

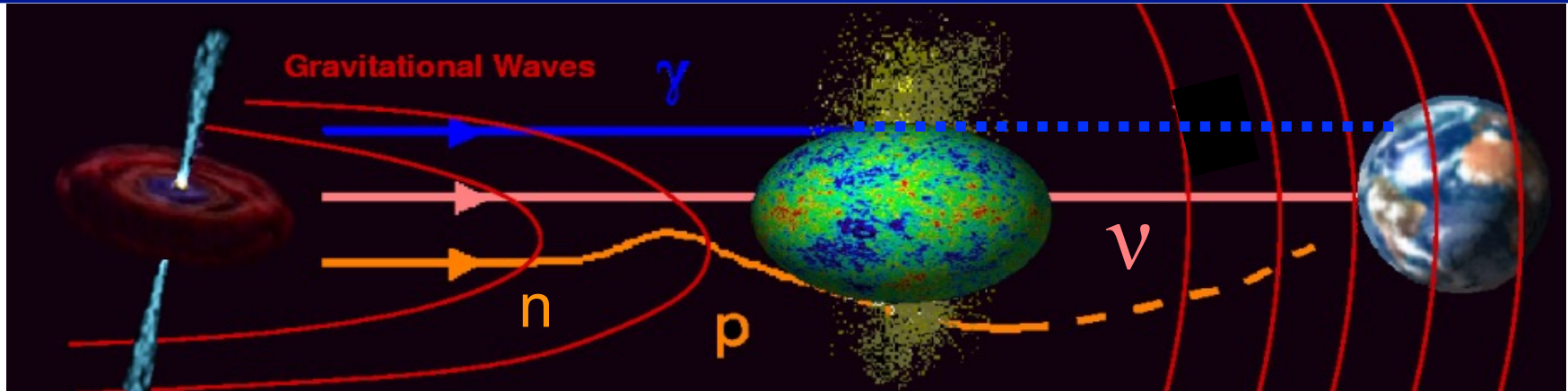


# Astrophysique et Neutrinos de haute énergie

Véronique Van Elewyck  
(APC & Université Paris Diderot)

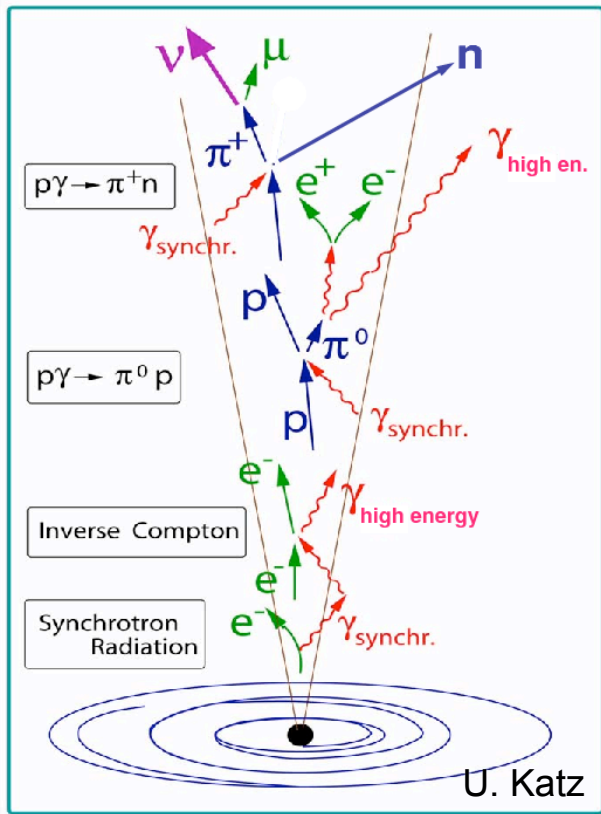
- ❖ Les neutrinos: des messagers cosmiques
- ❖ Les télescopes à neutrinos: IceCube et ANTARES
- ❖ La découverte des neutrinos cosmiques...et après ?
- ❖ La nouvelle génération: KM3NeT
- ❖ Perspectives

# Les neutrinos: des messagers cosmiques



- **Les neutrinos: des particules neutres, stables, faiblement interagissantes**
  - ✓ non absorbées par les fonds diffus → accès aux distances cosmologiques
  - ✓ non absorbées par la matière → accès aux environnements denses
  - ✓ Non déviées par les champs magnétiques → astronomie à travers tout le spectre énergétique
- **Corrélés en temps et en direction d'arrivée avec les signaux électromagnétiques / les ondes gravitationnelles**
- **Une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers (violent)**

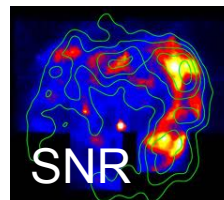
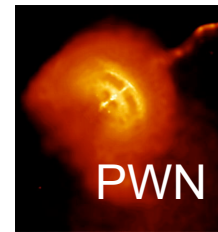
# Les neutrinos: des messagers cosmiques



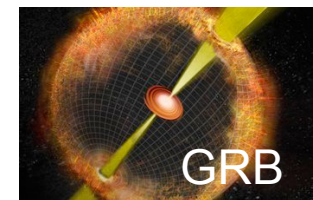
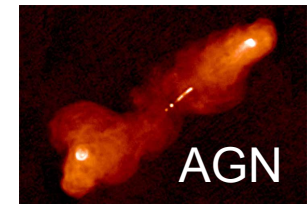
A haute énergie: les neutrinos sont des traceurs des processus hadroniques

... et donc des sites de production/accélération des rayons cosmiques (encore mal connus à haute énergie)

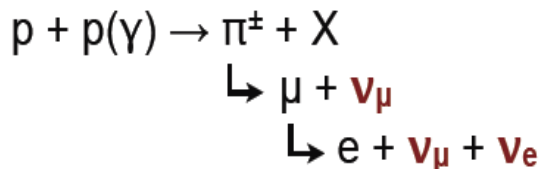
Galactiques



Extragalactiques



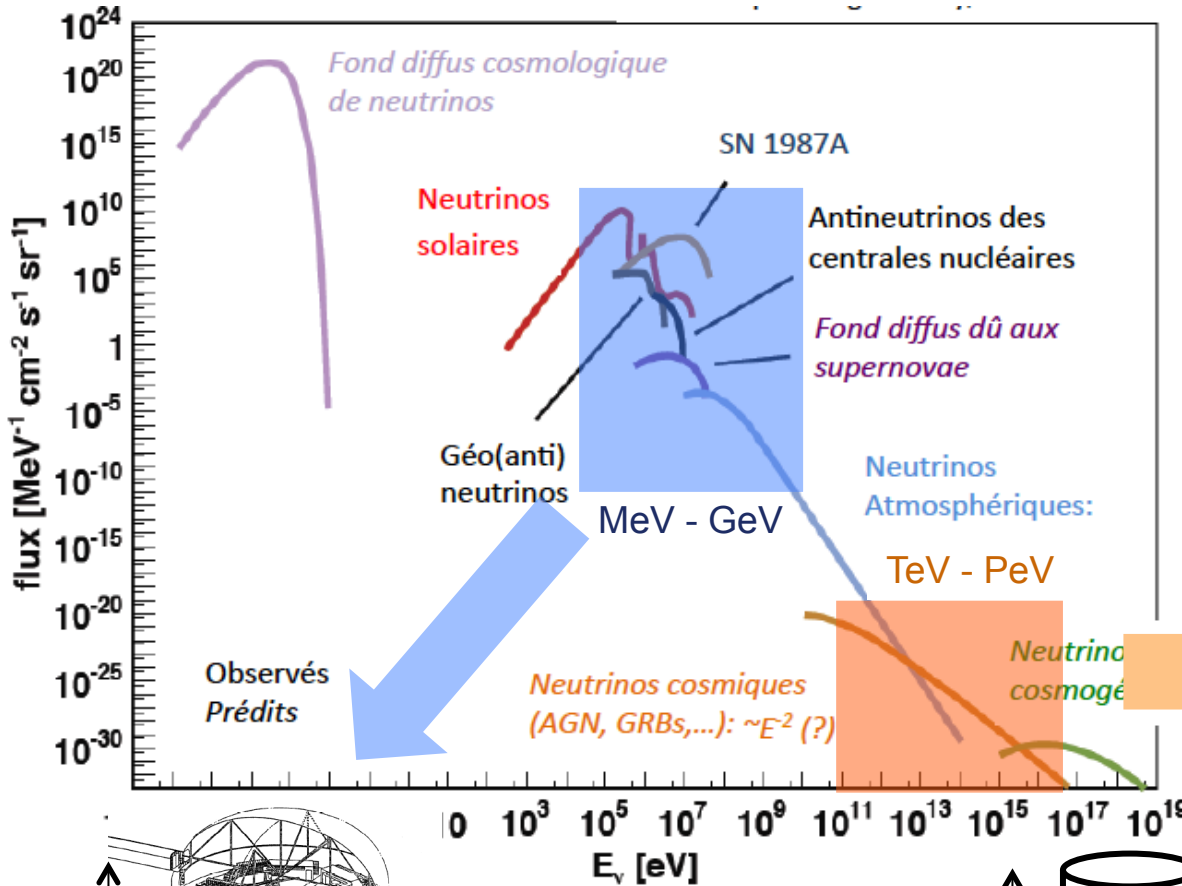
Spectre neutrino attendu  $\sim E^{-\gamma}$  avec indice spectral  $\gamma \approx 2$  (accélération des rayons cosmiques dans les sources: confinement + ondes de choc)



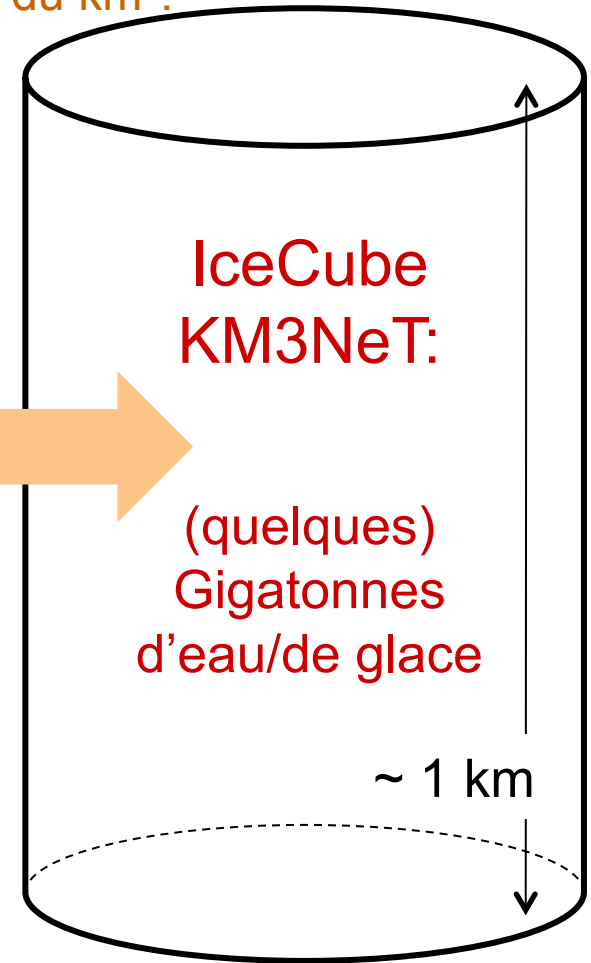
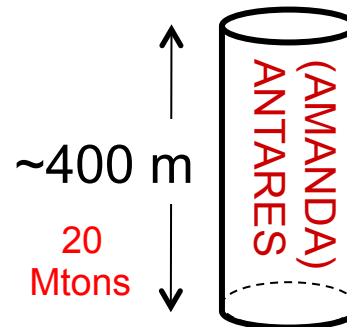
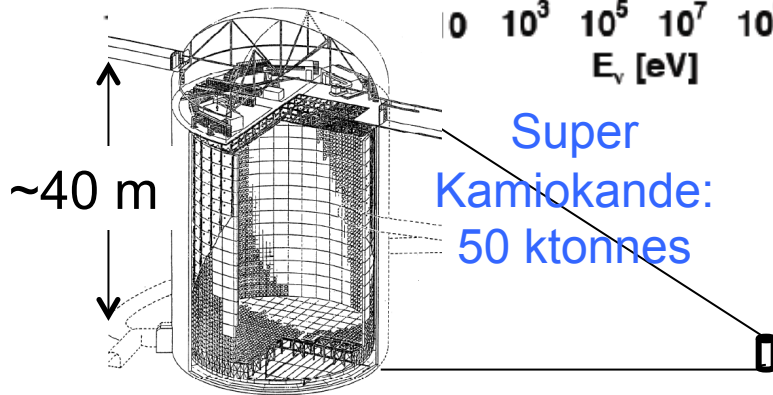
$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:2:0 \xrightarrow{\text{oscillations}} \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$$

à la source  à Terre

# Les télescopes à neutrinos

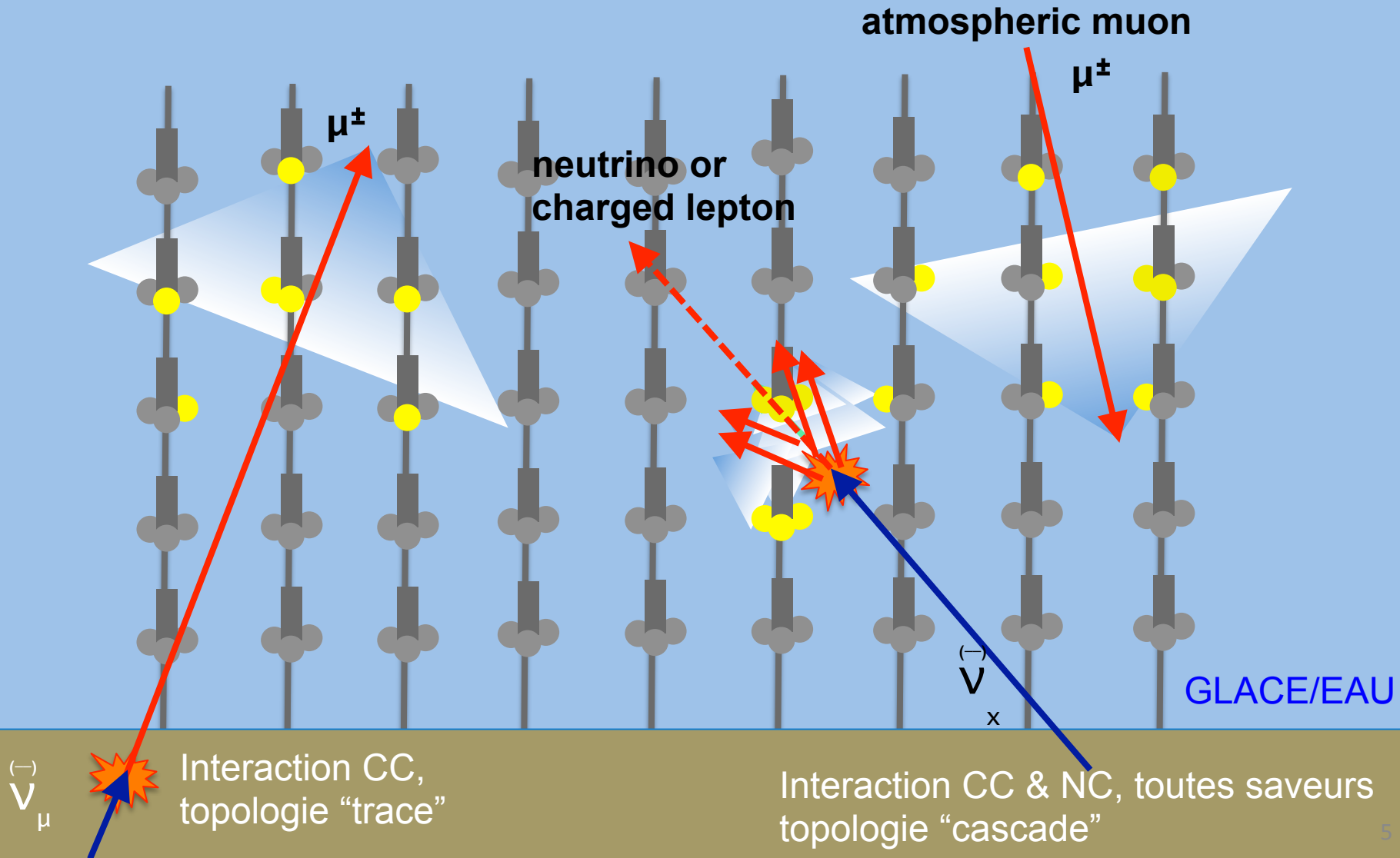


L'astronomie neutrino de haute énergie nécessite des détecteurs à l'échelle du km<sup>3</sup>:



# Principe de détection

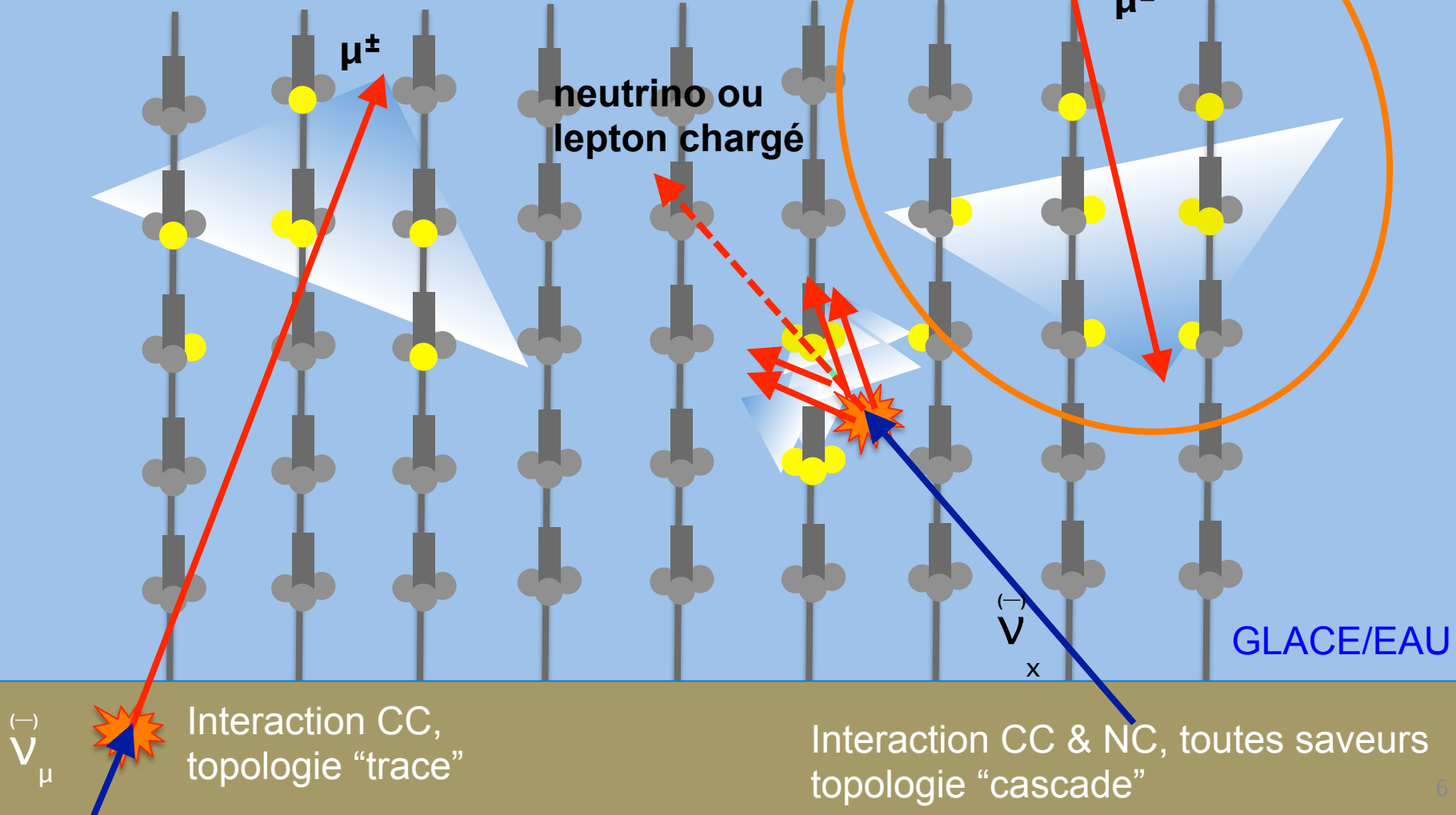
Matrice 3D de photomultiplicateurs



# Principe de détection

Matrice 3D de photomultiplicateurs

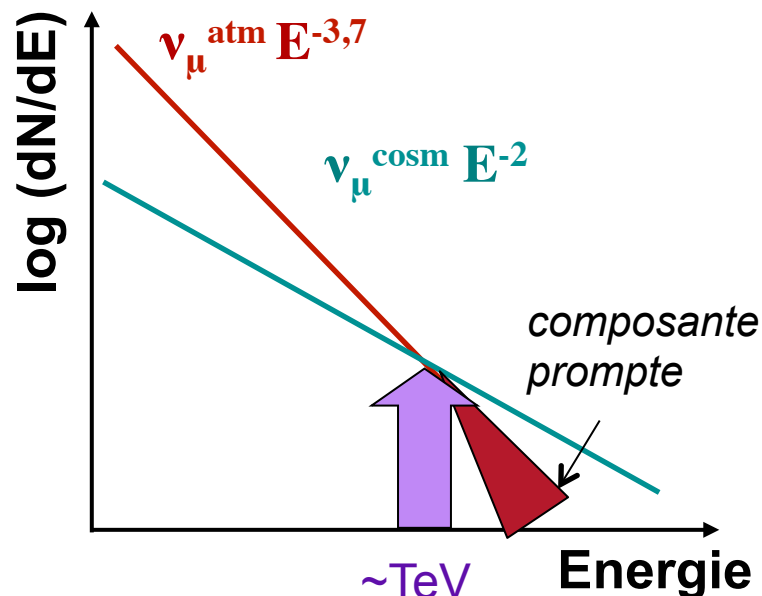
- détecteurs installés en profondeur
- optimisation pour les neutrinos « montants »
- utilisation d'un veto



# Principes d'analyse

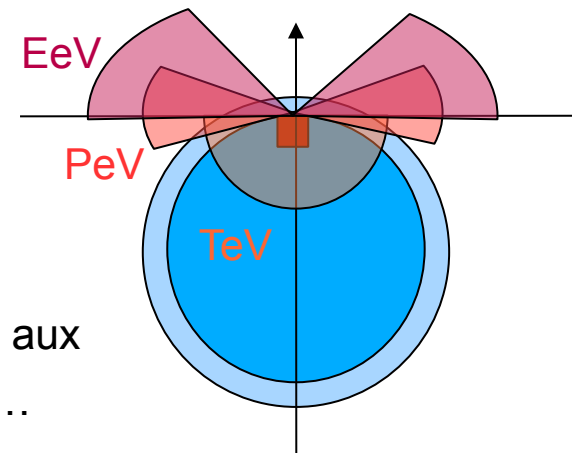
## Comment identifier les neutrinos cosmiques ?

- Excès à haute énergie (→ analyses de flux diffus)



→ utile pour les populations de sources non résolues individuellement & non localisées (e.g. extragalactiques)

→ ..la Terre devient opaque aux neutrinos au-delà du PeV...



- Anisotropies (accumulations) sur le ciel (→ recherches de sources ponctuelles)

→ requiert une bonne résolution angulaire

- Etudes multi-messagères

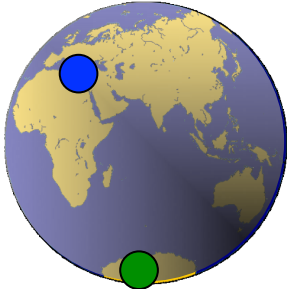
→ requiert la coïncidence spatio(-temporelle) avec d'autres messagers cosmiques: photons, rayons cosmiques, ondes gravitationnelles

# Les deux grands télescopes à neutrinos

## Dans la mer Méditerranannée: ANTARES

12 lignes, achevé en 2008  
 ~ 0,02 km<sup>3</sup> volume instrumenté  
 2450m profondeur au large de Toulon

Prototype pour un détecteur de taille kilométrique: **KM3NeT**

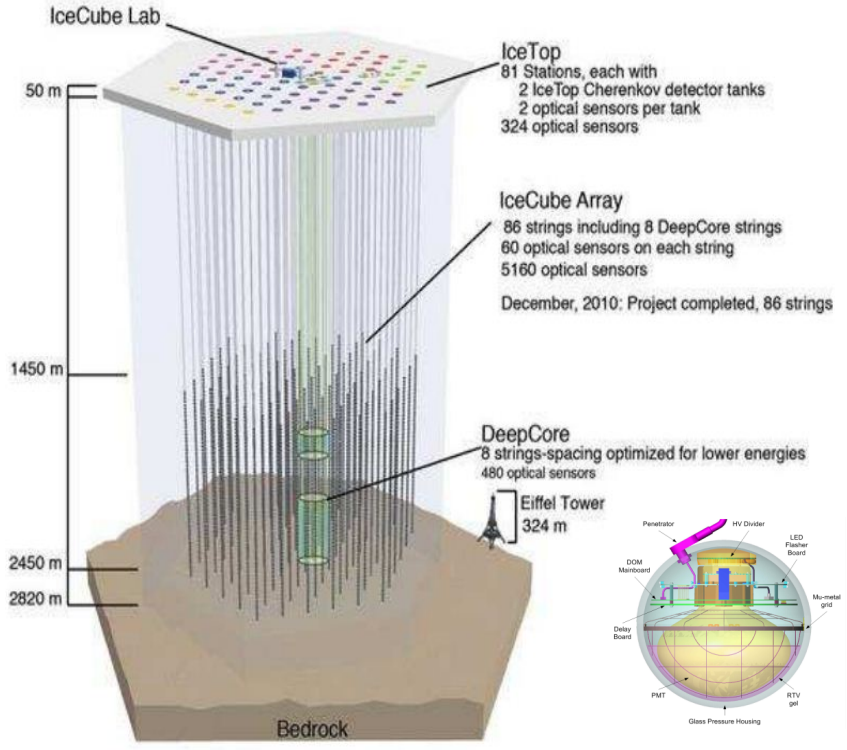
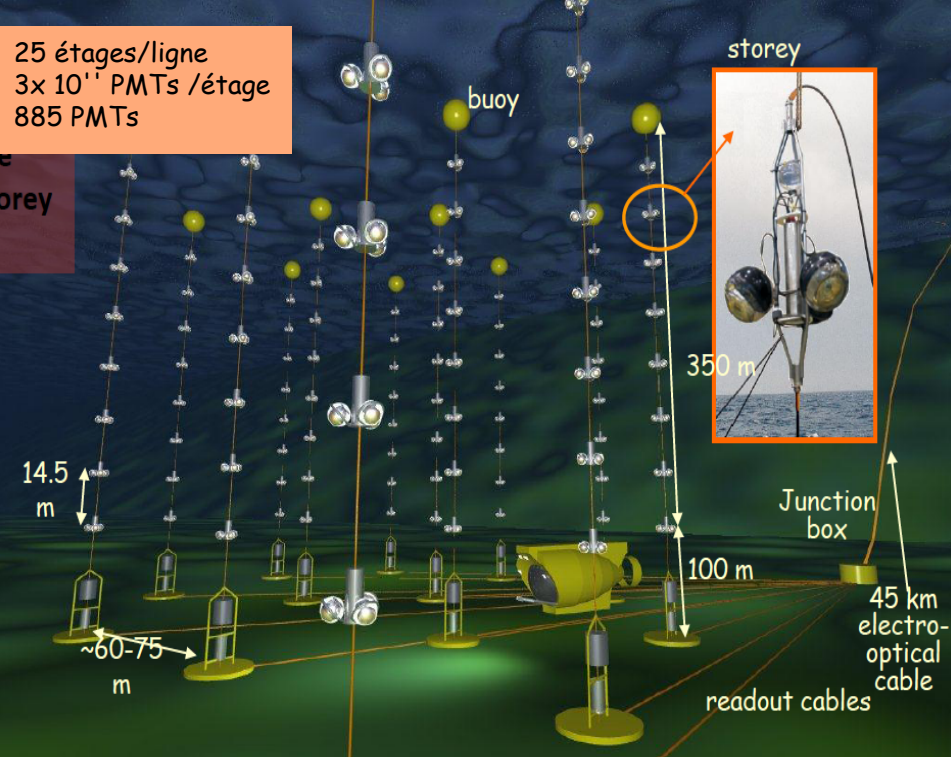


## Au Pôle Sud: IceCube

**InIce**: 86 lignes, achevé en 2010  
 ~ 1 km<sup>3</sup> volume instrumenté

**DeepCore**: 8 lignes, configuration dense

**IceTop**: détecteurs de surface pour les gerbes atmosphériques



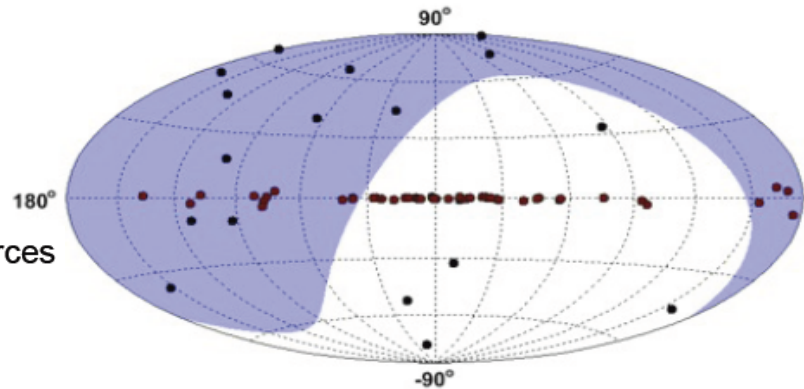
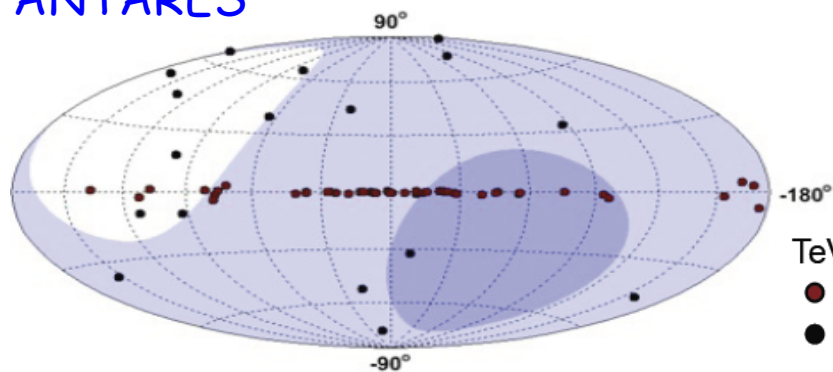


# Les deux grands télescopes à neutrinos

Complémentarité des champs de vue (TeV  $\rightarrow$  PeV)..

IceCube

ANTARES

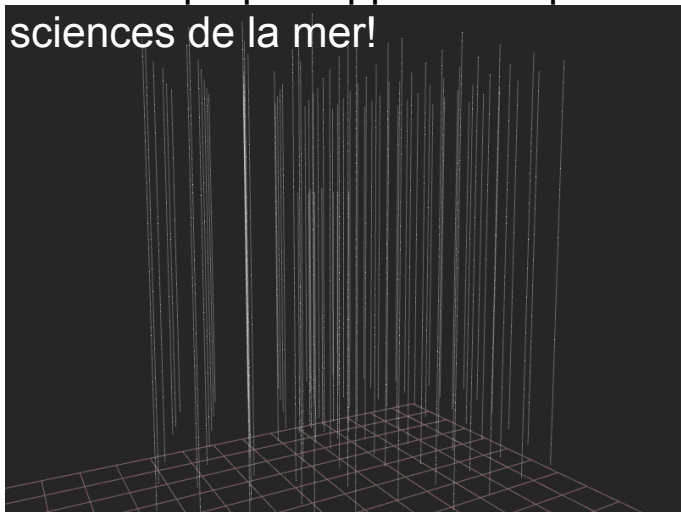


TeV gamma-ray sources

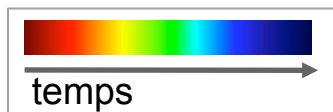
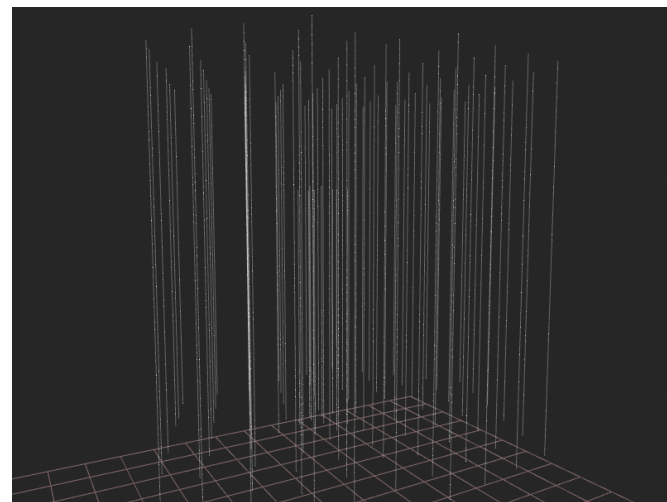
- Galactic
- extragalactic

...différents environnements:

EAU: faible diffusion de la lumière  
 $\rightarrow$  meilleure résolution angulaire  
Activité optique: opportunité pour les sciences de la mer!



GLACE: faible absorption de la lumière  
 $\rightarrow$  Meilleur calorimètre  
environnement « silencieux »



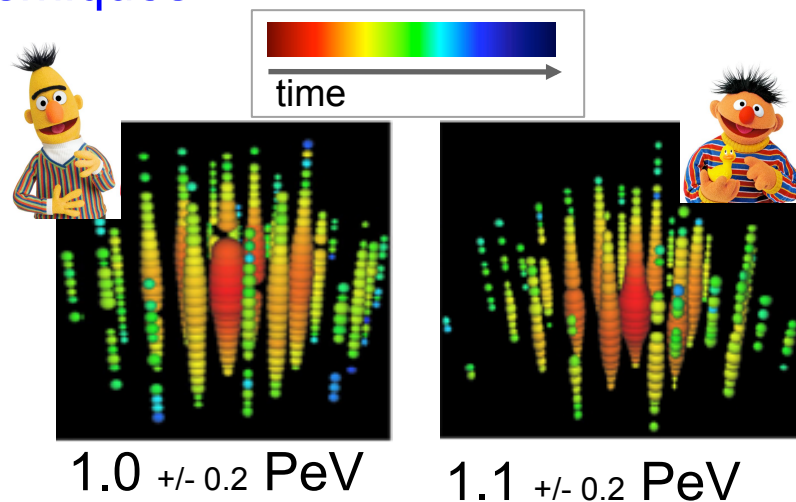
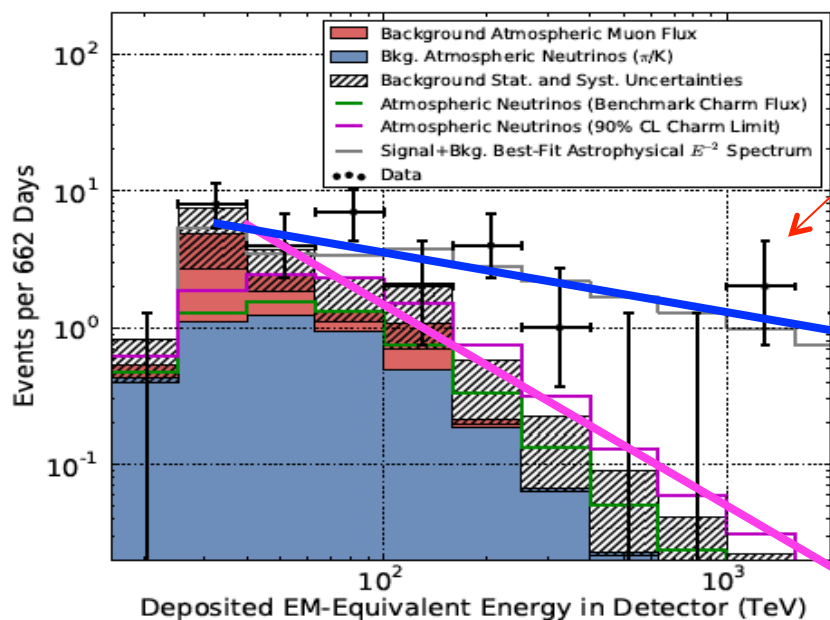
# Les débuts de l'astronomie neutrino HE

**2013**

Première détection de neutrinos cosmiques de haute énergie par IceCube!

- ❖ 2 événements de type « cascade » au PeV
- ❖ Analyse réoptimisée pour sélectionner les high-energy starting events (HESE):

seuil en énergie  $\sim 30$  TeV  
 + définition d'un veto contre les  $\mu_{\text{atm}}$  &  $\nu_{\text{atm}}$   
 couverture  $4\pi$  sr

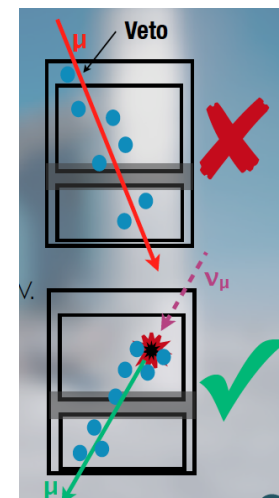


2 ans de données:

28 événements observés  
 (7 traces et 21 cascades)

11 évts attendus ( $\mu_{\text{atm}}$  &  $\nu_{\text{atm}}$ )

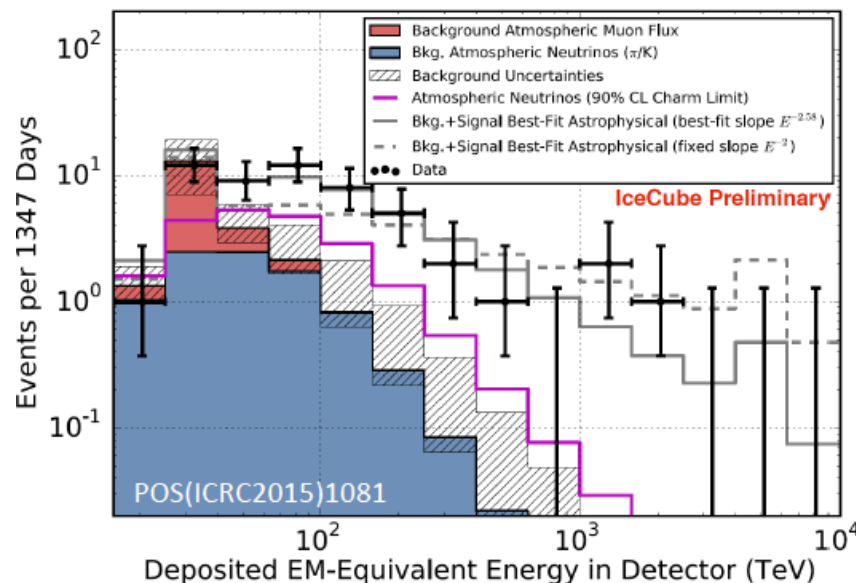
Significane 4.1 $\sigma$



# ...et aujourd'hui ?

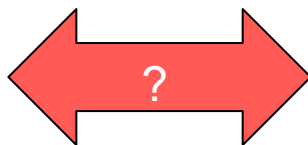
## Echantillon HESE 4 ans:

15 traces + 39 cascades  
Hémisphères Nord et Sud  
Seuil en énergie ~30 TeV



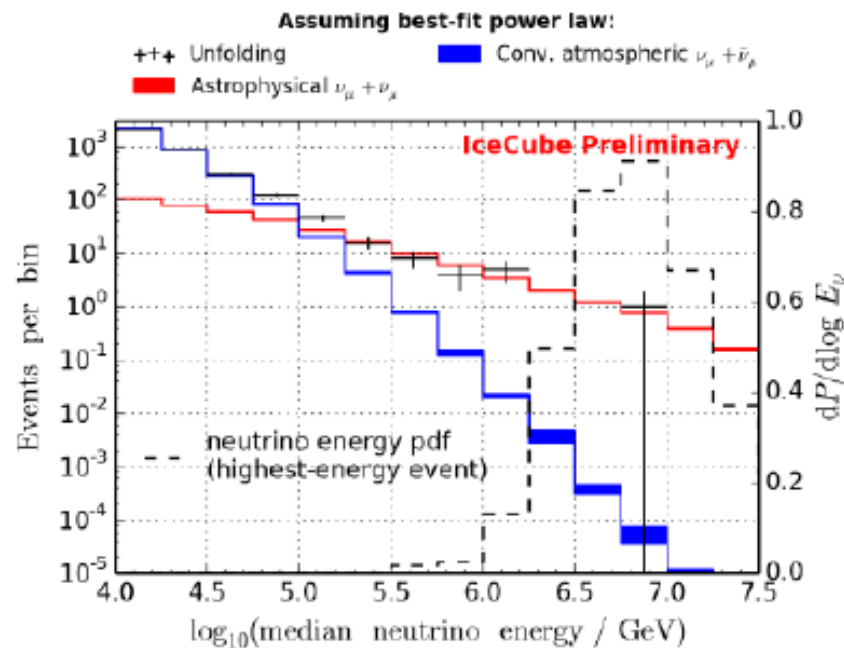
significance  $6.5 \sigma$

Meilleur fit du spectre:  $\sim E^{-2.58}$



## Echantillon $\nu_\mu$ montants (traces)

Hémisphère Nord uniquement  
Seuil en énergie ~100 GeV



significance  $5.9 \sigma$

Meilleur fit du spectre:  $\sim E^{-2.08}$   
(1 événement à  $>5$  PeV!)

- Indication d'une brisure dans le spectre ? (les seuils en énergie sont différents)
- Indication de la présence de composantes galactique et extra-galactique ? (les zones du ciel sont différentes)

# Le ciel en neutrinos HE vu par IceCube

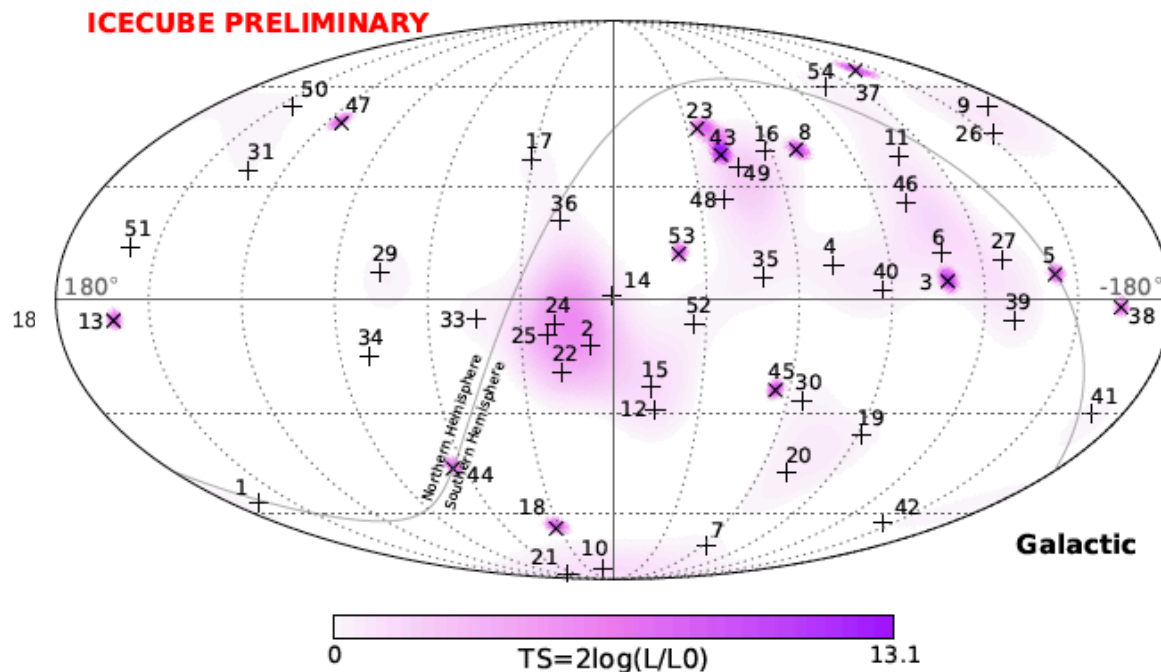
Echantillon HESE 4 ans (54 événements)

15 traces (x)

résolution angulaire  $1^\circ$

39 cascades (+)

résolution angulaire  $10^\circ - 45^\circ$



Pas d'accumulation significative:

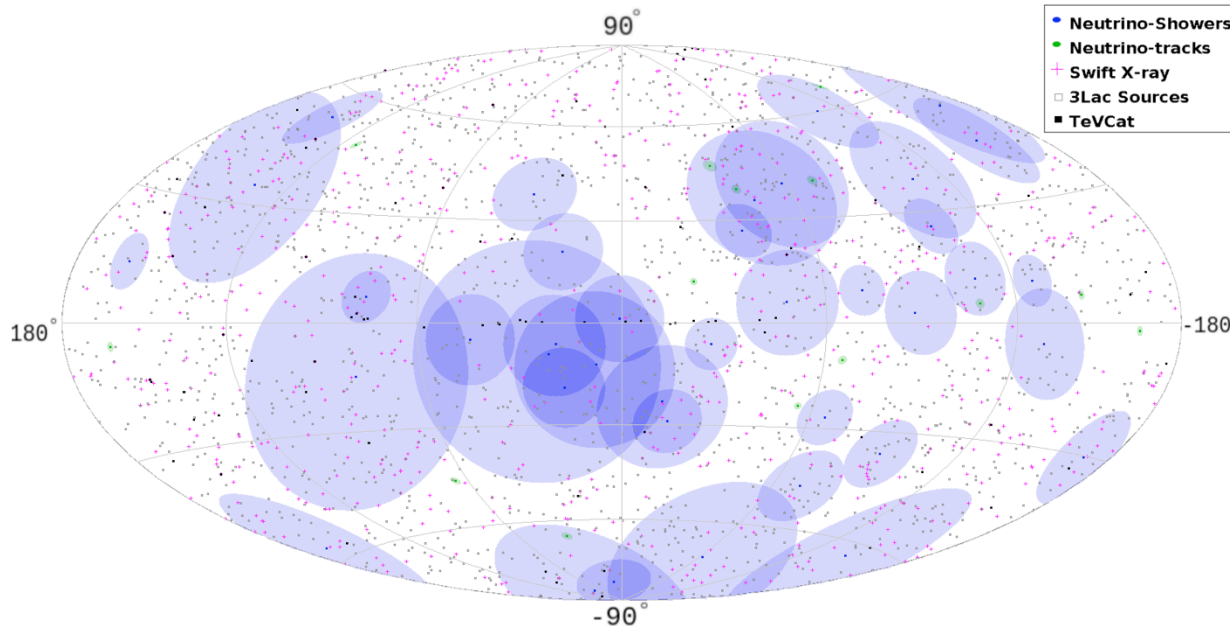
consistant avec un flux diffus (> 100 sources)

Pas de signal en provenance du plan galactique

Pas de contrepartie électromagnétique observée

# Le ciel en neutrinos HE vu par IceCube

Echantillon HESE 4 ans (54 événements)



15 traces (x)

résolution angulaire  $1^\circ$

39 cascades (+)

résolution angulaire

$10^\circ - 45^\circ$

**Pas d'accumulation significative:**

consistant avec un flux diffus (> 100 sources)

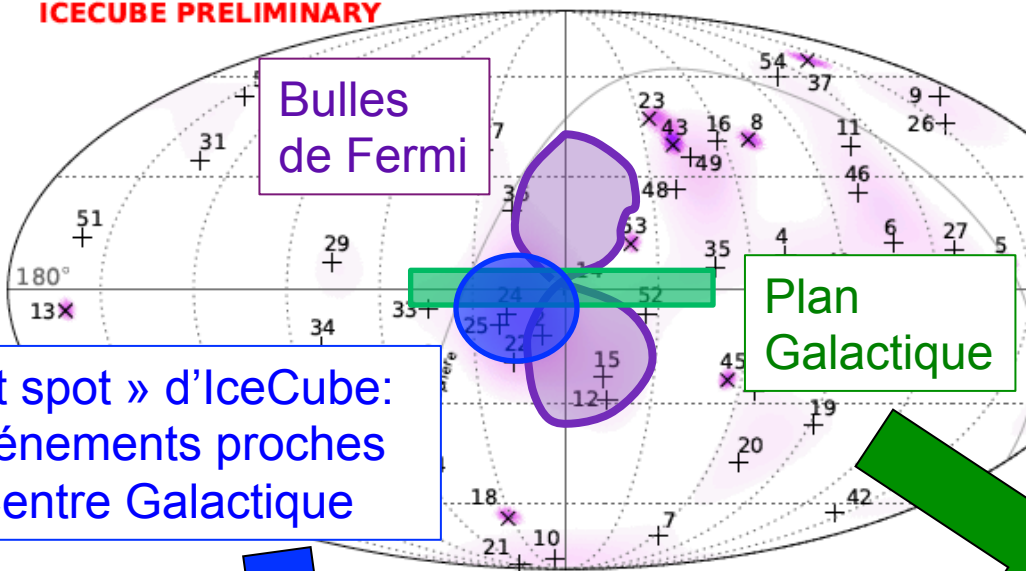
Pas de signal en provenance du plan galactique

Pas de contrepartie électromagnétique observée

# Le ciel en neutrinos HE vu par IceCube

Echantillon HESE 4 ans (54 événements)

ICECUBE PRELIMINARY



Bulles de Fermi

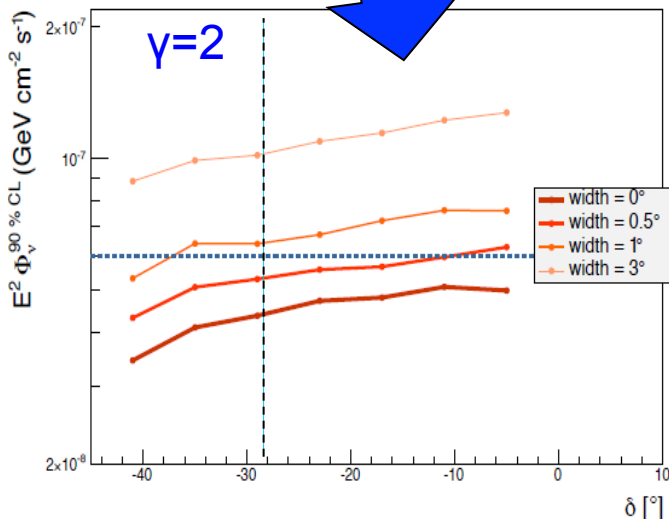
Plan Galactique

...Que peut apporter ANTARES ?

Meilleure visibilité de la zone galactique aux énergies 1 TeV → 100 TeV

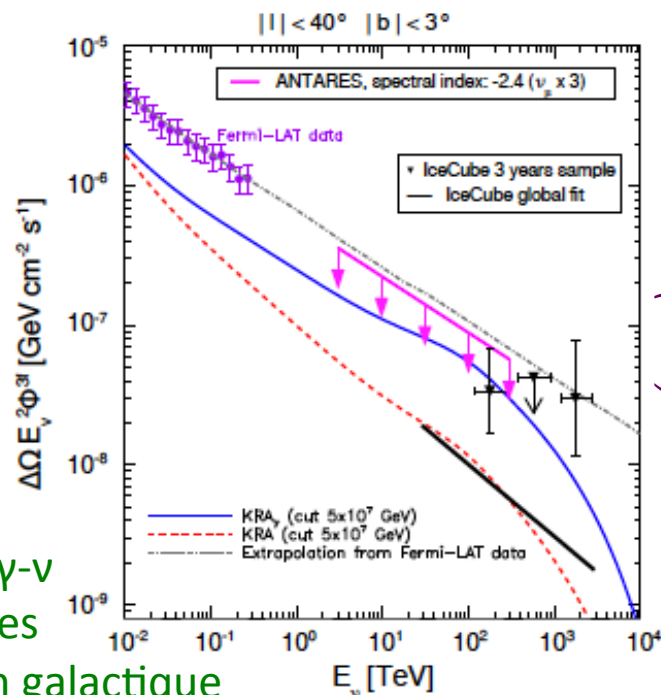
Meilleure résolution angulaire:  
 < 0.4° traces  
 < 3° cascades

« hot spot » d'IceCube:  
 6 événements proches du Centre Galactique



exclut une source unique comme origine du hot spot dans 20° autour du CG

teste la connection  $\gamma$ -gamma-neutrinos des modèles d'émission galactique

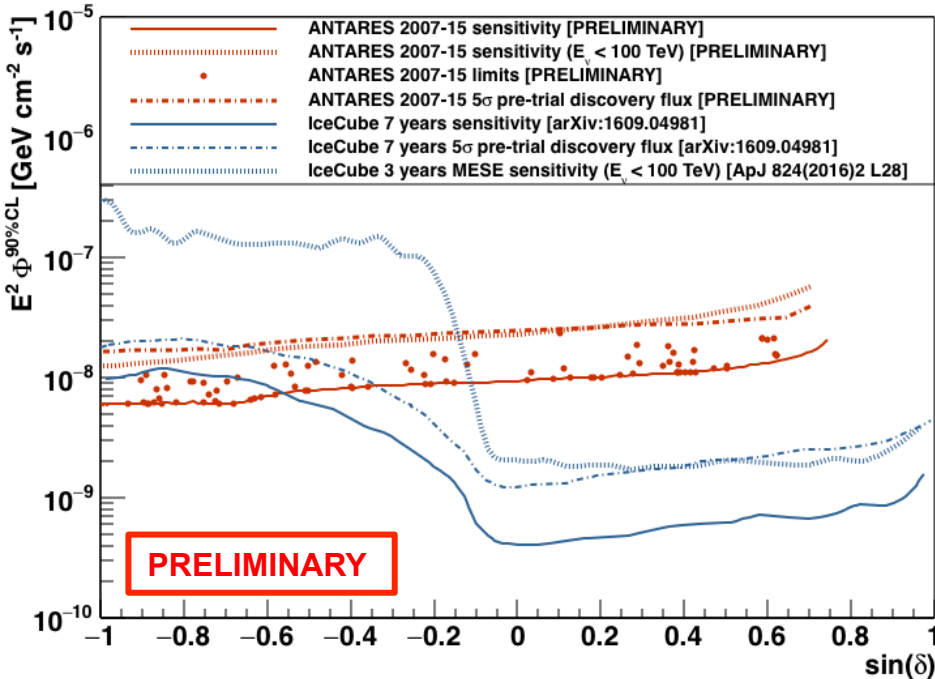


PLB 760(2016)143

# Les derniers résultats d'ANTARES

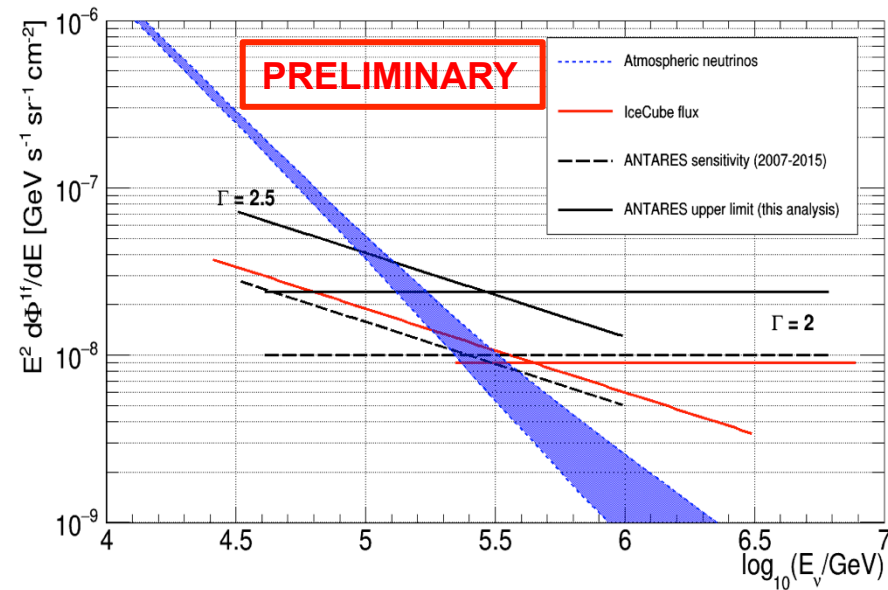
## Sources ponctuelles:

ANTARES 2007-2015 (2424 jours)  
7269 traces + 180 cascades  
"All-sky" + 92 candidats sources  
+ 8 HESE  $\mu$



## Flux diffus:

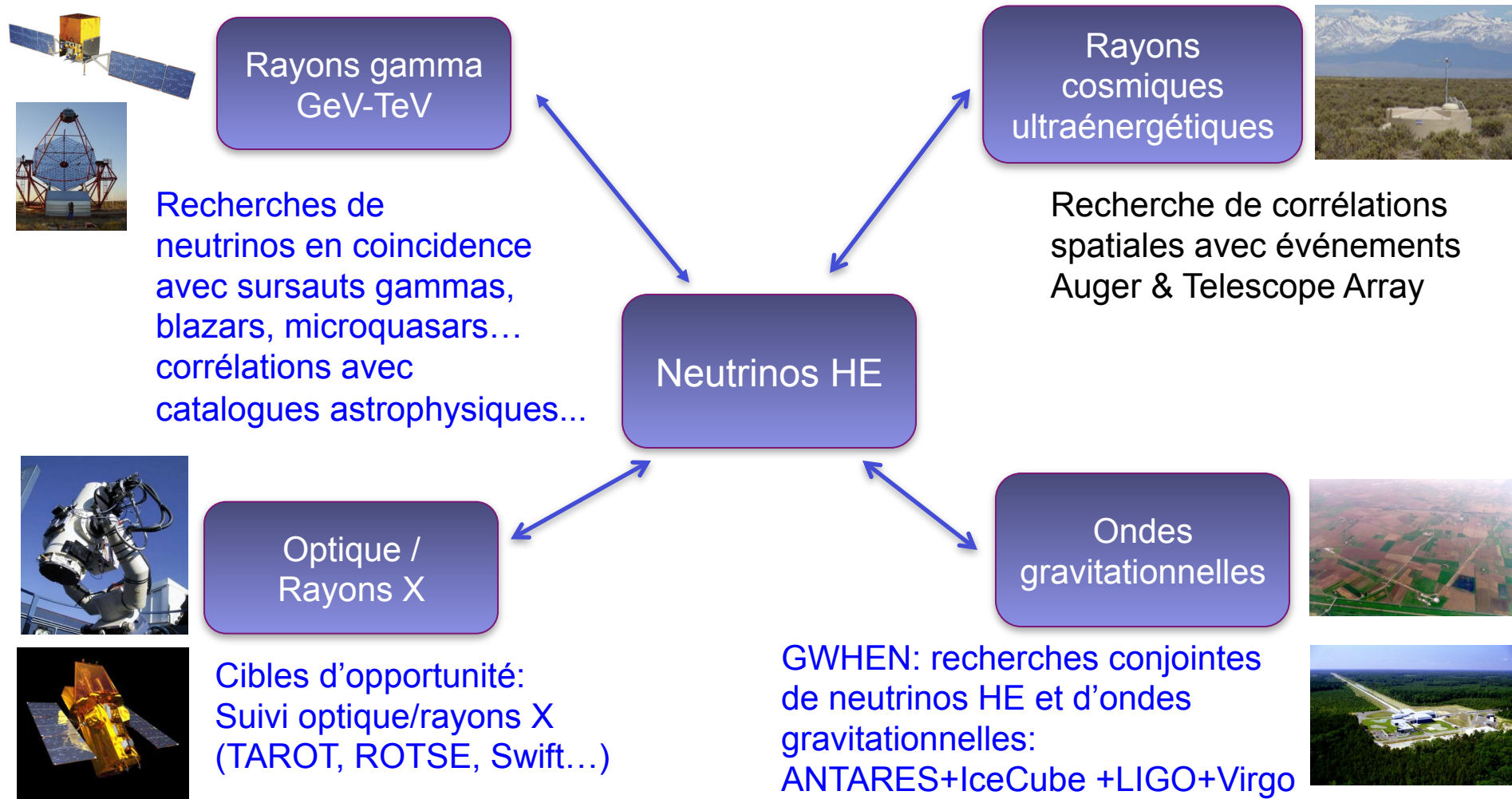
ANTARES 2007-2015 (2451 jours)  
traces + cascades



...résultats compatibles avec  
bruit de fond + signal IceCube...

Complémentarité ANTARES-IceCube  $E < 100$  TeV  
➔ développement d'analyses conjointes

# Les programmes multi-messagers



- ➔ augmentation de la sensibilité des instruments (lots de données indépendants)
- ➔ meilleure compréhension des phénomènes en jeu au sein des sources
- ➔ Effort dans le développement de programmes d'alertes « temps réel»



# Le futur de l'astronomie neutrino

Un contexte enthousiasmant:

les premiers neutrinos cosmiques HE détectés par IceCube ☺

...bientôt une confirmation en provenance des détecteurs de l'hémisphère Nord ?

pas encore de sources résolues

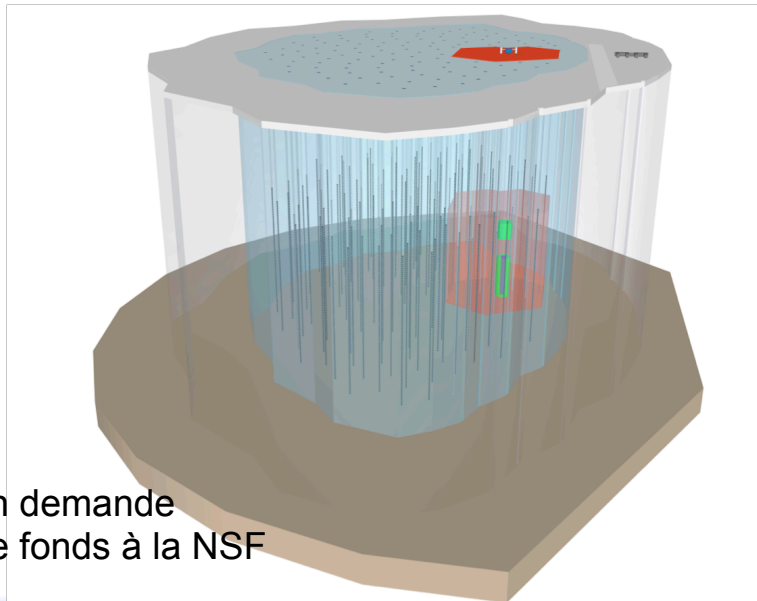
... identification possible d'une composante galactique ?

... les stratégies multimessagères (et un peu de chance) seront décisives

... l'astronomie « toutes saveurs » est un must!

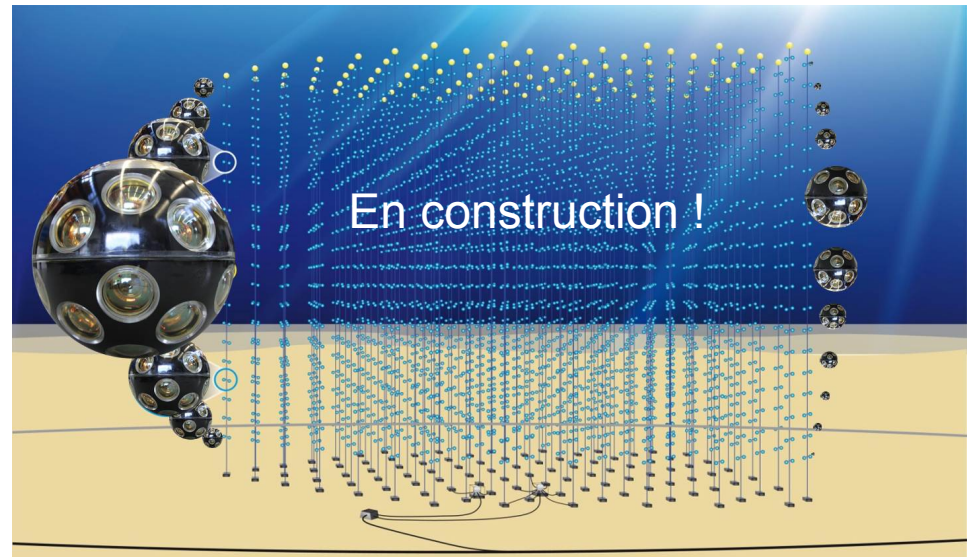
➔ la prochaine génération de télescopes à neutrinos est indispensable !

IceCube extension (Gen2)



en demande  
de fonds à la NSF

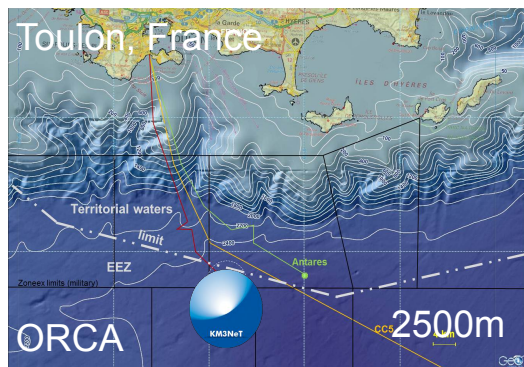
KM3NeT: plusieurs km<sup>3</sup> dans la Méditerranée



# KM3NeT: ORCA & ARCA

En construction sur 2 sites, 2 objectifs de physique principaux:

**O**scillations and **A**stroparticle **R**esearch with **C**osmics in the **A**byss



Physique fondamentale avec les neutrinos atmosphériques

Détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos



Astronomie neutrino de haute énergie:

Confirmation du signal d'IceCube et observation de sources Galactiques

Même technologie:  
Multi-PMT Digital  
Optical Module



31 x 3" PMTs

Couverture  $\sim 4 \pi$  sr

Comptage des photons

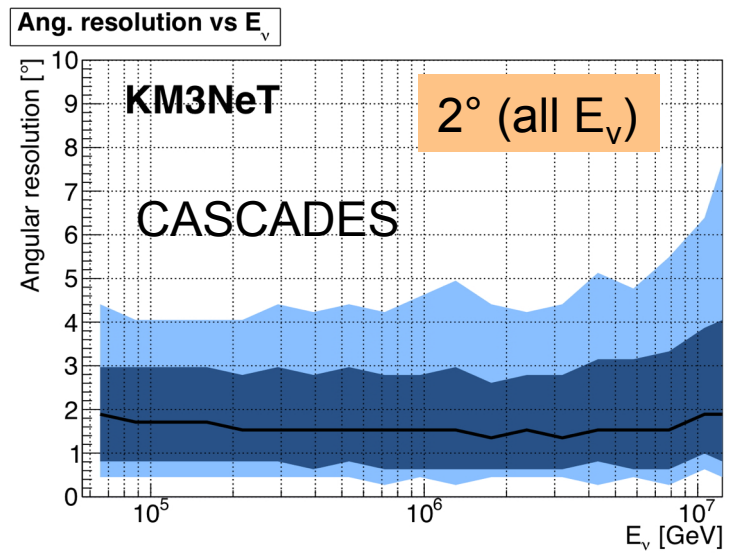
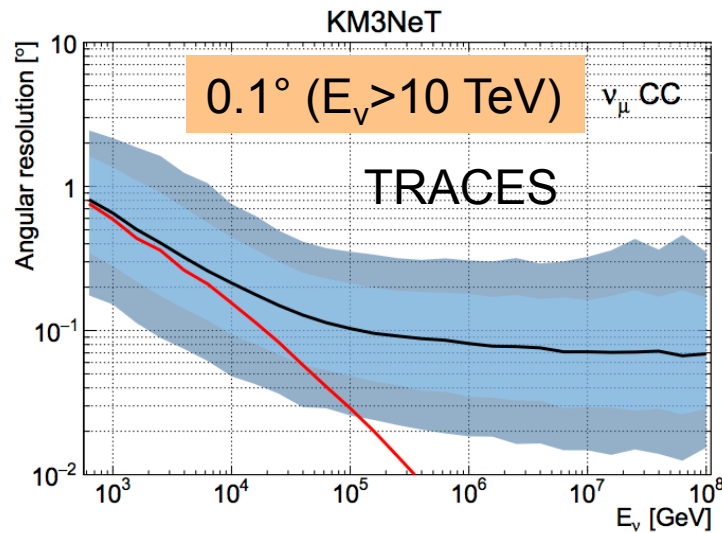
Information directionnelle

Réjection du bruit de fond

	ORCA	ARCA
Detector line distance	20 m	90 m
DOM spacing	9 m	36 m
Instrumented mass (1 building block = 115 lignes)	5.7 Mton	500 Mton

# Performances attendues d'ARCA

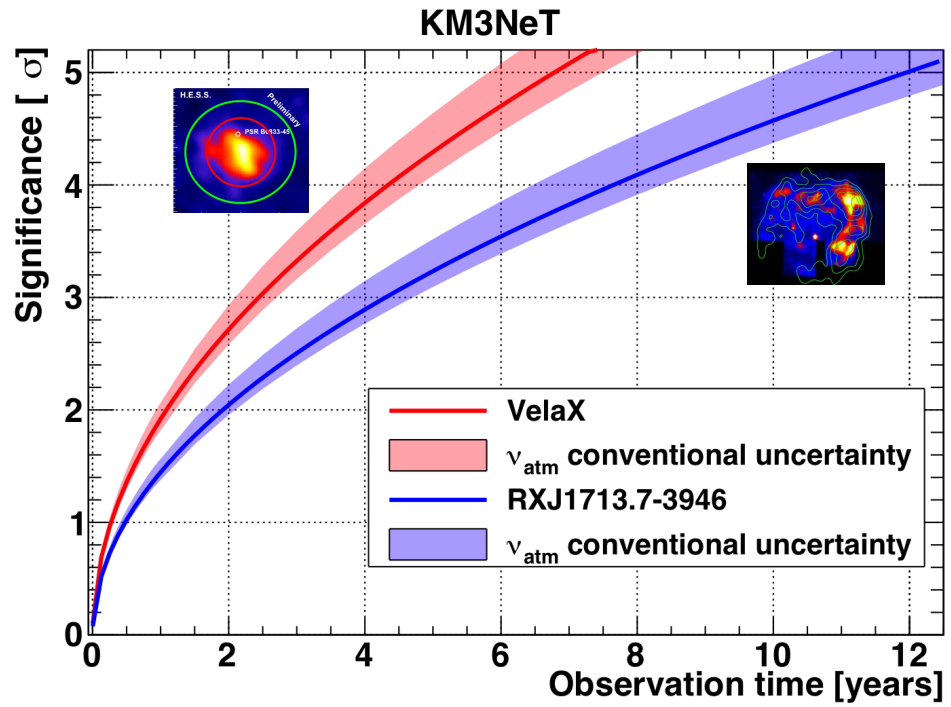
Le début de l'astronomie toutes saveurs!



PHASE 1 (en cours): infrastructure + 24 lignes

PHASE 2 (→ 2020):  
observation du signal d'IceCube  
(combiné traces et cascades: 5 en 6 mois)

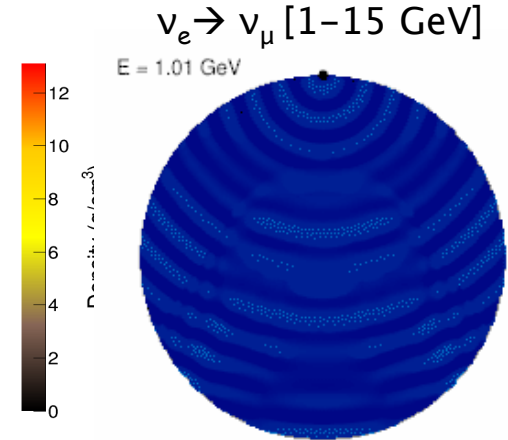
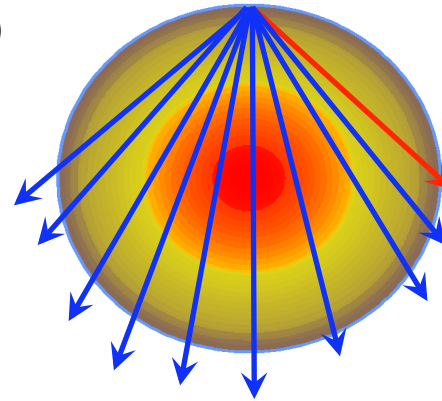
étude des premières sources Galactiques ?



# ORCA: Motivations

Comment mesurer la hiérarchie de masse avec les neutrinos atmosphériques ?

- Un "faisceau" de composition connue ( $\nu_e, \nu_\mu$ )
- Large spectre de baselines (50  $\rightarrow$  12800 km) et d'énergie (GeV  $\rightarrow$  PeV)
- L'oscillation des neutrinos est modifiée par les effets de matière (qui dépendent de la hiérarchie)



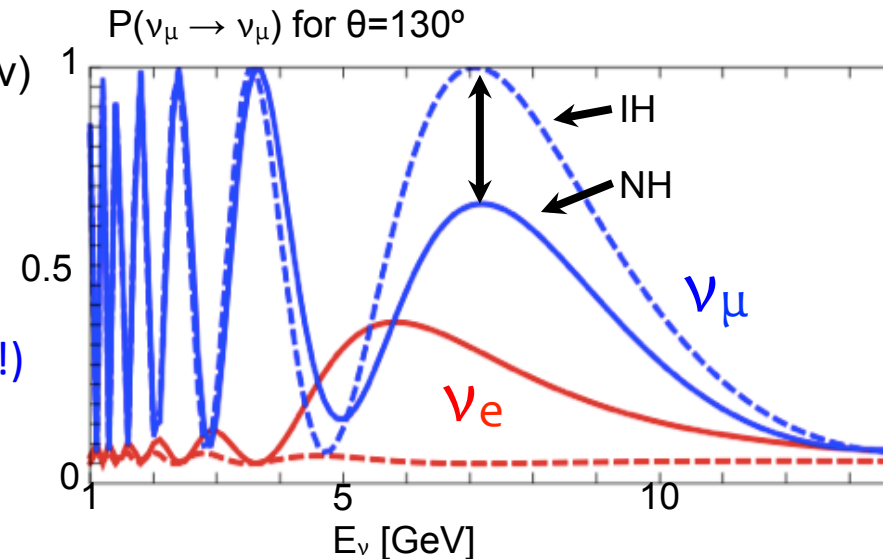
(c) Joao Coelho

différence IH  $\leftrightarrow$  NH maximum pour  $\theta=130^\circ$  (7645 km) et  $E_\nu = 7$  GeV (manteau)

- Effet opposé sur les anti-neutrinos: IH( $\nu$ ) $\approx$ NH(anti- $\nu$ )  
MAIS le flux et la section efficace sont différents:  
 $\Phi_{\text{atm}}(\nu) \approx 1.3 \times \Phi_{\text{atm}}(\text{anti-}\nu)$   
 $\sigma(\nu) \approx 2\sigma(\text{anti-}\nu)$

➡ opportunité pour les détecteurs Cherenkov à eau à la Mtonne (même sans ID de charge!)

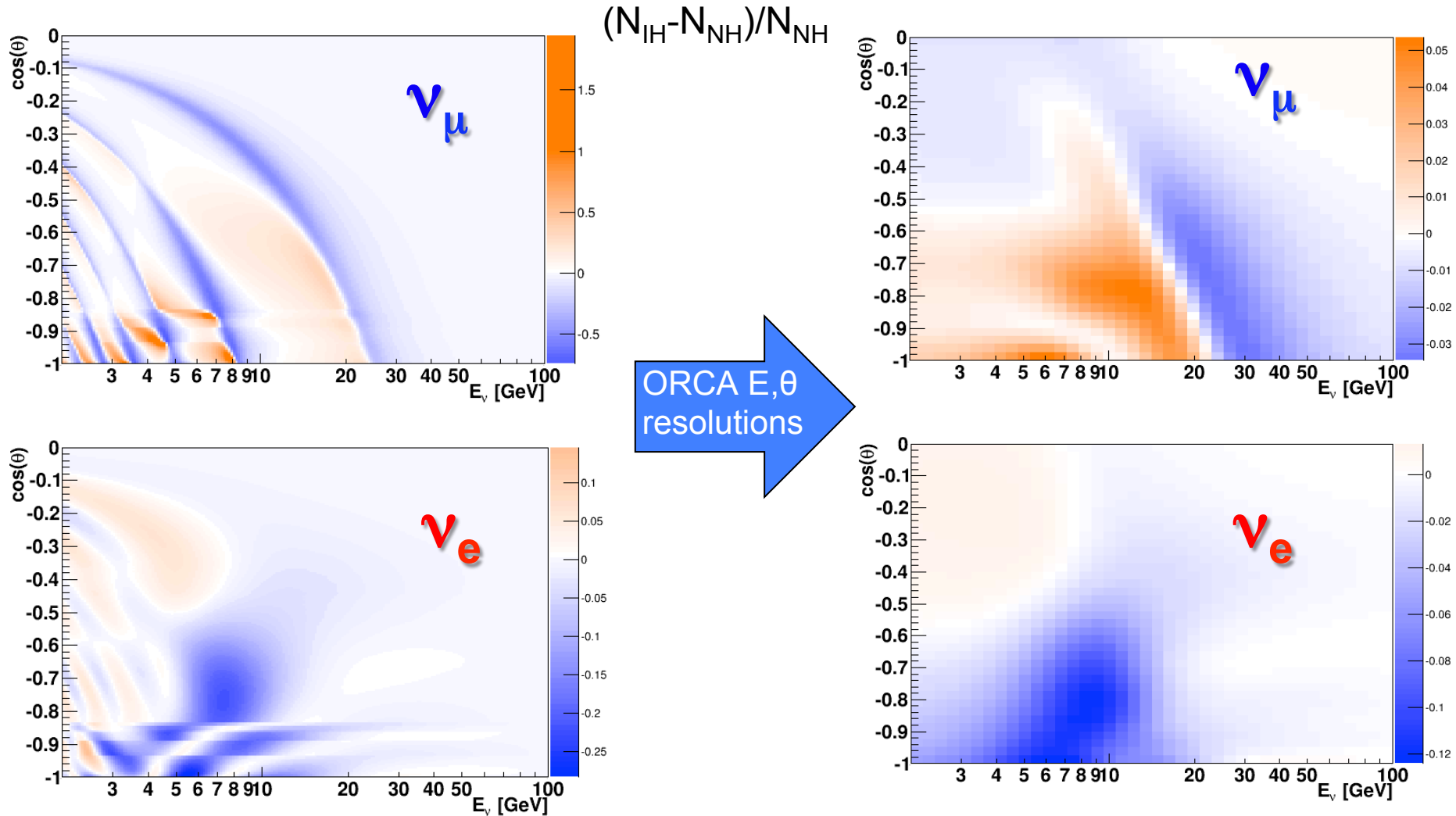
➡ Motivation accrue depuis la mesure de  $\theta_{13}$



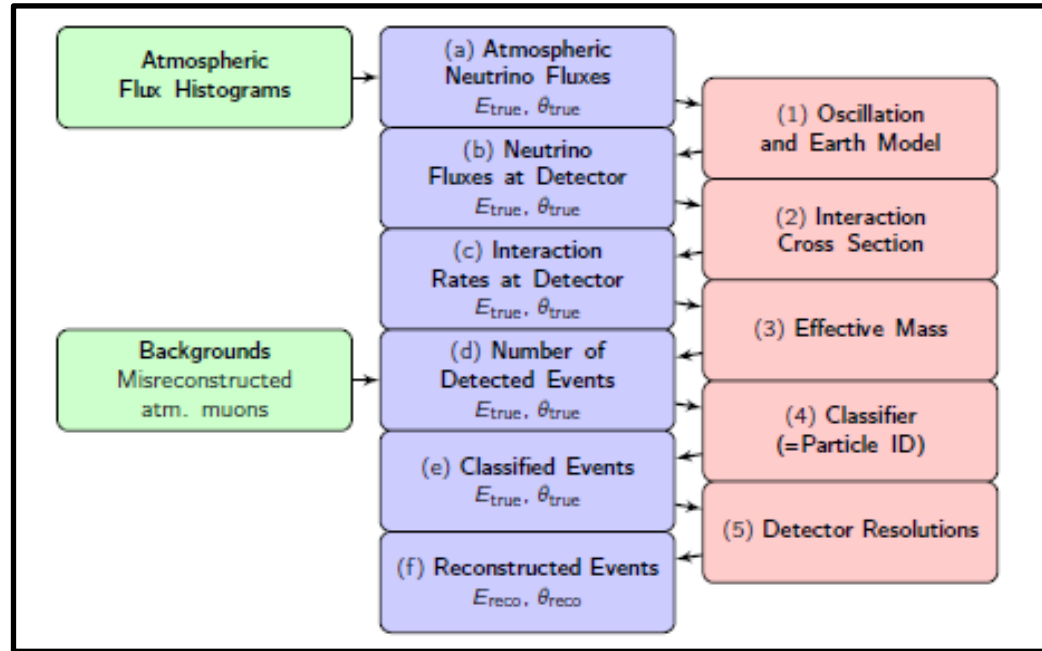
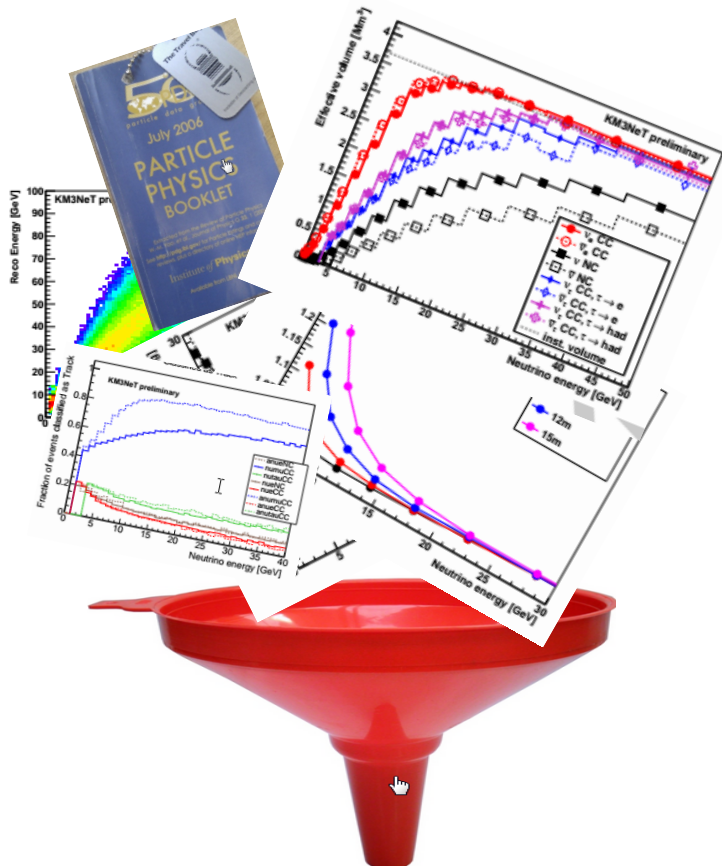
Akmedov, Razzaque & Smirnov, JHEP 02 (2013) 082

# ORCA: Méthode

Both muon- and electron-channels contribute to net hierarchy asymmetry  
electron channel more robust against detector resolution effects:



# ORCA: Méthode



Analyse statistique:

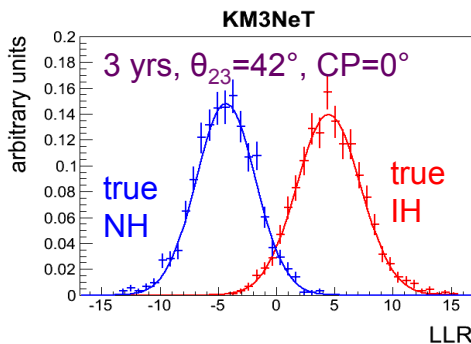
1/ Génération de pseudo-expériences en tenant compte

- des incertitudes sur les paramètres d'oscillation
- des autres systématiques

2/ Fit global du maximum de vraisemblance pour chaque hiérarchie (IH, NH)

3/ Calcul du rapport de vraisemblance  $\log(L_{NH}/L_{IH})$

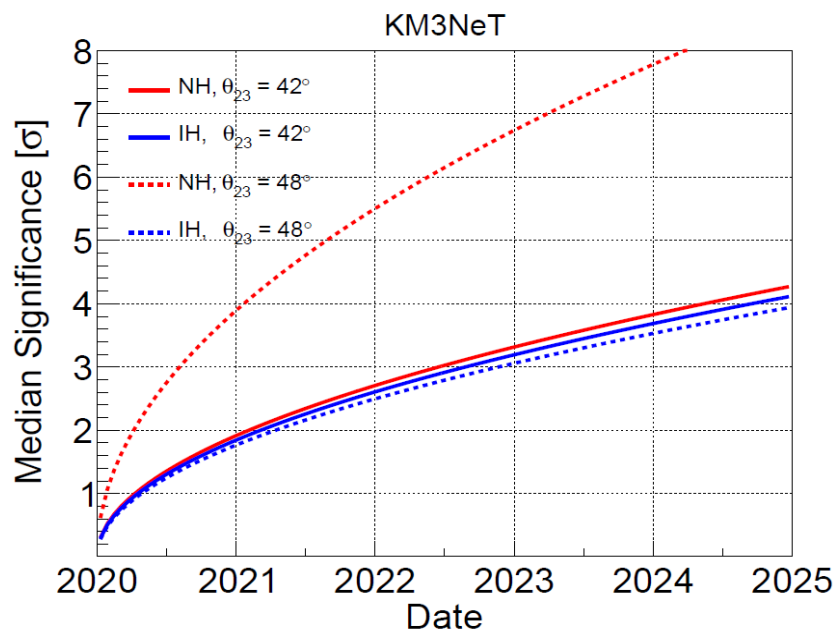
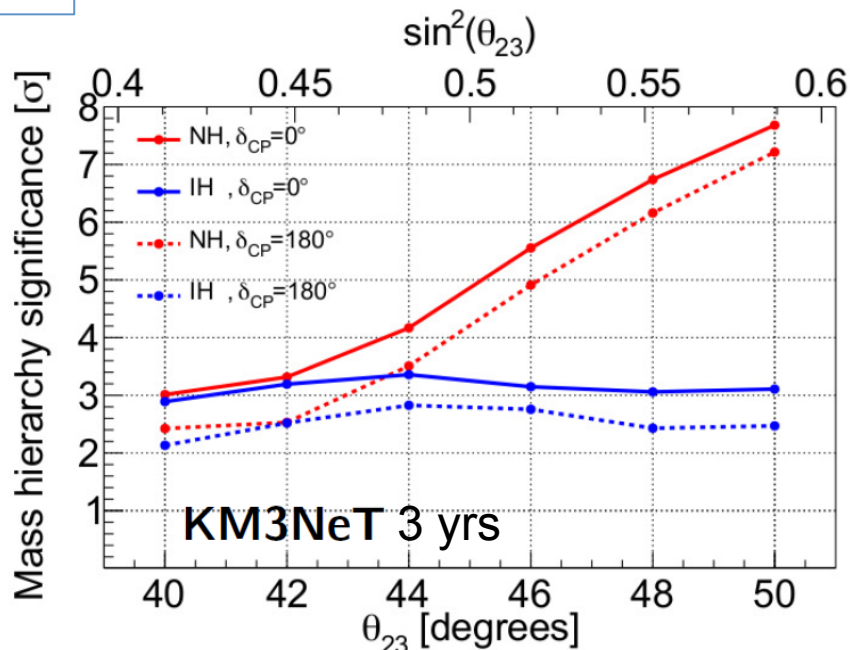
4/ La sensibilité est déterminée par l'écartement des deux distributions



# ORCA: Performances attendues

Systématiques

<i>parameter</i>	<i>true value distr.</i>	<i>initial value distr.</i>	<i>treatment</i>	<i>prior</i>
overall flux factor	1	$\mu = 1, \sigma = 0.1$	fitted	yes
NC scaling	1	$\mu = 1, \sigma = 0.05$	fitted	yes
$\nu/\bar{\nu}$ skew	0	$\mu = 0, \sigma = 0.03$	fitted	yes
$\mu/e$ skew	0	$\mu = 0, \sigma = 0.05$	fitted	yes
energy slope	0	$\mu = 0, \sigma = 0.05$	fitted	yes



Combinaison de NH et 2e octant pour  $\theta_{23}$  --  $> 5\sigma$  en 3 ans  
 ( $3\sigma$  en 4 ans même dans les scénarios pessimistes)  
 effet de  $\delta_{cp}$  petit mais pas négligeable:  $\sim 0.5\sigma$  sur la sensibilité

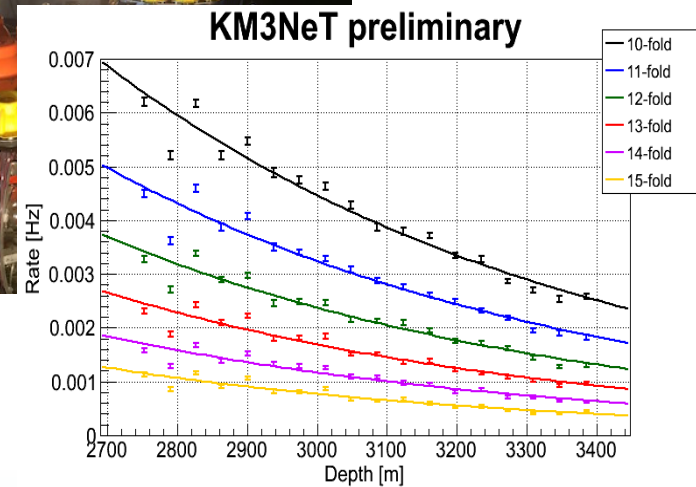
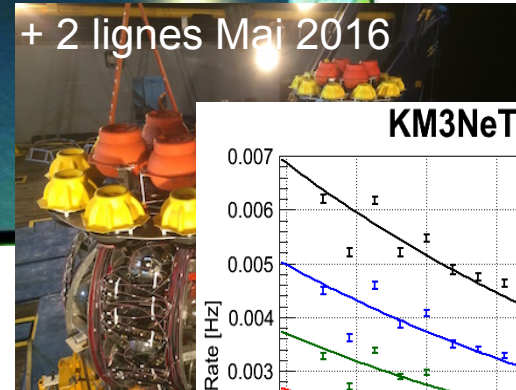
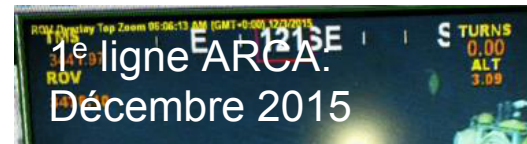
# Perspectives

## ORCA

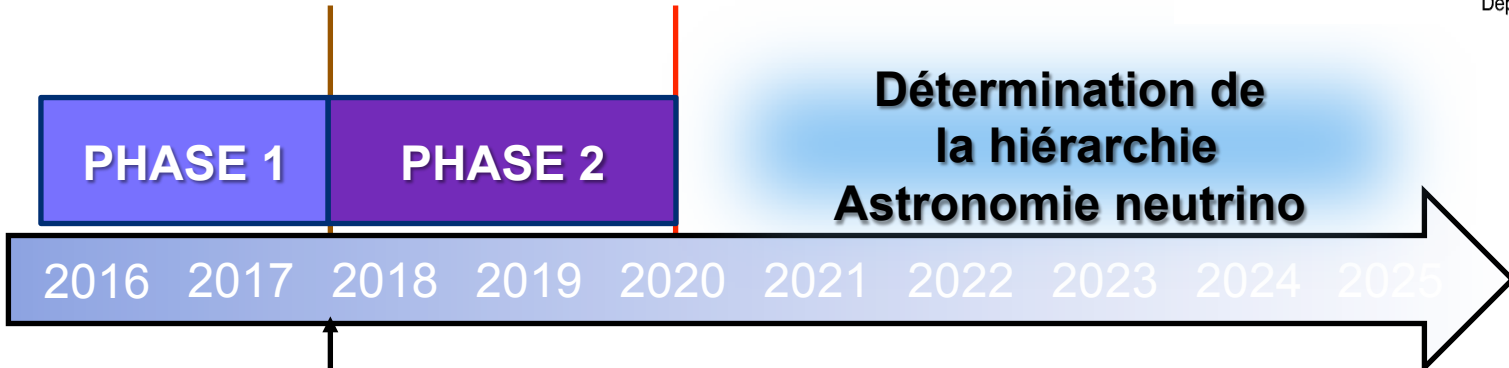


7 lignes ORCA      115 lignes ORCA  
24 lignes ARCA    230 lignes ARCA

## ARCA



Détermination de  
la hiérarchie  
Astronomie neutrino



ANTARES decommissioning

KM3NeT Lol:

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 43 (2016) 084001



An illustration of two orcas (killer whales) swimming in a clear blue ocean. The larger orca is in the upper half, and a smaller one is in the lower right. The water is filled with numerous white bubbles of various sizes. A semi-transparent white rectangular box is centered over the image, containing the text "Merci de votre attention!".

**Merci de votre attention!**