



LES NEUTRINOS

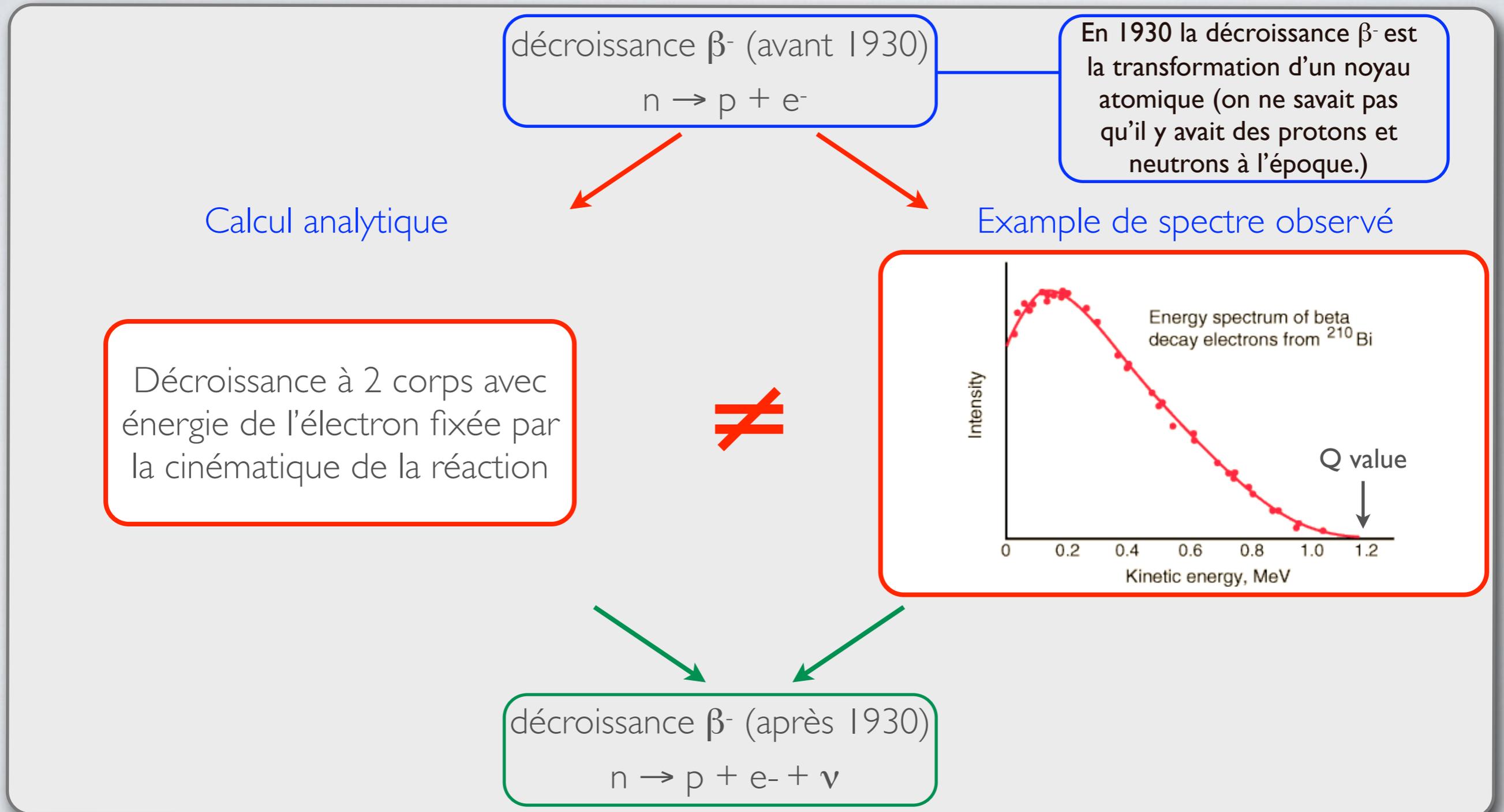
A.Meregaglia (CENBG)

Physique et détecteurs à la frontière - 22 juin 2021

Qu'est-ce qu'un neutrino

QU'EST CE QU'UN NEUTRINO

- Le neutrino est une particule fondamentale “**inventée**” par Pauli en **1930** pour conserver l'énergie dans les décroissances β^- .

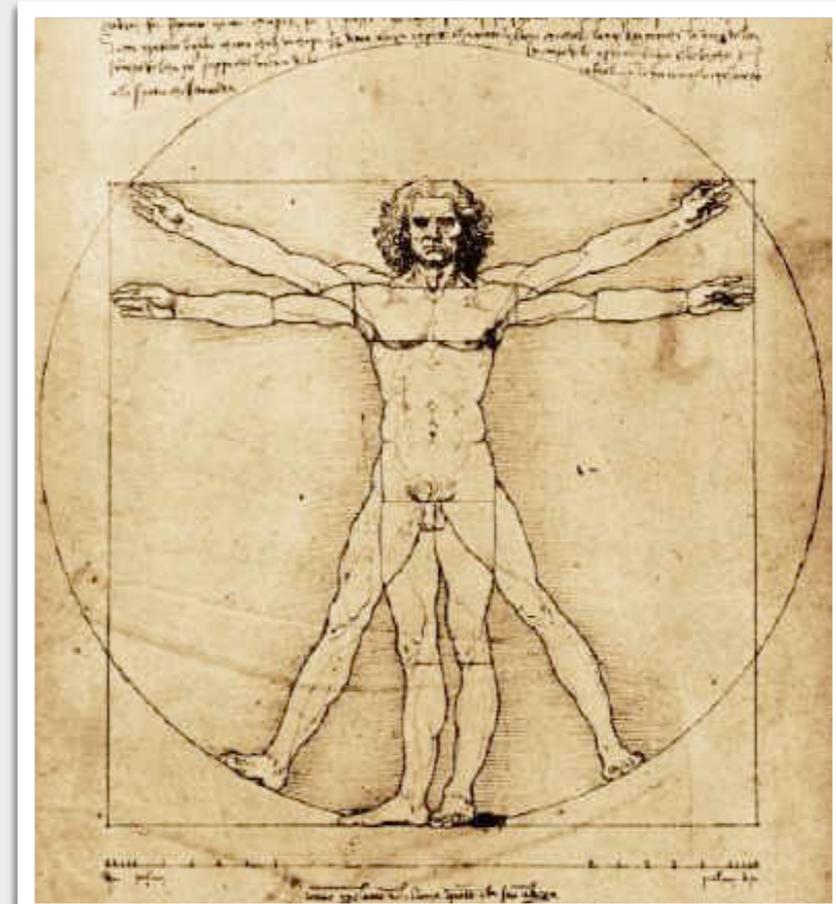


QU'EST CE QU'UN NEUTRINO

- Le neutrino est une particule fondamentale “**inventée**” par Pauli en **1930** pour conserver l'énergie dans les décroissances β .
- Le neutrino est **observé** par Cowan and Reines en **1956**.

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 détecter des neutrinos il faut une grande masse!

QU'EST CE QU'UN NEUTRINO

- Le neutrino est une particule fondamentale “**inventée**” par Pauli en **1930** pour conserver l'énergie dans les décroissances β .
- Le neutrino est **observé** par Cowan and Reines en **1956**.
- En **1962** on découvre que le neutrino existe en **différentes saveurs**.
- En **2000** le dernier neutrino (ν_τ) prévu dans le modèle standard est observé.
- Cette particule est pleine de surprises et on observe en 1998 ses **oscillations**.
- Les neutrinos sont introduits avec masse nulle dans le modèle standard, mais la découverte des oscillations démontre que leur masse n'est pas zéro. C'est une première indication de **physique au-delà du modèle standard**.

Three Generations of Matter (Fermions)

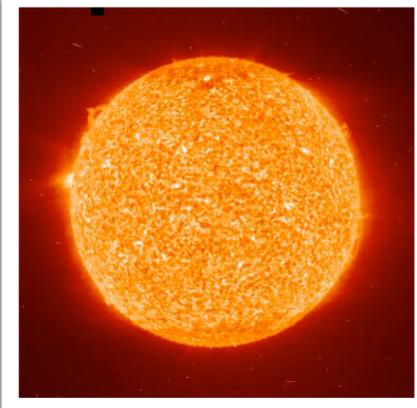
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<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
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

Les oscillation ne donnent pas d'indications sur la masse absolue des neutrinos ni sur son origine (Dirac Vs Majorana). Détails sur ce sujet dans la présentation de A.Giuliani

OU TROUVE T'ON LES NEUTRINOS?

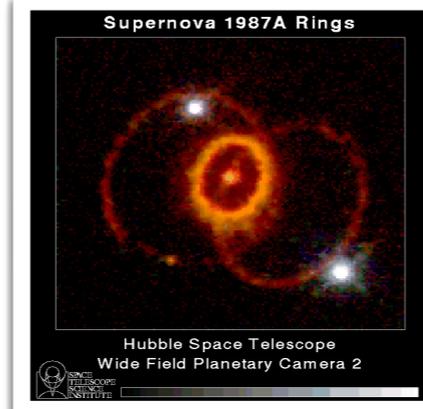
- Il existe de nombreuses sources de neutrinos que l'on peut diviser en **naturelles** (soleil, radioactivité naturelle, etc.) et **artificielles** (accélérateurs et réacteurs).



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



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



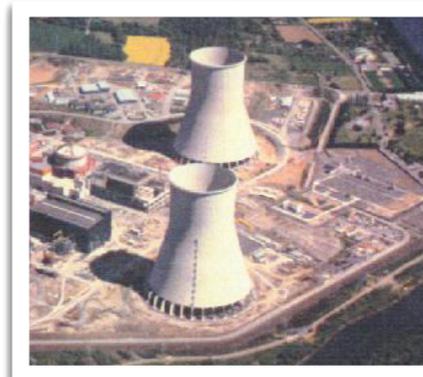
Supernova ν



Big Bang ν
 $(330 \nu cm^{-3})$



Accelerator ν

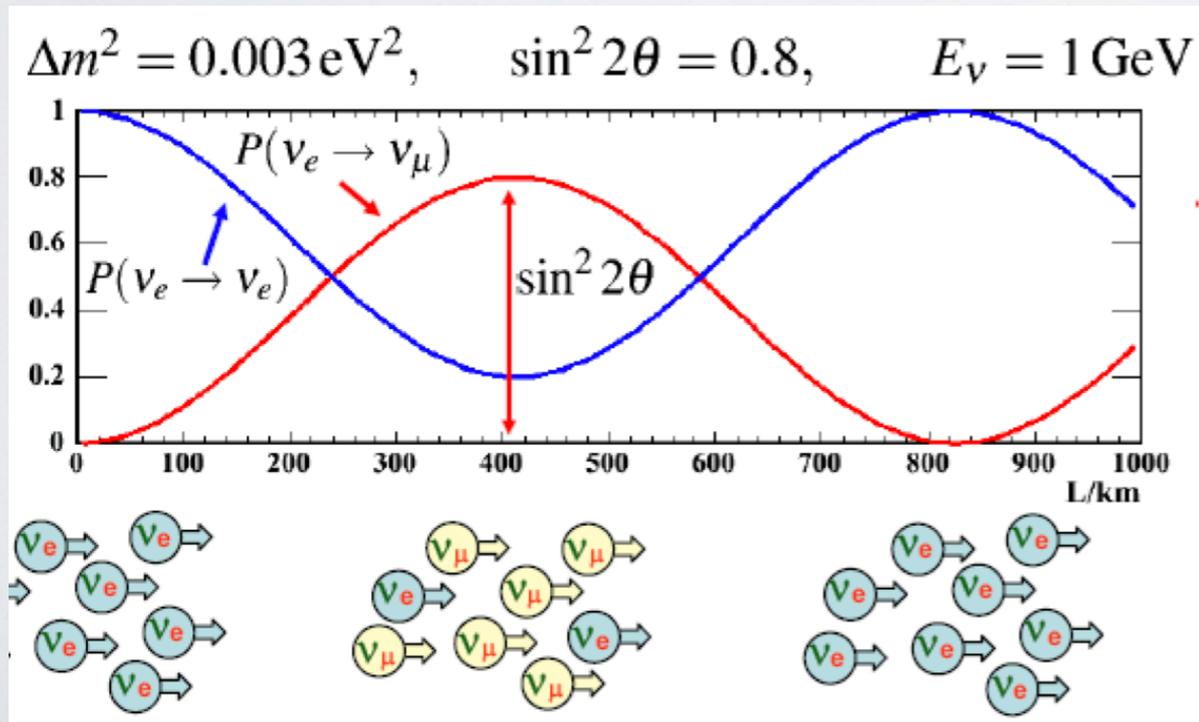


Reactor ν
 $10^{21} \nu s^{-1}$
produits

Les oscillations des neutrinos en
quelques mots...

OSCILLATION EN DEUX MOTS

- SNO et SK ont montré que les neutrinos oscillent (**prix Nobel de physique décerné à T. Kajita et à A. McDonald en 2015.**).
- 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)

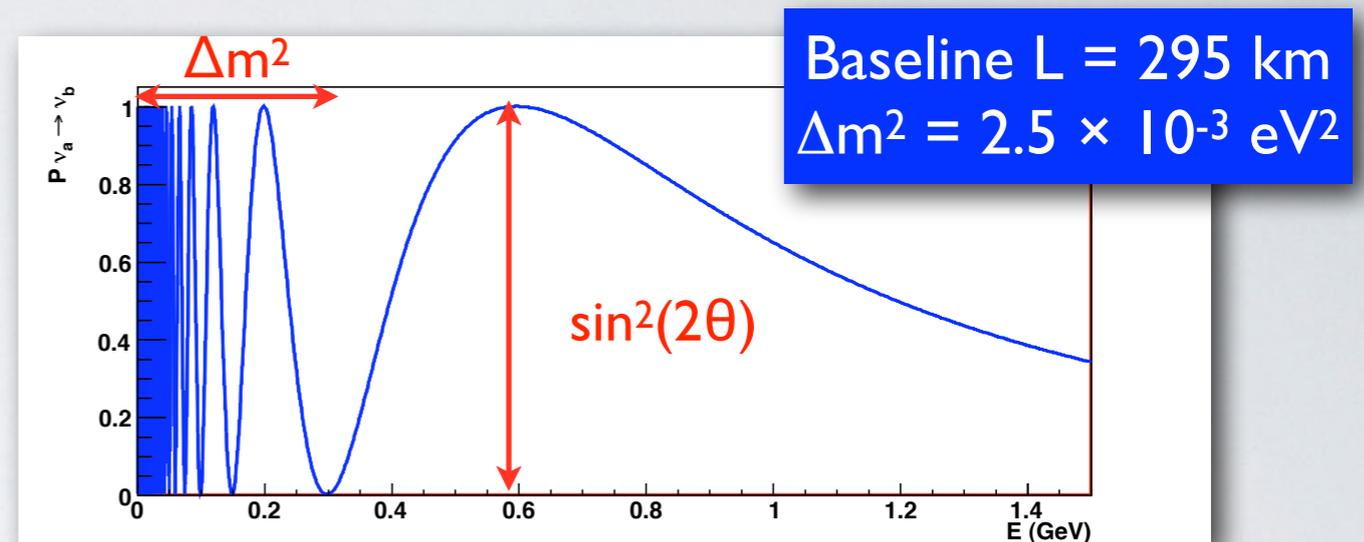


STATUS

- Avec l'observation de l'oscillation on peut déterminer les paramètres de la matrice (3 angles de mélange et 1 phase) et la différence de masse des neutrinos 1, 2 et 3.

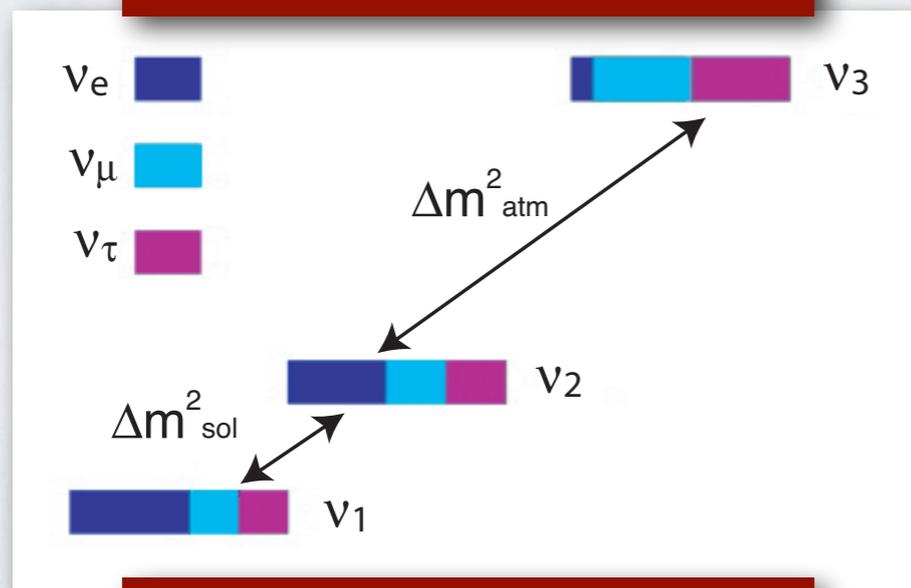
Probabilité à deux saveurs

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E}\right)$$



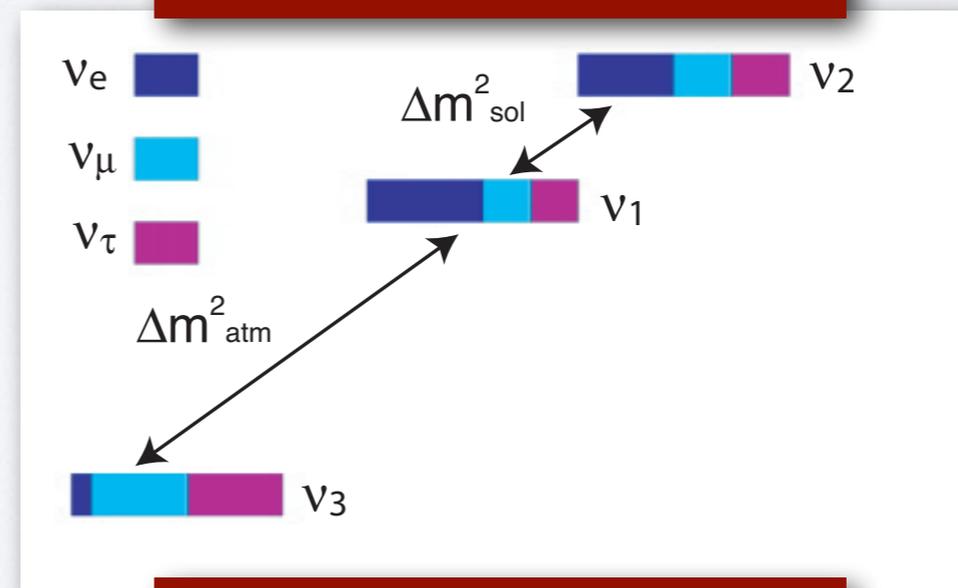
- Ce qui compte dans la probabilité d'oscillation c'est la différence de masse au carré et non pas la masse absolue. Pour connaître le "signe" il faut donc mesurer les "distorsions" de la probabilité d'oscillation dans la matière (effet MSW pas discuté ici).

Hiérarchie Normale



$$\Delta m_{31}^2 > 0$$

Hiérarchie Inversée



$$\Delta m_{31}^2 < 0$$

STATUS

- 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)?

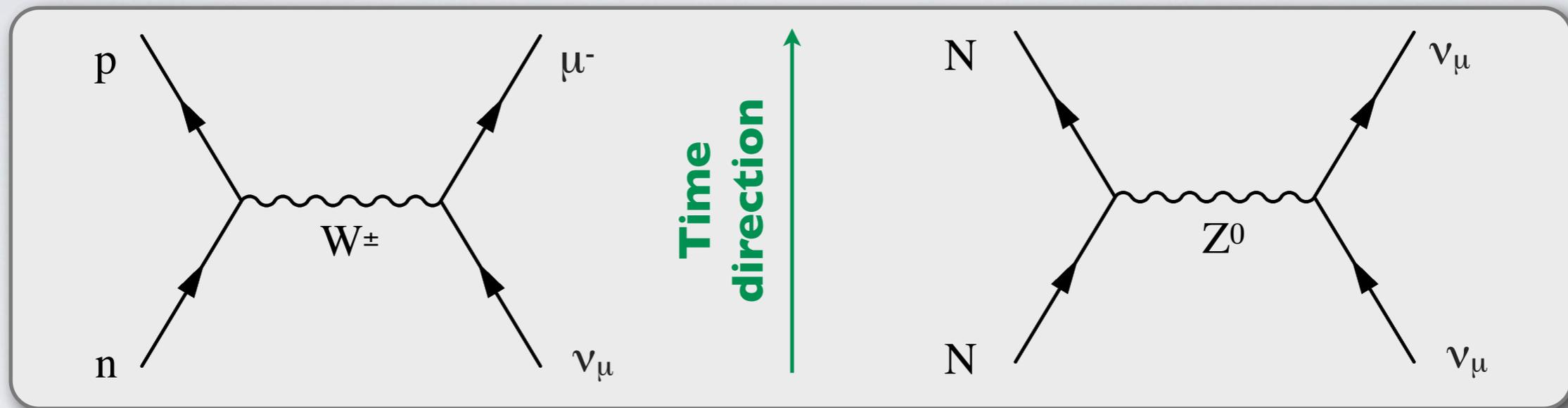


Si c'est le cas la probabilité d'oscillation de neutrinos et anti-neutrinos serait différente et cela aiderait à expliquer la différente concentration de matière et d'anti-matière dans l'univers

Comment voit-on un neutrino?

COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

- Les neutrinos sont sensibles uniquement à l'interaction faible.
- On peut donc avoir l'échange d'un boson **W** (courant chargé) ou **Z** (courant neutre).



- L'interaction est décrite via des variables cinématiques:

4-momentum transféré →

Masse invariante hadronique →

Energie transféré →

$$Q^2 = 4E_\nu E_\mu \sin^2(\theta/2)$$

$$W^2 + Q^2 = 2M\nu + M^2$$

$$\nu = E_{had} - M = E_\nu - E_\mu$$

Angle entre neutrino incident et lepton sortant

Masse du nucleon

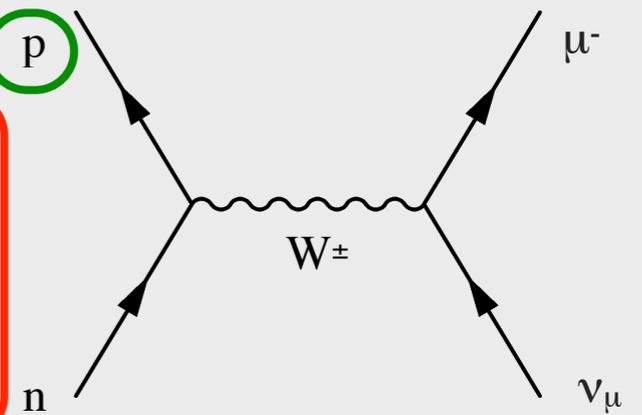
COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

- Les interactions peuvent être classées en quasi-élastique (**QE**) et deep-inélastique (**DIS**). Le régime intermédiaire est décrit par les interactions dites résonance (**RES**).
- Cette classification a un impact important sur ce que nous pouvons observer donc sur la détection du neutrino.

La masse invariante correspond environ à la masse du nucléon:
 $W \approx M$

QE

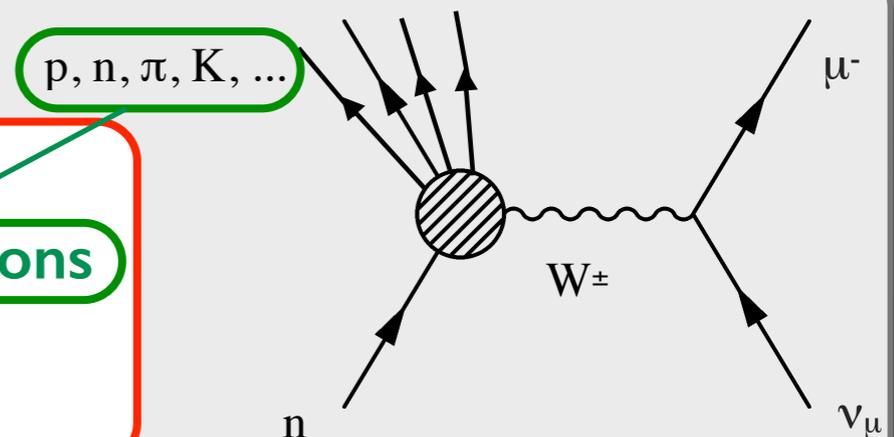
“collision soft”: **seulement un nucléon** est émis avec le lepton (avant ré-interactions nucléaires)



La masse invariante est plus grande que la masse du nucléon:
 $W \gg M$

DIS

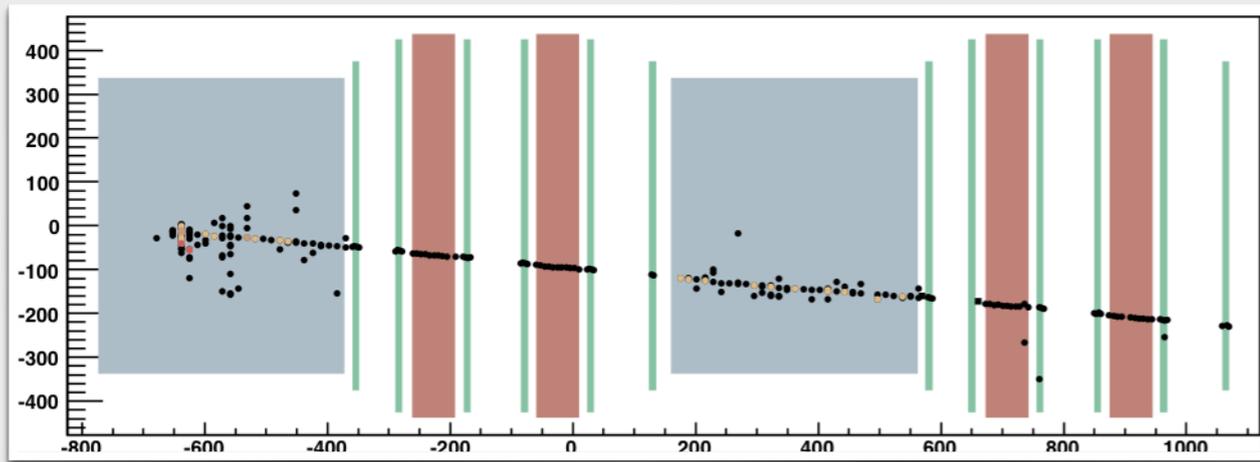
“collision hard” **plusieurs hadrons** sont émis



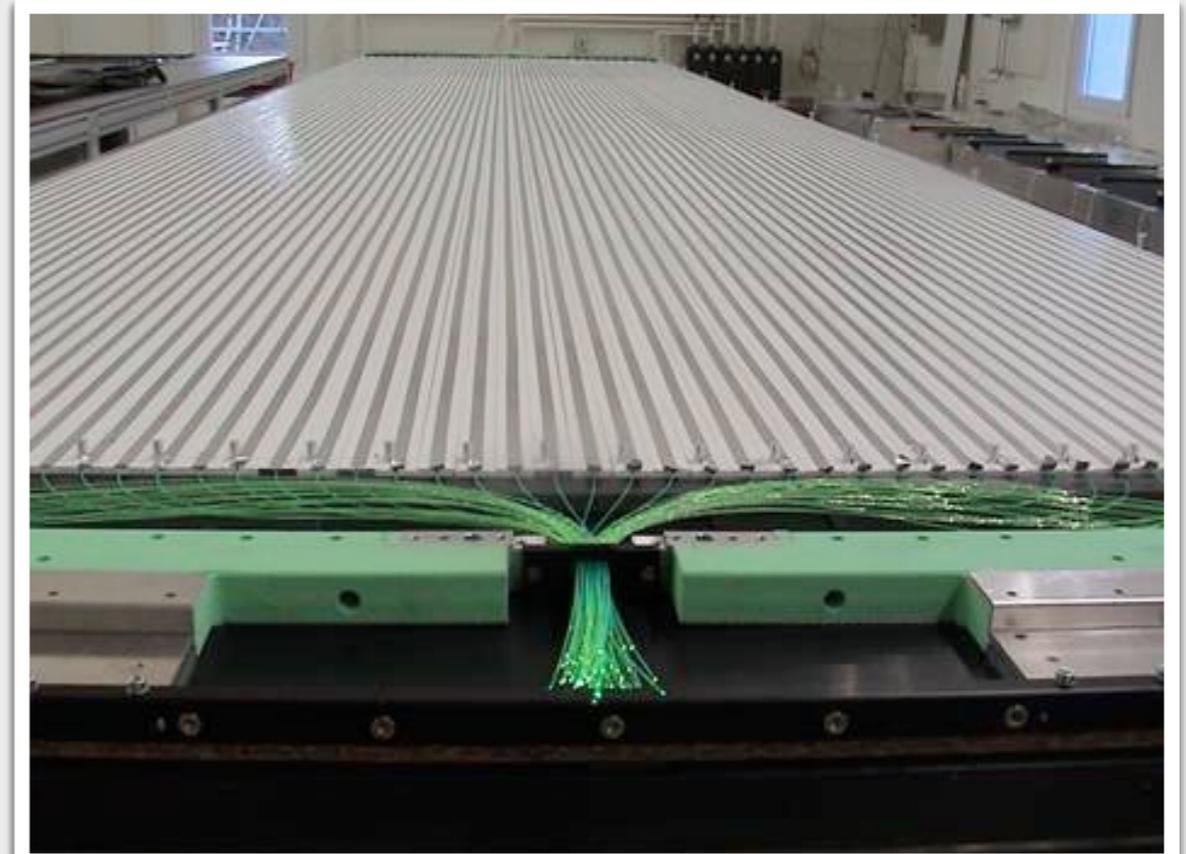
COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

- Les neutrino peuvent être observés seulement en regardant les produits de leurs réactions.
- Pour les événements **NC** le **nucleon/shower hadronique** peut être observé. Pour les événements **CC** le **lepton** et le **nucleon/shower hadronique** peuvent être observés.
- La **résolution, seuil et type de mesure dépendent du détecteur et de la technologie utilisée.**

ν_{μ} CC in electronics detectors of OPERA



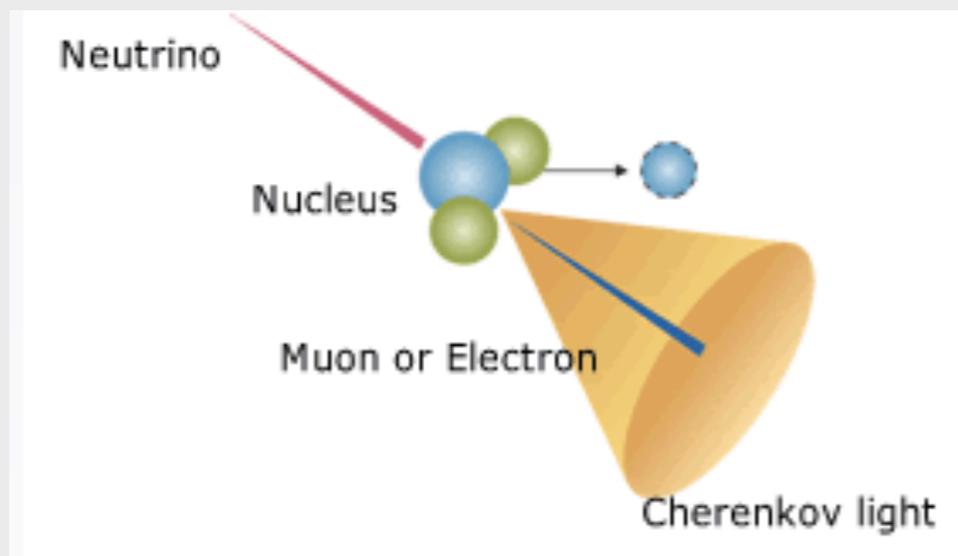
Barreaux de scintillateurs plastiques.
Chaque point est un barreau ou une
énergie supérieure au seuil (1/3 p.e.)
enregistrée



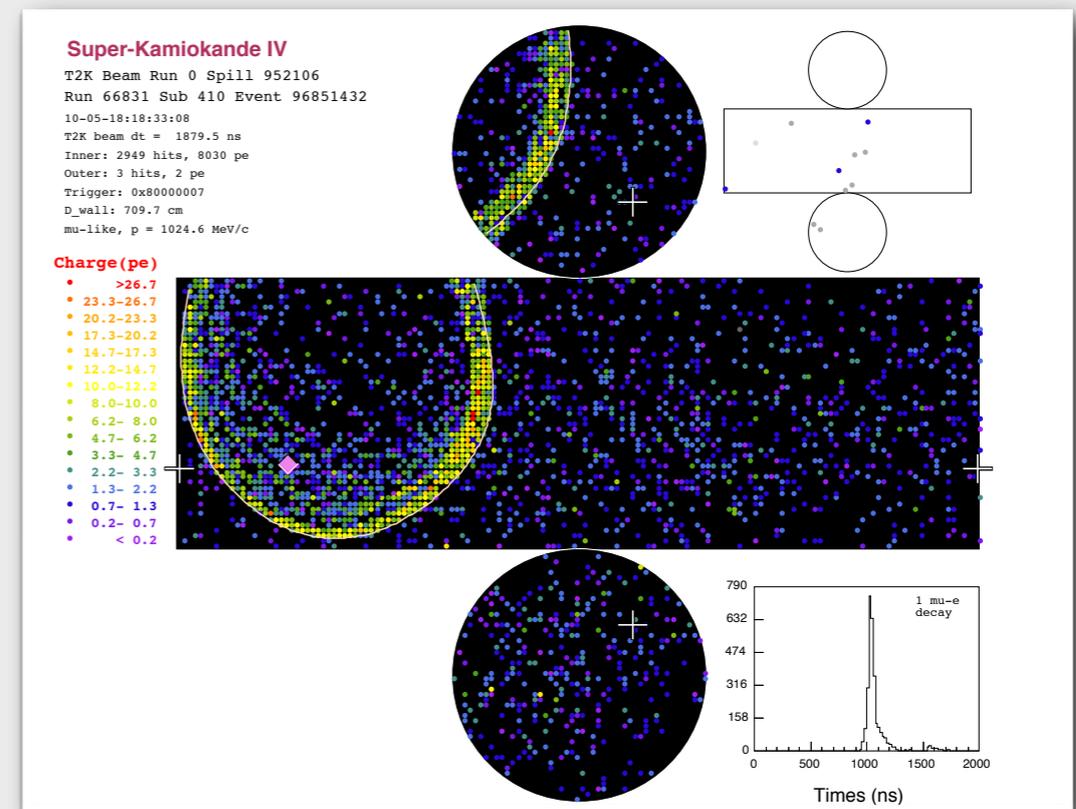
COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

- Les neutrino peuvent être observés seulement en regardant les produits de leurs réactions.
- Pour les événements **NC** le **nucleon/shower hadronique** peut être observé. Pour les événements **CC** le **lepton** et le **nucleon/shower hadronique** peuvent être observés.
- La **résolution, seuil et type de mesure dépendent du détecteur et de la technologie utilisée.**

ν_{μ} CC in SK



Les seuils dependent de la particule:
pour un proton il est de 1.4 GeV donc
typiquement on ne voit pas le proton dans
une interaction CC (160 MeV pour un
muon et 0.8 MeV pour un electron).

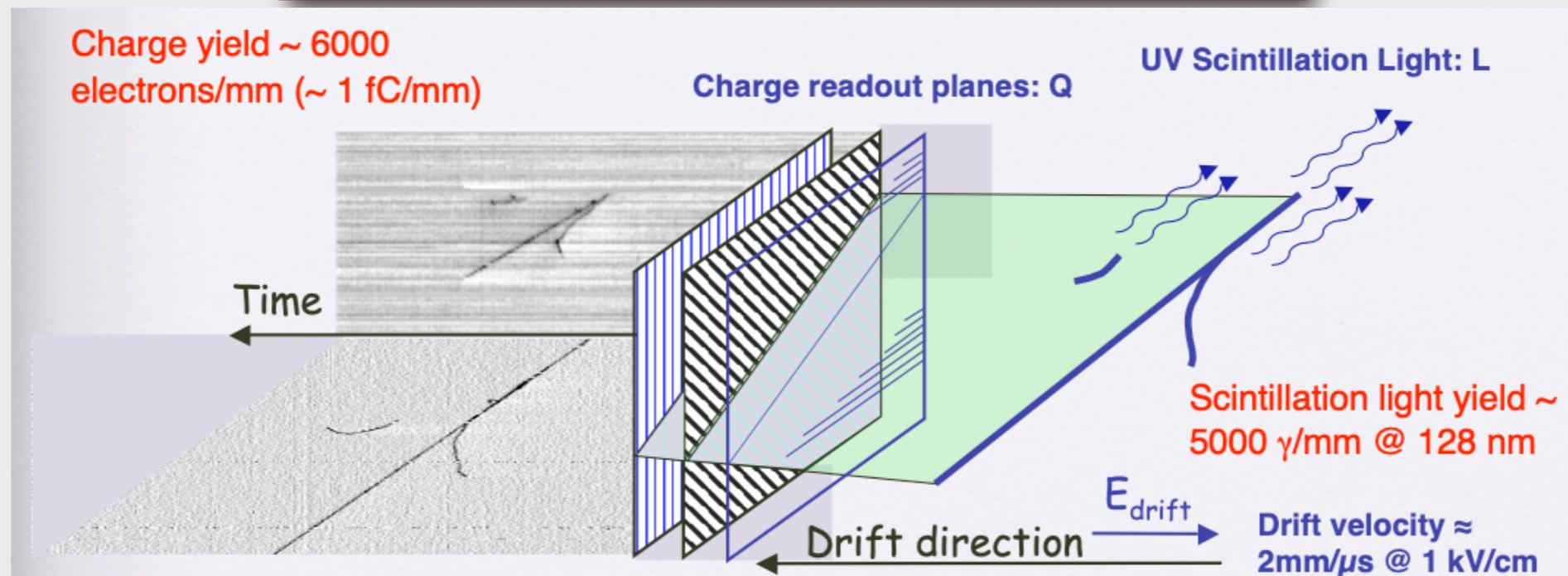


Anneau du muon dans SK.

COMMENT VOIT-ON UN NEUTRINO?

- Les neutrino peuvent être observés seulement en regardant les produits de leurs réactions.
- Pour les événements **NC** le **nucleon/shower hadronique** peut être observé. Pour les événements **CC** le **lepton** et le **nucleon/shower hadronique** peuvent être observés.
- La **résolution, seuil et type de mesure dépendent du détecteur et de la technologie utilisée.**

ν_μ CC in LAr TPC

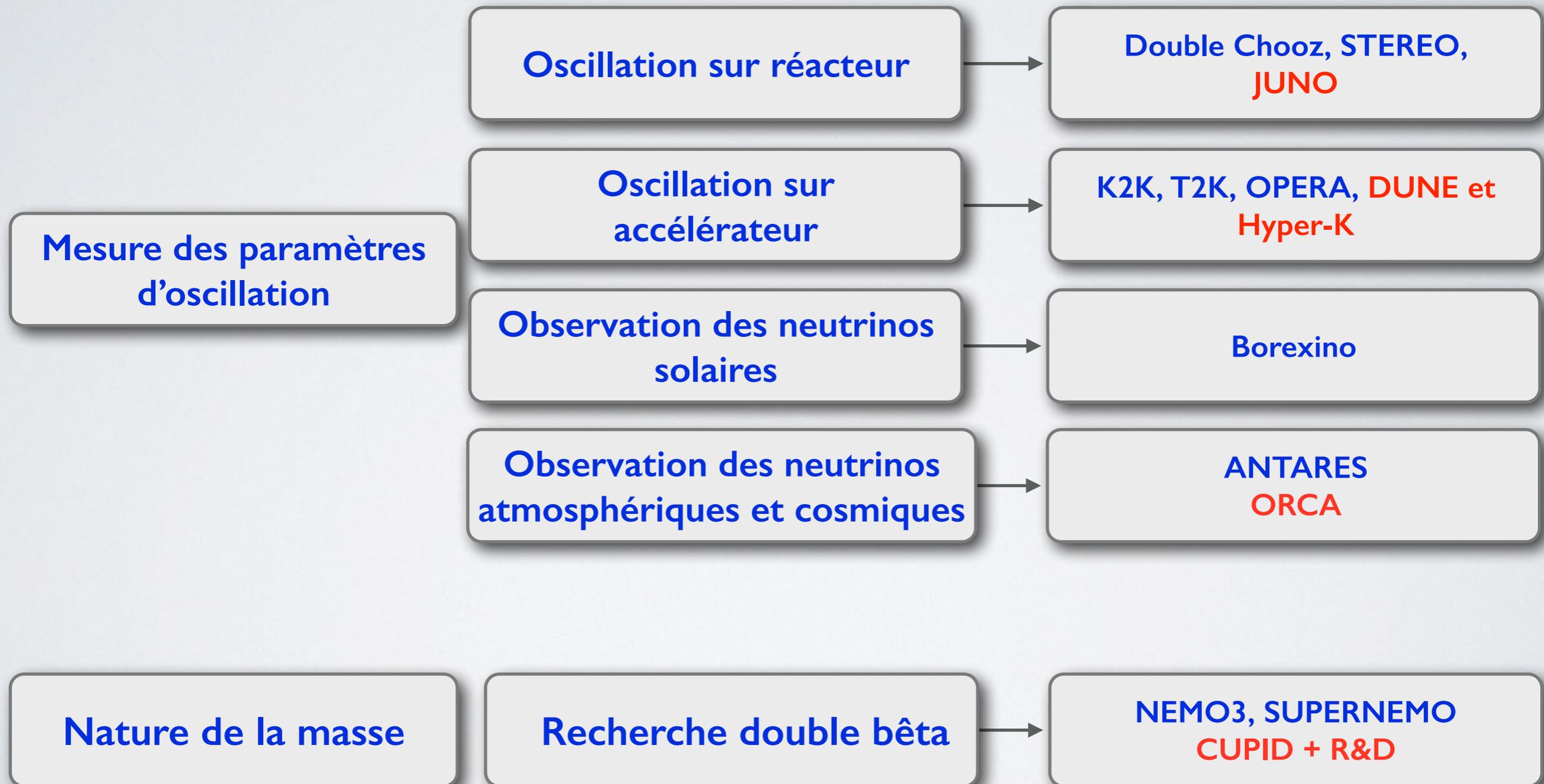


Trace du proton et muon dans une interaction CC

La recherche actuelle à l'IN2P3 et
les développements technologiques

NEUTRINO A L'IN2P3

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

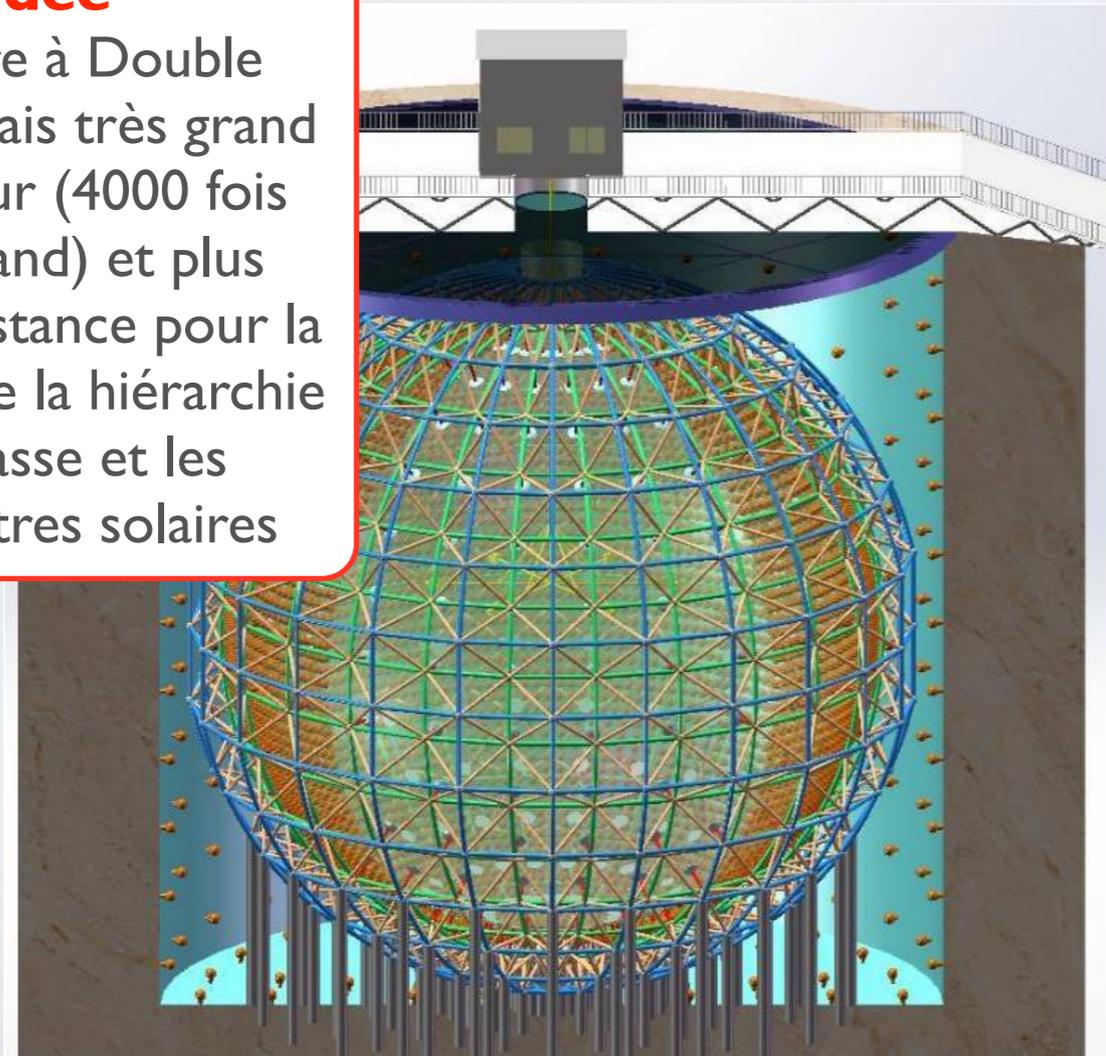


JUNO (PHOTODETECTION)

- Le futur détecteur JUNO, a une distance de 53 km des réacteurs nucléaires, vise à déterminer la hiérarchie de masse et à mesurer les paramètres d'oscillation solaire avec une précision meilleure que 1%.
- JUNO sera le plus grand détecteur scintillateur liquide jamais construit: 20 kton de scintillateur, 40 mètres de diamètre, 17612 20'' PMTs et 25600 3'' PMTs pour une photo-coverage de >75%.

Idée

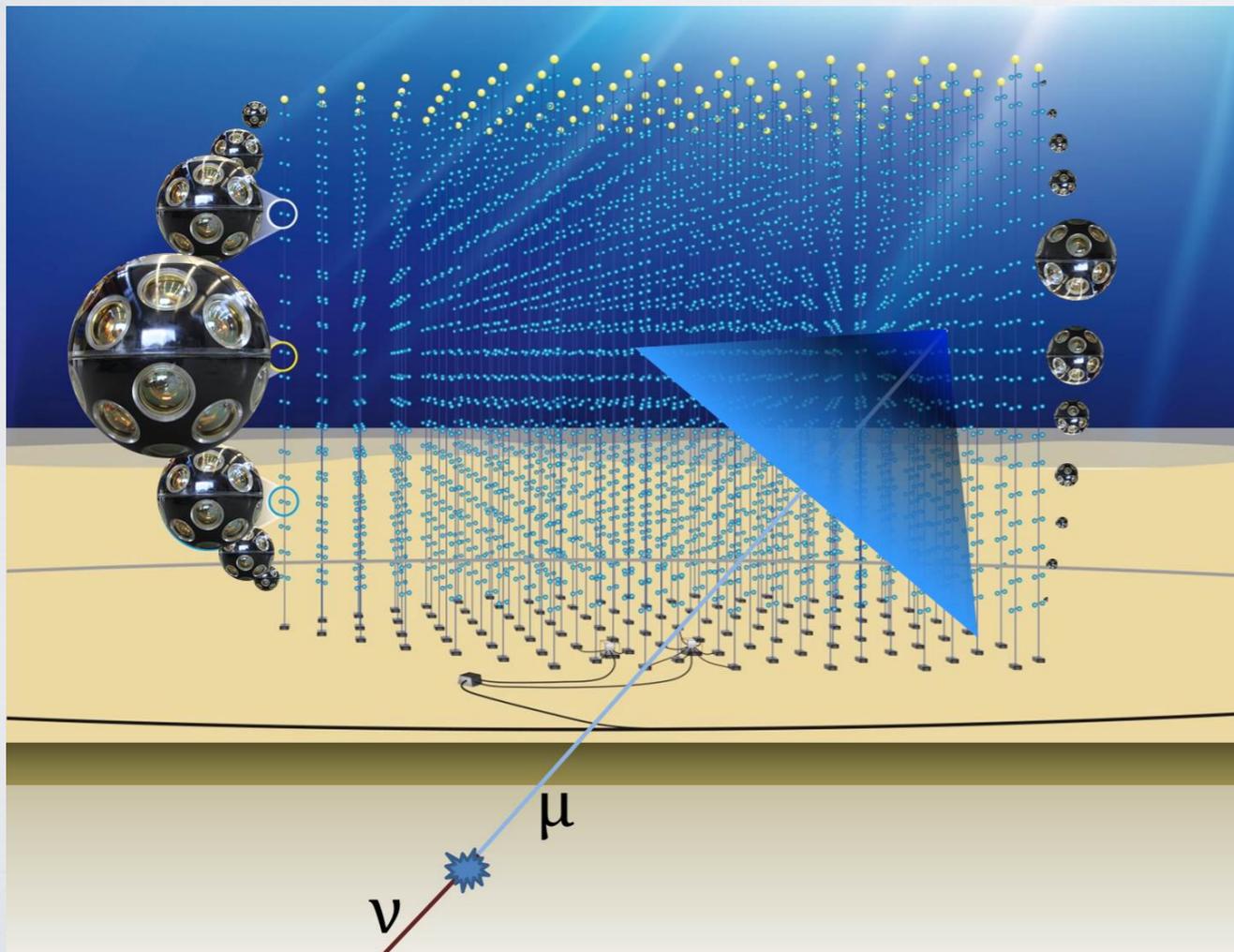
Similaire à Double Chooz mais très grand détecteur (4000 fois plus grand) et plus longue distance pour la mesure de la hiérarchie de masse et les paramètres solaires



- Le point clé est d'avoir une résolution au niveau de 3% à 1 MeV qui demande une collection de 1200 p.e. par MeV (KamLAND 250 p.e. per MeV, Borexino 500 p.e. per MeV) et une calibration qui ne dégrade pas la résolution.
- Rôle critique de la France en charge du développement de l'électronique pour les PMTs 3''.

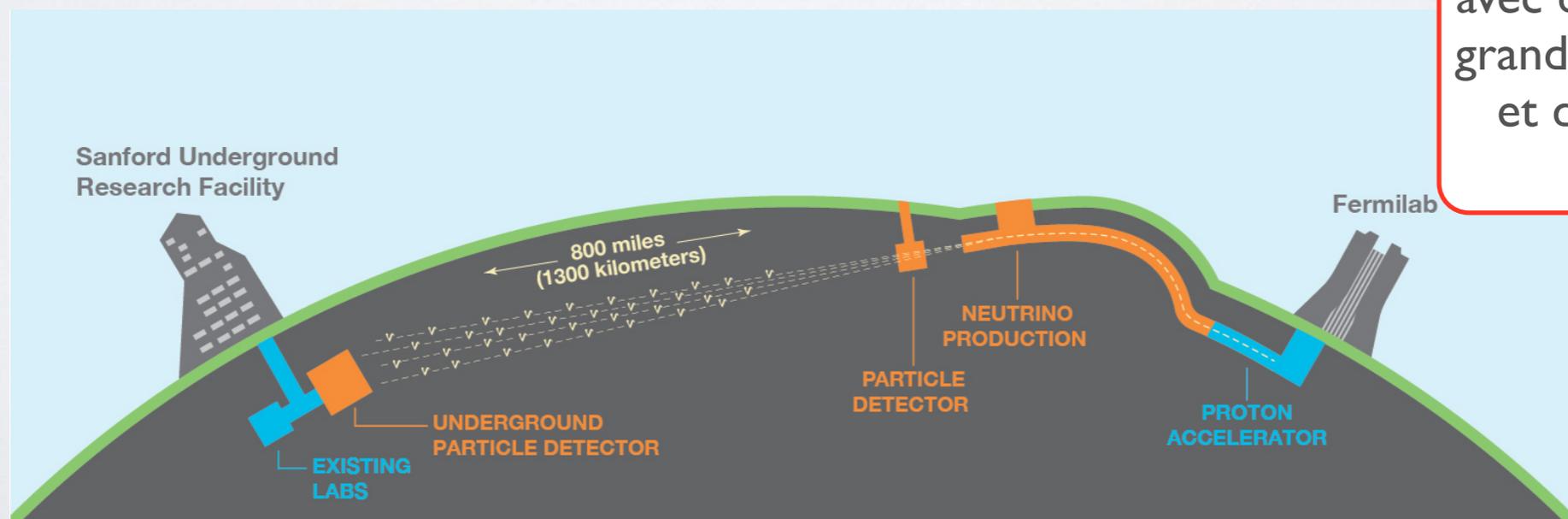
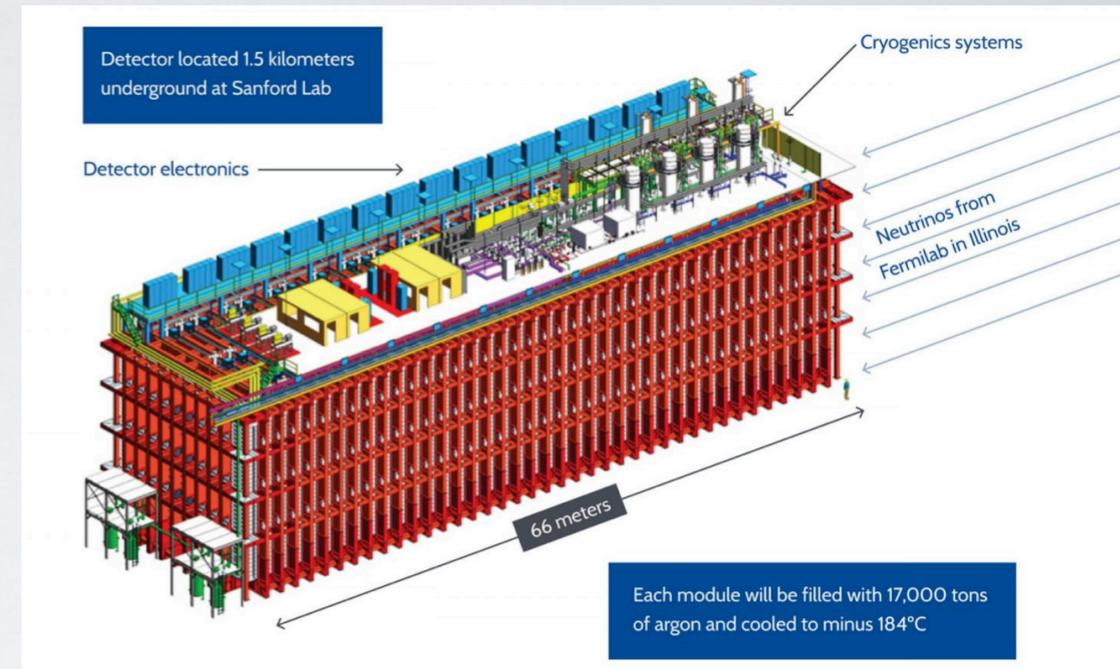
ORCA (PHOTODETECTION)

- 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 "telescope" 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.



DUNE (LIQUID ARGON TPC)

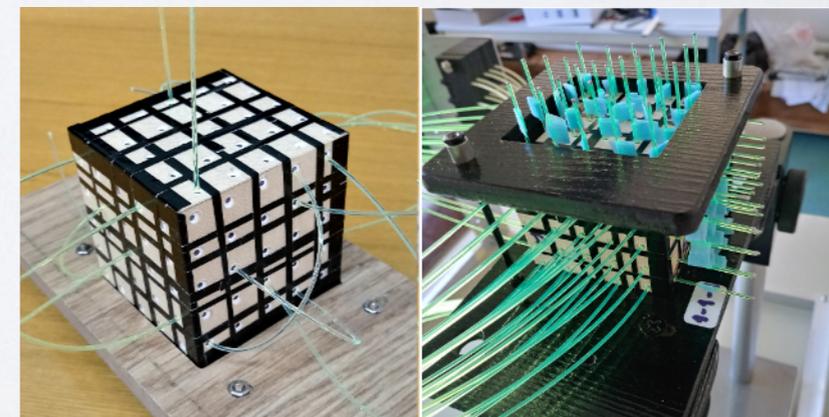
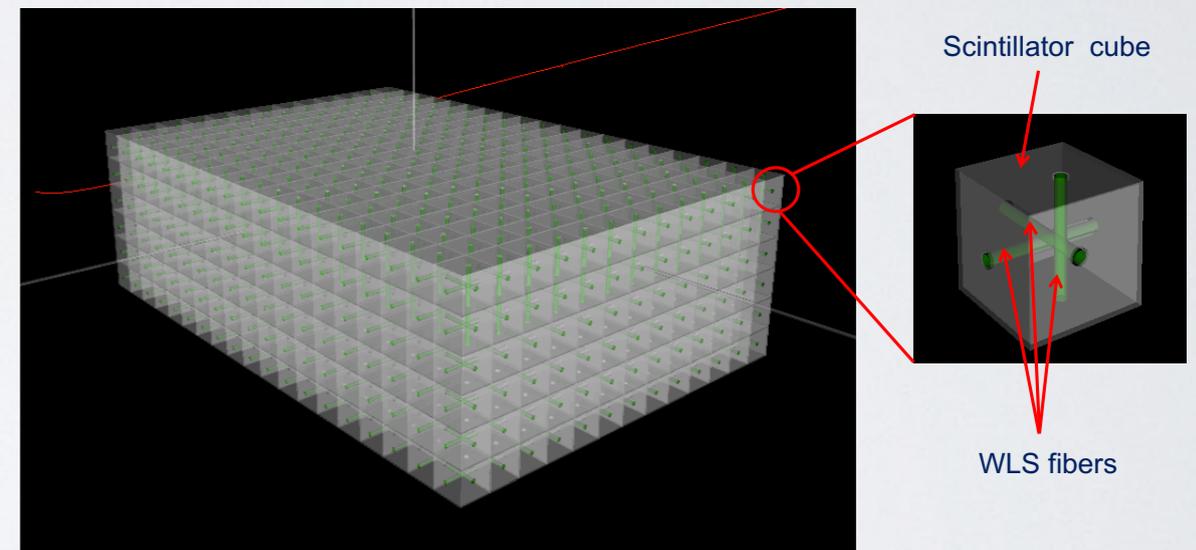
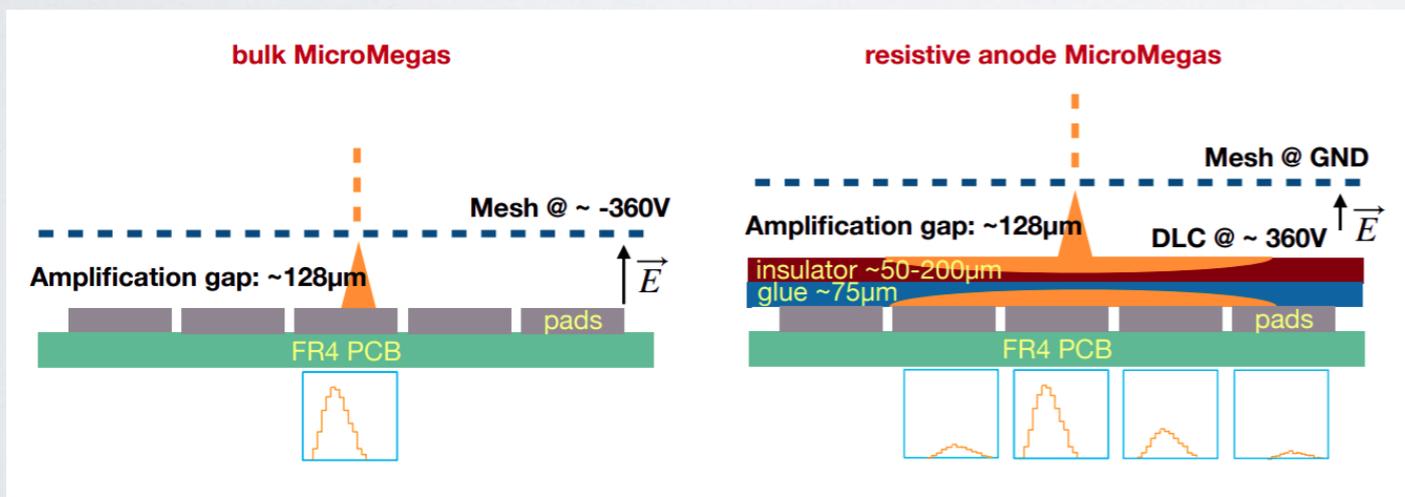
- DUNE est une expérience long baseline qui a pour objectif la mesure de la hiérarchie de masse et de la phase CP.
- 4 modules sont prévus (10 tonnes chaque module) et la France a eu un rôle leader dans le développement de la technologie “double phase” (amplification des charges dans argon gas après un drift dans l’argon liquide).
- En particulier depuis des années on développe l’électronique à froid avec un système qui permet le remplacement des cartes.



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

T2K-II/HK (MULTI-TECHNOLOGY)

- T2K-II et Hyper-K, comme DUNE visent à la mesure de la hiérarchie de masse et à la détermination de la phase CP.
- Le détecteur lointain (SK ou HK) utilise la technologie water cherenkov.
- Le détecteur proche, crucial pour réduire les systématiques sur la connaissance du flux, utilise différentes technologies (scintillateur plastiques, TPC à gas).
- La France a un rôle leader dans l'amélioration du détecteur proche et contribue techniquement avec le développement des resistive micromegas pour une meilleure reconstruction spatiale, et du super fine graine detector avec 2 millions de cubes de scintillateurs de 1 cm de côté.



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".
- D'autres questions s'ouvrent... y a-t-il plus que 3 neutrinos?
- L'IN2P3 est engagé sur plusieurs projet a l'échelle mondiale avec des rôles importants et des savoir-faire de pointe sur différentes technologies.

Cette présentation est une introduction rapide et non exhaustive de la physique du neutrino et des activités au sein de l'IN2P3.