

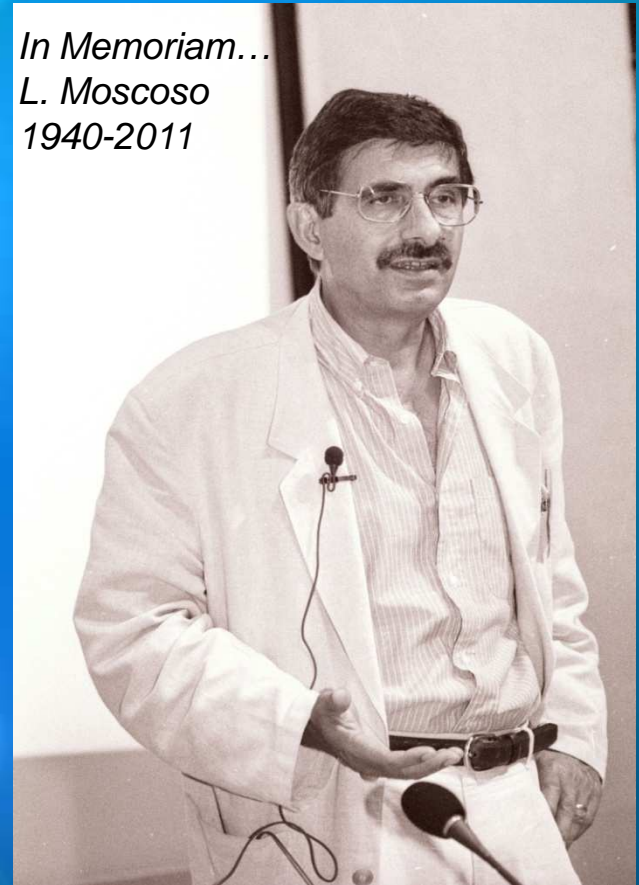
Astronomie des neutrinos de hautes énergies

Un aperçu un peu biaisé en faveur de:
- Technique Tcherenkov
- ANTARES

Antoine Kouchner
Université Paris 7 Diderot
Laboratoire APC



In Memoriam...
L. Moscoso
1940-2011



Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

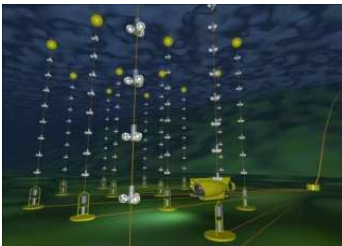
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

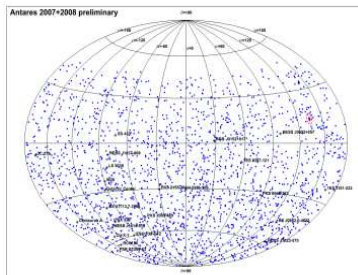
B) Les télescopes à neutrinos actuels

Principes de fonctionnement

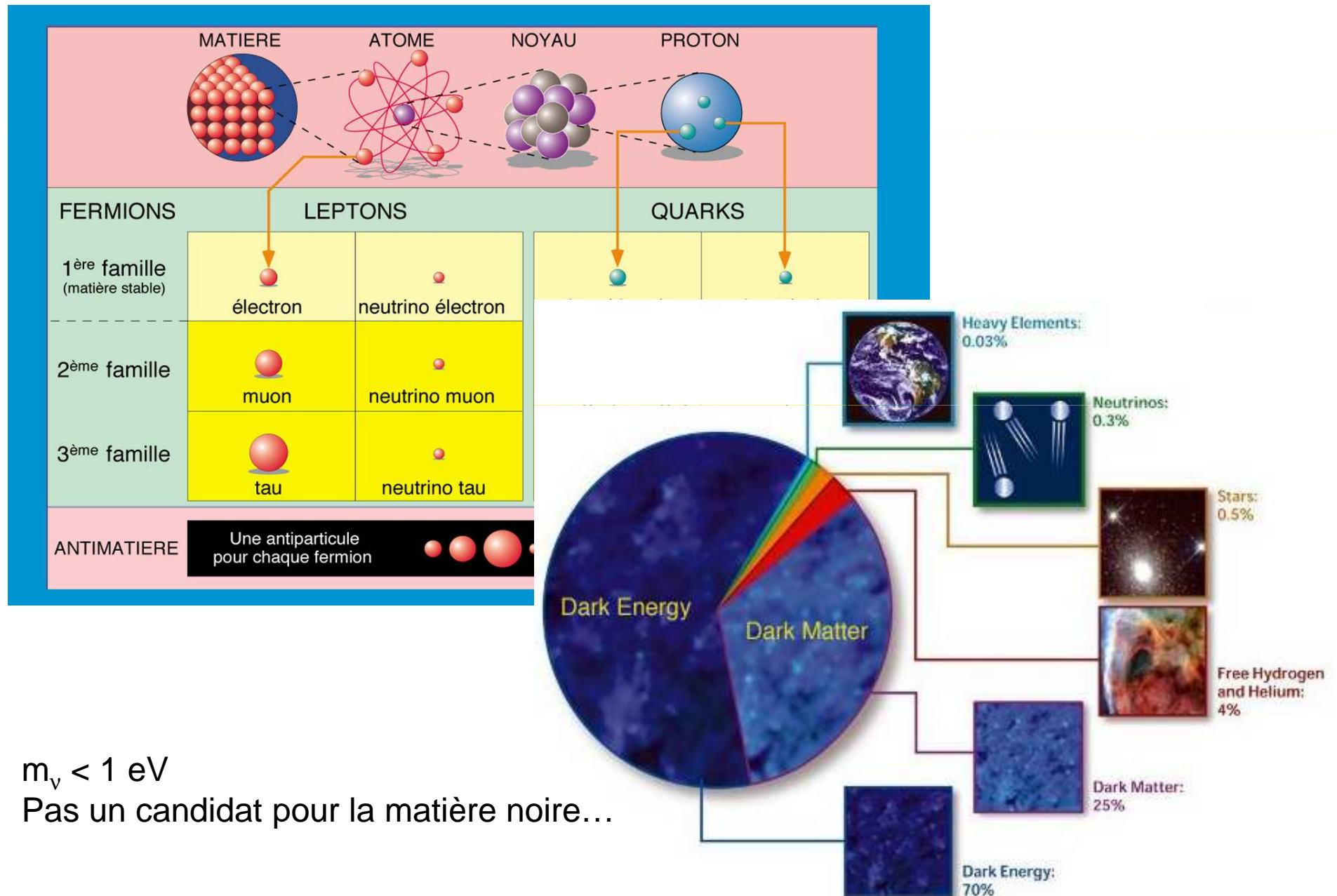
Reconstruction

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives



Le neutrino : particule élémentaire



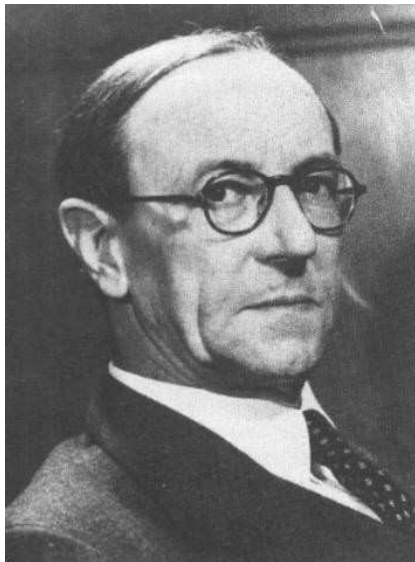
Le neutrino et la radioactivité β

1911-1912 : Van Bayer, O. Hahn, L. Meitner mesure l'énergie des électrons $\beta \rightarrow$ **spectre discret !**

Compatible avec interprétation d'alors :
noyau = A protons + (A - Z) électrons

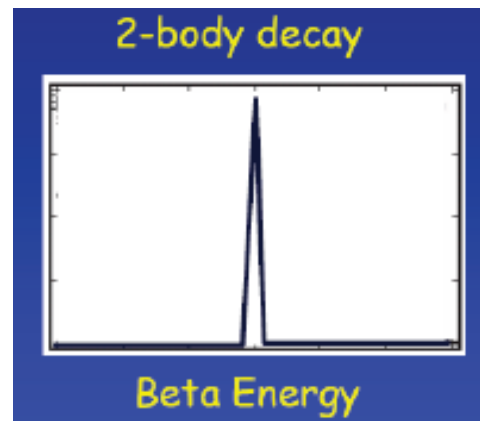
Désintégration β : $(A, Z) \longrightarrow (A, Z-1) + e^-$

1914: James Chadwick: Le spectre en énergie de l'électron est continu
(avec une chambre à ionisation)

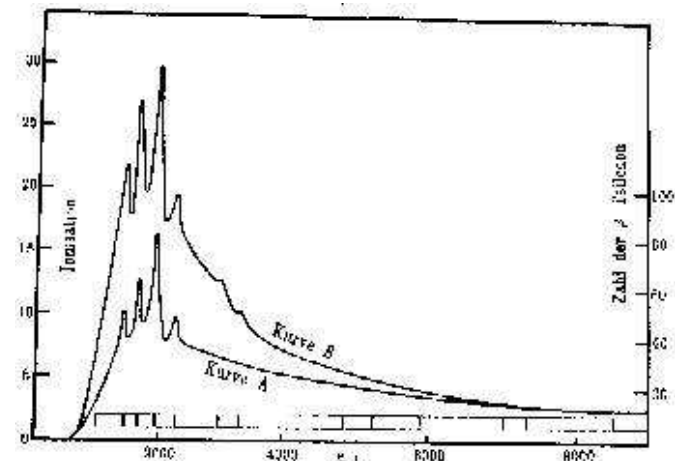


1891 - 1974

Attendu



Mesuré



1878 - 1968



"there is probably some silly mistake somewhere"

Quelques interprétations

Plusieurs e^- émis?

En 1924 K. G. Emeleus mesure 1.43 e^- émis par désintégration β par nucléon (avec un compteur Geiger)

L. Meitner 1924 : le rayonnement β initialement discret est transformé en spectre continue par des interactions secondaires.
Ralentissement inhomogène des électrons dans la source.
Mais l'électron initial jamais observé.

L'énergie maximale est partagée entre l'électron et des rayons γ :
$$E_\gamma = E_{\max} - E_e$$

C. D. Ellis 1924 : les raies observées par le passé sont dues à des γ émis par le noyau qui se désexcite (conversion interne) et fournit de l'énergie à des électrons du cortège (n'a rien à voir avec le processus β).

Débat tranché en 1927 par mesures calorimétriques
Ellis & Wooster

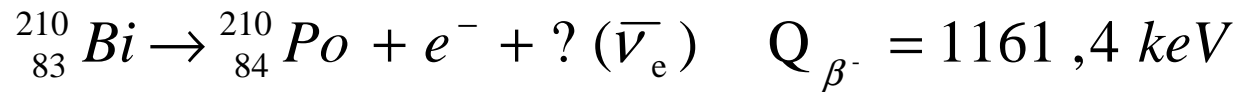
Expérience de Ellis et Wooster

1927 : C. D. Ellis et W. A. Wooster → mesure calorimétrique avec RaE ($\equiv {}^{210}\text{Bi}$)

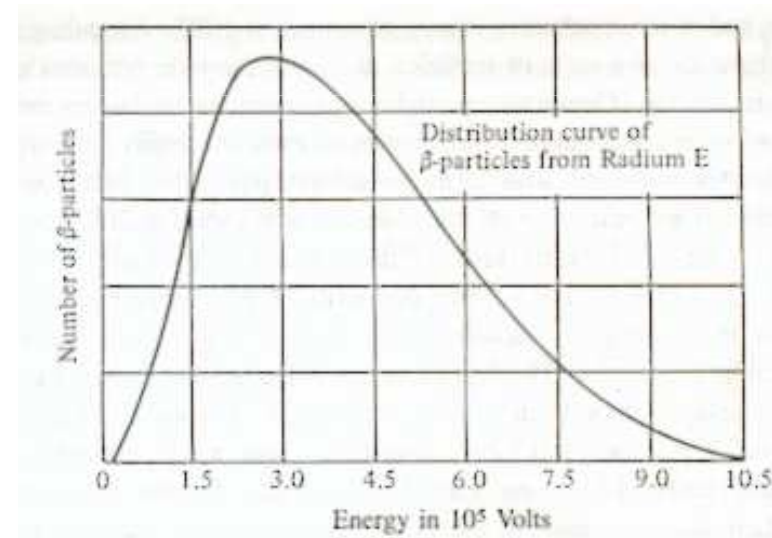
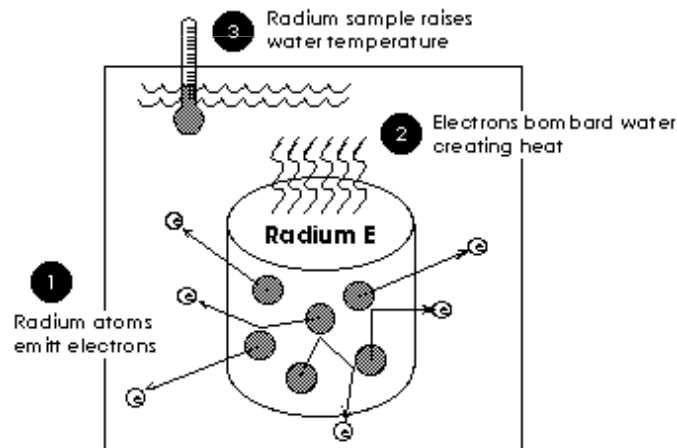
Expérience reproduite par Meitner

Pas de conversion interne
donc pas de raies

Sensible aux γ et e → chaleur déposée $E_{\text{max}} \sim 1\text{MeV}$



The Original Radium E Experiment

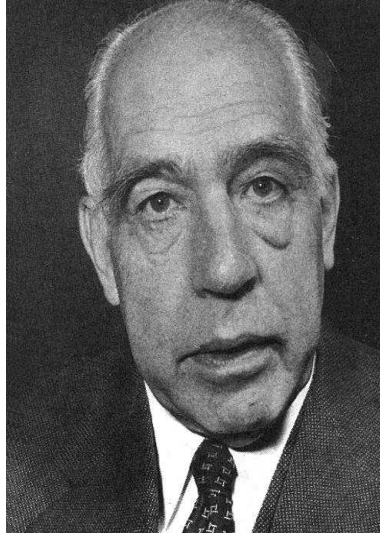


Observation Chaleur déposée = énergie moyenne du spectre $\beta = 0.35 \pm 0.04 \text{ MeV}$

Permet d'écarter les hypothèses fausses. Mais le problème reste entier.

Solutions théoriques possibles

Niels Bohr (1885-1962)



« L'énergie n'est conservée que statistiquement »

Wolfgang Pauli (1900-1958)



« 1934: Émission d'une particule neutre et légère »

Lettre aux Physiciens « radioactifs » en réunion
à Tübingen.

C'est la naissance du neutrino, d'abord appelé neutron

4 Dec.1930: Lettre de Pauli

Chères Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs,

Comme va vous l'expliquer avec plus de détails celui qui vous apporte ces lignes et auquel Je vous prie d'accorder toute votre bienveillante attention, il m'est venu en désespoir de cause, face à la statistique " fausse " concernant les noyaux ^{14}N et ^6Li ainsi que le spectre β continu, l'idée d'un expédient pour sauver le principe d'échange de la statistique et le principe de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité qu'il existe dans les noyaux des particules électriquement neutres, que je propose d'appeler neutrons, dotées d'un spin de valeur $\frac{1}{2}$, obéissant au principe d'exclusion et qui de surcroît se distinguent des quanta de lumière par le fait qu'ils ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons, et en tous cas non supérieure à 0,01 de celle des protons.

Le spectre β continu se comprendrait alors en admettant par hypothèse que lors de toute désintégration β est émis, outre l'électron, aussi un neutron, de telle sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante.

La question qui se pose maintenant est de savoir quelles forces agissent sur le neutron. Pour des raisons relevant de la mécanique ondulatoire (et dont celui qui vous transmet ces lignes est en mesure de vous informer plus précisément), le modèle le plus vraisemblable pour le neutron me semble impliquer qu'au repos il soit un dipôle magnétique doté d'un certain moment μ . Les expériences exigent assurément que l'action ionisante d'un tel neutron ne puisse pas être supérieure à celle d'un rayon et donc la dimension linéaire de μ ne doit sans doute pas être supérieur à 10^{-13} cmA l'heure actuelle, cependant, je ne m'aventurerai pas à publier quelque chose sur cette idée, je me tourne d'abord en toute confiance vers vous, chers radioactifs, pour vous demander ce qu'il en serait d'une expérimentation établissant l'existence d'un tel neutron si celui-ci devait présenter un pouvoir de pénétration égal ou supérieur d'un facteur 10 à celui d'un rayon gamma.

chers Radioactifs, examinez et jugez.- malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tubingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.- Je vous salue bien tous, ainsi que M.Back.

*Votre très dévoué,
W. Pauli*

1932-1933 : *neutrons ou neutrinos ?*

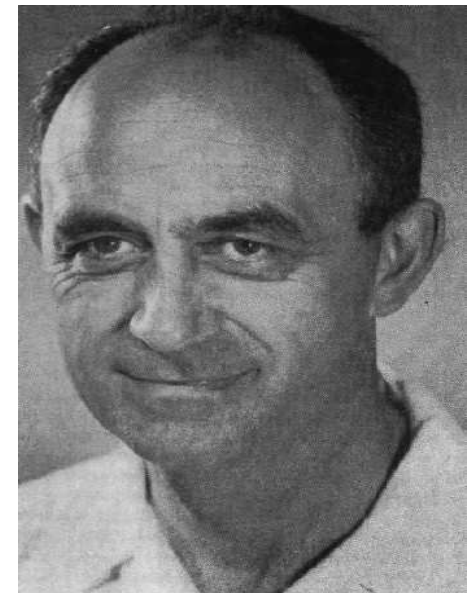
**Chadwick découvre le neutron
mais celui-ci est trop lourd pour
être la particule de Pauli.**



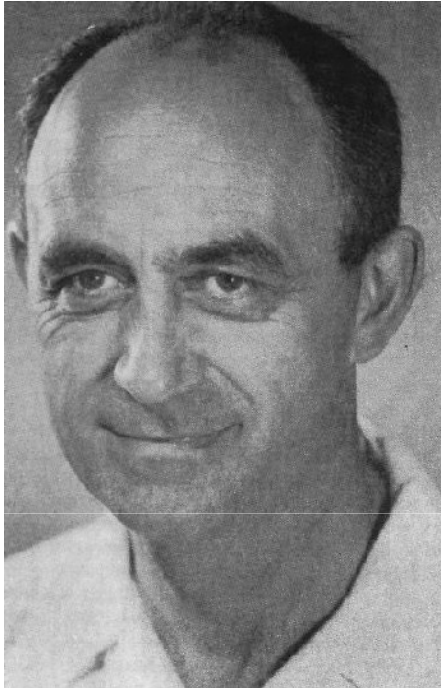
Pauli répond en Octobre 1933

**“... Leur masse ne peut guère être supérieure à celle
de l'électron. “**

Fermi les baptisera **neutrinos pour petits neutrons.**

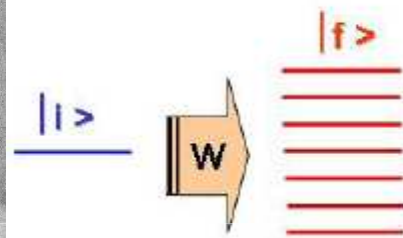


1933: Théorie de Fermi (β)



1901 - 1954

- Le neutrino est formellement traité comme une particule de spin $\frac{1}{2}$
- Fermi s'inspire de la **théorie des perturbations au premier ordre**
- **Règle d'or de Fermi**



$$\delta P_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | W | i \rangle|^2 \rho(E_f) \text{ sec}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | W | i \rangle|^2 \rho(E_f) \text{ sec}^{-1}$$

La probabilité de désintégration de la particule croît avec le temps

$$\Delta P = \lambda \cdot \Delta t$$

La probabilité de survie conduit à la loi de désintégration bien connue :

$$\lambda = N_i^{-1} (-dN_i/dt)$$

$$N_i(t) = N_i(0) e^{-\lambda t} \quad (\text{pour } t \gg \lambda^{-1})$$

dE_f $dN \text{ états}$

E_f

$$\frac{dN}{dE_f} = \rho(E)$$

État final

Densité des états finals

Durée de vie moyenne de la particule $\tau = \lambda^{-1}$

Vers une détection directe (inverse β)

- **1939:** Crane tente la première expérience radio-chimique

$Z \rightarrow (Z-1) + e^+ + \bar{\nu}$

- 1,5 kg de NaCl irradié avec $\bar{\nu}$ de Ra^{228} $_{17}\text{Cl}^{35} + \bar{\nu} \rightarrow _{16}\text{S}^{35} + e^+$
- extraction chimique sous forme de sulfate
- $T(_{16}\text{S}^{35} \rightarrow _{17}\text{Cl}^{35} + e^- + \bar{\nu}) = 88$ jours
- mesure de l'activité à l'aide d'une chambre à ionisation

Résultat négatif : Section efficace $< 10^{-30} \text{ cm}^2$

- **1946:** Pontecorvo suggère l'expérience $_{17}^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow _{18}^{37}\text{Ar} + e^-$
- 1949 : L. Alvarez. Résultat négatif. Savannah River reactor
- **1955:** R. Davis. Nouvelle tentative. Réacteur Brookhaven. 3900 litres de CCl_4 . 100 jours. Extraction.

Résultat négatif : Section efficace $< 0.9 \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2 < \text{prédictions}$

$Z \rightarrow (Z+1) + e^- + \nu$

~~$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$~~

~~$$n + \bar{\nu} \rightarrow p + e^-$$~~

Interdit

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

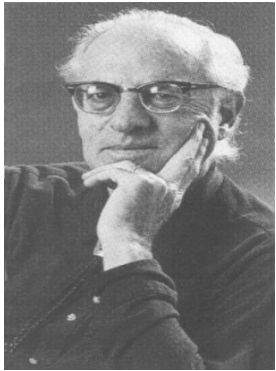
$$n + \nu \rightarrow p + e^-$$

Possible mais source?

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

(Nombre leptonique)

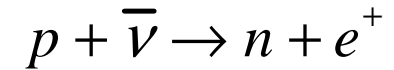
Reines et Cowan : détection directe



1953 : Hanford

300 litres de scintillateurs seulement.

Résultats encourageants, mais trop de bruit de fond

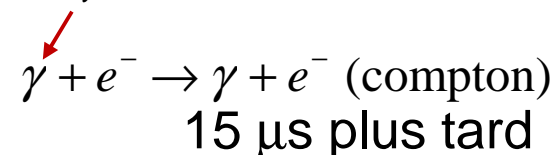
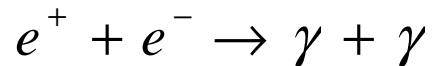


Seuil de la réaction = 1,8 MeV

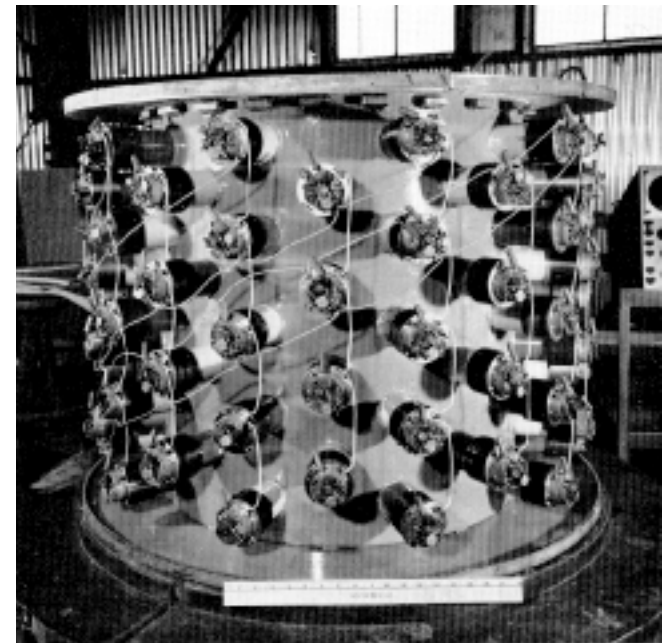
1956 : Savannah River

La cible est constituée de 400 litres d'eau et de Chlorure de Cadmium.

Le neutrino interagit avec un proton et donne un positon (e^+) et un neutron (n).



Prix Nobel 1995 (Cowan décédé)



ν_μ et ν_e sont-ils différents ?

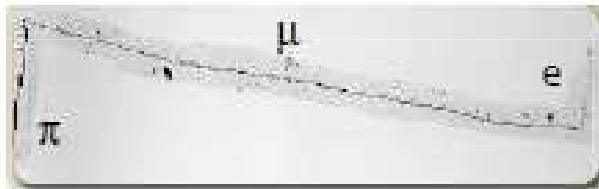
Interrogation motivée par l'absence de certains processus (conservation du nombre leptonique)

~~$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$$~~

~~$$\mu^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-$$~~

~~$$\mu^+ + N \rightarrow e^+ + N$$~~

Dans ce cas les neutrinos issus de la désintégration des pions sont différents de neutrinos β



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \text{ permis}$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p \text{ interdit}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n \text{ permis}$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n \text{ interdit}$$

1962: expérience de Brookhaven



Par conséquent les deux neutrinos de la désintégration du μ sont différents

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Découverte du neutrino muonique

1963

AGS 15 GeV Proton Beam

34 evts avec un seul μ ($P_\mu > 300 \text{ MeV}$)

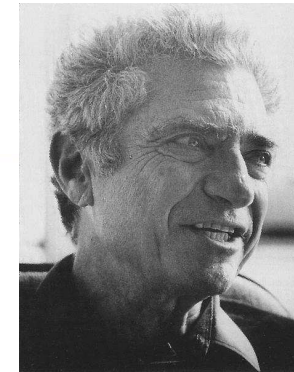
Bruit de fond (atm) attendu = 5



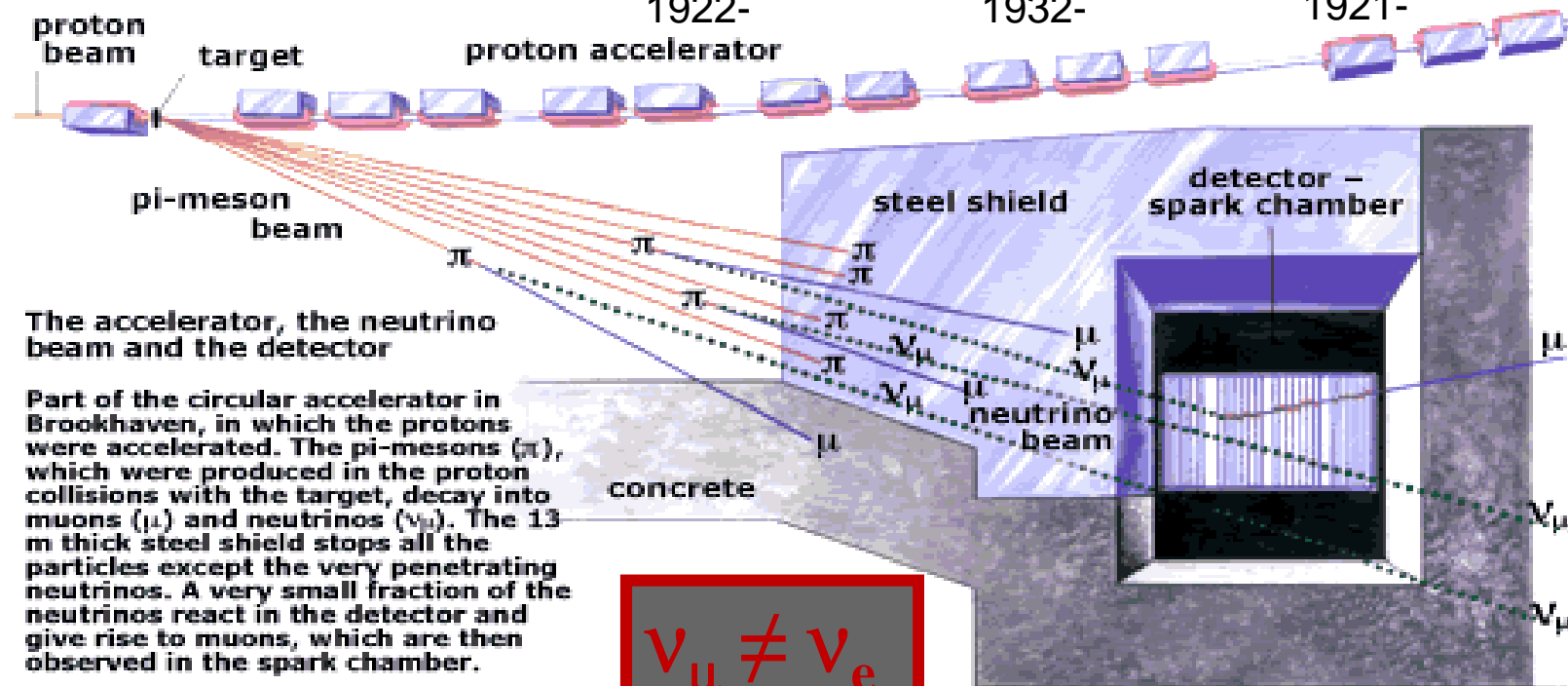
L. Lederman
1922-



M. Schwartz
1932-



J. Steinberger
1921-



The accelerator, the neutrino beam and the detector

Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

$$\nu_\mu \neq \nu_e$$

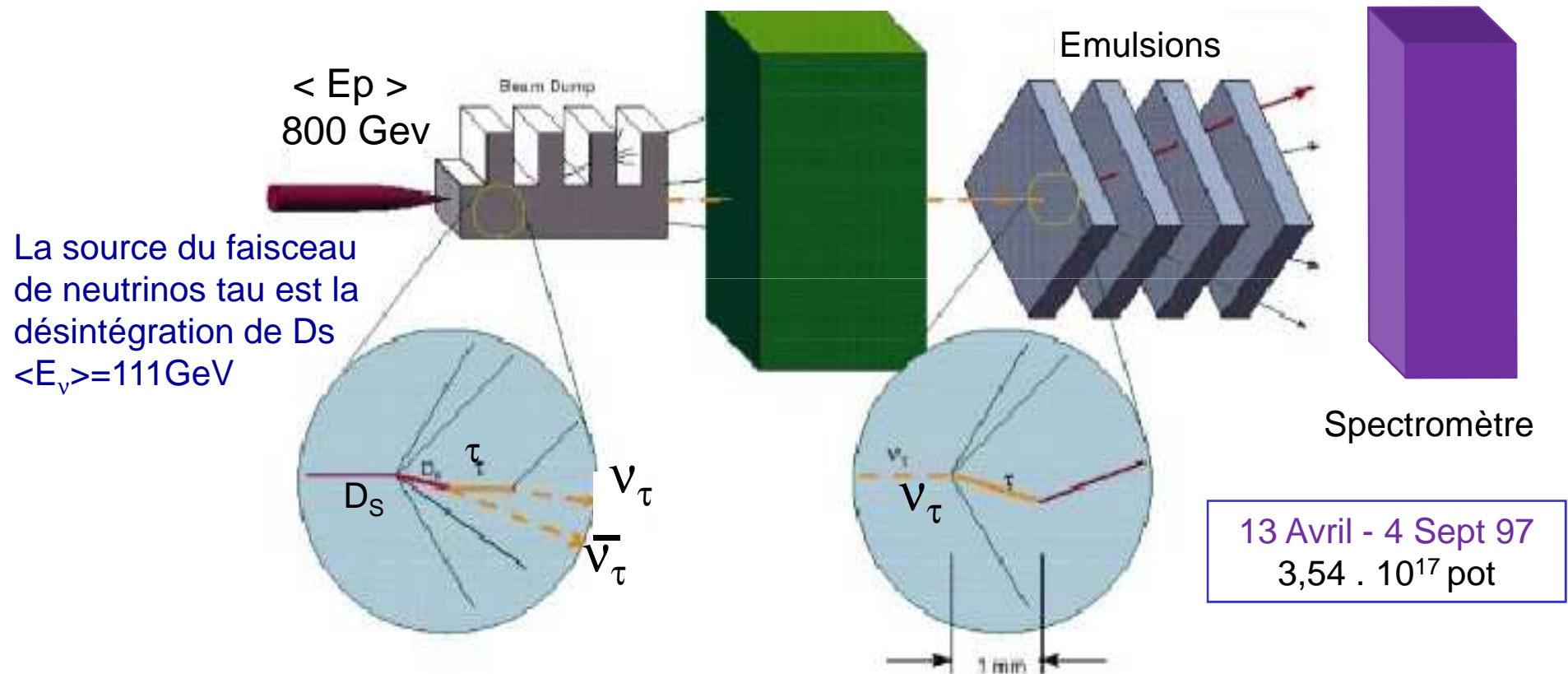
Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

Observation directe du neutrino tau

2000: Résultats de l'expérience **DONUT (E872)** au Fermilab

Observation des interactions du neutrino tau via le courant chargé \rightarrow détection du lepton τ

Ecran 36 m



Événement type:

une trace (lepton tau) + kink de désintégration avec un grand Pt et énergie manquante

$\tau \rightarrow e \nu_\tau \nu_e$ (18%) $\tau \rightarrow \mu \nu_\tau \nu_\mu$ (18%) $\tau \rightarrow h + \text{neutre}$ (50%)

Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

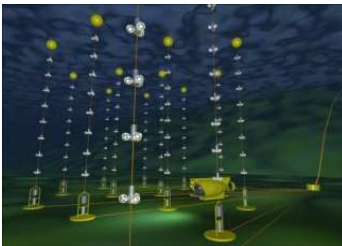
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

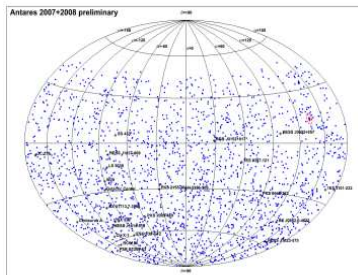
B) Les télescopes à neutrinos actuels

Principes de fonctionnement

Reconstruction

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives



Astroparticules

Larousse 2008: domaine de recherche à l'interface entre
l'**astrophysique** et la **physique des particules**

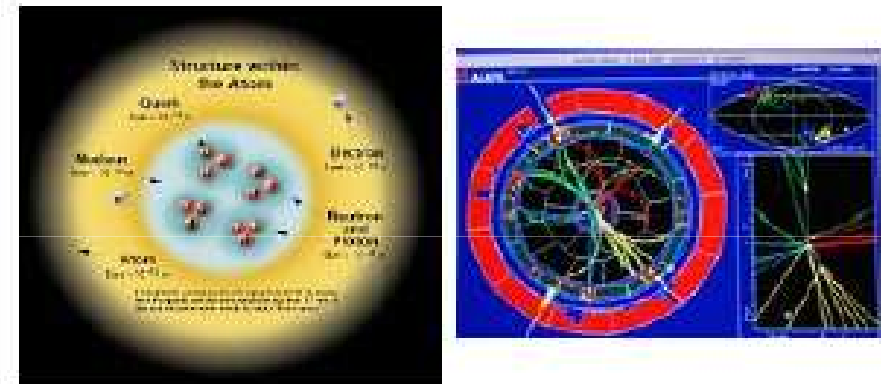
infiniment grand:



meilleure compréhension de la structure
de l'Univers et des phénomènes violents
dont il est le siège

« TELESCOPES »

infiniment petit



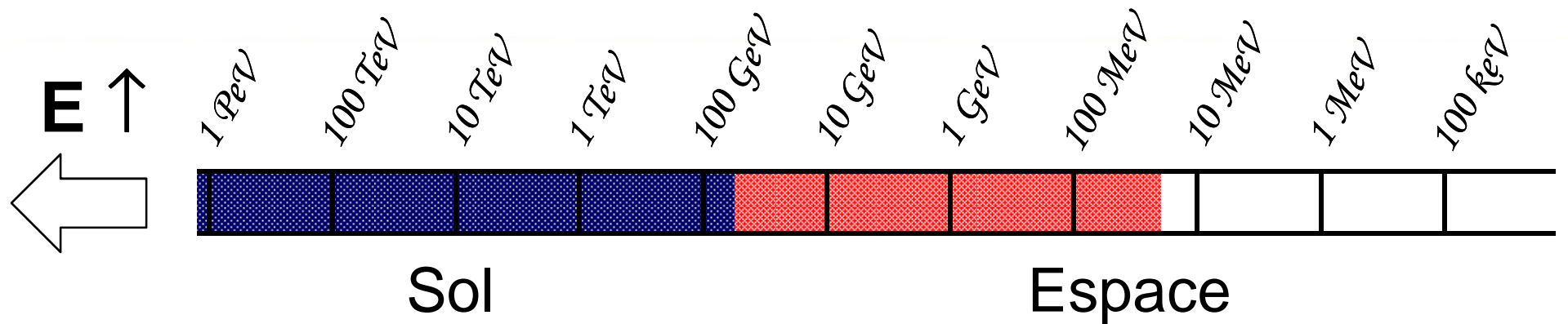
étude des constituants ultimes de la
matière et de leurs interactions

ACCELERATEURS DE
PARTICULES

But : Etudier la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers par
l'intermédiaire du rayonnement cosmique **dans toutes ses composantes**

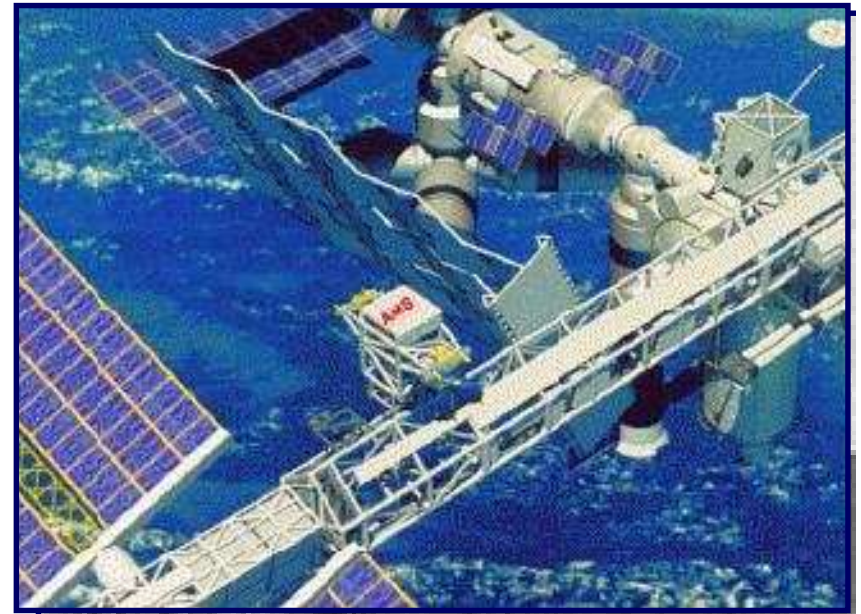
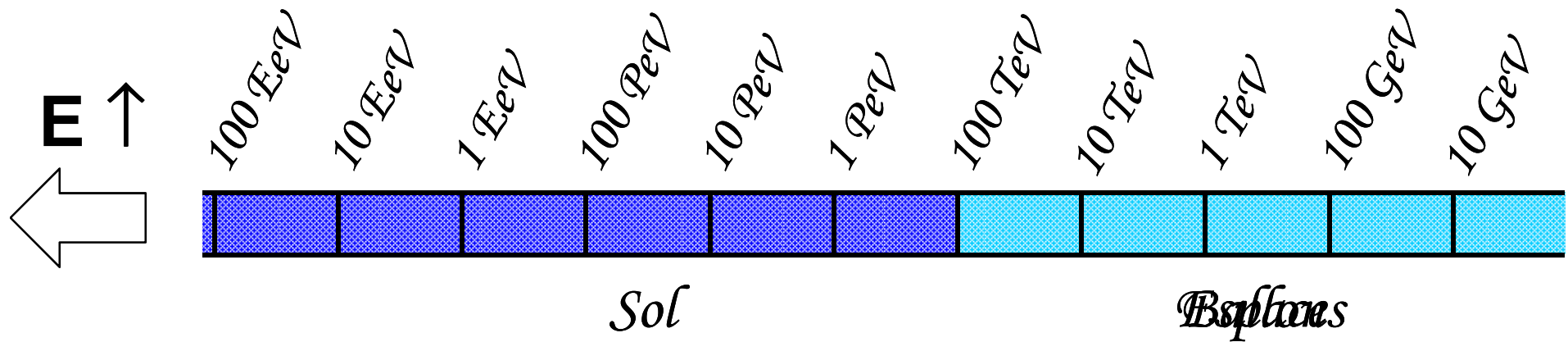
Gamma de Haute énergie (EM)

Crédit :J. Paul



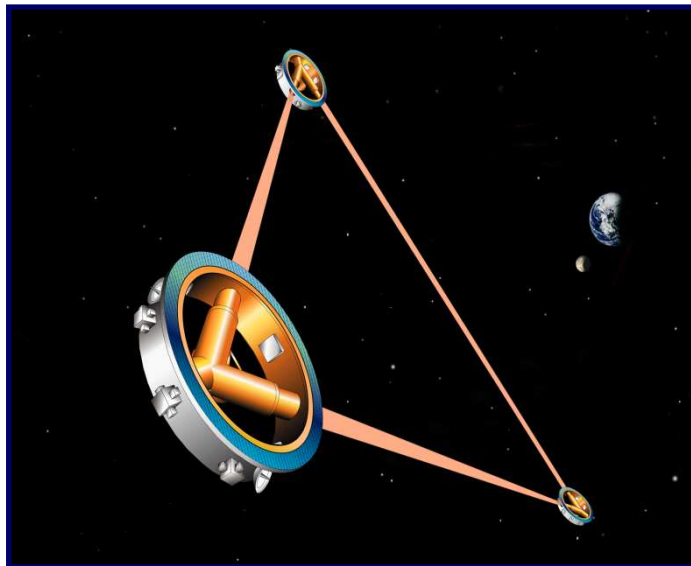
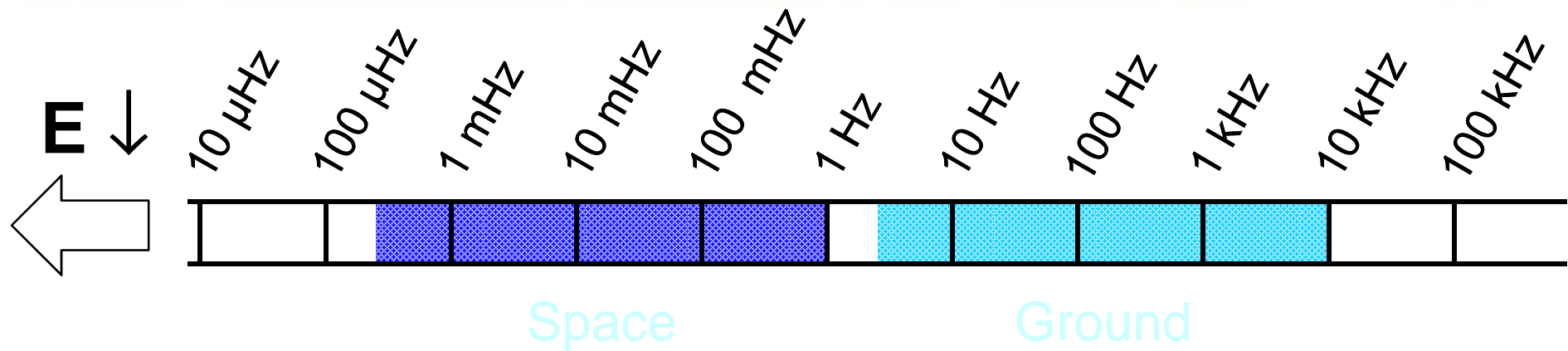
Les rayons cosmiques

Crédit : J. Paul



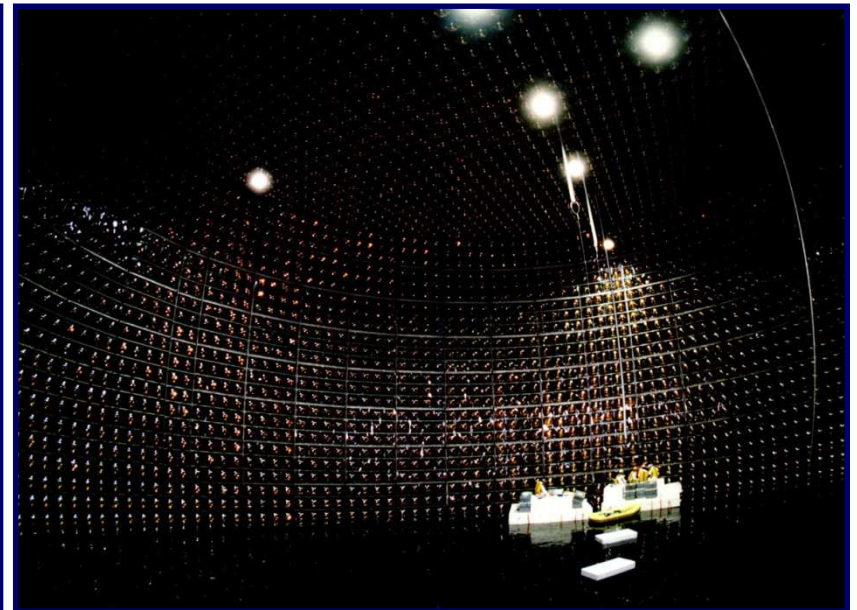
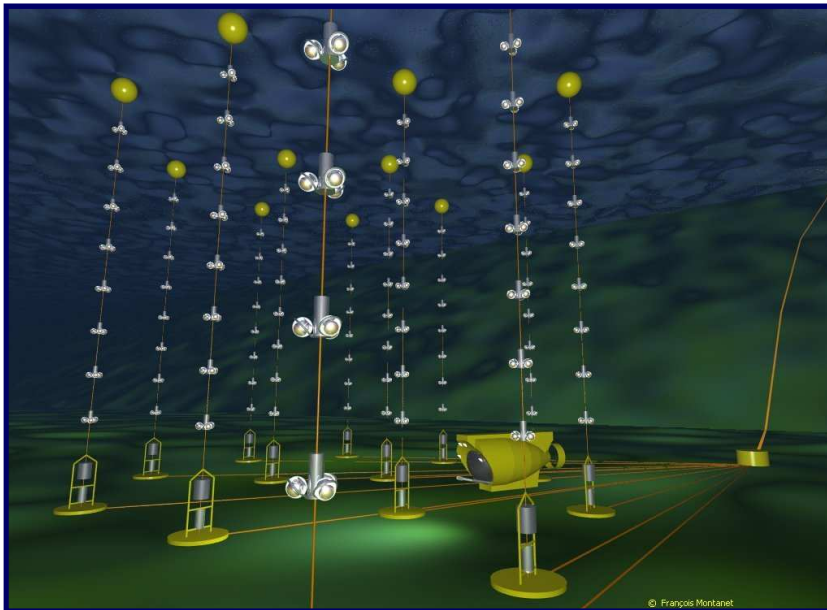
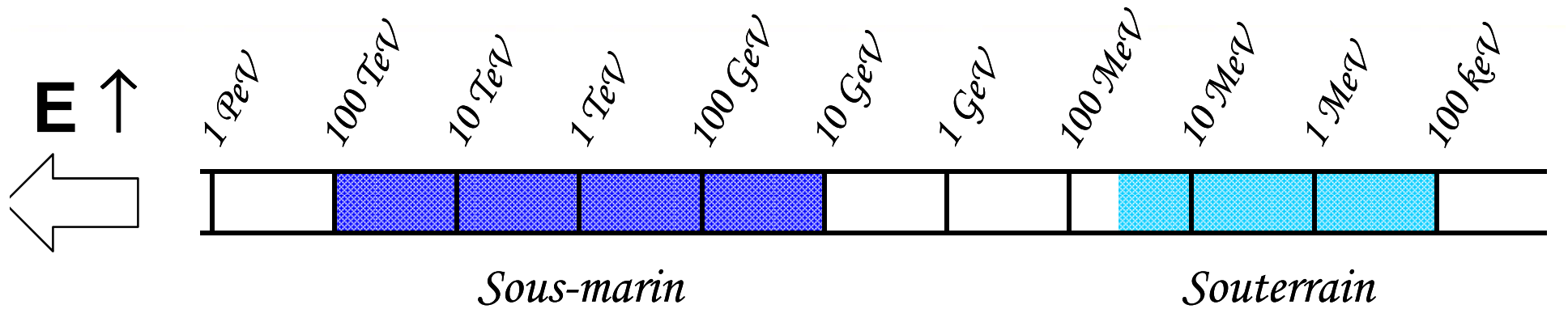
Ondes gravitationnelles

Crédit :J. Paul

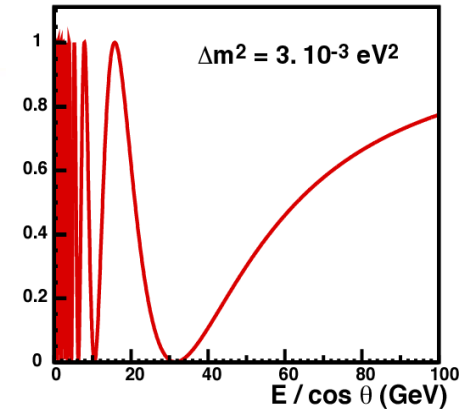
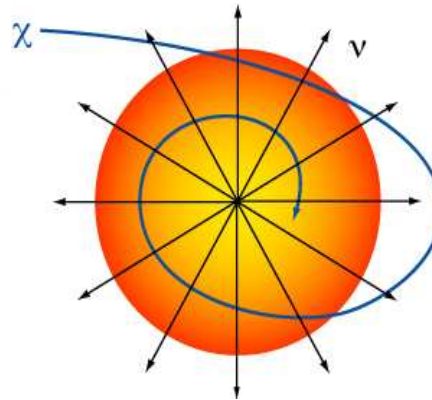
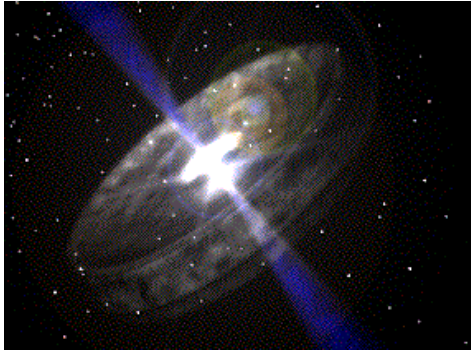


Télescopes à neutrinos

Crédit : J. Paul



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...

Les premières idées début 1960...

Ann.Rev.Nucl.Sci
10 (1960) 1

NEUTRINO INTERACTIONS¹

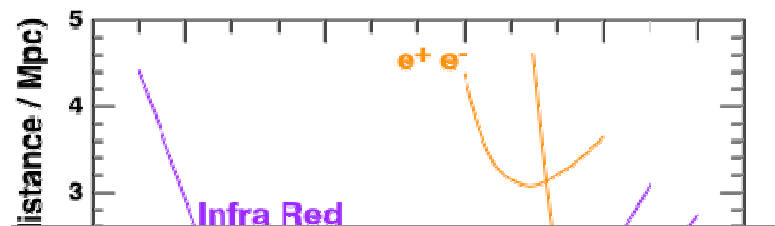
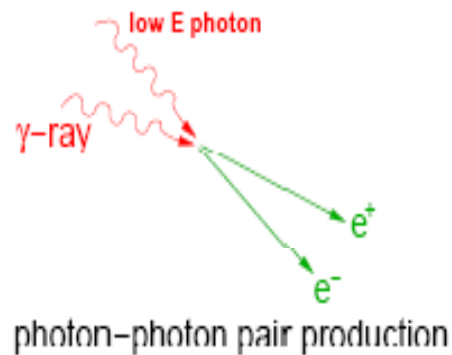
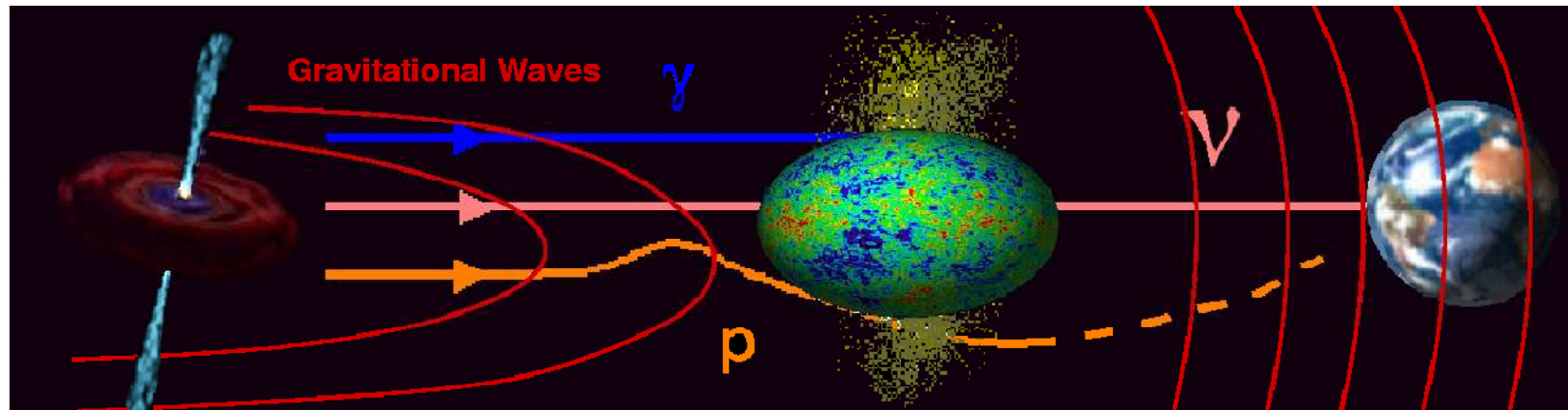
BY FREDERICK REINES²

IV. COSMIC AND COSMIC RAY NEUTRINOS

As we have seen, interactions of high-energy particles with matter produce neutrinos (and antineutrinos). The question naturally arises whether the neutrinos produced extraterrestrially (cosmic) and in the earth's atmosphere (cosmic ray) can be detected and studied. Interest in these possibilities stems from the weak interaction of neutrinos with matter, which means that they propagate essentially unchanged in direction and energy from their point of origin (except for the gravitational interaction with bulk matter, as in the case of light passing by a star) and so carry information which may be unique in character. For example, cosmic neutrinos can reach us from other galaxies whereas the charged cosmic ray primaries reaching us may be largely constrained by the galactic magnetic field and so must perforce be from our own galaxy. Our more usual source of astronomical information, the photon, can be absorbed by cosmic matter such as dust. At present no acceptable theory of the origin and extraterrestrial diffusion of cosmic rays exists so that the cosmic neutrino flux can not be usefully predicted. An observation of these neutrinos would provide new information as to what may be one of the principal carriers of energy in intergalactic space.

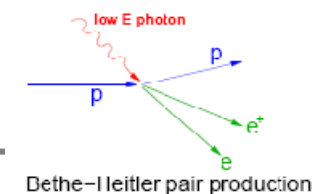
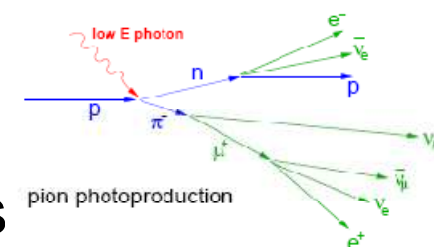
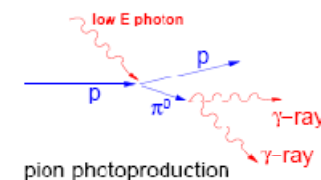
The situation is somewhat simpler in the case of cosmic-ray neutrinos: they are both more predictable and of less intrinsic interest. Cosmic-ray

Astronomie multi-messagère



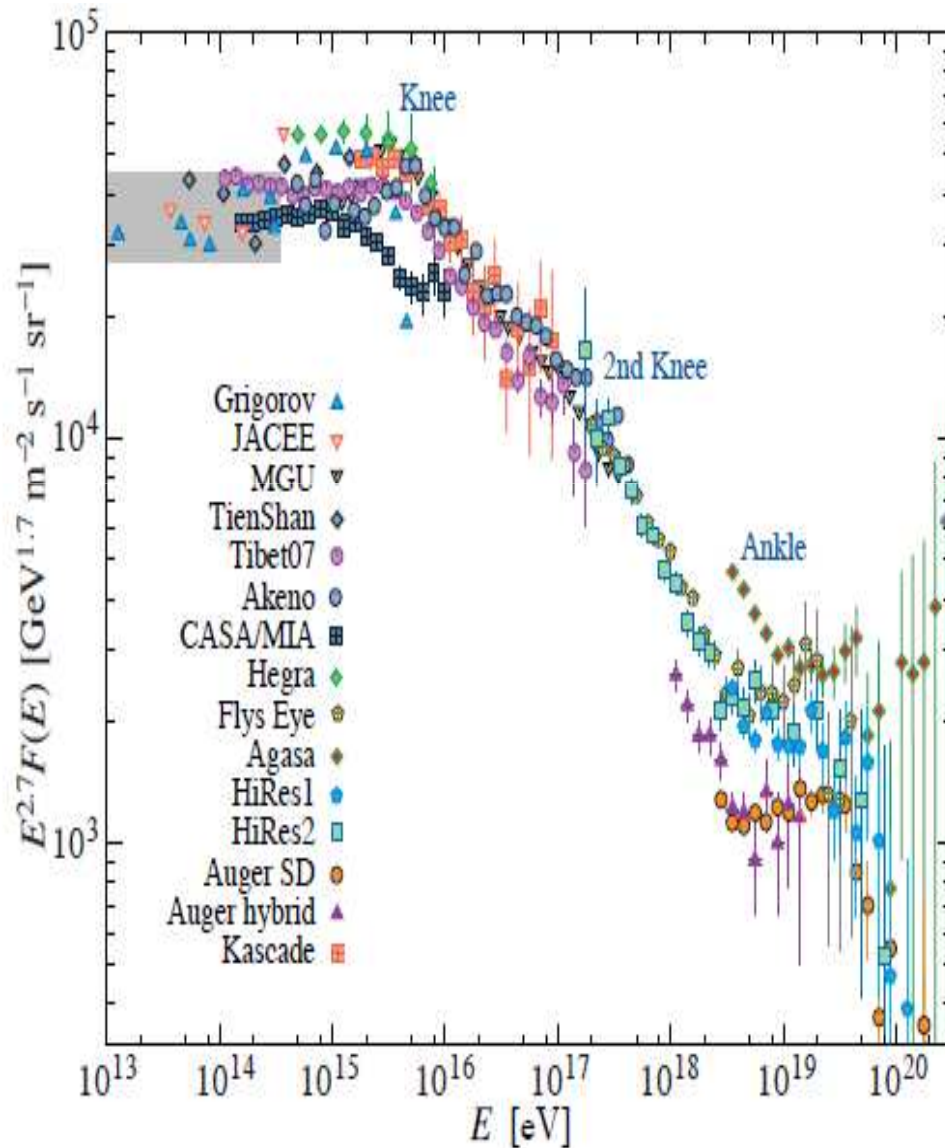
Neutrino

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

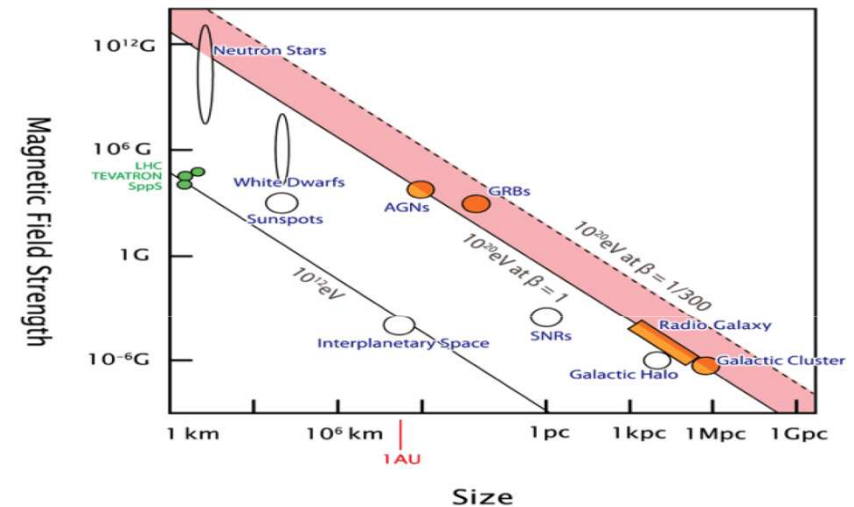


Les rayons cosmiques de haute énergie

Particle Data Group



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

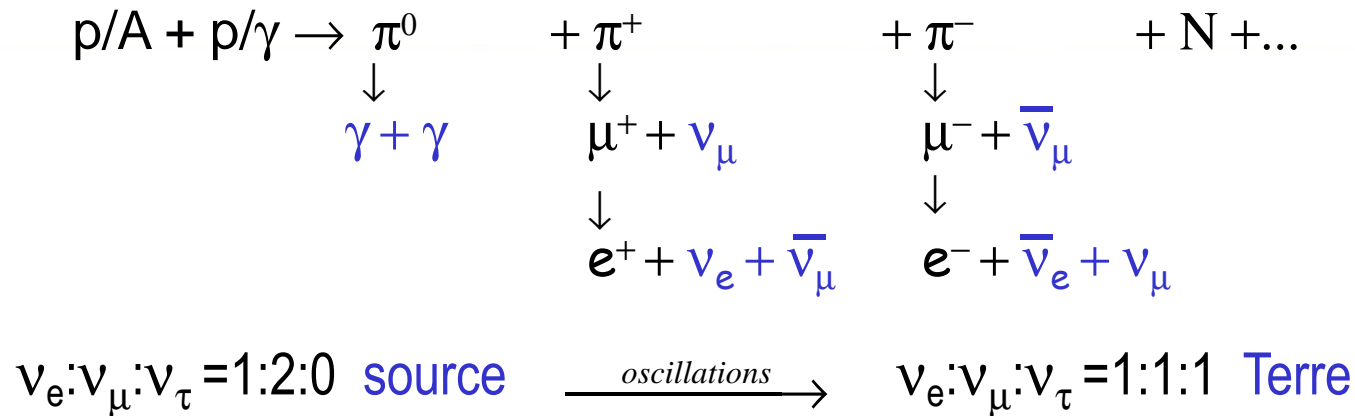


Coupure à UHE confirmée mais ...

Nature
Origine
Production ?

Lien entre les messagers

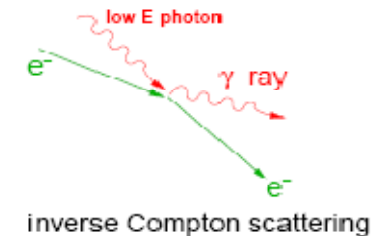
- Cascades hadroniques (comme pour les gerbes atmosphériques)



- Accélération («Bottom-Up»)

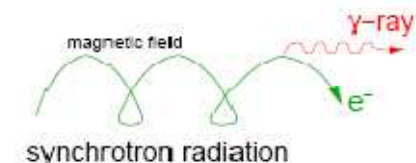
Chocs stochastiques (mécanisme de Fermi)

Explosion / Accrétion / Effondrement gravitationnel

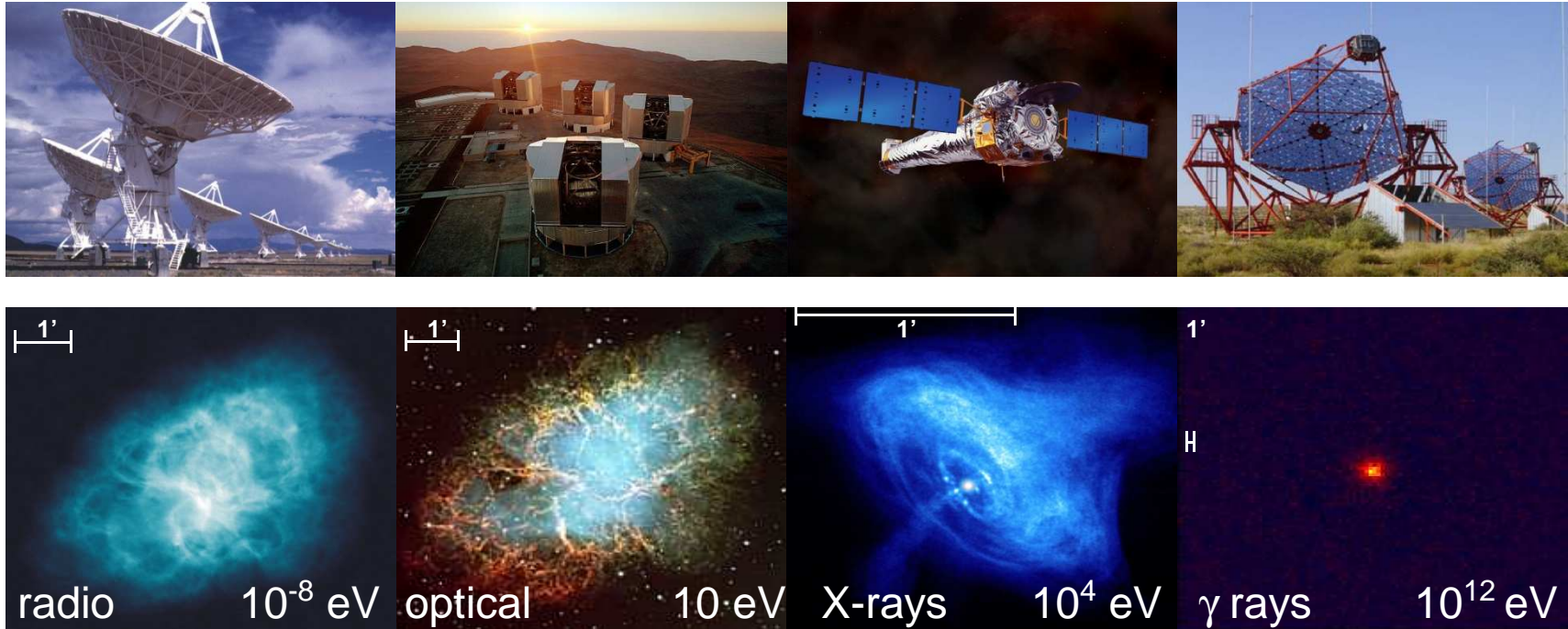


- Processus électromagnétiques

Synchrotron Inverse Compton = Pas de neutrinos

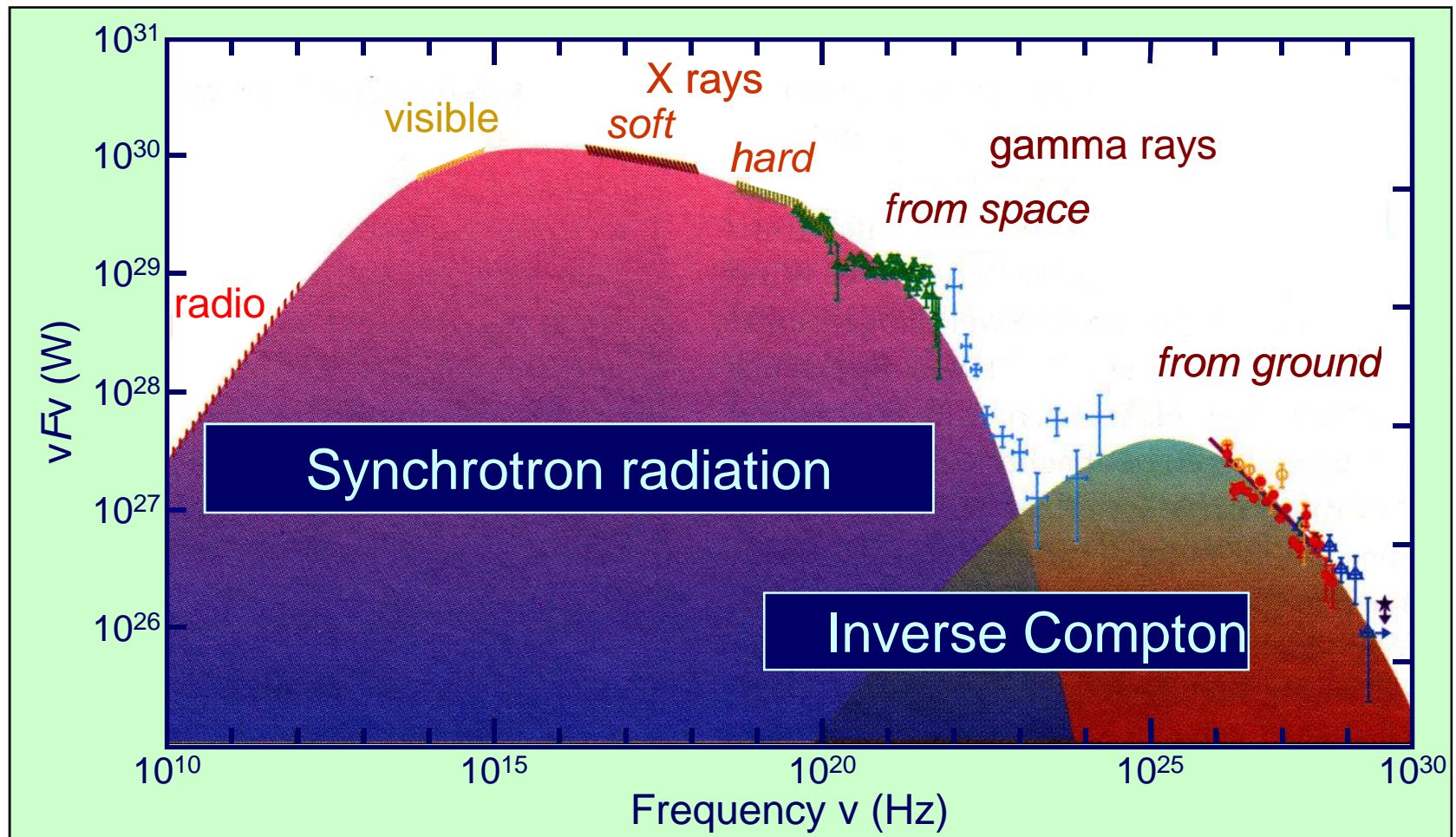


Ex: Crab Nebula



Standard candle for γ -ray astronomy
1st TeV gamma-ray source observed
by WHIPPLE in 1989 (50h)
HESS 2003 30s

Exemple : la nébuleuse du Crabe



Mutli-wavelength analysis → Modeling of the source

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

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

$\sim O(100)$ événements/an/km²



Fixe la taille caractéristique du détecteur \sim km

Limite controversée

- ♦ Mannheim, Protheroe, Rachen, 2001

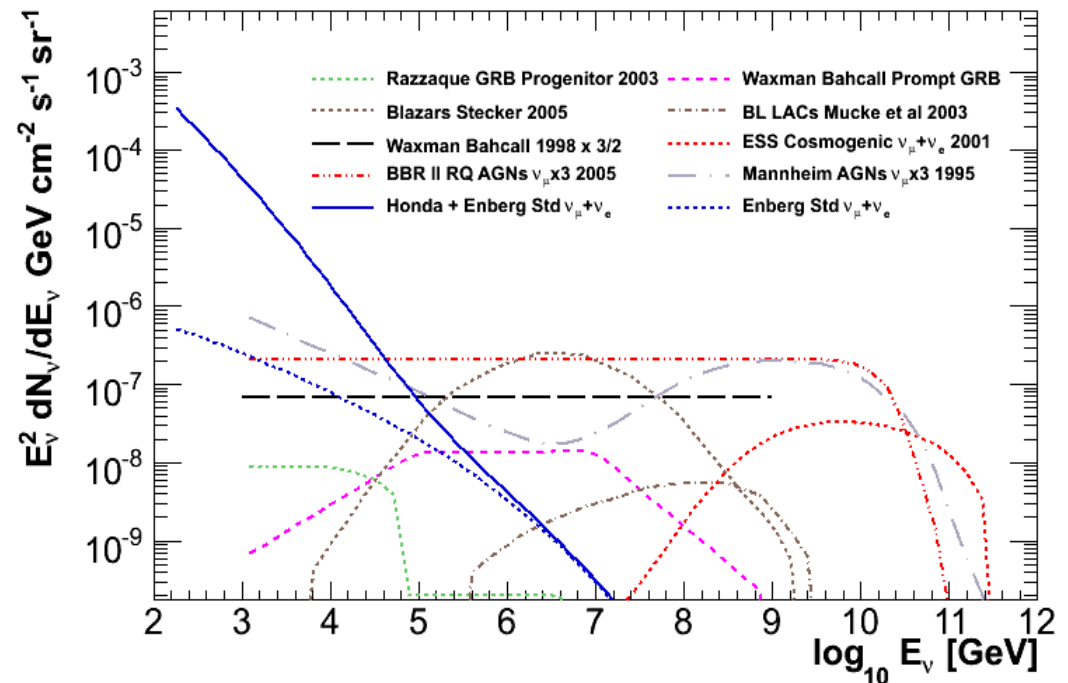
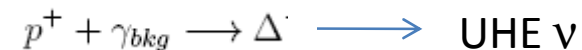
- Spectre des primaires libre
- Considèrent aussi les sources opaques aux neutrons

Exclu par IceCube et ANTARES

- Flux de neutrinos cosmogéniques

- ♦ Berezhinsky & Zatsepin, 1969

UHECR p interagit avec CMB $\Rightarrow \nu_{\text{GZK}}$



Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

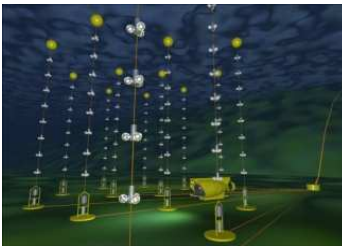
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

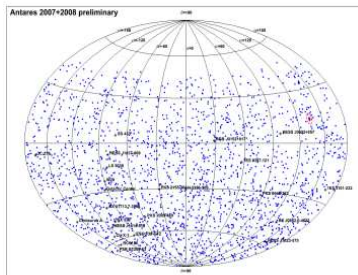
B) Les télescopes à neutrinos actuels

Principes de fonctionnement

Reconstruction

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives



Sources extragalactiques potentielles

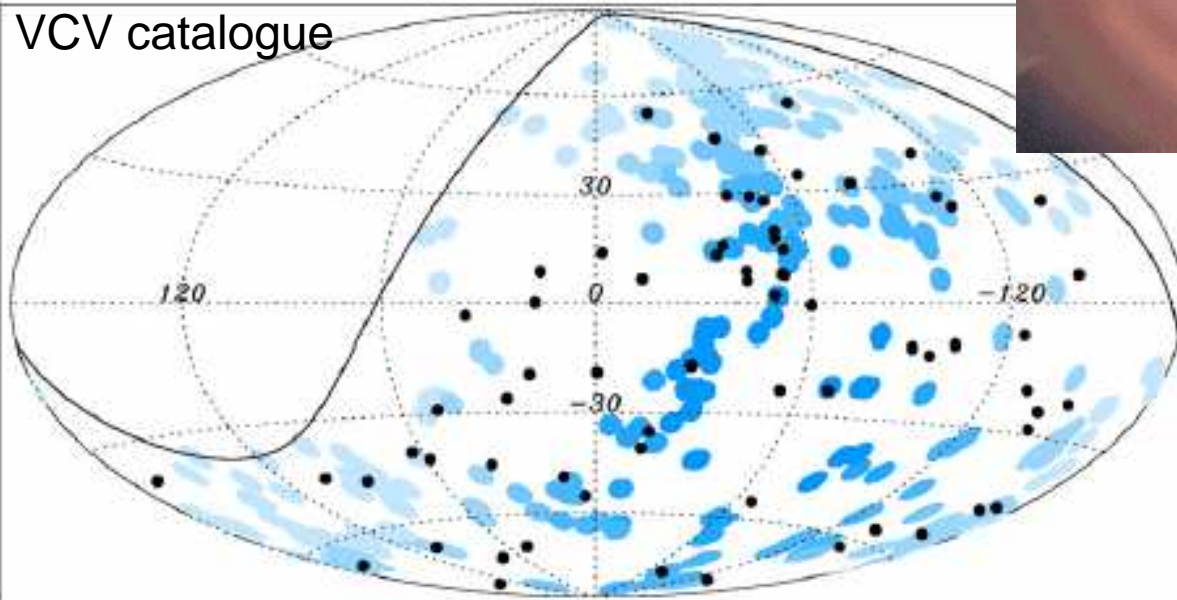
Noyaux actifs de galaxies (AGN)

Emission continue (mais variable)

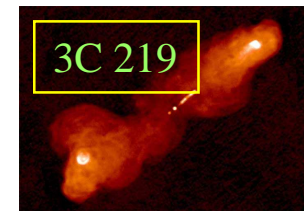
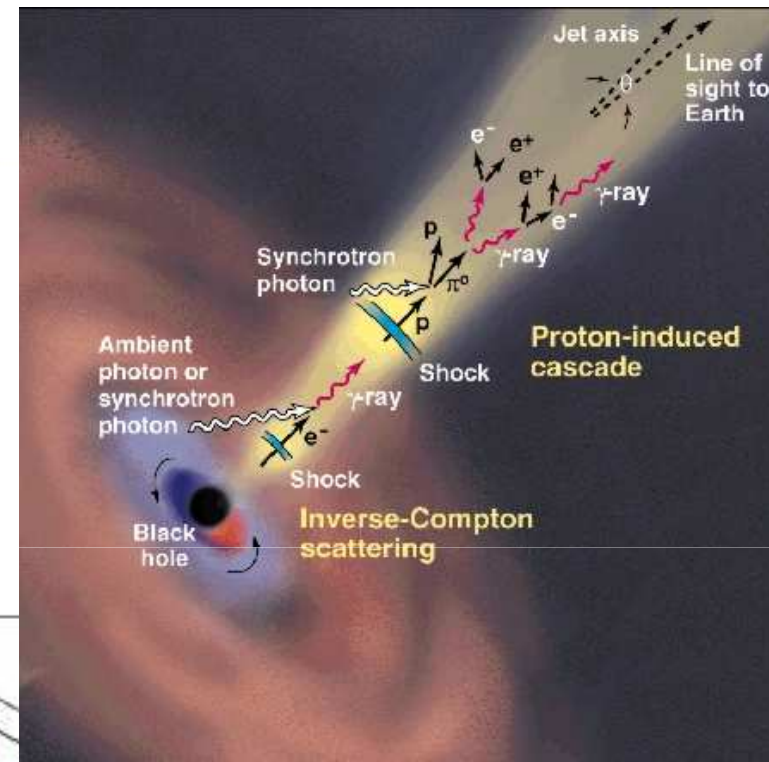
Luminosités observées

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

Corrélations AUGER 69 evts $E > 55$ EeV
VCV catalogue



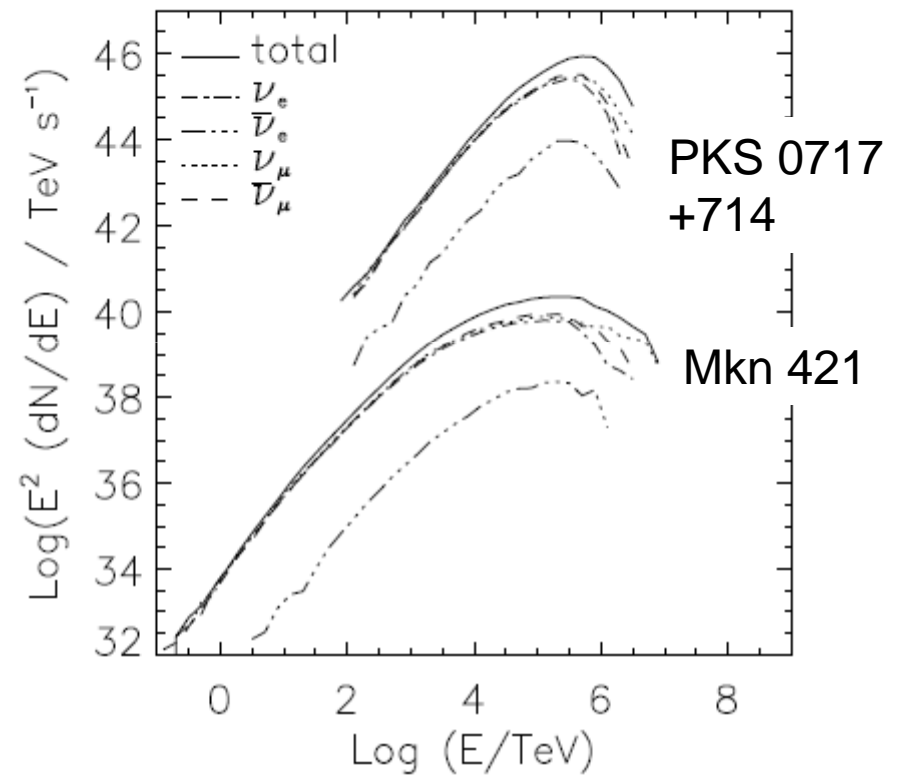
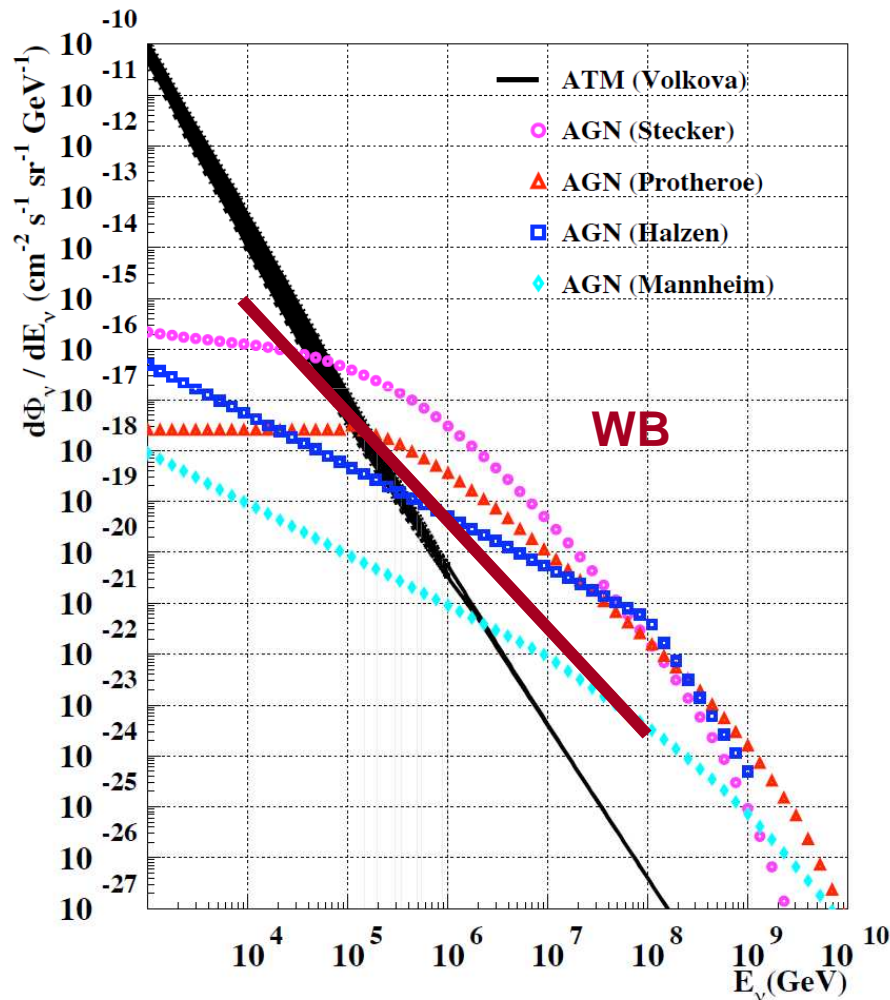
Astropart. Phys. 34 (2010)



La corrélation a baissé
de 68% (2007) à 38% (2010)
Il faut une statistique plus grande...

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

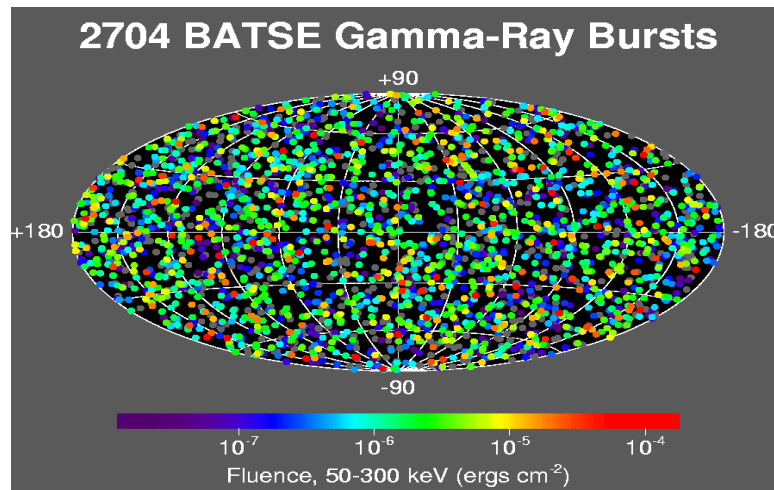
Sursauts gamma (GRB)

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

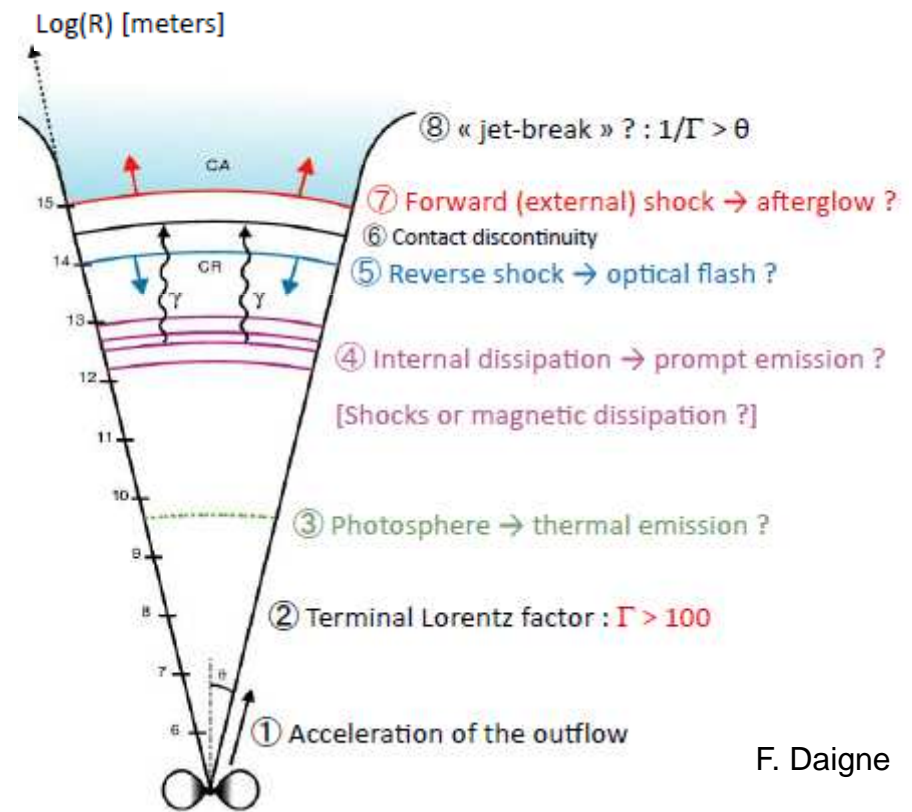
Contreparties $z_{\text{max}} = 8.3$ GRB 090423

Observés au GeV (Fermi)

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



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

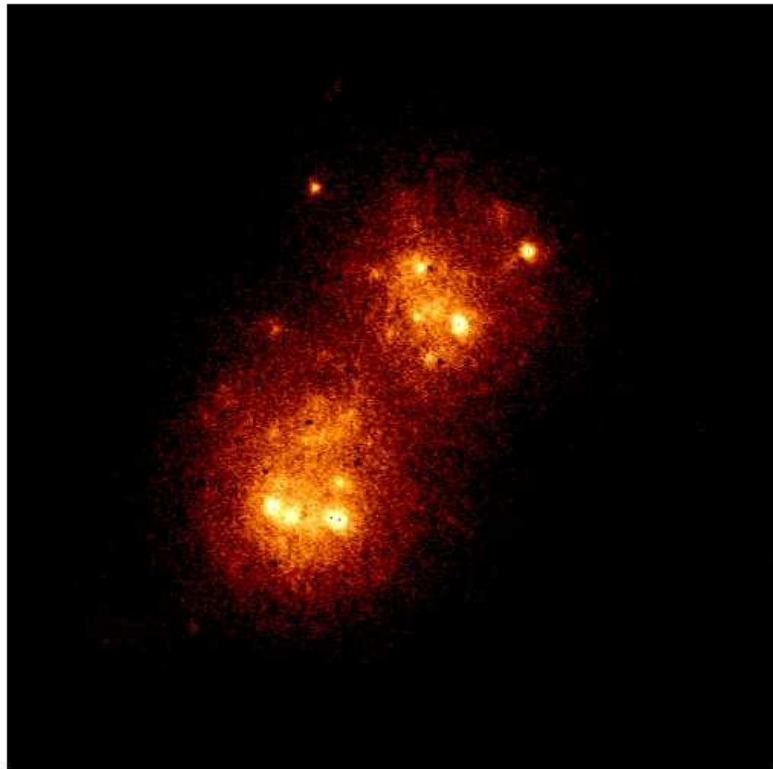


F. Daigne

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 ($\sim \text{PeV}$)

📖 Loeb & Waxman JCAP 05 (2006) 003

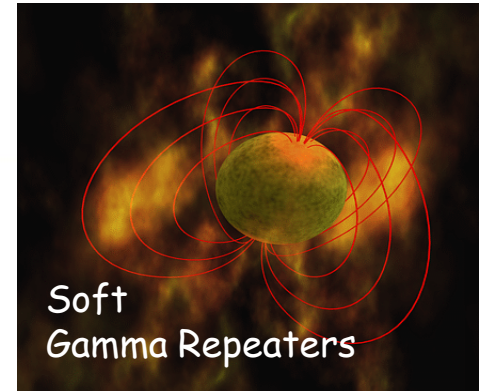
Sources Galactiques potentielles



- **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)

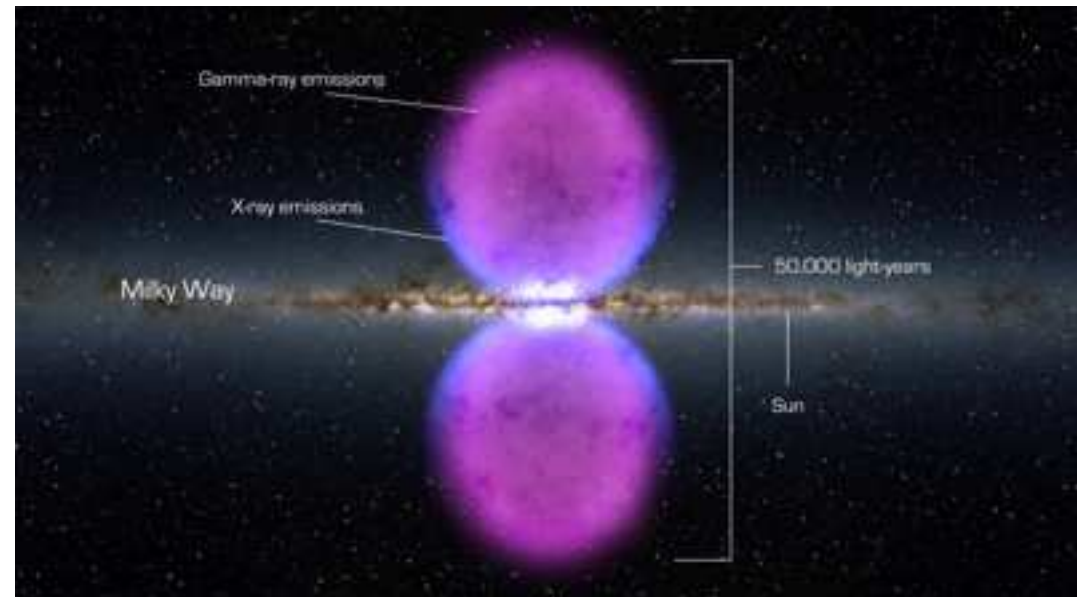
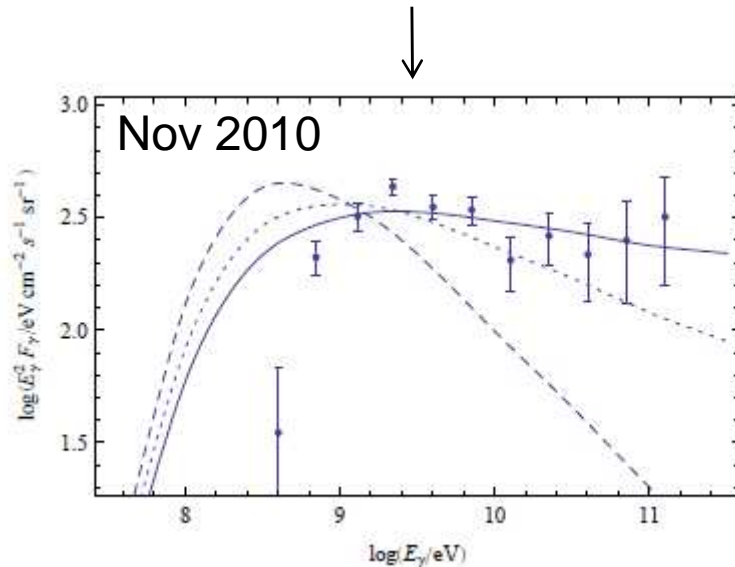
Fermi Bubbles

“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 $E^{-2.1}$



Prédictions théoriques

A considérer avec prudence...

Source Type	Distance (kpc)	E_ν (GeV)	$N_{\nu\mu}$ ($\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	Ref.
Supernovae Shocks pulsars	10	$< \sim 10^3$ $\sim 10^2 - 10^6$ $\sim 10^5 - 10^8$ $\sim 10 - 10^8$	~ 100 50 – 1000 $\sim 100 - 1000$ $< \sim 1000$	Waxman & Loeb 2001 Protheroe et al. 1998 Beall & Bednarek 2002 Nagataki 2004
Plerions Crab	0.5 – 4.4 2	$< 10^3 - 10^5$ $\sim 10^3 - 5 \cdot 10^5$ $\sim 10^3 - 5 \cdot 10^5$ $\sim 10^3 - 5 \cdot 10^5$ $10 - 10^6$	$\sim 1 - 12$ $< \sim 1$ a few ~ 1 $\sim 4 - 14$	Guetta & Amatto 2003 Bednarek 2003 Bednarek & Protheroe 1997 Bednarek 2003 Amato et al. 2003
Shell SNRs SNR RX J1713.7 Sgr A East	6 8	$< \sim 10^4$ $< \sim 10^5$	~ 40 ~ 140	Alvarez-Muñiz & Halzen 2002
Pulsars + Clouds Galactic Centre Cygnus OB2	8 1.7	$10^4 - 10^7$ $> \sim 10^3$ $10^4 - 10^7$ $< \sim 10^6$	$\sim 2 - 30$ a few ~ 0.5 ~ 4	Bednarek 2002 Torres et al. 2004 Bednarek 2003 Anchordoqui et al. 2003
Binary systems A0535+26	2.6	$3 \cdot 10^2 - 10^3$	a few	Anchordoqui et al. 2003
Microquasars	1 – 10	$10^3 - 10^5$	1 – 300	Distefano et al. 2002
Magnetars	3 – 16	$< \sim 10^5$	1.7 (0.1/ $\Delta\Omega$) (5/d ²)	Zhang et al. 2003

Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

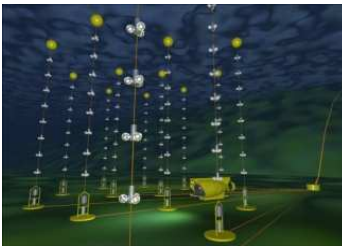
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

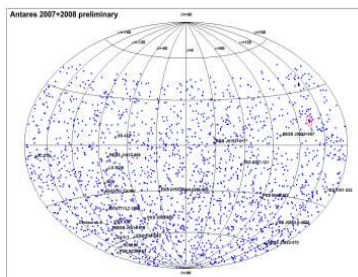
B) Les télescopes à neutrinos actuels

Principes de fonctionnement

Reconstruction

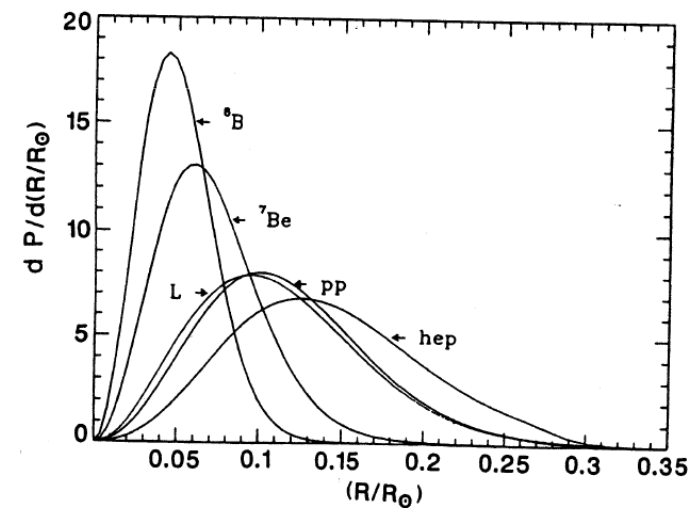
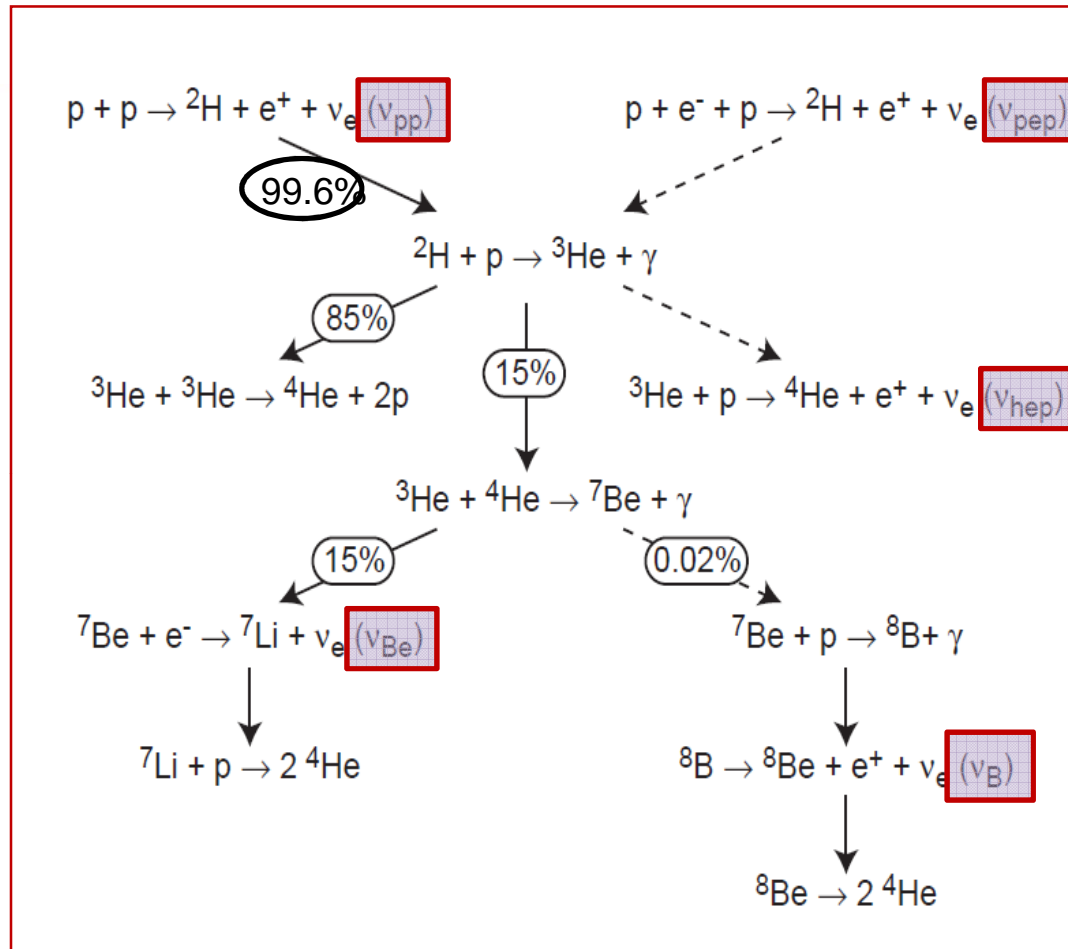
Calibration

Sélection choisie de quelques résultats



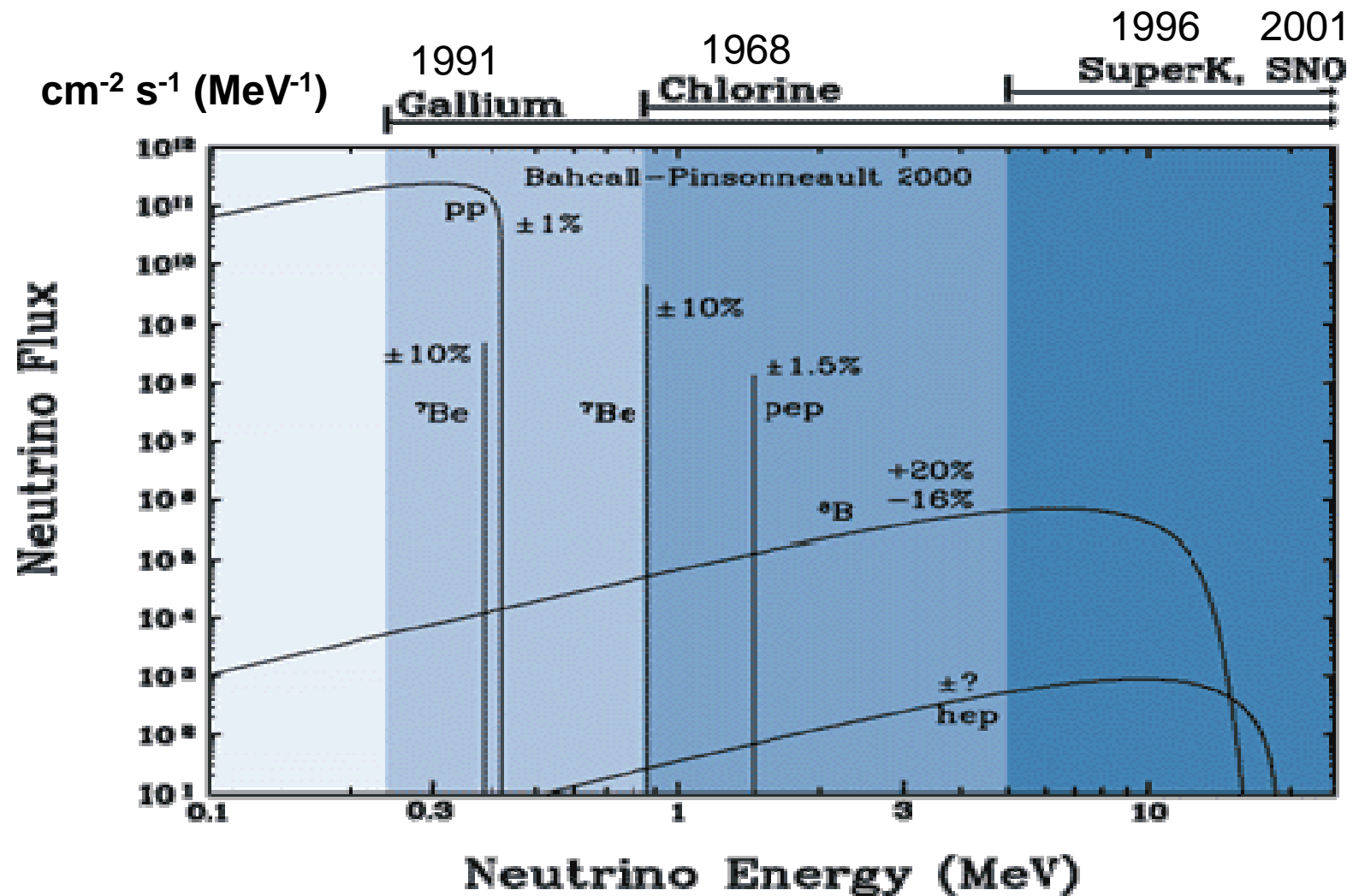
Neutrinos solaires (~MeV)

Cycle pp : 98.4% de l'énergie



Note : le taux de production de neutrinos et la luminosité solaires ont un maximum d'intensité au même endroit ➡ **forte contrainte**.

Neutrinos solaires

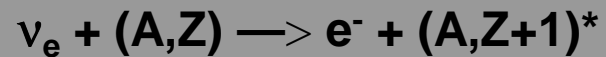


$$\Phi(pp) \approx \text{cte} \times T^{-1.2} \quad \Phi(hep) \approx \text{cte} \times T^{3-6} \quad \Phi({}^7\text{Be}) \approx \text{cte} \times T^8 \quad \Phi({}^8\text{B}) \approx \text{cte} \times T^{18}$$

Detection des neutrinos solaires

2 types de méthodes:

Expériences radio-chimiques



- On compte le nombre d'atomes fils
- Le taux de production est $R = N \int \Phi(E) \sigma(E) dE$

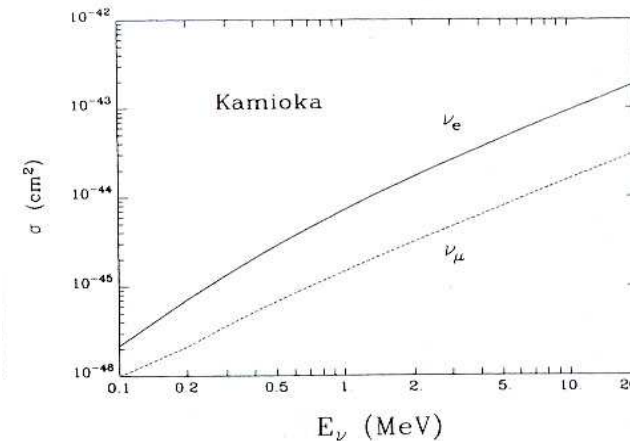
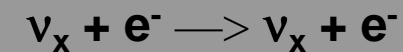
Nombre d'atomes cible $\sim 10^{30}$ $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$

$\Rightarrow \sim 10^{30}$ atomes nécessaires pour 1 ν /jour
 \Rightarrow cible : tonnes

1 SNU = 10^{-36} capture atom $^{-1}$ sec $^{-1}$

Pas d'information temps, E, direction des ν

Expériences temps réel



- L'électron diffusé est détecté par la lumière Tcherenkov émise.
- Diffusion avant: E estimable.
- $E_{\text{seuil}} \Rightarrow$ neutrinos du B seulement
 \Rightarrow cible : kilo tonnes

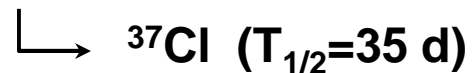
The Homestake experiment

1968 : First experiment detecting solar neutrinos
Homestake gold mine, South Dakota, USA
1480m underground

615 tons de C_2Cl_4 (Perchloroethylene)
~ 380 000 litres



Liquid (cheap,
commercially available)



$$E_{\text{thresl}}=0.8 \text{ MeV} > E_{\text{pp}}$$

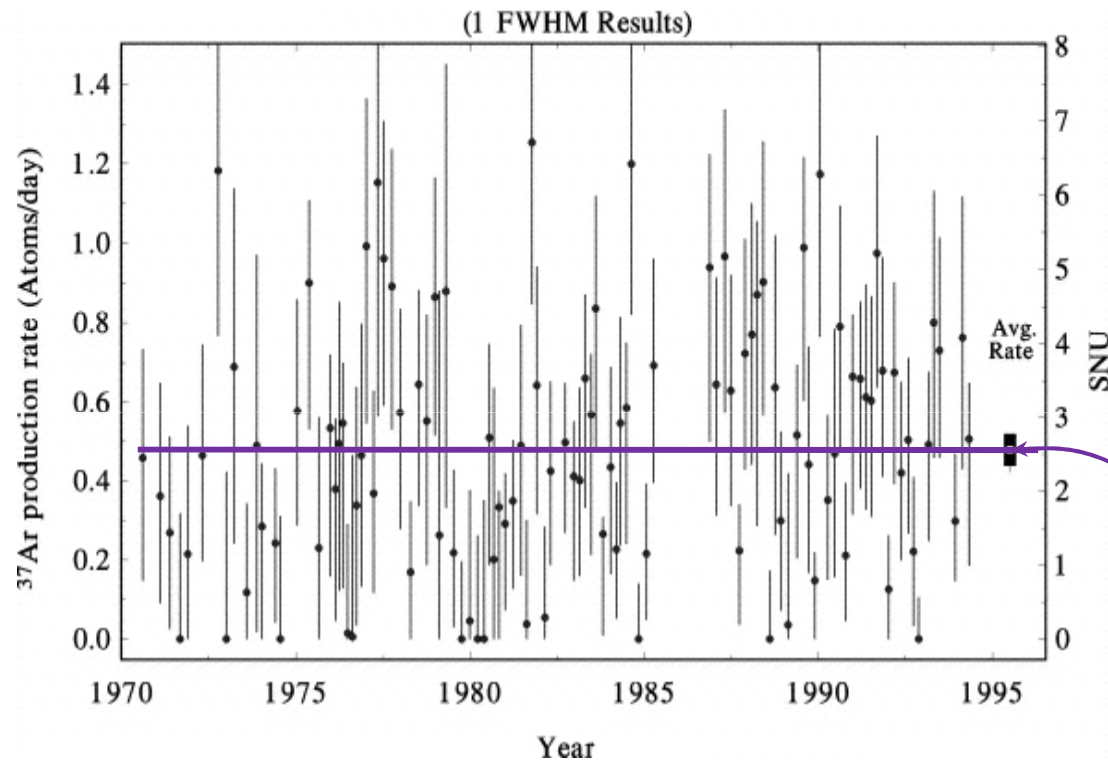
Principle of a cycle :

- Exposition (~2 months)
- Extraction of the produced Ar
 - He flushing, Ar trapping (charcoal)
 - Controlled by adding inert ${}^{38}\text{Ar}$
- Counting
 - Mini proportional counters $< \sim \text{cm}^3$
 - Observation of Ar disintegration (e_{AUGER})
 - Energy deposit and signal rise time



The Homestake experiment

➤ **25 years of data (108 runs)** 📖 B.T.Cleveland et al., Ap. J. 496 (1998) 505



R. Davis, Nobel prize in 2002

Average result:
 2.56 ± 0.20 SNU
so 1/3 of
predictions
 $(7.6 \pm 1.2$ SNU)

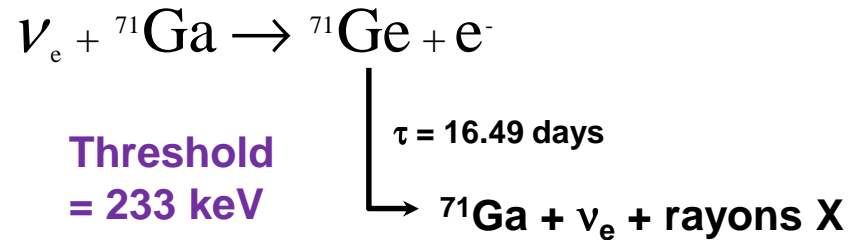
Around 750 disintegrations have been observed, which make ~ 0.5 per day

Early 1970 (~10 extractions): the birth of the “solar neutrino problem”
A confirmation was mandatory 👉 Gallium experiments

Radiochemical Gallium experiments



Gran Sasso laboratory
1991-1997 : Gallex
then called GNO

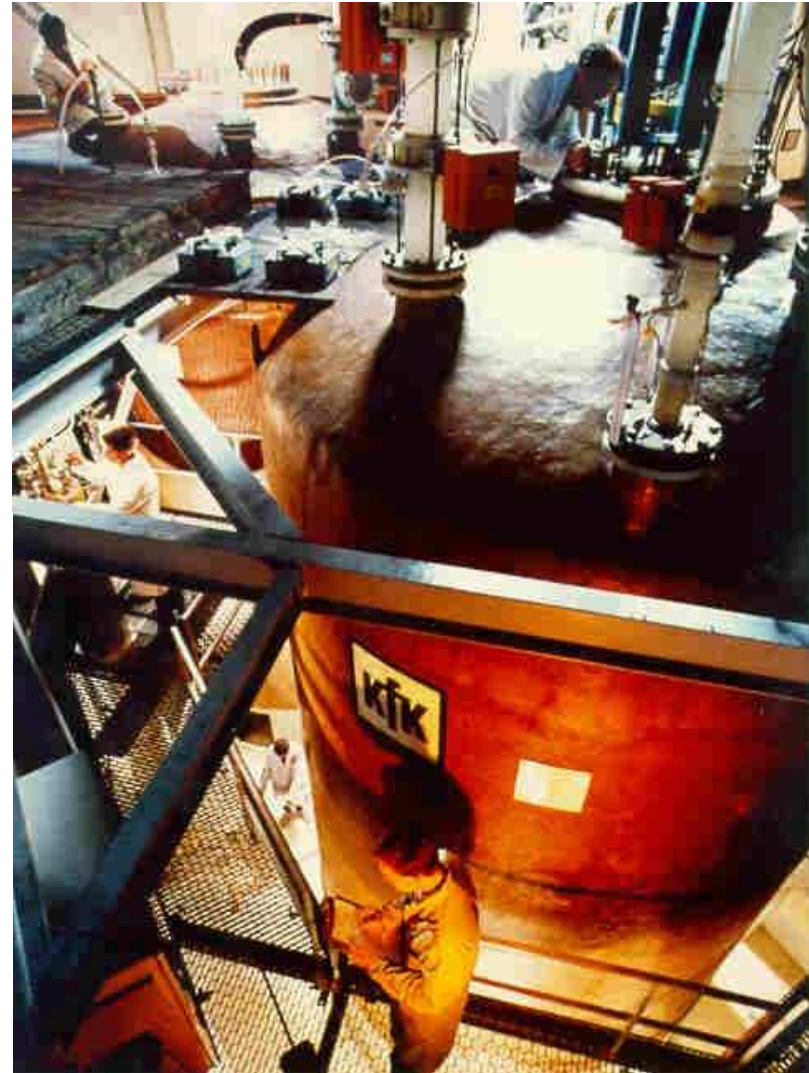
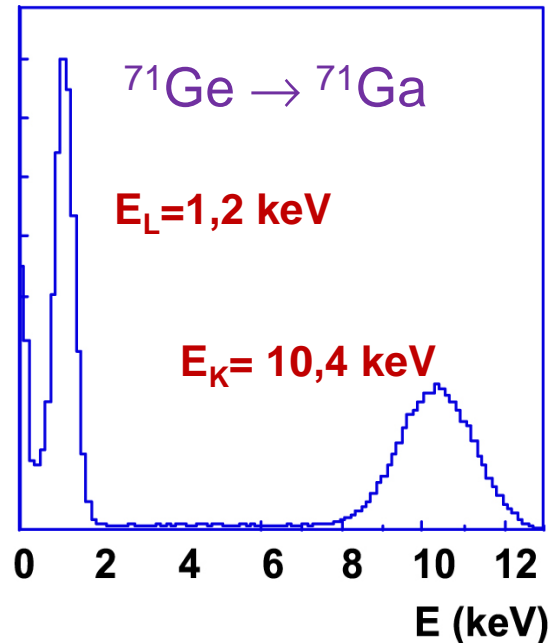


⇒ Sensitive to primordial ν_{pp}

Disintegration through EC
L & K capture

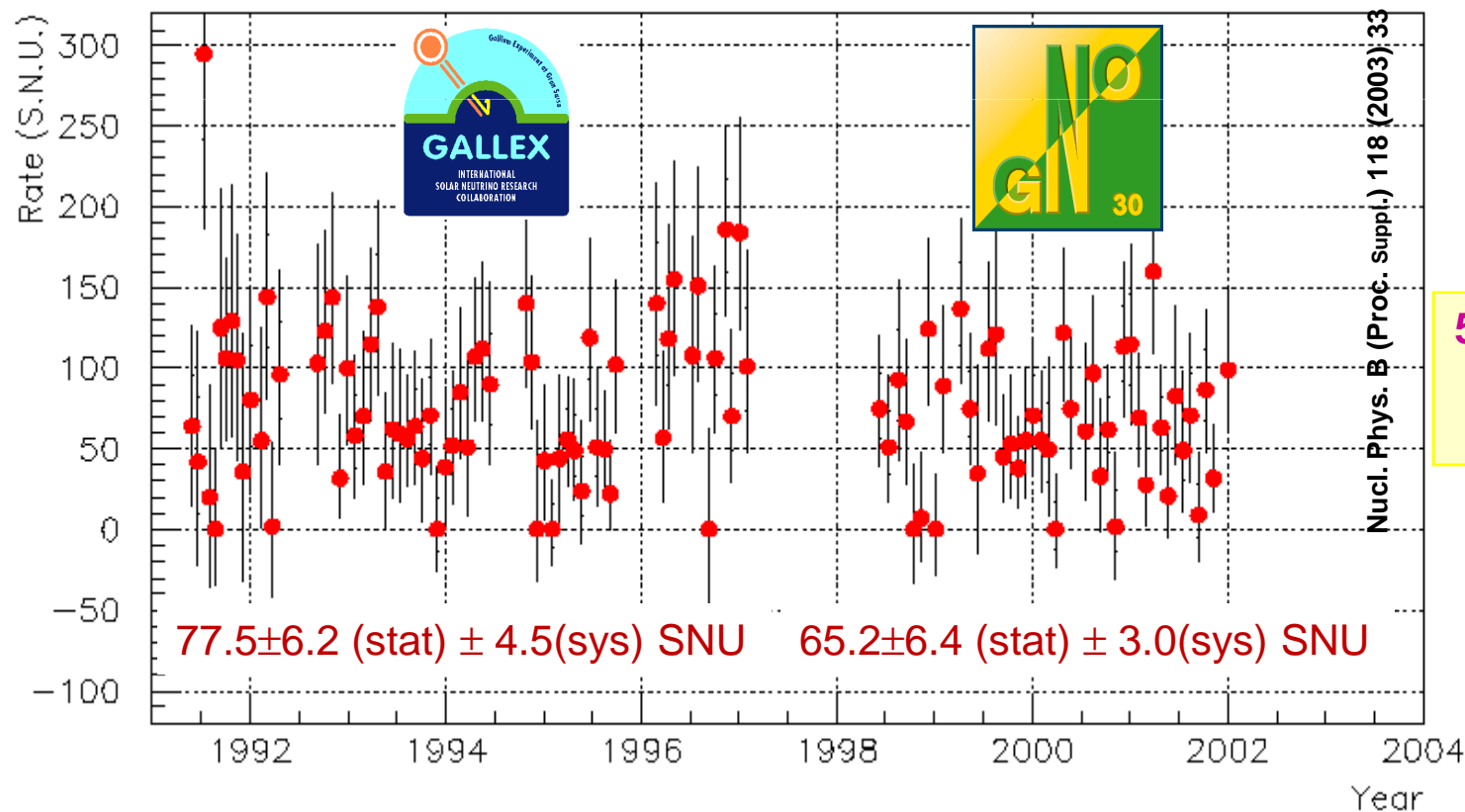
30 t of gallium in
54 m³ of GaCl₃ + HCl

↓
1,2 Ge atom
expected per day



Observations

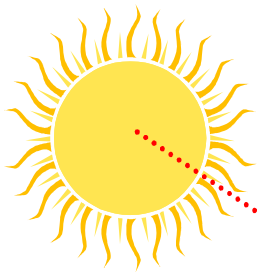
Bruit de fond	Contribution (SNU)
Interactions de muons atmosphériques dans le gallium [1][2]	$2,8 \pm 0,6$
Interactions des neutrons rapides de la radioactivité ambiante [1][3][4]	$0,15 \pm 0,10$
Désintégrations de ^{69}Ge produits par les neutrinos du ^8B et les muons, prises pour des désintégrations de ^{71}Ge [23]	$1,0 \pm 1,0$
Radon à l'extérieur des compteurs	$0,3 \pm 0,3$
Sous-total	$4,3 \pm 1,2$
Inefficacité des coupures au radon dans le compteur	$2,2 \pm 1,2$
Total à soustraire au taux mesuré	$6,5 \pm 1,7$



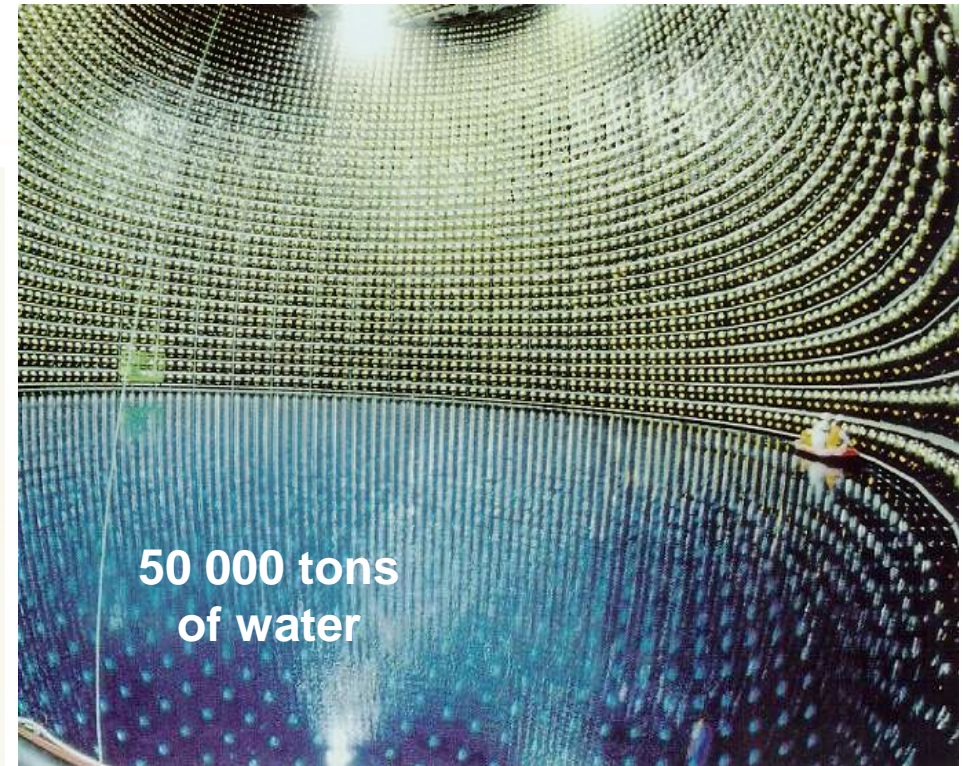
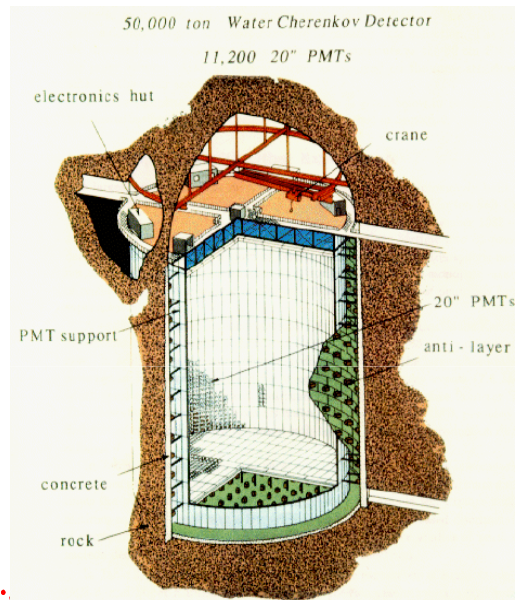
56% of the expected
solar neutrinos
(128 \pm 8) SNU

Real time experiments

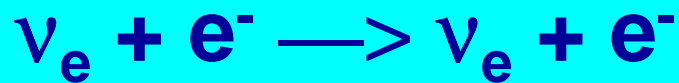
Kamiokande 1987-1996
SuperKamiokande 1996 -
2700m we



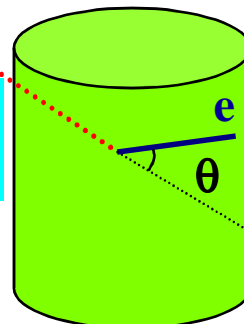
neutrino



11 146 PMTs 20 ''



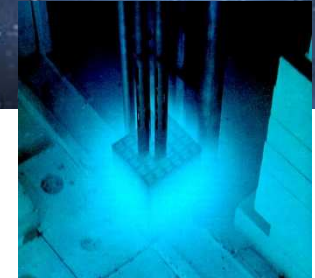
Threshold~6.5 MeV



The diffusion allows to know the direction of the incoming neutrino thanks to:

- The exact arrival time
- The recoil electron energy spectrum which is correlated to the one of the neutrino

Effet Tcherenkov

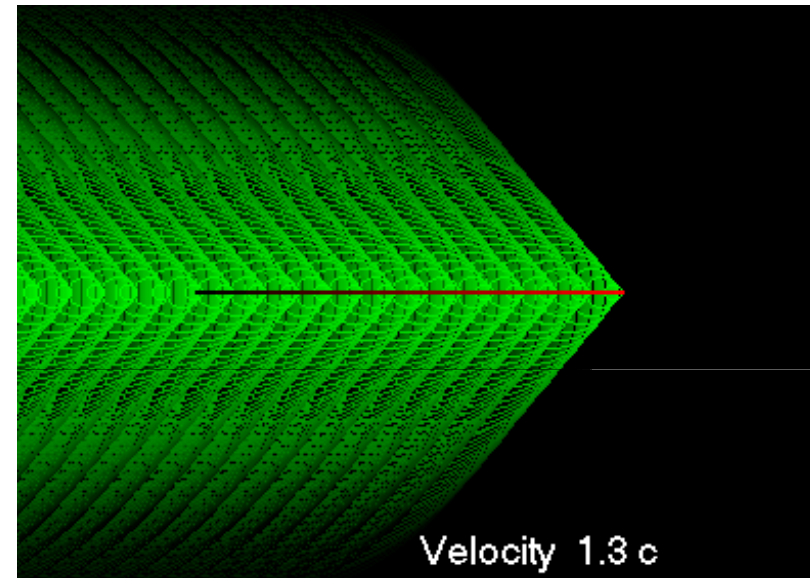


- A charged particle traversing through an insulator (dielectric) medium, e.g. water or glass, with a velocity v greater than the velocity of light in this medium ($v > c/n$), emits photons in a cone of aperture $2\theta_c$, where θ_c depends on the speed β of the particle :

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

The threshold velocity under which no coherent effect is detectable is :

$$v_s = \frac{1}{n}; \quad \gamma_s = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}$$



The number of Cherenkov photons emitted along the charged particle trajectory, though not large, can be easily detected with photomultipliers.

The number of Cherenkov photons emitted in the range 400 – 700 nm, to which photomultipliers are sensitive, is:

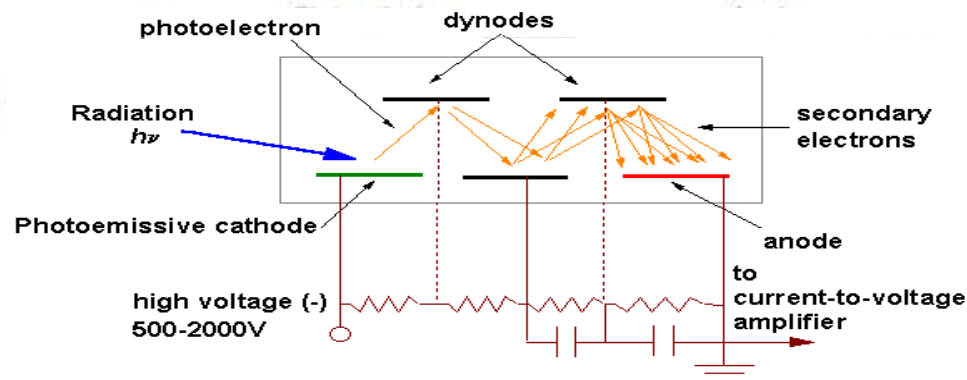
$$N_c \approx 5 \cdot 10^4 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \approx 5 \cdot 10^4 \sin^2 \theta_c \text{ (photons m}^{-1}\text{)}$$

Photomultiplicateurs

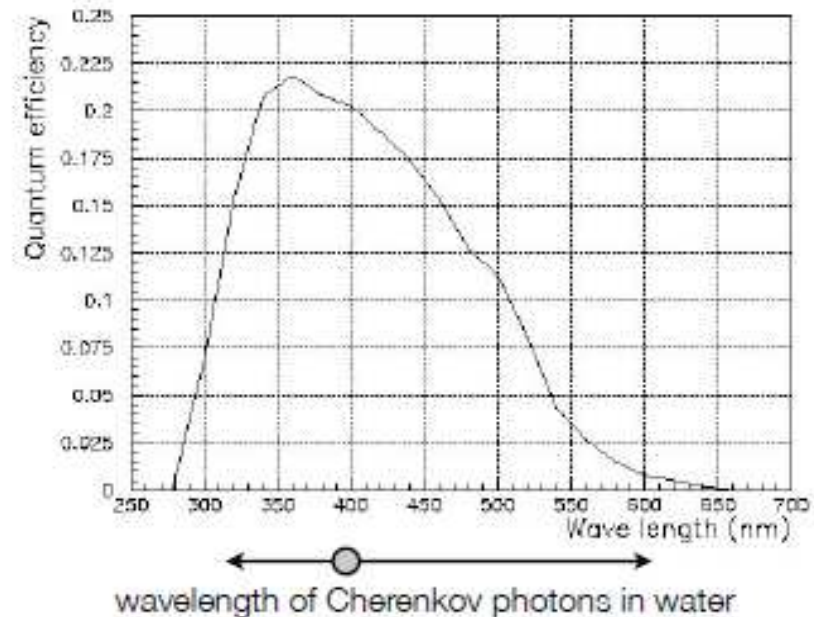
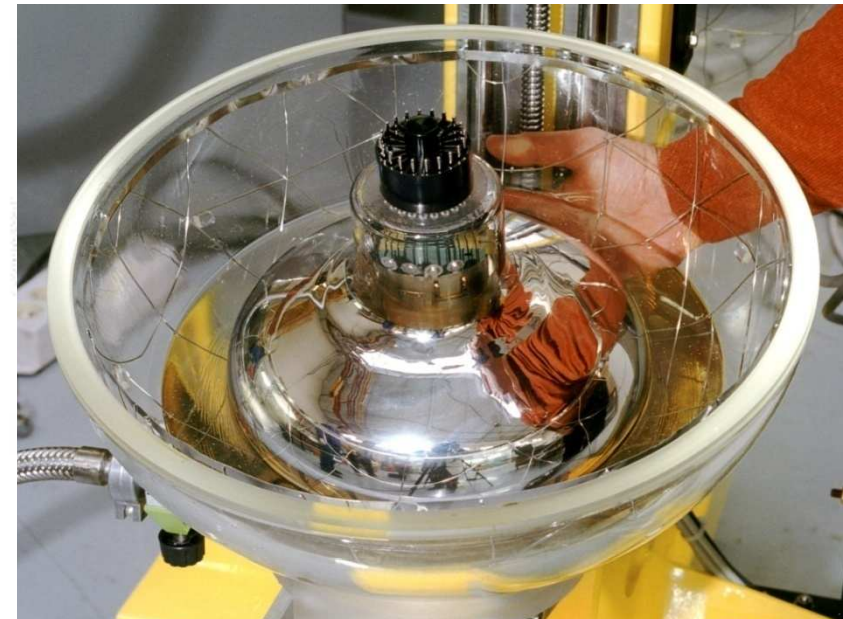
Conversion d'un signal lumineux en
signal électrique :
effet photoélectrique + amplification

Photon incident on the *photocathode* produces a *photoelectron* via the photoelectric effect. Probability to produce a photoelectron is called the *quantum efficiency* of the PMT.

Output signal is seen as a current delivered to the *anode*. Typical gains are 10^6 yielding pC-scale currents



A series of plates called *dynodes* are held at high voltage by the *base* such that electrons are accelerated from one dynode to the next. At each stage the number of electrons increases. Probability to get first electron from the photocathode to the first dynode is called the *collection efficiency*.



Exercise

Q: Estimate the vertex resolution for a water Cherenkov detector for a 10 MeV electron produced by the elastic scatter of a solar neutrino. Assume 40% of the detector walls are covered by PMT's and that the PMT's have an average of 25% efficiency.

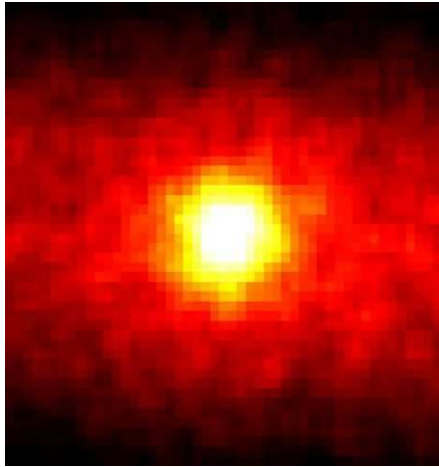
A: A 10 MeV electron will go about 5 cm in the tank making about $N = 370 \cdot \sin(42^\circ)^2 = 160$ photons. Of those $(0.4 \cdot 0.25) = 0.1$ will be detected. So I have ~ 16 detected photons each with a timing resolution of 2 ns $\sim (60 \text{ cm} \cdot 1.33) = 80 \text{ cm}$ since the speed of light is $n \cdot 30 \text{ cm/ns}$. This gives a final resolution of about: $80 \text{ cm}/\sqrt{16} = 20 \text{ cm}$.

Better use $N \approx 5 \cdot 10^2 \sin^2 \theta_c \text{ (photons cm}^{-1}\text{)}$

Q: Compare the detection efficiencies for the Kamiokande (20% photocathode coverage) and IMB-1 (1% photocathode coverage) for a 15 MeV super-nova neutrino

A: 15 MeV corresponds to about 240 photons which is about 0.6 detected photons on average in IMB and 12 in Kamiokande. Efficiency for detection is roughly $1 - \exp(-0.6) = 45\%$ for IMB and $1 - \exp(-12) = 99.99\%$ for Kamiokande.

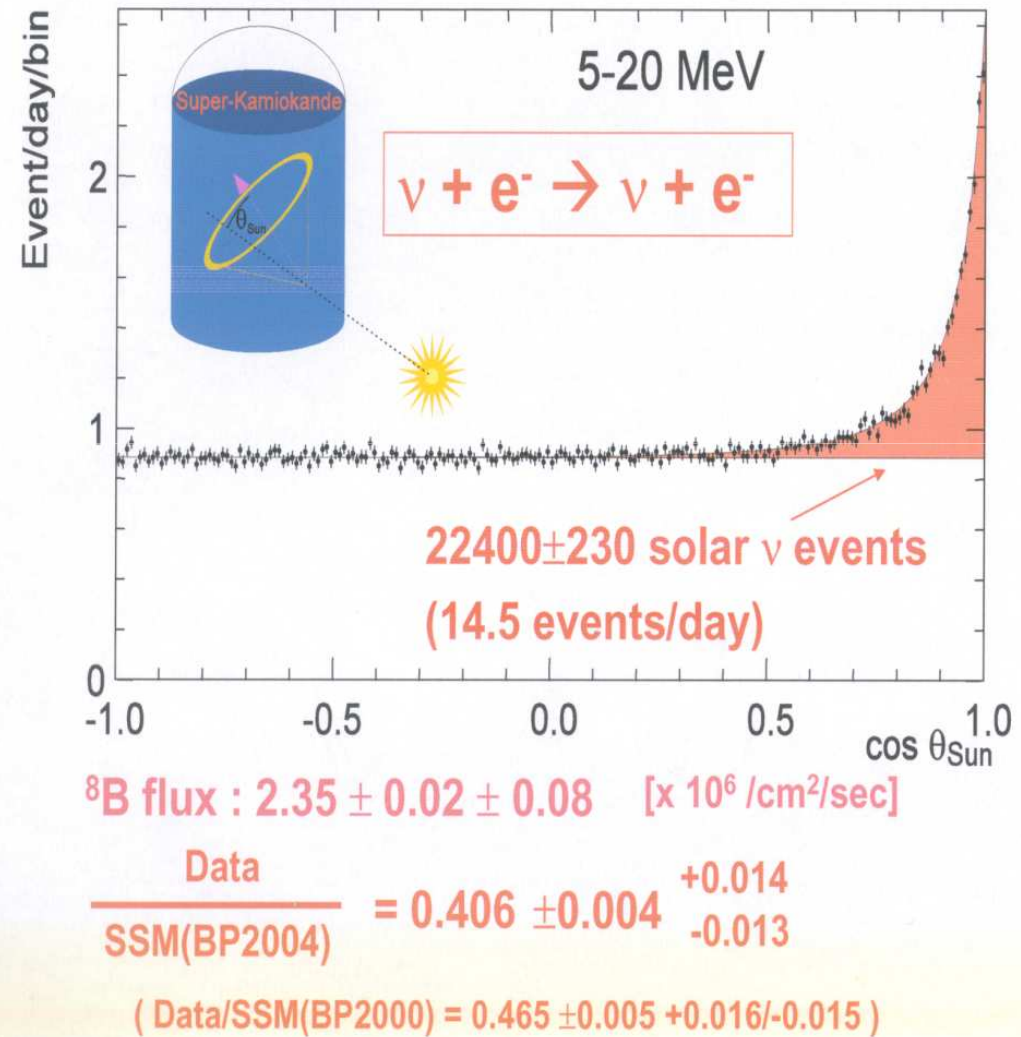
Detection with SuperK



- In 1500 days, SuperK detected 22000 events while 48000 were predicted.

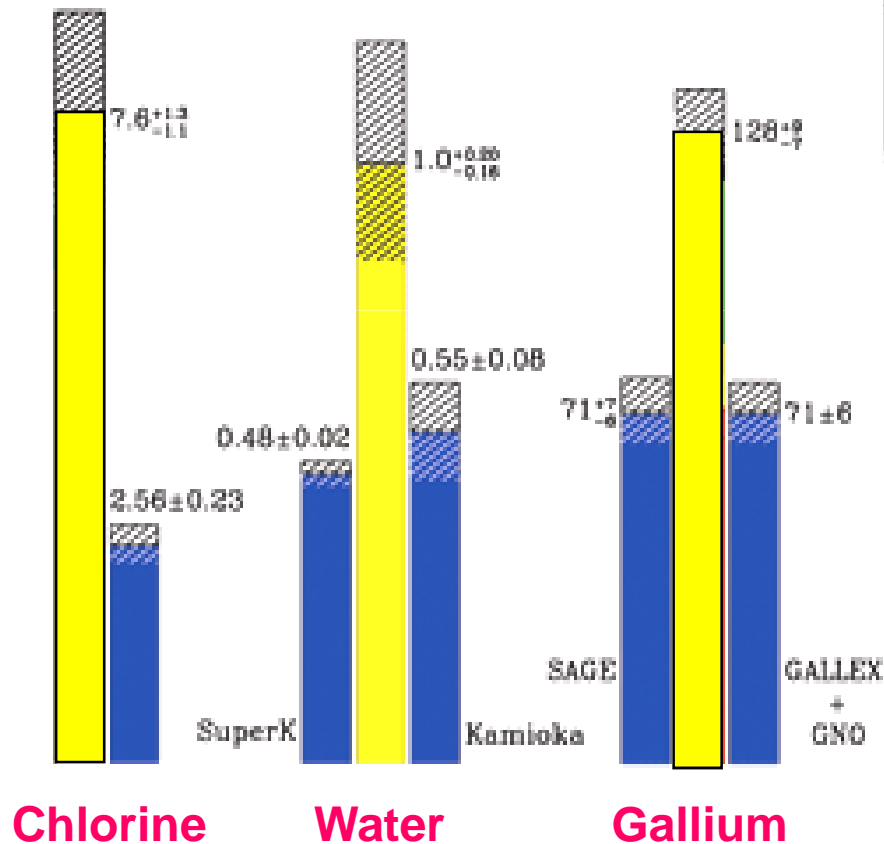
- This is the so-called *deficit* of solar neutrinos

Already seen with Homestake and Gallex/Sage experiments.



Le problème des neutrinos solaires

■ Resultats ■ Prédictions (BP)



Expérience	Expérience / Prédiction	Prédictions		
		ν_{pp}	ν_{Be}	ν_B
Gallium	$\sim 60\%$	60%	30%	10%
Chlore	$\sim 30\%$		20%	80%
SuperK	$\sim 50\%$			100%



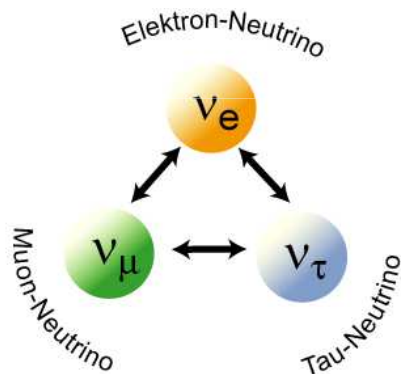
Si le modèle solaire est correct, les 3 résultats sont incompatibles.
Il faut supprimer une partie des ν_{Be} et une partie des ν_B ...

Printemps 2001

Solutions possibles

- Modification de la température centrale du soleil ☞ insuffisant
- Oscillations des neutrinos (Pontecorvo 1956) : Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata mixing matrix

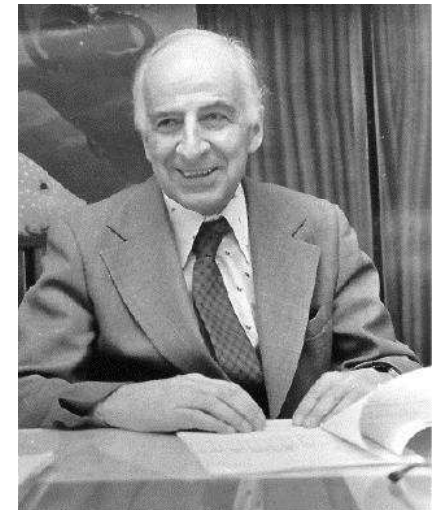
Flavor eigenstates



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

$$\nu_l = \sum_m U_{lm} \nu_m$$

Mass eigenstates

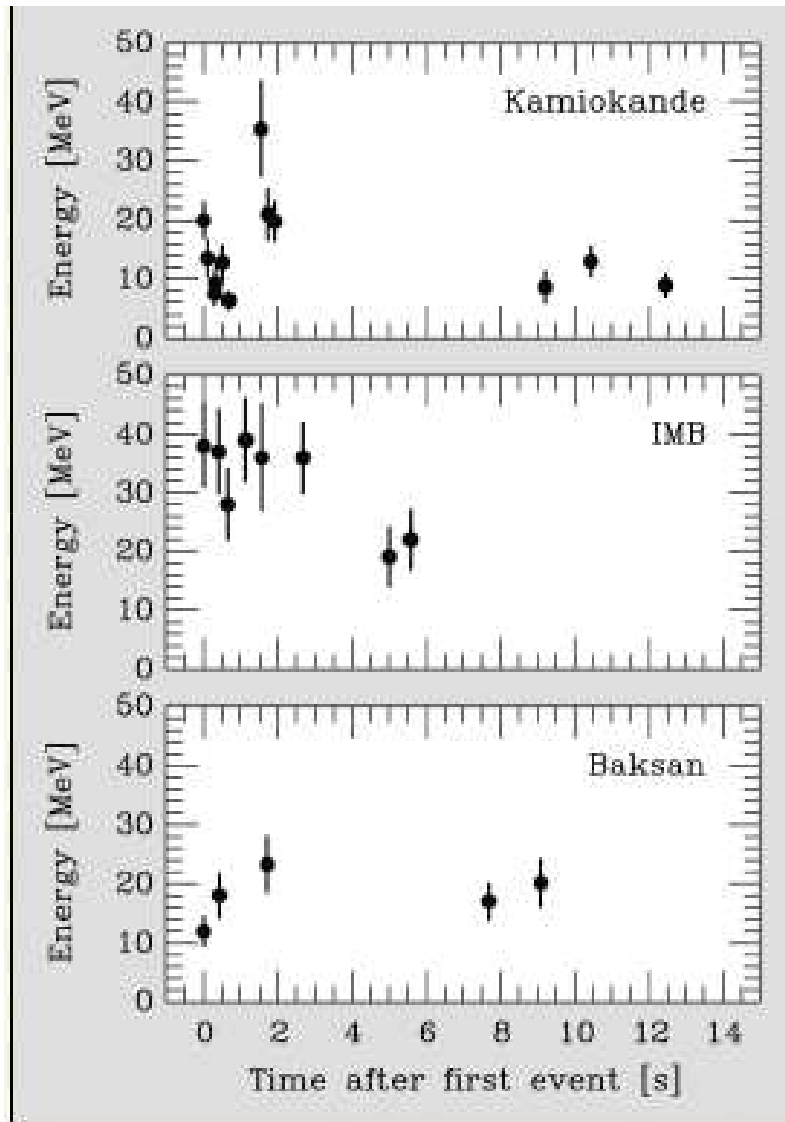


Bruno Pontecorvo

There are only 3 flavors of neutrino,
but the flavor eigenstates need not to coincide with the mass eigenstates
(or propagation eigenstates)

⇒ We have then 2 distinct bases connected though a unitary 3x3 matrix

SN 1987A : les neutrinos extraterrestres existent!



Neutrinos from
SN1987A
25 events in 12 s

Neutrinos extraterrestres: Nobel 2002



The Nobel Prize in Physics 2002

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"



Raymond Davis Jr.

🕒 1/4 of the prize

USA

University of Pennsylvania
Philadelphia, PA,
USA

b. 1914



Masatoshi Koshihara

🕒 1/4 of the prize

Japan

University of Tokyo
Tokyo, Japan

b. 1926



Riccardo Giacconi

🕒 1/2 of the prize

USA

Associated Universities Inc
Washington, DC,
USA

b. 1931
(in Genoa, Italy)

Neutrinos extraterrestres

(MeV)

Davis et al. 1955 – 1978

Koshihara et al., 1987 – 1988

Présence de
neutrinos à plus
haute $E > \text{GeV}$?

Galactique
Extragalactique

Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

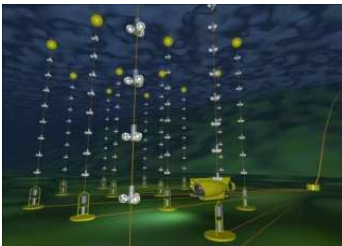
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

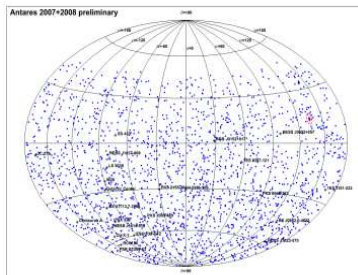
B) Les télescopes à neutrinos actuels

Principes de fonctionnement

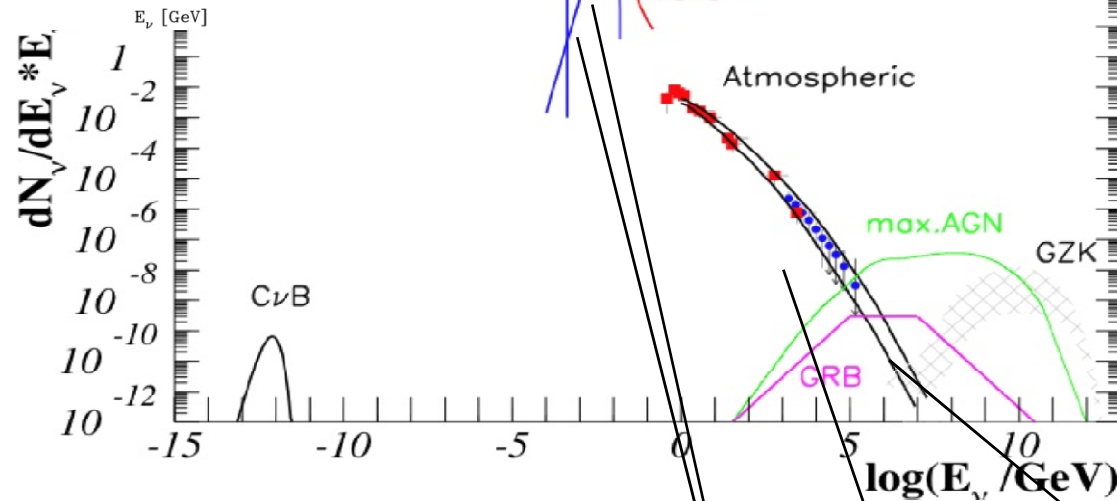
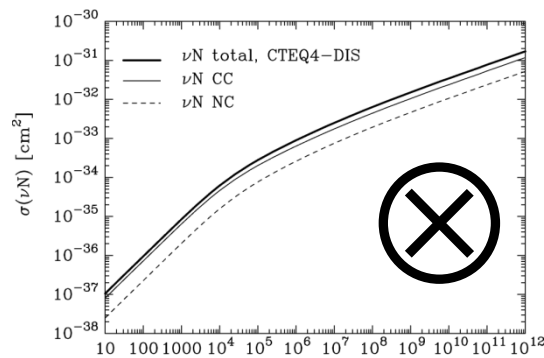
Reconstruction

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives

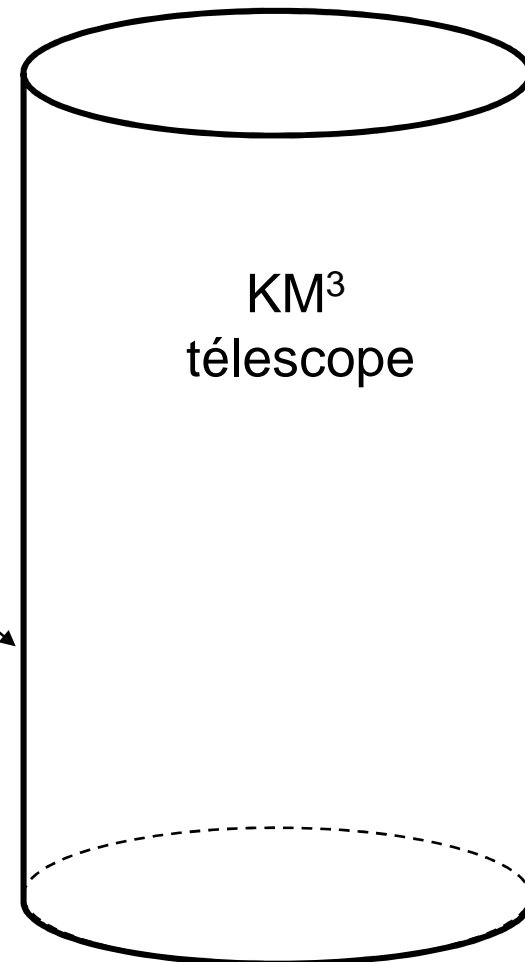
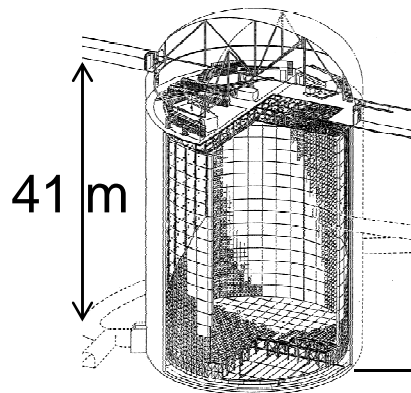


Du MeV au PeV : la longue marche



Le défi de la détection à HE

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



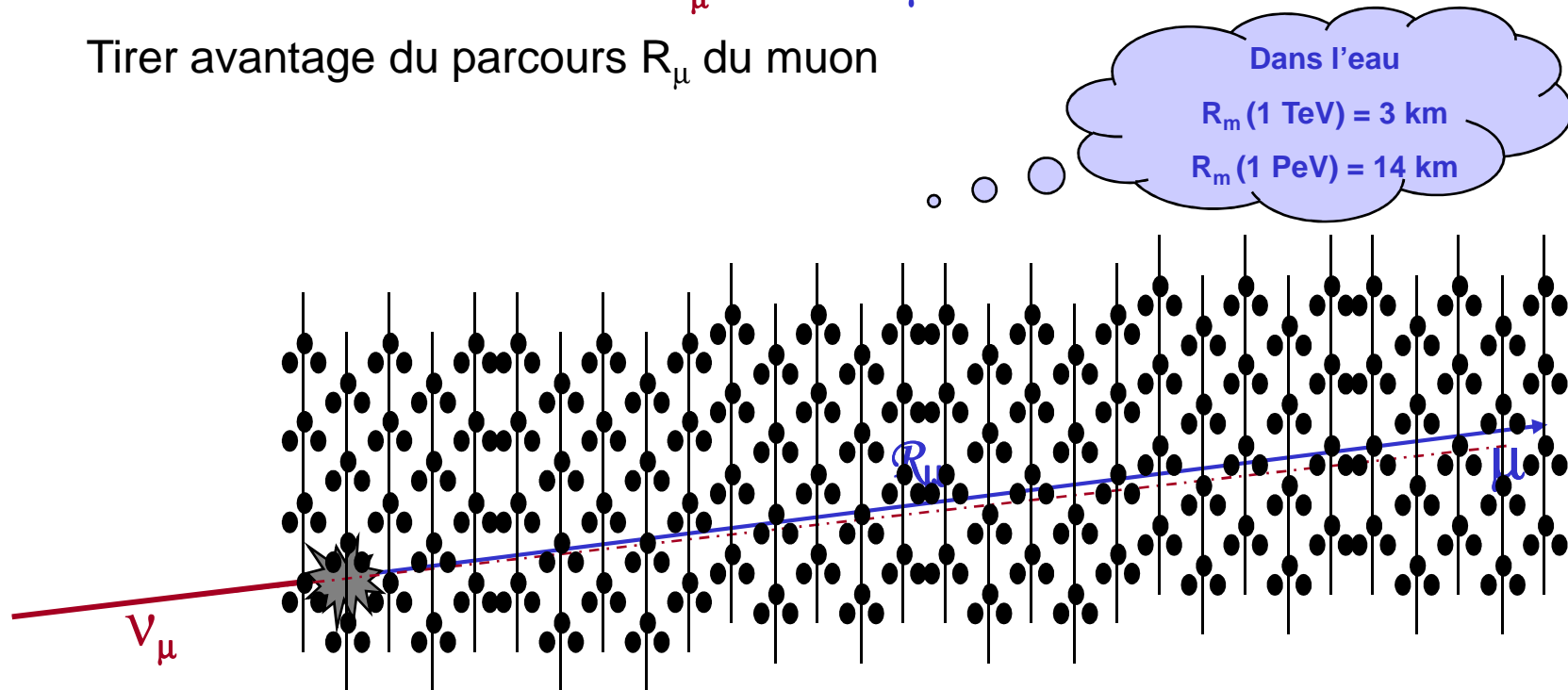
Les ν_μ mieux adaptés pour la détection



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



- 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

Interaction
courant chargé

μ

Signal = muons montant

Cône
Tcherenkov

42°

Lignes de
détection

$\times 10^6$

Réseau tri-dimensionnel
de photo-multiplicateurs

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

© François Montanet

Detection rate

The number of muon events in units of detection area **A** and observation time **T** is:

$$\frac{N_{\mu}(E_{\mu,\min}, \vartheta)}{AT} = \int_{E_{\mu,\min}}^{E_{\nu}} dE_{\nu} \Phi_{\nu}(E_{\nu}, \vartheta) P_{\nu\mu}(E_{\nu}, E_{\mu,\min}) e^{-\sigma_{\text{tot}}(E_{\nu}) N_A Z(\vartheta)}$$

- **Neutrino flux spectrum**
- **Probability to produce a detectable ($E_{\mu} > E_{\min}$) muon**
- **Earth transparency to HE neutrinos \rightarrow >PeV neutrinos search for “horizontal” tracks**

$$P_{\nu \rightarrow l} = \mathcal{N} \int_{E_{\min}}^{E_{\nu}} dE_l \frac{d\sigma}{dE_l} R_l(E_l, E_{\min})$$

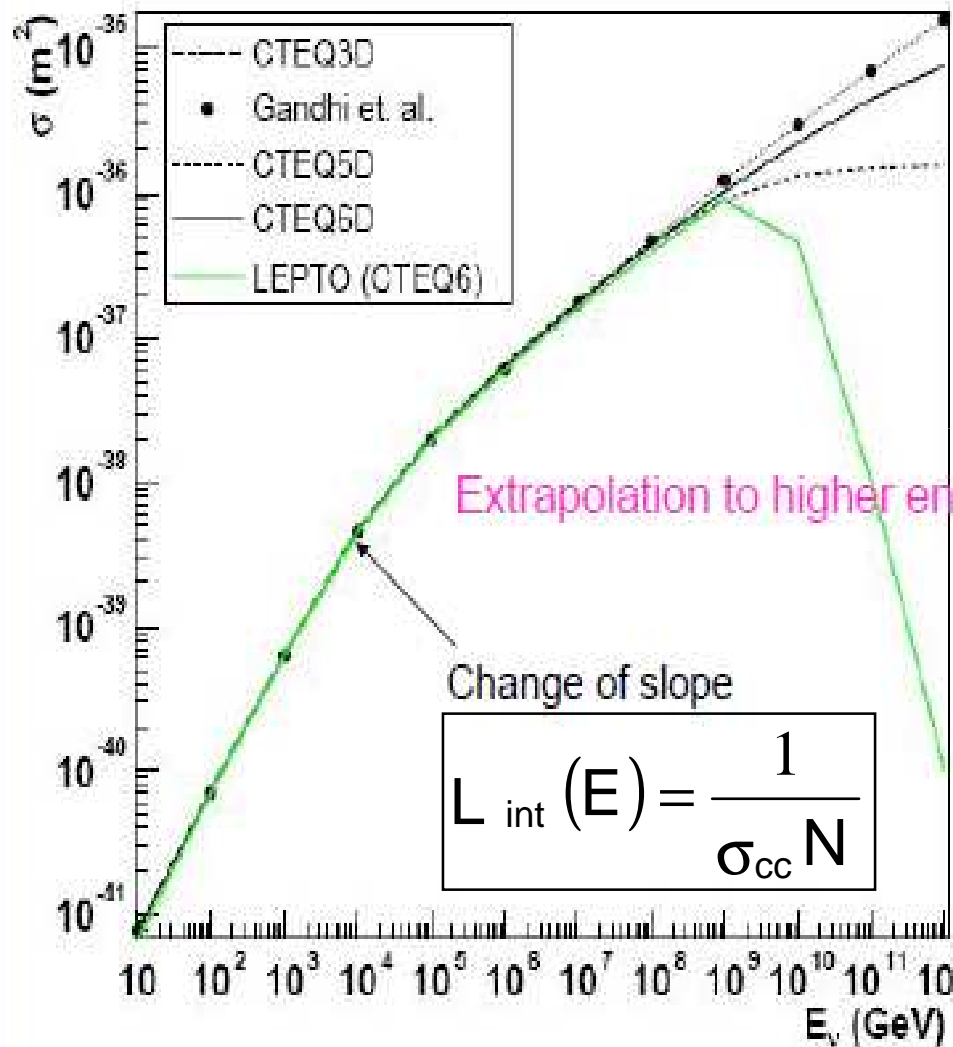
Range of lepton of energy E_l before it reaches E_{\min}

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{2G_F^2 m_N E_{\nu}}{\pi} \left(\frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2} \right)^2 [xq(x, Q^2) + x\bar{q}(x, Q^2)(1-y)^2]$$

où :

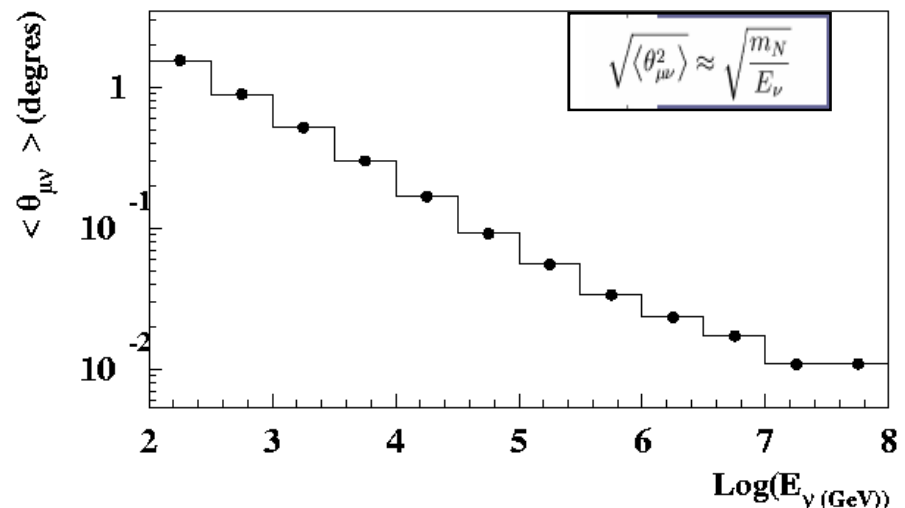
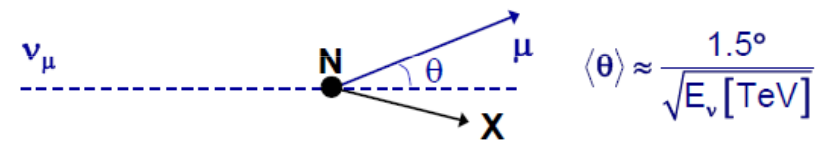
- m_N et M_W sont les masses respectives du nucléon et du boson intermédiaire
- Q est l'impulsion de transfert
- $\nu = E_{\nu} - E_l$ est l'énergie hadronique (fraction d'énergie du neutrino emportée par le boson) dans le référentiel du laboratoire
- $x = \frac{Q^2}{2m_N \nu}$ est la fraction d'impulsion emportée par le parton,
- $y = \frac{\nu}{E_{\nu}}$

Deep inelastic scattering

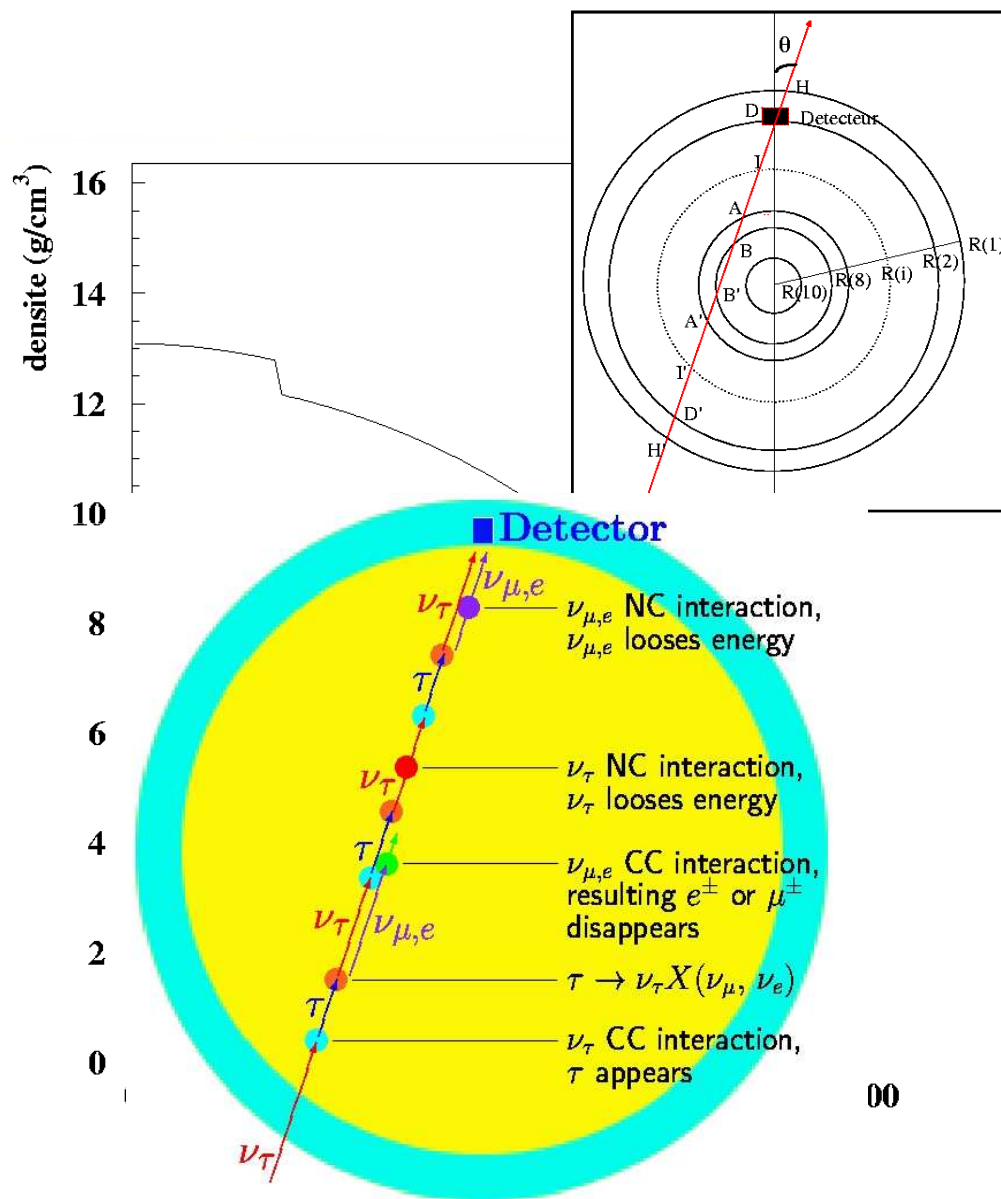


$$\sigma_{\nu N} \begin{cases} \propto E_\nu & E_\nu \leq 5 \text{ TeV} \\ \propto E_\nu^{0.4} & E_\nu > 5 \text{ TeV} \end{cases}$$

At >TeV energies the muon and the neutrino are co-linear

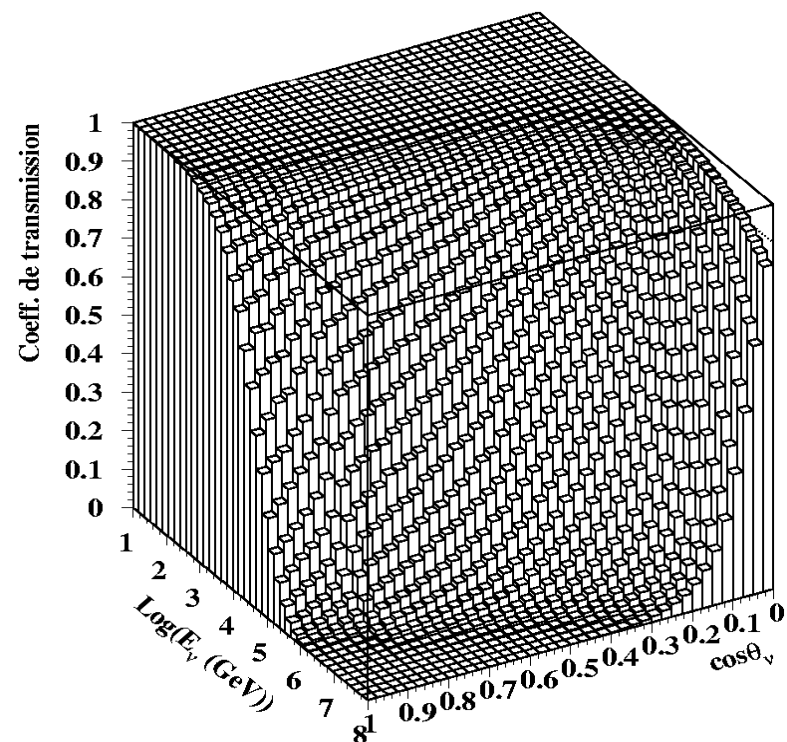


Absorption dans la Terre



Preliminary Earth model (10 layers)

$$A(\theta, E) = e^{-\frac{\int \rho(\theta) dl}{L_{\text{int}}}}$$



Absorption dans la Terre

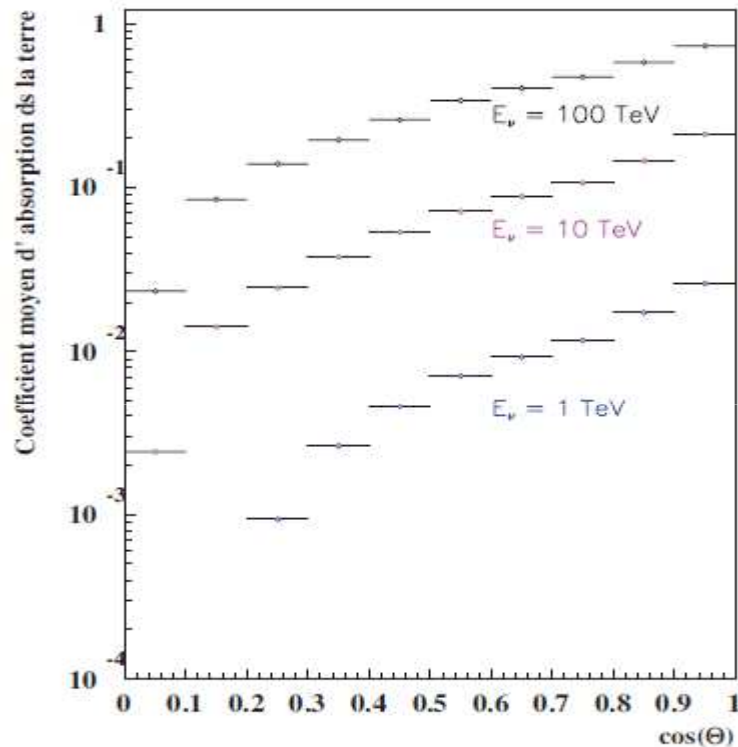


FIG. 1.17: Effet moyen de l'absorption de neutrinos d'énergie de 1, 10 et 100 TeV en fonction de leur angle zénithal.

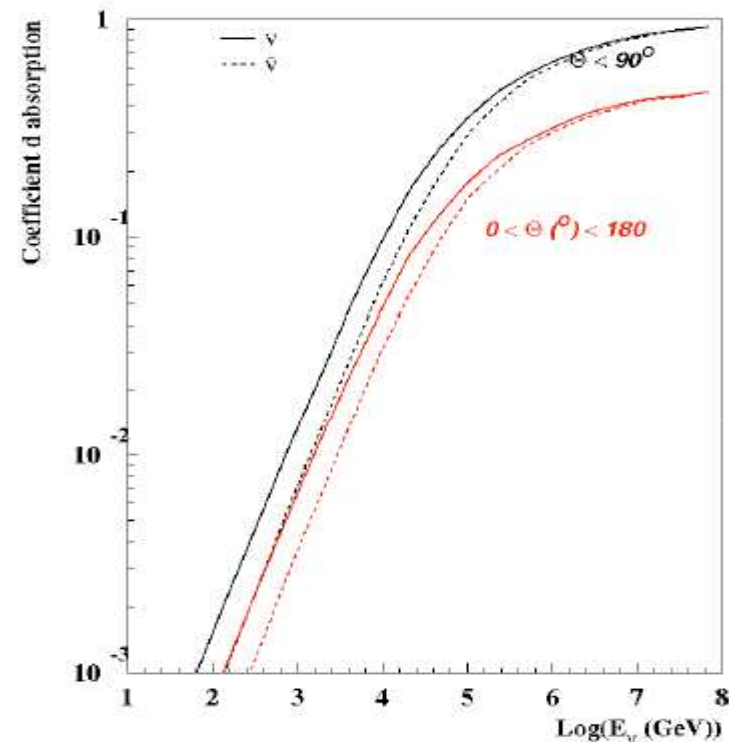
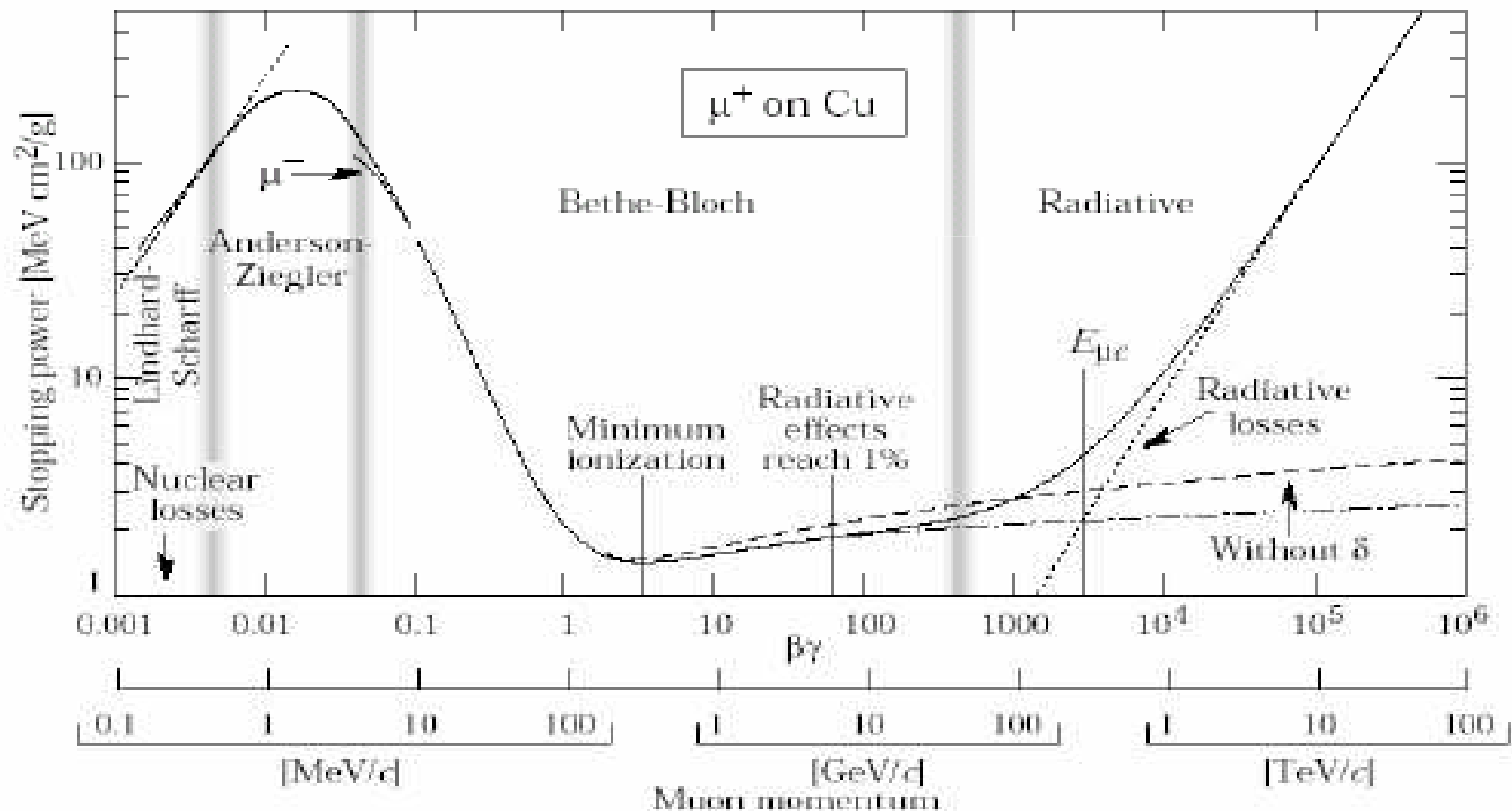


FIG. 1.18: Absorption moyennée pour les neutrinos montants (en noir) et pour les deux hémisphères (en rouge) en fonction de l'énergie.

Perte d'énergie des muons

$$\frac{dE}{dx} = a(E) + b(E)E$$



Perte d'énergie des muons

$$\frac{dE}{dx} = a(E) + b(E)E$$

Dominant for energy of 5 GeV - 1 TeV

Ionization

Energy loss proportional to the muon range



Contained or semi-contained events

Dark matter and oscillation studies

Dominant at high energy > 1 TeV

Pair creation, Bremsstrahlung, photo-nuclear interactions

Energy estimated from the total amount of collected light.



Through going events

Astrophysics

Muon energy loss

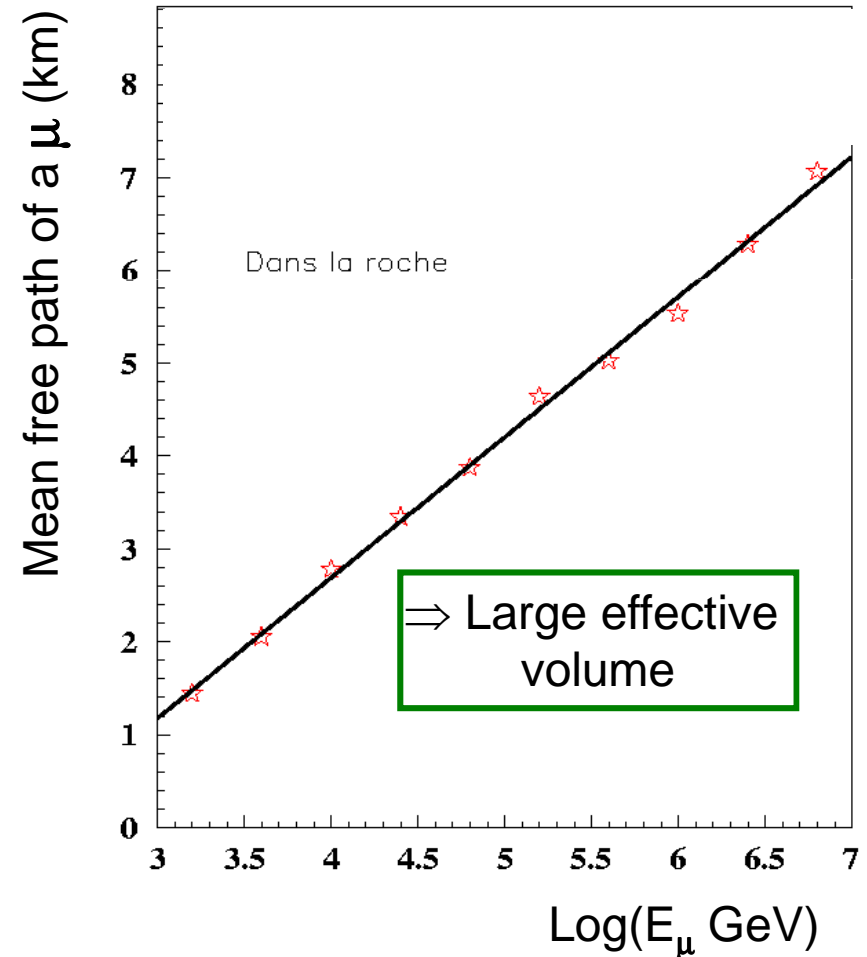
$$\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle \approx \alpha(E) + \beta(E)E \quad \begin{aligned} \alpha &\approx 2,2 \text{ MeV.g}^{-1}.\text{cm}^2 \\ \beta &\approx 4 \times 10^{-6} \text{ g}^{-1}.\text{cm}^2 \end{aligned}$$

EXERCICES:

1. Compute the path length of muon of energy E before it reaches the energy E_{\min} based on the approximate values of α and β .

$$R_{\mu}(E_{\mu}, E_{\min}) = \int_{E_{\min}}^{E_{\mu}} \frac{1}{\left\langle \frac{dE}{dX} \right\rangle} dE \approx \frac{1}{\beta} \ln \frac{(\alpha/\beta) + E_{\mu}}{(\alpha/\beta) + E_{\min}}$$

2. AN: What is the total range of a 10 TeV muon in the rock ($\rho_r=2.65 \text{ g.cm}^{-3}$), in sea water ($\rho_r=1.02 \text{ g.cm}^{-3}$) ?



Detection probability and rate

$$P_{\nu \rightarrow l} = \mathcal{N} \int_{E_{\min}}^{E_{\nu}} dE_l \frac{d\sigma}{dE_l} R_l(E_l, E_{\min})$$

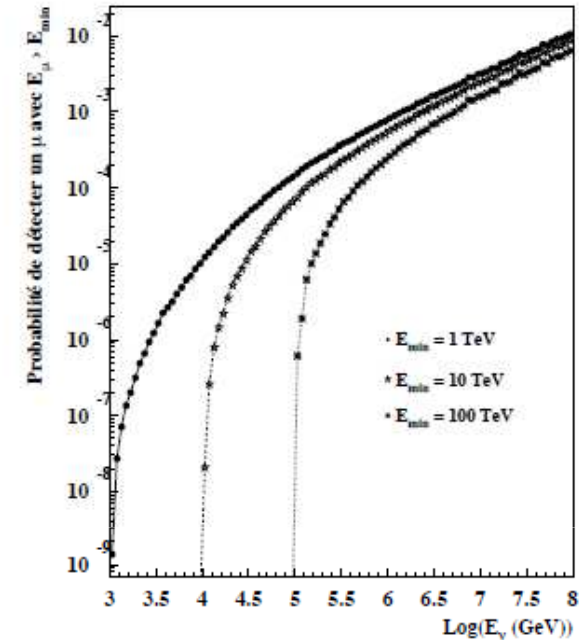
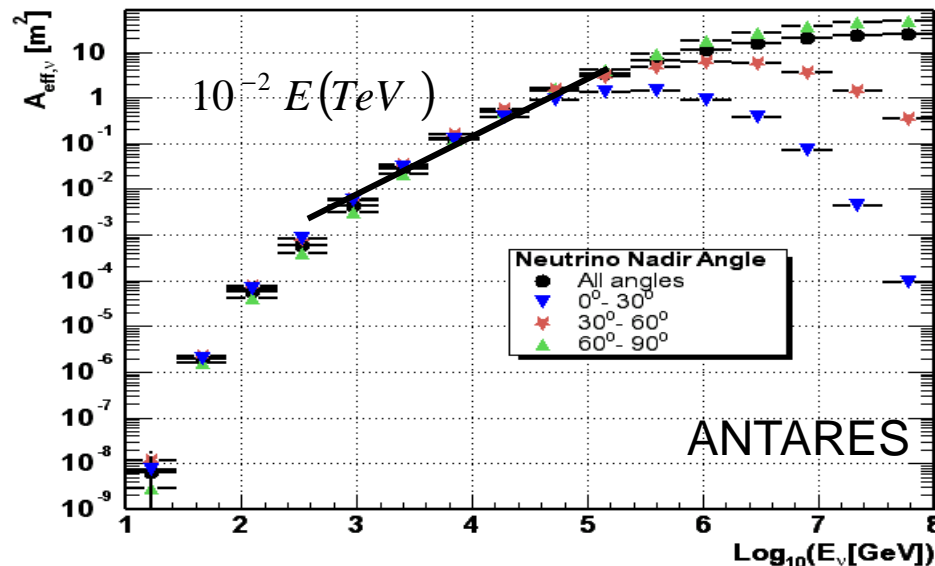


Here the Earth absorption is not taken into account

Event rate: $\frac{N_{\mu}}{T} = \int dE \cdot \frac{d\Phi_{\nu}}{dE_{\nu}} \cdot A_{eff}(E_{\nu})$

$$A^{eff}(\theta, E_{\nu}) = \frac{N_{rec}}{N_{gen}} \times V_{gen} \times (\rho N_A) \times \sigma(E_{\nu}) \times e^{-\sigma(E_{\nu}) \rho N_A z(\theta)}$$

Neutrino Effective Area



$$N = 2\pi \times \Delta t \times \int_{1\text{TeV}}^{1\text{PeV}} \frac{dN}{dE} A_{eff,\nu}(E) dE \times \frac{1}{2}$$

oscillations

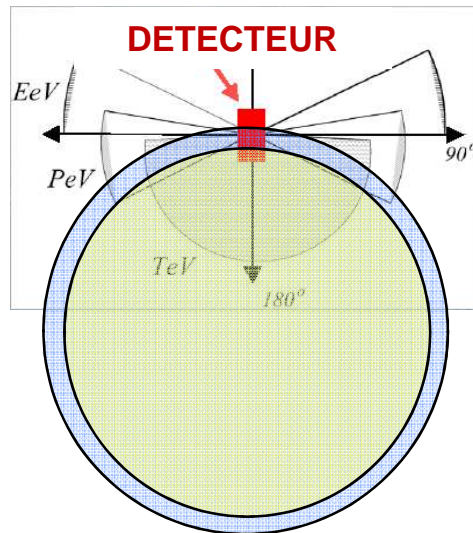
$$\text{WB: } \frac{dN}{dE} = \frac{4.5 \times 10^{-11}}{E^2} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

$$N \sim 3 / \text{an}$$

Séparation des ν atmosphériques et cosmiques

- Excès à haute énergie

☞ Bon étalonnage en charge

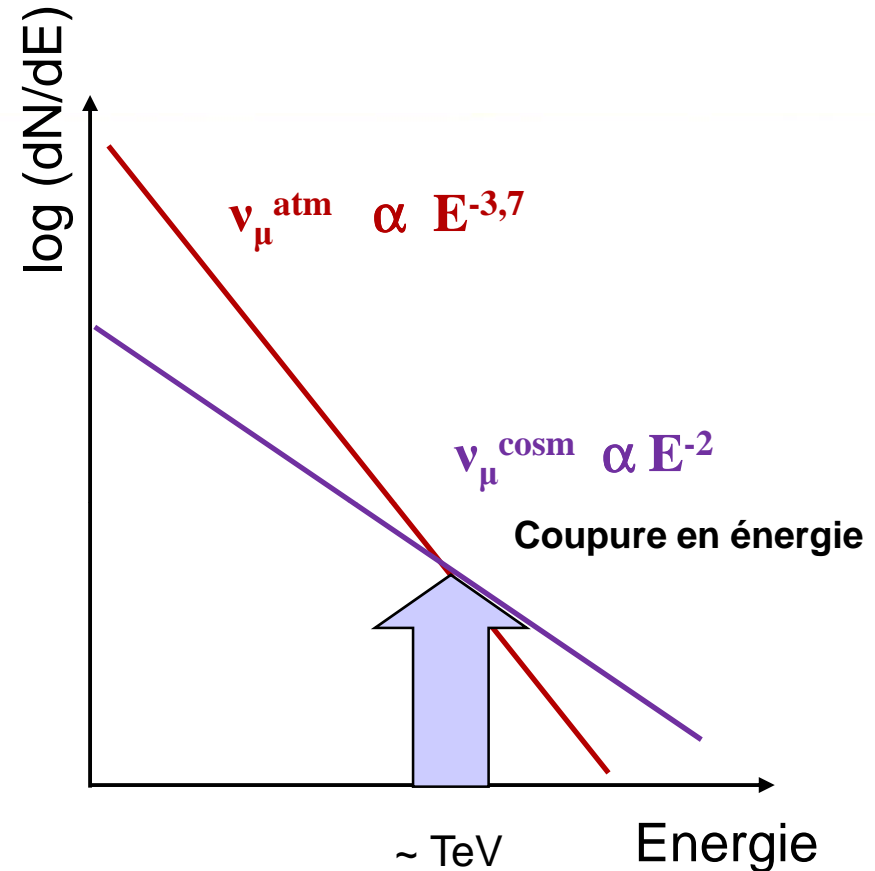


- Recherche d'anisotropies

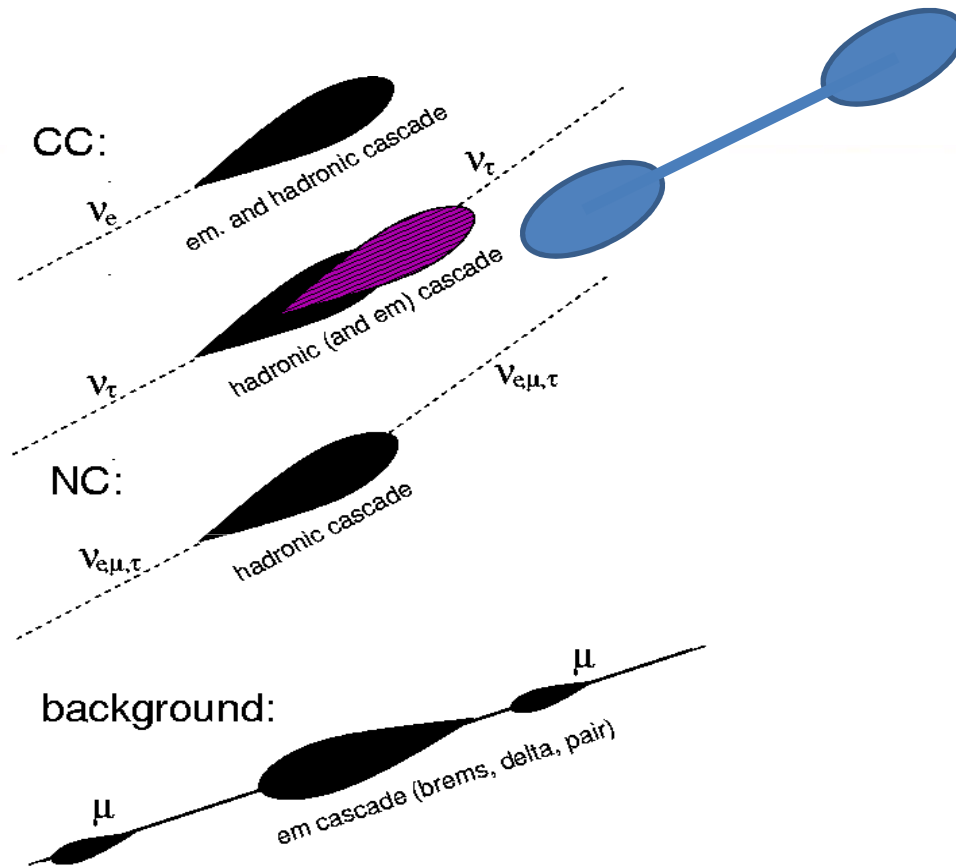
☞ Bonne résolution angulaire

- Confirmation par d'autres messagers

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

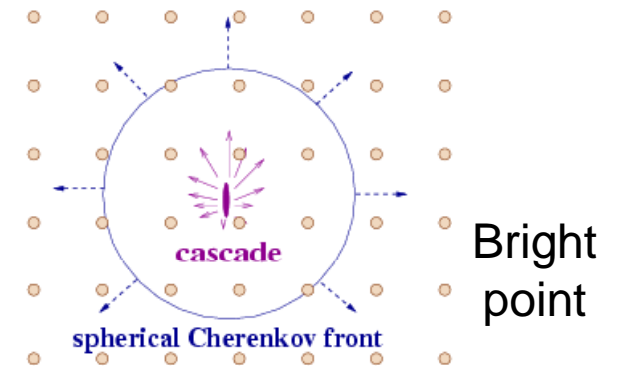


Les autres cannaux de détection



So-called “**cascade**” events

Generic reconstruction:



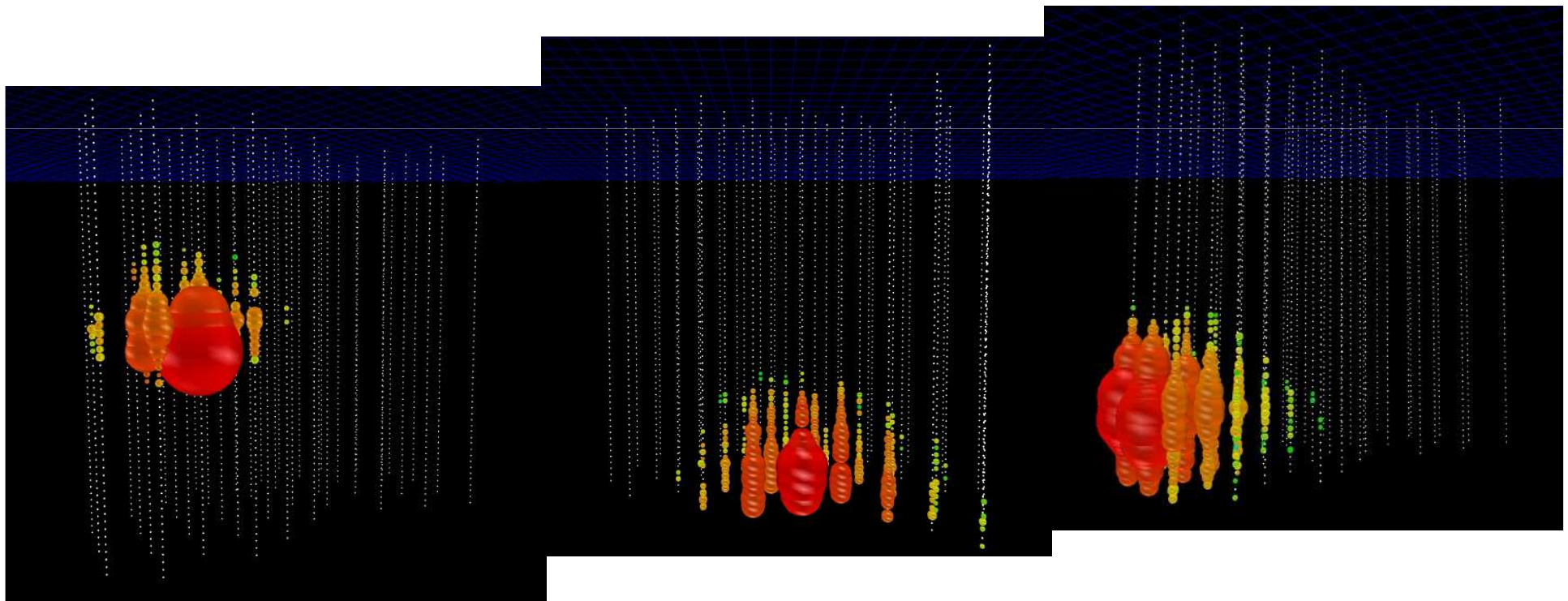
Événements contenus ($\sim 10m$)

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

Flux diffus

Pas de signal cosmique mais...

3 événements IceCube de type « cascade » passent les coupures (1.2 ± 0.5 attendus)
 $\Rightarrow \nu_e$ (atmosphériques?) de UHE.

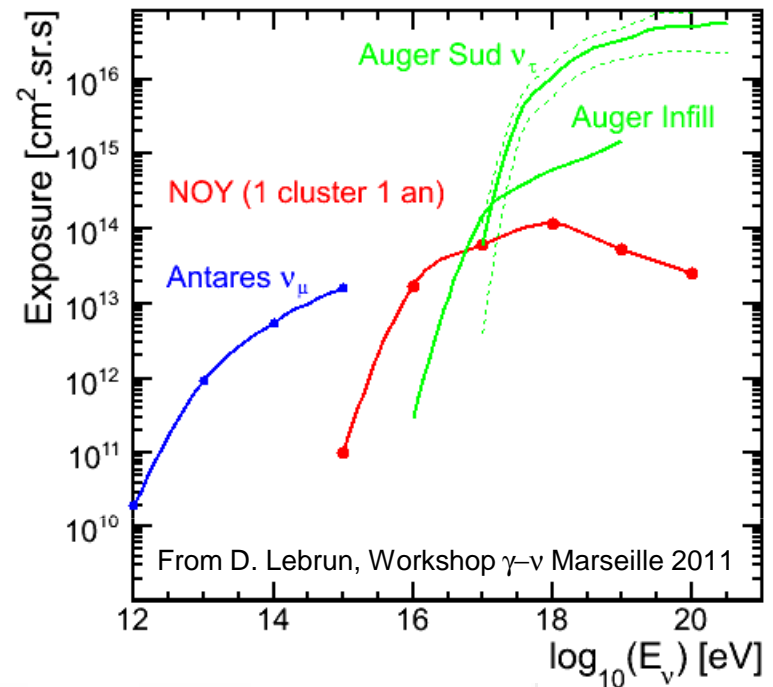


Techniques alternatives (UHE)

- 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)

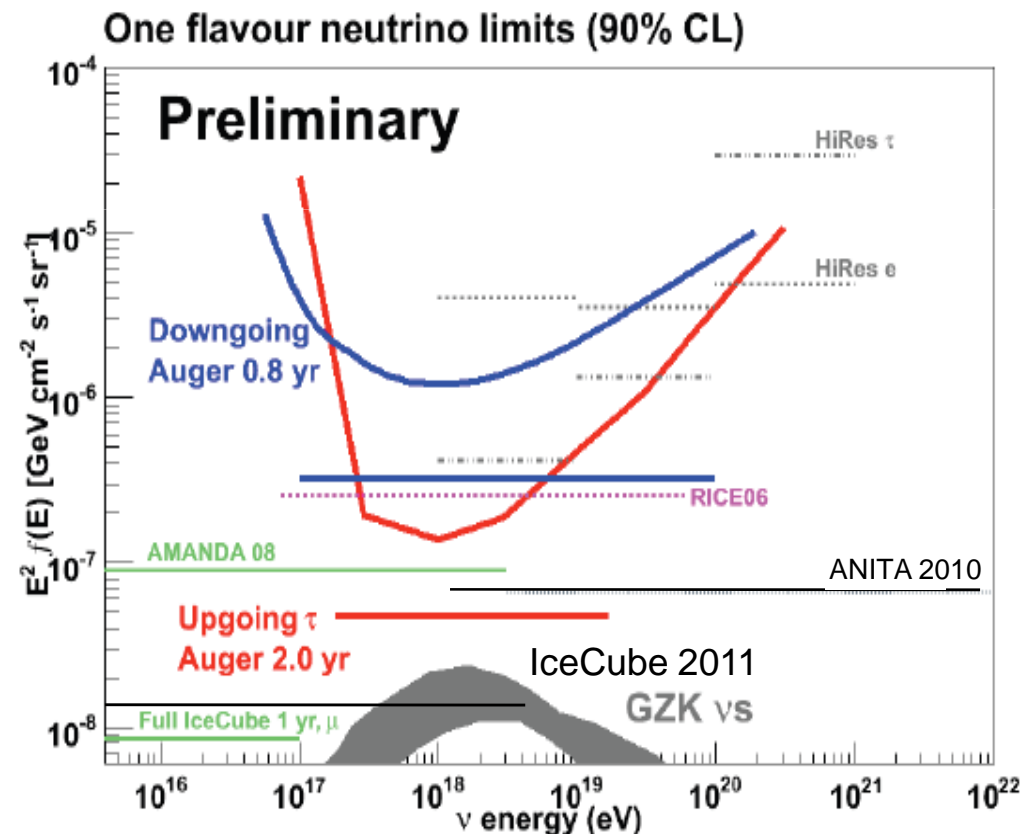
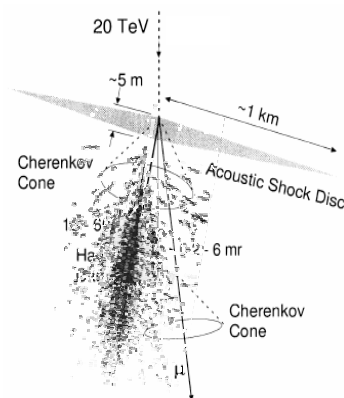
arXiv:0906.2347

arXiv:1103.4250

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

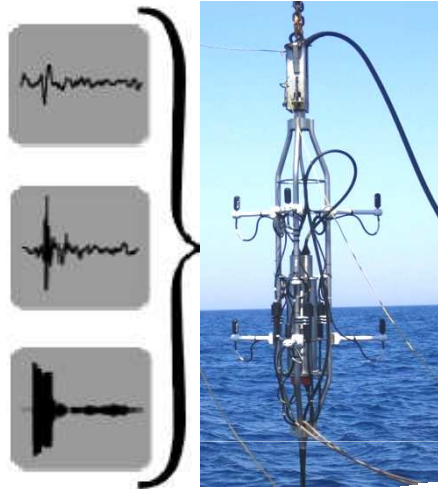
- Neutrinos de plus hautes énergies
Détection radio (effet Askaryan)
canal prometteur pour l'avenir

- Détection acoustique?

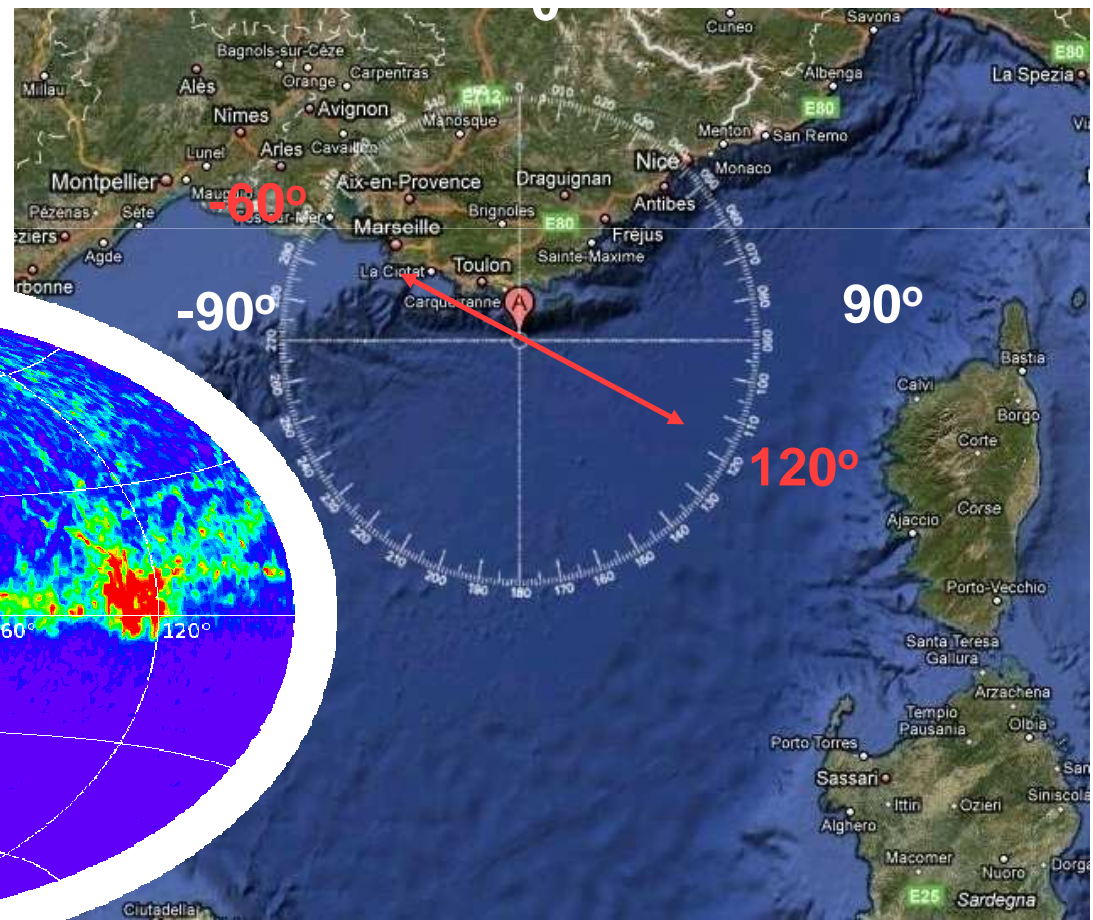
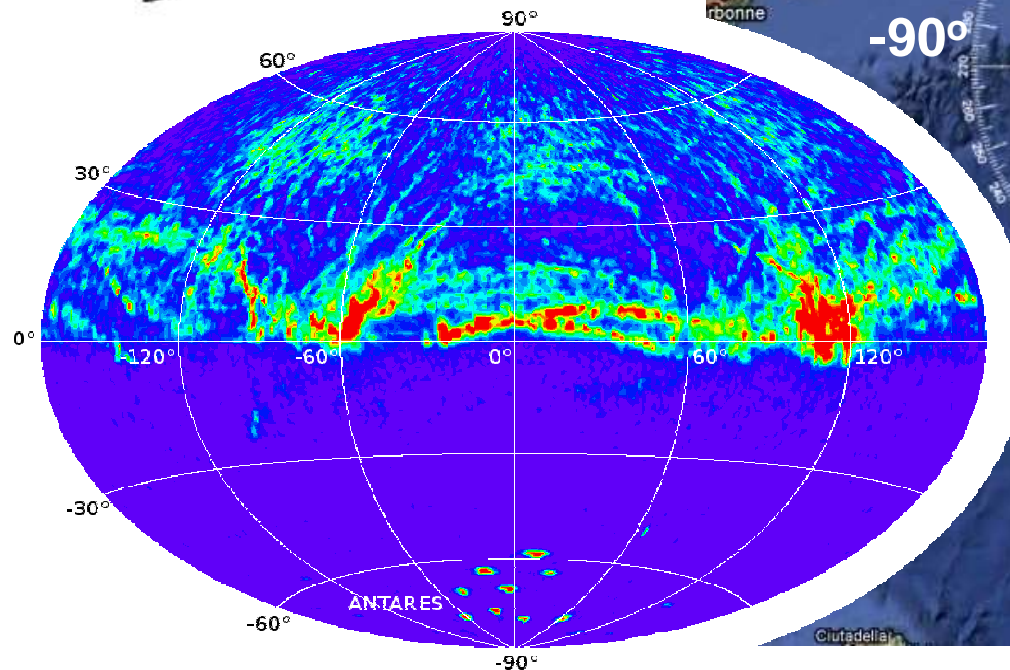


Ex de R&D pour la détection acoustique

*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



{ANTARES, NEMO, NESTOR} \in 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

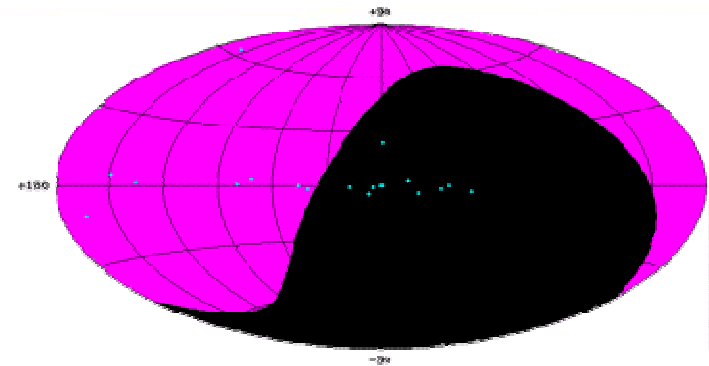
- Logistique accessible

Déploiement et réparation

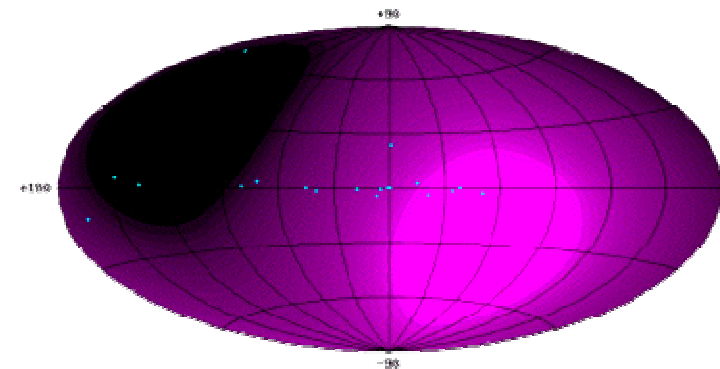
- Inconvénient : activité optique

Filtrage des données

Ciel visible au pôle sud

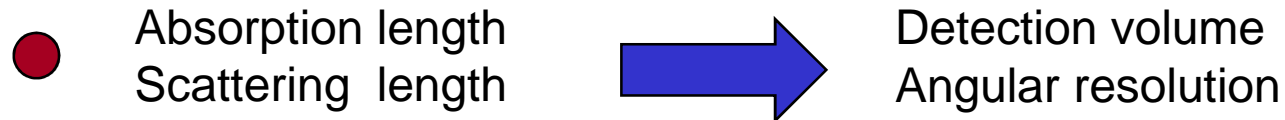


Majorité des sources HESS TeV
visibles par TN hémisphère Nord



Ciel visible en Méditerranée

Critères de sélection des sites

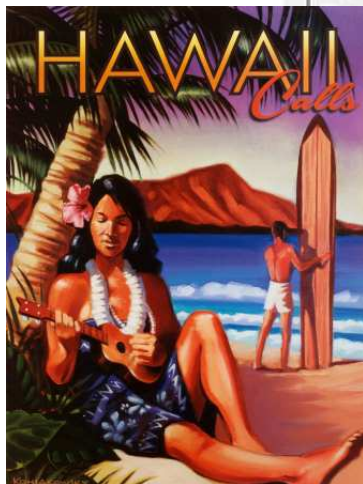
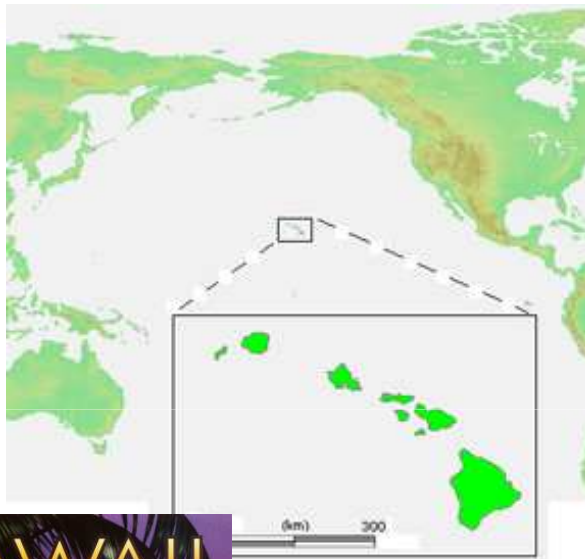


$[\lambda \sim 460 \text{ nm}]$ (blue)	Absorption length (m)	Effective Scattering length (m)	Angular resolution (°) ($< 0.1 \text{ km}^2$, $E > 10 \text{ TeV}$)
South Pole	≤ 100	≤ 25	3°
Lake Baikal	≥ 15	> 300	1.5°
Mediterranean	55	> 300	0.2°

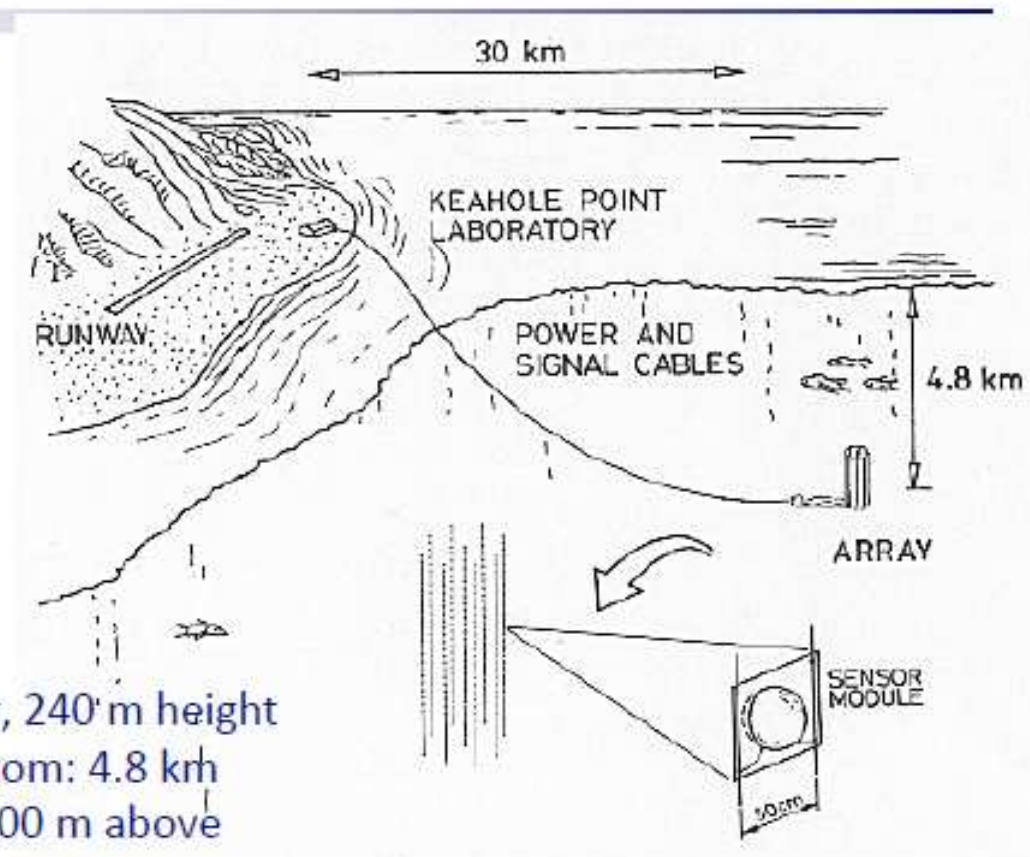
- Optical activity
- Living creatures
 - ^{40}K decay
- } Require causality filter
- [quiet in ice and fresh water]

Années 80 : le premier projet (concret)

See also: A.Roberts: The birth of high-energy neutrino astronomy: a personal history of the DUMAND project, Rev. Mod. Phys. 64 (1992) 259.

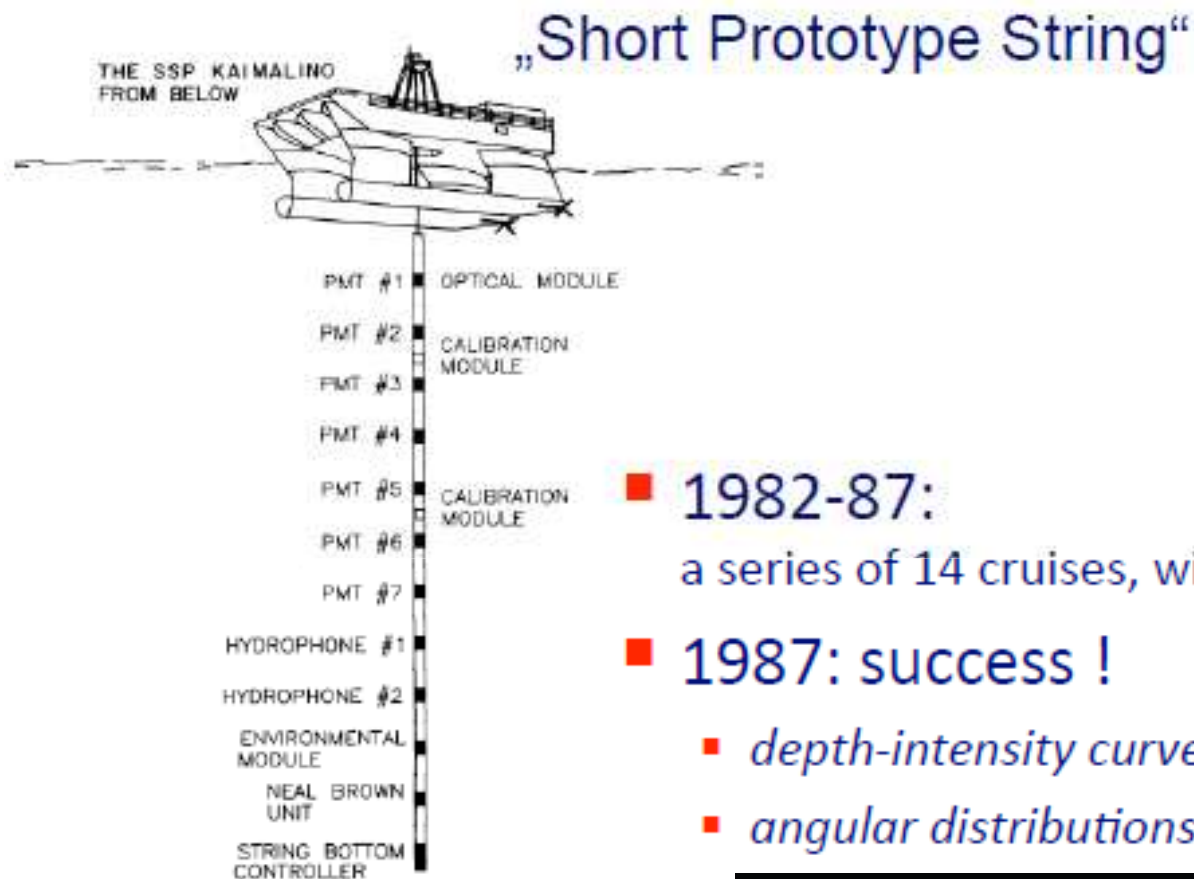


DUMAND-II (The Octagon)



- 9 strings
- 216 OM's
- 100 diameter, 240' m height
- Depth of bottom: 4.8 km
- Lowest OM 100 m above bottom

R&D à Hawaii



- 1982-87:
a series of 14 cruises, with two lost strings

- 1987: success !
 - *depth-intensity curve*
 - *angular distributions*

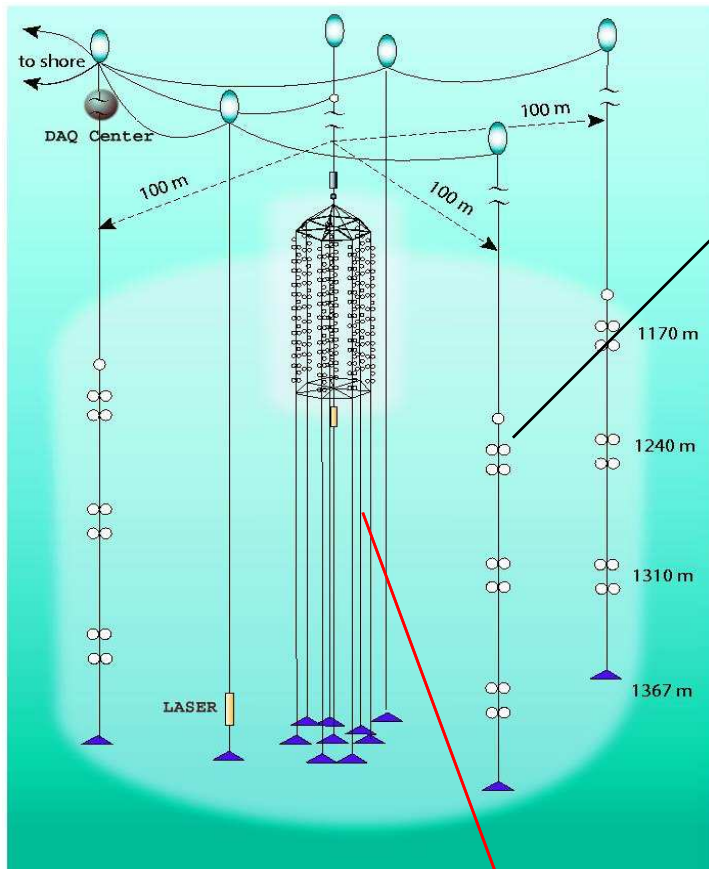
“At first, when we talked about DUMAND our accelerator friends laughed and said we were crazy. Now they ask why have you not got it operating yet !”
J G Learned (1992)

- December 1993: deployment of first string and connection to junction box. Failure after several hours

1995: DUMAND project is terminated



Baikal NT status



~ 3.6 km
to shore
1070m depth

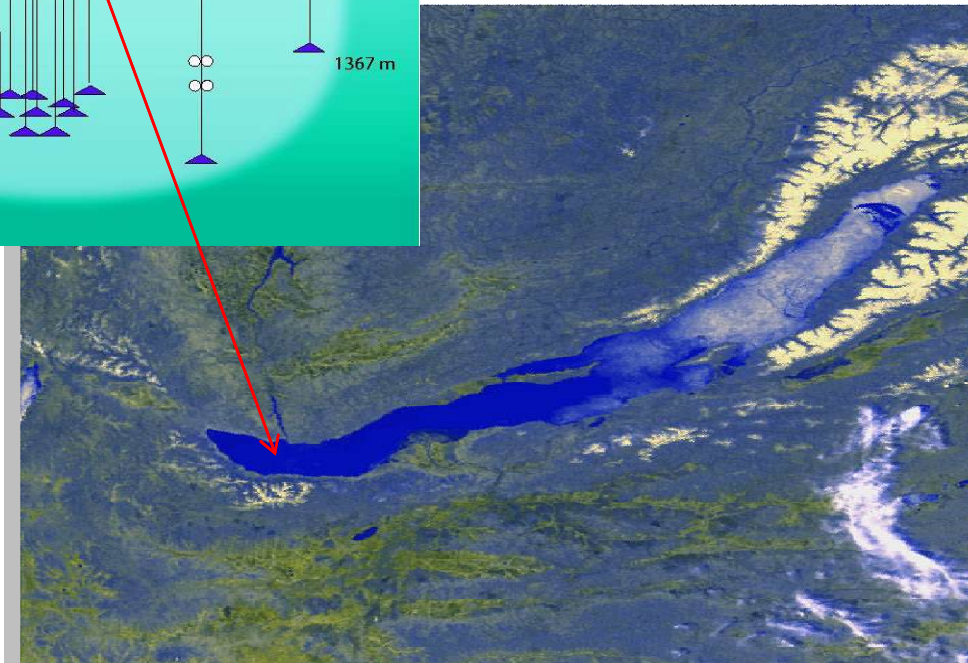
NT200+ is now operating



Quasar
photodetector
($\varnothing=37\text{cm}$)



**GVD TDR expected
in 2011**



NT200 +

8 strings (192 OMs) +
3 outer strings (36 OMs)

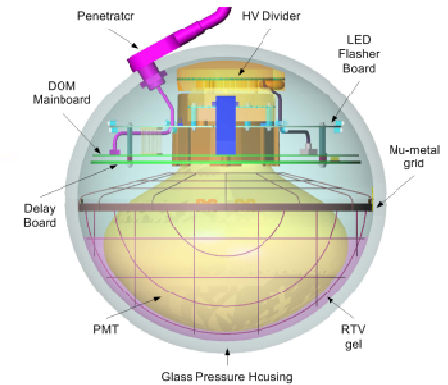
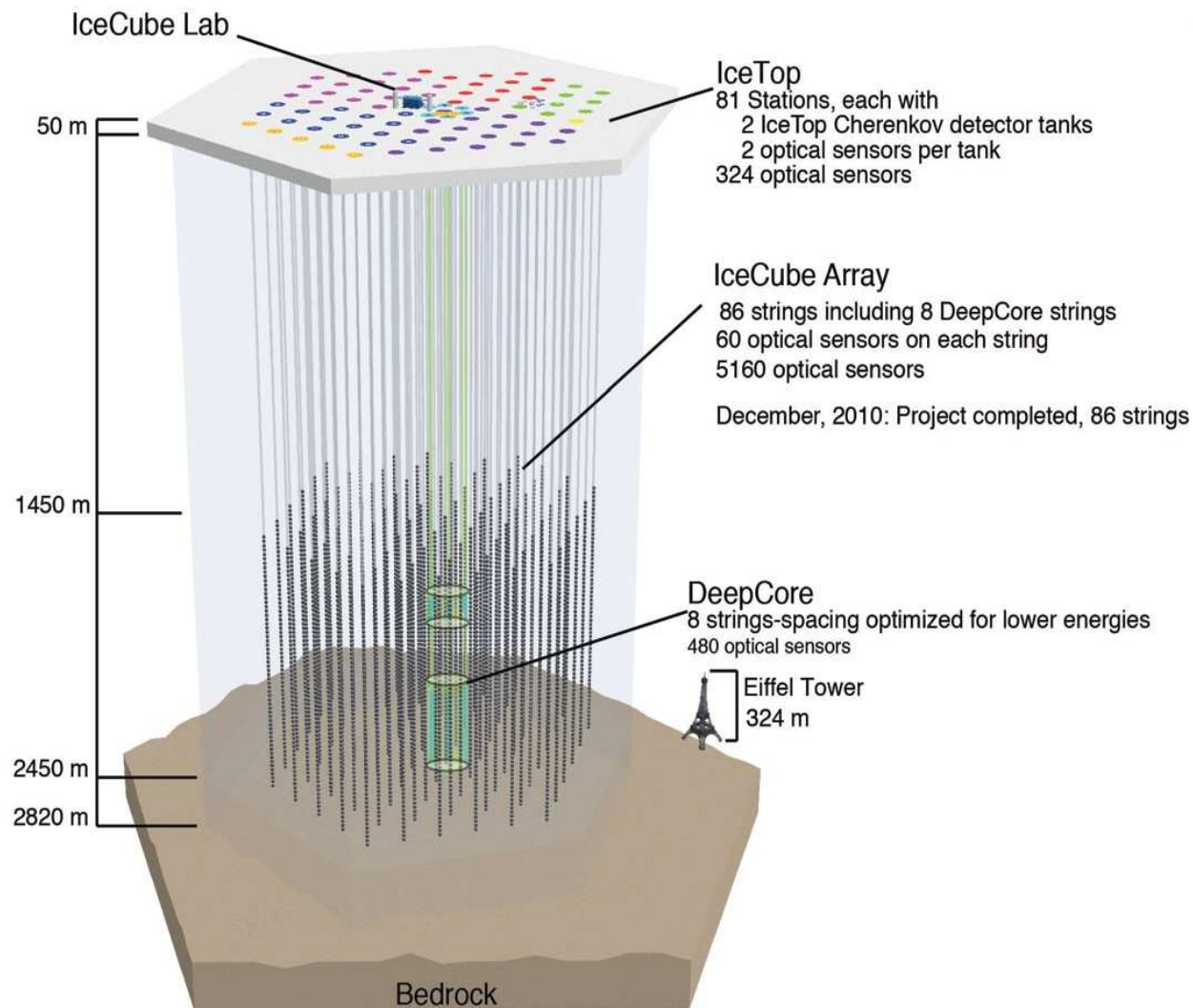
Height x \varnothing
210m x 200m
 $V_{\text{inst}} = 4 \times 10^6 \text{m}^3$

Eff. shower volume:
10 PeV ~ 10 Mton

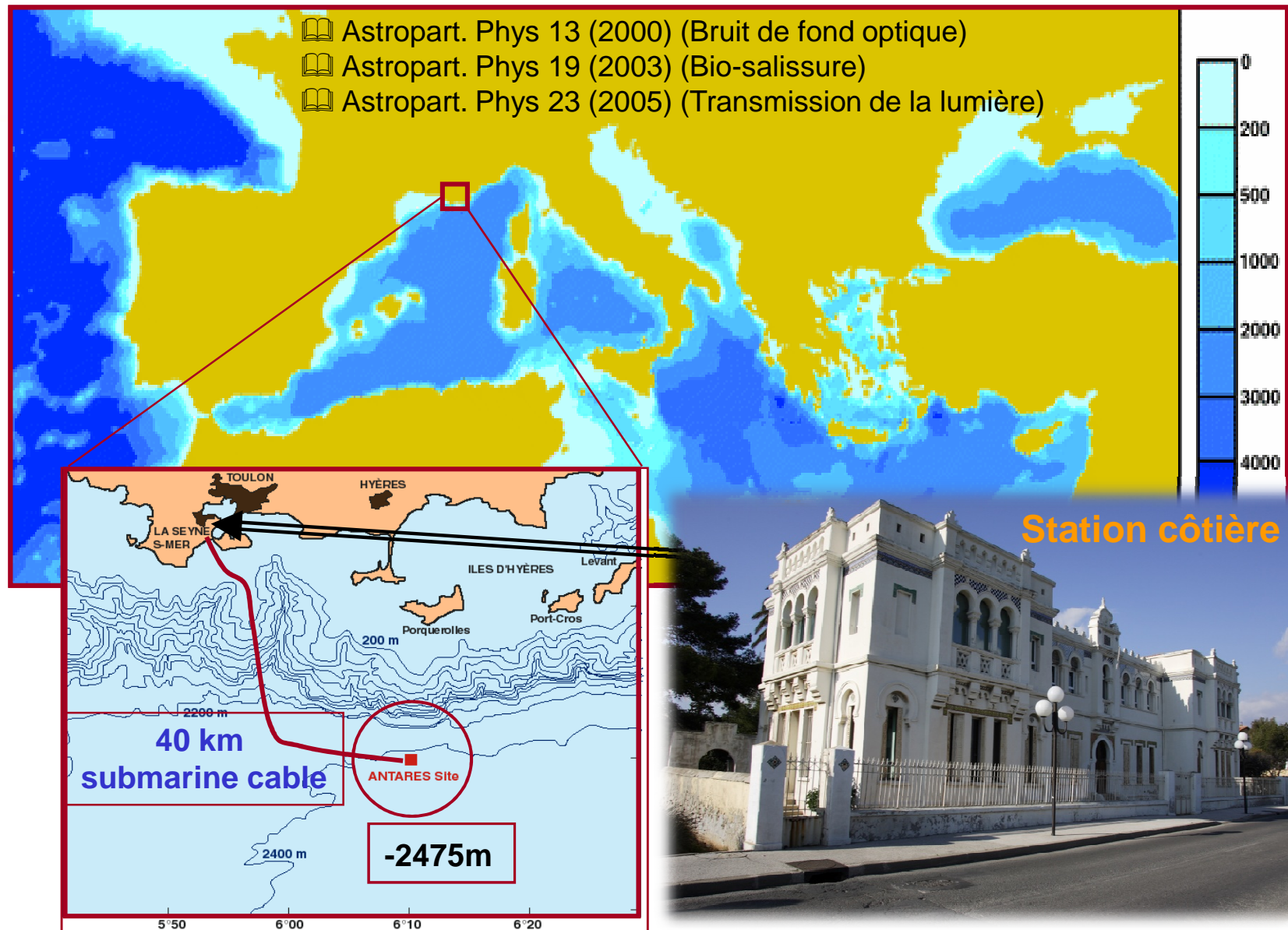
Includes 2 prototype
strings for GVD
New OM, DAQ, cabling
triggering systems

Le télescope IceCube

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



Le site Antares



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

100 m

~70 m

14.5 m

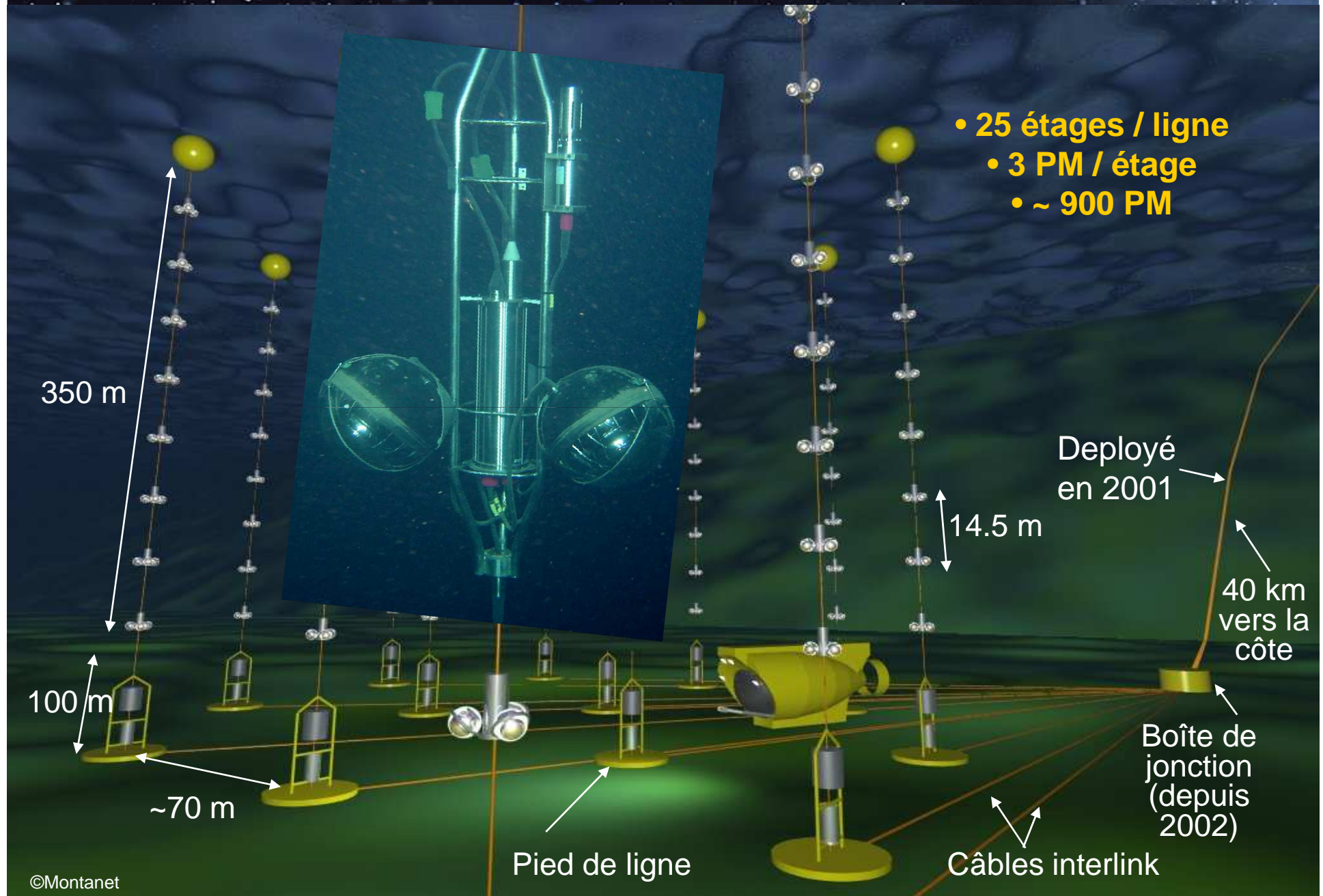
Deployé
en 2001

40 km
vers la
côte

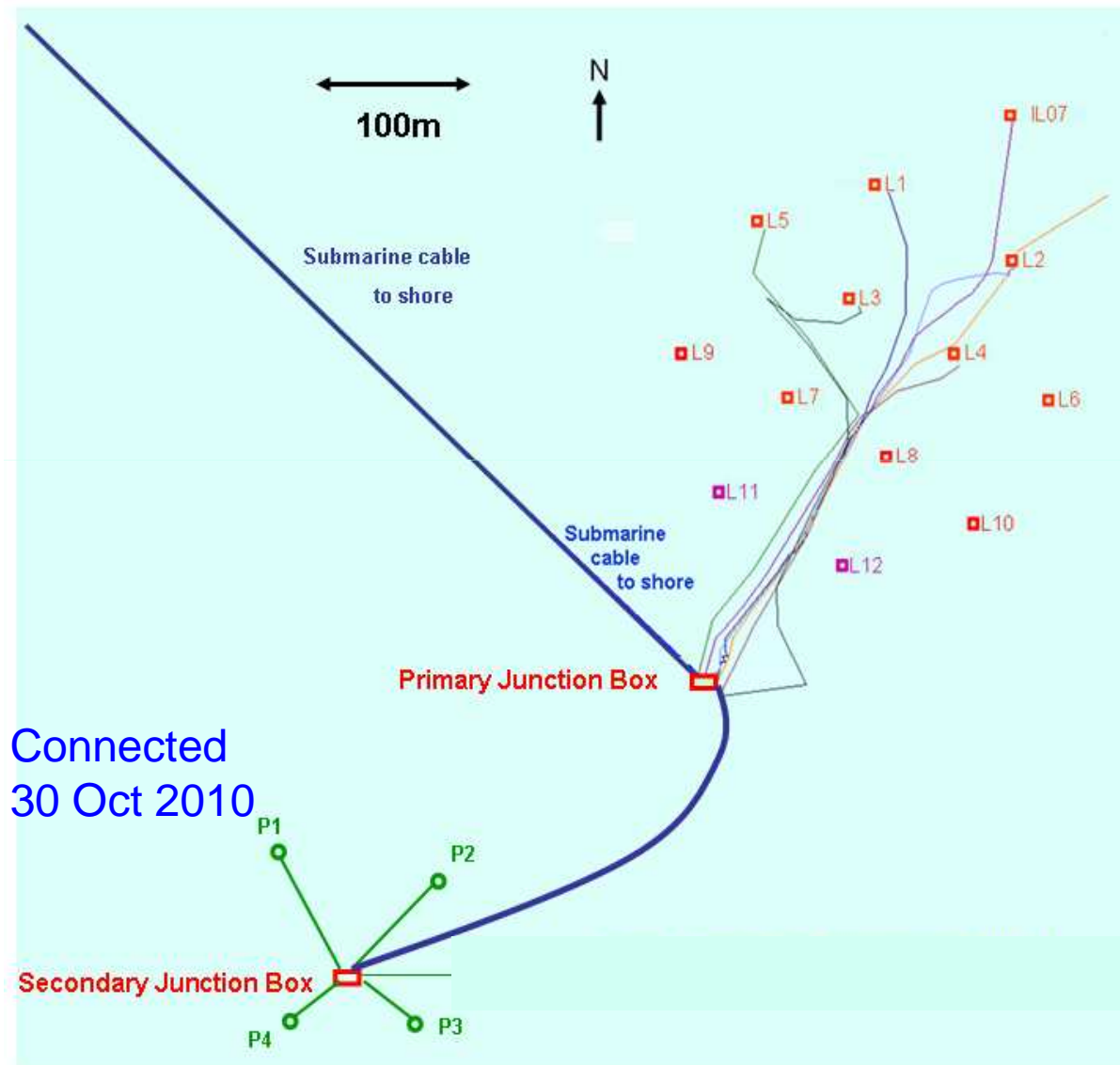
Boîte de
jonction
(depuis
2002)

Pied de ligne

Câbles interlink

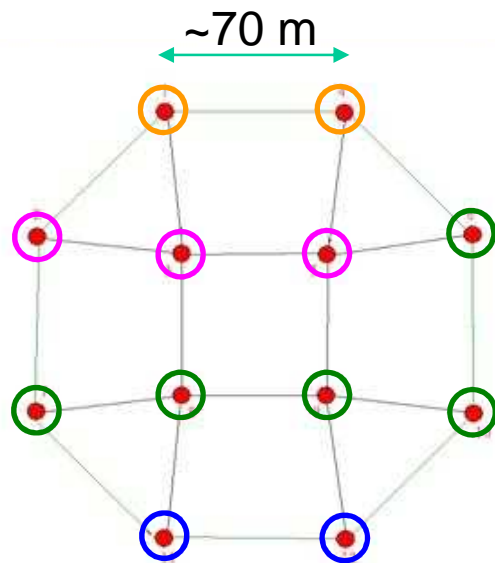


Etat actuel des infrastructures



Boîte de jonction:	2002
Ligne 1, 2	2006
Ligne 3, 4, 5	01 / 2007
Ligne 6, 7, 8, 9, 10	12 / 2007
Ligne 11, 12	05 / 2008

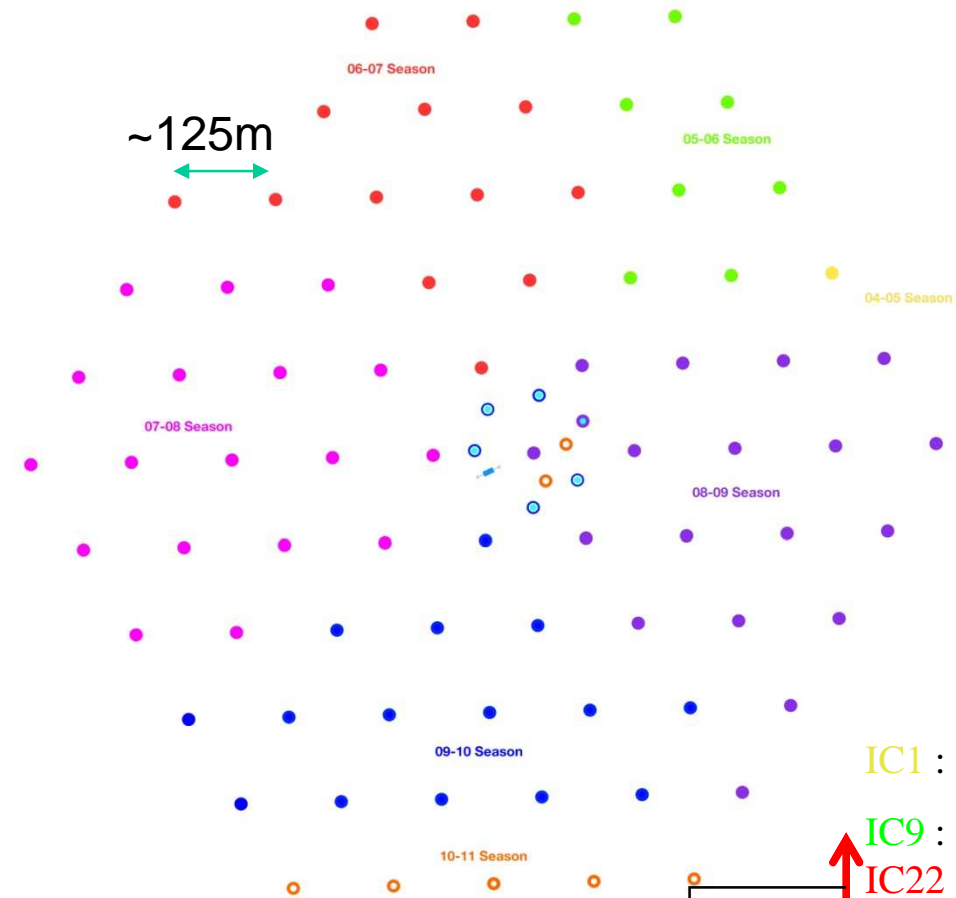
Etapes de construction



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



A quand les données en libre accès ?

Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

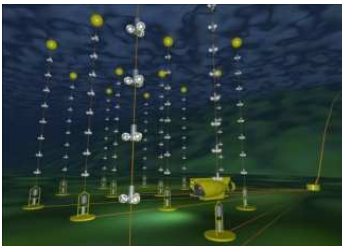
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

B) Les télescopes à neutrinos actuels

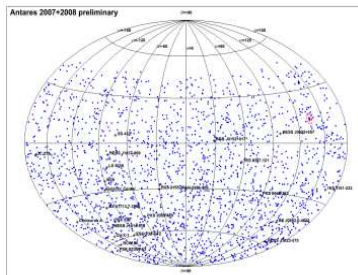
Principes de fonctionnement

Reconstruction

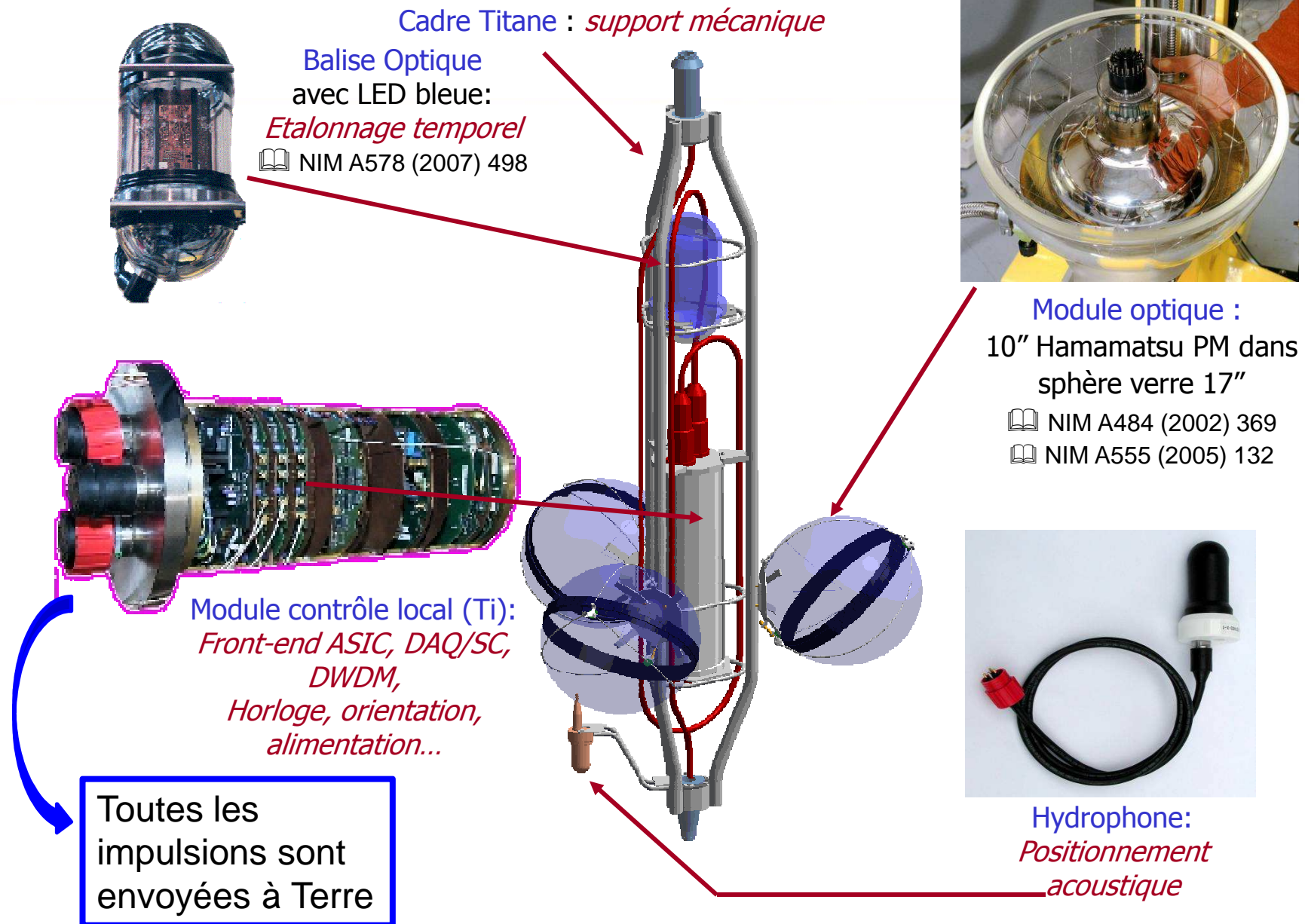
Calibration

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives

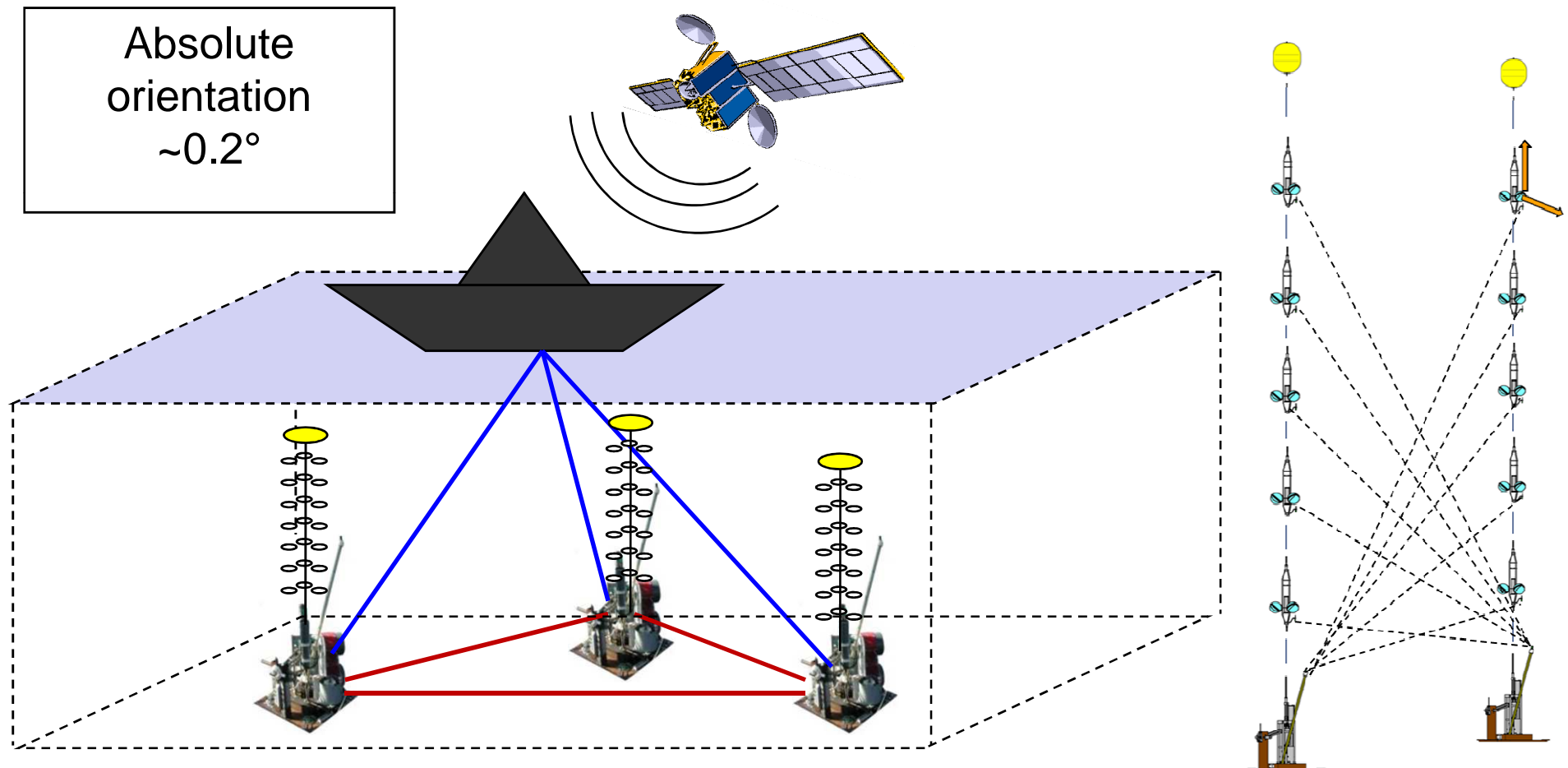


Un étage de détection

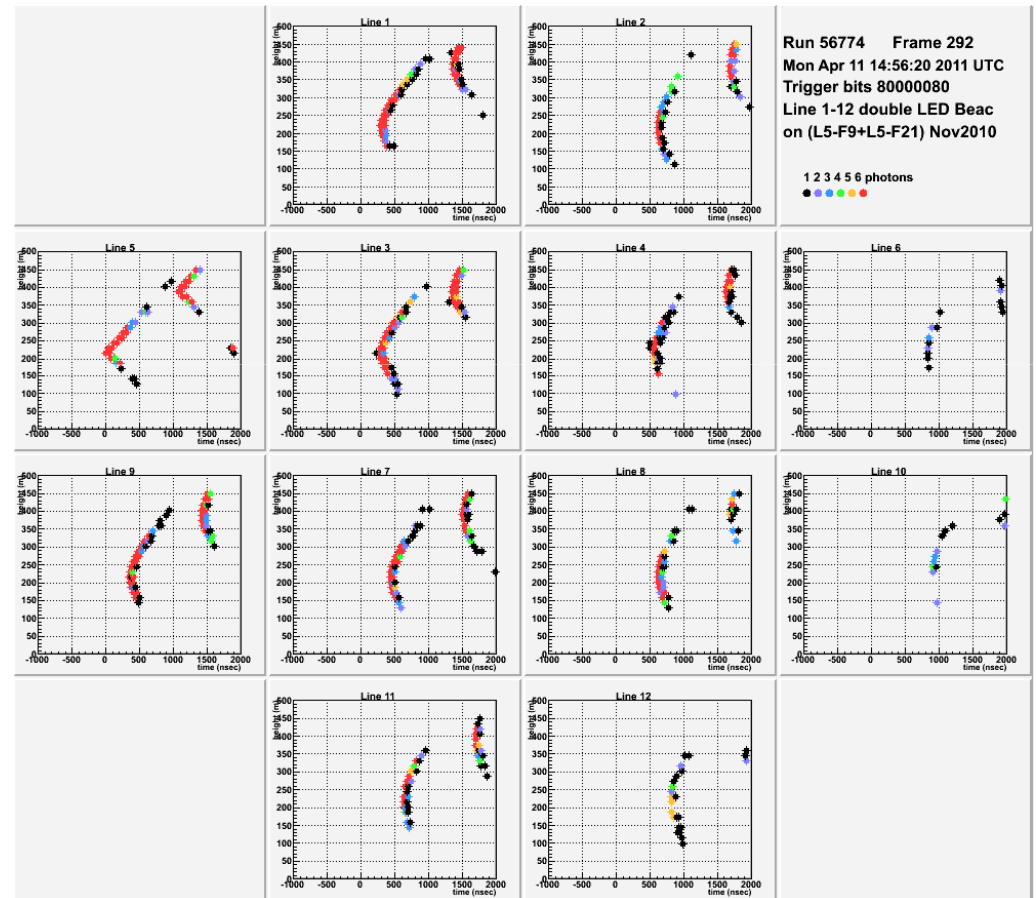
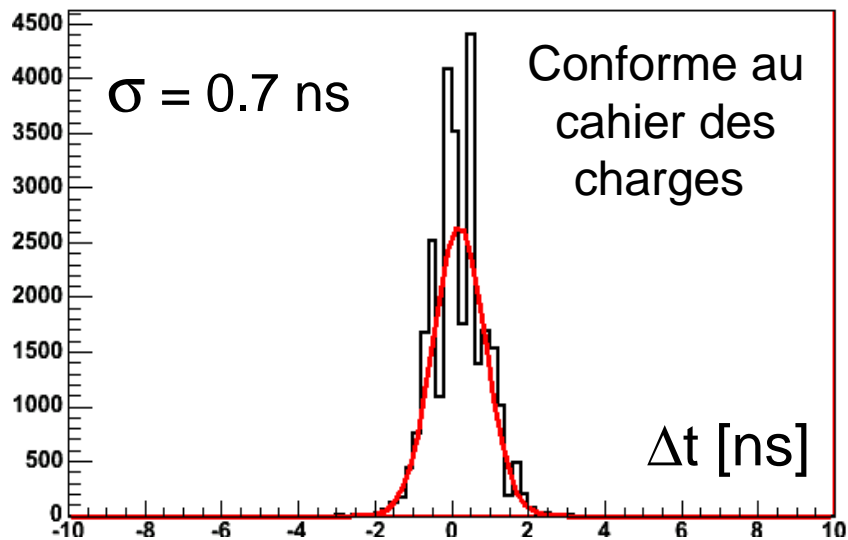
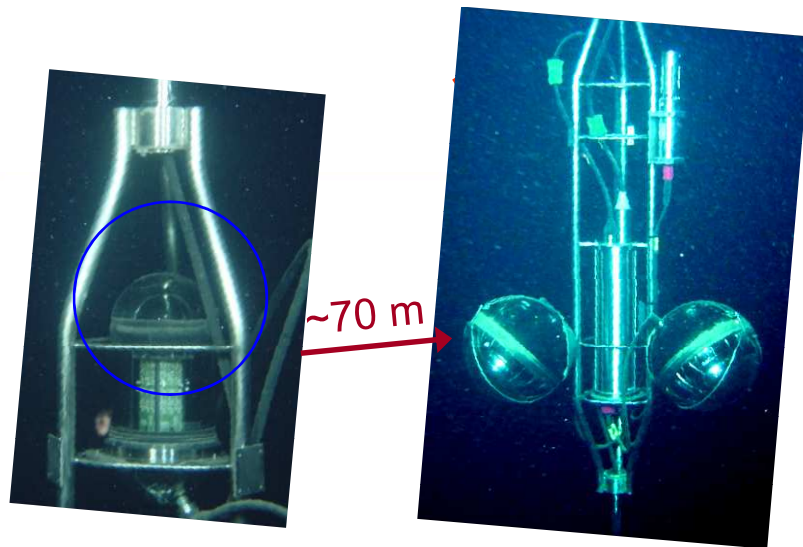


Positionnement acoustique

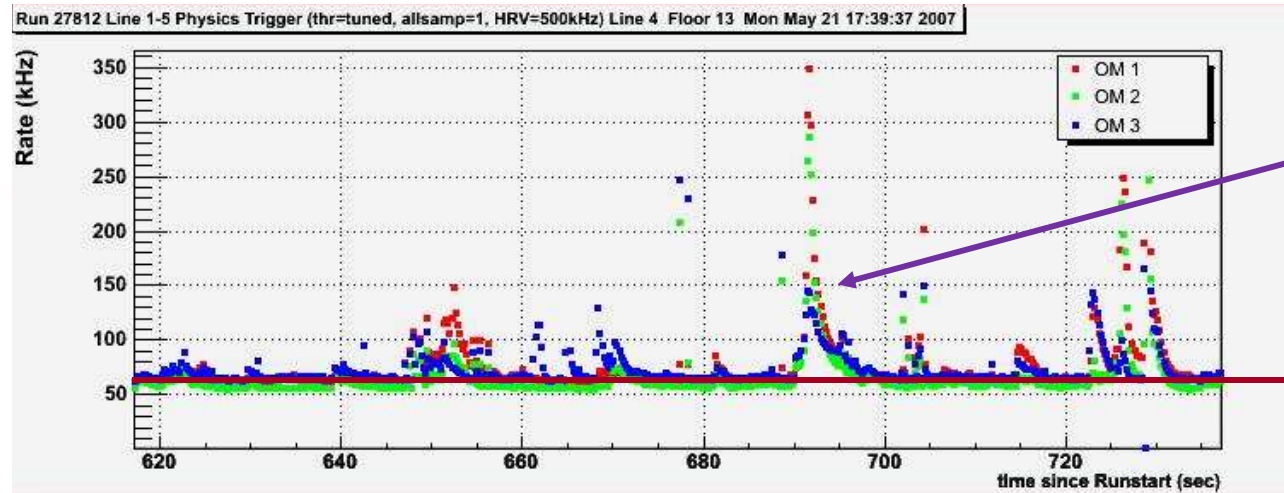
- Position of the boat : DGPS ($\sigma_x, \sigma_y \sim 1$ m)
- Positions of line anchors LF acoustic signals from boat ($\sigma_x, \sigma_y \sim 1$ m)
- Positions wrt line anchors HF acoustic triangulations ($\sigma < 10$ cm)



Etalonnage temporel : LED



Bruit de fond optique [ANTARES]

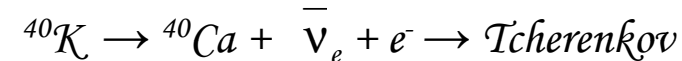


Sursauts
→ MHz

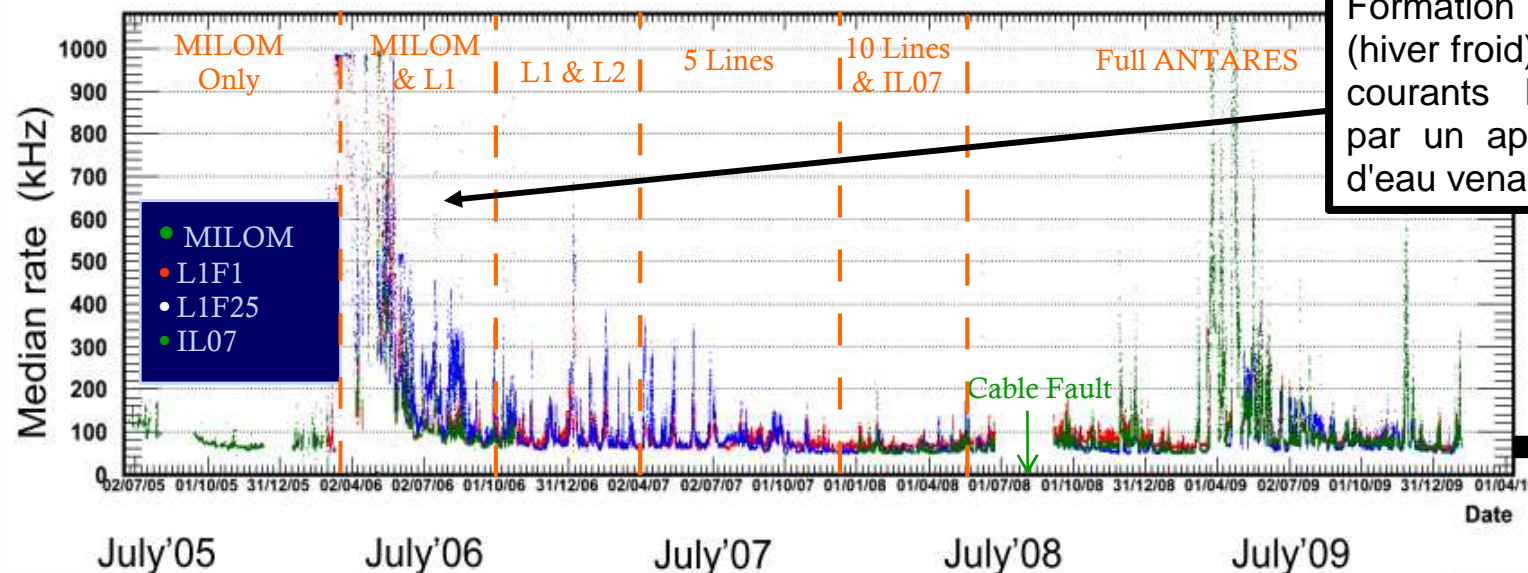
Ligne de base

Ligne de base (~60 – centaines) kHz

$\langle Q \rangle 1$ Etalonnage



Bioluminescence (bactéries)

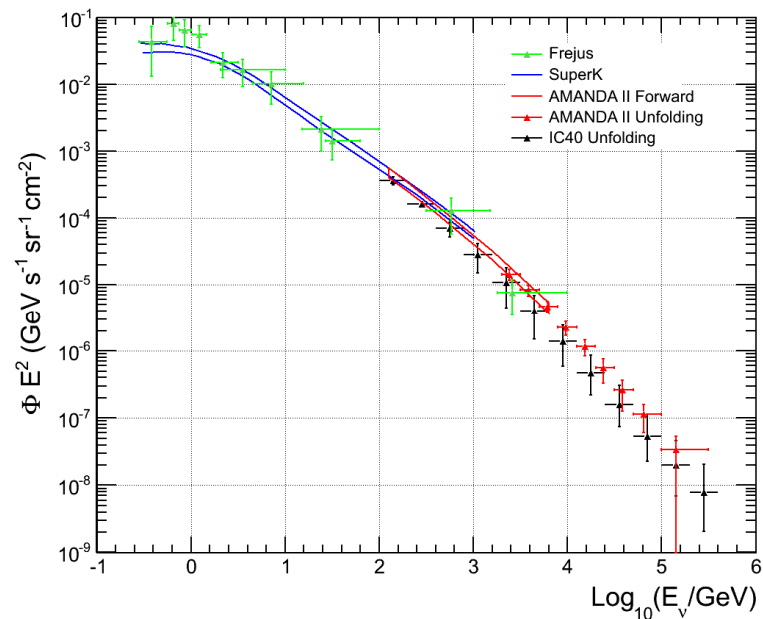
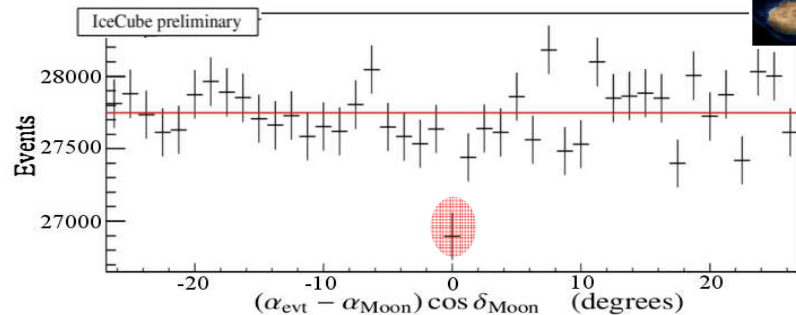
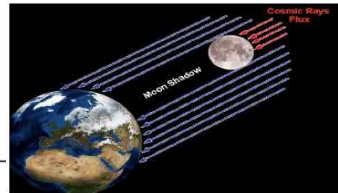


Formation d'eau dense (hiver froid) + instabilités de courants locaux causées par un apport de masses d'eau venant de la surface?

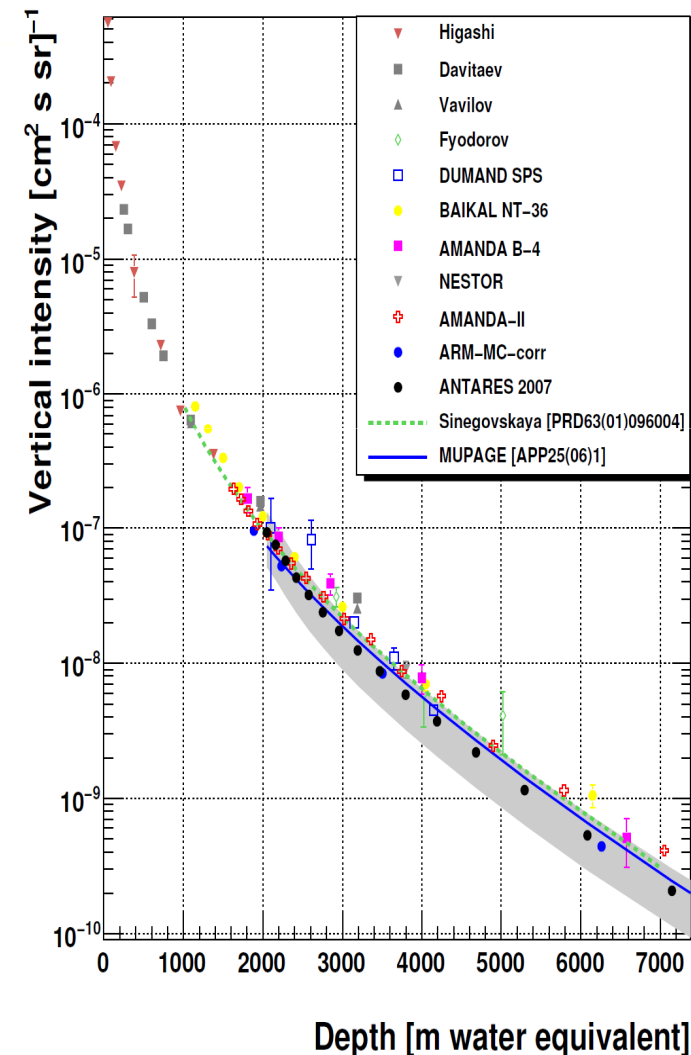
70kHz

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)

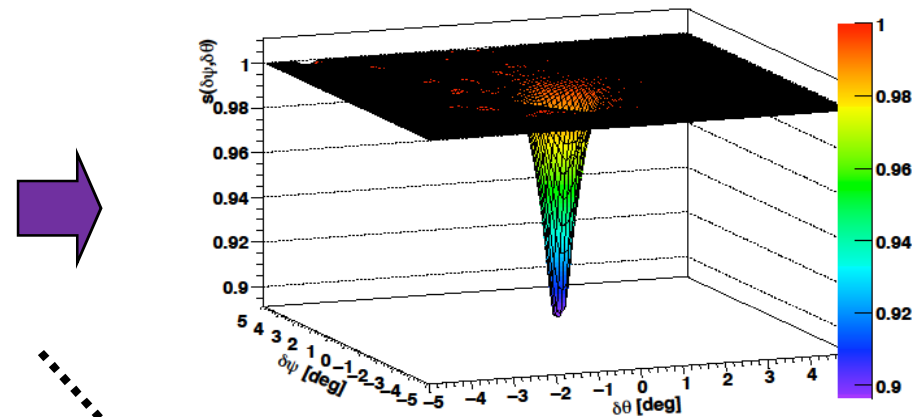
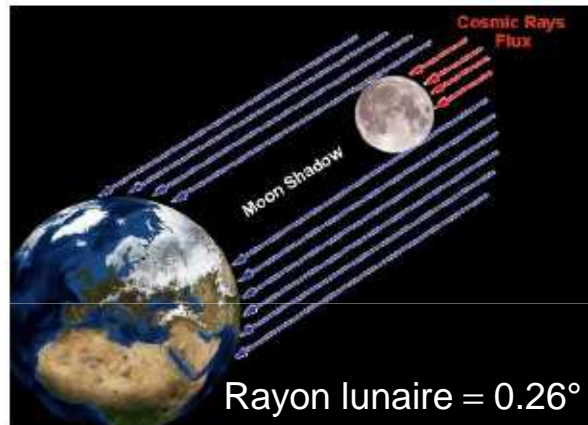


Thèse de C. Picq [APC/CEA]

Pouvoir de pointage et μ atmosphériques

- Pas de faisceau directionnel pour vérifier la capacité de pointage d'Antares

➡ Observer l'ombre de la lune dans le flux de muons atmosphériques
12 lignes 3σ en 2 ans, 5σ en 5 ans (préliminaire)



➡ Détecteur de surface

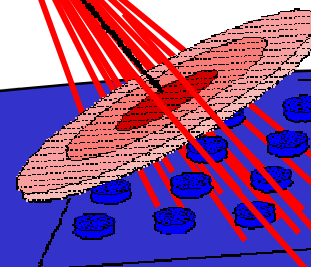
Campagne de mesure de N_{jours}

Erreur azimut : $\sim 2\% \sqrt{N_{\text{jours}}}$

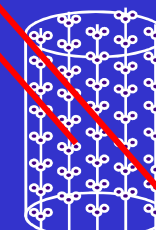
Erreur zénith : $\sim 1\% \sqrt{N_{\text{jours}}}$

Préliminaire

(12 lignes, $10 \times 1\text{m}^2$ scintillateurs)



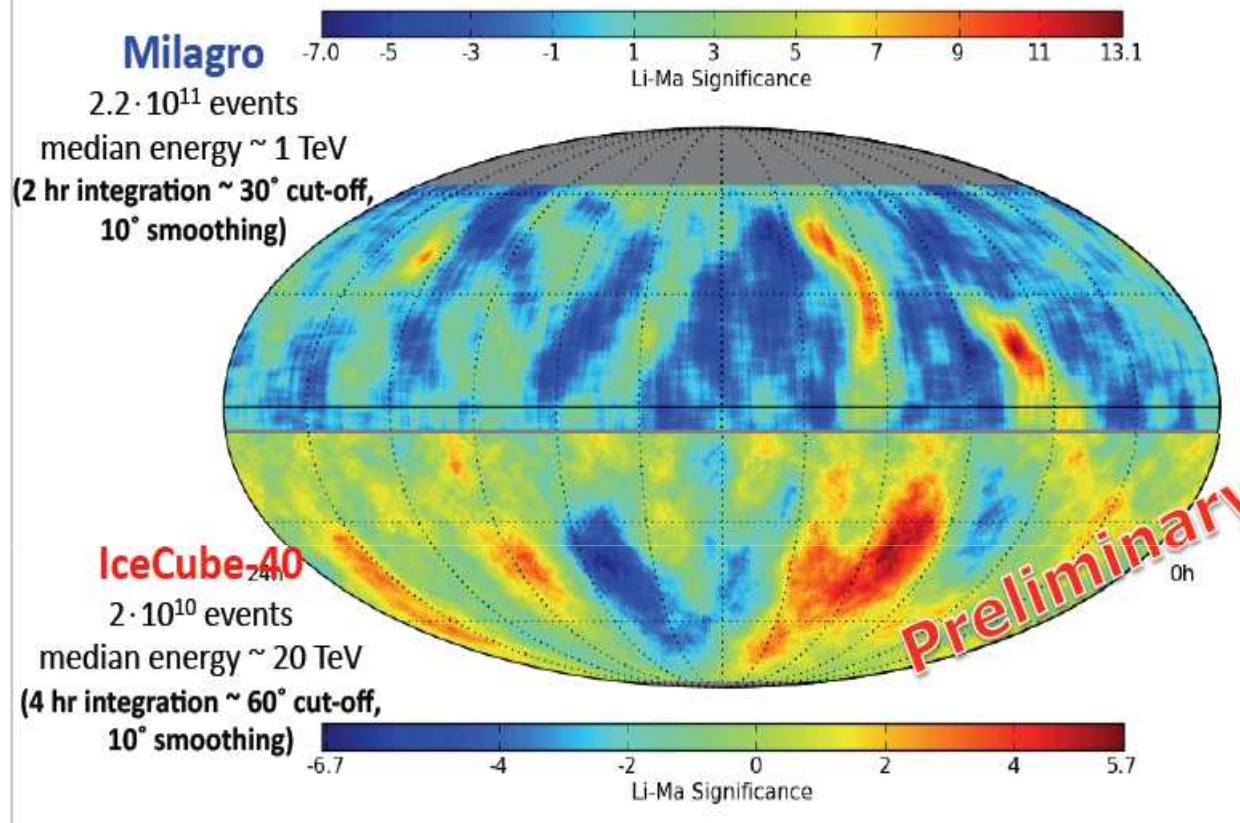
Reconstruction par
réseau de scintillateurs



Reconstruction
Par ANTARES

Etudes des rayons cosmiques

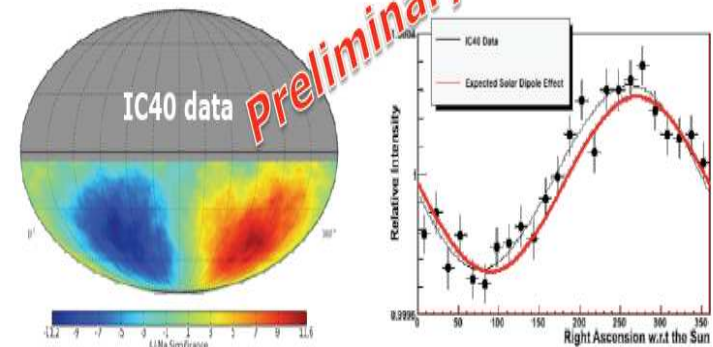
arXiv1011.5428v1



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

Anisotropie non expliquée...

Etudes en cours sur ANTARES



Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

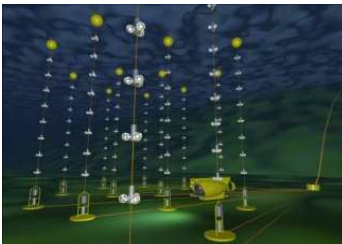
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

B) Les télescopes à neutrinos actuels

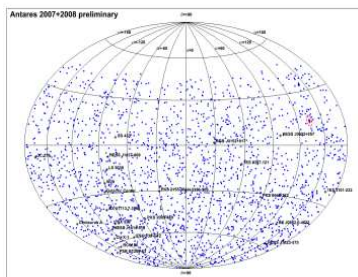
Principes de fonctionnement

Reconstruction

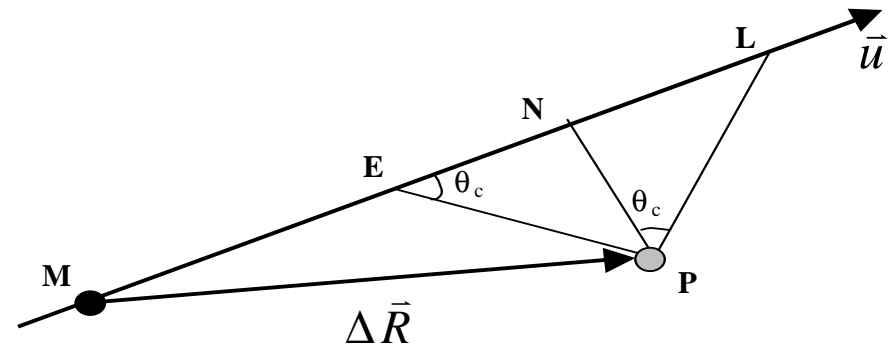
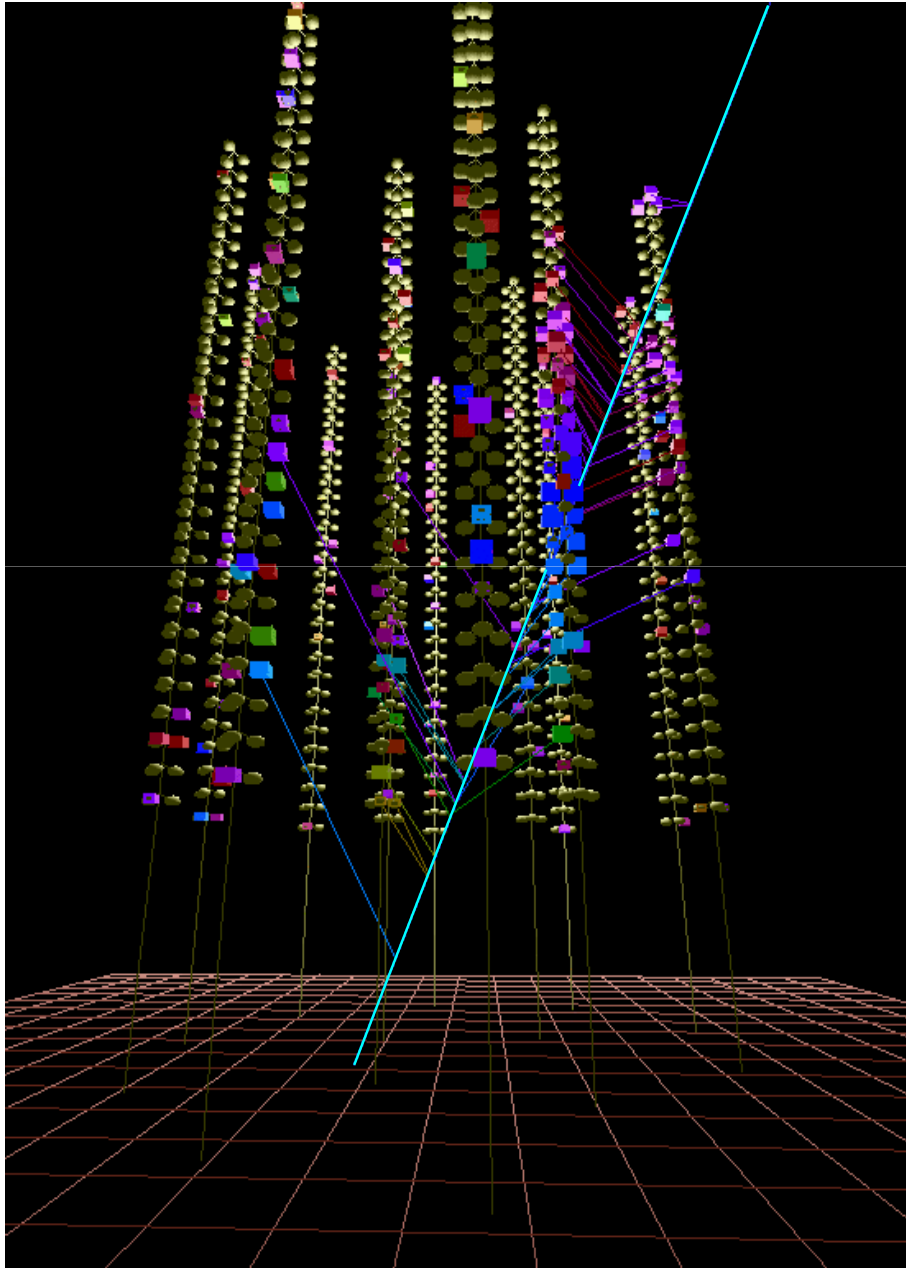
Calibration

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives



Reconstruction des trajectoires



$$c(t_{\text{theor}} - t_0) = \Delta \vec{R} \cdot \vec{u} + \alpha \sqrt{\Delta \vec{R}^2 - (\Delta \vec{R} \cdot \vec{u})^2}$$

$$\alpha \approx \text{tg} \theta_c$$

Il faut trouver les 5 paramètres de la trace :

M (x_0, y_0, z_0) @ t_0

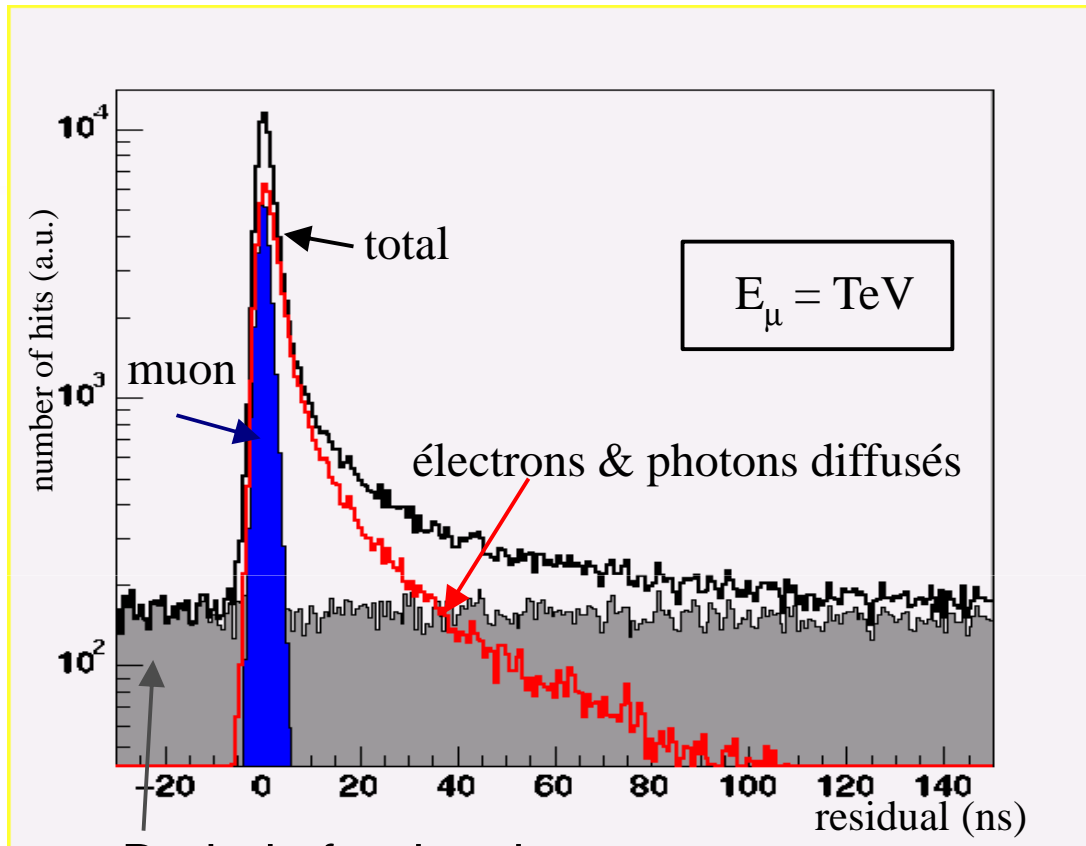
u (u_x, u_y, u_z)

1. Sélection des événements d'intérêt
fondée sur des critères de causalité

2 Ajustement fondé sur l'étude des résidus
temporels:

$$\Delta t_i = t_{\text{theor}}(\mathbf{M}, \mathbf{u}) - t_i$$

Fonction de densité de probabilité (PDF)



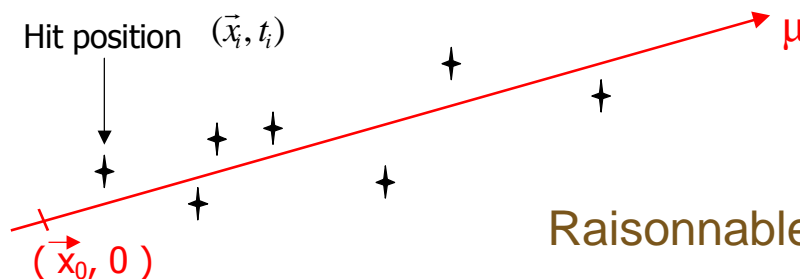
Simulations Monte Carlo avec
pour ingrédients les mesures
sur site

Difficulté : la PDF est plate pour
Les petits et très grands résidus



Il faut bien choisir les
paramètres de départ

Pré-ajustement linéaire



Raisonné si trajet du muon \gg longueur d'atténuation

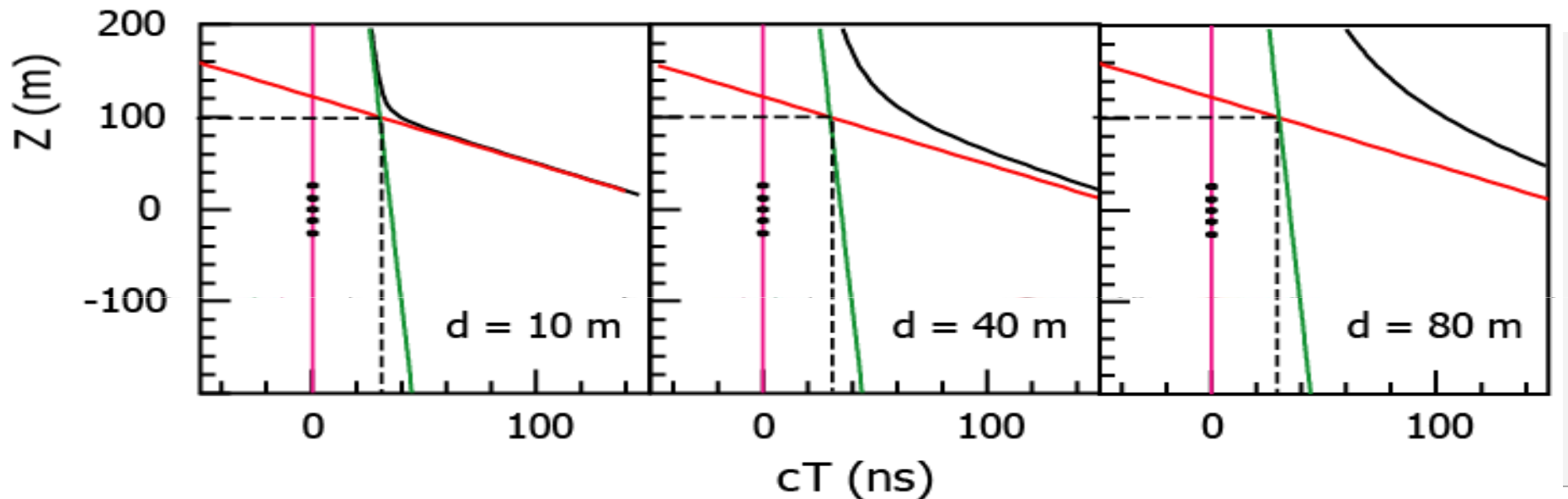
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_{hit}} a_i (\vec{x}_i - \vec{x}_0 - \vec{v} t_i)^2$$

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 »:

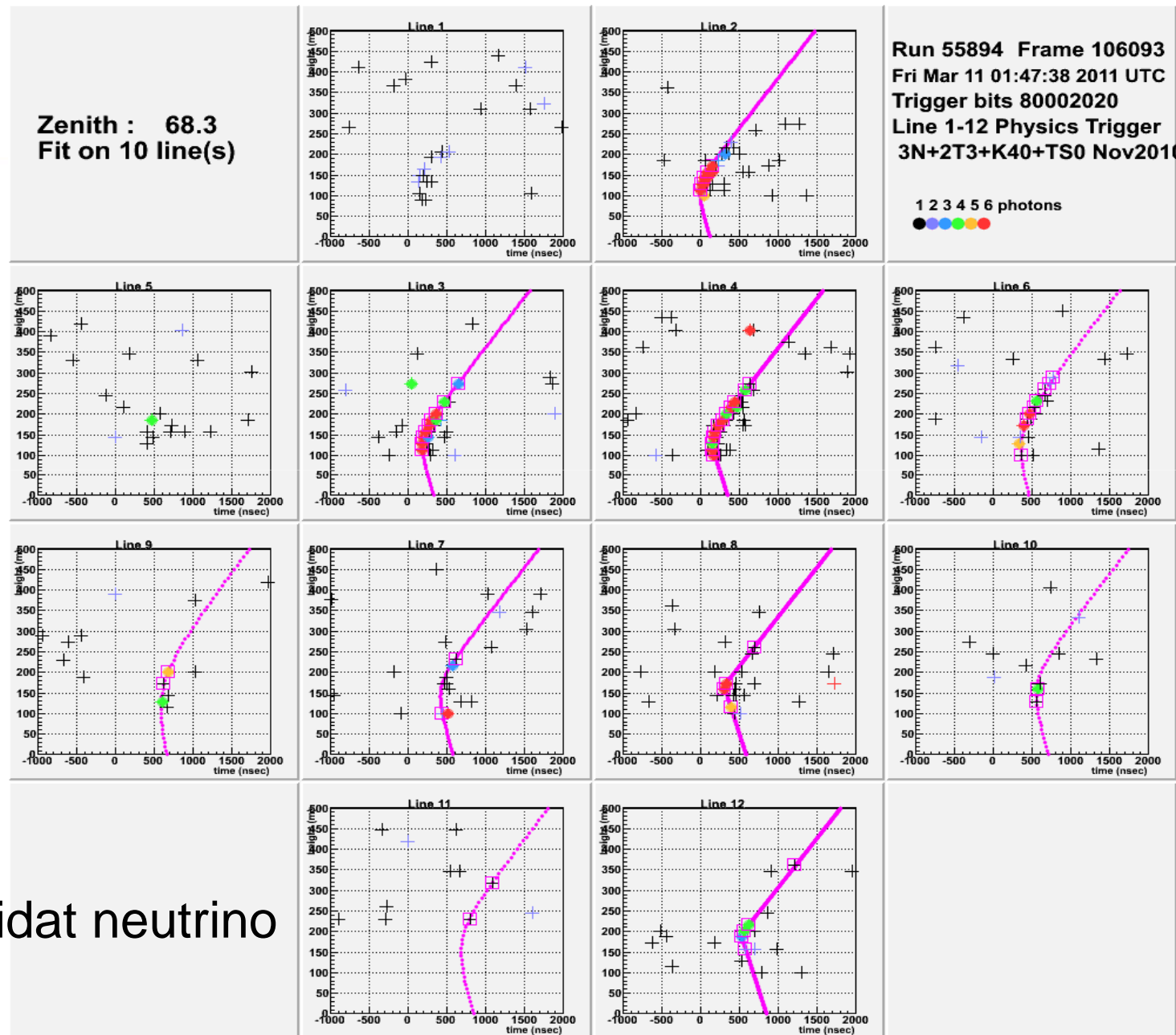
- Maximum de vraisemblance
- Fonction de densité de probabilité
- Algorithme sophistiqué
- Optimisé pour les muons montant (ν)

➤ « BBFit »: [Astropart. Phys. 34 \(2011\) 652-662](#)

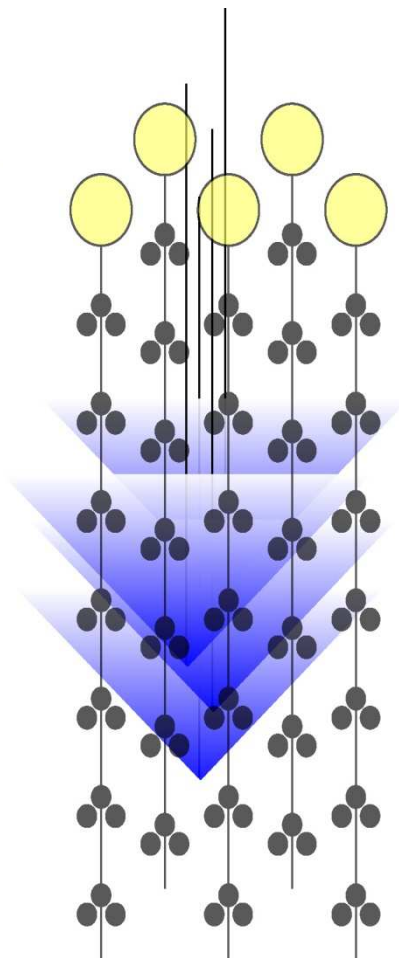
- Minimisation d'un χ^2
- Photons directs
- Utilisée en ligne
- Adaptée aux muons descendant

Hypothèse : Un seul muon dans le détecteur

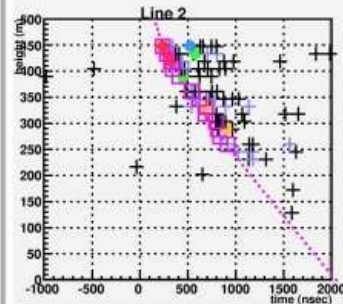
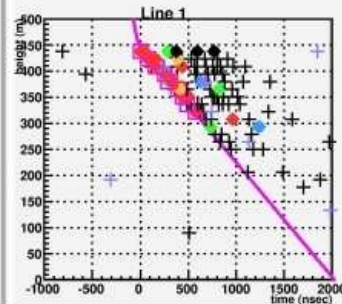
Un muon = $\sum(t_i, q_i, \text{position}_i)$



Une gerbe de muon?

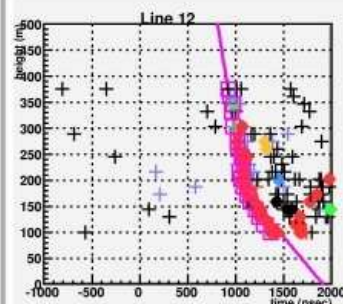
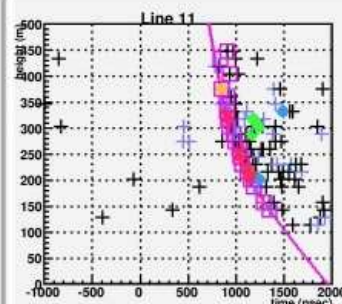
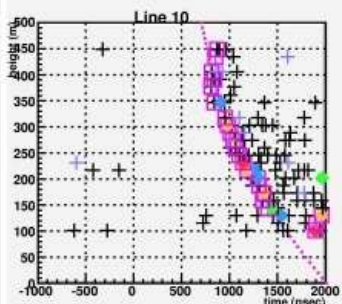
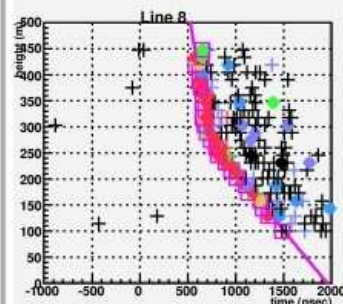
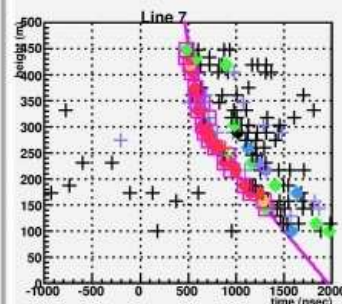
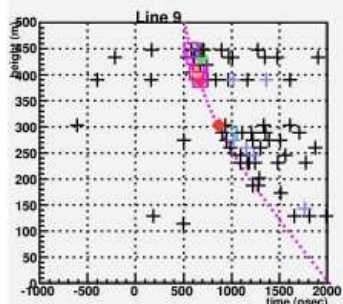
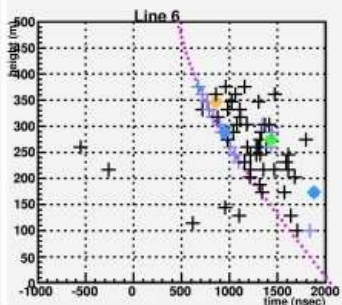
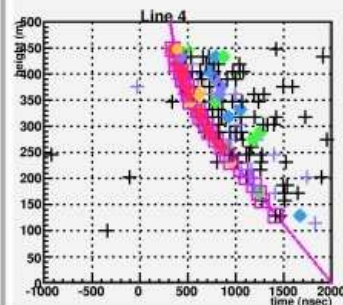
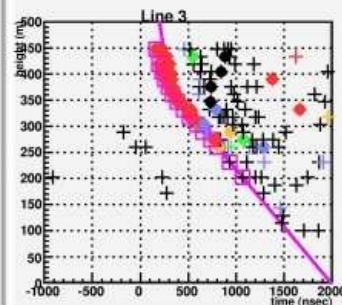
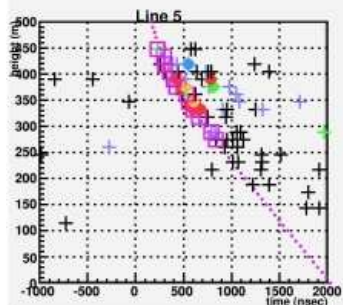


Zenith : 144.3
Fit on 11 line(s)



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
● ● ● ● ● ●

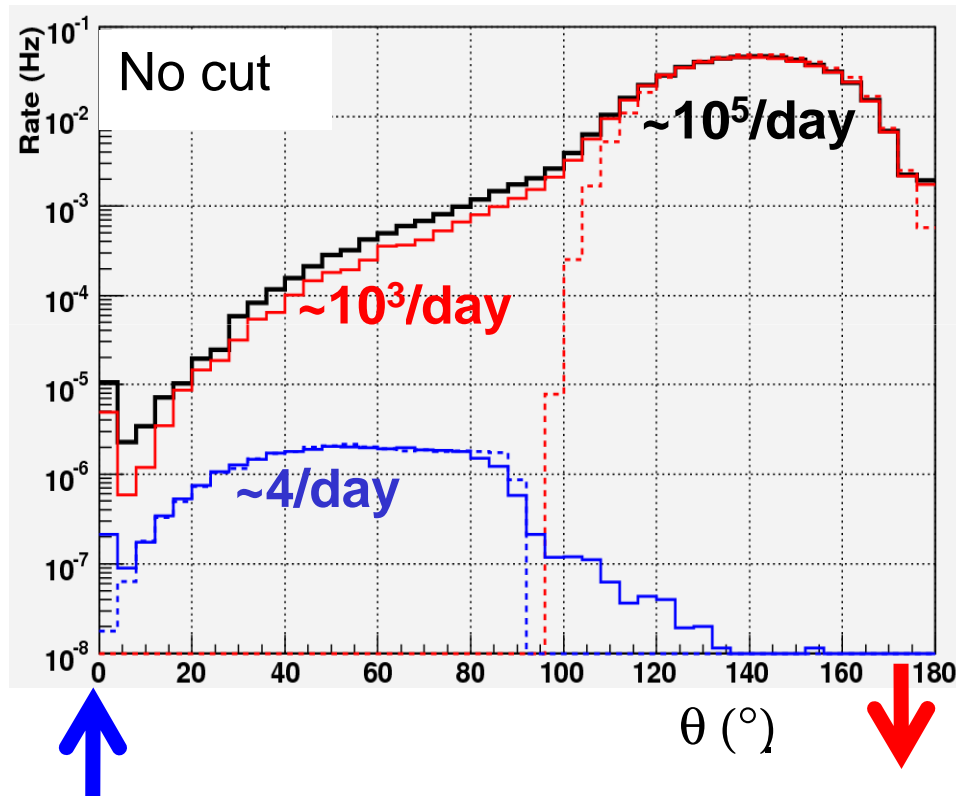


Des efforts en cours pour
estimer la multiplicité

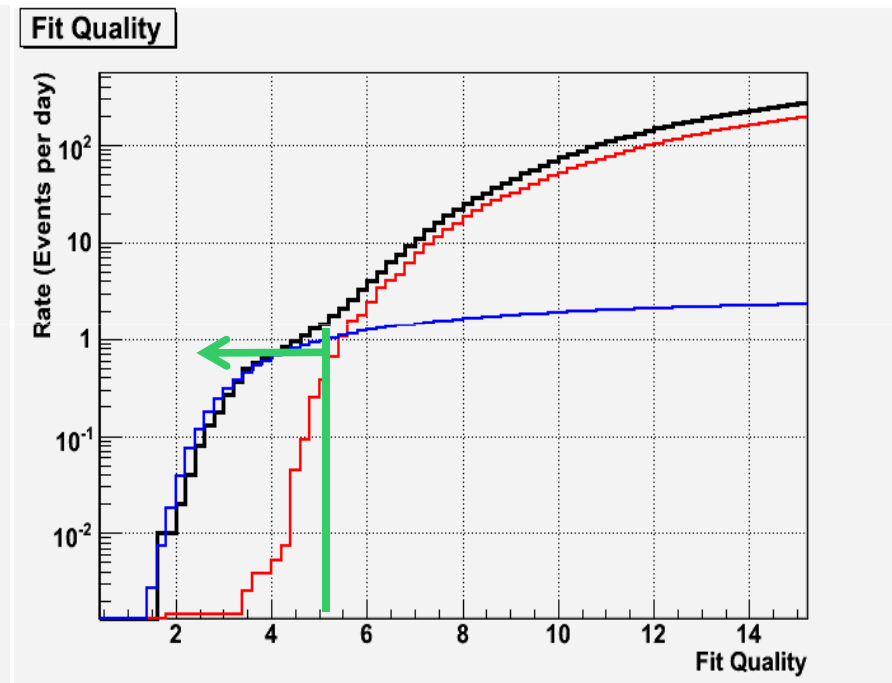
Sélection des événements

— Reconstruction
 - - - MC truth
 Data
 MC Muons
 MC Neutrinos

Upward tracks:



Typical ANTARES numbers



Quality cut:
 \Rightarrow get rid of badly
 reconstructed μ
 Few % μ contamination

Résolution angulaire attendue

Taille apparente importante:

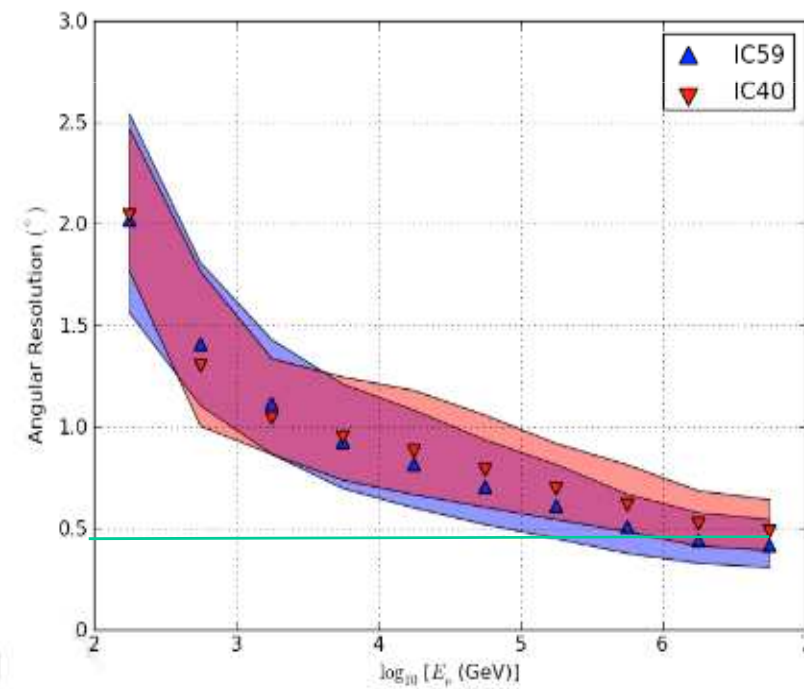
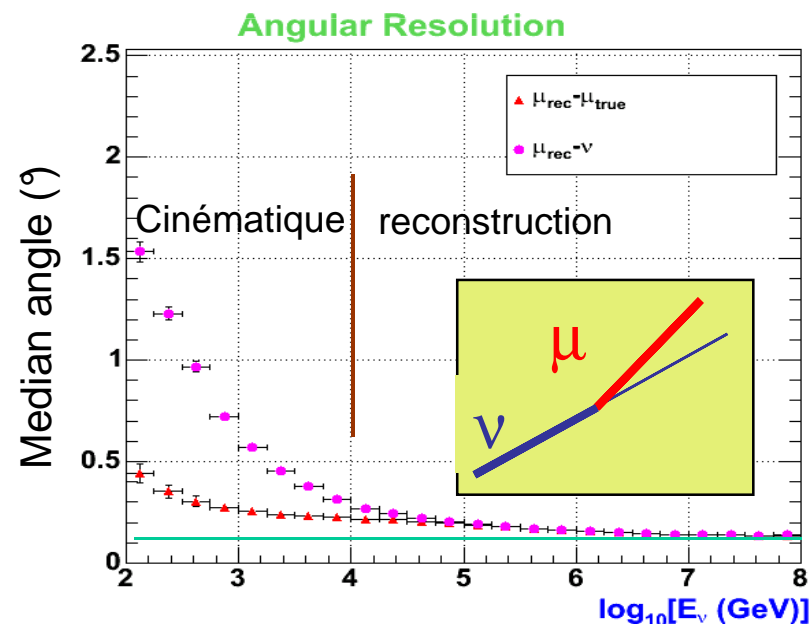
RXJ1713 (SNR): 1°

Moon, Sun : 0.5°

Cen A (AGN) : 0.3°

Pour la recherche de source :

Background $\propto \text{Res.}^2$



Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

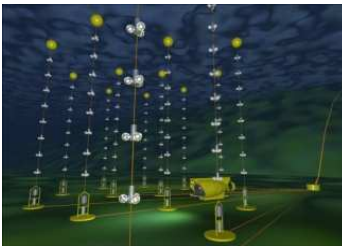
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

B) Les télescopes à neutrinos actuels

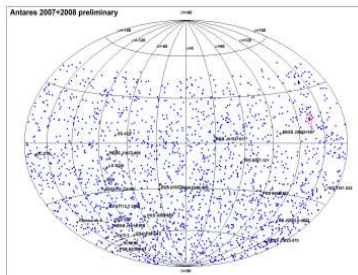
Principes de fonctionnement

Reconstruction

Calibration

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives

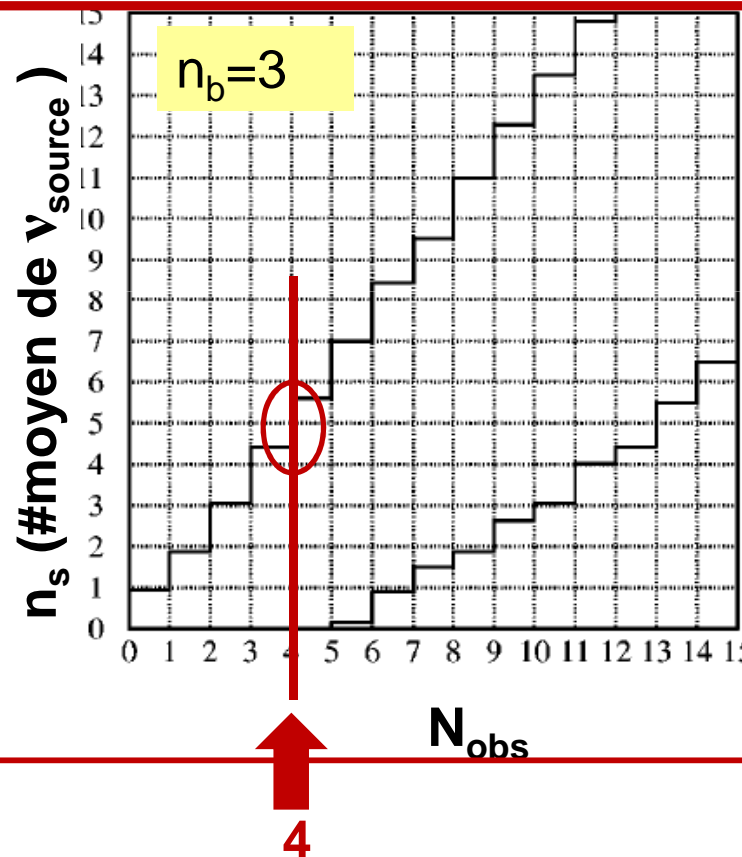


Limite supérieure sur un flux de neutrinos

On observe N_{obs} événements.

Donner un intervalle de confiance sur un flux moyen de source compatible à 90 % avec l'observation de N_{obs} événements.

Objectif



$$P(N_{\text{obs}}, n_s) = \frac{(n_s + n_b)^{N_{\text{obs}}} \exp(-(n_s + n_b))}{N_{\text{obs}}!}$$

➔ **5** = Limite supérieure = $\mu_{90}(N_{\text{obs}}, n_b)$
 \downarrow
 $\Phi_{90\%}$

Toute source ayant un flux moyen $< \Phi_{90\%}$ est compatible avec l'observation à 90% de niveau de confiance

Méthode employée

Hypothèse sur un flux de signal :

- Un flux diffus $E^2\Phi_{\text{test}} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

Observation : un excès de neutrinos

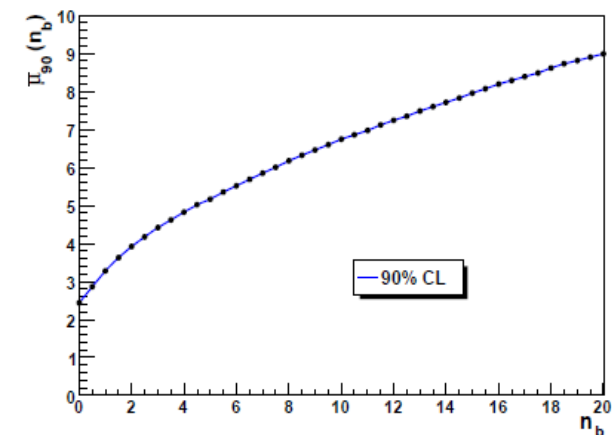
Mettre des coupures sur des variables pour :

- maximiser le potentiel de découverte
- minimiser la sensibilité dans une hypothèse de non-découverte

Analyse en
aveugle

Sensibilité (Monte-carlo): limite supérieure moyenne sur un flux de source obtenue pour des observations qui ne contiendraient que du bruit de fond.

$$\bar{\mu}_{90}(n_b) = \sum_{n_{obs}=0}^{\infty} \mu_{90}(n_{obs}, n_b) P(n_{obs}|n_b)$$



Des simulations sont nécessaires

Enjeu : accord entre les bruits de fond simulés et mesurés

- Production des flux ν_{atm} , μ_{atm} + hypothèse sur ν_{source}
- Interaction des ν dans la croûte terrestre et l'eau
- Perte d'énergie des muons
- Production et dispersion des photons Tcherenkov
(*indice de réfraction, longueur de diffusion et d'absorption*)
- Simulation des PM (*acceptance, TTS, position*)
- Simulation de l'électronique (*temps, charge, seuil*)
- Filtrage des impulsions de PM

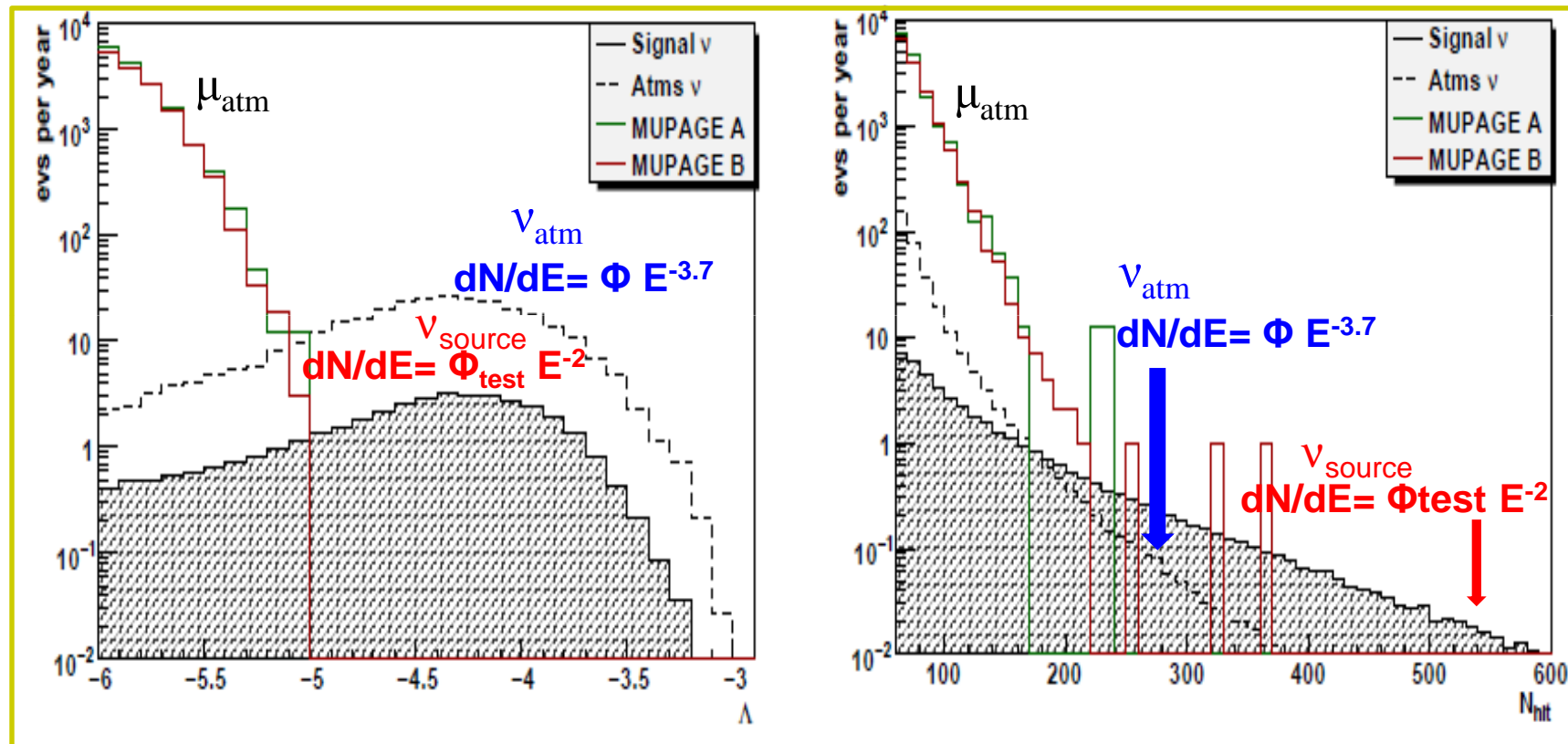
+ commun avec les données :

- Calibration du détecteur
- Reconstruction de la trajectoire pour chaque événement sélectionné
➡ Paramètre de qualité Λ , nb impulsions de PM/muon, ...

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

1. Principes de sélection des données

pré-sélection : muons montants



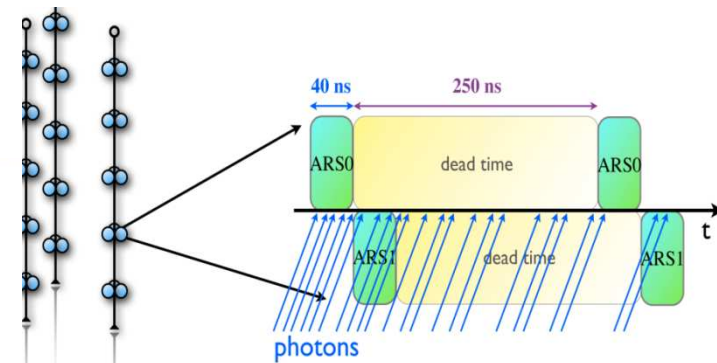
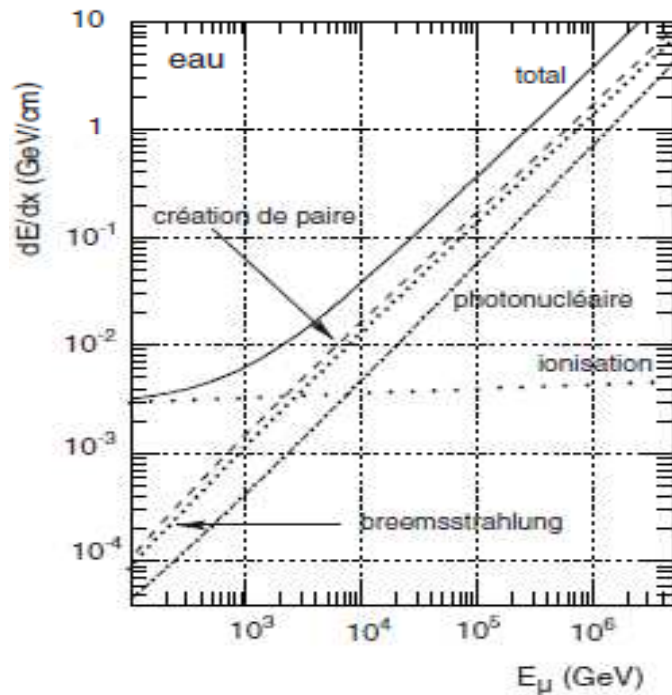
➡ Secondes coupures éliminent les μ_{atm} : Λ ($\sim \log$ Likelihood) et N_{hit}

➡ Estimateur d'énergie

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

2. Coupure supplémentaire sur l'estimateur d'énergie

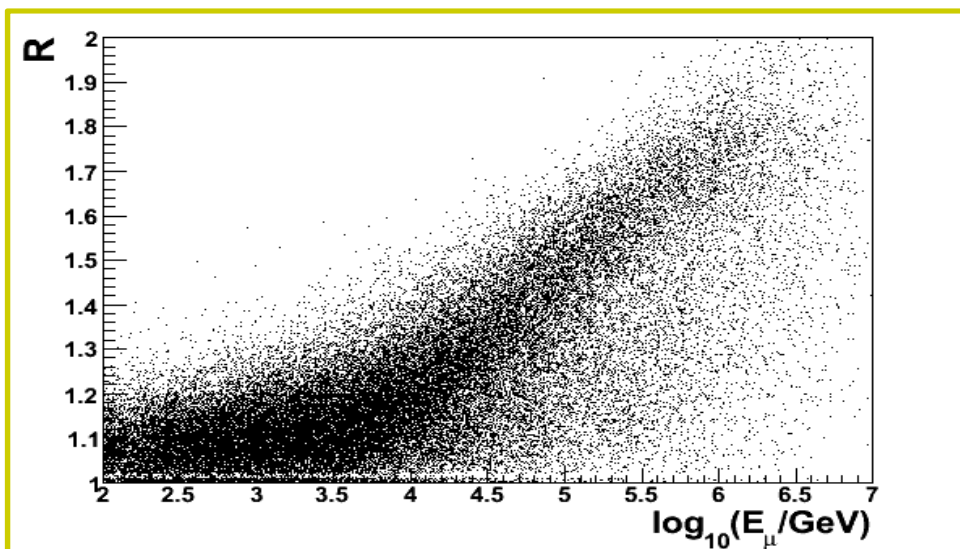
dE/dx des muons dans l'eau



Estimateur d'énergie

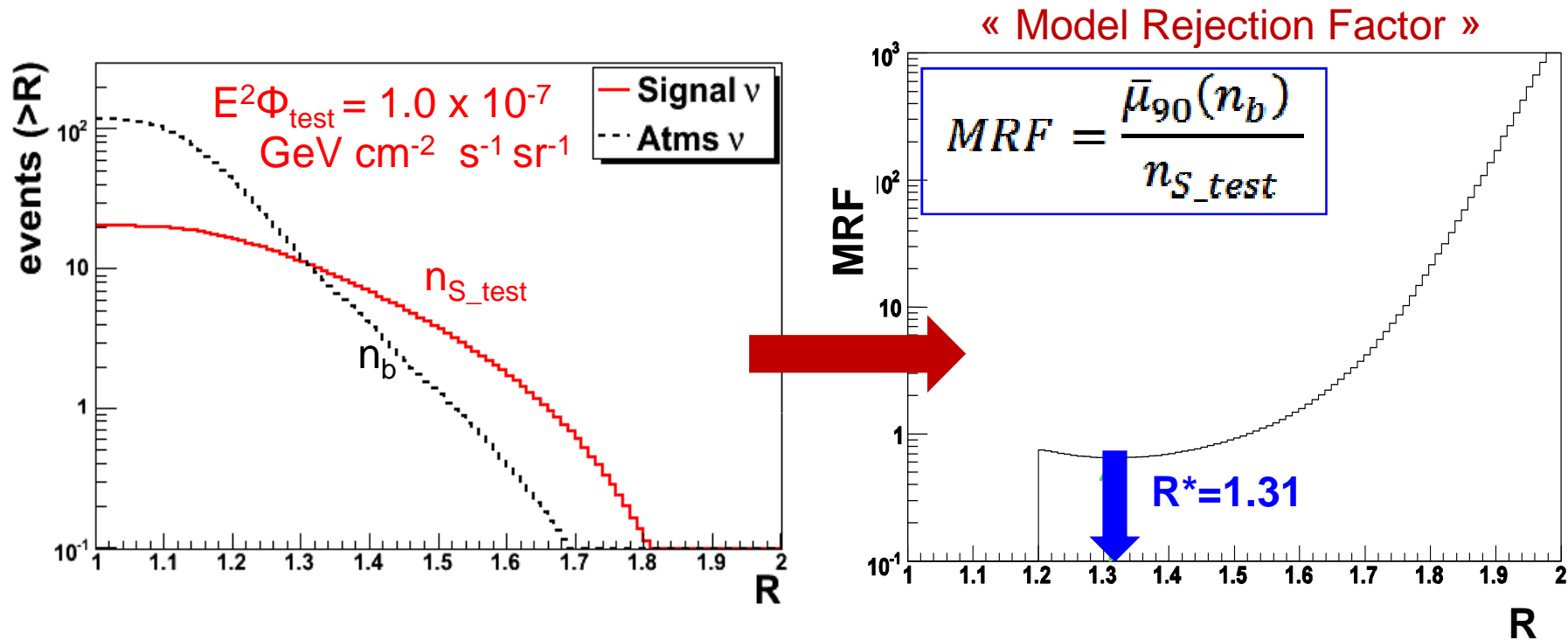
$$R = \sum_i \frac{N_i}{N_{PM}}$$

Nb moyen d'impulsions dans le même PM



Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

3. Minimisation de la sensibilité



$$\bar{\Phi}_{90\%} = \frac{\bar{\mu}_{90}(n_b)}{n_{S_test}} \Phi_{test} \text{ min}$$

La sensibilité à 90% de niveau de confiance
 $E^2\Phi_{90\%} = 4.3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

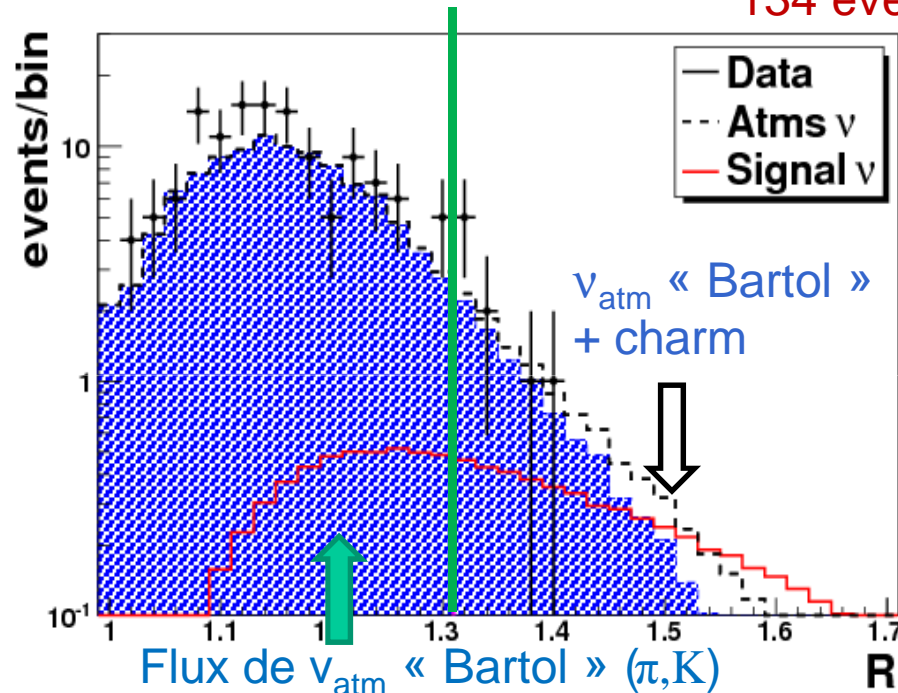
1 an de prises de données, 12 lignes

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



$R > 1.31$

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

$n_b : 10.1-12.5 \text{ (11.3)}$

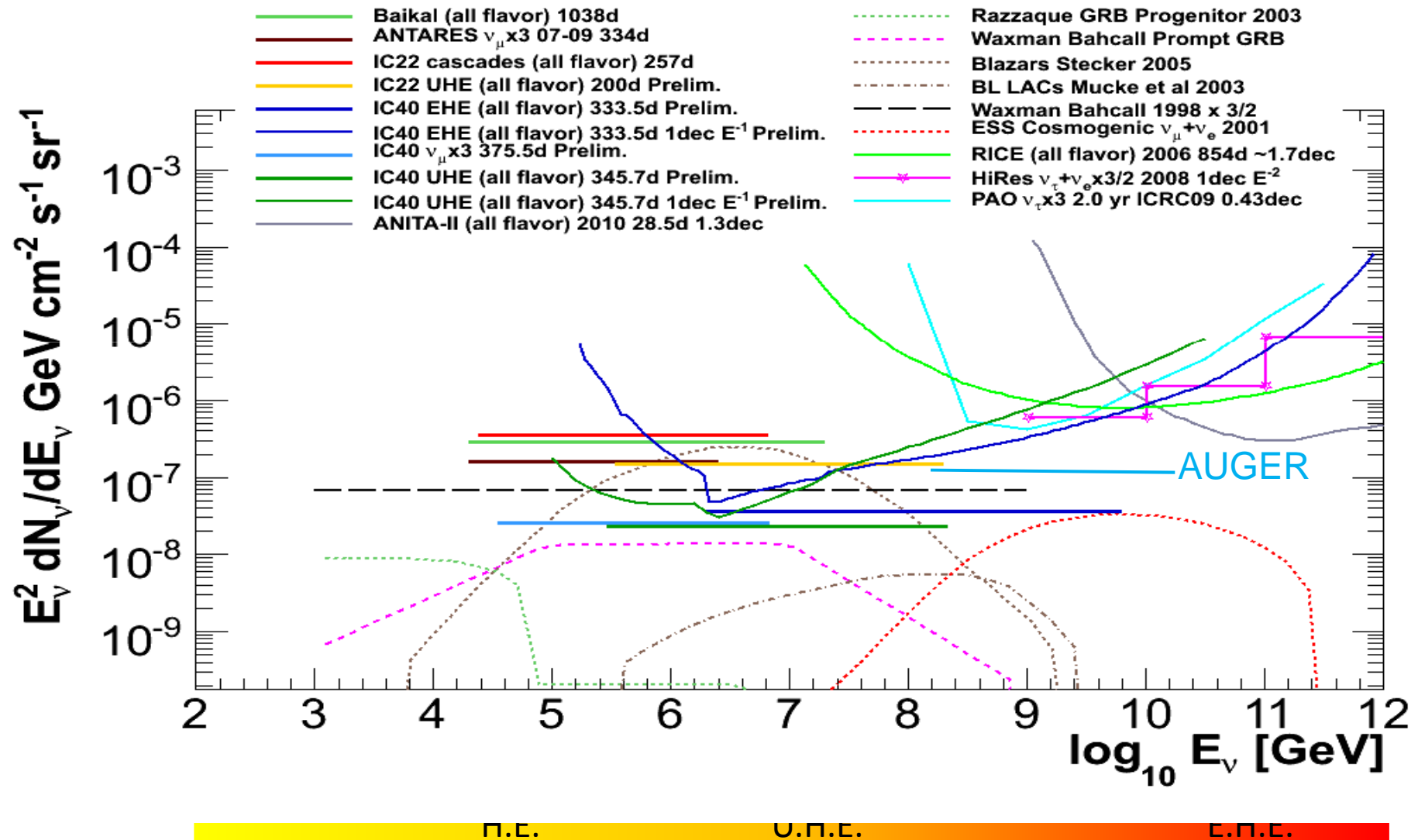
La limite supérieure (FC, 90% CL) du flux de ν_{astro}



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

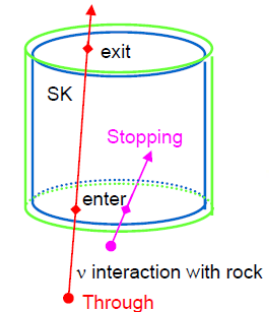
HE/UHE/EHE flux limits

All-flavor 90% CL limits and model fluxes



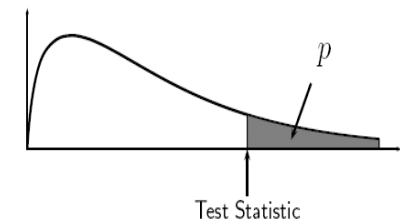
Recherche de sources ponctuelles

- 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

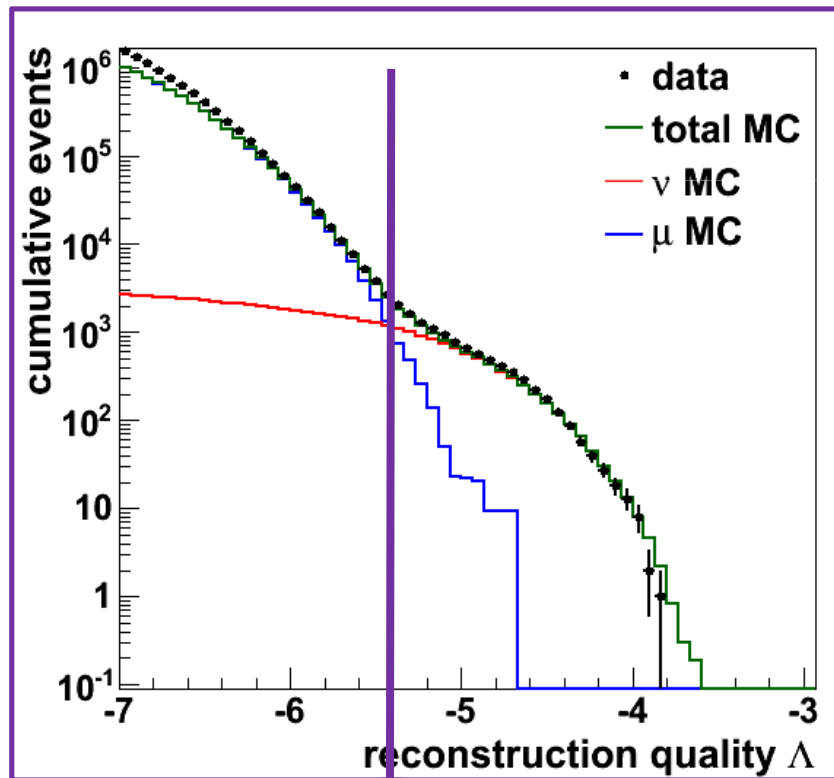
ANTARES

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

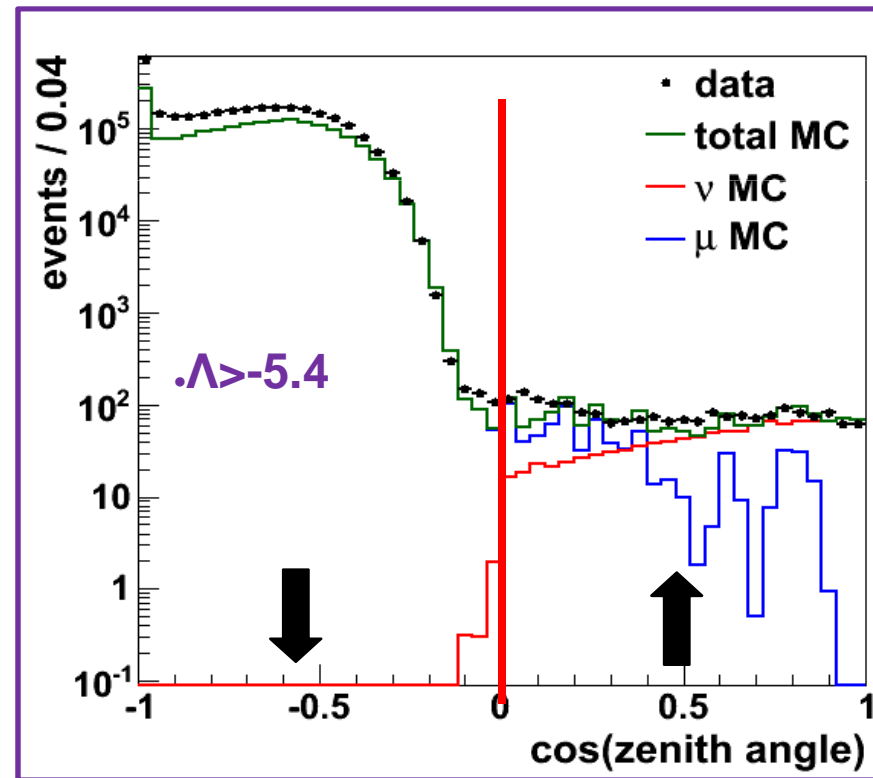
2040 muons montants (ν : 64% , μ : 36%)

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

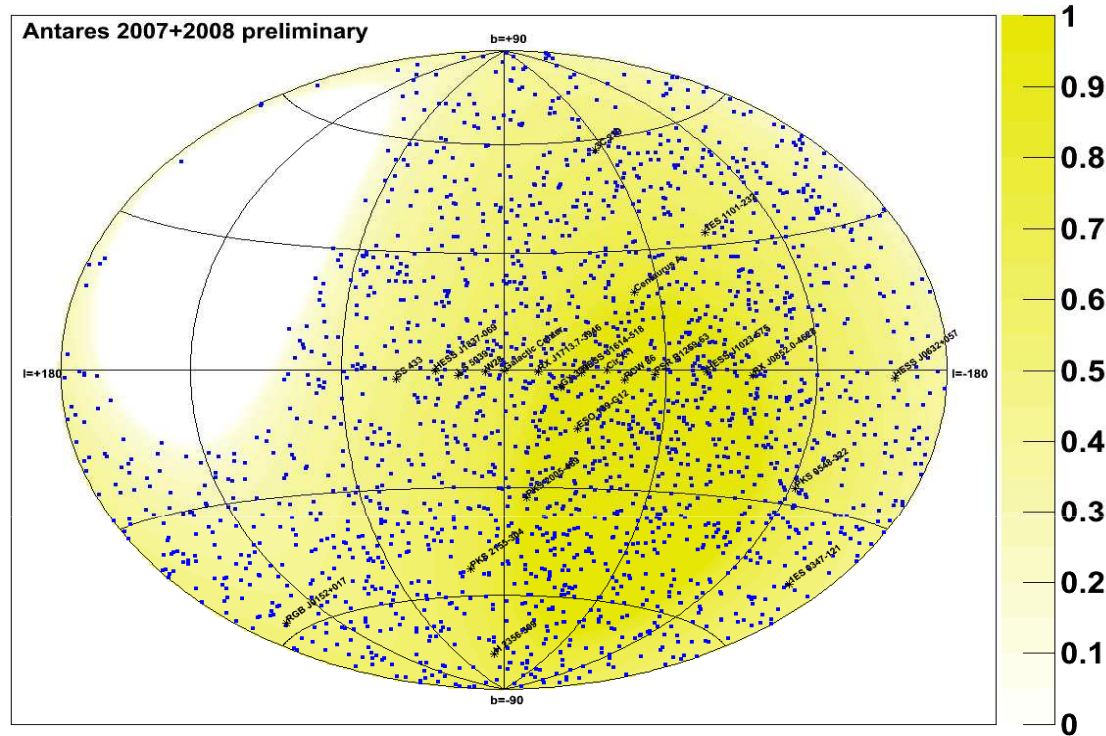
Préliminaire



5.4



Carte du ciel ANTARES



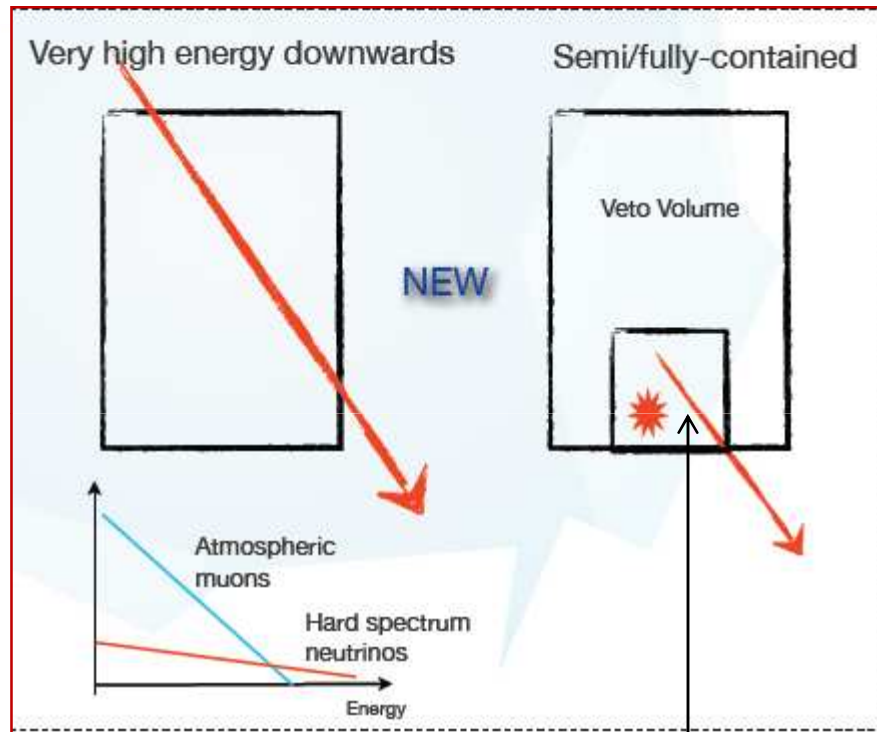
Préliminaire

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

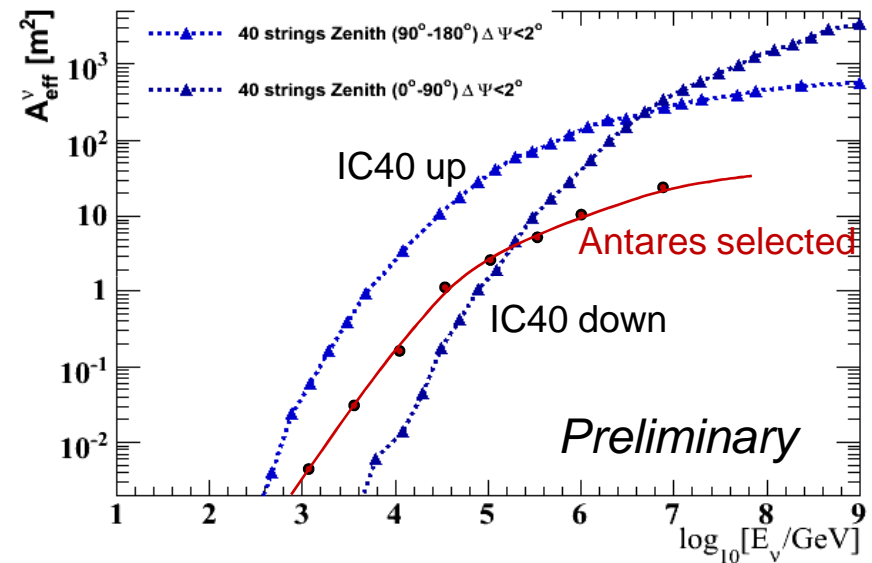
	dans 1 degré	commun aux 2 échantillons
muons reconstruit à tort comme montant	60%	70%
neutrinos avec flux en E^{-2}	92%	97%

IceCube regarde tout le ciel

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



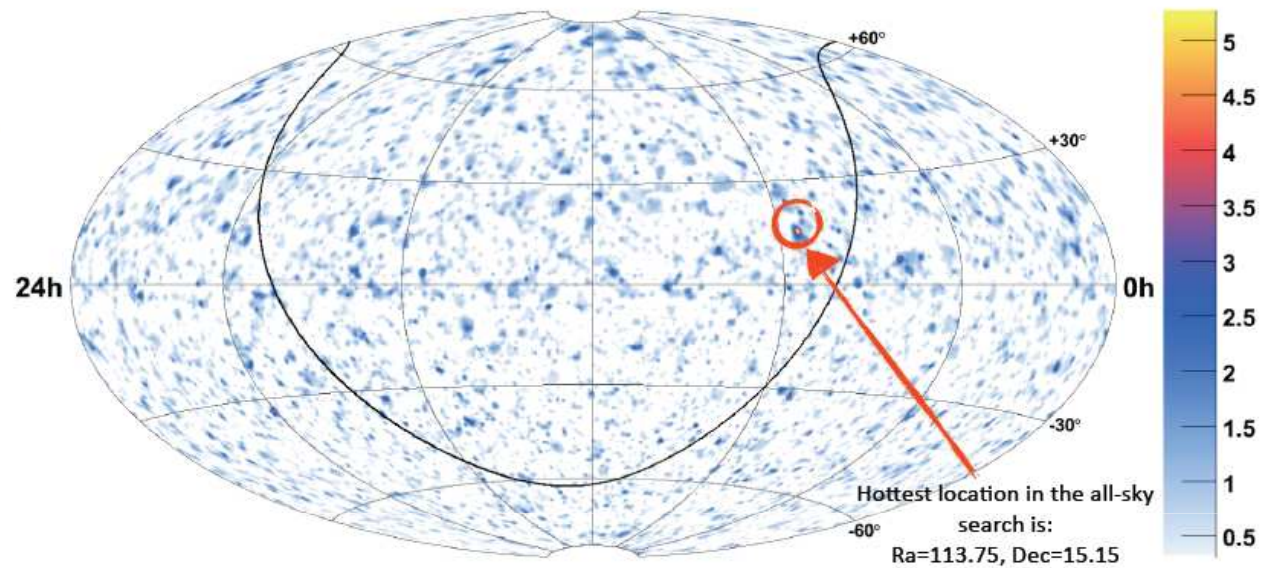
Including DeepCore



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



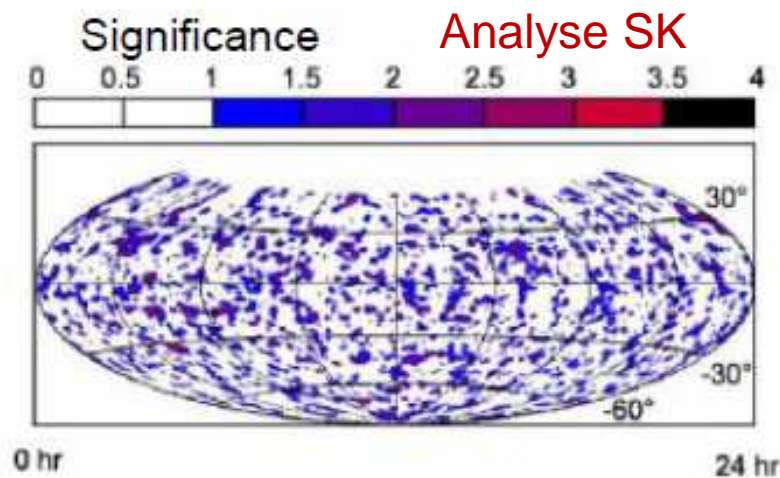
All sky post-trial:

plus basse p-value = 18%

Sources choisies:

Plus basse *p-value* = 10%

Pas d'excès ➡ limites



SuperKiomande post-trial

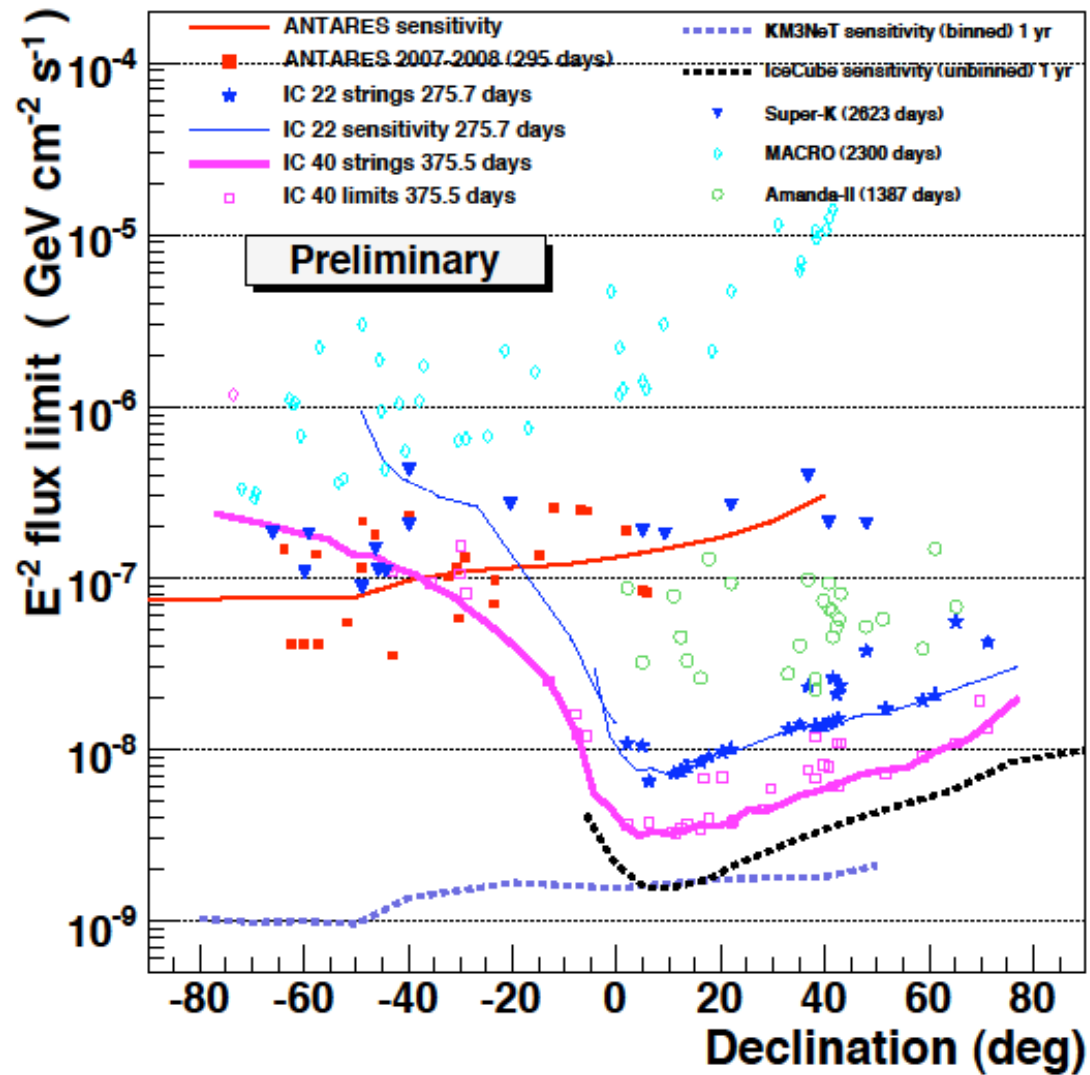
$p\text{-value} = 0.025 (\sim 2\sigma)$

RX J1713.7-1946

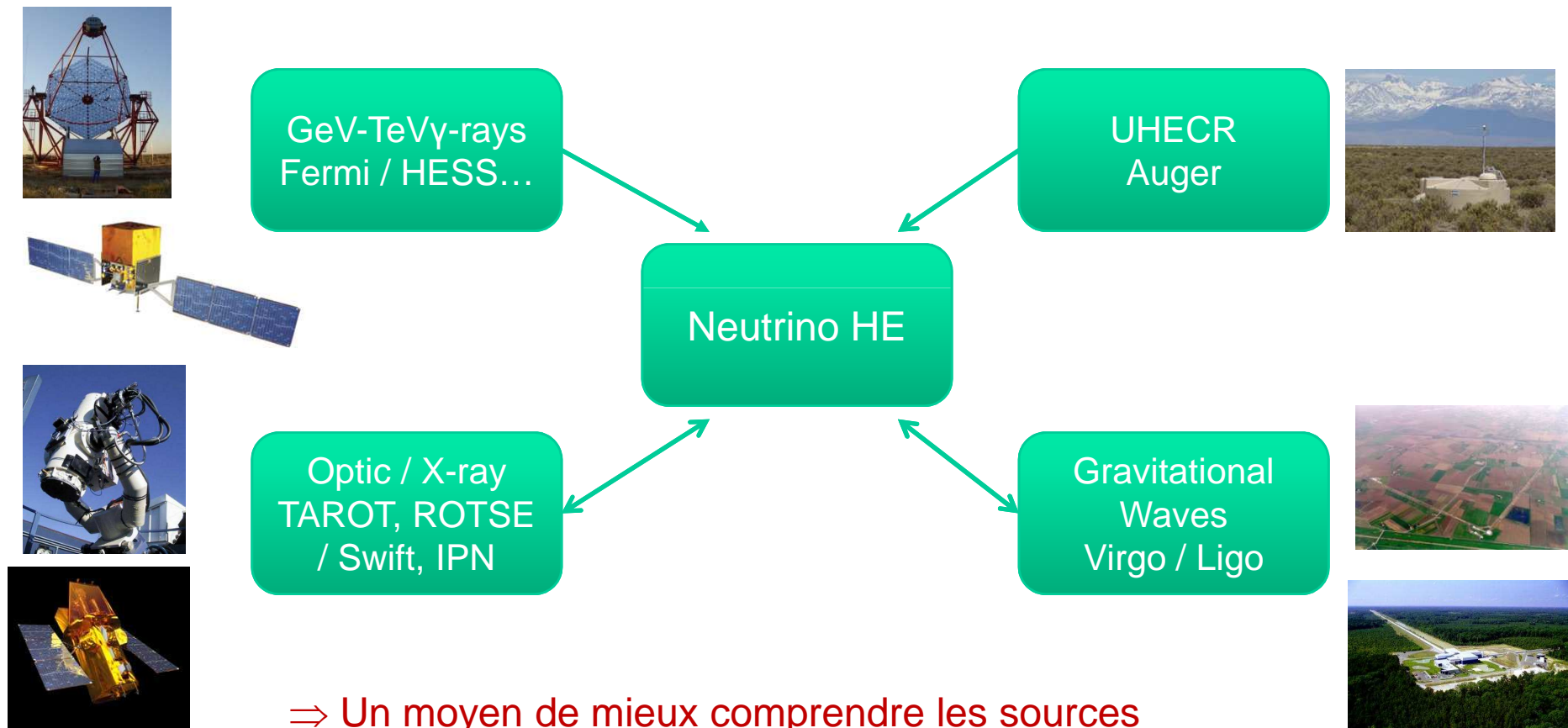
Pas d'excès significatif

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

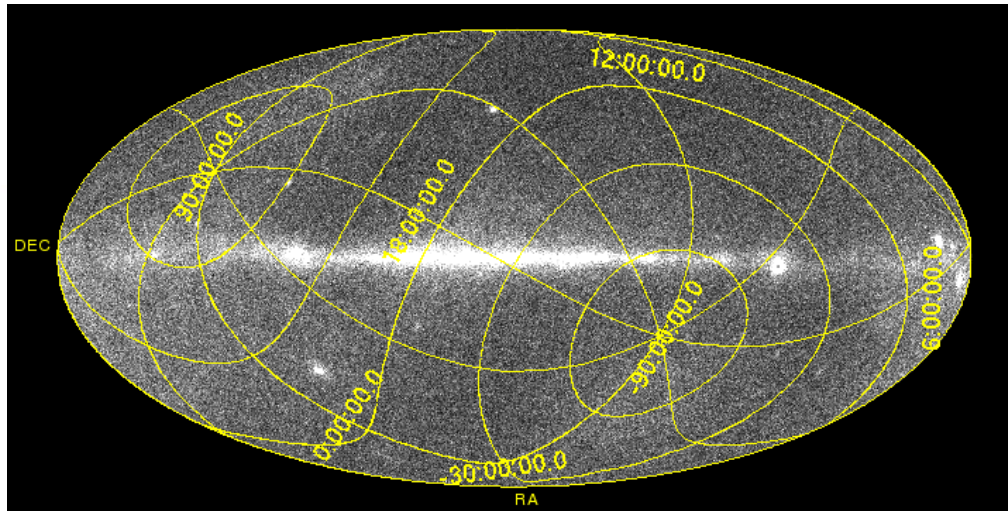
Limites supérieures



Programme multi-messagers

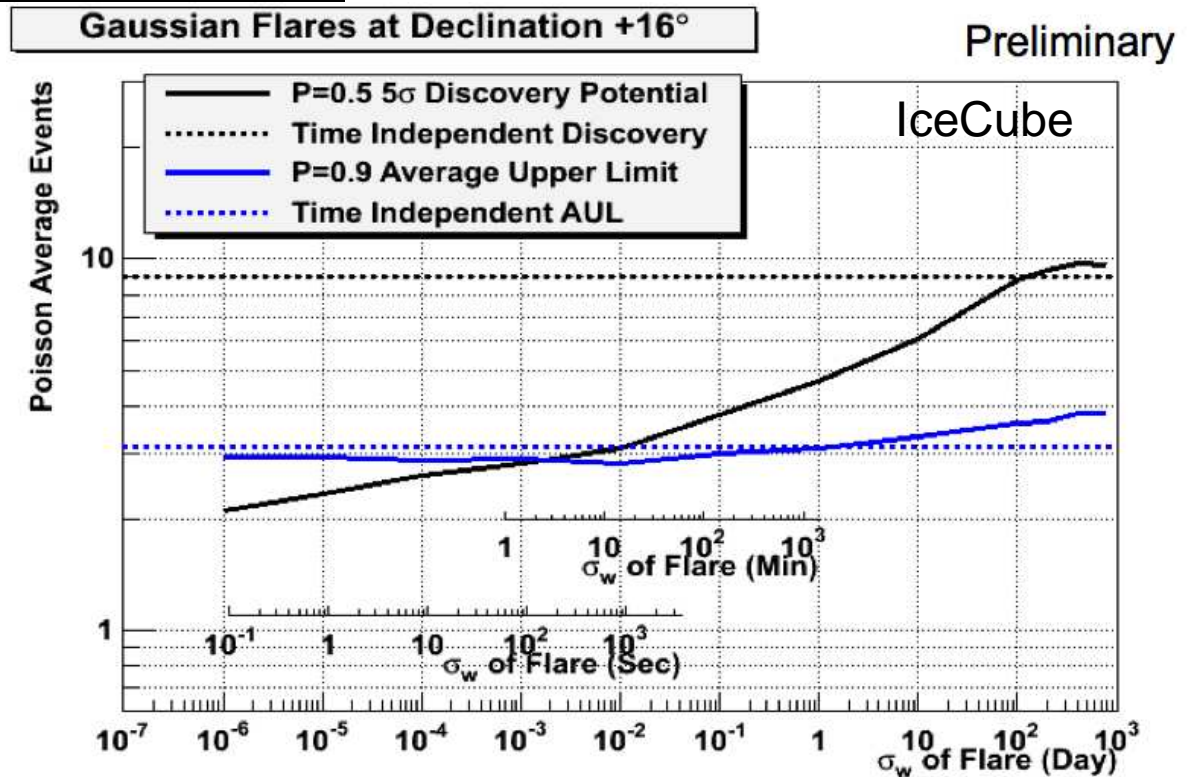


Etude des flares d'AGNs

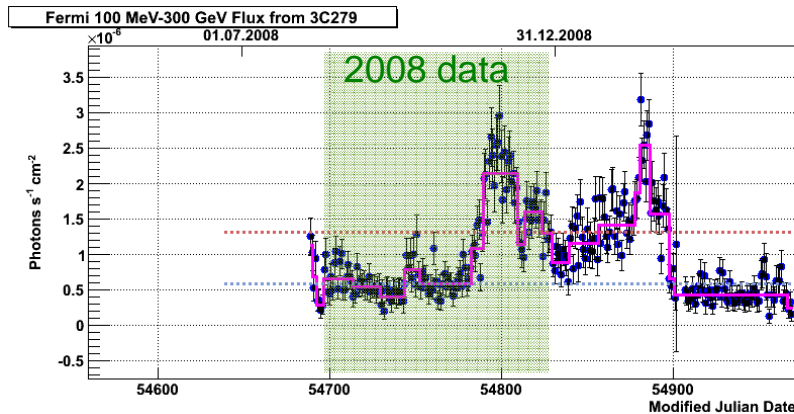


De nombreuses sources de
FERMI,
détectées à haute énergie,
sont variables...

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



Etude des flares d'AGNs



Données Fermi LAT

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

Durée typique : 1-20 jours

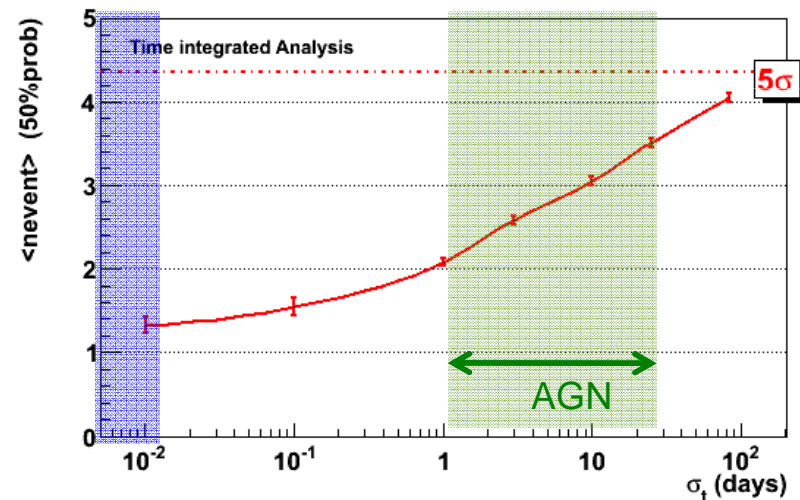
ANTARES:

- Time dependant likelihood method
- Analyse des données 2008 (4 mois)
- Performance: Nombre d'événements nécessaires pour une découverte à 5 σ (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 $\approx 10\%$)

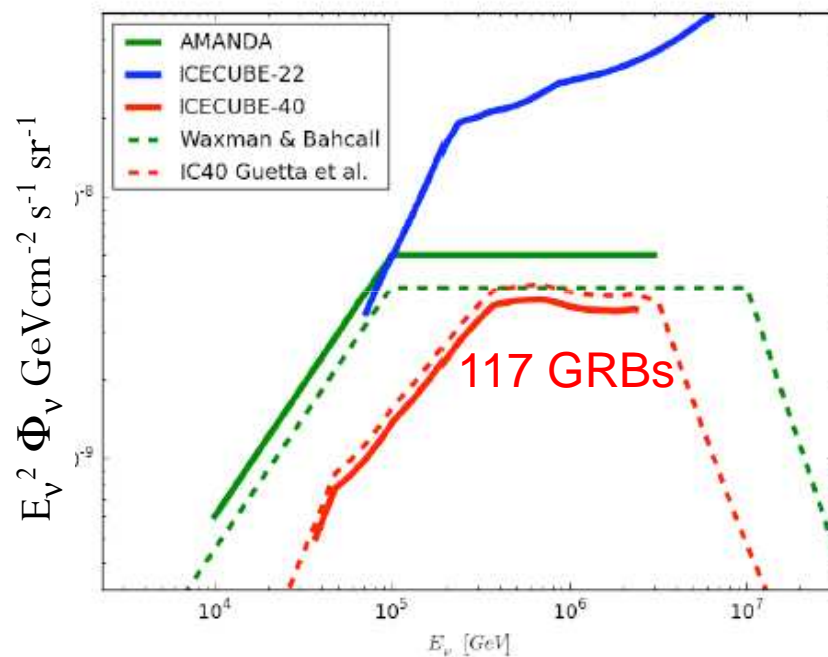


Preliminary

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)

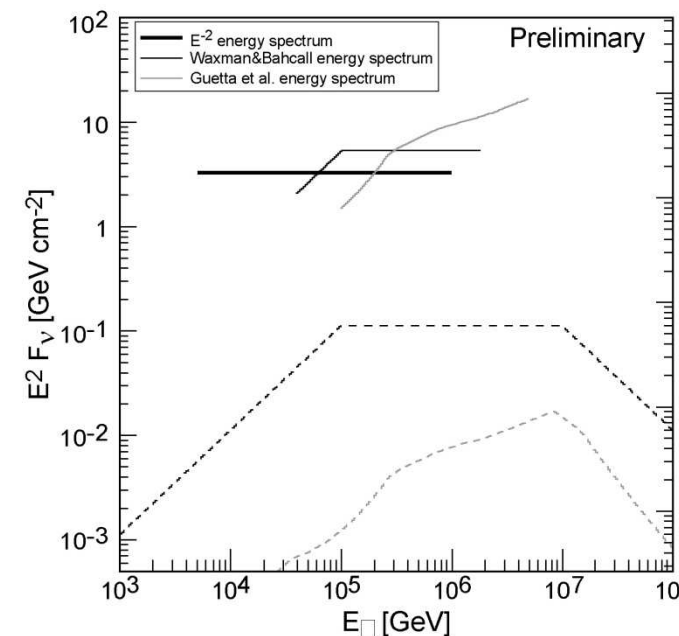


Meilleure limite avec IC40

Exclut les prédictions les plus optimistes

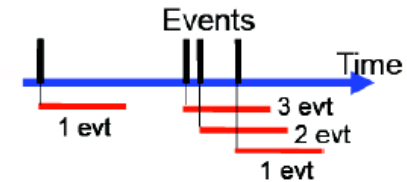
Phys.Rev.Lett.106:141101,2011

- 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)

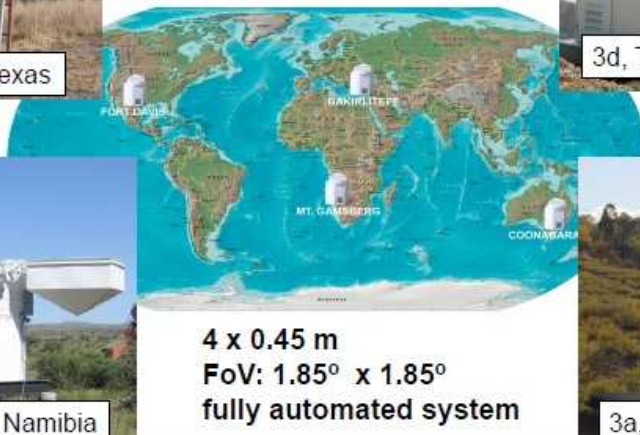


IceCube

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



**“The sun never
rises over the
ROTSE empire”**



Antares

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

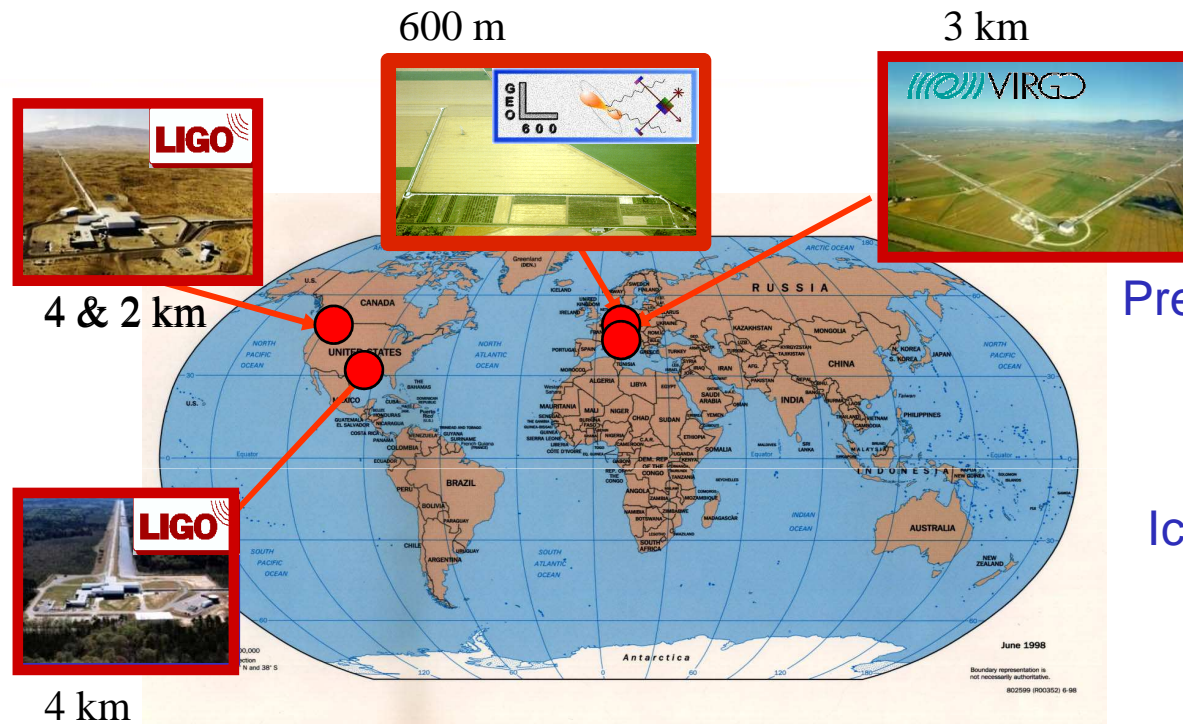
- TAROT (La Silla, Chile) since Feb 2009
 $T_0, T_0 + 1, 3, 9$ and 27 days
- ROTSE



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

GW-HEN coïncidences

Les interféromètres gravitationnels:

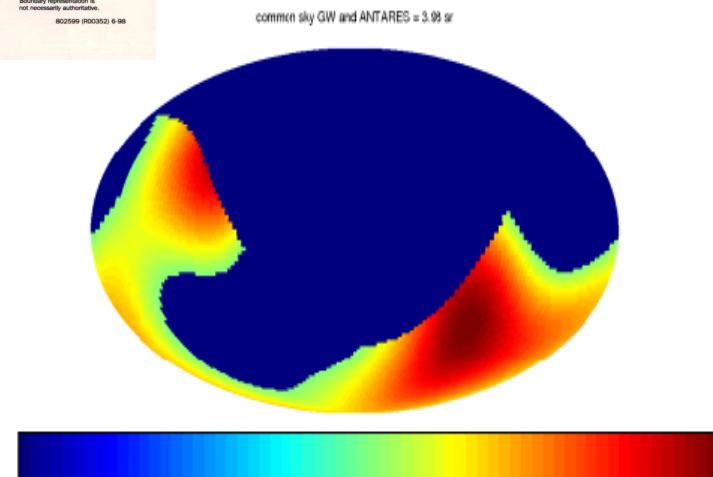


Première collaboration (MoU)
entre LSC et ANTARES
Sept 2009

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>



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)

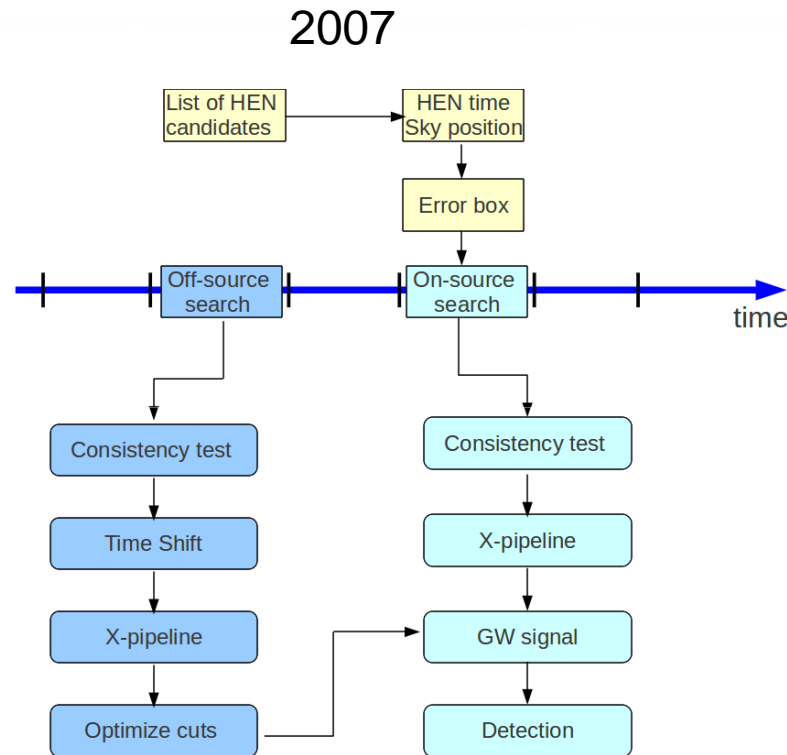
VIRGO

Inclut données jusqu'en 2010

Les analyses en cours

Plusieurs types d'analyse possibles:

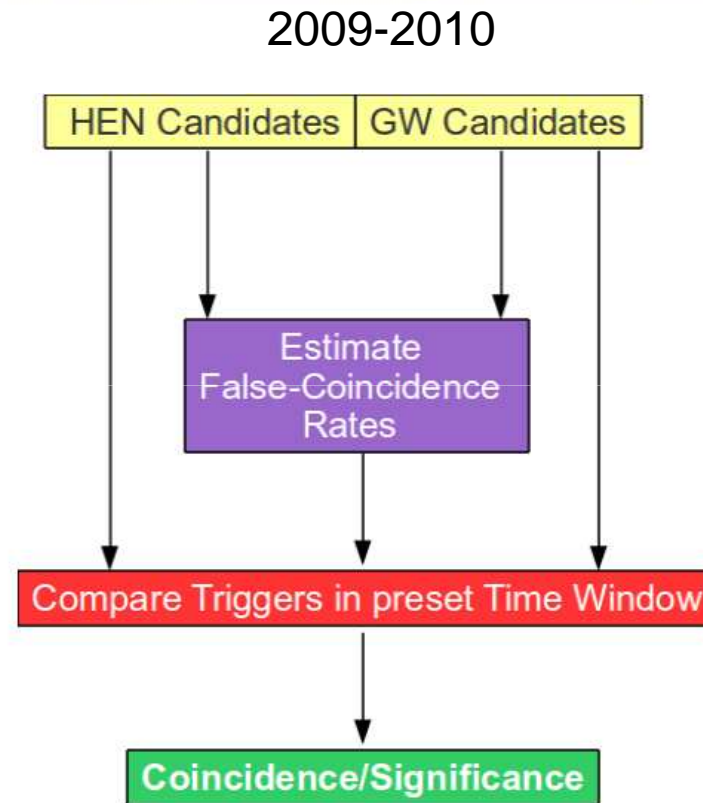
Thèse de B. Bouhou (APC)



153 candidats neutrino sélectionnés

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

Boîte ouverte il y a quelques jours
1 événement observé (pas significatif)



Fenêtre de coïncidence $\pm 500s$

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

Recherche de matière noire

Annihilations de particules supersymétriques dans les corps denses

$$\Gamma_{\text{ann}} = \frac{\sigma_{\text{ann}} v^2}{m^2}$$

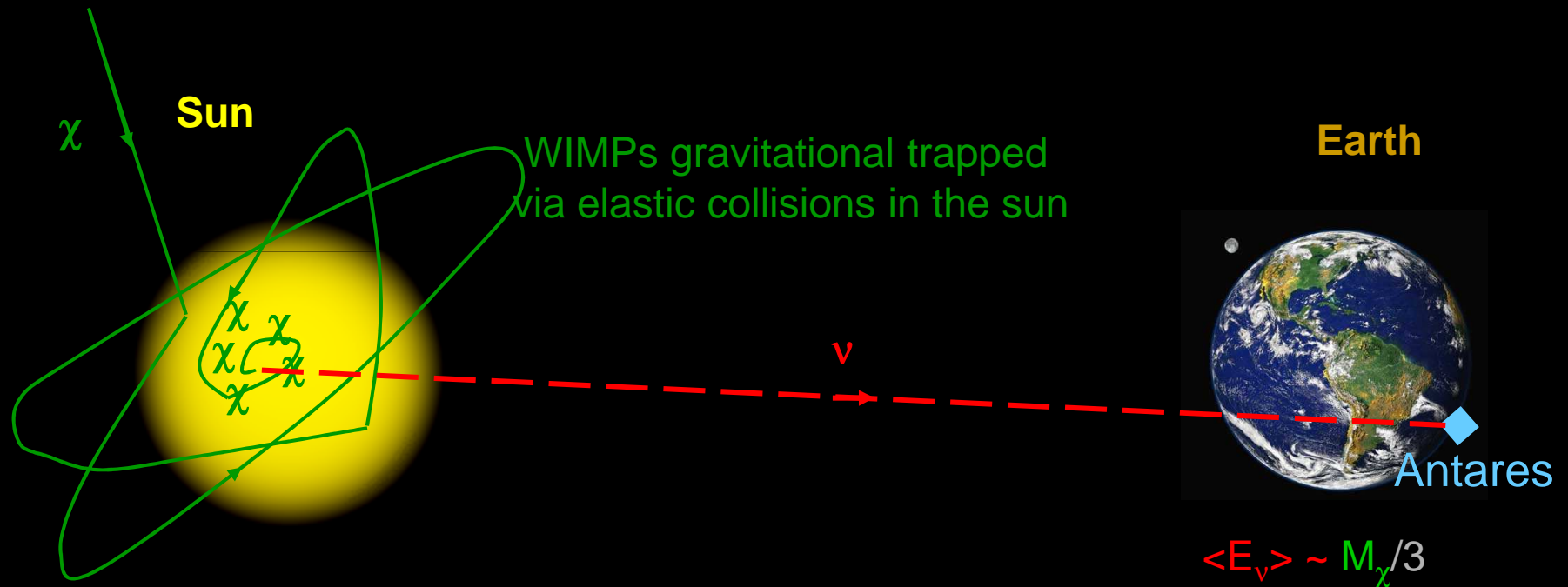
Γ_{ann} : annihilation rate per unit of volume

σ_{ann} : neutralino-neutralino cross-section

v : relative speed of the annihilating particles

ρ : neutralino mass density

m : neutralino mass



$$\chi \chi \rightarrow WW, ff$$

$$W, f \rightarrow \nu \chi$$

Neutralino annihilations in the Sun in mSUGRA

Study of neutralino Dark Matter sensitivity within SUSY mSUGRA framework

Random walk scan within
mSUGRA parameter space :

$$0 < m_{1/2} < 2000 \text{ GeV}$$

$$0 < m_0 < 8000 \text{ GeV}$$

$$0 < \tan\beta < 60$$

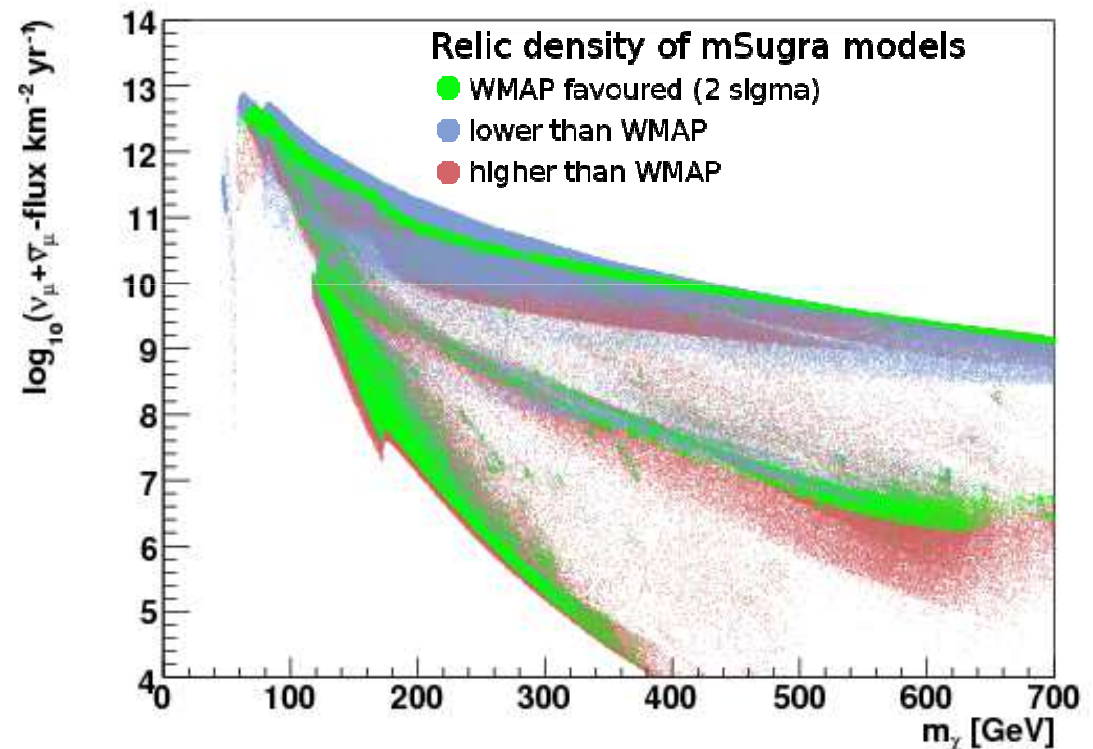
$$-3 m_0 < A_0 < 3 m_0$$

Calculated with DarkSUSY
and ISASUGRA (RGE code) with
 $m_{\text{top}} = 172.5 \text{ GeV}$

Local halo density: 0.3 GeV/cm^3

$$\langle v_\chi \rangle = 270 \text{ km/s}$$

Integrated neutrino flux for $E_\nu > 10 \text{ GeV}$

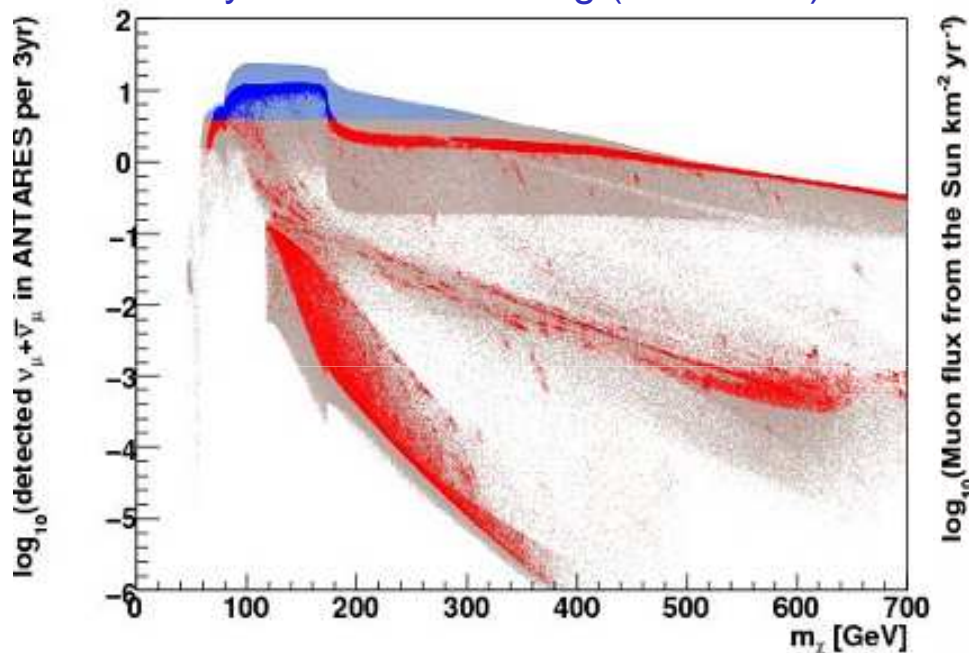


Includes ν oscillation effects in the Sun and in vacuum

Perspective pour la matière noire

- Current limits do not constrain the WMAP favored models ($0.094 < \Omega_\chi h^2 < 0.129$)

ANTARES sensitivity calculated for 3 years of data taking (mSUGRA)



mSugra models favoured by WMAP

● 90% CL excludable by ANTARES

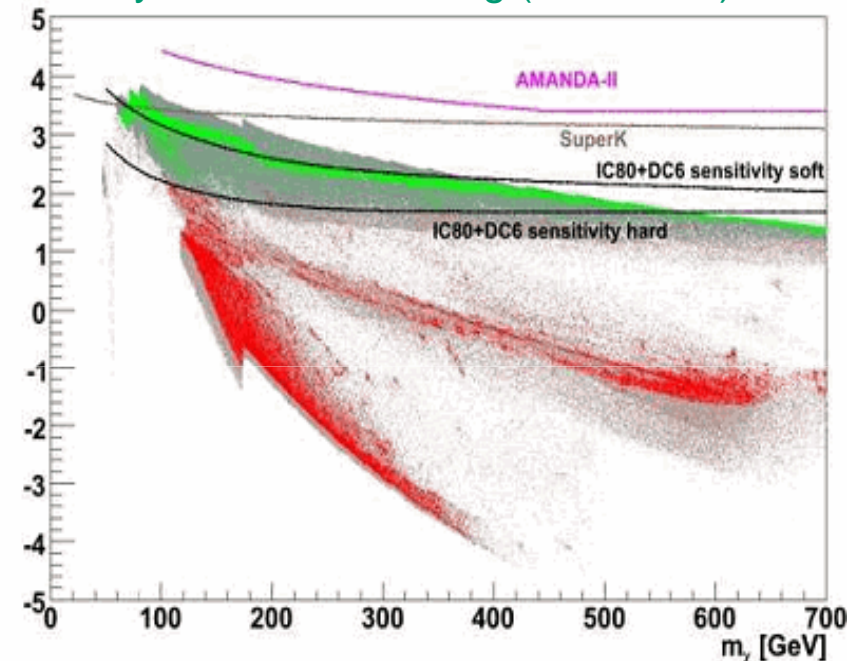
● not excludable

mSugra models disfavoured by WMAP

● 90% CL excludable by ANTARES

● not excludable

KM3NeT Sensitivity calculated for 10 years of data taking (mSUGRA)



mSugra models favoured by WMAP

● 90% CL excludable by KM3NeT

● not excludable

mSugra models disfavoured by WMAP

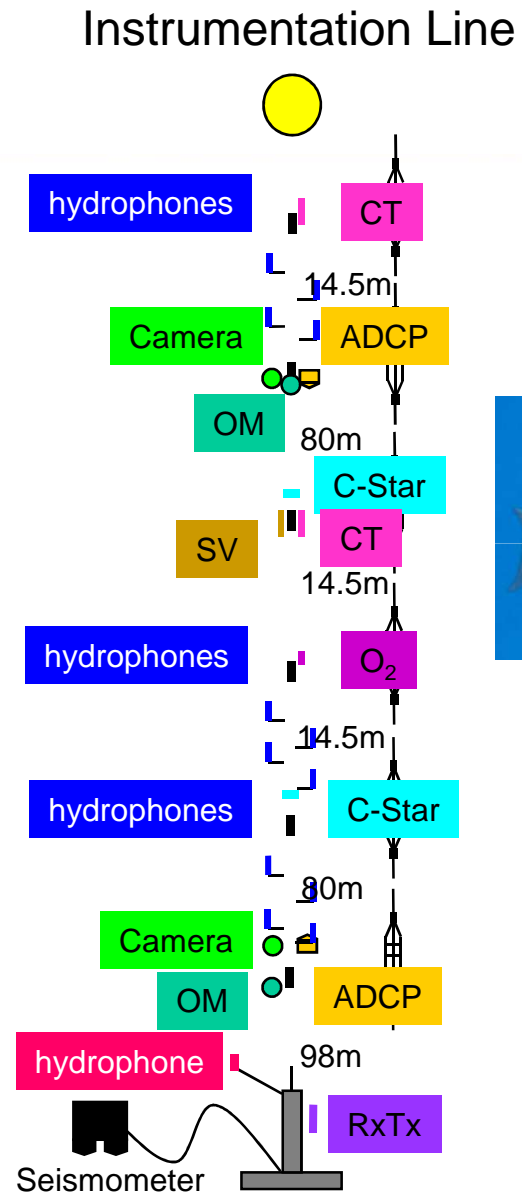
● 90% CL excludable by KM3NeT

● not excludable

Exclusion capabilities : mainly Focus Point region (good complementarity to LHC)

- Other models (e.g. mUED) have better prospects (direct LKP annihilation into neutrinos)

Un observatoire multi-disciplinaire



Acoustic noises



seismometer



Video-monitoring

Webcam la plus profonde
au monde...

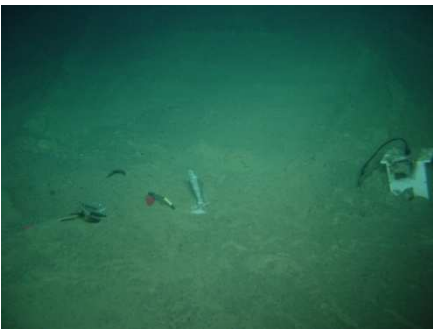
Sismographe



In laboratory

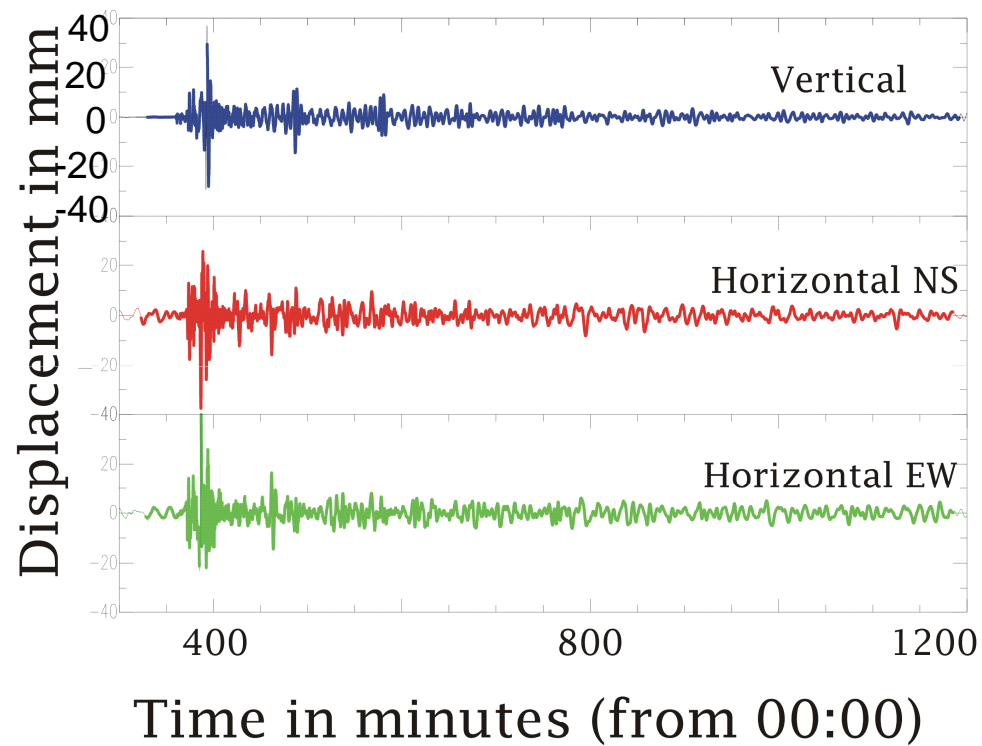


Deployment

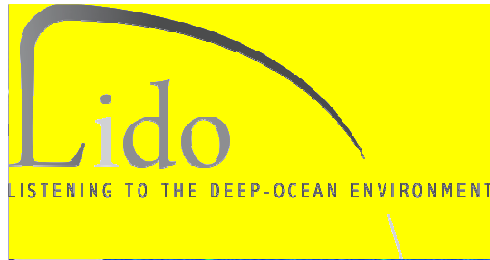


Buried at site

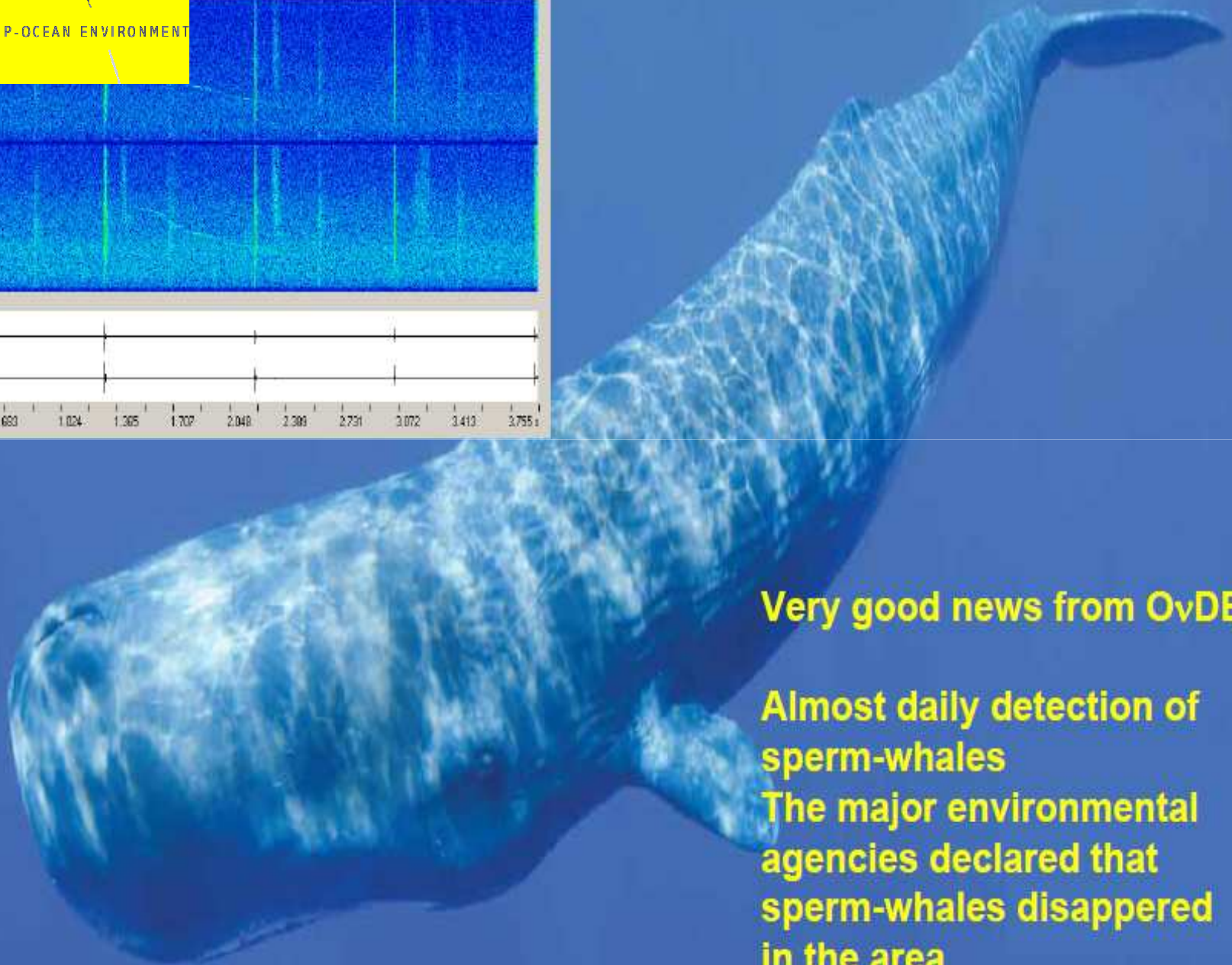
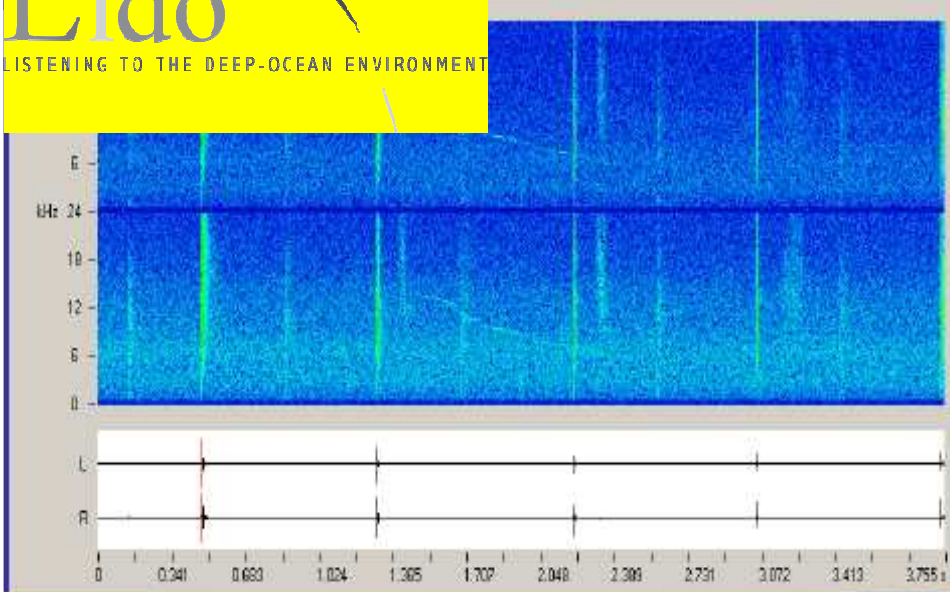
Japan earthquake 2011 March 11
at Antares site



Seismic/Tsunami network to be extended towards Nice



<http://www.listentothedeep.org>

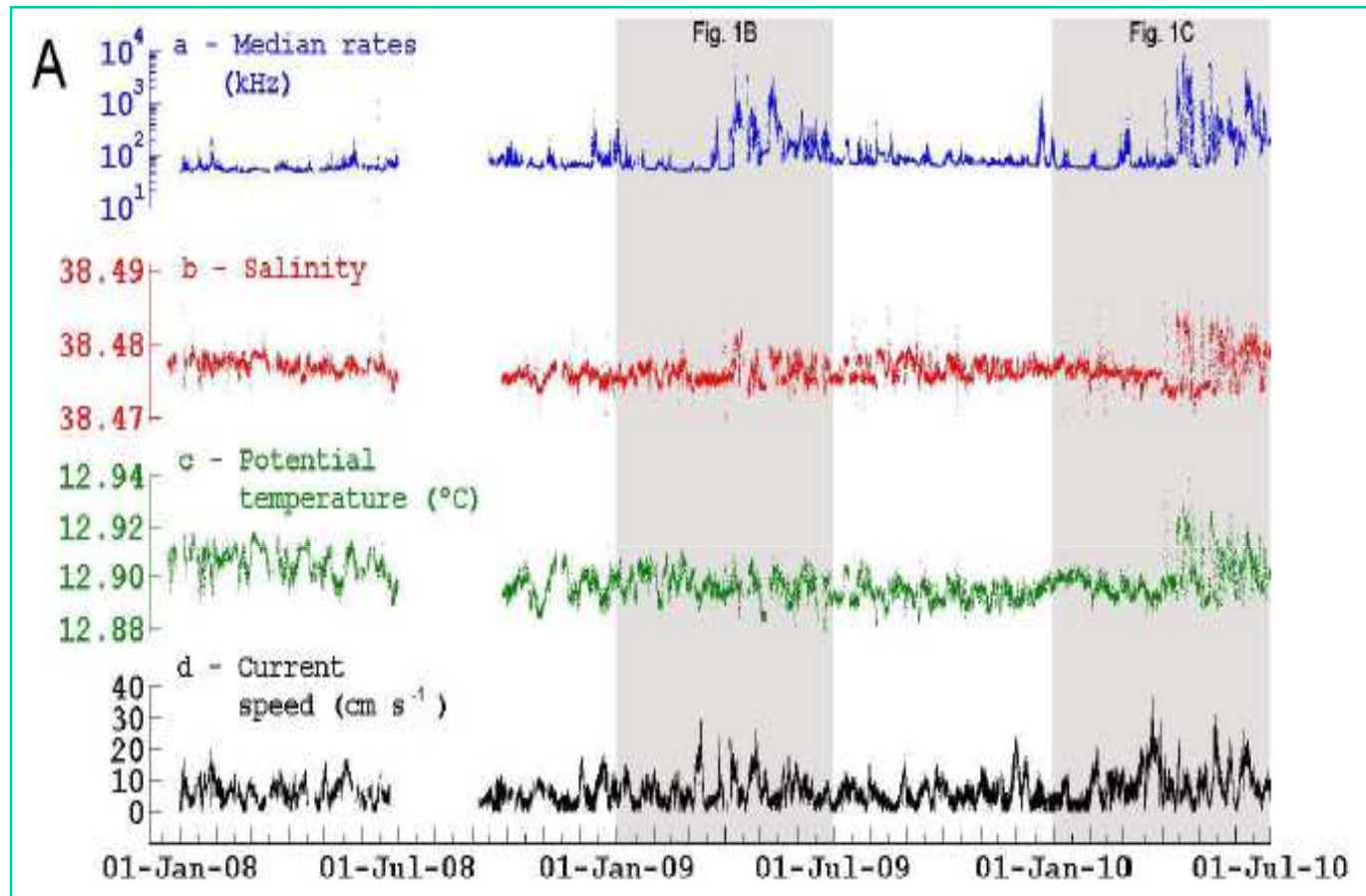


Very good news from OvDE:

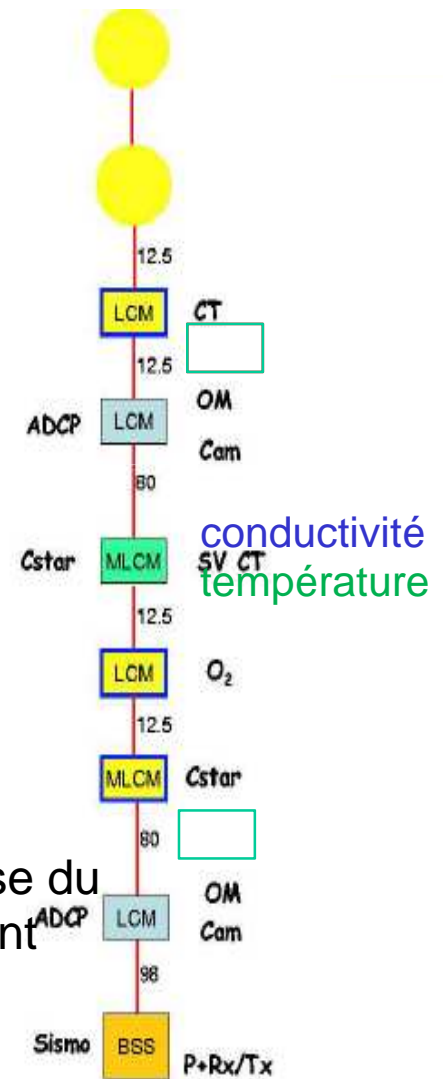
Almost daily detection of sperm-whales

The major environmental agencies declared that sperm-whales disappeared in the area

La ligne instrumentée

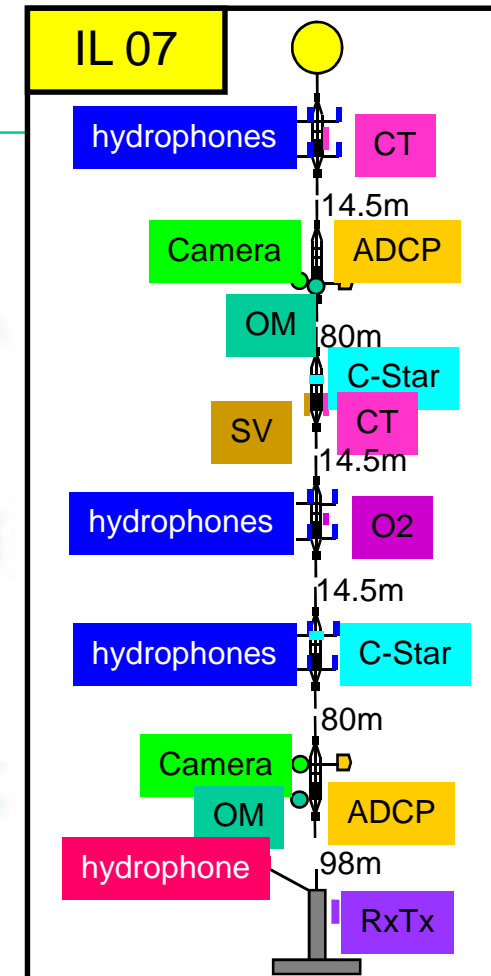
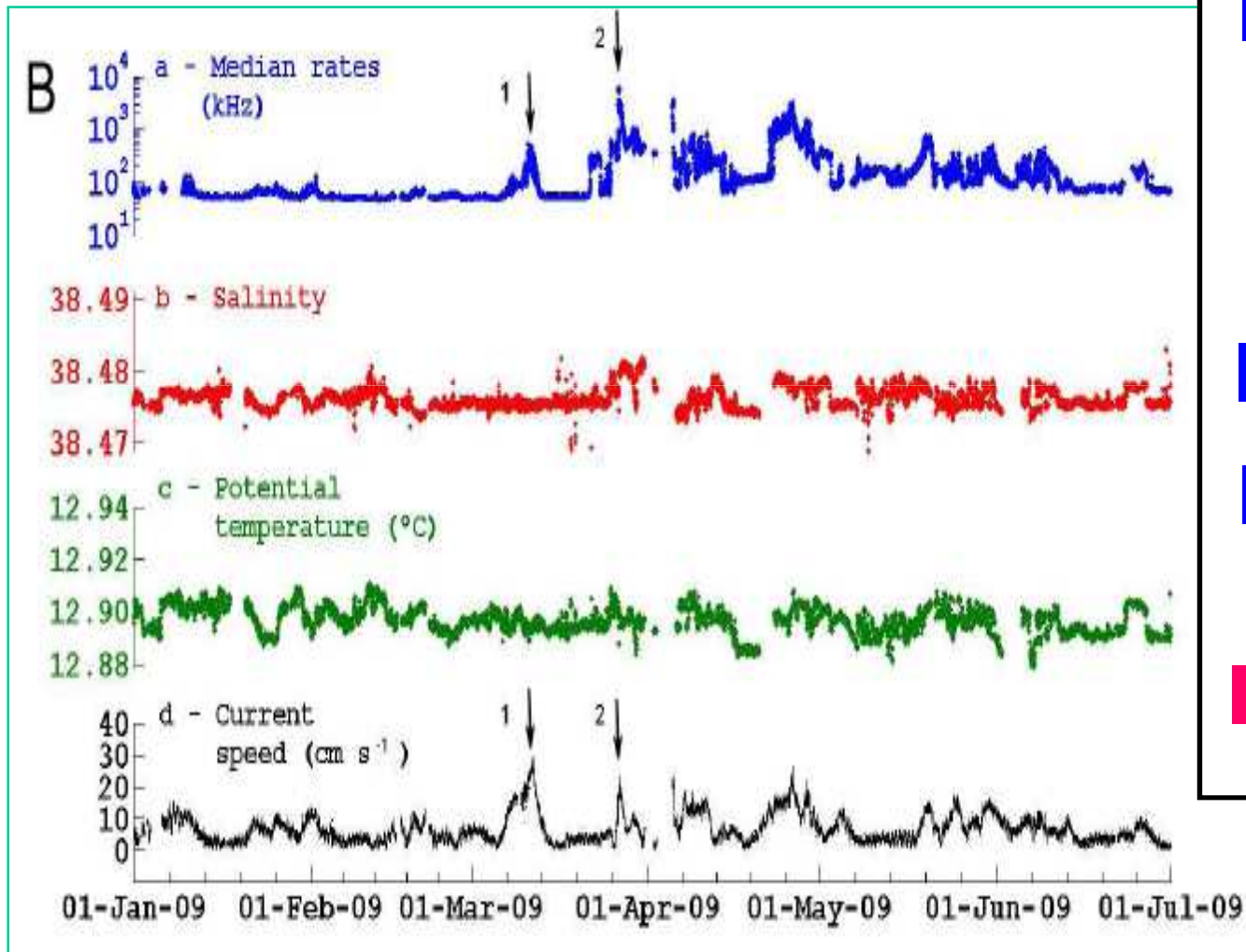


Vitesse du courant



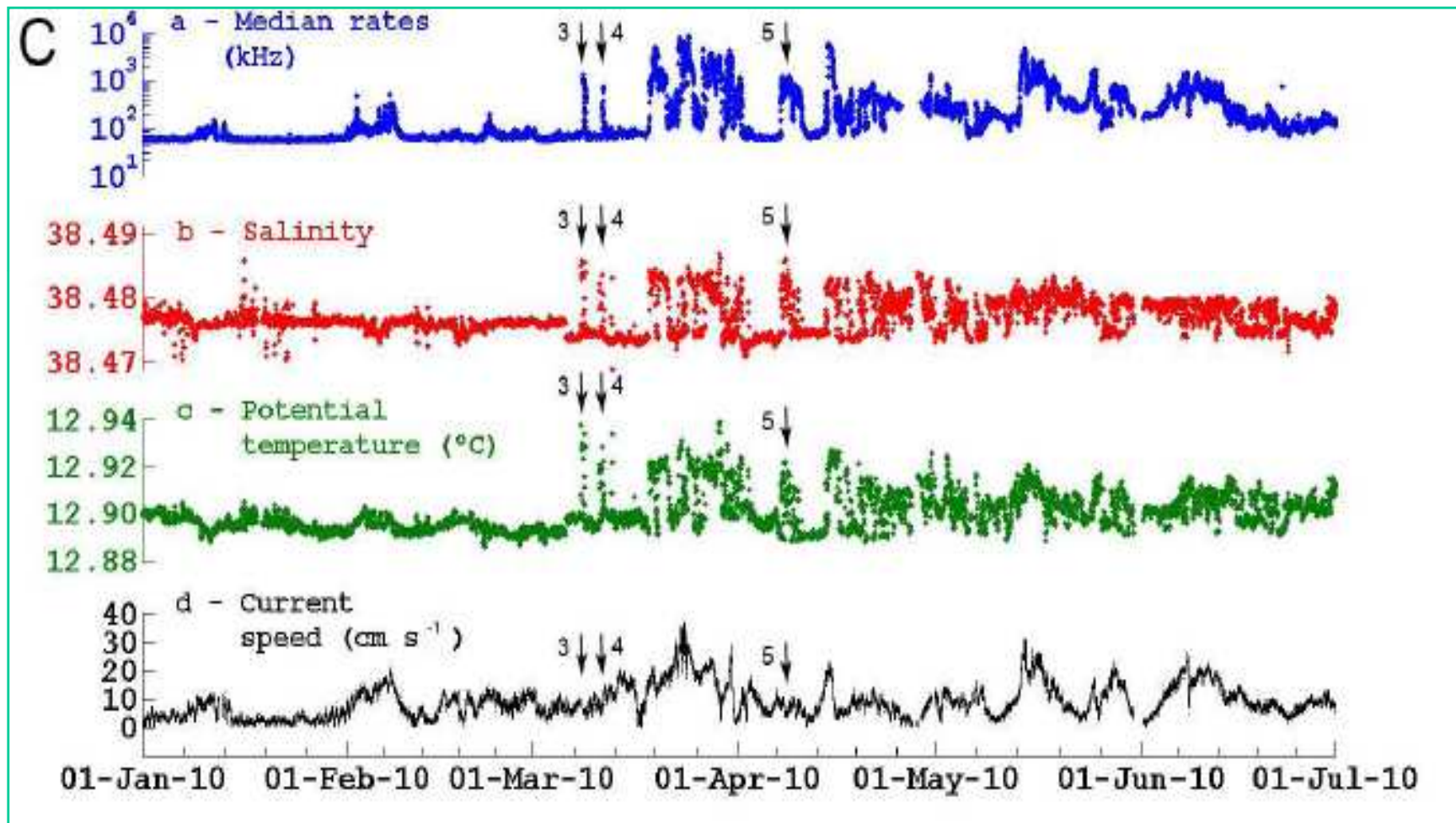
Printemps 2009

Corrélation bioluminescence & vitesse de courant



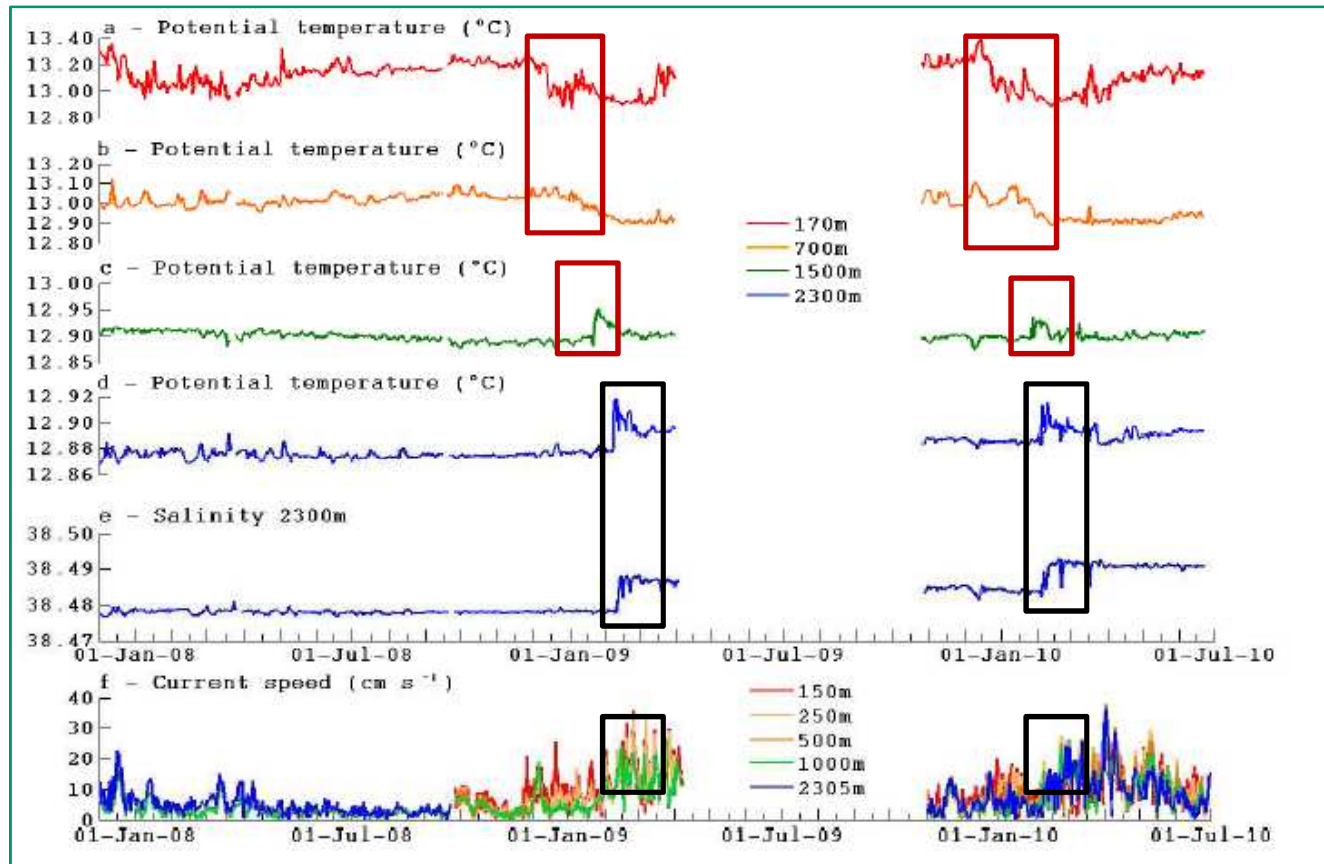
Printemps 2010

Corrélation bioluminescence & salinité & température
avec courant modéré ➡ pas le même phénomène?



Dans le golfe du Lyon

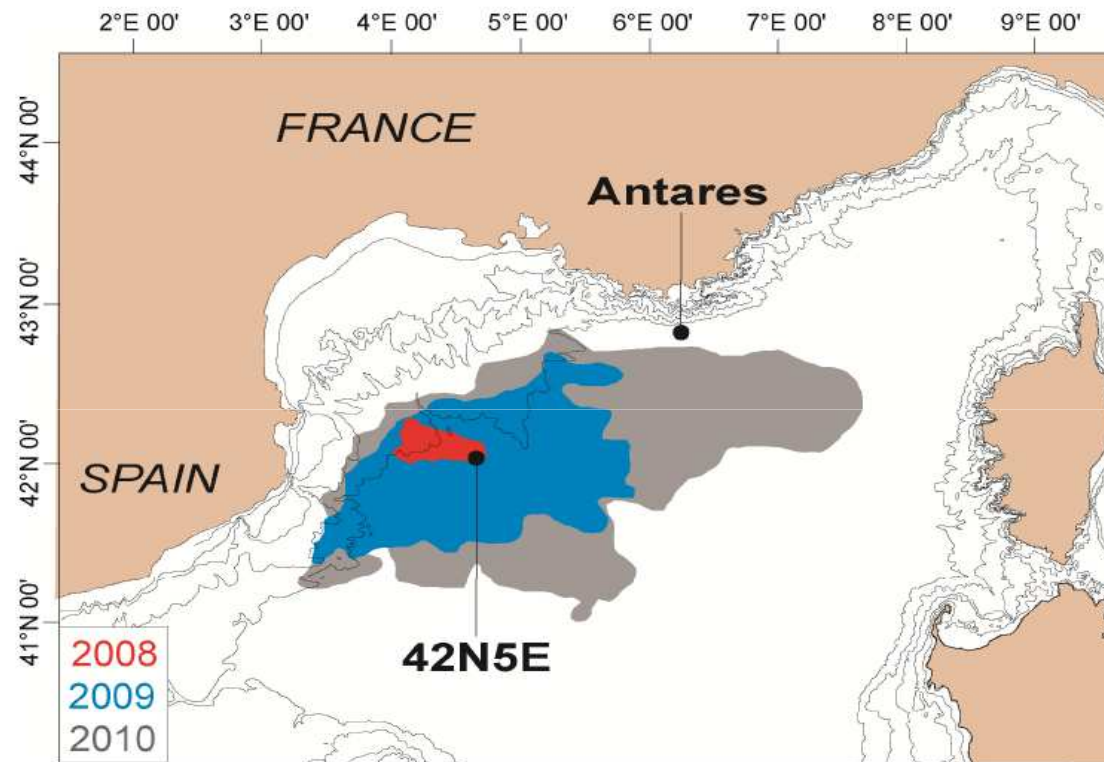
Ligne instrumentée : 42N5E



Interprétation : mouvements de convection de grande échelle

Origine des pics de bioluminescence

Concentration de Chlorophyll-a en hiver prise par le satellite NASA 558 MODIS-Aqua (contour : concentration $< 0.2 \text{ mg/m}^3$). Concentration faible : convection importante



Forts mouvements de convection en hiver dans le Golfe du Lion



apport de matière organique (carbone dissous, érosion du sol)

forts taux de bioluminescence observés aux printemps 2010 (et 2009 ?)

Plan de l'exposé

I Enjeux scientifiques



A) Introduction - Astronomie multi-messagers

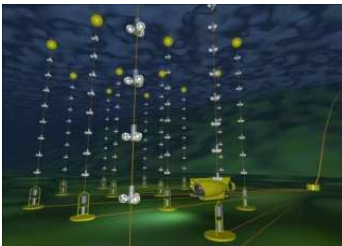
Le neutrino

Motivations scientifiques

B) Astronomie des neutrinos de haute énergie

Spécificité des neutrinos

Sources de neutrinos



II. Principes de détections

A) Les premiers neutrinos extraterrestres

B) Les télescopes à neutrinos actuels

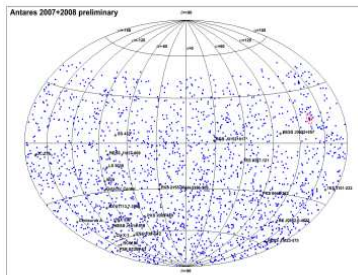
Principes de fonctionnement

Reconstruction

Calibration

Sélection choisie de quelques résultats

Perspectives



Le consortium KM3NeT

FP6 design study

- But : définir le futur détecteur km^3
- 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 km^3
 - 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

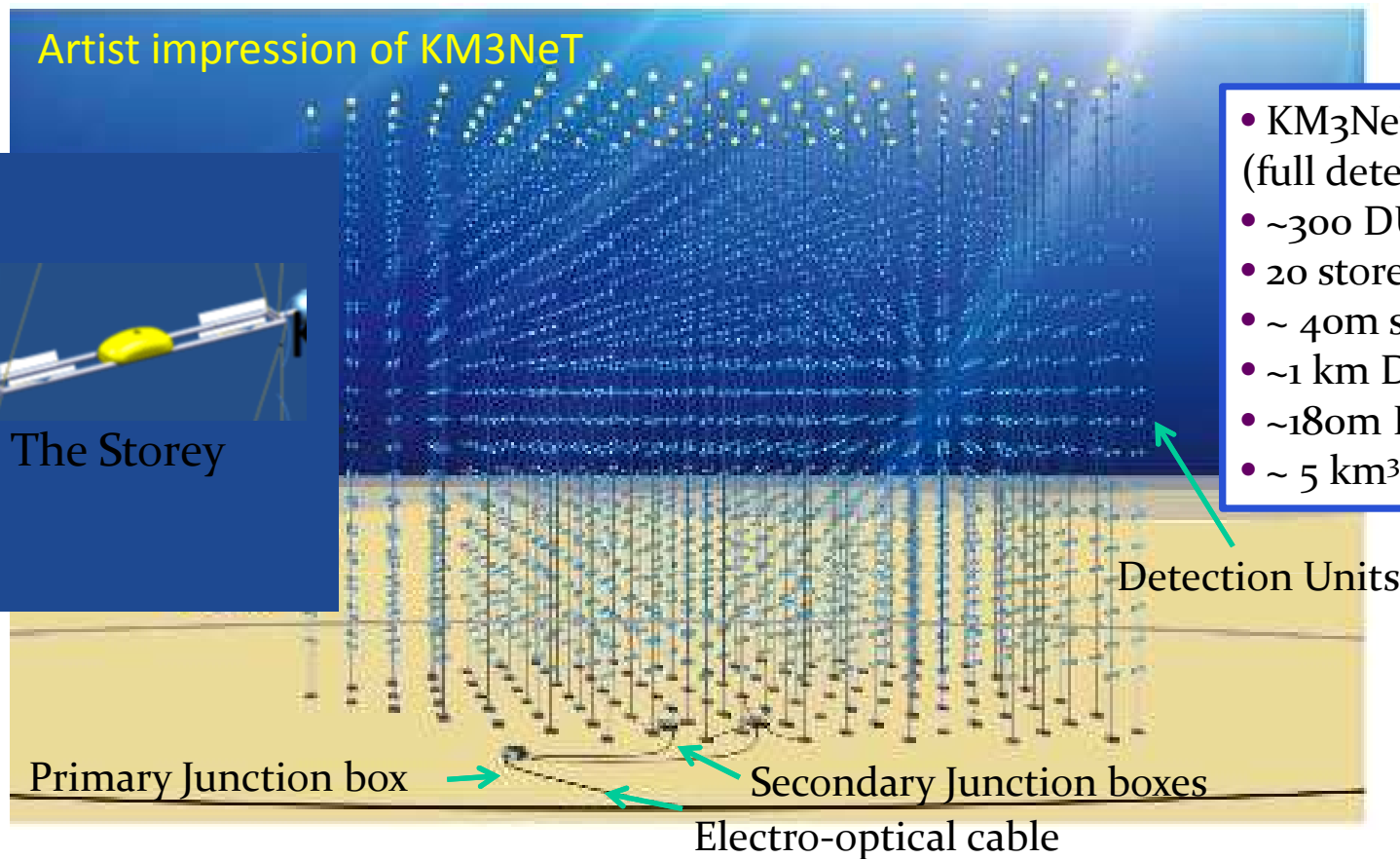


Le futur détecteur

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

Detection Units

Primary Junction box

Secondary Junction boxes

Electro-optical cable

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”

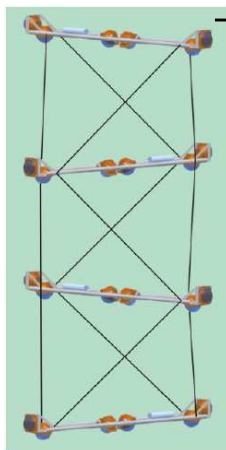
KM3NeT : choix retenus

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

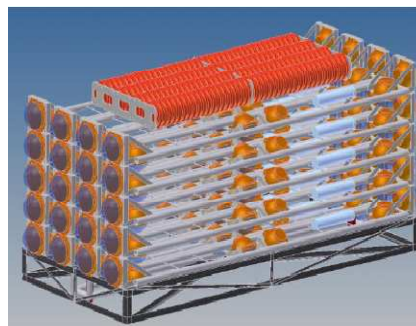


Unités de détection (DU)



→ Tours flexibles avec barres horizontales

☞ Lèvent les ambiguïtés de reconstruction de l'angle azimutal



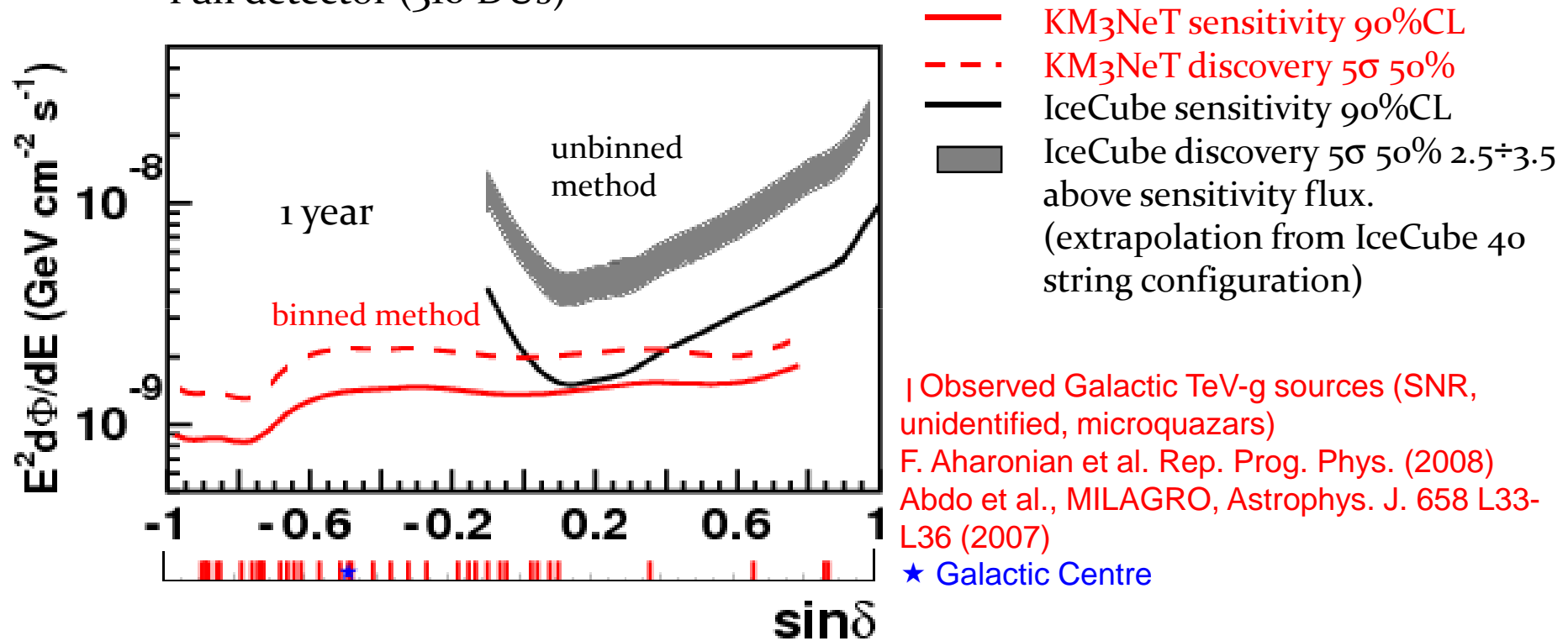
Structure compacte (20 étages)

Procédure de déploiement testée
avec succès en février 2010

Sensibilité escomptée

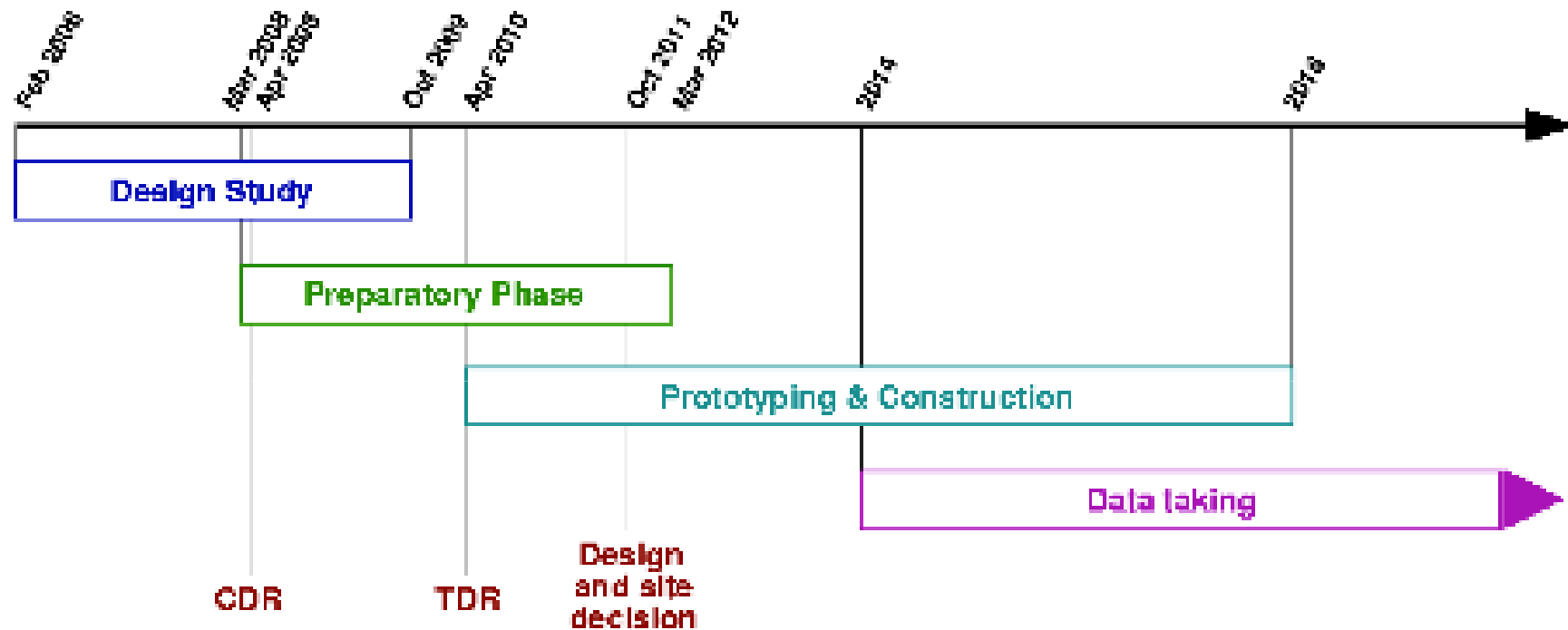
Sensitivity and discovery fluxes for point like sources with E^{-2} spectrum

Full detector (310 DUs)



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.
- 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.

« Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux .» M.Proust

« Observer les neutrinos, détecter les ondes gravitationnelles [...] permettront à l'astronome de trouver tous les sens qui lui manquent [...] On peut être sûr que notre appréhension de l'Univers sera bientôt complètement renouvelée » M. Boër , directeur de OHP. Regardons, sentons, goûtons l'Univers. (affiché dehors!)