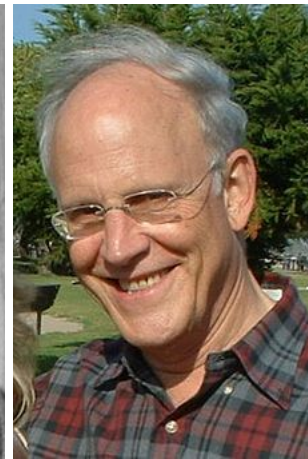
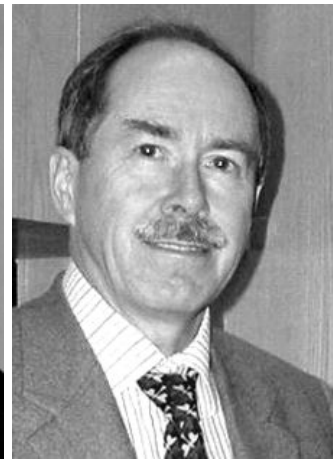
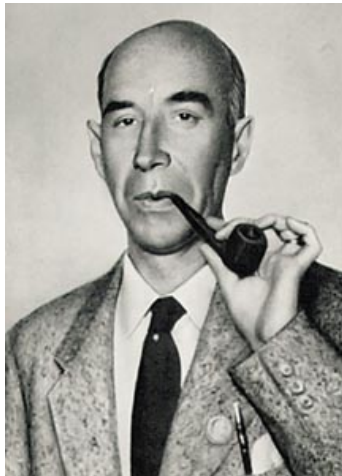


Le modèle standard en 60 minutes

Formation continue 2008

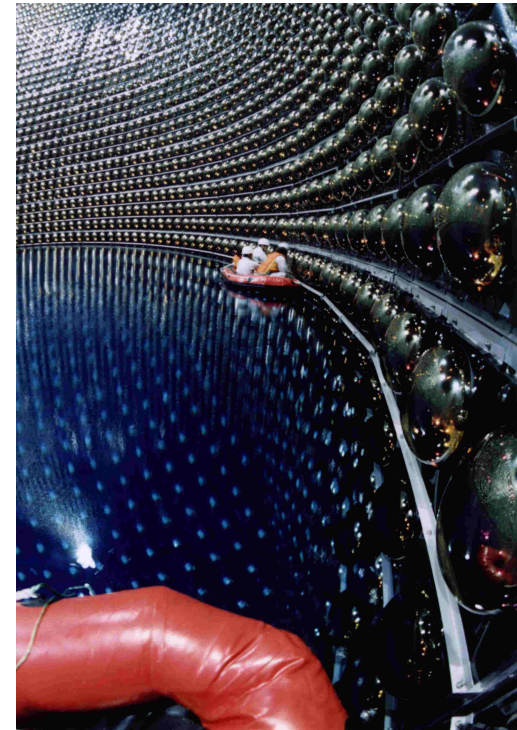
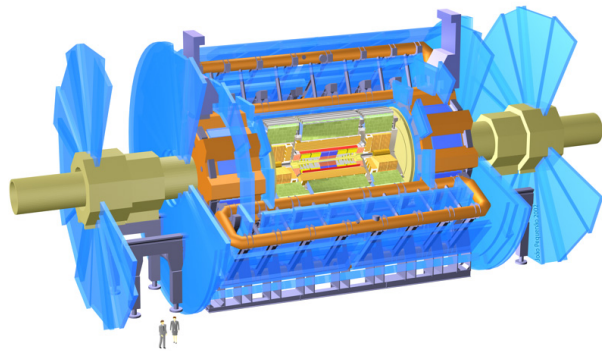


UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Martin Pohl

Une feuille de route pour les premières 60 minutes

- A chaque échelle sa physique
- Le modèle standard : une théorie de champs quantique
- Symétries et invariances
- Observables : calcul et mesure
- Exemples : la masse du Z, le temps de vie du myon

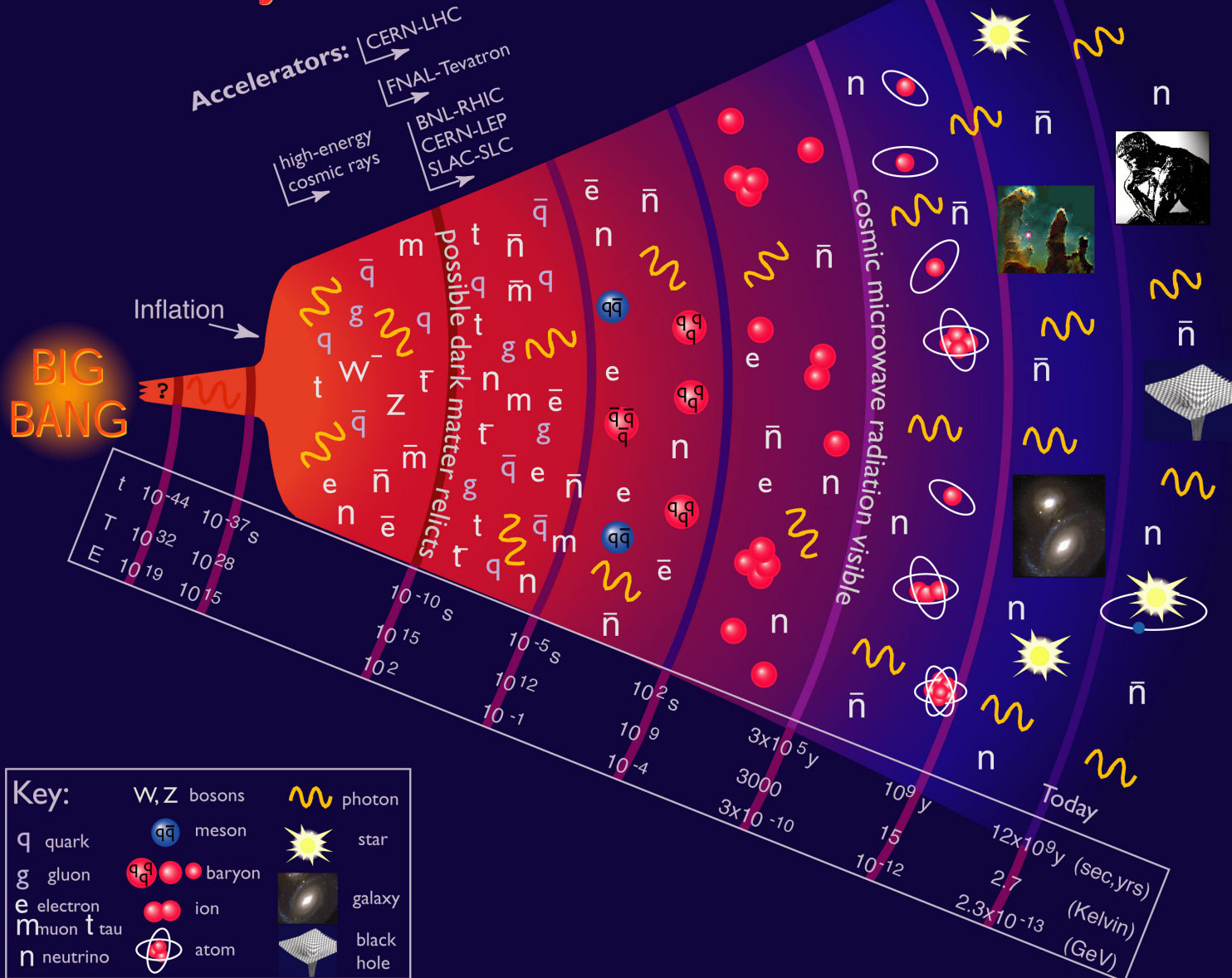


Hypothèses sur l'Univers à l'échelle microscopique

- **Matière** : nombre limité de catégories de **particules élémentaires**, identifiées par leur masse unique et leurs propriétés vis-à-vis des forces. Elles sont supposées sans structure intérieure, correspondant à un point dans l'espace-temps.
- **Forces** : limitées en nombre, agissent entre les constituants de la matière. Cas idéal : manifestations d'une seule **force universelle**.
- **Vide** : forces et matière évoluent dans le vide, à **trois dimensions spatiales** et une **dimension temporelle**.
- **L'homme** : fait partie de ce système dynamique, mais prétend pouvoir comprendre son fonctionnement, grâce à la méthode de **l'expérience scientifique** et de sa **description mathématique**.
- Hypothèses évidemment contestables
- Programme propose de **comprendre tout l'Univers par ses propriétés microscopiques, et la méthode scientifique**.

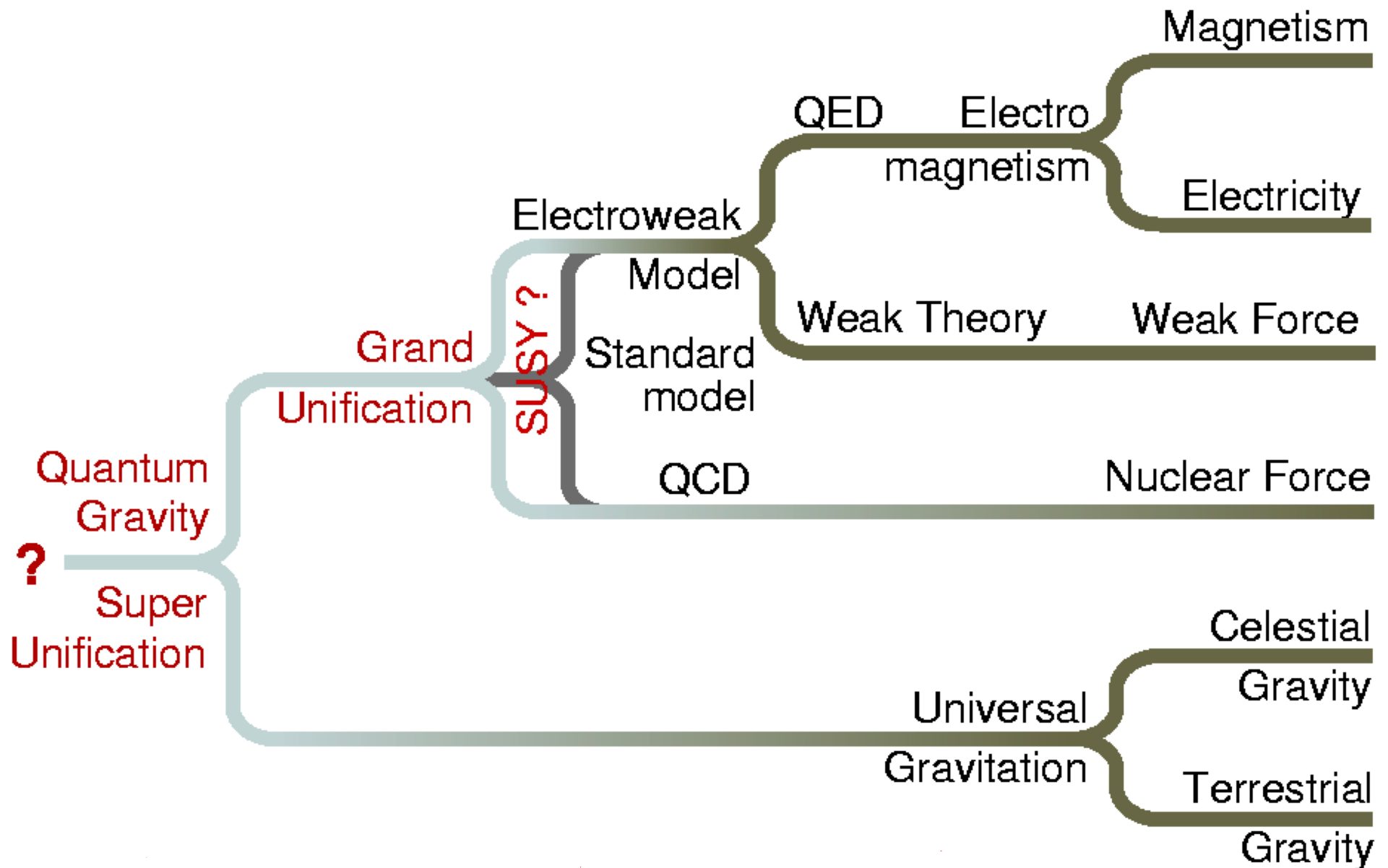
L'histoire de l'Univers

History of the Universe



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

Augmenter l'énergie permet de remonter dans le temps



Différentes échelles, différents moyens

Forces et matière peuvent être étudiées à différentes **échelles** de **distance** et de **vitesse** :

- La **physique classique** considère des distances beaucoup plus grandes que la taille d'un atome, et des vitesses beaucoup plus petites que la vitesse de la lumière.
- A des distances plus petites qu'un atome, la **physique quantique** remplace la physique classique. En effet, la physique classique est un cas particulier de la physique quantique pour grandes distances.
- A une vitesse comparable à celle de la lumière, la physique classique doit être complétée par les **principes de la relativité**. Encore une fois, la physique classique est un cas particulier de la physique relativiste à basses vitesses.
- La physique des **champs quantiques** réunit relativité et approche quantique pour toutes les forces **sauf la gravitation**.

La physique aspire à établir une **vue d'ensemble**, où chaque étape d'échelle retient l'essentiel de l'échelle précédente en élargissant le champ d'application.

Unités naturelles

La physique des hautes énergies s'occupe de processus quantiques relativistes, donc l'échelle est caractérisée par la constante de Planck $\hbar$ et la vitesse de la lumière c :

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi} \simeq 1.055 \times 10^{-34} \text{ J s}$$
$$c \simeq 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

avec les dimensions :

$$[\hbar] = \frac{ML^2}{T}$$
$$[c] = \frac{L}{T}$$

En mettant :

$$\hbar = c = 1$$

on définit $\hbar$ comme l'unité de l'action et c comme l'unité de vitesse. Ceci permet de mesurer les masse (m), les impulsions (mc) et les énergies (mc^2) toutes avec les mêmes unités :

$$[E, M, p] = \frac{ML^2}{T^2} = \text{GeV} = 10^9 \text{ eV} \simeq M_p$$

Unités naturelles

L'unité de base, **électronvolt** (eV), est définie comme le gain en énergie que fait un électron en parcourant une différence en potentiel de 1V. Un milliard de ces unités correspond à peu près à la masse du proton, M_p , et forme ainsi l'échelle naturelle de la physique des hautes énergies.

Quantité	Facteur de conversion	Unités naturelles	Unités conventionnelles
Masse	$1 \text{ kg} = 5.61 \times 10^{26} \text{ GeV}$	GeV	GeV/c^2
Longueur	$1 \text{ m} = 5.07 \times 10^{15} \text{ GeV}^{-1}$	GeV^{-1}	$\hbar c/\text{GeV}$
Temps	$1 \text{ s} = 1.52 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1}$	GeV^{-1}	$\hbar/\text{GeV}$

Dans le système des unités naturelles, la charge électrique est sans dimension $[e] = [\sqrt{\hbar c}] = [1]$. Elle paraît souvent sous forme de la **constante de structure fine** α , qui est l'énergie électrostatique de deux électrons à l'unité de la distance divisée par la masse de l'électron

$$\alpha = \frac{\frac{1}{4\pi} \frac{e^2}{\hbar/mc}}{mc^2} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$$

Rappel : concepts de la physique classique

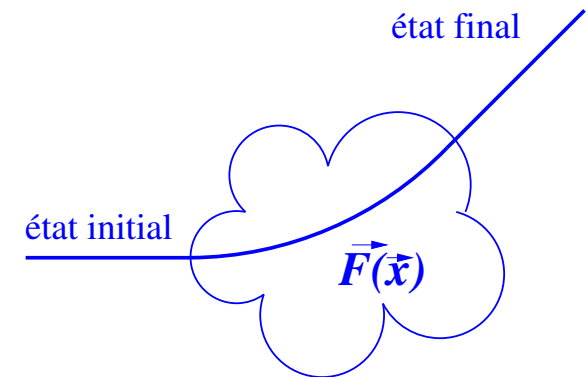
- Les particules sont des points de masse, leur position $\vec{x}$ et impulsion $\vec{p}$ sont certaines.
- La trajectoire est déterminée par la loi de Newton, si les forces et les conditions initiales sont connus :

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \sum_i \vec{F}_i$$

- L'action des forces est continue.
- Le nombre de particules est conservé.
- Le champ et le potentiel sont des astuces subordonnées à la force et l'énergie. Exemple électrique :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad ; \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad ; \quad E_{pot} = qV$$

Validité : $v \ll c$
 $\Delta x \gg 10^{-10} \text{m}$



Rappel : concepts de la mécanique quantique

- Les particules sont des champs, décrits par une amplitude de probabilité $\psi(\vec{x}, t)$. Le carré de cette amplitude $\rho = |\psi|^2 \geq 0$ donne la probabilité de trouver une particule à $(\vec{x}, t)$.
- La trajectoire n'existe pas, mais amplitude et probabilité évoluent à partir d'un état initial. L'évolution est décrite par l'équation de Schrödinger :

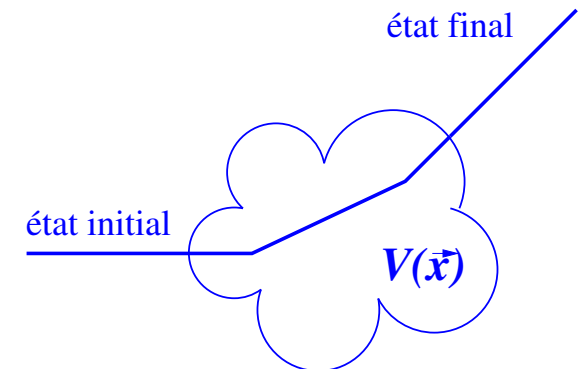
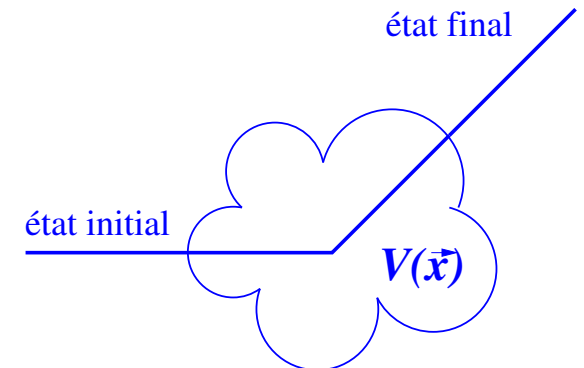
$$-\frac{1}{2m}\vec{\nabla}^2\psi = i\frac{\partial}{\partial t}\psi \quad ; \quad i\frac{\partial}{\partial t}\psi + \frac{1}{2m}\vec{\nabla}^2\psi = V\psi$$

- Les particules interagissent avec le potentiel. L'action du potentiel est continue, mais peut être approximée par une approche perturbative.
- Le nombre de particules est conservé :

$$\rho = (\psi\psi^*) \quad ; \quad \vec{j} = -\frac{i}{2m}(\psi^*\vec{\nabla}\psi - \psi\vec{\nabla}\psi^*) \quad ; \quad \partial\rho/\partial t + \vec{\nabla}\vec{j} = 0$$

- L'origine et les moyens de transport du potentiel restent inexpliqués.

Validité : $v \ll c$



Rappel : concepts de la théorie des champs relativiste

- L'évolution des particules est décrite par une équation de mouvement relativiste :

Validité : ? ? ?

$$E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial t^2}\phi + \vec{\nabla}^2\phi = m^2\phi$$

- Le nombre de particules n'est plus conservé, mais le courant électromagnétique est conservée :

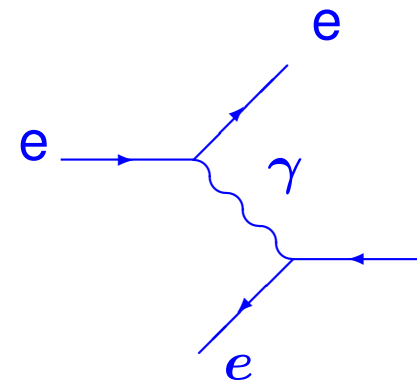
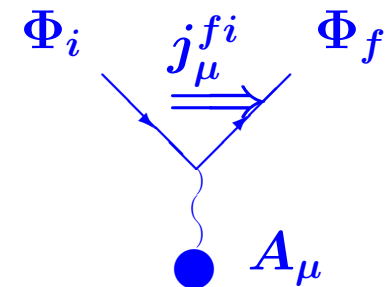
$$j^\mu = -2ep^\mu$$

Ceci donne la possibilité de créer des particules chargées en paires particule-antiparticule.

- Le potentiel est généré par un deuxième courant selon les équations de Maxwell :

$$A^\mu = -\frac{1}{q^2}j_{(2)}^\mu$$

Le propagateur $1/q^2 = (E_\gamma^2 - p_\gamma^2)^{-1}$ décrit l'amplitude de probabilité pour l'échange d'un photon de cette masse entre les deux courants.



Quadrivecteurs

Nous utilisons les **quadrivecteurs** pour simplifier les formules et mettre en évidence le comportement des grandeurs sous transformations de Lorentz. Le **vecteur de l'espace-temps contravariant** est $x^\mu = (t, x, y, z)$. Il se transforme comme le **vecteur énergie-impulsion contravariant** $p^\mu = (E, p_x, p_y, p_z)$.

Les **vecteurs covariants** suivent en appliquant le **tenseur métrique** $g_{\mu\nu}$:

$$x_\mu = g_{\mu\nu} x^\nu \quad ; \quad g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$
$$x_\mu = (t, -x, -y, -z) \quad ; \quad p_\mu = (E, -p_x, -p_y, -p_z)$$

Le **produit scalaire** est défini entre un vecteur contravariant et un vecteur covariant :

$$x_\mu x^\mu = t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = t^2 - \vec{x}^2$$
$$p_\mu p^\mu = E^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

Les produits scalaires entre quadrivecteurs sont des scalaires sous transformations de Lorentz, invariants quand on change de système inertiel.

Opérateurs quadrivecteurs

Il y a des opérateurs aussi qui se transforment comme un quadrivecteur.
Exemples : les **opérateurs de l'énergie et de l'impulsion** :

$$E = i \frac{\partial}{\partial t}$$
$$\vec{p} = \frac{1}{i} \vec{\nabla}$$

$$p_\mu = (E, \vec{p}) = (i \frac{\partial}{\partial t}, -i \vec{\nabla}) = i \partial^\mu$$

L'opérateur différentiel ∇^μ a les composantes carthésiennes suivantes :

$$\partial_\mu = \left(\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$
$$\partial^\mu = \left(\frac{\partial}{\partial t}, -\frac{\partial}{\partial x}, -\frac{\partial}{\partial y}, -\frac{\partial}{\partial z} \right)$$

Leur produit scalaire est l'**opérateur de d'Alembert** :

$$p^\mu p_\mu = -\frac{\partial}{\partial x_\mu} \frac{\partial}{\partial x^\mu} = -\partial^\mu \partial_\mu = -\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2 \right) \equiv -\square^2$$

Forces : comment changer l'impulsion ?

Le champ est créé en émettant un **boson vecteur**, qui a une certaine probabilité de voyager jusqu'à sa destination. Mais il faut respecter la **conservation de l'énergie-impulsion** !

L'électron émet un photon :

$$E^2 - \vec{p}^2 = (E' + k_0)^2 - (\vec{p}' + \vec{k})^2$$
$$m_e^2 = m_e^2 + m_\gamma^2 + 2E'k_0 - 2\vec{p}'\vec{k}$$

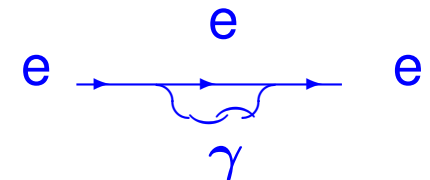
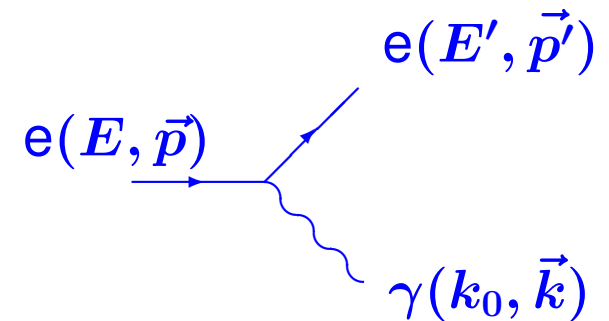
Avec $m_\gamma = 0$, $k_0 = |\vec{k}|$:

$$E' \leq |\vec{p}'|$$

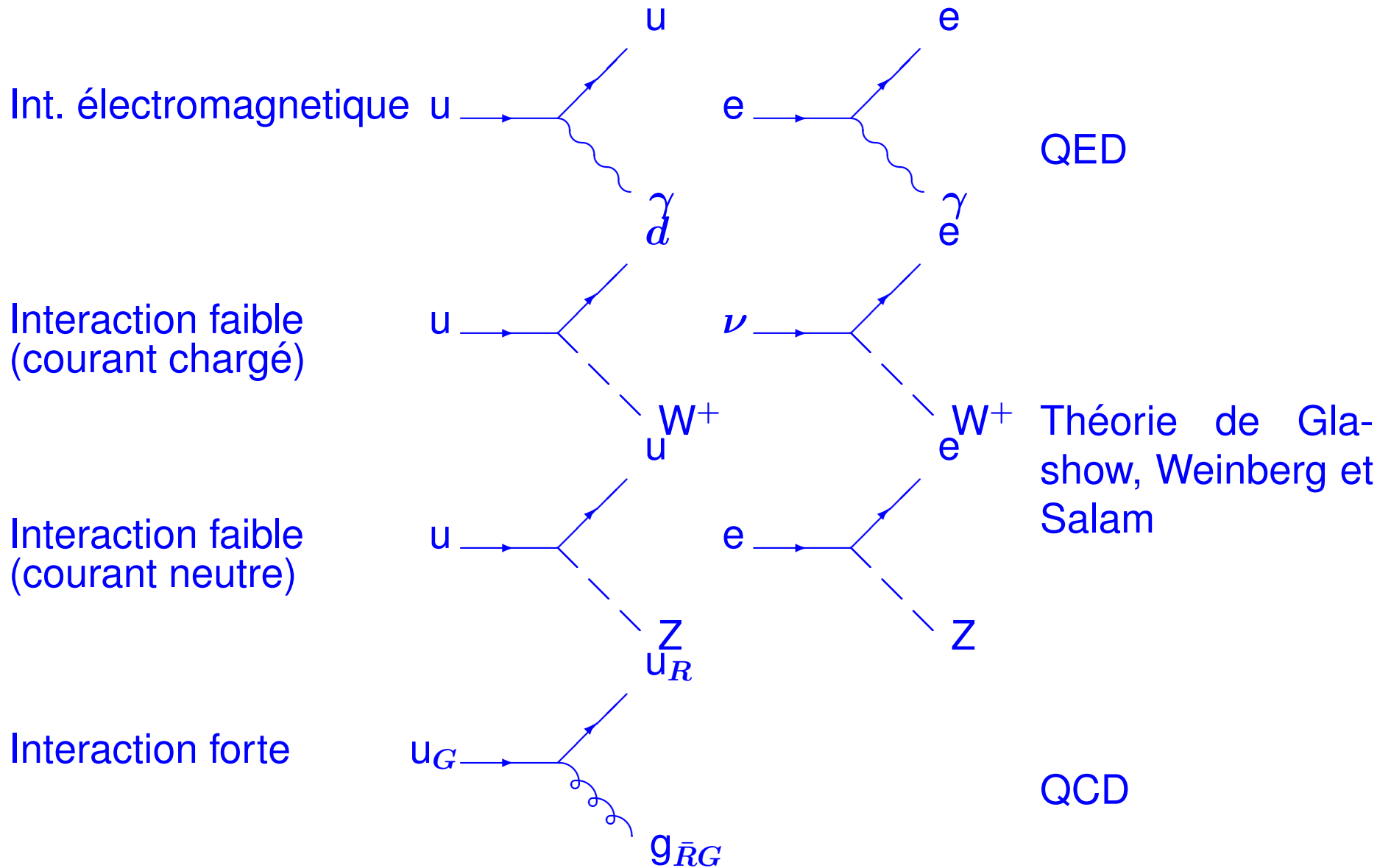
en contradiction avec $m_e \neq 0$.

Conclusion : la force électromagnétique est transmise par des **photons virtuels**, avec $k_0^2 - \vec{k}^2 > 0$. Les photons virtuels ont une masse, en contraste avec les photons réels.

Point de vue alternatif : grâce à la **relation d'incertitude** $\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$, l'énergie totale d'un système peut être augmentée par k_0 pendant $\Delta t \simeq \hbar/k_0$. Après ce temps là, le photon doit être réabsorbé.



Forces



Les forces fondamentales

- **Force forte** : force nucléaire, la plus forte interaction connue ; **noyaux**.
- **Force électromagnétique** : force entre particules chargées ; fondement de **la chimie et de la biologie** ; lumière, électronique, matériaux.
- **Force faible** : faible à grande distance, étroitement liée à l'électromagnétisme ; **radioactivité**.
- **Force gravitationnelle** : force entre **corps massifs** ; interaction la plus faible. Portée infinie.

Pour être soumise à une force la matière doit avoir certaines propriétés : par exemple, seule la matière chargée est sensible à la force électromagnétique.

Force	Agit sur	Intensité	Portée
Forte	Quarks et particules contenant des quarks	10^4	$\sim 10^{-14}$ m
Electromagnétique	Particules chargées électriquement	10^2	∞
Faible	Toutes particules	10^{-2}	$\sim 10^{-17}$ m
Gravitationnelle	Toutes particules	10^{-34}	∞

Attention : l'intensité dépend de la distance, ou du transfert d'impulsion.

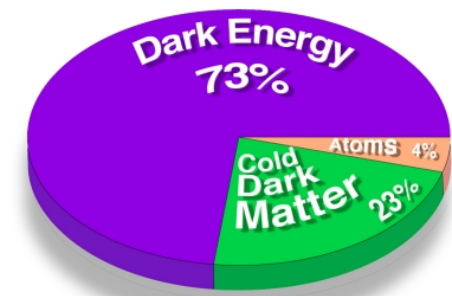
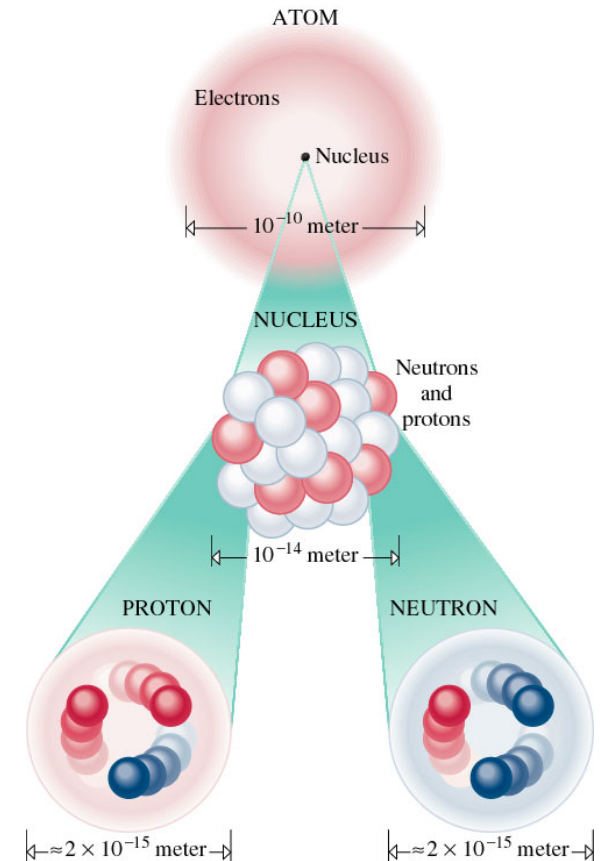
Les constituants de la matière

Familles, avec différents propriétés :

- **Leptons** : électron, détermine propriétés de l'atome. Interactions faibles et électromagnétiques.
- **Neutrinos** : produits dans desintégrations radioactives. Uniquement interactions faibles.
- **Quarks** : constituants des protons et neutrons, noyaux. Toutes interactions.

Générations, avec différentes masses :

- Trois générations pour chaque famille.
- Les générations se distinguent par leur **masse**.
- Propriétés très similaires.



Attention : Ceci décrit moins de 5% de l'Univers !

Tableau périodique de la matière

Nom	Spin	Nombre baryon.	Nombre lepton.	Charge élect.
Leptons :				
e, μ, τ	$1/2$	0	1	-1
ν_e, ν_μ, ν_τ	$1/2$	0	1	0
Quarks :				
u, c, t	$1/2$	$1/3$	0	$+2/3$
d, s, b	$1/2$	$1/3$	0	$-1/3$
Bosons de jauge :				
γ	1	0	0	0
Z, $W^\pm$	1	0	0	$0, \pm 1$
Gluons	1	0	0	0
Vide	0	0	0	0

Univers consiste de matière (fermions), de forces (bosons de jauge) et de vide. Pour chaque particule, il y a une **antiparticule**, distinguée par le signe de toutes ses charges.

Matière : générations et familles

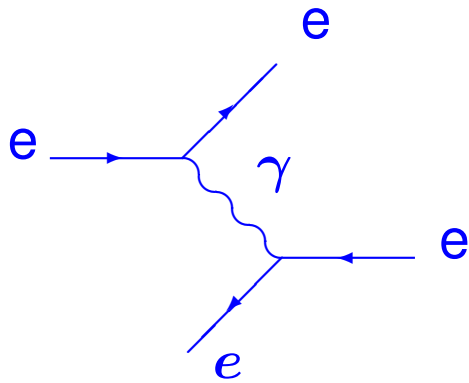
Famille	Génération		
	1	2	3
Neutrinos	ν_e	ν_μ	ν_τ
Leptons	e	μ	τ
Quarks Up	u	c	t
Quarks Down	d	s	b

Les propriétés des particules dans une famille sont très similaires. Les générations se distinguent par la **masse** des particules et par le nombre quantique de **saveur**, qui n'est pas conservée par les interactions faibles. Attention à la fourchette des masses : du neutrino presque sans masse jusqu'au quark top, aussi lourd qu'un noyau de Hafnium ($A = 178, Z = 72$).

Toutes les “particules” dans le **Review of Particle Properties** sont composées de ces 12 composants élémentaires. Quarks et antiquarks sont les constituants des **hadrons**, des particules avec interactions fortes : les mésons sont composés de paires quark-antiquark, $\pi^+ = \{u\bar{d}\}$, les baryons sont composés de trois quarks, $p = \{uud\}$. Les **leptons** n'ont pas d'interactions fortes, mais uniquement faibles et électromagnétiques.

Si les particules portent la **charge** nécessaire, elles peuvent interagir. Le concept de la charge ne se limite pas à la charge électromagnétique : les interactions faibles et fortes réclament eux aussi leur propre charge. Les **bosons de jauge** transmettent les forces : photon $\leftrightarrow$ force électromagnétique, $W^\pm$ and $Z \leftrightarrow$ forces faibles, gluons $\leftrightarrow$ force forte.

Diagrammes de Feynman



Si, par contre, le photon rencontre une autre particule pendant cette période, de l'impulsion est transférée de la source vers la destination : une **force** agit. Pour pouvoir émettre ou absorber des photons, les particules doivent porter une **charge électrique**. Lingo : les photons “se couplent” à la charge électrique, la charge unitaire est une **constante de couplage**. La probabilité (ou plutôt l'amplitude de probabilité) d'émettre ou absorber un photon est proportionnelle à la charge de la particule.

Diagrammes de Feynman : **lignes de propagation** des particules en coordonnées x et t , et leurs **vertex** d'interactions. Visualisation des réactions, et prescriptions de calcul pour leur probabilité en même temps. A chaque vertex, l'énergie et l'impulsion sont conservées ; les lignes entre deux vertex correspondent à des particules virtuelles.

Le modèle standard

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

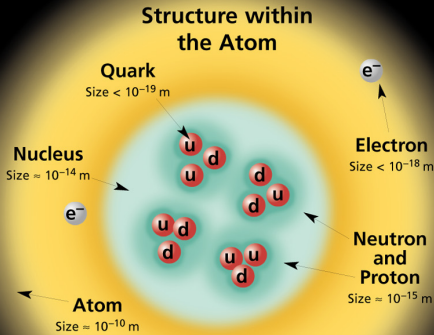
matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of $\hbar$, which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$ kg.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.4	-1			
W^+	80.4	+1			
Z^0	91.187	0			

Color Charge

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\bar{n}$	anti-neutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
$\bar{\Lambda}$	anti-lambda	$\bar{u}\bar{d}\bar{s}$	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2
$\bar{\Omega}^+$	anti-omega	$\bar{s}\bar{s}\bar{s}$	+1	1.672	3/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak		Electromagnetic	Strong	
			(Electroweak)			Fundamental	Residual
Acts on:		Mass – Energy	Flavor		Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons		Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W ⁺	W ⁻ Z ⁰	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	{	10 ⁻⁴¹	0.8		1	25	Not applicable to quarks
		10 ⁻⁴¹	10 ⁻⁴		1	60	
		10 ⁻³⁶	10 ⁻⁷		1	Not applicable to hadrons	
for two protons in nucleus							20

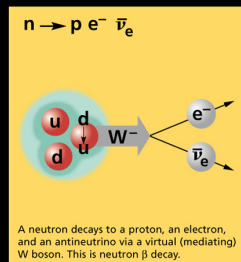
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

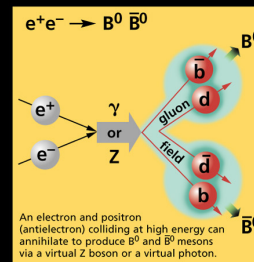
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., γ , Z^0 , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

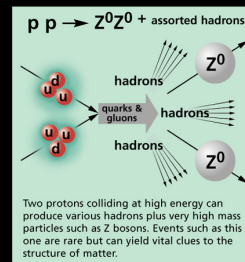
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W^- boson. This is neutron β decay.



An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and $\bar{B}^0$ mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

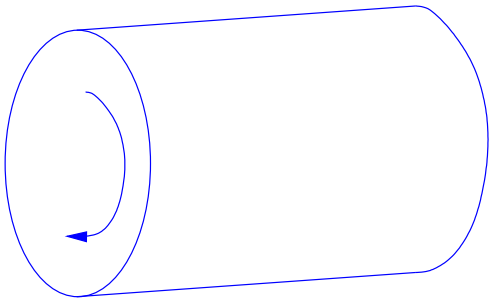
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

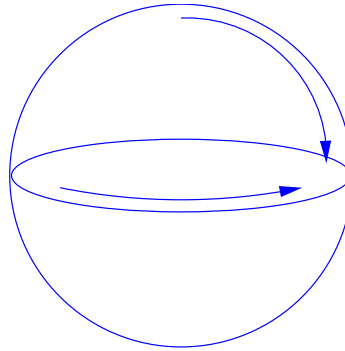
Symétries et invariances

Symétries et invariances :

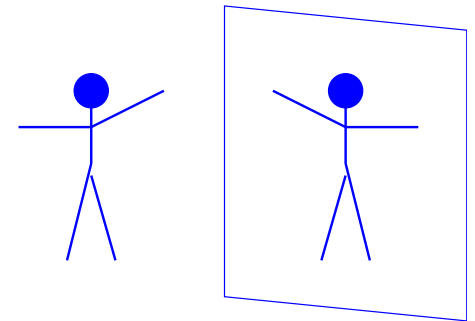
- Si un système ne change pas d'aspect sous l'application d'une manipulation, il est dit posséder une **symétrie** correspondante.
- Si le comportement d'un système ne change pas sous l'application d'une manipulation, il est dit **invariant** au changement.
- Exemples : symétries géométriques.



cylindrique



sphérique



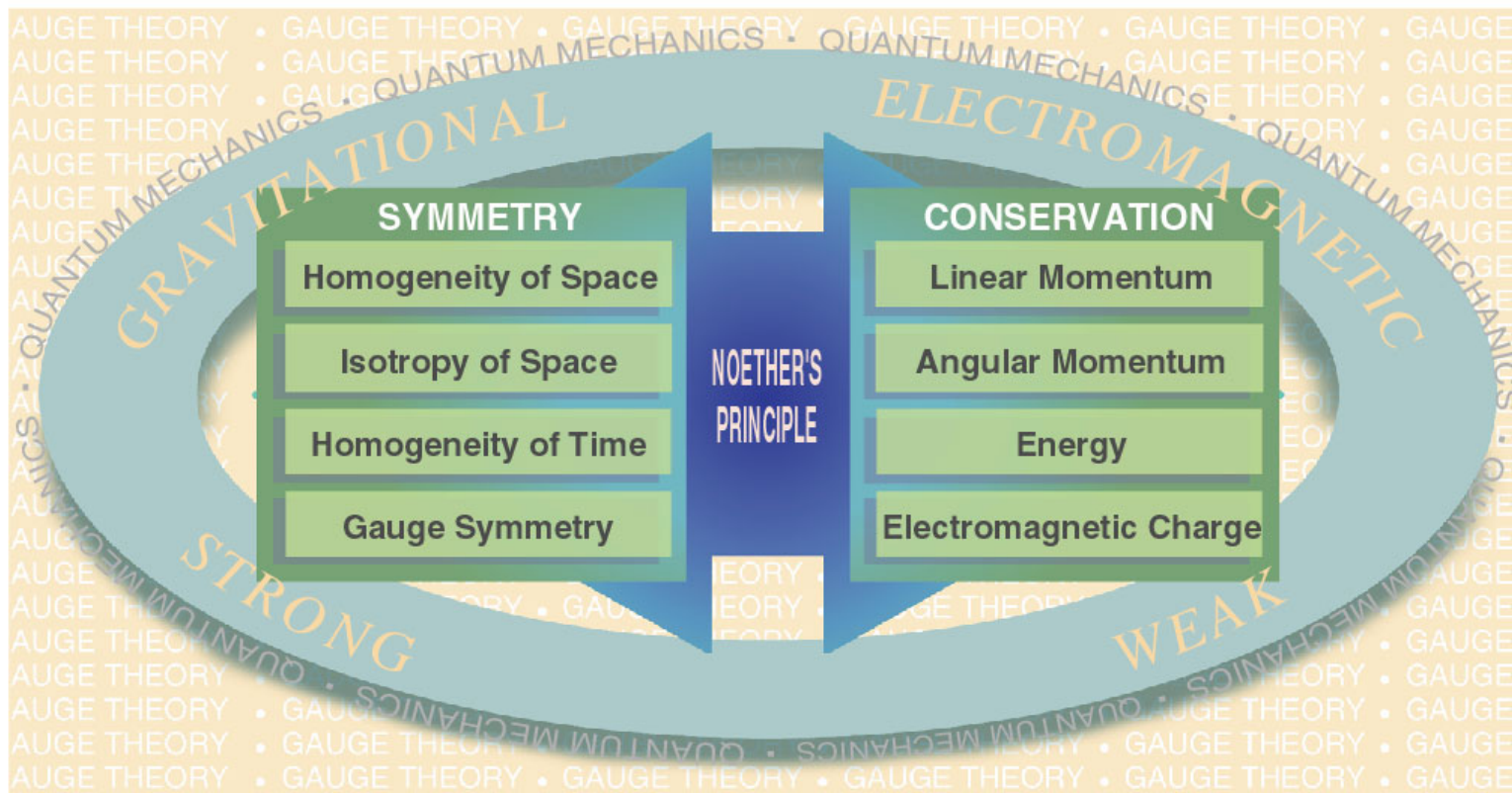
miroir

Symétries et quantités conservées

Principe de Noether :

- A chaque symétrie continue d'un système correspond une quantité conservée.

A. Noether (1882-1935)



Exemple : symétrie de jauge et conservation de la charge

La conservation de la charge électrique est étroitement liée au fait que le potentiel électrique (et son homologue magnétique) peut être redéfini avec un certain degré de liberté sans toucher aux propriétés physiques d'un système. Cette propriété est appelée **symétrie de jauge**.

Imaginez un laboratoire immergé dans un champ électrique homogène. Etant à l'extérieur du labo, nous fixons $V = 0$ à un point extérieur quelconque. Un collègue à l'intérieur fixerait le sien, $V' = 0$, à un point à l'intérieur. Quand on place une charge, elle aurait l'énergie potentielle qV pour nous, qV' pour le collègue à l'intérieur. Si on pourrait faire disparaître cette charge sans en impliquer une autre, opposée, cette énergie devrait être libérée sous une forme ou une autre, et donner un rendement différent dans les deux systèmes ! **Ainsi conservation de l'énergie et liberté de jauge pour le potentiel impliquent conservation de charge.**

L'action du potentiel

Quelle est l'action du potentiel sur les particules ? Le potentiel électromagnétique change la phase du champ d'une particule chargée, plus exactement de sa fonction d'onde ou de son amplitude de probabilité. Pour voir ceci on regarde une particule libre non-relativiste, qui suit l'équation de Schrödinger :

$$i\frac{\partial\psi_0}{\partial t} = H_0\psi_0$$

Dans un potentiel scalaire qui dépend du temps on aura l'équation inhomogène

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi = [H_0 + V(t)]\psi$$

Ses solutions auront une phase $S(t)$ qui dépend du temps, $\psi = \psi_0 \exp -iS(t)$:

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = i\frac{\partial\psi_0}{\partial t}e^{-iS} + \psi_0\frac{\partial S}{\partial t}e^{-iS} = H_0\psi_0e^{-iS} + \frac{\partial S}{\partial t}\psi_0e^{-iS} = \left[H_0 + \frac{\partial S}{\partial t}\right]\psi$$

Il en suit que $\frac{\partial S}{\partial t} = V(t)$, et sur un parcours fermé on a un décalage de phase :

$$\Delta S = \oint V(t)dt$$

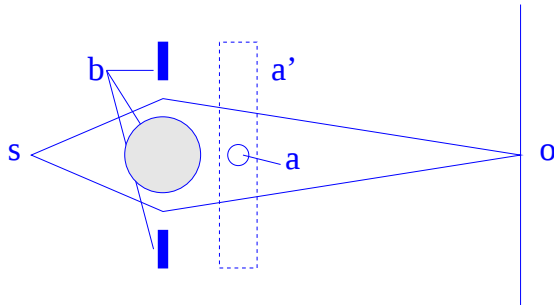
L'expérience d'Aharonov et Bohm

De même, on trouve pour un quadripotentiel $A_\mu = (V, \vec{A})$:

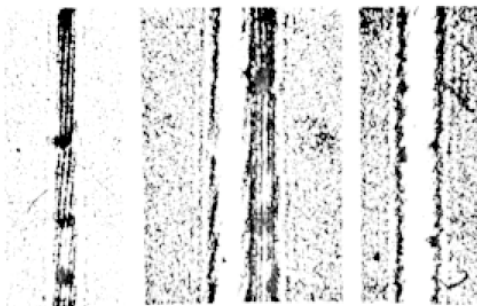
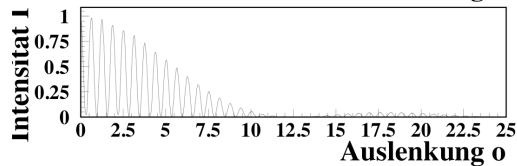
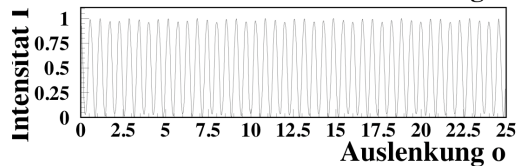
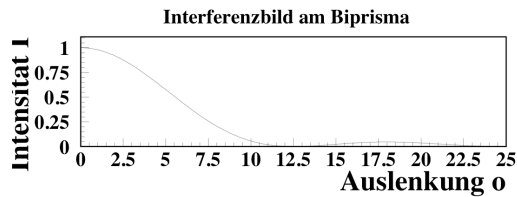
$$\Delta S = \oint V dt - \oint \vec{A} d\vec{x} = \oint A_\mu dx^\mu$$

Le potentiel électromagnétique change la phase du champ d'une particule chargée. Le décalage de phase est proportionnel au flux électromagnétique inclu dans le parcours. En contraste avec une phase absolue de la fonction d'onde, cette différence de phase est mesurable dans une expérience interférométrique. On peut alors se demander si les décalages de phases se produisent aussi si la particule parcourt un espace où le champ est zéro partout, mais où le potentiel est non-nul.

L'expérience d'Aharonov et Bohm



Le principe d'une telle expérience est due à Y. Aharonov et D. Bohm, Phys. Rev. **115** (1959) 485. Des électrons sortent de la source S . Ils sont mis en interférence par le biprisme à double fente b . Les franges d'interférence apparaissent sur l'écran en o . Si l'on introduit une fine aiguille ferromagnétique (R.G. Chambers, Phys. Rev. Lett **5** (1960) 3) ou une très fine bobine solénoïdale longue (G. Möllenstedt et W. Bath, Phys. Blätter (1962) 299) dans le parcours à l'endroit a , il en résulte un $\oint \vec{A} d\vec{x} \neq 0$ sur le parcours des électrons, parce que le potentiel vecteur à l'extérieur d'un solénoïde est tangentiel et diminue comme $1/r$. Le champ magnétique par contre, est zéro partout parce qu'il est confiné à l'intérieur du solénoïde. Si l'on varie le flux magnétique, on observe un décalage des franges, mais non pas de leur enveloppe. Ceci démontre que les électrons interagissent bel et bien avec le potentiel même en absence de champs.



(a)

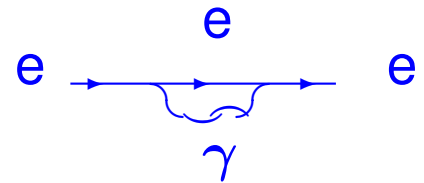
(b)

(c)

L'invariance de jauge

Si l'on re-jauge le potentiel électromagnétique globalement, $A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{d\lambda}{dx^\mu}$, $\oint A_\mu dx^\mu$ ne varie pas et il n'y a pas de différence de phase observable.

Mais si l'on réclame une **invariance locale** sous transformations de jauge, il y a un problème : que faire de la phase des champs qui en résulte ? Il s'avère que c'est en effet le photon, i.e. le potentiel A_μ lui-même qui s'en charge et l'absorbe. L'invariance locale sous transformations de jauge réclame donc la présence constante de l'interaction électromagnétique : **il n'y a pas d'électron sans photon, le champ du photon est le potentiel A_μ .**

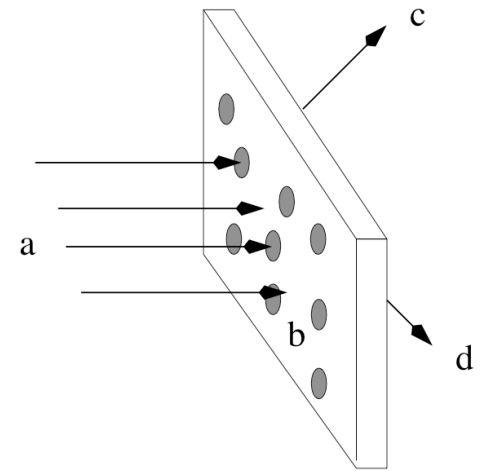


Tout semble alors se baser sur des symétries : l'invariance sous transformations de Lorentz réclame une équation de mouvement très précise pour les champs, l'invariance sous transformations de jauge prescrit la forme de leurs interactions et les propriétés des bosons de jauge, comme le photon. La construction théorique qui se base sur ces principes est appelée **le modèle standard**.

Observables : mesure expérimentale et calcul théorique

Comme la physique quantique est basé sur une approche statistique, le problème de base de la physique des particules est la mesure et le calcul de la probabilité pour un processus. Le calcul et la mesure de cette probabilité se font par le biais de la **section efficace**.

Le concept de la section efficace est purement géométrique. comme son nom l'indique. Considérons une réaction $a + b \rightarrow c + d$. Dans le laboratoire, le flux F_a des projectiles a , c'est à dire leur nombre par unité de surface et de temps, est $F_a = \rho_a v_a$, avec leur densité ρ_a et leur vitesse (par rapport à la cible b au repos) est v_a .



Si chacune des particules cibles a une **section efficace** σ , qui représente la probabilité de la “toucher”, le taux des réactions par seconde sera :

$$W = F_a N_b \sigma$$

avec le nombre N_b de cibles. La section efficace est donc définie comme le taux de réaction par unité de flux des projectiles et par particule cible. Elle représente l'intensité d'une réaction, indépendamment des détails expérimentaux.

Observables : mesure expérimentale et calcul théorique

La section efficace a la dimension d'une surface. Elle est mesurée dans l'unité (énorme !) de **barn**, $1\text{b} = 10^{-28}\text{m}^2$. Les sections efficaces que l'on trouve pour les leptons et quarks sont plutôt de l'ordre de nanobarn, $1\text{nb} = 10^{-9}\text{b}$, ou picobarn, $1\text{pb} = 10^{-12}\text{b} = 10^{-40}\text{m}^2$.

Au lieu d'observer seulement le taux total d'une réaction, on peut en enregistrer la distribution, par rapport à l'angle solide, par exemple. Dans ce cas, après normalisation par le flux incident et la densité de la cible, on mesure la **section efficace différentielle**, $d\sigma/d\Omega$, avec

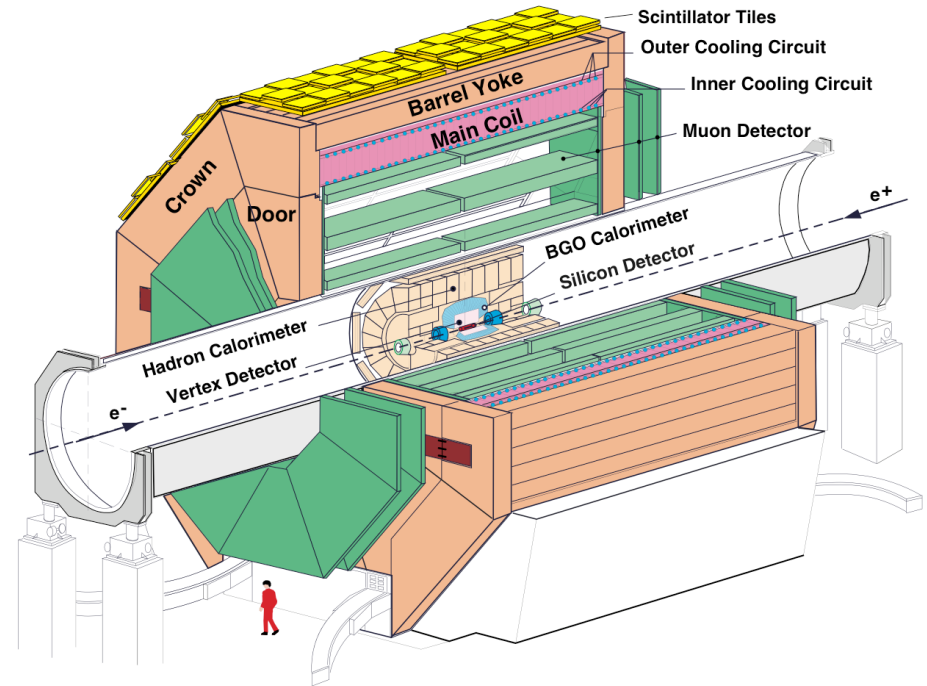
$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$

Etant donné une seule particule entrante sur une seule particule cible, la section efficace est aussi une **quantité calculable**. L'ingrédient majeur est encore une fois la probabilité que les deux réagissent, par l'intermédiaire d'un boson de jauge échangé. Cette probabilité (ou plutôt son amplitude) est calculable dans le cadre d'une théorie de champs, basé sur le principe de jauge. On peut donc comparer expérience et théorie, avec une bonne précision pour les deux. Une telle comparaison permet de **tester la théorie**, et de fixer ses **paramètres**, comme masses et constantes de couplages.

Exemple I : la masse du Z mesurée au LEP



- $e^+ e^-$, 27 km circonférence
- 8 sections d'interaction, 4 équipés de détecteurs : Aleph, Delphi, **L3**, Opal
- Energie maximale dans le centre de masse $\sqrt{s} > 200 \text{ GeV}$
- En service de 1989 à 2000



- L3 en service de 1989 à 2000
- Spécialisé dans la mesure de leptons et photons
- Opération stable, bonne efficacité, excellente résolution
- Tuiles scintillateurs pour rayons cosmiques

Mesure précise d'une masse par résonance

$$-kx - b\frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega t = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

Solution :

$$x(t) = \frac{F_0 \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{m^2(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + b^2\omega^2}}$$

avec $\omega_0^2 = k/m$.

$\omega \leftrightarrow$ énergie totale $E/\hbar$

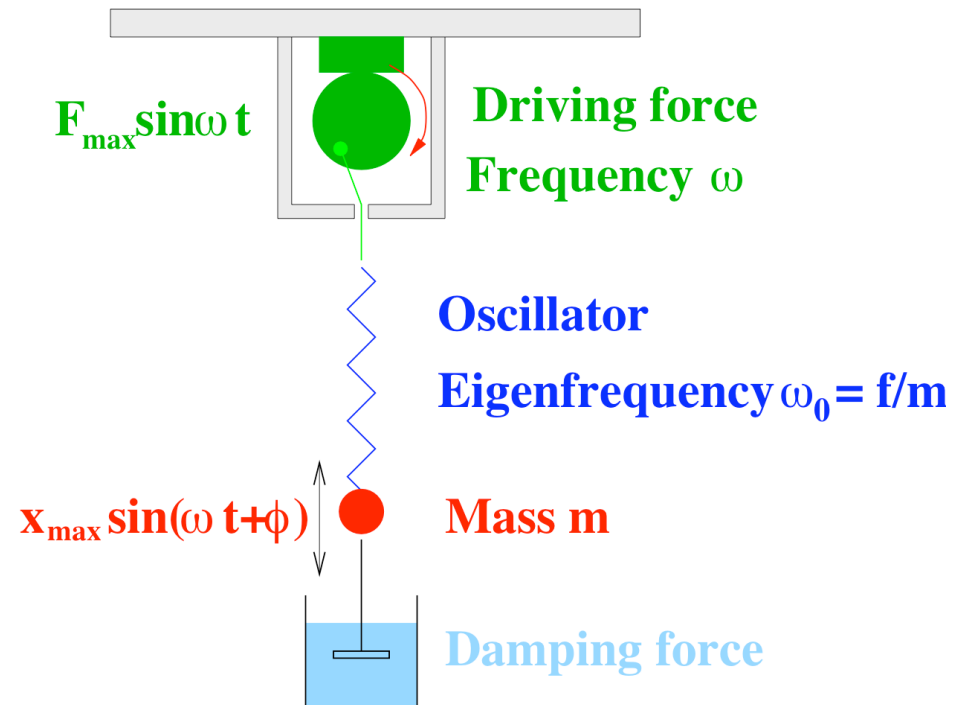
$k \leftrightarrow$ constante de couplage

$b \leftrightarrow$ largeur $= \tau^{-1}$

$m \leftrightarrow$ masse

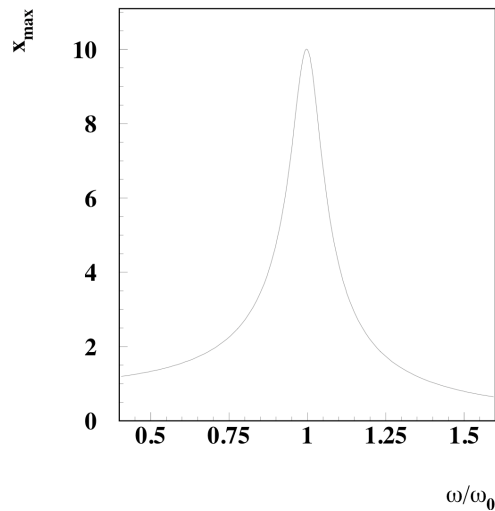
$x_{max}^2 \leftrightarrow$ section efficace

$\sin \phi \leftrightarrow$ asymétrie angulaire

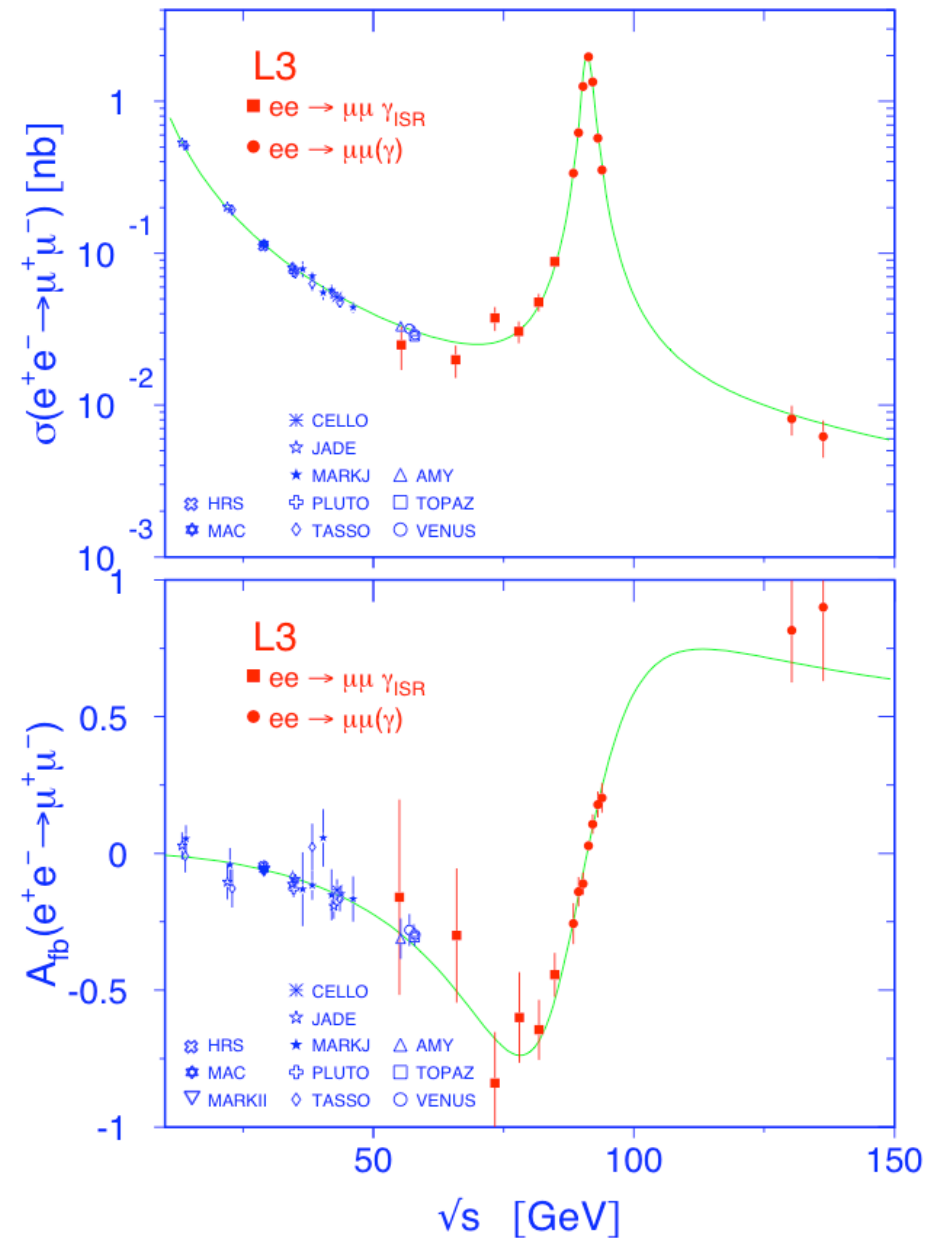
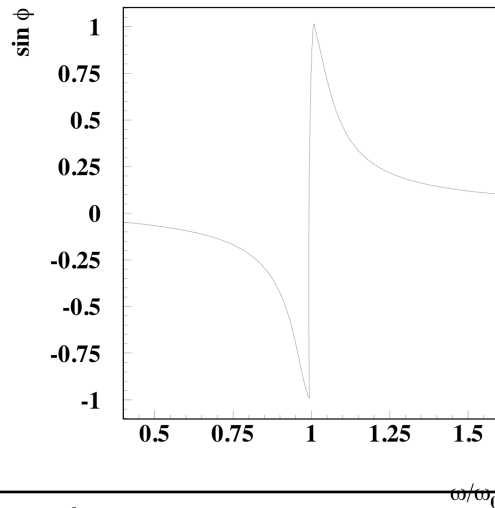


La masse du boson Z

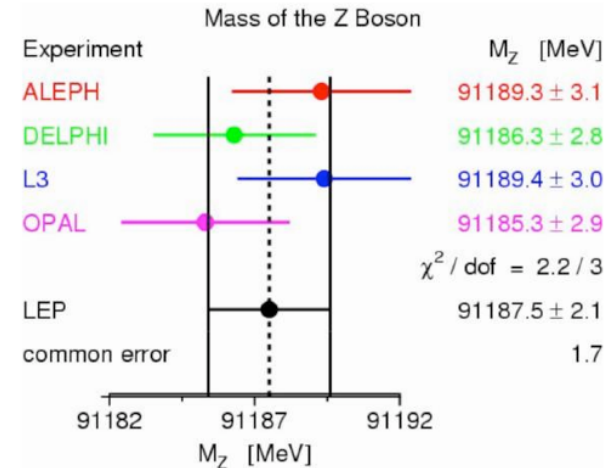
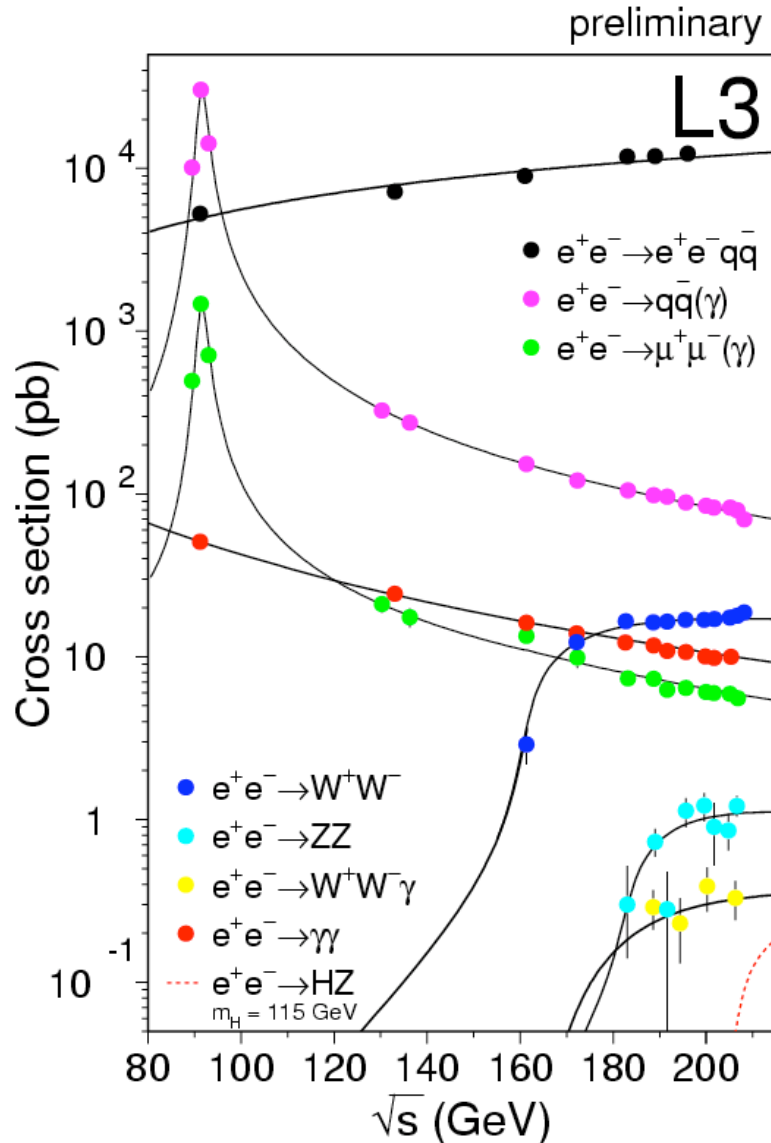
$x_{max}^2 \leftrightarrow$ section efficace



$\sin \phi \leftrightarrow$ asymétrie angulaire



Et cela marche !

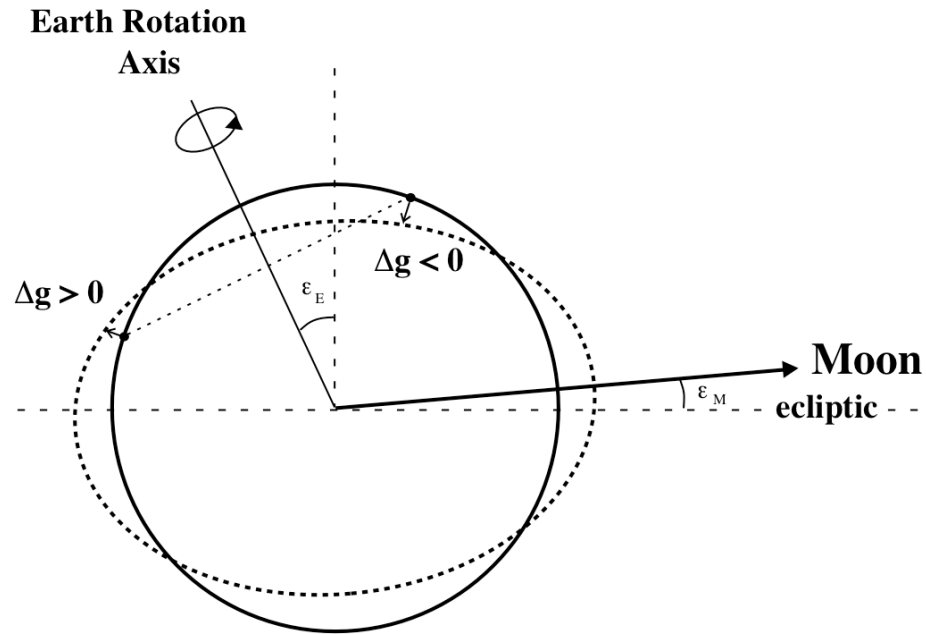


La détermination de la masse du boson Z avec cette méthode est précise à 2×10^5 . Ceci ne correspond qu'à une mesure de mon poids à 2g près, mais :

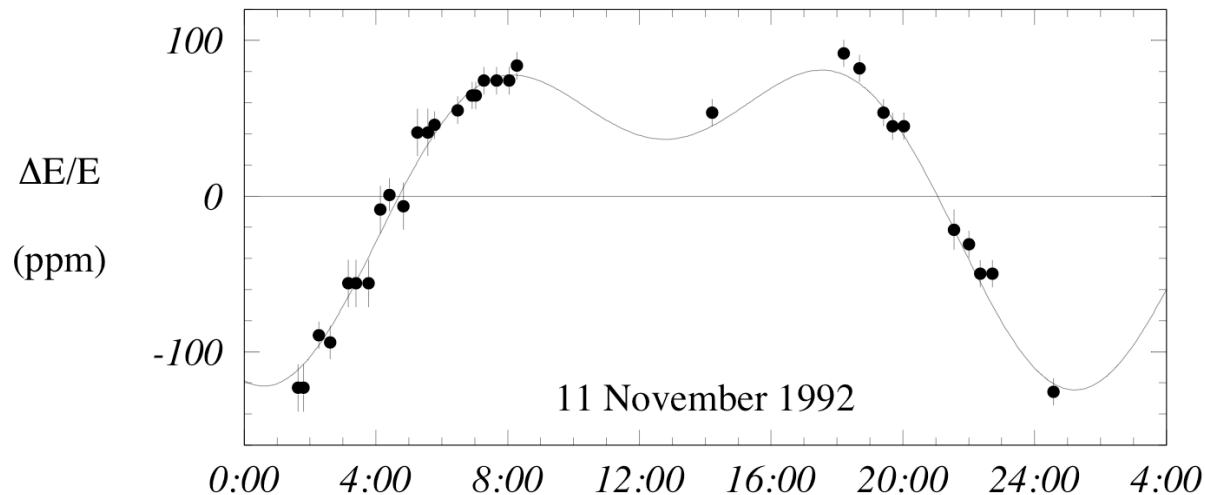
- mon temps de vie est $2 \times 10^{-25} \text{ s}$ et je pèse 10^{-25} g
- le temps de vie du boson Z est $3 \times 10^{-25} \text{ s}$ et il pèse $1.6251 \times 10^{-22} \text{ g}$

A ce niveau de précision, des effets inédits interviennent...

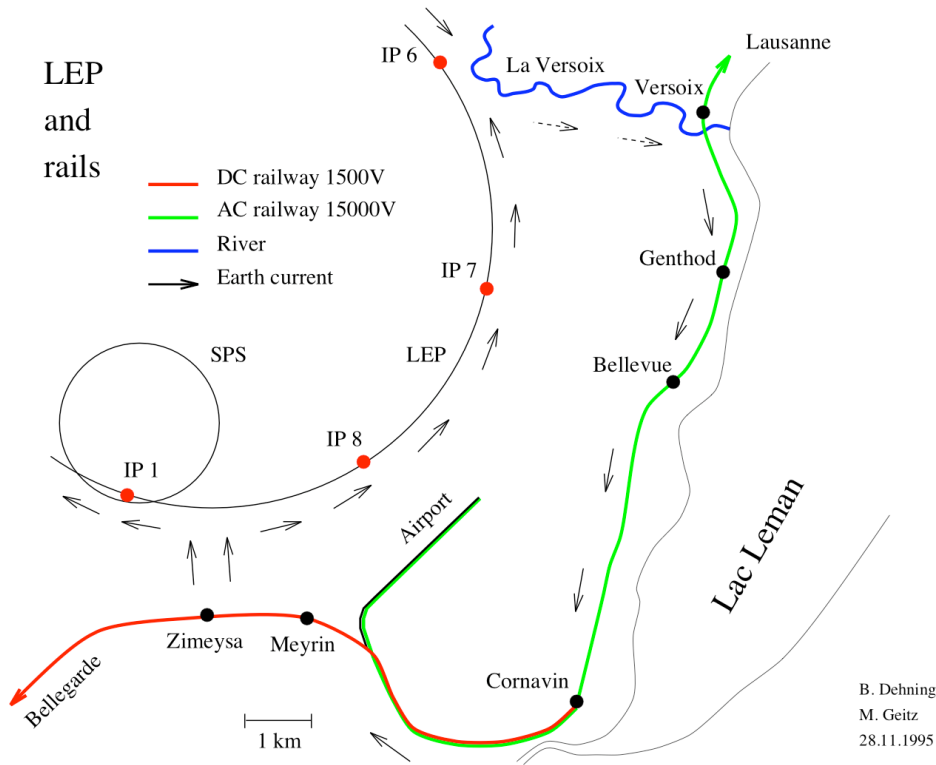
La phase de la Lune



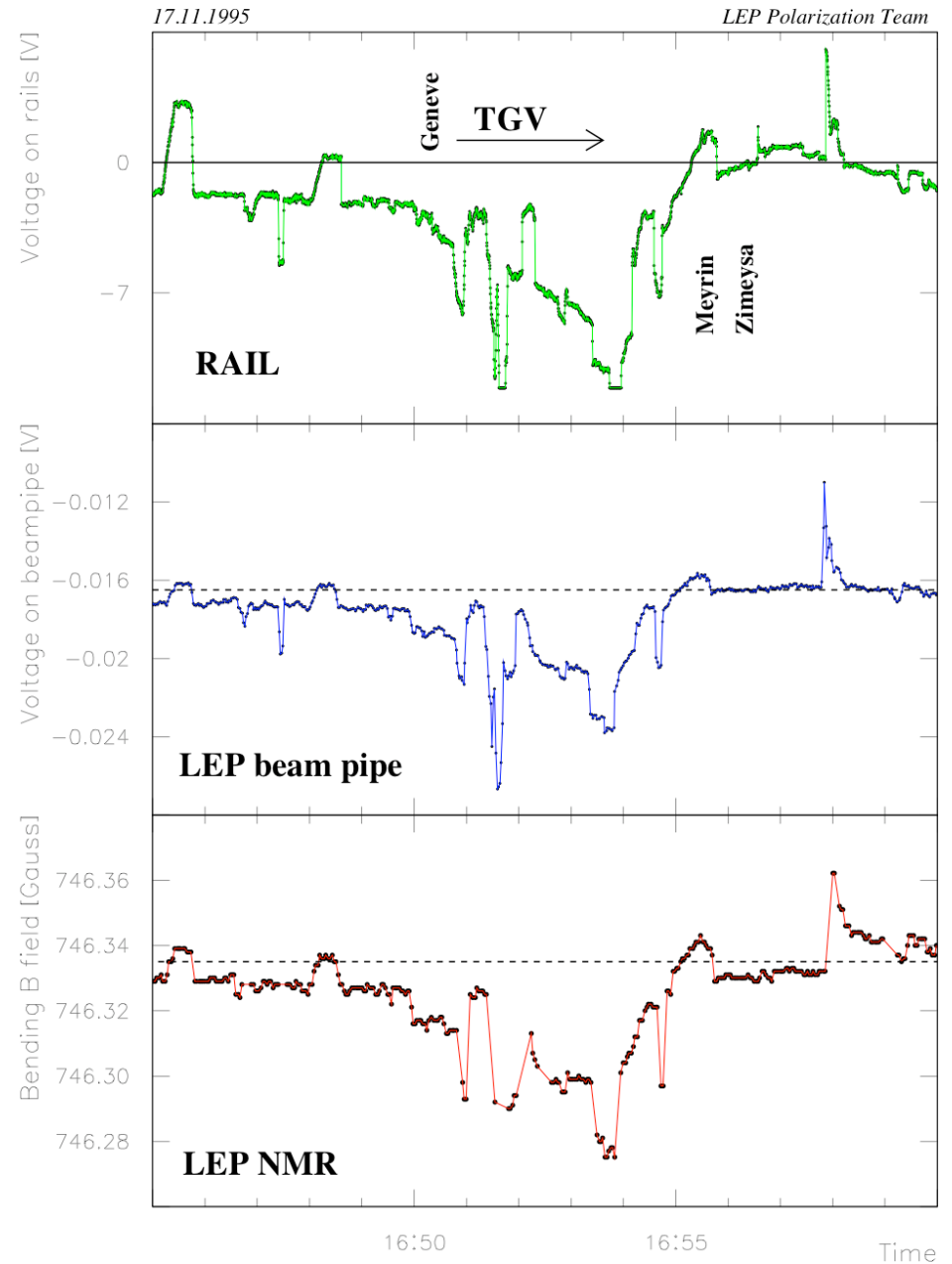
Tout comme l'eau de mer, la terre est sujet à des “marés hautes” d’une hauteur d’environ 20cm. Celles-ci déforment l’accélérateur par quelques mm, sur une longueur de 27km. A fréquence constante, ceci change l’impulsion du faisceau. La focalisation amplifie l’effet.



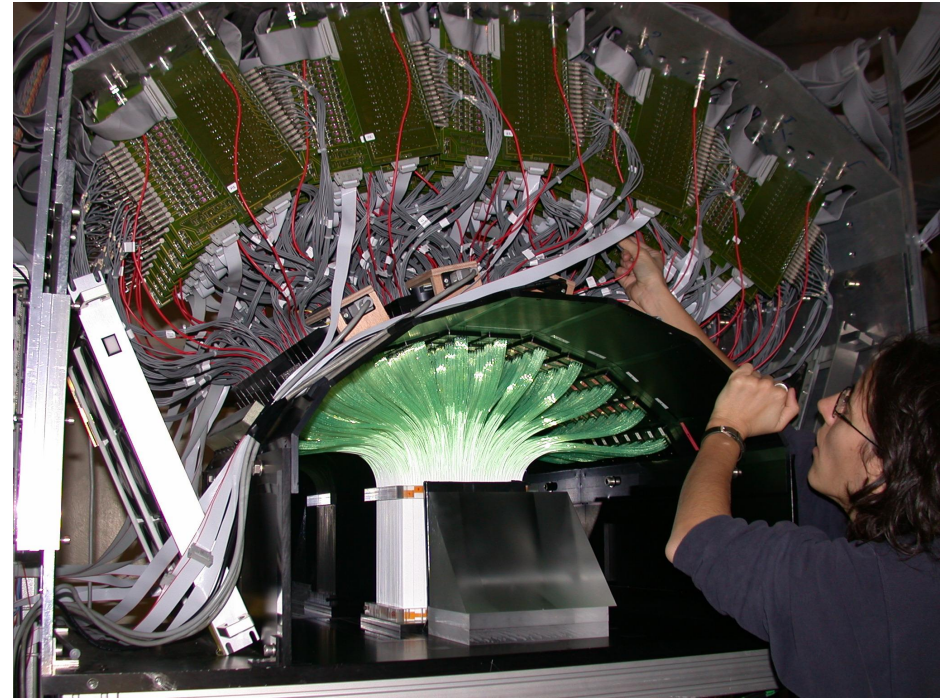
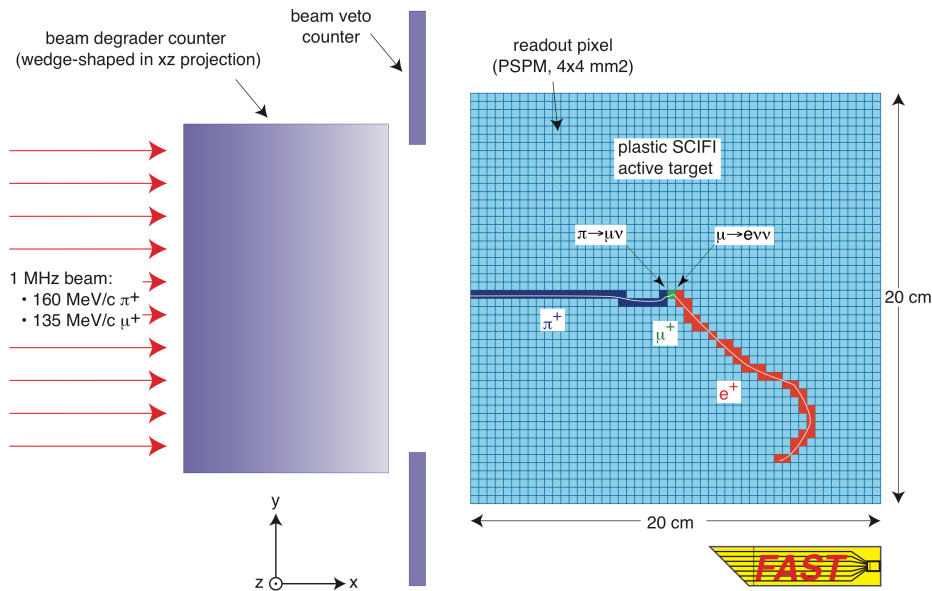
L'horaire du TGV



Le passage du TGV induit des courants parasites dans les aimants du LEP. A cause de leur hystérese ils se rapellent l'horaire du train.



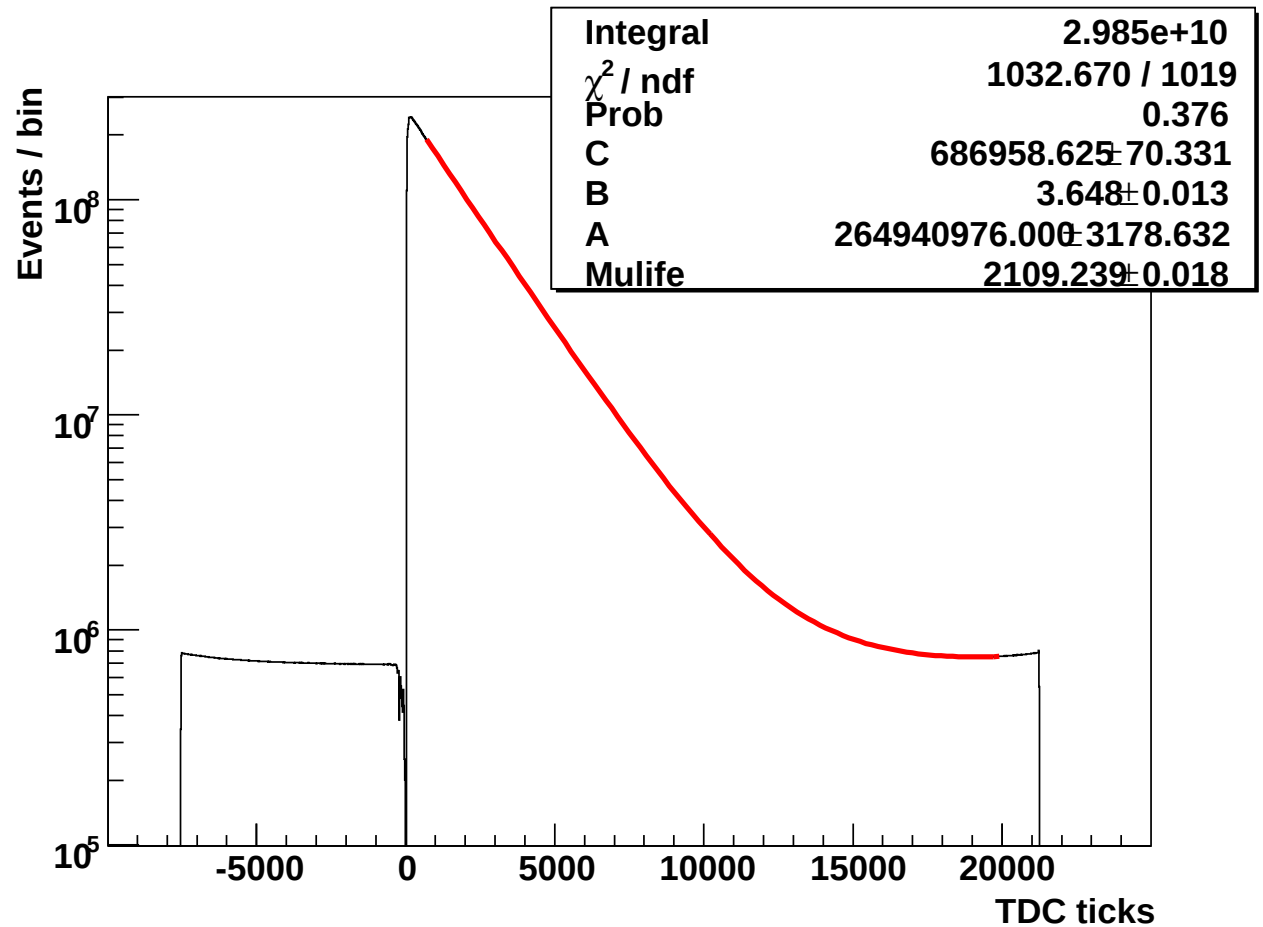
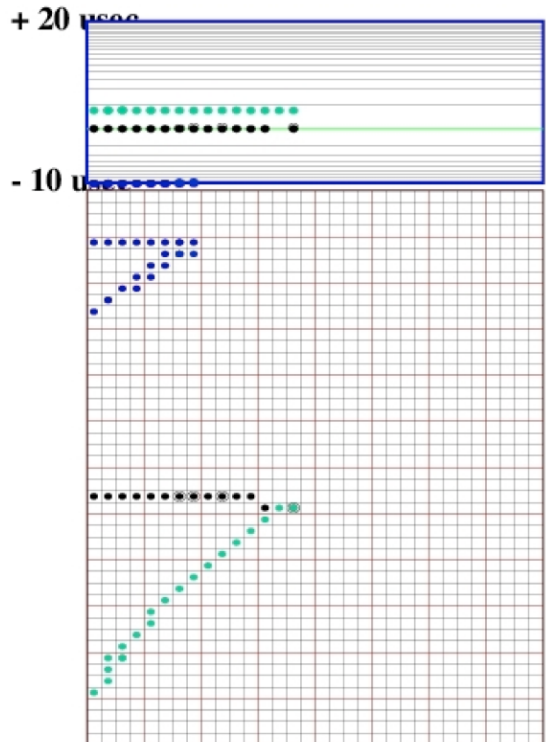
Exemple II : temps de vie du muon avec FAST



L'expérience observe la chaîne de désintégration : $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ et mesure pour chaque muon le temps entre sa création et sa désintégration. Jusqu'à 100 muons sont présent en chaque moment.

La probabilité de désintégration par unité de temps est une constante, la distribution du temps de désintégration doit être exponentielle : $dN/dt = N_0/\tau \exp(-t/\tau)$. Le temps caractéristique τ , le temps de vie du muon, est proportionnel au carré de la constante de couplage G_F de l'interaction faible chargée, qui cause la désintégration. On vise une précision de quelques ppm.

Et cela marche !



L'expérience FAST est en cours, 10^{12} évènements attendus en 2008/2009...

Plus de données, svp !

En ce moment, il n'existe pas de déviations expérimentales significatives au modèle standard, la théorie des champs basée sur les principes de symétrie. Par exemple, les expériences au collisionneur électron-positron LEP du CERN ont testé les théories des interactions électro-faibles et fortes en détail et avec une précision impressionnante. Le modèle standard a bien survécu à cet assaut. Les paramètres du modèle standard sont connus avec une grande précision.

Il est toutefois clair que le **modèle standard est au moins incomplet**. Tout ce qui a à voir avec les **brisures de la symétrie** reste à éclaircir. Par exemple, tout effet de masse, y inclue la gravitation, reste une énigme. Il est très probable, que les expériences au **LHC**, les expériences **d'astroparticules** et les expériences avec **neutrinos** contribueront à clarifier plusieurs de ces questions.

On parlera des failles dans l'image orthodoxe de l'Univers cet après-midi.