

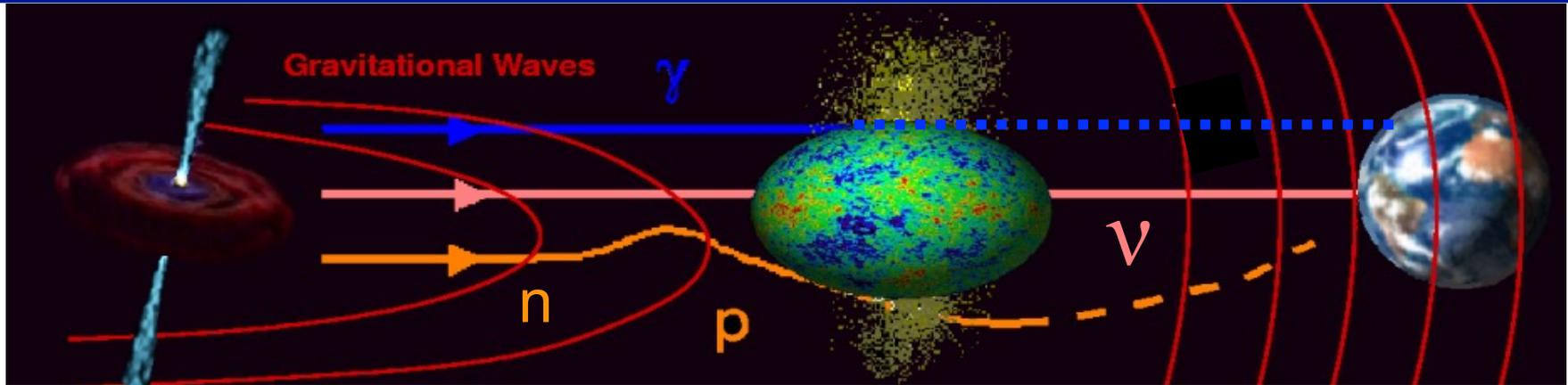


L'astronomie neutrino: Un état de l'art

Véronique Van Elewyck
(APC & Université Paris Diderot)

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

Les neutrinos: des messagers cosmiques



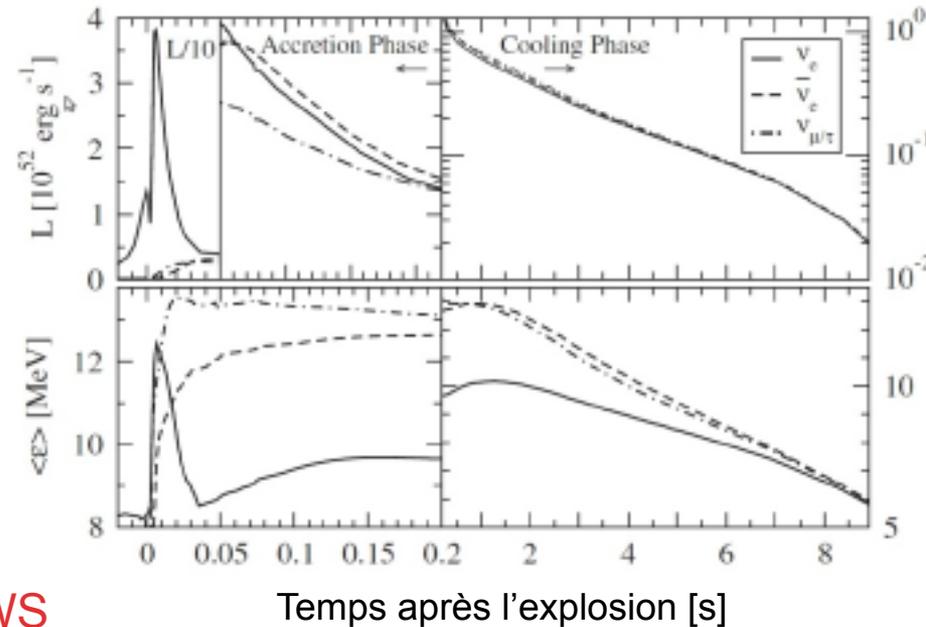
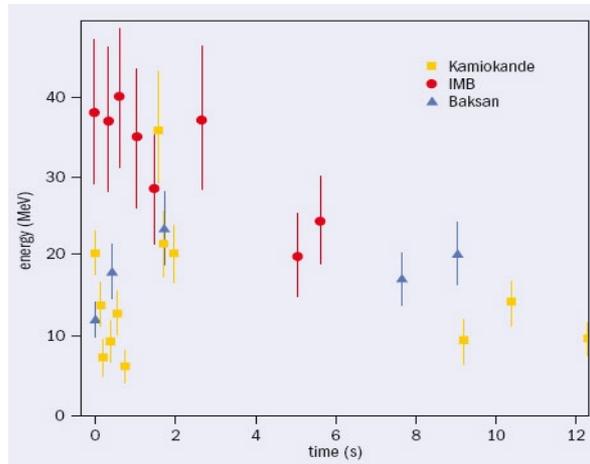
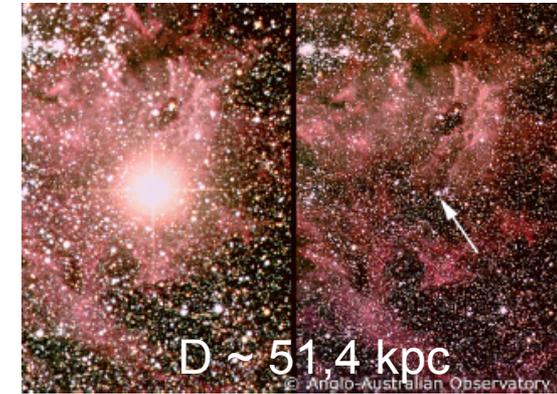
- **Les neutrinos: des particules neutres, stables, faiblement interagissantes**
 - ✓ non absorbées par les fonds diffus → accès aux distances cosmologiques
 - ✓ non absorbées par la matière → accès aux environnements denses
 - ✓ Non déviées par les champs magnétiques → astronomie à travers tout le spectre 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

1987

Observation d'une bouffée de neutrinos en provenance de la supernova 1987A dans le Grand Nuage de Magellan

24 neutrinos détectés en ~ 10 secondes (environ 3h avant le signal lumineux)



Les neutrinos emportent 99% de l'énergie gravitationnelle libérée lors du collapse!



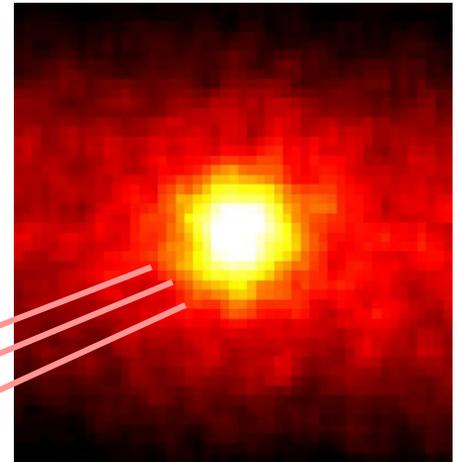
REXP: développement d'un réseau d'alertes neutrino: **SNEWS** (Supernova Early Warning System)

Les neutrinos: des messagers cosmiques

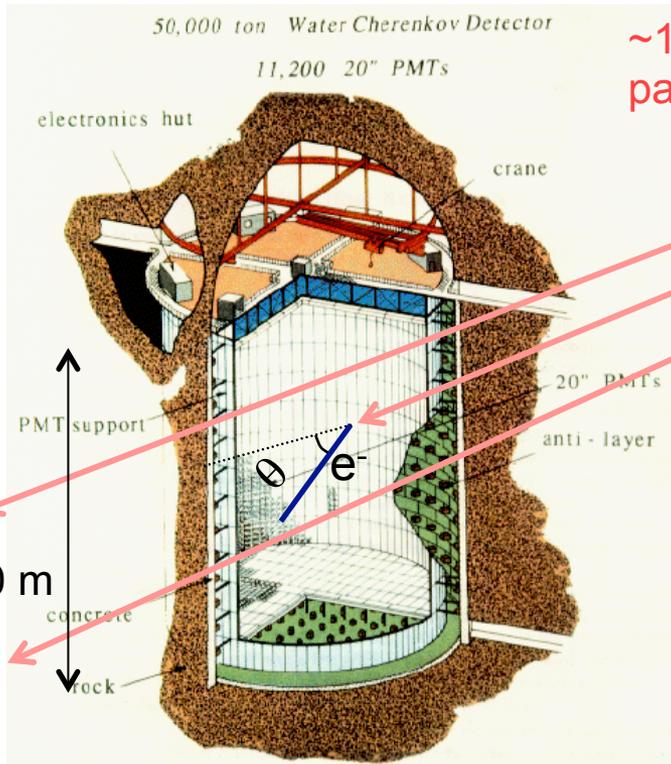
1998

L'expérience SuperKamiokande (Japon) produit la première image du Soleil en neutrinos !

Un détecteur de 50 000 tonnes d'eau, tapissé de photomultiplicateurs qui détectent les électrons par effet Cherenkov

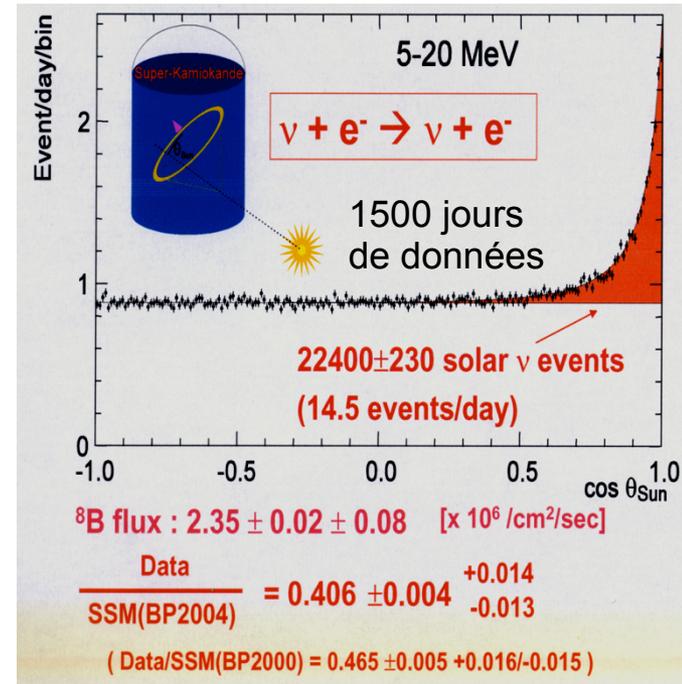
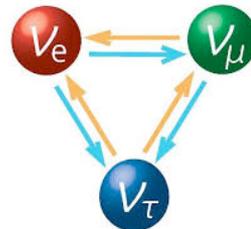


$\sim 10^{10}$ neutrinos
par cm^2 par sec

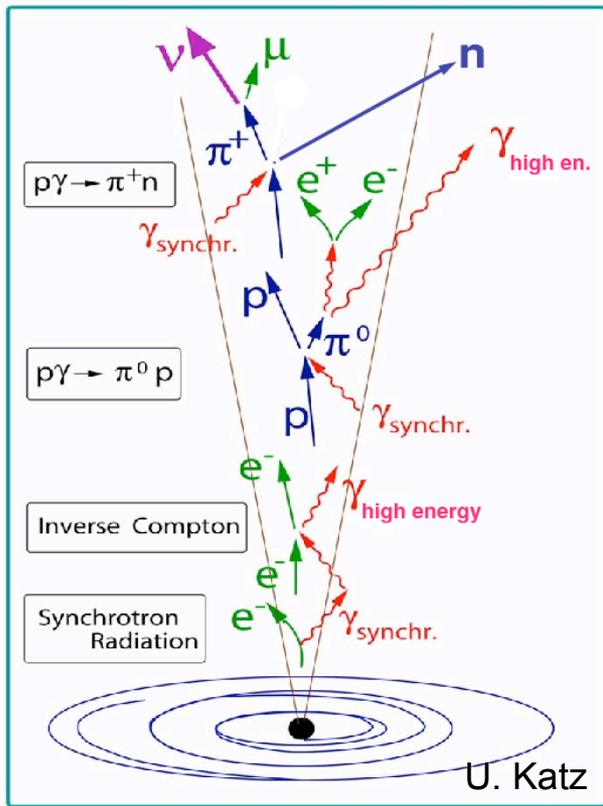


Seuil de détection ~ 6.5 MeV

Le déficit de neutrinos solaires corrobore l'hypothèse des oscillations:

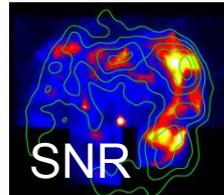
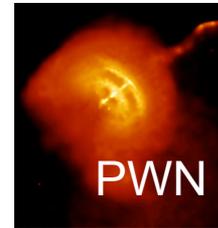


Les neutrinos: des messagers cosmiques

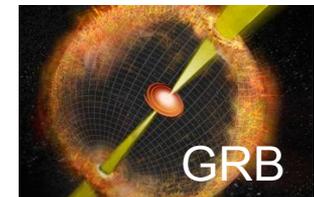
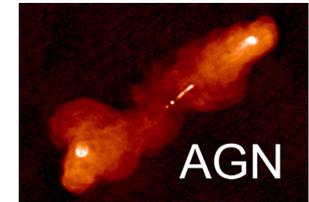


A haute énergie: les neutrinos sont des traceurs des processus hadroniques
 ... et donc des sites de production/accélération des rayons cosmiques (encore mal connus à ultra haute énergie)

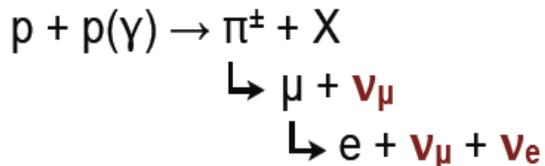
Galactiques



Extragalactiques



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

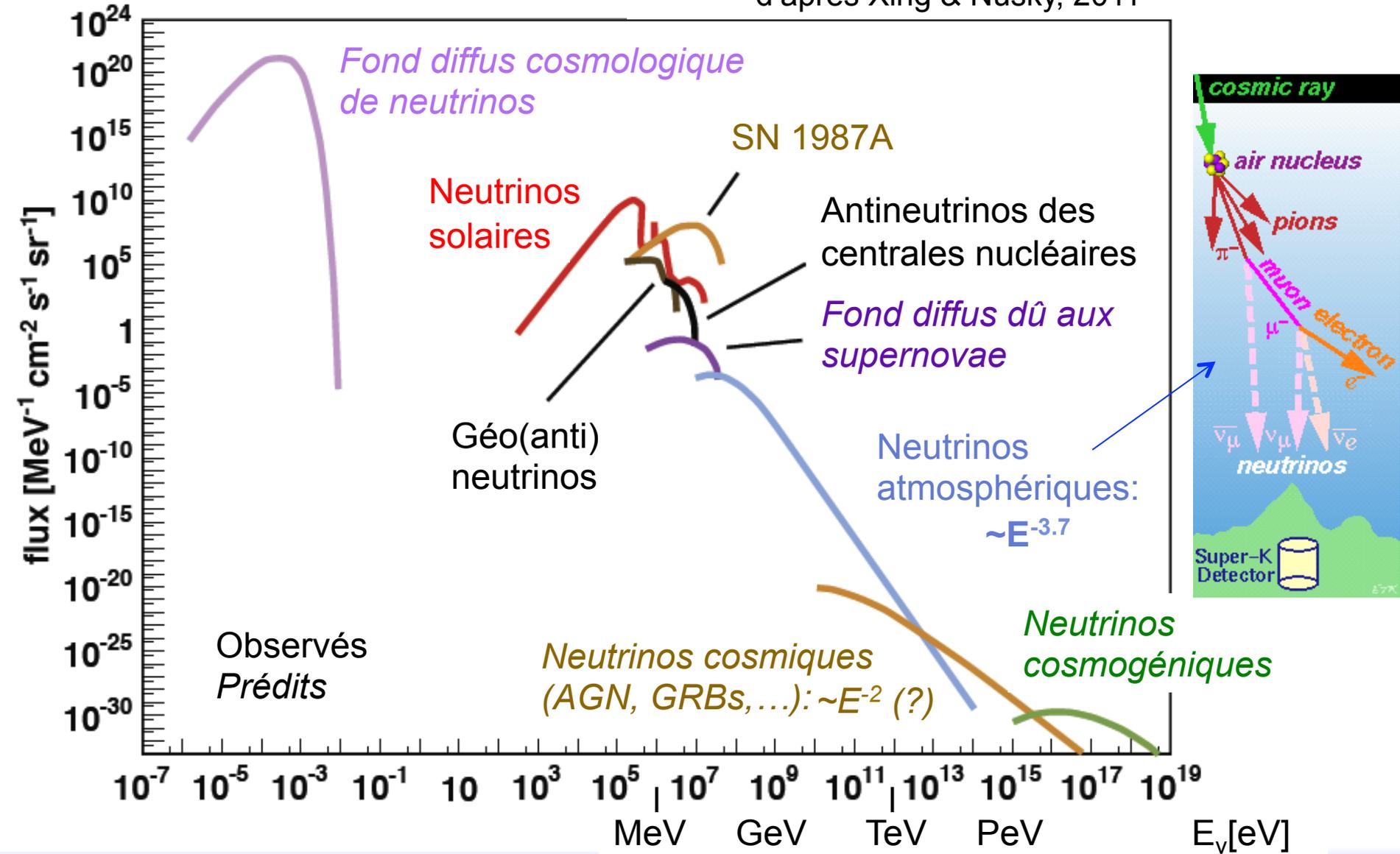


$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:2:0 \xrightarrow{\text{oscillations}} \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$$

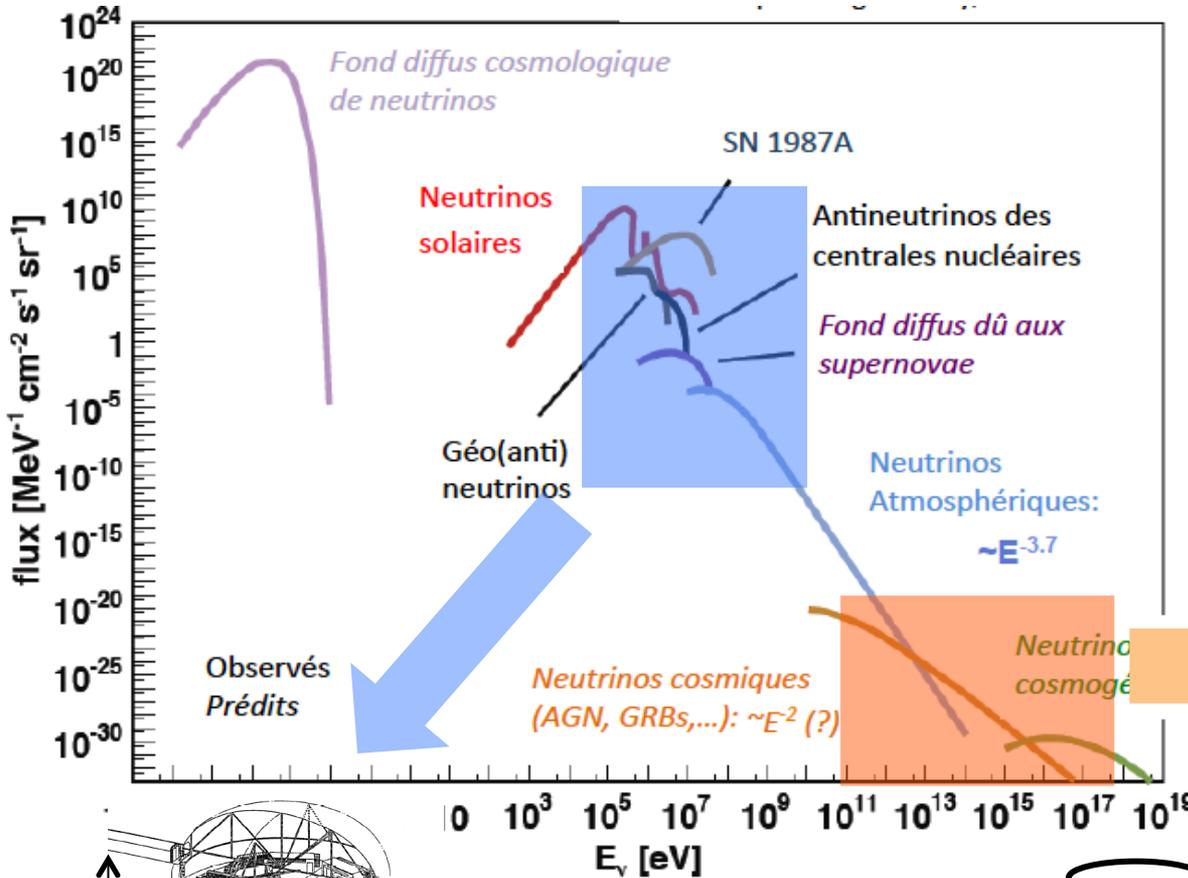
à la source à Terre

Le spectre des neutrinos

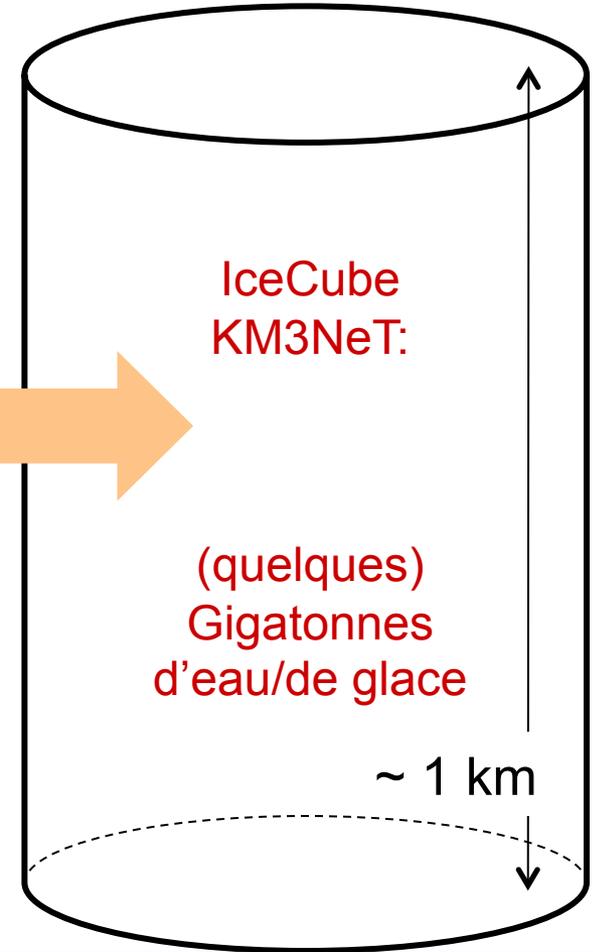
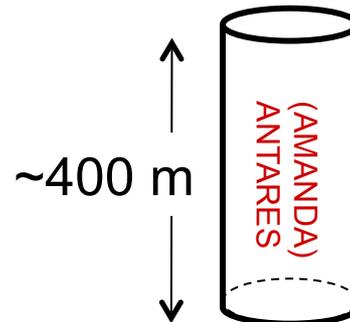
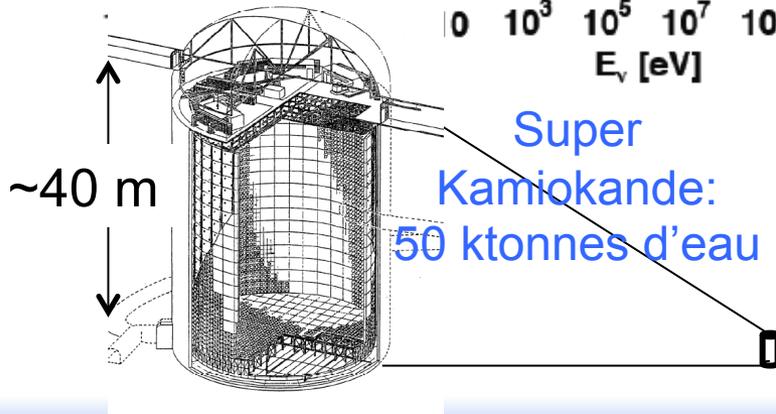
d'après Xing & Nusky, 2011



Les télescopes à neutrinos



L'astronomie neutrino de haute énergie nécessite des détecteurs à l'échelle du km³:

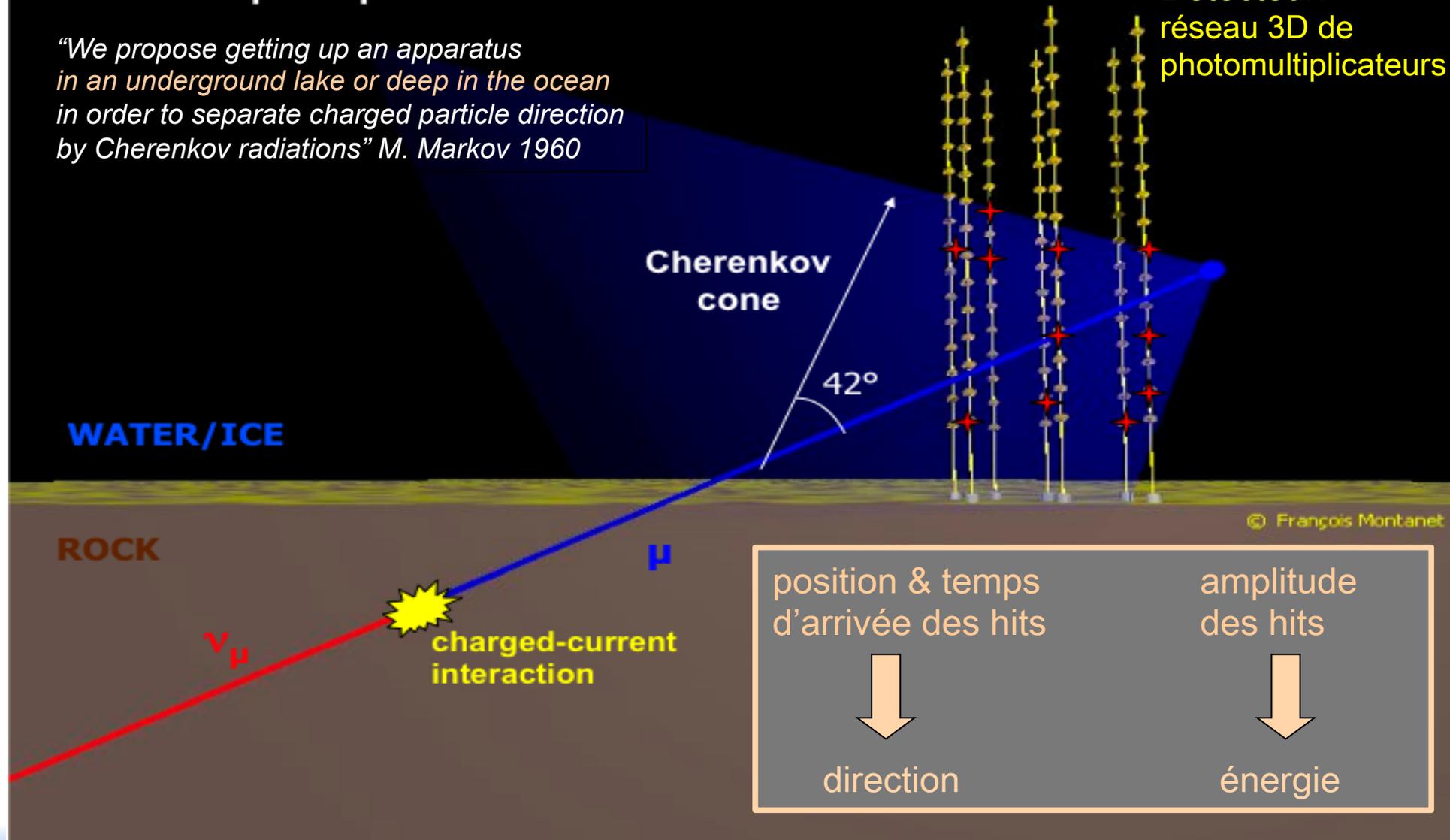


Principe de détection

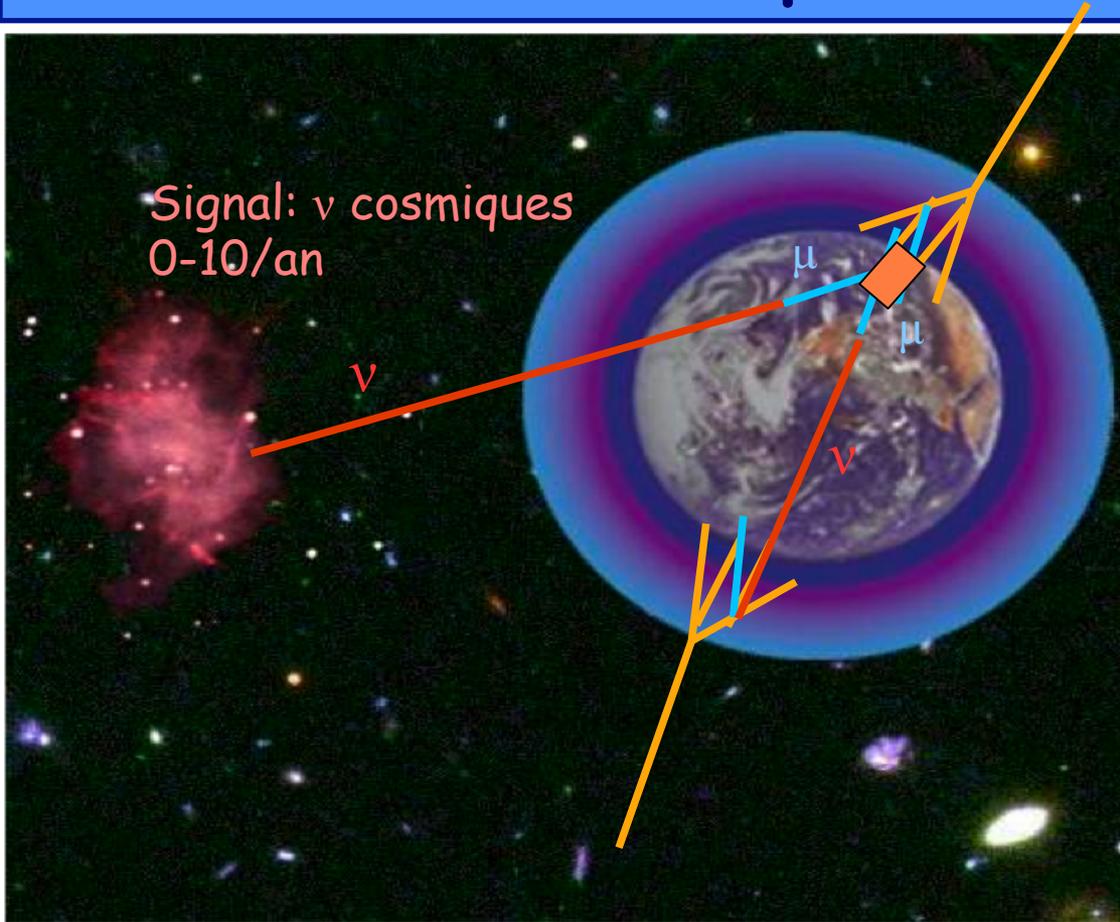
Detection principle

"We propose getting up an apparatus in an underground lake or deep in the ocean in order to separate charged particle direction by Cherenkov radiations" M. Markov 1960

Détecteur:
réseau 3D de
photomultiplicateurs



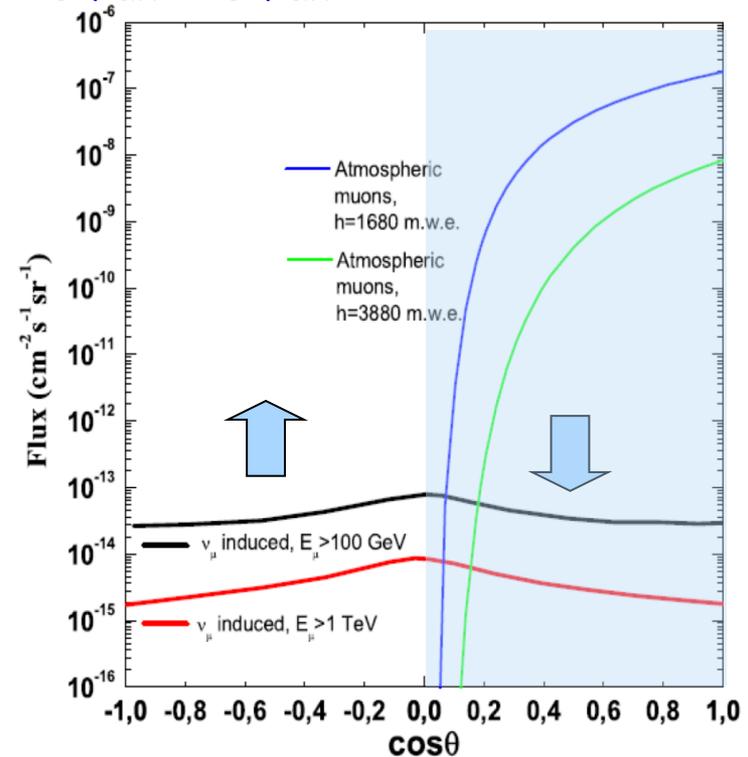
Principe de détection



Bruits de fond physiques: gerbes atmosphériques créées par les rayons cosmiques

• **Muons atmosphériques:** $\mu_{\text{atm}} \sim 10^8/\text{an} - 10^{10}/\text{an}$

• **Neutrinos atmosphériques:** $\nu_{\text{atm}} \sim 10^3/\text{an} - 10^5/\text{an}$

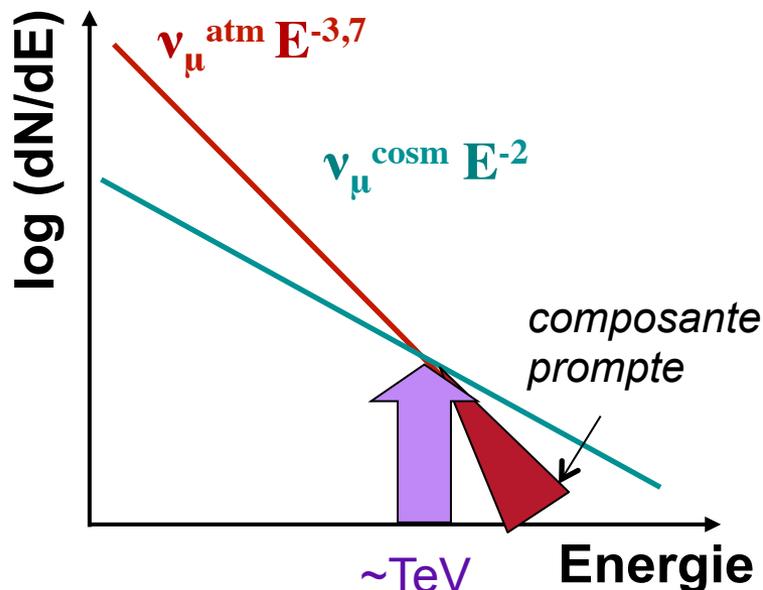


- détecteurs installés en profondeur
- utilisation d'un veto
- détecteurs optimisés pour les signaux de neutrinos « montants »

Principes d'analyse

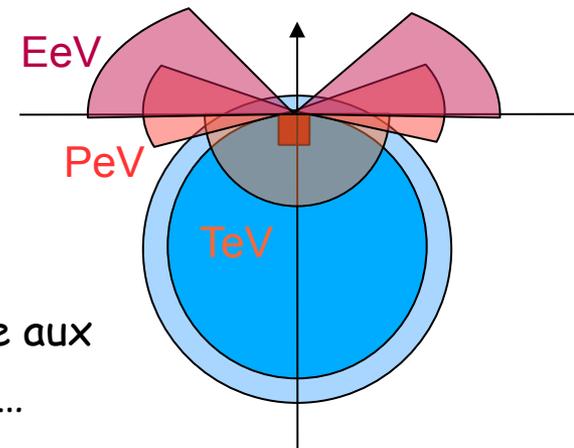
Comment identifier les neutrinos cosmiques ?

- 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

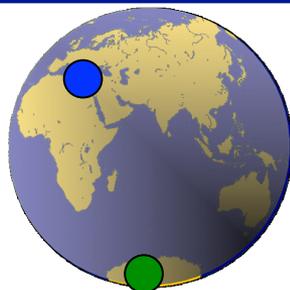
- Etudes multi-messagères

→ 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 km³ volume instrumenté
2450m profondeur au large de Toulon
Prototype pour un détecteur de taille
kilométrique: **KM3NeT**

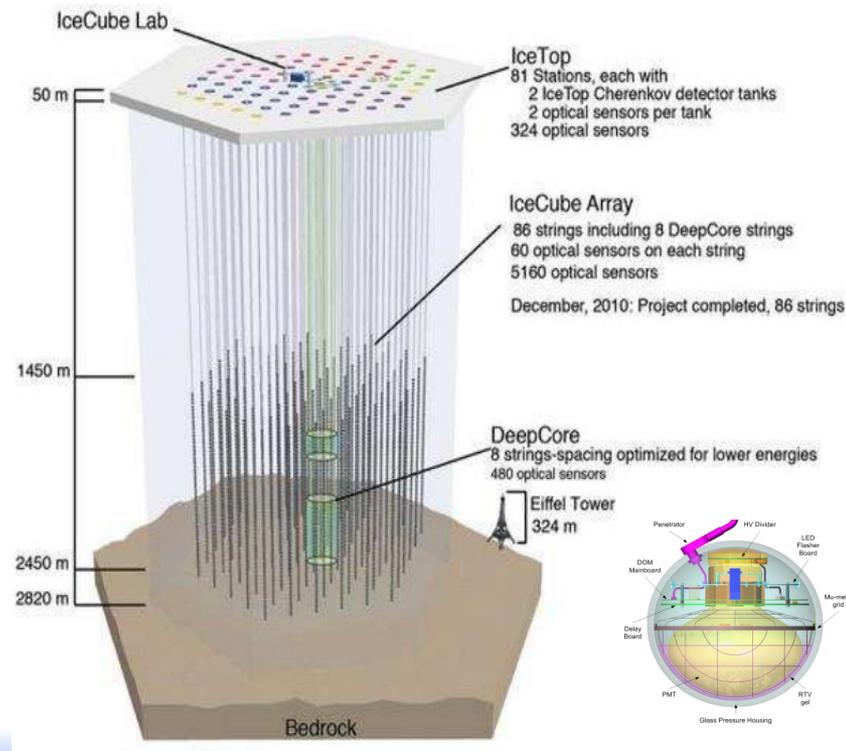
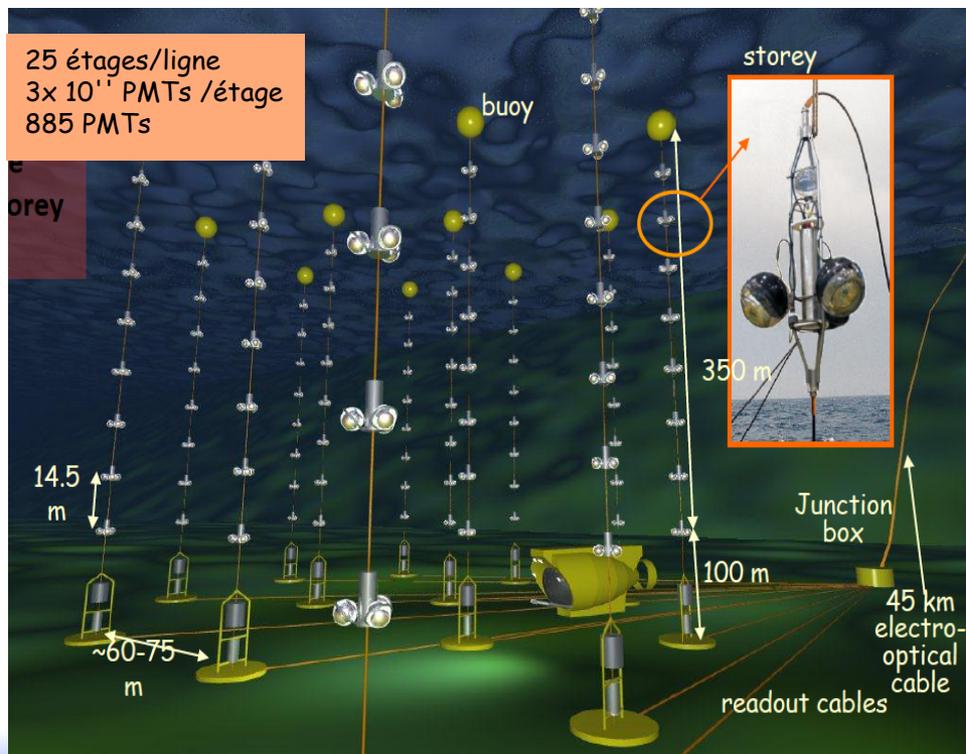


Au Pôle Sud: IceCube

InIce: 86 lignes, achevé en 2010
~ 1 km³ volume instrumenté

DeepCore: 8 lignes, configuration dense

IceTop: détecteurs de surface pour les
gerbes atmosphériques

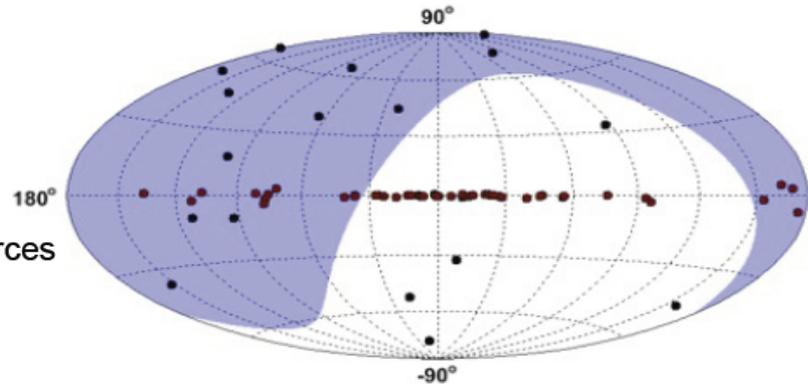
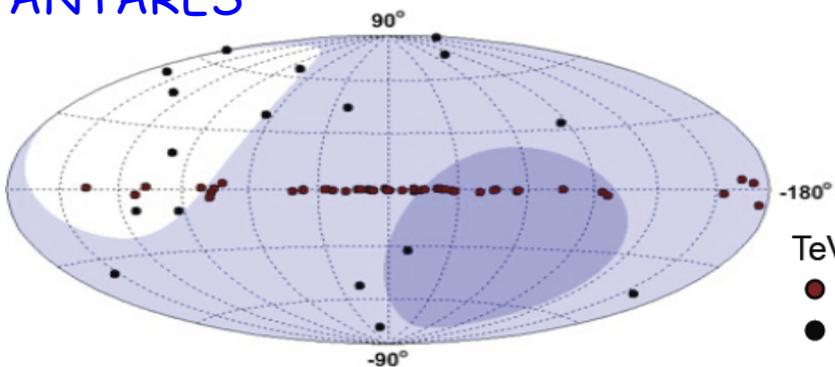


Les deux grands télescopes à neutrinos

Complémentarité des champs de vue..

IceCube

ANTARES



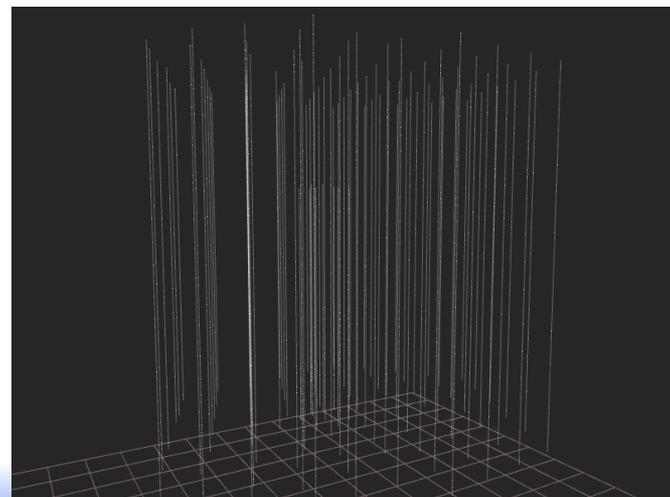
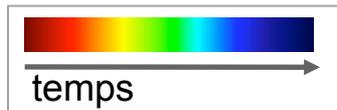
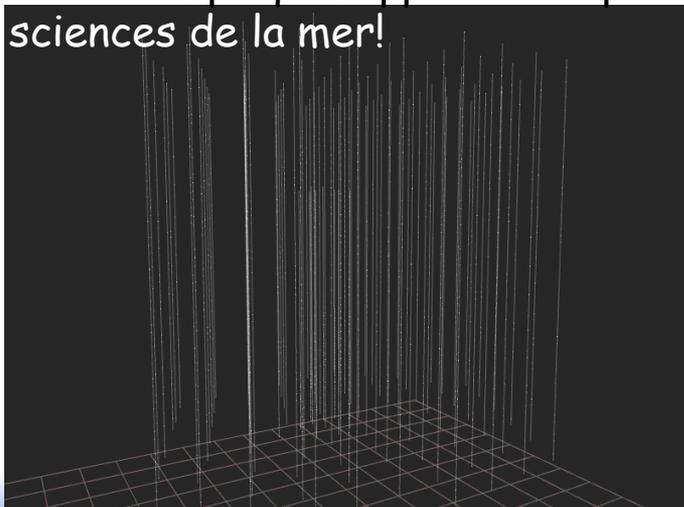
TeV gamma-ray sources

- Galactic
- extragalactic

...différents environnements:

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

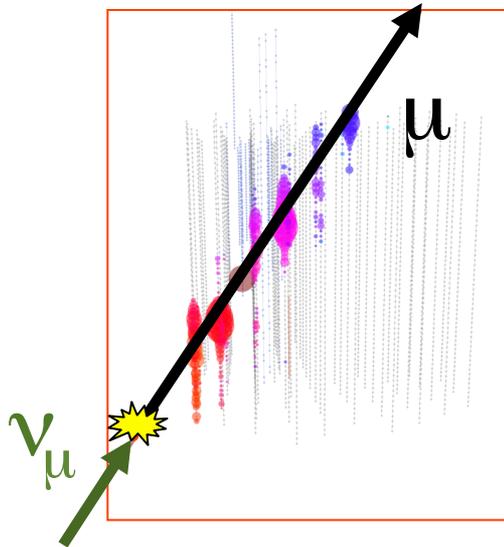
GLACE: faible absorption de la lumière
→ Meilleur calorimètre
environnement « silencieux »



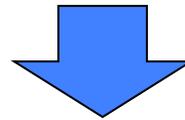
Les signatures expérimentales

TRACES

Muons issus de ν_μ
(int. courant chargé)



temps, position et
amplitude des hits



direction et énergie
du neutrino incident

Le neutrino peut avoir interagi hors
du détecteur: **grand volume effectif**

bonne résolution angulaire:

0.2° dans l'eau (ANTARES/KM3NeT)

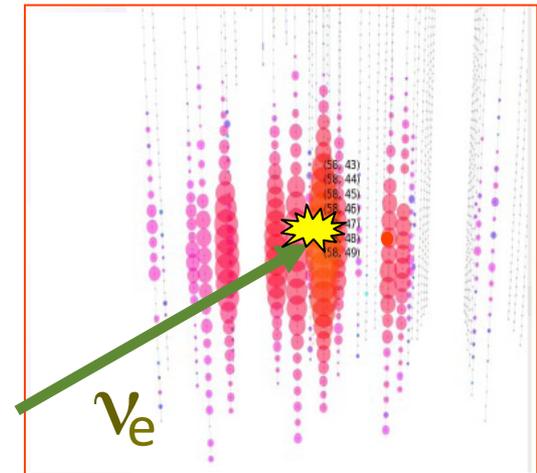
0.5° dans la glace (IceCube)

résolution en énergie limitée:

facteur 2-3 sur dE/dx

CASCADES

Gerbes (électromagnétiques/hadroniques)
Toutes saveurs de neutrinos
(ν_e, ν_μ, ν_τ)



événements contenus dans le volume
instrumenté, topologie quasi-sphérique:

bonne résolution en énergie

résolution angulaire plus limitée

2° dans l'eau (ANTARES/KM3NeT)

10° dans la glace (IceCube)

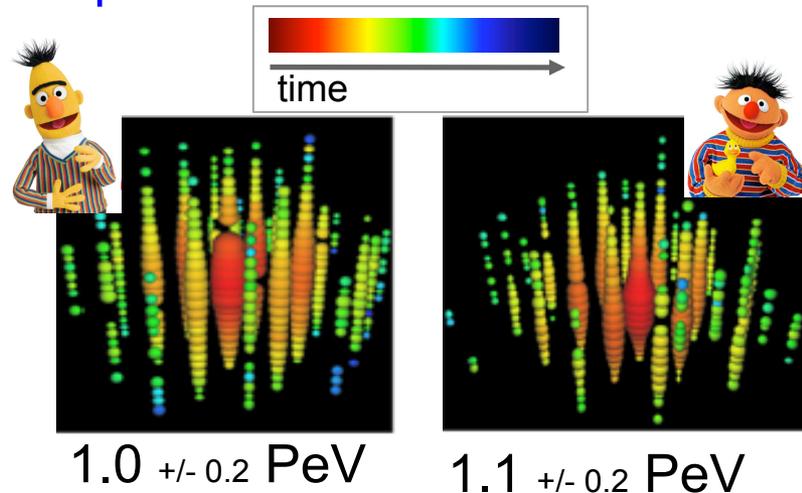
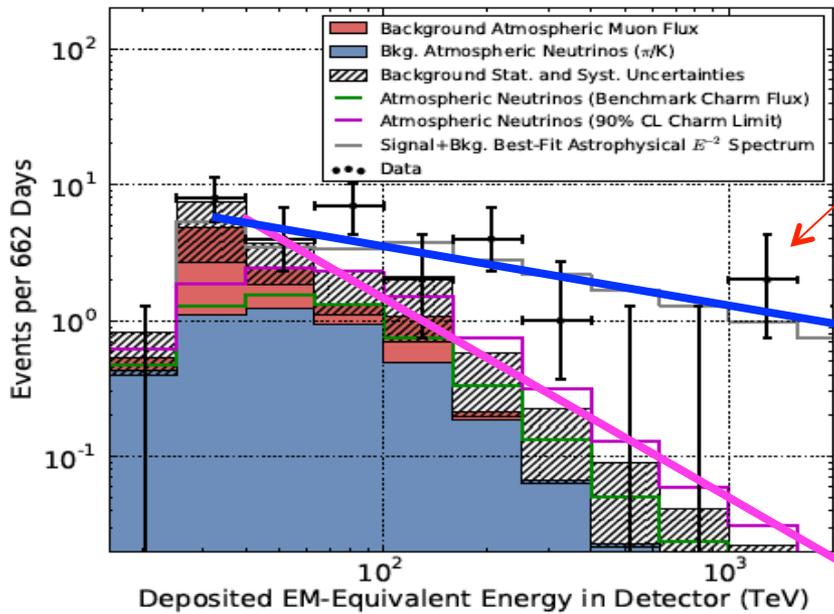
Les débuts de l'astronomie neutrino HE

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 ~ 30 TeV
 + définition d'un veto contre les μ_{atm} & ν_{atm}
 couverture 4π sr

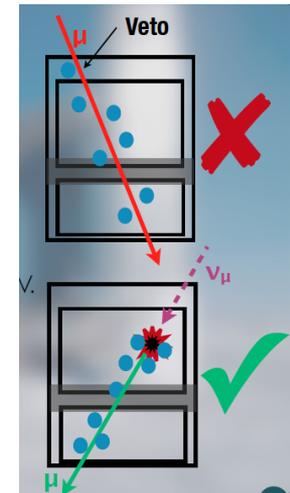


2 ans de données:

28 événements observés (7 traces et 21 cascades)

11 évts attendus (μ_{atm} & ν_{atm})

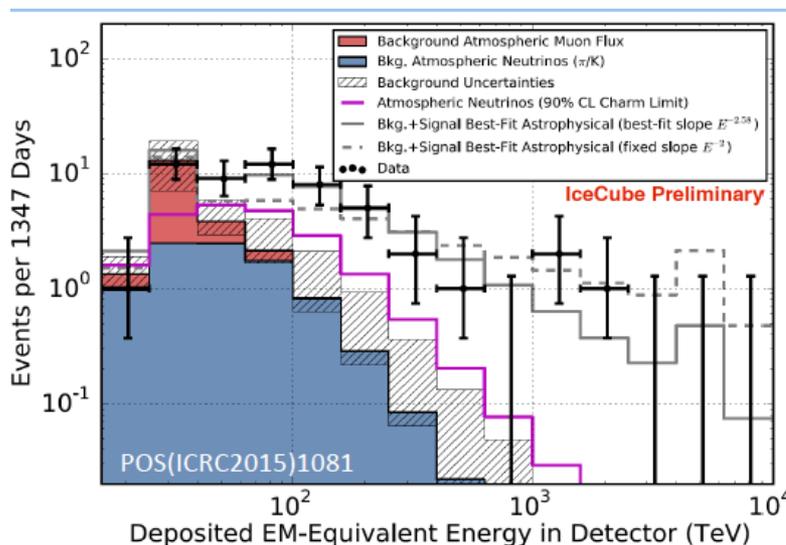
Significance 4.1σ



...et aujourd'hui ?

Echantillon HESE 4 ans:

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



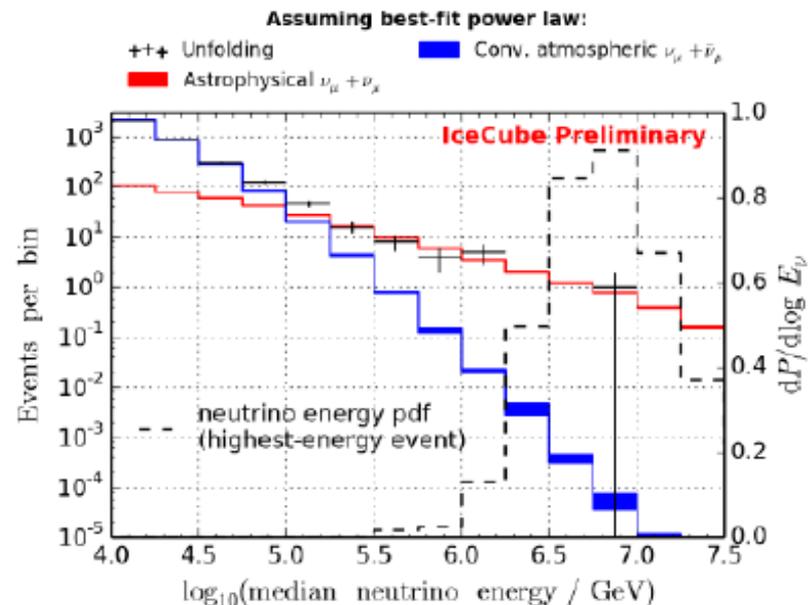
significance 6.5σ

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



Echantillon ν_μ montants (traces)

Hémisphère Nord uniquement
Seuil en énergie ~100 GeV



significance 5.9σ

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

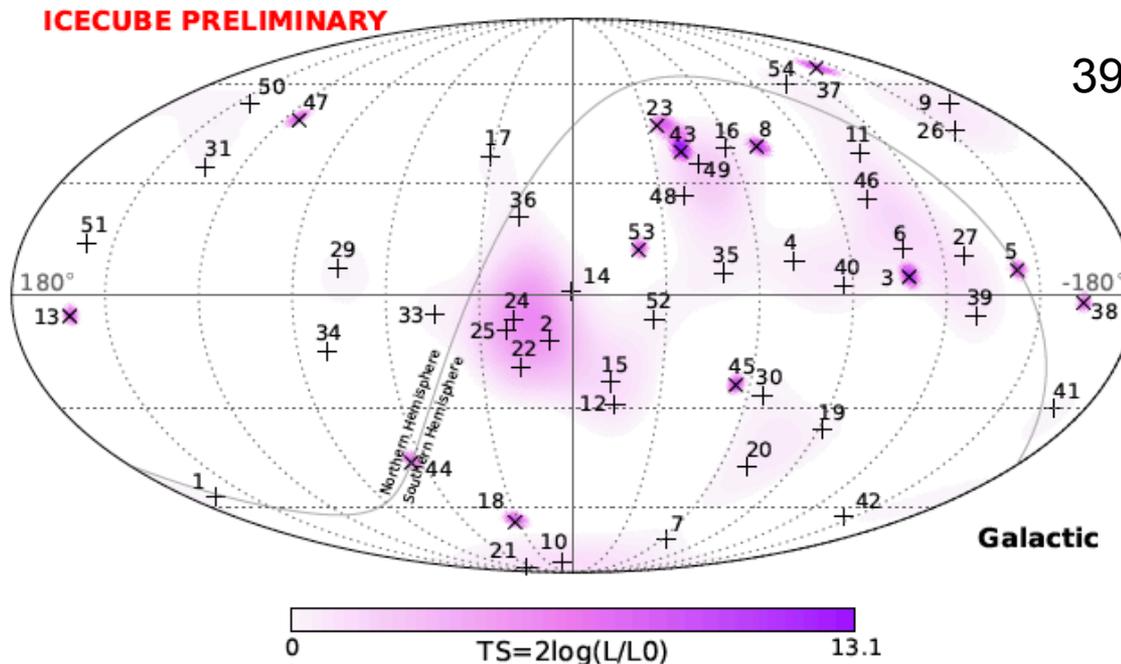
Echantillon HESE 4 ans (54 événements)

15 traces (x)

résolution angulaire 1°

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)

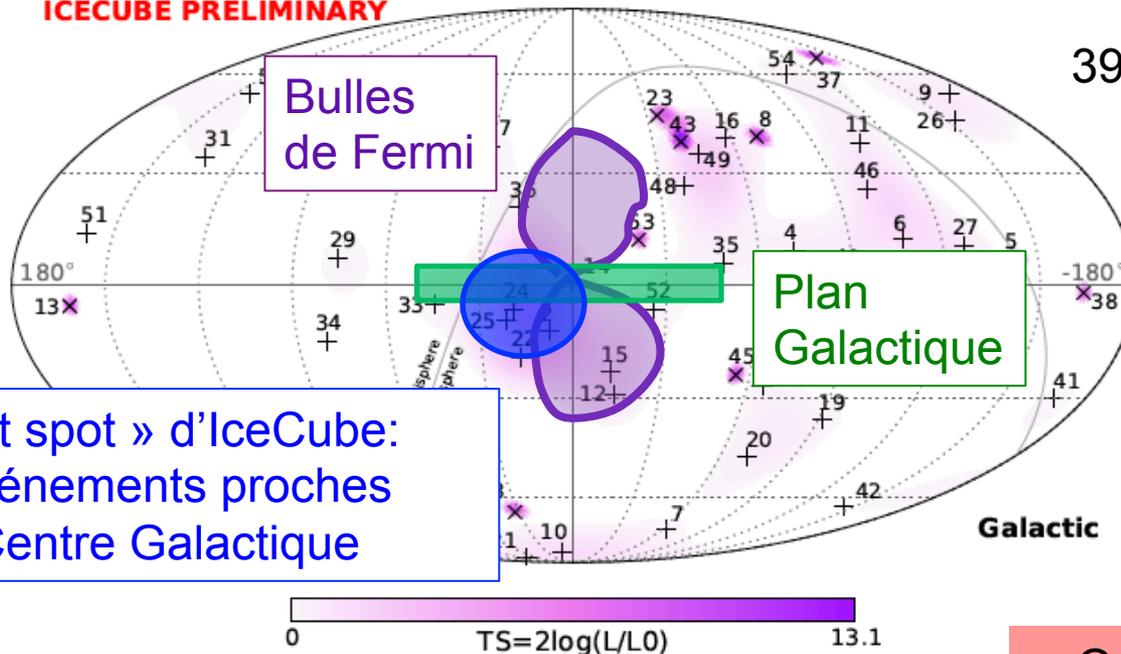
15 traces (x)

résolution angulaire 1°

39 cascades (+)

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

ICECUBE PRELIMINARY



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

Pas d'accumulation significative:
consistant avec un flux diffus (> 100 sources)
Pas de signal en provenance du plan galactique
Pas de contrepartie électromagnétique observée

...Que peut apporter ANTARES ?

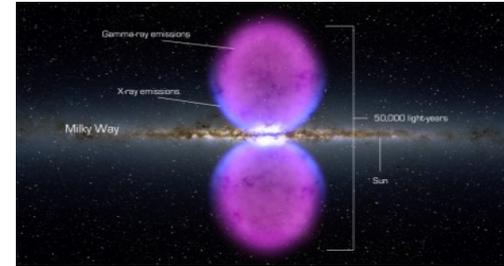
Meilleure visibilité de la zone
galactique aux énergies
 $1 \rightarrow 100$ TeV

Meilleure résolution angulaire
(traces & cascades)

Les résultats d'ANTARES

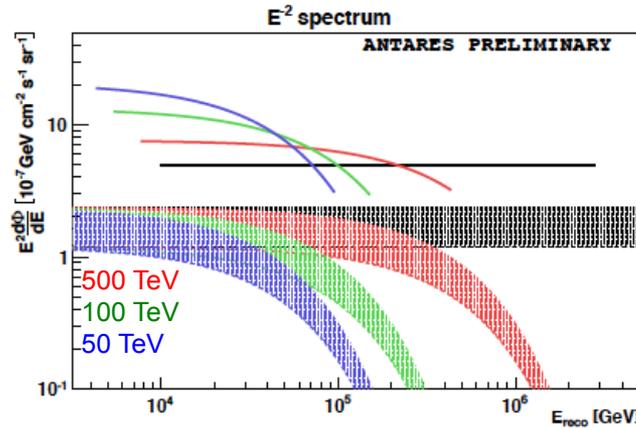
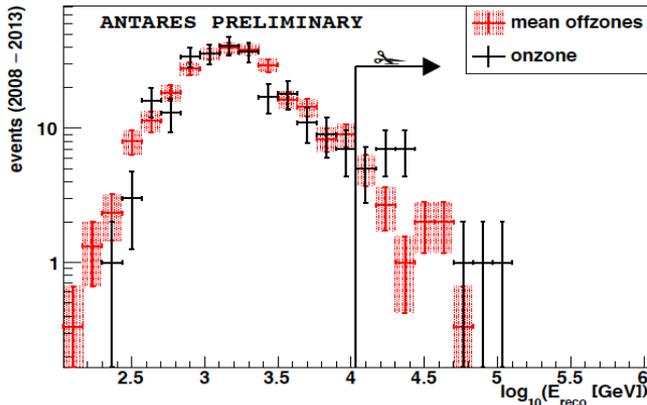
Bulles de Fermi: une origine hadronique ?

(interaction des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire ?)



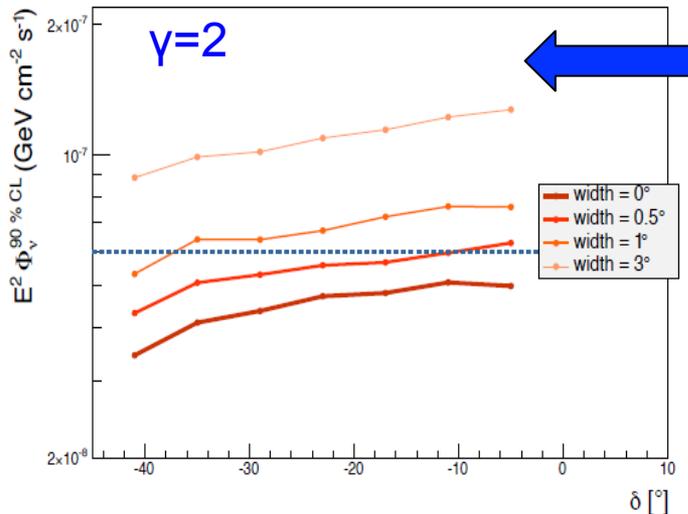
22 évts observés
12 attendus (μ_{atm} & ν_{atm})

Excès 1.9σ : à suivre!



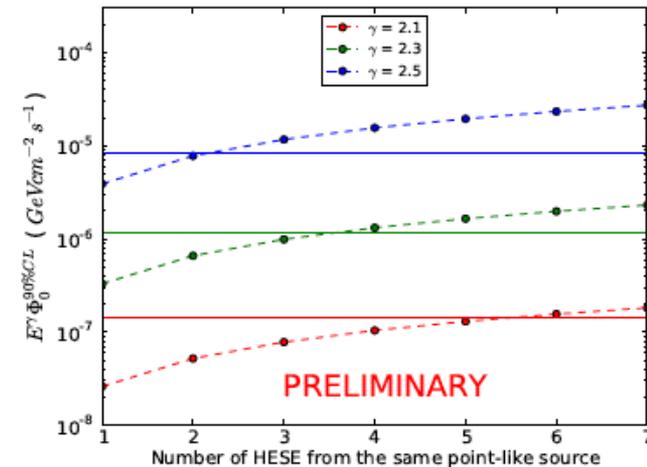
Hot spot IceCube (6 évts): une source unique (galactique ?)

→ scan de la zone du Centre Galactique avec différentes hypothèses d'indice spectral γ



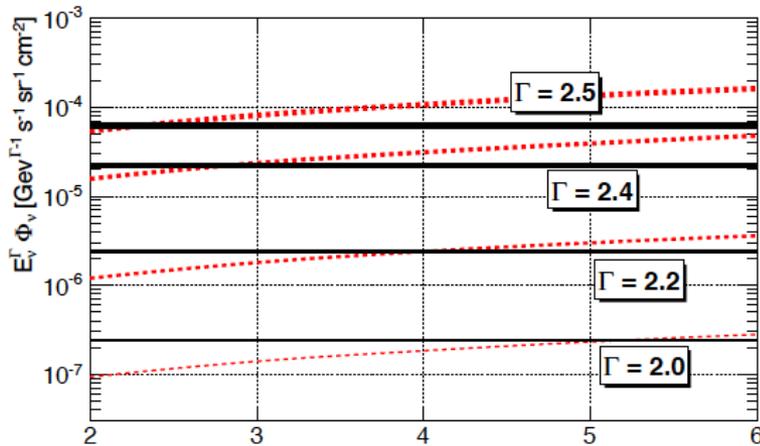
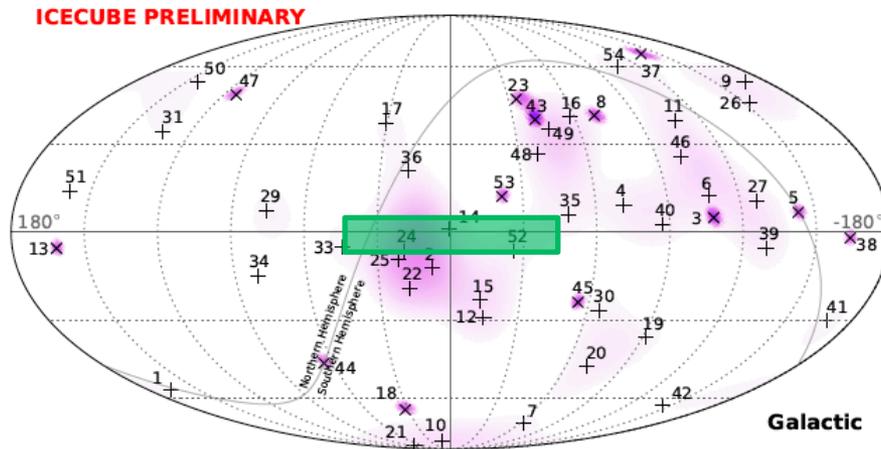
- une source unique
avec $\gamma=2$ (extension $< 1^\circ$)
exclue dans 20°
autour du CG

- une source ponctuelle
avec $\gamma=2.5$ ne peut avoir
produit plus de 2 HESE

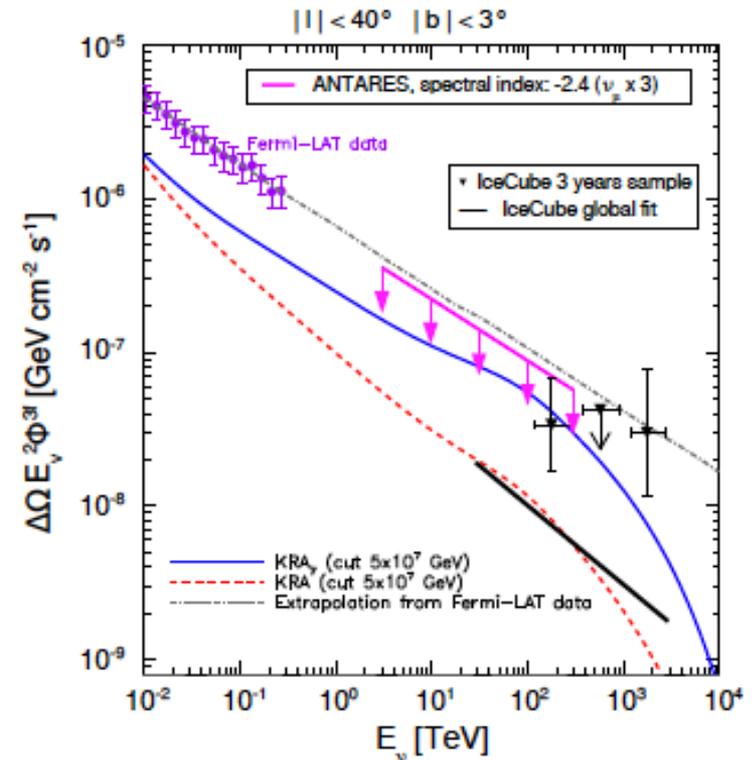


Les résultats d'ANTARES

Contraintes sur l'émission neutrino en provenance de la dorsale galactique:
 Latitude $\pm 3^\circ$
 Longitude $\pm 40^\circ$



Nombre d'évts IceCube HESE potentiellement associés à la dorsale galactique



...testera la connection gamma-neutrinos des modèles d'émission galactique

Les recherches de sources ponctuelles

La dernière « carte du ciel » d'ANTARES:
2007 – 2013 (1690 jours)

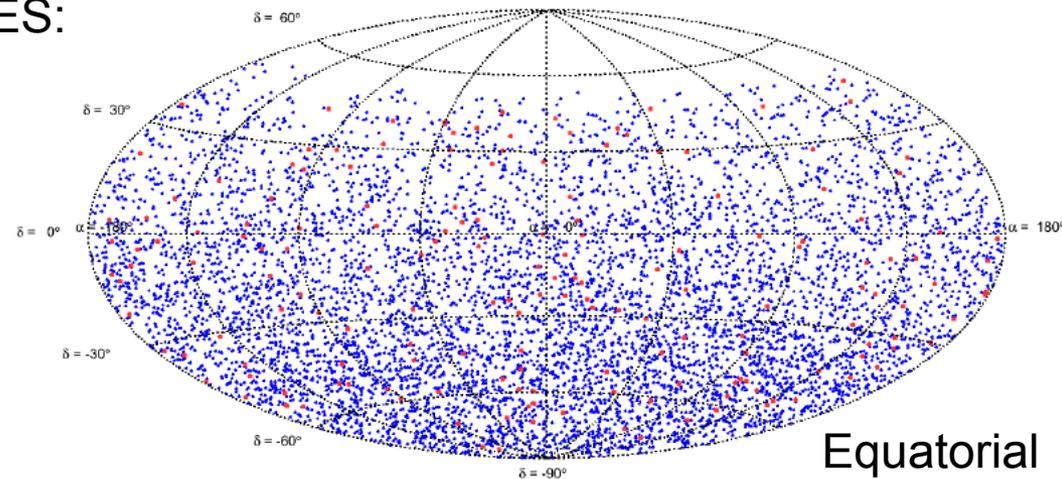
...essentiellement des neutrinos
atmosphériques (+ μ_{atm})

6490 traces - résolution angulaire 0.3°

172 cascades - résolution angulaire 3°



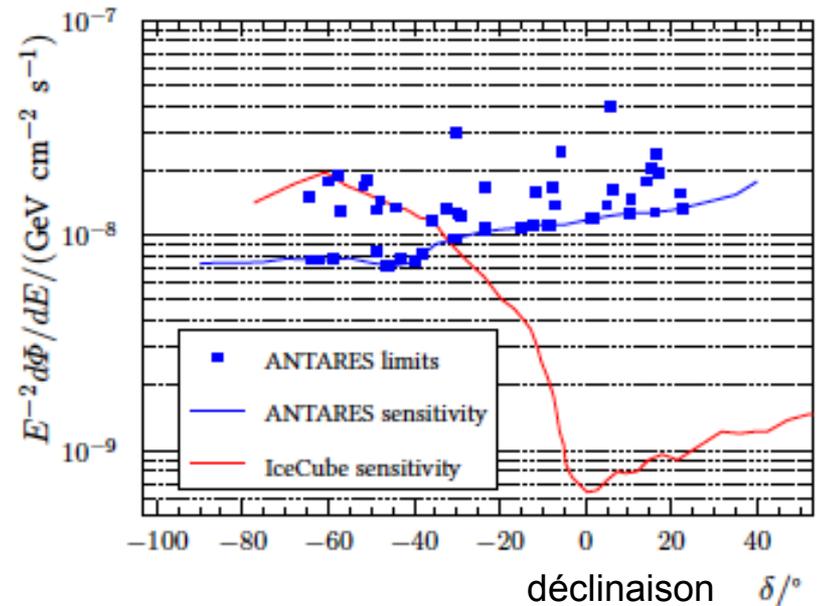
~1/3 des événements de signal
attendus pour un flux $\sim E^{-2}$ et
équipartition des saveurs !



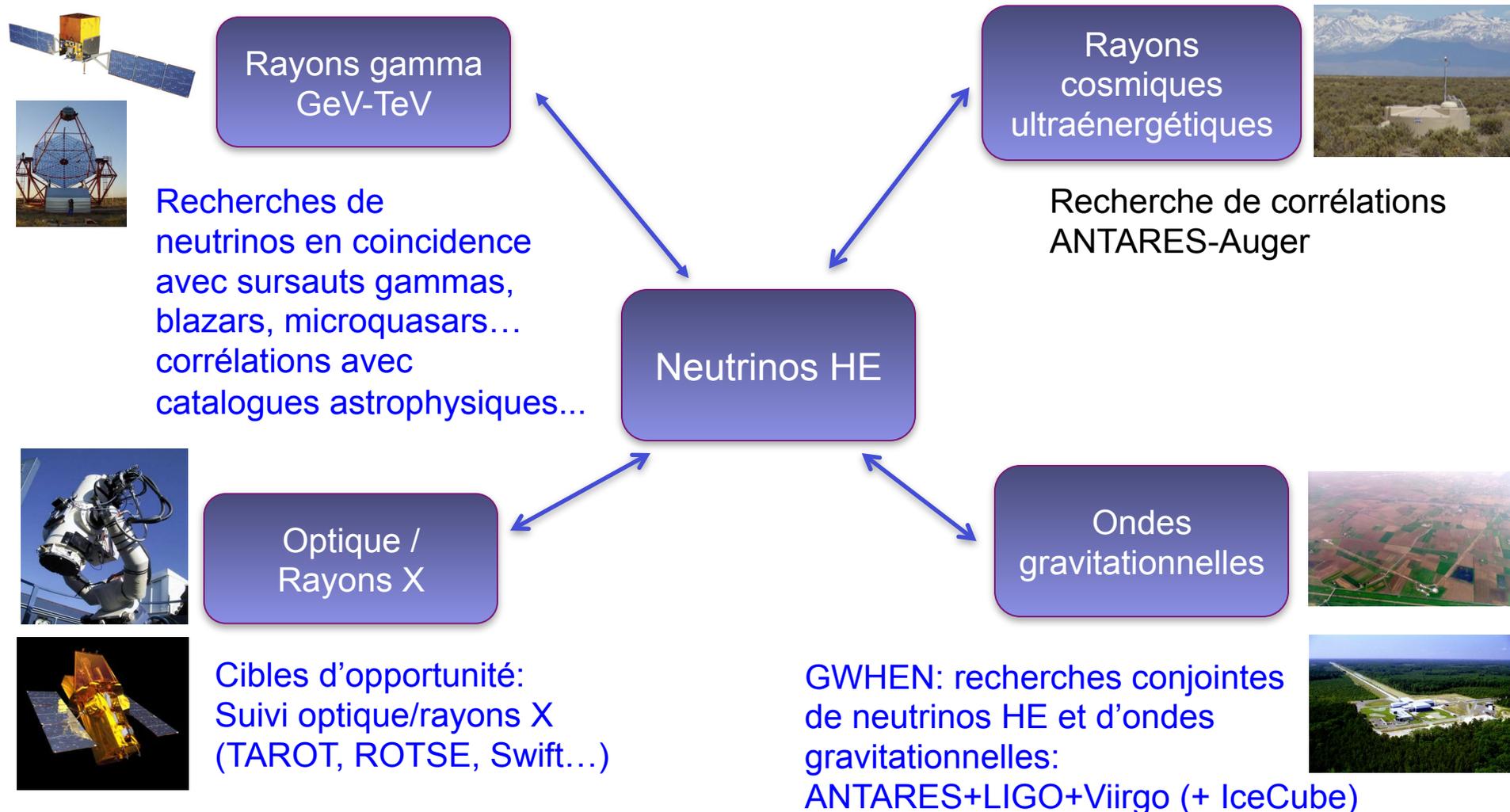
Aucune source détectée...

Intérêt des analyses combinées:

- ANTARES a une meilleure résolution angulaire
- IceCube a une plus grande statistique et une meilleure résolution en énergie
- les deux détecteurs testent des zones complémentaires du ciel



Les programmes multi-messagers



- ➔ augmentation de la sensibilité des instruments (lots de données indépendants)
- ➔ meilleure compréhension des phénomènes en jeu au sein des sources

Un exemple: TAToO

shore station



Fast online reconstruction

Trigger

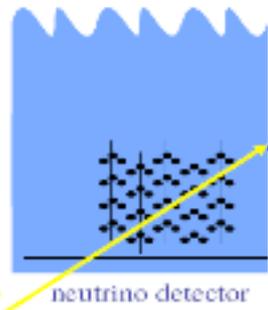
alert

- Recherche glissante:
- Multiplet de neutrinos dans une fenêtre ($\Delta t < 15'$, $\Delta \Omega < 3^\circ$)
 - UN neutrino très énergétique
 - UN évt en direction d'une galaxie proche (< 20 Mpc)

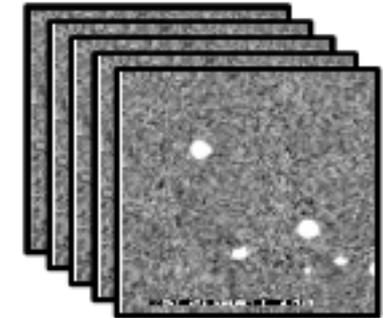


Latence minimale: alerte (3-5s) + repositionnement (< 20 s)

Résolution angulaire $\sim 1^\circ$



all data to shore

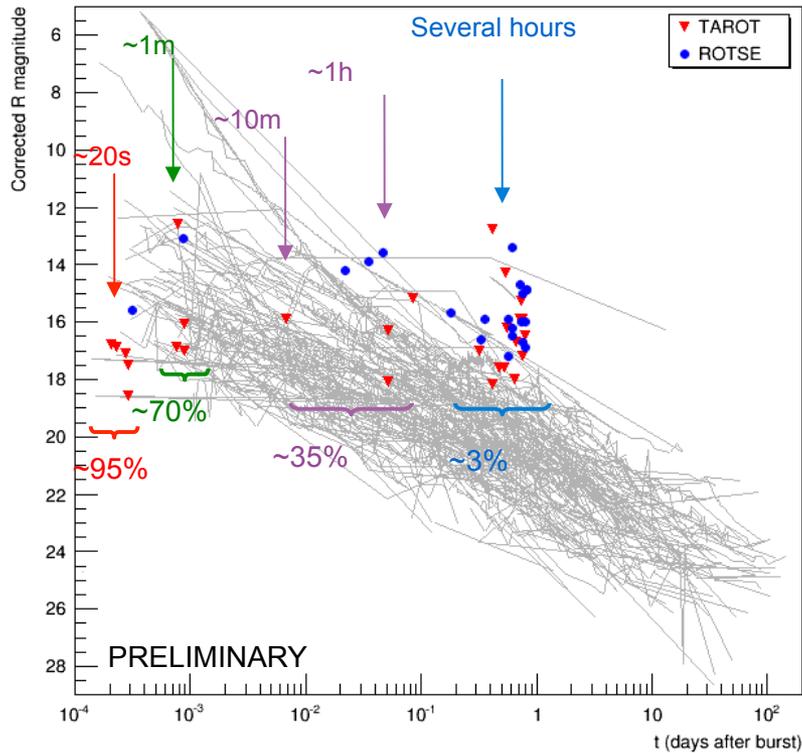


T_0 , $T_0 + 1$, 3, 9 and 27 days

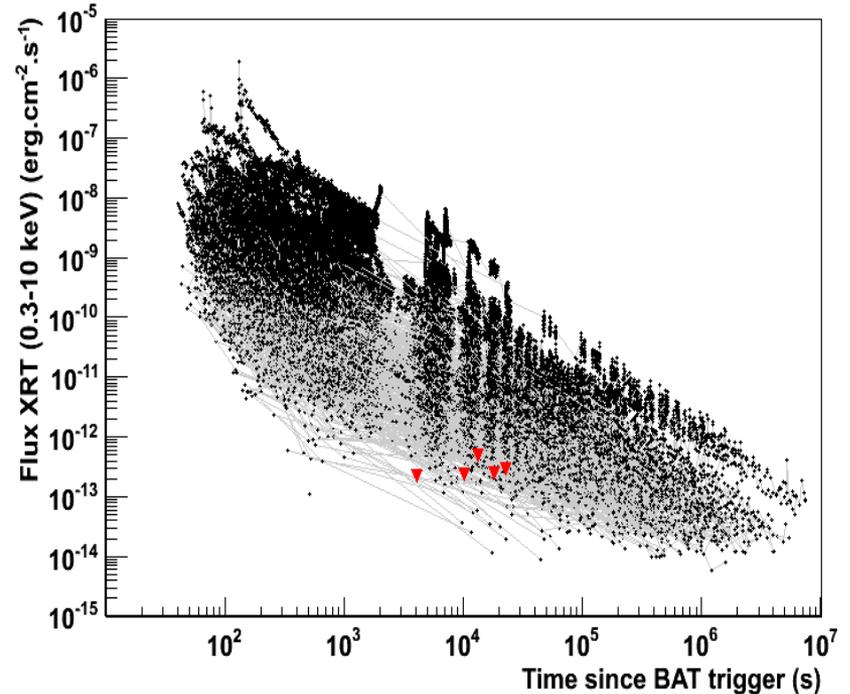
- grande couverture du ciel, duty cycle élevé
- aucune hypothèse sur la nature des sources
- ANTARES + réseau de télescopes et d'observatoires:
 - optique: TAROT, ROTSE, ZADKO, MASTER
 - rayons X: Swift/XRT
 - rayons gamma: H.E.S.S.
 - radio: Murchison Widefield Array

[Astropart. Phys. 35 \(2012\) 530](#)

Recherche de sursauts gamma avec TAToO



Gris: courbes de lumière de 158 émissions rémanentes optiques détectées entre 1997 et 2014 (Kann).



Gris: courbes de lumière de 503 émissions rémanentes détectées par Swift/XRT entre 2008 et 2013

Pas de contreparties observées → limites sur la fluence

 JCAP 02 (2016) 062

Neutrinos et ondes gravitationnelles



LIGO

Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

Supported by the National Science Foundation
Operated by Caltech and MIT

[About](#) [Learn More](#) [News](#) [Gallery](#) [Educational Resources](#)

Detection Papers

Scientific paper describing the detection published in *PRL* 116, 061102 (2016).

Companion Papers

"Unmodeled Searches Used for First LIGO Gravitational Wave Detection"

"A Search for Gravitational Waves from Compact Binary Coalescences in 16 Days of Advanced LIGO Data associated with GW150914"

"GW150914: A Merging Binary Black Hole at Redshift ~ 0.1 "

"Constraints on the Rate of Binary Black-hole Coalescences from 16 Days of Advanced LIGO Observations"

"Astrophysical Implications of the Binary Black-hole GW150914 Detected by LIGO"

"GW150914: A Black-hole Binary Coalescence as Predicted by General Relativity"

"The Stochastic Gravitational-wave Background from Black Hole Binaries: The implications of GW150914"

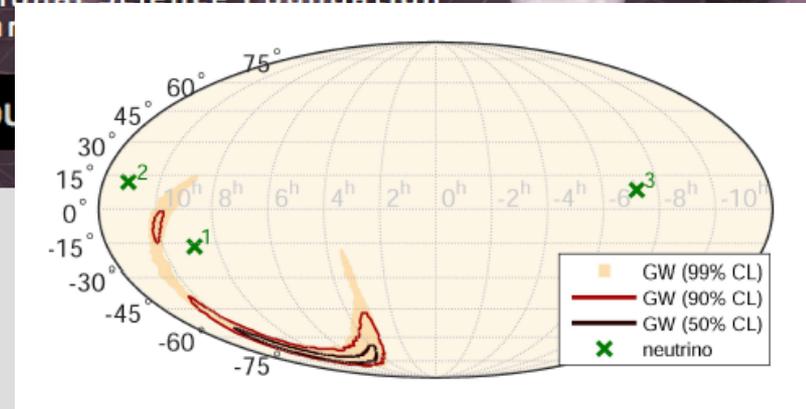
"Calibration Uncertainty of the Detectors in Early Advanced LIGO"

"Characterization of Transient Noise in the Advanced LIGO Interferometers Relevant to Gravitational Wave Signal GW150914"

"Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Candidate G184098"

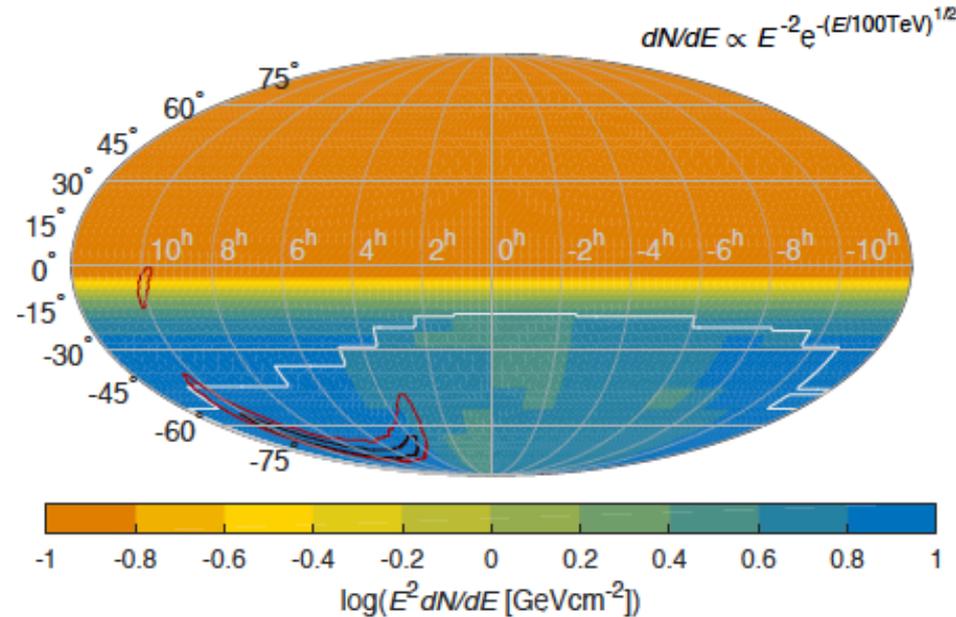
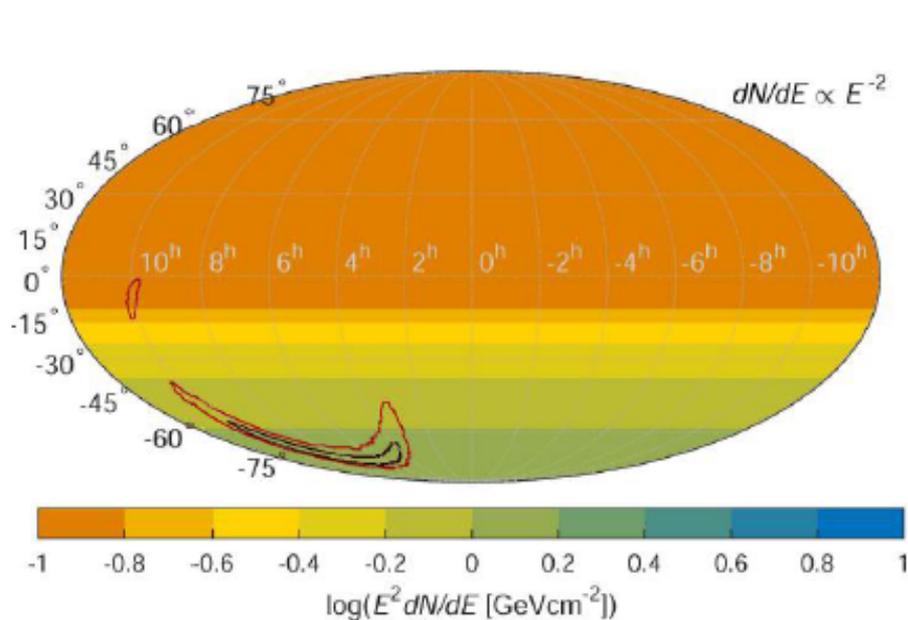
"High-energy Neutrino Follow-up Search of the First Advanced LIGO Gravitational Wave Event with IceCube and ANTARES"

"The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries"



Neutrinos et l'onde gravitationnelles

Limites combinées IceCube + ANTARES sur la fluence en neutrinos (spectre E^{-2})



Limite supérieure sur la fluence intégrée
[100 GeV – 100 PeV] ou [100 GeV – 100 TeV]:

$$E_{\nu, \text{tot}}^{\text{ul}} \sim 10^{52} - 10^{54} \left(\frac{D_{\text{gw}}}{410 \text{ Mpc}} \right)^2 \text{ erg}$$

- ➡ la limite d'ANTARES domine en-dessous de ~ 100 TeV (ligne blanche)
- ➡ importance d'un suivi rapide pour améliorer la localisation d'une source éventuelle:

Boîte d'erreur de GW160914 : 590 deg² \longleftrightarrow résolution ANTARES: < 0.5 deg²

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 ?

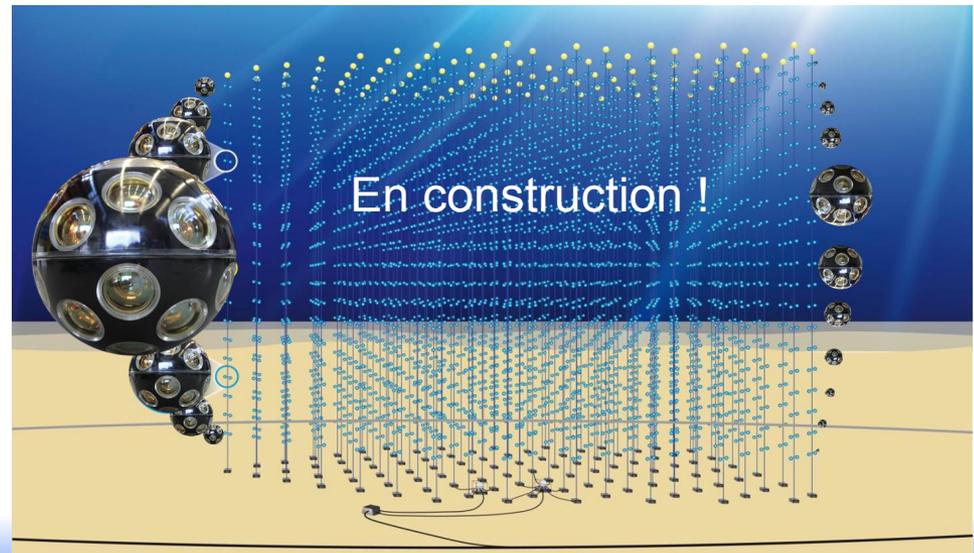
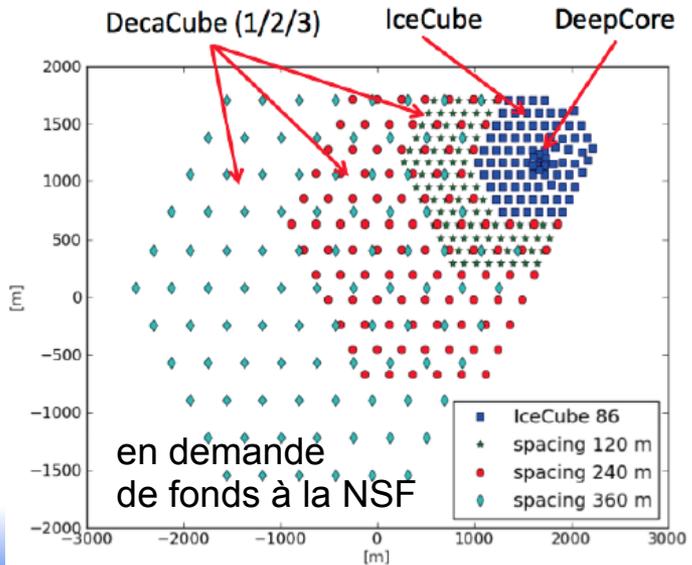
... les stratégies multimessagères (et un peu de chance) seront décisives

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

➔ la prochaine génération de télescopes à neutrinos est indispensable !

IceCube extension (Gen2)

KM3NeT: plusieurs km³ dans la Méditerranée



KM3NeT

Depuis 2015: PHASE 1

Infrastructure de surface et sous-marine: 2 sites (FR/IT)

31 lignes déployées pour 2017 (**3-4 x sensibilité d'ANTARES**)

Preuve de faisabilité d'un réseau de télescopes à neutrinos sous-marins

...et plus ?

**31 M€
FINANCE**

2017 PHASE 2

**ARCA: Astrophysics Research with
Cosmics in the Abyss**

230 lignes (2 blocs) KM3NeT-IT

Investigation du signal d'IceCube

Astronomie neutrino toutes saveurs

Premières sources galactiques ?

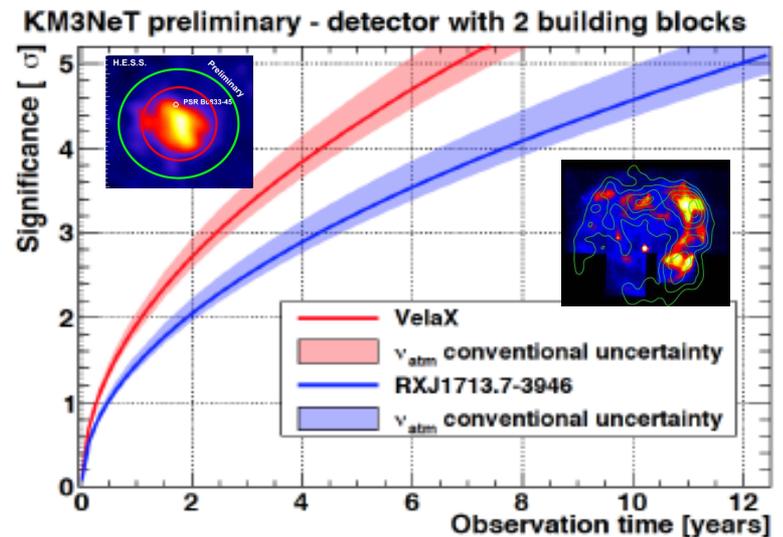
+ORCA: Oscillation Research

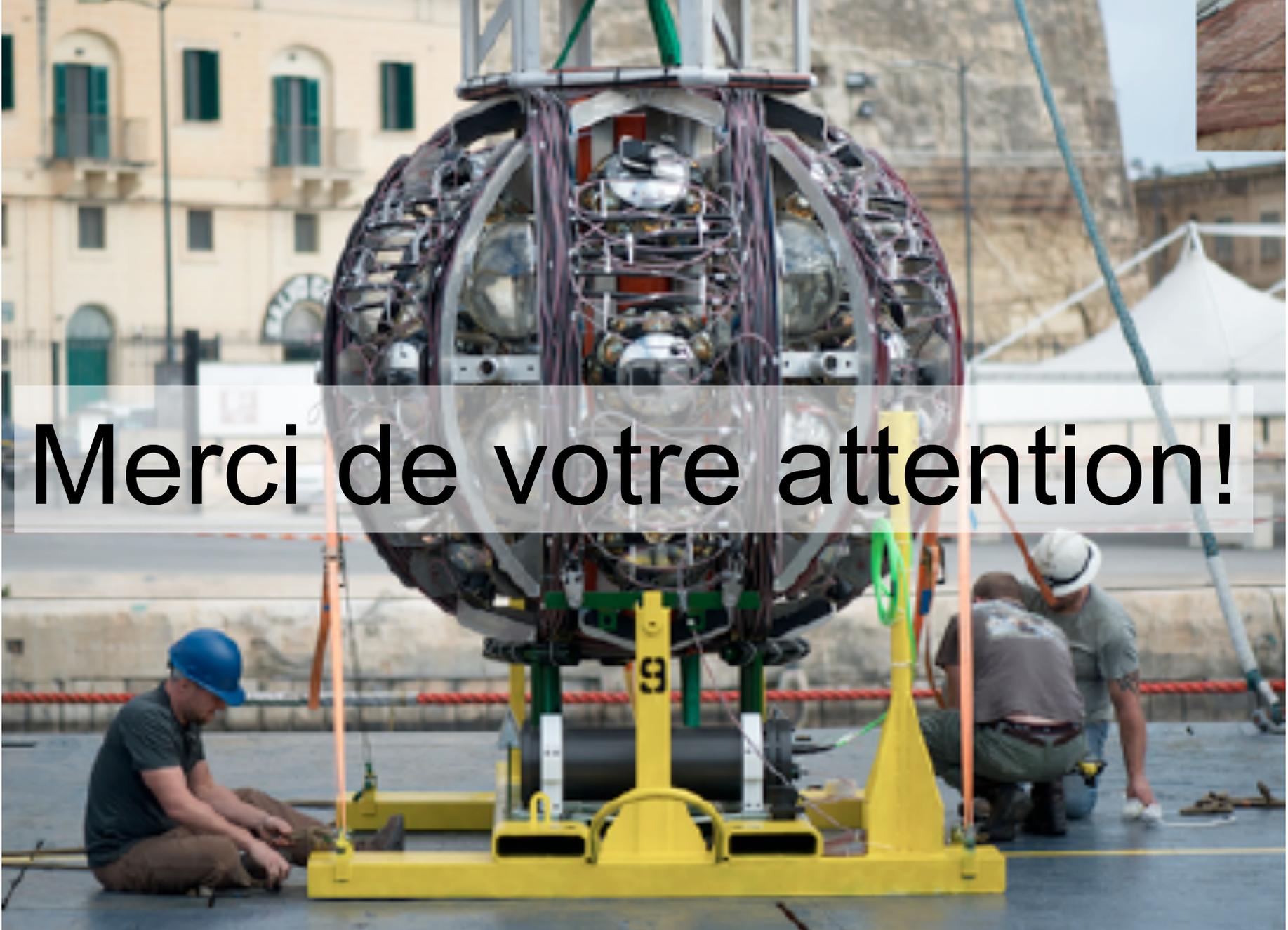
115 lignes (1 bloc) KM3NeT-FR

2020 KM3NeT 3.0: 6 blocks

Letter of Intent

arXiv:1601.07459 (bientôt dans J. Phys. G.)





Merci de votre attention!