



À LA RECHERCHE DES NEUTRINOS : COMMENT VOIR L'INVISIBLE

A.Meregaglia (LP2i Bordeaux)

“Mystères au cœur de l'Univers et de la matière”
Marseille - 14 juin 2025

Les origines...

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Depuis toujours l'homme cherche à comprendre nos origines et celles de notre univers.
- Malgré toutes les découvertes et les progrès de la science nous ne connaissons qu'une petite fraction de notre univers.

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Depuis toujours l'homme cherche à comprendre nos origines et celles de notre univers.
- Malgré toutes les découvertes et les progrès de la science nous ne connaissons qu'une petite fraction de notre univers.

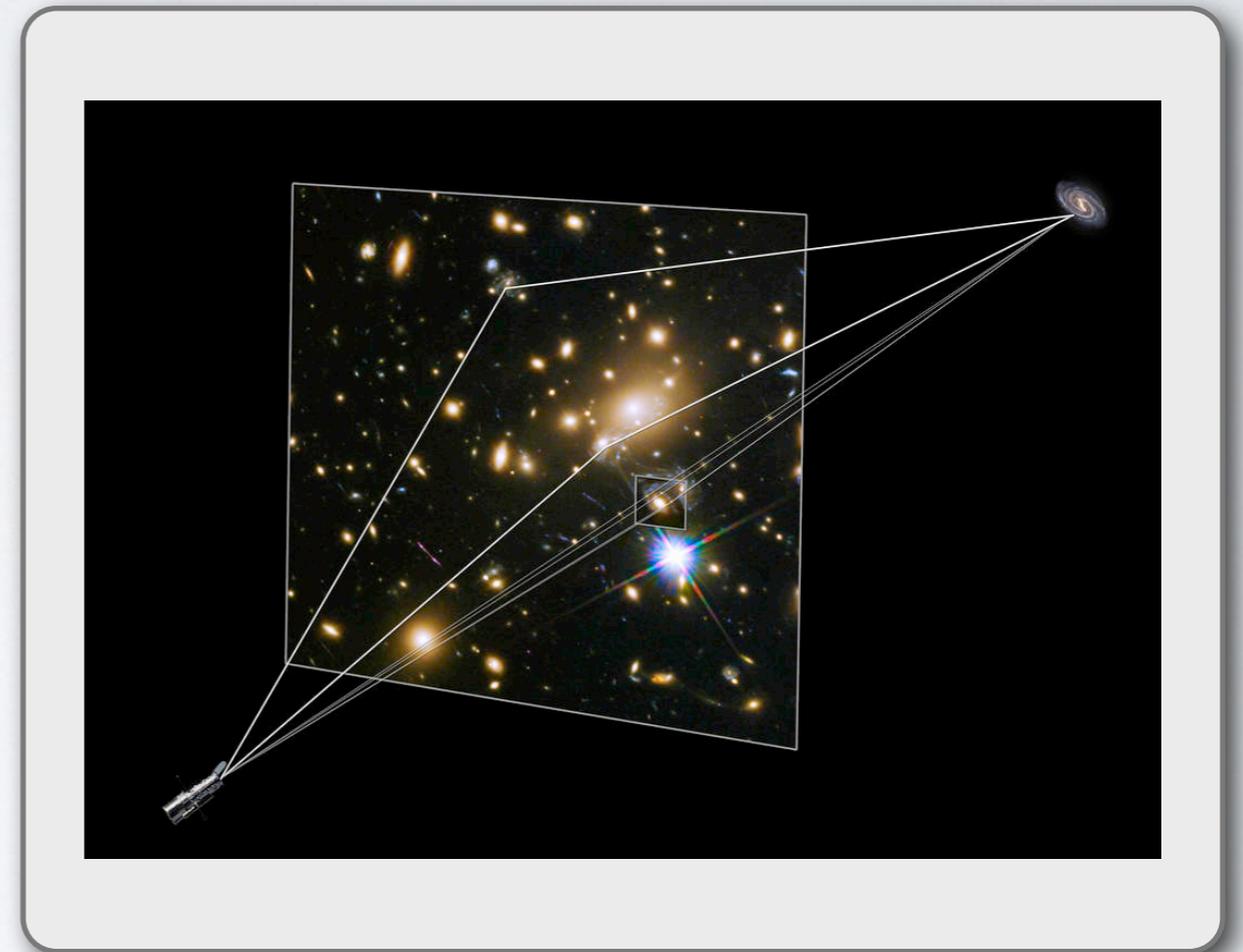
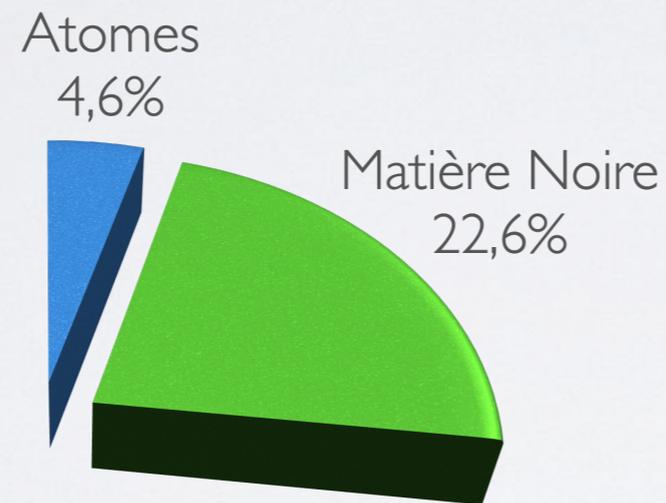
Atomes
4,6%



La matière que l'on voit

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

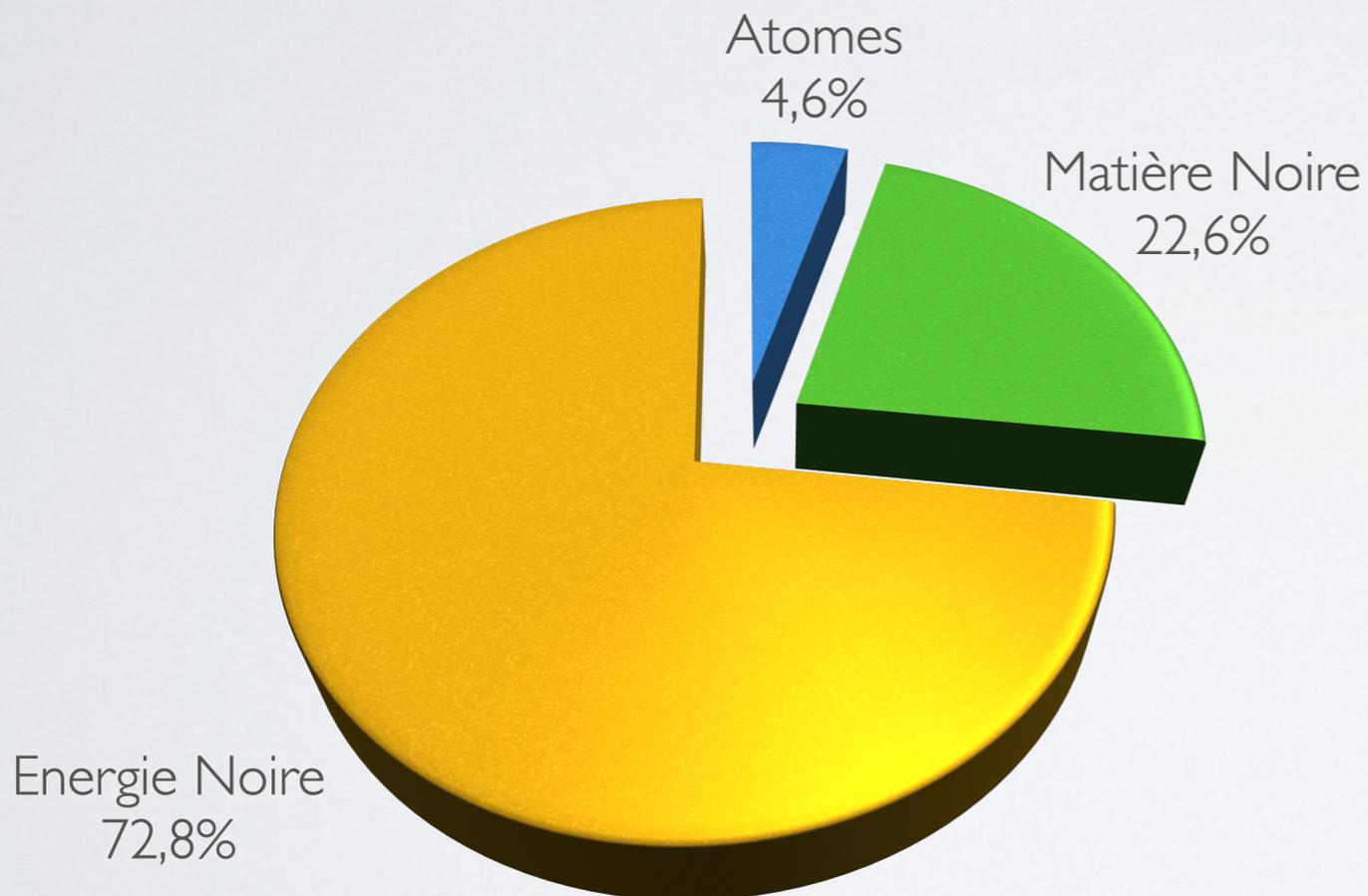
- Depuis toujours l'homme cherche à comprendre nos origines et celles de notre univers.
- Malgré toutes les découvertes et les progrès de la science nous ne connaissons qu'une petite fraction de notre univers.



La matière invisible (observation indirecte)

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Depuis toujours l'homme cherche à comprendre nos origines et celles de notre univers.
- Malgré toutes les découvertes et les progrès de la science nous ne connaissons qu'une petite fraction de notre univers.



**Inconnue nécessaire à expliquer
l'accélération de l'expansion de l'univers**

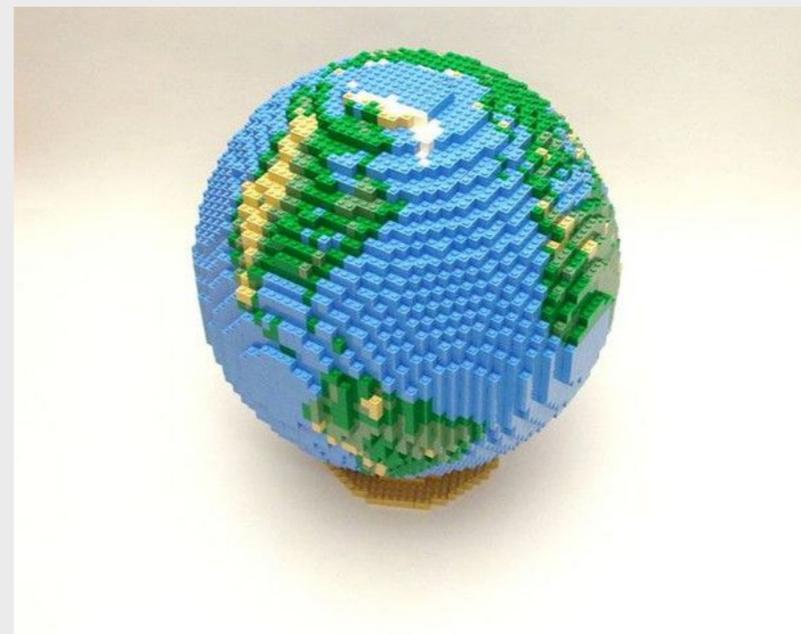
LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Les physiciens ont développé une théorie pour expliquer au mieux notre réalité : il s'agit du “**Modèle Standard**” qui inclut toutes les particules fondamentales que l'on divise en “catégories” (quarks, leptons et boson).
- Une “**particule fondamentale**” est une **brique qui compose le monde** que nous connaissons, comme un morceau de LEGO pour une construction.

Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force



Modèle Standard



Notre monde

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z ⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W [±] weak force
				Bosons (Forces)

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Quarks				
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	0
	0	0	0	1.2 GeV
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force
Leptons				Bosons (Forces)

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Pourquoi cette particule est-elle si intéressante et étudiée?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	1.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Pourquoi cette particule est-elle si intéressante et étudiée?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	1.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

- Le neutrino a des **propriétés très intéressantes** :

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Pourquoi cette particule est-elle si intéressante et étudiée?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	1.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)

- Le neutrino a des **propriétés très intéressantes** :
 - ➔ Il est la particule la plus abondante dans l'univers (330 neutrinos per cm³).

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Pourquoi cette particule est-elle si intéressante et étudiée?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	0
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)

- Le neutrino a des **propriétés très intéressantes** :
 - ➔ Il est la particule la plus abondante dans l'univers (330 neutrinos per cm³).
 - ➔ Sa masse non nulle est le premier signal de physique au-delà du modèle standard.

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Pourquoi cette particule est-elle si intéressante et étudiée?

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	1.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)

- Le neutrino a des **propriétés très intéressantes** :
 - ➔ Il est la particule la plus abondante dans l'univers (330 neutrinos per cm³).
 - ➔ Sa masse non nulle est le premier signal de physique au-delà du modèle standard.
 - ➔ Il pourrait expliquer une partie de la masse manquante de l'univers.
 - ➔ Il pourrait aider à comprendre l'asymétrie entre matière et anti-matière.

LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

- Une de ces particules fondamentales est le **neutrino** : une particule neutre, très légère, qui interagit par interaction faible.

Pourquoi cette particule est-elle si intéressante et étudiée?

Three Generations of Matter (Fermions)

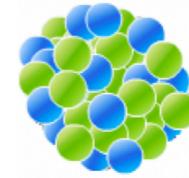
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	1.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

- Le neutrino a des **propriétés très intéressantes** :
 - ➔ Il est la particule la plus abondante dans l'univers (330 neutrinos per cm³).
 - ➔ Sa masse non nulle est le premier signal de physique au-delà du modèle standard.
 - ➔ Il pourrait expliquer une partie de la masse manquante de l'univers.
 - ➔ Il pourrait aider à comprendre l'asymétrie entre matière et anti-matière.
 - ➔ Il "oscille" (il change de saveur pendant son voyage).

Comment est-on arrivé au
neutrino?
... un peu d'histoire...

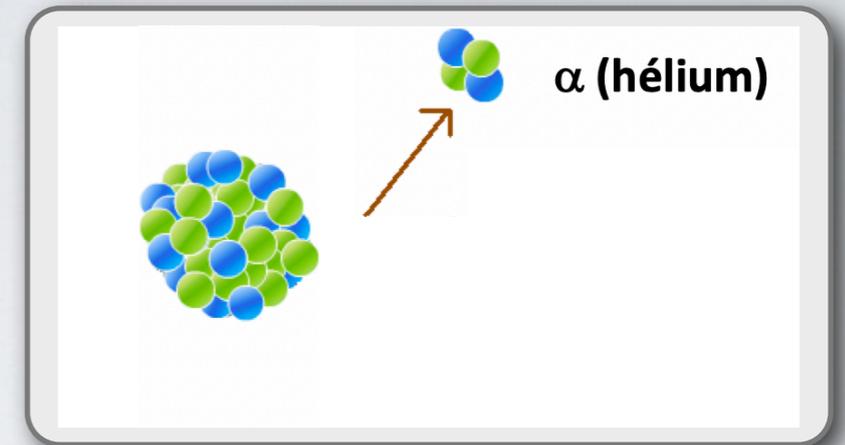
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.



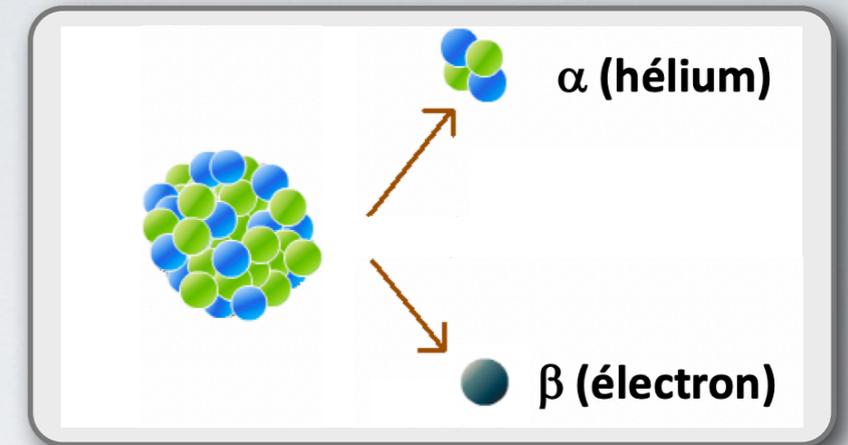
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.



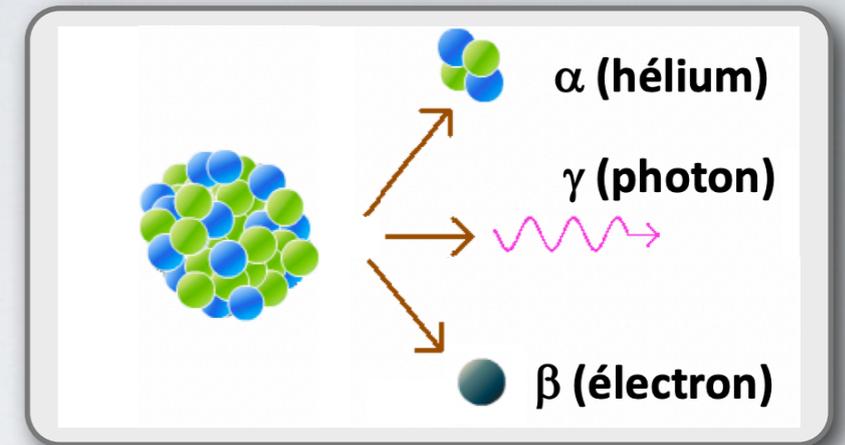
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.



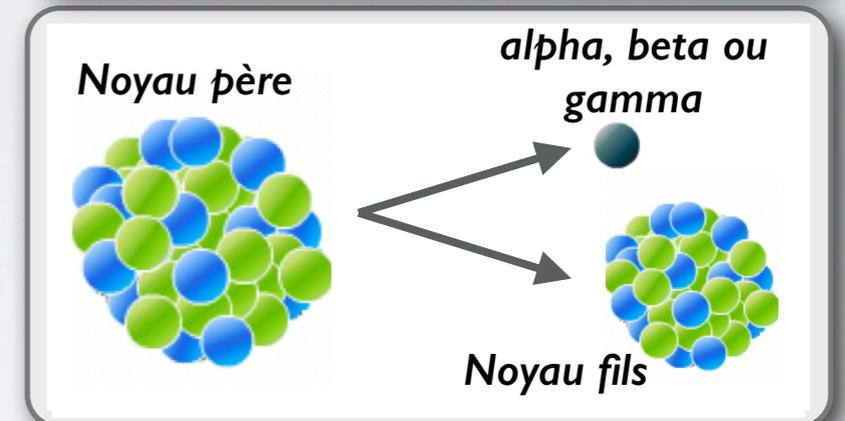
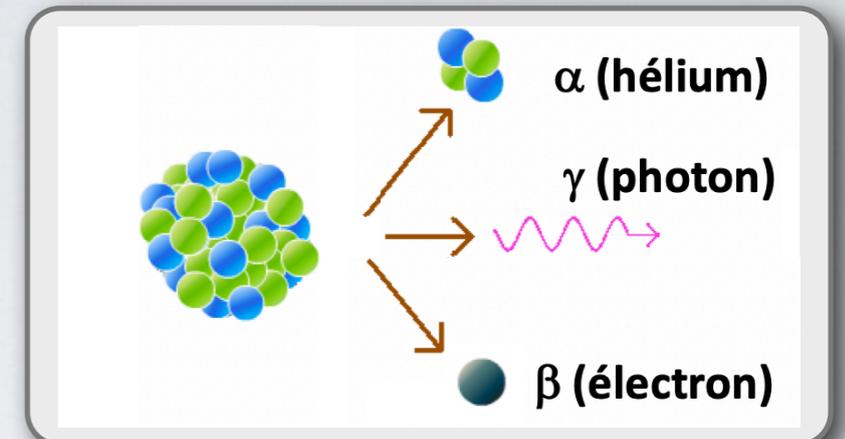
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.



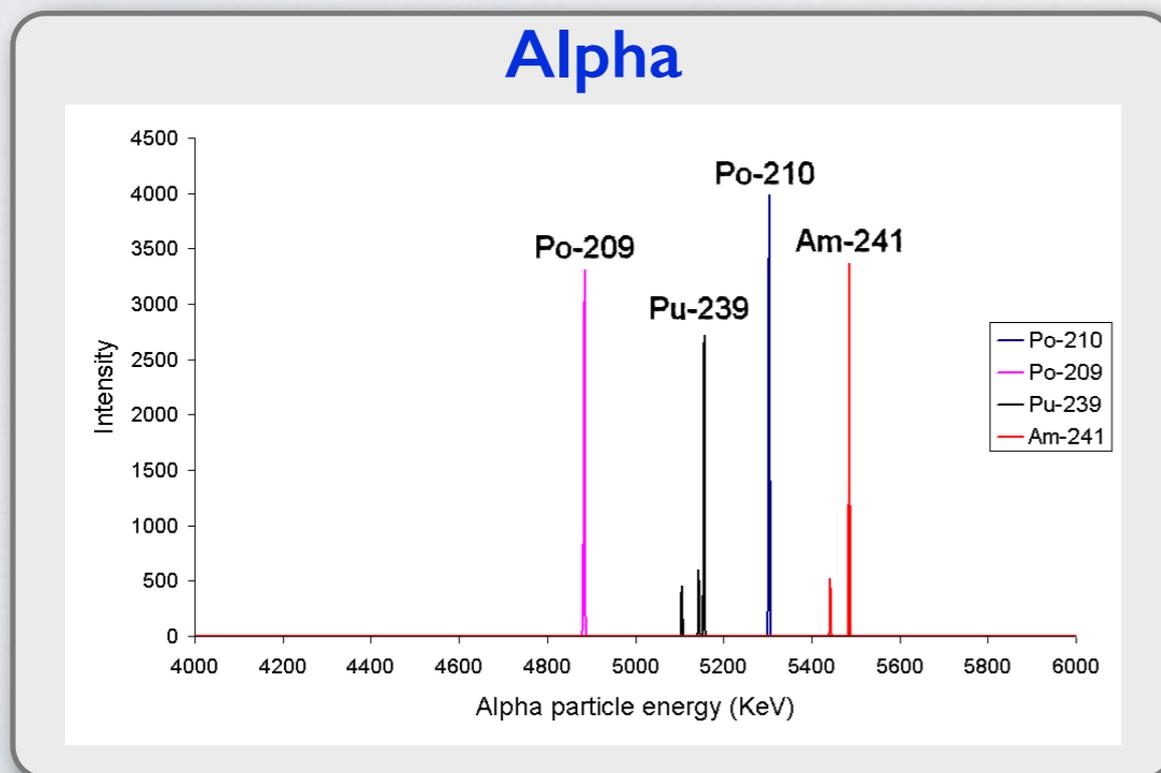
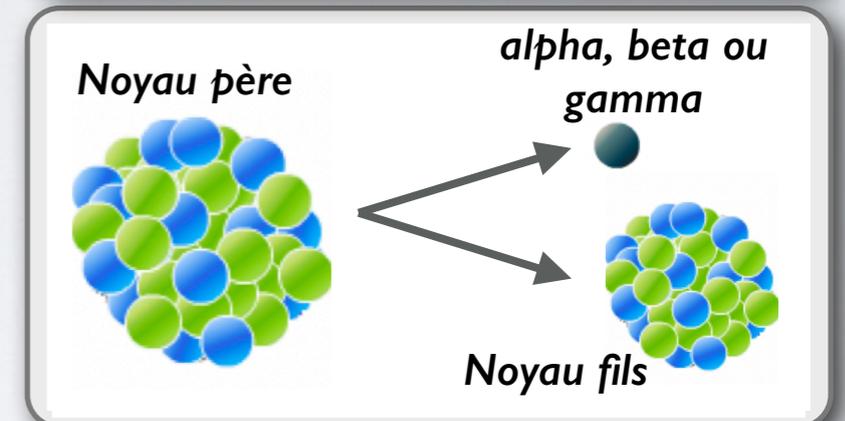
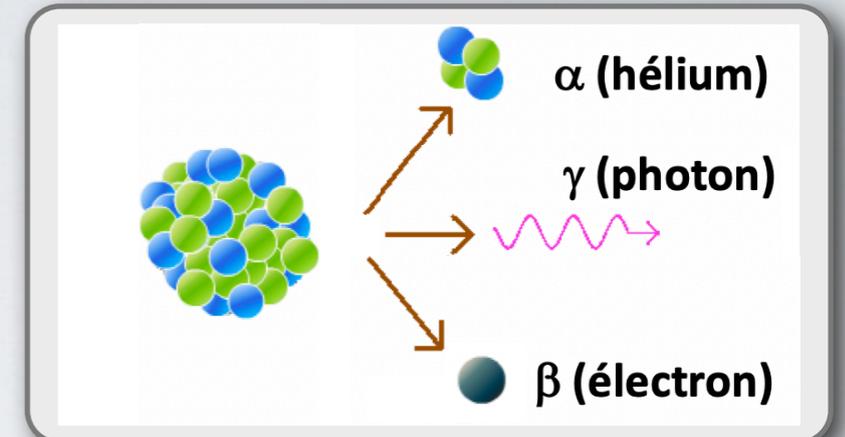
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.
- La cinématique (énergie libérée ou emportée) dans une **décroissance à deux corps** est bien définie et l'énergie de la particule émise devrait avoir une énergie bien définie.



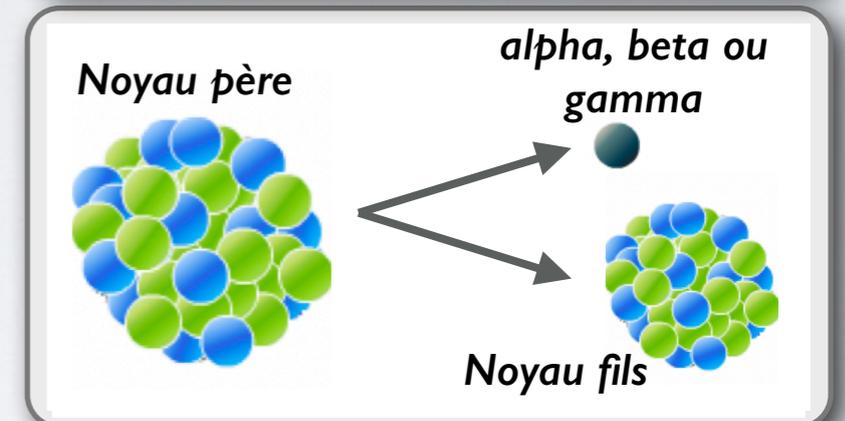
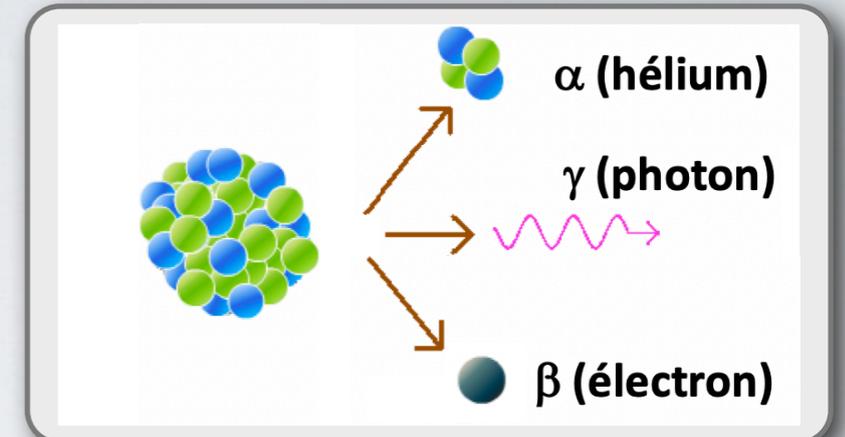
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.
- La cinématique (énergie libérée ou emportée) dans une **décroissance à deux corps** est bien définie et l'énergie de la particule émise devrait avoir une énergie bien définie.



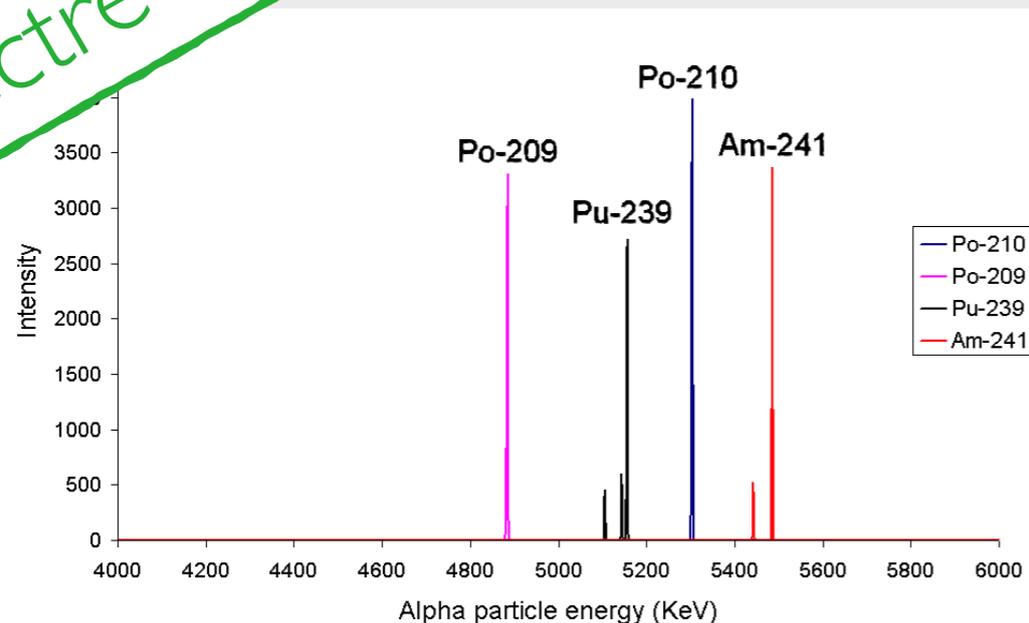
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.
- La cinématique (énergie libérée ou emportée) dans une **décroissance à deux corps** est bien définie et l'énergie de la particule émise doit avoir une énergie bien définie.



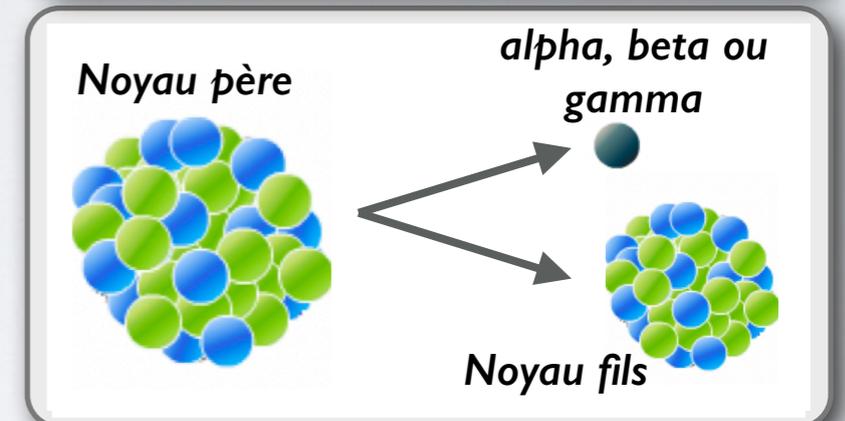
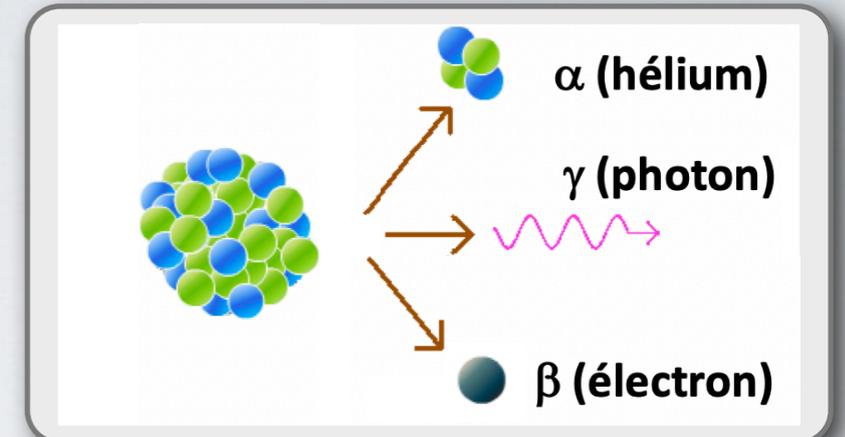
Spectre discret ✓

Alpha



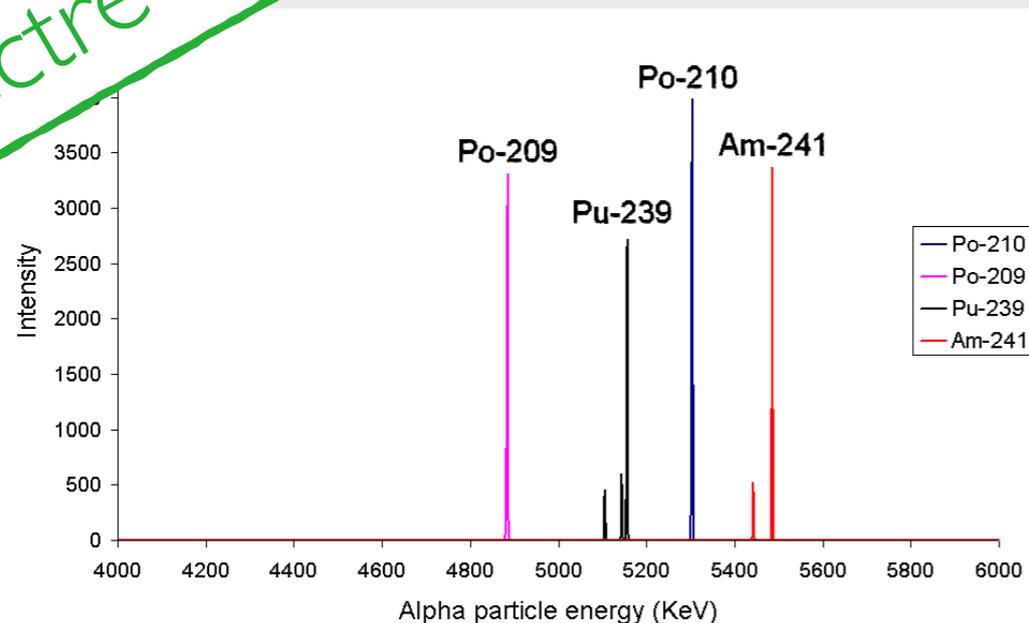
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.
- La cinématique (énergie libérée ou emportée) dans une **décroissance à deux corps** est bien définie et l'énergie de la particule émise doit avoir une énergie bien définie.

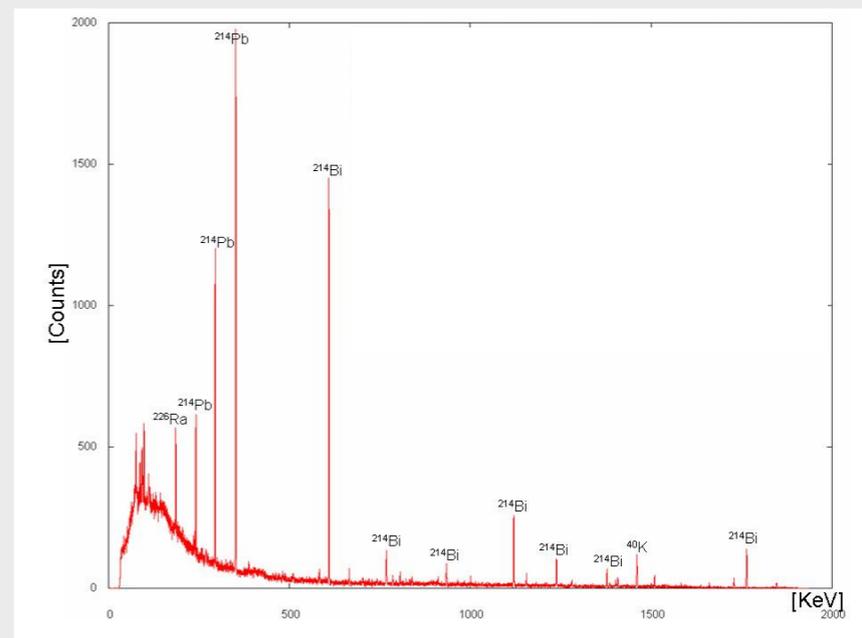


Spectre discret ✓

Alpha

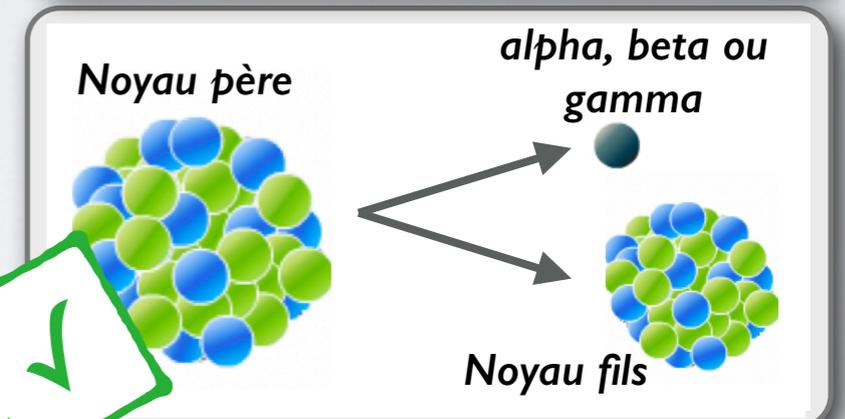
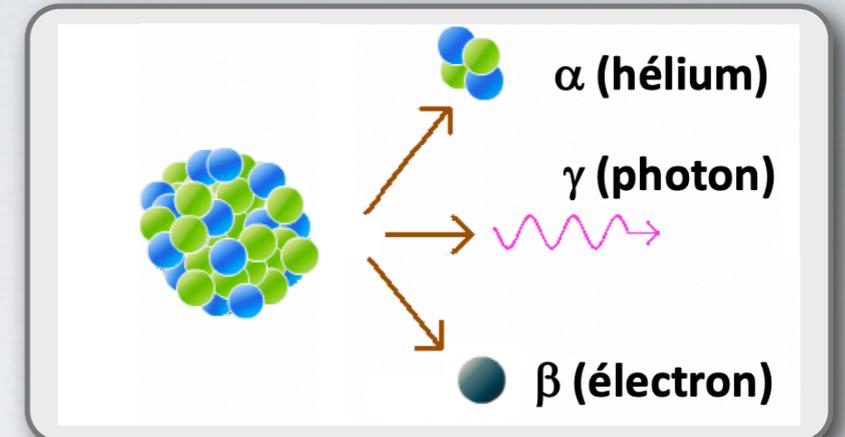


Spectre gamma



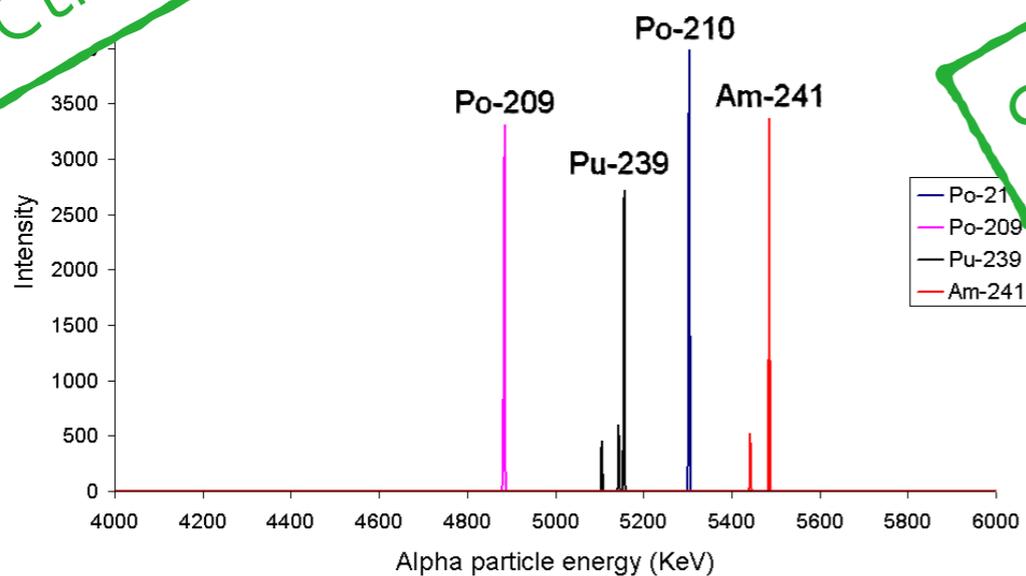
LA RADIOACTIVITÉ

- Becquerel, Pierre et Marie Curie découvrent la **radioactivité** en 1896. Successivement Rutherford, Chadwick, P. et M. Curie et Villard identifient **3 types** de rayonnement.
- La cinématique (énergie libérée ou emportée) dans une **décroissance à deux corps** est bien définie et l'énergie de la particule émise doit avoir une énergie bien définie.



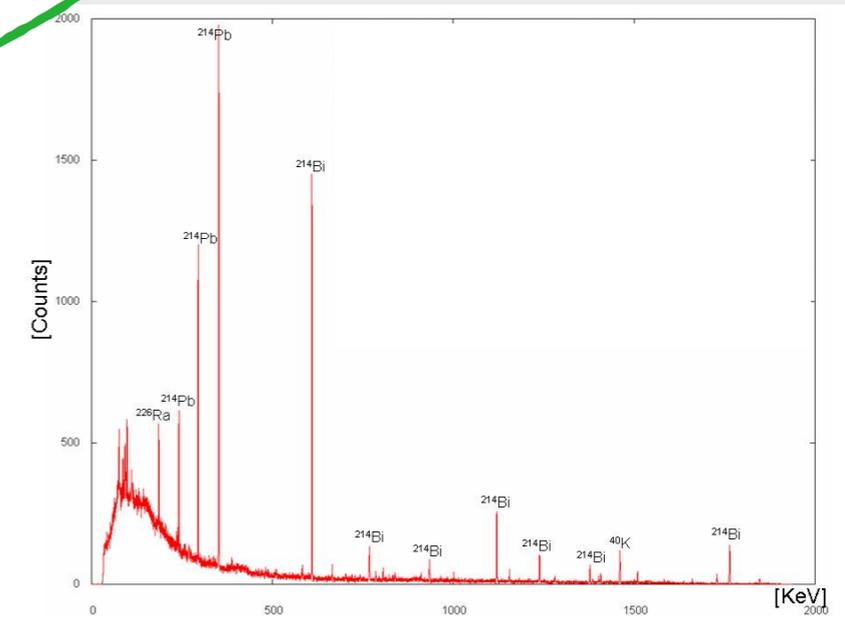
Spectre discret ✓

Alpha



Spectre discret ✓

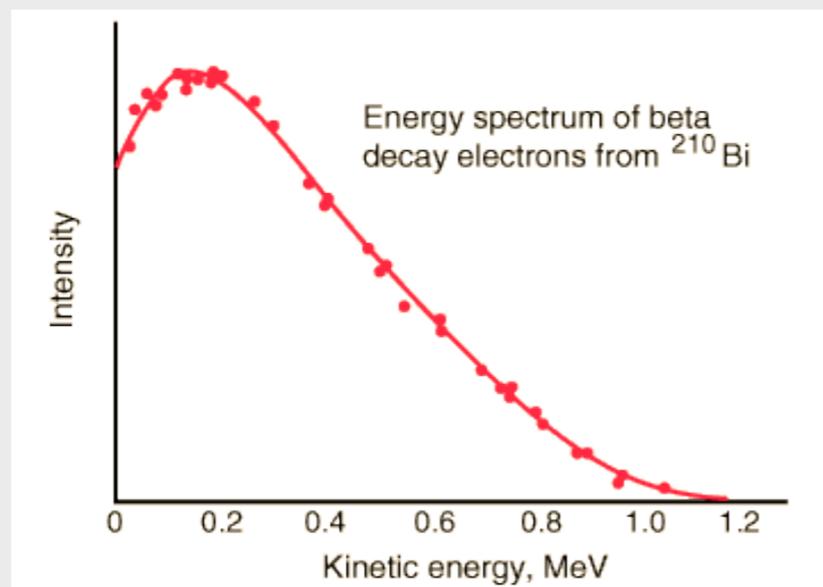
Spectre gamma



PROBLÈME ET POSSIBLE SOLUTION

- En 1914 Chadwick, Hahn et Meitner mesurent le spectre en énergie des rayonnements bêta (électrons).

Spectre bêta

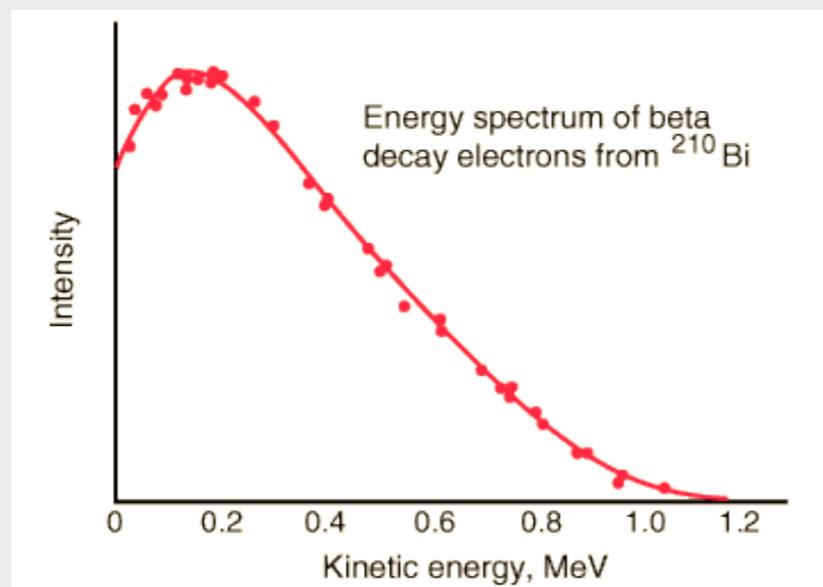


PROBLÈME ET POSSIBLE SOLUTION

- En 1914 Chadwick, Hahn et Meitner mesurent le spectre en énergie des rayonnements bêta (électrons).

Spectre continu X

Spectre bêta

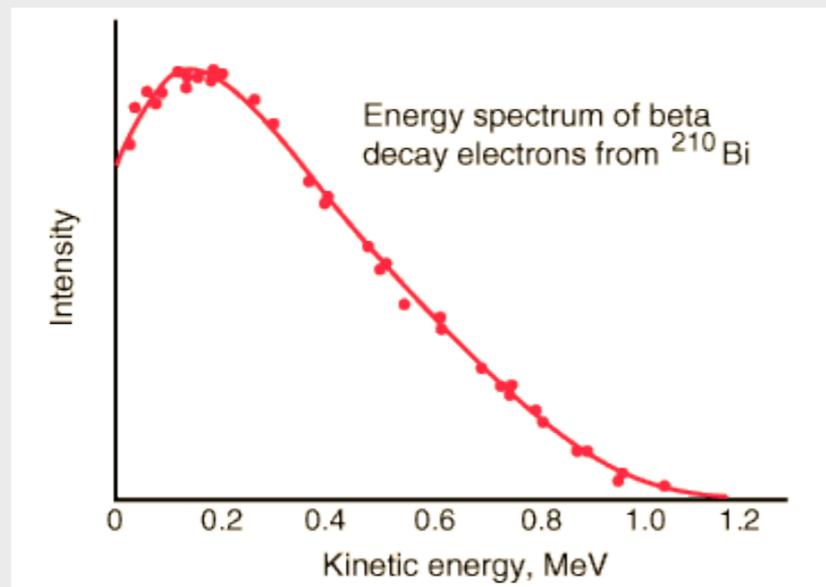


PROBLÈME ET POSSIBLE SOLUTION

- En 1914 Chadwick, Hahn et Meitner mesurent le spectre en énergie des rayonnements bêta (électrons).

Spectre continu X

Spectre bêta



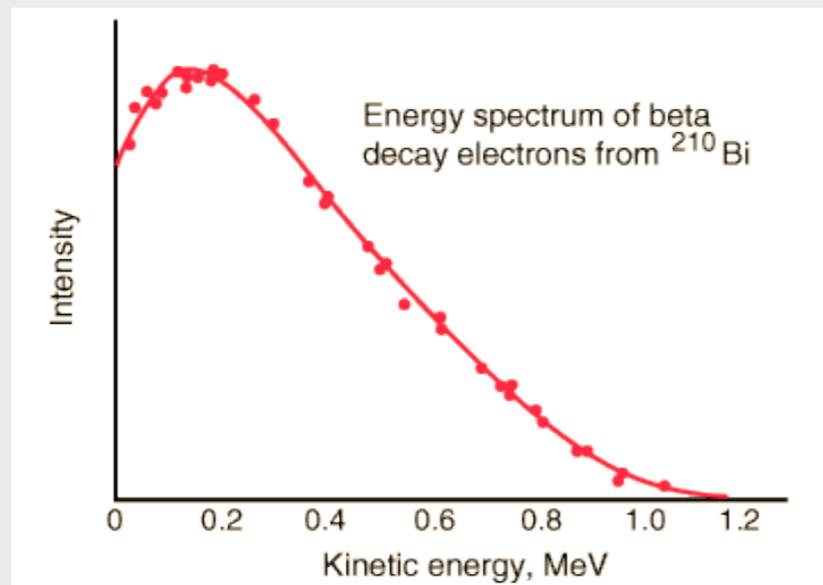
Energie non conservée???

PROBLÈME ET POSSIBLE SOLUTION

- En 1914 Chadwick, Hahn et Meitner mesurent le spectre en énergie des rayonnements bêta (électrons).

Spectre continu X

Spectre bêta



Energie non conservée???

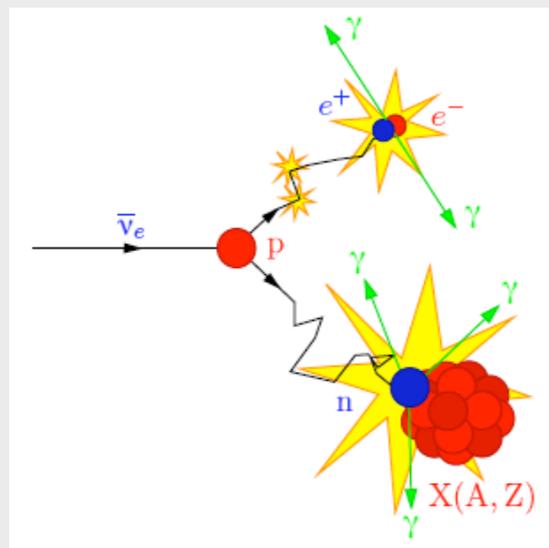
- En **1930 Pauli “invente” le neutron (après appelé neutrino)** pour conserver l'énergie dans la décroissance bêta.
- Il prévoit une particule ayant une masse très faible et qui n'interagit pas avec la matière.
- Option “moins pire” par rapport à la violation de la conservation de l'énergie.



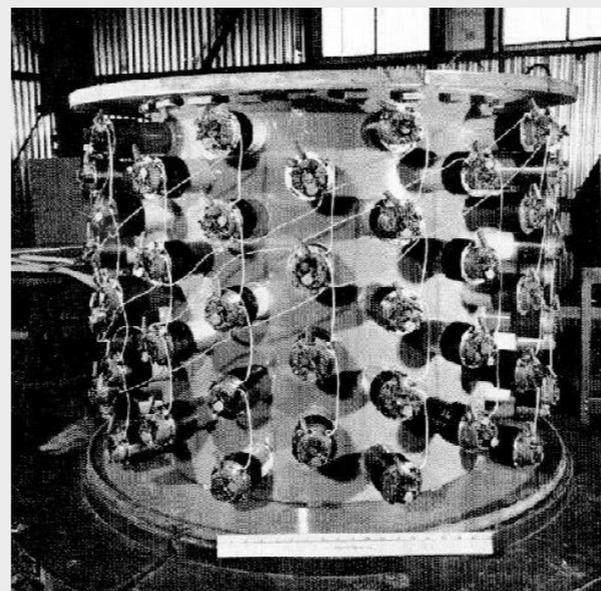
J'ai fait une chose terrible, j'ai inventé une particule que l'on ne pourra jamais détecter

LA DÉCOUVERTE DU NEUTRINO

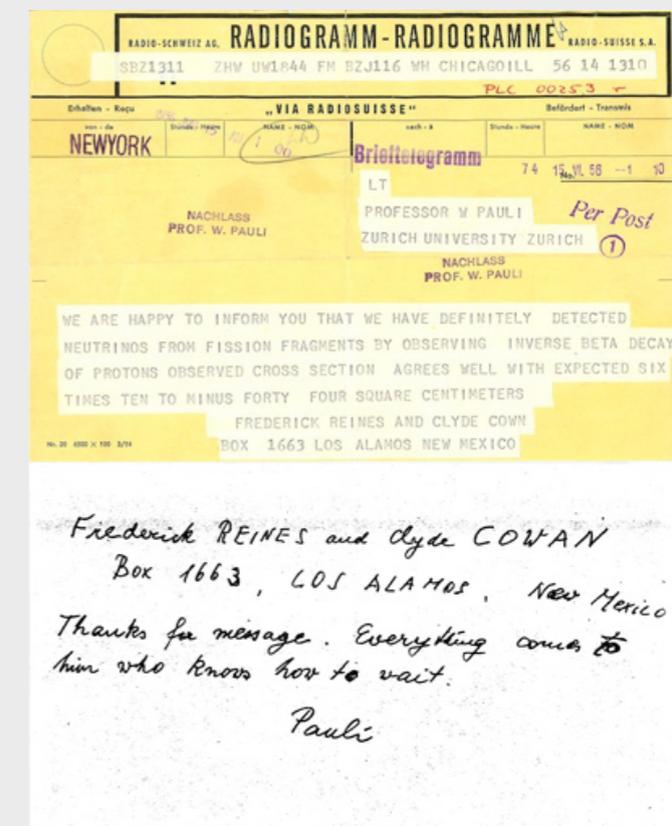
- Le neutrino est observé par **Reines et Cowan en 1956**.
- En utilisant les (anti)neutrinos émis dans les décroissances bêta du réacteur Savannah River (USA) ils observent les antineutrinos dans le détecteur poltergeist via le processus "Inverse Beta Decay"



Inverse Beta Decay



Poltergeist detector

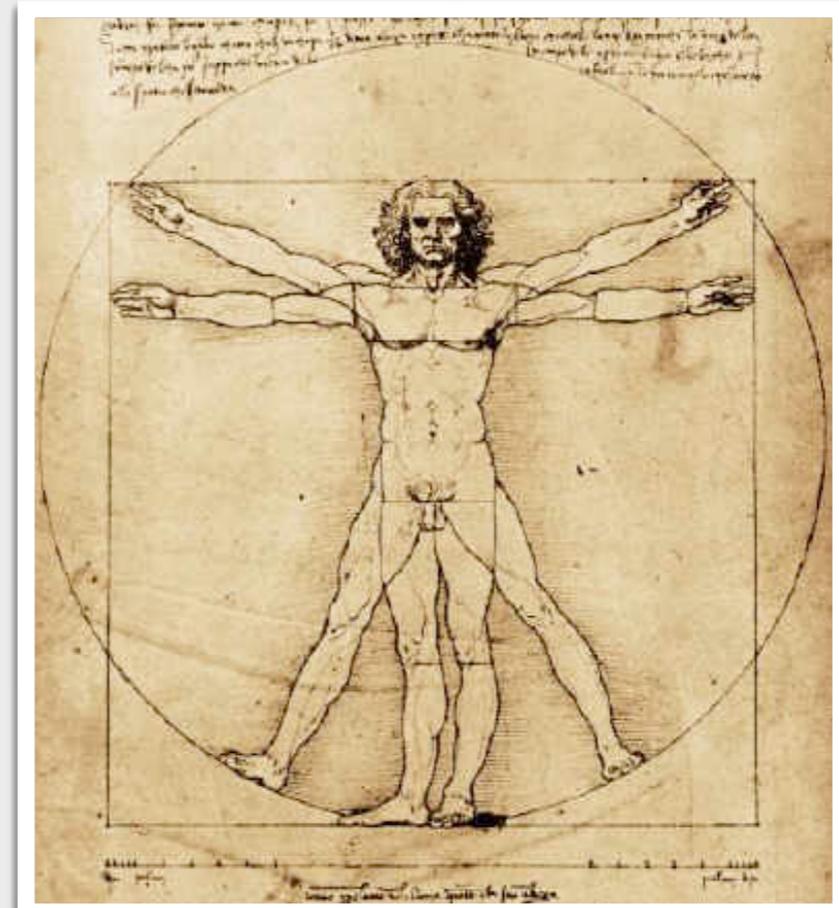


POURQUOI EST-IL SI DIFFICILE À VOIR?

- Entre l'introduction du neutrino par Pauli en 1930 et la découverte en 1956 par Cowan et Reines il s'est passé 26 années... pourquoi?
- Les neutrinos interagissent très faiblement avec la matière, on dit qu'ils ont une très faible "section efficace".

La probabilité d'interaction (section efficace) est très faible (environ 10^{-38} cm² à 1 GeV).

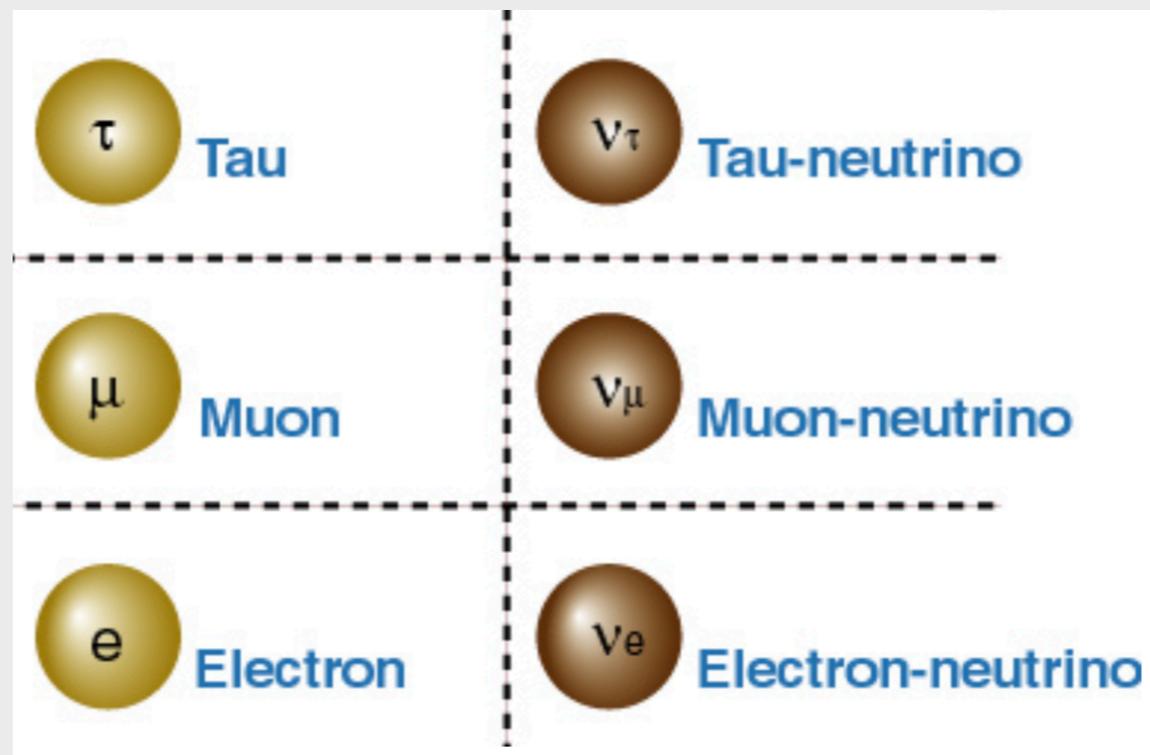
Tous les jours 40 milliard de milliard (4×10^{19}) de ν traversent notre corps et en moyenne seulement 1 neutrino interagira dans notre corps sur toute notre vie



Si on veut detecter des neutrinos il faut une grande masse!

SAVEUR

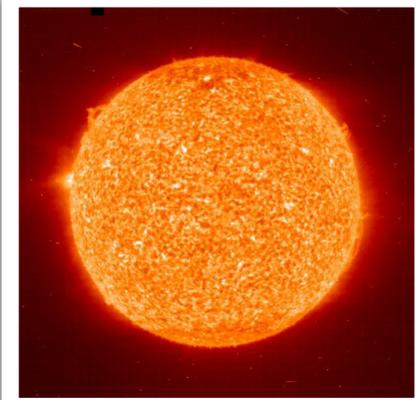
- Suite aux premières détections des neutrinos, d'autres expériences ont cherché à étudier cette particule.
- In 1962 Lederman, Schwartz et Steinberger ont montré que les neutrinos produits en association avec des muons sont différents de ceux produits en association avec les électrons.
- Cette nouvelle caractéristique est appelée "saveur" et suite à la découverte du lepton tau en 1975 a démarré la recherche du troisième neutrino. Cela s'est terminé en 2000 avec son observation par l'expérience DONUT.



3 "types" de neutrinos

OÙ TROUVER LES NEUTRINOS?

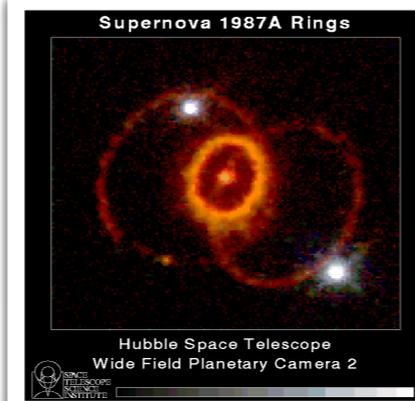
- Il existe de nombreuses sources de neutrinos que l'on peut diviser en **naturelles** (soleil, radioactivité naturelle, etc.) et **artificielles** (accélérateurs et réacteurs).



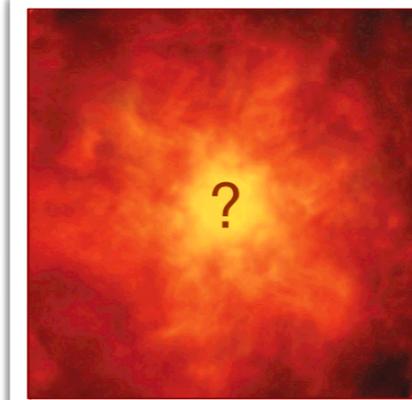
ν solaire
 $6 \times 10^{10} \nu s^{-1} cm^{-2}$
sur terre



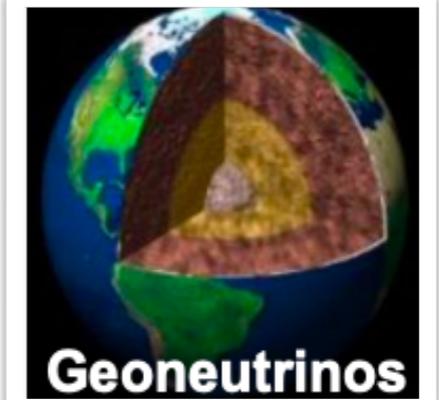
ν atmosphériques
 $1 \nu s^{-1} cm^{-2}$
sur terre



ν des supernova



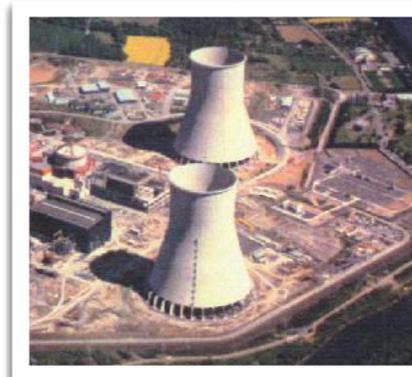
ν du Big Bang
($330 \nu cm^{-3}$)



Geo neutrinos
($10^6 - 10^7 \nu s^{-1} cm^{-2}$)



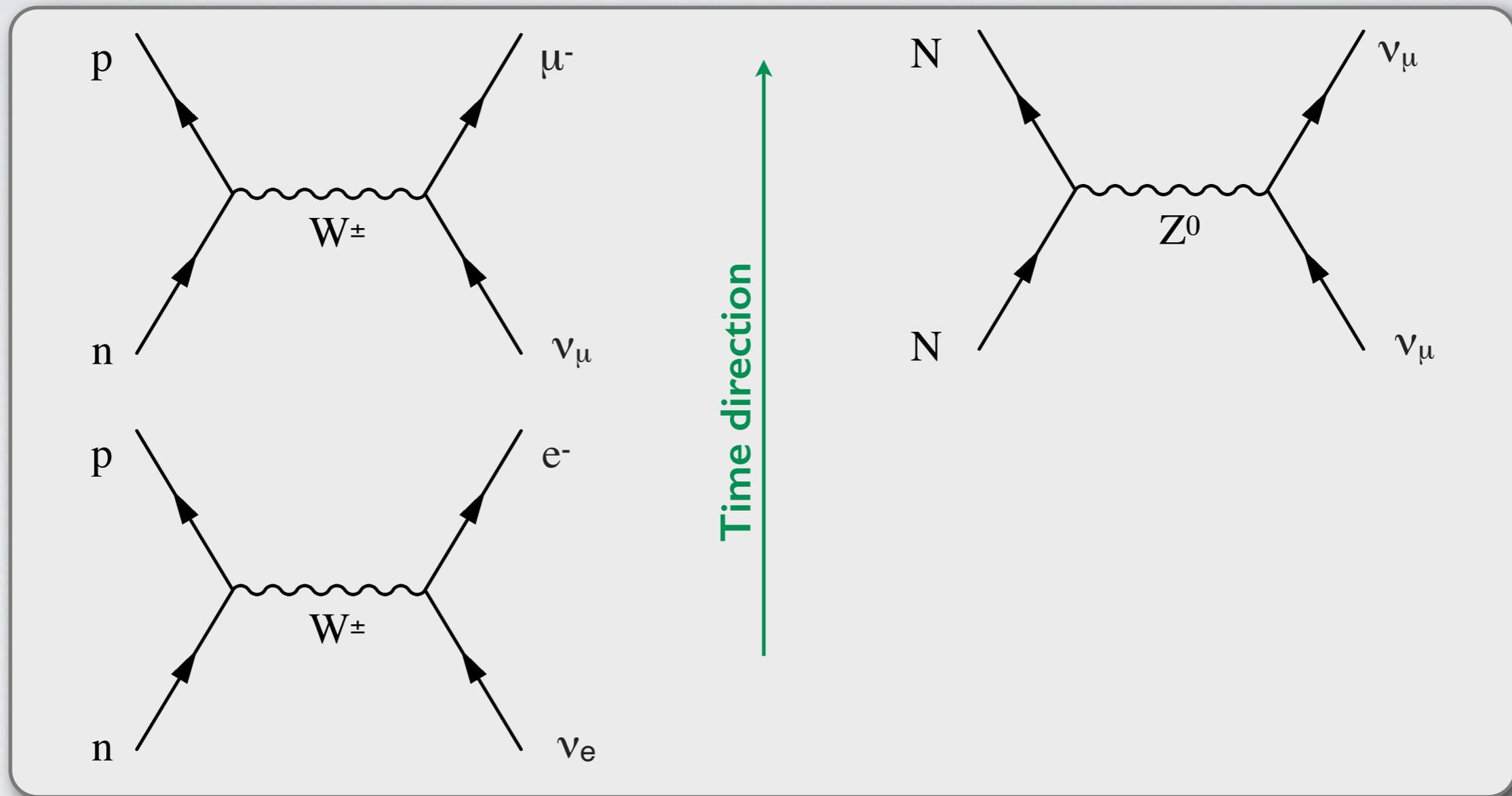
ν des accelerateurs



ν des reacteurs
 $10^{21} \nu s^{-1}$
produits (par GWth)

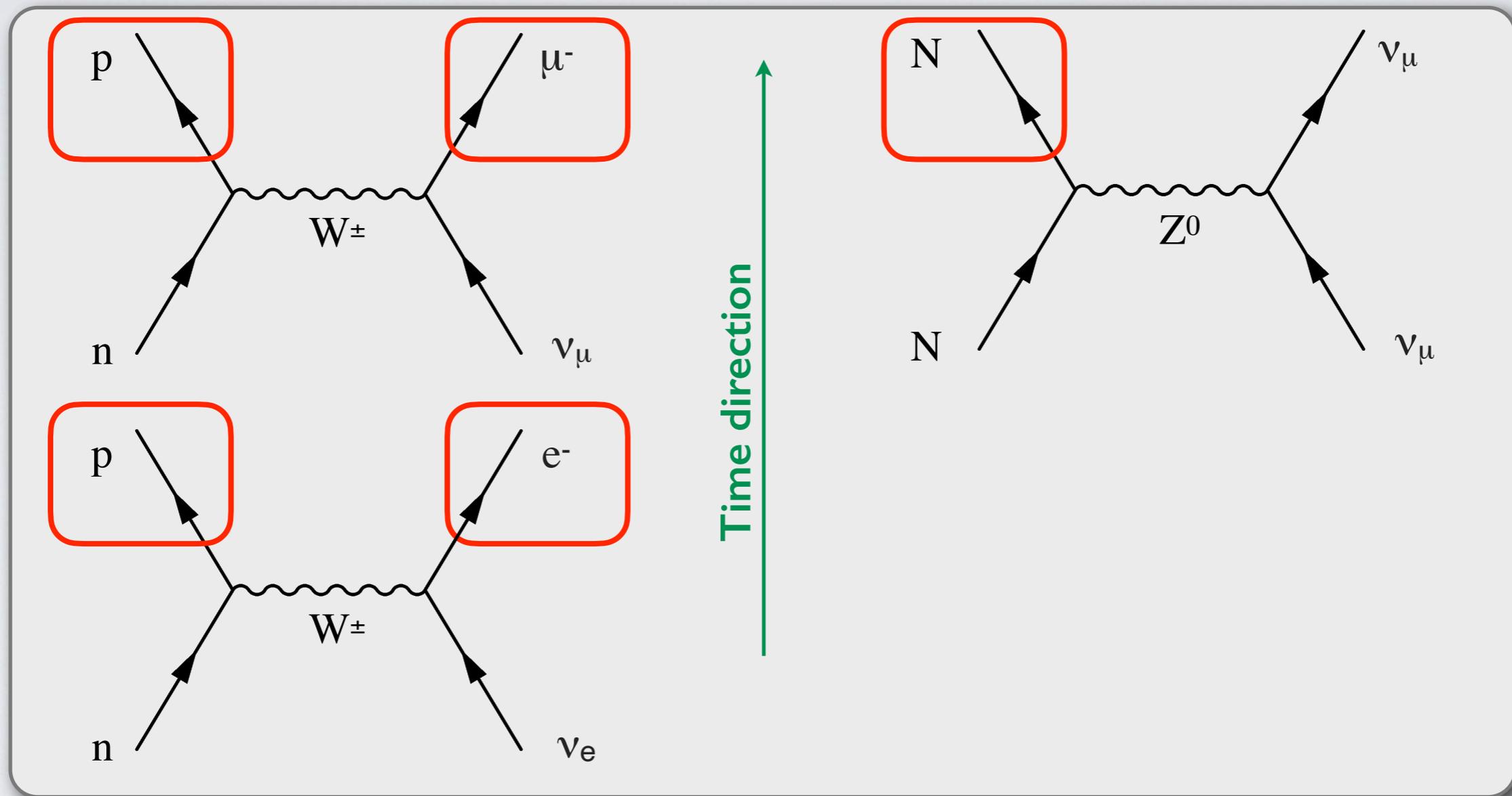
COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

- Les neutrinos sont sans charge électrique, très légers et **peuvent être identifiés seulement en regardant les produits de leurs interactions**. (La résolution et le seuil de détection en énergie dépendent de la technologie utilisée.)



COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

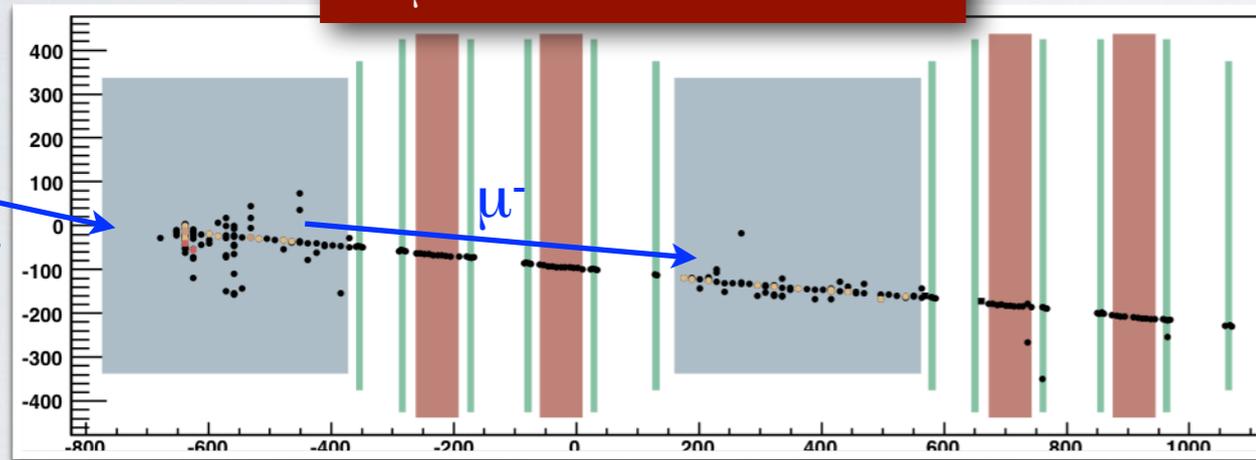
- Les neutrinos sont sans charge électrique, très légers et **peuvent être identifiés seulement en regardant les produits de leurs interactions.** (La résolution et le seuil de détection en énergie dépendent de la technologie utilisée.)



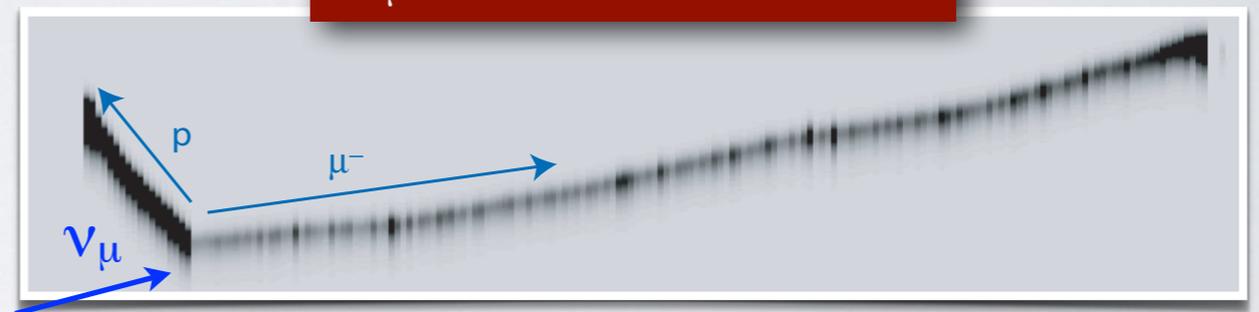
DÉTECTION DES NEUTRINOS

- Les neutrinos sont sans charge électrique, très légers et **peuvent être identifiés seulement en regardant les produits de leurs interactions.** (La résolution et le seuil de détection en énergie dépendent de la technologie utilisée.)

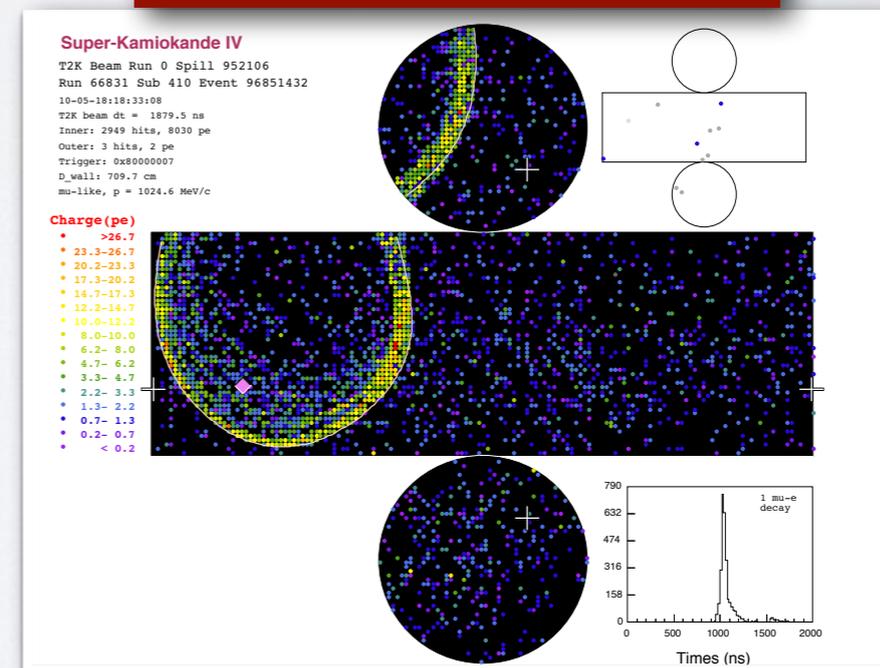
ν_μ CC dans OPERA



ν_μ CC dans LAr TPC



ν_μ CC dans SK

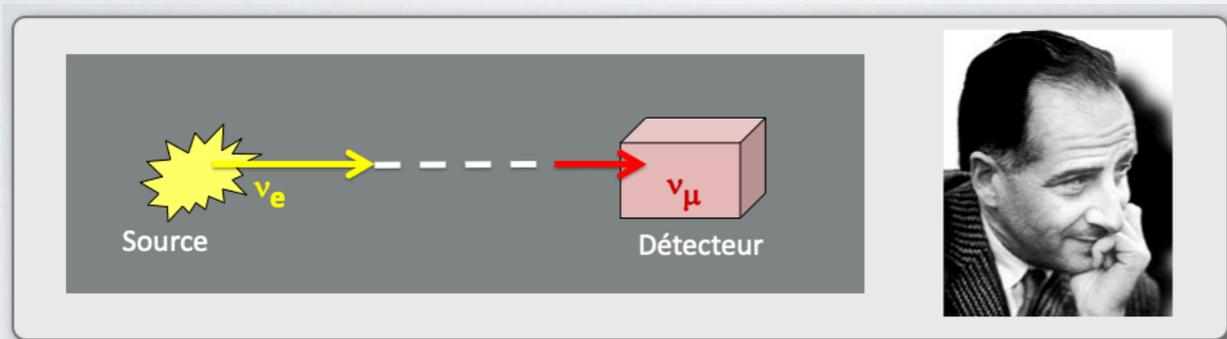


Quelques images comme exemples... plus de détails par la suite

Les oscillations des neutrinos

OSCILLATIONS

- Les oscillations des neutrinos sont encore aujourd'hui un des principaux arguments qui motivent les grandes expériences et la prochaine génération des expériences devrait compléter la compréhension de ce phénomène.
- Pour arriver aux oscillations il faut d'abord introduire deux problèmes qui ont occupé les physiciens à partir des années 80... le **déficit des neutrinos solaires** et le **déficit des neutrinos atmosphériques**.
- La première idée est de **B. Pontecorvo** qui prédit l'oscillation des neutrinos en **1957**.



- La démonstration expérimentale viendra bien plus tard et sera couronnée par le prix Nobel de physique décerné à T. Kajita et à A. McDonald en 2015.

The Nobel Prize in Physics 2015



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Takaaki Kajita
Prize share: 1/2

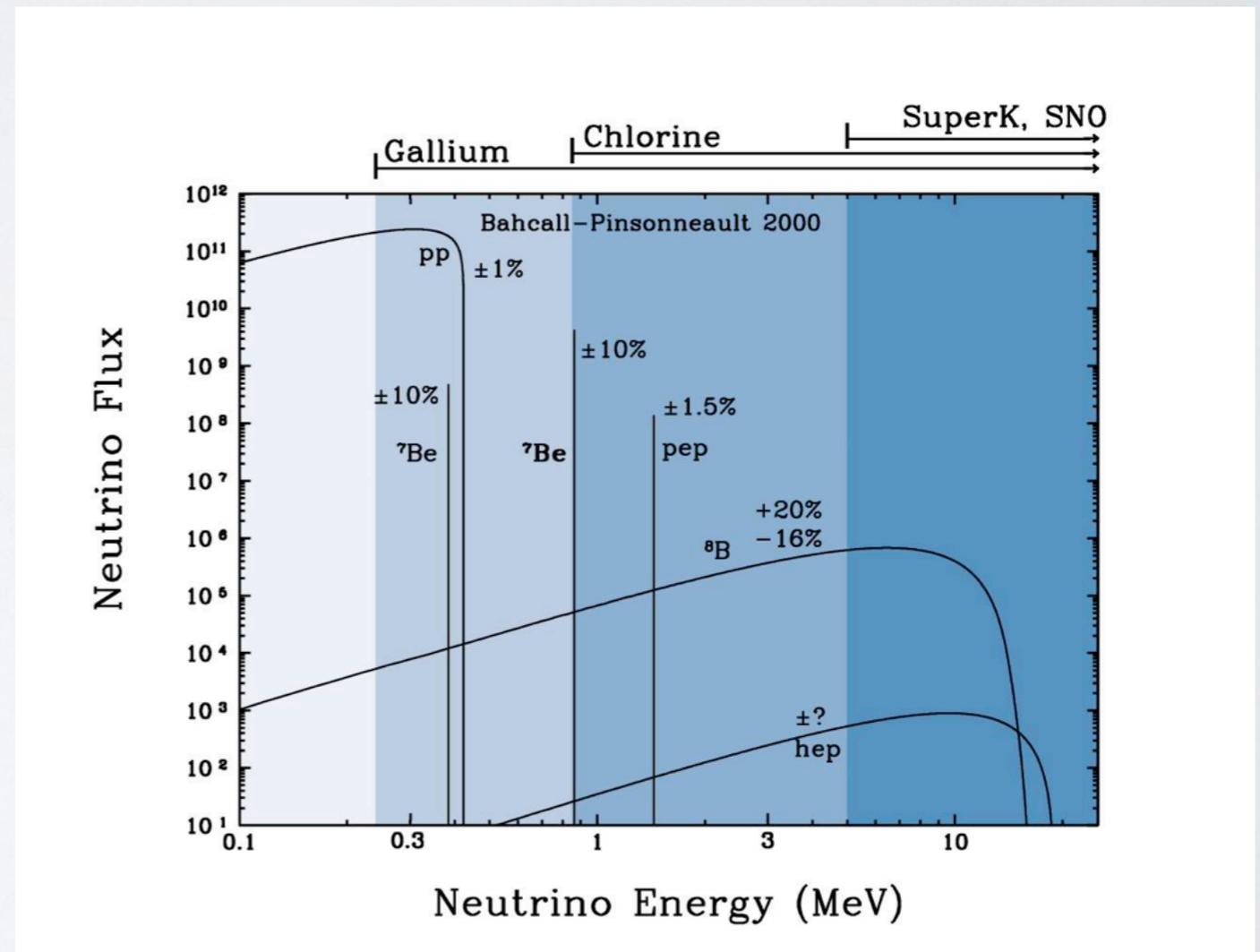
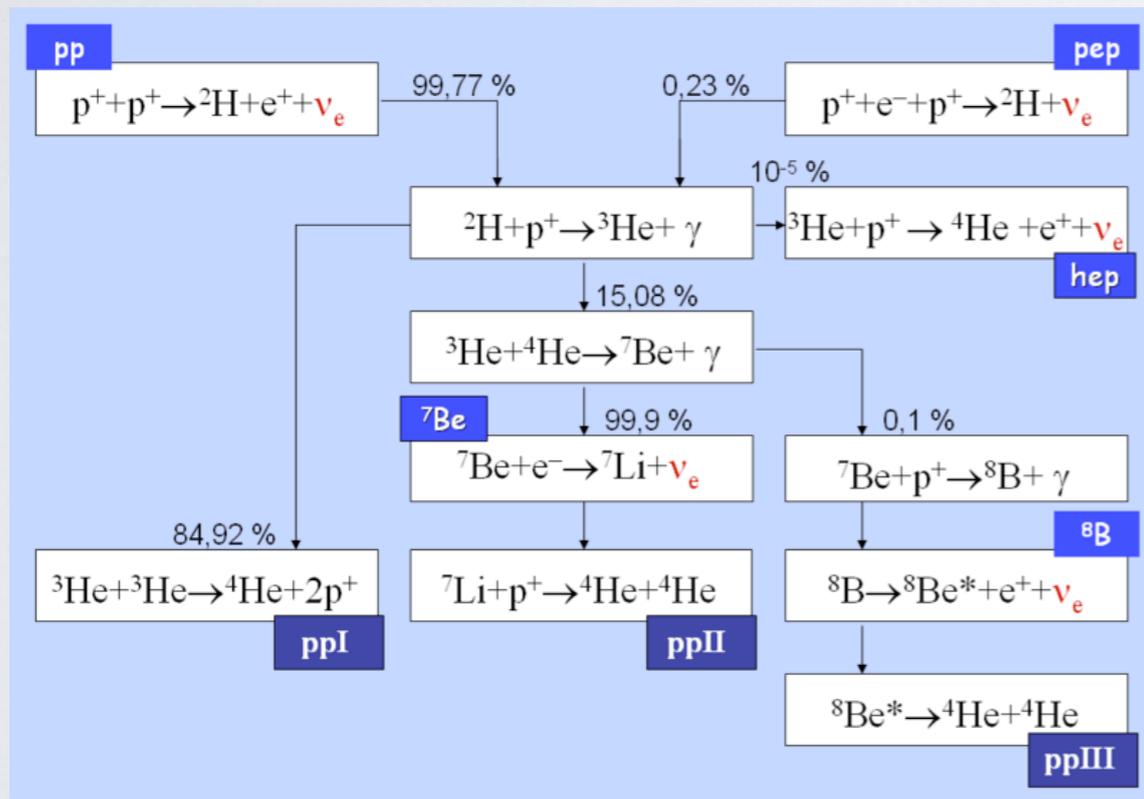


© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

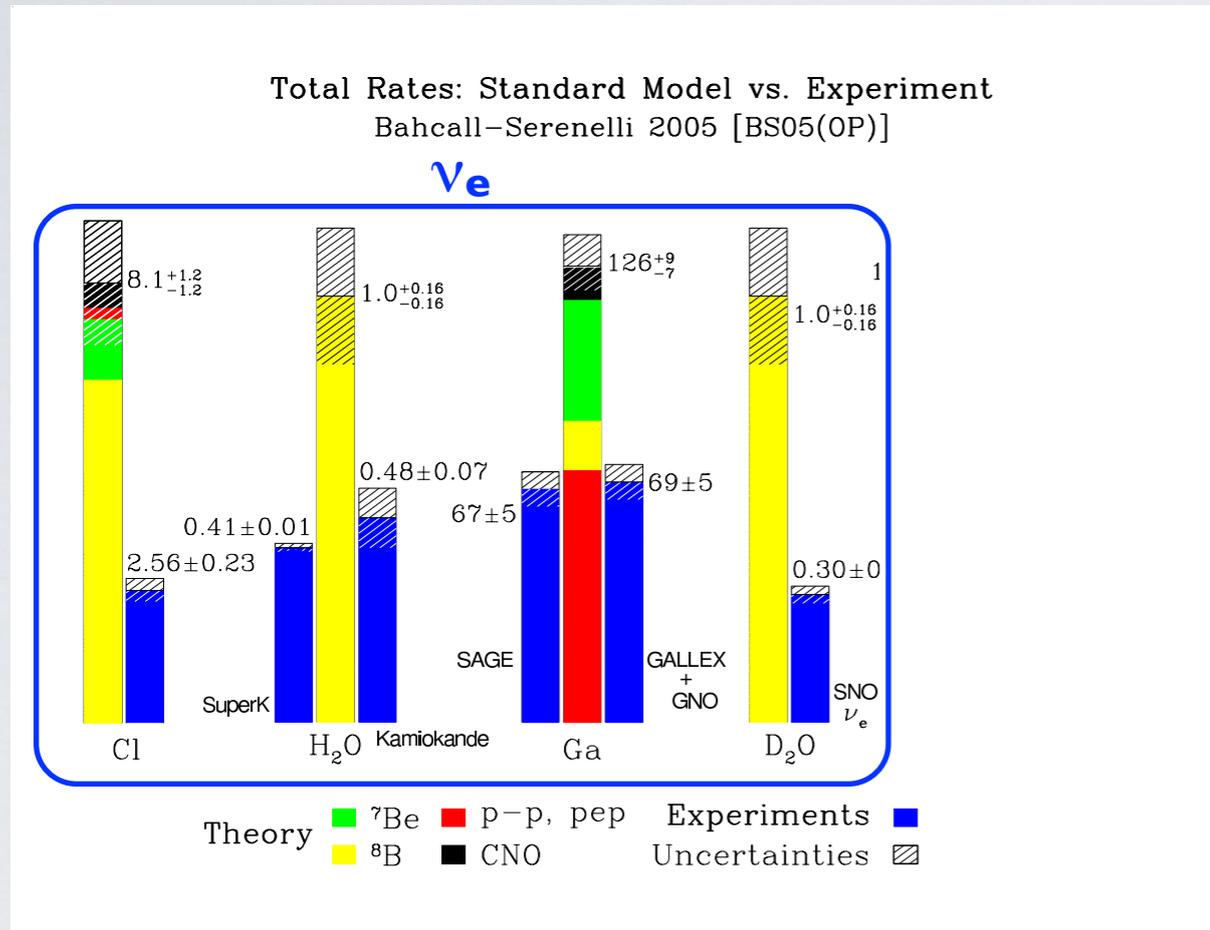
DÉFICIT DE NEUTRINOS SOLAIRES

- Le soleil émet un très grand nombre de neutrinos et leur énergie et flux ont été calculés par Bahcall à partir de 1960 selon notre connaissance du modèle solaire.



DÉFICIT DE NEUTRINOS SOLAIRES

- Les expériences ont **mesuré** environ la **moitié** du flux **attendu**.



Expérience	Seuil (MeV)	Rapport exp/théorie
Homestake (1968)	0.814	0.32
Kamiokande (1989)	6.5	0.48
Galex (1992)	0.233	0.55
SAGE (1990)	0.233	0.53
SK (1996)	6.5	0.41
SNO (1999)	5 (CC events)	0.30

1 SNU = 10^{-36} capture par cible atome par seconde

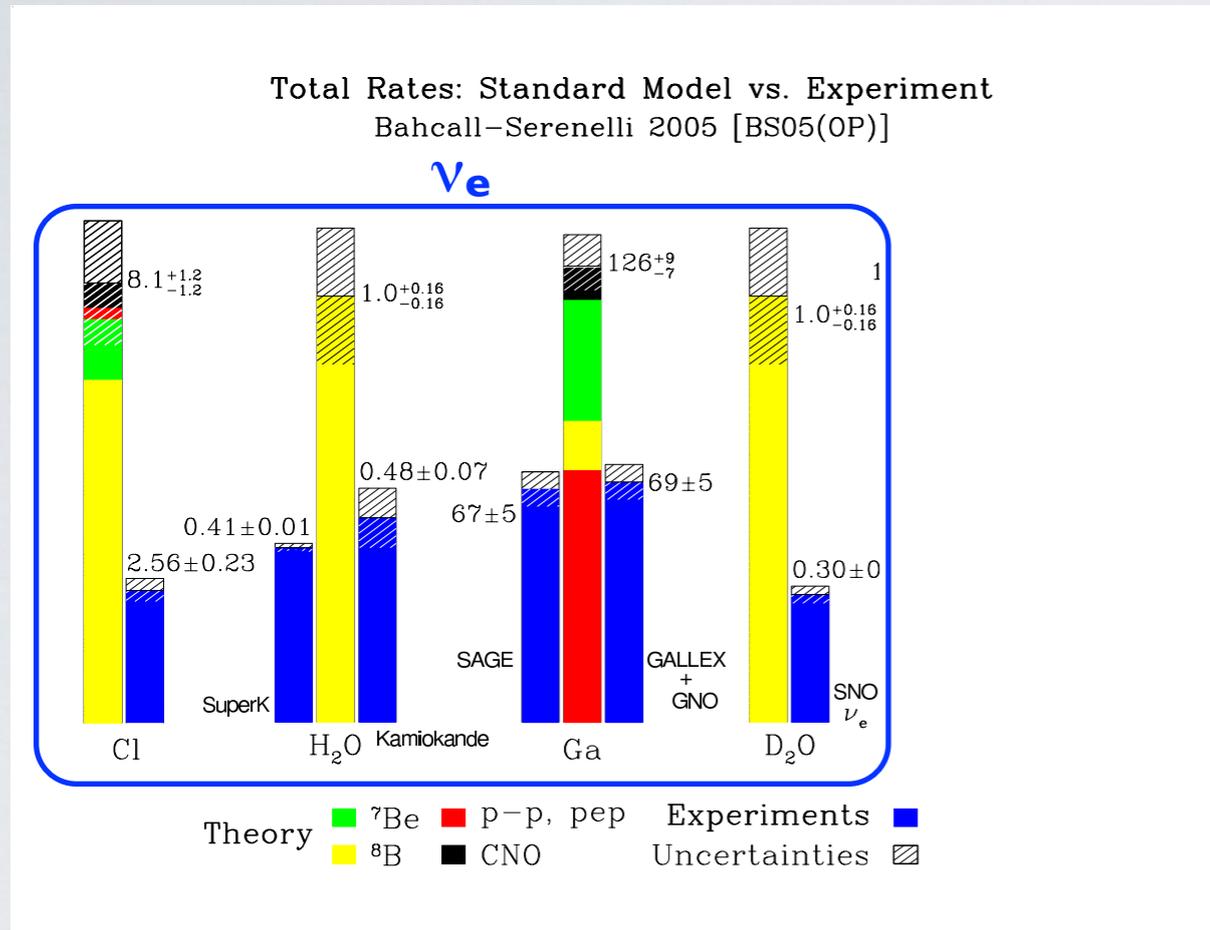
- Explications possibles :

1. Le modèle solaire n'est pas bien compris?

2. Les neutrinos ne sont pas bien compris?

DÉFICIT DE NEUTRINOS SOLAIRES

- Les expériences ont **mesuré** environ la **moitié** du flux **attendu**.



Expérience	Seuil (MeV)	Rapport exp/théorie
Homestake (1968)	0.814	0.32
Kamiokande (1989)	6.5	0.48
Galex (1992)	0.233	0.55
SAGE (1990)	0.233	0.53
SK (1996)	6.5	0.41
SNO (1999)	5 (CC events)	0.30

1 SNU = 10^{-36} capture par cible atome par seconde

- Explications possibles :

1. ~~Le modèle solaire n'est pas bien compris?~~

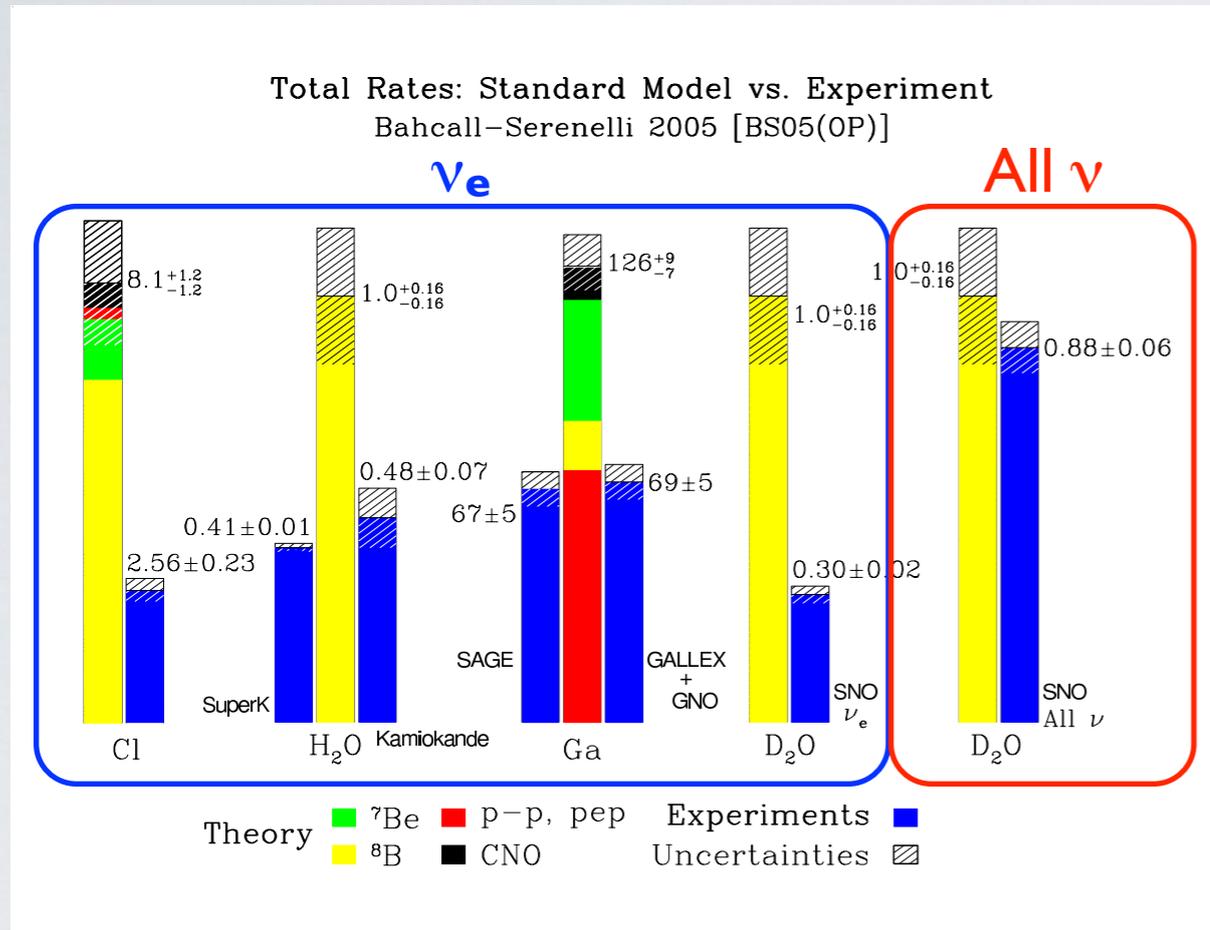
2. Les neutrinos ne sont pas bien compris?

Défavorisé par le bon accord avec les mesures de héliosismologie

Oscillation des neutrinos? Idée de Pontecorvo de 1957

DÉFICIT DE NEUTRINOS SOLAIRES

- Les expériences ont **mesuré** environ la **moitié** du flux **attendu**.



Expérience	Seuil (MeV)	Rapport exp/théorie
Homestake (1968)	0.814	0.32
Kamiokande (1989)	6.5	0.48
Galex (1992)	0.233	0.55
SAGE (1990)	0.233	0.53
SK (1996)	6.5	0.41
SNO (1999)	5 (CC events)	0.30

1 SNU = 10⁻³⁶ capture par cible atome par seconde

- Explication possibles :

1. ~~Le modèle solaire n'est pas bien compris?~~

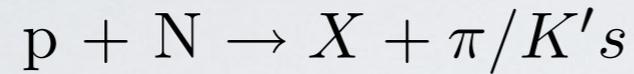
Défavorisé par le bon accord avec les mesures de héliosismologie

2. Les neutrinos ne sont pas bien compris?

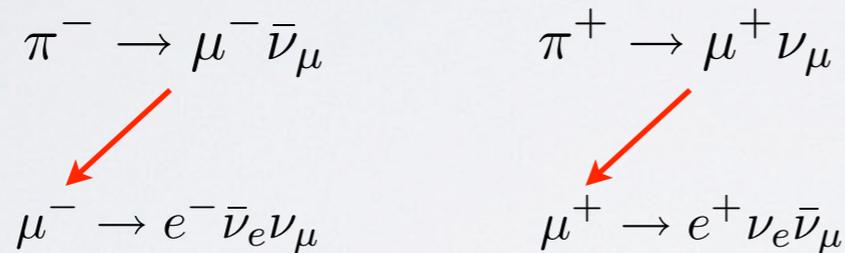
Oscillation des neutrinos? Idée de Pontecorvo de 1957

DÉFICIT DE NEUTRINOS ATMOSPHERIQUES

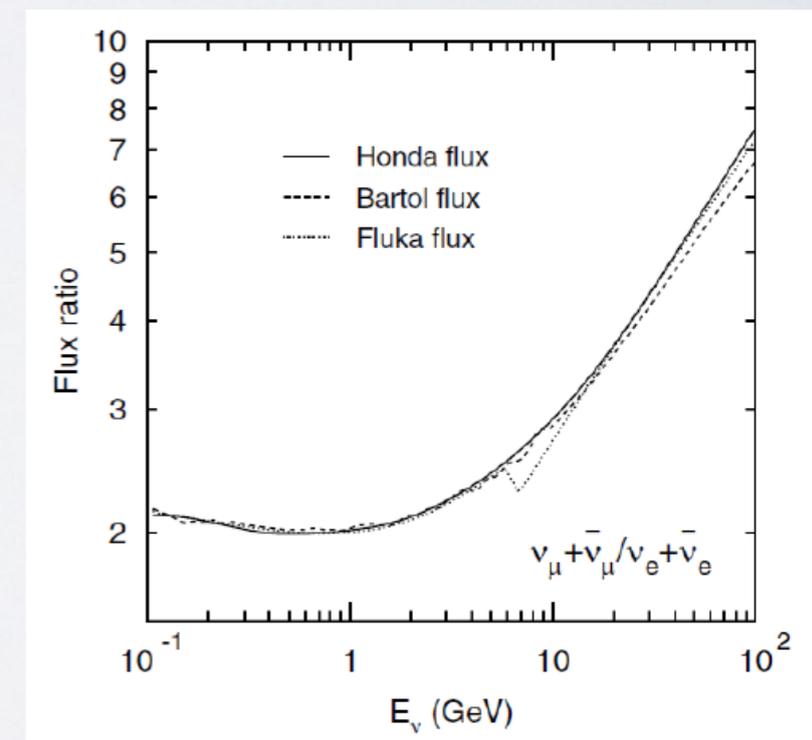
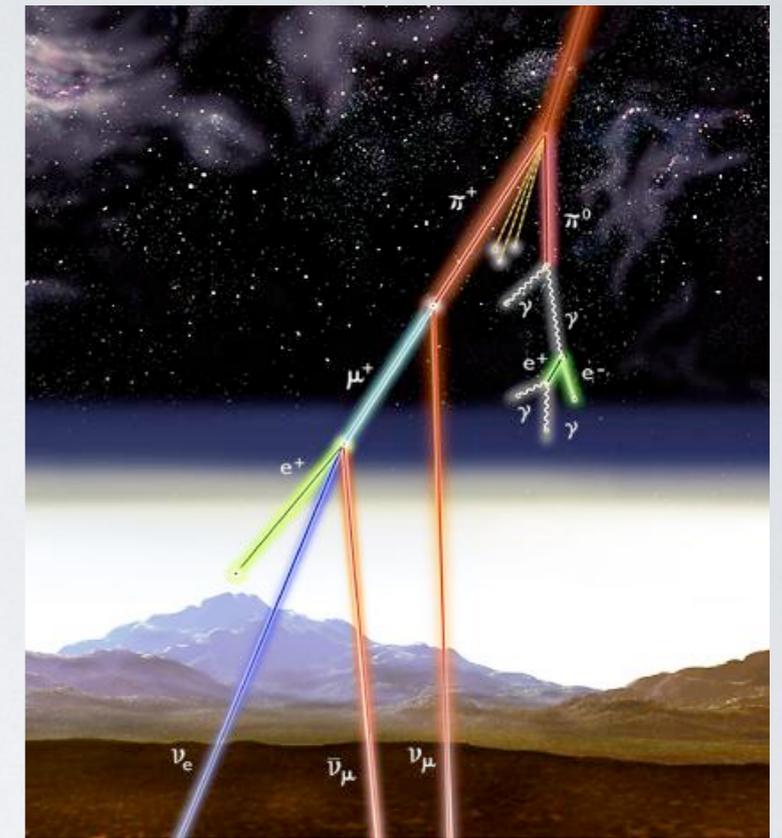
- **Les rayons cosmiques** qui impactent l'atmosphère produisent des gerbes hadroniques :



- A cause de la basse densité de l'atmosphère la plupart des **hadrons** font une **décroissance** avant d'interagir et une bonne partie des **muons** produits par les particules secondaires font une **décroissance** avant d'arriver sur terre :



- On peut s'attendre à ce que le rapport $\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$ soit ≈ 2 , mais cela est vrai seulement à basse énergie ($E_\mu < 1$ GeV). En effet les muons de haute énergie arrivent sur terre avant de faire une décroissance et donc la fraction de ν_e est réduite.



DÉFICIT DE NEUTRINOS ATMOSPHERIQUES

- Plusieurs expériences ont mesuré :
$$RR = \frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)_{Observed}}{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)_{Expected}}$$

Expérience	Rapport
Frejus (1988)	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$
IMB (1991)	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.11$
Kamiokande _{sub GeV} (1994)	$0.60 \pm 0.05 \pm 0.05$
Kamiokande _{multi GeV} (1994)	$0.57 \pm 0.08 \pm 0.07$
Soudan2 (1997)	$0.64 \pm 0.11 \pm 0.06$
SK _{sub GeV} (1997)	$0.65 \pm 0.02 \pm 0.05$
SK _{multi GeV} (1997)	$0.67 \pm 0.04 \pm 0.08$

DÉFICIT DE NEUTRINOS ATMOSPHERIQUES

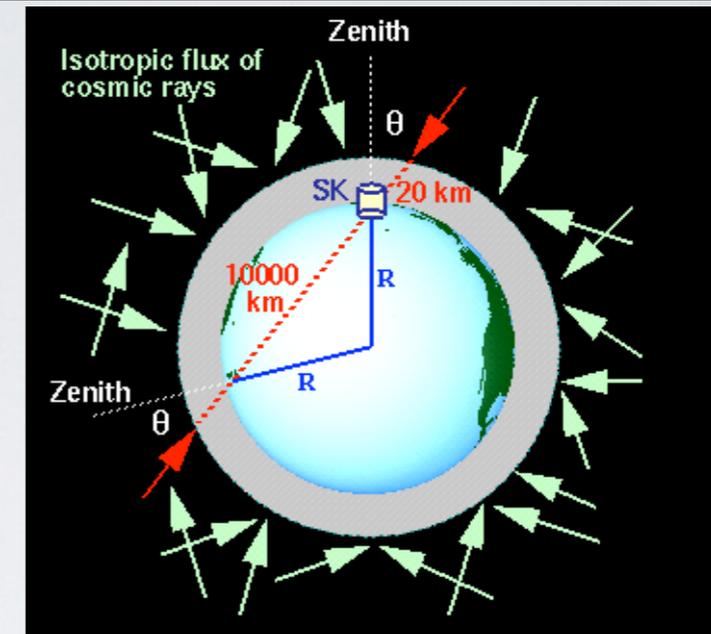
- Plusieurs expériences ont mesuré :
$$RR = \frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)_{Observed}}{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)_{Expected}}$$

Expérience	Rapport
Frejus (1988)	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$
IMB (1991)	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.11$
Kamiokande _{sub GeV} (1994)	$0.60 \pm 0.05 \pm 0.05$
Kamiokande _{multi GeV} (1994)	$0.57 \pm 0.08 \pm 0.07$
Soudan2 (1997)	$0.64 \pm 0.11 \pm 0.06$
SK _{sub GeV} (1997)	$0.65 \pm 0.02 \pm 0.05$
SK _{multi GeV} (1997)	$0.67 \pm 0.04 \pm 0.08$

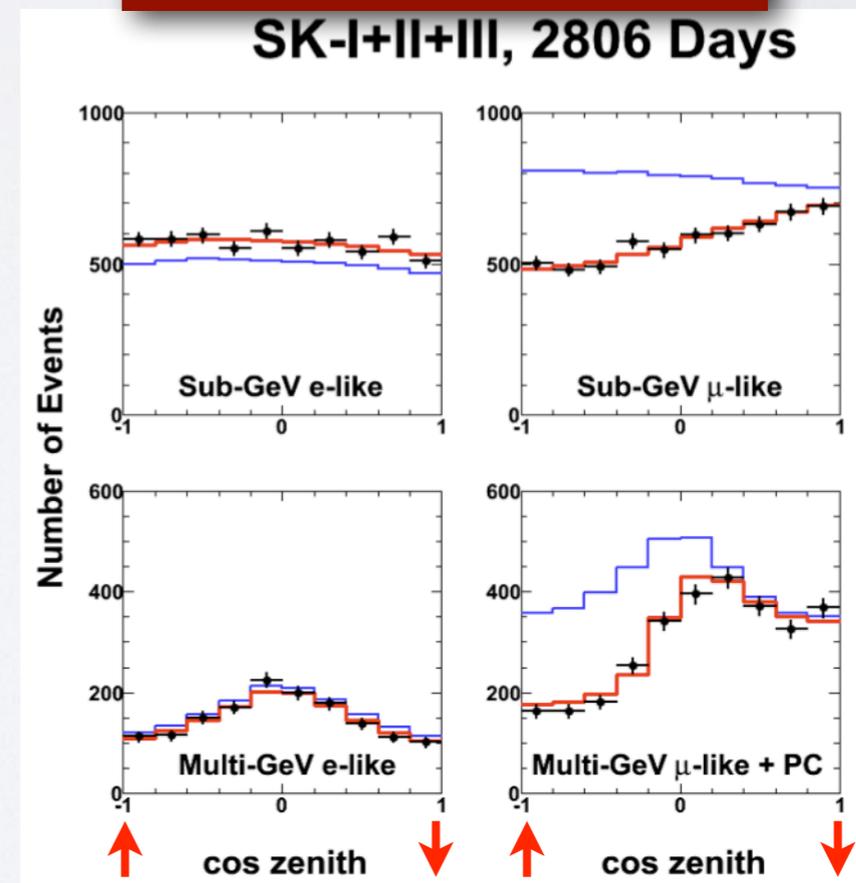
*Il y a trop d'électrons
ou pas assez de muons?*

DÉFICIT DE NEUTRINOS ATMOSPHERIQUES

- L'expérience Super Kamiokande (SK) a étudié la dépendance des électrons et muons (leptons sortant des interactions de neutrinos) en fonction de l'angle zénital.
- La “**disparition**” des muons à été observée pour les muons allant vers le haut (up-going muons) donc créés par les neutrinos ayant traversé la terre pour arriver au détecteur.
- Ceci est une forte évidence de l'**oscillation des neutrinos** ($\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ avec $\nu_x \neq \nu_e$).
- L'expérience montre aussi que le phénomène d'**oscillation dépend de la “baseline”** (i.e. distance entre la source de neutrinos et le détecteur).

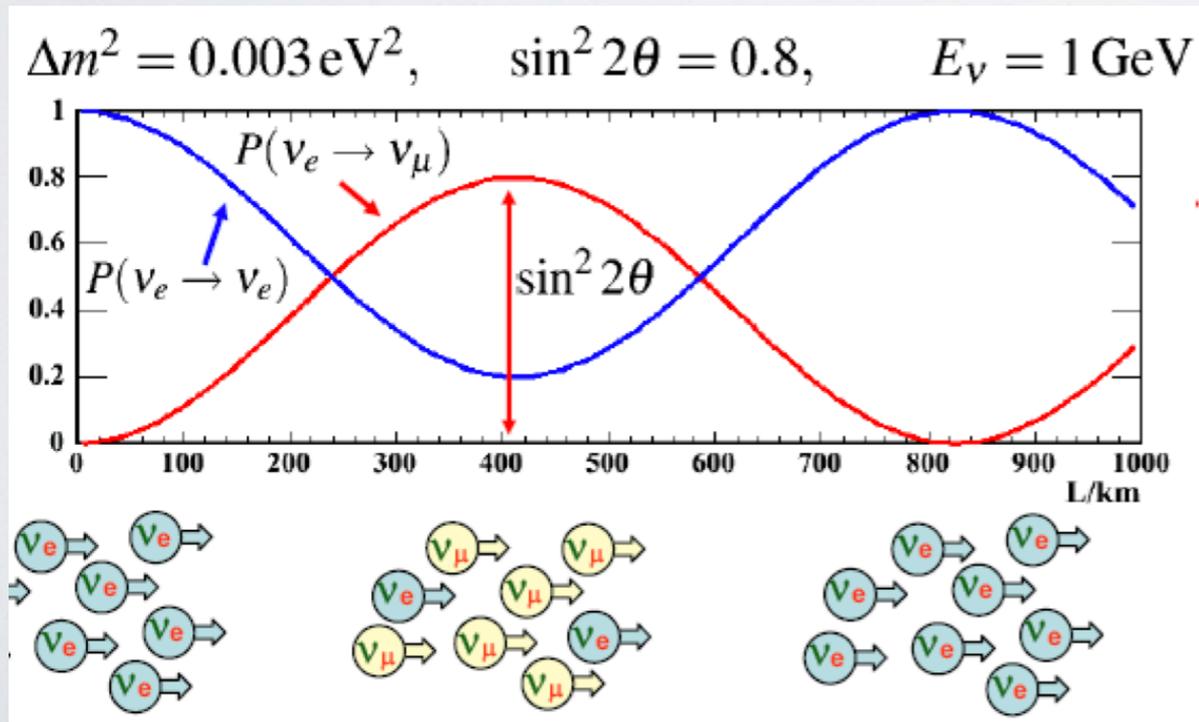


SK derniers résultats



OSCILLATION EN DEUX MOTS

- SNO et SK ont montré que les neutrinos oscillent.
- Suite à l'idée de Pontecorvo, le phénomène d'oscillation a été formalisé par Maki, M. Nakagawa and S. Sakata dans la matrice PMNS en 1962.
- Cette matrice met en relation les neutrinos d'une saveur fixée (création et détection) avec les neutrinos d'une masse fixée (propagation).



OSCILLATION EN FORMULE

- La relation entre les deux états peut être exprimée avec la matrice de Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata (PMNS) :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- Dans le cas de **3 familles de neutrinos** on a **3** paramètres réels (**angles de mélange**) et **1** **paramètre complexe** (**phase complexe**).
- La paramétrisation plus commune est :

$$\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} c_{12} c_{13} & s_{12} c_{13} & s_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12} c_{23} - c_{12} s_{13} s_{23} e^{i\delta_{CP}} & c_{12} c_{23} - s_{12} s_{13} s_{23} e^{i\delta_{CP}} & c_{13} s_{23} \\ s_{12} s_{23} - c_{12} s_{13} c_{23} e^{i\delta_{CP}} & -c_{12} s_{23} - s_{12} s_{13} c_{23} e^{i\delta_{CP}} & c_{13} c_{23} \end{pmatrix}$$

ou “ c_{ij} ” est “ $\cos \theta_{ij}$ ” et “ s_{ij} ” est “ $\sin \theta_{ij}$ ” avec θ_{ij} angle de mélange.

OSCILLATION EN FORMULE

Combien de paramètres faut-il
pour décrire les oscillations des
neutrinos???

3 angles de mélange
1 phase complexe

2 différences de
masse

$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(1.27 \Delta m_{ij}^2 L/E) \\ + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(2.54 \Delta m_{ij}^2 L/E)$$

OSCILLATION EN FORMULE

Combien de paramètres faut-il pour décrire les oscillations des neutrinos???

3 angles de mélange
1 phase complexe

2 différences de masse



$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(1.27 \Delta m_{ij}^2 L/E) + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(2.54 \Delta m_{ij}^2 L/E)$$

Le signe est important!

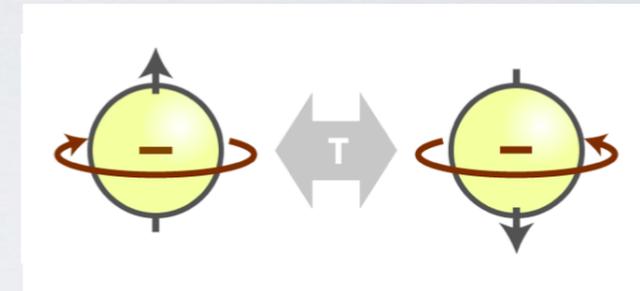
La violation de CP

SYMÉTRIE

- La nature aime la symétrie (et les physiciens cherchent sa violation).
- En physique des particules on a 3 symétries importantes :

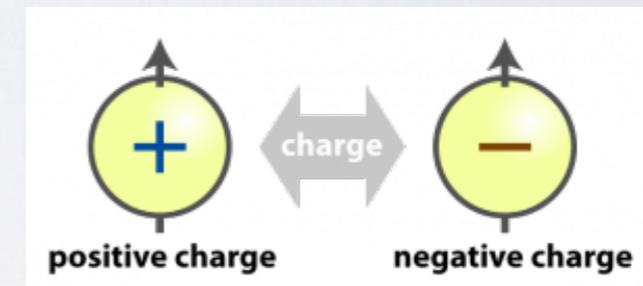
Symétrie temporelle (T)

- Les lois de la physique sont les mêmes en inversant l'axe temporel ($t \rightarrow -t$).



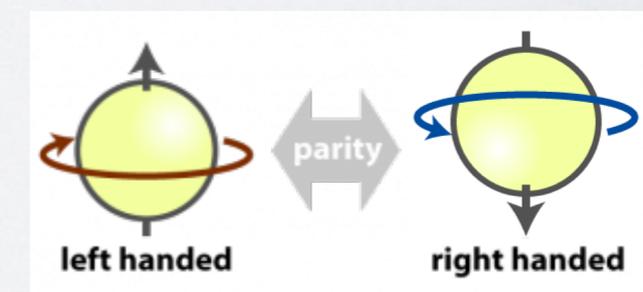
Symétrie de charge (C)

- Les lois de la physique sont les mêmes si on remplace la “charge” (pas seulement électrique) : en fait on transforme une particule en son antiparticule (**dans le Modèle Standard chaque particule a son antiparticule.**)



Symétrie de parité (P)

- Les lois de la physique sont les mêmes si on remplace les coordonnées spatiales (réflexion à travers un point en 3D).

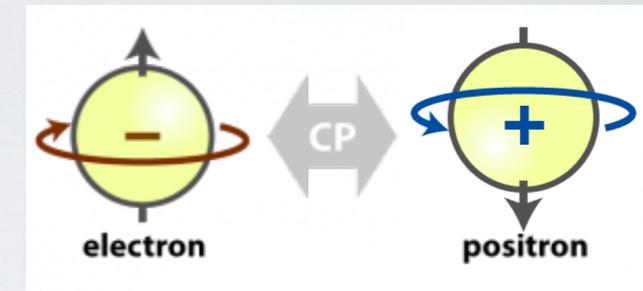


SYMÉTRIE

- Il a été démontré que la symétrie C (Goldhaber en 1957) et P (Wu en 1956) sont violés séparément, par contre la symétrie CP semble être conservée.

Symétrie CP

- Les lois de la physique sont les mêmes si on remplace simultanément la charge et les coordonnées spatiales.

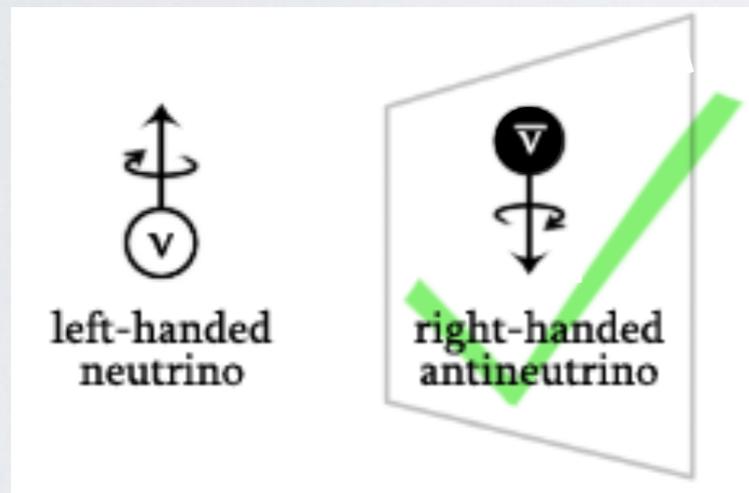
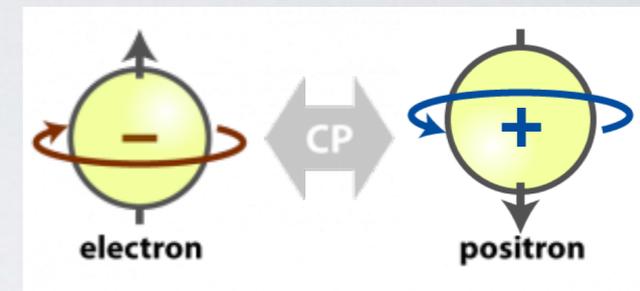


SYMÉTRIE

- Il a été démontré que la symétrie C (Goldhaber en 1957) et P (Wu en 1956) sont violés séparément, par contre la symétrie CP semble être conservée.

Symétrie CP

- Les lois de la physique sont les mêmes si on remplace simultanément la charge et les coordonnées spatiales.



Sous la symétrie CP un neutrino gauche devient un antineutrino droit... parfait!!

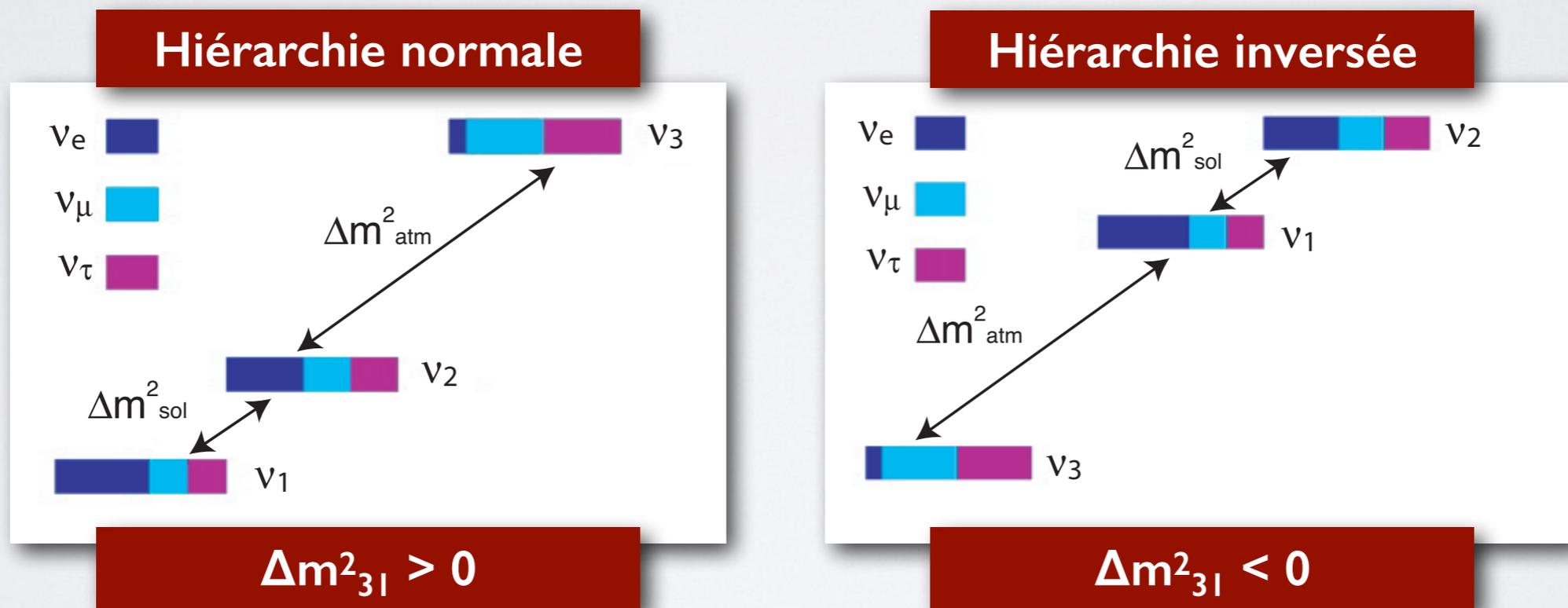
- La symétrie CP est conservée, mais **une violation de CP est nécessaire pour expliquer le fait que notre univers est fait de matière principalement.**

Les physiciens cherchent donc une violation de CP...

La masse du neutrino

HIÉRARCHIE DE MASSE

- Nous avons vu les ingrédients pour décrire les oscillations : 3 angles de mélange (θ_{12} , θ_{13} , θ_{23}), une possible phase complexe (δ_{CP}), et deux différences de masse (Δm^2_{21} , $\Delta m^2_{31} \approx \Delta m^2_{32}$).
- Un autre ingrédient important est le **signe** de la **différence de masses**.
- Le signe de Δm^2_{21} est connu par l'oscillation des neutrinos solaires mais le **signe de Δm^2_{31}** est **inconnu**. C'est ce que on appelle la dégénération de la hiérarchie de masse.



- Le signe a un effet sur la probabilité d'oscillation dans la matière et son indétermination a un effet sur la mesure de la violation de CP.

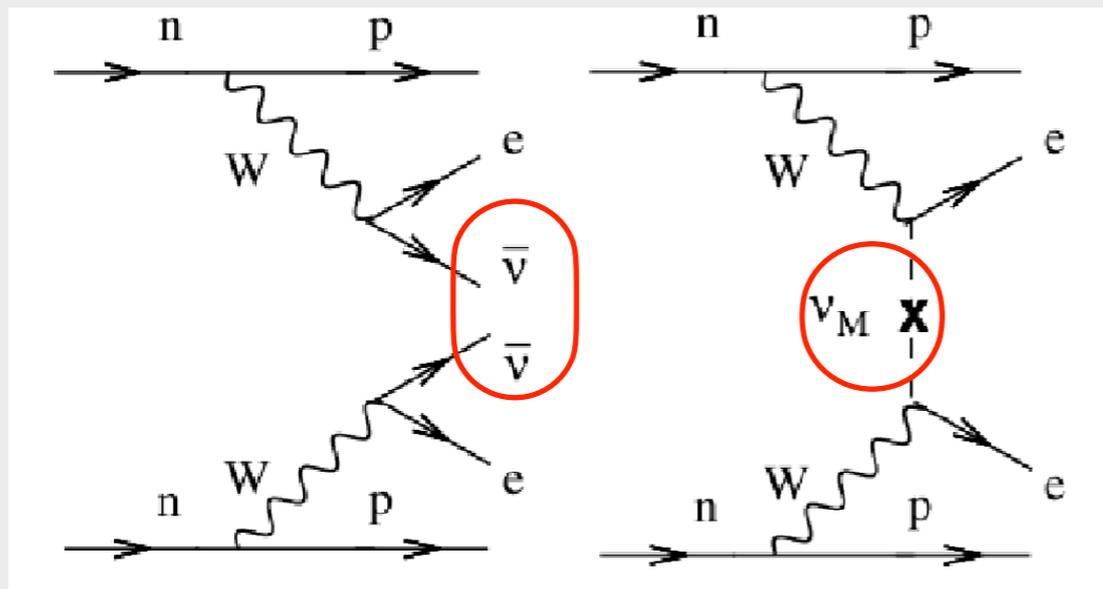
NEUTRINO DE MAJORANA

- La mesure des paramètres d'oscillation n'est pas la seule inconnue qui nous reste à découvrir... il y a une question fondamentale concernant l'origine de la **masse du neutrino**.
- **Les neutrinos et anti-neutrinos sont-ils la même particule???** C'est une possibilité pour les particules neutres.
- Si c'est le cas on peut observer ce qu'on appelle la "double désintégration bêta sans émission de neutrino".



1937

E. Majorana hypothèse
neutrino = anti neutrino



**Décroissance
double bêta**

**Décroissance
double bêta sans neutrino**

**Pas facile à voir... période de
plus de 10^{25} ans (l'âge de
l'univers est de 15×10^9 ans)**

...beaucoup d'informations...
Qu'est-ce qu'il faut retenir et que
veut-on savoir?

QU'EST QU'IL FAUT RETENIR?

QU'EST QU'IL FAUT RETENIR?



Le neutrino est une *particule*
fondamentale très légère et
très abondante dans l'univers

QU'EST QU'IL FAUT RETENIR?

Le neutrino est une *particule*
fondamentale très légère et
très abondante dans l'univers

Le neutrino est étudié car il
pourrait *contribuer à clarifier*
plusieurs des inconnues sur
notre univers comme
l'asymétrie matière-antimatière

QU'EST QU'IL FAUT RETENIR?

Le neutrino est une *particule fondamentale* très légère et très abondante dans l'univers

Le neutrino est étudié car il pourrait *contribuer à clarifier* plusieurs des inconnues sur notre univers comme *l'asymétrie matière-antimatière*

Le neutrino a une propriété assez singulière... il *oscille en changeant de saveur* pendant sa propagation

QUE VEUT-ON SAVOIR?

- Aujourd'hui notre connaissance des paramètres est assez poussée mais il y a encore des choses à découvrir.

Quel est l'ordre des masses (hiérarchie)?

		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 7.1$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 → 0.343
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.86	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 → 35.87
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.016}_{-0.020}$	0.415 → 0.616	$0.575^{+0.016}_{-0.019}$	0.419 → 0.617
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+0.9}_{-1.2}$	40.1 → 51.7	$49.3^{+0.9}_{-1.1}$	40.3 → 51.8
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02219^{+0.00062}_{-0.00063}$	0.02032 → 0.02410	$0.02238^{+0.00063}_{-0.00062}$	0.02052 → 0.02428
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.12}_{-0.12}$	8.20 → 8.93	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 → 8.96
	$\delta_{CP}/^\circ$	197^{+27}_{-24}	120 → 369	282^{+26}_{-30}	193 → 352
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2/c^4}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04
	$\frac{\Delta m_{3l}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2/c^4}$	$+2.517^{+0.026}_{-0.028}$	+2.435 → +2.598	$-2.498^{+0.028}_{-0.028}$	-2.581 → -2.414

Il y a-t-il une violation de CP (phase CP différente de 0 ou 180 degrés)?



Si c'est le cas la probabilité d'oscillation des neutrinos et anti-neutrinos serait différente et cela aiderait à expliquer la différente concentration de matière et d'anti-matière dans l'univers

On revient finalement au titre de
l'exposé...
“comment voir l'invisible”

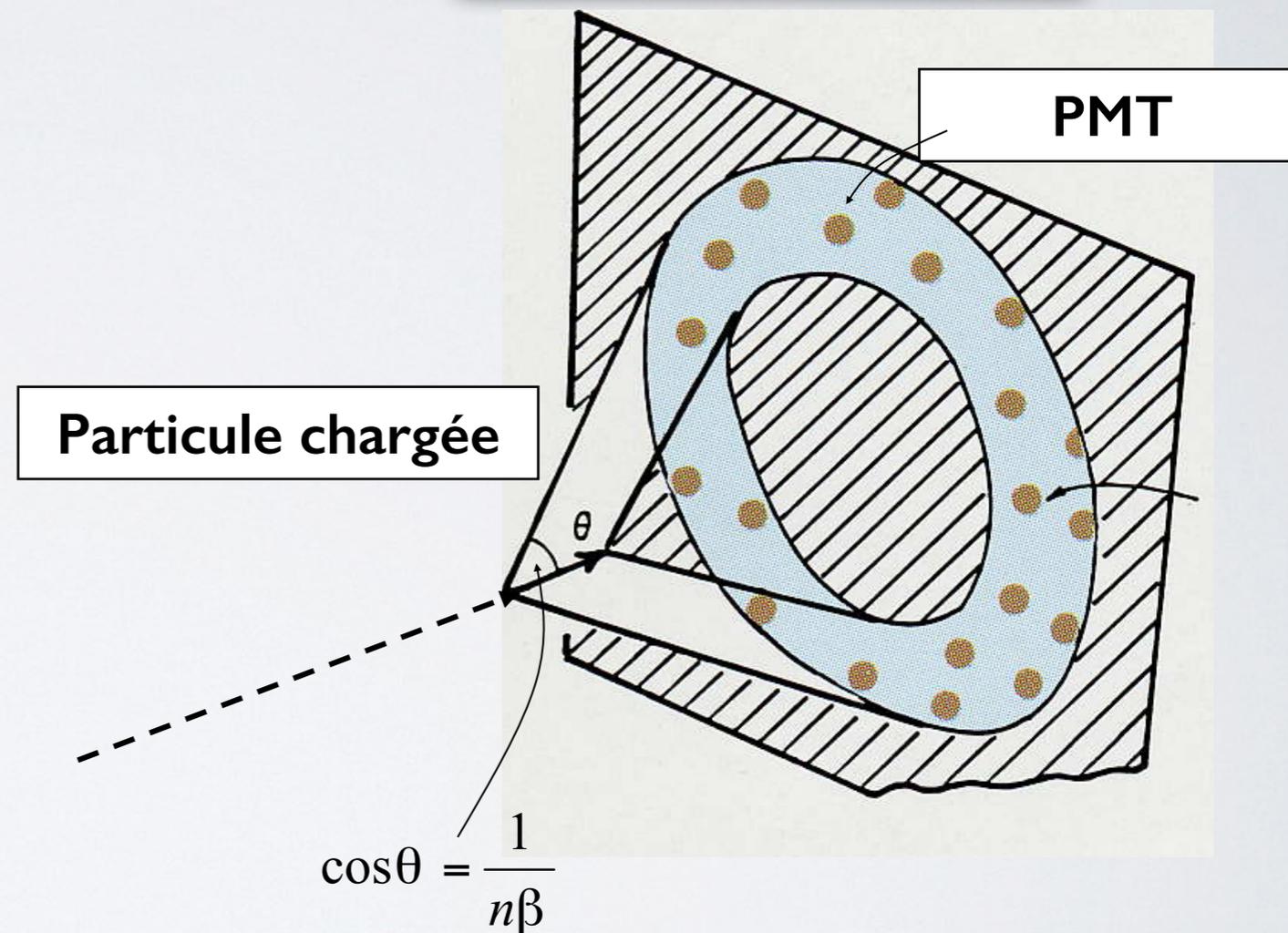
Détecteurs à eau Cherenkov

PRINCIPE DE DÉTECTION

- La détection des particules est basée sur l'émission de la radiation Cherenkov.
- Les **particules chargées** qui voyagent dans un milieu avec une **vitesse plus grande** que celle de la **lumière dans ce milieu** émettent de la lumière (**lumière Cherenkov**).
- L'angle ϑ dépend de l'indice de réfraction du milieu n et de la vitesse de la particule par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide β .
- Le **nombre de photons** émis avec une longueur d'onde entre 300 et 600 nm (intervalle typique d'efficacité des PMT) est de seulement **~ 340 par cm**. C'est pourquoi on utilise de grands PMTs.

Photomultiplicateur (PMT) : conversion des photons en électrons

Vue schématique

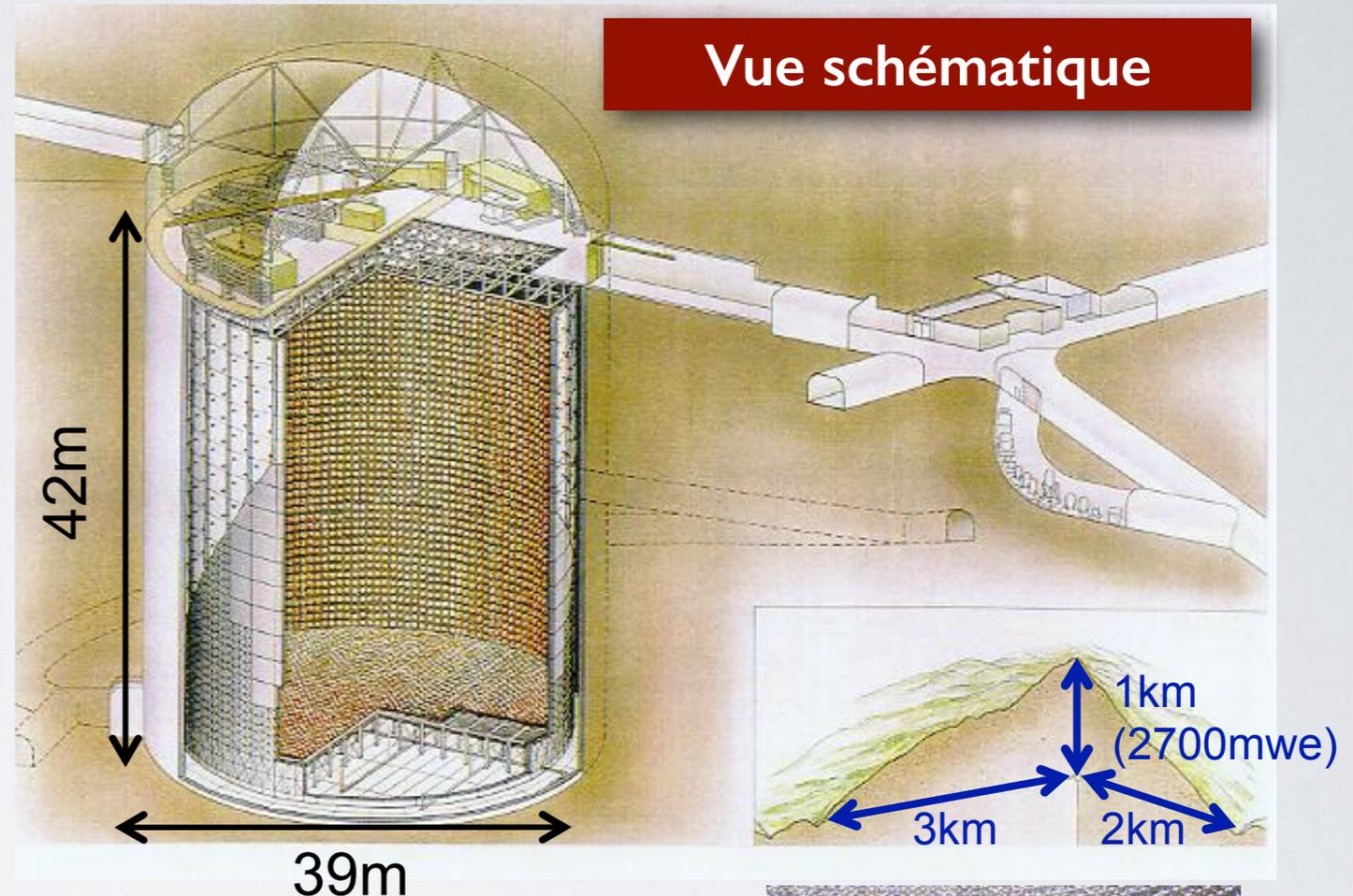


Dans l'**eau** $n = 1.34$ donc
pour $\beta = 1$, $\vartheta = 42$ deg.

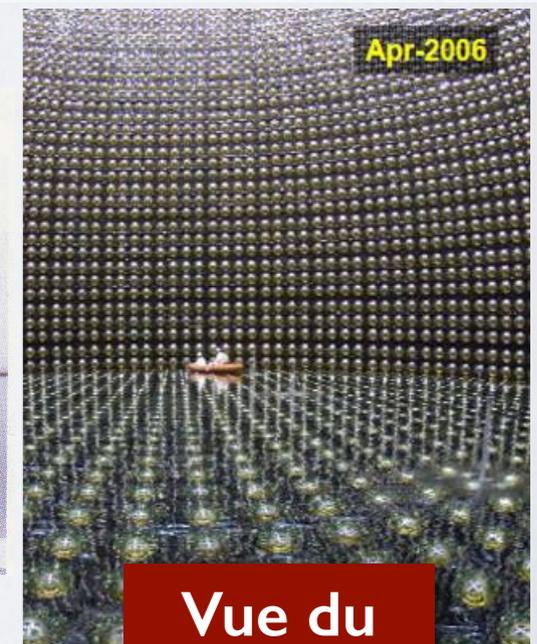
SUPER KAMIOKANDE

- Le détecteur Super Kamiokande (SK) est un exemple de détecteur Cherenkov eau.
- Il se trouve au Japon à 250 km de l'accélérateur J-PARC, **1 km sous terre**, et il a une masse de **50 kton d'eau** (volume fiduciel de 22.5 kton).
- Le détecteur est constitué de 11146 PMTs avec un diamètre de 50 cm.
- On observe environ **10 ν /jour** (neutrinos solaires et atmosphériques).

La prise de données a démarré en 1996 avec des **objectifs multiples** : ν atmosphériques, solaires et Supernova, détecteur lointain pour K2K et T2K, et recherche de la décroissance du proton.



PMTs



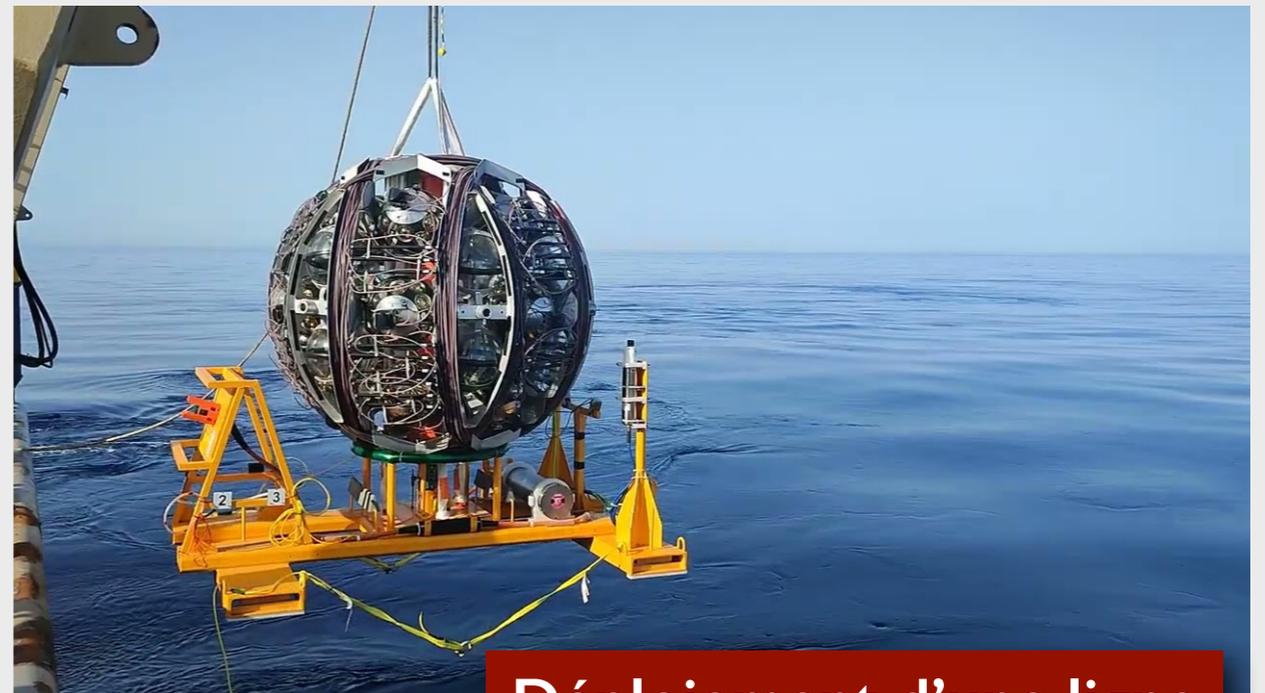
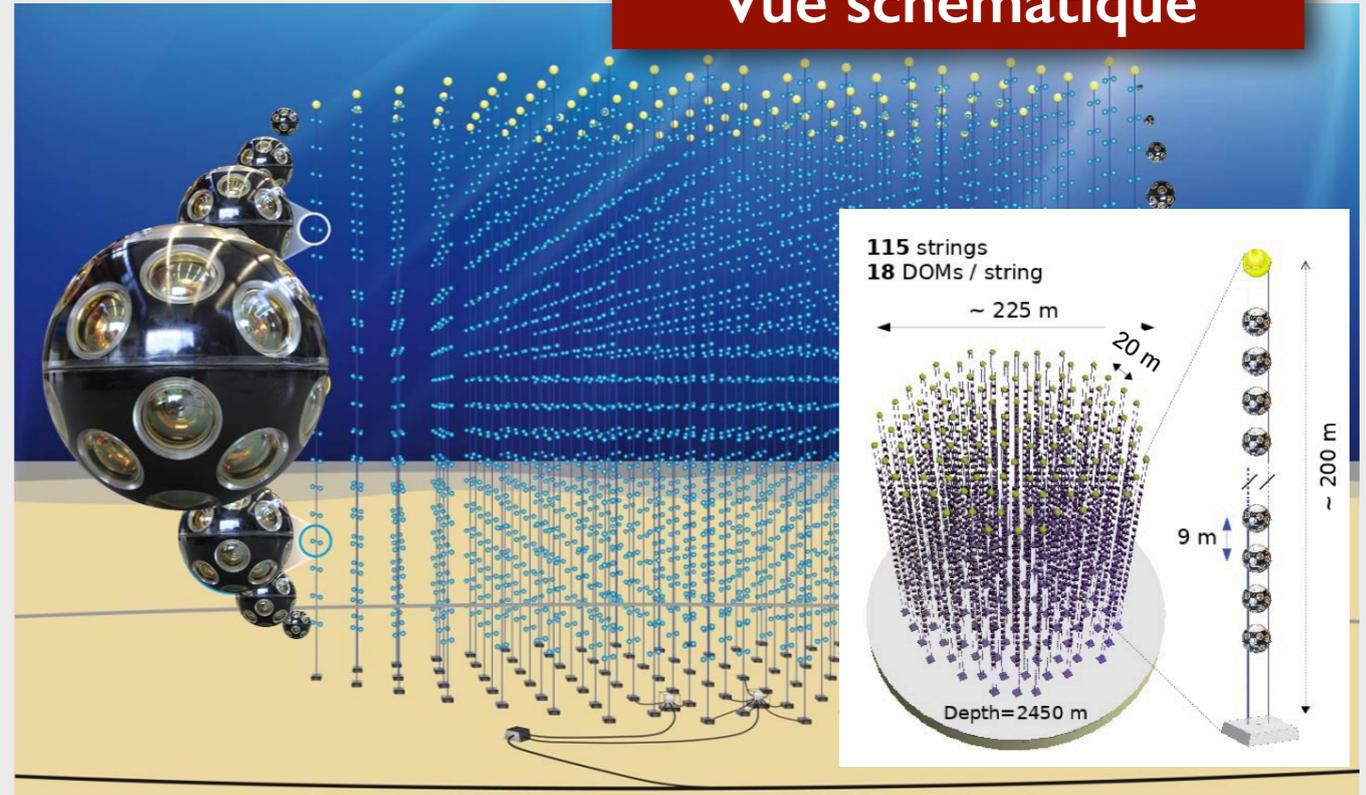
Vue du détecteur

ORCA

- Une autre possibilité est d'utiliser la mer comme cible et l'instrumenter avec des PMTs pour détecter la lumière.
- Cela est le principe de détection utilisé par ORCA qui se trouve à 40 km au large de Toulon. Il sera instrumenté par 115 lignes de PMTs pour une masse équivalente à **7 Mton d'eau**.
- La densité des lignes de PMTs permet d'observer les neutrinos à partir de quelques GeV.

La prise de données a démarré en 2018 avec 6 lignes (28 aujourd'hui). L'**objectif** est la recherche de la hiérarchie de masse et l'observation des neutrinos atmosphériques de haute énergie (avec le détecteur ARCA en Italie).

Vue schématique

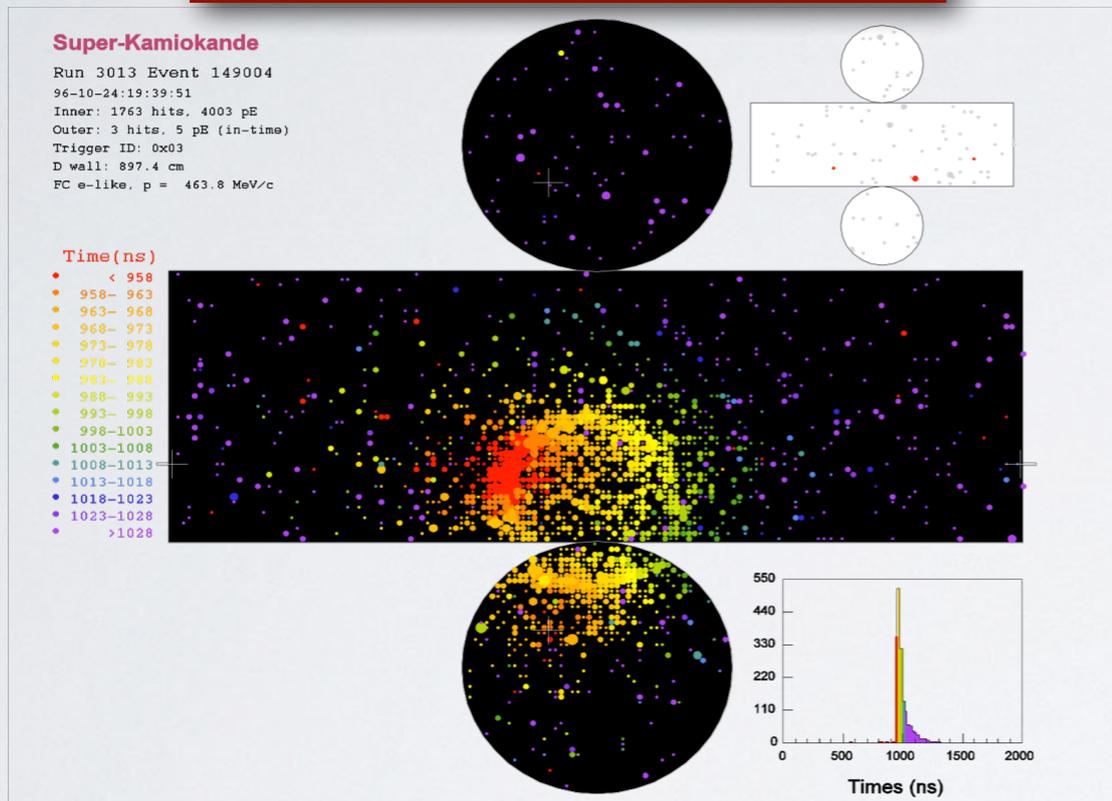


Déploiement d'une ligne

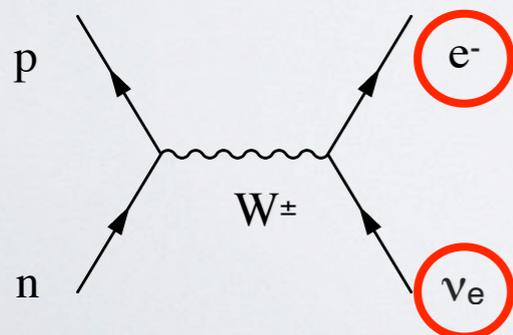
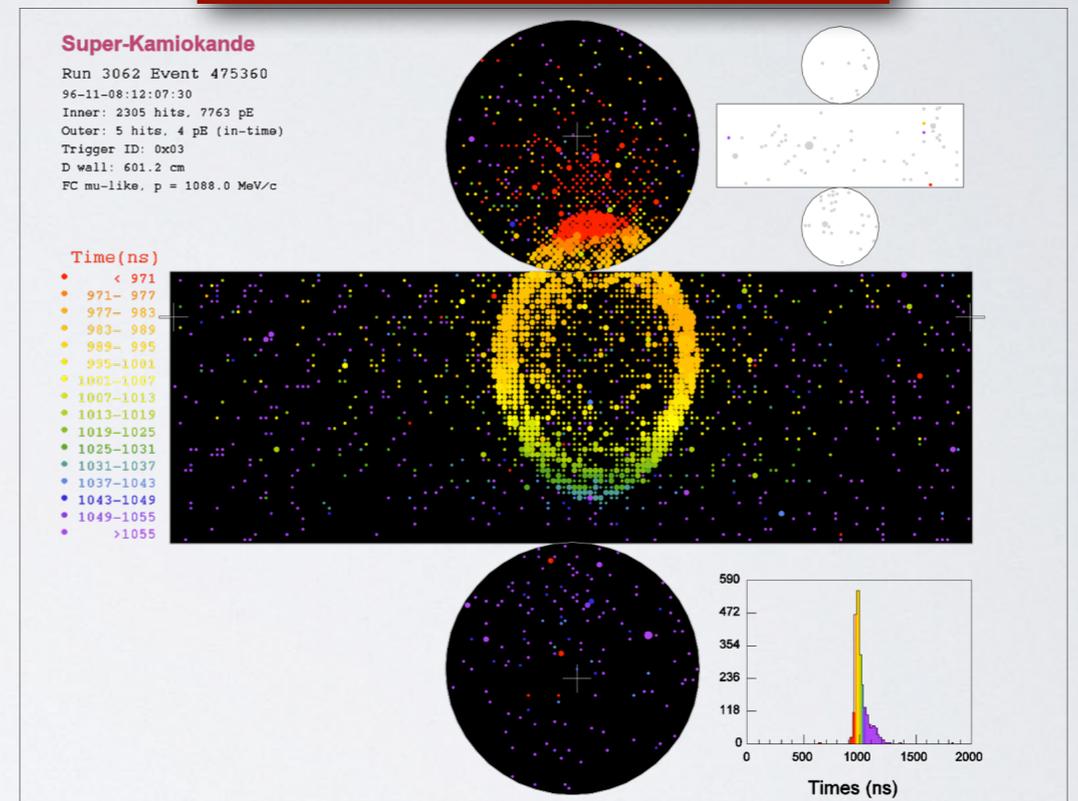
VISUALISATION DES NEUTRINOS

- L'**identification des particules** est importante pour définir la saveur du neutrino observé. Cela est fait en regardant la **forme de l'anneau**.

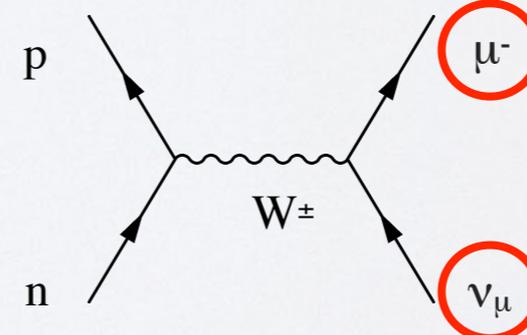
signal électron



signal muon



Cône pas bien défini



Cône bien défini

VISUALISATION DES NEUTRINOS

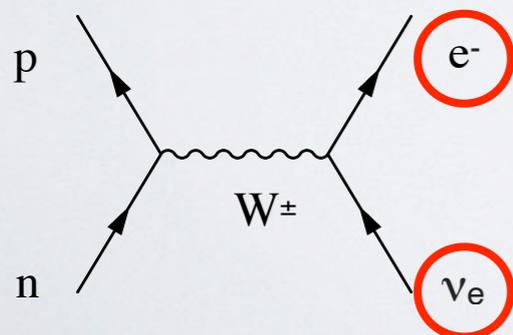
- L'**identification des particules** est importante pour définir la saveur du neutrino observé. Cela est fait en regardant la **forme de l'anneau**.



On ne voit que le lepton!!!

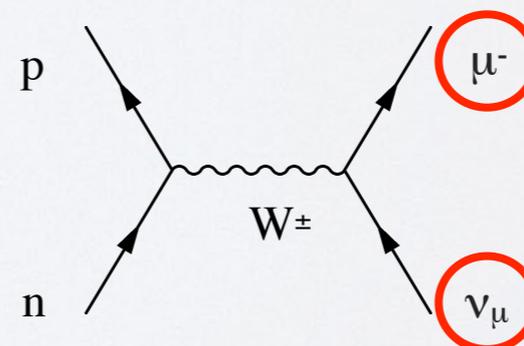
Le proton n'est typiquement pas visible car son énergie est normalement sous le seuil d'émission de lumière Cherenkov de 1.4 GeV!

Le seuil pour l'électron est de 800 keV et pour le muon de 160 MeV.



ELECTRON NEUTRINO
electron shower

Cône pas bien défini



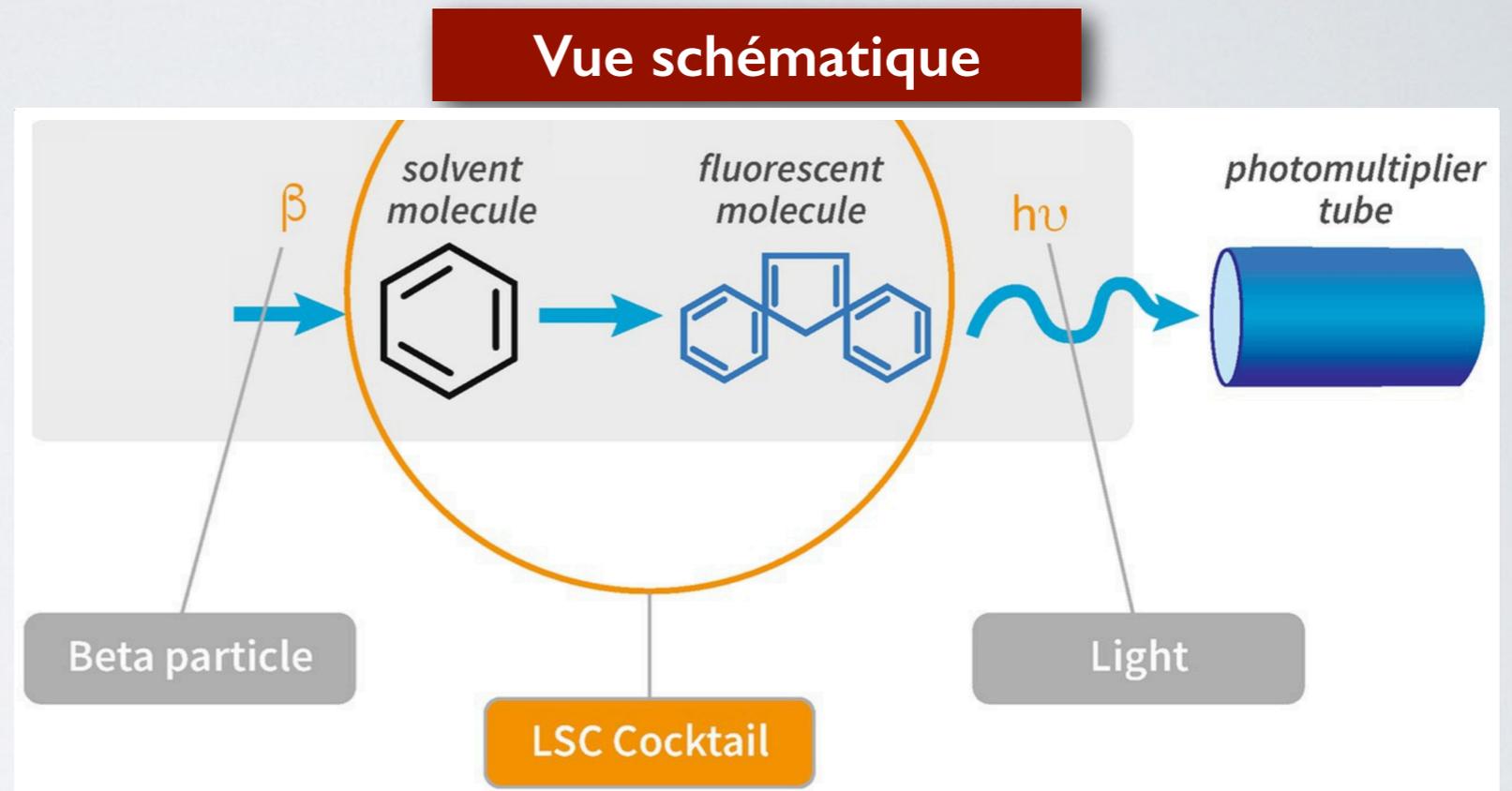
MUON NEUTRINO
muon

Cône bien défini

Détecteurs à scintillateur

PRINCIPE DE DÉTECTION

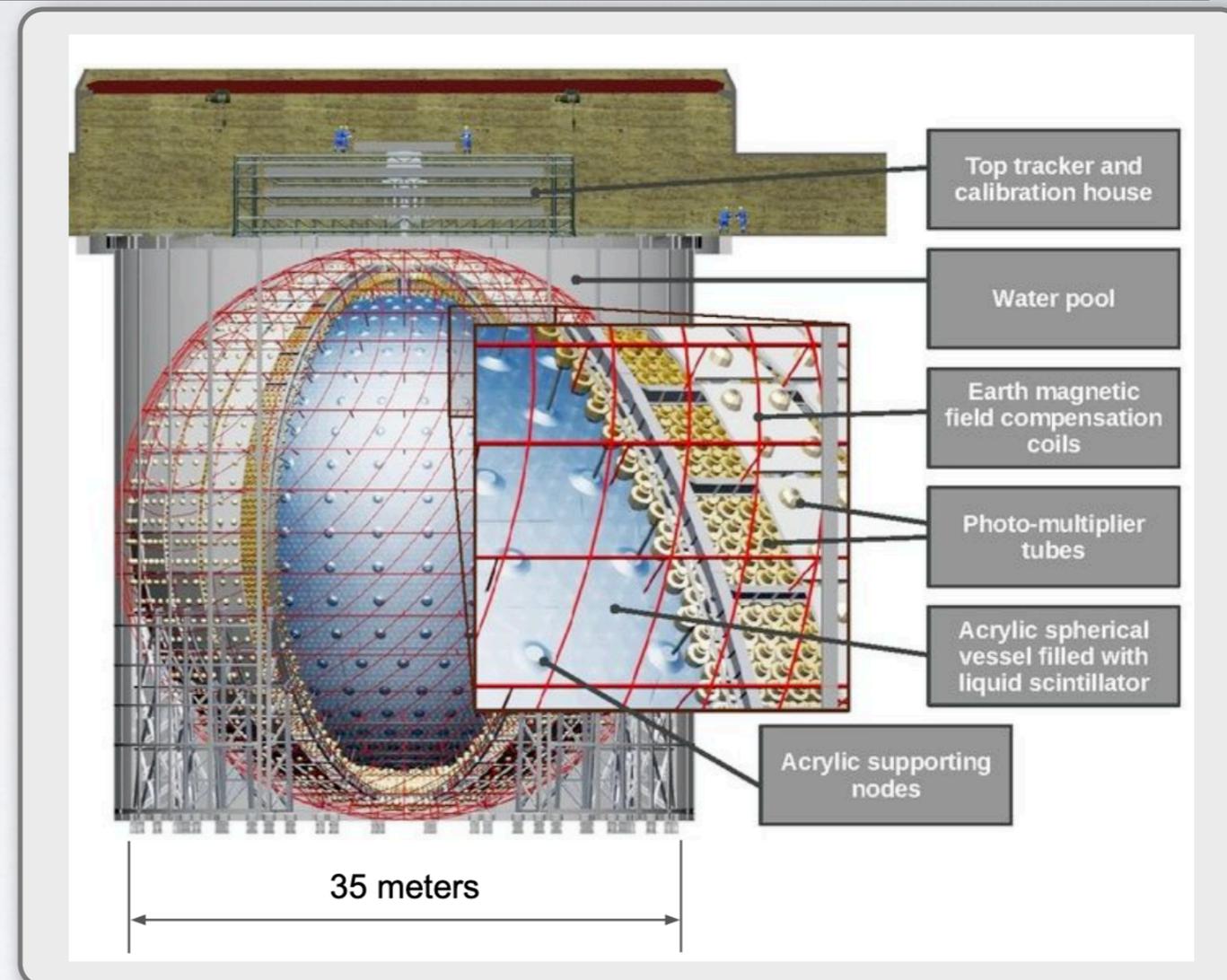
- La détection des particules est basée sur l'émission de la lumière de scintillation.
- **Particules chargées** qui traversent un scintillateur excitent des molécules qui émettent de la lumière dans le processus de des-excitation.
- Cela peut se faire dans des **scintillateurs liquides ou solides**.



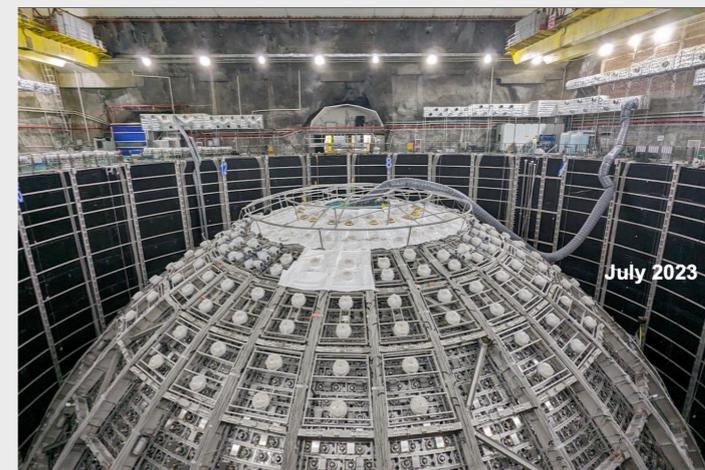
- Un scintillateur liquide est normalement basé sur des molécules organiques comme le LAB (linear alkyl benzene) pour lesquels des dopants sont ajoutés pour créer le phénomène de scintillation.
- D'autres dopants peuvent être ajoutés pour décaler le spectre de lumière et l'adapter aux PMTs.
- Le **nombre de photons** émis avec une longueur d'onde entre 300 et 600 nm (intervalle typique d'efficacité des PMT) est d'environ **10000 par MeV déposé**. Cette lumière est collectée par des PMTs.

JUNO

- Le détecteur JUNO est un exemple de détecteur scintillateur liquide.
- Il se trouve en Chine à 52 km des réacteurs nucléaires de Taishan et Yangjian, 700 m sous terre, et il a une masse de **20 kton**).
- Le détecteur est constitué de 17600 PMTs avec un diamètre de 50 cm et 25600 petits PMTs (diamètre de 3").
- On observera environ **47 v/jour** (neutrinos des réacteurs).

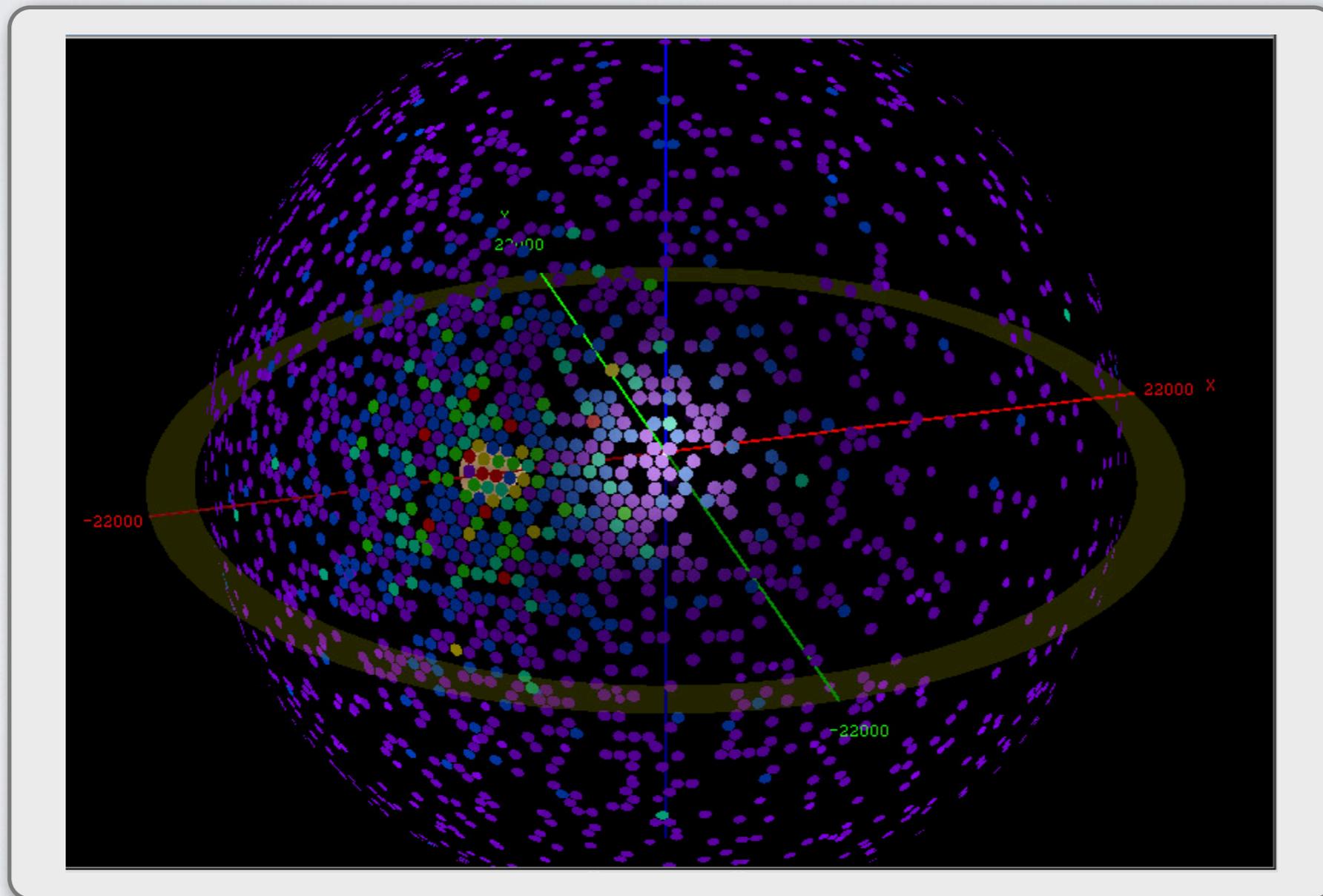


La détecteur est en cours de construction et la prise de données est prévue pour 2025 avec des **objectifs multiples**: mesure des paramètres solaires et hiérarchie de masse, recherche de la décroissance du proton.



VISUALISATION DES NEUTRINOS

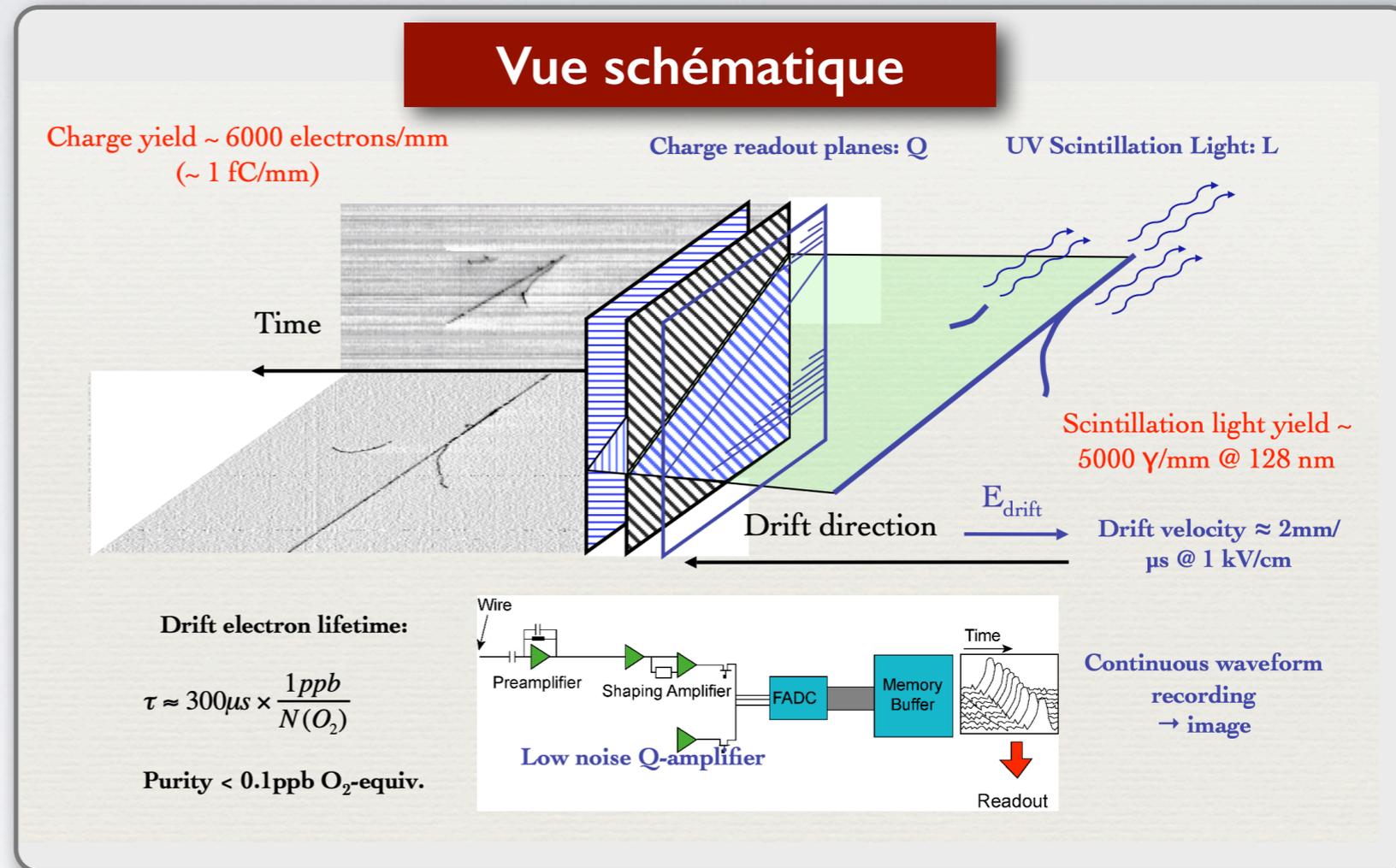
- Il n'y a pas de vraie "image". On a juste la charge mesurée par les différents PMTs et le temps d'arrivée des photons.
- C'est comme les détecteurs Cherenkov mais sans directionnalité donc la plupart des PMT voient de la lumière.



Détecteurs à Argon Liquide

PRINCIPE DE DÉTECTION

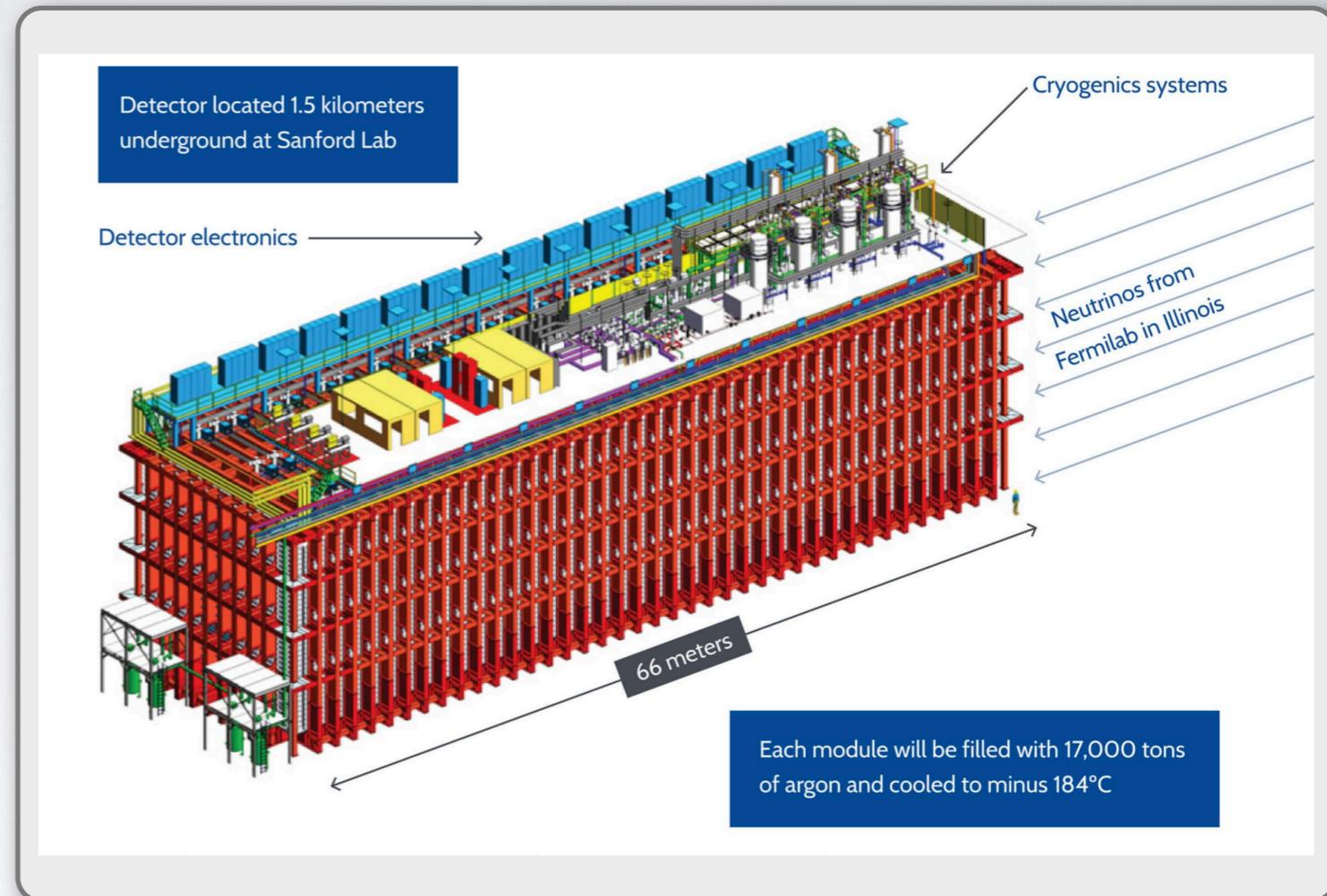
- La détection des particules est basée sur la mesure de la charge dans des TPC (Time Proportional Chamber).
- Les **Particules chargées** qui traversent l'argon liquide excitent ses molécules et arrachent des électrons qui sont dérivés par un champ électrique vers l'anode de lecture.



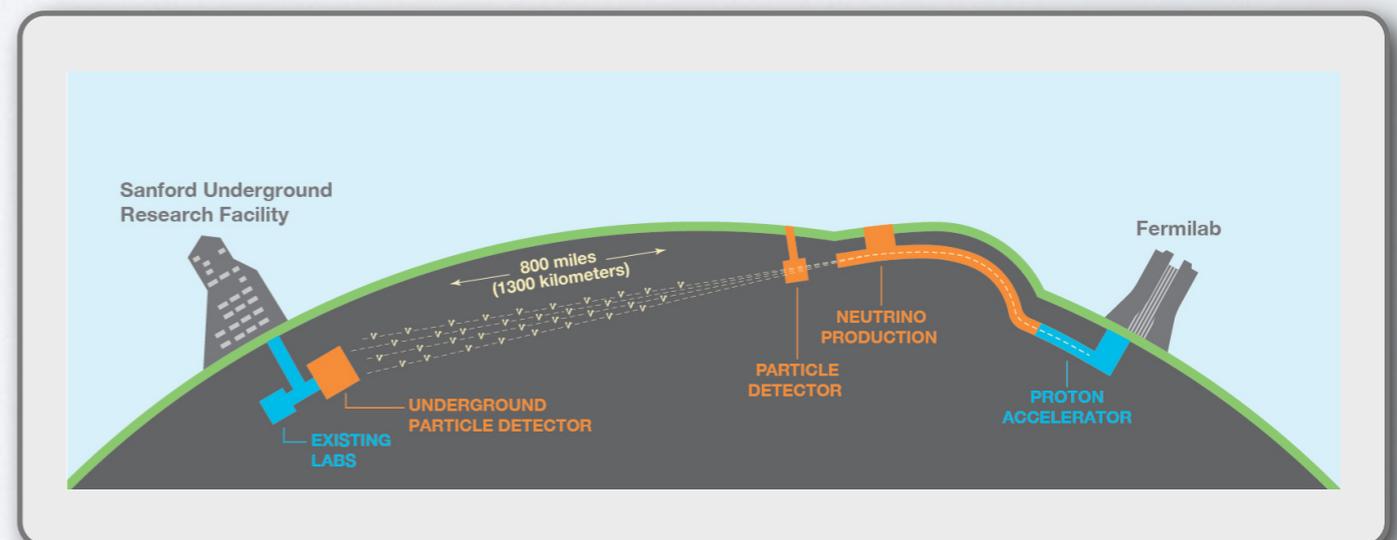
- La pureté qui peut être atteinte aujourd'hui permet de déplacer des électrons sur des distances de la **dizaine de mètres** et donc d'avoir des détecteurs de très grande masse.
- Cette technique initiée en 1979 par C. Rubbia a été utilisée dans plusieurs détecteurs depuis ICARUS (600 tonnes) jusqu'au futur détecteur DUNE (modules de 10 kton de volume fiduciel).

DUNE

- Le détecteur DUNE est un exemple d'un détecteur à Ar liquide.
- Il se trouve en US à 1300 km du Fermilab où les neutrinos sont produits.
- Le détecteur sera 1.5 km sous terre dans le Sanford laboratory.
- Le détecteur sera constituée de plusieurs modules (normalement 4) d'environ 10 kton chacun.
- On observera environ **10 v/jour** (neutrinos du faisceau).

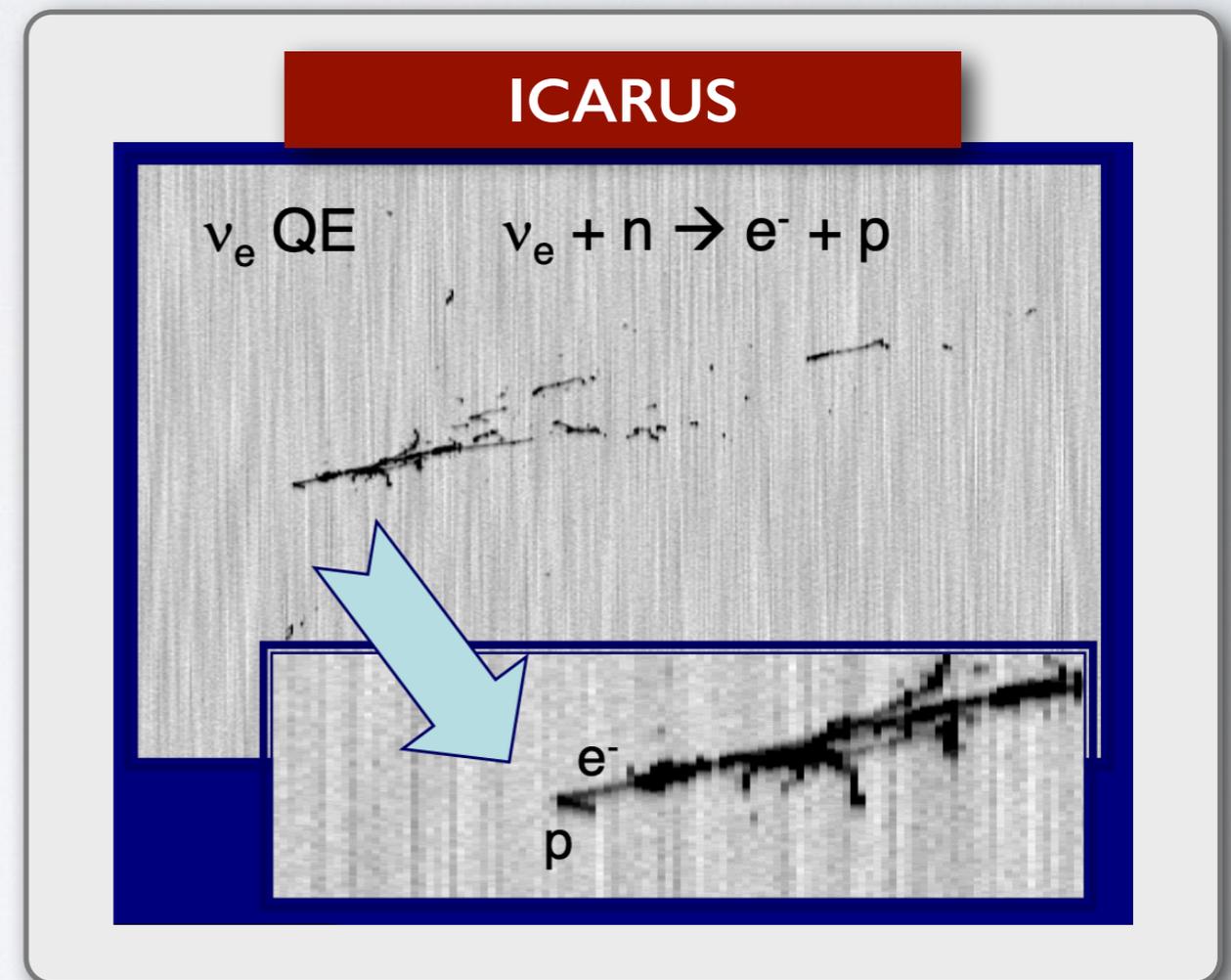
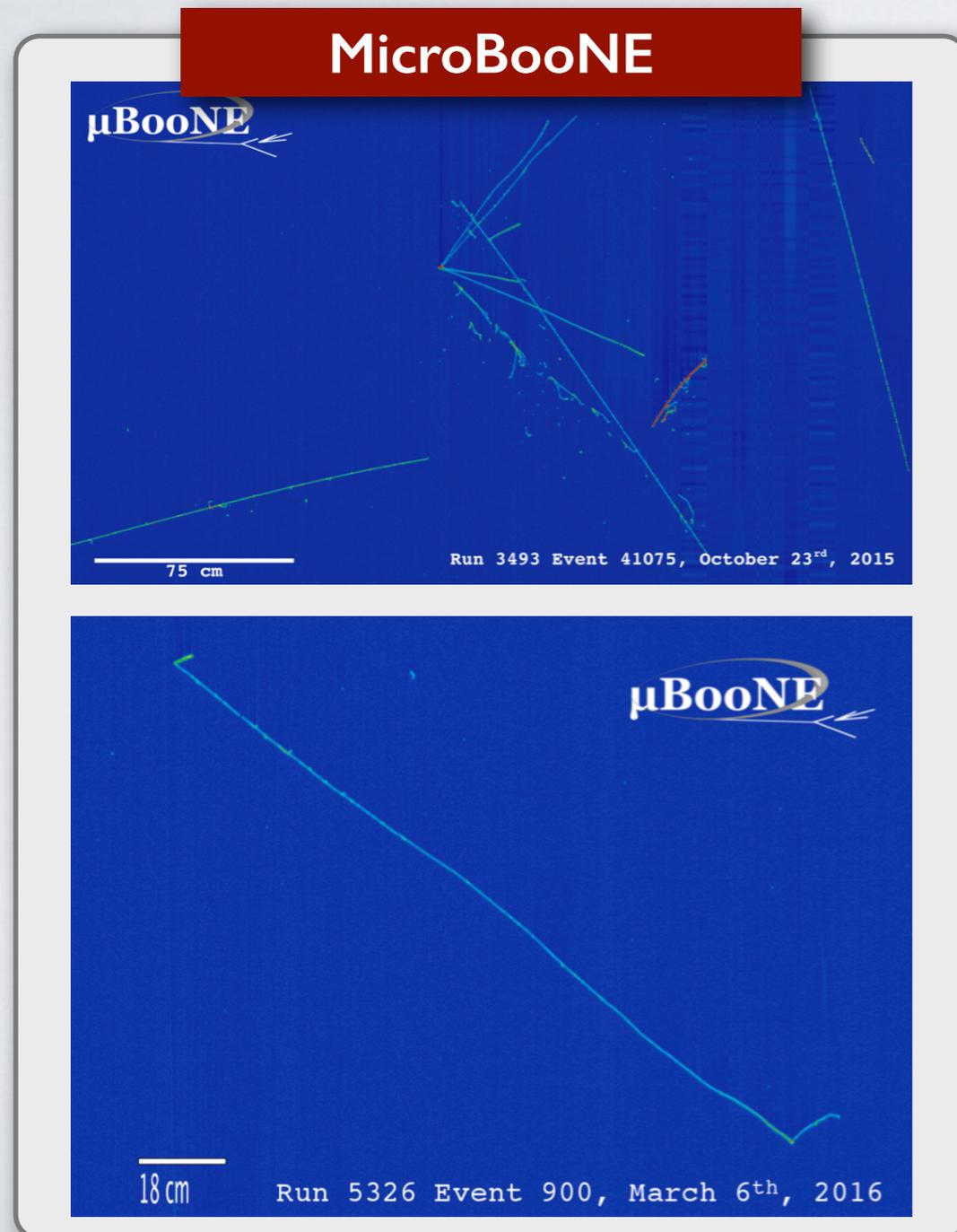


Le démarrage de l'expérience est prévue pour ~2030-2035 avec comme **objectif principal** la mesure de la hiérarchie de masse, et de la violation de CP.



VISUALISATION DES NEUTRINOS

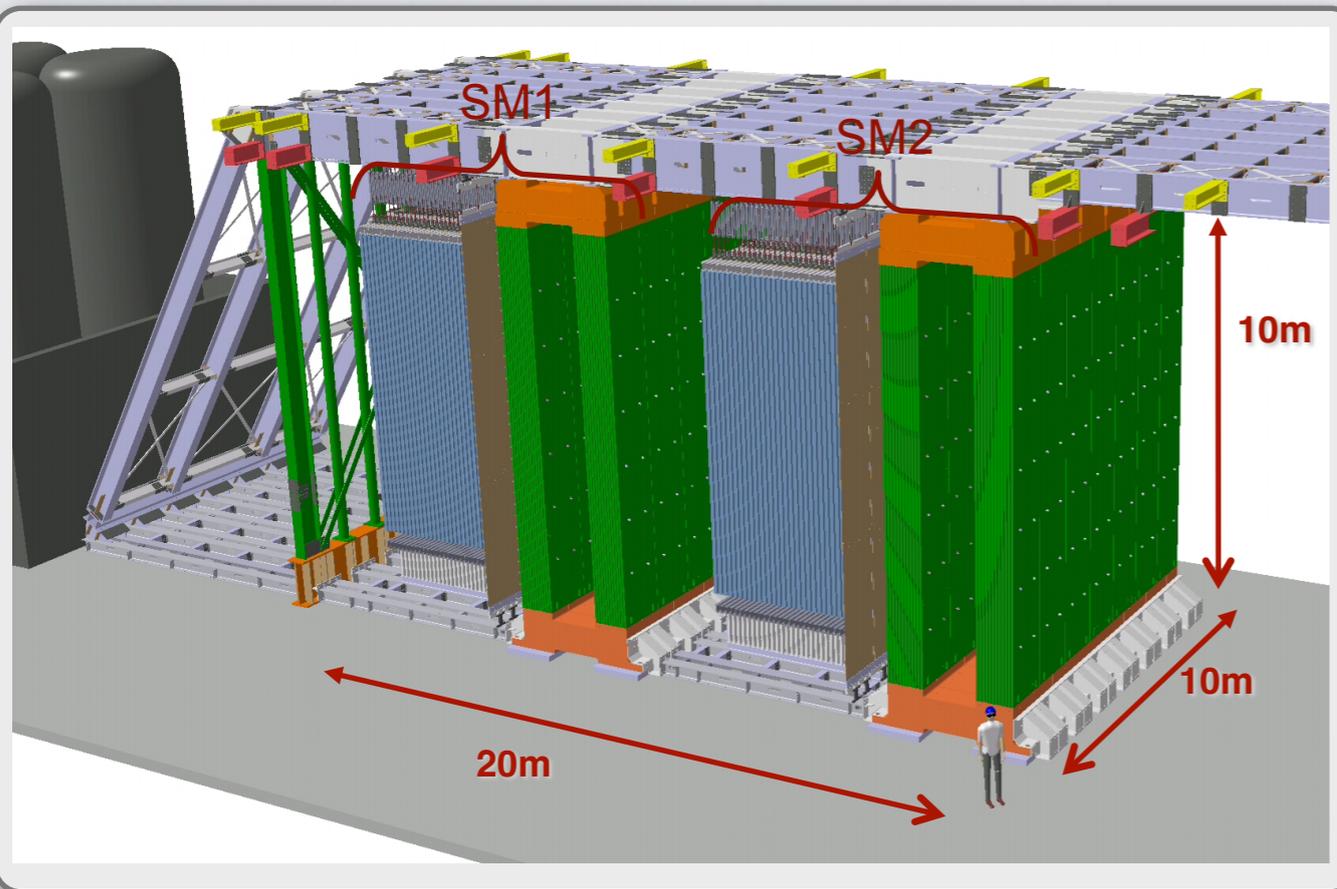
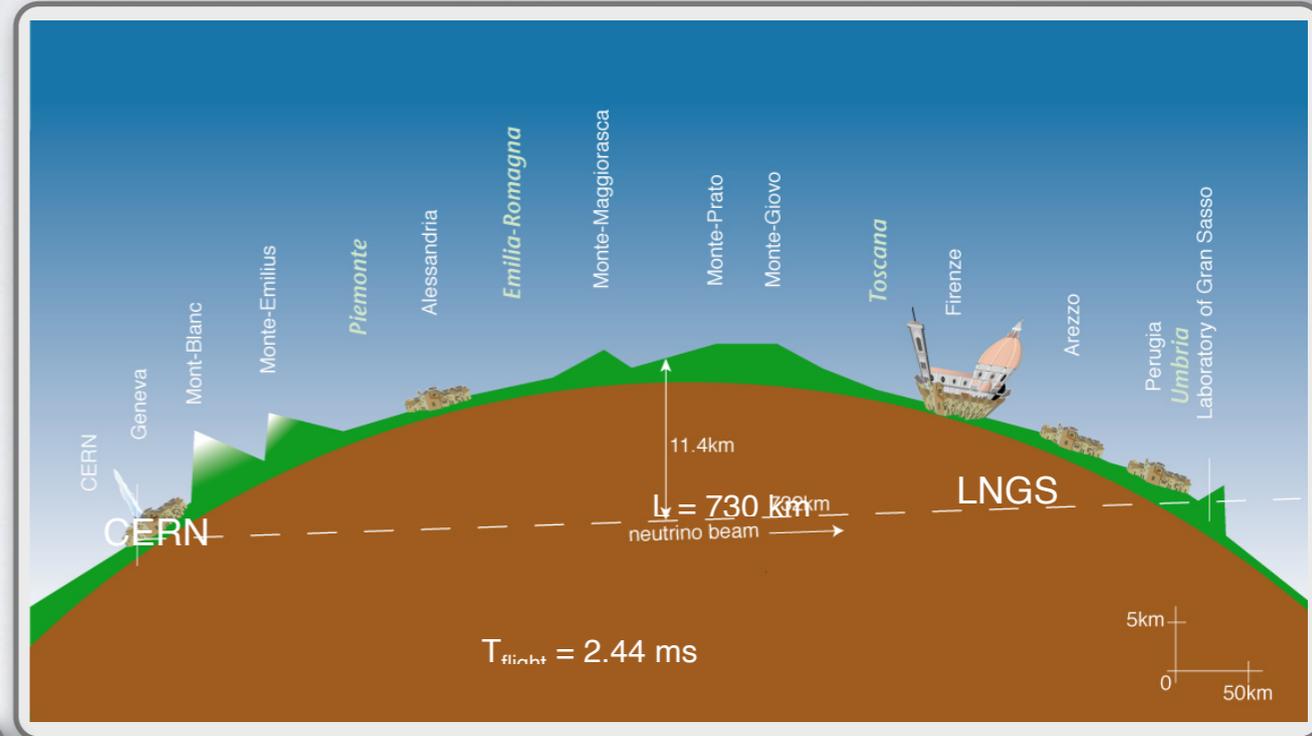
- La technologie Argon liquide permet d'avoir une image détaillée de l'événement avec aussi la reconstruction des hadrons.



Détecteurs hybrides

OPERA

- On a des détecteurs qui utilisent des technologies mélangées comme OPERA qui combine des scintillateurs plastiques aux émulsions photographiques.
- OPERA a été conçu pour observer l'apparition $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$, (faisceau du CERN et détection au Gran Sasso, soit un parcours de 730 km).

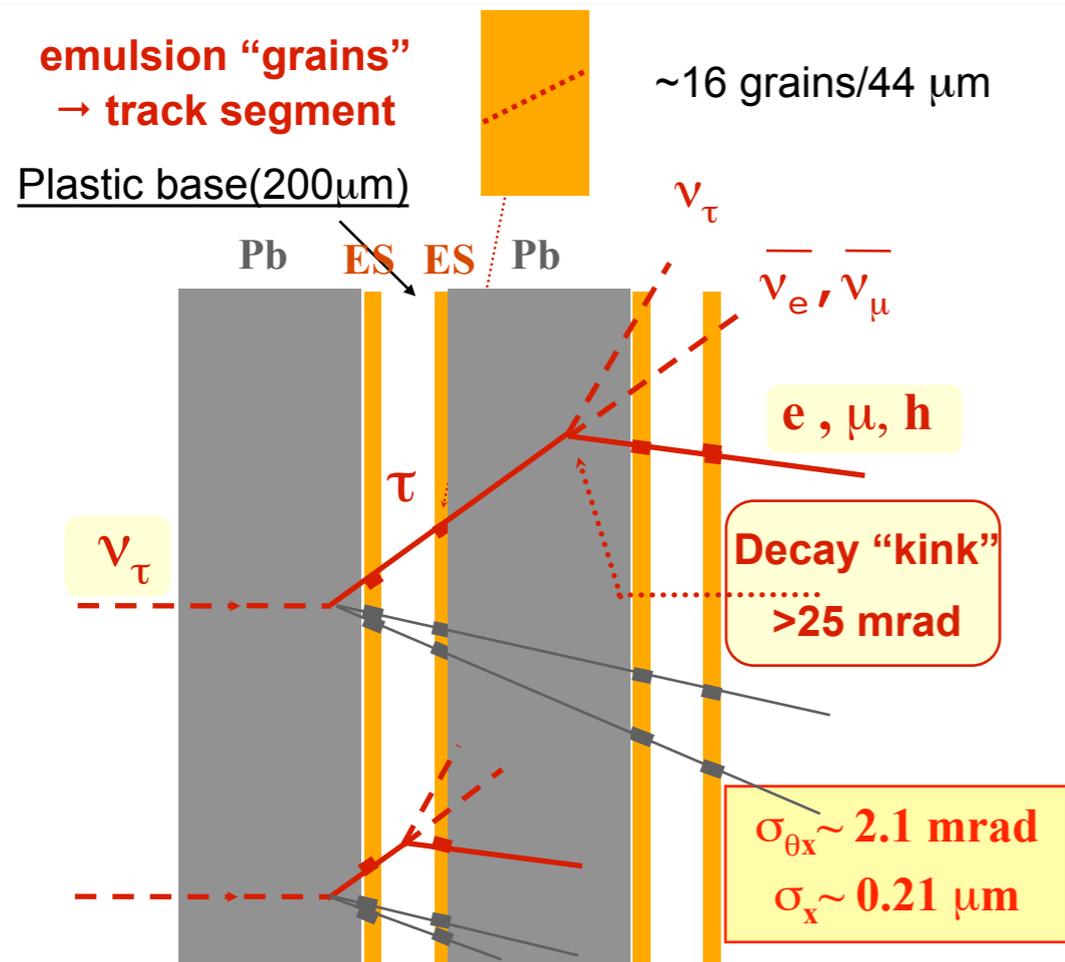


ν_{μ} \longrightarrow Oscillation \longrightarrow ν_{τ}

- Pour faire cela il fallait observer le lepton τ qui se désintègre très rapidement ($\sim 10^{-13} \text{ s}$) et qui voyage environ une centaine de μm .
- Chaque station est faite de 27 murs de briques alternés avec des plans de scintillateurs.
- La masse totale est de 1.25 kton (environ 150000 briques).

PRINCIPE DE DÉTECTION

- L'unité de base est appelée "brique", faite de feuilles de plomb et d'emulsions (films photos).
- La signature du signal est la topologie dite de "**kink decay**".
- Pour extraire la bonne brique du détecteur et pour l'identification des muon (sélection de ν_μ CC) on utilise les détecteur électroniques (scintillateurs plastiques) synchronisés en temps avec le faisceau.



Brick weight: 8.3 kg



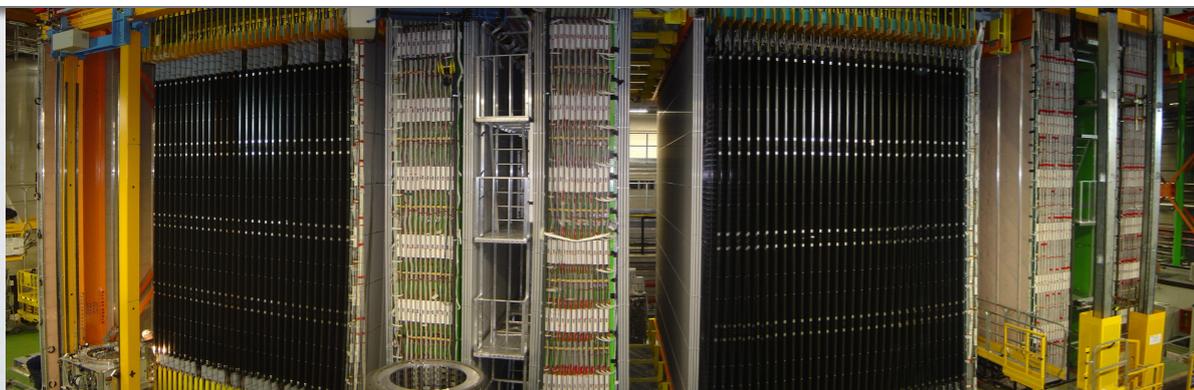
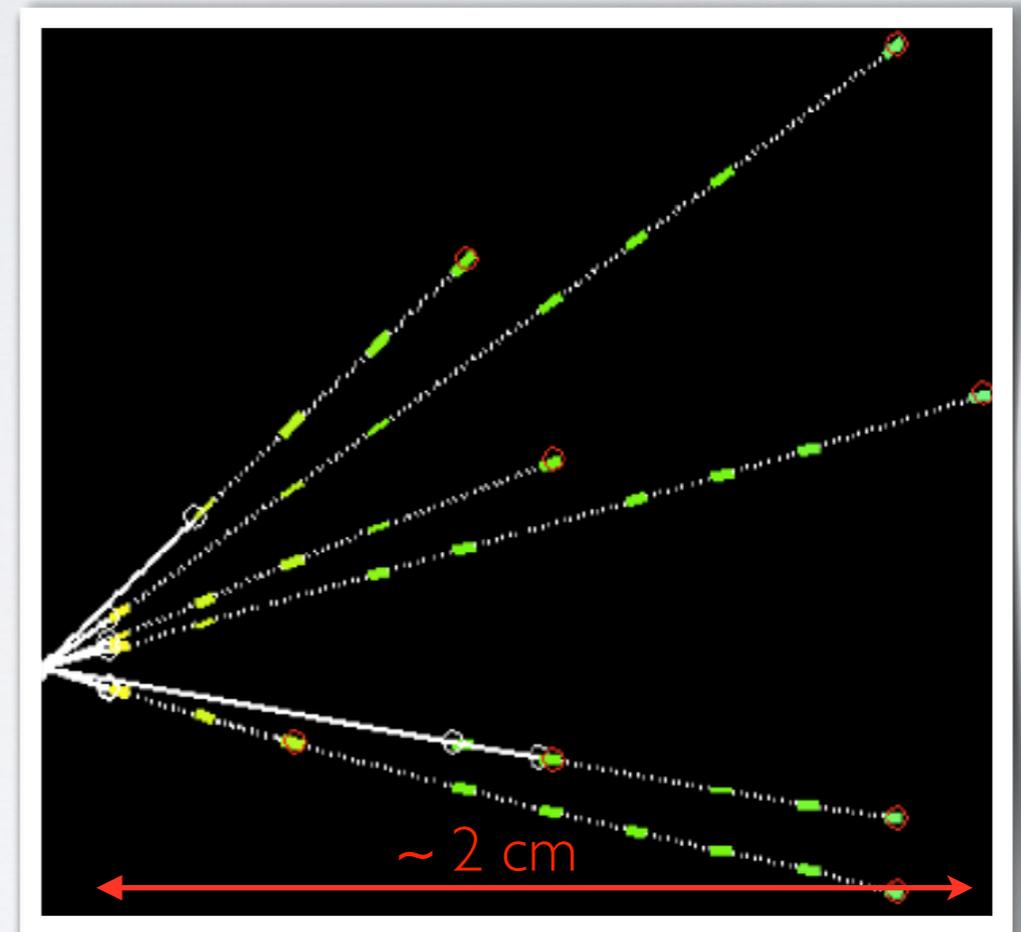
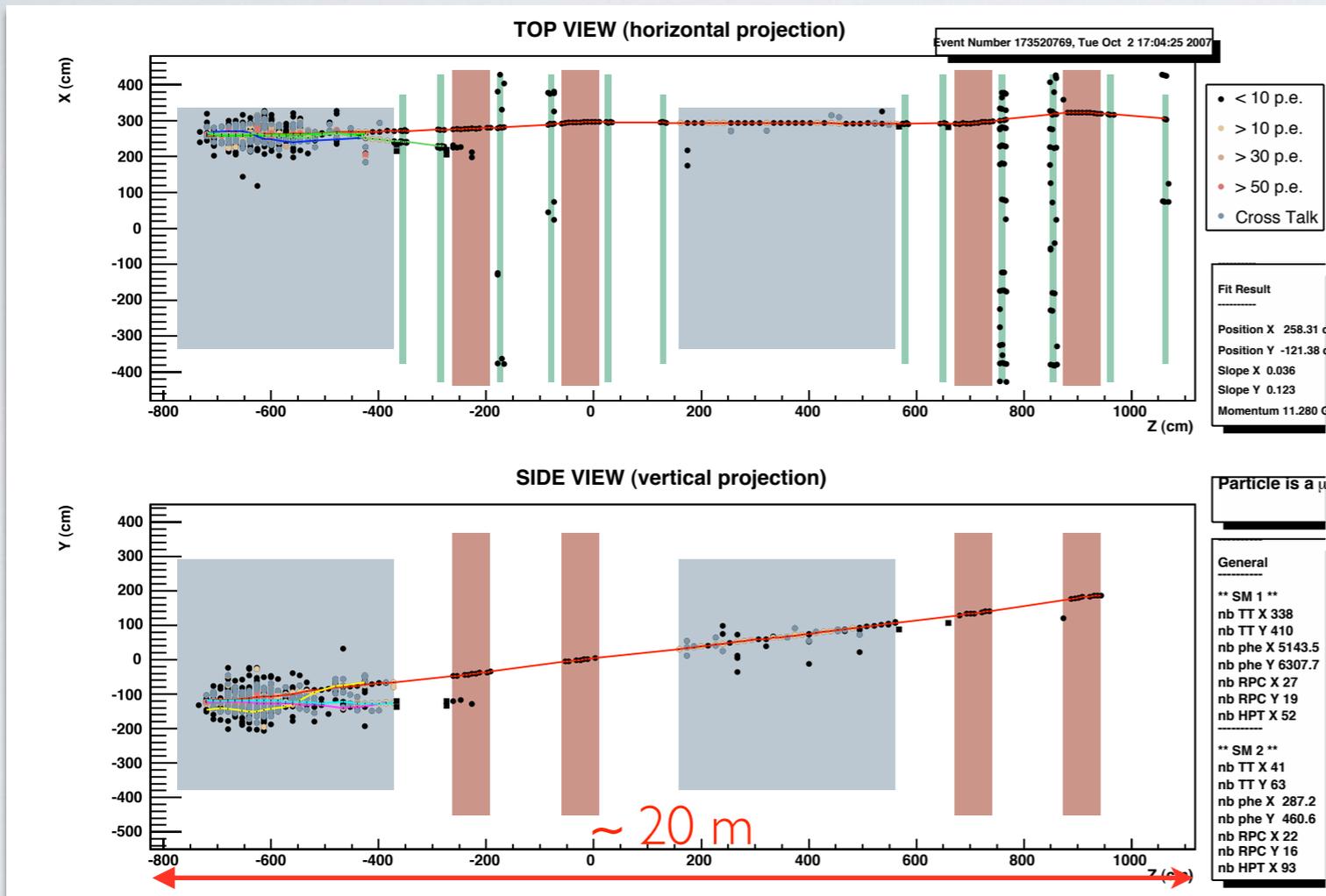
Sandwich of 56 (1mm) Pb sheets
+ 57 FUJI emulsion layers
+ 1 changeable sheet

VISUALISATION DES NEUTRINOS

ν_μ CC interaction

Reconstruction dans les détecteurs électroniques

Reconstruction dans les émulsions



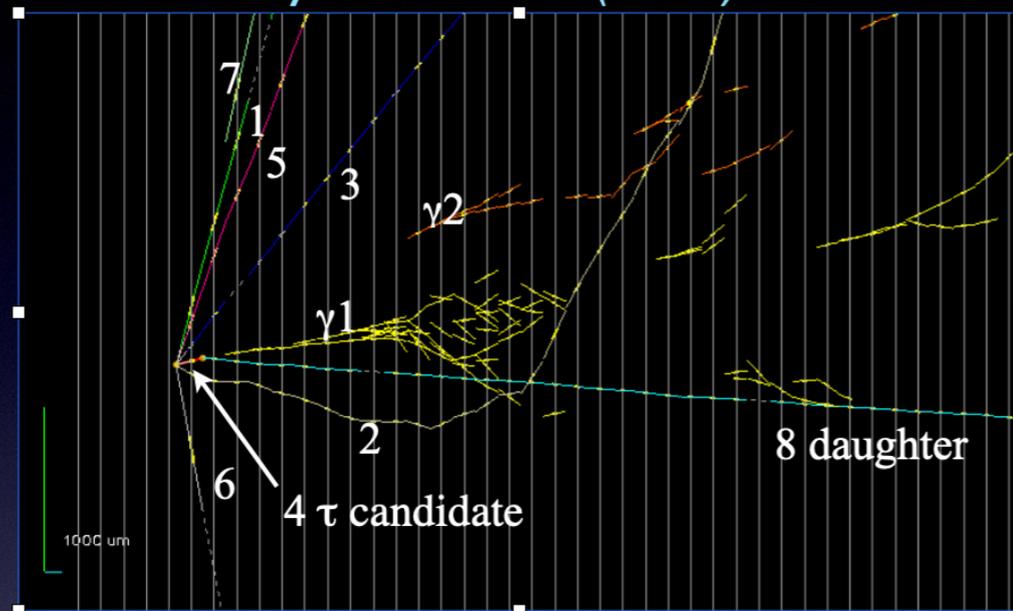
Prise de données entre 2008 et 2012 et **10 signal candidats** ont été observé (6.1 σ confidence level).

VISUALISATION DES NEUTRINOS

ν_τ CC interaction

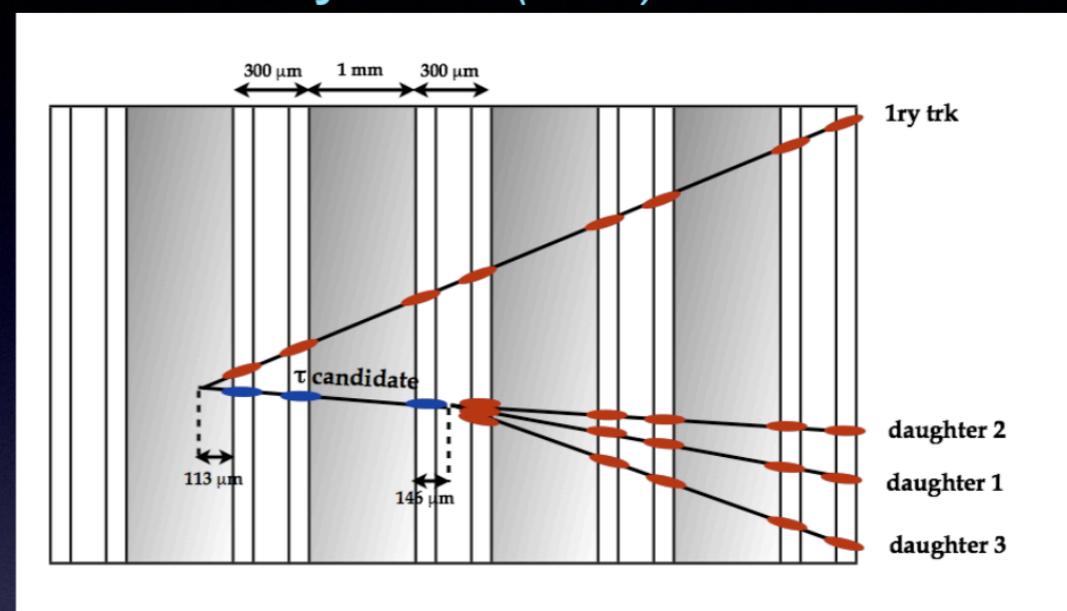
1st candidate (2010): $\tau \rightarrow \rho (\pi\pi^0)$

Phys. Lett. B 691 (2010) 138



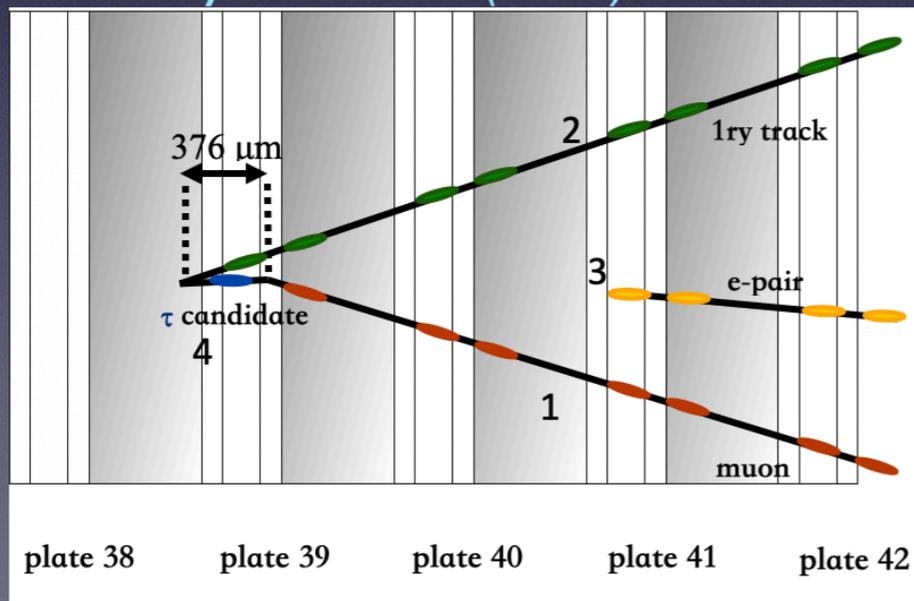
2nd candidate (2012): $\tau \rightarrow 3h$

JHEP 11 (2013) 036



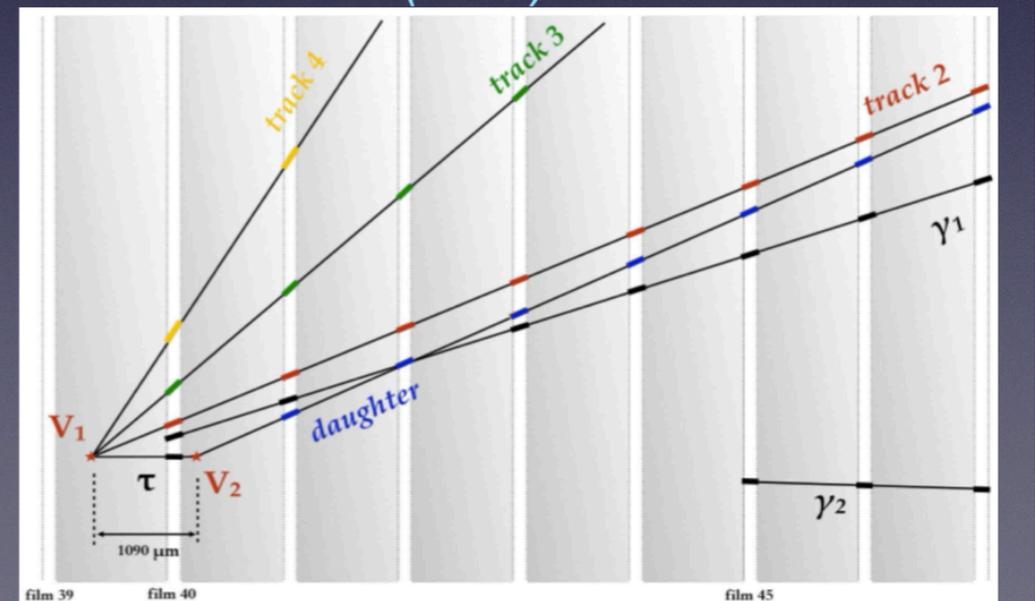
3rd candidate (2013): $\tau \rightarrow \mu$

Phys. Rev. D 89 (2014) 051102



4th candidate (2014): $\tau \rightarrow lh$

PTEP (2014) 101C01

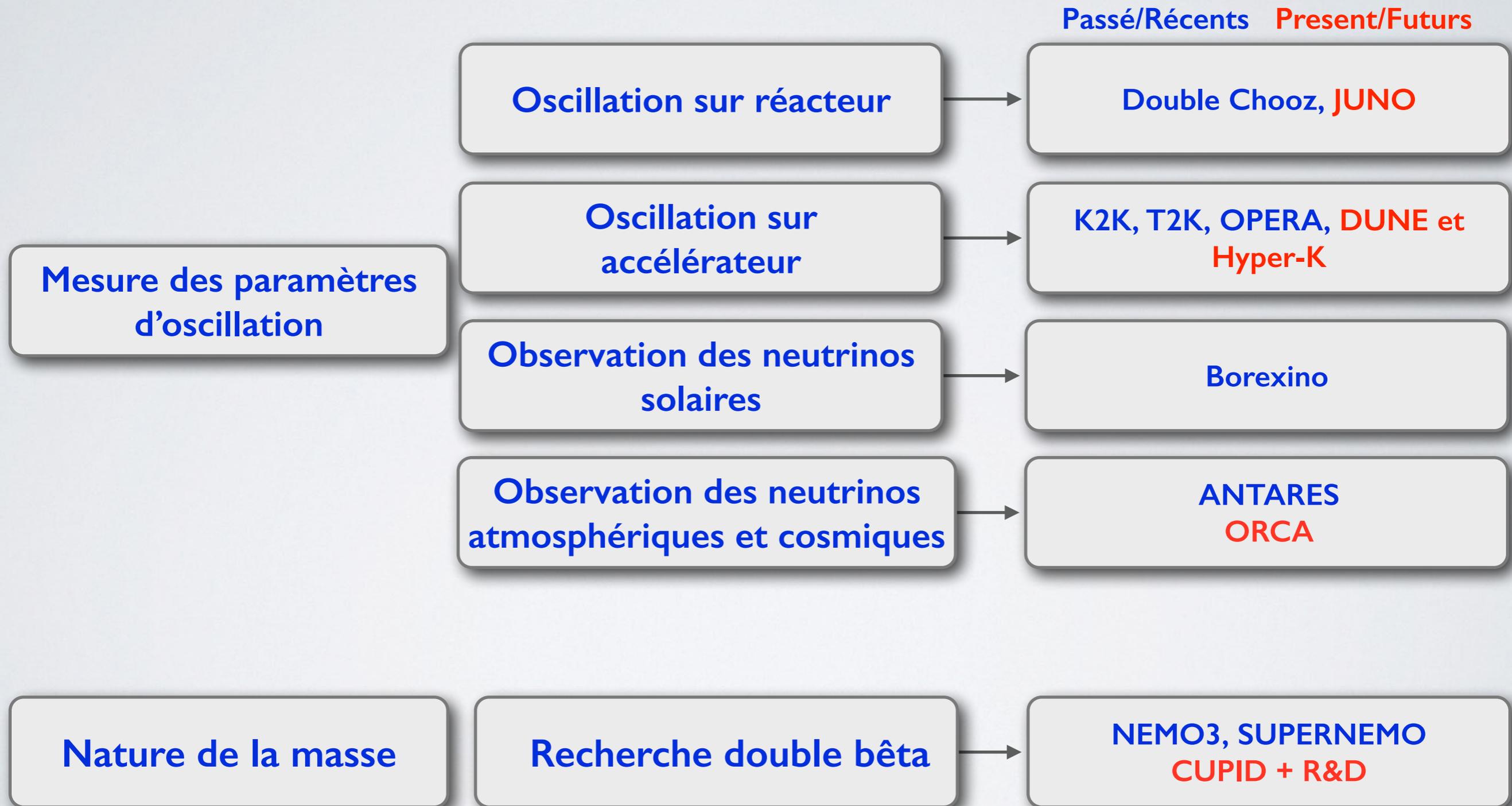


La recherche actuelle à l'IN2P3

(Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules)

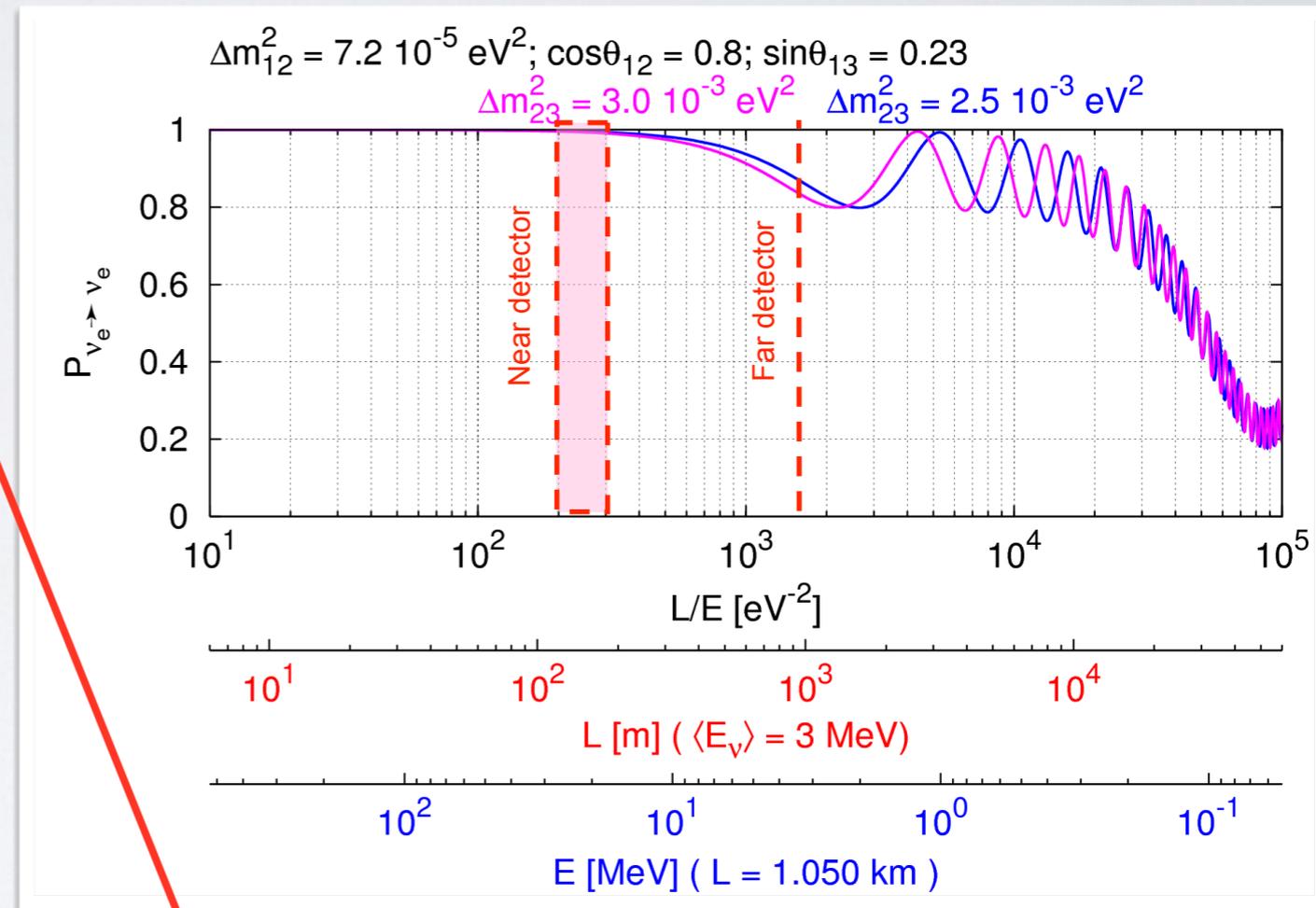
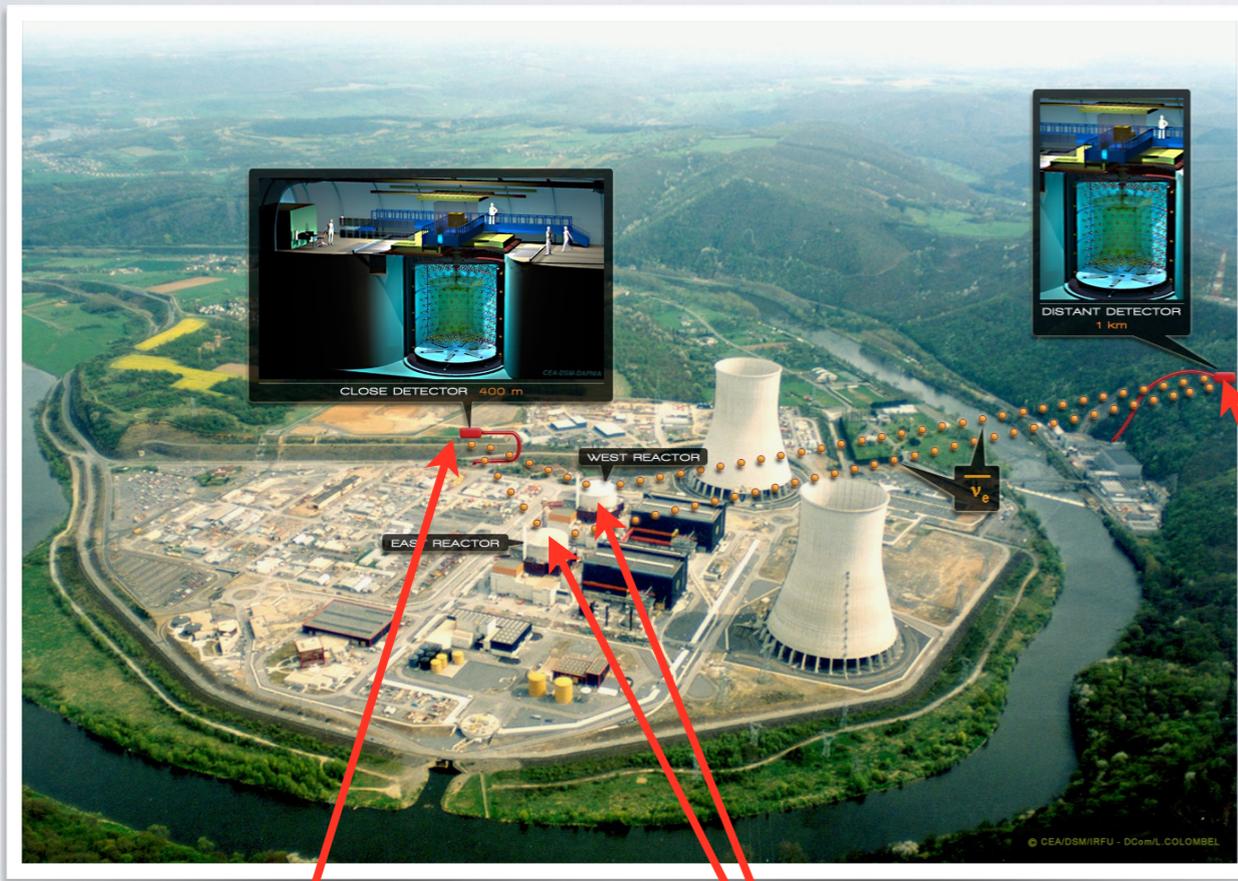
NEUTRINOS À L'IN2P3

- L'IN2P3 a toujours joué un rôle important dans les grandes collaborations qui visent à compléter notre connaissance du neutrino.



OSCILLATIONS SUR RÉACTEUR

- En observant l'oscillation des anti-neutrinos émis par les réacteurs **entre 2011 et 2018**, Double Chooz a mis en évidence un angle θ_{13} **différent de zéro**.



Détecteur proche

Distance: ~400 m

2 réacteurs

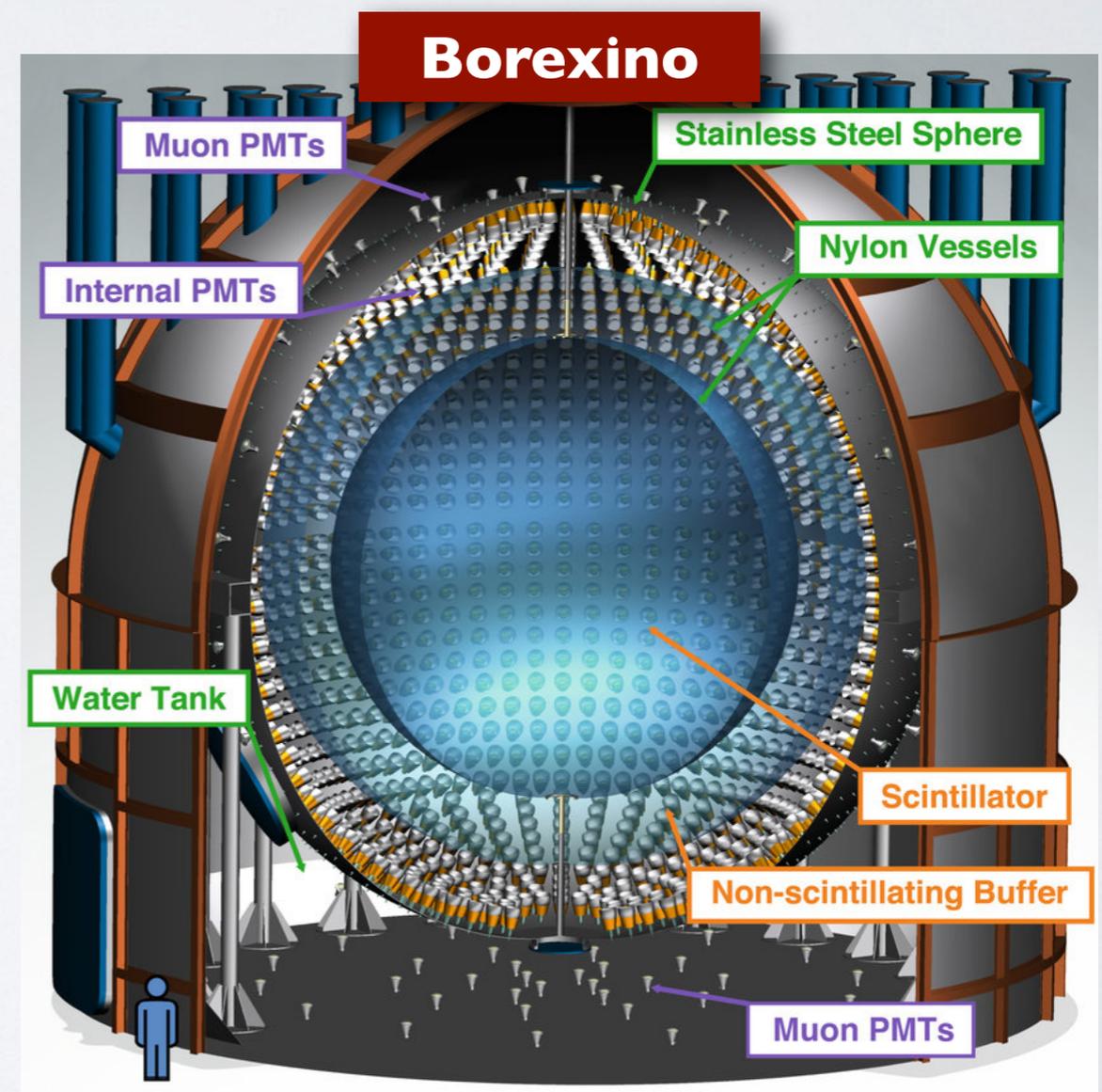
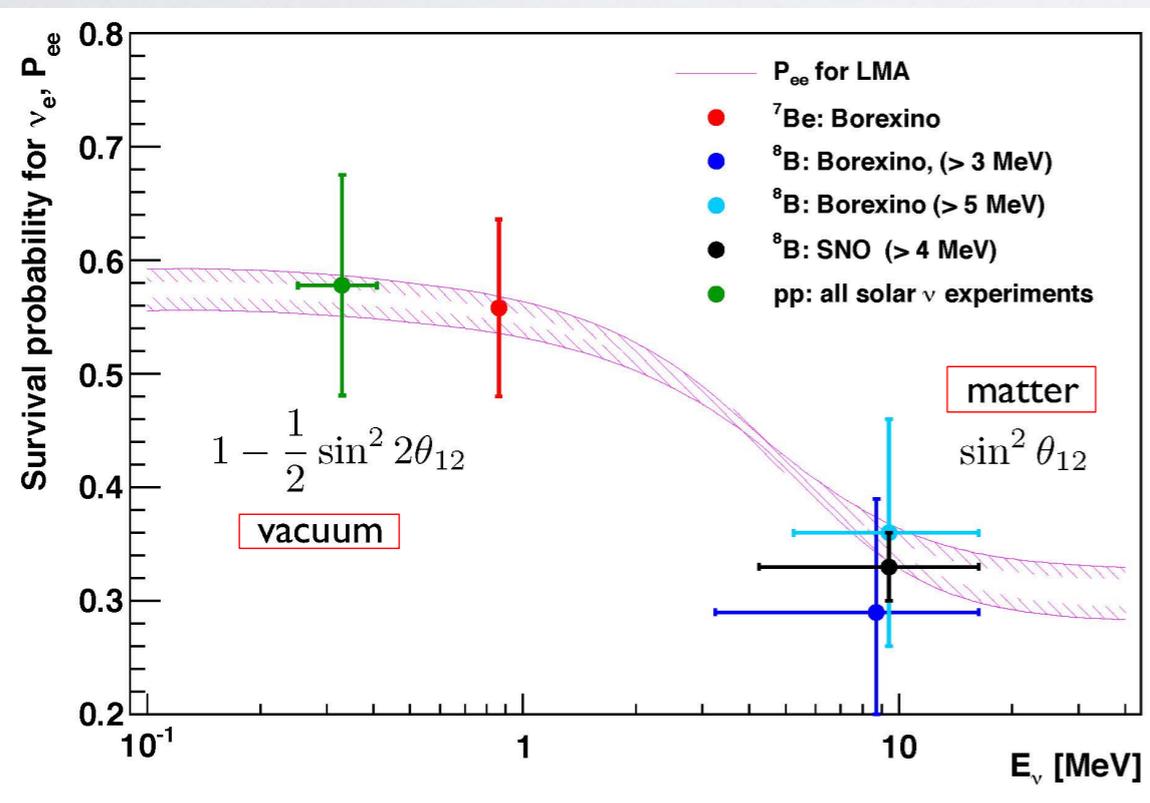
$P_{th} = 4.25 \text{ GW}$ chacun

Détecteur lointain

Distance: ~1050 m

NEUTRINOS SOLAIRES

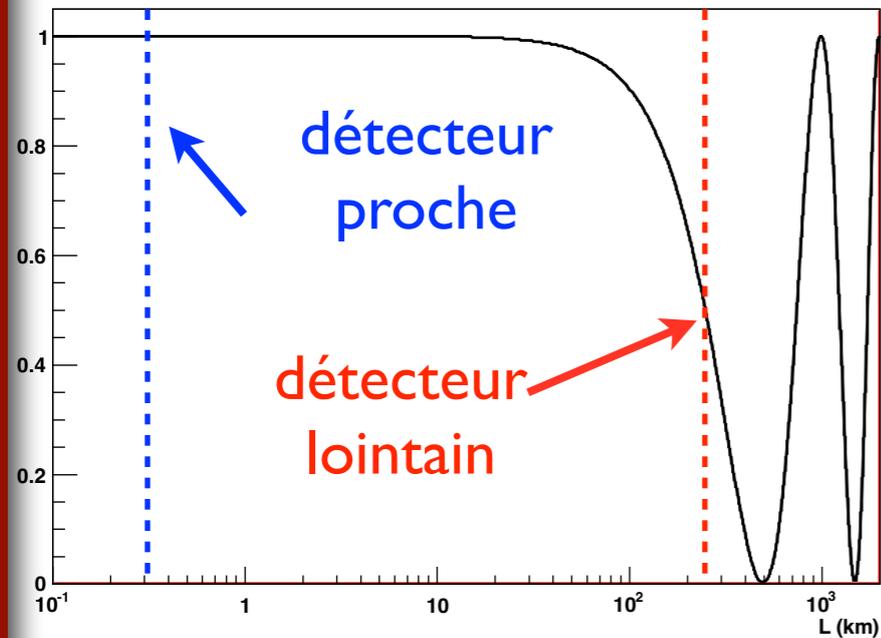
- L'observation des neutrinos solaires permet d'étudier les oscillations soumises à des effets de matière (ils traversent une partie du soleil).
- Une mesure du spectre des neutrinos permet aussi de valider notre connaissance du modèle solaire.
- Borexino a permis de tester les effets de matière et établir le signe du Δm^2 solaire.



OSCILLATIONS SUR ACCÉLÉRATEUR

- Avec un faisceau de neutrinos muoniques on peut observer la disparition des neutrinos et l'apparition d'une nouvelle saveur.

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ probability for 1 GeV neutrino with $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

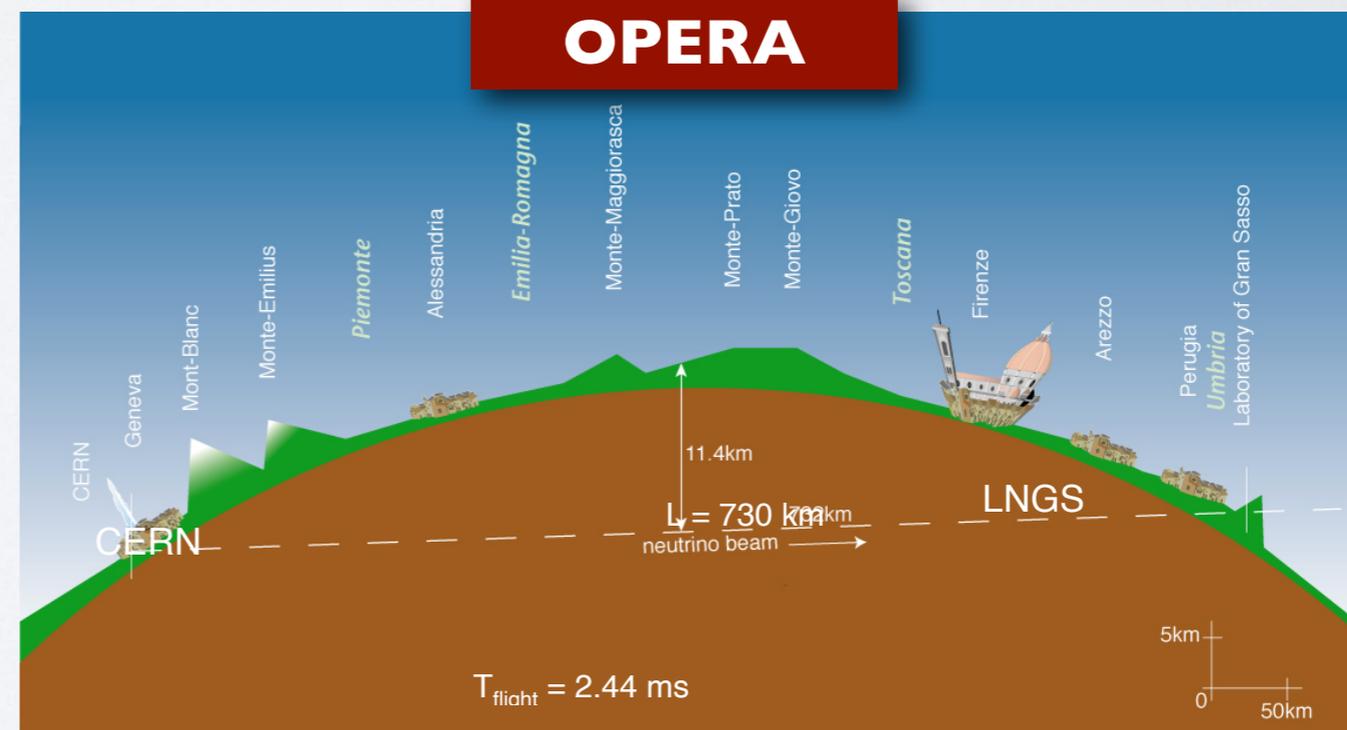


K2K - T2K



- K2K** (1999-2005) et **T2K** (depuis 2010) ont montré la transition $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ et $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ pour la mesure des paramètres atmosphériques et l'angle de mélange θ_{13} .
- OPERA** a mis en évidence la transition $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ en 2015.

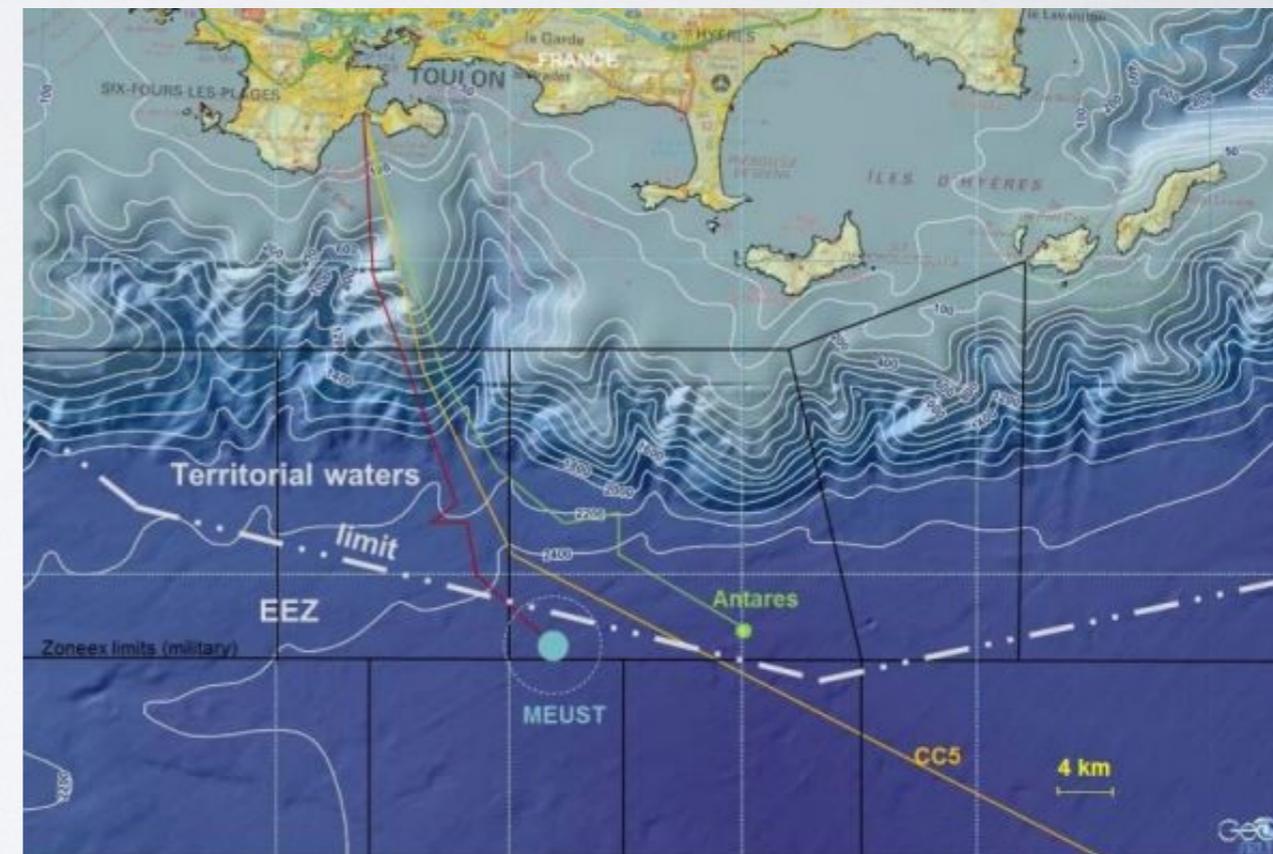
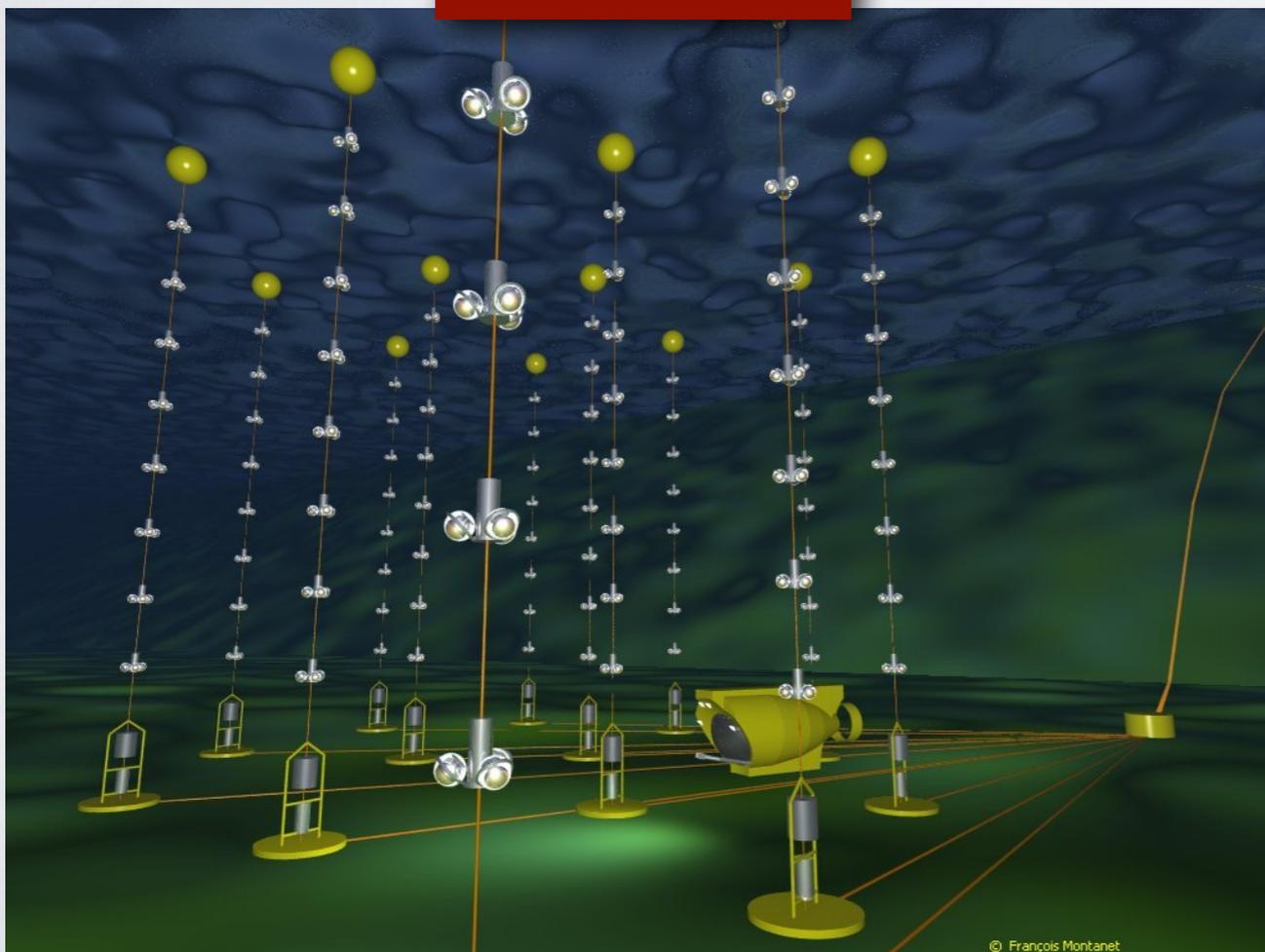
OPERA



NEUTRINOS ATMOSPHERIQUES

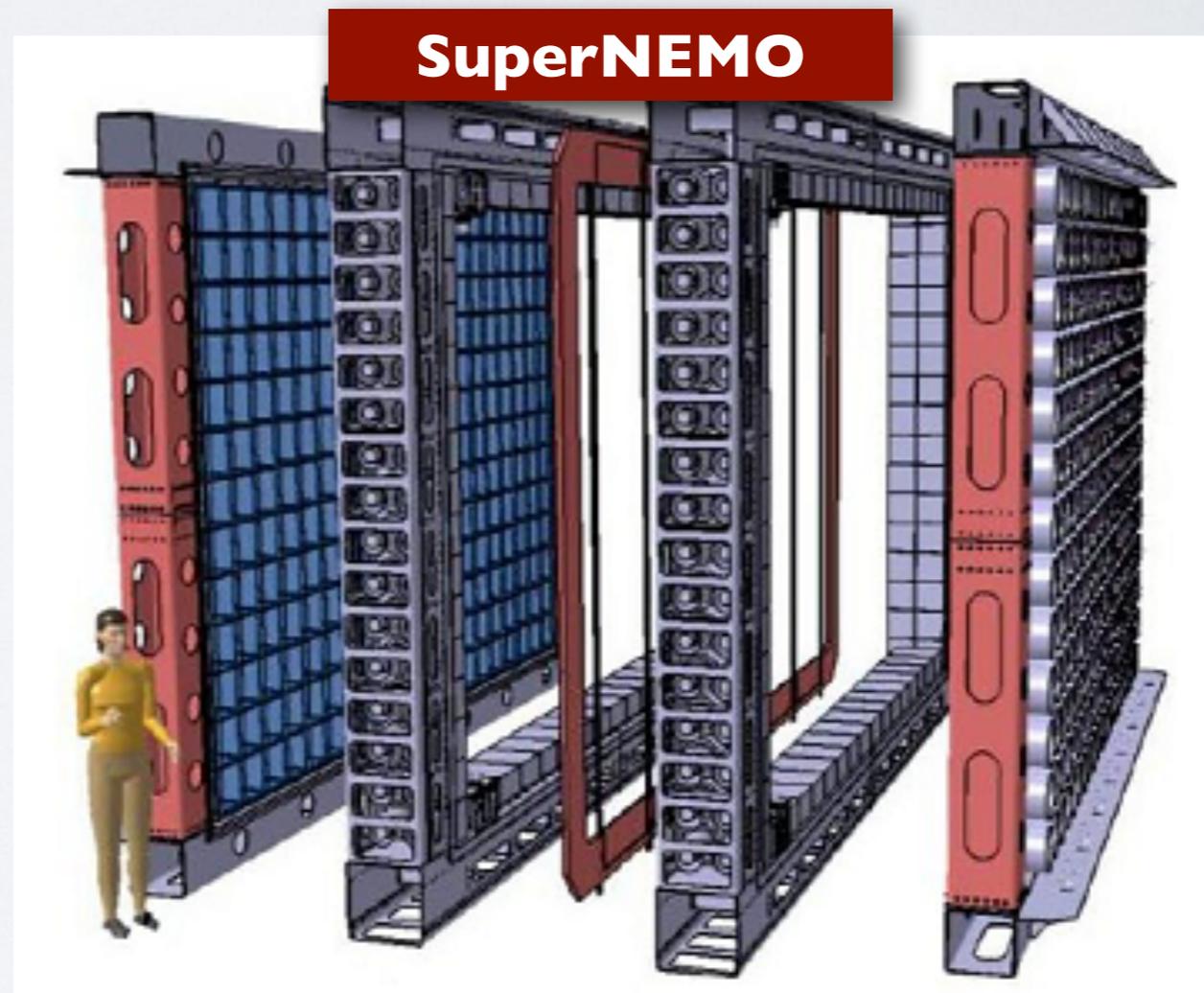
- L'observation des neutrinos de haute énergie d'origine astrophysique nous permet d'étudier l'émission dans un domaine différent du visible ou radio.
- **ANTARES** depuis 2008 constitue un "télescope" à neutrinos sous la mer.
- Une optimisation (projet **ORCA**) nous permettra de reconstruire la direction des neutrinos atmosphériques et de déterminer la hiérarchie de masse en utilisant les effets de matière.

ANTARES



DOUBLE BETA

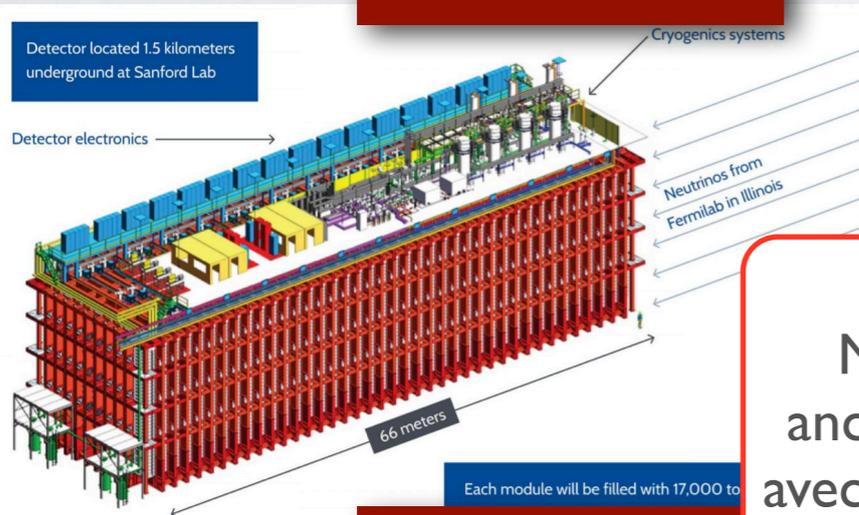
- Le projet NEMO a démarré en 1989 et après deux prototypes, **NEMO3** a démarré sa prise de données en 2003 (10 kg d'isotope) dans le laboratoire souterrain de Modane.
- La radio-pureté est extrêmement importante pour voir des processus rares : avec 200 tonnes de matériaux la radioactivité est de 1000 Bq contre 8000 Bq émis par le corp humain.
- Le projet **SuperNEMO** actuellement en cours vise à démontrer la possibilité d'utiliser cette technologie pour une détecteur de grande masse.



LE FUTUR

- L'IN2P3 a un rôle important dans les futurs projets pour la recherche de la **violation de CP**, de la **hiérarchie de masse** et la possible observation de la **décroissance double bêta sans émission des neutrinos**.
- Concernant la double bêta, une campagne de R&D est en cours et son succès pourra donner des options pour la suite.
- Concernant les longues baselines l'institut participe aux expériences DUNE et Hyper-K.
- Concernant la physique du neutrino auprès des réacteurs l'institut participe à JUNO.

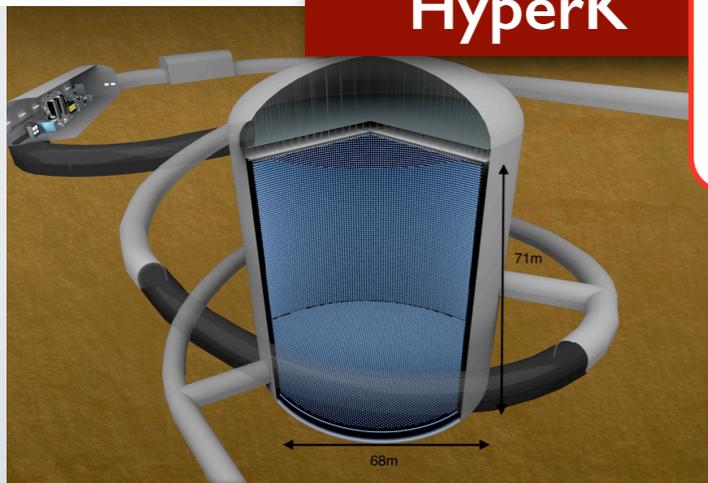
DUNE



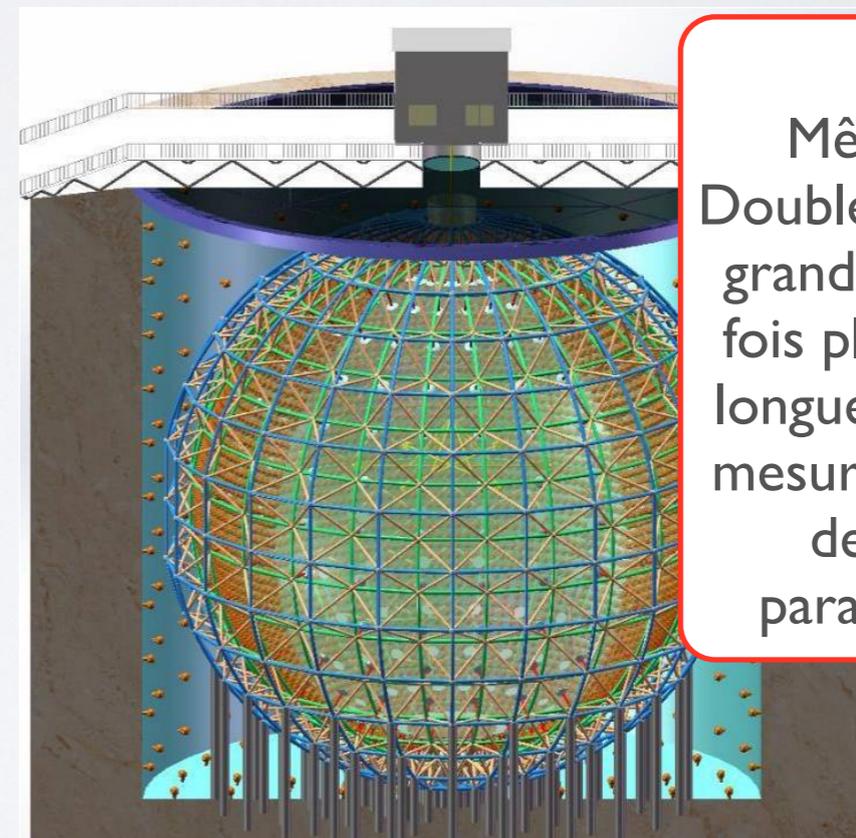
Idée

Même logique des anciennes expériences avec des détecteurs plus grands, plus performants et des faisceaux plus puissants

HyperK



JUNO



Idée

Même logique de Double Chooz mais très grand détecteur (4000 fois plus grand) et plus longue distance pour la mesure de la hiérarchie de masse et les paramètres solaires

CONCLUSION

- 90 années se sont écoulées depuis le postulat du neutrino et cette particule n'a jamais arrêtée de nous surprendre.
- Les prochains 10-20 ans pourront éclaircir son rôle dans l'évolution de l'univers en établissant la violation de CP dans le secteur leptonique.
- Cependant il est établi que le neutrino a une masse et cela nous amène déjà "au-delà du Modèle Standard".

- La physique des neutrinos implique des infrastructures complexes (laboratoires souterrains et faisceaux) et des détecteurs de grande taille.
- La communauté s'est regroupée sur des projets communs décidés à l'échelle mondiale.

Cette présentation est une introduction rapide et non exhaustive de la physique du neutrino et vous entendrez sans doute parler encore de cette petite particule pleine de surprises...