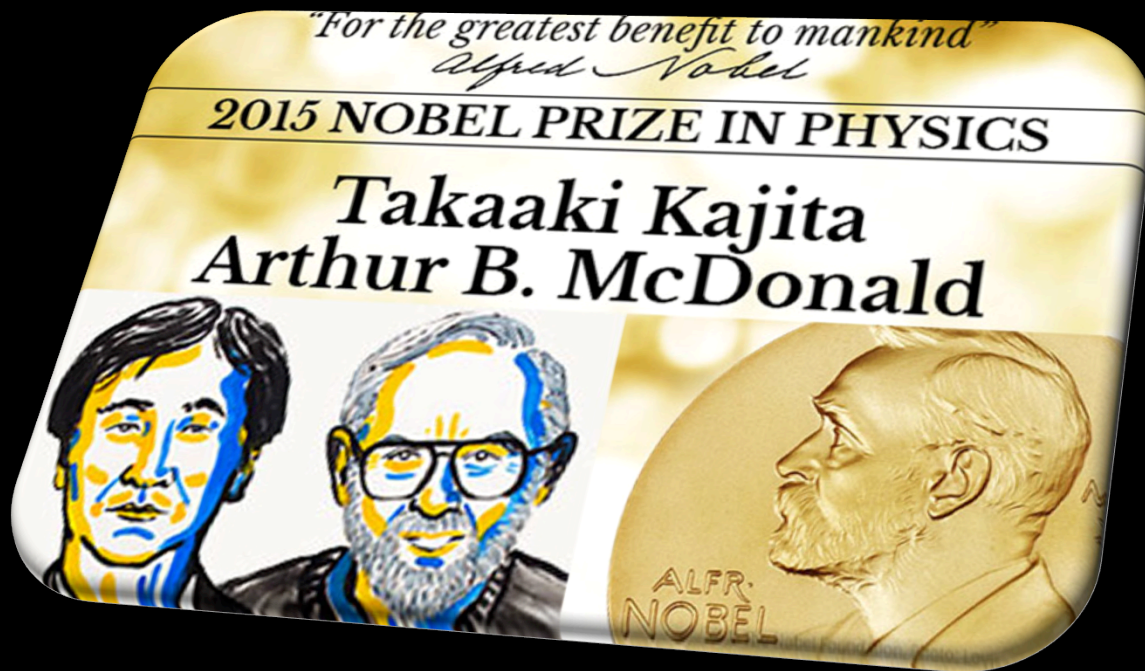


Les neutrinos: des particules universelles



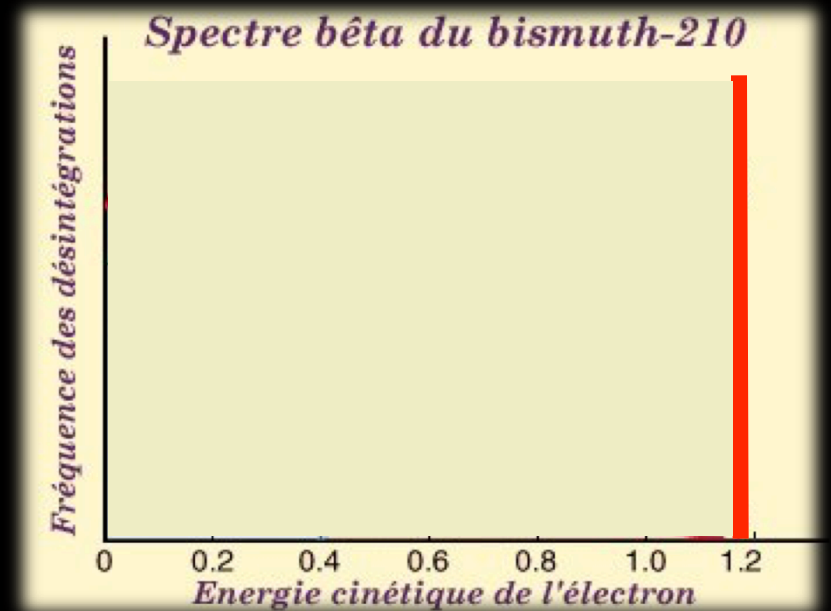
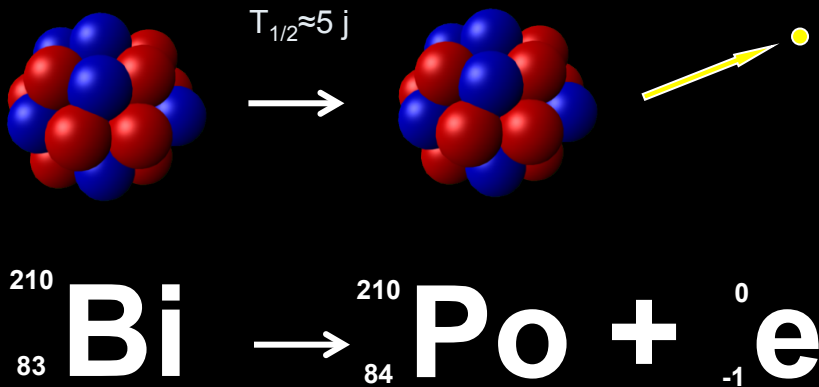
Thierry Lasserre (CEA/DSM/Irfu)
Masterday 2015, 05/12/2015

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



Le remède désespéré de Pauli (1930)

Zürich, 4 décembre 1930

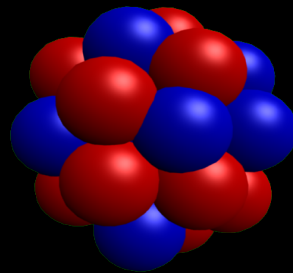
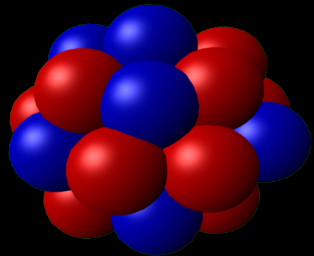
Liebe radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich ... auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um den Wechselsatz der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in dem Kern existieren, welche den Spin $\frac{1}{2}$ haben und das Ausschließungsprinzip befolgen ... Das kontinuierliche β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, daß beim β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, daß die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist. ...

Ich gebe zu, daß mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen mag ... Aber nur wer wagt, gewinnt ... Also, liebe Radioaktive, prüfet und richtet. - Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dezember in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.

Mit vielen Grüßen ...
Euer untertänigster Diener
W. Pauli.

• électron e^-



$X(A,Z)$

$Y(A,Z+1)$

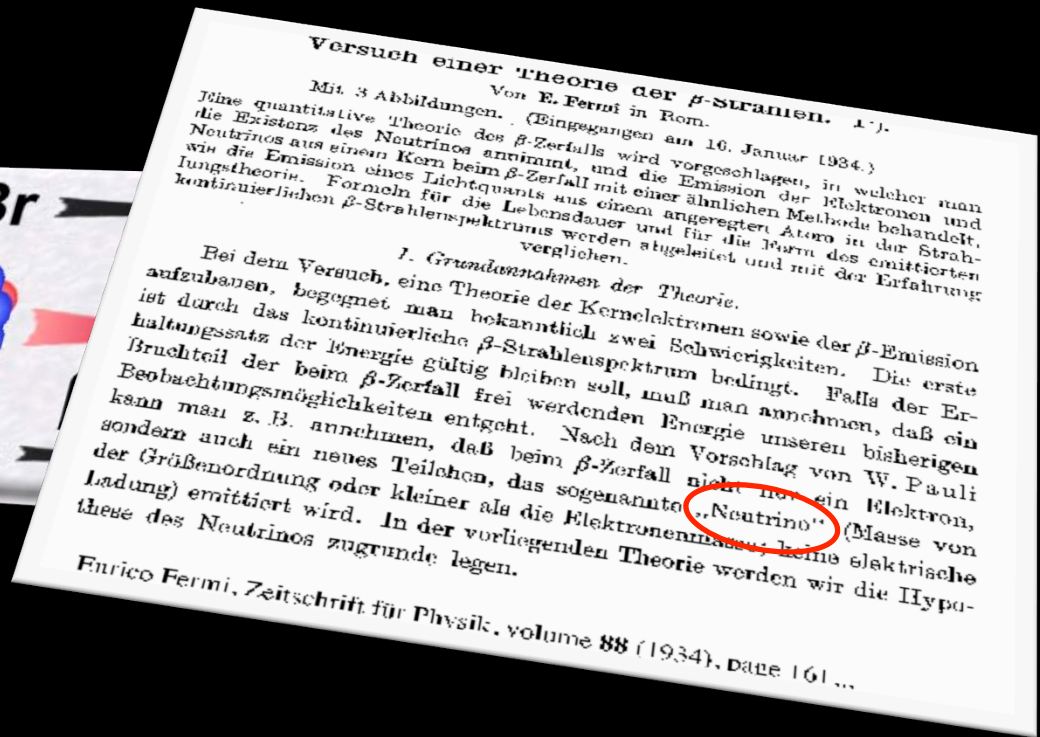
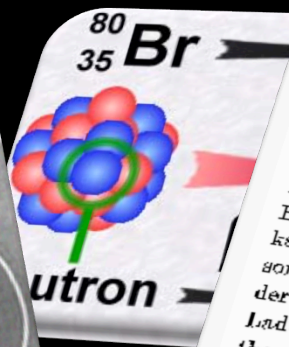
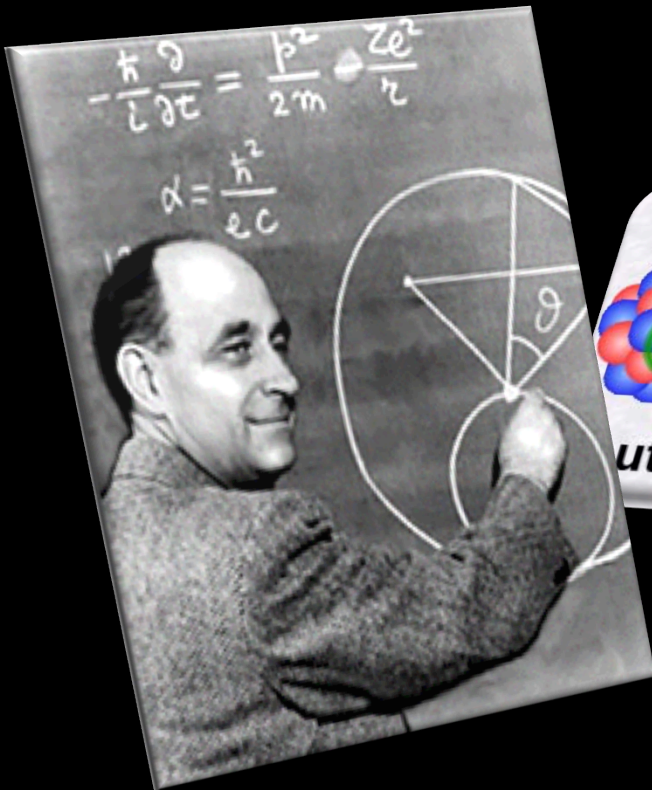
• neutrino ν

Théorie de la désintégration β (1934)

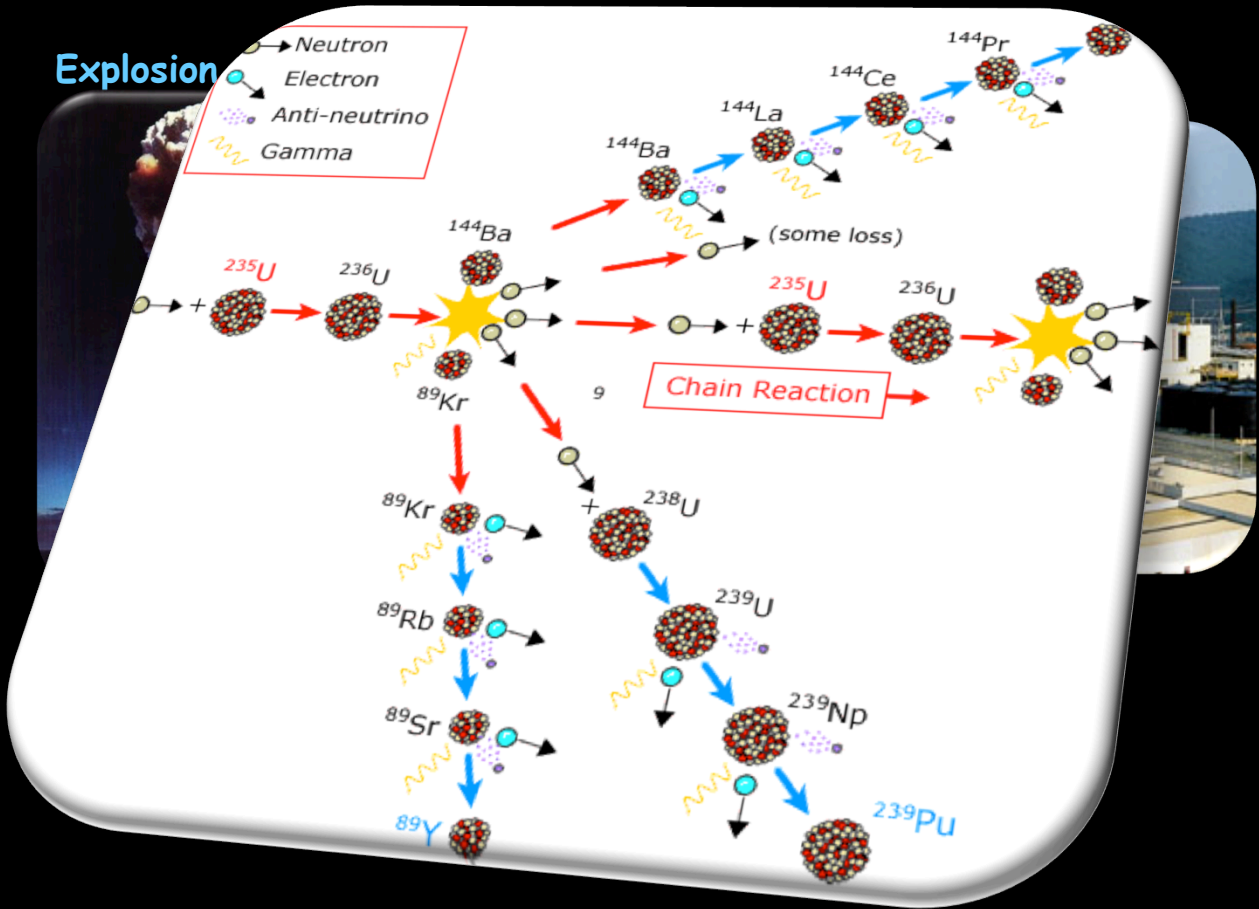
1932: Découverte du neutron par Chadwick

1934: Fermi construit une théorie de la désintégration β

- Baptême du neutrino



Fissions nucléaires en chaîne

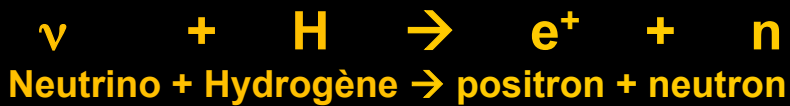
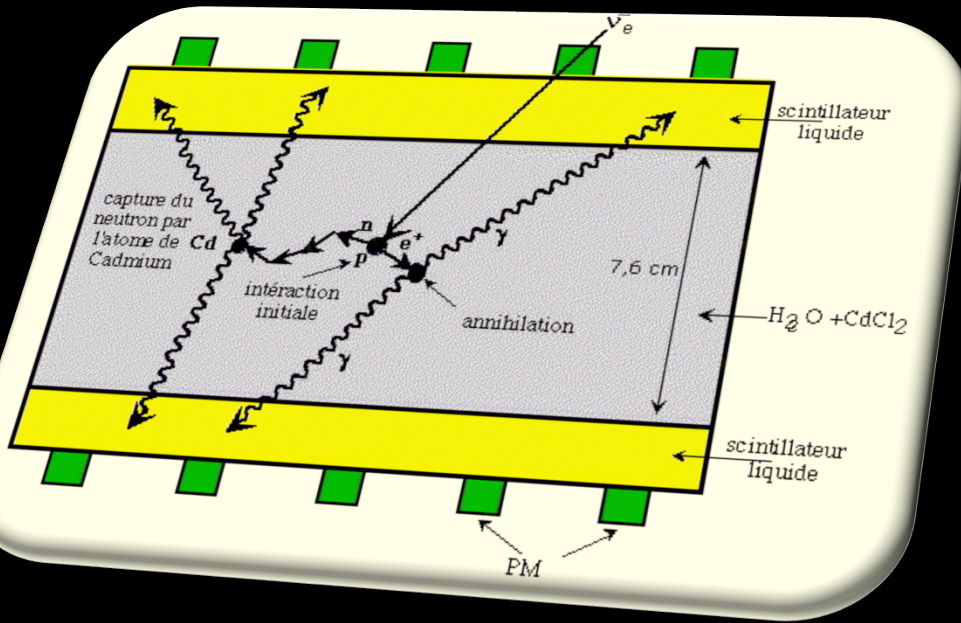


1 GW \cong 10^{21} neutrinos / second

Découverte du neutrino (1956)

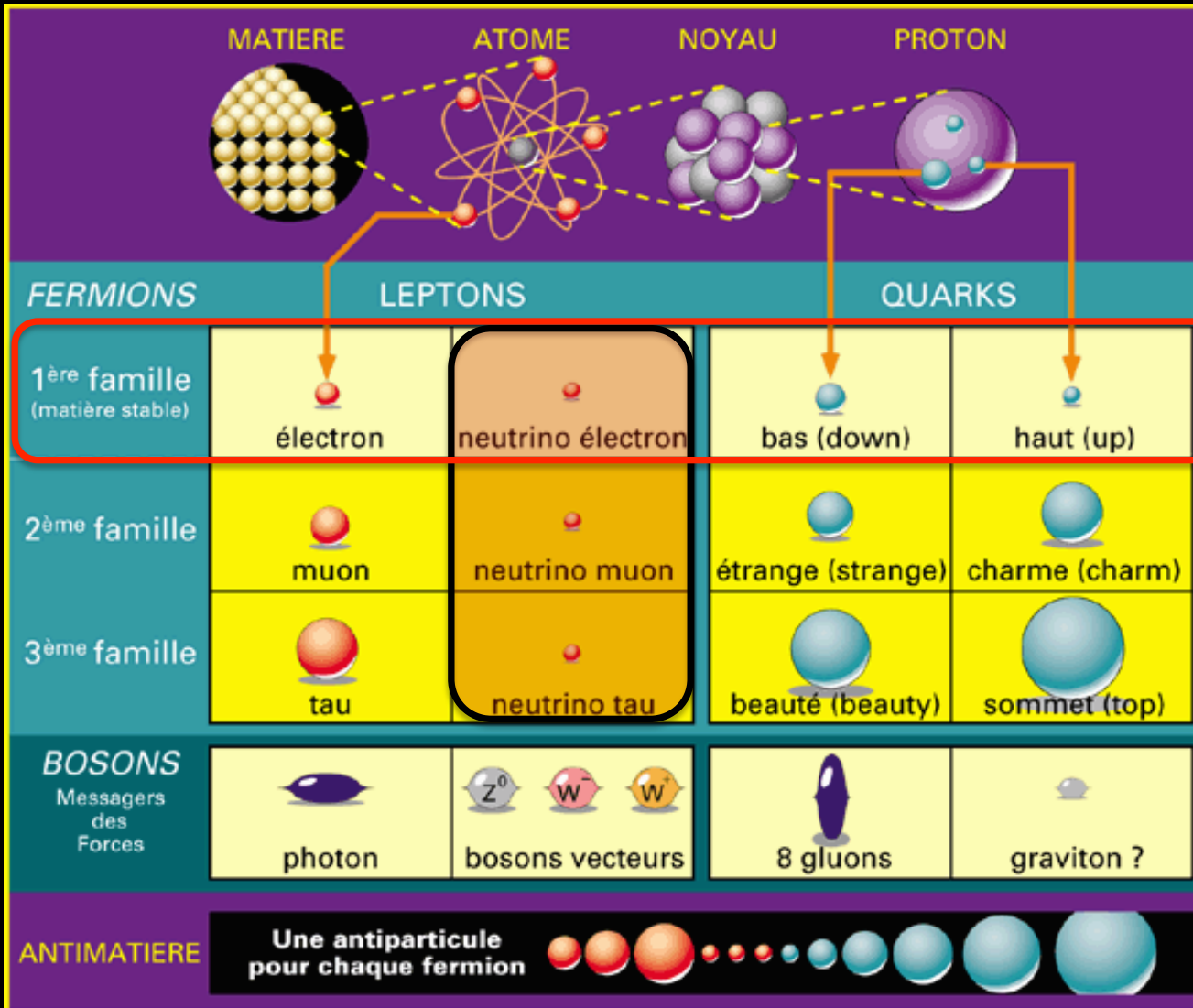


1956: Reines et Cowan détectent les (anti-) neutrino émis par le réacteur nucléaire de Savannah river (USA)



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

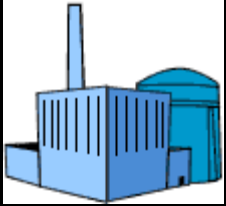
Le modèle standard des particules



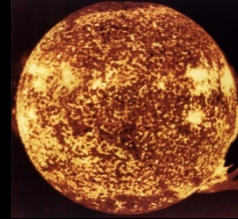
Matière Stable

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

Sources de neutrinos



Réacteurs nucléaires
 $E < 10 \text{ MeV}$



Soleil
 $E < 20 \text{ MeV}$



Accélérateurs
 $E \sim \text{GeV}$



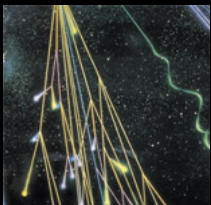
Supernova
 $E < 50 \text{ MeV}$



Terre (croûte)
 $E < 3 \text{ MeV}$



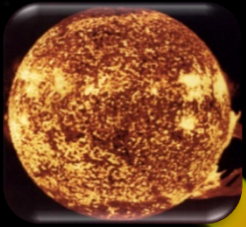
Accélérateur astro.
 TeV, Et au delà ?



Atmosphère
 $E \sim \text{GeV}$



Univers ...
 $E = 0,0004 \text{ eV}$



66 milliards /cm²/sec



3 millions /cm²/sec



10 000 milliards /cm²/sec



5 millions /cm²/sec



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

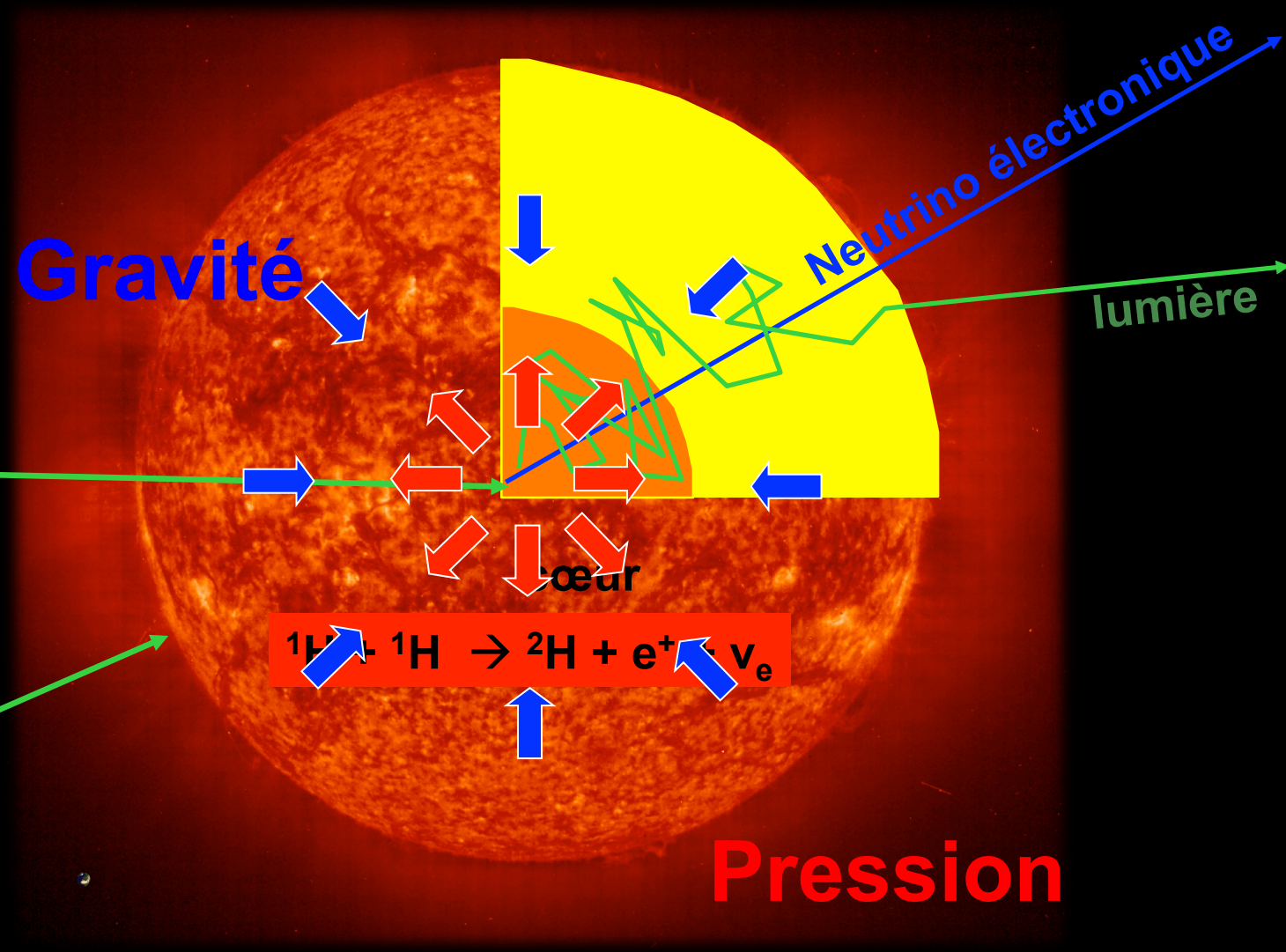
lumière

cœur



Pression

66 milliards de neutrinos arrivent sur Terre /cm² /sec



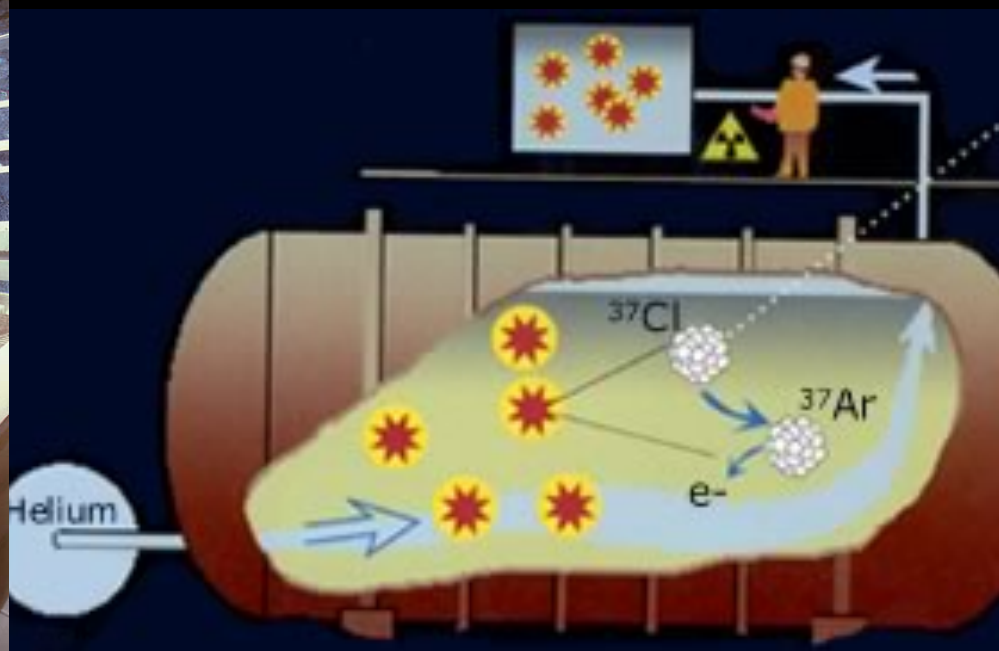
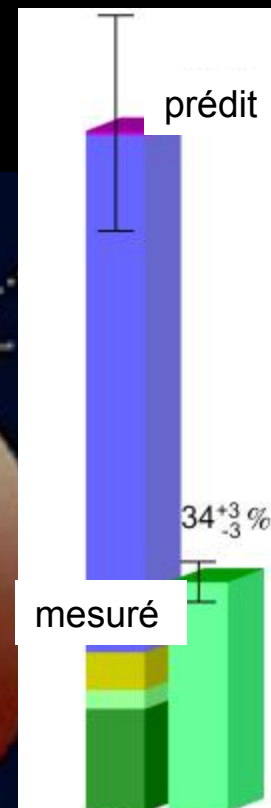


Homestake (1967-1995)

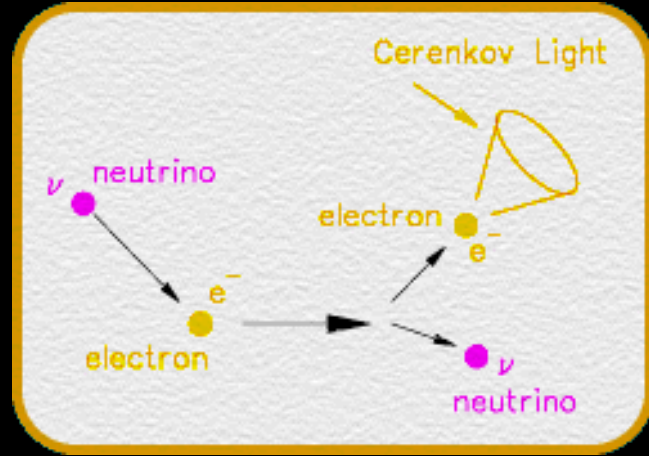
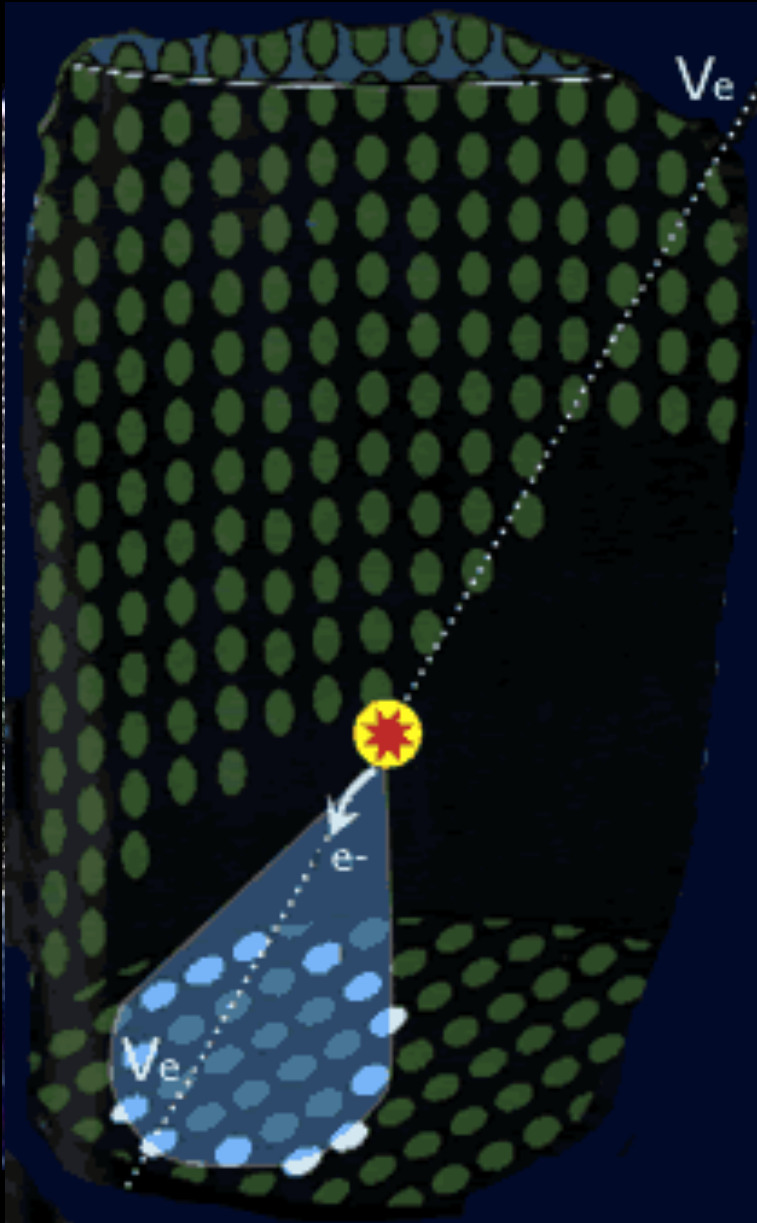
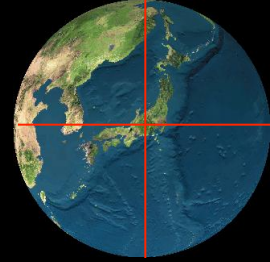


~1960 Davis construit le 1^{er} détecteur dans la mine de Homestake, USA
600 tonnes de détergent – 1 neutrino attendu chaque jour....

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 ...”



Super-Kamiokande



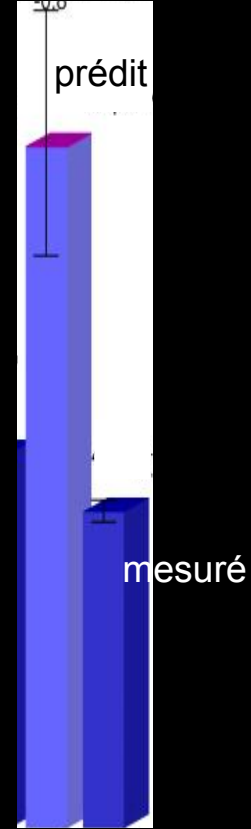
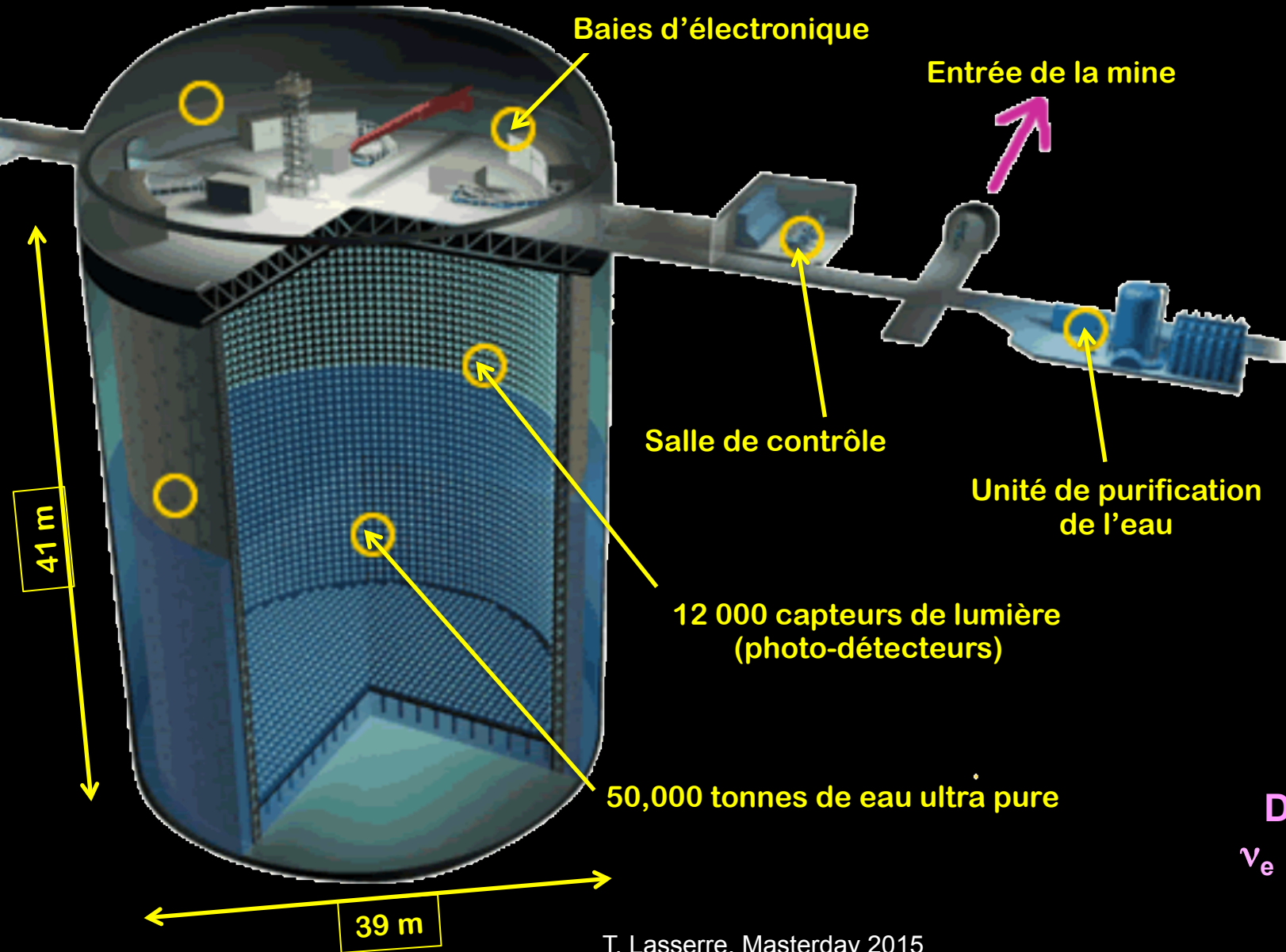
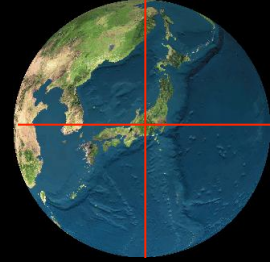
Effet Tcherenkov : émission de lumière dans un milieu, causée par le passage d'électrons traversant SK à une vitesse supérieure à celle de la lumière

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

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

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

Super-Kamiokande

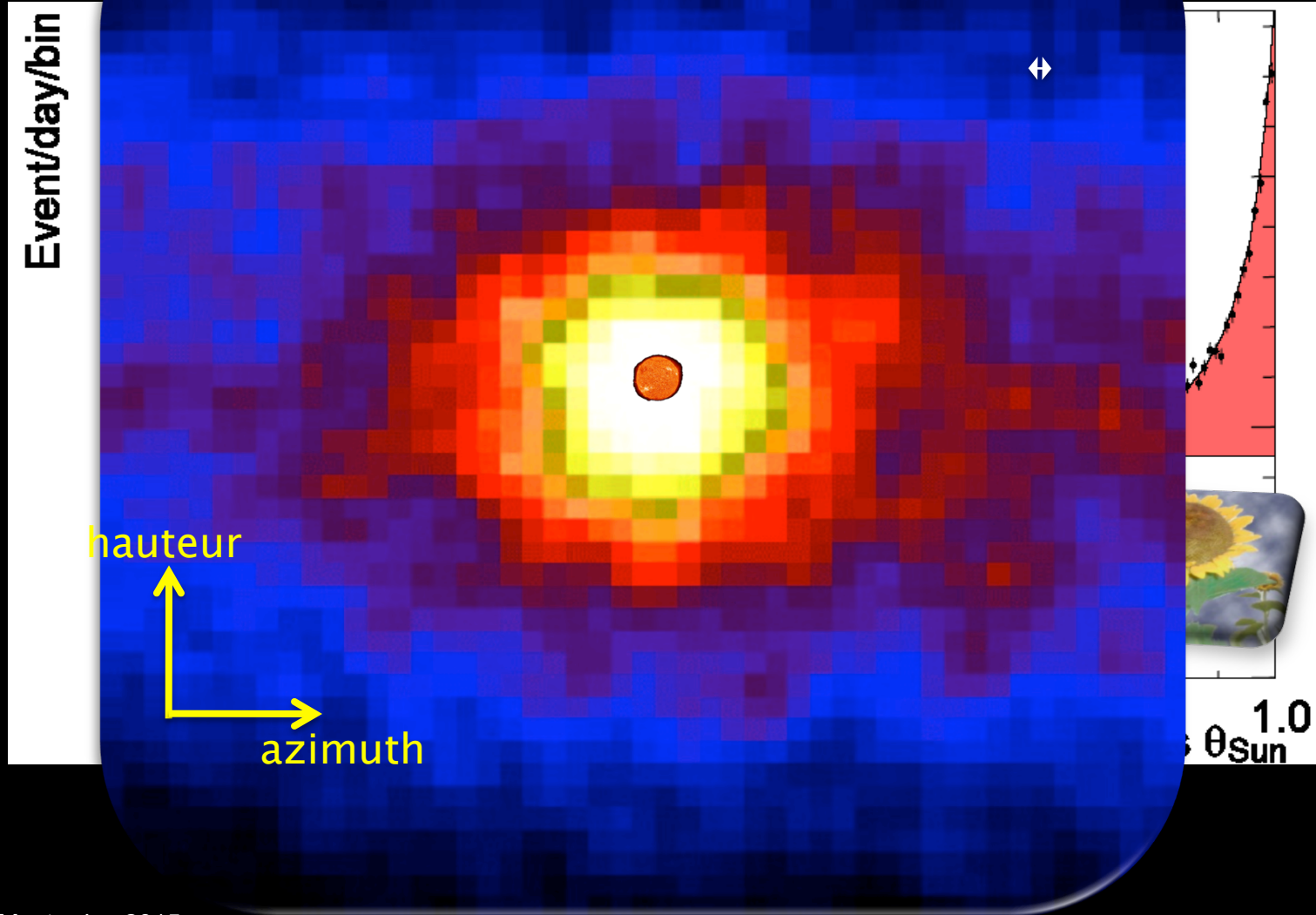


Déficit de ν_e confirmé !

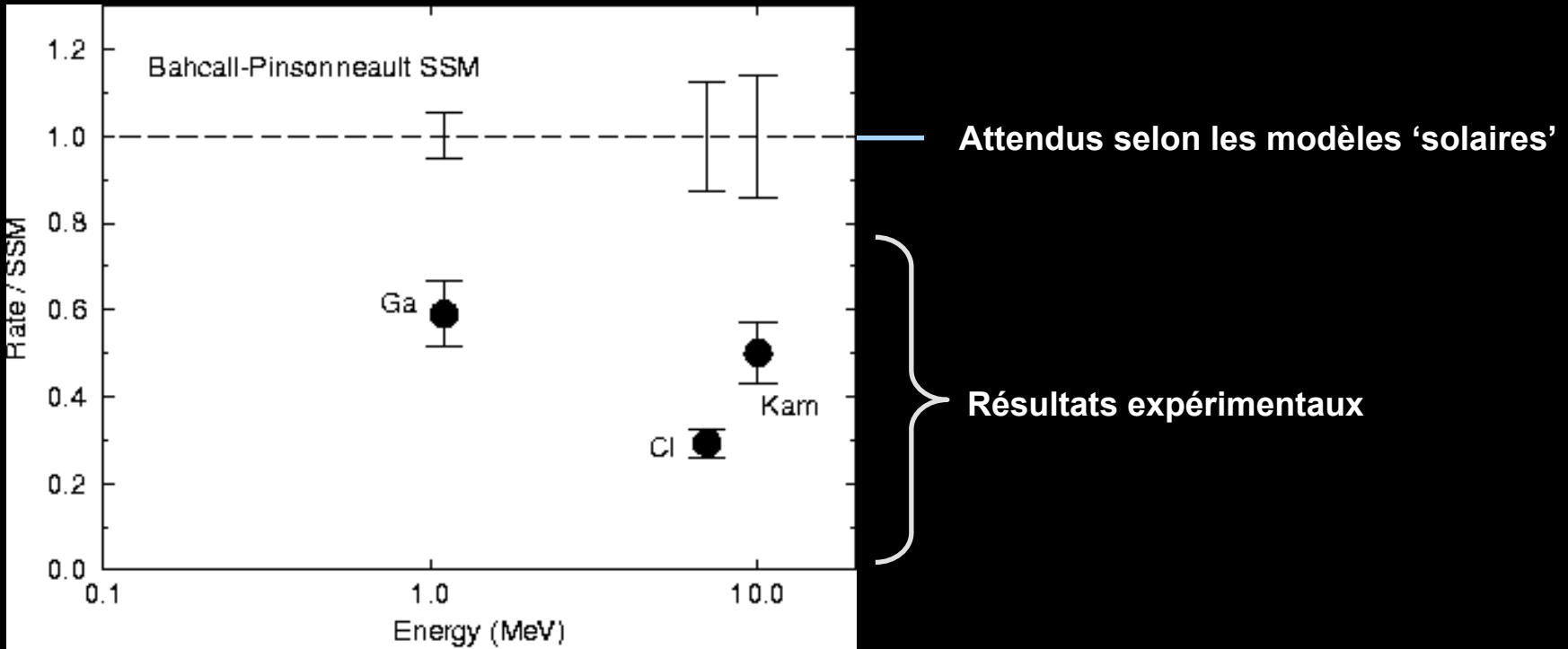
Image du cœur du soleil !



Temps de pose: 1500 jours ...



L'anomalie des neutrinos solaires



- Compréhension imparfaite du fonctionnement du cœur des étoiles

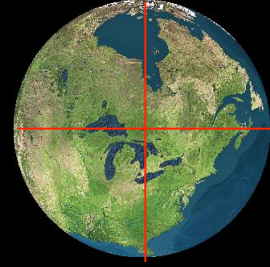
MAIS seuls les ν_e étaient mesurés.

- Nouvelle physique des neutrinos !

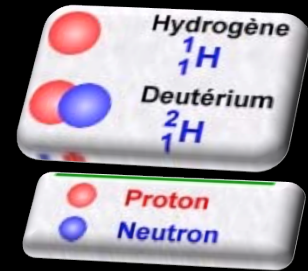
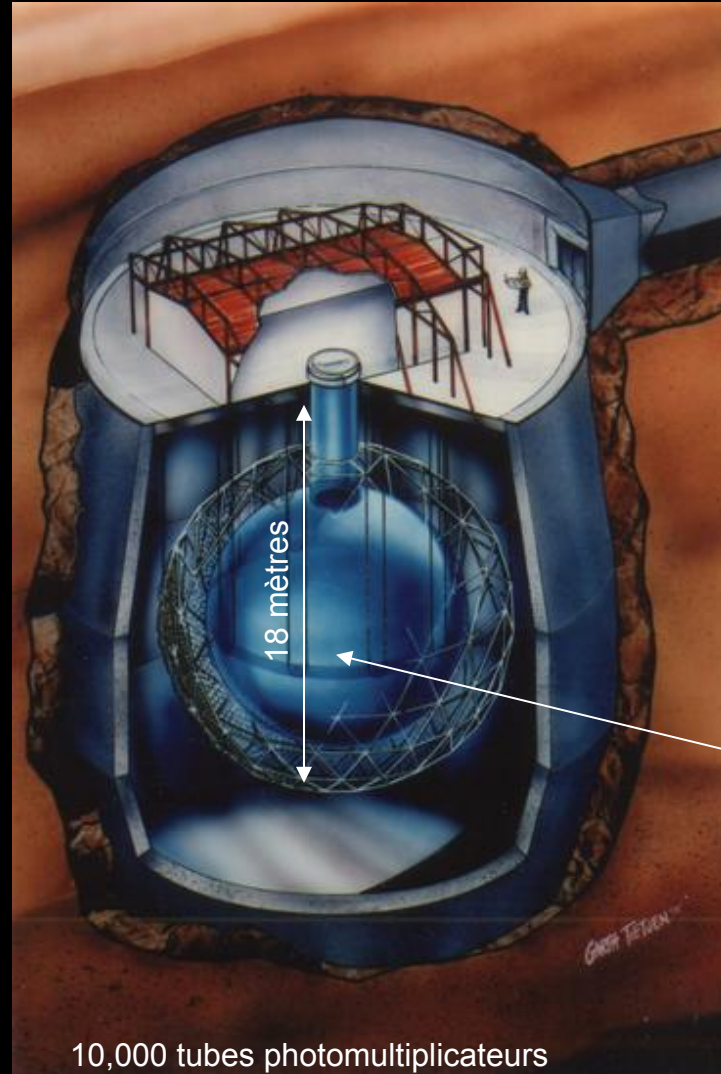
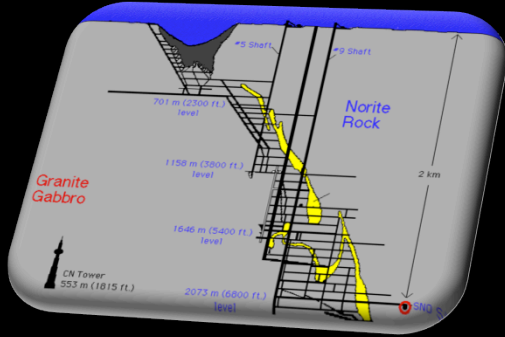
Nécessité d'une expérience mesurant aussi ν_μ , ν_τ

- Oscillation des neutrinos

L'expérience SNO



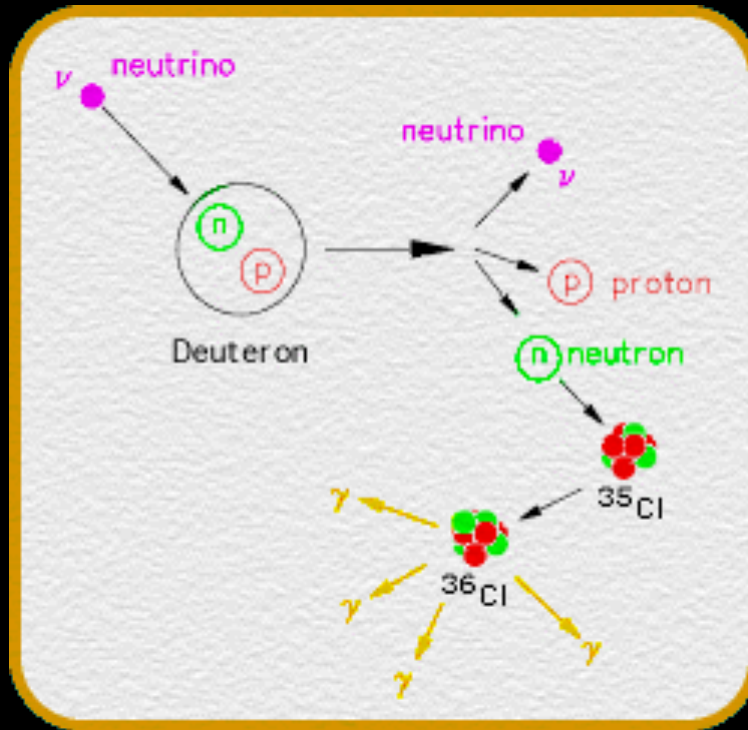
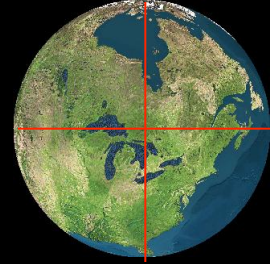
Mesure de TOUS les 'types' de neutrinos solaires ν_e , ν_μ , ν_τ



1000 tonnes
d'eau lourde

10,000 tubes photomultiplicateurs

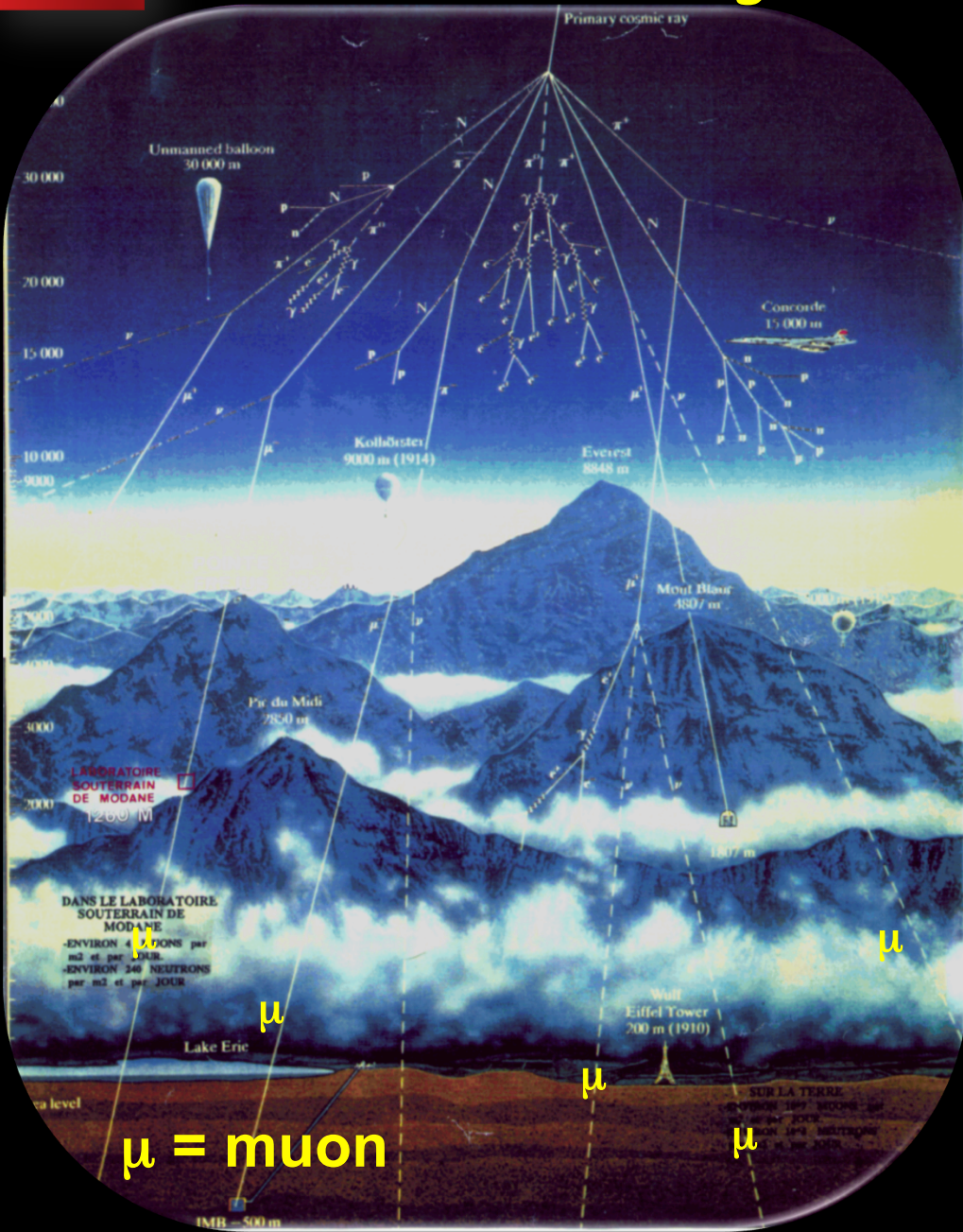
2001: L'énigme résolue !



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 / ν_τ

Les rayons cosmiques



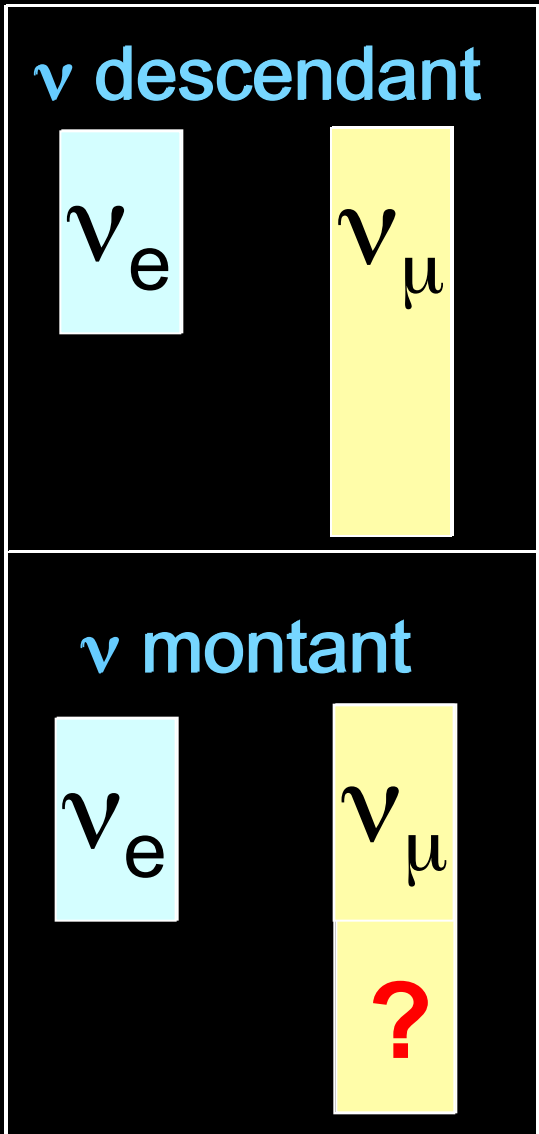
La Terre est constamment bombardée d'un rayonnement cosmiques (protons, noyaux légers)

proton + azote \rightarrow pions (π)

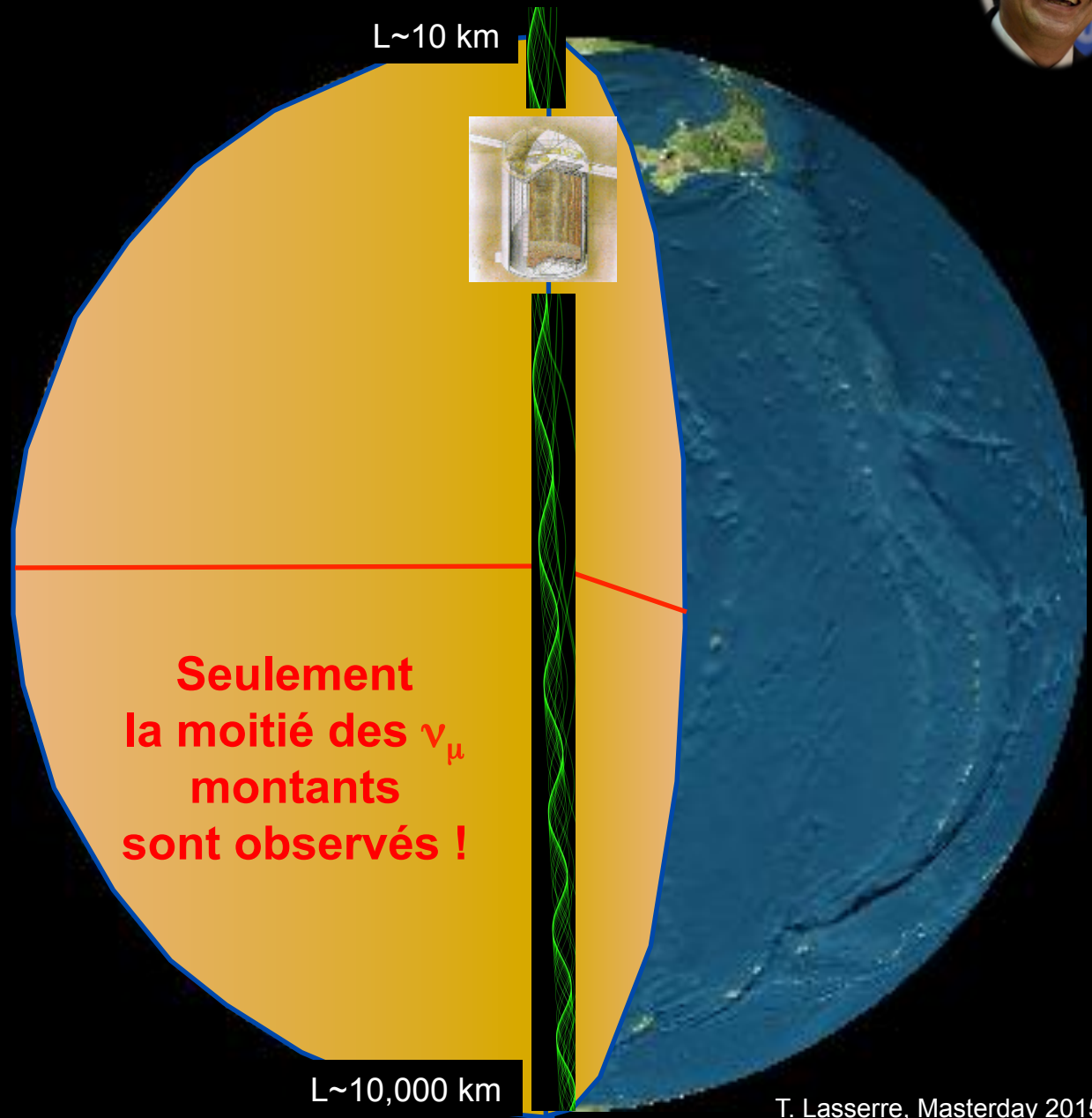
$$\pi \rightarrow \mu + \nu_{\mu}$$

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

L'anomalie des ν atmosphériques



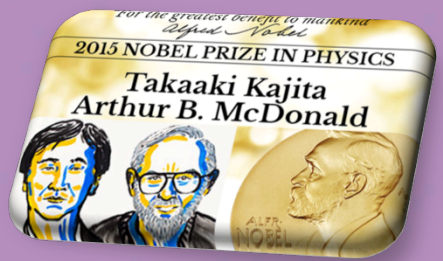
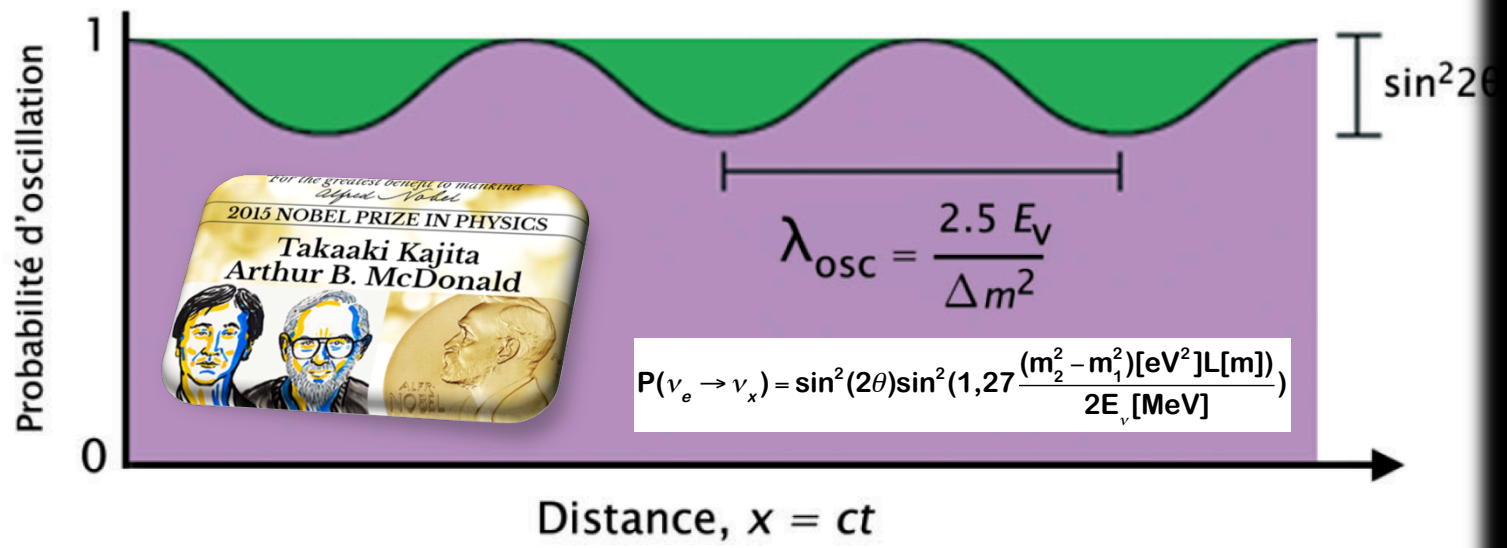
Désintégration



L ~ 10,000 km

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

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

Les oscillations déjà observées



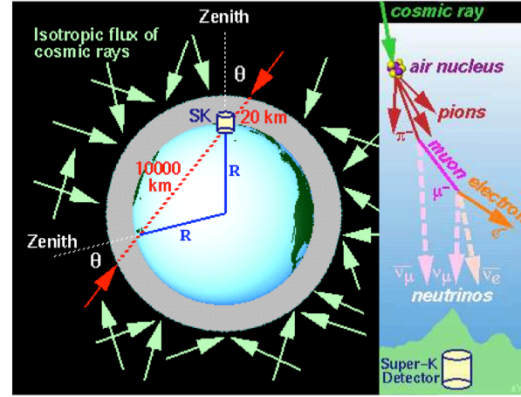
sun



reactors



atmosphere



accelerators



Homestake, SAGE, GALLEX
SuperK, SNO, Borexino

KamLAND, CHOOZ

SuperKamiokande

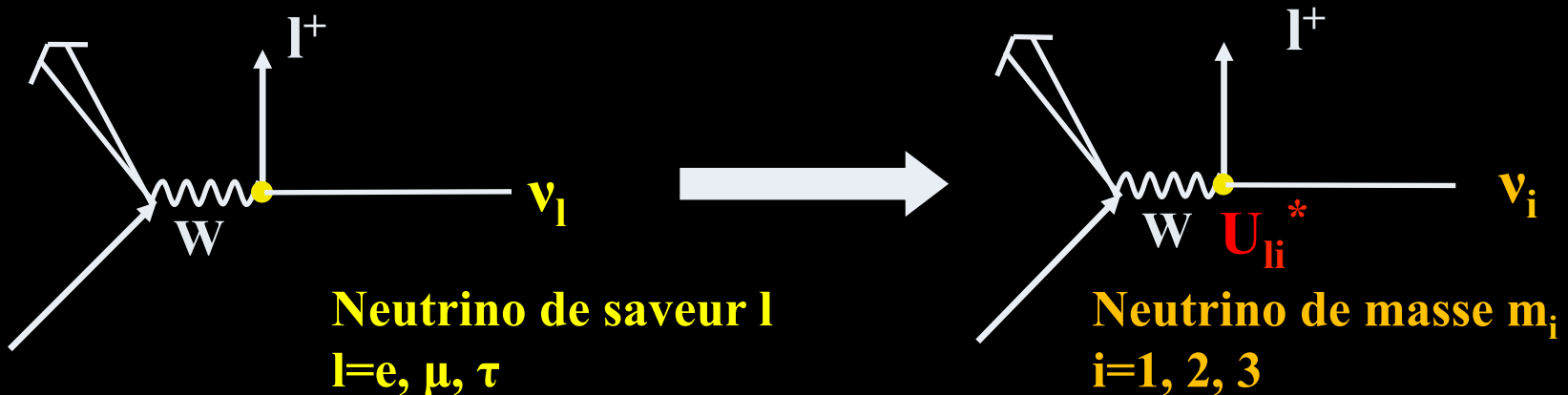
K2K, MINOS, T2K

- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ or $\text{anti-}\nu_{\mu} \rightarrow \text{anti-}\nu_{\tau}$:
- $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu, \tau}$:
- $\text{anti-}\nu_e \rightarrow \text{anti-}\nu_{\mu, \tau}$:
- $(\text{anti-})\nu_{\mu} \rightarrow (\text{anti-})\nu_{\mu, \tau}$:
- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$:

- ν atmosphériques & faisceaux de ν
- ν solaires
- ν de réacteurs
- ν atmosphériques & faisceaux de ν
- faisceaux de ν , T2K

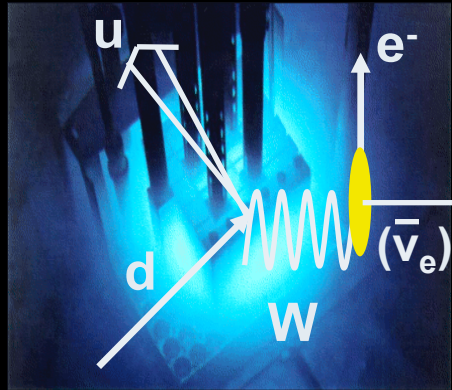
Neutrinos dans le modèle standard

- Neutrino: spin $\frac{1}{2}$, neutre, $\sigma \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$ (reacteur)
- Les neutrinos sont massifs : $0.04 \text{ eV} < m_{\nu} < \sim 1 \text{ eV}$
- 3 types: ν_e , ν_{μ} , ν_{τ} , partenaires neutres de e , μ , τ
- Deux visions de la désintégration du boson W :



- La matrice PMNS relie les états de **masse & saveur**: $|\nu_i\rangle = \sum U_{\alpha i} |\nu_{\alpha}\rangle$

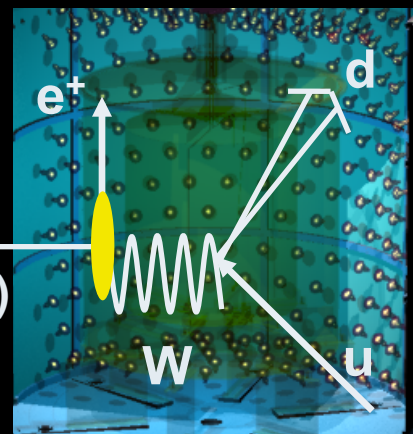
Oscillation de neutrinos à Chooz



Production dans le cœur du réacteur

Saveur purement électronique

$\bar{\nu}$



Détecteur de Neutrinos

Mélange:
Fraction électronique?
Fraction muonique?
Fraction tauique?

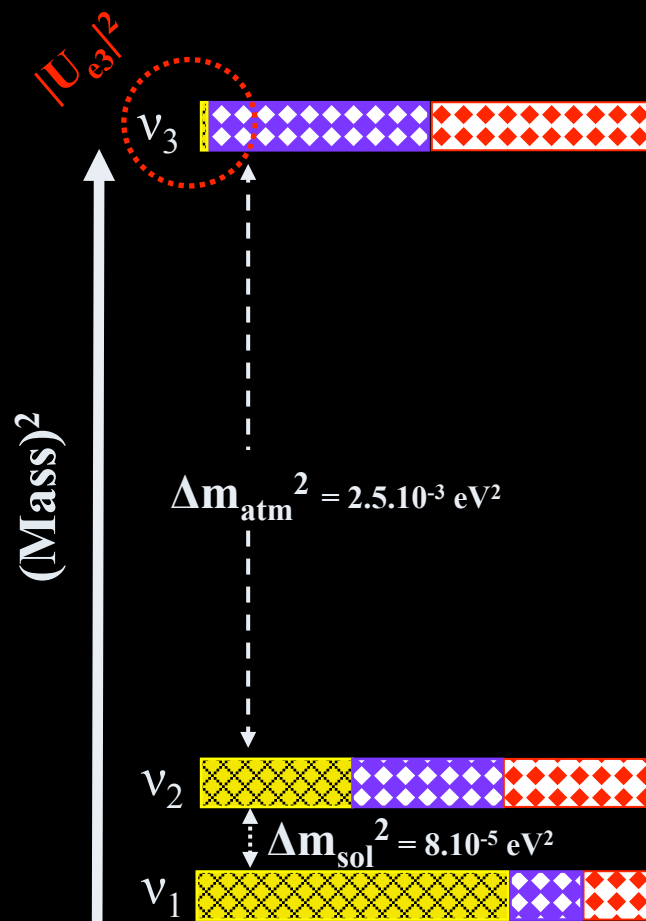
$t_{\text{création}}$



Distance parcourue depuis sa création

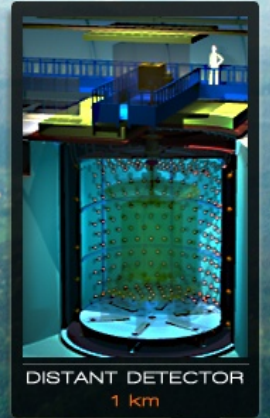
$t_{\text{détection}}$

θ_{13}

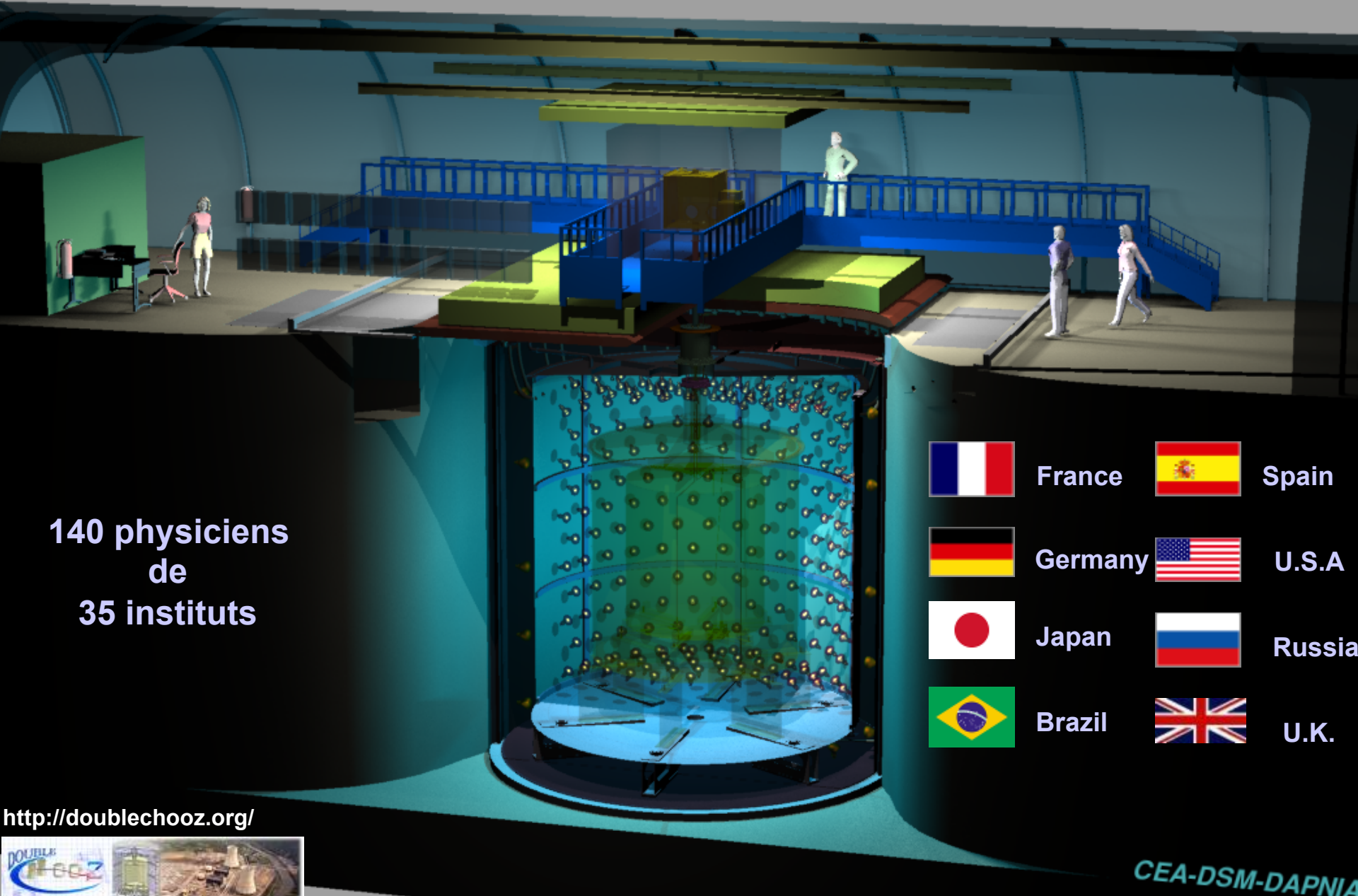


ν_e  $|U_{ei}|^2$
 ν_μ  $|U_{\mu i}|^2$
 ν_τ  $|U_{\tau i}|^2$

Etude des oscillations à Chooz



Double Chooz



140 physiciens
de
35 instituts



France



Spain



Germany



U.S.A



Japan



Russia



Brazil



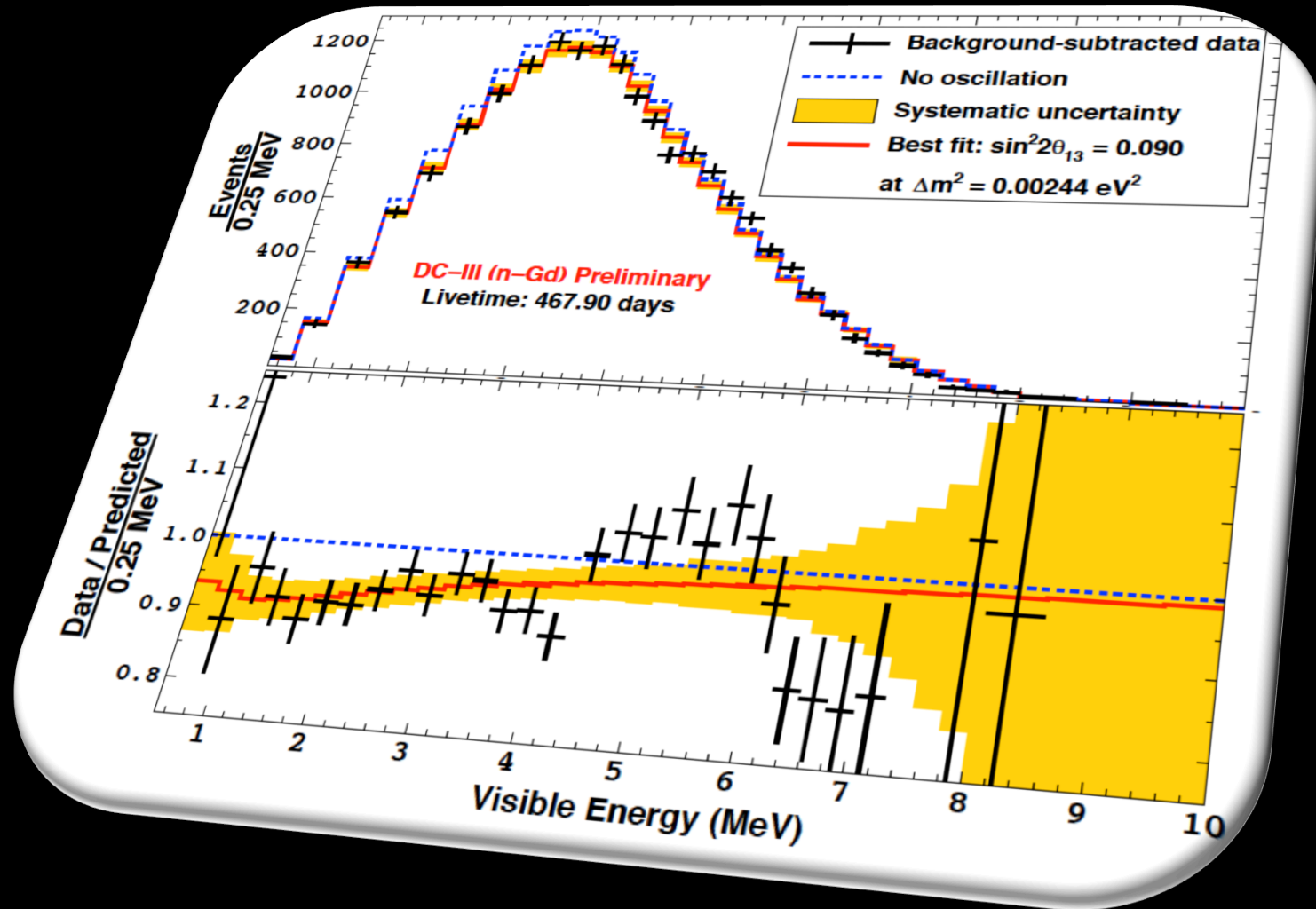
U.K.

<http://doublechooz.org/>

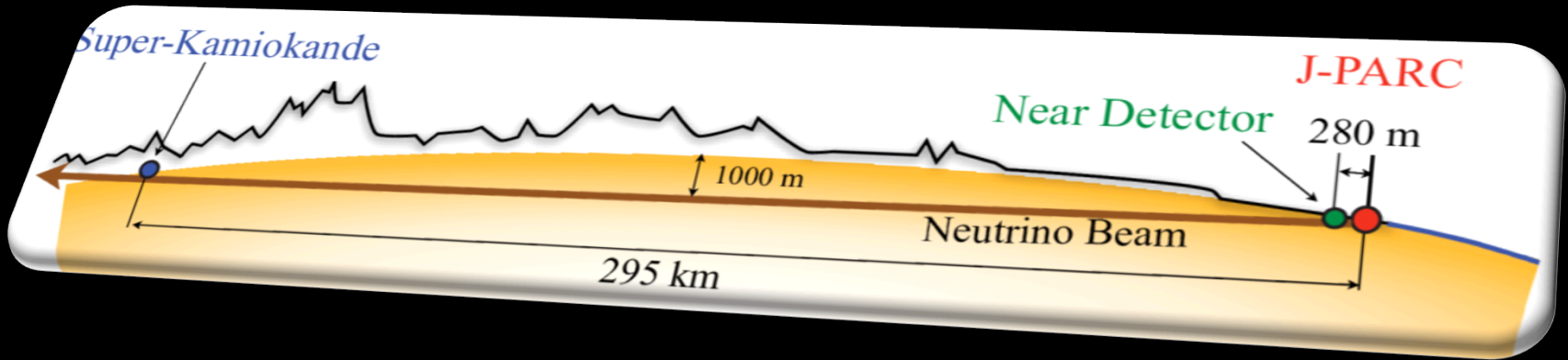




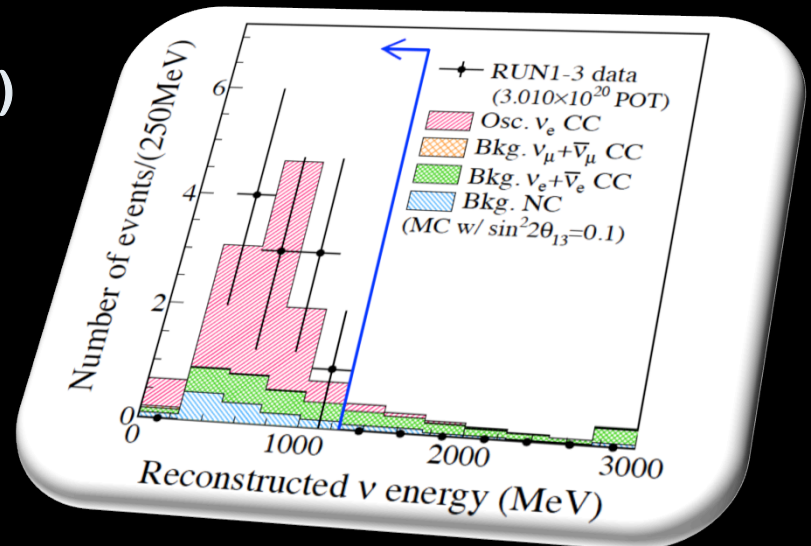
Résultats de Double Chooz



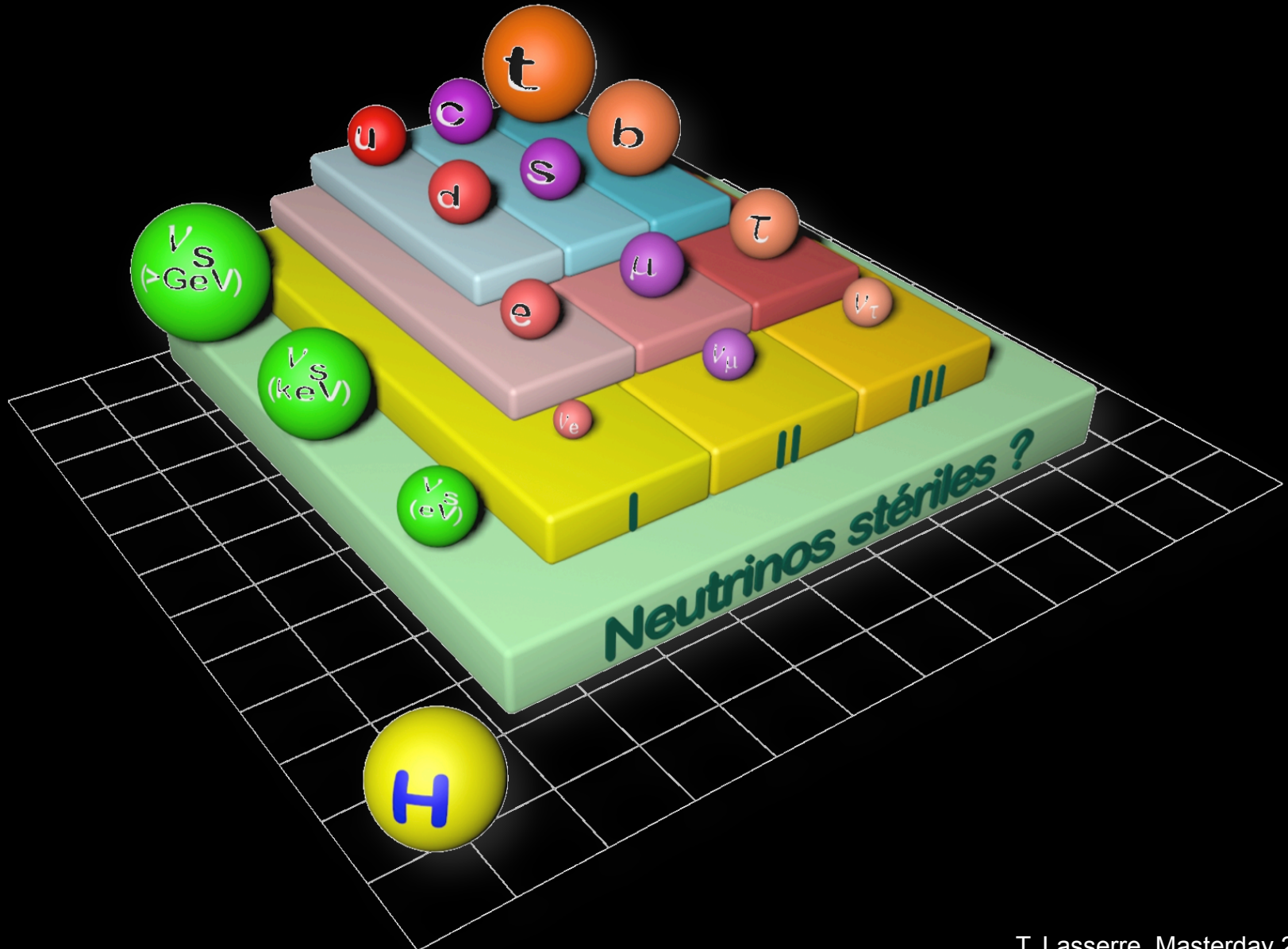
T2K (Tokai to Kamioka) @JPARK



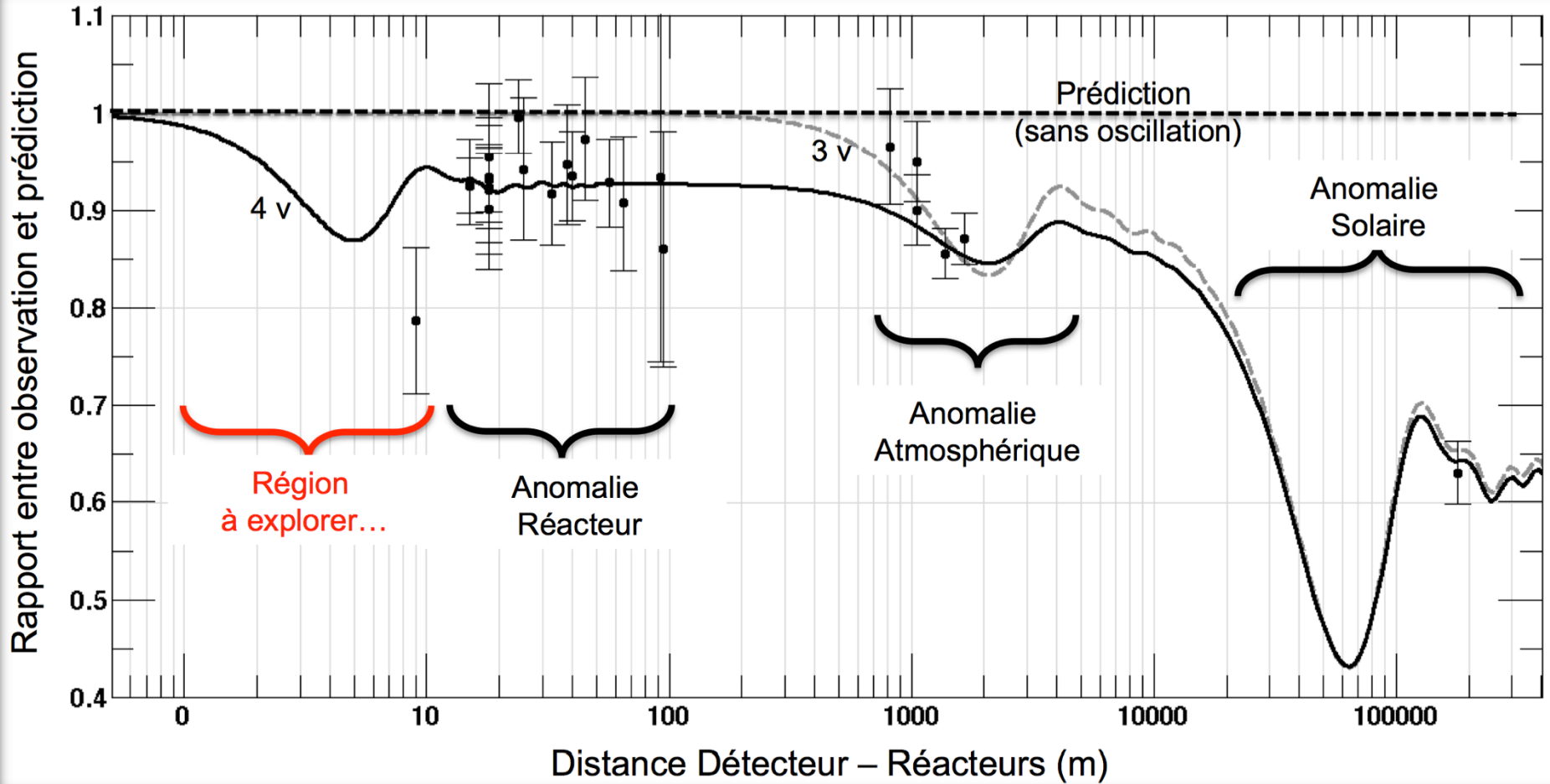
- Canal de détection: $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$
- Détection, CCQE: $\nu_l + n \rightarrow p + l^-$ ($l=e, \mu$)
- Détecteur à 295 km:
 - SuperKamiokande (50 kt)
- Détecteur proche à 280 m
- Mesure de θ_{13}



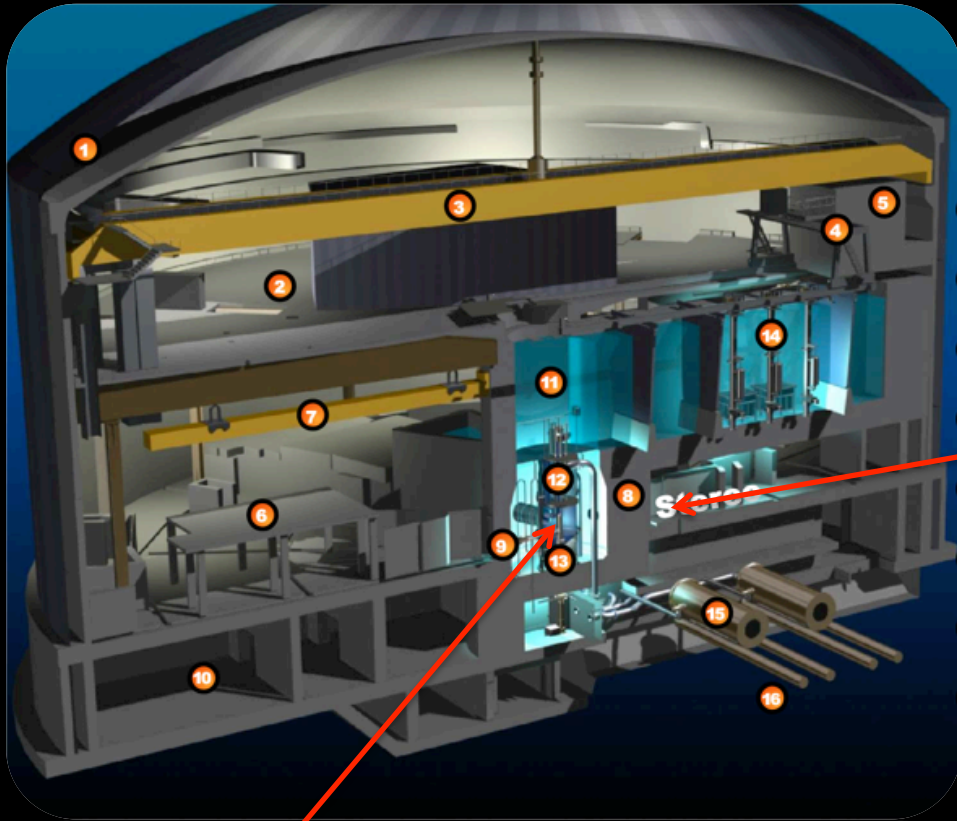
Rencontre du 4^e type?



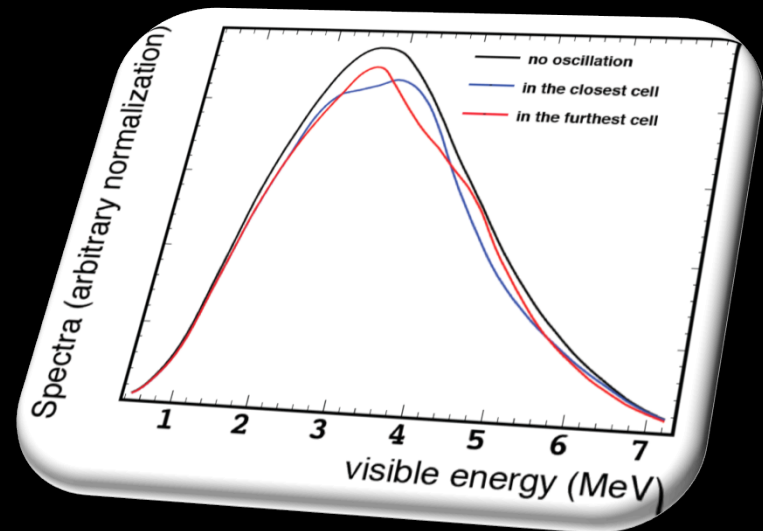
L'anomalie des neutrinos de réacteur



L'expérience Stéréo à l'ILL



Réacteur 50 MW



L'expérience CeSOX au Gran Sasso



$1.5 \cdot 10^{11}$ m

Solar Neutrino Anomaly
(1968-2001)

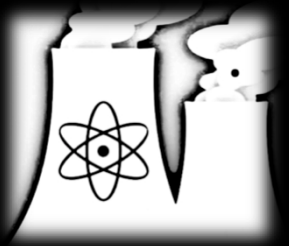
Oscillation



10^7 m

Atmospheric Neutrino Anomaly
(1986-1998)

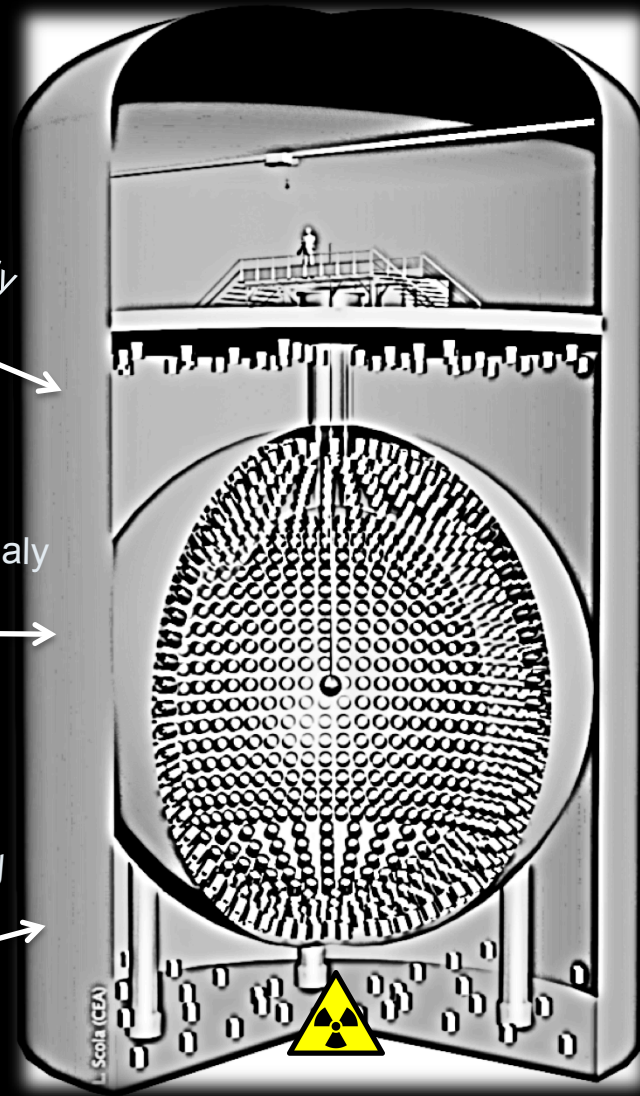
Oscillation



<100 m

Reactor Antineutrino Anomaly
(2011-)

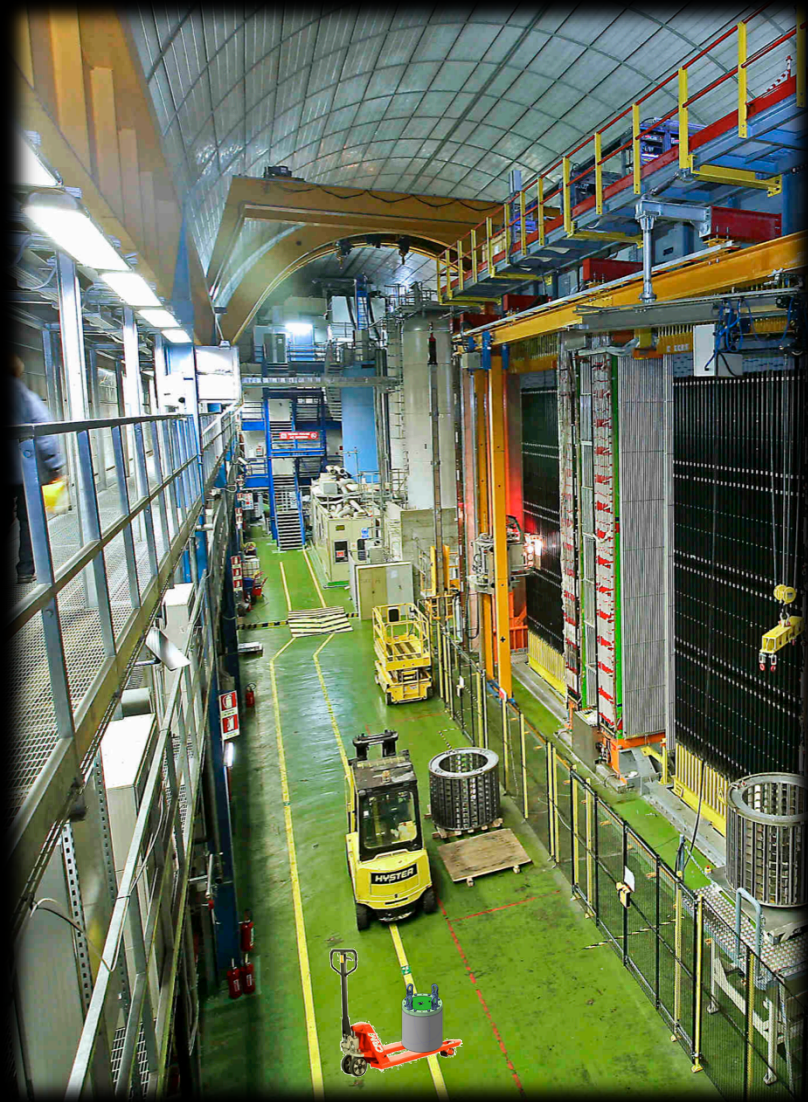
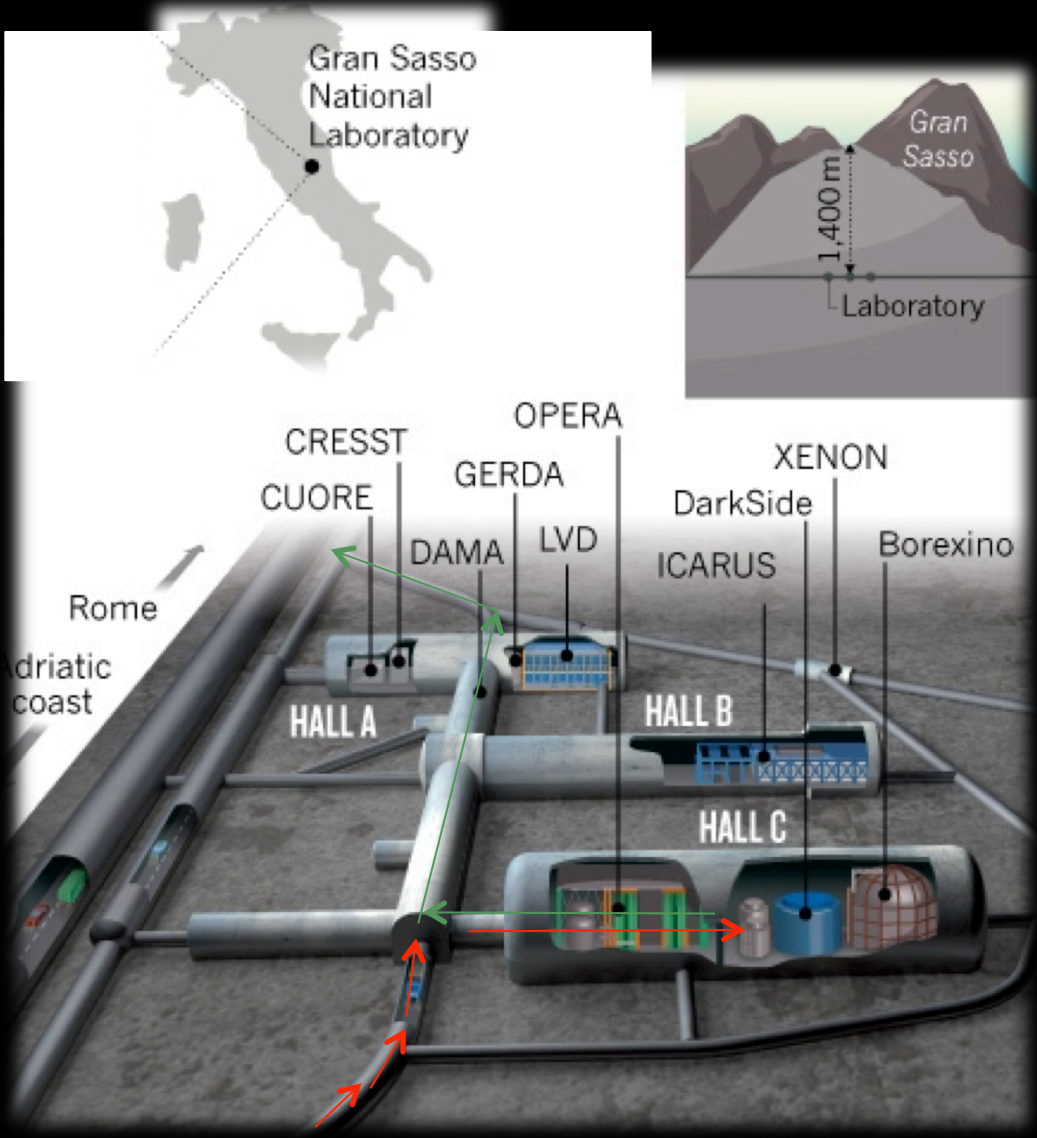
Neutrino oscillation?



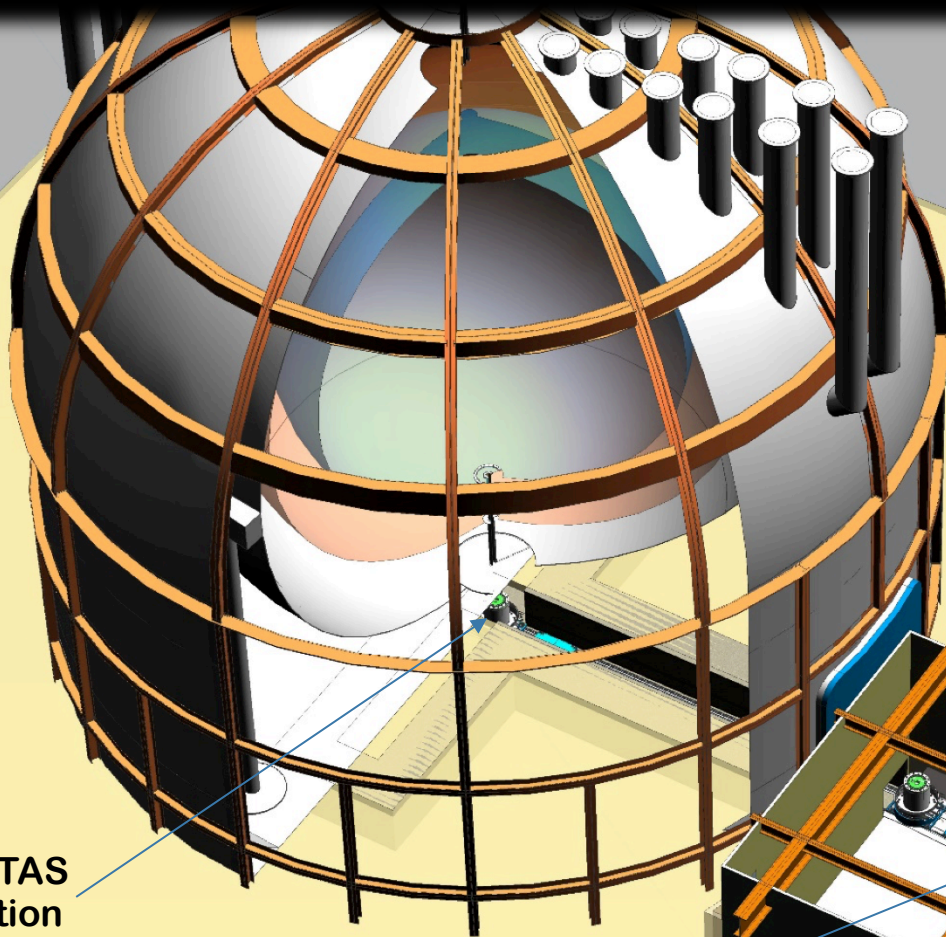
Des neutrinos à prendre au cérium



Laboratoire du Gran Sasso



Le détecteur Borexino



CR1 clean room



Manual winch

CeANG+HDTAS
in final position

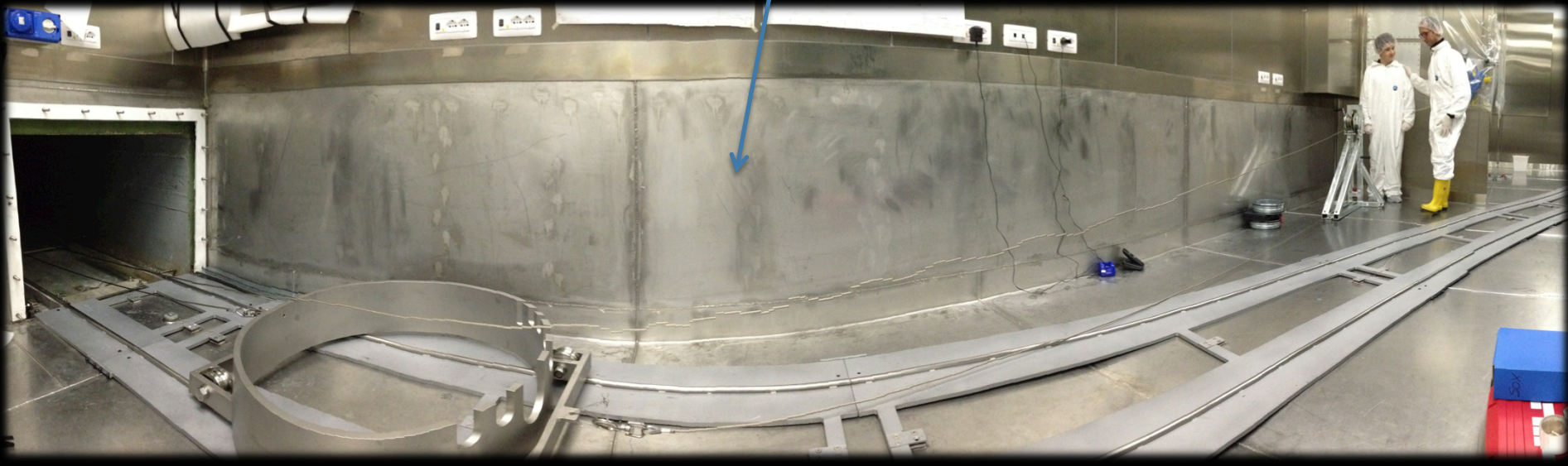
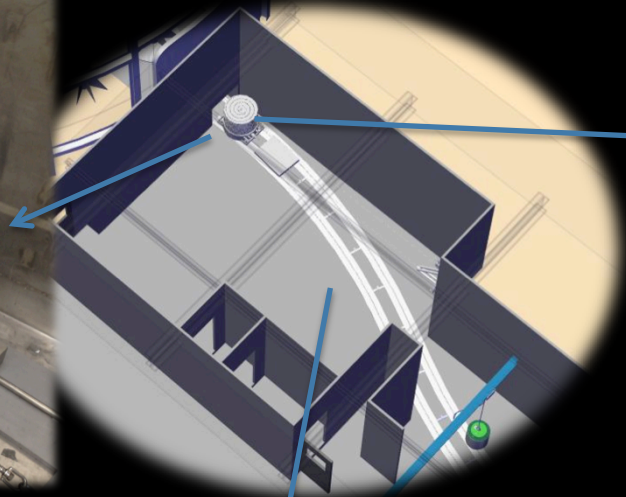


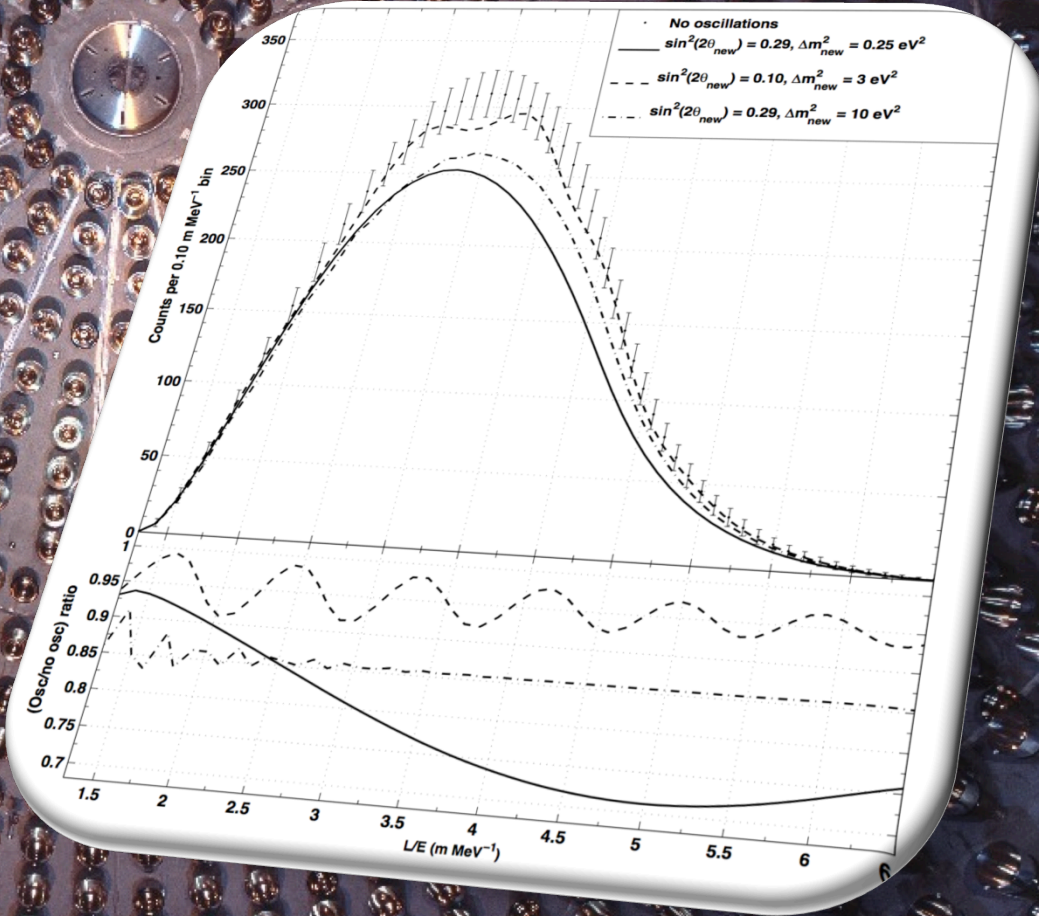
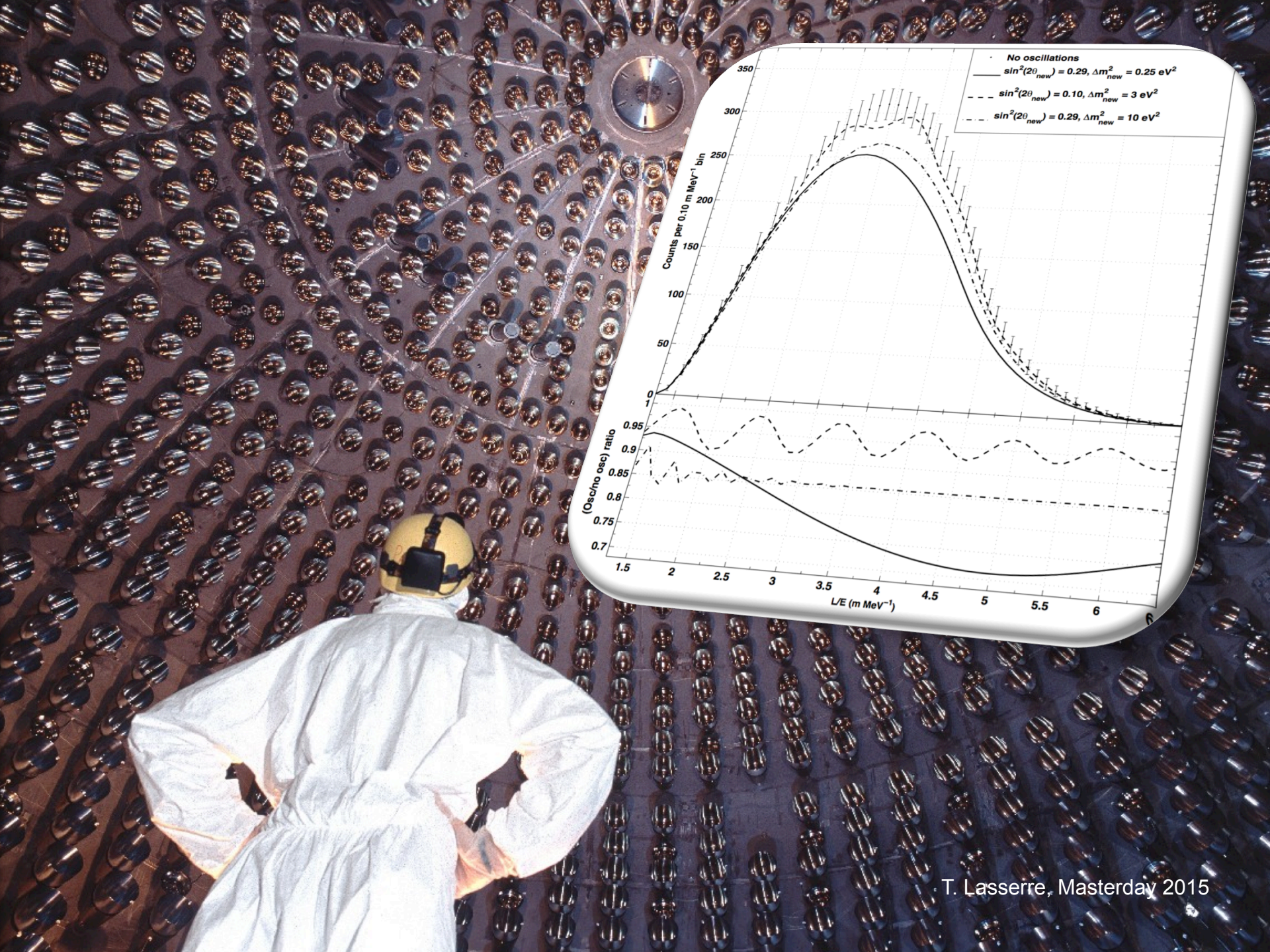
Custom trolley rails



CR1 clean room

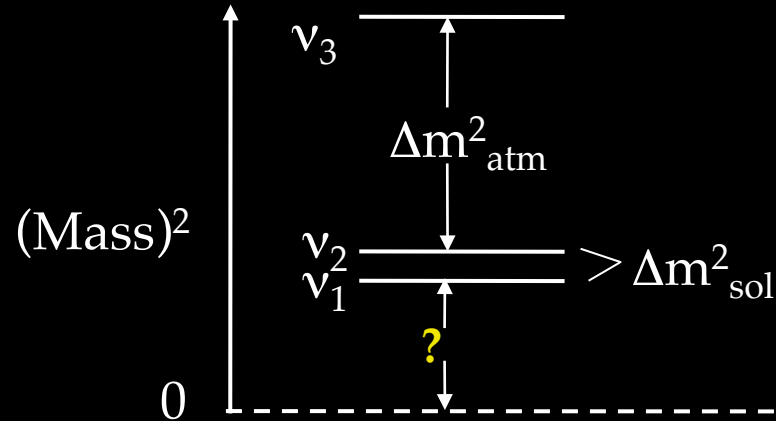
En Image...





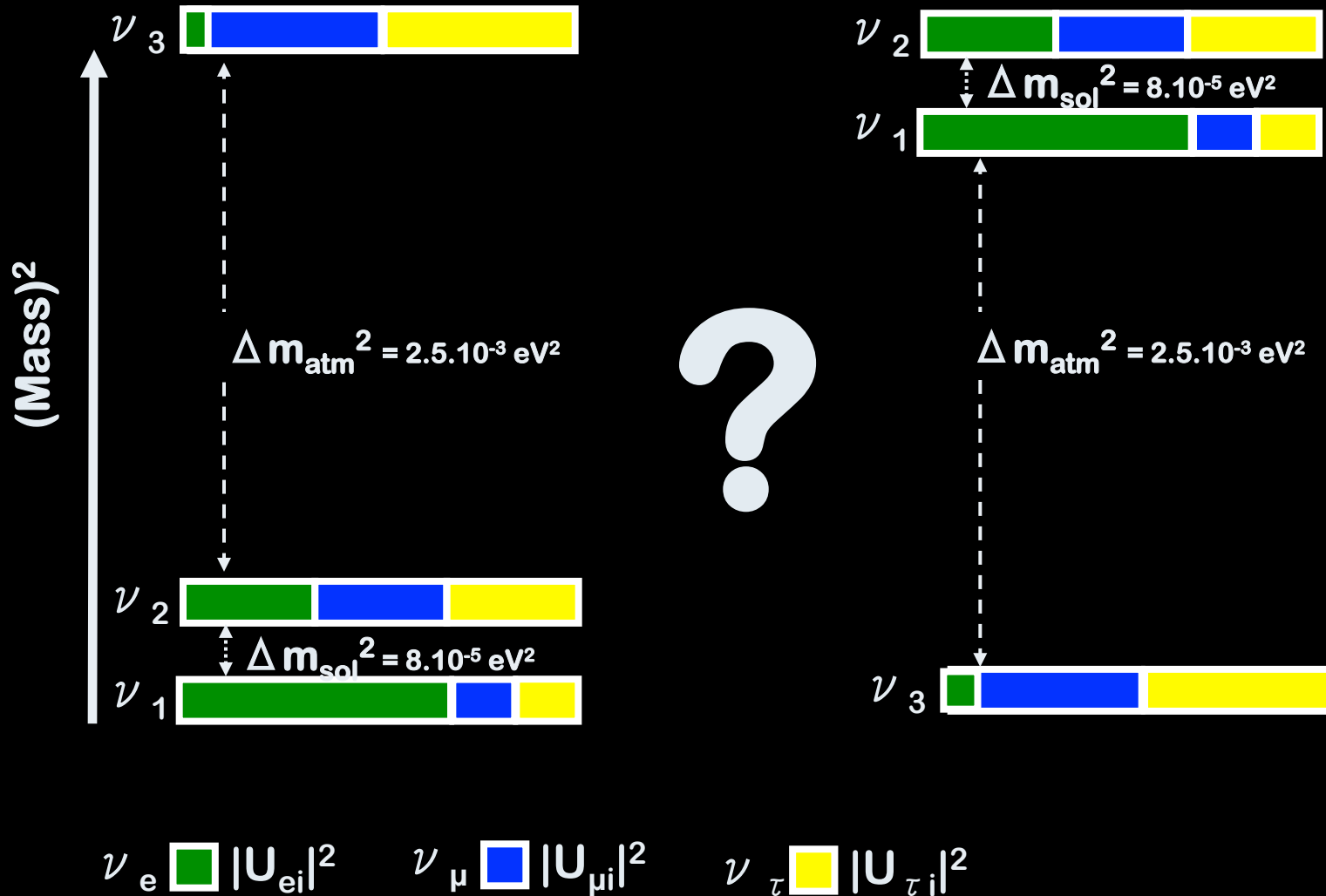


- Masse des neutrinos ν_i ?



- Spectre des masses $\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array}$ or $\begin{array}{c} \text{=} \\ \text{=} \end{array}$?
- Conservation du nombre leptonique (Dirac or Majorana neutrino) ?
- Angles de mélange?
- Violation de CP? Asymétrie matière-anti-matière?
- Neutrinos stériles? Matière noire?

Hierarchie de Masse



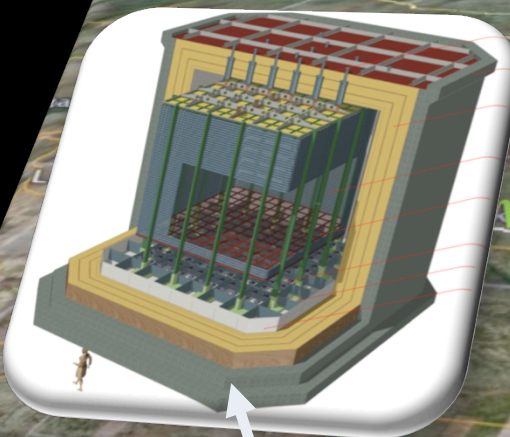
Violation CP



$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |A|^2 + |S|^2 + 2 A S \sin \delta$$

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) = |A|^2 + |S|^2 - 2 A S \sin \delta$$

$$A_{CP} \propto \frac{P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)}{P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) + P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)}$$



Prototype technologique au CERN

Milind Diwan

for the LBNE Collaboration



La supernova 1987A, 23/02/1987



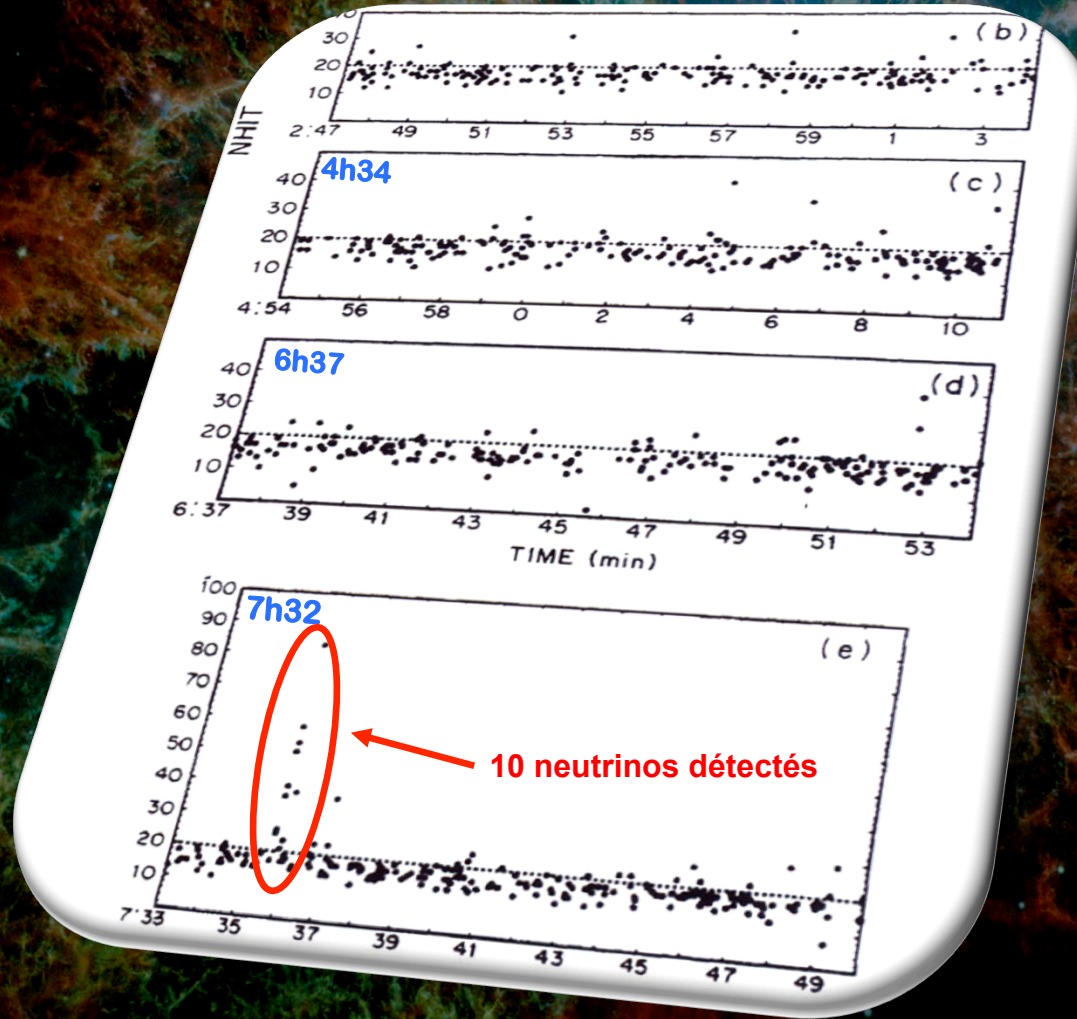
Sanduleak -69 202
(15-18 masses solaires)

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

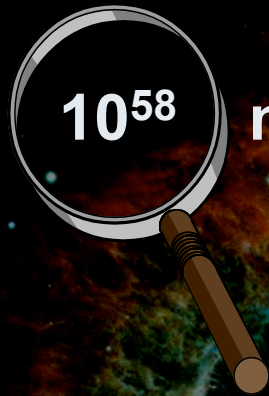
© Anglo-Australian Observatory

160,000 années lumières

Signal observé dans Kamiokande



SN 1987A : retour sur les neutrinos



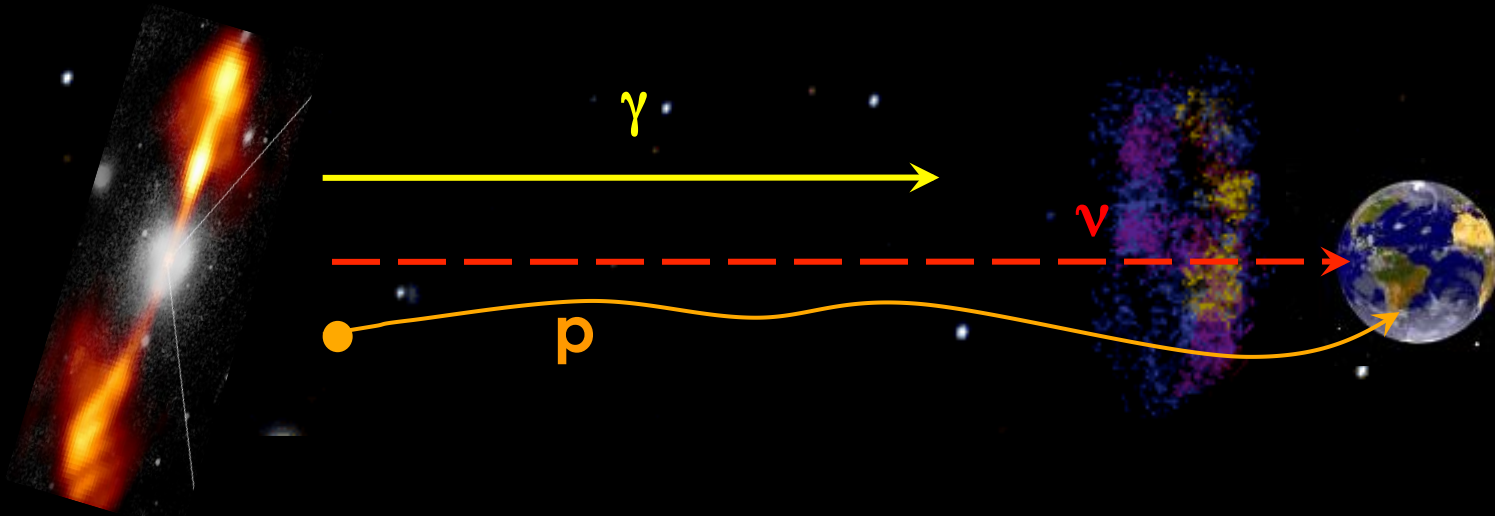
10^{58} neutrinos émis par SN1987A

il y a 150000 ans !

450 millions de milliards traversent Kamiokande (10^{17})
quelques heures avant la lumière de l'explosion...

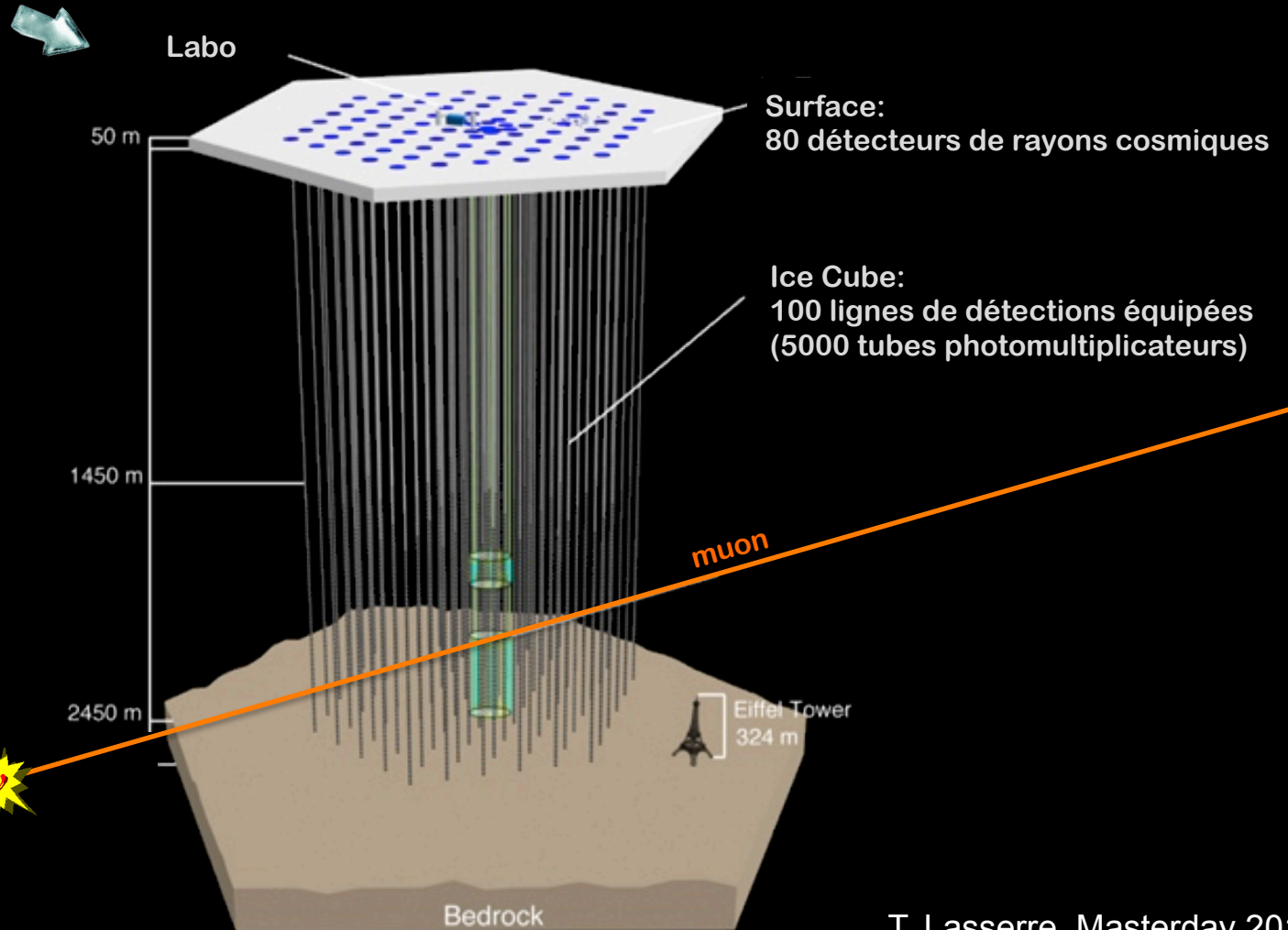
Nombre total de neutrinos détectés : **10** (en 10 s)

- Utilisation des neutrinos comme messagers cosmiques:
 - stable
 - neutre
 - interagit faiblement

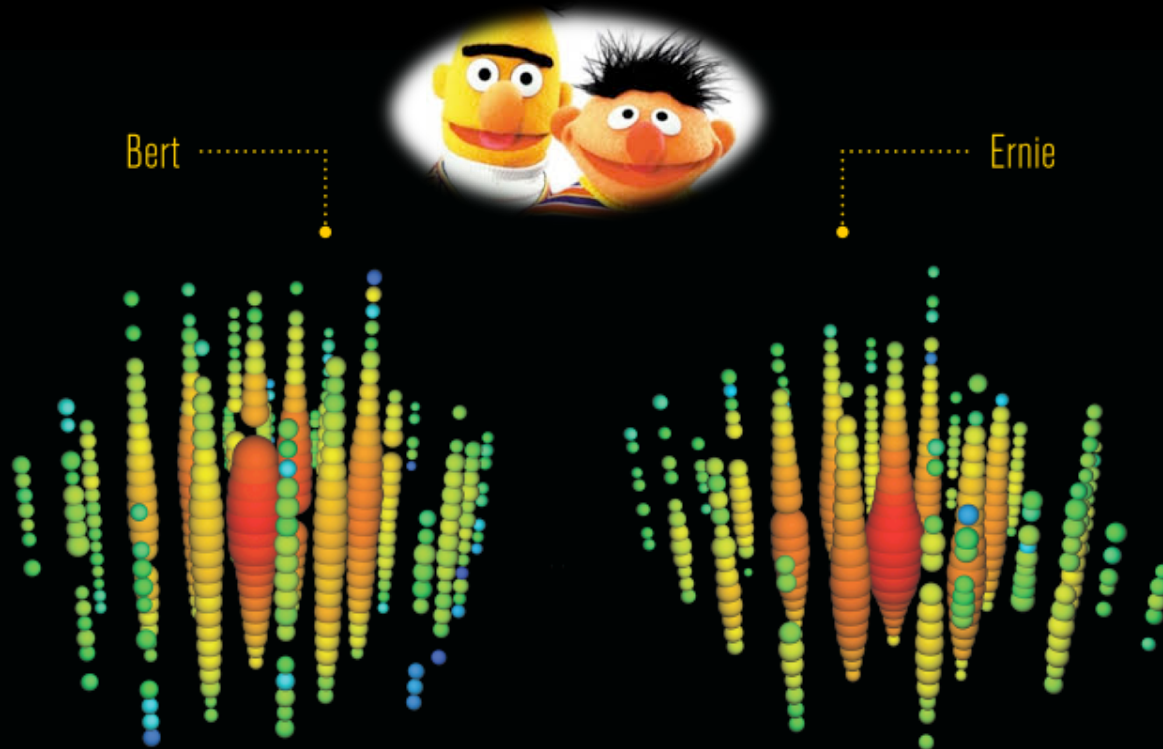


- Nécessite de TRES gros volumes de détection...

Télescope à neutrinos ICE CUBE



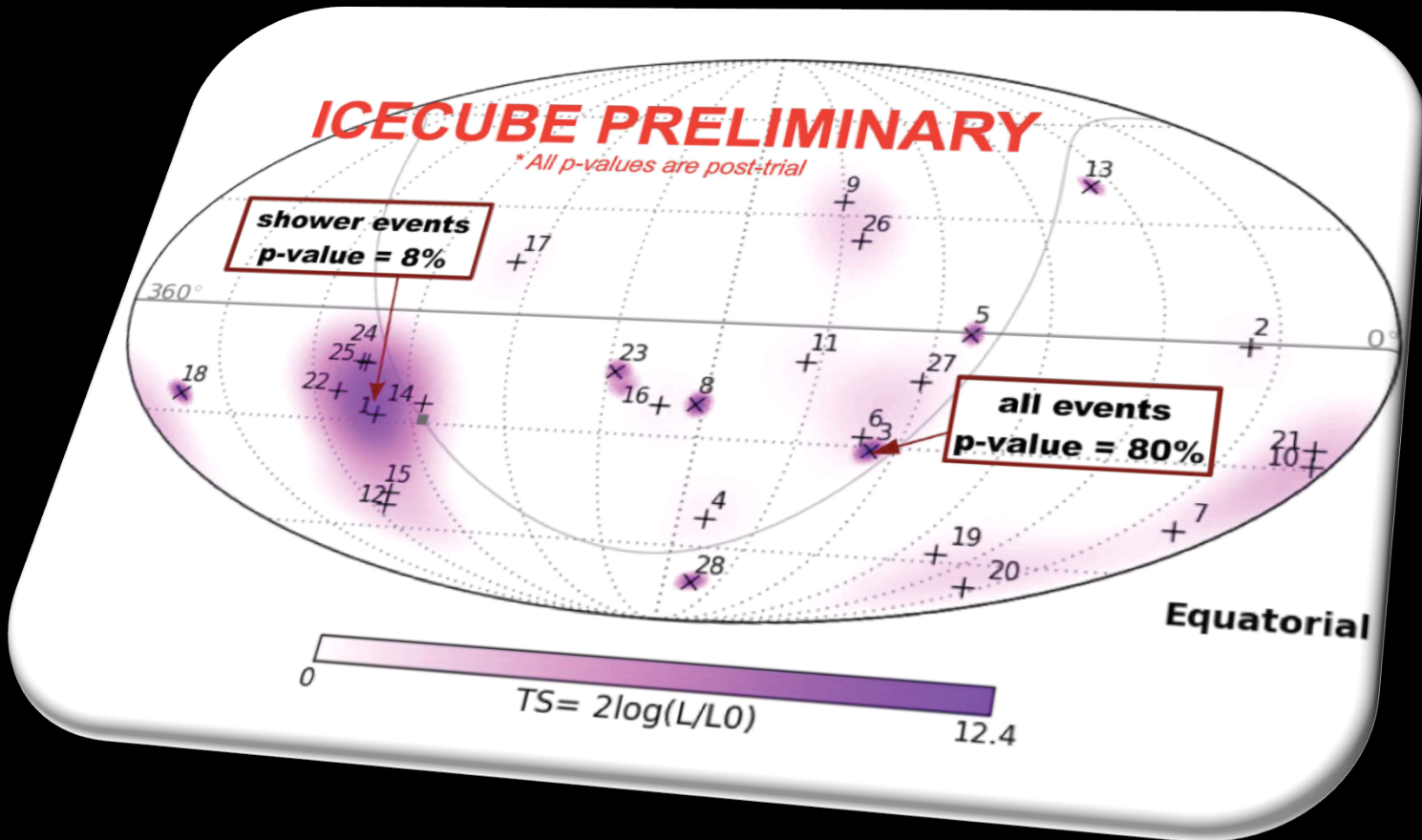
2013: 2 neutrinos atypiques !



Energie > 1000 TeV (1000 000 000 MeV)

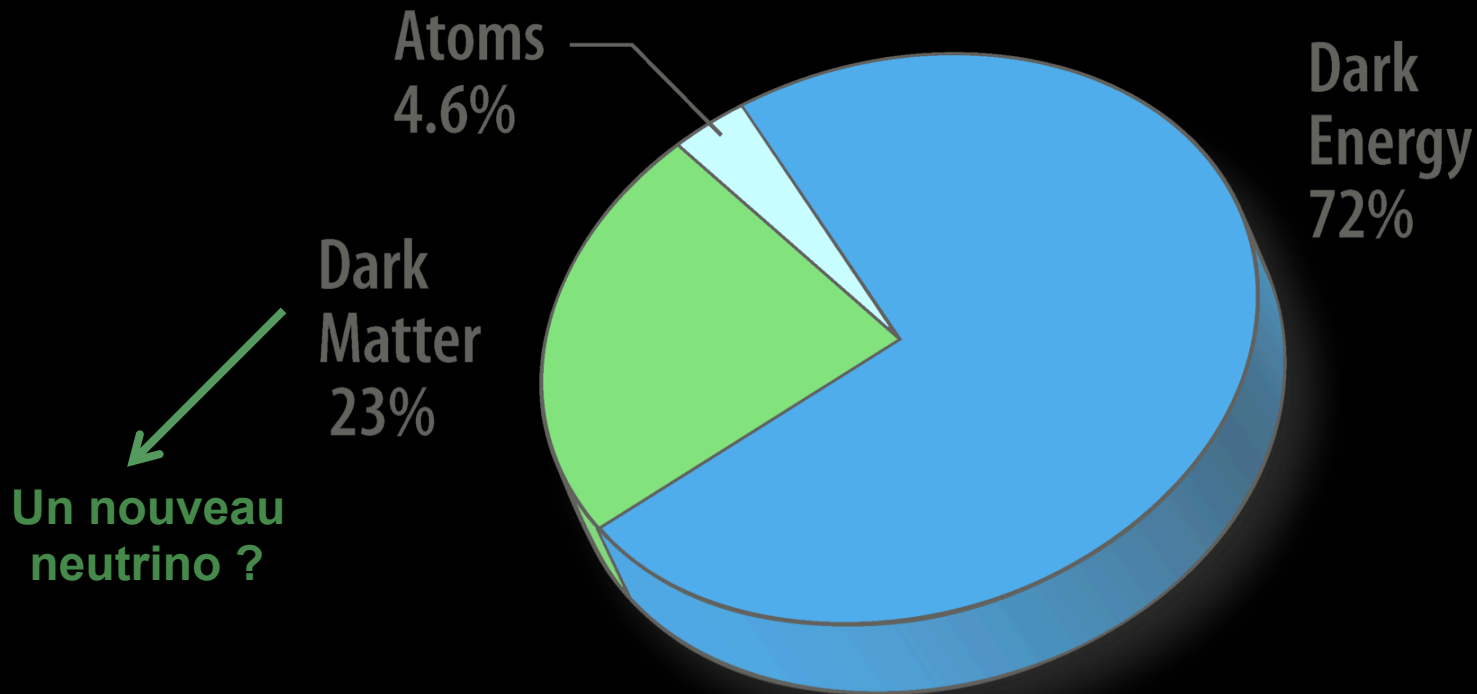
Découverte de neutrinos cosmiques !

L'origine de ces neutrinos reste mystérieuse...



Contenu énergétique de l'Univers

- Neutrinos ~0.5%
- Etoiles & Galaxies ~0.5%



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

Matière Noire et Neutrinos ?

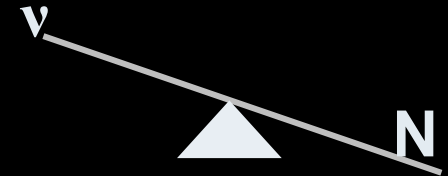


Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

	I	II	III		
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
name →	Left u Right up	Left c Right charm	Left t Right top	g gluon	
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	Left d Right down	Left s Right strange	Left b Right bottom	γ photon	
<0.0001 eV ~10 keV	~0.01 eV ~GeV	~0.04 eV ~GeV	91.2 GeV	0	>114 GeV
0	0	0	0	0	0
Left ν_e Right N₁ electron neutrino sterile neutrino	Left ν_μ Right N₂ muon neutrino sterile neutrino	Left ν_τ Right N₃ tau neutrino sterile neutrino	Z weak force	H Higgs boson	
Leptons	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	spin 0
	-1	-1	-1	±1	
	Left e Right electron	Left μ Right muon	Left τ Right tau	W[±] weak force	



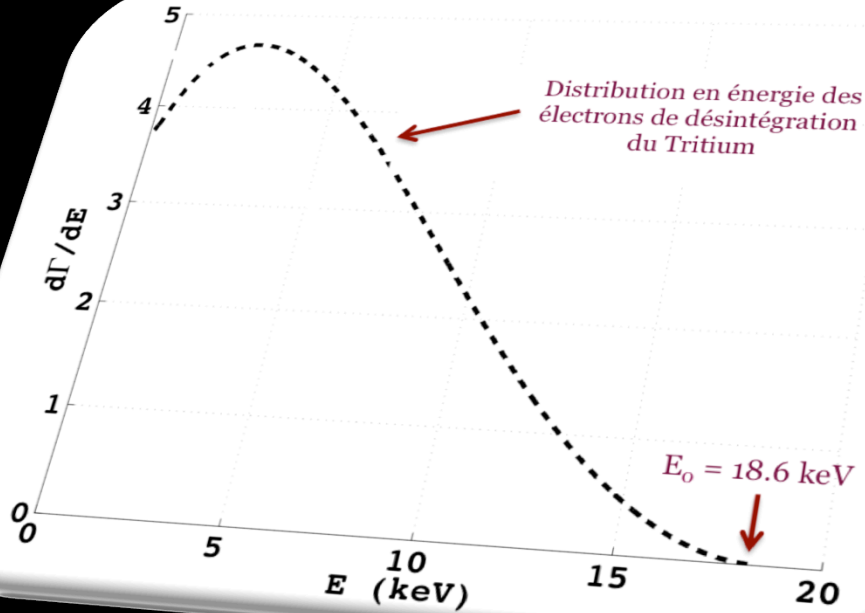
- Une asymétrie quark-antiquark existe (violation CP) mais ne permet pas de rendre compte de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers ...
- Un ν stérile TRES lourd (GUT) pourrait rendre compte de la très faible masse des $\nu_{\varepsilon,\mu,\tau}$ (mécanisme balançoire)
- A $t < 10^{-35}\text{s}$ \rightarrow production neutrino lourd
- $\mathcal{CP} \rightarrow R(N \rightarrow l^- + \Phi^+) < R(N \rightarrow l^+ + \Phi^-) \rightarrow L$ violation (Φ : champs de Higgs)
 \rightarrow Leptogénèse
- 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



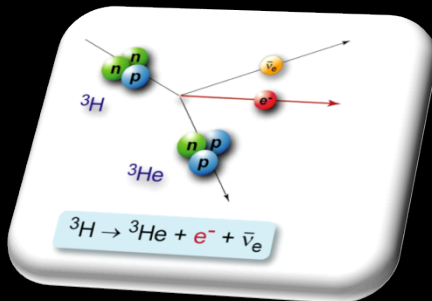
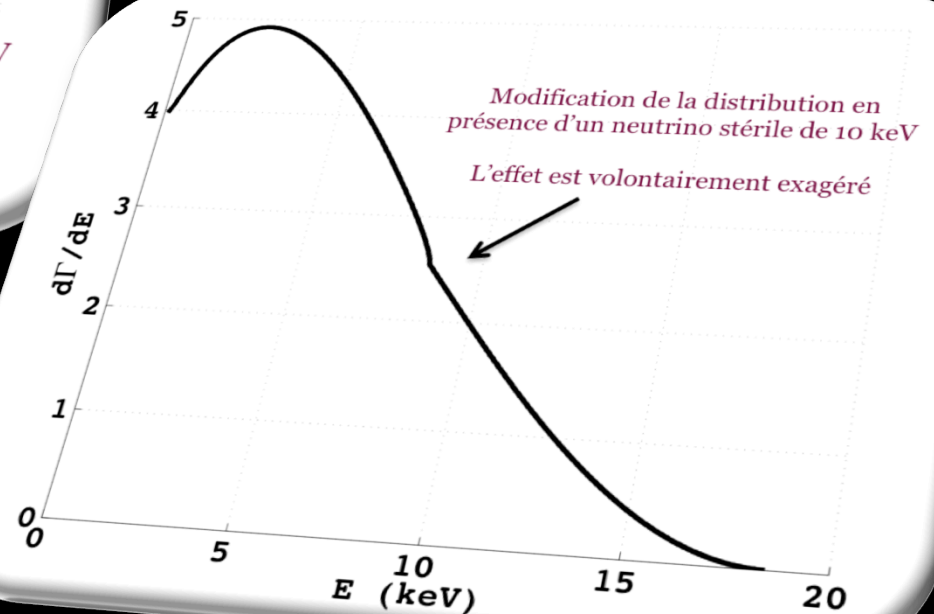
Recherche de neutrino au keV?



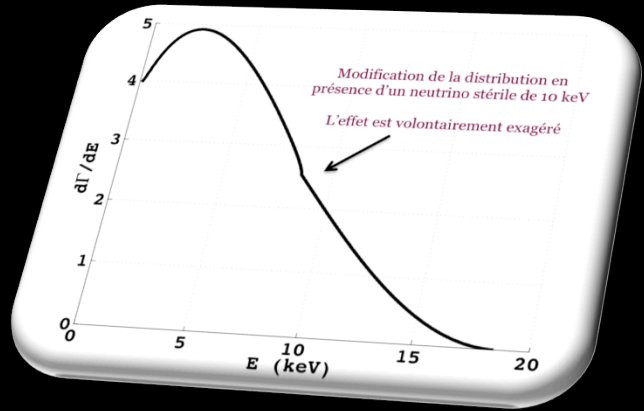
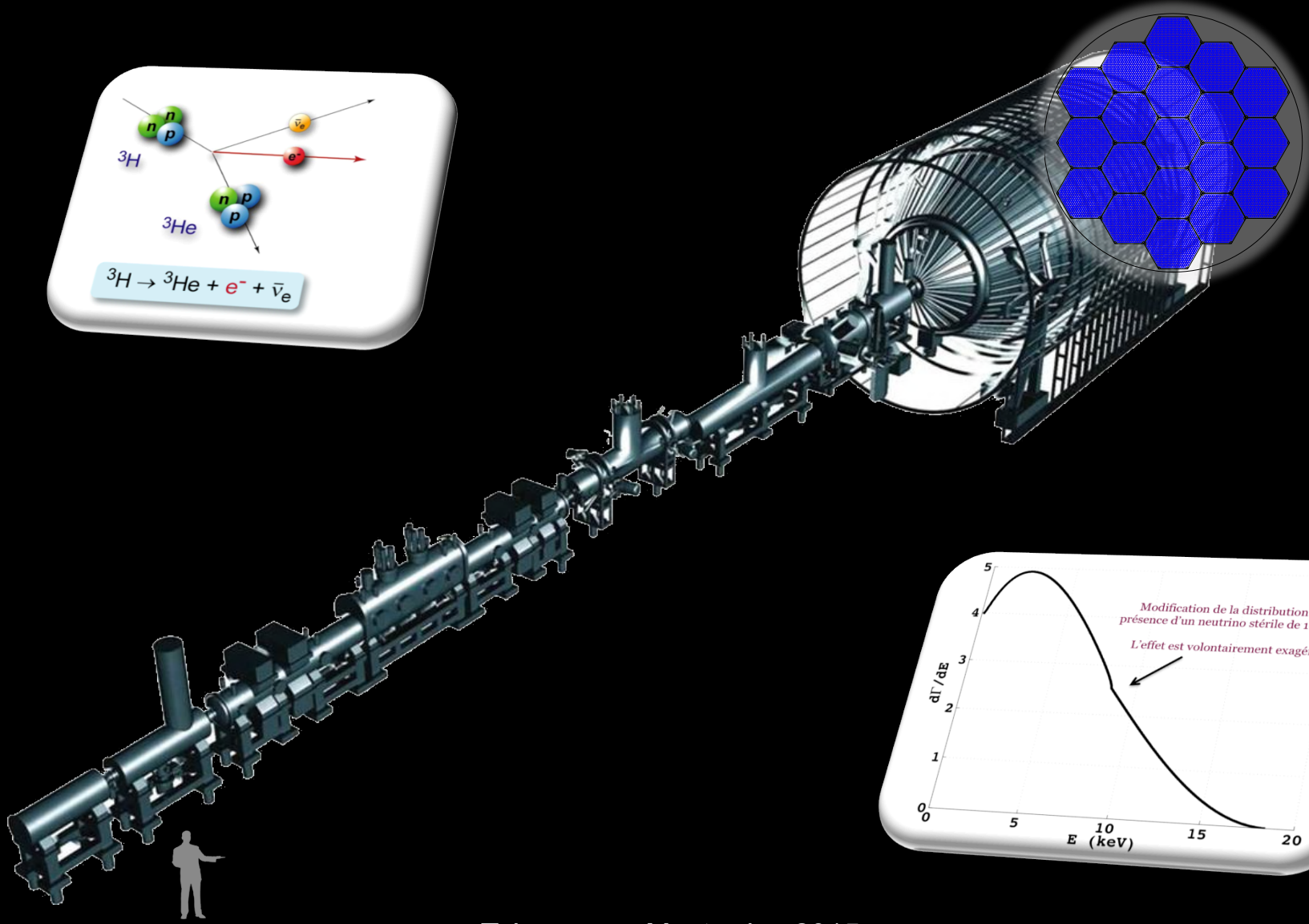
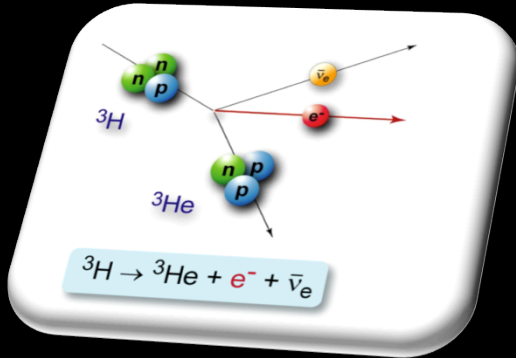
Modèle standard



Avec un neutrino de 10 keV

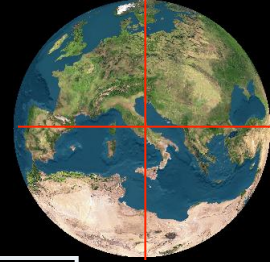


Le projet TRISTAN

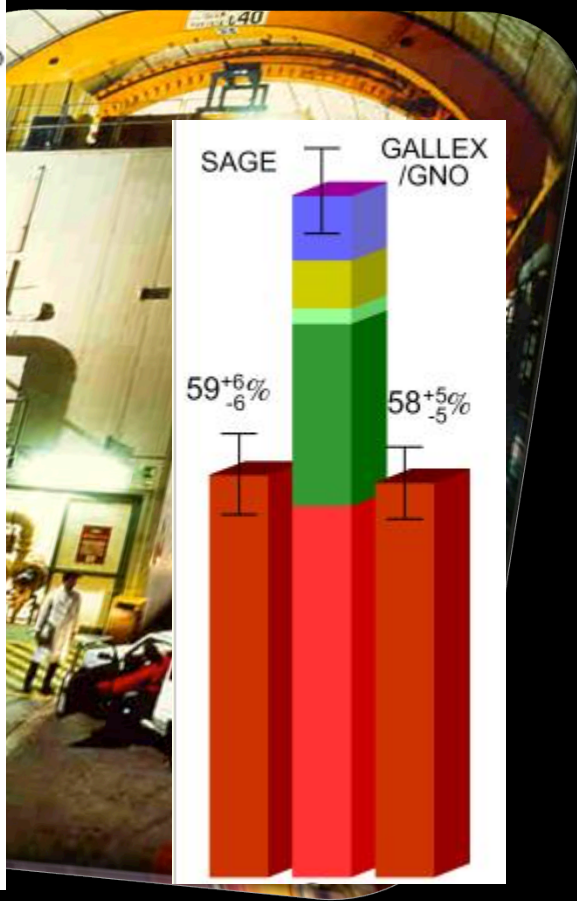
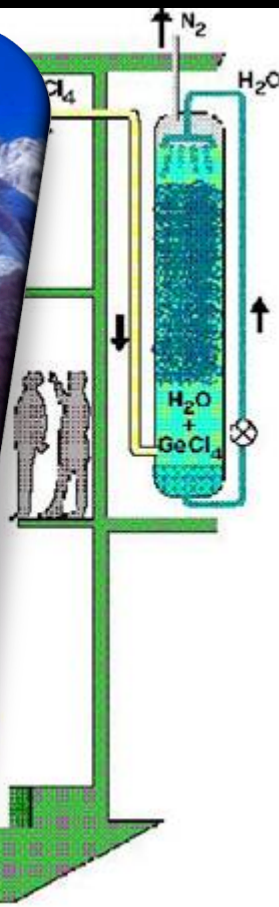
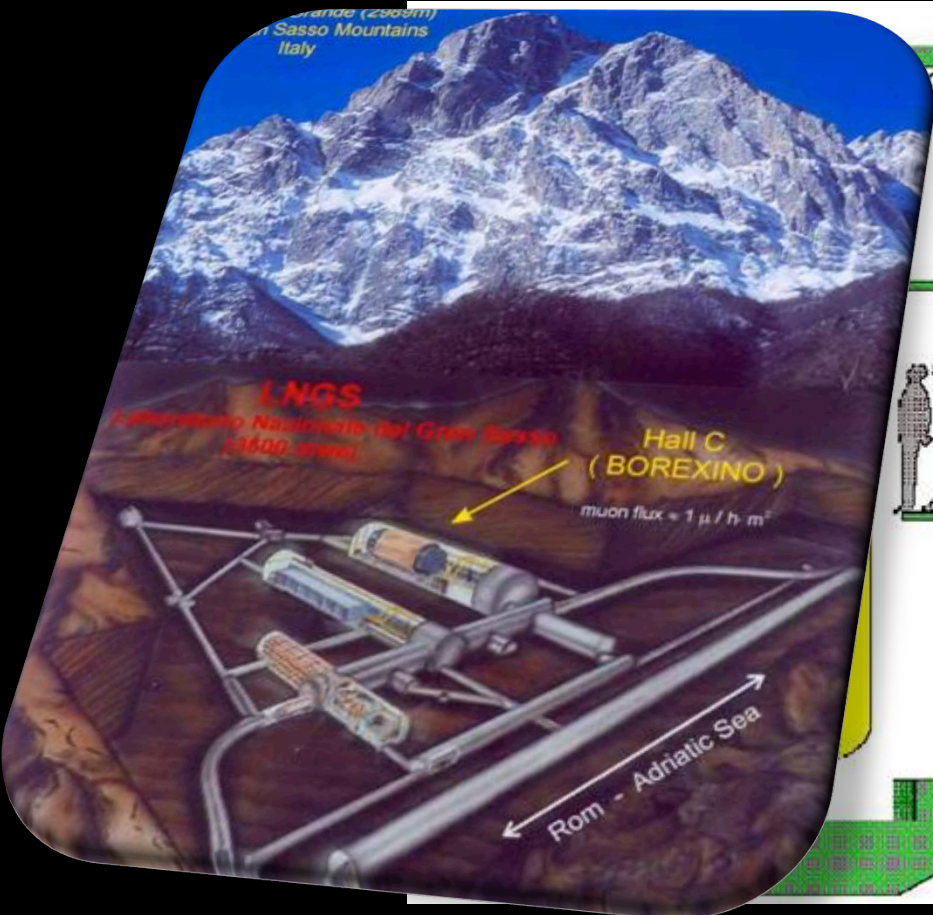




Gallex (1991-2003)



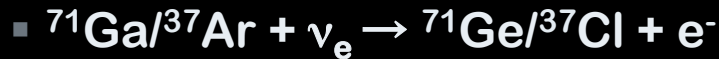
30 tonnes de Gallium (Gran Sasso, Italie)



Première détection des neutrinos « p-p »

Anomalie Gallex / Sage

- 'Calibration' des expériences de neutrinos solaires



- 4 runs avec des sources de 0.6 - 2 Mci

- **Gallex**, $\langle L \rangle = 1.9$ m

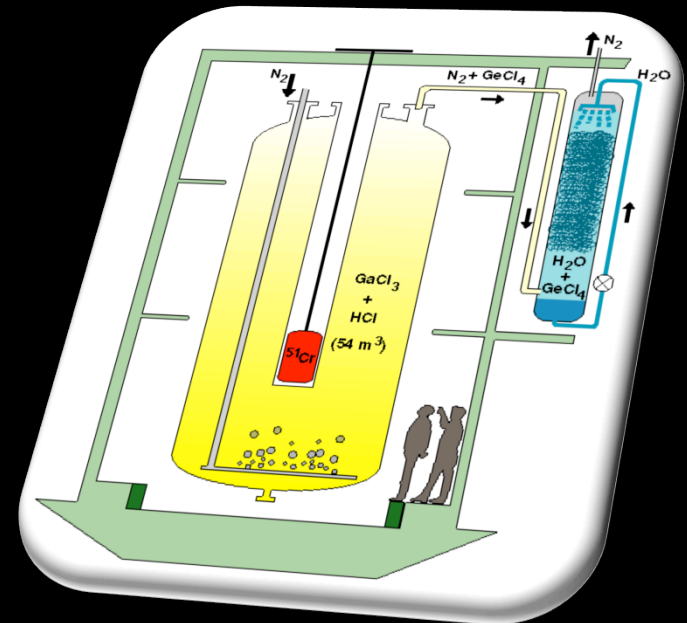
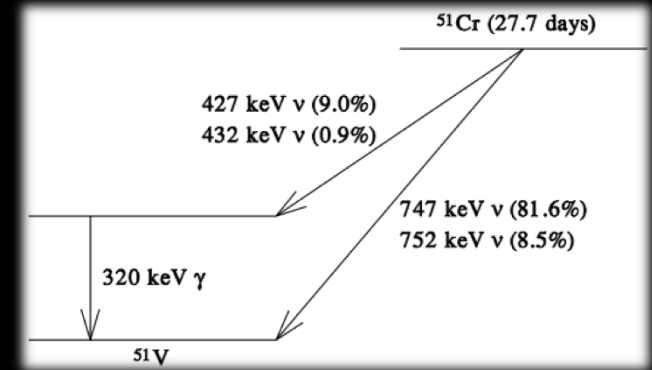
- ^{51}Cr , 750 keV

- **Sage**, $\langle L \rangle = 0.6$ m

- ^{51}Cr & ^{37}Ar (810 keV)

- Deficit observé / prédiction

- Nouvelle oscillation?



ν & non prolifération nucléaire

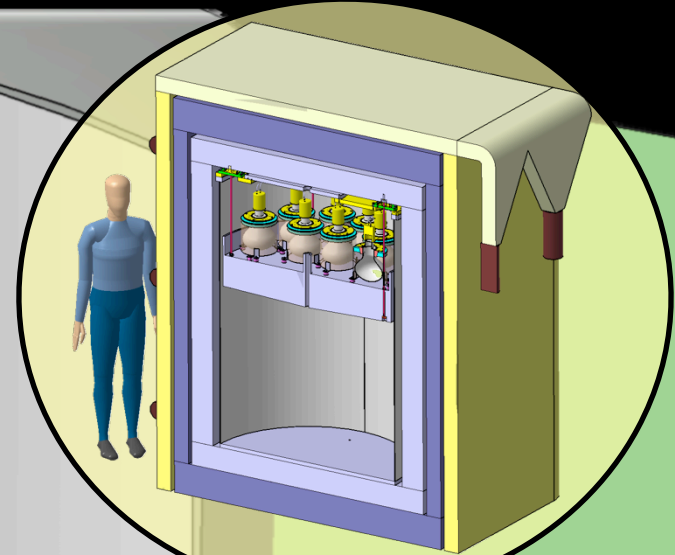
$$N_{\bar{\nu}} = \gamma \left| 1 + f \left(\frac{M_{Pu}}{M_U} \right) \right| P_{th}$$



40 m

REP 900
3.5 GW

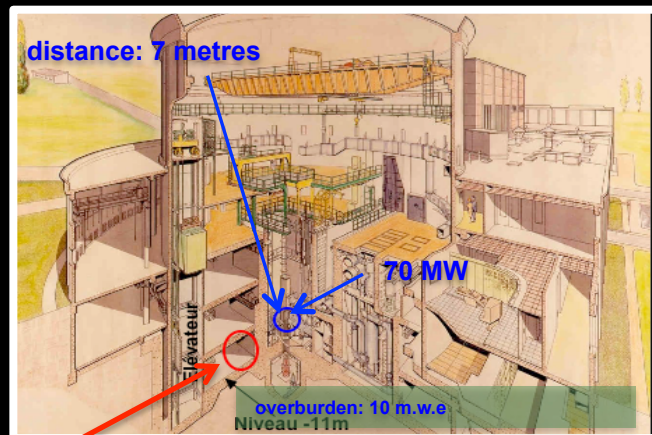
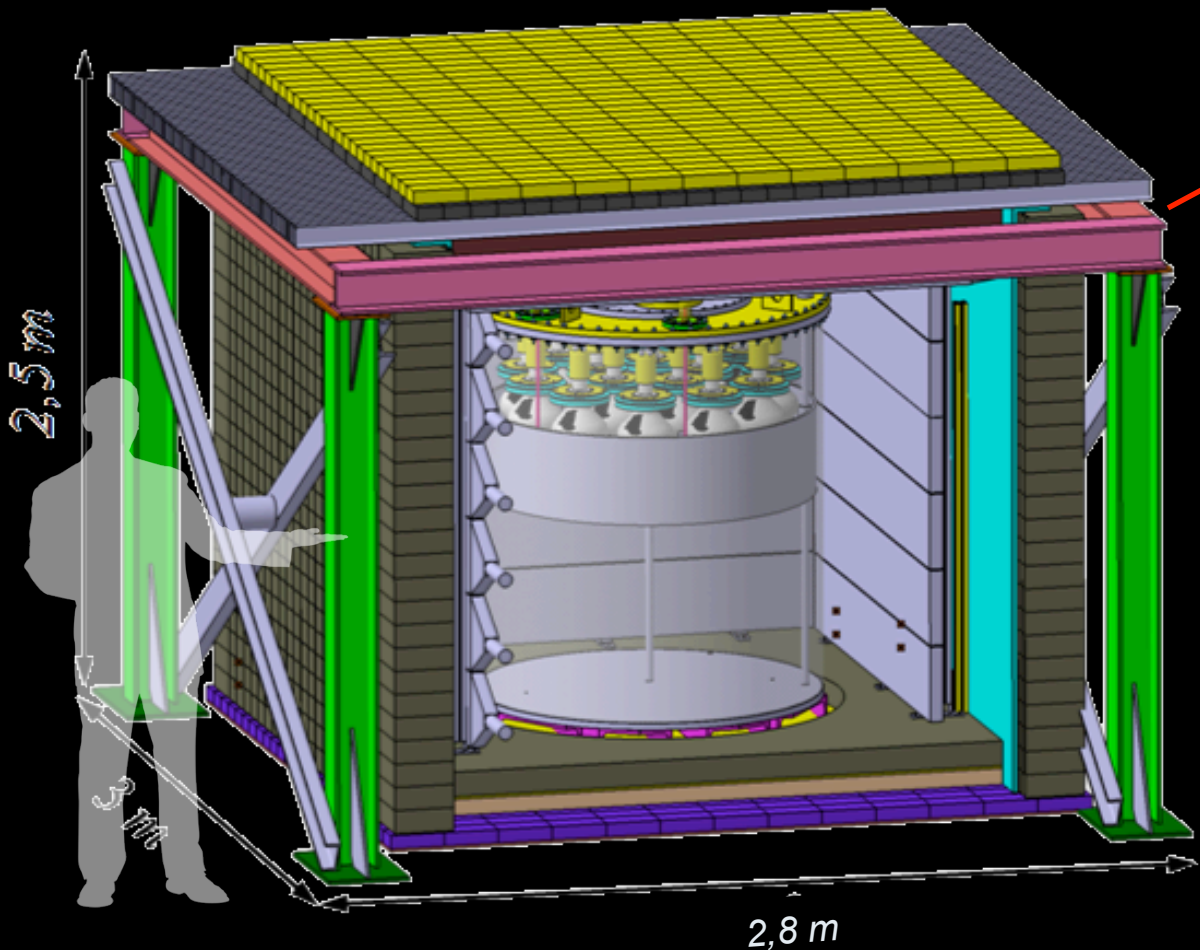
25m



L'Agence Internationale à l'Energie Atomique:

Contrôler, au nom de la communauté internationale, que les états membres ne détournent pas leurs installations nucléaires civiles à des fins militaires

Démonstrateur Nucifer @Osiris (Saclay)



Osiris research reactor - 70 MW
CEA-Saclay (300 v/d) - CEA - CNRS coll.

