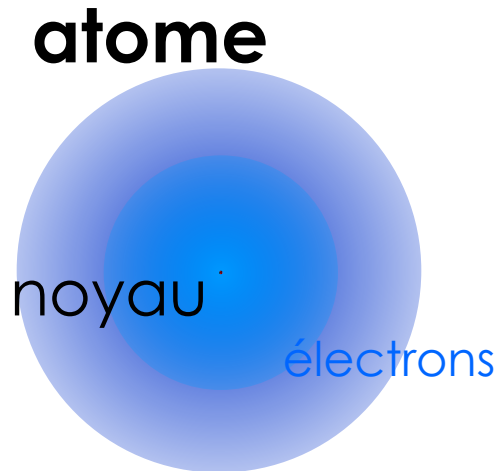




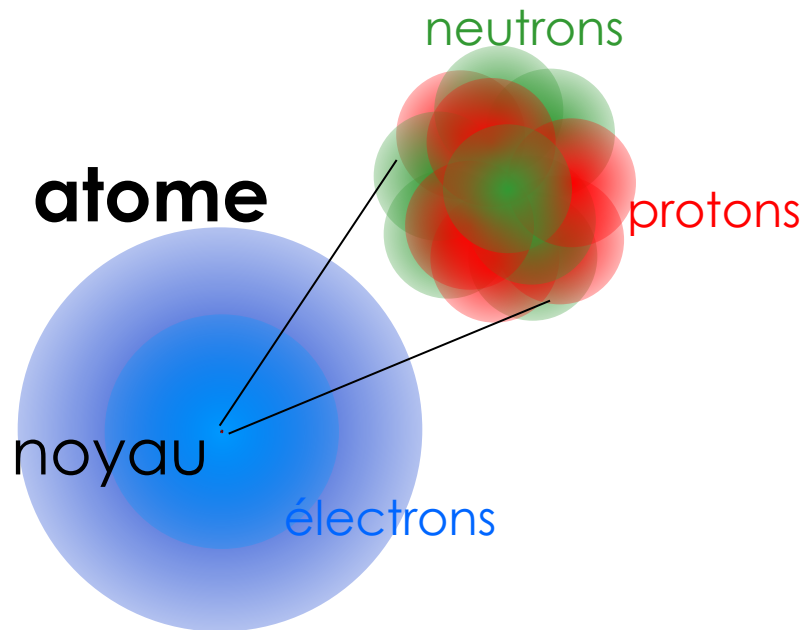
Petite introduction sur les neutrinos et leurs oscillations

Margherita Buizza Avanzini
(et merci à Olivier Drapier!)

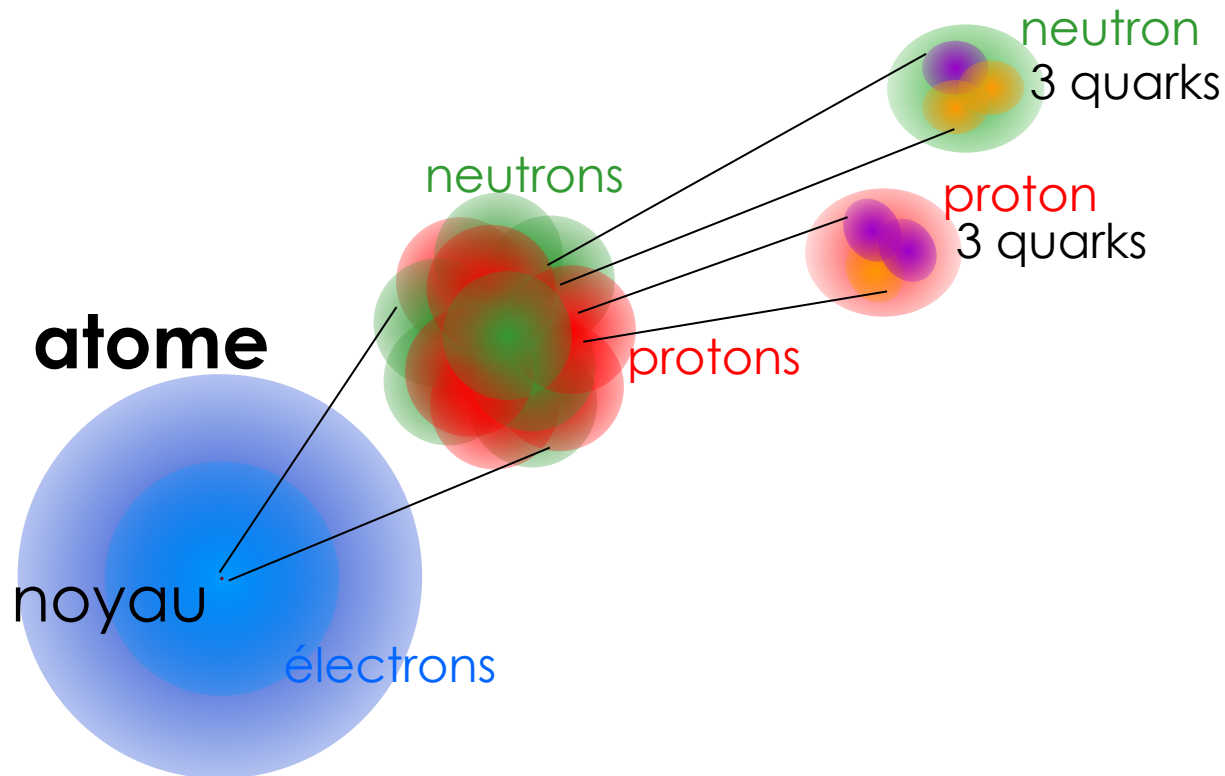
Particules élémentaires de matière



Particules élémentaires de matière



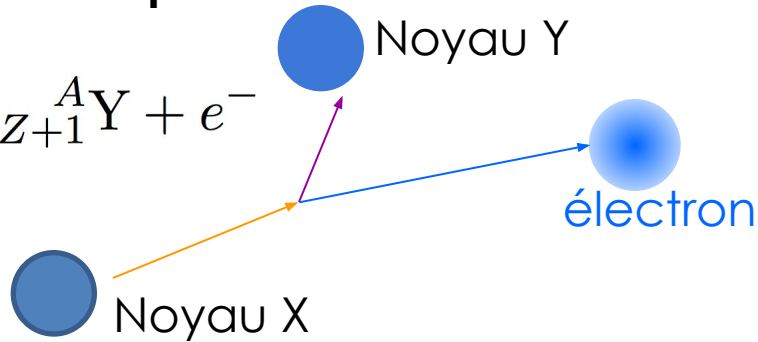
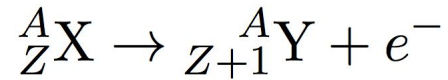
Particules élémentaires de matière



L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires**, c'est-à-dire les composantes fondamentales de la matière. Mais ils ne sont pas les seuls!

Avant 1930: pas de neutrinos

Radioactivité β^-



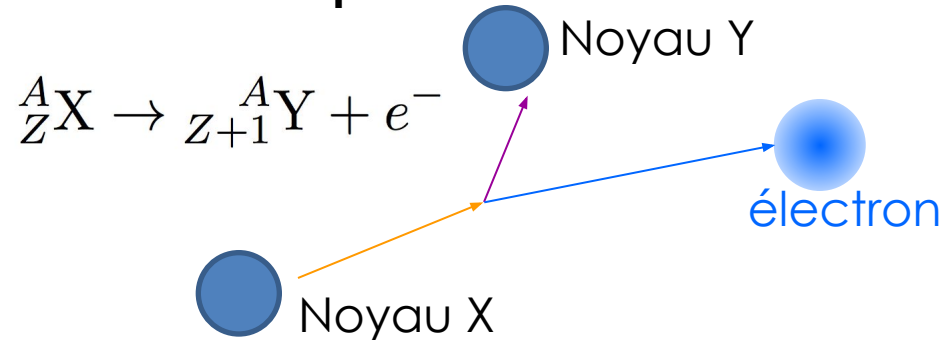
En gros, le noyau Y est le noyau X où un proton a pris la place d'un neutron (un neutron du noyau X se transforme en proton+électron)

Attendu : spectre d'énergie **discret**
(Y et e^- devraient se partager l'énergie de façon univoque)



Avant 1930: pas de neutrinos

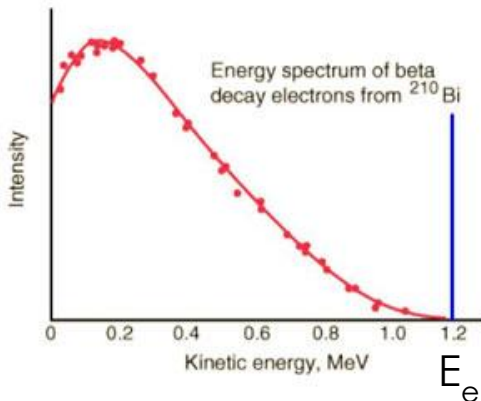
Radioactivité β^-



En gros, le noyau Y est le noyau X où un proton a pris la place d'un neutron (un neutron du noyau X se transforme en proton+électron)

Attendu : spectre d'énergie **discret**
(Y et e- devraient se partager l'énergie de façon univoque)

Mais on observe pour l'électron

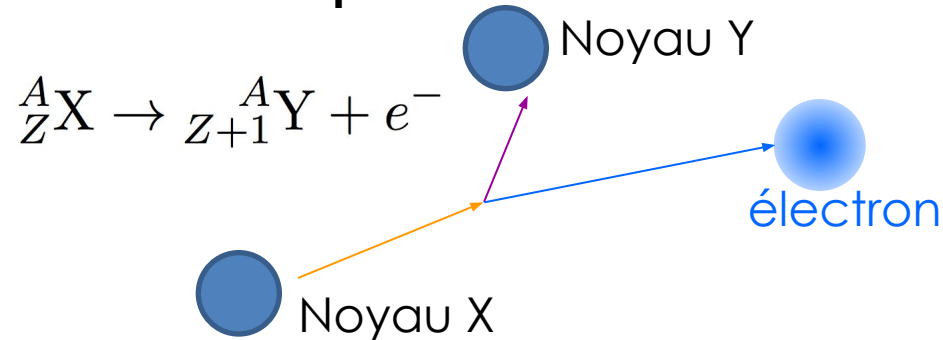


L'électron a une énergie inférieure à ce qui est attendu!
(spectre continu jusqu'au maximum)

Est ce que l'énergie ne se conserve plus???

Avant 1930: pas de neutrinos

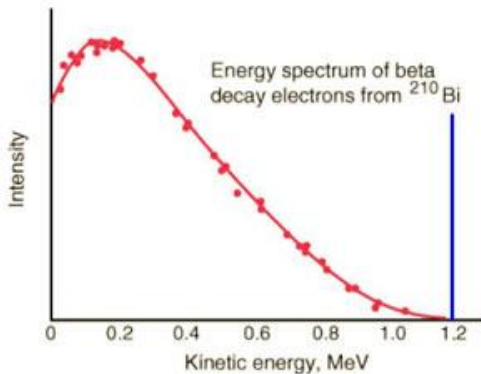
Radioactivité β^-



En gros, le noyau Y est le noyau X où un proton a pris la place d'un neutron (un neutron du noyau X se transforme en proton+électron)

Attendu : spectre d'énergie **discret**
(Y et e^- devraient se partager l'énergie de façon univoque)

Mais on observe pour l'électron



L'électron a une énergie inférieure à ce qui est attendu!
(spectre continu jusqu'au maximum)

Est-ce que l'énergie ne se conserve plus???

Ou bien... où l'énergie manquante est-elle partie???





1930: W. Pauli postule le neutrino

W. Pauli (théoricien) propose l'existence d'un « neutron », rebaptisé « **neutrino** » en 1933 après la découverte du neutron par Chadwick, qui emporterait l'énergie manquante.



Neutrinos: neutre (pas de charge) et petit (petite masse... ou pas de masse??)

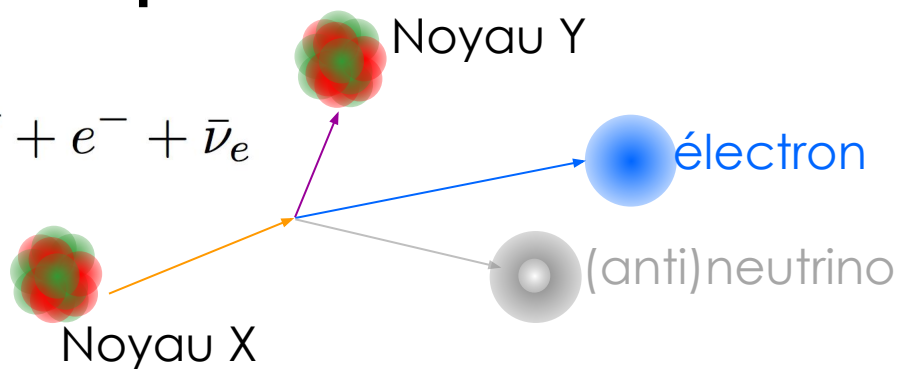


1930: W. Pauli postule le neutrino

W. Pauli (théoricien) propose l'existence d'un « neutron », rebaptisé « **neutrino** » en 1933 après la découverte du neutron par Chadwick, qui emporterait l'énergie manquante.









Radioactivité β^-



Neutrinos: neutre (pas de charge) et petit (petite masse... ou pas de masse??)

Trois types différents, trois « familles »







1 ^{ère} famille	e^- 	 ν_e
2 ^{ème} famille	μ^- 	 ν_μ
3 ^{ème} famille	τ^- 	 ν_τ
charge électrique	- 1	0

**Antineutrino électron
découvert (i.e. détecté par
les physiciens
expérimentalistes) en 1956**

Par la suite les physiciens ont
aussi découvert les autres
type de neutrinos

- Quarks, électrons (leptons chargés) et neutrinos existent en 3 « familles » ou “saveurs”
- Neutrino toujours associé au lepton chargé de la même famille
 - (anti) électron ↔ ν_e
 - (anti) muon ↔ ν_μ
 - (anti) tau ↔ ν_τ

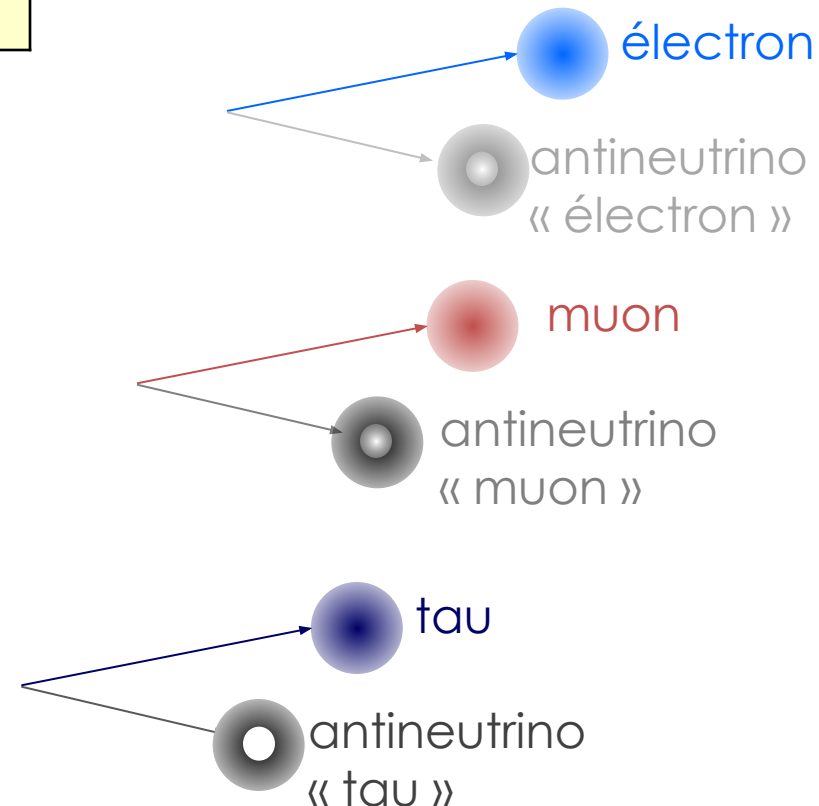
Trois types différents, trois « familles »

1 ^{ère} famille	e^- 	ν_e 
2 ^{ème} famille	μ^- 	ν_μ 
3 ^{ème} famille	τ^- 	ν_τ 
charge électrique	- 1	0

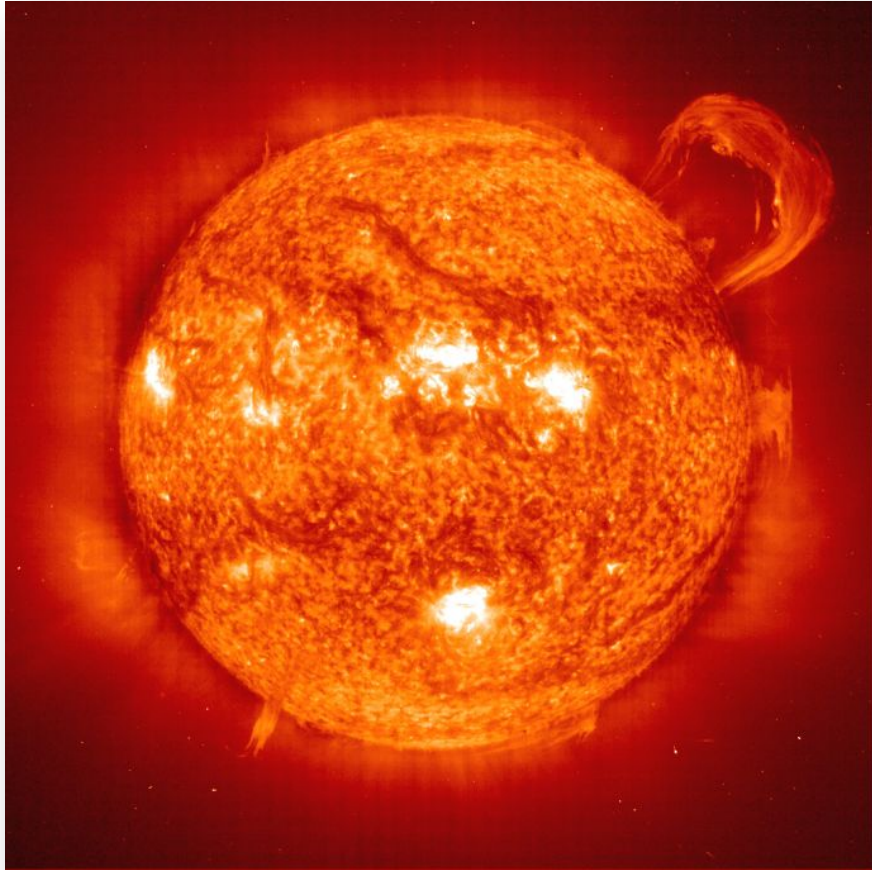
**Antineutrino électron
découvert (i.e. détecté par
les physiciens
expérimentalistes) en 1956**

- Quarks, électrons (leptons chargés) et neutrinos existent en 3 « familles » ou “saveurs”
- Neutrino toujours associé au lepton chargé de la même famille

- (anti) électron $\leftrightarrow \nu_e$
- (anti) muon $\leftrightarrow \nu_\mu$
- (anti) tau $\leftrightarrow \nu_\tau$

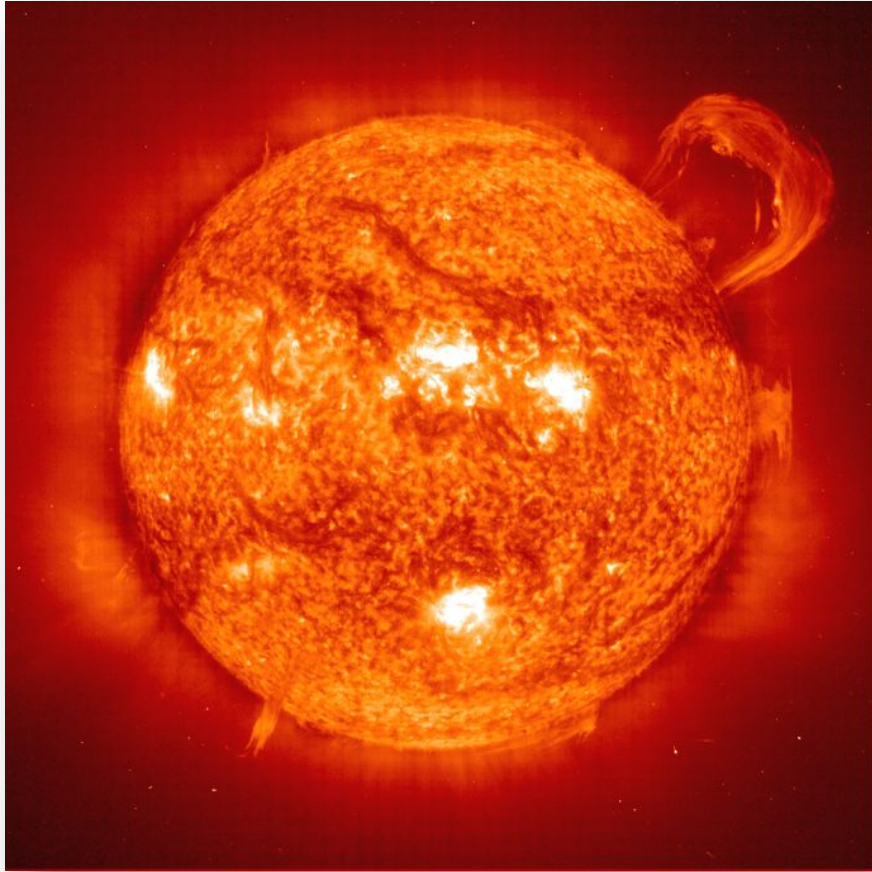


Les neutrinos sont partout



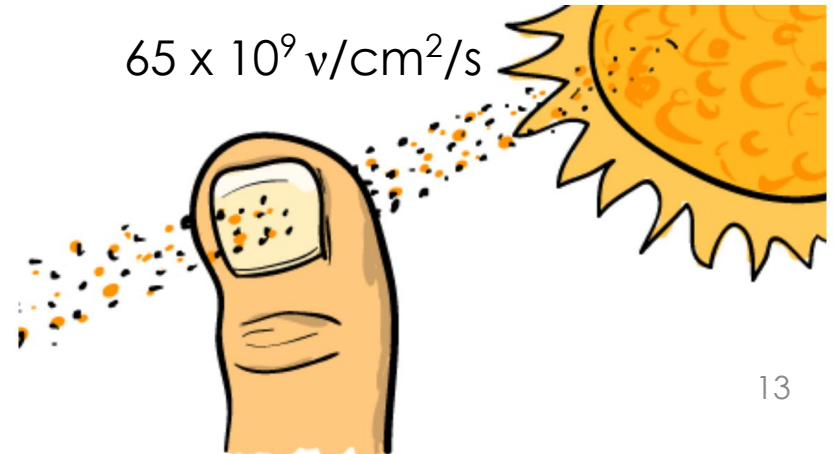
- Réactions nucléaires (Soleil, étoiles), radioactivité (Terre)
- Ils interagissent faiblement
- Seules particules capables de traverser la Terre entière : seulement 1/100 000 000 000 s'arrête !!!!

Les neutrinos sont partout

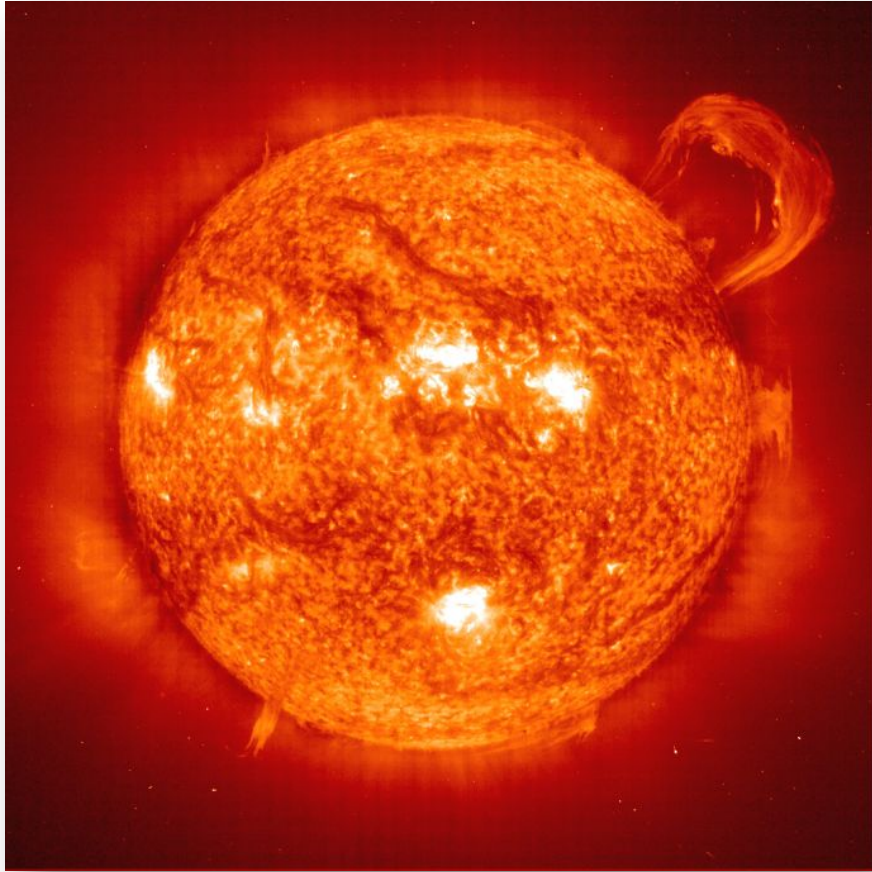


Sur Terre, nous recevons du Soleil
65 000 000 000 (65 milliards!) de
neutrinos par cm^2 et par
seconde !

- Réactions nucléaires (Soleil, étoiles), radioactivité (Terre)
- Ils interagissent faiblement
- Seules particules capables de traverser la Terre entière : seulement 1/100 000 000 000 s'arrête !!!!

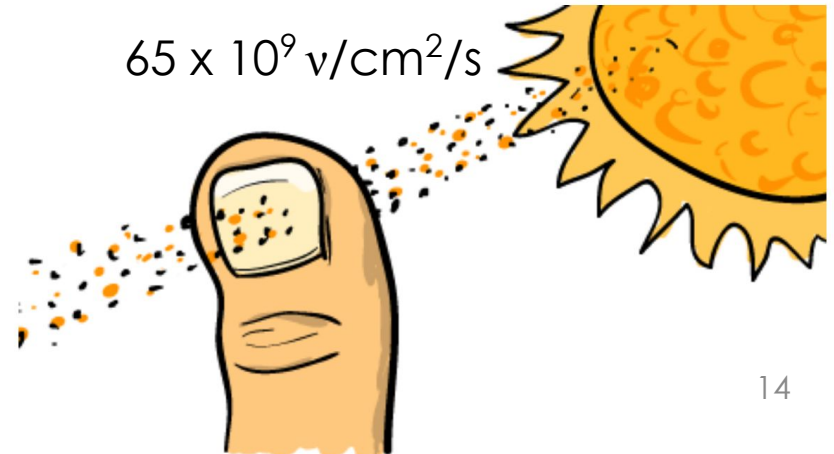


Les neutrinos sont partout

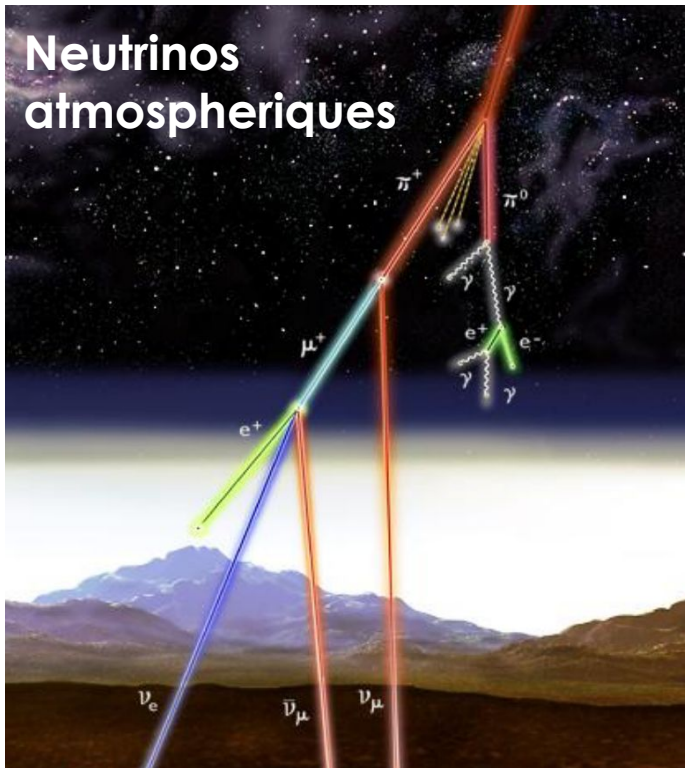


Sur Terre, nous recevons du Soleil
65 000 000 000 (65 milliards!) de
neutrinos par cm^2 et par
seconde !

- Réactions nucléaires (Soleil, étoiles), radioactivité (Terre)
- Ils interagissent faiblement
- Seules particules capables de traverser la Terre entière : seulement 1/100 000 000 000 s'arrête !!!!
- **Ce sont des messagers de l'Univers**
- **Mais on peut aussi les produire artificiellement pour mieux les étudier**



Sources de Neutrinos

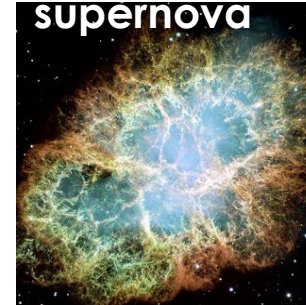


Naturelles

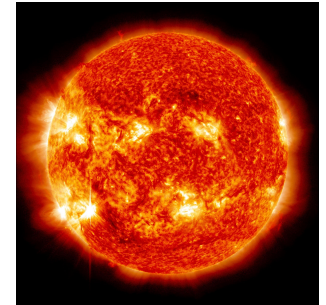
Geo-(anti)neutrinos



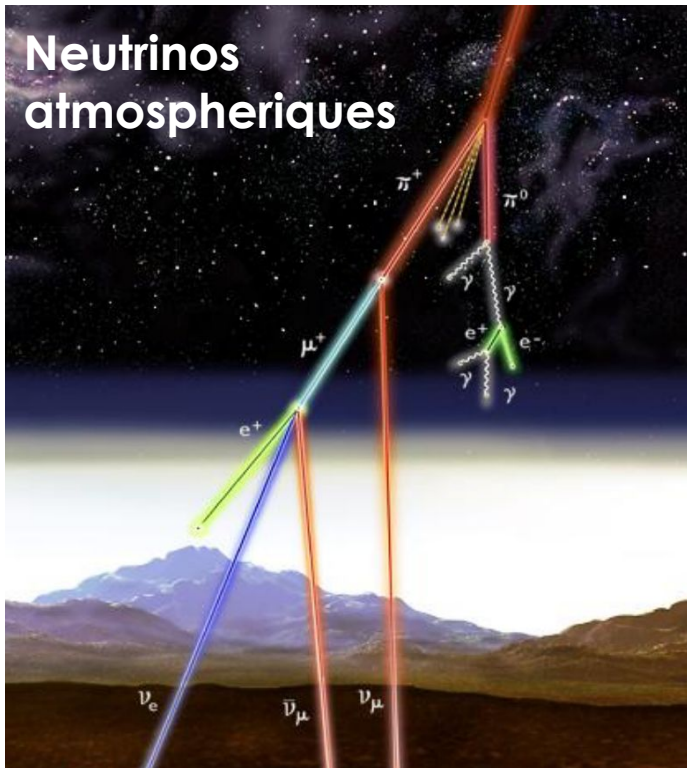
Neutrinos de supernova



Neutrinos solaires



Sources de Neutrinos

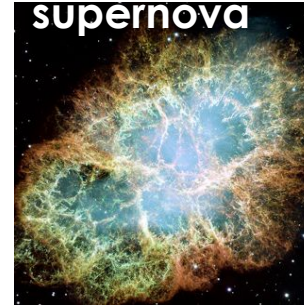


Naturelles

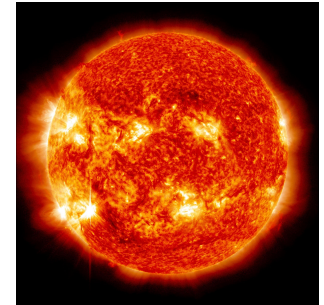
Geo-(anti)neutrinos



Neutrinos de supernova



Neutrinos solaires



Artificielles

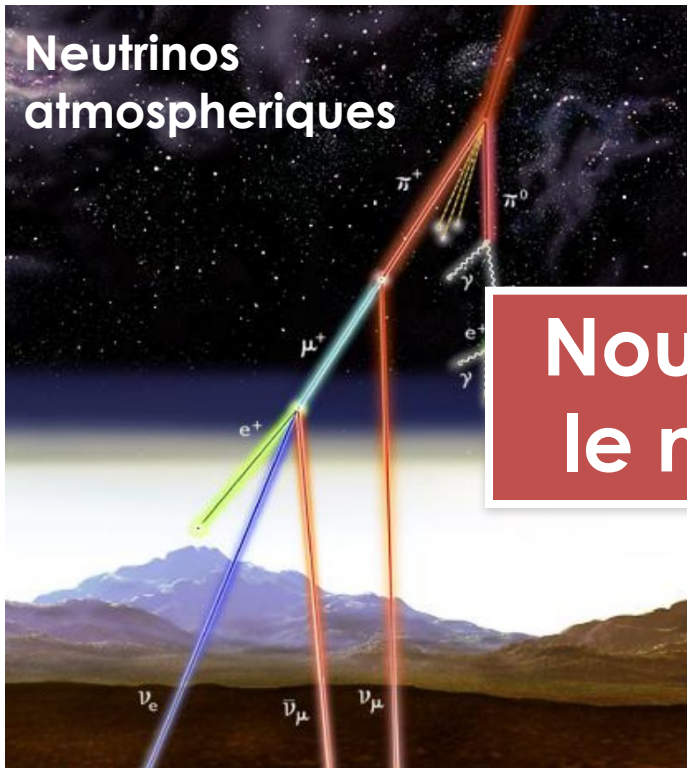
Neutrinos d'accélérateur



Neutrinos de réacteur

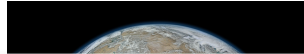


Sources de Neutrinos



Naturelles

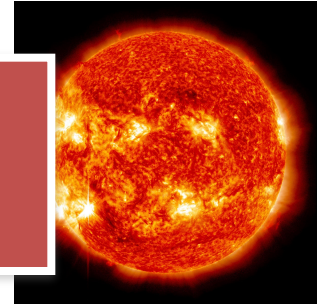
Geo-(anti)neutrinos



Neutrinos de supernova



Neutrinos solaires

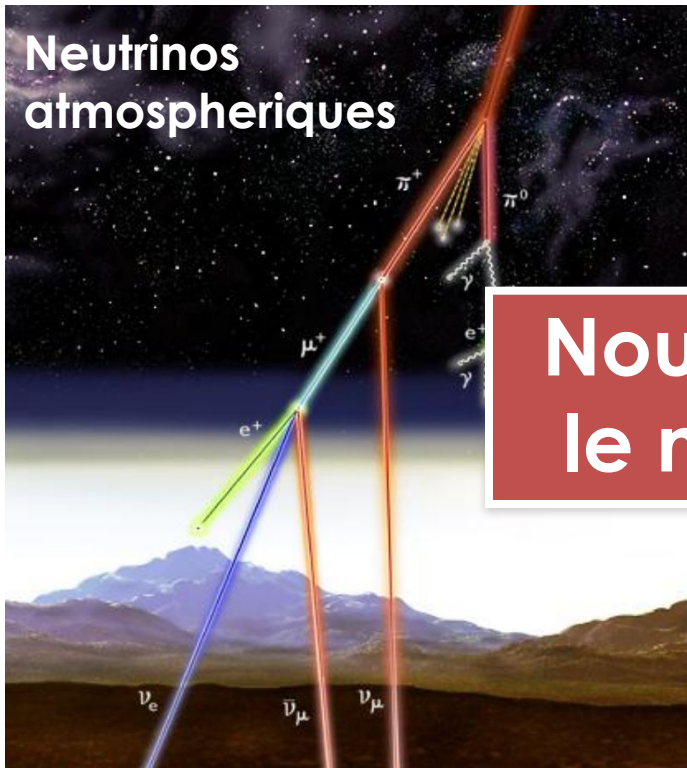


Nous permettent d'étudier le neutrino et ses sources

Artificielles

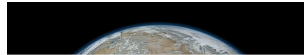


Sources de Neutrinos



Naturelles

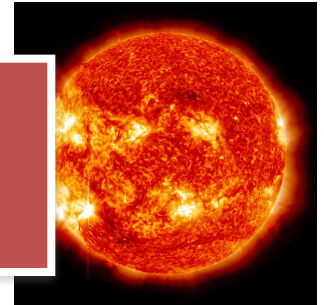
Geo-(anti)neutrinos



Neutrinos de supernova



Neutrinos solaires



Nous permettent d'étudier le neutrino et ses sources

Artificielles

Neutrinos d'accélérateur



Nous permettent d'étudier le comportement du neutrino

Neutrinos de réacteur



Prix Nobel 2015 pour la Physique



Arthur B. MacDonald



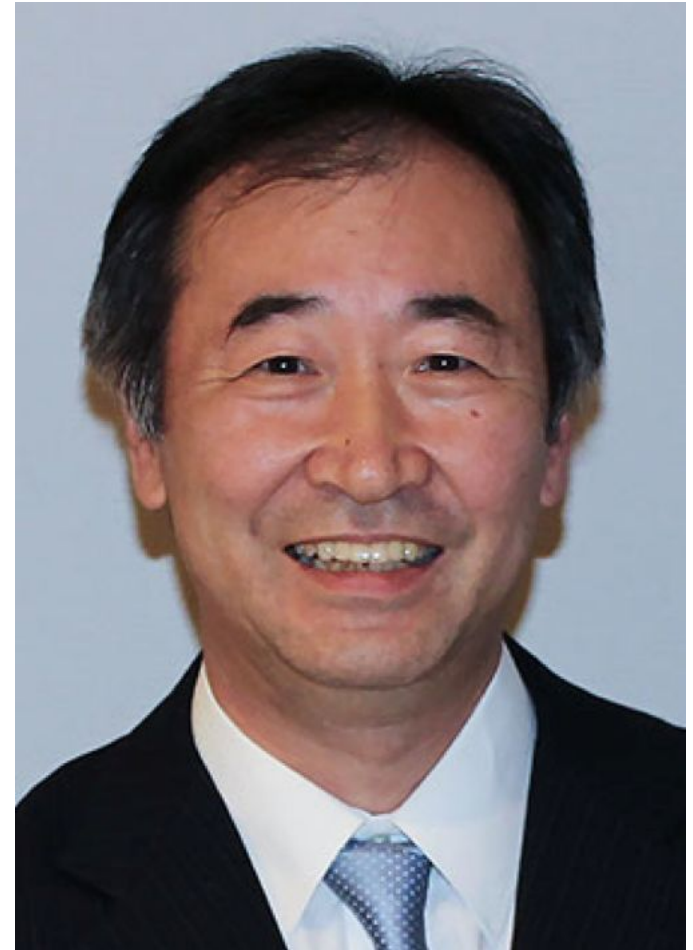
Takaaki Kajita

« for the discovery of neutrino **oscillations**,
which shows that neutrinos have **mass** »

Prix Nobel 2015 pour la Physique



Arthur B. MacDonald



Takaaki Kajita

« for the discovery of neutrino **oscillations**,
which shows that neutrinos have **mass** »

Oscillations???

Oscillation des neutrinos

Oscillations des neutrinos: quand un neutrino voyage de la source au détecteur, il a une certaine probabilité de changer de saveur en cours de route



Oscillation des neutrinos

Oscillations des neutrinos: quand un neutrino voyage de la source au détecteur, il a une certaine probabilité de changer de saveur en cours de route



Les oscillations des neutrinos ne sont possibles que si les neutrinos ont une **masse**.

Les oscillations se produisent car ce sont les **état de masse ν_i** qui se propagent. Ils sont reliés aux **états de saveur** via une **combinaison linéaire**

$$\nu_e = \cos\theta \times \nu_1 + \sin\theta \times \nu_2$$

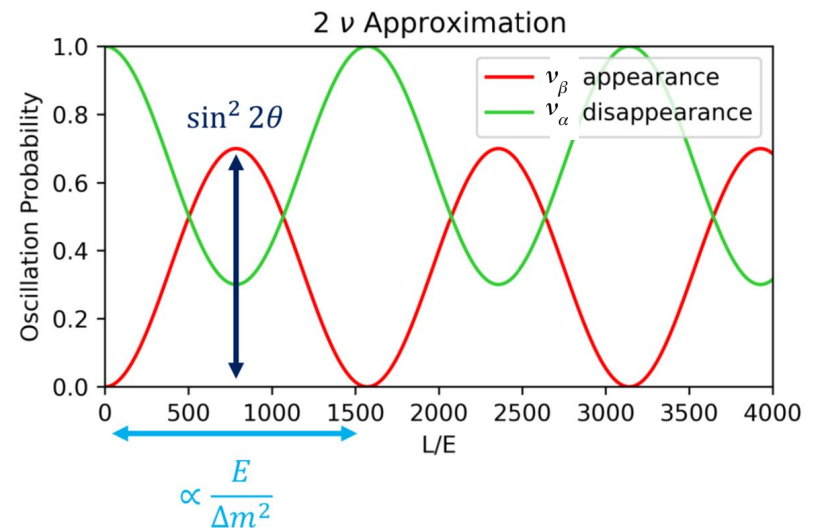
Oscillation des neutrinos

Oscillations des neutrinos: quand un neutrino voyage de la source au détecteur, il a une certaine probabilité de changer de saveur en cours de route



Les oscillations des neutrinos ne sont possibles que si les neutrinos ont une **masse**. Les oscillations se produisent car ce sont les **état de masse** ν_i qui se propagent. Ils sont reliés aux **états de saveur** via une **combinaison linéaire**

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$



$$\nu_e = \cos\theta \times \nu_1 + \sin\theta \times \nu_2$$

angle de melange

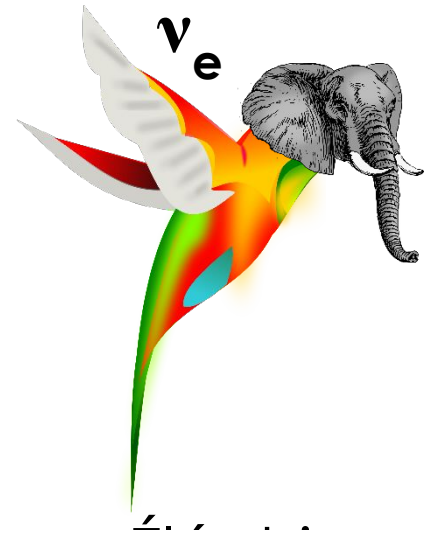
Neutrino observable = « état mixte »

- $\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau =$
états de saveur =
états observables =
états mixtes

Neutrino observable = « état mixte »

- $\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau =$
états de saveur =
états observables =
états mixtes

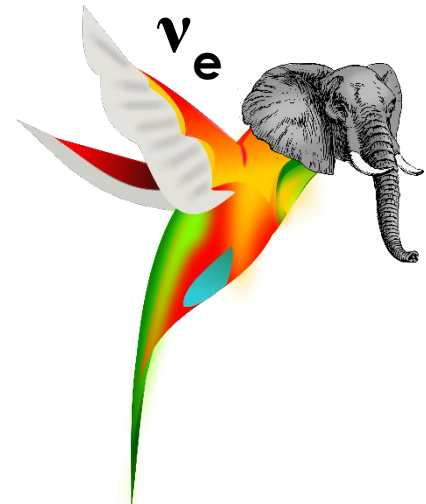
- Colibrants



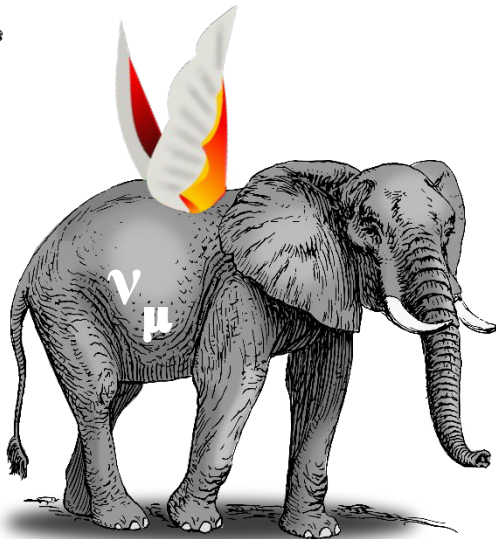
Neutrino observable = « état mixte »

- $\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau =$
états de saveur =
états observables =
états mixtes

- Colibrants



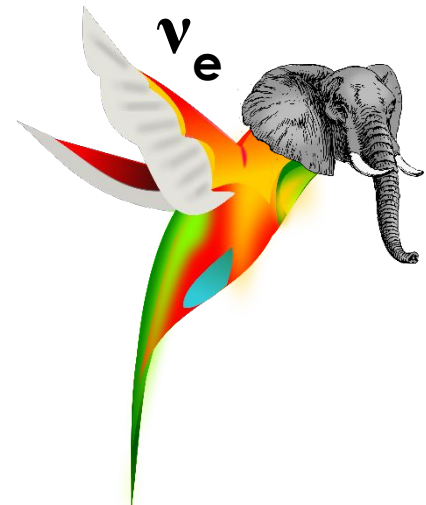
- Éléphis



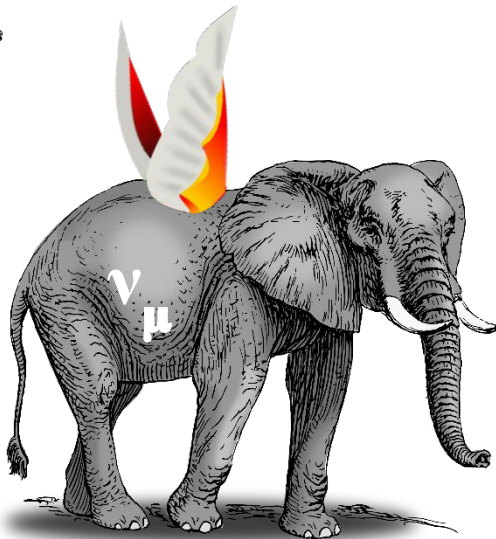
Neutrino observable = « état mixte »

- $\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau =$
états de saveur =
états observables =
états mixtes

- Colibrants

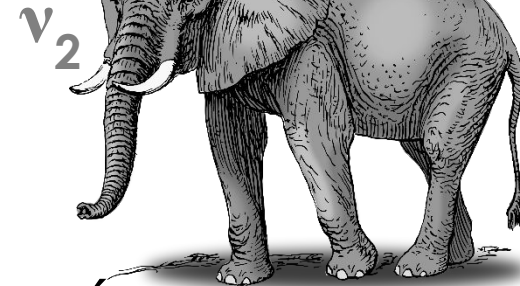


- Éléphis



- Seuls les états
de masse déterminée
se **propagent** librement

- Colibris



- Éléphants

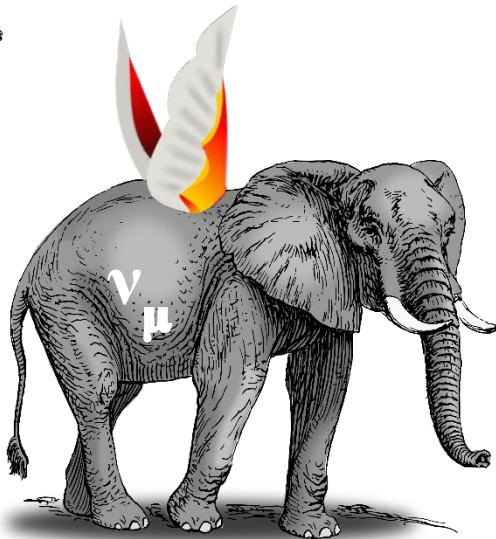
Neutrino observable = « état mixte »

- $\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau =$
états de saveur =
états observables =
états mixtes

- Colibrants

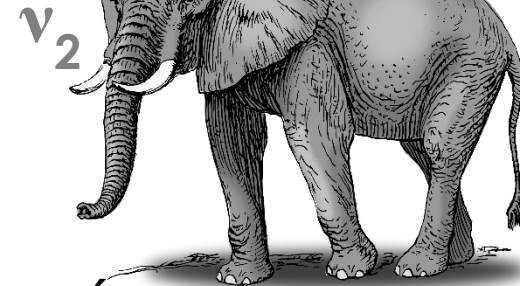


- Éléphis



- Seuls les états
de masse déterminée
se **propagent** librement

- Colibris



- Éléphants

- **Tout cela est possible
seulement si les neutrinos
ont une masse!**

Les états de masse déterminée ne sont jamais observables

- Propagation : états de masse déterminée, inobservables

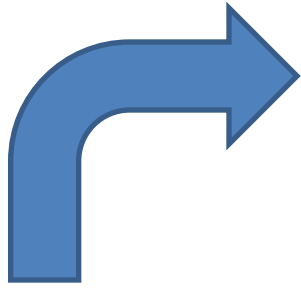


Création : états superposés
(par ex. Soleil)



Les états de masse déterminée ne sont jamais observables

- Propagation : états de masse déterminée, inobservables

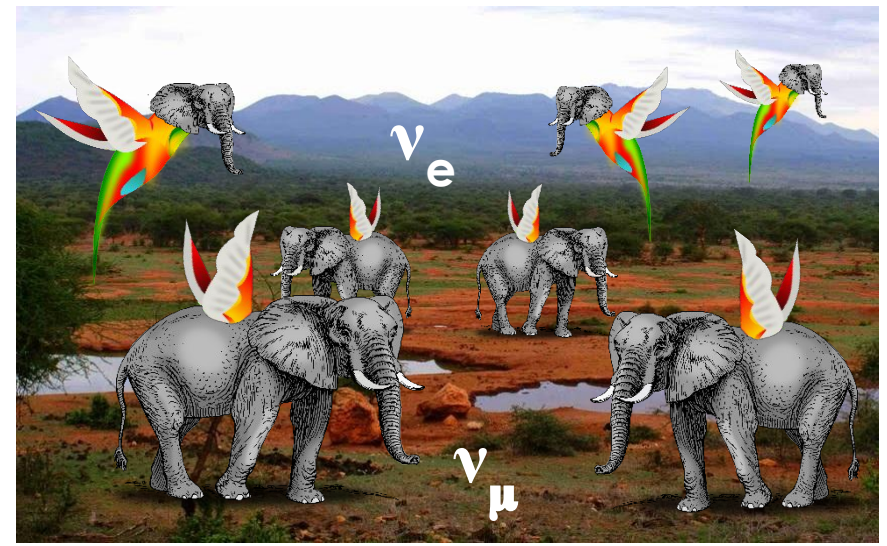


Création : états superposés
(par ex. Soleil)

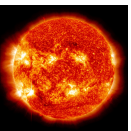


Les états de masse déterminée ne sont jamais observables

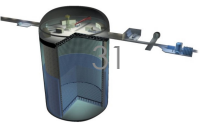
- Propagation : états de masse déterminée, inobservables



Création : états superposés
(par ex. Soleil)

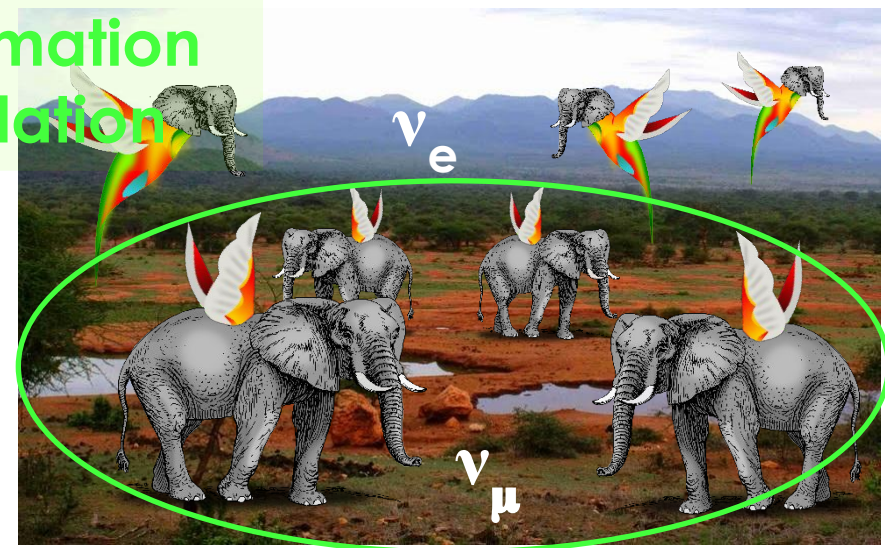
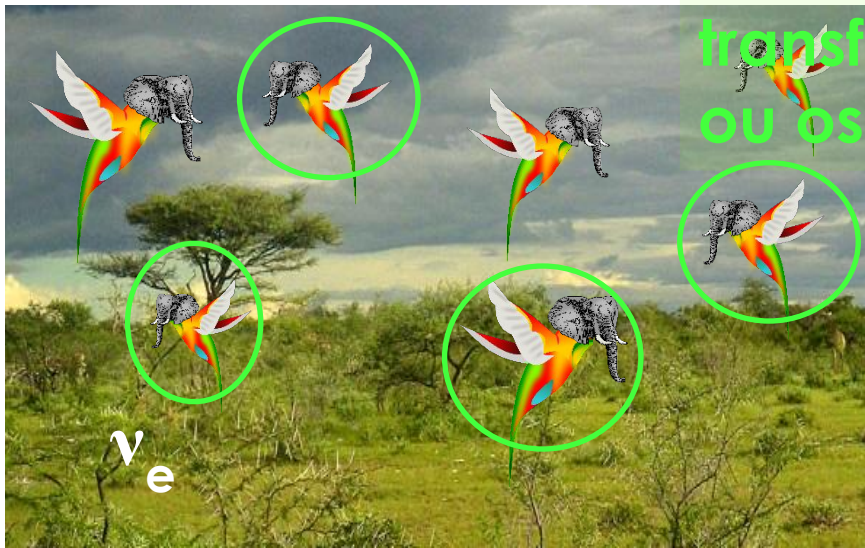


Détection : états superposés
(détecteur sur Terre)

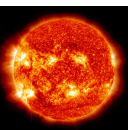


Les états de masse déterminée ne sont jamais observables

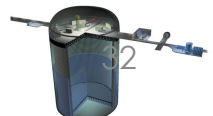
- Propagation : états de masse déterminée, inobservables



Création : états superposés
(par ex. Soleil)



Détection : états superposés
(détecteur sur Terre)



Détecteurs de neutrinos

La probabilité qu'un neutrino interagisse avec la matière est très faible

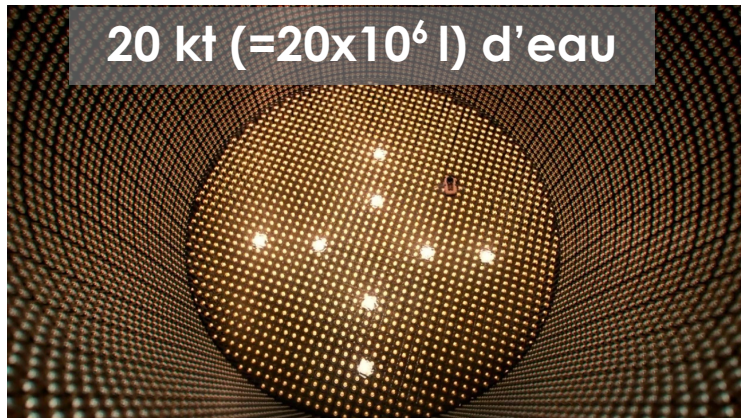
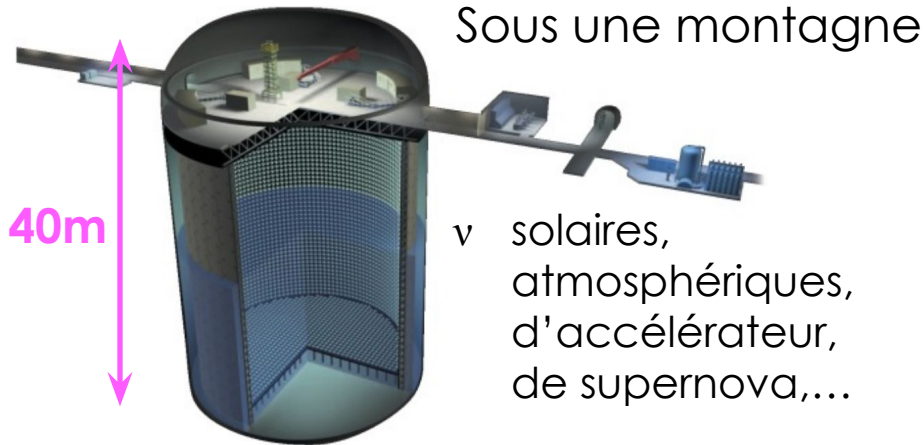
⇒ on a besoin de **très grands détecteurs!**

Et souvent **souterrains** pour se protéger des muons cosmiques

Détecteurs de neutrinos

La probabilité qu'un neutrino interagisse avec la matière est très faible
⇒ on a besoin de **très grands détecteurs!**
Et souvent **souterrains** pour se protéger des muons cosmiques

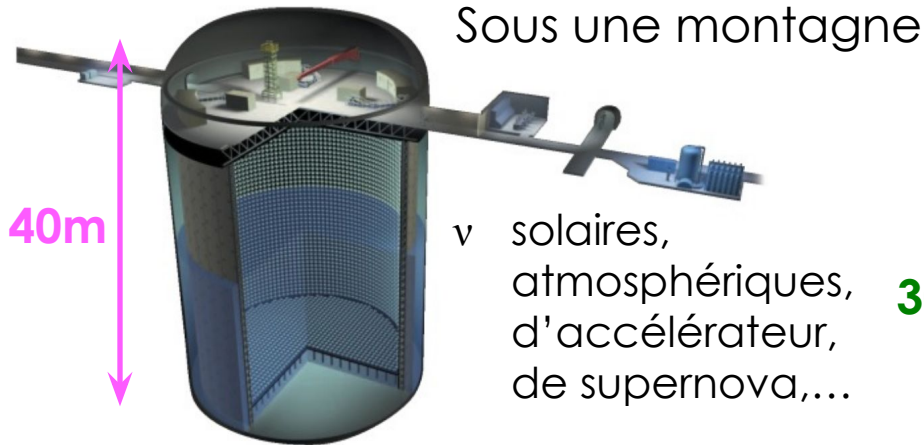
SuperKamiokande au Japon



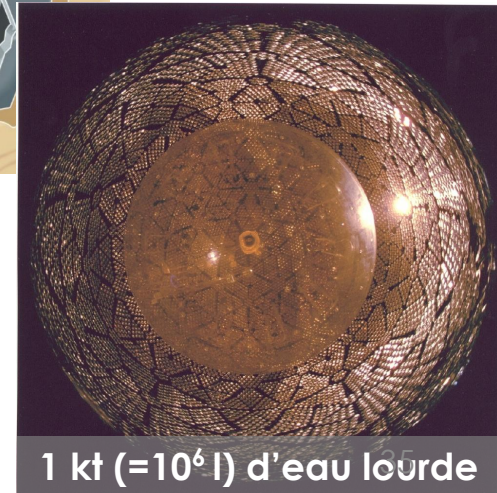
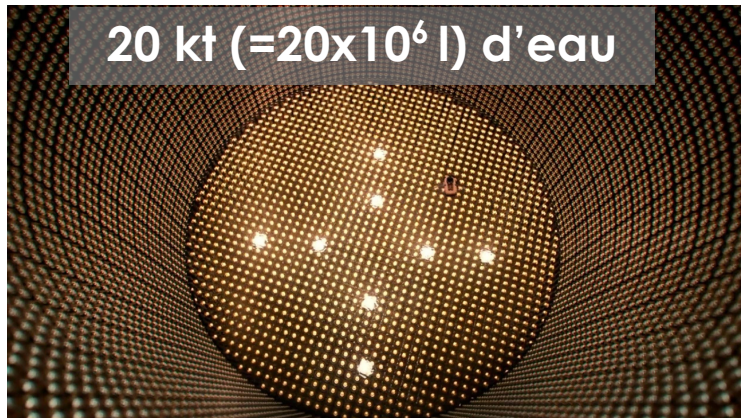
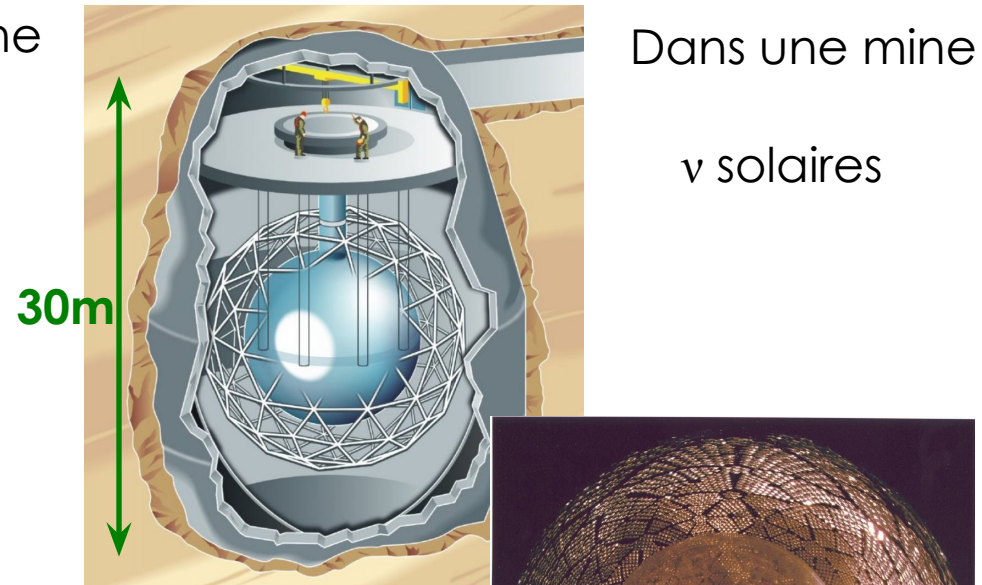
Detecteurs de neutrinos

La probabilité qu'un neutrino interagisse avec la matière est très faible
⇒ on a besoin de **très grands détecteurs!**
Et souvent **souterrains** pour se protéger des muons cosmiques

SuperKamiokande au Japon



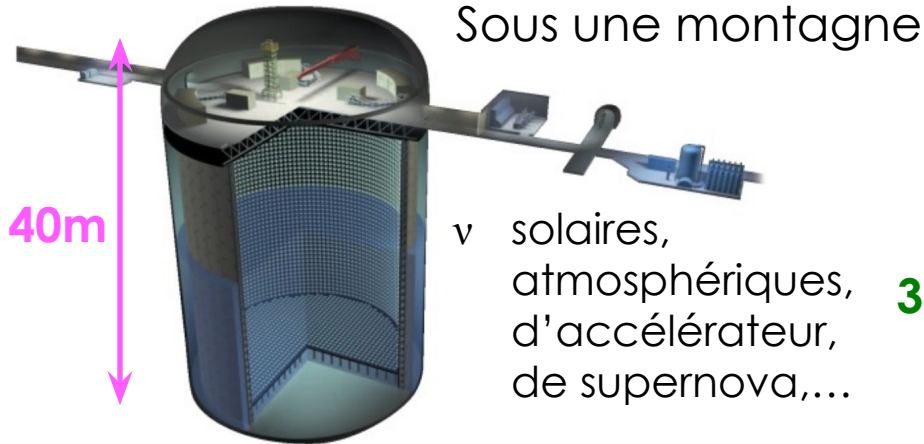
SNO au Canada



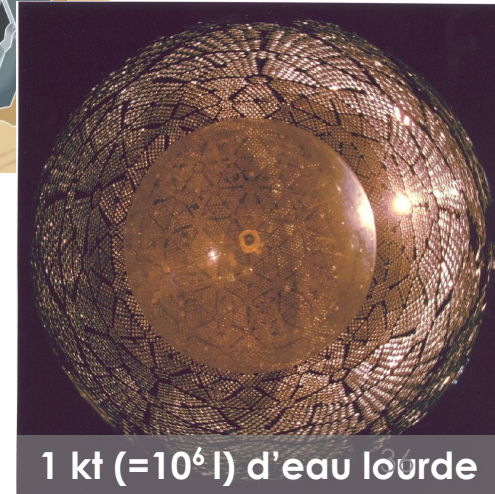
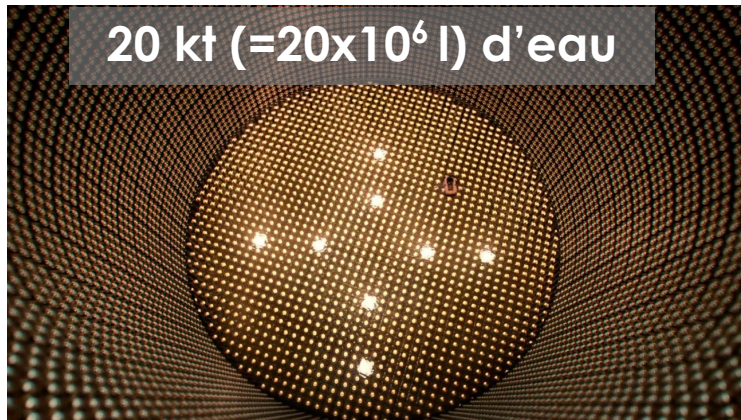
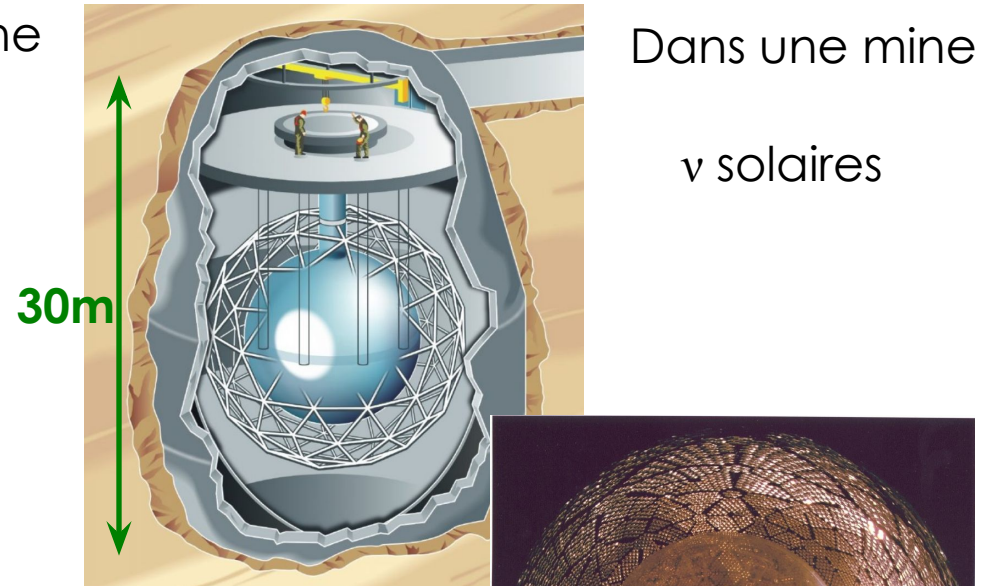
Détecteurs de neutrinos

La probabilité qu'un neutrino interagisse avec la matière est très faible
⇒ on a besoin de **très grands détecteurs!**
Et souvent **souterrains** pour se protéger des muons cosmiques

SuperKamiokande au Japon

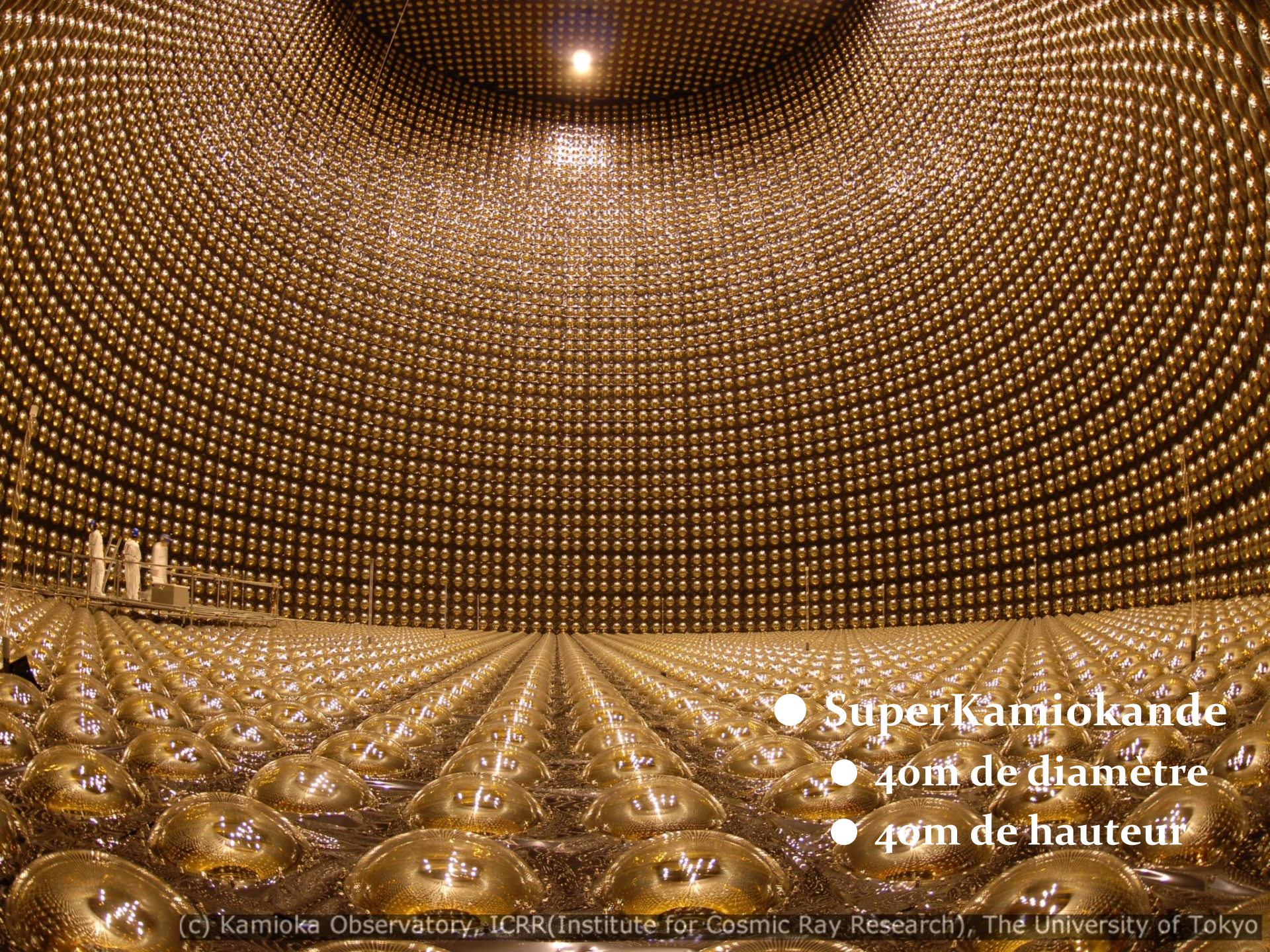


SNO au Canada

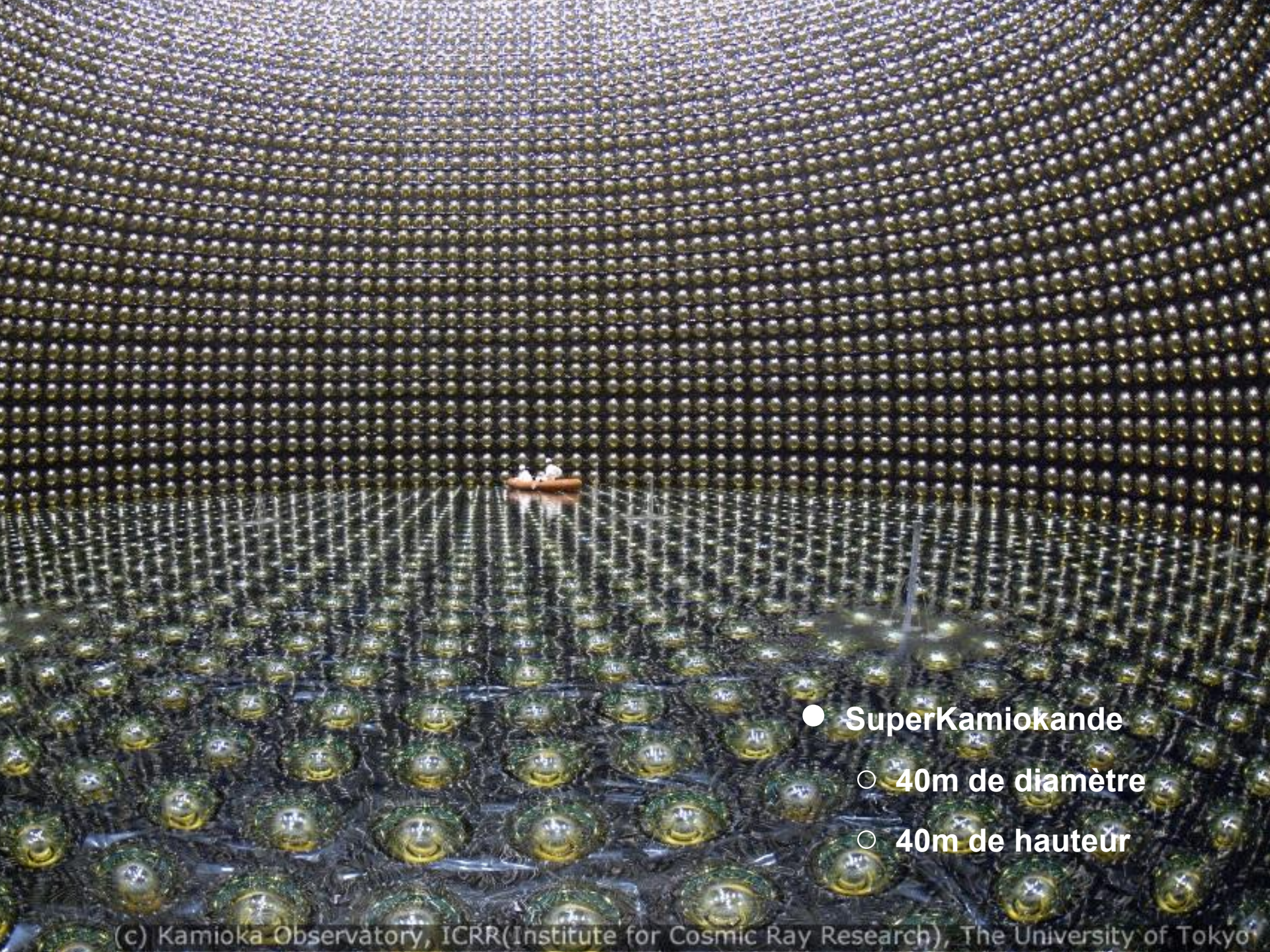


● Caverne de Super-Kamiokande





- SuperKamiokande
- 40m de diamètre
- 40m de hauteur

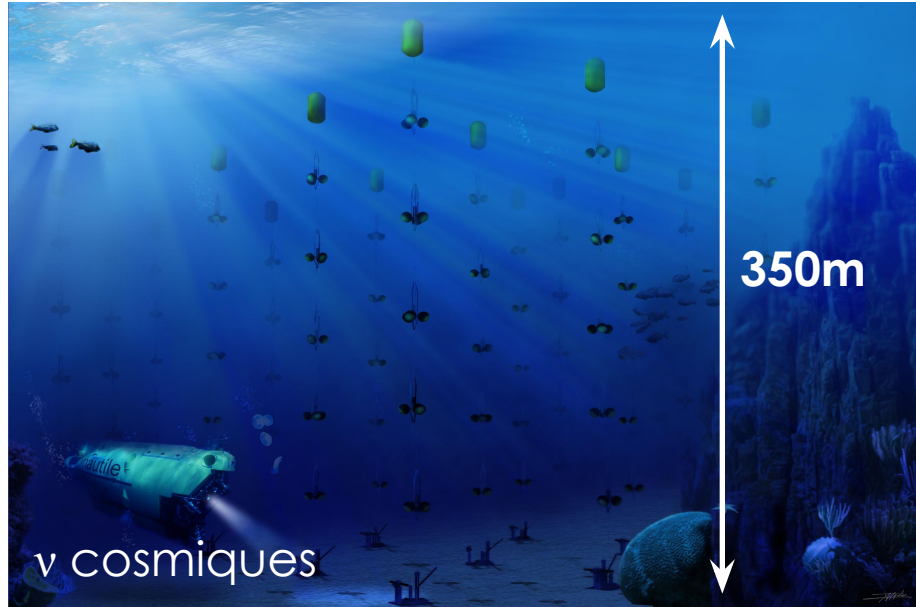


● SuperKamiokande

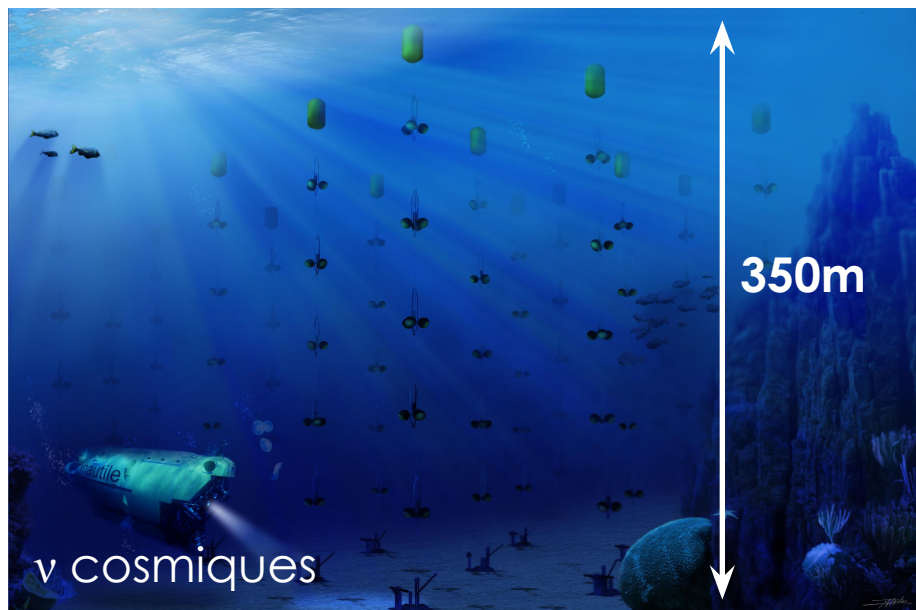
○ 40m de diamètre

○ 40m de hauteur

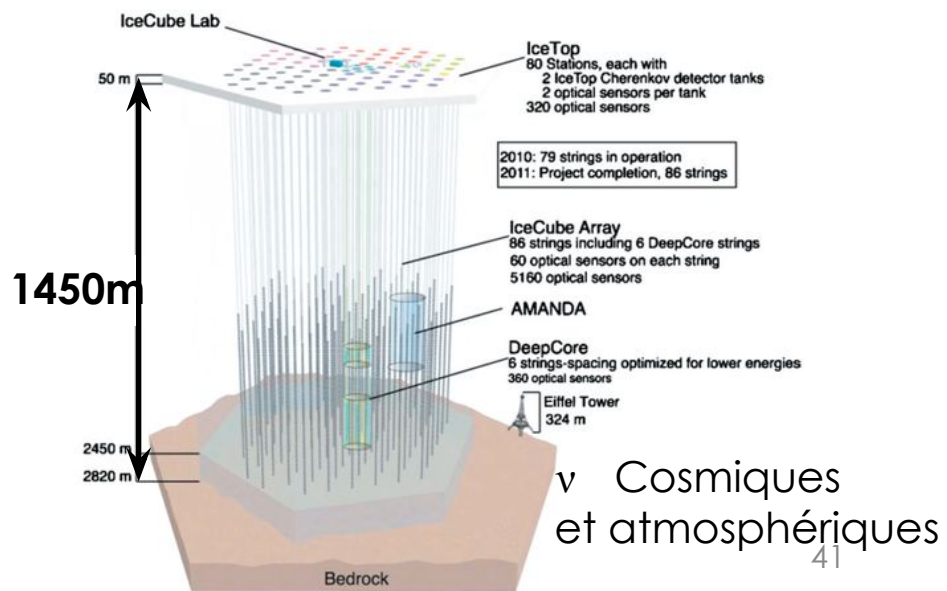
Antares dans la mer Méditerranée, proche de Toulon



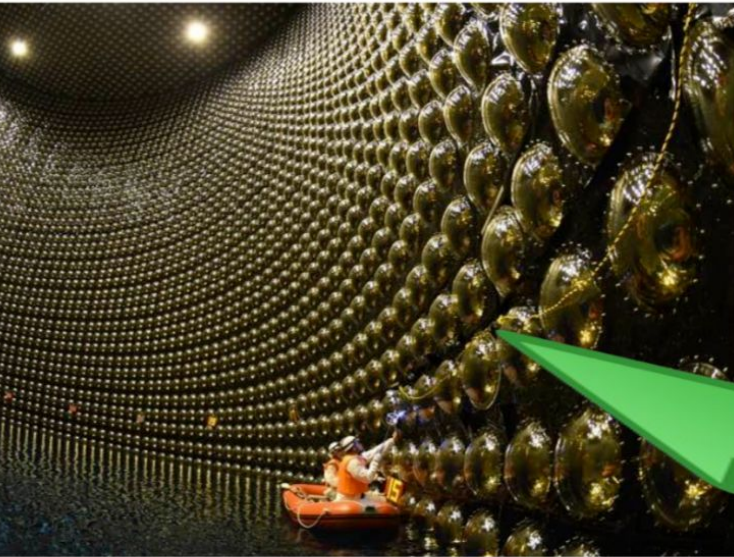
Antares dans la mer Méditerranée, proche de Toulon



IceCube au Pôle Sud



The Kamiokande series



Super-Kamiokande
SUPER SK

Hyper-Kamiokande



KamiokaNDE



258 kton

from 2027

1983-
1996

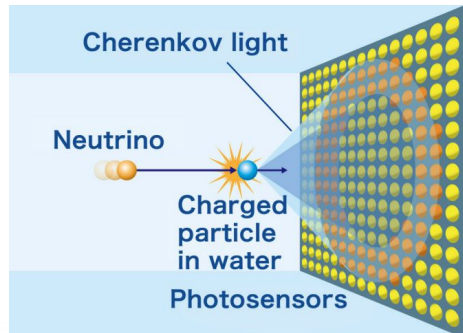
50 kton

1996 -

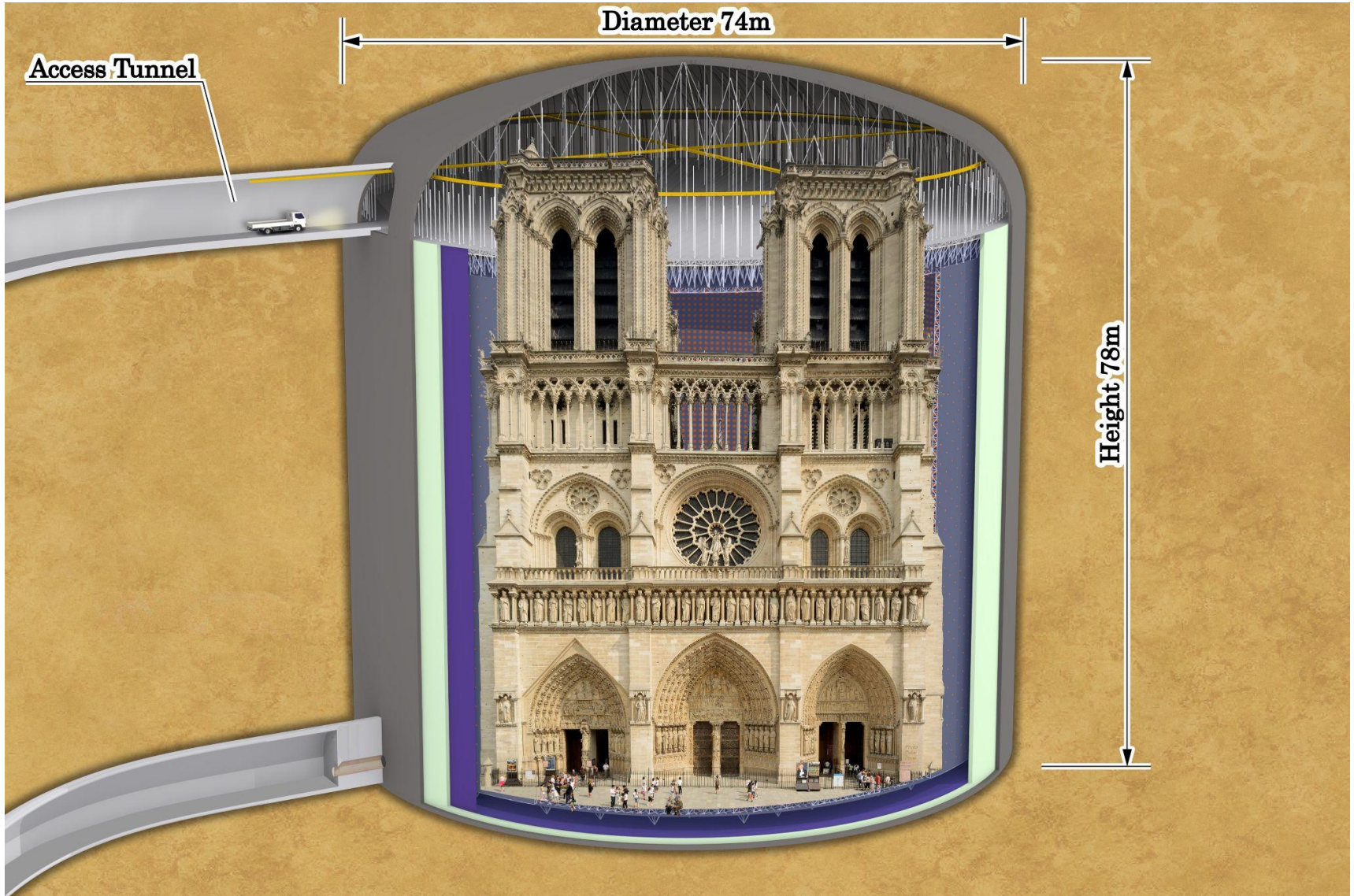
3 kton

x 8

x 20

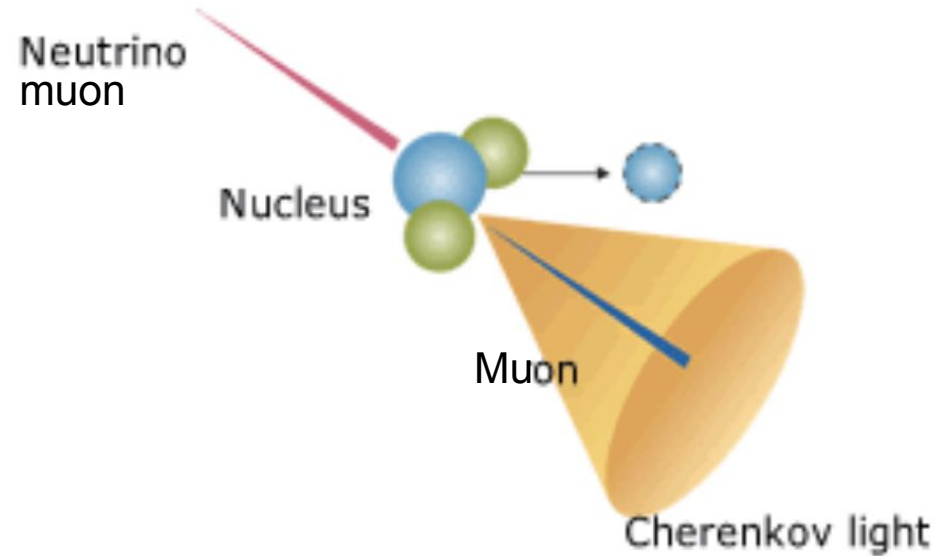
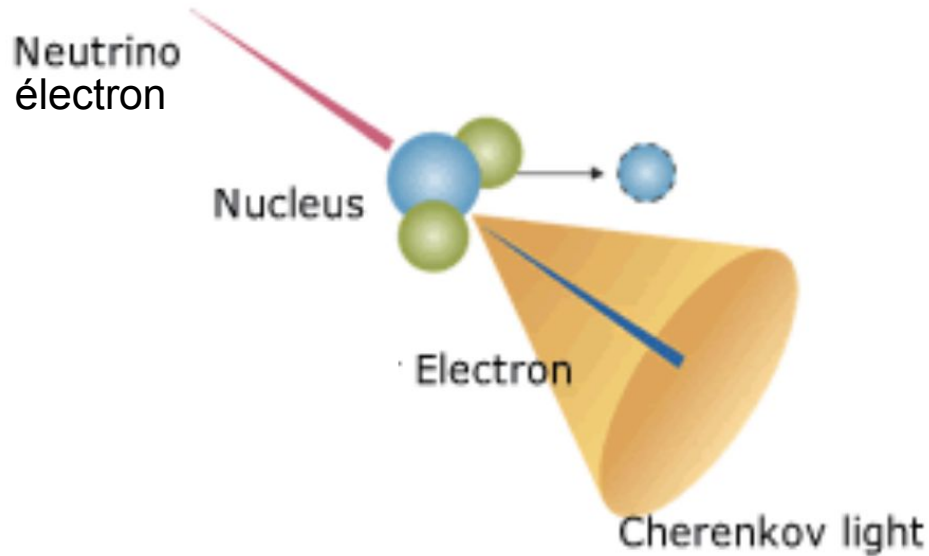


Hyper-K vs Notre Dame



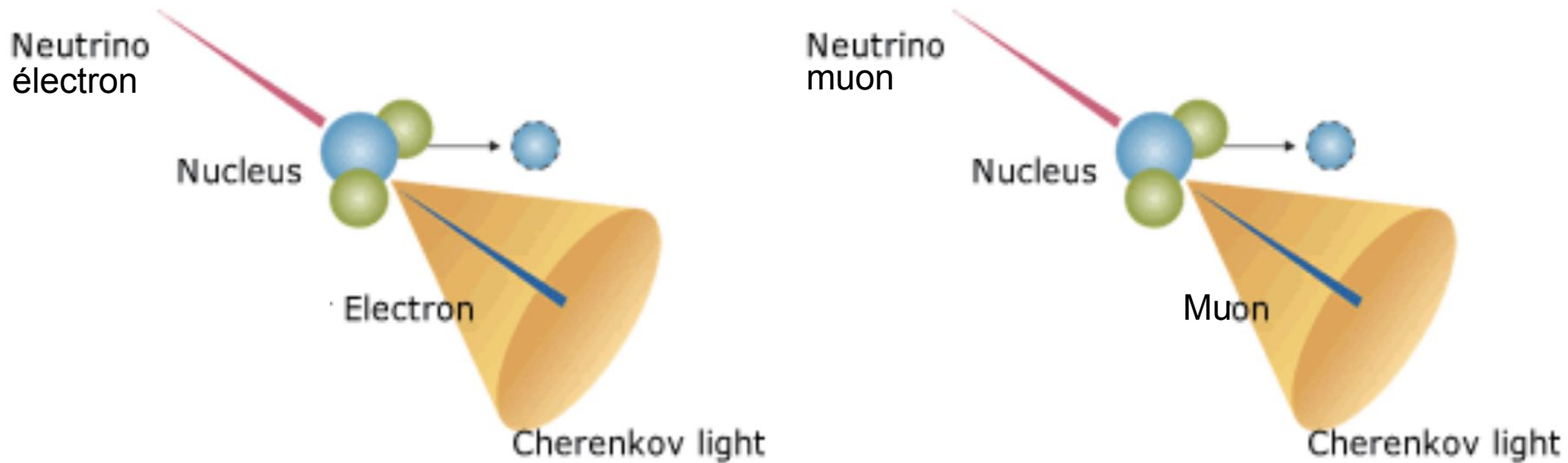
Détection des neutrinos

Dans la cuve d'eau, la mer ou la glace, le neutrino rencontre des noyaux, interagit avec n et p et se « transforme » en son partenaire chargé (électron, muon ou tau)



Détection des neutrinos

Dans la cuve d'eau, la mer ou la glace, le neutrino rencontre des noyaux, interagit avec n et p et se « transforme » en son partenaire chargé (électron, muon ou tau)

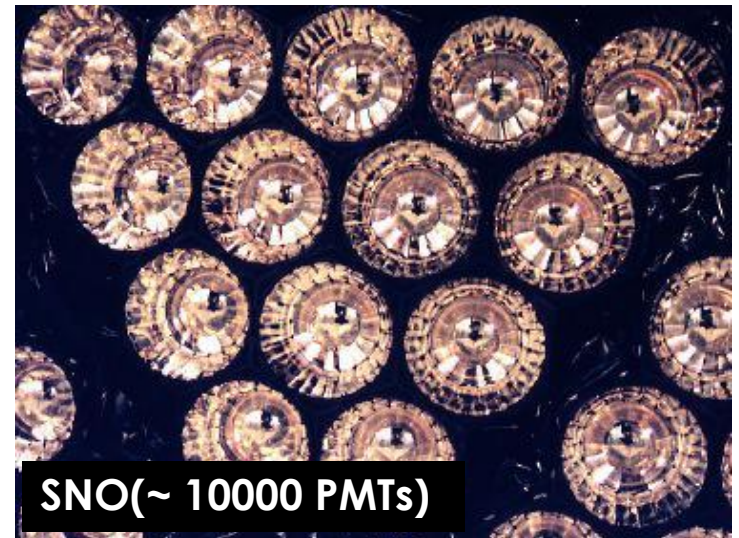
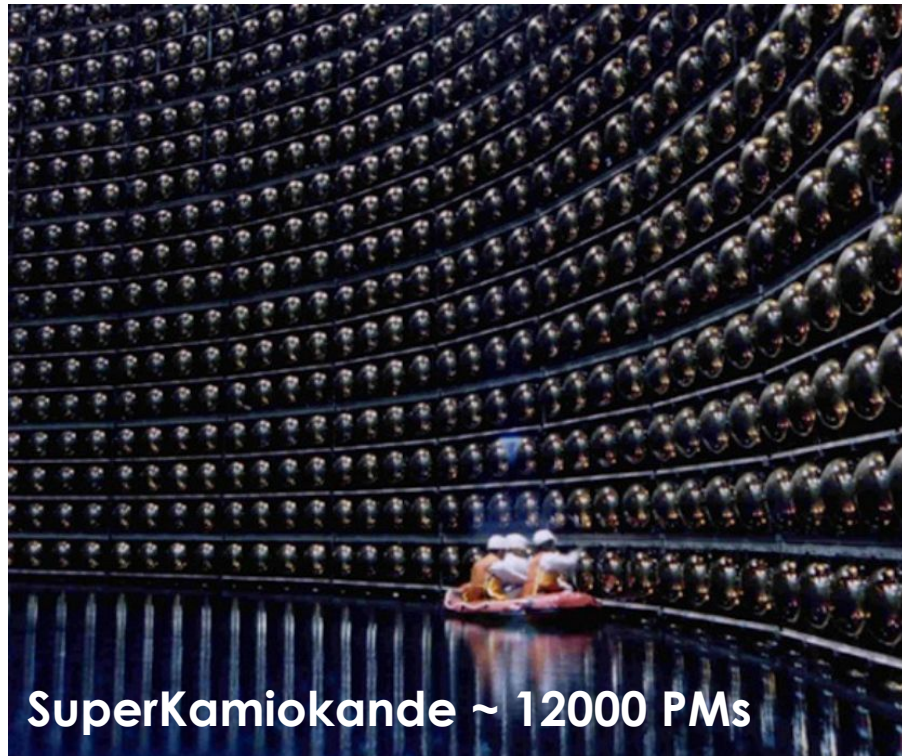


La particule chargée (muon ou électron) émet de la lumière Cherenkov dans l'eau.

Le concept de base est donc que pour observer un neutrino (ou plutôt son interaction) il faut détecter la lumière produite

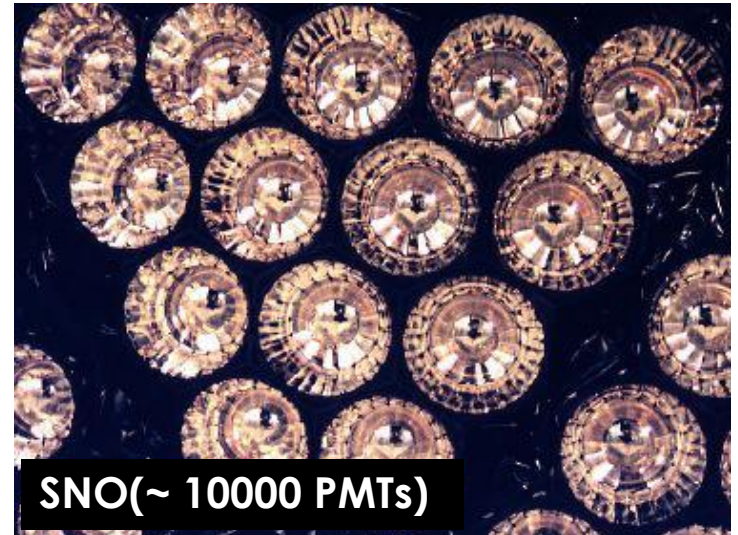
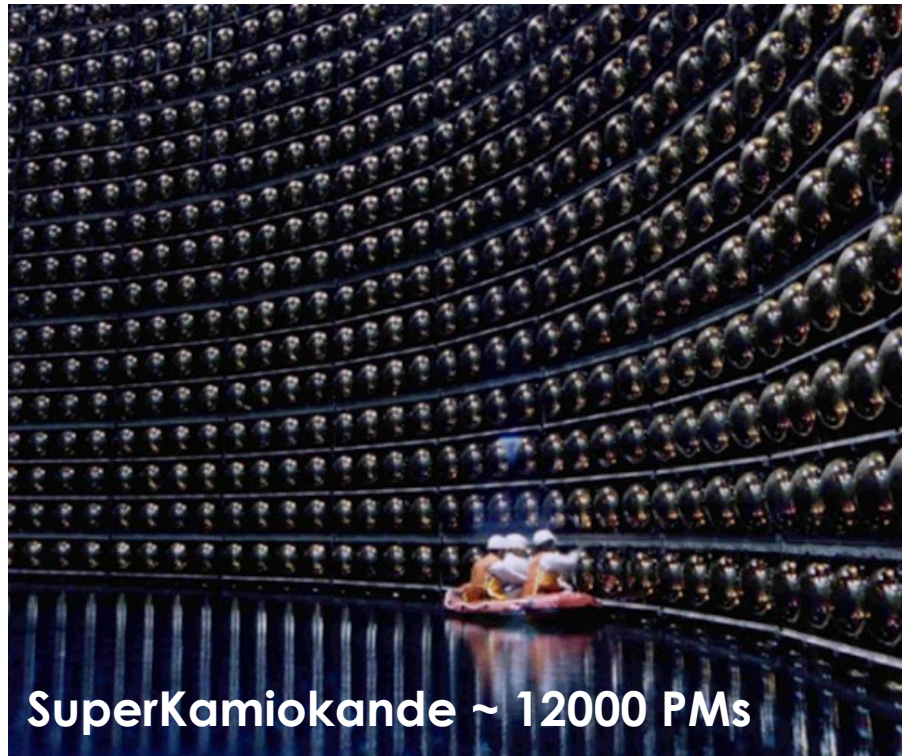
PhotoMultiplicateur

(une sorte d'ampoule inversée)



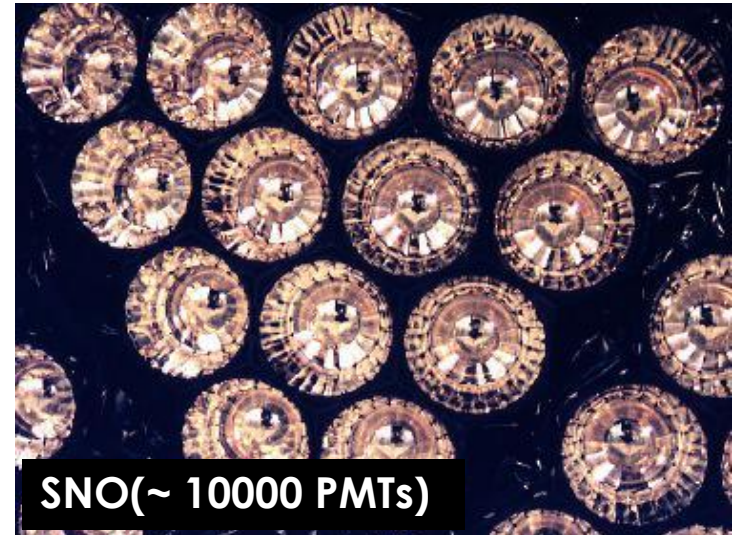
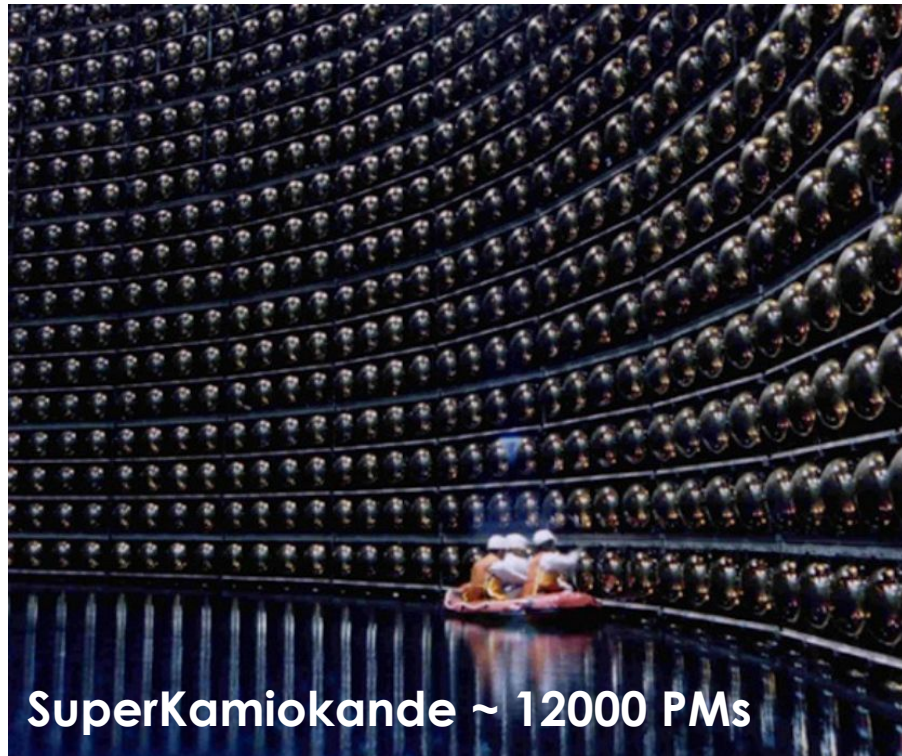
PhotoMultiplificateur

(une sorte d'ampoule inversée)

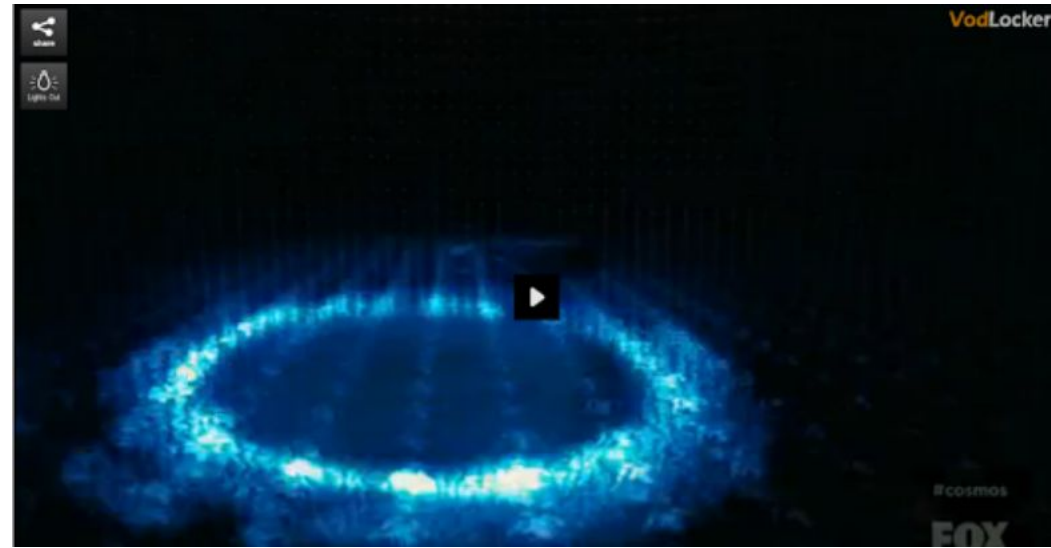
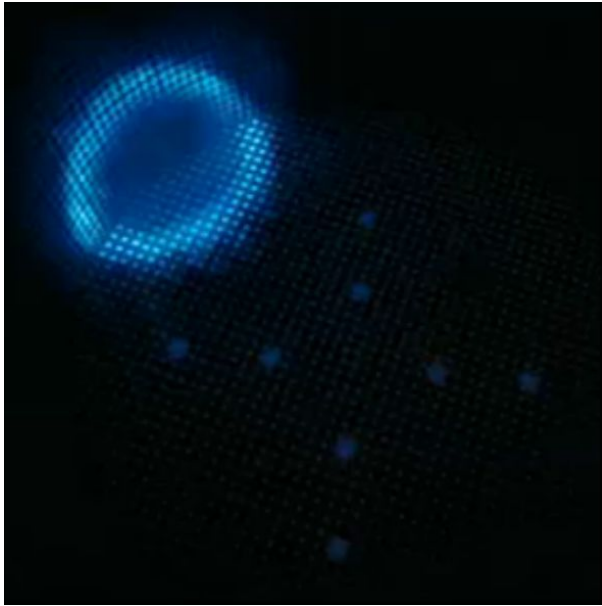


PhotoMultiplicateur

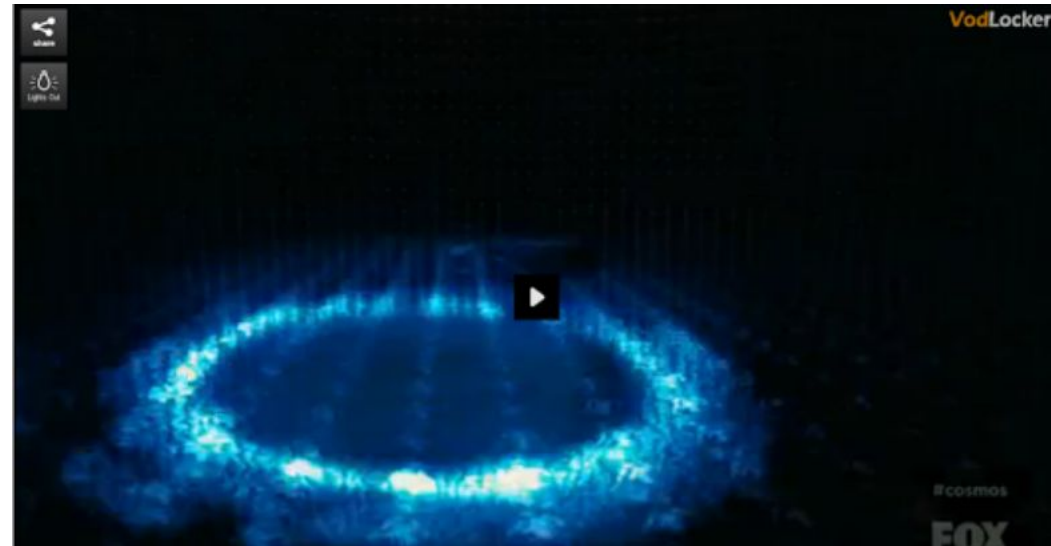
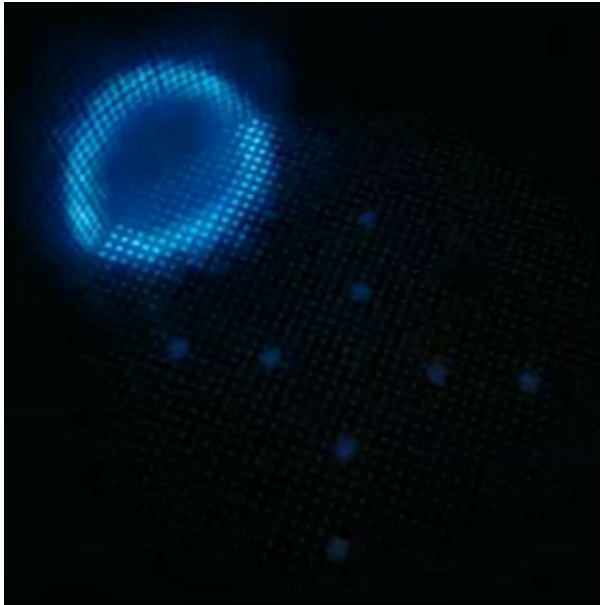
(une sorte d'ampoule inversée)



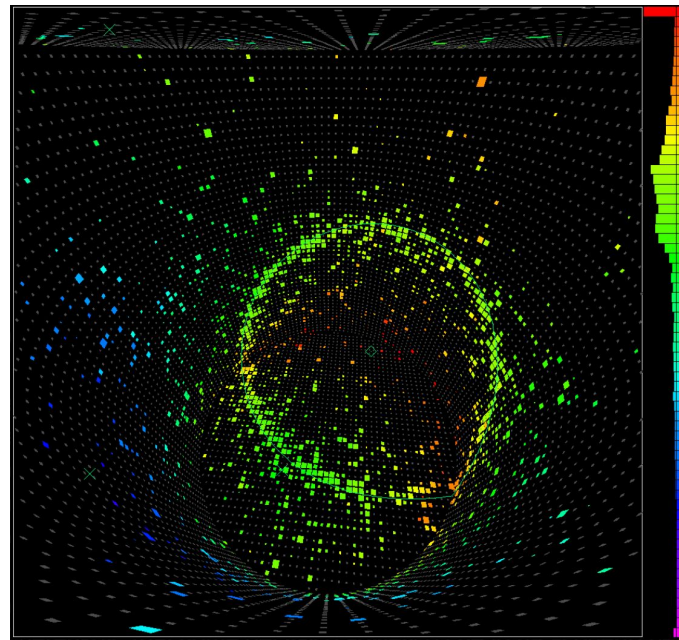
Anneau Cherenkov dans SuperKamiokande



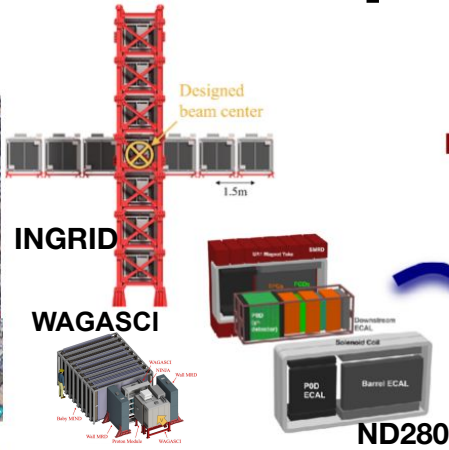
Anneau Cherenkov dans SuperKamiokande



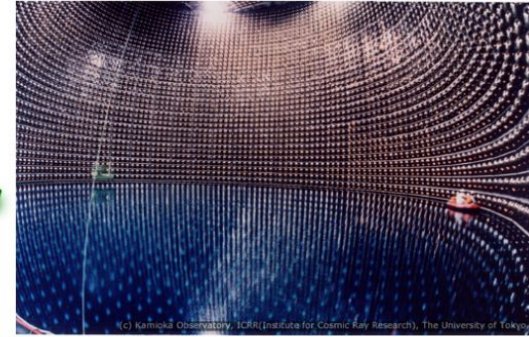
Reconstruction grace
aux PMs



L'experience T2K

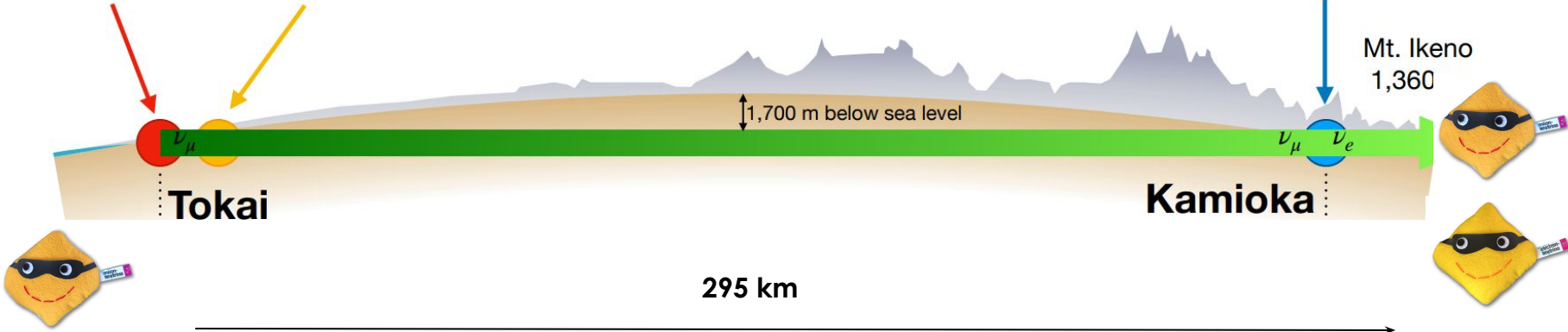


T2K

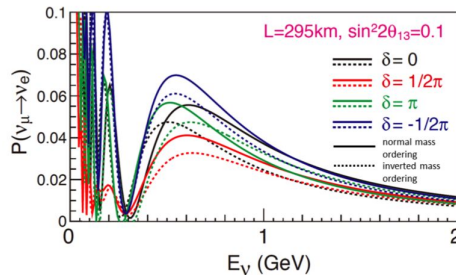
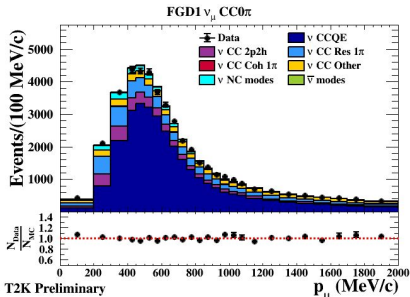


J-PARC **Near Detectors**

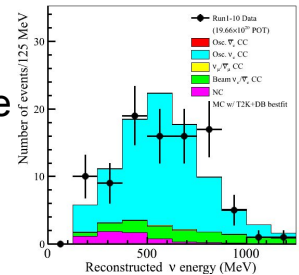
Super-Kamiokande



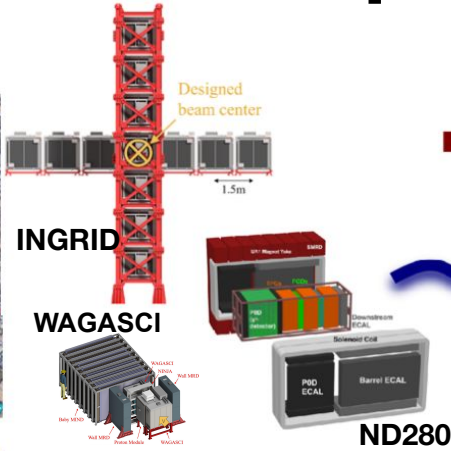
ν_μ beam



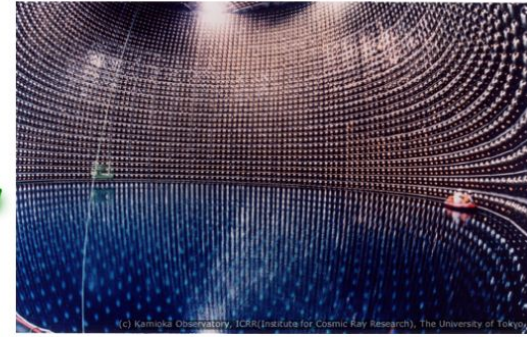
ν_e appearance



L'experience T2K



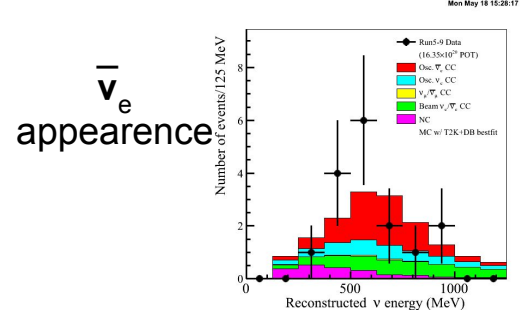
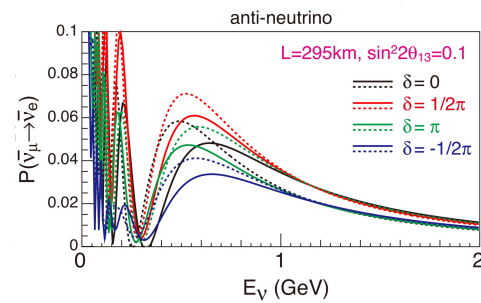
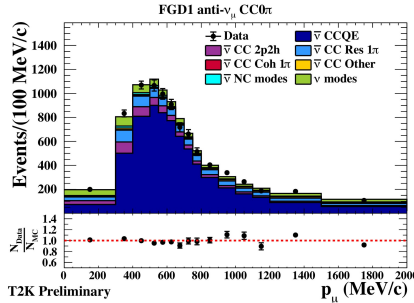
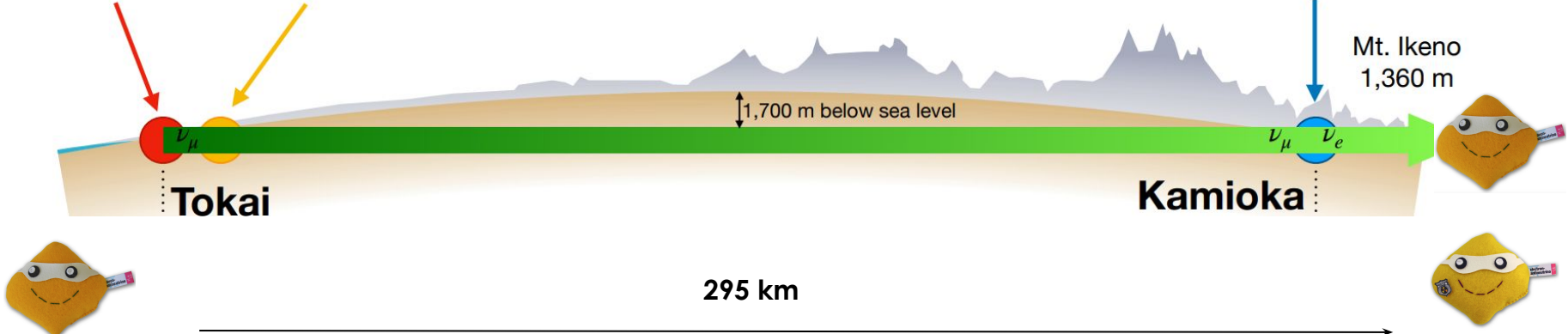
T2K



J-PARC

Near Detectors

Super-Kamiokande




$\bar{\nu}_\mu$ beam

$\bar{\nu}_e$ appearance

Neutrinos and the matter/anti-matter asymmetry

Probabilité d'oscillation dans T2K

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) (\mp) O(\sin \delta_{\text{CP}})$$


Si $\delta_{\text{CP}} \neq 0$ && $\delta_{\text{CP}} \neq \pi$ cela signifie $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$

**La matière se
comporte
différemment de
l'anti-matière**

Neutrinos and the matter/anti-matter asymmetry

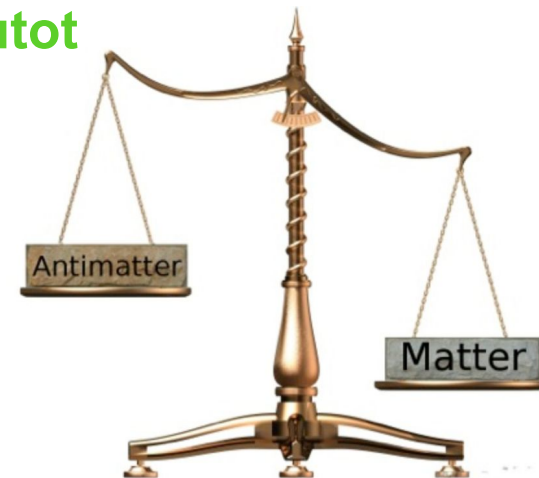
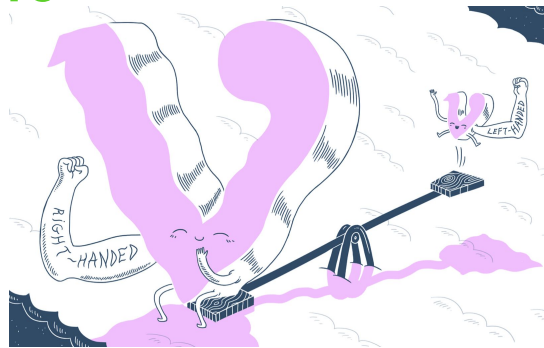
Probabilité d'oscillation dans T2K

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) (\mp) O(\sin \delta_{CP})$$

Si $\delta_{CP} \neq 0$ && $\delta_{CP} \neq \pi$ cela signifie $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$

La matière se comporte différemment de l'anti-matière

Découvrir que les neutrinos se comportent de manière différente que les anti-neutrinos pourrait nous aider à expliquer **pourquoi nous sommes fait de matière plutôt que d'anti-matière**



*We may be descended
from heavy neutrinos.*

Conclusions

- La quête aux neutrinos a commencé il y a presque un siècle
- Le neutrino est doublement intéressant: l'étudier pour le comprendre + l'exploiter pour étudier Soleil, étoiles, Terre,...
- La découverte des oscillations (et donc que les neutrinos ont une masse) a amené au Prix Nobel
- Les chercheurs continuent à étudier cette particule mystérieuse... un autre Prix Nobel dans le future?



Conclusions



- La quête aux neutrinos a commencé il y a presque un siècle
- Le neutrino est doublement intéressant: l'étudier pour le comprendre + l'exploiter pour étudier Soleil, étoiles, Terre,...
- La découverte des oscillations (et donc que les neutrinos ont une masse) a amené au Prix Nobel
- Les chercheurs continuent à étudier cette particule mystérieuse... un autre Prix Nobel dans le future?



Métier de chercheur

- beaucoup de voyages
- collaboration internationales
- structure interne (CNRS, labo) + structure de la collaboration international
- horaires souples
- travail “pratique” en laboratoire (réalisation de détecteurs) ou a` l`ordinateur (analyse des données)
- Anglais!
- Encadrement
- enseignement
- MdC vs chercheur

Possibilité d'oscillation d'un type à l'autre

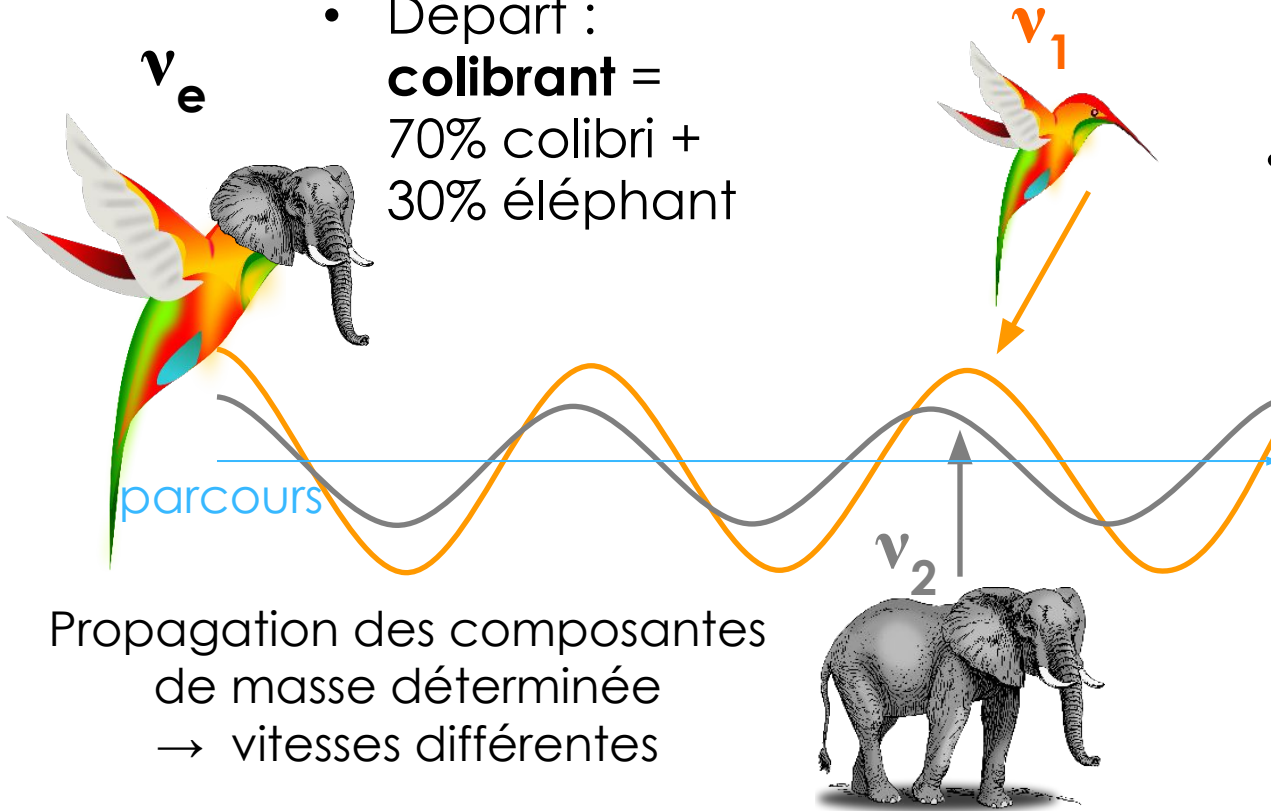
v_e

- Départ :
colibrant =
70% colibri +
30% éléphant



Possibilité d'oscillation d'un type à l'autre

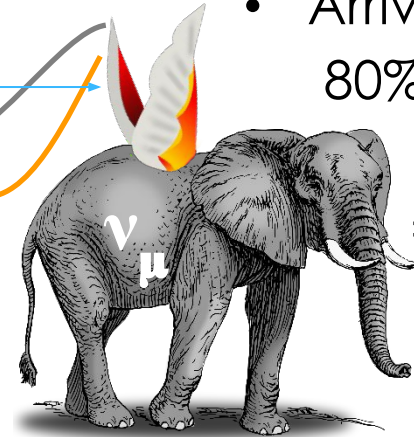
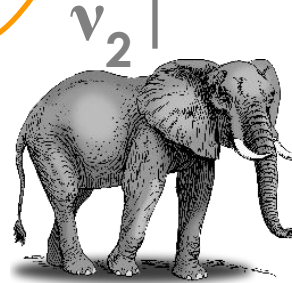
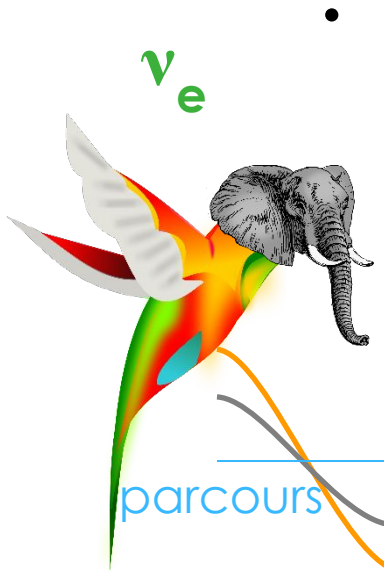
- Départ : **colibrant** = 70% colibri + 30% éléphant



- Détection : un des deux états superposés
- **Probabilité de détecter un autre état superposé**

Possibilité d'oscillation d'un type à l'autre

- Départ :
colibrant =
70% colibri +
30% éléphant



parcours

Propagation des composantes
de masse déterminée
→ vitesses différentes

- Détection : un des
deux états superposés
- **Probabilité de détecter
un autre état
superposé**
 - Arrivée
80% éléphant
+ 20% colibri
= **éléphi**

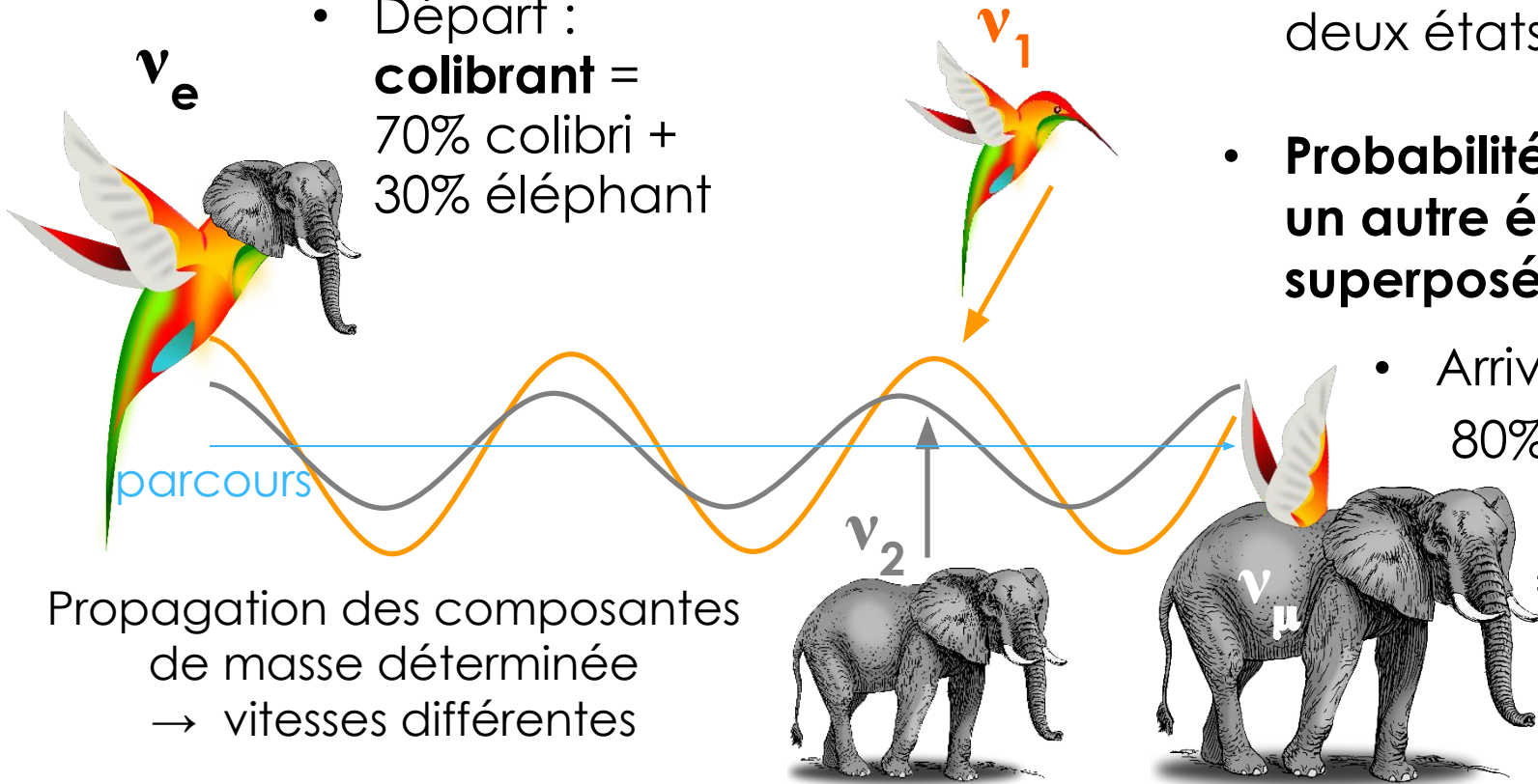
Possibilité d'oscillation d'un type à l'autre

- Détection : un des deux états superposés

- **Probabilité de détecter un autre état superposé**

- Arrivée
80% éléphant
+ 20% colibri
= **éléphi**

- Départ :
colibrant =
70% colibri +
30% éléphant



Propagation des composantes de masse déterminée
→ vitesses différentes

- Probabilité de transformation oscille avec la distance
– (en fait : L/E)
- Phénomène d'oscillation confirmé expérimentalement en 1998 et 2001 (Prix Nobel en 2015)

Probabilité max. de détecter des éléphis

parcours

Probabilité min. de détecter des éléphis

Prix Nobel 2015 pour la Physique



Arthur B. MacDonald



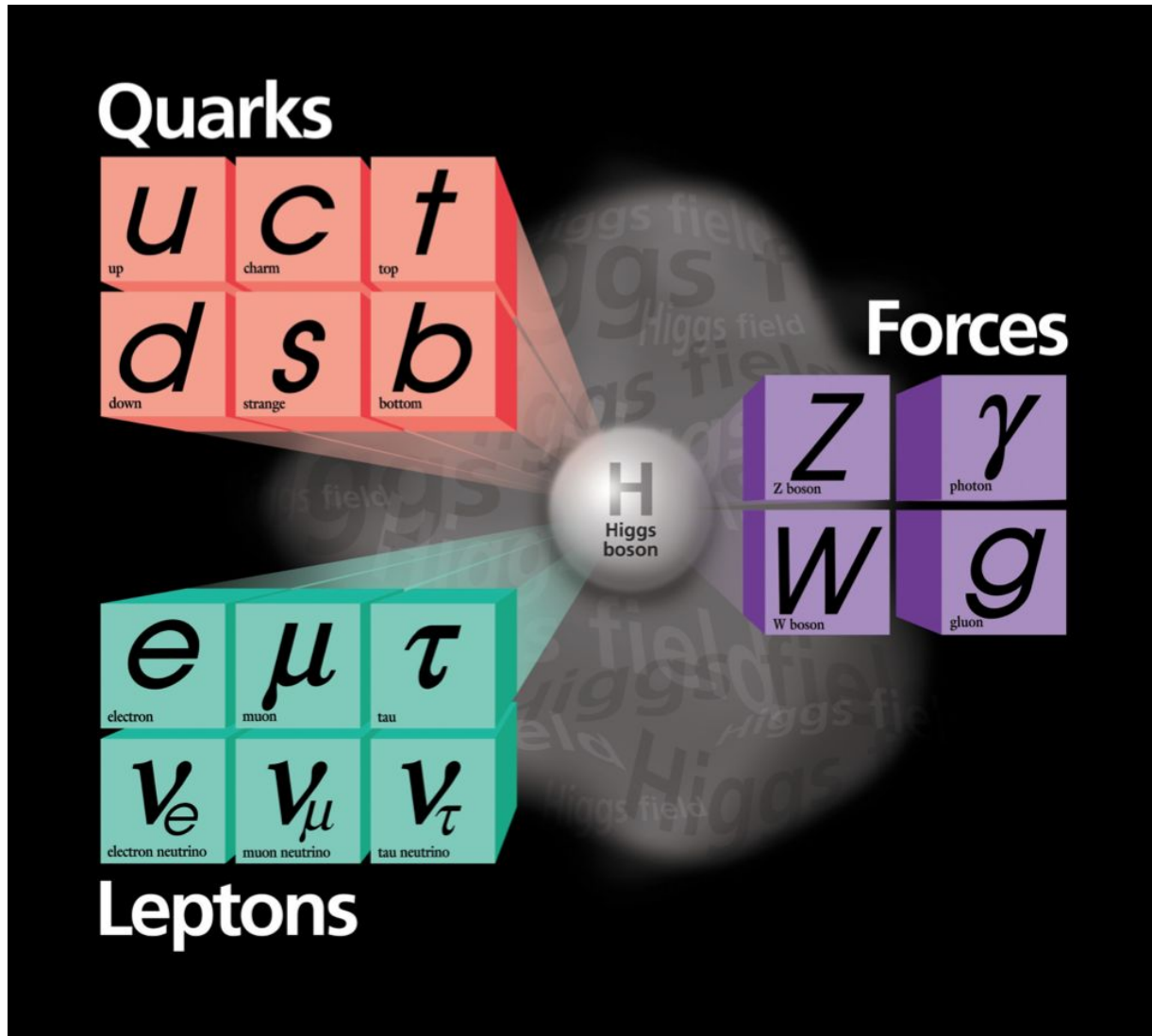
Takaaki Kajita

*« for the discovery of neutrino oscillations,
which shows that neutrinos have mass »*

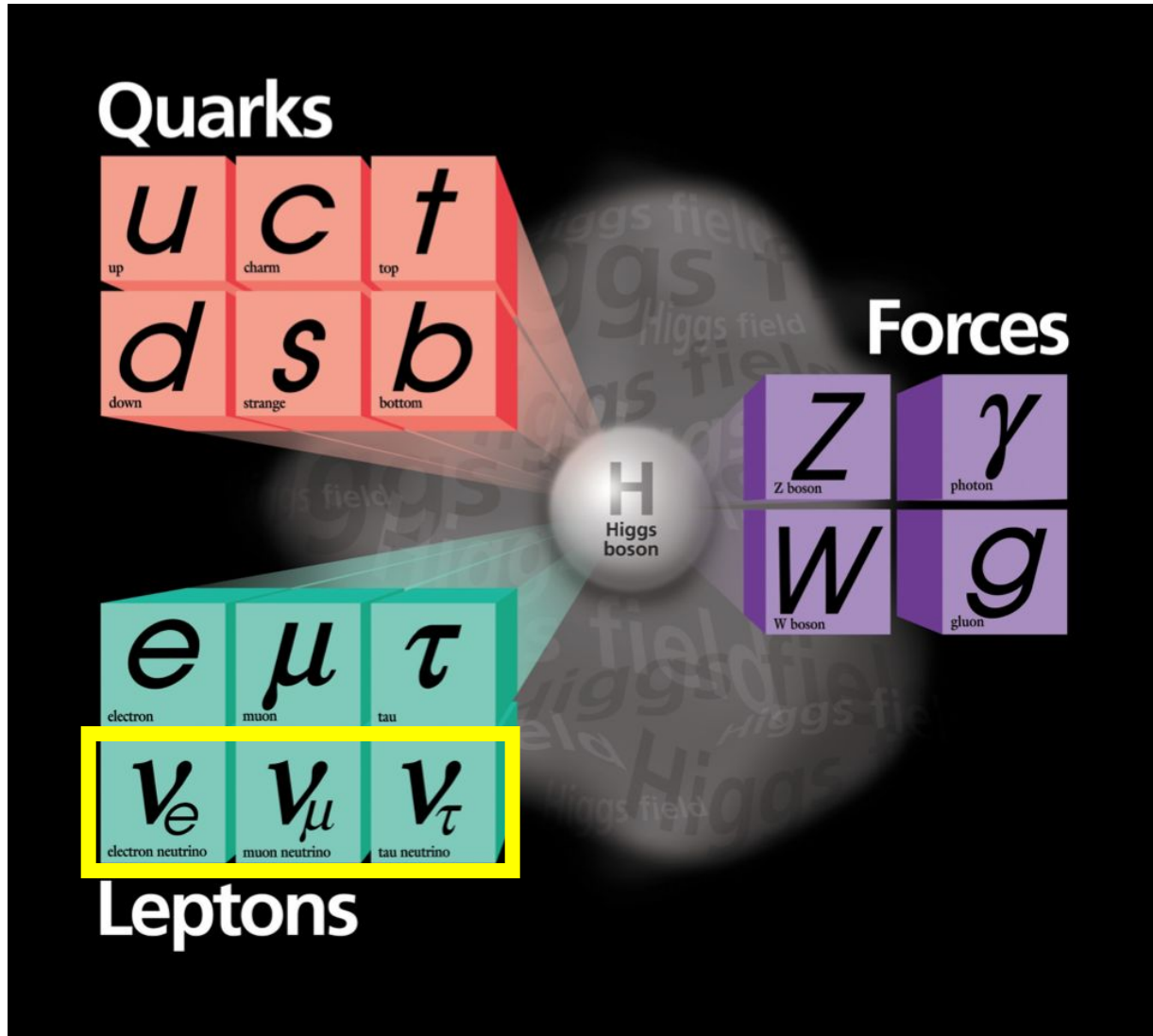
Et alors??

Le Modèle Standard

(en crise)

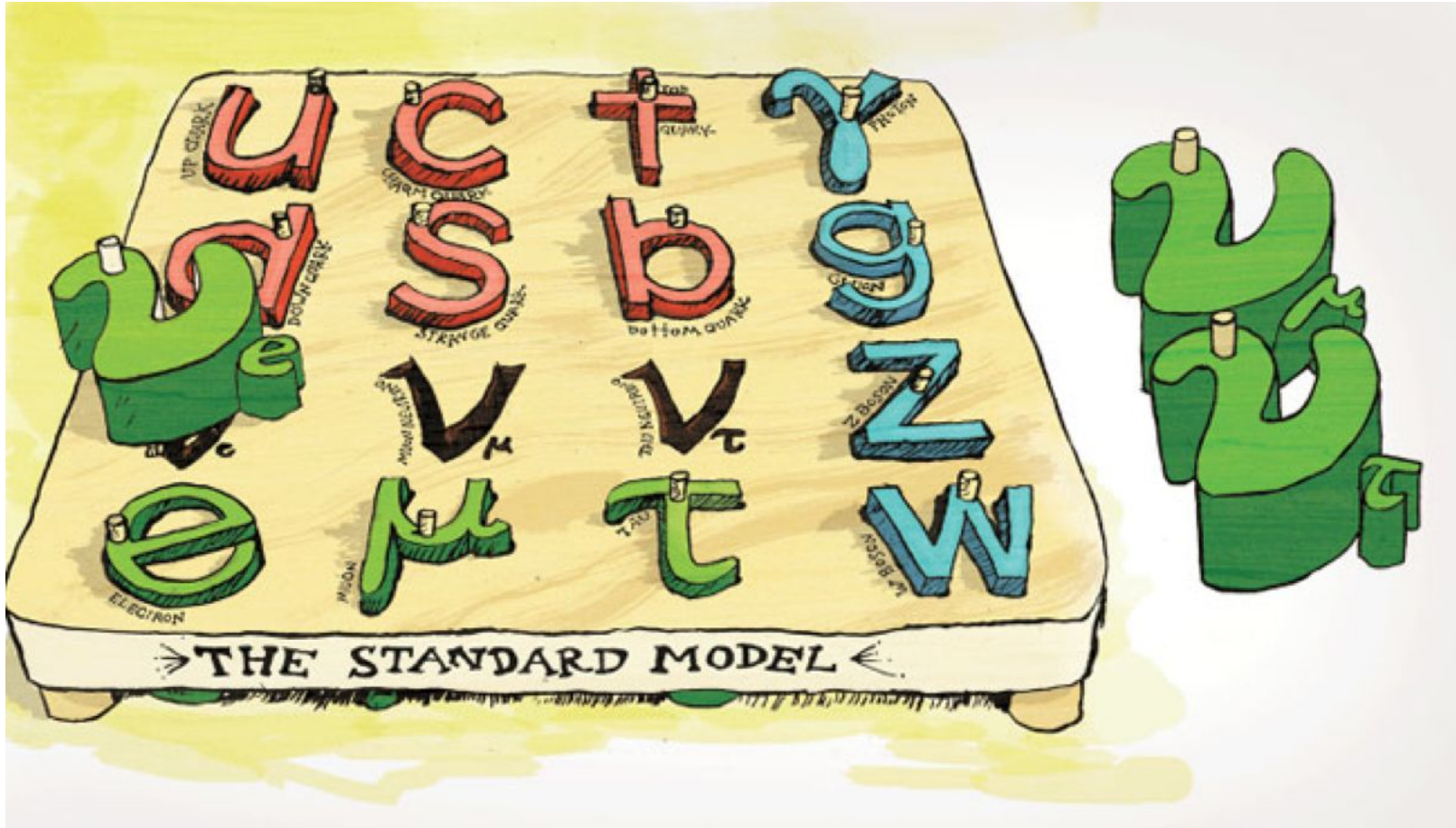


Le Modèle Standard (en crise)



Oups... si les neutrinos ont une masse...

Ils ne rentrent plus dans le modèle standard!



oscillation \Rightarrow masse

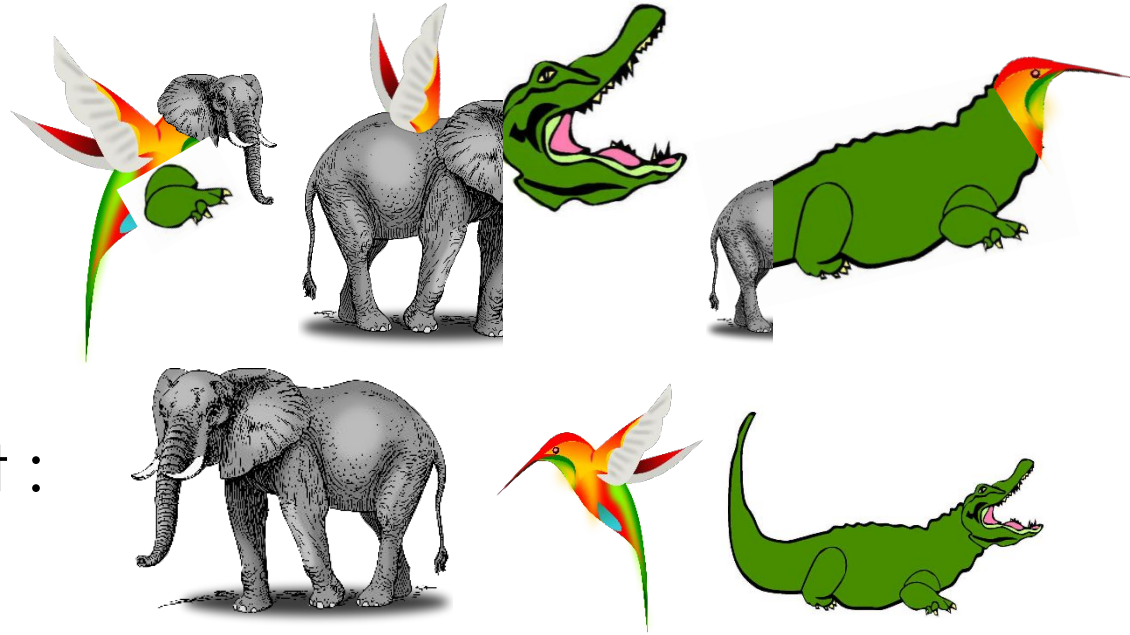
mais dans le MS les neutrinos sont sans masse \square physique au-delà du MS

Neutrinos : superposition à trois états

- **Types déterminés,**
détectables :
électron, muon, tau
 - **superposés**

Neutrinos : superposition à trois états

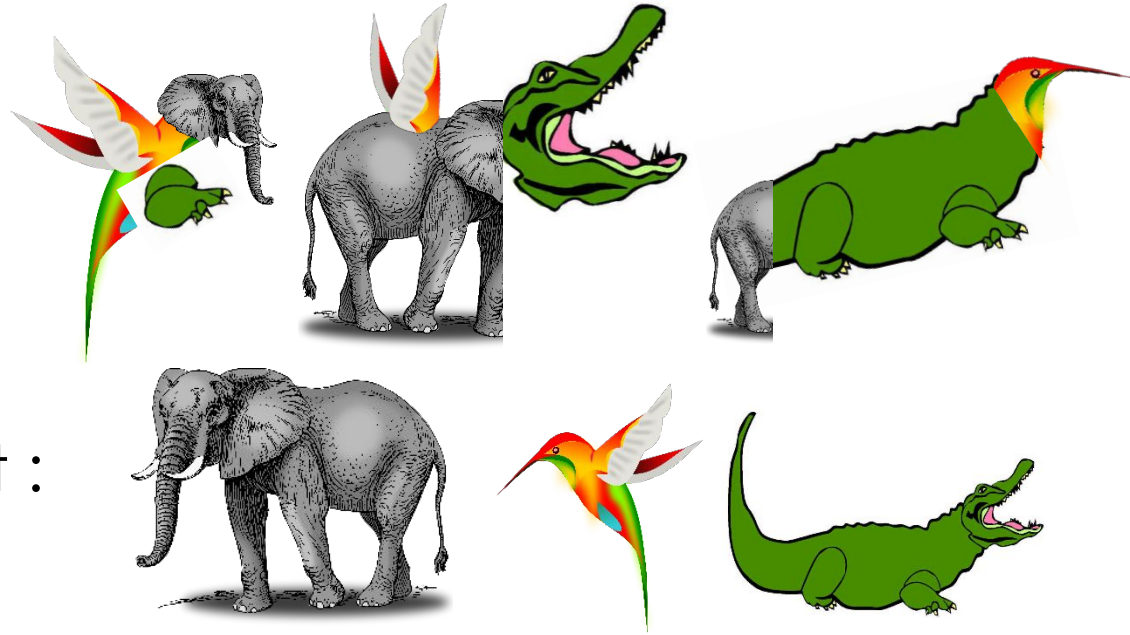
- **Types déterminés, détectables :**
électron, muon, tau
 - **superposés**
- **États qui se propagent :**
1, 2, 3
 - **Masses déterminées**



Neutrinos : superposition à trois états

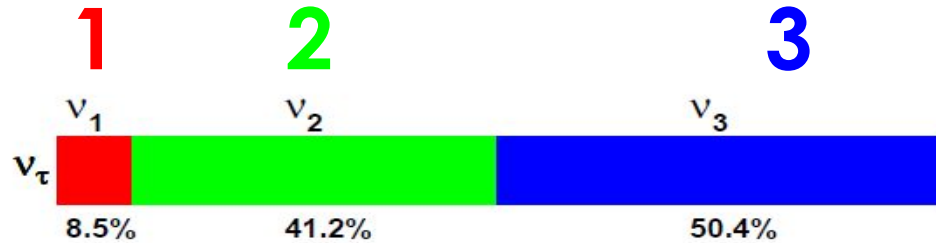
- Types déterminés, détectables :
électron, muon, tau
– superposés

- États qui se propagent :
1, 2, 3
– Masses déterminées



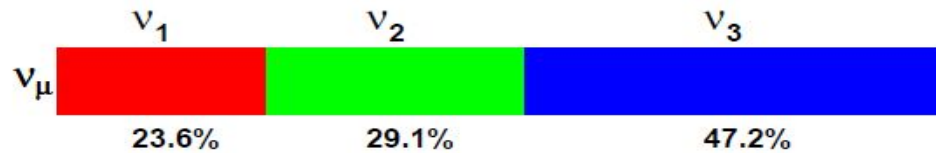
type tau

ν_τ



type muon

ν_μ



type électron

ν_e



-- Détection des anti- ν_e --

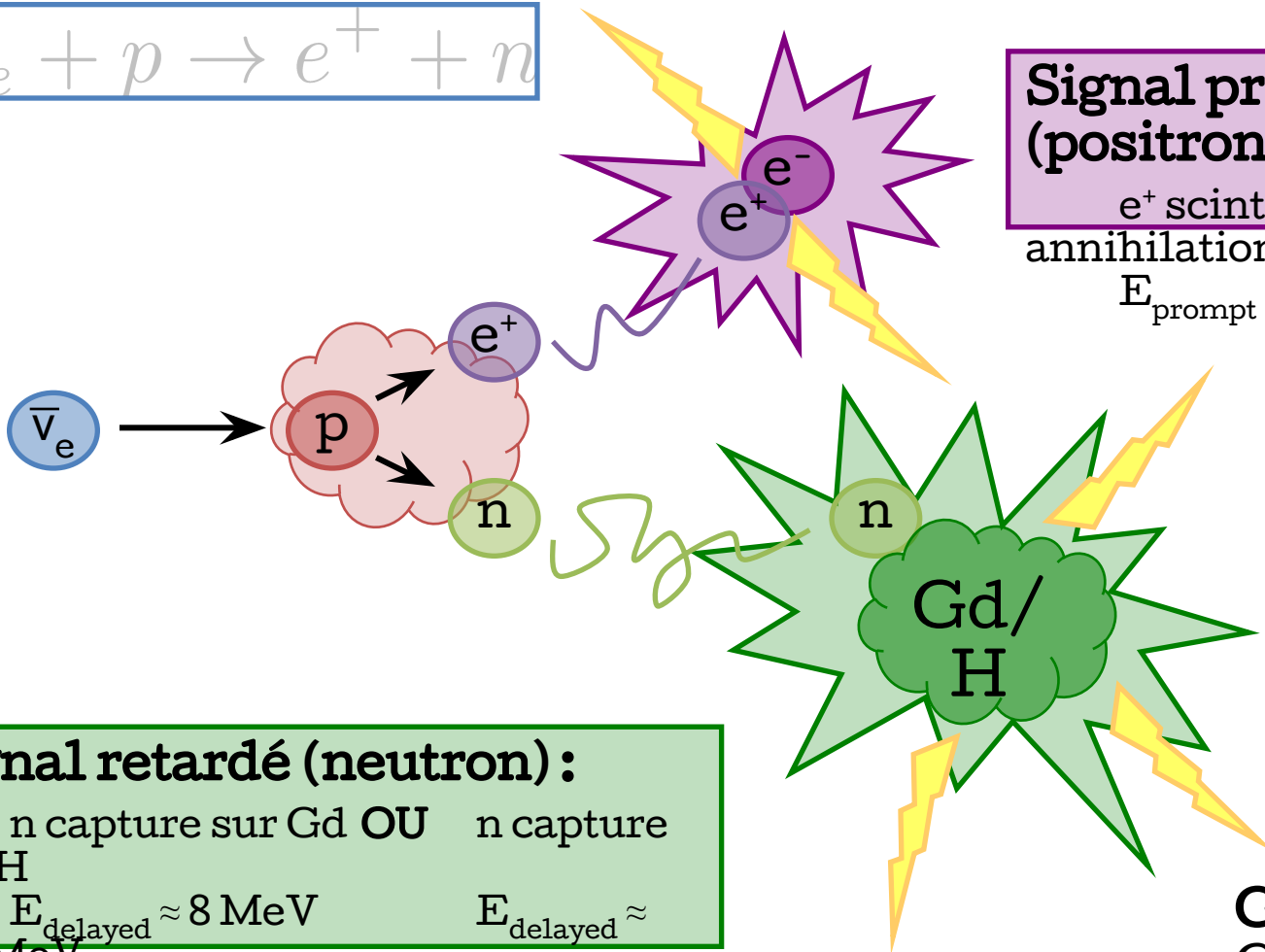
-- Détection dans des détecteurs à scintillateur liquide à l'aide des réactions inverses de désintégration β



Signal prompt (positron):

e^+ scintillation + annihilation

$$E_{\text{prompt}} \approx E_\nu - T_n - 0.8 \text{ MeV}$$



Signal retardé (neutron):

n capture sur Gd OU n capture sur H

$$E_{\text{delayed}} \approx 8 \text{ MeV}$$

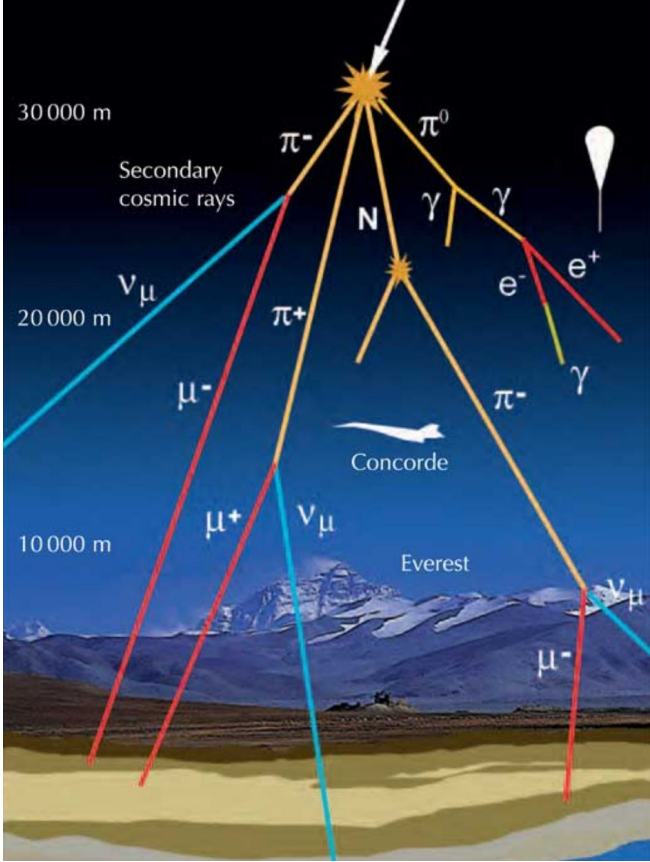
$$2.2 \text{ MeV}$$

$$\Delta t \approx 30 \mu\text{s}$$

$$E_{\text{delayed}} \approx$$

$$\Delta t \approx 200 \mu\text{s}$$

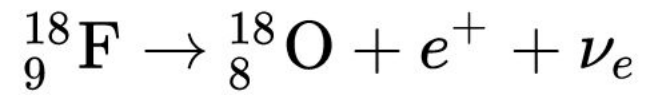
Gd Double Chooz
H Double Chooz



β^-



β^+



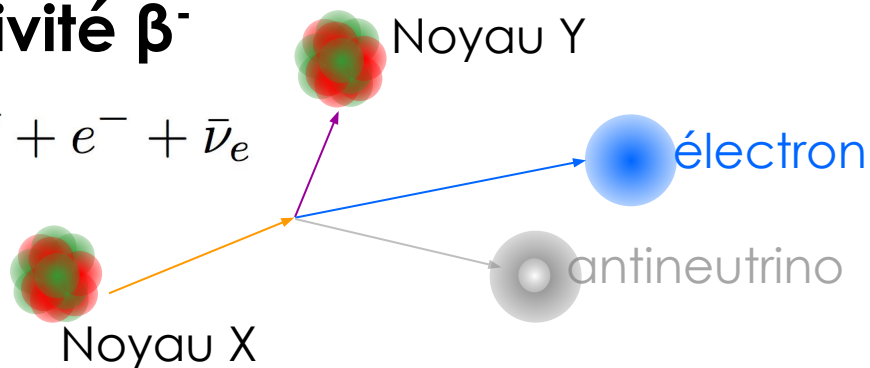


1930: W. Pauli postule le neutrino

W. Pauli (théoricien) propose l'existence d'un « neutron », rebaptisé « **neutrino** » en 1933 après la découverte du neutron par Chadwick, qui emporterait l'énergie manquante.

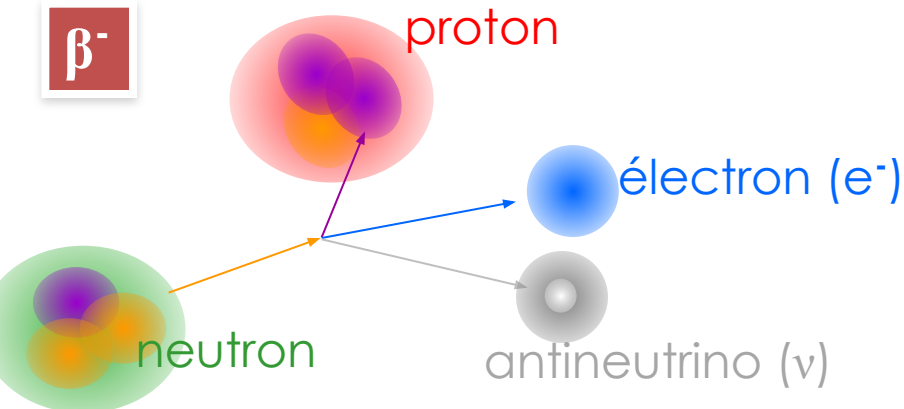


Radioactivité β⁻



Neutrinos: neutre (pas de charge) et petit (petite masse... ou pas de masse??)

β⁻



β⁺

