

# Hiérarchie de la masse du neutrino avec le télescope KM3NeT

Toghrai Tahir

Réunion du groupe 20 Juin 2016

# Plan

- **Introduction générale**
- **Partie I : Les rayons cosmiques**
- **Partie II : Les neutrinos**
- **Partie III: KM3NeT/ORCA**
- **Conclusion générale**

# Introduction générale

L'astroparticule, ou physique des astroparticules est un nouveau domaine, à l'intersection de la physique des particules, de l'astronomie et de la cosmologie. Son objectif est de répondre à certaines questions fondamentales :

- \* De quoi est fait l'Univers?
- \* Quelle est la durée de vie du proton?
- \* Quelles sont les propriétés des neutrinos, quel rôle jouent-ils dans l'évolution cosmique?
- \* Qu'est ce que les neutrinos nous disent sur l'intérieur du soleil, la Terre ou les explosions de supernovas?
- \* Quelle est l'origine des rayons cosmiques?
- \* À quoi ressemble le ciel aux énergies extrêmes?
- \* Quelle est la nature de la gravitation, pouvons nous détecter les ondes gravitationnelles?

Son développement rapide a amené à concevoir de nouveaux outils.

Dans ces dernières décennies, une nouvelle discipline s'intitulant « Astronomie des neutrinos » a vu le jour. Cette dernière est la branche de l'astronomie qui observe les objets célestes à l'aide des détecteurs de neutrinos comme IceCube situé au pôle Sud, l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO) situé à environ 2 km sous terre dans une ancienne mine d'Inco, en Ontario, et Super-Kamiokande situé au Japon etc...

Ces particules subatomiques peuvent contenir des informations sur le fonctionnement des phénomènes les plus énergétiques et les plus éloignés de l'Univers. Cependant, jusqu'ici, les seules observations de sources de neutrinos extraterrestres concernent ceux du Soleil et ceux de la supernova 1987A.

Toujours plus ambitieuse, l'astronomie neutrino ne fait donc que commencer et, en ce début de siècle il est très probable que s'installeront des expériences au sol ou sous marines destinées à la détection de neutrinos stellaires et extragalactiques.

## Un peu d'histoire ...



1912 Hess découvre les rayons cosmiques

1927 Les rayons cosmiques sont observés dans une chambre à brouillard

1932 Anderson découvre le positon

1937 Découverte du muon

1938 Auger découvre des gerbes de particules

1949 Théorie des rayons cosmiques de Fermi

1962 Détection d'un rayon cosmique de  $10^{20}$  eV

1975 détecteur de  $\nu$  DUMAND

1991 Fly's Eye détecte le rayon cosmique le plus énergétique

1992 Expérience  $\nu$  Baïkal

1993 Problème des  $\nu$  solaires

1997 Oscillations  $\nu_{\mu}$  atmosphérique

1999 Premiers résultats AMANDA

2001 Oscillations  $\nu_e$  solaires

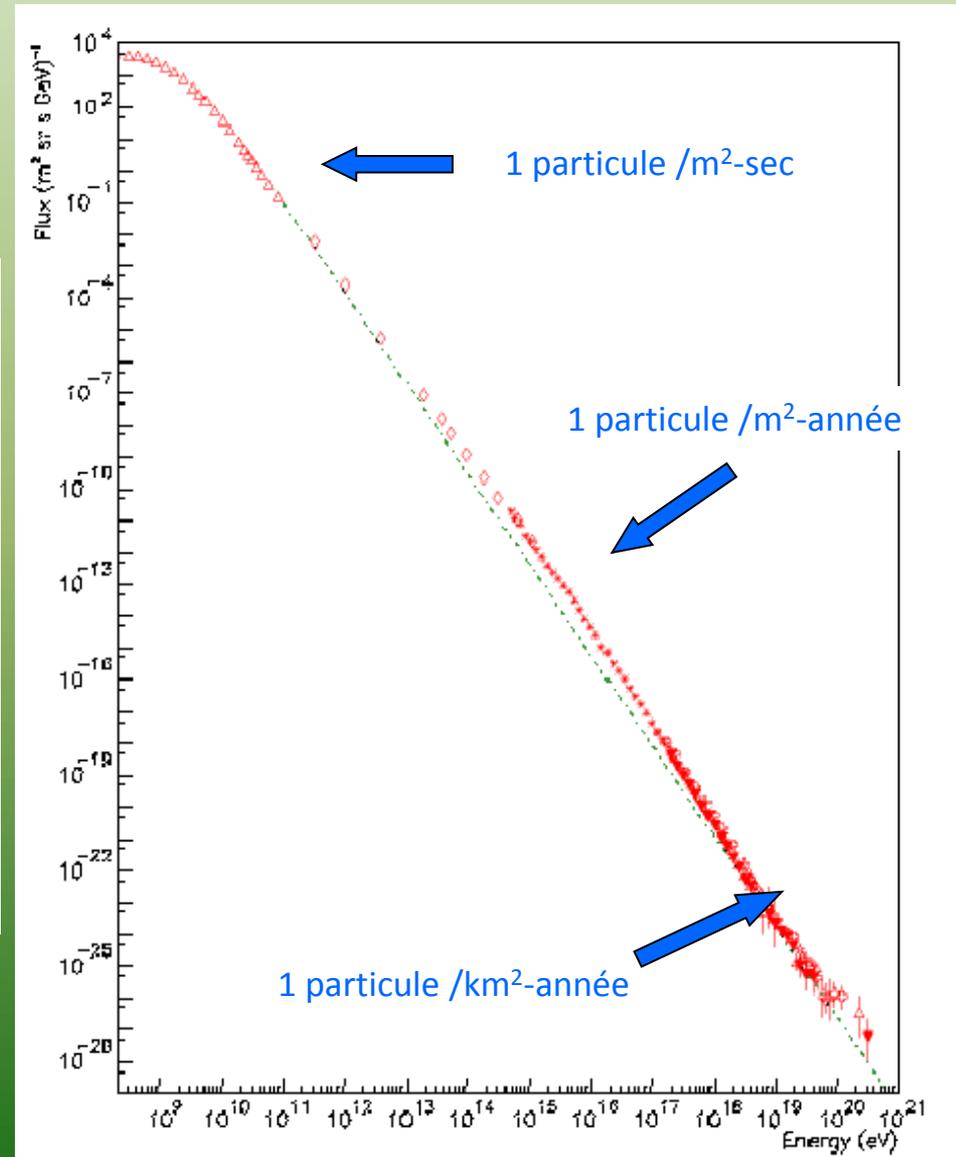
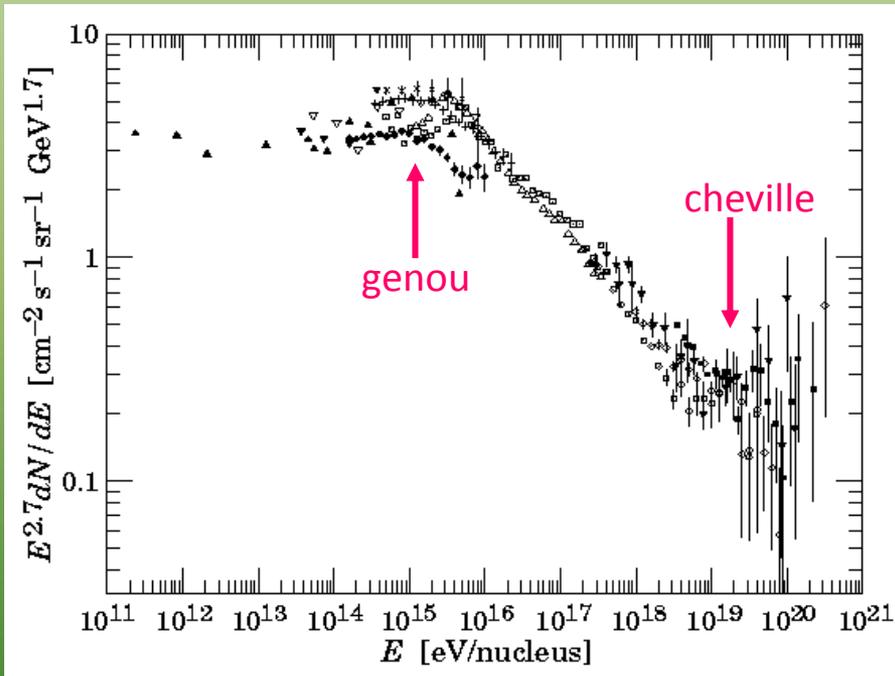
# Les rayons cosmiques primaires

- ❖ L'espace intersidéral est parcouru par des particules de haute énergie (protons, noyaux atomiques, électrons, rayons gamma).
- ❖ Leur énergie peut être beaucoup plus élevée que dans nos laboratoires. Elles sont probablement accélérées lors de l'explosion de supernovae, éruptions solaires ou de phénomènes astrophysiques analogues.
- ❖ Notre atmosphère (équivalente à 4 m de béton) absorbe une grande part de ce rayonnement.

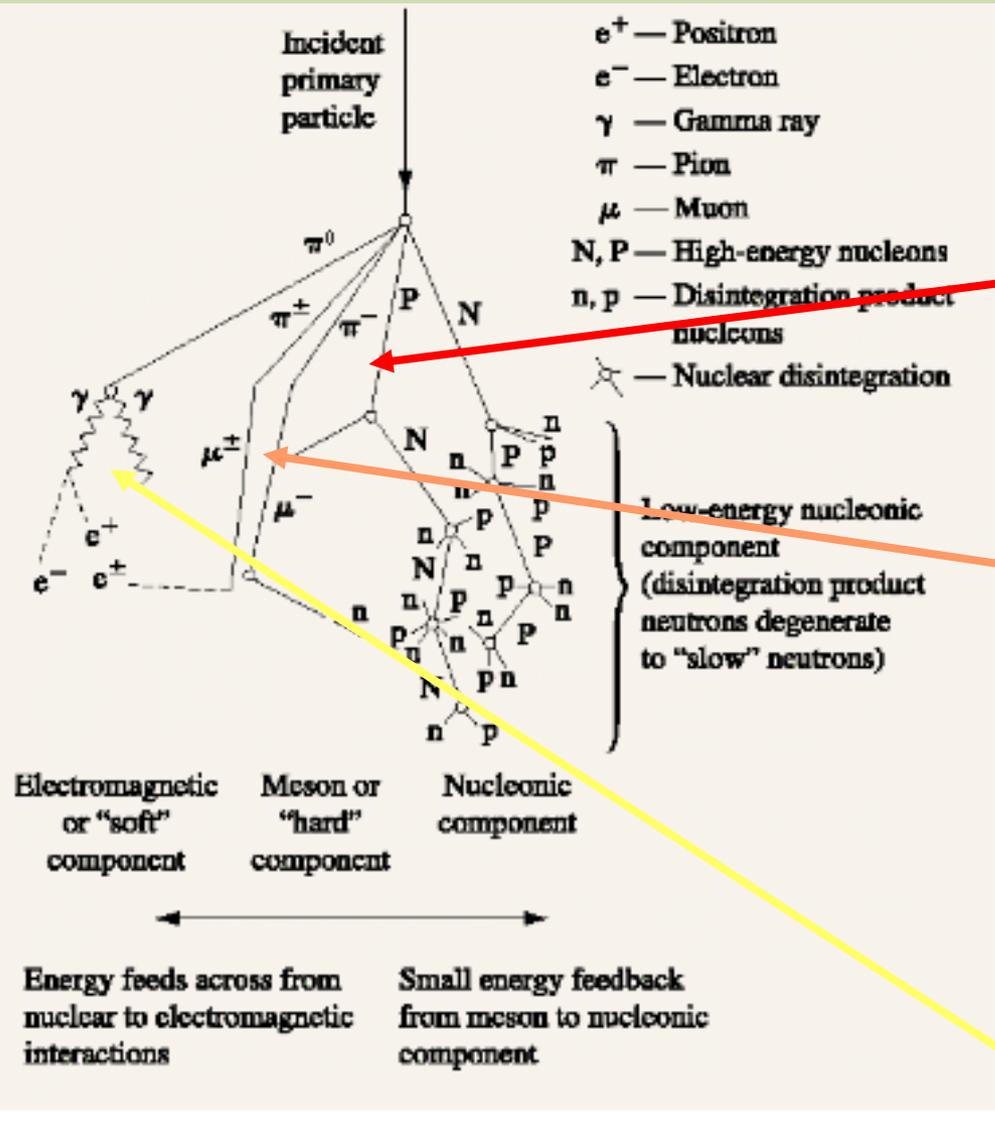
# Rayons cosmiques secondaires

- ❖ Dans la haute atmosphère ces particules entrent en collision avec des noyaux.
- ❖ De nouvelles particules ( $\pi^0, \pi^\pm$ ) sont produites lors de ces réactions nucléaires. Elles interagissent à leur tour, créant de véritables gerbes.
- ❖ Ces particules instables se désintègrent ensuite en des particules un peu plus stables (gammas, muons, neutrinos).
- ❖ Au niveau du sol, on ne détecte pratiquement plus que des muons et des électrons ( $\sim 100 / \text{m}^2 / \text{sec}$ ).

# Spectre en énergie des Rayons Cosmiques



# Les cascades



Production de mésons  $\pi$  :  
 $p+N \rightarrow N'+np+n\pi$

Composante hadronique

Les mésons  $\pi^\pm$  se désintègrent :  
 $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$

Composante muonique

Les mésons  $\pi^0$  et  $\mu$  se désintègrent :  
 $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$   
 $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$

Composante électromagnétique

# Extension des cascades

Les différentes composantes se distinguent par leur longueur d'absorption dans l'atmosphère :

Particule	Masse MeV	Durée de vie	Libre parcours g/cm <sup>2</sup>
Electron	0.5	stable	100
Muon	105	2 μs	261
Pion	139	26 ns	113
Proton	938	stable	110
Neutron	939	12 min	136

$$I = I_0 e^{-\frac{A}{L}}$$

Niveau de la mer :  
A = 1033 g/cm<sup>2</sup>

# Les sources à haute énergie

champ magnétique

$$E > 10^{19} \text{ eV ?}$$

$$E \sim \Gamma c B R$$

Energie

Facteur de Lorentz



Quasars

$$R \sim \Gamma M / c^2$$

masse

$$\Gamma \sim 1; B \sim 10^3 \text{ G}; M \sim 10^9 M_{\odot}$$

$$E \sim \Gamma B M$$

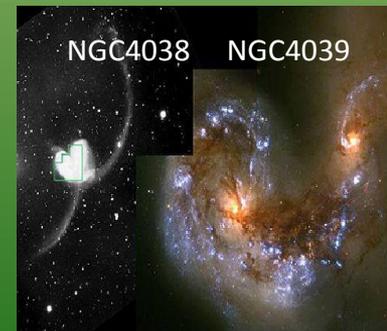
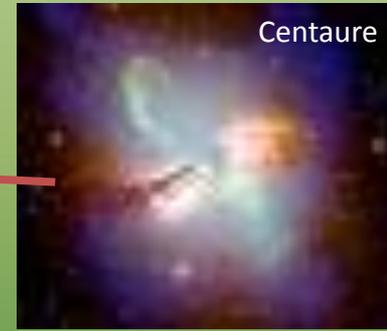
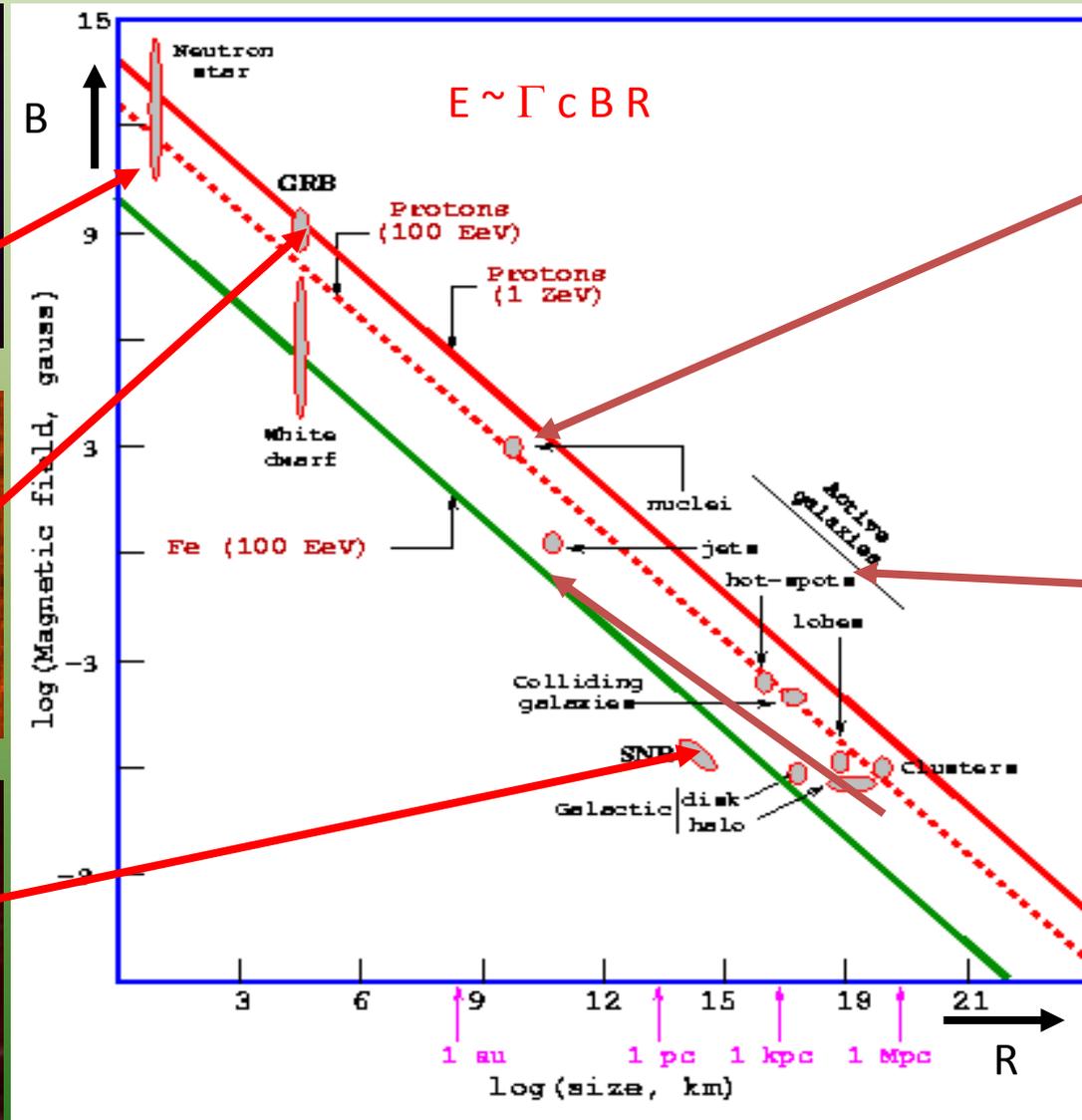
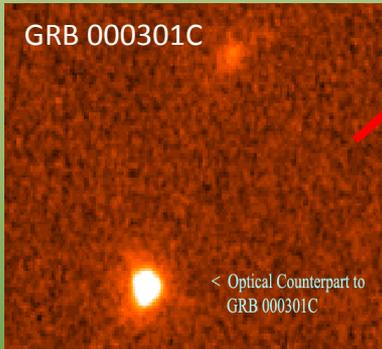


Etoiles à neutrons;

Trous noirs

$$\Gamma \sim 1; B \sim 10^{12} \text{ G}; M \sim M_{\odot}$$

# Le diagramme de Hillas



# Nouvelles expériences

Observatoire Pierre Auger : statut

⇒ **Détection en mode hybride fonctionnelle**

l'Observatoire Pierre Auger est devenu depuis octobre 2003 le plus grand réseau de détecteurs de rayons cosmiques au monde.

Déploiement et prise de données continuent

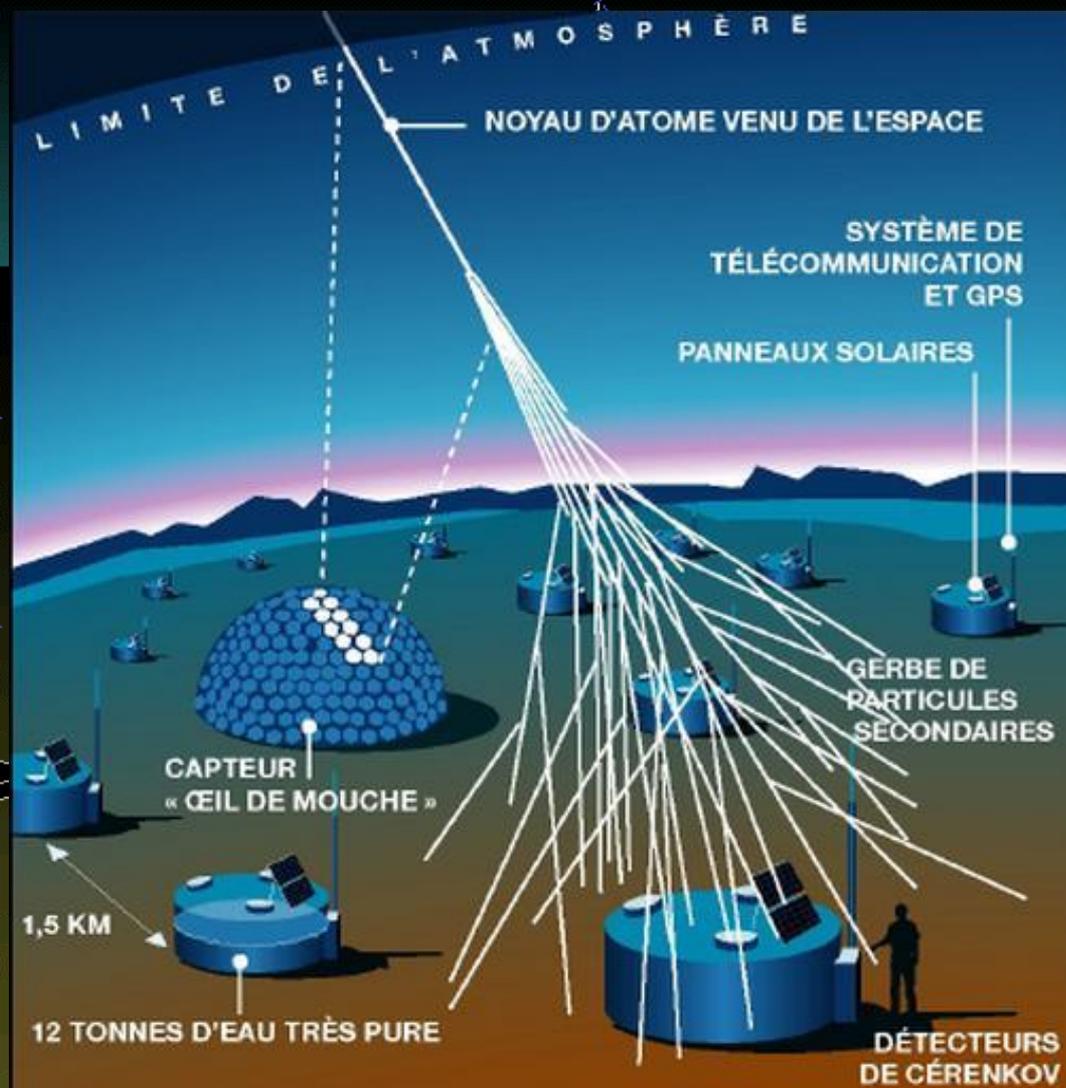
~1000 cuves qui enregistrent des données

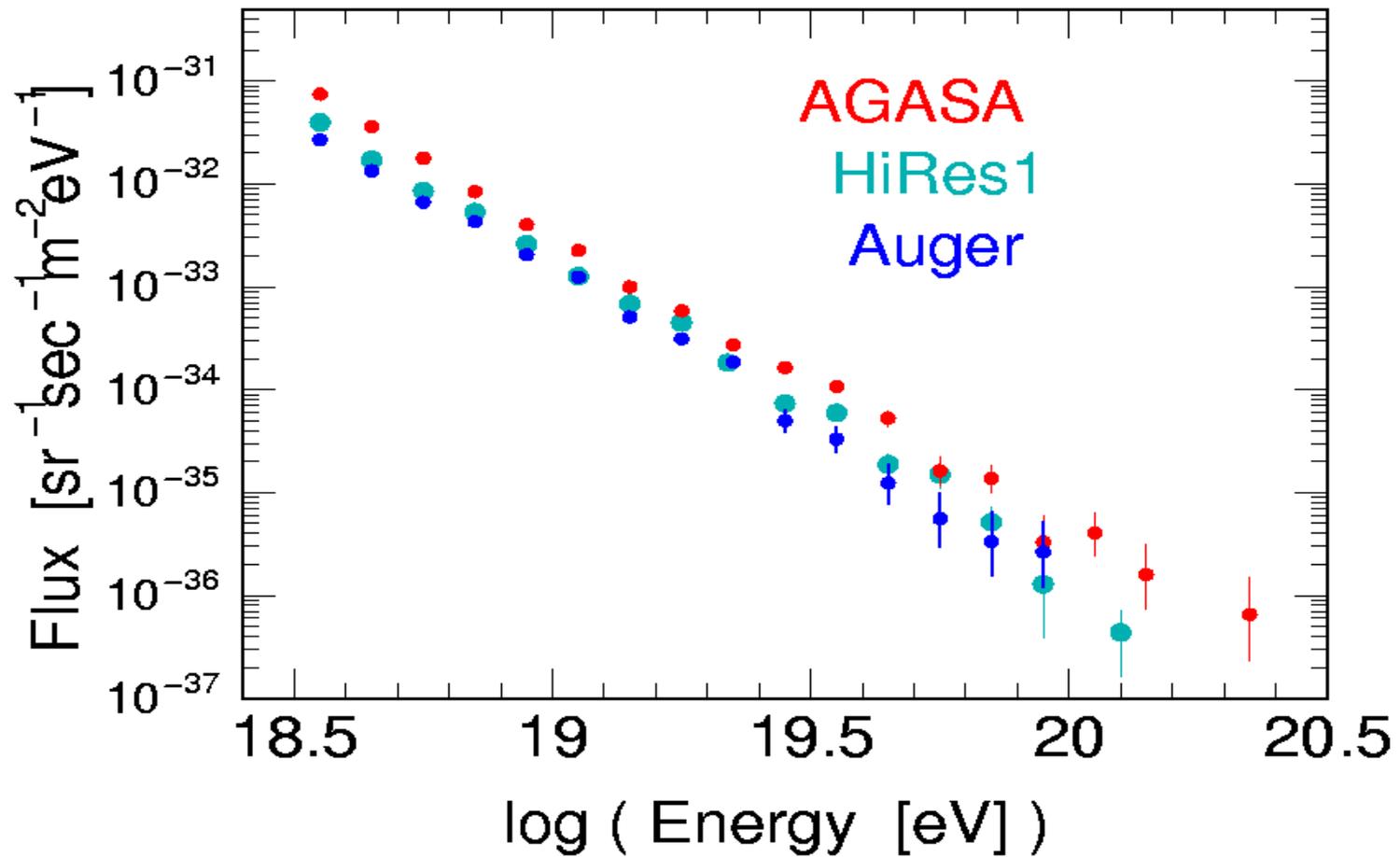
18 télescopes (3 bâtiments)

# Nouvelles expériences

## Observatoire Pierre AUGER

« Détection  
hybride »



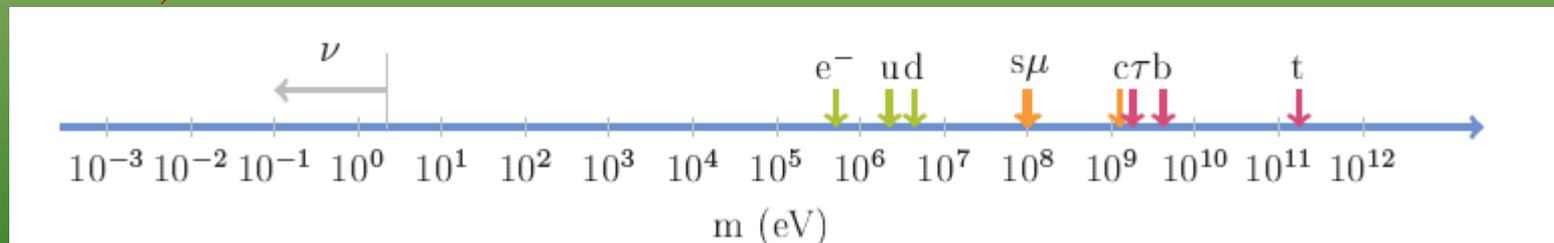


Premiers résultats  
(préliminaires, conf. été 2005)

# Les neutrinos: des fermions particuliers

- masse très faible,  $< 1 \text{ eV}/c^2$
- sensibles à l'interaction faible seulement
- fermions neutres  $\Rightarrow$  peuvent être leur propre antiparticule (Majorana vs Dirac)
- produits comme superposition cohérente de 3 états de masse dans les désintégrations faibles
- grand mélange leptonique par rapport aux petits angles de mélange de quarks (CKM)

$\nu$  sont massifs  $\Rightarrow$  indication de la physique "au-delà du Modèle Standard;"



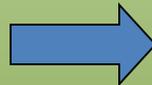
# Les oscillations des neutrinos

La **transformation spontanée** de neutrinos d'une famille en neutrinos d'une autre famille est connue sous le nom d'**oscillation de neutrinos**.

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$$

$$\nu_{\tau} \rightarrow \nu_{\mu}$$

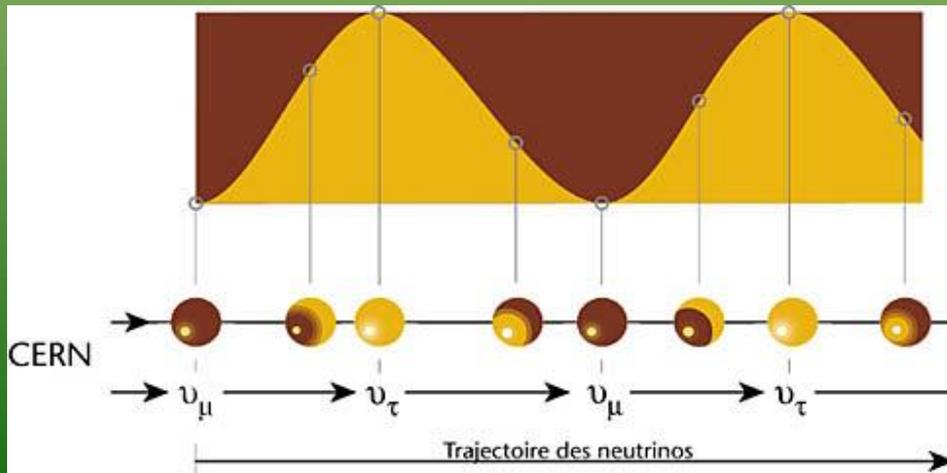
Cette oscillation de neutrinos s'explique en mécanique quantique par le fait que les **neutrinos ont une masse**.



Conséquence, si on voit un neutrino changer de type, on montre qu'il a une masse !

## Illustration des oscillations $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$

Le parcours des neutrinos permet de « voir » l'oscillation de ces derniers : un neutrino est d'abord de type  $\nu_{\mu}$  puis  $\nu_{\tau}$  puis à nouveau  $\nu_{\mu}$  etc...



# Matrice MNSP et oscillation à 3 ν

(MNSP: Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo)

Formalisme de base

Matrice de mélange:

$$\nu_\alpha = \sum_{j=1}^3 U_{\alpha j} \nu_j$$

$U_{\alpha j}$  est la matrice de mélange

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

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\Delta m_{31}^2$ 
 $\Delta m_{31}^2$ 
 $\Delta m_{21}^2$

atmos+LBL(dis)
Reactor + LBL (app)
solar+KamLAND

+ 2 phases de Majorana

$$c_{ij} = \cos(\theta_{ij}); s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$$

probabilité d'oscillation

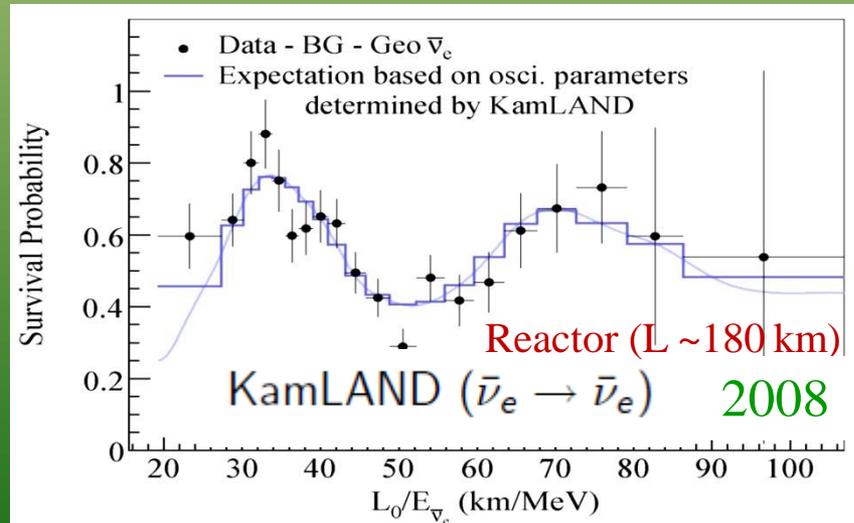
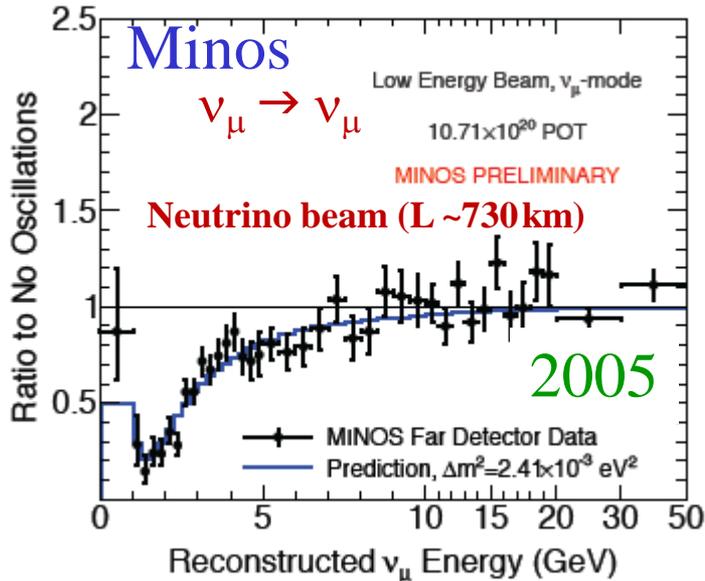
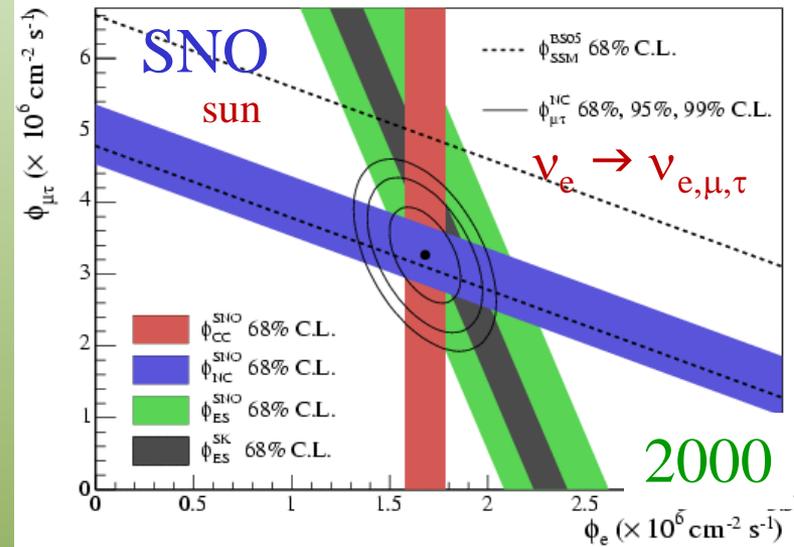
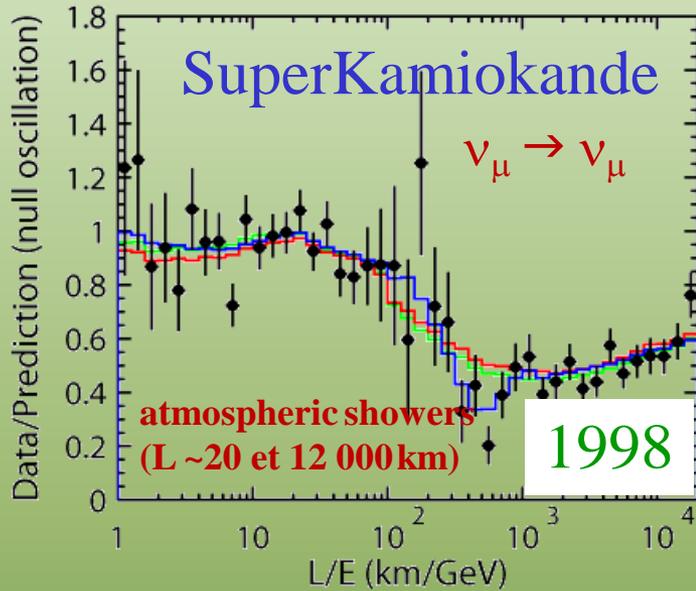
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sum_{ij} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \approx \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right)$$

6 paramètres accessibles:

- 3 angles, 2 différences de masse,
- 1 phase de violation CP

# Une période riche en succès expérimentaux (15 dernières années)

## Observation de l'oscillation de $\nu$ par disparition



# Encore de nombreuses questions fondamentales:

Quelques exemples et comment y répondre expérimentalement:

- **quelle est l'échelle de masse absolue?**

- fondamental pour cosmologie et le schéma d'unification des interactions

- temps de vol: Supernova 1987A  $m < 20$  eV; -désintégration bêta : Tritium  $m < 2.5$  eV;
- fluctuations fond cosmologique diffus: Planck  $\Sigma m_\nu < 0.23$  eV

- **les neutrinos sont-ils leur propre antiparticule (Majorana) ou pas (Dirac) ?**

- si Majorana => violation du nombre leptonique, conséquence théorique (leptogénèse, GUT)  
double désintégration beta sans émission de  $\nu$  (possible indice sur masse et hiérarchie)

- **La symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons?**

- i.e. a-t-on  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$  dans le vide? condition nécessaire pour la leptogénèse  
expériences faisceau long baseline car CP due à termes d'oscillation sous-dominants

- **Quelle est la hiérarchie de masse?**

- essentiel pour la quête de la violation CP

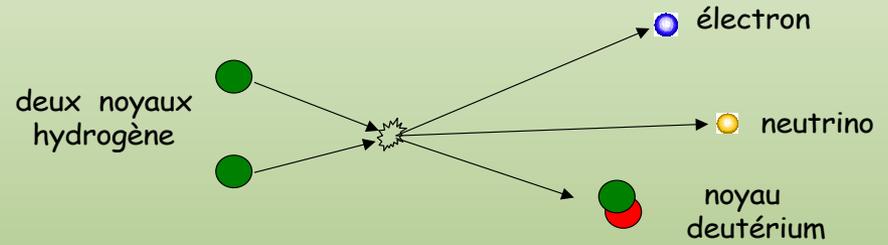
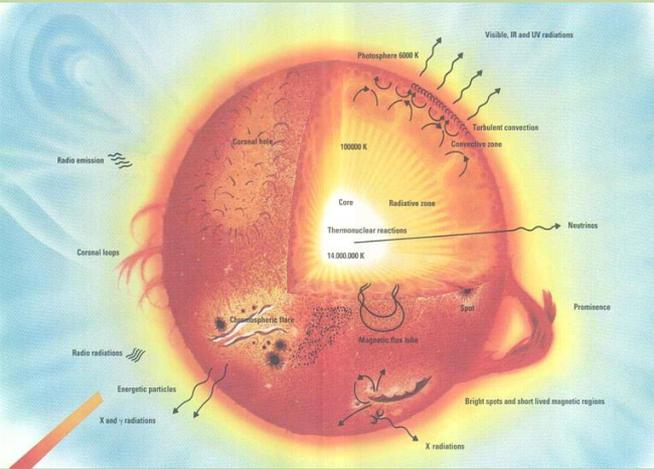
Distinguée par effet de matière sur oscillations (long baseline, atmosphérique...)

- **Existe-t-il plus de 3 neutrinos, quelle est l'origine des anomalies observées?**

- certaines données expérimentales suggèrent neutrino(s) stérile(s) de masse de l'ordre d'1eV  
Expériences d'oscillation courte distance sur réacteurs, avec sources intenses ou sur accélérateurs

# Le mystère des neutrinos évanescents

## Les $\nu$ solaires (1968-2002)



Fusion nucléaire

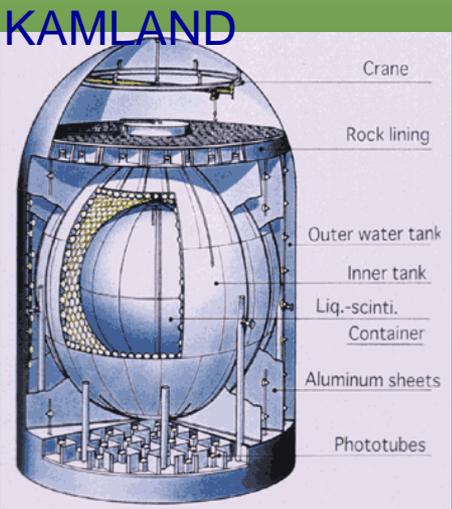
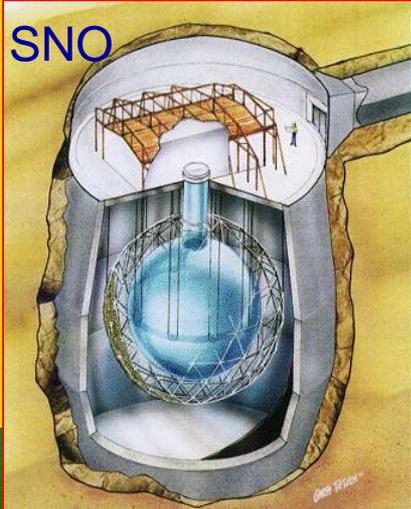
**Soleil : source pure de  $\nu_e$**   
**50% du flux attendu est mesuré sur terre**

Déficit



Oscillations ?

2001-2002: la **preuve** des oscillations:  
**SNO**: le flux total ( $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ ) de neutrinos solaires est correspondant au flux attendu  
**KAMLAND**: les oscillations des neutrinos solaires sont reproduites sur la terre avec les neutrinos des réacteurs nucléaires



# Neutrinos solaires

**40000000000000000 neutrinos/seconde =  $4 \cdot 10^{14}$  v/s** provenant du soleil  
traversent notre corps.

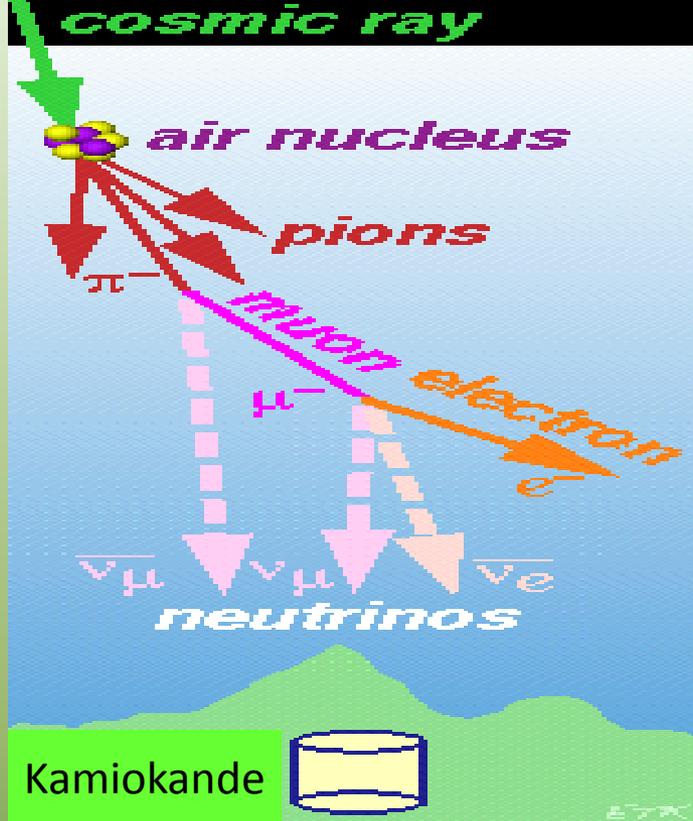


En 100 ans, seulement **1 neutrino**  
interagit dans notre corps !



On aurait besoin d'un bloc de plomb d'une épaisseur de  
**100000000000000000 =  $10^{16}$  mètres** pour arrêter la moitié des  
neutrinos provenant du soleil.

# Les $\nu$ atmosphériques



## Détecteur KAMIOKANDE 1988

$$R = N(\nu_\mu) / N(\nu_e)$$

$$R_{\text{production}} \cong 2$$

$$R_{\text{mesuré}} / R_{\text{production}} \cong 0.6$$

- excès de  $\nu_e$  ?
- disparition de  $\nu_\mu$  ?

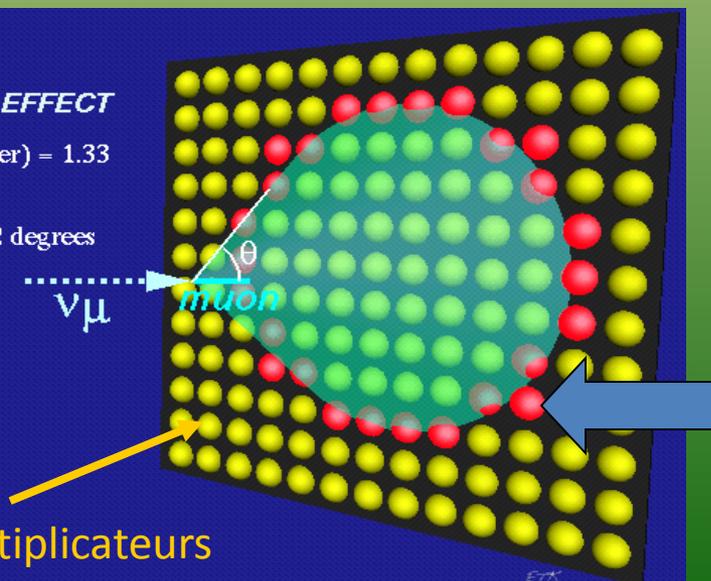
Détection de  $\nu_\mu / \nu_e$  par la lumière Tcherenkov produit par les muons/électrons dans l'eau

### CHERENKOV EFFECT

$$\beta = v/c \quad n(\text{water}) = 1.33$$

$$\cos \theta = 1/\beta n$$

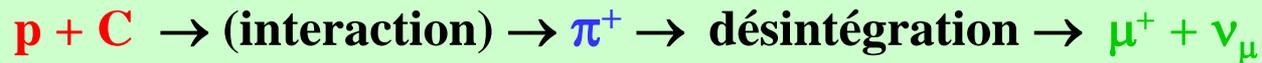
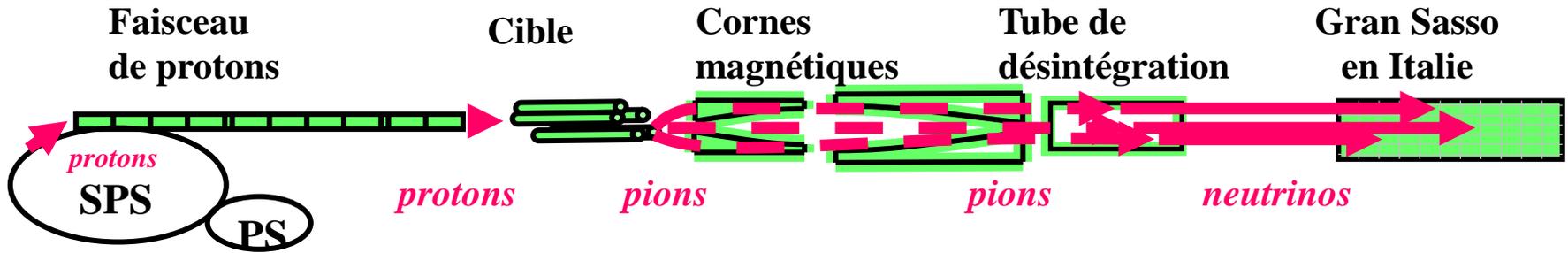
$$\beta = 1 \quad \theta = 42 \text{ degrees}$$



Photomultiplicateurs

# Production de Neutrinos

- Produire des protons de haute énergie
- Les envoyer contre une cible
- Produire ainsi des pions
- Guider ces pions à l'aide de corne magnétique
- Laisser ces pions se désintégrer en **neutrinos muon** et muons



1000000000000000000 =  $10^{17}$  neutrinos sont envoyés par jour

100000000000 =  $10^{11}$

neutrinos arrivent au Gran Sasso par jour

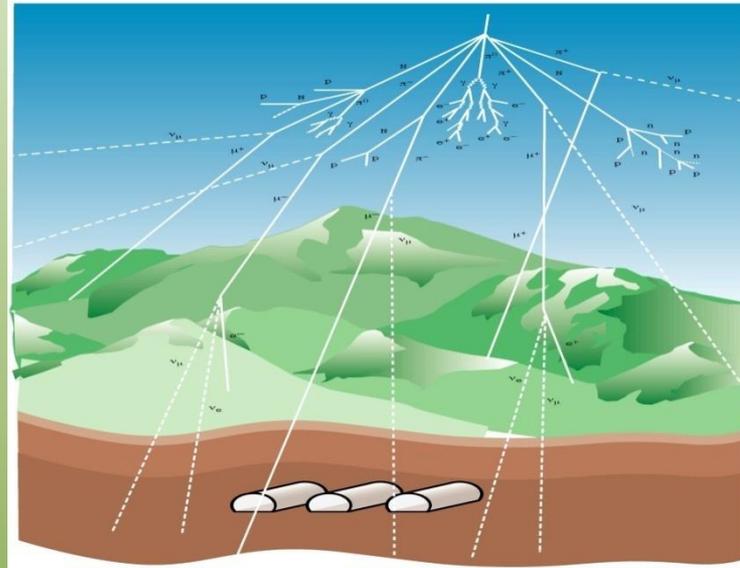
25

Neutrinos muon sont détectés par jour au Gran Sasso à l'aide d'un détecteur de 1800 tonnes

2

Neutrinos tau sont détectés par année au Gran Sasso à l'aide d'un détecteur de 1800 tonnes

# Détecteurs de Neutrinos

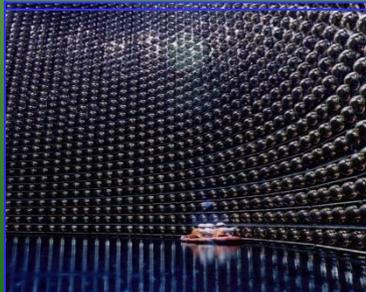


Les détecteurs de neutrinos sont composés d'une grande quantité de matériaux situés dans une caverne souterraine (pour les protéger du rayonnement cosmique).

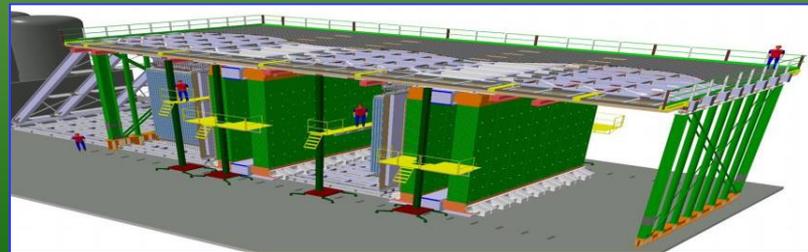
**Mine d'or de Homestake, South Dakota, USA.**  
Le détecteur contient 617 tonnes de tétrachloroéthylène.



**Super-Kamiokande, Japon:**  
Un détecteur de 50000 tonnes d'eau, 1000 m sous terre.



**OPERA, Laboratoire du Gran Sasso, Italie:**  
Le détecteur est fait de briques de plomb lourd/émulsions photographiques.  
Au total: 206336 briques = 1800 tonnes.



# Les neutrinos sont partout parmi nous...



**Neutrinos du soleil:** (réactions nucléaires)  
4000000000000000 (4x10<sup>14</sup>) par seconde.

## Neutrinos de la terre:

Cette radioactivité naturelle correspond à 20000 centrale nucléaire.

6000000 (6 millions) par seconde et par cm<sup>2</sup>.



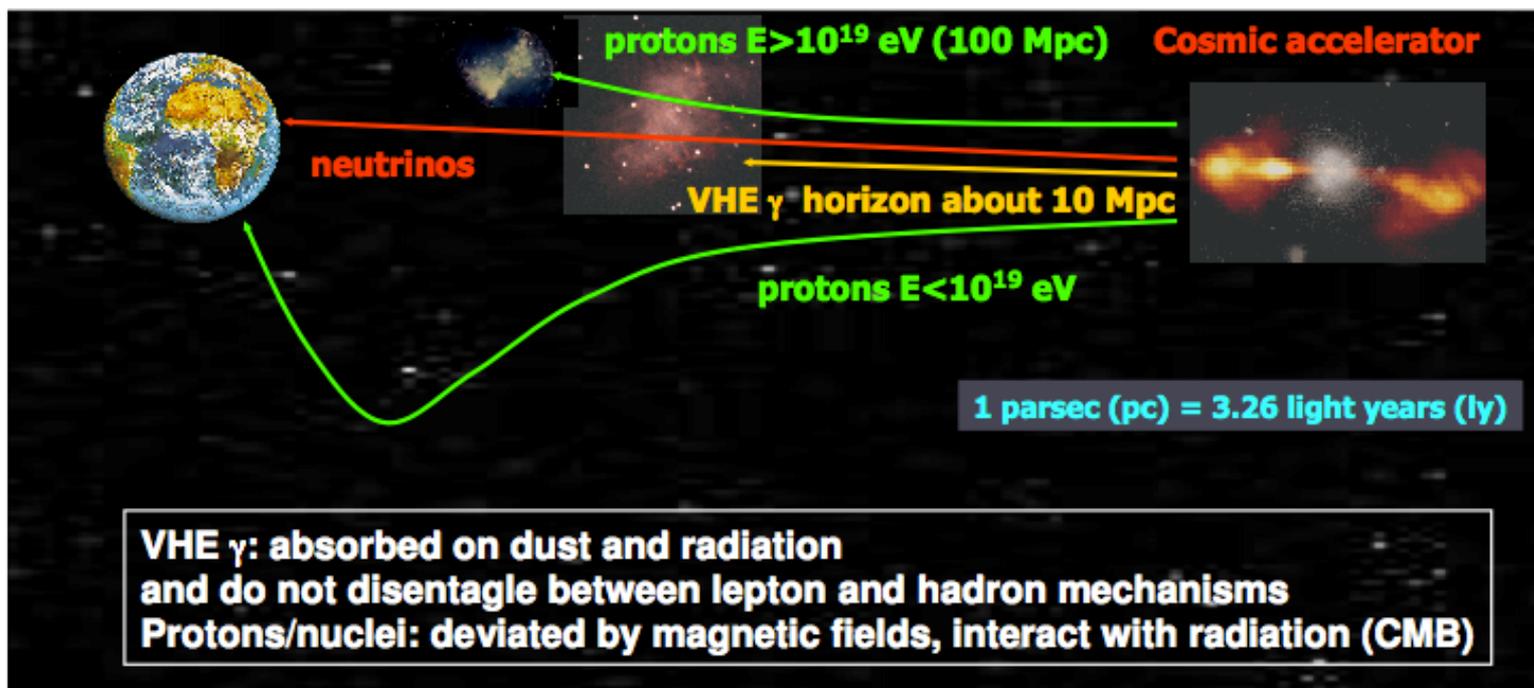
**Chaque personne**  
est émettrice de neutrinos:  
340000000 (340 millions) par jour.  
(20 milligrammes de potassium <sup>40</sup>K radioactif dans notre corps).

## Phénomènes cosmologiques:

- Neutrinos de Supernova (explosion d'étoiles)
- Neutrinos cosmiques: énergie très basse, partout dans l'univers: 330 neutrinos par cm<sup>3</sup>.



# Motivation pour la détection des neutrinos de haute énergie



- Le neutrino fournira une information unique sur la haute énergie de l'univers
- ✓ sur l'origine des rayons cosmiques UHE (astrophysique, cosmologie et la physique des particules)
  - ✓ sur le mécanisme de production de gamma de haute énergie (hadronique et / ou leptonique)
  - ✓ la source de noyau interne dense

L'observation de neutrinos peut être connectée avec les flux gamma observés pour les sources avec une densité de matière faible, tandis que de nouvelles sources de haute densité peuvent être observées

# Quête de la hiérarchie de masse et de $\delta_{CP}$ :

## Potentiels des expériences en cours:

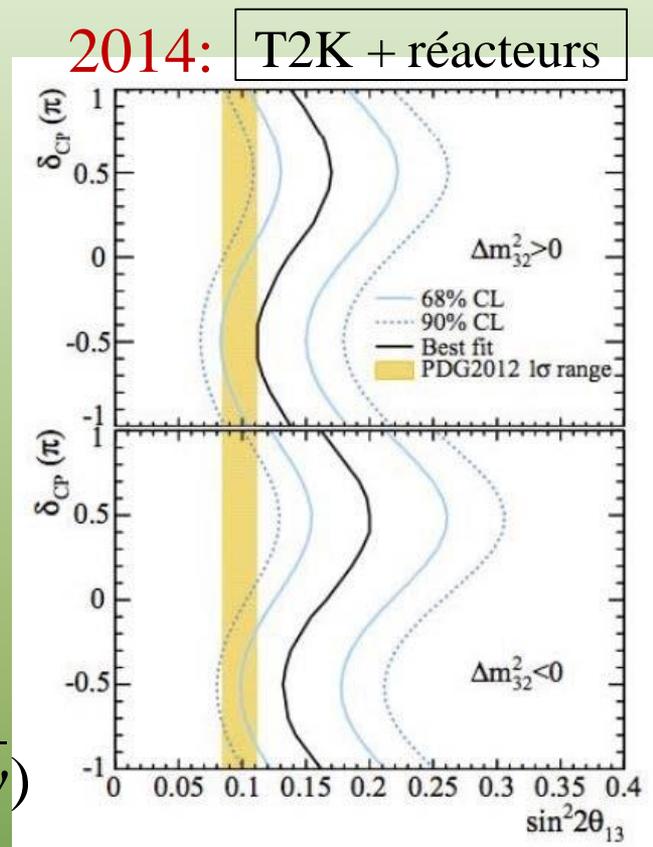
**T2K:** Avec  $\theta_{13}$  des réacteurs: le nombre observé (28 vs 21.7) favorise les options:

- Hiérarchie Normal
- $\theta_{23} > 45^\circ$
- $\delta_{CP} = 3\pi/2$

**Signification faible**

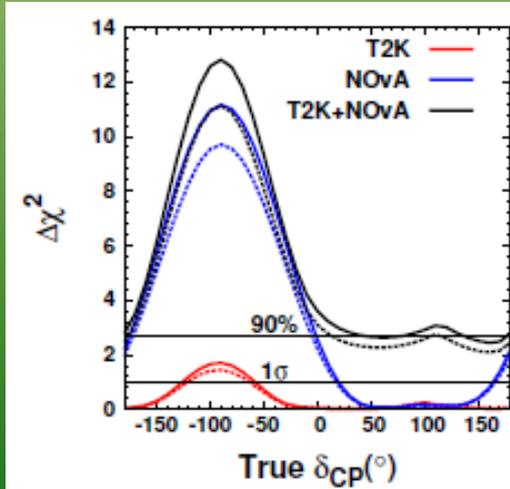
En ajoutant les mesures prévues dans le futur (235 kW => 700 kW) à celle de **Nova** (803 km)

**En 2024:** 6-7 ans de prises de données ( $\nu$  et  $\bar{\nu}$ )

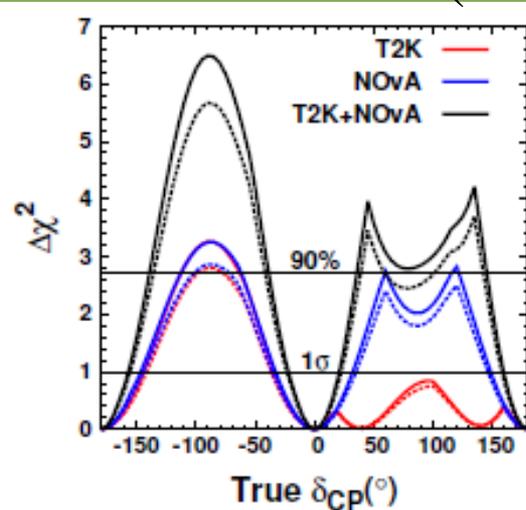


PRL 112, 061802 (2014)

arXiv:1409.7469



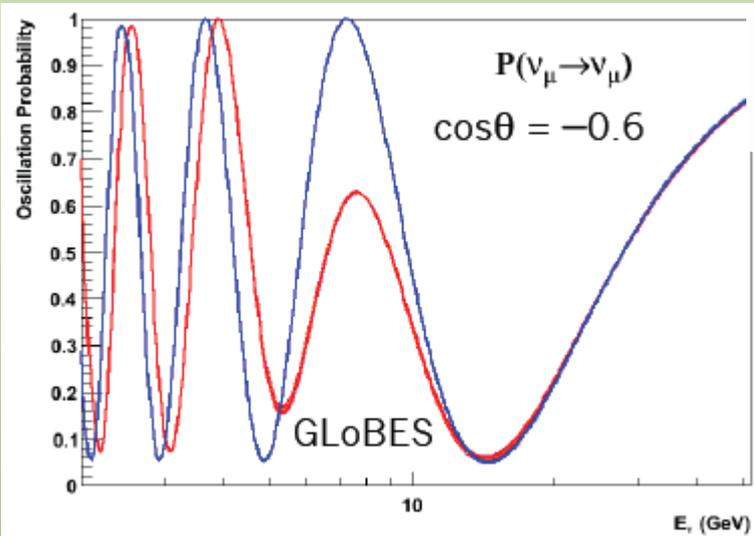
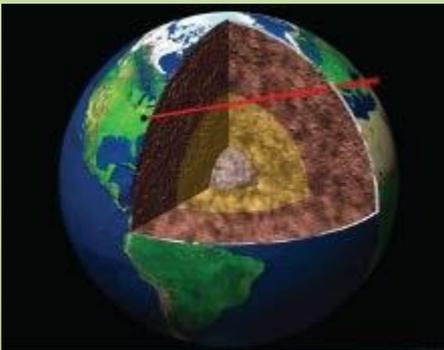
Exclusion IH



Exclusion  $\delta_{CP} = 0$

# Hiérarchie de masse avec des neutrinos atmosphériques

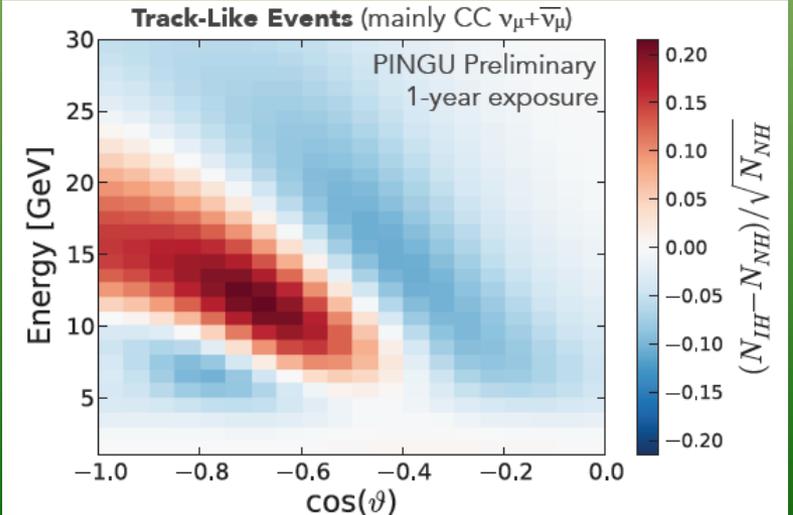
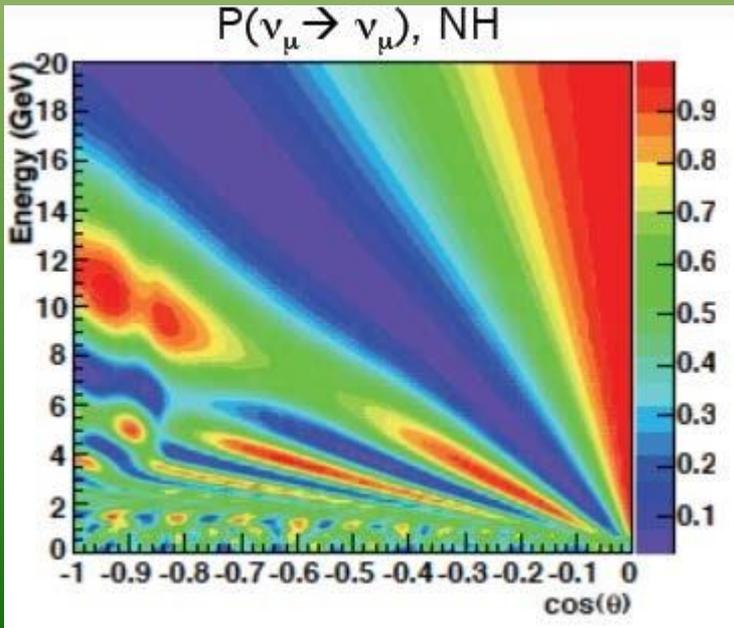
Principe; mettre en évidence les effets de matière en observant les taux de disparition des  $\nu_\mu$  et  $\bar{\nu}_\mu$  et d'apparition de  $\nu_e$



— Inverted Hierachy  
 — Normal Hierachy

Tout se joue sur la dépendance de la transition  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  avec les effets de matière

Etendre les télescopes à Neutrinos à des basses énergies (GeV)



# Perspectives de la physique des neutrinos

La « masse du neutrino » est le seul phénomène observé signe de nouvelle physique au delà du Modèle Standard

⇒ Phénoménologie doit être explorée avec le plus de précision possible

**La nature de la masse du neutrino** (Majorana ou Dirac) est un défi expérimental:  
si IH => accessible dans les 15 prochaines années  
si NH => très difficile à déterminer avec les technologies actuelles

**La Hiérarchie de Masse:** Premières informations pourraient apparaître avec les expériences réacteurs et/ou atmosphériques d'ici 10 ans  
Complètement déterminée avec des faisceaux longue distance d'ici 15 ans

**La phase de violation CP:** recherche peut être relativement longue et nécessite des faisceaux longues distances qui pourraient démarrer en 2023 et 10 ans de prise de données.

**Au-delà du modèle SvM:** les anomalies qui pourraient s'expliquer par des 'steriles' légers seront explorés par des expériences de réacteurs et de sources dans les 5 prochaines années.

Une quête systématique des  $\nu_s$  plus lourds nécessitent de nouveaux projets sur accélérateurs

# KM3NeT: un projet pour un télescope sous-marin à neutrino

Le consortium KM3NeT vise à développer une infrastructure de recherche sous-marine dans la mer Méditerranée. La construction d'un télescope Tcherenkov multi-cube-kilomètre pour les neutrinos avec des énergies supérieures à 100 GeV est le principal objectif KM3NeT

# KM3NeT et le concept international

## Carte mondiale à haute énergie du télescope à neutrino

### Antares

- Prise de données, dans sa configuration finale (12 lignes) depuis mai 2008.
- 5 lignes de données analysées et prêtes à être publiées



Pylos



Capo Passero



### ANTARES, NEMO, NESTOR

Unification de leurs efforts pour préparer un télescope à neutrinos de taille de km<sup>3</sup> dans la mer Méditerranée: **KM3NeT**



Baikal



### IceCube

IC 79 prenant des données depuis 2010  
IC 59: l'analyse des données a commencé

# KM3NeT:objectifs principales

## objectifs physiques :

Mise en évidence des «sources ponctuelles» du neutrino dans le régime énergétique 1-100 TeV

➤ galactique -> Supernova Rémanents, microquasars ...

➤ extragalactique -> Noyaux Actifs de Galaxies, Sursauts Gamma

Agrémentez le champ de vue d'IceCube.

Dépasser la sensibilité d'IceCube

## Autres éléments importants de physique :

- Détection du flux diffus de neutrino aux hautes énergies

- Recherche indirecte de la matière sombre dans l'univers

- Aspects des neutrinos à l'issus de la physique des particules

Exotiques(monopôles magnétiques, violation de l'invariance de Lorentz,...)

## Recherche interdisciplinaire

- géophysique, océanographie, biologie maritime, ...

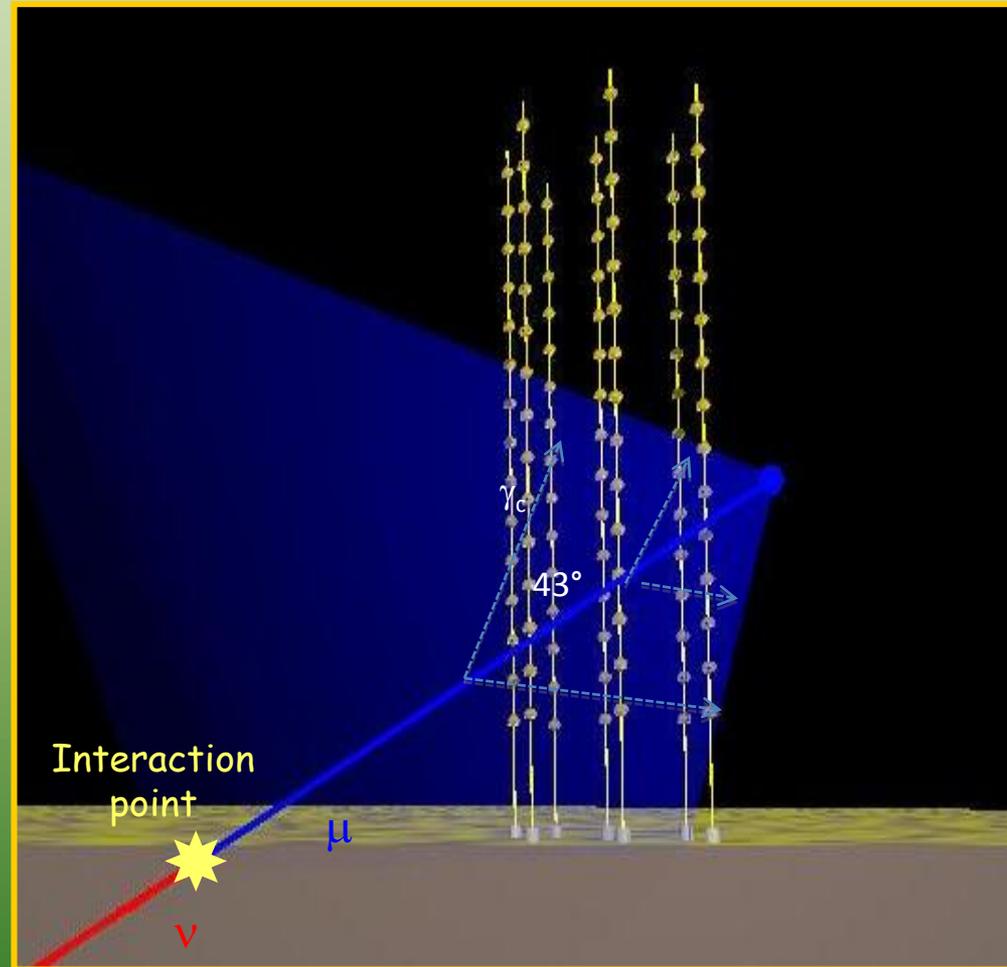
## Exigences de mise en œuvre:

• Temps de construction  $\leq 5$  ans

• Opération approximée à une durée de 10 ans

# Principe de détection du neutrino

- Vers le haut, les neutrinos interagissent avec la roche ou l'eau (nm est le canal d'or pour l'astronomie)
- Particules chargées émergentes (en muons particulier) produisent de la lumière Tcherenkov dans l'eau à  $43^\circ$  par rapport à la direction de neutrino
- 
- Détection de la lumière Tcherenkov par un réseau de photomultiplicateurs
- A partir des temps d'arrivée des photons et des positions de PMT, il est possible de reconstruire la direction de muons



volume de détection de l'ordre de  $5 \text{ km}^3$  qui dépasse la sensibilité d'IceCube par un facteur important

# Articles techniques

Le télescope est constitué d'une matrice tridimensionnelle(3D) de photodétecteurs supportés par des structures verticales (DU) reliés à un fond marin avec un réseau câblé

La construction d'un télescope à neutrino dans la mer profonde est techniquement très difficile

- ✓ Très haute pression
- ✓ Environnement chimiquement agressif
- ✓ opération de déploiement sûr, robuste et précis

## articles techniques

- ✓ Modules optiques
- ✓ Electronique frontale
- ✓ Acquisition de données, le transport de données
- ✓ Structures mécaniques, câble de dorsale
- ✓ Stratégie générale de déploiement
- ✓ réseau Sea-bed: câbles, boîtes de jonction
- ✓ Dispositifs d'étalonnage
- ✓ Assemblée, le transport, la logistique
- ✓ L'analyse des risques et de contrôle de la qualité

## Exigences

- ✓ Rentable
- ✓ Reliable
- ✓ Reproductible
- ✓ Facile à déployer

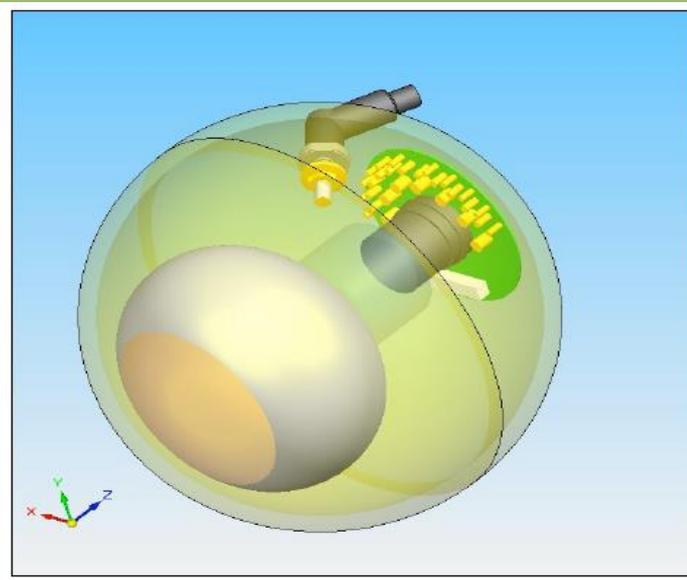
# Modules optiques

## Deux solutions alternatives dans le TDR pour l'OM

### Single-PMT Optical Module

Tubes photomultiplicateurs de 8 pouces avec 35% d'efficacité quantique à l'intérieur d'une boule en verre de 13 pouces

Evolution des projets pilotes



### Multi-PMT Optical Module

31 small PMTs (3 pouces) à l'intérieur d'une boule en verre de 17 pouces



Le premier prototype complet prêt à la fin de 2010

- 31 PMT de bases (total ~140 mW)
- Refroidissement du bouclier et de la tige



# Modules optiques

## Deux solutions alternatives dans le TDR pour l'OM

### Avantages des mono-PMT du module optique

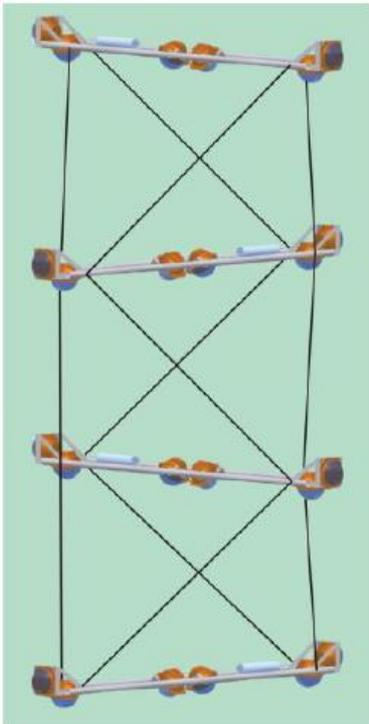
- grande acceptance angulaire
- bonne réponse temporelle
- technologie bien connue

### Avantages des multi-PMT du module optique

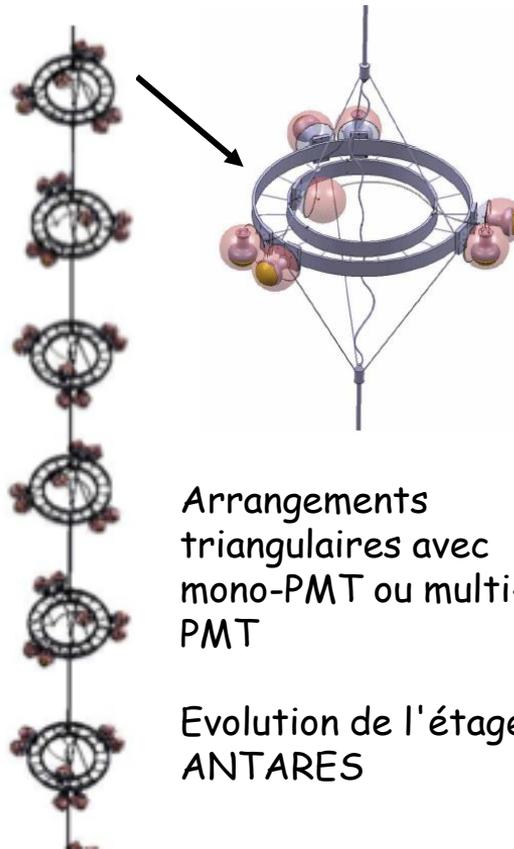
- surface de photocathode supérieure à 3 PMT de 8 pouces
- insensible au champ magnétique de la Terre -> pas de blindage mu-métal
- photon unique de multi-photon frappe la séparation
- informations sur la direction d'arrivée sur la lumière de Tcherenkov, meilleure reconstruction de la piste

# Unités de détection(DO)

Trois solutions alternatives dans le TDR(Rapport technique de conception) pour les DUs

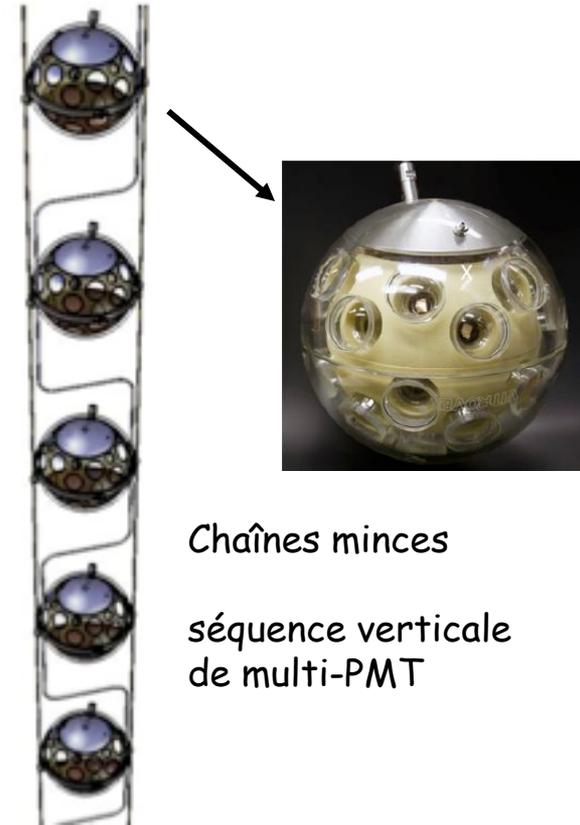


tour flexible avec des barres horizontales équipées de mono-PMT ou multi-PMT



Arrangements  
triangulaires avec  
mono-PMT ou multi-  
PMT

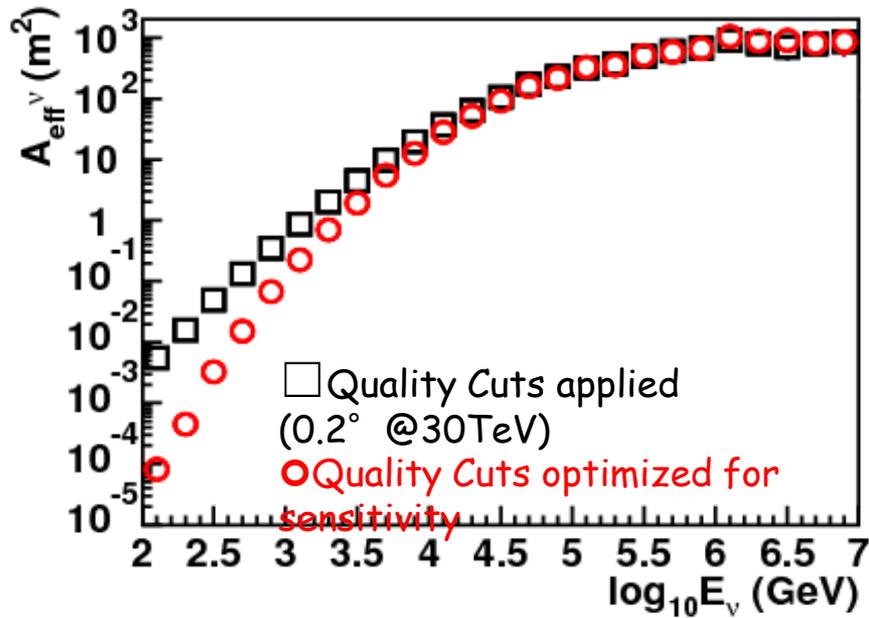
Evolution de l'étage  
ANTARES



Chaînes minces  
séquence verticale  
de multi-PMT

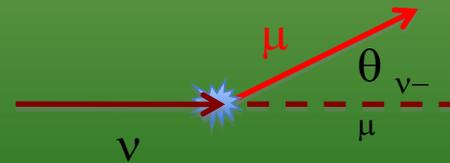
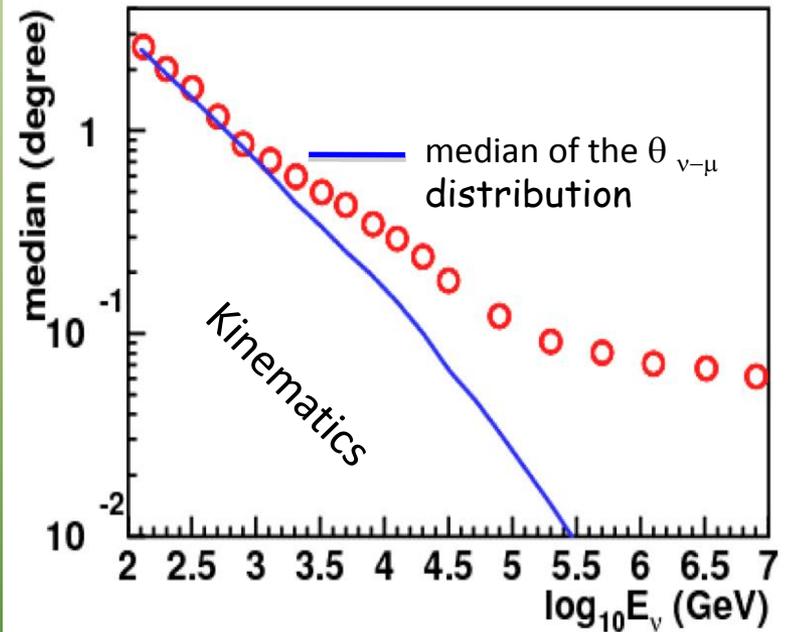
# KM3NeT: aire effective & résolution

Aire effective du neutrino



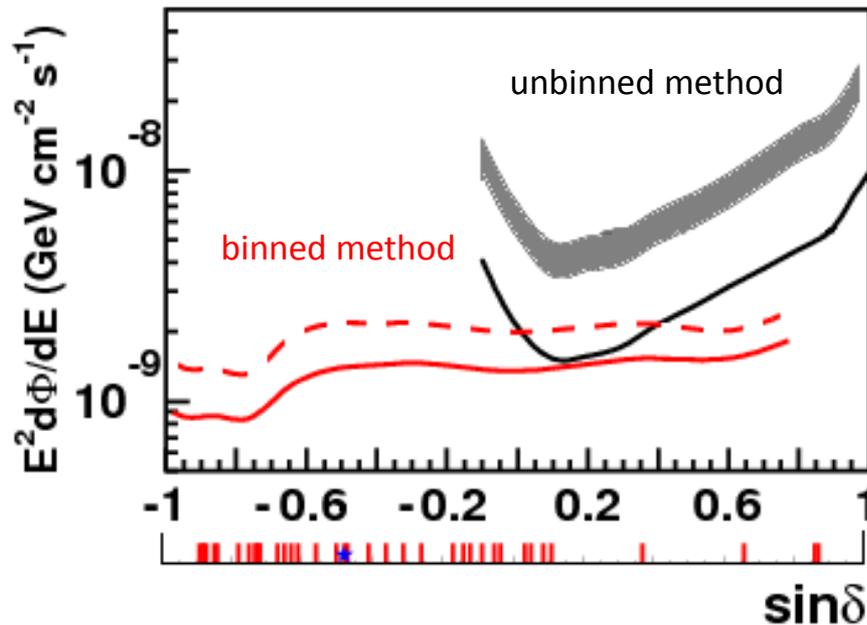
Résolution moyenne de

$$\Delta\Omega_{\nu-\mu\text{rec}}$$

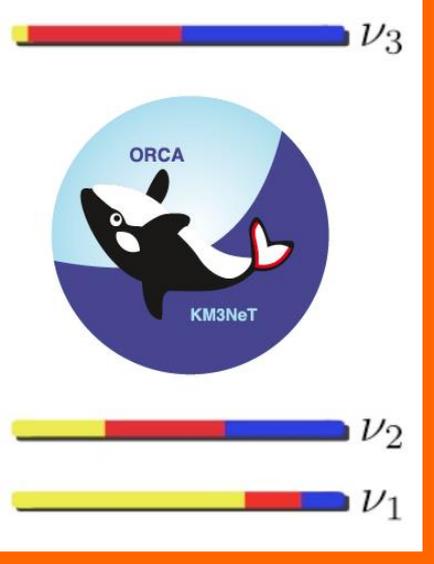


# KM3NeT: sensibilité & découverte

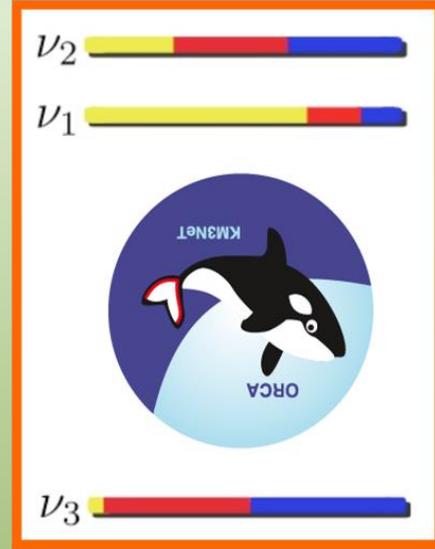
Spectre en  $E^{-2}$  de la sensibilité (découverte des flux)  
pour le point source pendant 1 année d'observation



- KM3NeT :sensibilité 90%CL
- - - KM3NeT :découverte 5σ 50%
- IceCube :sensibilité 90%CL
- IceCube :découverte 5σ 50% ( )



# ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss):



Etude de la faisabilité des mesures de l'hierarchie de masse de neutrino avec les neutrinos atmosphériques dans la méditerranée

Collaboration KM3NeT



## ORCA: un détecteur Cherenkov sous-marin de neutrino dans le cadre KM3NeT

ORCA est construit sur l'expertise de la Collaboration KM3NeT, qui vise à la mise en place d'un télescope à neutrinos multi-km<sup>3</sup> en Méditerranée pour effectuer à haute énergie (TeV-PeV) l'astronomie neutrino:

- Même principe de détection : la lumière Tcherenkov émise par les particules secondaires produit par l'interaction du avec de la matière autour du détecteur
- Même technologie et conception neutrino du détecteur (lignes instrumentées ancrées sur le fond marin et supportant des modules optiques numériques multi-PMT)
- Réseau plus dense d'abaisser le seuil d'énergie à  $\sim$  GeV
- L'espacement des lignes et la longueur limitée par des contingences de déploiement

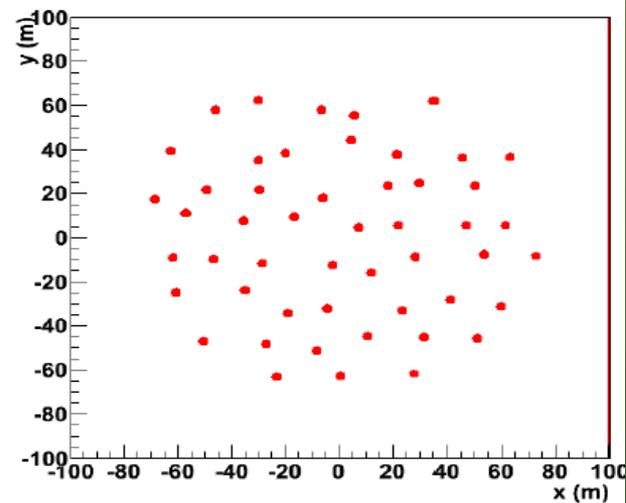
### ORCA detector:

- 50 strings 20m spaced
- 20 DOM/string spaced 6m

Instrumented volume:

$$\Pi \times 70^2 \times 114 = 1.75 \text{ Mt}$$

50 strings - PMT pos



(Optimisation complète à effectuer sur la base d'un détecteur avec différentes options de masquage)

## Mesure d'hiérarchie de la masse de neutrino avec les neutrinos atmosphériques

✓ Les valeurs de tous les paramètres d'oscillation des neutrinos peuvent maintenant être extraites de données disponibles avec une précision meilleure que 15%, la plus grande incertitude qui subsiste étant sur  $\theta_{23}$ .

La valeur relativement importante de  $\theta_{13}$  (qui entraîne l'oscillation  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ ) est un atout pour la détermination des paramètres de neutrinos inconnus restants:

- la valeur de la phase de violation CP ( $\delta_{CP}$ ), et l'ordre des masses de neutrino.
- stratégie standard pour la détermination de NMH: oscillation  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  en présence d'effets de matières qui permettent de résoudre le signe de  $\Delta m_{13}^2$ :

$$P_{e \rightarrow \mu} \approx P_{\mu \rightarrow e} \approx \sin^2 \theta_{23} \sin^2(2\theta_{13}^{\text{eff}}) \sin^2\left(\frac{\Delta_{13}^{\text{eff}} L}{2}\right)$$

$$\Delta_{13} = \frac{\Delta m_{13}^2}{2E_\nu} \quad \sin^2(2\theta_{13}^{\text{eff}}) = \frac{\Delta_{13}^2 \sin^2(2\theta_{13})}{\Delta_{13}^{\text{eff}} L}$$

$$\Delta_{13}^{\text{eff}} = \sqrt{[\Delta_{13} \cos(2\theta_{13}) - A]^2 + \Delta_{13}^2 \sin^2(2\theta_{13})}$$

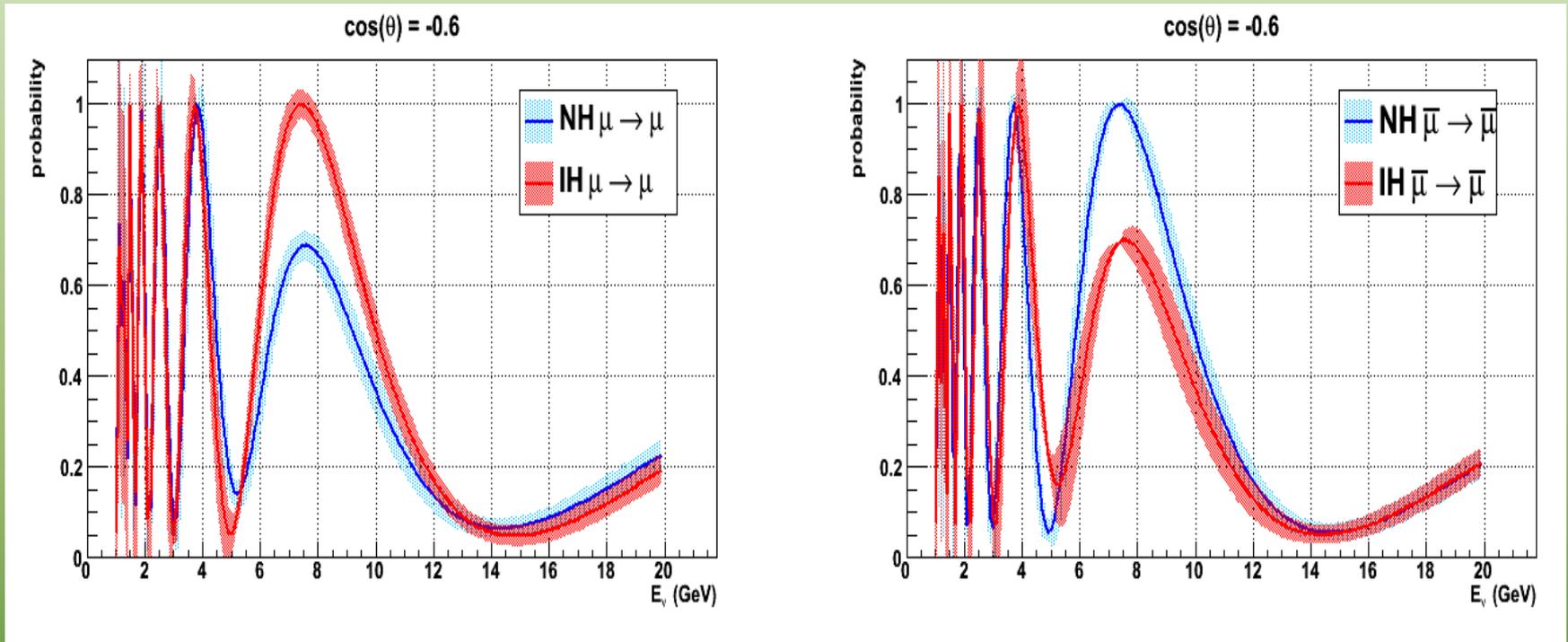
$$A = \sqrt{2} G_F N_e \text{ for } \nu \text{ and } A = -\sqrt{2} G_F N_e \text{ for } \bar{\nu}$$

La mise en valeur d'oscillation est maximale à l'énergie de résonance :

$$E_\nu^{\text{res}} = \pm \frac{\Delta m_{13}^2 \cos(2\theta_{13})}{2\sqrt{2} G_F N_e}$$

$E_{\text{res}} \approx$  quelques GeV pour la densité terrestre de la matière  
meilleures perspectives pour les neutrinos atmosphériques!

# Mesure d'hierarchie de la masse de neutrino avec les neutrinos atmosphériques

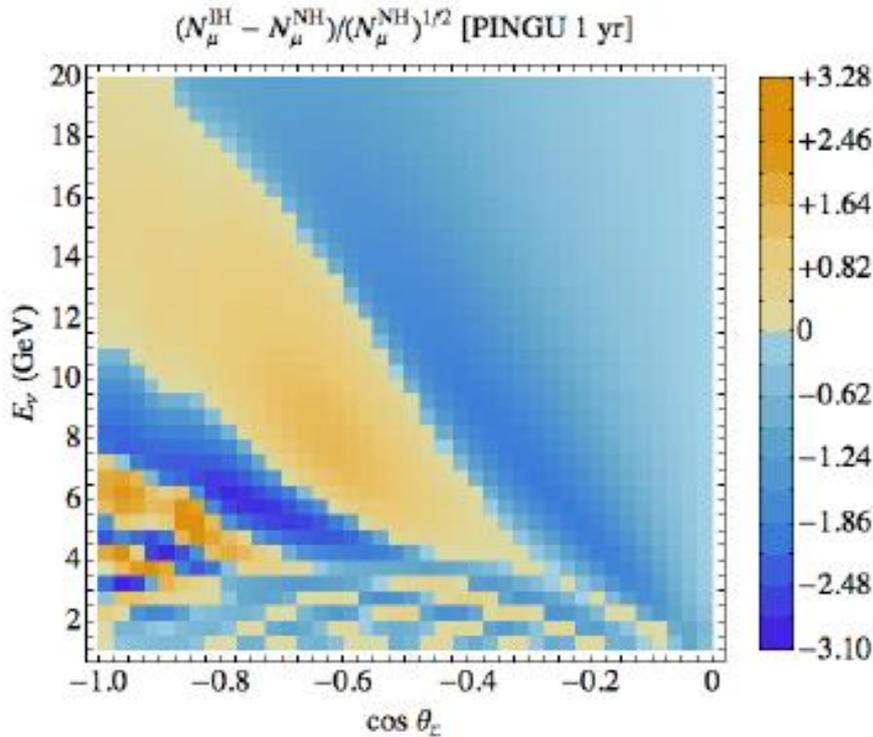


L'effet maximal à quelques GeV  $\approx$  pour la matière des densités de la Terre (en fonction de la ligne de base)

Mais  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu, \text{NH}) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu, \text{IH})$

➡ d'autres ingrédients sont nécessaires pour créer une différence dans le nombre d'événements d'IH vs NH:

# Mesure d'hierarchie de la masse de neutrino avec les neutrinos atmosphériques



modèles distinctifs en  $(E_{\nu}, \cos \theta_{\nu})$

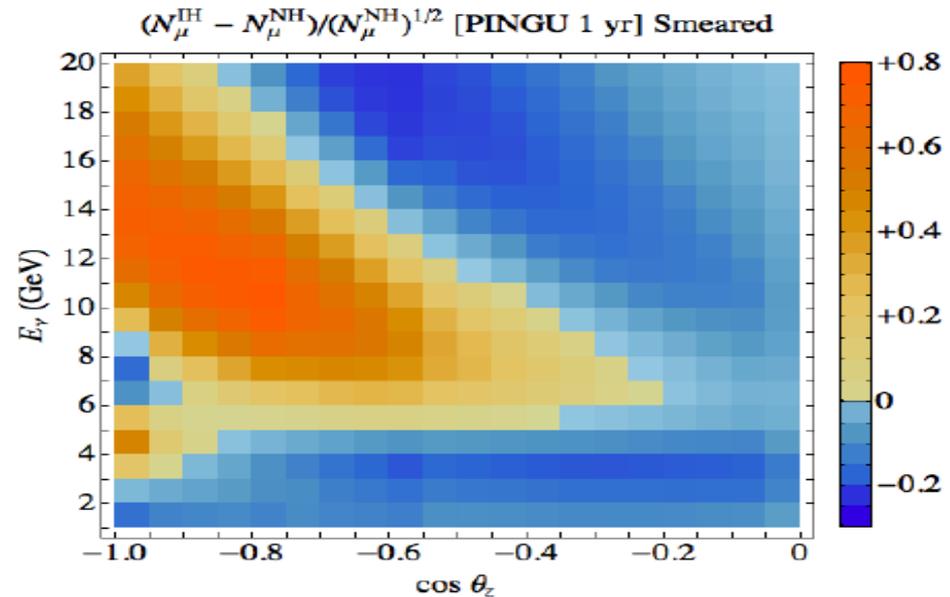
- oscillogrammes montrant la différence dans le nombre prévu d'événements pour les hiérarchies normales et inversées

## PRINCIPAUX DÉFIS:

NH / IH : différence intrinsèque petite

- En outre limitée par cinématique et intrinsèque fluctuations

- Oscillogrammes brouillée par l'énergie limitée et la précision angulaire du détecteur



$E, \theta$  smearing (kinematics + detector resolution)

# Résumé

- Une conception pour le télescope à neutrinos KM3NeT venant pour compléter le champ IceCube et dépasser la sensibilité de ce dernier par un facteur important
- La sensibilité requise peut être atteinte dans un budget global de 250 M € approximativement
- Mise en œuvre, avec l'augmentation du potentiel de découverte, est techniquement possible
- Processus de convergence vers une conception technique unique, en cours
- Plan de développement pour la qualification d'un modèle de l'unité de détection de pré-production définie

# Conclusion générale

Les sections précédentes fournissent des détails sur les performances du détecteur ORCA de KM3NeT pour établir l'hierarchie de la masse du neutrino et améliorer la précision sur les paramètres d'oscillation du secteur atmosphérique.

Bien que les résultats obtenus jusqu'à présent comptent sur des études complètes de Monte Carlo et des effets d'intégrations systématiques, des améliorations possibles ont déjà été identifiées et seront examinées dans un proche avenir.

Ceci comprend notamment :

- l'utilisation de la sensibilité obtenue à l'inélasticité de l'interaction comme un outil statistique
- Discrimination entre neutrino et antineutrinos et le rejet du fond de courant neutre

**Merci de votre attention**