

Public lecture at the APPEC town meeting
Paris, April 6, 2016

Neutrinos Oscillants

Takaaki Kajita

Institute for Cosmic Ray Research, The Univ. of Tokyo

Programme

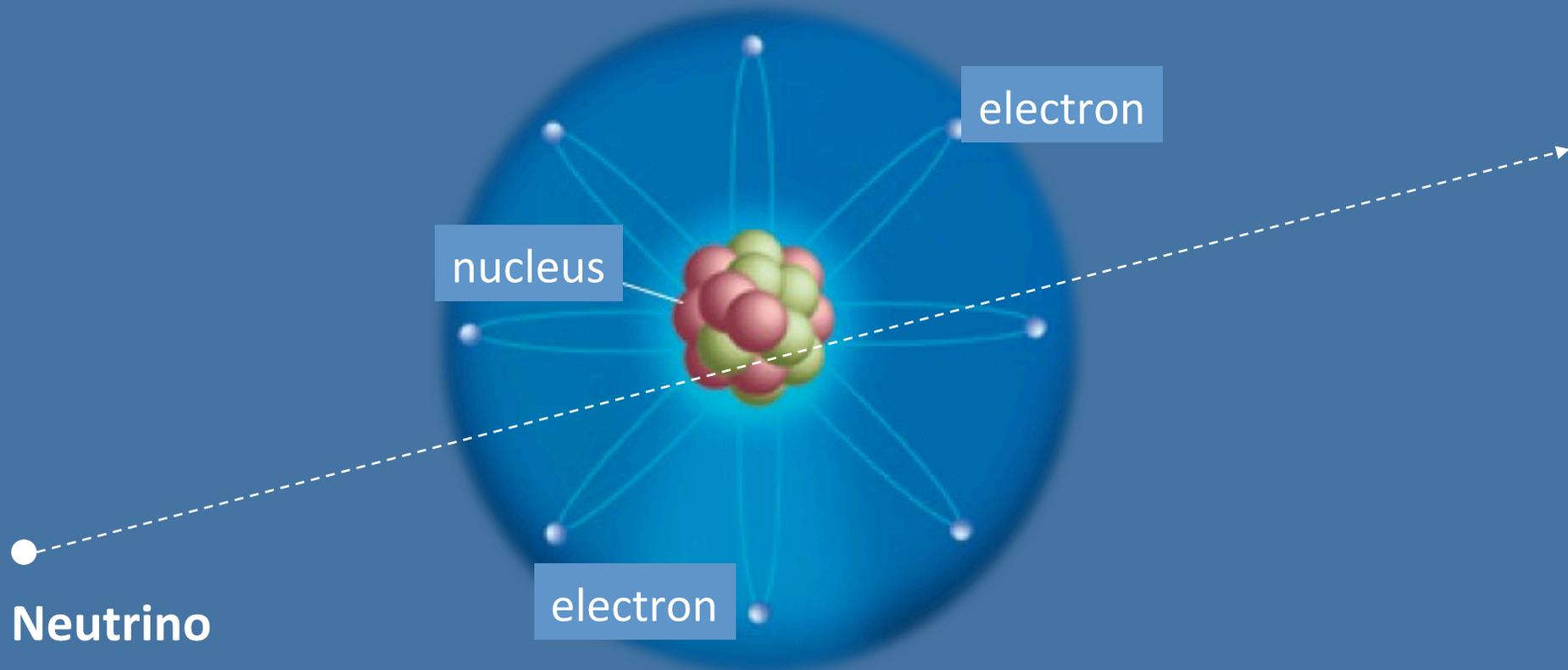
- Introduction: c'est quoi les neutrinos?
- Le déficit des neutrinos atmosphériques
- La découverte des oscillations des neutrinos
- Le statut actuel des oscillations des neutrinos
- Le future
- Conclusions

Introduction: C'est quoi les neutrinos?

C'est quoi les neutrinos?

Neutrinos;

- ✓ Ils sont des particules fondamentaux comme les électrons et les quarks
- ✓ Ils sont comme les électrons sans charge électrique
- ✓ Ils étaient supposées être sans mass



Les Neutrinos peuvent pénétrer la terre sans difficulté

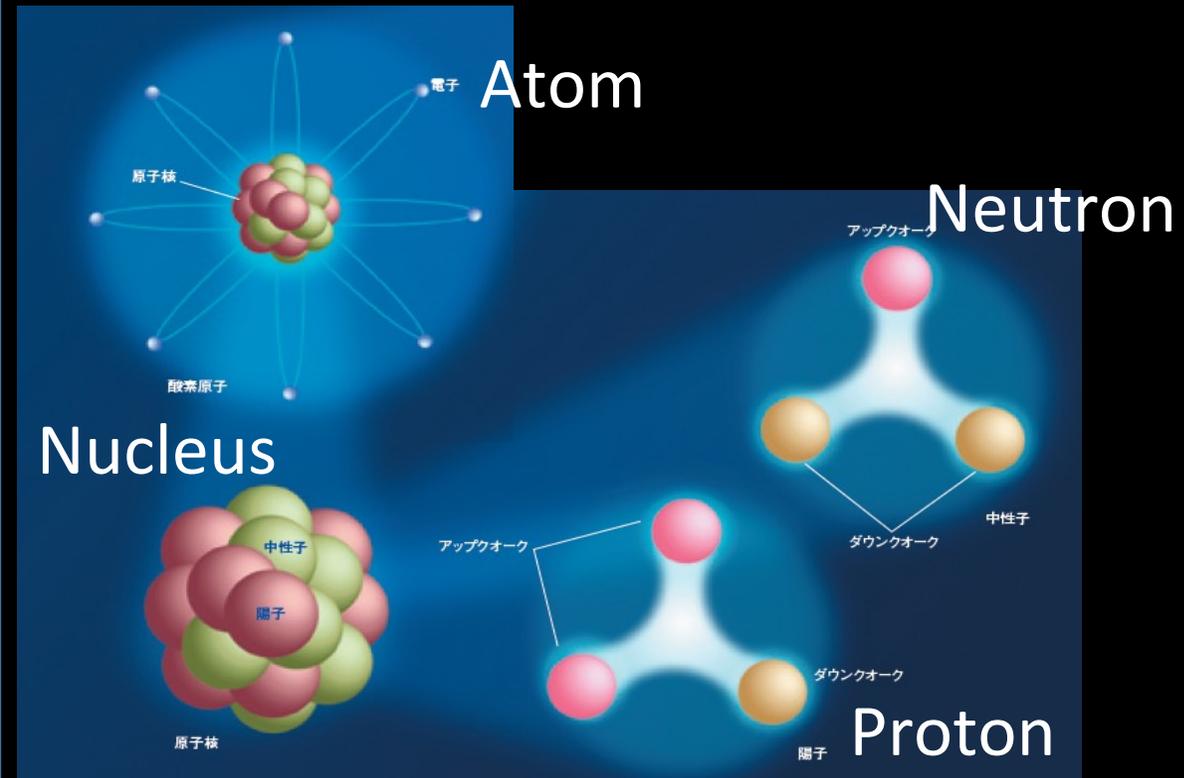


Neutrino

Les neutrinos d'énergie similaire à celle de la présentation d'aujourd'hui peuvent pénétrer 10,000 terres.

Pourtant ils interagissent avec la matière même si c'est faiblement

3 types (saveurs) de neutrinos

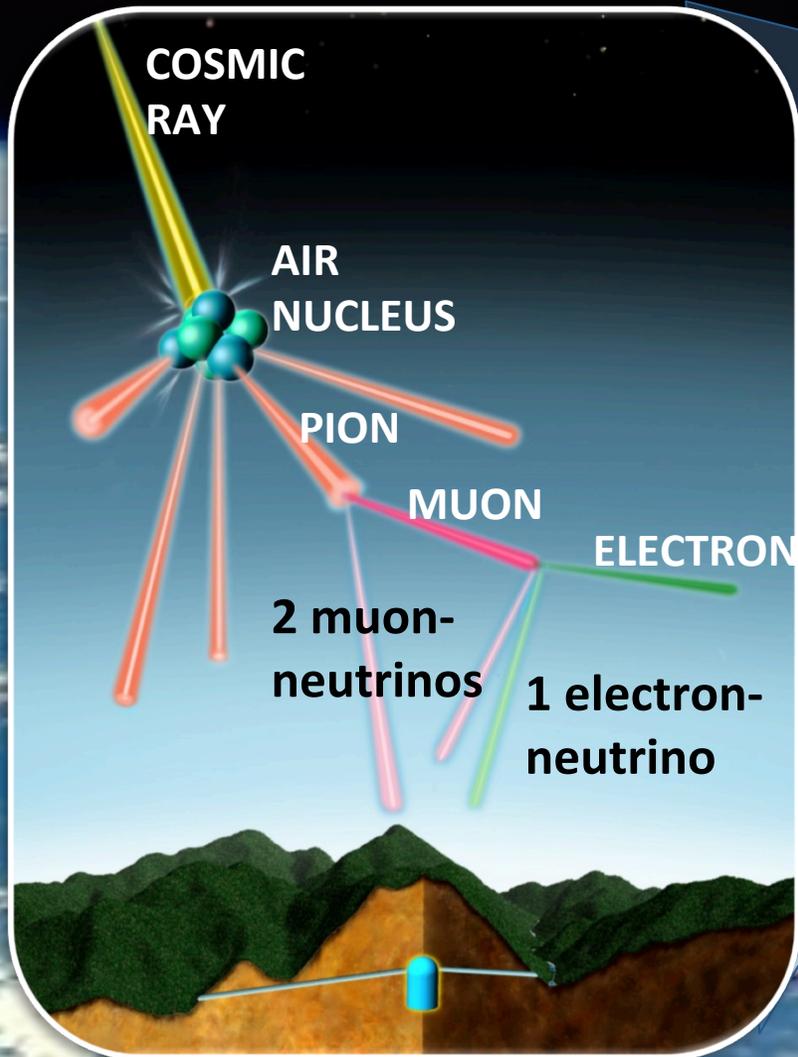


QUARKS	$2/3$ $1/2$ u up	$2/3$ $1/2$ c charm	$2/3$ $1/2$ t top
	$1/3$ $1/2$ d down	$1/3$ $1/2$ s strange	$1/3$ $1/2$ b bottom
	$2/3$ $1/2$ e electron	$1/2$ $1/2$ μ muon	$1/2$ $1/2$ τ tau
	$1/2$ $1/2$ ν_e electron neutrino	$1/2$ $1/2$ ν_μ muon neutrino	$1/2$ $1/2$ ν_τ tau neutrino
	LEPTONS		

Quarks and leptons sont les particules les constituants de la matière les plus fondamentaux
 Les neutrinos sont des leptons.
 Les neutrinos viennent en 3 types (saveurs):
 neutrinos-electron, neutrinos-muon et neutrinos-tau.

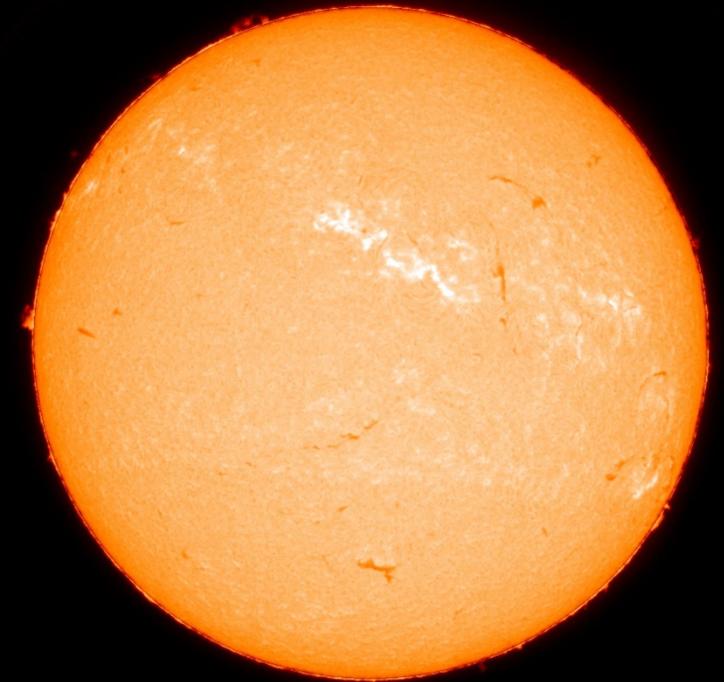
Production des neutrinos

Les neutrinos sont produits à plusieurs lieux, l'atmosphère terrestre, le centre du Soleil



Atmosphère

Solar Observatory, NAOJ, Mitaka

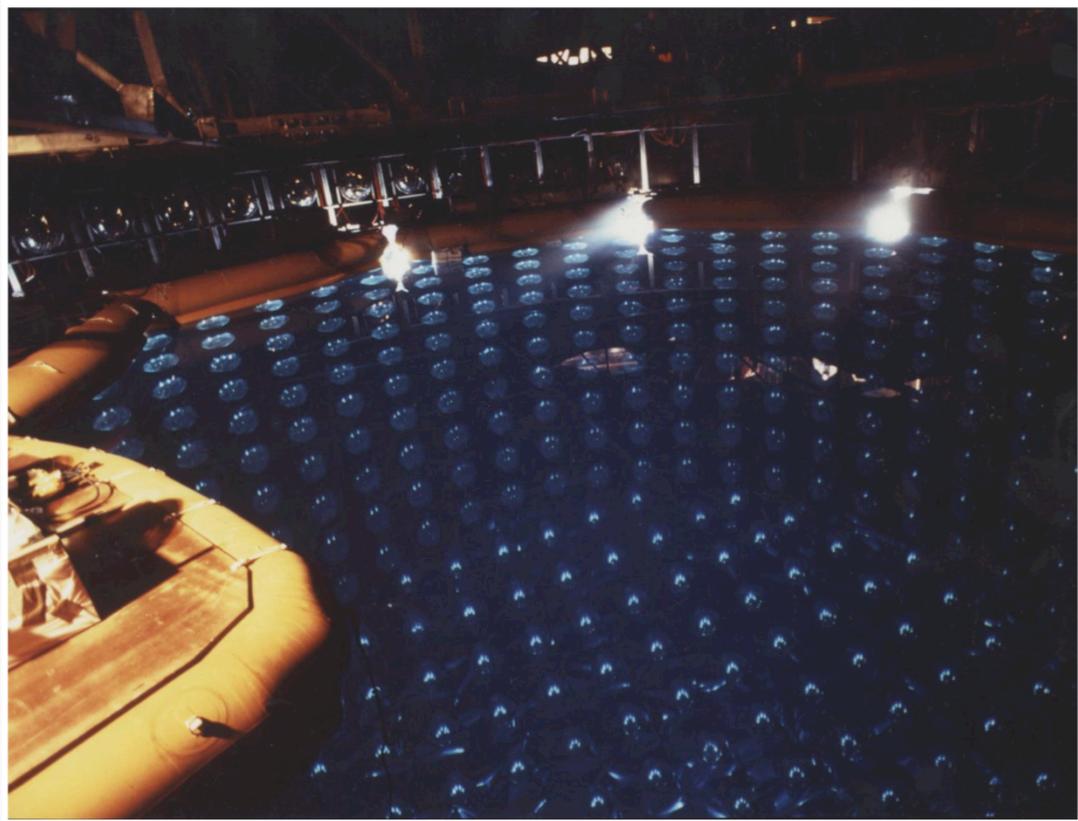


H α Center Intensity 2016-02-10 23:50:46 UT

Déficit des neutrinos Atmosphériques

Kamioka Neutron Decay Experiment (Kamiokande)

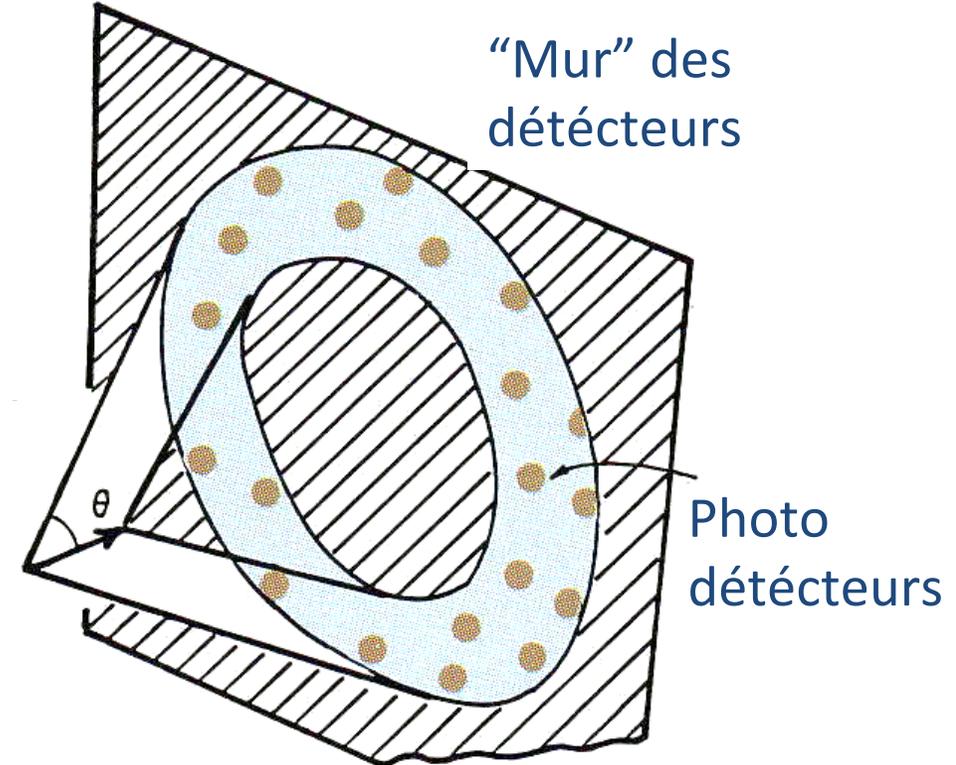
- ✓ Des nouvelles théories unifiant les interactions Fortes, Electromagnétiques et Faibles ont été proposées aux années 1970,
- ✓ Ces théories prédisaient que les protons et les neutrons (c.a.d. les nucléons) devaient se désintégrer avec un temps de vie de l'ordre de 10^{28} à 10^{32} années.
- ✓ Plusieurs expériences des « désintégration de proton » ont commencé aux années 1980 . Parmi eux l'expérience Kamiokande



Kamiokande
(Volume
fiduciel 1000
tonnes)

Lumière
Cherenkov

particule
chargée



Où est Kamioka?



Equipe de construction de Kamiokande (Printemps 1983)



M. Takita

TK

A. Suzuki

T.Suda

M. Nakahata

K. Arisaka

Y. Totsuka

**M. Koshiba
(2002 Nobel Prize)**

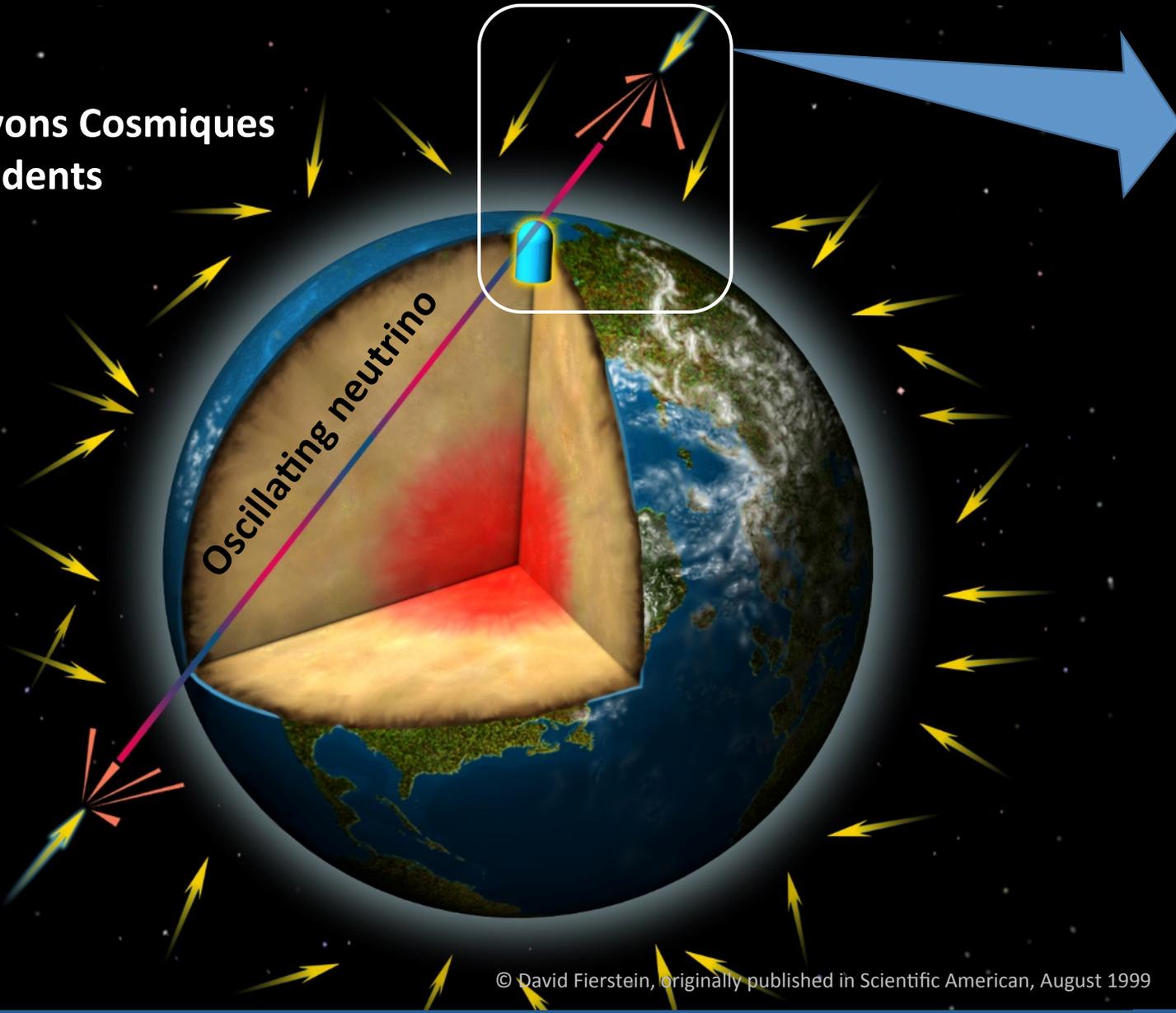
T. Kifune

La construction du détecteur Kamiokande (Printemps 1983)

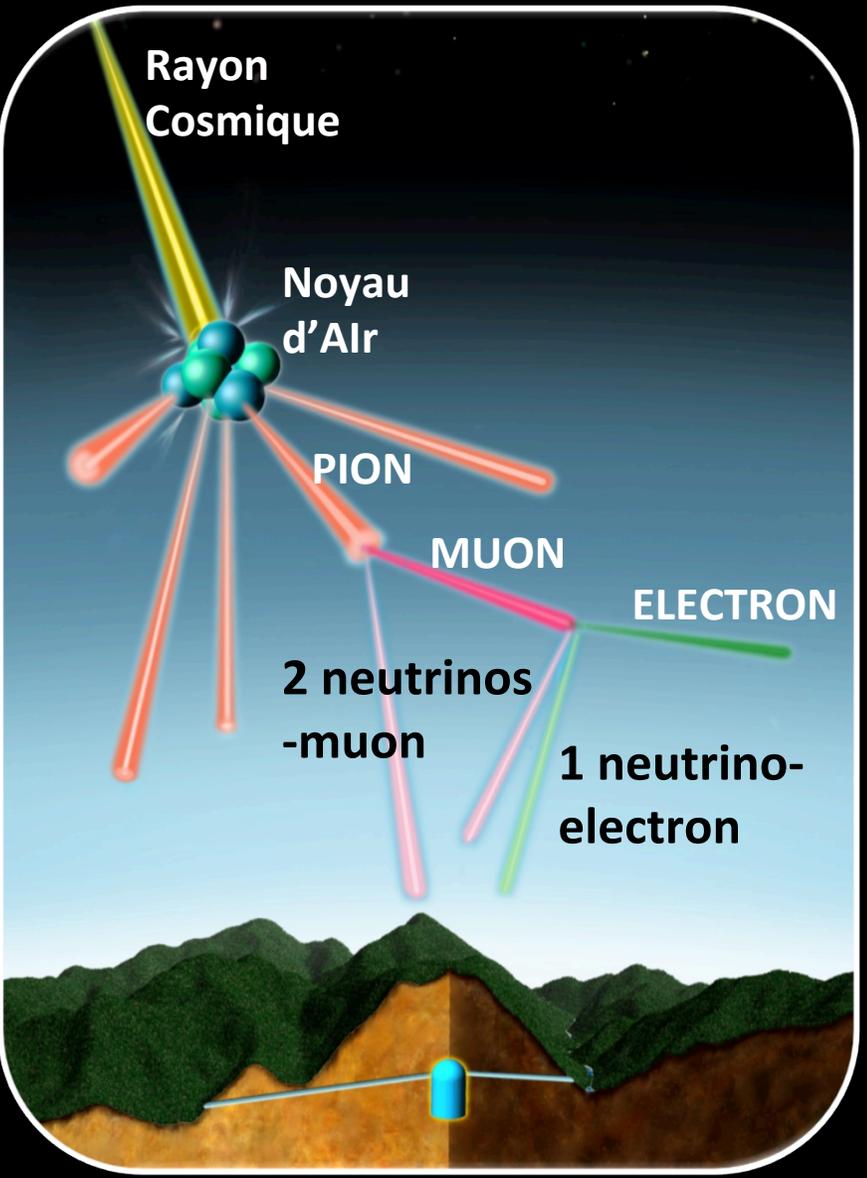


Neutrinos Atmosphériques

Rayons Cosmiques Incidents



Oscillating neutrino



Rayon Cosmique

Noyau d'Air

PION

MUON

ELECTRON

2 neutrinos -muon

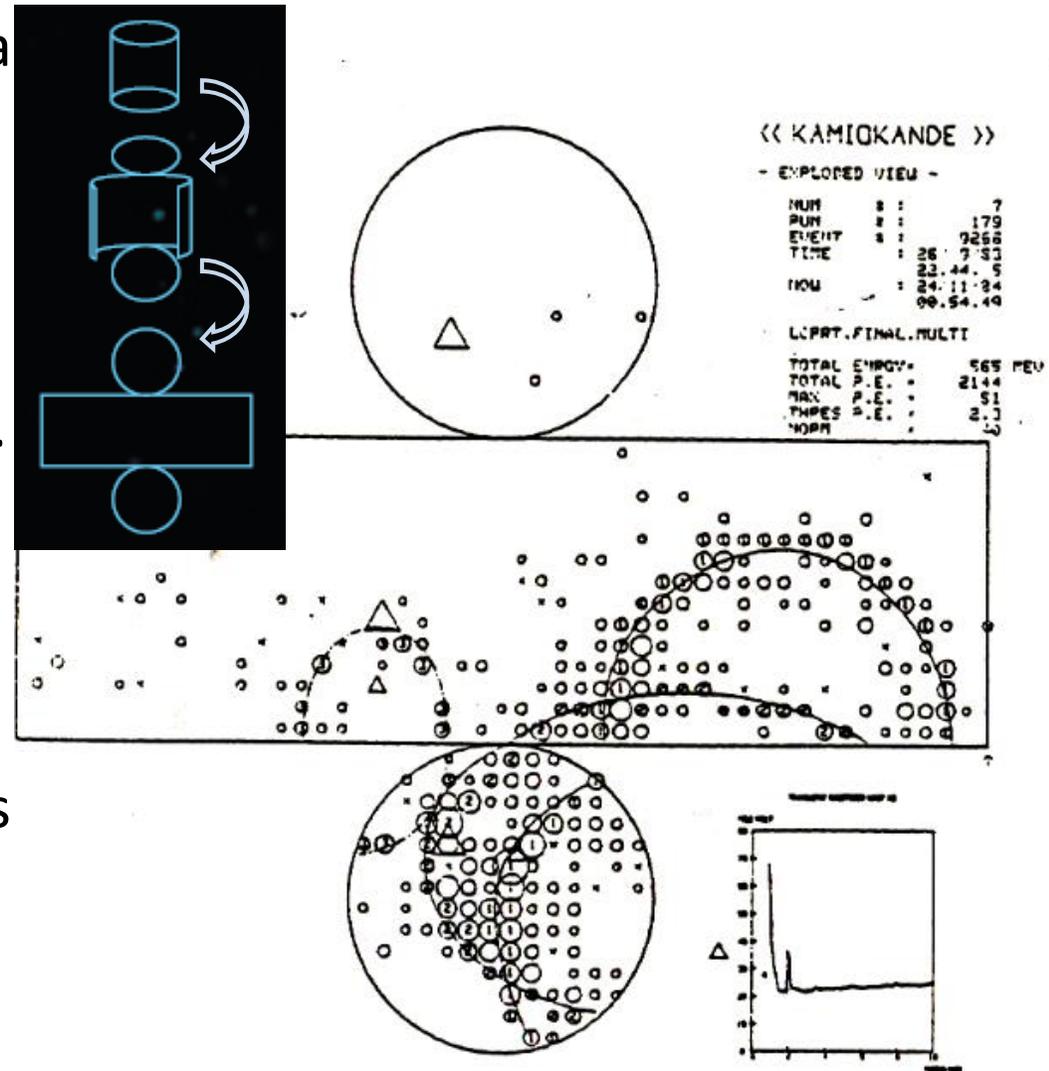
1 neutrino-electron

© David Fierstein, originally published in Scientific American, August 1999

1986...

J'ai obtenu mon doctorat en Mars 1986, il concernait la recherche de la désintégration du proton (Je n'en ai trouvé aucune preuve..).

Je sentais que le logiciel d'analyse n'a pas été assez efficace pour départager le signal (désintégration du proton) du bruit de fonds (neutrinos atmosphériques) . Par conséquent , dès que j'ai soumis ma thèse , j'ai commencé à travailler pour l'amélioration du logiciel . Une partie du logiciel concernait l'analyse d'événements multi-anneaux pour identifier le type de particules qui les produisent. En particulier, nous avons voulu savoir si chaque anneau « Cherenkov » dans un événement multi- anneau est produit par un électron ou un muon. Le nouveau logiciel a été appliqué à des événements Cherenkov - d'anneau unique , qui étaient les événements les plus faciles à analyser



Evénement multi-anneau observé à Kamiokande.

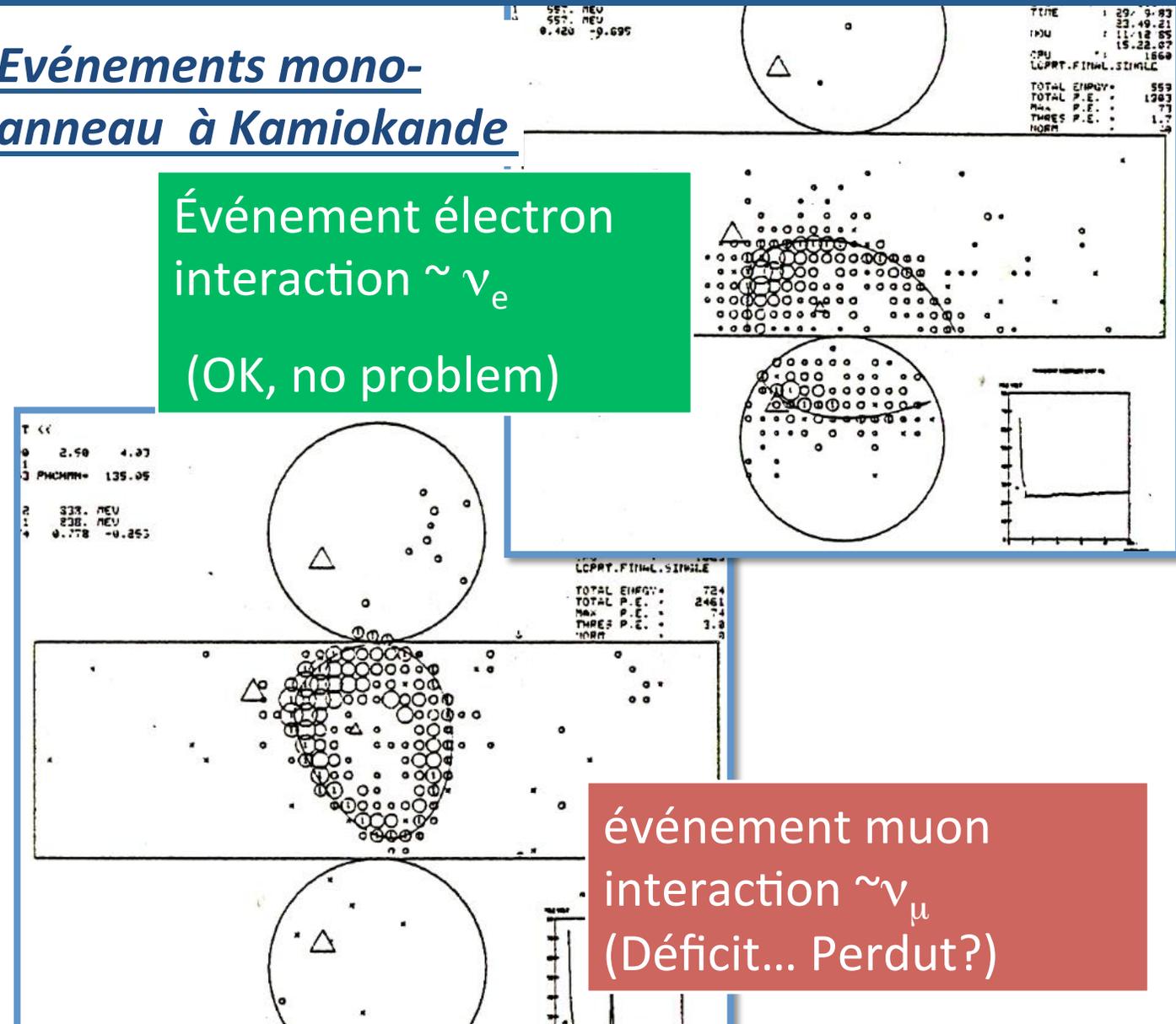
Un resultat étrange ...

- La saveur de neutrino a été étudié pour les événements de neutrinos atmosphériques .
- Le résultat était étrange . Le nombre d'événements ν_μ était beaucoup moins que prévu.
- Je pensais qu'il est probable qu'il y ait des erreurs quelque part dans la simulation , la réduction des données , et /ou à la reconstruction de l'événement.
- Nous avons commencé différentes études pour trouver des erreurs possibles vers la fin de 1986

Evénements mono- anneau à Kamiokande

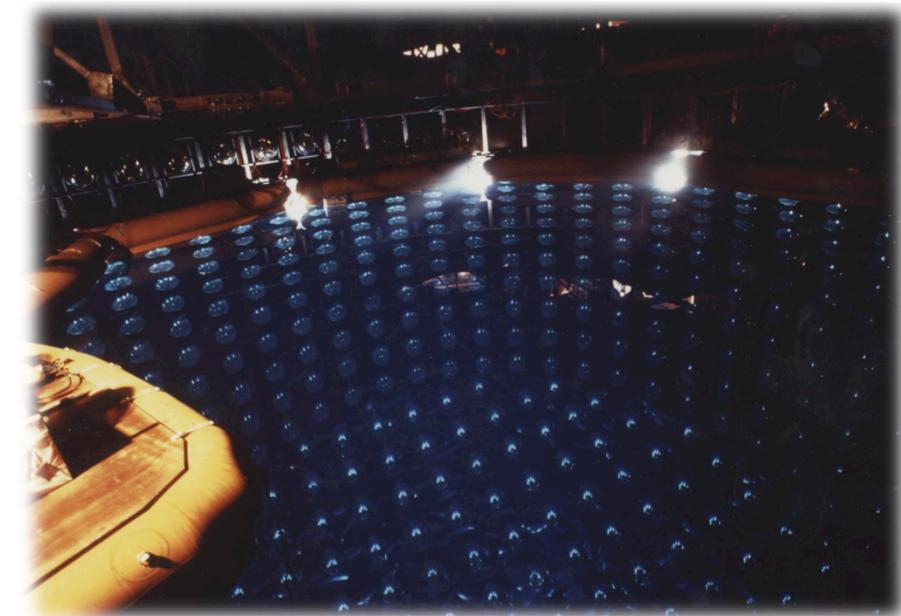
Événement électron
interaction $\sim \nu_e$
(OK, no problem)

événement muon
interaction $\sim \nu_\mu$
(Déficit... Perdut?)



Résultat pour le déficit ν_μ (1988)

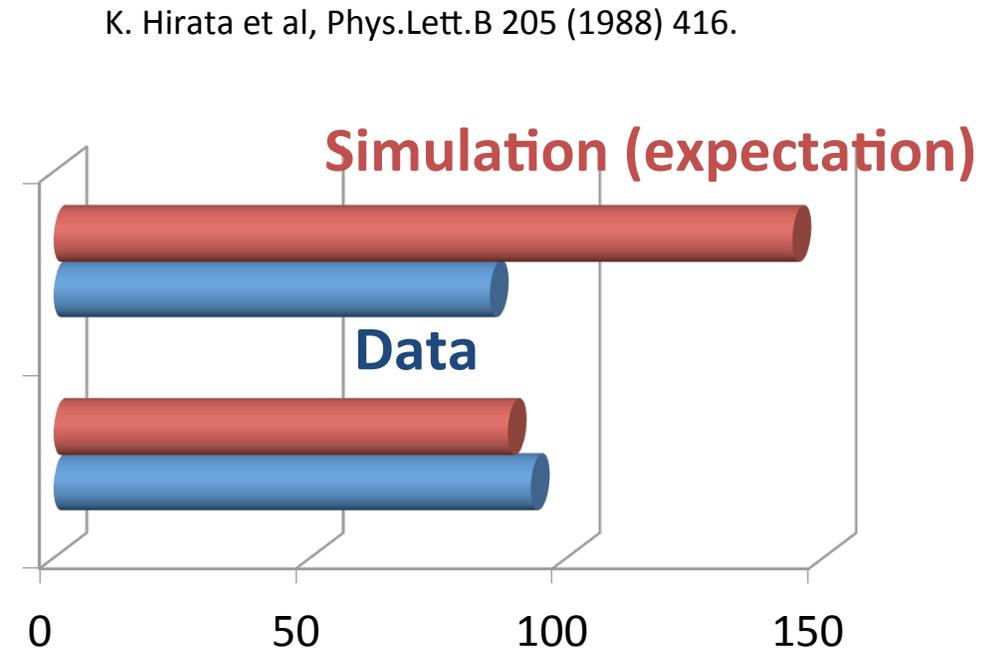
Après une année d'études, on a conclu que le déficit ν_μ ne peut pas être dû à un problème d'analyse et/ou simulation



Kamiokande

Evénements
Neutrino-muon

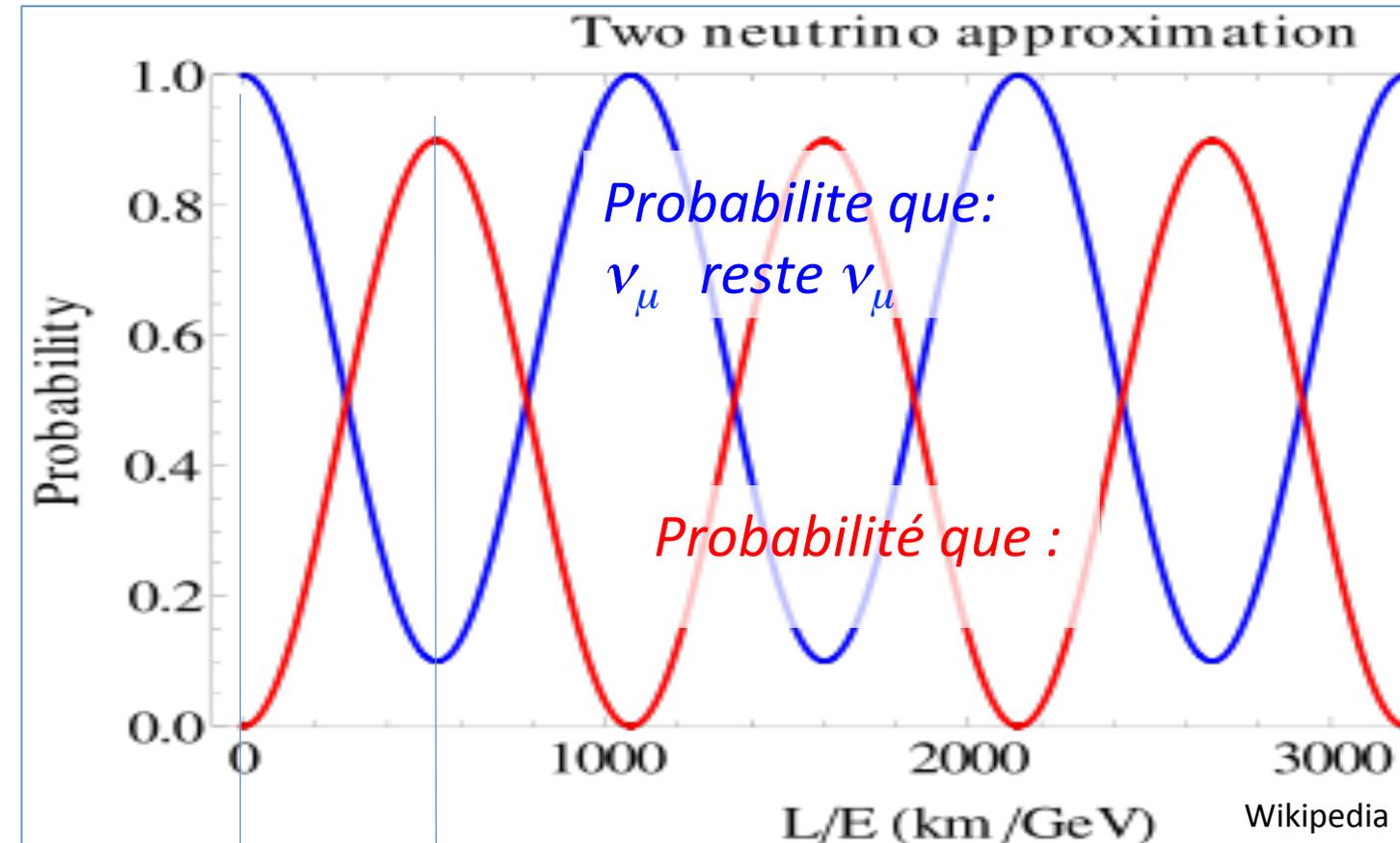
Evénements
Neutrino- Electron



Conclusion du papier: "On ne peut pas expliquer les données à partir des effets systématiques du détecteur ou les incertitudes des flux atmosphériques des neutrinos. . Une nouvelle physique comme les **oscillations neutrinos pourrait expliquer les données.**"

Oscillations des Neutrinos

Si les neutrinos ont une masse, ils changent leur saveur (type) d'une saveur(type) à une autre .
Par exemple, des oscillations peuvent arriver entre ν_μ et ν_τ .



Prédit par les théoriciens ;



S. Sakata, Z. Maki, M. Nakagawa

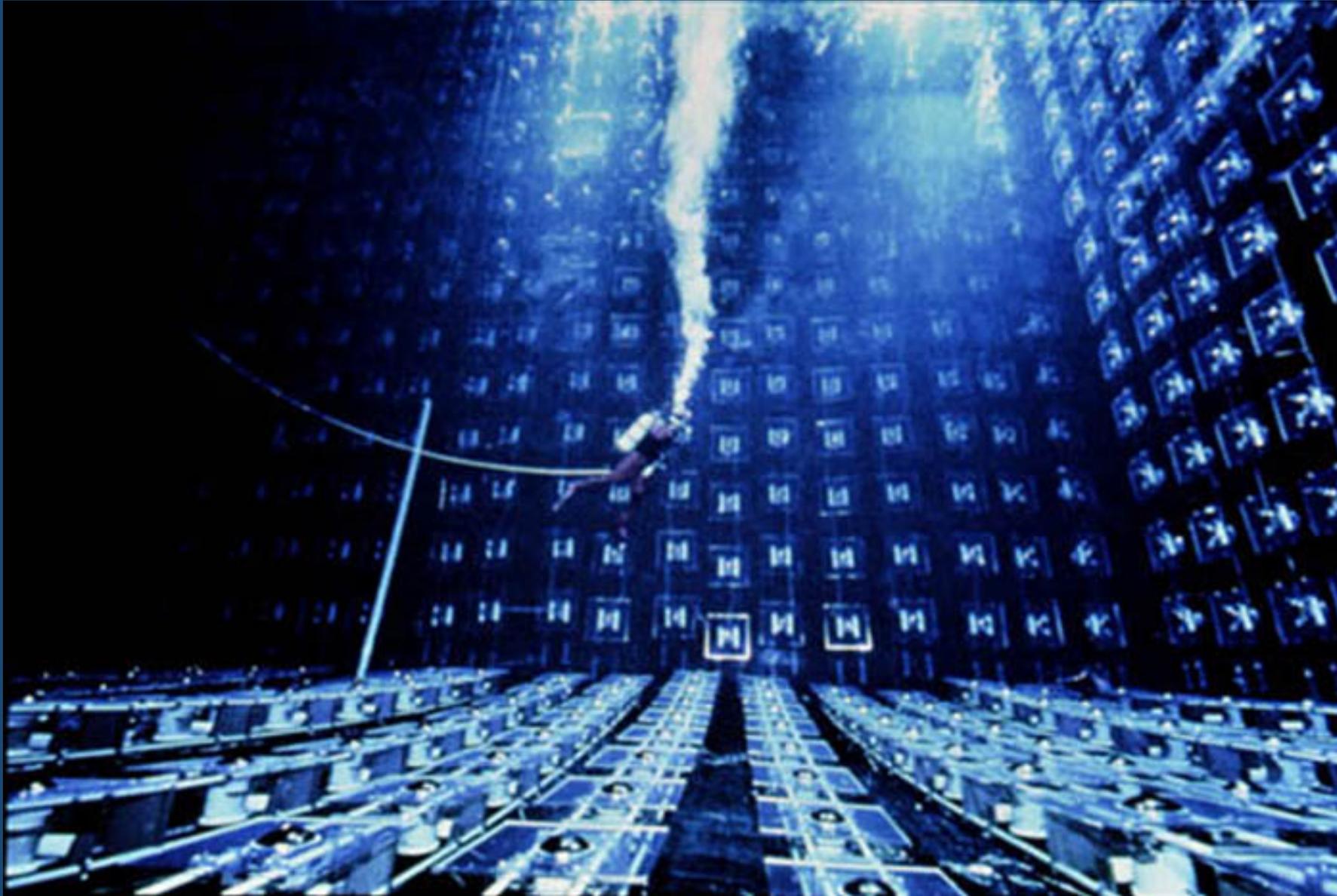


B. Pontecorvo

L est la longueur de vol du neutrino (km),
 E est l'énergie du neutrino (GeV).

Si la masse du neutrino est plus petite, la longueur d'oscillation (L/E) devient plus grande.

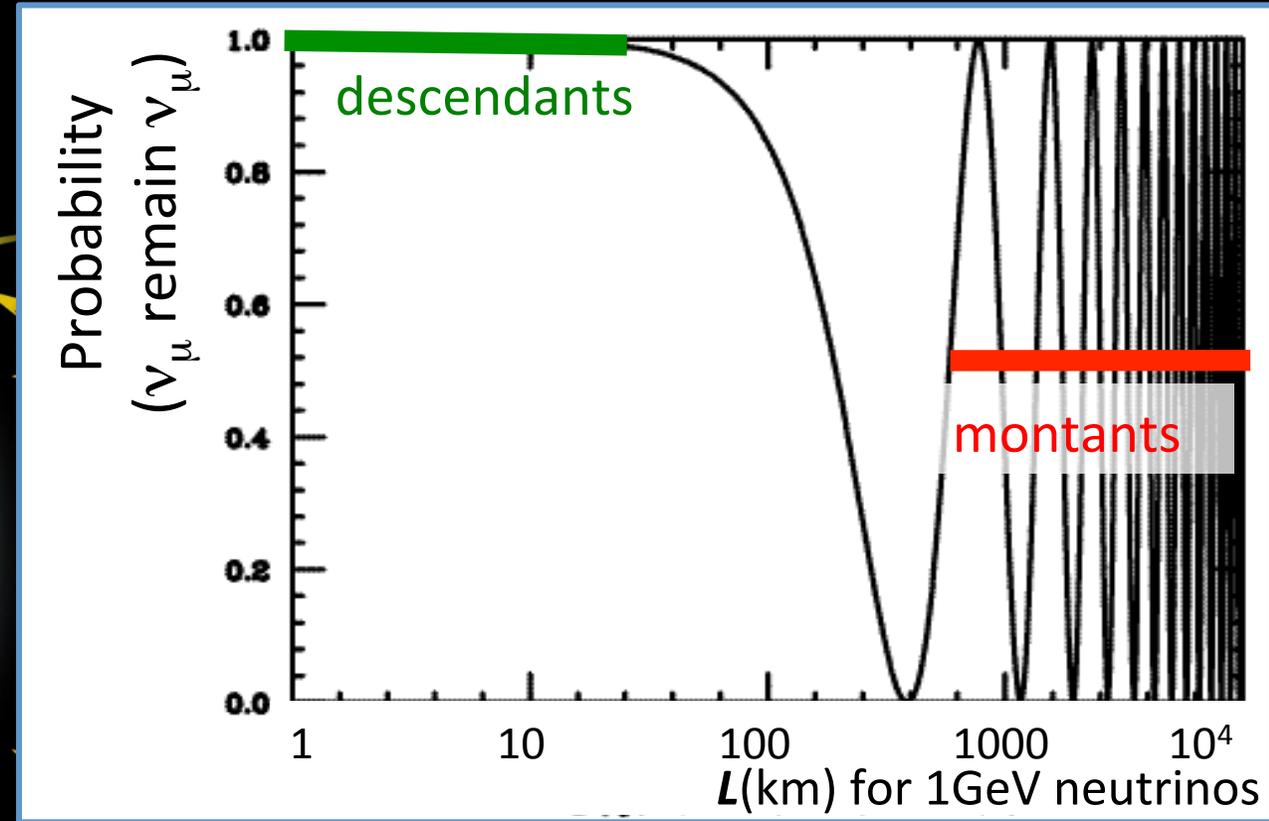
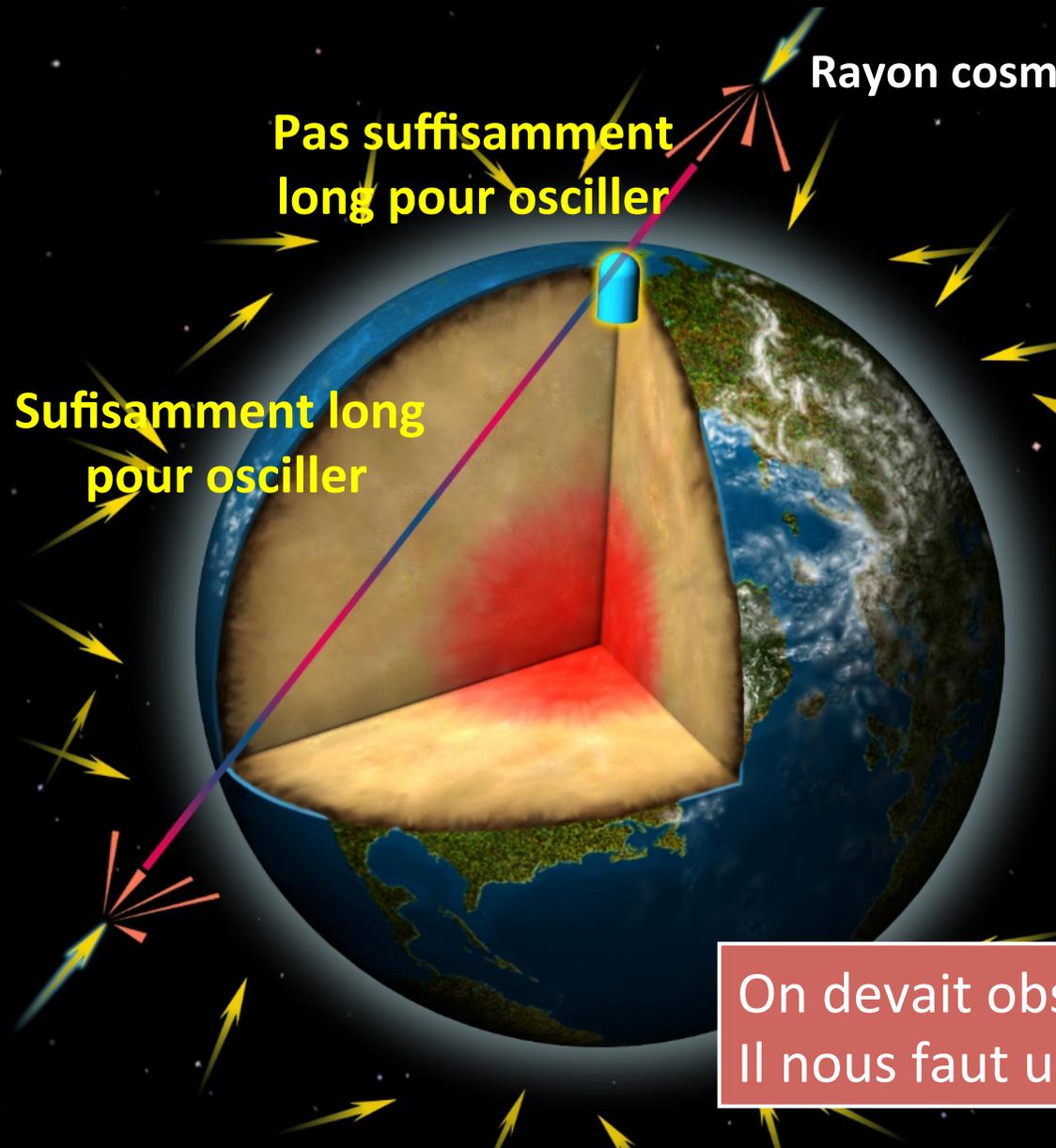
Résultats de l'expérience IMB pour le déficit ν_μ



D. Casper et al., PRL **66** (1991) 2561.
R. Becker-Szendy, PRD **46** (1992) 3720.

L'expérience IMB, un autre grand détecteur « Cherenkov à eau » a également rapporté un déficit d'événements ν_μ

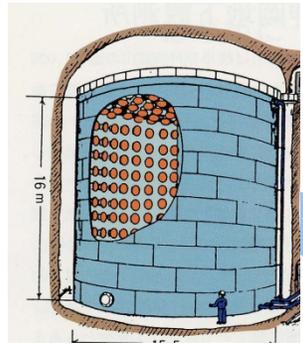
Qu'est-ce qu'il va se passer si le déficit ν_μ est dû à des oscillations ν ?



On devait observer un déficit de ν_μ montants !
Il nous faut un détecteur plus grand. → Super-Kamiokande

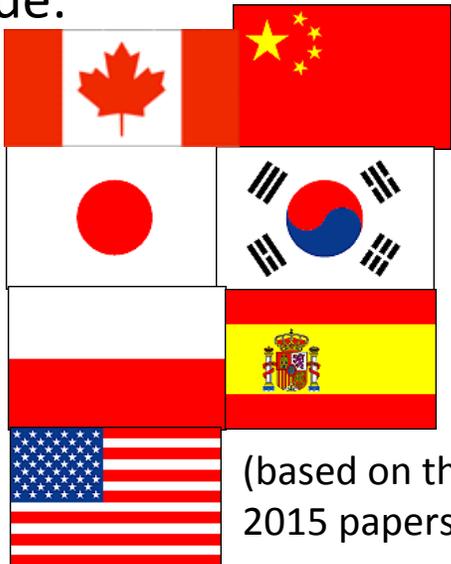
Découverte des oscillations neutrino

Détecteur Super-Kamiokande

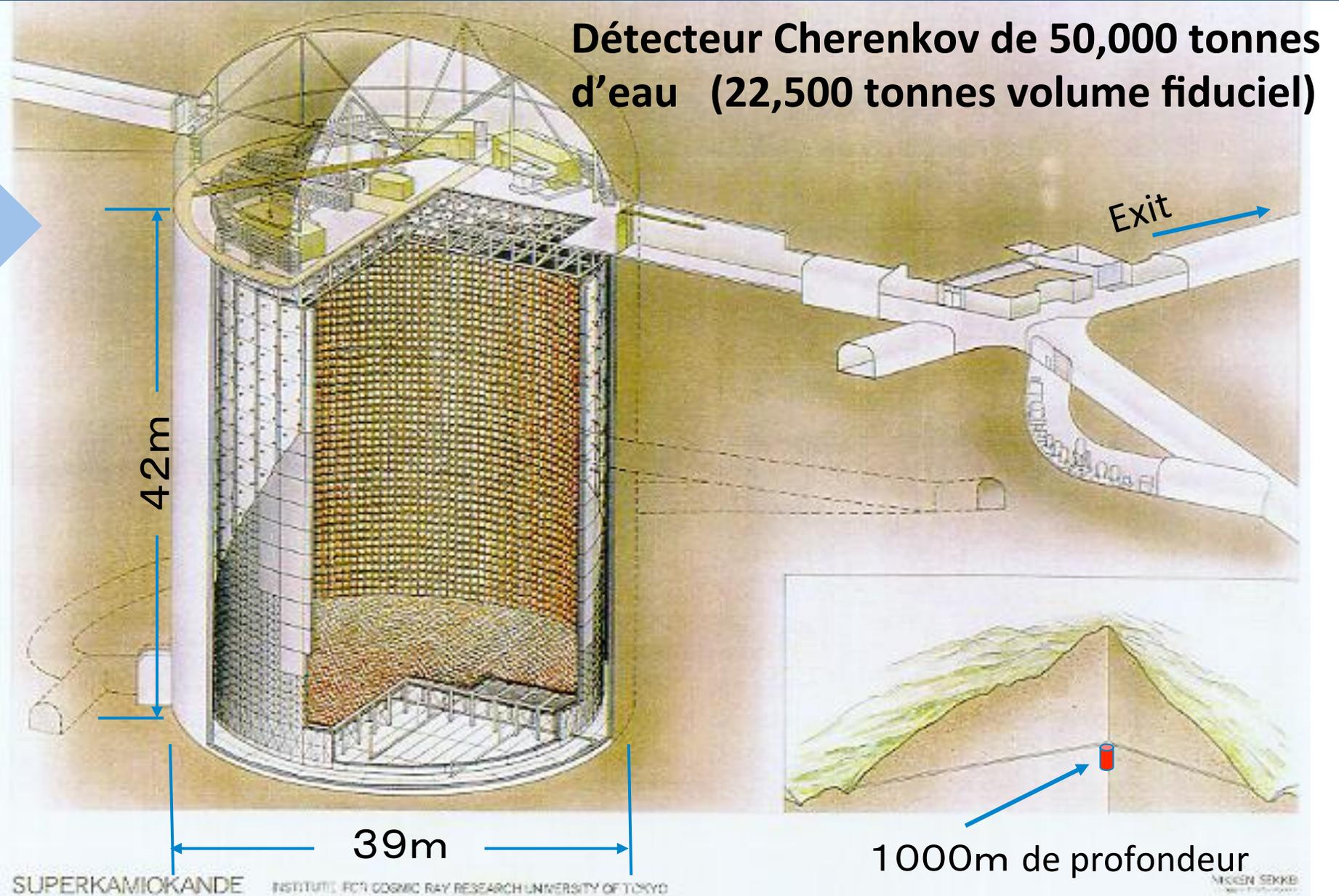


Masse supérieure
plus que 20 fois

~120 collaborateurs
de:



(based on the
2015 papers)



1000m de profondeur

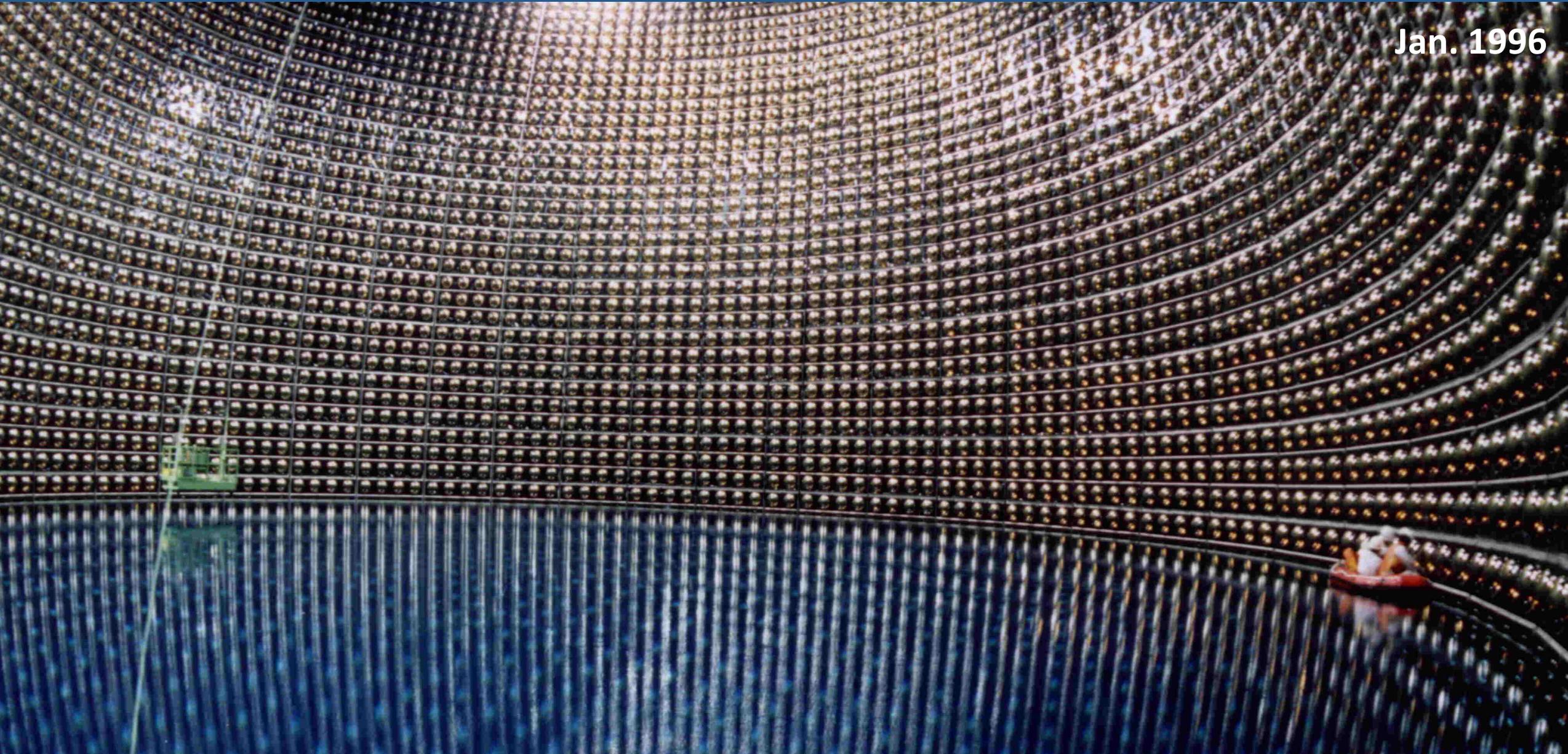
Construction du détecteur Super-Kamiokande (spring 1995)



Y. Totsuka

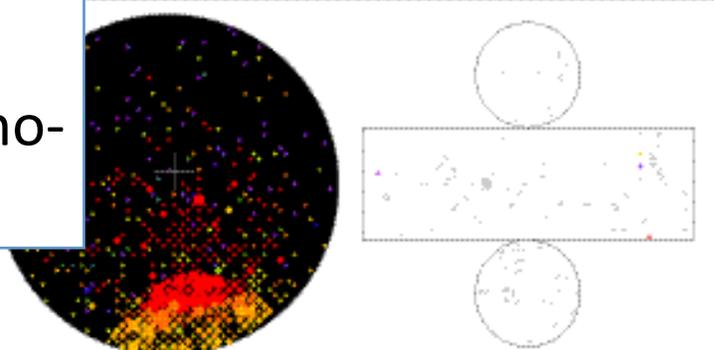
En remplissant Super-Kamiokande avec eau

Jan. 1996

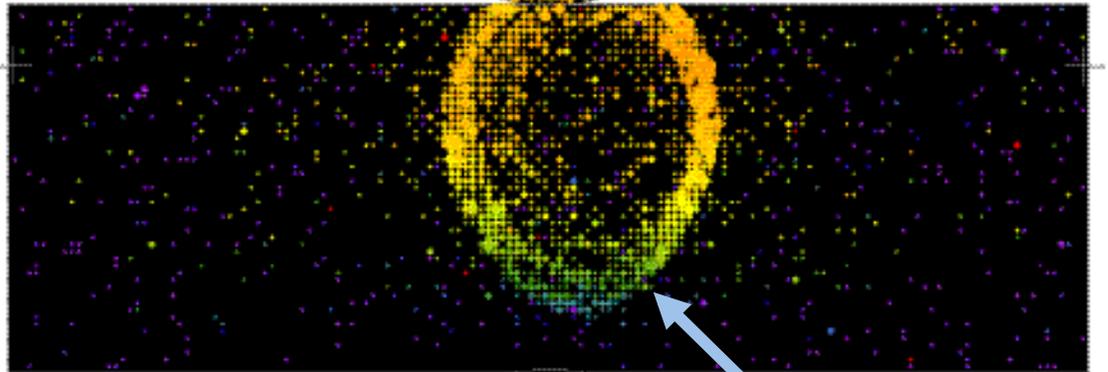
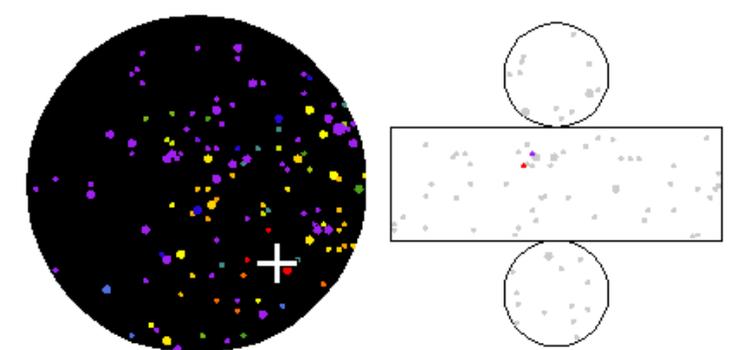


Evenements neutrino atmospheriques observés à Super-K (1)

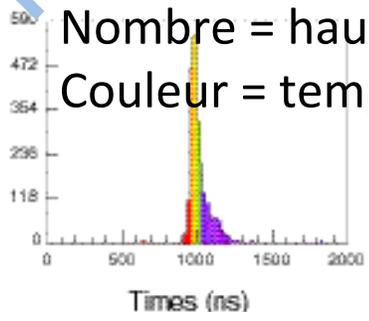
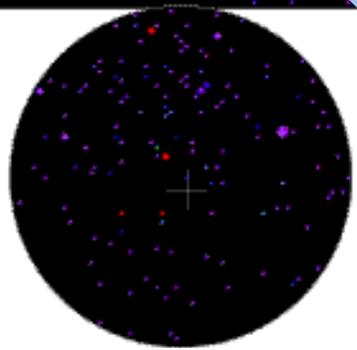
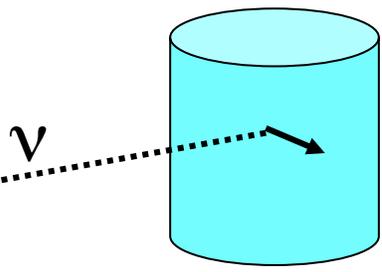
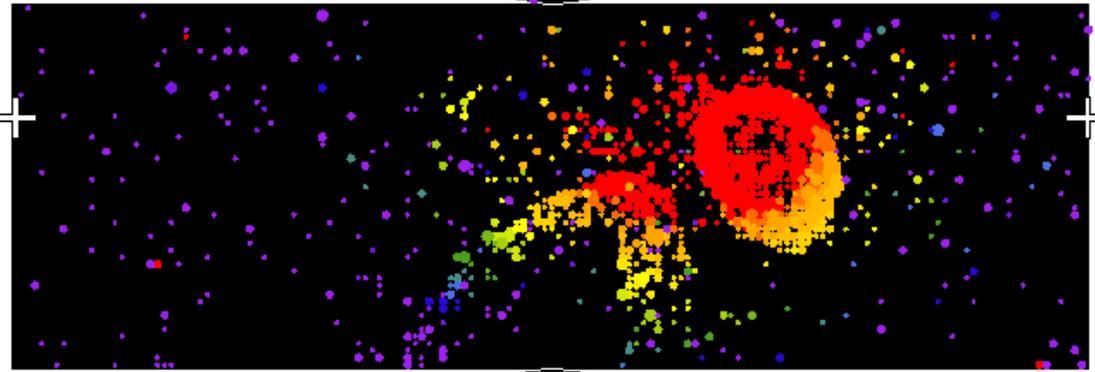
Evénement Cherenkov mono-anneau



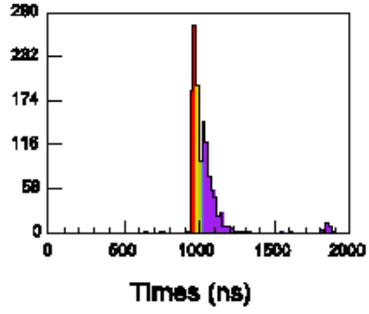
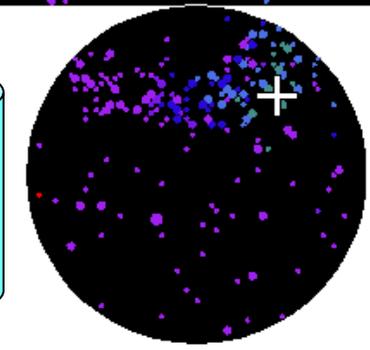
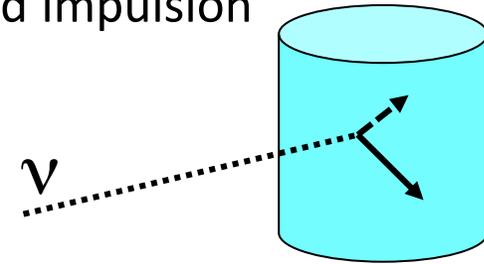
Evénement Cherenkov multi-anneaux



- Time(ns)
- ★ < 976
 - ★ 976- 981
 - ★ 981- 986
 - ★ 986- 991
 - ★ 991- 996
 - ★ 996-1001
 - ★ 1001-1006
 - ★ 1006-1011
 - ★ 1011-1016
 - ★ 1016-1021
 - ★ 1021-1026
 - ★ 1026-1031
 - ★ 1031-1036
 - ★ 1036-1041
 - ★ 1041-1046
 - ★ >1046

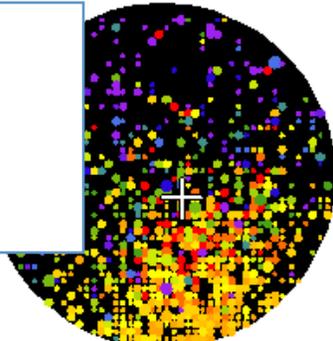


Nombre = hauteur d'impulsion
Couleur = temps

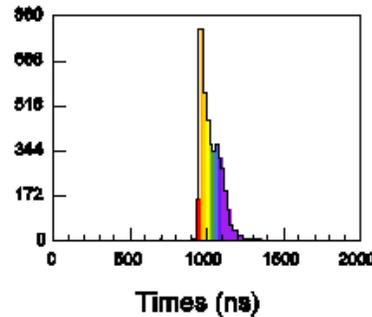
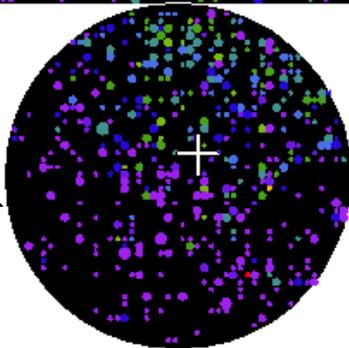
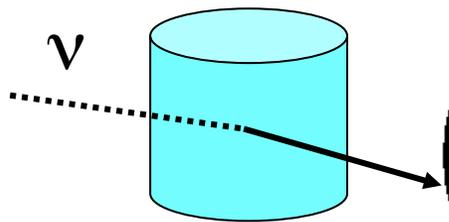
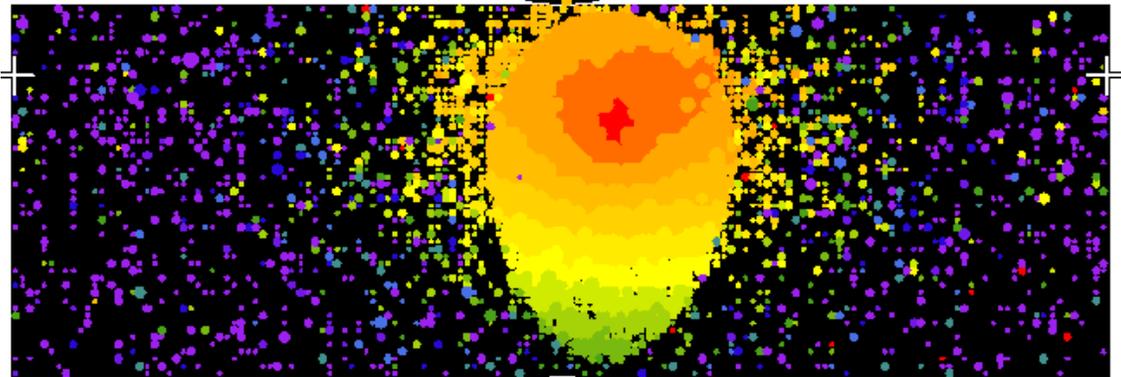
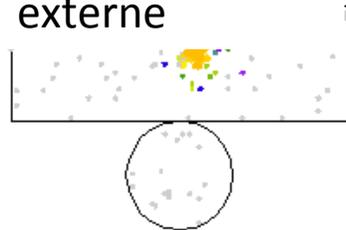


Atmospheric neutrino events observed in Super-K (2)

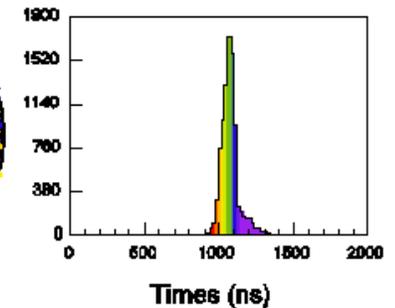
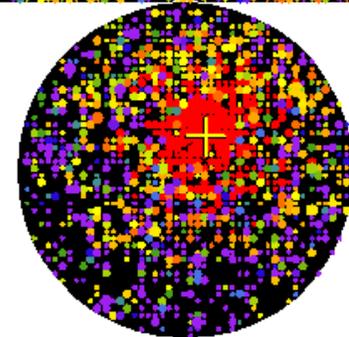
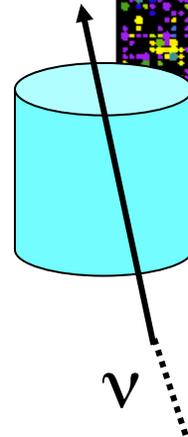
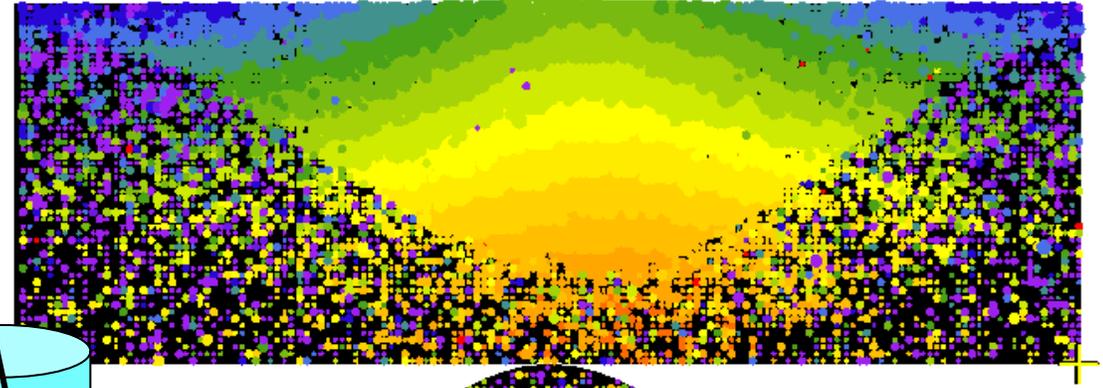
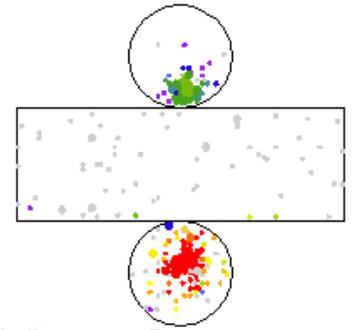
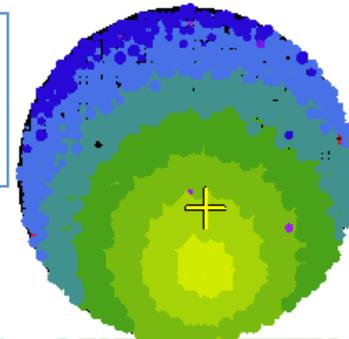
Événement
contenu
partiellement



Signal au
détecteur
externe



Événement muon
ascendant

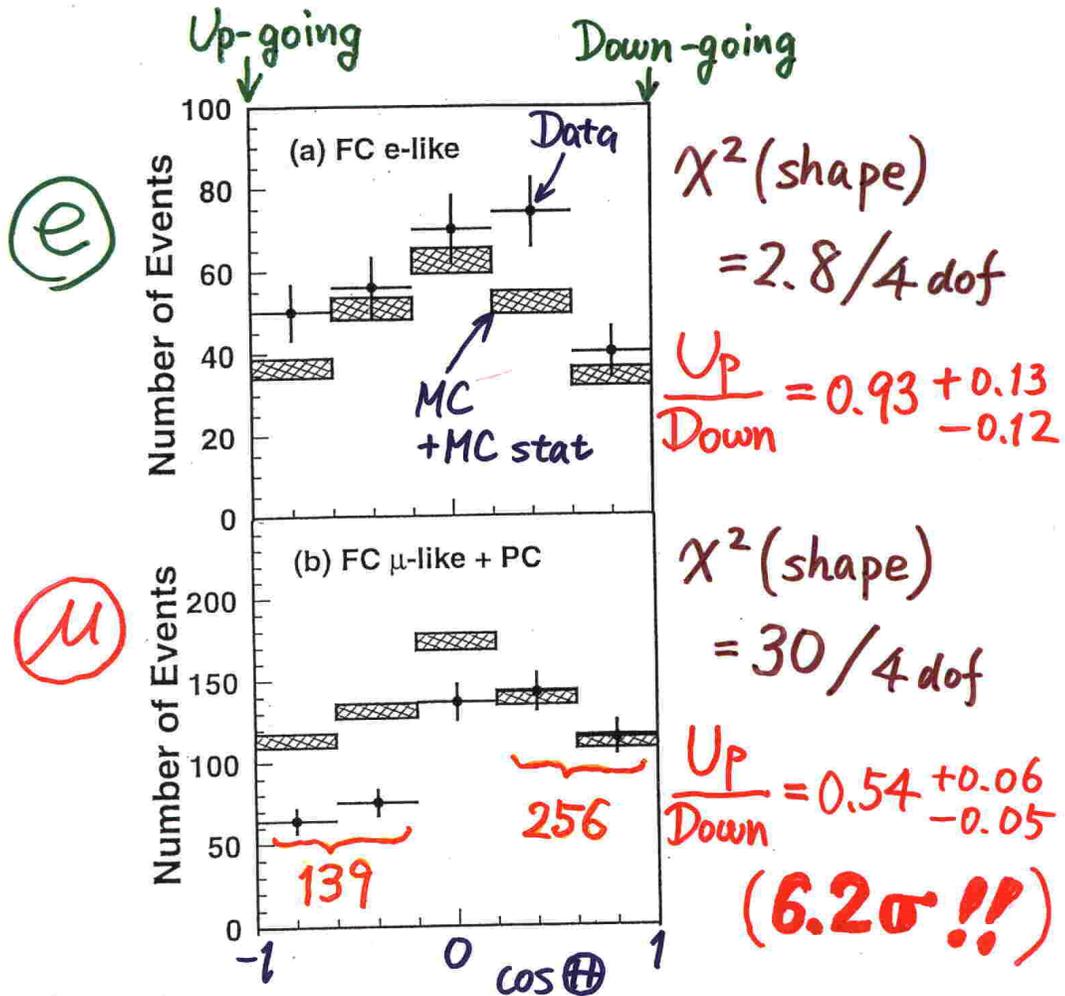


Tous ces événements sont utilisés à l'analyse. ← **Travail collaboratif de plusieurs (jeunes) chercheurs !**

Evidence pour les oscillations neutrinos (Super-Kamiokande @Neutrino '98)

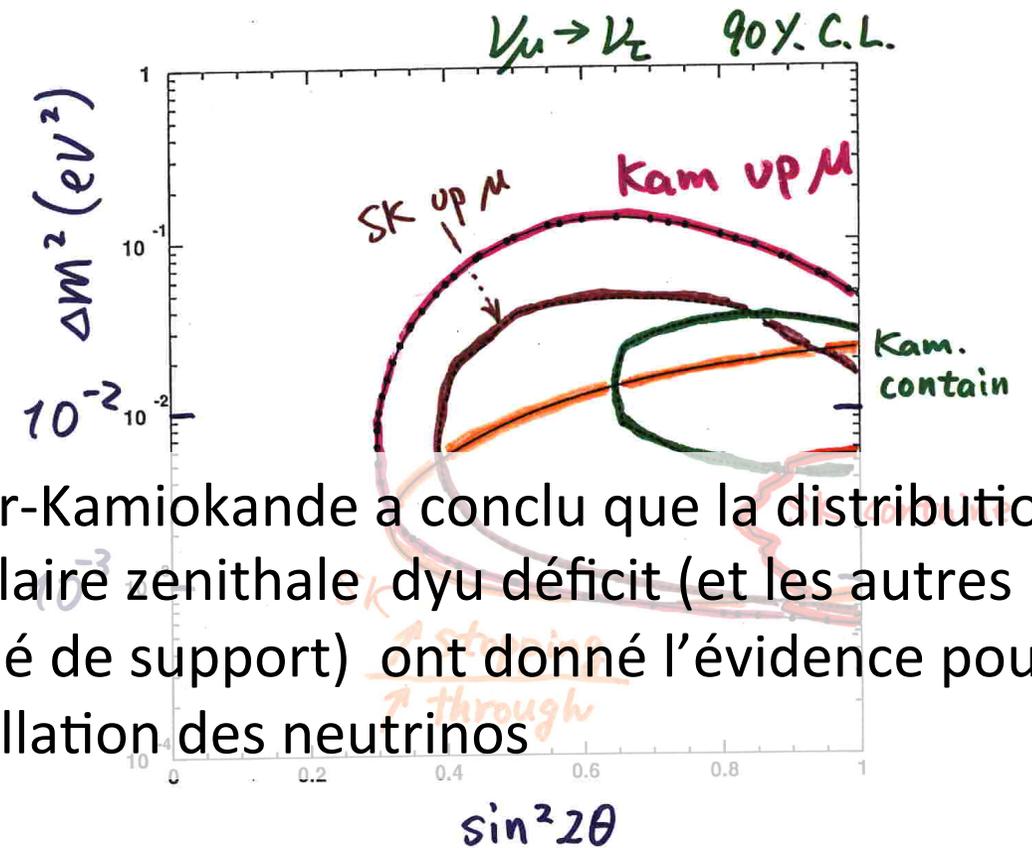
Y. Fukuda et al., PRL 81 (1998) 1562

Zenith angle dependence (Multi-GeV)



Summary

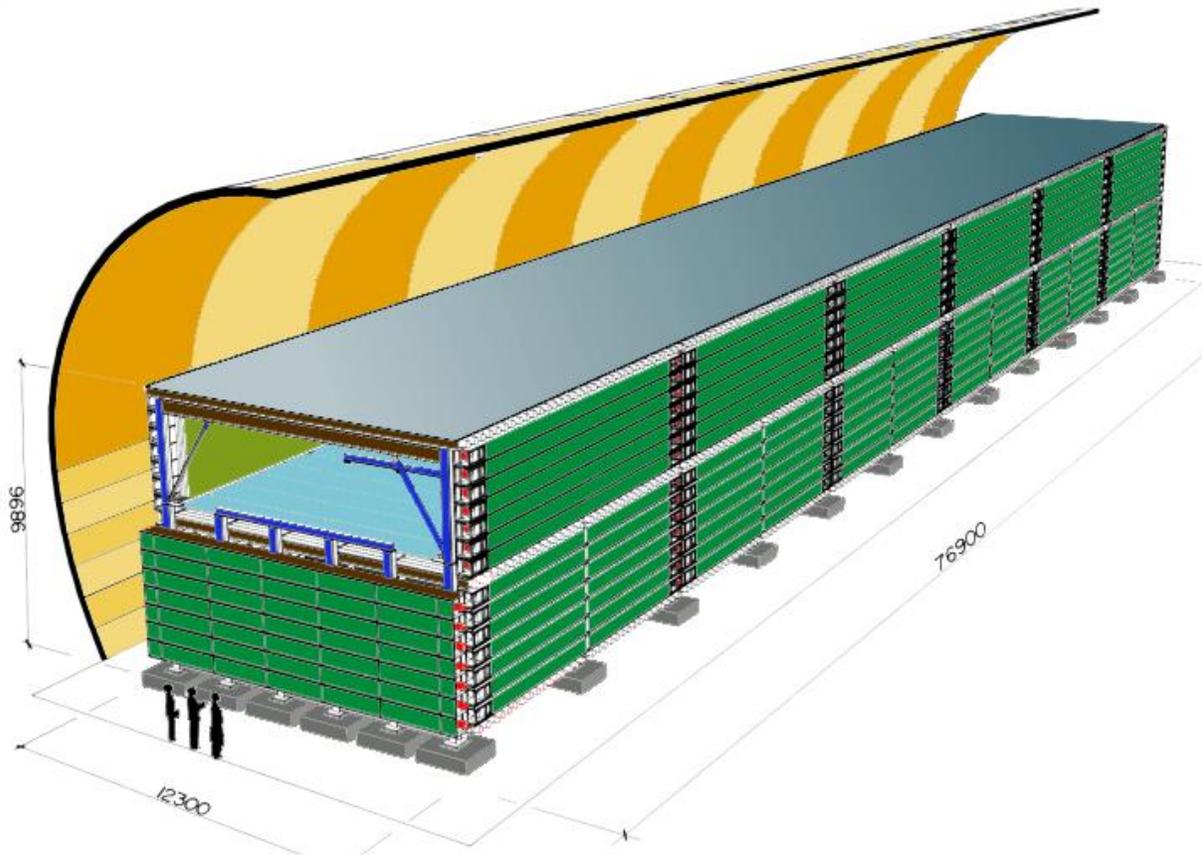
Evidence for ν_μ oscillations



Super-Kamiokande a conclu que la distribution angulaire zenithale dyu déficit (et les autres donné de support) ont donné l'évidence pour l'oscillation des neutrinos

Résultats des autres expériences neutrino atmosphériques

MACRO

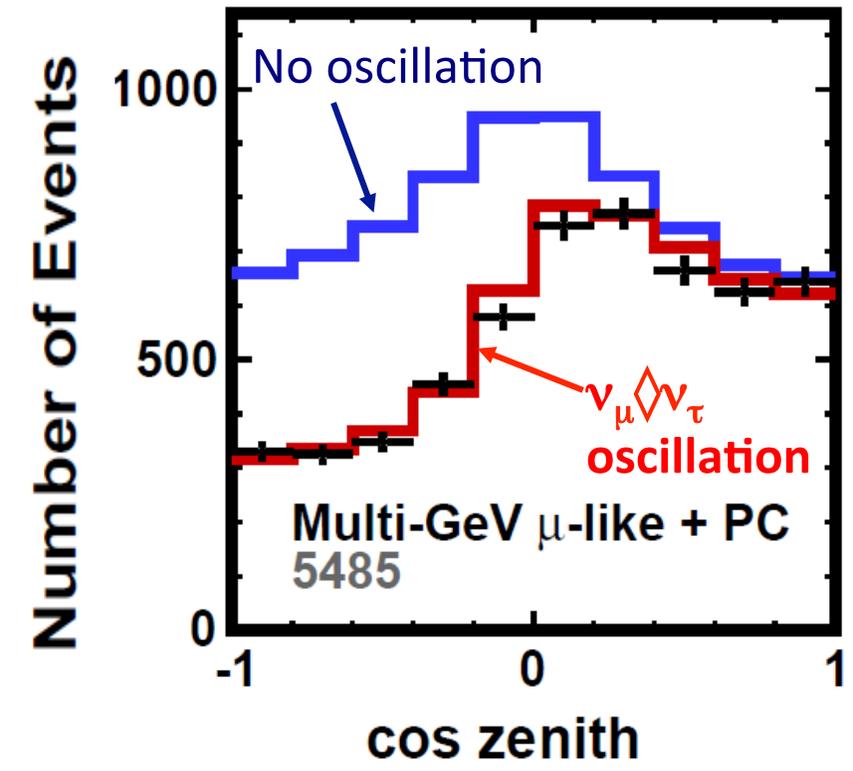
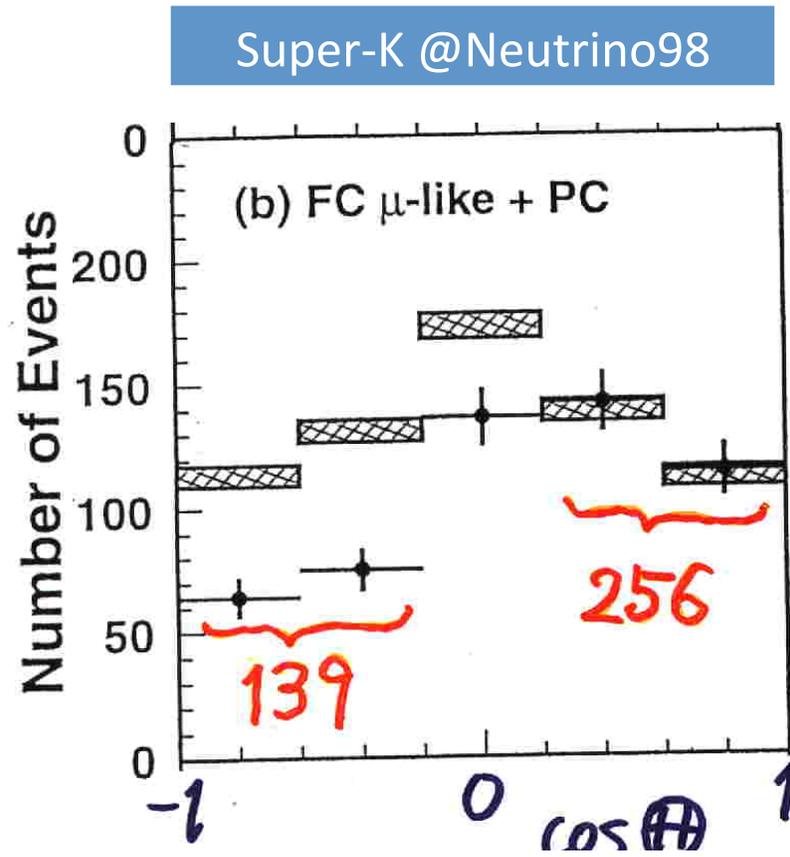


Soudan-2



Ces expériences ont observé les neutrinos atmosphériques et ils ont confirmé les oscillations neutrino

Mise à jour des données, masses et angles de mélange des neutrinos



Nombre d'événements : 531 événements

5485 événements

Plusieurs études des oscillations neutrino faites avec ces données

Etudes oscillation neutrino

Au delà des neutrinos atmosphériques, plusieurs expériences aux accélérateurs (à base longue: longue baseline) ont étudié les oscillations neutrino.

K2K (Japan)



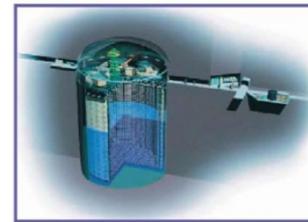
MINOS (USA)



OPERA (Europe)



T2K (Japan)



Super-Kamiokande (ICRR, Univ. Tokyo)

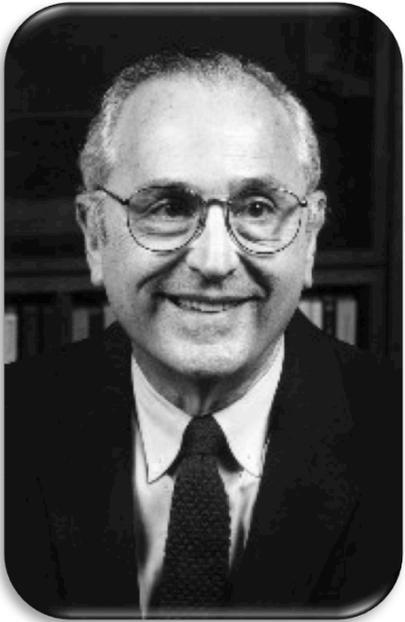


J-PARC Main Ring (KEK-JAEA, Tokai)

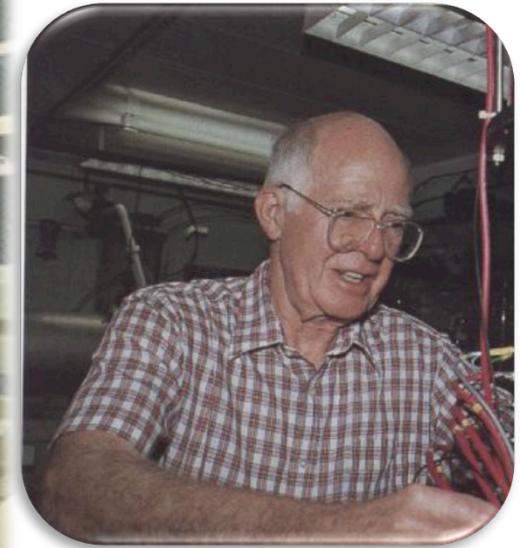
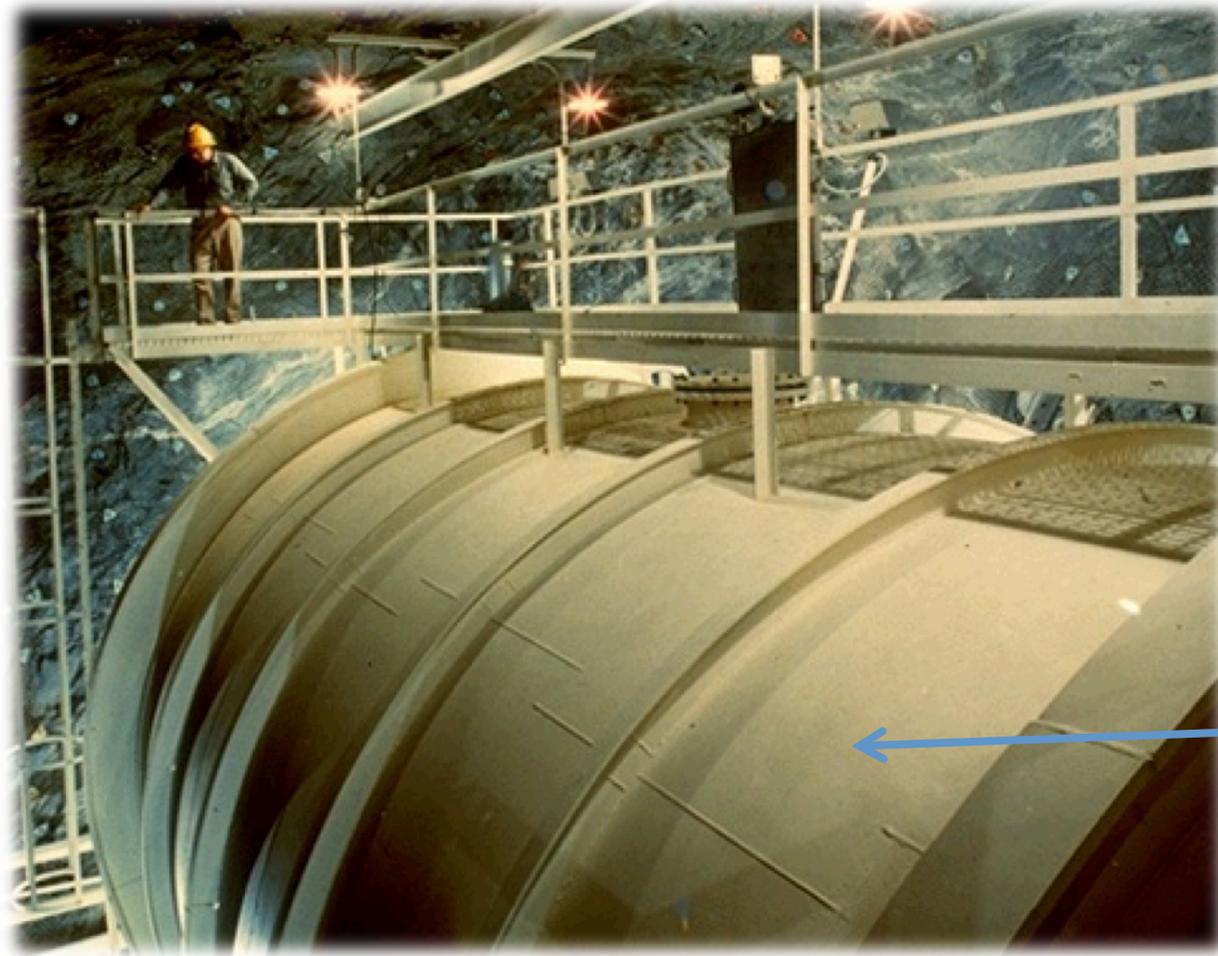


Statut des oscillations aujourd'hui

Problème des neutrinos solaires



J. N. Bahcall



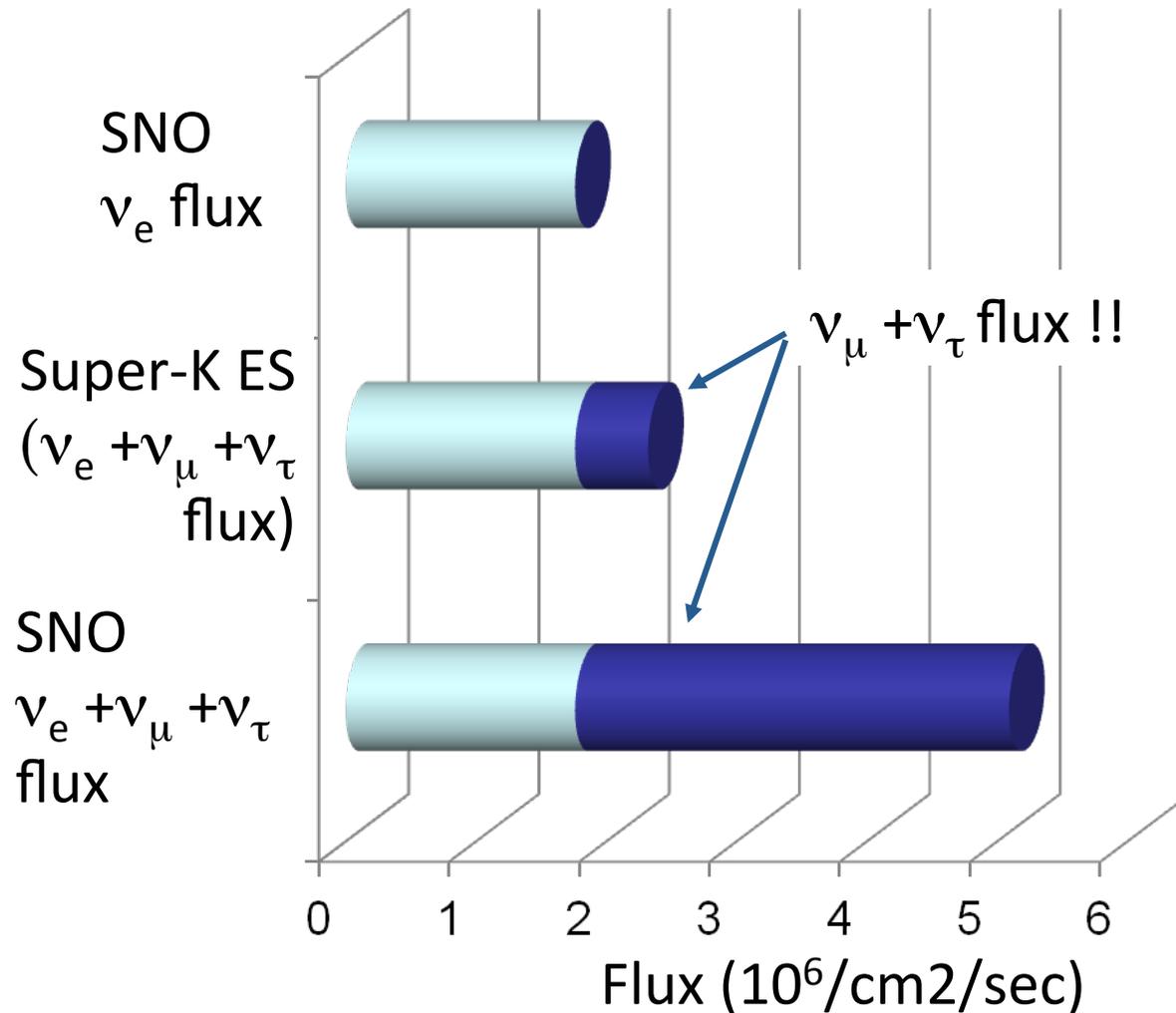
R. Davis Jr.

600ton
 C_2Cl_4

L'expérience des neutrinos solaires pionnière Homestake s a observé seulement le tiers (1/3) des neutrinos solaires prédits par la théorie (1960's).

Des déficits équivalents ont été vues par d'autres expériences aux années 1980 et 1990 .

La résolution du problème du neutrino solaire (2001-2002)



Oscillation neutrino: neutrino-electron aux neutrinos des autres saveurs (ν_μ, ν_τ).

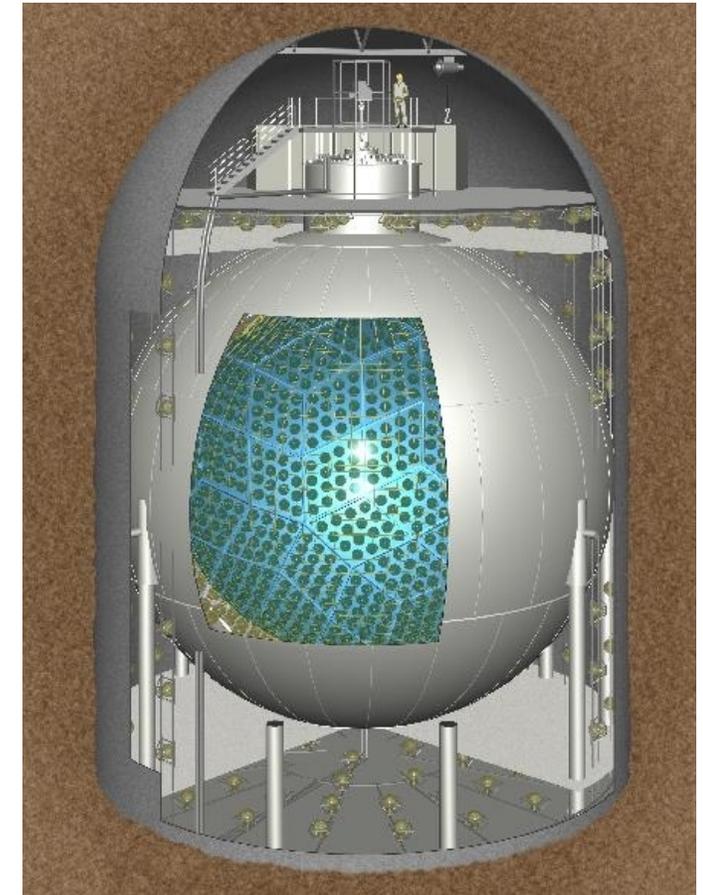
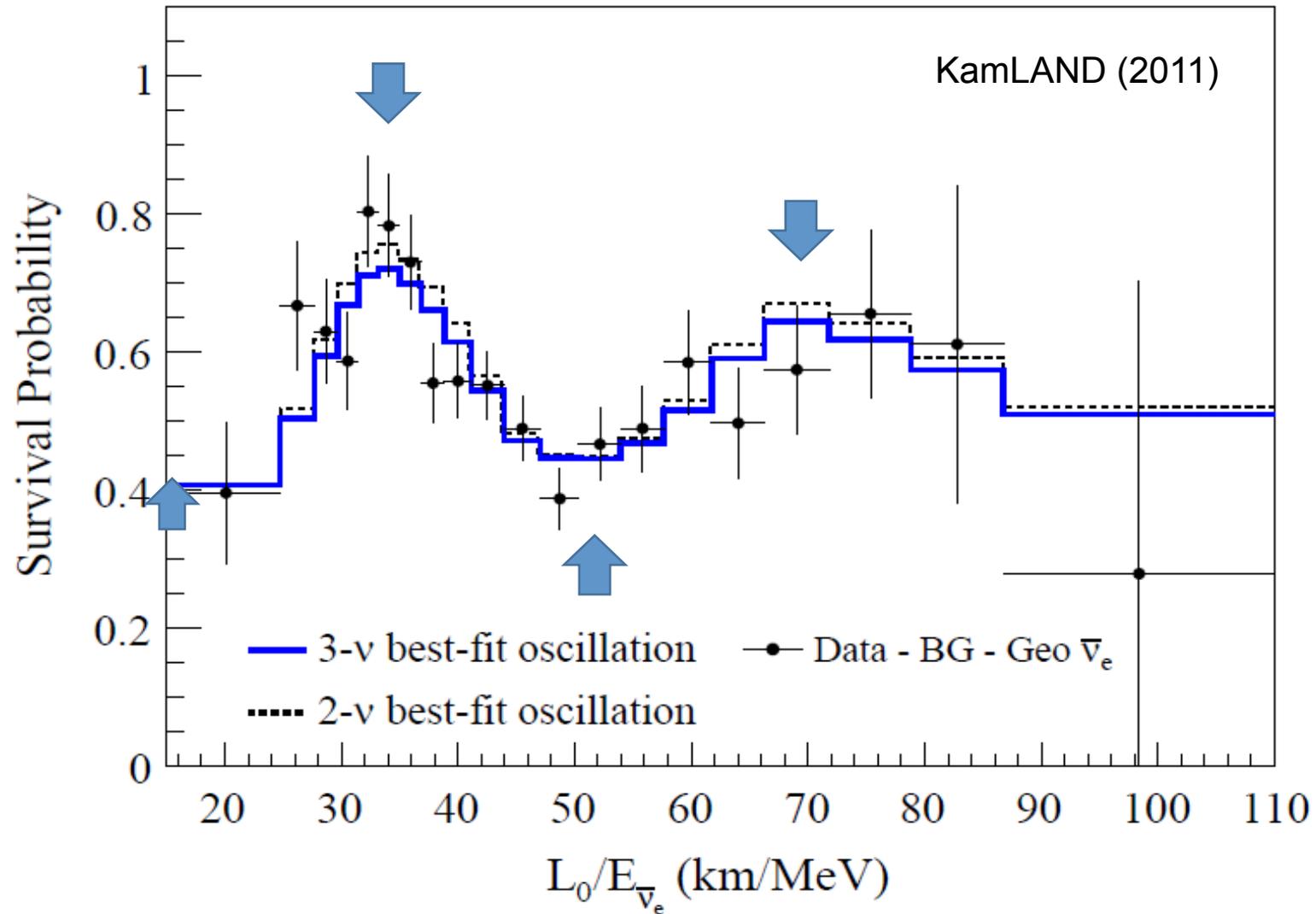


Art McDonald

1000 tonnes d'eau lourde (D_2O)

Voir les oscillations neutrino !

KamLAND a observé des neutrinos de deux stations nucléaires



KamLAND

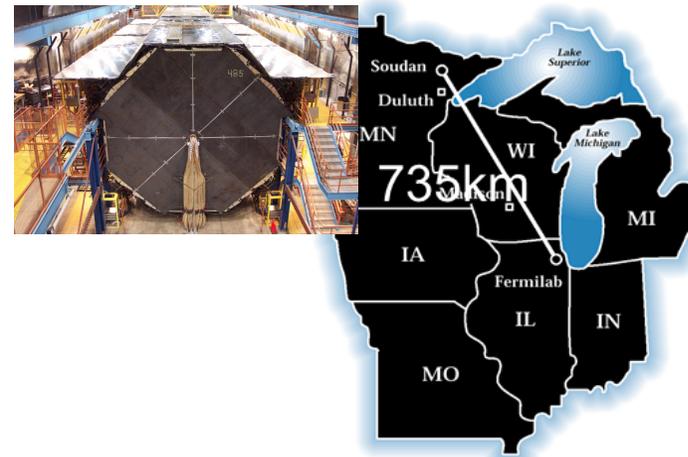
Découverte des oscillations neutrino dûs à la troisième ange de mélange (2011-2012)

Expériences d'oscillation neutrino "le linge de base longue" aux accélérateurs

T2K (Japan)



MINOS (USA)

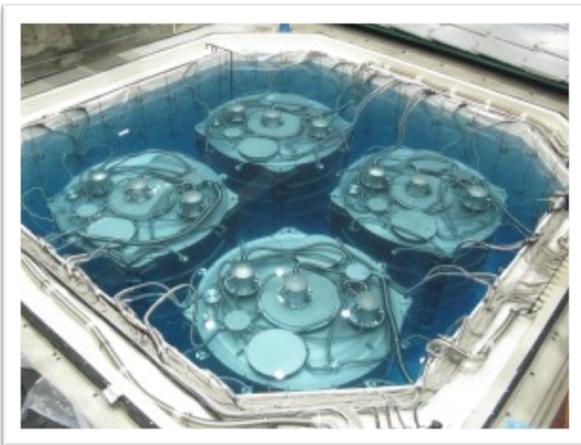


NO ν A (USA)



Expériences d'oscillation neutrino "de ligne de base courte" aux réacteurs

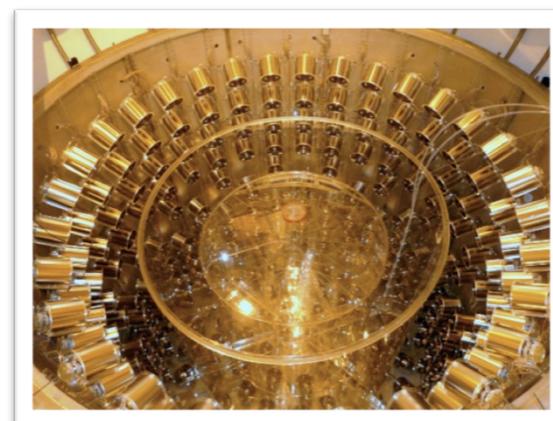
Daya Bay (Chine)



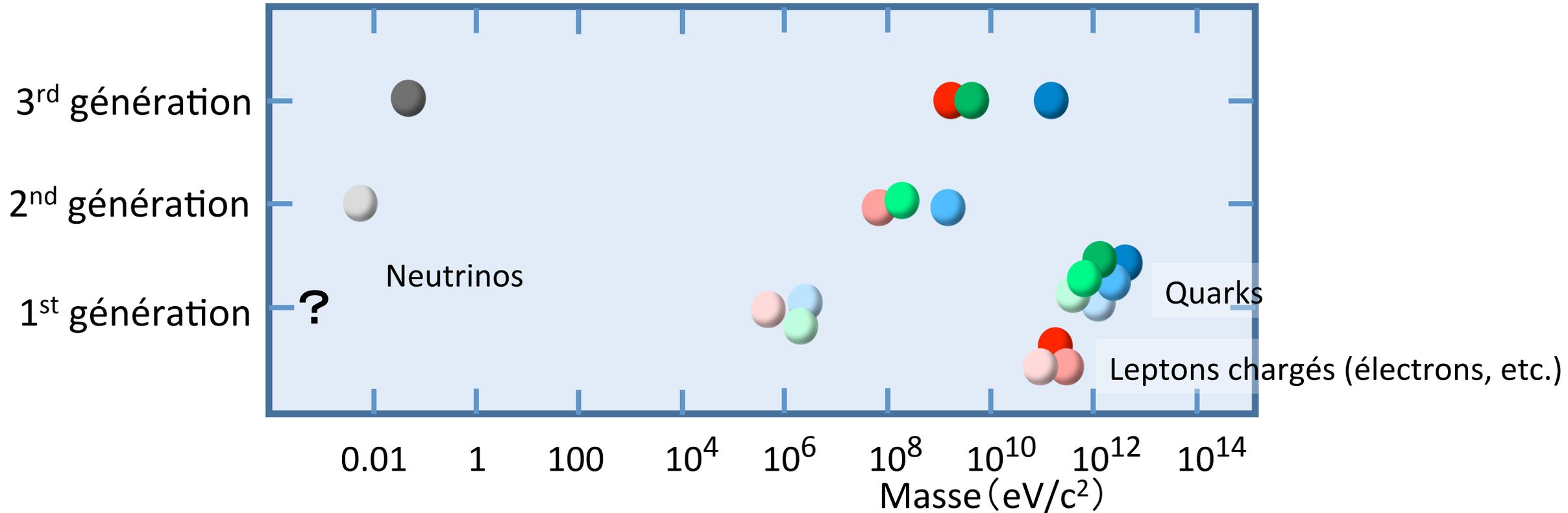
RENO (Korea)



Double Chooz (France)



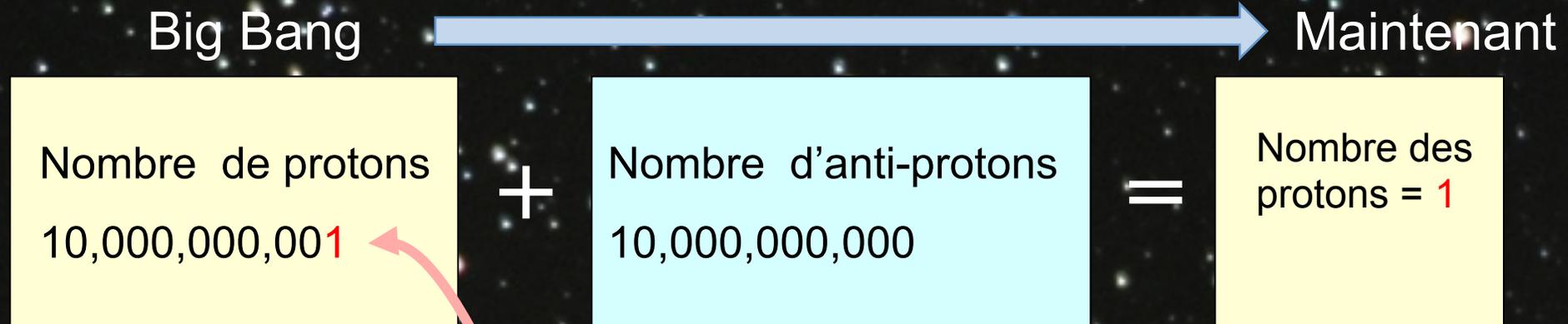
Qu'est-ce qu'on a appris ? Pourquoi les neutrinos sont importants?



Les masses des neutrinos sont approximativement (ou plus que) 10 milliards de fois plus petites (10 ordres de magnitude) que les masses correspondantes des quarks et des leptons chargés! Nous croyons qu'ils sont une clé pour comprendre la Nature des plus petites échelles aux plus grandes.

Le future

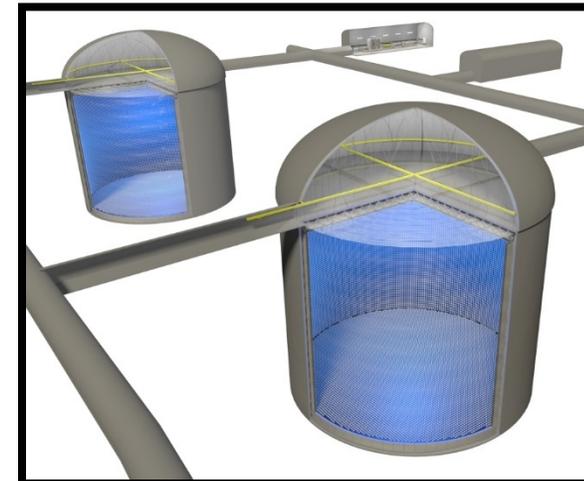
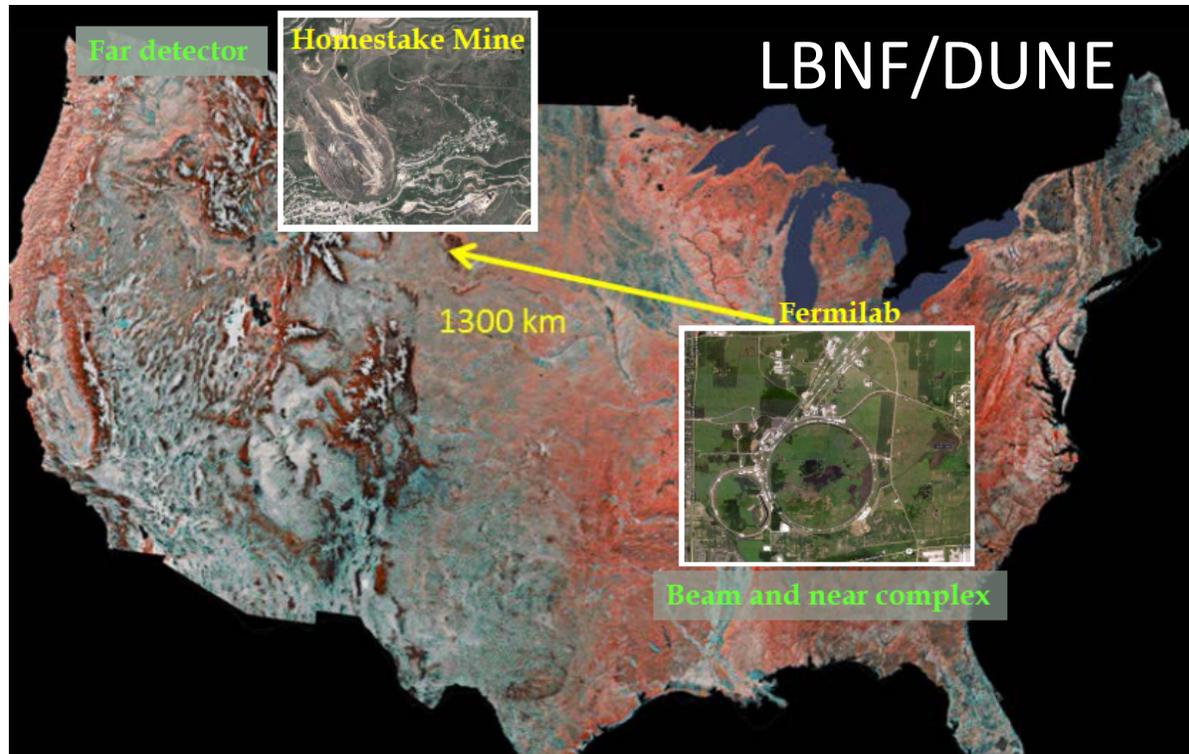
Un grand mystère



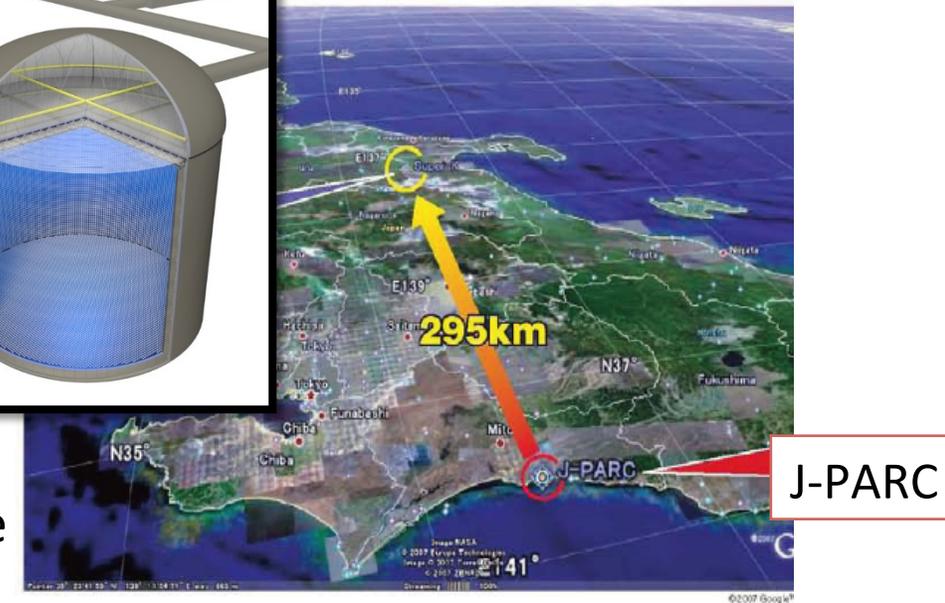
Les neutrinos avec leurs masses très petites pourraient être la clé de compréhension du grand mystère de l'existence de matière dans l'Univers

Comment on va résoudre ce mystère ?

- ✓ Ce mystère doit être compris sur la base des expériences d'oscillation neutrino .
- ✓ De manière plus détaillée , nous aimerions observer si les oscillations de neutrinos des neutrinos et ceux des anti-neutrinos sont différents. Ceci est une expérience difficile.
- ✓ Nous avons besoin des expériences de ligne de base longue de prochaine génération avec des détecteurs de neutrinos de haute performance beaucoup (voir ci-dessous) .



Hyper-Kamiokande



J-PARC

Conclusions

- ✓ Un déficit neutrinos-muon dans le flux de neutrinos atmosphériques a été observée dans Kamiokande (1988) .
- ✓ Par la suite , en 1998 , Super- Kamiokande a découvert les oscillations de neutrinos , ce qui démontre que les neutrinos ont une masse .
- ✓ Depuis lors , diverses expériences ont révélé la nature des neutrinos .
- ✓ La découverte que les neutrinos ont une masse différente de zéro, a ouvert une fenêtre pour étudier la physique au-delà du Modèle Standard de la physique des particules élémentaires , probablement celle de la Grande Unification des interactions des particules élémentaires .
- ✓ Il y a encore beaucoup de choses à observer dans les neutrinos . D'autres études de neutrinos pourraient nous donner des informations fondamentales pour la compréhension de la Nature , comme l'origine de la matière dans l'Univers .

Thank you very much for your attention!