



Borexino

Les premiers résultats



- But principal de Borexino : détection des neutrinos solaires du « béryllium-7 »
- Proposal (Italie, Allemagne, USA) : 1992
- Prototype et construction : 1994-200i
- APC : 1999
- Démarrage prise de données : mai 2007



Borexino
Les premiers résultats

1. Quelques rappels sur le Soleil
2. Les neutrinos solaires en 2004
3. Borexino
4. Les premiers résultats
5. Le futur



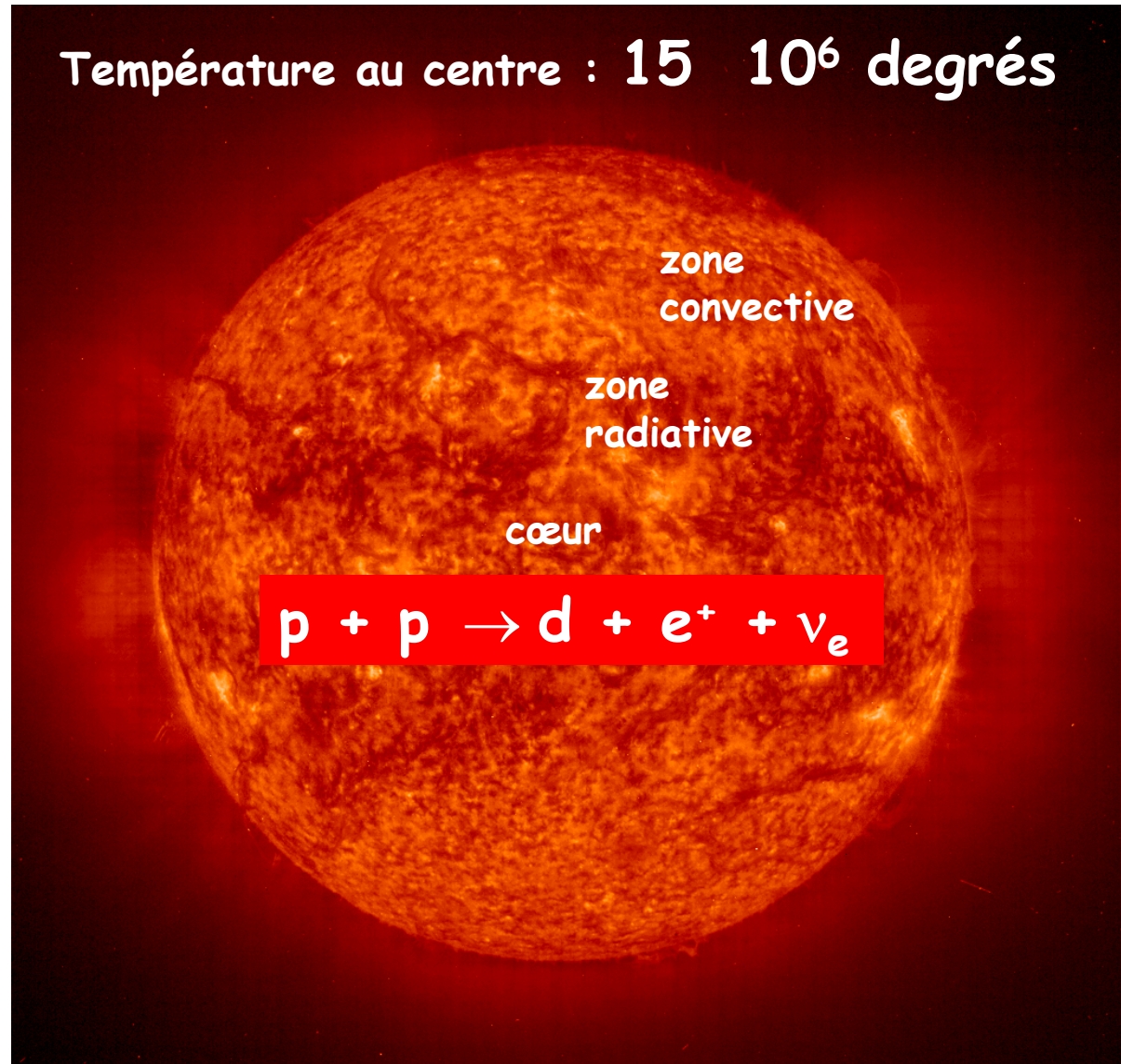
Borexino
Les premiers résultats

1. Quelques rappels sur le Soleil
2. Les neutrinos solaires en 2004
3. Borexino
4. Les premiers résultats
5. Le futur

Le Soleil

➤ Composition :
73% hydrogène (H)
25% hélium (He)
2% autres éléments

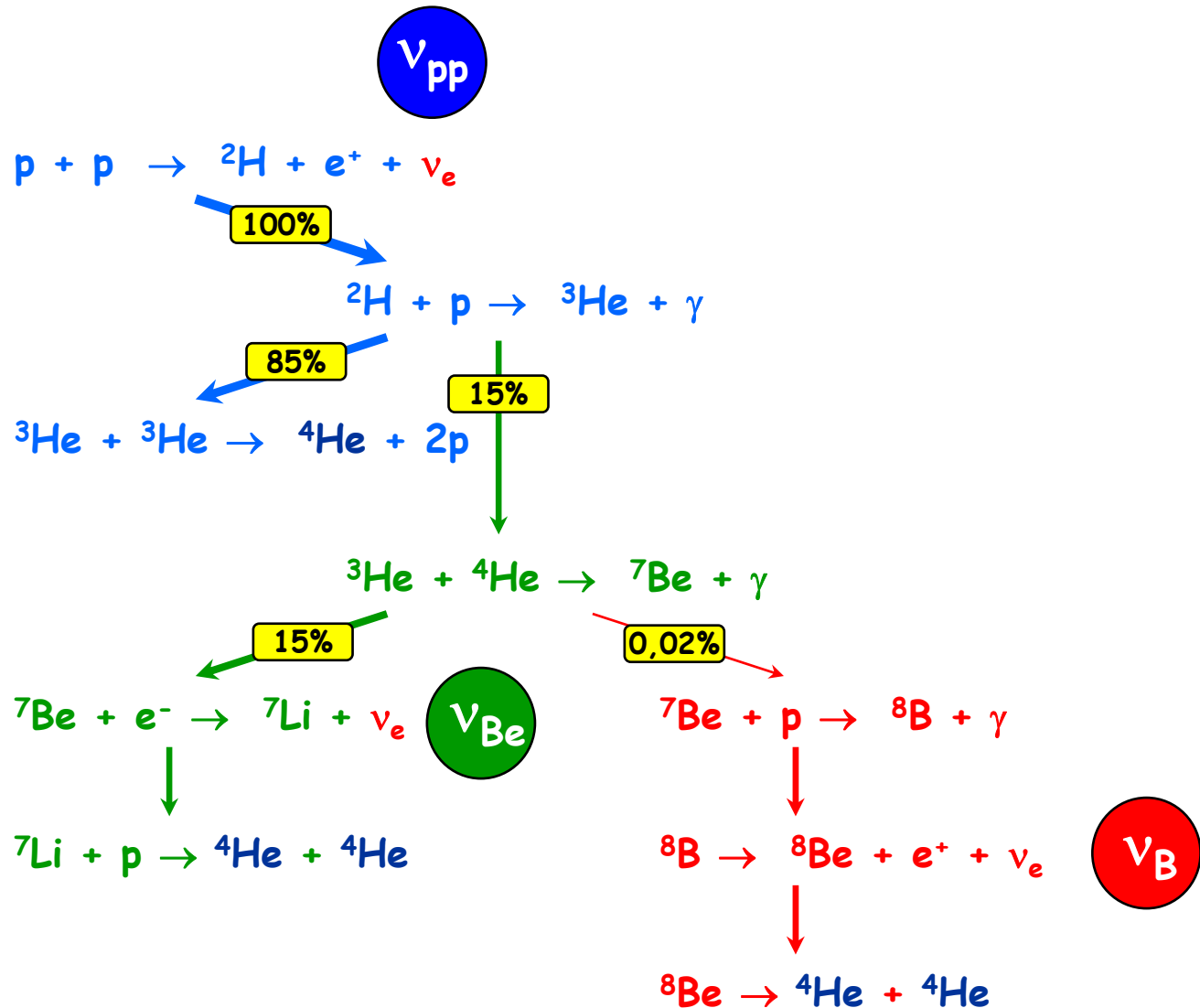
Température au centre : $15 \cdot 10^6$ degrés



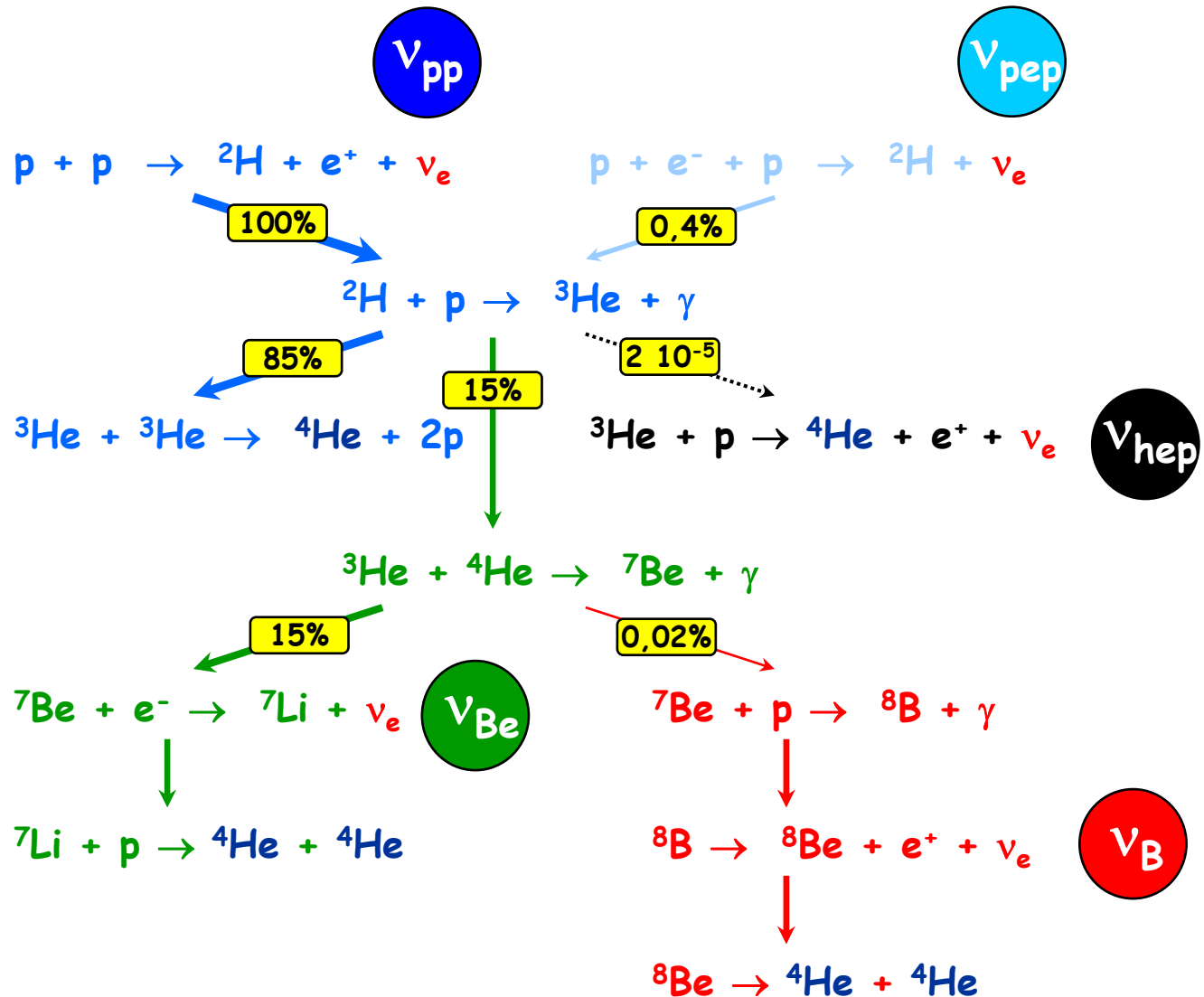
Energie du Soleil : cycle compliqué de réactions nucléaires

Bilan énergétique : 4 protons + 2 électrons \rightarrow hélium-4 + 2 neutrinos + $4 \cdot 10^{-12}$ W

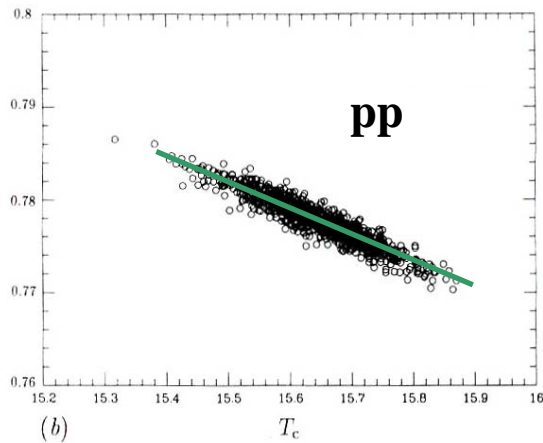
Réactions nucléaires dans le Soleil



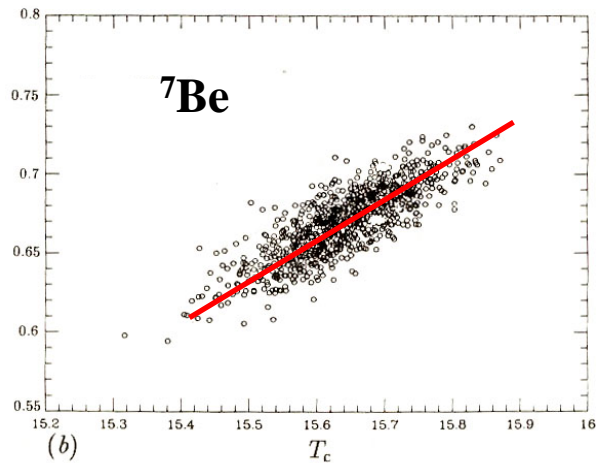
Réactions nucléaires dans le Soleil



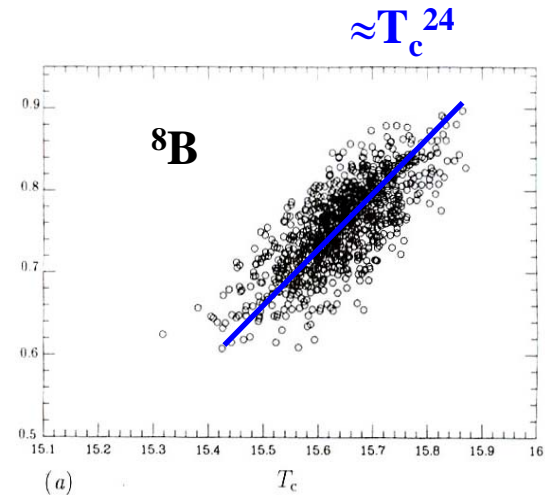
Dépendance en température des flux de ν solaires



$$\approx T_c^{-1.1}$$



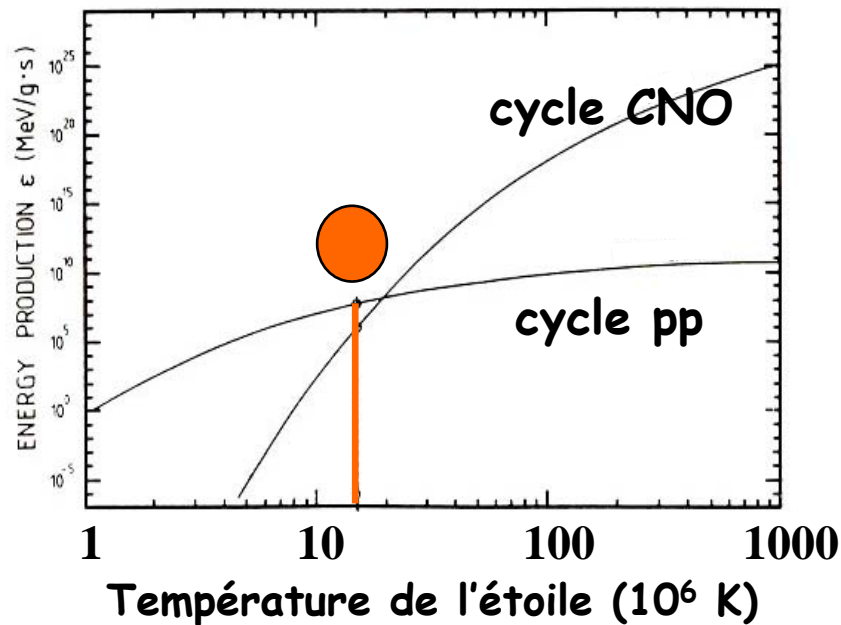
$$\approx T_c^{10}$$



$$\approx T_c^{24}$$

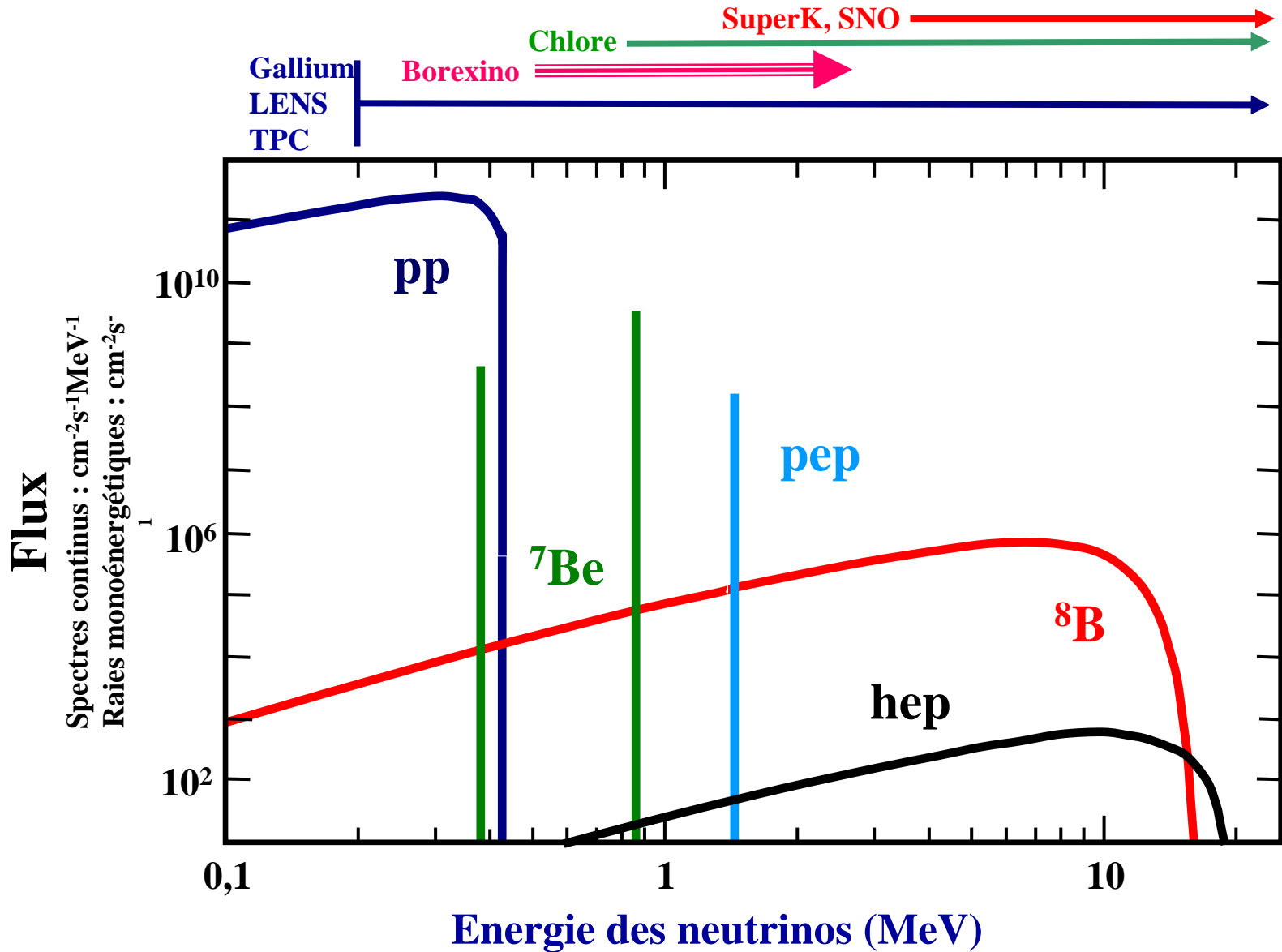
See also J.N.Bahcall and A.Ulmer, Phys. Rev. D53 (1996) 4202

Production d'énergie dans les étoiles

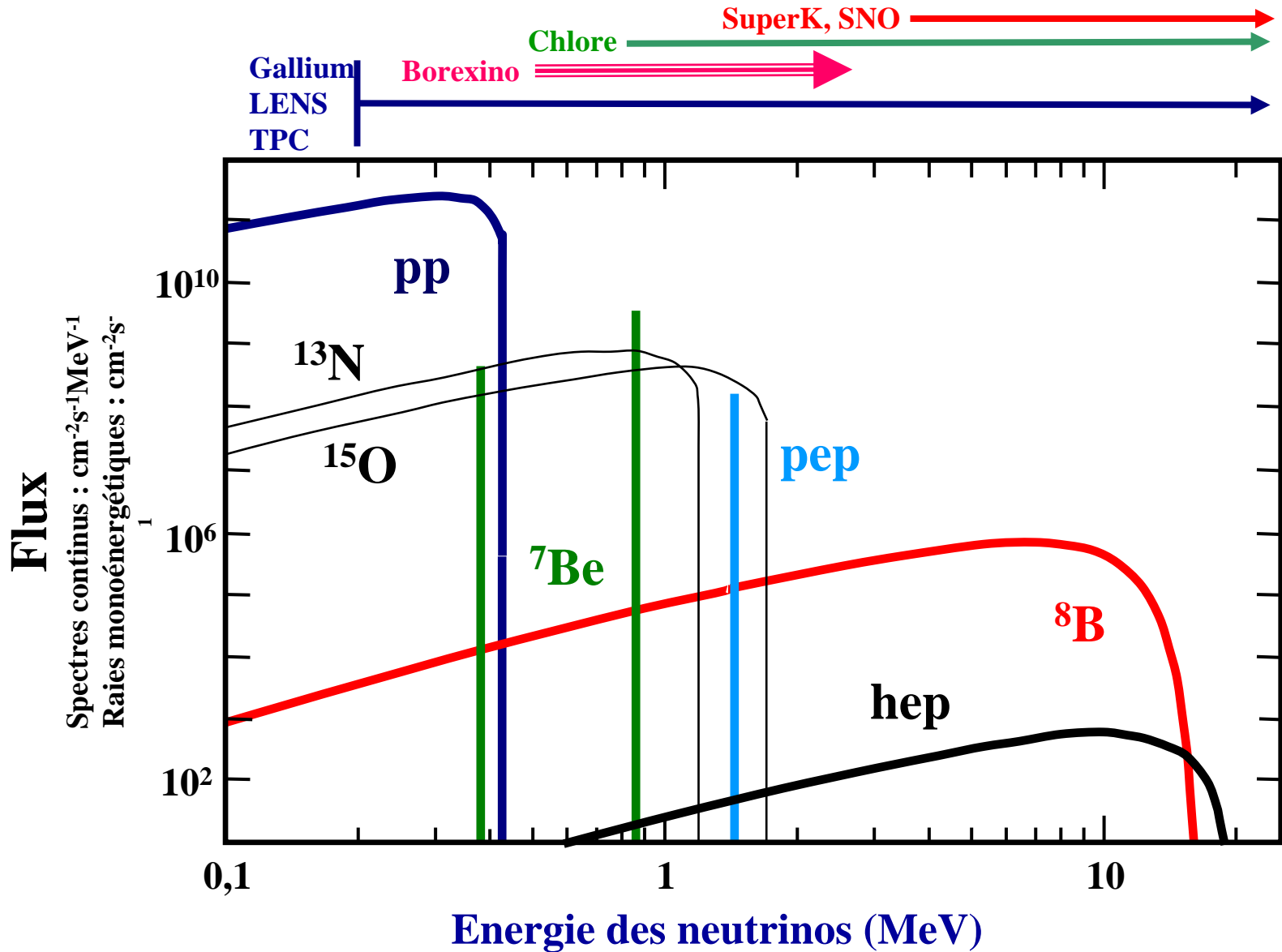


Competition between the pp chain and the CNO cycle as a function of the stellar temperature. For the Sun, the pp chain is still dominant.

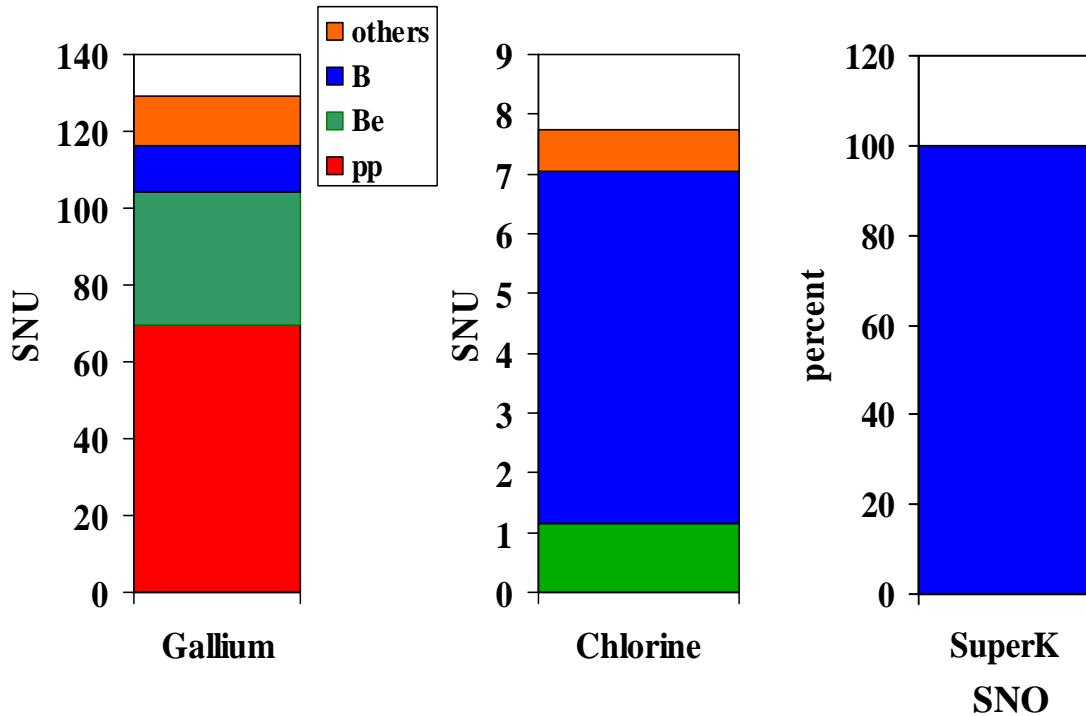
Spectre en énergie des neutrinos solaires



Spectre en énergie des neutrinos solaires



Prédictions du modèle standard du \odot



1 SNU = 10^{-36} capture/atome/s	BP01	Saclay 01
Gallium (SNU)	128±8	128±8
Chlorine (SNU)	7.7±1.2	7.45±1.0
SuperK, SNO ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	5.05±1.0	4.95±0.7
Borexino (^7Be) ($10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	4.77±0.48	4.70±0.48

✿ J.N.Bahcall, M.Pinsonneault, S.Basu, astro-ph/0010346, Ap. J. 555 (2001) 990.

✿ S.Turck-Chièze et al., Ap. J. Lett. 555 (2001) L69.



Borexino
Les premiers résultats

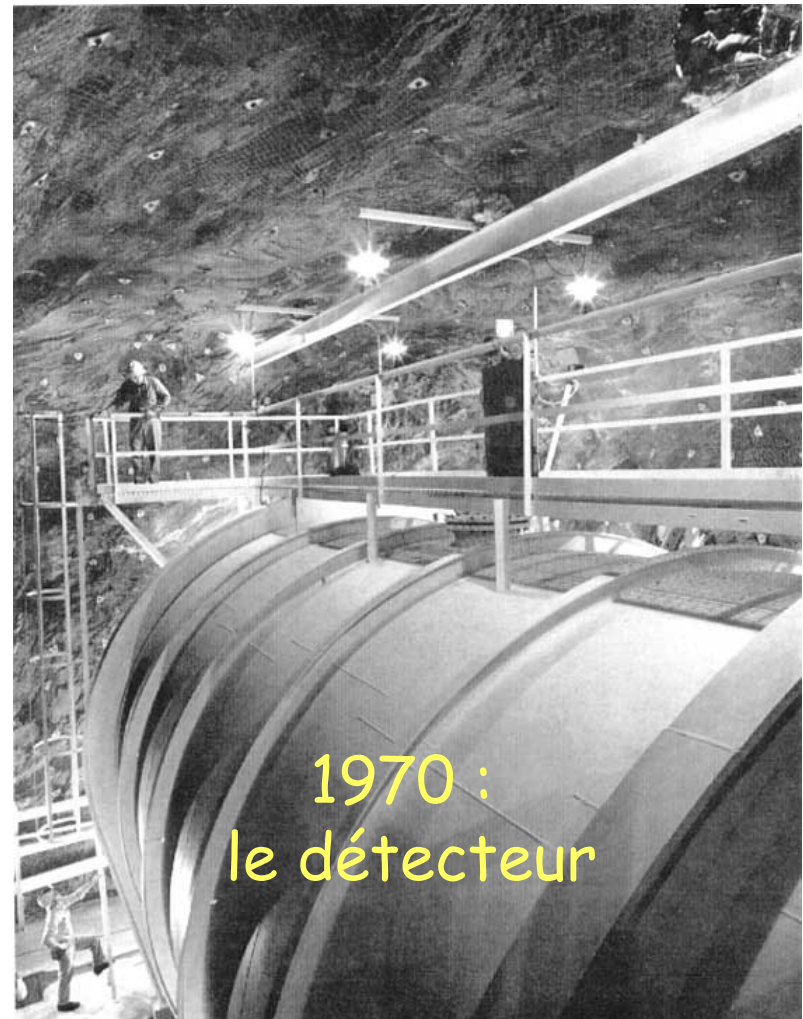
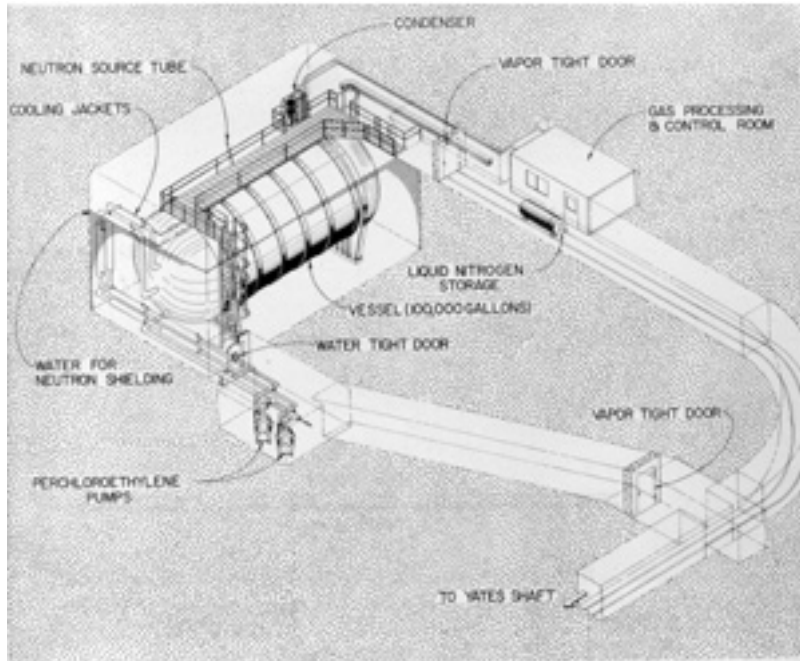
1. Quelques rappels sur le Soleil
2. Les neutrinos solaires en 2004
3. Borexino
4. Les premiers résultats
5. Le futur



L'énigme des
neutrinos solaires ?

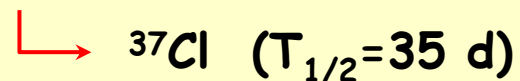
Just an oscillation !

L'expérience « pionnière » au chlore



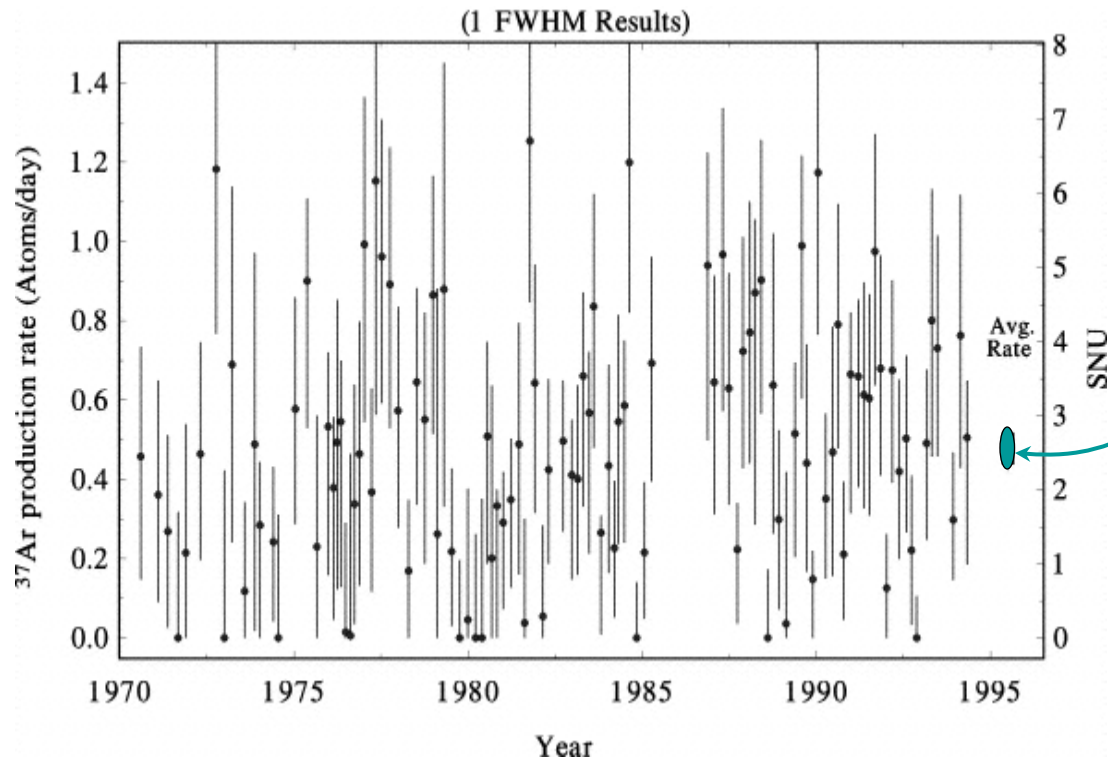
Homestake mine (South Dakota)

600 tons of C_2Cl_4



L'expérience « chlore »

- Radiochimique
- Sensible aux neutrinos Be et B
- 25 ans de données (108 runs)

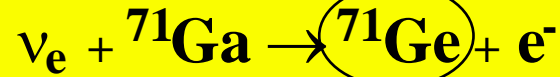


Résultat :
 2.56 ± 0.20 SNU

1/3 des
modèles solaires
(7.6 ± 1.2 SNU)



GALLEX : détection radiochimique des neutrinos solaires primordiaux



seuil = 233 keV

$\tau = 16.49 \text{ d}$

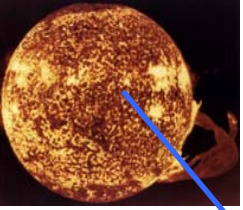
${}^{71}\text{Ga} + \nu_e + \text{rayons X}$

désintégration par **capture électronique**

* capture L : 1.17 keV

* capture K : 10.37 keV

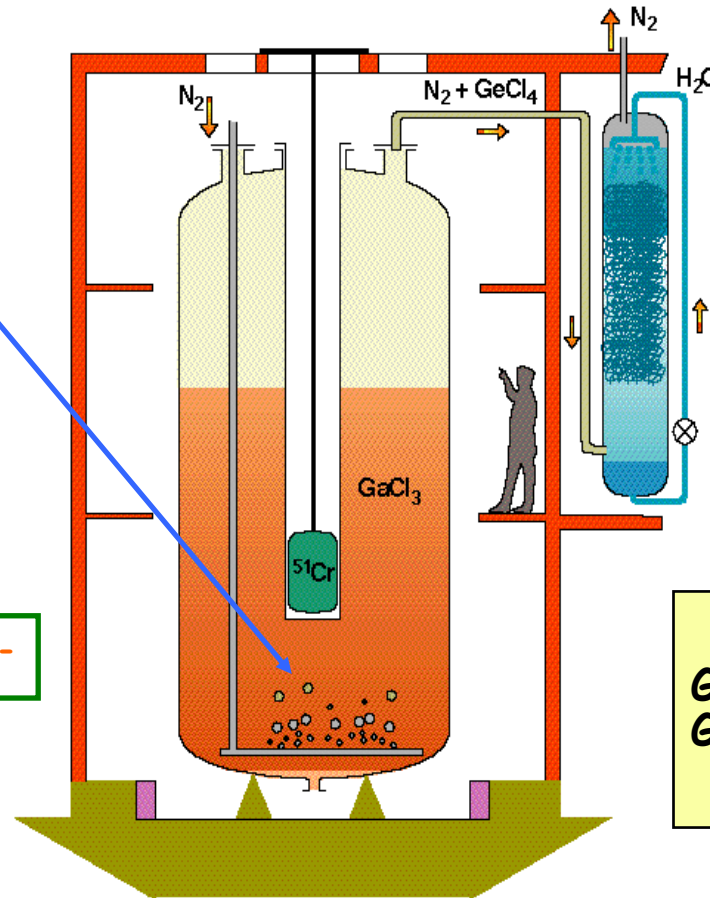
$65 \cdot 10^9$ neutrinos solaires/cm²/s
⇒ **1,2 atome de ${}^{71}\text{Ge}$** par jour
dans 30 tonnes de gallium



GALLEX : schéma expérimental

$L = 150$ millions km

$\langle E \rangle = 1$ MeV



30.3 tonnes de gallium
en solution aqueuse :
 $\text{GaCl}_3 + \text{HCl}$

EXTRACTION

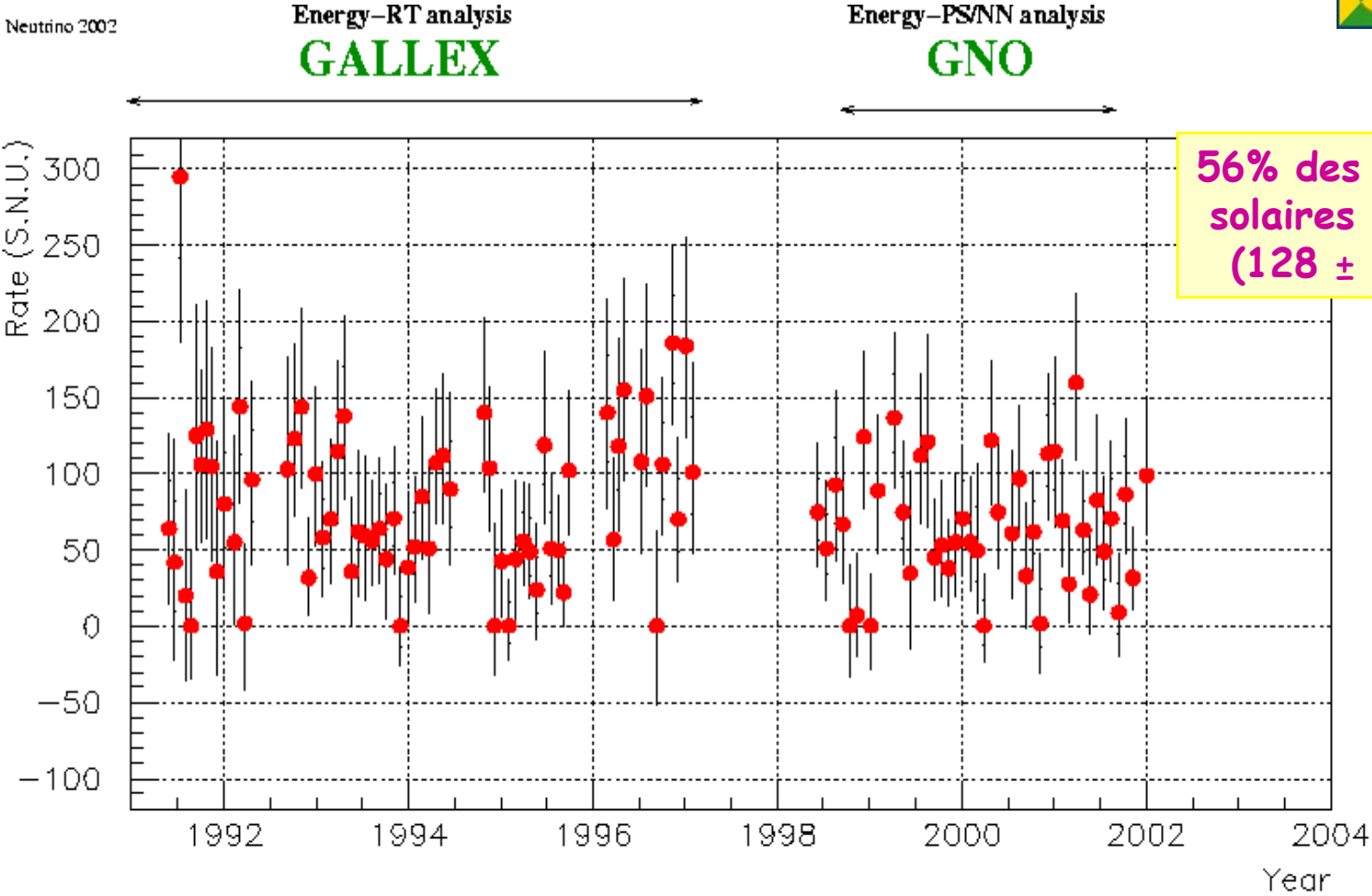
$\text{GeCl}_4 + \text{HCl}$: vapeur
 $\text{GeCl}_4 + \text{H}_2\text{O}$: solution

3000 m³ d'azote

Détecteur européen GALLEX (Gran Sasso)



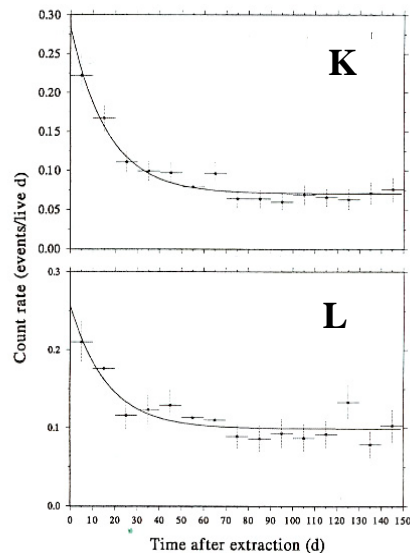
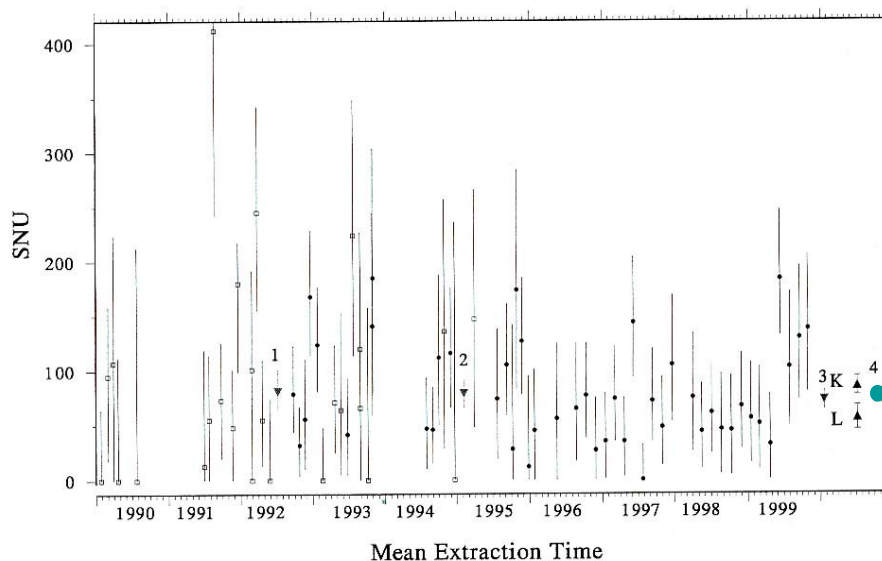
GALLEX/GNO : les résultats



GALLEX	65 SR	77.5 ± 6.2 (stat) ± 4.5 (sys) SNU
GNO	43 SR	65.2 ± 6.4 (stat) ± 3.0 (sys) SNU
GNO+GALLEX	108 SR	70.8 ± 4.5 (stat) ± 3.8 (sys) SNU



SAGE

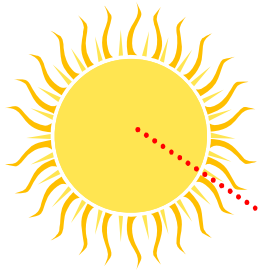
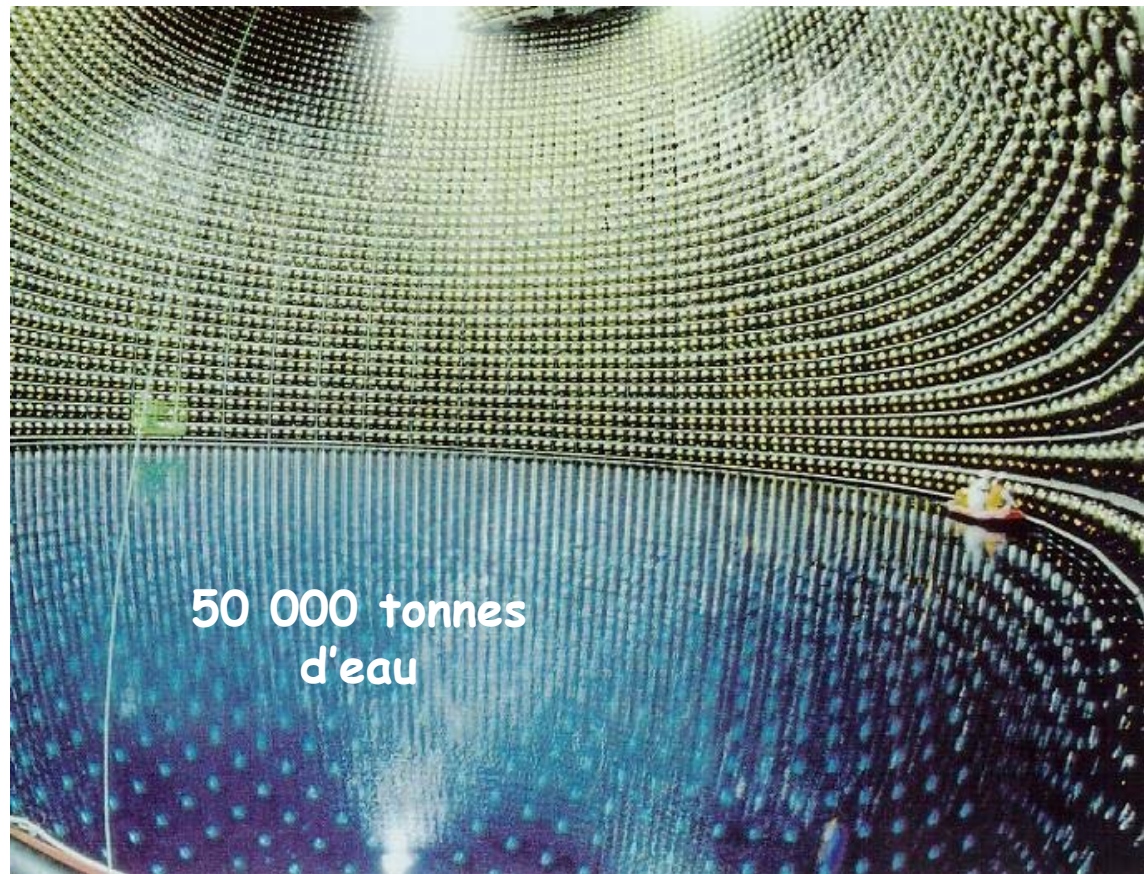


Count rates for
L and K peak

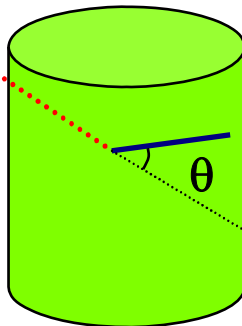
About 50 tons of Ga metal
157 runs
 66.2 ± 3.3 (stat.) ± 3.5 SNU (syst.)

Check with a ^{51}Cr source :
 0.95 ± 0.12

SuperKamiokande

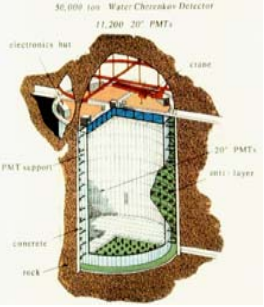


neutrino



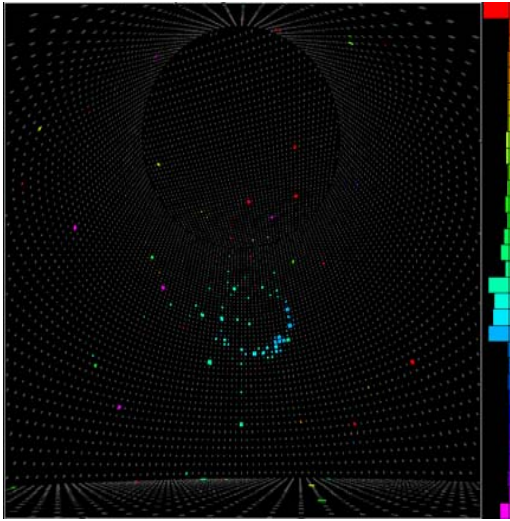
électron

θ



SuperKamiokande

Typical event

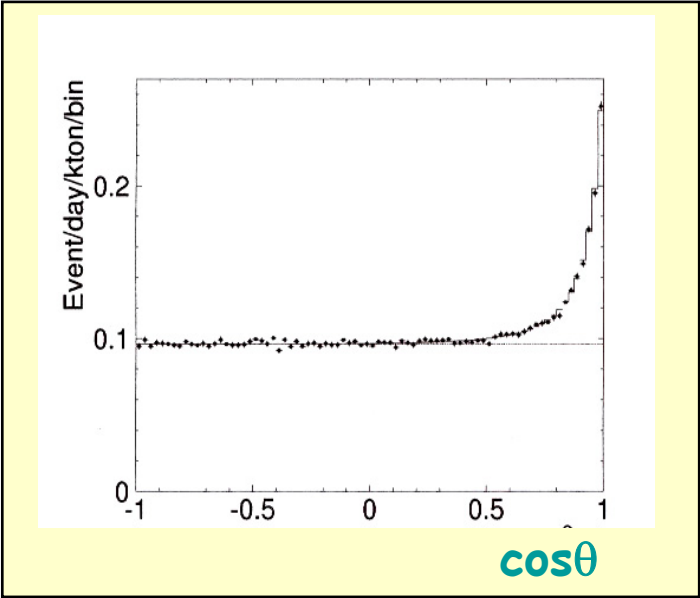


$E > 5 \text{ MeV}$
(6.5 MeV for the first 280 days)

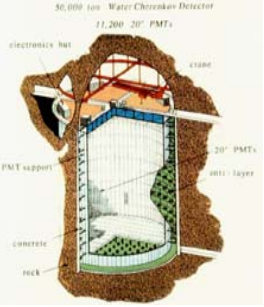
$2 \cdot 10^9$ events

Data reduction :
Cosmic ray muons
Spallation cut
External γ -ray cut
Vertex quality

236 140 events



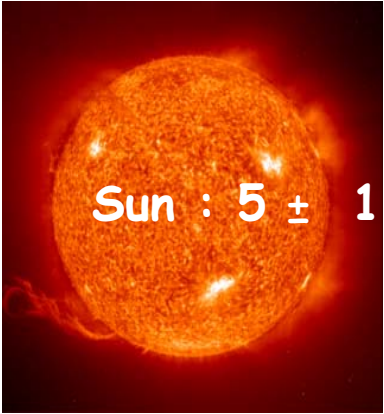
Signal :
 $18\,464 \pm 204 \pm 600$
events
(15 / day)



SuperKamiokande

45% des neutrinos solaires attendus !

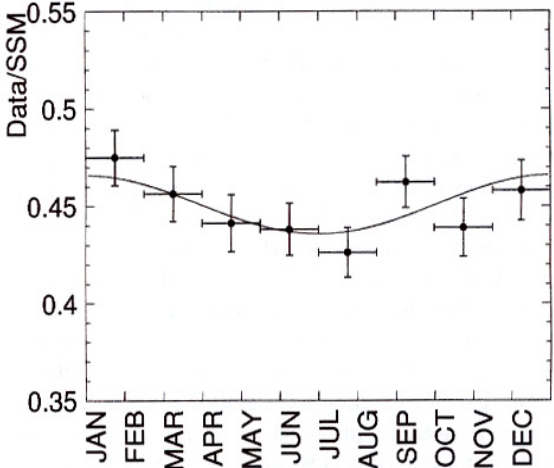
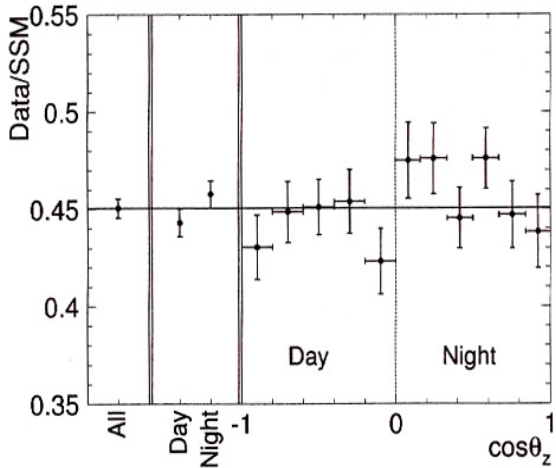
Flux measured for $^8\text{B } \nu$:
 $(2.32 \pm 0.03 \text{ (stat.)} \pm 0.08 \text{ (syst.)}) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Effet jour-nuit ?

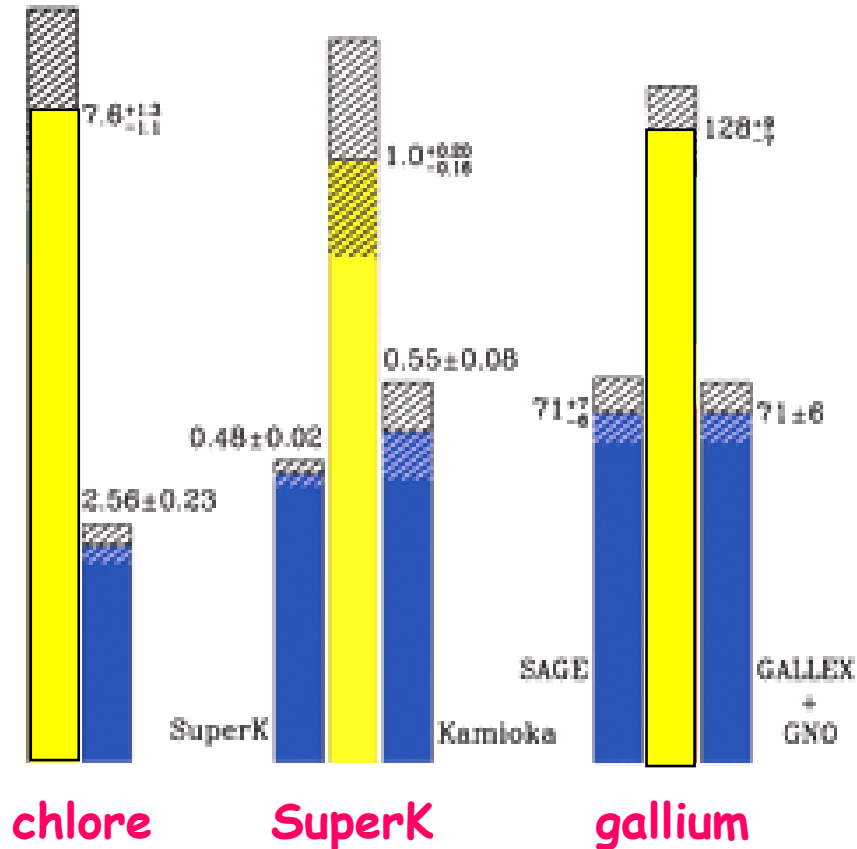
Day : $(2.28 \pm 0.04 \text{ (stat.)} \pm 0.08 \text{ (syst.)}) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 Night : $(2.36 \pm 0.04 \text{ (stat.)} \pm 0.08 \text{ (syst.)}) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 Asymmetry = $(N-D) / 0.5 (N+D) =$
 $0.033 \pm 0.022 \text{ (stat.)} \pm 0.013 \text{ (syst.)}$
 [1.3 s from 0]

Variation saisonnière ?



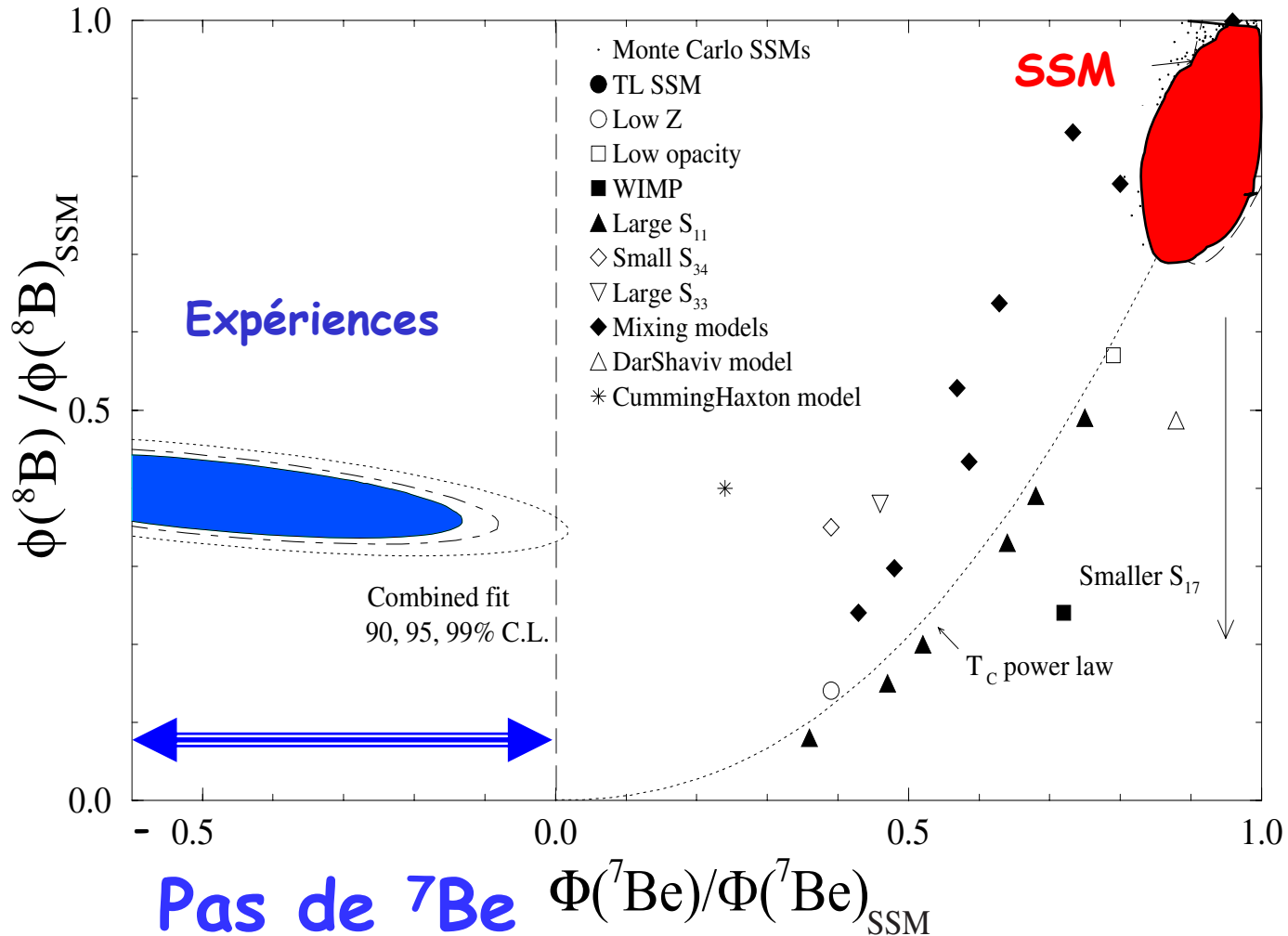
En accord avec distance Terre-Soleil

Neutrinos solaires : résultats et prédictions



Printemps 2001

Difficultés pour les solutions astrophysiques avant SNO : où sont passés les ν du béryllium ?



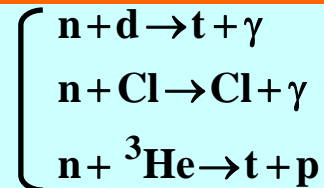
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

- 1000 tons D₂O (target)
- 7000 tons H₂O (shield)
- 9600 8" PM for Cerenkov light
- Canada-USA-GB Collaboration

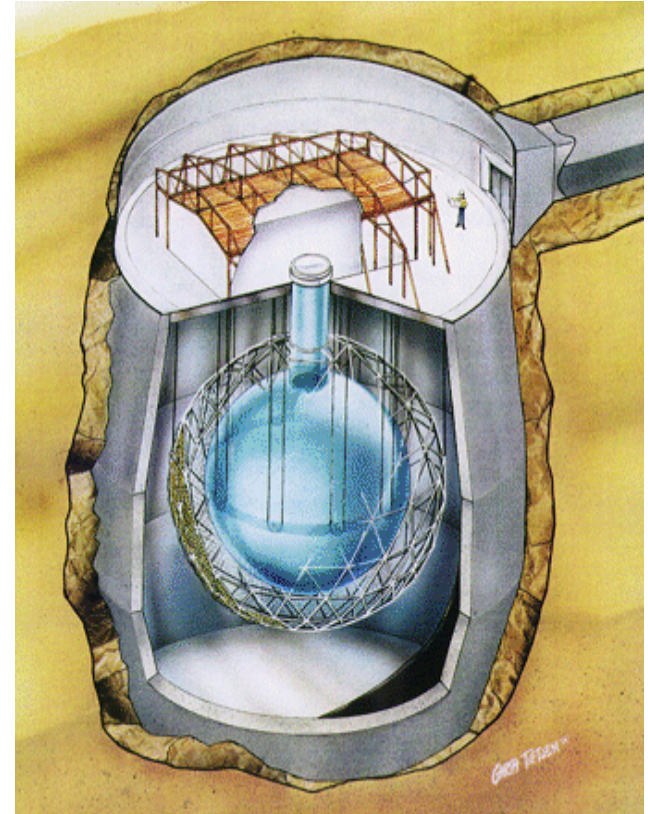
$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ (CC) 11 events / day

$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ (NC) 3 to 9 ev. / day

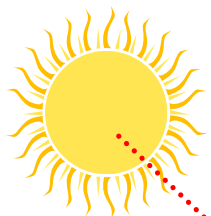
n detection



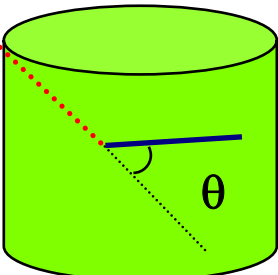
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ (elastic sc.) 1 ev./day
threshold : 5 MeV



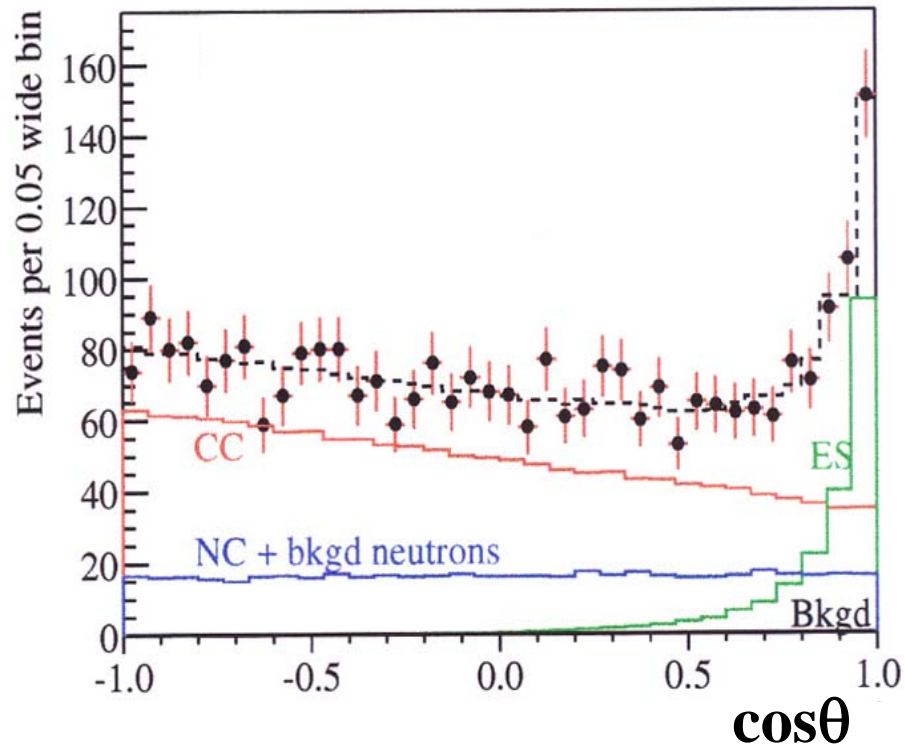
SNO (avril 2002)



neutrino

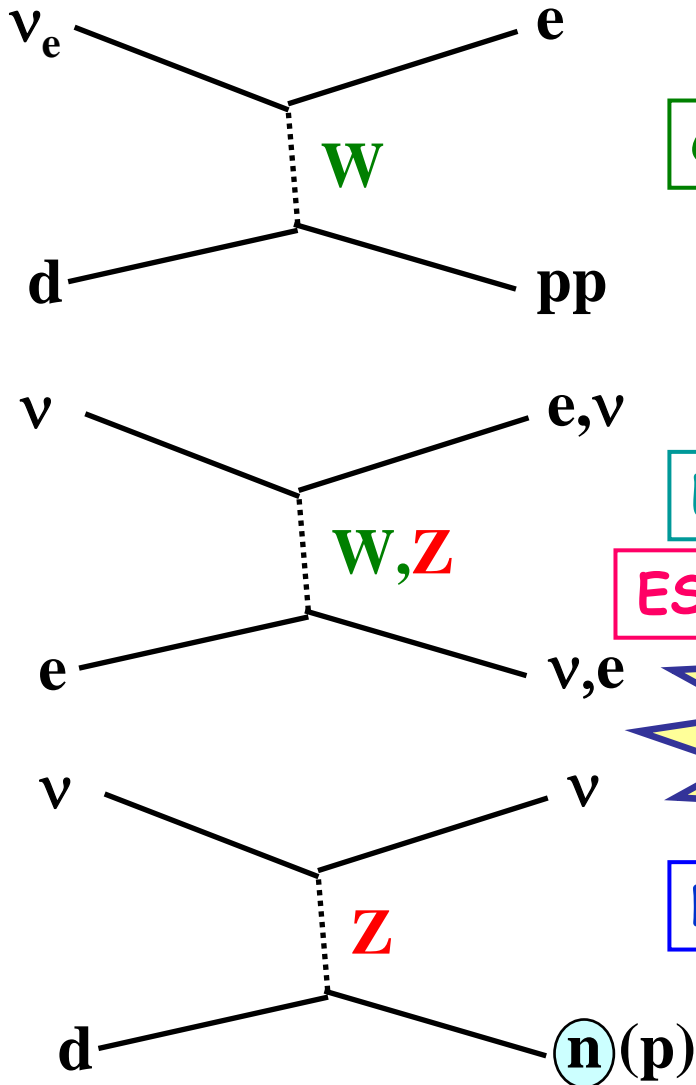


electron



Summary of SNO results

(update 2006) [units : $10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]



CC : 1.76 ± 0.11

CC : 1.68 ± 0.10

ES : 2.35 ± 0.27

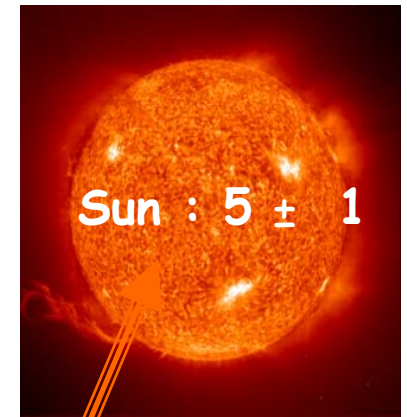
ES : 2.39 ± 0.27

ES(SK) : 2.32 ± 0.08

Phase avec
du sel

NC : 5.09 ± 0.63

NC : 4.94 ± 0.43

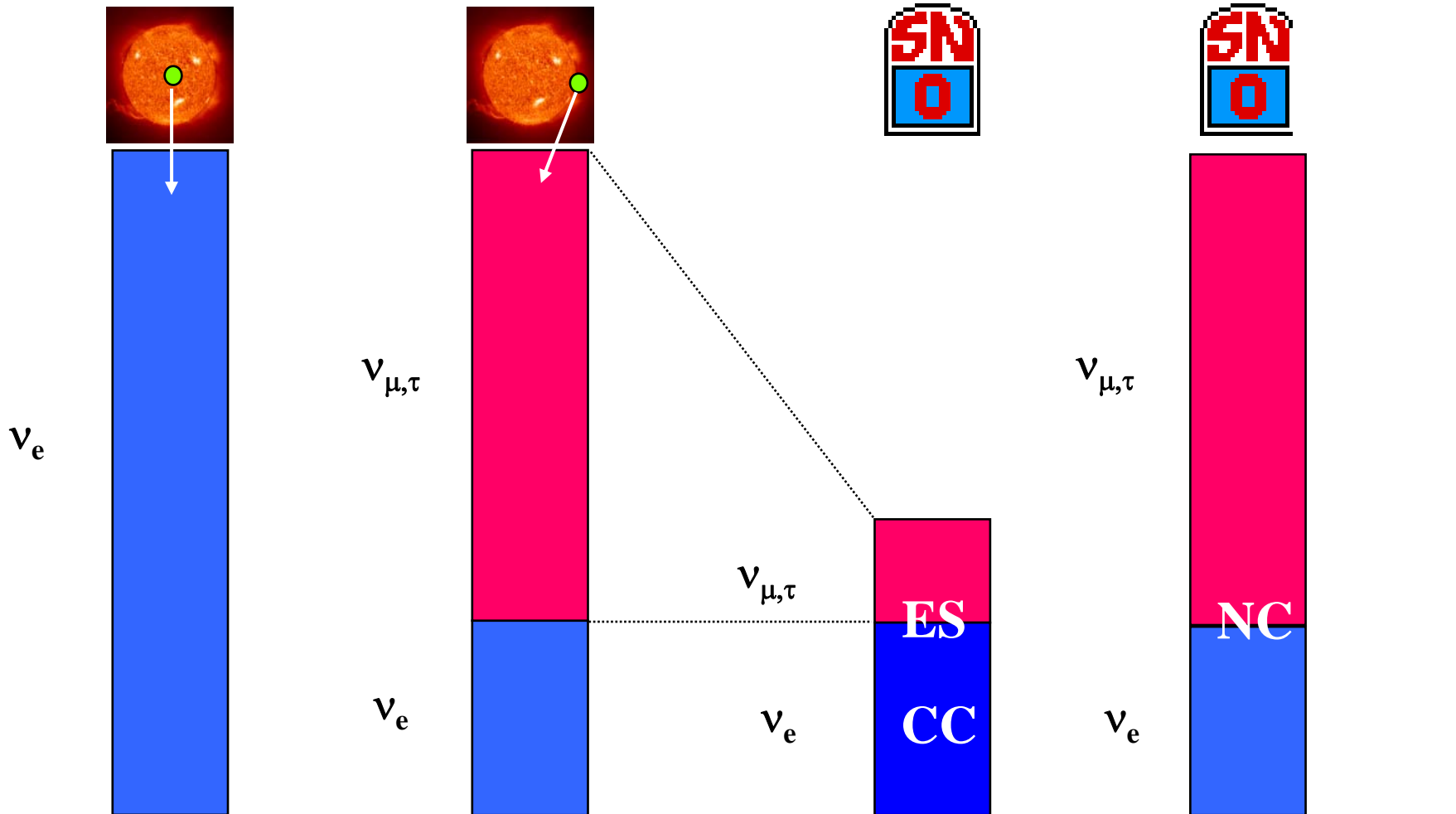


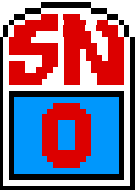
Sun : 5 ± 1

Pas d'oscillation :
Flux total =
ES = CC = NC

Oscillation
Flux total =
CC + (ES - CC)*6
= NC

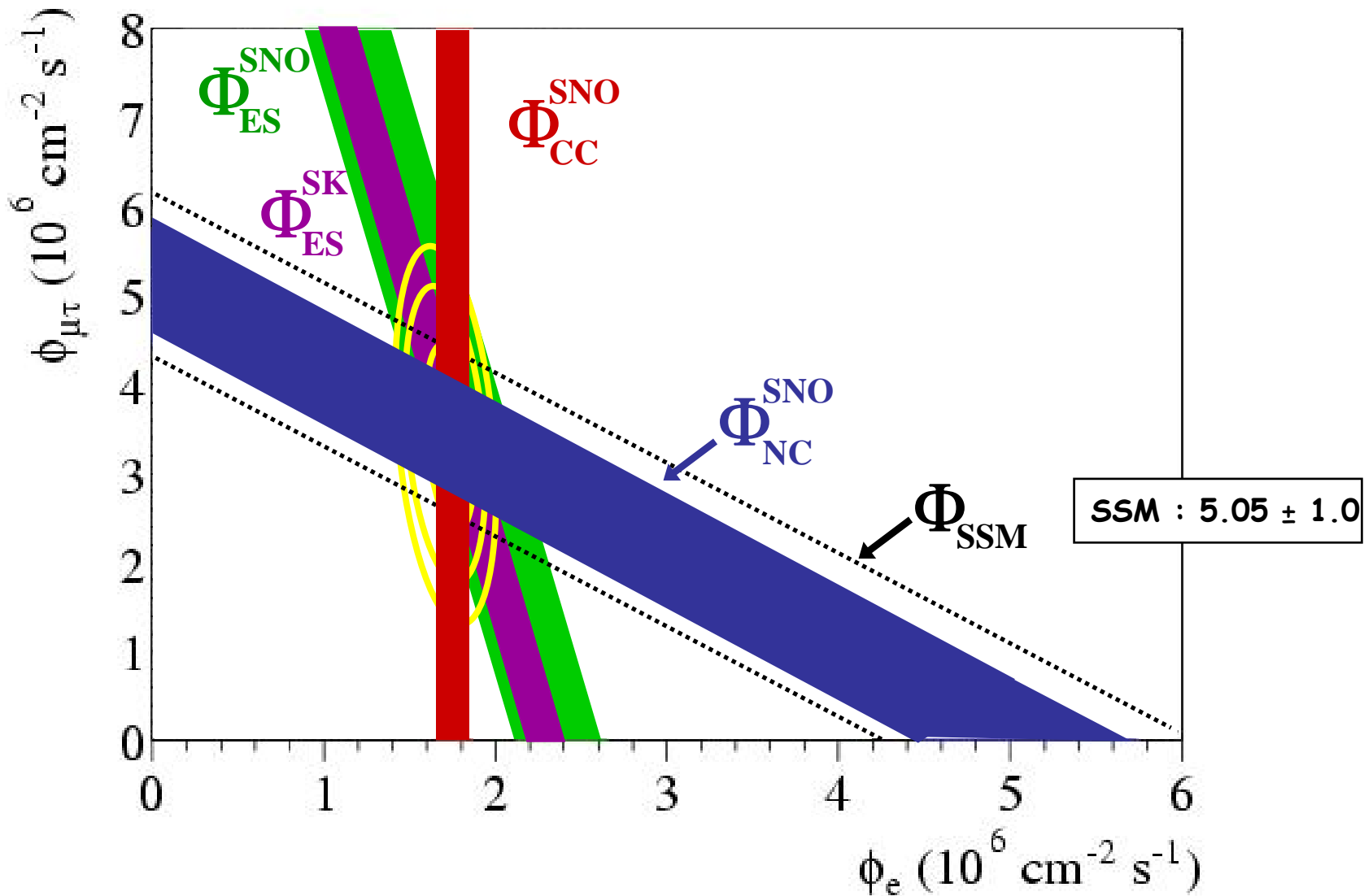
Summary of SNO results





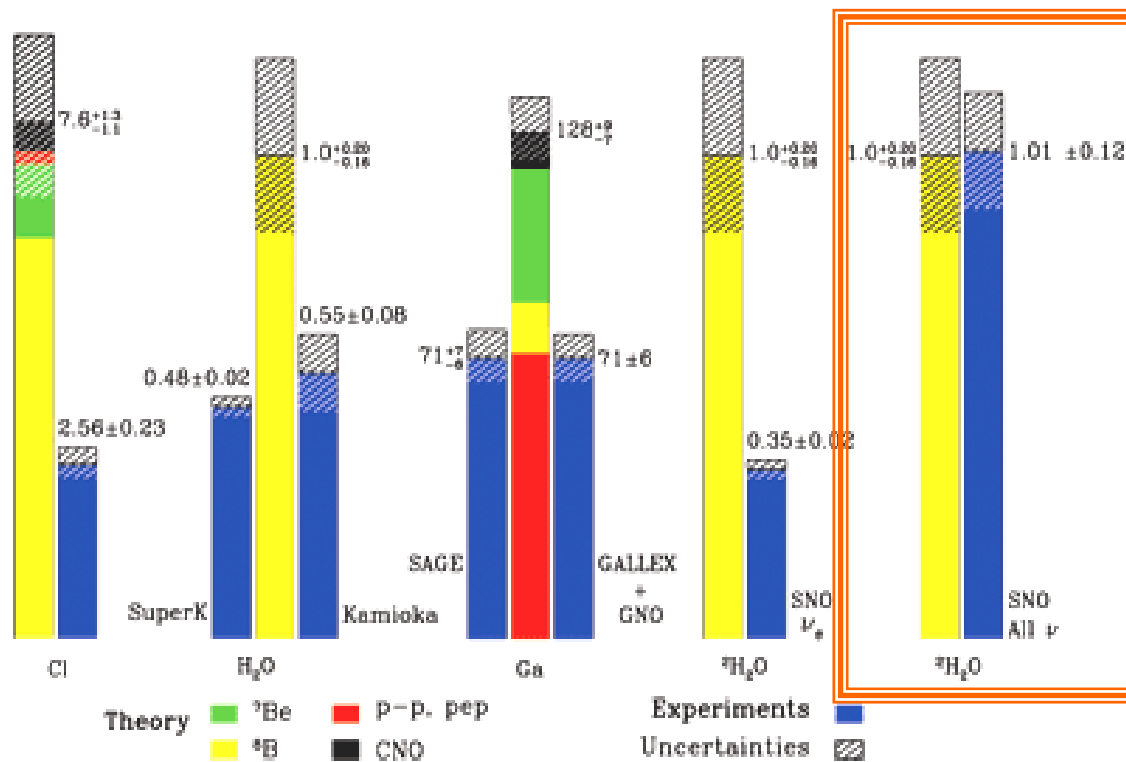
$$\Phi_e = (1.76 \pm 0.11) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi_{\mu,\tau} = (3.41 \pm 0.66) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



Résultats expérimentaux après SNO

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



Comment interpréter tout ça ?

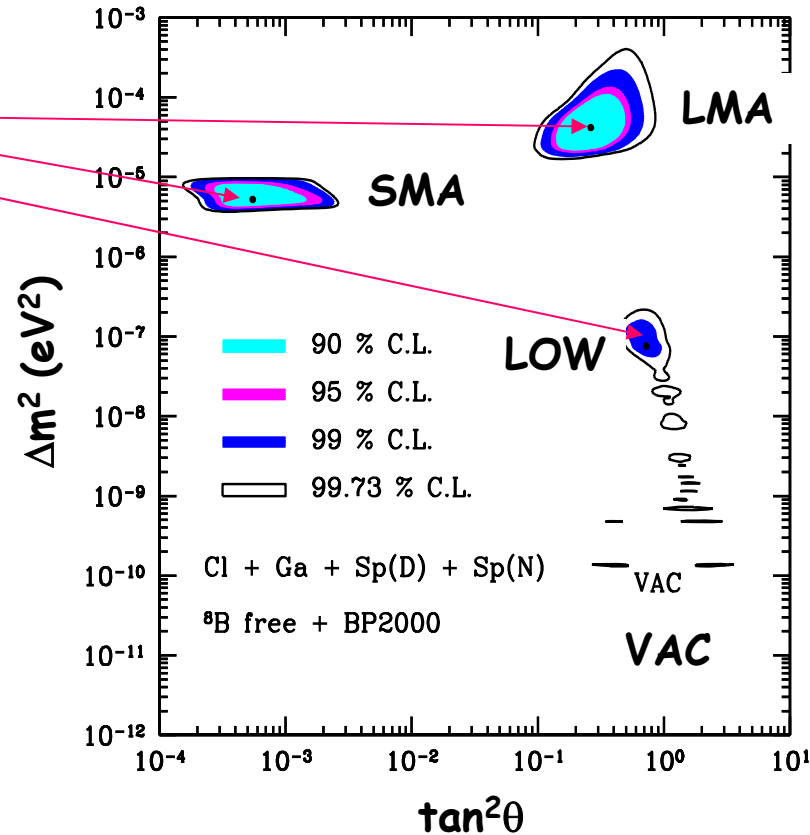
- ① Les réactions nucléaires dans le Soleil ne produisent que des ν_e
- ② Les détecteurs de neutrinos solaires étaient (jusqu'à SNO) sensibles seulement (ou principalement) aux ν_e

→ SNO a montré que les ν_e ont été (partiellement) transformés en ν_μ ou ν_τ et le mécanisme d'oscillation explique le déficit observé.

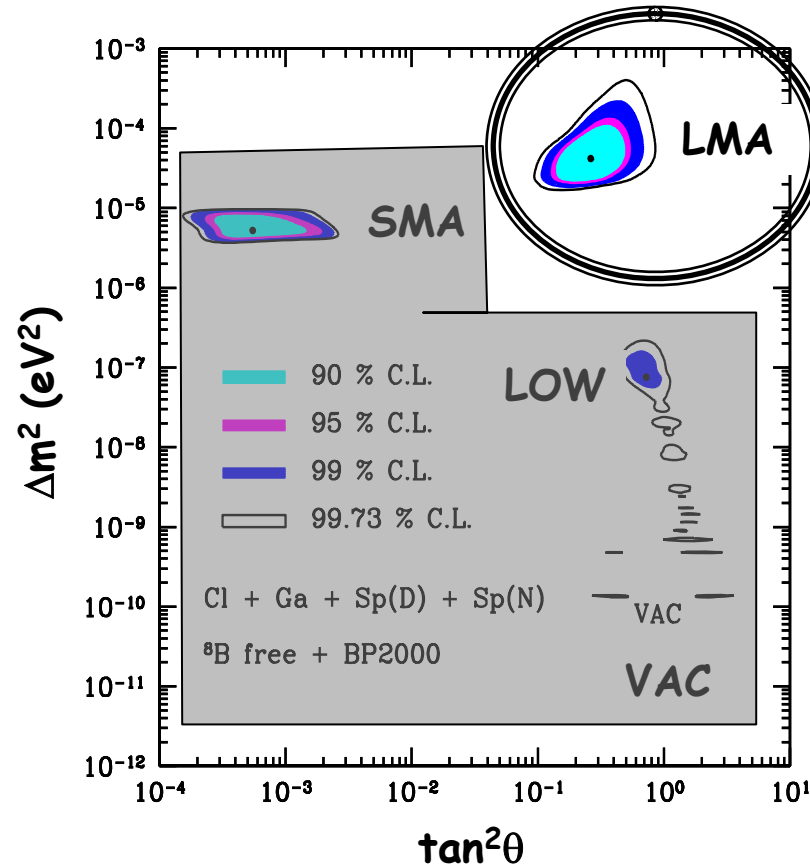
- ⊗ Pour obtenir les paramètres de l'oscillation, on ajuste simultanément les réductions de flux de observées dans les expériences et les spectres.

Solutions MSW (avant SNO)

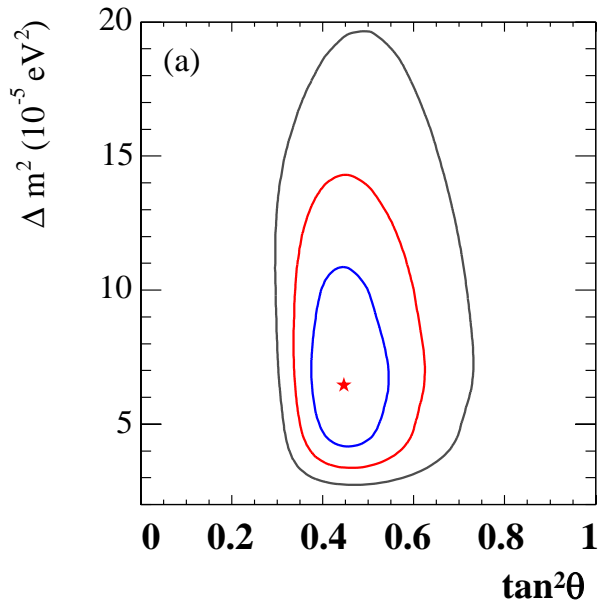
Possibles grâce
à l'effet MSW



Solutions MSW (après SNO)



Les neutrinos solaires et les paramètres d'oscillation



Le fit inclut les données solaires jusqu'en 2005 : précision sur l'angle θ_{12}

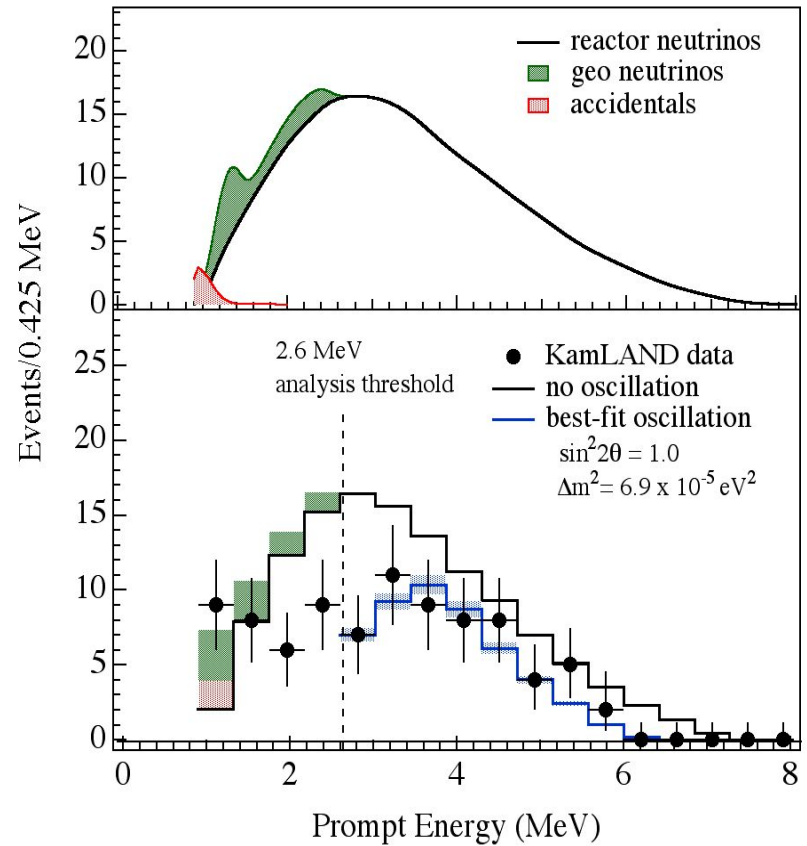
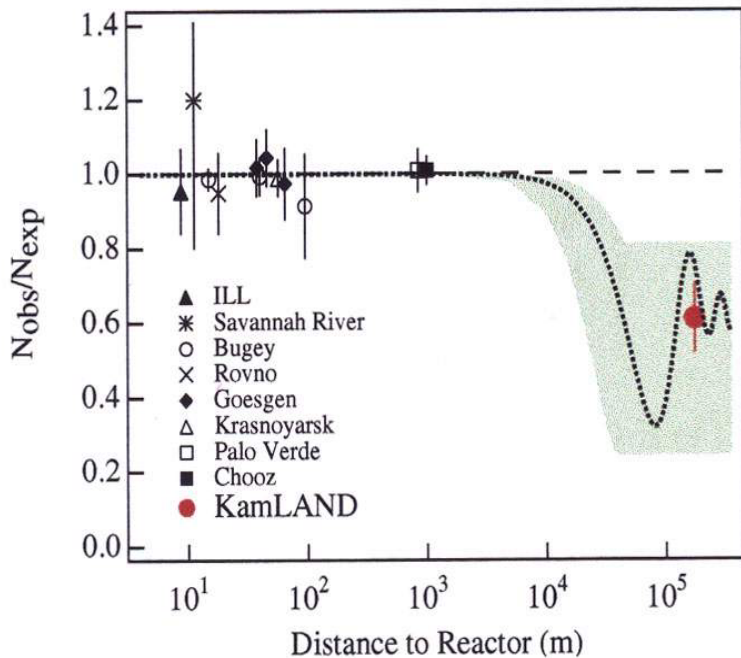


Kamland : décembre 2002

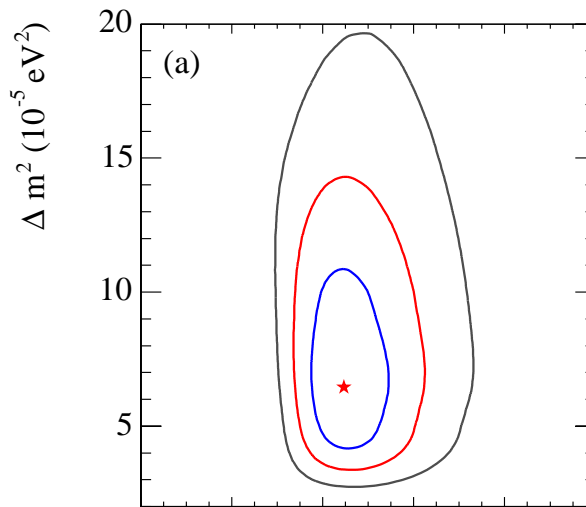
Observé : 54 événements

Attendu : 86.8 ± 5.6 événements

$(Obs - Bg) / Att = 0.611 \pm 0.085 \pm 0.041$



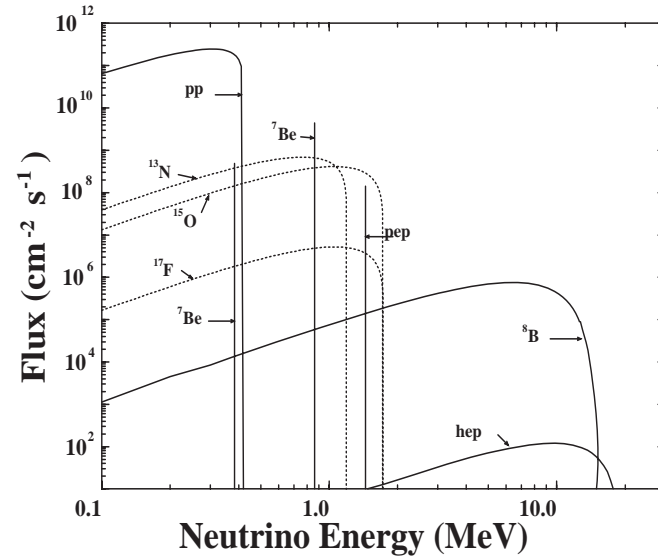
Les neutrinos solaires et les paramètres d'oscillation



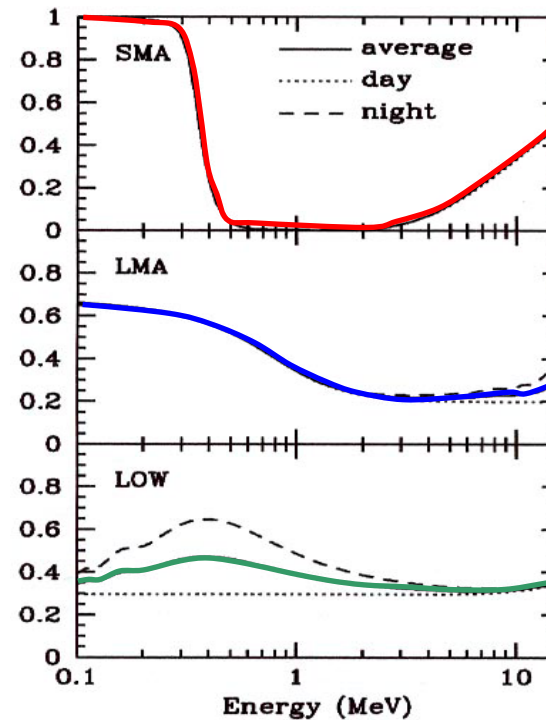
Le fit inclut les données solaires jusqu'en 2005 : précision sur l'angle θ_{12}

KamLAND - février 2008
10000 - 1500

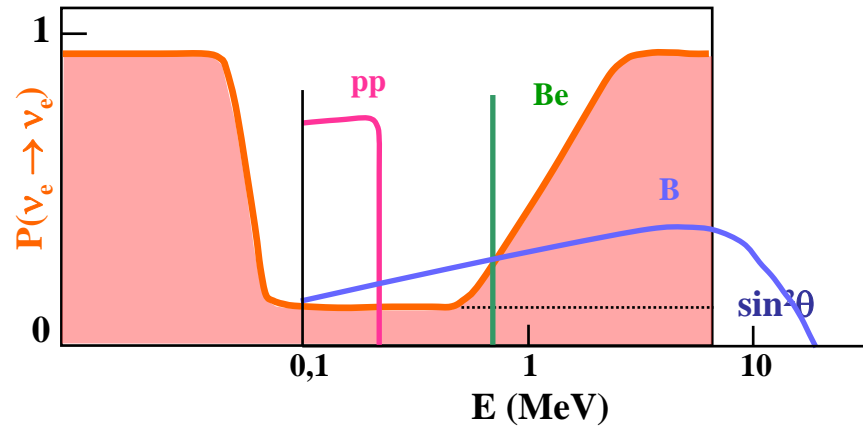
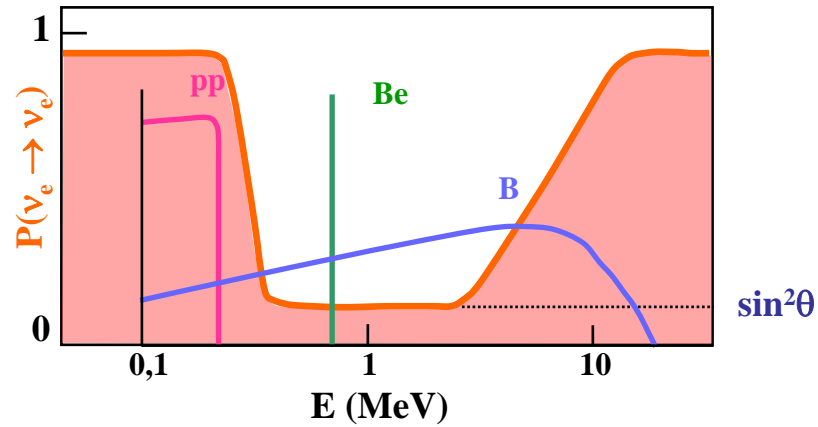
Comment le spectre des ν_e solaires est modifié par l'effet MSW ?



Survival probabilities with MSW effect



Effet MSW : le cas du Soleil (SMA)



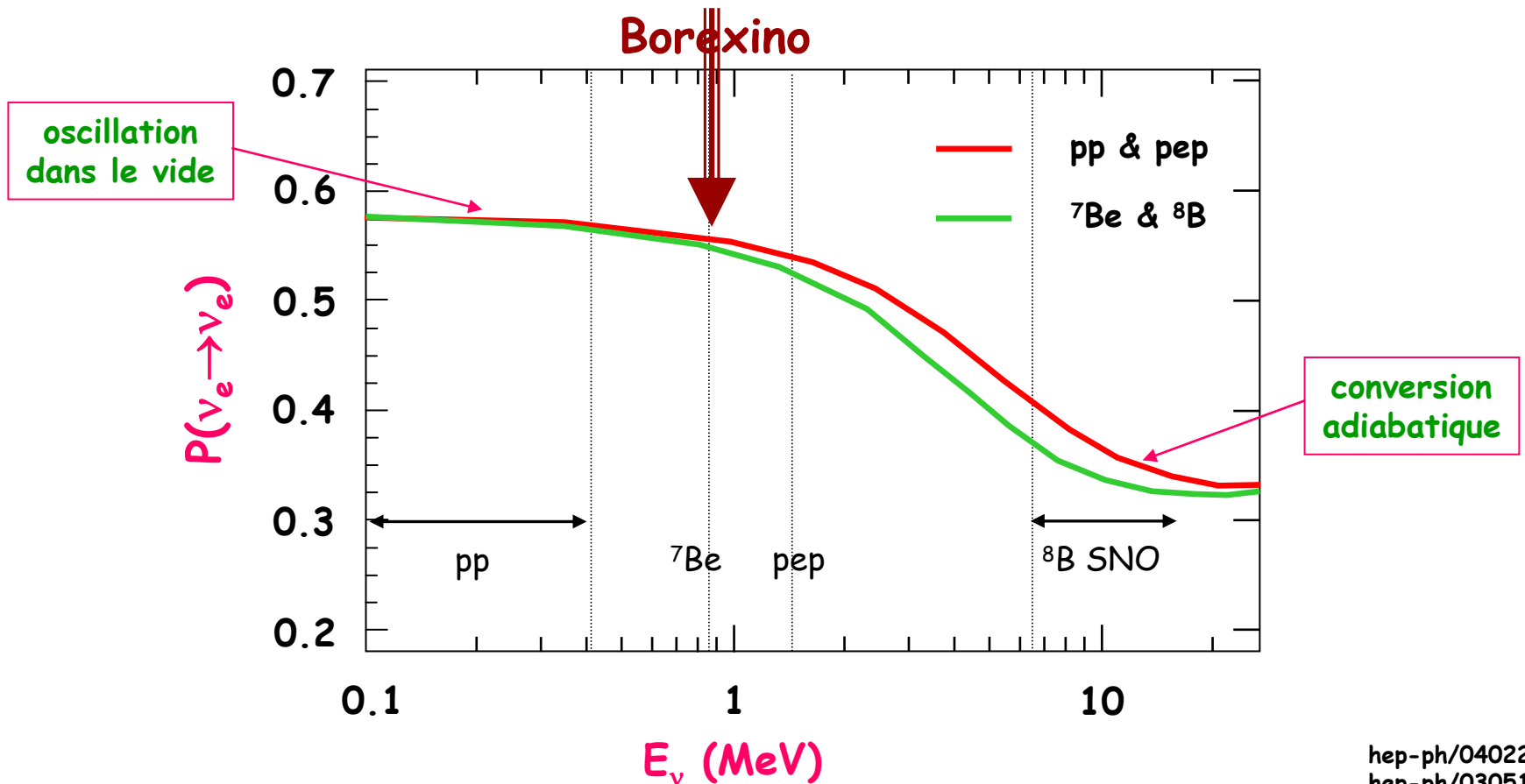
Effet MSW : le cas du Soleil (LMA)

Solution LMA (low mixing angle)

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.86$$

$$\Delta m^2 = 7.9 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

Borexino





Borexino
Les premiers résultats

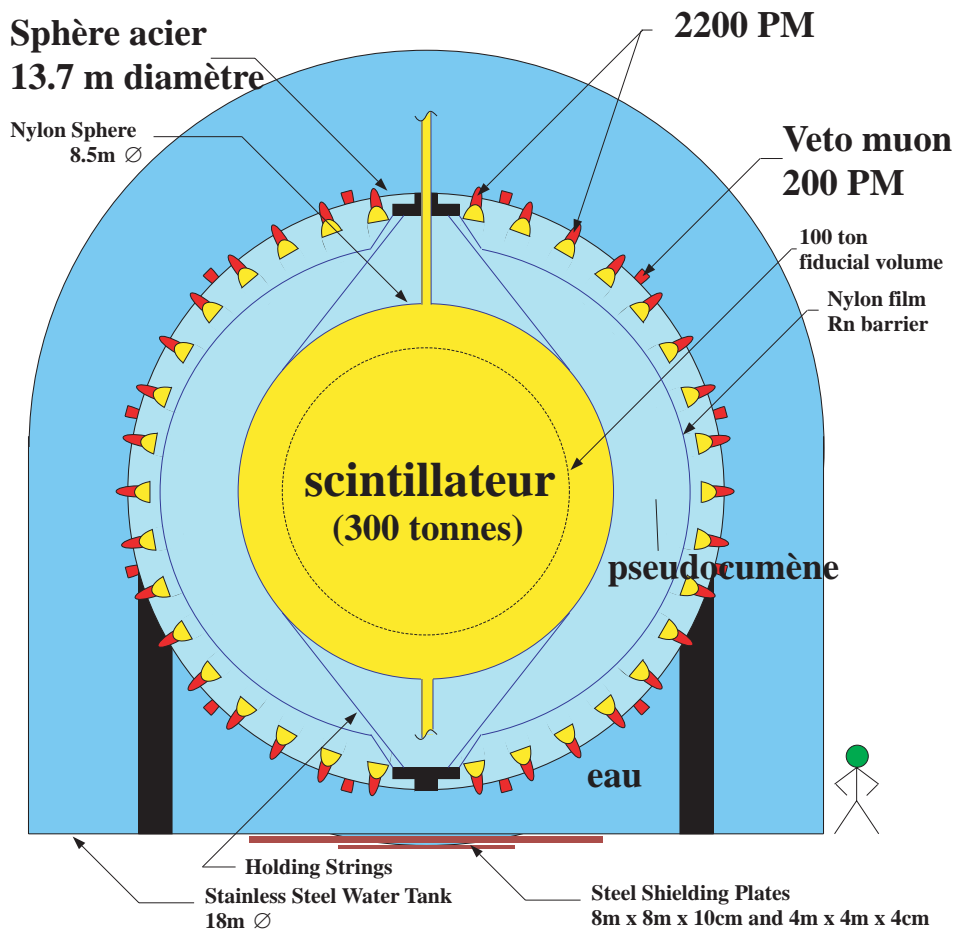
1. Quelques rappels sur le Soleil
2. Les neutrinos solaires en 2004
3. **Borexino**
4. Les premiers résultats
5. Le futur

Collaboration Borexino





Borexino



Diffusion élastique

$\nu_e \rightarrow \nu_e$

Objectif n° 1 : neutrinos du ${}^7\text{Be}$

Proposal :

60 événements / jour (sans oscillation)

10-40 (si oscillation)

Gran Sasso (Italie)

$5 \cdot 10^{-9}$ Bq/kg

1 verre d'eau : 10 Bq

Objectif :

Gagner 10 ordres de grandeur

Scintillateur



50 fois plus de lumière que Tcherenkov

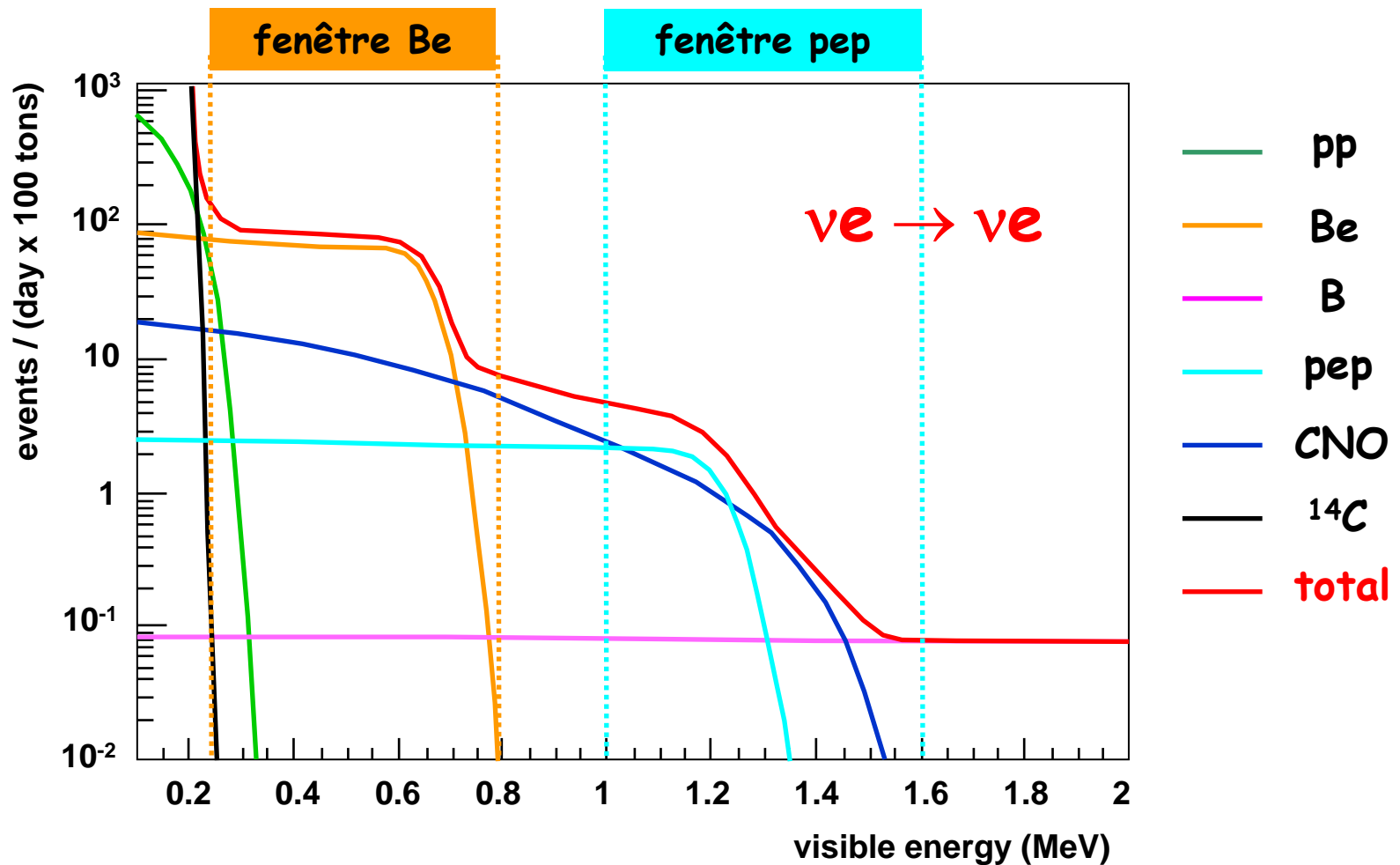


Pas de directionalité



Pas de distinction e^- Soleil et e^- radioactivité

Signal attendu dans Borexino (modèle standard + solution LMA)



Sphère acier
13.7 m diamètre

Nylon Sphere
8.5m Ø

2200 PM

Abruzzo, Italie
200 PMn est de Rome

100 ton
fiducial volume

Nylon film
Rn barrier

1000 m
roche

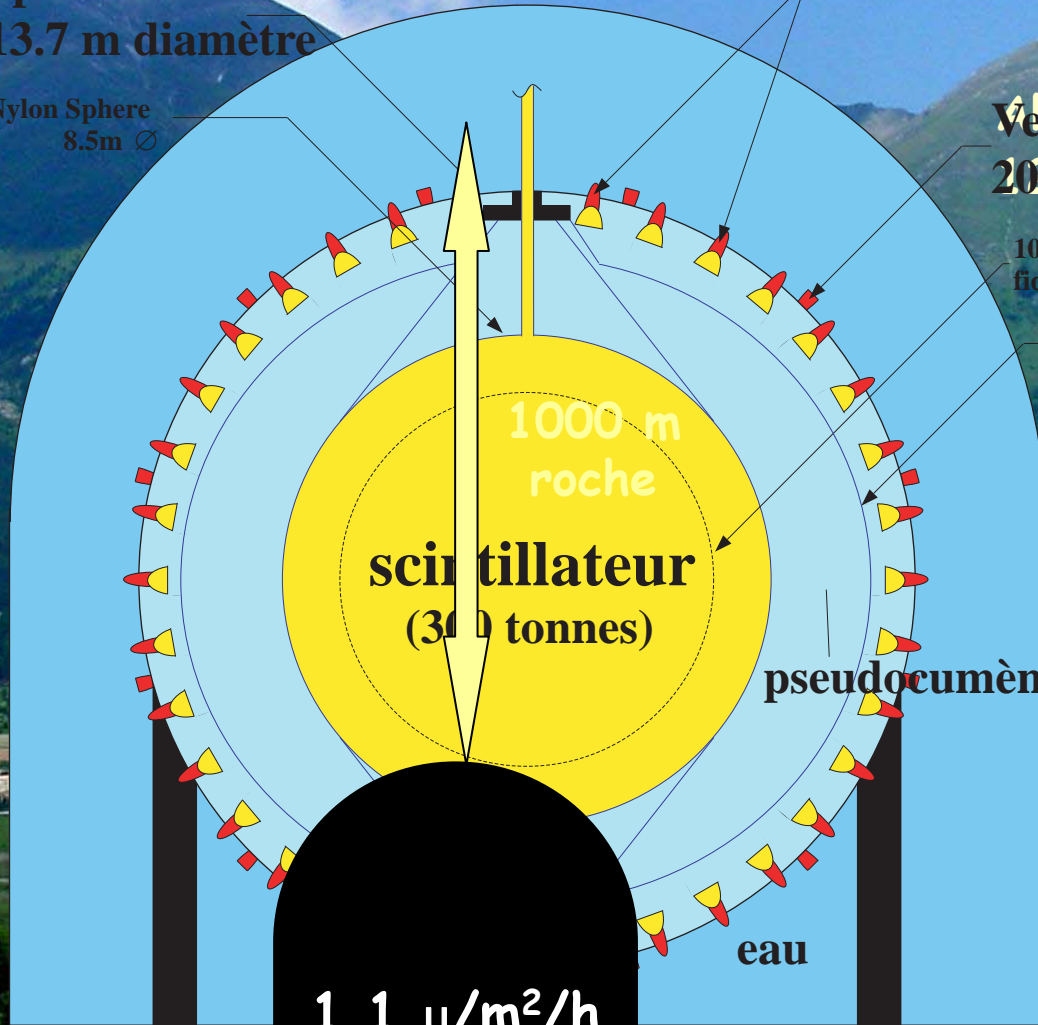
scintillateur
(300 tonnes)

pseudocumène

eau

$1.1 \mu/m^2/h$

Laboratori Nazionali del Gran Sasso



➤ Borexino est situé sous la montagne du Gran Sasso (3600 m équivalent eau)

Cible: 300 tonnes de liquide scintillant dans un nylon de 4,2 m de rayon

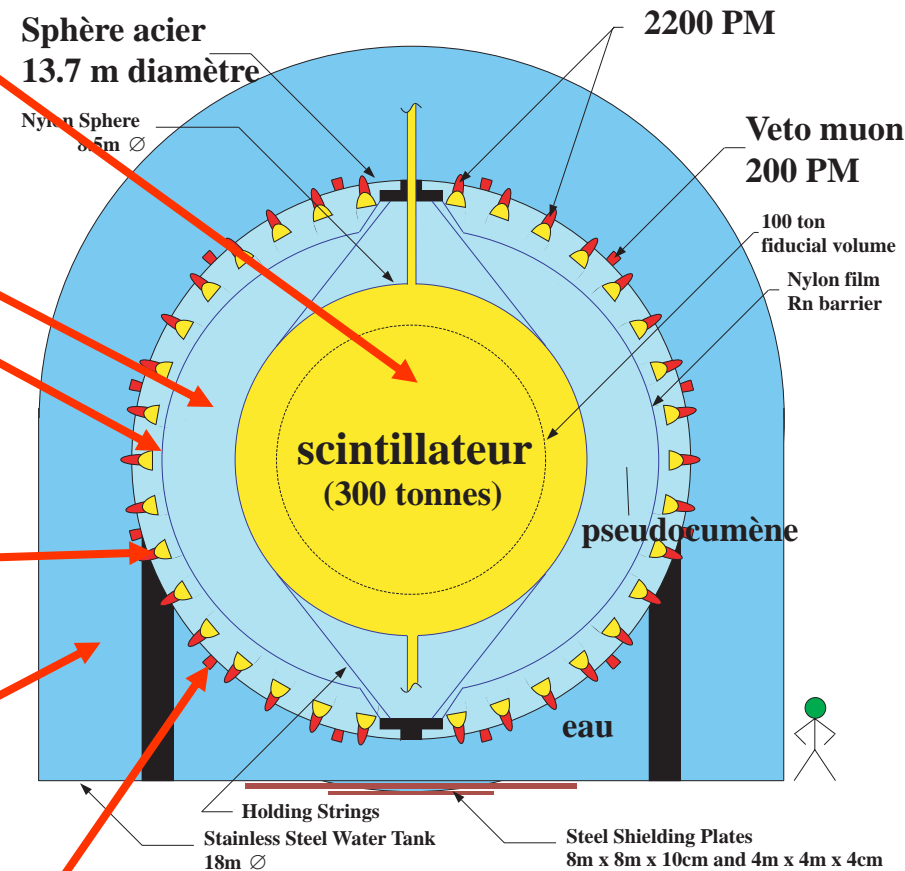
1^{er} blindage: 1000 tonnes de liquide non scintillant

2nd nylon (contre le radon)

2200 photomultiplicateurs regardant le centre

2nd blindage: 2400 tonnes d'eau

200 PMTs pour signer le passage d'un muon (veto)



Le détecteur en 3D

Scintillateur:

270 t PC+PPO
dans un voile de nylon
de 150 μm

Voiles de nylon :

Intérieur: $r=4.25$ m
Extérieur: $r=5.50$ m

Sphère en acier :

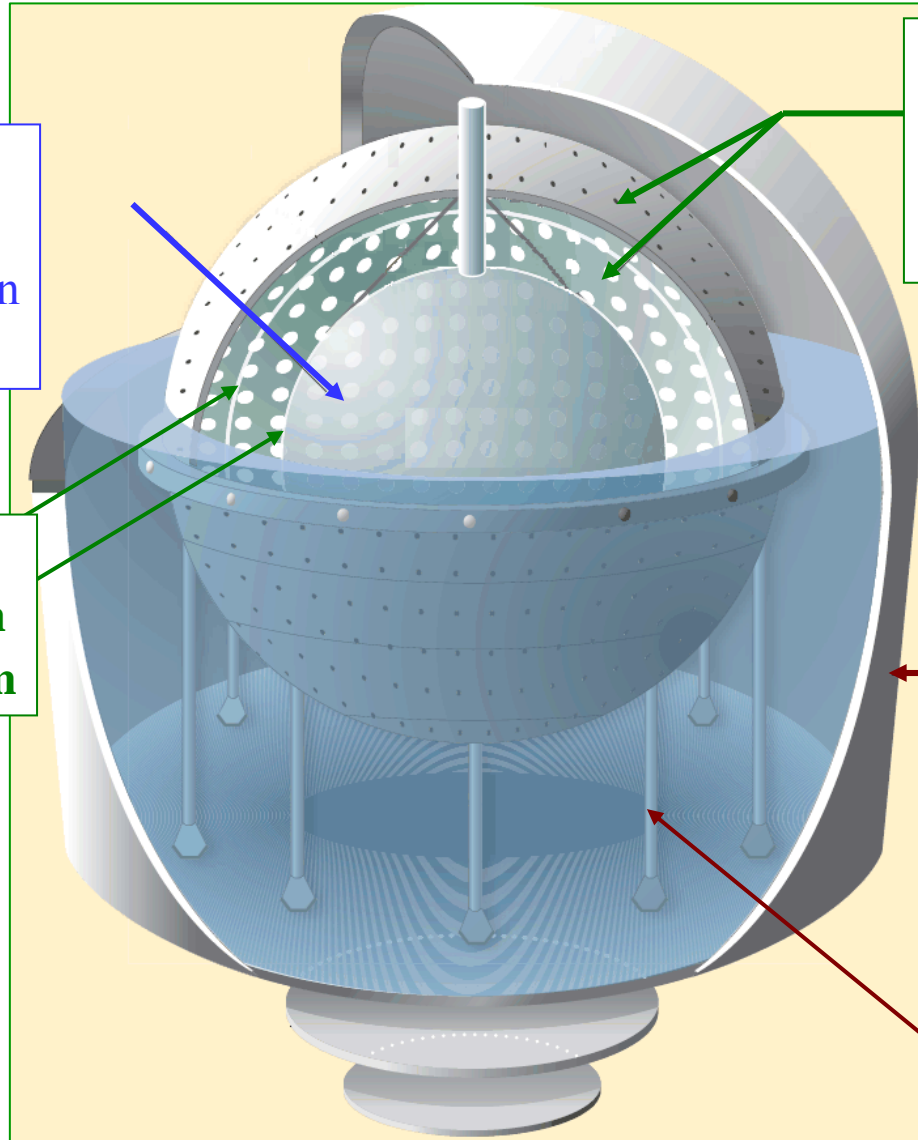
2212 PMTs (8" ETL)
 $r=6.85$ m
1350 m^3

Réservoir d'eau

(outer detector) :

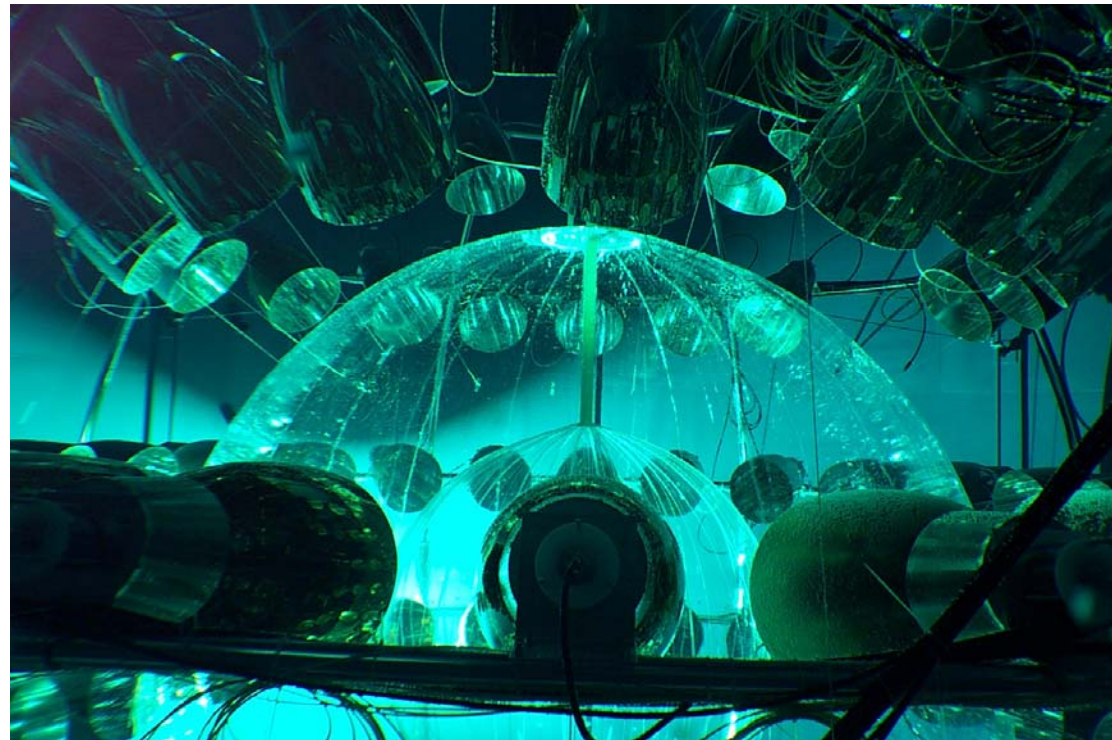
Blindage γ et n
Détection lumière Č
au passage des μ .
208 PMTs
 $r=9$ m
 $h=16.9$ m
2100 m^3

20 'jambes'



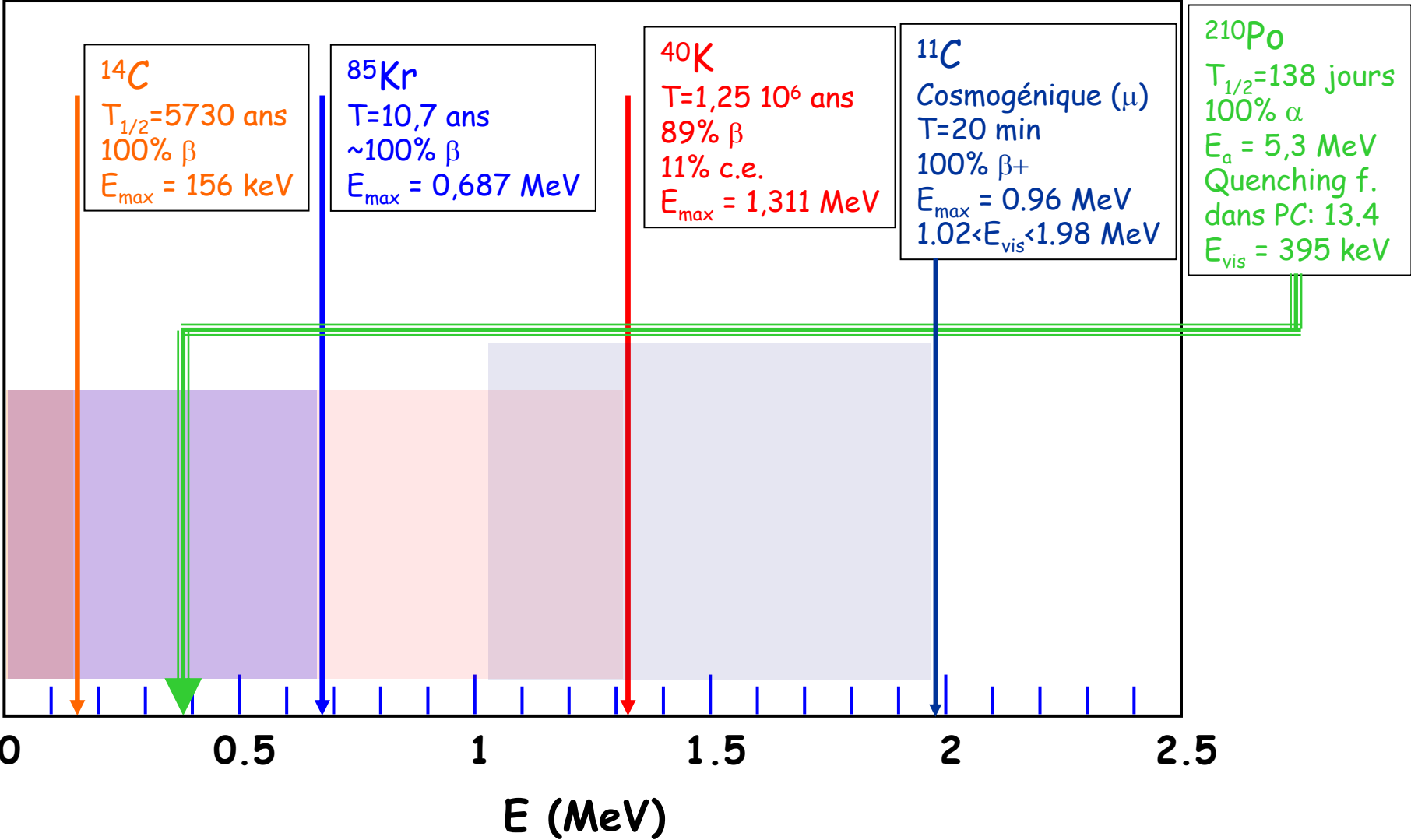
Ennemi n°1 : radioactivité

- Le défi majeur est la réduction de la radioactivité naturelle
- But (utopique lors du proposal en 1992):
 $\leq 10^{-16} \text{g/g}$: Th, U equiv.
 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \approx 10^{-18}$.
- Idée : construire un prototype le "Counting Test Facility" (CTF) pour tester les méthodes de purification jusqu'à $5 \cdot 10^{-16} \text{g/g}$ U,Th equiv.
- Le CTF a fonctionné de 1996 à 2002

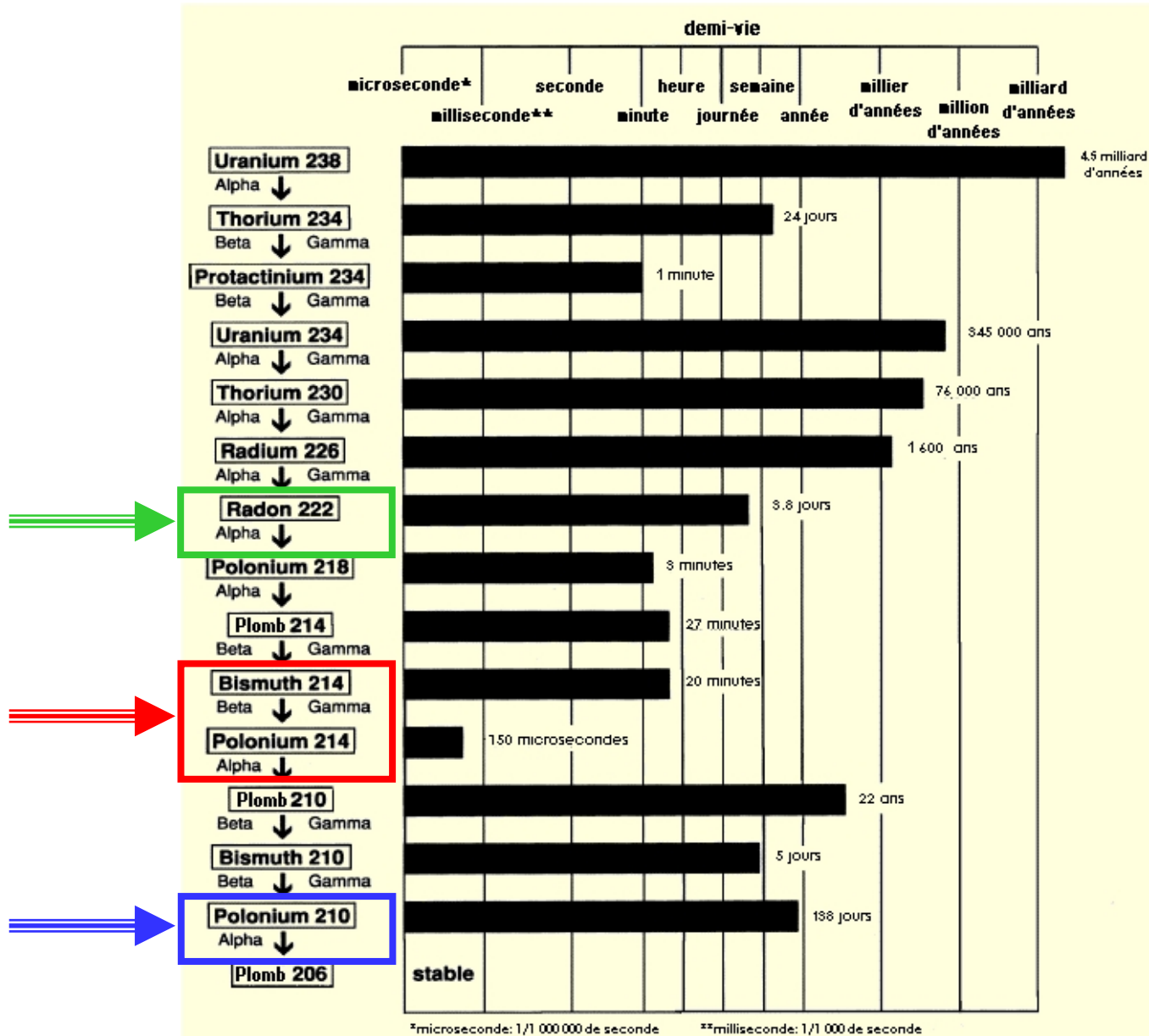


Les ennemis sont nombreux !

Zone d'intérêt pour le signal



Exemple : chaîne de l' ^{238}U



Un cahier des charges rigoureux pour la propreté et la purification

Scintillateur

- Volume central : PC + PPO (1.5 g/l) (longueur d'atténuation : ~ 7m)
- Volume extérieur et buffer : PC + DMP (5 g/l)
- ① PC : contrôle de la production et du transport, water extraction (eau ultra pure : U/Th equivalent: 10^{-14} g/g, $^{222}\text{Rn} < 1$ mBq/m³, $^{226}\text{Ra} < 0.8$ mBq/m³), distillation (80 mbar, 90°C), N₂ stripping avec de l'azote ultra-pur (low Ar-Kr : 0.005 ppm Ar, 0.06 ppt Kr, <0.1 mBq/m³ de Rn).
- ② PPO : purifié à part (master solution, puis purification)

Sélection des composants, surfaces électropolies et passivées, nettoyage (acide, eau ultrapure). Contrôle Rn dans le hall 40-120 Bq/m³.

Toutes les opérations en salle propre: classes 10,100,1000; le détecteur lui-même est maintenu salle propre de classe 10000

Voile de nylon : effort spécifique (fabrication, transport, stockage, déploiement)

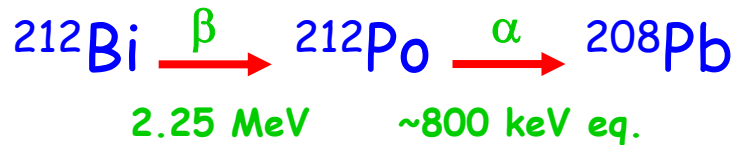
Bruits de fond (1)

➤ ^{14}C : $2.7 \pm 0.6 \cdot 10^{-18}$ $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$

➤ Chaîne ^{232}Th : étude via les descendants du ^{220}Rn (thoron)

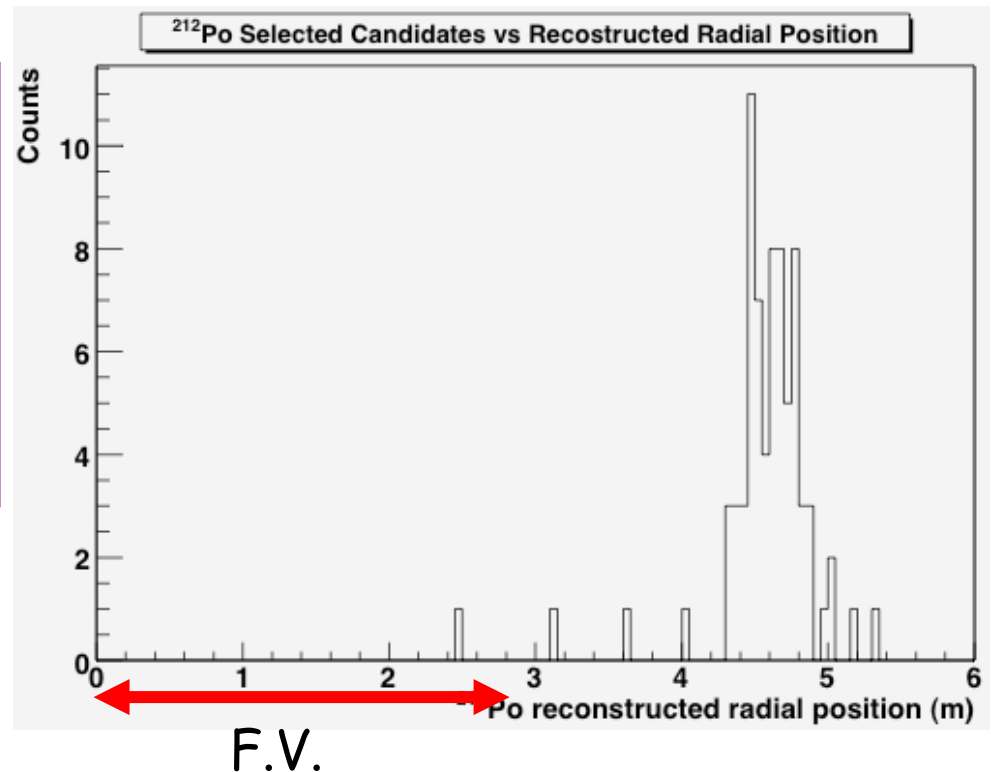
$^{212}\text{Bi}-^{212}\text{Po}$

coinc. retardée ($\tau=432.8$ ns)



Efficacité : 93%

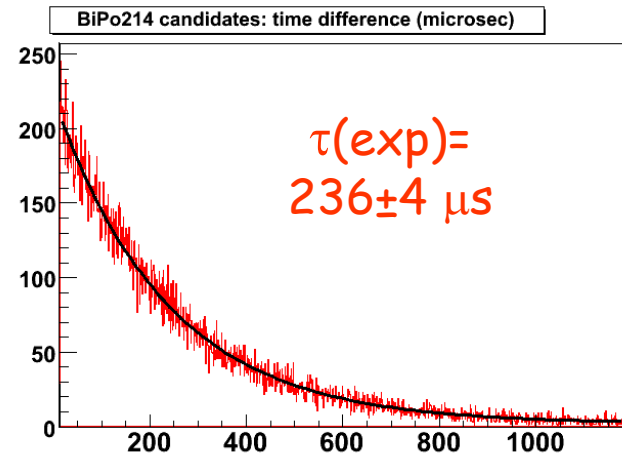
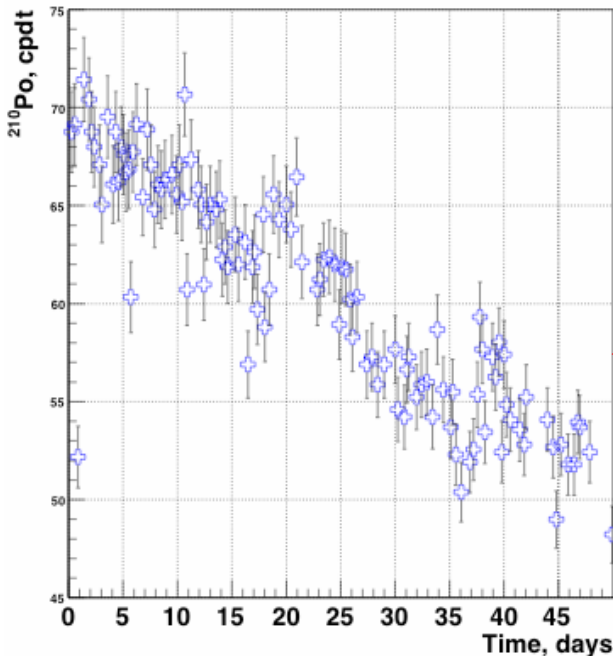
⇒ $2,4 \cdot 10^{-18}$ g/g
 ^{232}Th equivalent



Bruits de fond (2)

- ^{238}U - étude via les descendants du ^{222}Rn : ^{214}Bi - ^{214}Po
coïnc. retardée ($\tau=236 \mu\text{s}$) : β (3.2 MeV) + α ($\sim 750 \text{ keV eq.}$)
Taux < 2 ev./jour/100 tonnes. Efficacité: 99.3%

⇒ $< 2 \cdot 10^{-17} \text{ g/g}$
 ^{238}U équivalent

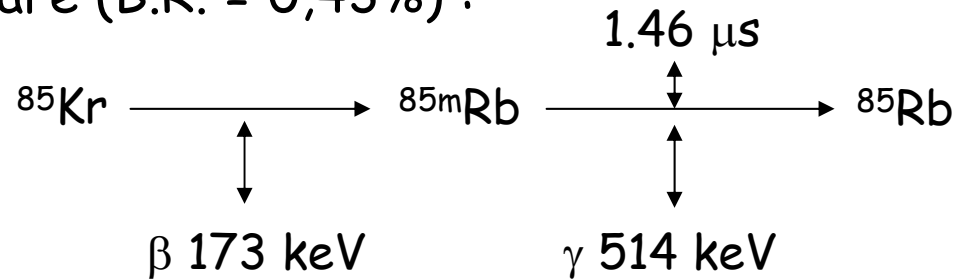


- ^{210}Po - fils du ^{222}Rn ($\approx 60 \text{ ev.}$ /jour/t) sans évidence de ^{210}Bi
- désintégration $\tau \approx 200$ jours
- contrôlé par Pulse Shape Discrimination (α/β)

Bruits de fond (3)

➤ ^{85}Kr

- ❖ β avec un endpoint voisin du recul de l'électron du ^7Be
- ❖ il existe une branche rare (B.R. = 0,43%) :



2 candidats dans la cible en 47,4 jours

⇒ limite supérieure : 35 ev./jour/100 tonnes (90% c.l.)

Plus de statistique nécessaire. En attendant, paramètre libre dans le fit.

➤ ^{210}Bi

Pas d'évidence directe ⇒ paramètre libre dans le fit

On ne peut, dans la zone du fit, le séparer du CNO

Picture gallery (I)

PMT sealing: PC & water proof



2000

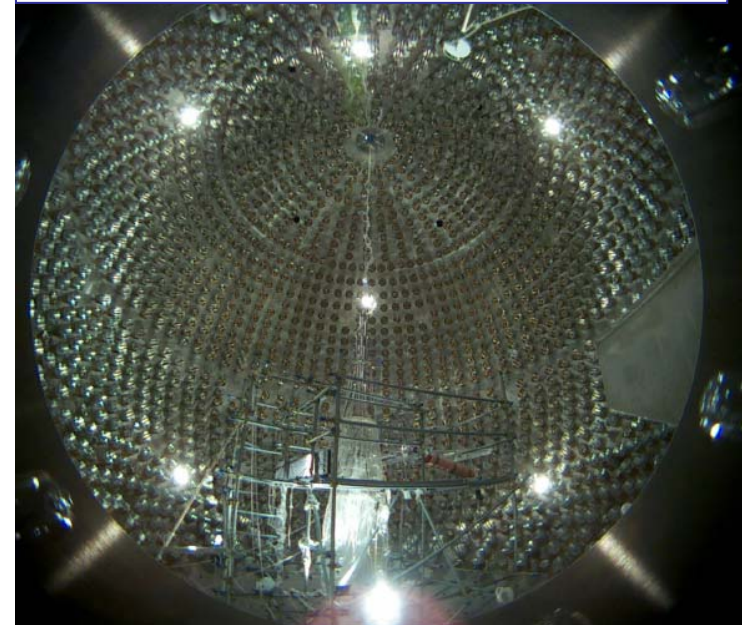
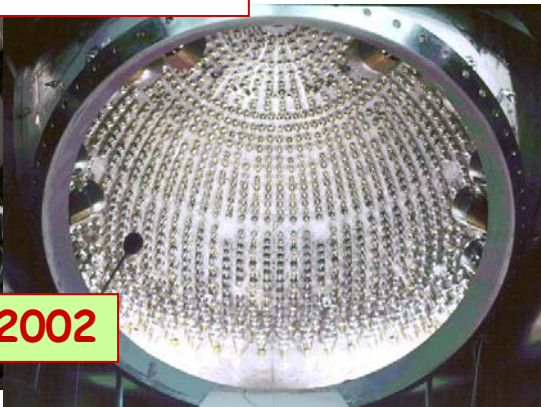


Nylon vessels installation (2004)

PMT installation in SSS



2002



Picture gallery (II)

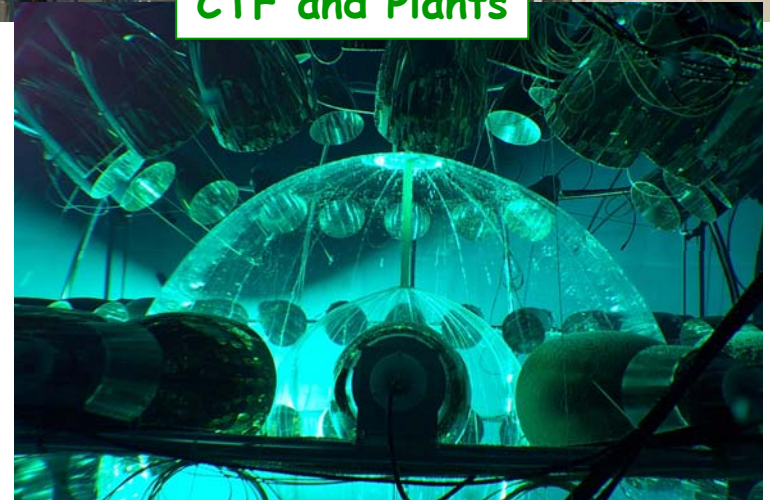
Water Plant



Storage area and Plants

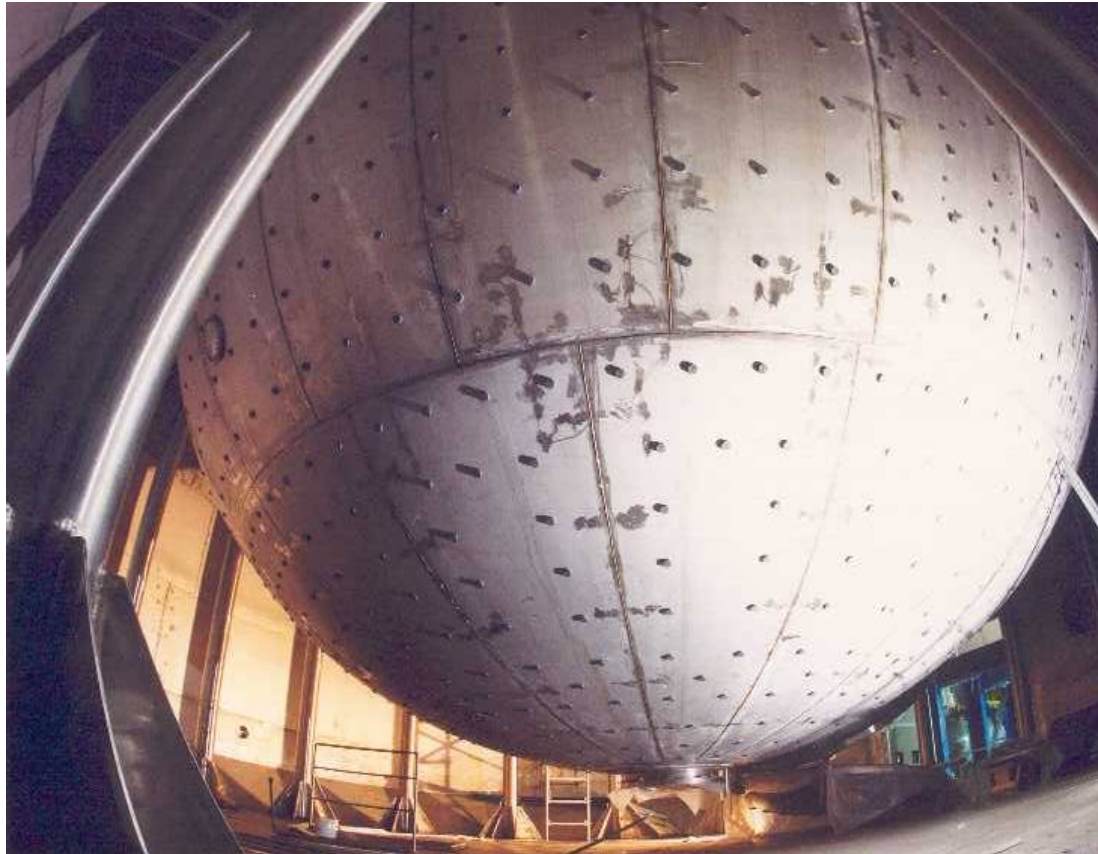


CTF and Plants

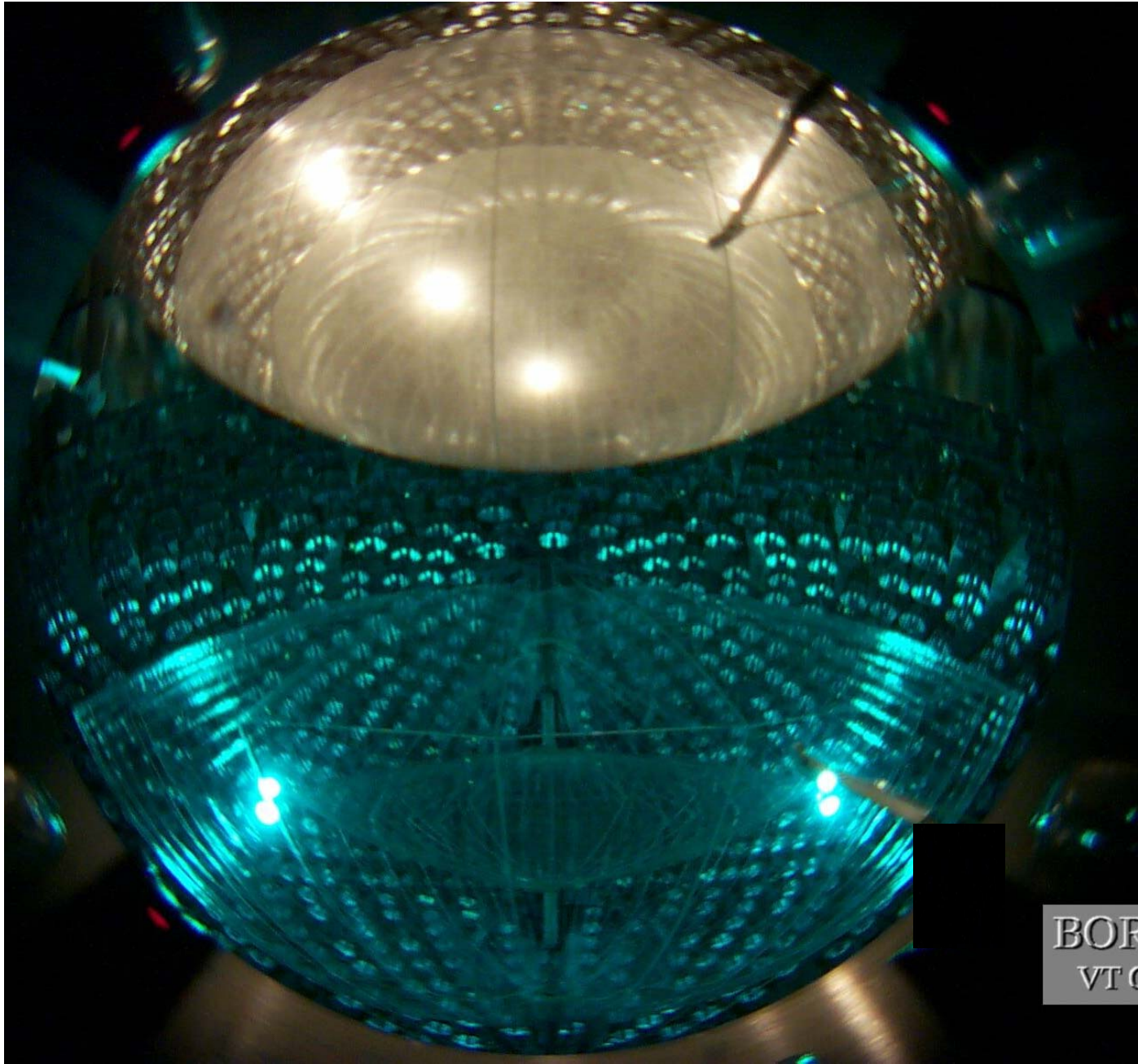


Picture gallery (III)

Sphère en acier vue de l'intérieur du "water tank"



Remplissage en eau (octobre 2006)



BOF
VTC

Remplissage en scintillateur

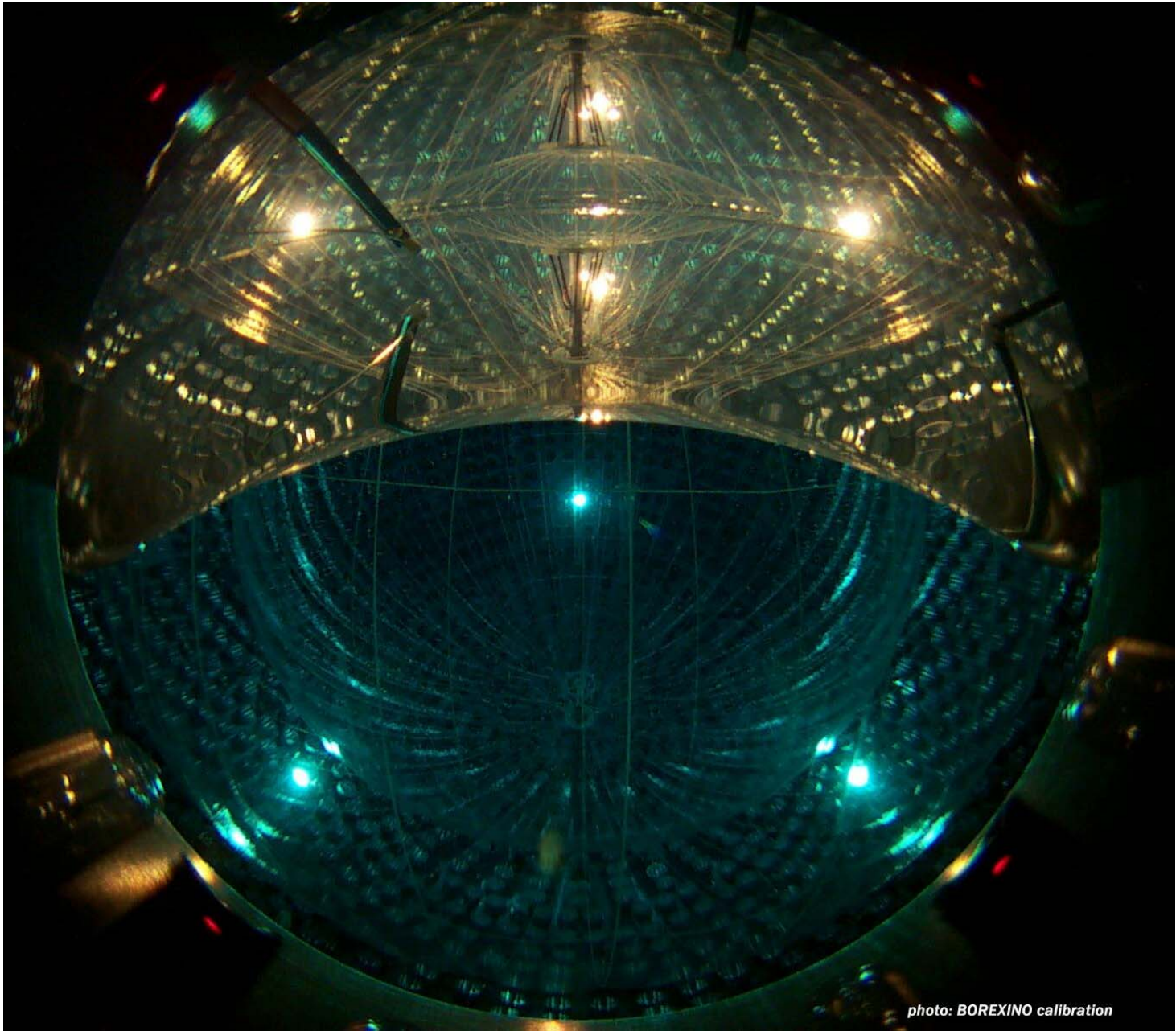
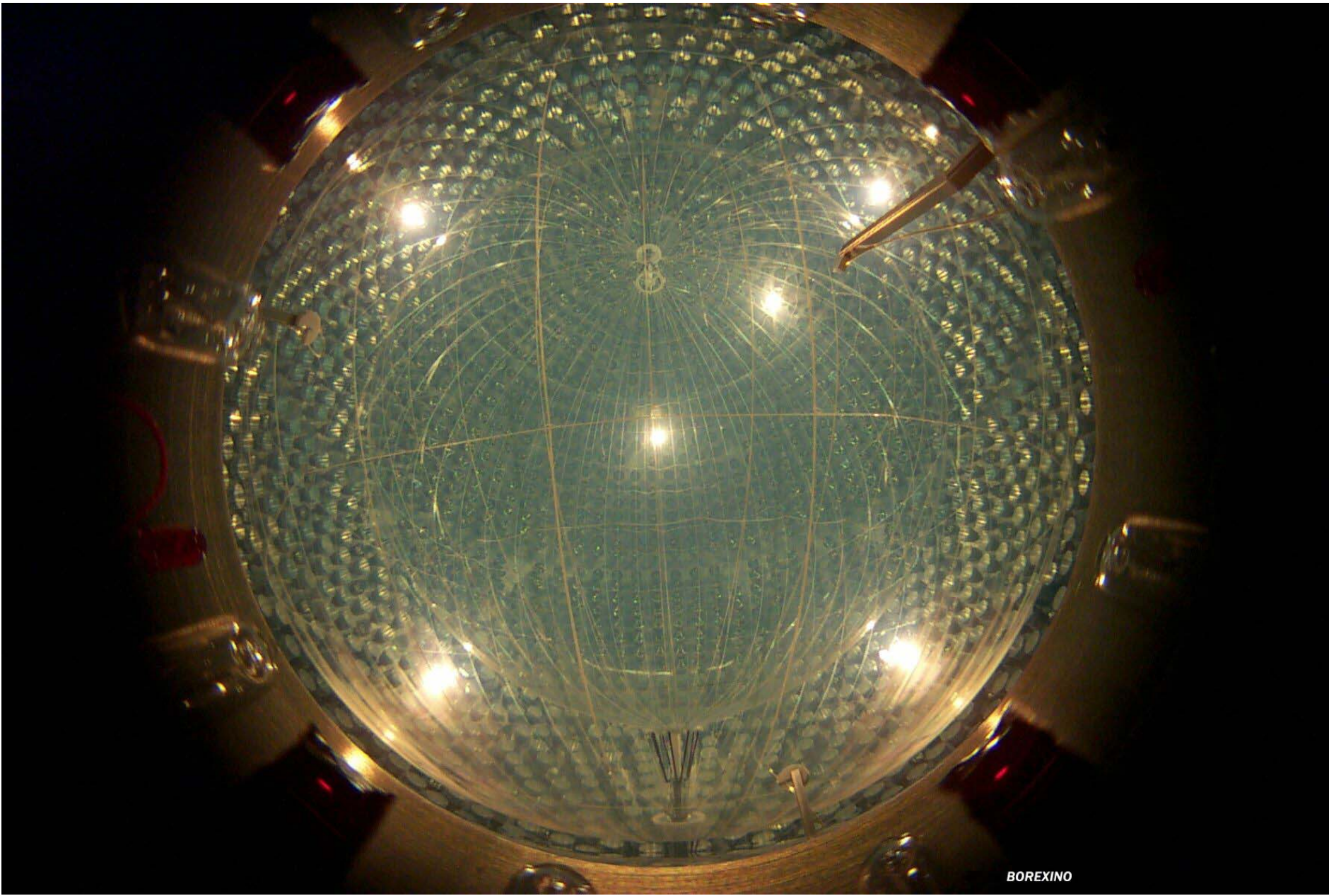
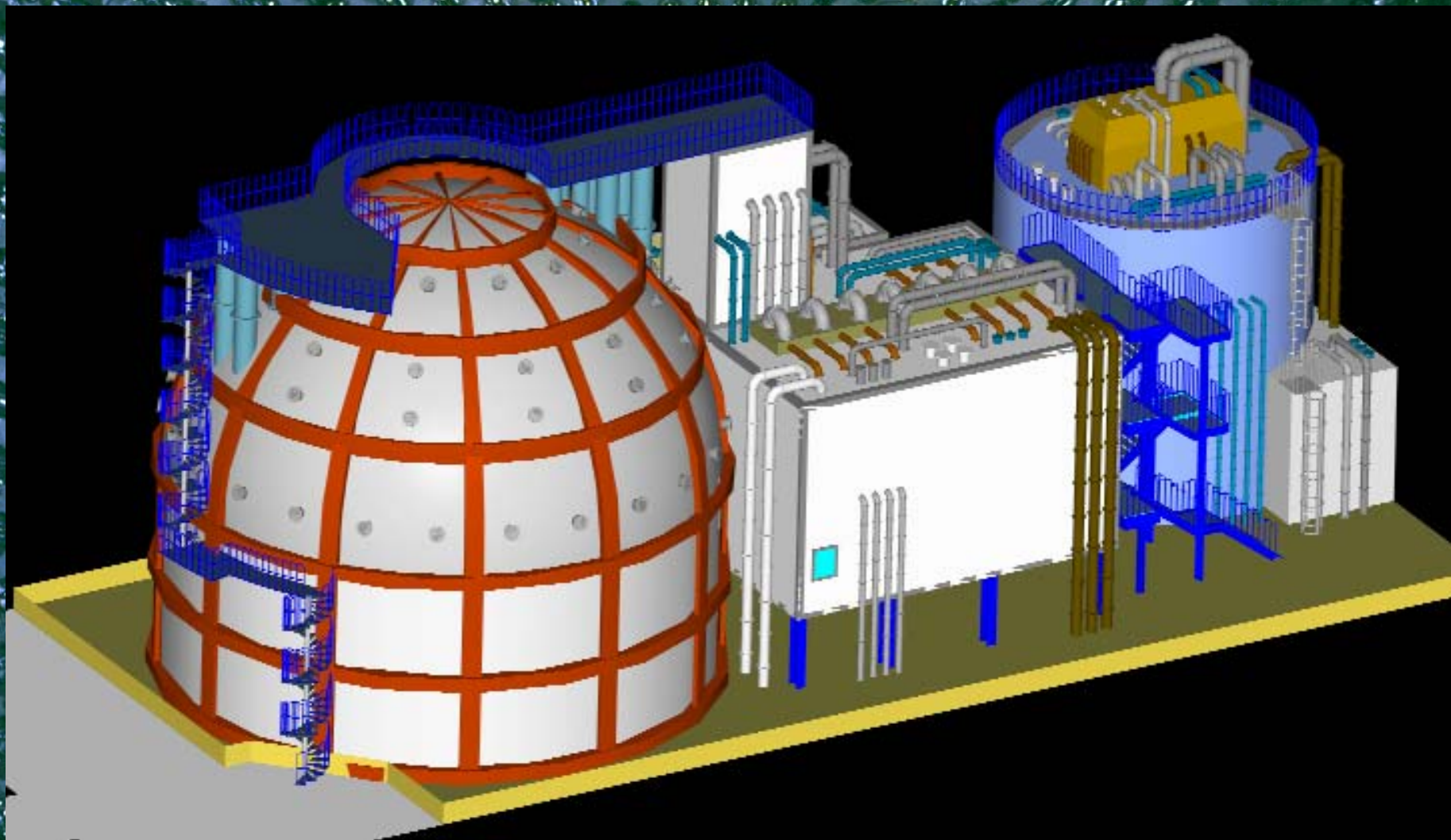


photo: BOREXINO calibration

Détecteur rempli de scintillateur (avril 2007)







Borexino
Les premiers résultats

1. Quelques rappels sur le Soleil
2. Les neutrinos solaires en 2004
3. Borexino
4. **Les premiers résultats**
5. Le futur

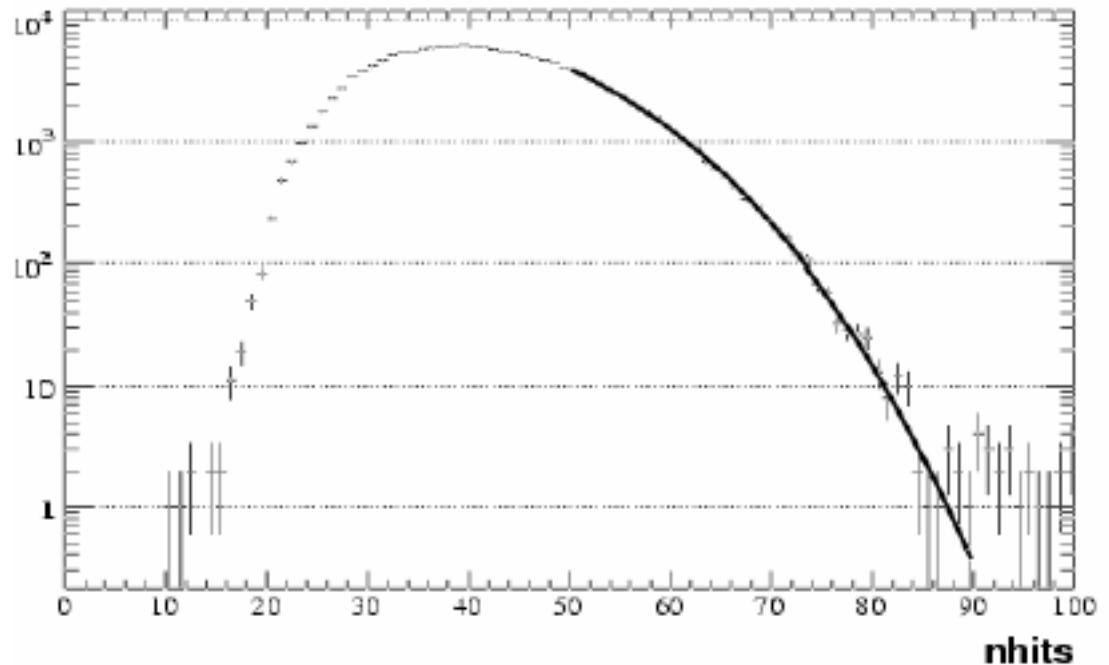
Les premières données



2002-2007 :
La traversée du désert

Le signal lumineux

La quantité de lumière (light yield) évaluée en fittant le spectre du ^{14}C (endpoint = 156 keV) et comme paramètre libre dans le fit global du spectre.



$LY \approx 500 \text{ p.e./MeV}$

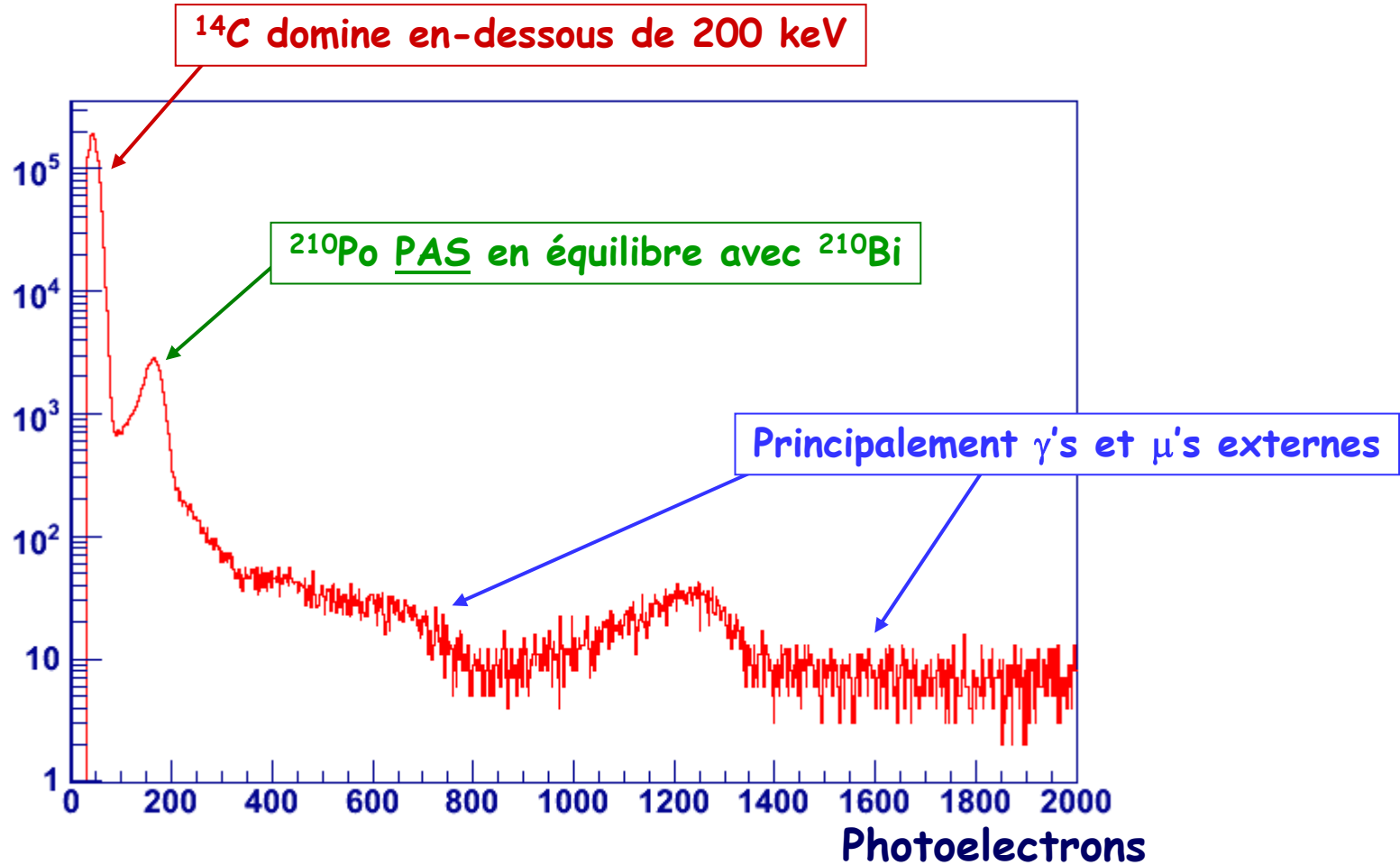
⌘ résolution spatiale: 16 cm @ 500 keV
(scaling $N_{p.e.}^{-1/2}$)

⌘ résolution en énergie: 10% @ 200 keV
8% @ 400 keV
6% @ 1 MeV

Acquisition

- Trigger si ≥ 30 PMTs (au moins 1 p.e. chacun) en 60 ns
⇒ seuil en énergie ≈ 60 keV
Mesure du temps et de la charge de chaque PMT
- Taux de trigger ~ 15 Hz (dominé par le ^{14}C)
- Outer veto si ≥ 6 PMT touchés (99.8 % de probabilité de réjection des μ). 2 ms de temps mort après chaque μ traversant le scintillateur. Taux de μ : 0.055 s^{-1} .
- Mesure du temps et de la charge totale (nb de PM touchés, la charge de chaque PM correspondant to ~ 1 p.e.). Position de chaque événement reconstruite.

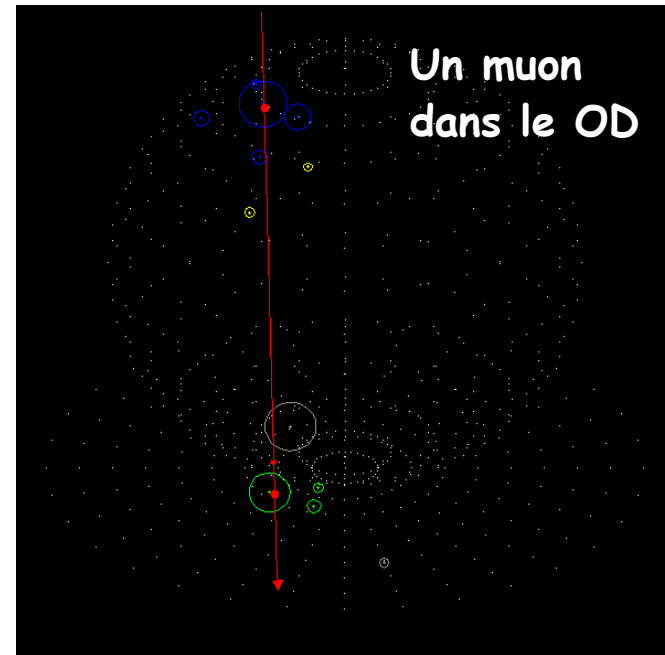
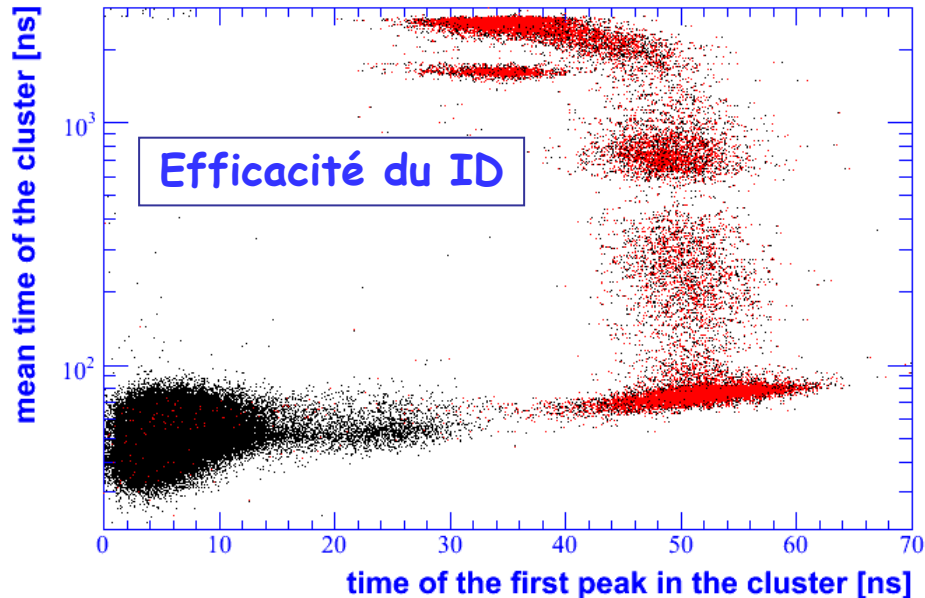
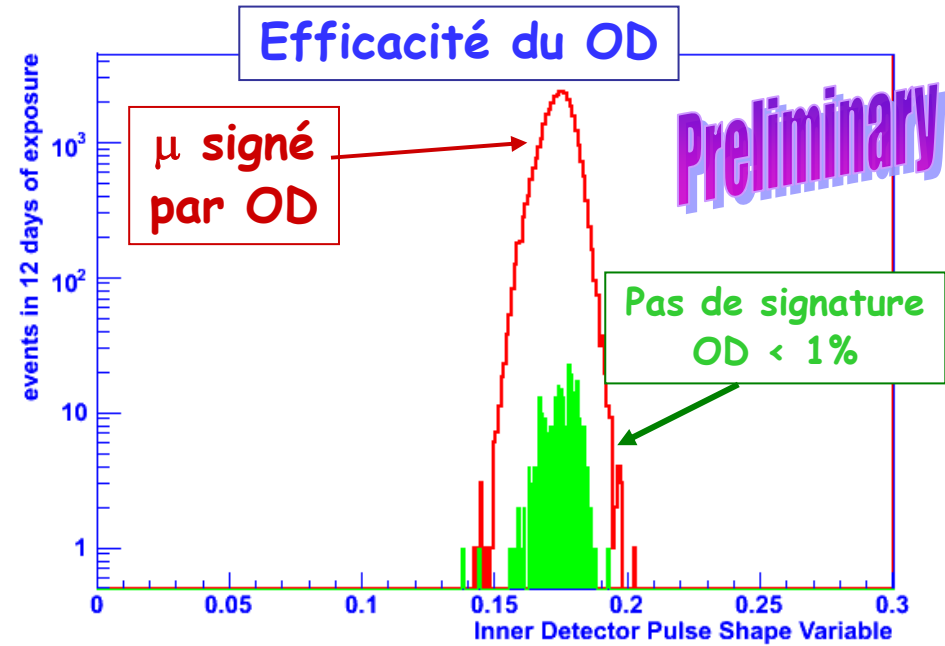
Point de départ : le spectre "brut"



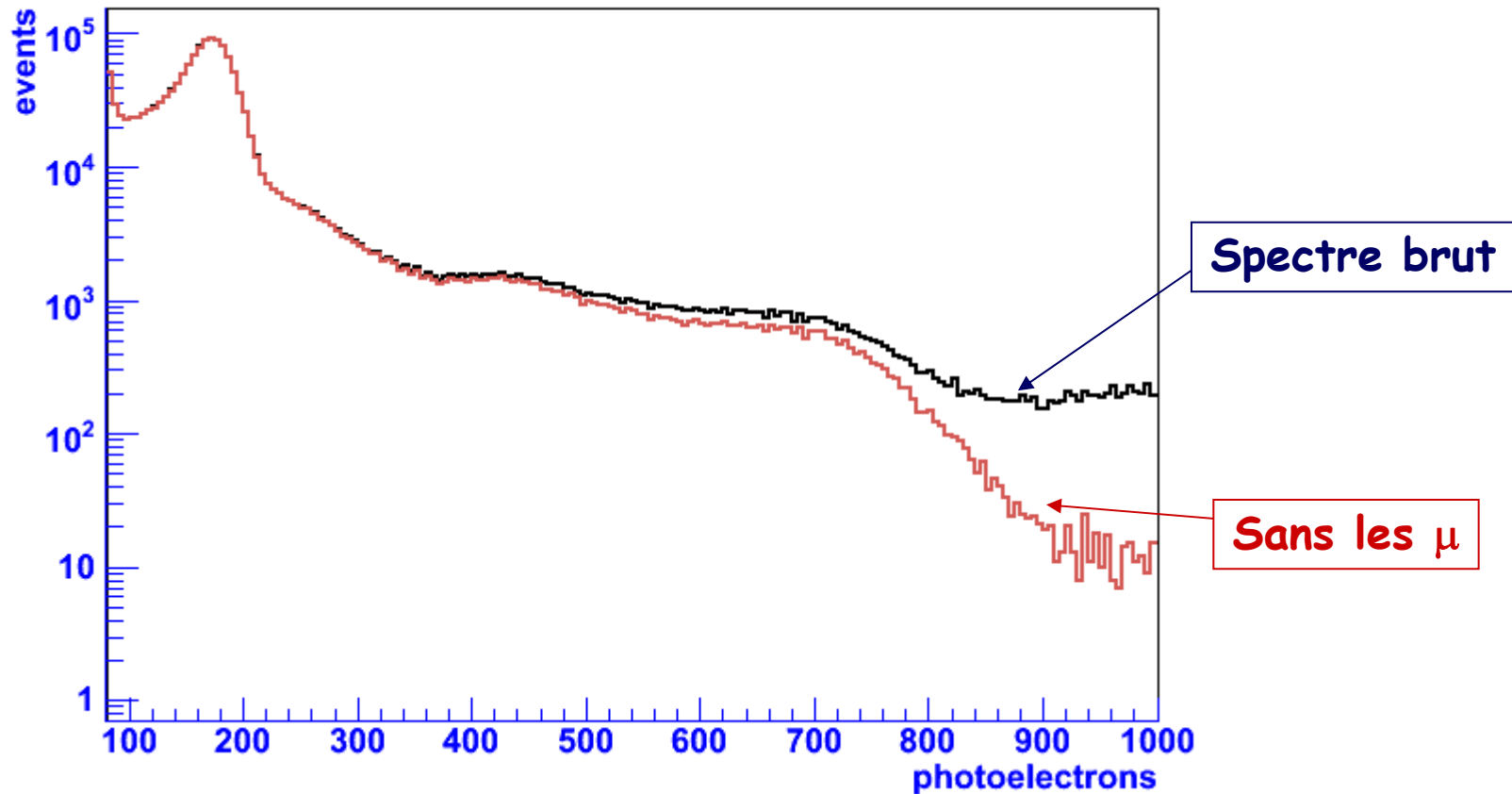
Statistique de ce plot: ~ 1 jour

Coupures sur les μ

- μ identifiés par les détecteurs externe (OD) et interne (ID) :
 - OD eff: $\sim 99\%$
 - ID analyse basée sur des "pulse shapes"
 - Facteur de réjection : $> 10^4$ (préliminaire)



Etape 1 : spectre sans les μ



- Après coupure, les μ ne sont plus un bruit de fond significatif pour le signal de ${}^7\text{Be}$ (bruit de fond résiduel : < 1 c/jour/100 t)

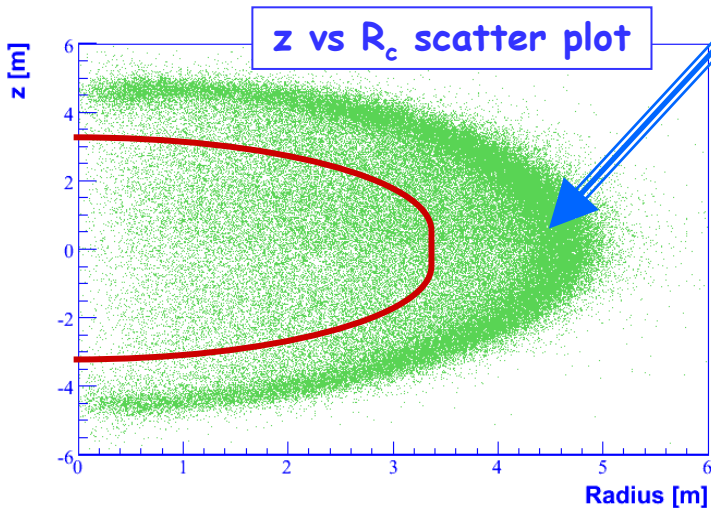
Le volume fiduciel

Reconstruction du vertex :

Algorithmes basés sur le temps de vol des « hits »

Monte-Carlo testé avec CTF, vérifié et affiné dans Borexino avec événements :

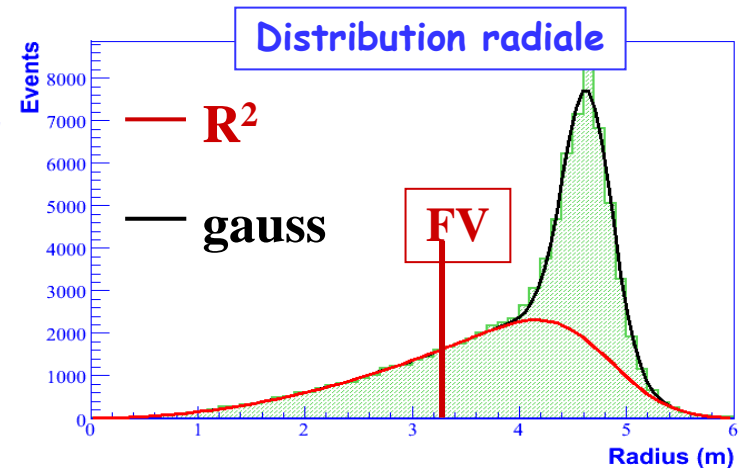
- ✓ ^{214}Bi - ^{214}Po (~ 800 keV - 14 ± 2 cm)
- ✓ ^{14}C (~ 100 keV - 41 ± 4 cm).



$$R_c = \sqrt{x^2 + y^2}$$

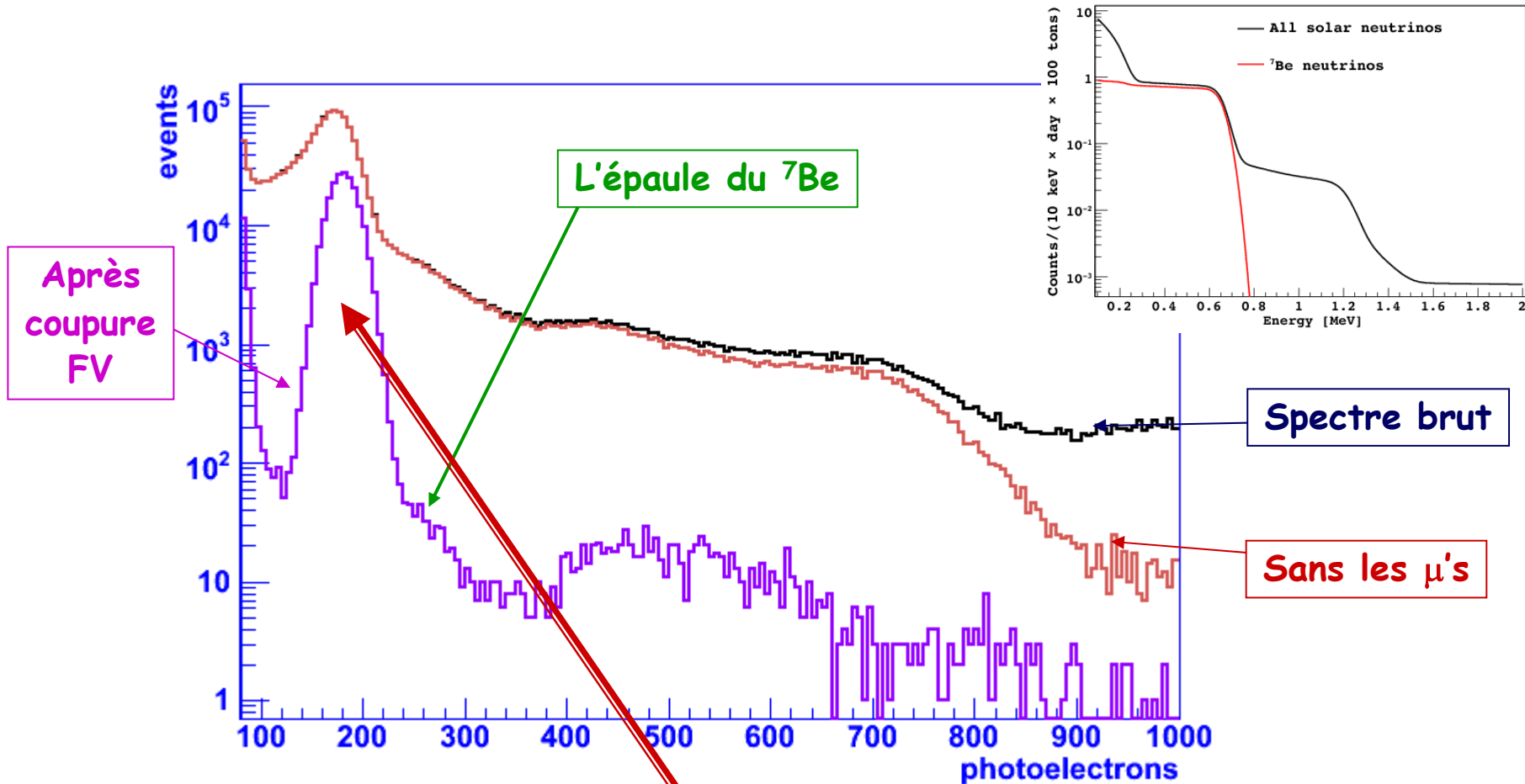
Preliminary

- **Bruit de fond** externe important à la périphérie du IV (en particulier γ)
- Suppression par une coupure en volume fiduciel :
 - $R < 3.276$ m (masse nominale 100 t)
 - $z < 1.8$ m pour enlever quelques ^{222}Rn résiduels (liés à la stabilisation thermique du scintillateur)
- **Volume fiduciel effectif : 87 t**



$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

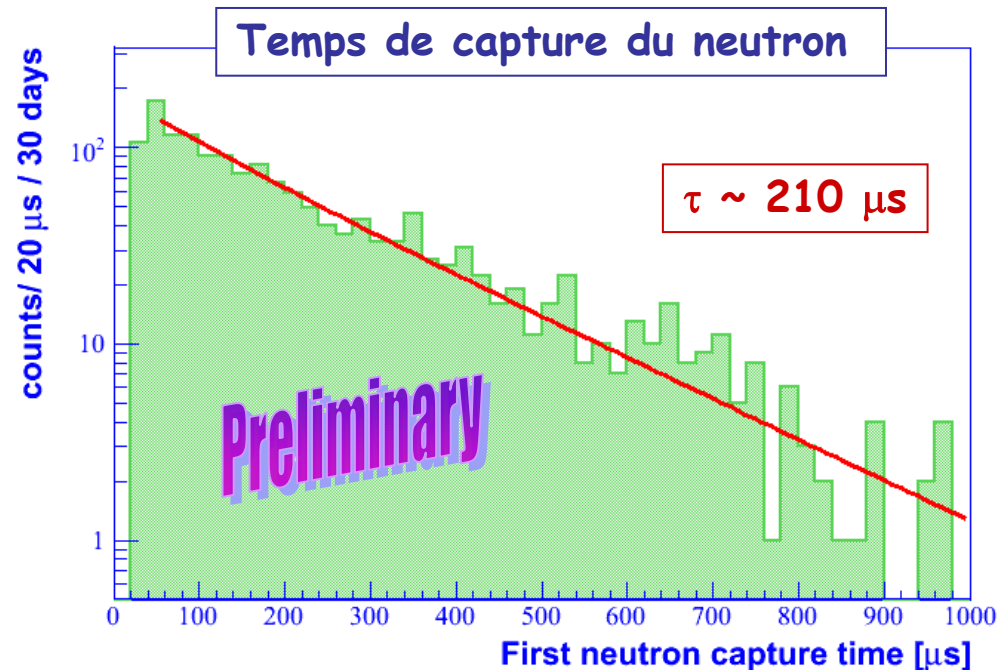
Etape 2 : coupure en volume fiduciel



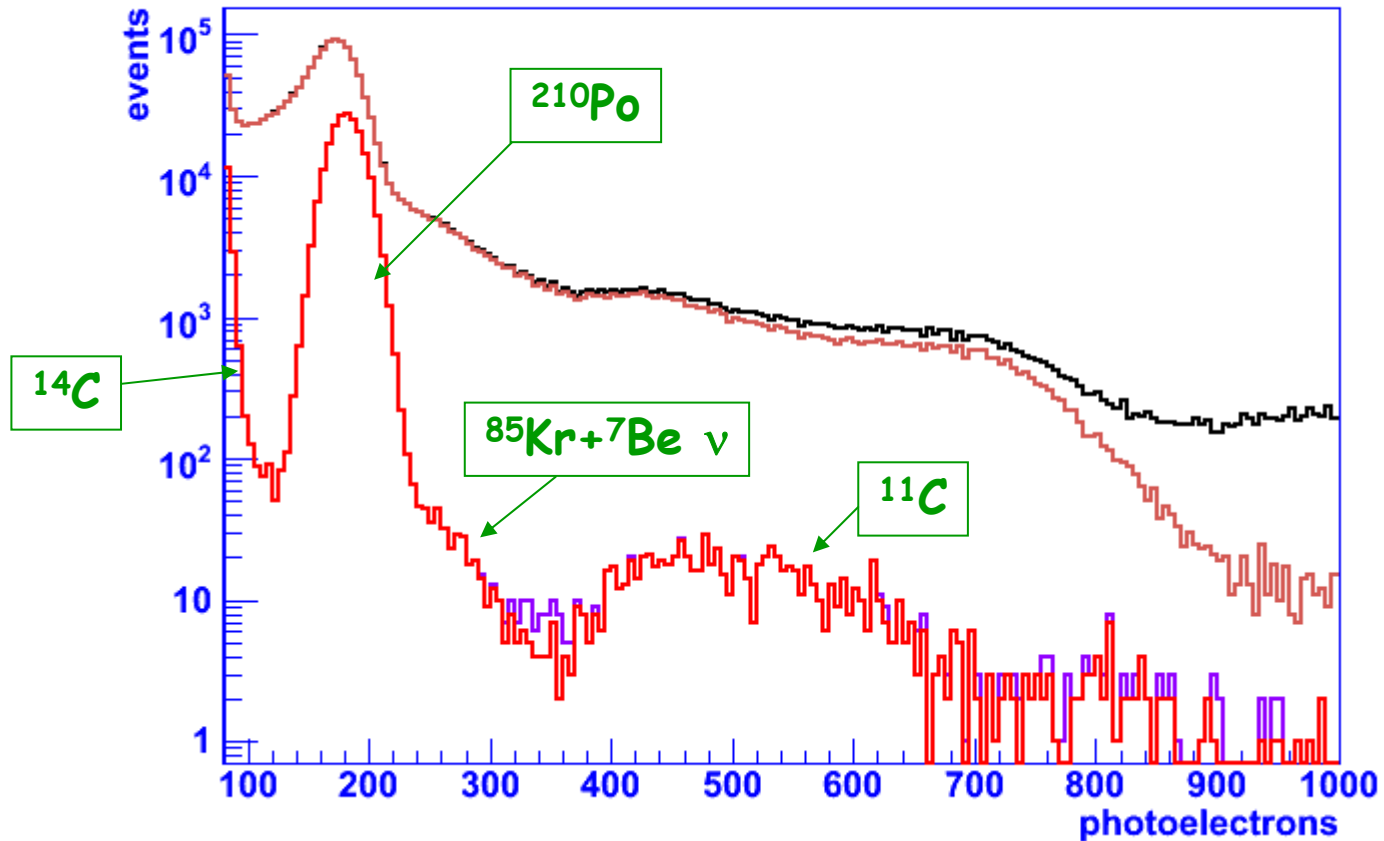
✓ Le bruit de fond externe est dominant partout, sauf dans la région du pic du ${}^{210}\text{Po}$.

Le ^{11}C et les neutrons issus des muons

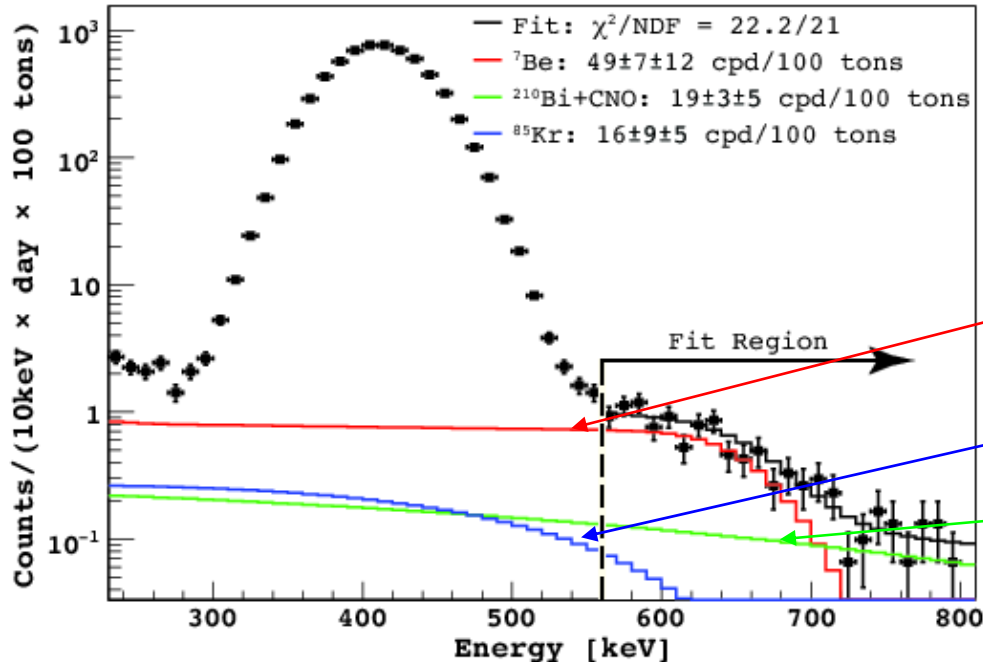
- Les μ 's peuvent produire du ^{11}C par spallation sur le ^{12}C de la cible
 - Des neutrons sont aussi produits dans 90% des cas.
 - Seul le premier neutron après un muon est actuellement détecté (travail en cours)
 - Les événements arrivant moins de 2 ms après un μ sont rejetés



Etape 3 : spectre final



Première méthode d'analyse : fit global



Evénements / jour / 100 tonnes :

${}^7\text{Be}$: 49 ± 7

${}^{85}\text{Kr}$: 16 ± 9

${}^{210}\text{Bi}+\text{CNO}$: 19 ± 3

2 étapes :

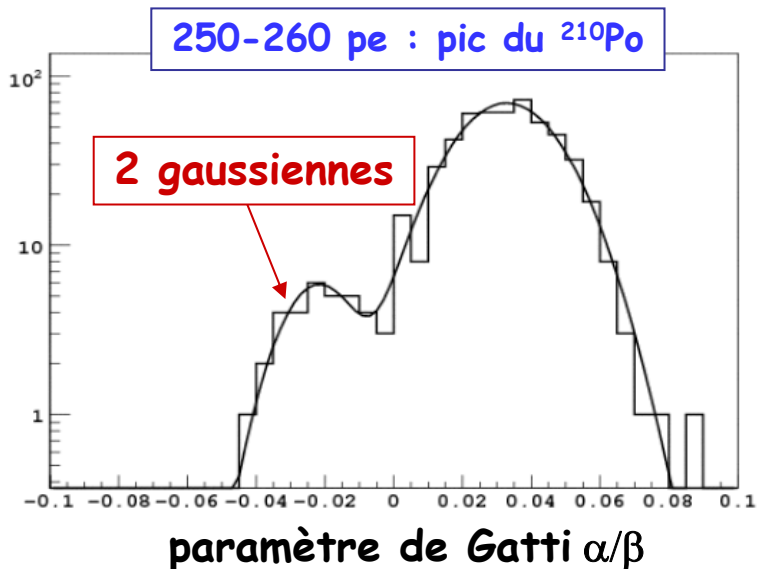
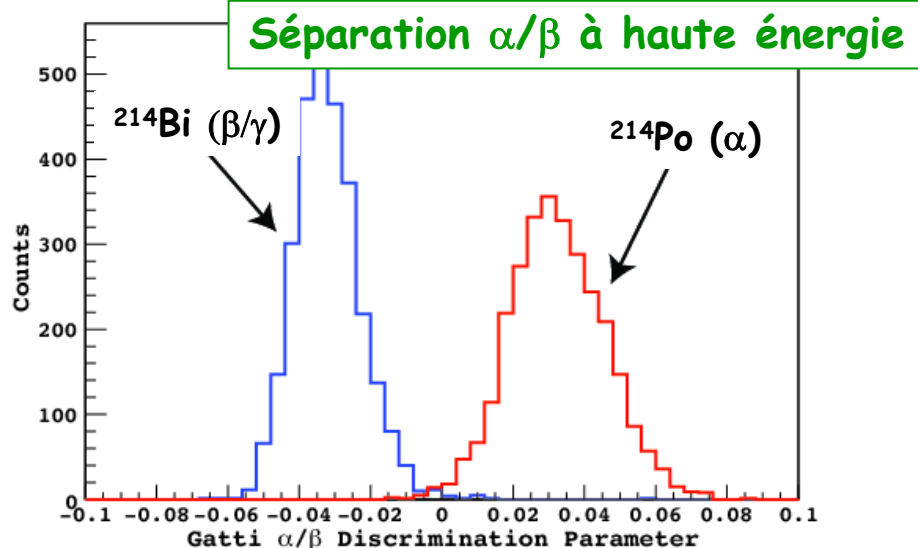
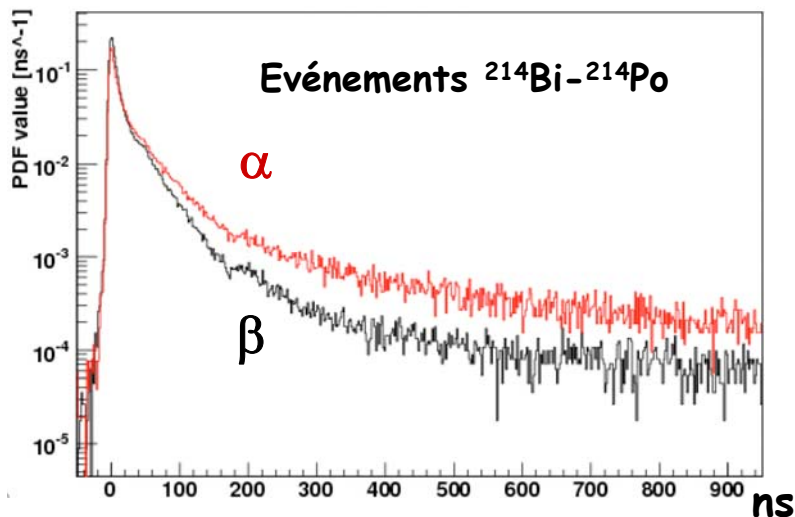
1) fit entre 250 et 800 keV avec « light yield », ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{85}\text{Kr}$, CNO+ ${}^{210}\text{Bi}$, ${}^7\text{Be}$ comme paramètres libres - *pep* fixé par LMA

2) fit entre 560 et 800 keV, avec ${}^7\text{Be}$ et CNO+ ${}^{210}\text{Bi}$ comme paramètres libres (les autres fixés par 1)).

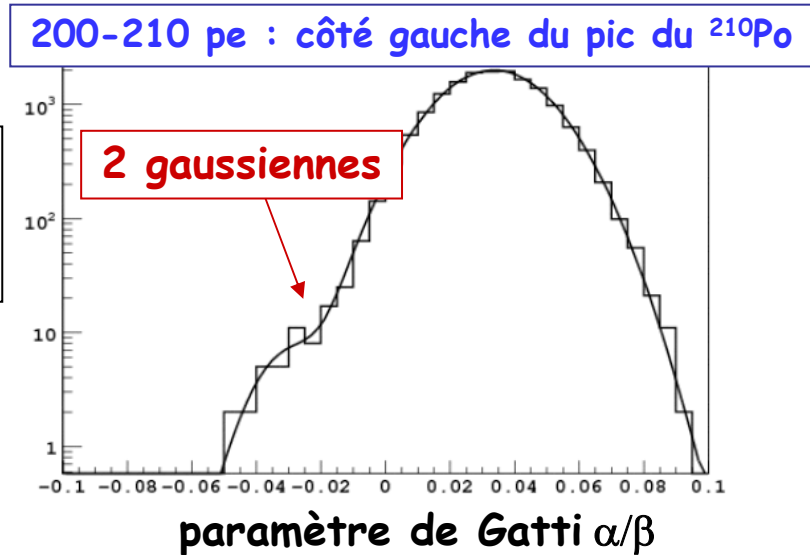
$\chi^2/\text{NDF} = 22.2/21$

Seconde méthode d'analyse : soustraction Po (1)

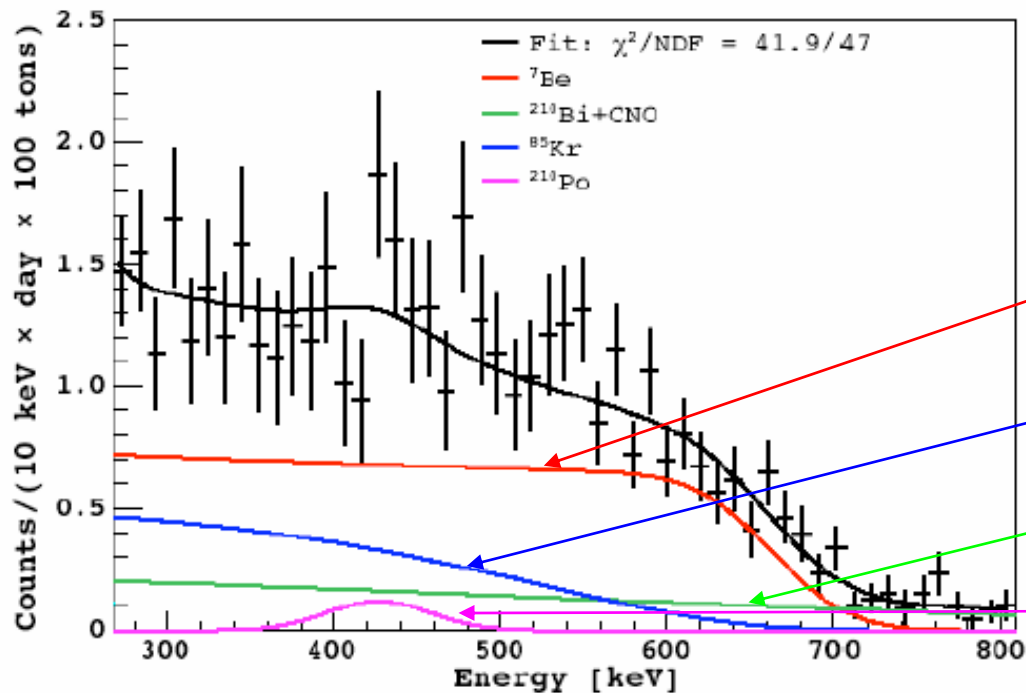
Discrimination α/β (paramètre de Gatti lié au pulse shape)



PSD par bin
de 20 keV
(exemples)



Seconde méthode d'analyse : soustraction Po (2)



Evénements / jour / 100 tonnes :

${}^7\text{Be}$: 47 ± 7

${}^{85}\text{Kr}$: 22 ± 7

${}^{210}\text{Bi}+\text{CNO}$: 15 ± 4

${}^{210}\text{Po}$: 0.9 ± 1.2

1. Soustraction des α bin par bin par méthode de Gatti

2. Fit sur l'intervalle: 240-800 keV

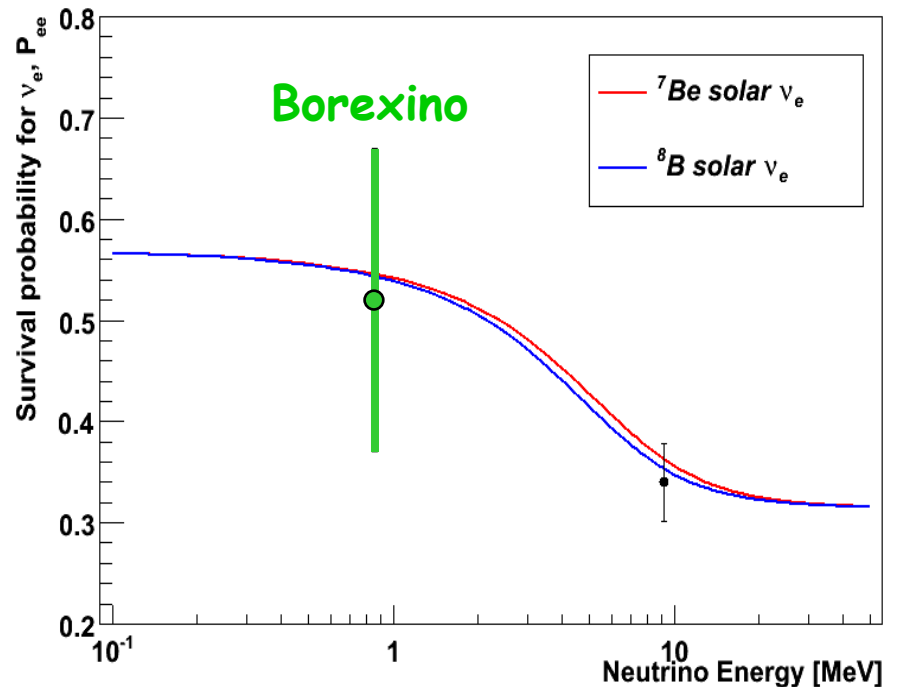
Paramètres : ${}^7\text{Be}$, $\text{CNO}+{}^{210}\text{Bi}$, ${}^{85}\text{Kr}$, ${}^{210}\text{Po}$ (résiduel)

$\chi^2/\text{NDF} = 41.9/47$

2 analyses indépendantes :
 47 ± 7 ev./jour/100 tonnes
pour les ν_{\odot} du ${}^7\text{Be}$ (862 keV)

Erreur statistique : profil du χ^2 (avec corrections liées au ${}^{85}\text{Kr}$)
Erreur systématique : $\sim 25\%$ (dominée par l'incertitude sur le volume fiduciel)

Rappel solution LMA
(Soleil + KamLAND) :
 $\Delta m_{12}^2 = 7.92 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 \theta_{12} = 0.314$





Borexino
Les premiers résultats

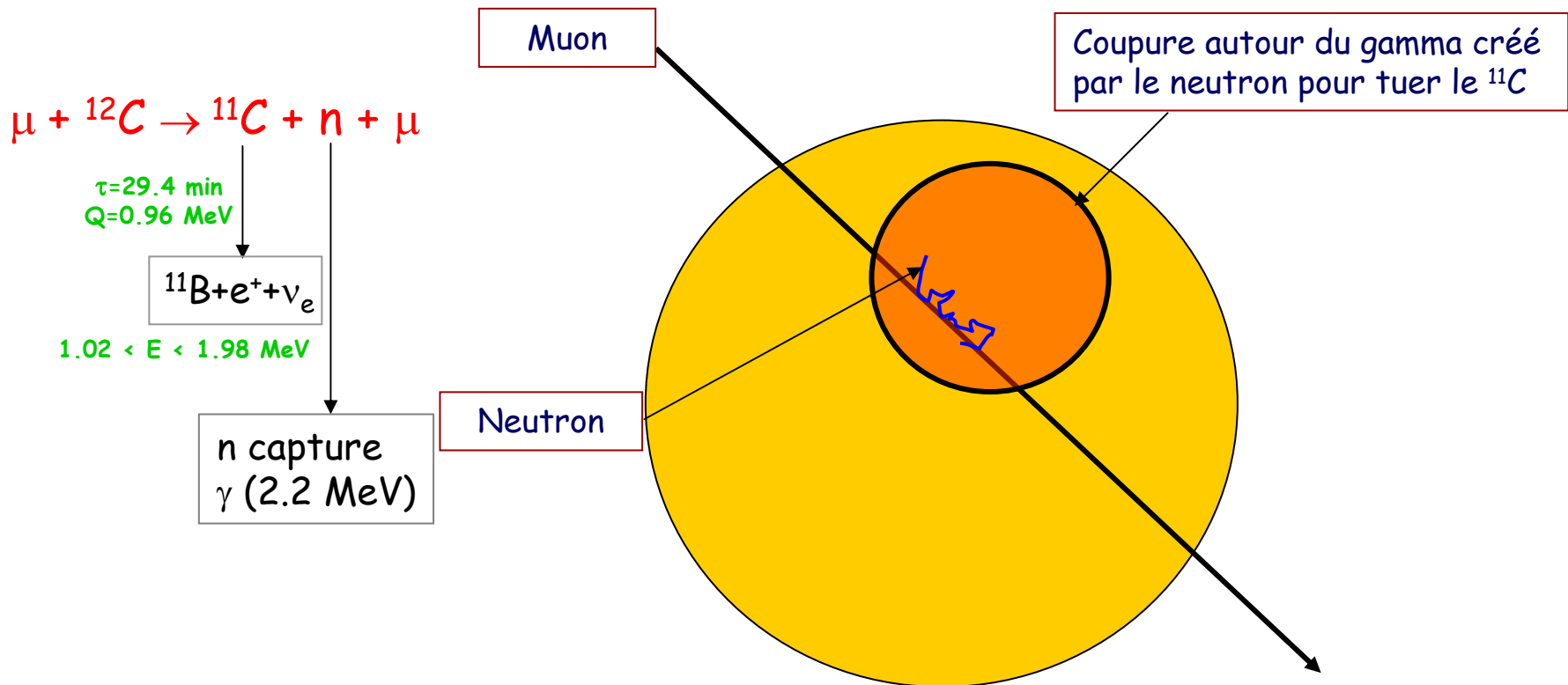
1. Quelques rappels sur le Soleil
2. Les neutrinos solaires en 2004
3. Borexino
4. Les premiers résultats
5. Le futur

Le futur pour les neutrinos solaires (1)

① mesurer les ν du ${}^7\text{Be}$ à mieux que 5 % (⊙+ test LMA)

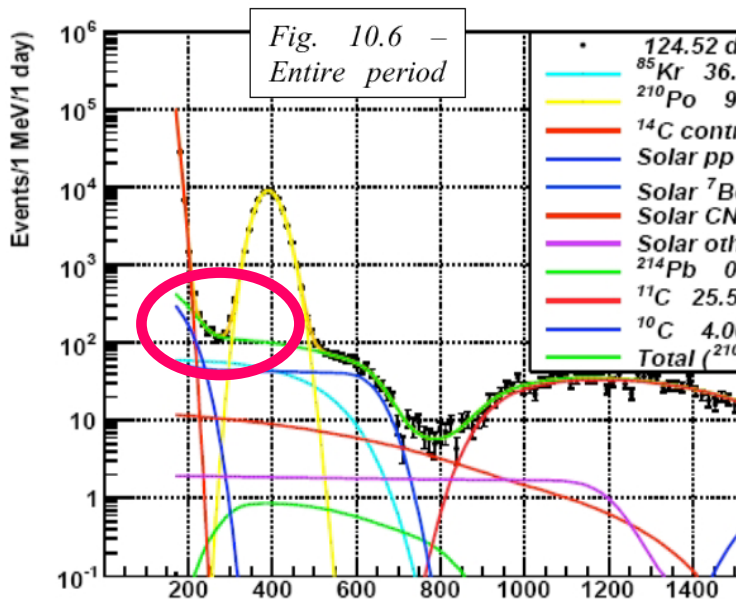
② mesurer les ν de la raie pep

Difficulté : le ${}^{11}\text{C}$ créé par les muons



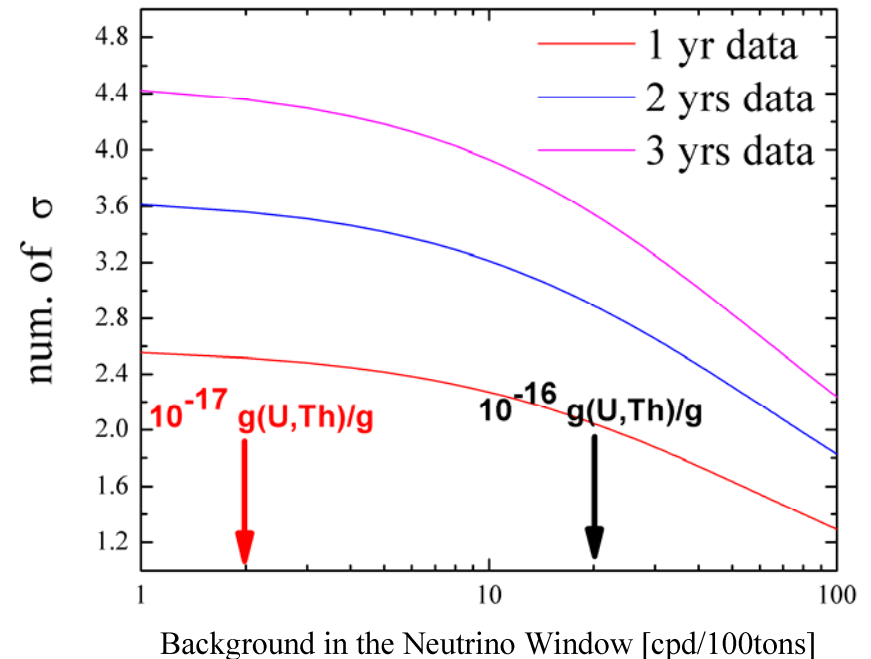
Le futur pour les neutrinos solaires (2)

③ les neutrinos p-p ?



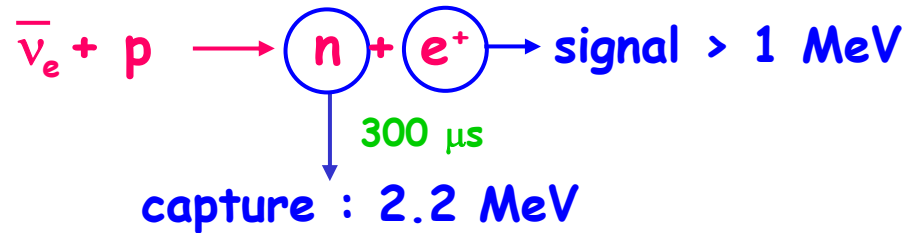
④ variation du taux de neutrinos durant l'année
3.5% attendus liés à l'excentricité de l'orbite terrestre

Statistical Significance of Seasonal Variations in Borexino



Le futur pour les antineutrinos : Soleil, réacteurs, géoneutrinos

Borexino excellent
détecteur d'antineutrinos

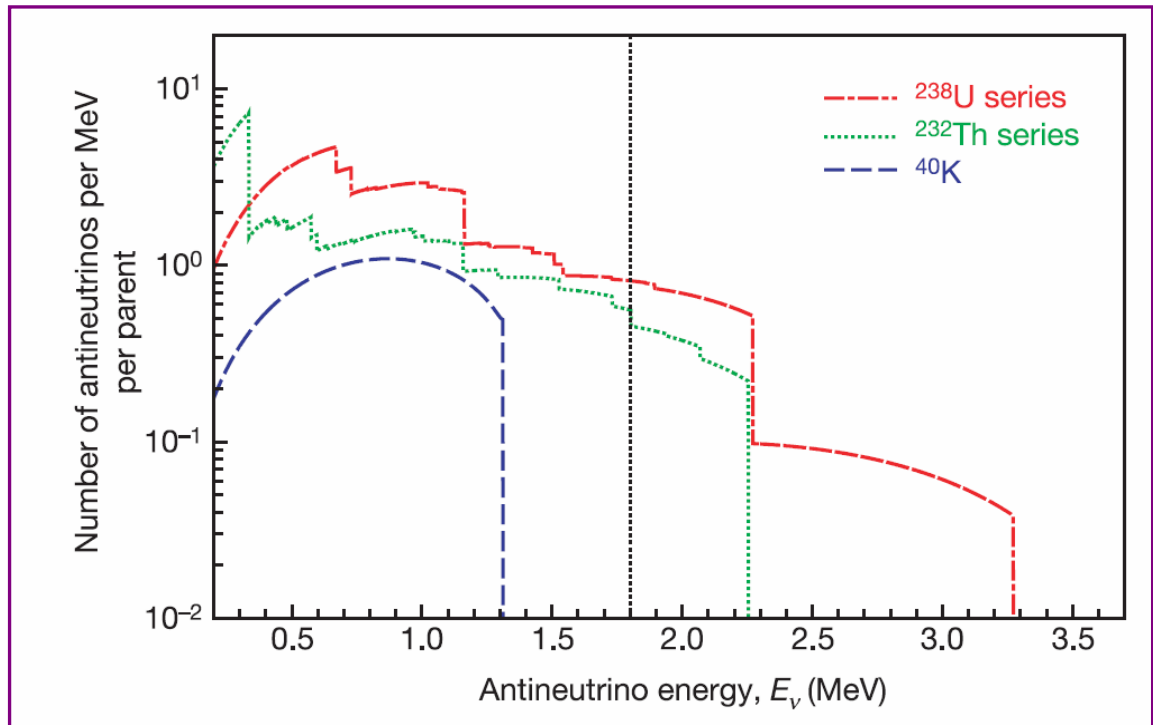


Géoneutrinos

Radioactivité naturelle de
la Terre (U, Th)

Mesure de la contribution
radiogénique à la chaleur
de la Terre (~ 40 TW)

Test du modèle BSE (Bulk
Silicate Earth)



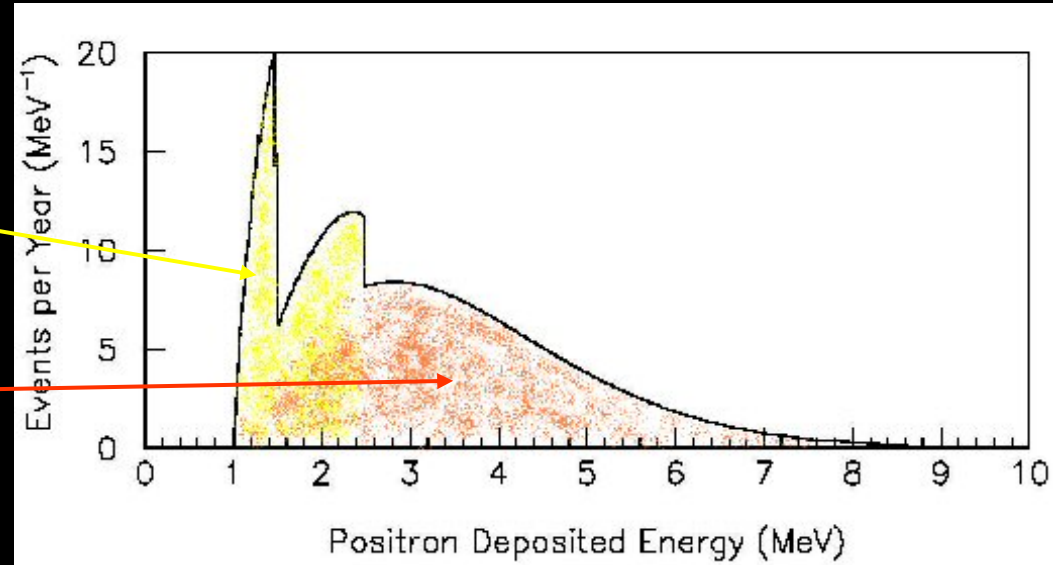
Géoneutrinos dans Borexino : mesure du spectre des positrons

Nombre d'événements attendus dans Borexino (300 t) :

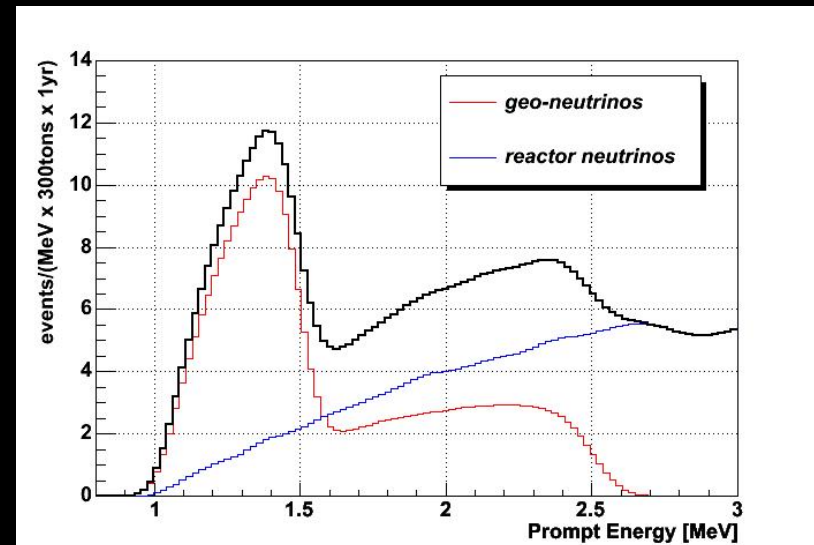
6-15 ev. / an U+Th

Bruit de fond :

19 ev. / an European Reactors



Précision attendue de 30% (5 ans)

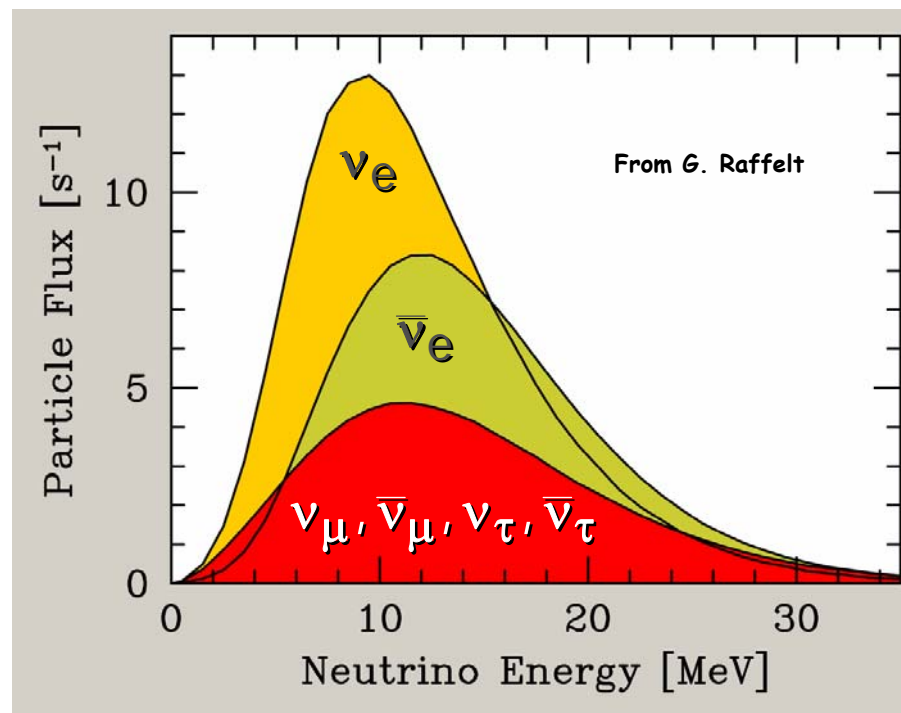
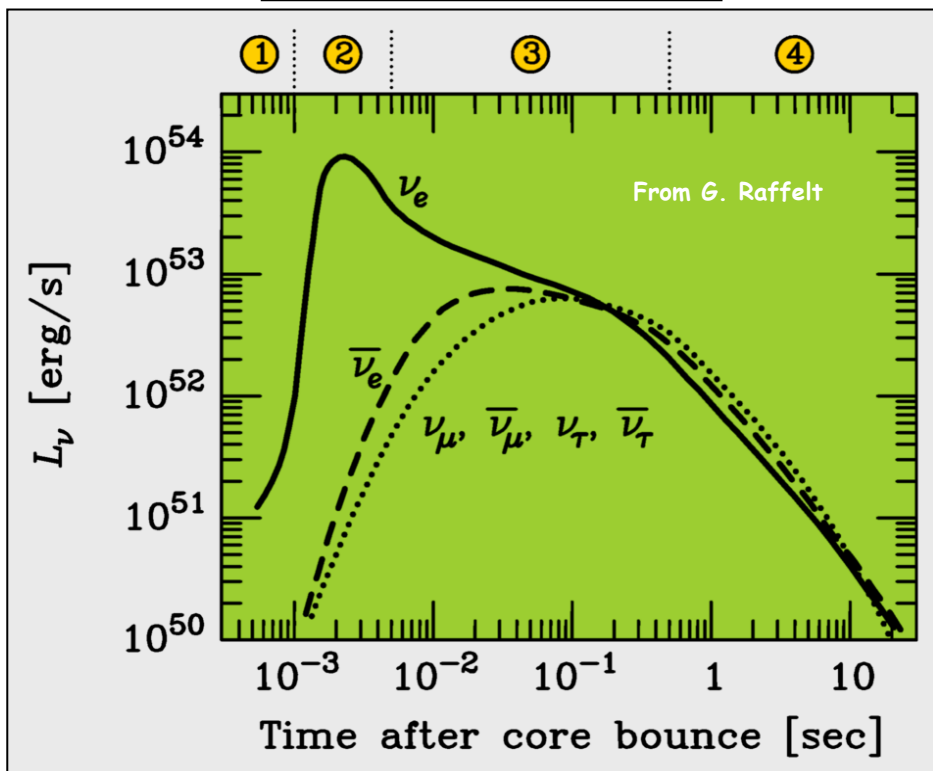




Le futur : les ν de supernovas

SNIa : $3 \cdot 10^{53}$ ergs (99% en neutrinos)
 10^{58} neutrinos émis en 10 secondes

1. Collapse
2. Onde de choc
3. Accrétion de matière
4. Refroidissement



Le futur : les ν de supernovas

Supernova typique au centre galactique (8 kpc)

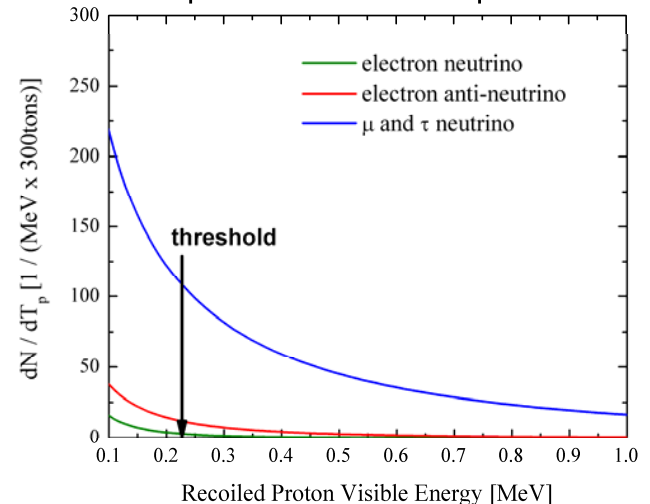
$$\bar{\nu}_e + p \longrightarrow \textcircled{n} + \textcircled{e^+} \quad E_\nu > 1.8 \text{ MeV} \quad 80 \text{ ev.}$$

$$\bar{\nu}_x + e^- \longrightarrow \bar{\nu}_x + \textcircled{e^-} \quad \text{diffusion élastique} \quad 5 \text{ ev.}$$

$$\bar{\nu}_x + p \longrightarrow \bar{\nu}_x + \textcircled{p} \quad \text{mesure p de recul (>0.25 MeV)} \quad 55 \text{ ev.}$$

$$\bar{\nu}_x + {}^{12}\text{C} \longrightarrow \bar{\nu}_x + {}^{12}\text{C}^* \quad E_\gamma = 15.1 \text{ MeV} \quad 20 \text{ ev.}$$

Spectrum of recoiled protons



Borexino @ APC

- Depuis 1999, grâce au soutien du labo et de l'Université Paris 7
- **Électronique**
 - Electronique des (anti)neutrinos au-dessus du MeV avec des Flash ADC développés en partenariat avec CAEN (Chooz, Borexino, Double Chooz)
 - Commercialisé (accord de valorisation)
 - Objectifs de physique : plus particulièrement les géoneutrinos et neutrinos de supernovae.
- **Thèses** : Tristan Beau, Olivier Dadoun, Maria-Elena Monzani (cotutelle avec Milan)

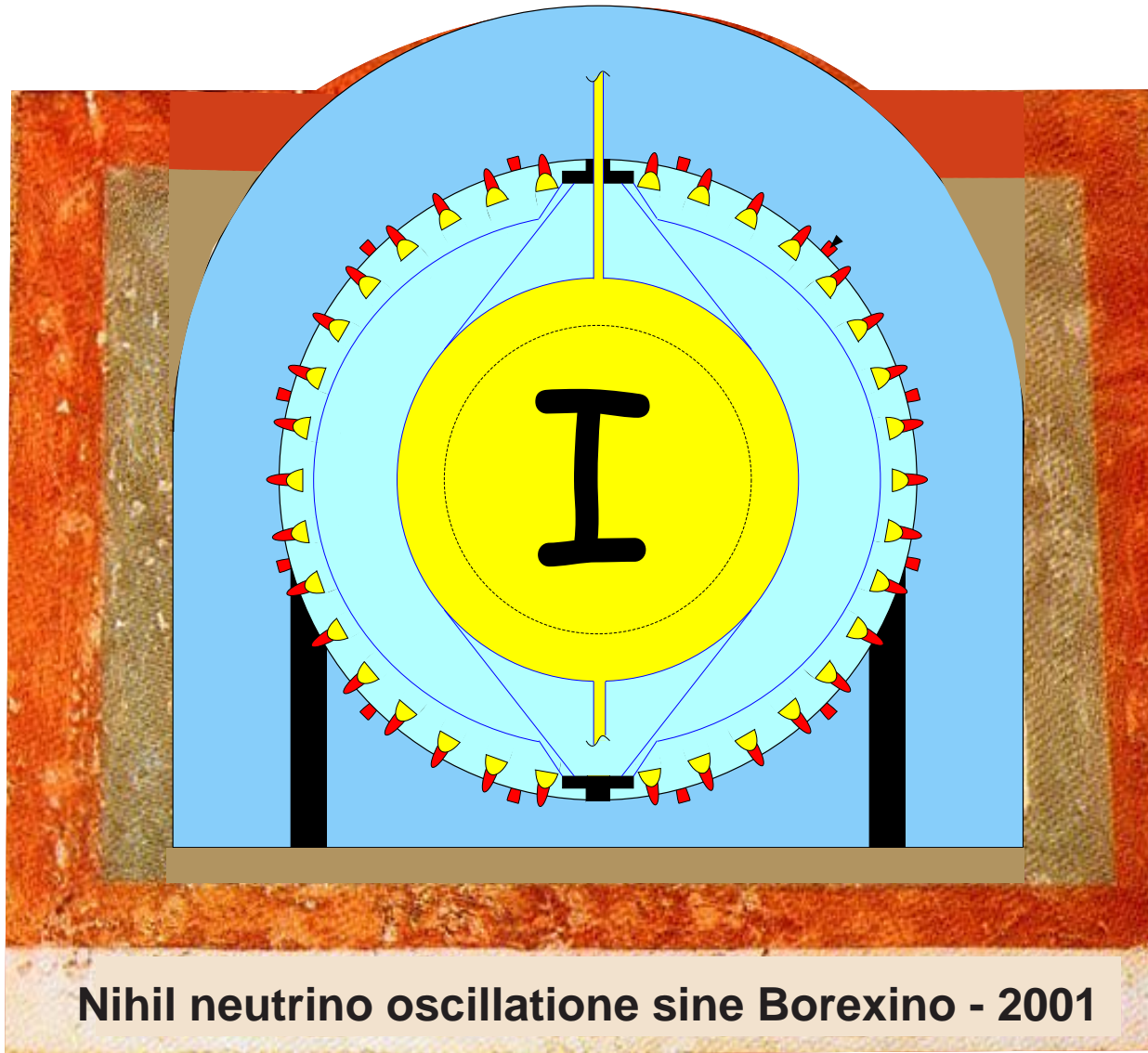
Conclusion

- Borexino a atteint (et dépassé) les objectifs du proposal
- Borexino mesure les neutrinos solaires du ${}^7\text{Be}$
- Futur prometteur : précision sur ${}^7\text{Be}$, mesure de pep et CNO, géoneutrinos, neutrinos de supernovas,...



NIHIL SINE SOLE-1838

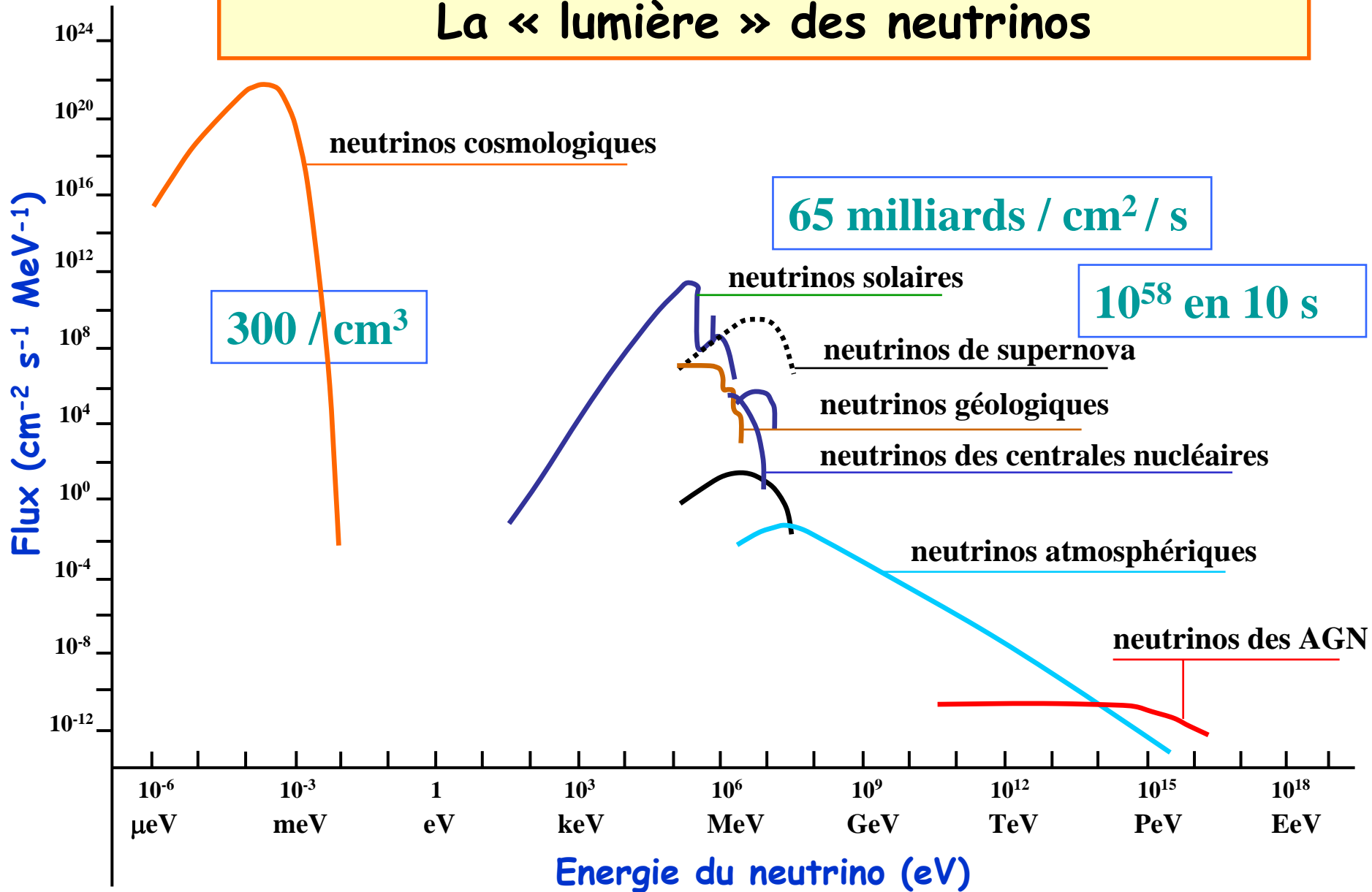
E



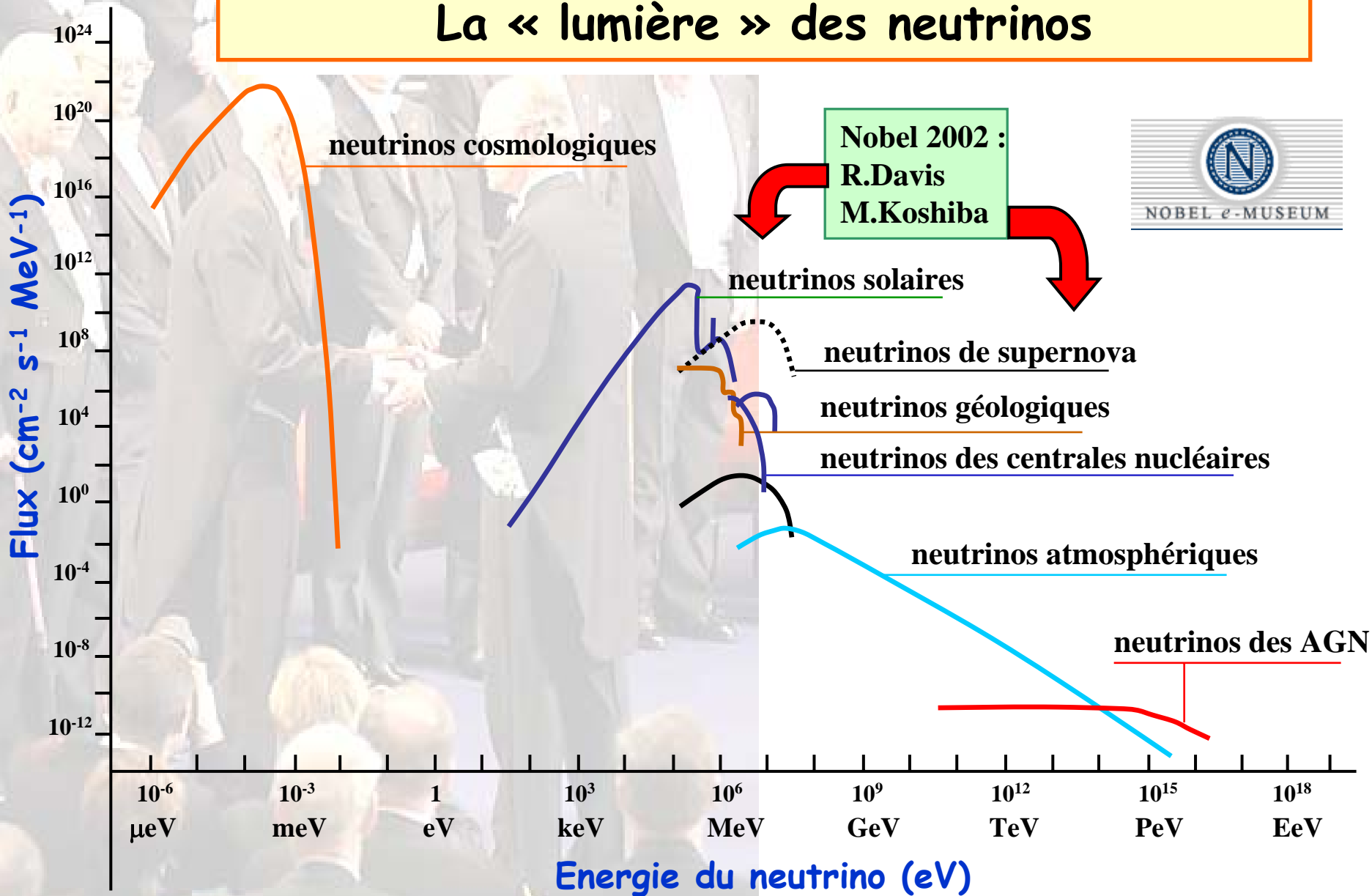
Z

Nihil neutrino oscillatione sine Borexino - 2001

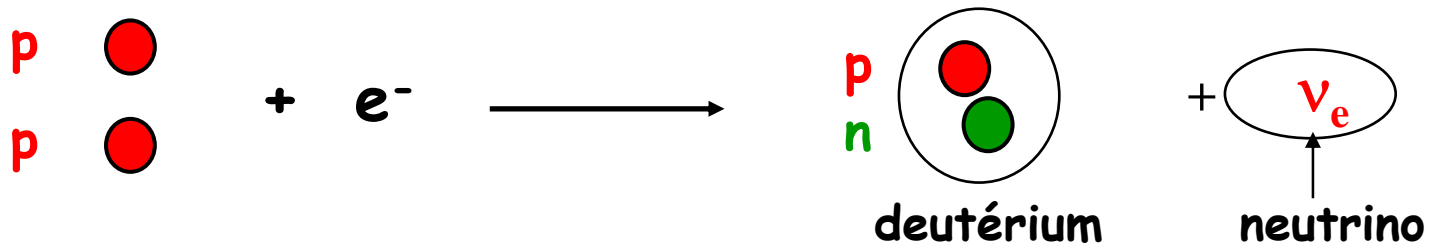
La « lumière » des neutrinos



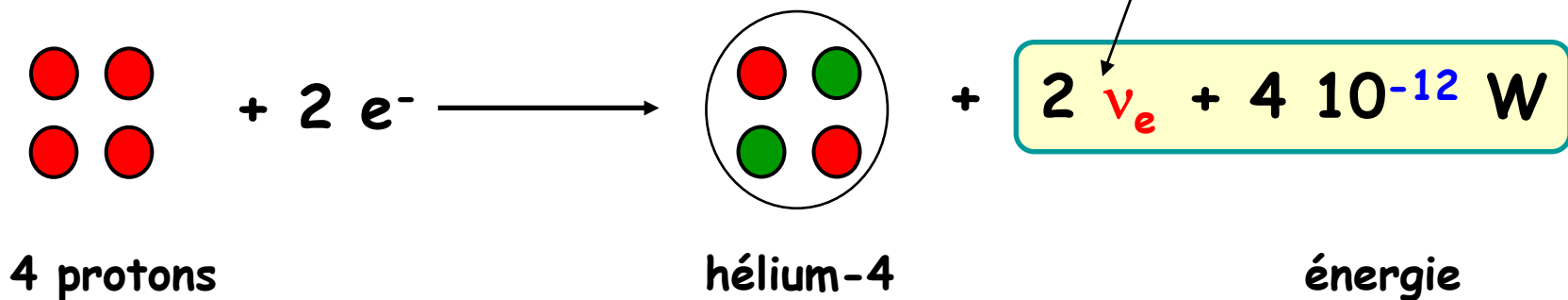
La « lumière » des neutrinos



Fusion primordiale entre 2 protons au cœur du Soleil

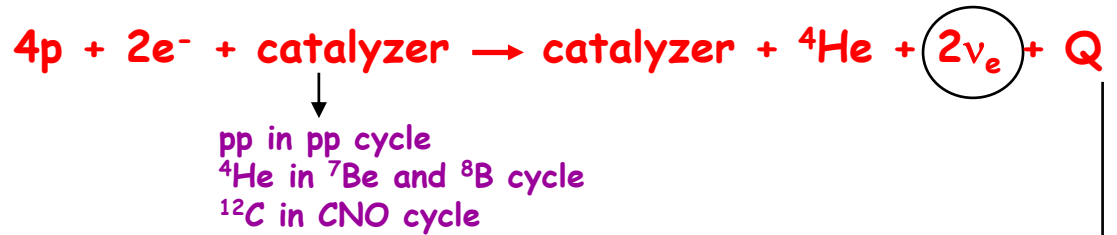


Bilan énergétique

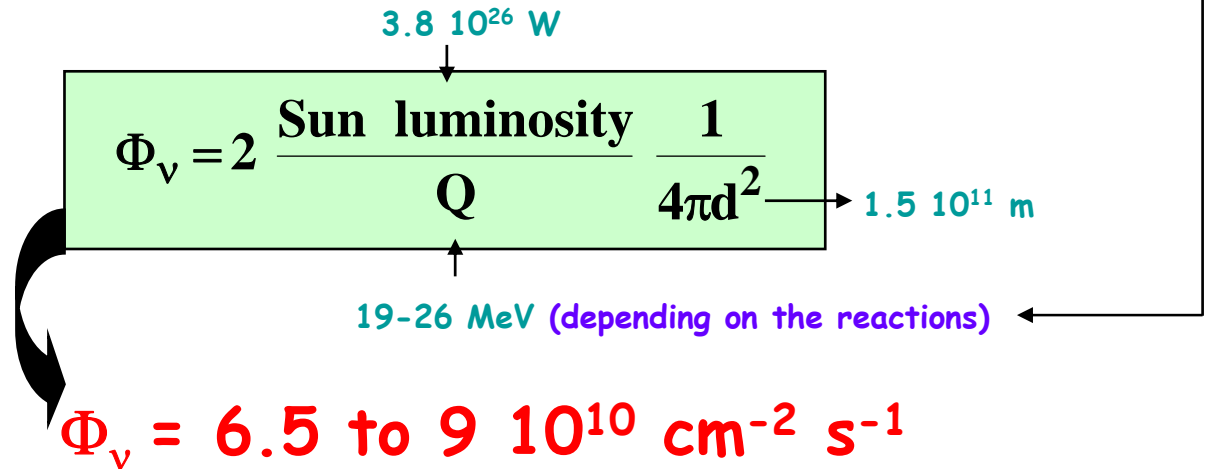


Model independent (?) luminosity constraint on the solar ν flux

★ Energy produced in the Sun results from several cycles



★ Each source is assumed to be the only process



Global ν flux strongly constrained by solar luminosity

Basic equations of stellar evolution

pressure

gravitational cst

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{M(r) G}{r^2} \rho$$

radius

density

hydrostatic equilibrium : each gas shell dr is balanced by the competition between **downward gravitational force** and **outward pressure force**.

$M(r)$: mass enclosed within a sphere of radius r :

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

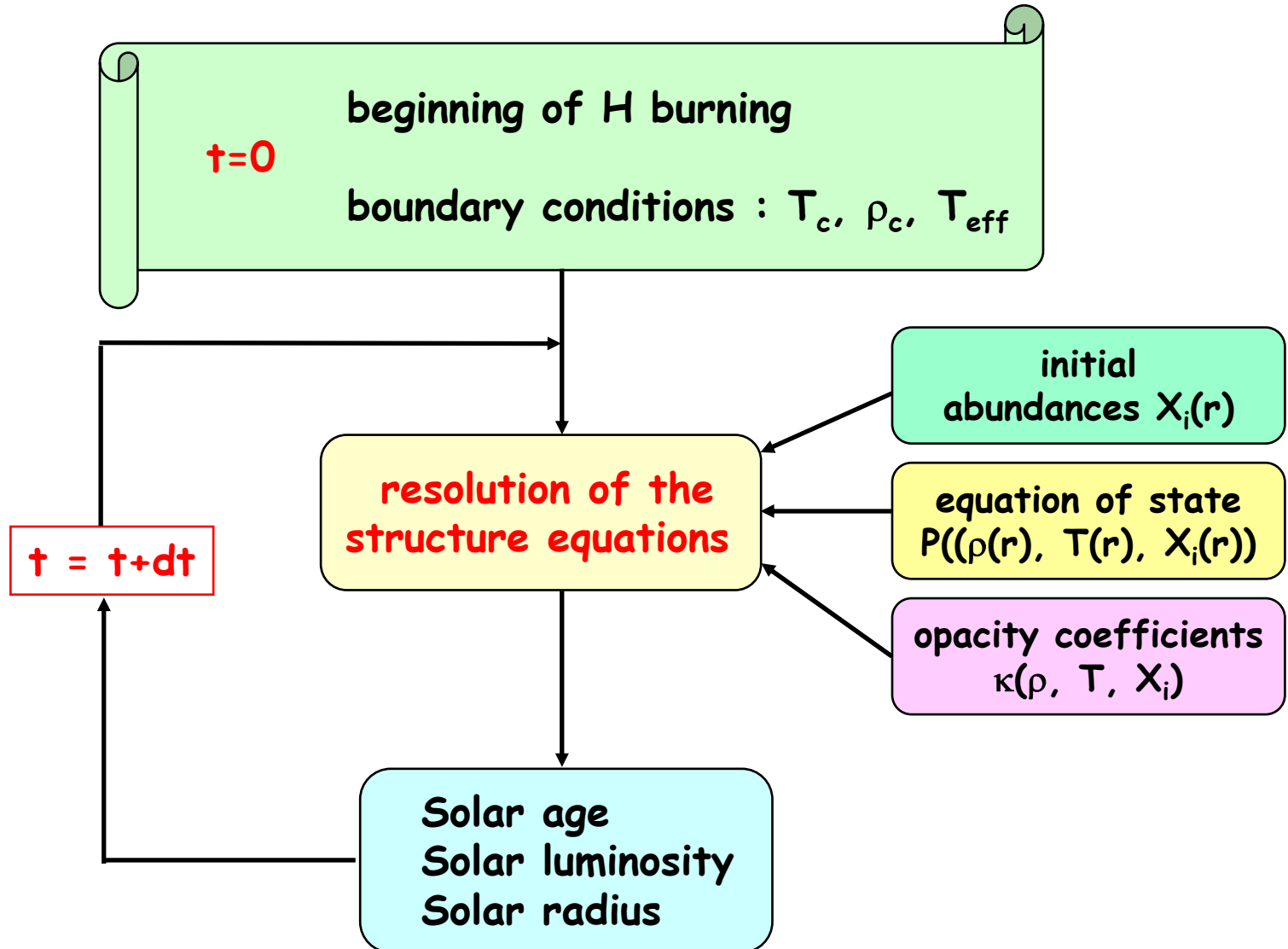
thermal equilibrium : energy ϵ produced by nuclear reactions balances the energy flux $L(r)$ emerging from the sphere of radius r :

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \left(\epsilon_{\text{nucl}} - T \frac{dS}{dT} \right)$$

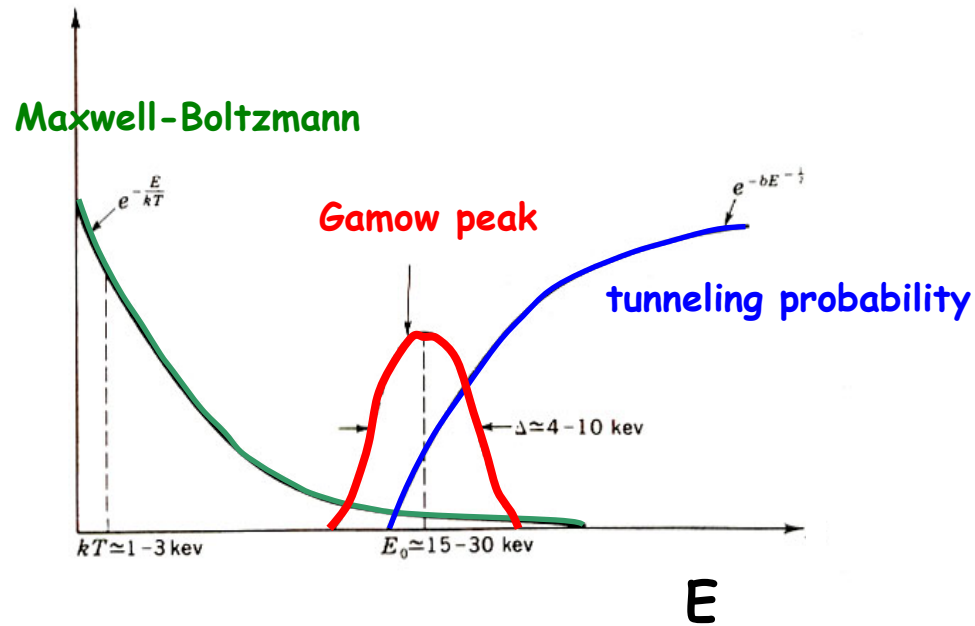
↓
correction
(heat transfer)
(S is entropy)

A third equation governs the **temperature gradient** dT/dr , which depends on the luminosity and the physical process of the energy transport.

How to build a solar model ?

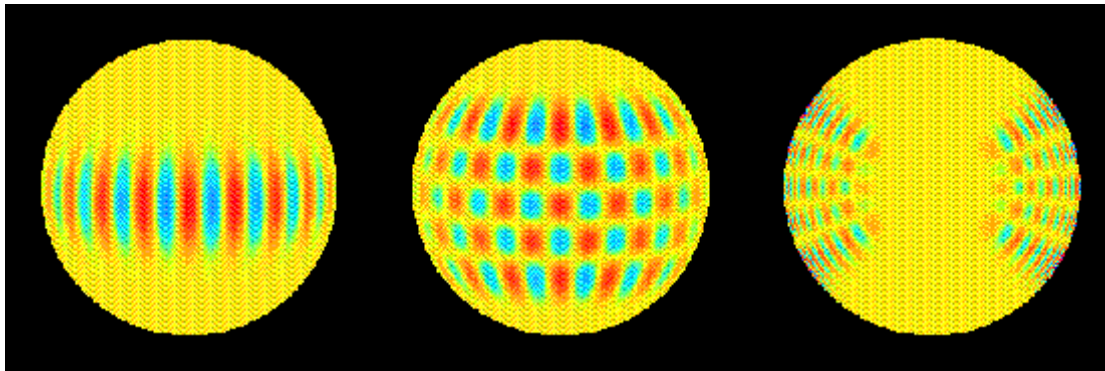
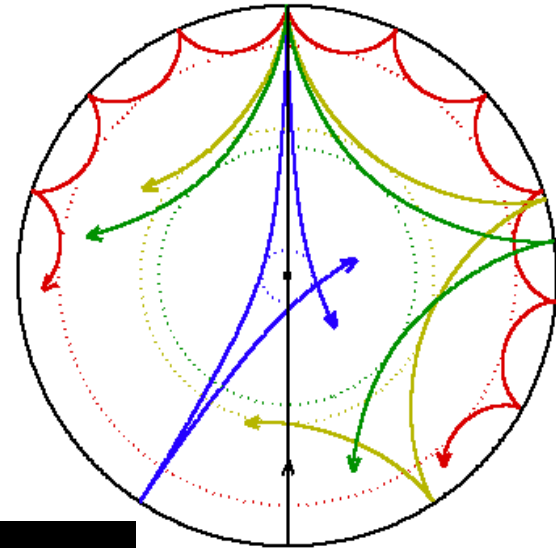


Gamow finds (1928) that there is a small (but finite) probability that the proton penetrates the Coulomb barrier (~ 1 MeV)



Helioseismologie (1)

The Sun acts as a resonating cavity, exhibiting millions of oscillation modes (described by spherical harmonics)

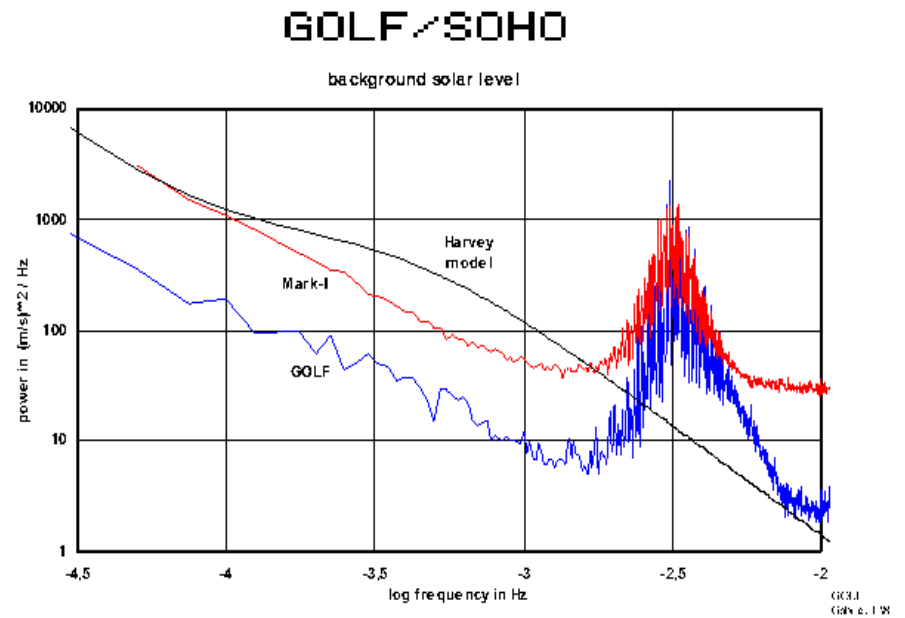
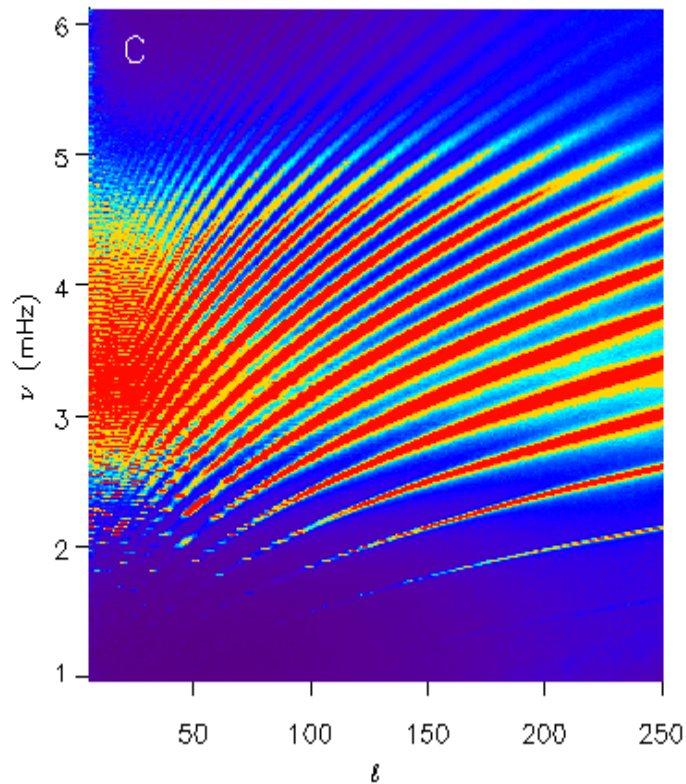


$l=19$
 $m=19$

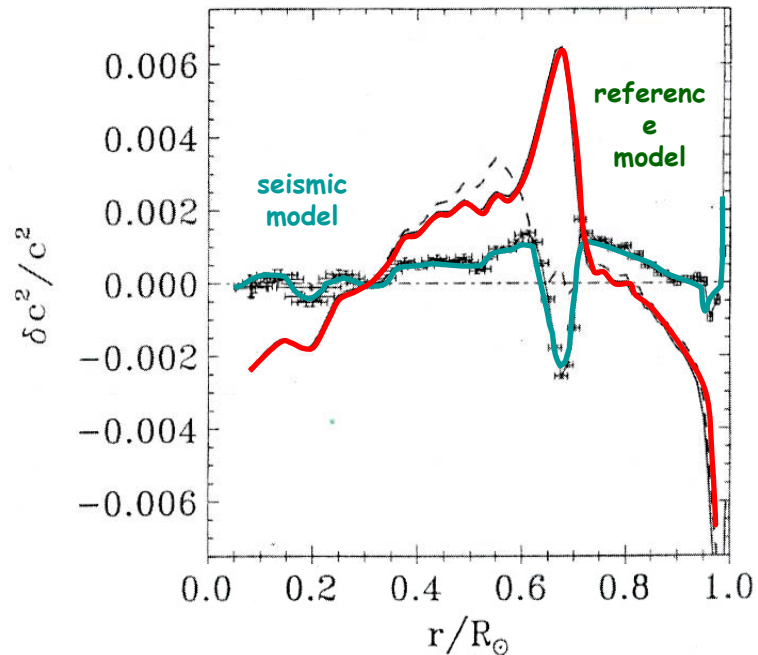
$l=19$
 $m=15$

$n=11$
 $l=19$
 $m=15$

Helioseismologie (2)

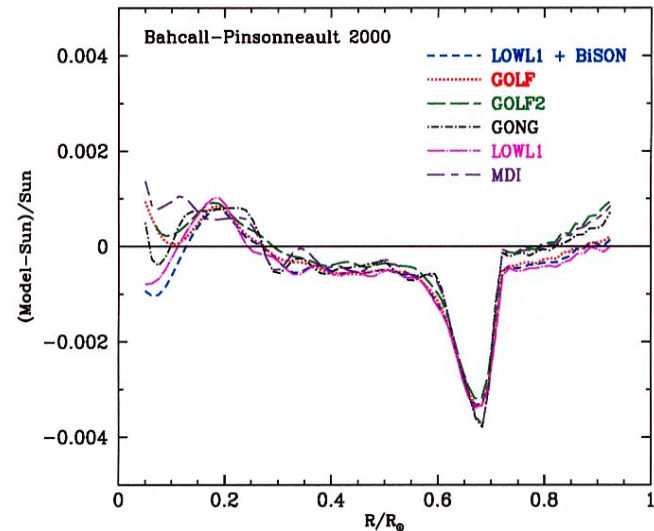


Helioseismology constraints



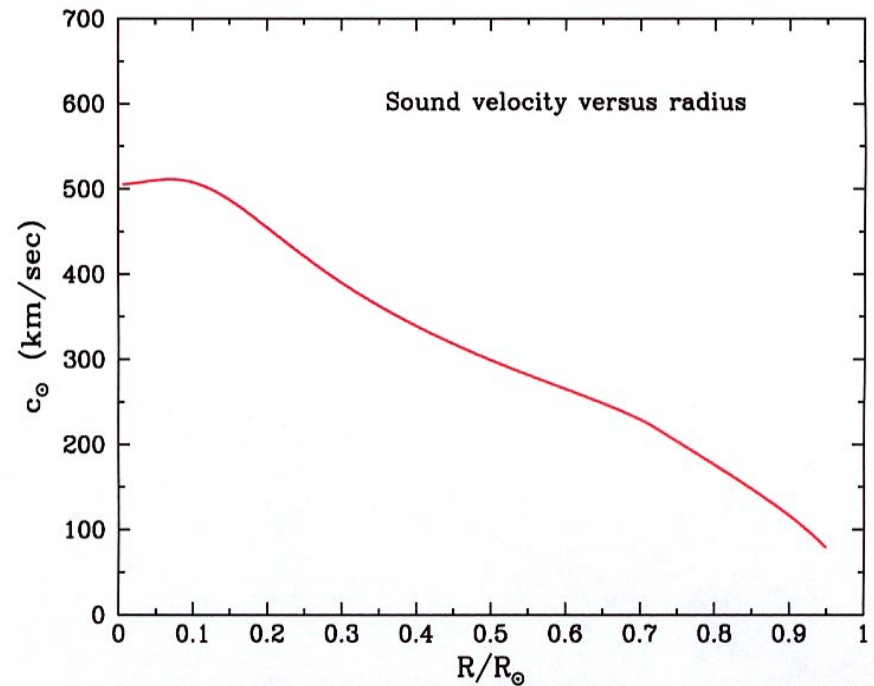
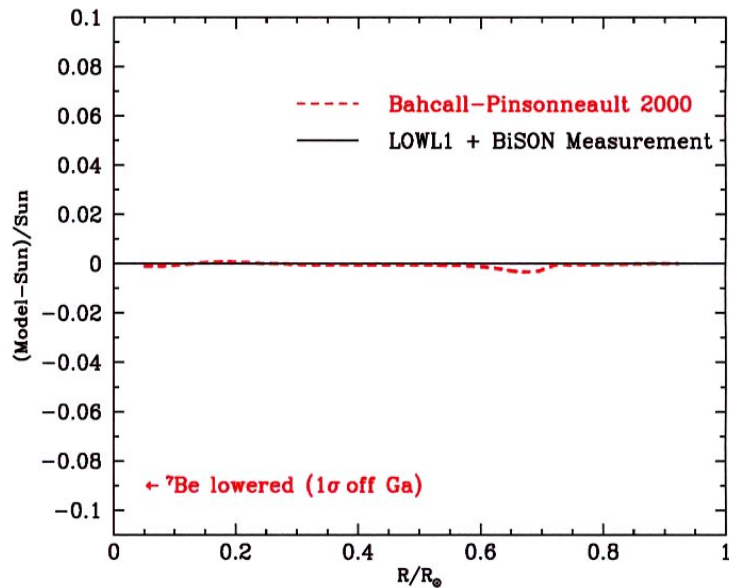
S. Turck-Chièze et al.,
Ap. J. Lett. 555 (2001) L69
(GOLF-MDI data)

Seismic model = Reference
model +
a) Diffusive treatment of the
tachocline
b) pp reaction rate : +1%
c) heavy elements : +3.5%



J.N. Bahcall et al., Ap. J. 555 (2001) 990

Helioseismology constraints : the sound speed



sound speed

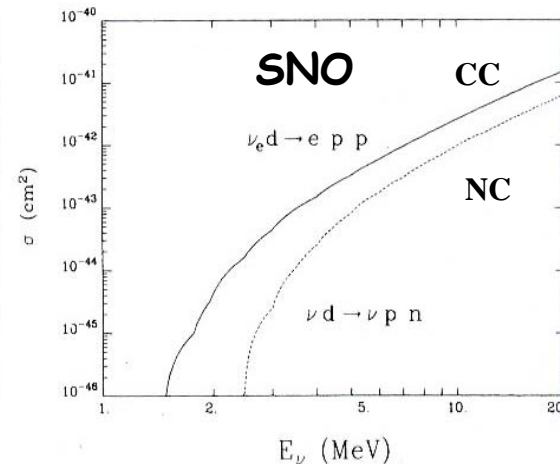
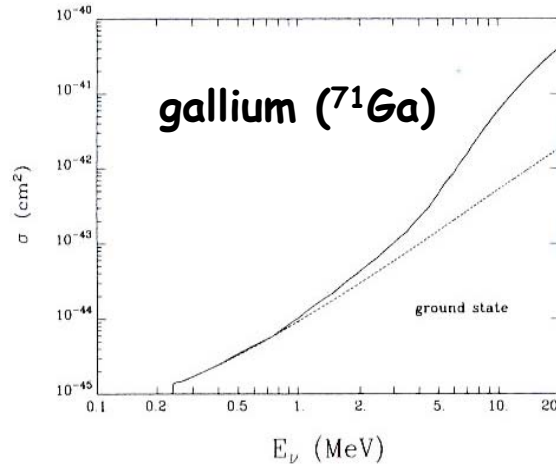
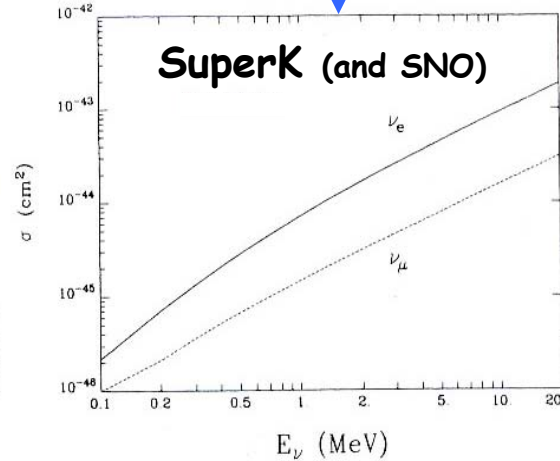
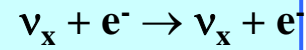
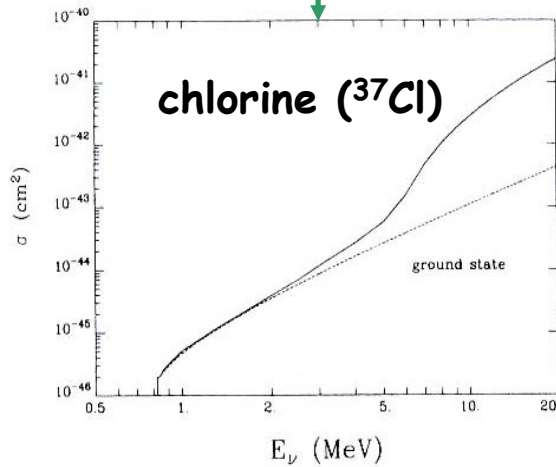
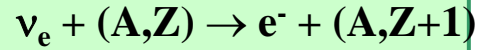
temperature

$$c^2 = T/\mu$$

mean molecular weight

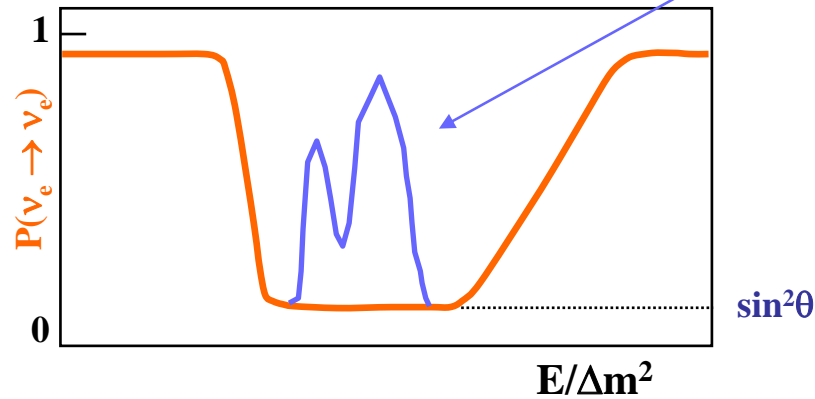
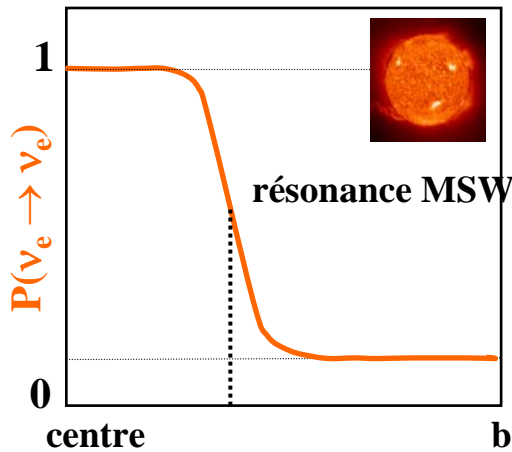
Detailed description: A diagram showing the equation $c^2 = T/\mu$ in a blue box. Three arrows point to the variables: 'sound speed' points to c , 'temperature' points to T , and 'mean molecular weight' points to μ .

Cross sections for solar neutrino detectors



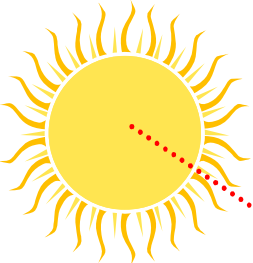
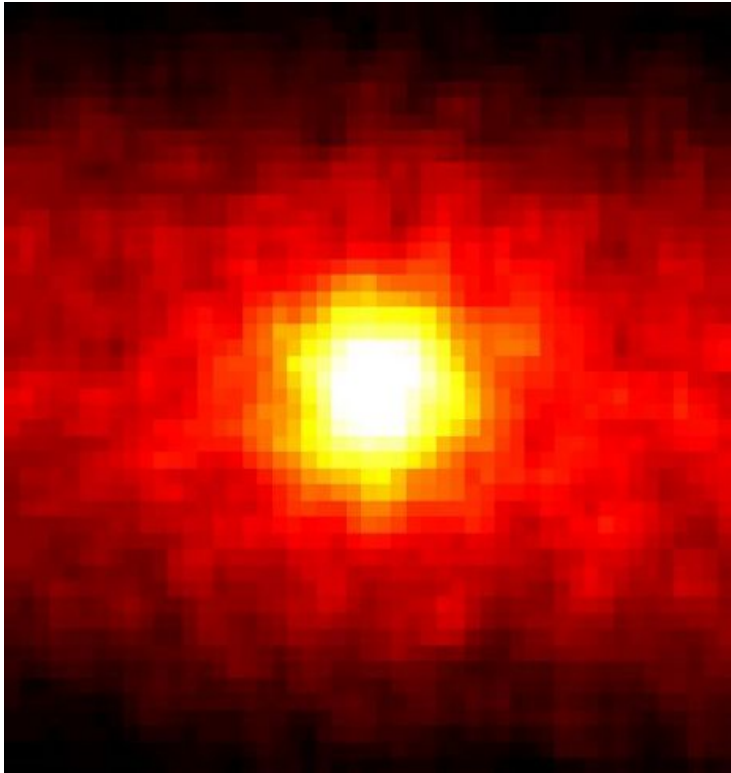
See also : J.F.Beacom
and S.J.Parke, hep-
ph/0106128
On the Normalization of
the ν -Deuteron Cross
Section

Effet MSW : le cas du Soleil

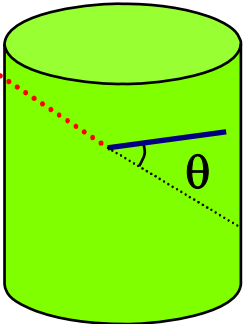


Régénération dans la Terre durant la nuit !

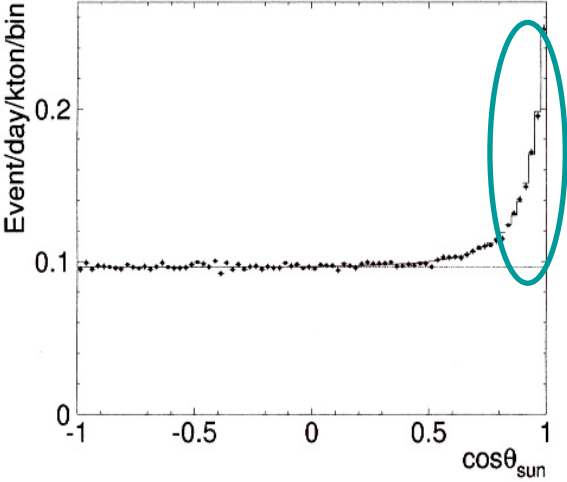
Image du Soleil
en neutrinos vue
par SuperKamioka

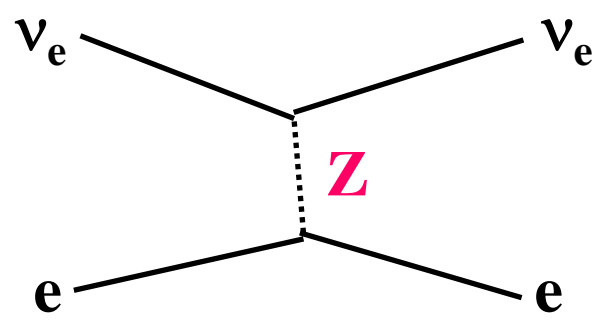
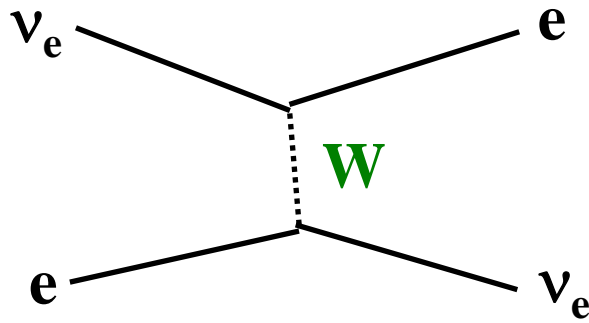


neutrino

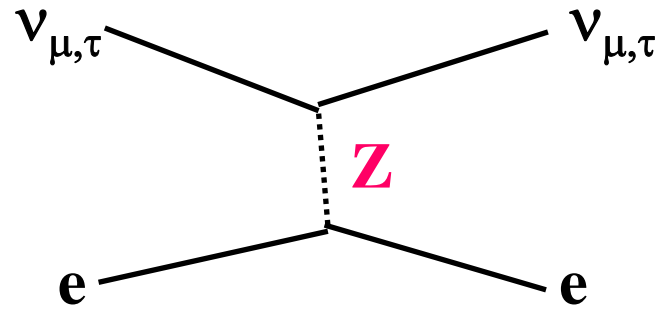


électron

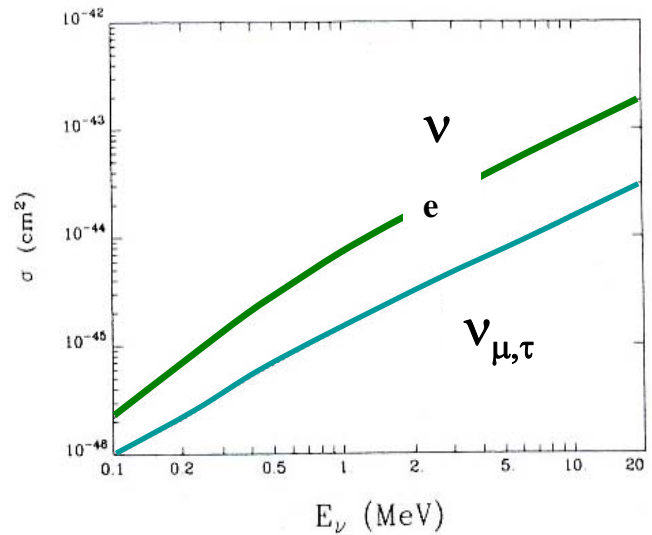




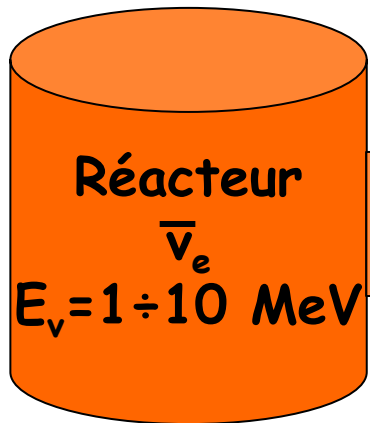
The missing graph



$$\sigma(\nu_e e) \approx 6 \sigma(\nu_{\mu,\tau} e)$$

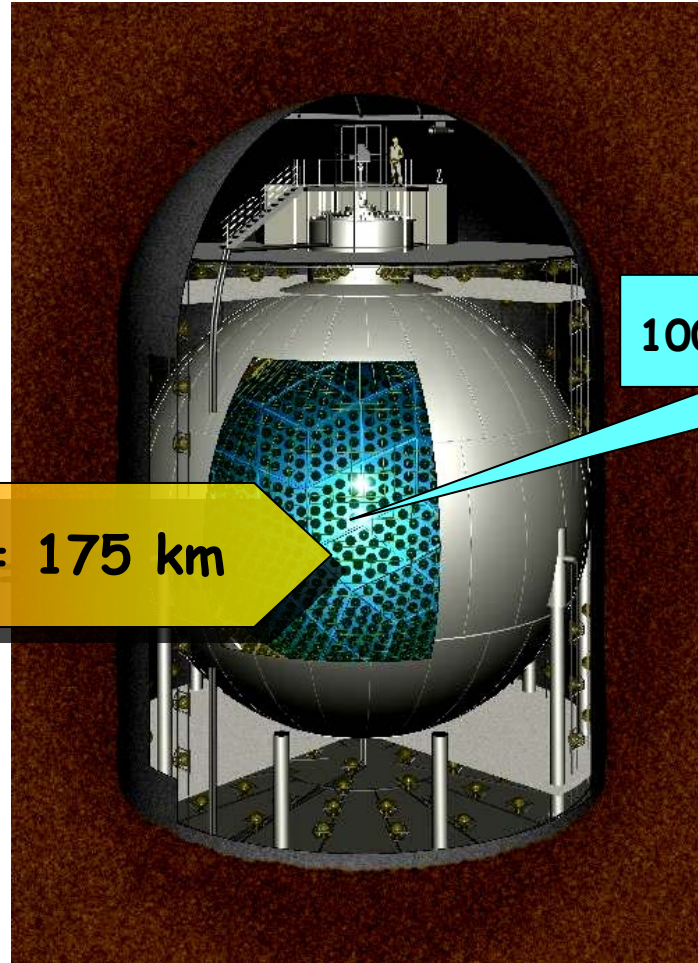


Expérience KamLAND



$\langle L \rangle = 175 \text{ km}$

A yellow arrow pointing from the reactor source to the detector, containing the text: $\langle L \rangle = 175 \text{ km}$.

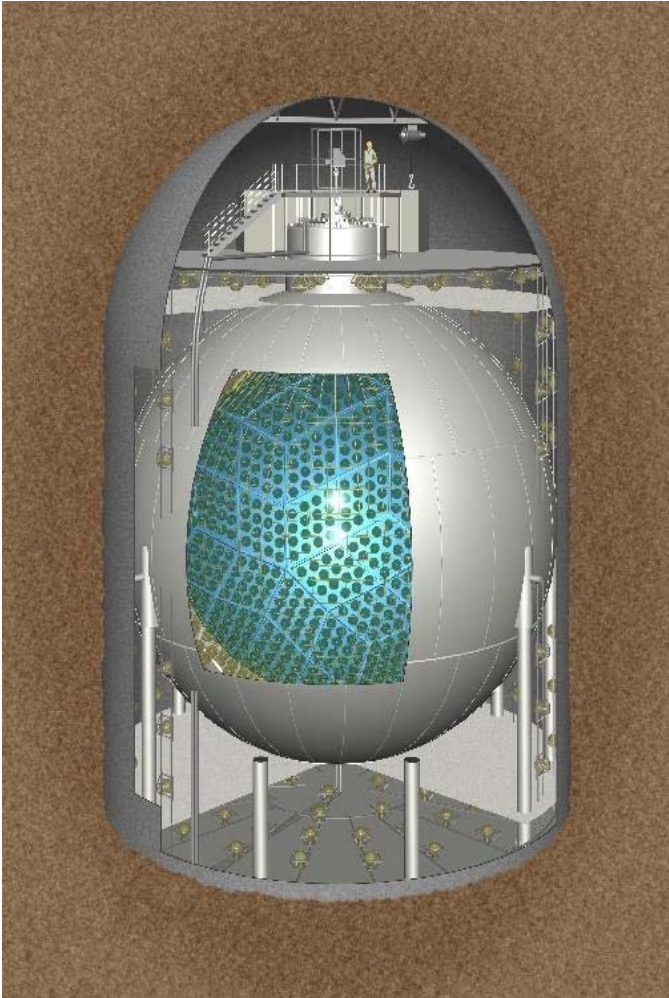
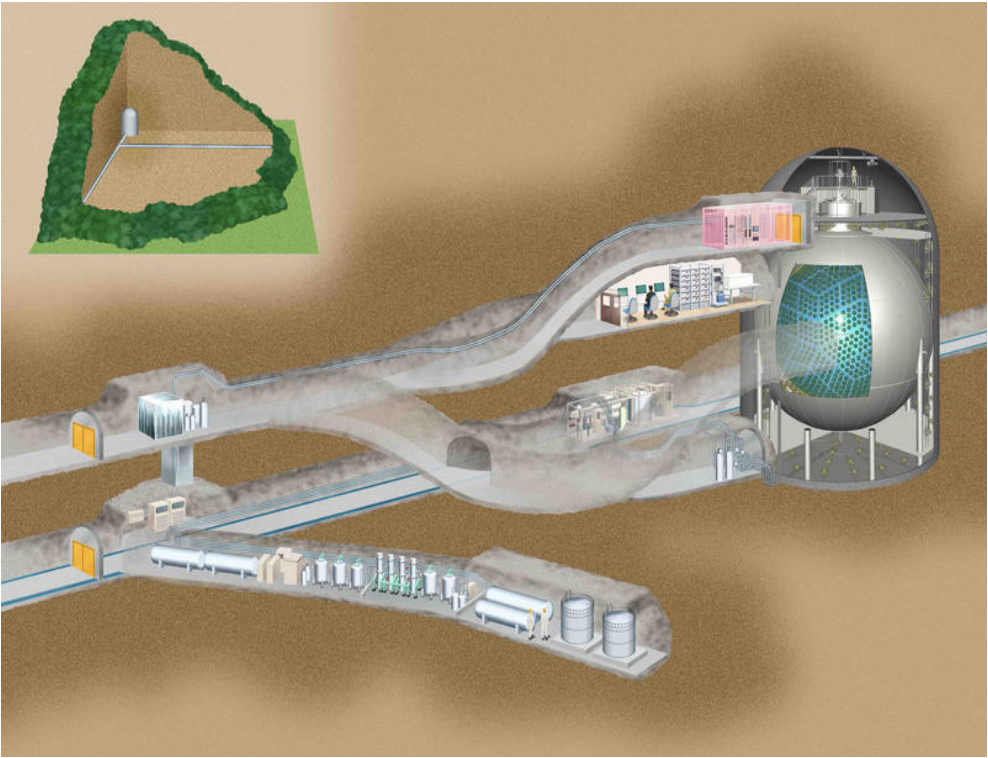


1000t scintillateur liquide

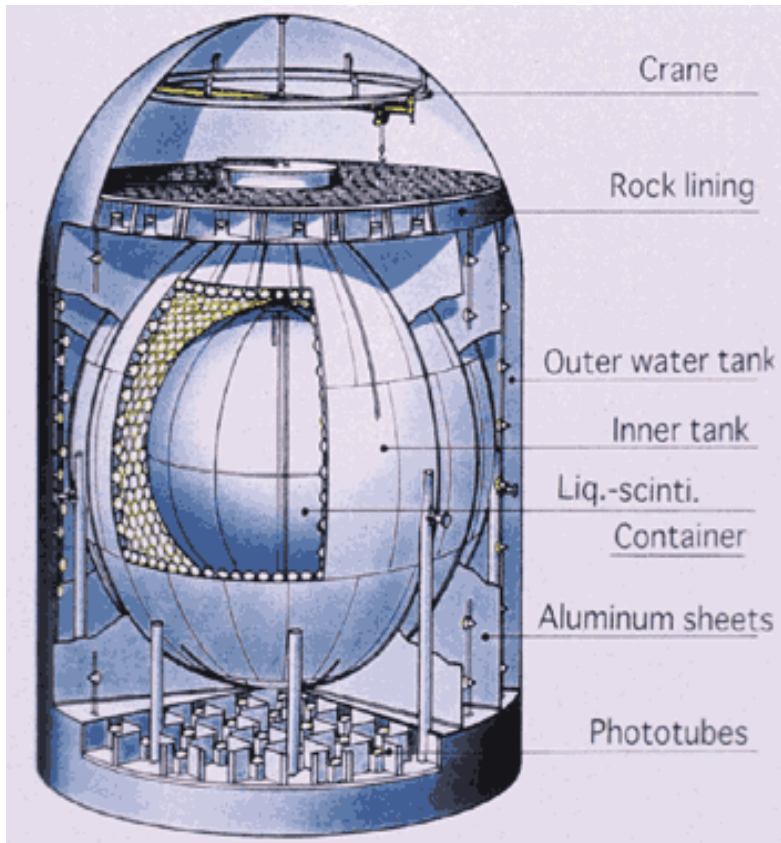
A cyan callout box pointing to the central core of the detector, containing the text: 1000t scintillateur liquide.



Kamland



Kamland



Neutrinos venant
 des réacteurs japonais
 pour prouver ou
 réfuter la solution LMA
 [$\langle d \rangle \gg 200 \text{ km}$]

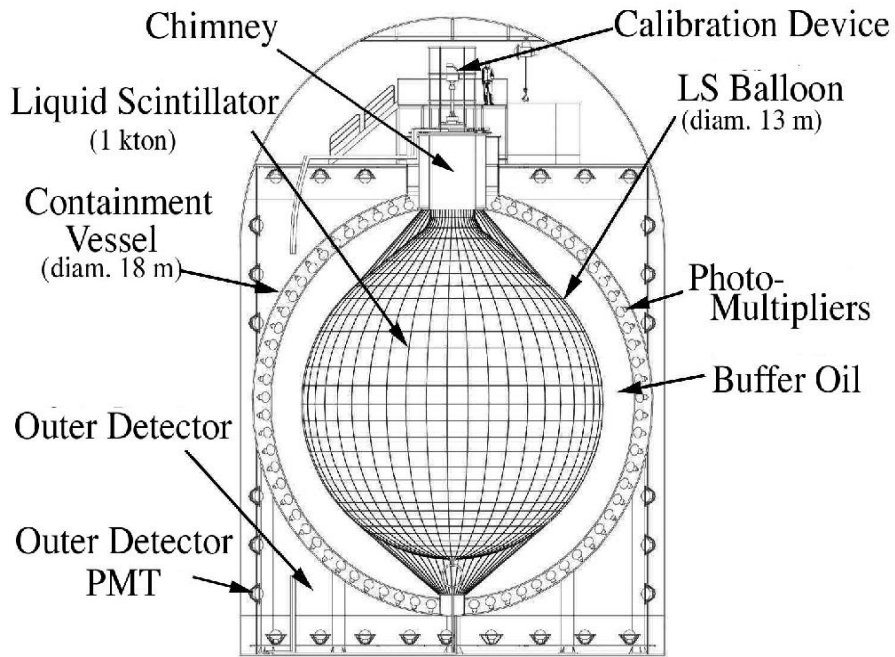
1000 tonnes de
 liquide scintillant



Prise de données
 depuis mars 2002

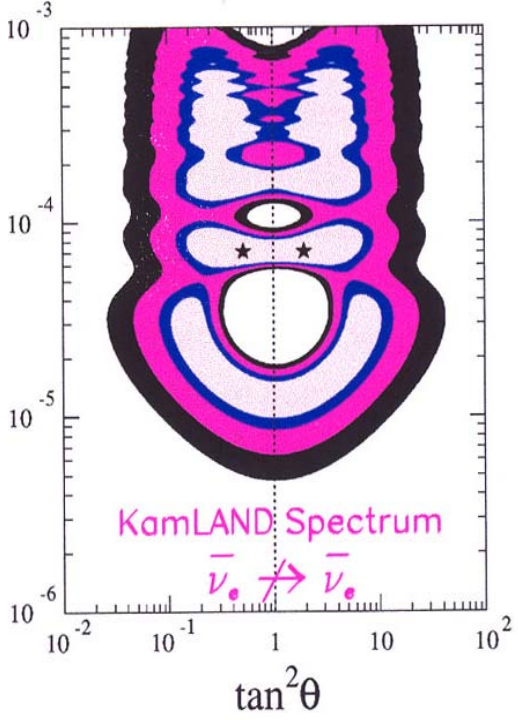
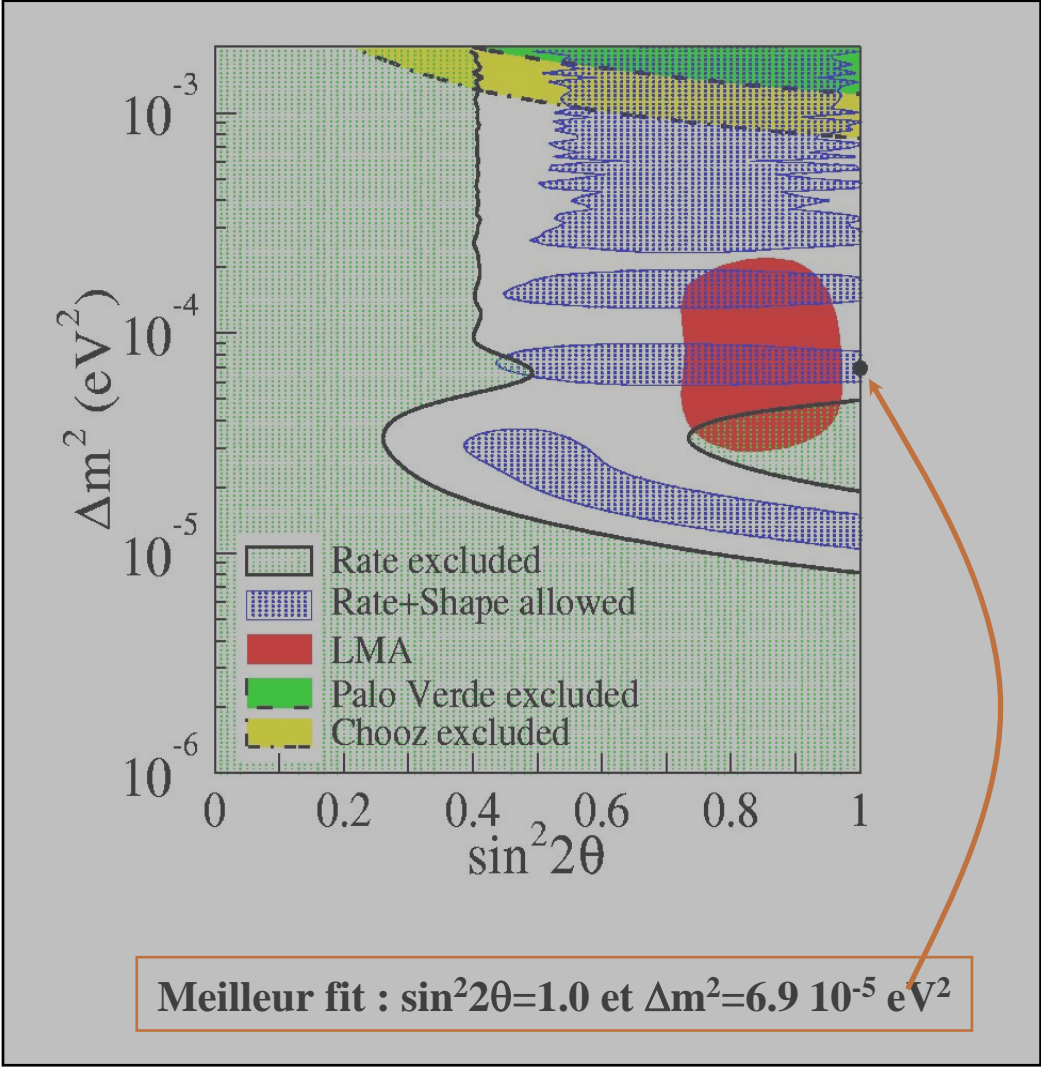


Kamland



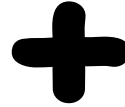


Kamland et les oscillations



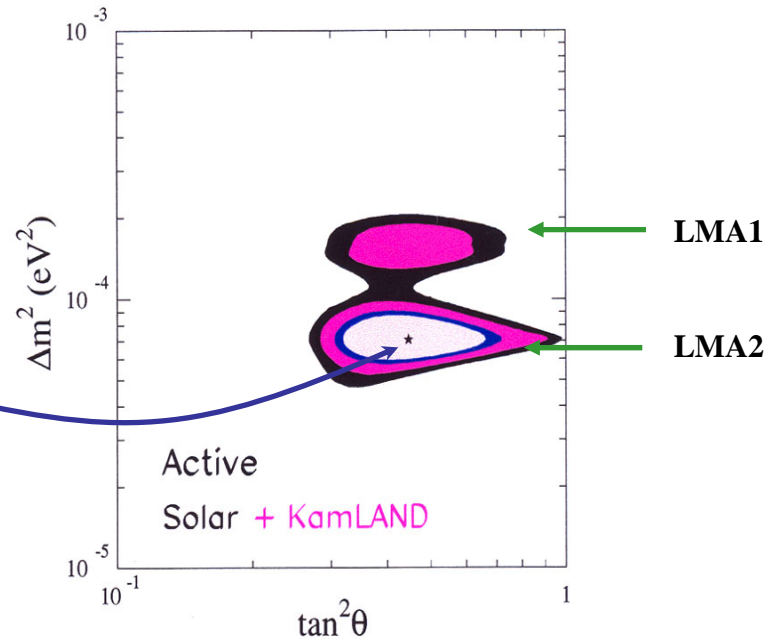
Bahcall, Gonzalez-Garcia, Pena-Garay
hep-ph/0212147

Les oscillations après Kamland



Soleil,
Nucléaire
Même combat !

$$\Delta m^2 = (7.3 \pm 0.5) 10^{-5} \text{ eV}^2$$
$$\tan^2 \theta = 0.42 \pm 0.07$$



Bahcall, Gonzalez-Garcia, Pena-Garay
hep-ph/0212147