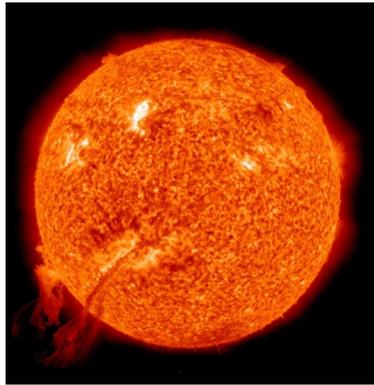


Mesure directe des neutrinos primordiaux du Soleil dans Borexino





Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun

Borexino Collaboration*

28 AUGUST 2014 | VOL 512 | NATURE | 383



LE FIGARO.fr

ACTUALITÉ | ECONOMIE | SPORT | CULTURE | LIFESTYLE | MADAME

Edition ABONNÉS

Plongée dans le cœur thermonucléaire du Soleil

ACTUALITÉ > SCIENCES & ENVIRONNEMENT Par Tristan Vey | Publié le 29/08/2014 à 17:41

LA TÊTE AU CARRÉ

par Mathieu Vidard du lundi au vendredi de 14h à 15h

l'émission | (ré)écouter | archives | à venir | contactez-nous | podcast

Les vidéos | Le blog au carré



l'émission du jeudi 18 septembre 2014



Soleil et neutrinos 12 commentaires

POUR LA SCIENCE

ACTUALITÉS | 03/09/2014 10:30 | Réagir à cet article | < Précédent - Suivant >

ASTROPHYSIQUE

Neutrinos : le Soleil à cœur ouvert

Les physiciens de l'expérience *Borexino* ont mesuré pour la première fois le flux des neutrinos produits par la fusion de protons au centre du Soleil, les témoins directs de la production d'énergie de notre étoile.

Libération

{SCIENCES}

Par Sylvestre Huet
Journaliste à Libération

LES NEUTRINOS DU SOLEIL CAPTÉS EN ITALIE



CARTE BLANCHE

Roland Lehoucq

Astrophysicien, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Le Monde

Des neutrinos pour ausculter le cœur du Soleil

Une équipe de physiciens a sondé le cœur du Soleil en direct (*Nature*, 28 août). Grâce au détecteur *Borexino*, ils ont montré que la puissance produite par les réactions nucléaires qui ont lieu dans les régions centrales de notre étoile n'a pratiquement pas changé depuis cent mille ans.

Pour comprendre comment ils y sont parvenus, il faut se rappeler que le Soleil est une sphère de gaz chaud dont l'équilibre dépend du jeu contradictoire entre gravité et pression. Il en résulte un fort contraste de température qui engendre un transfert d'énergie prévalant l'excès de la région chaude interne pour le céder à la région froide externe. En surface, cette énergie s'échappe sous forme de lumière : le Soleil brille !

Condamné à perdre de l'énergie par sa surface, il brûlerait durablement - des milliards d'années - car une source interne compense l'énergie de surface. Au centre, des réactions de fusion transforment 4 noyaux d'hydrogène en 1 noyau d'hélium et libèrent une énergie considérable. La production de 1 noyau d'hélium nécessite la conversion de 2 protons en neutrons, chaque transmutation s'accompagnant de l'émission de 1 neutrino. Comme

chaque seconde, chaque centimètre carré de la Terre est frappé par 66 milliards de neutrinos ! Vous ne sentez rien, et eux non plus d'ailleurs. En un jour, seuls 150 nous font la grâce de s'arrêter au cœur de *Borexino*.

Même si elles n'en ont pas la couleur, ces particules sont d'une discrétion de violette. Si le Soleil est transparent aux neutrinos, il ne l'est pas à la lumière. En fait, l'énergie produite par les réactions de fusion met environ cent mille ans à émerger par la surface solaire sous forme de lumière. Les neutrinos observés par *Borexino* sont donc des témoins directs des conditions qui régissent actuellement au cœur de notre étoile, tandis que l'énergie qui rayonne d'elle maintenant a été produite il y a bien longtemps.

Le flux de neutrinos mesuré par *Borexino* a permis de déduire la puissance dégagée par les réactions de fusion. Comme elle est tout à fait comparable à la puissance « rayonnée » par la surface de notre étoile, c'est que l'activité nucléaire du Soleil n'a pas sensiblement varié depuis cent mille ans.

Vous pouvez donc être rassuré sur la santé de notre étoile : sa luminosité restera pratiquement stable dans les prochains millénaires. ■



CERN COURIER

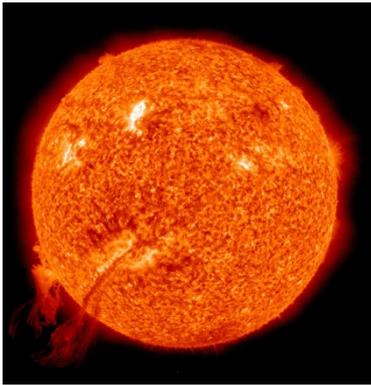
Sep 23, 2014

Borexino measures the Sun's energy in real time

The Borexino experiment at the INFN Gran Sasso National Laboratories has measured the energy of the Sun in real time, showing for the first time that the



3 SEPTEMBRE 2014



PHYSICS LETTERS B B 285 (1992) 376-389



Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso

GALLEX Collaboration ^{1,2,3,4,5}



The GALLEX experiment can truly claim to have observed, for the first time, the primary pp neutrinos.



MERCREDI 10 JUIN 1992

LES PARTICULES VENUES DU SOLEIL SE LAISSENT UN PEU PLUS ATTRAPER, MAIS PAS ASSEZ

Les neutrinos, lutins du cosmos

On n'en trouvait qu'un tiers de ce qui était prévu par les modèles théoriques. Maintenant, on en piège les deux tiers. Les neutrinos, témoins privilégiés de l'activité solaire, conservent leur mystère.

LE FIGARO VENDREDI 5 JUIN 1992



Une découverte au laboratoire de Gran Sasso, en Italie

Des neutrinos qui éclairent l'enfer du Soleil

Un détecteur installé sous 1 000 m de rocher a pour la première fois piégé de ces particules dites « primordiales », de faible énergie, émises au cœur de notre étoile lors de réactions thermonucléaires. L'inventaire de ces fantômes et de leurs avatars reste encore à faire.

DER SPIEGEL

218 DER SPIEGEL 26/1992

Neutrinos

Flitzer zu Gott

Auf einer Forschertagung in Granada gab es Streit um die Frage: Haben Neutrinos, die flüchtigsten unter den Atomteilchen, eine Masse oder nicht?

Le Monde Mercredi 10 juin 1992

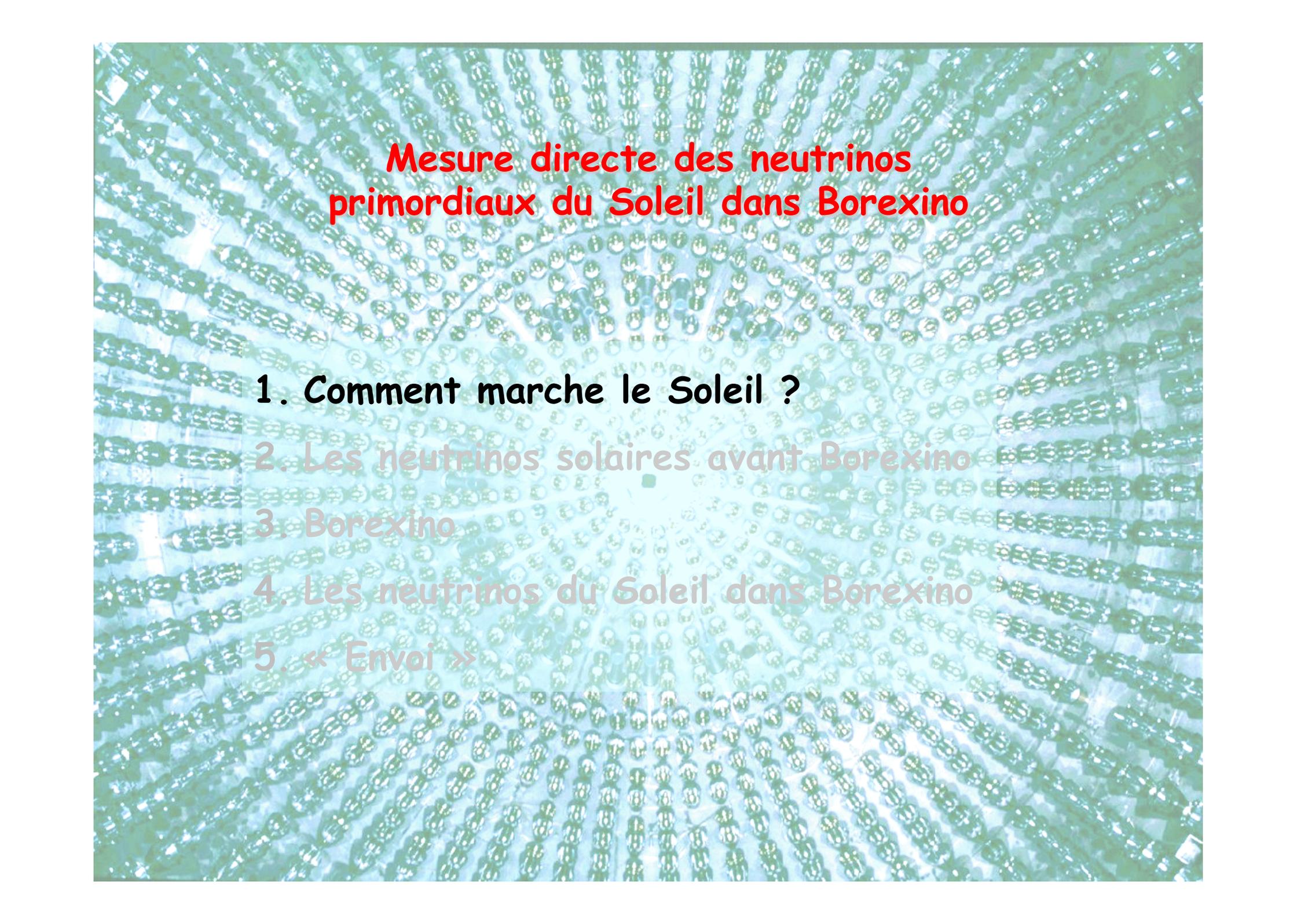
Casse-tête solaire

On croyait connaître le Soleil. Mais des particules manquent à l'appel qui pourraient bouleverser la théorie



**Mesure directe des neutrinos
primordiaux du Soleil dans Borexino**

- 1. Comment marche le Soleil ?**
- 2. Les neutrinos solaires avant Borexino**
- 3. Borexino**
- 4. Les neutrinos du Soleil dans Borexino**
- 5. « Envoi »**

The background of the slide is a microscopic image of plant tissue, likely a leaf cross-section, showing a regular grid of cells. A bright, circular spot is visible in the center of the grid, possibly representing a vascular bundle or a specific cell structure. The text is overlaid on this image.

Mesure directe des neutrinos primordiaux du Soleil dans Borexino

1. Comment marche le Soleil ?
2. Les neutrinos solaires avant Borexino
3. Borexino
4. Les neutrinos du Soleil dans Borexino
5. « Envoi »

Le Soleil

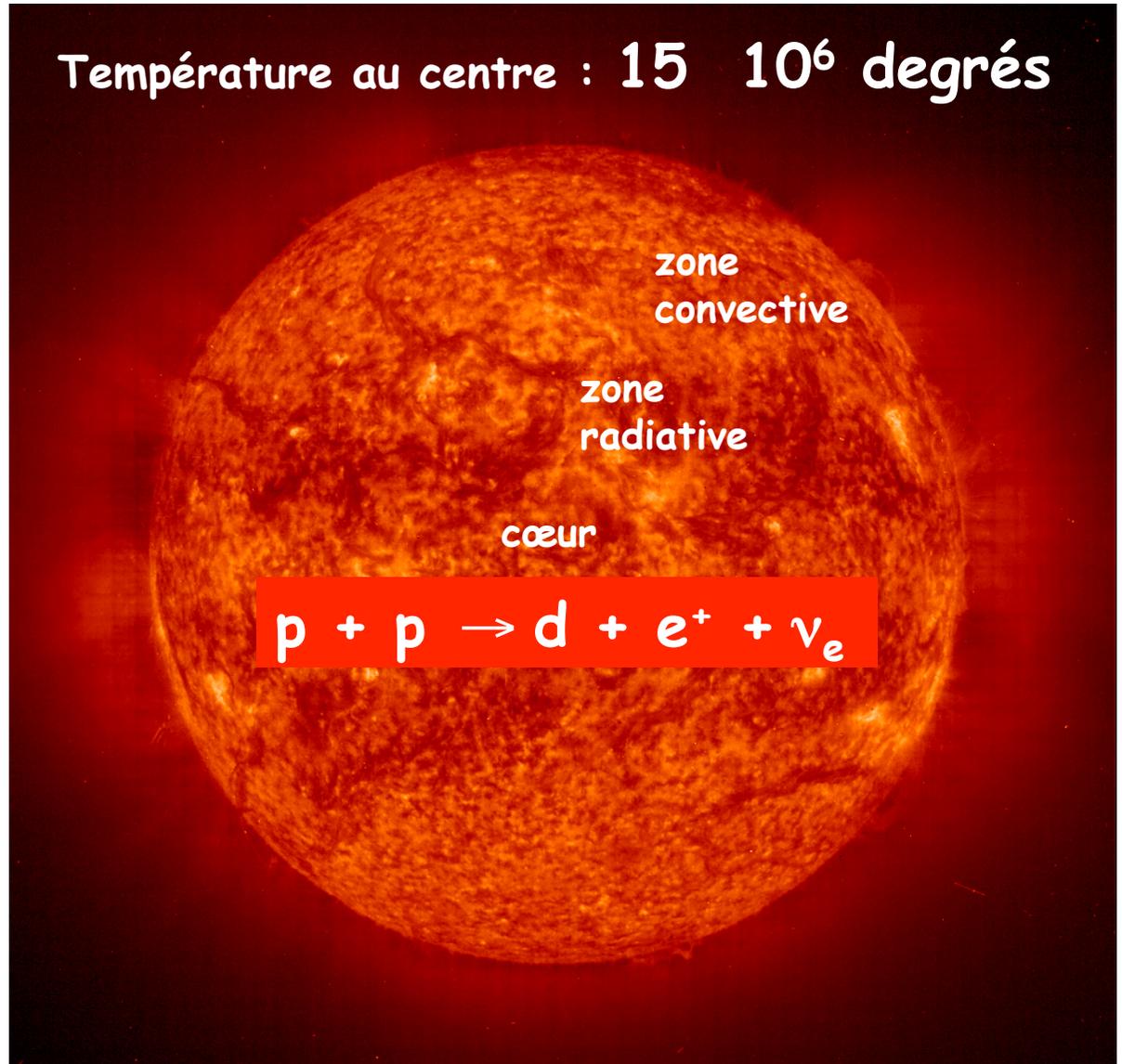
➤ Composition :
73% hydrogène (H)
25% hélium (He)
2% autres éléments

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

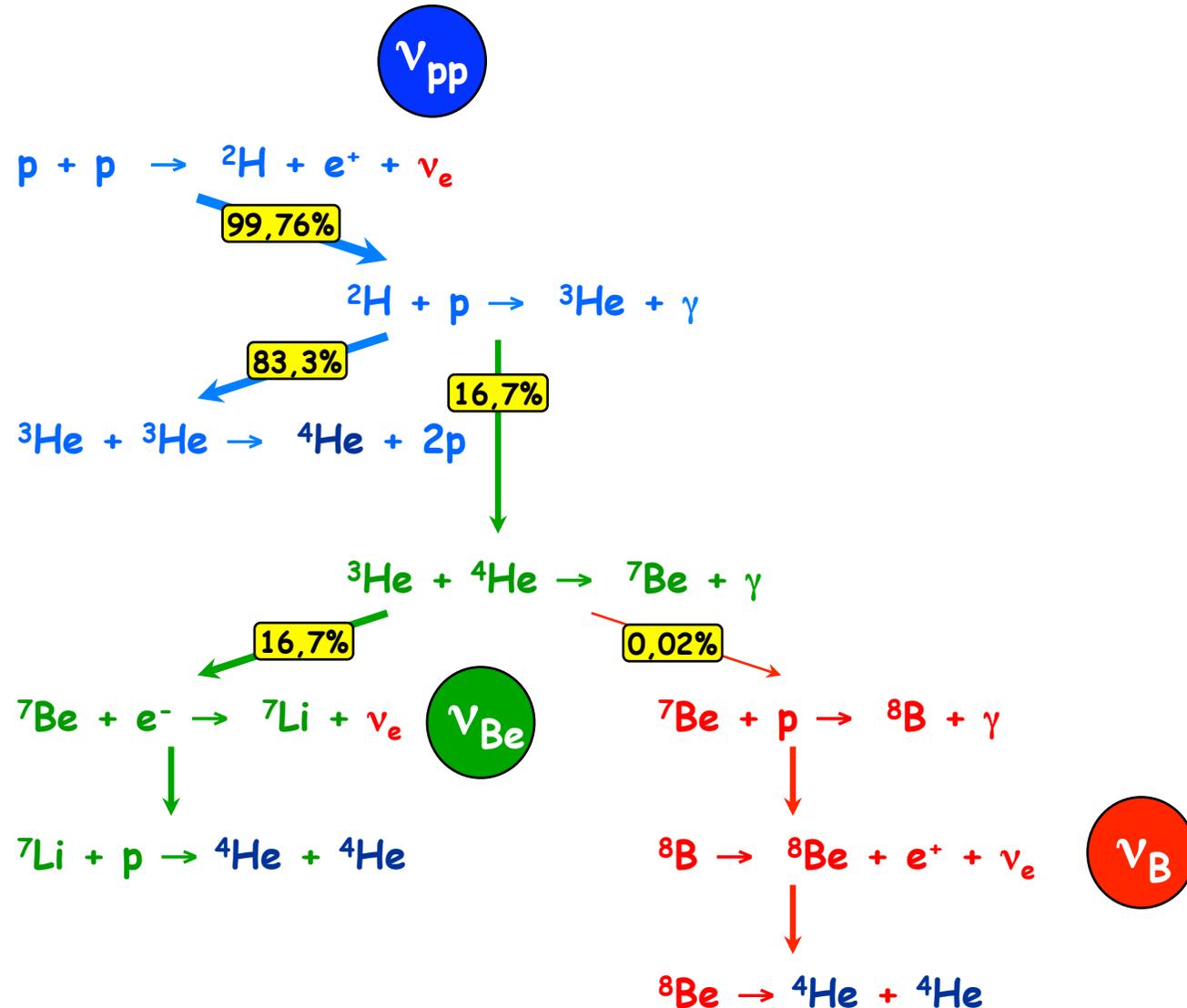
zone
convective

zone
radiative

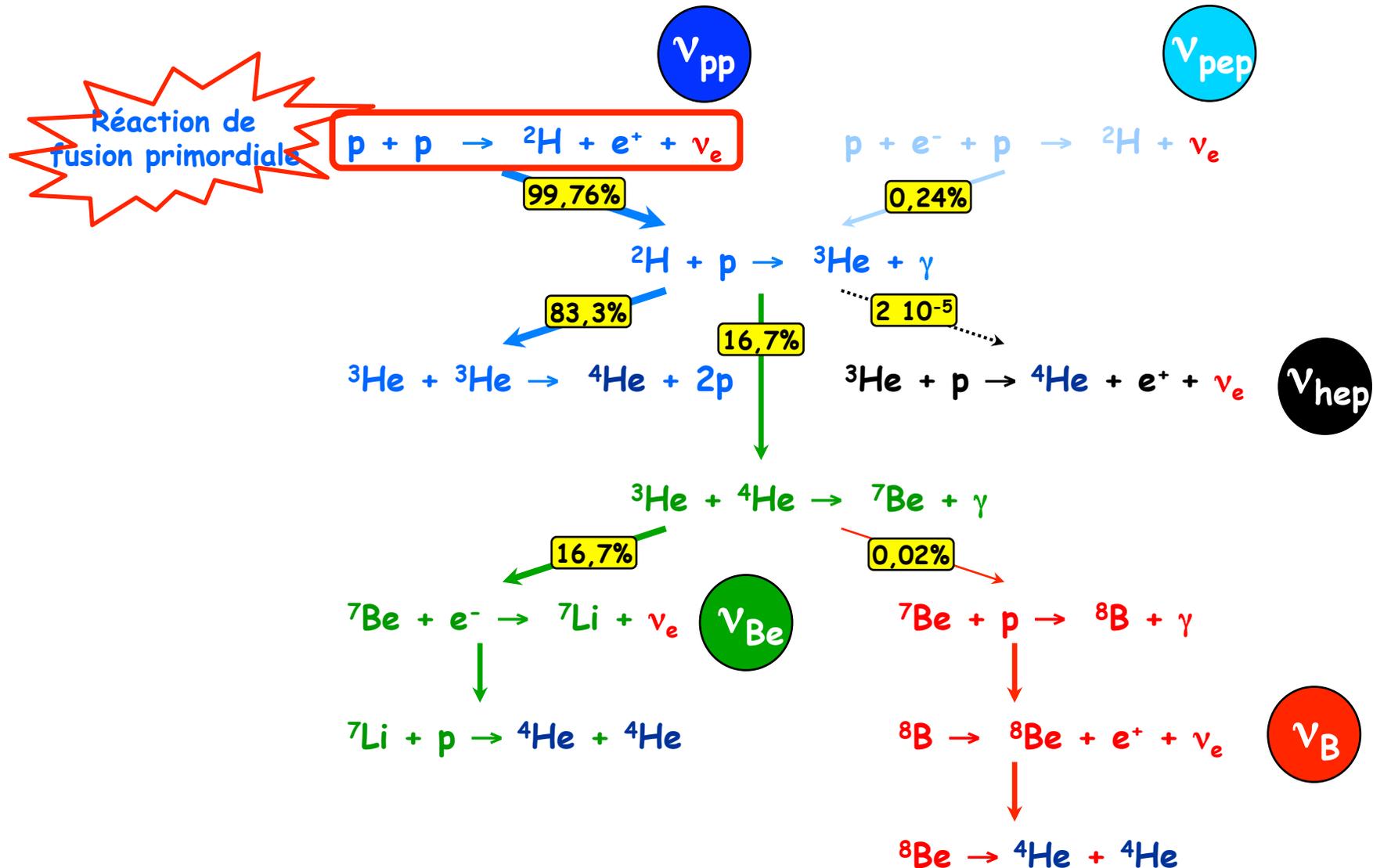
cœur



Réactions nucléaires dans le Soleil

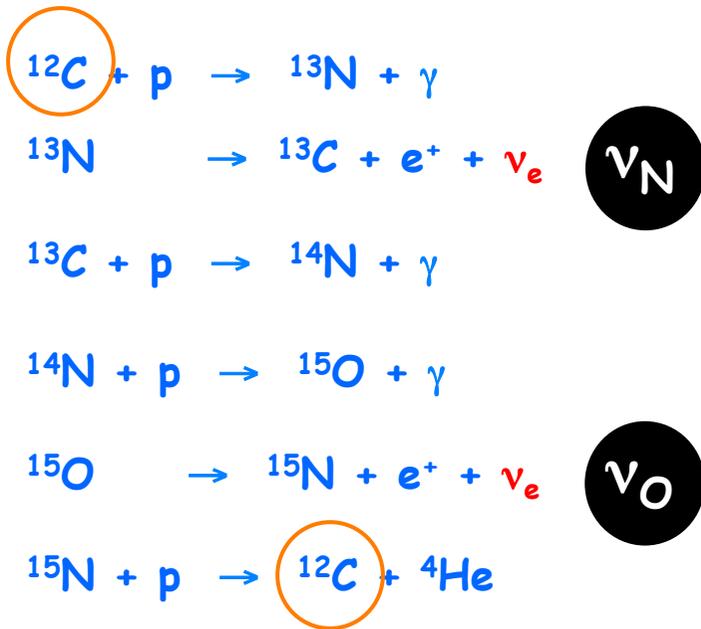


Réactions nucléaires dans le Soleil

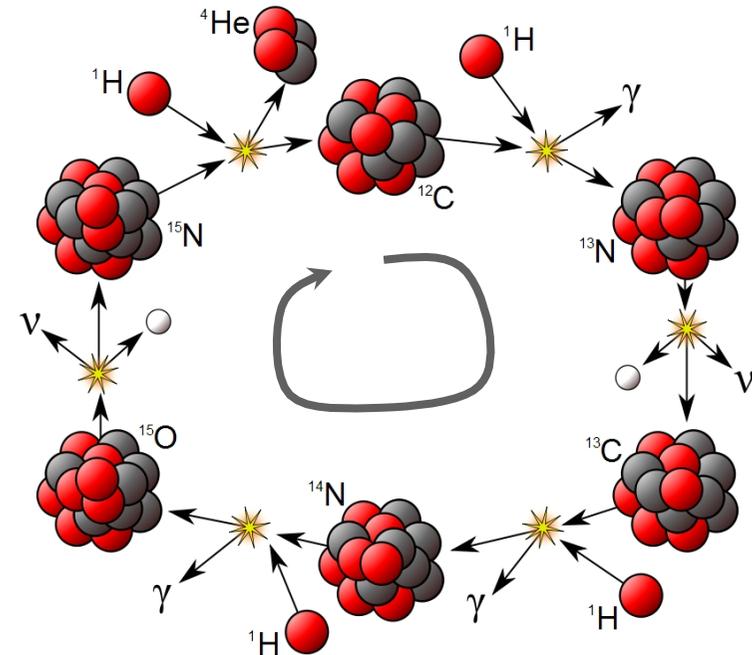


Réactions nucléaires dans le Soleil

cycle CNO

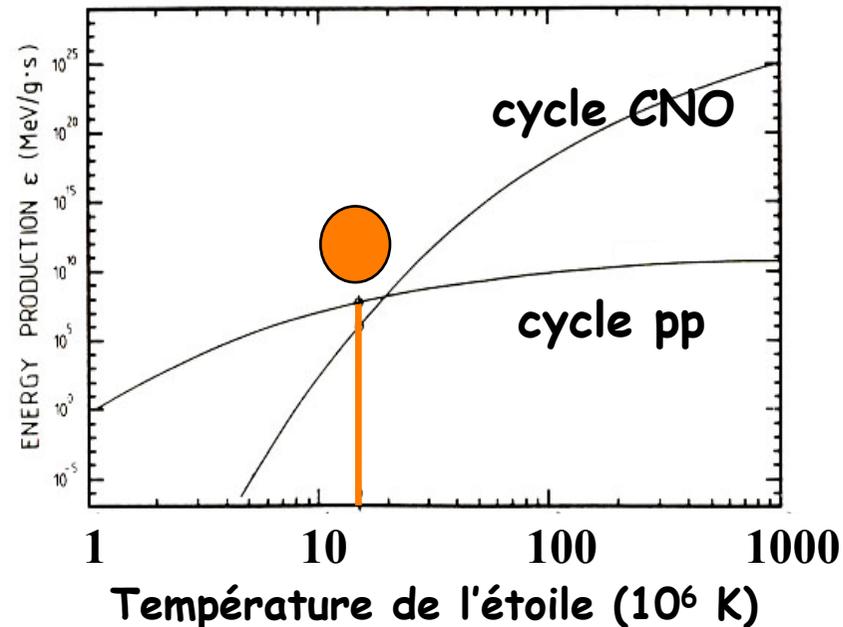


^{12}C : catalyseur



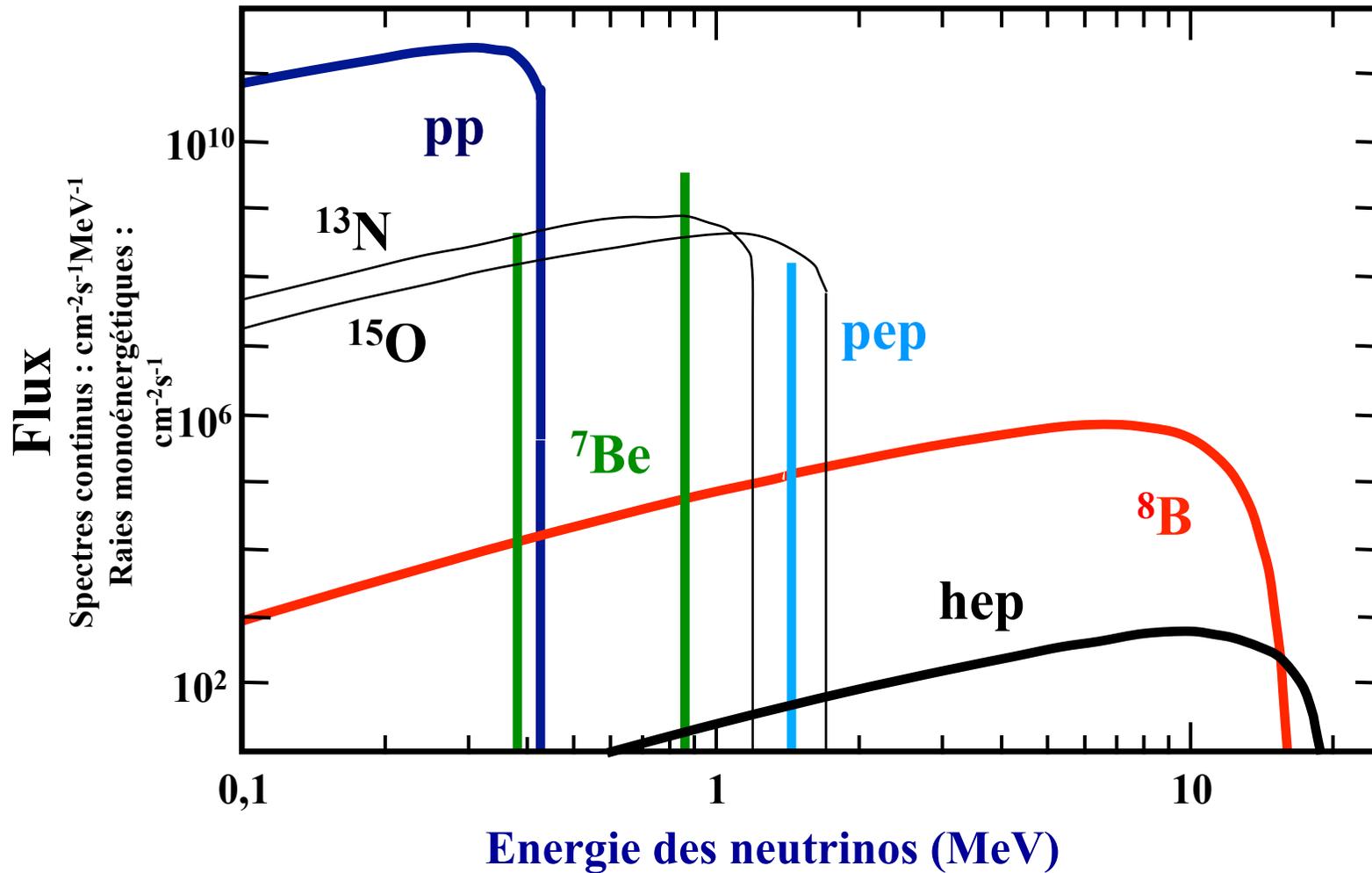
	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

Production d'énergie dans les étoiles

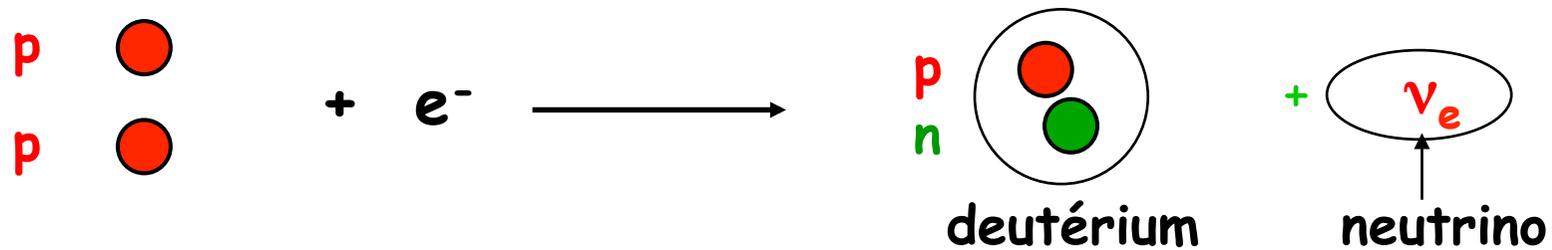


Compétition entre la chaîne pp et le cycle CNO en fonction de la température stellaire.
Pour le Soleil, la chaîne pp domine (~99%).

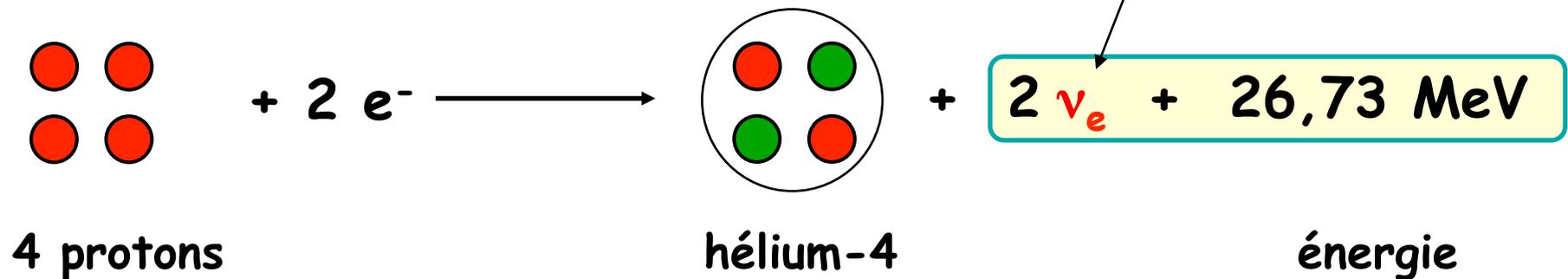
Spectre en énergie des neutrinos solaires



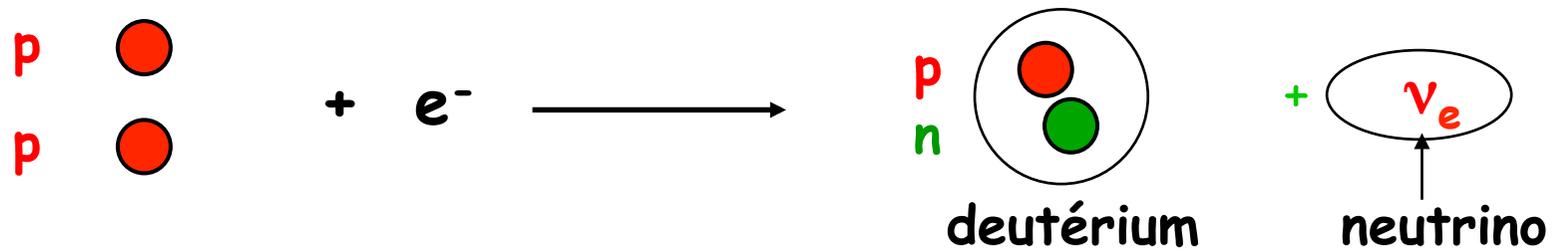
Fusion primordiale entre 2 protons au cœur du Soleil



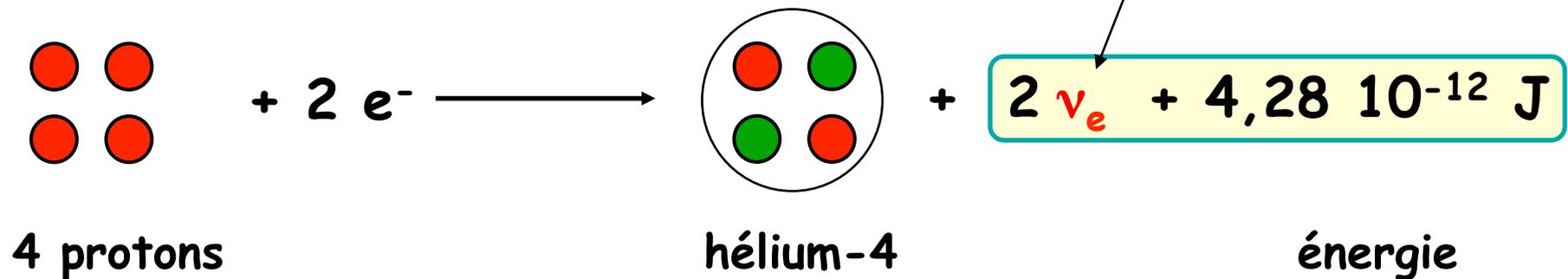
Bilan énergétique



Fusion primordiale entre 2 protons au cœur du Soleil



Bilan énergétique



Le Soleil

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

Constante solaire:
1360 W/m²

Luminosité

$$L = 3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

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

zone
convective

zone
radiative

cœur



Energie du Soleil : cycle compliqué de réactions nucléaires

Bilan énergétique : 4 protons + 2 électrons → hélium-4 + 2 neutrinos + $4,28 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

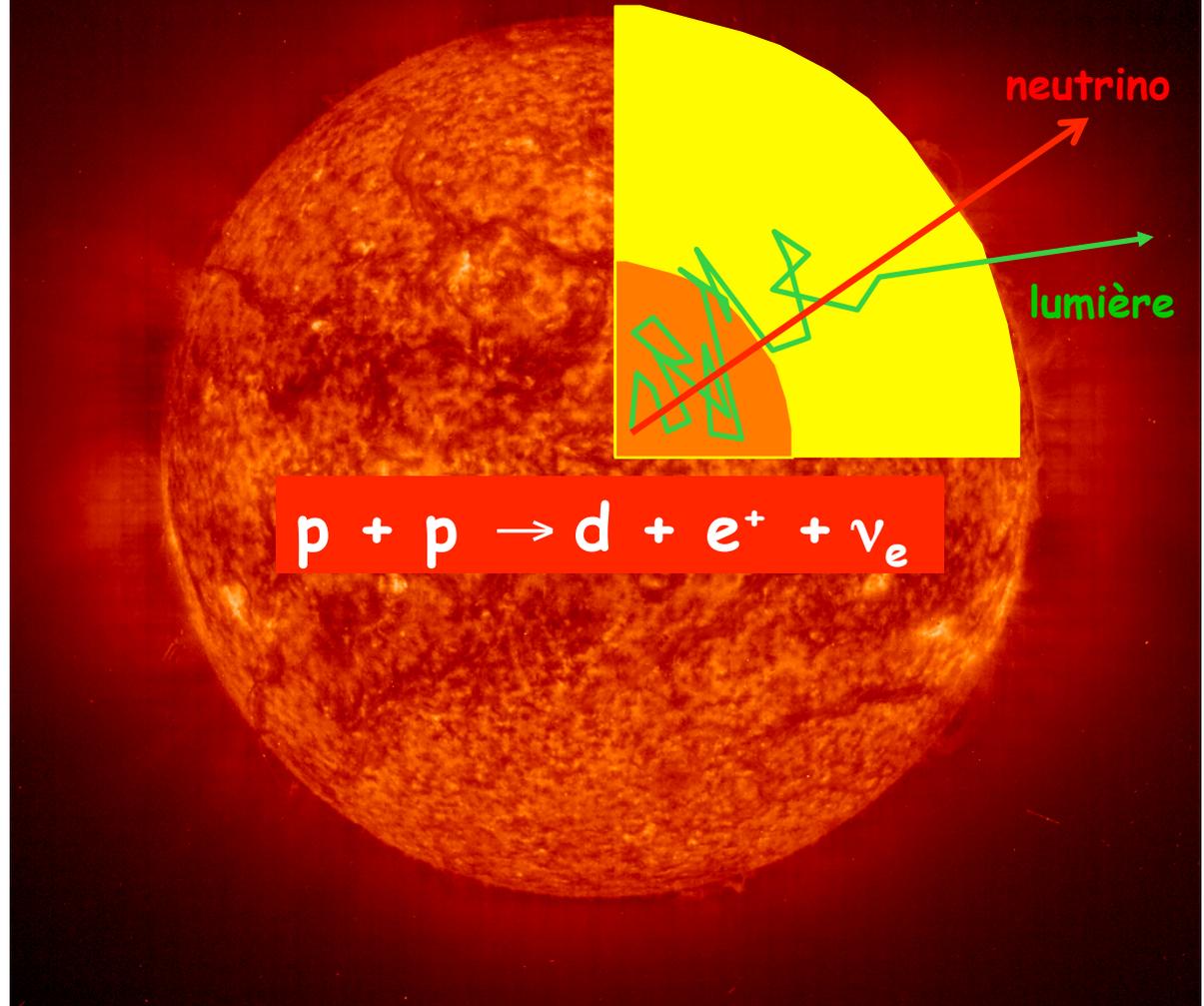
Le Soleil

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

Constante solaire:
1360 W/m²

Luminosité
 $L = 3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$

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

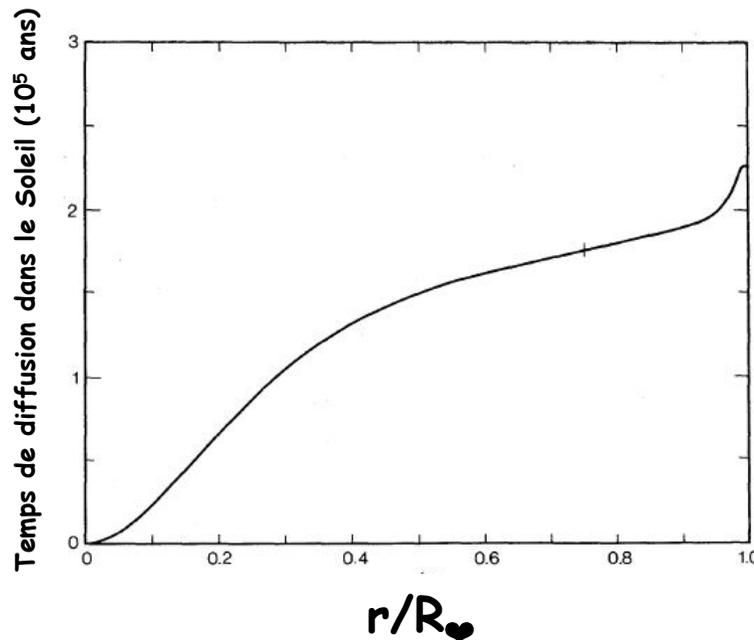


Energie du Soleil : cycle compliqué de réactions nucléaires

Bilan énergétique : 4 protons + 2 électrons \rightarrow hélium-4 + 2 neutrinos + $4,28 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

Combien de temps met l'énergie (« la lumière ») à sortir du Soleil ?

Les photons sont confrontés à une succession « infinie » de collisions (émission, réabsorption). Leur libre parcours moyen est : $l = 1/(\kappa\rho)$
 κ est l'opacité et ρ la densité (déterminés par les modèles solaires)



10^{25} collisions
 $l = 0,09$ cm

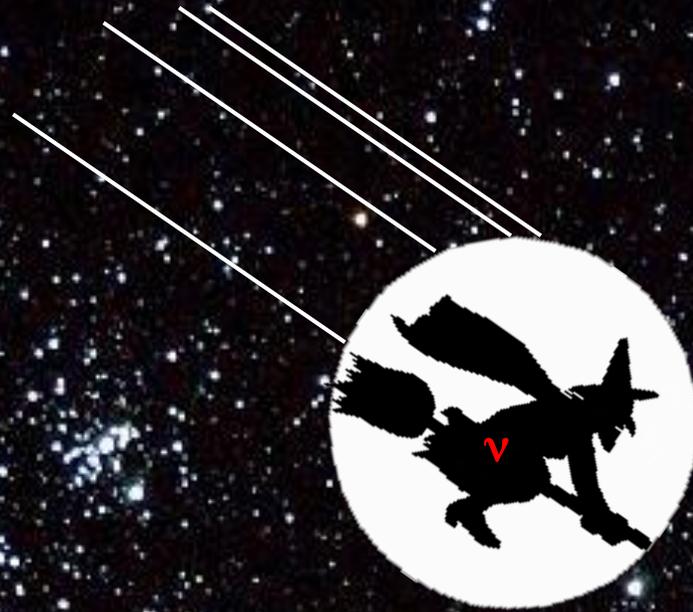
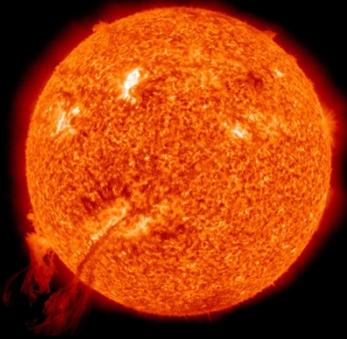
$t = 170\ 000$ ans !

[Attention, c'est une estimation moyenne]

Energie des photons au cœur : 100 keV. Ils arrivent à la surface dans le visible (eV) !
Les sources d'opacité sont la diffusion sur électron, la photoionization, le bremsstrahlung inverse,... Beaucoup de physique atomique pour créer les tables d'opacité.

Mitalas & Sills (Ap. J. 401 (1992) 759)

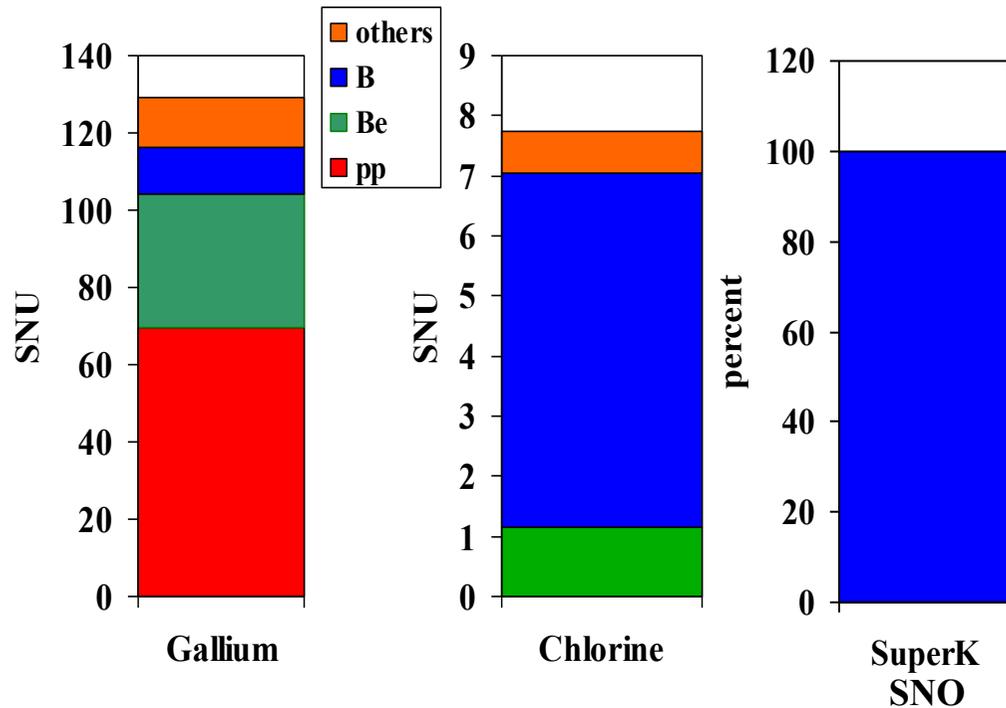
Traversée du Soleil pour les neutrinos : 2 secondes !!!



**Durée du voyage vers la Terre pour les neutrinos :
8 minutes (quasiment à la vitesse de la lumière)!**



Prédictions du modèle standard du \odot



Flux (cm ⁻² s ⁻¹)	GS98 (High met.)	AGS09 (Low met.)	Error
pp (10 ¹⁰)	5.98	6.03	0.6%
pep (10 ⁸)	1.44	1.47	1.2%
⁷ Be (10 ⁹)	5.00	4.56	7%
⁸ B (10 ⁶)	5.58	4.59	14%
¹³ N (10 ⁸)	2.96	2.17	14%
¹⁵ O (10 ⁸)	2.23	1.56	15%
Exp. radiochim. (SNU)			
Chlore	8.5	6.9	10%
Gallium	128	121	6%

40 ans de modélisation

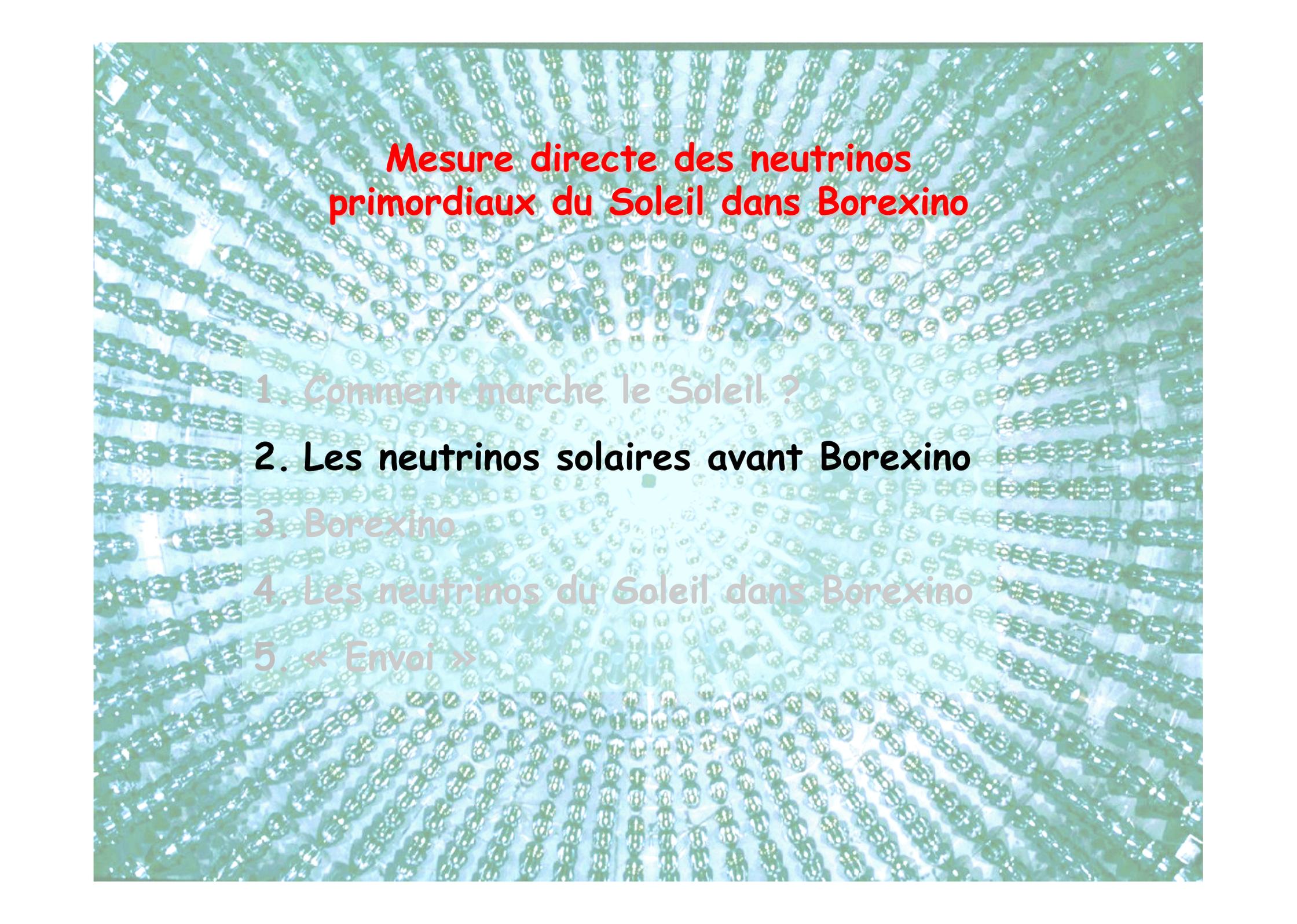
- ⊛ J.N. Bahcall, M. Pinsonneault, S. Basu, astro-ph/0010346, Ap. J. 555 (2001) 990
- A.M. Serenelli, W.C. Haxton, C. Pena-Garay, arXiv:1104.1639
- ⊛ S. Turck-Chièze et al., Ap. J. Lett. 555 (2001) L69
- S. Turck-Chièze and S. Couvidat, Rep. Prog. Phys. 74 (2011) 086901

Z/X

0.0229

0.0178

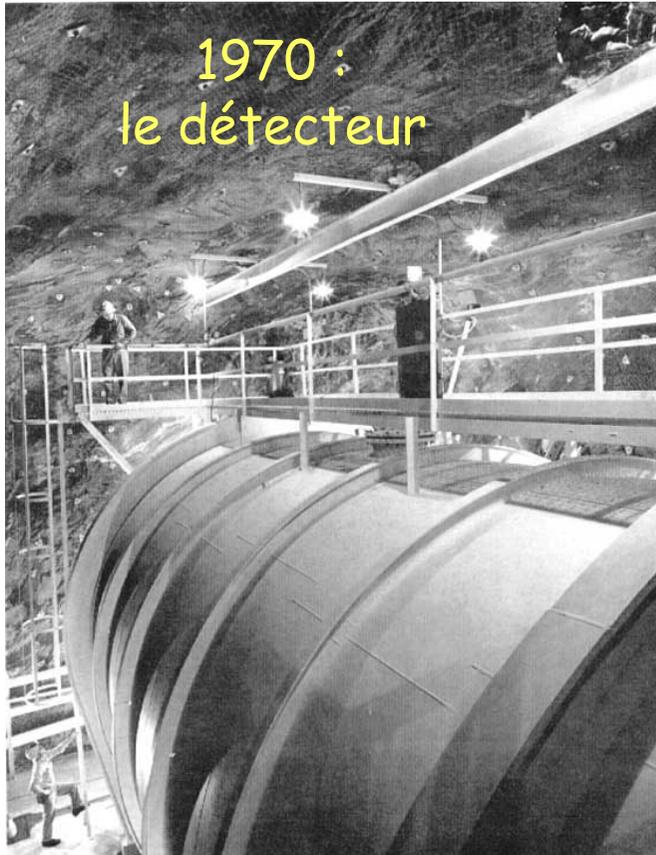
Meilleure détermination de la métallicité mais mauvais accord avec l'héliosismologie



Mesure directe des neutrinos primordiaux du Soleil dans Borexino

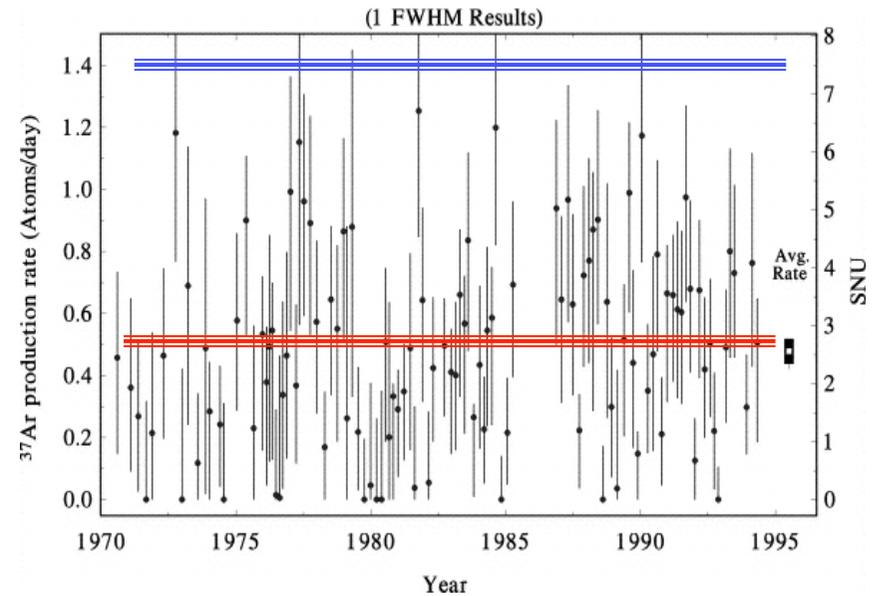
1. Comment marche le Soleil ?
2. Les neutrinos solaires avant Borexino
3. Borexino
4. Les neutrinos du Soleil dans Borexino
5. « Envoi »

L'expérience « pionnière » au chlore



1970 :
le détecteur

- Radiochimique
- Sensible aux neutrinos Be et B

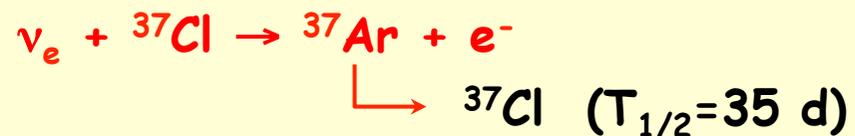


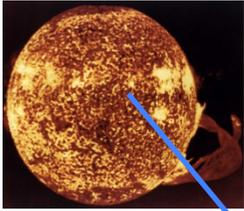
Résultat :
 2.56 ± 0.20 SNU

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

Homestake mine (South Dakota)

600 tons of C_2Cl_4





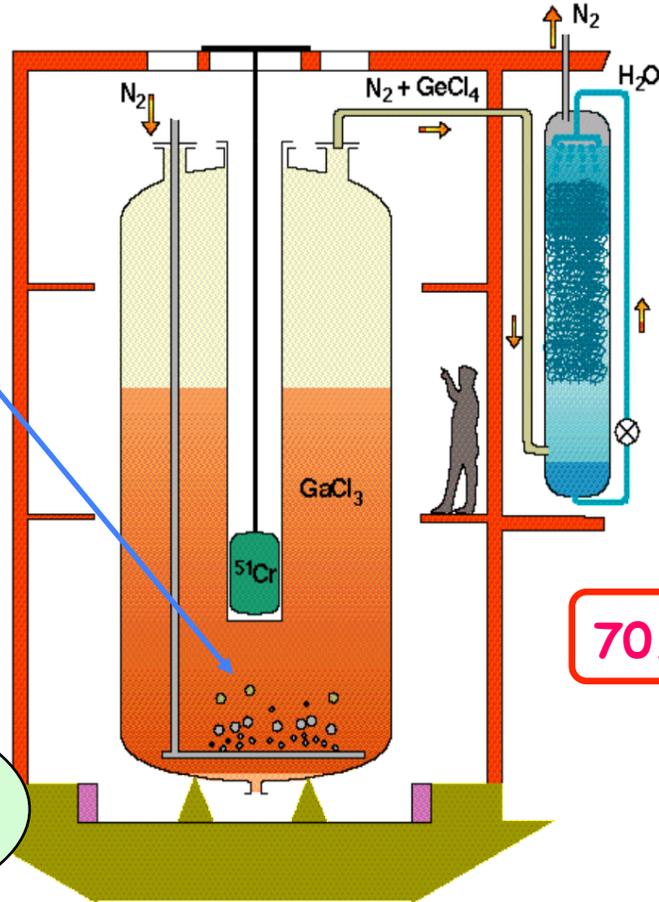
GALLEX (1992-2002) : détection radiochimique des neutrinos solaires primordiaux

$L = 150 \text{ millions km}$
 $\langle E \rangle = 1 \text{ MeV}$



seuil = 233 keV

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



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

108 runs

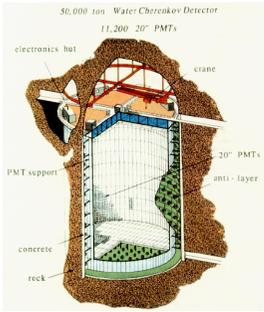
$70.8 \pm 4.5_{\text{(stat)}} \pm 3.8_{\text{(syst)}} \text{ SNU}$

56% des neutrinos
solaires attendus
 $(128 \pm 8) \text{ SNU}$

Détecteur européen GALLEX (Gran Sasso)

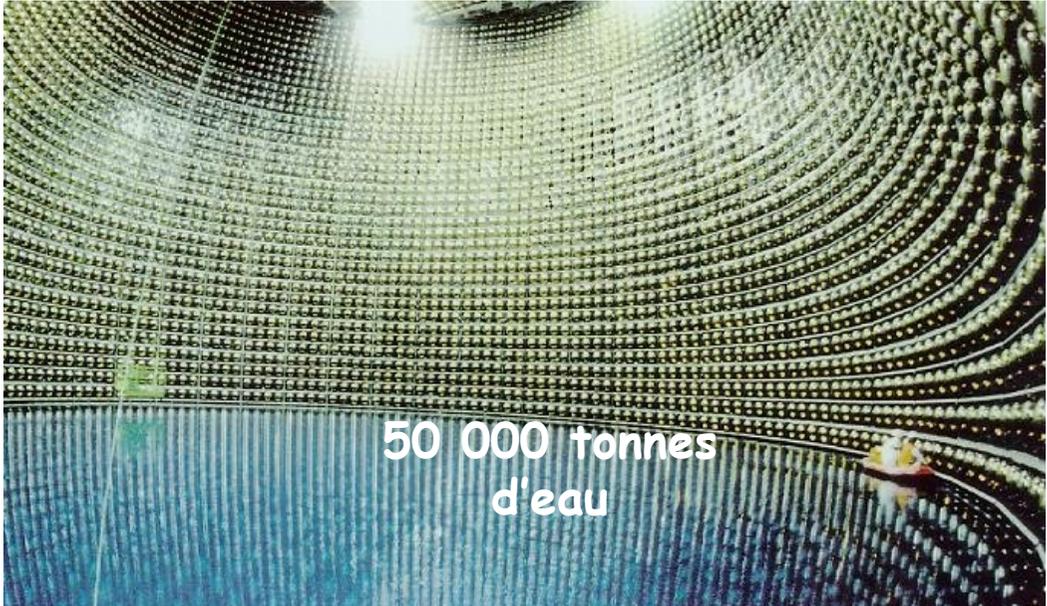
[SAGE (laboratoire de Baksan) : résultats analogues]

Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 118 (2003) 33

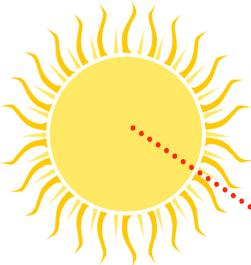
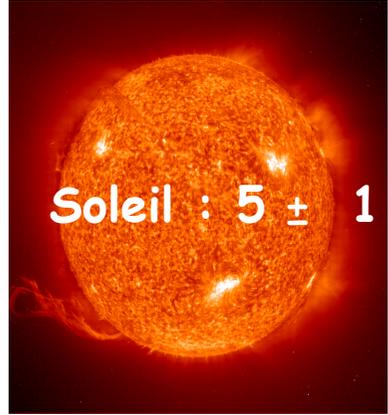


SuperKamiokande (>1996)

45% des neutrinos solaires attendus !



50 000 tonnes d'eau

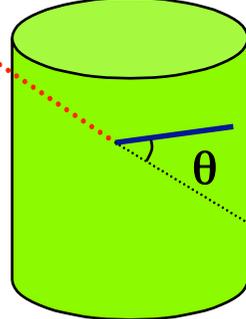


Flux measured for ${}^8\text{B } \nu$:
 $(2.32 \pm 0.03 \text{ (stat.)} \pm 0.08 \text{ (syst.)}) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

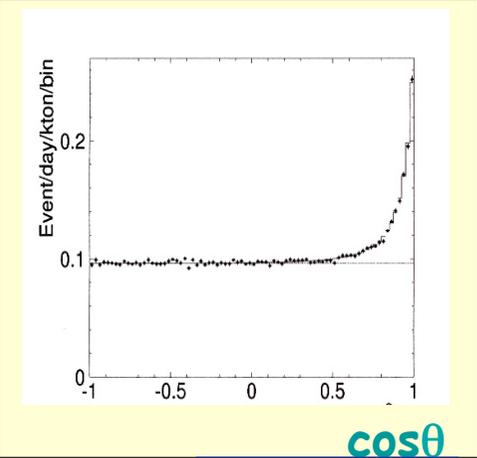
neutrino



$E > 5 \text{ MeV}$
 sensible aux neutrinos B

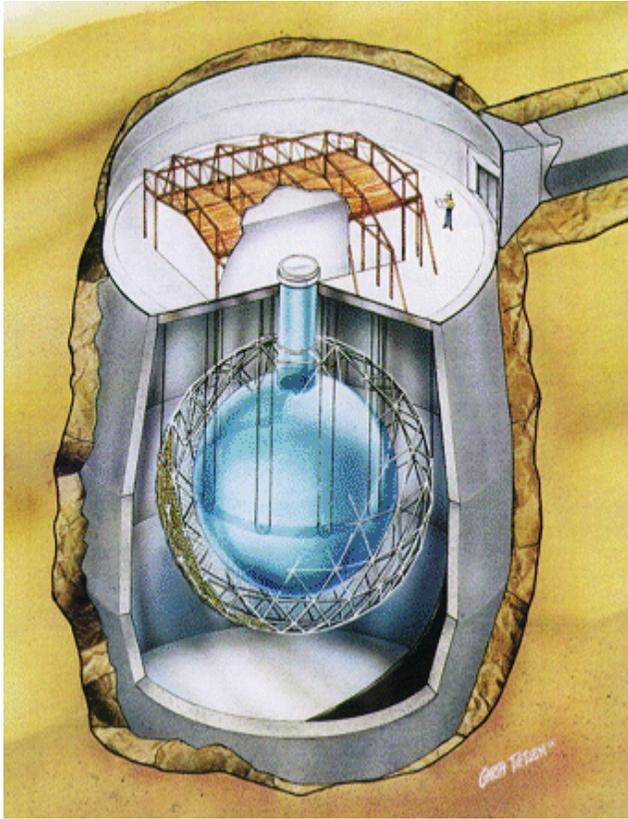


électron



cosθ

Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 2001-2009

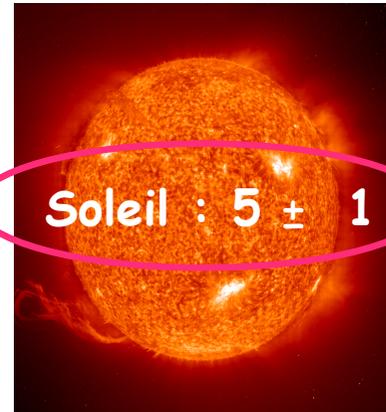


2000 tonnes D_2O
 $E > 4-5$ MeV
 sensible aux neutrinos B

	Flux ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ (CC)	1.68 ± 0.10
$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ (NC)	$5.25 \pm 0.16 \pm 0.11$
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ (elastic)	2.35 ± 0.27

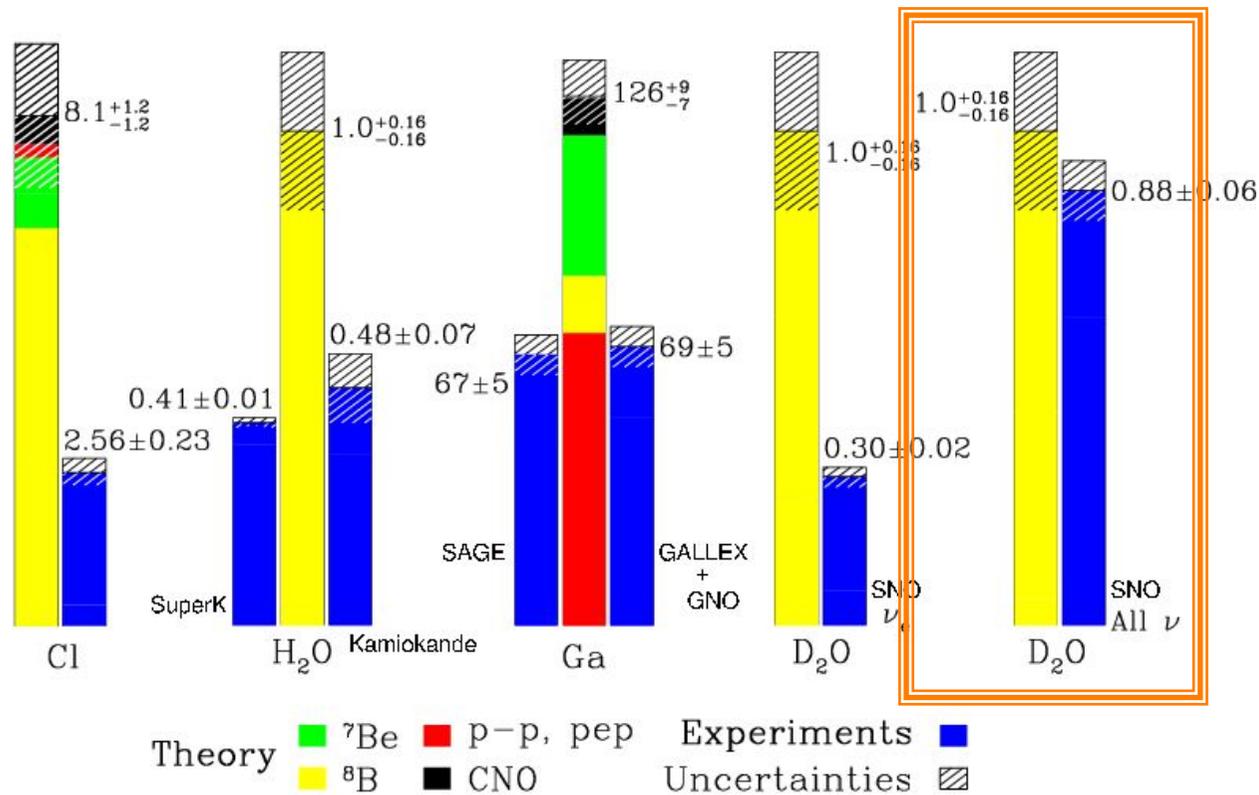
Pas d'oscillation :
 Flux total =
 $ES = CC = NC$

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



Résultats expérimentaux après SNO

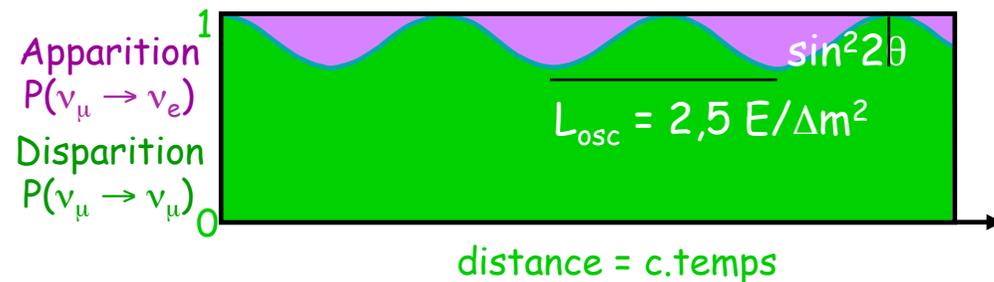
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



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.

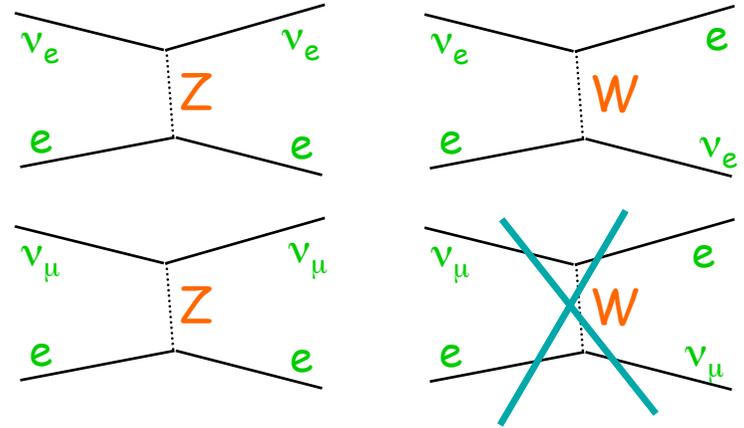


- ⊗ Pour obtenir les paramètres de l'oscillation (θ et Δm^2), on ajuste simultanément les réductions de flux de observées dans les expériences et les spectres.

Effet MSW

Équation d'évolution dans la matière (Wolfenstein) :

Comportement dissymétrique des ν_e et ν_μ vis à vis de la matière



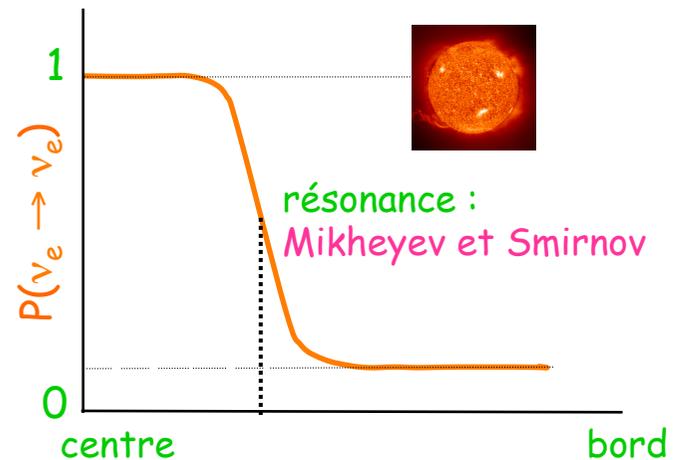
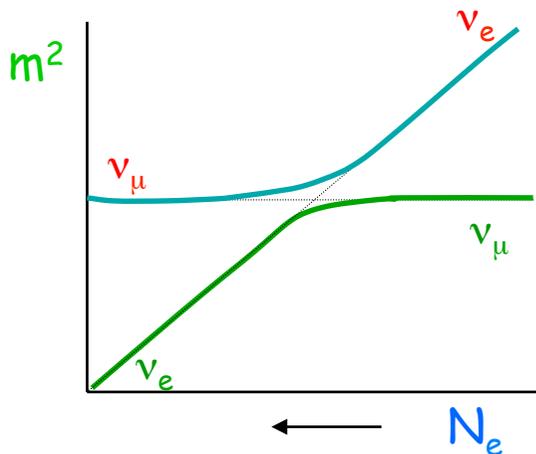
$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta m^2}{4p} \cos 2\theta + \frac{GN}{\sqrt{2}} & -\frac{\Delta m^2}{4p} \sin 2\theta \\ -\frac{\Delta m^2}{4p} \sin 2\theta & -\frac{\Delta m^2}{4p} \cos 2\theta - \frac{GN}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

N_e : densité électronique



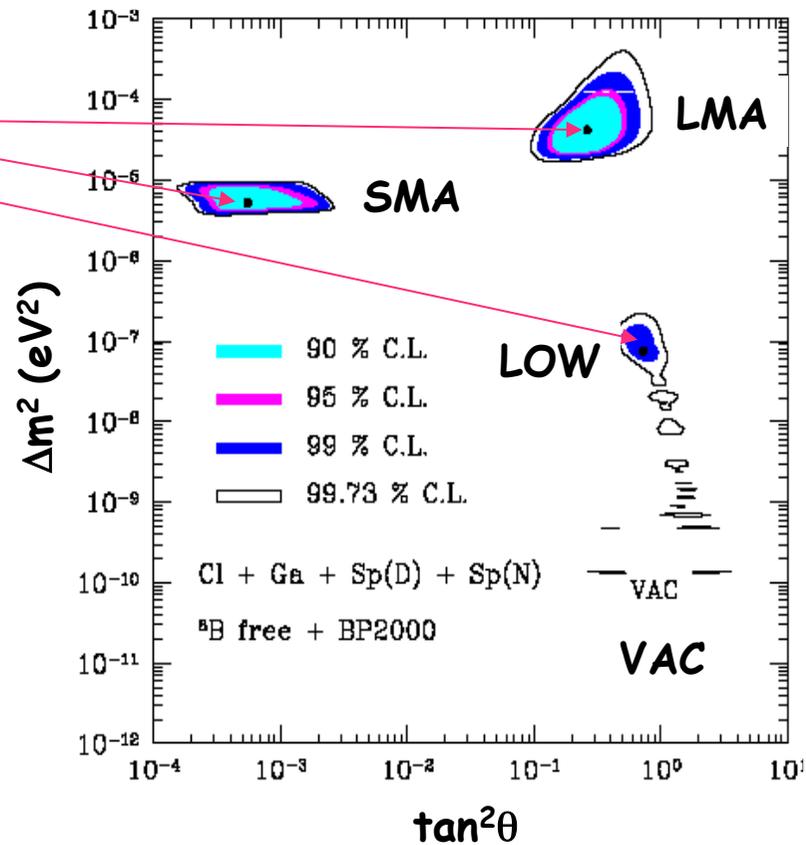
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = f(E, \Delta m^2, \theta, N_e)$$

$$\Delta f(0) = f_e(0) - f_\mu(0) \propto GN_e$$



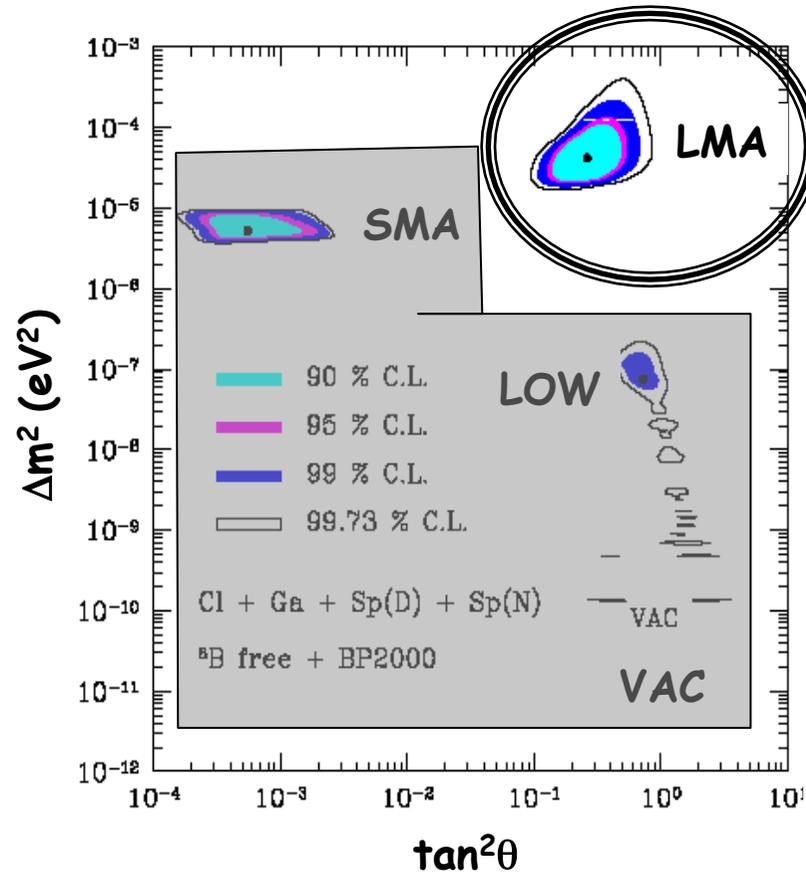
Solutions MSW (avant SNO)

Possibles grâce
à l'effet MSW

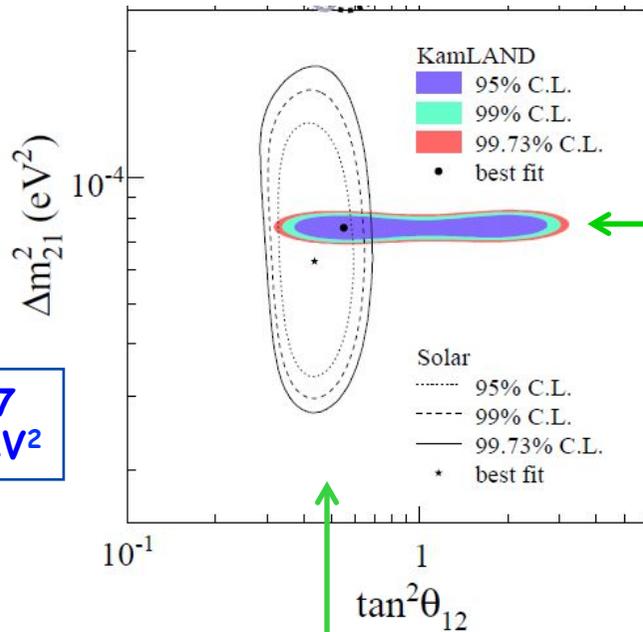


2 phénomènes :
-Oscillation dans le vide
-Transformation des ν_e dans le Soleil (effet MSW)

Solutions MSW (après SNO)

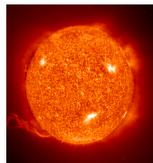


Les neutrinos solaires et les paramètres d'oscillation



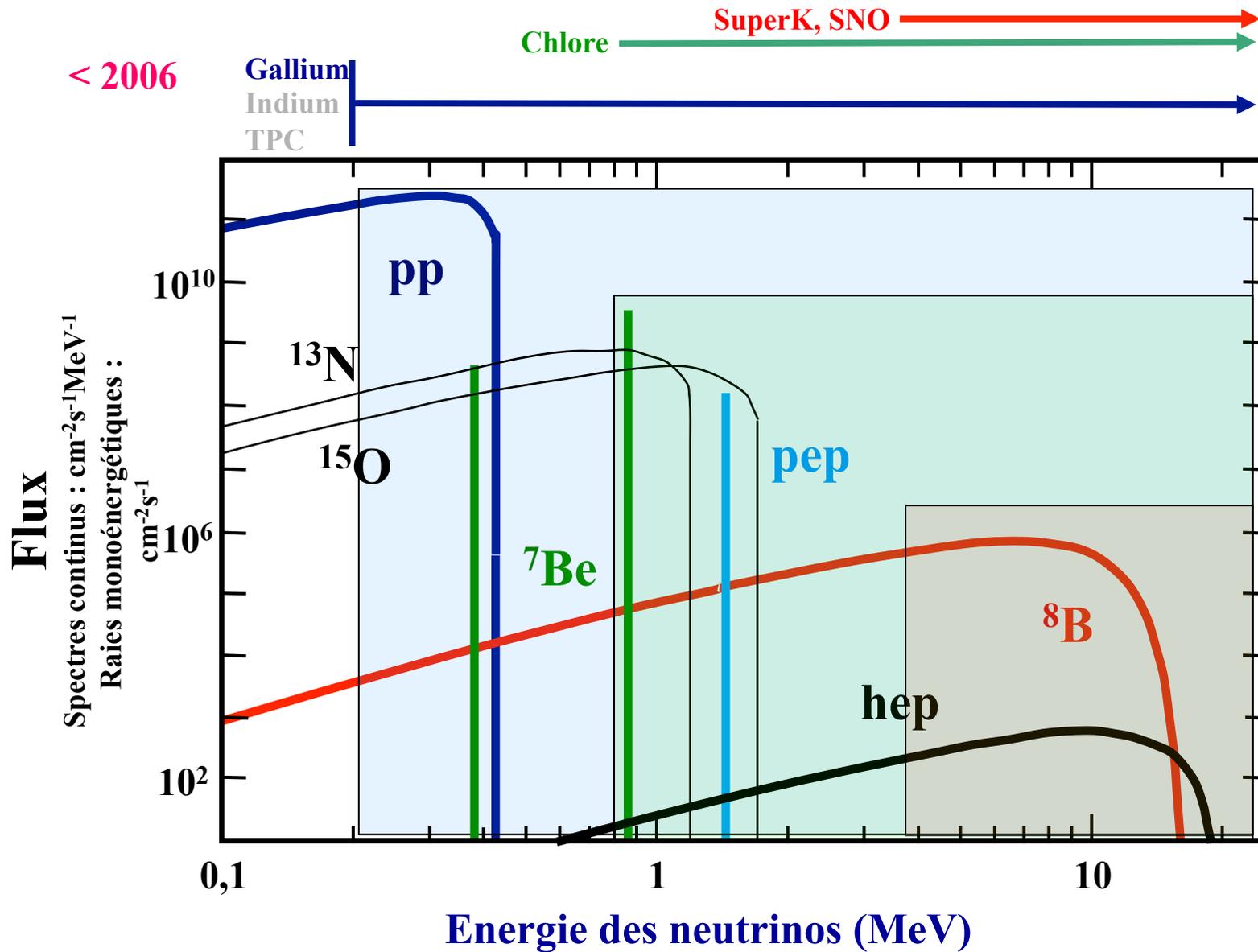
KamLAND : précision sur Δm^2_{12}

$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.87$
 $\Delta m^2 = 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$



Données solaires : précision sur l'angle θ_{12}

Spectre en énergie des neutrinos solaires



Pourquoi les ν -pp ?



J.N. Bahcall
(2001)

pp neutrinos are the **gold ring of solar neutrino physics and astronomy**. Their measurement will constitute a simultaneous and critical test of stellar evolution theory and of neutrino oscillation solutions.

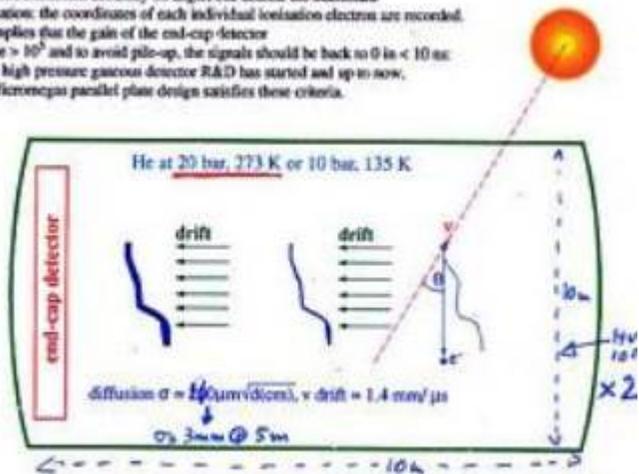
...

pp neutrinos are a fundamental product of the solar energy generation process whose flux is precisely predicted but not yet measured separately.

Quelques tentatives

HELLAZ (TPC hélium 20 bars)

To get the maximum accuracy on angle, one detects the maximum information: the coordinates of each individual ionisation electron are recorded. This implies that the gain of the end-cap detector must be $> 10^5$ and to avoid pile-up, the signals should be back to 0 in < 10 ns: a large high pressure gaseous detector R&D has started and up to now, only Microegas parallel plate design satisfies these criteria.



Indium (R&D + LENS)

A possible detector

A unit module...

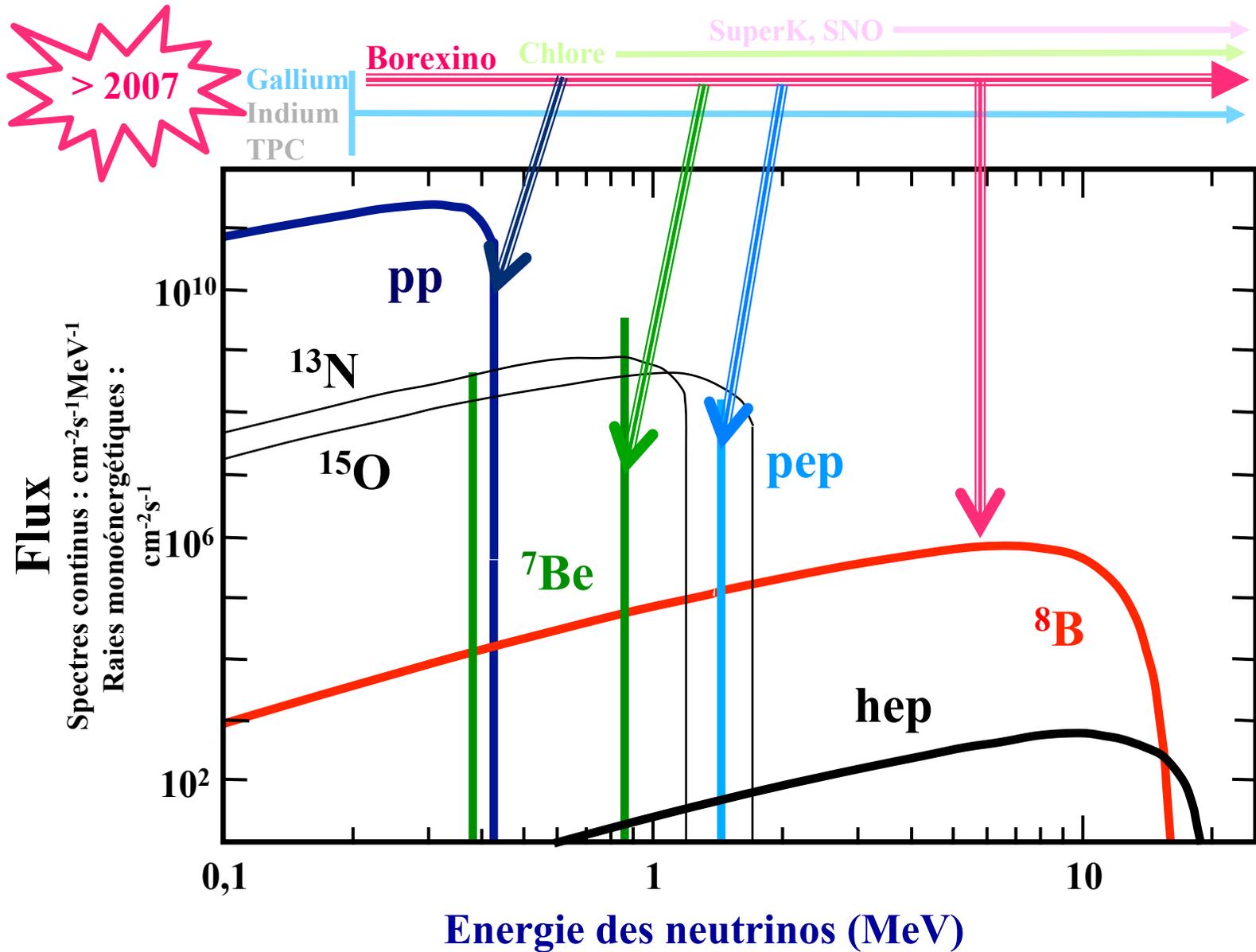
- 100 kg Yb
- technique :
→ liquid scintillator

- 1 m³
- localisation $\Delta V/V \approx 15\%$
- energy $\Delta E/E < 20\%$

...repeated 100 times

Super Munu,...

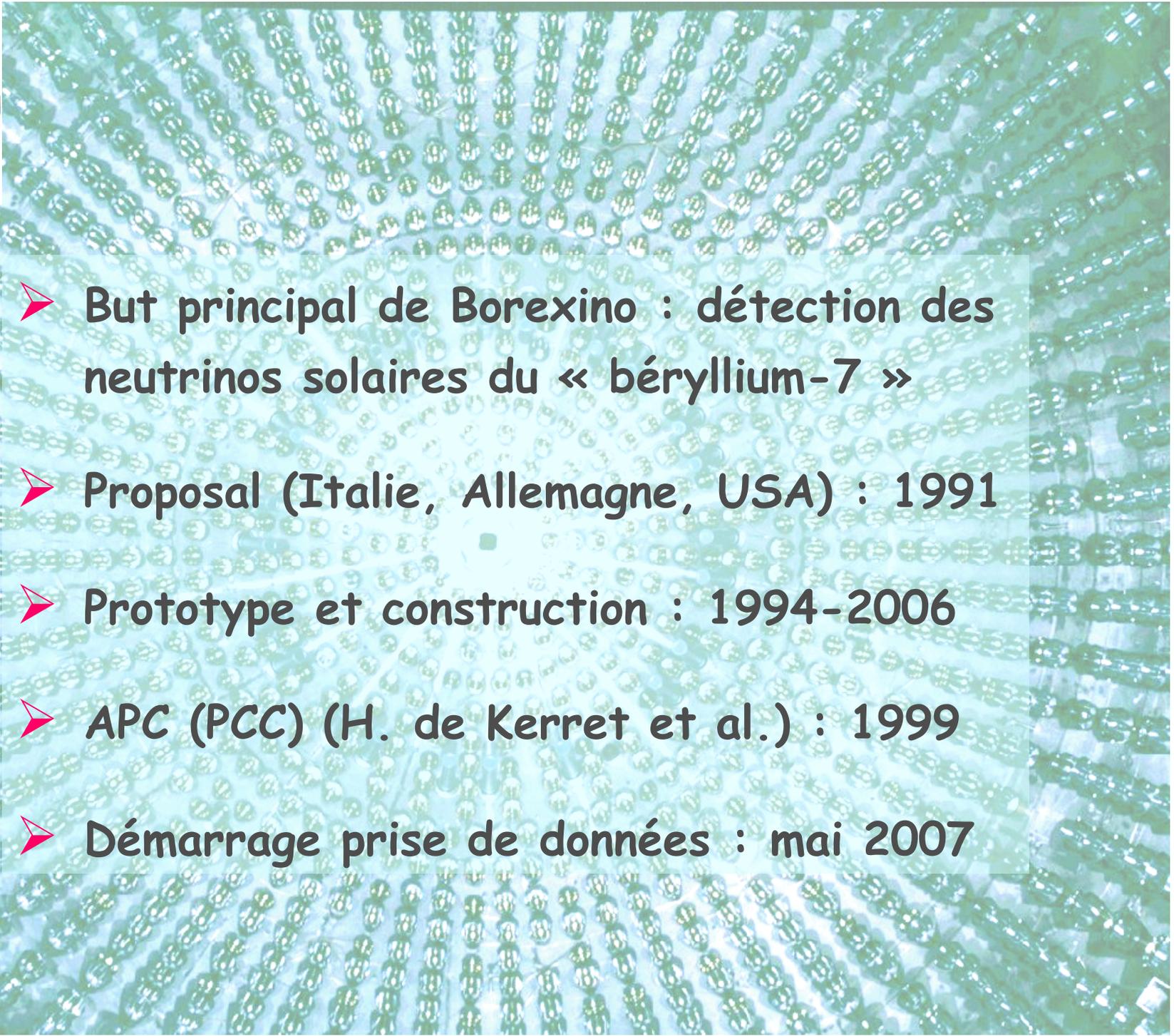
Spectre en énergie des neutrinos solaires





Mesure directe des neutrinos primordiaux du Soleil dans Borexino

1. Comment marche le Soleil ?
2. Les neutrinos solaires avant Borexino
3. Borexino
4. Les neutrinos du Soleil dans Borexino
5. « Envoi »



- But principal de Borexino : détection des neutrinos solaires du « béryllium-7 »
- Proposal (Italie, Allemagne, USA) : 1991
- Prototype et construction : 1994-2006
- APC (PCC) (H. de Kerret et al.) : 1999
- Démarrage prise de données : mai 2007



Milano



München



Heidelberg



Hamburg



Mainz



Gran Sasso



Perugia



Genova



Napoli



TU Dresden



Jagiellonian
Kraków



the Borexino Collaboration



JINR
Dubna



Virginia Tech



Houston



Paris



MOSCOW



Princeton



UMass
Amherst



St. Petersburg



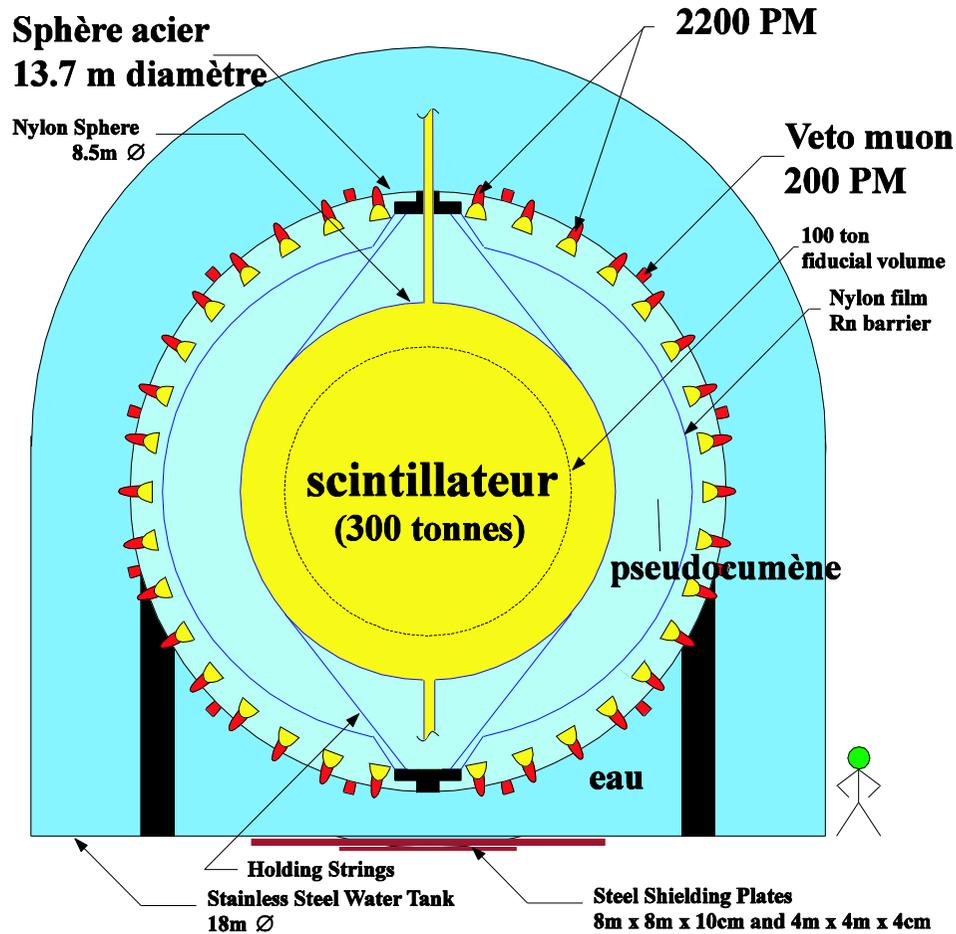
Los Angeles



Kurchatov
Moscow



Borexino



Diffusion élastique
 $\nu e \rightarrow \nu e$

Objectif n° 1 : neutrinos du ^7Be

Proposal :
 60 événements / jour (sans oscillation)
 10-40 (si oscillation)

Gran Sasso (Italie)

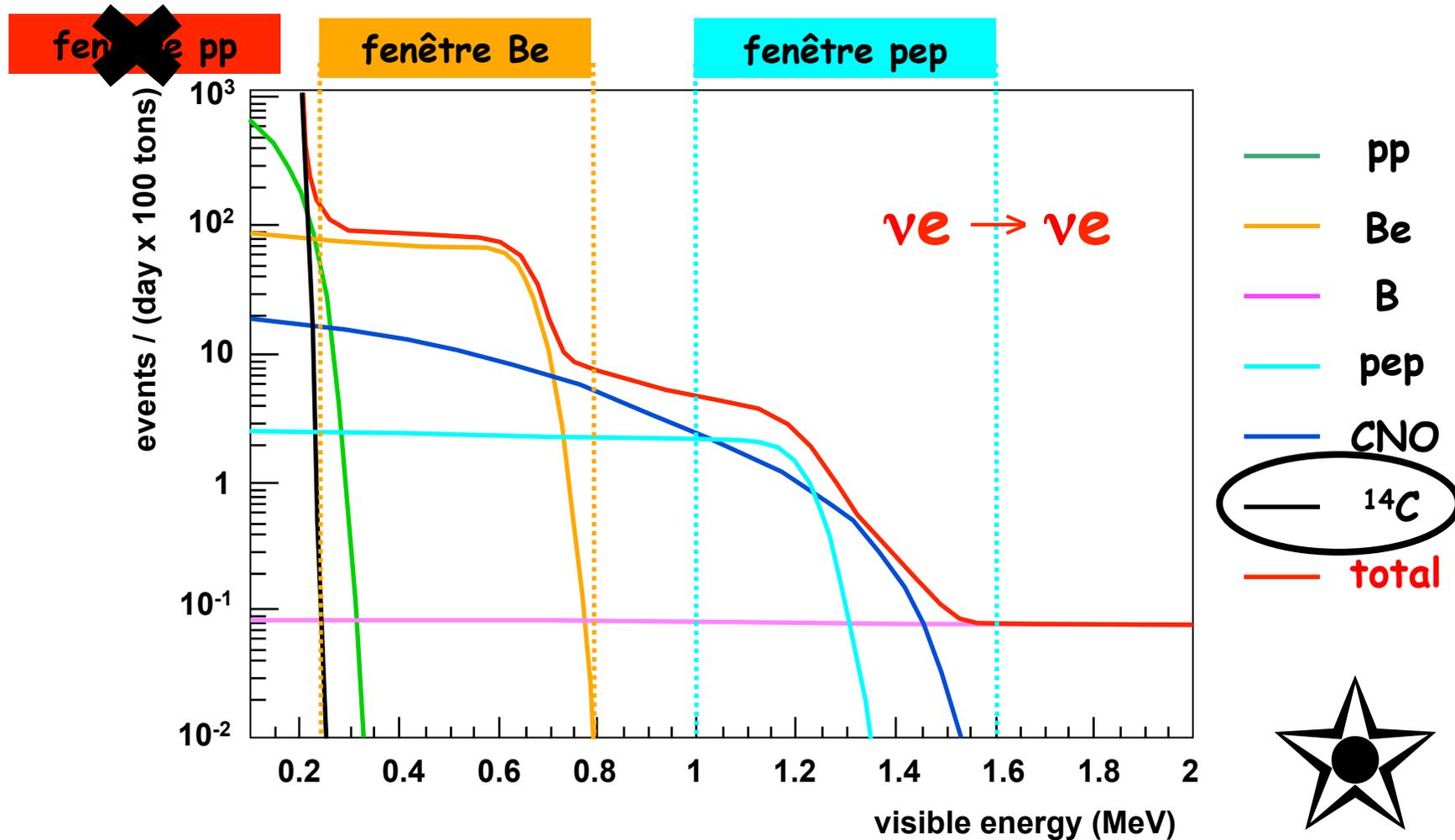
$5 \cdot 10^{-9}$ Bq/kg
 1 verre d'eau : 10 Bq

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

Viterbo, Italie
200 PM est de Rome

100 ton
fiducial volume

Nylon film
Rn barrier

1000 m
roche

scintillateur
(300 tonnes)

pseudocumèn

eau

$1.2 \mu/m^2/h$

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Steel Shielding Plates
8m x 8m x 10cm

➤ Borexino est situé sous la montagne du Gran Sasso (3800 m équivalent eau)

Cible: 300 tonnes de liquide scintillant dans un nylon de 4,25 m de rayon

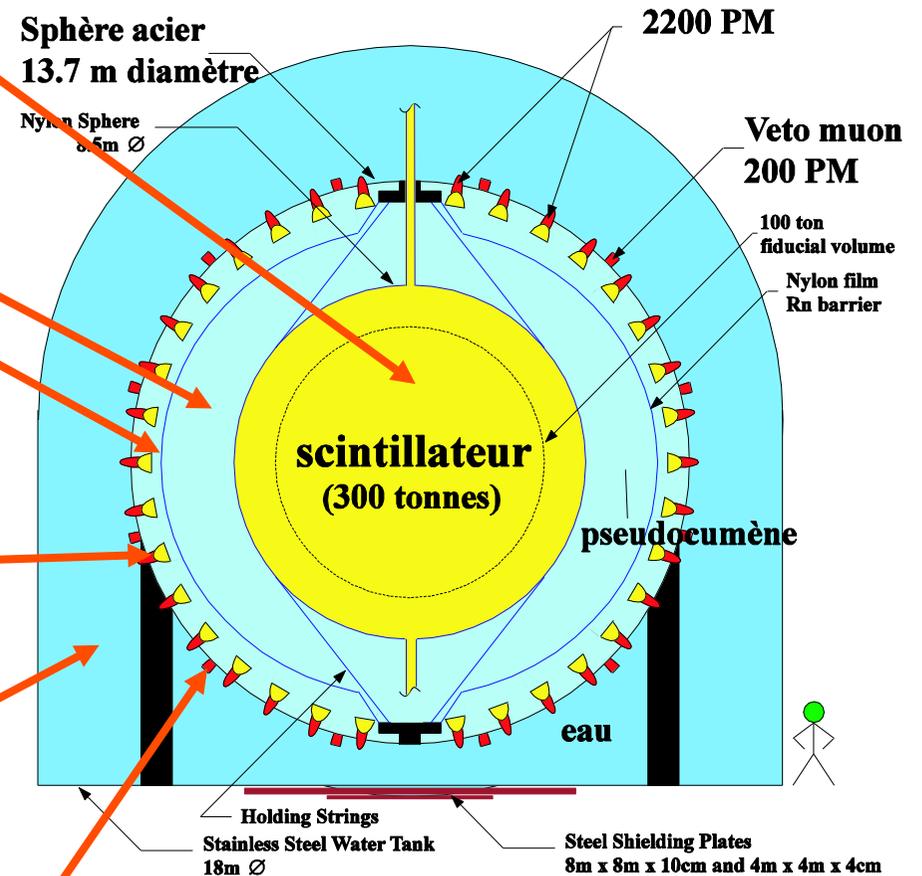
1^{er} blindage: 900 tonnes de liquide non scintillant

2nd nylon (contre le radon)

2200 photomultiplicateurs regardant le centre

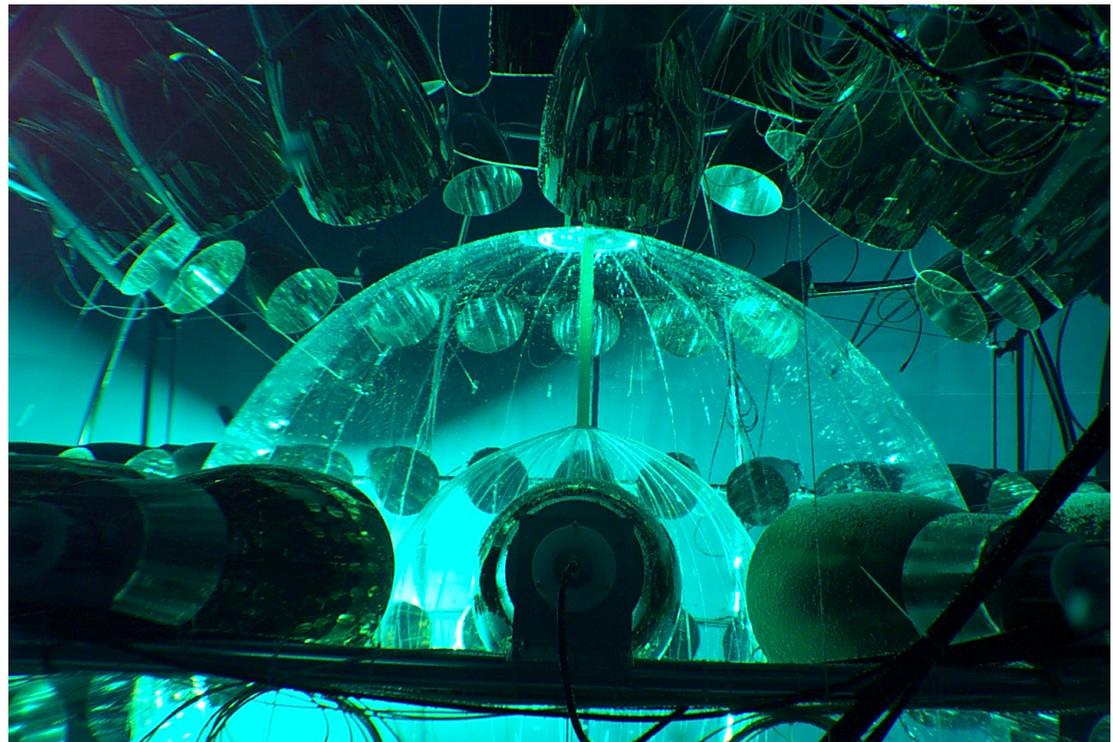
2nd blindage: 2100 tonnes d'eau

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

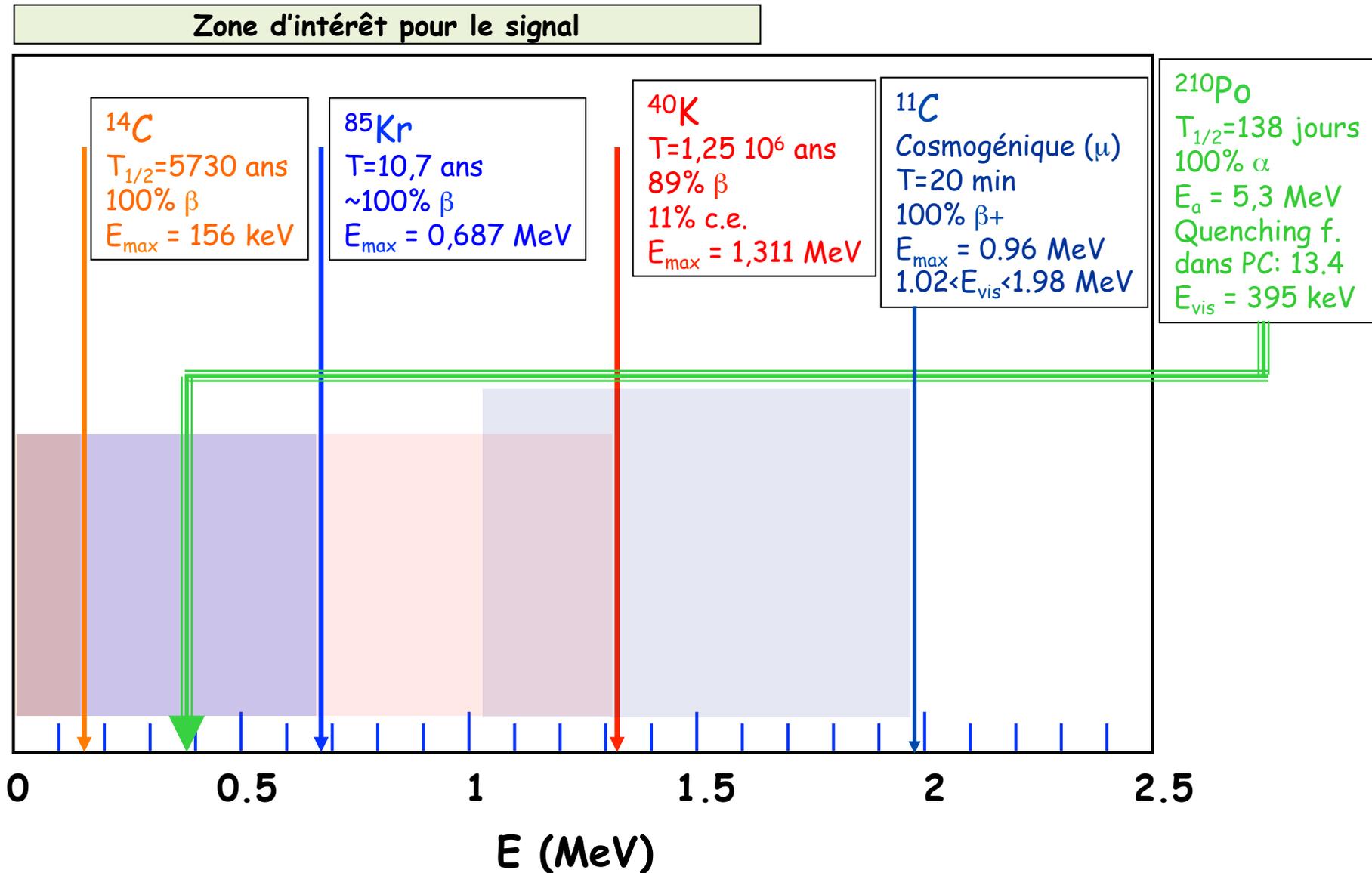


Ennemi n°1 : radioactivité

- Le défi majeur est la réduction de la radioactivité naturelle
- But (utopique lors du proposal en 1992):
 $\leq 10^{-16}$ 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 $5 \cdot 10^{-16}$ g/g U,Th equiv.
- Le CTF a fonctionné de 1996 à 2002



Les ennemis sont nombreux !



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

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

➤ ^{238}U - étude via les descendants du ^{222}Rn : ^{214}Bi - ^{214}Po

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

➤ ^{85}Kr

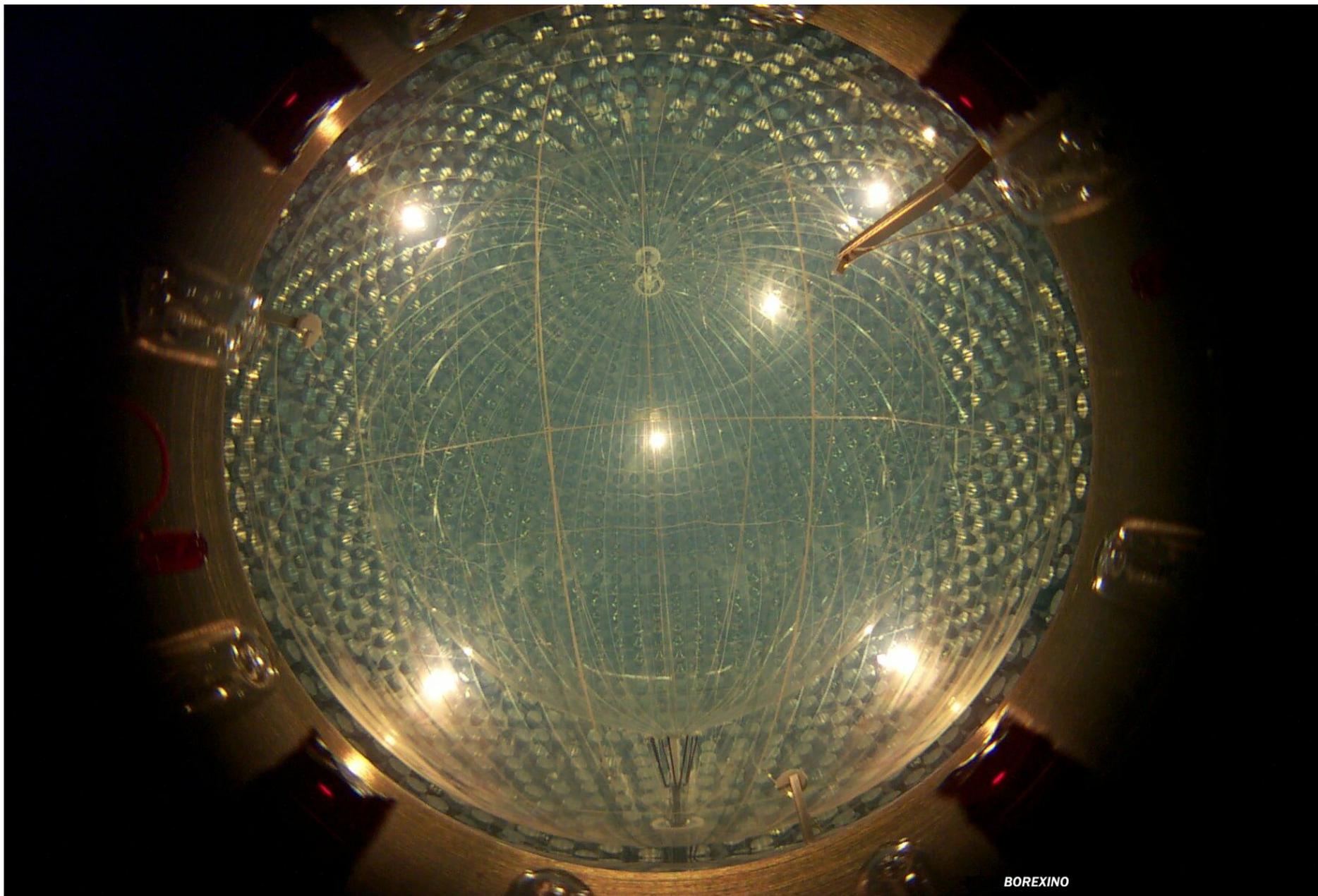
⇒ limite supérieure : 35 ev./jour/100 tonnes (avant 2010)

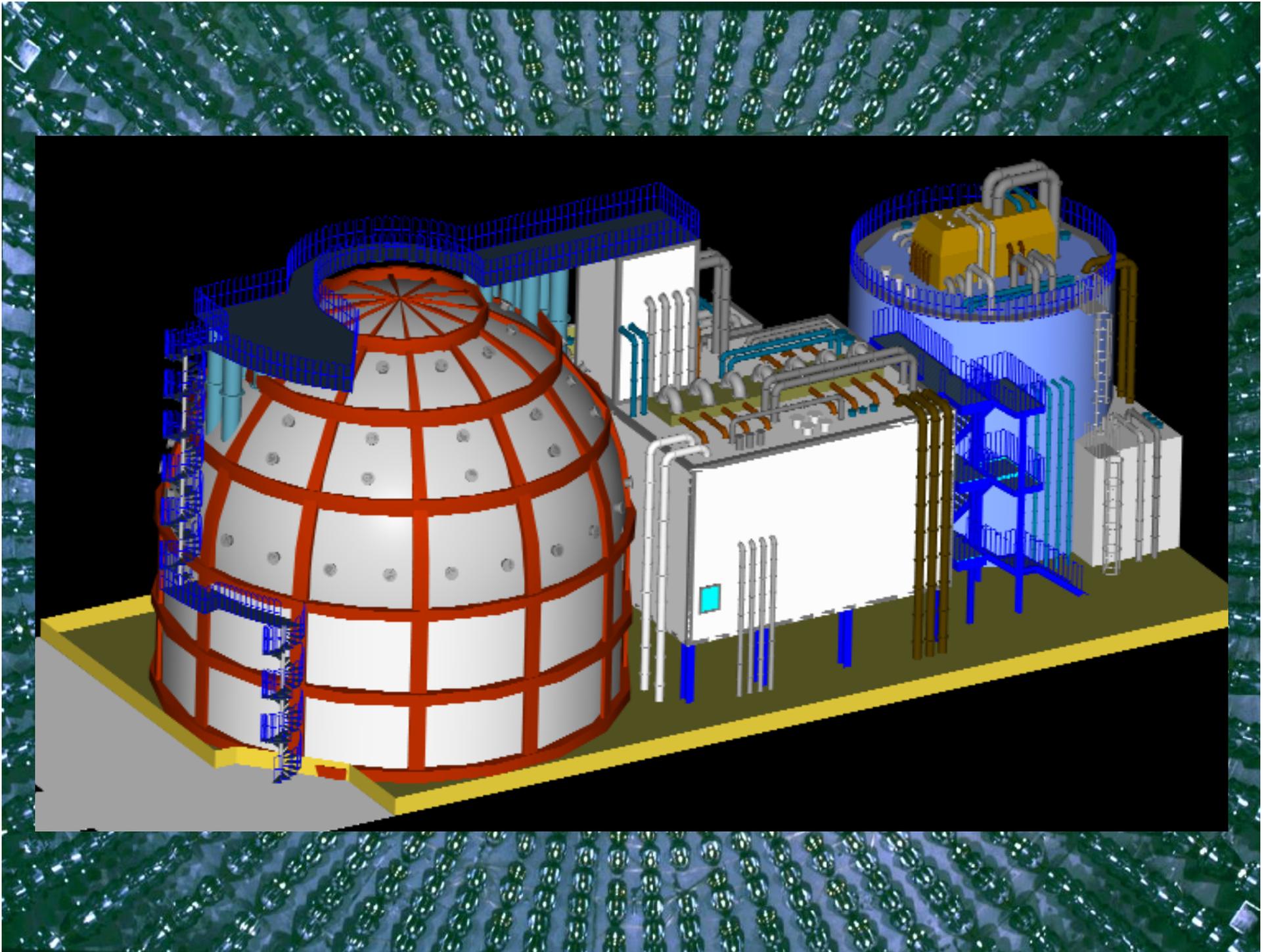
⇒ limite réduite à < 7 ev./jour/100 tonnes après campagne de purification

➤ ^{210}Bi

Pas d'évidence directe ⇒ paramètre libre dans le fit

Détecteur rempli de scintillateur (avril 2007)





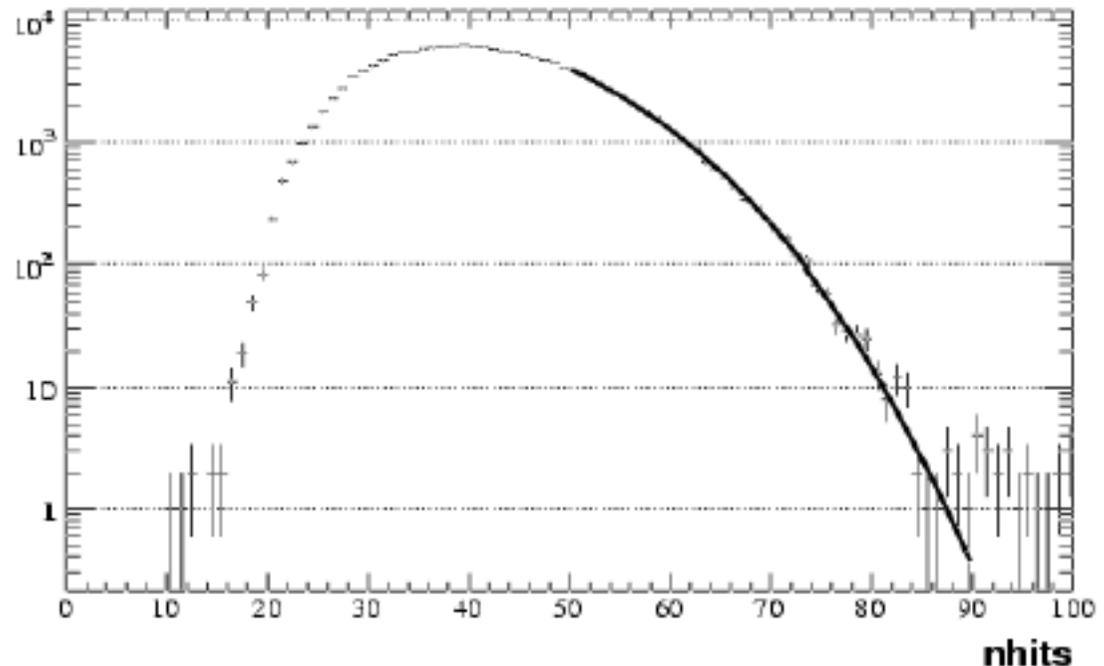
Les premières données



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.



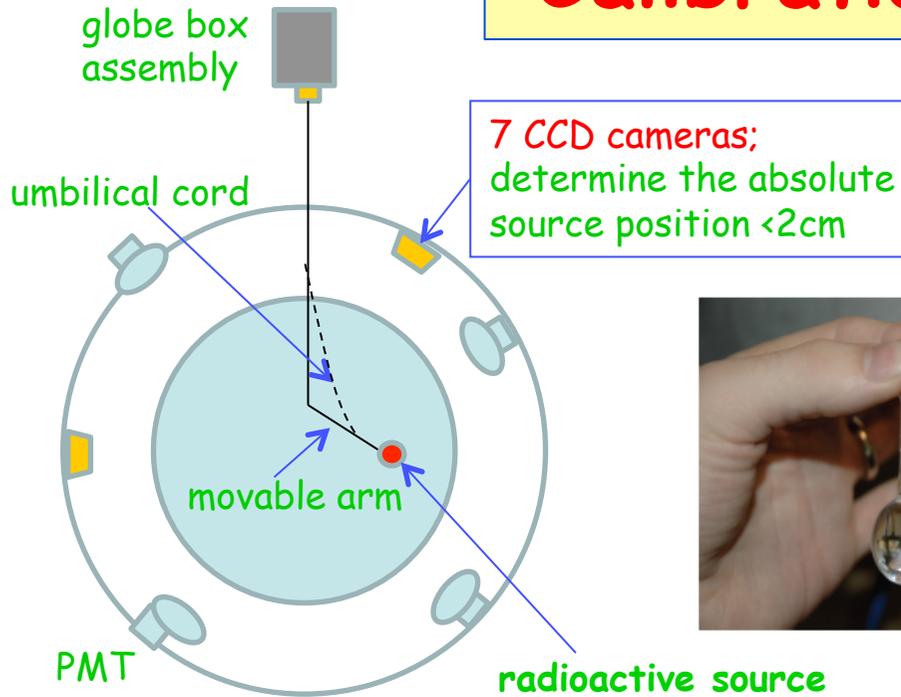
$LY \approx 500 \text{ p.e./MeV}$

⌘ avant calibration

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

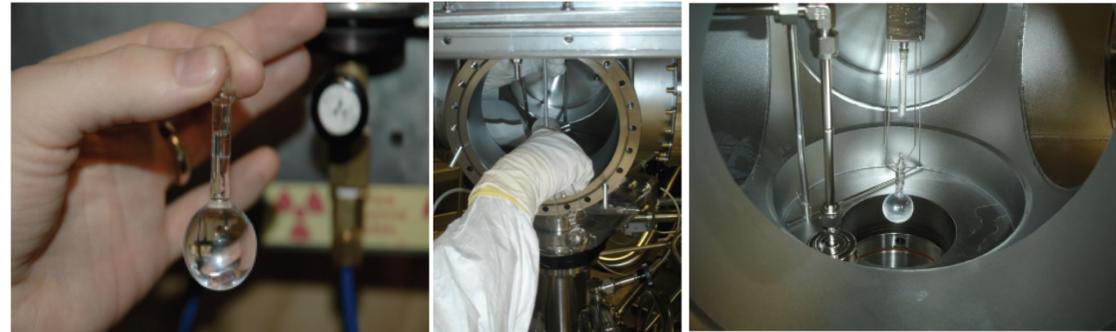
→ résolution en énergie: 10% @ 200 keV
8% @ 400 keV
6% @ 1 MeV

Calibration du détecteur (I)



3 campaigns in 2008-2009

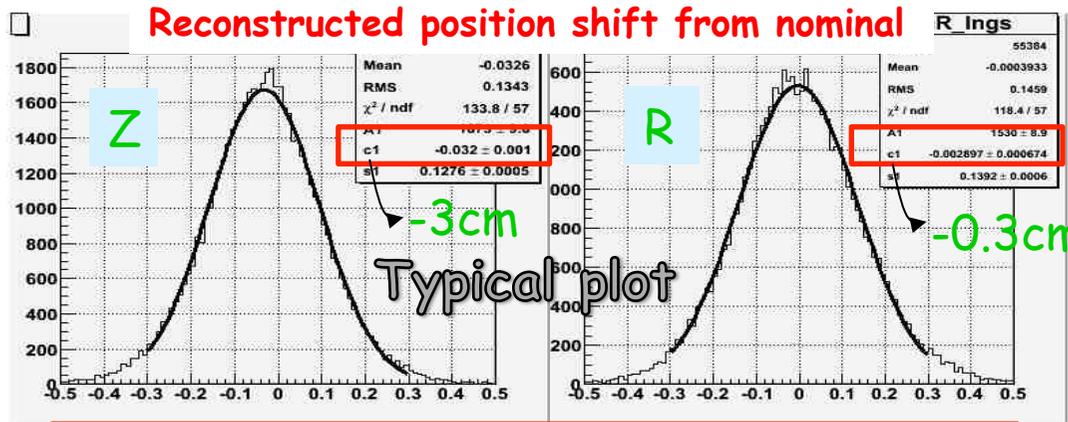
Source insertion



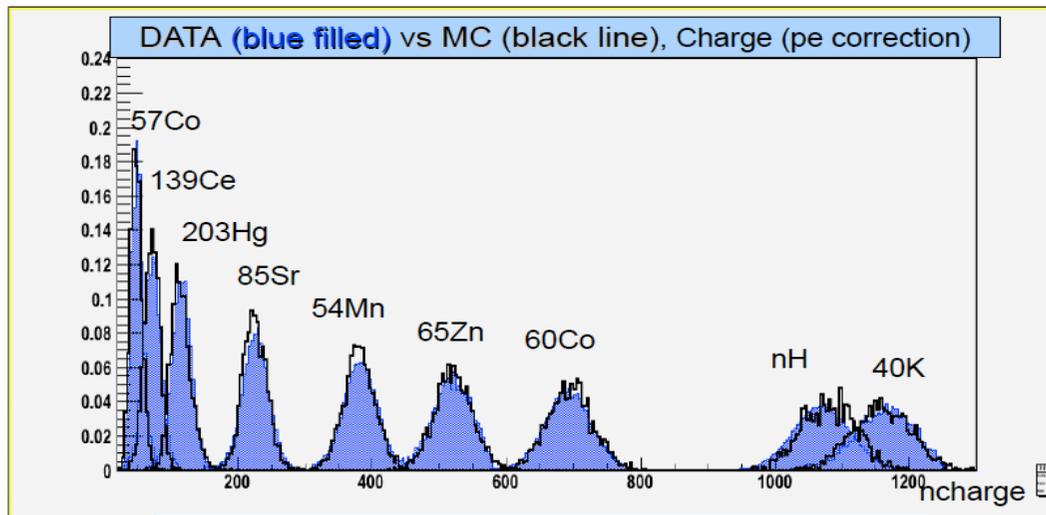
	γ								β	α	n			
	dopant dissolved in small water vial								^{222}Rn loaded liq. scint. vial			Am-Be		
	^{57}Co	^{139}Ce	^{203}Hg	^{85}Sr	^{54}Mn	^{65}Zn	^{60}Co	^{40}K	^{14}C	^{214}Bi	^{214}Po	n-p	$n_{+12}\text{C}$	n+Fe
Energy (MeV)	0.122	0.165	0.279	0.514	0,834	1.1	1.1 1.3	1.4	0.15	3.2	(7.6)	2.2	4.94	~7.5

clear tag from Bi-Po fast coincidence

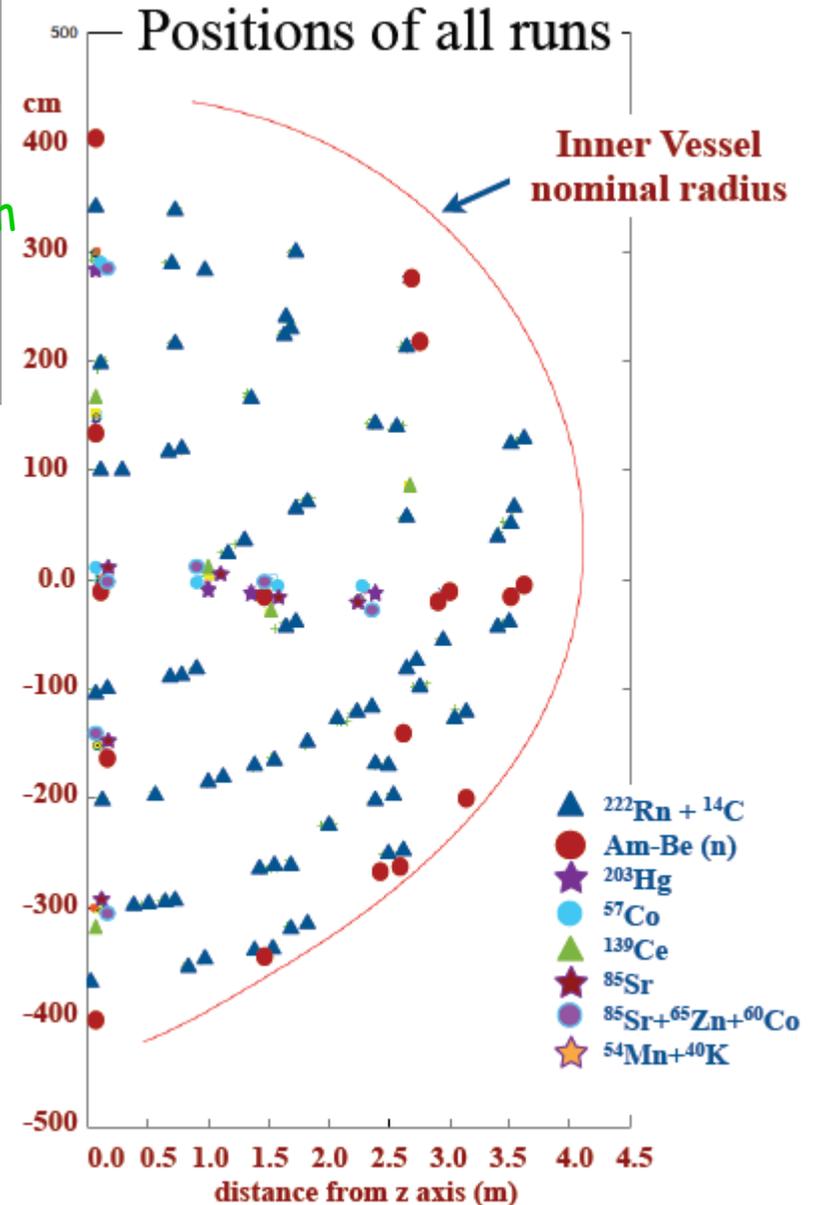
Calibration du détecteur (II)



Using the 184 points of Rn calibration data, the fiducial volume uncertainty is 1.3%



The energy scale uncertainty is less than 1.5% between 0~2MeV



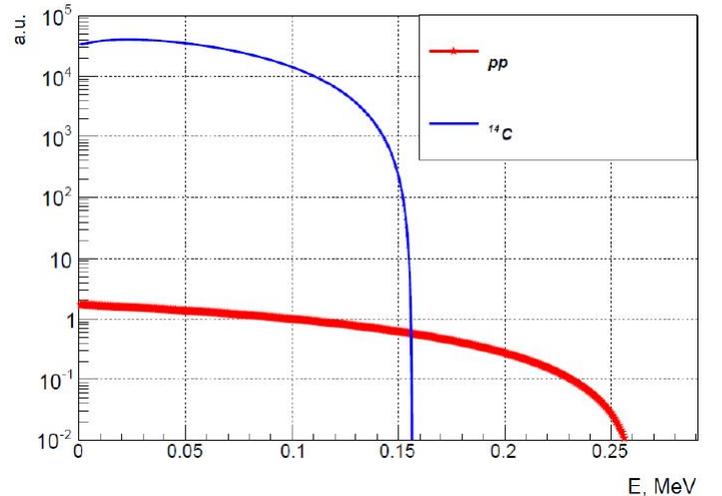
The background of the slide is a microscopic image of plant tissue, likely a leaf cross-section, showing a regular grid of cells. A bright, circular spot is visible in the center of the grid, possibly representing a stomata or a specific cell structure. The text is overlaid on this image.

Mesure directe des neutrinos primordiaux du Soleil dans Borexino

1. Comment marche le Soleil ?
2. Les neutrinos solaires avant Borexino
3. Borexino
4. Les neutrinos du Soleil dans Borexino
5. « Envoi »

A la recherche des ν -pp

Zoom (théorique) à basse énergie



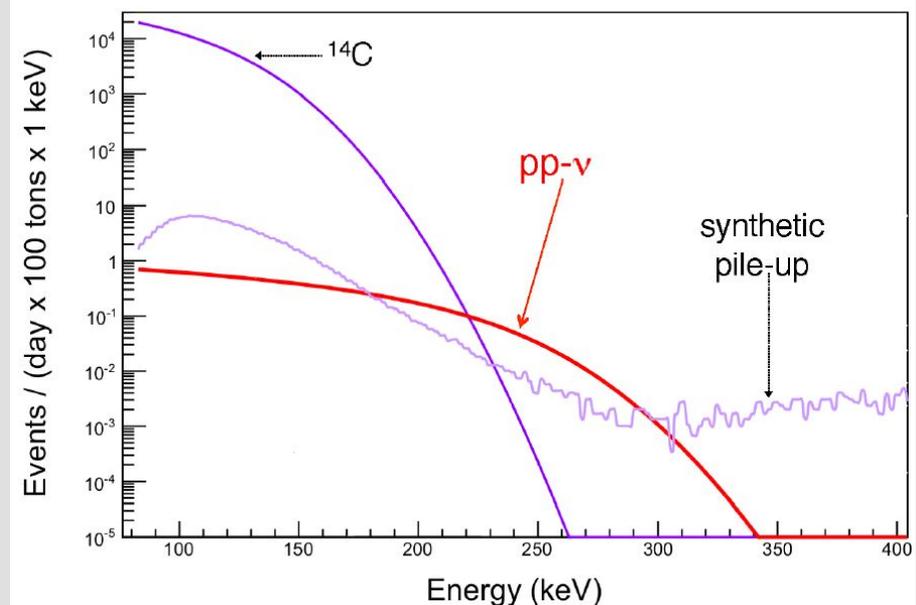
156 keV
(^{14}C)

264 keV
 ν -pp

Pour mesurer les ν -pp, il faut :

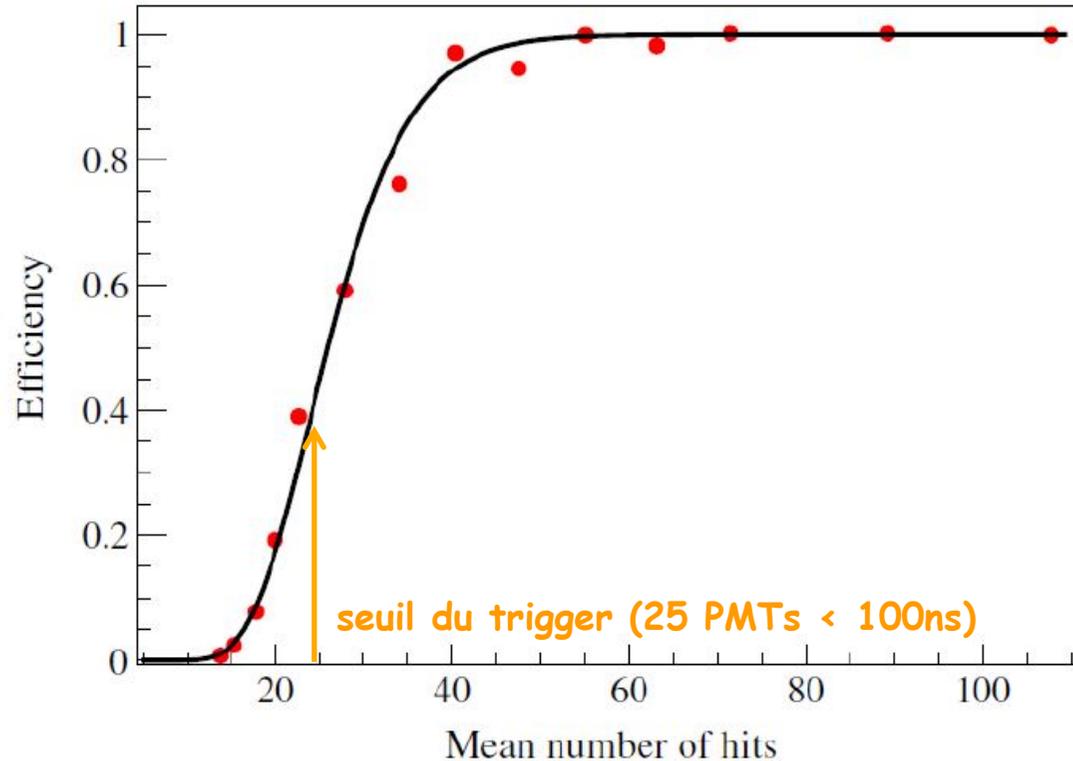
- Faible seuil en énergie
- Bonne résolution en énergie (10% à 200 keV)
- Radioactivité faible
- Faible taux de ^{14}C (queue et pile-up)

La réalité !



A la recherche des ν -pp

Seuil en énergie



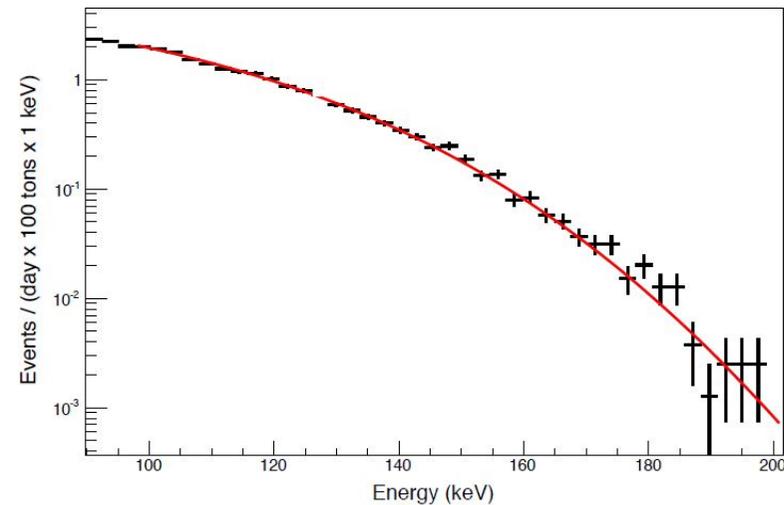
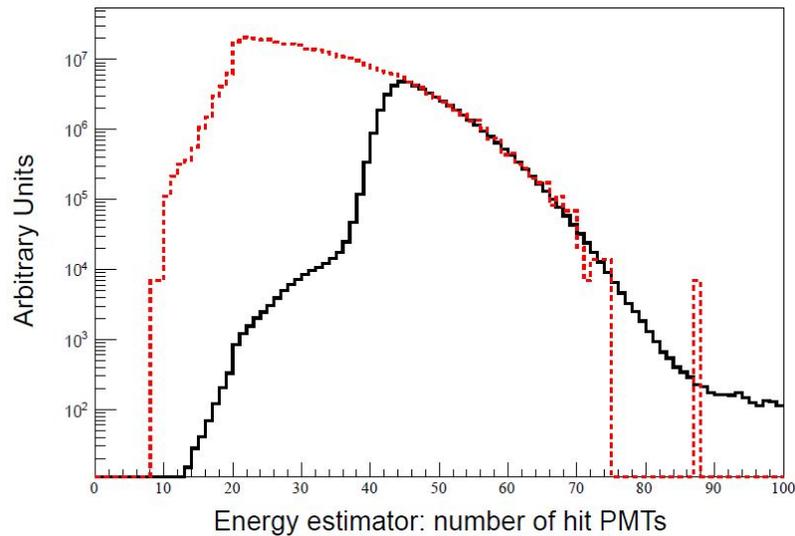
Energie ~proportionnelle au
nombre de photoélectrons:
60 PMTs
~120 keV

🍏 Pas de problème pour
mesurer le ^{14}C ...
et fitter les ν -pp!



A la recherche des ν -pp

Estimation du ^{14}C (ennemi public n°1)



^{14}C déterminé à partir d'un échantillon où l'événement qui provoque le trigger est suivi par un second événement (en rouge) dans une fenêtre de 16ms (en noir : spectre des événements triggerés)

Fit du ^{14}C

$40 \pm 1 \text{ Bq}/100 \text{ t}$

correspond à
 $2.7 \pm 0.1 \cdot 10^{-18} \text{ g/g de } ^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$
(origine « pétrole » du scintillateur)

A la recherche des ν -pp

Le « pile-up » et comment s'en débarrasser

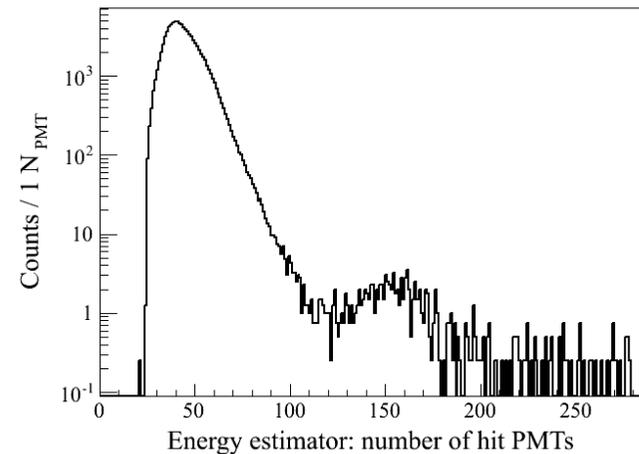
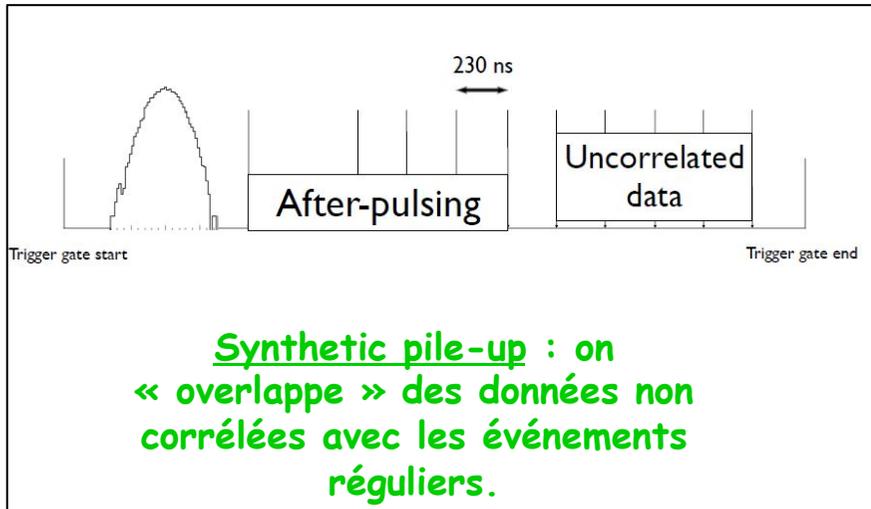
Pile-up : deux événements si proches en temps qu'on ne peut les séparer (le second profite de la porte ouverte pour s'engouffrer)

L'essentiel est dû au ^{14}C (mais aussi bruit de fond externe, PMT dark noise ou ^{210}Po).

Estimation du taux :

$$(300 \text{ tonnes} \times 40 \text{ Bq}/100 \text{ t}) \times 40 \text{ Bq}/100 \text{ t} \times 230 \text{ ns} = 100 \text{ cpd} / 100 \text{ t}$$

A comparer avec le taux attendu de ν -pp : $130 \text{ cpd} / 100 \text{ t}$ ★

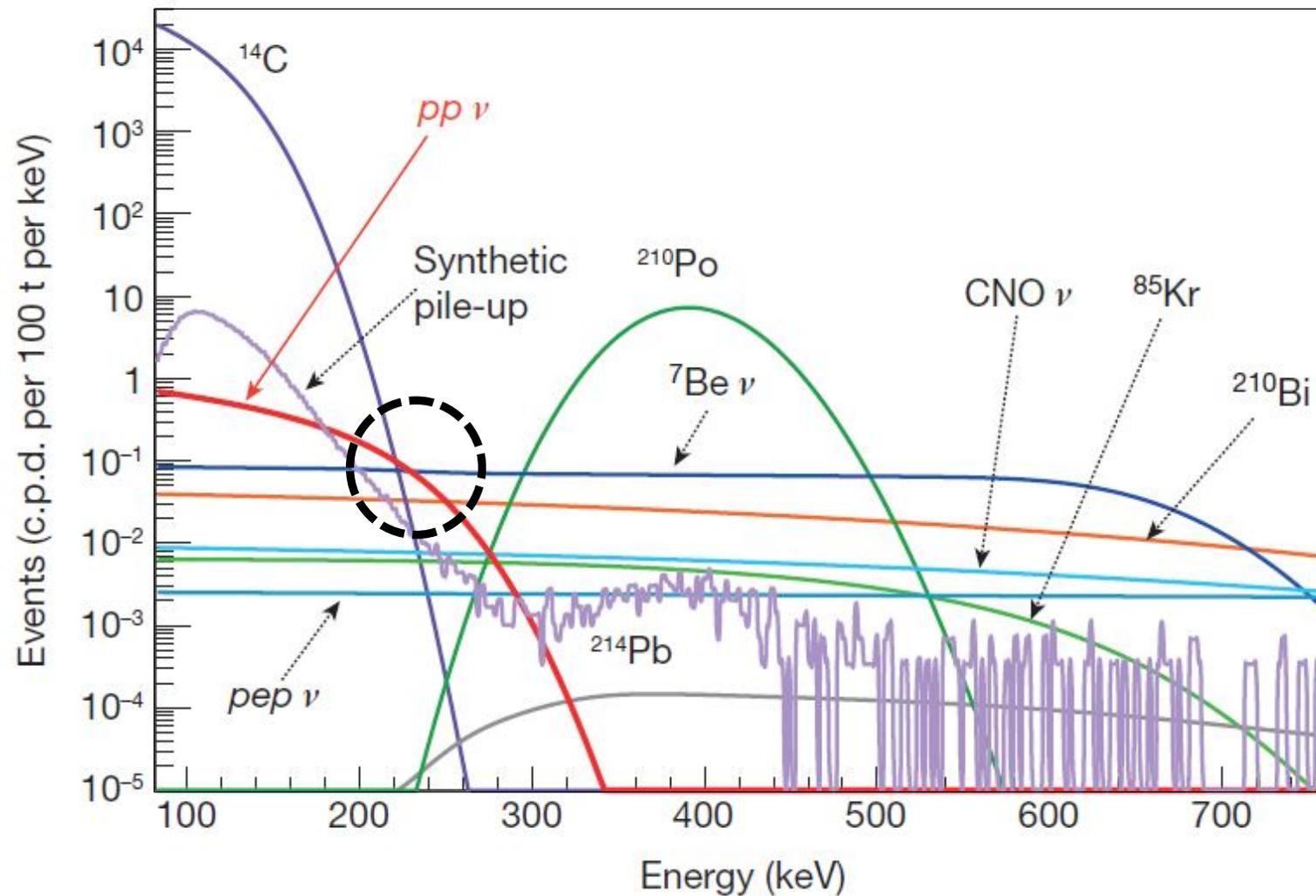


Spectre en énergie des données pile-up

Fit du pile-up ^{14}C - ^{14}C : $154 \pm 10 \text{ cpd} / 100 \text{ t}$

A la recherche des ν -pp

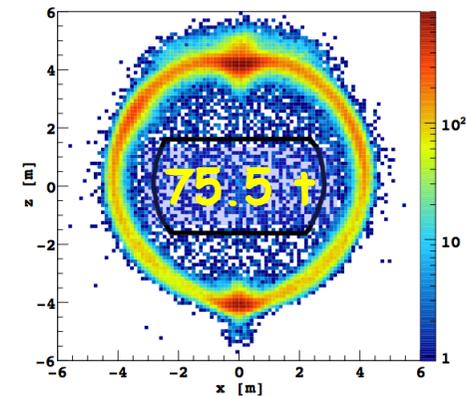
Spectre en énergie attendu



A la recherche des ν -pp

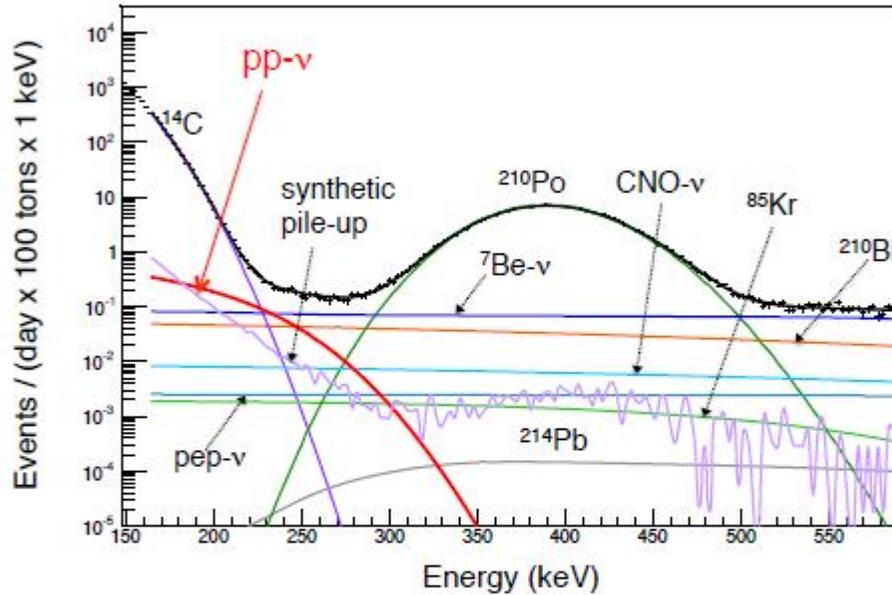
Vers le fit !

1. Sélection des données (Janvier 2012 - Mai 2013 : 408 jours).
2. Calcul de l'énergie (passer du nombre de PMTs en keV [calibration + Monte Carlo]), de la position pour tous les événements,....
3. Coupures :
 - a) Pas de coïncidence avec un μ (veto de 300 ms)
 - b) Reconstruction dans le volume fiduciel :
 $R < 3.021$ m et $|z| > 1.67$ m.
 - c) ...
4. Contraindre le ^{14}C .
5. Contraindre le pile-up.
6. Effectuer le « fit spectral » entre 165 et 590 keV. Utilise un outil software développé précédemment.

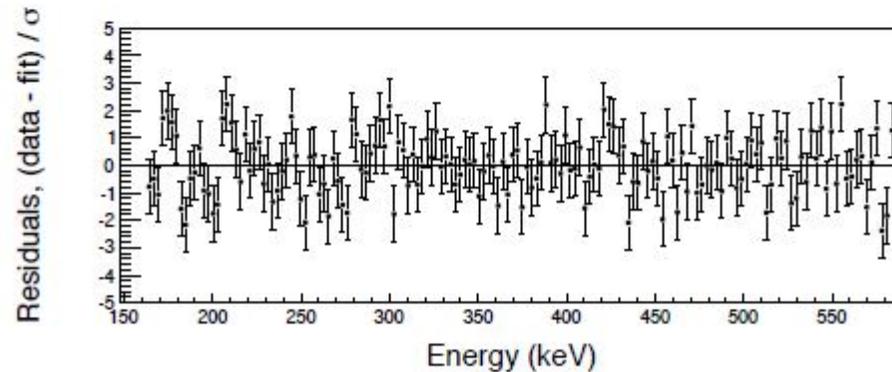


A la recherche des ν -pp

Résultat



- ${}^7\text{Be}$ contraint (valeur mesurée avec σ)
- pep, CNO fixés (SSM)
- ${}^{214}\text{Pb}$ fixé au taux mesuré (BiPo)
- ${}^{14}\text{C}$ et pile-up contraints (valeur mesurée avec σ)
- pp, ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{210}\text{Bi}$, ${}^{85}\text{Kr}$: libres



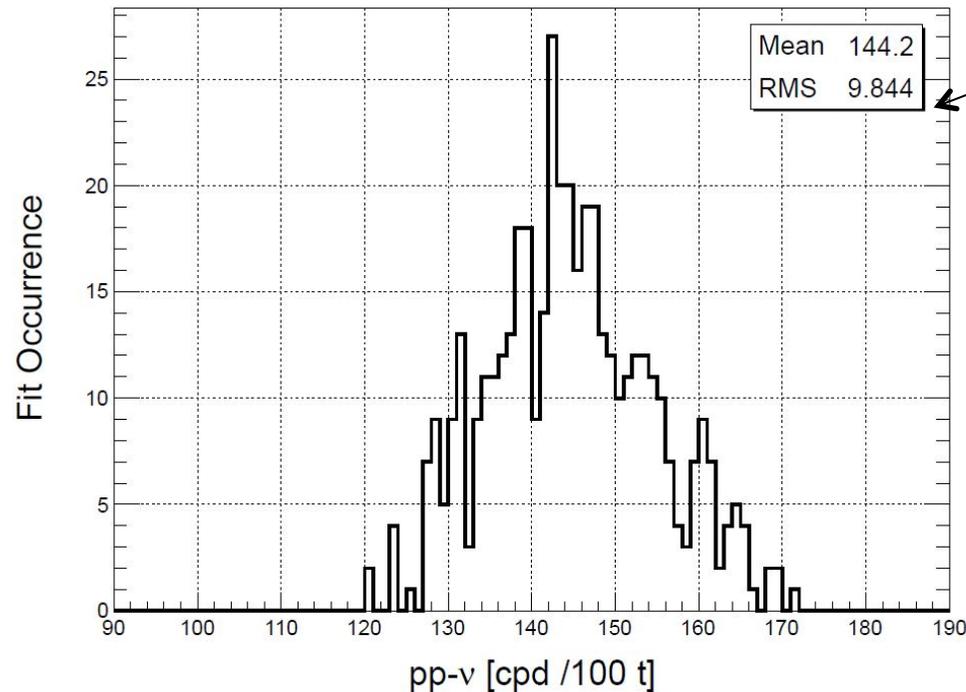
$\chi^2/\text{d.o.f.} = 172.3/147$

— $pp \nu$: 144 ± 13 (free)	— ${}^{210}\text{Po}$: 583 ± 2 (free)
— ${}^7\text{Be} \nu$: 46.2 ± 2.1 (constrained)	— ${}^{14}\text{C}$: 39.8 ± 0.9 (constrained)
— pep ν : 2.8 (fixed)	— Pile-up: 321 ± 7 (constrained)
— CNO ν : 5.36 (fixed)	— ${}^{210}\text{Bi}$: 27 ± 8 (free)
— ${}^{214}\text{Pb}$: 0.06 (fixed)	— ${}^{85}\text{Kr}$: 1 ± 9 (free)

A la recherche des ν -pp

Résultat

ν -pp : 144 ± 13 (stat) ± 10 (syst) cpd / 100 t



Erreur systématique totale

- 7% (ci-contre)
- 2% (masse fiducielle nominale)

Recherche de bruits de fond résiduels:

- Veto μ augmenté de 300 ms à 5s
- Emetteurs basse énergie α (^{222}Rn , ^{218}Po , ^{147}Sm , ^{148}Sm) ou β (^7Be , ^{87}Rb)

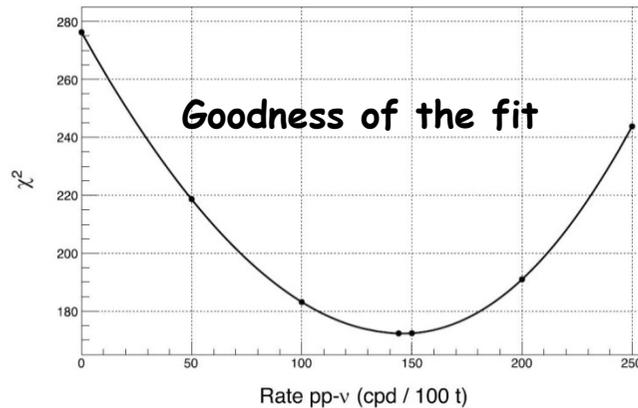
RAS : 

Nombreux fits en variant les conditions initiales (fenêtre en énergie, critères de sélection des données, autre méthode pour pile-up, estimateur en énergie, ...) 🍏 7% erreur systématique

A la recherche des ν -pp

Résultat

ν -pp : 144 ± 13 (stat) ± 10 (syst) cpd / 100 t



Absence d'un signal ν -pp
exclue à 10σ .

$\Phi(\nu$ -pp) : $6.6 \pm 0.7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

SSM

High met. : $5.98 (1 \pm 0.06) \cdot 10^{10}$
(131 ± 2 cpd / 100 t)

Low met. : $6.03 (1 \pm 0.06) \cdot 10^{10}$

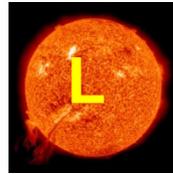
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = \frac{R_{\text{exp}} - \overset{\text{nb } e^-}{\Phi^{\text{SSM}} n_e} \sigma_{\mu}}{\underset{\substack{\text{sections efficaces } \nu_e \text{ et } \nu_{\mu}}{\Phi^{\text{SSM}} n_e (\sigma_e - \sigma_{\mu})}} = 0.64 \pm 0.12$$

Quelques chiffres pour résumer

Au cœur du Soleil:

$\sim 10^{38}$ interactions pp par seconde (et autant de ν)

$$[3,84 \cdot 10^{26} \text{ W} / 4,28 \cdot 10^{-12} \text{ J}]$$



$$m_{4p} - m_{\text{He}}$$

1 ν

$\sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ W}$

~ 600 millions de tonnes d'hydrogène brûlées par seconde

Sur Terre:



$65 \cdot 10^{13} \nu / \text{m}^2 / \text{s}$

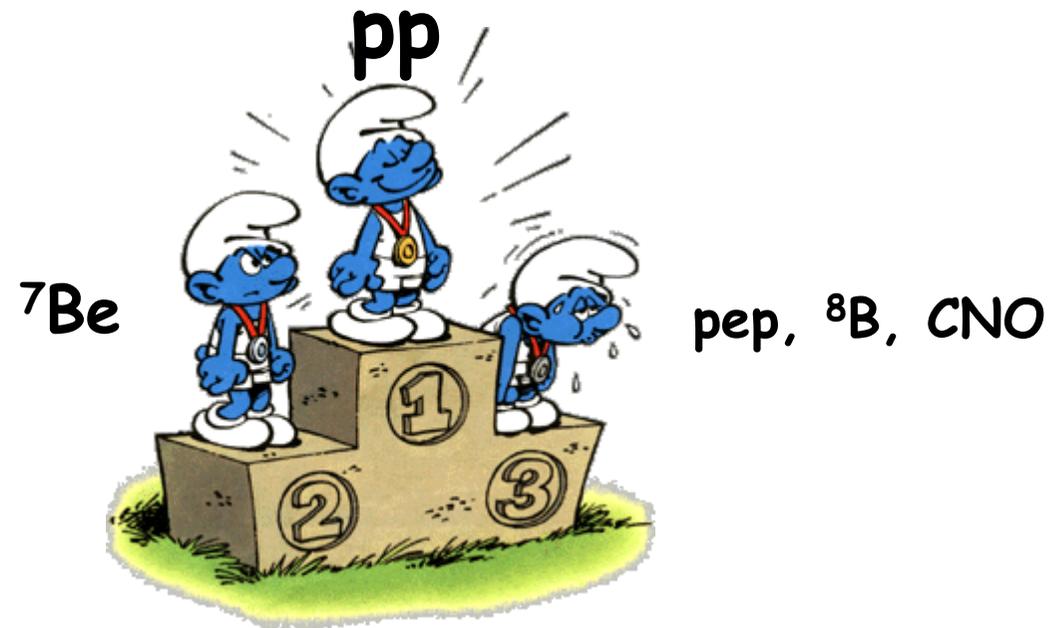
1360 W/m^2

$1,5 \cdot 10^{21} \nu$ ont traversé la cible chaque jour

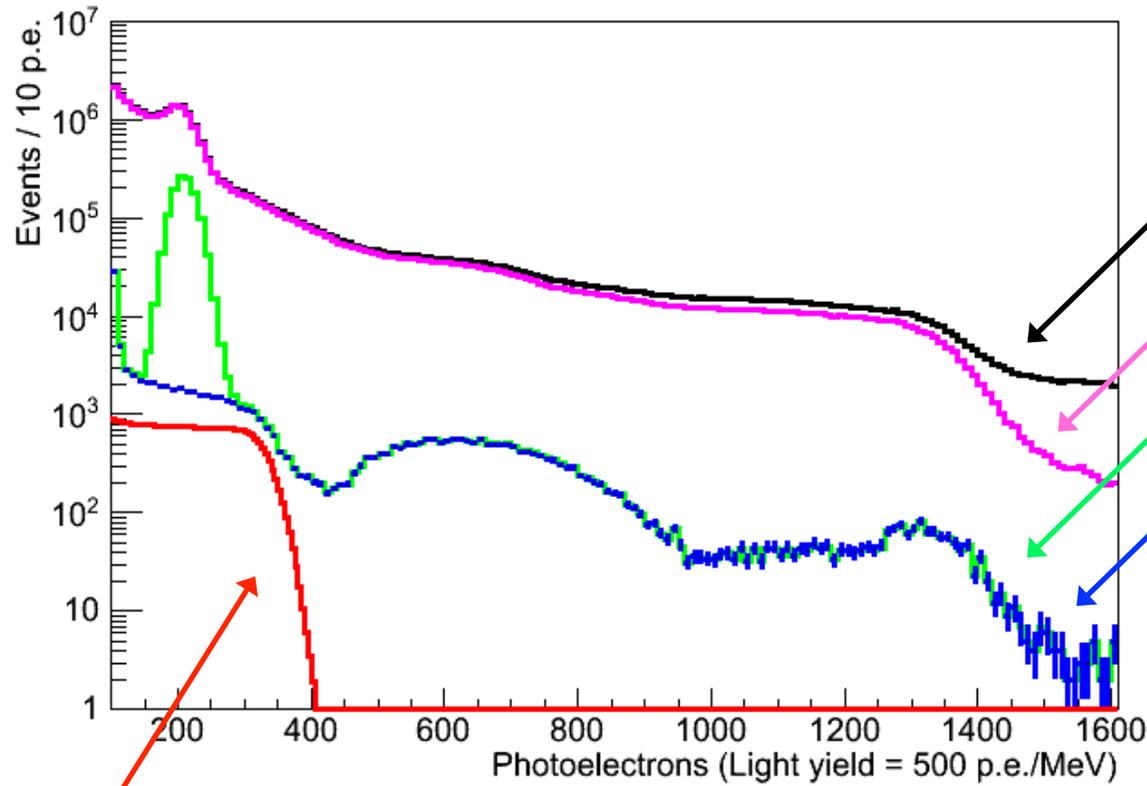
~ 150 piégés !



Quid des neutrinos qui ne sont pas primordiaux ???



A la recherche des ν du ${}^7\text{Be}$ (2011)



Expected ${}^7\text{Be}$ signal

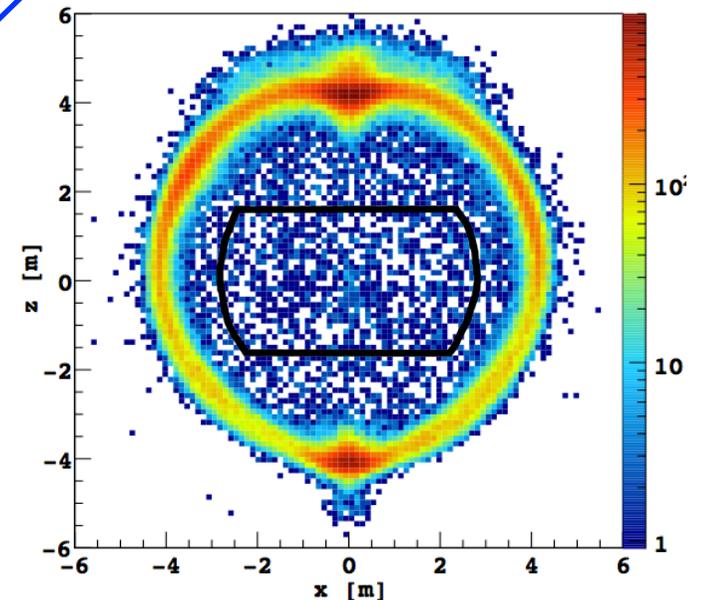
All data: 740 live days

Remove $\mu + \mu$ followers (2 ms)

Fiducial Volume

$R < 3.02\text{m}$ & $|z| < 1.67\text{m}$

Statistically subtract α 's



A la recherche des ν du ${}^7\text{Be}$ (2011)

46.0 ± 1.5 (stat) ± 1.5 (syst) ev./jour/100 tonnes
pour les ν_{\odot} du ${}^7\text{Be}$ (862 keV)

Erreurs systématiques

Source	[%]
Trigger efficiency and stability	<0.1
Live time	0.04
Scintillator density	0.05
Sacrifice of cuts	0.1
Fiducial volume	+0.5 -1.3
Fit methods	2.0
Energy response	2.7
Total systematic error	+3.4 -3.6

$$\Phi({}^7\text{Be}-862 \text{ keV}) = (2.78 \pm 0.13) 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

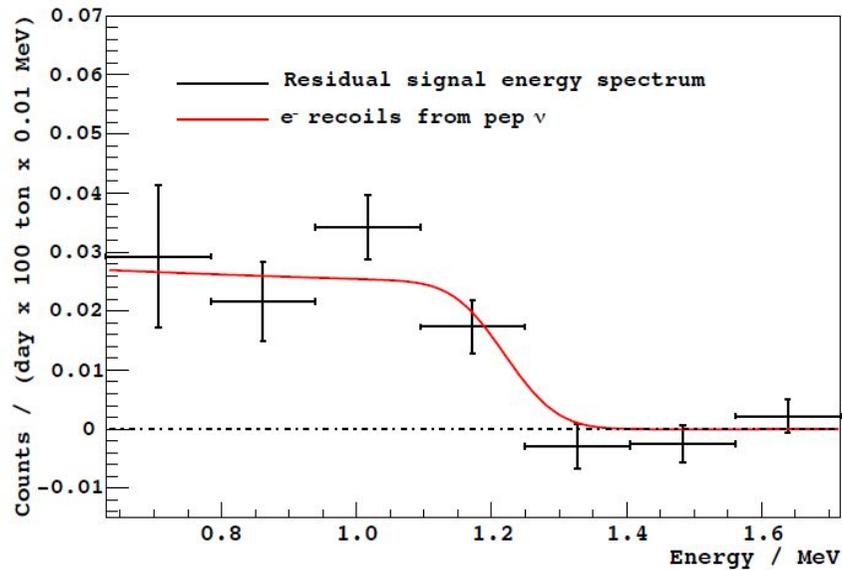
$$\text{SSM-High Met} = (4.48 \pm 0.31) 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Ratio} = 0.62 \pm 0.05$$

$$P_{ee} = 0.51 \pm 0.07$$

$$[\sigma(\nu_e)=4.5 \sigma(\nu_{\mu}, \nu_{\tau})]$$

A la recherche des ν pep et CNO (2011)

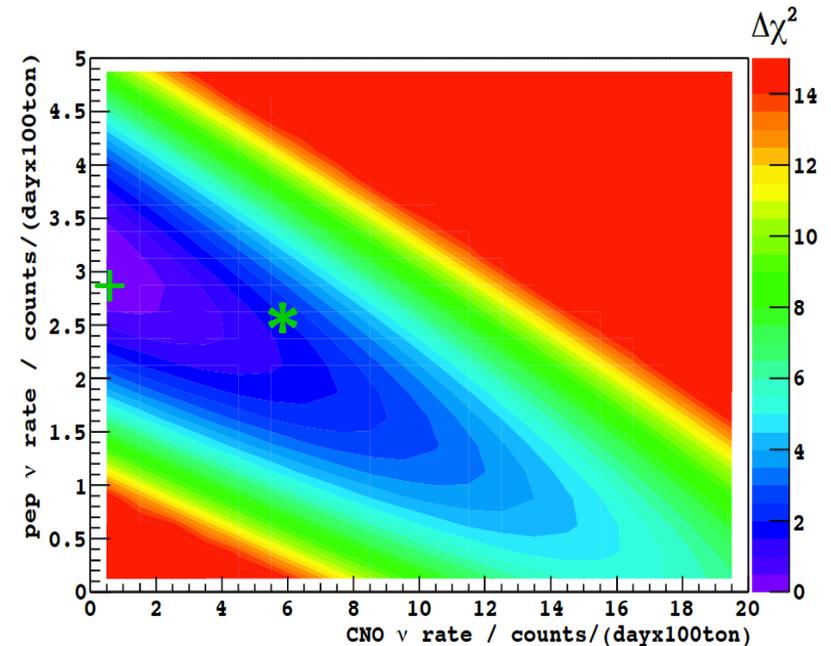


pep flux

$$3.1 \pm 0.6 \pm 0.3 \text{ counts}/(\text{day} \cdot 100 \text{ ton})$$

$$\Phi(\text{pep}) = 1.6 \pm 0.3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi(\text{SSM}) = 1.45 \pm 0.1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$



CNO flux

$$< 7.9 \text{ counts}/(\text{day} \cdot 100 \text{ ton})$$

$$\Phi(\text{CNO}) < 7.7 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi(\text{SSM}) = 5.2 (3.7) \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Le flux des ν_{\odot} du ${}^8\text{B}$ (2010)

345.3 d

75 ± 13 events above 3 MeV
 (46 \pm 8 events above 5 MeV)

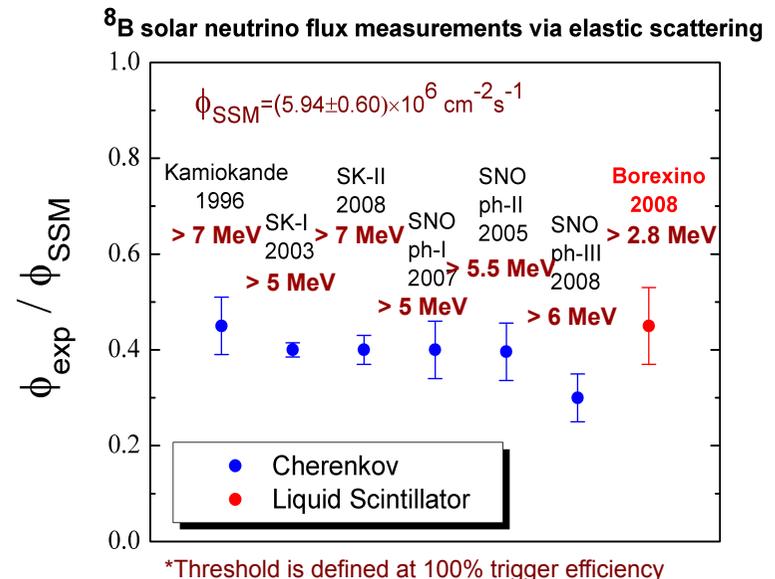
$\Phi({}^8\text{B}) = 0.22 \pm 0.04 \pm 0.01$ cpd/100 \dagger
 ($\Phi({}^8\text{B}) = 0.13 \pm 0.02 \pm 0.01$ cpd/100 \dagger)

$\Phi({}^8\text{B}) = 2.4 \pm 0.4 \pm 0.1$ $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 ($\Phi({}^8\text{B}) = 2.7 \pm 0.4 \pm 0.2$ $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

$\Phi(\text{SSM})_{\text{High Met}} = 5.58 \pm 0.6$ $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

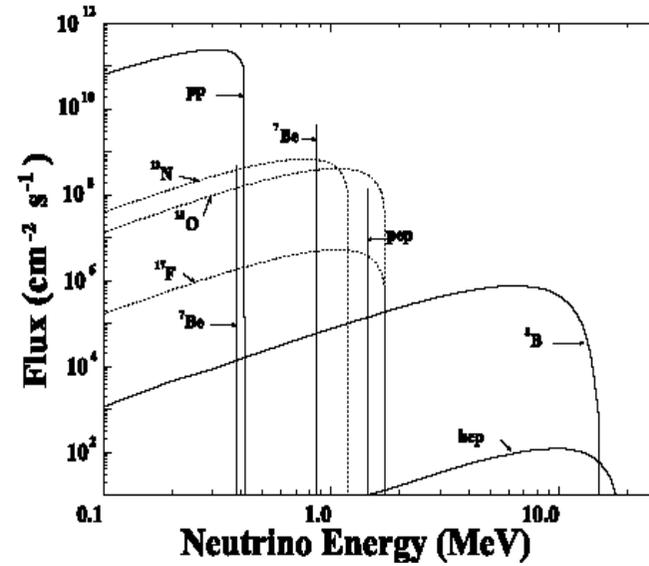
Systematic errors:

- 3.8% (*masse fiducielle*)
- 3.5% (*energy threshold*)

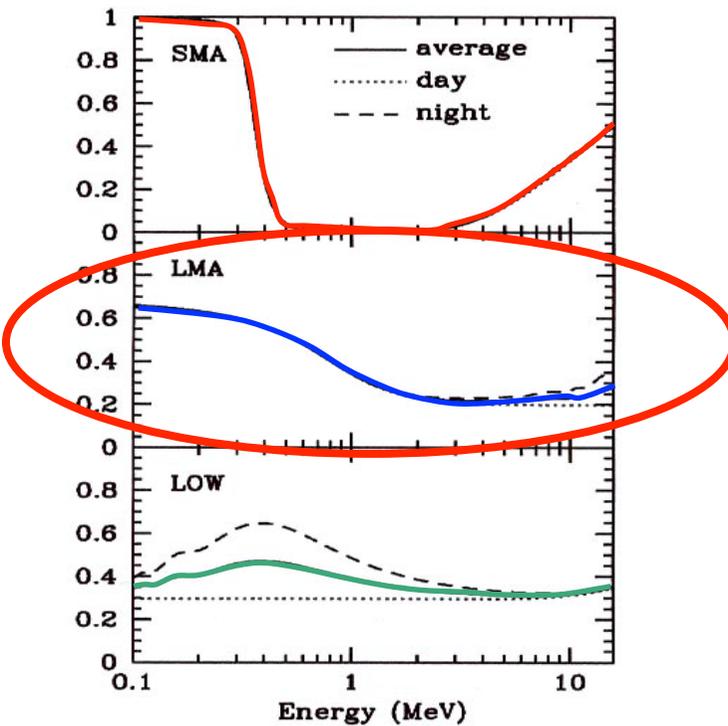


arXiv:0808.2868
 Phys. Rev. D82 (2010) 033006

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



Survival probabilities with MSW effect

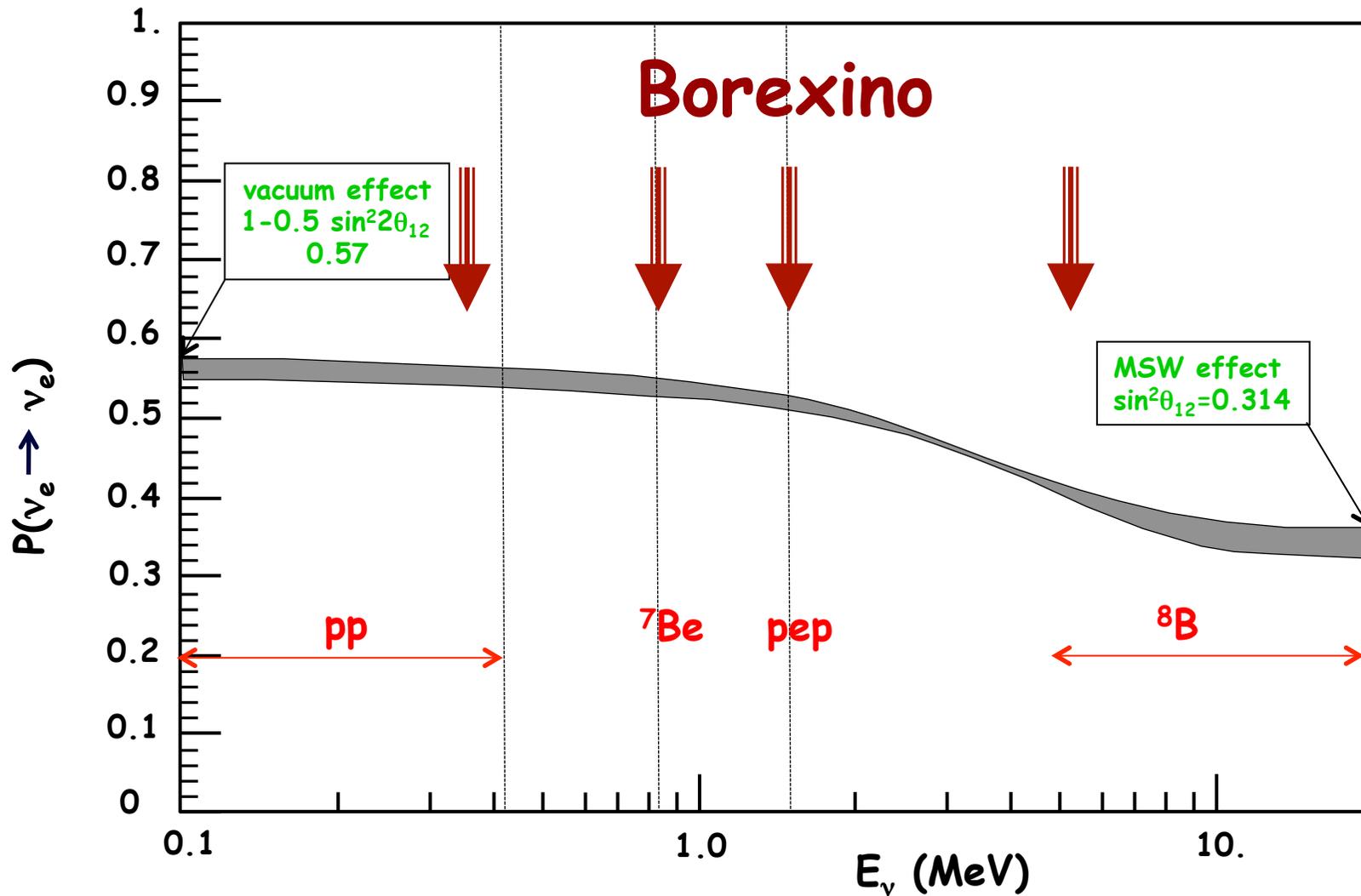


Effet MSW : le cas du Soleil (LMA)

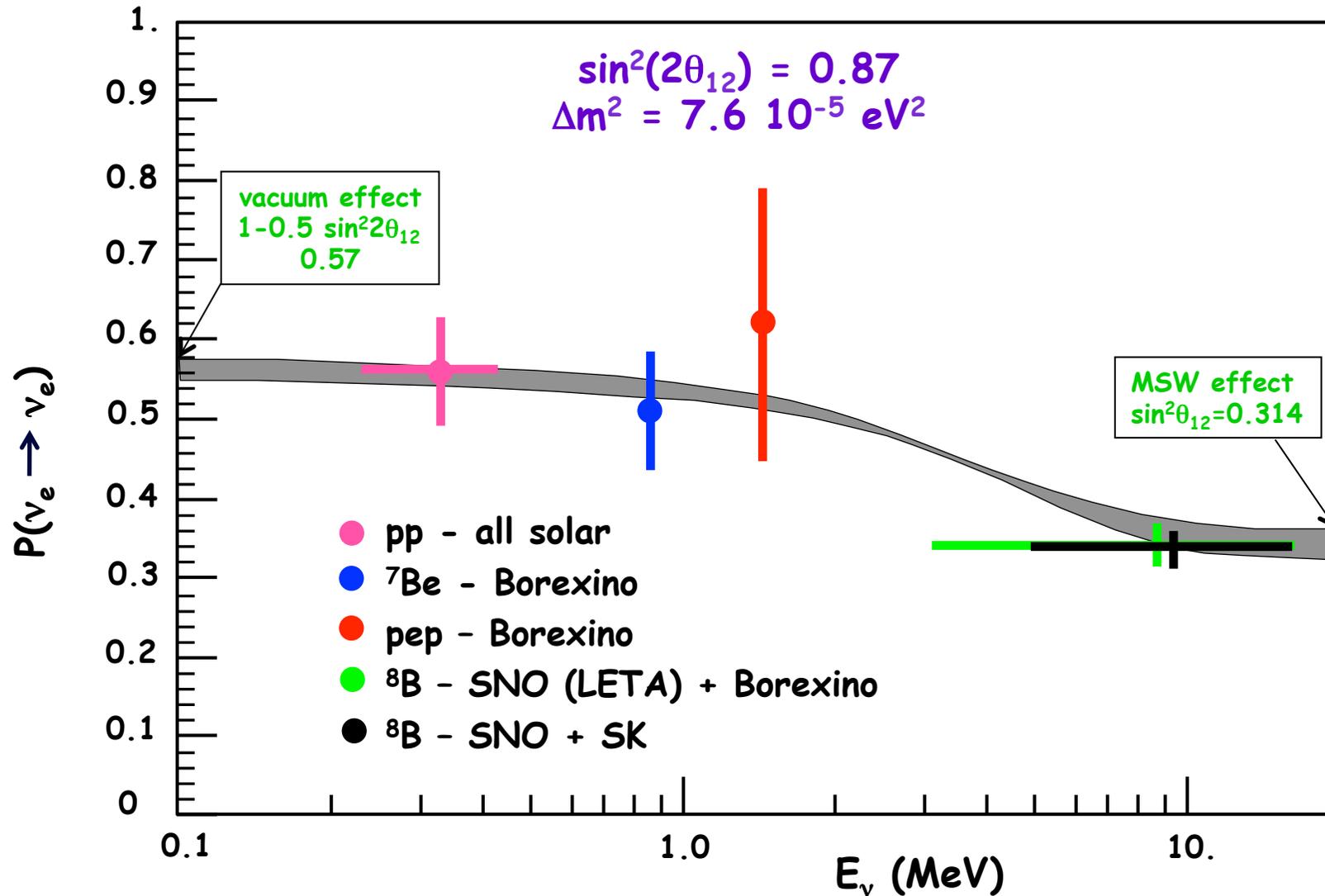
Large Mixing Angle solution

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.87$$

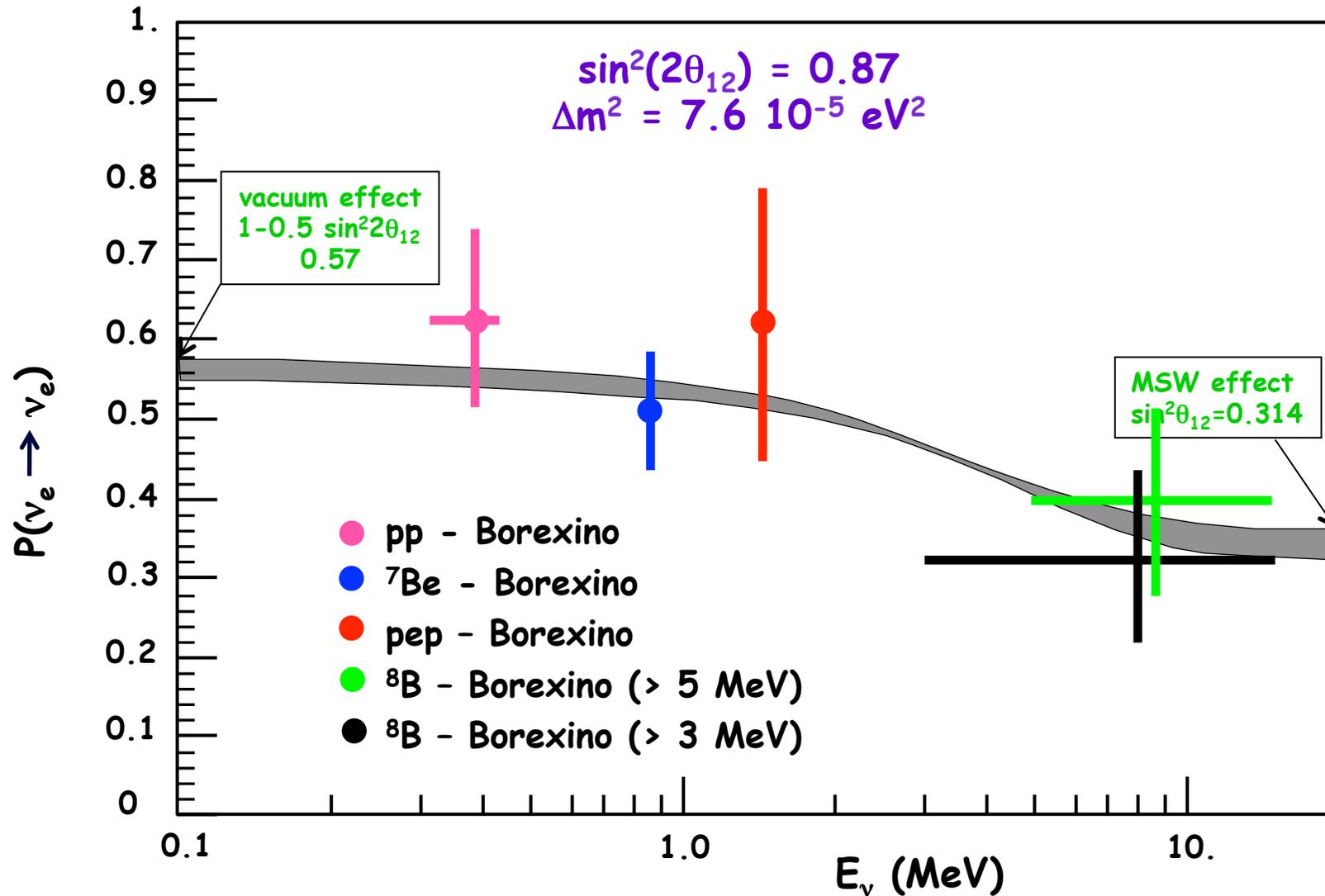
$$\Delta m^2 = 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

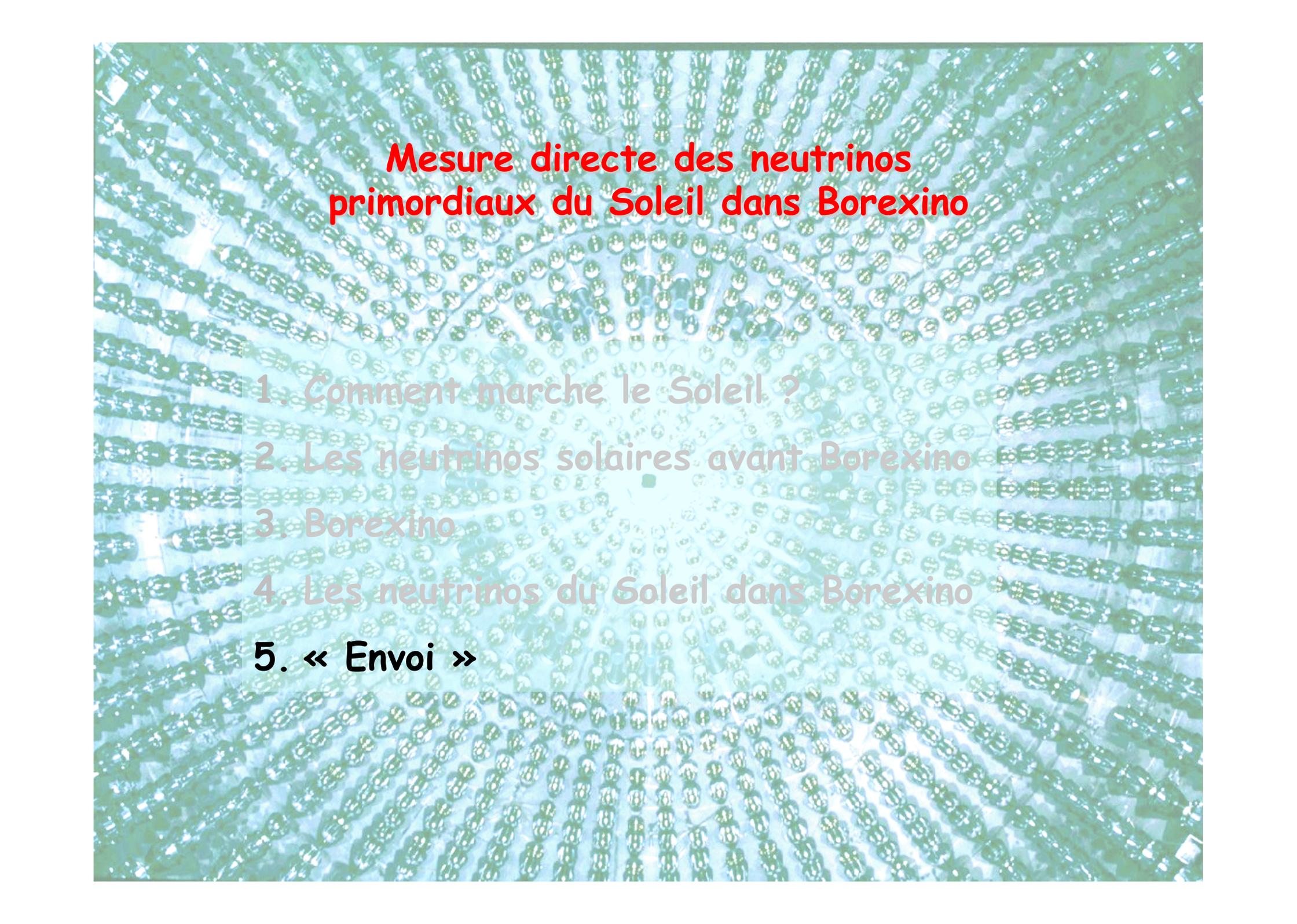


Borexino et la solution MSW-LMA



Borexino et la solution MSW-LMA



A microscopic image of plant tissue, likely a leaf cross-section, showing a regular grid of cells. The cells are arranged in a pattern that converges towards a central bright spot, creating a radial effect. The overall color is a light greenish-blue.

Mesure directe des neutrinos primordiaux du Soleil dans Borexino

1. Comment marche le Soleil ?
2. Les neutrinos solaires avant Borexino
3. Borexino
4. Les neutrinos du Soleil dans Borexino
5. « Envoi »

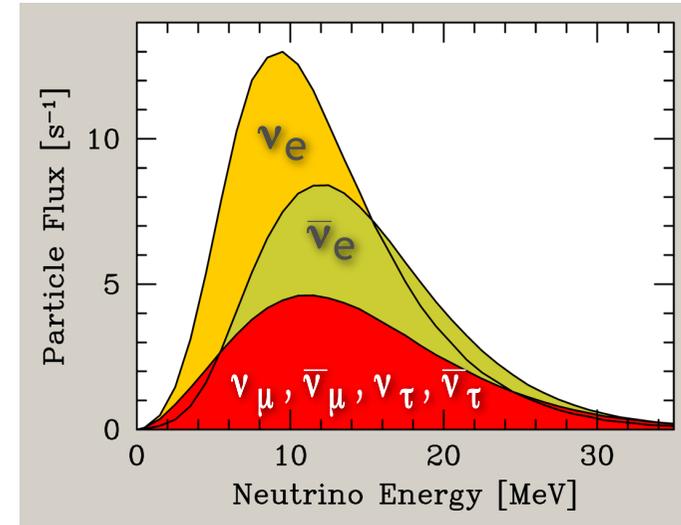
Le futur pour les neutrinos solaires

- ① mesurer les ν de la raie **pep** avec meilleure précision
- ② mesurer les ν **CNO** (si suppression ^{210}Bi)

Le futur : les ν de supernovas

SNIa : $3 \cdot 10^{53}$ ergs (99% en ν)

10^{58} neutrinos émis en 10 s



Supernova typique au centre galactique (8 kpc)



$E_\nu > 1.8 \text{ MeV}$

80 ev.



diffusion élastique

5 ev.



mesure p de recul ($>0.25 \text{ MeV}$)

55 ev.



$E_\gamma = 15.1 \text{ MeV}$

20 ev.

Le futur : les ν stériles ????

Différentes anomalies autour de $\Delta m^2 = 1\text{eV}^2$ (LSND, MiniBoone, réacteurs, gallium sources, ...)

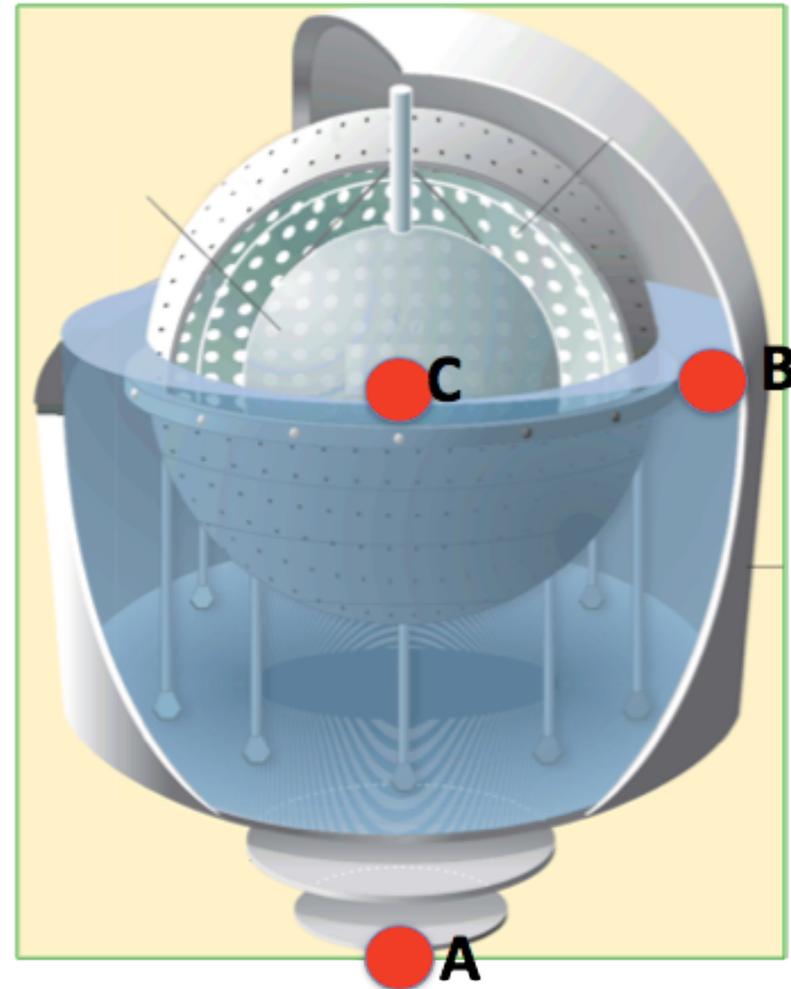
(Brevet IRFU/ Mention et al. – arXiv:1101-2755)

⇒ Existence de neutrinos stériles ????

→ Source de neutrinos (^{50}Cr) > 100 PBq
ou d'antineutrinos (^{144}Ce , ^{106}Ru) > 1 PBq
pour tester (Cribier et al. arXiv:1107-2335)

Où mettre la source ?

- A: **underneath** - D = 825 cm - No change to present configuration
- B: **inside** - D = 700 cm - Need to remove shielding water
- C: **center** - Major change - Remove inner vessels



SOX ^{144}Ce - 2015

Conclusion

- Borexino vient de compléter magistralement son étude détaillée de la spectroscopie des neutrinos solaires.
- La détection directe des neutrinos issus de la fusion primordiale de deux protons démontre que $\sim 99\%$ de la puissance du Soleil ($3,84 \cdot 10^{26}$ W) est générée par ce processus, en accord avec les modèles solaires.
- Confirmation expérimentale que le Soleil est en équilibre thermodynamique sur une échelle de plus de 10^5 ans.
- La précision de la mesure ($\sim 10\%$) devrait atteindre 1% pour atteindre celle de la luminosité en photons.
- Borexino affine la solution MSW-LMA des oscillations dans le secteur "solaire".
- Futur : meilleure précision sur pep, CNO; neutrinos de supernovas ?? neutrinos stériles ???

Conclusion

- Borexino vient de compléter magistralement son étude détaillée de la spectroscopie des neutrinos solaires.
- La détection directe des neutrinos issus de la fusion primordiale de deux protons démontre que $\sim 99\%$ de la puissance du Soleil ($3.84 \cdot 10^{26}$ W) est générée par ce processus, en accord avec les modèles solaires.
- Confirmation expérimentale que le Soleil est en équilibre thermodynamique sur une échelle de plus de 10^5 ans.
- La précision de la mesure ($\sim 10\%$) devrait atteindre 1% pour atteindre celle de la luminosité en photons.

- Borexino affine le spectre MSW-LMA, les oscillations dans le secteur θ_{12} .

- Futur : meilleure précision sur pep, CNO; neutrinos de supernovas ?? neutrinos stériles ???

Astro
particule



**Je suis bêtement entré
en collision avec un
stupide électron dans
un très joli piège appelé
Borexino.**

**J'ai un message pour
vous: le Soleil
fonctionne
parfaitement bien et
vous n'aurez pas de
problème d'énergie
pour les prochains
100 000 ans!**

**Je suis un pauvre
neutrino solitaire,
away from home.**

**Je suis né au cœur du
Soleil il y a 8 minutes
là où il fait très chaud.**

**Je vais maintenant
errer dans l'espace
intersidéral, avec le
souvenir de vous avoir
transmis un message
sympathique!**



NIHIL SINE SOLE - 1838

E



N

Nihil Sole sine Borexino - 2014