

Paolo Strolin

Particules Élémentaires et Interactions Fondamentales

Quelles sont-elles?

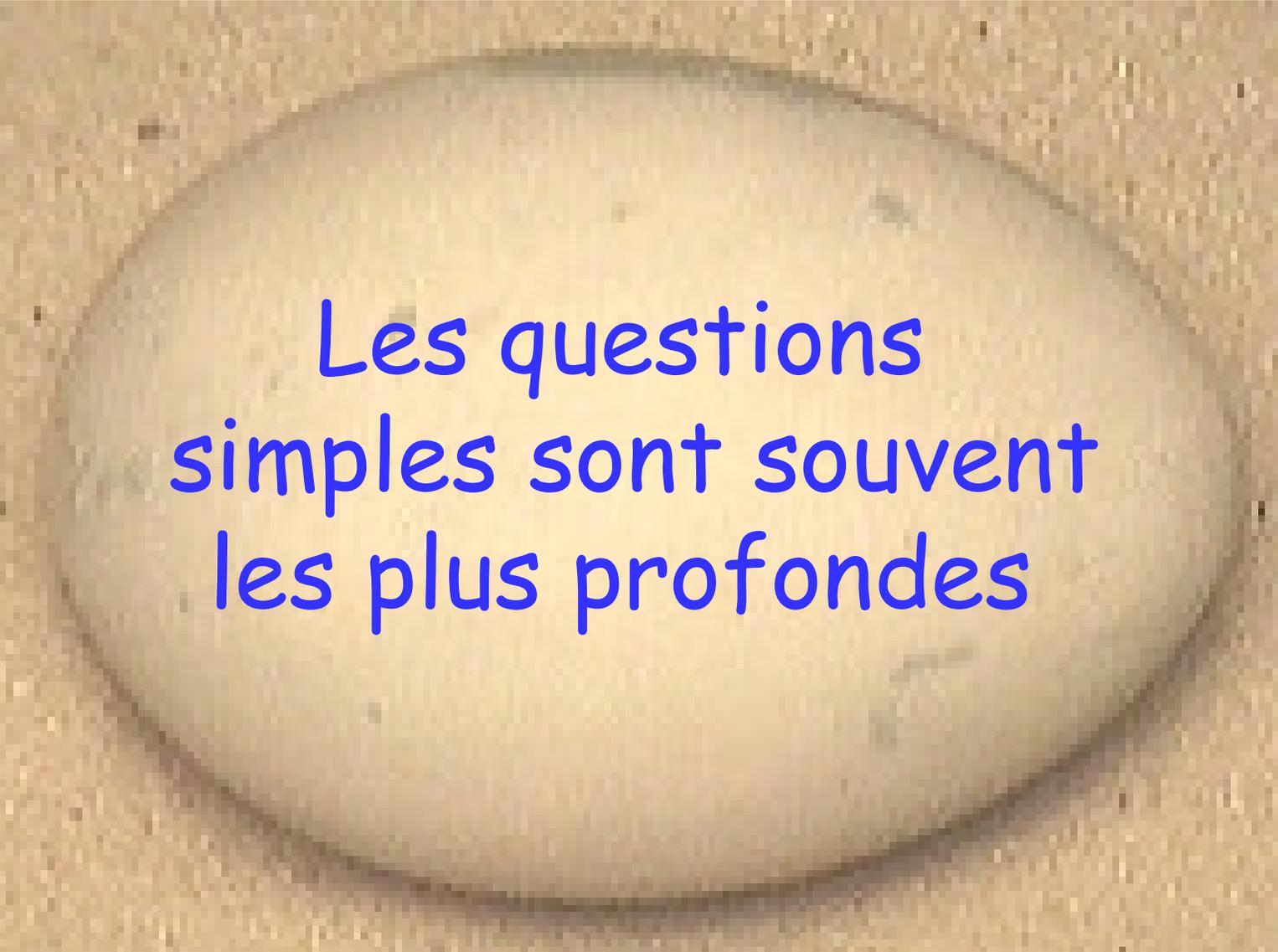
Comment les étudier

Pourquoi ?

Images depuis les sites Web

CERN, CPPM Marseille, Fermilab, ICRR Tokyo, LAPP Annecy et Particle Adventure

Version française par Jean Dupraz, Jean Paul Fabre et Christiane Gentet

A circular stone plaque with a slightly raised, textured surface is centered on a larger, textured, light-brown background. The plaque contains the text "Les questions simples sont souvent les plus profondes" in a blue, sans-serif font.

Les questions
simples sont souvent
les plus profondes

Exemple : qu'est-ce que la "masse" ?

Quelles-sont elles?

Constituants fondamentaux de la matière



Particules Élémentaires

L'origine de leur liaison (ou de leur répulsion)



Les Interactions Fondamentales

De Démocrite et Epicure aux versets de Lucreèce

(*De rerum natura*, Livre I versets 483 et 548)

Les corps se distinguent en éléments primordiaux et en objets formés de la cohésion des particules élémentaires.

Par contre il n'y a pas de force capable de fractionner les éléments primordiaux. Ils l'emportent toujours, à cause de la solidité de leur corps.

.....

Les particules élémentaires sont par conséquent solides et simples. Sinon, elles ne se conserveraient pas à travers les âges, et ne pourraient pas depuis un temps infini renouveler les choses.

*Corpora sunt porro partim primordia rerum,
partim concilio quae constant principiorum.
Sed quae sunt rerum primordia, nulla potest vis
stinguere; nam solido vincunt ea corpore demum.*

.....

*Sunt igitur solida primordia simplicitate
nec ratione queunt alia servata per aevum
ex infinito iam tempore res reparare.*

Titus Lucrece

(~ 97-55 avant Jésus Christ)

"Naissance du poète Titus Lucrece. Celui-ci, devenu fou à cause d'un philtre d'amour, écrit plusieurs livres pendant ses moments de lucidité. Il s'est suicidé à l'âge de 44 ans. Par la suite, ses livres ont été publiés par Cicérone."

Annotations de S.Jérôme (IV siècle avant JC) *Chronique* d' Eusebe de Cesaree

De Rerum Natura était peu connu au Moyen Age. Lucrece était considéré comme lunatique et athée. Le texte fut diffusé en 1417, après la découverte d'un vieux manuscrit par Poggio Bracciolini humaniste et secrétaire du Pape.



Lucrece , *De Rerum Natura*

Copie de Girolamo de Matteo de Tauris pour Sisto V, 1483
Rome, Bibliothèque du Vatican

Depuis 1905:



La masse est une forme d'énergie

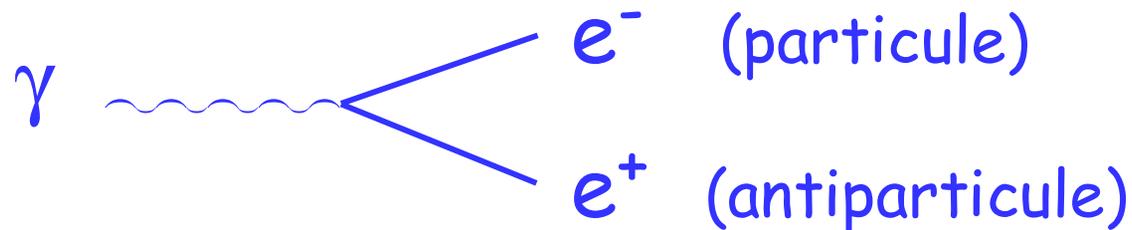
A photograph of a handwritten equation $E = mc^2$ on a textured surface. A red diagonal line is drawn through the c^2 term, indicating a modification or critique of the equation.

si cela avait été compris plus tôt, on aurait imposé $c=1$, d'où $E=m$

énergie 

 masse

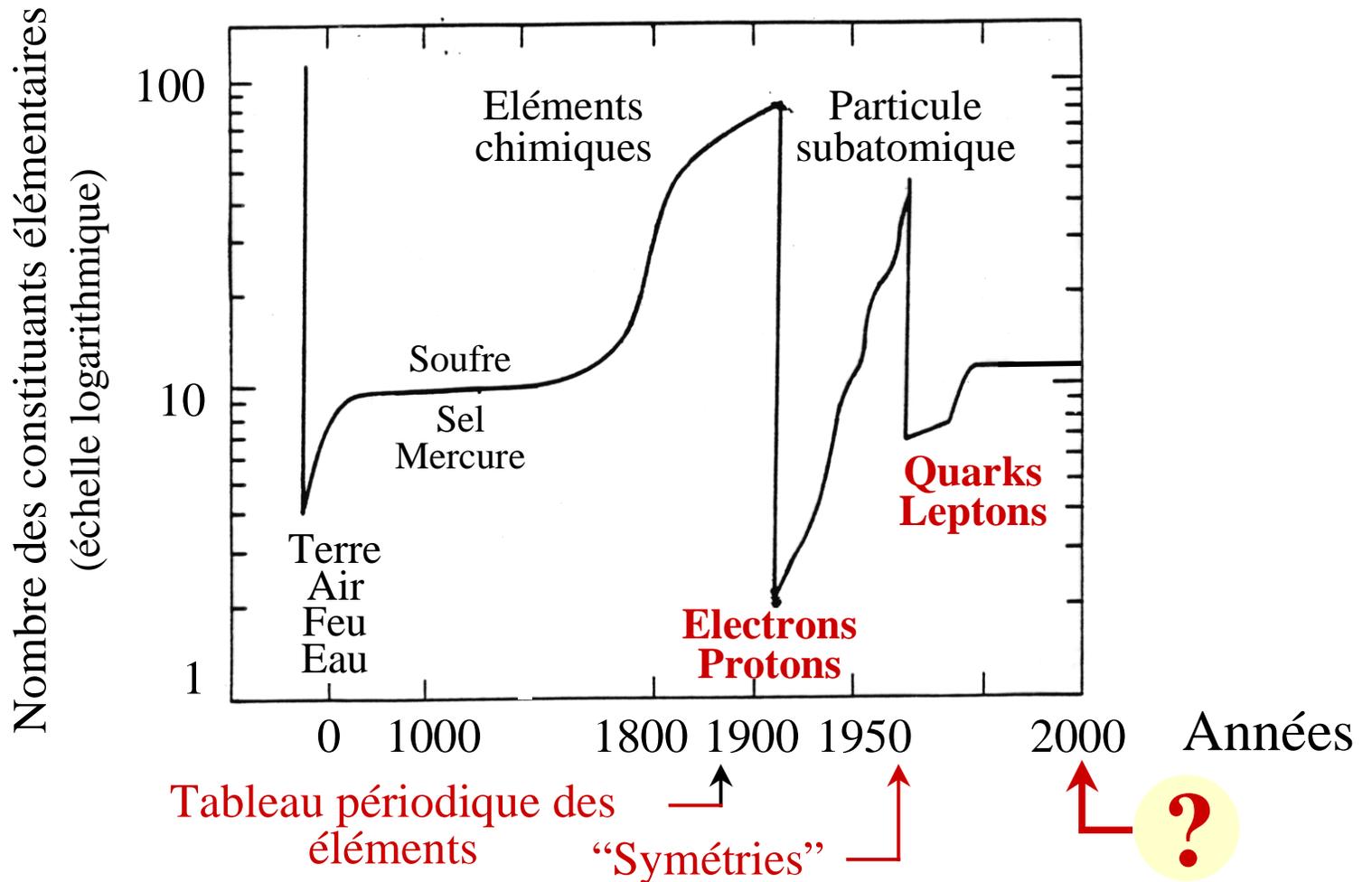
Exemple :



Les particules ne sont plus "solides et simples"

mais les fondements philosophiques (Démocrite, Epicure et Lucrèce) demeurent

Histoire des constituants fondamentaux de la matière

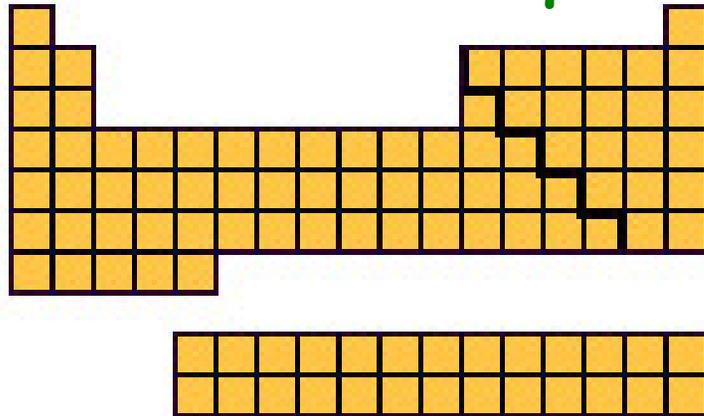


Démocrite : la variété et l'évolution de ce que l'on observe dans la nature provient du grand nombre de combinaisons possibles d'un petit nombre de "constituants élémentaires"

(6 milliards d'individus vivants : tous avec un ADN différent)

Régularité → ?

Tableau périodique des éléments chimiques



Physique atomique

protons, neutrons, électrons
pour "construire"
tous les éléments chimiques

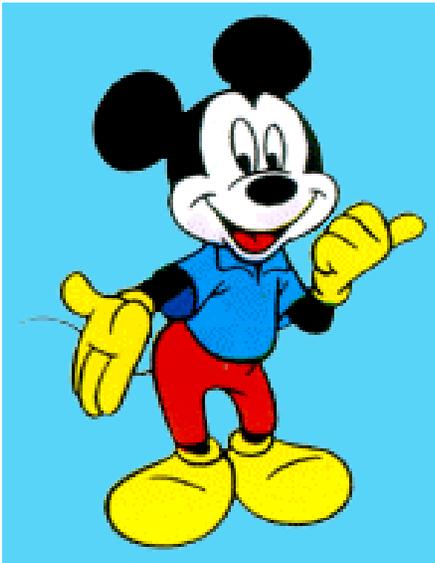
Les particules
"élémentaires" d'aujourd'hui

Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		



?

Particules Élémentaires

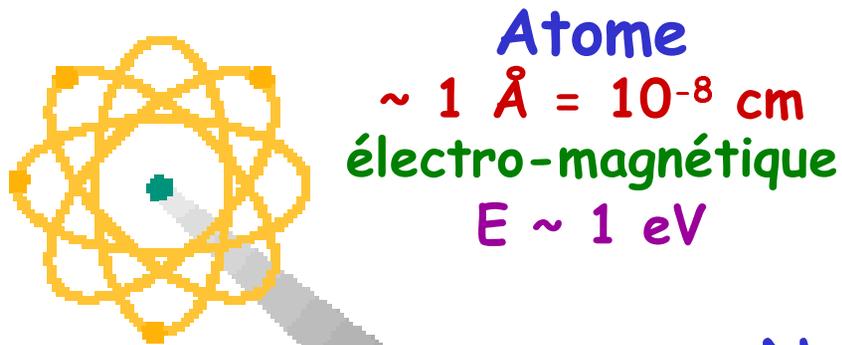


Une particule, aujourd'hui
"élémentaire", ne le sera
peut-être plus demain

L'atome, hier "élémentaire",
n'est aujourd'hui plus considéré comme tel:
on sait qu'il est formé d'électrons et d'un noyau.

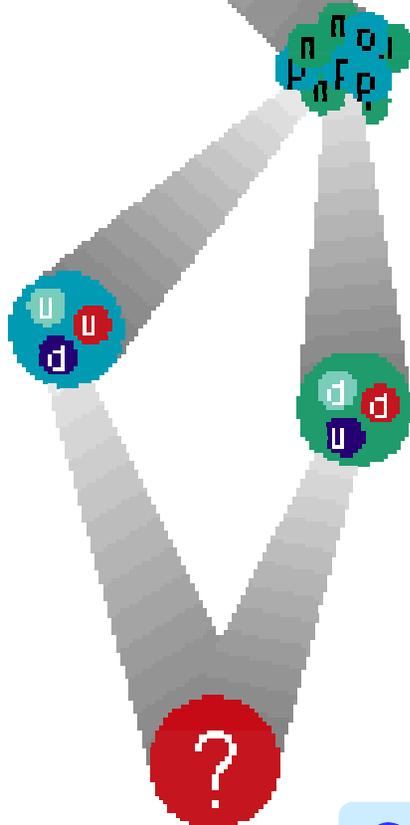
Une particule est considérée comme "élémentaire"
(ou pas) en fonction des développements scientifiques

Des atomes aux quarks



Atome
 $\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$
électro-magnétique
 $E \sim 1 \text{ eV}$

Noyau
 $\sim 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm}$
"forte"
 $E \sim 1 \text{ MeV}$



Nucléons (p ou n)
 $\sim 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm}$
"forte"
 $E \sim 100 \text{ MeV}$

Quarks u, d, ...

(limite de notre connaissance actuelle)

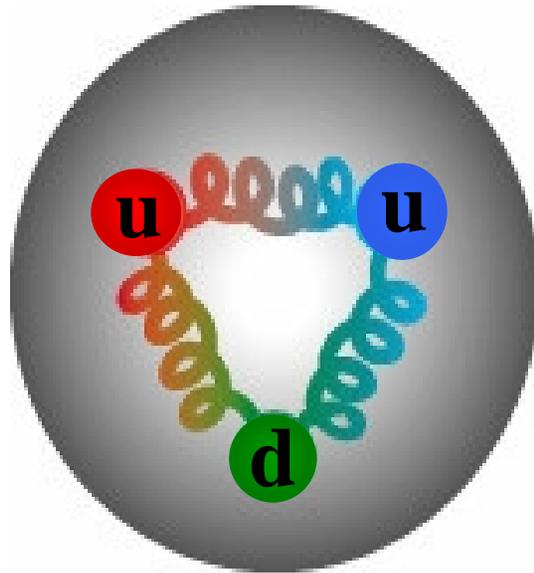
Sont-ils vraiment "élémentaires" ?

Dimensions

Interaction

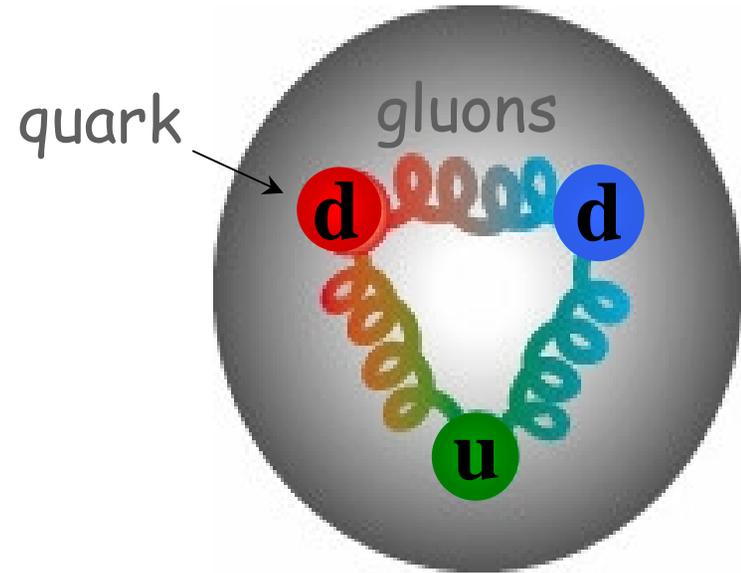
Energie de liaison

Le scandale des charges électriques fractionnées: $Q_u = +2/3 e$ $Q_d = -1/3$



proton

$$Q = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$



neutron

$$Q = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 0$$

Quark doté de "charge de couleur"
Force "de couleur" transmise par les "gluons"
(médiateurs des "Interactions Fortes")

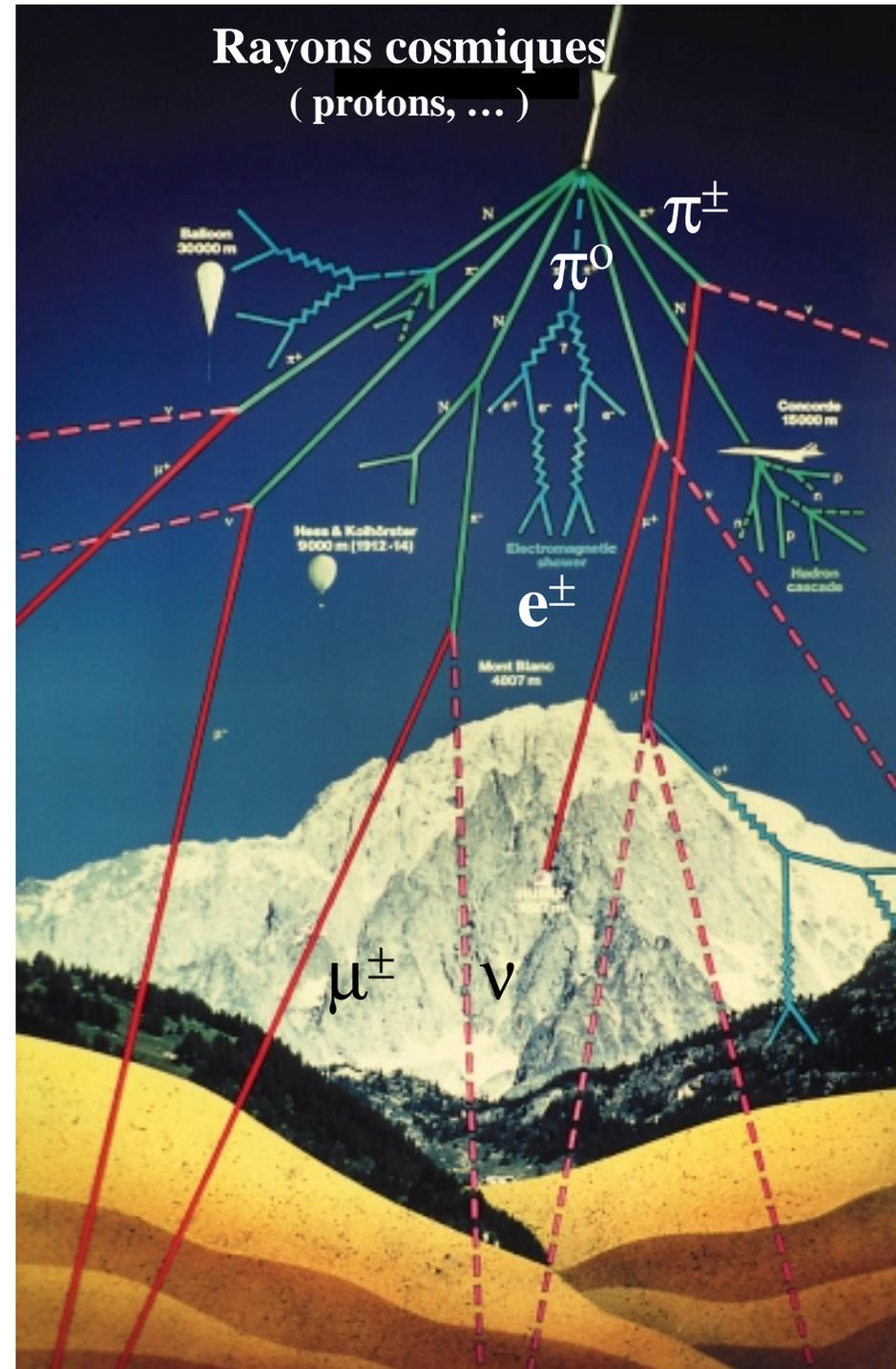
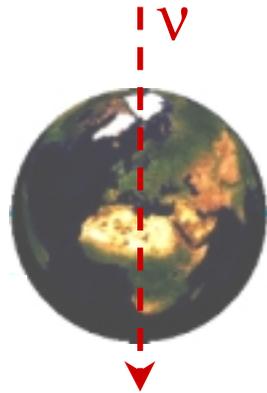
Matière ordinaire : p, n , e⁻

La pluie cosmique

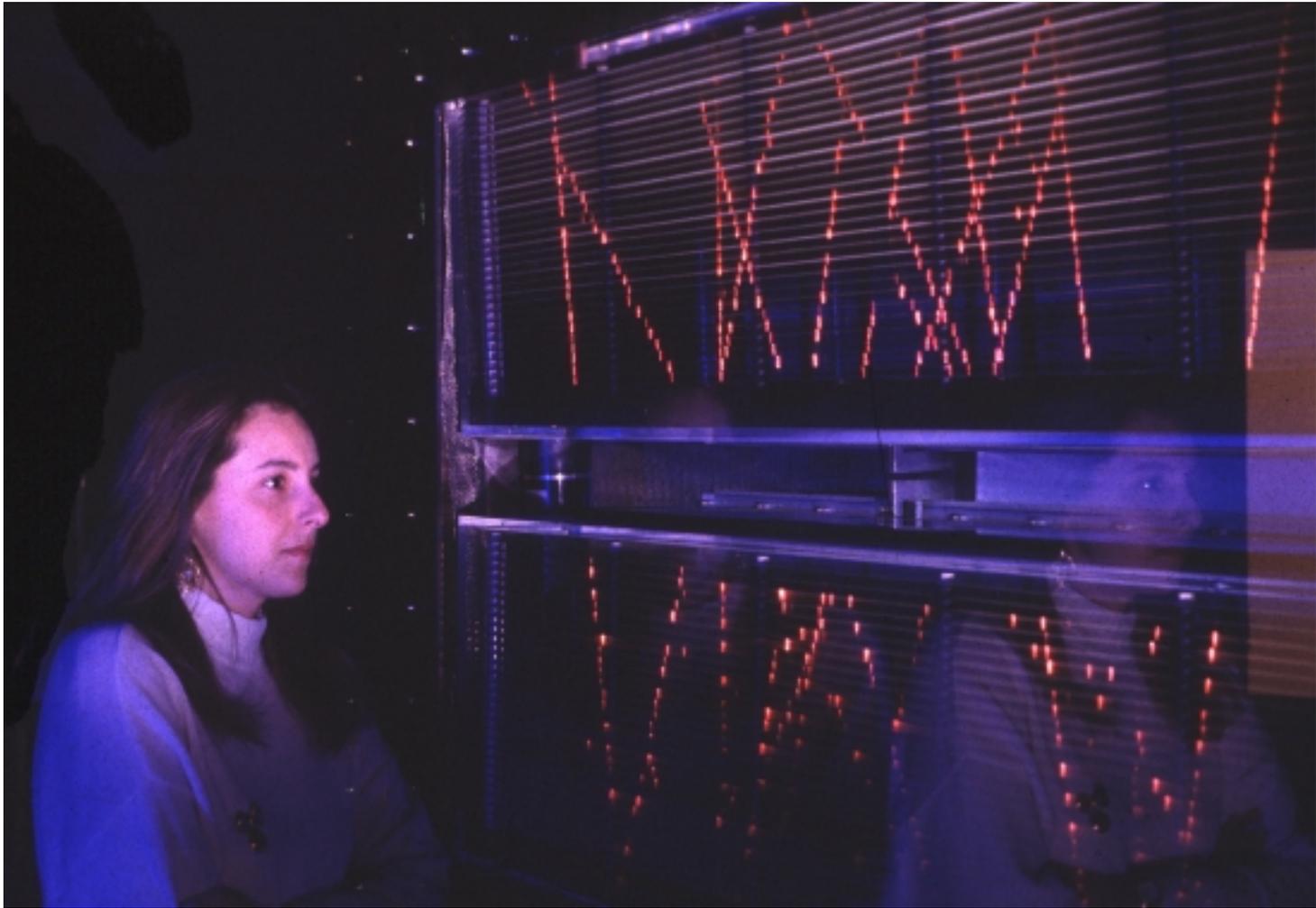
Des particules élémentaires de très haute énergie sont générées dans de lointaines galaxies, par des mécanismes peu connus.

Elles interagissent avec l'atmosphère et génèrent des "gerbes" de particules élémentaires secondaires

Les neutrinos traversent la terre !



Nous pouvons "voir" la pluie cosmique (au moyen de "détecteurs de particules")



Traces de particules visualisées dans une "chambre à étincelles"

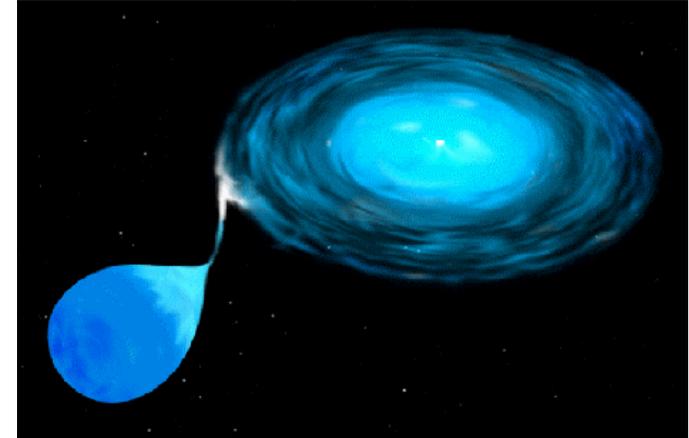
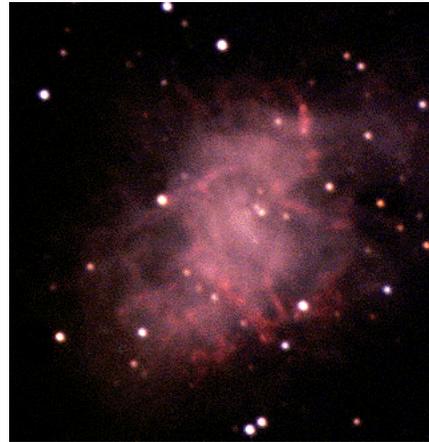
Sources de rayons cosmiques et neutrinos de haute énergie

(les neutrinos sont de parfaits messagers : ils se propagent sur d'énormes distances, sans interagir ni être déviés par les champs magnétiques)

Sources galactiques

Restes de Supernova

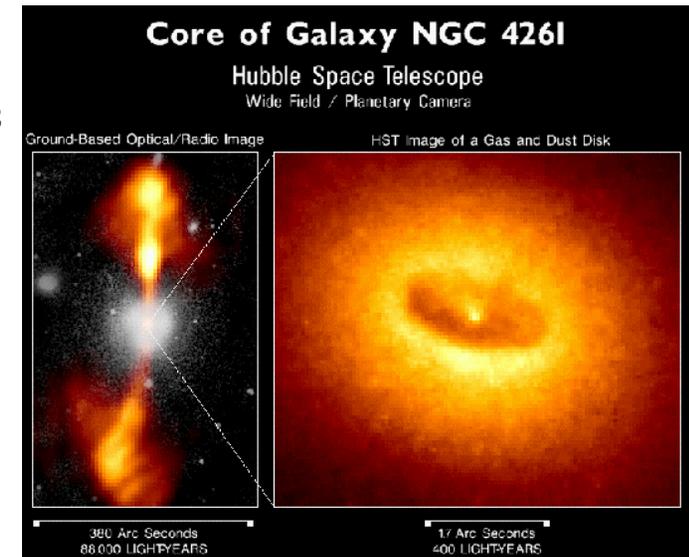
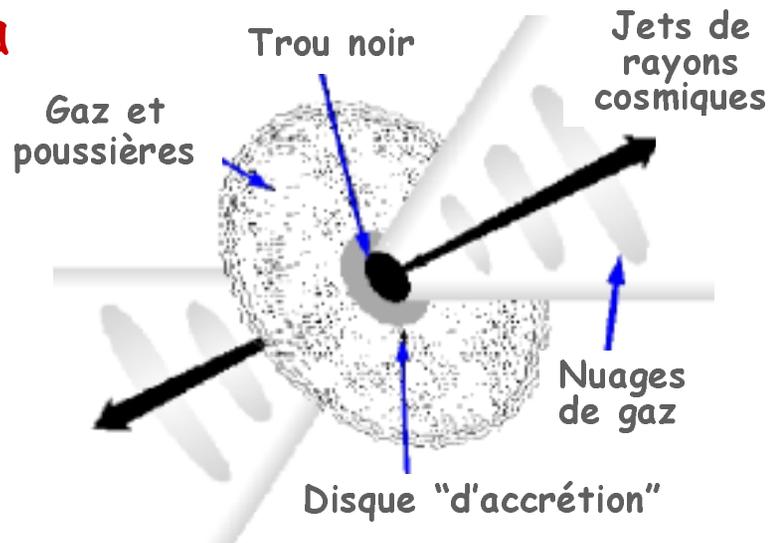
Système binaire autour des pulsars (étoiles à neutrons en rotation rapide) ou trou noir



Sources extra galactiques

Noyaux galactiques actifs (quasars)

haute énergie

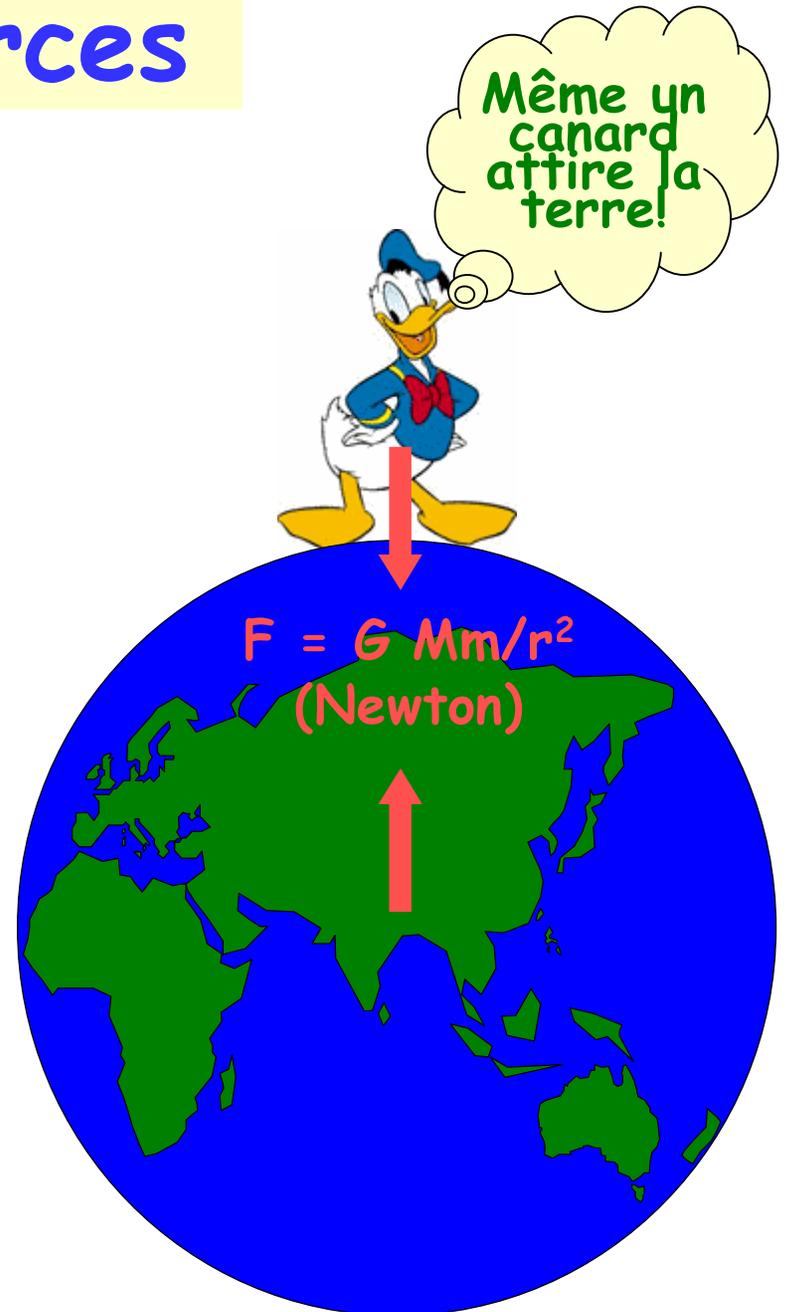


Interactions et Forces

Nous pensons seulement à la force avec laquelle la Terre nous attire, et non à celle avec laquelle nous l'attirons !



Le concept d' "interaction" est plus complet



Chaque *interaction* a un *médiateur*

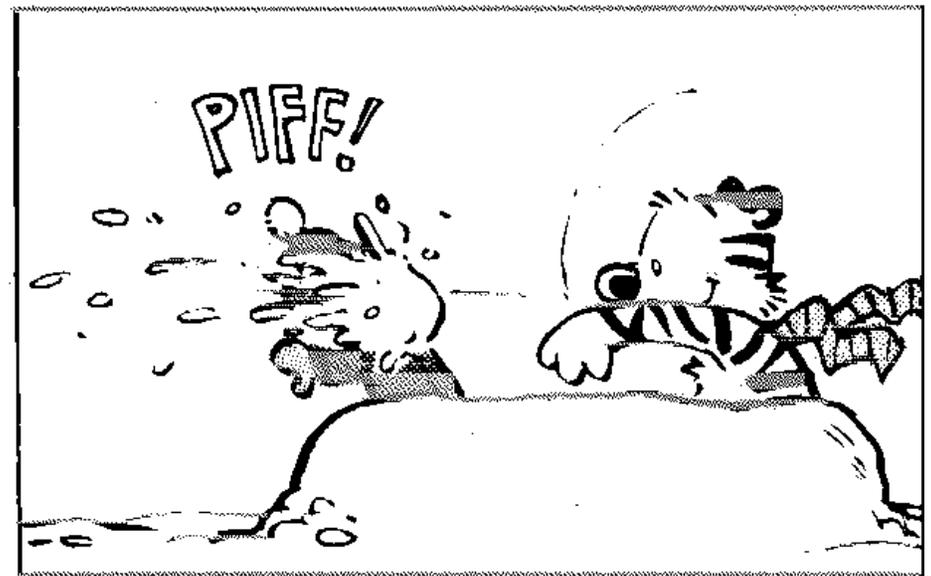
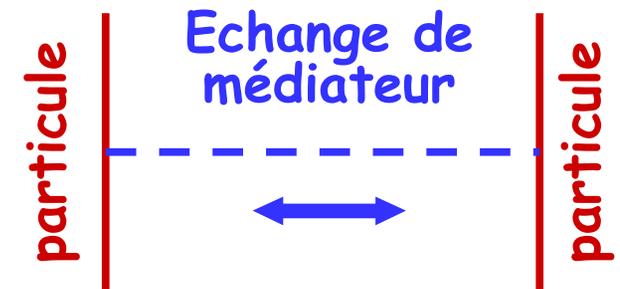
(ces médiateurs sont des particules "vecteurs de force")

Dynamique Classique

Interaction "à distance"



Dynamique Quantique Relativiste



Les trois interactions "fondamentales"

	Intensité relative	Charge	Médiateur	Action sur			Observées dans
				quarks	e^-	ν	
Forte	1	couleur	Gluon ($m_g = 0$)	✓			Noyau de l'atome
Electro-Magnétique	$\sim 10^{-3}$	électrique	Photon ($m_\gamma = 0$)	✓	✓		Atome, molécule, ADN, ...
Faible	$\sim 10^{-5}$		Bosons W^\pm, Z^0 ($m \sim 100 \text{ GeV}$)	✓	✓	✓	Désintégration radioactive β
Gravitationnelle*	$\sim 10^{-38}$	masse	Graviton ?	✓	✓		Corps célestes



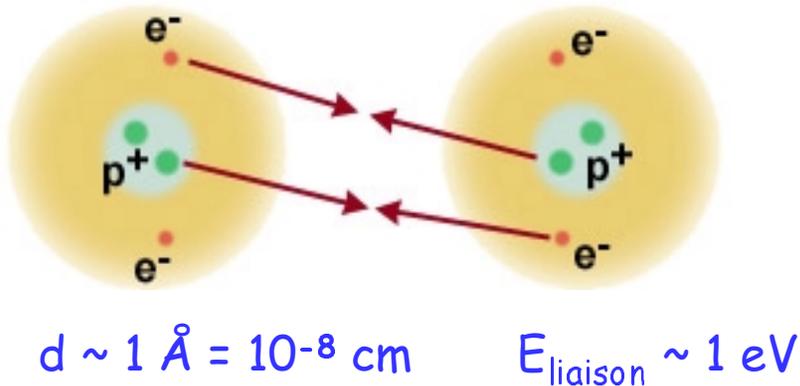
Par échange de médiateur:

- ▶ Dynamique classique : seulement répulsion
- ▶ Dynamique Quantique : répulsion ou attraction

* Totalement négligeable pour des particules élémentaires. En revanche très intense pour les objets, car les charges (masses) sont toutes positives

Interaction Electro-Magnétique

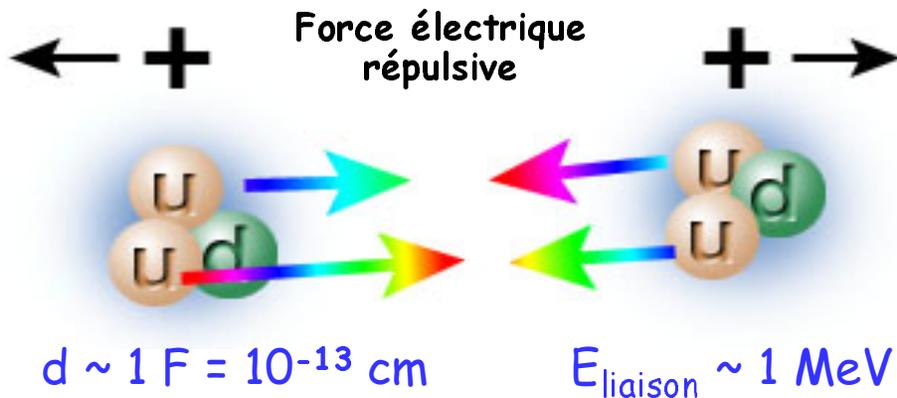
➔ cohésion atomique et moléculaire



Bien que les **atomes** soient électriquement neutres, il y a cohésion moléculaire

Expliquée par la mécanique quantique
Les forces attractives sont prédominantes

Interaction Forte ➔ cohésion nucléaire



Bien que sa charge totale de couleur soit nulle, il y a cohésion nucléaire

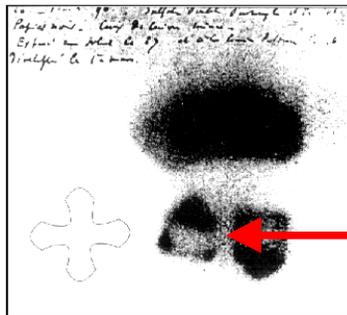
Les Interactions "Fortes" (charge de couleur) dominant à l'intérieur du **noyau atomique**

Interaction "Faible"

Becquerel (1896)

Feuille photographique conservée dans le noir et pourtant impressionnée!

Création spontanée de radiations

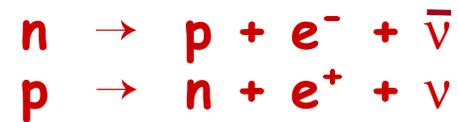


Une "croix d'honneur" a absorbé les radiations : son "ombre"

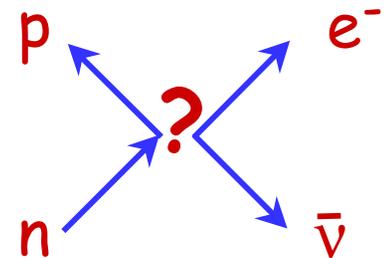
Désintégration β nucléaire (éléments chimiques transmutables)



Hypothèse du neutrino (Pauli 1930)

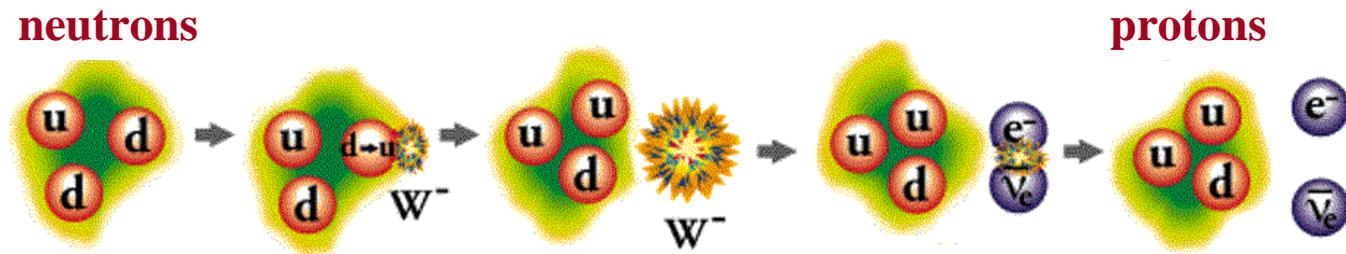


Théorie de Fermi (1933)
encore sans médiateur



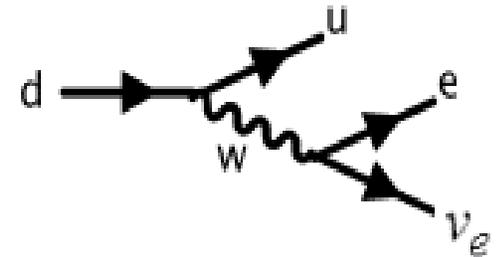
L'Interaction Faible est devenue Electro-Faible

Désintégration β d'aujourd'hui : échange de W^\pm entre des quarks



Expliquée synthétiquement et quantitativement par un

“Diagramme de Feynman”



Mais les propriétés du neutrino restent un mystère,
à commencer par sa masse

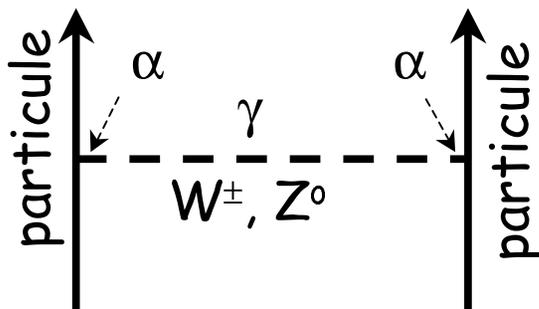
Electro-Dynamique Quantique et Chromo-Dynamique Quantique

(théories actuelles des interactions électro-faibles et fortes)

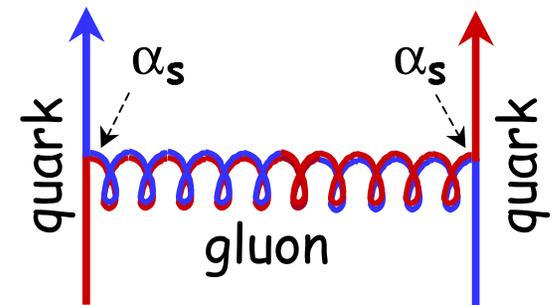
"constante de couplage" = probabilité d'émissions du médiateur
(α pour QED, α_s pour QCD)

Interactions différentes = différentes constantes de couplage

QED
(charge électrique)



QCD
(charge de couleur)



"Diagrammes de Feynman"

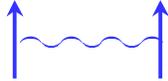
écrits en termes de "probabilité $1/2$ " au lieu de "probabilité"
[d'après la mécanique quantique]

L'unification Electro-Faible

Interactions électromagnétiques et faibles :

- Même "constante de couplage" $\alpha = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137$
- Ne sont pas fondamentalement différentes
(la constante G de l'interaction gravitationnelle est différente)

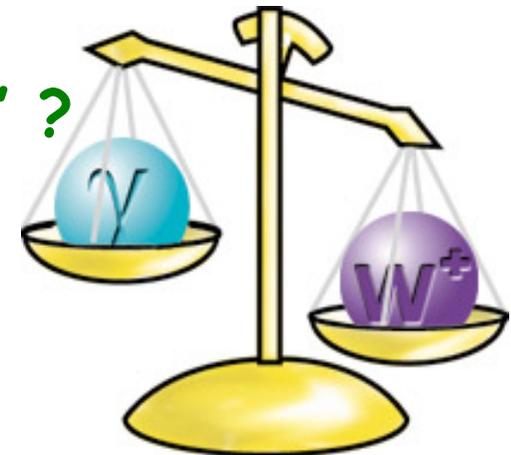
Mais le médiateur échangé est différent

e.m : photon γ 

faible: W^\pm, Z^0 

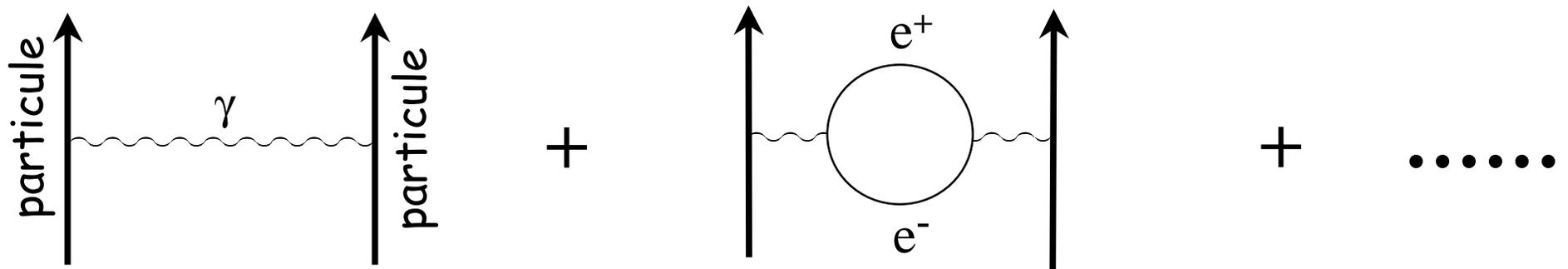
Pourquoi les interactions sont dites "faibles" ?

- W^\pm ou Z^0 : masse (énergie au repos) extrêmement grande
- probabilité d'échange très petite



Les théories quantiques peuplent le "vide" !

- Tout est réglé par des lois de probabilité
- Il faut additionner les différentes possibilités
- Sans oublier que :
 - le médiateur (γ) peut émettre un couple particule-antiparticule qui s'annihile à nouveau dans le médiateur
- Plus toute une série d'autres éventualités ...



L'espace entre deux particules est ainsi peuplé de couples "virtuels" particule-antiparticule

"Polarisation du vide"

Que des particules !

(y compris les médiateurs des interactions)

Constituants de la matière

( spin $\frac{1}{2}$ → "fermions")

quarks: u, d, ...

leptons: e^- , ...

Médiateurs des interactions

( spin 1 → "bosons")

γ , W^\pm

gluons

Avec les quarks on construit des "hadrons"

"barions" qqq : spin $\frac{1}{2}$, ...

protons, neutrons, ...

"mesons" $q\bar{q}$: spin 0, 1, ...

pions, ...

Protons et neutrons forment le noyau de l'atome

Noyau et électrons forment l'atome

.....

Interrogations

Le "boson de Higgs" existe-il ?

Un morceau nécessaire manque dans la théorie actuelle

Le neutrino a-t-il une masse ?

Nouvelle vision de la physique des particules
Implications pour l'astrophysique et la cosmologie

"Grande Unification" électro-faible-forte ?

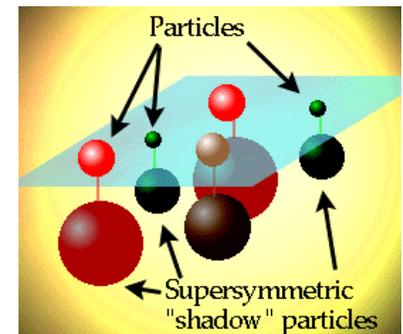
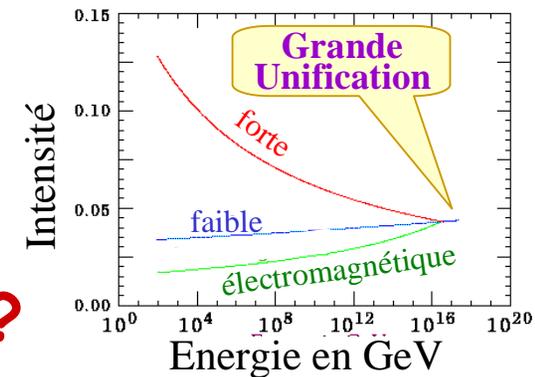
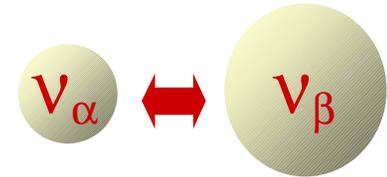
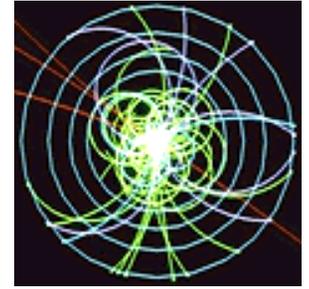
Continuer à suivre le chemin montré par Newton, avec la
Gravitation Universelle

Super-symétrie ?

Un lien entre les particules constituant la matière (quarks et leptons)
et les particules vecteurs de force (médiateurs)

"Onde" gravitationnelles ?

Vérifier la prédiction de la relativité générale



Comment :

*Accélérateurs de particules
DéTECTEURS et expériences*

Faire une
expérience
c'est comme
"observer"

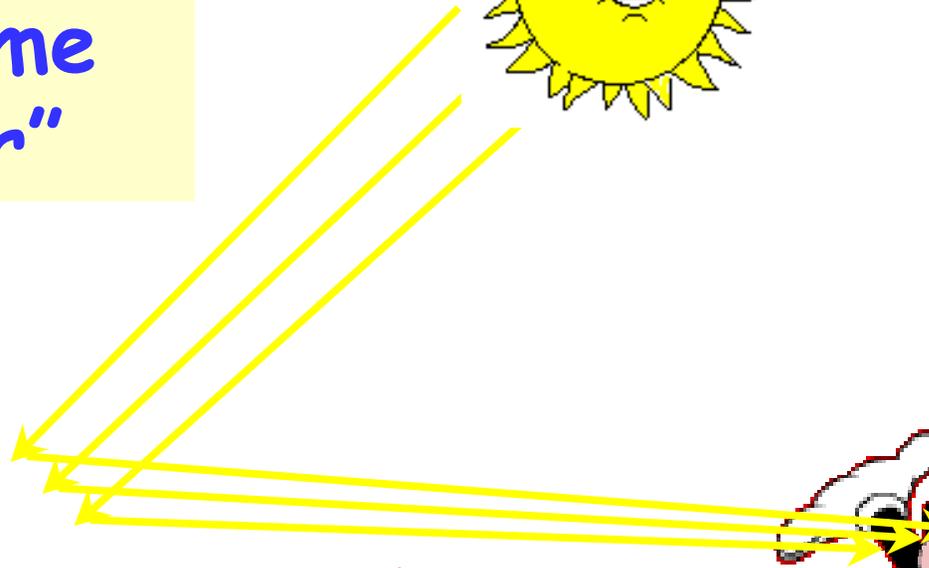


source



cible

(à observer et à étudier)

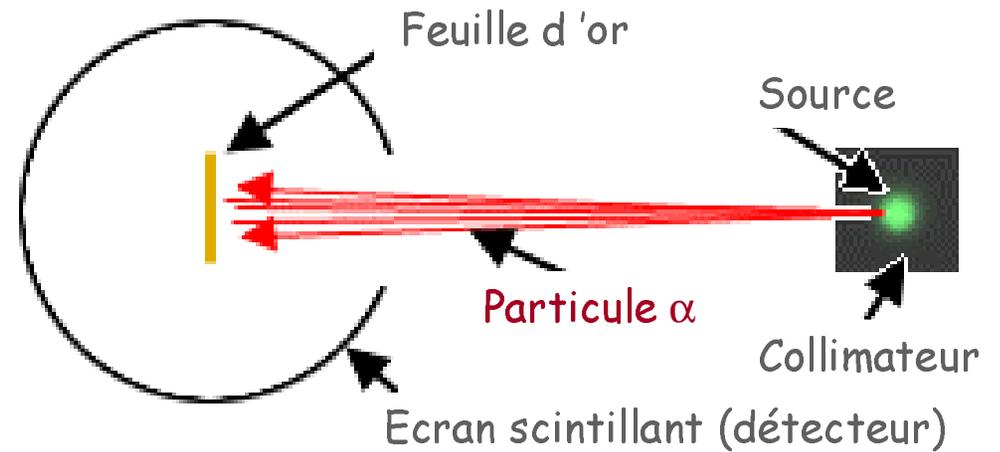


particules
(lumière)

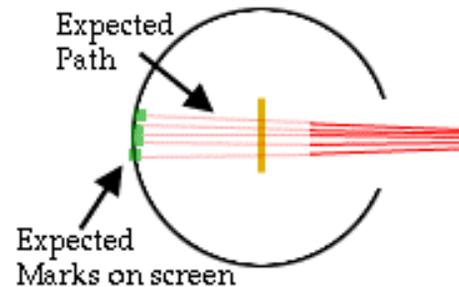
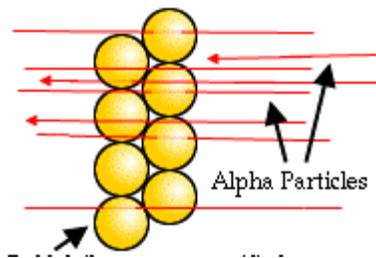


"détecteur"
(oeil)

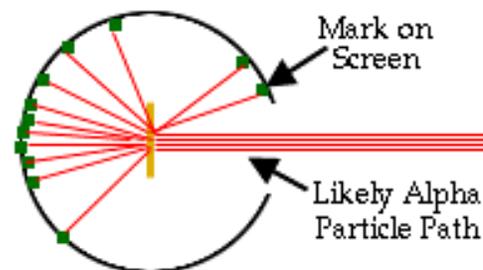
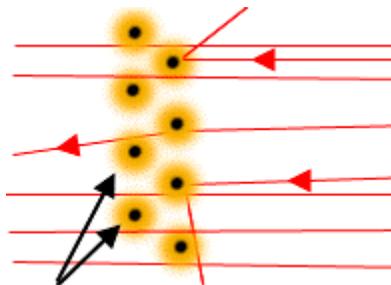
L'expérience de Rutherford



Vérification d'hypothèses alternatives sur la structure interne des atomes

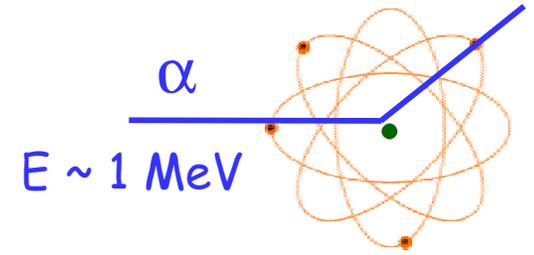


Atomes "amorphes"
↓
petits angles de diffusion



Atomes avec structure interne
↓
collision dure entre nucléons
↓
angles de diffusion étonnamment grands !

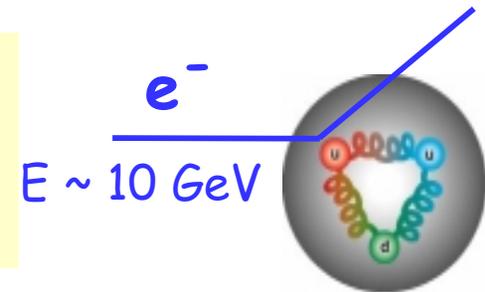
L'expérience de Rutherford : les débuts d'une méthode



L'observation des angles de diffusion fournit des informations sur la structure interne des objets inconnus

(une radiographie met en évidence les structures internes à travers une mesure d'absorption moins sensible. C'est pourquoi les doses sont plus grandes)

La méthode "de Rutherford" nous a aussi amené à la découverte des **quarks**,
logés à l'intérieur des protons et des neutrons

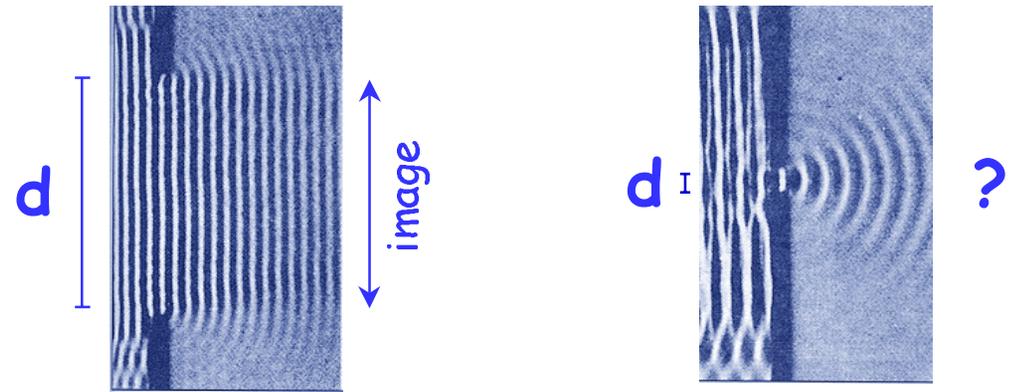


Pour chercher au delà, il faut de très hautes énergies
Pourquoi ? Comment faire ?

Longueur d'onde (λ) et résolution

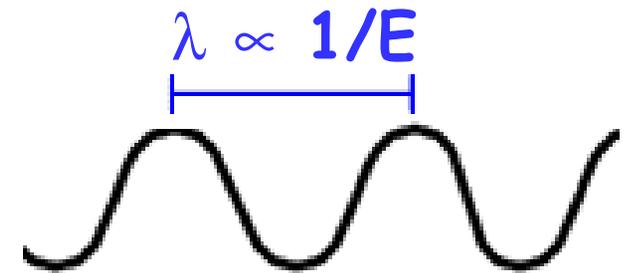
Physique classique

Images nettes si
 $\lambda \ll d$



Physique quantique-ondulatoire

Particules représentées par des ondes

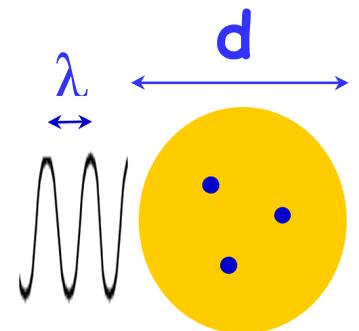


Etude des particules subnucléaires

$$\lambda \ll d \sim 10^{-13} \text{ cm}$$

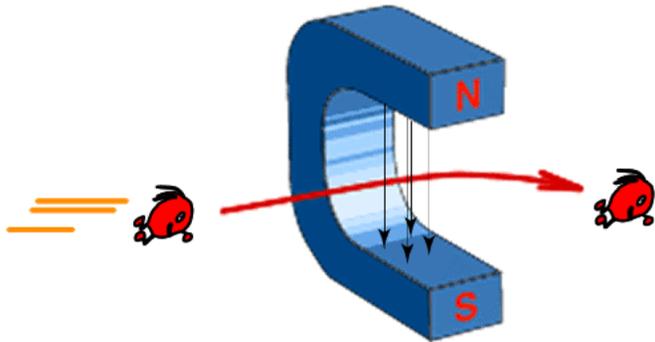


Sources des particules de très haute énergie
Accélérateurs de particules

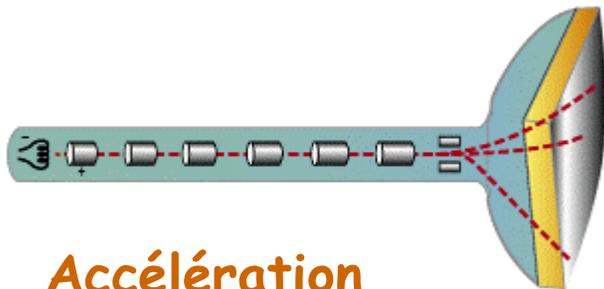
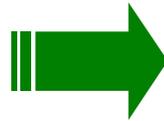


Accélérateur circulaire de particules

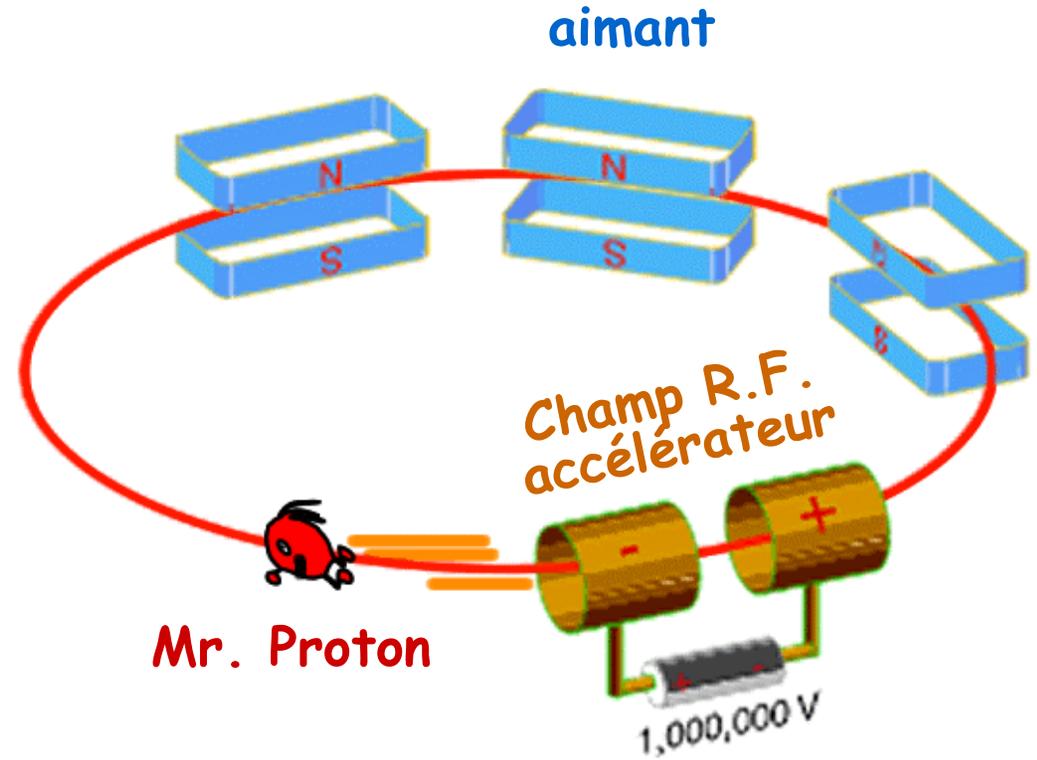
Déflexion
(champs magnétiques)



+



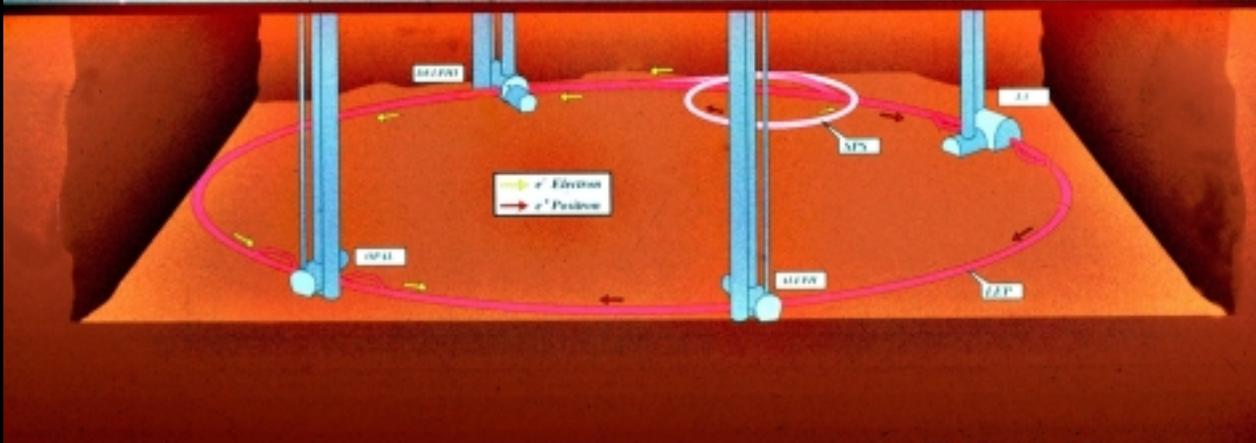
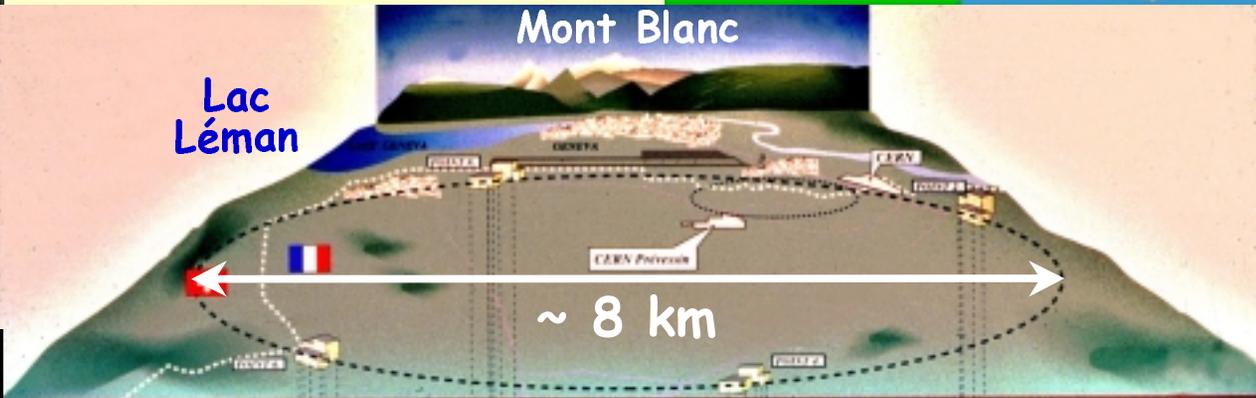
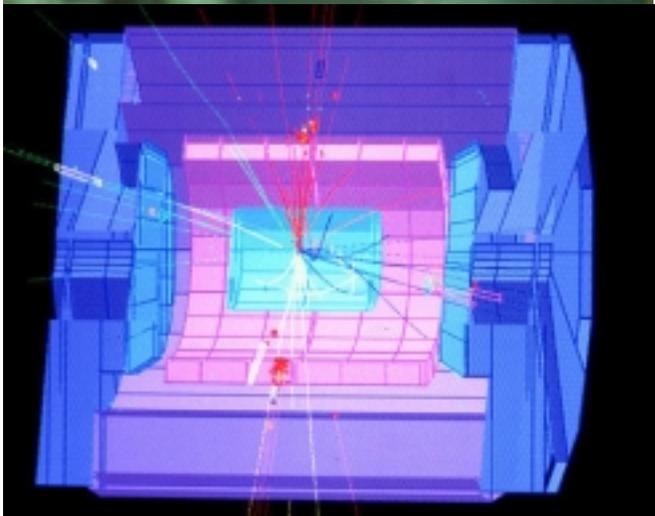
Accélération
(champs électriques)



Mr. Proton



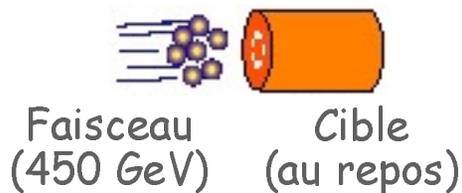
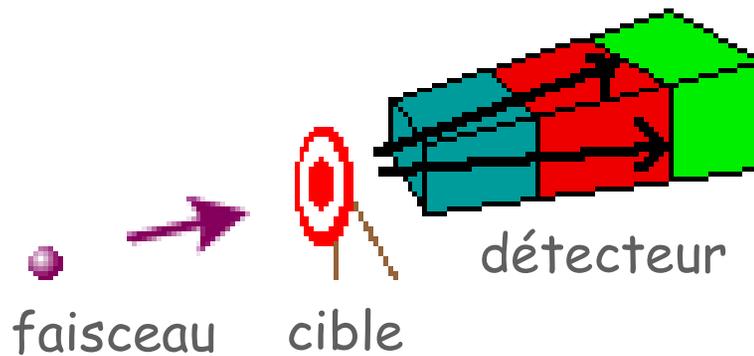
Les grands accélérateurs de particules du Laboratoire Européen CERN (Genève) SPS, LEP, ... LHC



Expériences "à cible fixe"

Particules projetées sur une cible

Densité des corps solides
→ haute probabilité d'interaction
Aptes à rechercher des événements rares

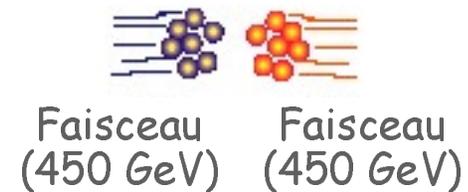
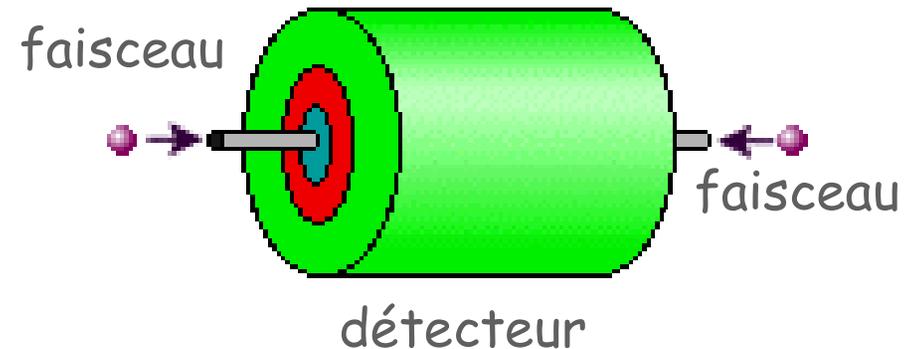


Energie de collision 29 GeV

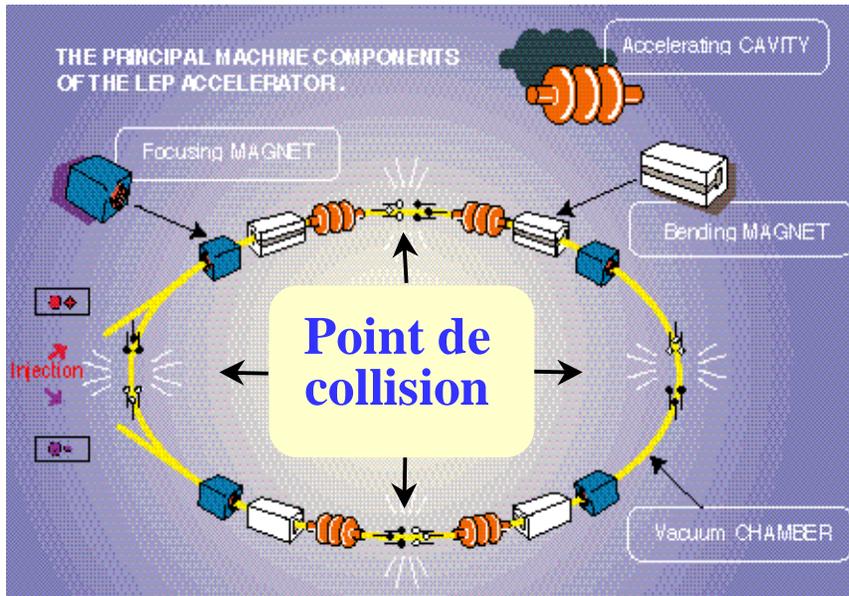
Expériences "par collisions"

Collisions frontales entre particules

Energie (de collision) très élevée
mais peu d'événements



Energie de collision 900 GeV



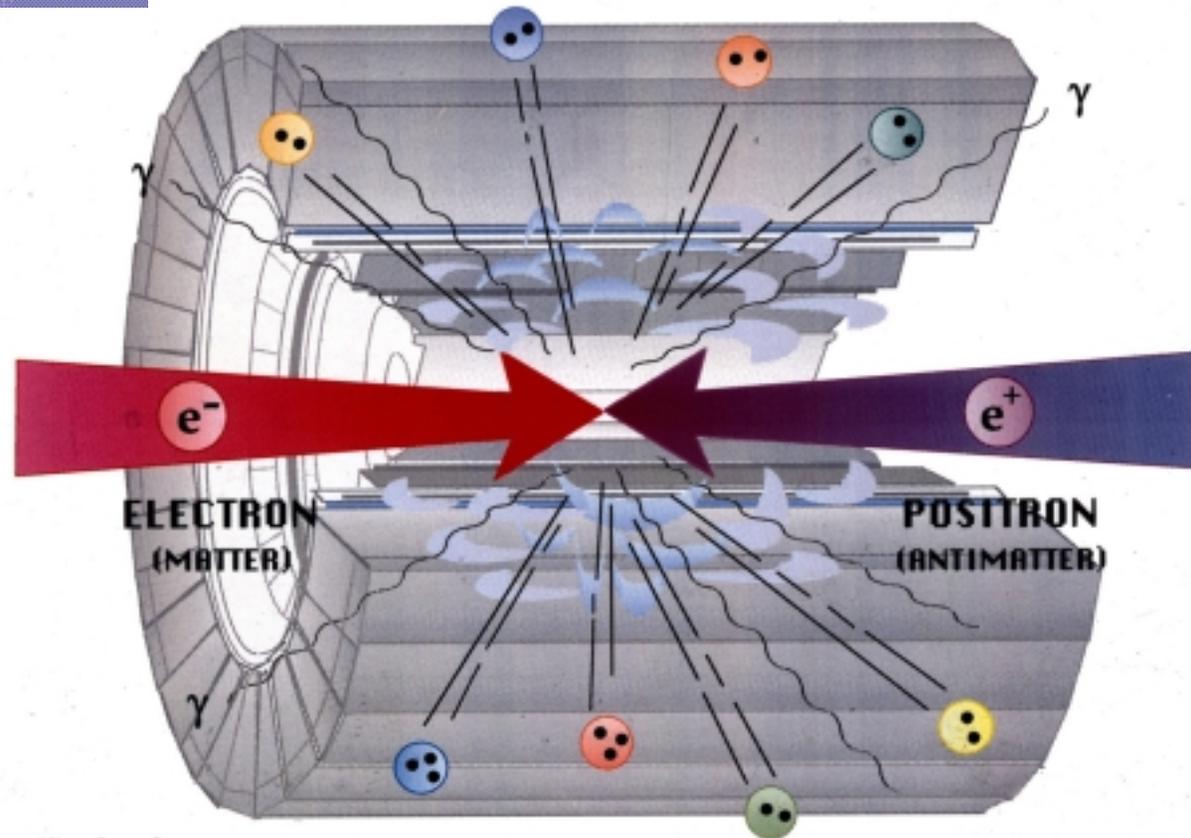
Collisionneur électrons-positons

(matière) (antimatière)

LEP (au CERN)

100 + 100 GeV

Un détecteur à
chaque point de
collision



Mais il existe aussi la frontière des événements rares

(par exemple la Physique des Neutrinos)

Frontière des hautes énergies



Haute énergie pour révéler la structure interne des particules, de nouveaux phénomènes



Energie des Collisionneurs toujours plus élevée

Installations complexes et grandes

Frontière des événements rares



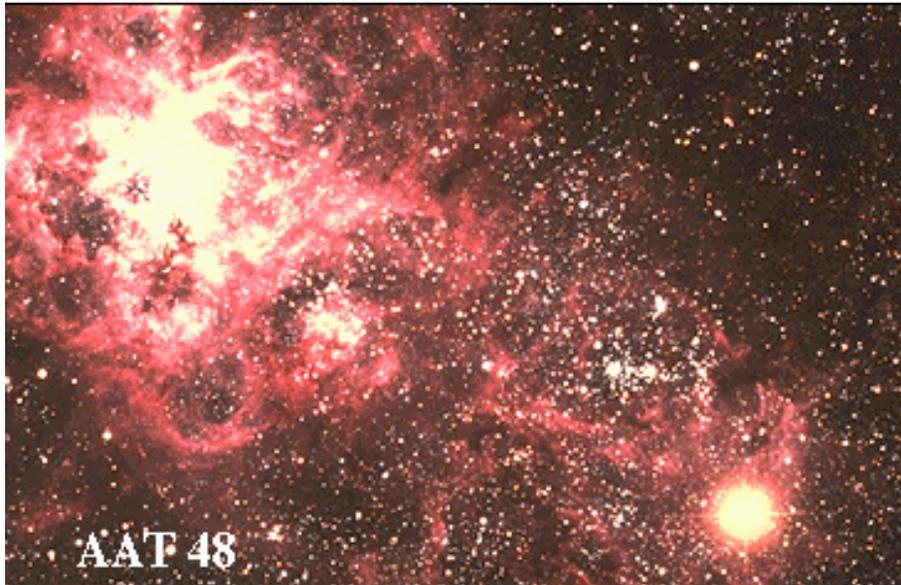
Des anomalies par rapport à ce que nous "croyons savoir", peuvent révolutionner la connaissance



L'aiguille dans la botte de foin, technologies modernes et très raffinées



Faisceaux de haute intensité
Frontière de la patience et des astuces expérimentales



Neutrinos et Supernovas

Nébuleuse Tarentule et Supernova 1987A
du Grand Nuage de Magellan

Une explosion exceptionnellement proche de
nous (une tous les ~ 300 ans) a inondé la
terre de neutrinos

~ 170000 années
lumière



En 1987, dans les laboratoires souterrains :

- on a pu observer les neutrinos émis lors de l'explosion d'une Supernova
- d'après la mesure du temps d'arrivée, on a tenté d'estimer leur vitesse, donc leur masse

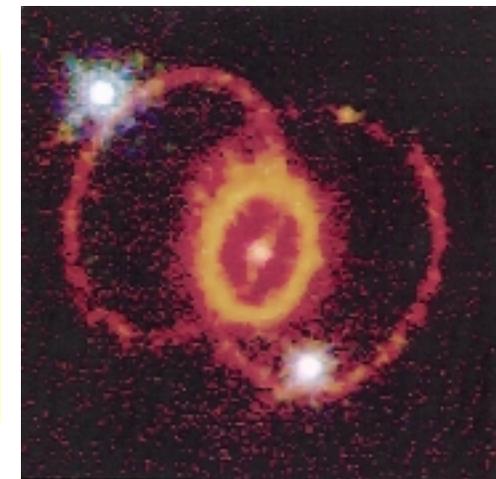
Etape importante pour la Physique et
l'Astrophysique

Immensité de l'énergie dégagée lors des effondrements gravitationnels et complexité de ces phénomènes



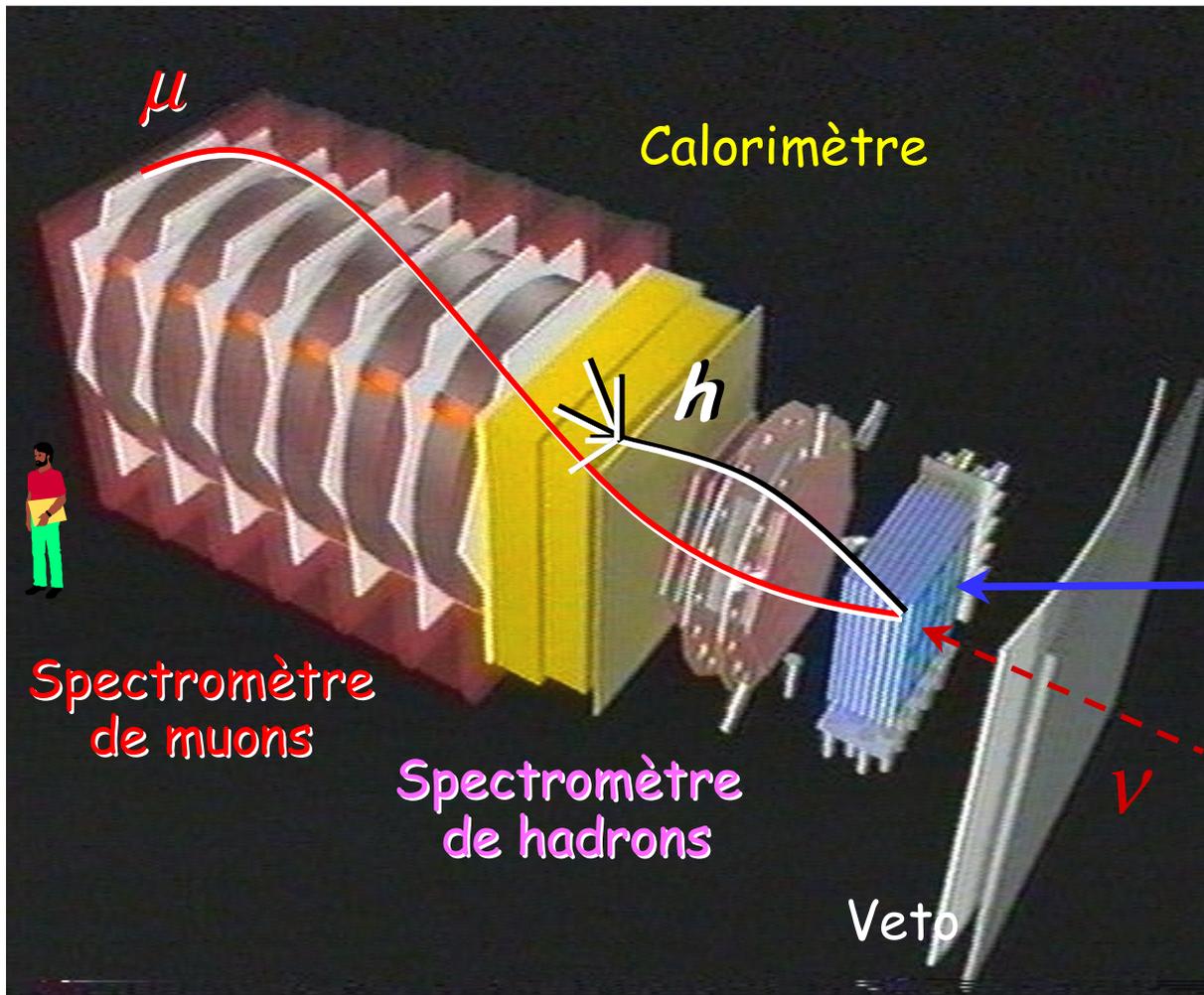
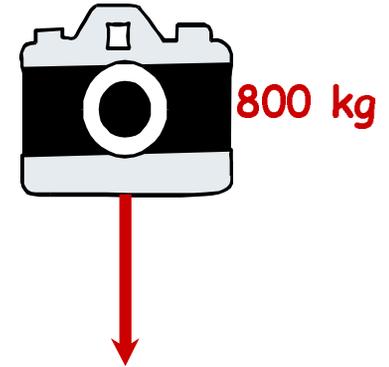
La Supernova 1987A avant et après l'explosion

... et les extraordinaires anneaux observés dans ses débris en 1994 par le Télescope spatial Hubble (résolution exceptionnelle, possible en dehors de l'atmosphère)



CHORUS

"Caméra" très spéciale pour micro-images d'interactions de ν produits par des accélérateurs !



Détecteurs "électroniques"

- localisent les traces dans les émulsions
- identifient les particules
- mesurent l'énergie

Fibres optiques scintillantes et autres techniques



Pourquoi?



Ulysse et Dante Alighieri

La Divine Comédie, l'Enfer Chant XXVI

"Pensez à ce que vous êtes:

point n'avez été faits pour vivre comme des brutes, mais pour chercher la vertu et la connaissance.

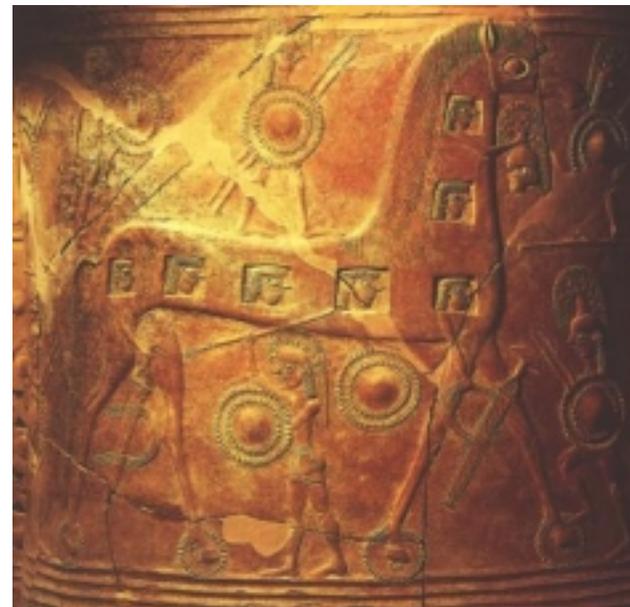
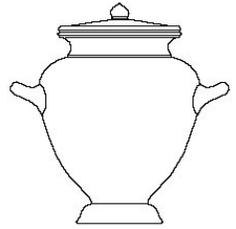
Par ces brèves paroles, j'excitai tellement mes compagnons à continuer leur route, qu'à peine aurais-je pu les retenir. La poupe tournée vers le levant, des rames nous fîmes des ailes pour follement voler ..."

Ulysse était effectivement

Un homme d'action animé de "curiositas" ...

avec l'intelligence et l'adresse expérimentale

Ulysse et les sirènes (stamnos à figure attique rouge)
Période archaïque, de Vulci, British Museum



Le cheval de Troie (pithos), VII siècle avant JC
Mykonos (Musée Archéologique)

... en outre

La recherche "fondamentale" ouvre la voie à de futures applications

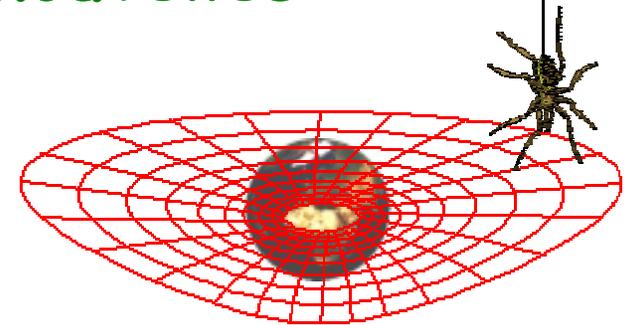
Radio, transistor, laser,

basés sur de précédentes découvertes de la physique fondamentale

Naissance et développement de nouvelles technologies

Le World Wide Web est né au CERN

Recherche ↔ Technologie

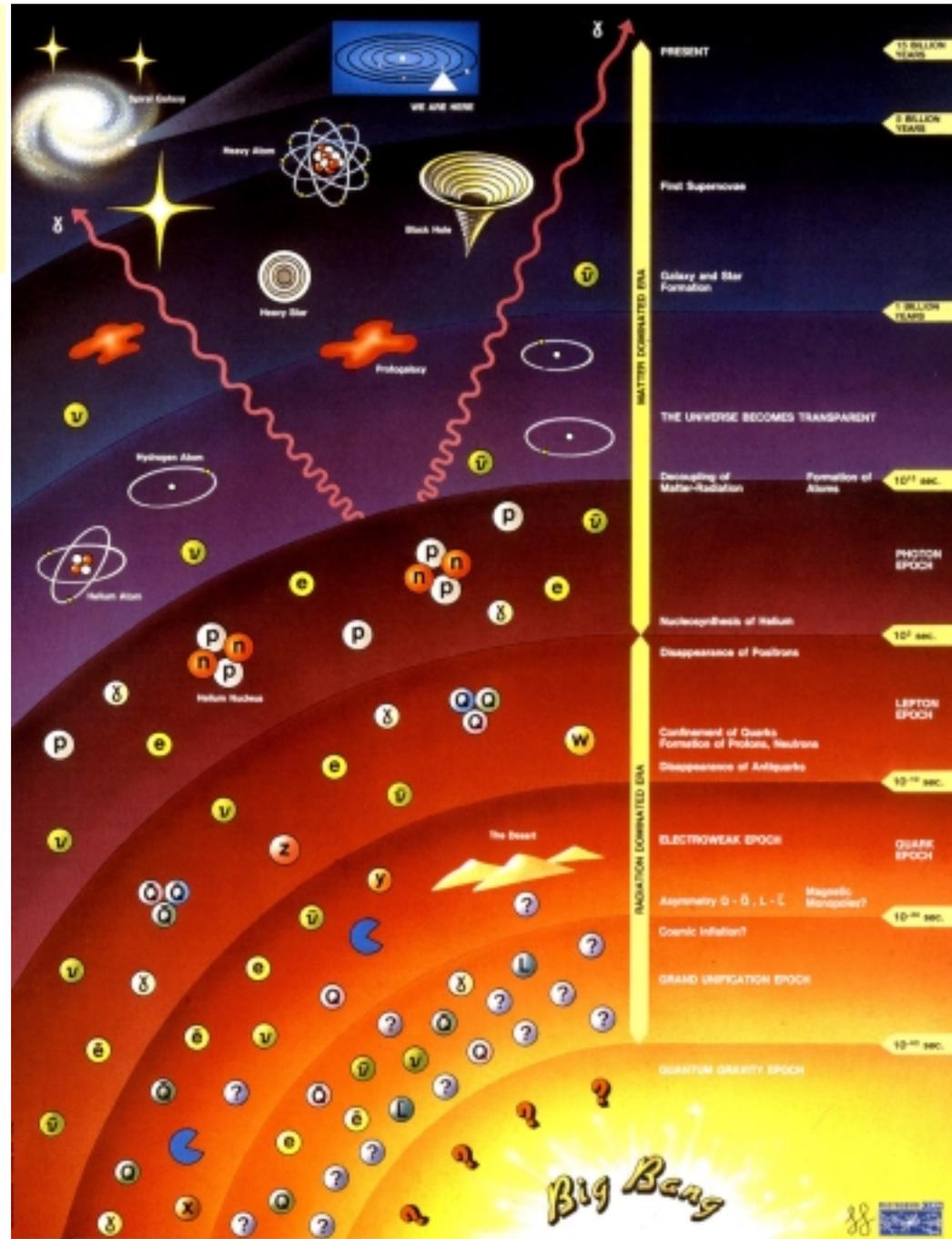


Formation de compétences et professionnalisme

Participation à la recherche dans les Universités et dans les Laboratoires:
thèses d'étudiants et doctorats, bourses d'études, ...

Nous sommes ici ↘

L'histoire de l'univers en une page



Un moment important ↗

Découplage radiation-matière (petite densité, faible probabilité d'interaction)

L'univers devient transparent !

Début ↻ très rapide

Mystères

De la galaxie à notre porte ...

(Andromède est à "seulement"
2 millions d'années lumière)



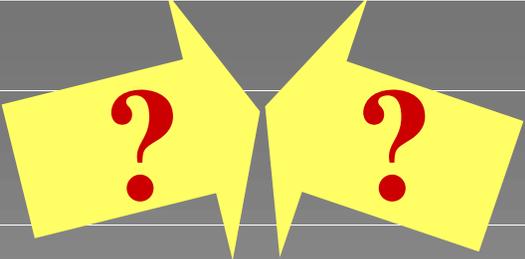
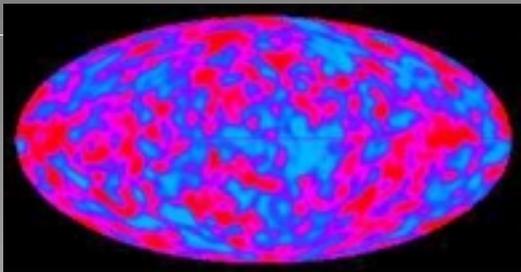
... aux "objets" les plus lointains

(environ 10 milliards d'années lumière ~ l'âge de l'univers)

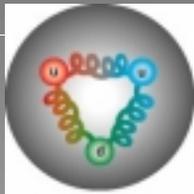


Quand on regarde les étoiles lointaines, nous regardons dans le passé, vers le big-bang (il y a 10-20 milliards d'années)

radiation cosmique à 3°K



quarks



Aller vers l'infiniment petit c'est aller vers le Big-Bang

