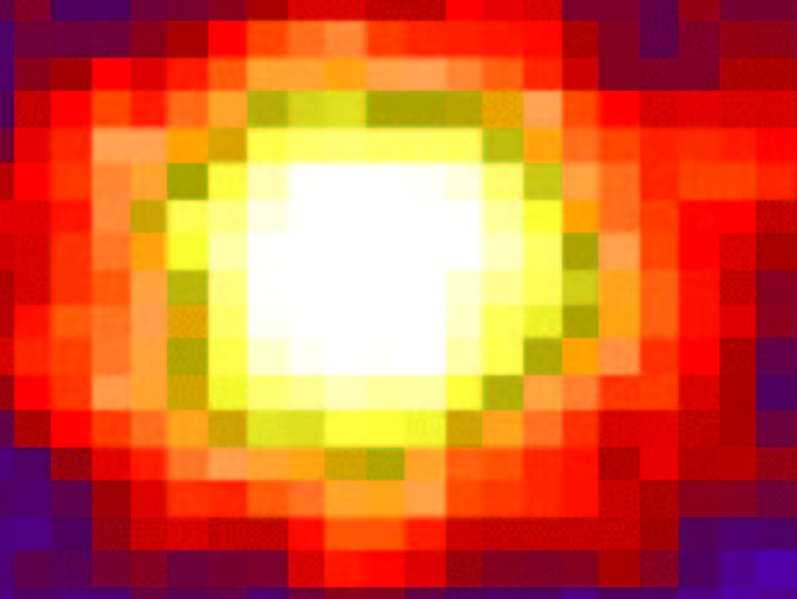


Les neutrinos à la croisée des deux infinis



Thierry Lasserre (Physicien au CEA)

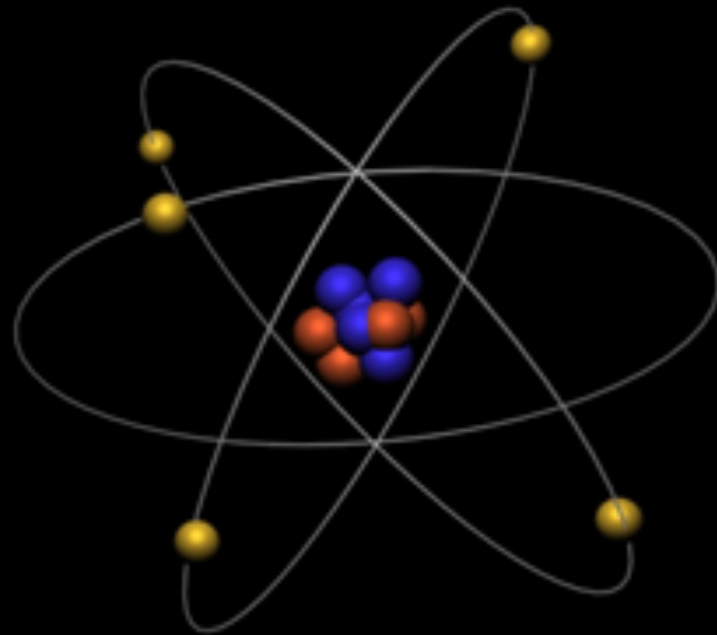
Festival de Fleurance, 07/08/2013

Matière et Atomes

● Neutron

● Proton

● Electron



Une idée reçue...

Toute la matière autour de nous est composée de trois particules élémentaires qui forment les atomes: n, p, e⁻



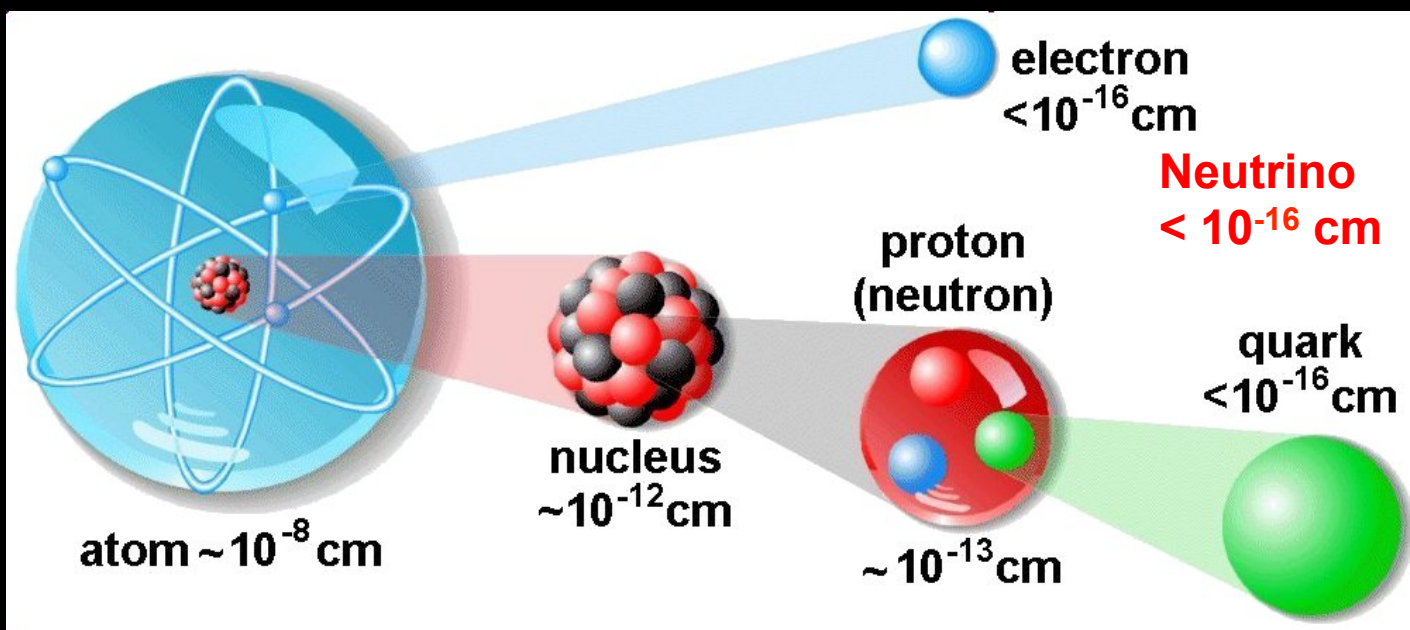
Ne pas oublier le discret (ν)

La matière autour de nous est bien faite **d'électrons de protons et de neutrons** mais ces derniers sont finalement très **minoritaires** dans l'Univers ...

Car pour chaque électron, proton, et neutron de l'Univers il y a 1 000 000 000 de neutrinos !

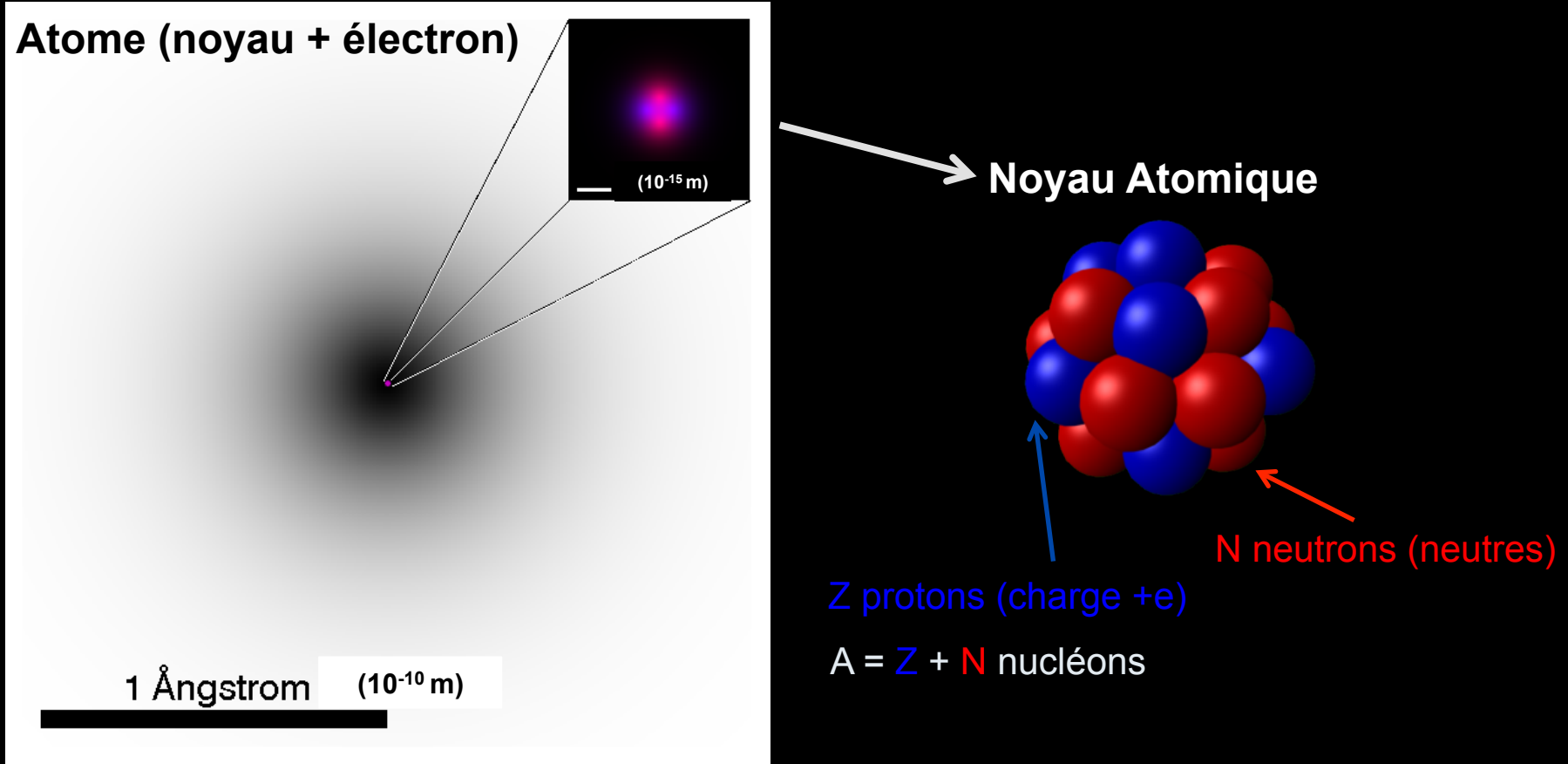
Un humain contient 30 millions de neutrinos du Big-Bang et est traversé par 100 000 milliard de neutrinos solaires/s

A la recherche du Neutrino ...



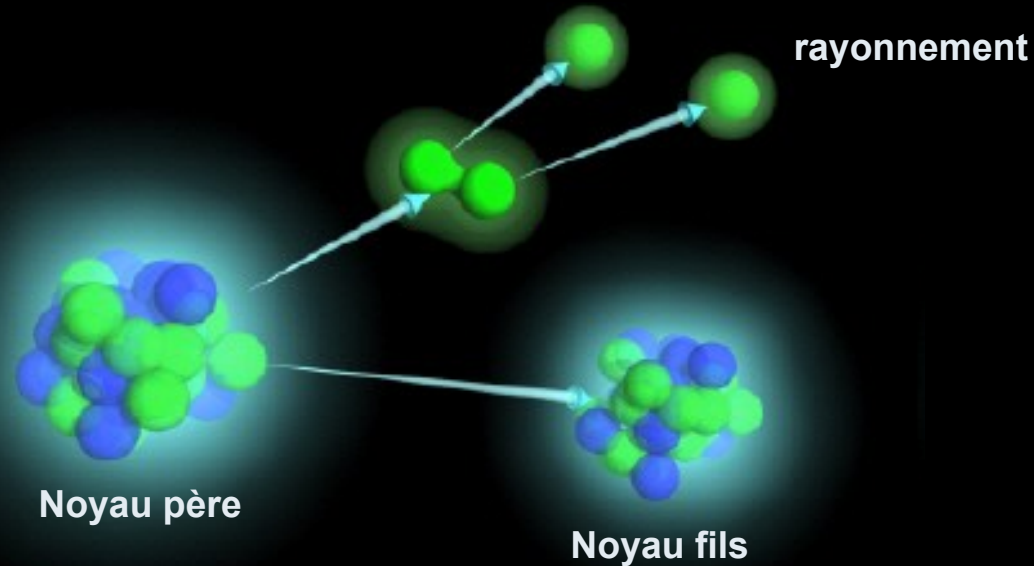
Noyau Atomique de potassium

40
19 **K**



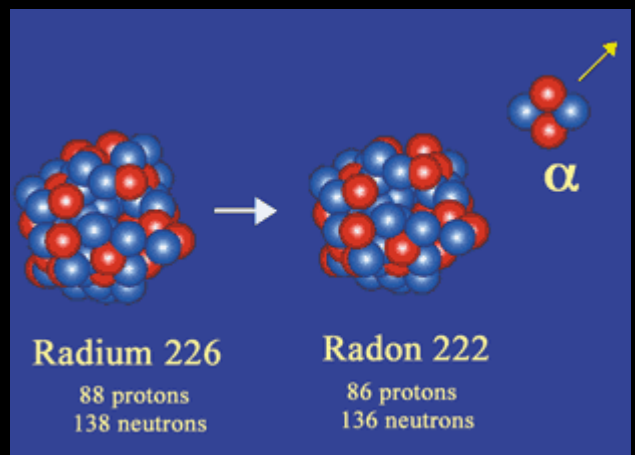
Radioactivité

Phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables

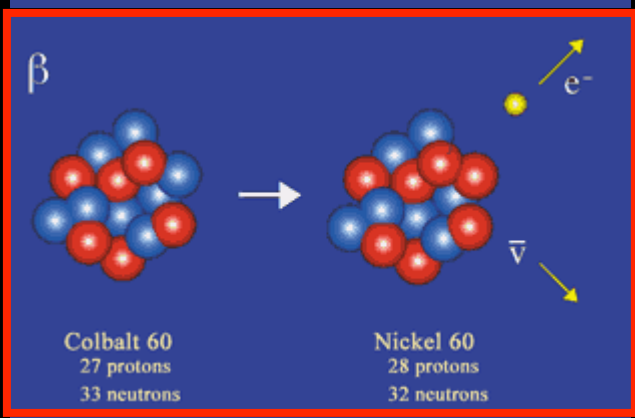


Types de Radioactivité

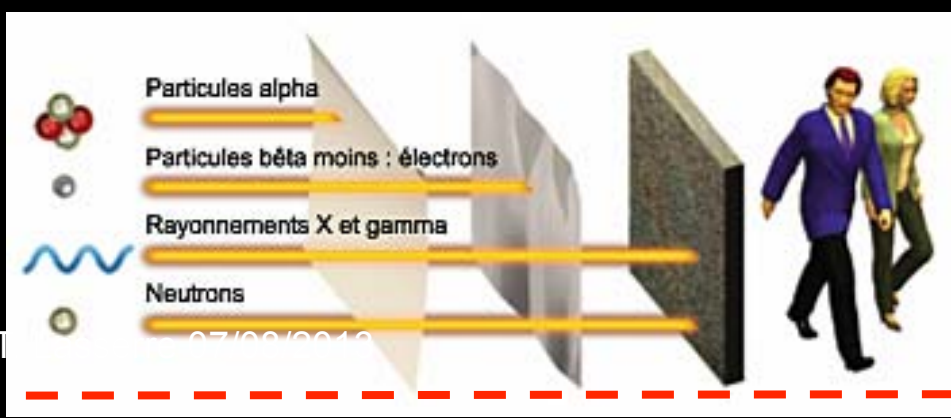
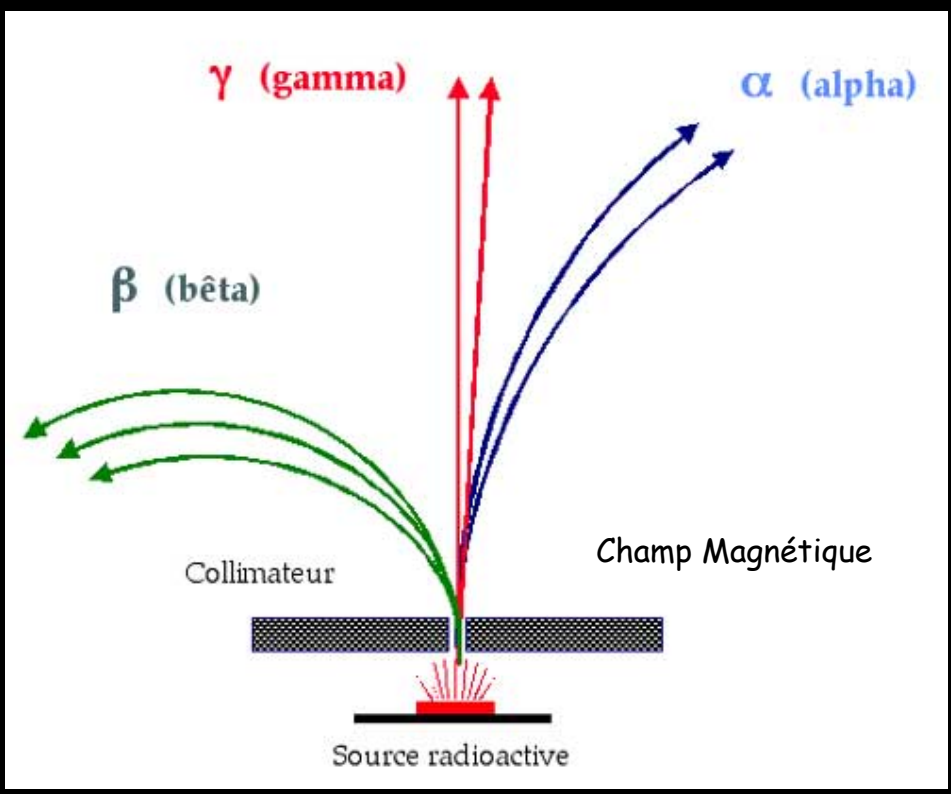
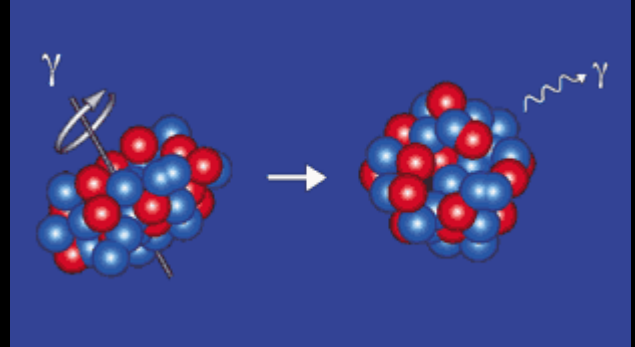
α



β



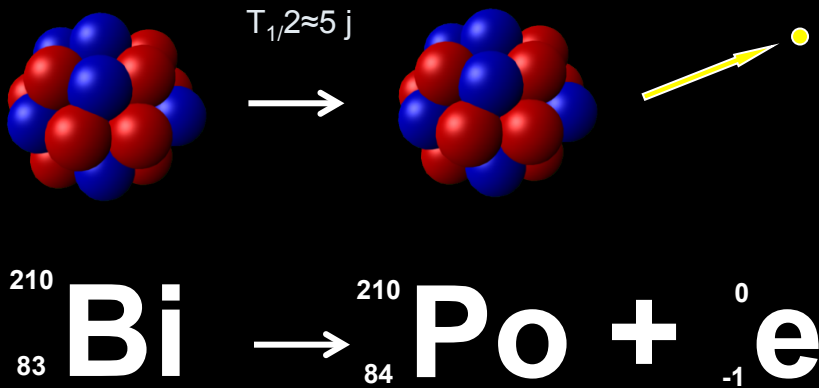
γ



Le paradoxe des désintégrations β

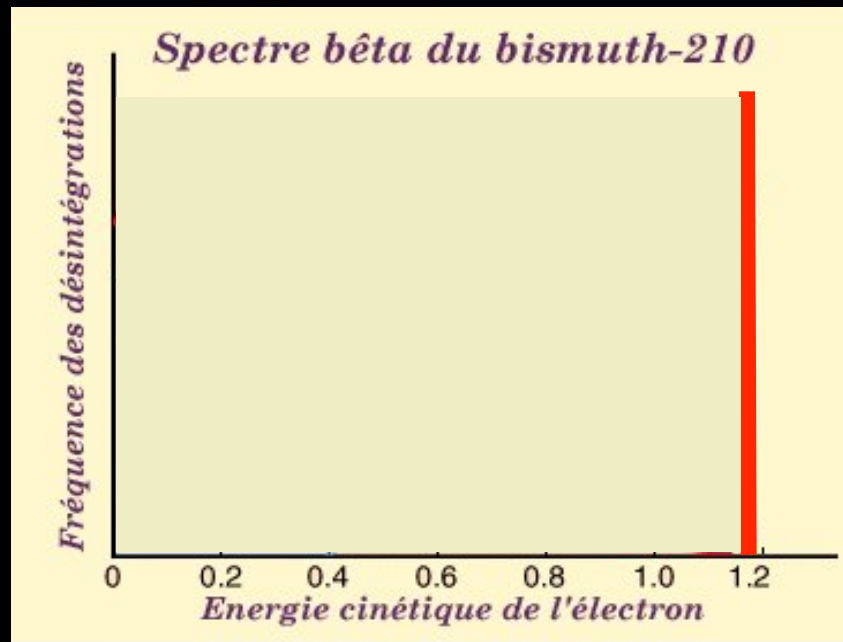
1914: Mesure du spectre de désintégration bêta des noyaux par Chadwick
Un noyau (A,Z) se transforme en un noyau (A,Z+1) avec émission d'un électron

Si deux corps sont émis, l'énergie de l'électron devrait tj être fixée à la même valeur...



Lois de conservation:

- Energie & Quantité de Mouvement
- Nbx Masse & Charge



Le remède désespéré de Pauli (1930)

Zürich, 4 décembre 1930



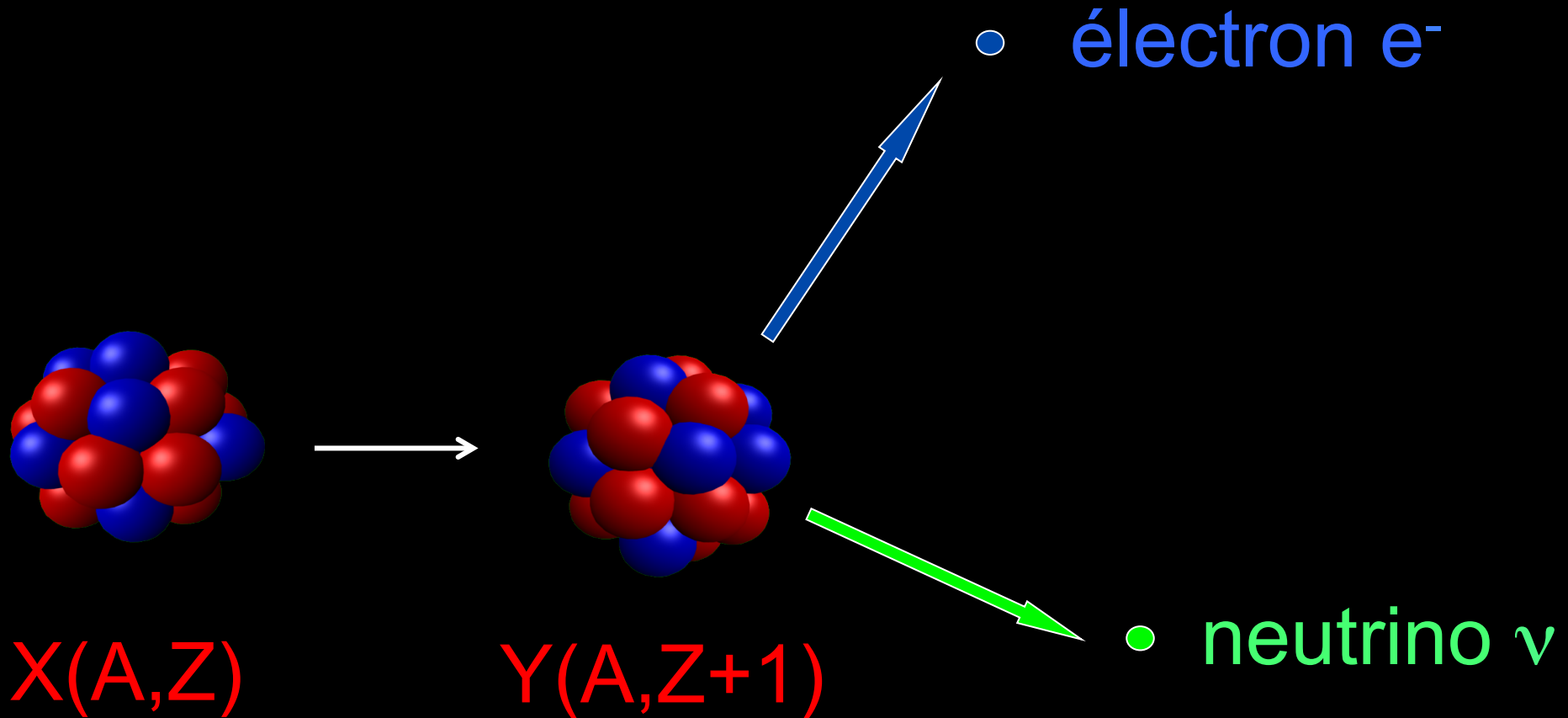
Chers dames et messieurs radioactifs,

Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la "mauvaise" statistique des noyaux N et ${}^6\text{Li}$ et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin $1/2$, obéissent au principe d'exclusion, mais différentes des photons parce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0.01 fois la masse du proton. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que, pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante...

J'admet que mon remède puisse paraître invraisemblable car on aurait du voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, ... Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement, je ne pourrai pas être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

*Votre serviteur le plus dévoué,
W. Pauli*

Face cachée des désintégration β



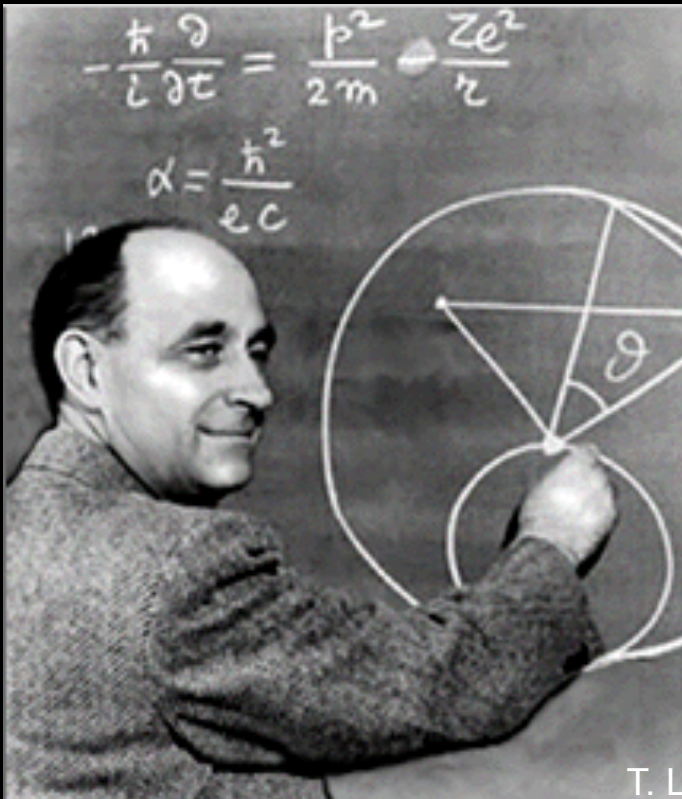
Théorie de la désintégration β (1934)

1932: Découverte du neutron par Chadwick

- Un atome est formé d'un nuage d'électrons orbitant autour d'un noyau constitué de protons et de neutrons

1934: Fermi construit une théorie de la désintégration β

- Baptême du neutrino. La communauté scientifique y croit!



T. Las

Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I¹⁾.

Von E. Fermi in Rom.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 10. Januar 1934.)

Eine quantitative Theorie des β -Zerfalls wird vorgeschlagen, in welcher man die Existenz des Neutrinos annimmt, und die Emission der Elektronen und Neutrinos aus einem Kern beim β -Zerfall mit einer ähnlichen Methode behandelt, wie die Emission eines Lichtquants aus einem angeregten Atom in der Strahlungstheorie. Formeln für die Lebensdauer und für die Form des emittierten kontinuierlichen β -Strahlenspektrums werden abgeleitet und mit der Erfahrung verglichen.

1. Grundannahmen der Theorie.

Bei dem Versuch, eine Theorie der Kernelektronen sowie der β -Emission aufzubauen, begegnet man bekanntlich zwei Schwierigkeiten. Die erste ist durch das kontinuierliche β -Strahlenspektrum bedingt. Falls der Erhaltungssatz der Energie gültig bleiben soll, muß man annehmen, daß ein Bruchteil der beim β -Zerfall frei werdenden Energie unseren bisherigen Beobachtungsmöglichkeiten entgeht. Nach dem Vorschlag von W. Pauli kann man z. B. annehmen, daß beim β -Zerfall nicht nur ein Elektron, sondern auch ein neues Teilchen, das sogenannte „Neutrino“ (Masse von der Größenordnung oder kleiner als die Elektronenmasse, keine elektrische Ladung) emittiert wird. In der vorliegenden Theorie werden wir die Hypothese des Neutrinos zugrunde legen.

Enrico Fermi, Zeitschrift für Physik, volume 88 (1934), page 161 ...

Les Neutrinos interagissent très ... très ... très peu !

La probabilité d'interaction d'un neutrino (solaire)
avec un humain est de $1 / 10\,000\,000\,000\,000\,000$

Vu par nos yeux



Vu par un neutrino

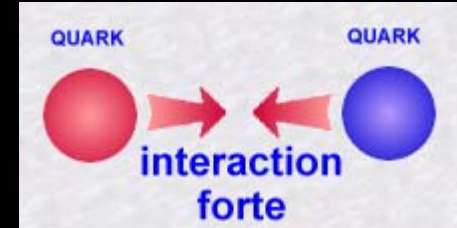


La détection des neutrinos est donc difficile ...

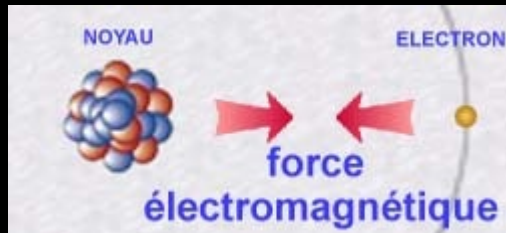
Le modèle standard: forces



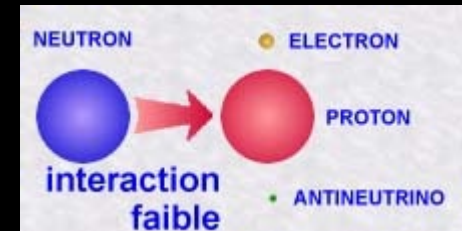
Interaction entre deux objets 'massifs'



Maintien la cohésion des noyaux



Electricité et Magnétisme



Permet aux particules de changer de nature

Higgs

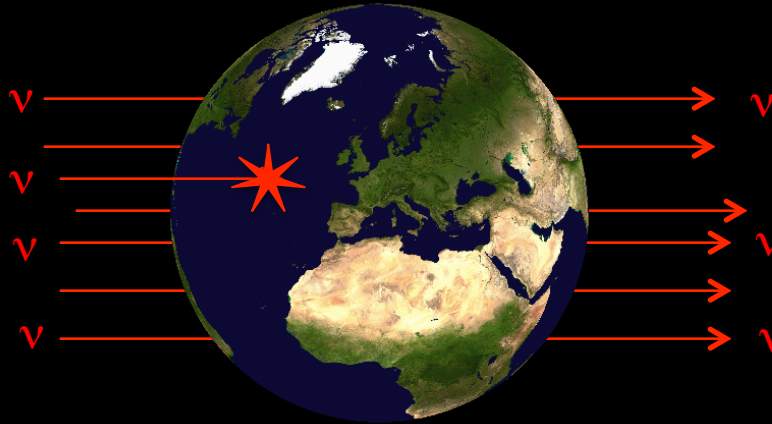


Masse des Particules

Les neutrinos ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et à la gravitation

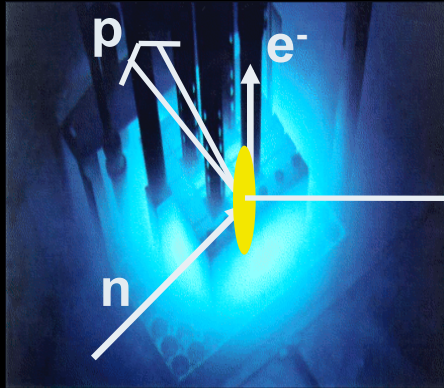
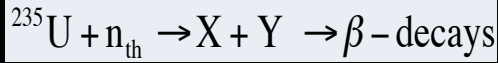
Peut-on détecter les neutrinos ?

Le neutrino n'est sensible qu'à l'interaction faible

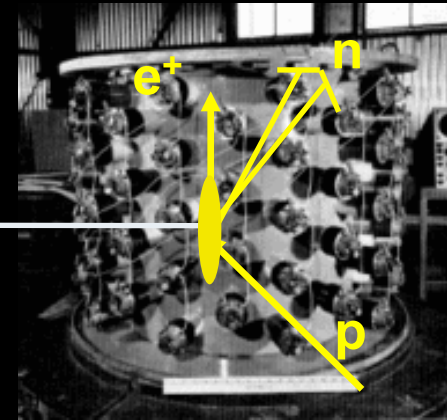
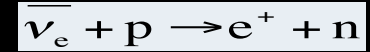


Seul 1 neutrino sur 10 000 milliards est intercepté en traversant la terre !

Découverte du neutrino en 1956



Production dans le cœur du réacteur nucléaire

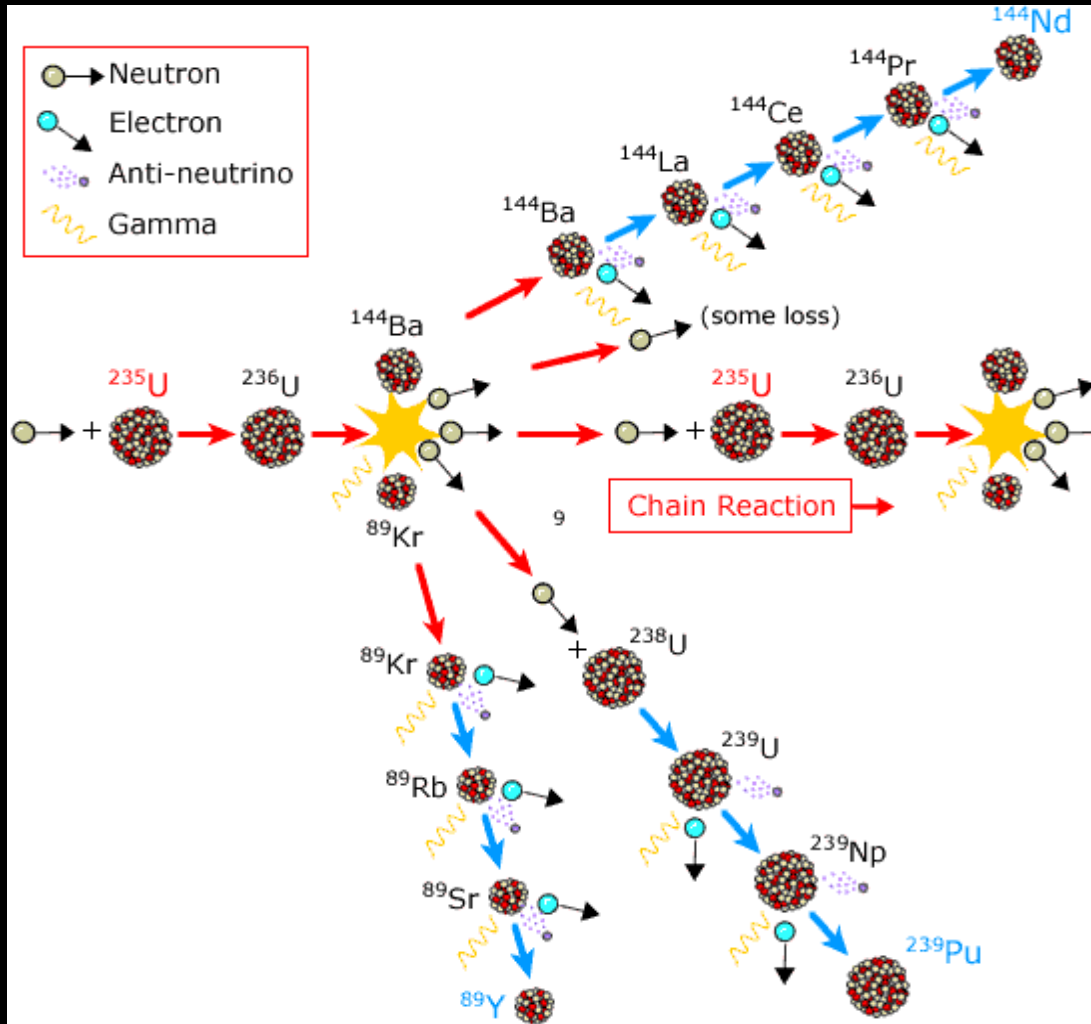


Détecteur de Neutrinos



Temps de vol ou distance parcourue depuis sa création

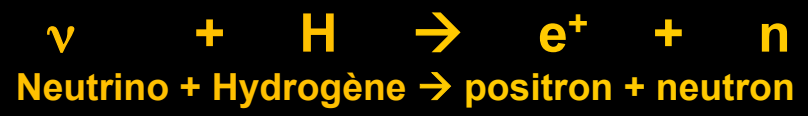
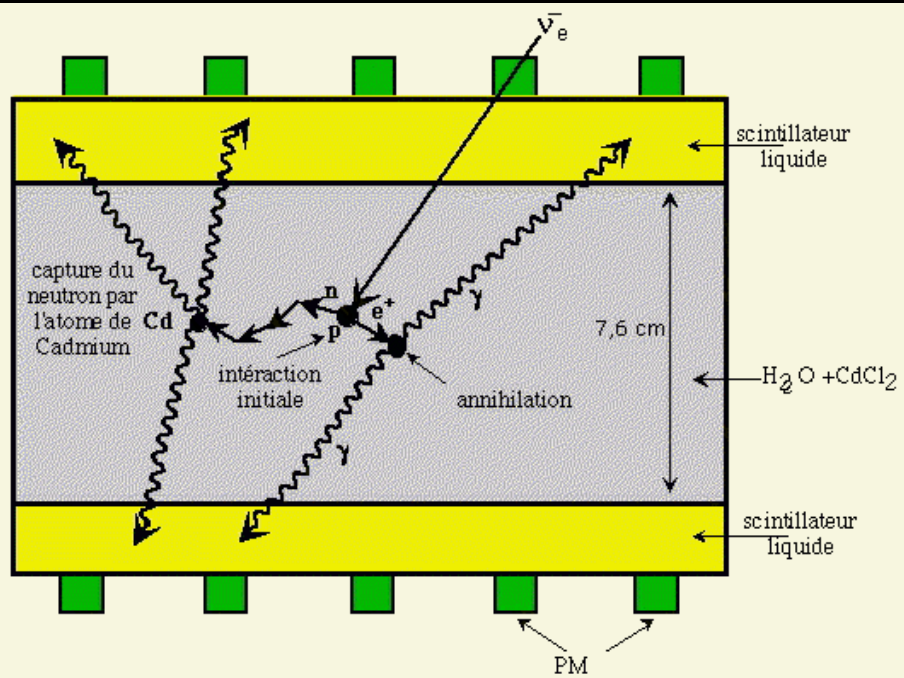
Fissions nucléaires en chaîne



1 Zetta Neutrinos par seconde (10^{21})

Découverte du neutrino (1956)

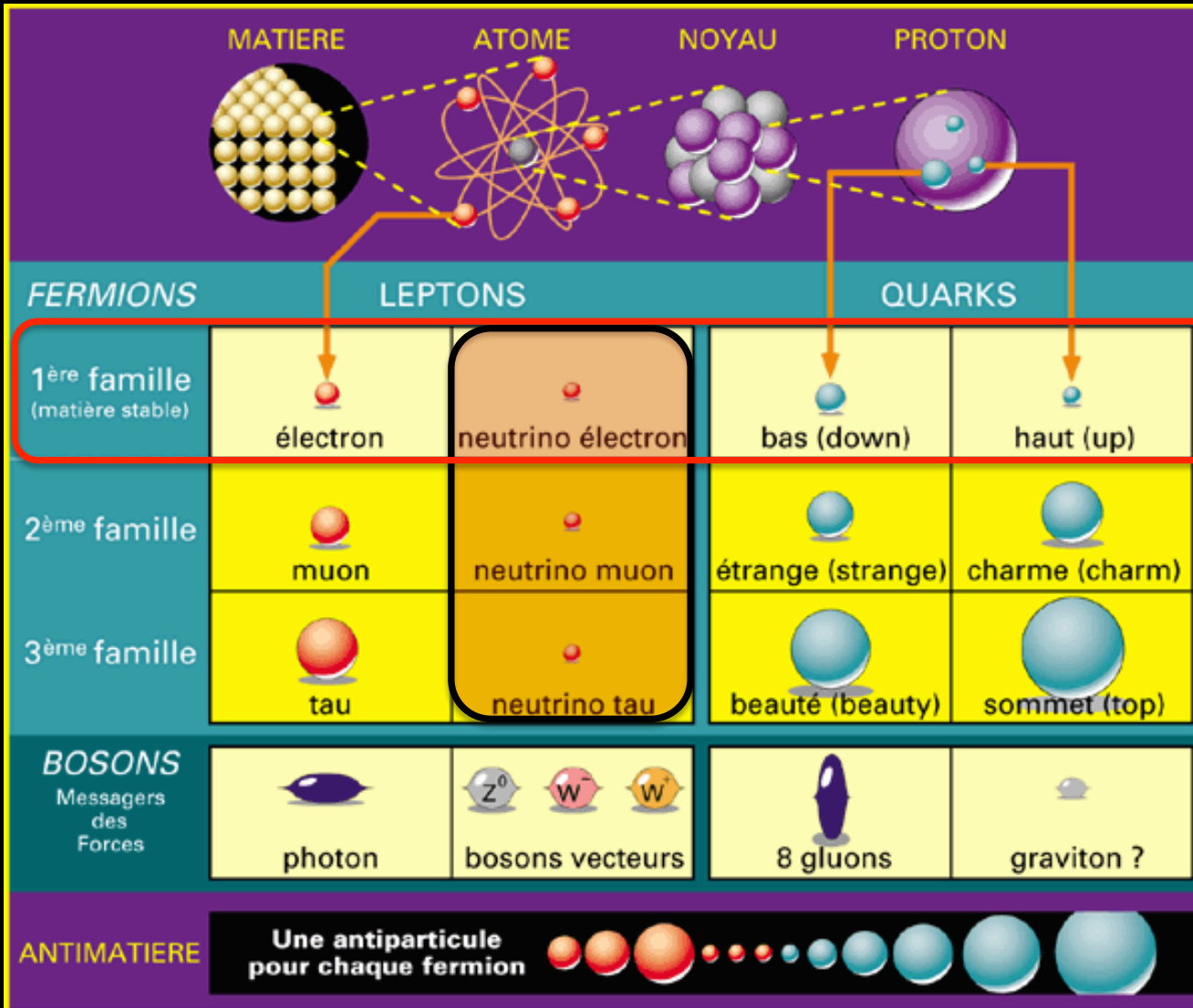
1956: Reines et Cowan détectent les (anti-) neutrino émis par le réacteur nucléaire de Savannah river (USA)



Réacteur OFF : 1 événement/heure
Réacteur ON : 4 événements/heure

Le Neutrino dans le modèle standard de la physique des particules

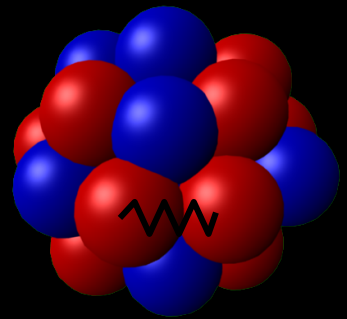
Le modèle standard des particules



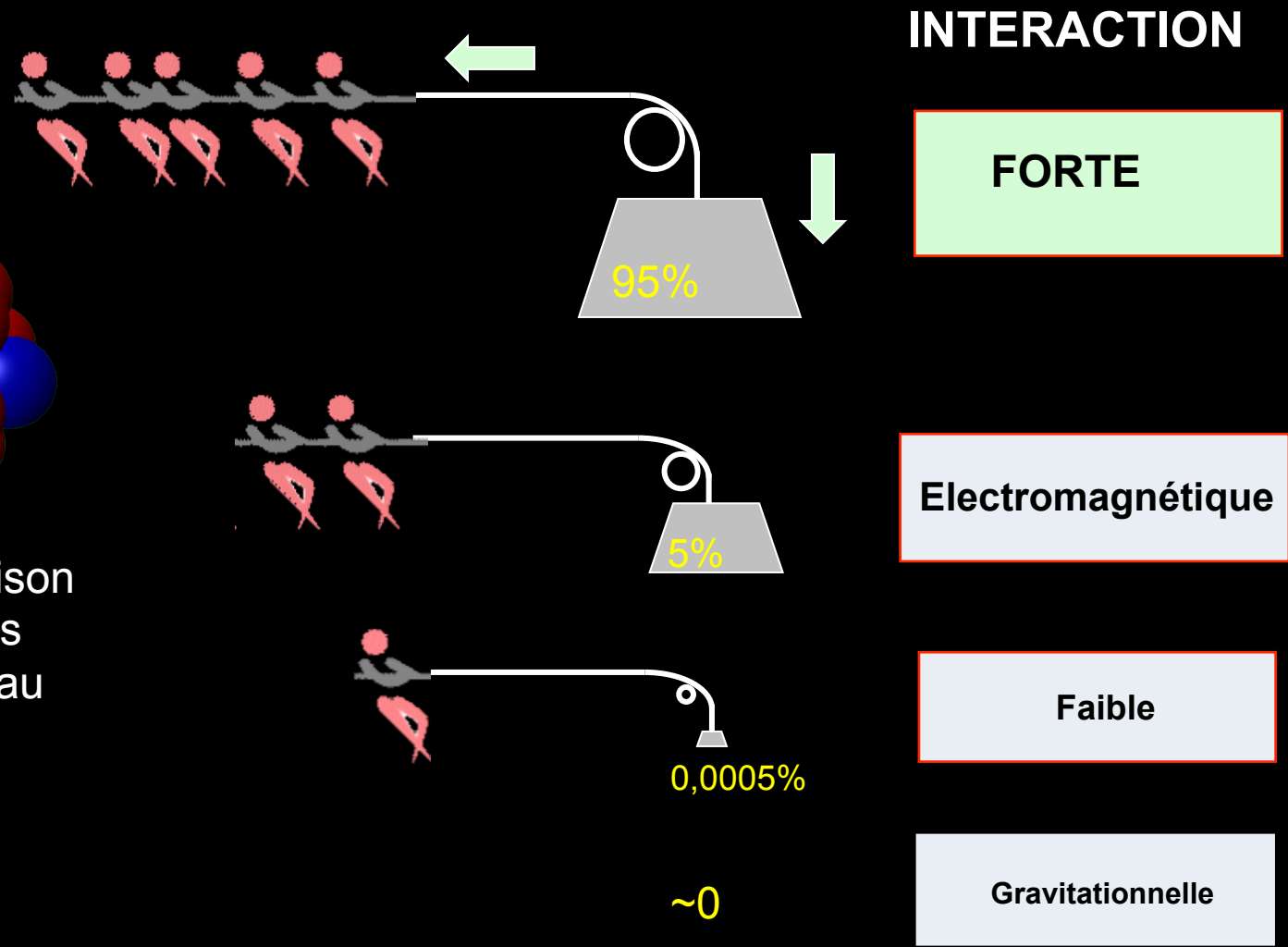
Matière Stable

**Boson de Higgs
+ Découvert en 2012
au LHC (CERN)**

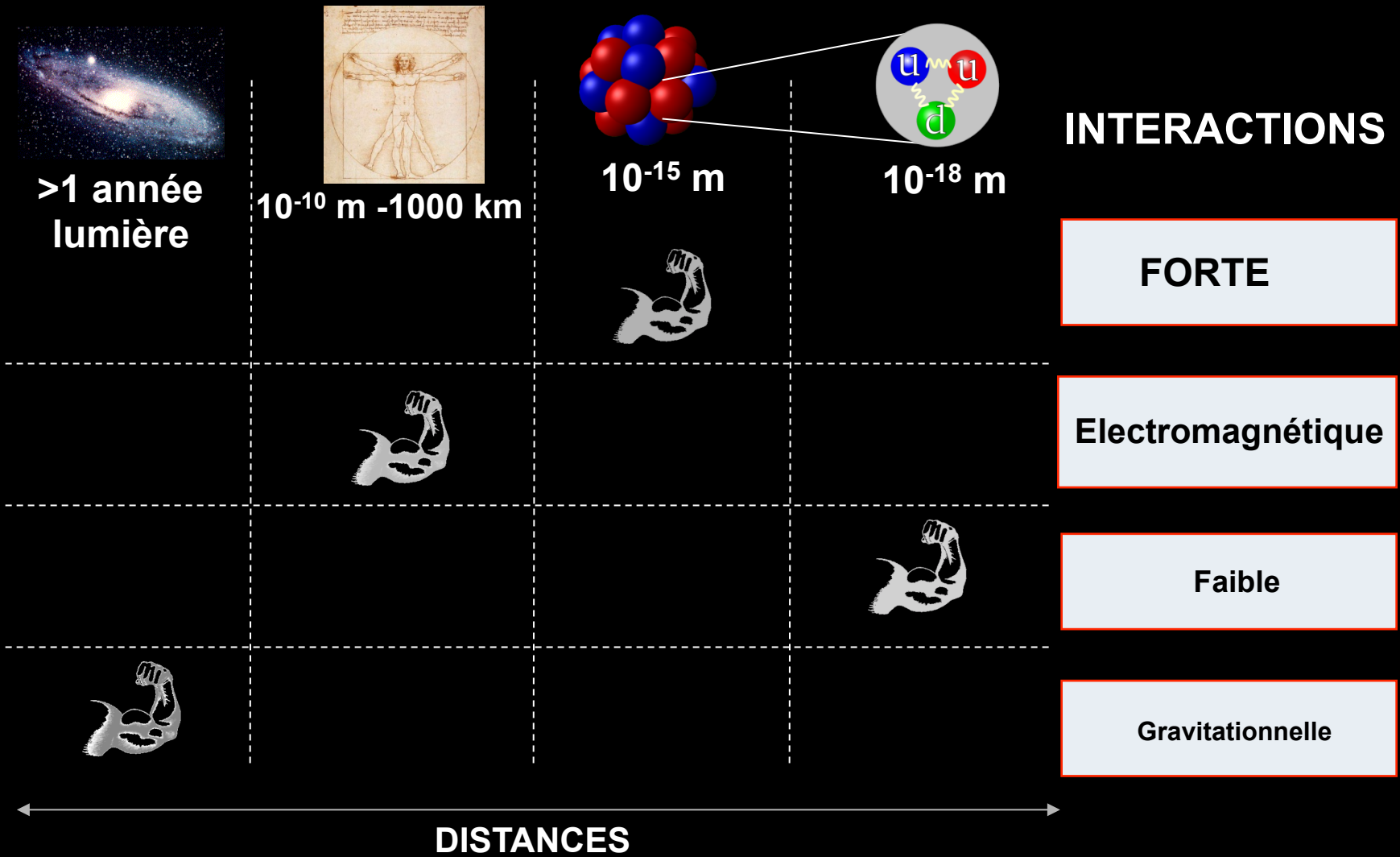
Cohésion d'un noyau atomique



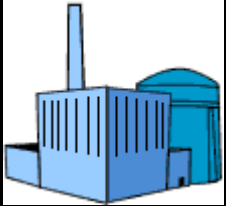
Energie de liaison
de 2 protons
dans un noyau



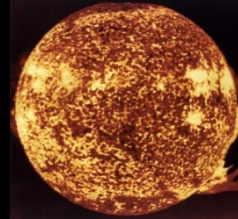
Portée des interactions



Sources de neutrinos



Réacteur nucléaires



Le Soleil et
les autres étoiles



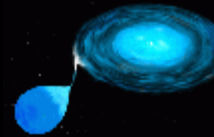
Accélérateurs de particules



Explosion d'étoiles
massives (supernova)



La Terre



Les accélérateur
astrophysiques



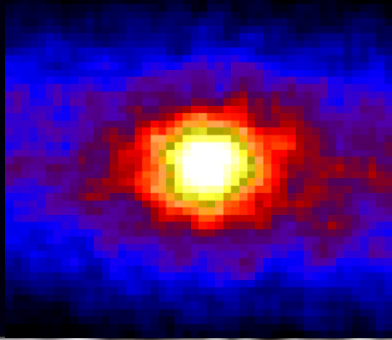
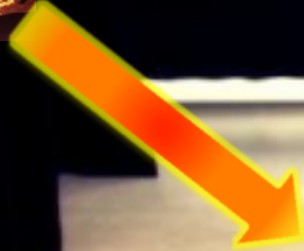
L'atmosphère



L'Univers ...

Bain de γ à Fleurance

66 milliards /cm²/sec



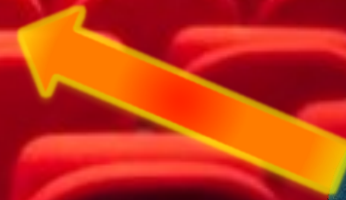
3 millions /cm²/sec



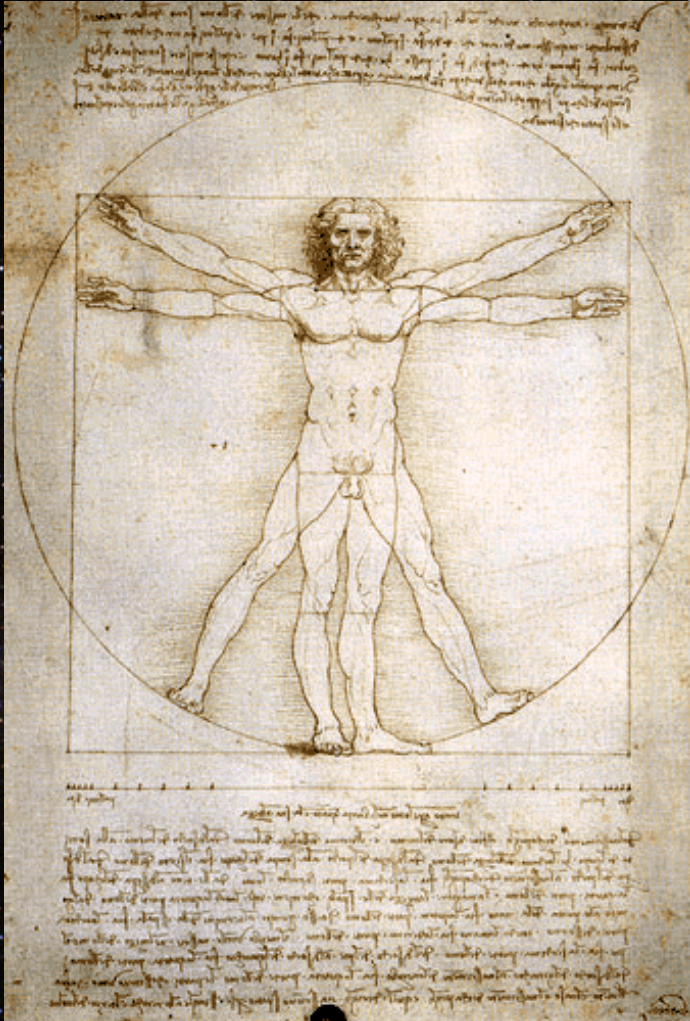
10 000 milliards /cm²/sec



5 millions /cm²/sec



Une autre source moins connue



**Le corps humain contient
20 mg de potassium 40
(émetteur radioactif β)**



**Nous émettons ainsi 330
millions d'antineutrinos
électroniques par jour !**

L'énigme des neutrinos solaires

Des neutrinos au cœur du Soleil

Masse : $2 \cdot 10^{30}$ kg

rayon: 700 000 km

T = 15 millions
de degrés

T = 6000 degrés

Gravité

Neutrino électronique

lumière

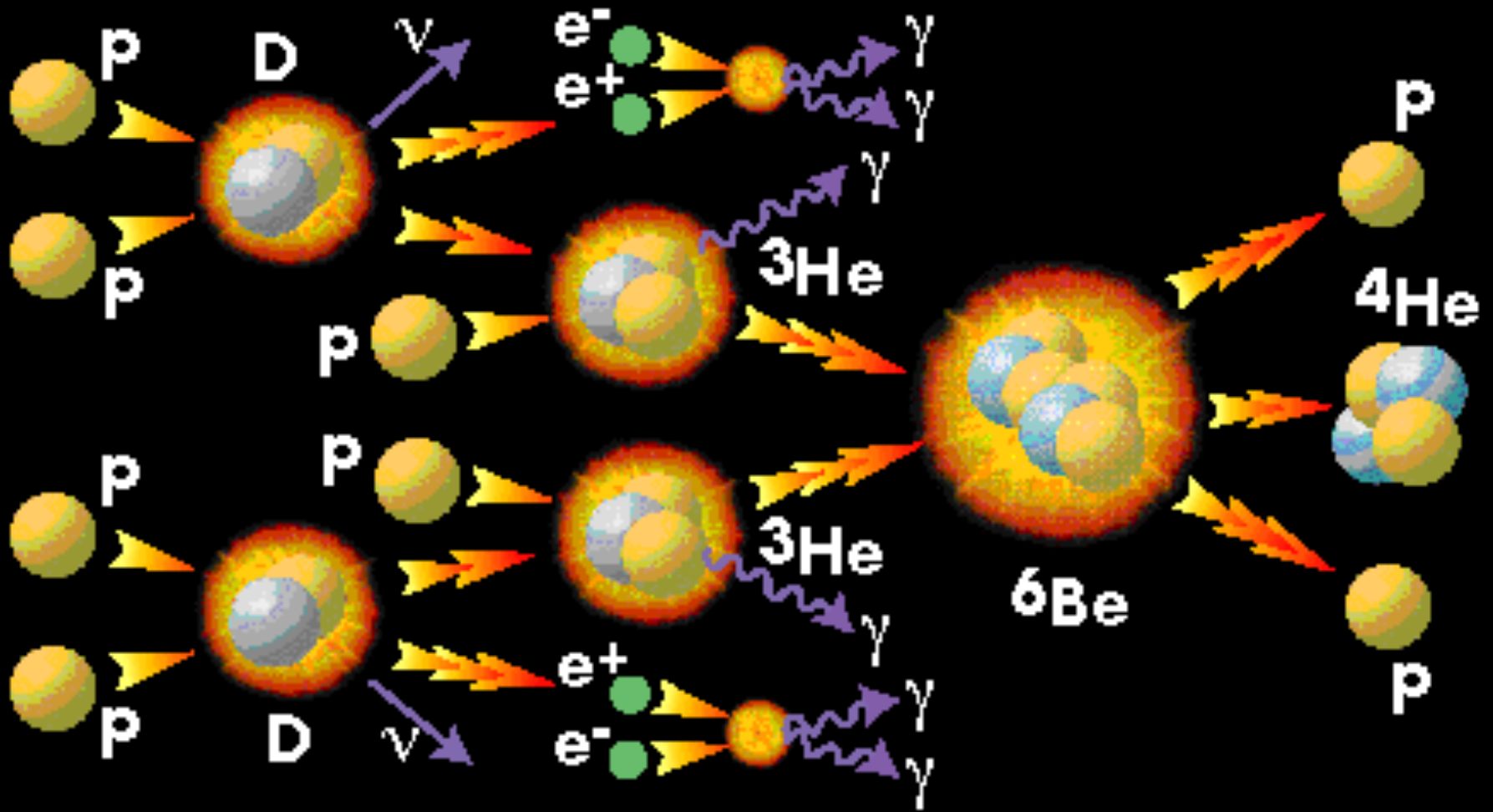
cœur



Pression

66 milliards de neutrinos arrivent sur Terre /cm² /sec

Source d'énergie du Soleil



Flux de neutrinos solaires

Bilan de la réaction

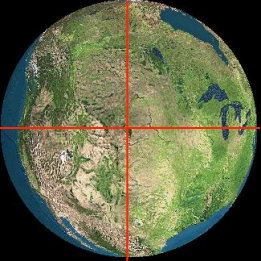


- Fusion de 4 protons :
 - énergie dégagée: $4 \cdot 10^{-12}$ Joules
 - 2 neutrinos émis

- Puissance du Soleil : $3,8 \cdot 10^{26}$ W (J/s)
 - Terre-Soleil: $150 \cdot 10^6$ km
 - Energie reçue sur Terre 1344 W/m²

- Flux de neutrinos:
 - $0,1350$ W/cm² / $4 \cdot 10^{-12}$ Joules * 2
 - 66 milliards de neutrinos /cm²/s



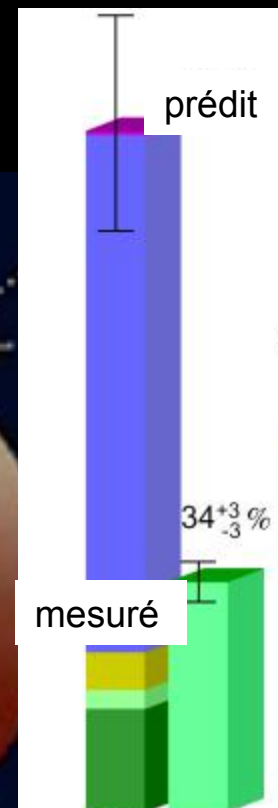
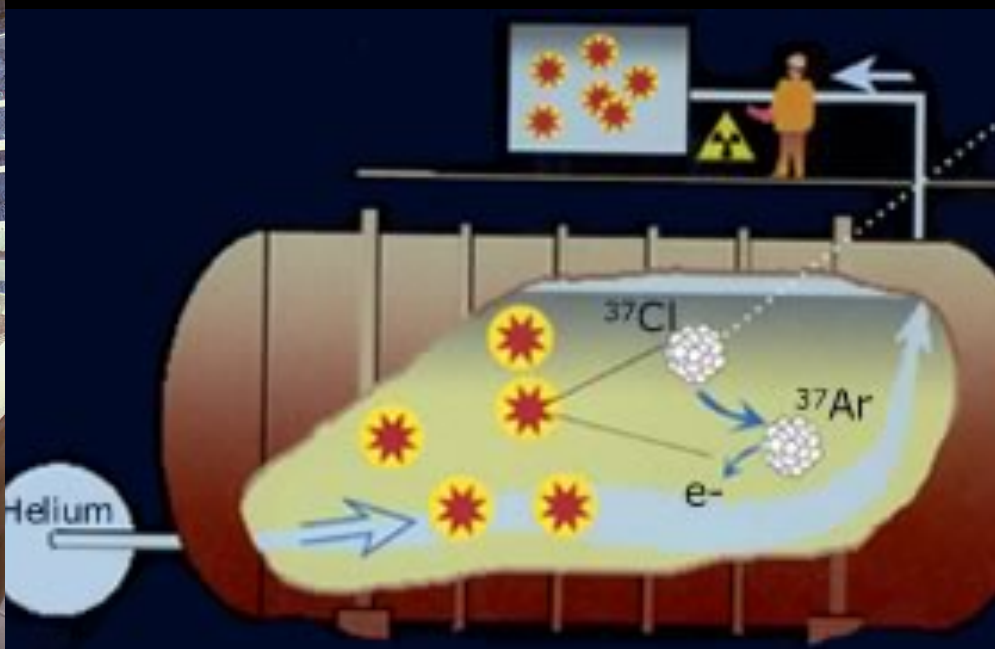
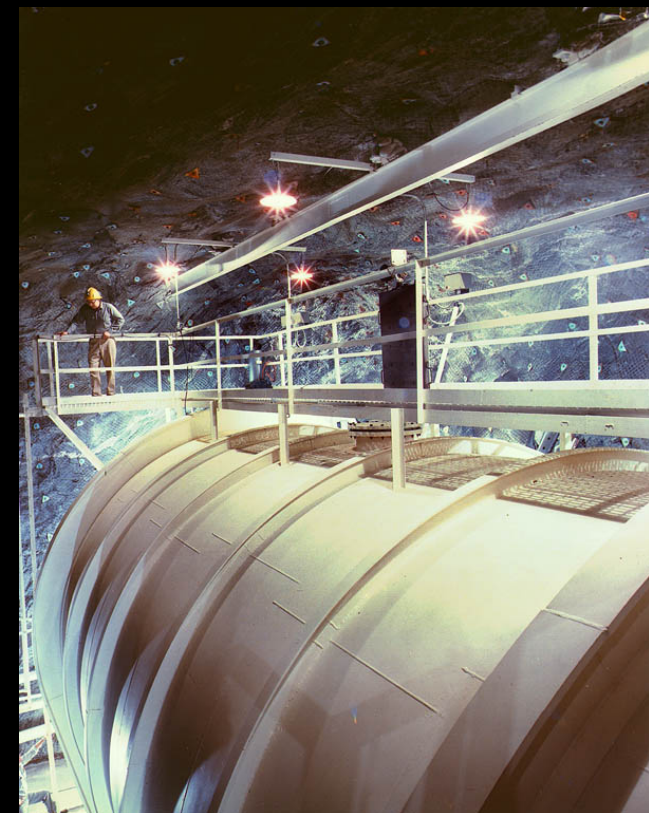


Détecteur Homestake (1967-1995)

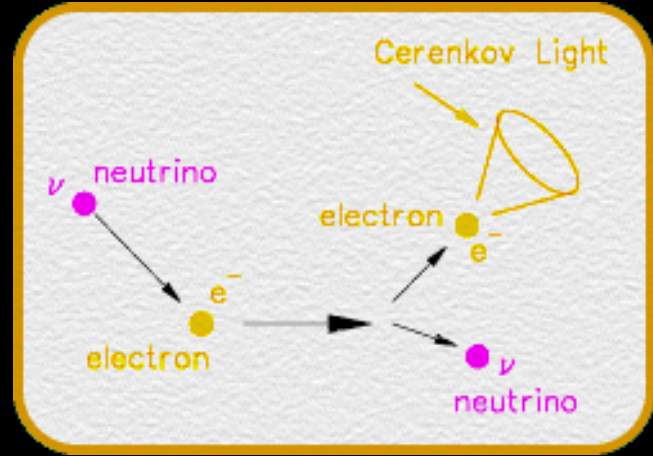
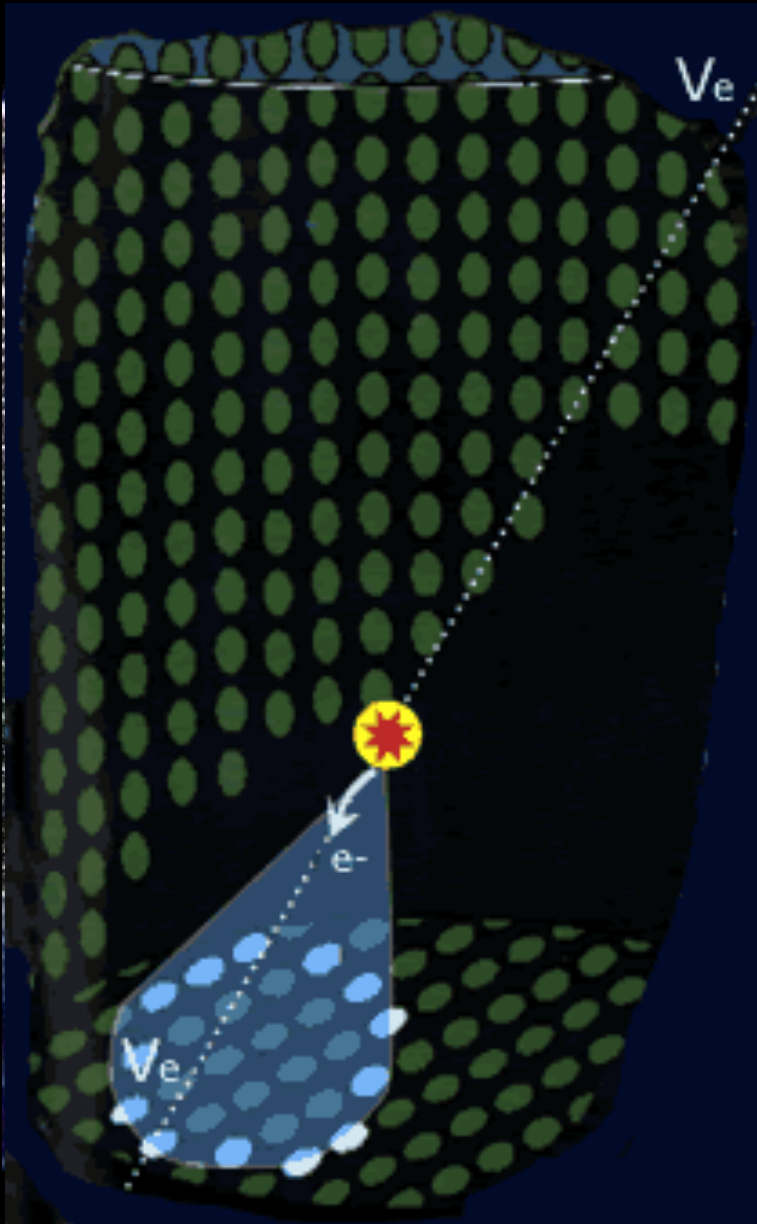
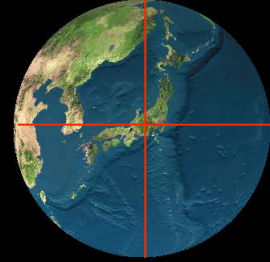


~1960 Davis construit le 1^{er} détecteur dans la mine de Homestake, USA
600 tonnes de détergent – 1 neutrino attendu chaque jour....

But: “... pour voir à l’intérieur d’une étoile et donc vérifier directement l’hypothèse de la production d’énergie nucléaire au sein des étoiles ...”



Détecteur Super-Kamiokande



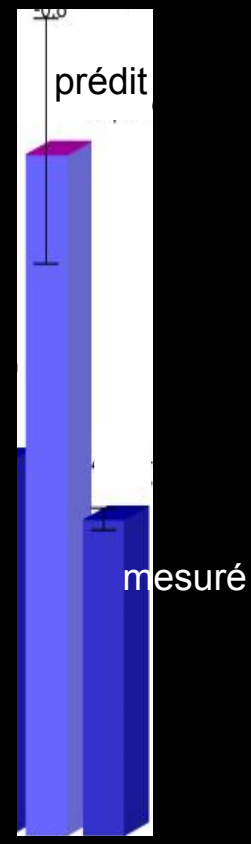
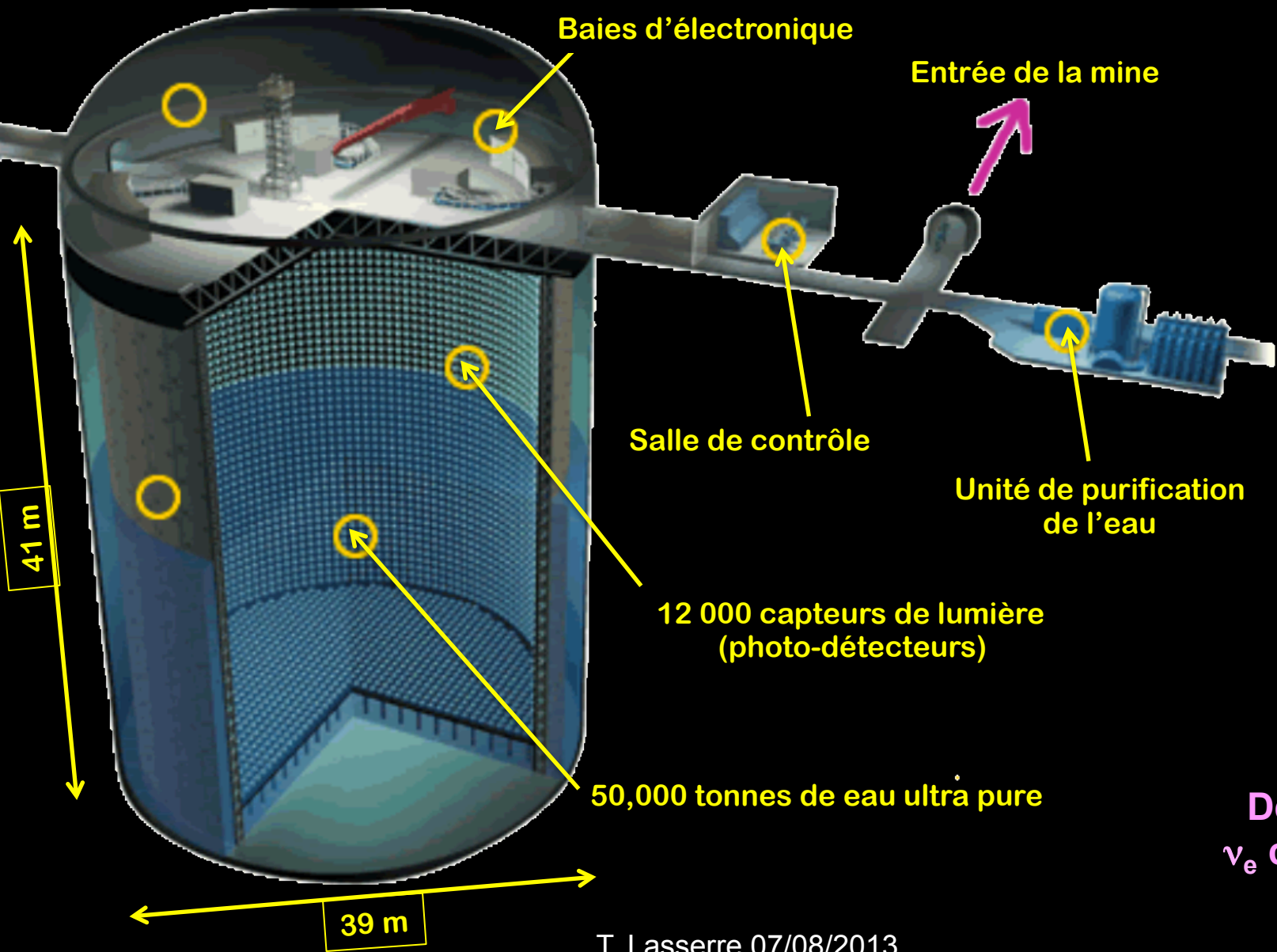
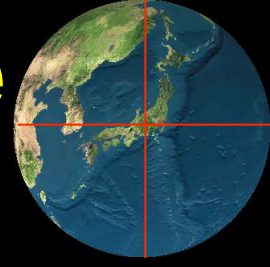
Effet Tcherenkov : émission de lumière dans un milieu, causée par le passage d'électrons traversant SK à une vitesse supérieure à celle de la lumière

$$v(e^-, H_2O) \approx c = 300\,000 \text{ km s}^{-1}$$

$$v(\gamma, H_2O) \approx c/n = 225\,000 \text{ km s}^{-1}$$

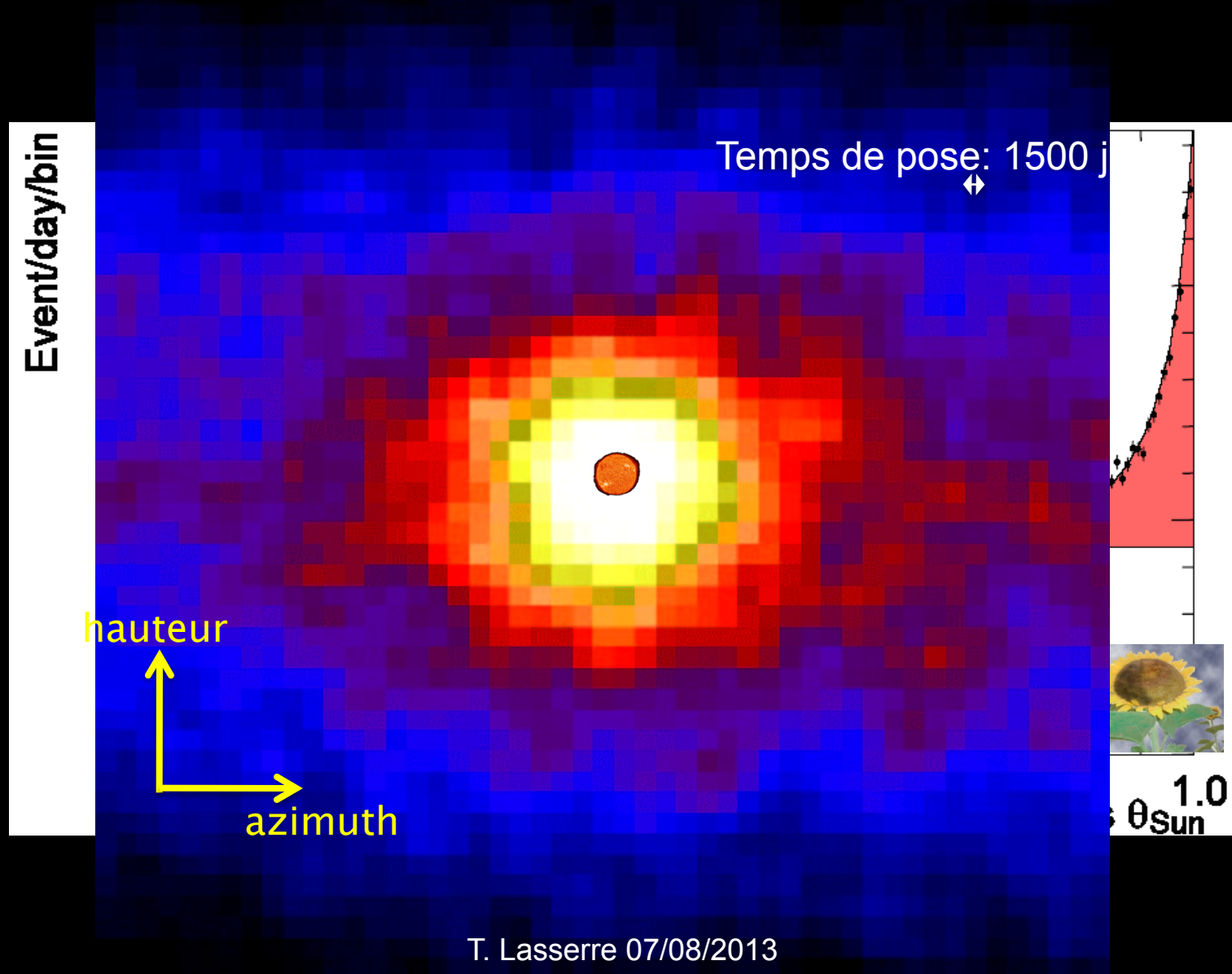
Indice réfraction H₂O: $n = 1.33$

Détecteur Super-Kamiokande



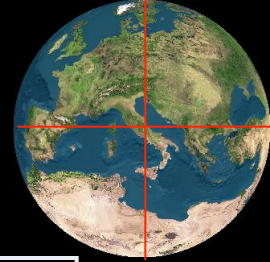
Déficit de ν_e confirmé !

Le soleil vu en neutrinos !

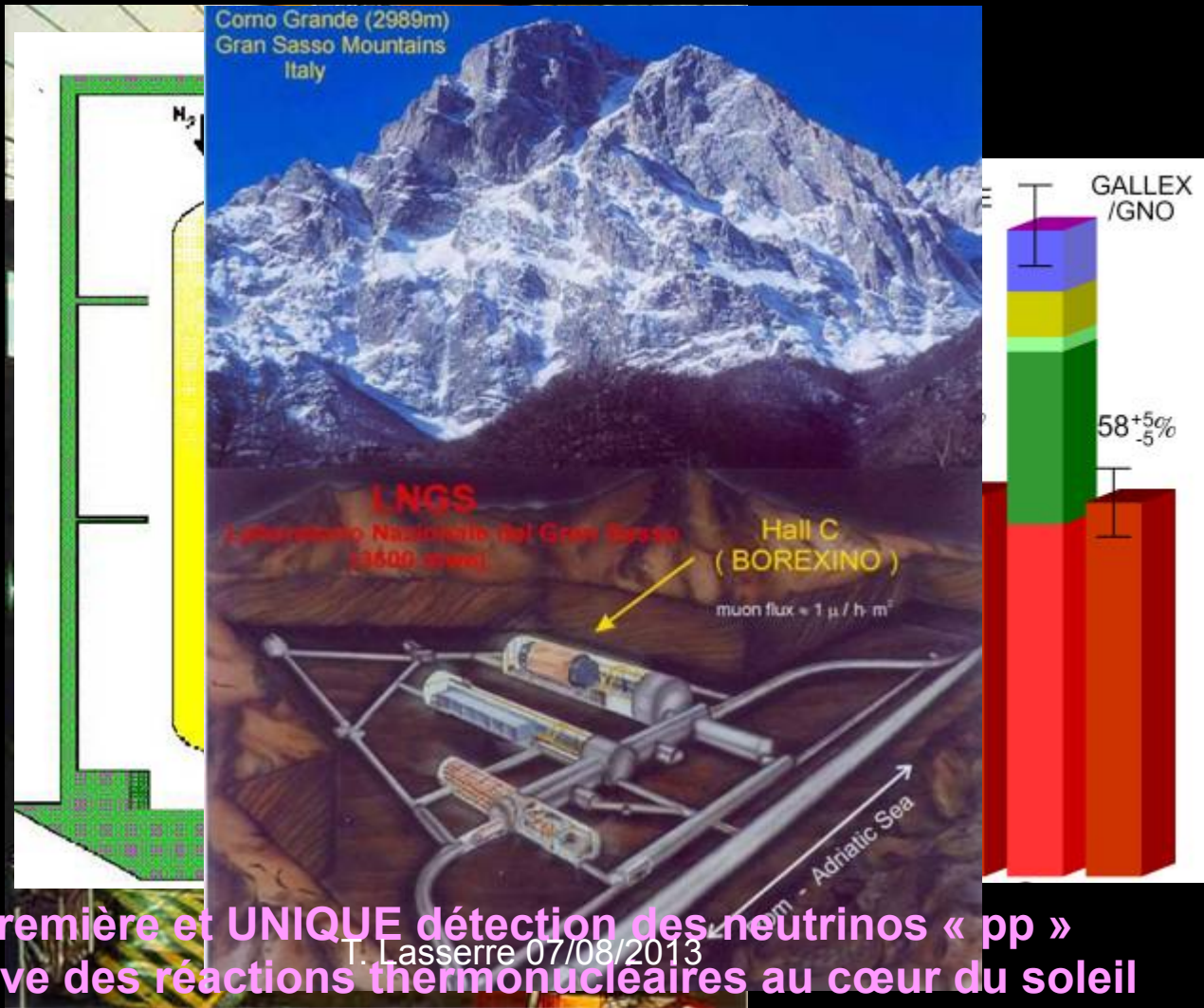




Gallex (1991-2003)

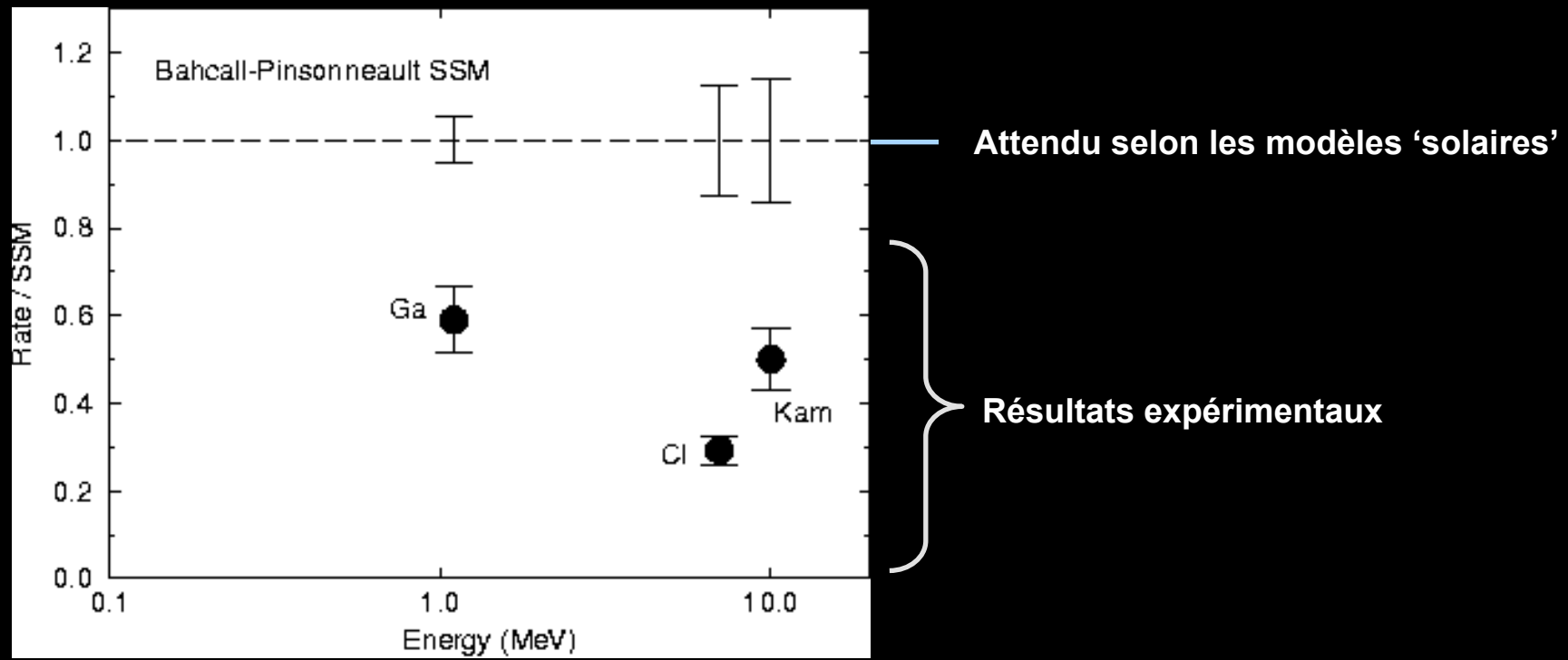


30 tonnes de Gallium (Gran Sasso, Italie)



Première et UNIQUE détection des neutrinos « pp »
 preuve des réactions thermonucléaires au cœur du soleil

L'anomalie des neutrinos solaires



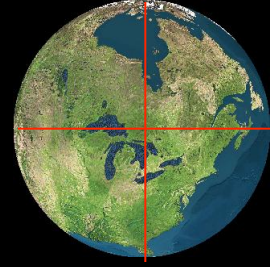
- Compréhension imparfaite du fonctionnement du cœur des étoiles

MAIS seuls les ν_e étaient jusqu'à là mesurés.

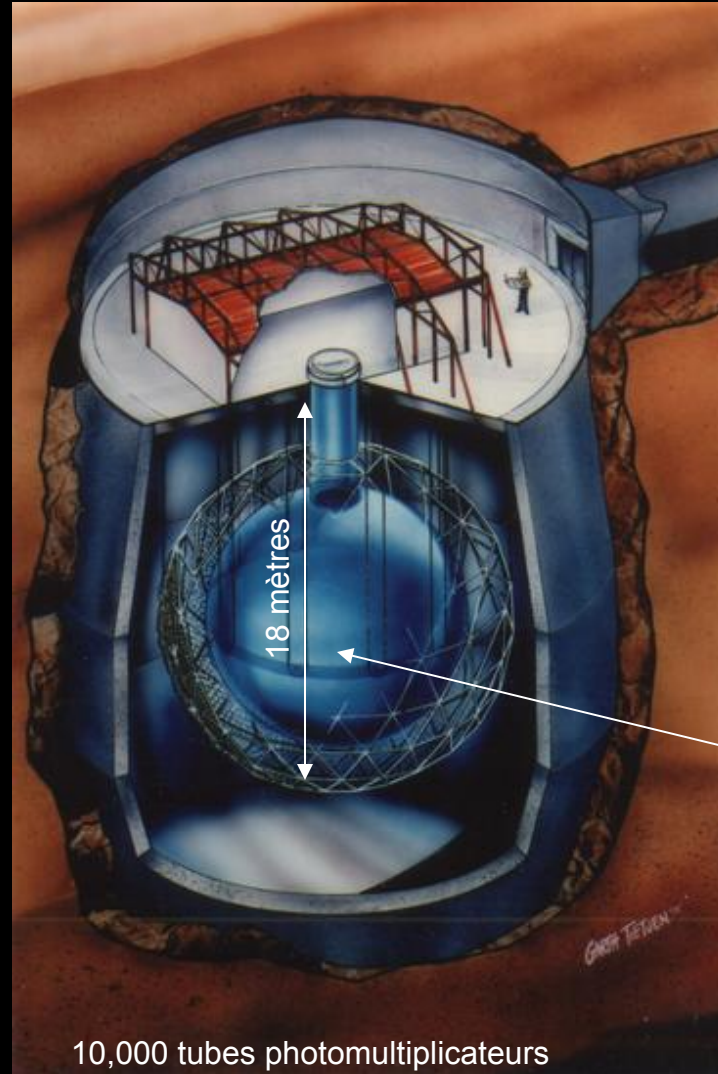
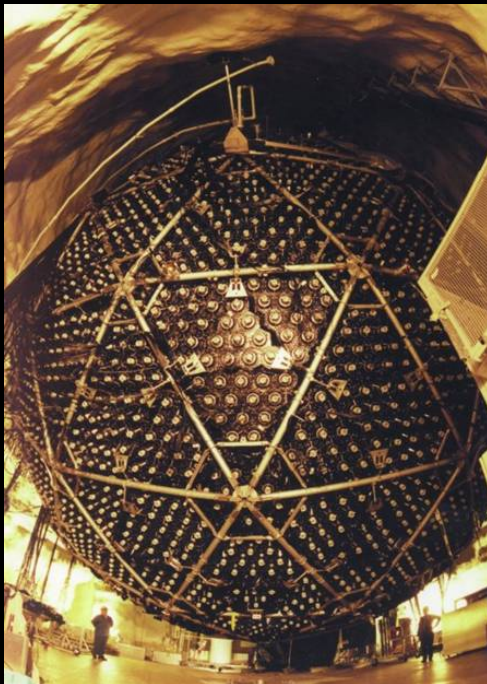
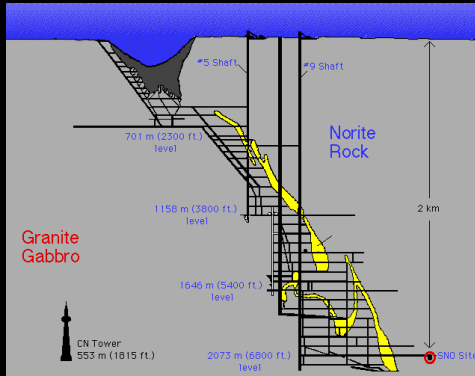
- Nouvelle physique des neutrinos !

Nécessité d'une expérience mesurant aussi ν_μ , ν_τ

Le détecteur SNO



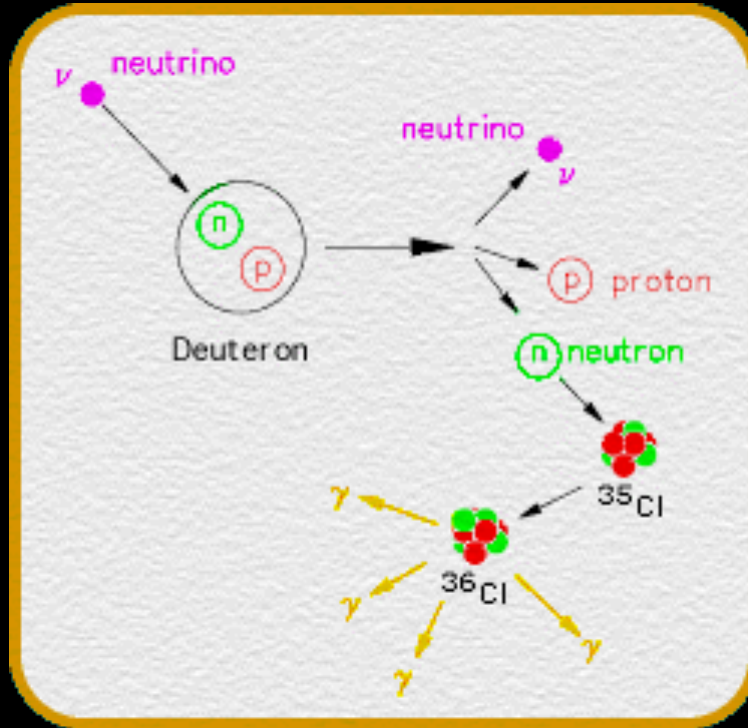
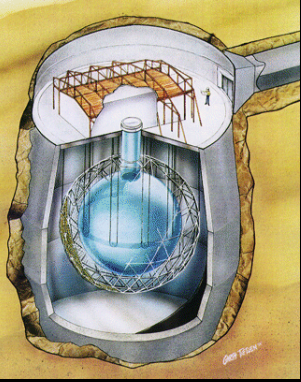
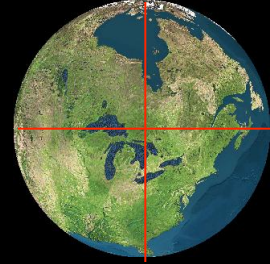
Mesure de TOUS les 'types' de neutrinos solaires ν_e , ν_μ , ν_τ



	Hydrogène
	^1_1H
	Deutérium
	^2_1H
	Proton
	Neutron

1000 tonnes d'eau lourde

2001: L'énigme résolue !



Courant neutre : détecte ν_e, ν_μ, ν_τ

Au cours de leur trajet vers la Terre une partie des neutrinos ν_e se convertissent en neutrinos ν_μ &/ou ν_τ

L'énigme des neutrinos atmosphériques

Les rayons cosmiques

La Terre est constamment bombardée d'un rayonnement cosmiques (protons, noyaux légers)

proton + azote \rightarrow pions (π)

$$\pi \rightarrow \mu + \nu_{\mu}$$

$$\mu \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_e$$



L'anomalie des ν atmosphériques

ν descendant

ν_e

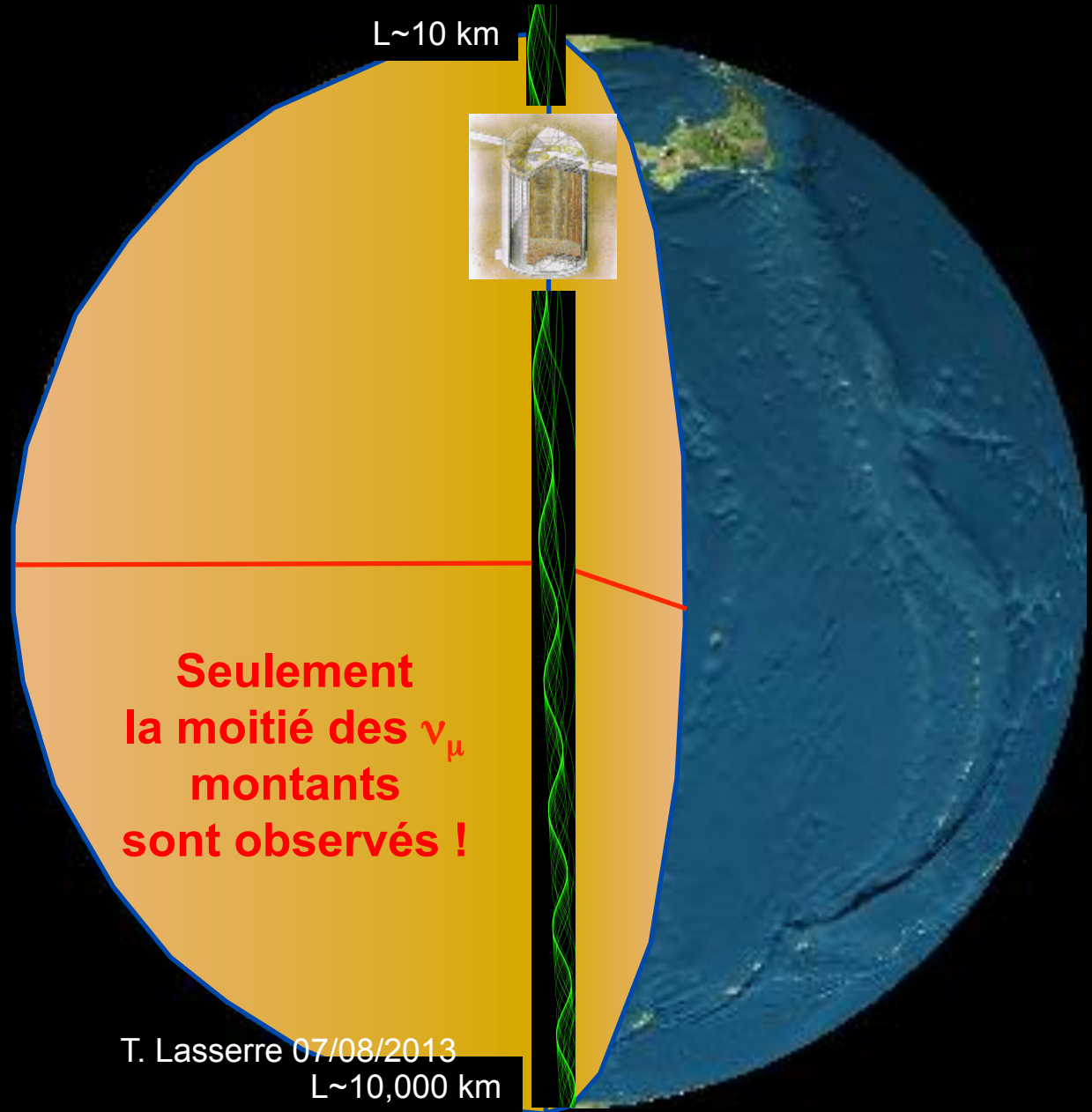
ν_μ

ν montant

ν_e

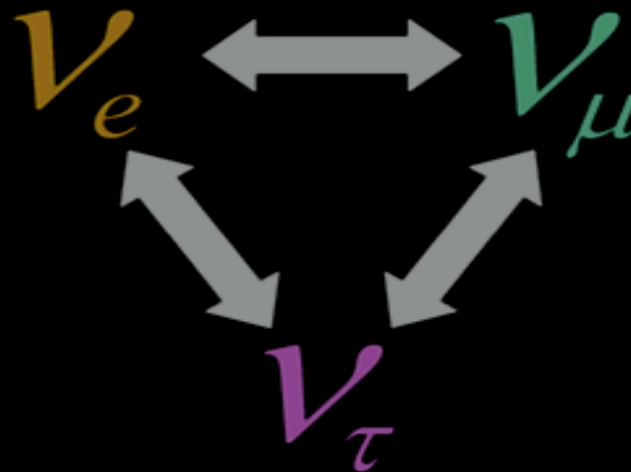
ν_μ

?



Implications en physique Des particules

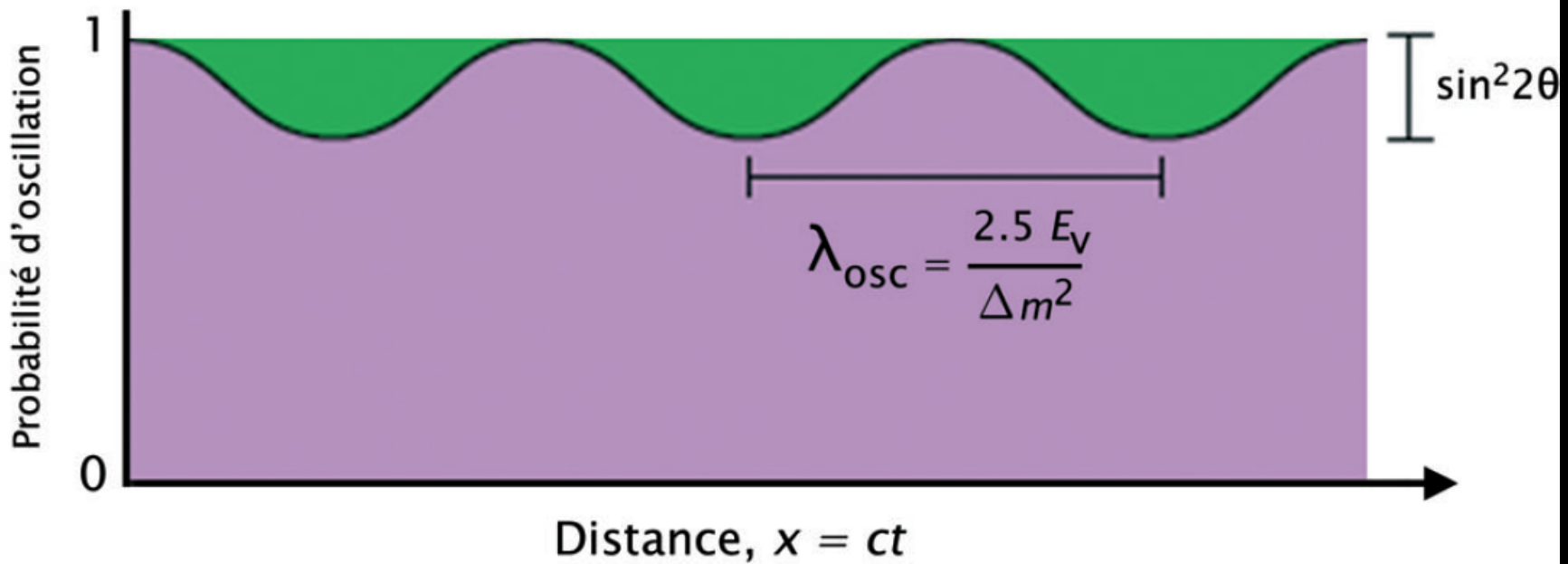
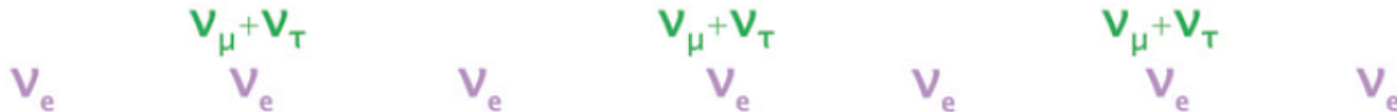
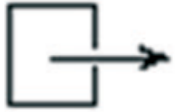
Phénomène d'interférence quantique au cours duquel un neutrino d'une saveur donnée se métamorphose spontanément en un neutrino d'une autre saveur



L'observation du phénomène implique que les neutrinos ont une masse $m_e / 10 \text{ millions} < m < m_e / 1 \text{ million}$

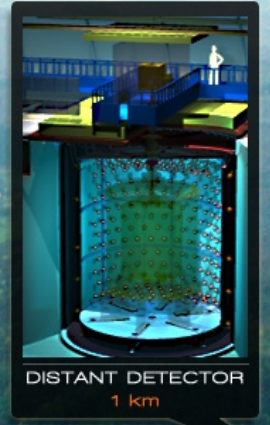
L'oscillation des neutrinos

Source

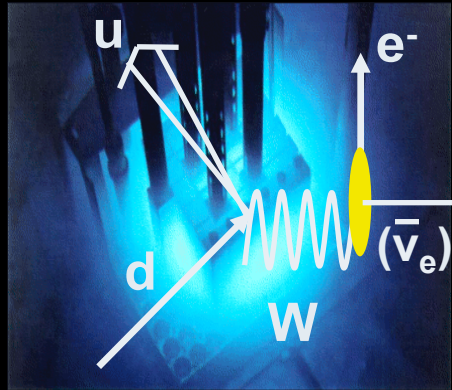


- probabilité qu'un ν_e devienne ν_μ ou ν_τ
- probabilité qu'un ν_e reste un ν_e

Etude des oscillations à Chooz



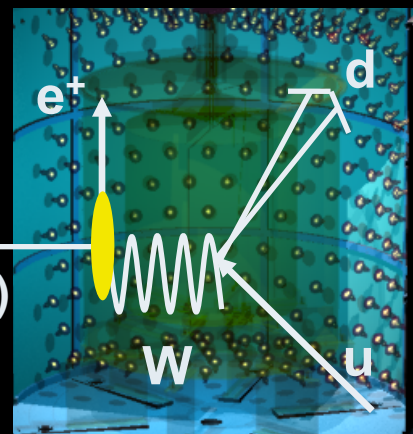
Oscillation de neutrinos à Chooz



Production dans le cœur du réacteur

Saveur purement électronique

$\bar{\nu}$



Détecteur de Neutrinos

Mélange:
Fraction électronique?
Fraction muonique?
Fraction tauique?



Comment « voir » Les neutrinos?

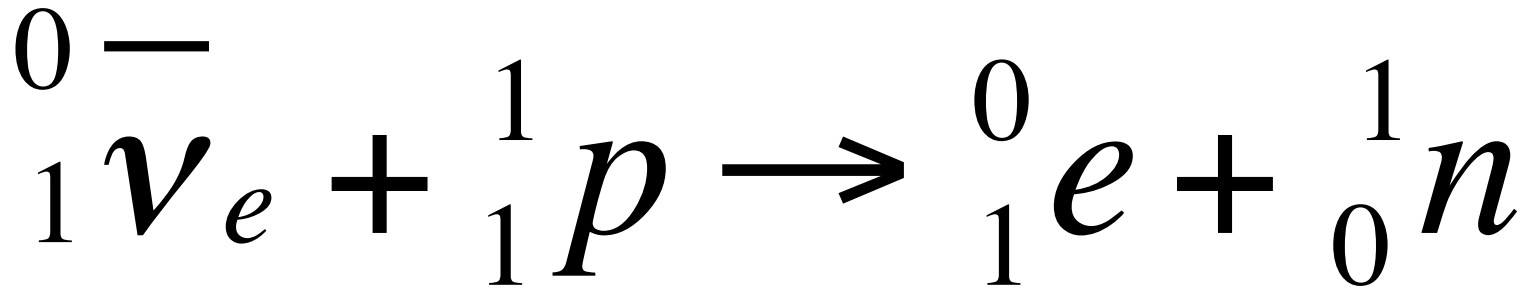
La traque des neutrinos à Chooz

1 00 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000
neutrino / jour émis par la centrale (26 zéros)

1 000 000 000 000 0000 000 000 000
neutrinos / jour dans le détecteur (19 zéros)

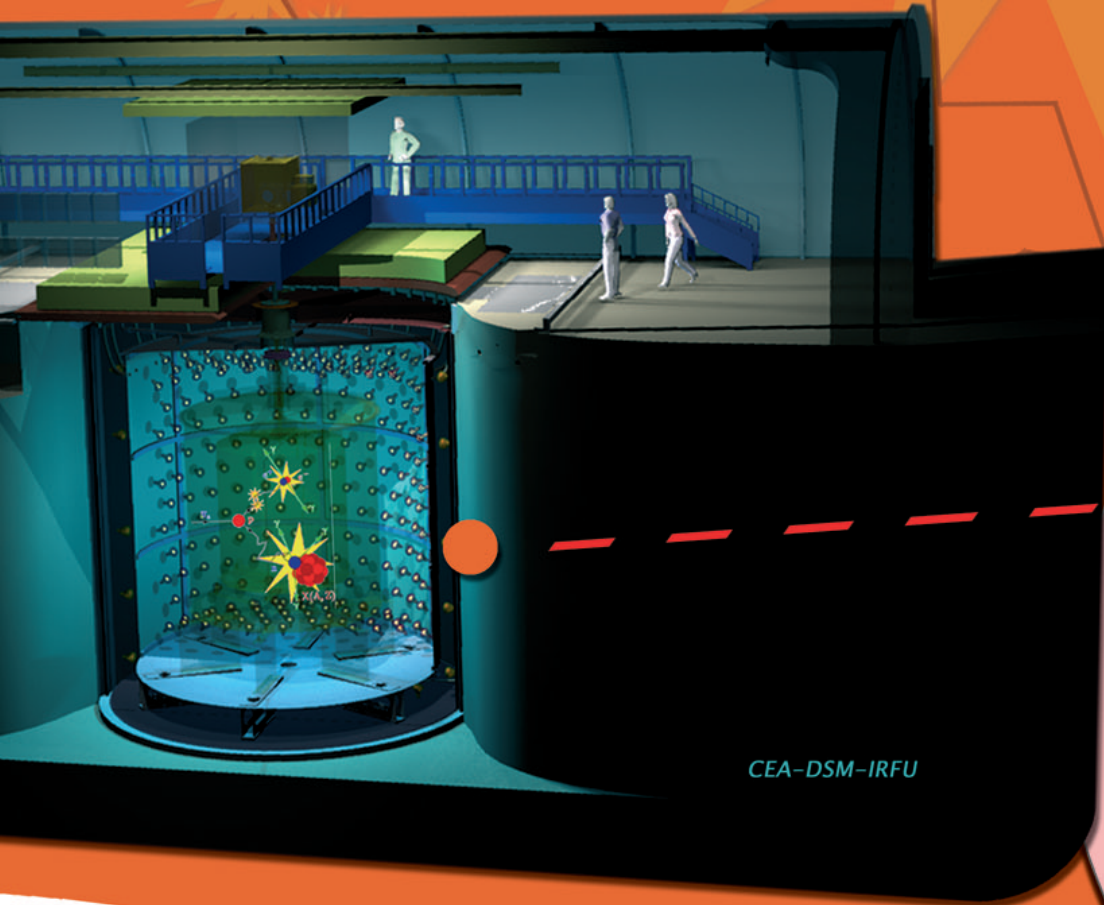
50 neutrinos / jour détectés à 1 km

Réaction de Détection: lois de conservations

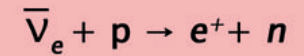


- Conservation de la charge électrique
- Conservation du nombre de masse
- Conservation de l'énergie
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation des moments angulaires (spin...)
- Conservation du nombre leptonique

Principe de détection



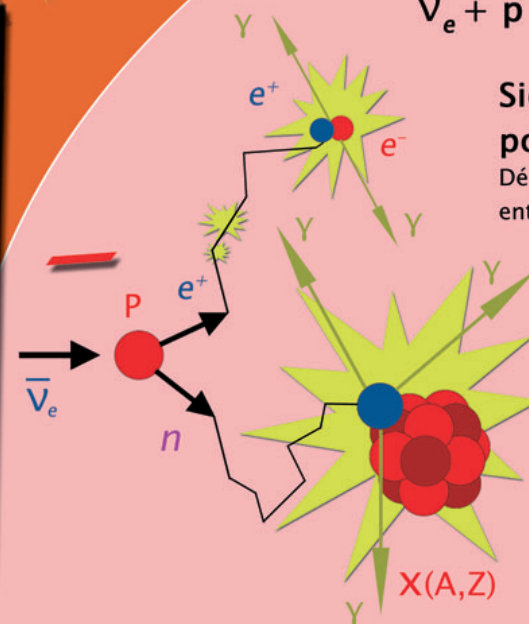
Le signal de la réaction β inverse



Signal prompt :

positron e^+

Dépôt d'énergie
entre 1 et 10 MeV



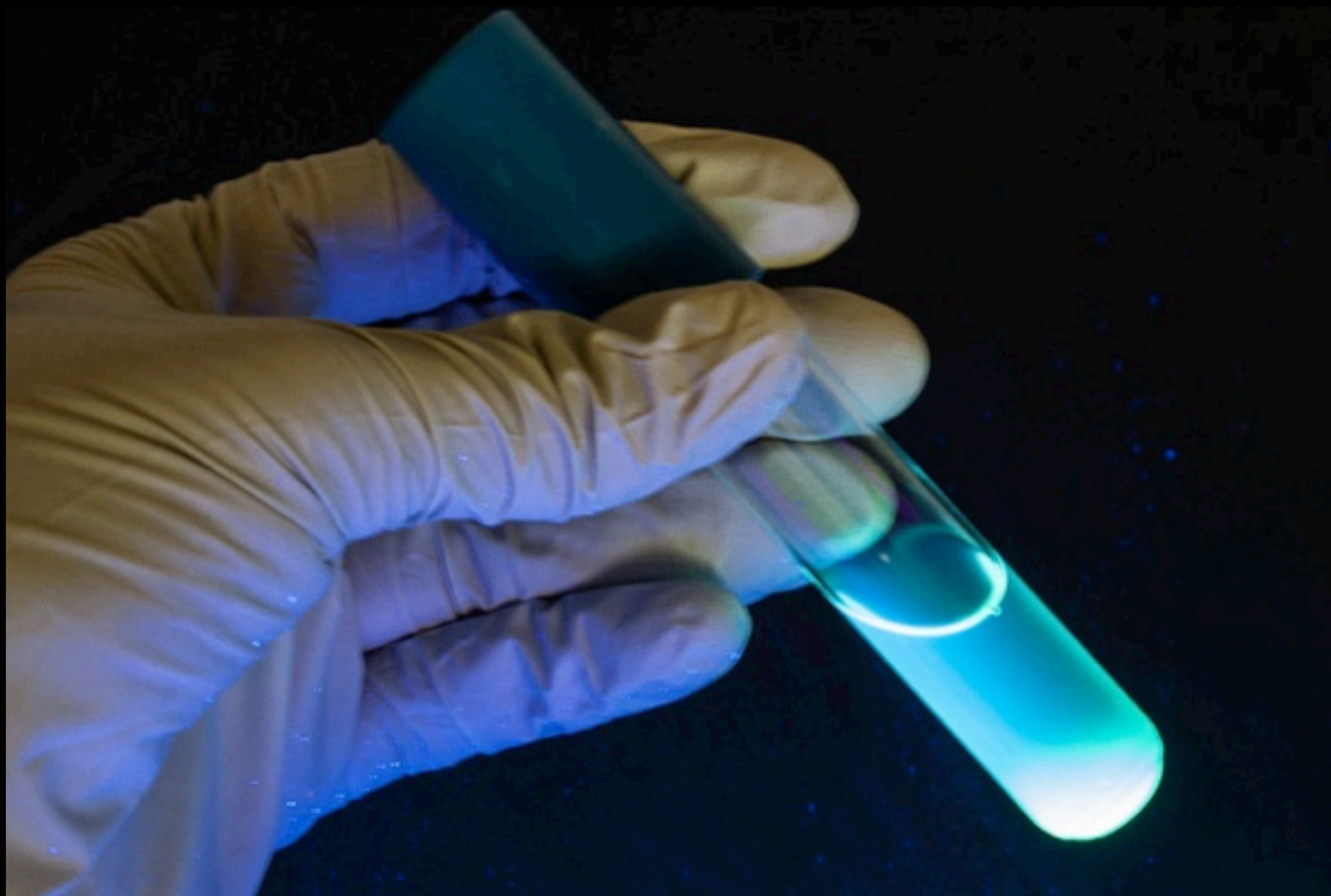
Signal retardé :

neutron n

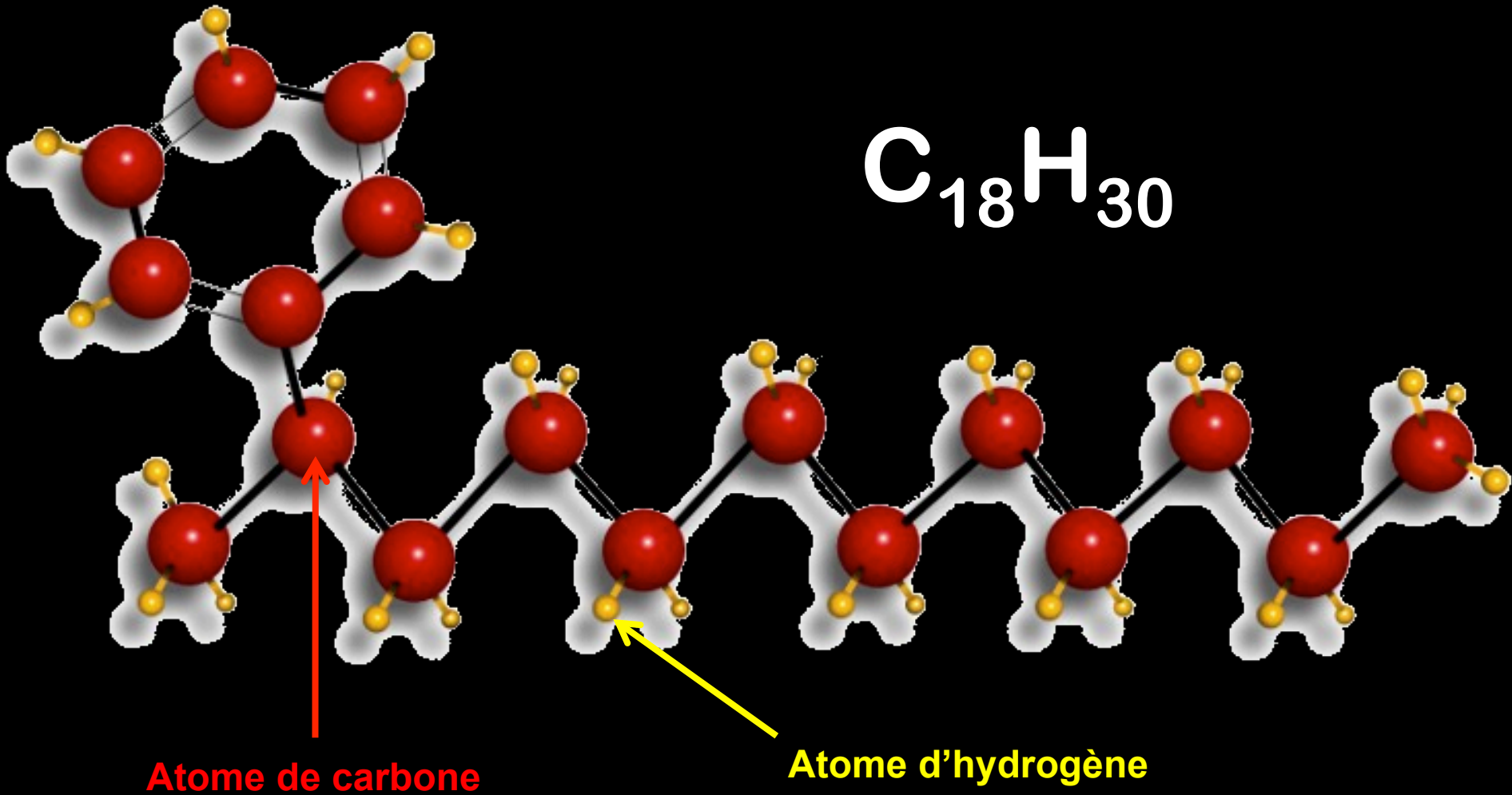
capturé par un noyau
de Gd
Dépôt d'énergie
de 8 MeV

La détection des antineutrinos utilise la réaction $\text{anti-}\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$. Le positron et le neutron sont détectés en coïncidence à quelques dizaines de microsecondes d'intervalle et avec une séparation d'une dizaine de centimètres.

Scintillation

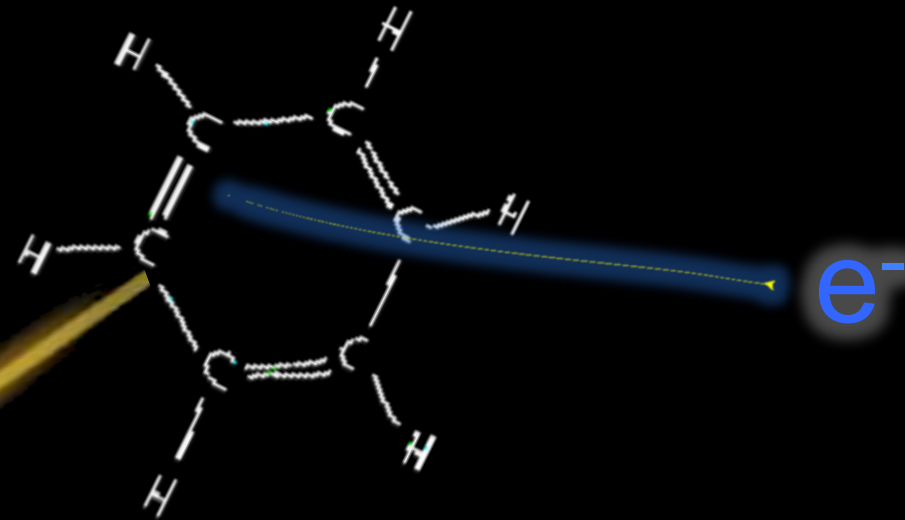


Huile Scintillante

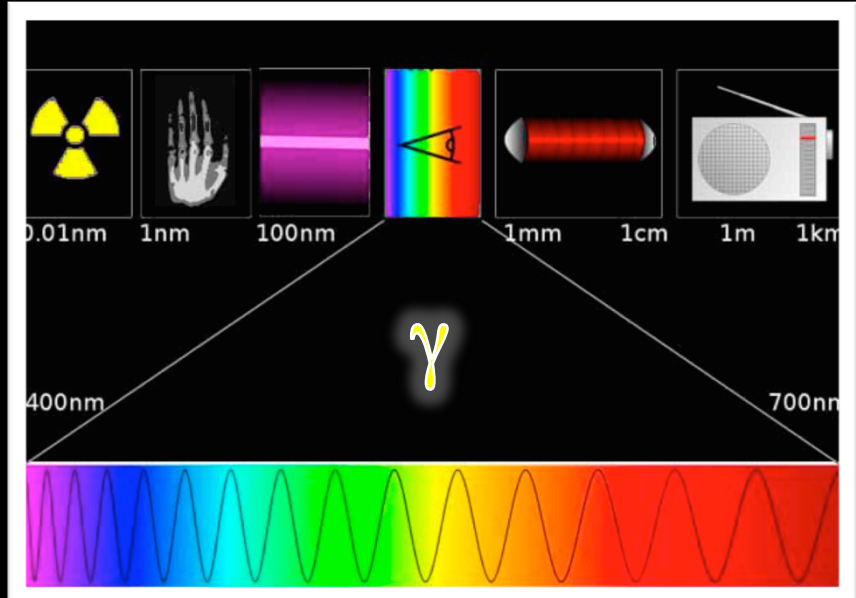


Transfer d'énergie

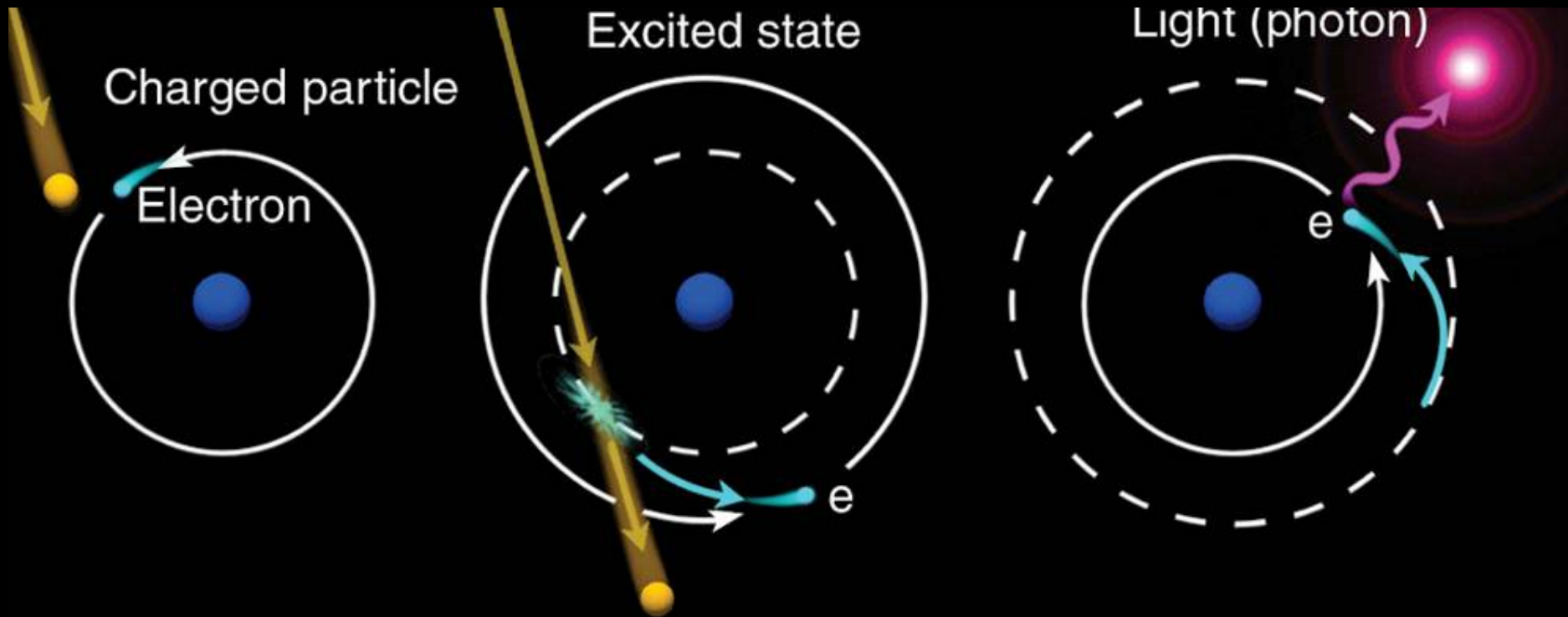
Rayonnement ionisant
(positron) induit par le neutrino



Détecteur de photons (γ)

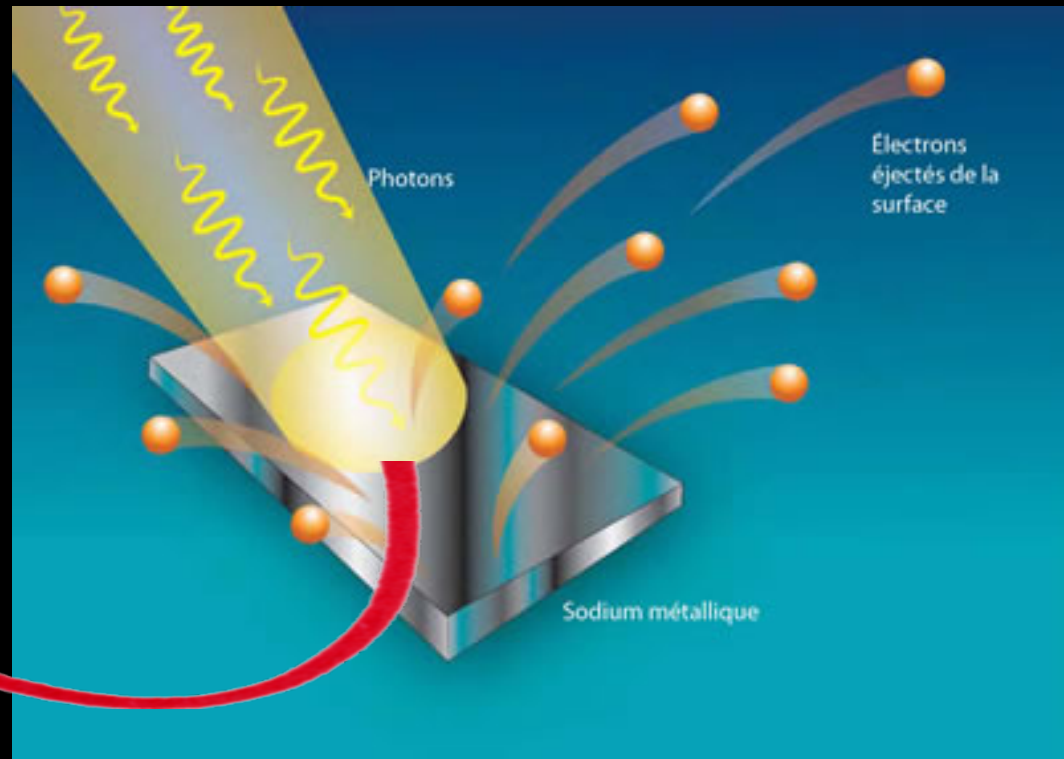
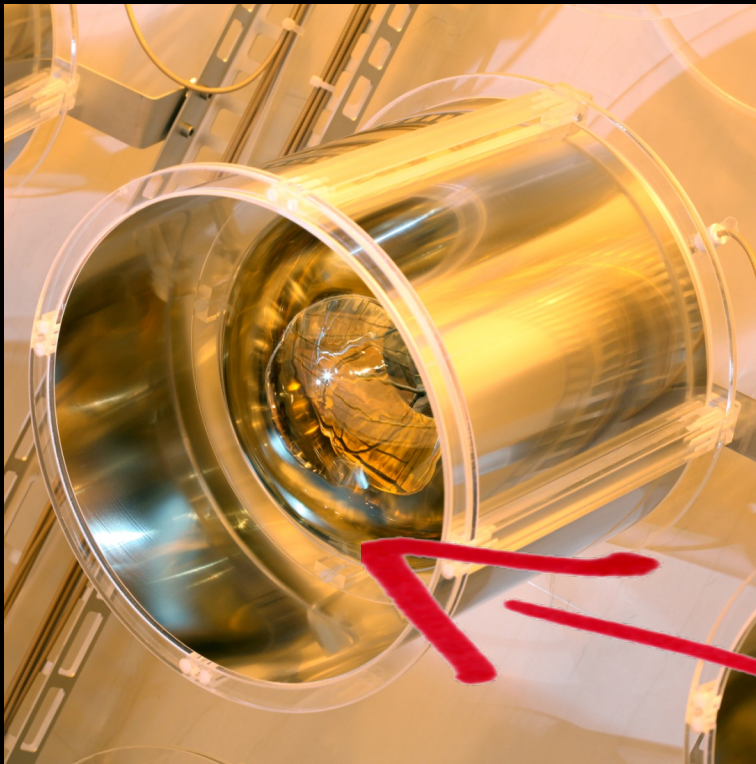


Interaction Lumière - Matière



Tube photomultiplicateur

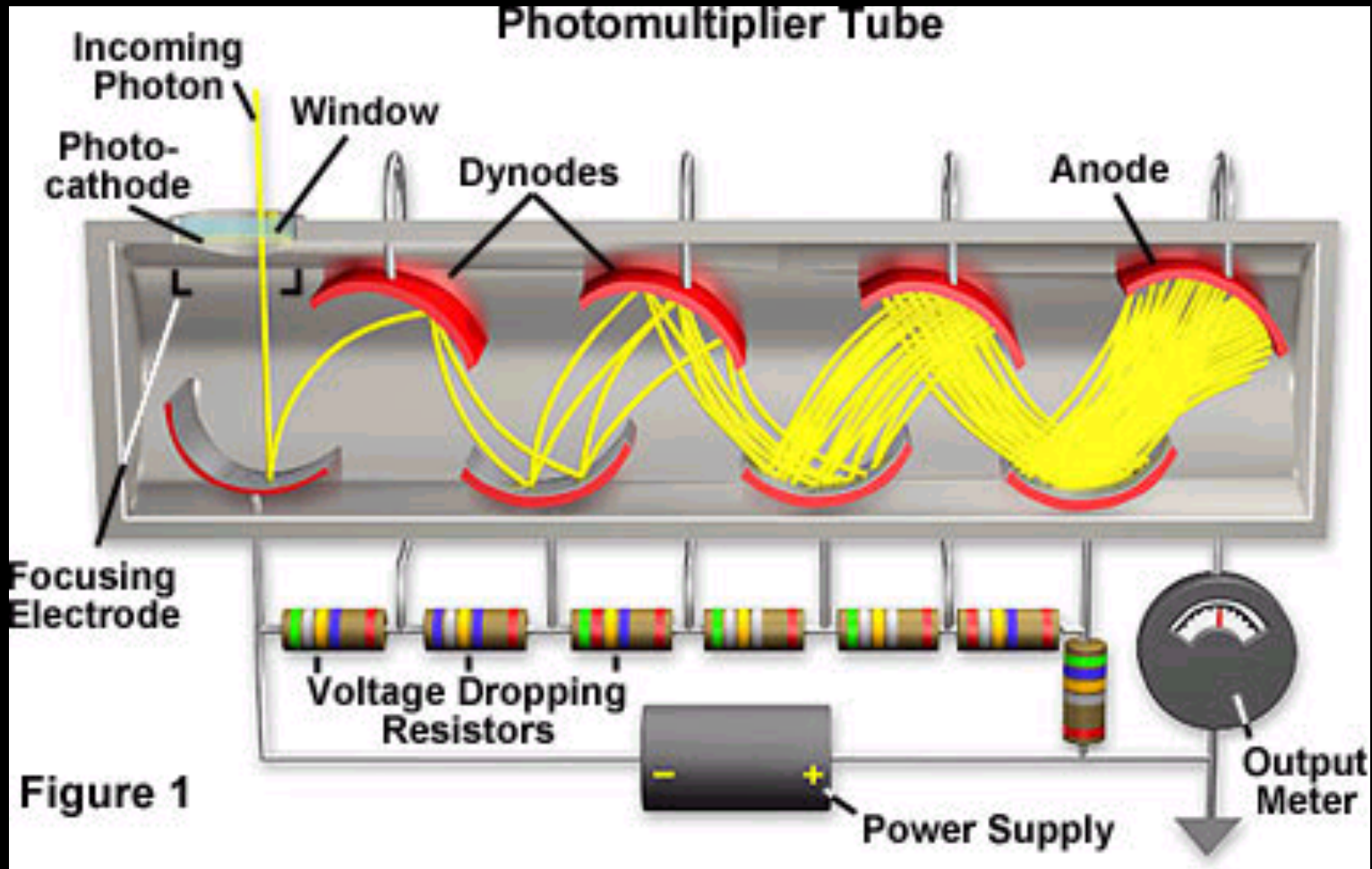
1: conversion photons \rightarrow électrons
(effet photoélectrique, Einstein , 1905)



Transformation d'un flux de photons (lumière) en flux d'électrons (courant électrique)

Tube photomultiplicateur

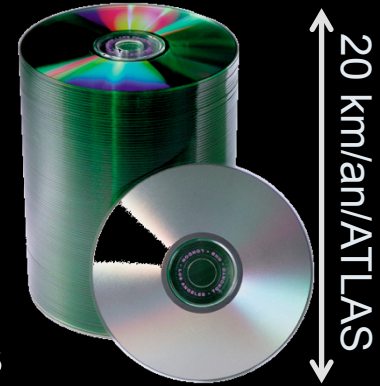
2: amplification du signal électrique (courant)



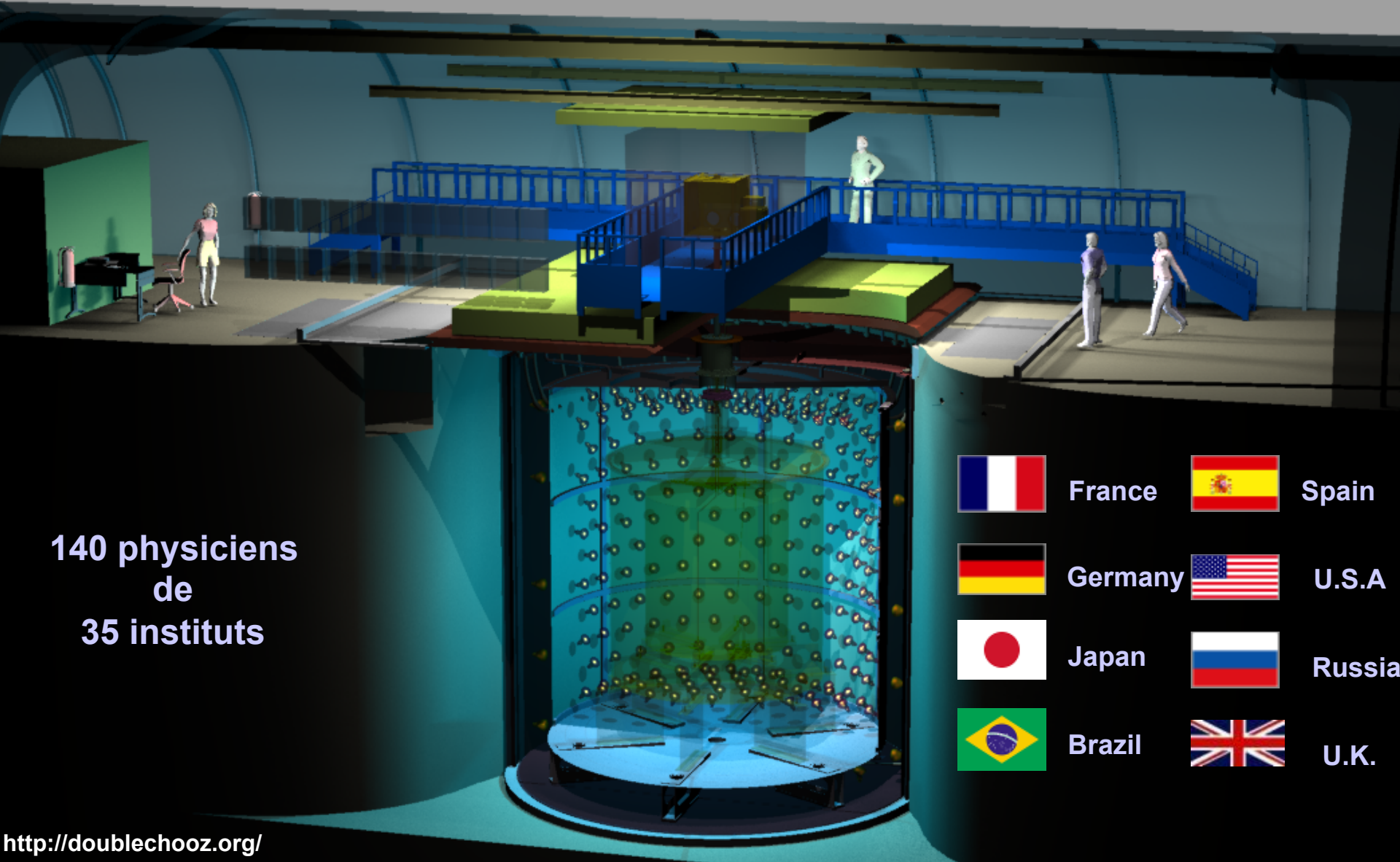
Traitement et Analyse des Données

- **Quantité phénoménale de données à traiter**
 - Etalonnage des détecteurs
 - Assemblage des éléments des sous-détecteurs
 - Reconstruction des événements physique

- **Analyse des données en vue de mesure, découvertes**
 - Des efforts internationaux
 - Double Chooz, 150 scientifiques, 35 labos, 8 pays
 - **Mesure de la 3^e oscillation en 2011**
 - ATLAS/CMS (CERN), 3000 scientifiques, 180 instituts, 40 pays
 - **Découverte du boson de Higgs en 2012**



Double Chooz



140 physiciens
de
35 instituts



France



Spain



Germany



U.S.A



Japan



Russia



Brazil



U.K.

<http://doublechooz.org/>



4 ans d'étude – 3 ans de construction





2003



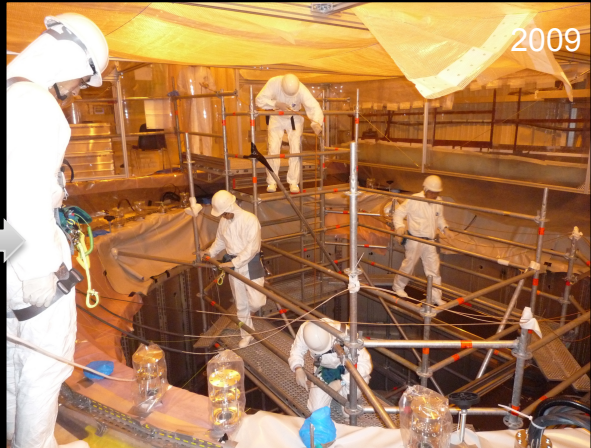
2008



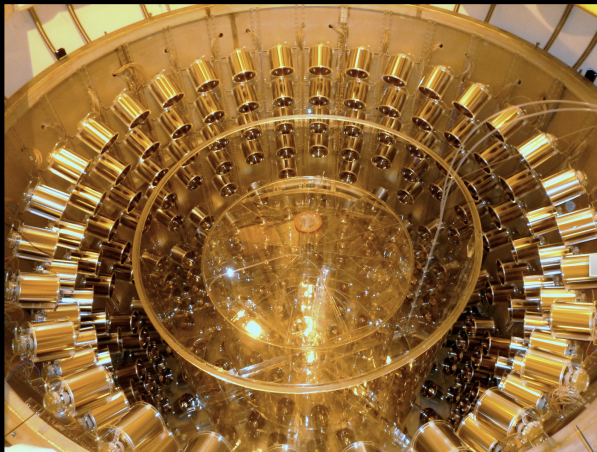
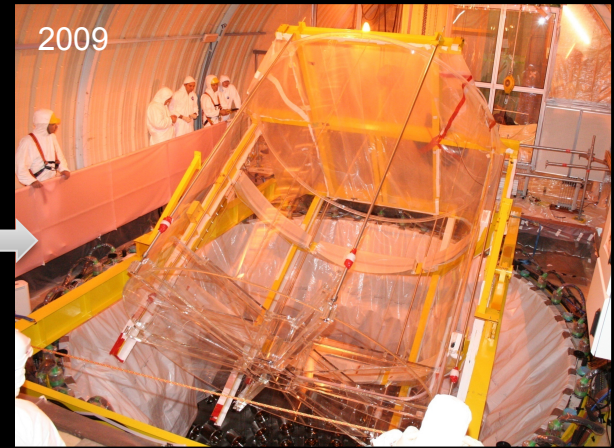
2009



2009



2009



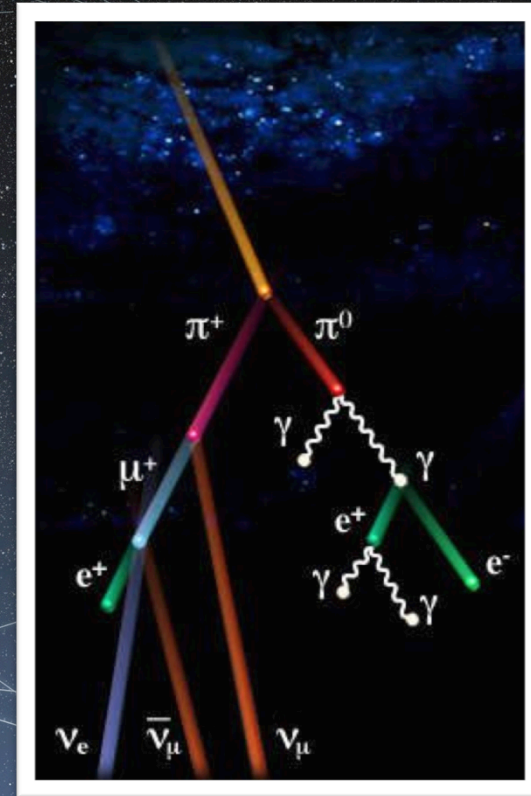
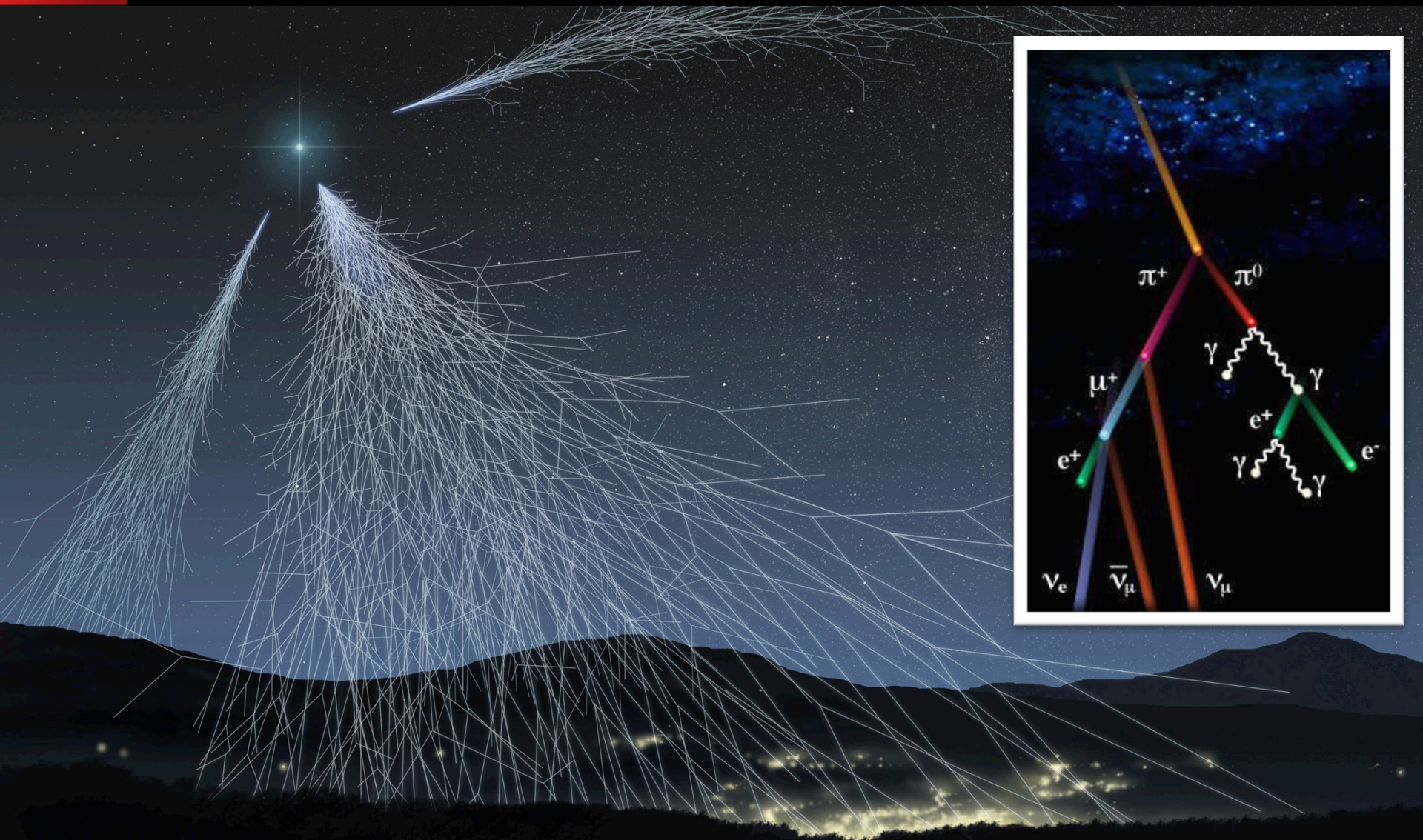
2010



2011



S'affanchir des rayons cosmiques



T. Lasserre 07/08/2013

100 muons cosmiques / seconde / m²

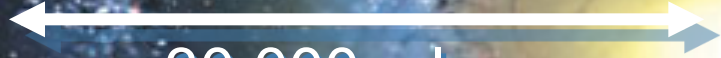
Sonder l'Univers

T. Lasserre 07/08/2013

La Voie Lactée



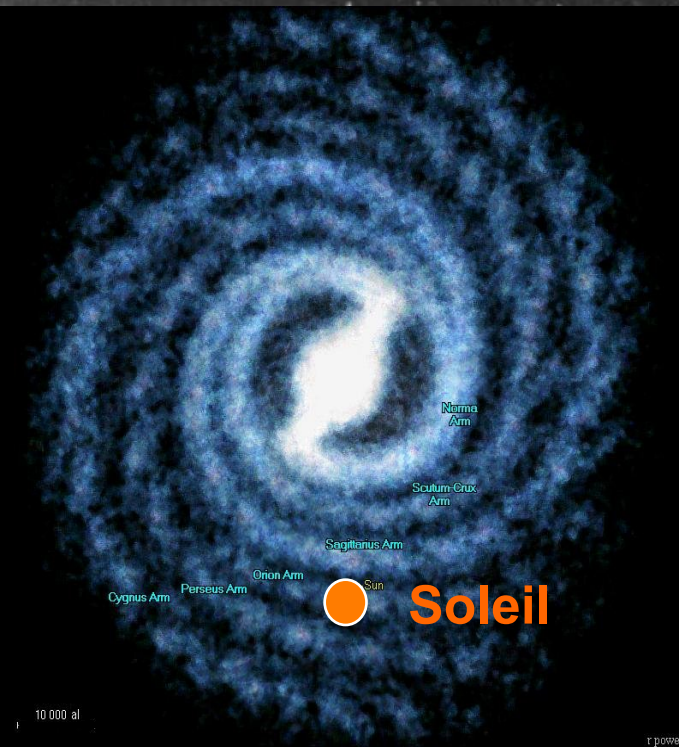
30 000 a.l.



T. Lasserre 07/08/2013

160 000 000 années-lumière

Voie lactée



Grand Nuage de Magellan



160 000 années-lumière

La supernova 1987A, 23/02/1987

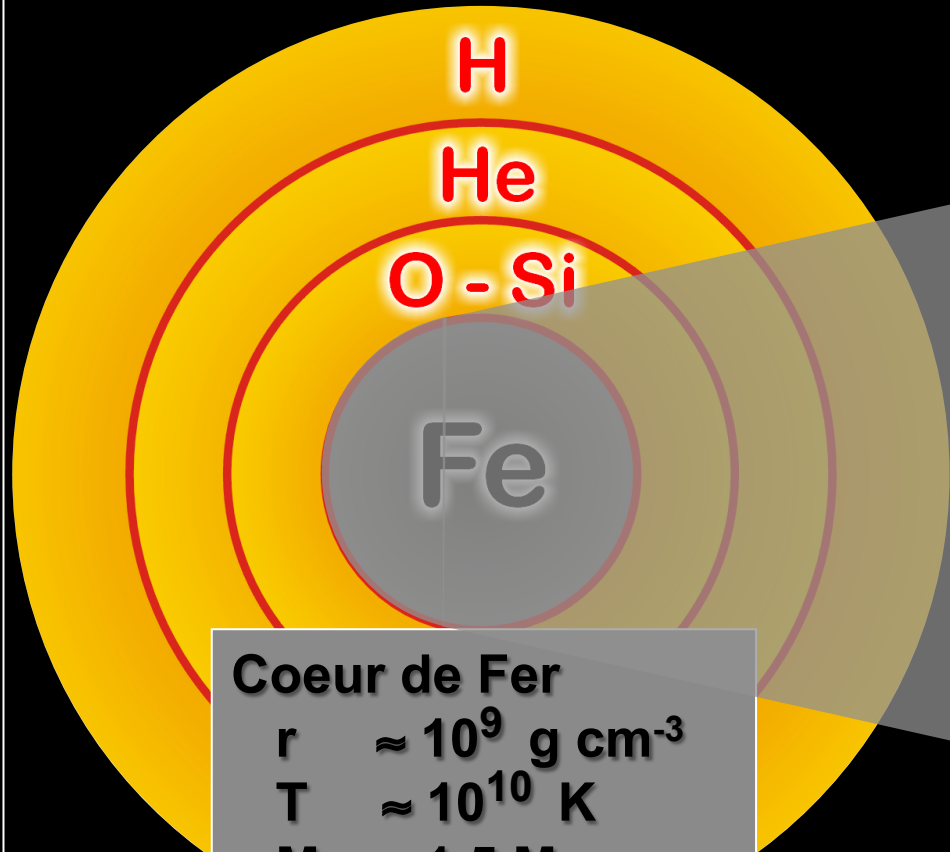


T. Lasserre © 07/08/2003 Australian Observatory

160,000 années lumières

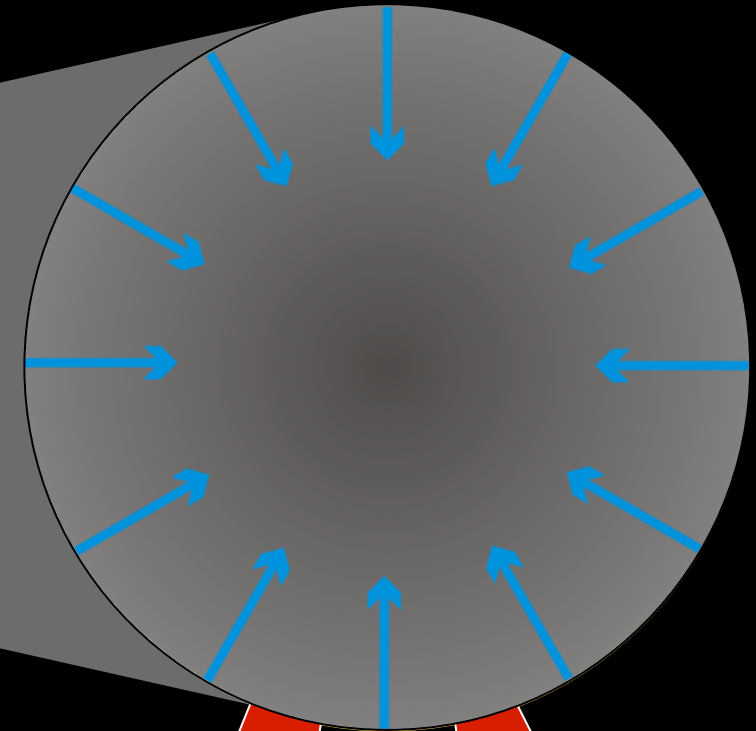
Effondrement d'une étoile

Structure en pelure d'oignon



Coeur de Fer
 $r \approx 10^9 \text{ g cm}^{-3}$
 $T \approx 10^{10} \text{ K}$
 $M_{\text{Fe}} \approx 1.5 M_{\text{soleil}}$
 $R_{\text{Fe}} \approx 3000 \text{ km}$

Effondrement



**Fusion de
L'hélium**

**Fusion de
L'hydrogène**

Supernova

Naissance d'une étoile à neutrons

Explosion

50 km

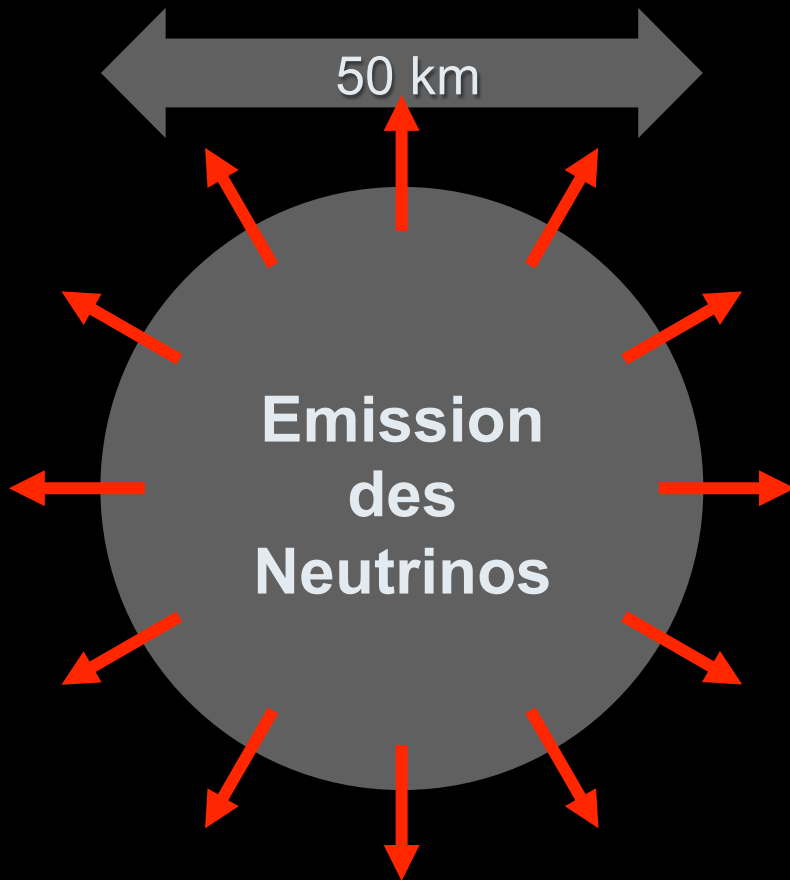
proto-étoile à neutron

$$\rho \quad \rho_{nuc} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

$T \quad 30 \text{ MeV}$

Supernova

Proto-étoile à neutrons



- Implosion d'une étoile supermassive (8-40 masse solaire)

- Masse de l'étoile convertie en énergie : 10^{46} J

- 99% de l'énergie sous forme de neutrinos

- 1% sous forme d'énergie cinétique de l'explosion

- Seulement 0,01% de l'énergie émise sous forme de lumière... Mais aussi lumineux qu'une galaxie toute entière !

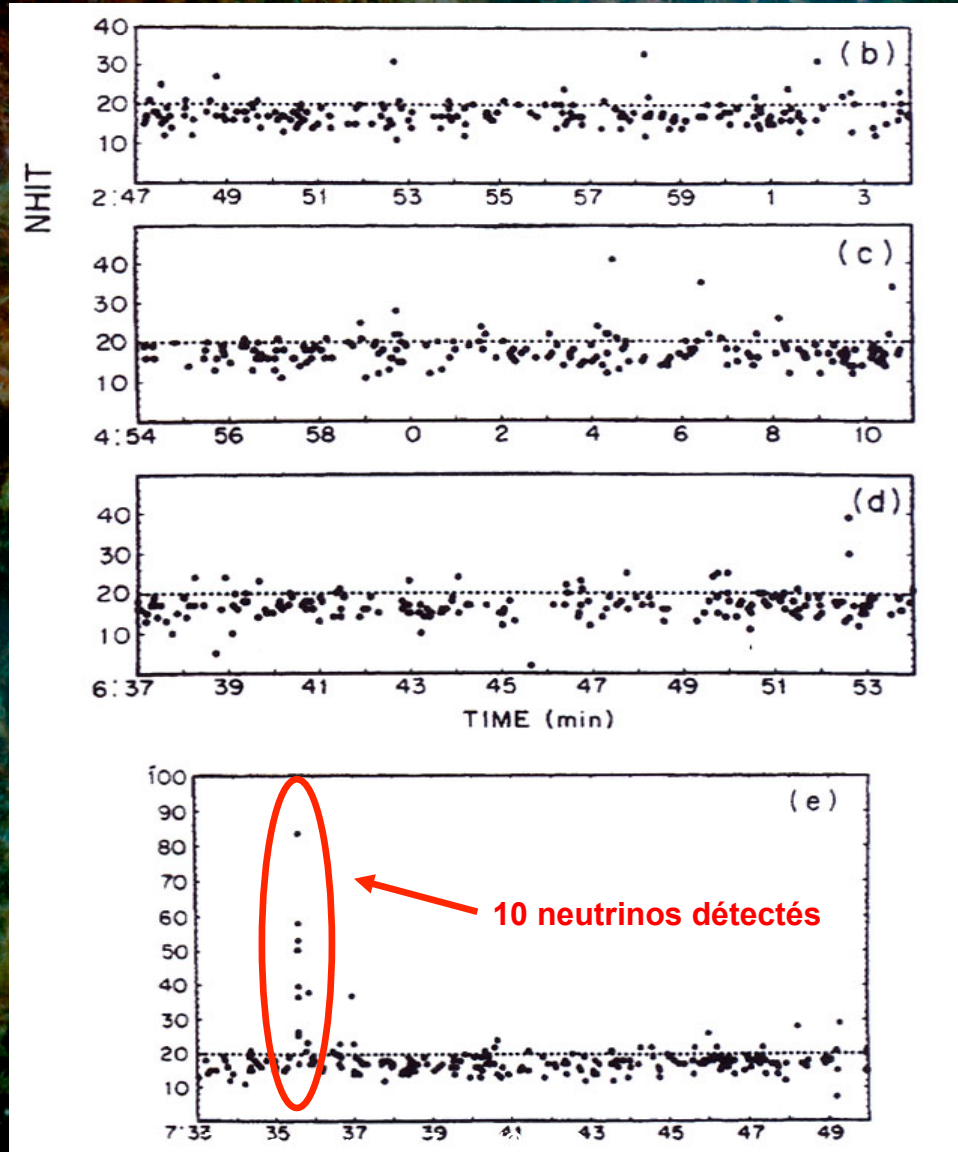
Signal observé dans Kamiokande

2h47

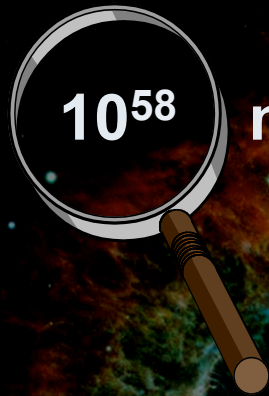
4h34

6h37

7h32



SN 1987A : retour sur les neutrinos

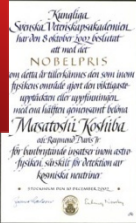


10^{58} neutrinos émis par SN1987A

il y a 150000 ans !

450 millions de milliards dans Kamiokande ($4,5 \cdot 10^{17}$)
quelques heures avant la lumière de l'explosion...

Nombre total de neutrinos détectés : **10** (en 10s)



Prix Nobel de Physique 2002



Masatoshi Koshiba

Raymond Davis Jr

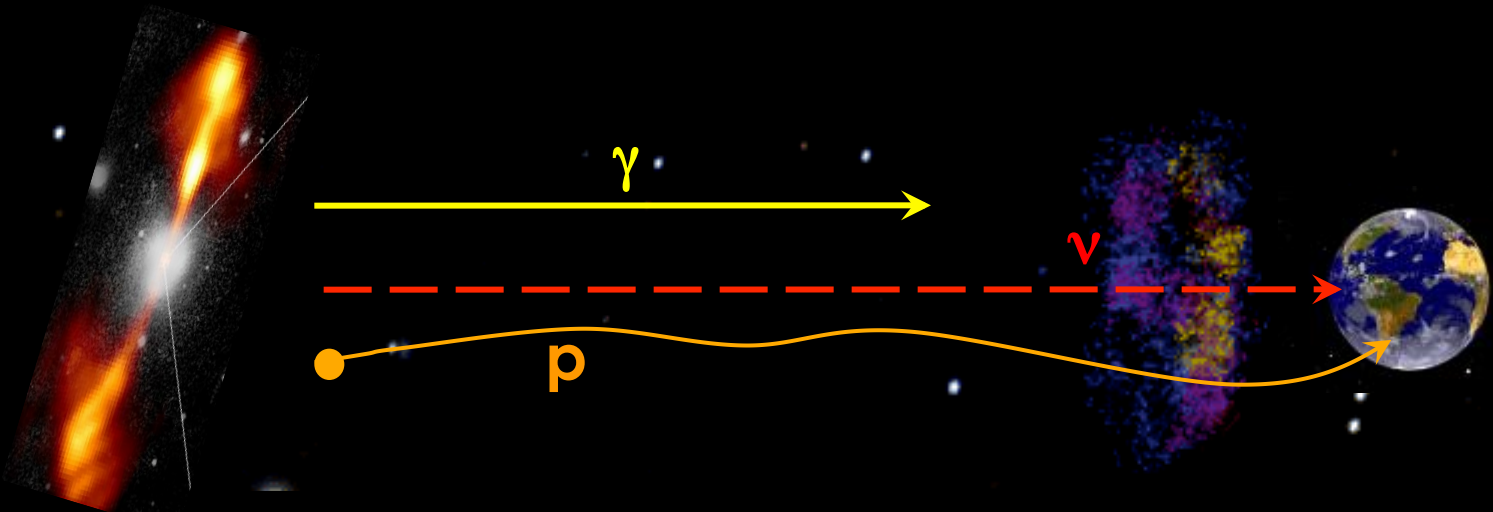


”pour leurs travaux pionniers dans le domaine de l’astrophysique, en particulier pour la détection des neutrinos cosmiques”

> 100 000 000 années-lumière

- Le neutrino comme message cosmique:
 - stable
 - neutre
 - interagit faiblement

- Mais nécessite de TRES gros volumes de détection...



Quasar
NGC 4261

Noyaux Actifs de Galaxie

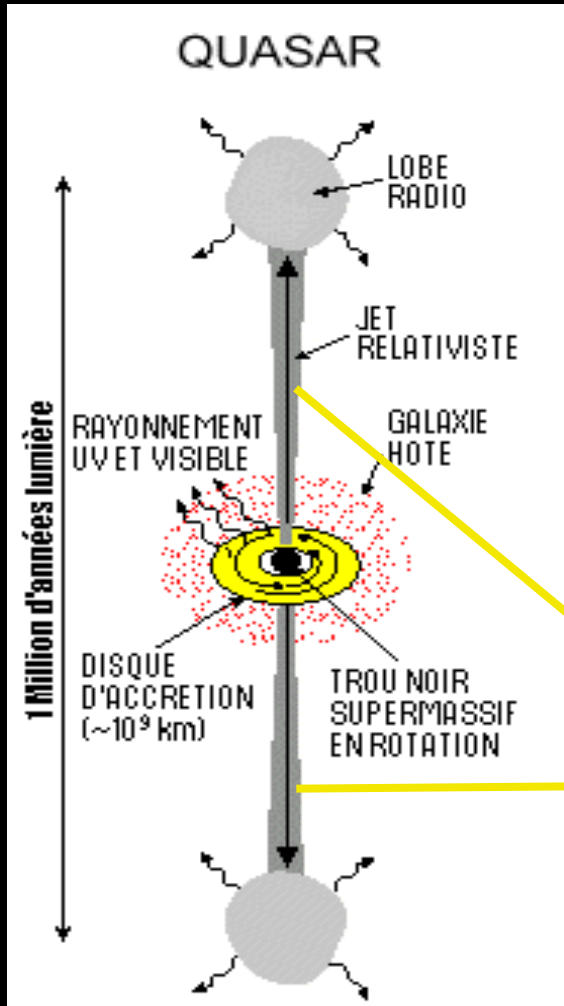
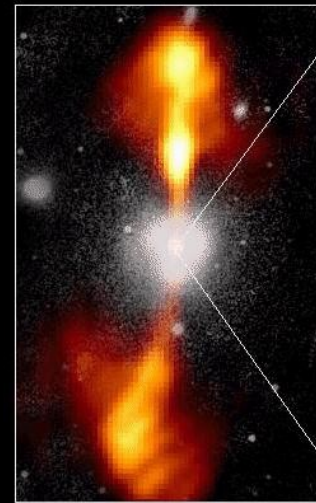
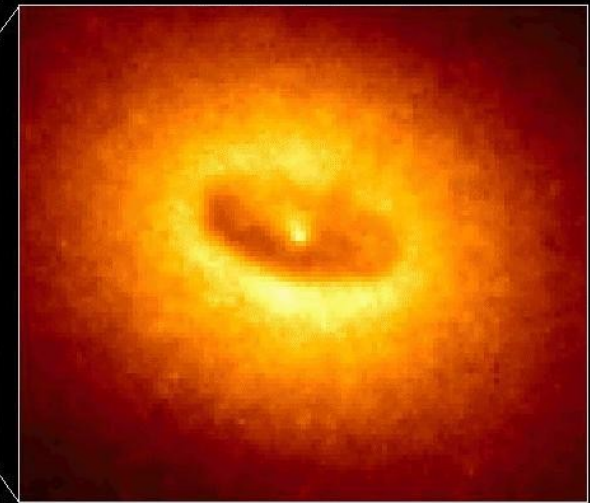


Image Radio /Optique prise au sol



360 secondes d'arc
88000 années-lumière

Image du disque de gaz et de poussière prise avec le HST

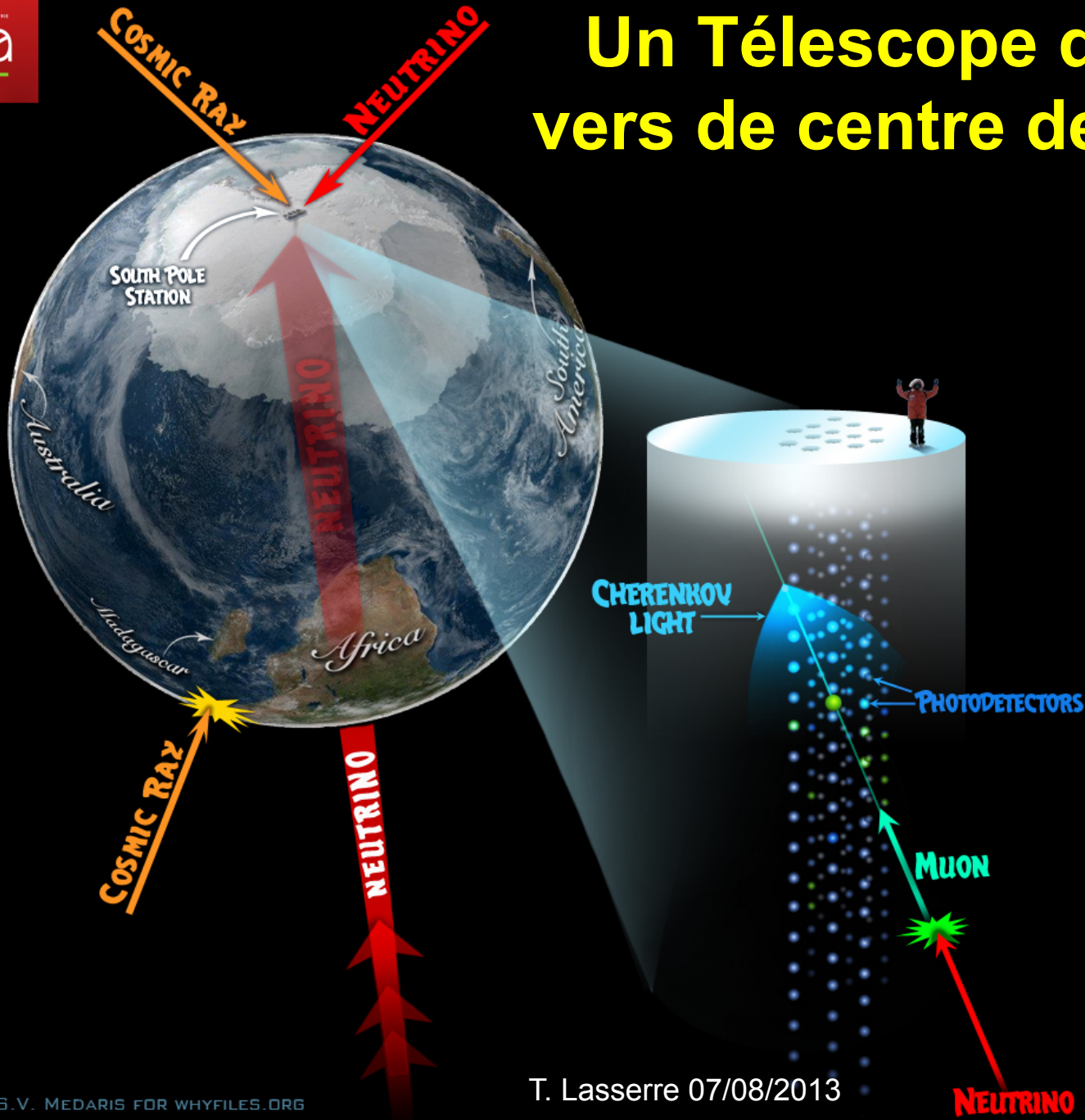


1.7 secondes d'arc
400 années-lumière

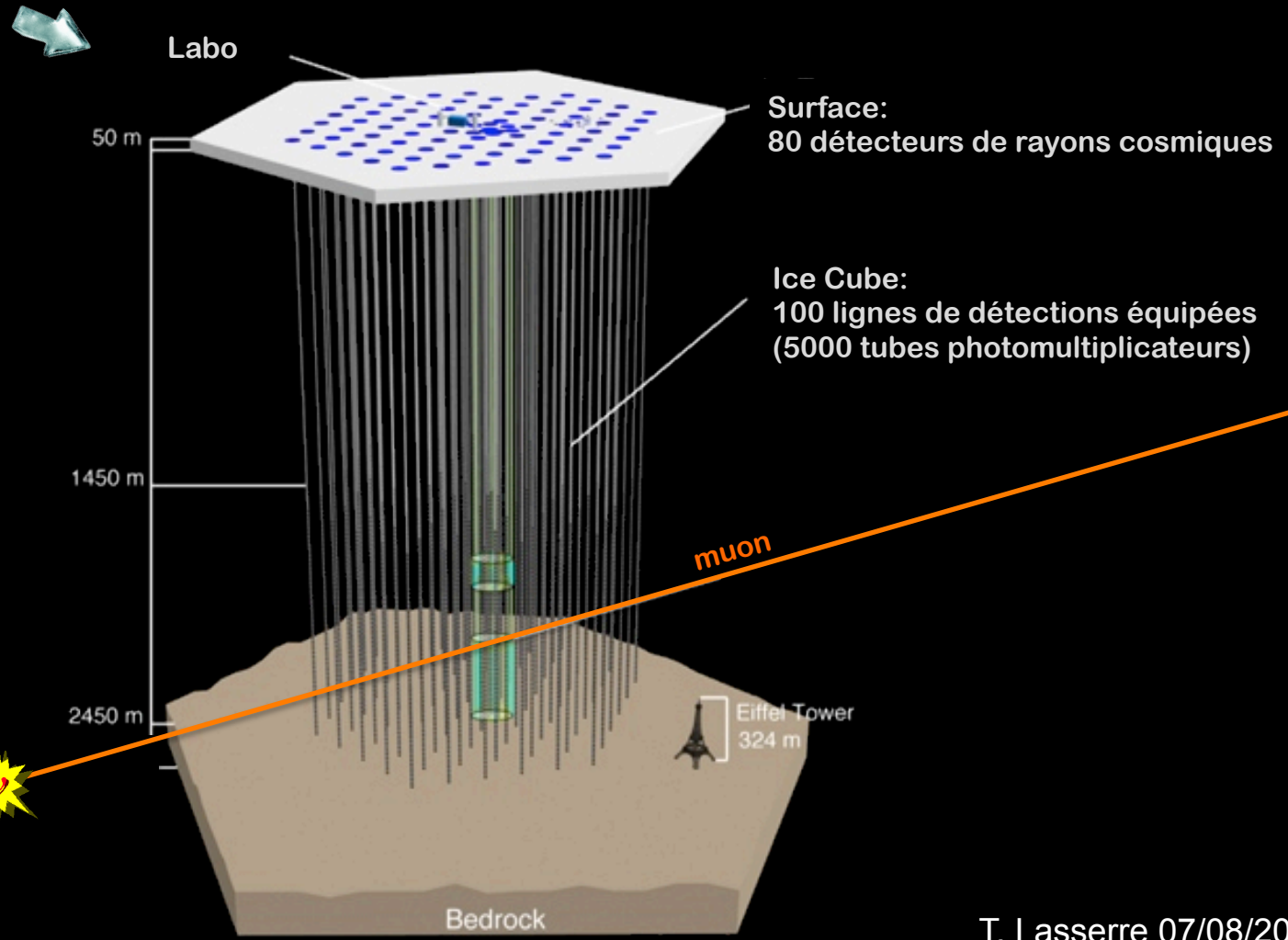
Electrons → Photons (γ)

Protons → π et K → Neutrinos

Un Télescope qui pointe vers de centre de la Terre...

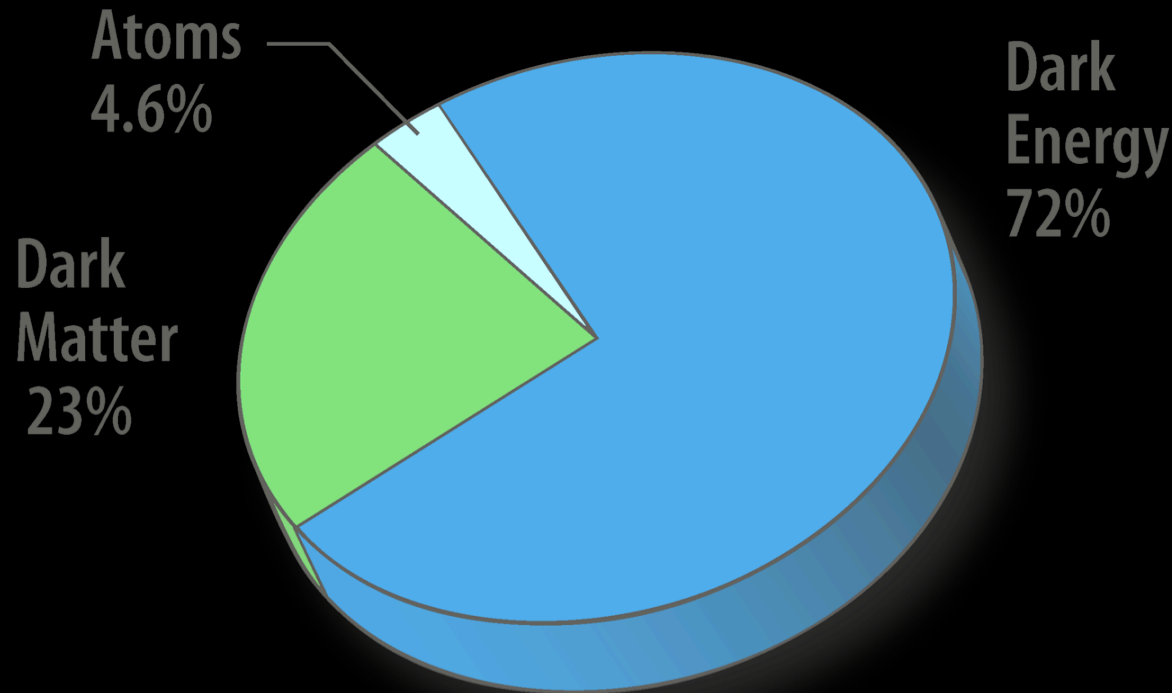


Télescope à neutrinos ICE CUBE



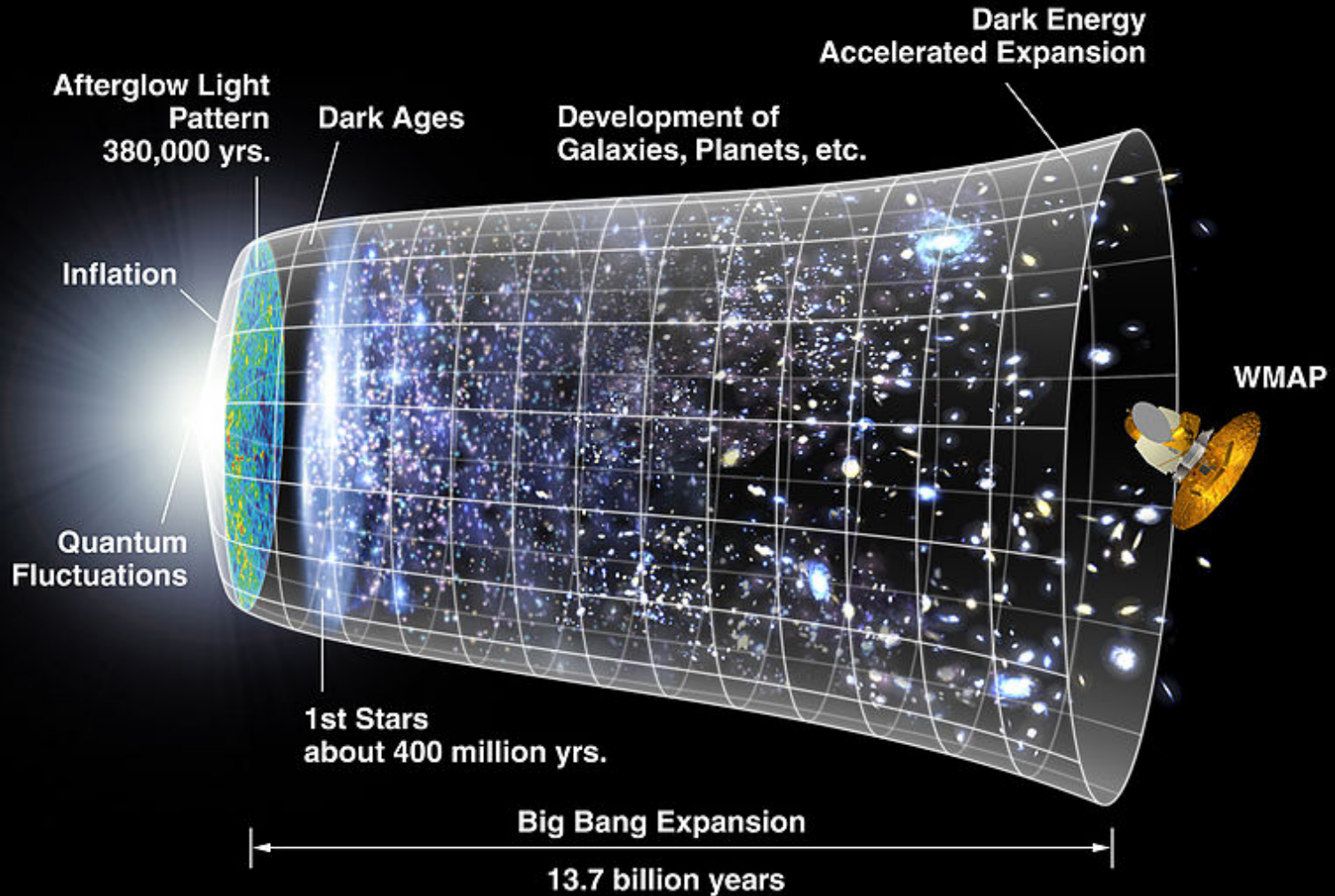
L'Univers d'aujourd'hui: Composition énergétique ($E=mc^2$)

- Neutrinos <3%?
- Etoiles & Galaxies ~0.5%



**Matière noire & Energie noire:
95% de l'Univers encore mystérieux...**

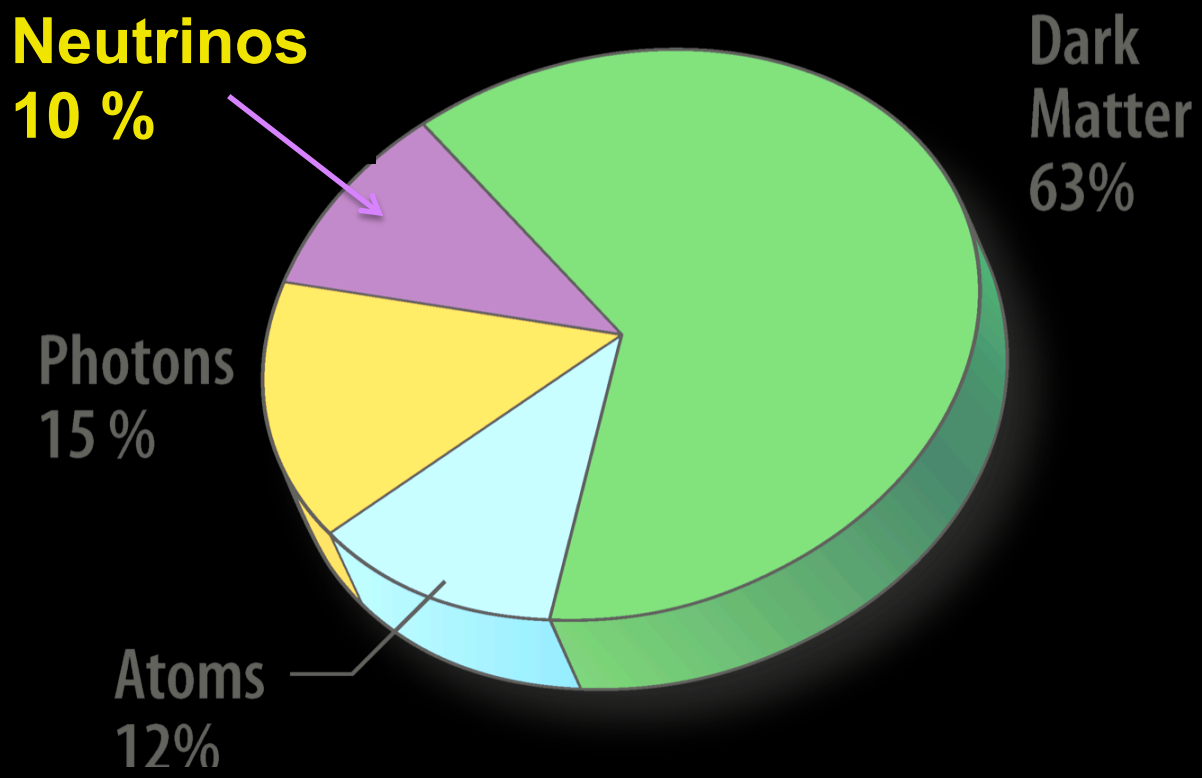
Histoire de l'Univers



Découplage $t_{\text{big-bang}} + 1\text{s} \rightarrow$ Rayonnement fossile de neutrinos (1.9K)
0,0000005 protons / cm^3 & **330 neutrinos / cm^3**

L'Univers âgé de 380,000 ans

Composition énergétique ($E=mc^2$)



Asymétrie Matière - Antimatière

Au moment du **Big-Bang**: autant de matière que d'antimatière



La prépondérance de la matière sur l'antimatière (**1 milliard contre 1**) s'est développée après la création des premières particules

Une différence de comportement entre Neutrino et anti-neutrinos de l'Univers primordial pourrait être à l'Origine de l'excès de Matière: c'est la Leptogénèse

Ce qu'il faut retenir..

1 milliard de neutrinos pour chaque e^- , p, n

Les neutrinos interagissent très ... très faiblement

Les neutrinos ont une masse d'au plus $10^{-6} m_{\text{electron}}$

Les neutrinos oscillent d'une saveur à l'autre

L'Univers est observable au travers des neutrinos

Les neutrinos ont une utilité sociétale

Existe t'il un 4^e neutrino ?

Famille de particules élémentaires...



Le Neutrino:

- Le plus léger
- Le plus faible
- Il est arrivé alors qu'il était inattendu ...
- Il se comporte souvent bizarrement
- Il attire toujours l'attention de la grande famille des physiciens des particules ...

Merci pour votre attention