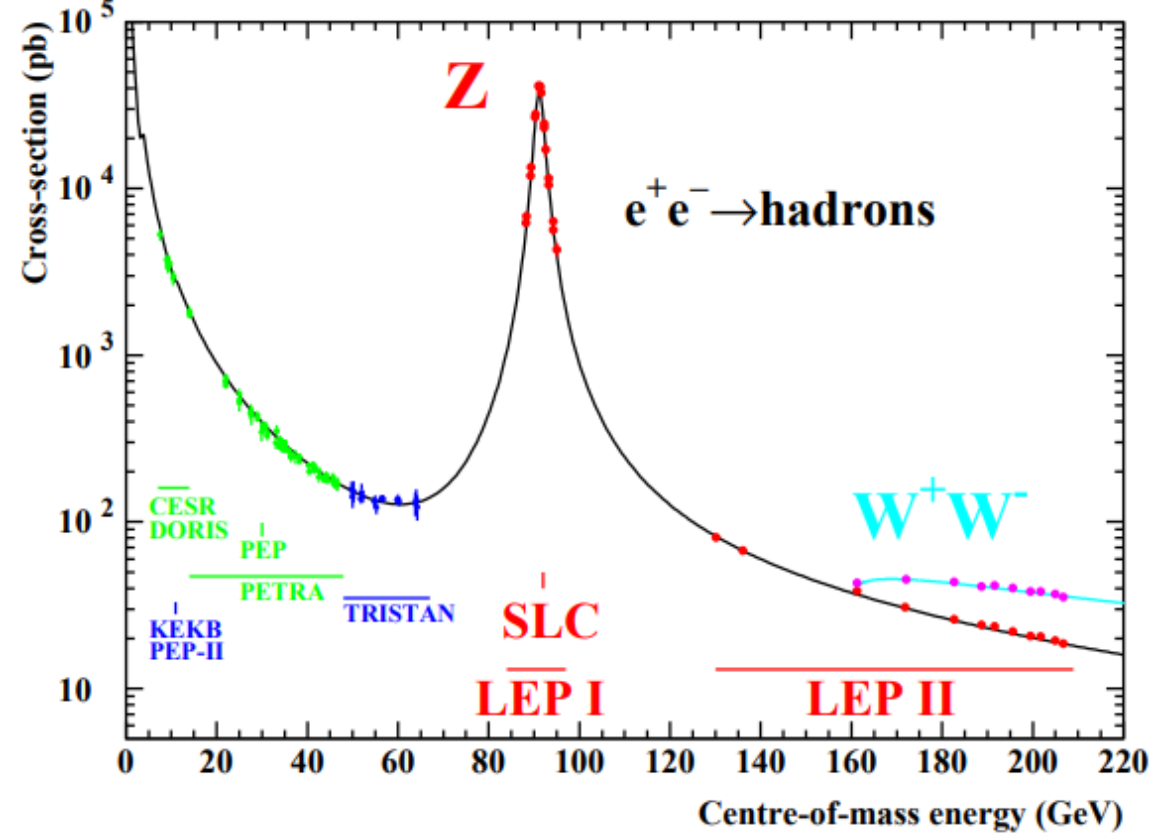


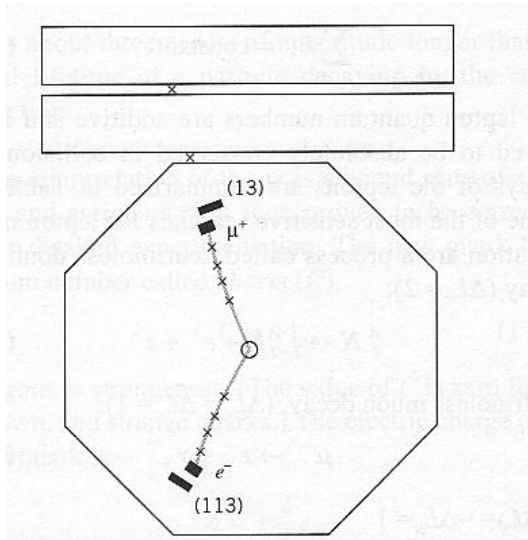
Image credit: arXiv:hep-ex/0509008



$$m_Z = 91.1876 \pm 0,0021 \text{ GeV}$$

Jamais deux sans trois (dès 1973...)

Jamais deux sans trois (dès 1973...)



1975 : découverte du

lepton tau

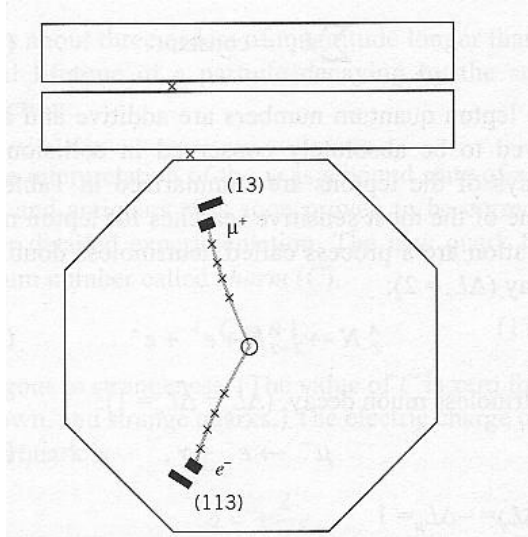
Détecteur Mark I au
collisionneur e+e-
SPEAR @SLAC

M. Perl et al.

Evidence for Anomalous Lepton
Production in e+e- Annihilation,

1975

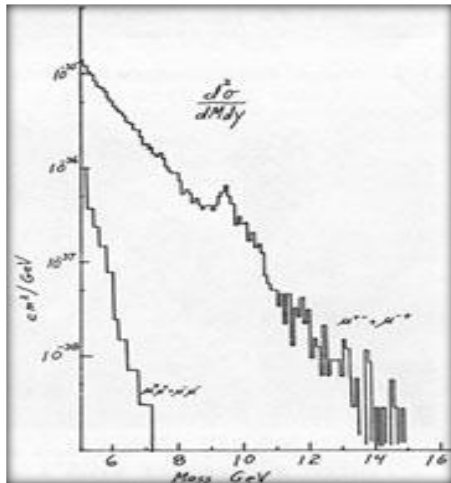
Jamais deux sans trois (dès 1973...)



1975 : découverte du **lepton tau**

Détecteur Mark I au collisionneur e+e- SPEAR @SLAC

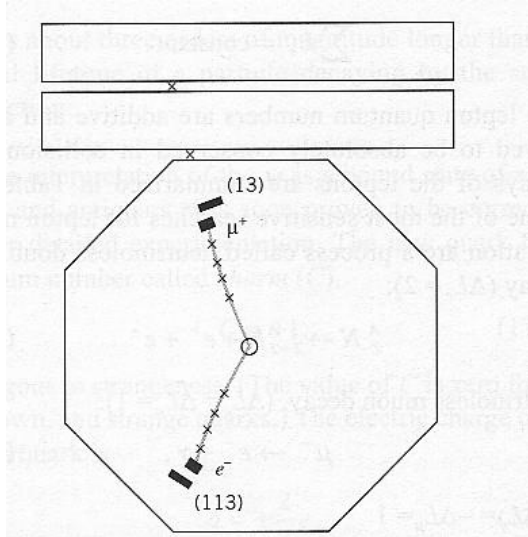
M. Perl et al.
Evidence for Anomalous Lepton Production in e+e- Annihilation, **1975**



1977 : découverte du **quark b**
 $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ @ 9,5 GeV
Y (Upsilon) = état lié $b\bar{b}$
E288 $\mu\mu$ II @ Fermilab

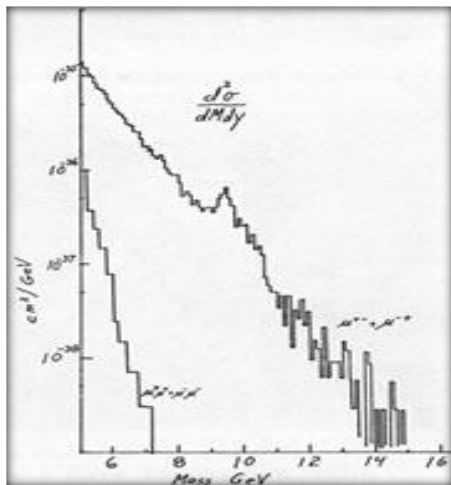
S.W. Herb et al.
Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV
in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions, **1977**

Jamais deux sans trois



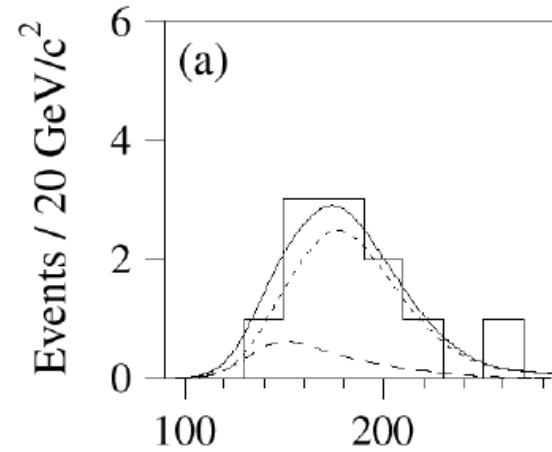
1975 : découverte du **lepton tau**
Détecteur Mark I au collisionneur e+e- SPEAR @SLAC

M. Perl et al.
Evidence for Anomalous Lepton Production in e+e- Annihilation, **1975**



1977 : découverte du **quark b**
 $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ @ 9,5 GeV
Y (Upsilon) = état lié $b\bar{b}$
E288 $\mu\mu$ II @ Fermilab

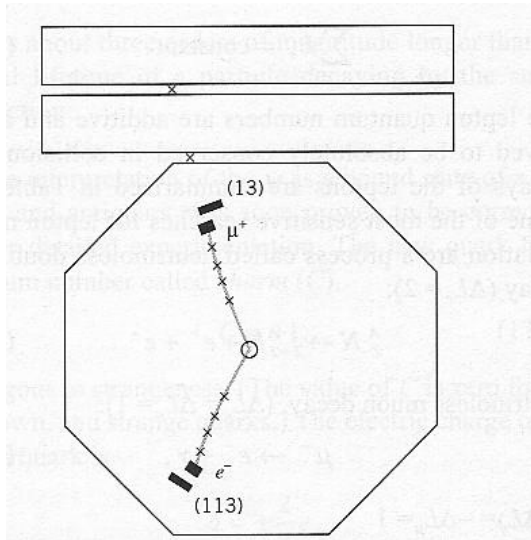
S.W. Herb et al.
Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions, **1977**



CDF Collaboration
Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab, **1995**
DØ Collaboration
Search for High Mass Top Quark Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, **1995**

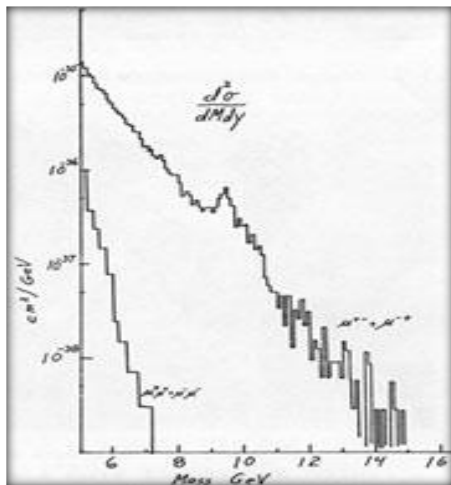
1995 : découverte du **quark top** par les expériences Do et CDF (TeVatron @ Fermilab)
 $m \sim 175$ GeV (la plus massive des particules élémentaires)

Jamais deux sans trois



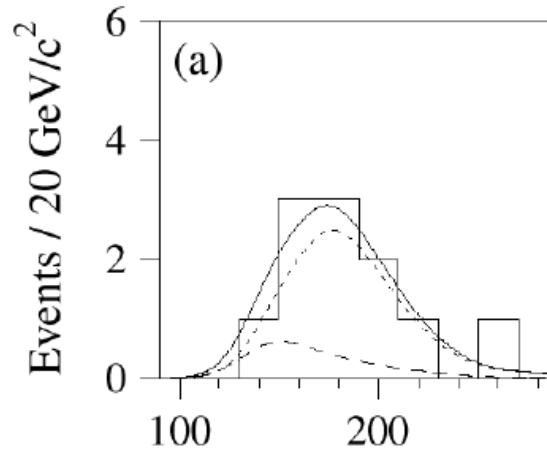
1975 : découverte du **lepton tau**
 Détecteur Mark I au collisionneur e+e- SPEAR @SLAC

M. Perl et al.
 Evidence for Anomalous Lepton Production in e+e- Annihilation, **1975**

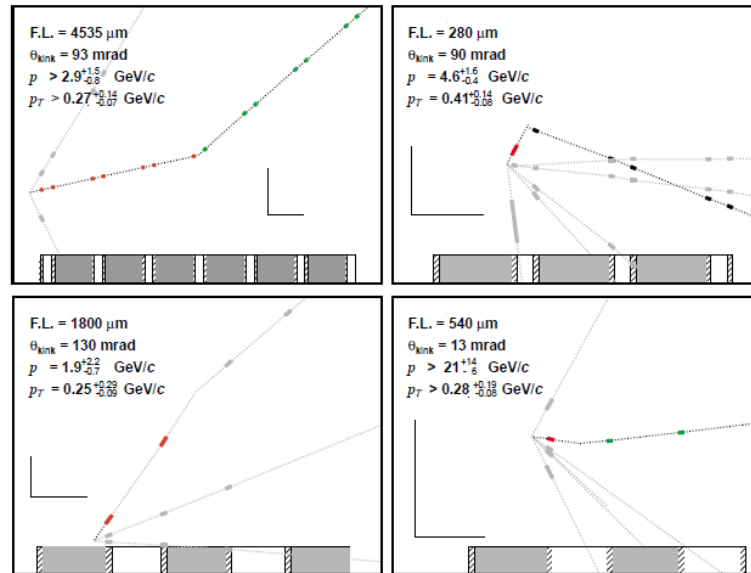


1977 : découverte du **quark b**
 $pp \rightarrow \mu^+\mu^-$ @ 9,5 GeV
 Υ (Upsilon) = état lié $b\bar{b}$
 E288 $\mu\mu$ II @ Fermilab

S.W. Herb et al.
 Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions, **1977**



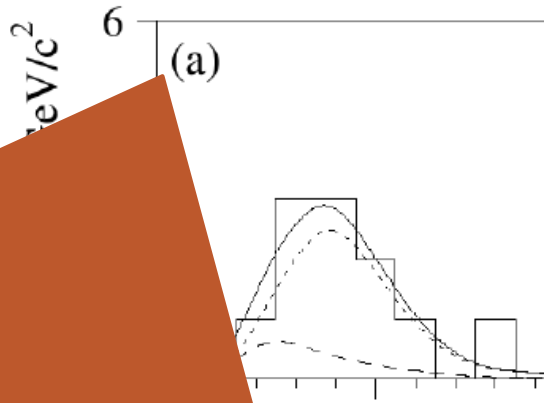
CDF Collaboration
 Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab, **1995**
 DØ Collaboration
 Search for High Mass Top Quark Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$, **1995**



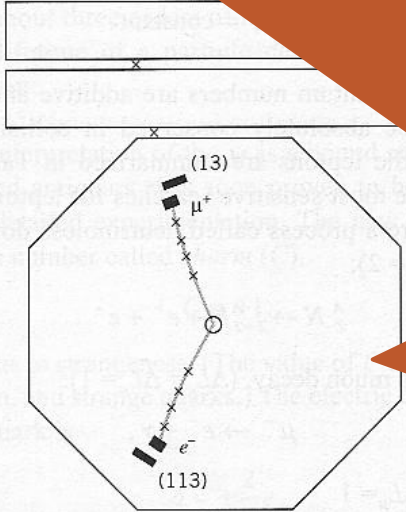
2000 : découverte du **neutrino tau** ν_τ par DONUT @ Fermilab

DONUT Collaboration
 Phys.Lett.B 504, **2001**

Jamais de... is



1995 : découverte du **quark top** par les expériences Do et CDF (TeVatron @ Fermilab)
 $m \sim 175 \text{ GeV}$ (la plus massive des particules élémentaires)



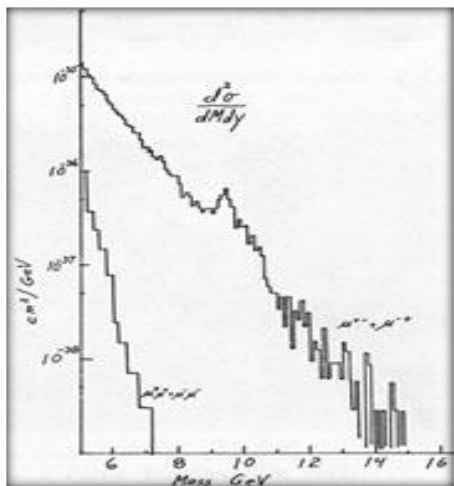
Sp

Produced in
1975

ons with the Collider Detector at Fermilab, **1995**

in pp Collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$, **1995**

Troisième famille !



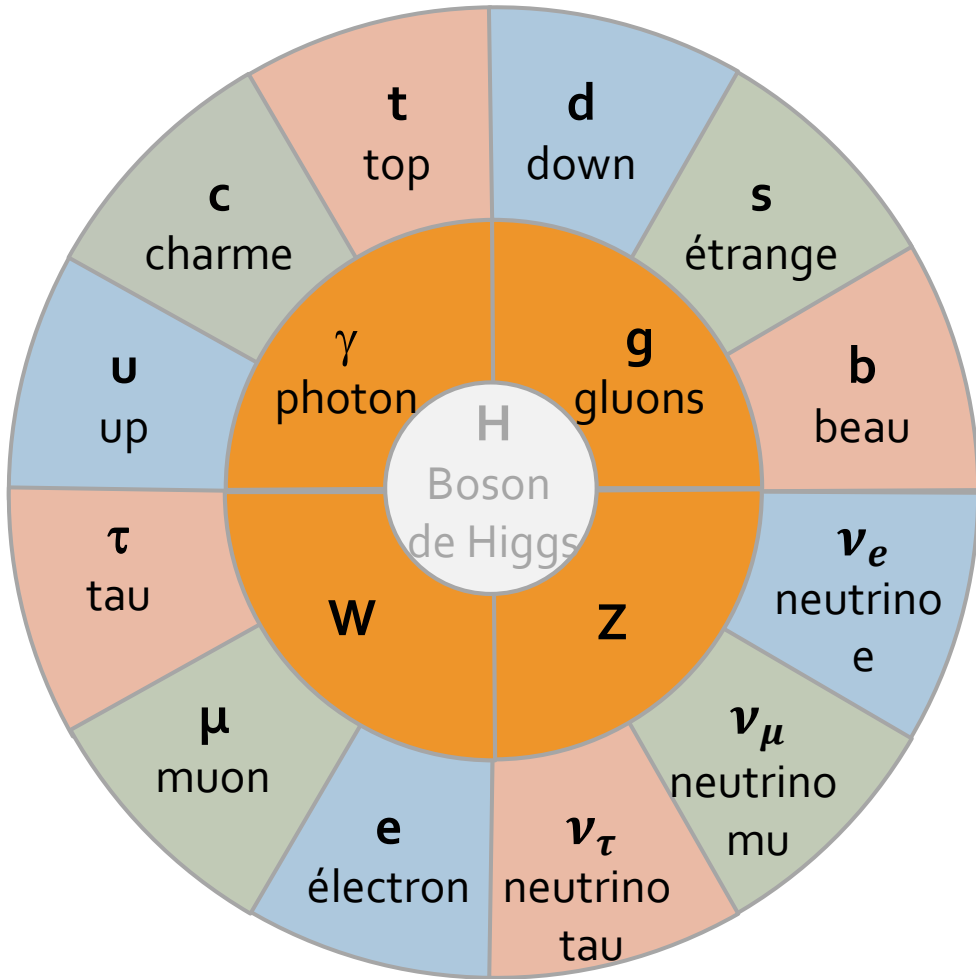
1977 : découverte du **quark bottom**
 $pp \rightarrow \mu^+ \mu^-$ @ Fermilab
 Υ (Upsilon) = état lié $b\bar{b}$
 E288 $\mu\mu$ II @ Fermilab

S.W. Herb et al.
 Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV
 in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions, **1977**

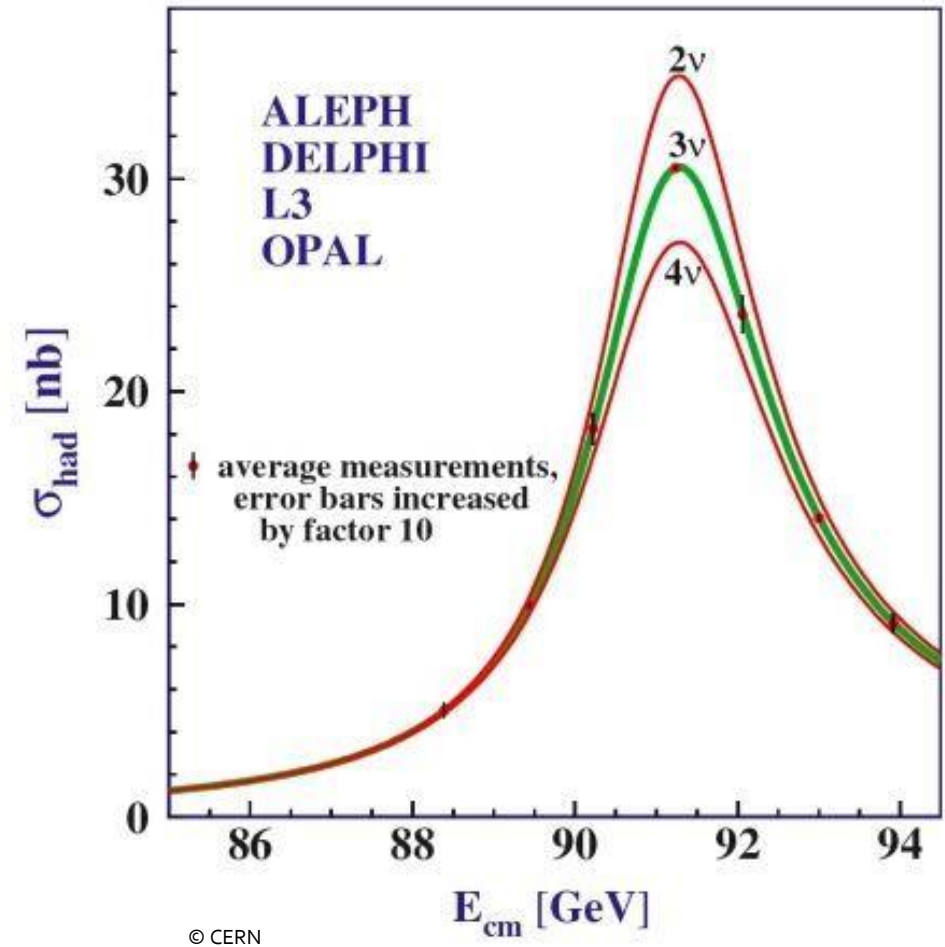
découverte du **neutrino tau ν_τ** par DONUT @ Fermilab

DONUT Collaboration
 Phys. Lett. B 504, **2001**





Nombre de neutrinos au LEP @ Cern



La mode est au sombrero

Symétries fondamentales \Rightarrow bosons de masse nulle

Patatra, les bosons W et Z sont massifs !

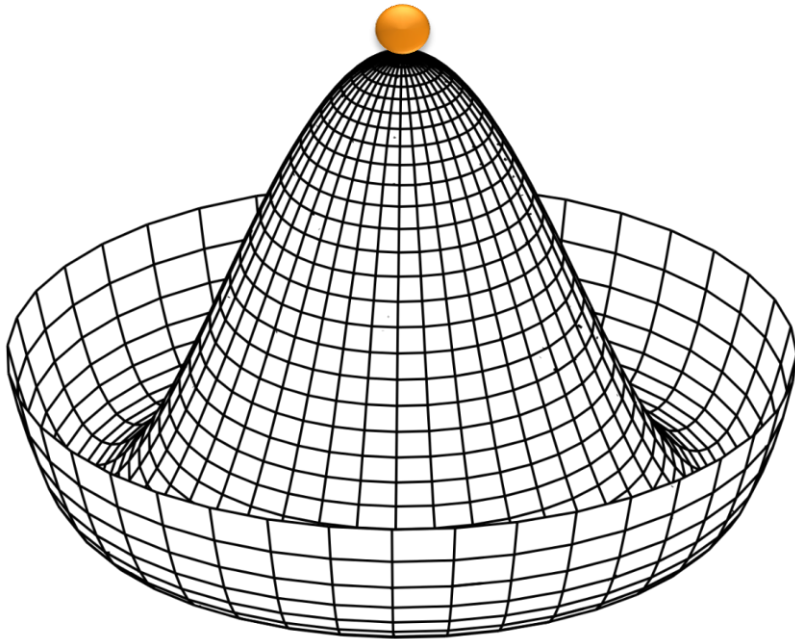
Il faut trouver un moyen de « briser doucement » les symétries fondamentales :
permettre que les états physique ne respectent pas les symétries tout en conservant ses symétries à l'équation

La mode est au sombrero

Symétries fondamentales \Rightarrow bosons de masse nulle

Patatra, les bosons W et Z sont massifs !

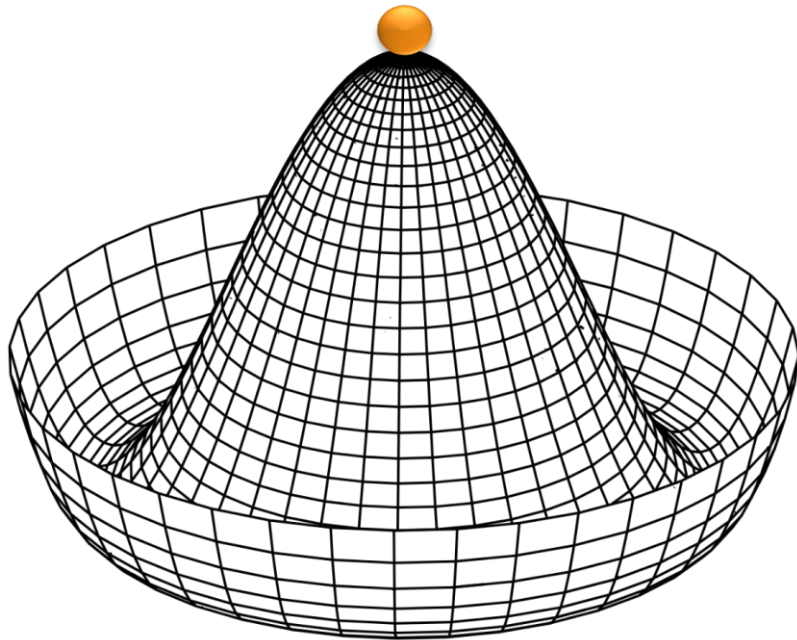
Il faut trouver un moyen de « briser doucement » les symétries fondamentales :
permettre que les états physique ne respectent pas les symétries tout en conservant ses symétries à l'équation




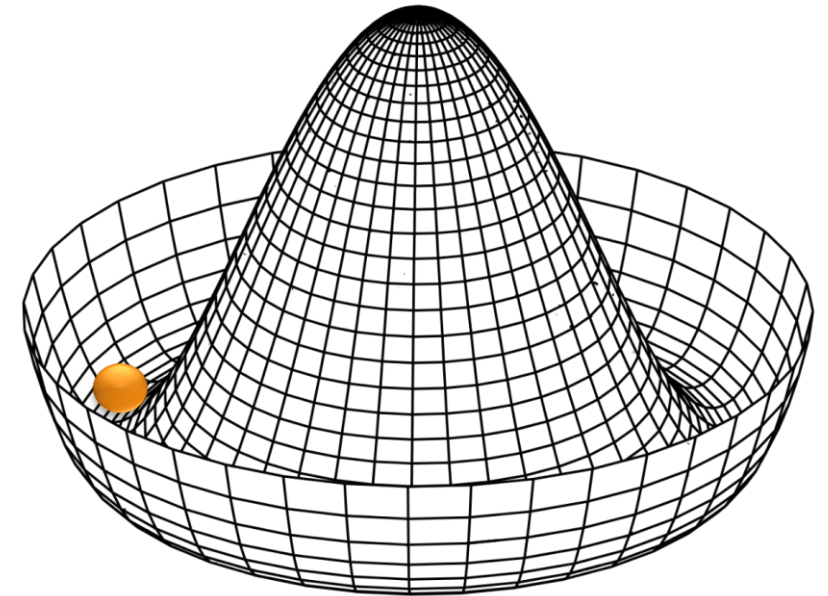
La mode est au sombrero

Symétries fondamentales \Rightarrow bosons de masse nulle
Patatra, les bosons W et Z sont massifs !

Il faut trouver un moyen de « briser doucement » les symétries fondamentales :
permettre que les états physique ne respectent pas les symétries tout en conservant ses symétries à l'équation



brisure
douce
de
symétrie

Transition
de phase



La mode est au sombrero

Symétries fondamentales \Rightarrow bosons de masse nulle

Patatra, les bosons W et Z sont massifs !

Il faut trouver un moyen de « briser doucement » les symétries fondamentales :
permettre que les états physique ne respectent pas les symétries tout en conservant ses symétries à l'équation

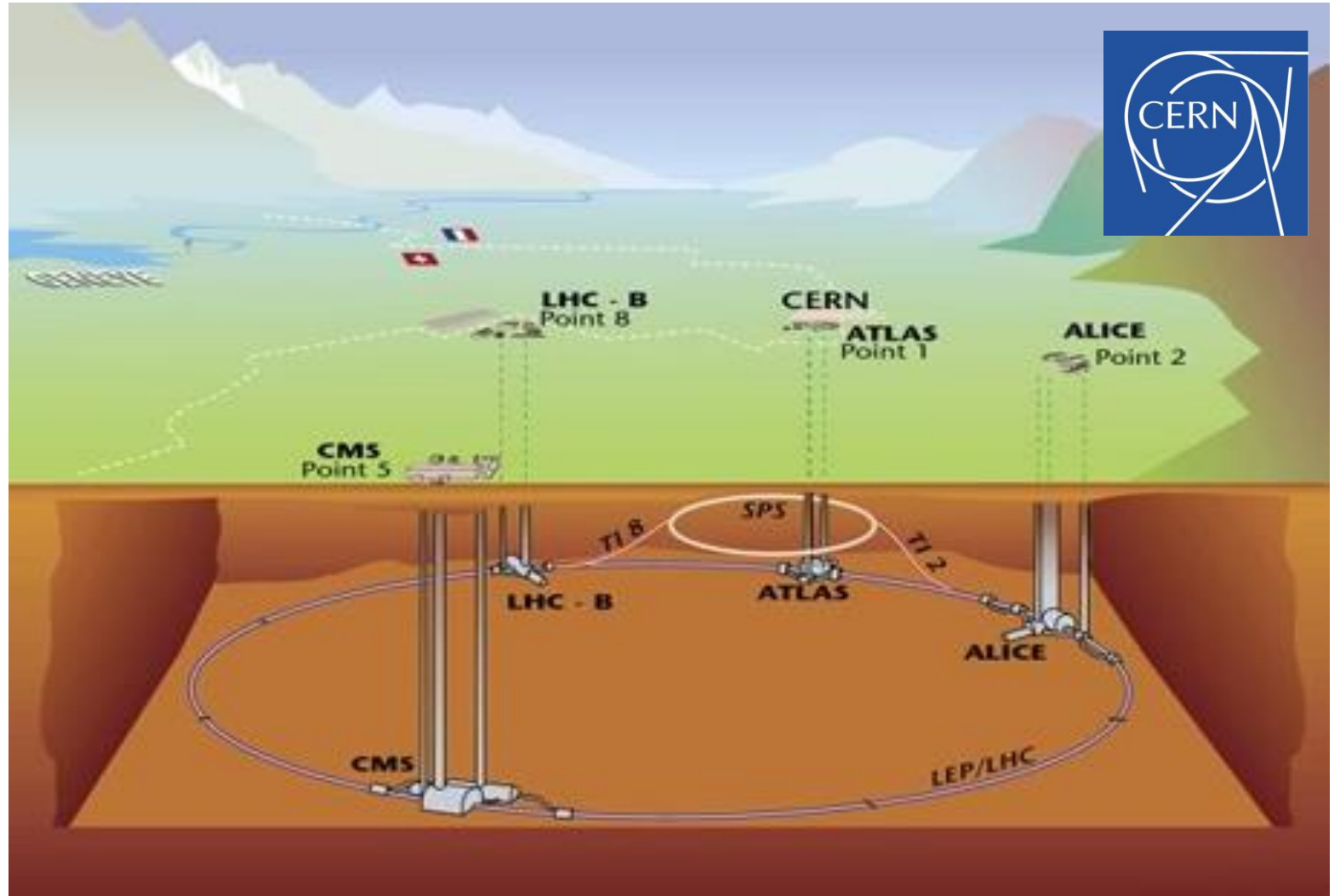
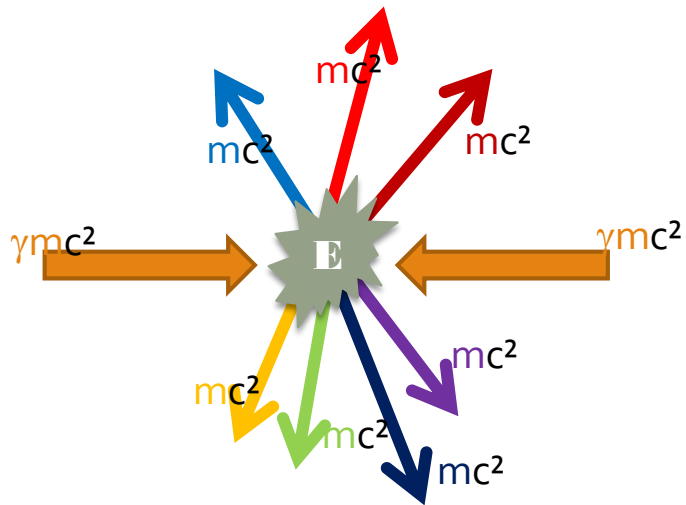
$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} \cdot B^{\mu\nu} + \bar{L} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) L \\ & + \bar{R} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) R - g (\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^a - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \\ & + \left| \left(i \partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \boldsymbol{\phi} \right|^2 - V(\boldsymbol{\phi}) - (G_1 \bar{L} \boldsymbol{\phi} R + G_2 \bar{L} \boldsymbol{\phi}_c R + h. c.) \end{aligned}$$

Une nouvelle particule ?

La chasse au boson est ouverte

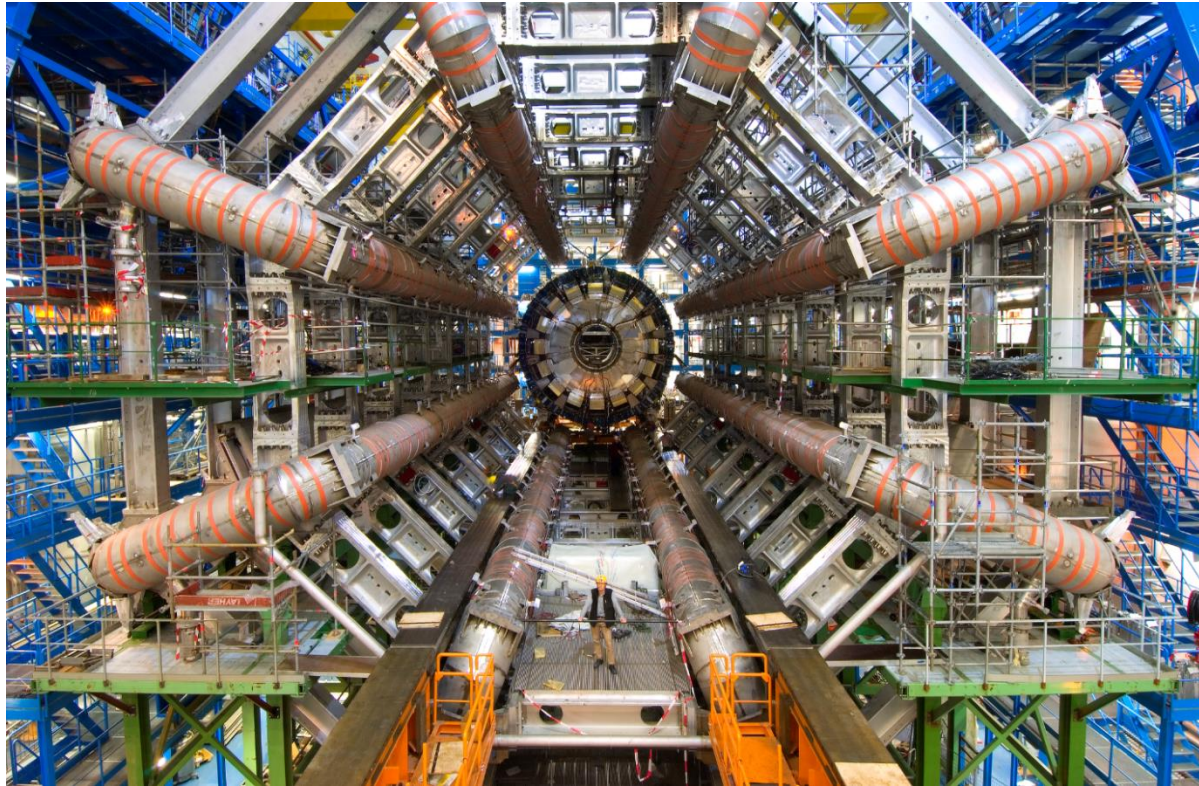
Particule massive et difficile à produire (processus rares)

⇒ **beaucoup de collisions à haute énergie !**

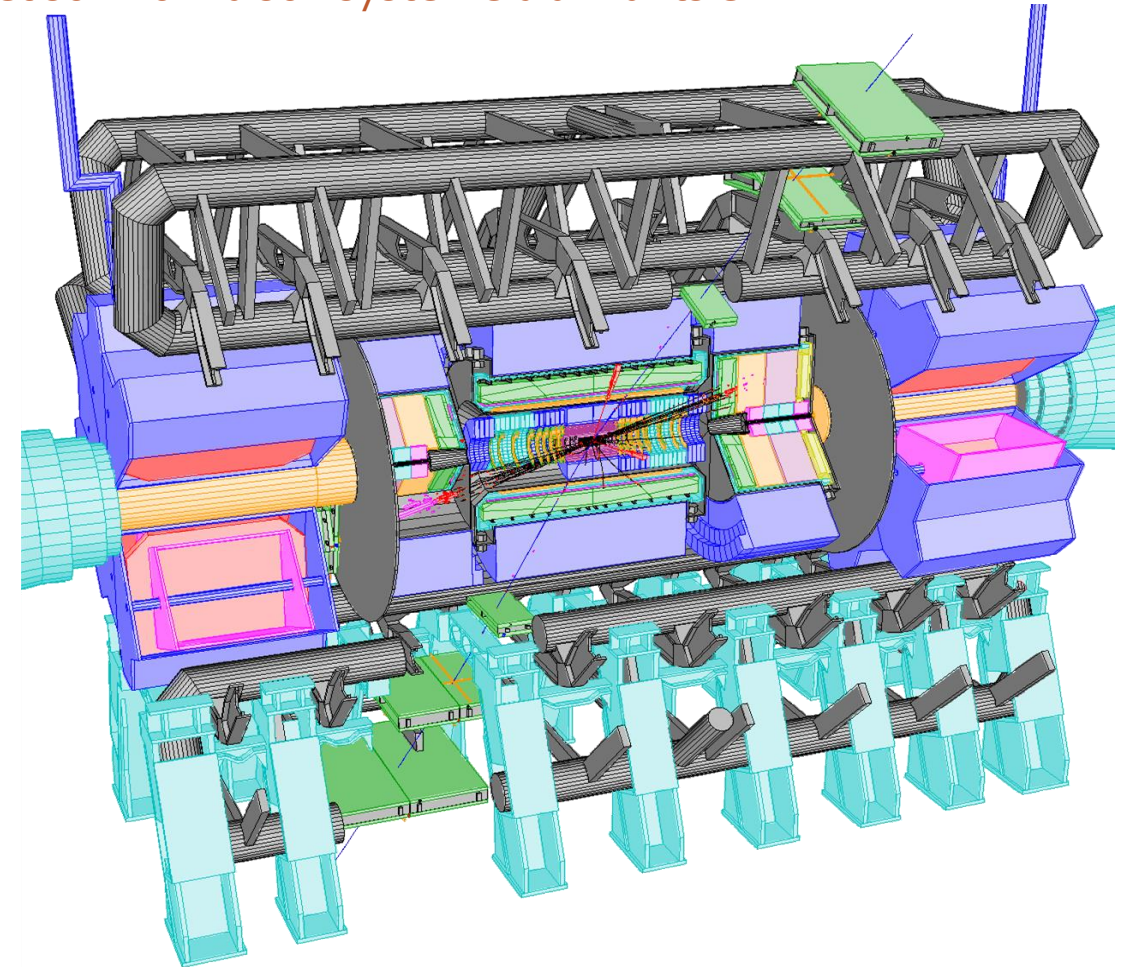




A Toroidal LHC ApparatuS : 7000 t pour 45 m de long et 25m de diamètre, le plus grand détecteur de particules jamais construit doit sa taille et son nom à son système d'aimants en particulier son toroïde

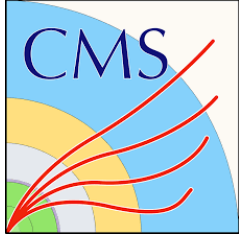


© CERN

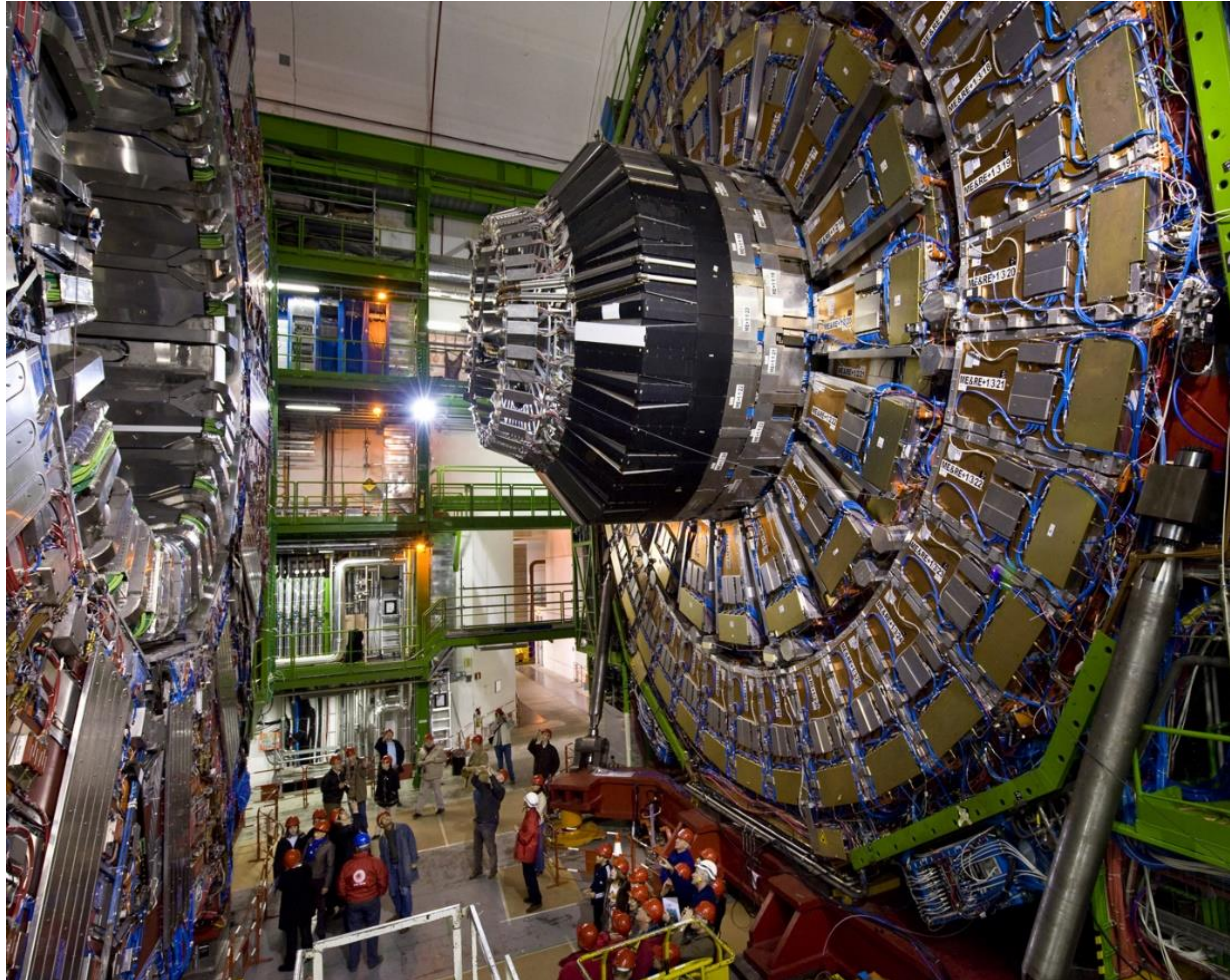


© IRFU

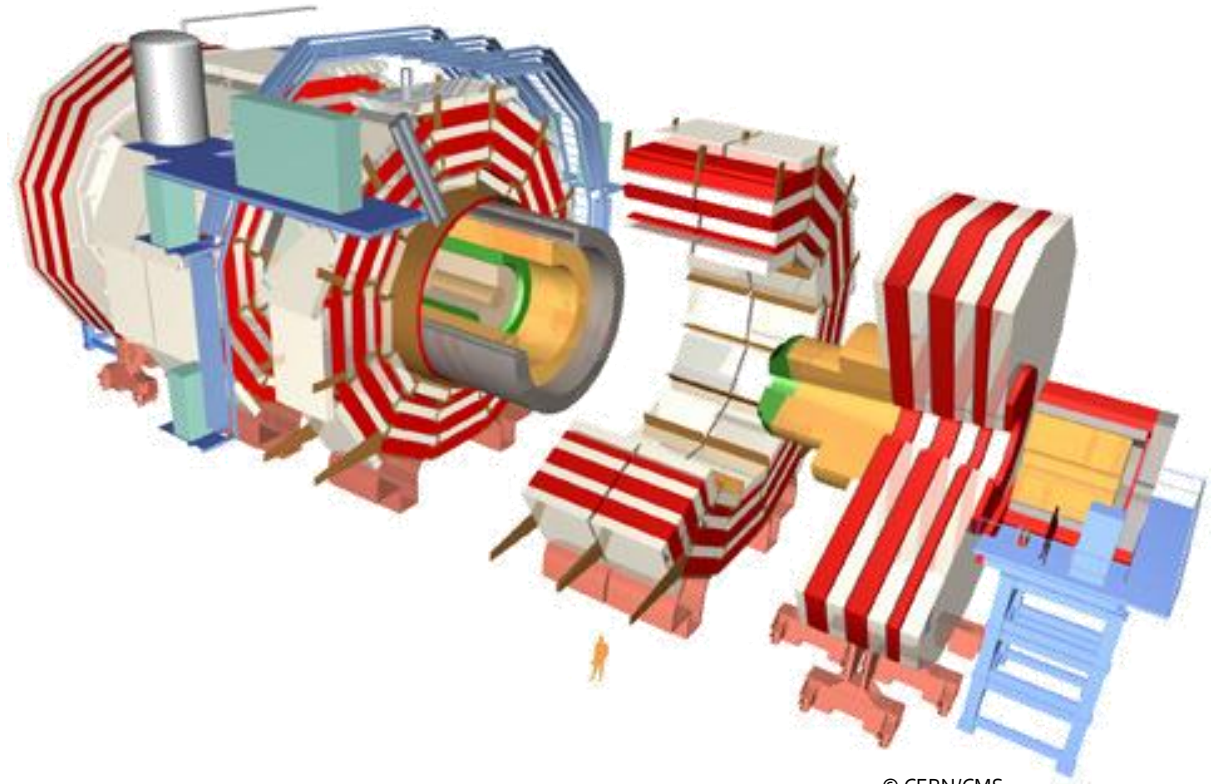
> 5 500 scientifiques issus de 245 instituts, représentant pas moins de 42 pays



Compact Muon Solenoid : 14,000 t mais seulement 15 m de haut et 21 m de long et le solénoïde le plus puissant jamais construit (énergie stockée 2,6 GJ)



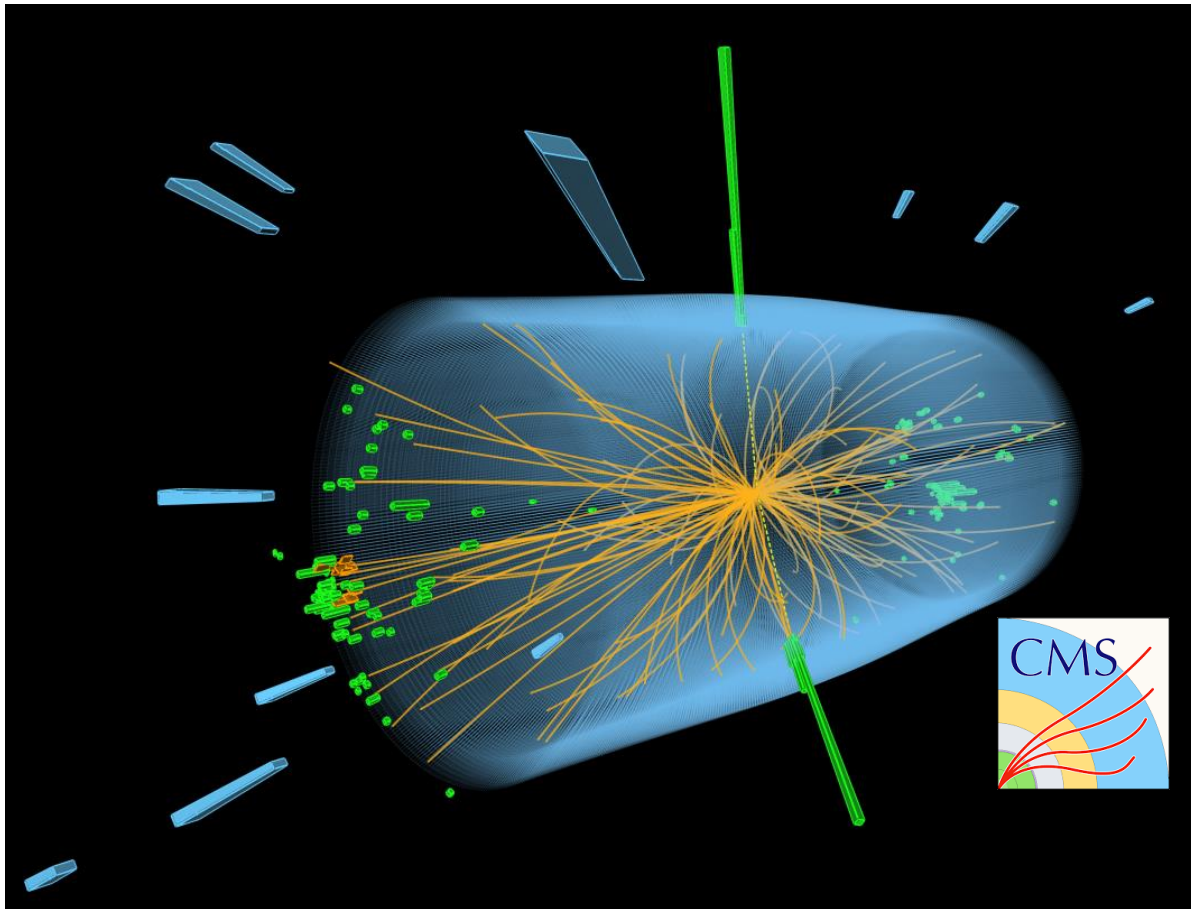
© CERN



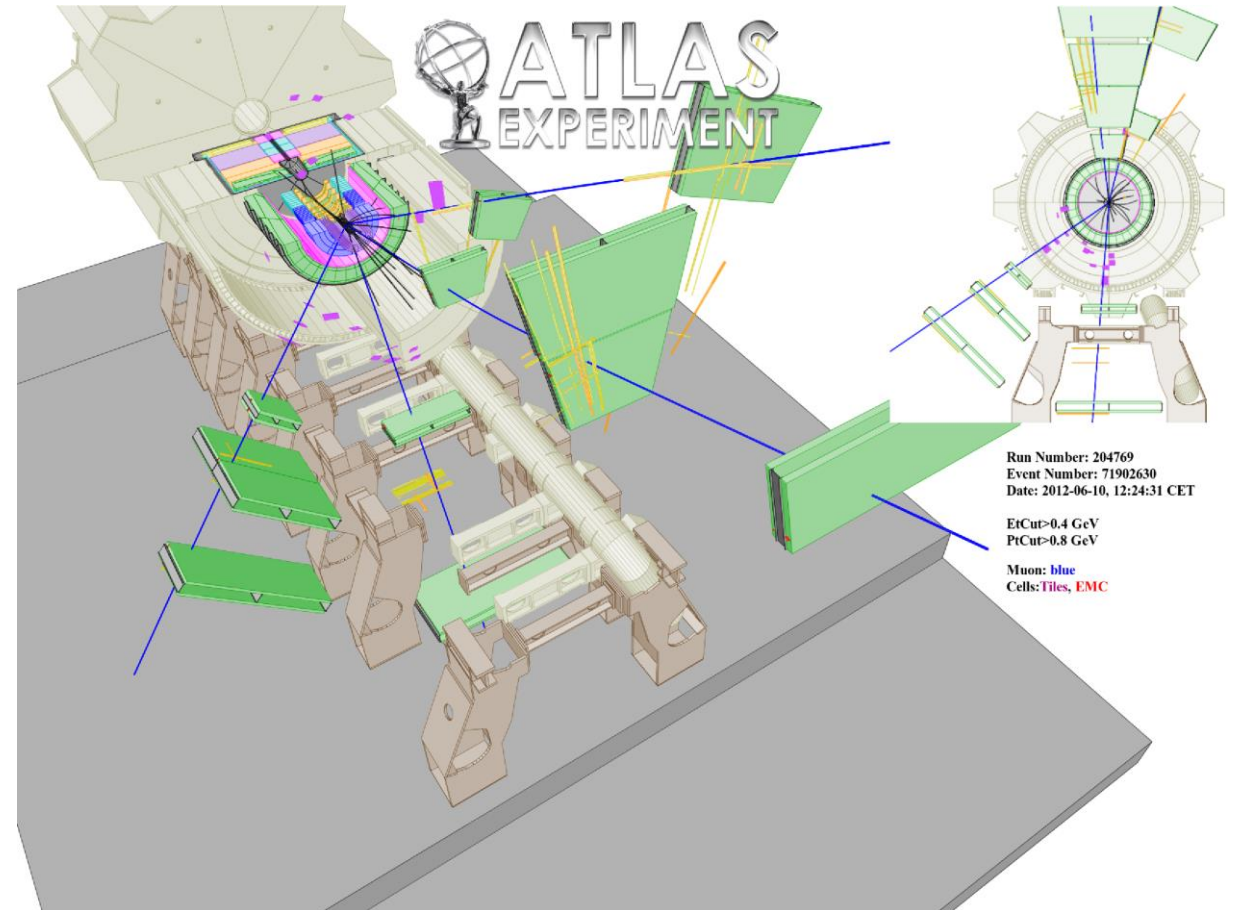
© CERN/CMS

> 4000 physiciens des particules, ingénieurs, informaticiens, techniciens et étudiants de quelque 240 instituts et universités de plus de 50 pays

La pièce manquante

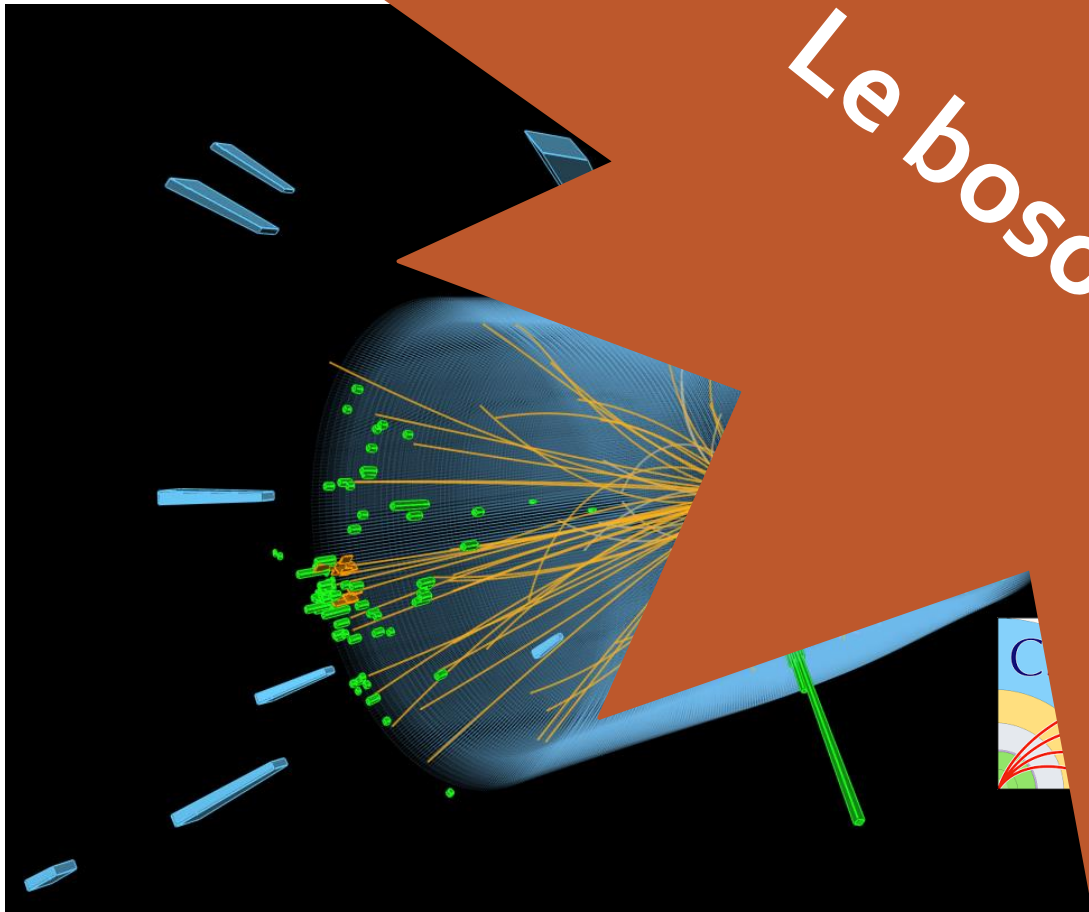


© CERN/CMS

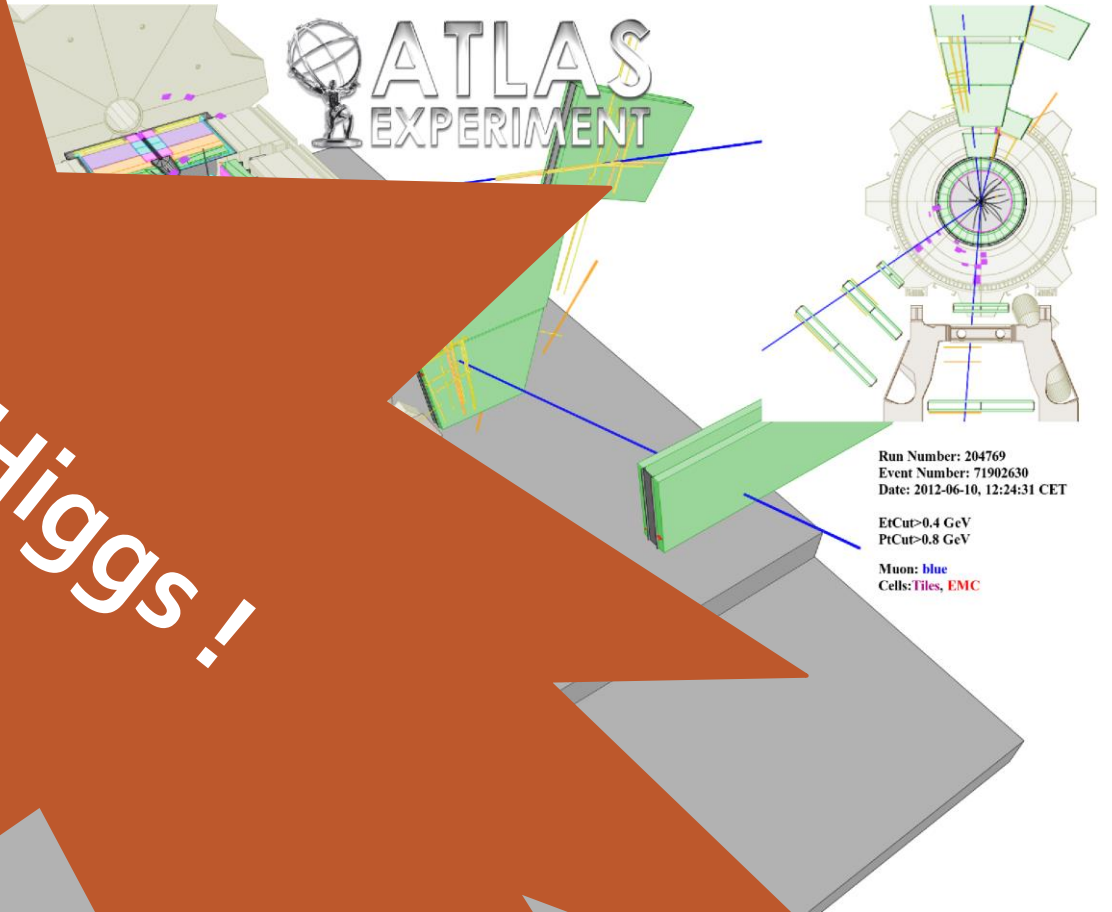


© IRFU

La pièce ma



Le boson de Higgs !



Run Number: 204769
Event Number: 71902630
Date: 2012-06-10, 12:24:31 CET

E_TCut=0.4 GeV
P_TCut=0.8 GeV

Muon: blue
Cells: Tiles, EMC

Prix Nobel 2013 pour un boson... très standard

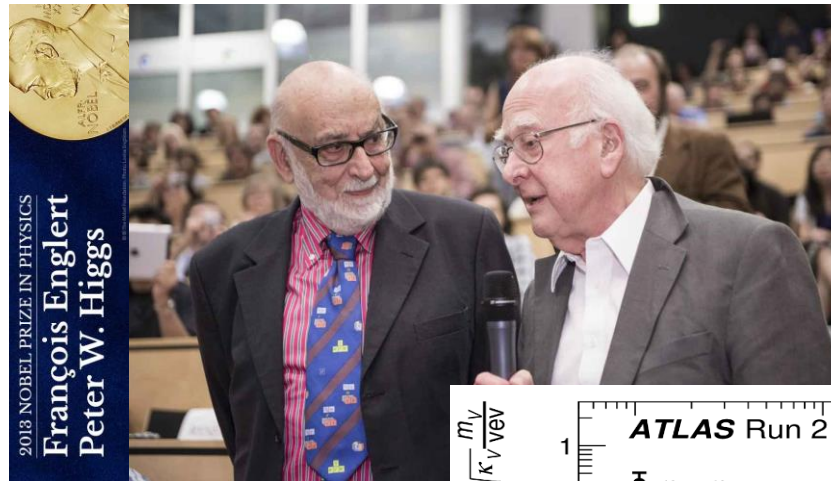
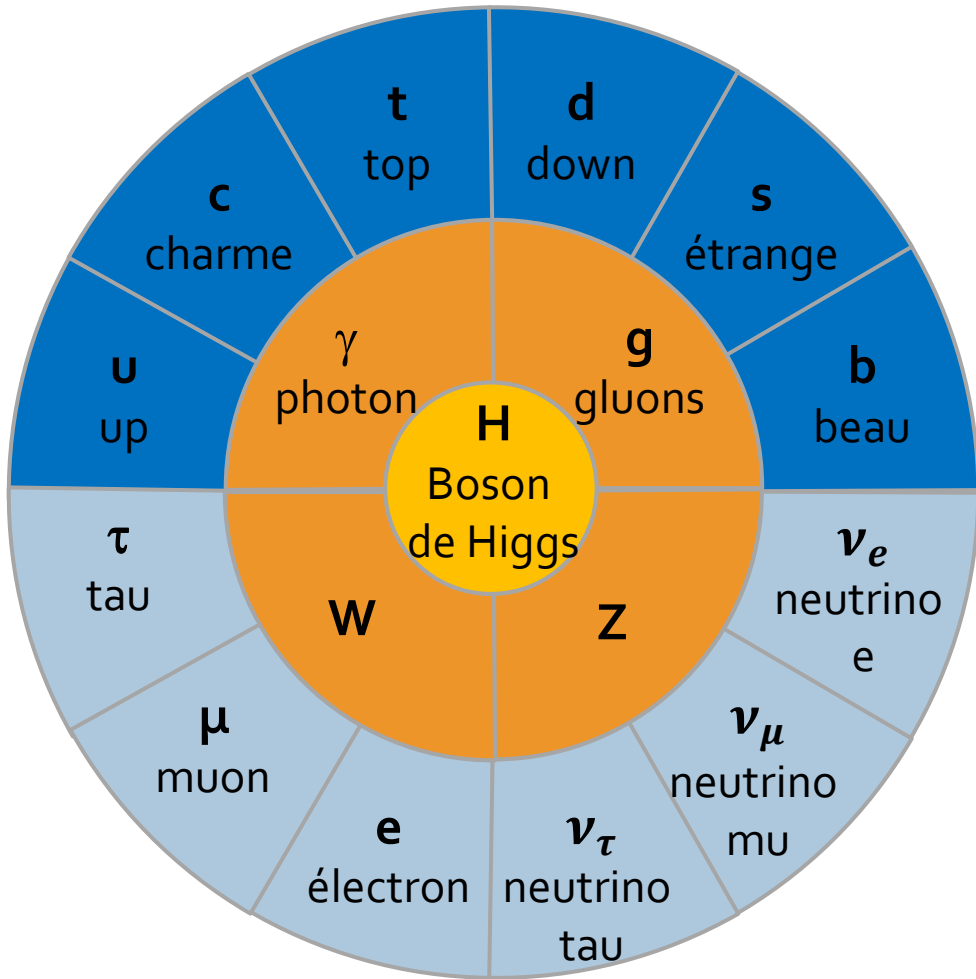
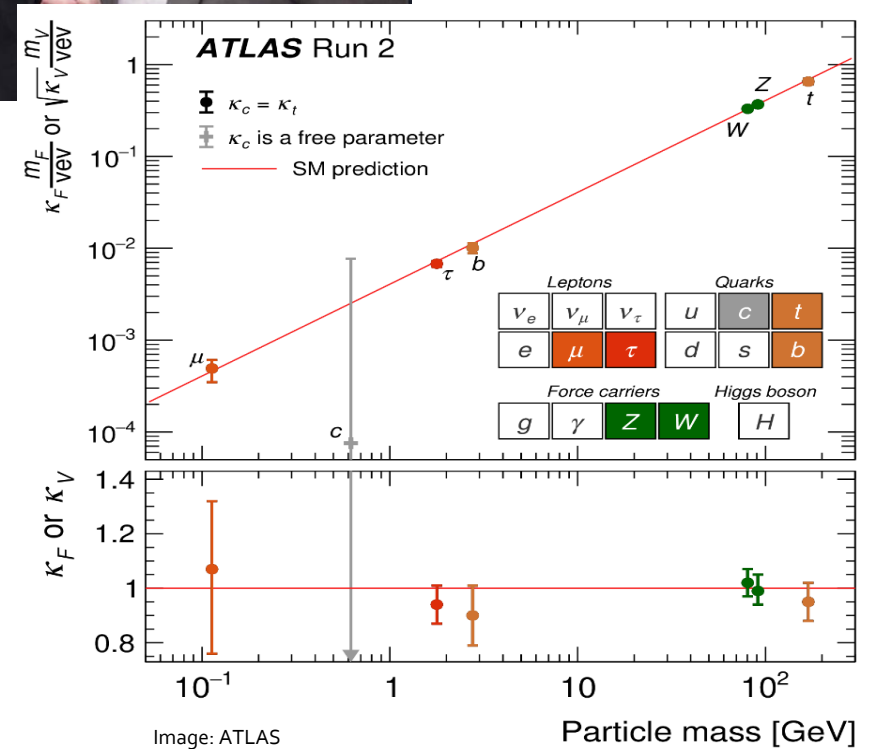
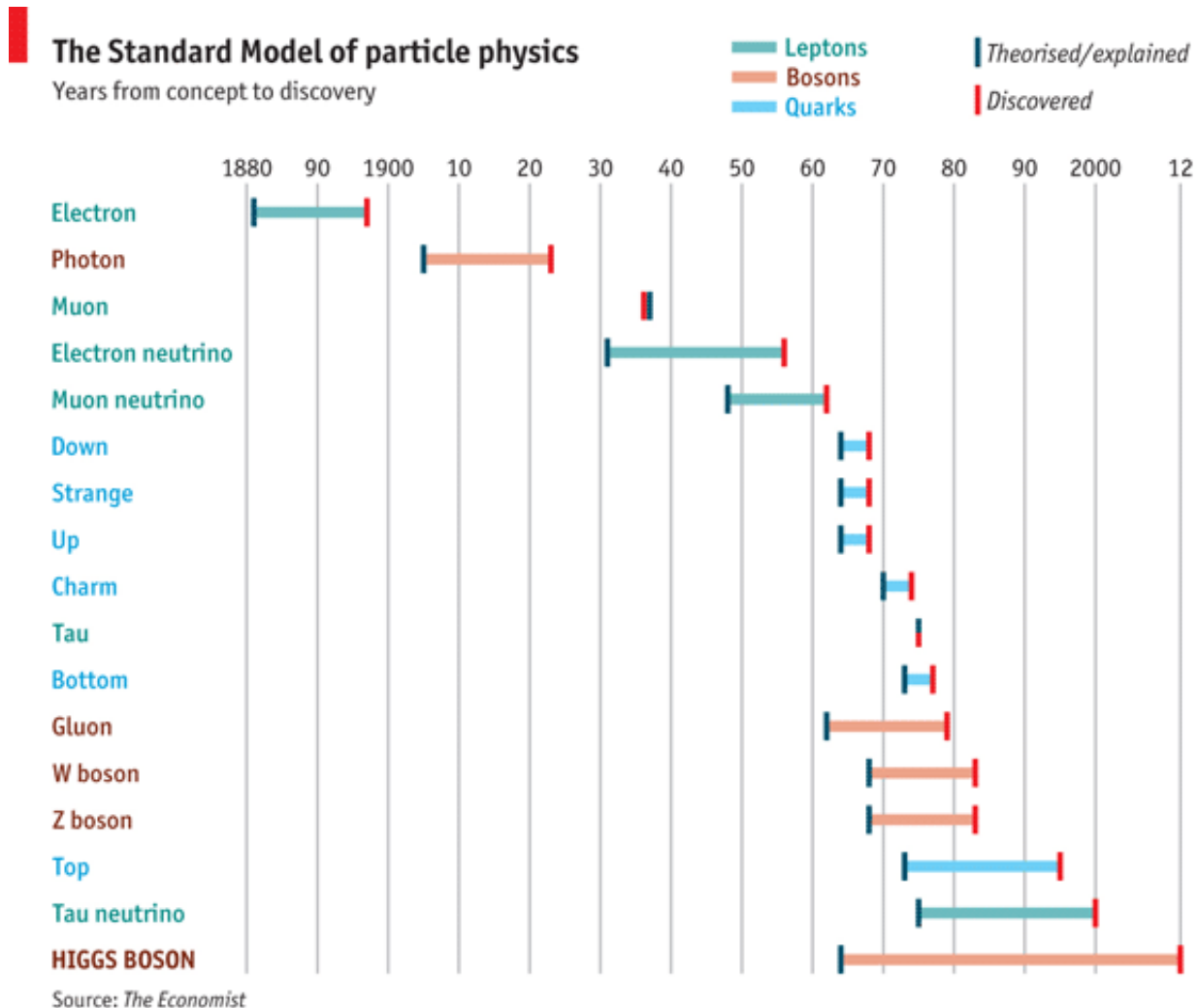


Image: Maximilien Brice / CERN

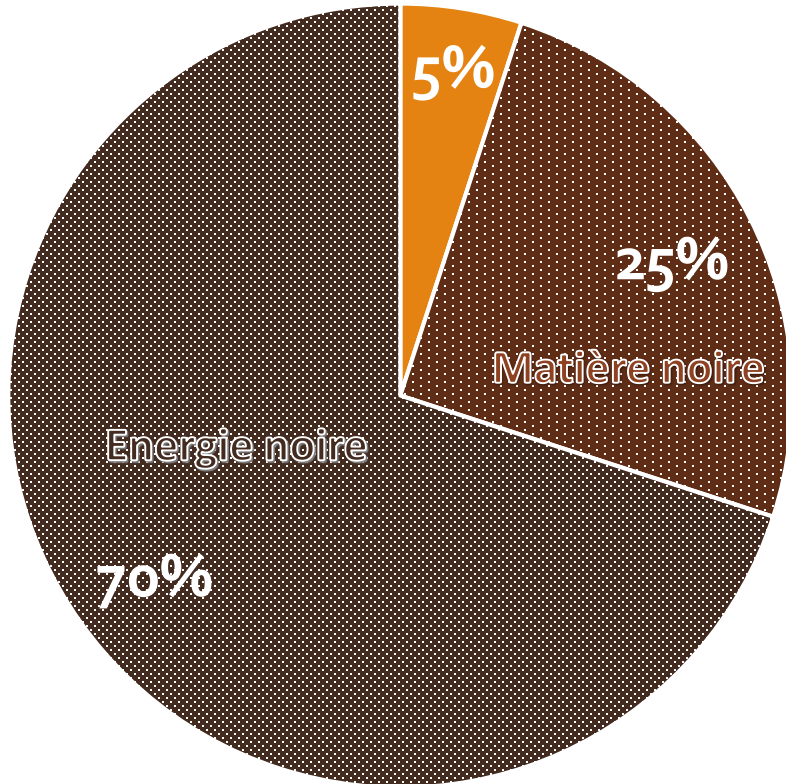


Standard vous avez dit standard ?



Validé expérimentalement,
complet, prédictif et robuste

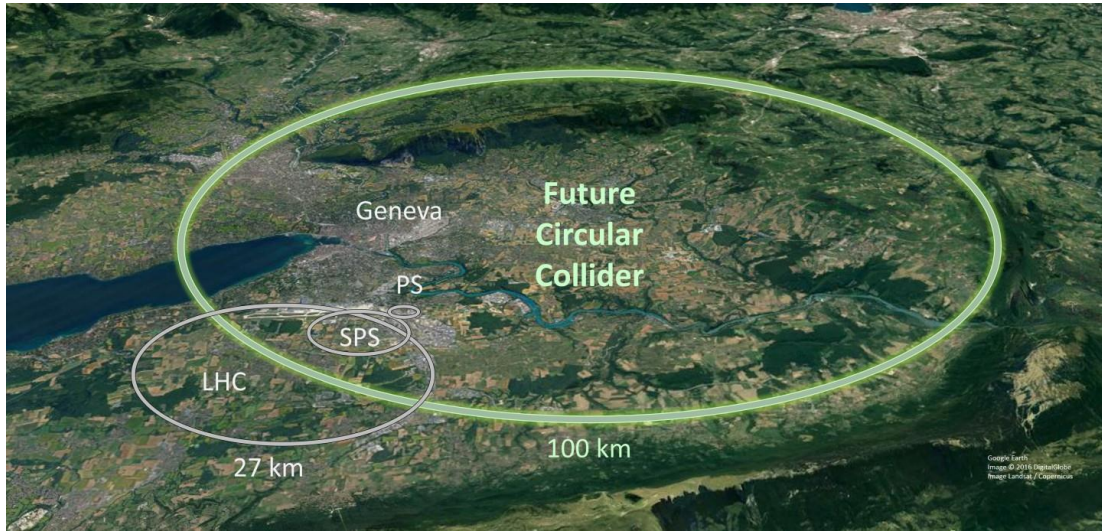
Il en manque un tout petit peu...



- Où est passée l'antimatière ?
- Qu'est-ce que l'énergie noire ?
- Qu'est-ce que la matière noire ?
- Que faire de la gravitation ?
- Que s'est-il passé au tout début de l'Univers ?
- Et beaucoup d'autres questions

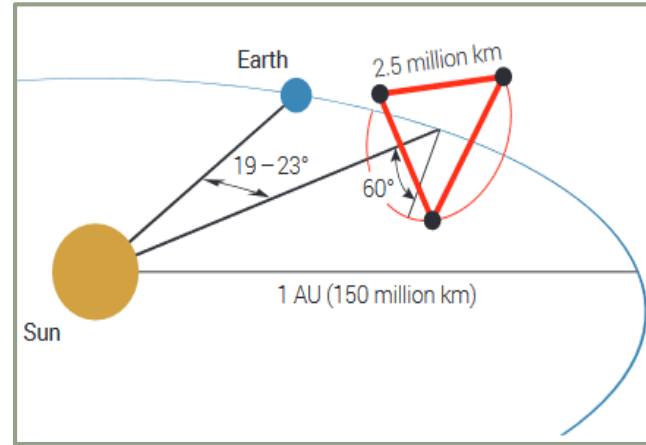
Il doit y avoir autre chose

La traque continue !

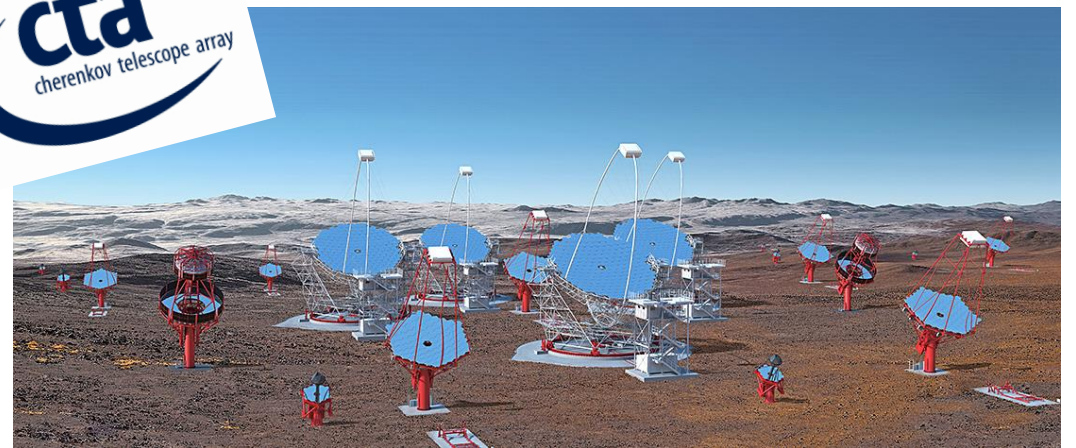
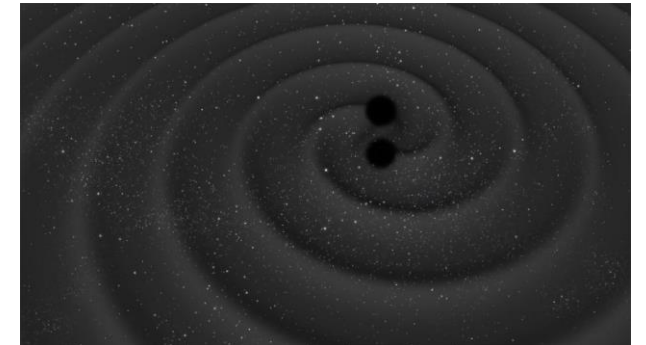


~ 2070 FCC 100 km, 100 TeV

2030 HK 260 000 t d'H₂O, 60 m x 74 m



~ 2035 LISA 2,5 10⁶ km



~2030 CTA > 100 télescopes Nord et Sud, 3 tailles



Merci
de
votre
Attention !