L' Univers des Neutrinos

ou

Les Neutrinos de l'Univers

Gaston Wilquet

juin 2006

Physique des particules (élémentaires)
ou bien
Physique des hautes énergies ?

Physique des particules (élémentaires) ou bien physique des hautes énergies ?

Les instruments:

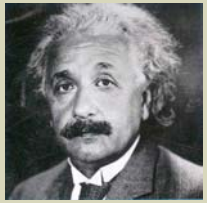
- les détecteurs: «voir» les particules, c.à.d. détecter leurs effets

- les accélérateurs: accélérer des faisceaux de particules à des énergies de plus en plus élevées ⇒ **hautes énergies.**

Pourquoi ? Deux grandes théories de la physique moderne

• Relativité restreinte: grandes vitesses
équivalence masse - énergie
$E = mc^2$ (c = 300 000 km/s)

Einstein



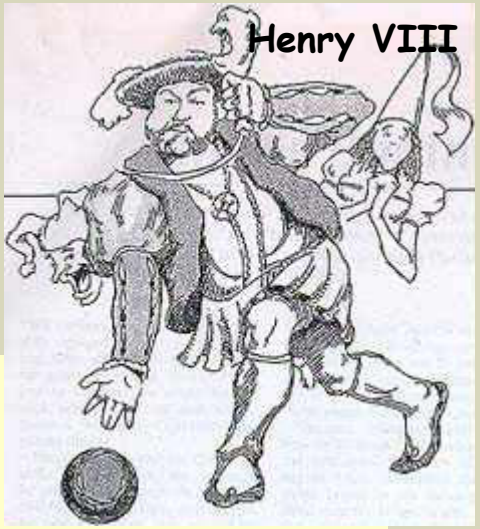
•Mécanique quantique : petites dimensions
équivalence onde - corpuscule
$E = hc/\lambda$

de Broglie

Relativité : grandes vitesses : équivalence masse - énergie

$E = mc^2 \Rightarrow E = m_0c^2 + T$

énergie de masse au repos — énergie cinétique



. Boule de bowling de 5kg lancée à 10 km/h :

Énergie de masse : $5\ 10^{17}$ Joules

Énergie cinétique : 250 Joules dérisoire par rapport à la masse

Après la collision boule/quilles : boule et quilles

. Electron de 10^{-30} kg accéléré à 0,9999999999875 fois la vitesse de la lumière (300 000 km/ s) sur une cible:

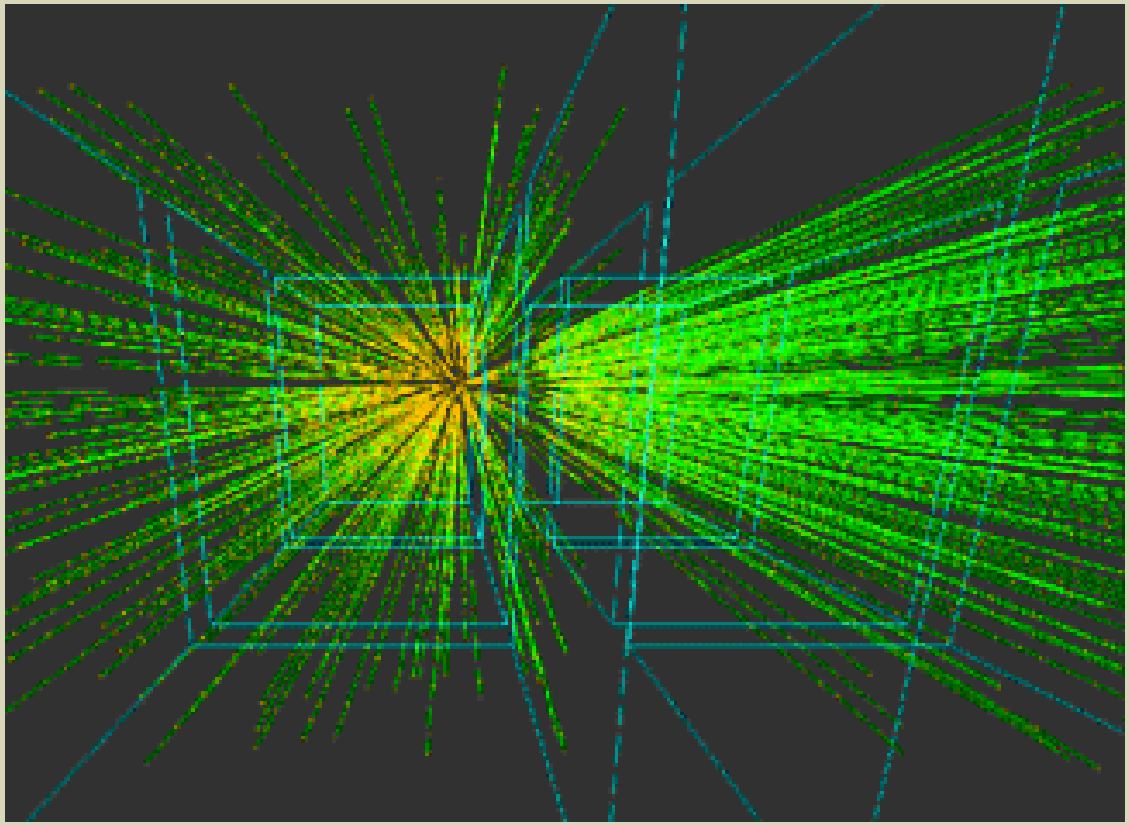
Énergie de masse : $0{,}8\ 10^{-13}$ Joules 10^{30} fois moins que la boule, mais

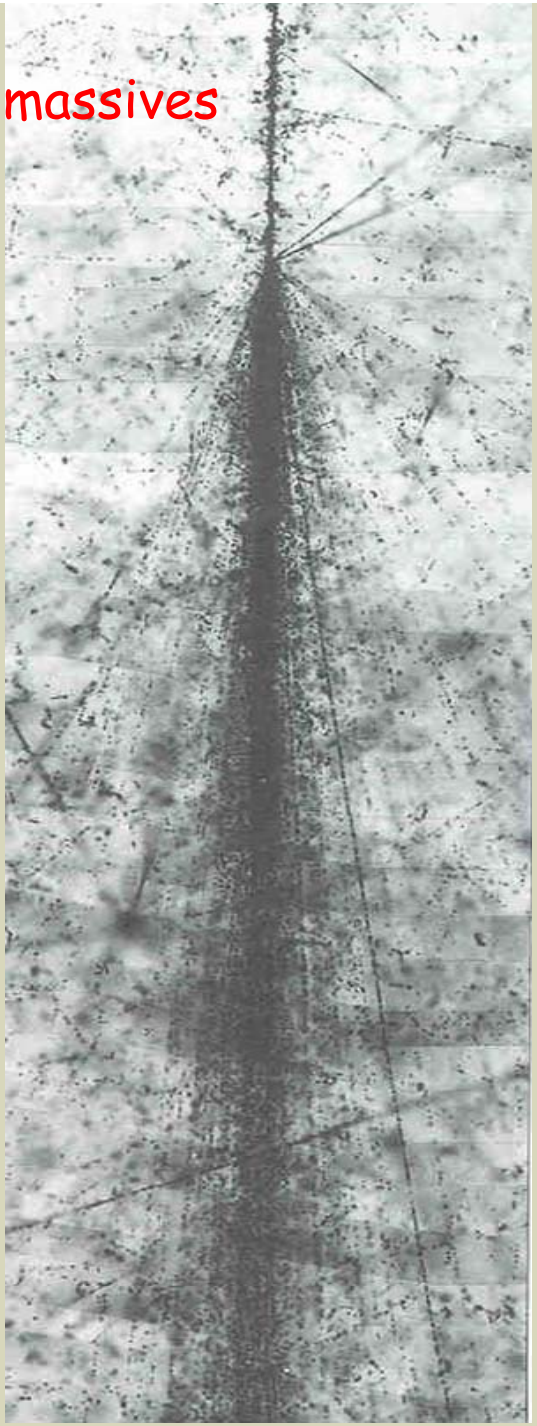
Énergie cinétique : $1{,}6\ 10^{-8}$ Joules **200 000 fois plus grande que sa masse**

Après la collision électron/cible : nombreuses particules massives produites

Collision entre particules : production de particules massives

- pas des débris
- conversion d'énergie en masse





Avec une longueur d 'onde λ on peut observer des détails de dimension λ

Mécanique quantique : petites dimensions

équivalence onde - corpuscule

$E = hc / \lambda$ λ : longueur d'onde

Grande énergie $\Rightarrow$ Petite longueur d'onde $\Rightarrow$ Grande résolution

Mécanique quantique : petites dimensions
équivalence onde - corpuscule

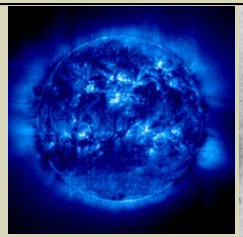
$E = hc / \lambda$ λ : longueur d'onde

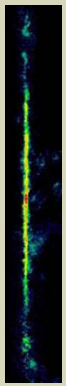
Grande énergie $\Rightarrow$ Petite longueur d'onde $\Rightarrow$ Grande résolution

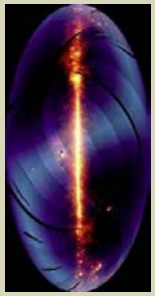
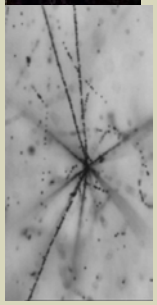
Les photons, particules de lumière ou les ondes électromagnétiques:

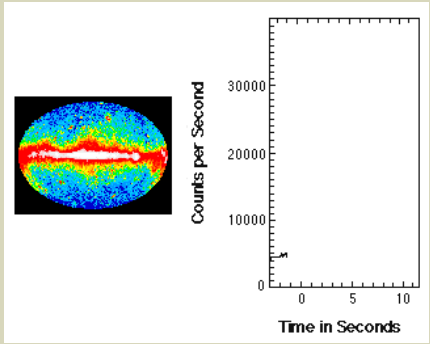
Ondes radio	Micro onde	Infra rouge	Visible	Ultra violet	Rayon X	Rayons γ

10 0.1 6.10^{-4} 4.10^{-4} 10^{-5} 10^{-9} (mm)



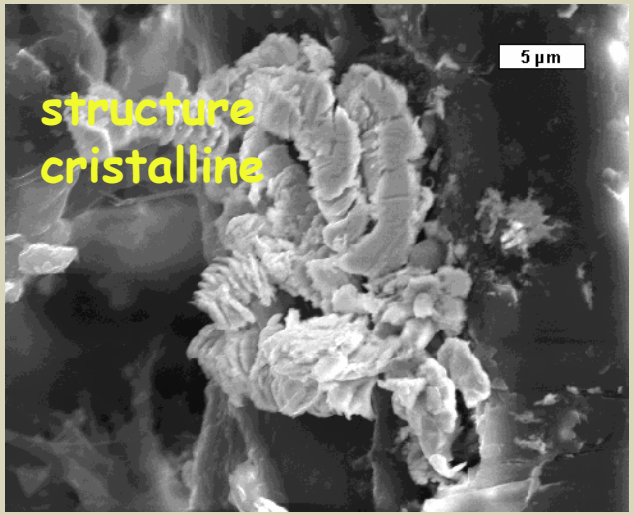


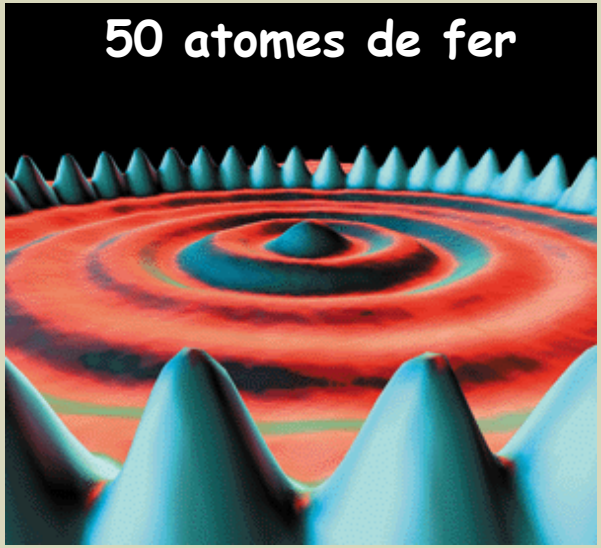





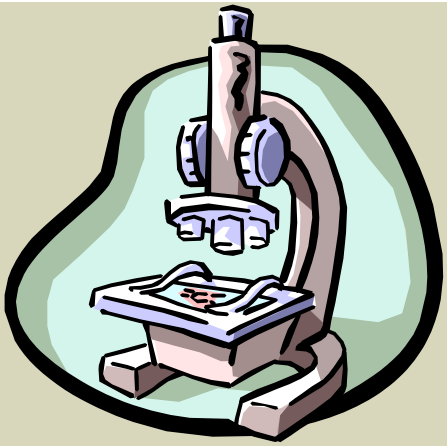
Avec une longueur d 'onde λ on peut observer des détails de dimension λ

Microscope électronique:
avec les ondes associées aux faisceaux d'électrons on «voit» des détails 10 000 fois plus petits qu'avec la lumière visible, de la taille des atomes, 10^{-10}mm.





Accélérateurs de particules:



Les protons et les neutrons des noyaux des atomes sont encore 100 000 fois plus petits que les atomes:
10^{-15} m ou 1 millionième de milliardième de mètre.

Comment étudier la structure des protons et des neutrons?

Avec des ondes - particules accélérées à très haute énergie

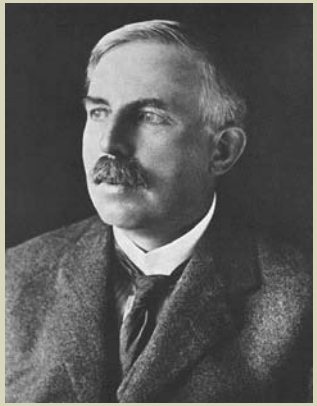
⇓

Longueur d'onde au moins dix fois plus petite que la taille des nucléons (protons et neutrons) :
10^{-16} m ou 1 dix millionième de milliardième de mètre.

Diamètre : 9km

1911 Ernest Rutherford invente le principe
"physique des particules = physique de hautes énergies"

Seule source de particules rapides disponible :
les noyaux radioactifs



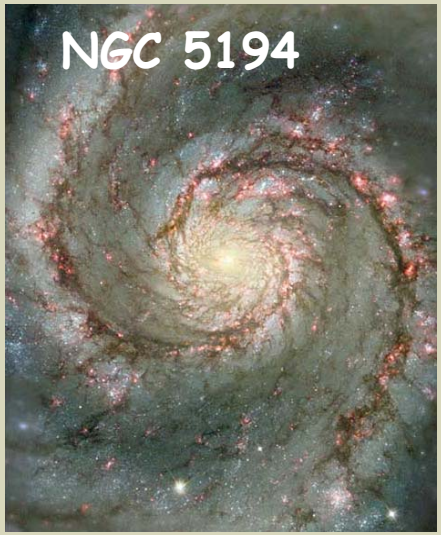
Bombardement de feuilles d'aluminium
avec des particules α:

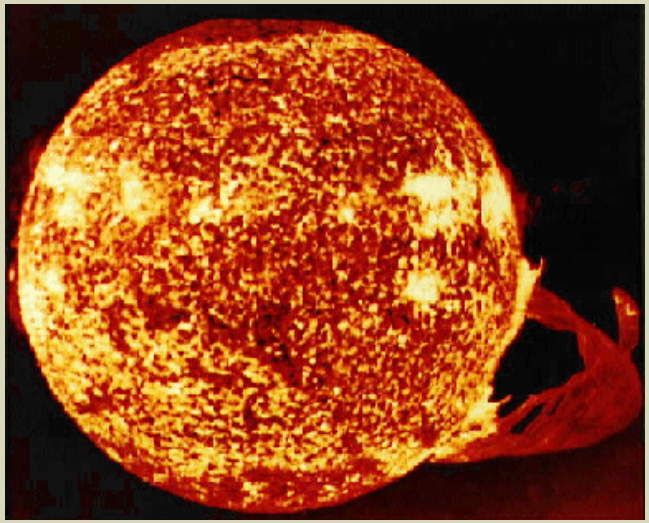
Les atomes ont un noyau

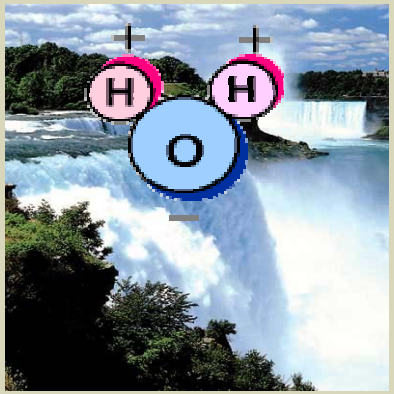
- rayon de l'atome ~ 10^{-10}m
- rayon du noyau ~ 10^{-15}m
- noyau contient 99.98% de la masse.

La matière
et
les forces

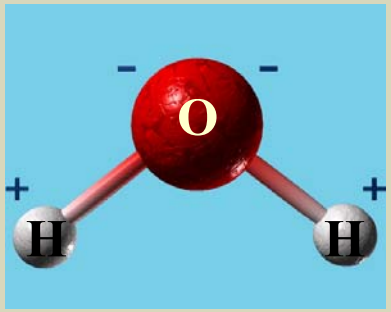
Vue optique la plus lointaine que l'homme a de l'univers





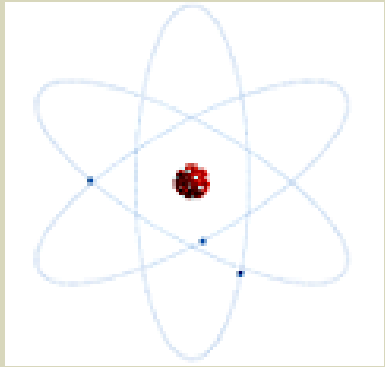


La molécule est faites d'atomes …



R semblable aux atomes.

L' atome d'électrons en orbite autour d'un noyau…



R ~ 10^{-10}m

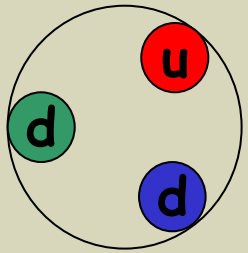
Force électromagnétique

Le noyau est fait de nucléons : protons et neutrons …

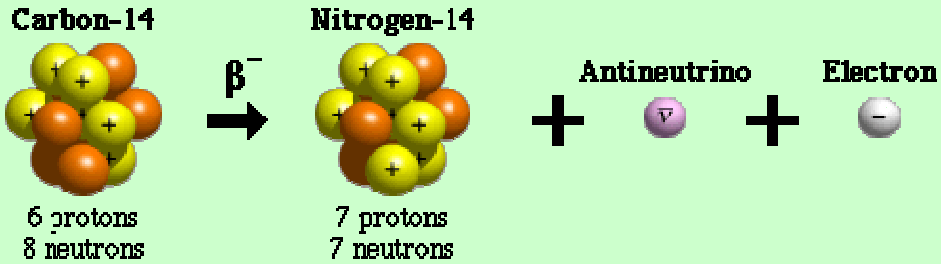
R semblable aux nucléons

Force (nucléaire) forte

Les nucléons sont fait de quarks u et d …



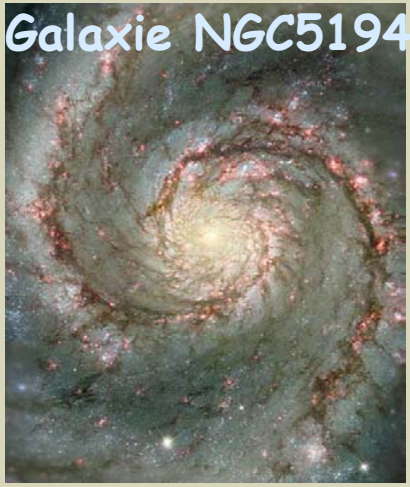
R ~ 10^{-15}m

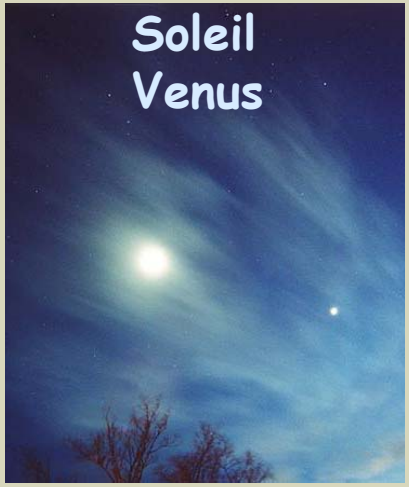


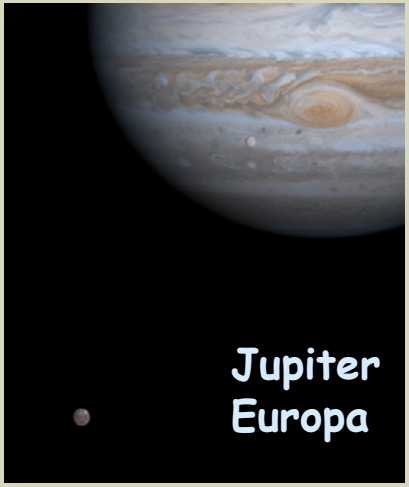
Force (nucléaire) faible : désintégration β

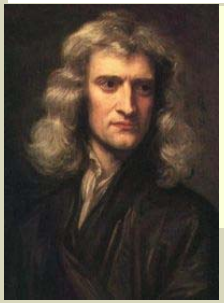
Les quarks sans structure … à la limite de nos connaissances

R < 10^{-18}m









$$F \div \frac{m\,m'}{r^2}$$

Force gravitationnelle

Dominante aux grandes échelles

Sans objet aux petites échelles

Les particules «élémentaires» composant la matière ordinaire

2 quarks

$$\begin{pmatrix} u^{2/3} & \text{quark u} \\ d^{-1/3} & \text{quark d} \end{pmatrix}$$

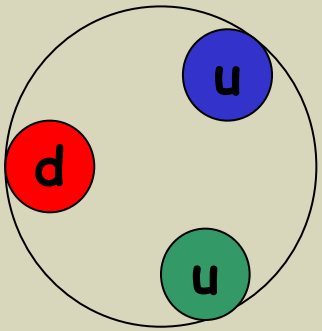
2 leptons

$$\begin{pmatrix} e^- & \text{électron} \\ \nu_e & \text{neutrino-e} \end{pmatrix}$$

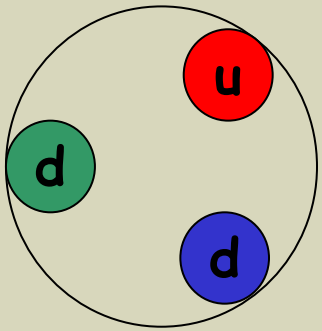
matière ordinaire radioactive

Les quarks ne sont pas libres; ils sont liés

proton $\begin{pmatrix} u^{2/3} \\ u^{2/3} \\ d^{-1/3} \end{pmatrix}$

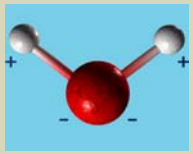


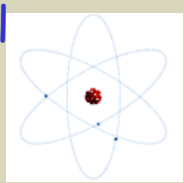
neutron $\begin{pmatrix} u^{2/3} \\ d^{-1/3} \\ d^{-1/3} \end{pmatrix}$



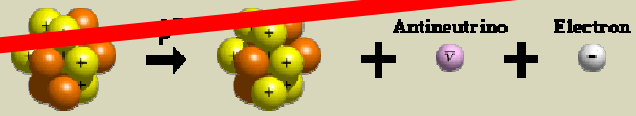
Les 4 forces qui structurent la matière à toutes les dimensions

		portée (m)	intensité relative
~~• **forte**~~	~~[charge de couleur]~~ ~~lie les quarks dans les nucléons~~ ~~lie les nucléons dans les noyaux des atomes~~	~~10^{-15}~~	~~1~~
• **électromagnétique** Maxwell	lie l… lie l…	infinie	10^{-2}
~~• **faible** : Fermi~~	~~[charge faible]~~ ~~responsable de la radioactivité β~~	~~10^{-18}~~	~~10^{-5}~~
• **gravitation** : Newton Einstein		infinie	10^{-40}





$$F \div \frac{q\,q'}{d^2} \begin{cases} \text{signe de } F = \\ \text{signe de } q \times q' \end{cases}$$



$$F \div \frac{m\,m'}{d^2} \quad \text{toujours} > 0$$

Le bestiaire des particules semblables aux protons et neutrons.

Leurs composants: les quarks

De plus en plus complexe, de plus en plus élémentaire

Les atomes, les «atomos» indivisibles des grecs

la plus petite "particule" capable de liaison chimique

1911: Ernest Rutherford invente le principe

"**physique des particules = physique de hautes énergies**"

Les atomes ont un noyau 100 000 fois plus petit et contenant pratiquement toute la masse.

1932: James Chadwick découvre **le neutron**, le frère neutre du proton

Les noyaux sont constitués de nucléons: protons et neutrons

Le tableau empirique des éléments de Mendeleev s'explique

Tableau empirique de Mendeleev

Reihen	Gruppe I. - R^2O	Gruppe II. - RO	Gruppe III. - R^2O^3	Gruppe IV. RH^4 RO^2	Gruppe V. RH^3 R^2O^5	Gruppe VI. RH^2 RO^3	Gruppe VII. RH R^2O^7	Gruppe VIII. - RO^4
1	H = 1							
2	Li = 7	Be = 9,4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19	
3	Na = 23	Mg = 24	Al = 27,3	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35,5	
4	K = 39	Ca = 40	- = 44	Ti = 48	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	Fe = 56, Co=59 Ni=59, Cu=63
5	(Cu = 63)	Zn = 65	- = 68	- = 72	As = 75	Se = 78	Br = 80	
6	Rb = 85	Sr = 87	?Yt = 88	Zr = 90	Nb = 94	Mo = 96	- = 100	Ru=104, Rh=104 Pd=106, Ag=108
7	Ag = 108	Cd = 112	In = 113	Sn = 118	Sb = 122	Te = 125	J = 127	
8	Cs = 133	Ba = 137	?Di = 138	?Ce = 140	-	-	-	- - - -
9	(-)	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	?Er = 178	?La = 180	Ta = 182	W = 184	-	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199
11	(Au = 199)	Hg = 200	Tl = 204	Pb = 207	Bi = 208	-	-	
12	-	-	-	Th = 231	-	U = 240	-	- - - -

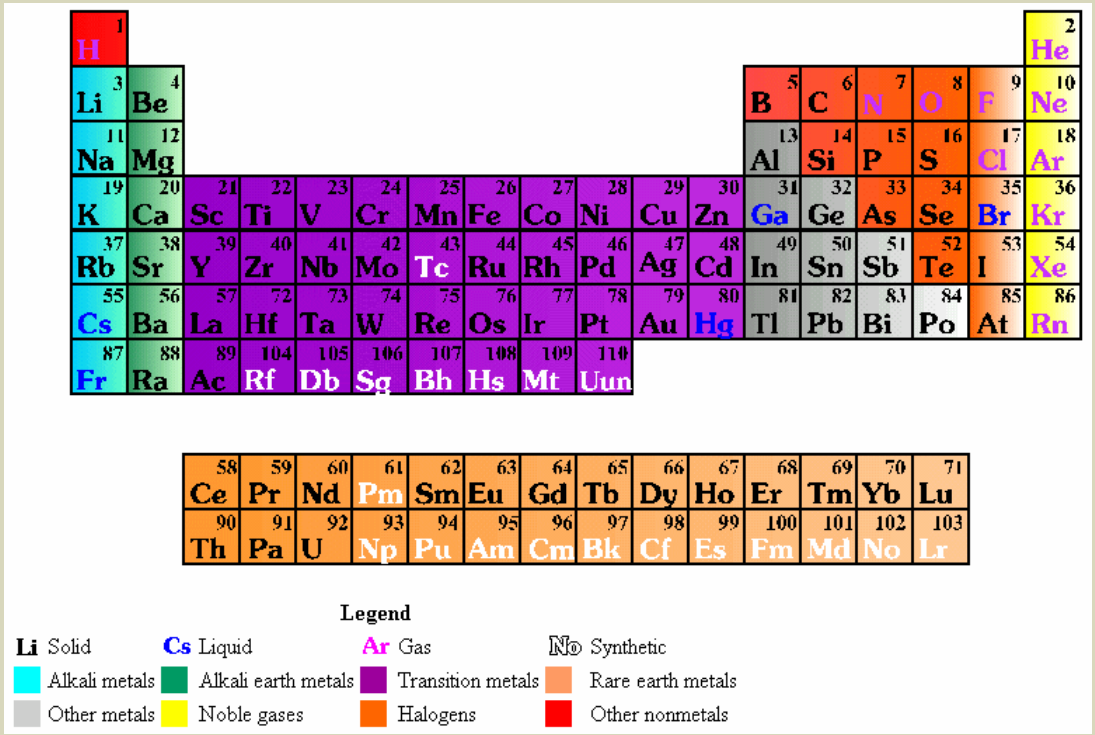


Tableau périodique des éléments

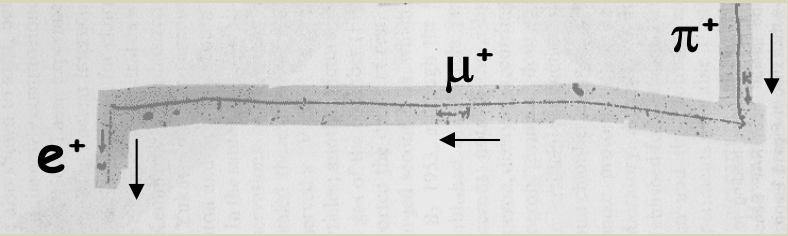
Le noyau est constitué de protons chargés positivement et de neutrons neutres.

L'atome est neutre: il y a autant d'électrons négatifs que de protons.

Les propriétés chimiques sont liées aux électrons.

Dès les années 1940 : plaques photographiques exposées au rayonnement cosmique (haute montagne, ballons stratosphériques)

- découverte de particules interagissant fortement avec la matière : comparables au proton et au neutron
- hautement instables (10^{-8} - 10^{-12} s)

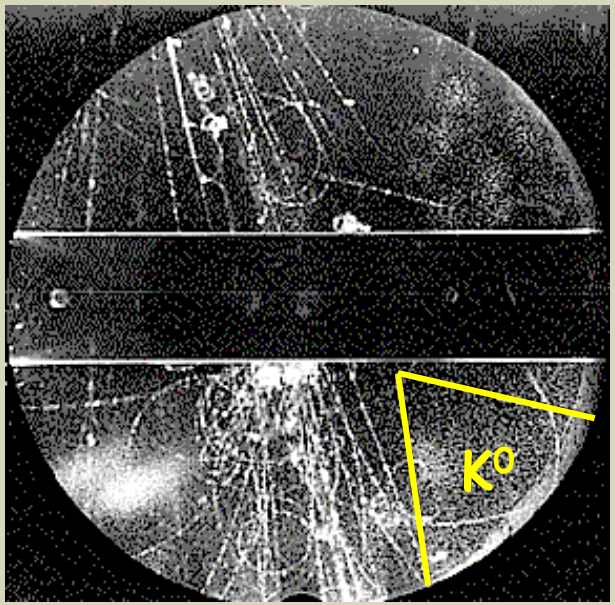


Occhialini et col

1947:

$\Leftarrow \pi^+$

$K^0 \Rightarrow$



Rochester & Butler

1953: premier accélérateur de particules à Brookhaven
La faune des particules explose

mésons π, ρ, η, ϕ, ω, K,f , a_1, a_2, ψ, χ, υ, D, B, D_S...
baryons p ,n, Λ, Σ, Ξ, Ω, Δ, Λ_c, Σ_c ...

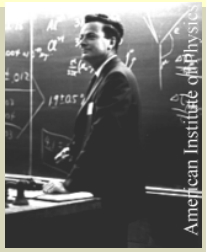
La nature est-elle si compliquée?

1959 : Allistair et Hostdadter

Le proton a une dimension finie (10^{-15}m)

1960 : Feynman, Gell-Mann, Zweig, les nouveaux Mendeleev:

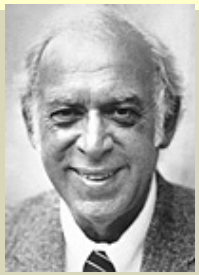
"comme si" les particules étaient composées de quarks

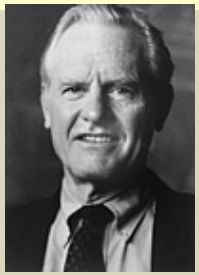


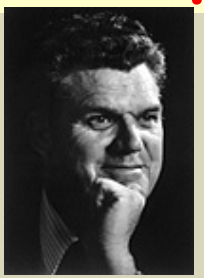
«Three quarks for Mr. Mark » James Joyce

1969 : expérience de Friedman, Kendall et Taylor et collaborateurs

Le proton est composé de quarks liés par la force forte







Les hadrons et les familles de quarks aujourd'hui

les quarks | **les antiquarks**

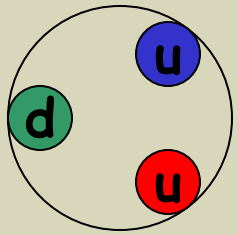
$$\begin{pmatrix} \text{up} & u^{2/3} \\ \text{down} & d^{-1/3} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \text{charm} & c^{2/3} \\ \text{strange} & s^{-1/3} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \text{top} & t^{2/3} \\ \text{bottom} & b^{-1/3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{u}^{-2/3} \\ \bar{d}^{+1/3} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{c}^{-2/3} \\ \bar{s}^{+1/3} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{t}^{-2/3} \\ \bar{b}^{+1/3} \end{pmatrix}$$

Pourquoi trois familles ?

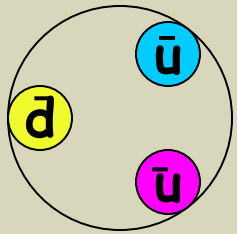
Baryons: 3 quarks

proton $\begin{pmatrix} u^{2/3} \\ u^{2/3} \\ d^{-1/3} \end{pmatrix}$



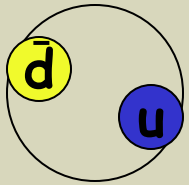
Antibaryons: 3 antiquarks

antiproton $\begin{pmatrix} \bar{u}^{-2/3} \\ \bar{u}^{-2/3} \\ \bar{d}^{1/3} \end{pmatrix}$



Mésons: 1 quark et un antiquark

méson π^+ $\begin{pmatrix} u^{2/3} \\ \bar{d}^{1/3} \end{pmatrix}$



Les neutrinos
ont
une histoire liée à celle de
la physique moderne

De la découverte de la radioactivité à la crise de l'énergie

1886: Pierre Becquerel découvre la **radioactivité**

1897: J.J.Thomson découvre l'**électron**

1902: Pierre et Marie Curie découvrent que **les rayons β sont des électrons**

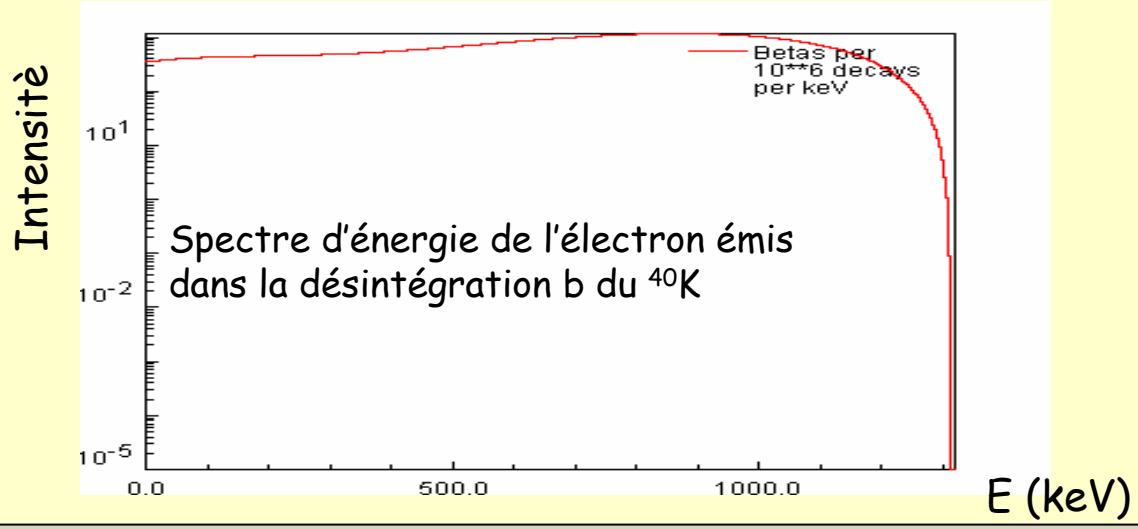
1914 : Lise Maitner, Otto Hahn et James Chadwick
mesurent le spectre d'énergie des rayons β

de 1914 à 1930: Crise de la sacro-sainte loi fondamentale de la physique: la conservation de l'énergie

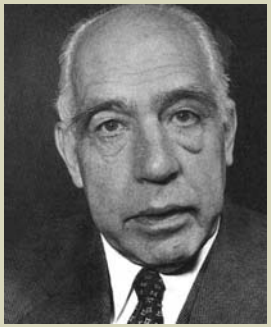
Transmutation par désintégration β^-

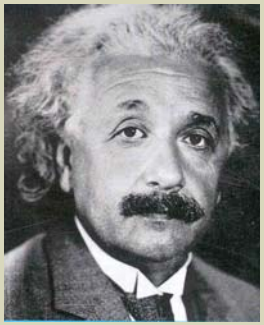
$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca + e^-$

Conservation de l'énergie: l'électron devrait avoir une énergie constante. Or il a tout un spectre d'énergie



Spectre d'énergie de l'électron émis dans la désintégration b du ^{40}K





Deux monuments s'affrontent:

- Niels Bohr (et les pragmatiques)
- Albert Einstein (et les gardiens du temple)

De l'«invention» à la découverte du neutrino

1930: Wolfgang Pauli, retenu par un bal à Zurich, dans une lettre à

"Dear Radioactive Ladies and Gentlemen"
en congrès à Tübingen le 4 décembre
"I have hit upon a desperate remedy
to save the law of conservation of energy."

L'idée de Pauli : l'oeuf de Colomb

1. - la non conservation de l'énergie n'est qu'apparente,
2. - **une partie de l'énergie donnée à un troisième corps, neutre,**
3. - comme l'électron peut occasionnellement prendre toute l'énergie disponible: la masse de cette particule est petite,
4. - comme la particule n'a jamais été observée, elle interagit très faiblement avec la matière.

$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca + e^- + \nu$ en fait $n \rightarrow p + e^- + \nu$
ou plutôt $d \rightarrow u + e^- + \nu$

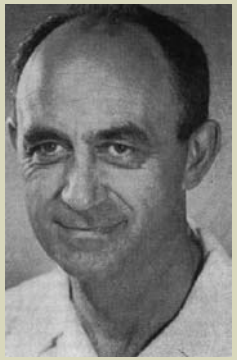
1933: Enrico Fermi **baptise le neutrino**, le petit neutre
- invente la **théorie la force (nucléaire) faible**
- promet une caisse de champagne à qui découvrira le neutrino

Pour comprendre le pari de Fermi: une comparaison comme une autre entre forces forte et faible:

Force forte:
désintégration en chaîne des états excités des nucléons en 10^{-23}s

Force faible:
désintégration du neutron en environ 887 s

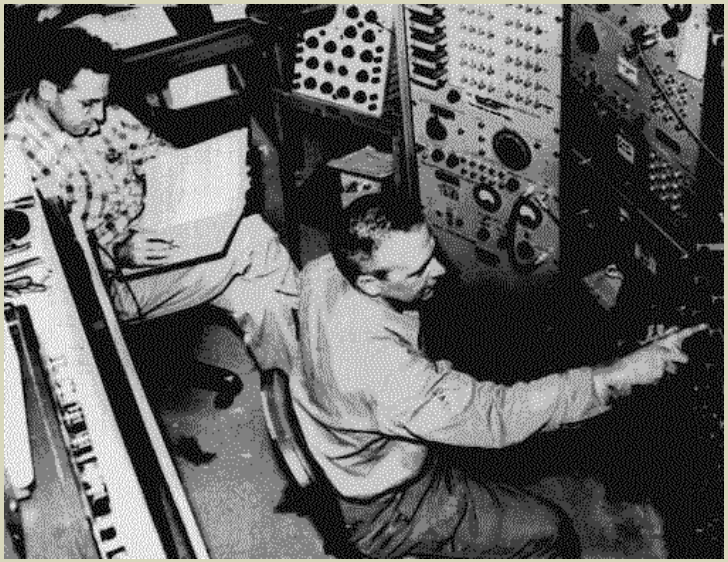
$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$



26 ordres de grandeur de différence

1956: 26 ans plus tard, la fin d'une longue quête:
Fred Reines et Clyde Cowan **prouvent l'existence du neutrino**

Grâce aux premiers neutrinos fabriqués par l'homme au réacteur de Savannah River



Fermi est mort depuis deux ans et ne pourra pas offrir le champagne.
Pauli a plus de chance et survira deux ans à la découverte de son "invention".

Les électrons ont aussi des répliques et des antiparticules

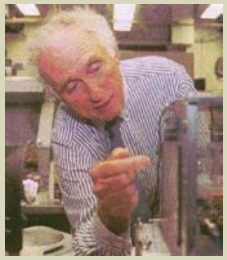
La nature a aussi des antiélectrons:

1930 : Carl Anderson découvre **le positon = antiélectron**
Pierre Joliot-Curie la désintégration β^+

$^{210}Rn \rightarrow {}^{210}At + e^+ + \nu$ émission d'un positon

La nature bégaie pour les électrons:

1937 : Carl Anderson et d'autres découvrent **les muons** μ^-, μ^+
semblables en tout à l'électron et au positon, mais instables (2 microsecondes) et 200 fois plus massifs..



1974: L'équipe de Martin Perl découvre **les taus** τ^-, τ^+
hautement instables (10^{-13}s) et 3500 fois plus massifs

Et les neutrinos, pourquoi n'auraient-ils pas aussi des répliques et des antiparticules?

1956-1957 : prédiction de Tsung Dao Lee et Cgen Nin Yang

La nature **reconnaît sa gauche de sa droite**
vérification par Chien Shung Wu

La nature a aussi des antineutrinos

1959 : Ray Davis : neutrinos et antineutrinos sont différents

Noyau radioactif β^+ : $e^+ + \nu$ $\qquad$ ν + noyau $\rightarrow e^- + X$

Noyau radioactif β^- : $e^- + \bar{\nu}$ $\qquad$ $\bar{\nu}$ + noyau $\rightarrow e^+ + X$

La nature bégaie pour les neutrinos:

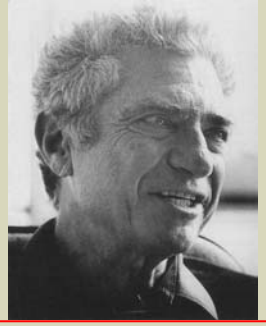
1962 : Leon Lenderman, Melvin Schwartz et Jack Steinberger découvrent que **les neutrinos associés aux électrons et aux muons sont différents:**

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$$

$$\beta^+ : e^+ + \nu_e$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$



2000 : Le groupe DONUT découvre les ν_τ, les **neutrinos du** τ.

Les familles de leptons aujourd'hui

les leptons | **les antileptons**

$$\begin{pmatrix} \text{neutrino-e} & \nu_e \\ \text{électron} & e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{neutrino-mu} & \nu_\mu \\ \text{muon} & \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{neutrino-tau} & \nu_\tau \\ \text{tau} & \tau^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$$

les leptons existent à l'état libre

Les familles de quarks aujourd'hui

les quarks | **les antiquarks**

$$\begin{pmatrix} \text{up} & u^{2/3} \\ \text{down} & d^{-1/3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{charm} & c^{2/3} \\ \text{strange} & s^{-1/3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{top} & t^{2/3} \\ \text{bottom} & b^{-1/3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}^{-2/3} \\ \bar{d}^{+1/3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{c}^{-2/3} \\ \bar{s}^{+1/3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{t}^{-2/3} \\ \bar{b}^{+1/3} \end{pmatrix}$$

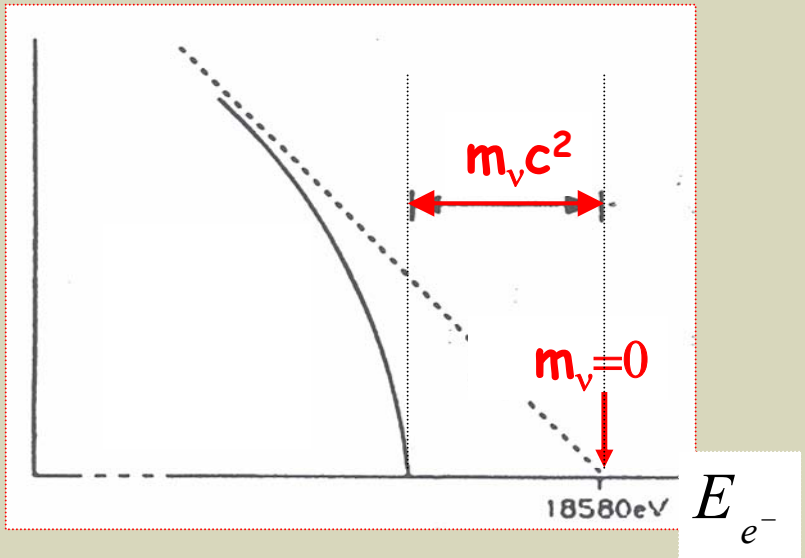
les quarks sont liés dans les mésons et les baryons

Les neutrinos ont-ils au moins une masse ?

Les neutrinos sont neutres et n'interagissent pratiquement pas mais au moins ont-ils une masse?

Limite expérimentale:
désintégration β du tritium

$$^{3}H \rightarrow {}^{3}He + e^{-} + \bar{\nu}_e$$



L'électron peut prendre toute l'énergie disponible.
Aucune énergie $m_\nu c^2$ ne doit être réservée pour la masse m_ν du neutrino

m_ν < 1/50 000 masse de l'électron
m_ν < 1/100 000 000 masse du proton

Les neutrinos du Big-Bang remplissent l'Univers

Les neutrinos du Big-Bang remplissent l'Univers

Hedwin Hubble découvre les galaxies:
elles se fuient d'autant plus vite qu'elles sont éloignées,
inspire l ' "atome primitif" à Georges Lemaître

65 km/s à 3 millions d'années-lumière

Le modèle cosmologique du Big-Bang:

décrit l'évolution de l'Univers à partir d'une formidable explosion qui crée espace, temps, matière et radiation
il y a 13.5 milliards d'années

depuis, l'Univers est en expansion et s'est structuré en se refroidissant

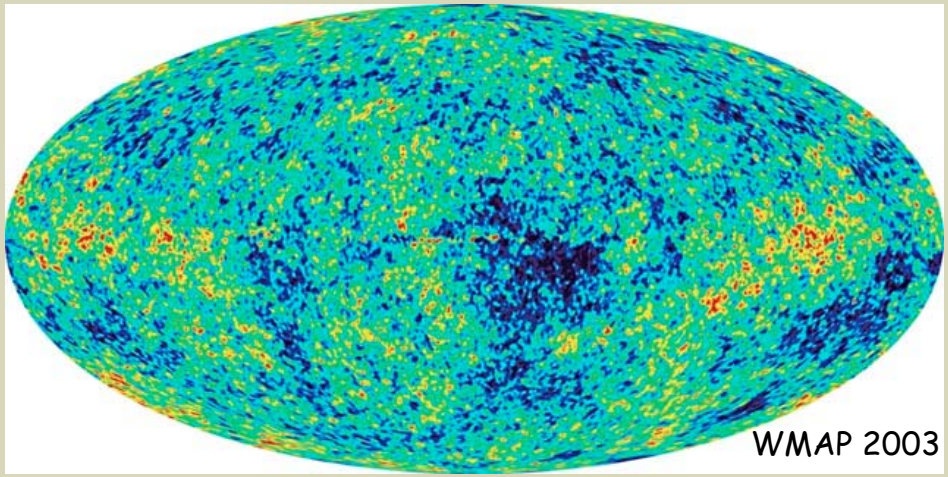
Il s'en est fallu d'un rien pour que l'Univers soit vide de matière

Première fraction de seconde:
Matière et antimatière s'annihilent totalement en rayonnement γ.

Complètement ?

Miracle ! Un 10 milliardième de particules de matière en plus!

Pourquoi? Modèles vrais ou faux ? A vérifier comment?
En augmentant l'énergie de nos accélérateurs. Réponse après 2010



Après 14 milliards d'années :

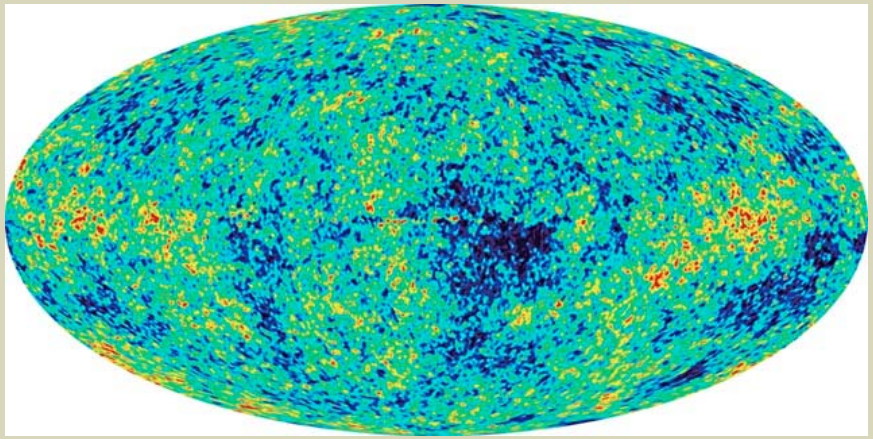
Cartographie du rayonnement fossile de l' Univers refroidi à 2.73 K (-270.42 °C):

Bruit de Fond Micro-onde.

Penzias et Wilson en 1965

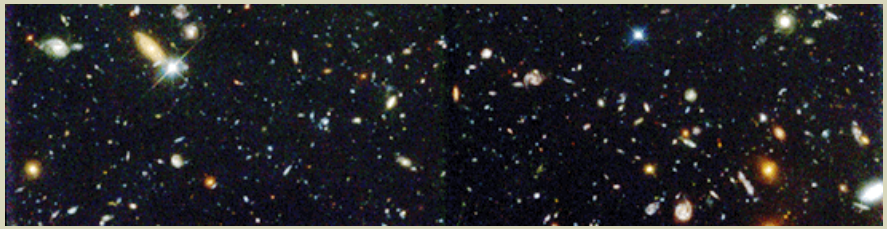
Age de l'Univers : 14 milliards d'années

Carte de la température du rayonnement fossile micro-onde



Très homogène: T=2.73 K, variations ≈ 10^{-5}

Carte de la densité de la matière

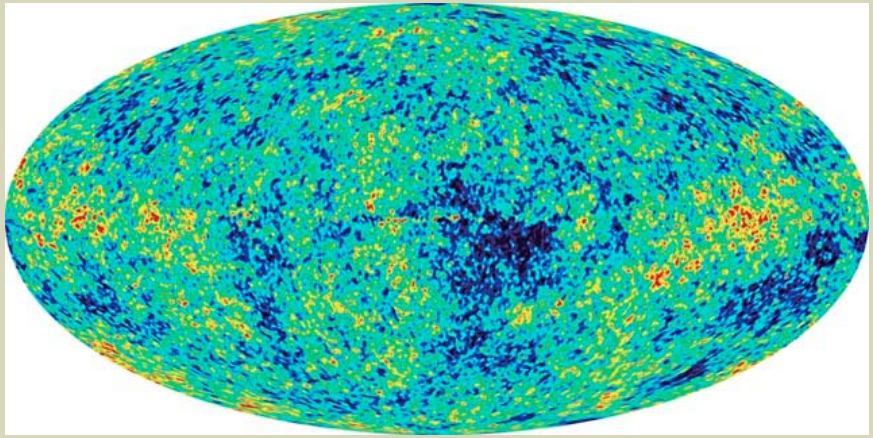


Très inhomogène

Gravitation

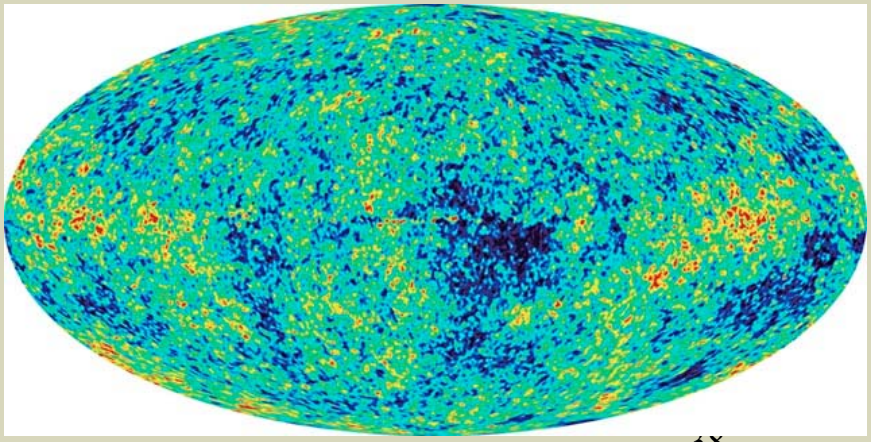
Age de l'Univers : entre 300 000 ans et 1 milliard d'années

Carte de la température du rayonnement



Très homogène: T≈4000→70 K, variations ≈ 10^{-5}

Carte de la densité de la matière



Très homogène

… A part les neutrinos qui ont survécu en nombre ?

L'annihilation neutrino - antineutrino en rayonnement est infiniment faible

Il y a 10 milliards de fois plus de neutrinos dans l'Univers
que de protons ou d'électrons

environ 100 par cm3

Flux : au moins 200 milliards / cm^2 / s

… du moins, tout le monde en est convaincu.

Aucune bonne idée pour détecter des neutrinos d'énergie aussi petite.

Les neutrinos humains

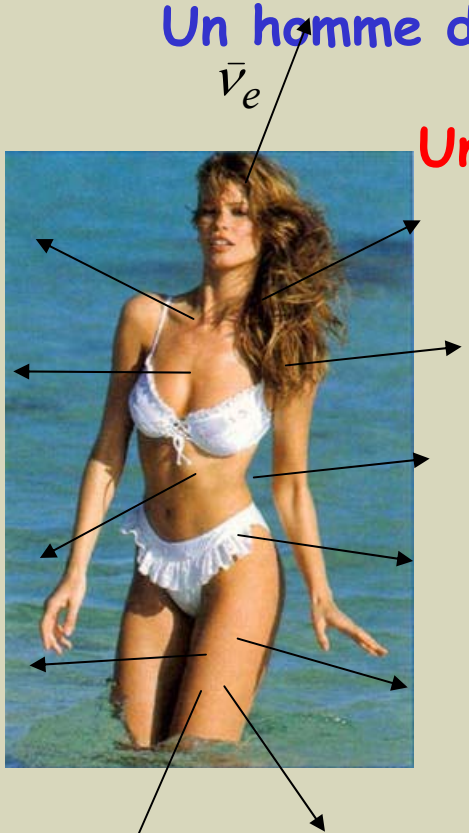
Un être humain contient environ 2 g de potassium par kg

dont 0.012%= 0.24 mg de ^{40}K radioactif β^-

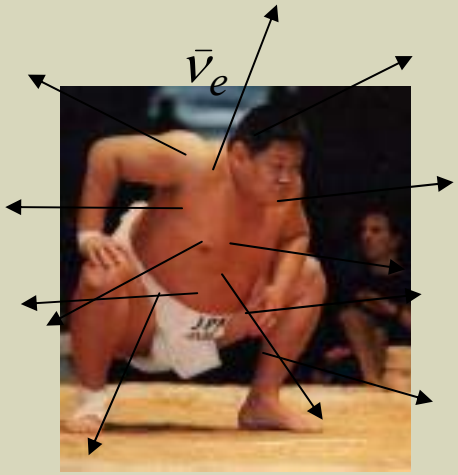
Le ^{40}K a une demi-vie de 1.3 milliards d'années :
$15 \cdot 10^{-21}$ g se désintègrent chaque seconde

$15 \cdot 10^{-21}$ g de ^{40}K radioactif = 100 atomes se désintègrent par seconde

Un homme de 200 kg émet 20 000 neutrinos chaque seconde



Une femme de 50 kg, environ 5 000



Les neutrinos de la Terre

L'énergie de la Terre : gigantesque réacteur nucléaire? Désintégration β des noyaux instables.

40 000 Gigawatts ou
20 000 centrales nucléaires

$10^7 \bar{\nu}_e / cm^2 / s$

Les neutrinos peuvent osciller :

Une autre manière
de connaître leur masse

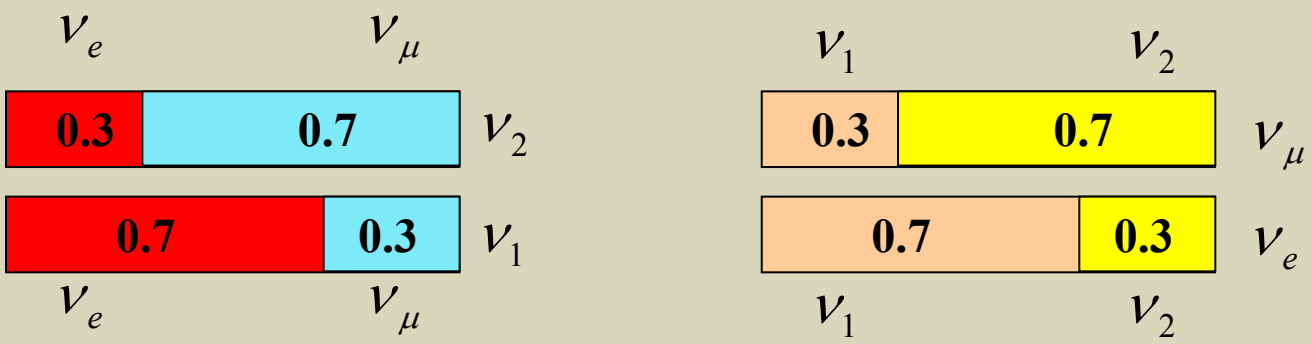
Les oscillations de neutrinos

Un autre mystère du monde de la mécanique quantique :
Un ν_e créé ici peut se transformer en ν_μ puis à nouveau en ν_e
et **osciller** entre les états ν_e et ν_μ avant d'arriver là-bas

Un neutrino peut être regardé comme
un ν_e produit dans une interaction en même temps qu'un e^+
un ν_μ produit dans une interaction en même temps qu'un μ^+

Un neutrino peut être regardé comme
un ν_1 de masse m_1
un ν_2 de masse m_2

Les paires d'états $\{\nu_e\ \nu_\mu\}$ et $\{\nu_1\ \nu_2\}$ ne coïncident pas

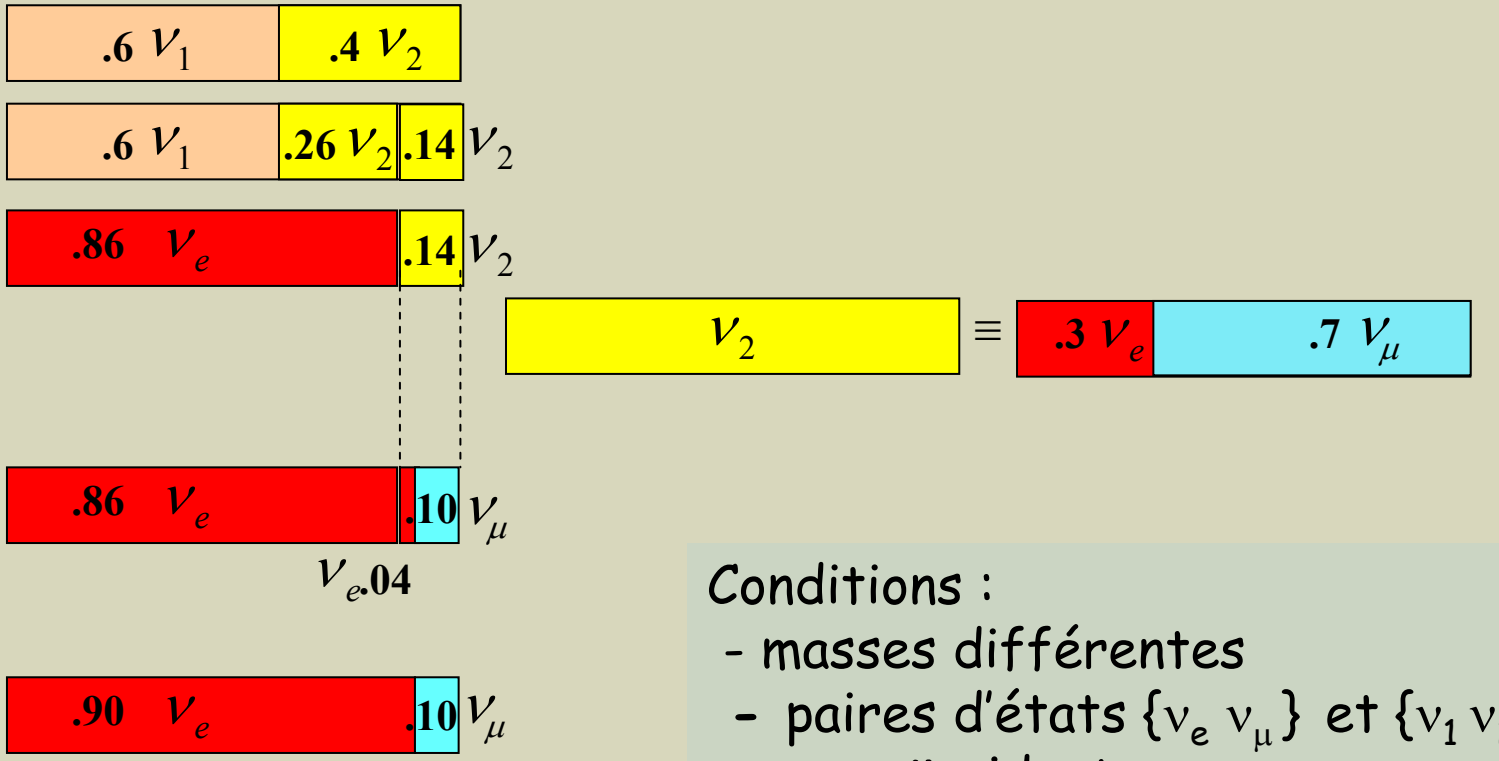


Un ν_e $\equiv$ $.7\ \nu_1$ $.3\ \nu_2$

est créé avec un *e+* dans une interaction.

Les deux composantes de la masse se propagent avec des vitesses différentes. Ceci génère un déphasages entre ces deux composantes.

Après une distance *L*, la composition est devenue, par exemple,



Conditions :
- masses différentes
- paires d'états $\{\nu_e\ \nu_\mu\}$ et $\{\nu_1\ \nu_2\}$ ne coïncident pas

Les oscillations de neutrinos

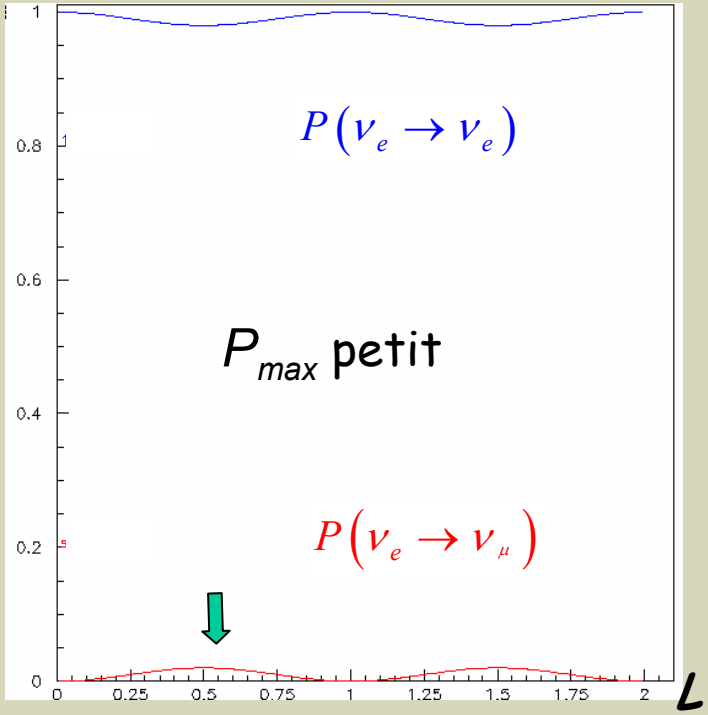
$$P\left(\nu_e \rightarrow \nu_\mu\right) = P_{max}\, sin^2 \frac{\Delta m^2\, L}{4E}$$

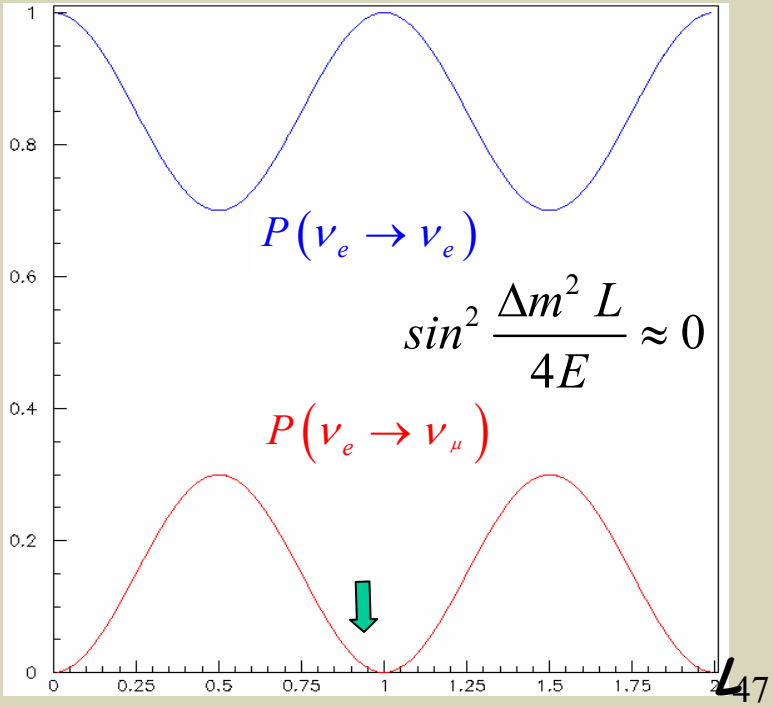
$L =$ distance parcourue par le neutrino

$E =$ énergie du neutrino

$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

Expériences très difficiles
Aucune prédiction théoriques de P_{max} et de Δm^2





Le rayonnement cosmique
et
les neutrinos atmosphériques

Le rayonnement cosmique

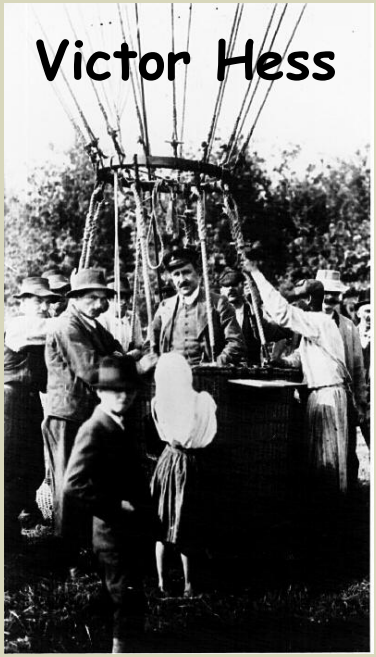
Origine:

- Soleil
- Tous les cataclysmes astrophysiques de notre Galaxie (Supernovae)
- Tous les cataclysmes astrophysiques de l'Univers
- Les reliquats du Big-Bang

Composition: semblable à celle de l'Univers

principalement des noyaux d'hydrogène et d'hélium

Flux dans la haute atmosphère: 10 000 / m2 / s



Les derniers filtres:

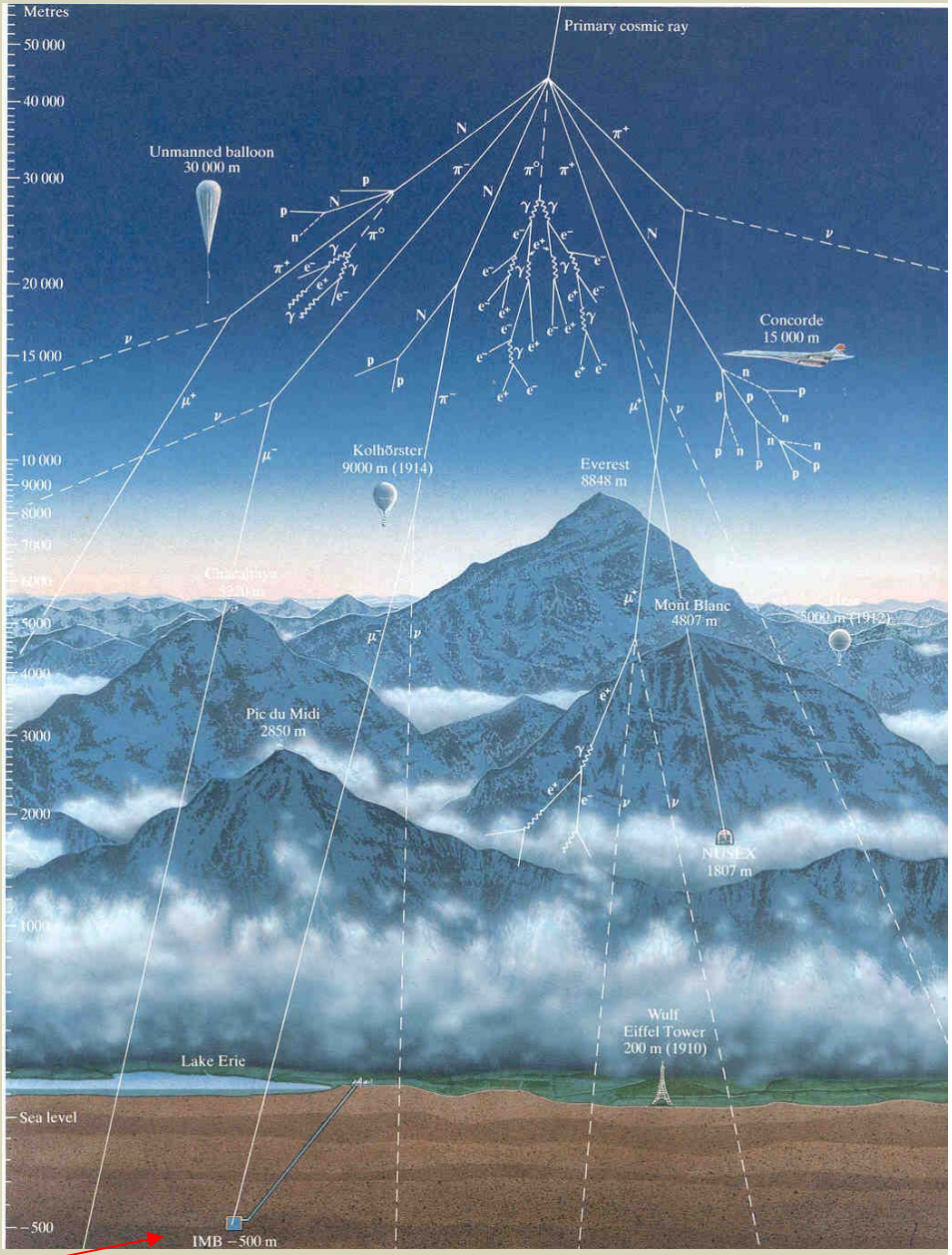
L'atmosphère arrête presque tout mais laisse passer ce qui n'interagit pas fortement:

- électrons : 1 / (m^2 s),
- muons : 200 / (m^2 s),
- neutrinos : 10 000 / (m^2 s)

La Terre arrête

- électrons sur quelques mètres
- muons sur 1 ou 2 km

La Terre n'arrête (quasiment) pas les neutrinos !!!



détecteur à neutrinos

Les détecteurs à neutrinos atmosphériques:
massifs : avoir quelques interactions
souterrains : blindage cosmique

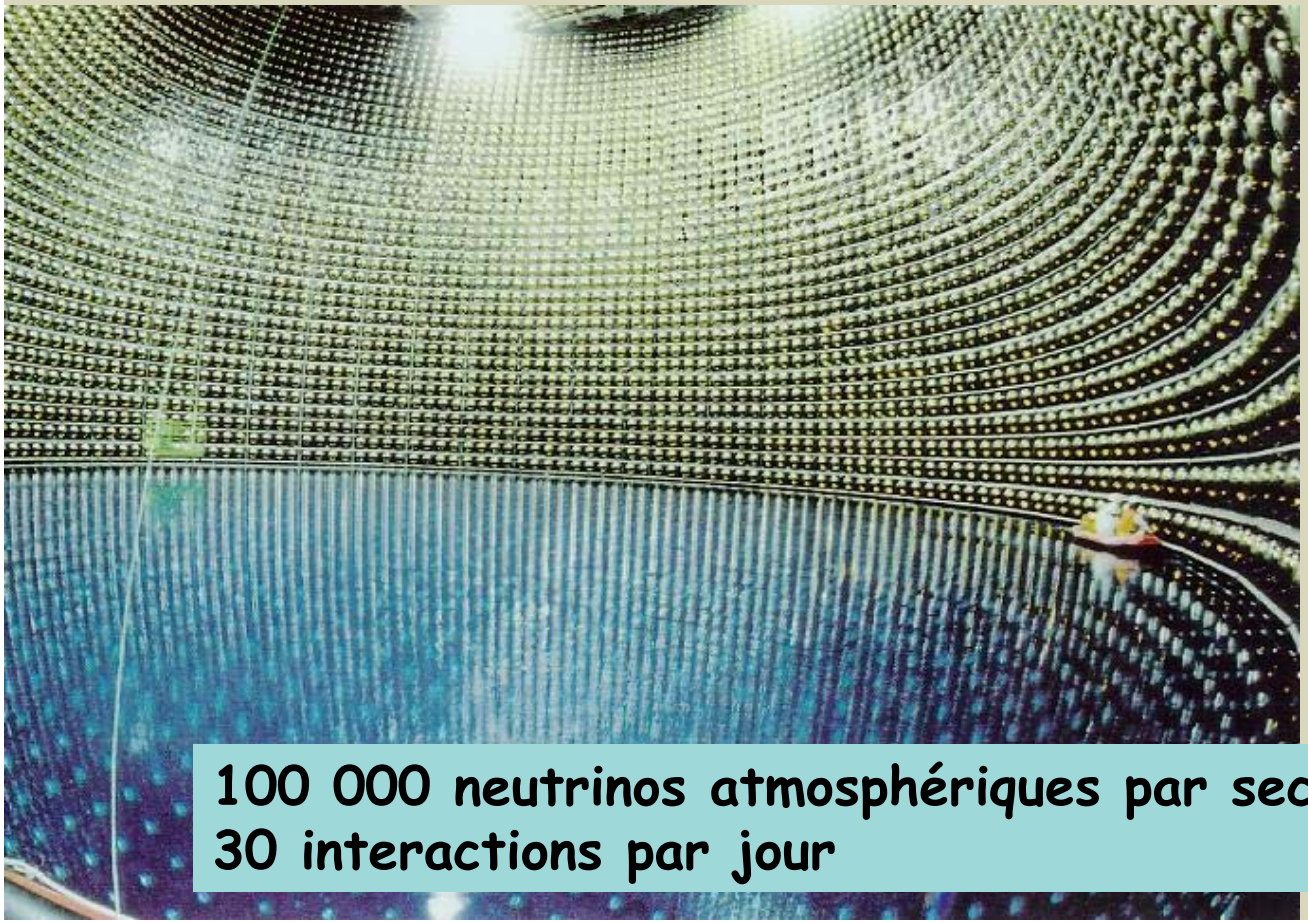
sous les Alpes (Mont Blanc, du Frejus), les Abruzzes (Gran Sasso), le Caucase (Baksan), au fond des mines de Soudan, Sudbury, Kamioka

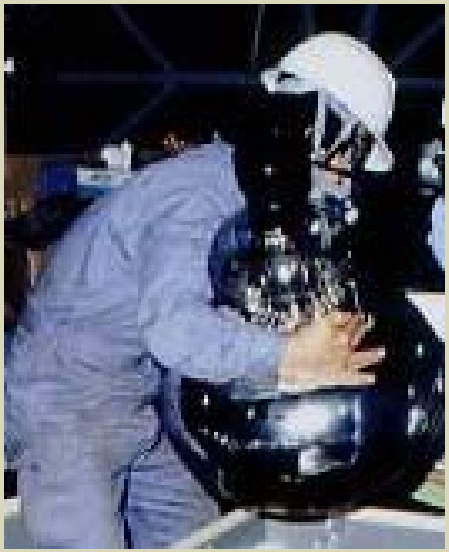
MACRO

53 000 tonnes
sous le Gran Sasso

Super-Kamiokande : détecteur à neutrinos atmosphériques

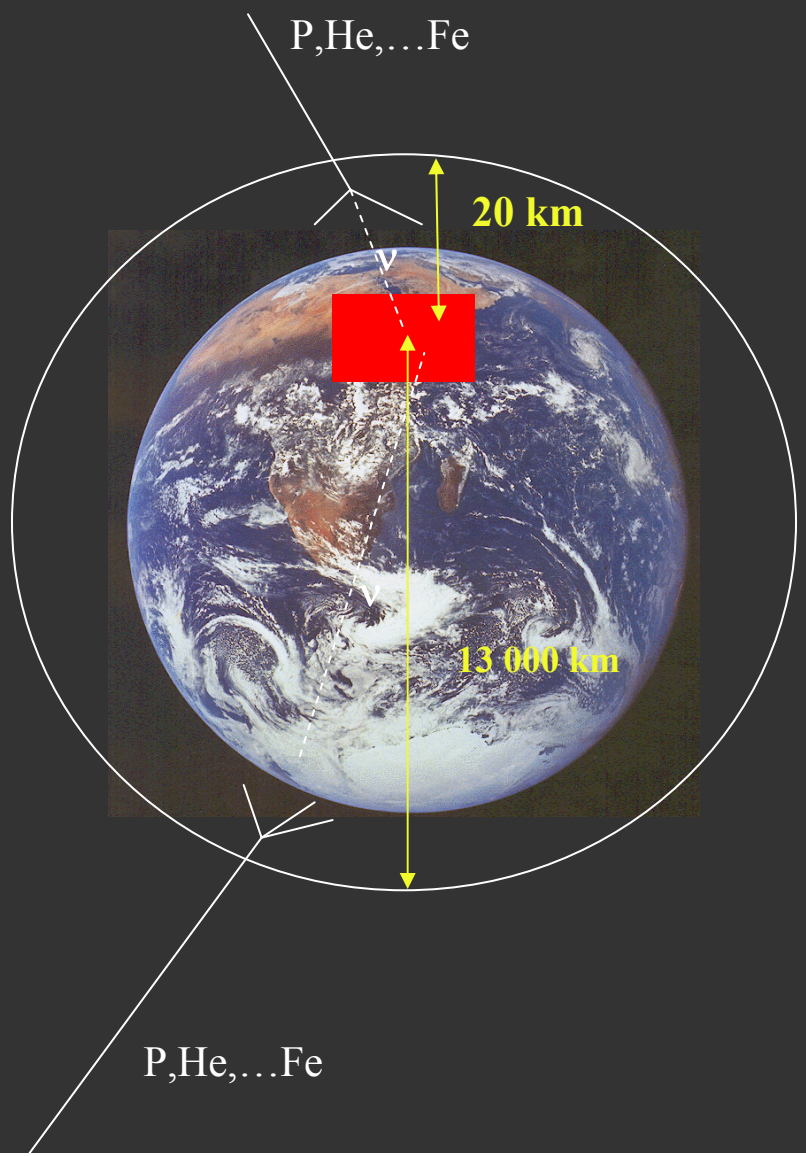
- **50 000 tonnes (50 000 m^3) d'eau** hautement purifiée (transparente)
- **sous 1000 m de roche** dans la mine Mozumi, Kamioka, Japon : blindage cosmique
- vue par **11200 yeux électroniques** (tubes photomultiplicateurs) :
  détecter la lumière ténue émise par les particules créées dans l'interaction d'un ν





100 000 neutrinos atmosphériques par seconde
30 interactions par jour

Les neutrinos viennent de partout



Résultats unanimes

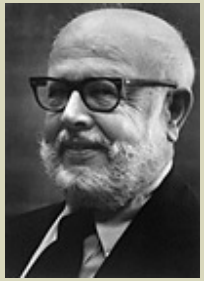
- nombre observé de ν_e = nombre attendu
- nombre observé de ν_μ venant du haut (20 km) = nombre attendu
- nombre observé de ν_μ venant du bas (13 000 km) = 1/2 nombre attendu

Interprétation admise:

Les ν_μ venant du bas ont eu le temps d 'osciller en ν_τ que le détecteur ne voit pas

Les neutrinos du Soleil

Comment fonctionne le soleil?



- Hans Bethe (années 1930) William Fowler (années 1950)

Le soleil est un plasma de noyaux d'hydrogène et d'hélium et d'électrons

Le cœur du soleil est une centrale nucléaire :
fusion de l'hydrogène en hélium

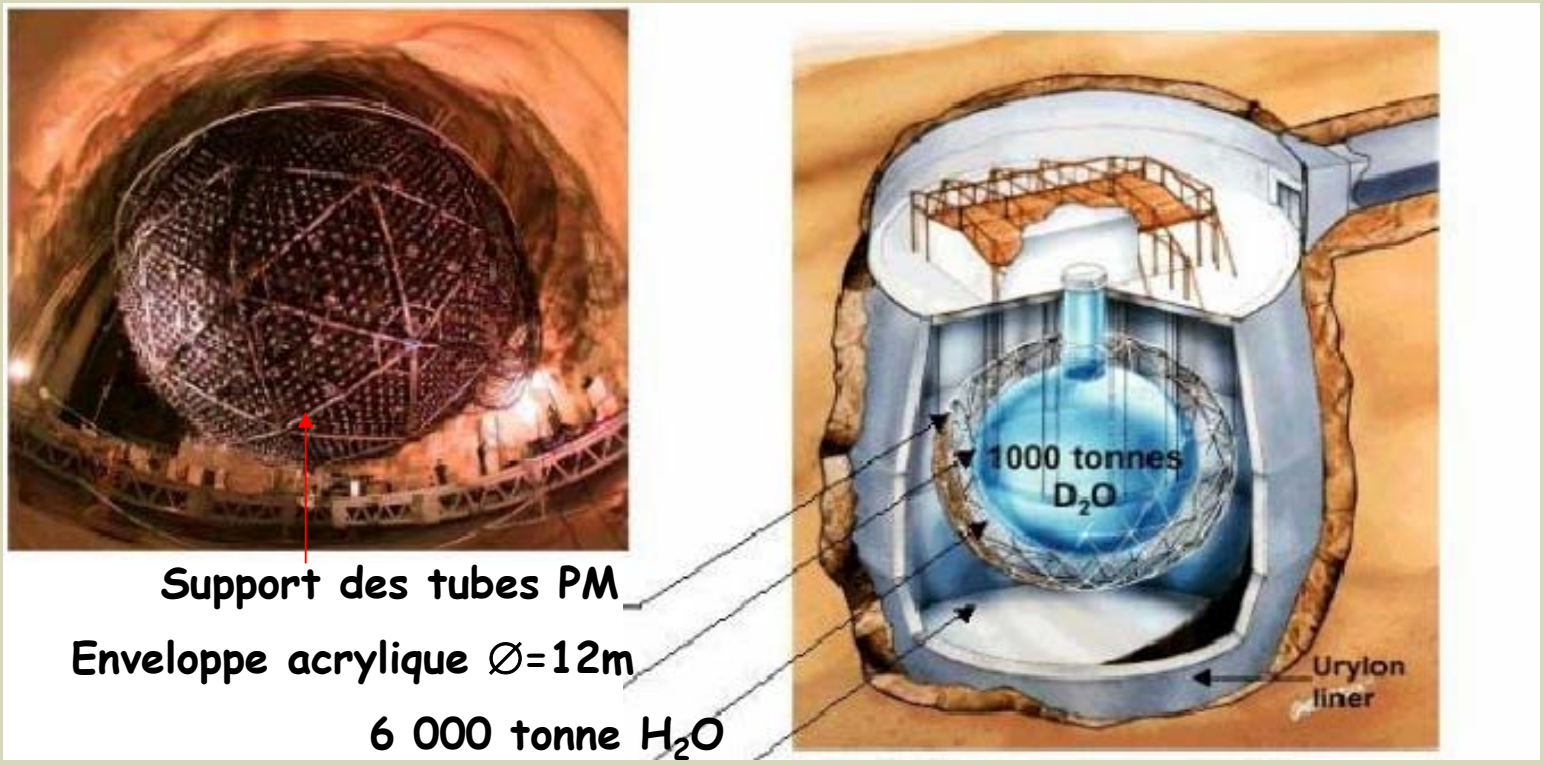
$$4\ {}^{1}H^{+} \rightarrow {}^{4}He^{++} + 2\ e^{+} + 2\ \nu_{e} + \text{Energie (rayons } \gamma)$$

Température: 10 millions de degrés

Nos centrales nucléaires : fission de noyaux lourds en noyaux plus légers.

SNO : Détecteur à neutrinos solaires

- **1 000 tonnes (1 000 m^3) d'eau lourde (D_2O)** hautement purifiée
- **sous 1300 m de roche** dans la mine de Creighton, Sudbury, Canada : blindage cosmique
- vue par **9500 yeux électroniques** (tubes photomultiplicateurs) capables de détecter la lumière ténue émise par les particules créées dans l'interaction d'un ν_e

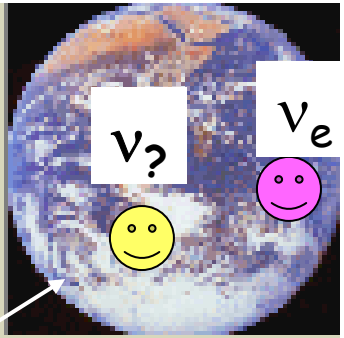


Les neutrinos du soleil

Flux de ν_e mesuré depuis 30 ans

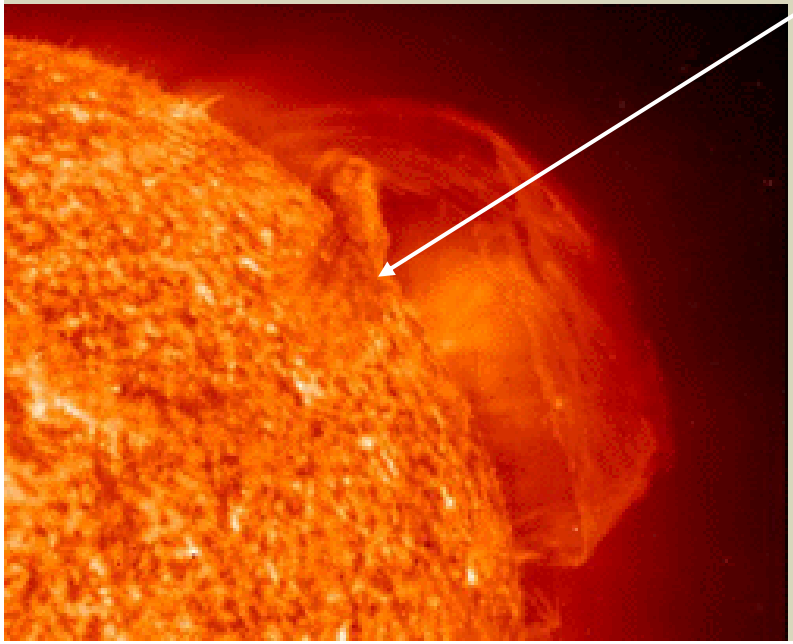
Résultat unanime de 5 expériences:

50% des neutrinos ν_e manquent à l'appel



150 000 000 km
500 s

65 milliards /cm²/s

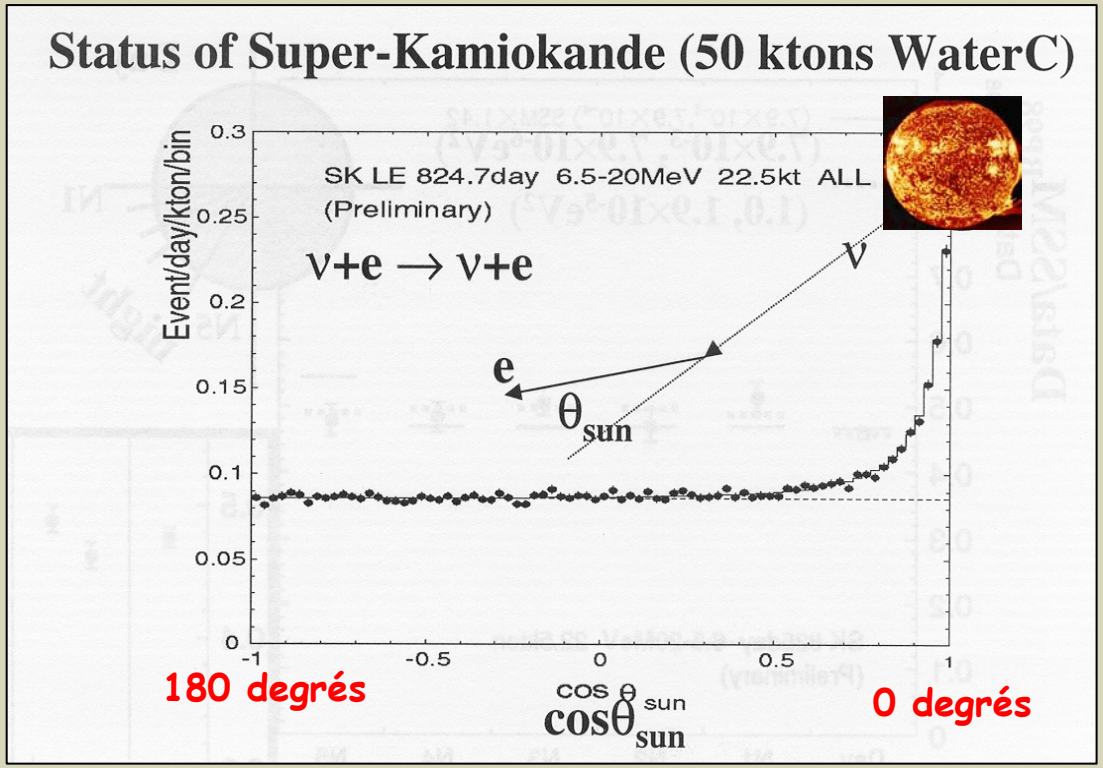


Flux total mesuré depuis 2 ans :

Nombre total de ν : (ν_e ν_μ ν_τ confondus)
= Nombre de ν_e attendu

Les ν_e venant du soleil ont eu le temps d'osciller

La preuve par les neutrinos
que le moteur solaire est bien un moteur à fusion nucléaire



Angle entre les directions du Soleil
et de l'électron émis dans l'interaction des neutrinos solaires

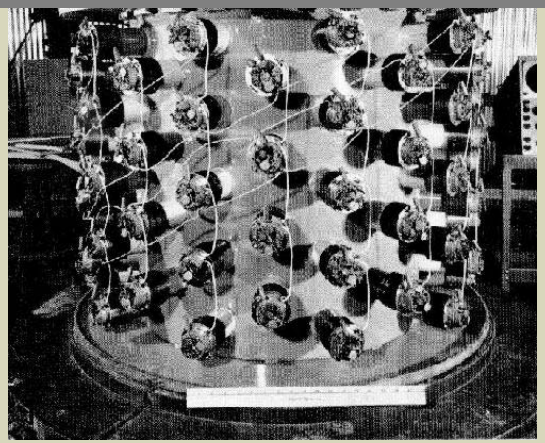
Les neutrinos faits par les hommes:

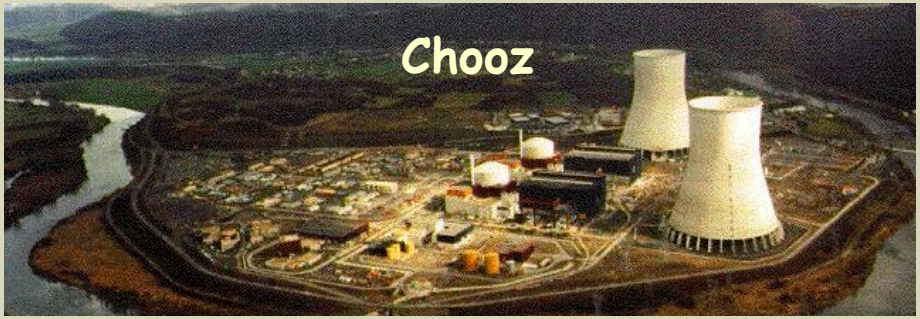
Les réacteurs nucléaires

Les neutrinos des réacteurs

Un réacteur de 1 GigaWatt produit environ 6×10^{20} neutrinos (antineutrino - e) par seconde au cours de 10^{20} chaînes de fission

Savanah River: Reines et Cowan découvrent le neutrino





puis Bugey(F), Chooz(F), Gösgen(D), Rovno(UKR), Krasnoïarsk(RUS), Palo Verde (USA)

Avantage : gratuit !!!

Inconvénients : domaine d'énergie très limité,
difficulté de monter des expériences près d'un réacteur.

Les neutrinos faits par les hommes:

Les accélérateurs de particules

Les neutrinos des accélérateurs

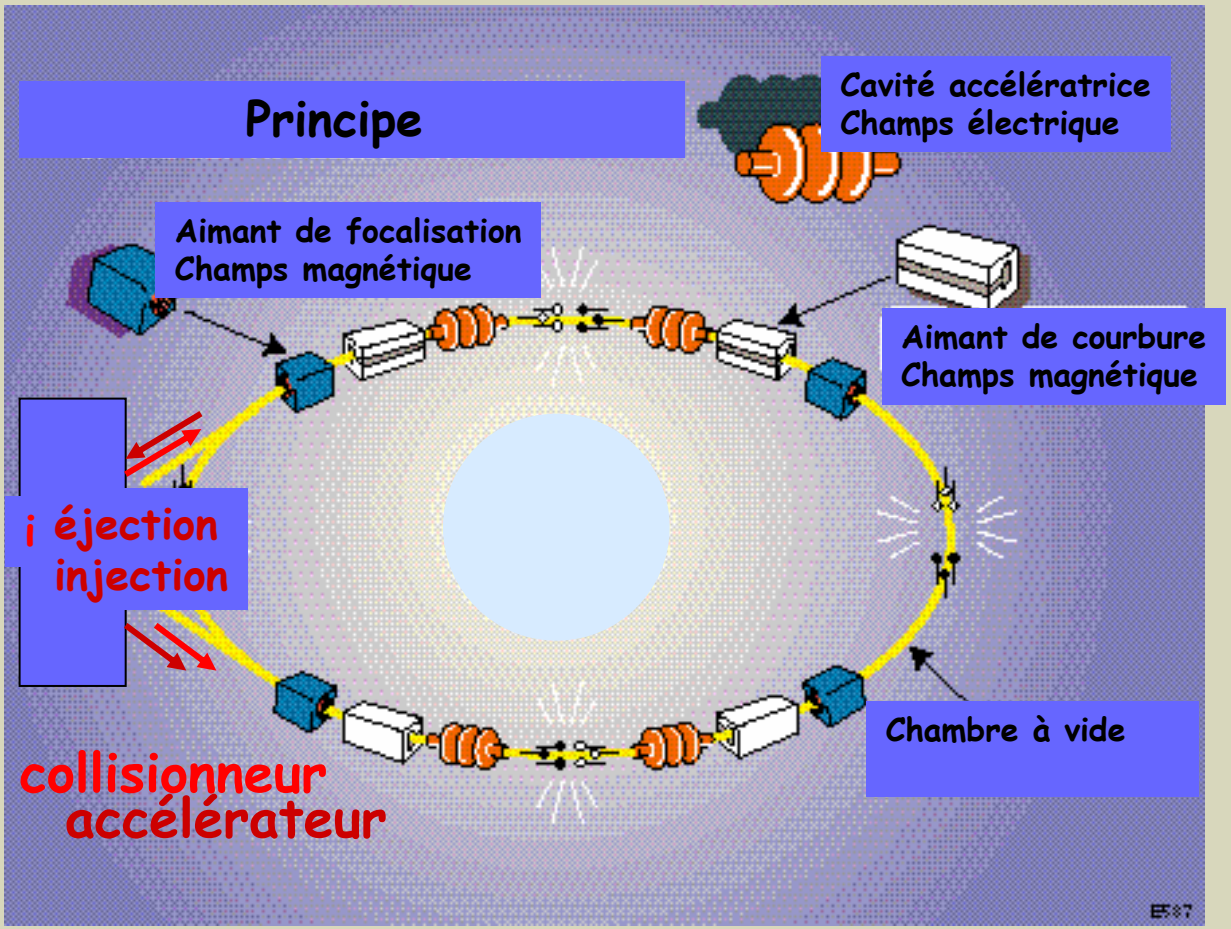
Avantages : contrôle de l'énergie
du type de neutrinos créés

Inconvénients : cher même si l'accélérateur existe
- à la construction: faisceaux complexes
- à l'exploitation, pour l'éternelle raison:
  des milliers de milliards de neutrinos pour une interaction

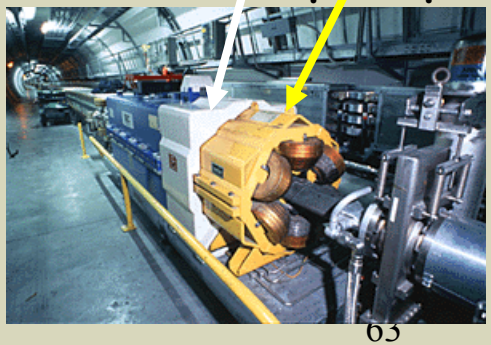
Programmes continus de physique du neutrino:

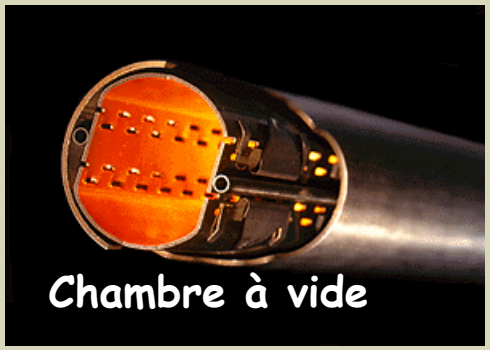
- Au CERN et au laboratoire FERMI, Chicago
  depuis la fin des années 1960.
- Au KEK, Tsukuba (Jp), à Los Alamos (USA), au Laboratoire Rutherford (GB) depuis plus récemment

Accélérateur circulaire et Collisionneur

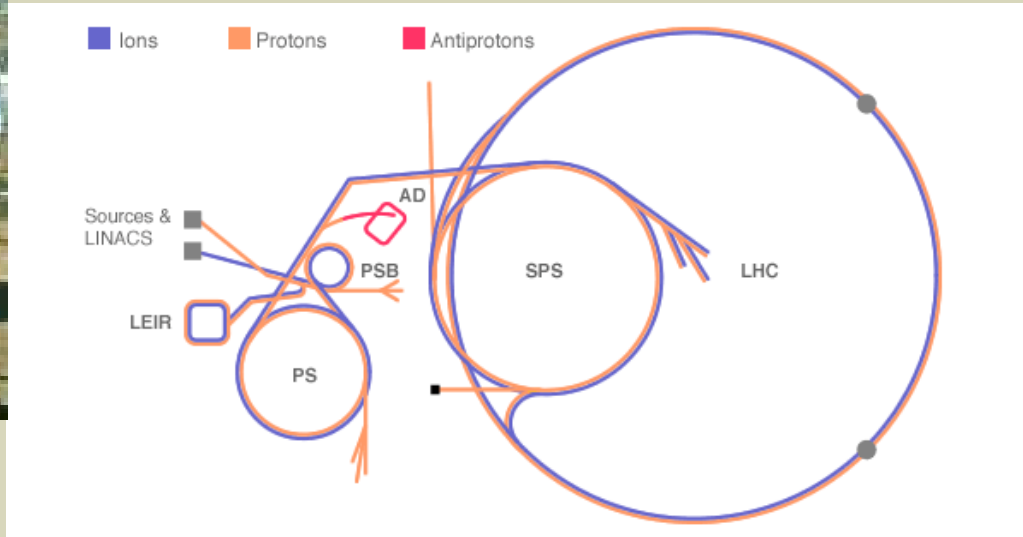


Aimants:
Courbure : dipôle
Focalisation : quadripôle



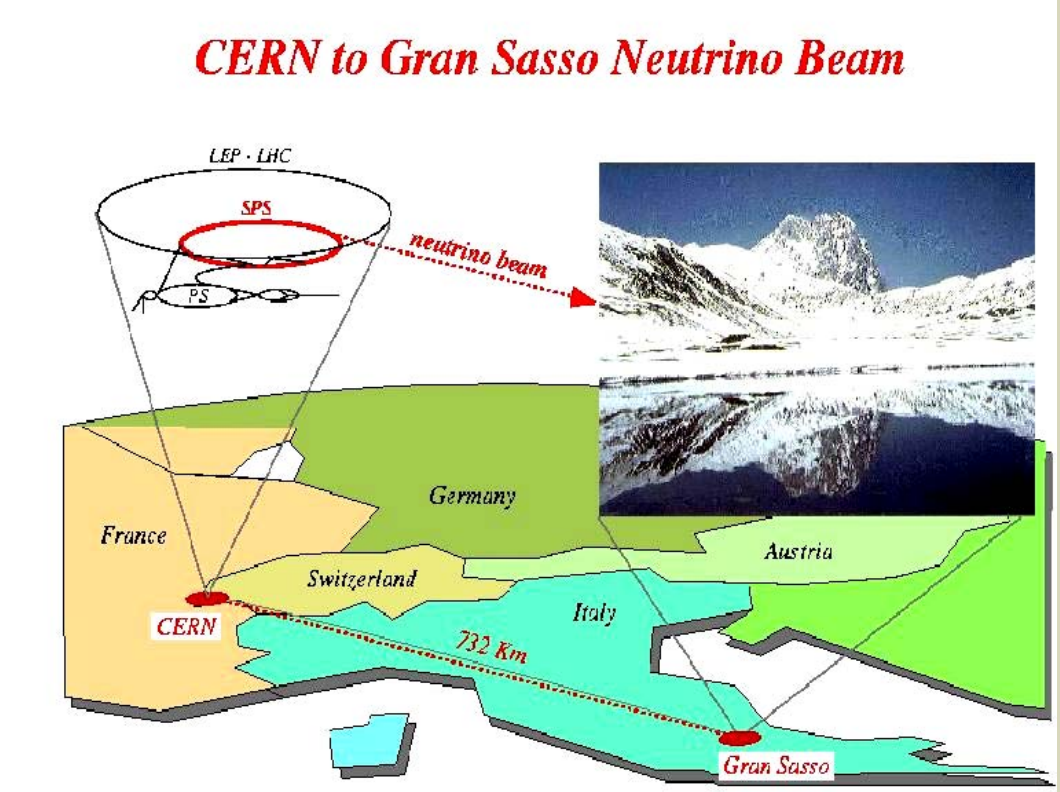


Accélérateurs du CERN à Genève



L'expérience OPERA

L'expérience OPERA : vérifier de manière contrôlée les résultats des neutrinos atmosphériques $\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$



Faisceau de neutrinos:
CERN, Genève

Détecteur:
sous le Gran Sasso, Abruzzes

Distance Genève - Gran Sasso:
730 km
0,002 secondes

Permettre aux oscillations de se développer

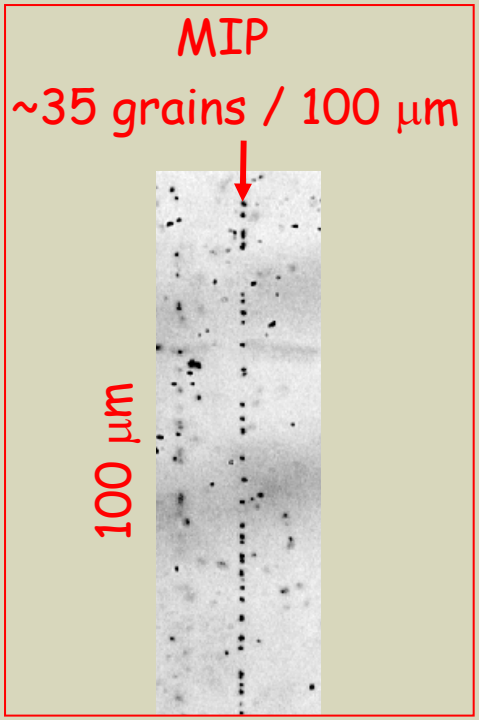
2000 km serait mieux

La cible d'OPERA

235 000 briques de plomb de 8,3 kg instrumentée par du film photographique.

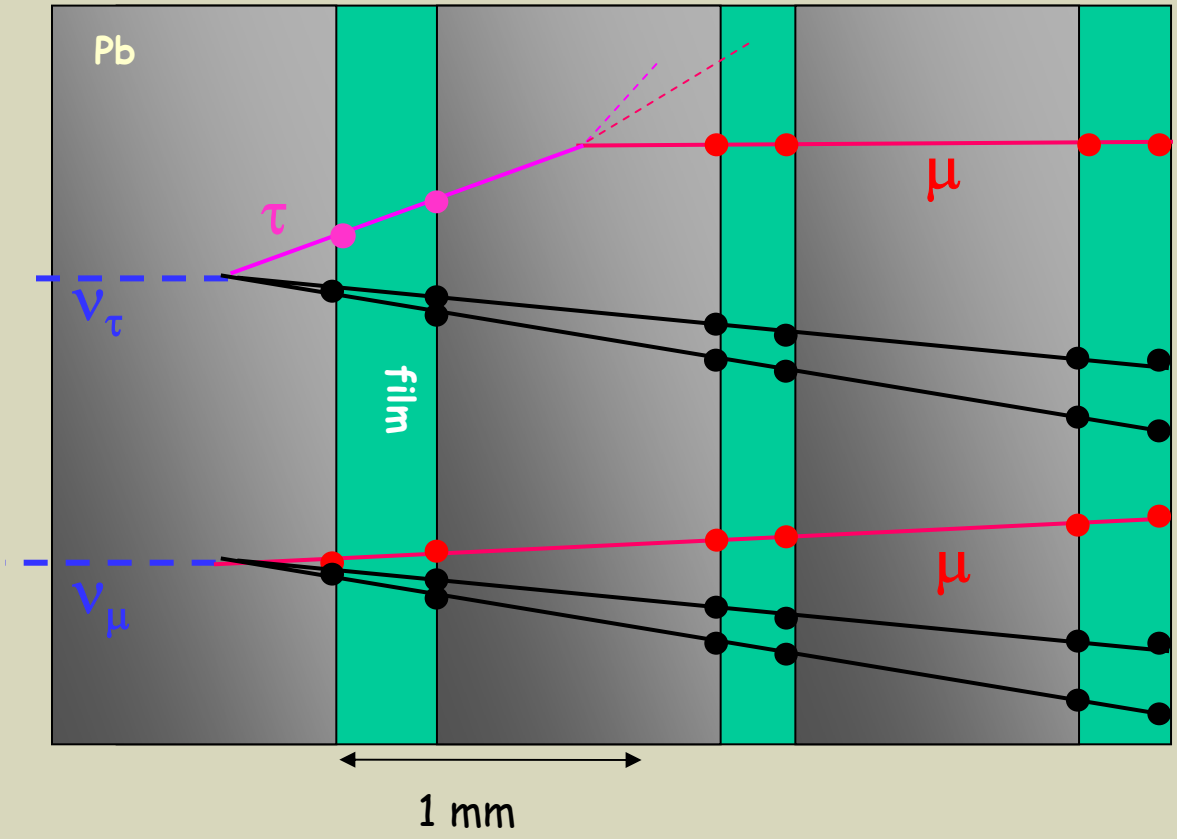
Poids Total : 1800 tonnes

17 hectares de film photographique

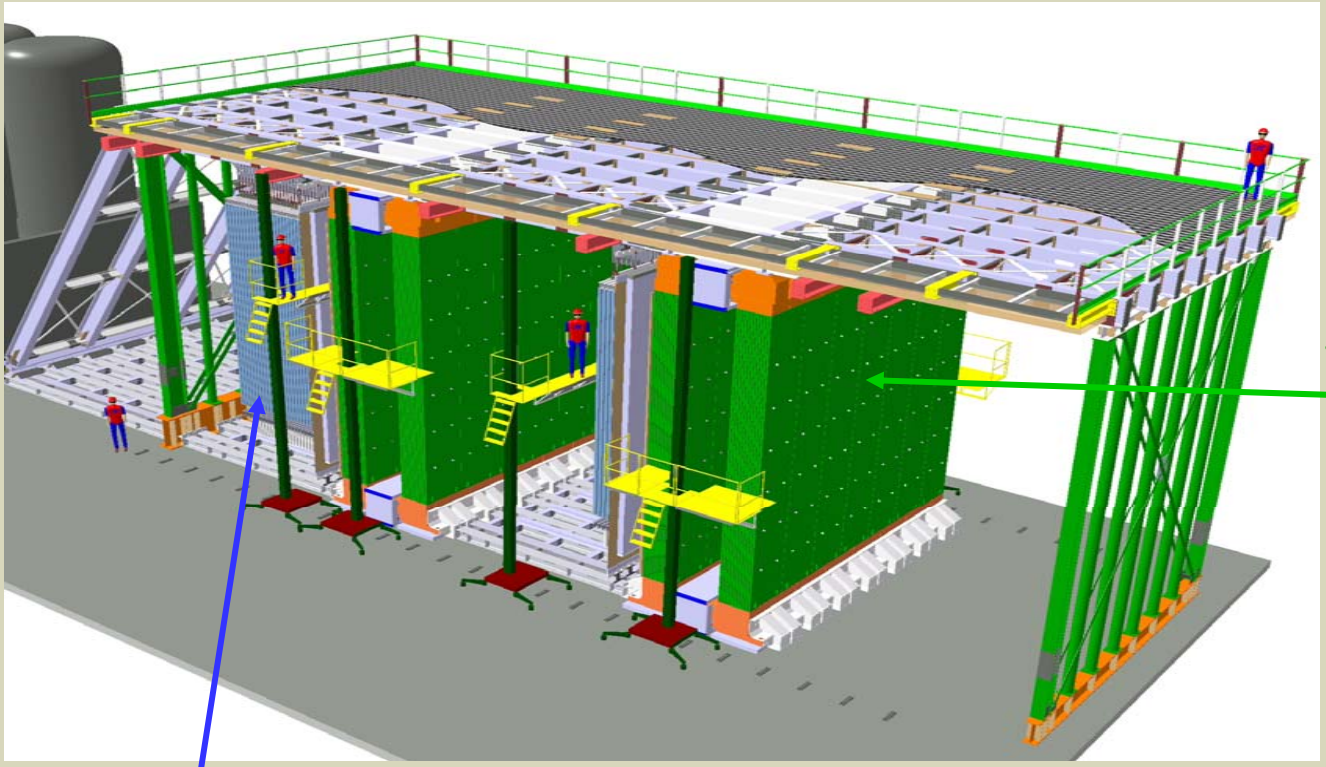


Pourquoi du Plomb ? Cible massive pour compenser la probabilité extrêmement faible d'interaction des neutrinos.

Pourquoi du film photographique ? Toute la différence entre une interaction de ν_μ et une interaction de ν_τ se passe sur 1 mm.



Le détecteur OPERA

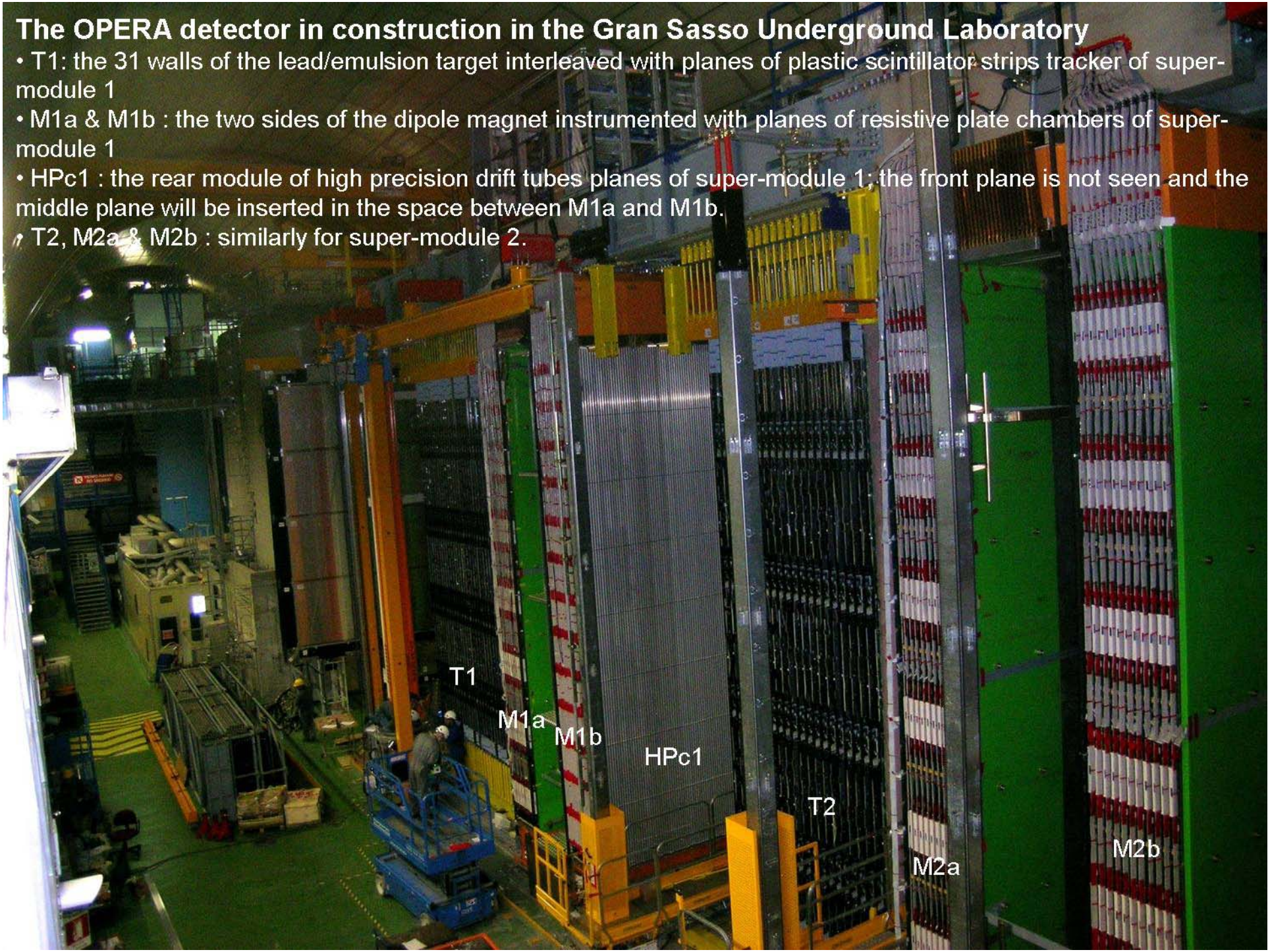


Aimants dipolaires +
Trajectographe à
haute résolution

Murs de plomb instrumentés
Émulsion photographique +
Trajectographe à basse résolution (TT)

The OPERA detector in construction in the Gran Sasso Underground Laboratory

- T1: the 31 walls of the lead/emulsion target interleaved with planes of plastic scintillator strips tracker of super-module 1
- M1a & M1b : the two sides of the dipole magnet instrumented with planes of resistive plate chambers of super-module 1
- HPc1 : the rear module of high precision drift tubes planes of super-module 1; the front plane is not seen and the middle plane will be inserted in the space between M1a and M1b.
- T2, M2a & M2b : similarly for super-module 2.



Posters TT OPERA

Adobe Acrobat 7.0 Document

Principe de fonctionnement

Adobe Acrobat 7.0 Document

Prototype mécanique

Adobe Acrobat 7.0 Document

Évolution du collage des fibres

Adobe Acrobat 7.0 Document

Évolution dans la fabrication des barreaux

Adobe Acrobat 7.0 Document

Évolution
du système d'injection de lumière
de polissage de la fenêtre optique
de l'acquisition de données

Adobe Acrobat 7.0 Document

Évolution
des bouchons
du collage des peaux

Adobe Acrobat 7.0 Document

Assemblage des modules en plans

Adobe Acrobat 7.0 Document

Insertion des traceurs dans le détecteur

Adobe Acrobat 7.0 Document

Best of

OPERA : un projet de taille moyenne

•150 physiciens, 30 laboratoires d'Allemagne, Belgique, Chine, Corée, Croatie, France, Israël, Italie, Japon, Russie, Suisse et Turquie

La physique des particules: une longue patience

1997 : premières contributions
2000 : proposition d'expérience, début de la recherche de fonds
2001 : expérience approuvée par le CERN
début de la construction du faisceau
2002 : début de la construction des détecteurs dans les laboratoires
2003 : début de l 'installation au Gran Sasso
mi-2006 : la construction du détecteur est suffisamment avancée pour que la physique puisse commencer
mi-2007 : fin de la construction
2011 : fin (provisoire?) de la prise de données de l'expérience
2014?? : fin de l'analyse

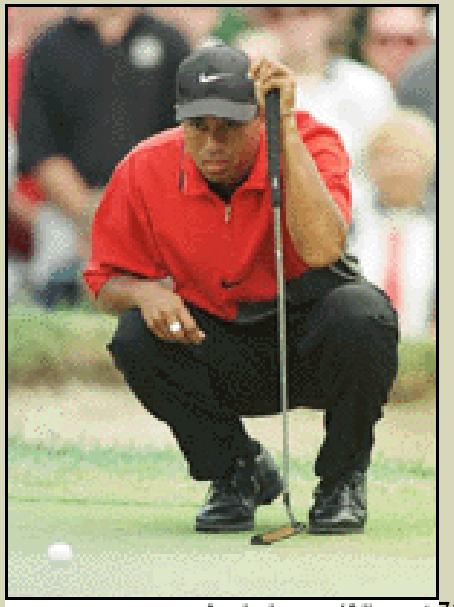
Coût :

faisceau : 50 millions €

détecteur: 55 millions €

dont émulsion nucléaire : 25 millions €

C 'est cher ?



Andy Lyons/Allsport

Notre récompense, après 15 ans de dur labeur,
Si nous avons bien travaillé

ET

Si la physique est ce que nous croyons qu'elle est:

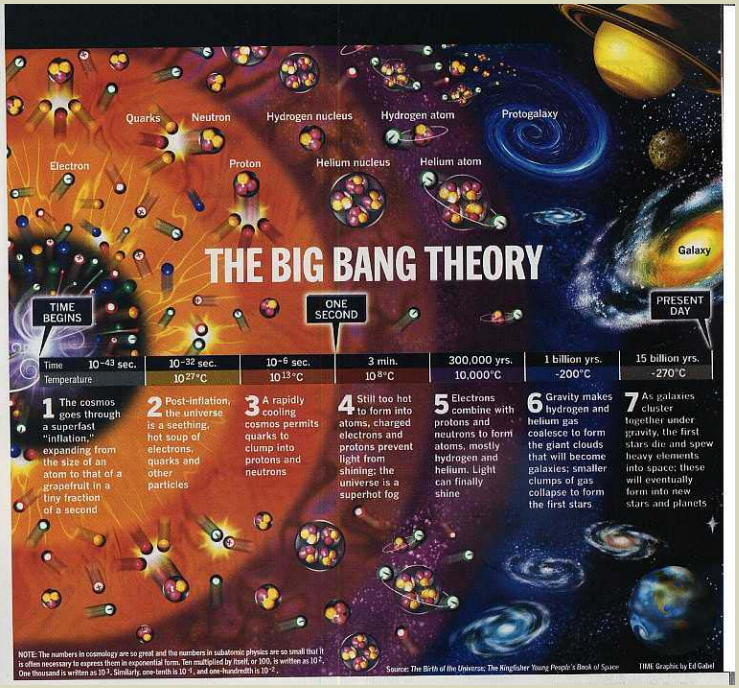
Quelques dizaines de ν_μ
ayant oscillé en ν_τ
et interagi dans le détecteur OPERA.

et

A quoi ça sert ?

Physique des Particules, Astrophysique, Cosmologie :
Recherche fondamentale sur le plan de la connaissance

Comprendre l'Univers



Big-Bang:
Création de Espace–Temps–Matière-Energie

après 14 milliards d'années

Avatar?
Inévitable?
Déterminé?

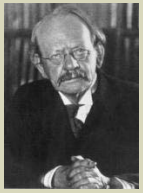
à la fin du temps ???

Argent bien investi !!

Histoire de la physique : exemples parmi une myriade

• Michael Faraday (1791-1867), à un député, à propos de ses travaux sur les effets magnétiques de l'électricité : "Je ne sais à quoi serviront mes recherches, mais un jour, le gouvernement britannique pourra lever des impôts dessus"

• Heinrich Herz vers 1890 poursuit les travaux théoriques de Maxwell sur l'électromagnétique : communication par voie hertzienne.



• Joseph John Thomson et Hendrik Lorentz, fin du XIX siècle, veulent comprendre la nature du courant électrique et découvrent l'électron.

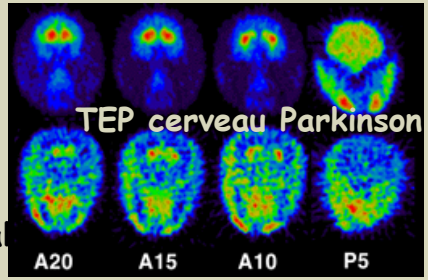
• 1930 : premiers ordinateurs pour besoins en calculs des théoriciens de la physique nucléaire (longtemps avant Hiroshima et Savannah River)

• William Shockley, John Bardeen et Walter Bratain, théoriciens de la physique quantique des solides, en 1950 : effet transistor.

Retombées directes et indirectes de la physique des particules

Sciences de la vie :

- radiothérapie, proton thérapie
- dosimétrie
- imagerie médicale: rayons X, caméras gamma, tomographie à émission de positons (TEP),
- stérilisation gamma du matériel chirurgical,
- radio-isotopes pour implants,…



Métallurgie :

- contrôle de qualité,
- processus d'usure,…

Science des matériaux :

- modifications des surfaces par implantation d'ions (avionique, prothèse,…

Microélectronique :

- fabrication des puces par lithographie

Réseau de 40 nm
(40 millionième de mm)
lithographie par rayonnement synchrotron X

Retombées directes et indirectes de la physique des particules

Archéologie, œuvres d'arts :
- datation
- analyse des pigments,…

Agroalimentaire :
- stérilisation gamma

Sécurité :
- imagerie : détection de matériaux, de personnes.
- stérilisation du courrier

Énergie, retraitement :
- transmutation des déchets de fission à longue vie des réacteurs nucléaires,
- production d'énergie nucléaire par amplification : chaîne de réaction sous-critique, déchets de fission "propres", combustible abondant (Th^{232})

Technologies de pointe :
- techniques du vide extrême,
- cryogénie,
- supra-conductivité,hauts champs magnétiques,…

where the Web was born

Début 1993 : 50 recherche physique
Fin 1993 : 500 recherche
Fin 1994 : 10 000
2 000 commerciaux

2007, Prochaine étape
GRID - calcul sur réseau :

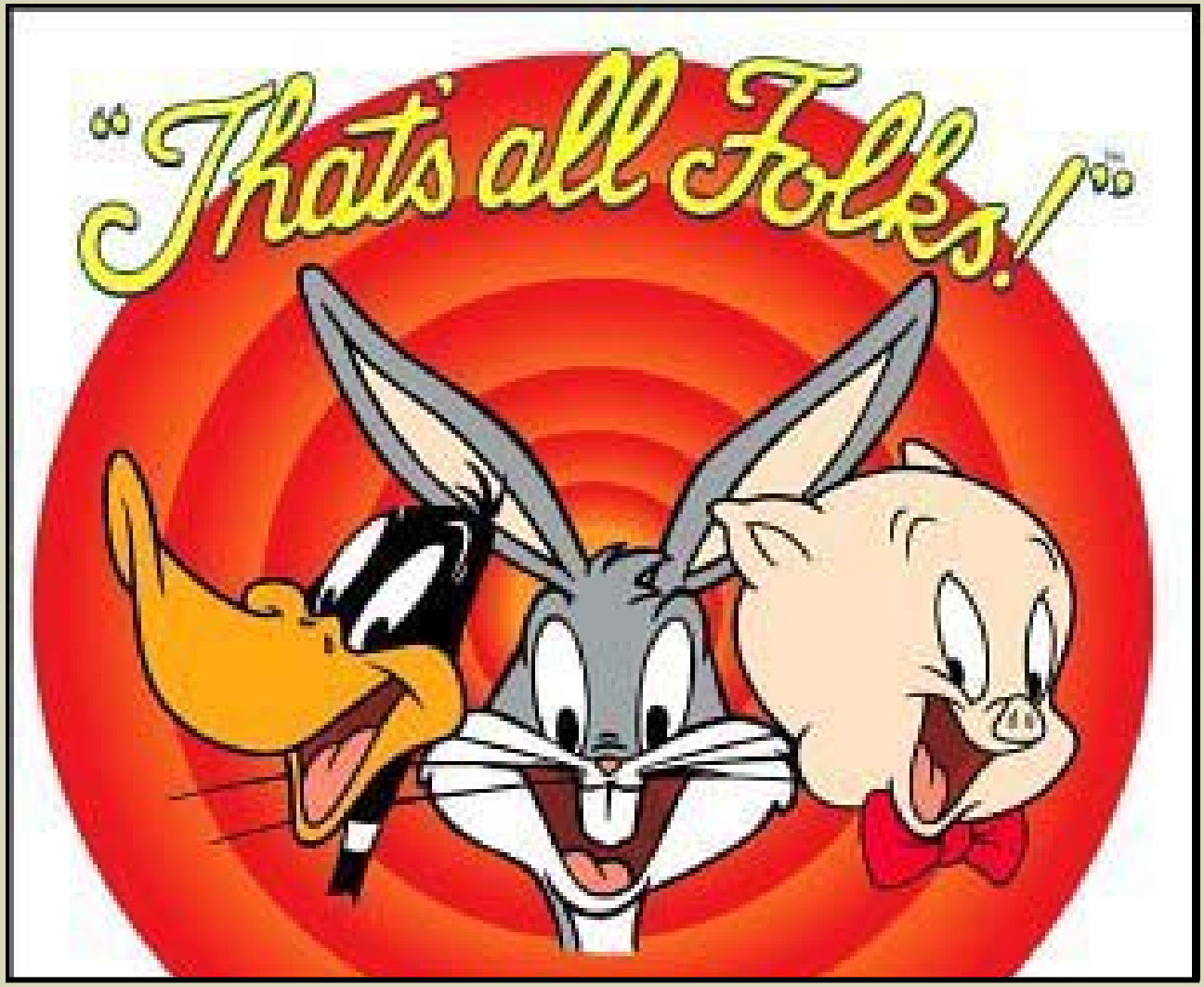
Physique des particules, Météorologie, Observation de la Terre, Bio-informatique, Génomique, Espace,…

1991: Tim Berners-Lee crée le premier serveur et premier browser, et les protocoles de base du World Wide Web: adresses URL, protocole de transmission HTTP et code HTML …

… pour les besoins des grandes collaborations internationales de physique des particules.

Le parc des accélérateurs en 2002

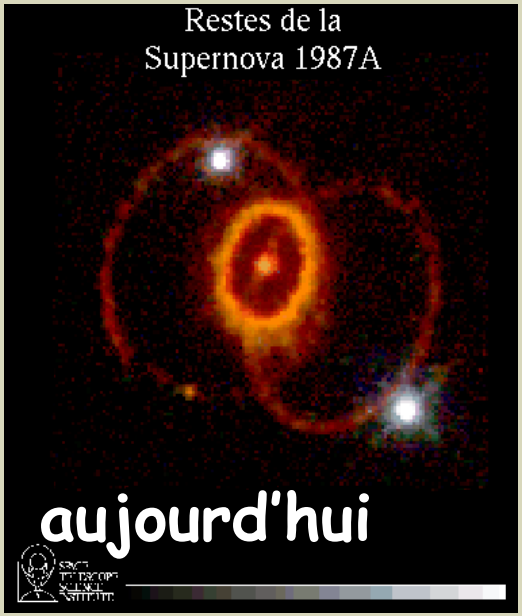
- Implantation d'ions, modifications de surfaces de matériaux : 7 000
- Industrie, métallurgie : 1 500
- Recherche non nucléaire : 1 000
- Radiothérapie : 5 000
- Production de radio-isotopes pour la médecine : 500
- Sources de radiation synchrotron pour l'industrie et la recherche :70
- Recherche en physique des particules et physique nucléaire : 110


"That's all Folks!"

Une nouvelle discipline: l'astrophysique des neutrinos

Naissance de la discipline : la Supernovae SN1987a

Explosion de Sanduleak 69202
dans le Grand Nuage de Magellan
il y a 150 000 ans (donc à 150 000 a.l.)



Supernovae II: le modèle

- les grosses étoiles (8 fois le Soleil) meurent jeunes : 100 millions d'années.
- 1 seconde : le cœur de fer s'effondre en une étoile à neutrons ou un trou noir
- 10 secondes: rebond sur le cœur, onde de choc, synthèse des noyaux lourds et expulsion des couches externes.
- Energie produite: $2 \cdot 10^{48}$ Joules (400 fois le Soleil sur une vie de Soleil)
  comment ? 99% sous forme de neutrinos !!

150 000 ans plus tard:
SN1987a: la preuve du modèle par les neutrinos

Un flash de 4 10^{43} ν / m^2 doit traverser la terre en dix secondes

Le 23 février 1987 à 7h35 T.U.
SN1987a est observé par les astronomes

Détecteur à neutrinos:

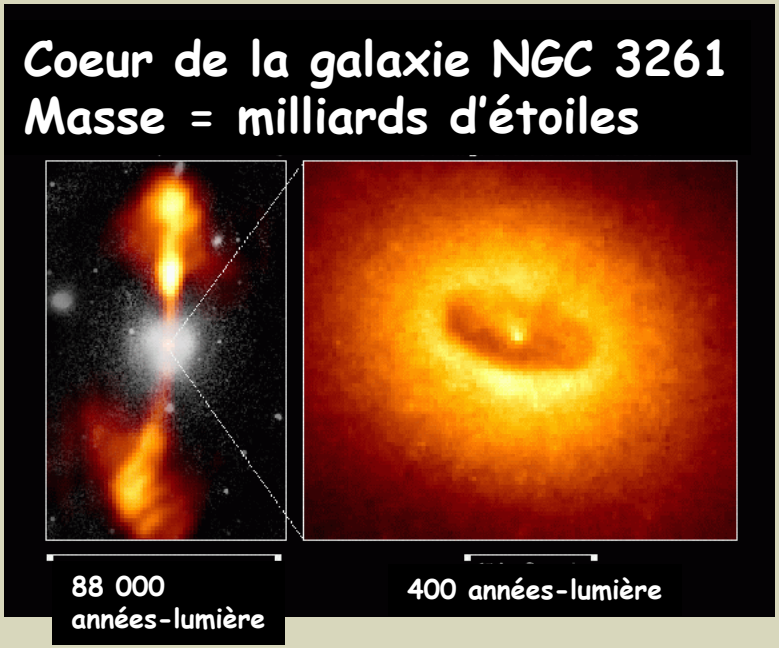
Kamiokande - mine Mozumi de Kamioka, Japon
12 interactions de neutrinos en 12.4 s

IMB - mine de Fairport Harbour, Ohio
8 interactions de neutrinos en 6.0 s

Baksan - sous le mont Baksan, Caucase
5 interactions de neutrinos en 9.1 s

en temps normal: 1 interaction de neutrino par jour

L'astrophysique des neutrinos : observer les cataclysmes astrophysiques les plus énergétiques



Messagers du Cosmos:

- la lumière (ondes radios,… visible, … rayons γ)
  l'Univers est opaque aux rayons γ les plus énergétiques
- les protons, les noyaux d'atome
  l'Univers est opaque aux protons les plus énergétiques
  les protons sont déviés dans les champs magnétiques
- les neutrinos
  vont tout droit et l'Univers leur est (quasi) transparent …
  mais les détecteurs aussi sont (quasi) transparents !!!!

Des détecteurs super-hyper-méga massifs pour l'astrophysique des neutrinos

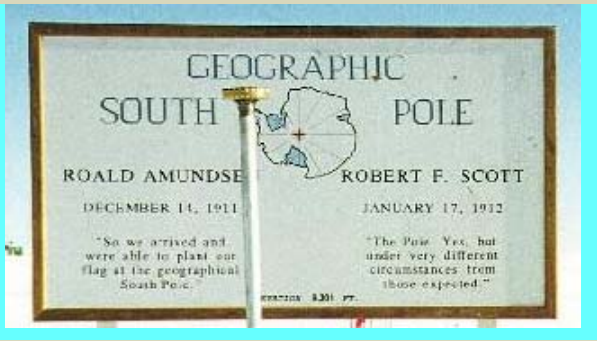
Regarder avec des yeux électroniques des volumes d'eau pure et transparente de l'ordre du km^3

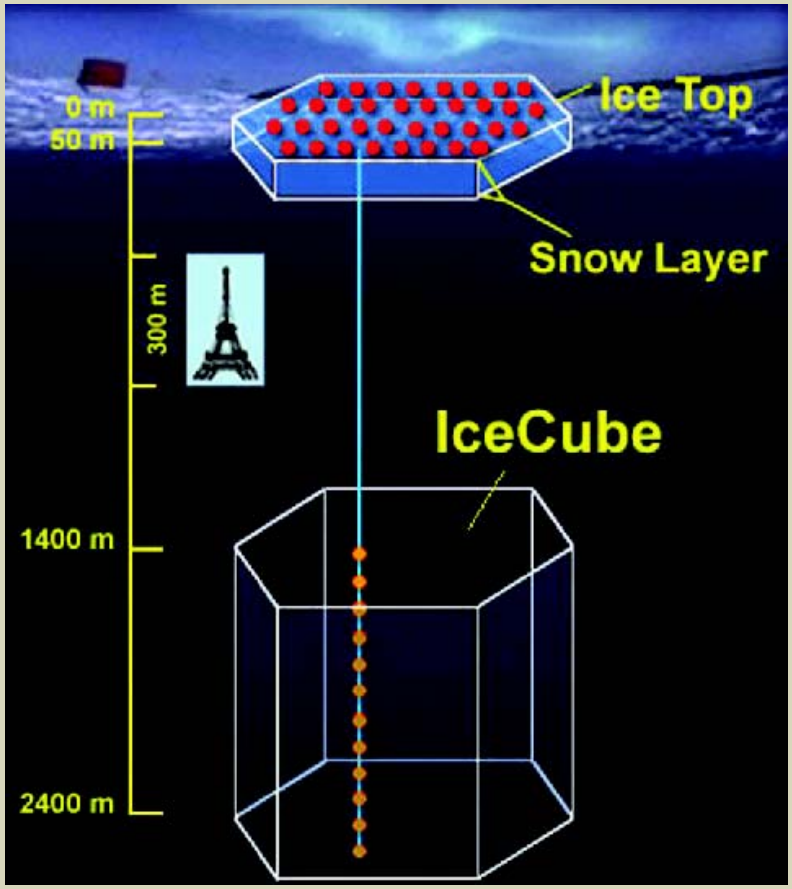
Mis à disposition par la nature

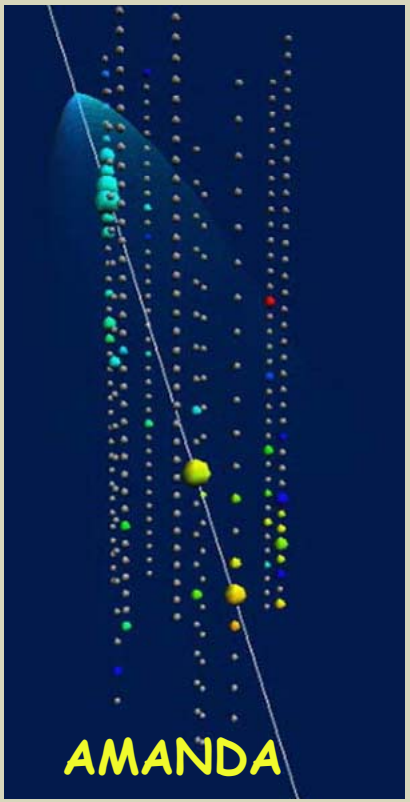
- **au fond de la Méditerranée (ANTARES, NESTOR, NEMO)**
- **au fond du lac Baïkal (BAIKAL)**
- **sous l'Antarctique (AMANDA, ICE-CUBE)**

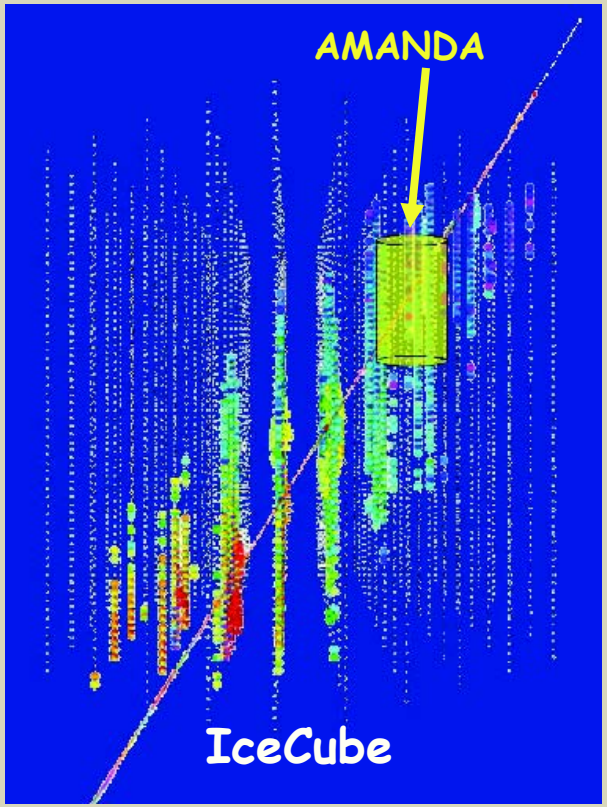
AMANDA/IceCube au

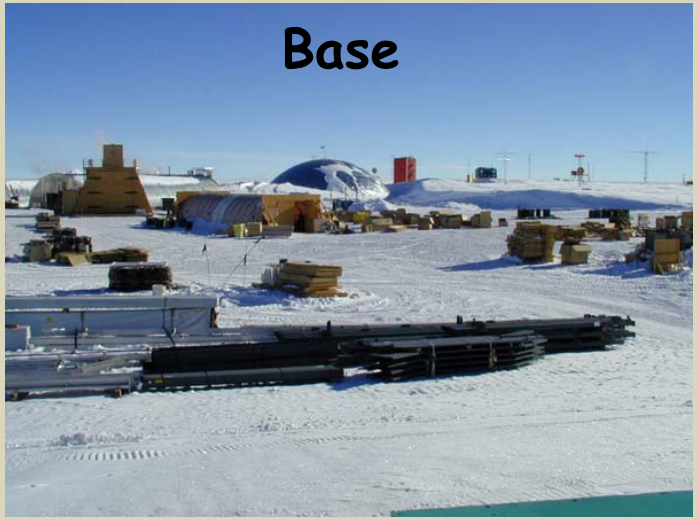
Début de l'installation : 1997
Fin : 2008.
Du travail pour 20 ans

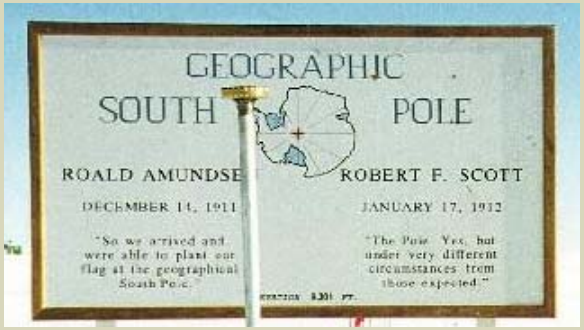






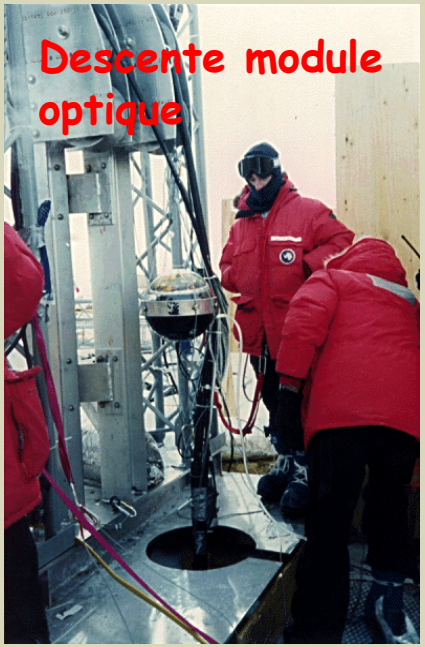



Base


GEOGRAPHIC
SOUTH POLE
ROALD AMUNDSE
ROBERT F. SCOTT
DECEMBER 14, 1911
JANUARY 17, 1912

Module optique....

Forage d'un trou
de 2400 m dans la glace


Descente module
optique

De quoi est faite la matière noire de l'Univers?

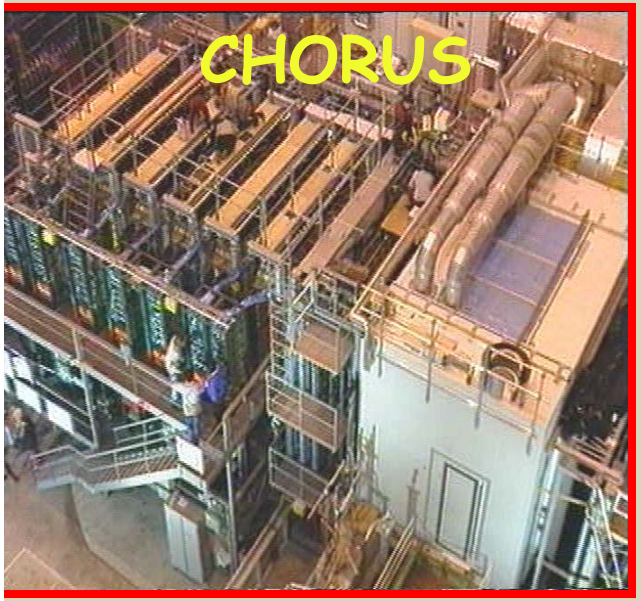
1 - Particules non encore détectées:
interagissant faiblement avec la matière.

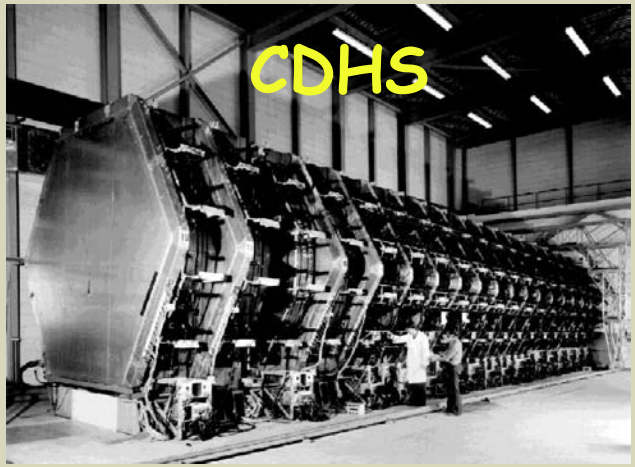
2 - Particules massives : effets gravitationnels

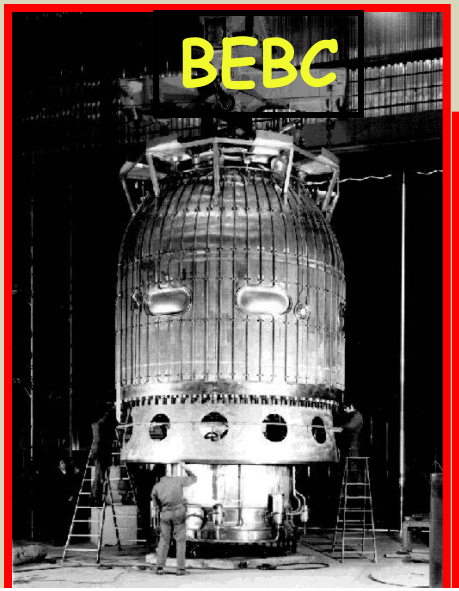
Les neutrinos existent, satisfont aux deux conditions

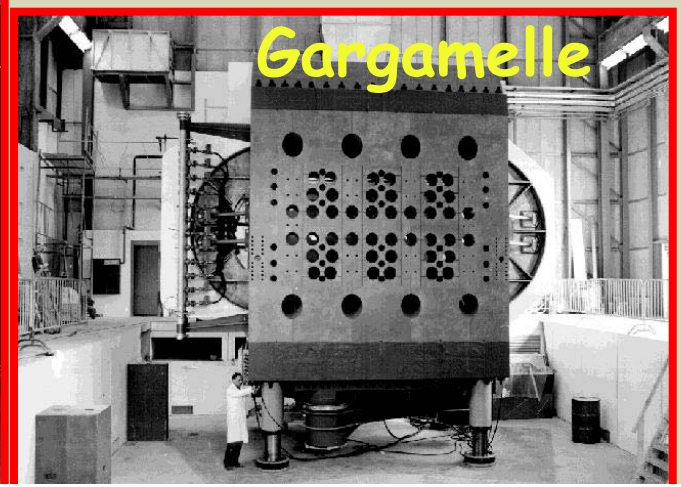
Leur masse est très petite : < 100 millionième de masse du proton
… mais pas nécessairement nulle
… et ils sont 10 milliards de fois plus nombreux dans l'Univers!

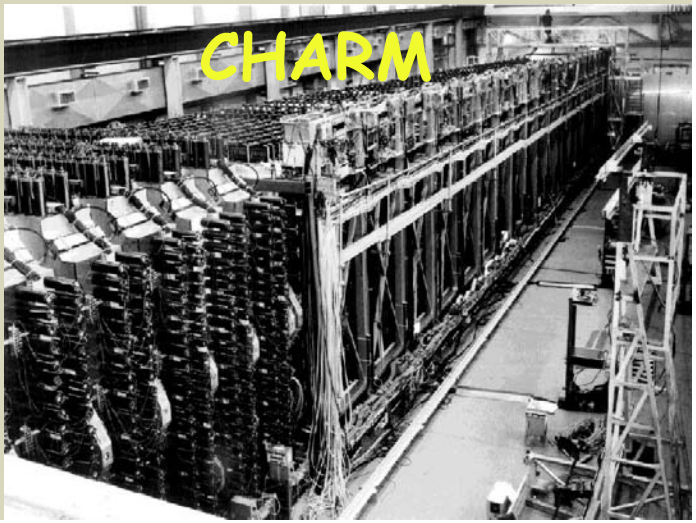
30 ans de physique du neutrino au CERN











Pourquoi et comment cette explosion? Et quoi avant?

1 2 3 4 5 6 7

Avant 1

A vérifi

Début d

6- t=1 000 000 années

7- t=14 milliards d'années : Aujourd'hui
T=-270 ºC

Nous pour essayer de comprendre
Hydrogène, Hélium, Lithium
Domaine de la physique nucléaire
énergies réalisées en laboratoire.
des planetes
Domaine de l'astrophysique

nes , des amas.
rent,
nouvelles étoiles et

rateurs.

Puissance de la centrale nucléaire solaire :

$4 \cdot 10^{17}$ *gigawatt*

20 milliards de milliards
de centrales nucléaires

C'est quoi, l'énergie du Soleil reçue sur Terre? 1 kilowatt/m^2

98% : rayonnement γ au cœur du soleil
1 million d 'années pour traverser le soleil !
énergie réduite d'un facteur 1 million :
rayonnement $\gamma \Rightarrow$ rayonnement visible **par hasard?**

2% : neutrinos
8 minutes du centre du soleil à la terre

Pourquoi vous parler de neutrinos?

- Prétexte pour parler des particules «élémentaires» : les composants ultimes de la matière et des forces qui les structurent.

Élémentaires: sans structure plus petite … jusqu'à preuve du contraire.

- Prétexte pour parcourir une partie de l'histoire de la physique au XXeme siecle

- Sa charge électrique, son rayon sont nuls,
  Sa masse quasi nulle : moins du 1 / 500 000 de celle de l'électron
  L'Univers est quasi transparent aux neutrinos

Pourquoi vous parler de neutrinos?

- Ils ont émis partout et par tous:
  - la terre, le soleil et les étoiles, tous les cataclysmes astronomiques, l'atmosphère,
  - le Big Bang,
  - tous les êtres vivants, et donc VOUS,
  - les centrales nucléaires, les accélérateurs de particules.

- La particule la plus abondante dans l'Univers, et de loin:
  chaque cm^2 de VOTRE corps est traversé par
  - ✓ 65 milliards de neutrinos venant du soleil chaque seconde.
  - ✓ au moins 200 milliards de neutrinos émis lors du Big-Bang.

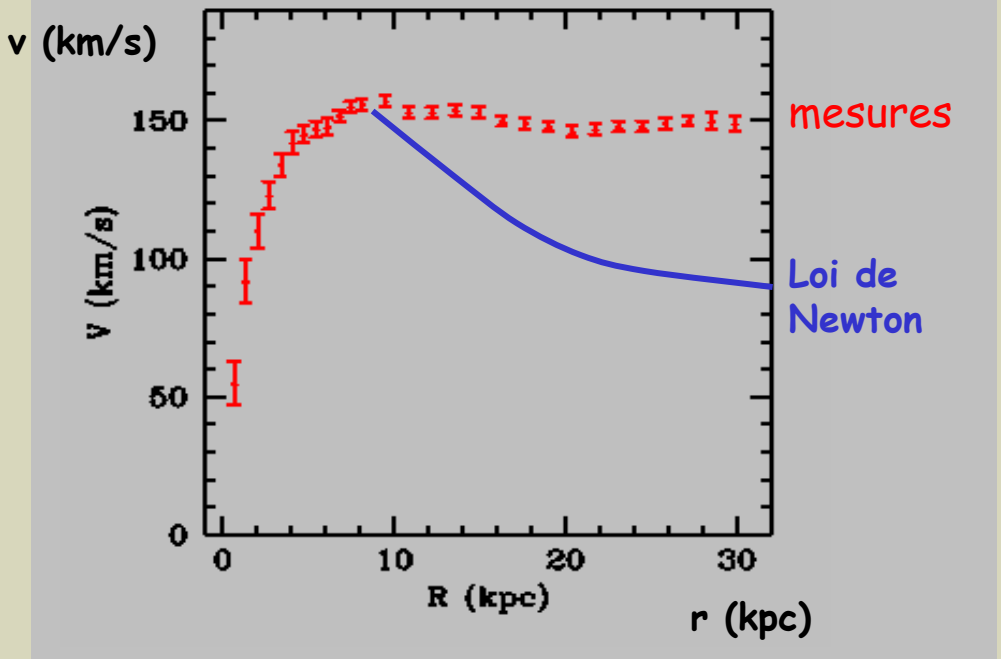
- Passerelle entre l'infiniment grand et l'infiniment petit:
  - l'Univers observé: 10^{25} m (=10000000000000000000000000 m)
  - les particules élémentaires: < 10^{-16} m (=0.0000000000000001 m)

La dimension de l'Univers observé est au moins 10^{41}fois plus grand que la dimension des particules.

Les neutrinos du Big-Bang
et la matière noire de l'Univers

La matière noire de l'Univers : détectée par effets gravitationnels

Vitesse de rotation des étoiles en fonction de la distance au cœur de la galaxie



The rotation curve for the galaxy NGC3198 from Begeman 1989

Au moins 80% de la matière de l'Univers est "noire" et de nature inconnue.

	densite d'energie relative
matiere ordinaire	10
dont lumineuse	1
neutrinos	0.7 – 17
radiation	0.012
matiere noire	67

De nouvelles particules ? Modèles vrais ou faux ?
A vérifier comment?
En augmentant l'énergie de nos accélérateurs.
Sans doute une réponse avant 2010