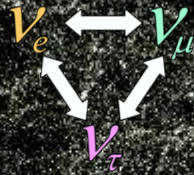


Les Neutrinos de L'Univers



Conférence à la Société Astronomique de France

Thierry Lasserre (physicien au CEA-Saclay)

18/01/2014

Une idée reçue...

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



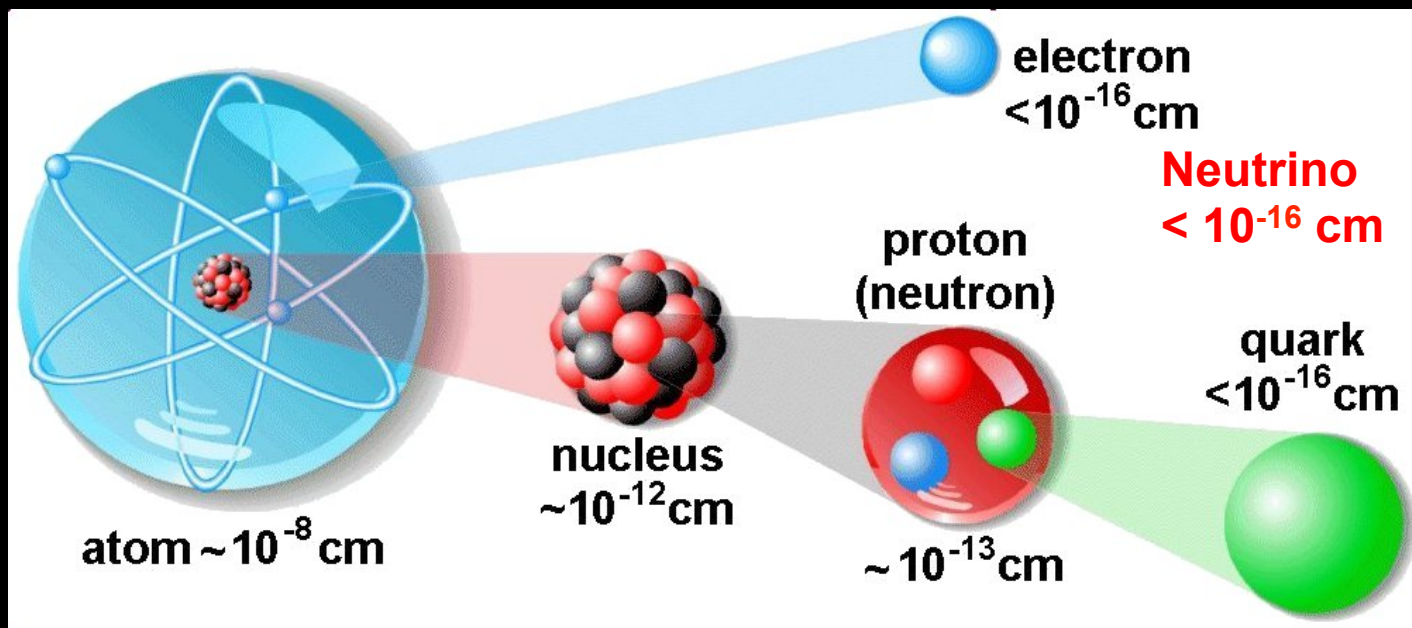
Ne pas oublier le discret (ν)

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

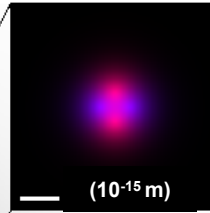
A la recherche du Neutrino ...



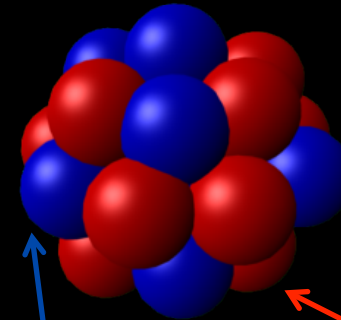
Noyau Atomique de potassium

40
19 **K**

Atome (noyau + électron)



Noyau Atomique



Z protons (charge $+e$)

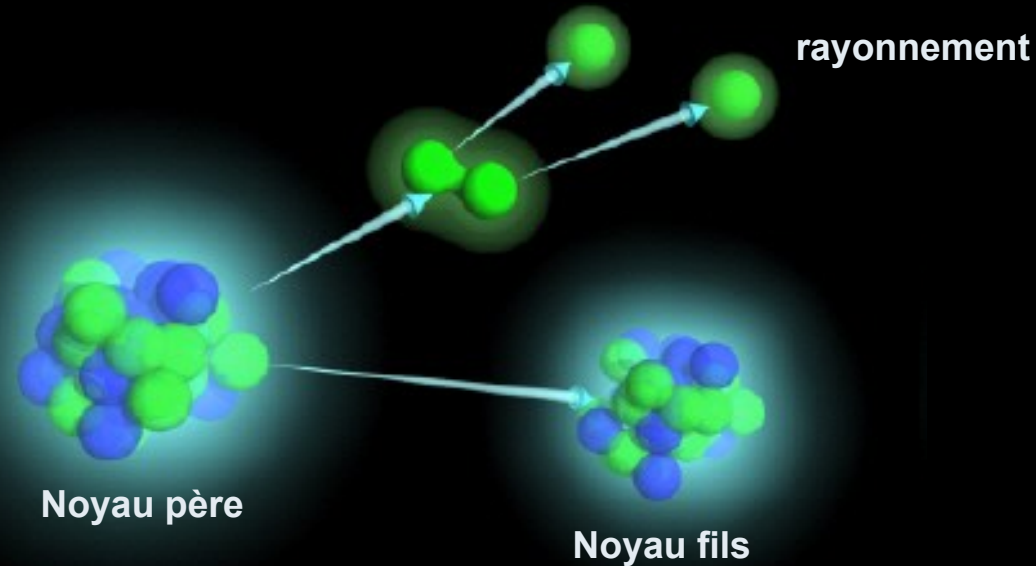
N neutrons (neutres)

$A = Z + N$ nucléons

1 Ångstrom (10⁻¹⁰ m)

Radioactivité

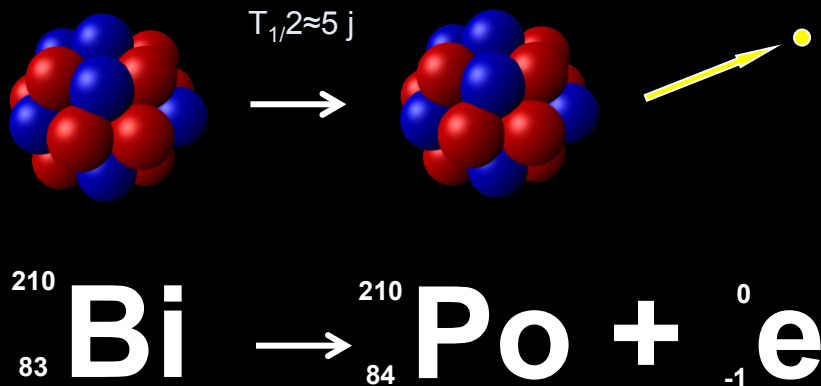
Phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables



Le paradoxe des désintégrations β

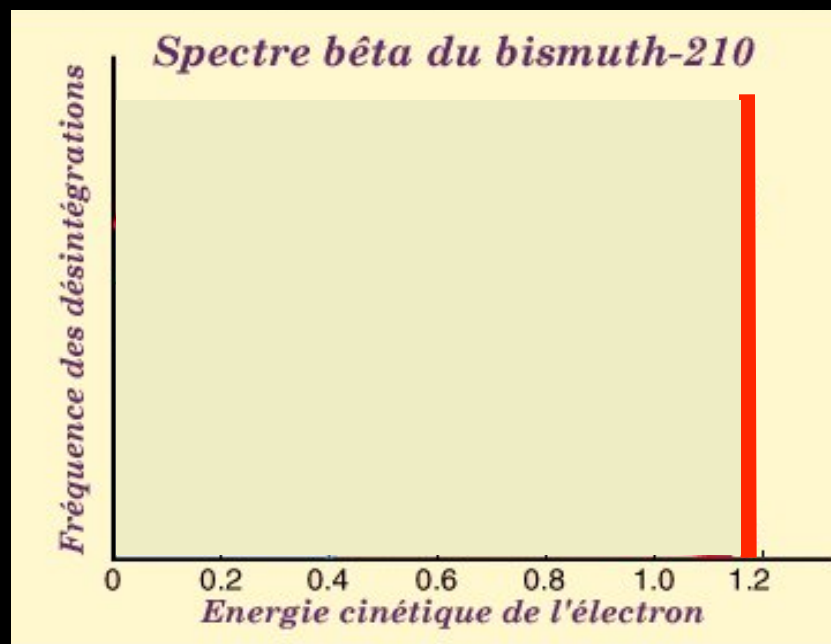
1914: Mesure du spectre de désintégration bêta des noyaux par Chadwick
Un noyau (A,Z) se transforme en un noyau (A,Z+1) avec émission d'un électron

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,

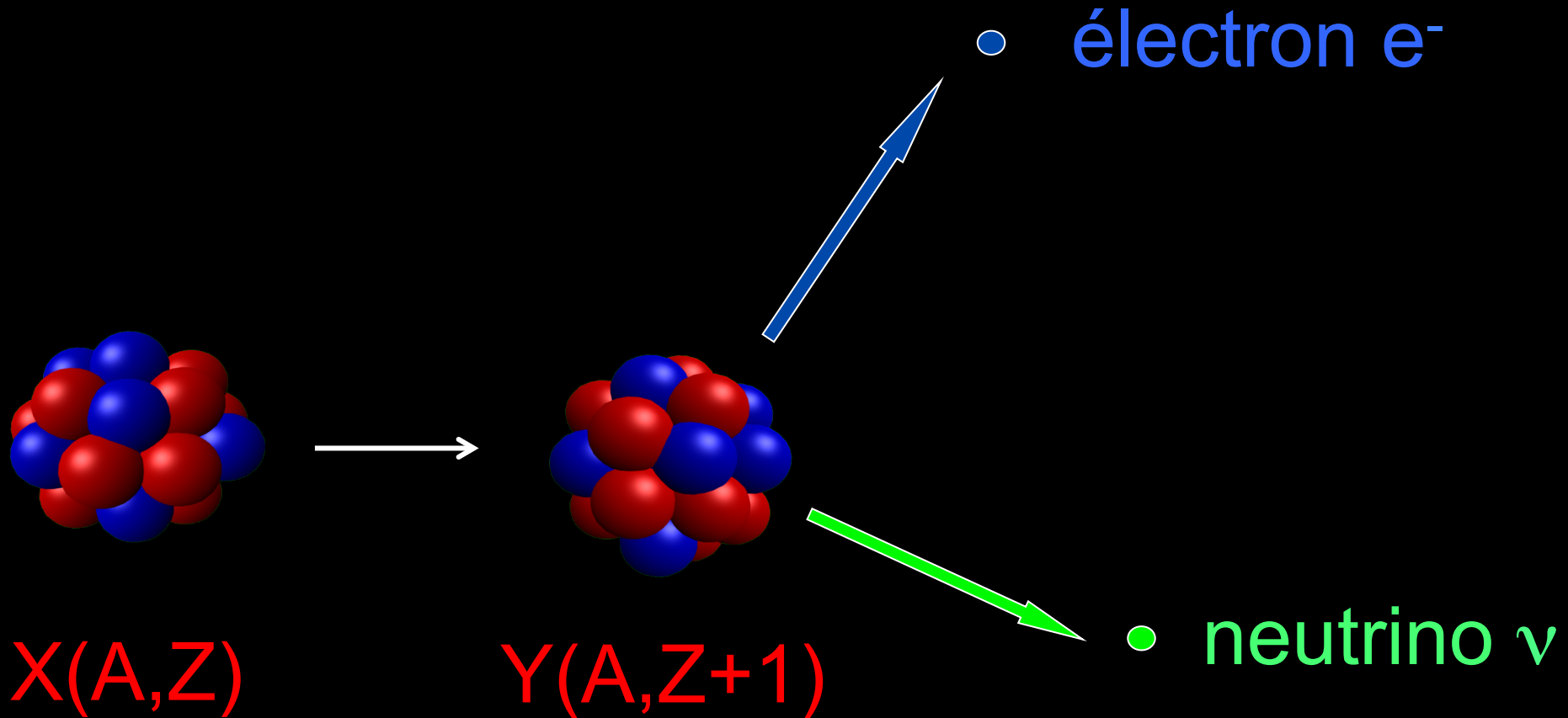
Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la "mauvaise" statistique des noyaux N et ${}^6\text{Li}$ et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. 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



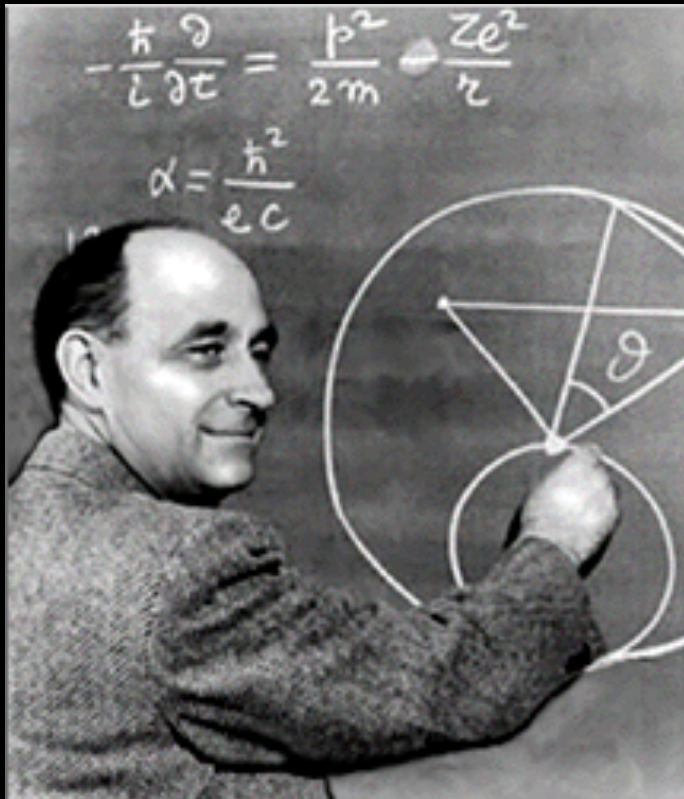
Théorie de la désintégration β (1934)

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!



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

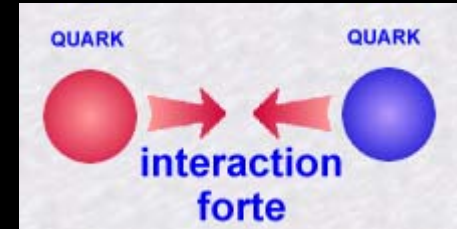


La détection des neutrinos est donc difficile ...

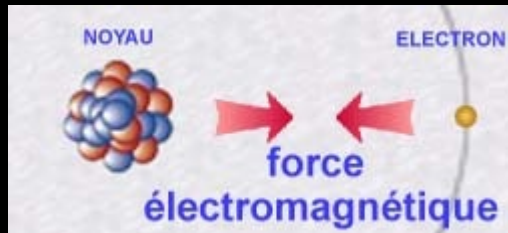
Le modèle standard: forces



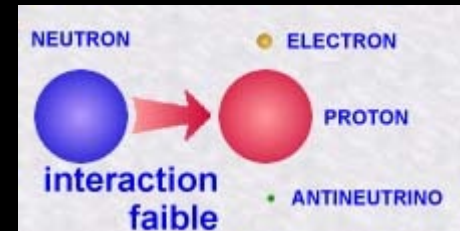
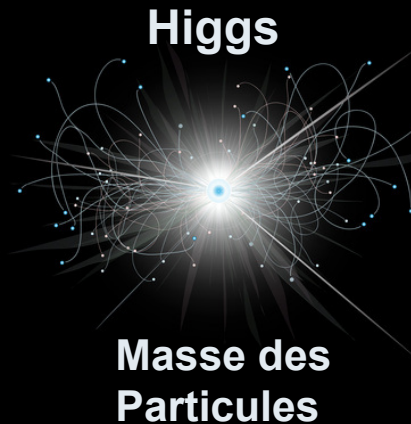
Interaction entre deux objets 'massifs'



Maintien la cohésion des noyaux



Electricité et Magnétisme

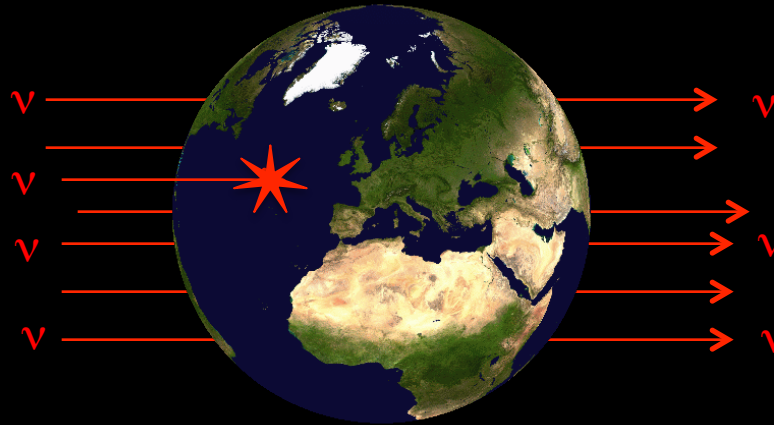


Permet aux particules de changer de nature

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

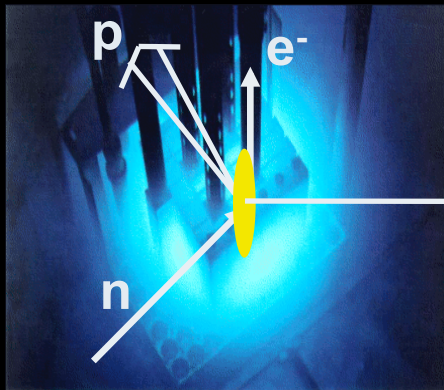
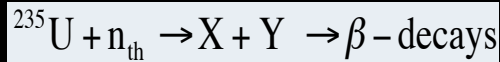
Peut-on détecter les neutrinos ?

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

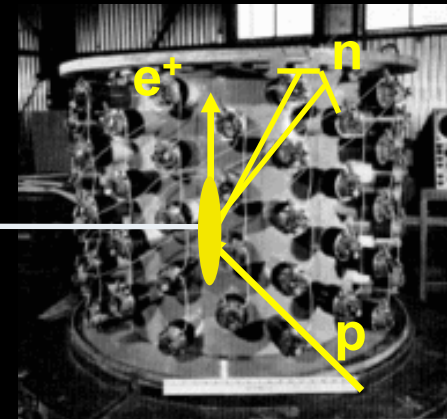


**Seul 1 neutrino sur 10 000 milliards
est intercepté en traversant la terre !**

Découverte du neutrino en 1956



Production dans le cœur
du réacteur nucléaire

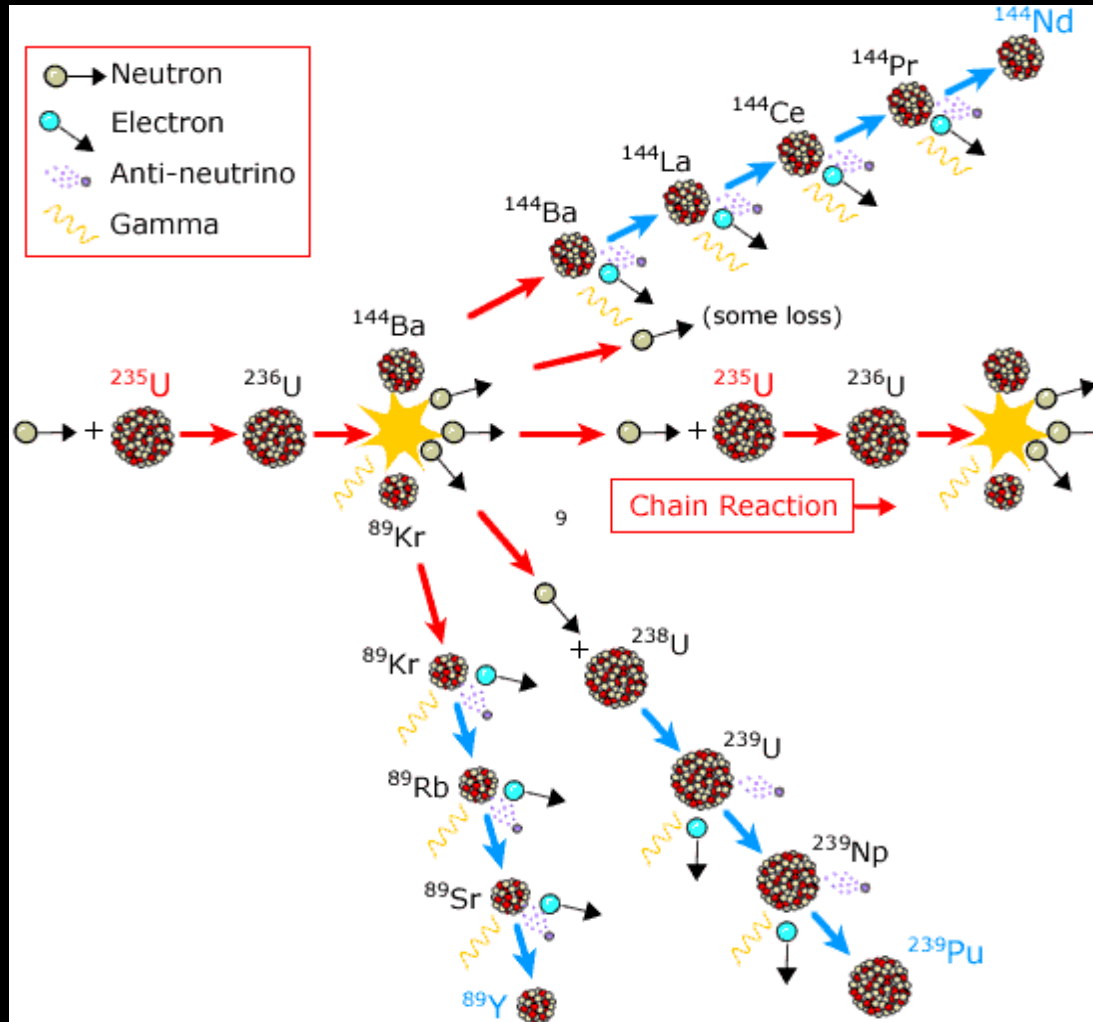


Détecteur de Neutrinos

$t_{\text{création}}$ $t_{\text{détection}}$

Temps de vol ou distance parcourue depuis sa création

Fissions nucléaires en chaîne



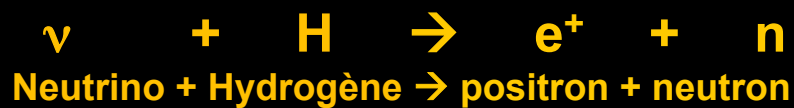
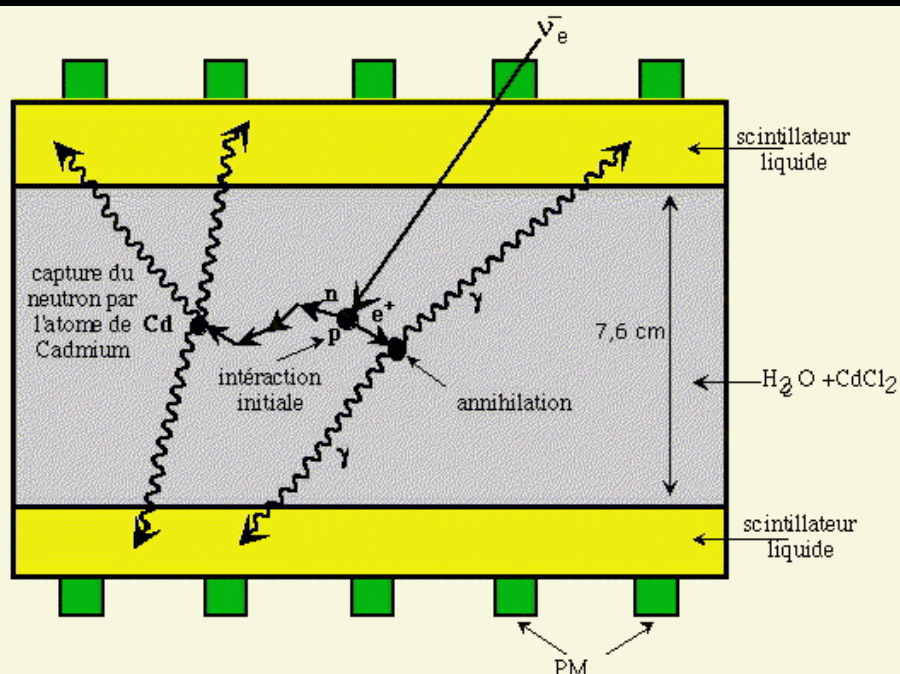
re



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

Découverte du neutrino (1956)

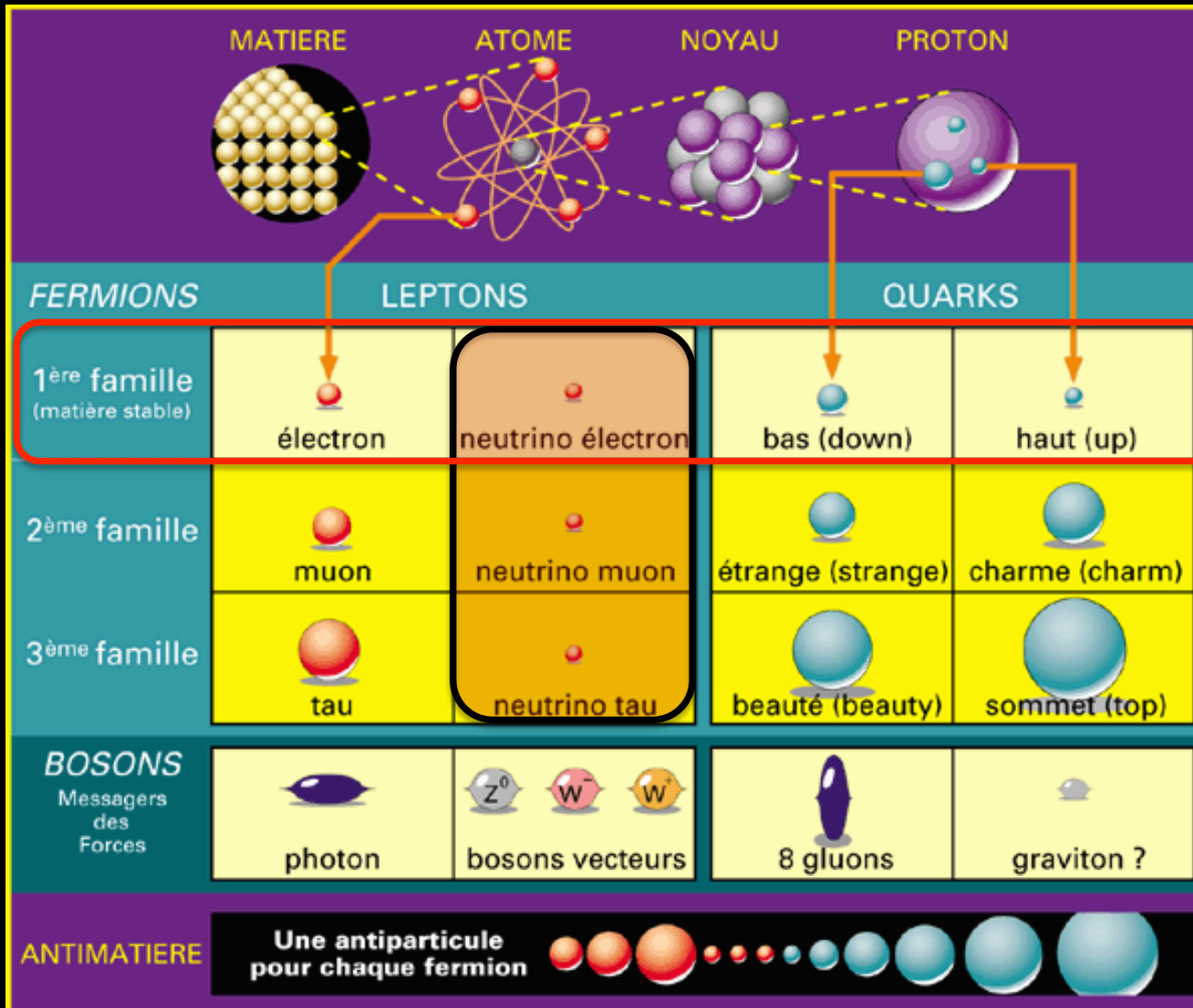
1956: Reines et Cowan détectent les (anti-) neutrino émis par le réacteur nucléaire de Savannah river (USA)



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

Le Neutrino dans le modèle standard de la physique des particules

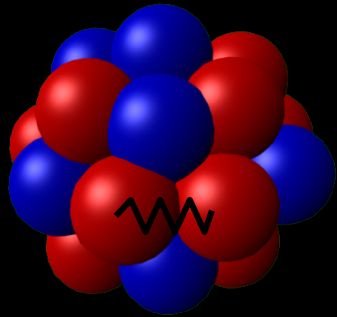
Le modèle standard des particules



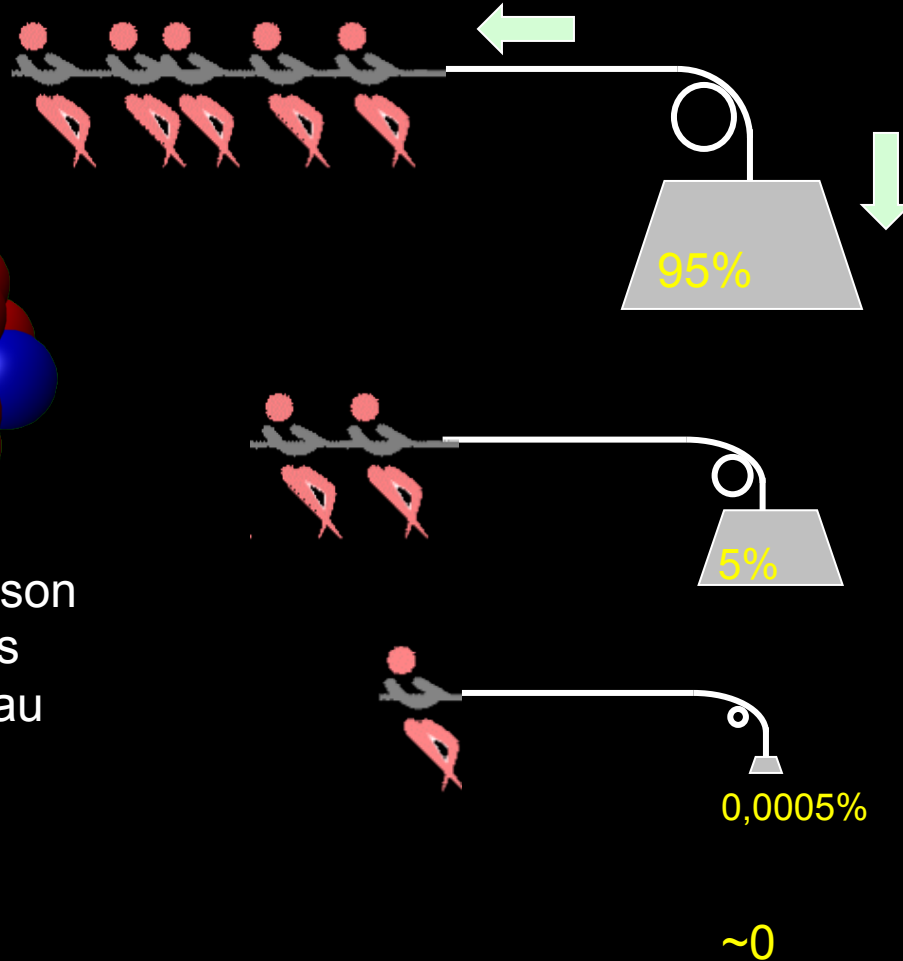
Matière Stable

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

Cohésion d'un noyau atomique



Energie de liaison
de 2 protons
dans un noyau



INTERACTION

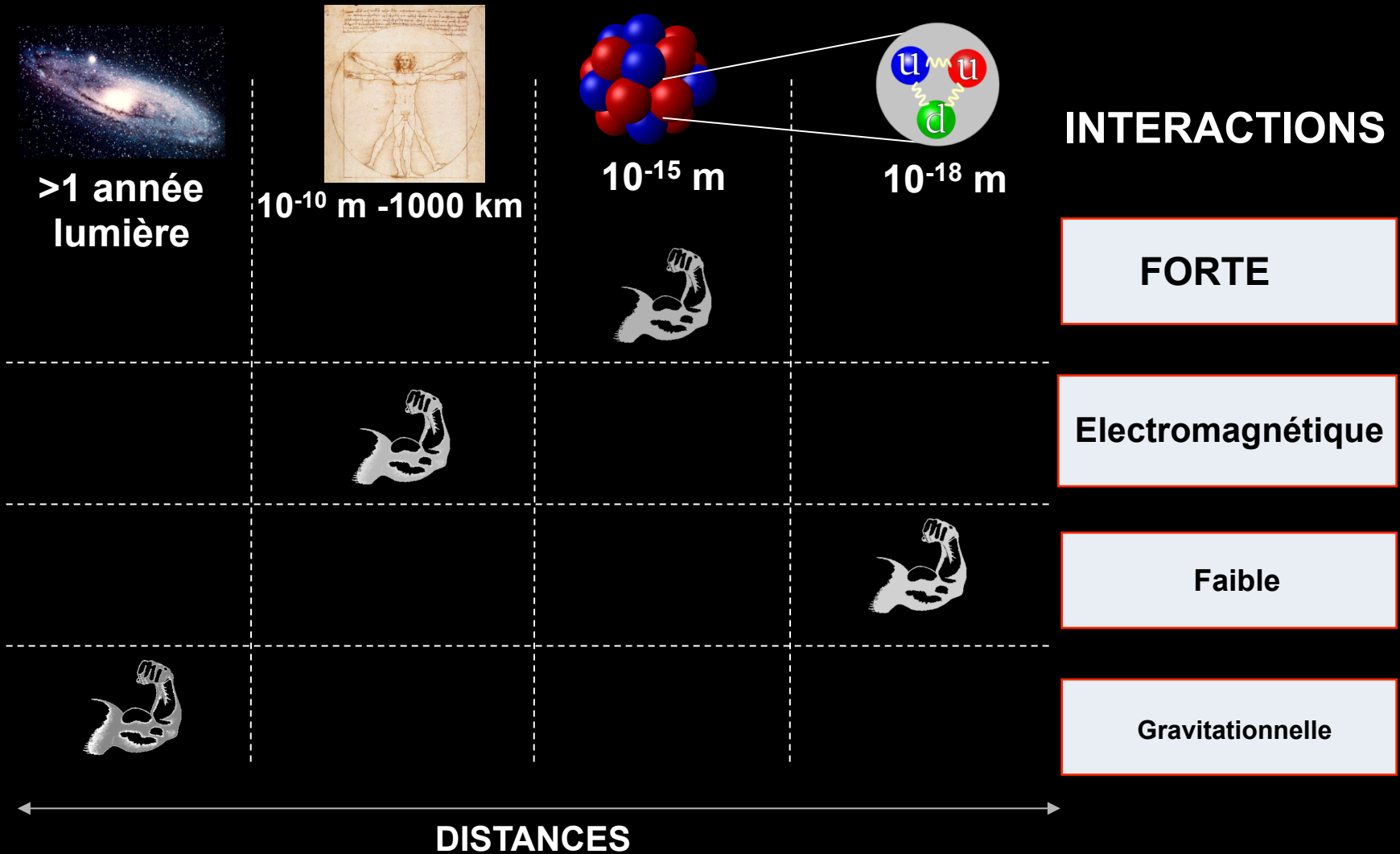
FORTE

Electromagnétique

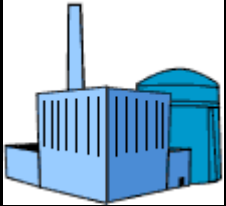
Faible

Gravitationnelle

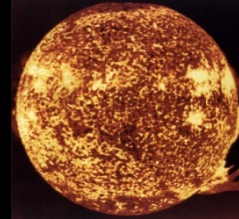
Portée des interactions



Sources de neutrinos



Réacteur nucléaires



Le Soleil et
les autres étoiles



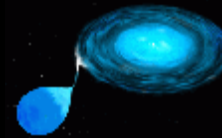
Accélérateurs de particules



Explosion d'étoiles
massives (supernova)



La Terre



Les accélérateur
astrophysiques



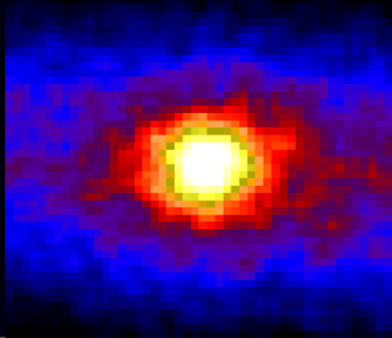
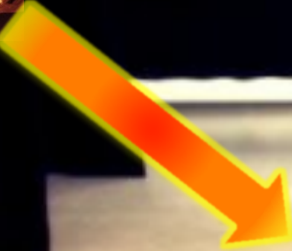
L'atmosphère



L'Univers ...

Bain de γ à Fleurance

66 milliards /cm²/sec



3 millions /cm²/sec



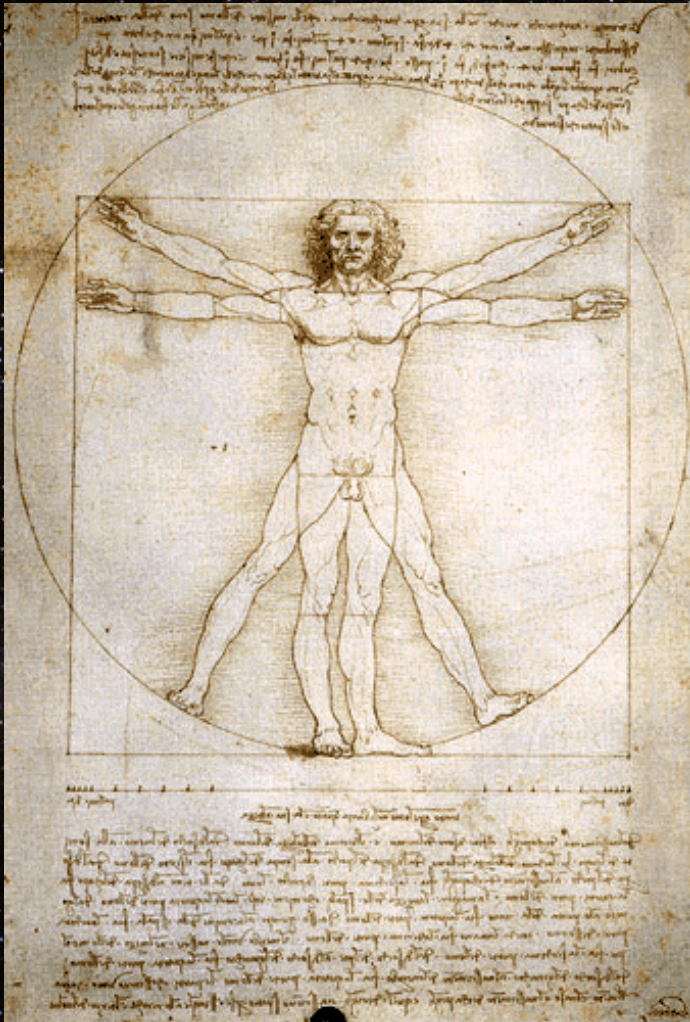
10 000 milliards /cm²/sec



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

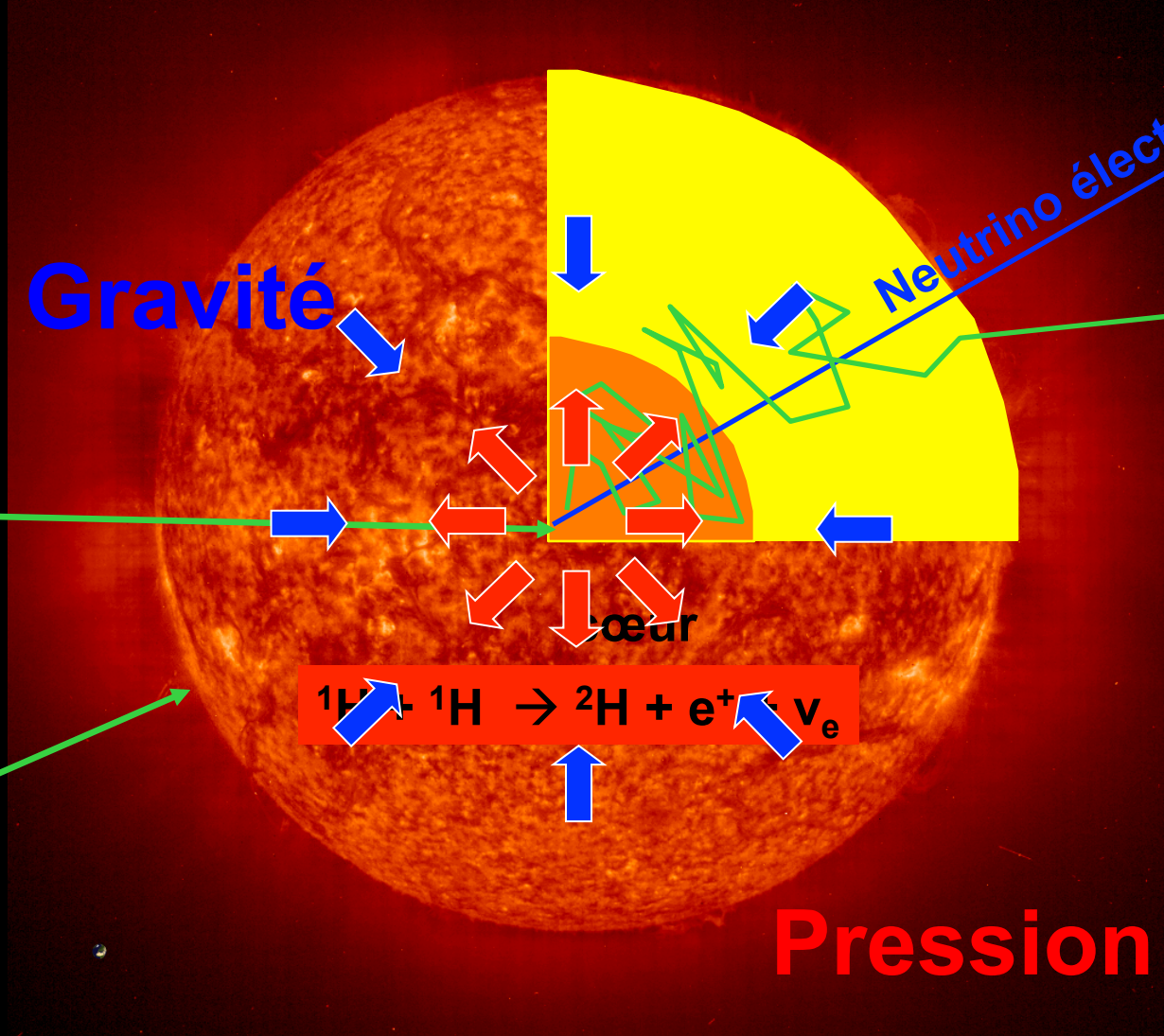
lumière

cœur

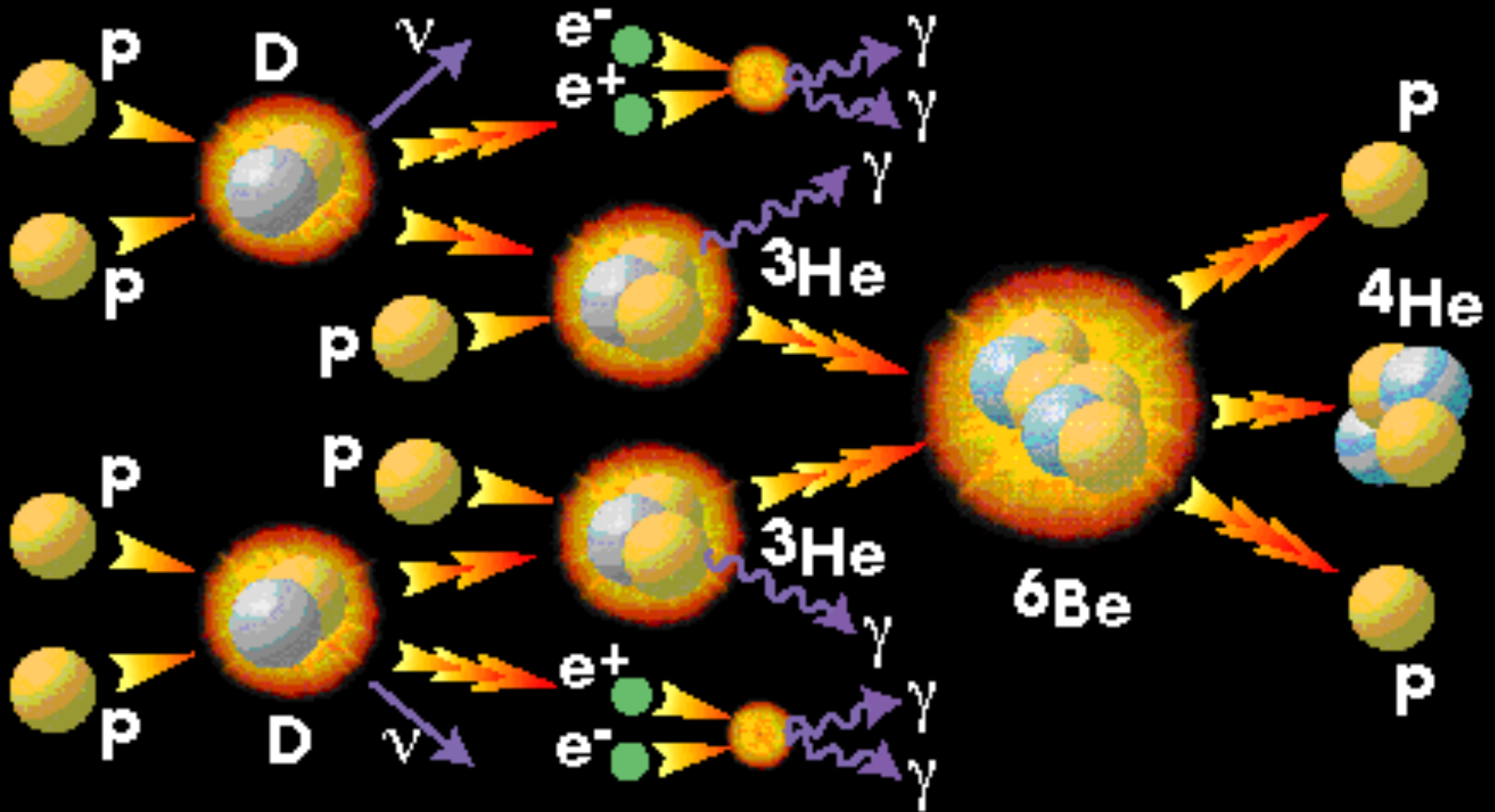


Pression

66 milliards de neutrinos arrivent sur Terre /cm² /sec



Source d'énergie du Soleil



Flux de neutrinos solaires

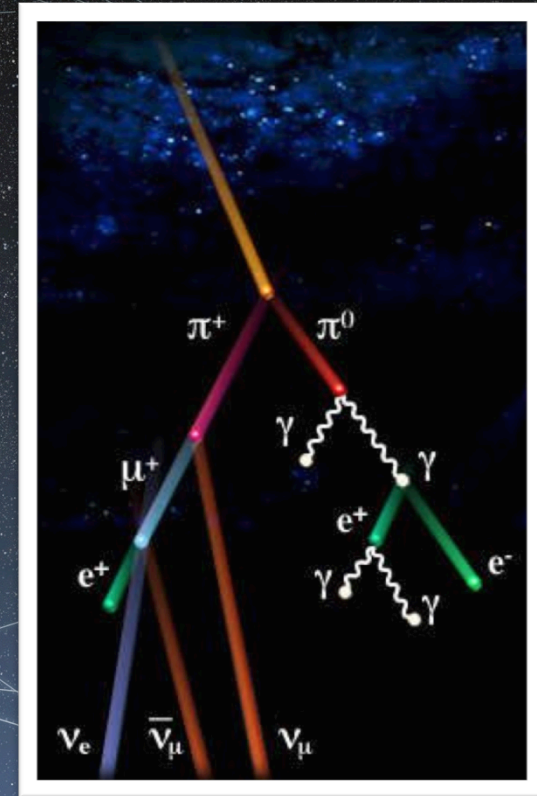
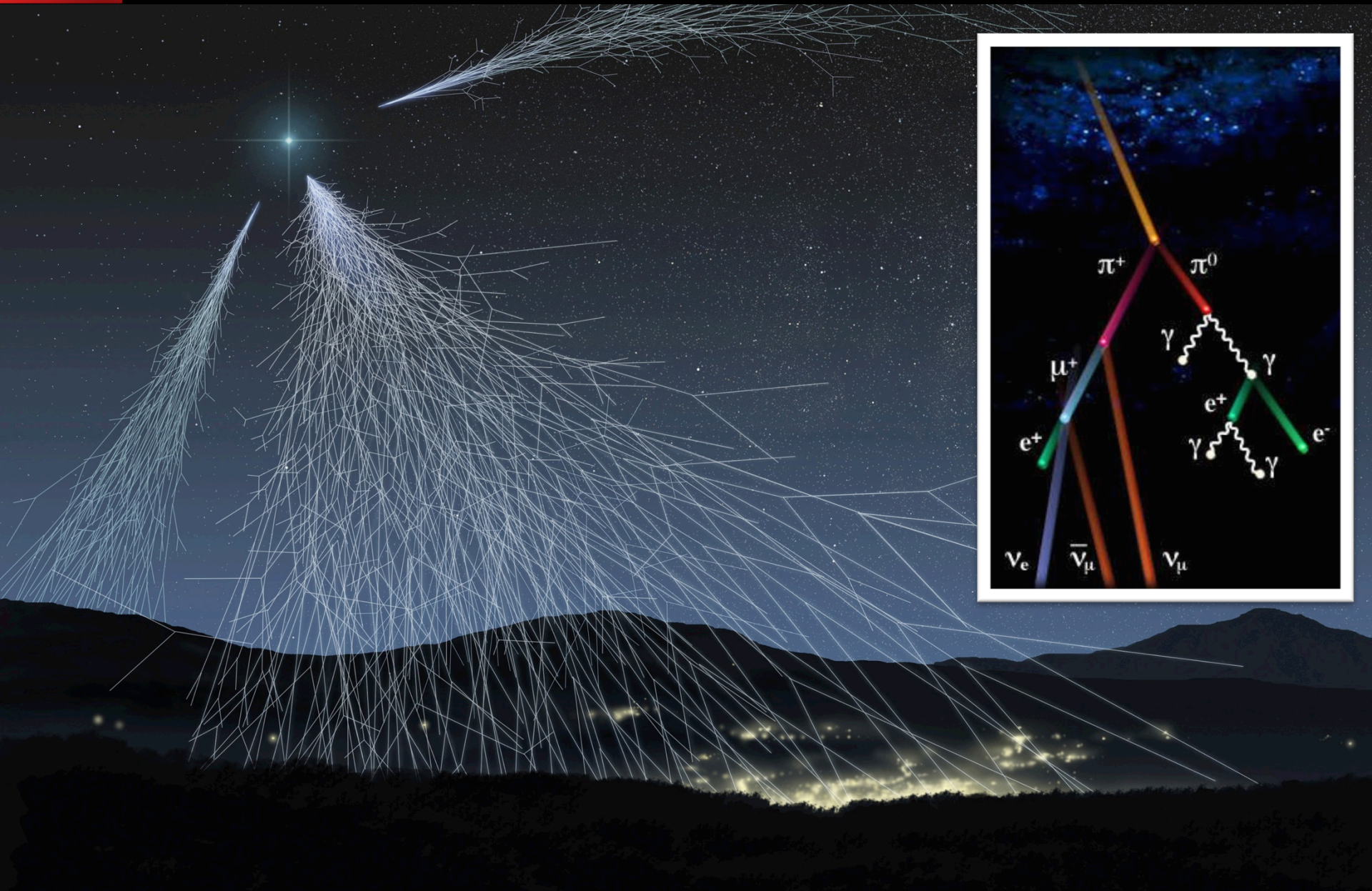
Bilan de la réaction



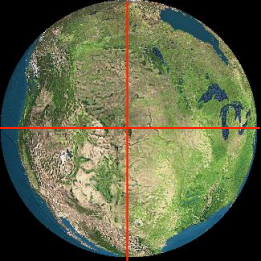
- Fusion de 4 protons :
 - énergie dégagée: $4 \cdot 10^{-12}$ Joules
 - 2 neutrinos émis
- Puissance du Soleil : $3,8 \cdot 10^{26}$ W (J/s)
 - Terre-Soleil: $150 \cdot 10^6$ km
 - Energie reçue sur Terre 1344 W/m²
- Flux de neutrinos:
 - $0,1350$ W/cm² / $4 \cdot 10^{-12}$ Joules * 2
 - 66 milliards de neutrinos /cm²/s



S'affanchir des rayons cosmiques



100 muons cosmiques / seconde / m²

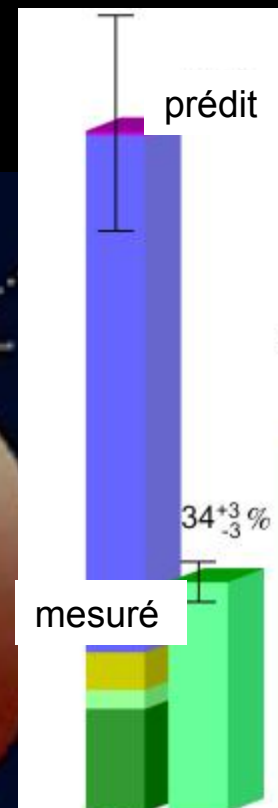
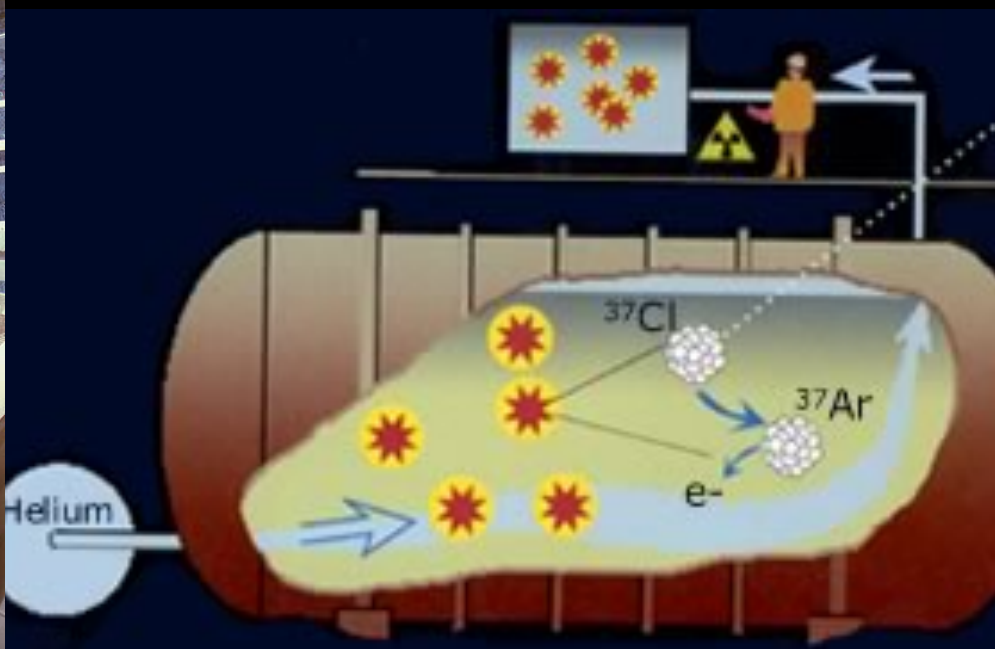
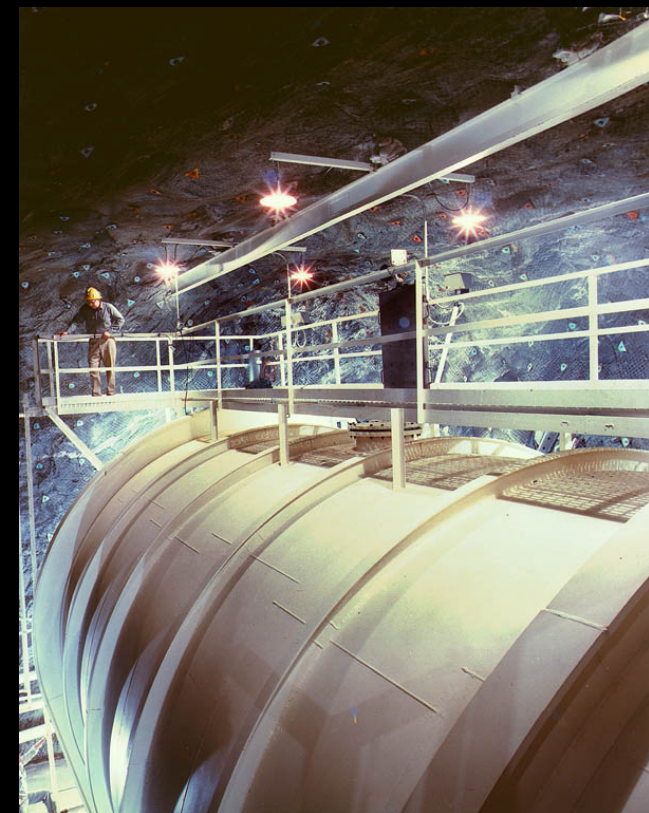


Détecteur Homestake (1967-1995)

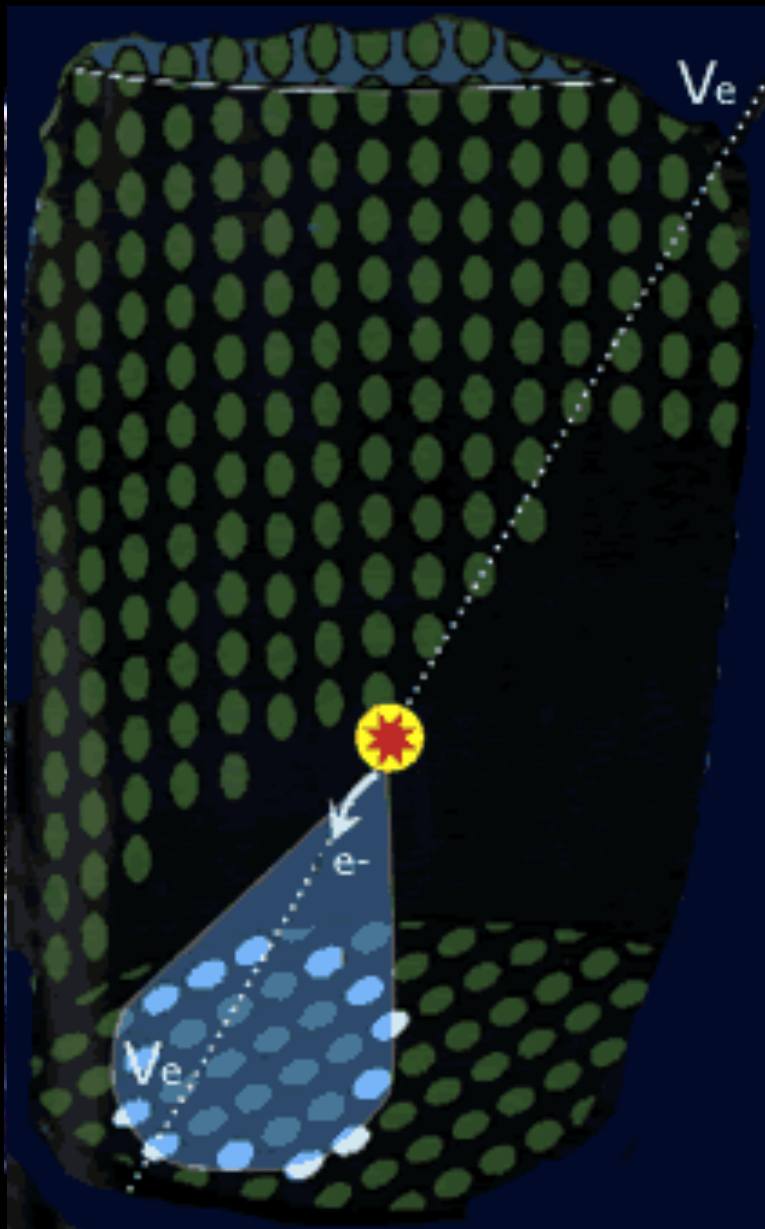
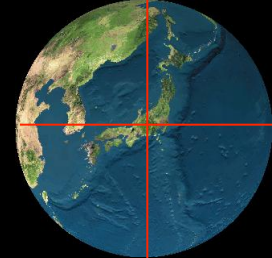


~1960 Davis construit le 1^{er} détecteur dans la mine de Homestake, USA
600 tonnes de détergent – 1 neutrino attendu chaque jour....

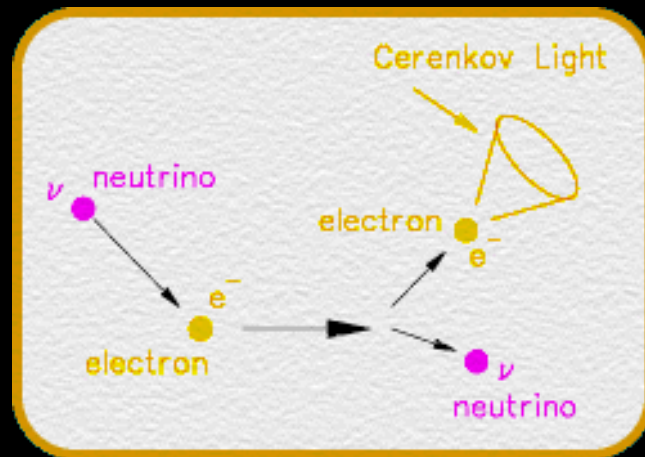
But: “... pour voir à l’intérieur d’une étoile et donc vérifier directement l’hypothèse de la production d’énergie nucléaire au sein des étoiles ...”



Détecteur Super-Kamiokande



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

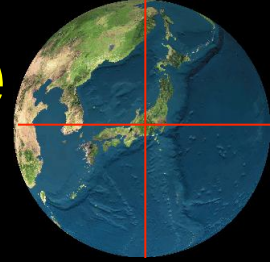


Effet Tcherenkov : émission de lumière dans un milieu, causée par le passage d'électrons traversant SK à une vitesse supérieure à celle de la lumière

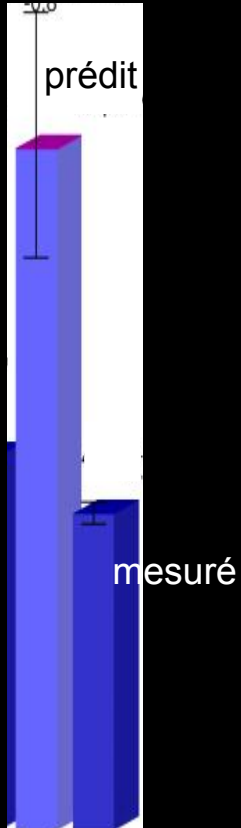
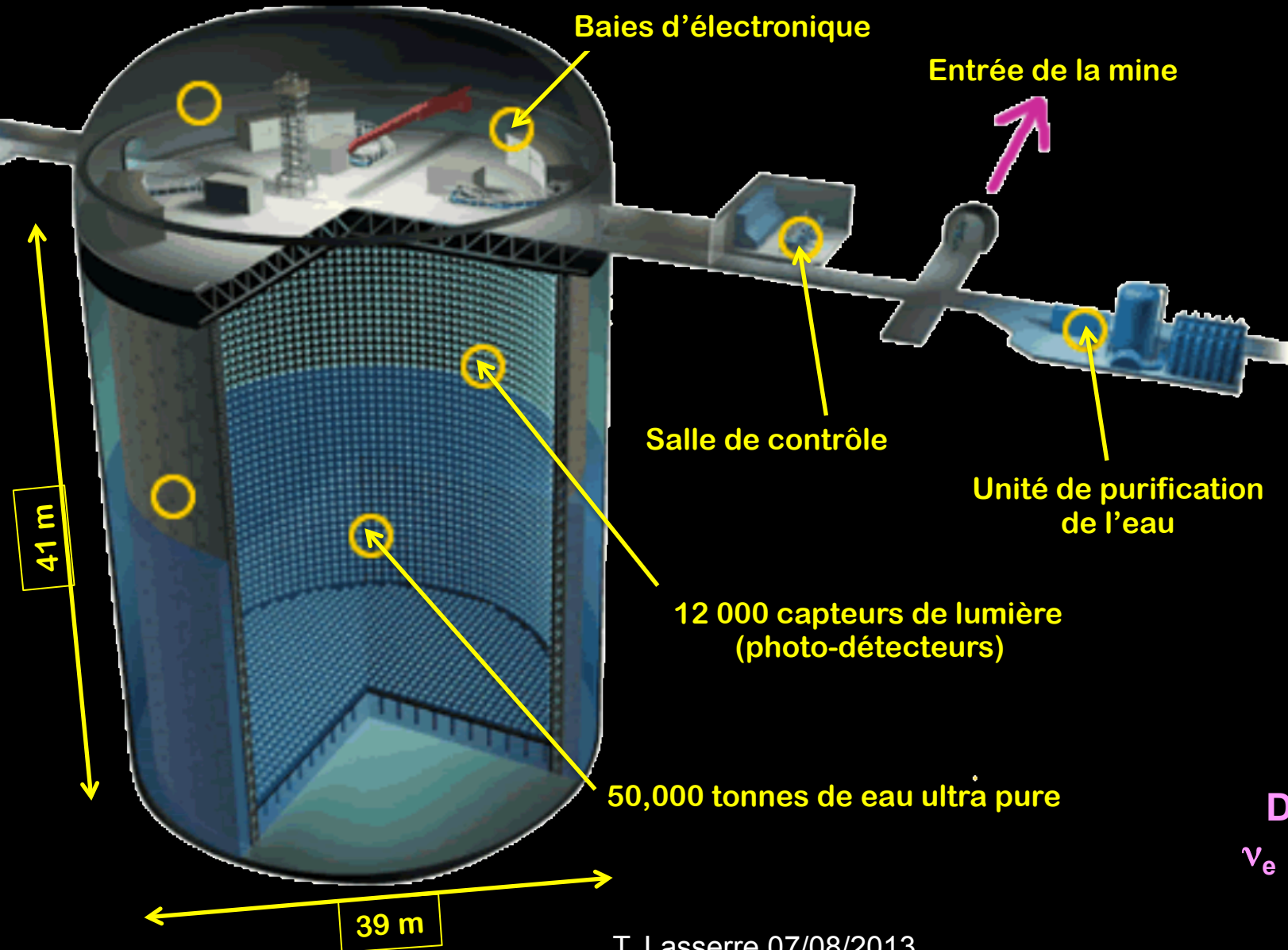
$$v(e^-, H_2O) \approx c = 300\,000 \text{ km s}^{-1}$$

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

$$\text{Indice réfraction } H_2O: n = 1.33$$

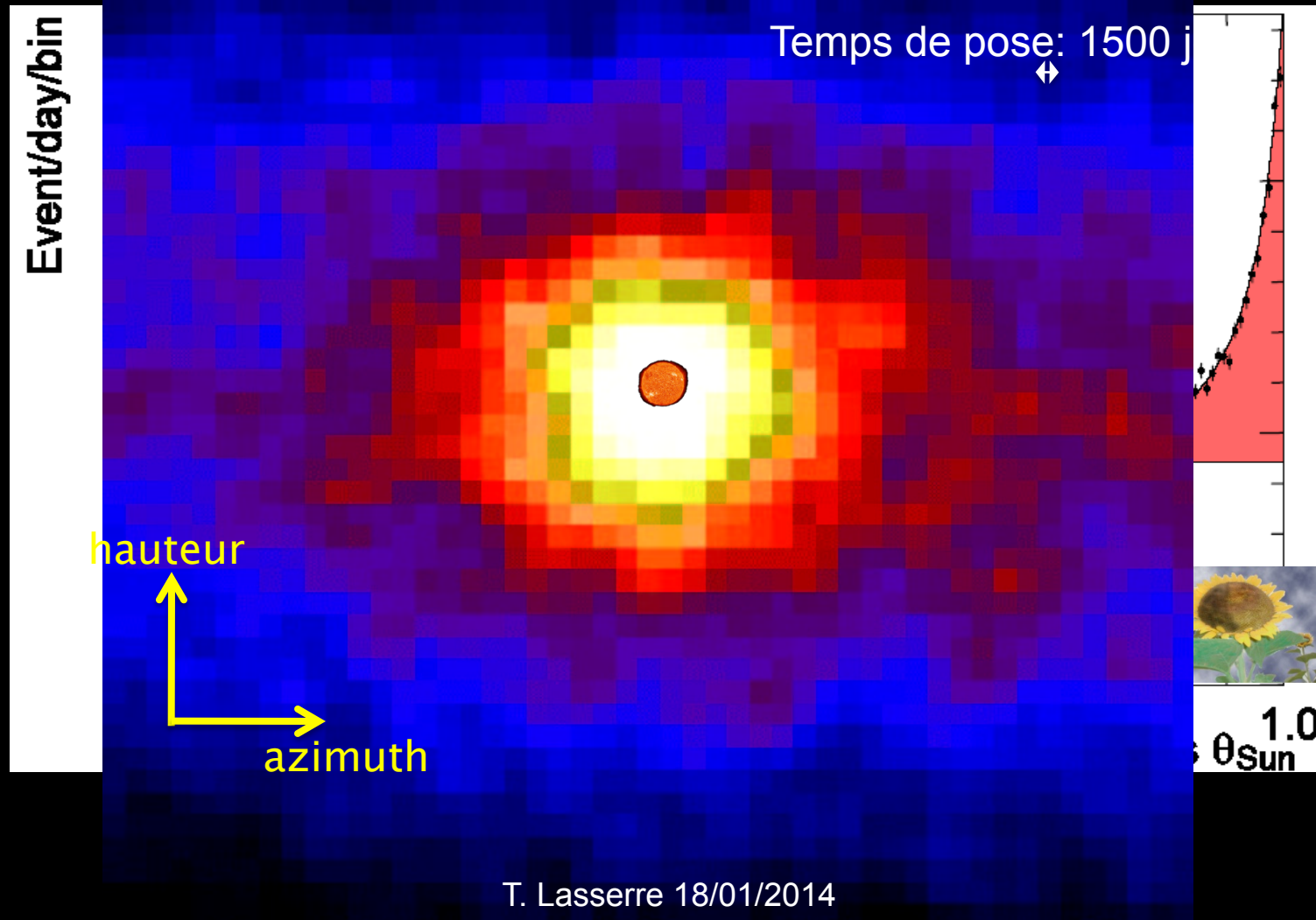


Détecteur Super-Kamiokande

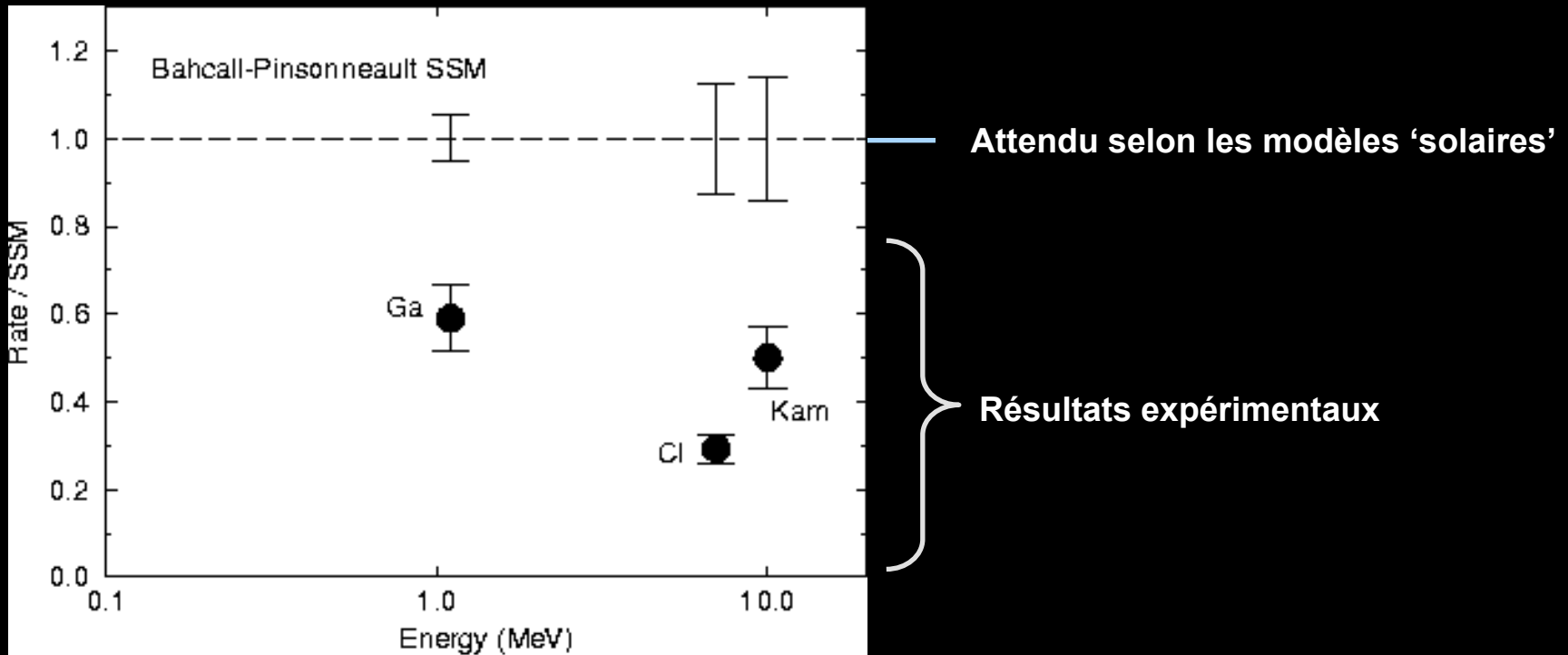


Déficit de ν_e confirmé !

Le soleil vu en neutrinos !



L'anomalie des neutrinos solaires



- Compréhension imparfaite du fonctionnement du cœur des étoiles

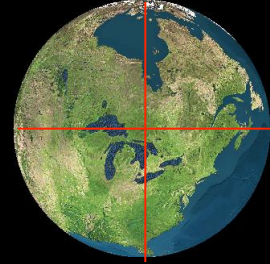
MAIS seuls les ν_e étaient jusqu'à là mesurés.

- Nouvelle physique des neutrinos !

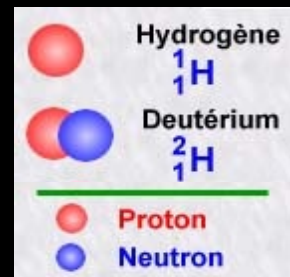
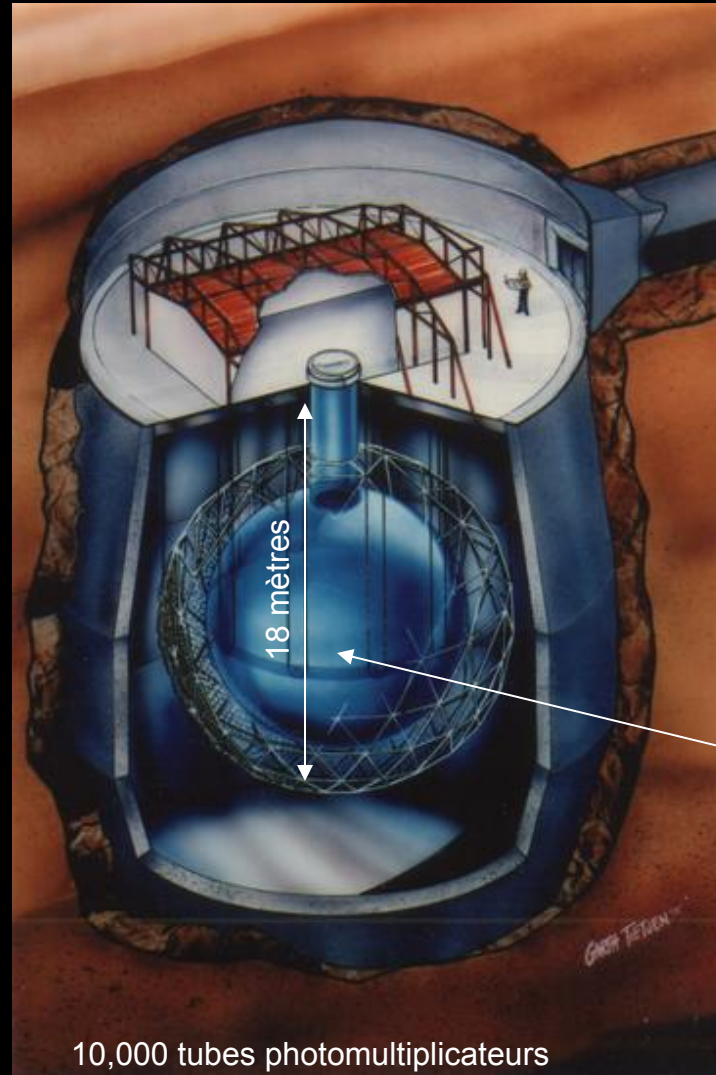
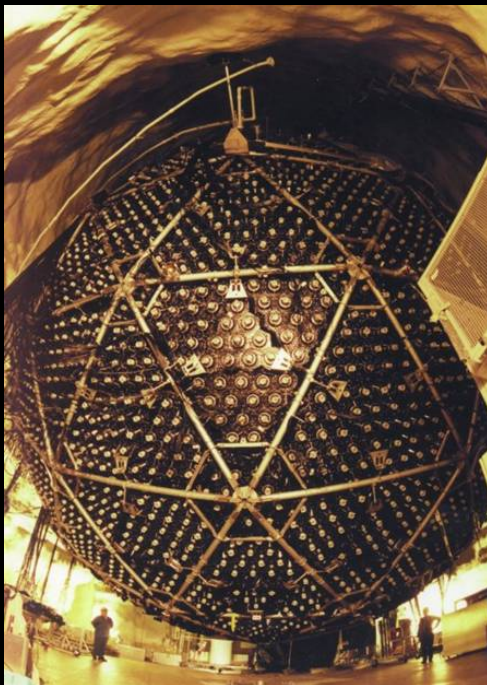
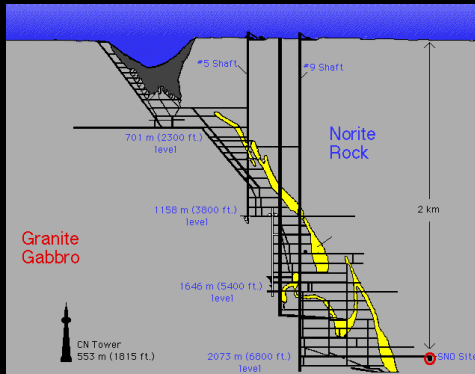
Nécessité d'une expérience mesurant aussi ν_μ , ν_τ

- Oscillation des neutrinos

Le détecteur SNO



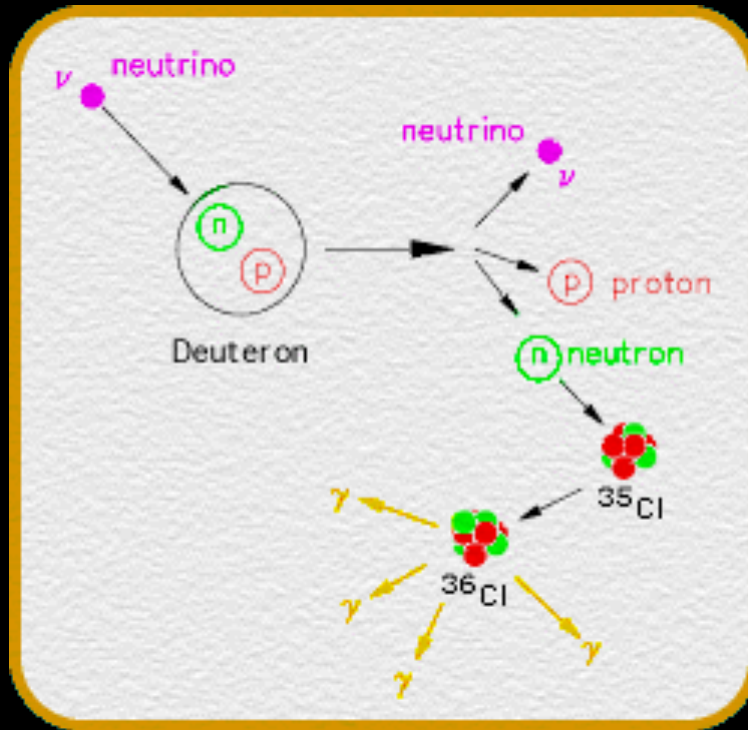
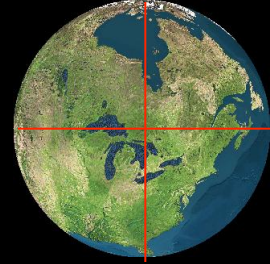
Mesure de TOUS les 'types' de neutrinos solaires ν_e , ν_μ , ν_τ



1000 tonnes
d'eau lourde

10,000 tubes photomultiplicateurs

2001: L'énigme résolue !



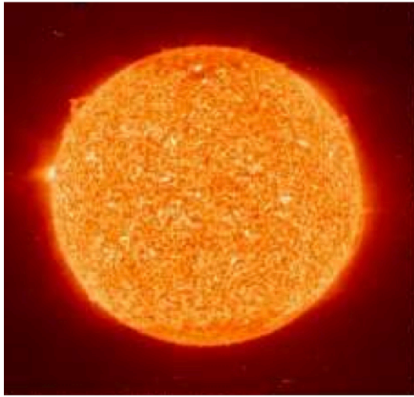
Courant neutre : détecte ν_e , ν_μ , ν_τ



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

Les oscillations déjà observées

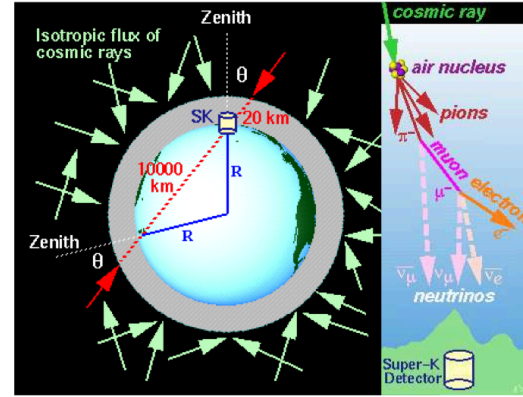
sun



reactors



atmosphere



accelerators



Homestake, SAGE, GALLEX
SuperK, SNO, Borexino

KamLAND, CHOOZ

SuperKamiokande

K2K, MINOS, T2K

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ or $\text{anti-}\nu_\mu \rightarrow \text{anti-}\nu_\tau$: ν atmosphériques & faisceaux de ν
- $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu, \tau}$: ν solaires
- $\text{anti-}\nu_e \rightarrow \text{anti-}\nu_{\mu, \tau}$: ν de réacteurs
- $(\text{anti-})\nu_\mu \rightarrow (\text{anti-})\nu_{\mu, \tau}$: ν atmosphériques & faisceaux de ν
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$: faisceaux de ν

Sonder l'Univers



La Voie Lactée



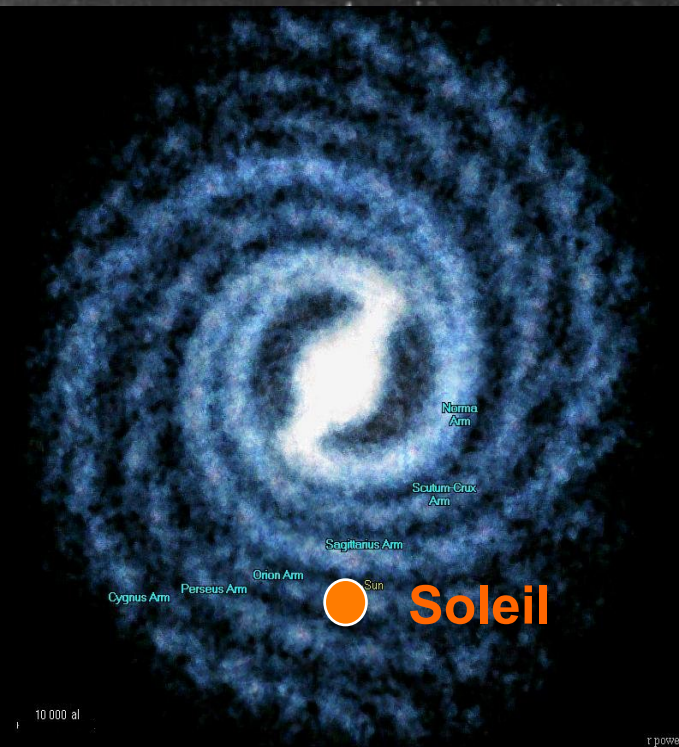
60 000 a.l.

30 000 a.l.

T. Lasserre 18/01/2014

160 000 000 années-lumière

Voie lactée



Grand Nuage de Magellan



160 000 années-lumière

La supernova 1987A, 23/02/1987



Sanduleak -69 202
(15-18 masses solaires)

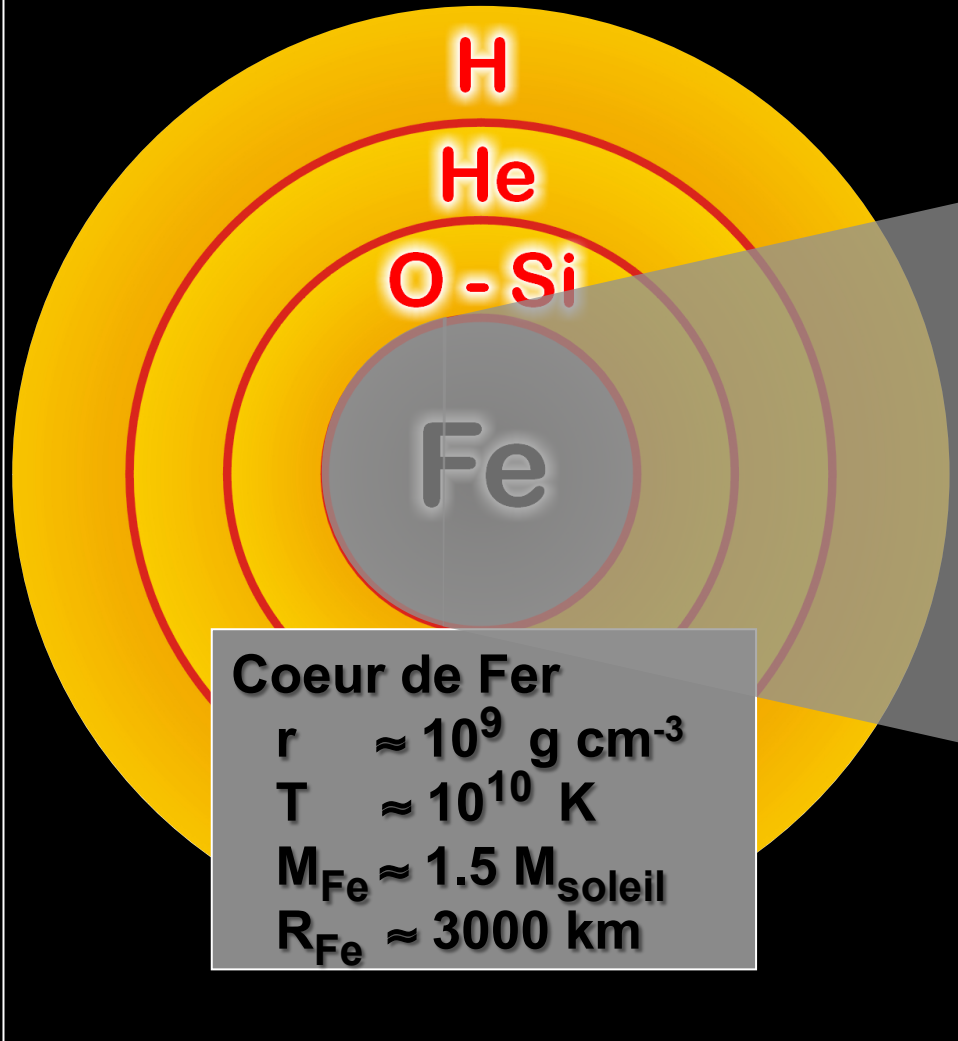
Découverte de SN1987A à l'œil nu !
Observatoire de Las Campanas (Chili)

© Anglo-Australian Observatory

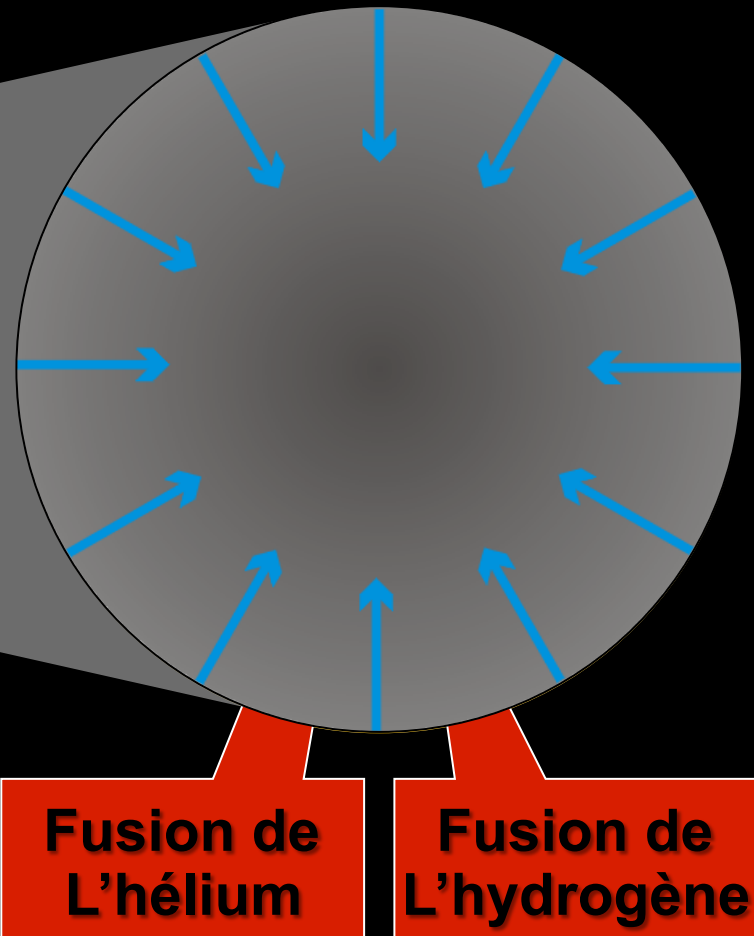
160,000 années lumières

Effondrement d'une étoile

Structure en pelure d'oignon



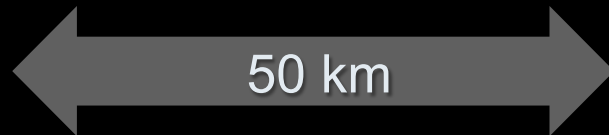
Effondrement



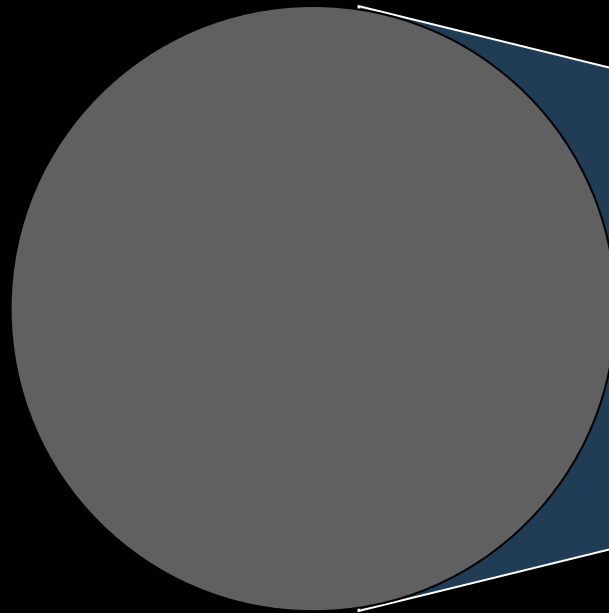
Supernova

Naissance d'une étoile à neutrons

Explosion



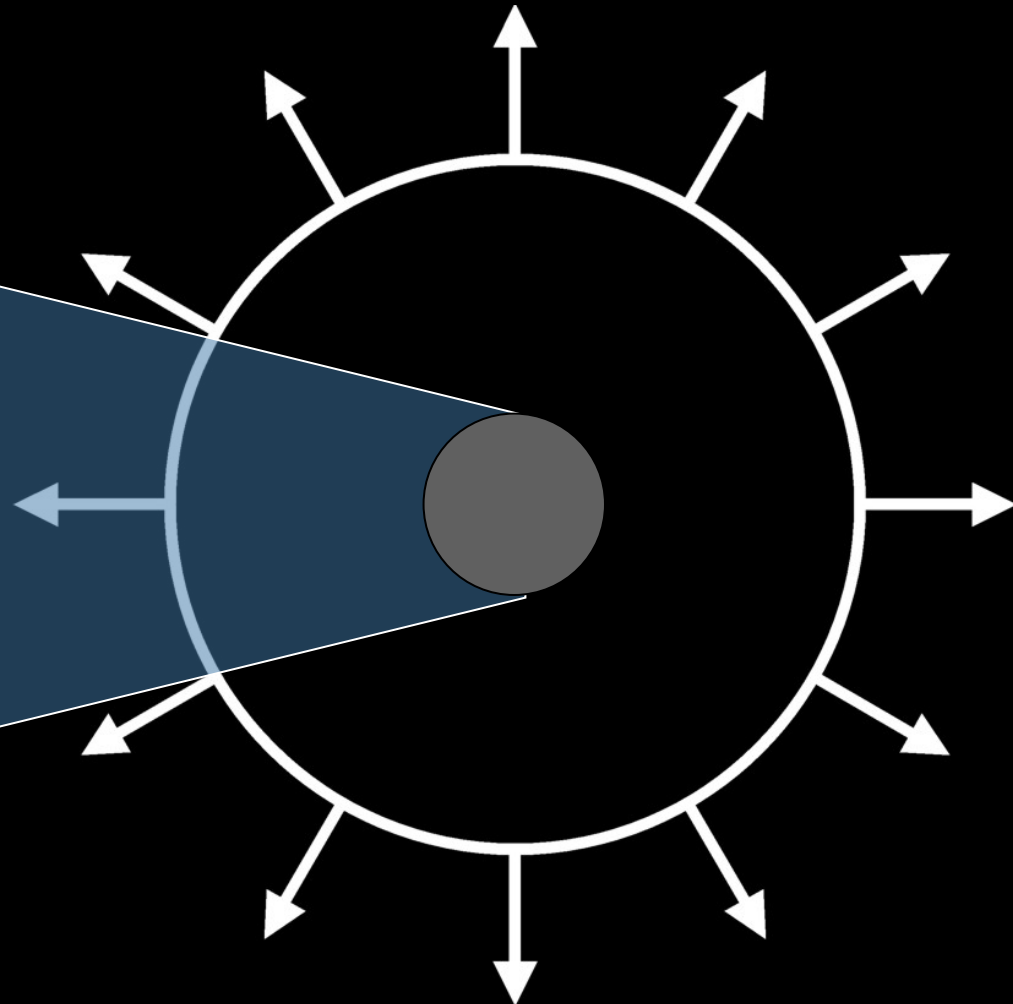
50 km



proto-étoile à neutron

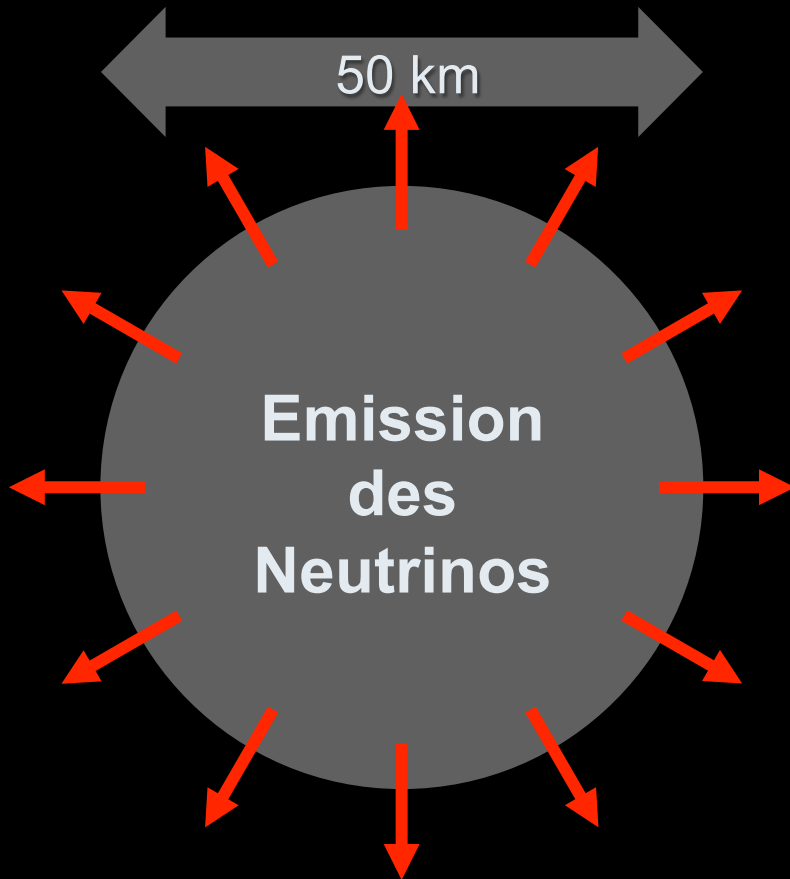
$\rho \quad \rho_{nuc} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$

$T \quad 30 \text{ MeV}$



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 !

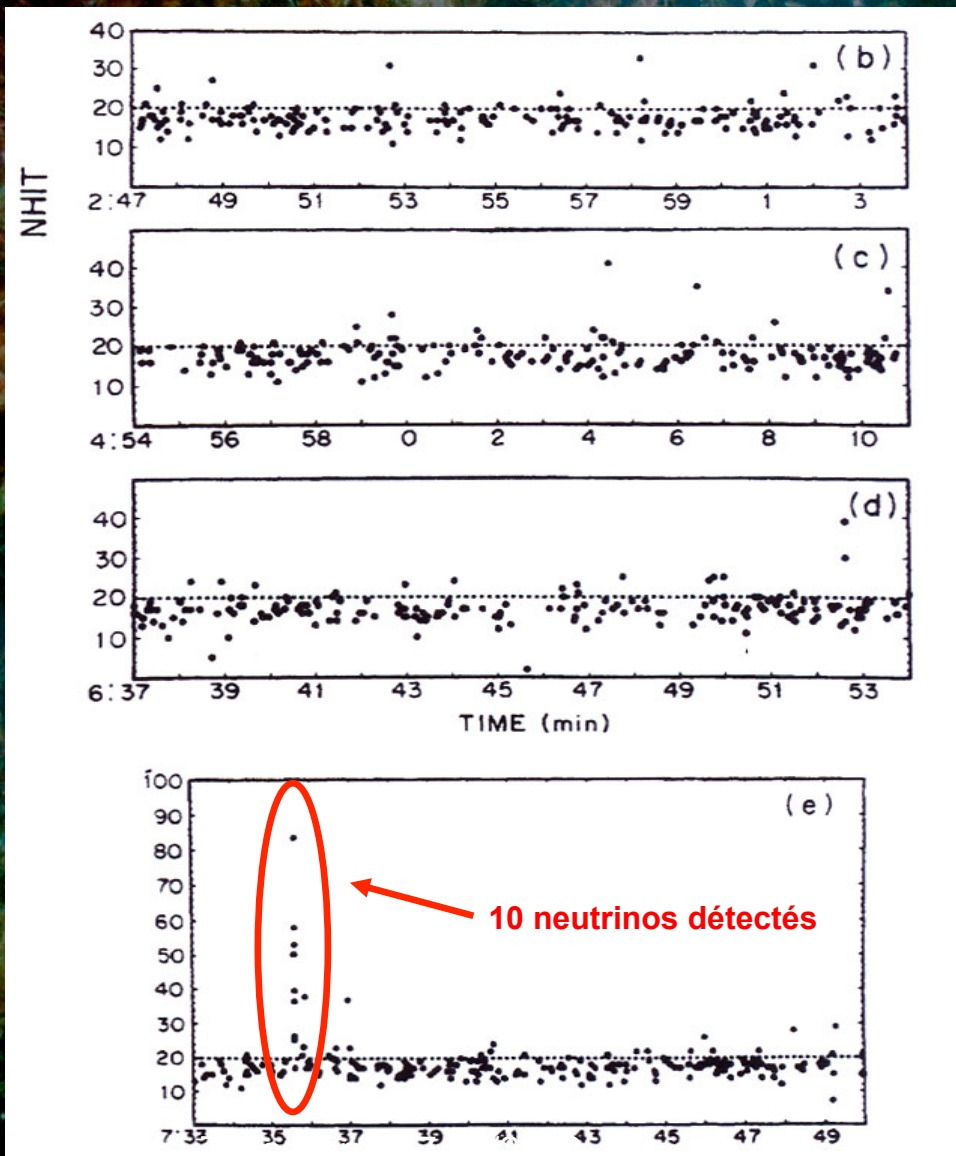
Signal observé dans Kamiokande

2h47

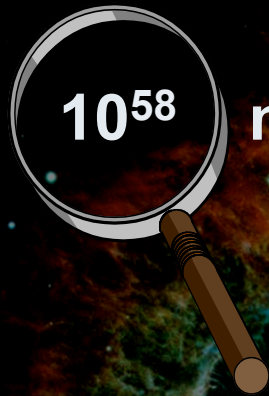
4h34

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



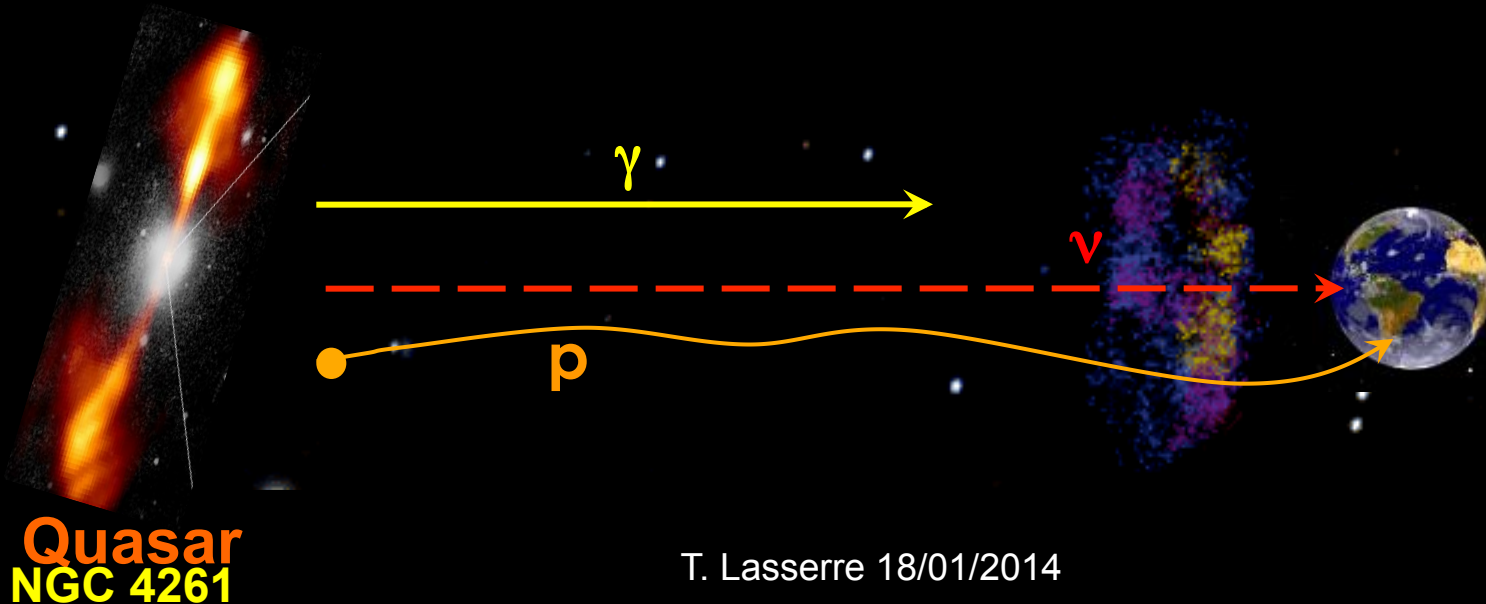
Raymond Davis Jr



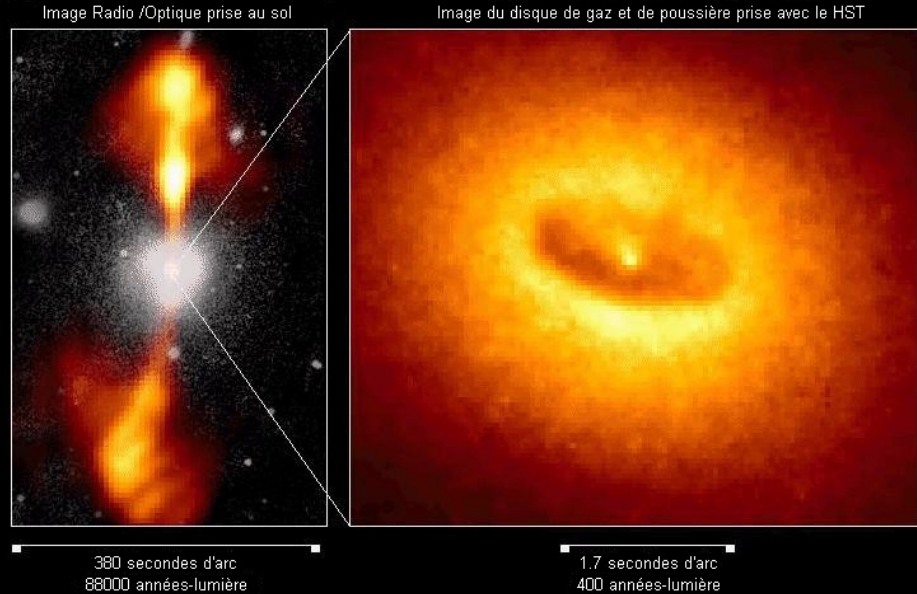
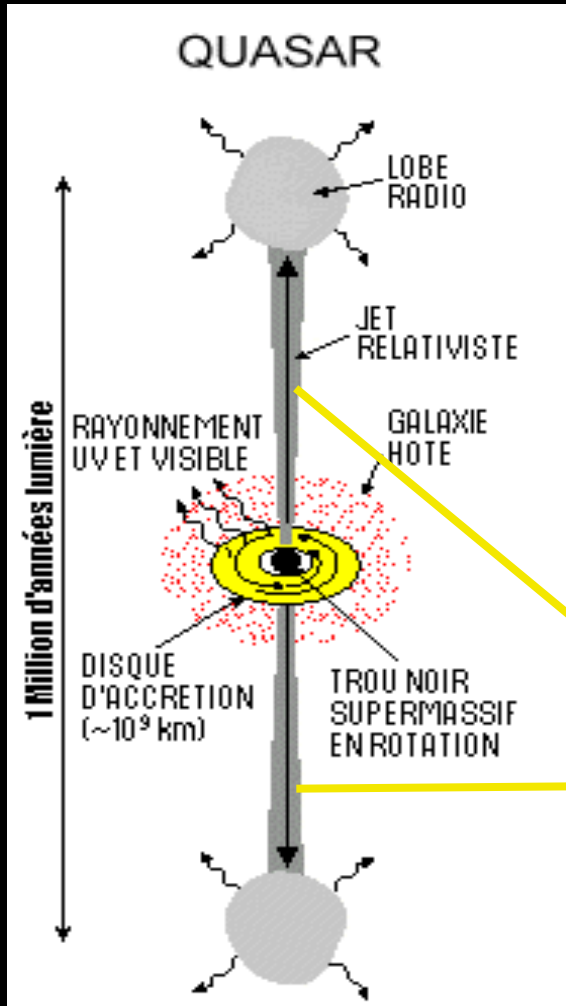
"pour leurs travaux pionniers dans le domaine de l'astrophysique, en particulier pour la détection des neutrinos cosmiques"

> 100 000 000 années-lumière

- Le neutrino comme message cosmique:
 - stable
 - neutre
 - interagit faiblement
- Mais nécessite de TRES gros volumes de détection...



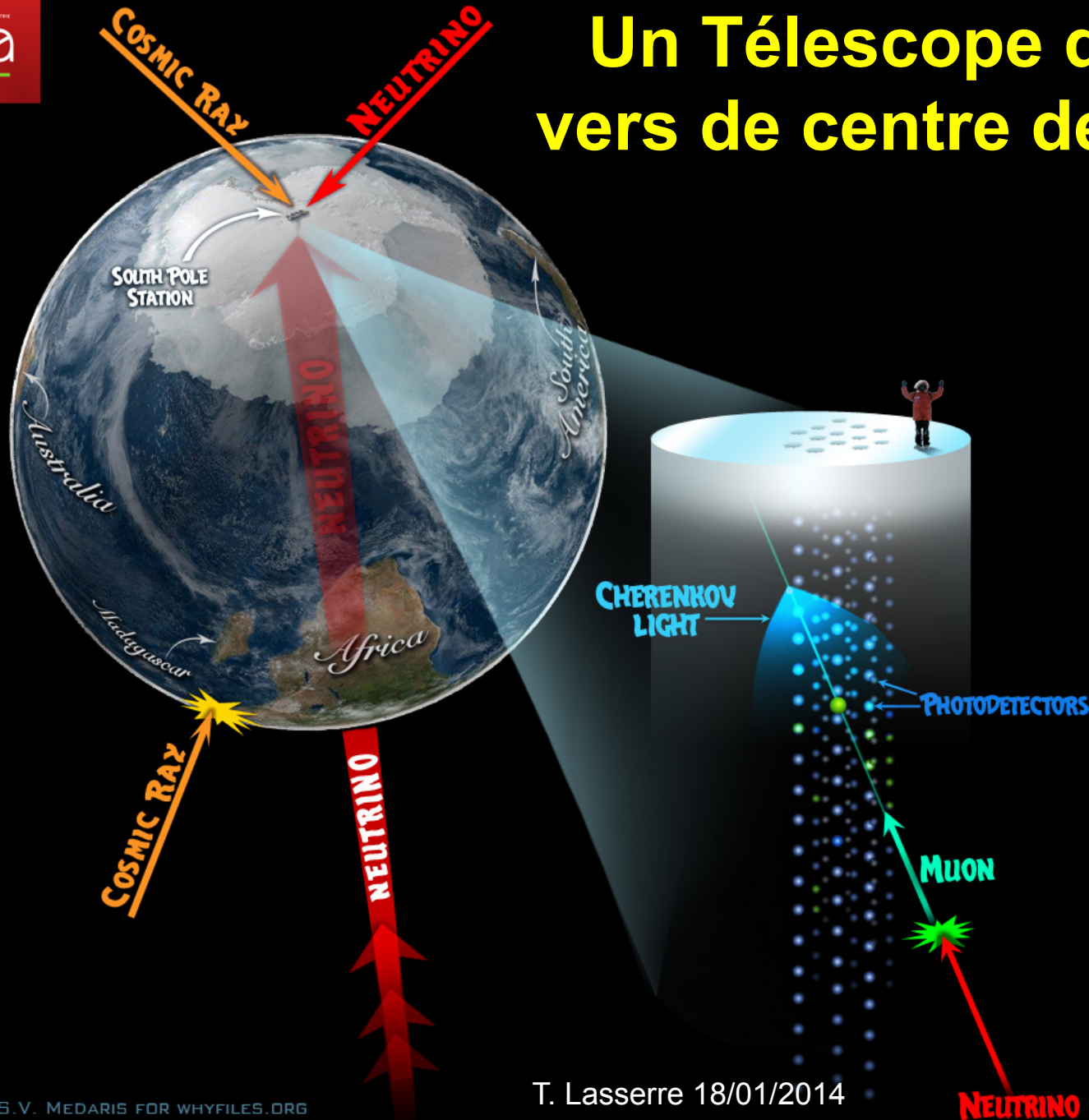
Noyaux Actifs de Galaxie



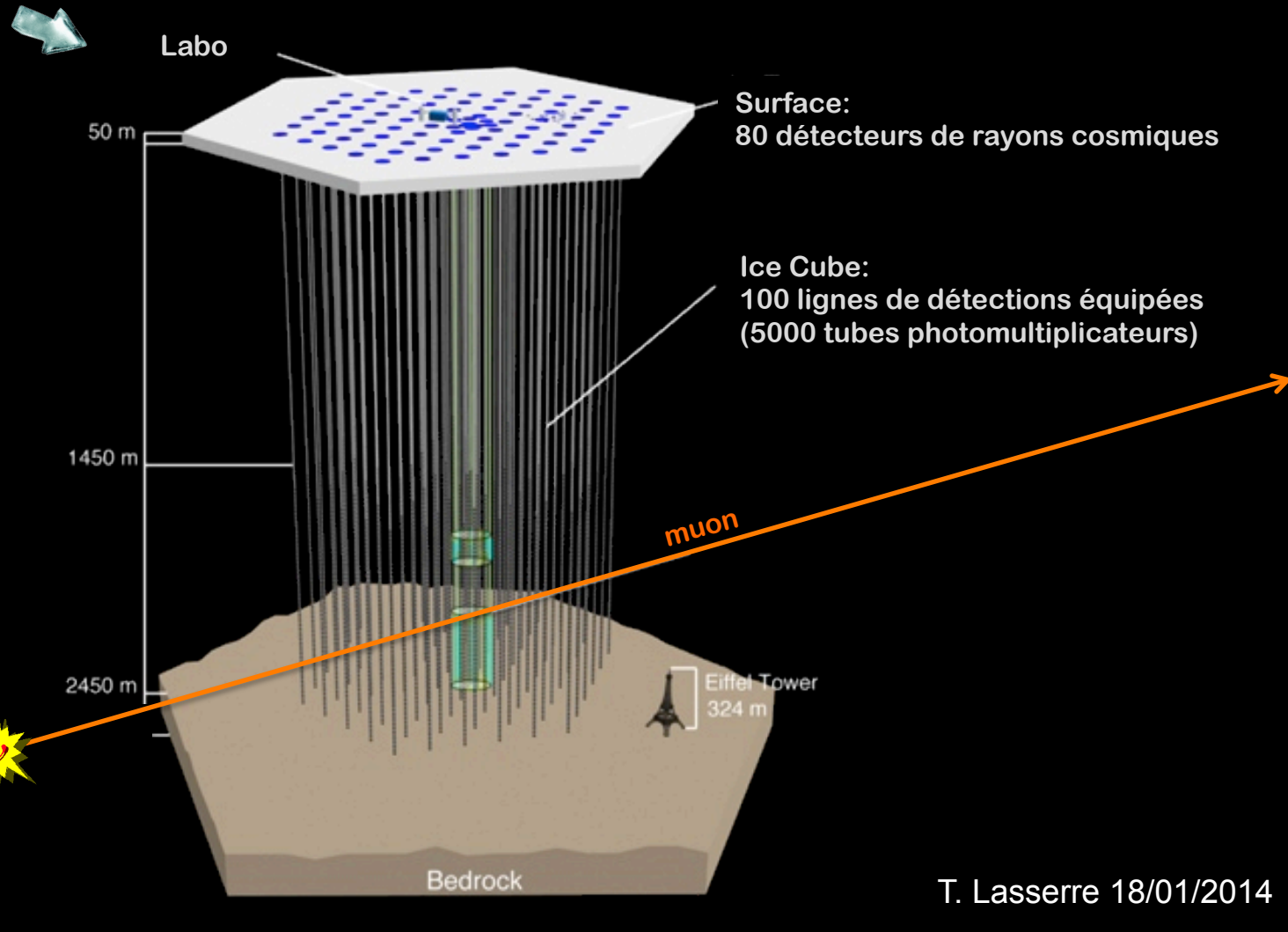
Electrons \rightarrow Photons (γ)

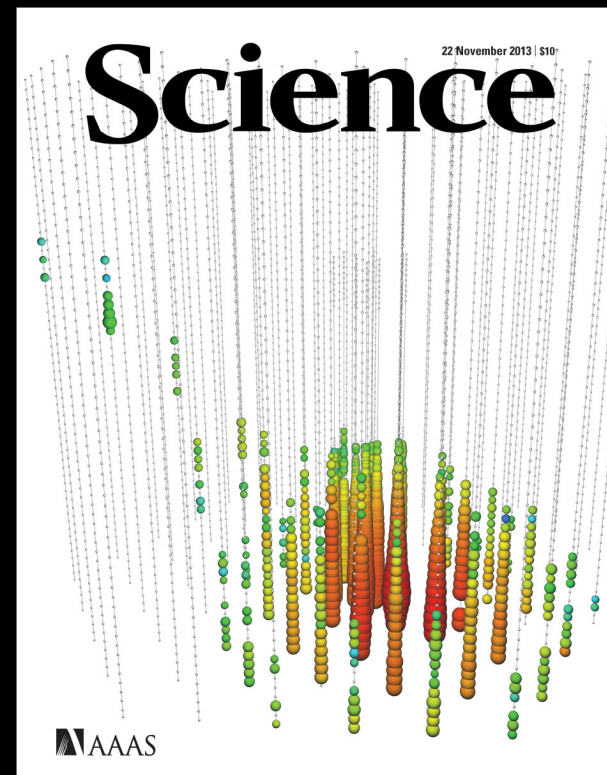
Protons $\rightarrow \pi$ et $K \rightarrow$ Neutrinos

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



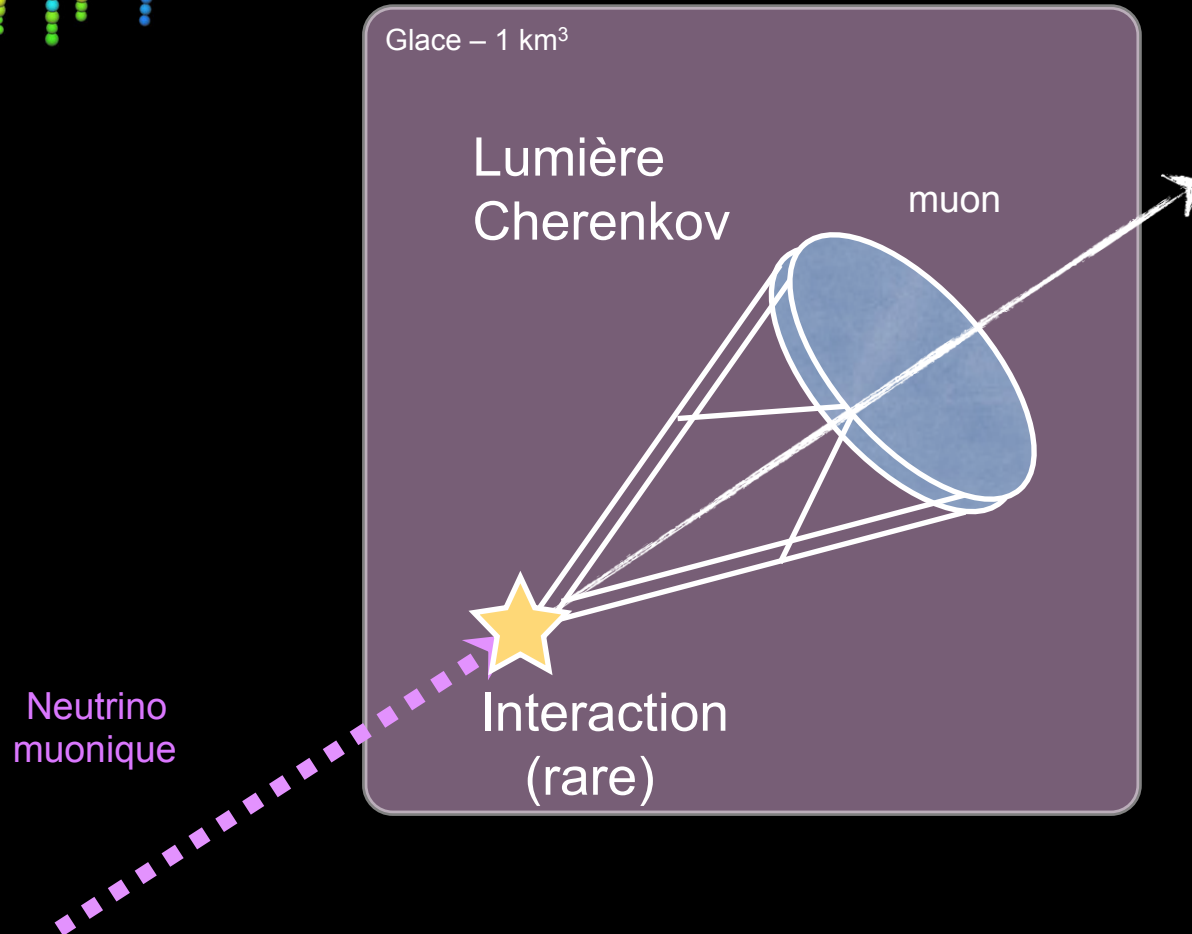
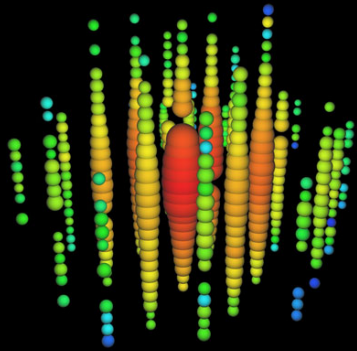
Télescope à neutrinos ICE CUBE



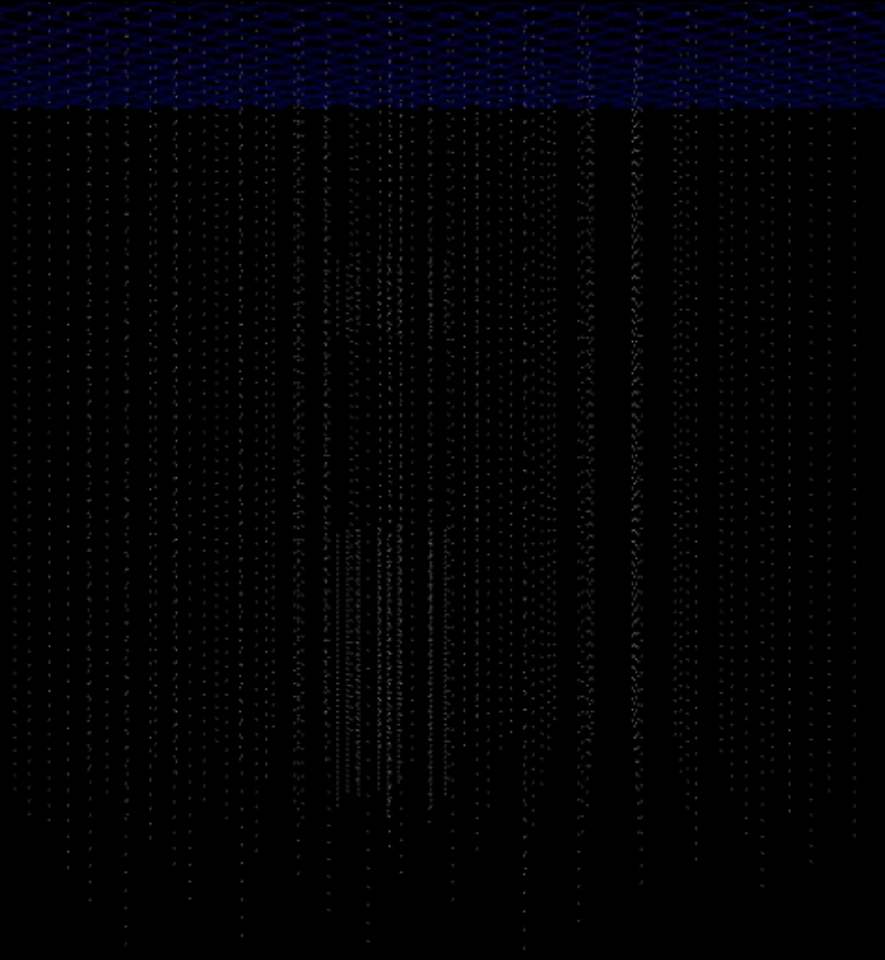


IceCube

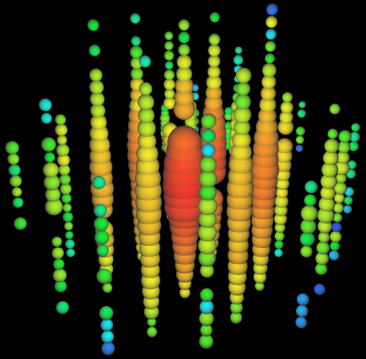
Telescope à Neutrinos



Signal Parasite: Muons Atmosphériques

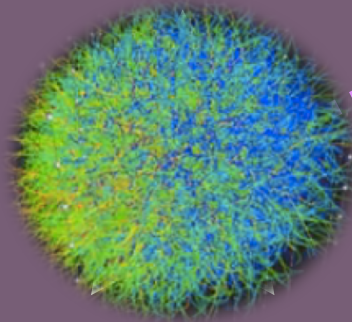


Interaction d'un neutrino électronique

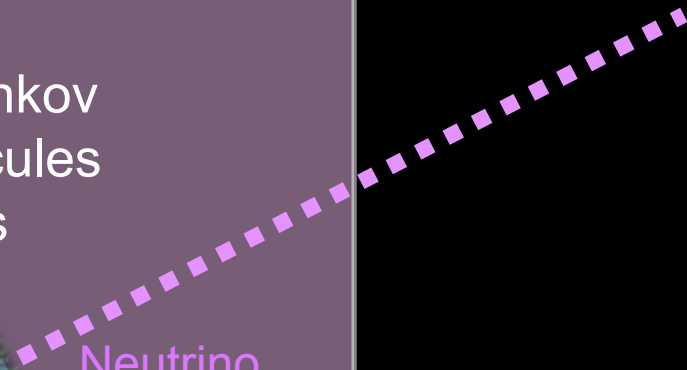


Glace

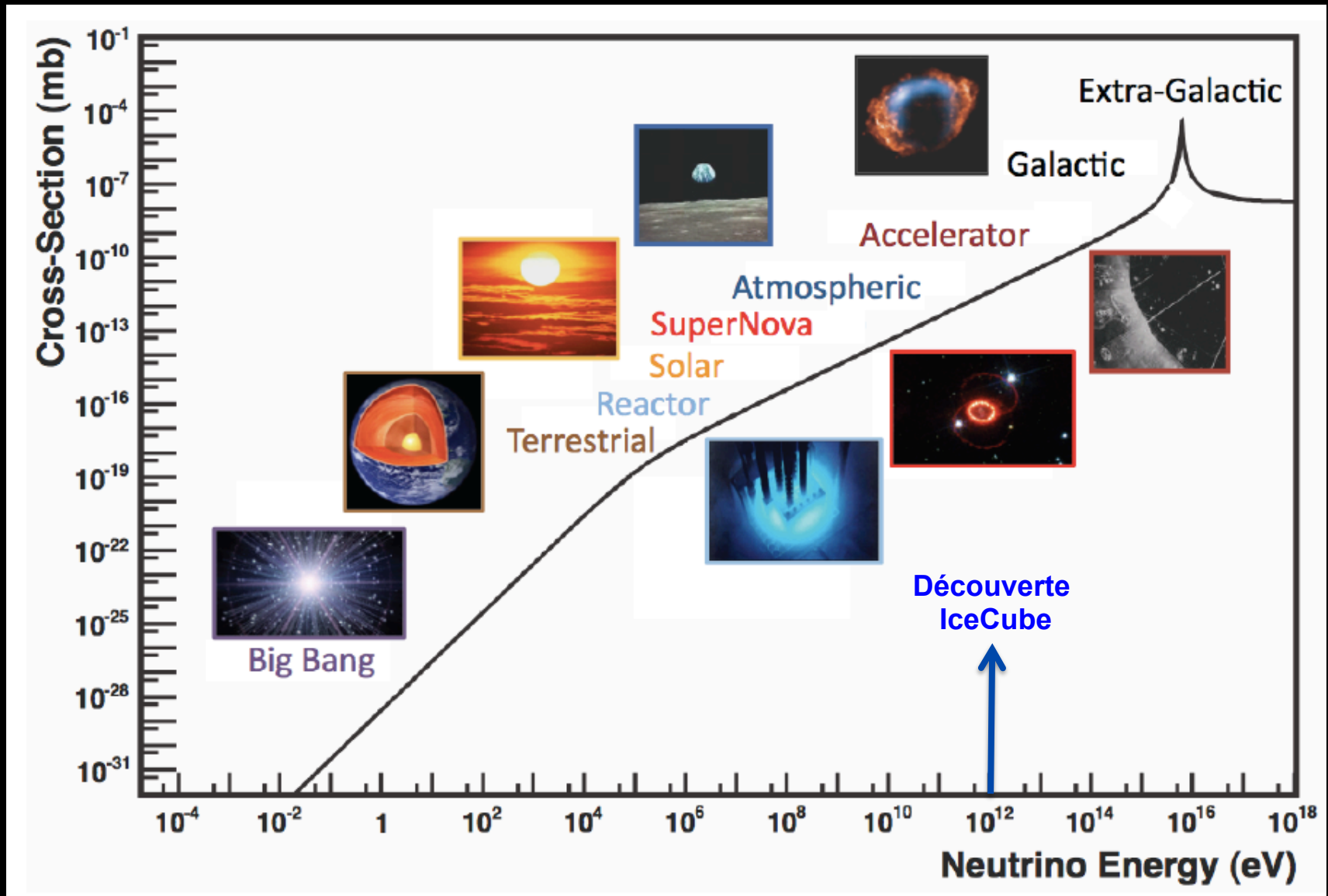
Lumière Cherenkov
Issue des particules
secondaires



Neutrino
électronique

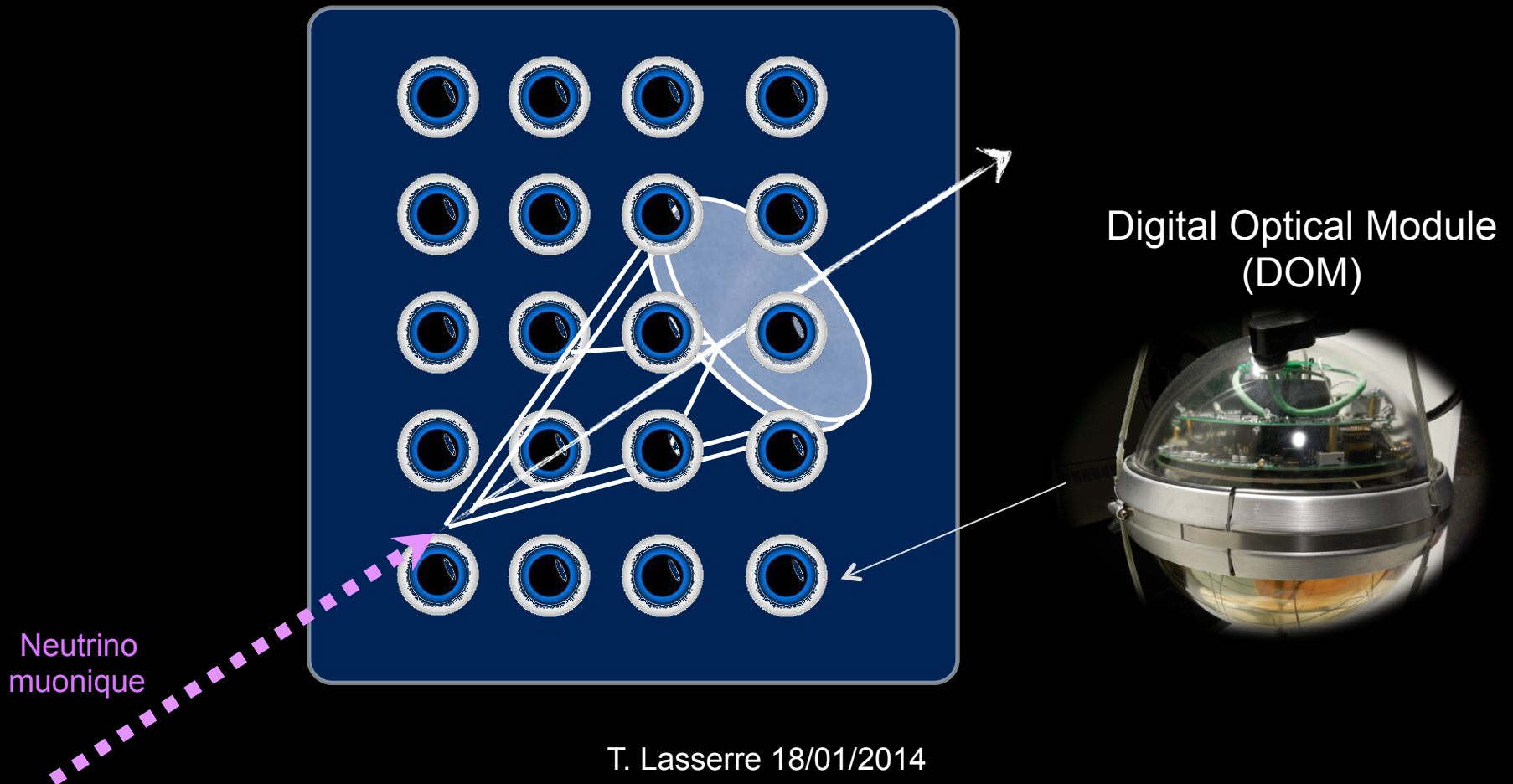


Probabilité d'interaction des neutrinos

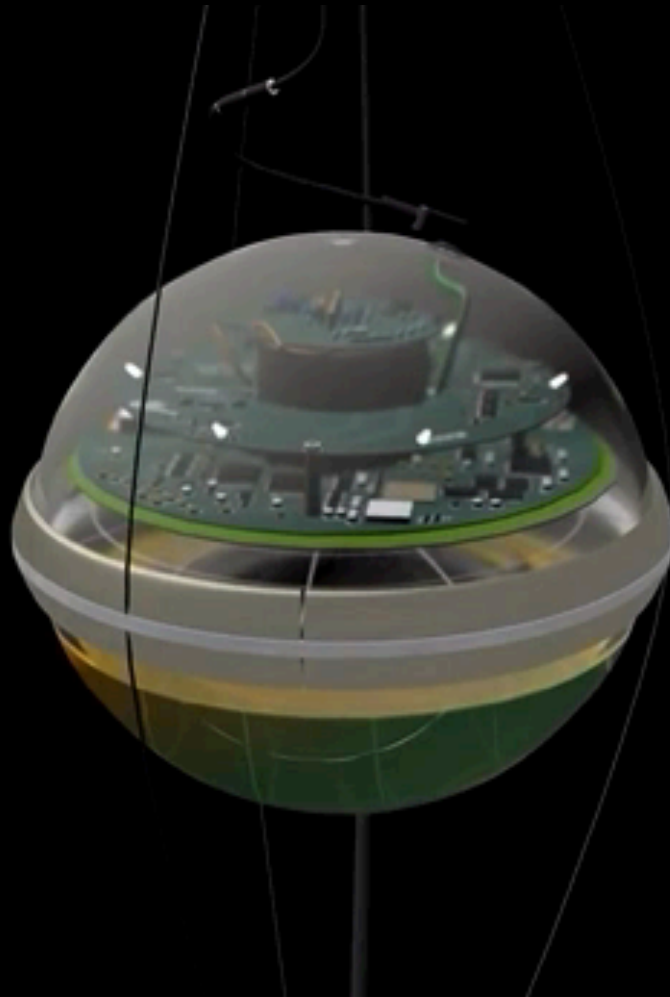


Détection des neutrinos

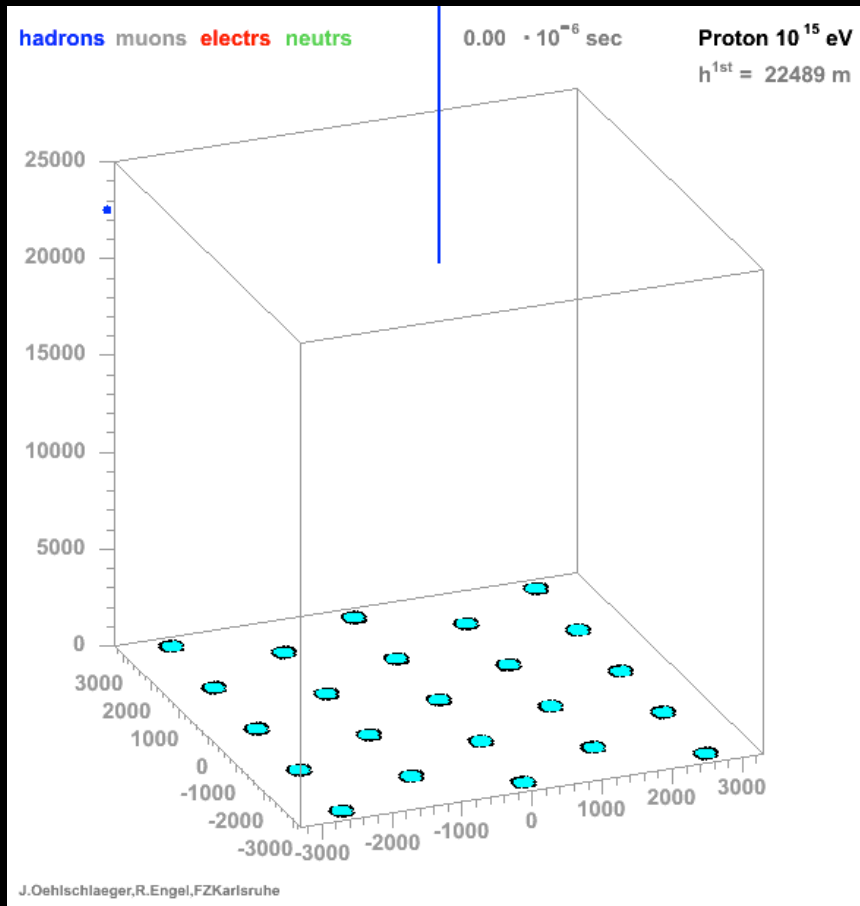
Détection de la lumière Cherenkov par une matrice de modules optiques (tubes photomultiplicateurs)



5000 modules de photodétection

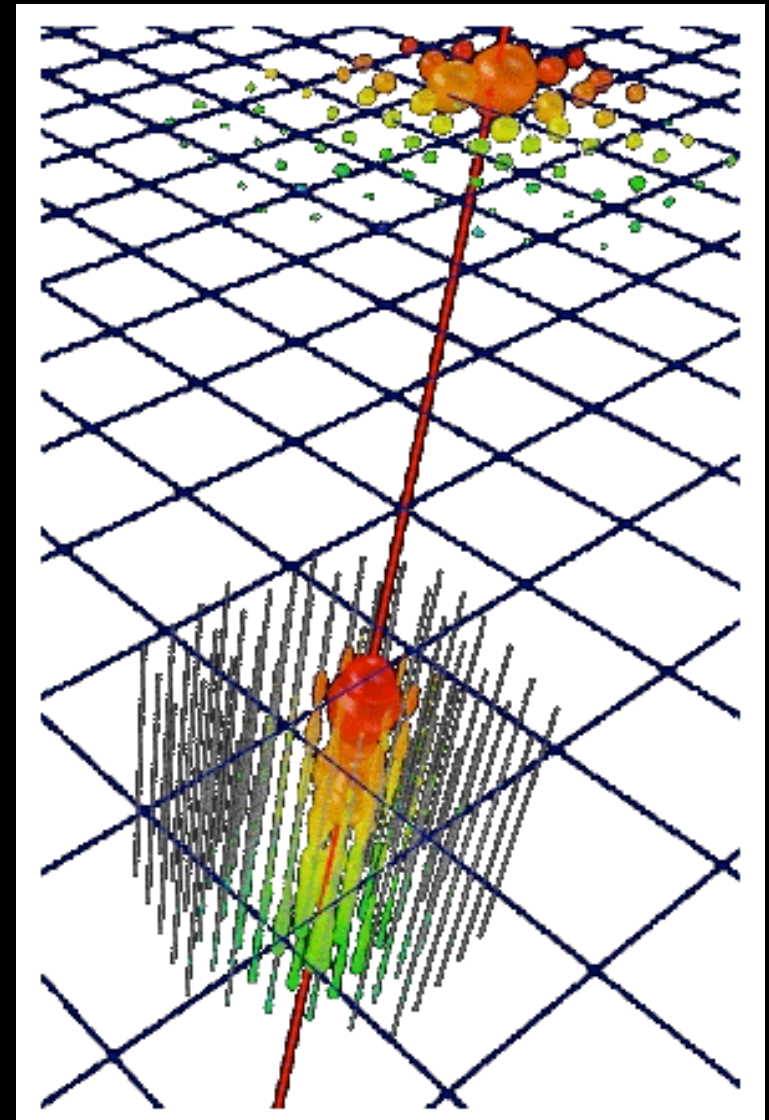


Muons Parasites

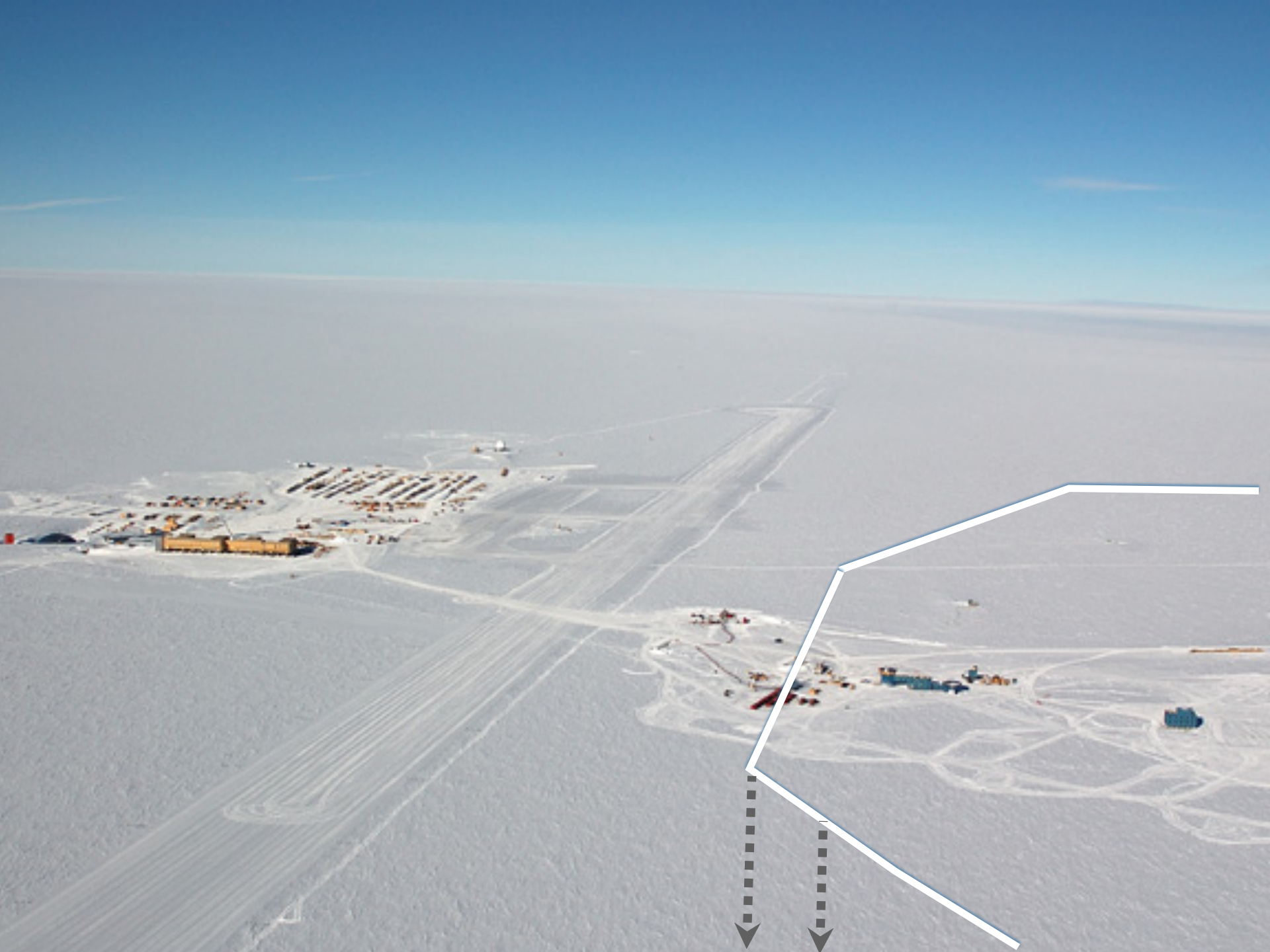


T. Lasserre 18/01/2014

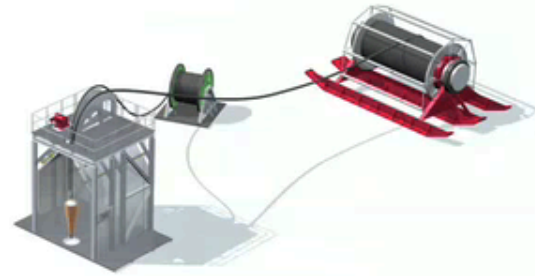
Ice Top: Détecteur de muon à la surface

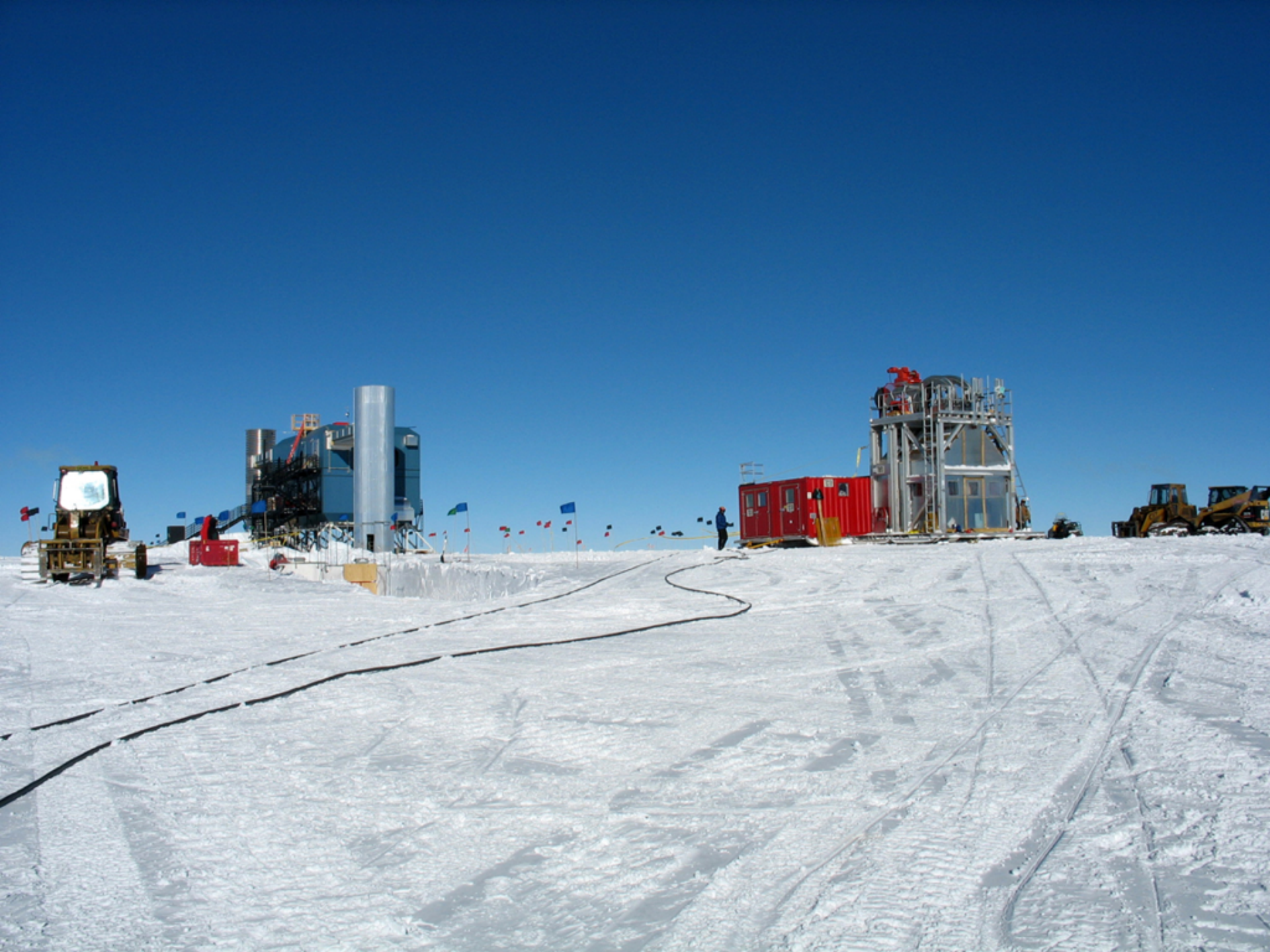


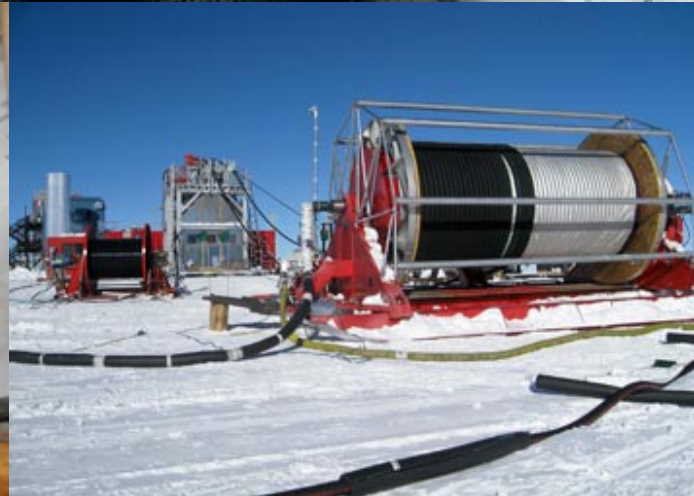
Ice cube à 1400-2450 m de profondeur



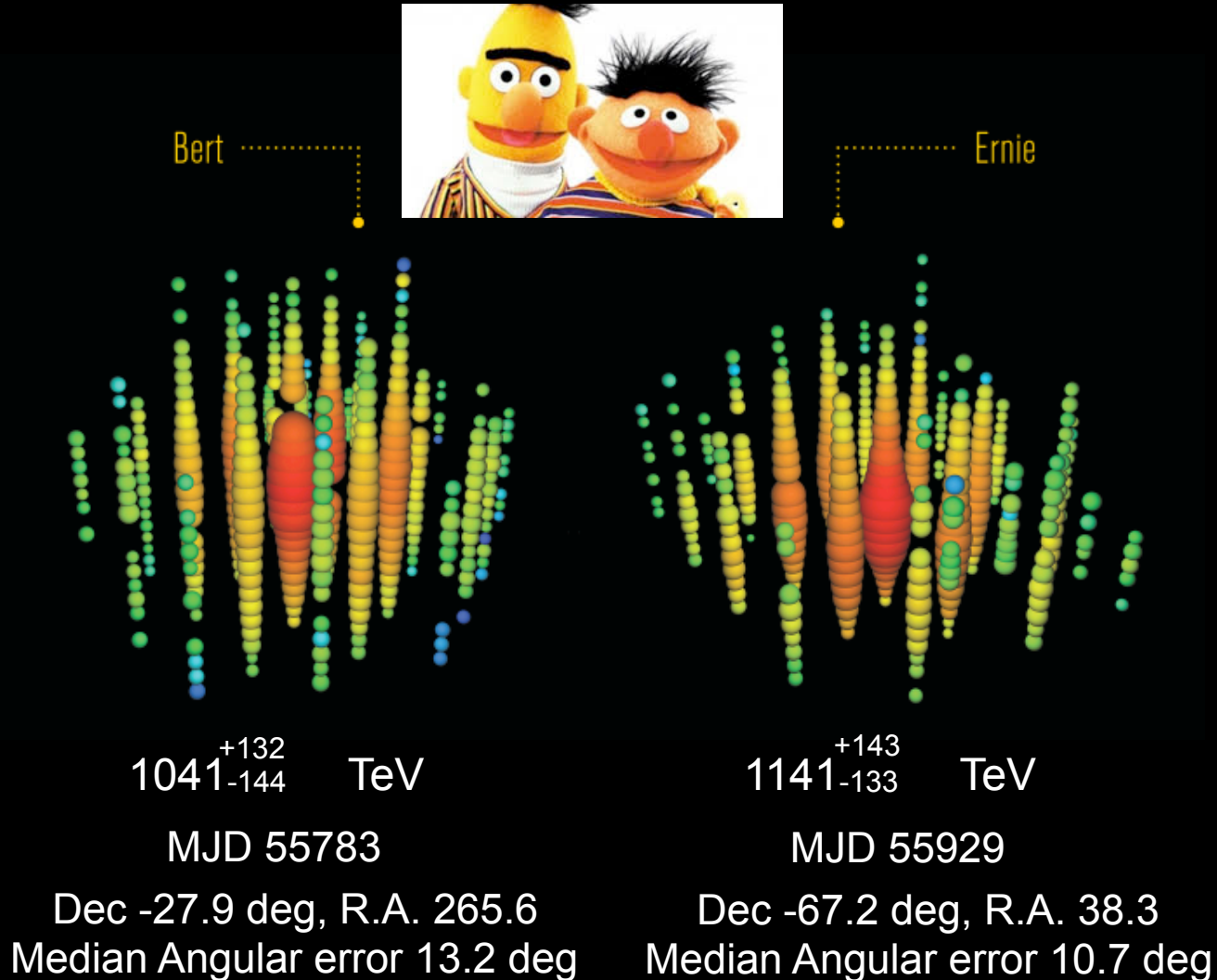
Intégration des modules optiques







2 candidats de très haute énergie (PeV)



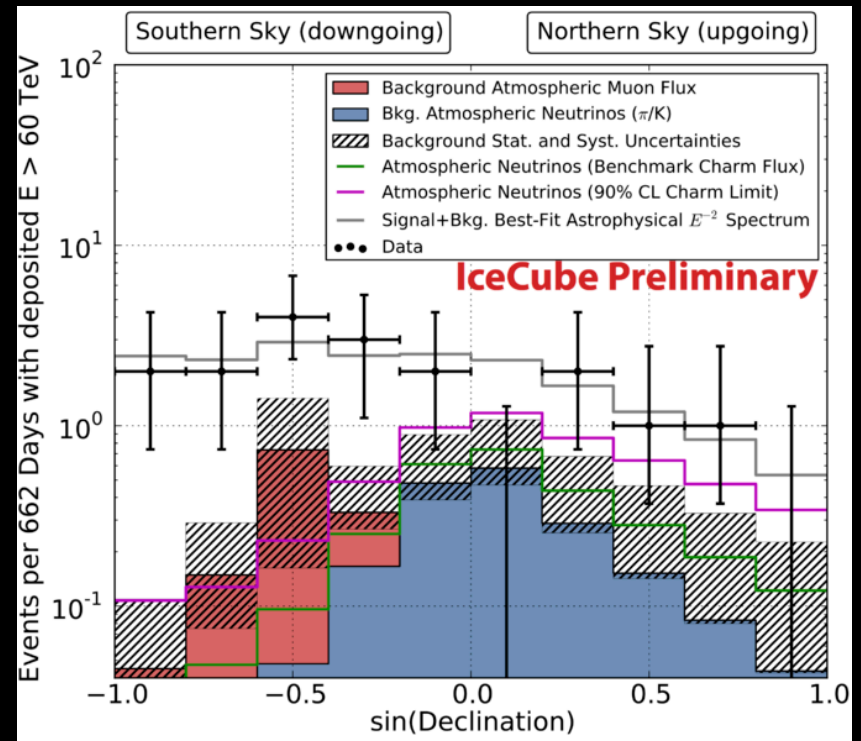
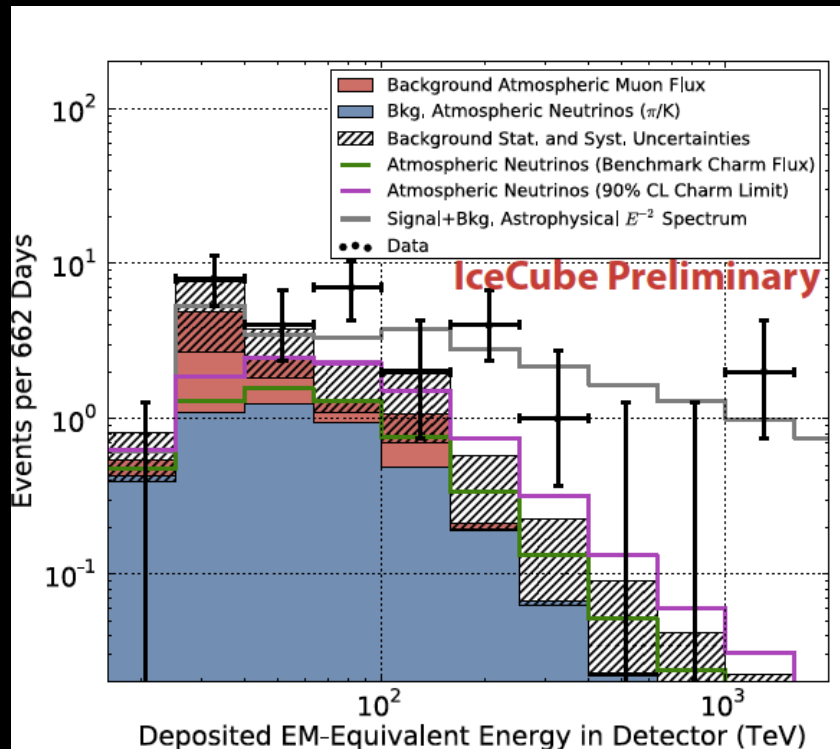
2 neutrinos de très haute énergie (PeV)

- Evénements localisés au cœur du détecteur
- Aucune trace de muon associée
- Aucun signal en surface (IceTop)
- Très haute énergie incompatible avec des neutrinos atmosphériques

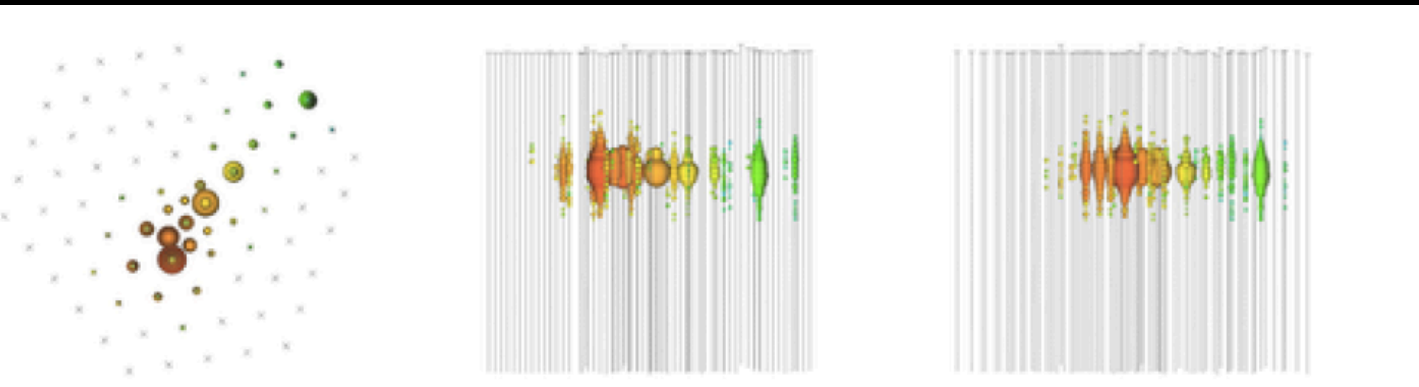
→ Neutrinos 'Electronique' Extraterrestres
(26 Nouveaux candidats découverts fin 2013)

La moisson de neutrinos continue...

26 nouveaux candidats observés pour 10 attendus (atmosphère) → significatif



Candidat Neutrino Muonique

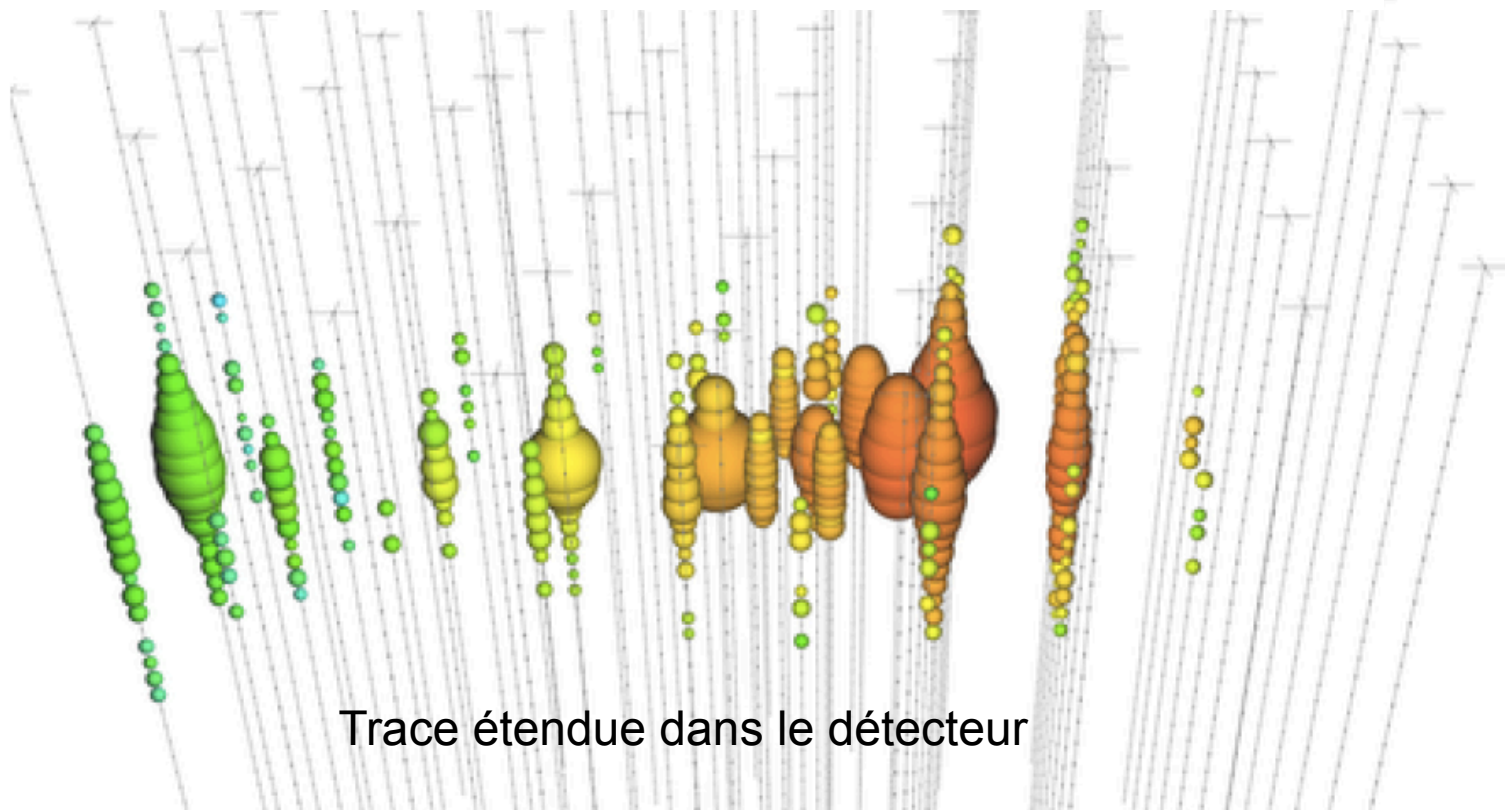


71.4-9.0+9.0 TeV

MJD 55513

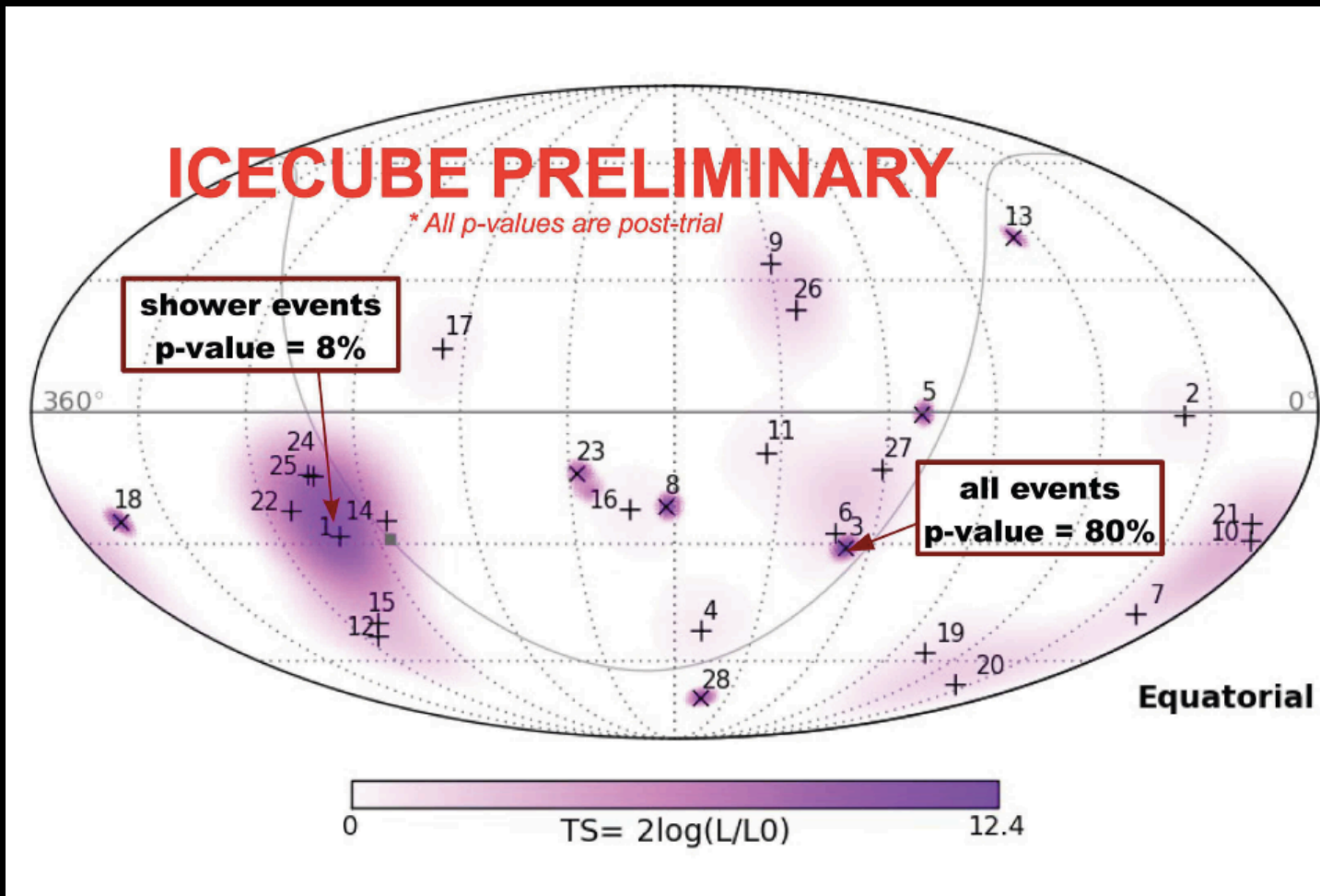
Dec -0.4 deg, R.A. 110.0

Median Angular error
<1.2 deg



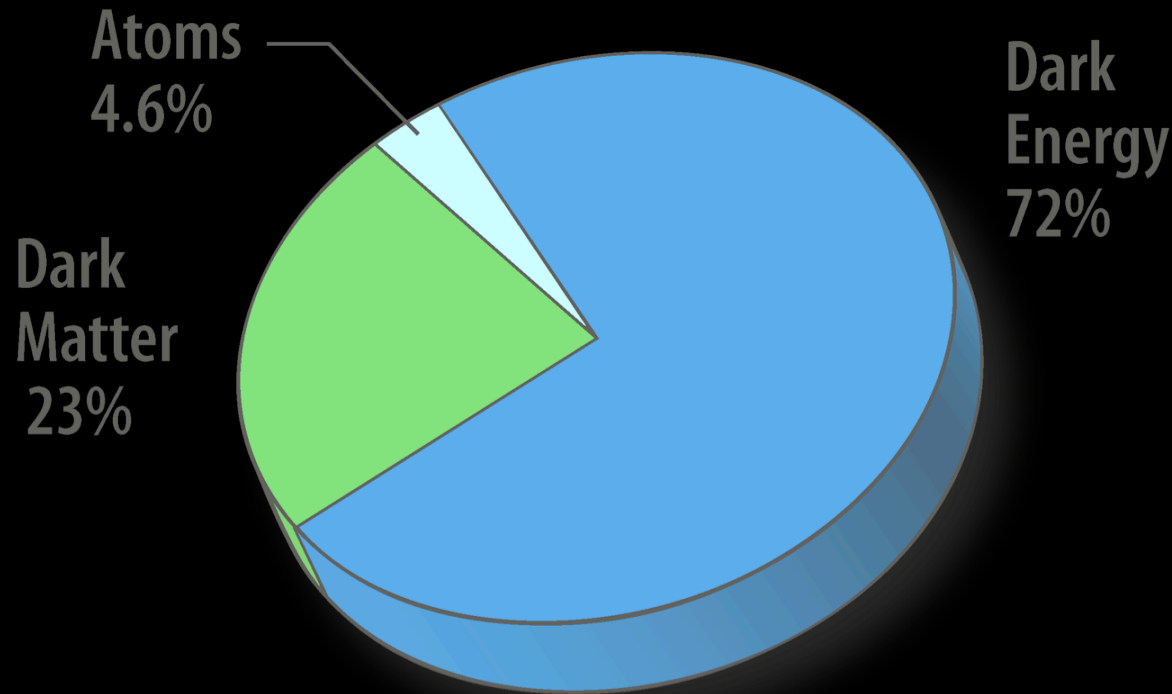
Trace étendue dans le détecteur

L'origine de ces neutrinos reste mystérieuses...



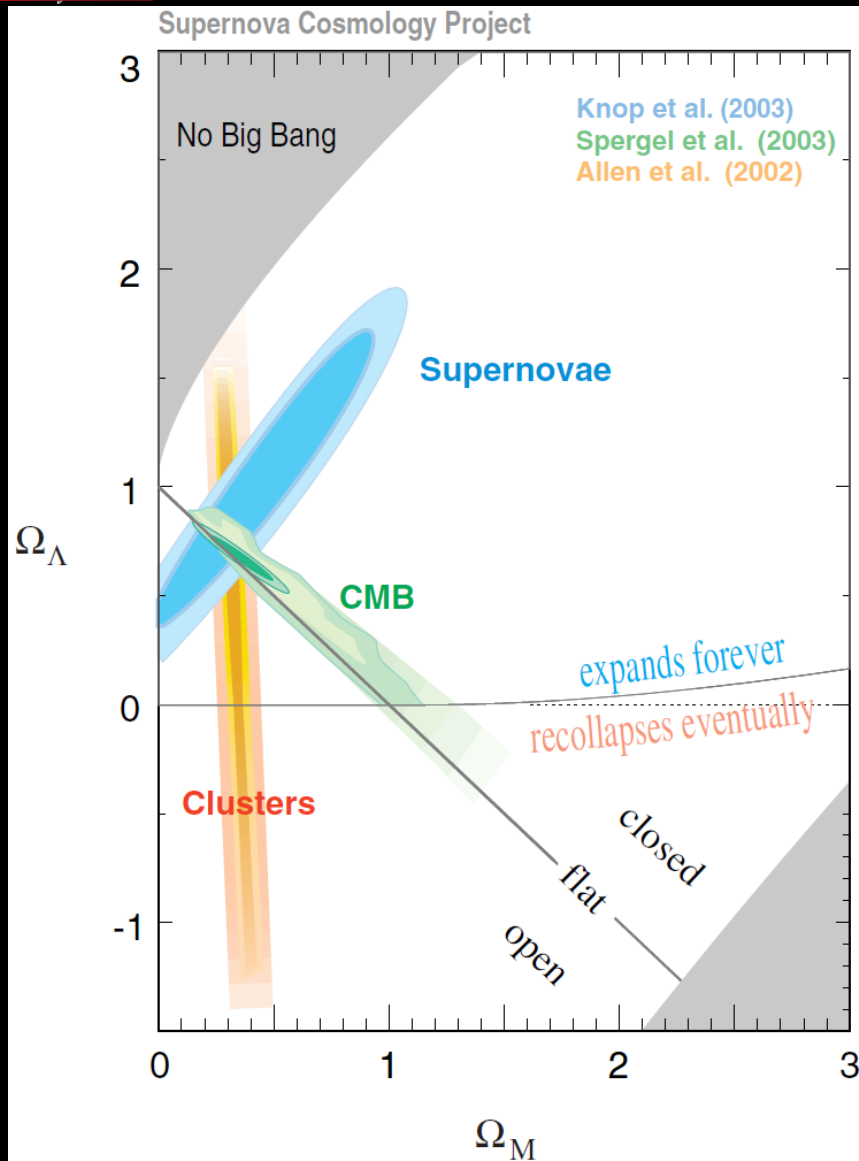
L'Univers d'aujourd'hui: Composition énergétique ($E=mc^2$)

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



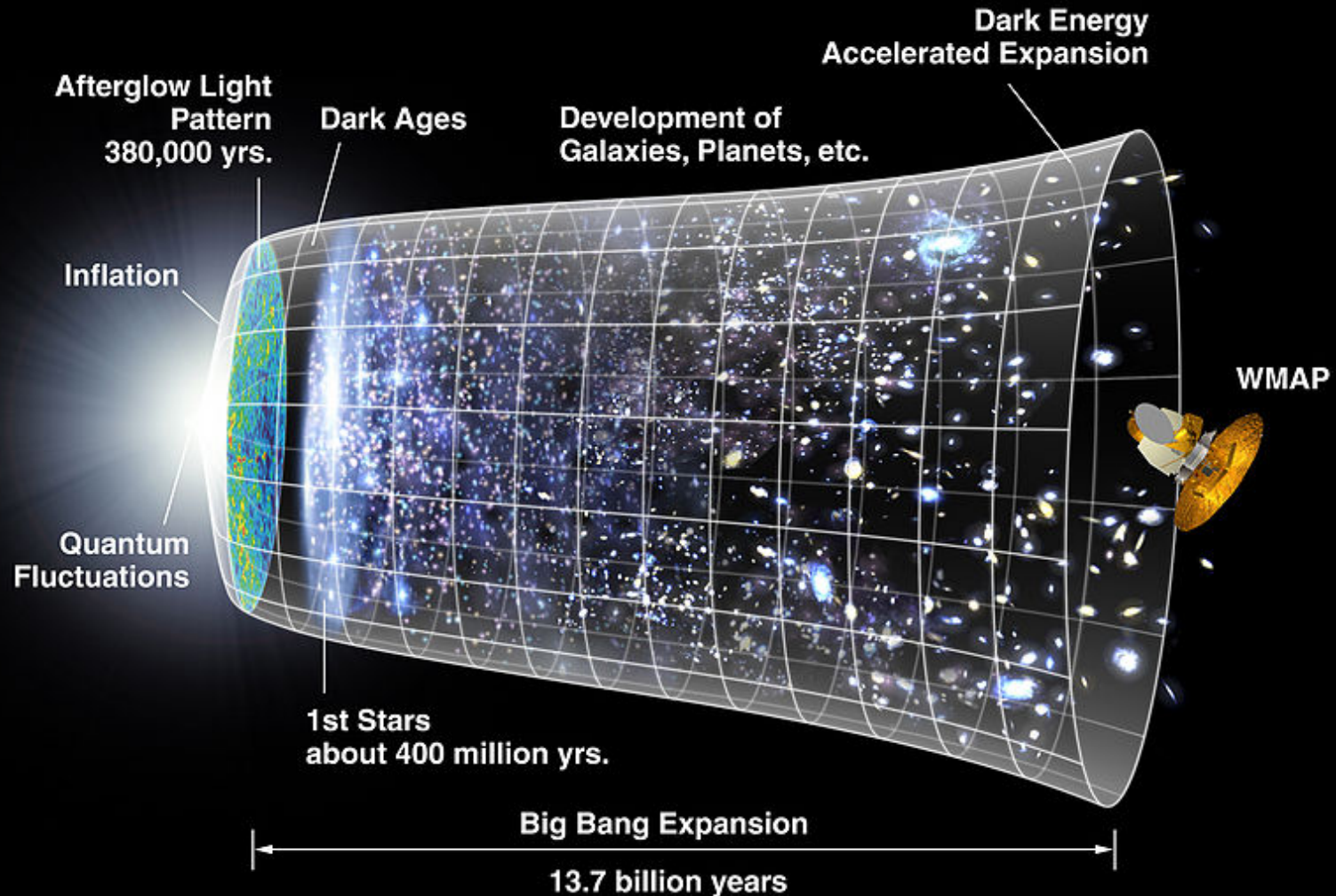
**Matière noire & Energie noire:
95% de l'Univers encore mystérieux...**

Le modèle de concordance



- **Rayonnement diffus cosmologique :**
 - $\Omega_{\text{Tot}} = \Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$ within 1%
 - $\Omega_{\text{Matter}} \sim 0.3$
 - $\Omega_{\text{baryon}} \sim 0.04$
- **Nucléosynthèse primordiale**
 - $n_{\text{baryon}}/n_\gamma \sim 4 \cdot 10^{-10}$
 - $\Omega_{\text{baryons}} \sim 0.04$
- **Dynamique des amas de galaxies, ...**
 - $\Omega_{\text{Matter}} \sim 0.3$
- **Supernovae type Ia**
 - Constraint $\Omega_\Lambda - \Omega_M \rightarrow \Omega_\Lambda \sim 0.7$
 - L'expansion s'accélère...

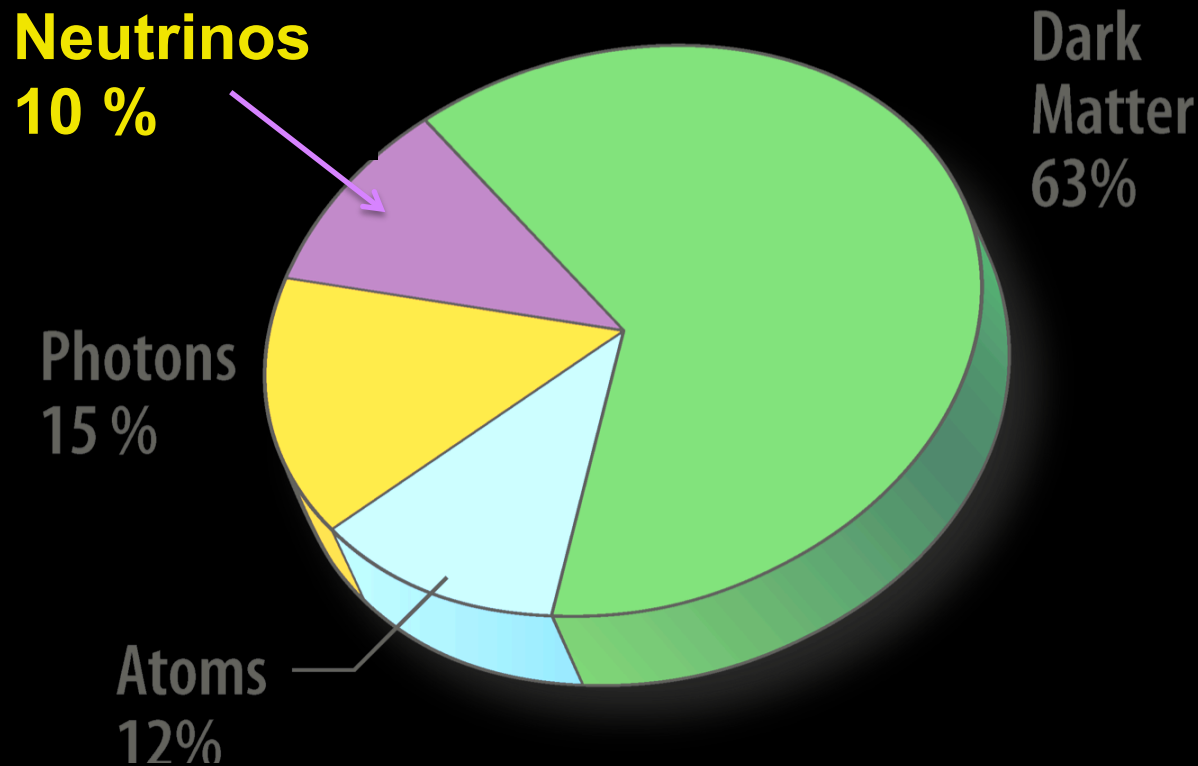
Histoire de l'Univers



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

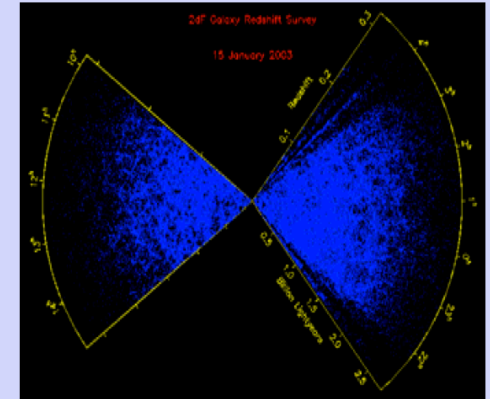
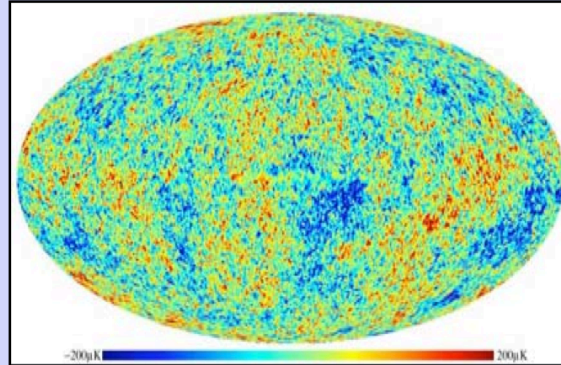
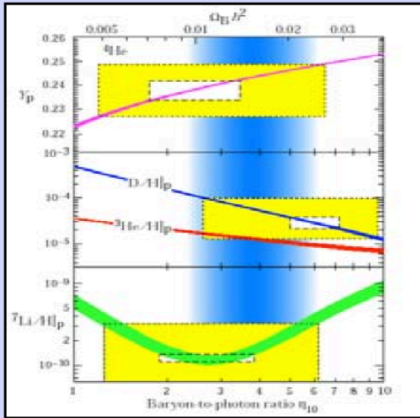
Composition énergétique ($E=mc^2$)



Temps & Température

| Temps | Température (photons) | Evènement |
|---------------------------------------|----------------------------------|---|
| $t_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ an}$ | $2.35 \times 10^{-4} \text{ eV}$ | Aujourd'hui |
| 10^9 an | 10^{-3} eV | Formation des structures |
| $4 \times 10^5 \text{ an}$ | 0.26 eV | Recombinaison- L'univers devient transparent |
| $4 \times 10^4 \text{ an}$ | 0.8 eV | Egalité matière-rayonnement |
| 3 minutes | $6 \times 10^4 \text{ eV}$ | Nucléosynthèse, formation des noyaux légers ($A=2, 3, 4, 6, 7$) |
| 1 s | 10^6 eV | Émission CNB, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ |
| $4 \times 10^{-6} \text{ s}$ | $4 \times 10^8 \text{ eV}$ | Formation de hadrons à partir des quarks et gluons |
| $<4 \times 10^{-6} \text{ s}$ | $> 10^9 \text{ eV}$ | Génération de l'asymétrie baryon-antibaryon ? |

Les observables



**Nucléosynthèse
primordiale**

Fond diffus cosmologique

Formation des structures

$T \approx \text{MeV}$

$T \approx \text{eV}$

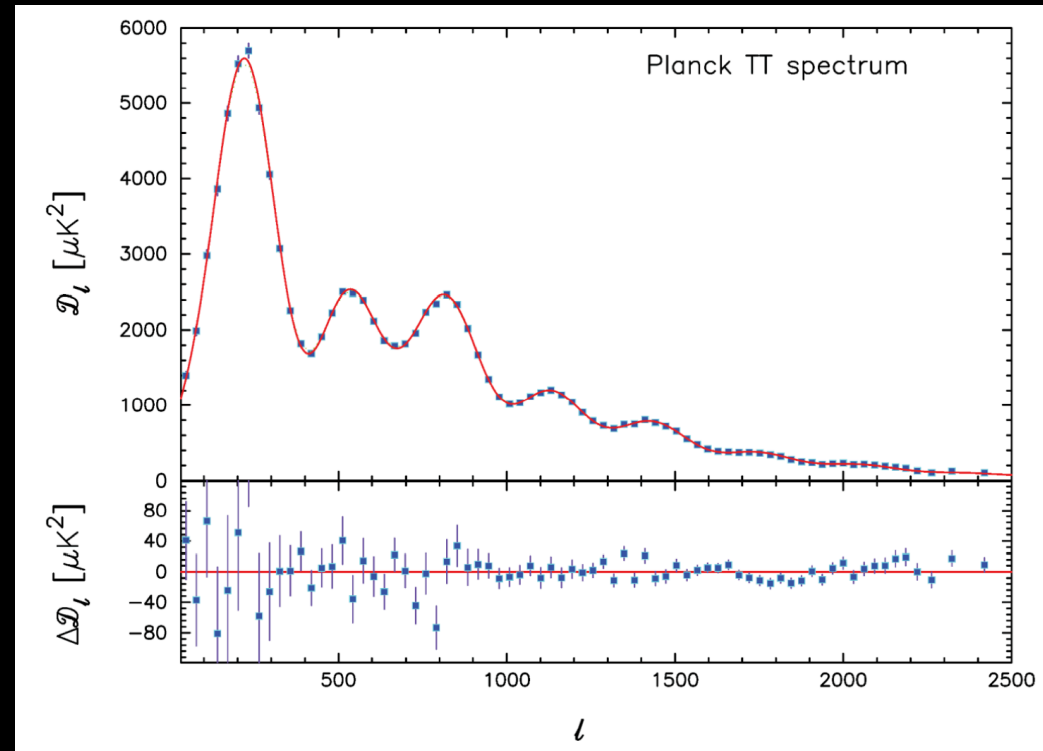
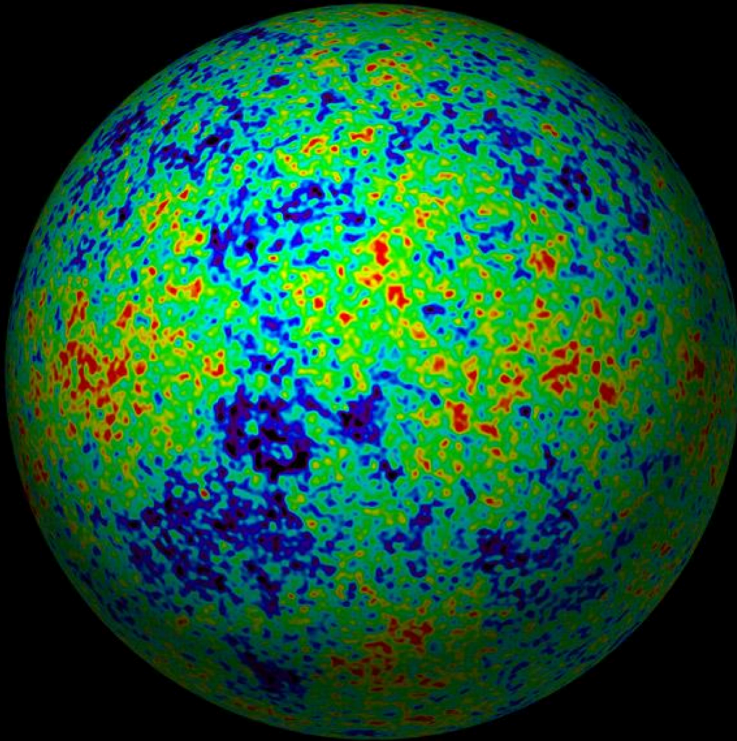
$T \approx \text{eV}$

Nombre de neutrinos

Nombre de neutrinos

**Nombre de neutrinos &
masse**

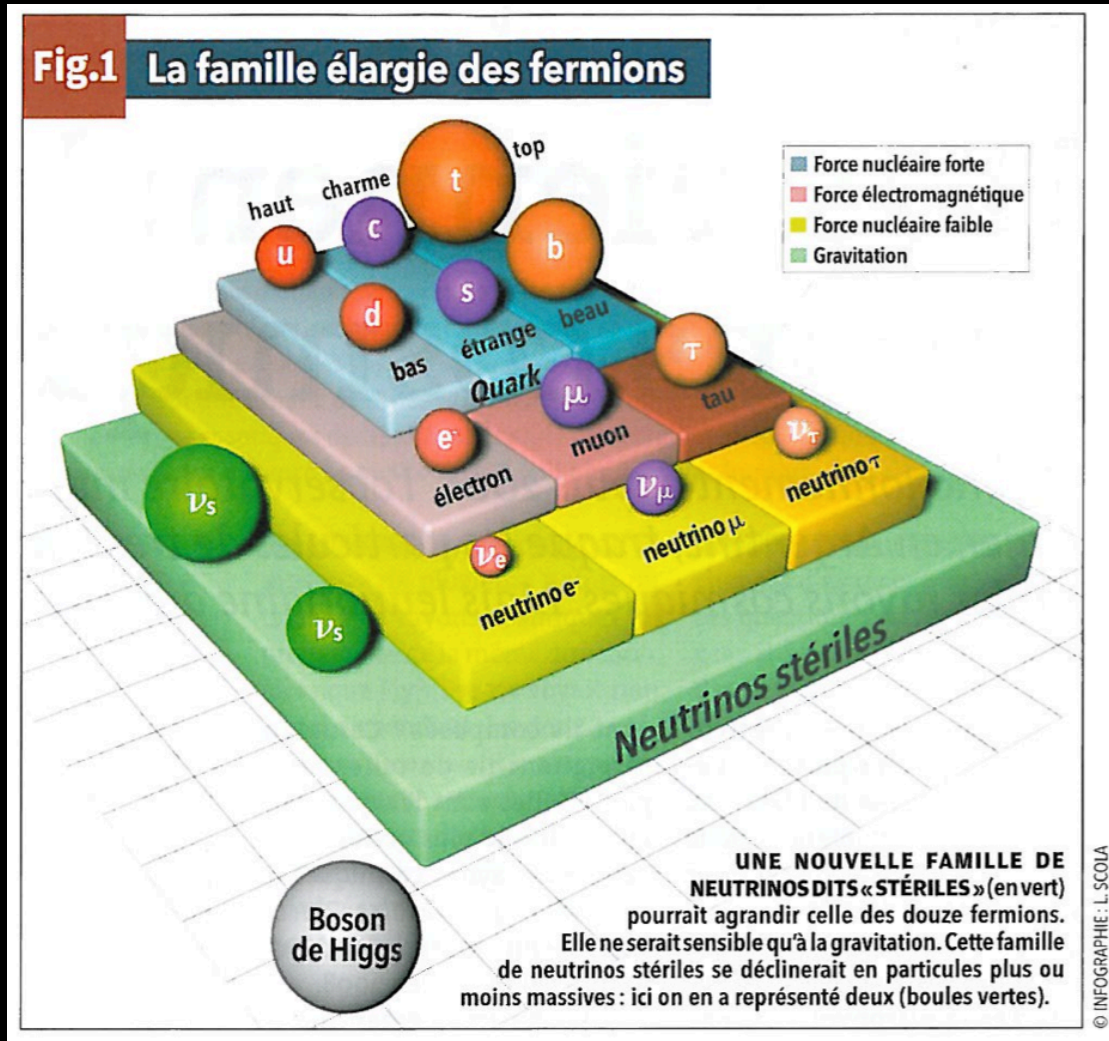
Résultats du satellite Planck



Mesure des fluctuations de température du CMB aux différentes échelles

Un 4^e type de neutrino?

Fig.1 La famille élargie des fermions

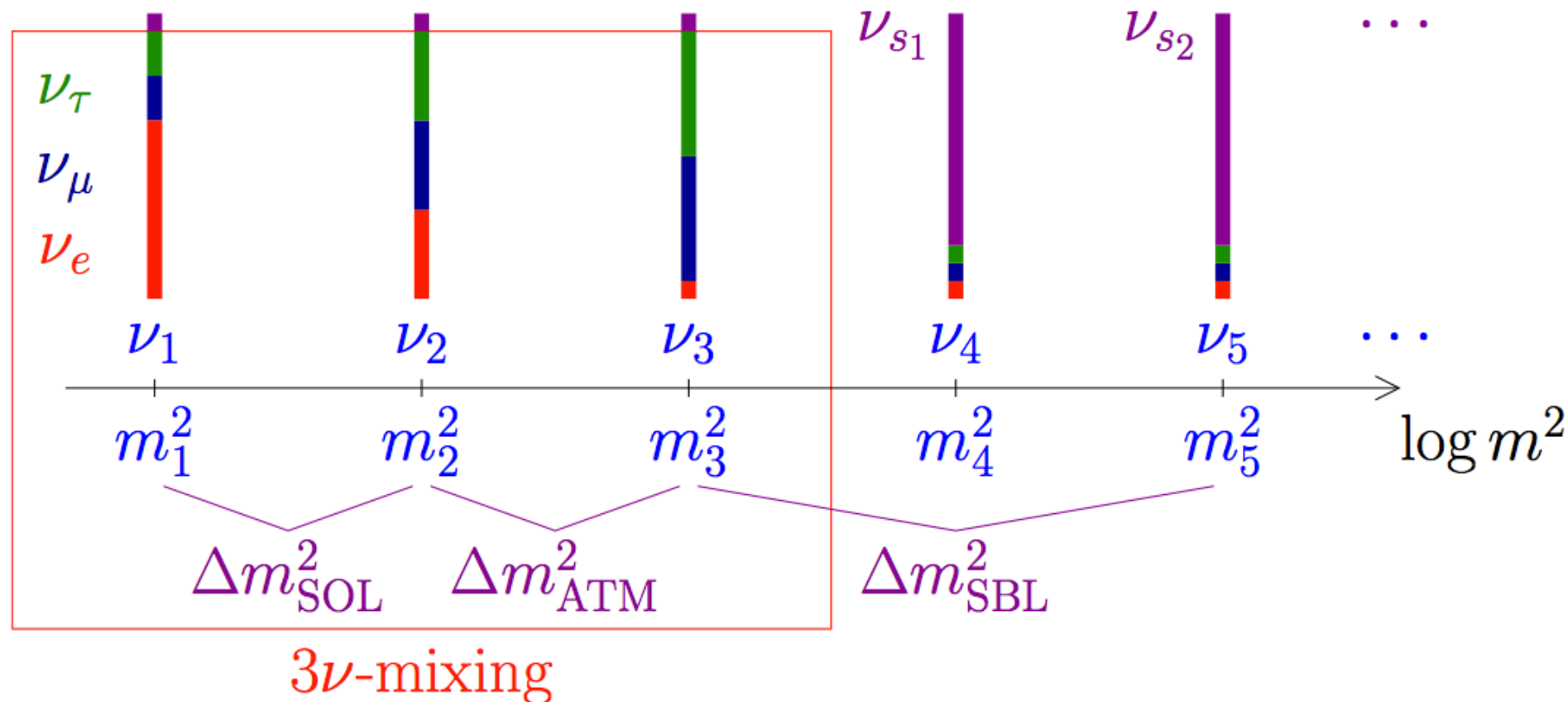


Les hypothétiques neutrinos stériles

Un nouveau neutrino léger, ν_s

- sans interaction
- mélange avec les autres ν 's
- $m_4 \approx 1$ eV ?

Pas de couplage avec les bosons W/Z

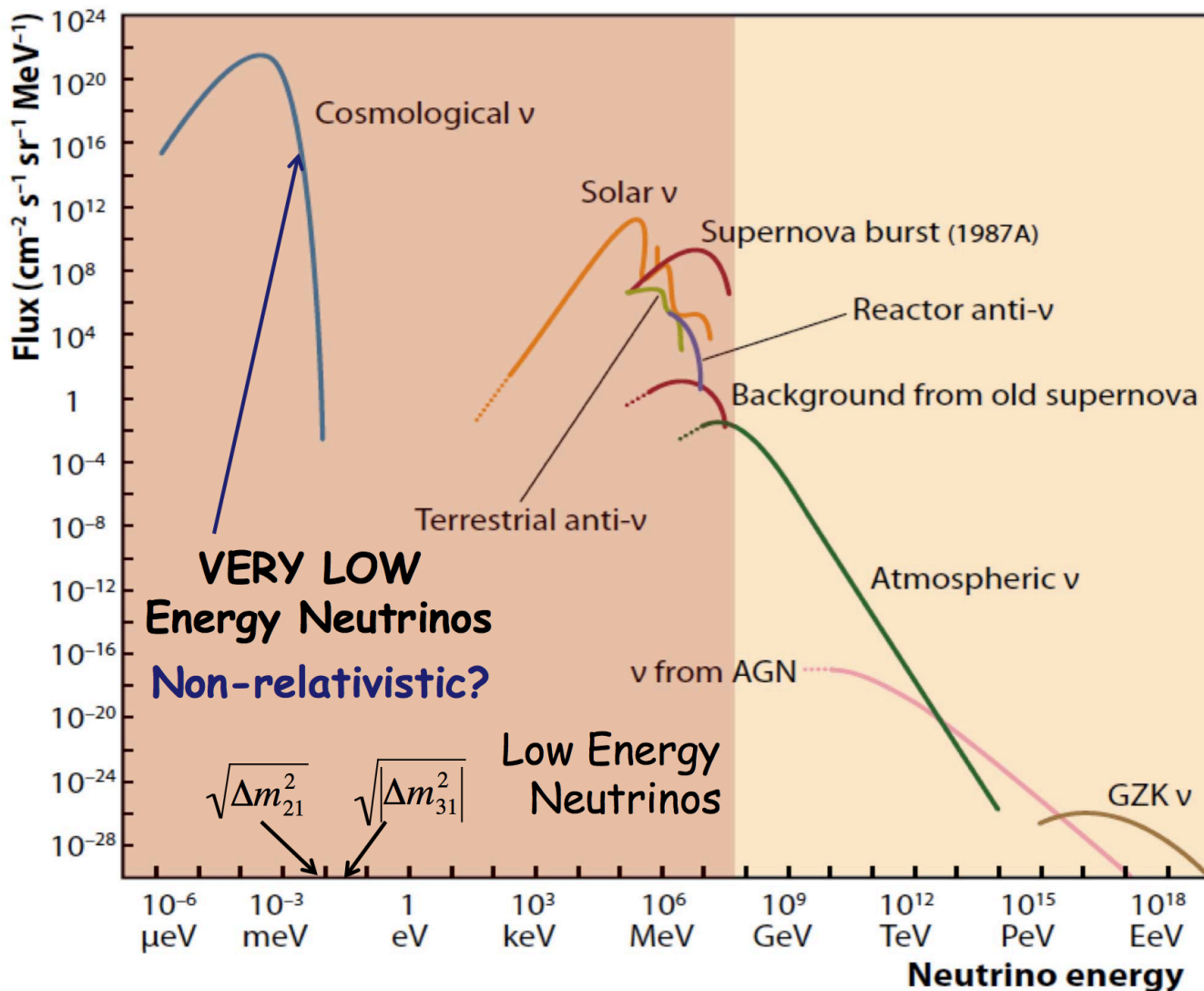


Résultats du satellite Planck

- Mesure de ρ_r par 'ajustement' du modèle de concordance aux données CMB
- Combinaison avec d'autres observables (structures dans l'Univers, H_0 , ...)
- Résultats :
 - Planck seul: $N_{\text{eff}} = 3.36 +0.68 -0.64 @95\% \text{ C.L}$
 - Planck +autres : $N_{\text{eff}} = 3.52 +0.48 -0.45 @95\% \text{ C.L}$
- Conclusions :
 - Le CNB est détecté sans aucune ambiguïté (ce n'est pas nouveau)
 - Un 4^e type de neutrinos n'est pas exclu par les données...
 - Ce pourrait être aussi une autre (nouvelle) particule...

Spectre en énergie du CNB

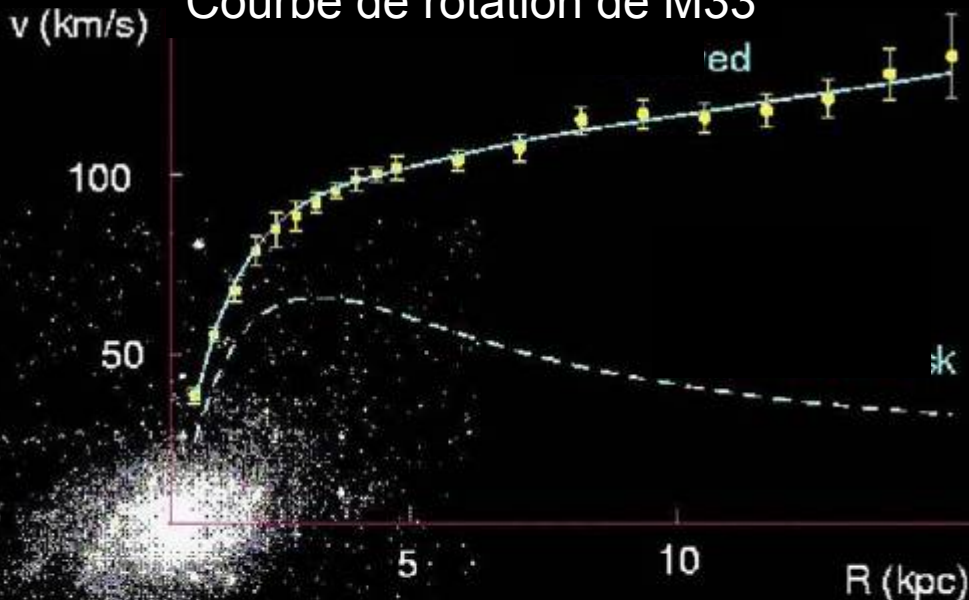
Aucune piste sérieuse pour la détection 'directe' du CNB....



5^e neutrino et Matière noire?

Matière noire Galactique

Courbe de rotation de M33



Vitesse constante à grands R

→ Un halo de matière noire

→ $M(R) \sim (50-200 \text{ kpc?})$

→ $\rho_{\text{local}} \sim 0.1 \text{ GeV/cm}^3$

Matière 'lumineuse' (étoiles):

→ $\Omega_{\text{lum}} = 0.003$

→ $\rho_{\text{star}} \sim 10^{-8} \text{ GeV/cm}^3$

■ Cosmologie : $\Omega_{\text{MatièreNoire}} \sim 0.3 \rightarrow \rho_{\text{MatièreNoire}} \sim 10^{-6} \text{ GeV/cm}^3$

→ Nous vivons dans une surdensité de matière noire $\rho_{\text{local}} > 100\,000 < \rho_{\text{MatièreNoire}} >$

→ Quelle est la nature de la matière noire :

- Matière noire froide, WIMPS, $m = 10-1000 \text{ GeV} \rightarrow$ encore non détecté
- Un ν stérile 'lourd' (keV) pourrait-il rendre compte des observations?

Matière noire: froide (CDM) ou tiède (WDM)

Les modèles CDM prédisent un grand nombre de structures à petites échelles autour des galaxies

CDM

WIMPS

WDM

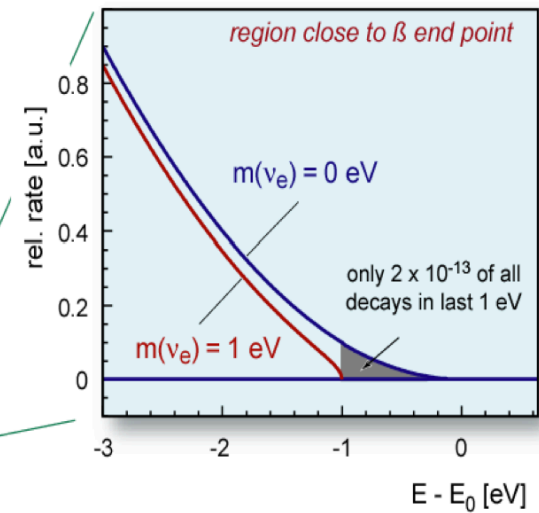
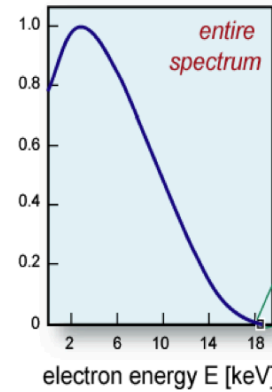
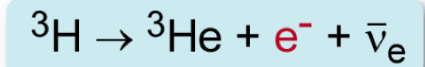
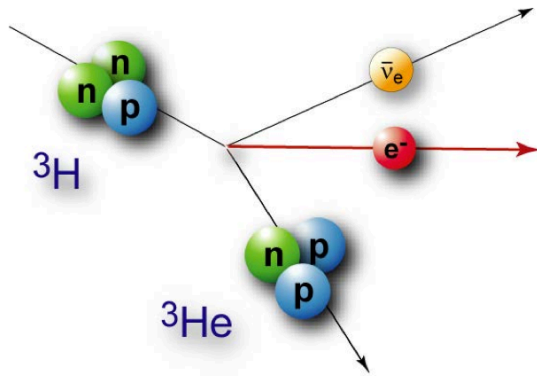
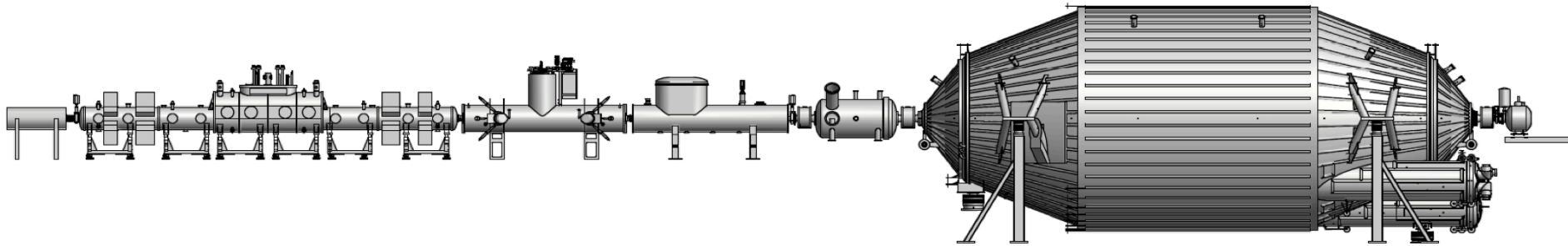
keV ν

Simulation numérique

Un candidat ad-hoc, un ν stérile au keV, pourrait mieux rendre compte de ces observations ?

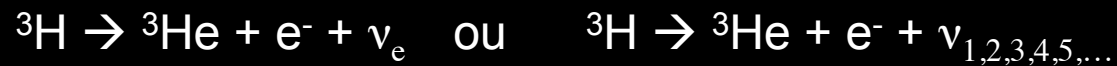
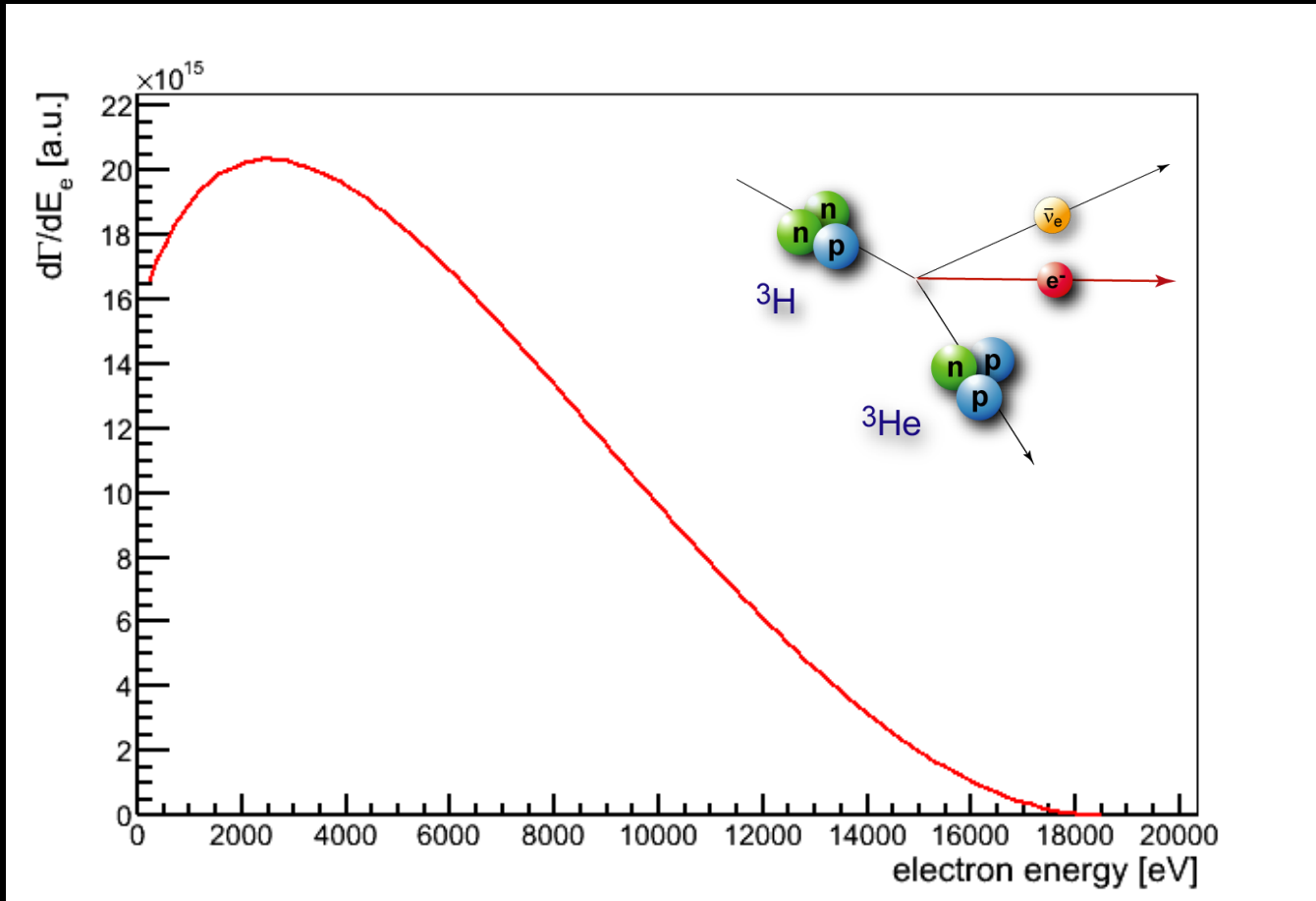
Mesure directe de la masse des ν

Expérience KATRIN (Karlsruhe)



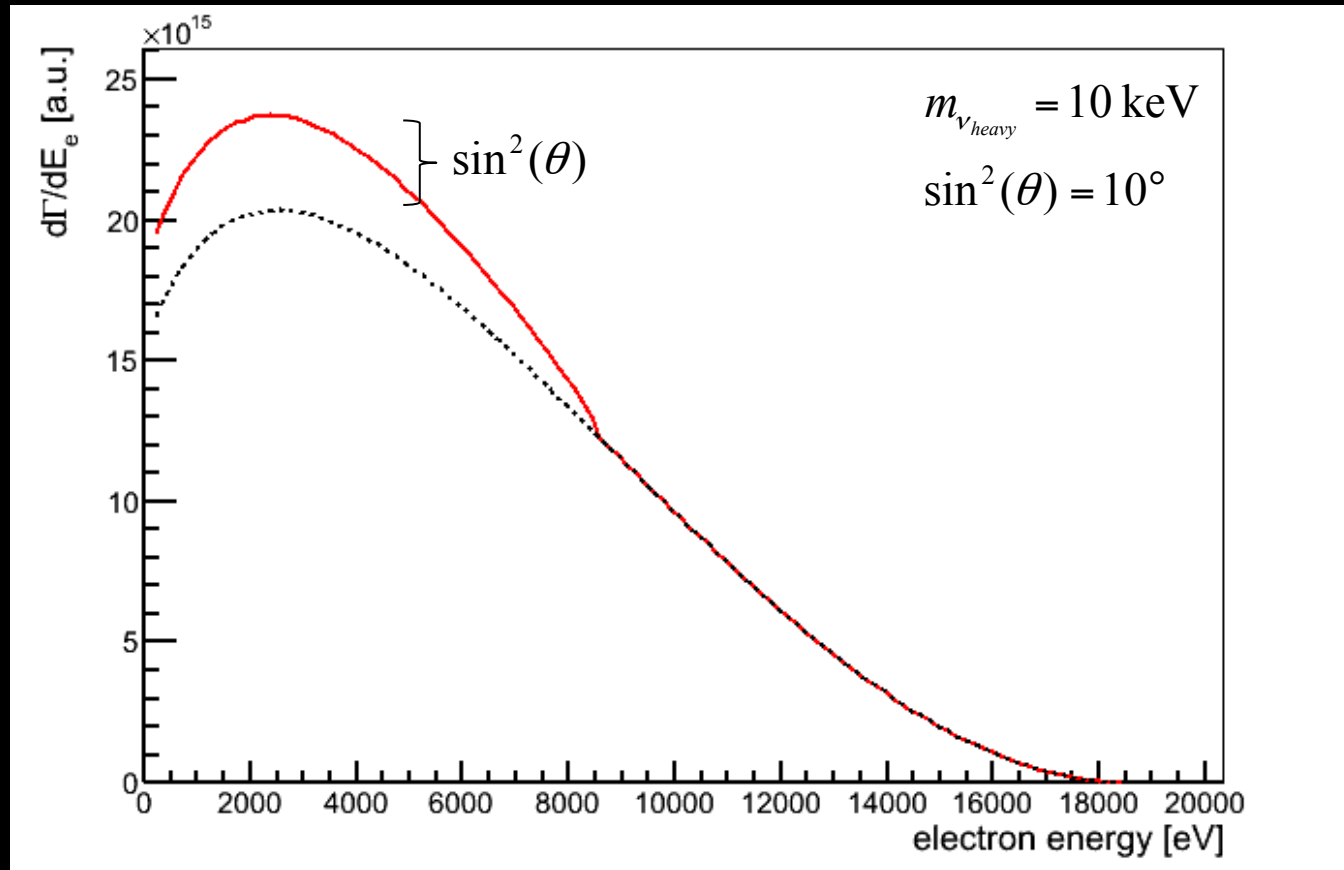
Spectre attendu dans KATRIN

Spectre en énergie de la désintégration bêta du Tritium : ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_e$



Recherche du ν stérile au keV (KATRIN)

Expérience difficile car $\sin^2(\theta) \approx 10^{-7}$ pour rendre compte de la matière noire galactique...



$m_{\nu_{keV}}$

Asymétrie Matière - Antimatière

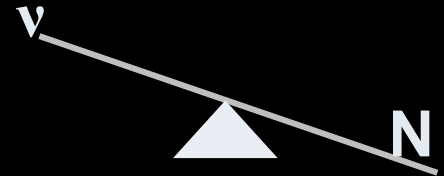
Au moment du **Big-Bang**: autant de matière que d'antimatière



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

- Une asymétrie quark-antiquark existe (violation CP) mais ne permet pas de rendre compte de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers ...
- Un ν stérile lourd (GUT scale) pourrait rendre compte de la très faible masse des $\nu_{e,\mu,\tau}$ (mécanisme balançoire)
- A $t < 10^{-35}s \rightarrow$ production neutrino lourd
- $C\bar{P} \rightarrow R(N \rightarrow l^- + \Phi^+) < R(N \rightarrow l^+ + \Phi^-) \rightarrow L$ violation (Φ : champs de Higgs)
 \rightarrow Leptogenesis
- Conversion de l'asymétrie leptonique en asymétrie baryonique (**B-L** conservé)
- Un scénario prometteur mais difficilement testable
 - Recherche de la nature du neutrino (dirac ou Majorana)
 - Recherche de violation CP dans le secteur des neutrinos légers



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

IceCube: Renaissance de l'astronomie neutrino

Existe t'il un d'autres neutrinos (stériles) ?



Merci pour votre attention