

Super-Kamiokande L'Âge du Gadolinium

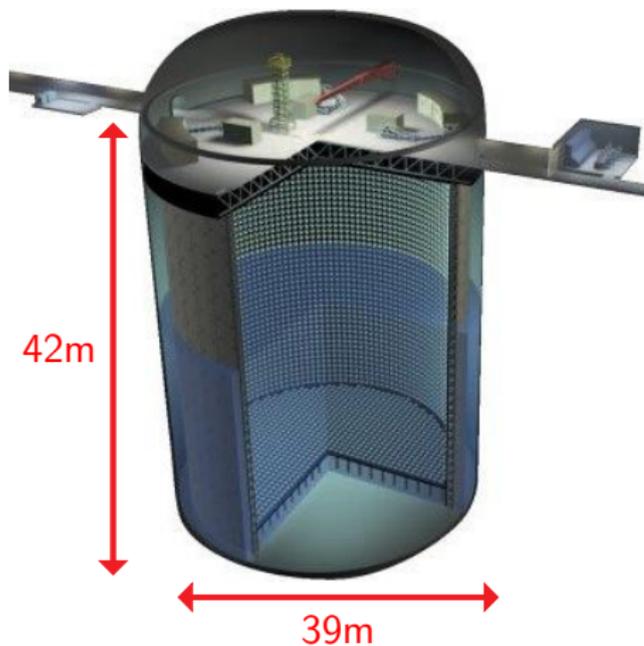
Sonia El Hedri

Biennale du LLR

17 septembre 2019



Infos pratiques



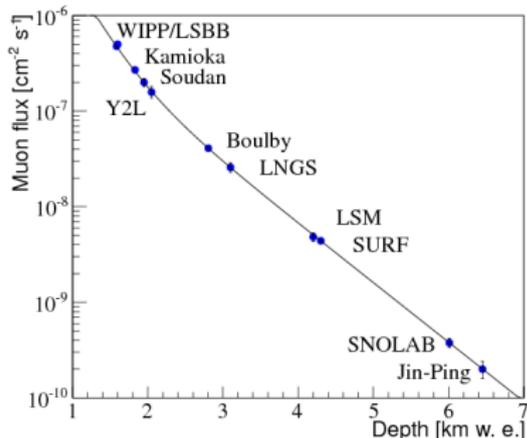
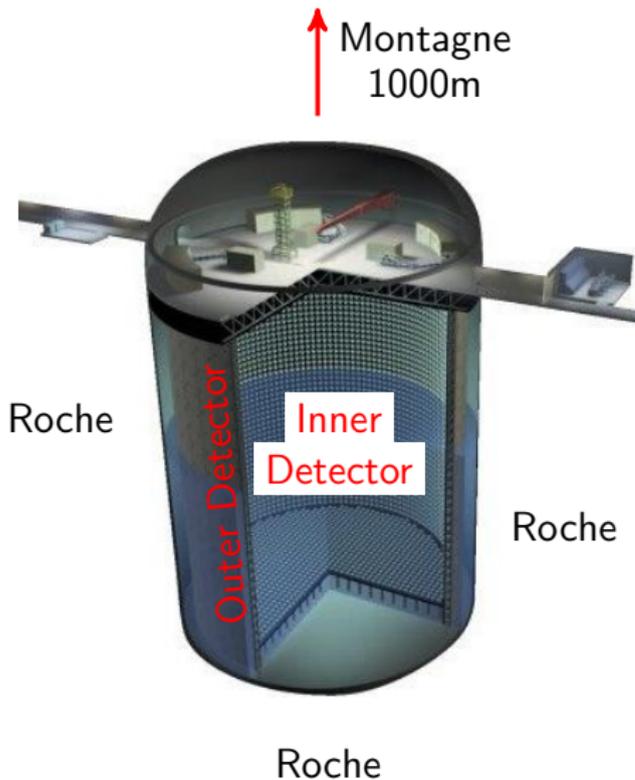
- ▶ Détecteur à effet Cherenkov
- ▶ 50 kt d'eau ultra-pure
- ▶ Mine de "Kamioka"

2nd shift
(16:25-1:00)

3rd shift
(0:30-8:30)



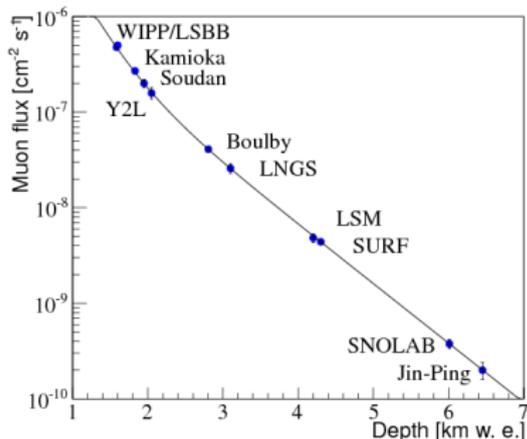
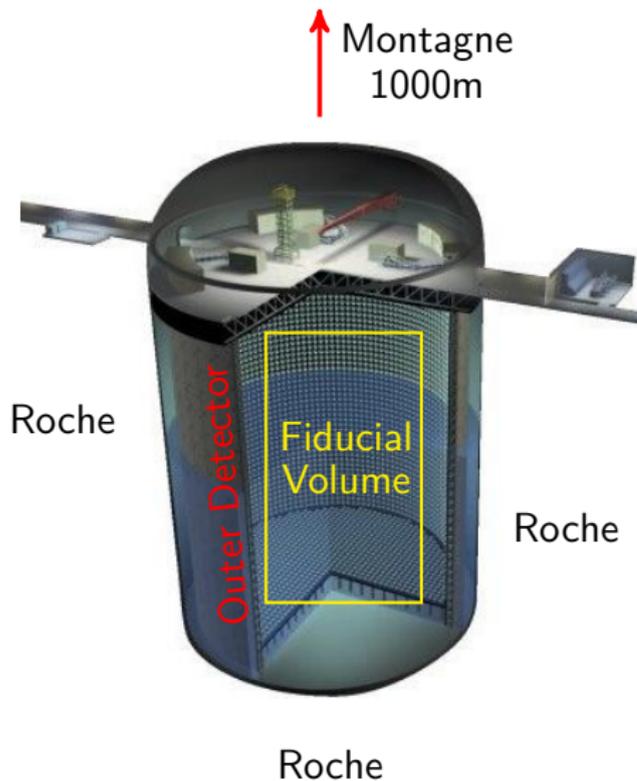
Des détails !



[Mei et al, Phys. Rev. D73, 053004]

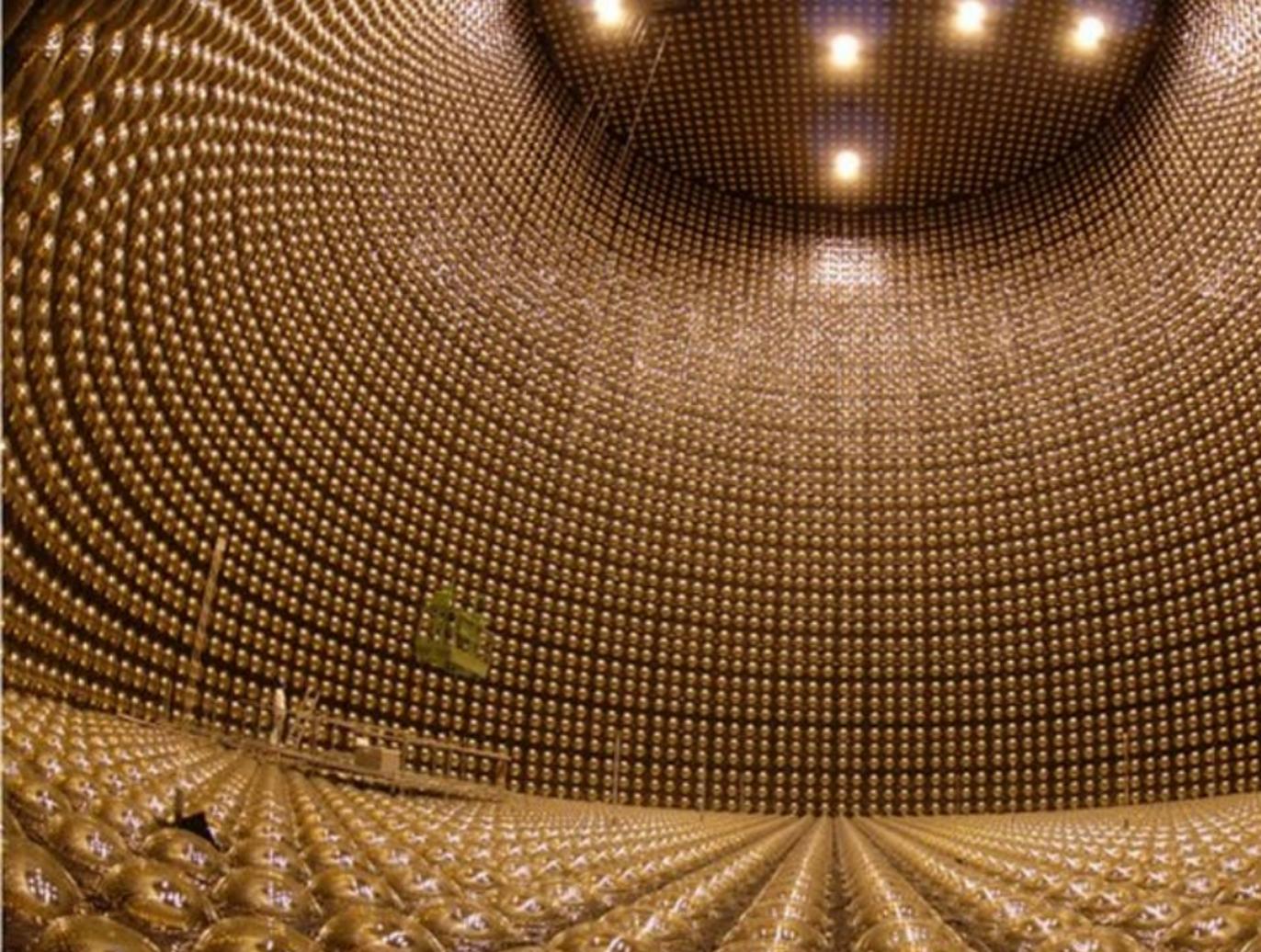
- ▶ Réduction de 1/100 000 du flux de muons
- ▶ $1\mu/\text{s} \Rightarrow$ Outer Detector (veto)
Inner Detector (mesures)
- ▶ Radioactivité ambiante
 \Rightarrow Volume fiduciel (2m des parois de l'ID) **22.5 ktonnes**

Des détails !

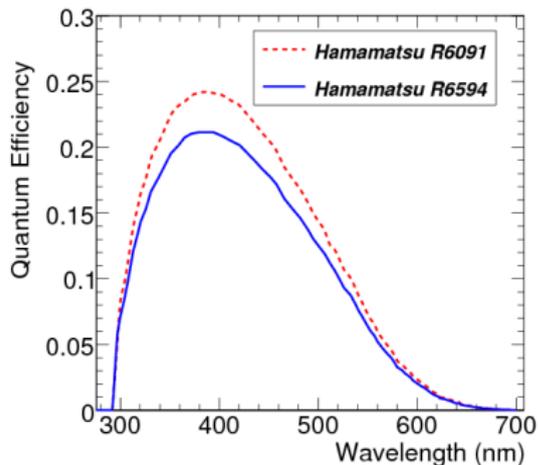


[Mei et al, Phys. Rev. D73, 053004]

- ▶ Réduction de 1/100 000 du flux de muons
- ▶ $1\mu/\text{s} \Rightarrow$ Outer Detector (veto)
Inner Detector (mesures)
- ▶ Radioactivité ambiante
 \Rightarrow Volume fiduciel (2m des parois de l'ID) **22.5 ktonnes**



Les photomultiplicateurs



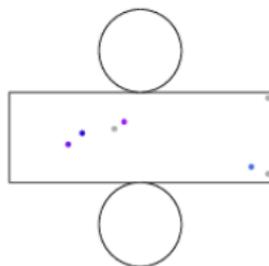
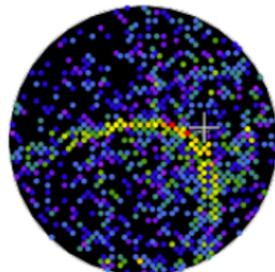
[Nucl. Instrum. Meth. A 625, 20 (2011)]

- ▶ OD : 1885 PMTs, 20 cm de diamètre, 200 ns de résolution
- ▶ ID : 11129 PMTs, 50 cm de diamètre, 3 ns de résolution

Résolution

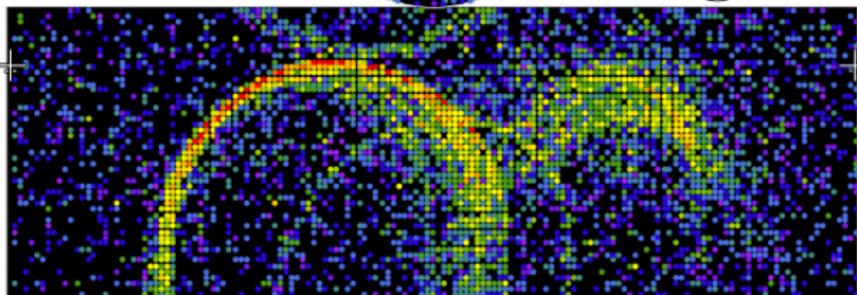
Super-Kamiokande IV

Run 999999 Sub 1 Event 179
16-03-10:18:48:26
Inner: 5770 hits, 19150 pe
Outer: 4 hits, 3 pe
Trigger: 0x07
D_wall: 723.9 cm
Evis: 2.2 GeV

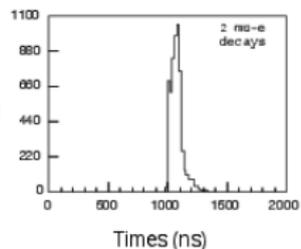
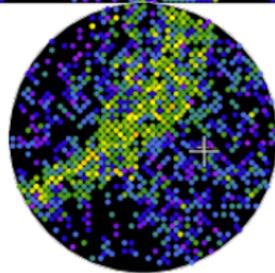


Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2



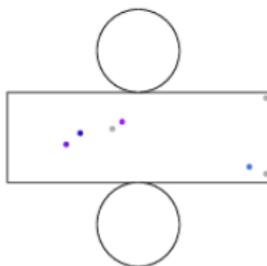
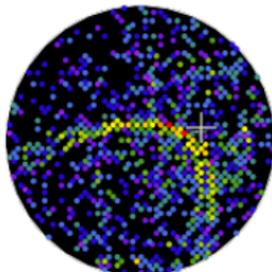
Pic d'activité : 200 ns
 $\Delta l \sim 50$ cm



Résolution

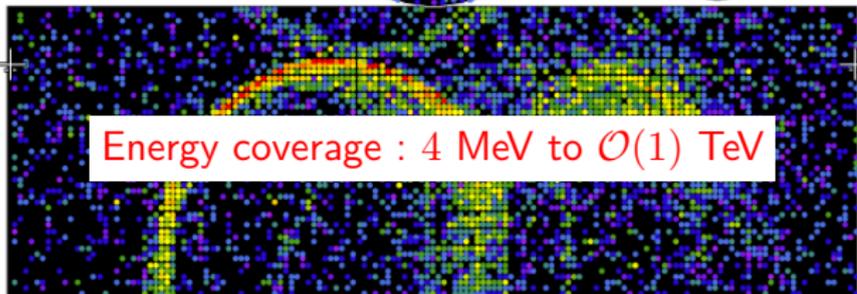
Super-Kamiokande IV

Run 999999 Sub 1 Event 179
16-03-1018:48:26
Inner: 5770 hits, 19150 pe
Outer: 4 hits, 3 pe
Trigger: 0x07
D_wall: 723.9 cm
Evis: 2.2 GeV



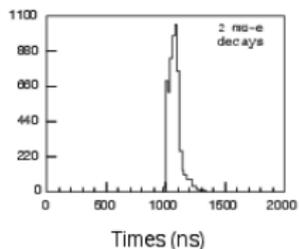
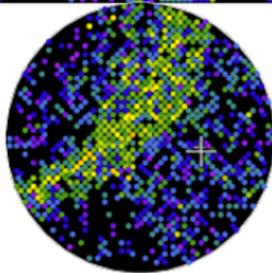
Charge(pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2

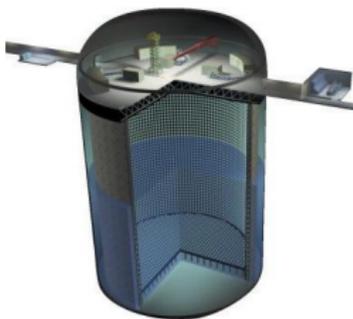


Energy coverage : 4 MeV to $\mathcal{O}(1)$ TeV

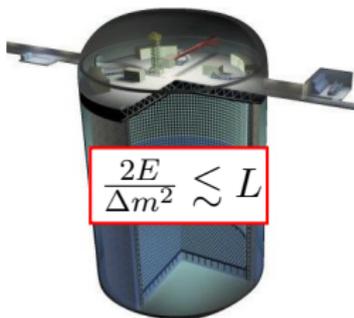
Pic d'activité : 200 ns
 $\Delta l \sim 50$ cm



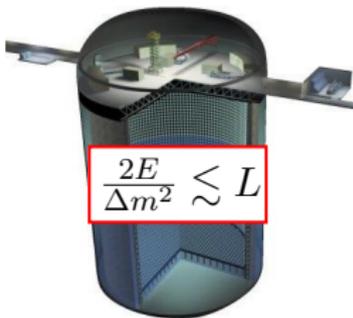
Potentiel de détection : Oscillations



Potentiel de détection : Oscillations



Potentiel de détection : Oscillations



Potentiel de détection : Oscillations

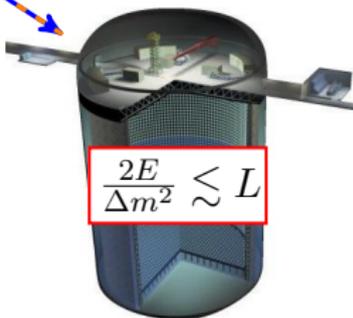


$\nu_e \nu_\mu$

$$L \sim 10^8 \text{ m}$$

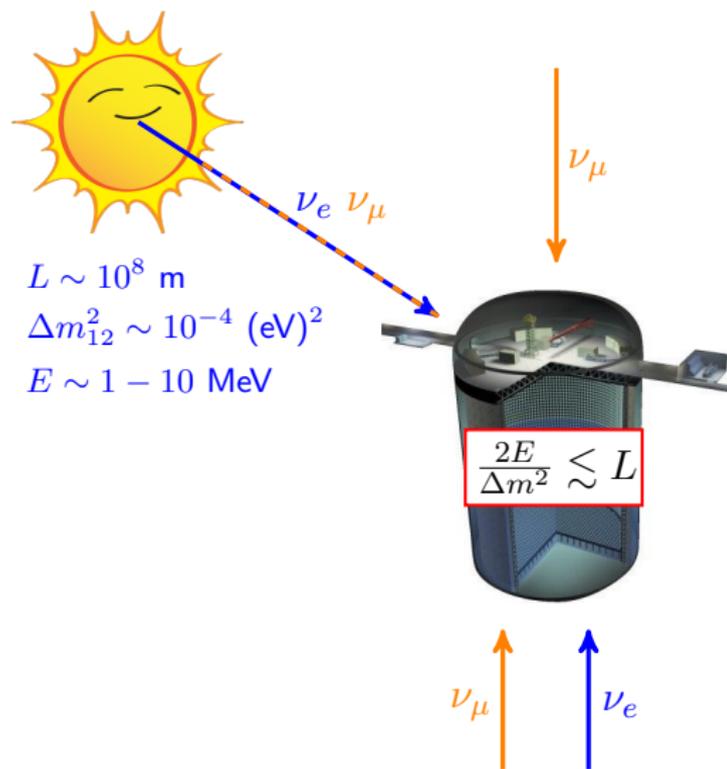
$$\Delta m_{12}^2 \sim 10^{-4} \text{ (eV)}^2$$

$$E \sim 1 - 10 \text{ MeV}$$

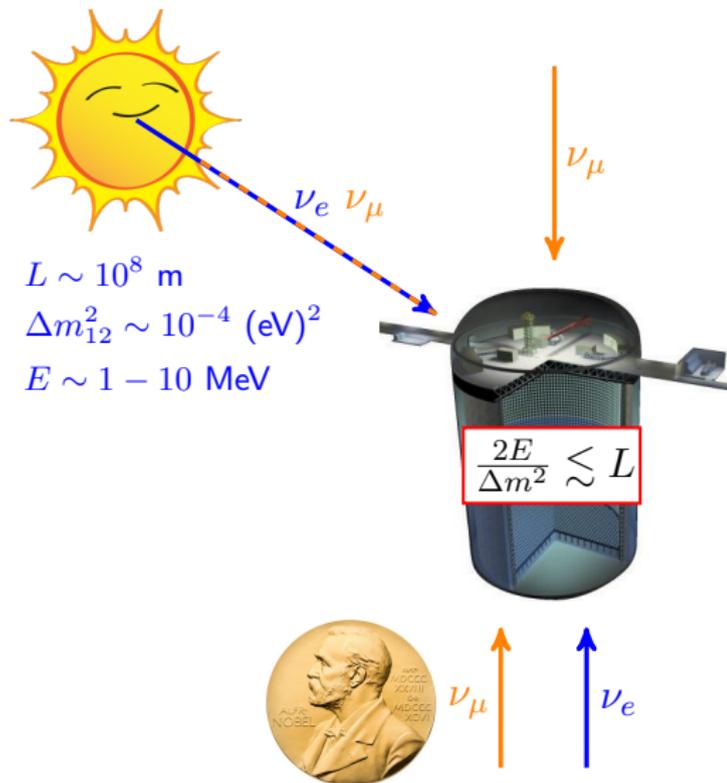


$$\frac{2E}{\Delta m^2} \lesssim L$$

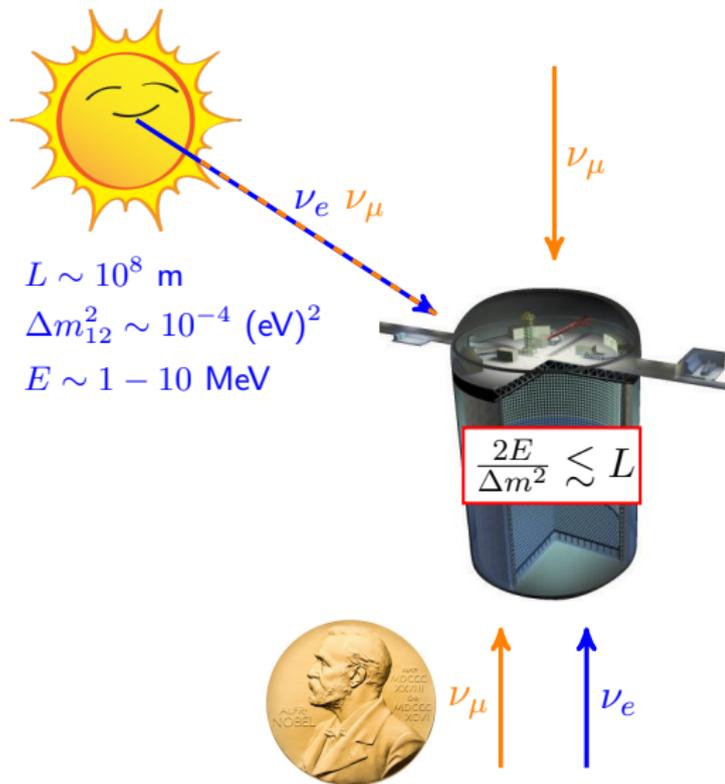
Potentiel de détection : Oscillations



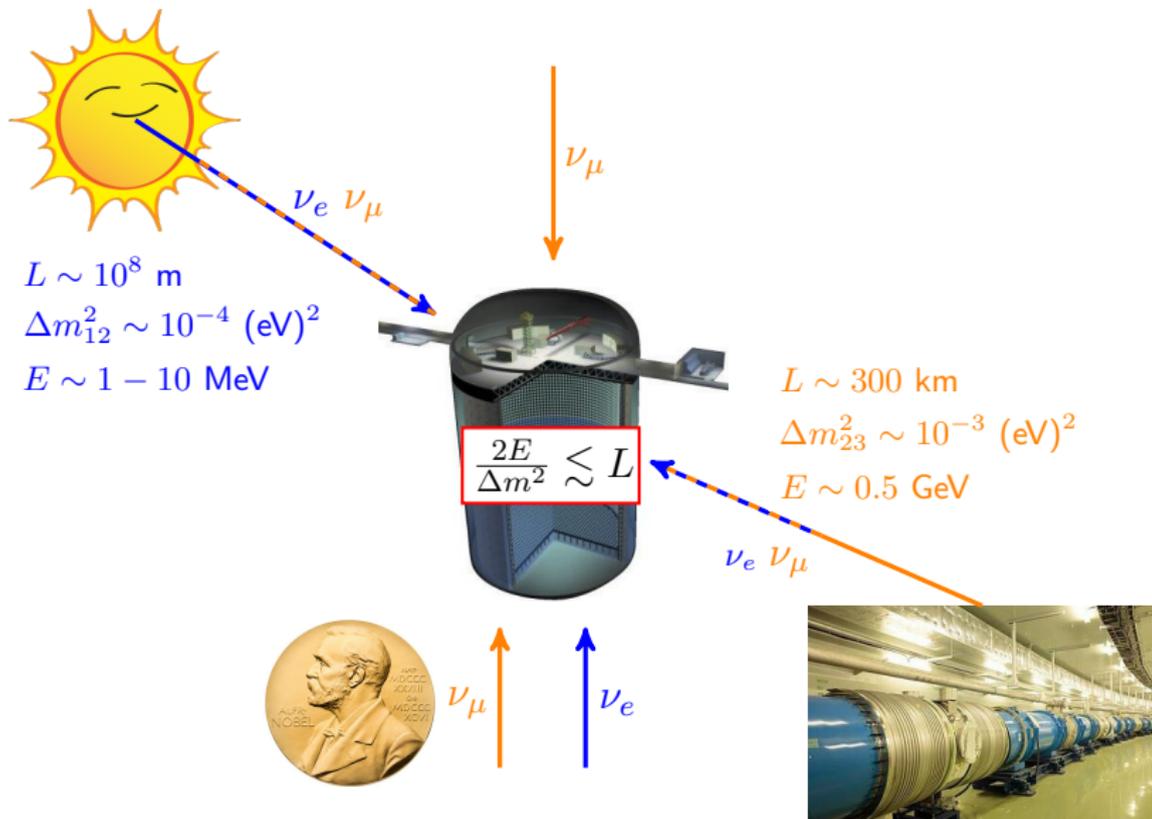
Potentiel de détection : Oscillations



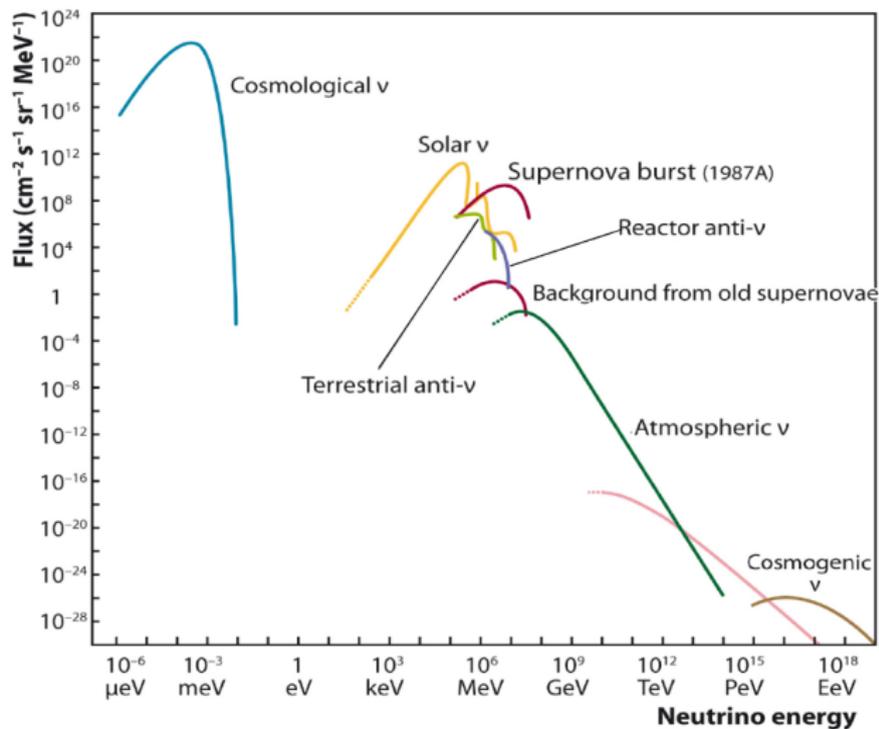
Potentiel de détection : Oscillations



Potentiel de détection : Oscillations

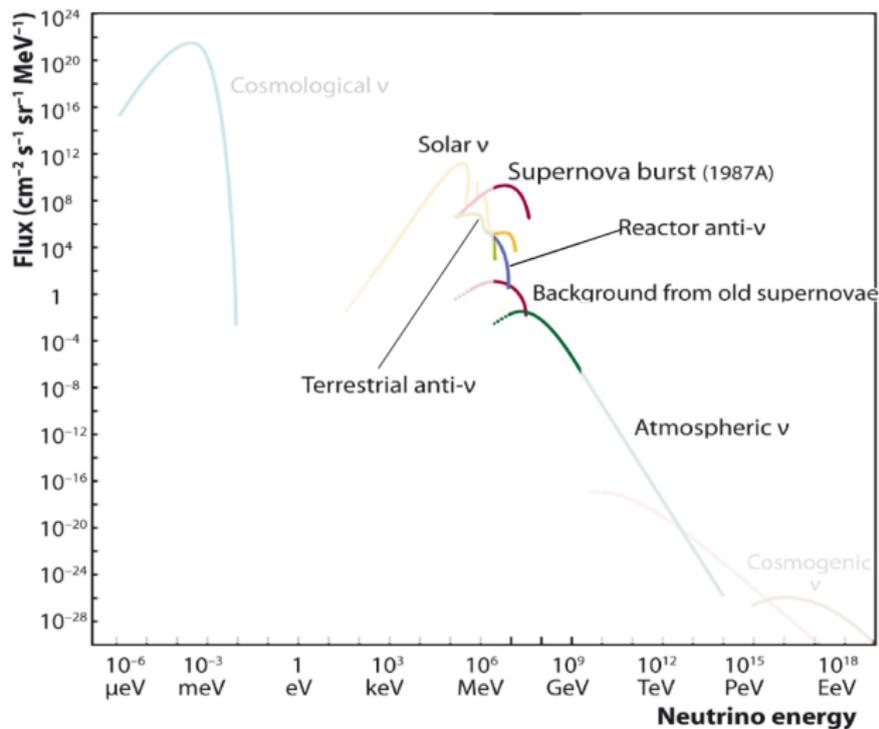


Champ d'action



[Katz et al. Prog.Part.Nucl.Phys. 67 (2012)]

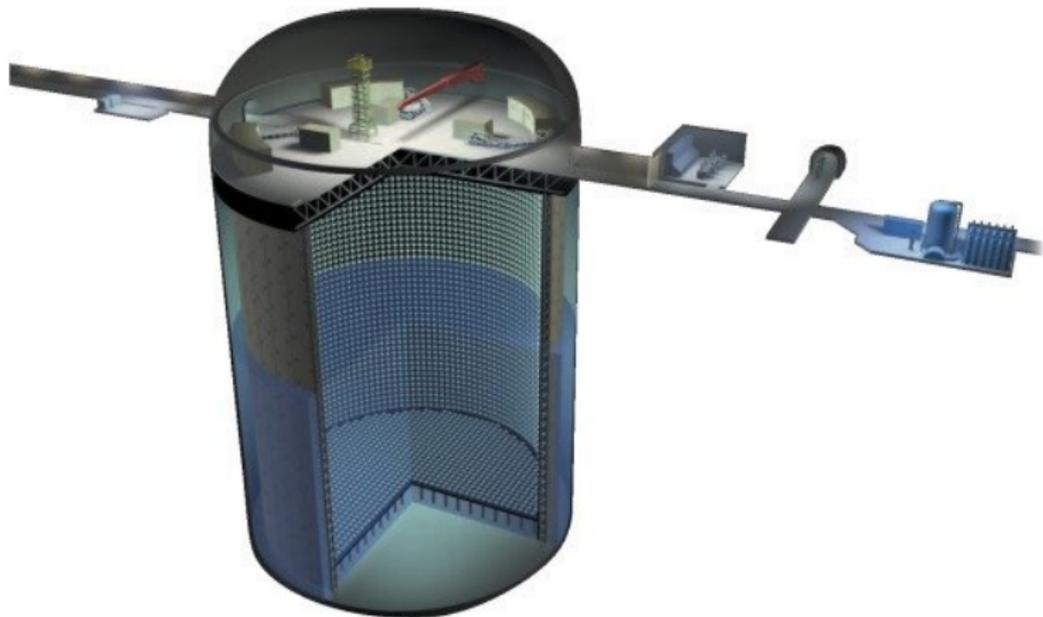
Champ d'action



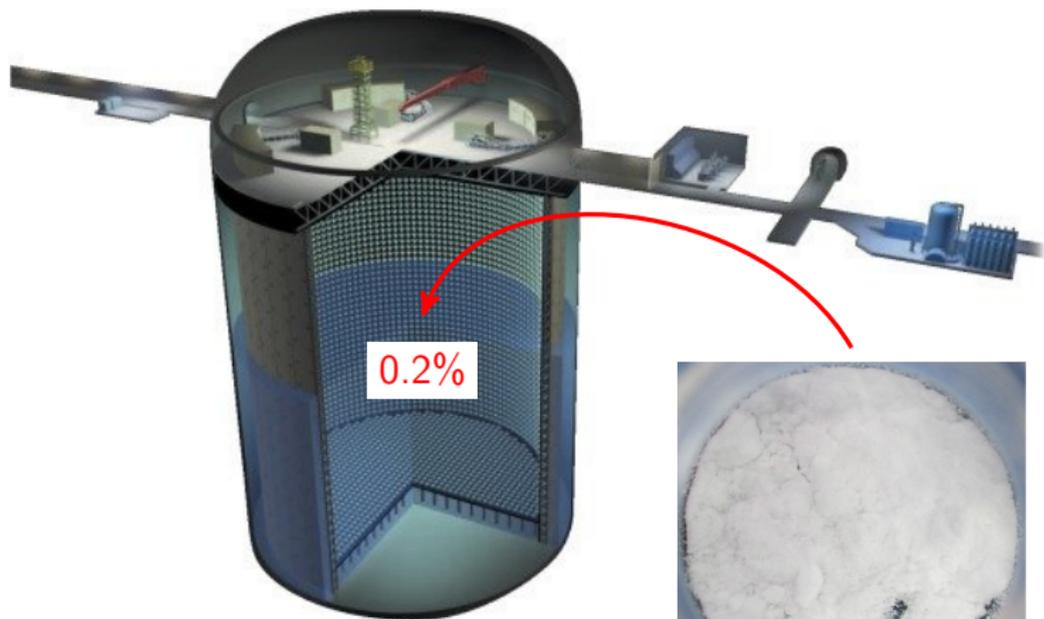
[Katz et al. Prog.Part.Nucl.Phys. 67 (2012)]

Et maintenant ?

- ▶ Démarrage le 1er Avril 1996 – 21 ans de fonctionnement !

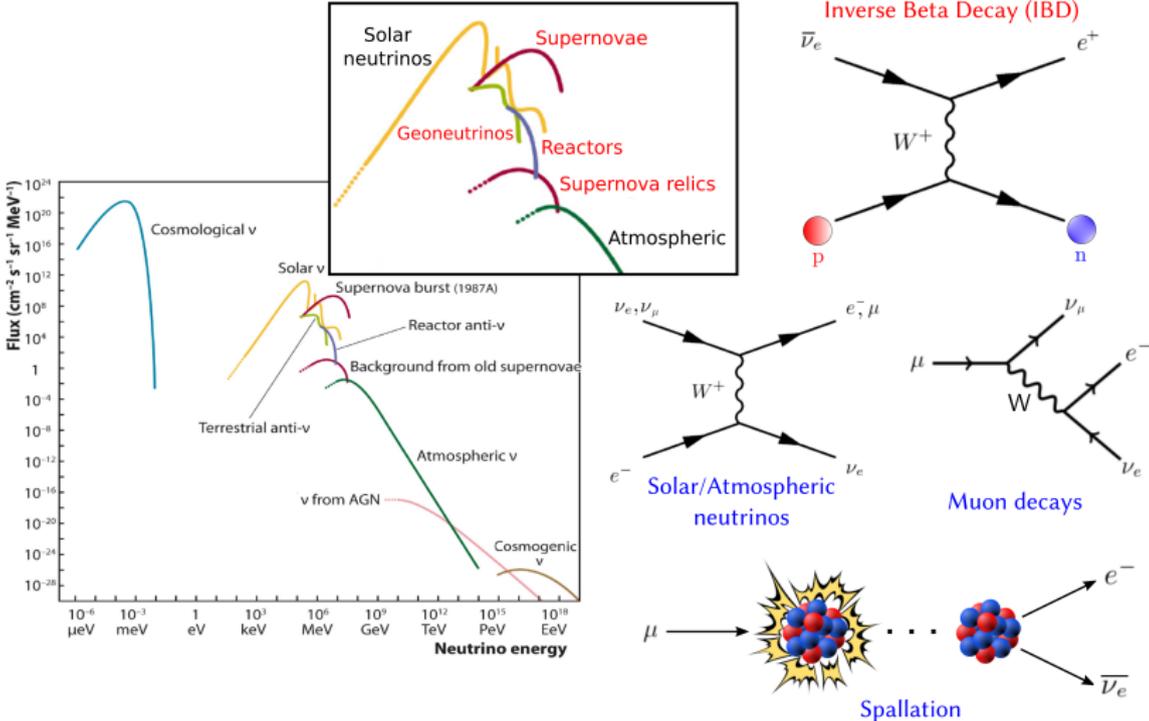


Super-K Gd

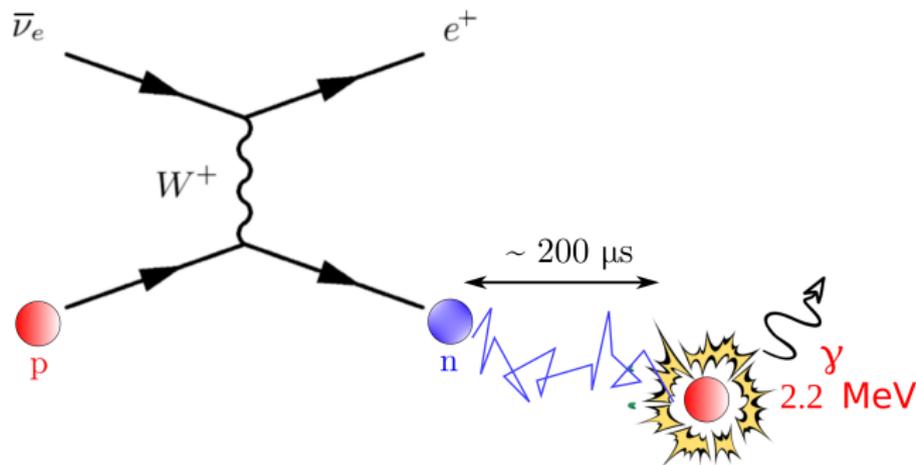


Sulfate de Gadolinium

Neutrinos à basse énergie

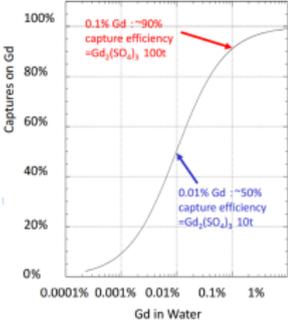
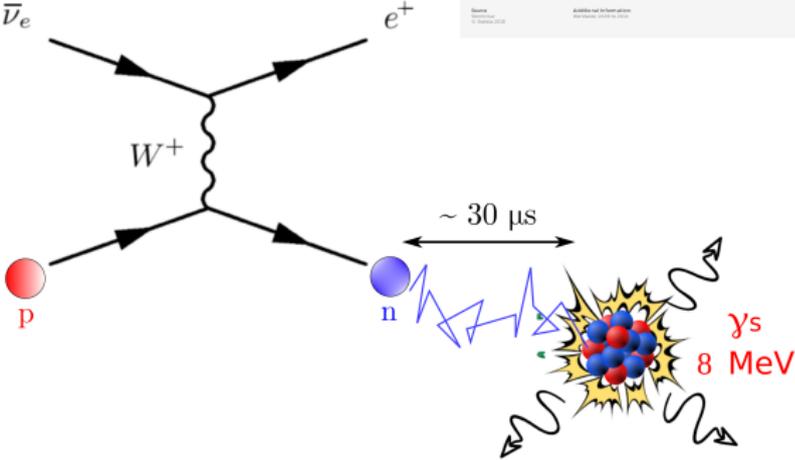
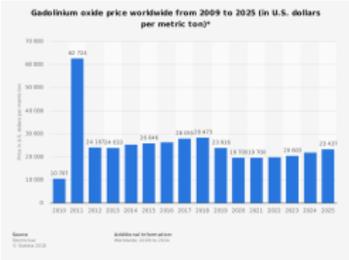


Capter les neutrons : l'hydrogène



- ▶ Capture sur l'hydrogène systématique : $d_{\text{neutron}} \lesssim 50 \text{ cm}$
- ▶ Distance de propagation inférieure à la résolution de SK
- ▶ Très long temps de capture, signal faible
⇒ **Détection extrêmement difficile !**
- ▶ Algorithmes actuels : $\epsilon_{\text{signal}} \sim 4 - 25\%$

Le Gadolinium



Le Gadolinium

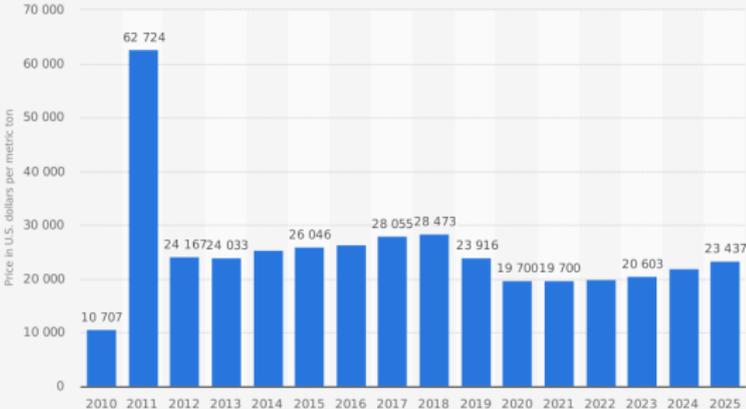


\bar{v}_e



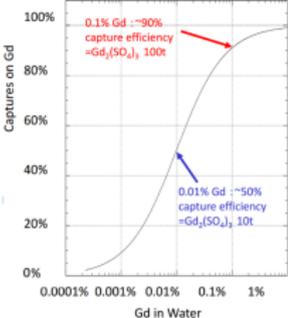
p

Gadolinium oxide price worldwide from 2009 to 2025 (in U.S. dollars per metric ton)*



Source: Stormcrow
Worldwide: 2009 to 2014
© Statista 2018

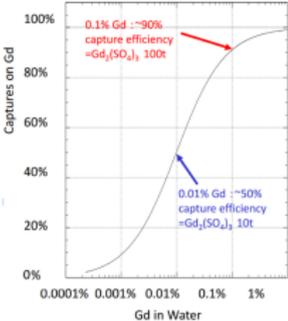
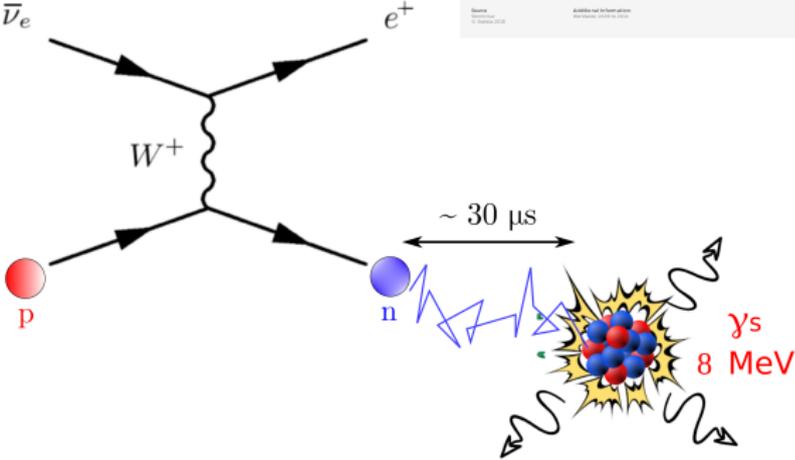
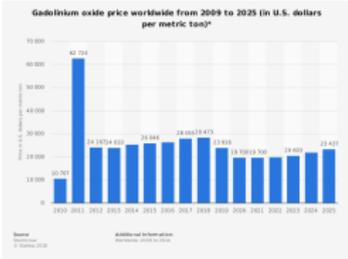
Additional Information:
Worldwide: 2009 to 2014



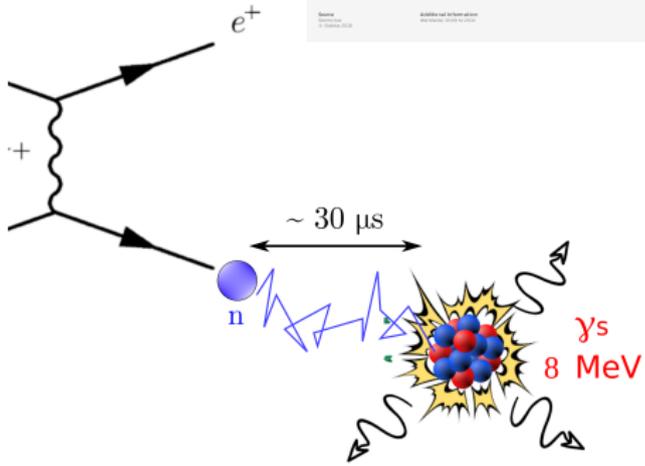
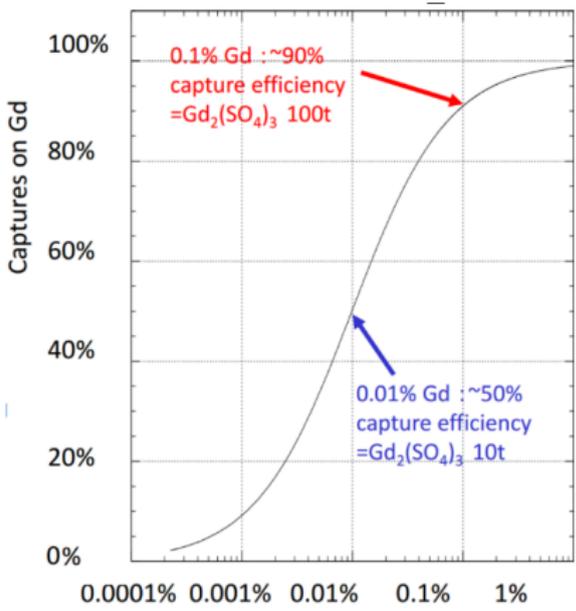
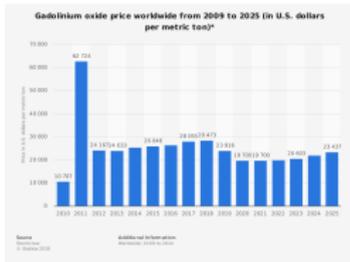
Le Gadolinium



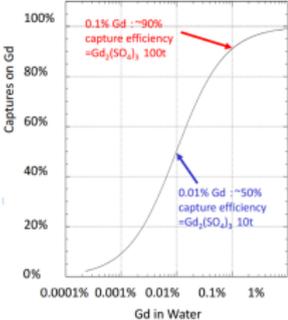
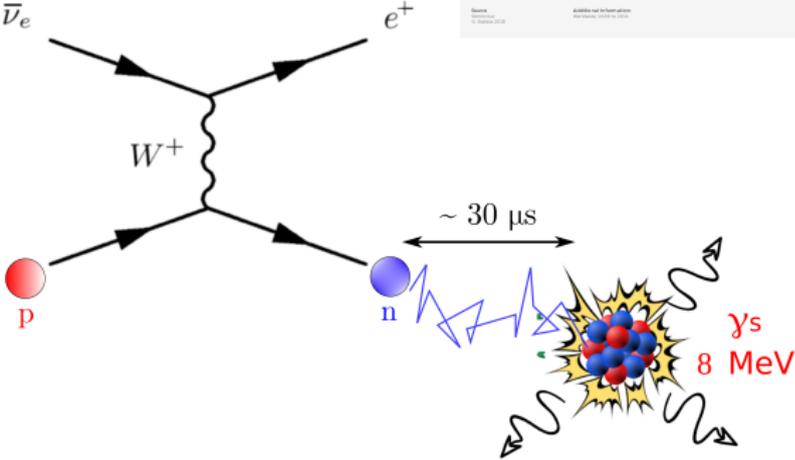
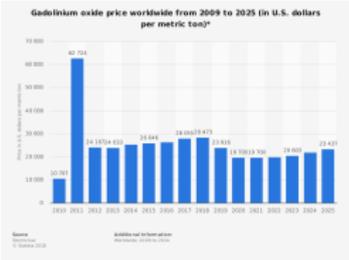
$\sigma \sim 49000$ barns



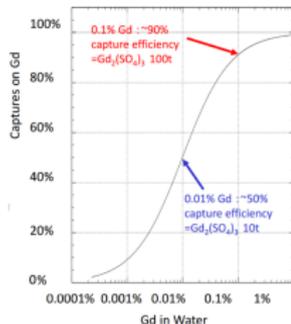
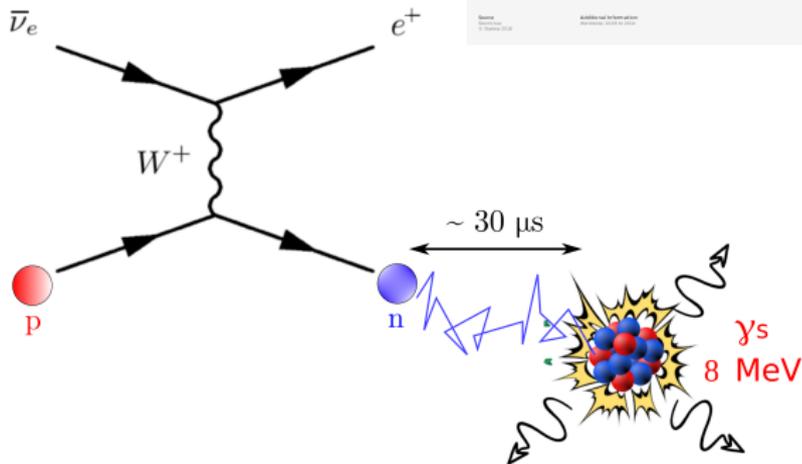
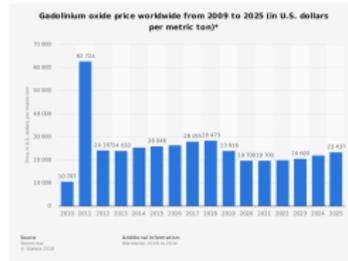
Le Gadolinium



Le Gadolinium



Le Gadolinium



Geosciences 2019, 9(2), 93; <https://doi.org/10.3390/geosciences9020093>

Open Access

Review

Gadolinium as an Emerging Microcontaminant in Water Resources: Threats and Opportunities

by Pooria Ebrahimi ^{1,2} and Maurizio Barbieri ^{3,*}  

Questions pratiques

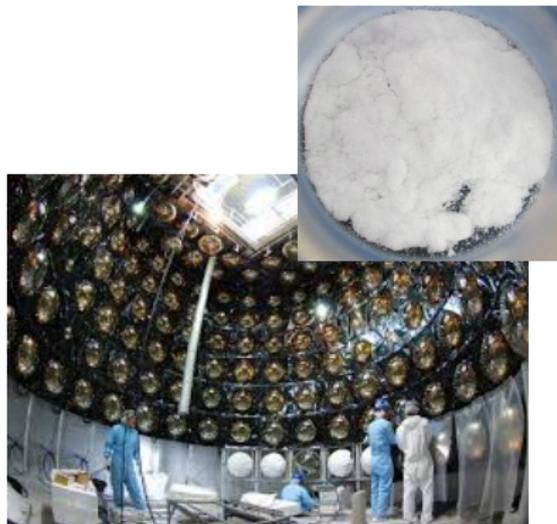
- ▶ Réactions avec les composants du détecteur ?
- ▶ Transparence de l'eau ?
- ▶ Système de recirculation : comment recycler le gadolinium ?
- ▶ Stabilité de la concentration de gadolinium ?
- ▶ Fuites dans SK...problèmes de toxicité ?

Mai-Septembre 2018 : rénovation de Super-Kamiokande



- ▶ Vidange de la cuve
- ▶ Remplacement de 136 photomultiplicateurs
- ▶ Nettoyage
- ▶ Fuites réparées!!!
- ▶ Calibration (Alice)
Janvier – Mars 2019

Prototype : l'expérience EGADS



Résultats :

- ▶ Composé utilisé : $(\text{Gd})_2(\text{SO}_4)_3$
Solution à 0.2%
- ▶ Pas d'effet adverse sur le détecteur
- ▶ Nouveau système de recirculation
- ▶ 650 recirculations, pas de pertes
- ▶ Concentration stable
- ▶ Transparence de l'eau :
 $\ell_{\text{att}} \sim 100 \text{ m}$
- ▶ *Simulations* : ϵ_{signal} passe de 20 à 66%

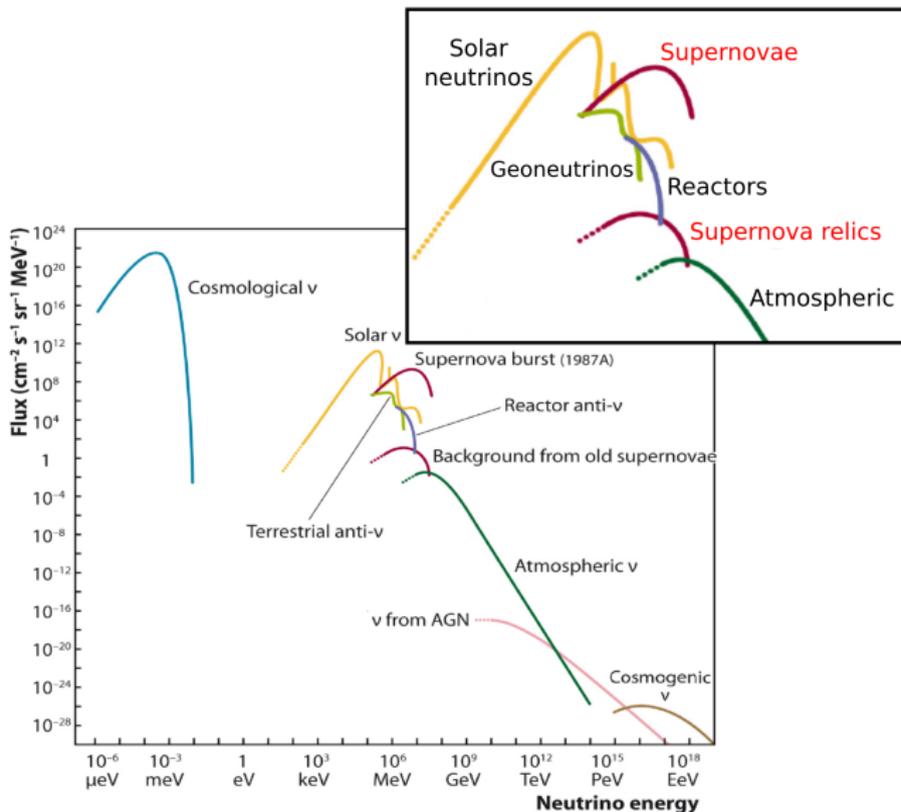
Le détecteur :

- ▶ Quasi-réplique de SK, 200 T
- ▶ Démarrage en 2011
- ▶ Gadolinium :
Avr. 2015 – Sep. 2017

SuperK-Gd : planning

- ▶ 13 T de Gd ultra-pur sont arrivées
- ▶ Fin 2019 – Début 2020 : nouveau système de recirculation
- ▶ Avant mars 2020 : dilution de 0.02% de $(\text{Gd})_2(\text{SO}_4)_3$
- ▶ Fin 2020 (?) : Dilution de 0.2% de $(\text{Gd})_2(\text{SO}_4)_3$
- ▶ 2020 – 2030 : prises de données

SuperK-Gd et l'astrophysique multi-messager



Supernovae : fun facts

- ▶ Fin de vie d'une étoile
 $M_{\text{star}} \gtrsim 8M_{\odot}$
- ▶ *Option 1* : explosion, étoile à neutrons
⇒ Luminosité de toute une galaxie !
- ▶ *Option 2* : effondrement, trou noir
- ▶ Mécanisme encore mal compris :
centre de l'étoile, dure $\sim 1\text{s}$
- ▶ Émission de 10^{57} neutrinos
99% de l'énergie de la supernova !
- ▶ Spectres d'émission ⇒ cartographie
du mécanisme de l'explosion



NASA, Hubble Heritage Team

Supernovae : fun facts

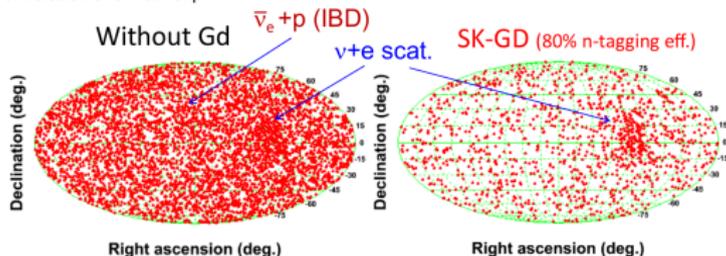
- ▶ Fin de vie d'une étoile
 $M_{\text{star}} \gtrsim 8M_{\odot}$
- ▶ *Option 1* : explosion, étoile à neutrons
⇒ Luminosité de toute une galaxie !
- ▶ *Option 2* : effondrement, trou noir
- ▶ Mécanisme encore mal compris :
centre de l'étoile, dure $\sim 1\text{s}$
- ▶ Émission de 10^{57} neutrinos
99% de l'énergie de la supernova !
- ▶ Spectres d'émission ⇒ cartographie
du mécanisme de l'explosion



SN2011dh, Waid Observatory

Supernovae et multi-messenger

Simulation of SN at 10kpc



Supernova à 10 kpc :

- ▶ 7300 $\bar{\nu}_e$
- ▶ 300 ν_e (élastique)
- ▶ Plusieurs heures avant le signal visible...

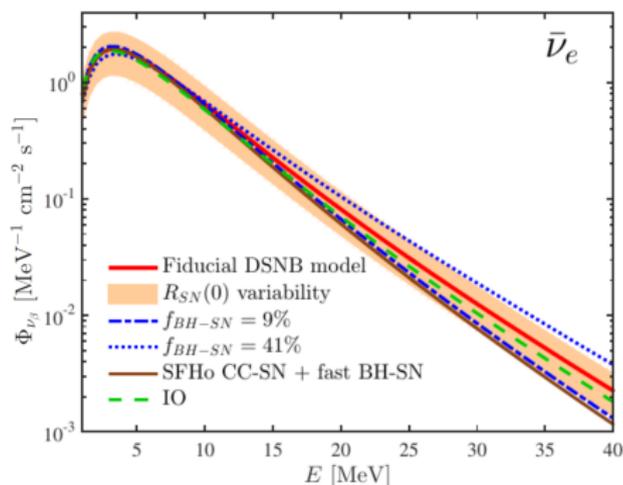
Système d'alerte pour les autres expériences :

- ▶ SNEWs : Super-Kamiokande, IceCUBE, KamLAND, LVD, Borexino, Daya Bay, HALO
- ▶ Avance confortable pour les télescopes
- ▶ Fenêtre d'analyse pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles
- ▶ **Gadolinium** : identification des interactions élastiques ν_e
⇒ **pointage avec 3° de résolution**

Mais les supernovae galactiques sont rares...

Le fond diffus de neutrinos de supernovae (DSNB)

- ▶ Univers observable : une supernova per seconde
- ▶ Supernovae passées
⇒ Fond diffus de neutrinos
- ▶ Neutrinos/antineutrinos de toutes les saveurs

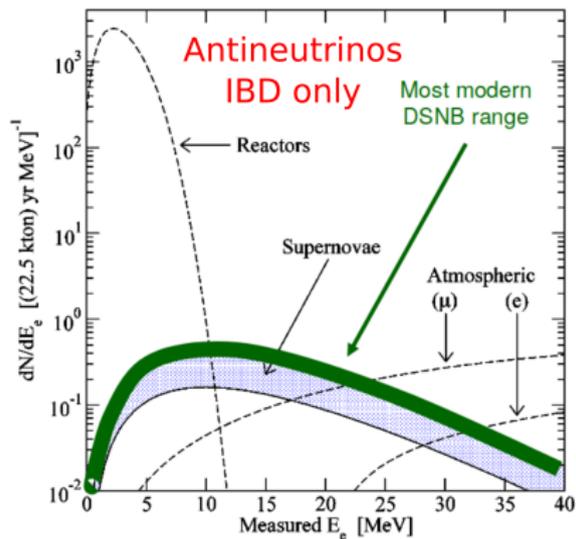


[Lunardini et al, JCAP 1207 (2012) 012]

$$\Phi = \int \left[\begin{array}{c} \bar{\nu}_e \text{ emission} \\ \text{(black hole} \\ \text{fraction)} \end{array} \right] \otimes \left[\begin{array}{c} \text{Star} \\ \text{formation} \end{array} \right] \otimes \left[\begin{array}{c} \text{Universe} \\ \text{expansion} \end{array} \right]$$

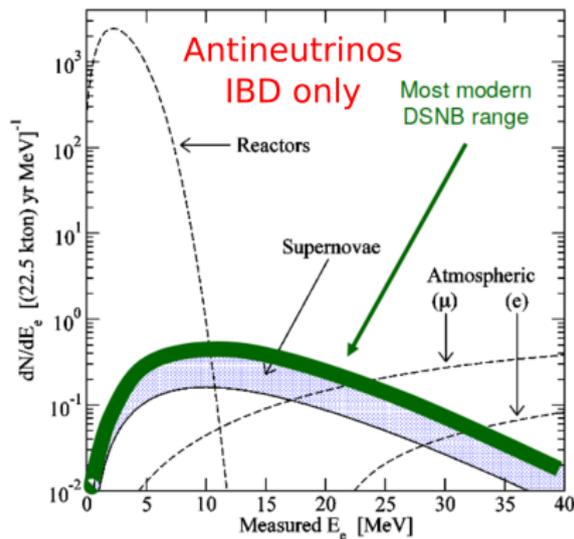
- ▶ **Signal faible** : 5 à 20 événements/an

DSNB et détection : les challenges



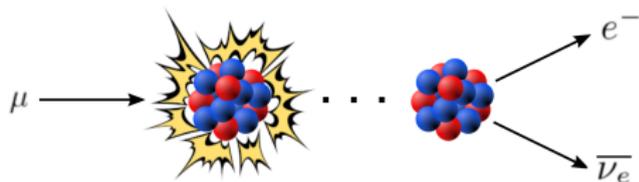
[Beacom and Vagins, Phys. Rev. Lett., 93 :171101, 2004]

DSNB et détection : les challenges



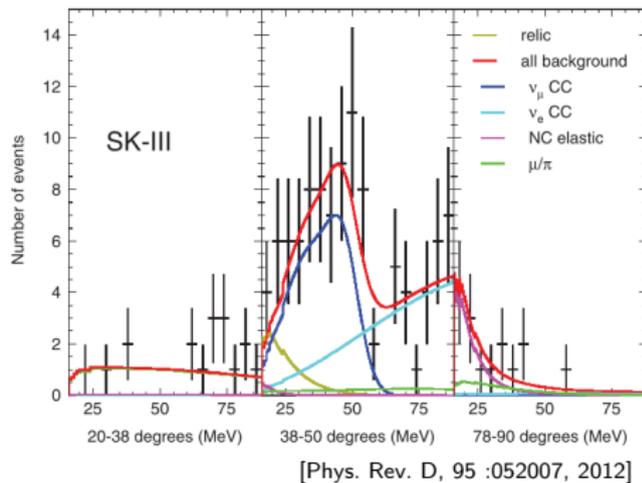
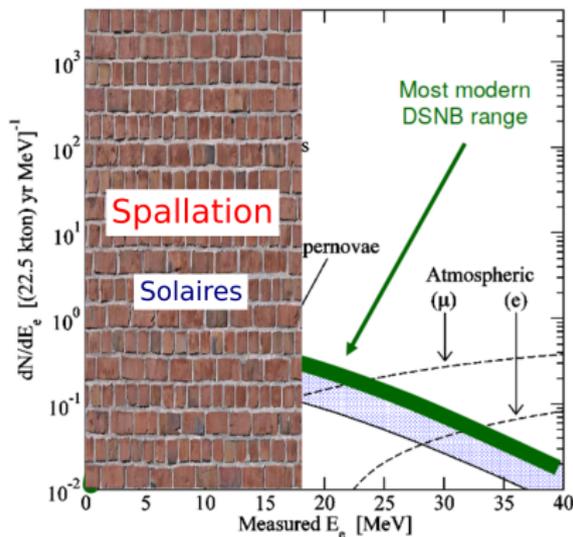
[Beacom and Vagins, Phys. Rev. Lett., 93 :171101, 2004]

Spallation



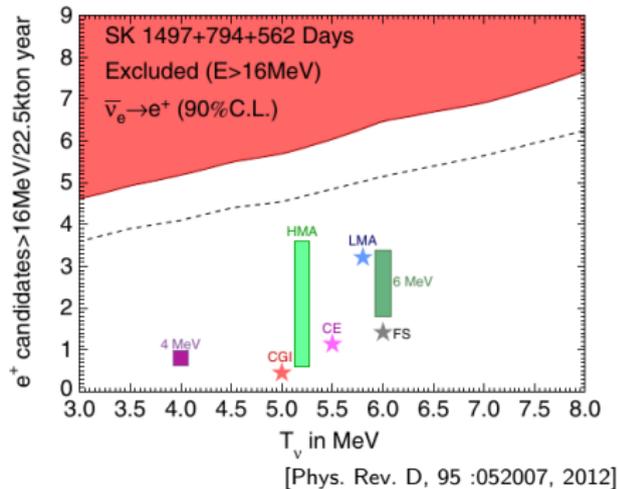
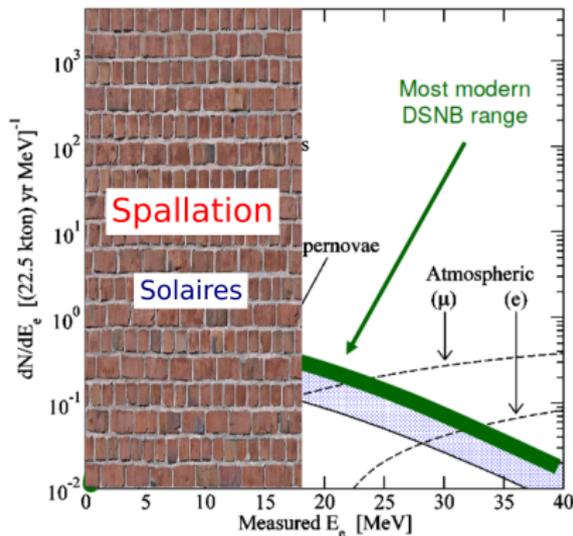
$$\mathcal{O}(10^4 - 10^5) \times \text{signal}$$

DSNB et détection : les challenges



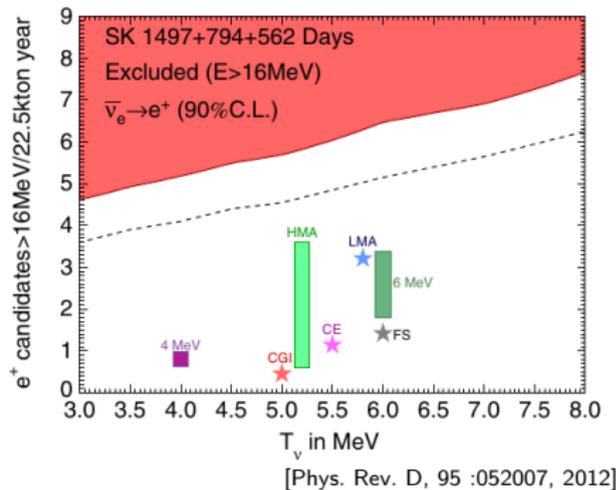
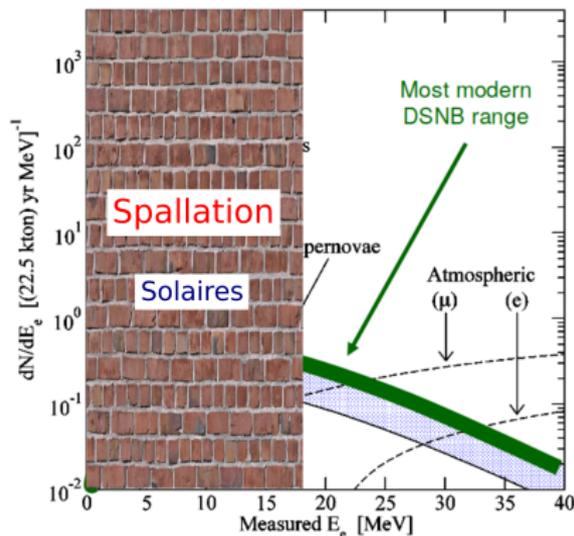
► Analyse actuelle : seuil à $E = 17.3 \text{ MeV} \Rightarrow$ statistique faible...

DSNB et détection : les challenges



- Analyse actuelle : seuil à $E = 17.3 \text{ MeV} \Rightarrow$ statistique faible...

DSNB et détection : les challenges



- ▶ Analyse actuelle : seuil à $E = 17.3 \text{ MeV} \Rightarrow$ statistique faible...
- ▶ Réduction des événements de spallation
- ▶ Optimisation de l'algorithme d'identification des neutrons
- ▶ Le gadolinium sera indispensable pour cette analyse !

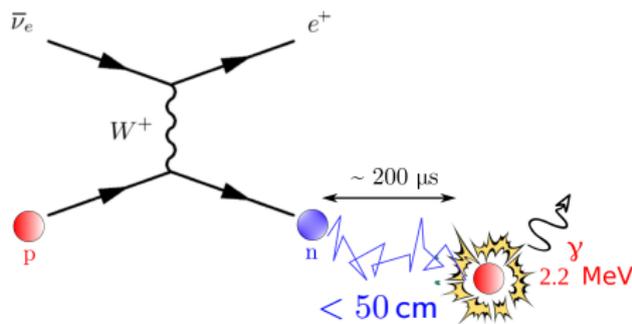
The LLR Gadolinium Squad (a.k.a Michel's Eight)



Capture de neutrons

Stage de master d'Alberto

- ▶ Capture sur proton : jusqu'à $500 \mu\text{s}$ de latence entre le positron et le photon
- ▶ **Coincidence accidentelles** : bruit électronique, "flashing" des PMTs, etc...

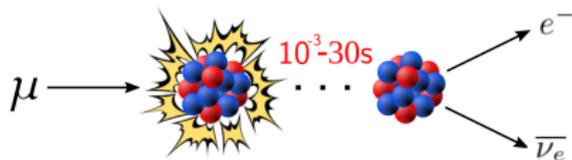


Stratégie d'analyse :

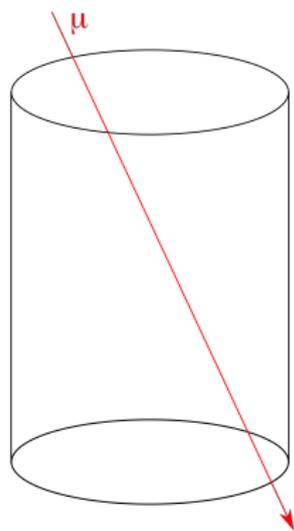
- ▶ Capture du neutron : même endroit que l'émission du positron
- ▶ Algorithme de machine learning : vertex initial, timing et position des hits \Rightarrow *22 variables, 1 semaine de training*
- ▶ Simplifier et optimiser l'algorithme actuel
- ▶ Déterminer l'origine des erreurs systématiques
- ▶ Adaptation à la capture sur gadolinium

Spallation

Thèse d'Alice

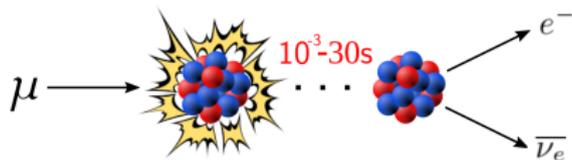


- ▶ Analyse à partir de données, pas de simulations
- ▶ Réduction d'un facteur $10^{-4} - 10^{-5}$
⇒ **neutron tagging insuffisant !**

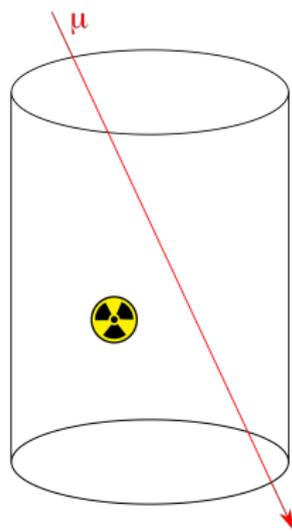


Spallation

Thèse d'Alice

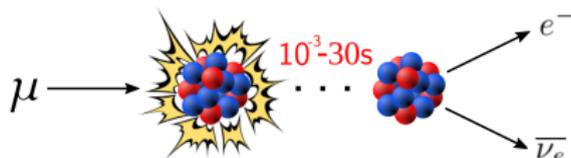


- ▶ Analyse à partir de données, pas de simulations
- ▶ Réduction d'un facteur $10^{-4} - 10^{-5}$
⇒ **neutron tagging insuffisant !**

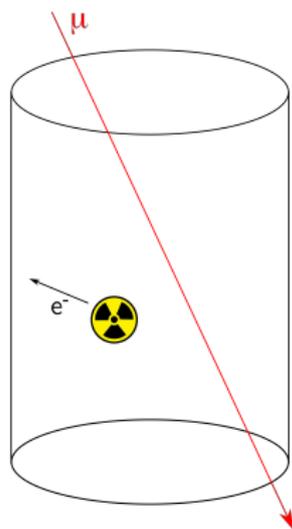


Spallation

Thèse d'Alice



- ▶ Analyse à partir de données, pas de simulations
- ▶ Réduction d'un facteur $10^{-4} - 10^{-5}$
⇒ **neutron tagging insuffisant !**



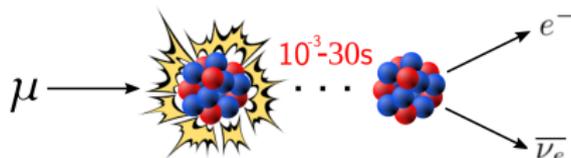
- ▶ Premières simulations (FLUKA) ⇒ **isotopes produits par les particules secondaires des gerbes hadroniques du muon**

[Li & Beacom, Phys.Rev. C89 (2014) 045801]

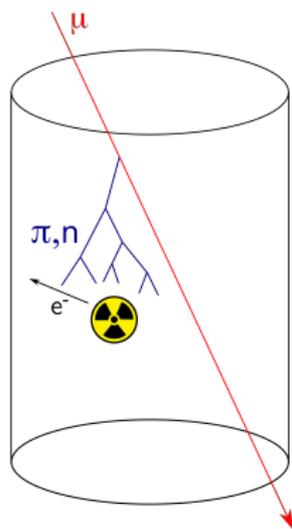
- ▶ Simulations dédiées pour Super-Kamiokande
- ▶ Liens entre spallation et propriétés de la trace du muon
- ▶ Identification des gerbes par analyse d'image

Spallation

Thèse d'Alice



- ▶ Analyse à partir de données, pas de simulations
- ▶ Réduction d'un facteur $10^{-4} - 10^{-5}$
⇒ **neutron tagging insuffisant !**



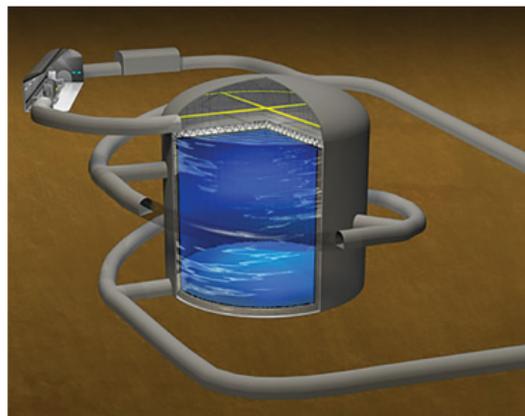
- ▶ Premières simulations (FLUKA) ⇒ **isotopes produits par les particules secondaires des gerbes hadroniques du muon**

[Li & Beacom, Phys.Rev. C89 (2014) 045801]

- ▶ Simulations dédiées pour Super-Kamiokande
- ▶ Liens entre spallation et propriétés de la trace du muon
- ▶ Identification des gerbes par analyse d'image

Préparer le futur : Hyper-Kamiokande

- ▶ **Approuvé!**
- ▶ 150 kT de volume fiduciel
- ▶ Moins profond que SK : 600 m
- ▶ Nouveaux types de PMTs ?



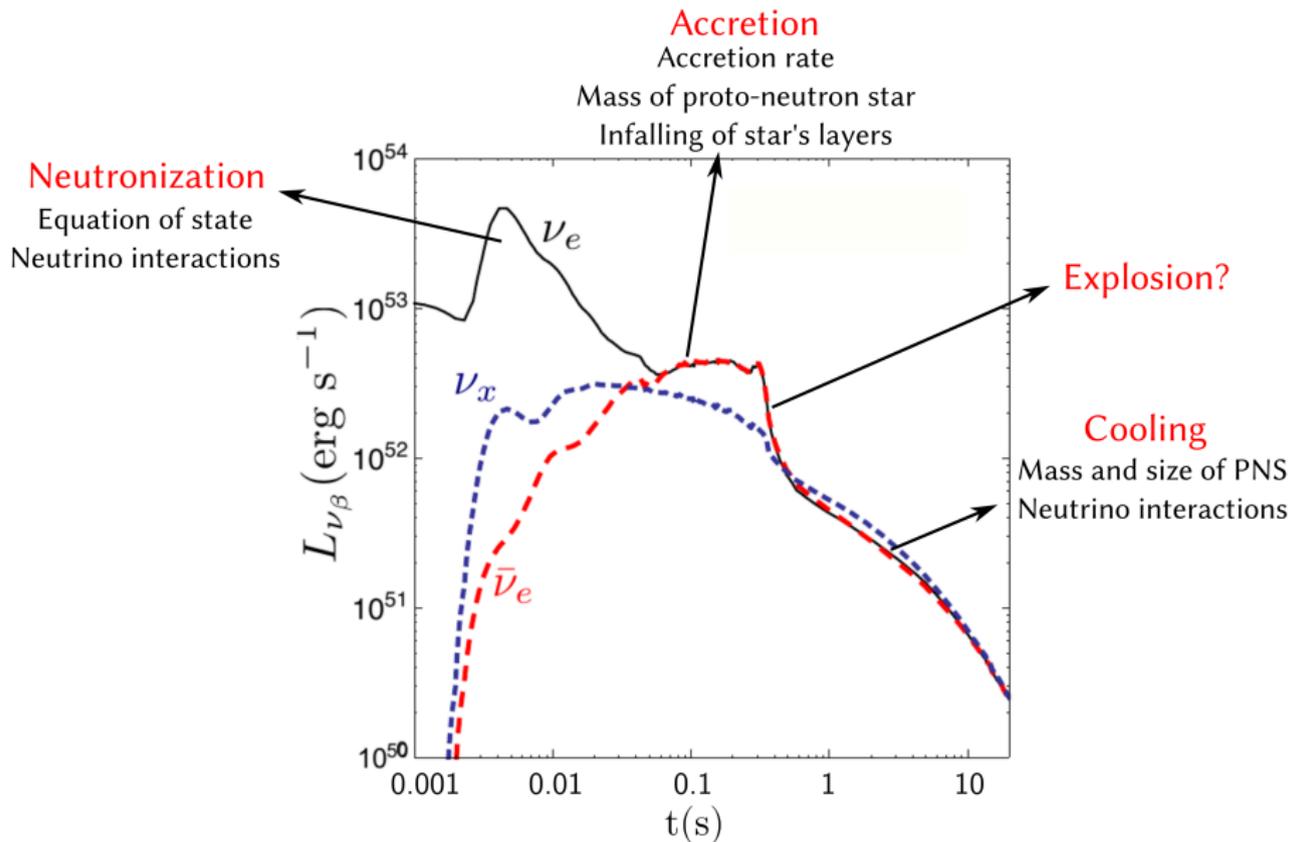
Supernovae dans Hyper-Kamiokande :

- ▶ Comment adapter les analyses basse énergie de Super-Kamiokande ?
- ▶ Spallation : développement de nouvelles techniques
- ▶ Neutrinos reliques : de la détection à la mesure du spectre
Que peut-on apprendre sur les supernovae, la cosmologie, et la formation des étoiles ?

Conclusion

- ▶ SK-Gd va démarrer dans quelques mois
- ▶ Projet clé des prochaines années : accès à des spectres de neutrinos encore jamais observés
- ▶ Nécessite des techniques d'analyse innovantes
- ▶ Informations essentielles sur les supernovae, la cosmologie, et la formation des étoiles
- ▶ SK-Gd et Hyper-K : un nouveau champ d'études théoriques et expérimentales pour les 10-20 ans à venir

Supernovae et spectre de neutrinos



Supernovae et spectre de neutrinos

