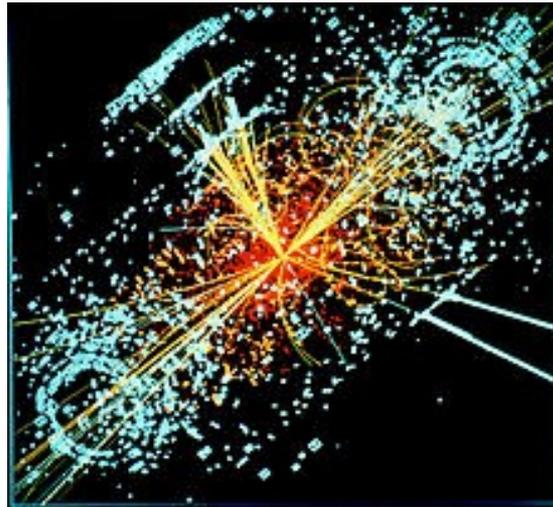


Physique des particules sur collisionneur



Fabienne Ledroit

LPSC (Grenoble)

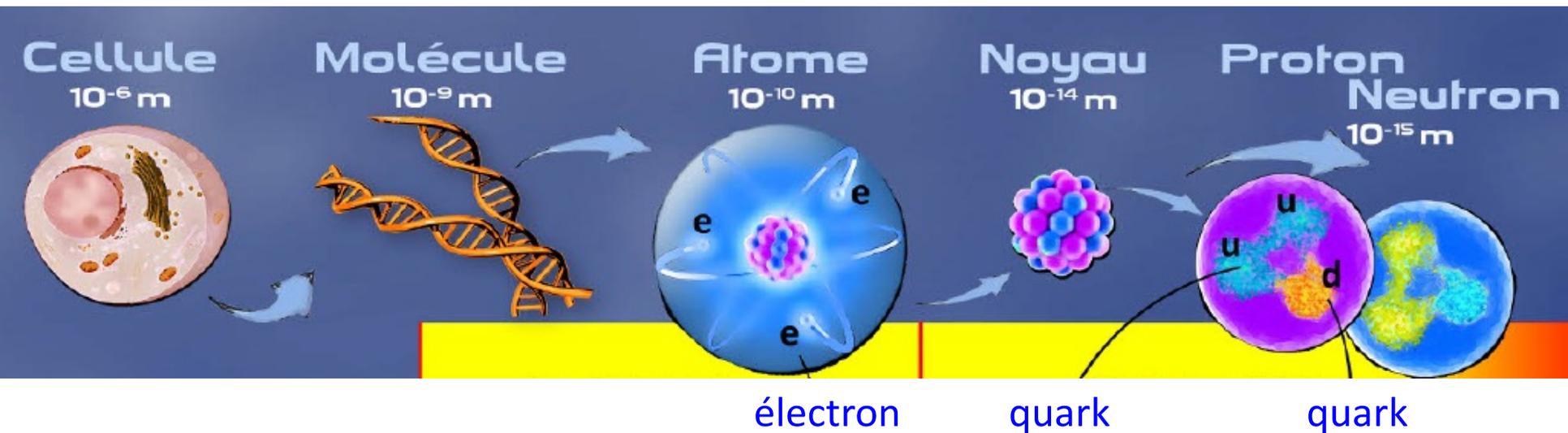
1989-2002 : expérience DELPHI (LEP) ; depuis 2002 : expérience ATLAS (LHC)

Programme

- Introduction
- **Le Modèle Standard** de la physique des particules
- Outils expérimentaux
 - accélérateurs, détecteurs, grille de calcul
- Complémentarité des collisionneurs
- **La physique au LHC**
 - le boson de Higgs
 - la recherche de «nouvelle physique»
- Le futur

Introduction

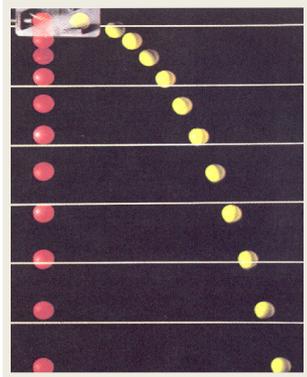
Ambition de la physique des particules : description **élémentaire** du monde



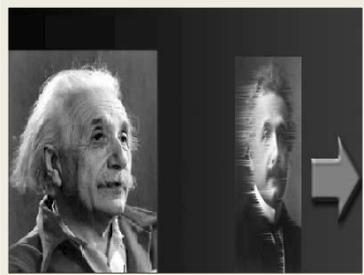
- Particules élémentaire = **constituants** fondamentaux de la matière
- Les forces basiques qui les lient = les **interactions** fondamentales

Tout cela est aujourd'hui décrit par le **Modèle Standard** de la physique des particules

Introduction : les grandes théories de la physique

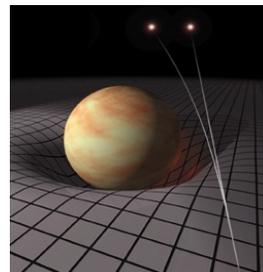


rapide



**aux grandes échelles :
Relativité Générale**

voir le cours d'A. Cappi



petit

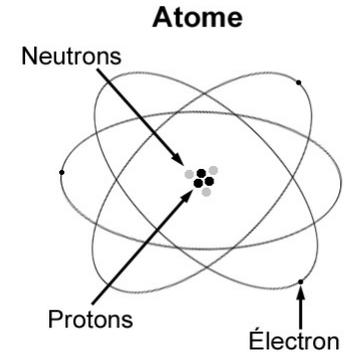


**Mécanique
Classique
XIXe**

**Mécanique
Quantique**

**Relativité
Restreinte**

**Théorie
Quantique
des Champs
XXe**



Introduction : fondements du Modèle Standard

Le « Modèle Standard » = une **Théorie Quantique des Champs**

→ l'unification de

– **la relativité restreinte** (1905, Einstein)

- Invariance de Lorentz :

le résultat d'une expérience ne dépend pas du référentiel galiléen dans lequel on se place

- Energie au repos $E=mc^2$ (c : vitesse lumière dans le vide)
- $E^2 = (|p|c)^2 + (mc^2)^2$ (p : quantité de mouvement ou impulsion)

– **la mécanique quantique** (~1900-1930, Planck, Heisenberg,...)

- **Dualité onde-corpuscule**
- Principe d'incertitude $\Delta x \Delta p_x \sim \hbar$, $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ (\hbar : constante de Planck)

Unifiées dans les années ~1927-1954 (P. Dirac,...)

Complétée plus tard par les « **symétries de jauge** »
(théorie des groupes)



H Lorentz

Prix Nobel 1902



A Einstein

Prix Nobel 1921



M Planck

Prix Nobel 1918



W Heisenberg

Prix Nobel 1932



Paul Adrien Maurice Dirac

Prix Nobel 1933

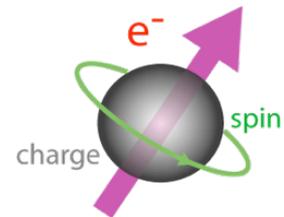
Unités

Relativité restreinte

- Energie d'une particule : « électron Volt » (eV)
 - 1 eV = énergie cinétique d'un électron accéléré par une ddp de 1 V
 - eV, keV (10^3), MeV (10^6), GeV (10^9), TeV (10^{12})
 - 1 GeV = $1.6 \cdot 10^{-10}$ J
- Masse d'une particule : eV/c^2
- Impulsion d'une particule : eV/c
 - en pratique : on n'écrit pas c ($c=1$) $\rightarrow E^2 = |\mathbf{p}|^2 + m^2$, tout en eV

Mécanique
quantique

- Longueur d'onde associée à une particule $\lambda = h/p$
- Spin d'une particule (moment cinétique intrinsèque): en unité de $\hbar = h/2\pi$
 - en pratique : on n'écrit pas \hbar ($\hbar=1$)
 - \rightarrow spin = $1/2, 3/2, \dots$: *fermion*, spin = $0, 1, \dots$: *boson*

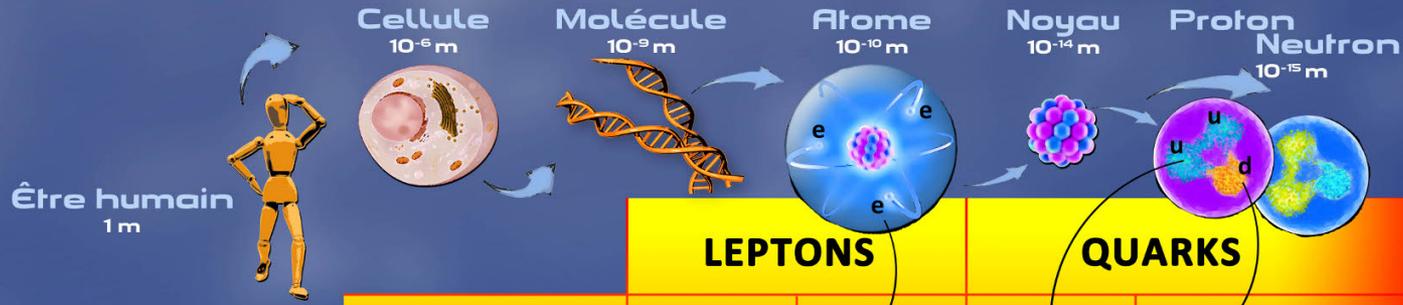


- $\hbar c = 200 \text{ MeV fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Résumé

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON DE HIGGS H
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV $Q=0$ $t=?$	e électron $m = 0,00055$ GeV $Q=-1$ $t=\infty$	u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q=2/3$ $t=\infty$	d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q=-1/3$ $t=10$ min	BOSON DE HIGGS H $m = 126$ GeV $Q=0$ $t=1,5 \cdot 10^{-22}$ s
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV $Q=0$ $t=?$	μ muon $m = 0,106$ GeV $Q=-1$ $t=2,2 \cdot 10^{-6}$ s	c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q=2/3$ $t=10^{-12}$ s	s étrange / strange $m = 0,1$ GeV $Q=-1/3$ $t=10^{-12}$ s	<p>Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, il est responsable de leurs masses.</p> <p>Il provoque la séparation entre interactions électromagnétique et faible.</p> <p>Champ de Higgs</p>
3^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	ν_τ neutrino tau $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV $Q=0$ $t=?$	τ tau $m = 1,78$ GeV $Q=-1$ $t=2,9 \cdot 10^{-13}$ s	t top $m = 173$ GeV $Q=2/3$ $t=4 \cdot 10^{-25}$ s	b beau / beauty / bottom $m = 4,2$ GeV $Q=-1/3$ $t=1,5 \cdot 10^{-12}$ s	

INTERACTIONS FONDAMENTALES



Bosons Z^0, W^+, W^-	Désintégrations radioactives β^- et β^+ de certains noyaux instables
Photon γ	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction est transmise par des particules associées

Les quatre interactions fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil et des étoiles

- formation des étoiles sous l'effet de la gravitation
- réactions de fusion nucléaire grâce aux interactions forte et faible
- production de lumière par interaction électromagnétique



ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. Elles ont la même masse, mais des charges opposées.

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

Autres **nombres quantiques** : charge électrique Q , « charge forte »,...

Temps de vie t (découle des caractéristiques précédentes)

Antiparticule : même masse, même spin, même temps de vie, charges opposées

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e	e électron	u haut / up	d bas / down
	$m < 2 \cdot 10^{-19}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	$m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	$m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	$m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min

$$Q = 0$$

$$Q = -1$$

$$Q = 2/3$$

$$Q = -1/3$$

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

Autres **nombres quantiques** : charge électrique Q , charge faible, charge forte,...

Temps de vie t (découle des caractéristiques précédentes)

Antiparticule : même masse, même spin, même temps de vie, charges opposées

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-19}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	e électron $m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	μ muon $m = 0,106$ GeV $Q = -1$ $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s	c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q = 2/3$ $t = 10^{-12}$ s	s étrange / strange $m = 0,1$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10^{-10}$ s

$Q = 0$

$Q = -1$

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

Autres **nombres quantiques** : charge électrique Q , charge faible, charge forte,...

Temps de vie t (découle des caractéristiques précédentes)

Antiparticule : même masse, même spin, même temps de vie, charges opposées

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	e électron $m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	μ muon $m = 0,106$ GeV $Q = -1$ $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s	c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q = 2/3$ $t = 10^{-12}$ s	s étrange / strange $m = 0,1$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10^{-10}$ s
3^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	ν_τ neutrino tau $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	τ tau $m = 1,78$ GeV $Q = -1$ $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s	t top $m = 173$ GeV $Q = 2/3$ $t = 4 \cdot 10^{-25}$ s	b beau / beauty / bottom $m = 4,2$ GeV $Q = -1/3$ $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s

$Q = 0$

$Q = -1$

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

Autres **nombres quantiques** : charge électrique Q , charge faible, charge forte,...

Temps de vie t (découle des caractéristiques précédentes)

Antiparticule : même masse, même spin, même temps de vie, charges opposées

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

	LEPTONS		QUARKS	
1^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	1956 ν_e neutrino e $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1897 e électron $m = 0,00055$ GeV $Q = -1$ $t = \infty$	1968 u haut / up $m = 0,002$ GeV $Q = 2/3$ $t = \infty$	1968 d bas / down $m = 0,005$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10$ min
2^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	1962 ν_μ neutrino mu $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1936 μ muon $m = 0,106$ GeV $Q = -1$ $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s	1974 c charme / charm $m = 1,3$ GeV $Q = 2/3$ $t = 10^{-12}$ s	1968 s étrange / strange $m = 0,1$ GeV $Q = -1/3$ $t = 10^{-10}$ s
3^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	2000 ν_τ neutrino tau $m < 2 \cdot 10^{-10}$ GeV $Q = 0$ $t = ?$	1974 τ tau $m = 1,78$ GeV $Q = -1$ $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s	1994 t top $m = 173$ GeV $Q = 2/3$ $t = 4 \cdot 10^{-25}$ s	1977 b beau / beauty / bottom $m = 4,2$ GeV $Q = -1/3$ $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s

$Q = 0$

$Q = -1$

$Q = 2/3$

$Q = -1/3$

Les constituants

Caractéristiques d'une particule :

Masse m

Spin (moment cinétique intrinsèque)

Autres **nombres quantiques** : charge électrique Q , charge faible, charge forte,...

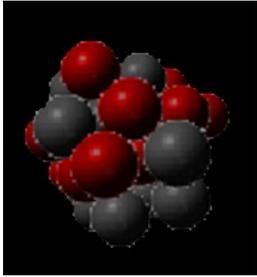
Temps de vie t (découle des caractéristiques précédentes)

Antiparticule : même masse, même spin, même temps de vie, charges opposées

*Les constituants de la matière sont tous des **fermions**, de spin $\frac{1}{2}$:*

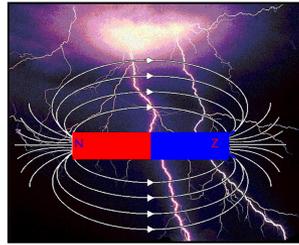


Les quatre interactions fondamentales



nucléaire forte

Cohésion des noyaux



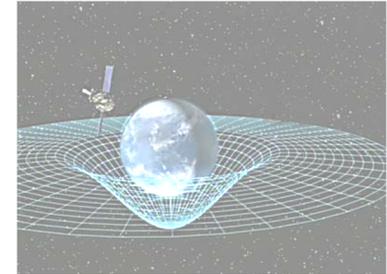
électromagnétique

Structure atomes
et molécules



nucléaire faible

Energie stellaire,
radioactivité
naturelle



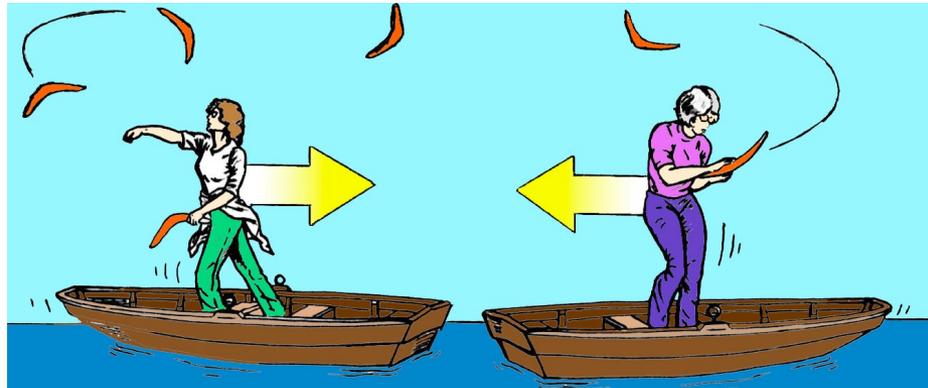
gravitationnelle

Structure de l'univers,
chute des pommes

- Le Modèle Standard de la physique des particules décrit les interactions **forte**, **électromagnétique** et **faible**.
- La 4^e interaction, la gravitation, est négligeable à l'échelle microscopique. Elle fait partie d'un autre « modèle standard », celui de la cosmologie → *voir le cours d'A. Cappi*

Particules d'interaction

- Constituants (quarks et leptons) = tous des *fermions* (spin $\frac{1}{2}$)
- 2^e sorte de particules élémentaires = les *bosons* (spin entier, ici 1)
 - Elles portent les interactions fondamentales !



Particules d'interaction

- Constituants (quarks et leptons) = tous des *fermions* (spin $\frac{1}{2}$)
- 2^e sorte de particules élémentaires = les *bosons* (spin entier, ici 1)
 - Elles portent les interactions fondamentales !

Interaction faible

Bosons Z^0, W^+, W^-

$m = \sim 91 \text{ GeV}, \sim 80 \text{ GeV}$

Interaction EM

Photon γ

$m = 0$

Interaction forte

Gluons g

$m = 0$

Gravitation

Graviton (?)

$m = 0 ?$

- ces bosons, dits « *intermédiaires* » ou « *vecteurs* » ou « *de jauge* », sont leur propre antiparticule

Particules d'interaction

- Constituants (quarks et leptons) = tous des *fermions*
- 2^e sorte de particules élémentaires = les *bosons* (spin entier)
 - Elles portent les interactions fondamentales !

Interaction faible

Bosons Z^0, W^+, W^-

1983

Interaction EM

Photon γ

1923

Interaction forte

Gluons g

1978

Gravitation

Graviton (?)

...

Prix Nobel 1984



Carlo Rubbia



Simon van der Meer



Prix Nobel 1927

Arthur Compton

- ces bosons, dits « **intermédiaires** » ou « **vecteurs** » ou « **de jauge** », sont leur propre antiparticule

Quelles particules sont sensibles à quelles interactions ?

ν_e neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}/c^2$	e électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051 \text{ GeV}/c^2$	u haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002 \text{ GeV}/c^2$	d bas / down $t = 15 \text{ min}$ $Q = -e/3$ $m = 0,005 \text{ GeV}/c^2$
ν_μ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}/c^2$	μ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 0,106 \text{ GeV}/c^2$	c charme / charm $t = 10^{-12} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 1,3 \text{ GeV}/c^2$	s étrange / strange $t = 10^{-12} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 0,1 \text{ GeV}/c^2$
ν_τ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}/c^2$	τ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 1,78 \text{ GeV}/c^2$	t top $t = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 173 \text{ GeV}/c^2$	b beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 4,2 \text{ GeV}/c^2$

FONDAMENTALES			
Interaction faible			
Interaction électromagnétique			
Interaction forte			
Gravitation			

Interaction faible et gravitation affectent **tous** les constituants,
 Interaction électromagnétique seulement les particules de $Q_{ei} \neq 0$,
 Interaction forte seulement les **quarks**.

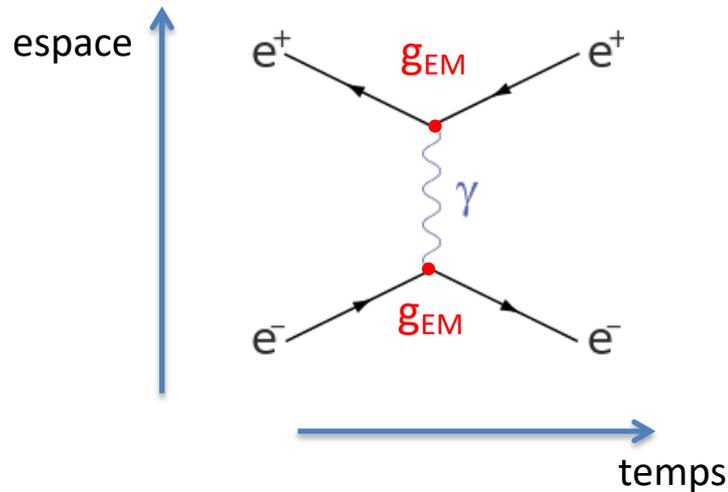
- Pour être sensibles à une interaction, les particules doivent porter une « charge » :
- Interaction électromagnétique : charge électrique
 - Interaction faible : « charge faible » = *isospin faible*
 - Interaction forte : « charge forte » = *couleur*
 - *Gravitation = cas particulier : courbure de l'espace temps affecte même $m=0$*

Caractéristiques des interactions

- **Intensité** de l'interaction entre deux particules est proportionnelle à la *constante de couplage* (« α ») de l'interaction :
ex : 2 protons distants de 1 fm
si $\alpha_{\text{forte}} = 1$, $\alpha_{\text{EM}} = 10^{-2}$, $\alpha_{\text{faible}} = 10^{-5}$, $\alpha_{\text{gravitation}} = 10^{-40}$
- **Portée** d'une interaction inversement proportionnelle à la masse du boson intermédiaire :
 - Interaction électromagnétique : infinie ; $m(\text{photon}) = 0$
 - Interaction faible : 2×10^{-4} fm ; $m(Z, W^+, W^-) \sim 100$ GeV
 - Interaction forte : 2 fm ; $m(\text{gluons})=0$, mais le gluon a une couleur

Intermède : diagrammes de Feynman

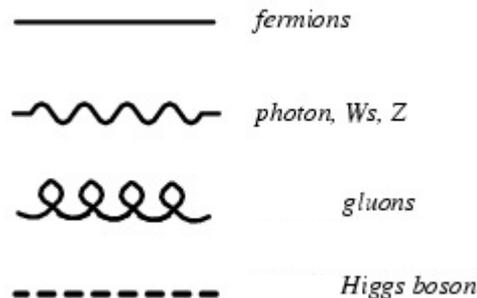
- Servent à décrire les processus (\neq trajectoires) et à faire les calculs correspondants
- Exemple :



Prix Nobel 1965

amplitude de diffusion proportionnelle à $(g_{EM})^2$ et donc à α_{EM}
avec g_{EM} proportionnel à e (charge élémentaire)

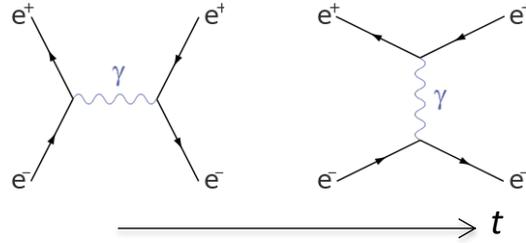
- Convention :



Interactions EM et faible

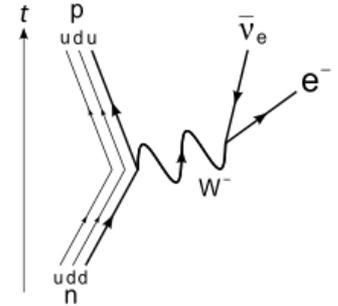
- Exemples : Interaction électromagnétique (théorie « QED »)

Diffusion Bhabha



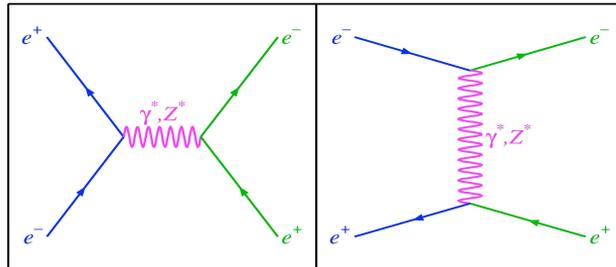
Interaction faible

Désintégration β



- A très grande énergie par rapport à $m(Z,W) \sim 100 \text{ GeV}$, les interactions EM et faible sont indiscernables, elle sont « unifiées » : **interaction électrofaible (« EW »)**

Bhabha Scattering



Prix Nobel 1979



Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam

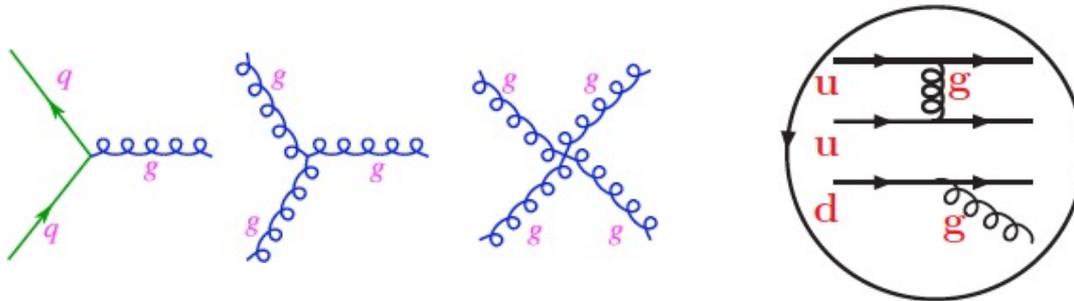


Steven Weinberg

- Description de Glashow, Salam et Weinberg (1967) \rightarrow naissance du **Modèle Standard**
- Les interactions EM et faible se séparent à basse énergie sous l'effet du **champ de Higgs** et prennent chacune leur structure et leur portée.

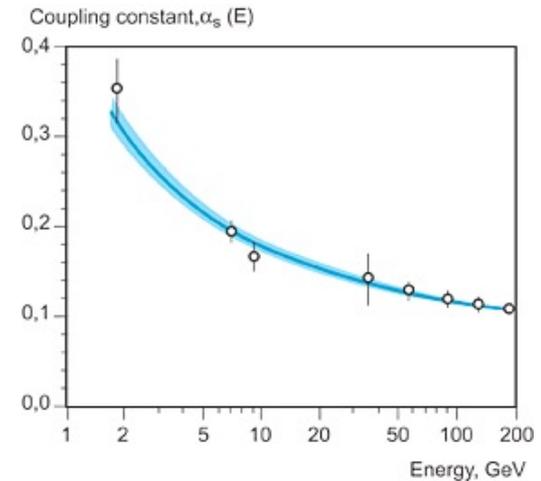
Interaction forte

- Exemples :



quarks et gluons = « partons »

- Théorie de l'interaction forte = « QCD », copiée sur QED, mais l'intensité (couplage) *augmente* avec la distance
 - les gluons ont une charge forte (« couleur ») non nulle

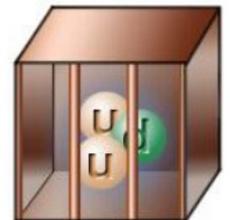


« liberté asymptotique »



Prix Nobel 2004
D Gross, D Politzer, F Wilczek

- Quarks jamais observés seuls/libres : toujours confinés dans des *hadrons*
 - charge électrique des quarks $2/3, -1/3$, mais charge des hadrons entières

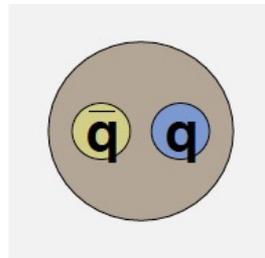


Particules composites

- Avec les particules élémentaires on fait des particules composites : en **très** grande majorité des **hadrons** = états **liés**, par interaction forte, de quarks
- Deux types de *hadrons* : **mésons** : quark-antiquark, ou **baryons** : qqq

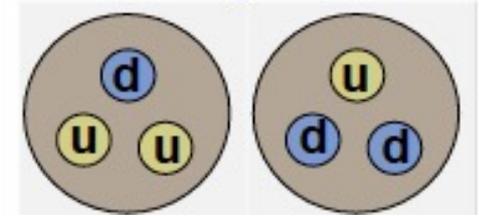
Exemples 1^{ère} famille :

★ $\pi^+ \equiv u\bar{d}$



★ Proton = (uud)

★ Neutron = (udd)



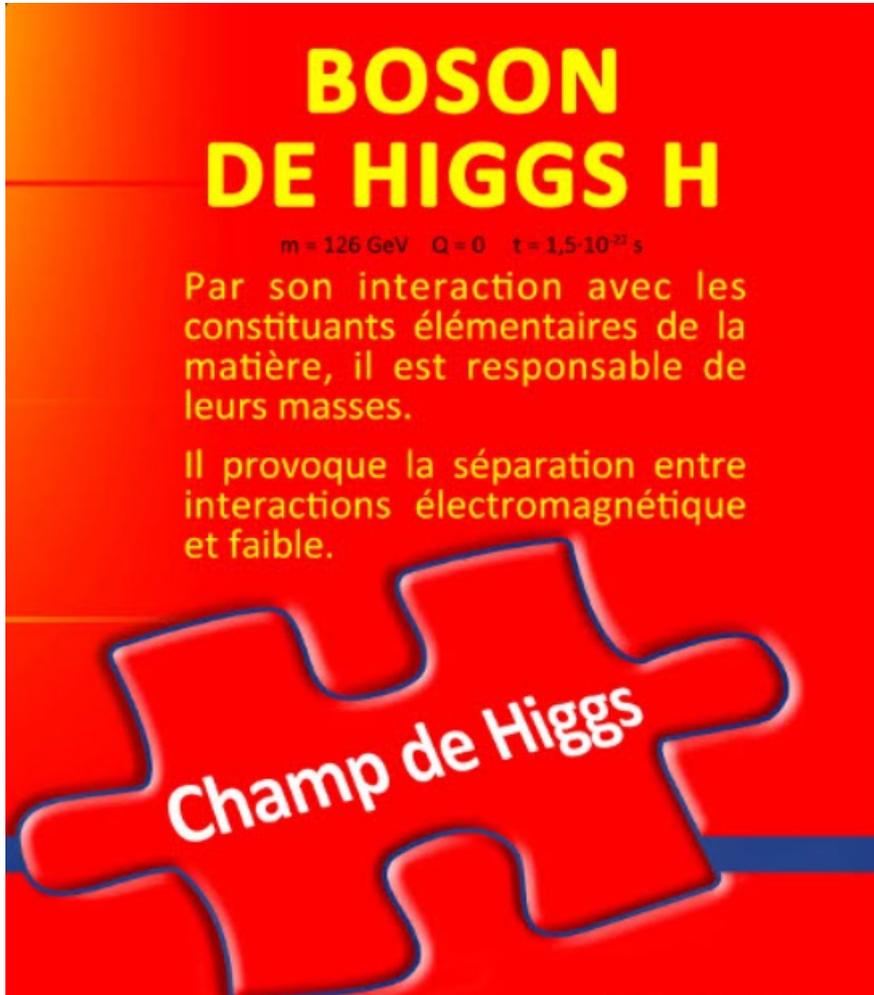
$\Delta^{++} = uuu$, $\Delta^- = ddd$, ...

Exemples 2^{ème} famille : Kaons K^+ , $K^- = u s^{\text{bar}}$, $u^{\text{bar}} s$, $K^0 = d s^{\text{bar}}$, $\Omega^- = sss$, ...

Exemples 3^{ème} famille : $B^+ = u b^{\text{bar}}$, $B^0 = d b^{\text{bar}}$, $B_s^0 = s b^{\text{bar}}$, ...

- Caractérisées de la même façon que les particules élémentaires : masse, spin, temps de vie, etc.
 - Temps de vie infini = particule **stable**. Exemples : électron, proton (?)
 - Une particule se désintègre si une interaction le permet, et si elle est plus massive que ses produits de désintégration

Boson de Higgs



BOSON DE HIGGS H

$m = 126 \text{ GeV}$ $Q = 0$ $t = 1,5 \cdot 10^{-22} \text{ s}$

Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, il est responsable de leurs masses.

Il provoque la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

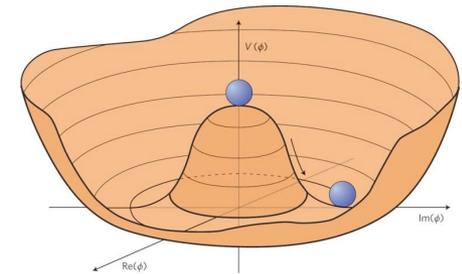
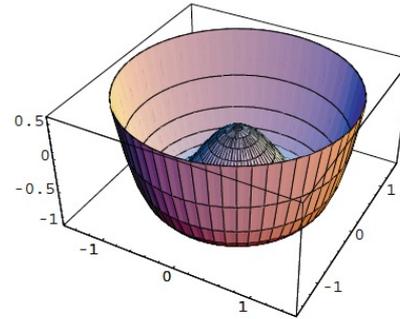
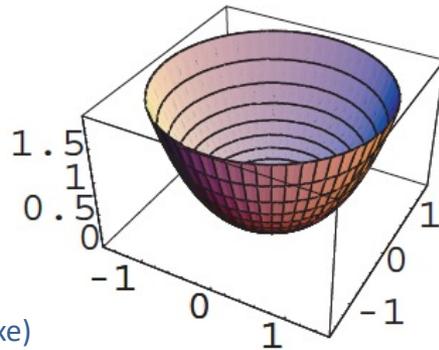
- La dernière particule élémentaire à avoir été découverte (en 2012)
- Spin entier (boson) mais = 0
 - la **seule** particule élémentaire de spin 0 connue à ce jour
- Nécessaire au « fonctionnement » de la théorie (= le Modèle Standard)
 - séparation des interactions électromagnétique et faible
 - donne leur masse aux bosons Z et W via le « **mécanisme de Higgs** »
 - donne aussi leur masse aux autres particules

Mécanisme de Higgs

Rappel : dualité onde-corpuscule, toutes les particules sont aussi des champs, qui varient en intensité. **Celui de Higgs est particulier** : le seul à ne pas être nul dans « l'état fondamental » (niveau le plus bas en énergie).

Forme **ad-hoc** du potentiel de Higgs :

$E_{\text{potentielle}}$
Intensité du champ (complexe) de Higgs



Brisure de la symétrie

Sans cette astuce, toutes les particules sont de masse nulle dans la théorie !

Deux publications en 1964 : François Englert et Robert Brout en juin, Peter Higgs en août : « **boson de BEH** » ; seul Peter Higgs décrit le boson lui-même

Mécanisme de Higgs

L'univers est rempli d'un **champ de Higgs non nul** qui interagit avec tous les **constituants** élémentaires, plus ou moins, et leur donne plus ou moins de masse

- Analogie avec un champ de neige



Boson de Higgs



$E=mc^2$: les particules élémentaires sont des points de l'espace-temps dans lesquels il y a une concentration d'énergie.

Avec le champ de Higgs, le vide se condense autour d'une particule, ce qui lui donne une masse.
Le vide peut s'auto-condenser : c'est le boson de Higgs.

OUTILS EXPÉRIMENTAUX

Méthodes expérimentales

1) Sources de particules naturelles : découverte, étude

- Radioactivité : énergies typiques keV – MeV
- Rayons cosmiques (*voir le cours d'Alberto Cappi*):
 - Protons,... : en moyenne qq GeV, mais spectre s'étend jusqu'à 10^{19} eV !
Au sol (après interaction avec l'atmosphère) : surtout des muons
 - Neutrinos solaires (*voir le cours de Fabian Schüssler*)

2) Source artificielle: **accélérateurs**

- permettent de *sonder* des particules : principe du microscope

Energie du faisceau	0,5 eV	10 keV	100 MeV	100 GeV	$\lambda = h/p$
Longueur d'onde	0,4 μ	0,2 Å	2 fm	$2 \cdot 10^{-3}$ fm	
Echelle	Visible	Atome	Noyau		

- permettent de *produire* de nouvelles particules : $E = mc^2$
- cible fixe ou **collisionneur**

Accélérateurs

- Particules **chargées** uniquement (stables de préférence) : électrons, (muons), protons, ions,...
 - Remarque : on peut obtenir des faisceaux de particules secondaires, par ex. neutrinos
- Accélérateurs linéaires → accélérer : champ électrostatique ou champ radiofréquence (E)



- Circulaires → accélérer + courber : dipôles (champ magnétique B)

Rayonnement synchrotron :

ΔE proportionnel à γ^4/ρ^2 ,

avec $\gamma = E/m$ et $\rho =$ rayon de courbure

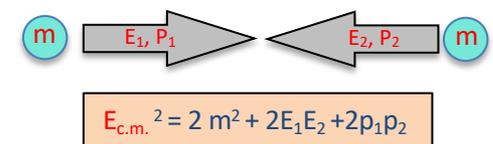
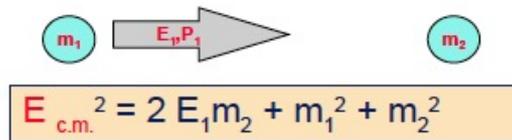
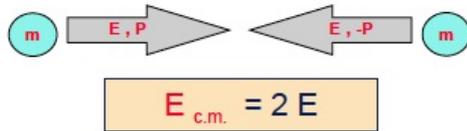


- Dans tous les cas : tube à vide + focaliser : quadripôles (B)

Collisionneurs : paramètres importants

- **Energie**

- $\Delta E = \Delta mc^2 \rightarrow$ créer des particules très massives
- Collisionneur \rightarrow plus d'énergie dans le «centre de masse*» que cible fixe



- **Luminosité**

- **Nombre d'interactions par seconde $dN/dt = \sigma \times L$**

- $\sigma =$ **section efficace** = probabilité de la réaction

Unité = cm^2 , ou barn (b) : $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, ou pb (10^{-12} b) ou fb (10^{-15} b)

- $L =$ **luminosité instantanée** $L = f \cdot N_1 N_2 / (4\pi\sigma_x \sigma_y)$ Unité = $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

f =fréquence de croisement, N_i =nombre de particules par faisceau, $\sigma_{x,y}$ =taille des faisceaux au point d'interaction

- **Luminosité intégrée** sur le temps en cm^{-2} ou en fb^{-1} ($1 \text{ fb}^{-1} = 10^{15} \text{ b}^{-1}$)

Attention : même notation (σ) pour 2 grandeurs différentes !

*Référentiel du « centre de masse » : la somme des impulsions des particules est nulle.

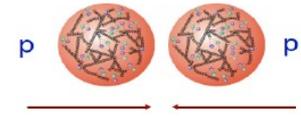
L'énergie dans ce référentiel est l'énergie utile à la collision. $E_{c.m.}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$

Collisionneurs : paramètres importants (suite)

• « Leptonique »



ou « hadronique »



• Energie collision = E_{CM}

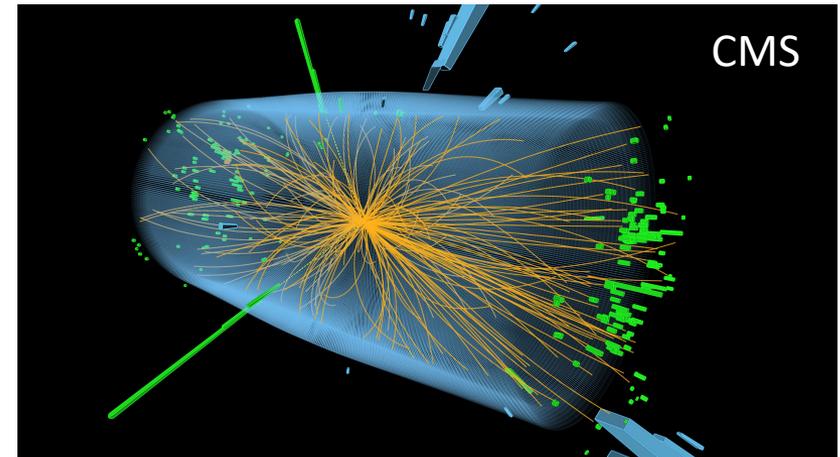
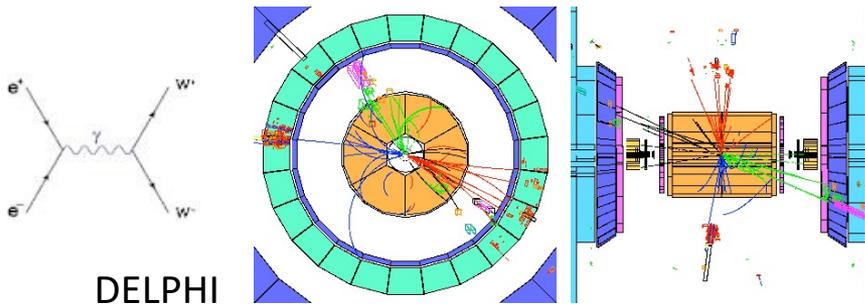
• Événements « propres » →

• Energie collision $E'_{CM} < E_{CM}$

• Energie totale processus inconnue

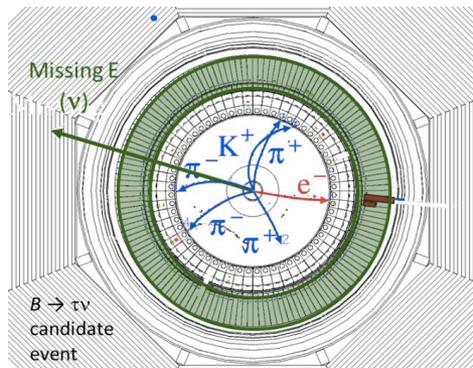
⇒ utilisation de l'énergie-impulsion *transverse*

• Événements compliqués →



DELPHI

CMS



BELLE II

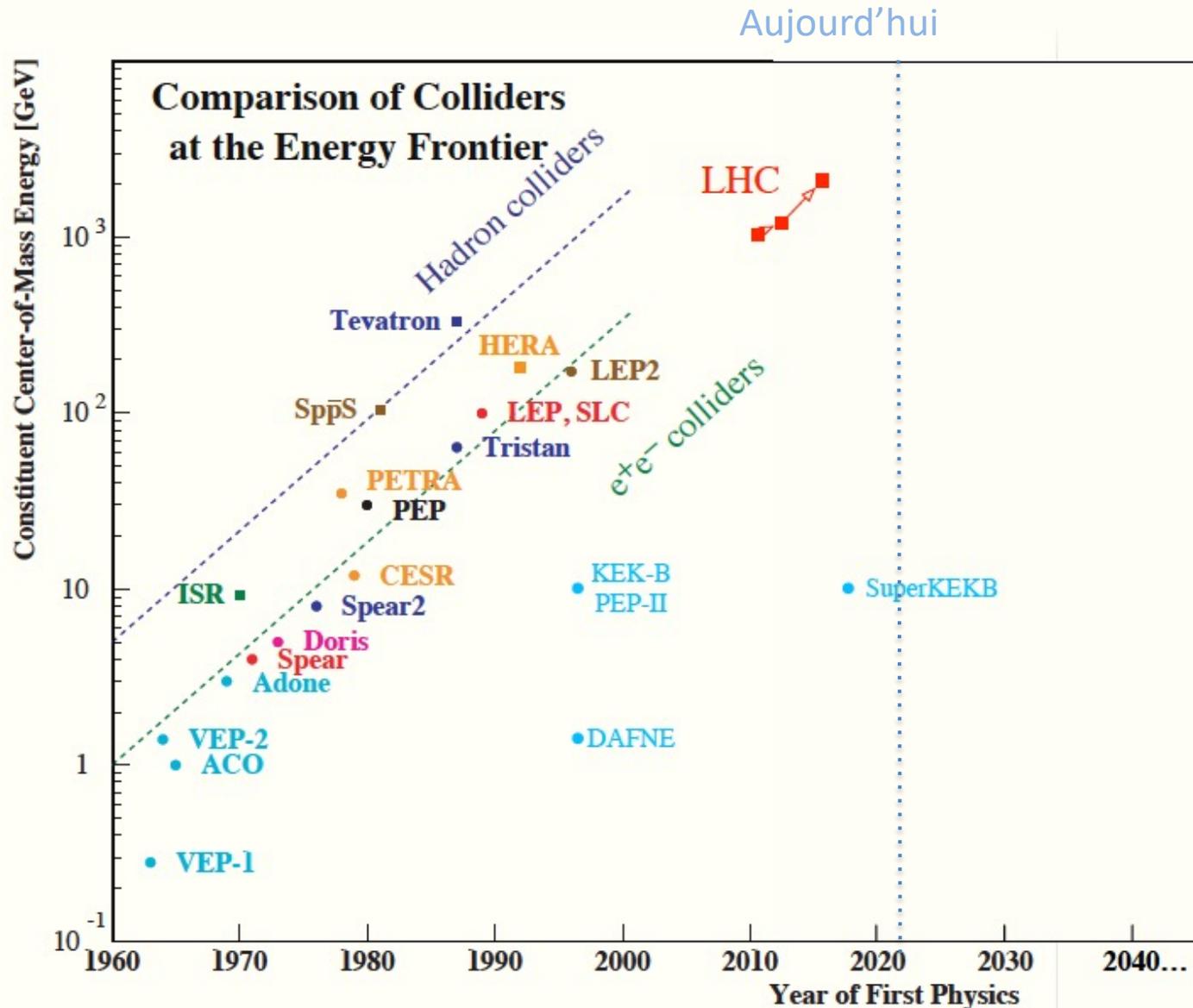
• Complication supplémentaire avec « l'empilement »

ou encore « mixte »



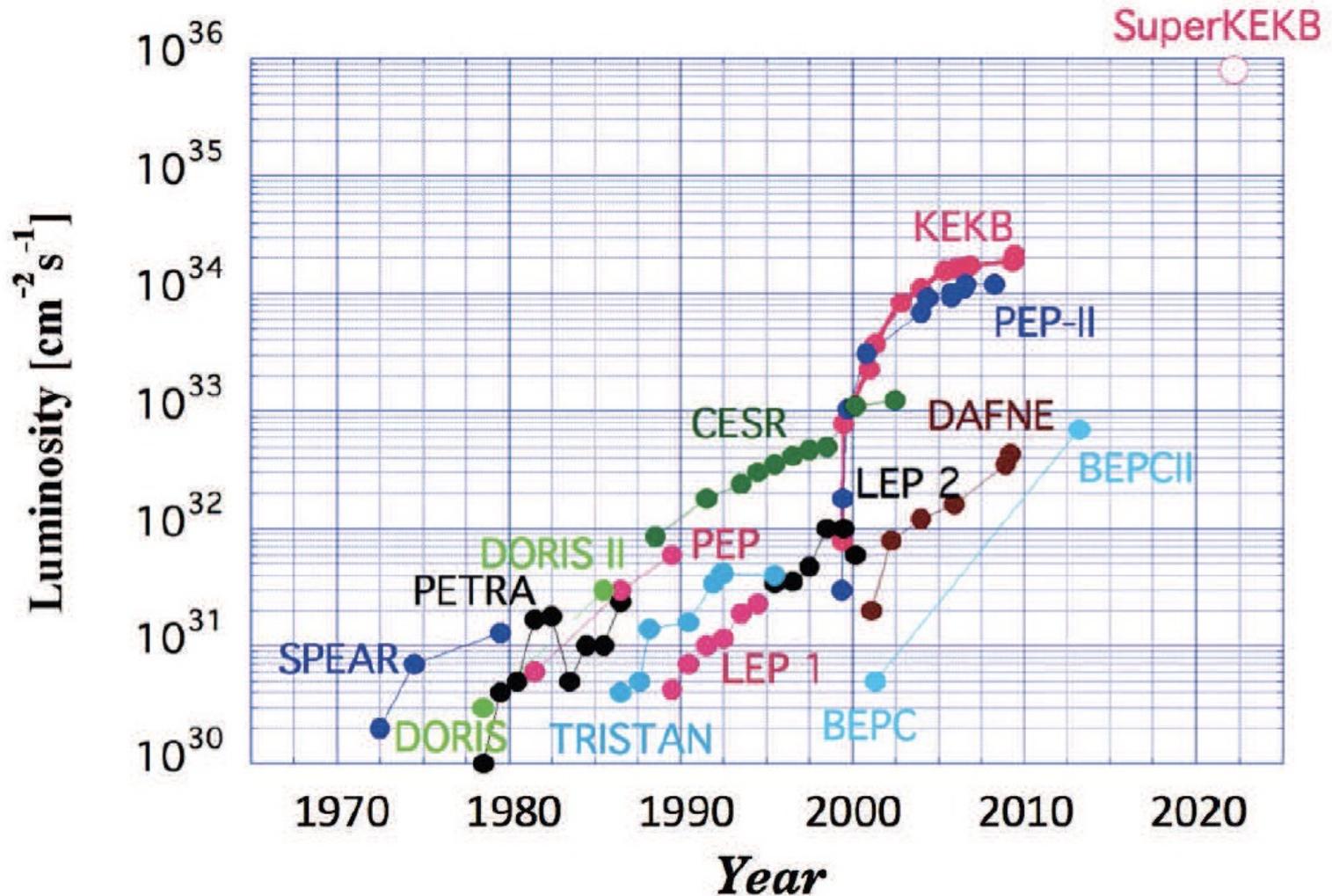
Collisionneurs: énergie

Échelle logarithmique !



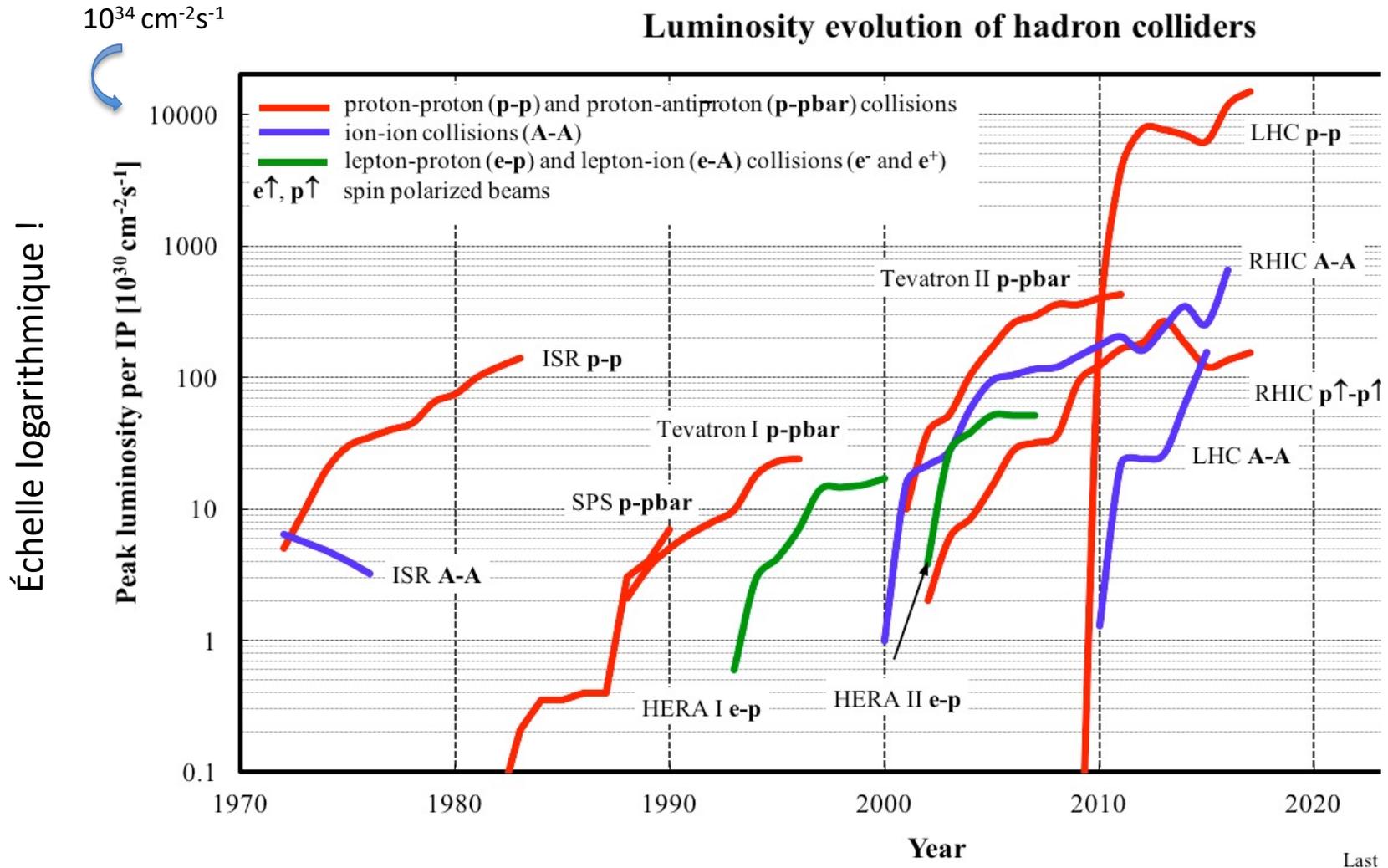
Collisionneurs leptoniques : luminosité

Échelle logarithmique !



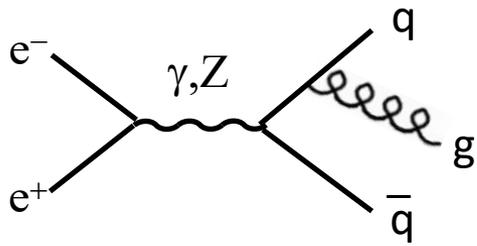
Proceedings of eeFACT2016, Daresbury, UK

Collisionneurs hadroniques : luminosité



Collision leptonique

avec état final hadronique \rightarrow compliqué



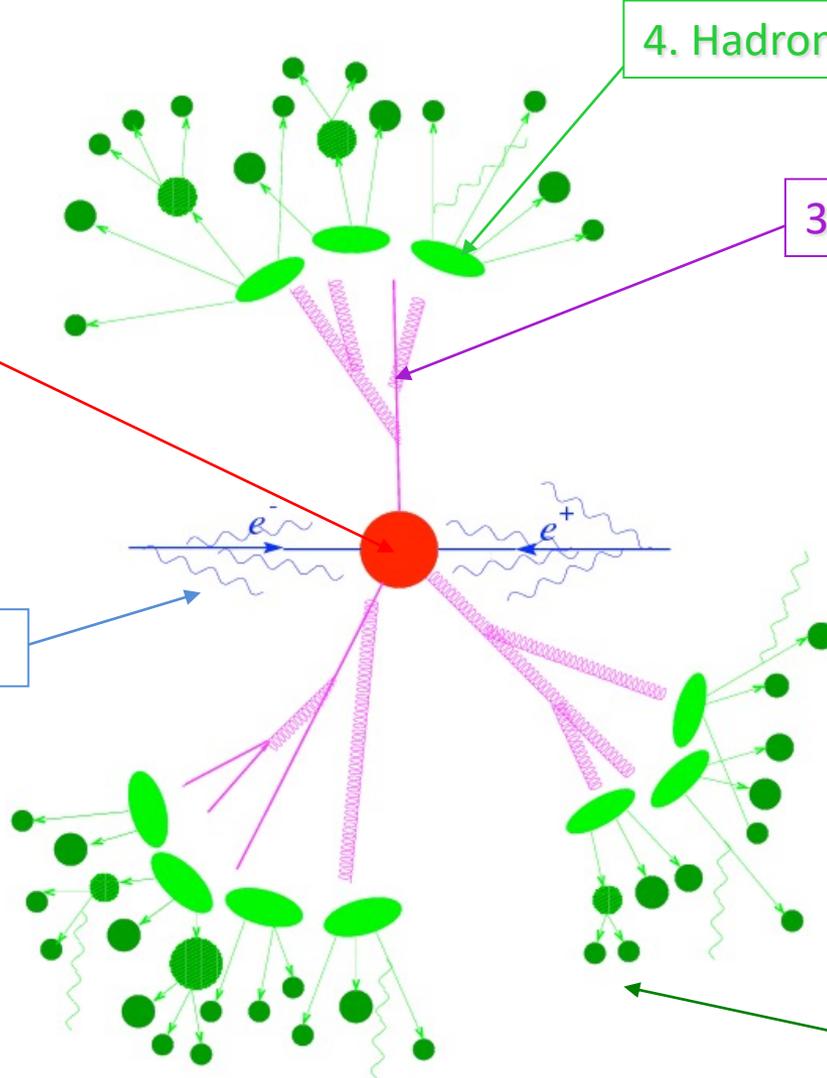
2. Annihilation

1. Radiation Etat Initial

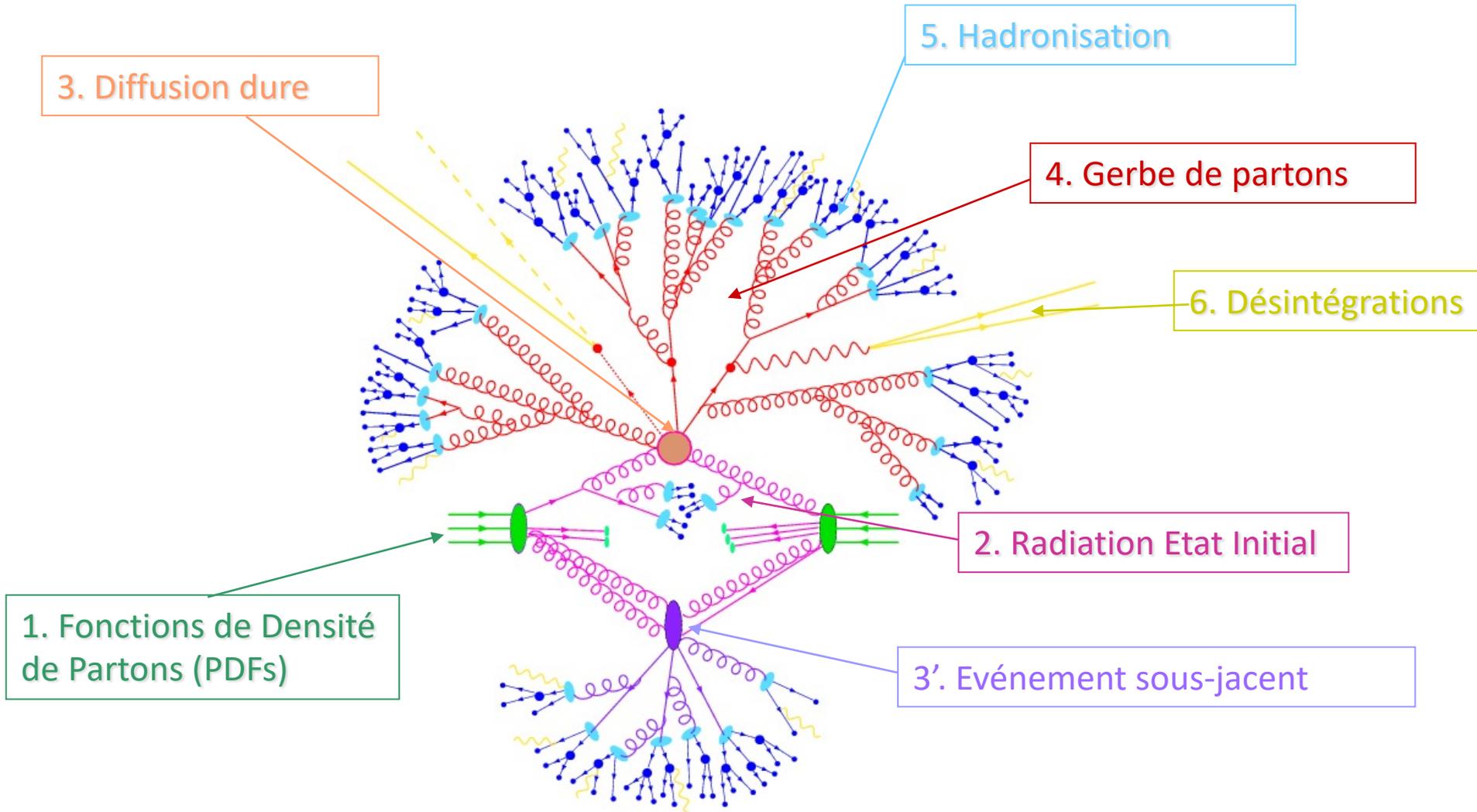
4. Hadronisation

3. Gerbe de partons

5. Désintégrations



Collision hadronique



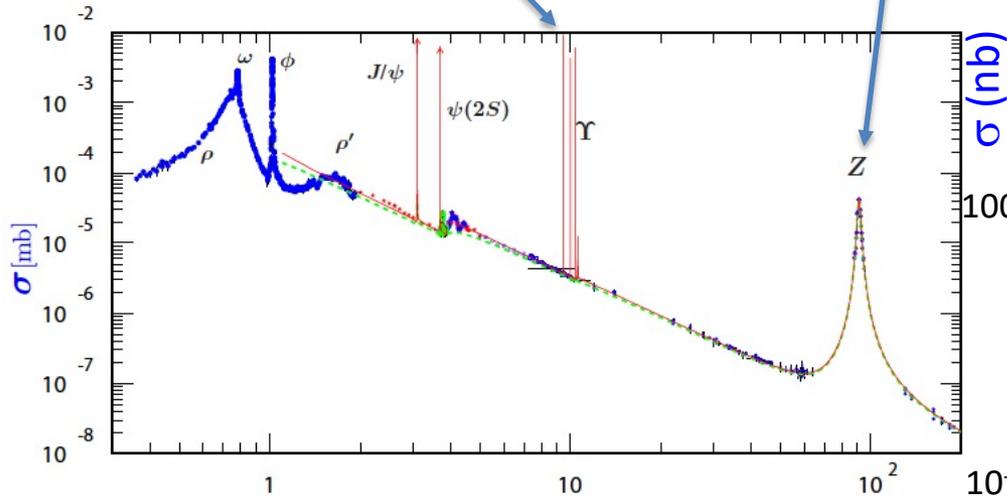
Sections efficaces e^+e^- et pp

e^+e^-

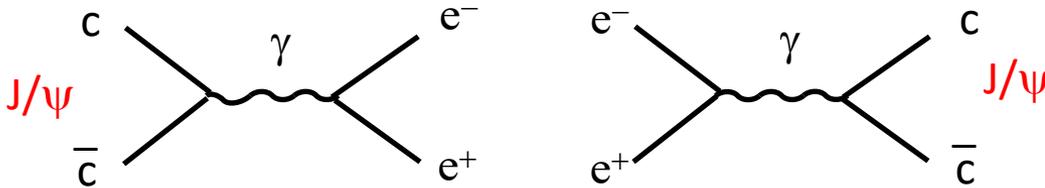
pp

Usines à b

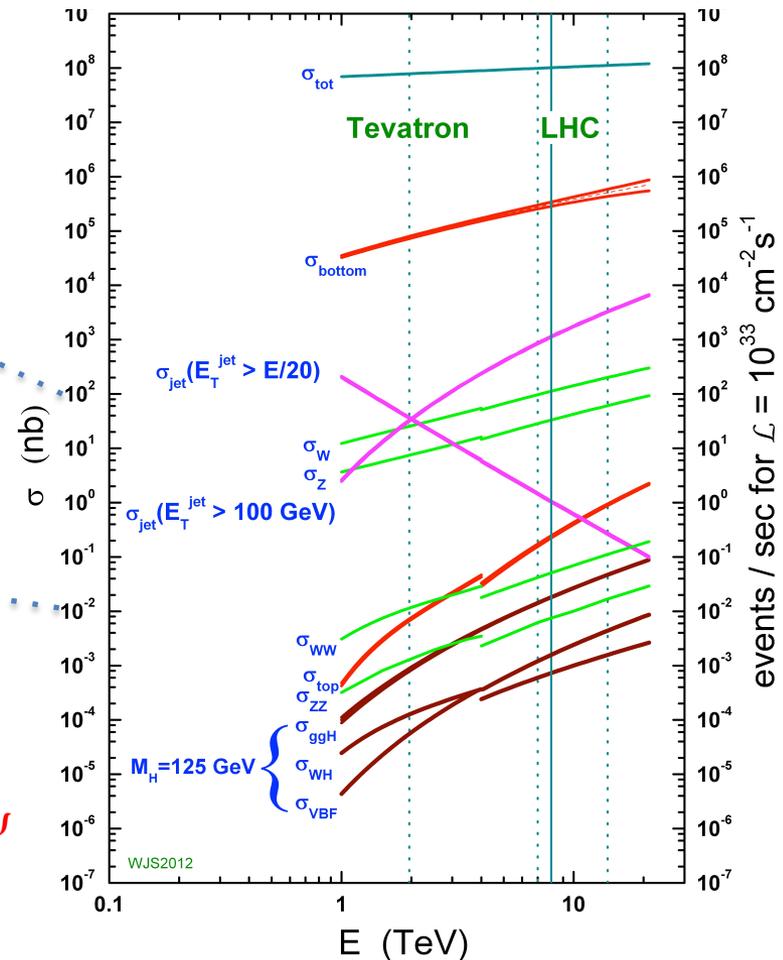
Usines à Z



$$E_{\text{CM}} = \sqrt{s} \text{ [GeV]}$$



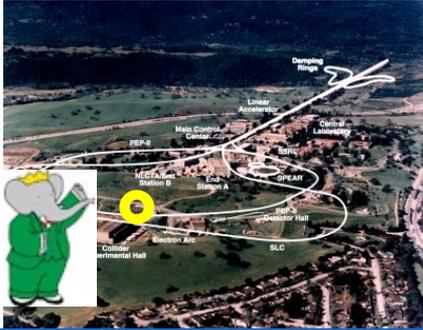
Sections efficaces p-(anti)-p calculées



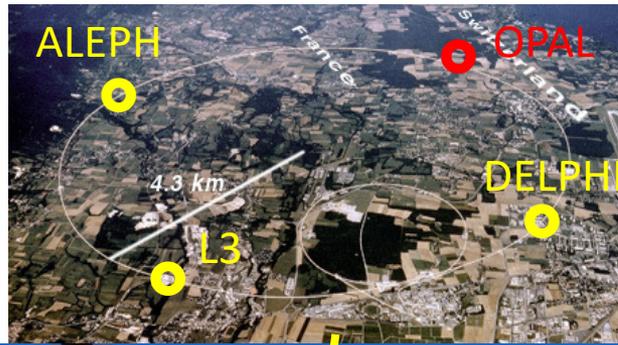
Il faut faire varier l'énergie des faisceaux pour mesurer ces courbes

Collisionneurs électron-positron ~récents

PEP II @ SLAC



LEP @ CERN



superKEKB @ KEK



Usine à b

$E_{cm} \sim 10 \text{ GeV}$
 $E(\text{faisceaux}) : 9 \text{ GeV} + 3.1 \text{ GeV}$
 Luminosité intégrée $> 400 \text{ fb}^{-1}$
 Dernier run avril 2008

Energie centre de masse :
 90-200 GeV
 Luminosité intégrée 160 pb^{-1}
 Dernier run novembre 2000

Usine à Z

Usine à b

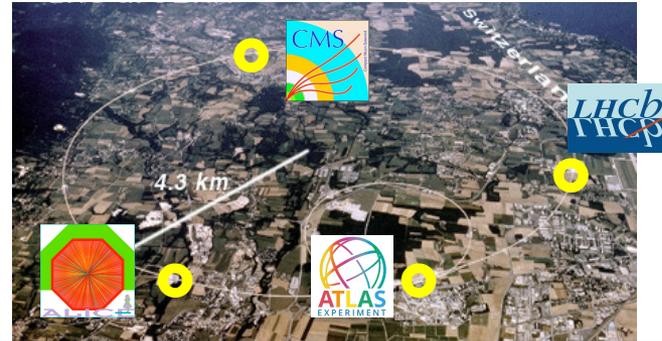
$E_{cm} \sim 10 \text{ GeV}$
 $E(\text{faisceaux}) : 7 \text{ GeV} + 4 \text{ GeV}$
 Luminosité intégrée $> 200 \text{ fb}^{-1}$
 Premier run en 2019

Collisionneurs hadroniques récents

Tevatron @ Fermilab ($p\bar{p}$)



LHC @ CERN (pp , pPb , $PbPb$, $XeXe$)

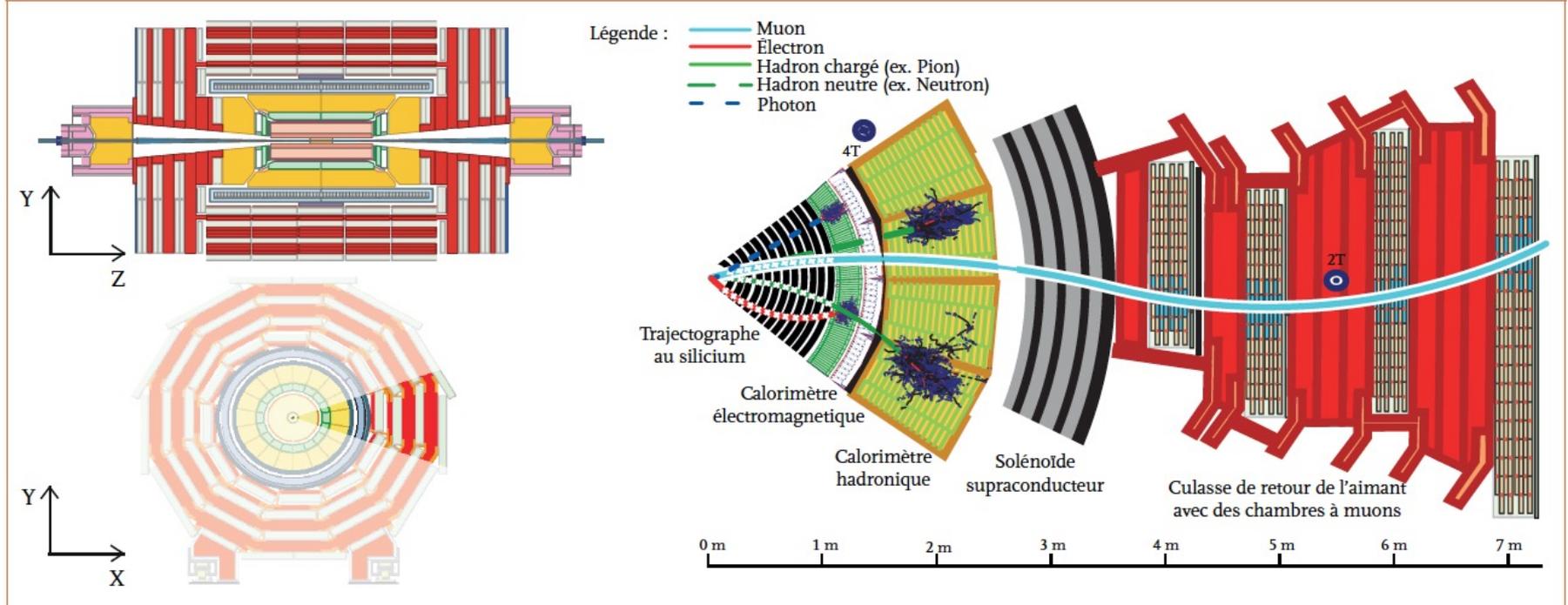


Energie centre de masse : 1.96 TeV
Luminosité intégrée $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ / exp.
Dernier run 2011

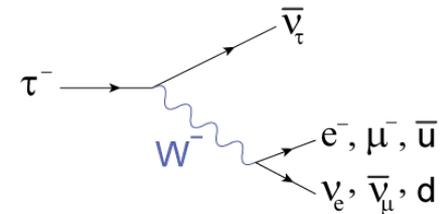
Energie centre de masse : 7, 8, 13 TeV (en pp)
Premier run 2009

Détection

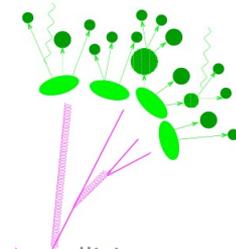
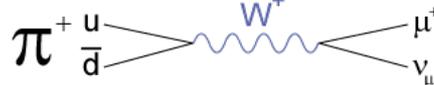
Voir les cours de
P. Puzo et N. Morange



- Temps de vie du muon $\tau_\mu \sim 2 \mu\text{s}$, longueur de vol moyenne $c\tau \sim 660 \text{ m}$
- Temps de vie du tau $\tau_\tau \sim 300 \text{ fs}$, $c\tau \sim 90 \mu\text{m}$
détection des $\tau =$ via leur produits de désintégration



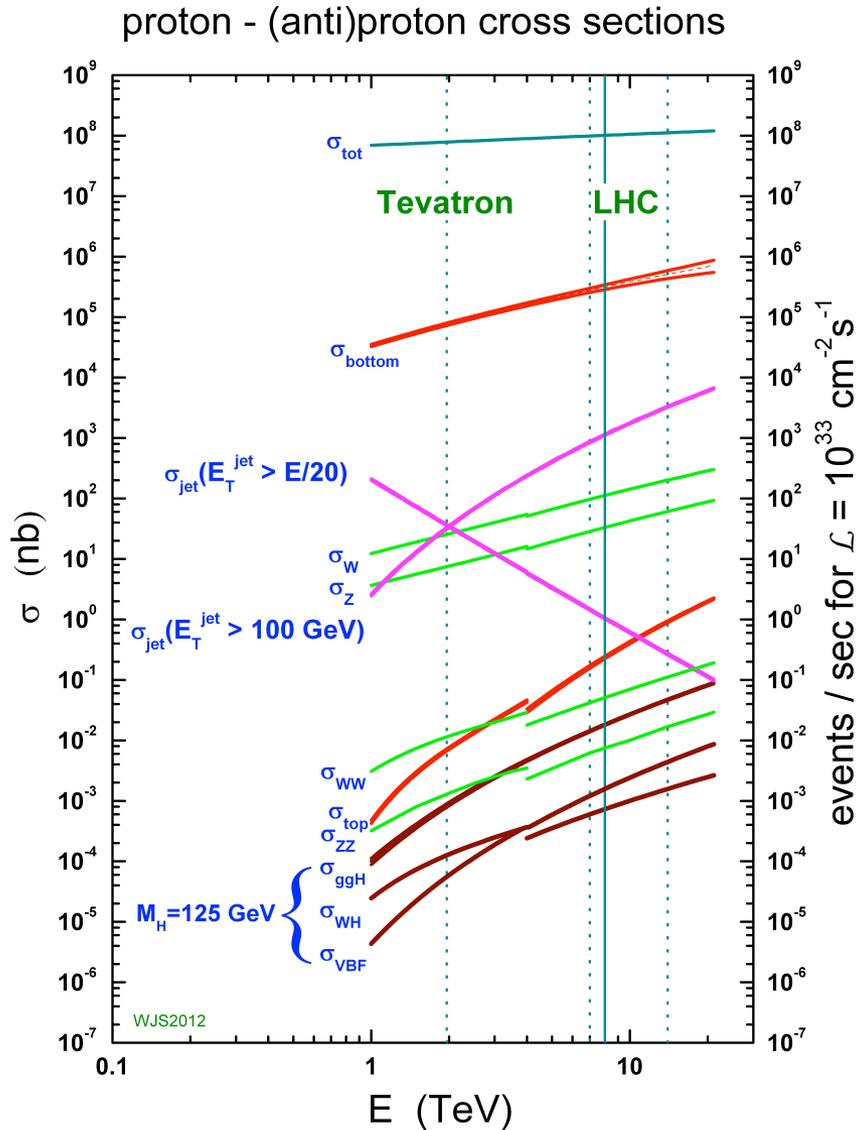
- Temps de vie des hadrons : π^\pm : 26 ns ($\sim 8 \text{ m}$), K^\pm : 12 ns ($\sim 4 \text{ m}$)



- Quarks et gluons : « jets »
- Neutrinos : impulsion (p) ou impulsion transverse (p_T) manquante

Déclenchement expériences sur collisionneur hadronique

≥1 collision
toutes les
25 ns



(chiffres
approximatifs)

