

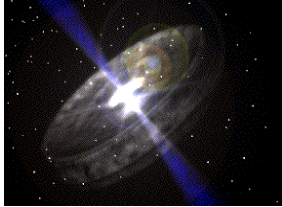
Récentes avancées en astronomie des neutrinos à haute énergie



Antoine Kouchner
Université Paris 7 Diderot
Laboratoire APC



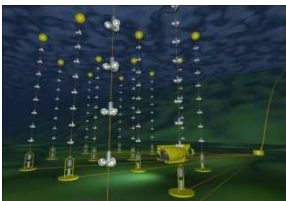
Plan de l'exposé



Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

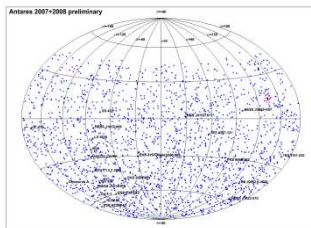


Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques résultats

Flux diffus

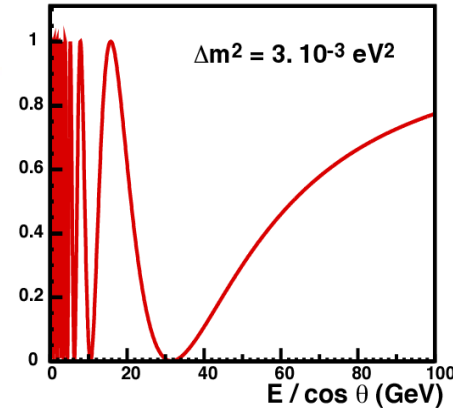
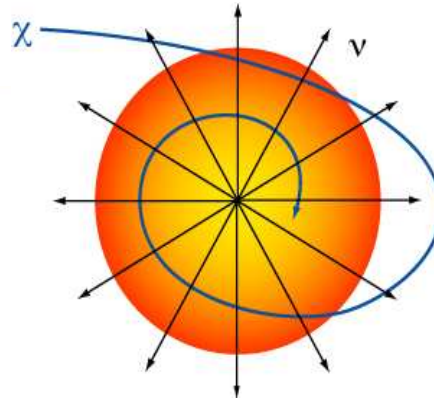
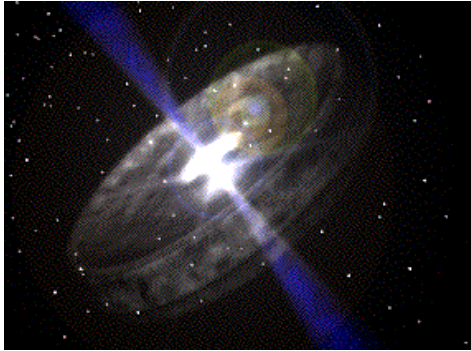
Recherche de sources ponctuelles

Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

Cadre scientifique des télescopes à neutrinos



Haute Energie
 $E_\nu > 1 \text{ TeV}$

Energie moyenne
 $10 \text{ GeV} < E_\nu < 1 \text{ TeV}$

Basse Energie
 $10 \text{ GeV} < E_\nu < 100 \text{ GeV}$

ν cosmiques

Recherche de
matière noire

Oscillations ν



But principal

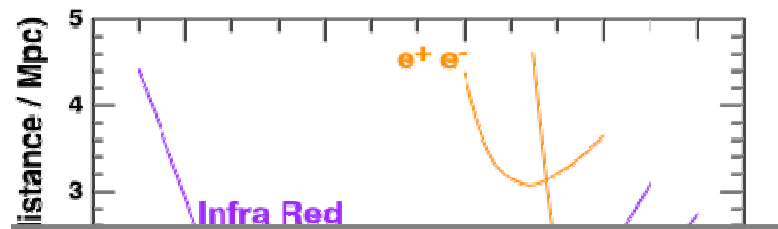
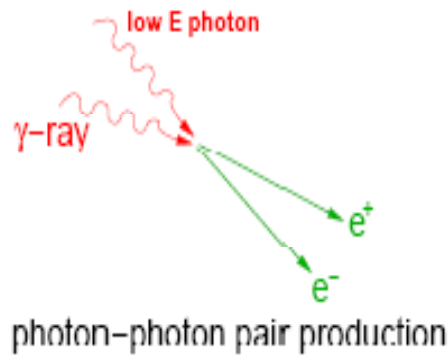
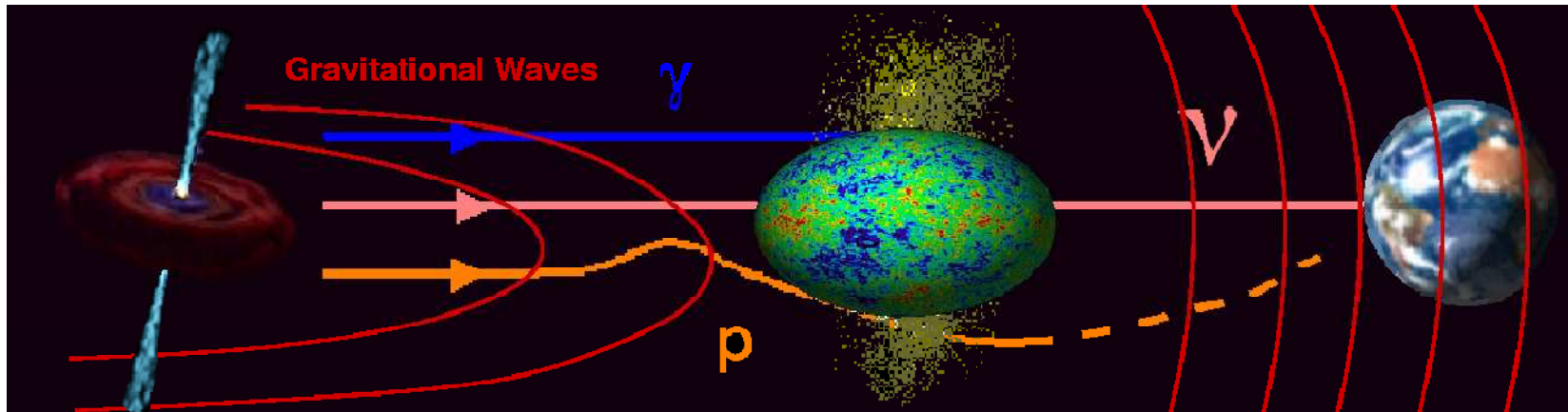
Nouvelle physique (exotique)
Monopoles, nucléarites,...



Sciences environnementales: océanographie, biologie, géologie...

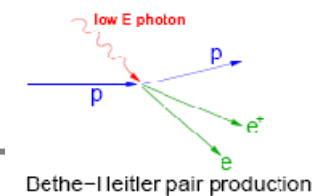
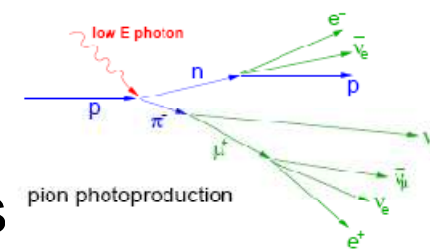
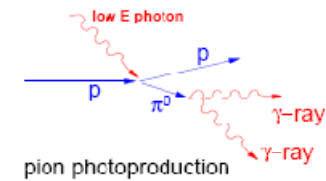
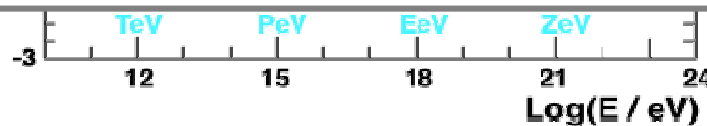
<http://listentothedeep.org/>

Astronomie multi-messagère



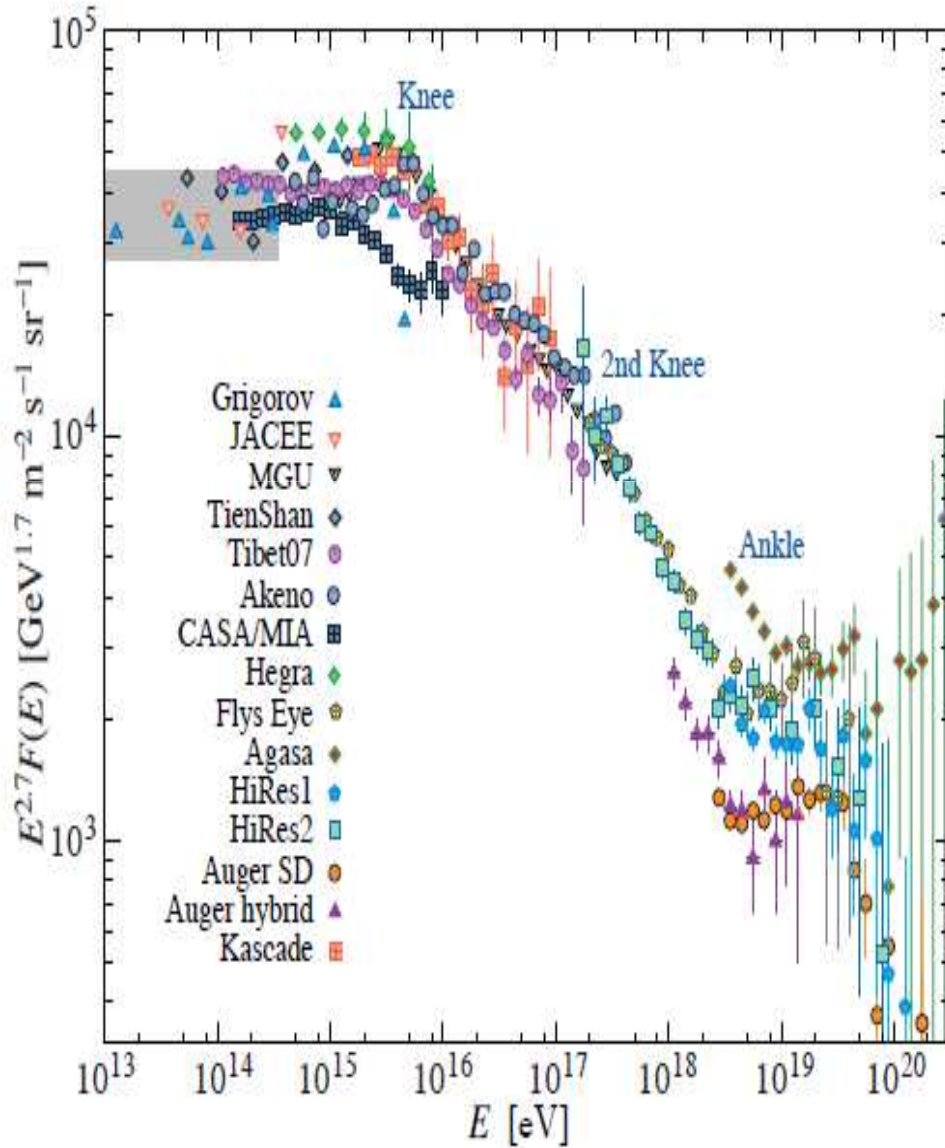
Neutrino

- ⇒ Phénomènes transitoires
- ⇒ Distances cosmologiques
- ⇒ Cœur des sources
- ⇒ Sources ponctuelles

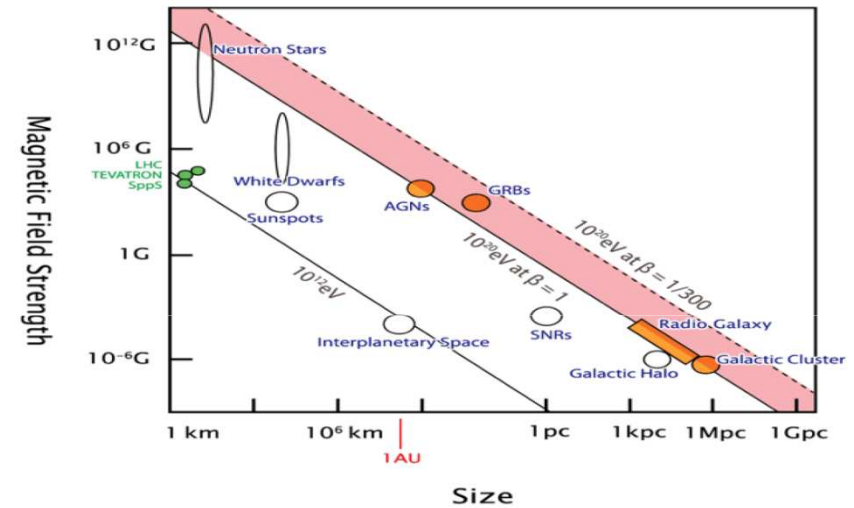


Les rayons cosmiques de haute énergie

Particle Data Group



Accélération de particules chargées lors de chocs stochastiques en présence de champs magnétiques forts → loi de puissance

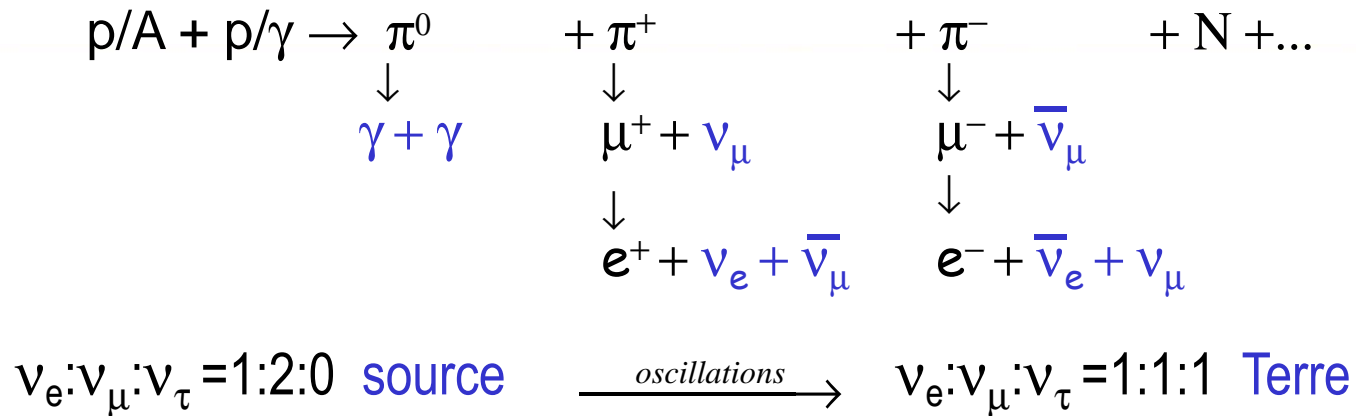


Coupe à UHE confirmée mais ...

Nature
 Origine
 Production ?

Lien entre les messagers

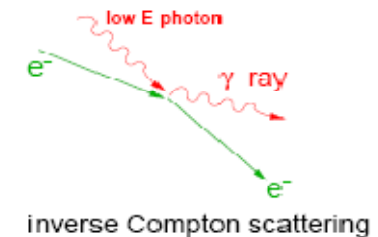
- Cascades hadroniques (comme pour les gerbes atmosphériques)



- Accélération («Bottom-Up»)

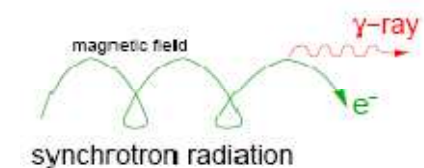
Chocs stochastiques (mécanisme de Fermi)

Explosion / Accrétion / Effondrement gravitationnel



- Processus électromagnétiques

Synchrotron Inverse Compton = Pas de neutrinos



Lien entre messagers flux de neutrinos

- Benchmark extragalactic muon neutrino flux

- ◆ Waxman & Bahcall, 1999

- $dN/dE \propto E^{-2}$ spectre primaire [protons!]
- Normalisation avec le spectre de RC observé entre 10^{19} - 10^{20} eV

$$E^{-2} I(E) = 4.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

~ O(100) événements/an/km²



Fixe la taille caractéristique du détecteur ~km

Limite controversée

- ◆ Mannheim, Protheroe, Rachen, 2001

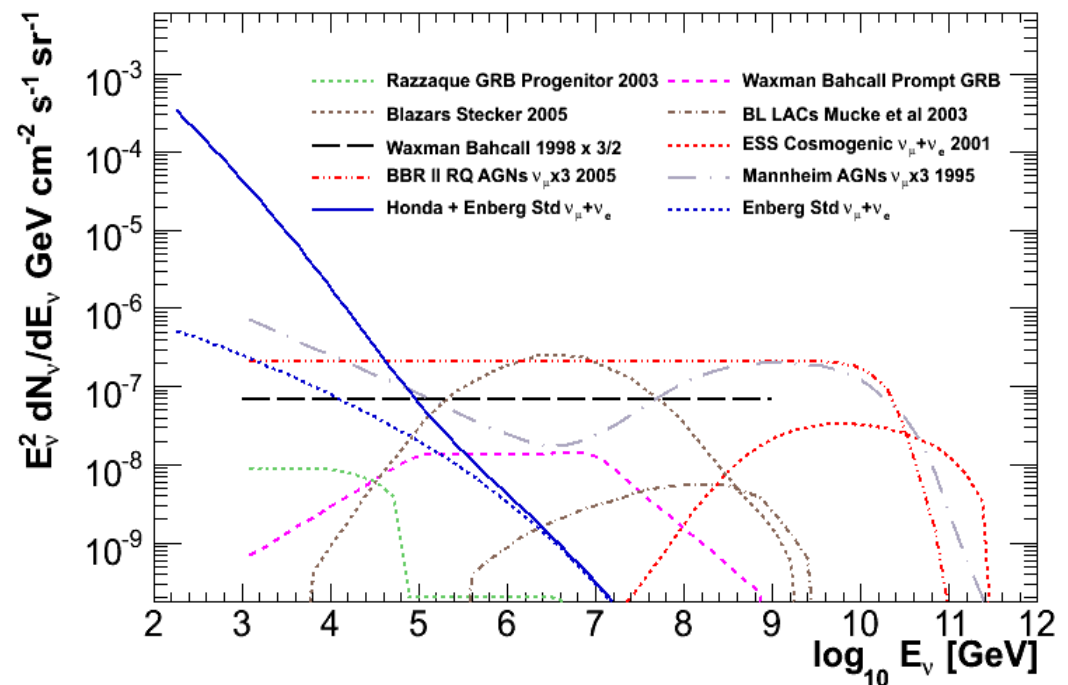
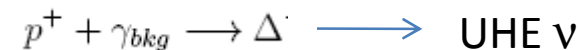
- Spectre des primaires libre
- Considèrent aussi les sources opaques aux neutrons

Exclu par IceCube et ANTARES

- Flux de neutrinos cosmogéniques

- ◆ Berezhinsky & Zatsepin, 1969

UHECR p interagit avec CMB => ν_{GZK}



Sources extragalactiques potentielles

Noyaux actifs de galaxies (AGN)

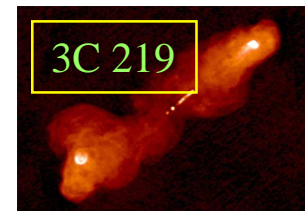
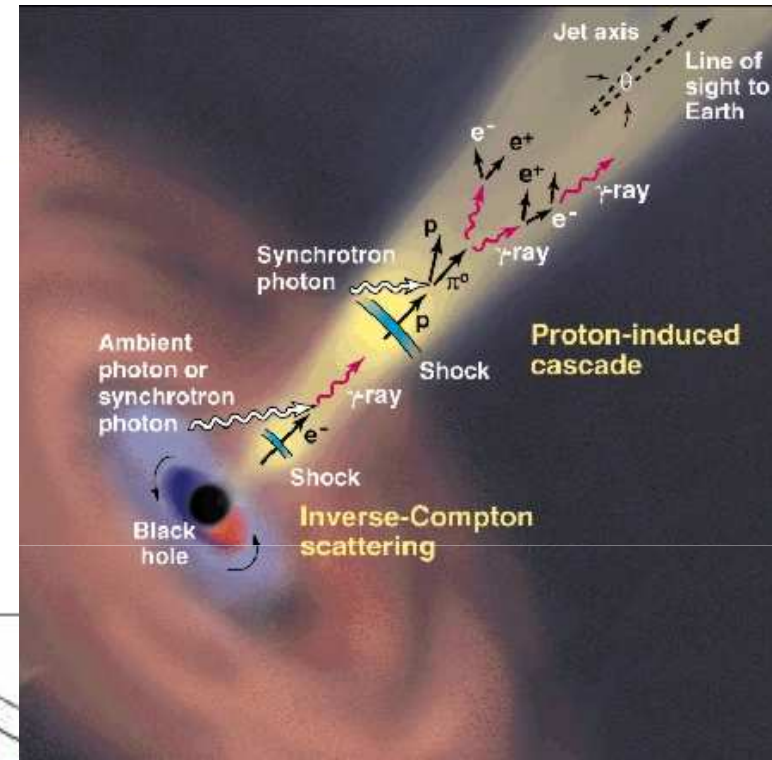
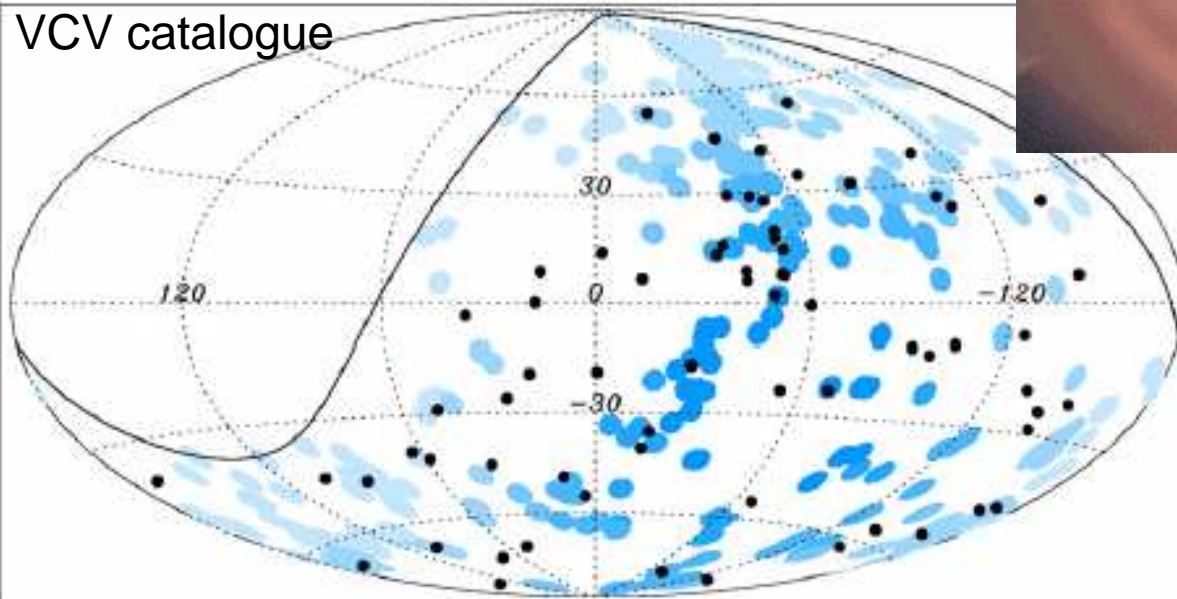
Emission continue (mais variable)

Luminosités observées

$$10^9 - 10^{15} \times L_{\odot}$$

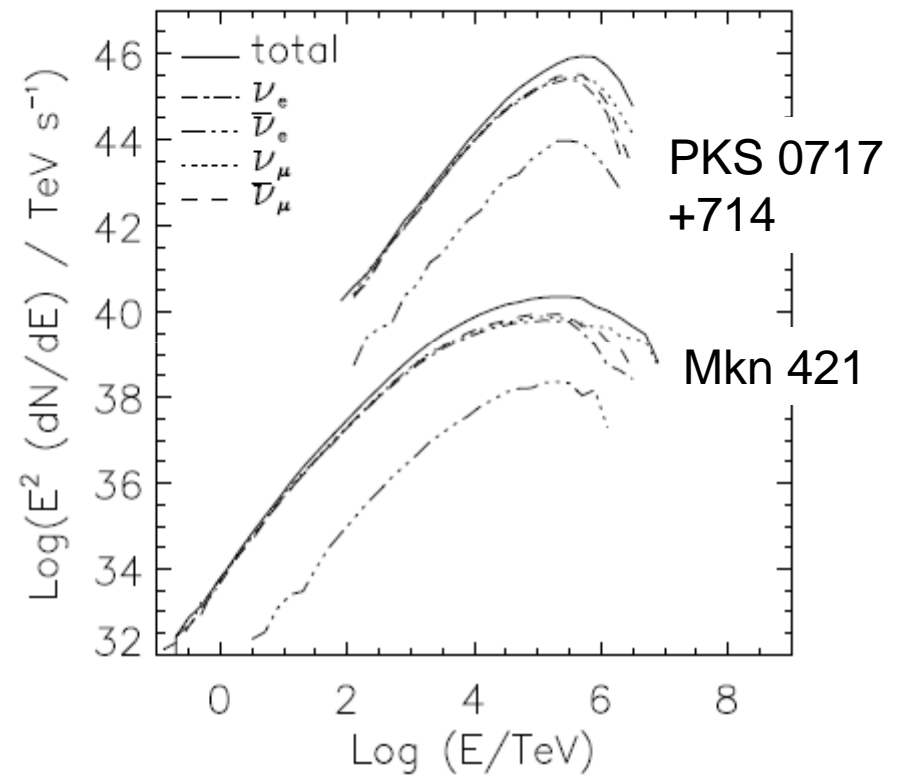
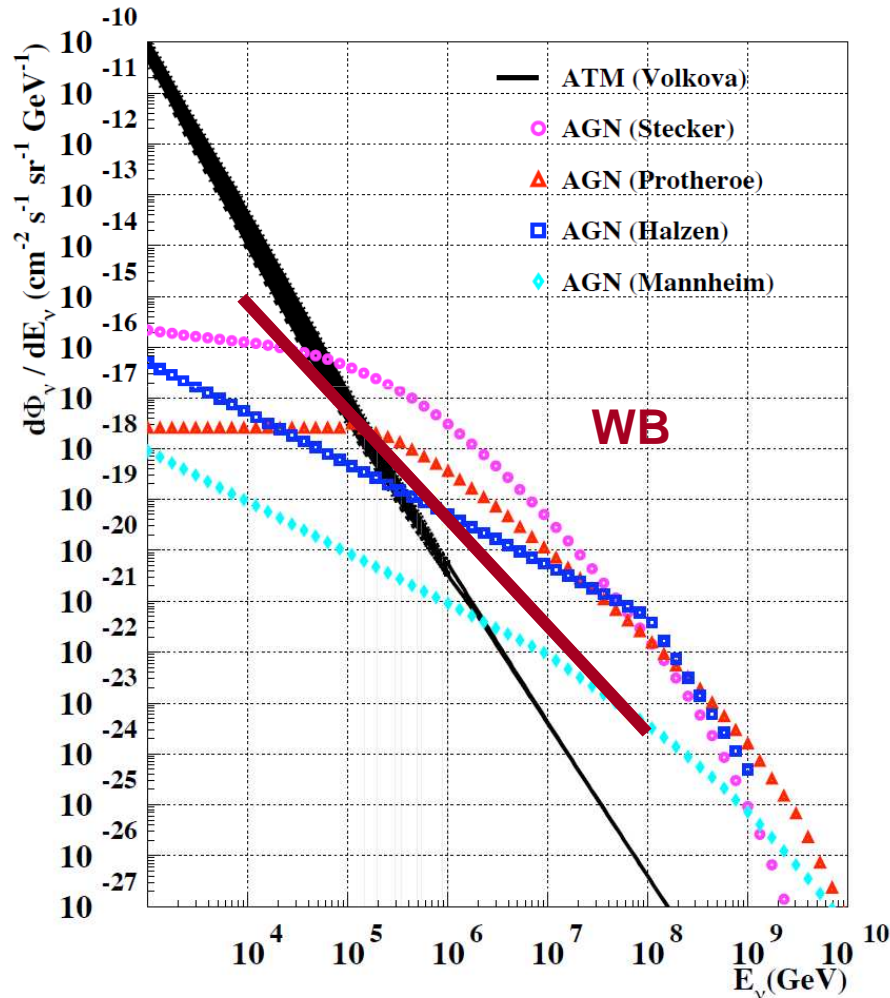
Corrélations AUGER 69 evts $E > 55 \text{ EeV}$

VCV catalogue



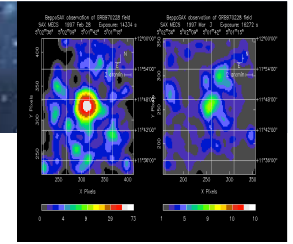
Sources extragalactiques potentielles

De nombreuses prédictions de flux diffus de neutrinos dans les années 90...
Révisées à la baisse après les travaux de WB et les premiers limites expérimentales



📖 Mücke et al, 2005

Sources extragalactiques potentielles



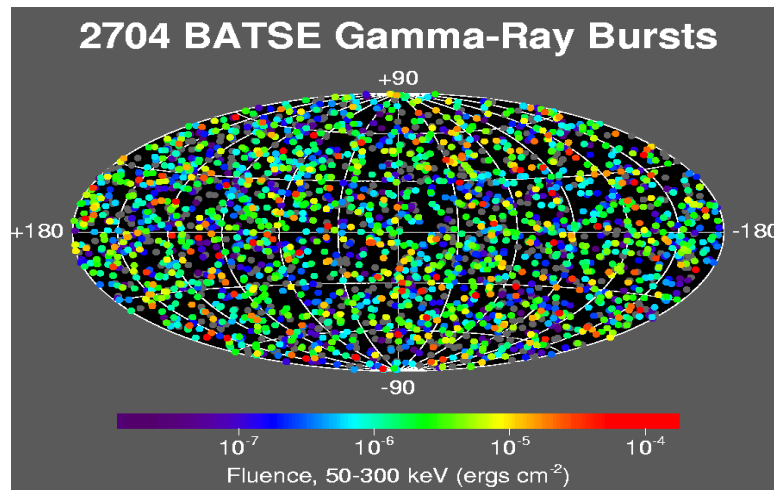
Sursauts gamma (GRB)

Très courts ($\sim 1s$)
Très brillants $\sim 10^{18} \times L_{\odot}$

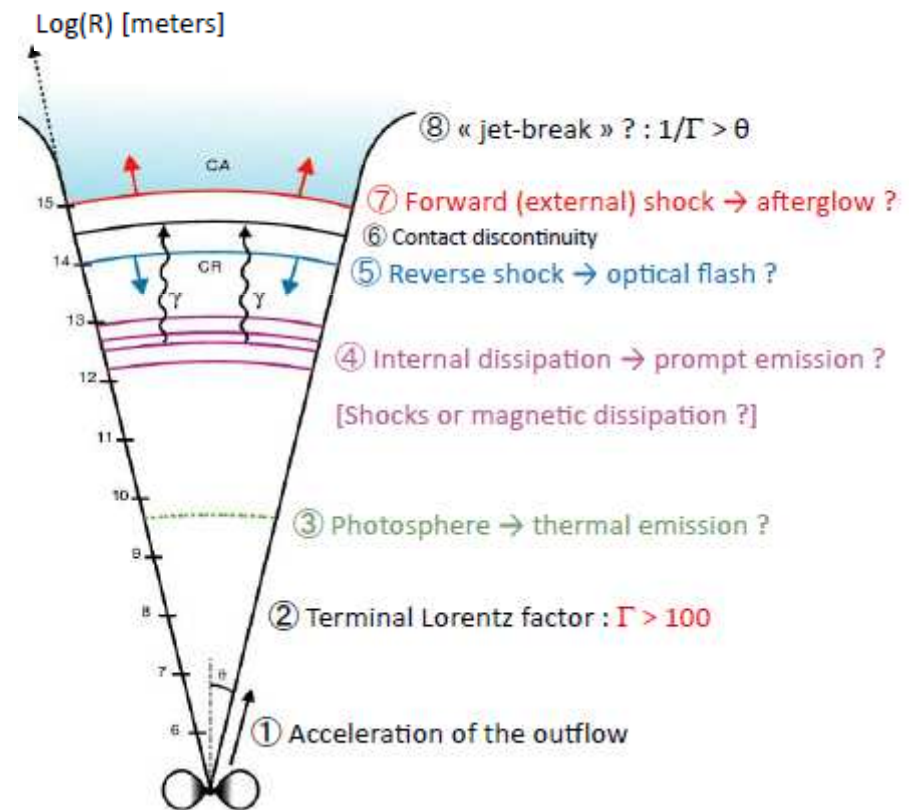
Contreparties $z_{\max} = 8.3$ GRB 090423

Observés au GeV (Fermi)

BATSE : 1 sursaut /jour ($4\pi/3$ sr)



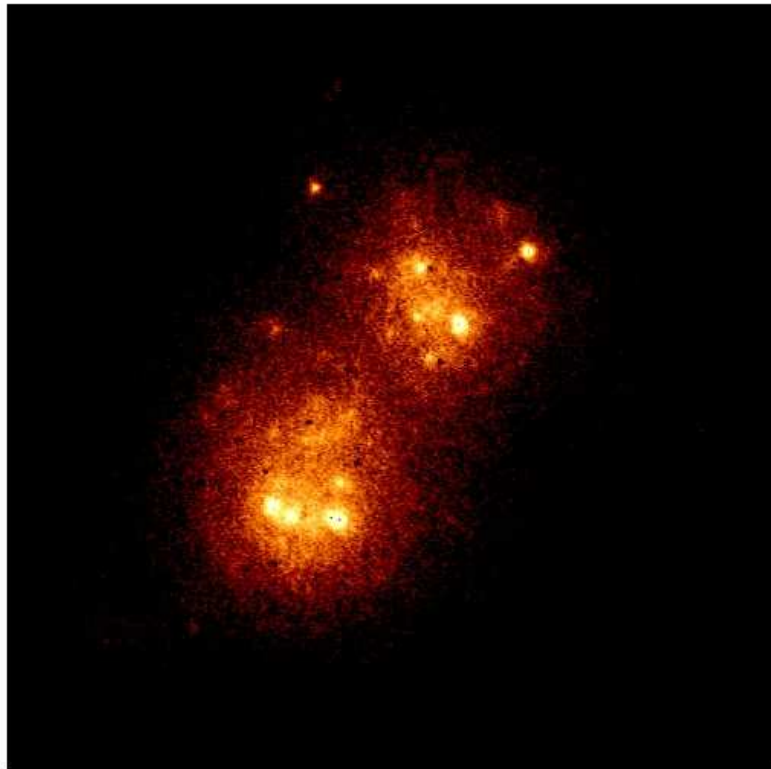
Les neutrinos seraient produits pendant les chocs internes et externes (fireball model)



Les neutrinos pourraient être détectés pendant l'observation du sursaut (gamma)
☞ Traitement spécial pour ANTARES

Sources extragalactiques potentielles

Starburst galaxie (galaxies à sursaut de formation d'étoiles)



merging galaxies

⇒ Taux exceptionnel de formation d'étoiles qui pourrait résulter d'une collision, ou d'une interaction avec une ou plusieurs galaxies proches.

Phase temporaire de l'évolution de la galaxie.

Supernovae

☞ rayons cosmiques + gaz interstellaire

☞ Pions

☞ Neutrinos (\sim PeV)

📖 Loeb & Waxman JCAP 05 (2006) 003

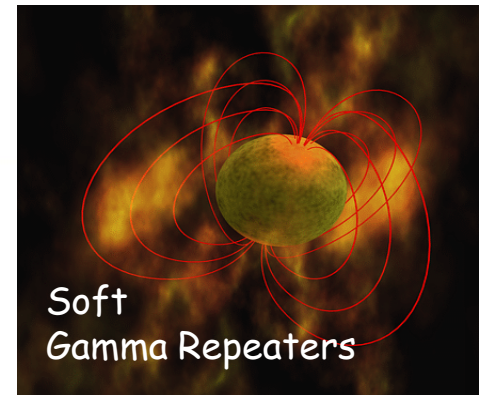
Sources Galactiques potentielles



- **Microquasars** binaires X avec objet compact (étoile à neutrons ou trou noir) accréteur réémettant sous forme de jets (radio & IR)

- **Restes de Supernovae**

Indications d'accélération hadrons
SN1006, W28, W44, W49B, W51C ...



- **SGRs** pulsars X avec sursauts γ .
Modèle "magnetar" : étoile à neutrons magnétisée subissant un tremblement de croûte

- **Régions denses**

Soleil, Centre Galactique,
milieu interstellaire

- **Fermi Bubbles**

Découverte à 5σ en 2 ans
(estimation préliminaire
KM3NeT)

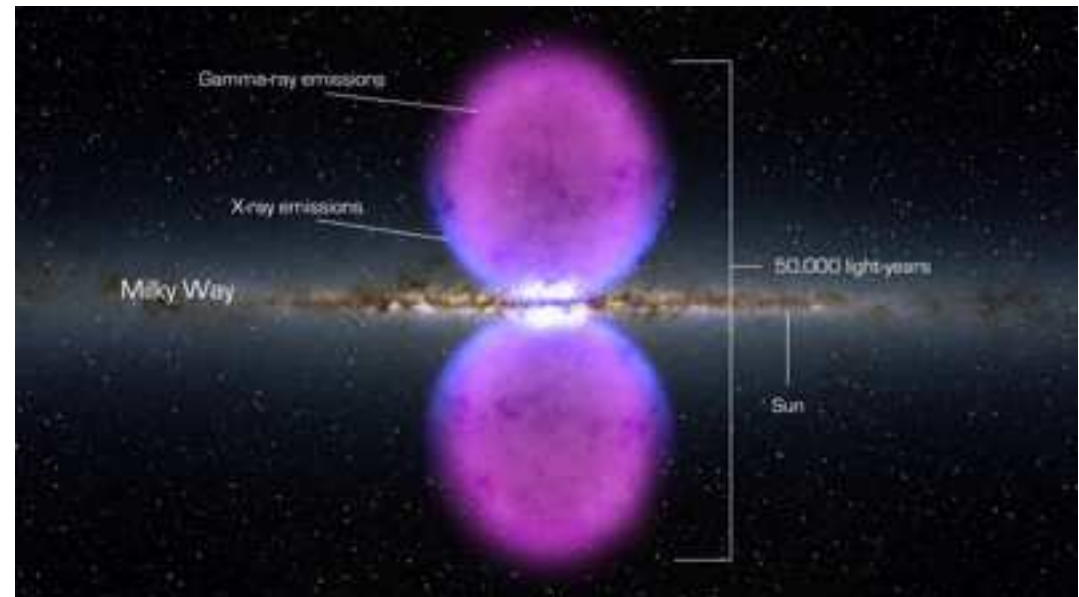
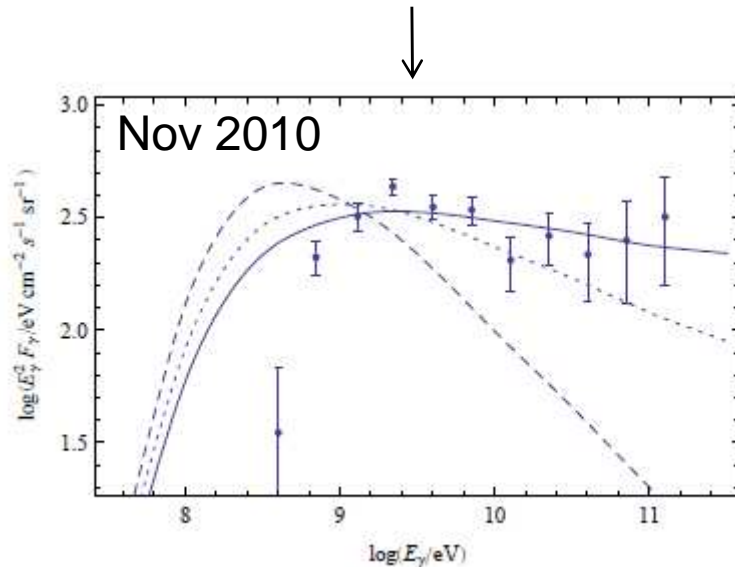
Fermi Bubbles

“Giant, Multi-Billion-Year-Old Reservoirs of Galactic Center Cosmic Rays”

📖 M. Crocker and F. Aharonian Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 11102

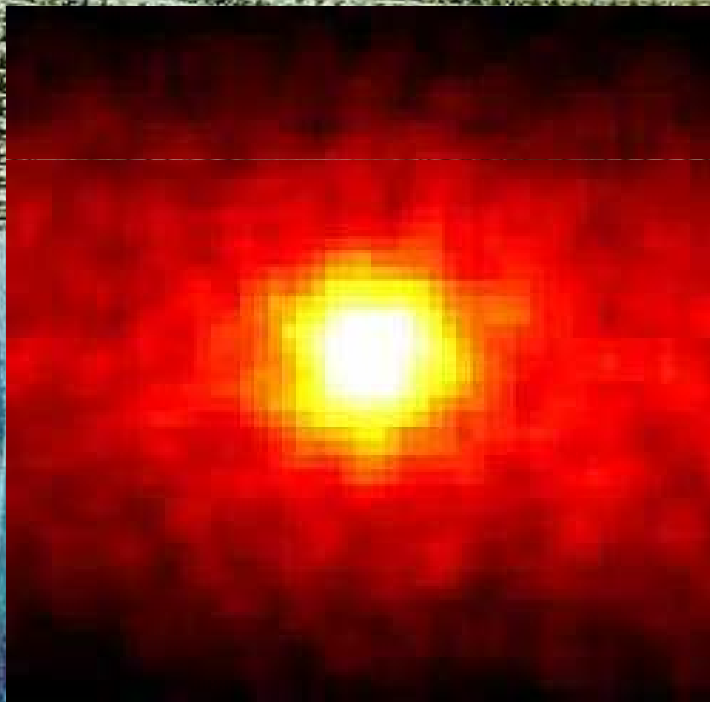
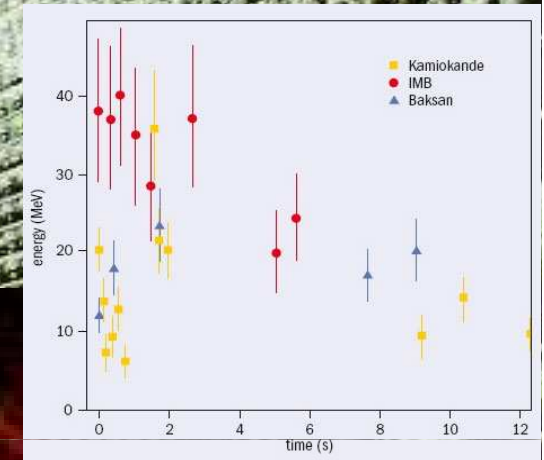
“Bilateral ‘bubbles’ of emission centered on the core of the Galaxy and extending to around 10 kpc above and below the Galactic plane. These structures are coincident with a non-thermal microwave ‘haze’ found in WMAP data and an extended region of X-ray emission detected by ROSAT.”

Spectre de Fermi $E^{-2.1}$



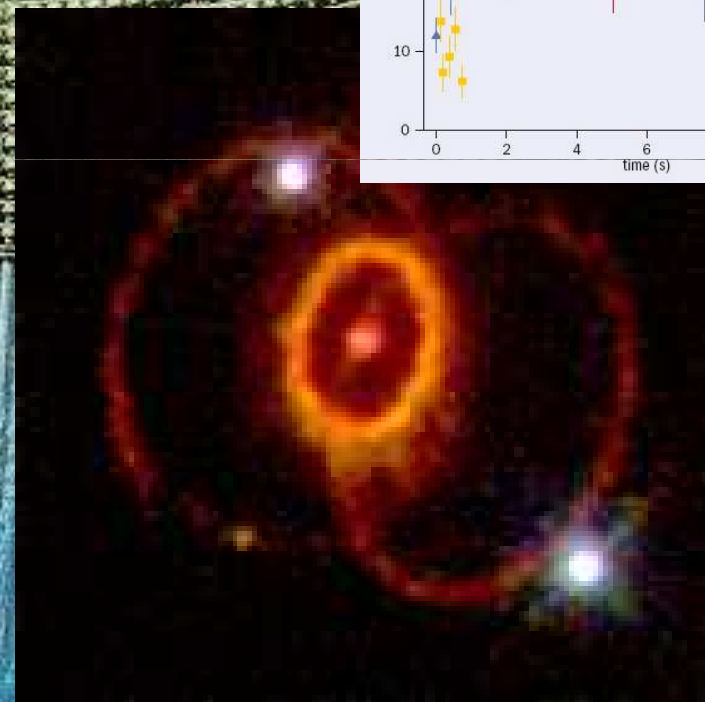
Premiers neutrinos extraterrestres

Présence de ν cosmiques $E > \text{GeV}$?
Galactiques
Extragalactiques



Le soleil vu par
l'expérience
SuperKamiokande

~MeV



Neutrinos issus de la
supernova 1987A

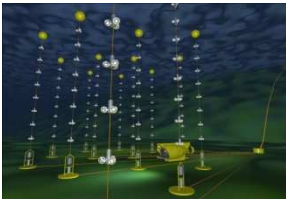
Plan de l'exposé



Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

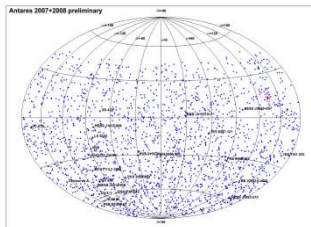


Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques résultats

Flux diffus

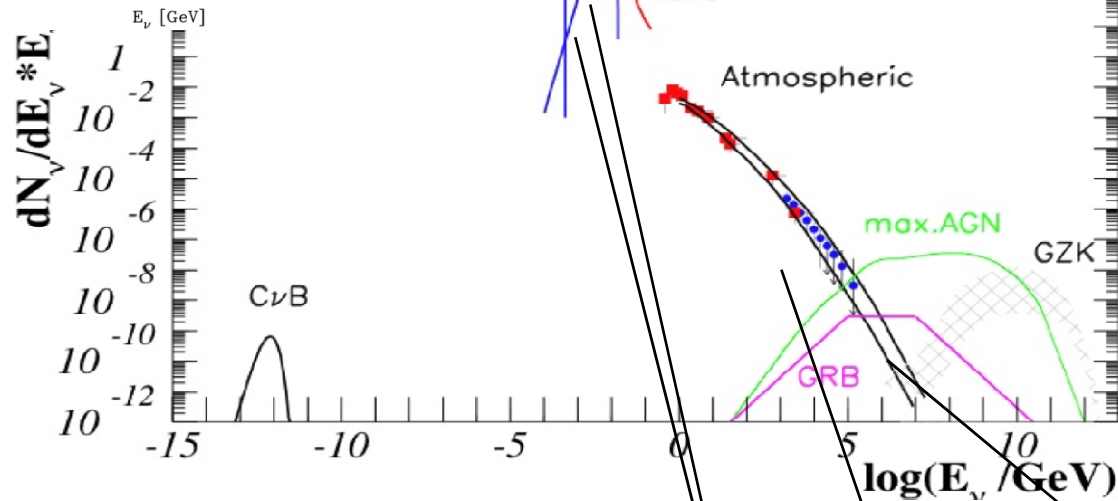
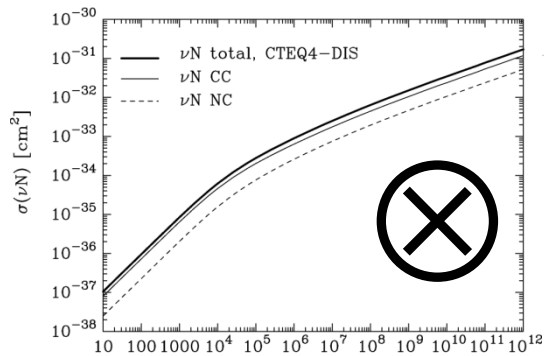
Recherche de sources ponctuelles

Analyses multi-messagers



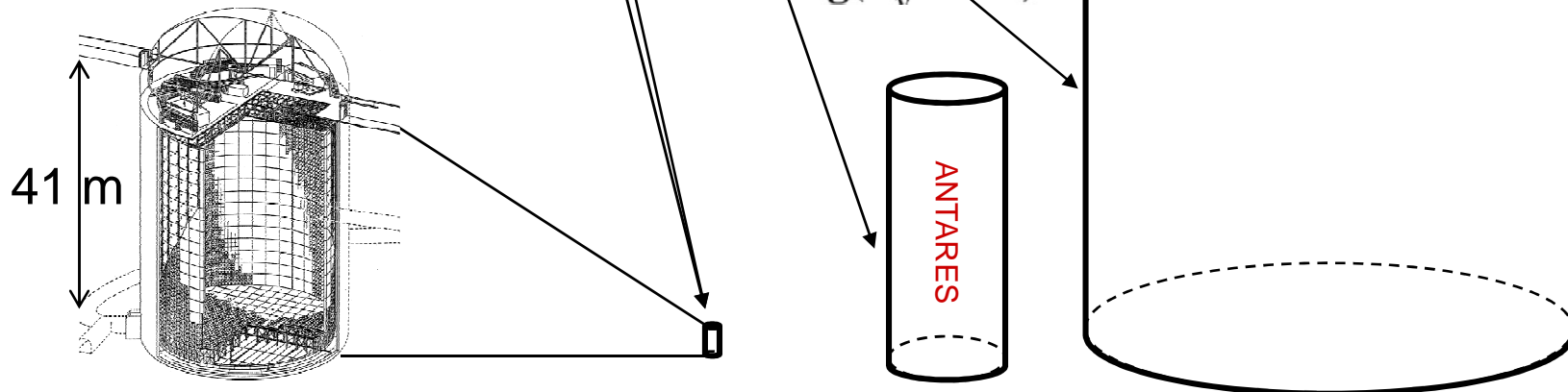
Le projet KM3NeT

Du MeV au PeV : la longue marche



Le défi de la détection à HE

☞ Grand volume pour compenser la faiblesse du flux et de la section efficace



Les ν_μ mieux adaptés pour la détection



Idée de Markov (1960) :  Nuclear Phys. 27 (1961) 385

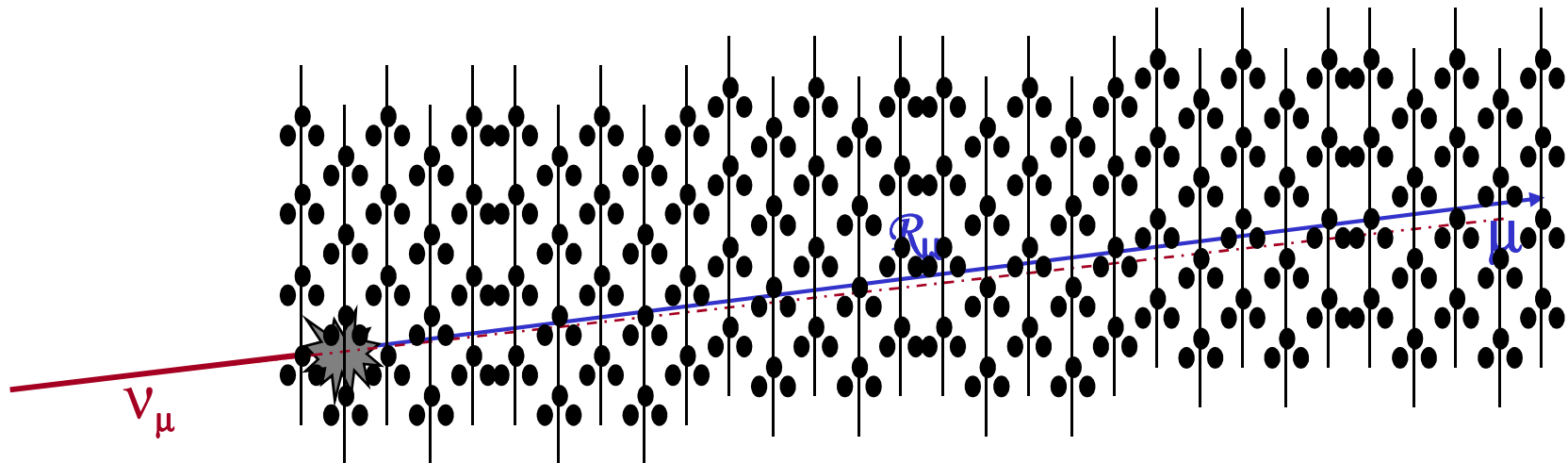
Détecter les muons issus de $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours R_μ du muon

Dans l'eau

$R_\mu(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$

$R_\mu(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



- Volume effectif de détection **augmente** avec E_ν
- La déviation entre le ν et le μ **diminue** avec E_ν
- Section efficace d'interaction **augmente** avec E_ν

La détection des neutrinos muoniques de HE est favorisée

Trajectoire du muon

“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 1060

Nécessite un milieu
sombre et transparent
+ grand volume

EAU/GLACE

ROCHE

v_{μ}



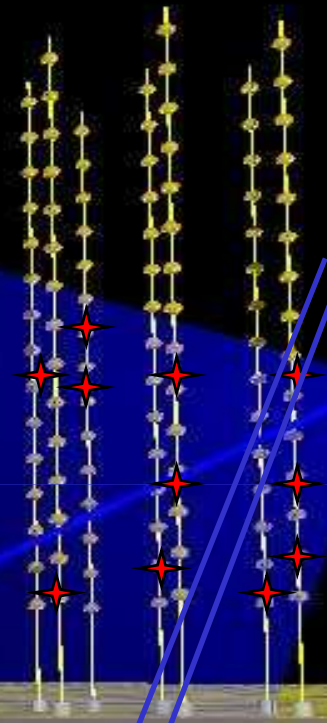
μ

Interaction
courant chargé

Signal = muons montant

Cône
Tcherenkov

42°



Lignes de
détection

$\times 10^6$

Réseau tri-dimensionnel
de photo-multipliateurs

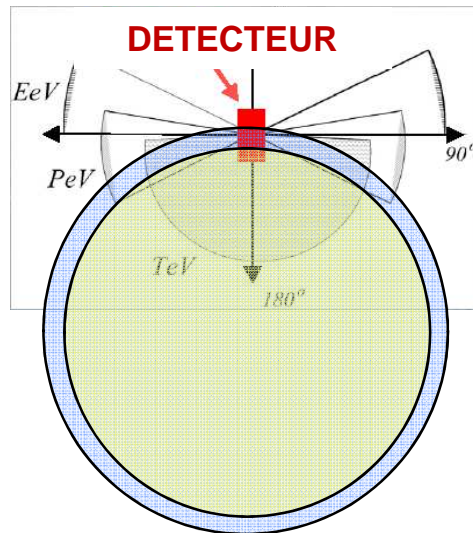
Temps, amplitude des signaux de PM
 \Rightarrow Trajectoire μ ($\sim \nu < 0.5$ °)

© François Montanet

Séparation des ν atmosphériques et cosmiques

- Excès à haute énergie

☞ Bon étalonnage en charge

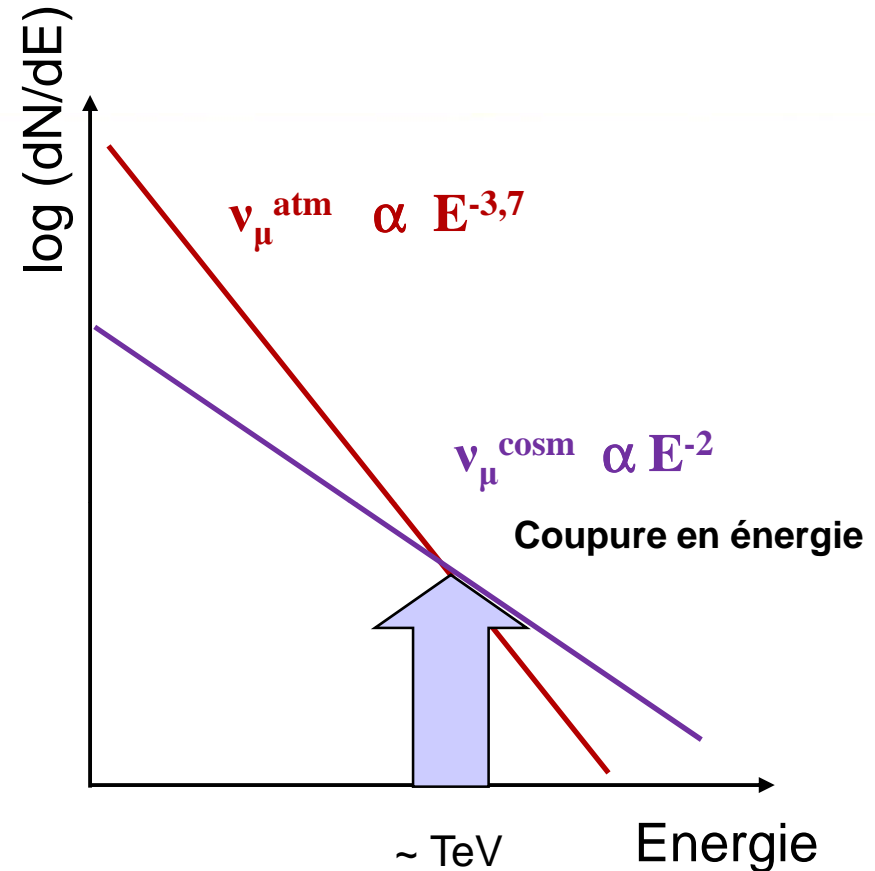


- Recherche d'anisotropies

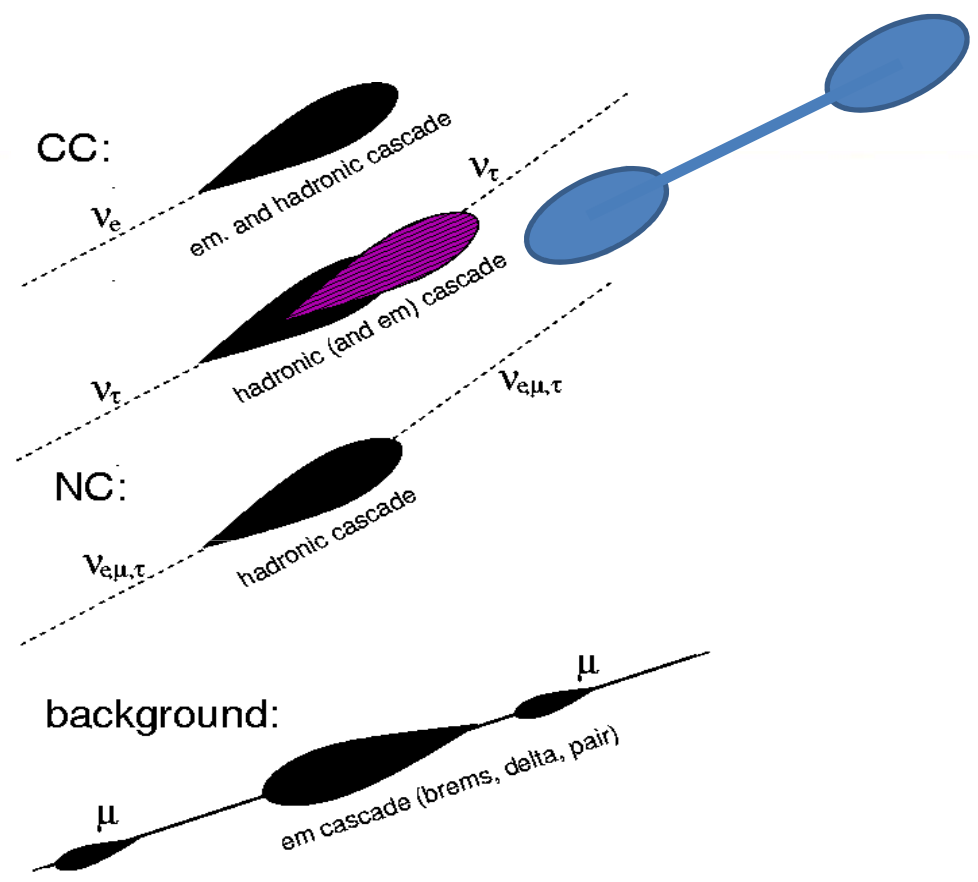
☞ Bonne résolution angulaire

- Confirmation par d'autres messagers

☞ Programme multi-messagers : alertes GRB, suivi optique, coïncidences GW, ...

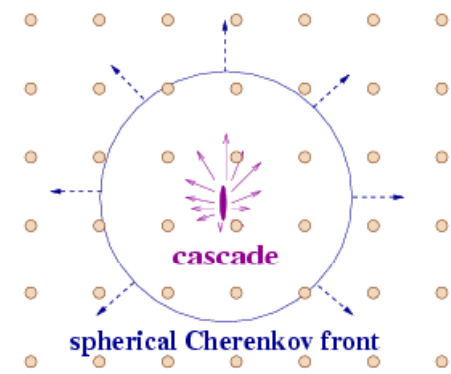


Les autres canaux de détection



So-called "cascade" events

Generic reconstruction:



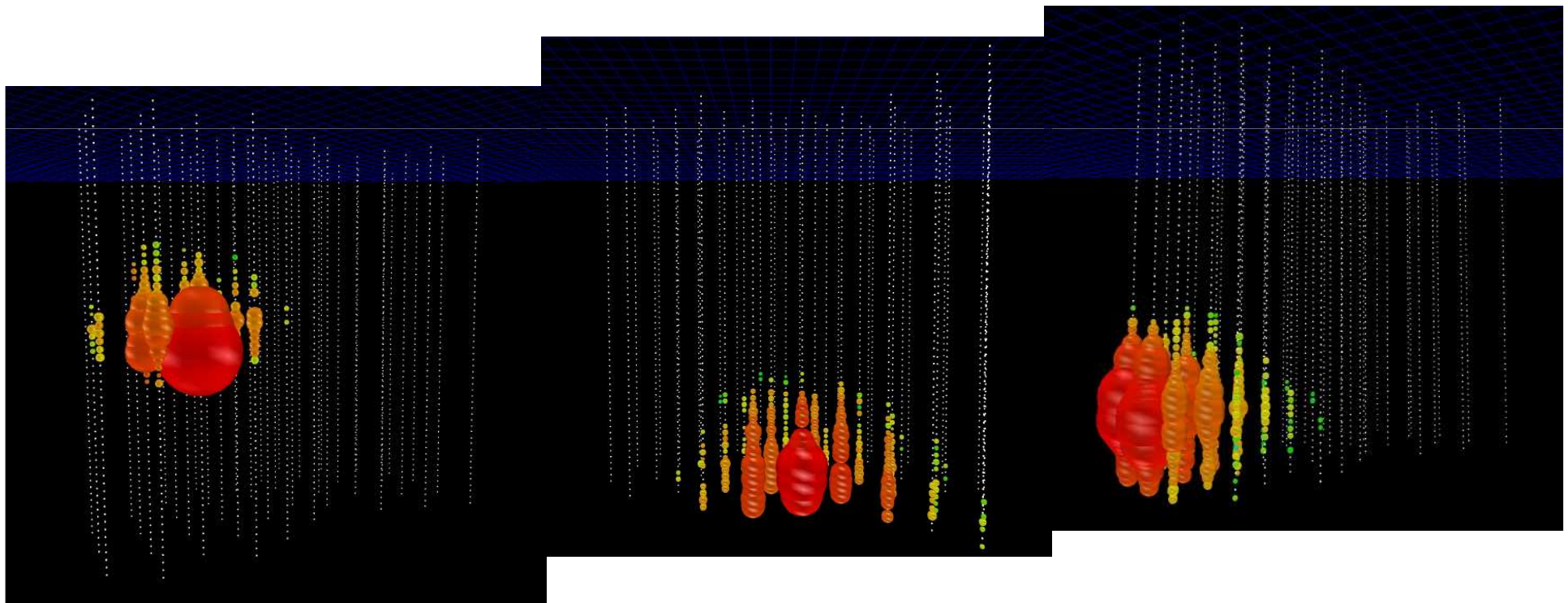
Événements contenus (~10m)

- + Meilleure estimation de l'énergie
- Moins bonne résolution angulaire
- + Identification des saveurs
- Moindre volume effectif

Flux diffus

Pas de signal mais...

3 événements IceCube de type « cascade » passent les coupures (1.2 +/- 0.5 attendus)
⇒ ν_e (atmosphériques?) de UHE.

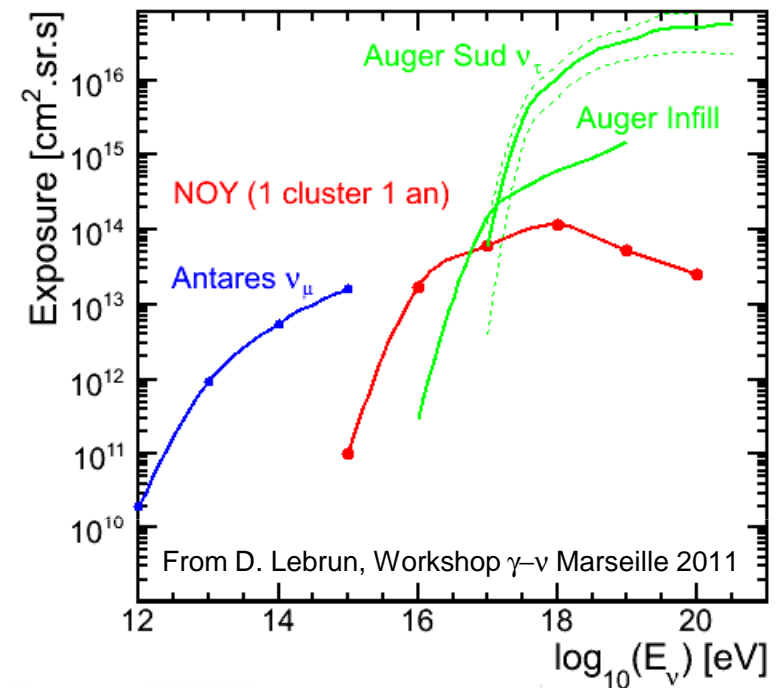


Techniques alternatives (UHE)

- Neutrinos cosmogéniques
- Pour le moment des limites seulement

**Gerbes induites par les neutrinos tau
Observables par détecteurs de surface (AUGER, ...)**

Exposure for one year and one cluster



Neutrinos de ultra haute énergie

- Ces limites + coupure GZK défavorisent les modèles « Top-Down »
RC UHE issus de la désintégration de particules supermassives

- Défavorisé également par la fraction de photons UHE (Auger)

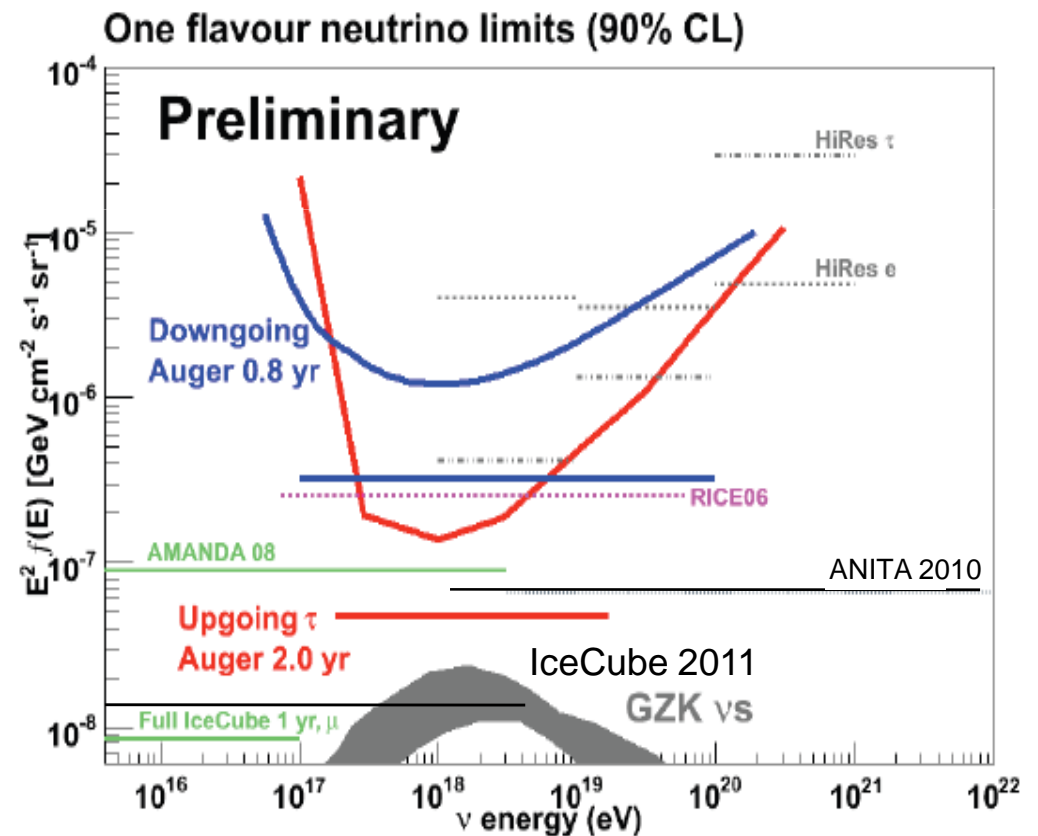
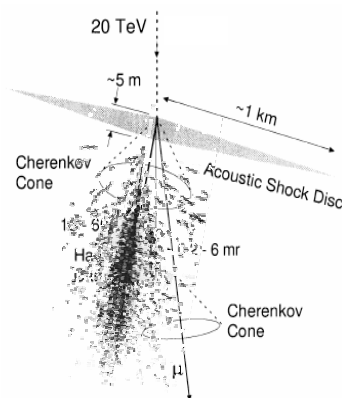
arXiv:0906.2347

arXiv:1103.4250

- Contraintes aussi par le flux diffus de photons GeV (Egret, Fermi)

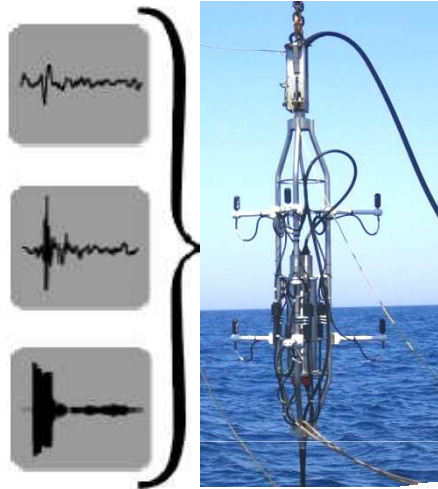
- Neutrinos de plus hautes énergies
Détection radio (effet Askaryan)
canal prometteur pour l'avenir

- Détection acoustique?

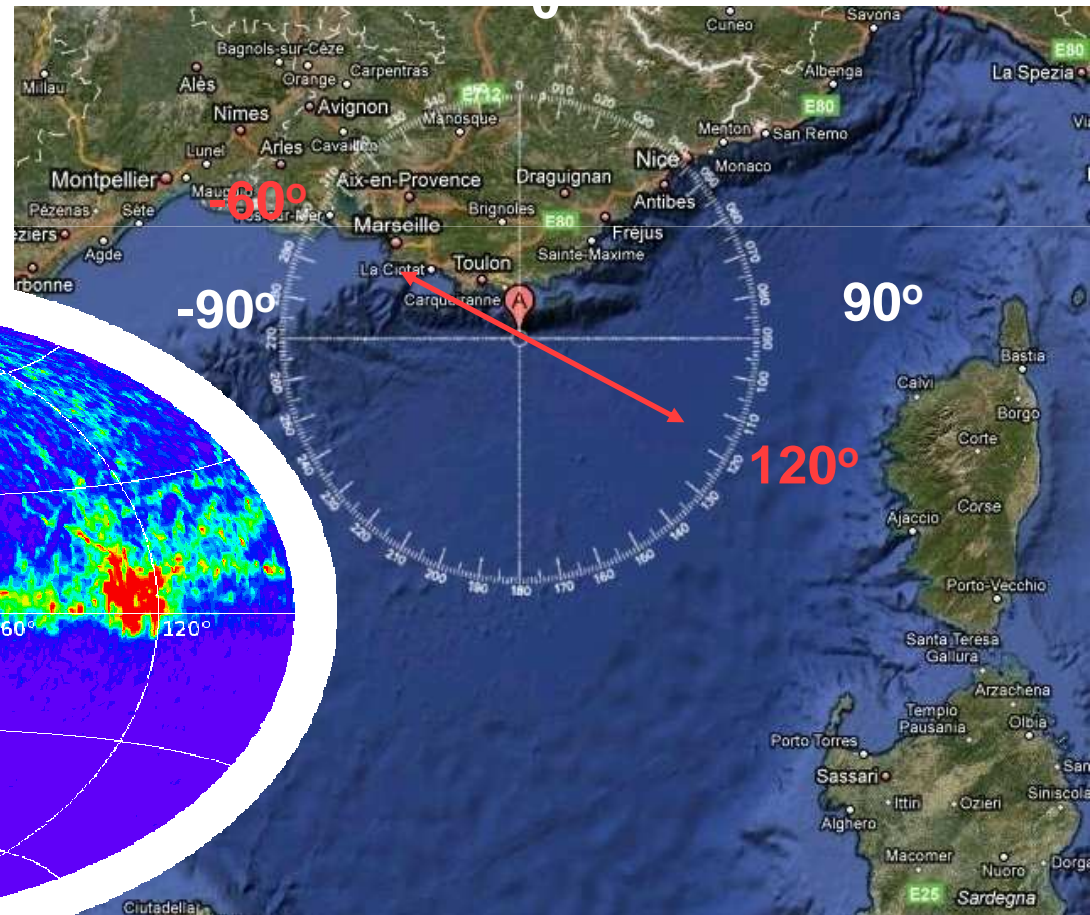
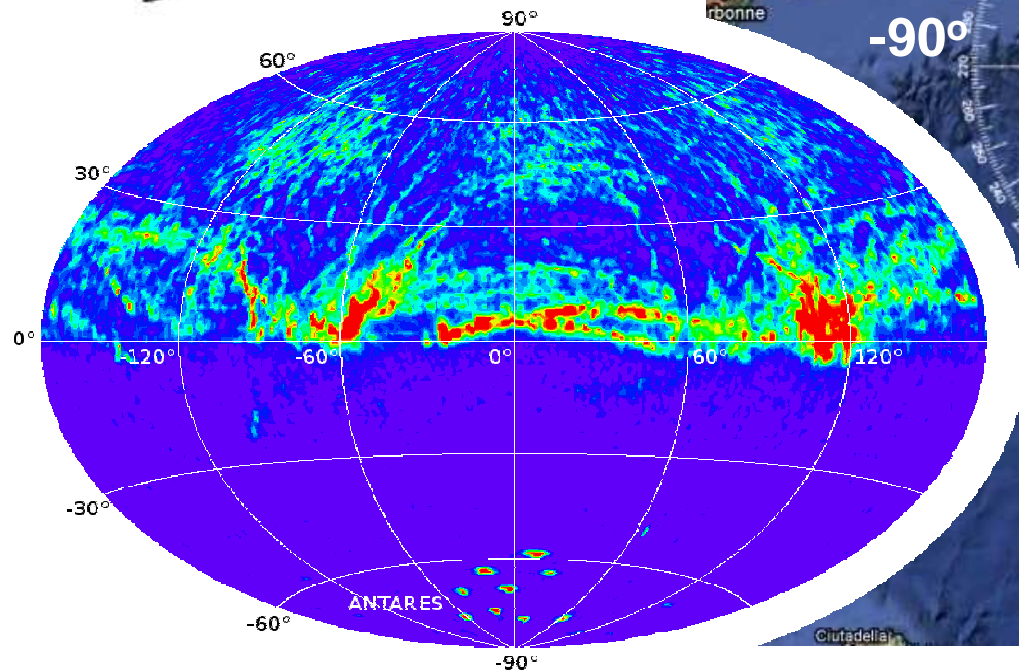


Ex de R&D pour la détection acoustique

*AMADEUS : un sous-ensemble du télescope ANTARES
(ou SPATS au pôle sud...)*



Reconstruction de la direction par triangulation
Tout type de signal transitoire: animaux, bateaux...



Les télescopes à neutrinos

{ANTARES, BAIKAL, ICECUBE} en fonctionnement



“At first, when we talked about DUMAND our accelerator friends laughed and said we were crazy. Now they ask why have you not got it operating yet !”
J G Learned (1992)

{ANTARES, NEMO, NESTOR} ∈ Consortium KM3NeT

Les atouts de la Méditerranée

- Complémentarité du champ de vue

Centre galactique

- Peu de diffusion

Bonne précision angulaire

- Sites profonds ~5000m

Réduction du bruit de fond

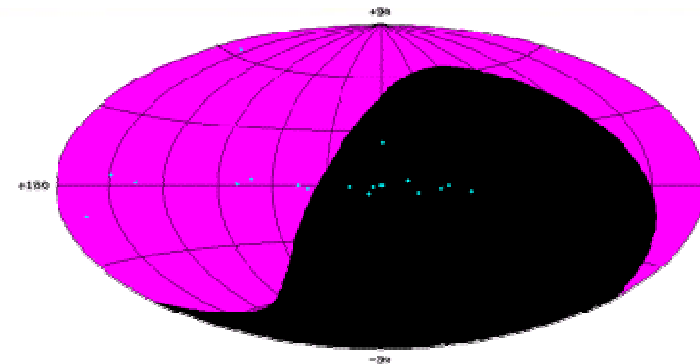
- Logistique accessible

Déploiement et réparation

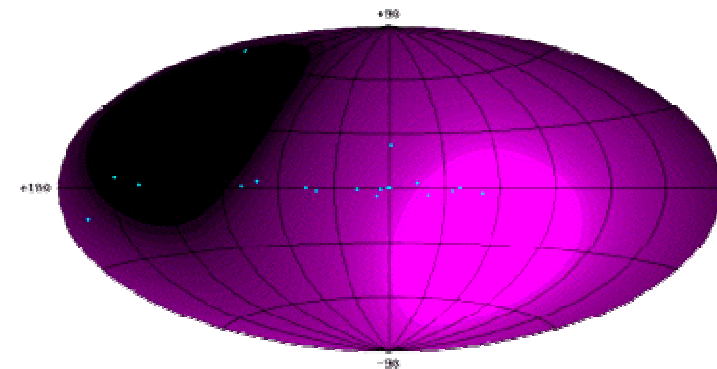
- Inconvénient : activité optique

Filtrage des données

Ciel visible au pôle sud



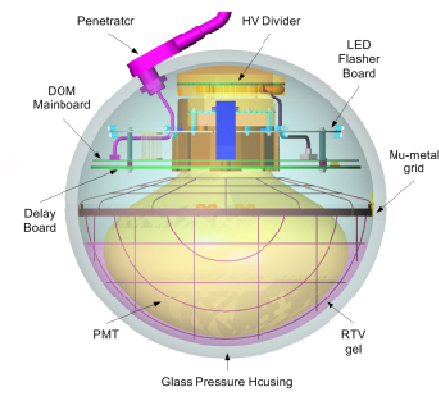
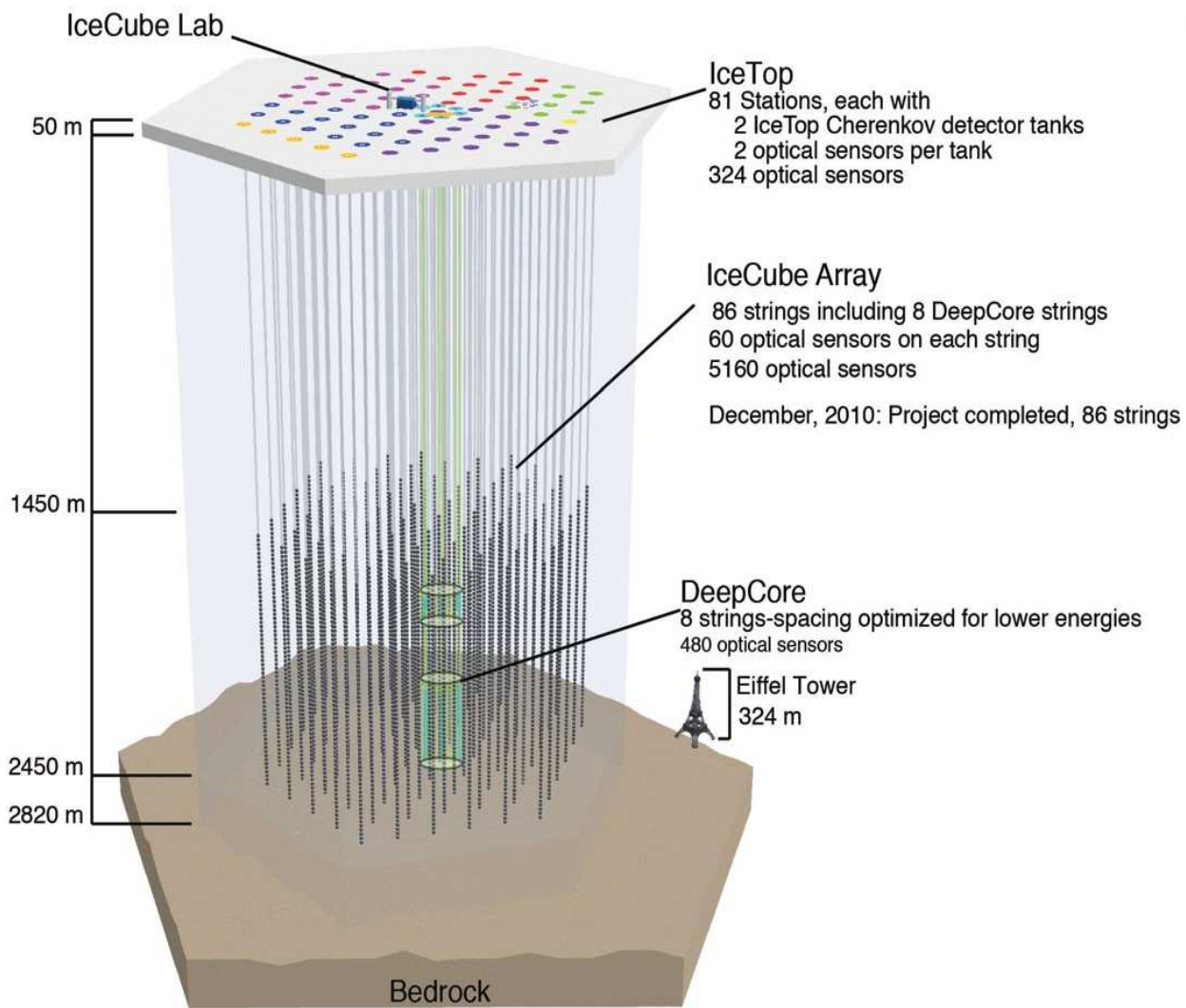
Majorité des sources HESS TeV
visibles par TN hémisphère Nord



Ciel visible en Méditerranée

Le télescope IceCube

Complet depuis le 14 décembre 2010.
Inauguration fêtée mi-avril 2011.



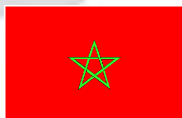
La collaboration Antares



NIKHEF Amsterdam
KVI Groningen
NIOZ Texel



APC Paris
IFREMER, Brest
DAPNIA, Saclay
IReS, Strasbourg Mulhouse
CPPM Marseille
IFREMER, Toulon
COM, Marseille
OCA, Nice



Le télescope Antares

- 25 étages / ligne
- 3 PM / étage
- ~ 900 PM

350 m

Deployé en 2001

14.5 m

40 km vers la côte

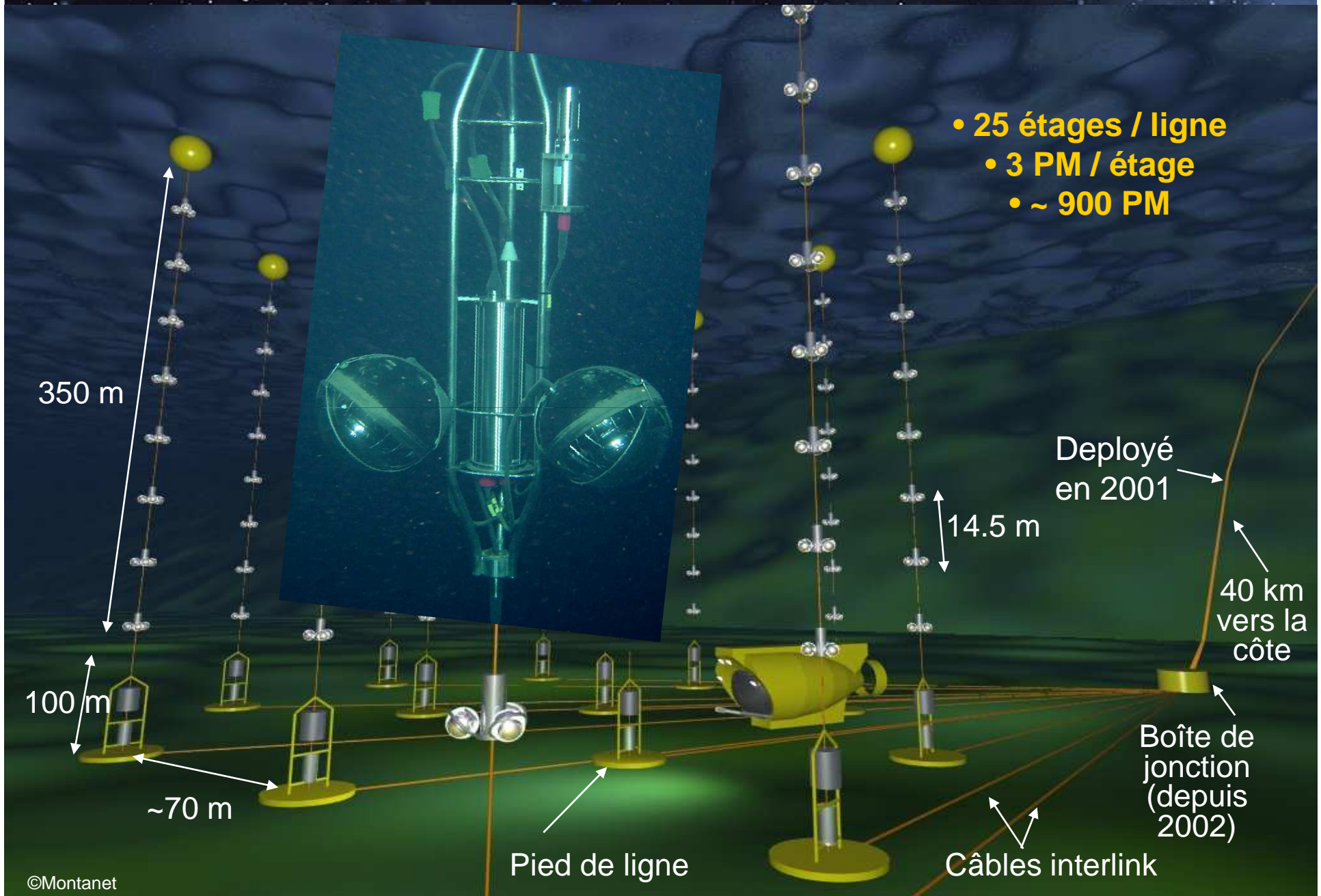
Boîte de jonction (depuis 2002)

100 m

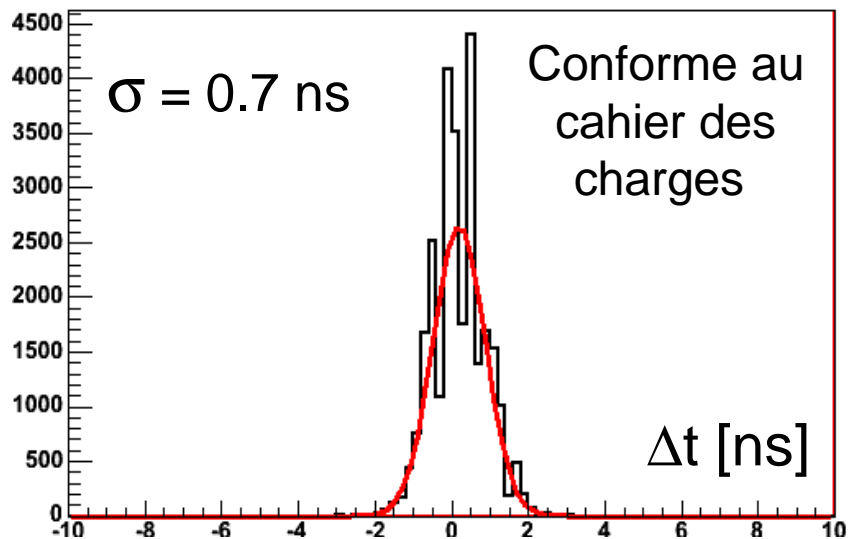
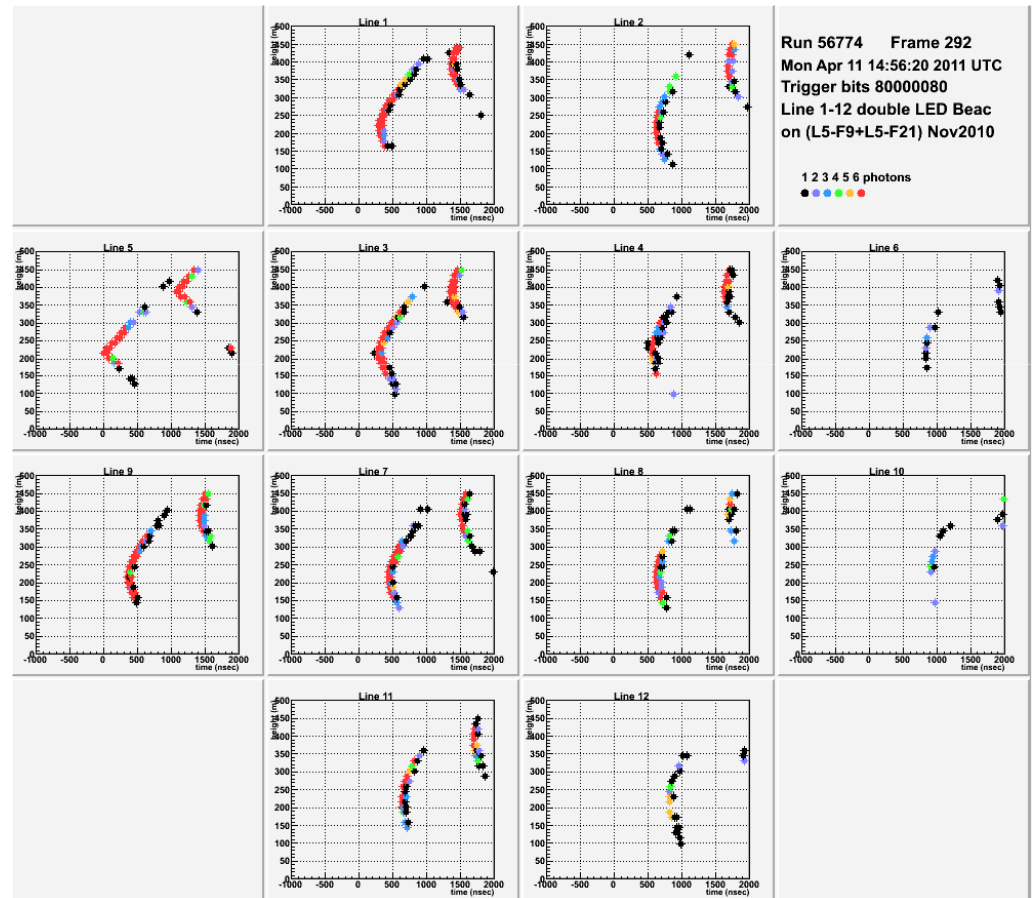
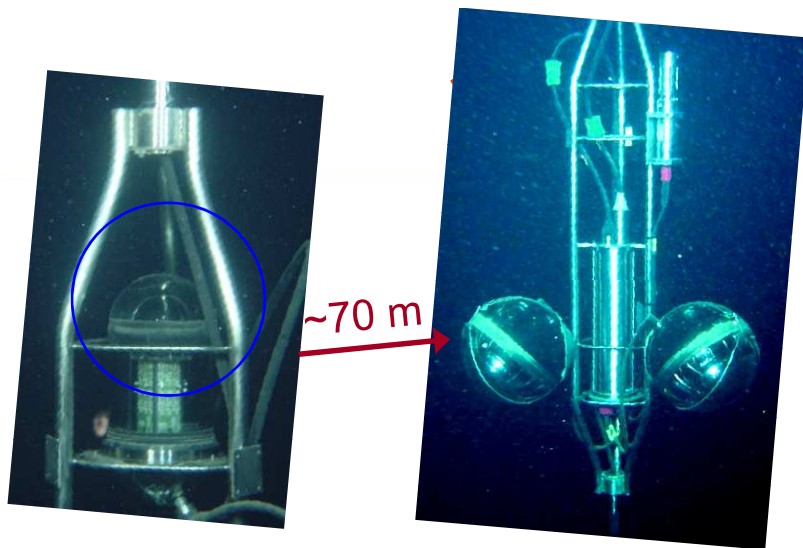
~70 m

Pied de ligne

Câbles interlink

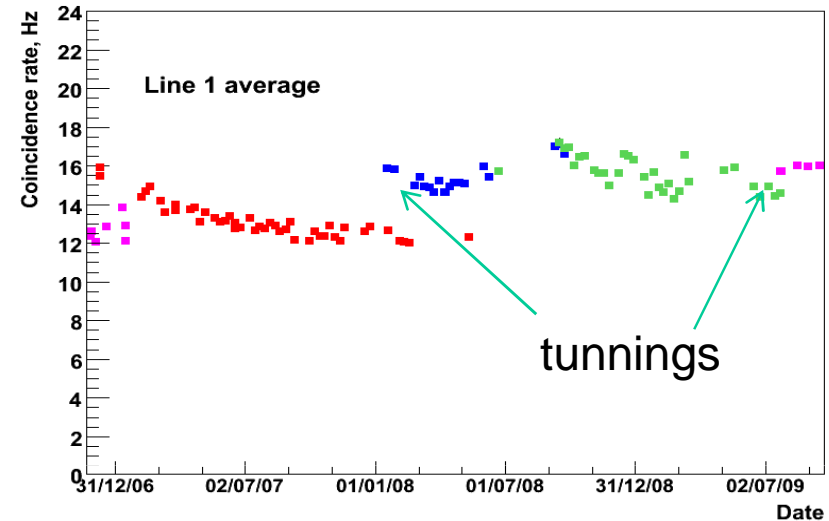
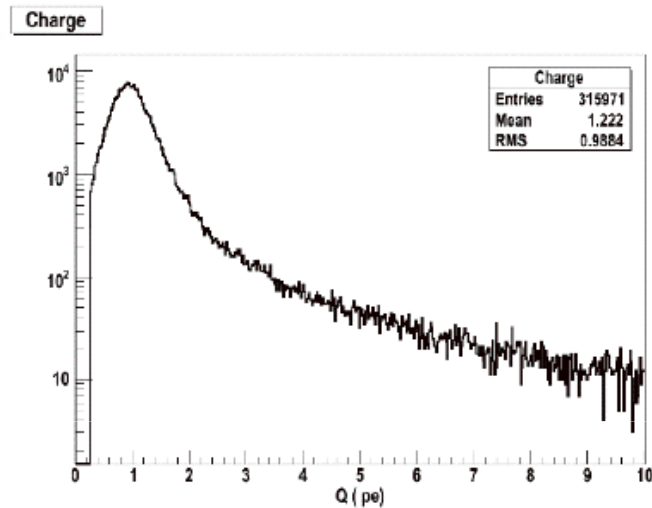


Etalonnage temporel : LED



Activité optique et étalonnage

Essentiellement au « photo-électron »



Surveillance en continue du gain des photomultiplicateurs

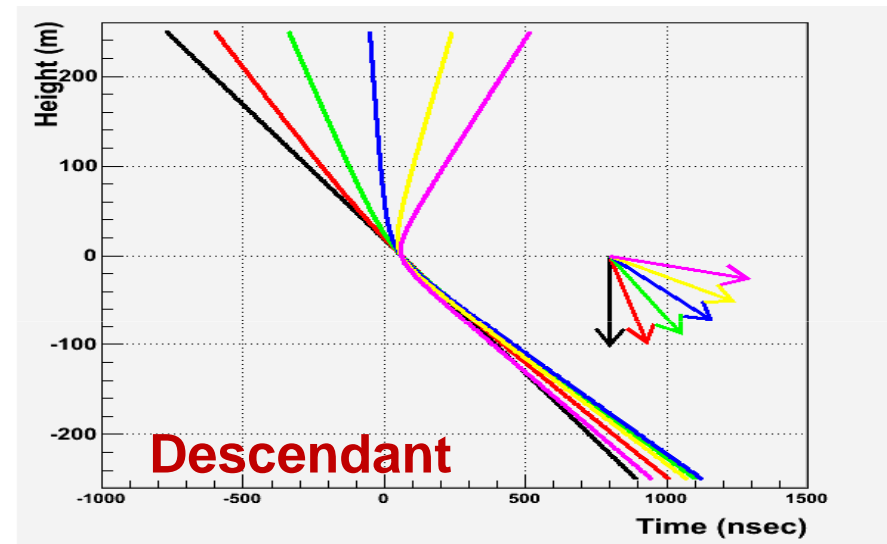
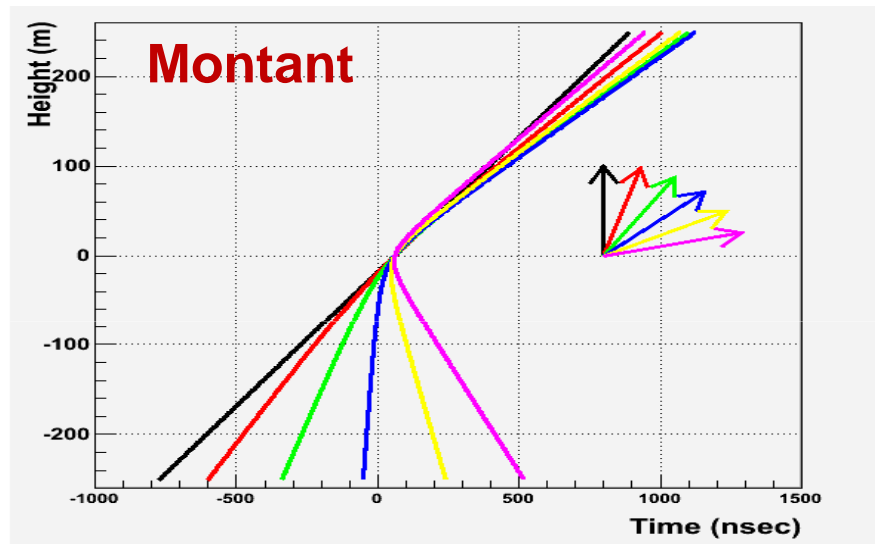
- ☞ Ajustement régulier pour maintenir une efficacité de détection optimale
- ☞ Réajustement des seuils de lecture des signaux
- ☞ Paramètres importants pour les études systématiques et l'estimation de l'énergie

Reconstruction de la trajectoire des muons

Altitude (z) des photons en fonction du temps d'arrivée (t)

⇒ Fonction de l'angle zénithal et de la distance minimale d'approche

Intersection du plan (z,t) et du cône Tcherenkov ⇒ Hyperbole



➤ « Aafit »:

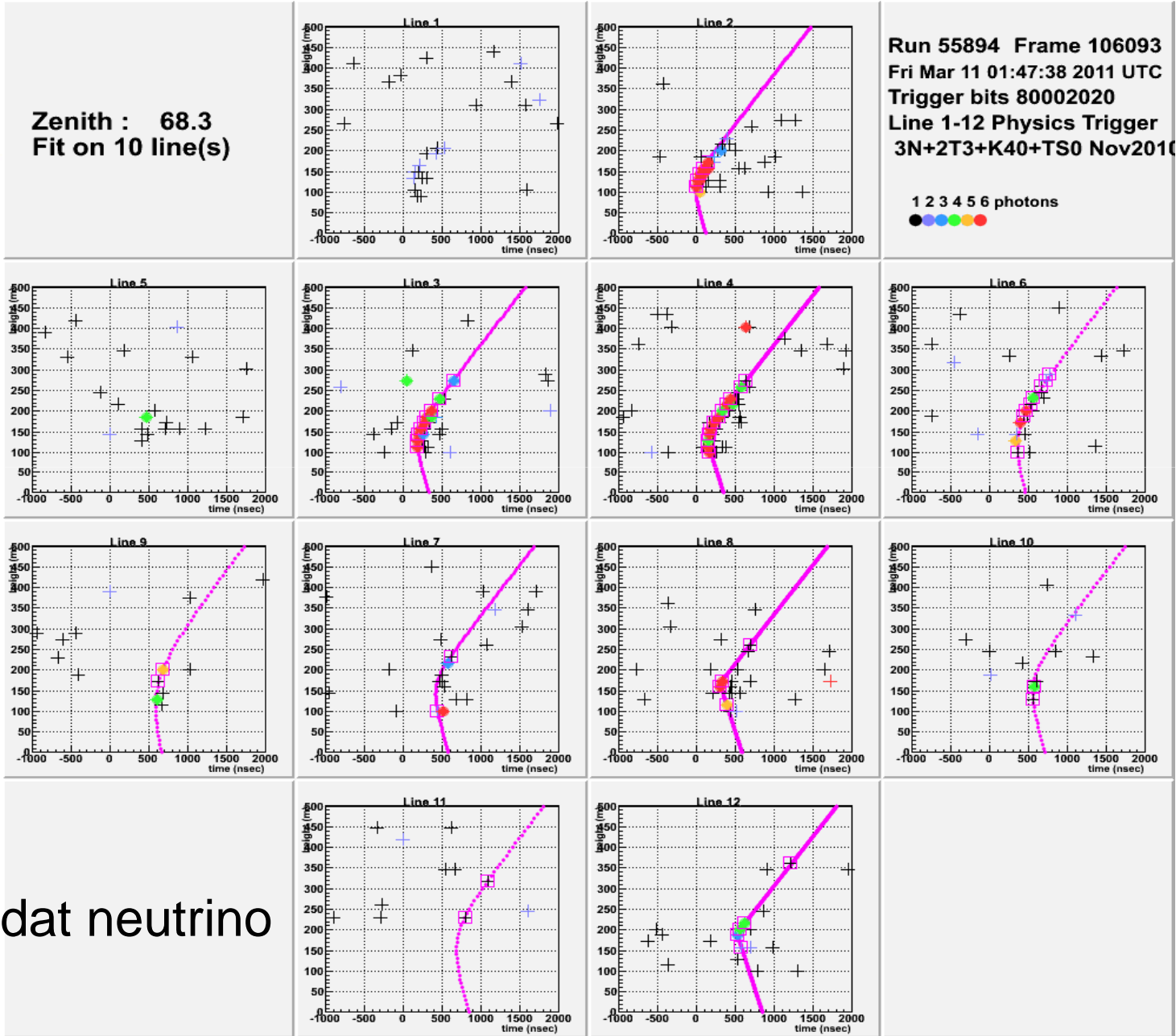
- Maximum de vraisemblance
- Fonction de densité de probabilité
- Algorithme sophistiqué
- Optimisé pour les muons montant (v)

➤ « BBFit »:  Astropart. Phys. 34 (2011) 652-662

- Minimisation d'un χ^2
- Photons directs
- Utilisée en ligne
- Adaptée aux muons descendant

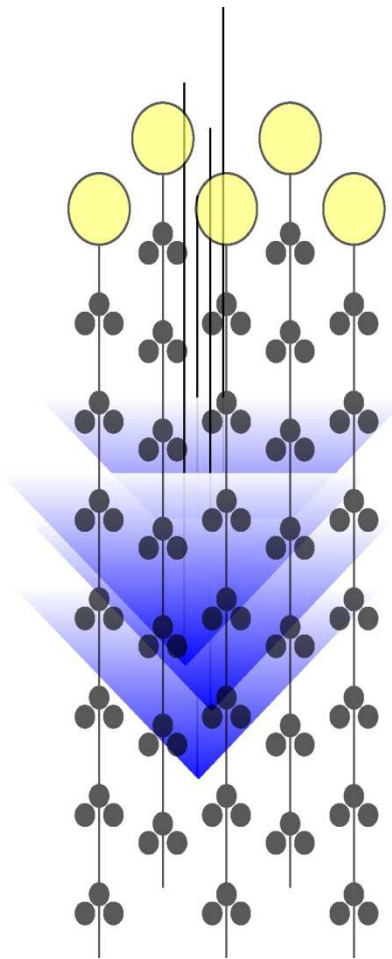
Hypothèse : *Un seul muon dans le détecteur*

Un muon = $\sum (t_i, q_i, \text{position}_i)$

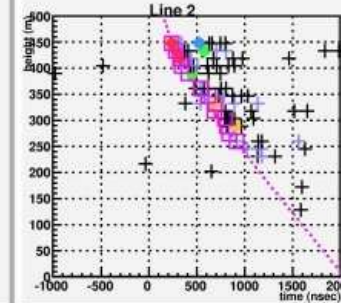
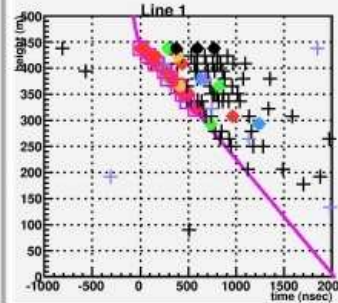


Candidat neutrino

Une gerbe de muon?

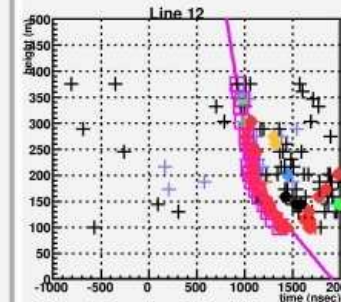
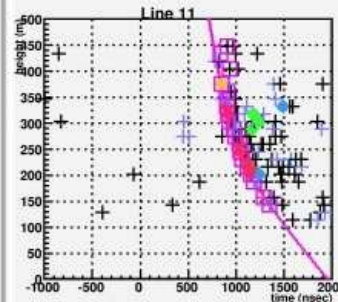
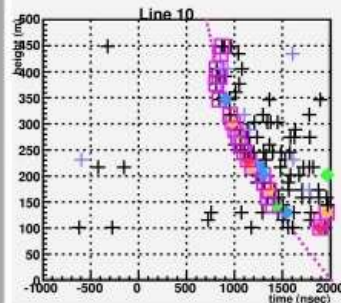
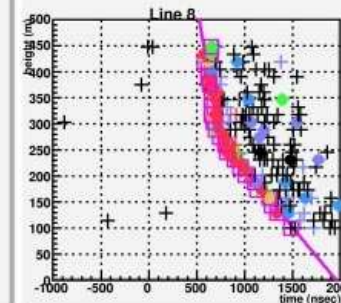
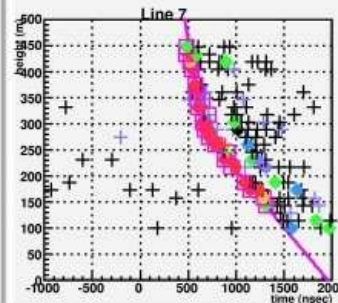
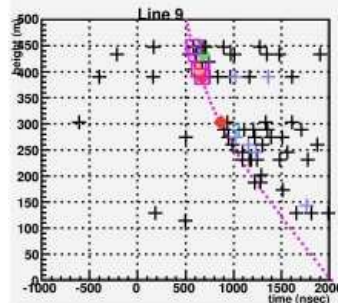
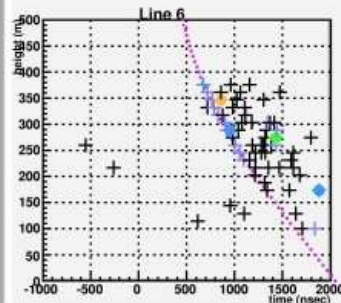
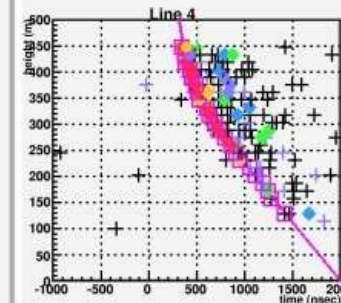
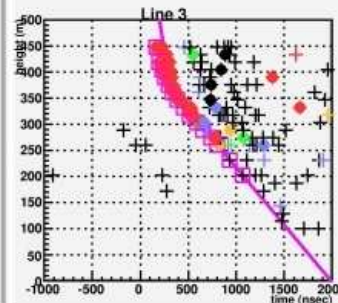
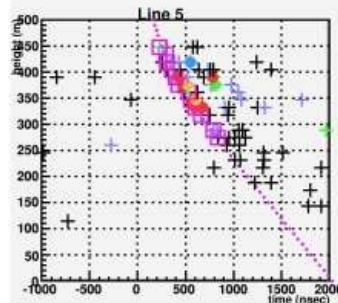


Zenith : 144.3
Fit on 11 line(s)



Run 34497 Frame 40952
Mon Jun 2 03:30:15 2008
Trigger bits 80002020
Line 1 - 12 Physics Trigger (t

1 2 3 4 5 6 photons
● ● ● ● ● ●



Des efforts en cours pour
estimer la multiplicité

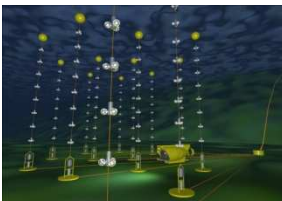
Plan de l'exposé



Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

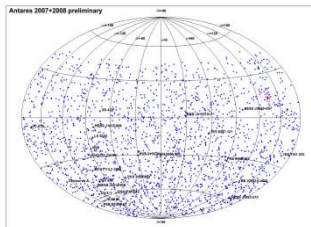


Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques résultats

Flux diffus

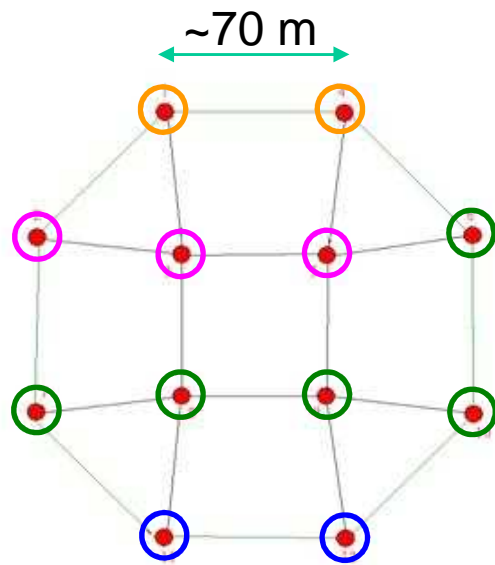
Recherche de sources ponctuelles

Analyses multi-messagers

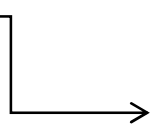


Le projet KM3NeT

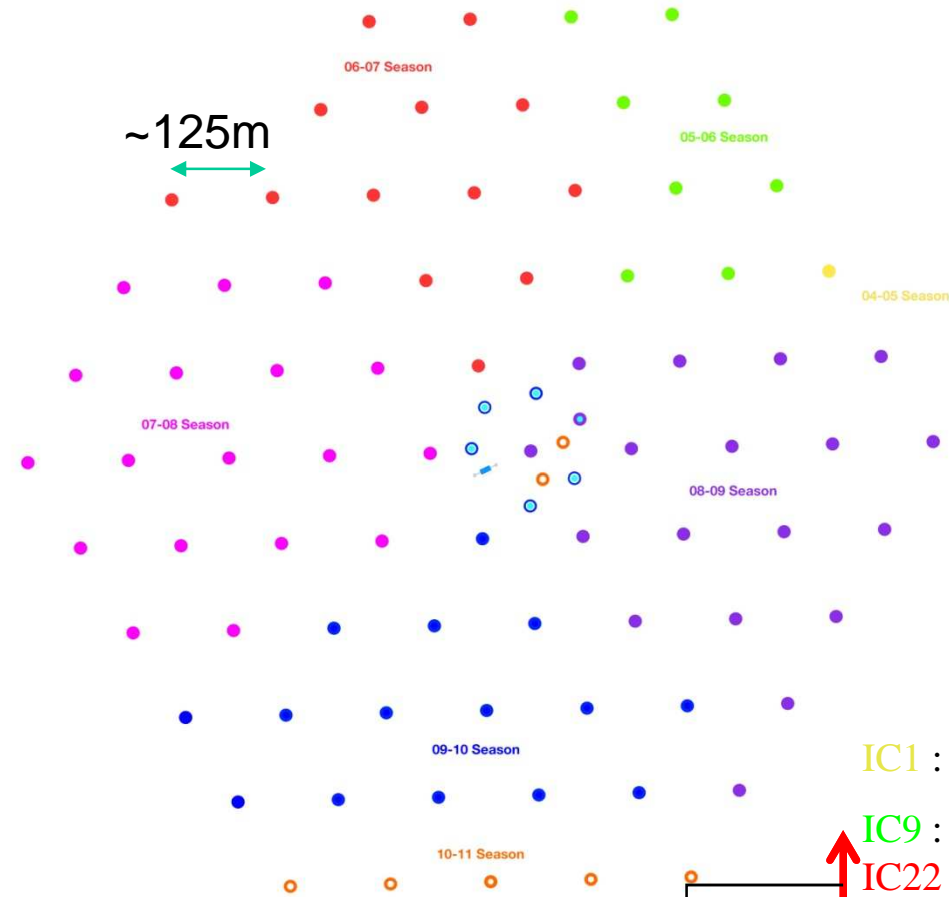
Etapes de construction



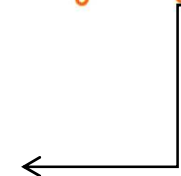
2L :2006
5L :01/2007
10L :12/2007
12L :05/2008



Exploitation scientifique
(à ce jour)

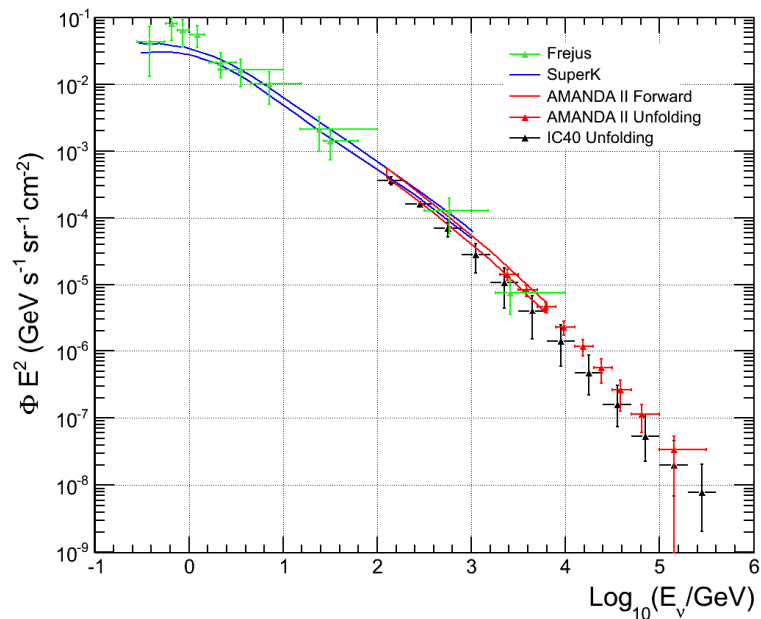
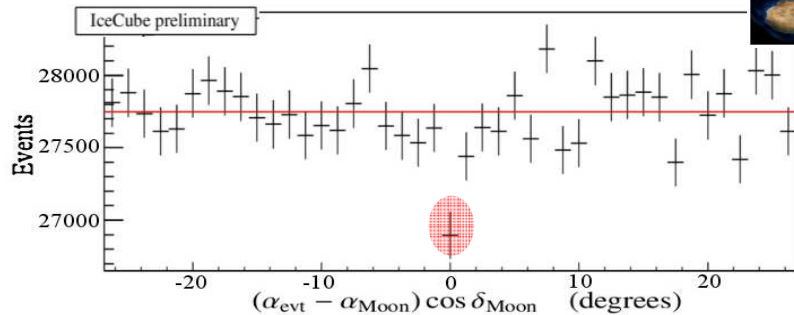
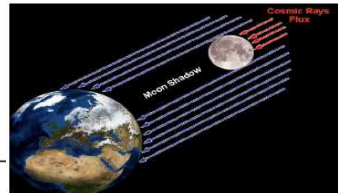


IC1 : 2004-5
IC9 : 2005-6
IC22 :2006-7
IC40:2007-8
IC59:2008-9
IC79:2009-10
IC86:2010-11

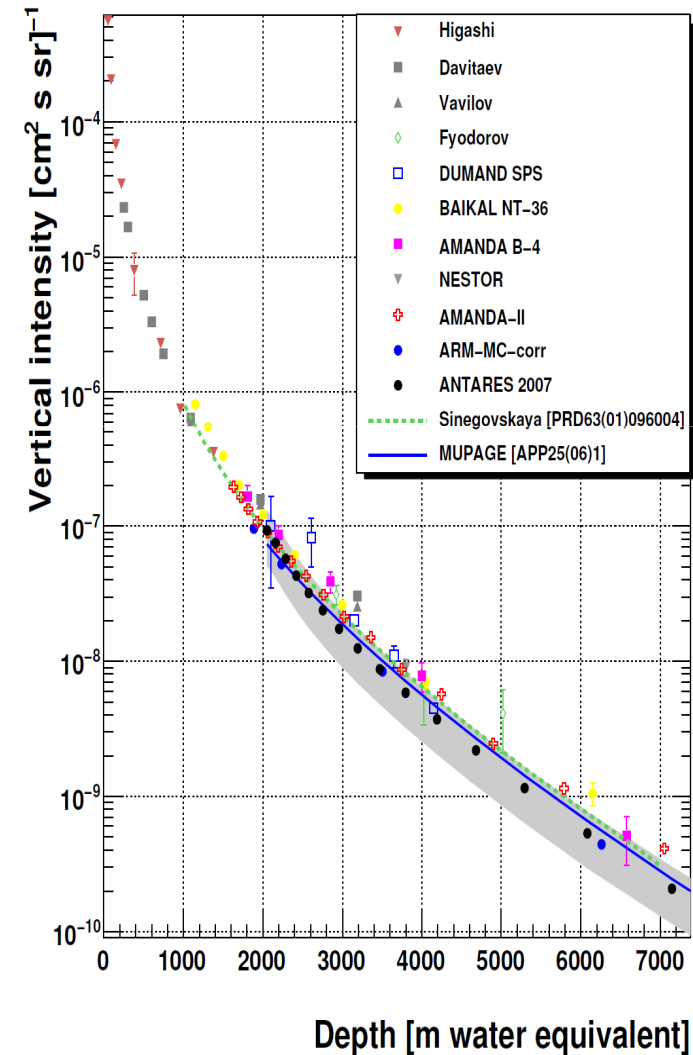


Flux atmosphériques et étalonnage

IceCube voit l'ombre de la lune :
déficit à $\sim 6\sigma$ => pointage correct

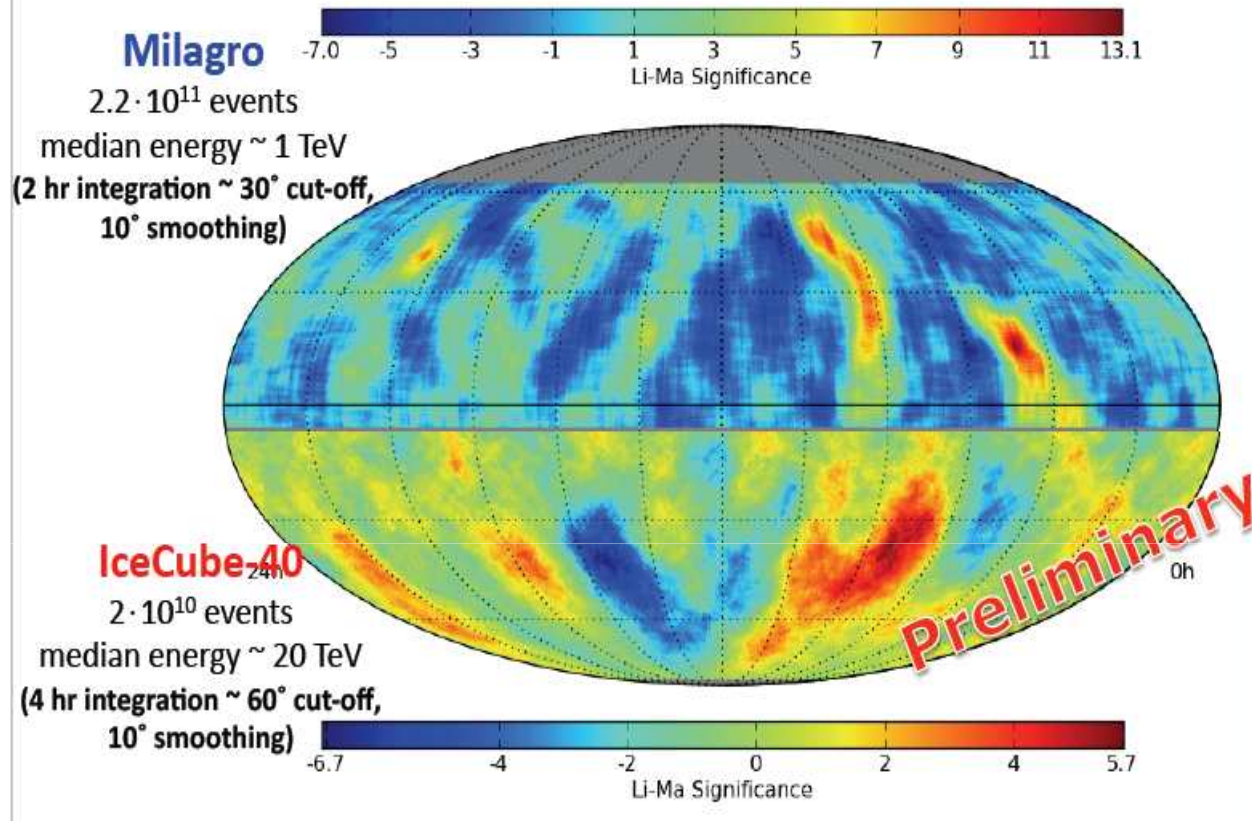


Flux de muons atmosphériques
Phys. 34, 179 (2010)

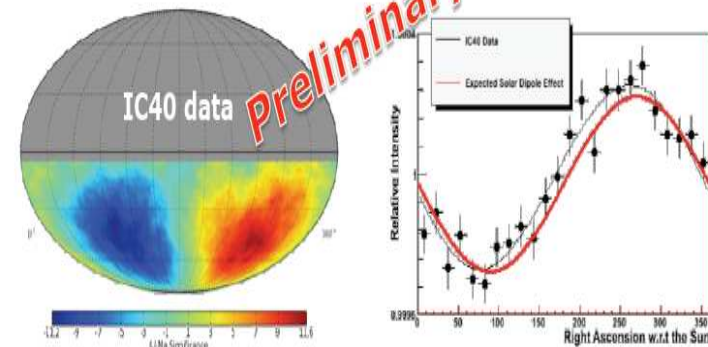


Etudes des rayons cosmiques

📖 arXiv1011.5428v1



Dipôle induit par mouvement
 autour du soleil
 Compton & Getting effect
 📖 Phys Rev 47 (1935) 817



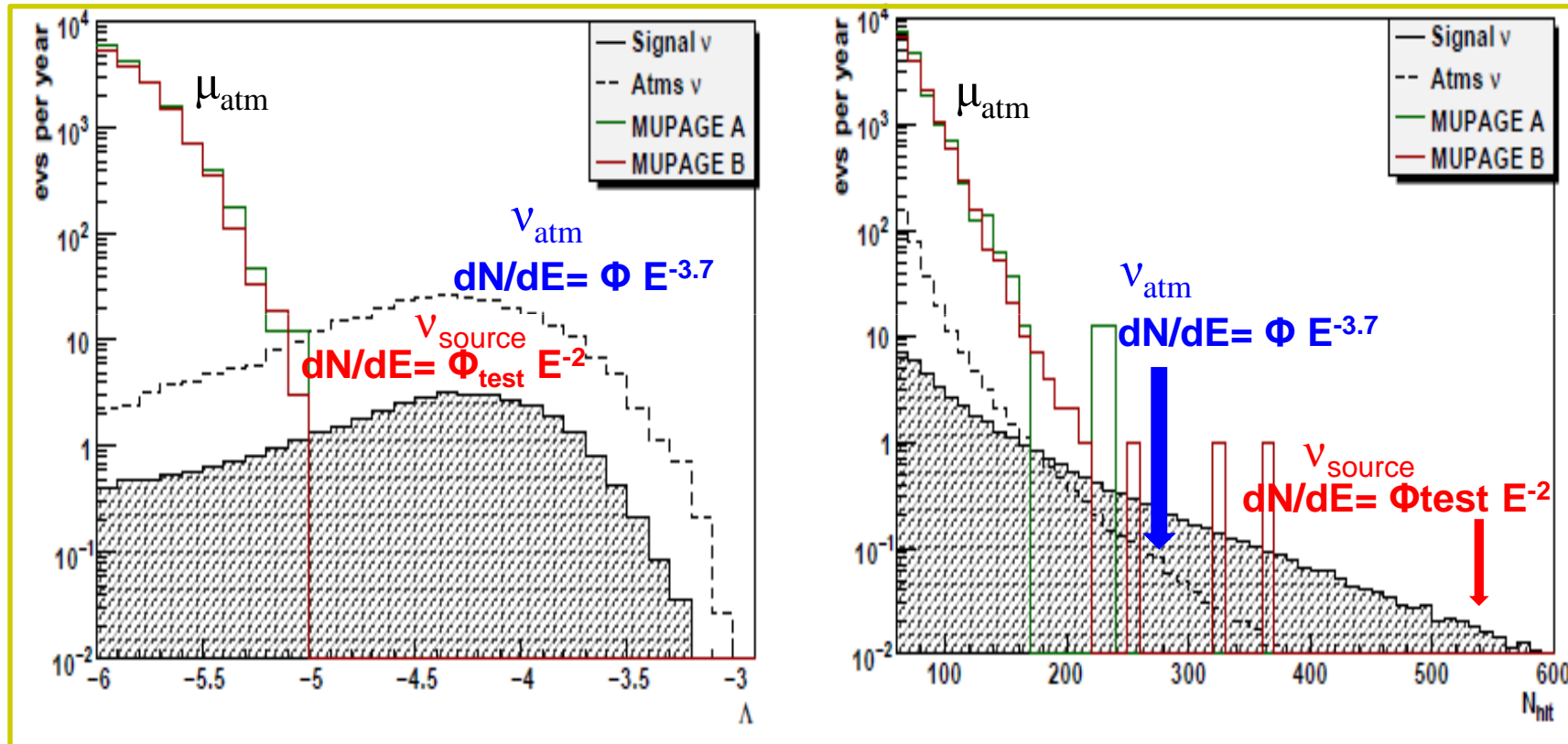
Anisotropie non expliquée...

Etudes en cours sur ANTARES

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

1. Principes de sélection des données

pré-sélection : muons montants

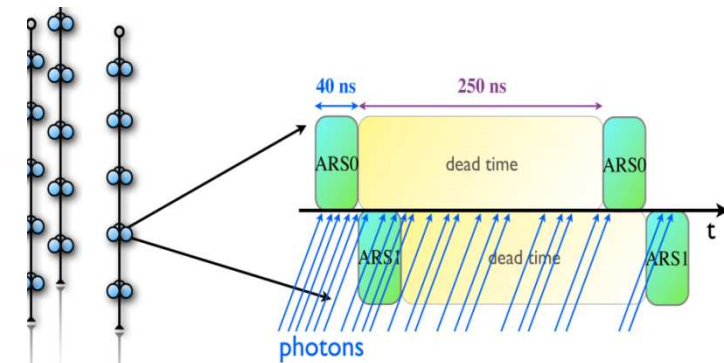


➡ Secondes coupures éliminent les μ_{atm} : Λ ($\sim \log$ Likelihood) et N_{hit}

➡ Estimateur d'énergie

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

2. Coupure supplémentaire sur l'estimateur d'énergie

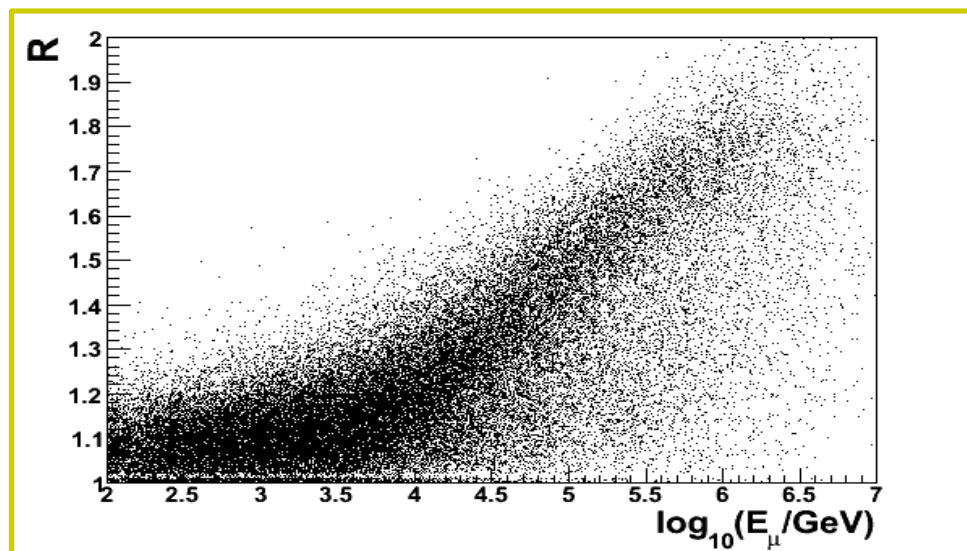
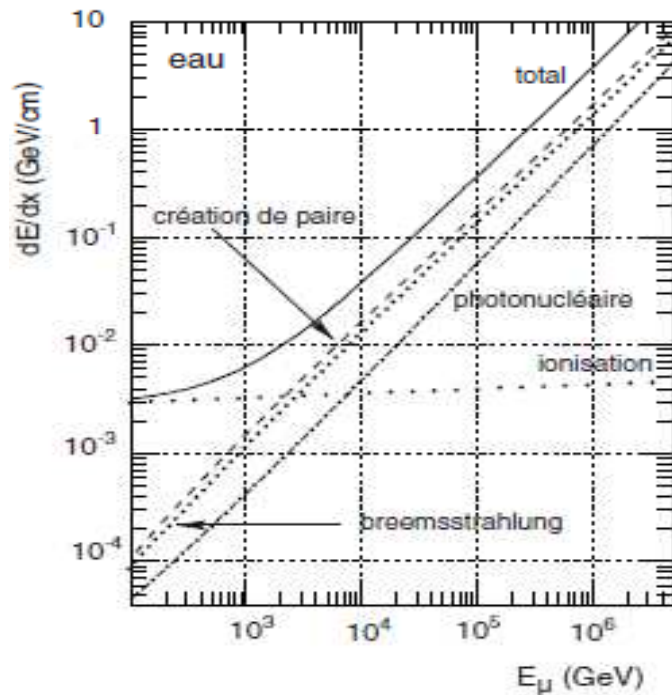


Estimateur d'énergie

$$R = \sum_i \frac{N_i}{N_{PM}}$$

Nb moyen d'impulsions dans le même PM

dE/dx des muons dans l'eau

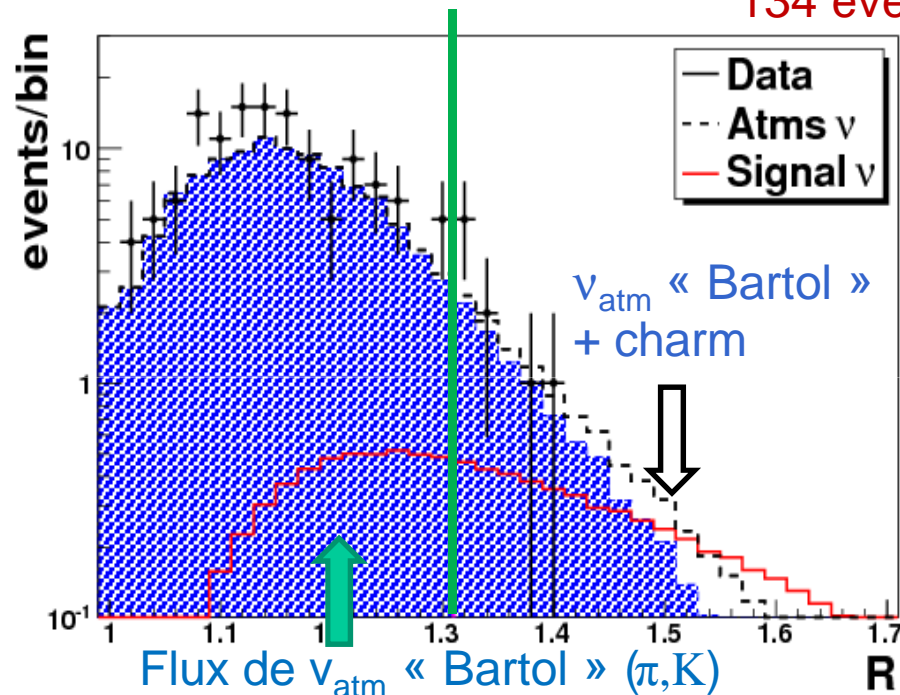


Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

3. Résultats

Données: 2008-2009(9,10&12L) : 334 jours effectifs

134 événements passent les 2^{ndes} coupures



$R > 1.31$

$N_{\text{obs}} : 9$

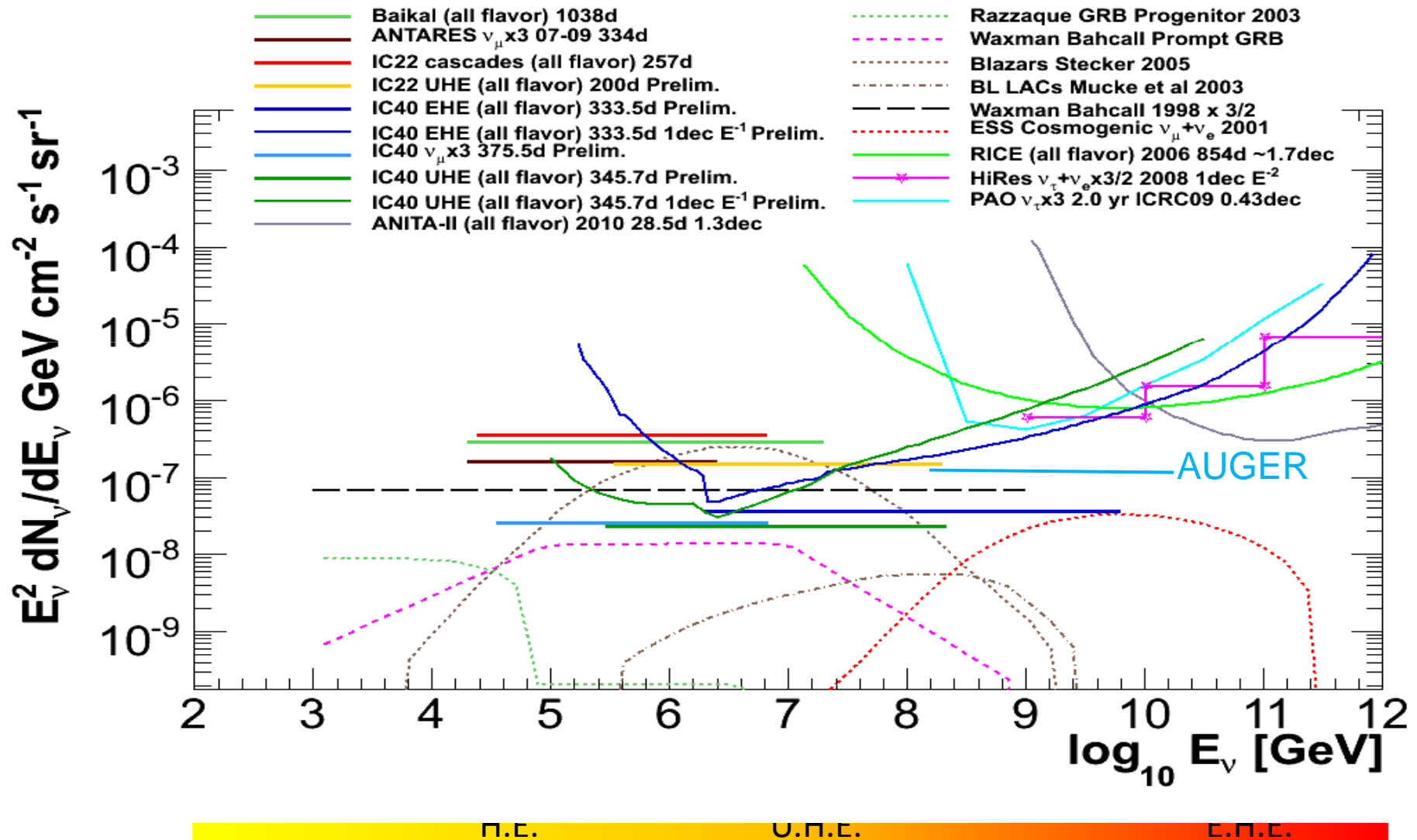
$n_b : 10.1-12.5 (11.3)$

La limite supérieure (FC, 90% CL) du flux de ν_{astro}

→ $E^2\Phi_{90\%} = 4.0 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

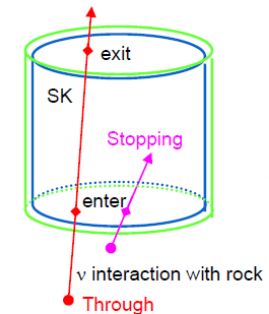
HE/UHE/EHE flux limits

All-flavor 90% CL limits and model fluxes



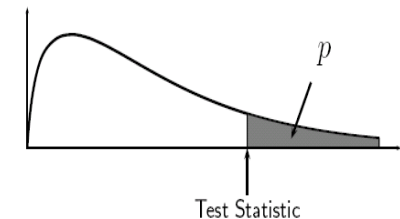
Recherche de sources ponctuelles

- SuperKamiokande (bas seuil en énergie $E > 1.6$ GeV)
 - 3134 “upward through going events” en 2623 jours
- ANTARES: données à 5-10-12 lignes (TeV)
 - 2007-2008 : 2040 événements montants (295 jours)
- ICECUBE (IC40) 375.5 jours



« Analyse en aveugle » : Optimisation avec evts dont l’ascension droite est rendue aléatoire

- Algorithme de recherche d’agrégats
- Mise en place d’un test statistique (e.g. Likelihood ratio)
- Calcul de la p -value (probabilité d’observer une telle valeur par fluctuation du bruit de fond)
- Calcul de la significativité finale (post trial) d’avoir p -value après plusieurs essais



Ces analyses peuvent se faire :

- Sur tout le ciel
- Pour une liste prédéfinie de sources d’intérêt
- Pour une collection de sources du même type (stacking analysis)

Methods

- Neunhoffer and Kopke NIM A 558 (2006) 561
- Hill and Rawlins, Astrop. Phys., 19, 393, (2003)

Recherche de sources ponctuelles

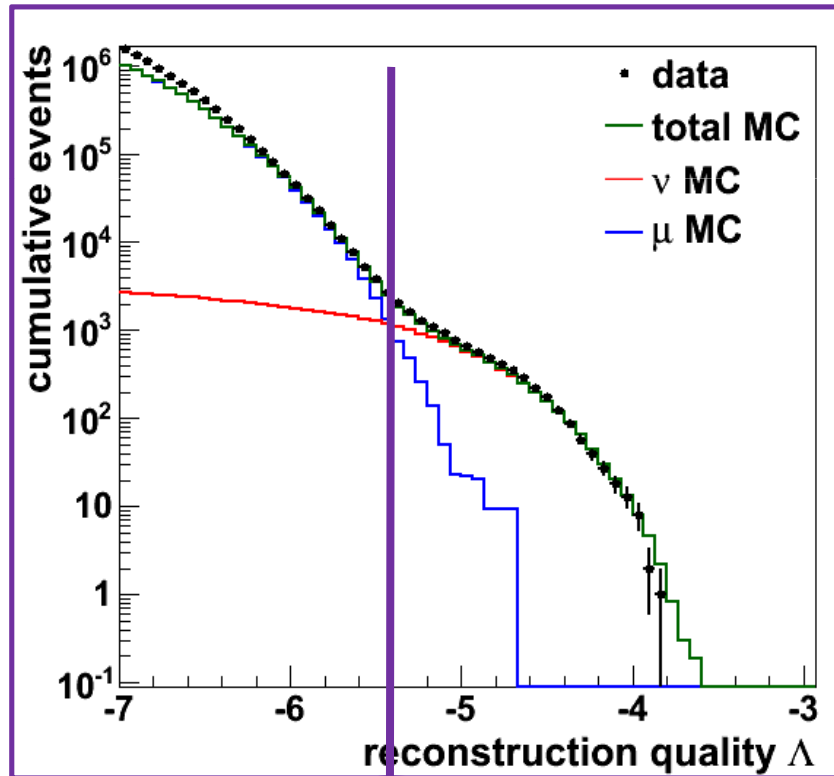
ANTARES

Données : 2007(5L)-2008(10&12L) : 295 jours effectifs

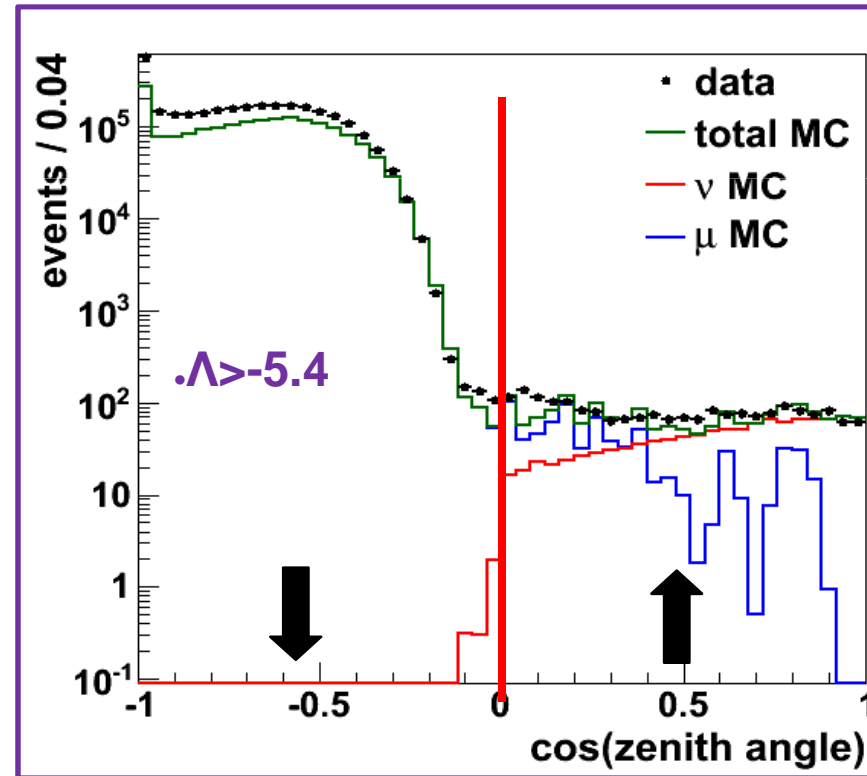
2040 muons montants (ν : 64% , μ : 36%)

Résolution angulaire : 0.5° pour un spectre en E^{-2}

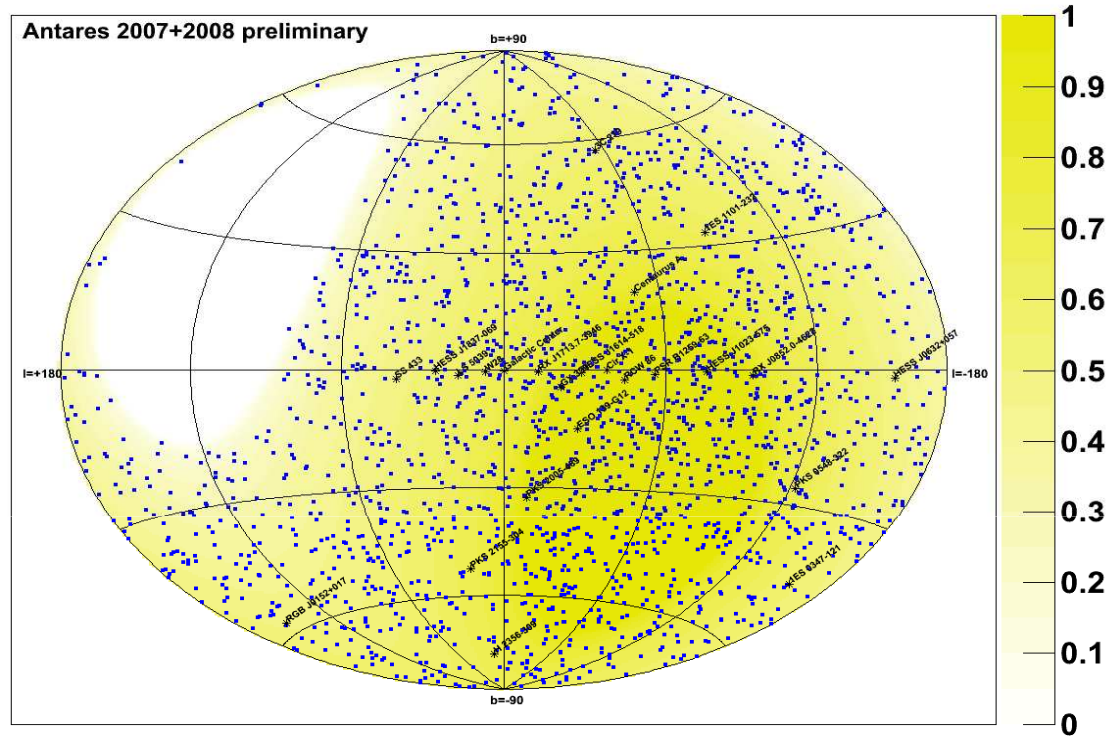
Préliminaire



5.4



Carte du ciel ANTARES



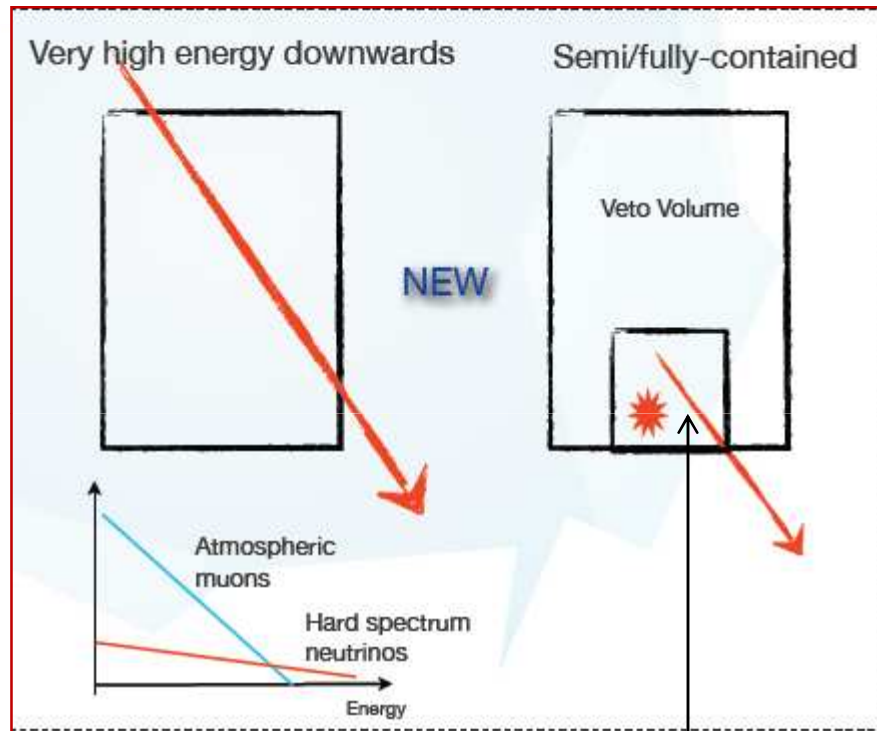
Préliminaire

Robustesse de (δ_i, α_i) si on déplace chaque ligne de 20 cm au hasard :

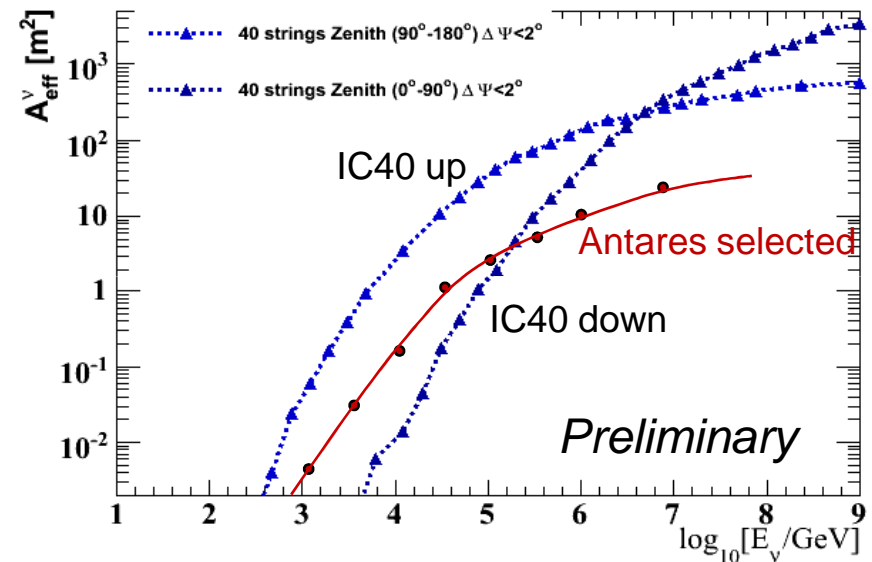
	dans 1 degré	commun aux 2 échantillons
muons reconstruit à tort comme montant	60%	70%
neutrinos avec flux en E^{-2}	92%	97%

IceCube regarde tout le ciel

La taille d'IceCube permet désormais une recherche sur tout le ciel à très haute énergie



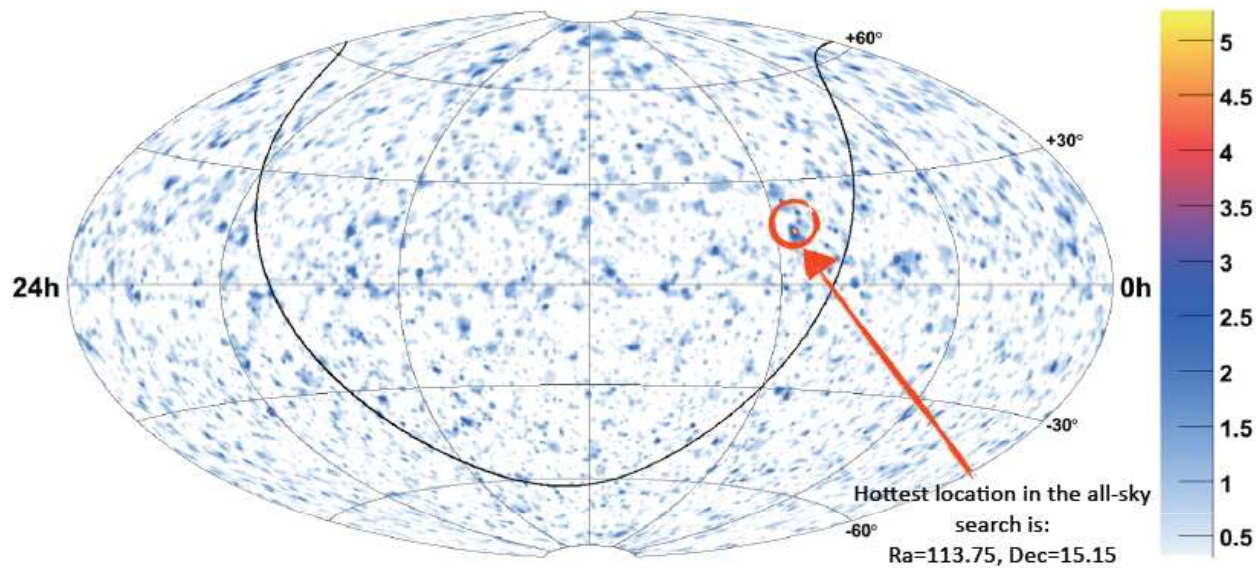
Including DeepCore



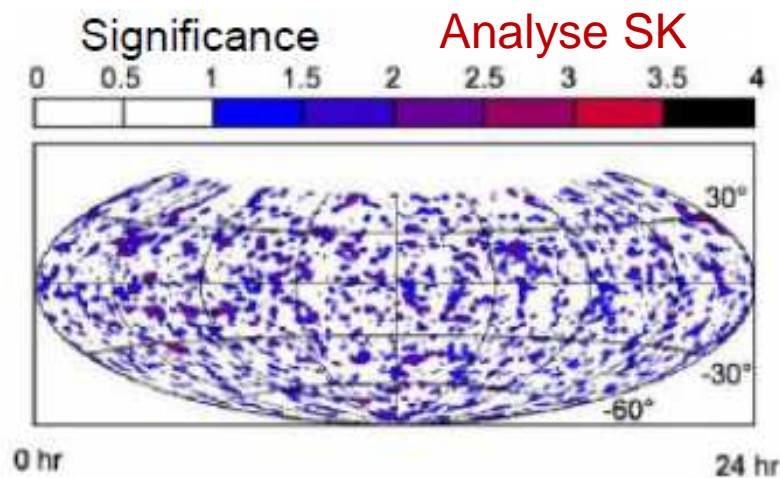
Mais la sensibilité est réduite par:

- Les coupures à haute énergie pour réduire le bruit de fond atmosphérique
- L'application d'un veto contre le bruit de fond (interactions contenues)
- Rend difficile l'étude des sources galactiques au TeV

IceCube & SK : cartes du ciel



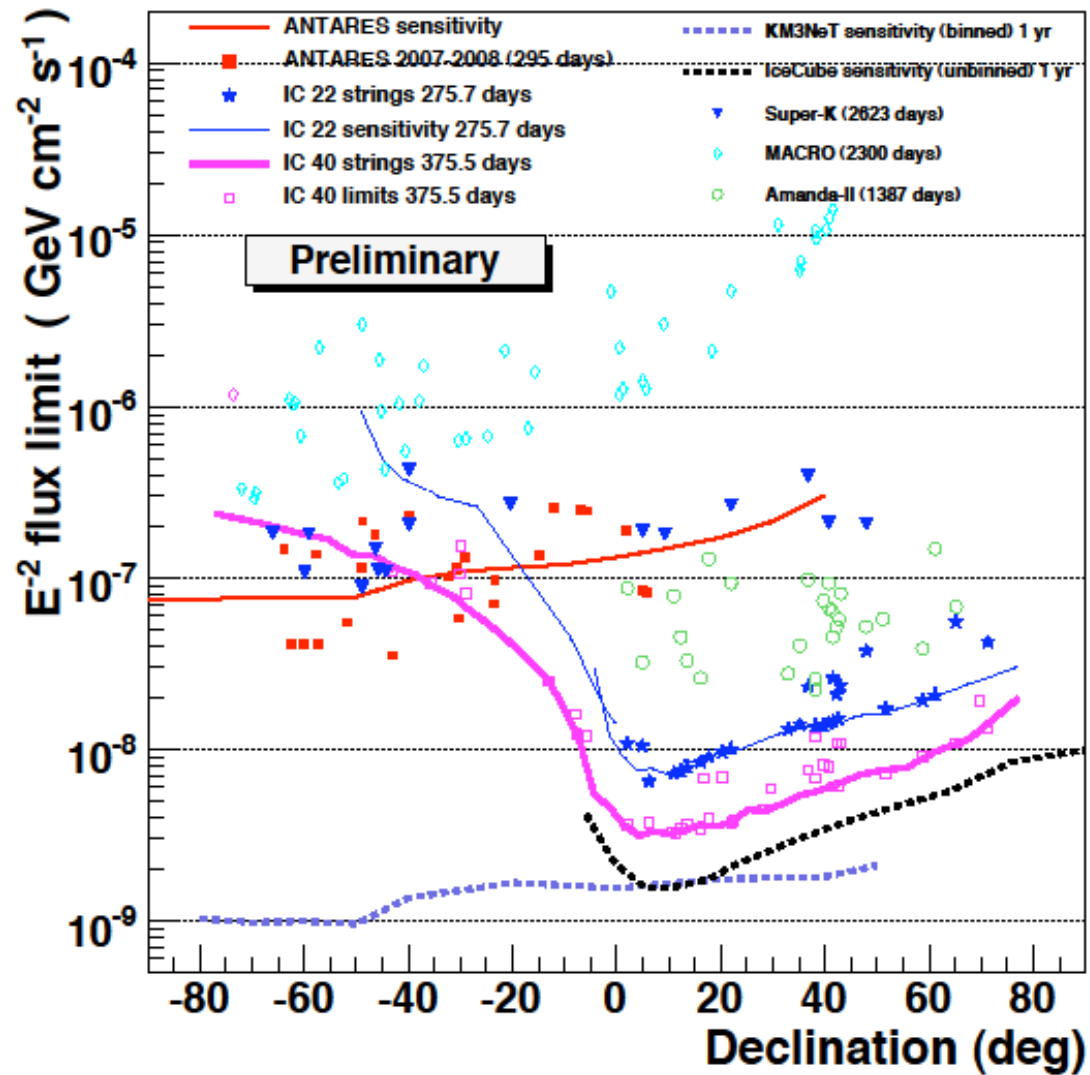
All sky post-trial:
plus basse p-value = 18%
Sources choisies:
Plus basse *p-value = 10%*
Pas d'excès ☞ limites



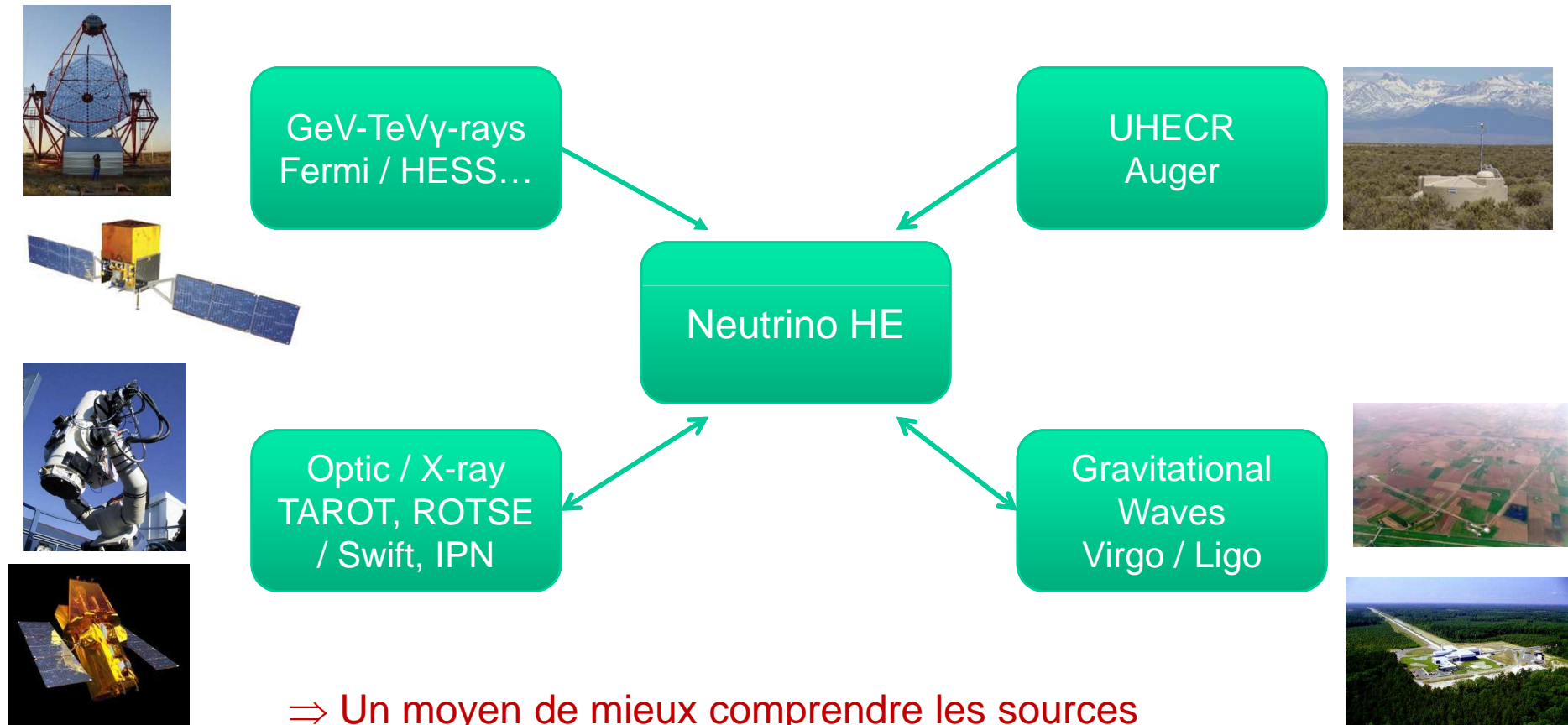
SuperKiomande post-trial
 $p\text{-value} = 0.025 (\sim 2\sigma)$
RX J1713.7-1946
Pas d'excès significatif

ANTARES exclut l'interprétation
d'un excès significatif dans le données SK

Limites supérieures

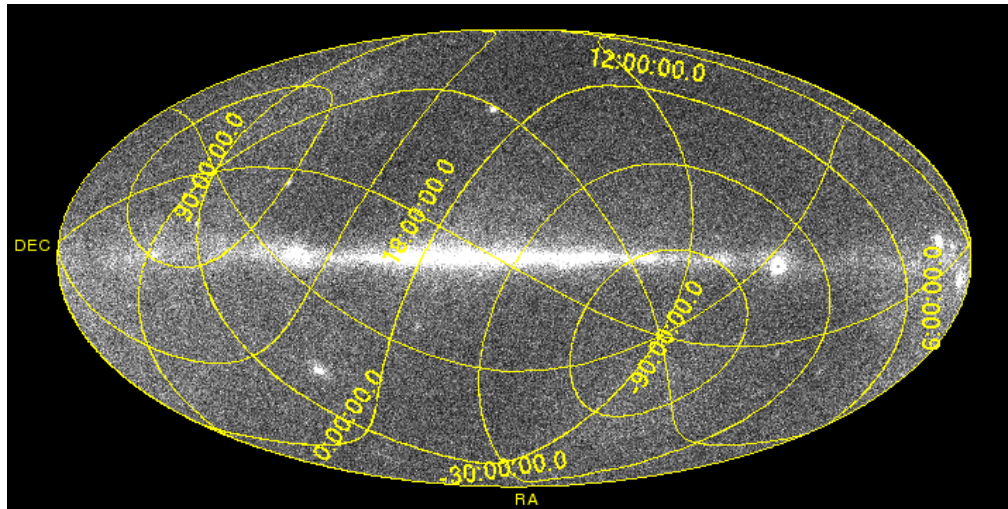


Programme multi-messagers



- ⇒ Un moyen de mieux comprendre les sources
- ⇒ Un moyen d'augmenter la sensibilité des détecteurs

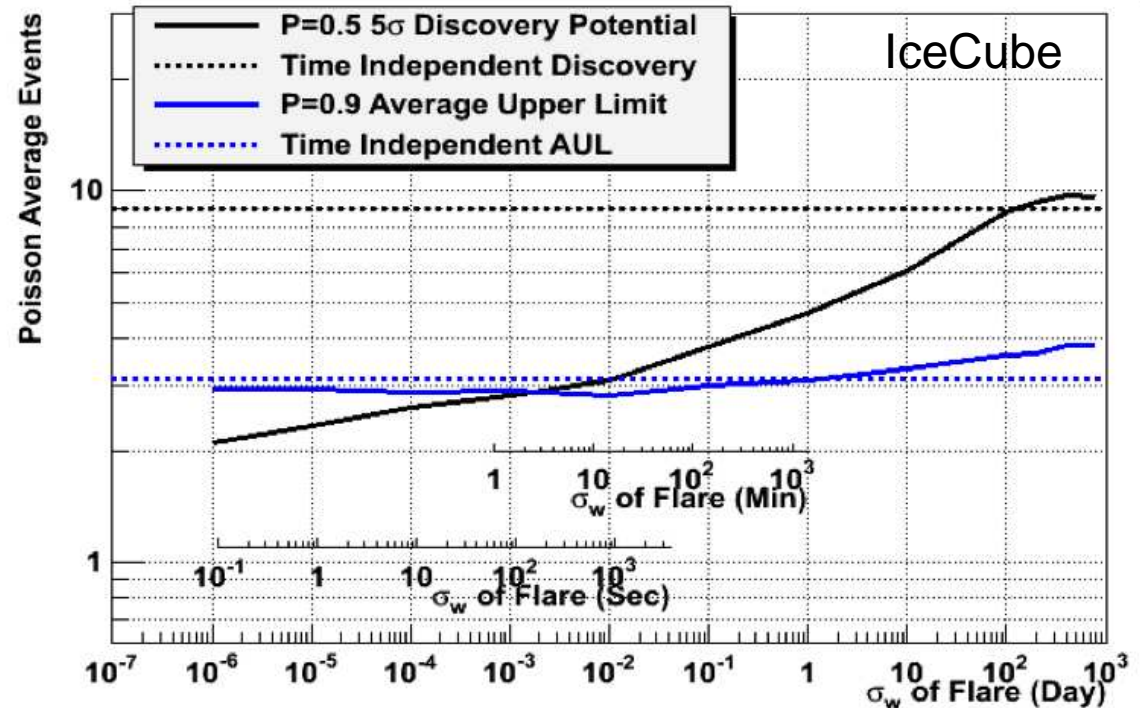
Etude des flares d'AGNs



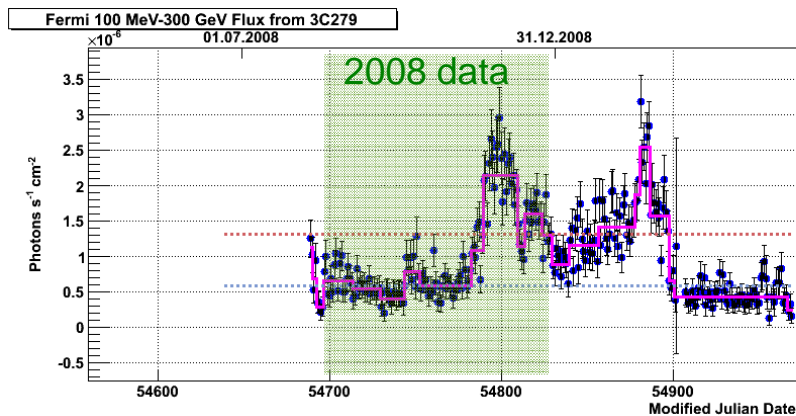
De nombreuses sources de
FERMI,
détectées à haute énergie,
sont variables...

→ Utilisation de la
corrélation temps
espace pour réduire le
bruit de fond
et augmenter le potentiel
de découverte.

Gaussian Flares at Declination +16°



Etude des flares d'AGNs



Données Fermi LAT

Identification des périodes actives des AGNs (blazars...)

Durée typique : 1-20 jours

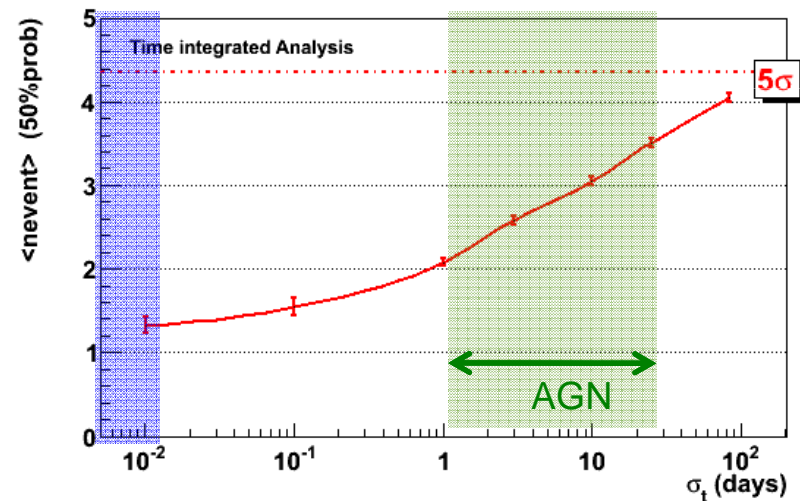
ANTARES:

- Time dependant likelihood method
- Analyse des données 2008 (4 mois)
- Performance: Nombre d'événements nécessaires pour une découverte à 5σ (50 % prob.)

→ Amélioration d'un factor 2-3 par rapport à l'analyse standard

Analyse de 10 sources Fermi :

=> 1 neutrino corrélé à 3C279 (post-trial p-value $\approx 10\%$)

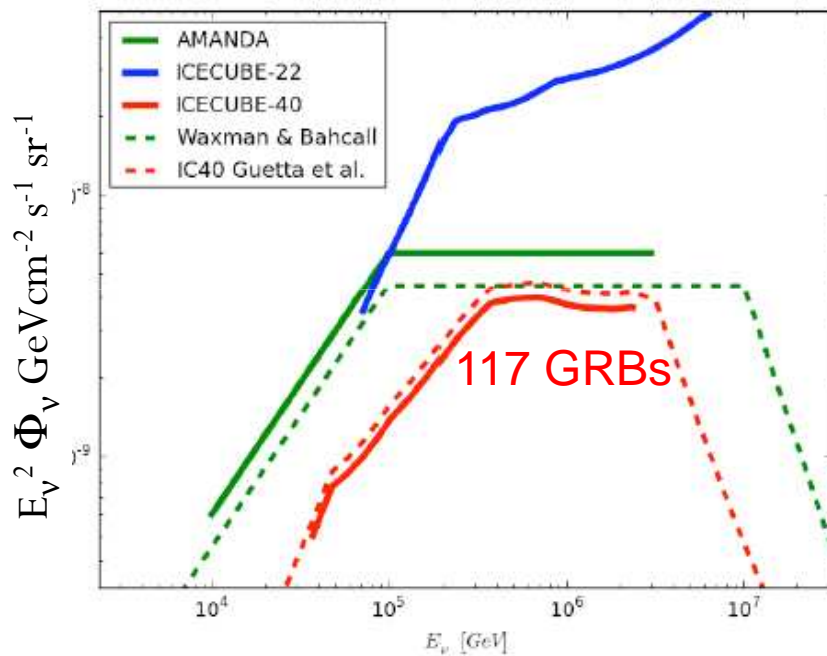


Preliminary

Alerte aux sursauts gamma



- Recherche de neutrinos en coïncidence avec les GRB (117)
 - Temps et direction connus → réduction du bruit de fond → meilleure sensibilité
 - modélisation individuelles des sursauts (fireball model)

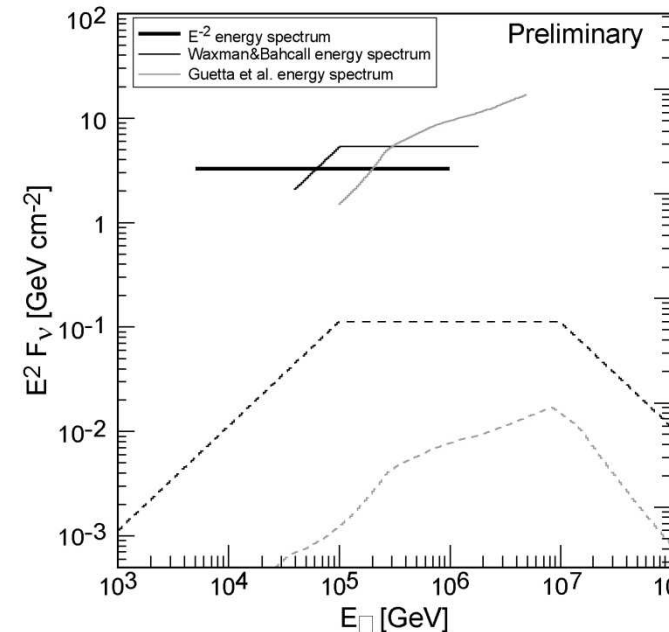


Meilleure limite avec IC40

Exclut les prédictions les plus optimistes

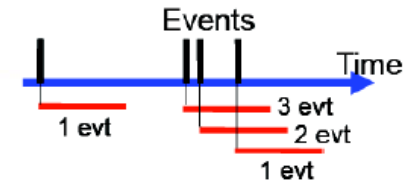
Phys.Rev.Lett.106:141101,2011

- ANTARES 2007 (5L) 34 GRB



Alertes neutrino : suivi électromagnétique

- Inversement, IceCube et ANTARES envoient des alertes pour suivi optique
 - Pourrait confirmer une détection
 - Triggers : VHE events ou multiplets (rolling searches)



IceCube

Latency has been reduced to ~ minutes
 Alarm rate ~ 30 /year
 Alerts are sent to ROTSE
 $T_0, T_0 + 1, 2, \dots, 14$ days

Antares

Latency ~ sec
 Alarm rate 1-2 / month
 Alerts are sent to :

- TAROT (La Silla, Chile) since Feb 2009
 $T_0, T_0 + 1, 3, 9$ and 27 days
- ROTSE



“The sun never rises over the ROTSE empire”



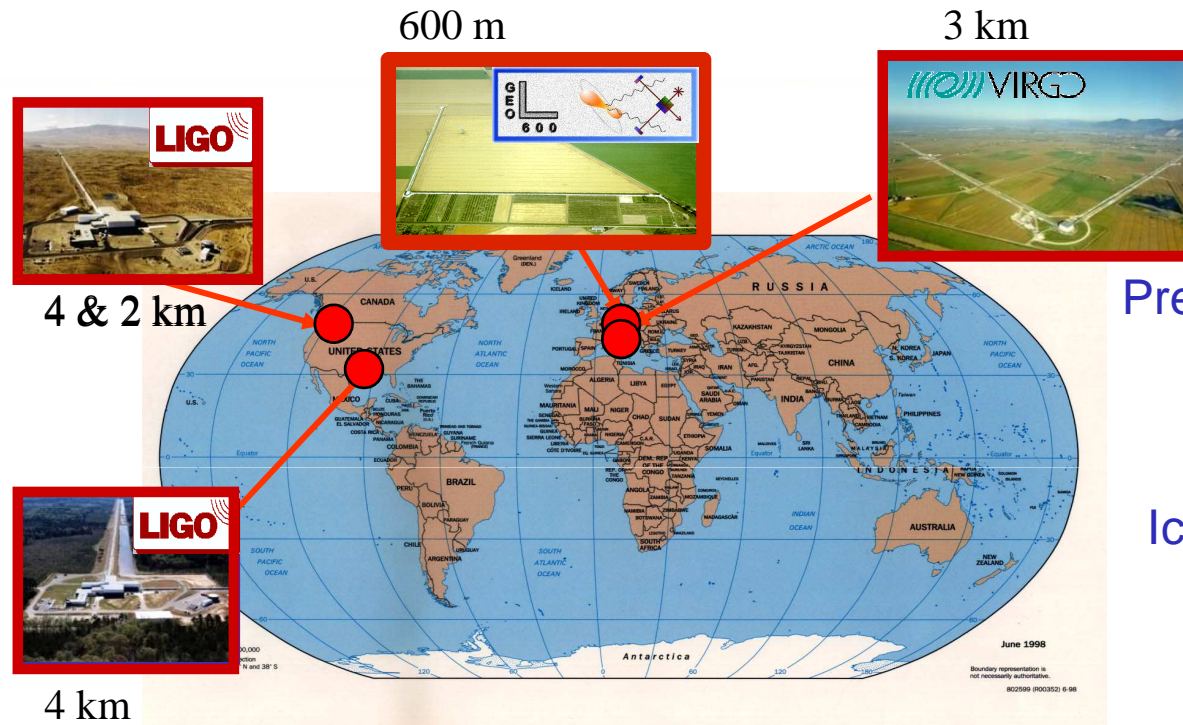
4 x 0.45 m
 FoV: $1.85^\circ \times 1.85^\circ$
 fully automated system



IceCube envoie également des alertes à
 MAGIC (La Palma, $E > 25 \text{ GeV}$)

GW-HEN coïncidences

Les interféromètres gravitationnels:

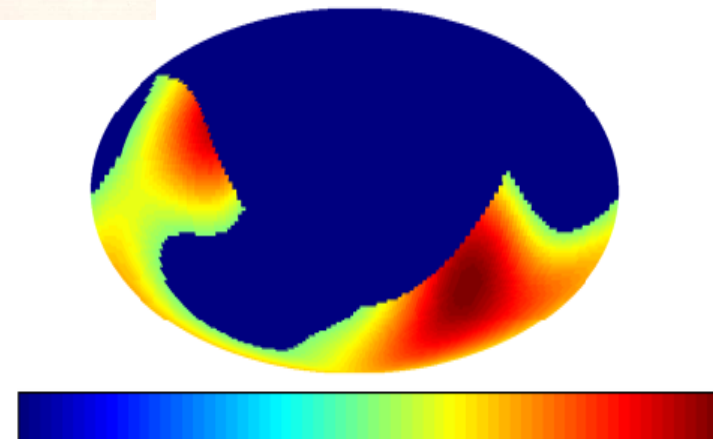


Première collaboration (MoU)
entre LSC et ANTARES
Sept 2009

IceCube a rejoint le groupe
plus récemment

Couverture céleste commune
VIRGO+LIGO+ANTARES
en coordonnées géocentriques ~ 30%

Workshop GWHEN, APC, mai 2009
<http://www.gwhen-2009.org>



common sky GW and ANTARES = 3.98 sr

Les données communes

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ANTARES	5L	10L	12L					
Ice Cube	9s	22s	40s	59s	79s	Ice Cube 86 strings		
LIGO	S5			S6				
VIRGO	VSR1		VSR2	VS R3				

Memorandum of Understanding (LIGO-M0900278-v1, VIRGO-XXXX)

between the

ANTARES Collaboration

and the

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) Scientific Collaboration

and

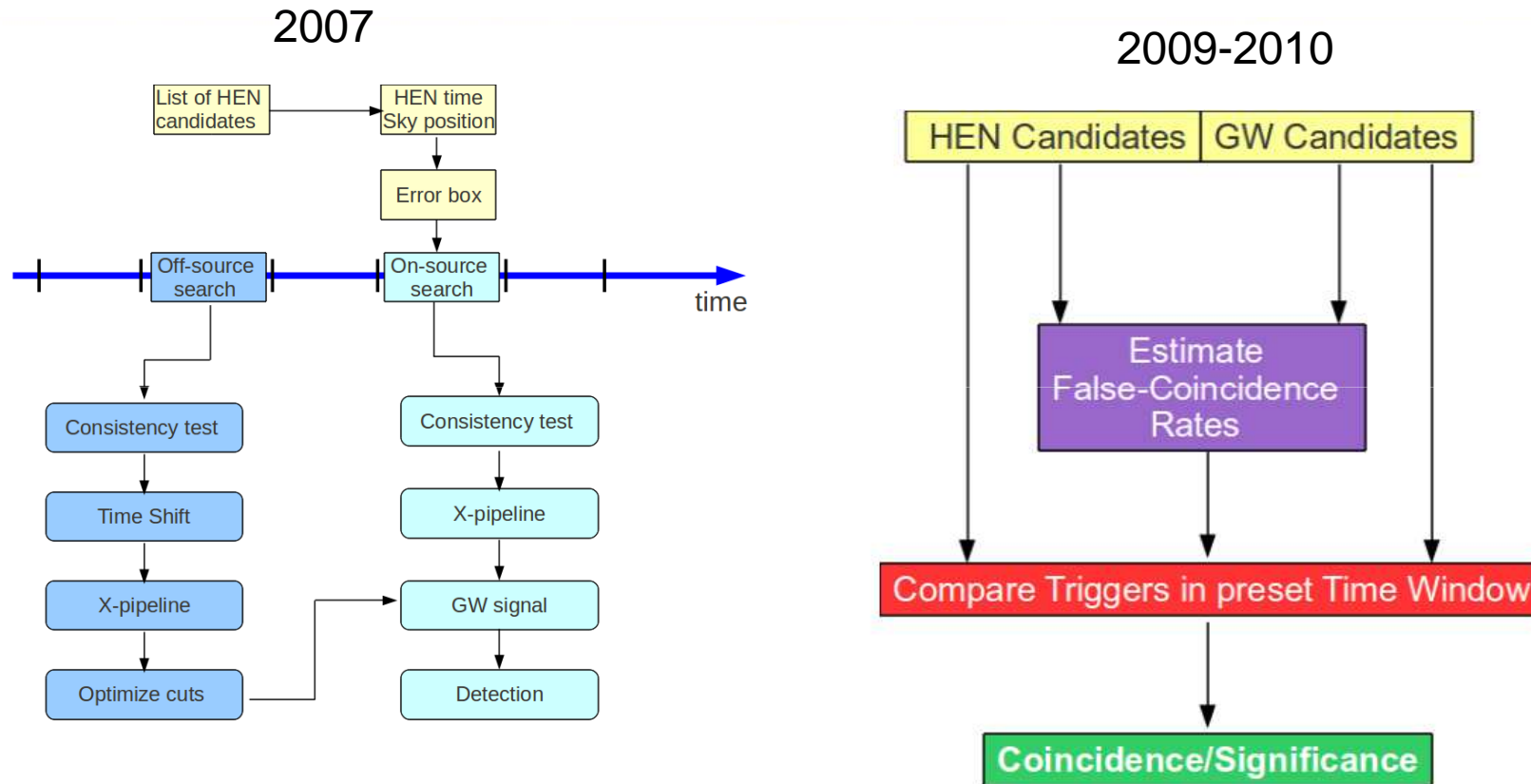
Approved by all participants
(7 signatures)

VIRGO

Inclut données jusqu'en 2010

Les analyses en cours

Plusieurs types d'analyse possibles:



Thèse de B. Bouhou (APC)

Fenêtre de coïncidence $\pm 500s$

 GWHEN group, Astropart. Phys. 35 (2011) 1-7

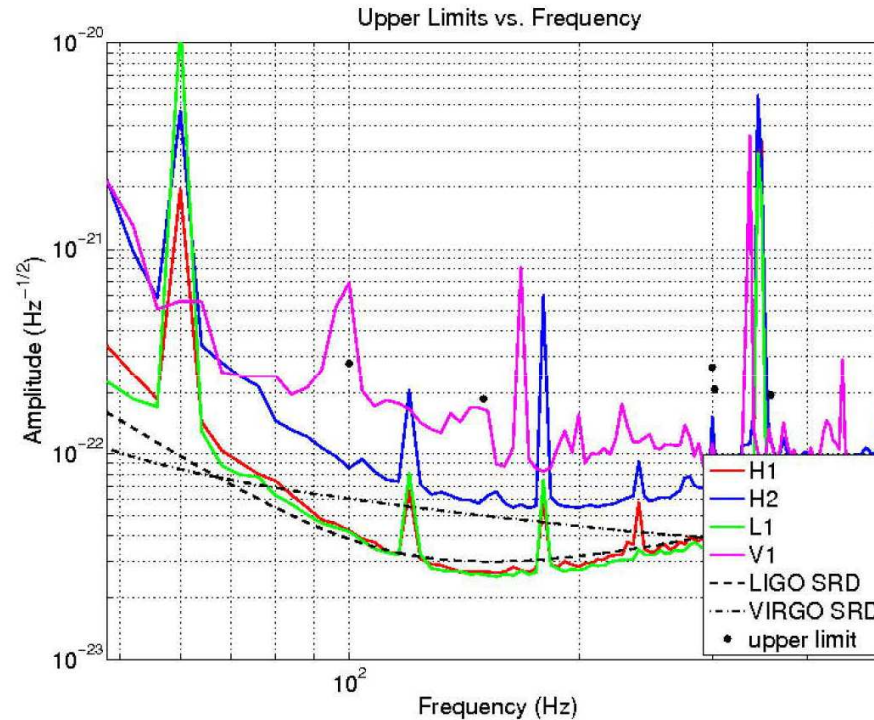
2007 data analysis

153 candidats neutrino sélectionnés

- Temps
- Direction
- Nhit (~energie)
- Paramétrisation PSF

Boîte ouverte il ya quelques jours
1 événement observé (3σ)

Limites supérieures en cours



Injections	SG 100Hz	SG 150 Hz	SG 300 Hz	BH-NS	NS-NS
h _{rss} 50%	2.79e-22 Hz-1/2	1.85e-22 Hz-1/2	2.66e-22 Hz-1/2	2.06e-22 Hz-1/2	1.94e-22 Hz-1/2

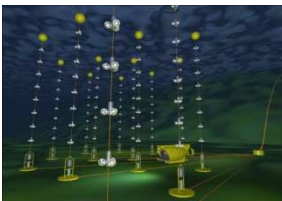
Plan de l'exposé



Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

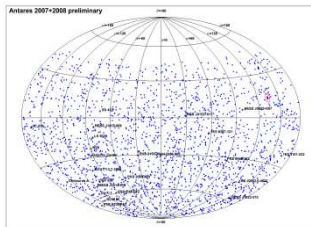


Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques résultats

Flux diffus

Recherche de sources ponctuelles

Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

Le consortium KM3NeT

FP6 design study

- But : définir le futur détecteur km³
- Démarré le 1^{er} février 2006 pour 3 ans
- Moyens 9 M€
- Etapes
 - CDR, +18 mois
 - TDR, fin de contrat
 - <http://www.km3net.org>

FP7 preparatory phase

- But : préparer la construction du km³
 - Moyens de productions
 - Accords stratégiques (site, MOU...)
- 2008-2012
- 5 M€ attribués
- Interconnexion EMSO et ESONET

- KM3NeT ➡ 40 instituts dans 10 pays européens
- KM3NeT inscrit dans les feuilles de route ESFRI et ASPERA
- Restent en suspend le choix du site (mutli-site?)... Arbitrage non scientifique



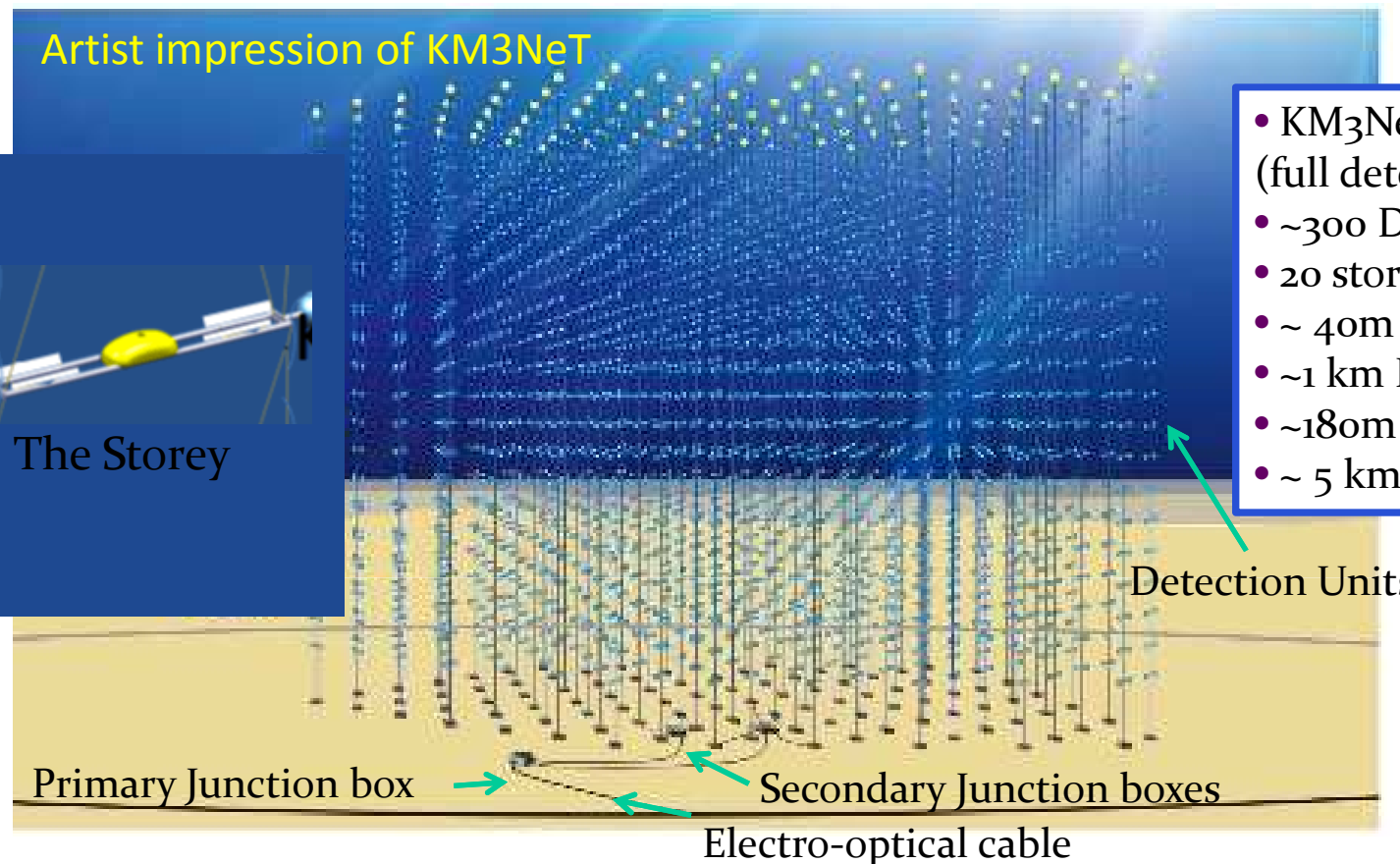
Le futur détecteur

Artist impression of KM3NeT



The Storey

- KM₃NeT in numbers (full detector)
- ~300 DU
- 20 storey/DU
- ~ 40m storey spacing
- ~1 km DU height
- ~180m DU distance
- ~ 5 km³ volume



Digital Optical Module (DOM) = pressure resistant/tight sphere containing photo-multipliers and associated electronics

Detection Unit (DU) = mechanical structure holding DOMs, environmental sensors

Implementation requirements

Construction time ≤ 5 years

Operation over at least 10 years without “major maintenance”

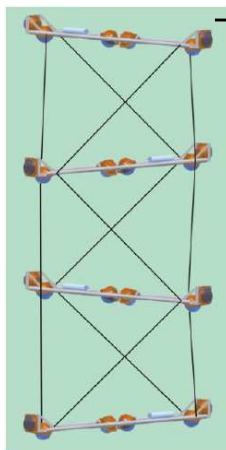
KM3NeT : choix retenus

Module optique : multi-PMT

- 31 PMs (avec leur base) 3" dans une sphère de 17" (total ~140 mW)
- Premiers prototypes sous test
- Plus de surface de détection par OM
- Autorise des coïncidences locales intra-OM (calibration) et séparation de 1 vs plusieurs photo-électron

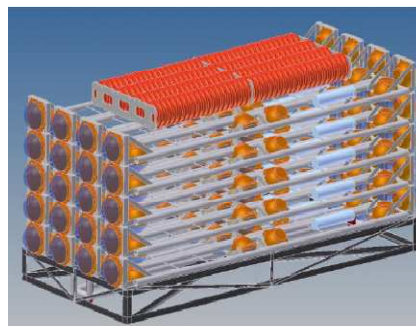


Unités de détection (DU)



→ Tours flexibles avec barres horizontales

☞ Lèvent les ambiguïtés de reconstruction de l'angle azimutal



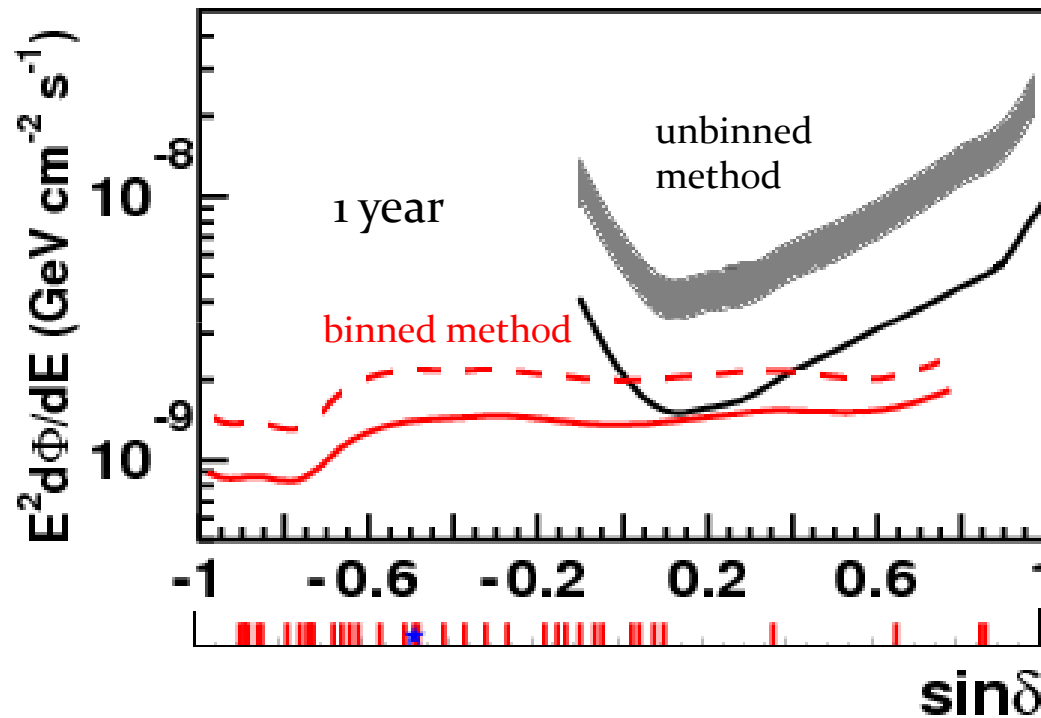
Structure compacte (20 étages)

Procédure de déploiement testée
avec succès en février 2010

Sensibilité escomptée

Sensitivity and discovery fluxes for point like sources with E^{-2} spectrum

Full detector (310 DUs)



- KM3NeT sensitivity 90%CL
- - - KM3NeT discovery 5σ 50%
- IceCube sensitivity 90%CL
- IceCube discovery 5σ 50% 2.5±3.5 above sensitivity flux. (extrapolation from IceCube 40 string configuration)

| Observed Galactic TeV-g sources (SNR, unidentified, microquazars)

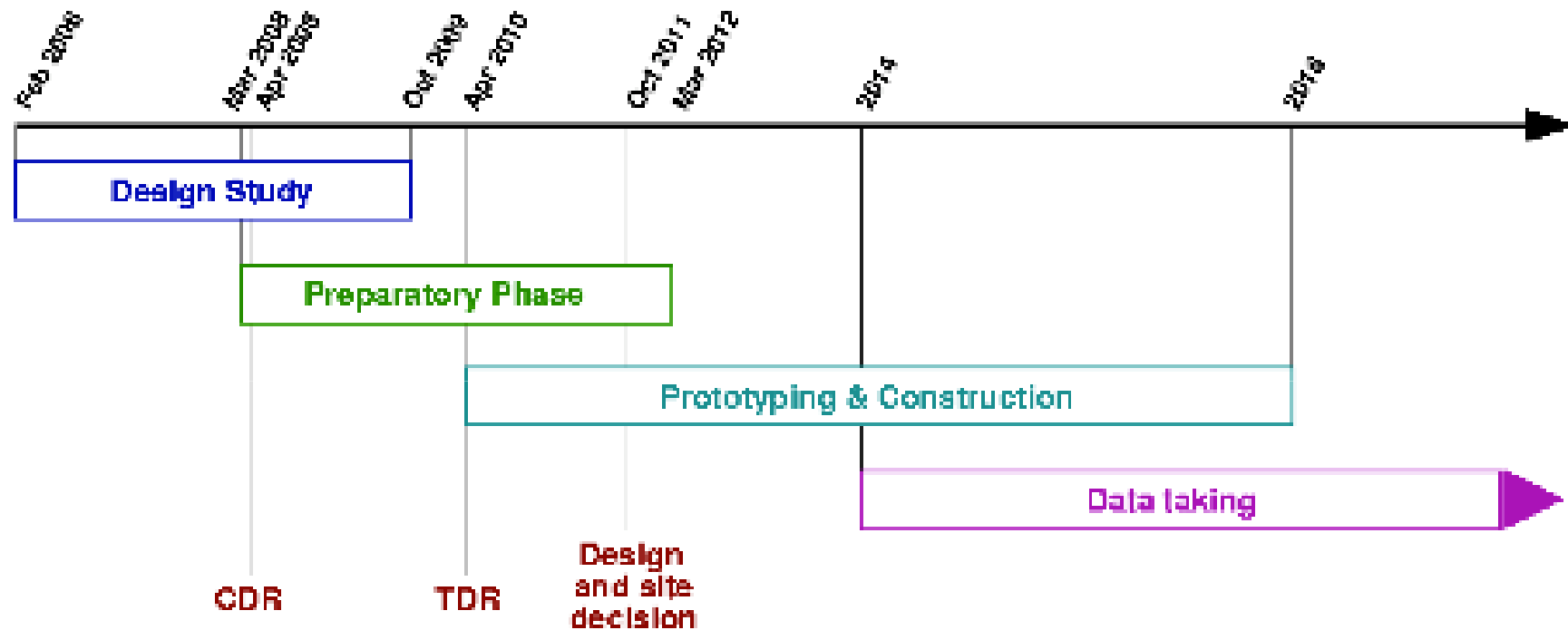
F. Aharonian et al. Rep. Prog. Phys. (2008)

Abdo et al., MILAGRO, Astrophys. J. 658 L33-L36 (2007)

★ Galactic Centre

Sensitivity and discovery will improve with the unbinned analysis

Calendrier prévisionnel



La phase de construction pourrait démarrer l'année prochaine, en fonction du financement obtenu...

Conclusions

- Astronomie neutrino en marche avec des détecteurs fonctionnant selon le cahier des charges.
- De nombreuses études multi-messagers sont en cours.
- IceCube est complet depuis quelques mois : sensibilité dans la région d'intérêt physique.
- ANTARES prouve la faisabilité d'un détecteur à ν sous-marin
- ANTARES est le plus grand TN de l'hémisphère nord... Une plateforme pour les sciences associées.
- Exploitation scientifique jusqu'en 2016.
- Etape majeure vers un détecteur KM^3 méditerranéen. Les choix techniques sont identifiés.
- Merci de votre attention...

Luciano Moscoso



1940 - 2011

Une référence dans le domaine de
l'astronomie des neutrinos

Un des pères fondateurs d' ANTARES

Un collaborateur apprécié de tous

Un directeur de thèse modèle