

Détection d'antineutrinos de réacteur nucléaire : trois approches comparées.

Benoit VIAUD
(in2p3/CNRS)

Introduction

L'objet de ce cours est la comparaison de trois expériences de physique des particules : STEREO, PROSPECT et SoLid.

Ces trois expériences ont exactement le même objectif :

prouver qu'un *antineutrino électronique* $\bar{\nu}_e$ peut se transformer spontanément en un nouveau type de neutrino, le *neutrino stérile*.

Nous expliquerons les méthodes qu'elles emploient pour y parvenir.

En particulier, nous essaierons de justifier les différences entre leurs approches : pourquoi telle expérience a-t-elle choisi telle stratégie ?

* * *

Les deux premières heures de ce cours : quelques repères en physique des particules, des neutrinos et en techniques de détection.

Les deux suivantes : étude comparée de ces trois expériences.

Sommaire du premier cours

- Pourquoi étudier les neutrinos ?
 - Mini-introduction à la physique des particules
 - La place des neutrinos
 - L'oscillation des neutrinos : fenêtre sur la nouvelle physique
 - Autres intérêts des neutrinos
- Bases en physique de la détection : comprendre comment on mesure des neutrinos.
 - Interaction des particules avec la matière du détecteur
 - Les scintillateurs (organiques, inorganiques, plastiques, liquides)
 - Les détecteurs de photons (PMT, SiPM)
 - Quelques exemples d'expériences
- STEREO vs. PROSPECT vs. SoLid
 - Motivations physiques
 - Première comparaison expresse
 - Problématiques expérimentales de base
 - Comparaison détaillée.

Chapitre I

**Les neutrinos, principales propriétés
et pourquoi il faut les étudier.**

Pourquoi étudier les neutrinos ?

1. Leur étude permet de mieux comprendre la **physique des particules élémentaires**.
2. Ils permettent d'observer certains phénomènes **astrophysiques** (alternative à la lumière).
3. Ils permettent de sonder les **réacteurs nucléaires**.
4. Les **géoneutrinos** renseignent sur les réactions radioactives dans la croûte terrestre, ou dans le manteau (moteur de la tectonique).

Nous nous concentrerons sur le premier point de cette liste.
Les autres seront très brièvement abordés.

La physique des particules en quelques mots

La physique des particules cherche à établir la *liste de toutes les particules élémentaires* et à comprendre *comment elles interagissent*.

La description théorique des particules élémentaires s'appuie sur la **Théorie des Champs Quantique et Relativiste (TCQR)**, cadre théorique mariant mécanique quantique et la relativité restreinte.

Tout comme en mécanique classique ou en mécanique quantique, où les équations d'Euler-Lagrange ou l'équation de Schrödinger ne suffisent pas à décrire un système, il faut fournir un **Hamiltonien** à la TCQR.

Cet Hamiltonien retranscrit un **modèle** prédisant la liste des particules existantes et leur façon d'interagir.

Le Modèle standard de la physique des particules

Il est parvenu à prédire toutes les particules actuellement connues.

Il parvient encore à prédire toutes les observations faites en laboratoire sur leurs interactions.

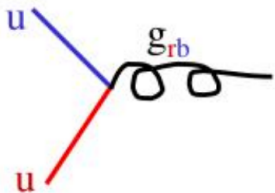
Appel à une notion de **symétrie** pour déterminer son Hamiltonien.

Monkish :

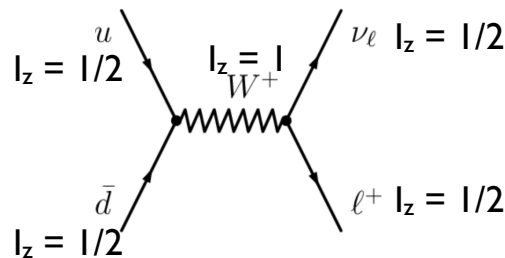
- Hamiltonien déterminé en cherchant un Hamiltonien respectant la symétrie de jauge $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
- Application du théo. de Noether : un Hamiltonien doit être invariant sous une transformation de jauge pour décrire la **conservation d'une charge**.

Donc, principale loi derrière le Modèle standard : les interactions entre particules conservent 3 charges

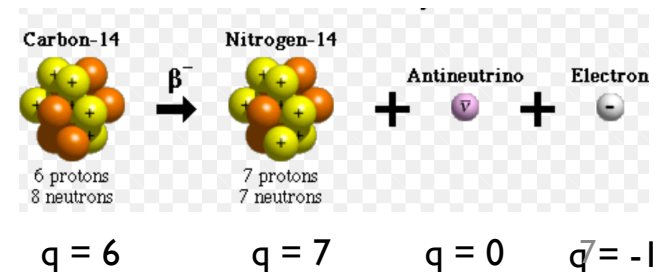
Couleur



Isospin faible

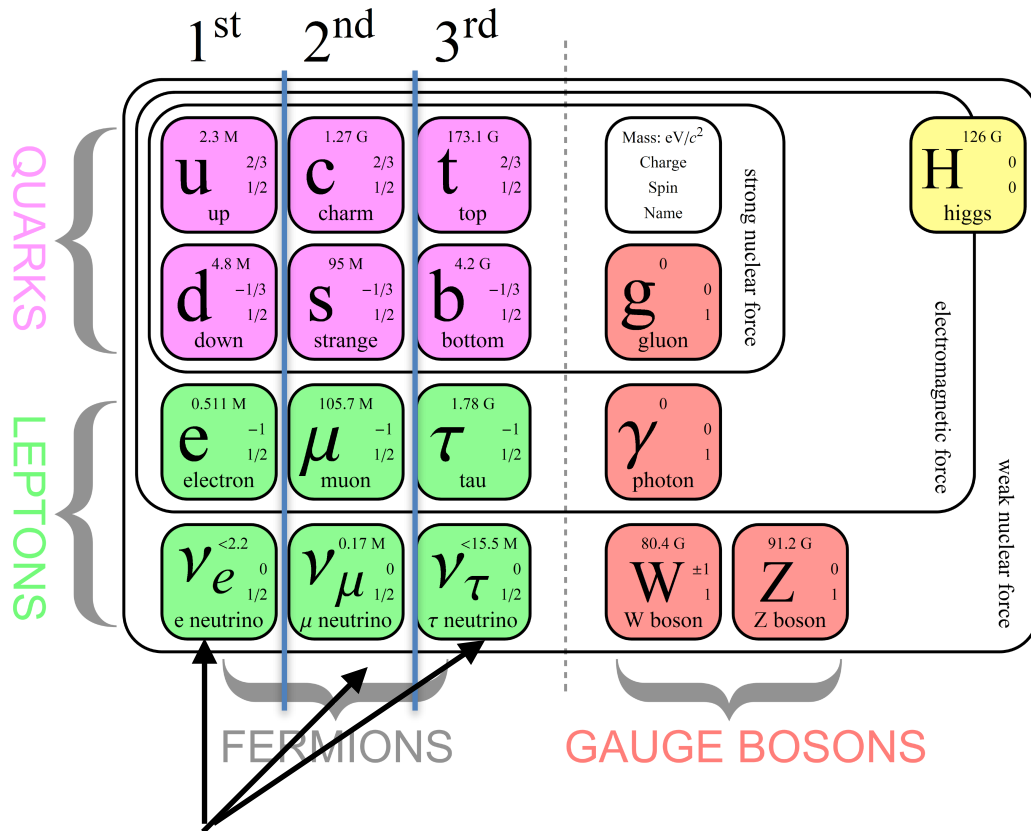


Charge électromagnétique



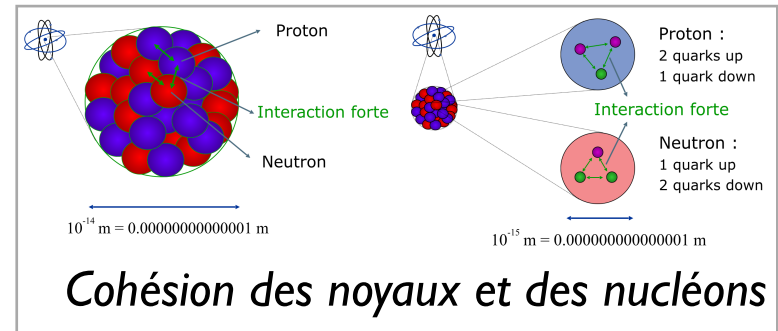
Le Modèle standard de la physique des particules

12 particules de matière, 4 bosons de jauge, 1 boson de Higgs

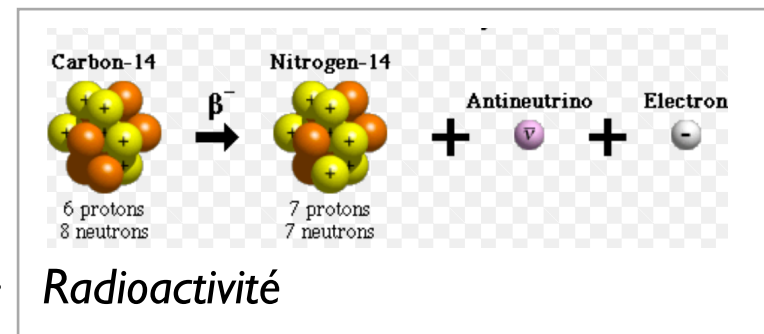


3 interactions:

- électromagnétique
- nucléaire forte

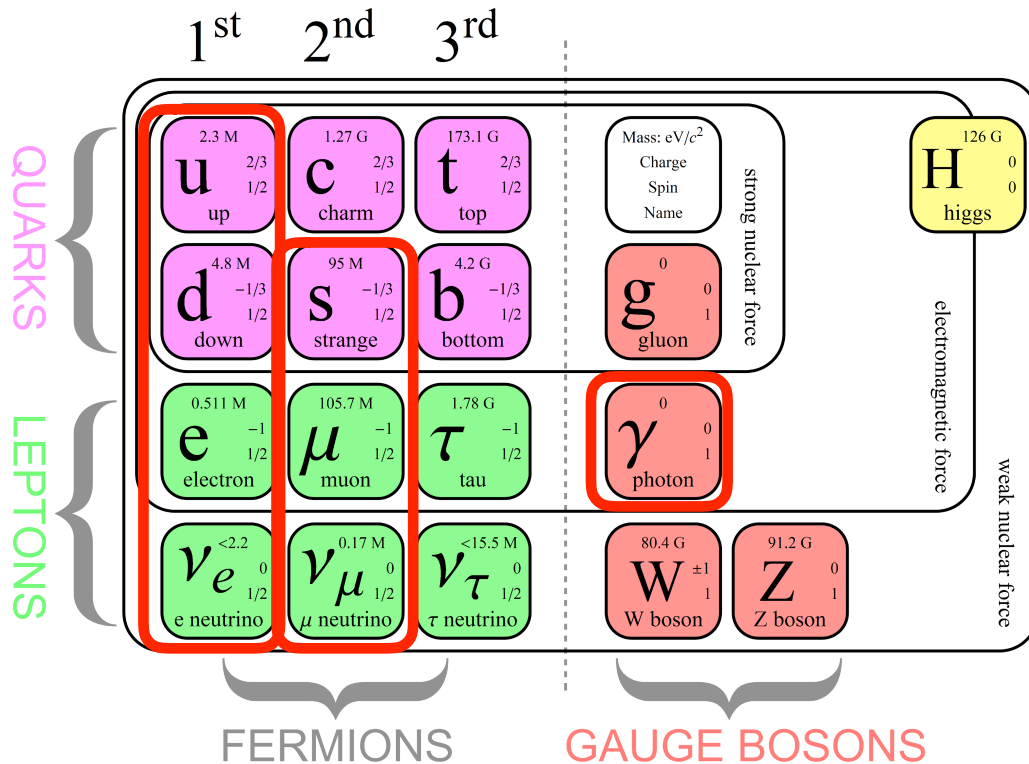


- nucléaire faible



3 générations de masses croissantes, découvertes à mesure que les accélérateurs de particules montaient en puissance ($E=mc^2$). Autres propriétés identiques.

Le Modèle standard: Triomphe scientifique !



Particules déjà connues quand le Modèle a été conçu (~1970)

Toutes les autres prédites, puis découvertes à la bonne masse !!

Note: 12 antiparticules associées aux fermions (même propriétés, mais charges opposées).

Depuis 50 ans, les prédictions du Modèle standard sont systématiquement confirmées expérimentalement !

(particules, durées de vie, taux de désintégration des particules, différences entre les valeurs de ces observables pour particules et antiparticules, etc.)

Limites du Modèle standard.

Malgré ses grands succès, ce Modèle n'est sans doute que l'expression aux énergies actuellement accessibles d'une physique plus fondamentale.

Parmi les limitations qui nous le font penser :

- La **gravitation** est très difficile à inclure dans le Modèle.
- Les particules du Modèle ne rendent compte que de $\sim 20\%$ de la masse des galaxies. Le reste : **matière noire** encore incomprise.
- Le Modèle comporte une **vingtaine de paramètres** dont il ne prédit pas la valeur. Cela semble **trop pour un Modèle réellement fondamental**.
- La masse du boson de Higgs est prédite par le Modèle. Mais pour obtenir la masse mesurée (~ 126 GeV) il faut régler finement la valeur de certains de ses paramètres. **Ces valeurs semblent peu naturelles**.
- et encore d'autres : prochaines diapos...

Limites du Modèle standard : Baryogénèse.

La baryogénèse est le processus physique hypothétique à l'origine de la matière baryonique (ex: protons, neutrons, etc.) dans l'Univers.

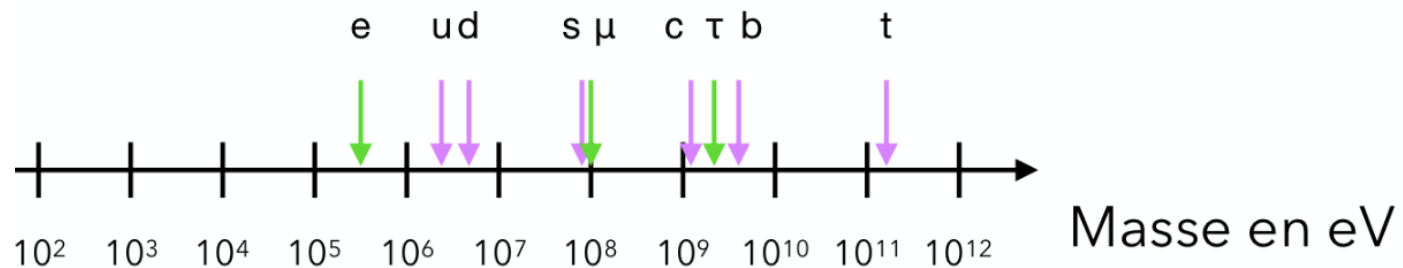
- Juste après le Big bang, matière et antimatière se créent en quantités égales.
- Entre 10^{-32} s et 10^{-12} s plus tard, les deux se recombinent pour ne plus produire que des photons.
- Donc: il ne devrait (presque) plus exister que des photons de nos jours.
- Pour expliquer la présence de matière : différence entre les lois de la physique s'appliquant à la matière et à l'antimatière, nommée **violation de CP**.
- La violation de CP aurait créé un déséquilibre avant la recombinaison.
- Le Modèle standard permet la violation de CP, mais d'une magnitude beaucoup trop faible !

Limites du Modèle standard : Les masses

Le Modèle standard explique l'existence des masses des particules par leur interaction permanente avec le champ de Higgs.

Mais il ne dit rien de leurs valeurs, qui doivent être mesurées.

Or, un schéma non trivial apparaît :



En particulier: rien dans le Modèle ne force l'électron à être ~300000 fois plus léger que le quark top. Ils pourraient avoir la même masse.

Ce schéma n'est sans doute pas dû au hasard !

Note:

E en eV, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

M en eV/c², $1 \text{ MeV} = 1.7 \times 10^{-30} \text{ kg}$

La place des neutrinos dans tout cela ?

D'après les deux précédentes diapos, étudier des particules :

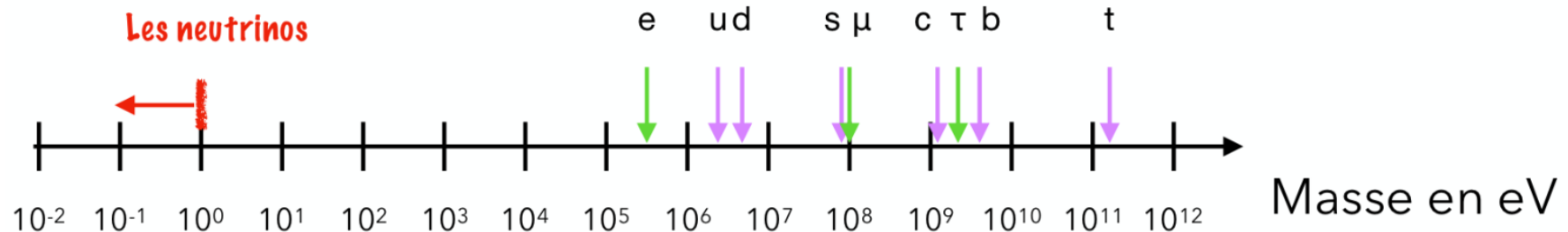
- de masses particulières ;
- capables de violer CP ;

aidera à révéler une **physique plus fondamentale**.

Rechercher cette Nouvelle Physique, "au-delà du Modèle standard", est l'activité exclusive des physiciens des particules actuellement.

Les neutrinos répondent à ces conditions !

Ex:

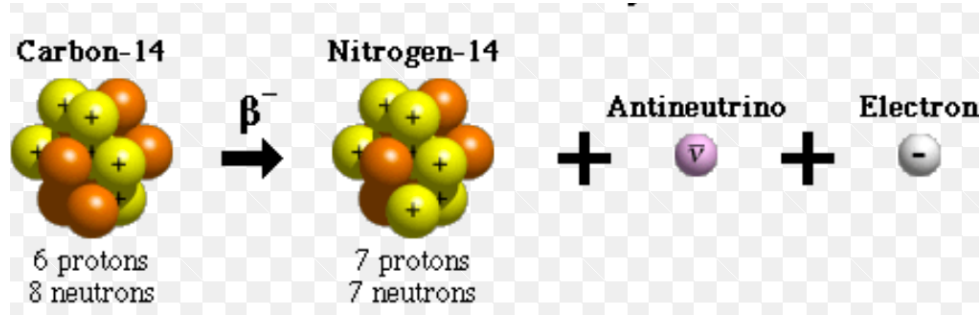


Une masse encore beaucoup plus faible que les autres !

Les neutrinos

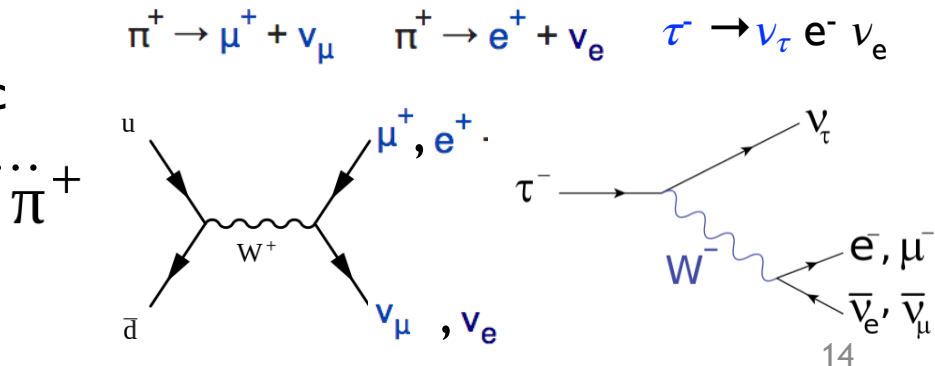
Des particules encore très mal connues...

- Découvertes il y a ~ 1 siècle dans des désintégrations radioactives.



- Interagissent uniquement par interaction faible (charge élec. et couleur = 0)
- Masses très faibles et mal connues (sans doute < 0.1 eV)
- 3 "saveurs" de neutrinos (électronique, muonique, tauique).

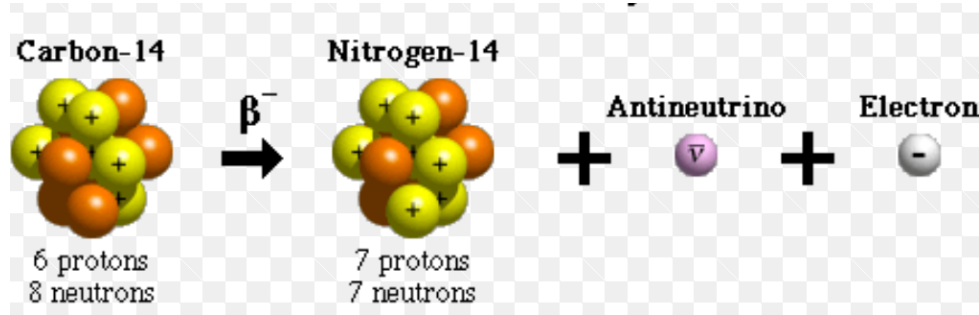
Origine: neutrinos toujours produits avec une autre particule (électron, muon, tau)...



Les neutrinos

Des particules encore très mal connues...

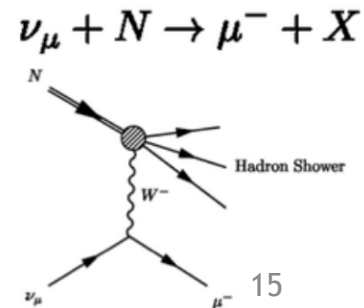
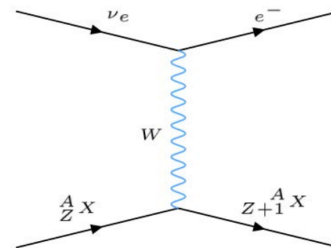
- Découvertes il y a ~ 1 siècle dans des désintégrations radioactives.



- Interagissent uniquement par interaction faible (charge élec. et couleur =0)
- Masses très faibles et mal connues (sans doute < 0.1 eV)
- 3 "saveurs" de neutrinos (électronique, muonique, tauique).

Et produisent toujours cette même particule...

$$\nu_e + \frac{A}{Z} X \rightarrow e^- + \frac{A}{Z+1} X$$

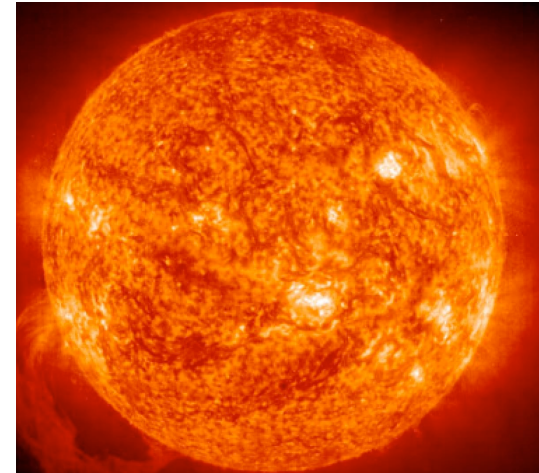
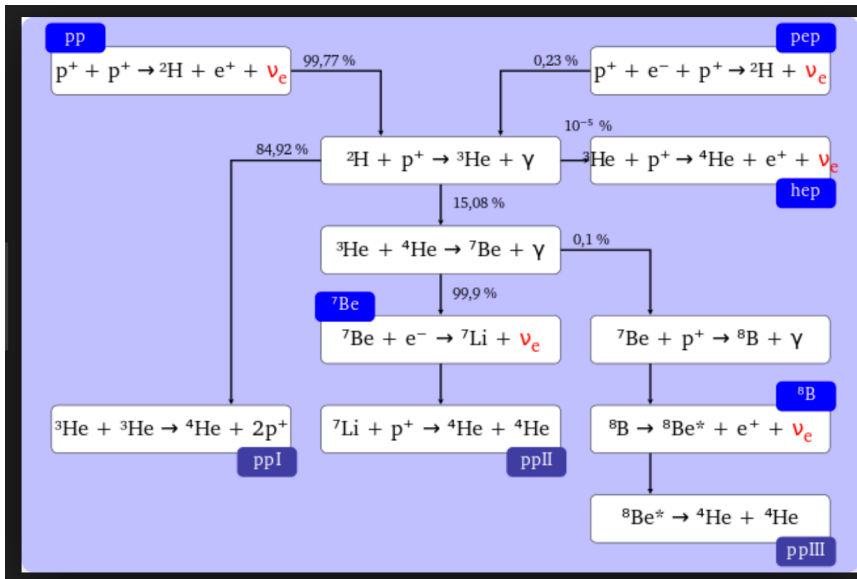


Les neutrinos autour de nous

Des particules encore très mal connues, **mais pourtant présentes partout !**

Des neutrinos sont produits naturellement:

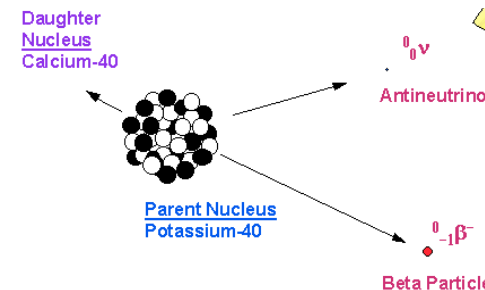
- Par le soleil, dans les réactions qui produisent son énergie



A chaque seconde, **~500000 milliards** de neutrinos solaires traversent notre corps !

- Par la radioactivité naturelle

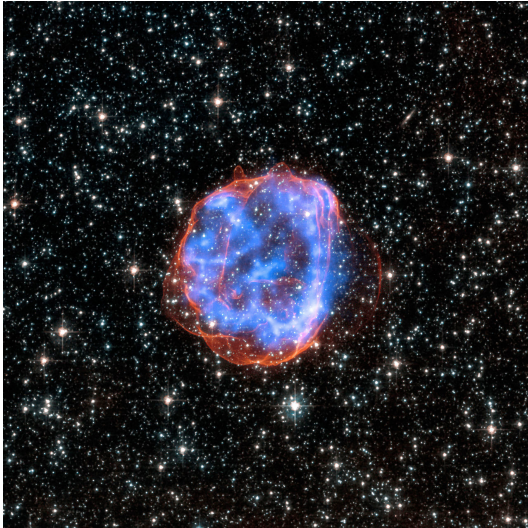
Ex: 4000 neutrinos produits dans votre corps à chaque seconde.



Les neutrinos autour de nous

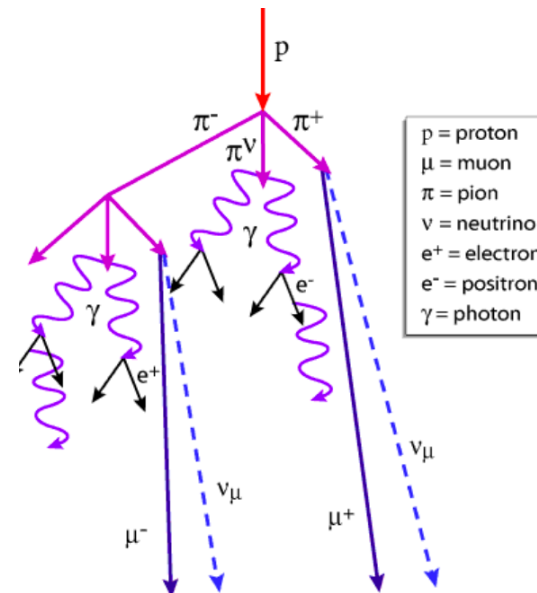
Des neutrinos sont produits naturellement:

- Dans des supernovae ou autres phénomènes cosmiques violents.



- Dans l'interaction de "rayons cosmiques" avec l'atmosphère terrestre (ex: protons issus de supernovae)

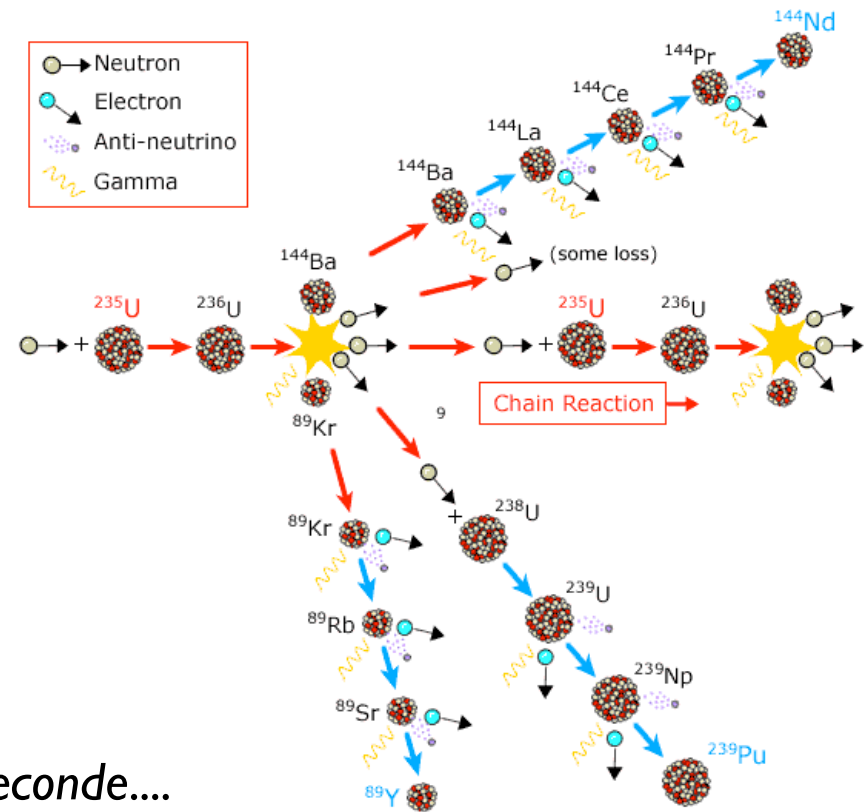
→ 100 neutrinos par seconde et par m²



Les neutrinos autour de nous

L'homme produit aussi artificiellement des neutrinos

- Dans des centrales nucléaires



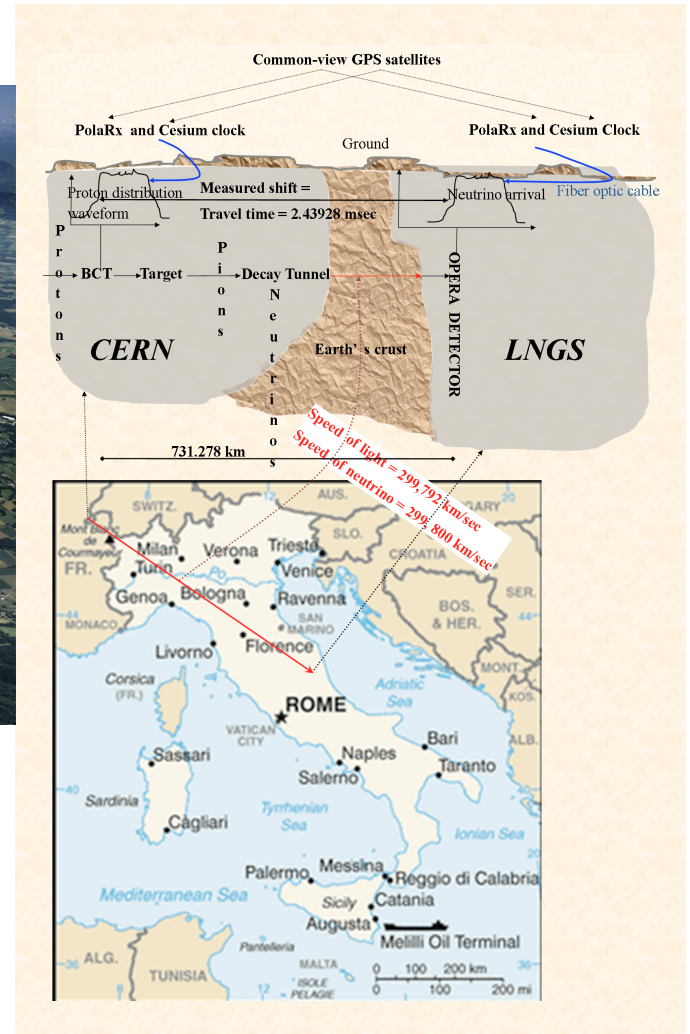
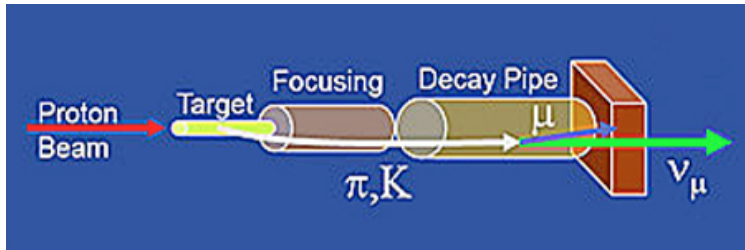
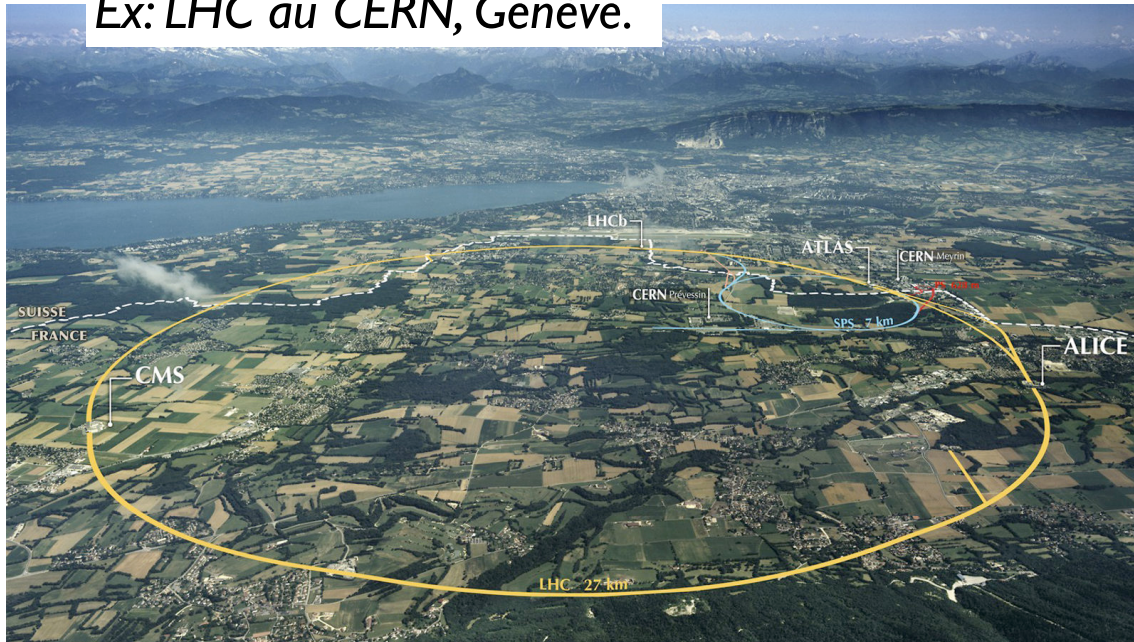
De l'ordre de 10^{21} neutrinos émis par seconde...

Les neutrinos autour de nous

L'Homme produit aussi artificiellement des neutrinos

- Par des accélérateurs de particules

Ex: LHC au CERN, Genève.



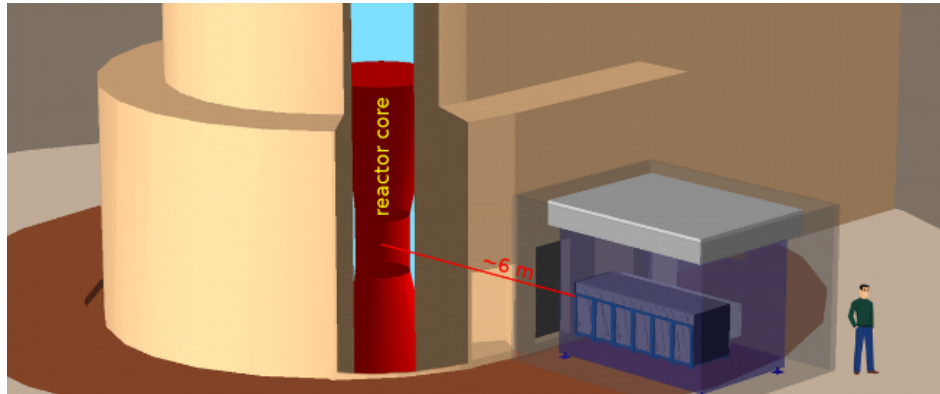
Une propriété des neutrinos, essentielle en pratique

Les neutrinos sont les particules élémentaires les moins bien connues

Q: Si les neutrinos sont partout, pourquoi sont-ils si mal connus ?

R: Parce qu'ils interagissent très peu avec la matière !

Exemple 1: détecteur SoLid, placé à 6 m du coeur du réacteur BR2 à Mol (Belgique)



Ce réacteur produit $\sim 10^{19}$ neutrinos par seconde.

Le détecteur en mesure ~ 300 par jour \rightarrow seulement 1 sur $3 \cdot 10^{21}$!

Exemple 2:

500000 milliards de neutrinos traversent votre corps à chaque seconde.

Seuls quelques uns (< 10) y laisseront de l'énergie en une vie !

Une propriété des neutrinos, essentielle pour la physique

Les neutrinos **oscillent** : ils peuvent changer spontanément de saveur.

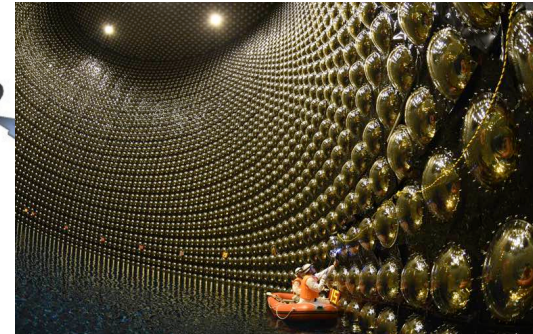
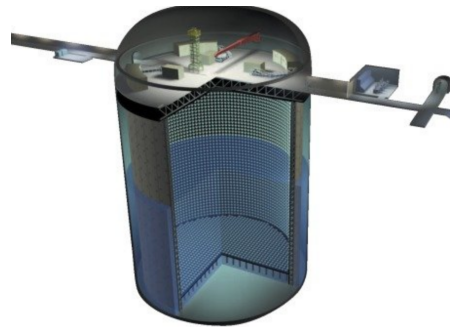
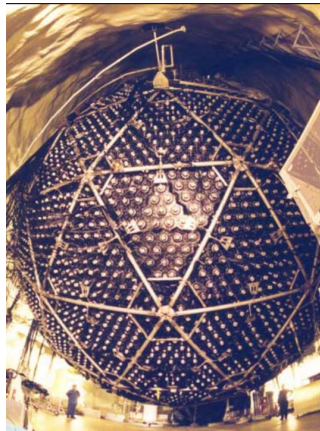
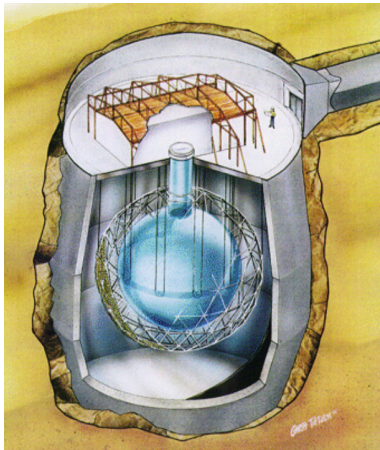
$$\nu_e \longrightarrow \nu_\mu ; \nu_e \longrightarrow \nu_\tau ; \nu_\mu \longrightarrow \nu_e ; \text{etc.}$$

C'est cette propriété qui permet d'étudier **leurs masses** et une éventuelle **violation de CP** dans leurs interaction.

L'existence des oscillations prouvée par les expériences SNO (Canada, 1998) et Super Kamiokande (Japon, 2002).

SNO : déficit de ν_e solaires.

SK : déficit de ν_e atmosphériques



Une propriété des neutrinos, essentielle pour la physique

Les neutrinos **oscillent** : ils peuvent changer spontanément de saveur.

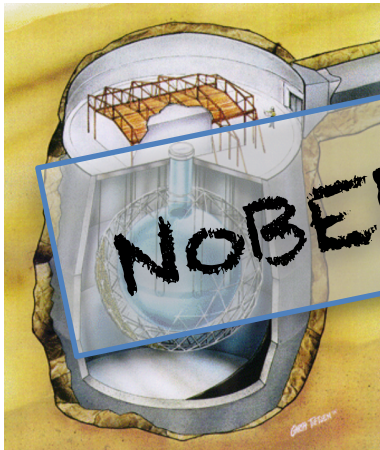
$$\nu_e \longrightarrow \nu_\mu ; \nu_e \longrightarrow \nu_\tau ; \nu_\mu \longrightarrow \nu_e ; \text{etc.}$$

C'est cette propriété qui permet d'étudier **leurs masses** et une éventuelle **violation de CP** dans leurs interaction.

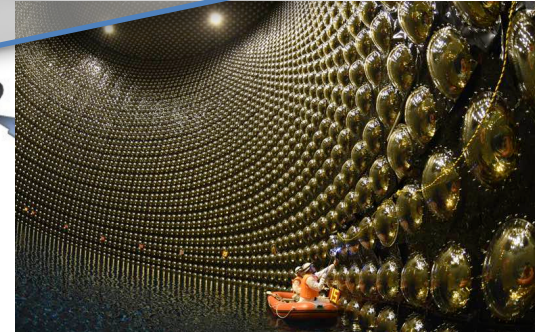
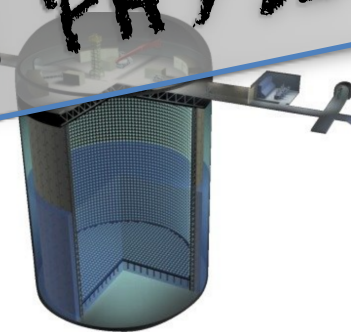
L'existence des oscillations prouvée par les expériences SNO (Canada, 1998) et Super Kamiokande (Japon, 2002).

SNO : déficit de ν_e solaires.

SK : déficit de ν_μ atmosphériques



IN PHYSICS 2016



Cela prouvait pour la première fois que les neutrinos ont une masse
peuvent violer CP : nouvelle fenêtre sur la Nouvelle physique

Une propriété des neutrinos, essentielle pour la physique

Les neutrinos **oscillent** : ils peuvent changer spontanément de saveur.

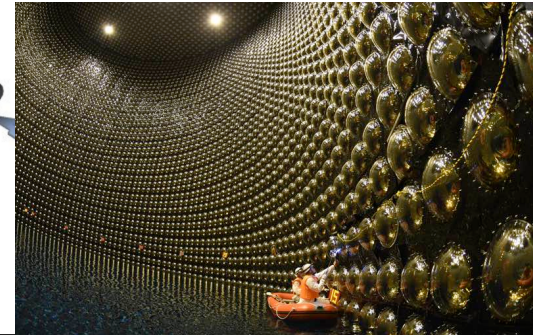
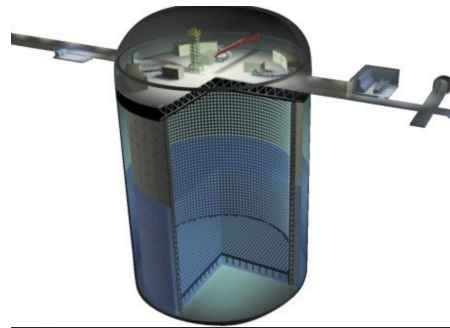
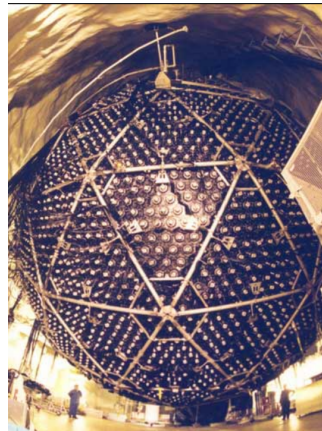
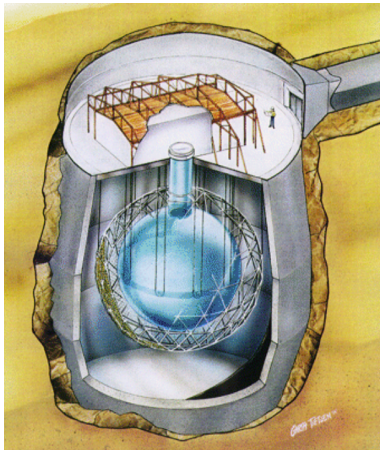
$$\nu_e \longrightarrow \nu_\mu ; \nu_e \longrightarrow \nu_\tau ; \nu_\mu \longrightarrow \nu_e ; \text{etc.}$$

C'est cette propriété qui permet d'étudier **leurs masses** et une éventuelle **violation de CP** dans leurs interaction.

L'existence des oscillations prouvée par les expériences SNO (Canada, 1998) et Super Kamiokande (Japon, 2002).

SNO : déficit de ν_e solaires.

SK : déficit de ν_e atmosphériques



La plupart des expériences actuelles en physique des neutrinos cherchent à mesurer d'autres types d'oscillations.

Oscillation des neutrinos : explications

On explique l'oscillation en postulant qu'un neutrino dans un état de saveur donné n'a pas de masse définie.

Il est alors une superposition quantique d'états propres de masse.

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha,i}^* |\nu_i\rangle \quad \text{État de saveur } \alpha \text{ dans lequel se trouve un neutrino}$$

juste après sa création.

Exemple juste après sa création en $t=0$ dans la réaction $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
le neutrino électronique est dans l'état

$$|\nu_e\rangle = U_{e,1}^* |\nu_1\rangle + U_{e,2}^* |\nu_2\rangle + U_{e,3}^* |\nu_3\rangle$$

Autre façon d'écrire la même chose :

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} \quad \text{Où apparaît la matrice **PMNS**.}$$

(Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)

Oscillation des neutrinos : explications

On explique l'oscillation en postulant qu'un neutrino dans un état de saveur donné n'a pas de masse définie.

Il est alors une superposition quantique d'états propres de masse.

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha,i}^* |\nu_i\rangle \quad \text{État de saveur } \alpha \text{ dans lequel se trouve un neutrino}$$

juste après sa création.

Exemple juste après sa création en $t=0$ dans la réaction $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
le neutrino électronique est dans l'état

$$|\nu_e\rangle = U_{e,1}^* |\nu_1\rangle + U_{e,2}^* |\nu_2\rangle + U_{e,3}^* |\nu_3\rangle$$

Paramétrisation:

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} ; s_{ij} = \sin \theta_{ij} ; \delta = \text{phase violant CP}$$

$$\begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Oscillation des neutrinos : explications

Cette superposition évolue dans le temps. L'éq. de Schrödinger nous donne :

$$|\nu_\alpha(t, L)\rangle = \sum_i U_{\alpha,i}^* e^{-i(E_i t - pL)} |\nu_i\rangle :$$

Oscillation des neutrinos : explications

Cette superposition évolue dans le temps. L'éq. de Schrödinger nous donne :

$$\text{Ou bien } |\nu_\alpha(t, L)\rangle = \sum_i U_{\alpha,i}^* e^{-i \frac{m_i^2}{2E} L} |\nu_i\rangle$$

avec des particules relativistes : $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E}$.

$pc \simeq E$ et $t/c = L$

Oscillation des neutrinos : explications

Cette superposition évolue dans le temps. L'éq. de Schrödinger nous donne :

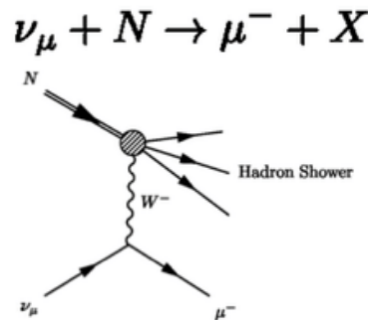
$$|\nu_\alpha(t, L)\rangle = \sum_i U_{\alpha,i}^* e^{-i\frac{m_i^2}{2E}L} |\nu_i\rangle$$

Après un certain temps,

$$\begin{aligned} |\nu_e(t)\rangle &= U_{e,1}^* e^{-i(m_1^2 L/2E)} |\nu_1\rangle + U_{e,2}^* e^{-i(m_2^2 L/2E)} |\nu_2\rangle + U_{e,3}^* e^{-i(m_3^2 L/2E)} |\nu_3\rangle \\ &= U_{\mu,1}^* |\nu_1\rangle + U_{\mu,2}^* |\nu_2\rangle + U_{\mu,3}^* |\nu_3\rangle = |\nu_\mu\rangle \end{aligned}$$

Le neutrino électronique est devenu un neutrino muonique !

En cas d'interaction, c'est un muon que l'on détectera alors !



Probabilités d'oscillation

Les équations des dernières diapos permettent d'établir la probabilité qu'un neutrino produit dans la saveur α soit mesuré au temps t dans la saveur β

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sum_i |U_{\alpha,i} U_{\beta,i}^*|^2 + 2\text{Re} \left(\sum_{i>j} U_{\alpha,i} U_{\beta,i}^* U_{\alpha,j}^* U_{\beta,j} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \right)$$

Différents termes dominent cette somme en fonction

- Du type d'oscillation : Apparition $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ ou survie $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$?
- De la distance L et de l'énergie E du neutrino.
- Des différences entre les masses : $\Delta m_{ij}^2 = (m_i^2 - m_j^2)$

L et E déterminent les termes qui dominent, les Δm_{ij}^2 étant donnés.

Chaque cas donne accès à des informations particulières (exemples plus loin)

Donc : Suivant ce que l'on veut mesurer, on choisit des neutrinos d'une certaine E et on place le détecteur à une certaine L du point de production.

Exemple I : Mesure de $\sin^2 2\theta_{13}$

On mesure la proba de survie de $\bar{\nu}_e$ de **3 MeV**.

On se place à **1 km**

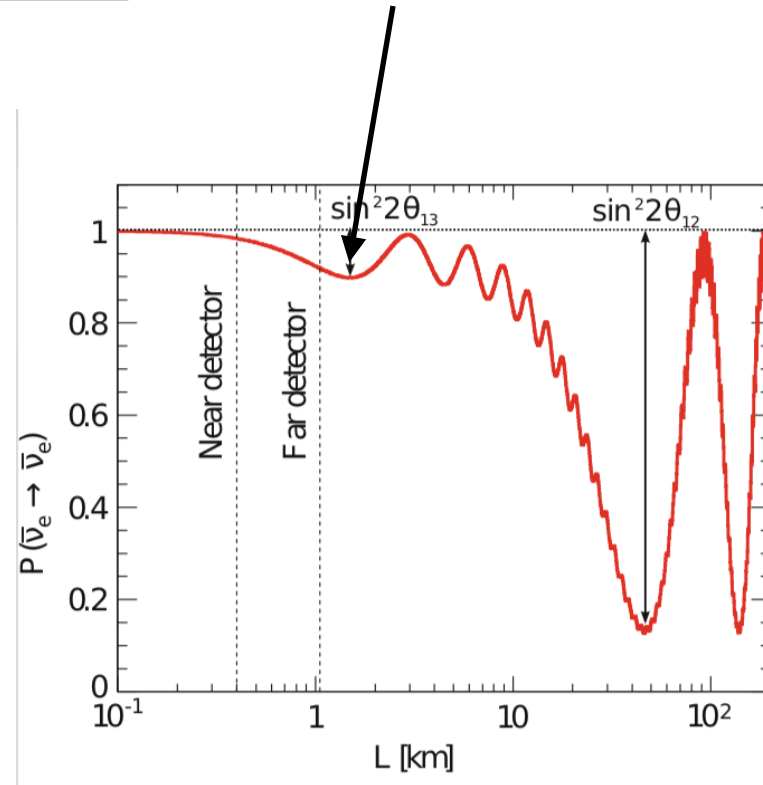
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e, L) = 1 - \frac{\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21}}{2} - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31}$$

~ 0

$$\Delta_{ij} = 1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} = \pi/2$$

$$\Delta m_{13}^2 \approx 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{12}^2 \approx 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$



Exemple 2 : Recherche de violation de CP

On mesure probabilité d'oscillation d'un ν_μ de $\sim \mathbf{1 \text{ GeV}}$ vers ν_e

$$P_{\mu e} = 4s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{\sin^2(\hat{A} - 1)\Delta}{(\hat{A} - 1)^2} + 2\alpha s_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos(\Delta + \delta_{CP}) \frac{\sin \hat{A}\Delta}{\hat{A}} \frac{\sin(\hat{A} - 1)\Delta}{\hat{A} - 1} + \alpha^2 \sin^2 2\theta_{12} c_{23}^2 \frac{\sin^2 \hat{A}\Delta}{\hat{A}^2},$$

$$\alpha = \Delta m_{21}^2 / \Delta m_{31}^2$$

$$\Delta = \Delta m_{31}^2 L / 4E$$

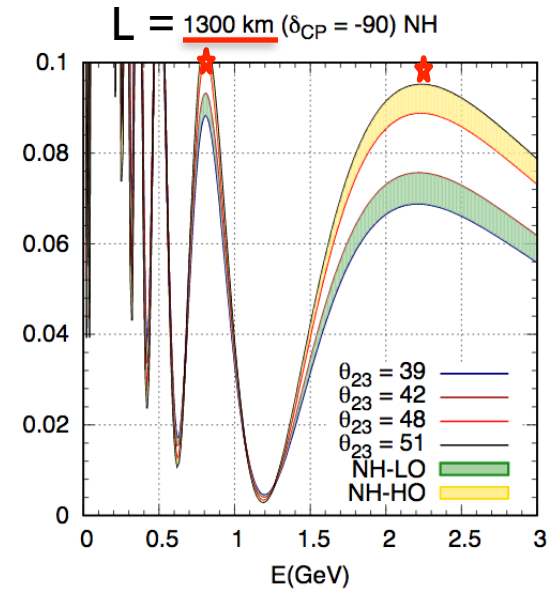
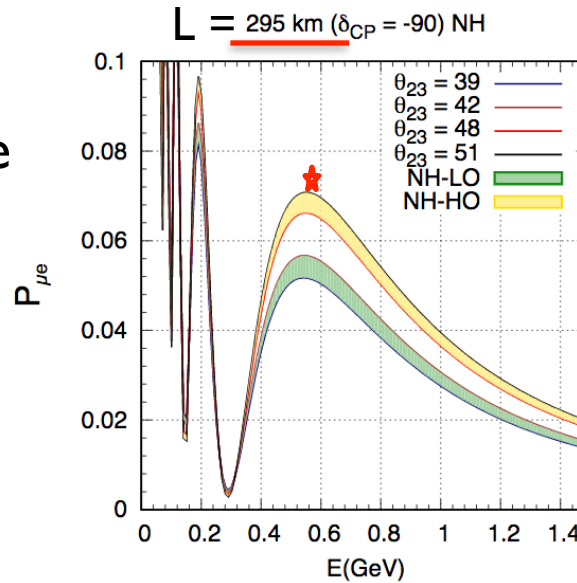
$$\hat{A} = A / \Delta m_{31}^2$$

$$A = 2\sqrt{2}G_F N_e E$$

À cette énergie : détecteur beaucoup plus loin pour être au maximum d'oscillation...

$$\Delta m_{13}^2 \approx 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{12}^2 \approx 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$



Exemple 2 : Recherche de violation de CP

On mesure probabilité d'oscillation d'un ν_μ de $\sim \mathbf{1 \text{ GeV}}$ vers ν_e

$$P_{\mu e} = 4s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{\sin^2(\hat{A} - 1)\Delta}{(\hat{A} - 1)^2} + 2\alpha s_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos(\Delta + \delta_{CP}) \frac{\sin \hat{A}\Delta}{\hat{A}} \frac{\sin(\hat{A} - 1)\Delta}{\hat{A} - 1} + \alpha^2 \sin^2 2\theta_{12} c_{23}^2 \frac{\sin^2 \hat{A}\Delta}{\hat{A}^2},$$

$$\alpha = \Delta m_{21}^2 / \Delta m_{31}^2$$

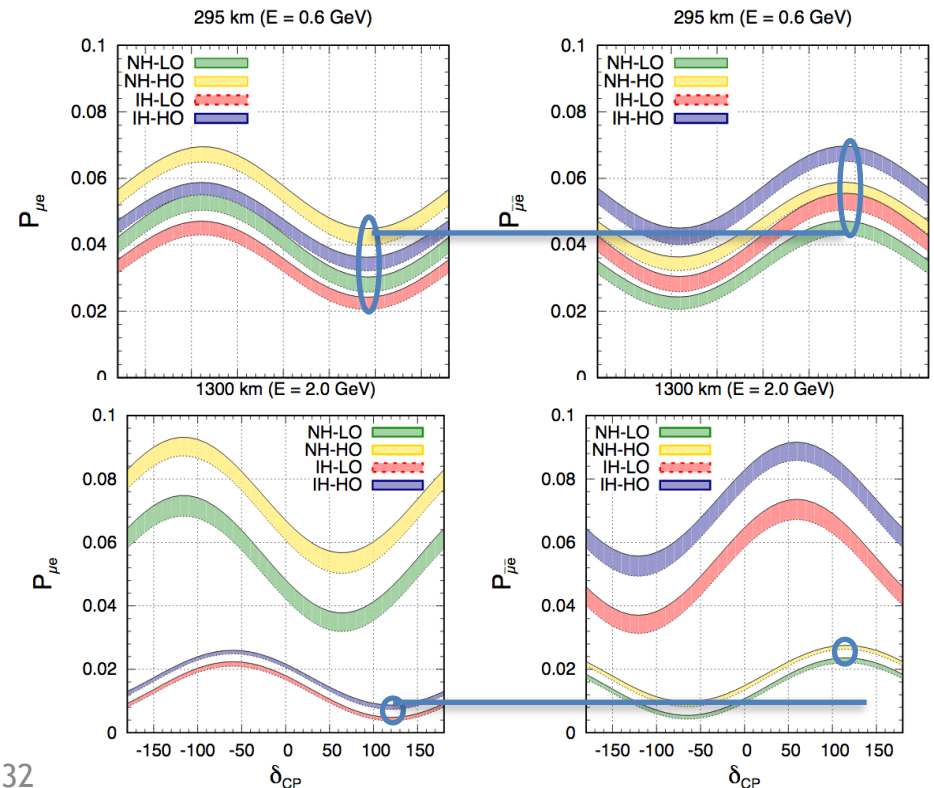
$$\Delta = \Delta m_{31}^2 L / 4E$$

$$\hat{A} = A / \Delta m_{31}^2$$

$$A = 2\sqrt{2}G_F N_e E$$

À cette énergie : détecteur beaucoup plus loin pour être au maximum d'oscillation...

... où la sensibilité à la violation de CP est maximale.



D'où vient la violation de CP ?

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, L) = & 4s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{\sin^2(\hat{A} - 1)\Delta}{(\hat{A} - 1)^2} \\
 & + 2\alpha s_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos(\Delta + \delta_{CP}) \frac{\sin \hat{A}\Delta}{\hat{A}} \frac{\sin(\hat{A} - 1)\Delta}{\hat{A} - 1} \\
 & + \alpha^2 \sin^2 2\theta_{12} c_{23}^2 \frac{\sin^2 \hat{A}\Delta}{\hat{A}^2},
 \end{aligned}$$

$$\alpha = \Delta m_{21}^2 / \Delta m_{31}^2$$

$$\Delta = \Delta m_{31}^2 L / 4E$$

$$\hat{A} = A / \Delta m_{31}^2$$

$$A = 2\sqrt{2}G_F N_e E$$

Ce type d'expérience permet de chercher une violation de CP dans le système des neutrinos.

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, L) \neq P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e, L)$$

$$\begin{aligned}
 P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e, L) = & 4s_{13}^2 s_{23}^2 \frac{\sin^2(\hat{A} - 1)\Delta}{(\hat{A} - 1)^2} \\
 & + 2\alpha s_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \cos(\Delta - \delta_{CP}) \frac{\sin \hat{A}\Delta}{\hat{A}} \frac{\sin(\hat{A} - 1)\Delta}{\hat{A} - 1} \\
 & + \alpha^2 \sin^2 2\theta_{12} c_{23}^2 \frac{\sin^2 \hat{A}\Delta}{\hat{A}^2},
 \end{aligned}$$

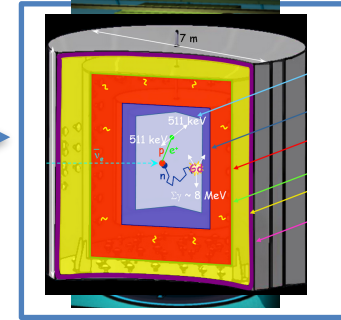
Comment détecter des neutrinos ? Mini intro

1. Une source de neutrinos

- Réacteur nucléaire.
- Accélérateur de particule.
- Rayons cosmiques dans l'atmosphère.
- Le Soleil.
- ...

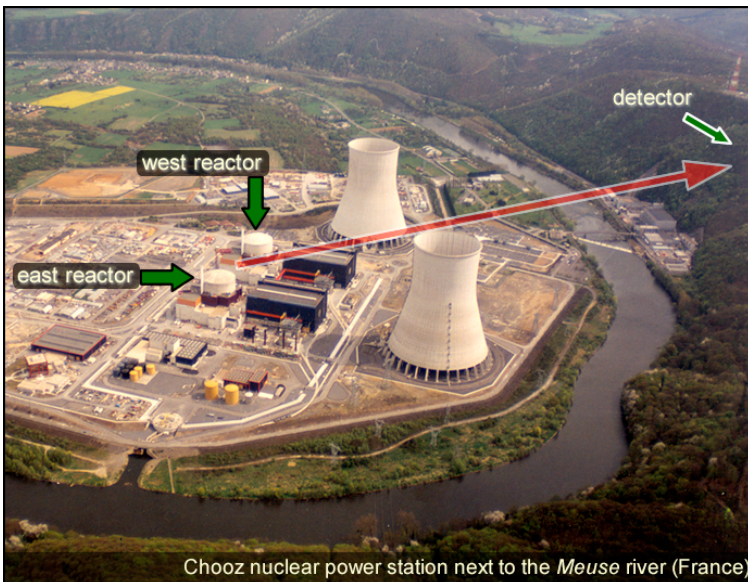
L

2. Un détecteur de neutrinos

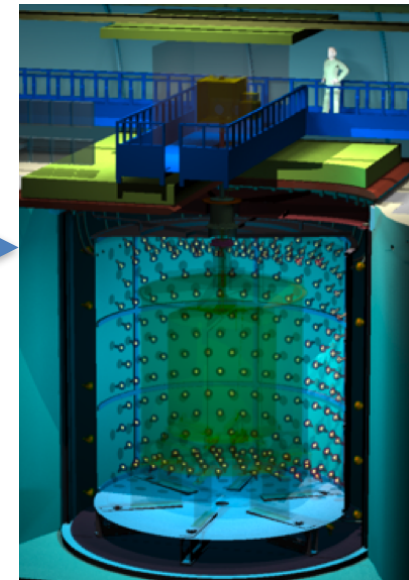


Ex : Expérience Double Chooz
Une centrale nucléaire produisant des $\bar{\nu}_e$

Une cuve de liquide scintillant détectant des $\bar{\nu}_e$



1 km

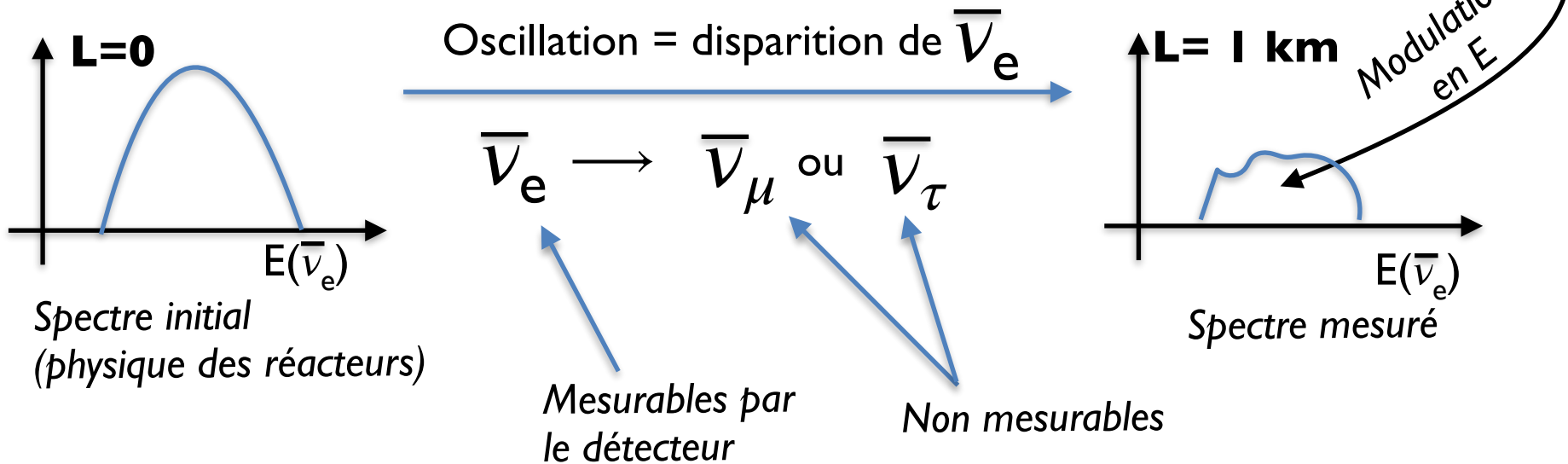


Ex: L'expérience Double Chooz pour mesurer $\sin^2 2\theta_{13}$

Spectre en E : chercher réduction globale + modulation de sa forme.

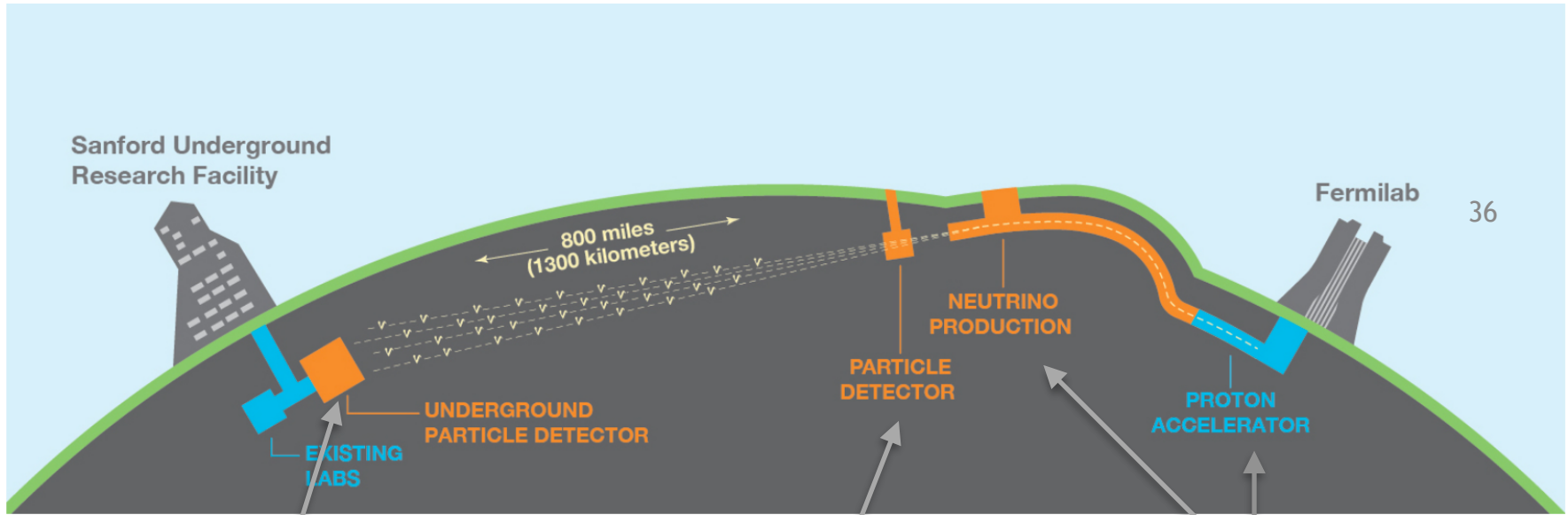
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e, L) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31}$$

$$\Delta_{31} = 1.27 \frac{\Delta m_{31}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]}$$



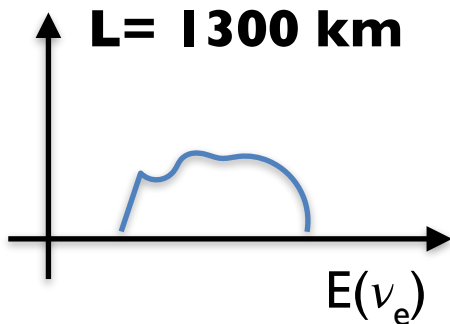
Ex: expérience DUNE (violation de CP)

Apparition de ν_e dans un faisceau de ν_μ

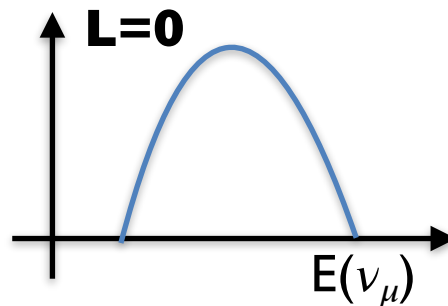


36

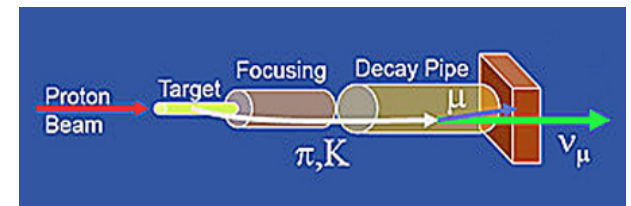
Détecteur de ν_e pour le spectre d'apparition.



Détecteur de ν_μ pour produire le spectre initial



Production de neutrinos : faisceau de protons sur une cible.

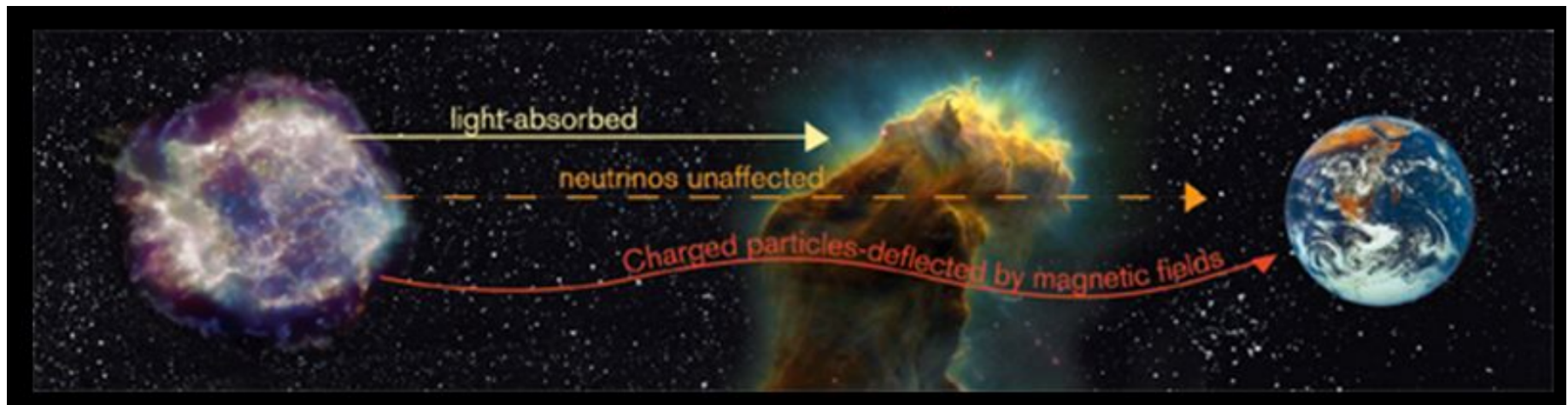


Les neutrinos pour l'astrophysique

Les objets qui émettent de la lumière (astronomie classique) émettent parfois aussi des neutrinos.

Ils donnent des informations complémentaires sur certains phénomènes (ex: supernovae, mécanismes différents pour émettre lumière ou neutrinos)

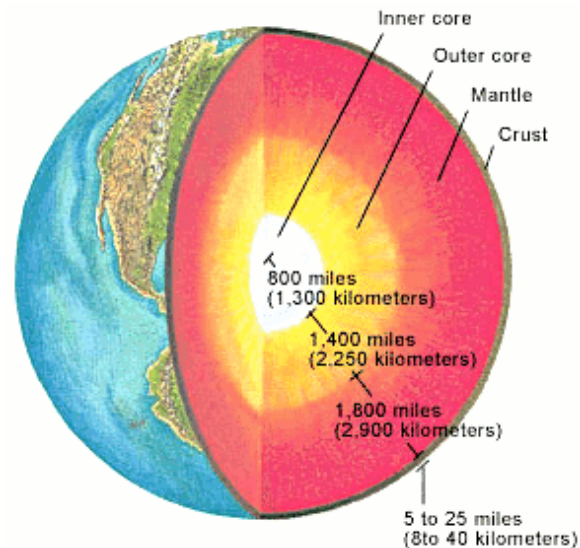
Ils ne sont pas absorbés en chemin (comme ils interagissent très peu) et sont donc parfois la seule information !



Autres intérêts des neutrinos

À nouveau lié au fait que l'immense majorité des neutrinos "traversent tout" sans être absorbés ou déviés.

- ▶ **La physique des réacteurs.** Les neutrinos permettent de sonder l'intérieur d'un réacteur nucléaire pour mieux comprendre les réactions qui s'y déroulent, aider à la non prolifération, etc... Aussi les phénomènes de **physique nucléaire** au sein des réacteurs.
- ▶ **La géologie.** Les « géoneutrinos » nous renseignent sur la radioactivité au sein du manteau terrestre, qui est la principale source interne d'énergie et le « moteur » de la tectonique.



Fin du chapitre I !

**Maintenant : bases en physique de la
détection pour comprendre plus en détail
comment mesurer des neutrinos...**

Chapitre 2

Repères en techniques de détection

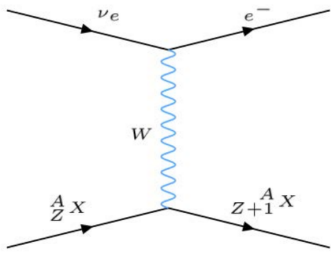
Détection de neutrinos

1^{ère} condition pour détecter un ν : interaction avec un détecteur !

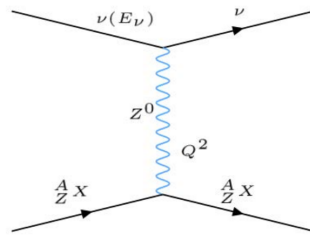
Suivant sa **nature** (électronique, muonique, etc.) et son **énergie**, les modes d'interaction dominants diffèrent.

Exemples en vrac :

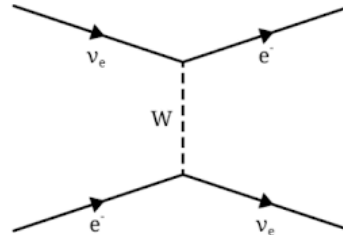
$$\nu_e + \frac{A}{Z} X \rightarrow e^- + \frac{A}{Z+1} X$$



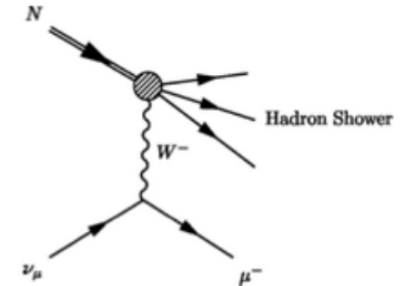
$$\nu + \frac{A}{Z} X \rightarrow \nu + \frac{A}{Z} X^*$$



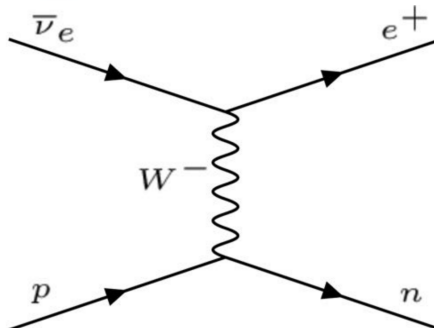
$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$



$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$$



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$



Détection de neutrinos

OR, nous venons de le voir, il existe plusieurs types d'oscillations, observables à **diverses distances** et **diverses énergies** :

- à des **centaines de km** de la source, neutrinos de **$O(1-10 \text{ GeV})$**
- à des **millions de km** de la source, neutrinos de **$O(1 \text{ keV})$**
- à quelques **m ou km** de la source, neutrinos de **$O(1 \text{ MeV})$**

Certaines oscillations impliquent des neutrinos **électroniques**, d'autres des neutrinos **muoniques** ou **tauiques**.

La détection sera donc basée sur différentes interactions dans le détecteur et donc **différentes techniques** (très nombreuses).

Dans ce cours, nous nous concentrons sur la détection :

- d'antineutrinos électroniques
- produits par des réacteurs nucléaires
- dans la gamme 1-10 MeV.

Détection de $\bar{\nu}_e$ issus de réacteurs nucléaires.

On les détecte en mesurant une "désintégration bêta inverse" (IBD).

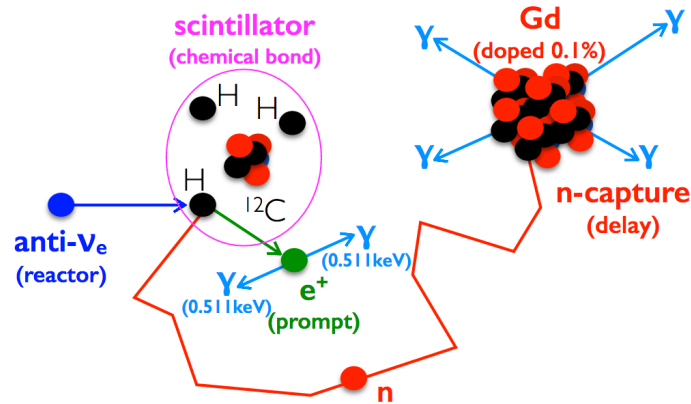


En pratique, on détecte les produits de l'IBD : e^+ et n .

Détection en coïncidence temporelle:

→ 1 signal prompt (e^+ et 2 γ d'annihilation)

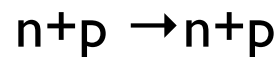
→ 1 signal retardé (n) vu ~ 10 - $100 \mu s$ après.



En réalité, on ne détecte que des particules chargées, qui déposent de l'énergie en interagissant avec la matière du détecteur.

• Les **neutrons** doivent d'abord

- mettre en mouvement un proton via une collision élastique

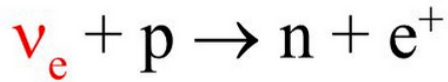


- être absorbés par un noyau, désintégré ensuite en particules chargées



Détection de $\bar{\nu}_e$ issus de réacteurs nucléaires.

On les détecte en mesurant une "désintégration bêta inverse" (IBD).

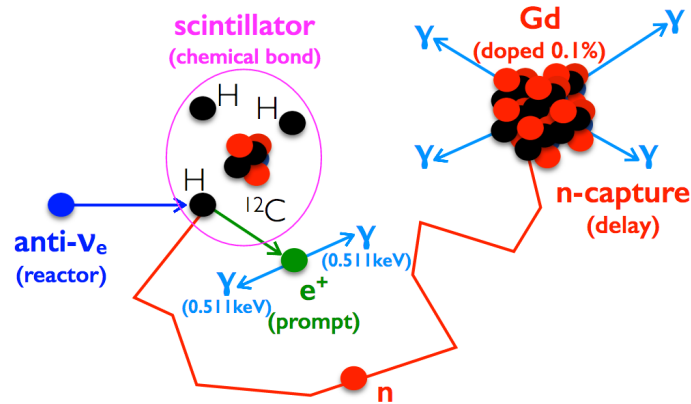


En pratique, on détecte les produits de l'IBD : e^+ et n .

Détection en coïncidence temporelle:

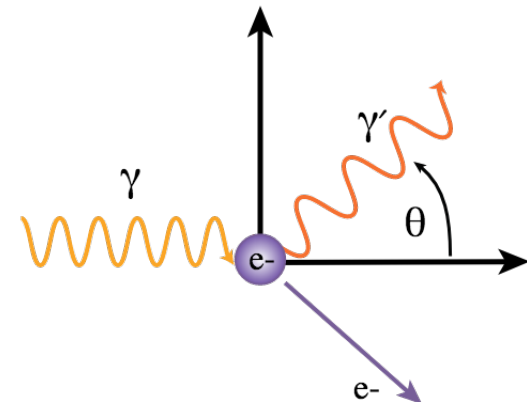
→ 1 signal prompt (e^+ et 2 γ d'annihilation)

→ 1 signal retardé (n) vu ~ 10 - $100 \mu s$ après.



En réalité, on ne détecte que des particules chargées, qui déposent de l'énergie en interagissant par *ionisation* avec la matière du détecteur.

- Les **gamma** doivent d'abord
 - mettre en mouvement un e^- du milieu par *diffusion Compton*.
 - c'est cet e^- qui dépose son énergie.



Interaction d'une part. chargée avec la matière

Principalement, deux types d'interaction sont en jeu.

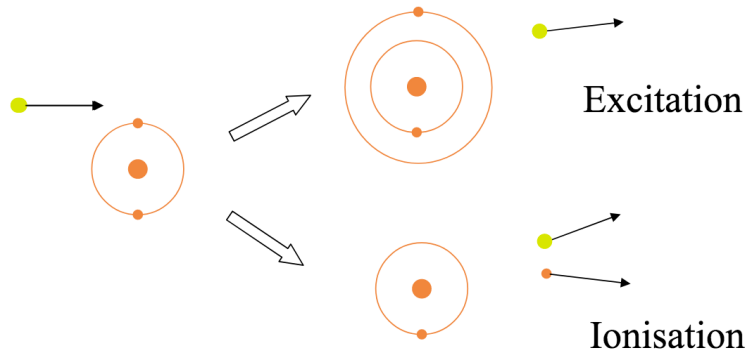
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll}$$

↑
Dépôt d'énergie en traversant dx de matériau:
Stopping power

↑
Par interaction radiative:
Bremsstrahlung

↑
Par collision avec des atomes:
Excitation ou Ionisation

Excitation ou ionisation : int. électromagnétique avec les e⁻ du milieu



Interaction d'une part. chargée avec la matière

Principalement, deux types d'interaction sont en jeu.

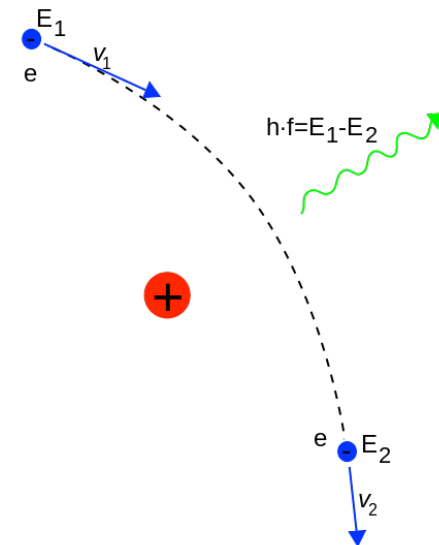
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll}$$

↑
Dépôt d'énergie en traversant dx de matériau:
Stopping power

↑
Par interaction radiative:
Bremsstrahlung

↑
Par collision avec des atomes:
Excitation ou Ionisation

Bremsstrahlung : émission d'un photon lors du freinage dû au champ électrique des noyaux du milieu traversé.



Interaction d'une part. chargée avec la matière

Principalement, deux types d'interaction sont en jeu.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll}$$

Dépôt d'énergie en traversant dx de matériau:
Stopping power

Par interaction radiative:
Bremsstrahlung

Par collision avec des atomes:
Excitation ou Ionisation

Dépend de l'énergie, de la masse et de la charge de la particule, et du Z du milieu traversé.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{NZz^2}{\beta^2} \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I}\right) - \beta^2 \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \frac{C_K}{Z}$$

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 c^2}\right)^2 \cdot \frac{Z^2}{A} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \cdot \frac{z^2}{m^2} E$$

const. independent of material and particle

material constants of the absorber

particle charge z
 particle mass m
 particle energy E

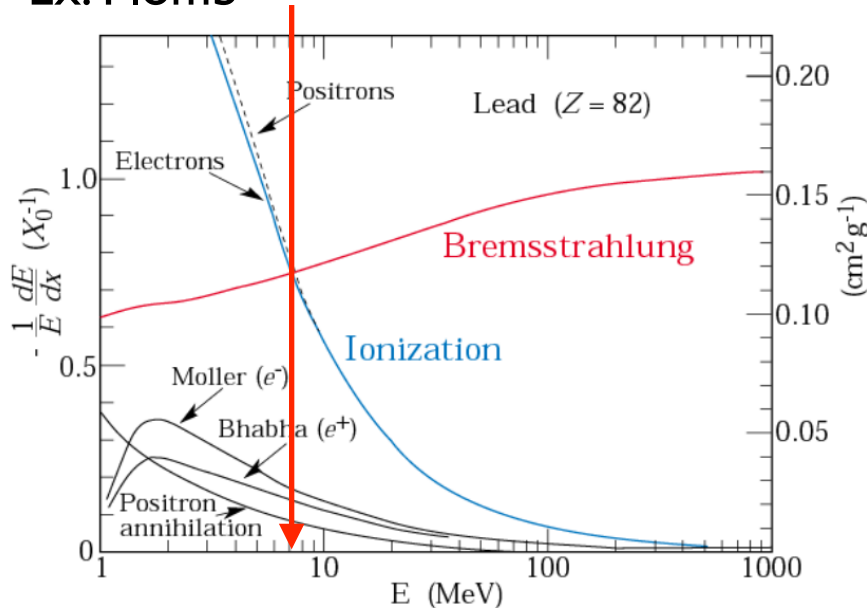
linear in E
 $\propto 1/m^2$

Interaction d'une part. chargée avec la matière

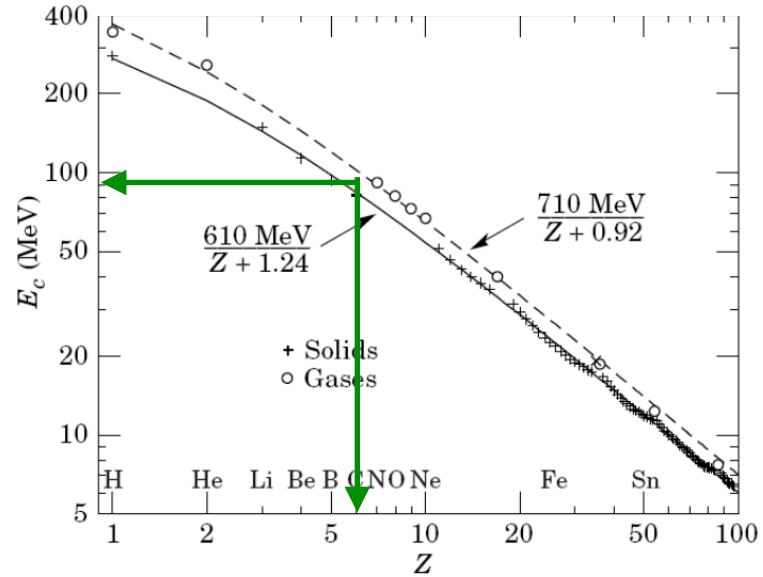
Quelle interaction domine dans les cas qui nous intéressent ?

L'énergie critique E_c : énergie incidente en dessous de laquelle excitation & ionisation dominant.

Ex: Plomb



$$E_c \approx 600 \left(\frac{1}{z} \frac{M}{m_e} \right)^2 \frac{1}{Z+1} \text{ (MeV)}$$



Les expériences que nous allons comparer emploient des scintillateurs organiques (C_xH_y). Donc $E_c \approx 100 \text{ MeV}$.

Les neutrinos que nous allons étudier: $E < 10 \text{ MeV} \Rightarrow$ excitation & ionisation

Détection de l'énergie déposée par la particule

Les **scintillateurs** sont le type de détecteur privilégié pour la détection de neutrinos de réacteur (et pour plein d'autres choses...).

En très court : l'énergie déposée est convertie en photons optiques que l'on peut compter pour mesurer cette énergie.

Qualités que l'on attend d'un scintillateur ?

- Quantité de lumière proportionnelle à l'énergie, $N_{\text{photons}} \propto E$
- Transparence
- $N_{\text{photons}}/\text{MeV}$ le plus élevé possible :
 - on ne veut pas simplement repérer le neutrino ;
 - on veut aussi reconstruire son énergie ;
 - le plus précisément possible, or $\sigma E \propto \sqrt{(N_{\text{photons}})}$
- Bonne résolution temporelle : "flash" de photons scintillés aussi court que possible (<100 ns). Cela permet entre autres :
 - de localiser l'interaction ;
 - d'associer les dépôts d'énergie dûs à un même événement physique ; souvent utile pour distinguer le signal de ses bruits de fond.
 - de distinguer les dépôts de e^+ et e^- de ceux des p , alphas, tritium, etc.
- Bonne efficacité de détection :
 - toutes les particules visées doivent déposer de l'énergie ;
 - si possible, toute leur énergie dans une volume restreint (si on en perd, la résolution est moins bonne).

Qualités que l'on attend d'un scintillateur ?

- Longueur d'onde la lumière scintillée compatible avec les détecteurs de photons.
- Un bon vieillissement :
 - perte de scintillation ou de transparence avec le temps ;
 - due à des effets chimiques ;
 - due à l'exposition aux radiations.
- Grands volumes (détecteurs de phys. subatomique : souvent grands).
- Possibilité de formes complexes.

Qualités que l'on attend d'un scintillateur ?

- Longueur d'onde la lumière scintillée compatible avec les détecteurs de photons.
- Un bon vieillissement :
 - perte de scintillation ou de transparence avec le temps ;
 - due à des effets chimiques ;
 - due à l'exposition aux radiations.
- Grands volumes (détecteurs de phys. subatomique : souvent grands).
- Possibilité de formes complexes.

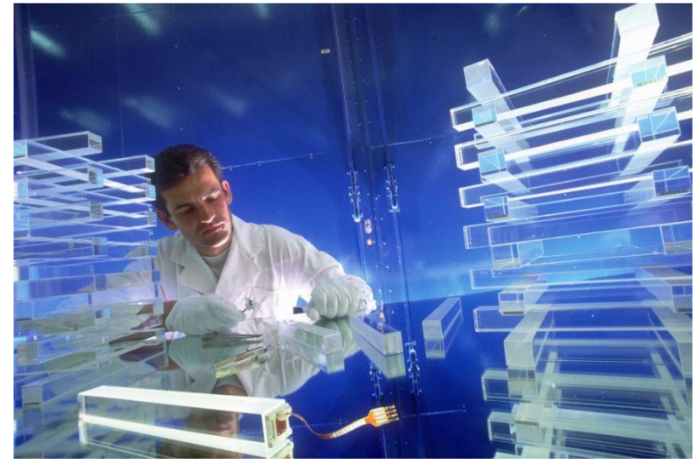
• Pas cher !

Scintillateurs utilisés en physique subatomique

Deux types de scintillateurs :

- Scintillateurs inorganiques

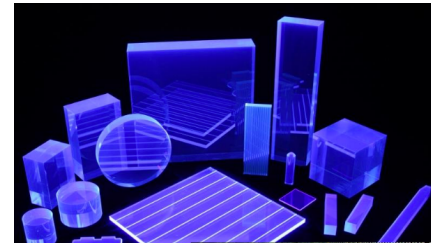
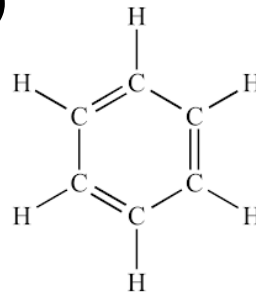
- Z élevé (ex: PbWO_4)
- Densité élevée
- Cristaux
- Gaz nobles liquides (Ex LAr)



Lead tungstate crystals used in the CMS ECAL

- Scintillateurs organiques

- Basé sur la physique et la chimie du benzène : Z faible
- Densité plus faible
- Cristaux (mais très rares)
- Liquides
- Plastiques



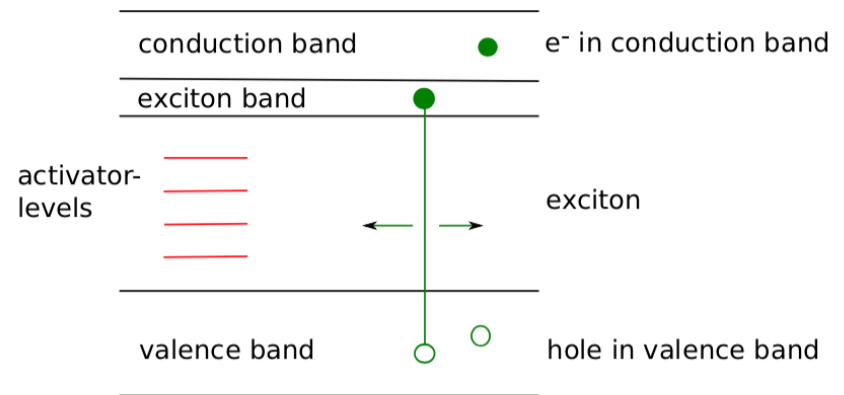
Scint. inorganiques : mécanisme de scintillation

- Une particule chargée (e^\pm , μ^\pm , p , etc.) dépose de l'énergie par ionisation.
 - Énergie donc transmise à un e^- de la bande de valence du crystal :
 - il passe dans la bande de conduction ;
 - ou forme une paire e^- -trou (exciton).
- Désexcitation vers bande de valence : produit les photons de scintillation !*

- e^- et excitons peuvent se propager librement dans le cristal, sans scintillation.
- L'ajout d'un dopant permet de former un centre luminescent :

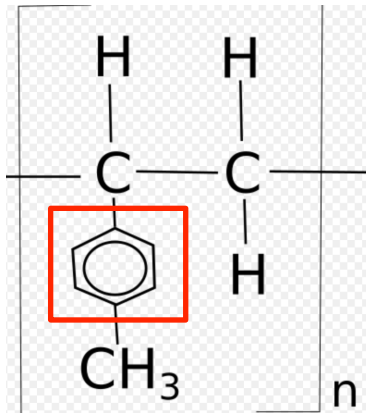
=> niveaux intermédiaires pour désexcitation plus probable.

=> Plus de scintillation.



Scintillateurs organiques

- Partons d'un exemple : le Polyvinyltoluene (PVT, scintillateur plastique)

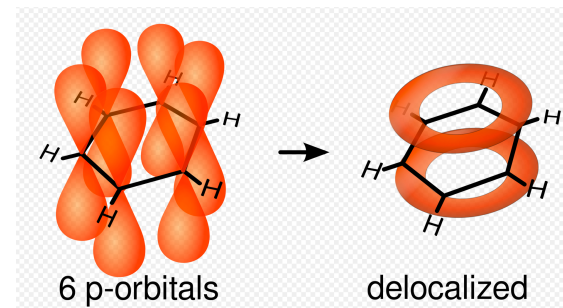
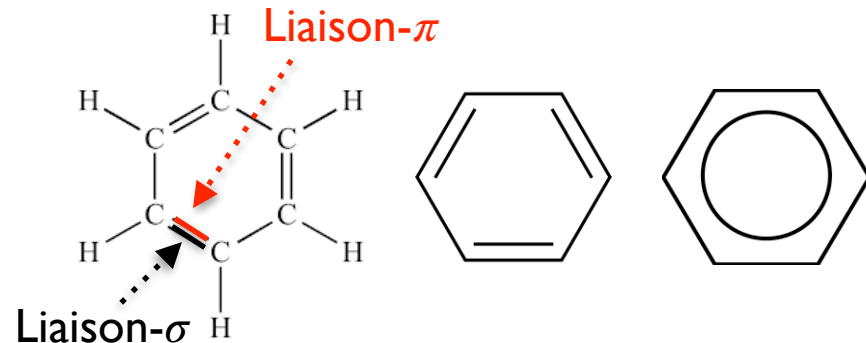


Une particule chargée peut déposer son énergie par ionisation :

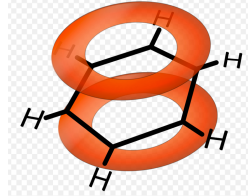
- directement dans le **cercle aromatique** (~benzene) dans le reste du matériau ;
- dans le reste du matériau, qui transmet cette énergie au **cercle aromatique**.

- Ce **cercle aromatique** est donc à la base de la scintillation.
- Il s'agit d'une molécule faite de C et de H...

...qui forme des **liaisons- π** car les orbitales p des carbones se chevauchent.

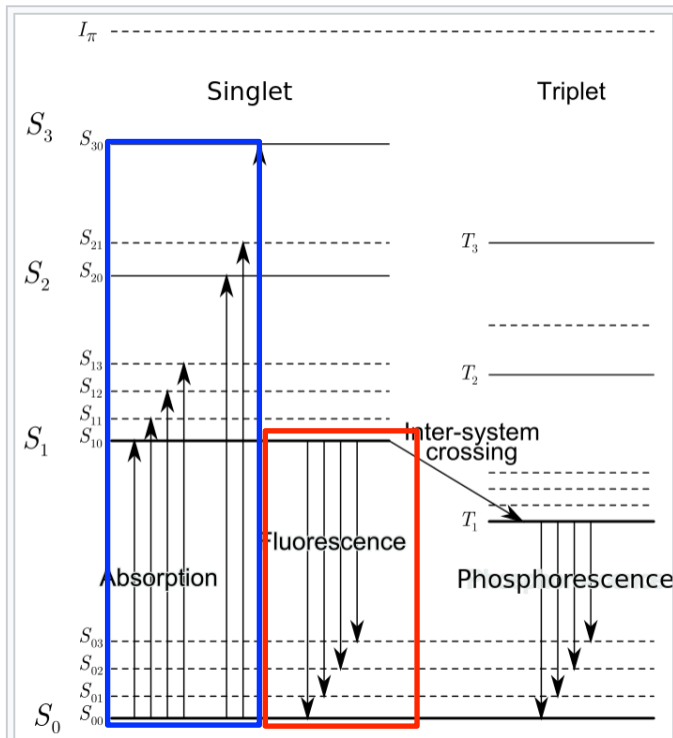


Scint. organiques : mécanisme de scintillation



delocalized

- Il est basé sur l'excitation d' e^- délocalisés de l'orbitale π .
- Cette **excitation** les amène sur divers niveaux excités.
- La désexcitation du 1er niveau singlet S_{10} à l'état de base S_{00} produit de la lumière par **fluorescence**.



π -electronic energy levels of an organic molecule. S_0 is the ground state. S_1, S_2, S_3 are excited singlet states. T_1, T_2, T_3 are excited triplet states. $S_{00}, S_{01}, S_{10}, S_{11}$ etc. are vibrational sublevels.

- Cet **agent de fluorescence primaire** peut aussi ré-absorber les photons scintillés !
Si grande concentration de scintillateur
=> perte de transparence !
 - Solution: ajout d'un **agent de fluorescence secondaire**, (combinaison d') autre(s) arômes. Ces **wavelength shifters** absorbent et ré-émettent à une longueur d'onde différente, non absorbable.
- Les longueurs d'onde produites sont également plus adaptées **aux détecteurs de photons** (voir plus loin).

Scintillateurs utilisés en physique subatomique

Inorganiques

- Z élevé
- Densité élevée
- N_{photons}/E élevé

+

Efficacité et
résolution en E

-

- Bon vieillissement et
résistance aux radiations

+

Prise de données
pendant longtemps

-

- Temps de réponse long.

-

Identification signal

+

- Le plus souvent: cristaux
difficiles à produire et usiner.

-

Géométrie complexe

+

- Très chers !

-

Grands volumes de
détection

+

Organiques

- Z faible (H et C)
- Densité plus faible
- $N_{\text{photons}}/\text{MeV}$ plus faible

- Sensible au
vieillissement, radiations

- Temps de réponse rapide.

- Le plus souvent: liquides
ou plastiques, nombreuses
géométries possibles.

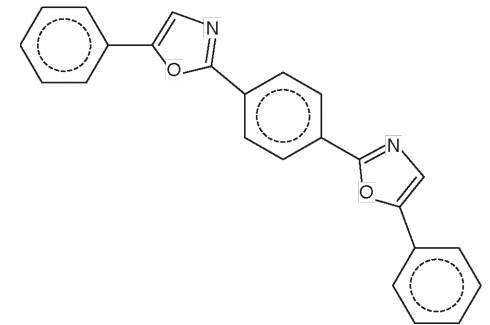
- Peu chers !

Nota bene




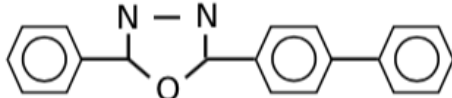
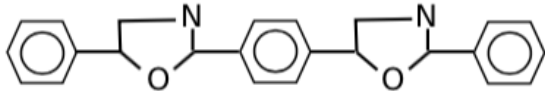
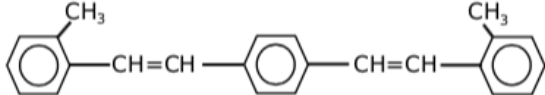
- Les explications données ici sur les scintillateurs sont un peu rapides. (je ne suis pas expert...)
- Sachez que mettre au point un bon scintillateur, **c'est tout un art**, qui fait appel à des **experts**.
- La plupart des expériences y consacrent des efforts conséquents lors de leur phase de R&D.

Pour l'exemple : jungle des agents de fluorescence secondaires.

- **POPOP** (1,4-bis-[2-(5-Phenyloxazolyl)]-Benzen; $C_{24}H_{16}N_2O_2$)
- **bis-MSB** (1,4-bis(2-Methylstyryl)-Benzen; $C_{24}H_{22}$)
- **BBQ** (Benzimidazo-Benzisochinolin-7-on)



Nota bene

primary fluorescent agent	structure	λ_{max} emission [nm]	decay time [ns]	light yield rel. to NaI
naphtalene		348	96	0.12
anthracene		440	30	0.5
p-terphenyl		440	5	0.25
PBD		360	1.2	
wavelength shifter				
POPOP		420	1.6	
bis-MSB		420	1.2	

Inorganiques

scintillator composition	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (μs)	scintillation pulse height ¹⁾	notes	Photons/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190	2)	4 × 10 ⁴
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	3)	
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	3)	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	3)	1.1 × 10 ⁴
CaI(Na)	4.51	1.84	420	0.63	85	3)	
KI(Tl)	3.13	1.71	410	0.24/2.5	24	3)	1.4 × 10 ⁴
⁶ LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	3)	
CaF ₂ (Eu)	3.19	1.44	435	0.9	50		6.5 × 10 ³
BaF ₂	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8 × 10 ³
CaWO ₄	6.12	1.92	430	0.5/20	50		
ZnWO ₄	7.87	2.2	480	5.0	26		
CdWO ₄	7.90	2.3	540	5.0	40		
CsF	4.65	1.48	390	0.005	5	3)	
CeF ₃	6.16	1.68	300 340	0.005 0.020	5		
ZnS(Ag)	4.09	2.35	450	0.2	150	4)	
GSO	6.71	1.9	440	0.060	20		
ZnO(Ga)	5.61	2.02	385	0.0004	40	4)	
YSO	4.45	1.8	420	0.035	50		
YAP	5.50	1.9	370	0.030	40		

¹⁾ relative to NaI(Tl) ²⁾ at 80 K ³⁾ hygroscopic ⁴⁾ polycrystalline

PbWO ₄	8.28	1.82	440, 530	0.01			100
-------------------	------	------	----------	------	--	--	-----

LAr	1.4	1.29 ⁵⁾	120-170	0.005 / 0.860			
LKr	2.41	1.40 ⁵⁾	120-170	0.002 / 0.085			
LXe	3.06	1.60 ⁵⁾	120-170	0.003 / 0.022			4 × 10 ⁴

- $N_{ph}/MeV \sim 10000 - 40000$ ph/MeV
- decay time $\tau \sim O(50$ ns)
- parfois $\tau \downarrow$ mais alors $N_{ph}/MeV \downarrow$
- Des exceptions: mais chères !

Organiques

scintillator	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (ns)	scintillation pulse height ¹⁾	H/C ratio ²⁾	yield/NaI
Monocrystals							
naphthalene	1.15	1.58	348	11	11	0.800	0.5
anthracene	1.25	1.59	448	30-32	100	0.714	
trans-stilbene	1.16	1.58	384	3-8	46	0.857	
p-terphenyl	1.23		391	6-12	30	0.778	
Plastics ³⁾							
NE 102 A	1.032	1.58	425	2.5	65	1.105	
NE 104	1.032	1.58	405	1.8	68	1.100	
NE 110	1.032	1.58	437	3.3	60	1.105	
NE 111	1.032	1.58	370	1.7	55	1.096	
Plastics ⁴⁾							
BC-400	1.032	1.581	423	2.4	65	1.103	
BC-404	1.032	1.58	408	1.8	68	1.107	
BC-408	1.032	1.58	425	2.1	64	1.104	
BC-412	1.032	1.58	434	3.3	60	1.104	
BC-414	1.032	1.58	392	1.8	68	1.110	
BC-416	1.032	1.58	434	4.0	50	1.110	
BC-418	1.032	1.58	391	1.4	67	1.100	
BC-420	1.032	1.58	391	1.5	64	1.100	
BC-422	1.032	1.58	370	1.6	55	1.102	
BC-422Q	1.032	1.58	370	0.7	11	1.102	
BC-428	1.032	1.58	480	12.5	50	1.103	
BC-430	1.032	1.58	580	16.8	45	1.108	
BC-434	1.049	1.58	425	2.2	60	0.995	

¹⁾ relative to anthracene

²⁾ ratio of hydrogen to carbon atoms

³⁾ Nuclear Enterprises Ltd. Sighthill, Edinburgh, U.K.

⁴⁾ Bicon Corporation, Newbury, Ohio, USA

- $N_{ph}/MeV \sim 10000/MeV$
- decay time $\tau \sim O(5$ ns)

Détection d' $\bar{\nu}_e$ de réacteurs : quels scintillateurs ?

Facteur clef: le détecteur est aussi la cible pour produire des IBD !

Les $\bar{\nu}_e$ interagissant très faiblement : besoin de bcp de protons !

=> grand volumes nécessaires.

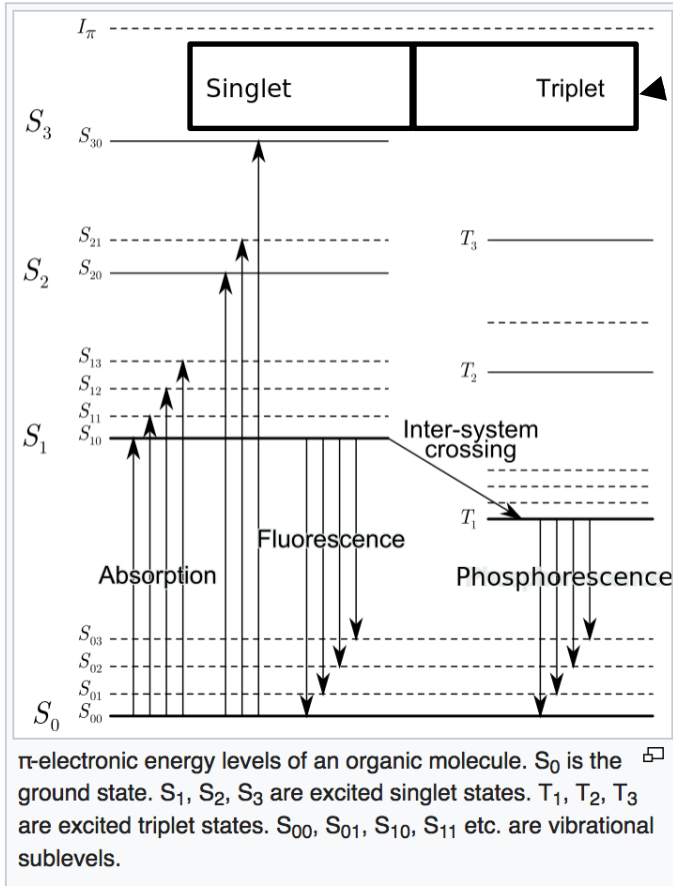
Le prix élevé des cristaux inorganiques (10-100\$/cm³) nous pousse alors vers des organiques liquides ou plastiques (1-10\$/cm³).

Certes, avec un grand Z et une grande densité, un scintillateur inorganique n'a pas besoin d'autant de volume qu'un organique pour convertir autant de $\bar{\nu}_e$. Mais cela ne compense pas.

Détection d' $\bar{\nu}_e$ de réacteurs : quels scintillateurs ?

Facteur clef II: distinction entre e-/e+ et p, α , ^3H , ...

Retour sur le mécanisme de scintillation :



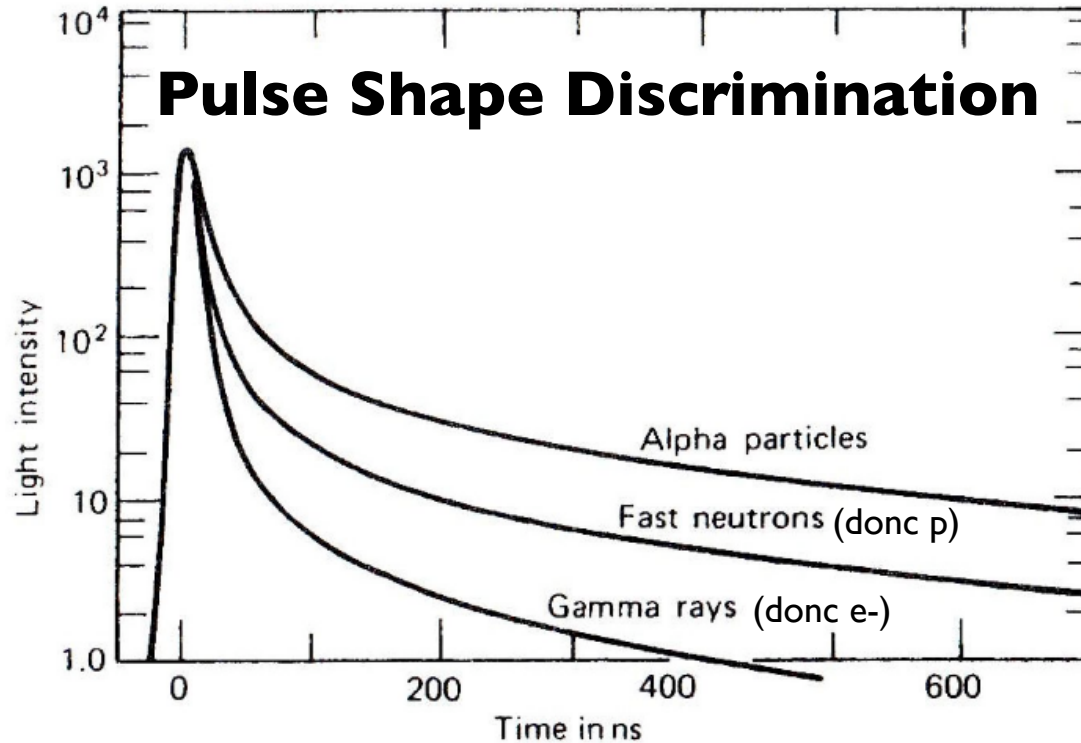
Il existe en réalité 2 séries d'états

- La probabilité pour un électron- π excité de peupler les états S ou un T varie en fct de l'énergie déposée.
- Lorsque la **particule incidente est lourde** (p , α , ...) son dE/dx est plus élevé.
=> Les états T sont peuplés plus souvent.
- **Or, les états T mettent bcp plus de temps à se desexciter !**

=> Pulse Shape Discrimination (PSD)

Détection d' $\bar{\nu}_e$ de réacteurs : quels scintillateurs ?

Facteur clef II: distinction entre e^-/e^+ et $p, \alpha, {}^3\text{H}, \dots$



C'est une technique cruciale pour la détection de $\bar{\nu}_e$ de réacteur.

Possible "facilement" avec des scintillateurs organiques.

Détection d' $\bar{\nu}_e$ de réacteurs : quels scintillateurs ?

Facteur clef I + Facteur clef II :
=> on choisit les scintillateurs **organiques**.

Prochaines questions :

- Plastique ou liquide ?
=> plus tard : comparaison entre SoLid, PROSPECT et STEREO
- Mais que faire des photons de scintillation ?
=> maintenant : détecteurs de photons (photomultiplicateurs).

Détecteurs de photons

Il en existe de nombreux types :

- Tubes photomultiplicateurs (PMT)
- Micro-channel plates
- Photodétecteurs hybrides
- Photomultiplicateurs à gaz

- Photomultiplicateurs à Silicium (SiPM),
aussi appelés Multi Pixel Photon Counter (MPPC)
- Divers autres photodétecteurs solides...

Nous nous concentrerons ici sur les deux types les plus utilisés en physique des neutrinos.

Détecteurs de photons : les qualités requises

Ces détecteurs changent un γ en un courant électrique mesurable.

Qualités recherchées :

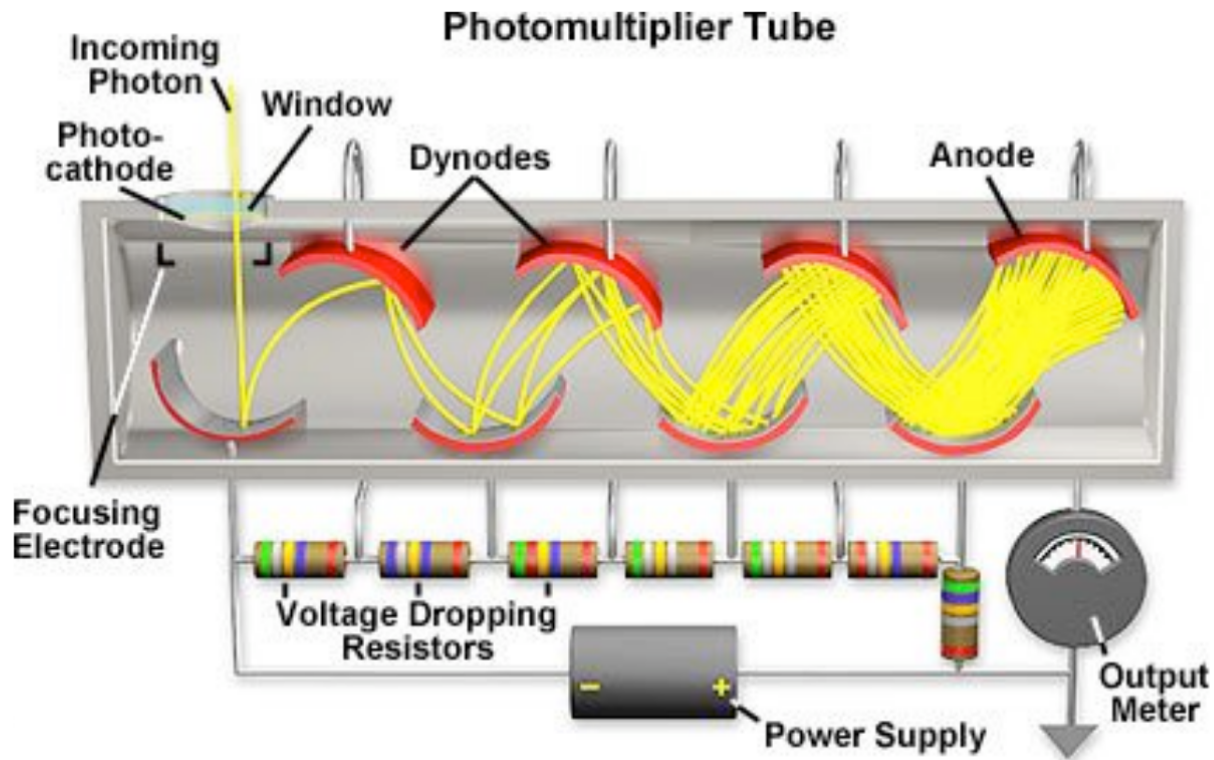
- Gain élevé (charge générée à partir d'un photon).
- Timing : Pulse en charge aussi court que possible
- Efficacité quantique élevée (proba pour un photon de libérer un électron par effet photo-électrique), dépend de la longueur d'onde du photon...
- Acceptance : grande "fenêtre" pour capter le plus possible de photons.
Plus généralement : aisance du couplage à un scintillateur.
- Aussi petit et léger que possible (structure mécan. des détecteurs)
- Facile à alimenter (Hautes tensions: sécurité + prix :-()

- Résistant et robuste.
- Bruit de fond interne minimal (courant en l'absence de γ , dark count, etc.)
- Grande gamme dynamique ($\sim N_{ph}$ max mesurable sans saturer)
- Aussi peu sensible que possible aux champs magnétiques.
- Peu sensible aux radiations.

Qualités requises : en plus court

- High photodetection efficiency (affects S/N of the detection and thus resolution)
- High intrinsic gain (reduces the importance of electronic noise and, thus, better count rate and measurable lower energy levels)
- Low excess noise (affects energy resolution)
- High linearity (affects systematic errors and energy range)
- Ability to couple to a scintillator

Slawomir Piatek



Photomultiplier Tubes

Un photon frappe une photocathode d'où il libère un électron par effet photoélectrique.

Un champ électrique important l'accélère jusqu'à la première dynode, d'où il arrache à nouveau des électrons, accélérés jusqu'à la seconde dynode, etc.

Cette amplification aboutit à un pulse en courant mesurable.

Une dizaine de dynodes, 5 électrons à chaque fois -> Gain $\sim 10^7$

PMT: les plus

Le détecteur de photons traditionnel en physique subatomique.

Des décennies d'optimisation, un grand savoir-faire des entreprises spécialisées (photocathode, configuration des dynodes, contrôle du vide, traitement du signal électrique).

Bruit et Dark Current faibles !

Bonne acceptance et couplage au scintillateur

=> maximise N_{ph} détectés, résolution en énergie.

=> peut instrumenter de grandes surfaces.



Photocathode material	λ (nm)	Window material	Peak ϵ_Q (λ /nm)
CsI	115–200	MgF ₂	0.11 (140)
CsTe	115–320	MgF ₂	0.14 (240)
Bi-alkali	300–650	Borosilicate	0.27 (390)
	160-650	Synthetic Silica	0.27 (390)
“Ultra Bi-alkali”	300–650	Borosilicate	0.43 (350)
	160-650	Synthetic Silica	0.43 (350)
Multi-alkali	300–850	Borosilicate	0.20 (360)
	160-850	Synthetic Silica	0.20 (360)
GaAs(Cs)*	160–930	Synthetic Silica	0.23 (280)
GaAsP(Cs)	300-750	Borosilicate	0.50 (500)
InP/InGaAsP [†]	350-1700	Borosilicate	0.01 (1100)

PMT: les moins

Perspectives de progrès limitées, progressivement remplacé par SiPM dans de nombreuses applications.

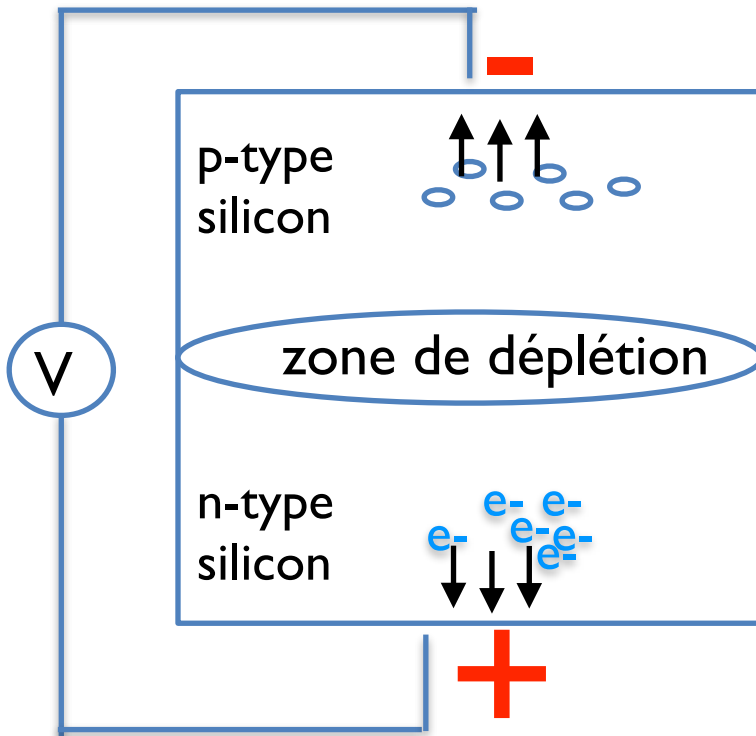
Difficile à produire en série (fait main) donc cher.
Ne facilite pas la segmentation des détecteur.

Sensible aux champs magnétiques.

Mais difficile à remplacer pour instrumenter de grandes surfaces.

Les SiPM sont basés sur des Photodiodes à avalanche (APD).

Les APD impliquent des jonctions p-n mises sous tension en mode "reverse bias".



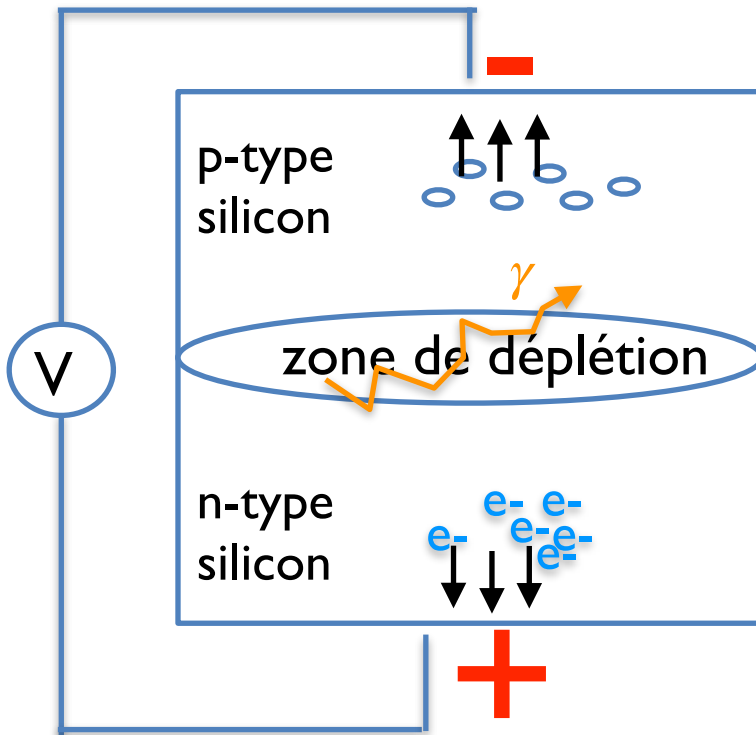
Le voltage appliqué en inverse agrandit la zone de déplétion en poussant les porteurs de charge loin de la jonction, qui devient résistante.

Un grand champ électrique s'installe dans la zone de déplétion.

Les SiPM sont basés sur des Photodiodes à avalanche (APD).

Les APD impliquent des jonctions p-n mises sous tension en mode "reverse bias".

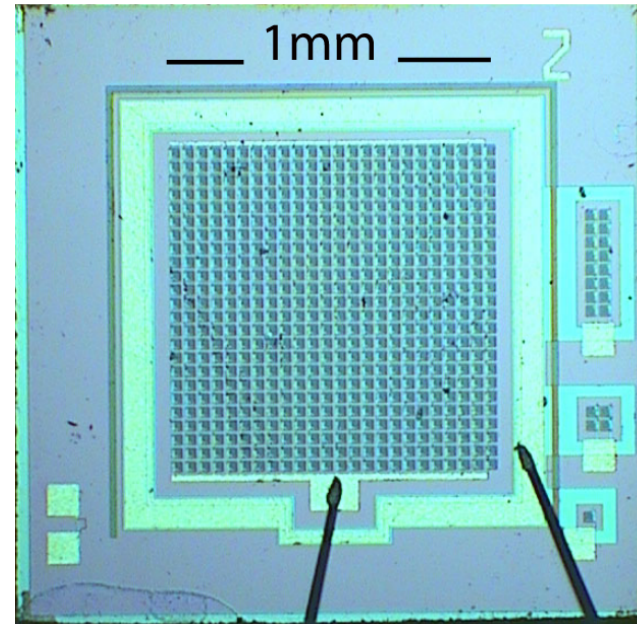
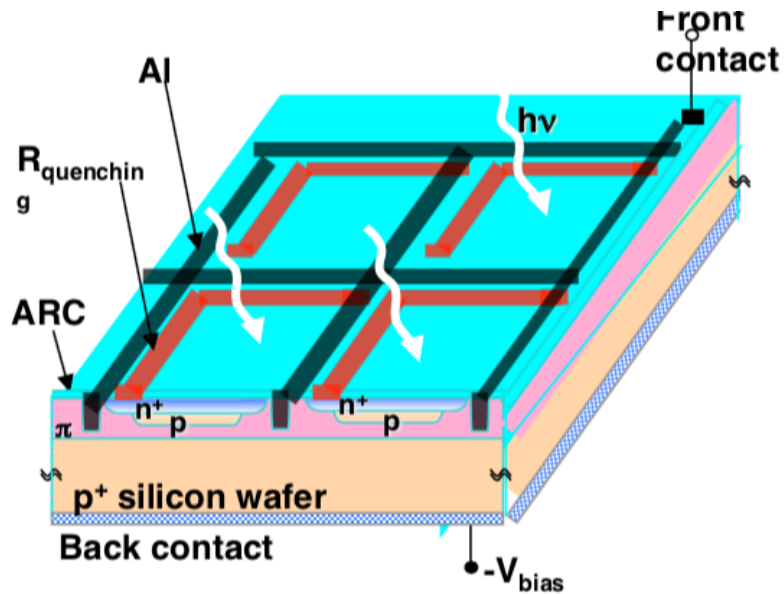
Une fluctuation thermique, ou un *effet photoélectrique dû à un photon de scintillation* peut libérer un e^- dans la zone de déplétion.



Sous l'action du champ, il migre vers le **+**
Si le voltage inverse est supérieur au *breakdown voltage*, il a assez d' E_{cin} pour provoquer la libération d'autres e^-

=> Avalanche ! => Courant détectable !

Les SiPM sont en fait des matrices d'APD



Le principe paraît simple, mais en pratique, il faut une grande maîtrise de la physique des semi-conducteurs : plus récent que les PMT...

En plein progrès !

SiPM vs. PMT (il y a quelques années, SiPM progressent)

	PMT	SiPM
photo-detection efficiency [%]	20-40	20-40
gain	10^6 - 10^7	10^5 - 10^6
dynamic range	10^6	10^3 /mm ²
bias voltage [V]	1000-2000	20-70
1 phe resolution [%]	50	4
time jitter (1σ) [ps]	200	50
magnetic field compatibility	no	yes (up to 15 T)

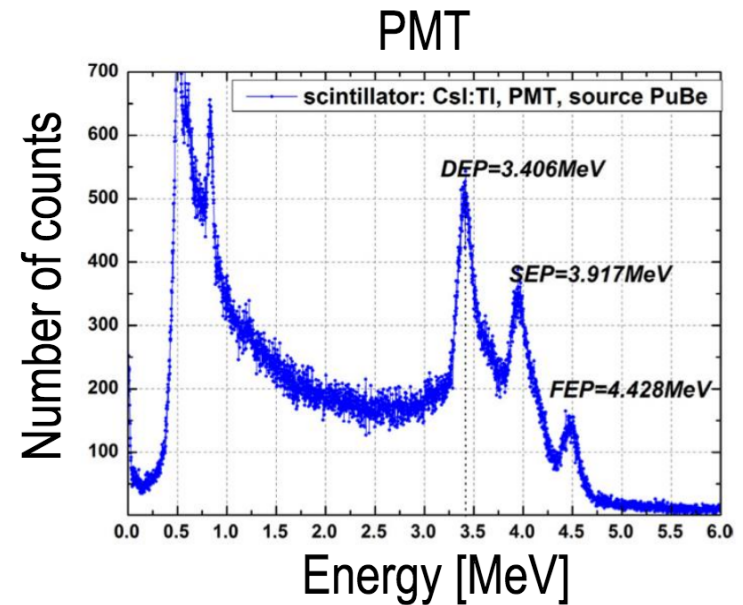
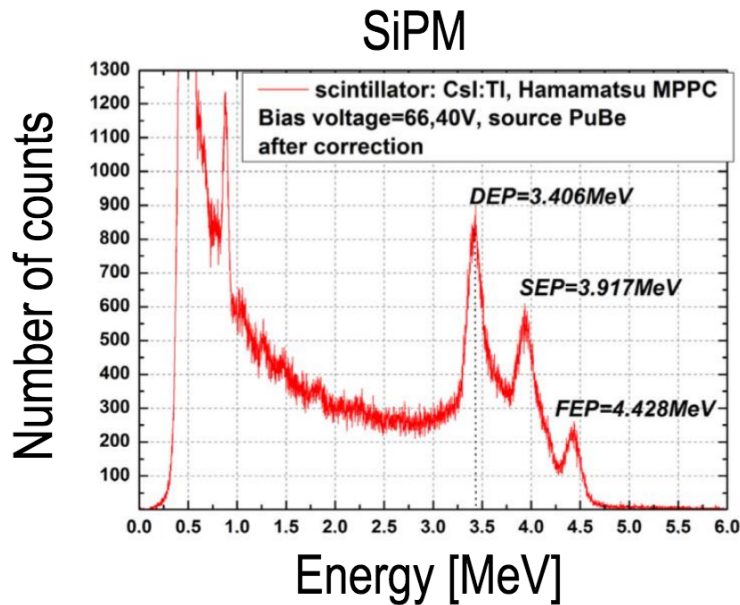
SiPM

- similaires aux PMT
- meilleurs
- acceptables
- moins bons

Dark Count !

Autres bruits (Cross talk, gain fluct, electr.)

SiPM vs. PMT



Example of energy spectra from Grodzicka et al. 2017 [Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 874 (2017) 137–148]

Résolution en énergie similaire possible (cas par cas).

SiPM vs. PMT : lequel choisir ?

SiPM

- Petits détecteurs.
- Scint: plastique ou cristaux.
- Très segmentés.
- Environnement difficile :
 - radiations
 - champ magn
- En zone sensible, ou mobile :
 - peu de place
 - hautes tensions indésirables
- Résolution en E non cruciale.
- Budget limité.

PMT

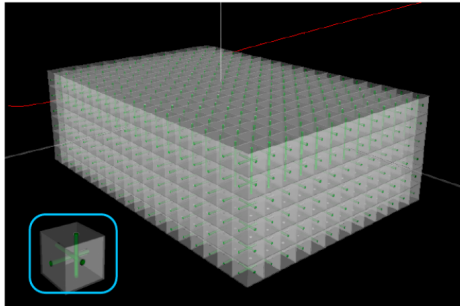
- Grands volumes.
- Scint: liquide
- Résolution en E cruciale.

- Besoin d'une bonne compréhension du fonctionnement, de recul.

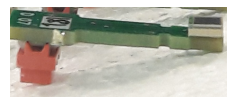
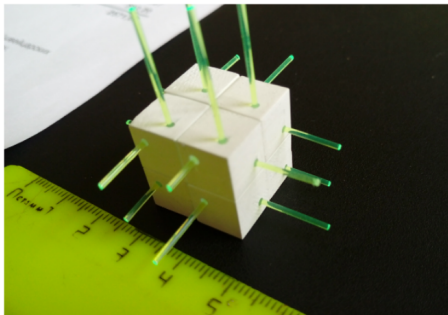
SiPM vs. PMT : deux archétypes

SiPM

- Upgrade du détecteur T2K (Japon)
- Neutrinos d'accélérateurs.
- Nécessité de reco de trajectoires (e-, muon) précises sur ~ 1 m
- Donc ultra-segmenté : cubes isolés lus par fibres optiques.

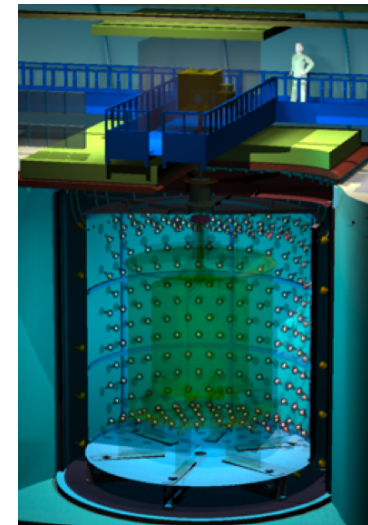


~ 1 m



Double Chooz

- Neutrinos de réacteurs.
- Réacteur à 1 km ! Donc petit flux, donc gros volume de détection nécessaire.
- Reconstruction précise de E pour voir la modulation du spectre dû à l'oscillation.



~ 5 m

Chapitre 3

Les expériences STEREO PROSPECT et SoLid

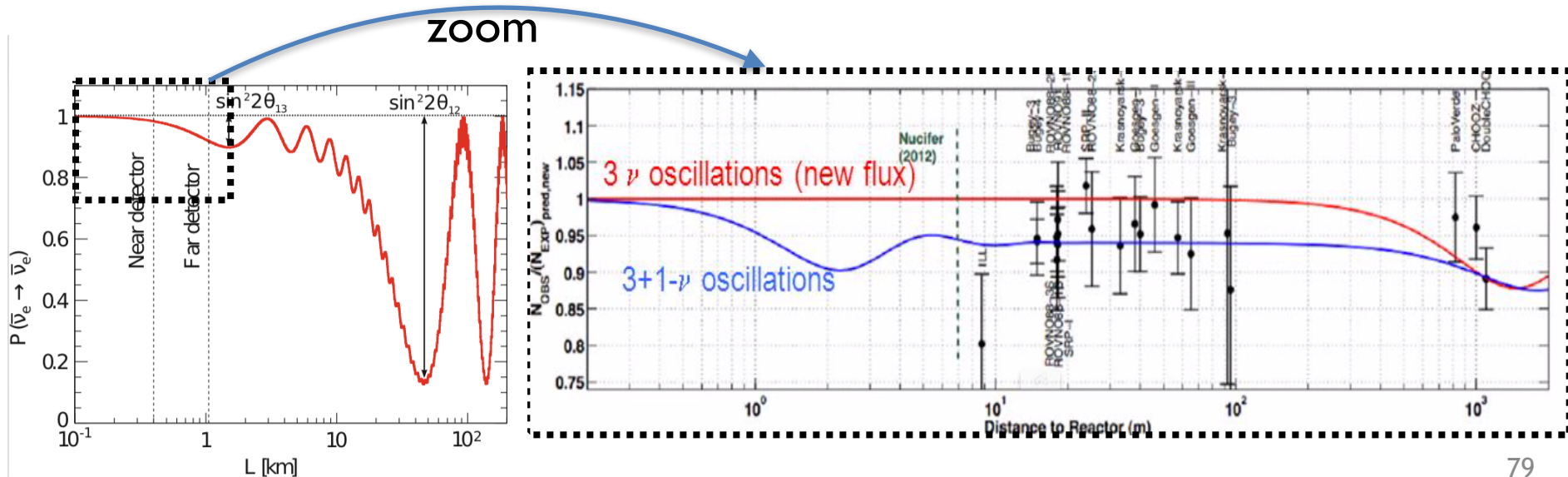
Motivations : I. Anomalie réacteurs et neutrino stérile.

Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses expériences ont mesuré le flux de $\bar{\nu}_e$ issus de réacteurs nucléaires, à des distances de 10 à 1000 m.

En les comparant aux prédictions de physique des réacteurs: $\sim 6\%$ de déficit !
C'est l'**anomalie réacteurs**.

Dans un monde à **3 saveurs de neutrinos** (électronique, muonique, tauique), cela ne peut s'expliquer par l'**oscillation**, qui **commence à 400 m**.

Mais cela pourrait être dû à l'**oscillation vers un nouveau neutrino** !



Motivations : I. Anomalie réacteurs et neutrino stérile.

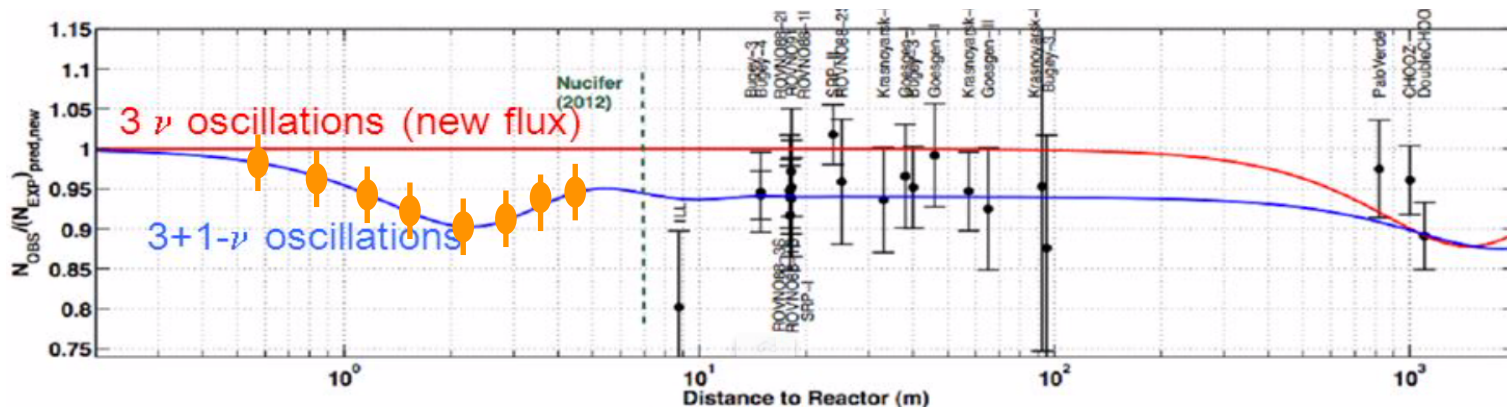
Ce nouveau neutrino serait encore inconnu car il n'interagirait pas du tout avec les autres particules : **neutrino stérile**.

Plus précisément, il n'interagirait que via une oscillation depuis ou vers les saveurs de neutrinos déjà connues.

Mesurer un déficit dans le flux ne suffit pas car les prédictions réacteurs sont délicates et pourraient être fausses.

Pour découvrir un neutrino stérile, il faut un **nouveau jeu de mesures** à plusieurs très petits L, pour constater une variation rapide du flux, compatible avec une oscillation :

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e, L) = 1 - \sin^2 2\theta_s \sin^2 \Delta_{41} \quad \Delta_{41} = 1.27 \frac{\Delta m_{41}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]}$$



Motivations : II. La distortion dite à 5 MeV.

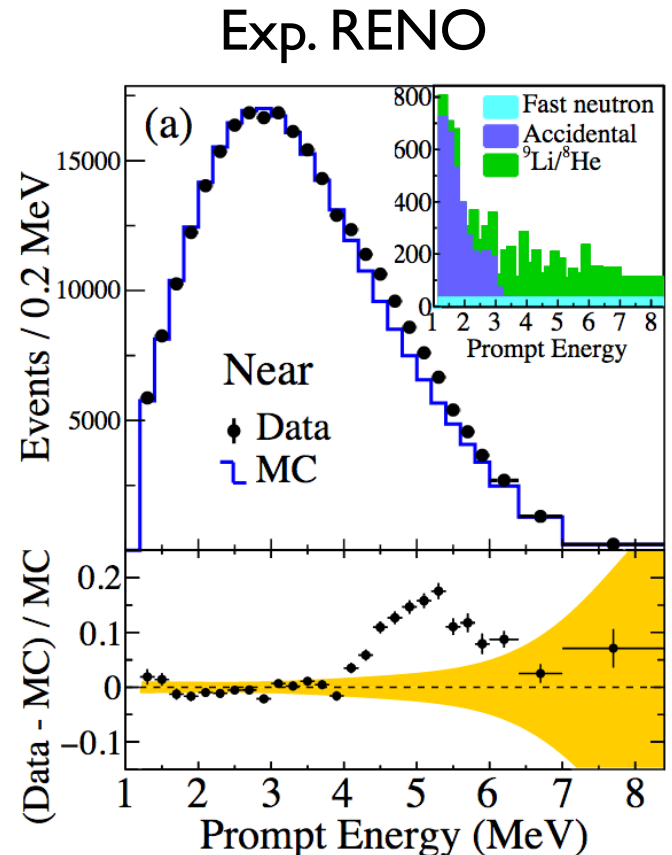
Le **flux total** de neutrinos n'est pas la seule quantité mesurée qui ne correspond pas aux prédictions.

Les expériences Daya Bay, Reno et Double Chooz mesurent le **spectre en énergie** de $\bar{\nu}_e$ à ~ 300 m de réacteurs. Elles trouvent une **forme différente des prédictions**.

À cette distance, cette déformation ne peut pas s'expliquer par l'oscillation entre neutrinos électroniques.

Il se pourrait que les prédictions soient fausses pour certaines compositions du combustible (fractions de divers U et Pu).

Une mesure très proche de réacteurs très enrichis en ^{235}U (plus "simple") est souhaitable.

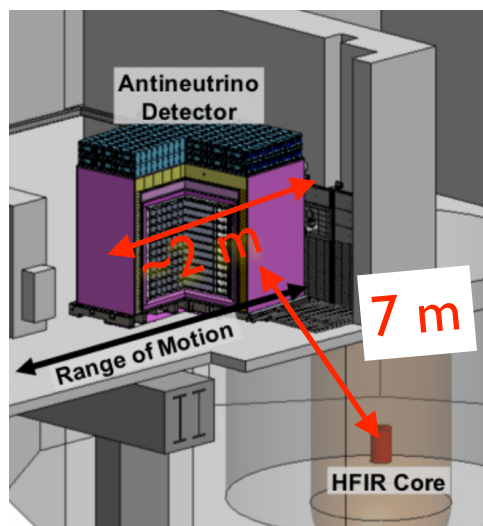


STEREO, PROSPECT, SoLid

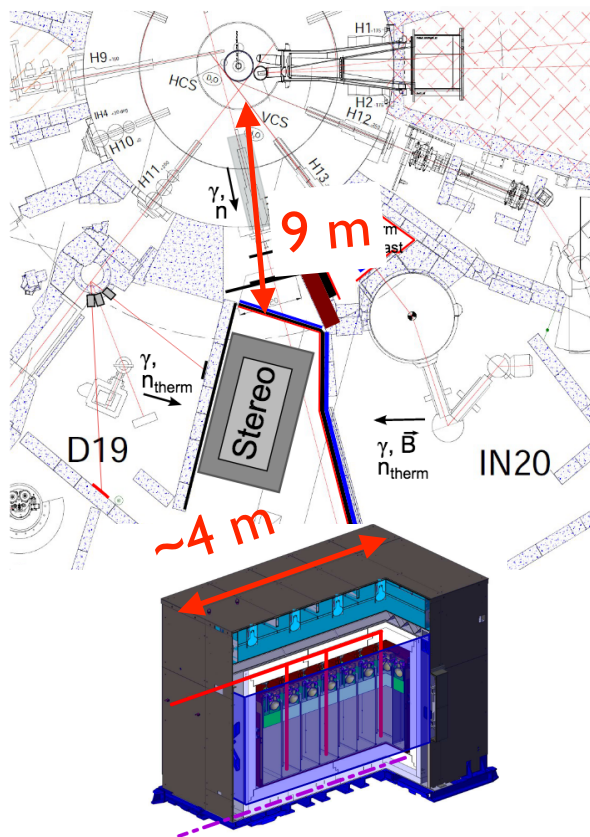
Une dizaine d'expériences à travers le Monde se sont installées à grande proximité d'un réacteur (≈ 10 m) pour rechercher un neutrino stérile et étudier le spectre.

Notamment :

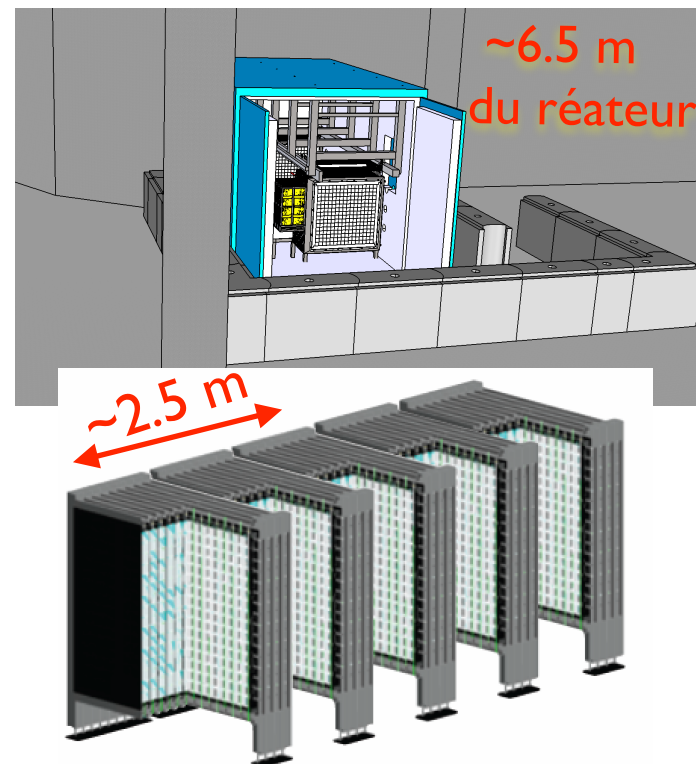
PROSPECT



STEREO

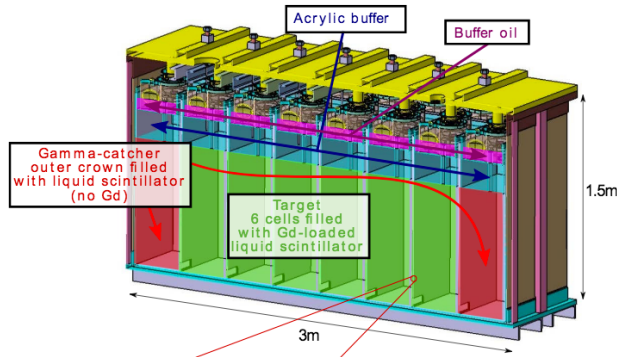


SoLid.

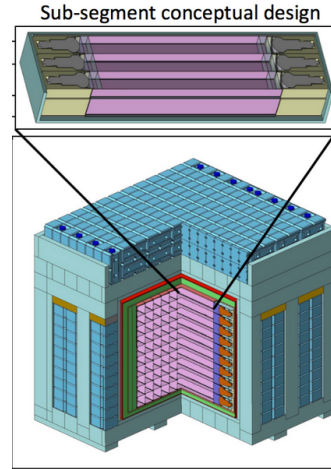


STEREO, PROSPECT, SoLid : comparaison expresse

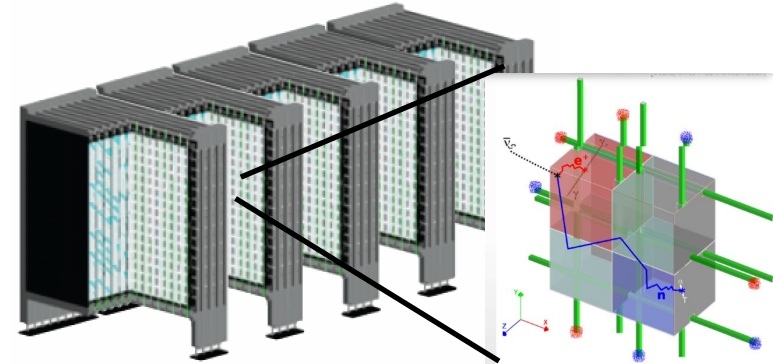
STEREO



PROSPECT



SoLid.

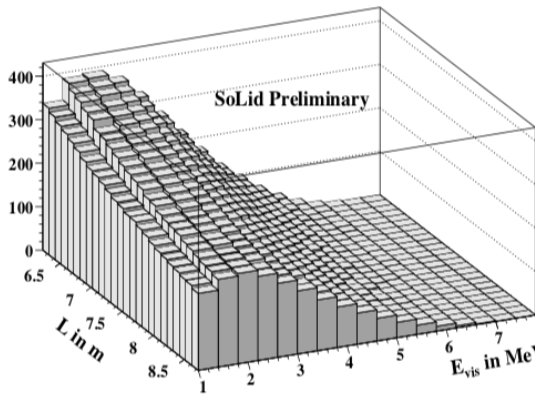


Segmentation (L, bruits de f)	6 cuves de $0.37 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$	Barres $0.15 \times 0.15 \times 1.2 \text{ m}^3$	Cubes $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$
Cible	Liquide scintillant (organ.)	Liquide scintillant (organ.)	Plastique scintillant (organ.)
Capture neutron	Gd dilué dans scintillateur	${}^6\text{Li}$ dilué dans scintillateur	Feuilles ${}^6\text{Li}:\text{ZnS}$ accolées au cubes
Photodétection	PMT	PMT	SiPM
Masse cible	2 t	4 t	1.6 t
Laboratoire	ILL Grenoble	Oak Ridge Nat. Lab. (TN, USA)	SCK-CEN, Mol (BEL)
Réacteur (PW)	HFRILL, 60 MW	HFIR, 85 MW	BR-2, 60 MW

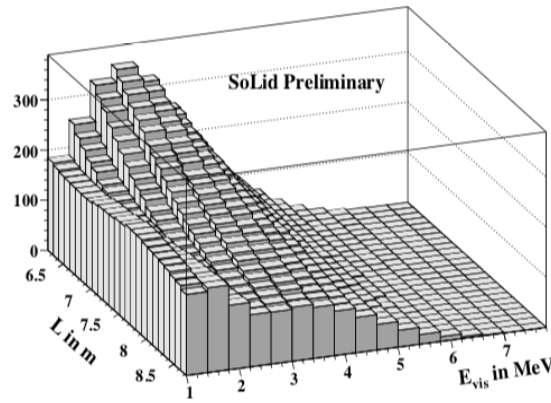
La mesure

Les trois expériences cherchent à mesurer une déformation du spectre en $E(\nu_e)$ en fonction de L (distance au réacteur).

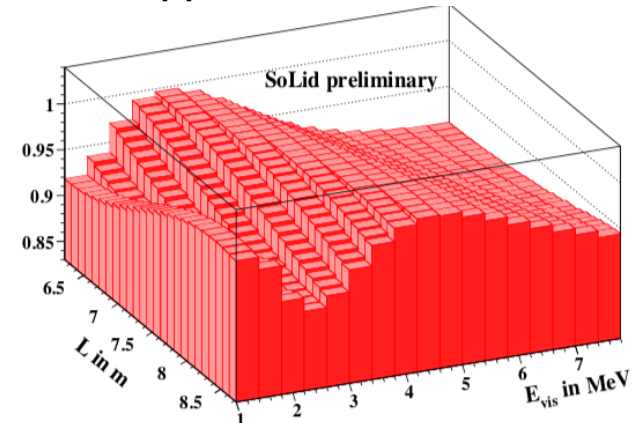
Spectre sans oscillation



Spectre oscillé

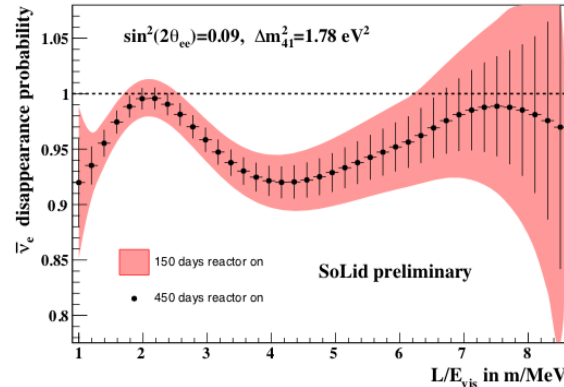
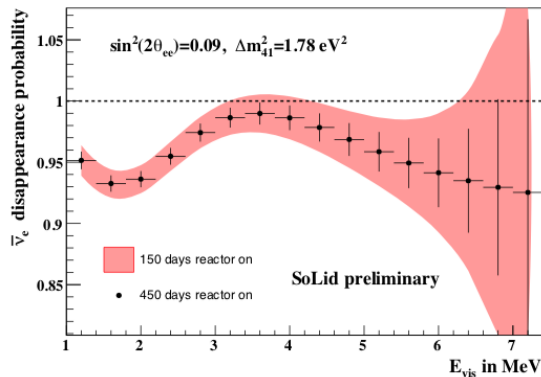


Rapport oscil/non oscil



$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e, L) = 1 - \sin^2 2\theta_s \sin^2 \Delta_{41} \quad \Delta_{41} = 1.27 \frac{\Delta m_{41}^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]}$$

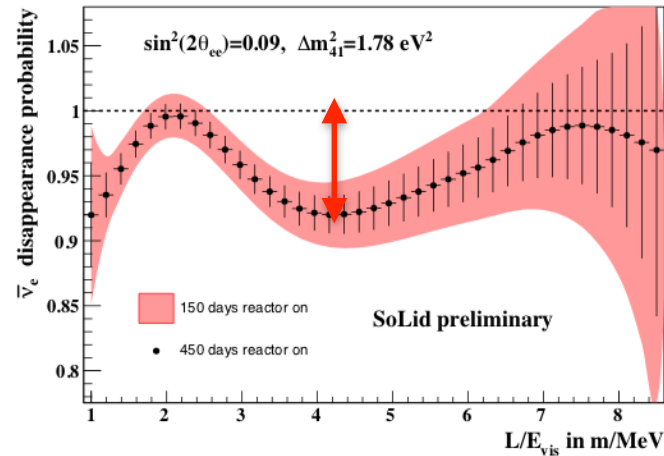
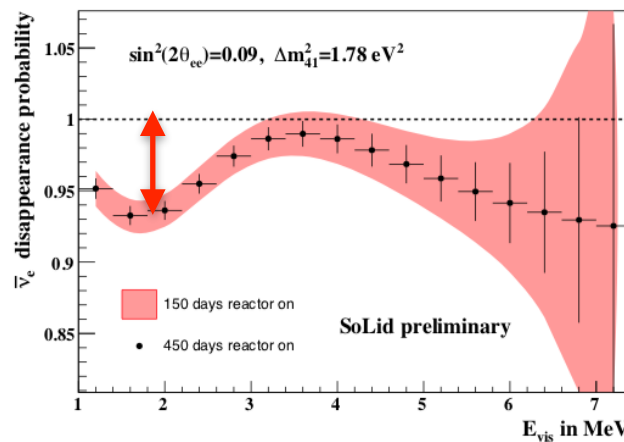
Rapport oscil/non oscil



La mesure

Les trois expériences cherchent à mesurer une déformation du spectre en $E(\nu_e)$ en fonction de L (distance au réacteur).

Rapport oscil/non oscil



L'effet à mesurer est subtil : jamais plus de 10%.

Il faut donc une mesure très précise et très fiable de E et L.

Quelles sont les sources d'imprécision/incertitude et de biais ?

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection.

Incertitude I : incertitude statistique.

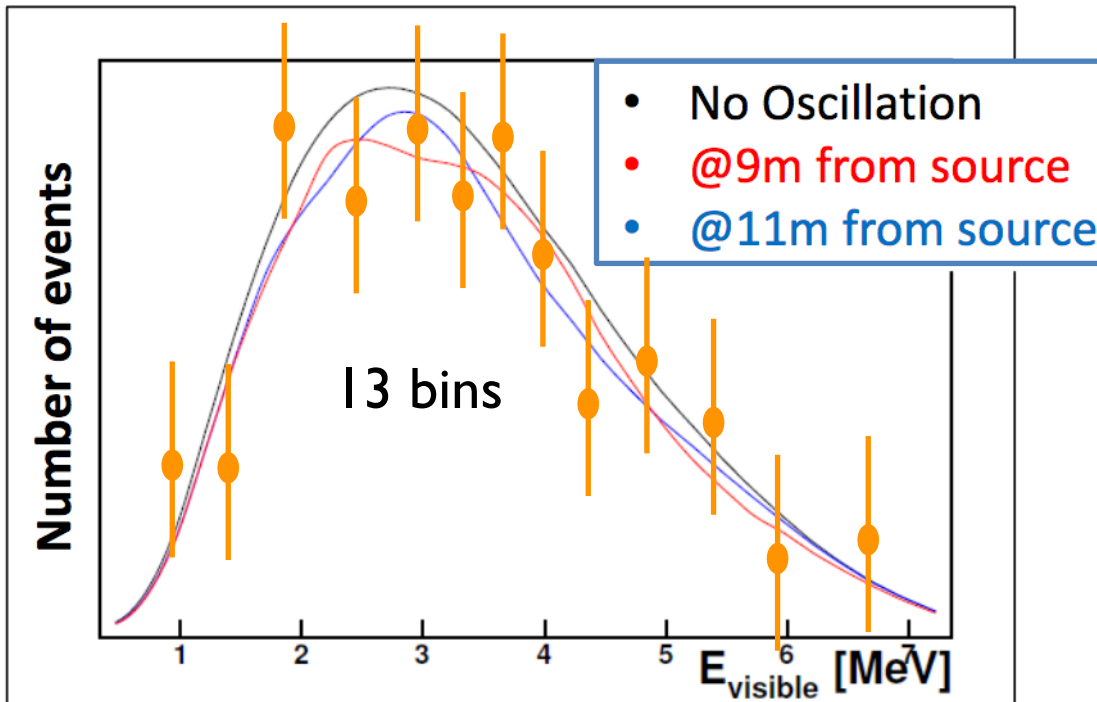
On mesure un certain nombre de neutrinos (i.e. d'IBDs)

Pour chacun, on mesure son E.

On les place ensuite dans des bins (= intervalles d'E) pour construire leur distribution en énergie.

Le nombre N_ν dans chaque bin souffre d'une incertitude $= \sqrt{N_\nu}$

Elle occasionne des fluctuations statistiques.



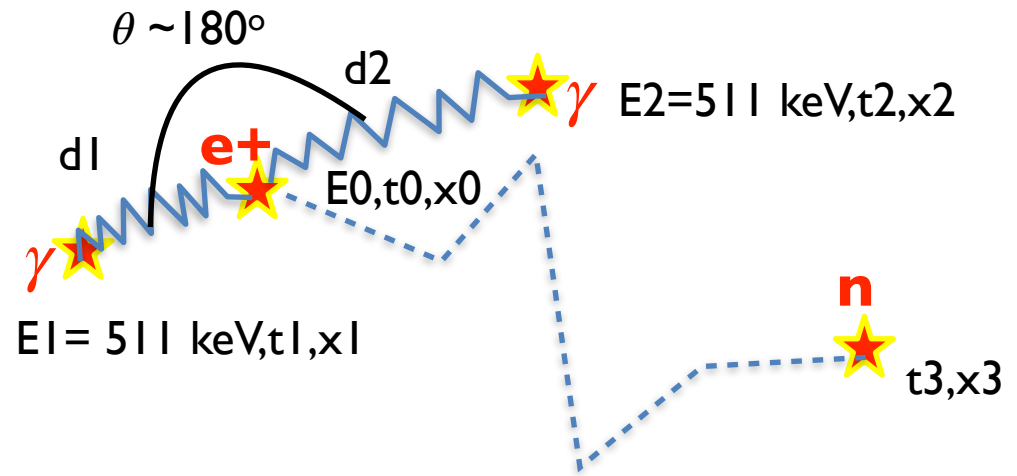
Si le nombre de neutrinos reconstruits et sélectionnés par l'expérience est trop faible, on ne peut pas voir les structures fines du spectre.

Ci-contre : on ne peut pas déceler l'oscillation. Les mesures sont compatibles avec tous les spectres.

Incertitude II : Les bruits de fond

On ne sélectionne pas que des IBD : d'autres types d'événements, ressemblant à l'IBD, constituent un bruit de fond.

IBD

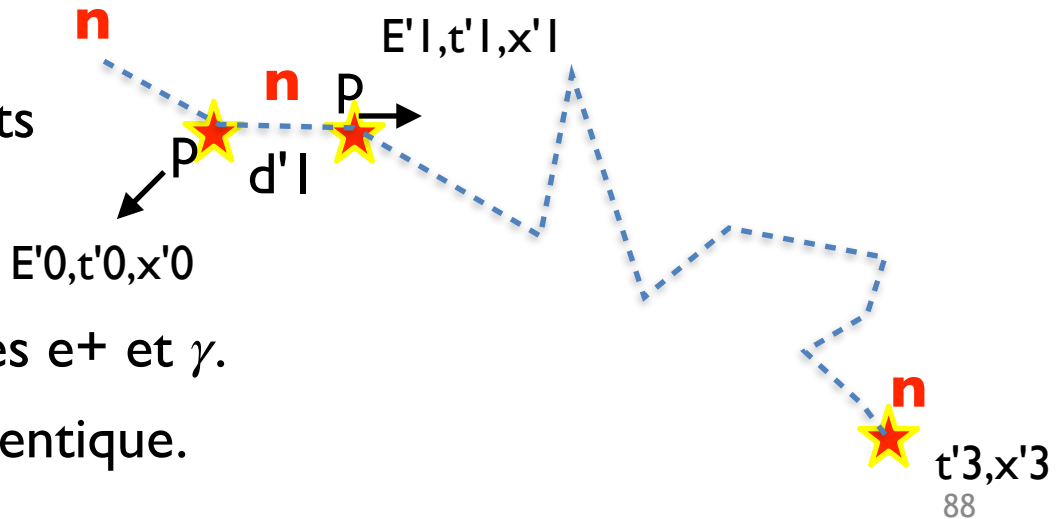


Bruit de fond
'fast neutrons'

Neutrons atmosphériques produits par des rayons cosmiques.

Collisions avec des protons : scintillation ressemblant à celle des e^+ et γ .

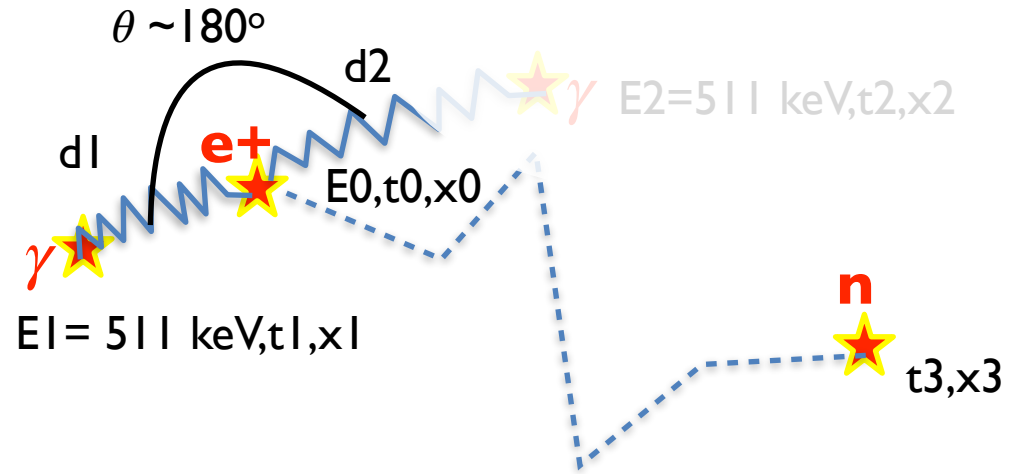
Capture du neutron thermalisé identique.



Incertitude II : Les bruits de fond

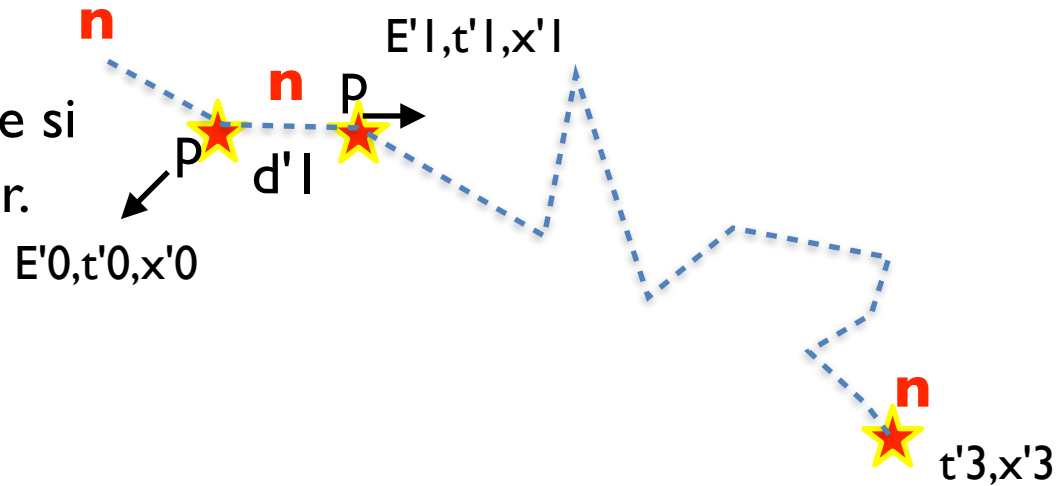
On ne sélectionne pas que des IBD : d'autres types d'événements, ressemblant à l'IBD, constituent un bruit de fond.

IBD

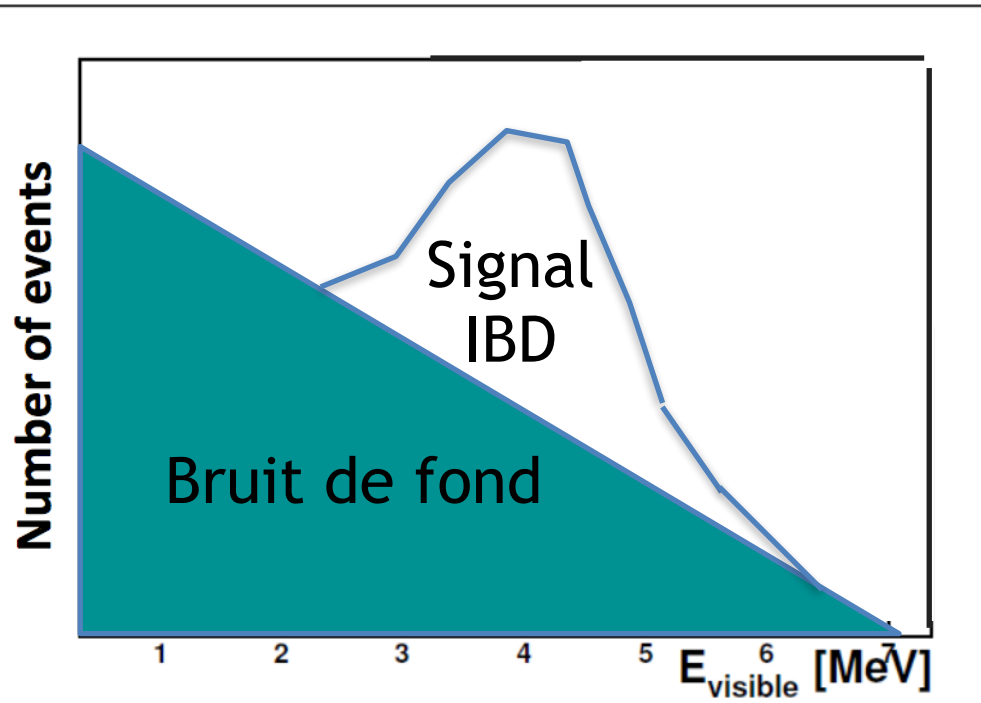


Bruit de fond
'fast neutrons'

Deviens indiscernable par exemple si l'un des γ est raté par le détecteur.



Effet des bruits de fond sur le spectre en E

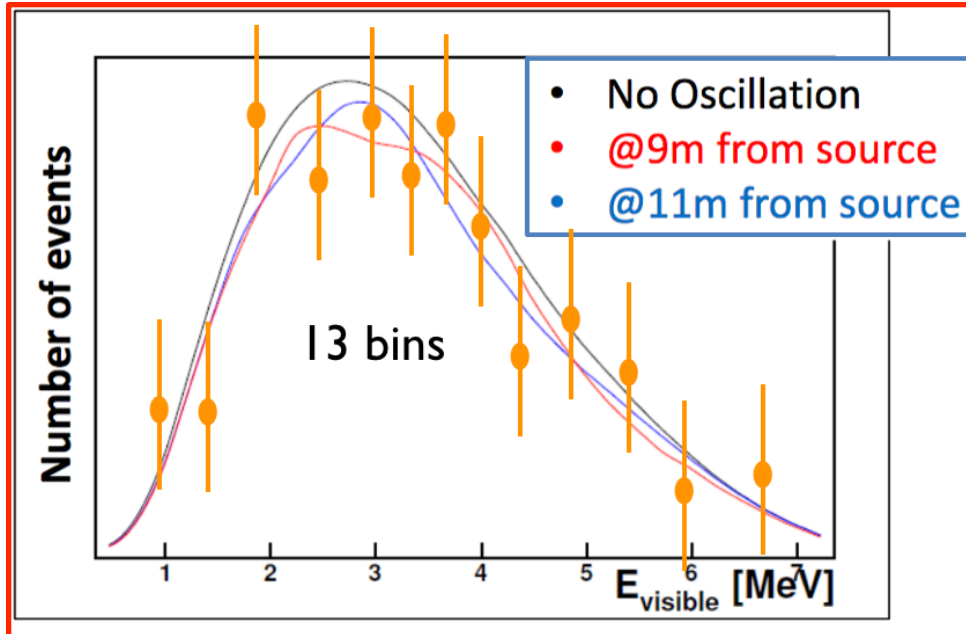


Le bruit de fond doit être soustrait.

Les fluctuations statistiques du bruit de fond s'ajoutent alors à celles du signal.

Plus le rapport S/B est faible, plus l'incertitude sur le spectre final sera grande !

Effet des bruits de fond sur le spectre en E



Le bruit de fond doit être soustrait.

Les fluctuations statistiques du bruit de fond s'ajoutent alors à celle du signal.

Plus le rapport S/B est faible, plus l'incertitude sur le **spectre final** sera grande !

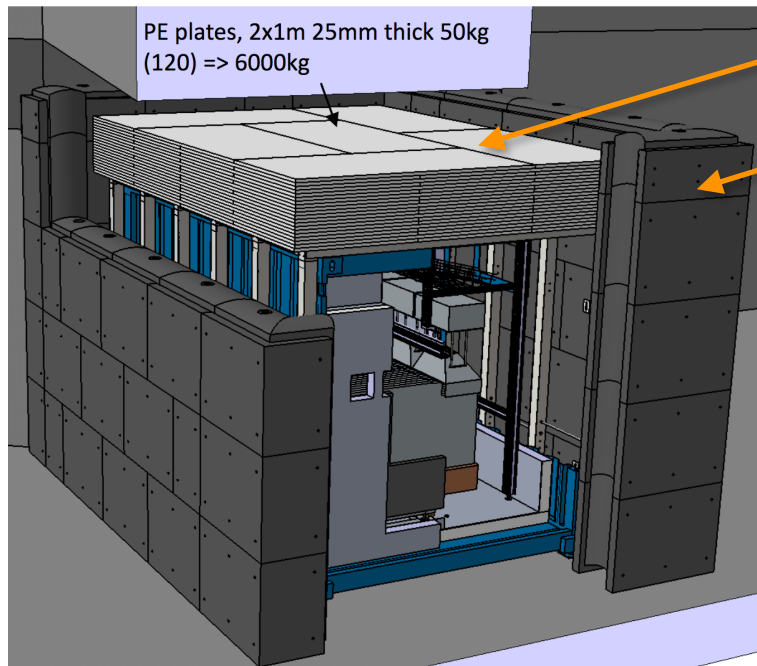
Il faut donc minimiser les bruits de fond en restant efficace dans la sélection du signal.

Bruits de fond : solutions I

Réduire les bruits de fond à la source.

Blindages pour absorber les neutrons.

Exemple de SoLid:

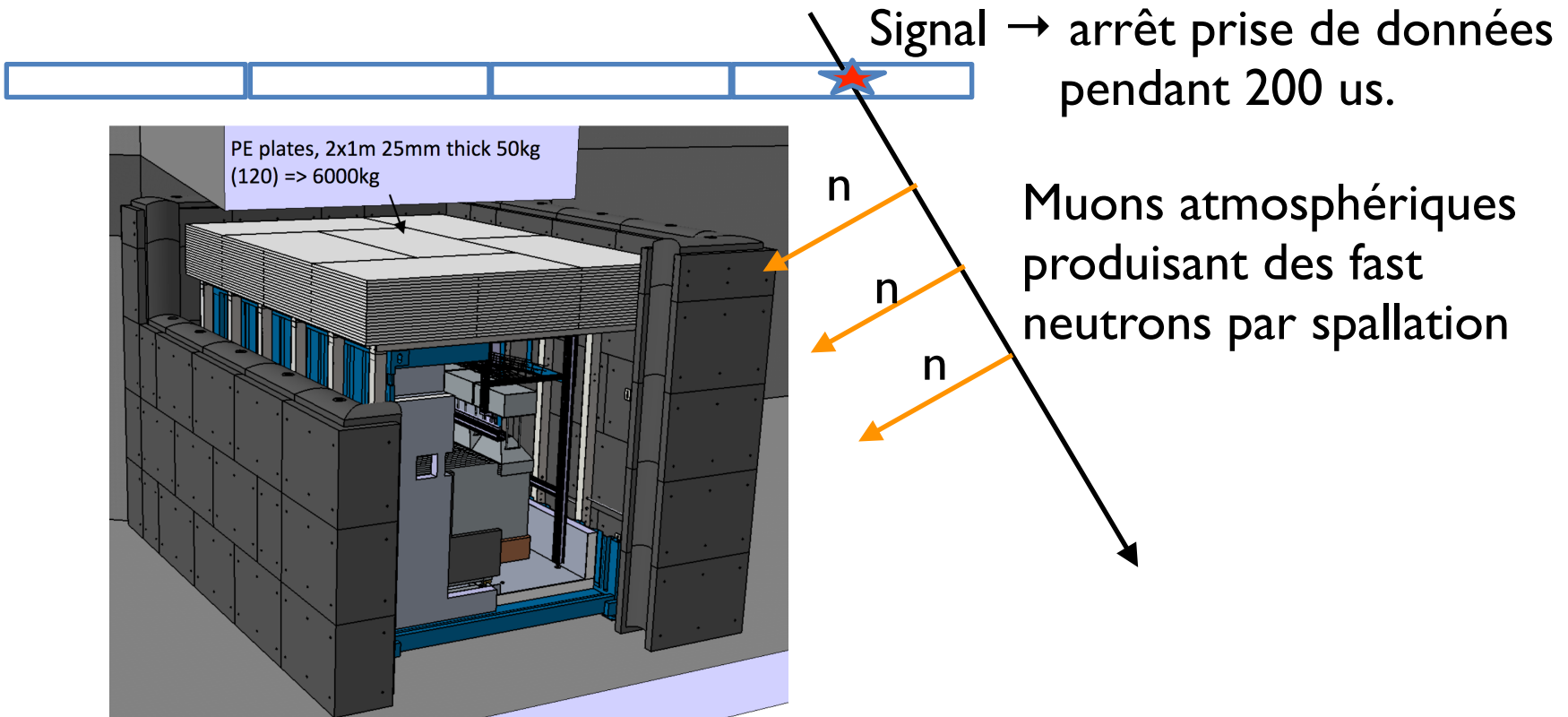


- blindage de Polyéthylène.
- blindage de briques d'eau (éventuellement avec du Bore, bon absorbeur de neutrons)

Bruits de fond : solutions II

Réduire les bruits de fond à la source.

Veto : morceau de détecteur dédié à détection de bruits de fond spécifiques et qui inhibe la prise de données en cas de détection.



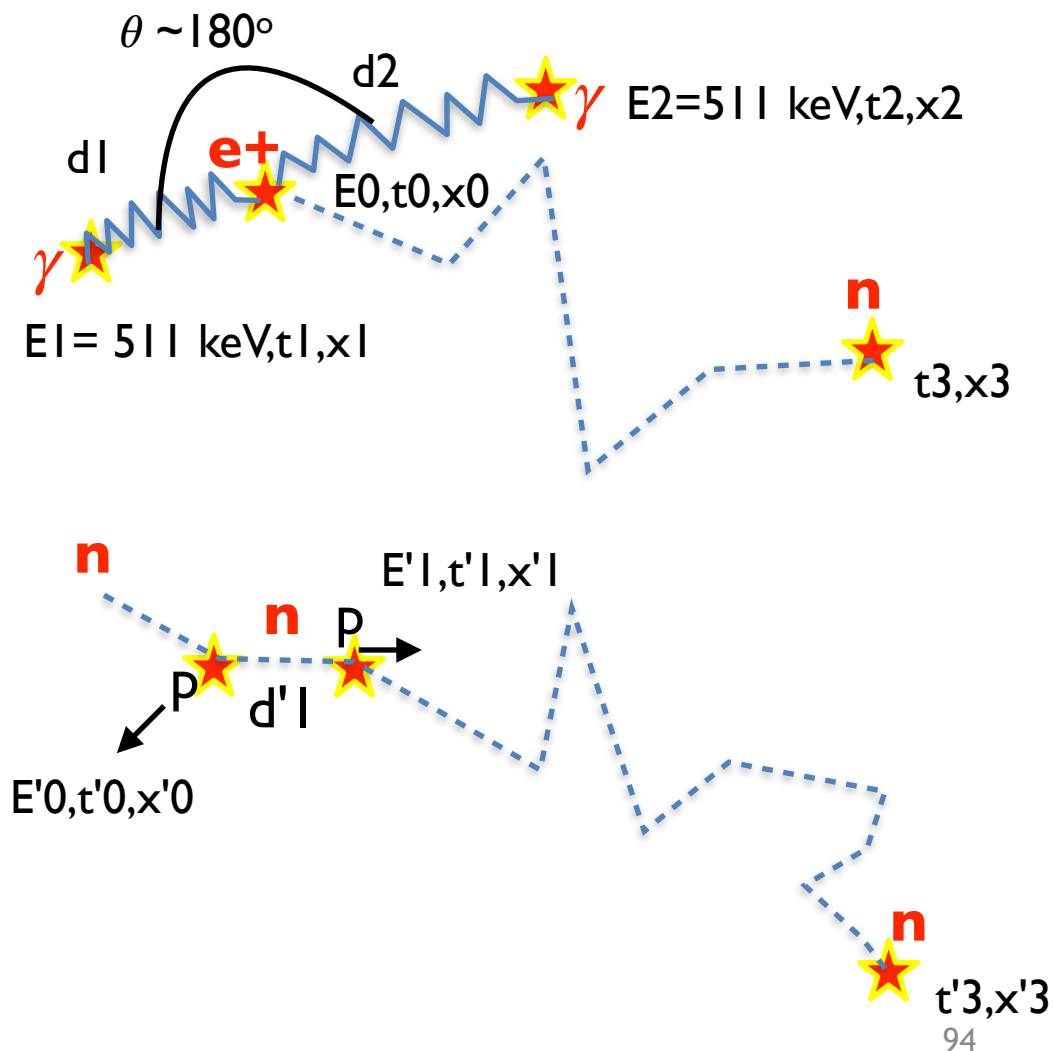
Bruits de fond : solutions III

Un détecteur suffisamment sensible pour trouver des critères de discrimination rejetant les bruits de fond en gardant l'essentiel du signal

Exemples :

Capable de détecter les deux γ
-faible E = détection difficile

À la bonne E de 511 keV
-E'0 et E'1 ne sont en général pas à cette valeur



Bruits de fond : solutions III

Un détecteur suffisamment sensible pour trouver des critères de discrimination rejetant les bruits de fond en gardant l'essentiel du signal

Exemples :

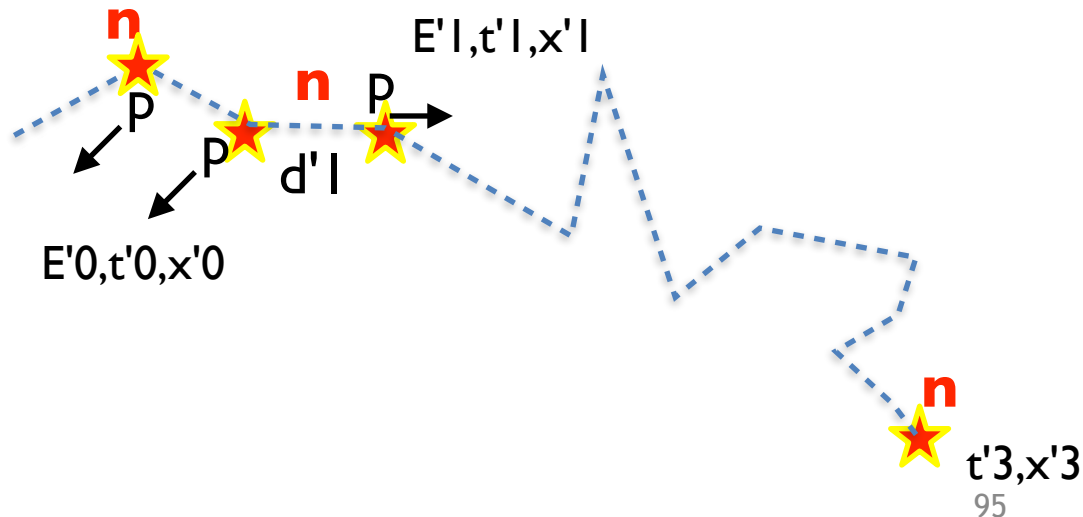
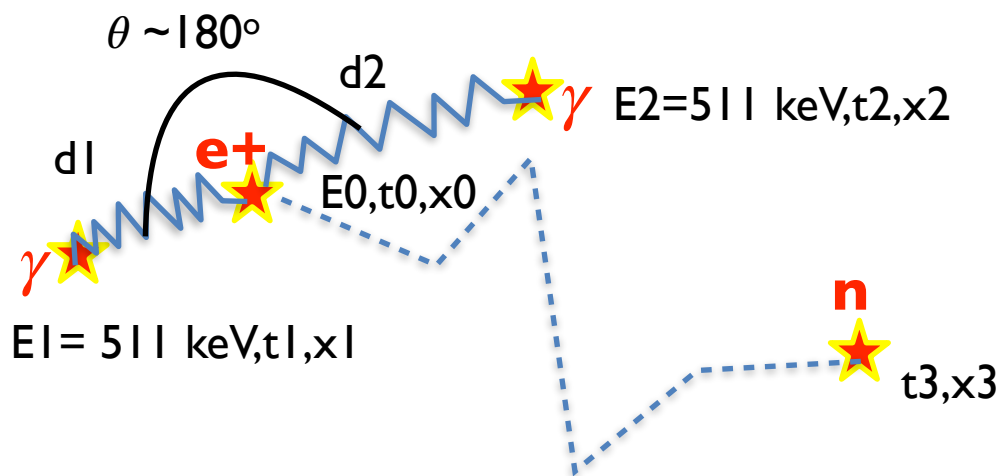
Capable de détecter les deux γ
-faible E = détection difficile

À la bonne E de 511 keV
-E'0 et E'1 ne sont en général pas à cette valeur

Avec le bon θ

-si 3 'proton recoils', pas d'angle particulier pour fast neutrons, etc.

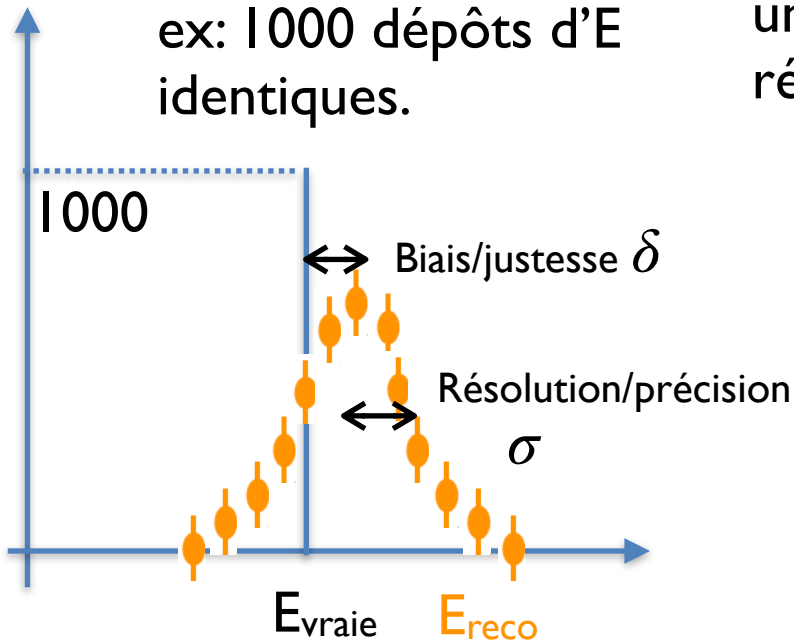
Une bonne résolution en temps
- $t_0=t_1=t_2$ alors que $t'_1=t'_0+5$ ns
(les neutrons sont plus lents)



Incertitude III : Reconstruction de l'E

Définitions : Résolution σ et Biais δ

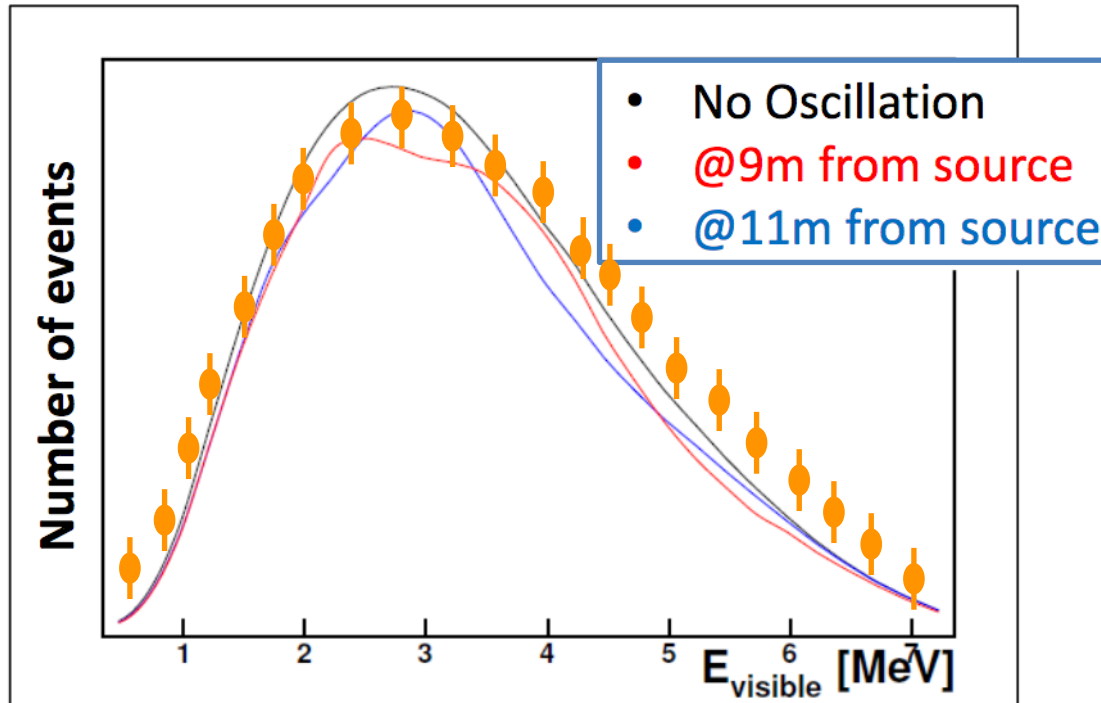
ex: 1000 dépôts d'E
identiques.



Résolution et **biais** : capacité à mesurer une grandeur en restant proche de sa valeur réelle, **mesure par mesure**, et **en moyenne**.

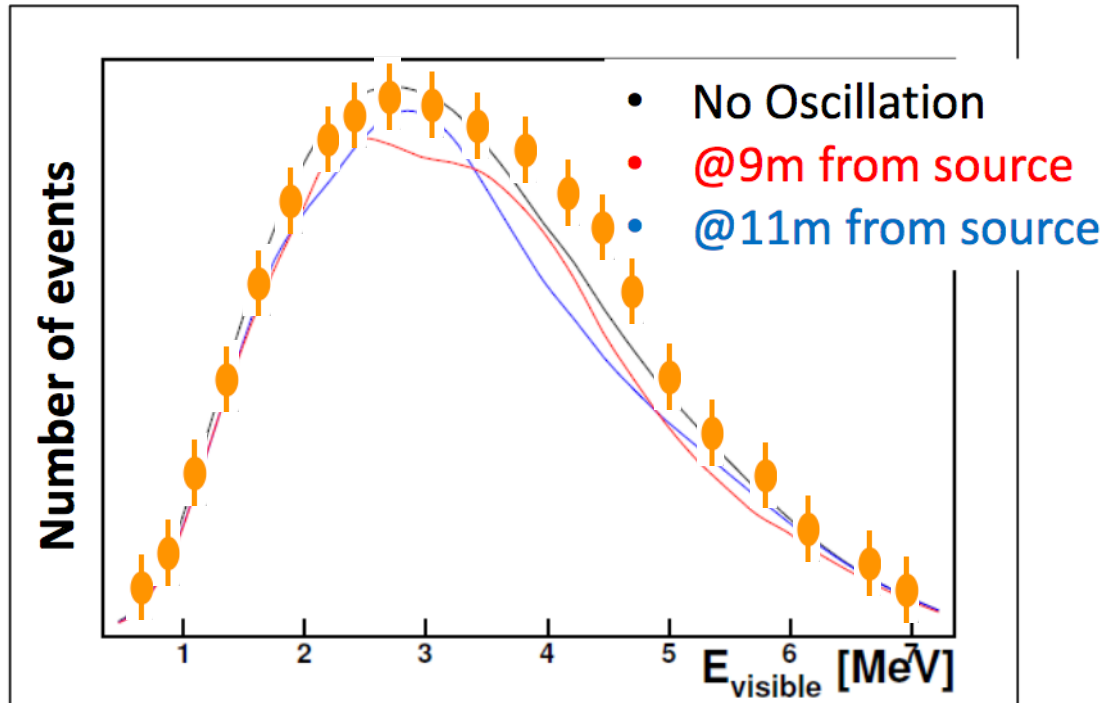
Note : Résolution et biais peuvent varier en fonction de E_{vraie} !

Effet de σ sur le spectre en énergie



Le spectre de E_{vraie} (ex: **le rouge**) devient une fois **mesuré** un spectre plus large où la déformation due à l'oscillation n'est plus visible.

Effet de $\delta=f(E_{\text{vrai}})$ sur le spectre en énergie



Le spectre de E_{vraie} noir où l'on suppose que l'**oscillation n'existe pas** devient une fois **mesuré** un spectre avec une distortion qui peut faire croire par erreur à une oscillation...

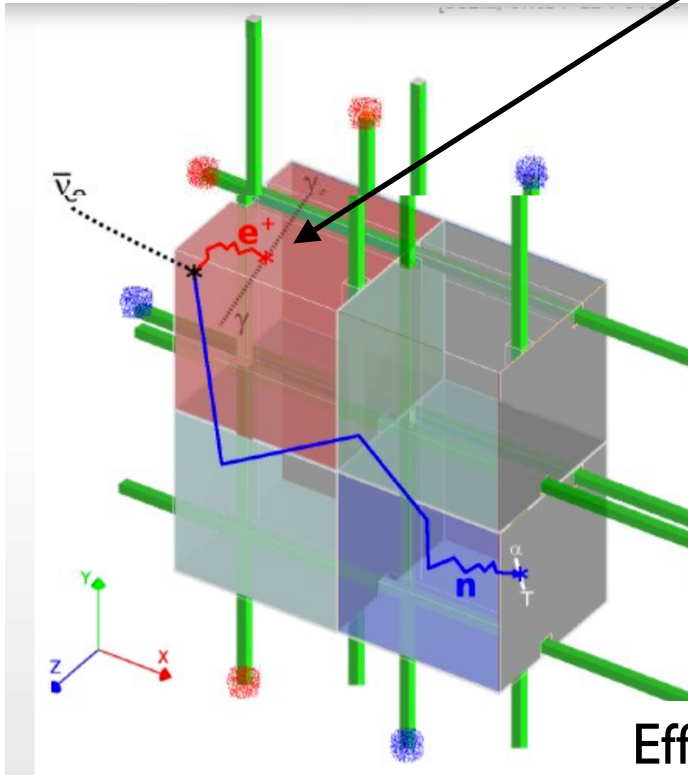
Résolution σ et biais δ : solutions I

Maximiser le nombre de photons détectés $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$!

$$\sigma E/E \sim 1 / \sqrt{N_{\text{ph}}^{\text{det}}}$$

Exemple de SoLid

Le e^+ dépose 1 MeV dans le cube de PVT.



Environ $N_{\text{ph}} \sim 10000$ photons sont scintillés.
Propagation dans le cube jusqu'aux fibres optiques.

Absorption avant d'atteindre les fibres +
acceptance géométrique (petites fibres)
→ $N_{\text{ph}}^{\text{fibre}} \sim 100$ photons atteignent 1 fibre.

Absorption le long de la fibre ($\sim 1\text{m}$ jusqu'au
SiPM)

→ $N_{\text{ph}}^{\text{fibre}} \sim 60$ photons atteignent le SiPM

Efficacité quantique ($\sim 30\%$)

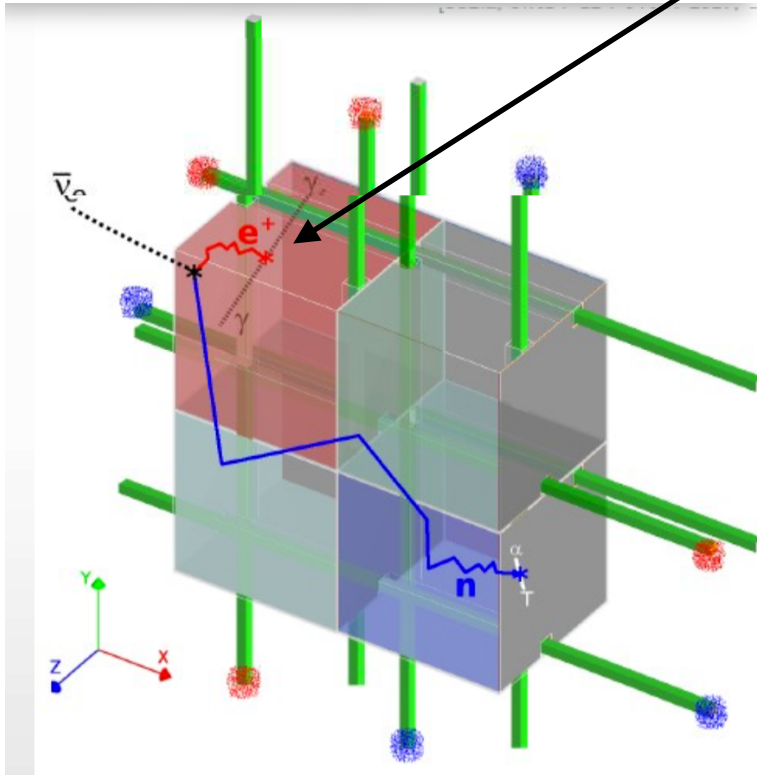
→ $N_{\text{ph}}^{\text{det}} \sim 20$ photo-avalanches (PA) détectées.

Résolution σ : solution

Maximiser le nombre de photons détectés $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$!

$$\sigma E/E \sim 1 / \sqrt{N_{\text{ph}}^{\text{det}}}$$

Exemple de SoLid



Le e^+ dépose 1 MeV dans le cube de PVT.

→ ~ 80 PA / MeV / Cube (4 fibres)

→ $\sigma E/E \sim 11\%$ à 1 MeV.

Si budget plus grand (rêve)?

- Meilleur scintillateur ? $N_{\text{ph}} \sim 15000$
- Meilleure transparence des cubes
- Meilleure atténuation
- Meilleur eff quantique (40%)

→ ~ 190 PA / MeV / Cube (4 fibres)

→ $\sigma E/E \sim 7\%$ à 1 MeV.

Biais δ : solution

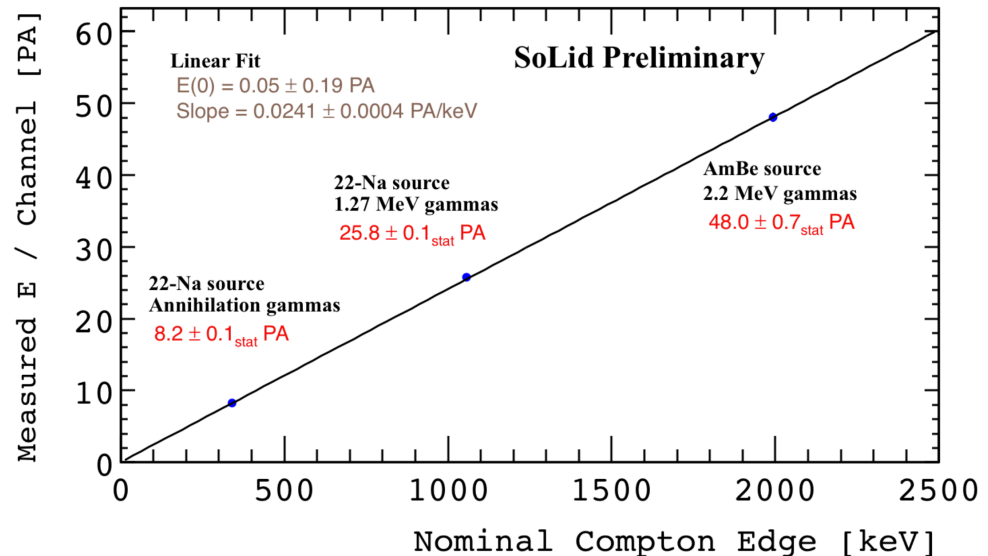
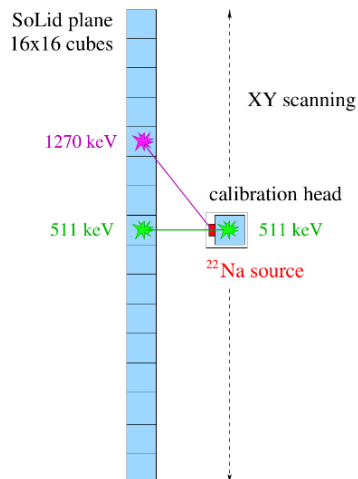
Calibration !

On expose le détecteur à des sources radioactive émettant des particules dont l'énergie est connue.

On mesure $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$ et on sait alors combien de PA ont lieu en moyenne pour un dépôt donné \rightarrow **E-scale en PA / MeV.**

E-scale varie en fonction de E (voir la semaine prochaine). On mesure cette variation en utilisant plusieurs sources, à diverses énergies.

Exemple : SoLid, sources ^{22}Na et AmBe

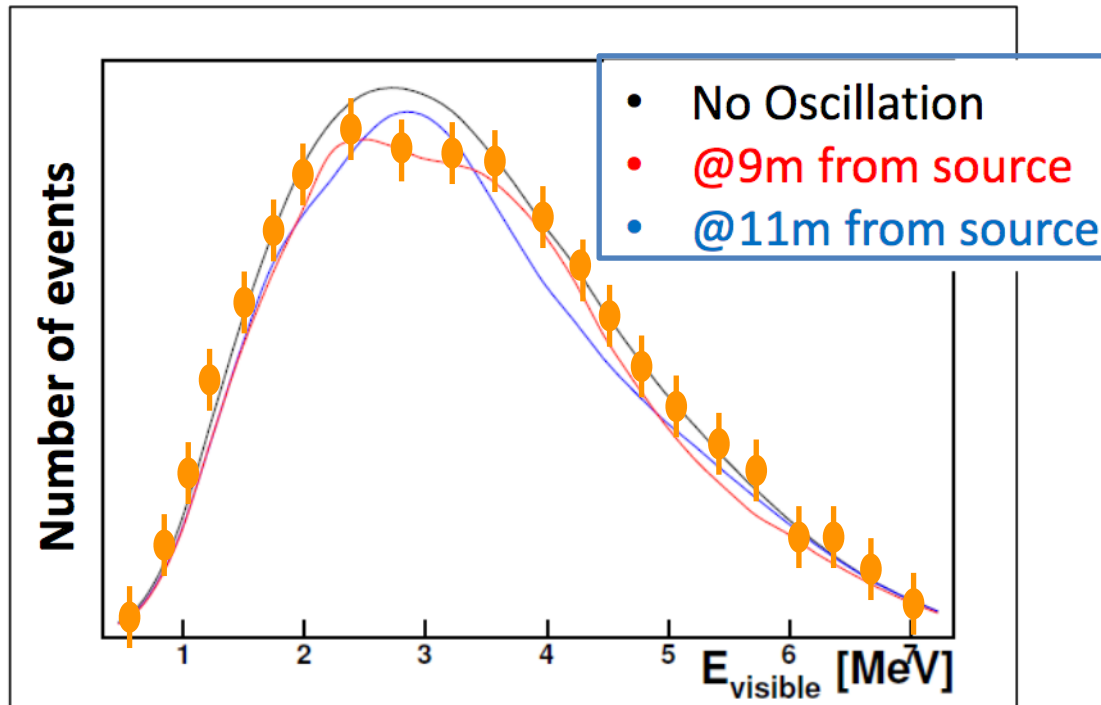


Incertitude IV: biais de détection/sélection

L'efficacité avec laquelle les neutrinos sont détectés et sélectionnés peut dépendre de l'E.

Le spectre en E est alors déformé ! Excès dans des régions en énergie où la détection/sélection est plus facile, déficit là où elle est plus difficile

En cas d'absence d'oscillation dans la réalité, la déformation peut nous donner l'illusion d'une oscillation.

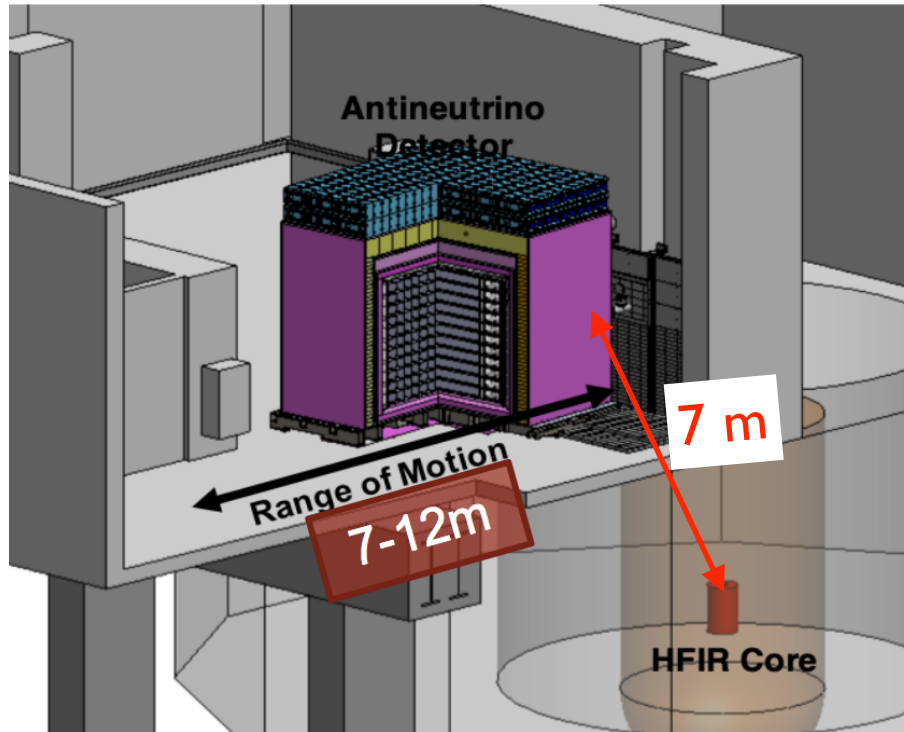


Solution :

Simulation numérique précise de l'expérience pour évaluer et corriger ces effets.

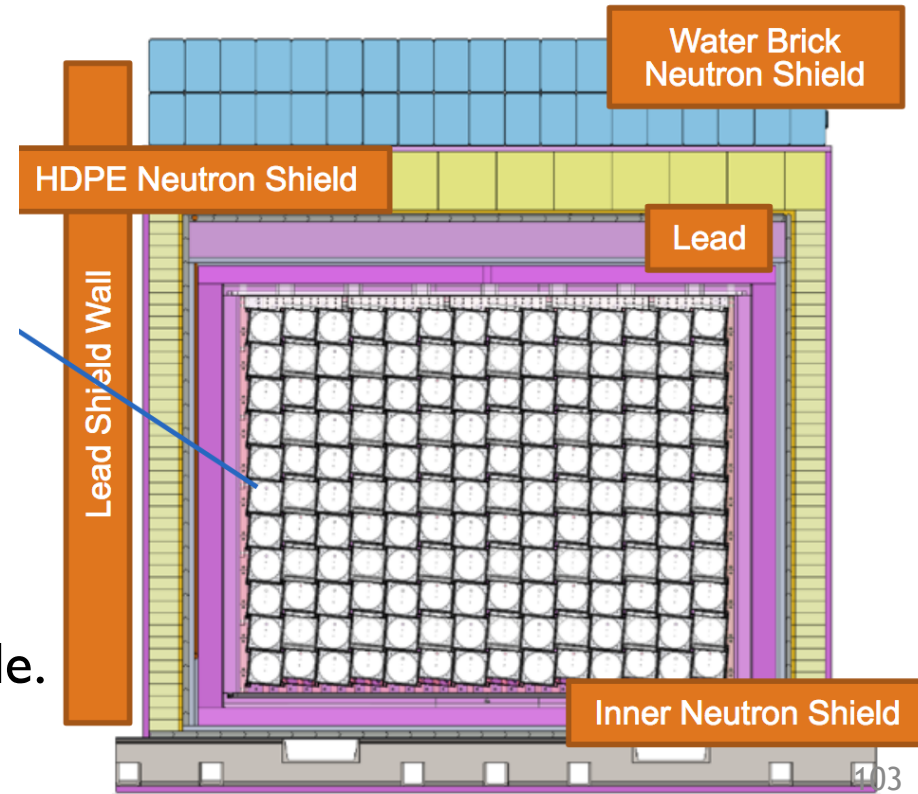
On fait aussi appel à des données réelles spécifiquement choisies (échantillon de contrôle).

L'expérience PROSPECT



Baseline L : 7-9 m dans sa configuration actuelle.

Mobile pour couvrir un intervalle plus grand.

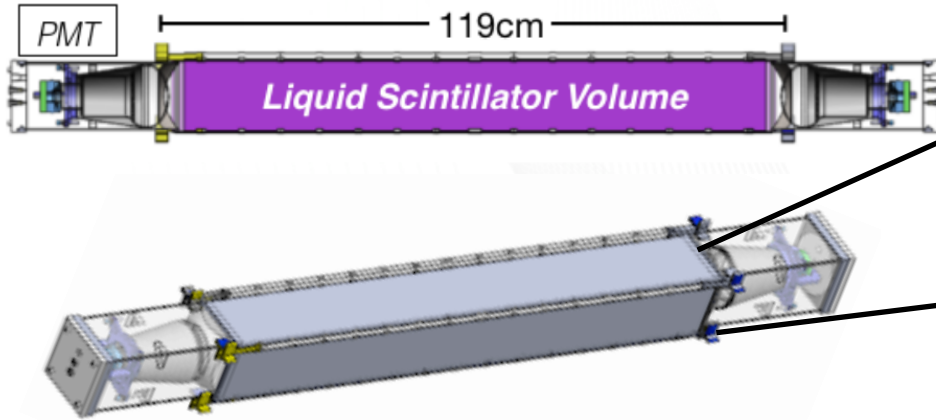


Cible et détection des neutrinos :
Matrice de 14*11 segments optiques.

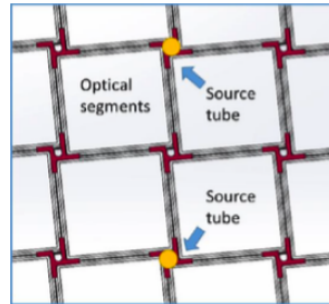
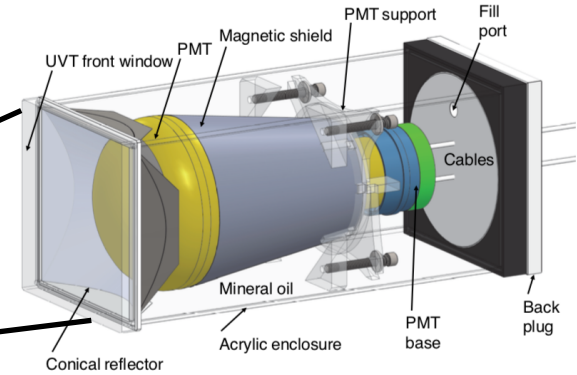
Remplis de scintillateur organique liquide.

PROSPECT : le segment, cellule de détection de base.

Plusieurs vues d'un segment

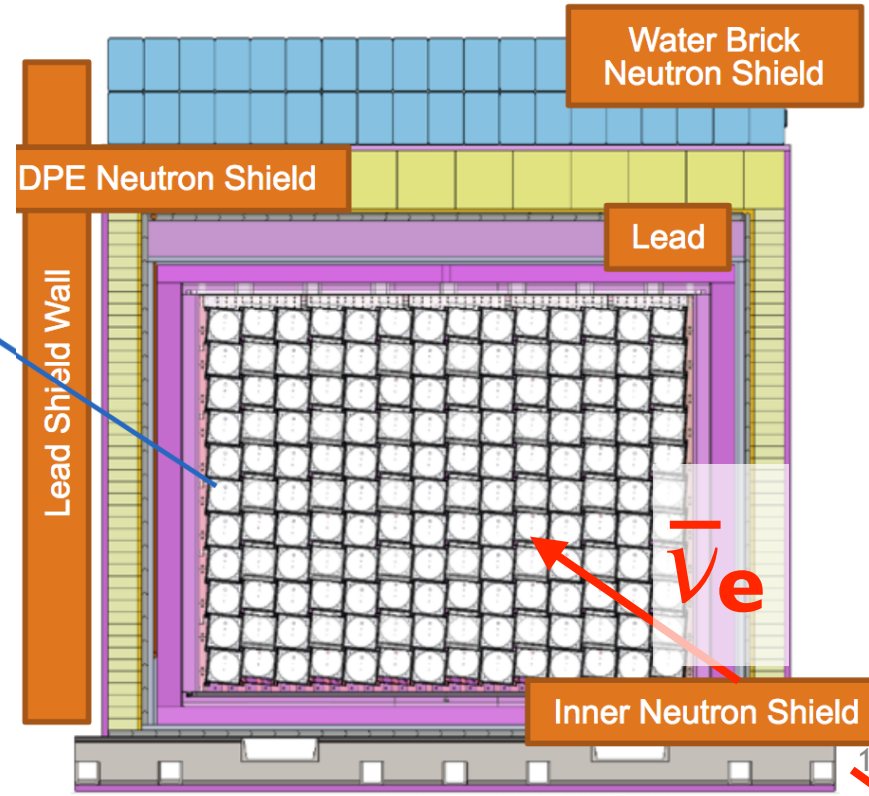


Un PMT dans son casier

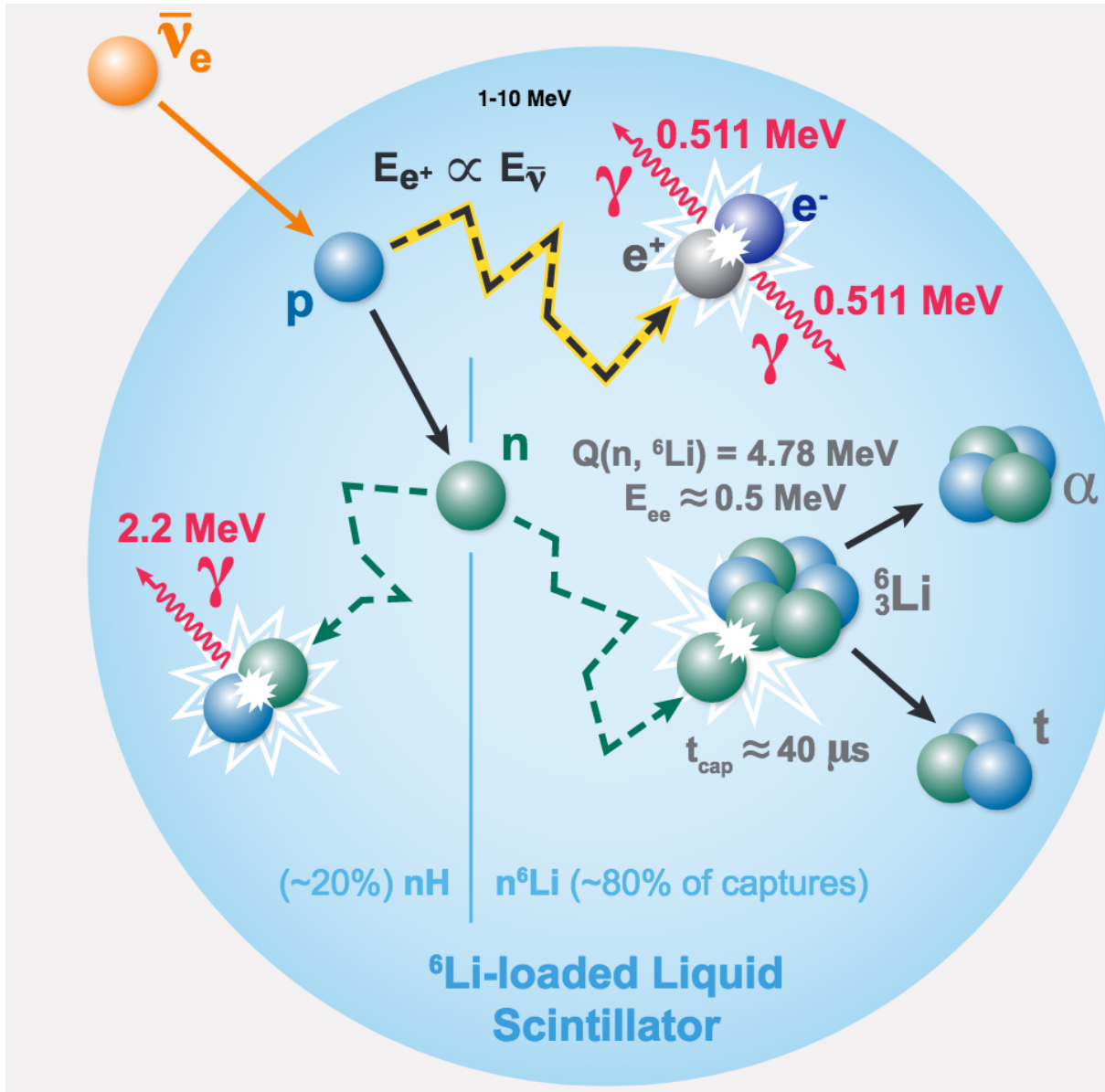


Cible & détection des $\bar{\nu}_e$

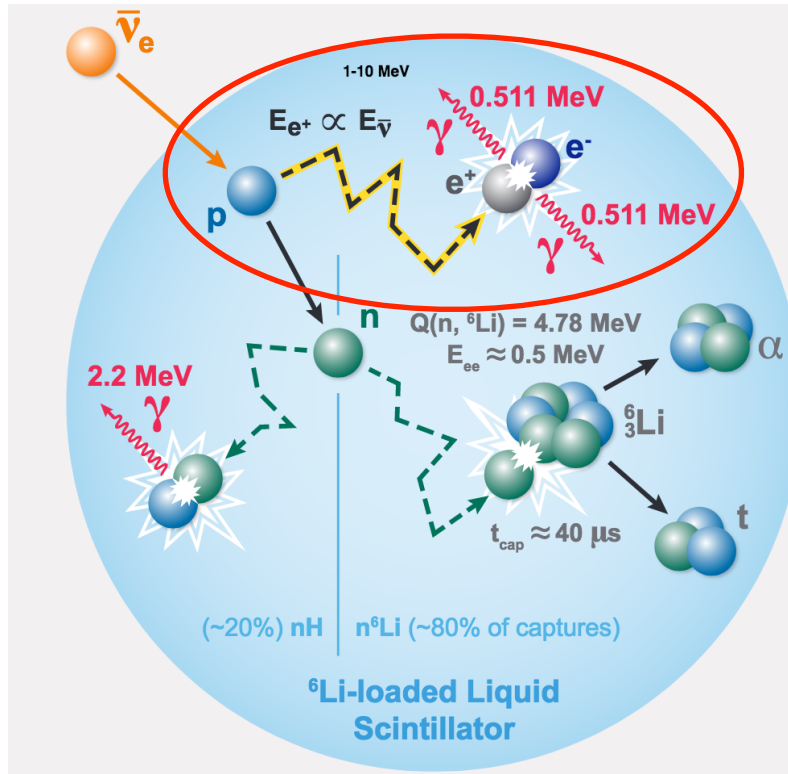
Matrice de 14*11 segments optiques. Remplis de Scint. organique liquide, dopé au ${}^6\text{Li}$ (0.1% masse) pour capture des neutrons.



PROSPECT : mesure d'une IBD.



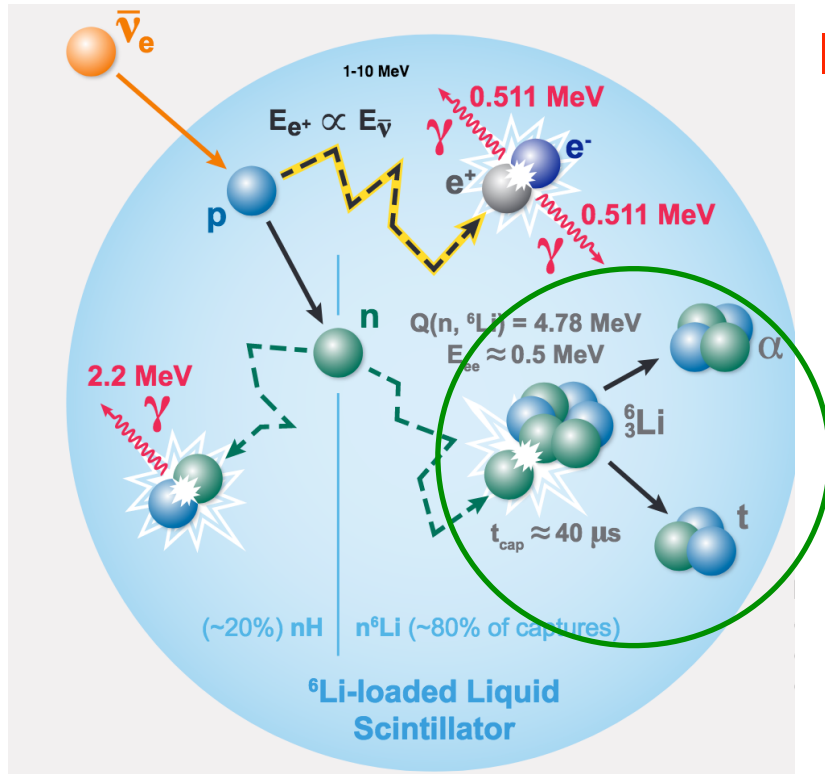
PROSPECT : mesure d'une IBD.



I. Signal de scintillation dans un segment, ou plusieurs.

- γ d'annihil. peuvent voyager $\sim 20 \text{ cm}$
- $0.8 < E_{\text{cluster}} < 7.2 \text{ MeV}$
- PSD compatible avec e^\pm, γ (voir plus loin)

PROSPECT : mesure d'une IBD.



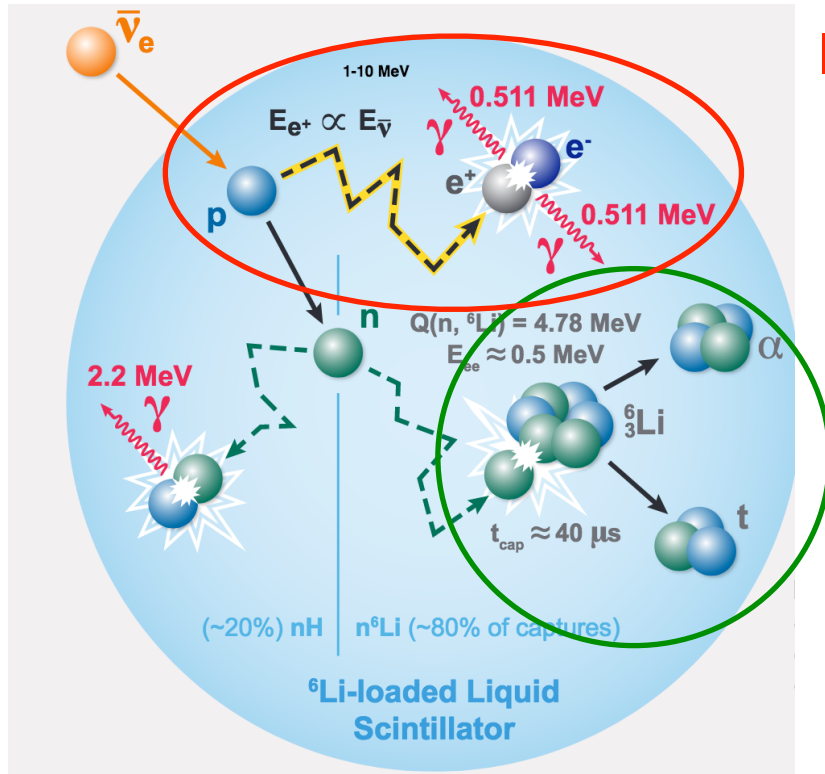
1. Signal de scintillation dans un segment, ou plusieurs.

- γ d'annihil. peuvent voyager $\sim 20 \text{ cm}$
- $0.8 < E_{\text{cluster}} < 7.2 \text{ MeV}$
- PSD compatible avec e^{\pm}, γ
(voir plus loin)

2. Signal de scintillation dans un seul segment.

- $0.46 < E_{\text{cluster}} < 0.6 \text{ MeV}$
- PSD non-compatible avec e^{\pm}, γ

PROSPECT : mesure d'une IBD.



1. Signal de scintillation dans un segment, ou plusieurs.

- γ d'annihil. peuvent voyager $\sim 20 \text{ cm}$
- $0.8 < E_{\text{cluster}} < 7.2 \text{ MeV}$
- PSD compatible avec e^\pm, γ (voir plus loin)

2. Signal de scintillation dans un seul segment.

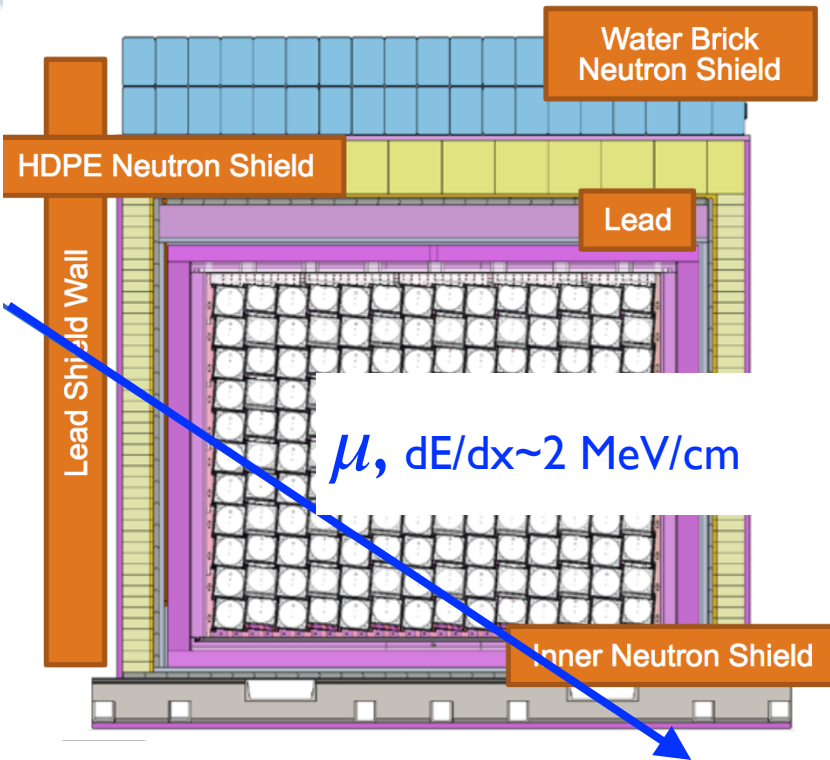
- $0.46 < E_{\text{cluster}} < 0.6 \text{ MeV}$
- PSD non-compatible avec e^\pm, γ

3. Former une paire prompt+retardé

- $| < \Delta t < 120 \mu\text{s}$ ($< \Delta t > \sim 50 \mu\text{s}$).
- Segment le + énergétique du prompt et le segment du retardé sont adjacents.
- $\Delta z < 15 \text{ cm}$.

$$\Leftrightarrow d < 20 \text{ cm} \pm 15 \text{ cm}$$

PROSPECT : mesure d'une IBD.



1. Signal de scintillation dans un segment, ou plusieurs.

- γ d'annihil. peuvent voyager $\sim 20 \text{ cm}$
- $0.8 < E_{\text{cluster}} < 7.2 \text{ MeV}$
- PSD compatible avec e^{\pm}, γ
(voir plus loin)

2. Signal de scintillation dans un seul segment.

- $0.46 < E_{\text{cluster}} < 0.6 \text{ MeV}$
- PSD non-compatible avec e^{\pm}, γ

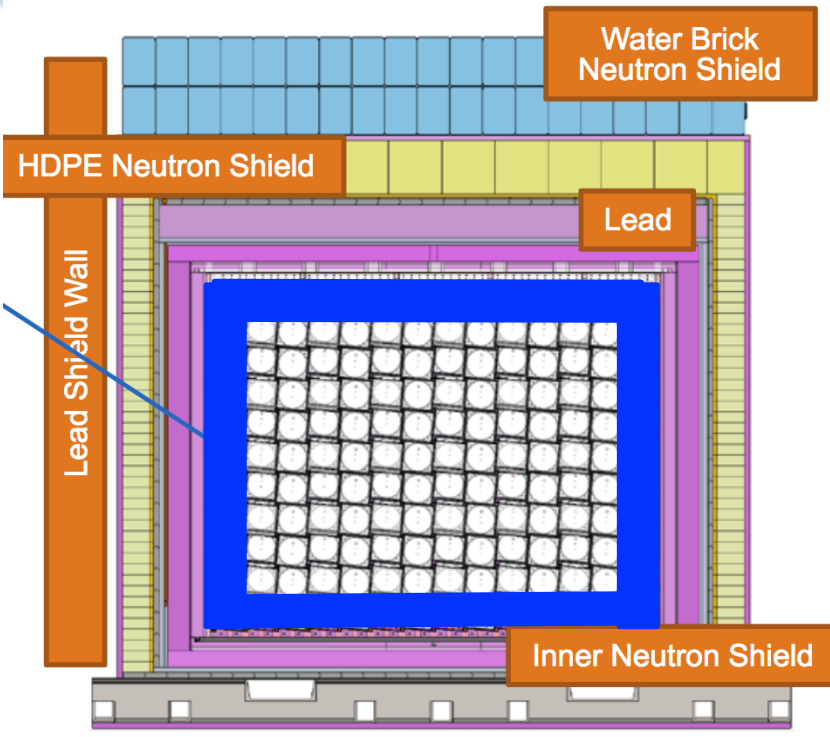
3. Former une paire **prompt**+**retardé**

- $1 < \Delta t < 120 \mu\text{s}$ ($\langle \Delta t \rangle \sim 50 \mu\text{s}$).
- Segment le + énergétique du prompt et segment du retardé sont adjacents.
- $\Delta z < 15 \text{ cm}$.

4. Muon Veto

Élimine toute paire avec prompt ou retardé $< 100 \mu\text{s}$ après un muon (= $E_{\text{cluster}} > 15 \text{ MeV}$)

PROSPECT : mesure d'une IBD.



5. Veto de multiplicité

Élimine toute paire avec prompt ou retardé à moins de $200 \mu\text{s}$ d'un autre retardé (parfois muon produit plusieurs neutrons !)

6. Fiducialisation

Élimine toute paire avec prompt ou retardé mesuré dans la couche externe, ou à moins de 15 cm de l'extrémité d'un segment. (bruit de fond vient le plus souvent de l'extérieur)

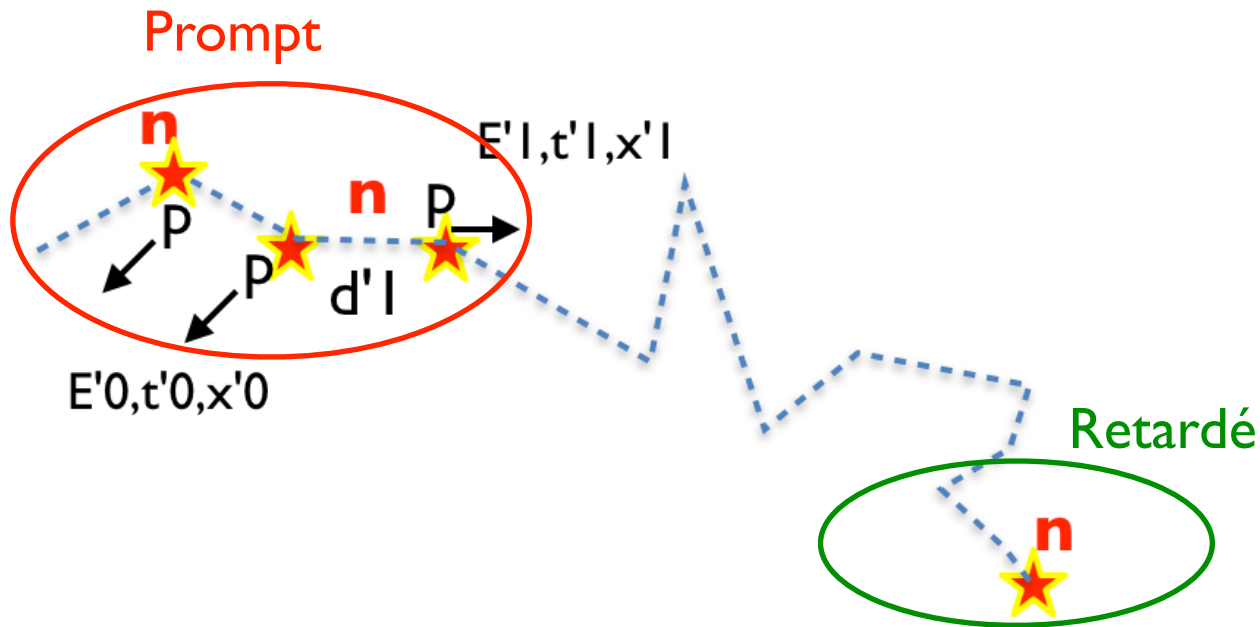
Stratégie de PROSPECT

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Parmi les points clefs pour une mesure précise, le plus difficile à respecter pour PROSPECT: **Bruits de fond !**

Raison : un détecteur en surface est bombardé de neutrons rapides produits dans l'atmosphère, ou près de lui, par un μ atmosphérique (spallation).

Ils constituent un bruit de fond, en imitant la signature de l'IBD.



Stratégie de PROSPECT

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Les **bruits de fond** : un point particulièrement délicat pour PROSPECT : il ne bénéficie que d'un **overburden de 1 mwe**.

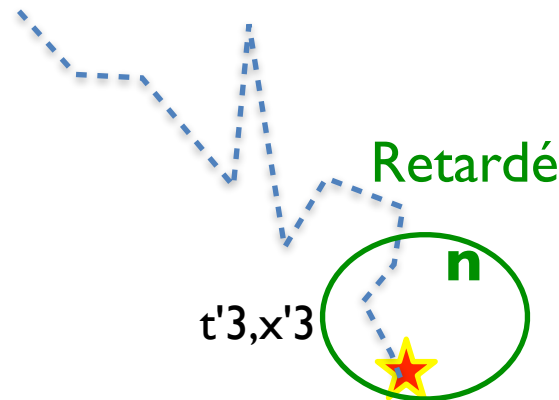
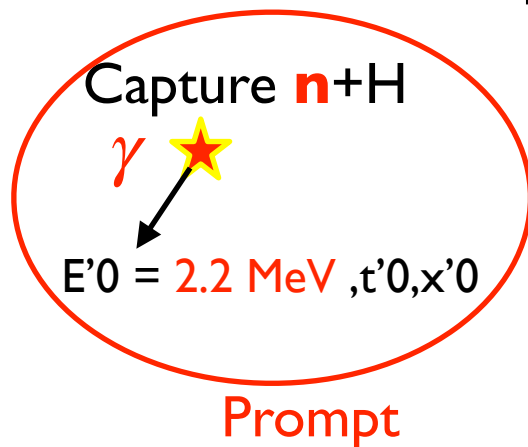
Overburden: quantité de matière au-dessus du détecteur, exprimée en mètres-équivalent-eau, ou m.w.e (meter of water equivalent).

Comparaison: STEREO bénéficie de **15 mwe**.

Ainsi : **> 10 fois plus neutrons atmosphériques atteignent PROSPECT**

Comme ils sont le bruit de fond principal : **> 10 fois plus de bruit de fond !**

Note : aussi beaucoup plus de bruits de fond **accidentels**.



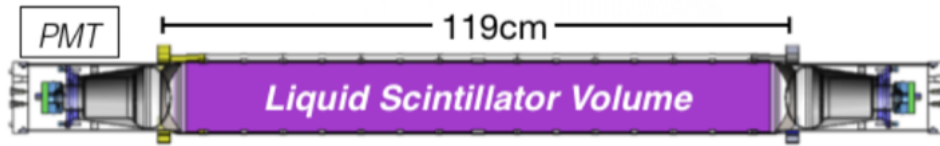
Prompt et retardé dus à particules différentes.

*Tous les Δt et les distances entre **prpt** et **rtrd** équiprobables.*

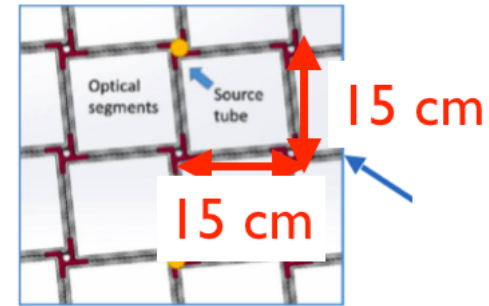
Stratégie de PROSPECT

Donc: priorité de PROSPECT = contrôler les bruits de fond.

Solution : **SEGMENTATION** ! D'où le design sophistiqué de PROSPECT.

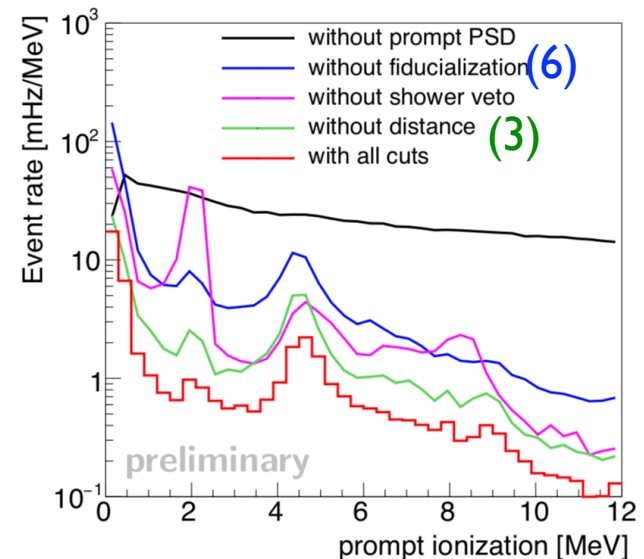


Comparaison des temps d'arrivée et des N_{ph} dans les 2 PMT $\Rightarrow z$



Il permet de localiser un prompt ou un retardé avec une précision de $\sigma_x, \sigma_y \sim 15 \text{ cm}$ et $\sigma_z \sim 15 \text{ cm}$.

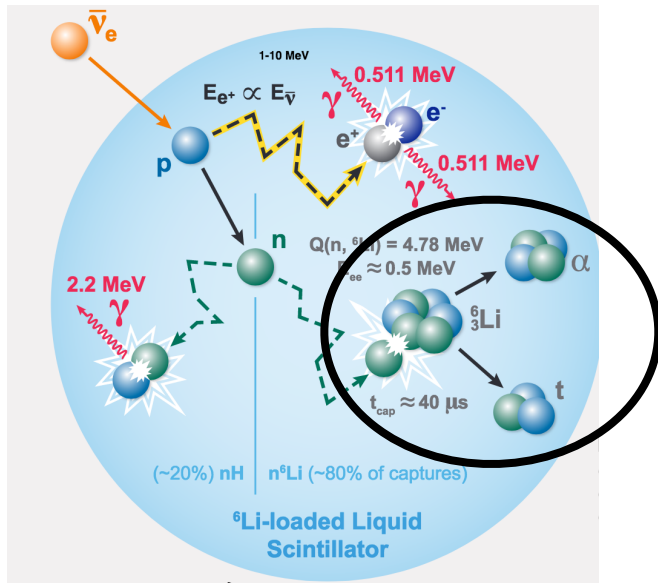
\rightarrow Grand pouvoir de réjection des bruits de fond pour les coupures topologiques (3) et de fiducialisation (6) **sans perdre trop de signal.**



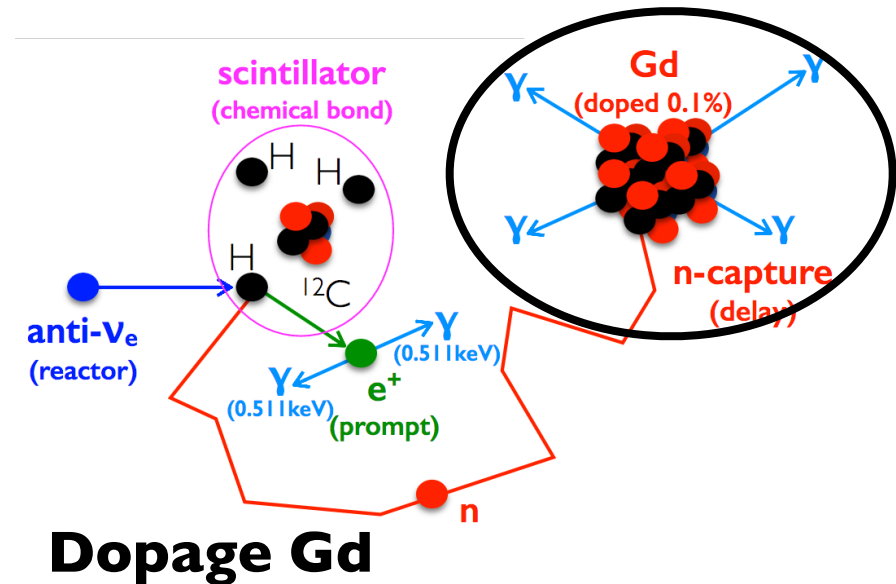
Stratégie de PROSPECT

La **segmentation** à entrainé la mise au point d'un liquide scintillant particulier : **dopé au ${}^6\text{Li}$** (0.1 % de la masse).

Pourquoi pas du **Gd**, comme beaucoup d'autres (ex: STEREO) ?



Dopage ${}^6\text{Li}$



Parce que plusieurs γ issus du Gd peuvent facilement voyager $> 50 \text{ cm}$!

→ plusieurs segments touchés, certains assez loin → ~~segmentation~~

Les α et ${}^3\text{H}$, eux, déposent leur énergie en quelques cm !

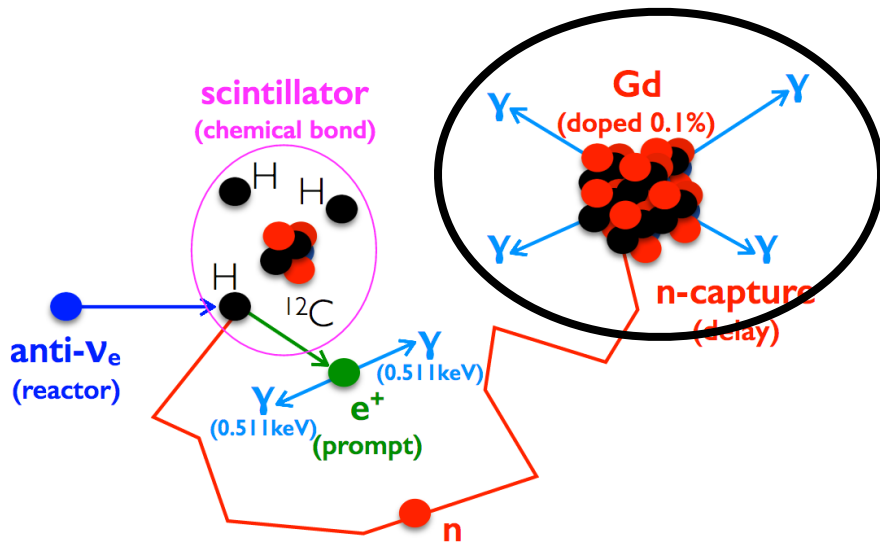
Stratégie de PROSPECT

La **segmentation** à entrainé la mise au point d'un liquide scintillant particulier : **dopé au ${}^6\text{Li}$** (0.1 % de la masse).

Mais perte d'une caractéristique capitale du Gd:

Les γ issus du Gd fournissent un pulse très clair et typique : $E_{\text{rec}} = 8 \text{ MeV}$.

Permet de déterminer sans erreur qui est le cluster prompt ($E_{\text{rec}} < 7 \text{ MeV}$) et qui est le retardé ($E_{\text{rec}} > 7 \text{ MeV}$).



Par quoi remplacer cela dans le cas de PROSPECT ?

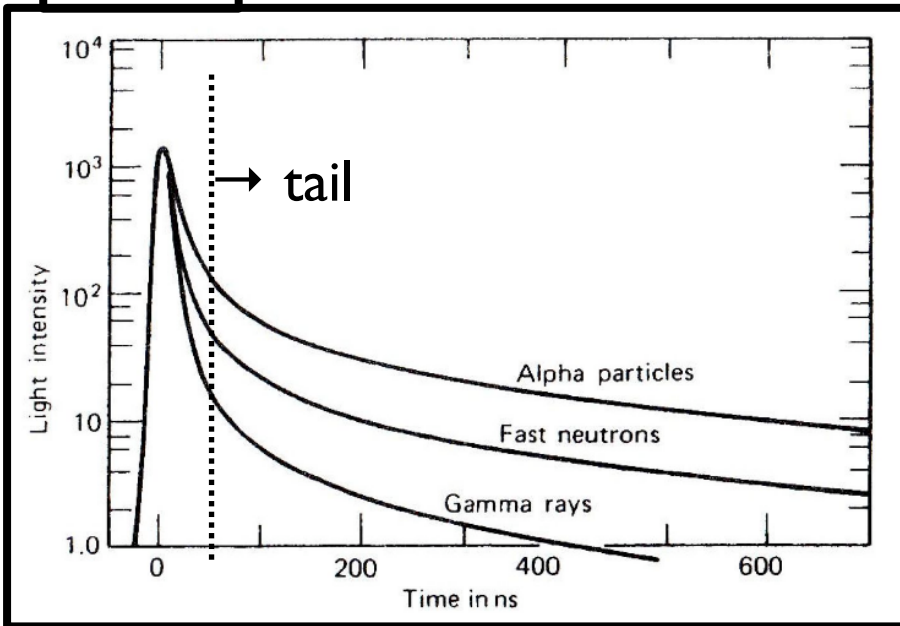
→ Pulse Shape Discrimination (PSD)

Stratégie de PROSPECT

La R&D du liquide scintillant de PROSPECT n'a pas concerné que le dopage au ${}^6\text{Li}$.

Il a fallu aussi assurer une excellente PSD.

Rappel



Variable pour distinguer les e^\pm , γ des α , ${}^3\text{H}$ et fast neutrons (via proton recoils)

$$R_{\text{PSD}} = Q_{\text{tail}}/Q_{\text{tot}}$$

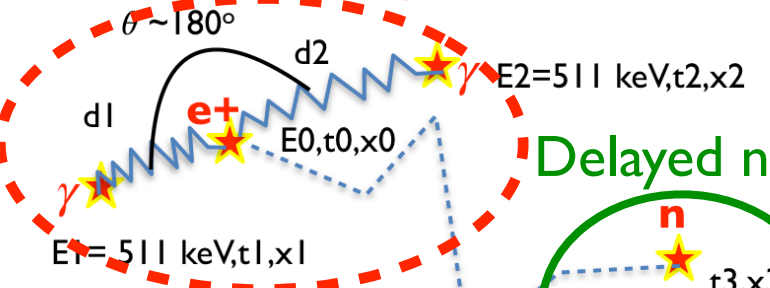
Stratégie de PROSPECT

La R&D du liquide scintillant de PROSPECT n'a pas concerné que le dopage au ^6Li .

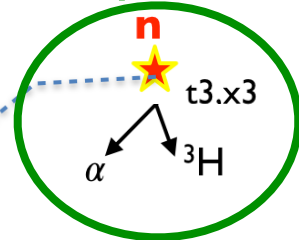
Il a fallu aussi assurer une excellente PSD, qui permet aussi de réduire encore les bruits de fond neutrons rapides (crucial)!

IBD

Prompt, e^\pm, γ

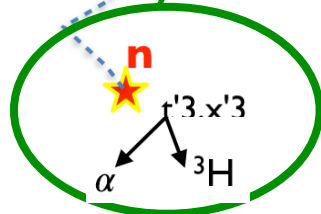


Delayed n

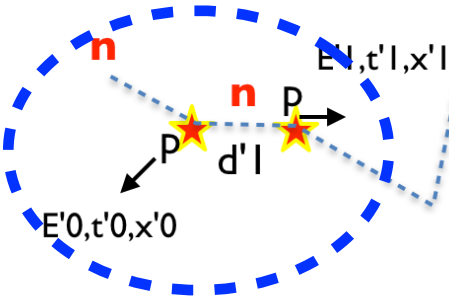


$$R_{\text{PSD}} = Q_{\text{tail}} / Q_{\text{tot}}$$

Delayed n

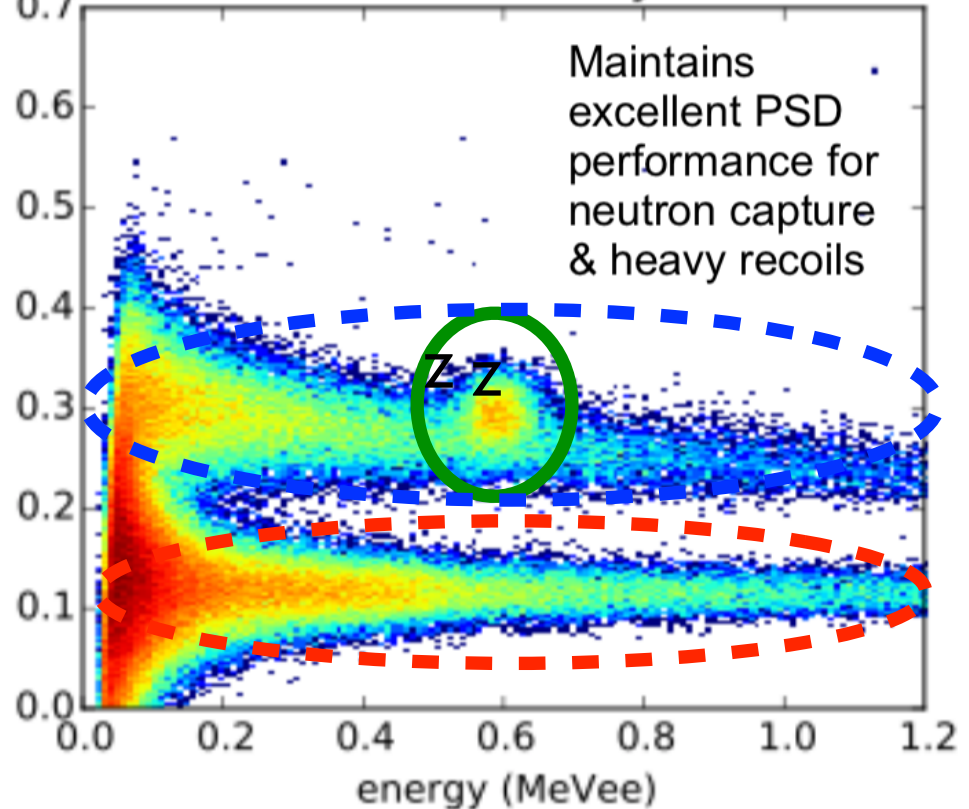


Bruit de fd fast n



Prpt : proton recoils dus au neutron.

PSD for Cf in LiEJ-309



Stratégie de PROSPECT

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Pour réduire **l'incertitude statistique**, PROSPECT exploite son **budget élevé** (\sim STEREO/SoLid \times 3).

- 4 tonnes de liquide scintillant (\sim STEREO/SoLid \times 2)

De plus: le réacteur HFIR a une $PW_{th} = 85$ MW (\sim STEREO/SoLid \times 1.5).

→ Malgré la perte d'efficacité due à la sélection plus stricte pour contrôler les bruits de fond, **\sim 2 fois plus de neutrinos collectés par jour !**

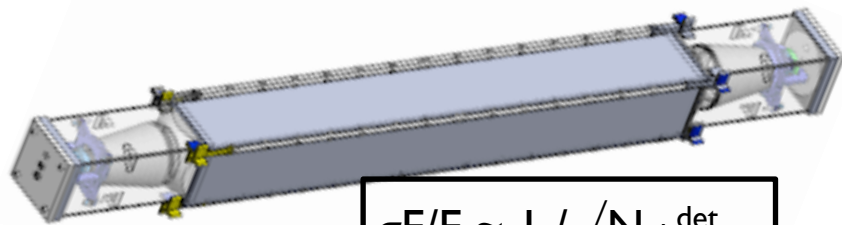
* * *

PROSPECT maximise sa sensibilité à l'oscillation grâce à une

exceptionnelle **Résolution en énergie** : $\sigma E/E = 4.5\%$ à 1 MeV !

- due à la qualité du liquide scintillant

- aussi beaucoup à l'**efficacité de la collection des photons** par les PMTs.



$$\sigma E/E \sim 1 / \sqrt{N_{ph}^{det}}$$

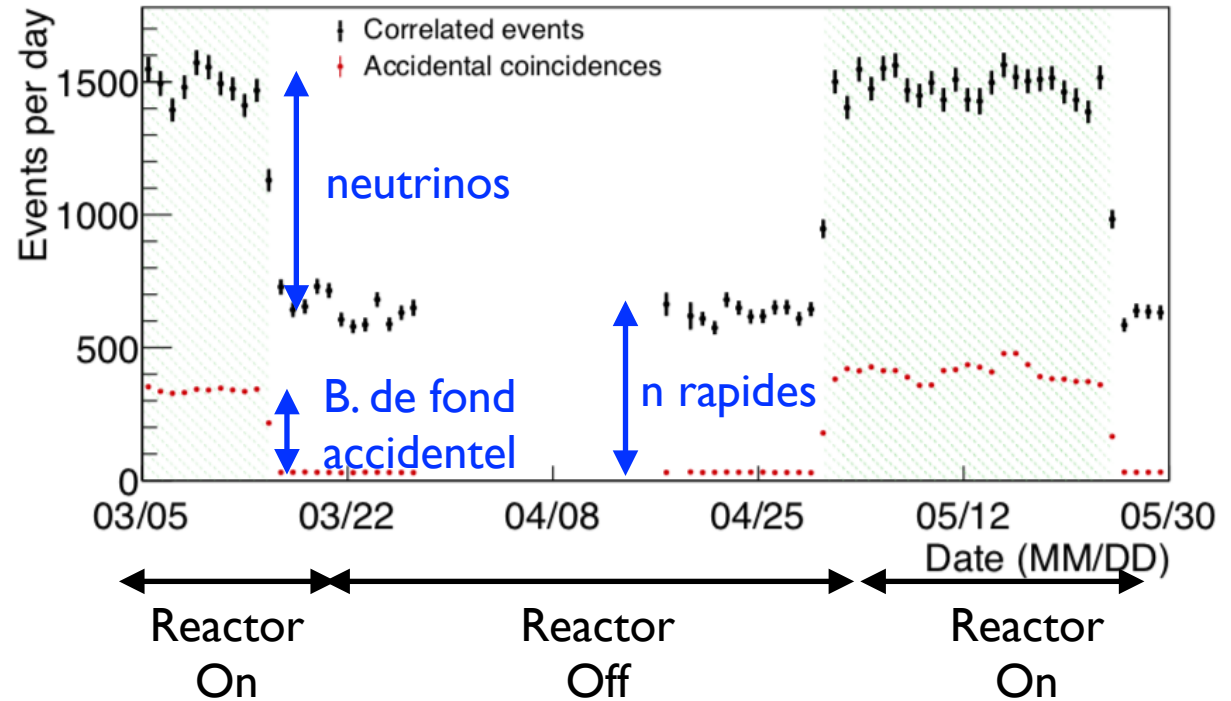
2 PMTs pour chaque segment !

*Très bon couplage, acceptation géométrique !
(voir plus loin comp avec STEREO)*

PROSPECT : bilan

- $\sim 770 \bar{\nu}_e / \text{jour}$
- $S/B \sim 0.80$
- $\sigma E/E = 4.5\% @ 1 \text{ MeV}$

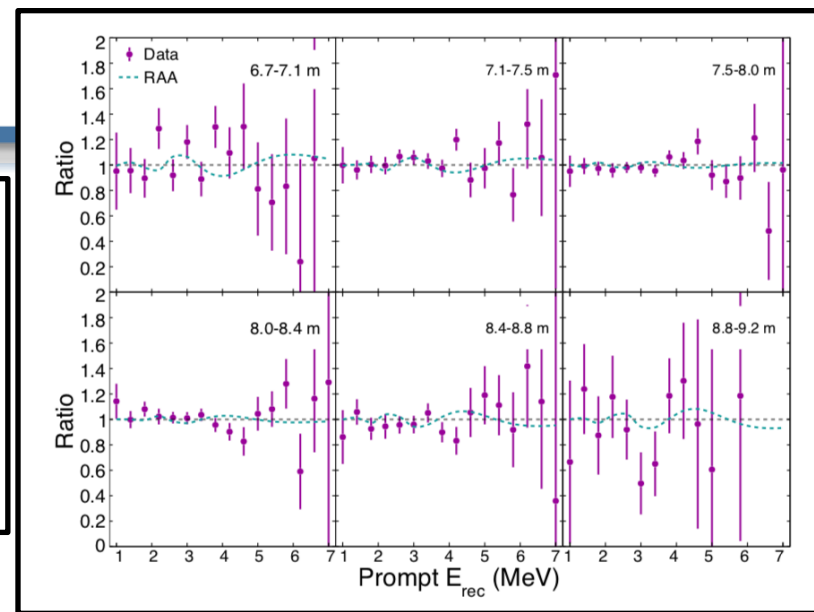
Prise de données 1er semestre 2018



PROSPECT : bilan

- $\sim 770 \bar{\nu}_e / \text{jour}$
- $S/B \sim 0.80$
- $\sigma E/E = 4.5\% @ 1 \text{ MeV}$

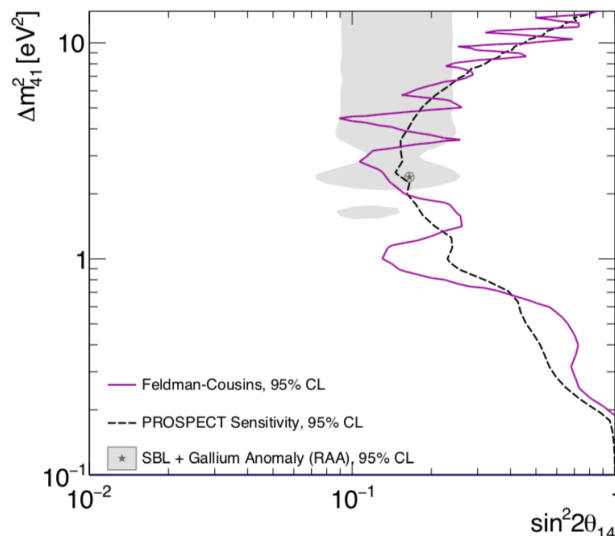
Rapports entre spectres en E mesuré et prédits, à 6 L différents.
Pas de distortion.



Seulement 33 jours de données, mais un premier résultat appréciable !

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e, L) = 1 - \sin^2 2\theta_s \sin^2 \Delta_{41}$$

$$\Delta_{41} = 1.27 \frac{\Delta m_{41}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}$$

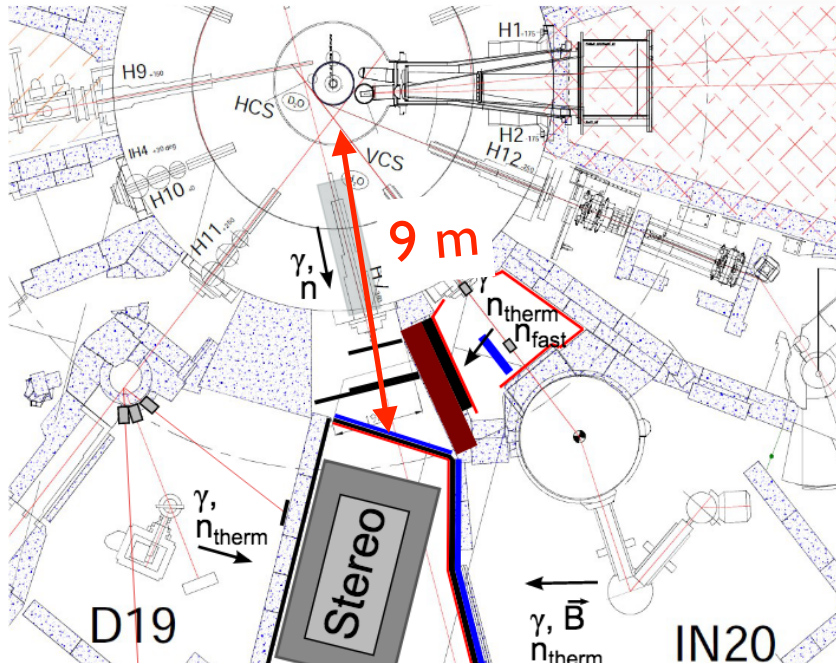


Les expériences précédentes avaient isolé une région probable dans l'espace des param. du neutrino stérile (partie I: "anomalie réacteur").

Une bonne partie maintenant exclue à 95% de niveau de confiance.

Vers une exclusion totale en 2020.

L'expérience STEREO



Baseline L : 9-11 m

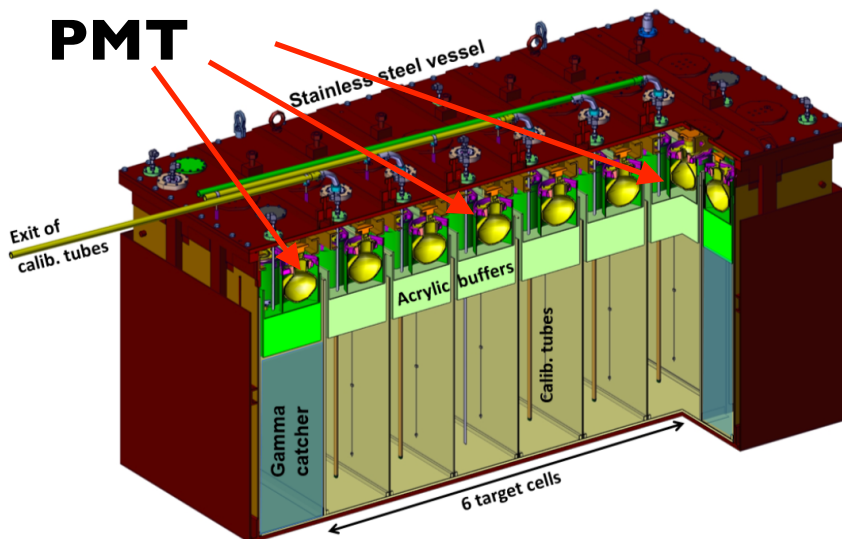
Cible & détection des neutrinos :

6 cuves de scintillateur organique liquide.

Dopé au Gd pour capture des neutrons.

Extrémités et côtés: cuves de "**gamma catchers**".

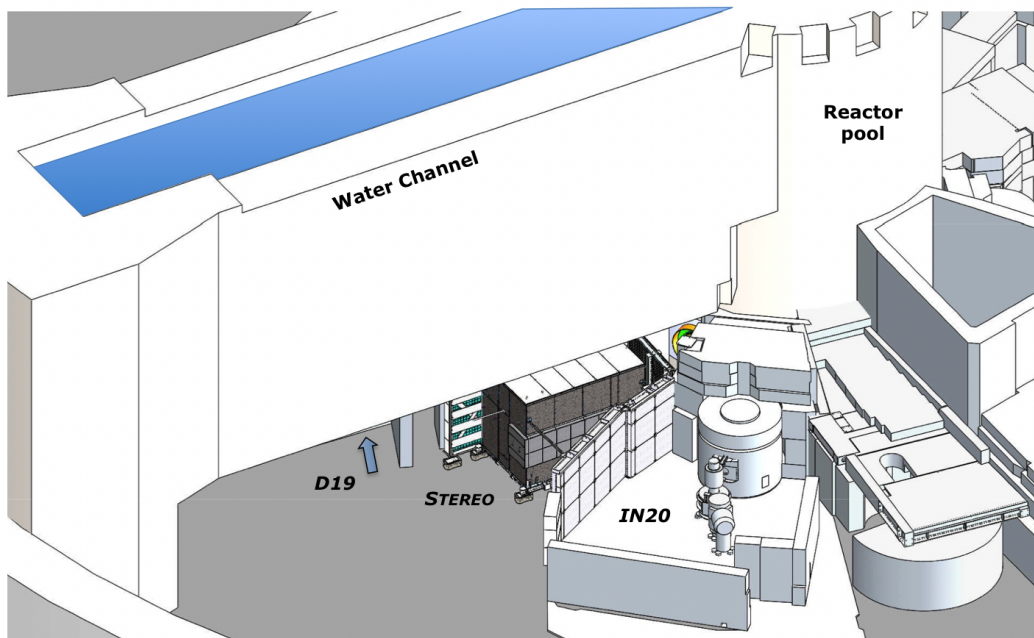
Pas de Gd, donc pas d'IBD, juste la mesure des gammas s'échappant des 6 cellules cibles.



γ de scintillation collectés par :

- Cellules cibles : 4 **PMT**
- γ catcher avant/arrière : 4 **PMT**
- γ catcher côtés : 8 **PMT**

L'expérience STEREO



Baseline L : 9-11 m

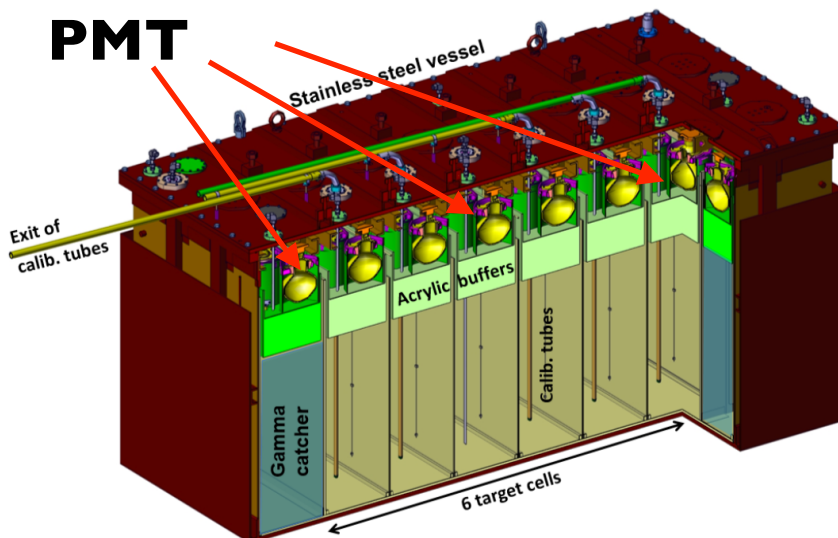
Cible & détection des neutrinos :

6 cuves de scintillateur organique liquide.

Dopé au Gd pour capture des neutrons.

Extrémités et côtés: cuves de "**gamma catchers**".

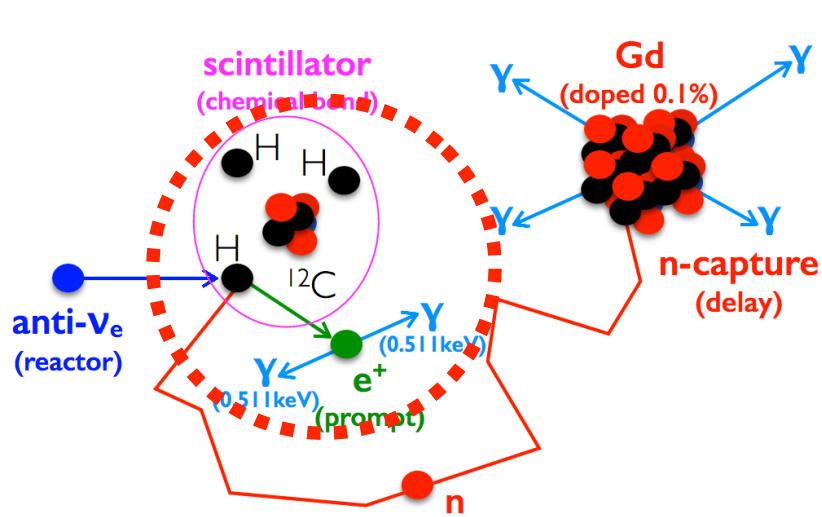
Pas de Gd, donc pas d'IBD, juste la mesure des gammas s'échappant des 6 cellules cibles.



γ de scintillation collectés par :

- Cellules cibles : **4 PMT**
- γ catcher avant/arrière : **4 PMT**
- γ catcher côtés : **8 PMT**

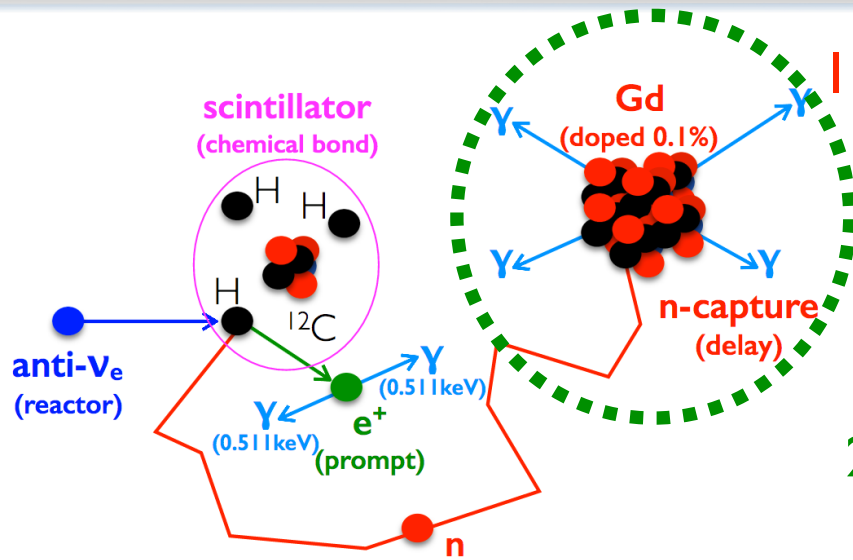
STEREO : mesure d'une IBD.



I. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $1.6 < E_{\text{cluster}} < 7.1 \text{ MeV}$
- γ d'annihil. : signal dans autres cuves autorisé si compatible avec $2 \cdot 511 \text{ keV}$

STEREO : mesure d'une IBD.



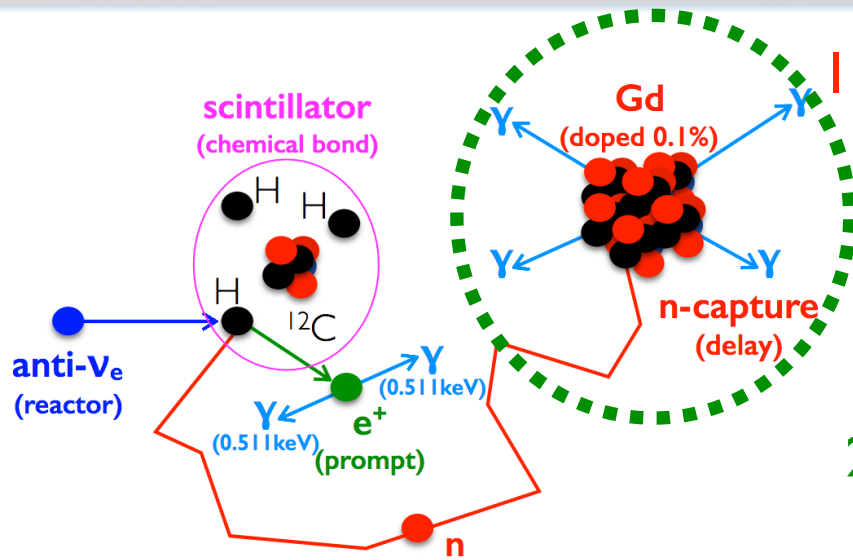
1. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $1.6 < E_{\text{cluster}} < 7.1 \text{ MeV}$
- γ d'annihil. : signal dans autres cuves autorisé si compatible avec $2 \times 511 \text{ keV}$

2. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $4.5 < E_{\text{cluster}} < 10 \text{ MeV}$
- γ du Gd : signal dans autres cuves autorisé si $> 1 \text{ MeV}$

STEREO : mesure d'une IBD.



1. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $1.6 < E_{\text{cluster}} < 7.1 \text{ MeV}$
- γ d'annihil. : signal dans autres cuves autorisé si compatible avec $2 \times 511 \text{ keV}$

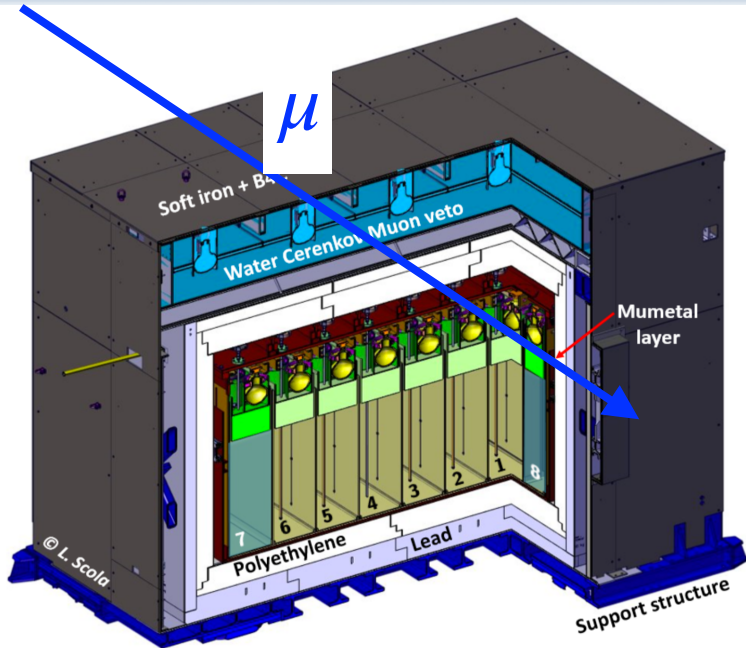
2. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $4.5 < E_{\text{cluster}} < 10 \text{ MeV}$
- γ du Gd : signal dans autres cuves autorisé si $> 1 \text{ MeV}$

3. Former une paire prompt+retardé

- $0.25 < \Delta t < 70 \mu\text{s}$ ($\langle \Delta t \rangle \sim 16 \mu\text{s}$).
- Distance prompt-retardé $< 60 \text{ cm}$.
(en gros: même cuve, ou cuves voisines)

STEREO : mesure d'une IBD.



1. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $1.6 < E_{\text{cluster}} < 7.1 \text{ MeV}$
- γ d'annihil. : signal dans autres cuves autorisé si compatible avec $2 \times 511 \text{ keV}$

2. Signal de scintillation dans une cuve de la cible

- $4.5 < E_{\text{cluster}} < 10 \text{ MeV}$
- γ du Gd : signal dans autres cuves autorisé si $> 1 \text{ MeV}$

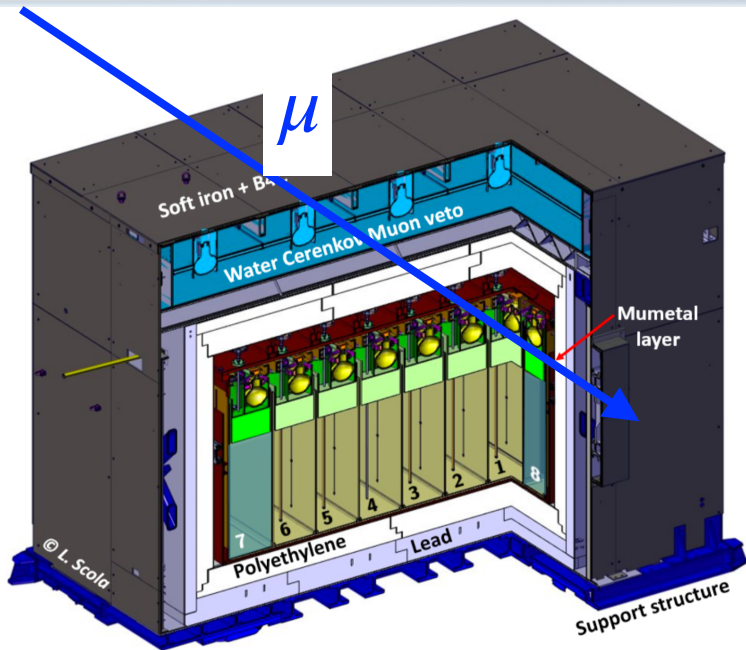
3. Former une paire prompt+retardé

- $0.25 < \Delta t < 70 \mu\text{s}$ ($\langle \Delta t \rangle \sim 16 \mu\text{s}$).
- Distance prompt-retardé $< 60 \text{ cm}$.
(en gros: même cuve, ou cuves voisines)

4. Muon Veto

Élimine toute paire avec prompt ou retardé $< 100 \mu\text{s}$ après un μ , repéré par un **détecteur dédié** : effet Cerenkov dans l'eau + PMT.

STEREO : mesure d'une IBD.



5. Veto de multiplicité

Élimine toute paire avec prompt ou retardé > 1.5 MeV à moins de $100 \mu\text{s}$ d'un autre retardé ou prompt. (parfois μ produit plusieurs neutrons !)

3. Former une paire

prompt+retardé

- $0.25 < \Delta t < 70 \mu\text{s}$ ($\langle \Delta t \rangle \sim 16 \mu\text{s}$).
- Distance prompt-retardé < 60 cm. (en gros: même cuve, ou cuves voisines)

4. Muon Veto

Élimine toute paire avec prompt ou retardé $< 100 \mu\text{s}$ après un μ , repéré par un **détecteur dédié** : effet Cerenkov dans l'eau + PMT.

STEREO : mesure d'une IBD.

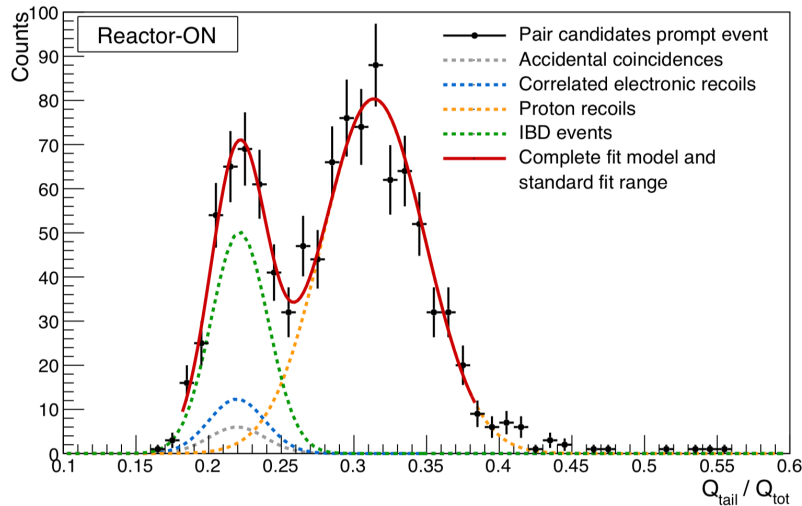


FIG. 2. Example of the PSD distribution for events in cell 1 with reconstructed energy in $[3.125, 3.625]$ MeV, collected in

5. Veto de multiplicité

Élimine toute paire avec prompt ou retardé > 1.5 MeV à moins de $100 \mu s$ d'un autre retardé ou prompt. (parfois μ produit plusieurs neutrons !)

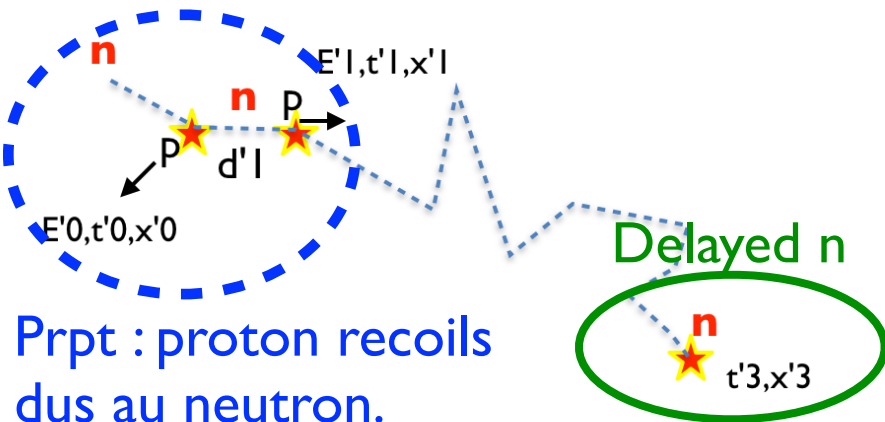
6. Pour prompt : PSD

Sélectionne prompts comptibles avec e^\pm, γ .

Élimine prompts comptibles avec recul de protons.

4. Muon Veto

Élimine toute paire avec prompt ou retardé $< 100 \mu s$ après un μ , repéré par un **détecteur dédié** : effet Cerenkov dans l'eau + PMT.



Stratégie de STEREO

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

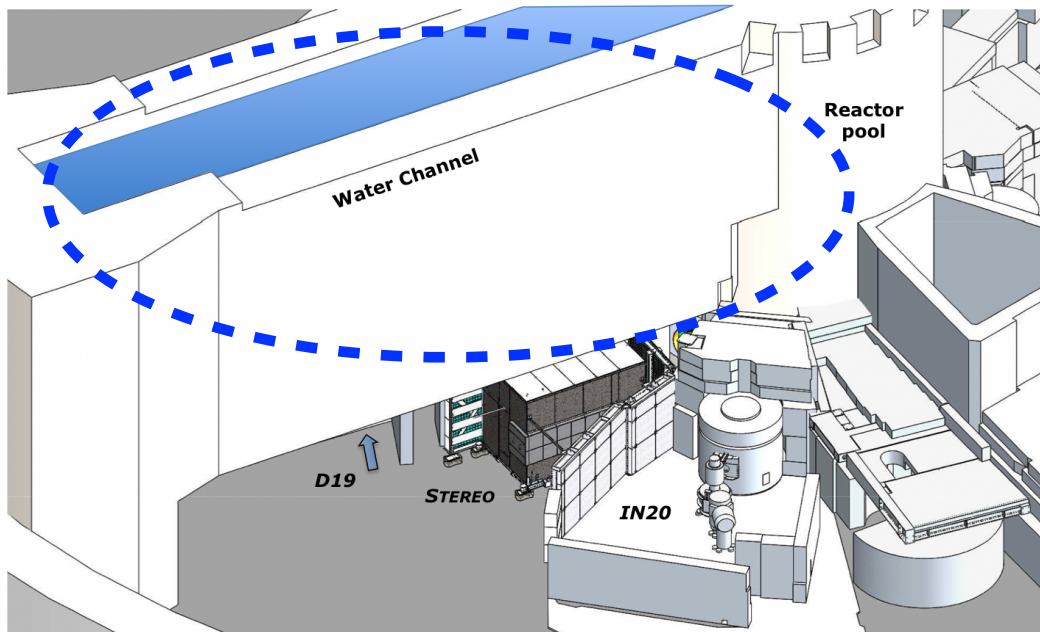
Prenons PROSPECT pour référence...

STEREO est **beaucoup moins segmenté.**

- $\delta z = 0.37$ m
- $\delta x \sim 0.9$ m , $\delta y \sim 1.2$ m

Raison : beaucoup moins exposé aux fast neutrons, donc **contrôle des bruits de fond plus facile.**

Ceci est dû à un **overburden** de 15 mwe !



Stratégie de STEREO

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Prenons PROSPECT pour référence...

STEREO est **beaucoup moins segmenté.**

- $\delta z = 0.37$ m
- $\delta x \sim 0.9$ m , $\delta y \sim 1.2$ m

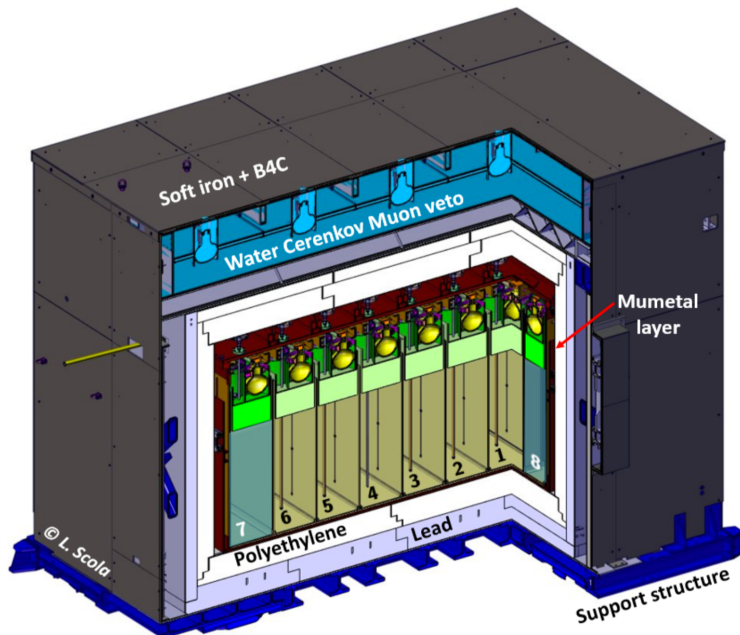
Raison : beaucoup moins exposé aux fast neutrons, donc **contrôle des bruits de fond plus facile.**

De plus : l'overburden a pu être complété par un **blindage de 65 t !**

+ un veto à muons !

PROSPECT ne peut peser plus de 30 t sous peine de passer au travers du plancher !

Pas de place pour un veto à muons.



Stratégie de STEREO

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Prenons PROSPECT pour référence...

STEREO est **beaucoup moins segmenté**.

Conséquence de ne pas avoir à segmenter : possible d'utiliser un liquide scintillant proche de celui employé par Double Chooz, dopé au Gd.

Les physiciens de STEREO ont participé à Double Chooz: **très bonne maîtrise de ce scintillateur !** R&D plus "simple"...

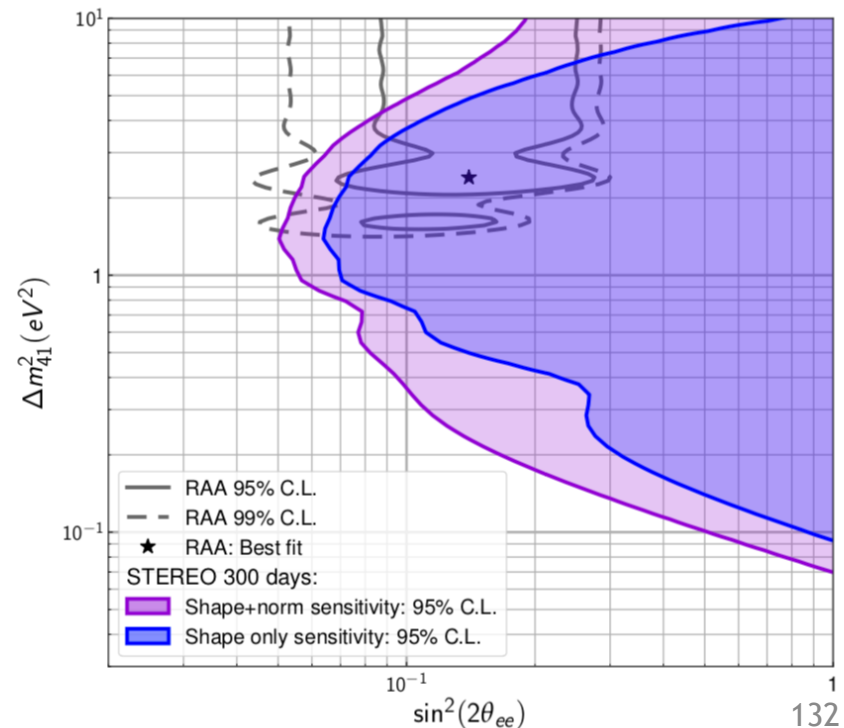
Stratégie de STEREO

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Pour STEREO, la segmentation sert surtout pour mesurer les distortions dans le spectre en énergie en fonction de L . Moins pour réduire b. de fond.

Lors de la conception de l'expérience, des simulations numériques ont montré qu'avec $\sigma L \sim 37 \text{ cm}$, une **sensibilité suffisante** au neutrino stérile pouvait être atteinte pour **exclure une grande partie de l'espace des paramètres en 2 ans**.

On supposait aussi $\sigma E/E = 8\% @ 1 \text{ MeV}$



Stratégie de STEREO

Conséquence de pouvoir se "contenter" de $\sigma E/E = 8\%$ @ 1 MeV :

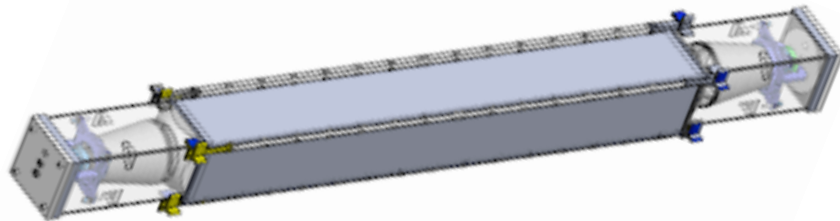
→ Moins de PMT nécessaires (plus facile/rapide à construire, système d'acquisition et traitement des données plus simple).

PROSPECT

vs.

STEREO

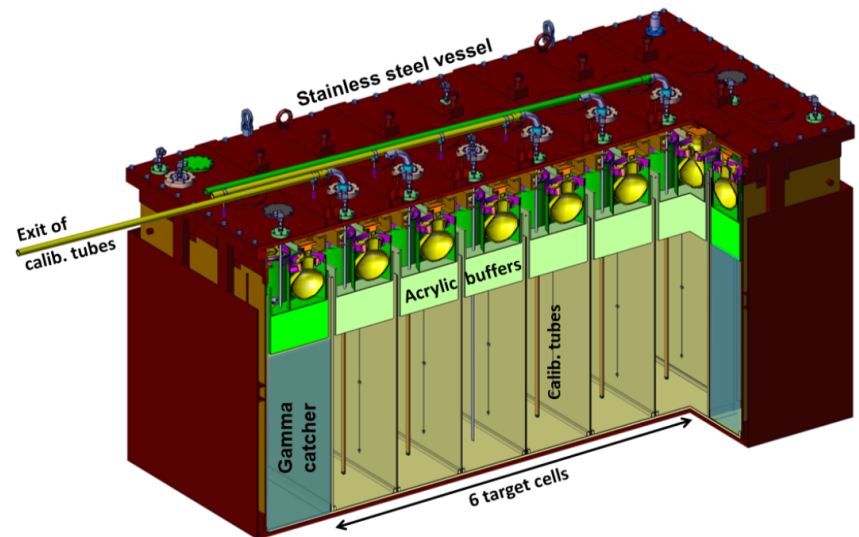
N_{ph} scintillés par MeV ~ similaire, mais collecte plus efficace dans PROSPECT



2 PMTs pour chaque segment !

Très bon couplage & acceptance géom.

PMT de 12.7 cm de diamètre.



4 PMT par cellule cible
PMT de 20.2 cm.

Stratégie de STEREO

Conséquence de pouvoir se "contenter" de $\sigma E/E = 8\%$ @ 1 MeV :

→ Moins de PMT nécessaires (plus facile/rapide à construire, système d'acquisition et traitement des données plus simple).

PROSPECT

vs.

STEREO

N_{ph} scintillés par MeV ~ similaire, mais collecte plus efficace dans PROSPECT

$$N_{\text{ph}} = 8000 / \text{MeV}$$

$$N_{\text{ph}} = 6400 / \text{MeV}$$

308 PMT pour
4t de Liquide
Scintillant

24 PMT pour
2t de Liquide
Scintillant

$$= 77 \text{ PMT/tonne}$$

$$= 12 \text{ PMT/tonne}$$

$$\text{Accept. géom} \propto (12.7 \text{ cm})^2$$

$$\text{Accept. géom} \propto (20.2 \text{ cm})^2$$

$$N_{\text{ph}}^{\text{det}}(\text{PRO}) = N_{\text{ph}}^{\text{det}}(\text{STE}) \times (77/12) \times (12.5/20.2)^2 \times (8000/6400)$$

Stratégie de STEREO

Conséquence de pouvoir se "contenter" de $\sigma E/E = 8\%$ @ 1 MeV :

→ Moins de PMT nécessaires (plus facile/rapide à construire, système d'acquisition et traitement des données plus simple).

PROSPECT

vs.

STEREO

N_{ph} scintillés par MeV ~ similaire, mais collecte plus efficace dans PROSPECT

$$N_{\text{ph}} = 8000 / \text{MeV}$$

$$N_{\text{ph}} = 6400 / \text{MeV}$$

308 PMT pour
4t de Liquide
Scintillant

Valeurs trouvées
dans leurs publications.

24 PMT pour
2t de Liquide
Scintillant

$$= 77 \text{ PMT/tonne}$$

$$= 12 \text{ PMT/tonne}$$

$$\text{Accept. géom} \propto (12.7 \text{ cm})^2$$

$$\text{Accept. géom} \propto (20.2 \text{ cm})^2$$

$$N_{\text{ph}}^{\text{det}}(\text{PRO}) = 260 \times (77/12) \times (12.5/20.2)^2 \times (8000/6400) = 800 / \text{MeV}$$
$$= 850 / \text{MeV}$$

Stratégie de STEREO

Conséquence de pouvoir se "contenter" de $\sigma E/E = 8\%$ @ 1 MeV :

→ Moins de PMT nécessaires (plus facile/rapide à construire, système d'acquisition et traitement des données plus simple).

PROSPECT

vs.

STEREO

N_{ph} scintillés par MeV ~ similaire, mais collecte plus efficace dans PROSPECT

$$N_{ph} = 8000 / \text{MeV}$$

$$N_{ph} = 6400 / \text{MeV}$$

308 PMT pour
4t de Liquide
Scintillant

Valeurs trouvées
dans leurs publications.

24 PMT pour
2t de Liquide
Scintillant

$$= 77 \text{ PMT/tonne}$$

$$= 12 \text{ PMT/tonne}$$

$$\text{Accept. géom} \propto (12.7 \text{ cm})^2$$

$$\text{Accept. géom} \propto (20.2 \text{ cm})^2$$

$$\sigma E/E(\text{STE}) = \sigma E/E(\text{PRO}) \times \sqrt{3.1} = 4.5\% \times \sqrt{3.1} = 8\% \text{ @ 1 MeV}$$

STEREO bilan

- $\sim 400 \bar{\nu}_e / \text{jour}$ (PROSPECT : 770)
 - Avec $PW_{th} = 58 \text{ MW}$ (PROSPECT : 85 MW) et $M_{cible} = 2t$ (PROSPECT : 4t)
On attend naïvement $770 \times 58 / 85 \times 2 / 4 = 260 / \text{jour}$
 - Mais: 20% des segments de PROSPECT non encore sous tension.
De plus: efficacité de PROSPECT 15% plus basse ! En effet, la segmentation n'arrange pas tout : bruit de fond sous contrôle mais un peu de signal sacrifié lors de la sélection.
- $S/B \sim 0.9$ (PROSPECT : 0.8)
- $\sigma_{E/E} = 8\% @ 1 \text{ MeV}$ (PROSPECT : 4.5%)

STEREO bilan

- $\sim 400 \bar{\nu}_e / \text{jour}$ (PROSPECT : 770)
- S/B ~ 0.9 (PROSPECT : 0.8)
- $\sigma E/E = 8\%$ @ 1 MeV (PROSPECT : 4.5%)

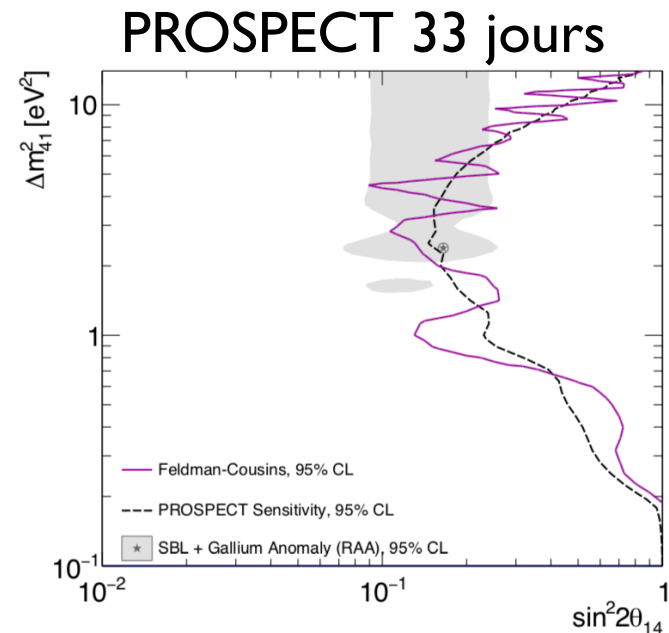
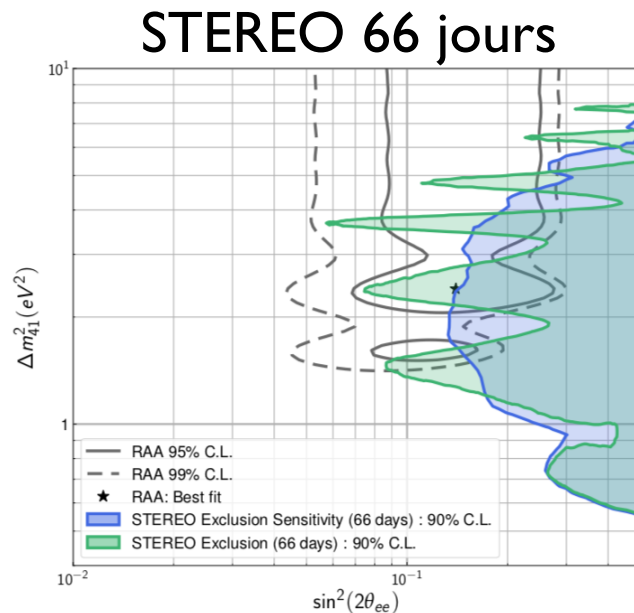
- ~ 2 fois moins de neutrinos par jour
- S/B similaire
- Résolution en Energie 2 fois pire



STEREO
devrait être
**moins
sensible**
que
PROSPECT

STEREO bilan

En effet, dans les premiers résultat publiés (printemps 2018), les contours d'exclusion sont similaires, mais il a fallu **une prise de données deux fois plus longue pour STEREO**.



Back to strategy : pourquoi faire STEREO si moins bon ?

Raison scientifique : il est difficile de croire aux résultats d'une expérience si ils ne sont pas reproduits par d'autres expériences indépendantes, soumises à des incertitudes et des risques d'erreur différents. On y reviendra avec SoLid.

Raison politico-scientifique : faire STEREO, c'était saisir une opportunité :

- Le site de l'ILL est idéal pour ce genre de manip (overburden, blindage, ...) et était disponible (bonnes relations avec les gens du CEA).
- L'expertise de Double Chooz était disponible.

Il était ainsi possible de construire **rapidement** et pour **pas cher** une expérience capable d'exclure en 1 ou 2 ans une grande partie de l'espace des paramètres, ou de voir un stérile s'il existe.

PROSPECT ferait mieux, mais commencerait plus tard, car plus complexe.
Si ≥ 1 an plus tard : Bingo pour STEREO.

Détecteur innovant et sophistiqué = moins robuste, +de pb inattendus...

L'expérience SoLid

Baseline L : 6.5-9 m

**Cible & détection des neutrinos :
12800 cubes de plastique
scintillant (PVT)**

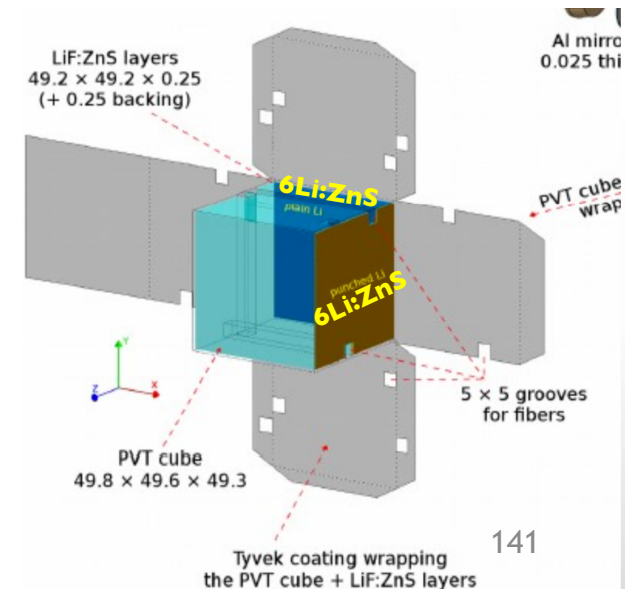
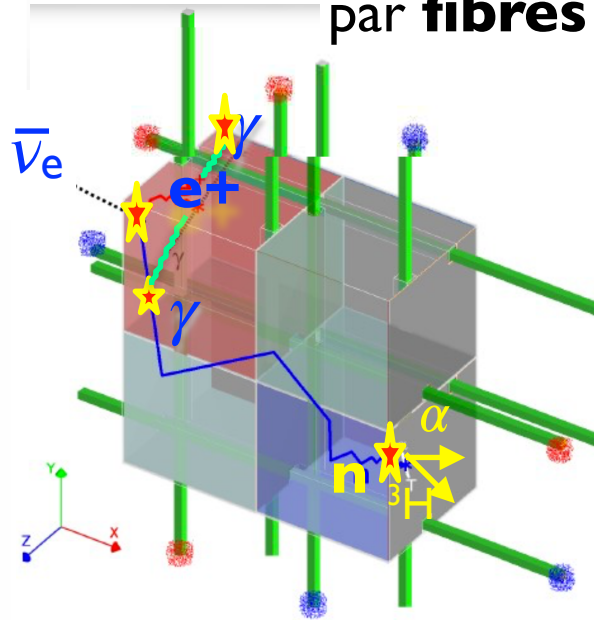
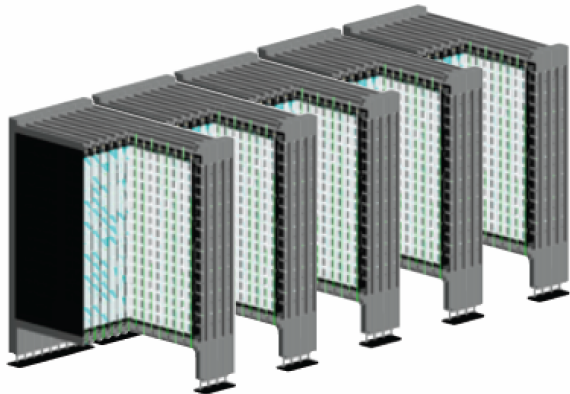
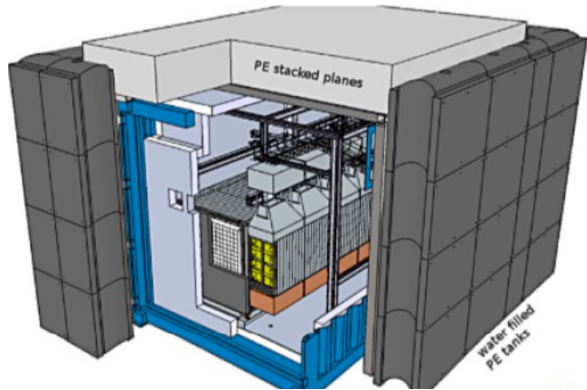
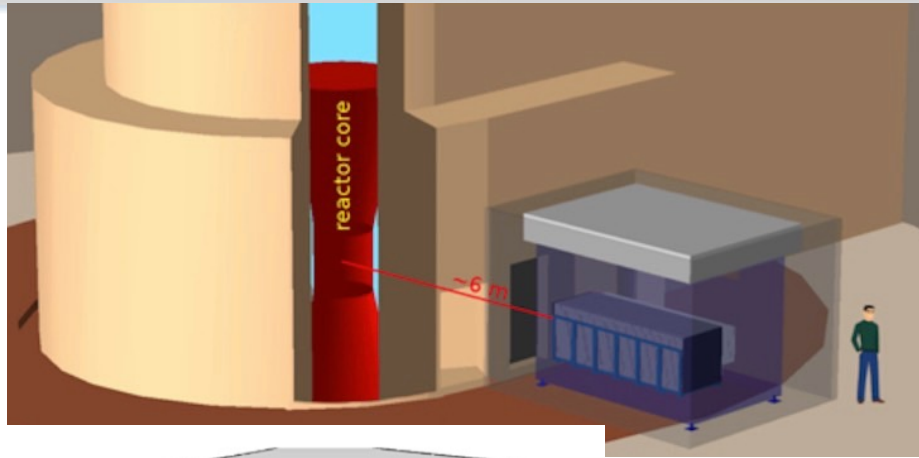
5 cm d'arête, 50 plans de 16×16.

Capture des neutrons

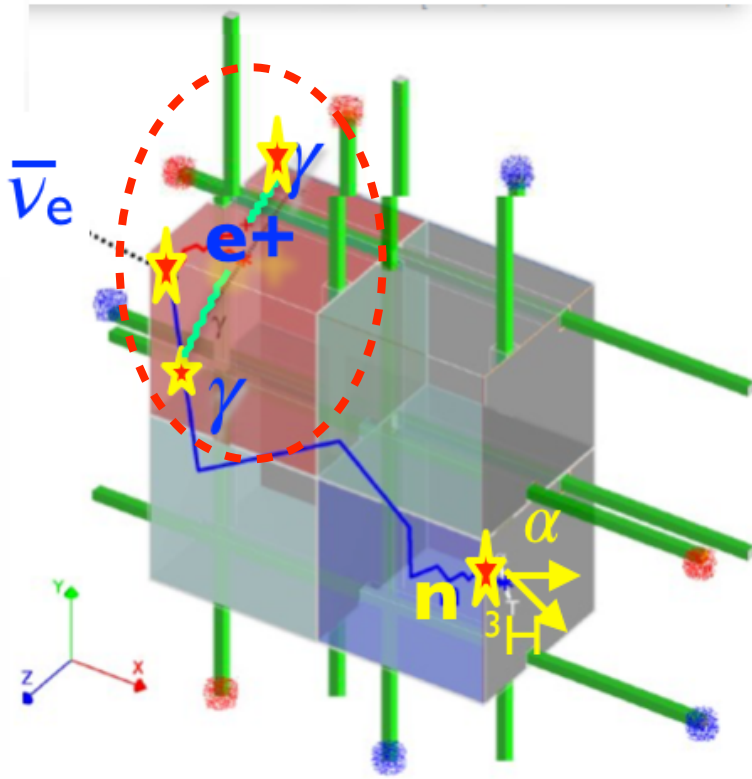
**${}^6\text{Li}$ réparti dans feuilles de
ZnS (scint. inorganique).**

2 feuilles de 250 μm sur 2 faces.

Lumière de scintillation collectée
par **fibres connectées à SiPMs**



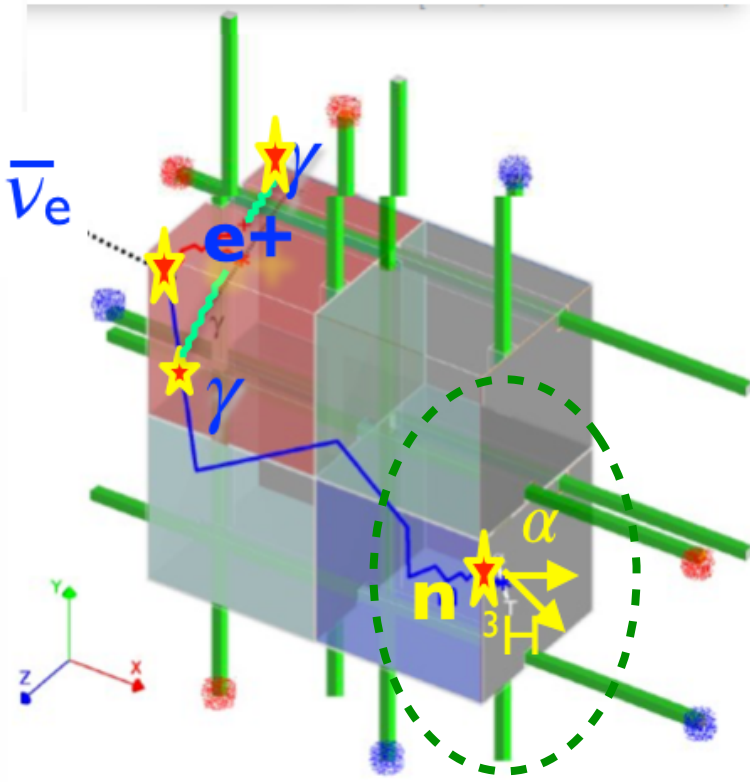
SoLid : Mesure d'une IBD (préliminaire)



I. Prompt : Signal de scintillation dans plusieurs cubes

- Pulse haut et très bref (~ 250 ns)
- $E_{\text{cluster}} > 2.0$ MeV
- other cubes : < 0.5 MeV (annihil. γ)

SoLid : Mesure d'une IBD (préliminaire)



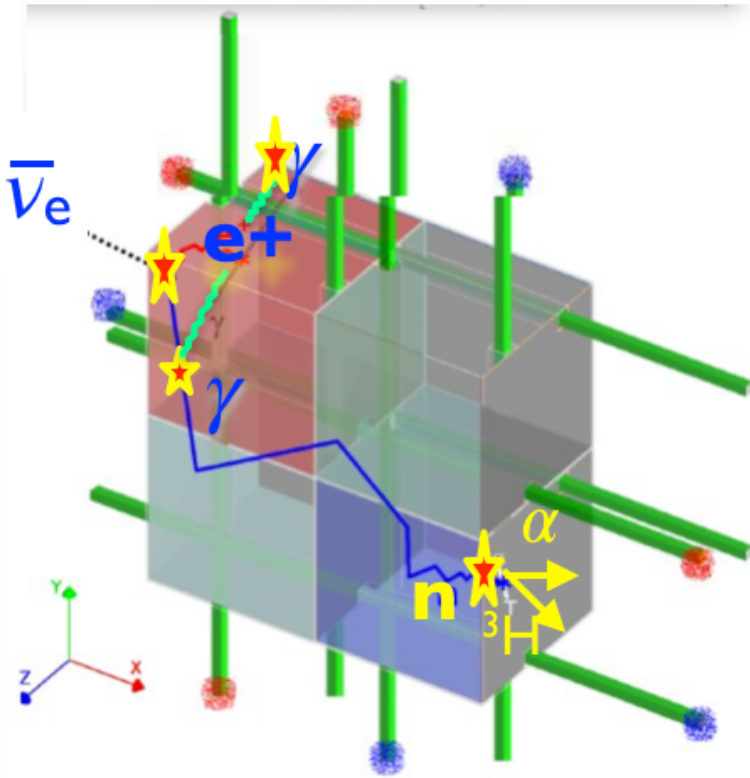
1. Prompt : Signal de scintillation dans plusieurs cubes

- Pulse haut et très bref (~ 250 ns)
- $E_{\text{cluster}} > 2.0$ MeV
- other cubes : < 0.5 MeV (annihil. γ)

2. Retardé : signal de scintillation dans une seul cube

- Pulse bas et long (~ 12 μs)
- Le α et le ${}^3\text{H}$ (dE/dx élevé) excitent des niveaux du ZnS qui sont longs à se desexciter.

SoLid : Mesure d'une IBD (préliminaire)



1. Prompt : Signal de scintillation dans plusieurs cubes

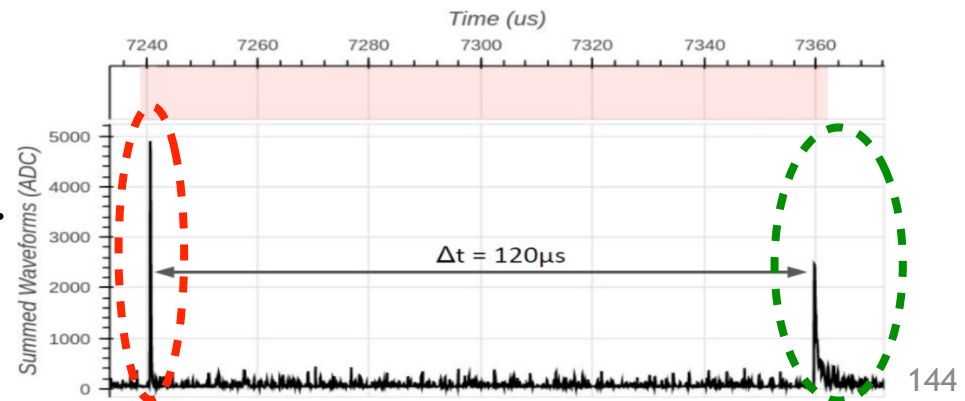
- Pulse haut et très bref (~ 250 ns)
- $E_{\text{cluster}} > 2.9$ MeV
- other cubes : < 0.5 MeV (annihil. γ)

2. Retardé : signal de scintillation dans une seul cube

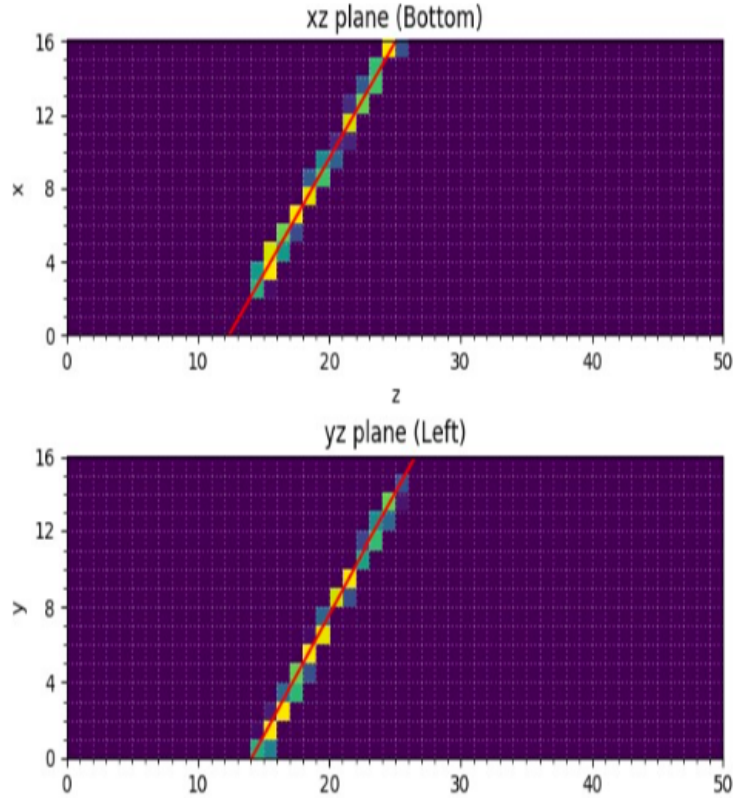
- Pulse bas et long (~ 12 μ s)
- Le α et le ${}^3\text{H}$ (dE/dx élevé) excitent des niveaux du ZnS qui sont longs à se desexciter.

3. Former une paire prompt+retardé

- $1 < \Delta t < 180$ μ s ($\langle \Delta t \rangle \sim 60$ μ s).
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z < 3$ cubes,
- $1 \leq \Delta R \leq 2.4$ cubes



SoLid : Mesure d'une IBD (préliminaire)



1. Prompt : Signal de scintillation dans plusieurs cubes

- Pulse haut et très bref (~ 250 ns)
- $E_{\text{cluster}} > 2.9$ MeV
- other cubes : < 0.5 MeV (annihil. γ)

2. Retardé : signal de scintillation dans une seul cube

- Pulse bas et long (~ 12 μ s)
- Le α et le ^3H (dE/dx élevé) excitent des niveaux du ZnS qui sont longs à se desexciter.

3. Former une paire

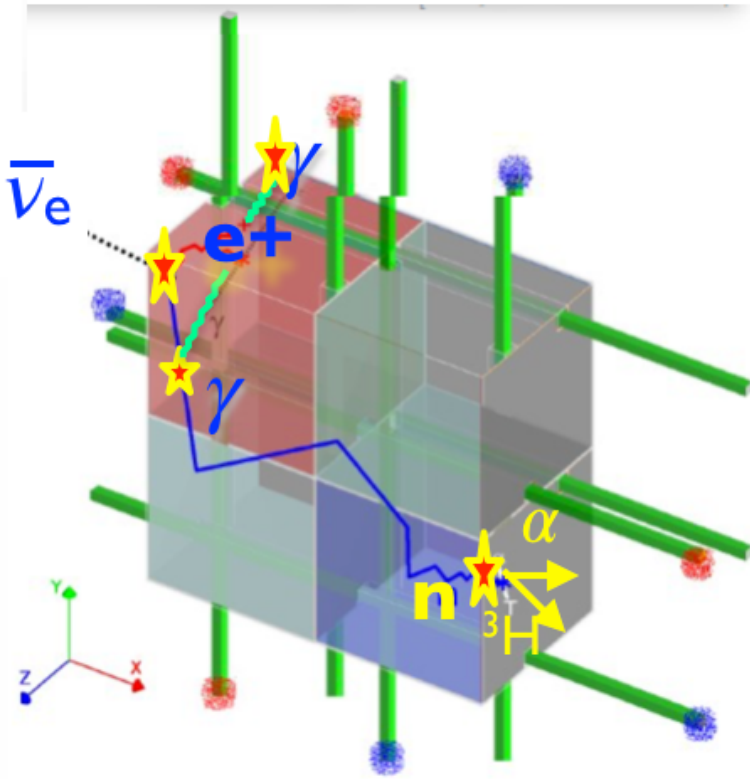
prompt+retardé

- $1 < \Delta t < 180$ μ s ($\langle \Delta t \rangle \sim 60$ μ s).
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z < 3$ cubes,
 $1 \leq \Delta R \leq 2.4$ cubes

4. Muon Veto

Élimine toute paire avec prompt ou retardé < 120 μ s après un μ , dont la trajectoire est directement reconstruite (haute segmentation !)

SoLid : Mesure d'une IBD (préliminaire)



5. Veto de multiplicité

Élimine toute paire avec prompt ou retardé à moins de $200 \mu\text{s}$ d'un autre retardé ou prompt.
(parfois μ produit plusieurs neutrons !)

Stratégie de SoLid

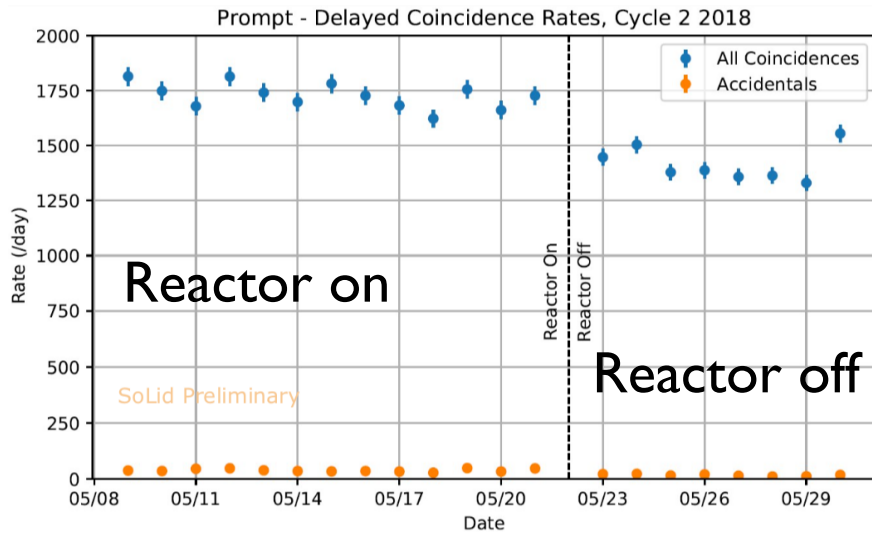
- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Le principal problème de SoLid est le contrôle des **bruits de fond**.

Avec la sélection préliminaire présentée au précédent slide **S/B ~ 1/10 !**

Bruit de fond dominé par les **neutrons rapides**.

C'est **10 fois pire** que STEREO et PROSPECT.



Pourtant, SoLid est **beaucoup plus segmenté**.

- $\delta x, y, z = 5$ cm (PROSPECT: 15 cm)

De plus, **overburden ~ 8 m.w.e**

Que se passe-t-il ?

Et c'est avec une coupure forte sur l'énergie du prompt $E_{\text{cube, max}} > 2. \text{ MeV}$. (PROSPECT : $> 0.8 \text{ MeV}$; STEREO : $> 1.6 \text{ MeV}$).

Sans cette coupure : **S/B ~ 1/100 !!**

SoLid et les bruits de fond I

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

SoLid ne peut pas utiliser de PSD !

Il faudrait un PVT scintillant beaucoup plus cher.

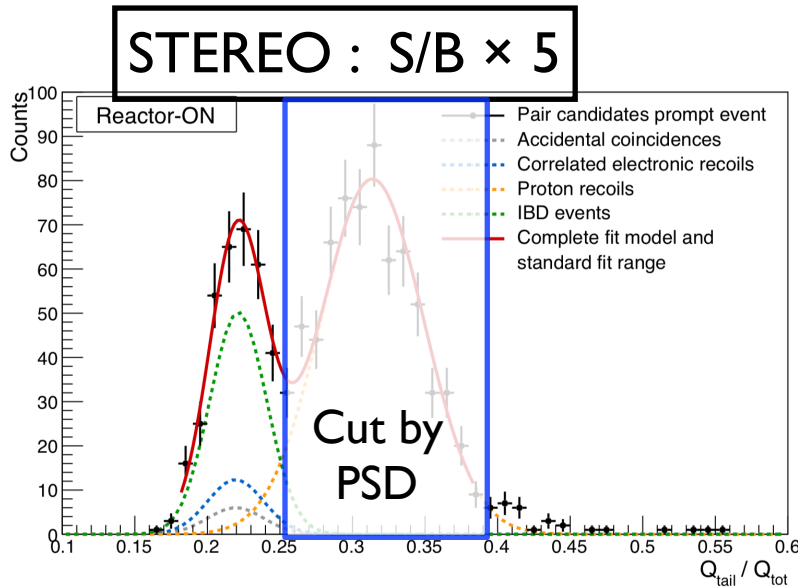
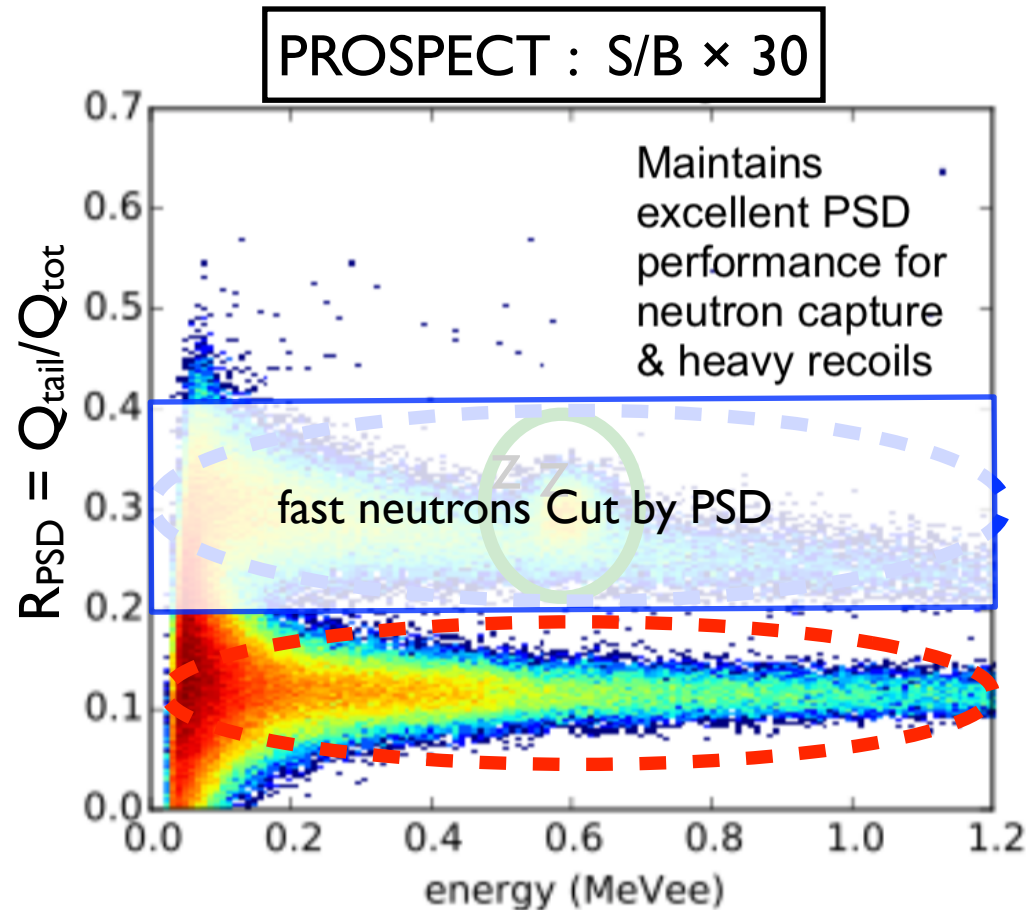


FIG. 2. Example of the PSD distribution for events in cell 1 with reconstructed energy in [3.125,3.625] MeV, collected in



SoLid et les bruits de fond I

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

SoLid ne peut pas utiliser de PSD !

Il faudrait un PVT scintillant beaucoup plus cher.

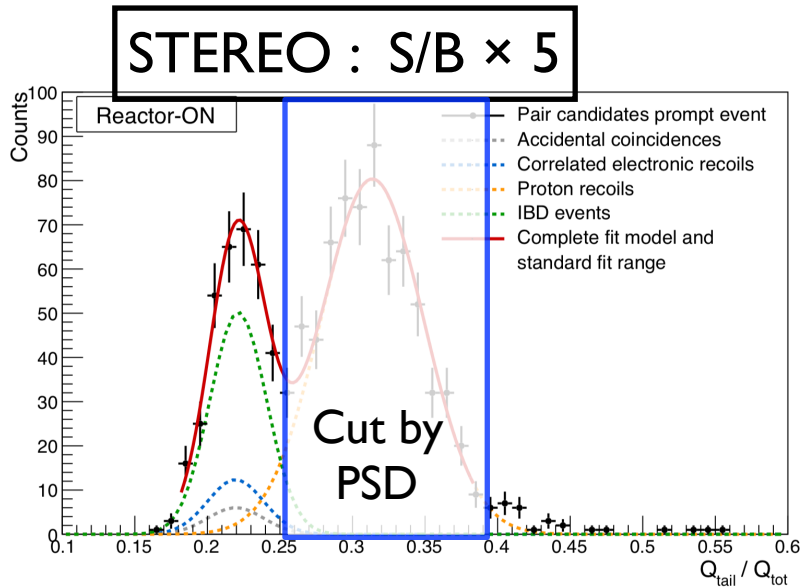
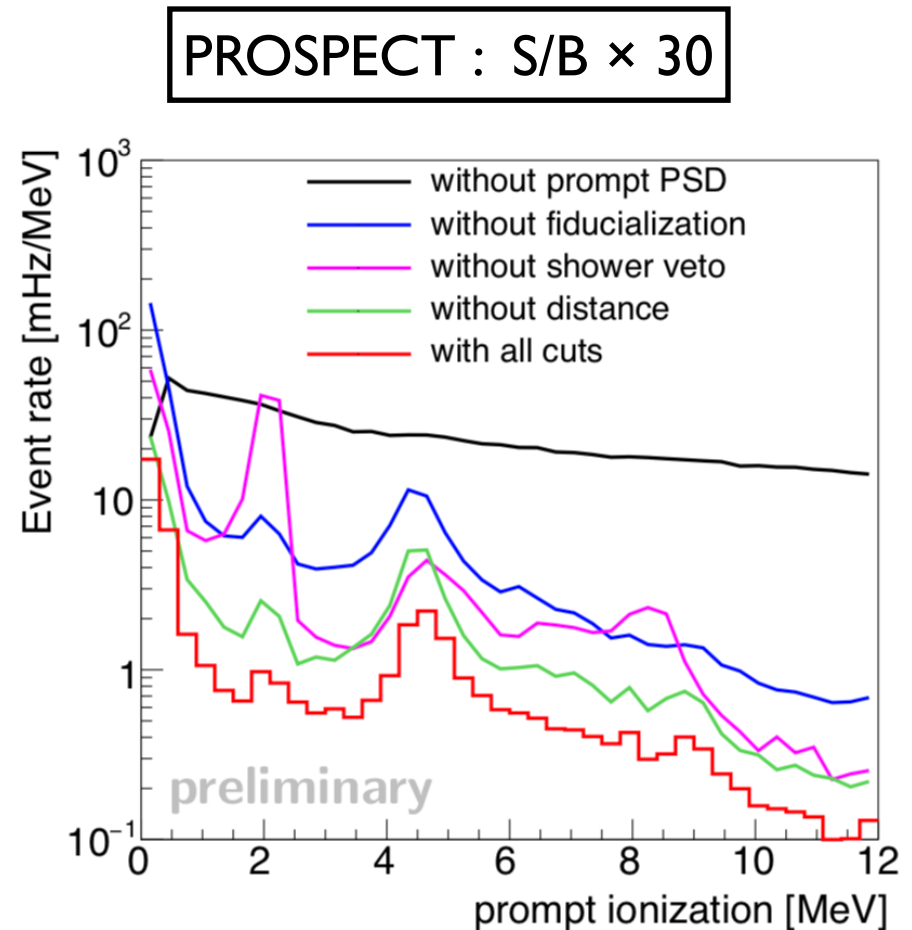


FIG. 2. Example of the PSD distribution for events in cell 1 with reconstructed energy in [3.125,3.625] MeV, collected in



SoLid et les bruits de fond I

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Comment SoLid compte-il s'en sortir ?

En exploitant **tout** le potentiel de sa segmentation, pour faire exactement ce que décrivait cette diapo (partie I)

Bruits de fond : solution II

Un détecteur suffisamment sensible pour trouver des critères de discrimination rejetant les bruits de fond en gardant l'essentiel du signal

Exemples :

Capable de détecter les deux γ
-faible E = détection difficile

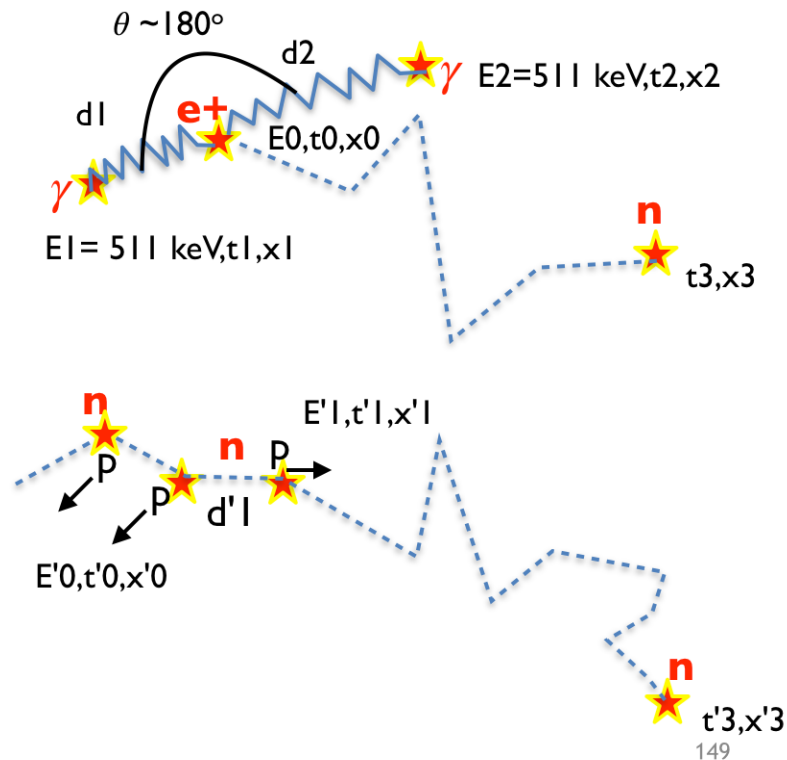
À la bonne E de 511 keV
-E'0 et E'1 ne sont en général pas à cette valeur

Avec le bon θ

-si 3 'proton recoils', pas d'angle particulier pour fast neutrons, etc.

Avec les bonnes distances d1, d2, d'1, etc.

Une bonne résolution en temps
- $t_0=t_1=t_2$ alors que $t'_1=t'_0+5$ ns
(les neutrons sont plus lents)



SoLid et les bruits de fond I

- Incertitude statistique.
- Bruits de fond.
- Résolution en énergie
- Biais de reconstruction ou de sélection

Comment SoLid compte-il s'en sortir ?

En exploitant **tout** le potentiel de sa segmentation, pour faire exactement ce que décrivait cette diapo (partie I)

Bruits de fond : solution II

Un détecteur suffisamment sensible pour trouver des critères de discrimination rejetant les bruits de fond en gardant l'essentiel du signal

Exemples :

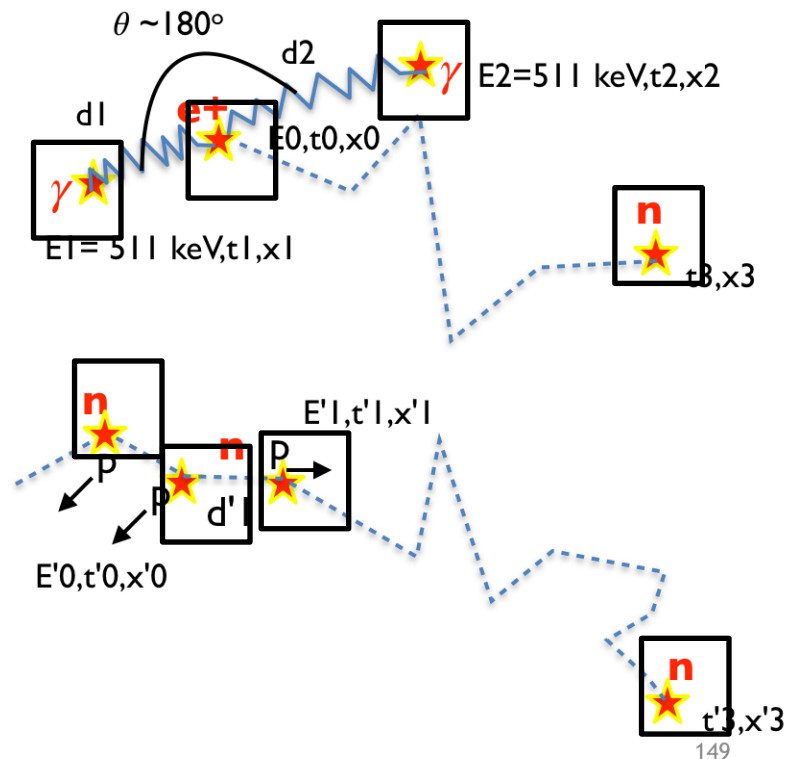
Capable de détecter les deux γ
-faible E = détection difficile

À la bonne E de 511 keV
-E'0 et E'1 ne sont en général pas à cette valeur

Avec le bon θ
-si 3 'proton recoils', pas d'angle particulier pour fast neutrons, etc.

Avec les bonnes distances d1, d2, d'1, etc.

Une bonne résolution en temps
- $t_0=t_1=t_2$ alors que $t'_1=t'_0+5$ ns
(les neutrons sont plus lents)



SoLid et les bruits de fond I

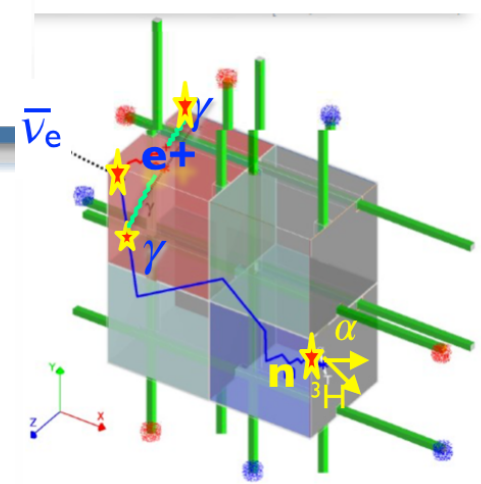
Comment SoLid compte-t-il s'en sortir ?

En exploitant **tout** le potentiel de sa segmentation, pour faire exactement ce que décrivait cette diapo (partie I)

Problème : indispensable de détecter même les petits dépôts d'E (~ 100 keV)

- Les γ d'annihilation ne laissent pas toute leur énergie dans un cube de seulement 5 cm d'arête.
- Ils subissent essentiellement 3 ou 4 diffusions Compton dans des cubes distinct
 - souvent : des dépôts de 200 keV, 100 keV ou moins.
 - jamais plus de 340 keV (Front Compton)
- Les proton recoils dus aux neutrons rapides peuvent aussi ne laisser qu'un dépôt faible.

SoLid et les bruits de fond I



Indispensable de détecter même les petits dépôts d'E (~ 100 keV)

Or : $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$ par MeV est faible.

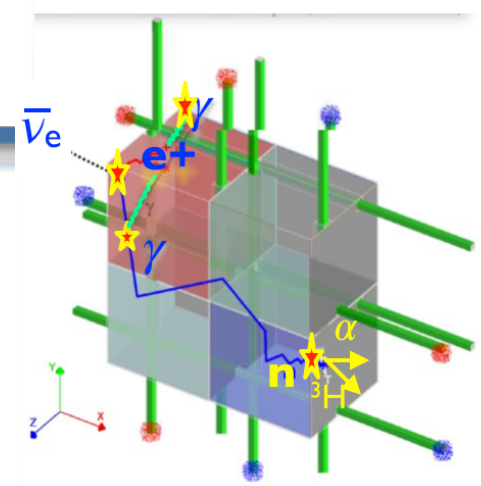
- $N_{\text{ph}}^{\text{det}} = 60 / \text{MeV}$ (PROSPECT: 850 ; STEREO : 260)
- Raison : faible couplage entre fibre/SiPM et le cube, qui ne permet de collecter qu'une petite partie des photons scintillés (N_{ph} scintillés/ MeV similaire, idem pour atténuation ou efficacité quantique)

Donc : à 200 keV, chacune des 4 fibres lisant un cube ne voit en moyenne que 3 photo-avalanches. Pas tellement mieux à 340 keV.

On est alors dans un régime poissonien. **À chaque dépôt de 200 keV, la probabilité d'avoir 0 photo-avalanche est grande**, et la probabilité d'avoir simultanément 1 photo-avalanche sur une fibre verticale et une fibre horizontale (condition pour trouver un cube) est faible !

→ Faible efficacité de reconstruction des petits dépôts.

SoLid et les bruits de fond I



Indispensable de détecter même les petits dépôts d'E (~ 100 keV)

Or : $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$ par MeV est faible.

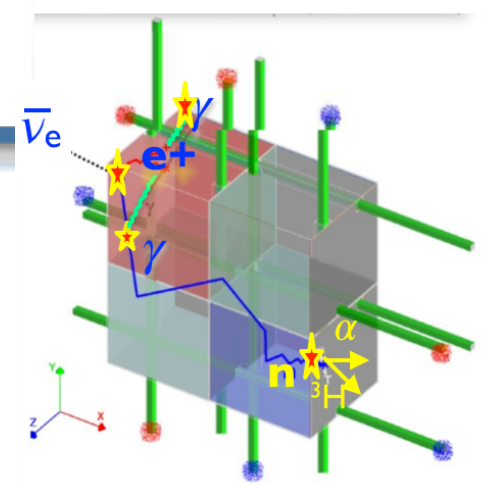
- $N_{\text{ph}}^{\text{det}} = 60 / \text{MeV}$ (PROSPECT: 850 ; STEREO : 260)
- Raison : faible couplage entre fibre/SiPM et le cube, qui ne permet de collecter qu'une petite partie des photons scintillés (N_{ph} scintillés/ MeV similaire, idem pour atténuation ou efficacité quantique)

Donc : à 200 keV, chacune des 4 fibres lisant un cube ne voit en moyenne que 3 photo-avalanches. Pas tellement mieux à 340 keV.

Même en cas de détection, mauvaise résolution en E à ces énergies : 30-50%

Difficile, même en combinant tous les cubes ou ils ont déposé de l'E de retrouver l'énergie unique des gamma d'annihilation (= 511 keV,) pour les distinguer d'un proton recoil.

SoLid et les bruits de fond I



Indispensable de détecter même les petits dépôts d'E (~ 100 keV)

Or : $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$ par MeV est faible.

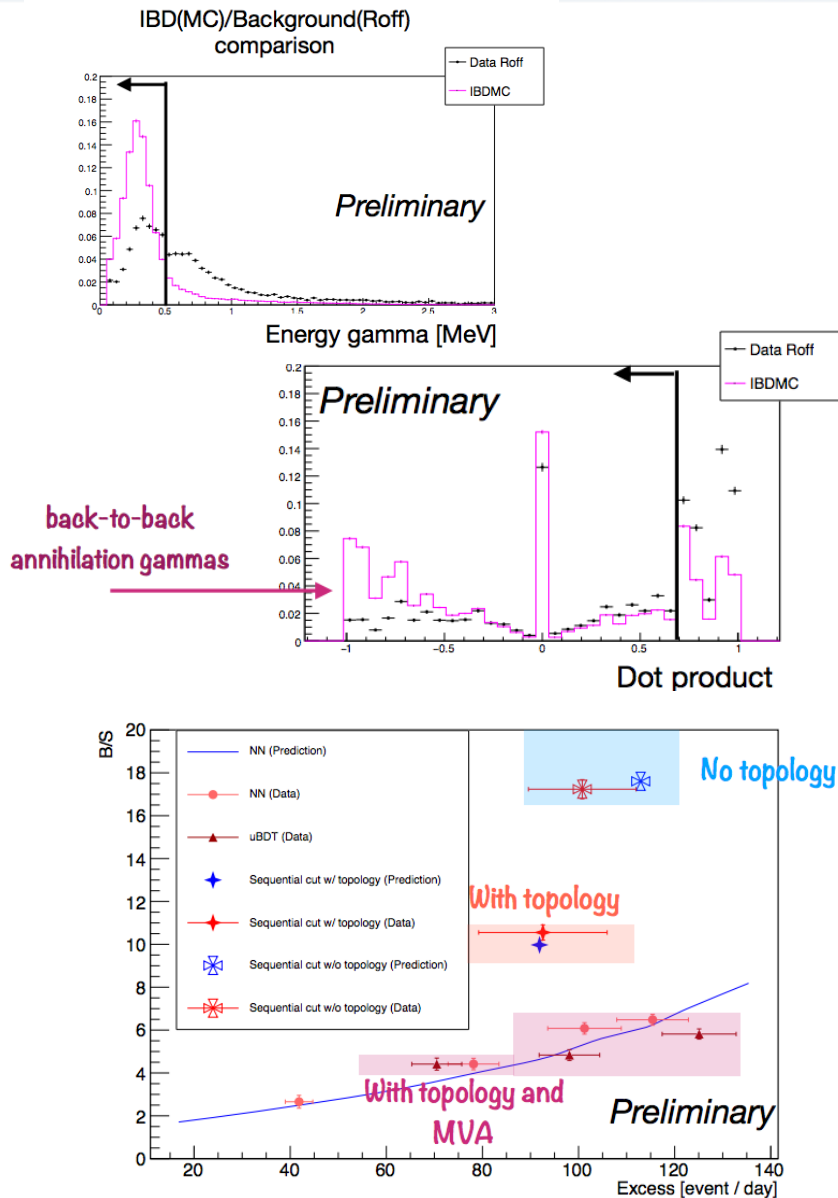
- $N_{\text{ph}}^{\text{det}} = 60 / \text{MeV}$ (PROSPECT: 850 ; STEREO : 260)
- Raison : faible couplage entre fibre/SiPM et le cube, qui ne permet de collecter qu'une petite partie des photons scintillés (N_{ph} scintillés/ MeV similaire, idem pour atténuation ou efficacité quantique)

Donc : à 200 keV, chacune des 4 fibres lisant un cube ne voit en moyenne que 3 photo-avalanches. Pas tellement mieux à 340 keV.

→ Nécessité d'algorithmes de détection sophistiqués pour exploiter toute l'information restant dans le détecteur... **Avec un petit manpower...**

→ Cela a pris 2 ans...

SoLid et les bruits de fond I

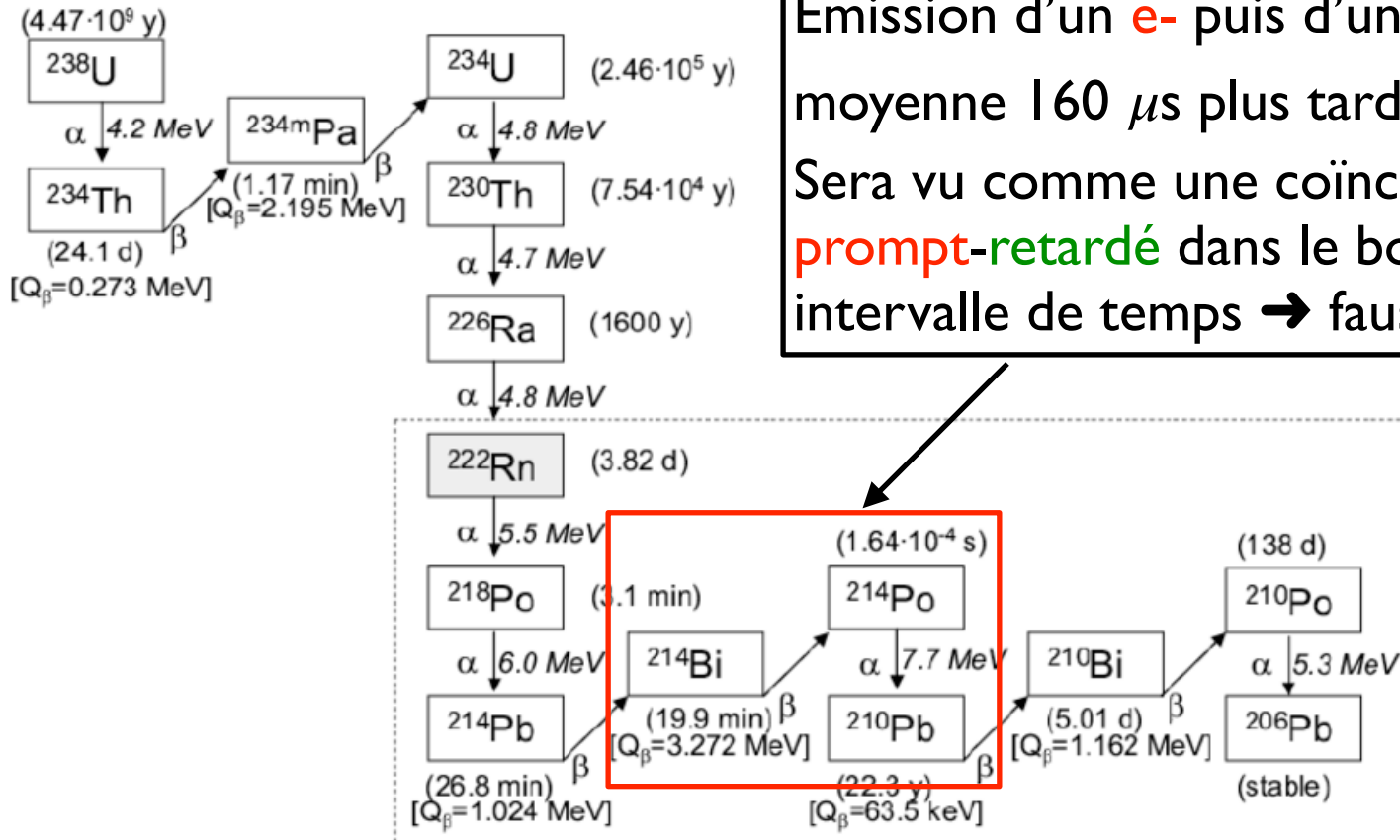


→ Cela a pris 2 ans, sans atteindre les résultats de PROSPECT et STEREO

Une partie de l'explication : une source supplémentaire de bruit de fond

SoLid et les bruits de fond II

Le procédé d'ajout du ${}^6\text{Li}$ au ZnS cause une pollution radioactive !
Due au radon de l'environnement.



Emission d'un e^- puis d'un α en moyenne $160 \mu\text{s}$ plus tard.
Sera vu comme une coïncidence **prompt-retardé** dans le bon intervalle de temps \rightarrow fausse IBD !

SoLid et les bruits de fond II

Le procédé d'ajout du ${}^6\text{Li}$ au ZnS cause une pollution radioactive !
Due au radon de l'environnement.

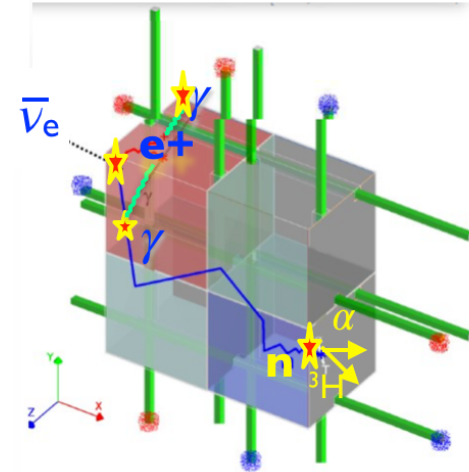
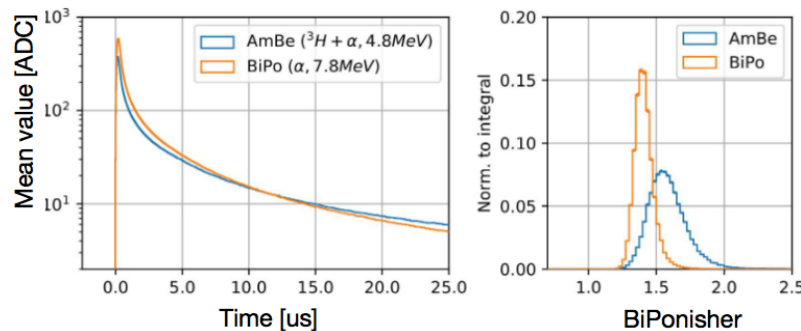
Le fabricant des feuilles de ${}^6\text{Li}:\text{ZnS}$ a mal contrôlé cette pollution...

Dans la région de $E_{\text{cube, max}} < 3 \text{ MeV}$: **S/B ~ 1/100**

(le spectre en énergie du e^- émis par le ${}^{214}\text{Bi}$ s'arrête à 3 MeV)

Solutions développées (encore en cours):

- Le pulse de scintillation dans le ZnS n'a pas la même forme pour α que pour $\alpha + {}^3\text{H}$.



- L' e^- du ${}^{214}\text{Bi}$ est émis dans la feuille de ZnS et donc apparaît toujours sur une face du cube. On pourrait exploiter l'asymétrie entre les signaux vus sur les fibres proches et les lointaines.

SoLid : stratégie

Si **SoLid parvient** à une exploitation optimale de sa segmentation pour **contrôler ses bruits de fond**: même nombre d'antineutrinos / jour et même S/B que STEREO.

Résolution en E moins bonne : $\sigma E/E = 14\%$ @ 1 MeV au lieu de 8%

Mais suffisante pour exclure en 1 à 3 ans une grande partie de l'espace des paramètres, ou de voir un stérile s'il existe (simulations numériques)

La meilleure résolution en L (5 cm au lieu de 37cm) et la plus grande proximité au réacteur (donc plus grande sensibilité à certaines valeurs des paramètres) permettant une **sensibilité proche de celle de STEREO**.

Lors de la conception de l'expérience (avant les problèmes de bruit de fond), en tablant sur une construction facile (SiPM standards, PVT et ${}^6\text{Li}:\text{ZnS}$ disponibles dans le commerce, moins de pb de logistique qu'avec du liquide, etc.) **SoLid pouvait espérer obtenir le premier résultat précis.**

Et pour pas très cher...

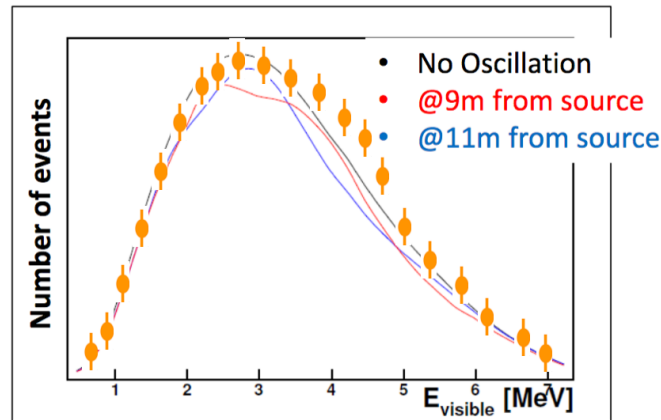
SoLid : stratégie

SoLid possède (toujours) un autre avantage majeur.

Nous avons vu que les résultats d'une expérience doivent être validés par des expériences indépendantes (avec incertitudes et des risques d'erreur différents).

L'un des principaux risques pour ce type d'expérience était souligné lors de la première partie de ce cours :

Effet sur le spectre en énergie d'un biais de reconstruction = $f(E_{\text{true}})$



Le spectre de E_{vraie} noir où l'on suppose que l'oscillation n'existe pas devient une fois mesuré un spectre avec une distortion qui peut faire croire par erreur à une oscillation...

SoLid : stratégie

Pour éviter ce type de distortion, il faut bien comprendre l' "Energy scale" du détecteur, qui permet de déduire l'énergie reconstruite du nombre de photons détectés $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$.

Cela revient à très bien connaître la variation de $N_{\text{ph}}^{\text{det}}$ en fonction de l'énergie véritablement déposée.

Cette fonction n'est pas linéaire a priori :

- Nous avons déjà vu que la réponse d'un scintillateur dépend de dE/dx .
Base de la PSD : dE/dx est plus grand pour p, α , etc. que pour e^{\pm}, γ
- La réponse à une même particule dépend aussi de son dE/dx .
- Lorsqu'une particule n'a plus beaucoup d'E, son dE/dx est plus élevé.
- Le "quenching" entre alors en jeu: l'énergie importante déposée dans un dx ne peut plus être transformée efficacement en scintillation.

SoLid : stratégie

Réponse du détecteur en présence de quenching.

Il faut donc déterminer très précisément cette variation, grâce à des données de calibration.

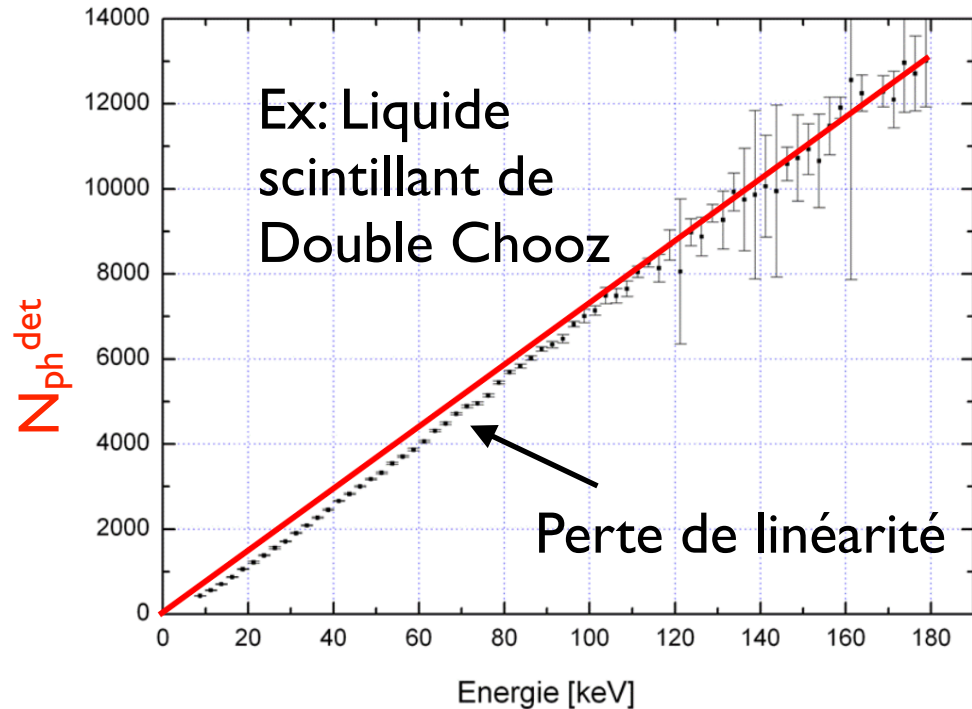
Difficile en pratique !

Plus facile dans les scintillateurs plastiques (ex: PVT) où l'effet est en général beaucoup plus petit.

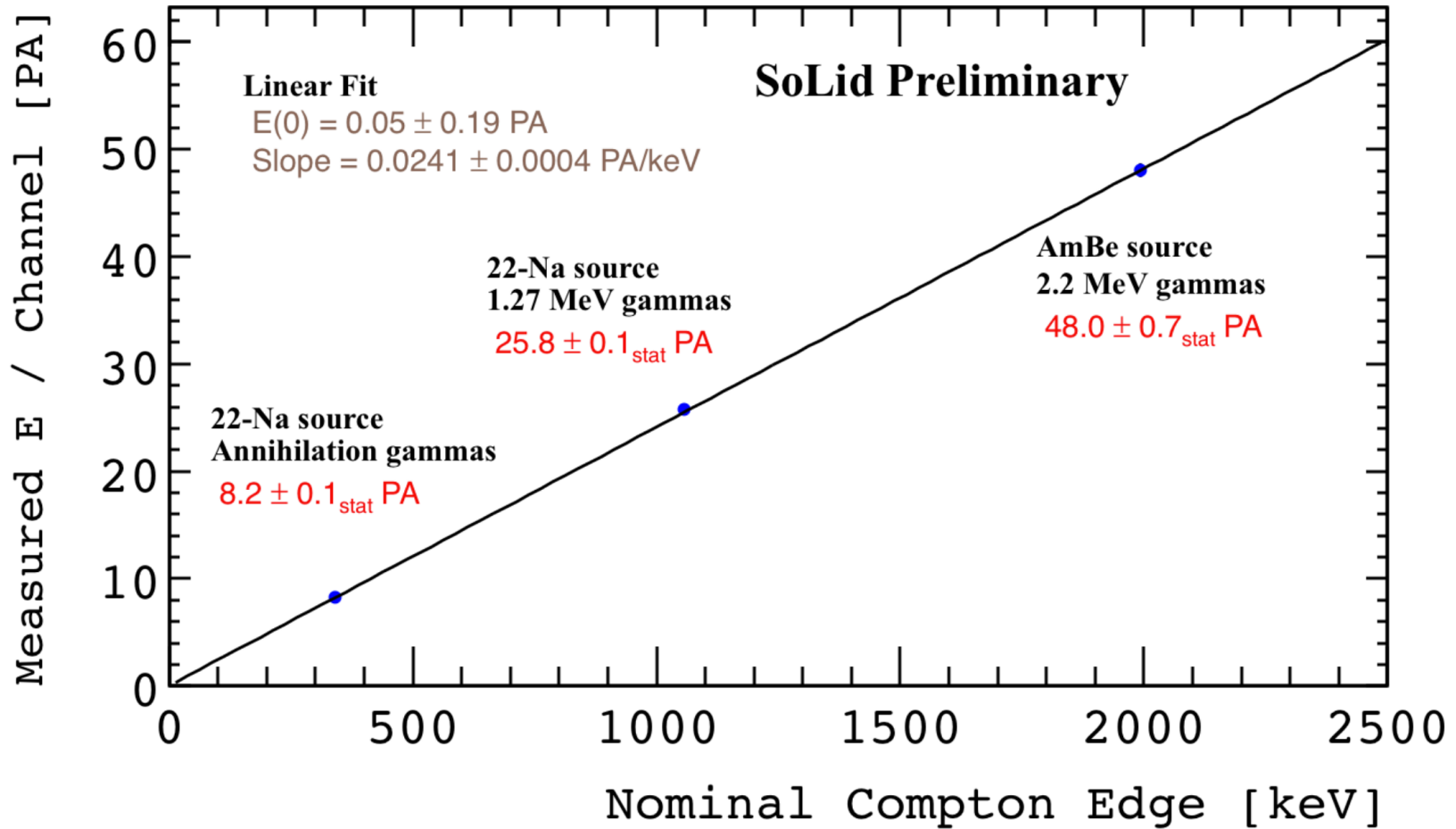
Si PROSPECT et STEREO sont affectés par une erreur à ce niveau, SoLid pourra les corriger.

Corrolaire : Si SoLid voit la même oscillation que PROSPECT et STEREO, difficile de croire que c'est un mirage dû à une E-scale mal maîtrisée.

Scintillator: PC (Pseudocumene) + PPO



SoLid : stratégie



SoLid : remarques supplémentaires

SoLid inaugure une **nouvelle façon de détecter des neutrinos de réacteurs**.

Détection classiquement basée sur des liquides scintillants.

Peu de maturité/recul : nous découvrons les problèmes au fur et à mesure...

- Pollution au radon
- Segmentation suffisante pour réjection des bruits de fond seulement si algorithmes de sélection avancés.
- Peut-être un manque de temps lors des évaluations préliminaires des bruits de fond...
- Faible $N_{\text{ph}}^{\text{det}} / \text{MeV}$ n'a pas qu'un impact sur la résolution en E mais aussi sur l'efficacité de détection.

SoLid : remarques supplémentaires

Autres complications :

- 3000 canaux et 12800 cubes à calibrer !
(PROSPECT: 308 canaux et 154 segments ; STEREO: 48 canaux et 6 cuves)
- Avec des γ ne laissant pas toute leur énergie dans le cube, donc calibrer sur un spectre et non une valeur précise connue de l'énergie.
- 3000 voies d'électronique ! → 50 cartes d'électronique embarquée, à plus de 1000 euros pièce.
- Quantité de données à transférer depuis le réacteur en TB/jour

Ces complications sont le prix d'un autre aspect de la stratégie de Solid

- Ce type de détecteurs vise aussi à être employé pour la surveillance de réacteurs.
- Des cubes en plastique et des SiPM (basses tensions) sont préférables à des liquides scintillants inflammables et peu mobiles et à des PMT à haute tension et fragiles...

Parce qu'il faut conclure...

Nous avons comparé trois expériences cherchant à mesurer la même chose.

Elles ont adopté des stratégies différentes.

Exercice difficile : les choix ne suivent pas toujours des critères triviaux permettant de comprendre ces stratégies facilement.

- On ne construit pas toujours le meilleur détecteur possible car on saisit parfois l'opportunité d'être le premier à publier un résultat important.
- On choisit parfois une technologie en fonction des compétences disponibles. Similaire : faire travailler des entreprises du pays conditionne certaines subventions d'état.
- Certains choix sous-estiment certains problèmes (toujours plus facile à voir a posteriori). Ex : moins de manpower que prévu...

Parce qu'il faut conclure...

Une certaine logique est cependant respectée : le plus gros budget aboutit à l'expérience la plus sensible. **Quand on arrive à tout faire fonctionner...**

- Plus grande masse cible.
- Technologie innovante mariant segmentation et PSD pour surmonter des bruits de fond importants, tout en obtenant la très bonne résolution en E typique des liquides.

Logique également : les technologies matures avancent plus vite.

Les leçons de la première partie sont respectées

- Les expériences jouant sur une bonne résolution en E et la PSD : liquide scintillant + PMT
- Les expériences jouant tout sur la segmentation, limitée en prix, et visant aussi des applications civiles : Plastique et SiPM

Parce qu'il faut conclure...

Enfin : 3 approches affectées par des biais expérimentaux différents.

→ Résultats plus robustes si découverte du neutrino stérile.