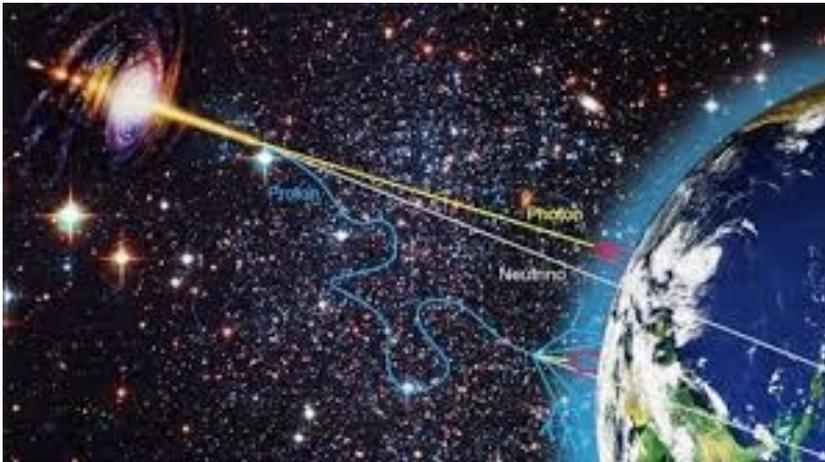


# Les neutrinos : nouveaux messagers de l'Univers

Les astroparticules

rencontre entre physique des particules et astrophysique



Antoine Kouchner (Université Paris Cité)

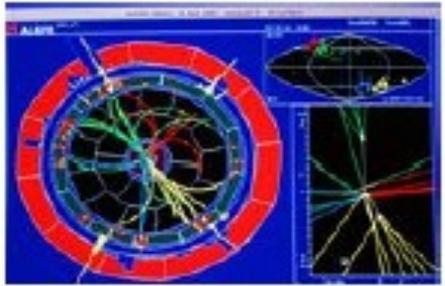
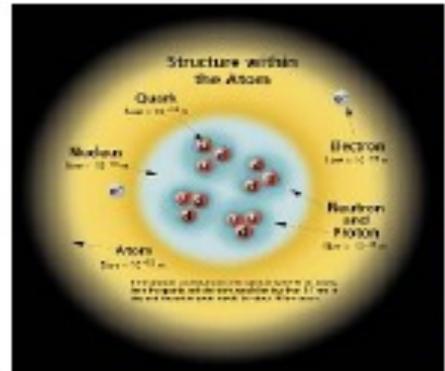


# Astroparticules

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

infiniment grand:

infiniment petit



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

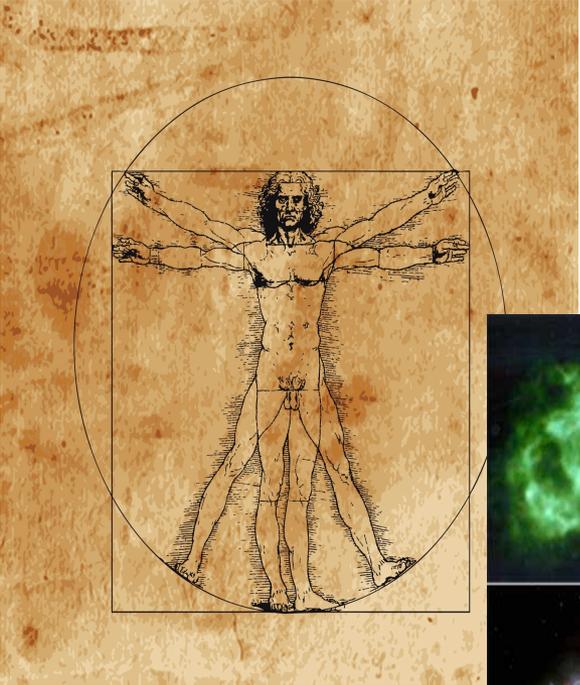
étude des constituants ultimes de la matière et de leurs interactions

« TELESCOPES »

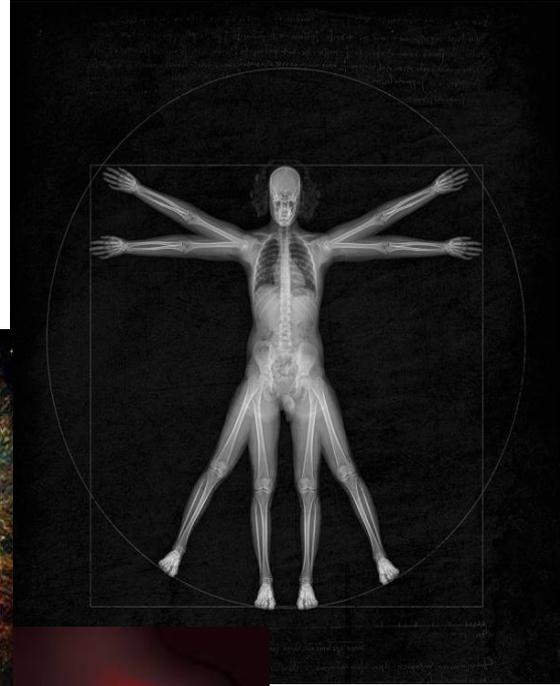
ACCELERATEURS DE PARTICULES

# Physique multi-longueurs d'onde

Différentes longueurs d'ondes



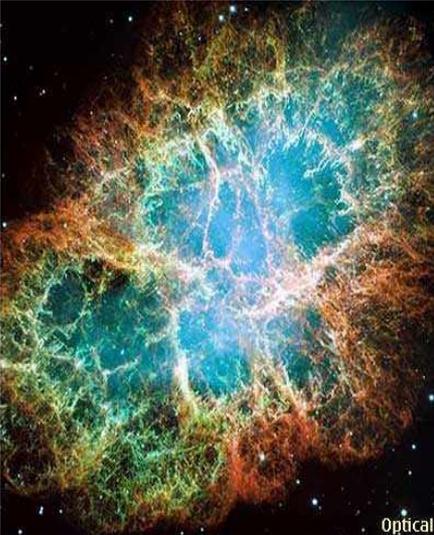
Différentes échelles/phénomènes



Radio



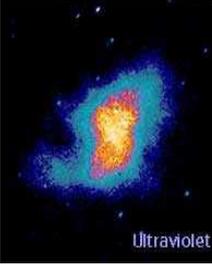
Infrared



Optical



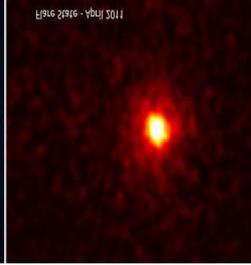
Multiwavelength  
Crab Nebula



Ultraviolet



X-ray



Exploitée de longue date en astrophysique...  
Différentes énergies d'e- et structures du champ magnétique

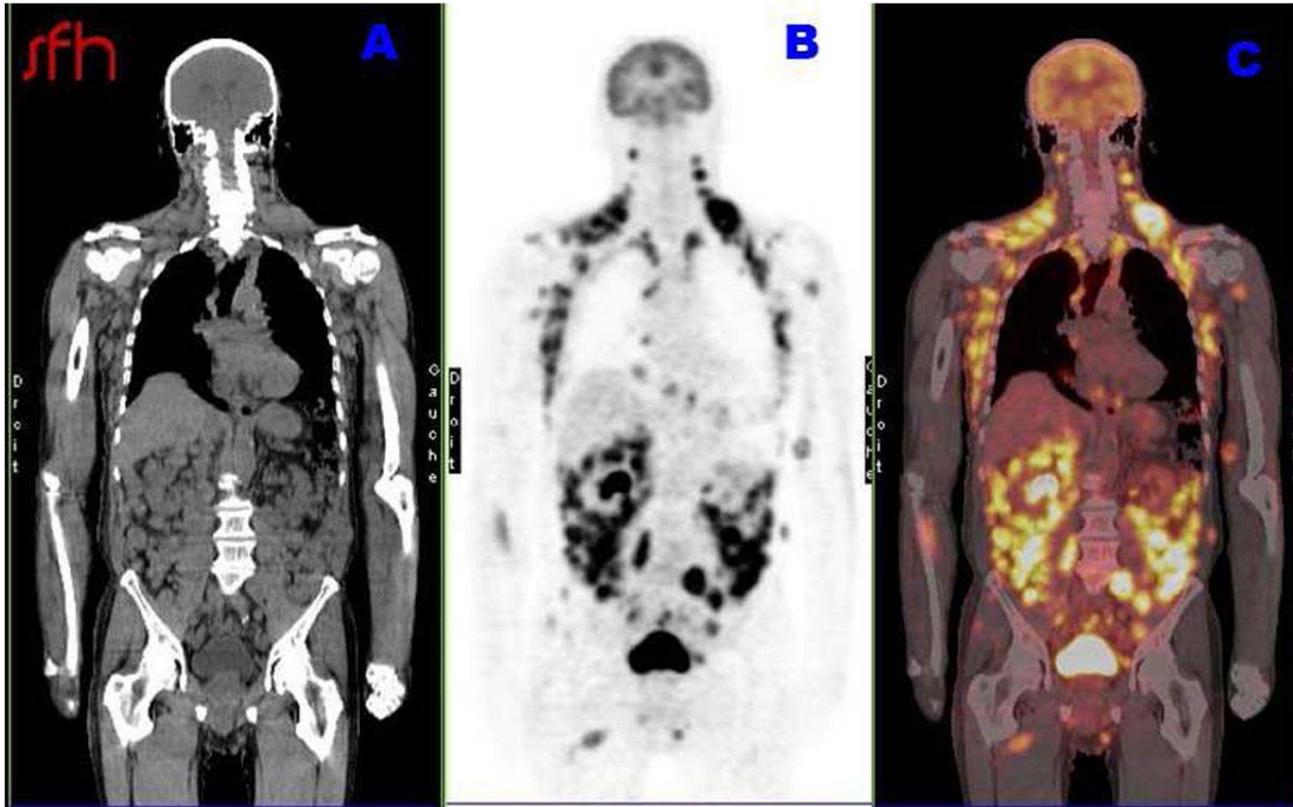
# Physique multi-messagers

Tomographie X:  
Densité de matière

Tomographie à émission de  $e^+$ :  
Marqueurs radioactifs spécifiques

Os+organes

Métabolisme



Pour compléter les informations astrophysiques

# Astroparticules

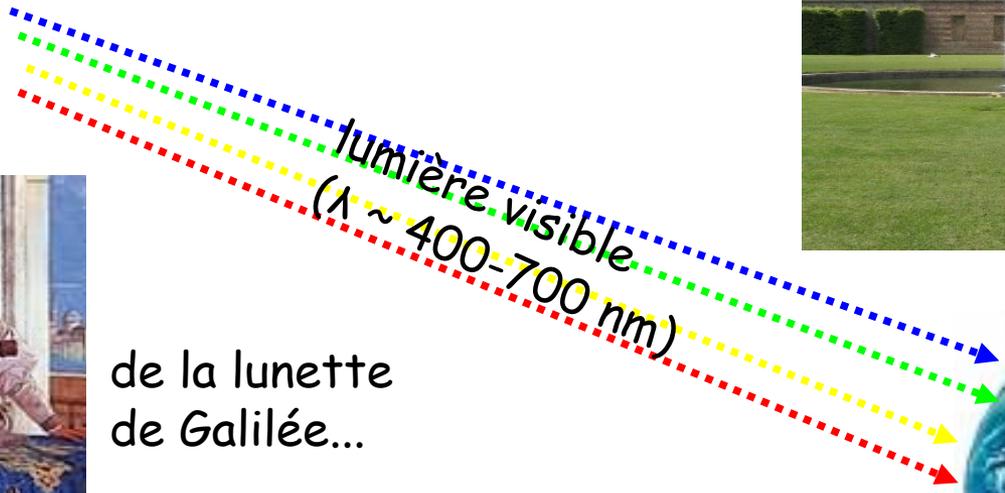
BUT: révéler la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers via l'étude des accélérateurs cosmiques et de leur rayonnement dans toutes ses composantes



...à l'Observatoire de Paris



de la lunette de Galilée...



# Astroparticules

BUT: révéler la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers via l'étude des accélérateurs cosmiques et de leur rayonnement dans toutes ses composantes

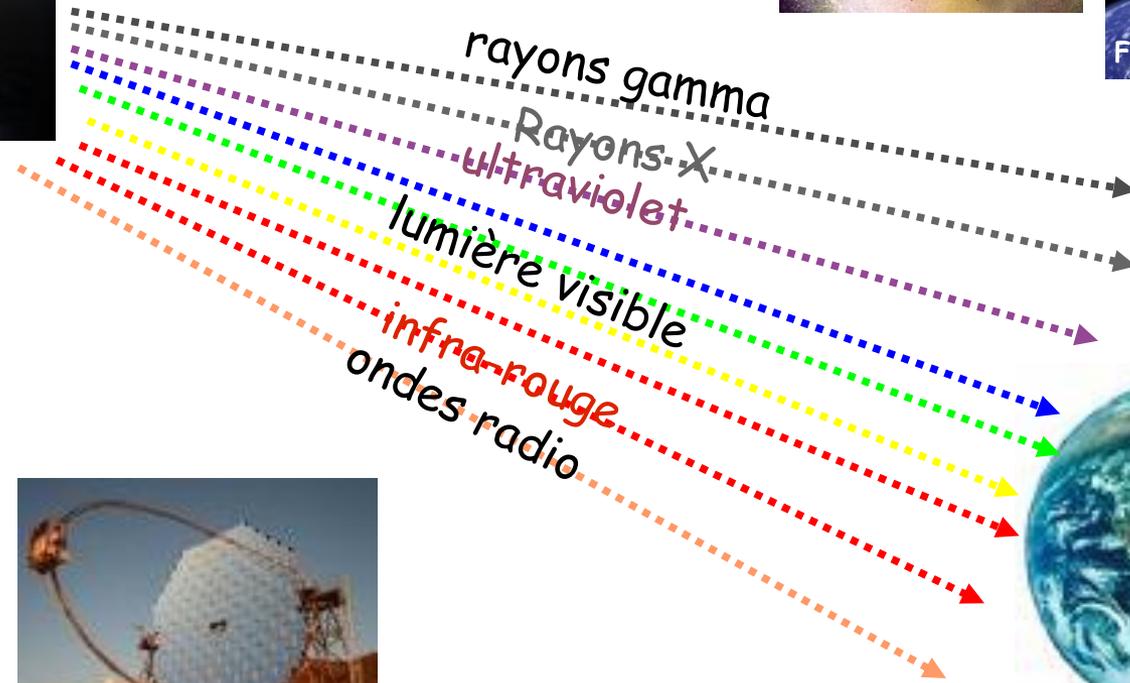
...ou depuis l'espace



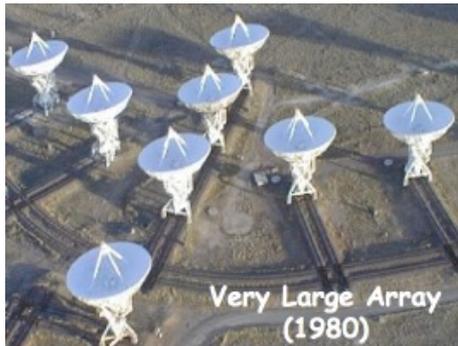
Chandra (1999)



FERMI (2008)



Au sol...



Very Large Array (1980)



MAGIC (2003)



# Astroparticules

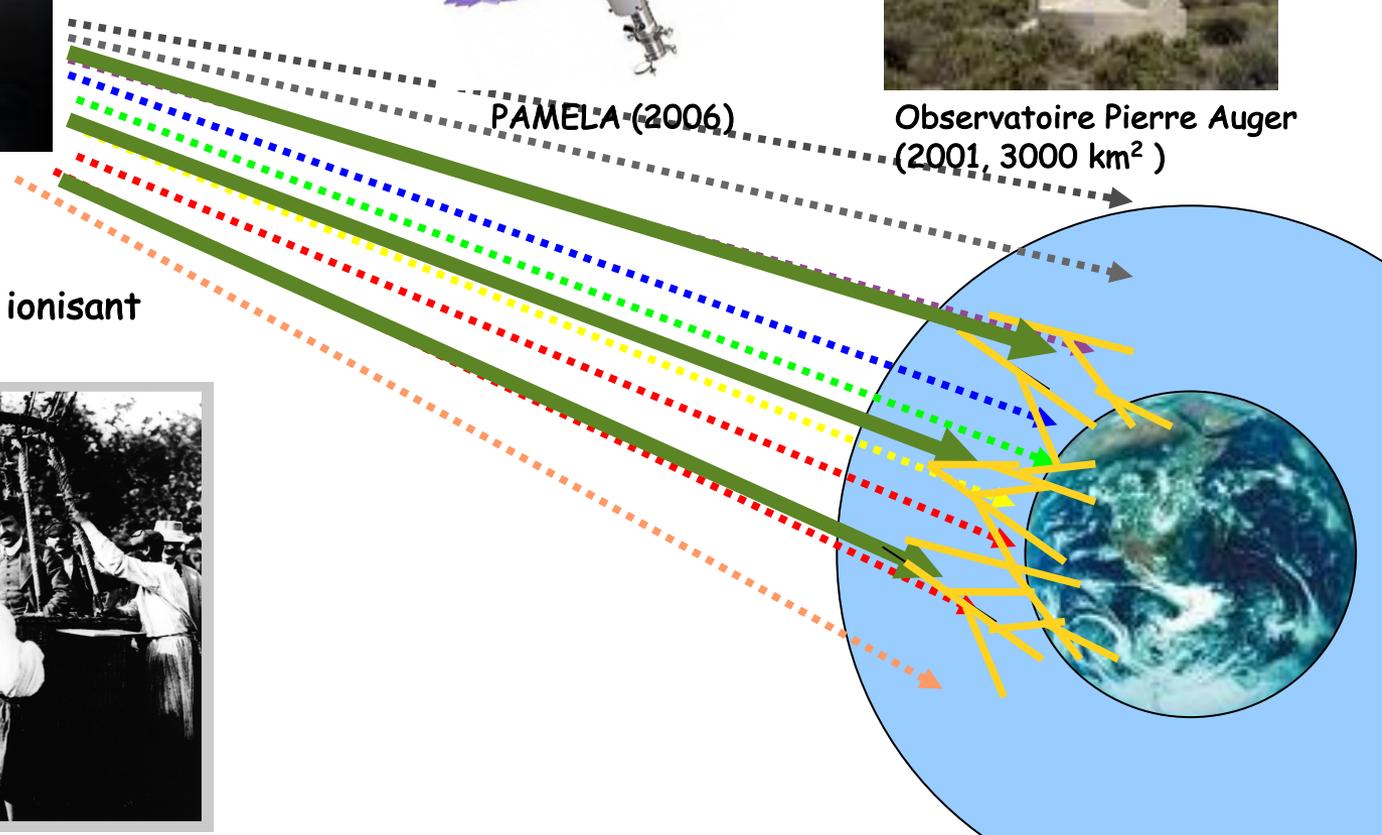
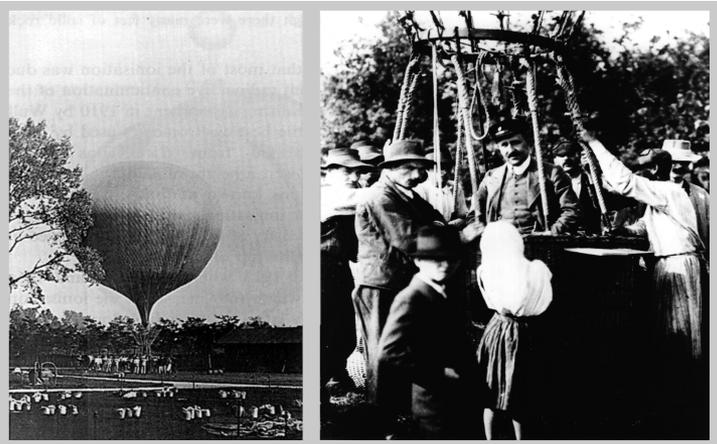
BUT: révéler la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers via l'étude des accélérateurs cosmiques et de leur rayonnement dans toutes ses composantes



PAMELA (2006)

Observatoire Pierre Auger (2001, 3000 km<sup>2</sup>)

Hess (1912):  
observation du rayonnement ionisant  
dans la haute atmosphère

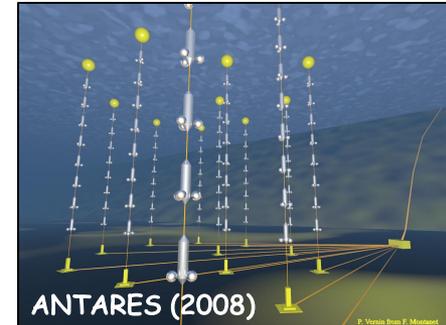


# Astroparticules

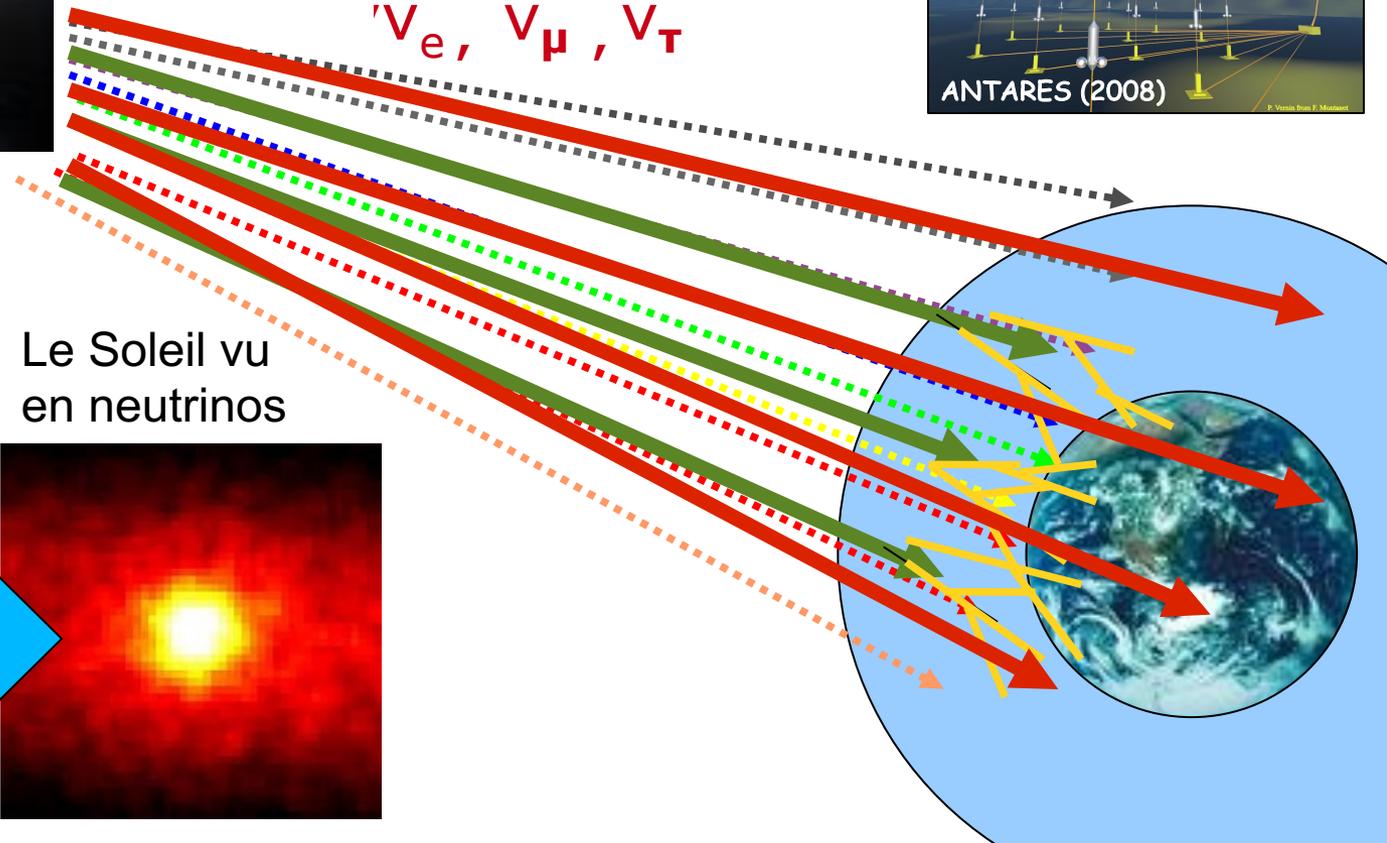
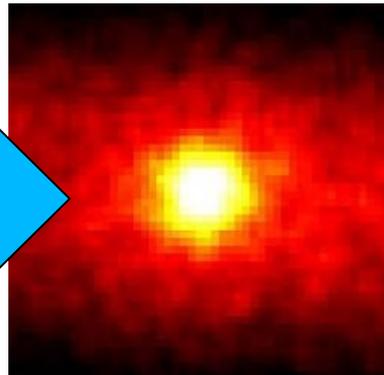
BUT: révéler la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers  
via l'étude des accélérateurs cosmiques et de leur rayonnement  
dans toutes ses composantes



Neutrinos:  
 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$



Le Soleil vu  
en neutrinos



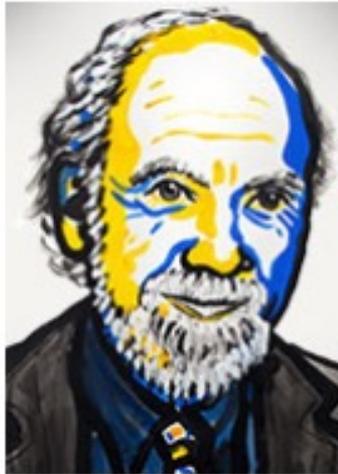
# Astroparticules

BUT: révéler la nature et la structure de la matière qui compose l'Univers  
via

## The Nobel Prize in Physics 2017



© Nobel Media. Ill. N. Elmejed  
**Rainer Weiss**  
Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. N. Elmejed  
**Barry C. Barish**  
Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. N. Elmejed  
**Kip S. Thorne**  
Prize share: 1/4

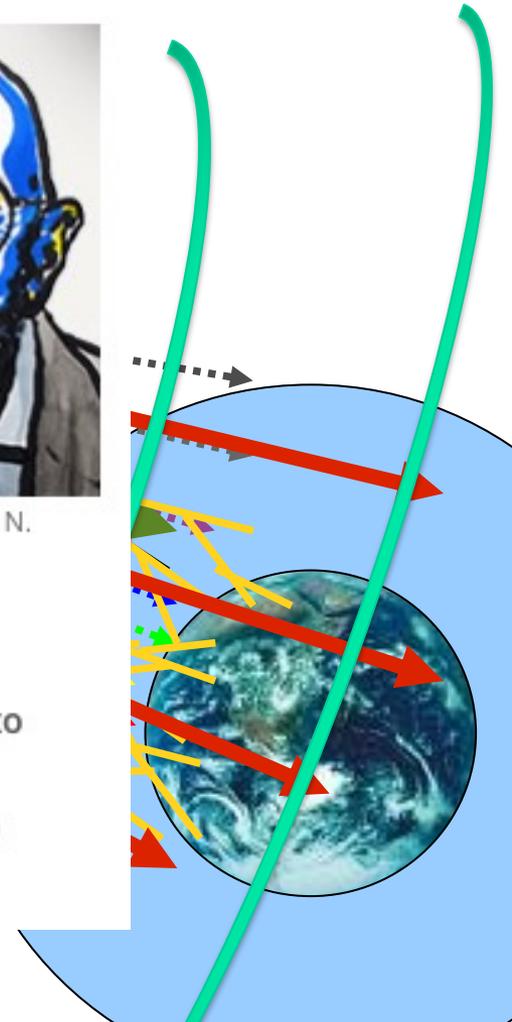
The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves".



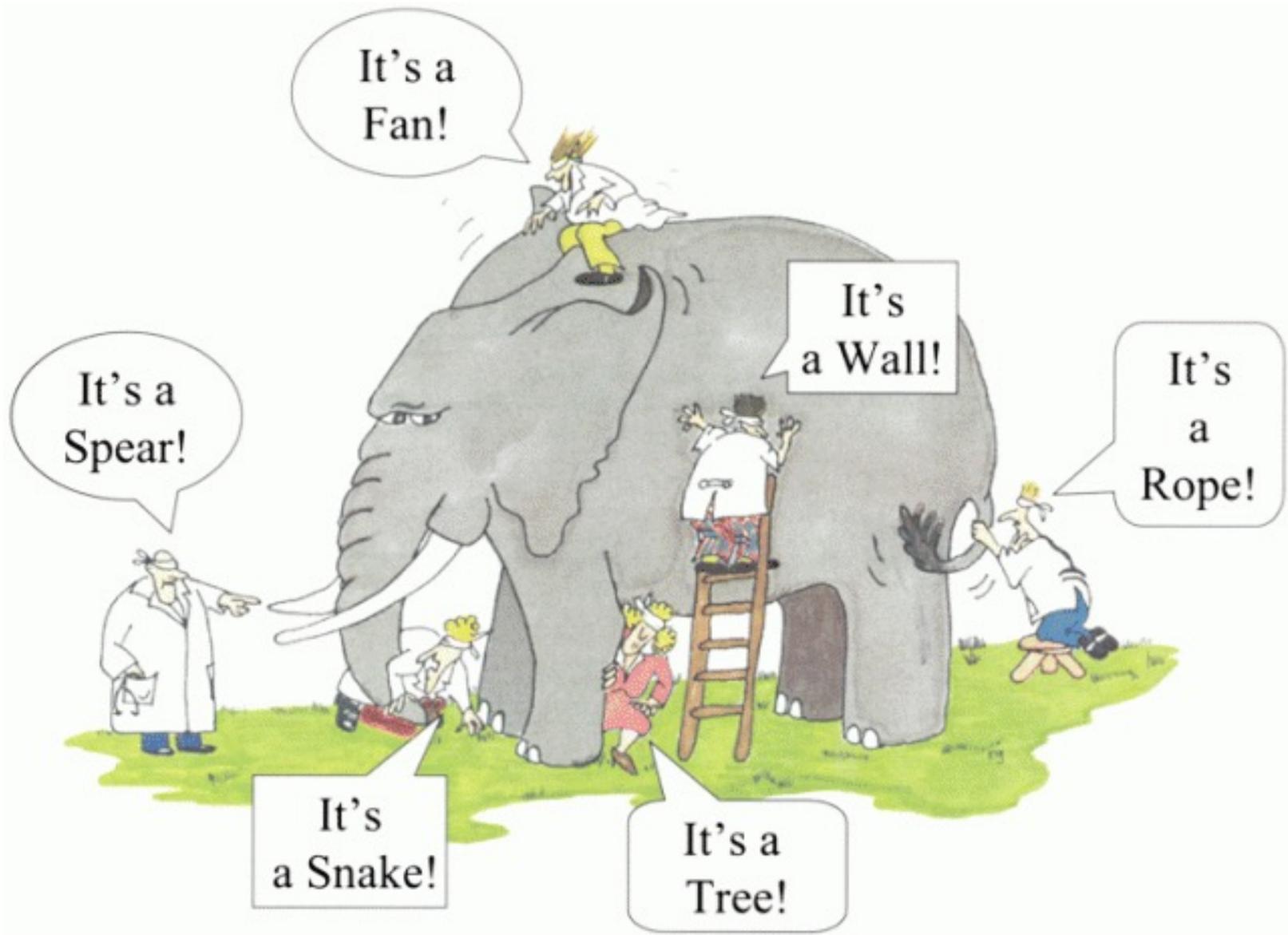
LIGO



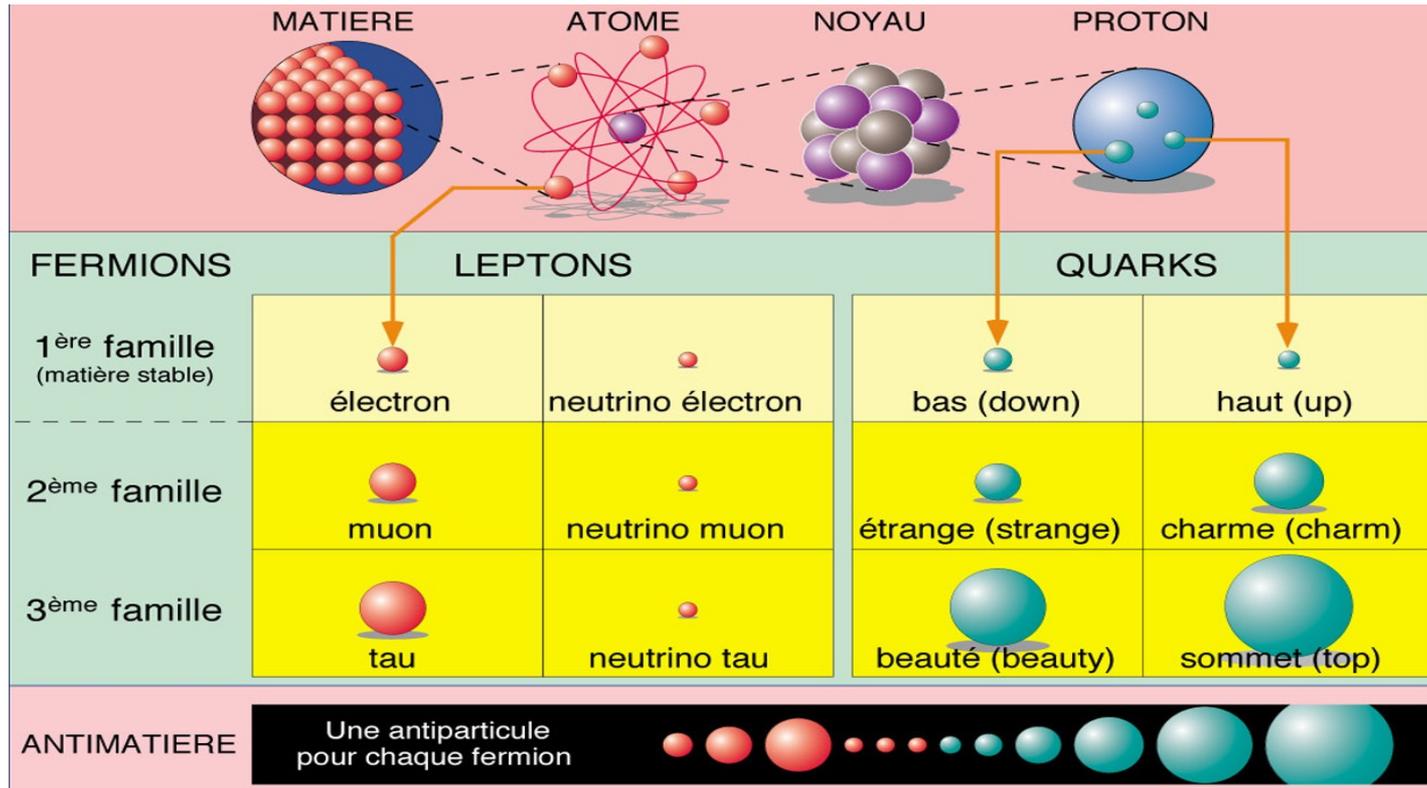
VIRGO



# Astronomie Multi-Messengers?



# Le monde des particules - les neutrinos



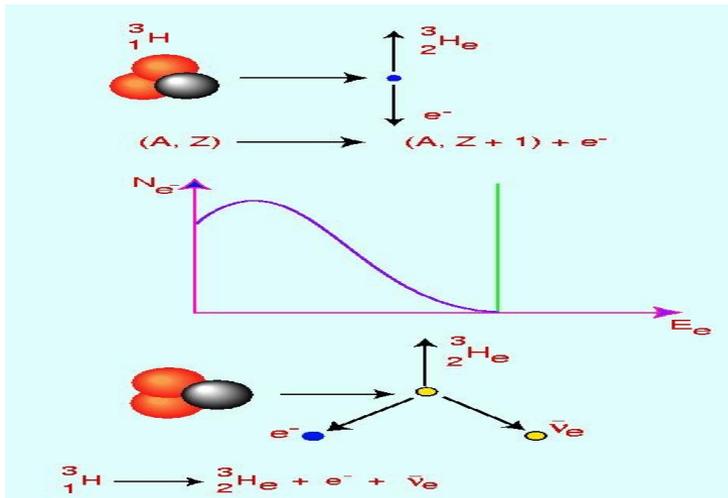
- Ce qu'il y a de plus proche de "rien".  
Pas de charge, presque pas de masse, interaction faible

- Une particule passe-muraille  
Accès aux régions les plus reculées de l'Univers  
Accès au cœur des sources astrophysiques

- Un lepton comme l'électron, mais sans charge électrique
- (anti)neutrino a une hélicité (droite)gauche



# 1930 Neutrinos : naissance d'une idée



*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  ${}^{14}\text{N}$  et  ${}^6\text{Li}$  ainsi que le spectre  $\beta$  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  $\beta$  continu se comprendrait alors en admettant par hypothèse que lors de toute désintégration  $\beta$  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  $\mu$ . 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  $\mu$  ne doit sans doute pas être supérieure 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 Tübingen, 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,

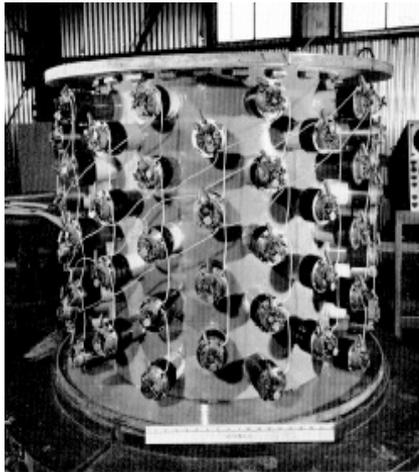
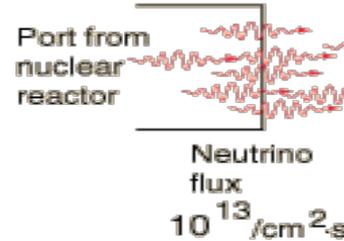
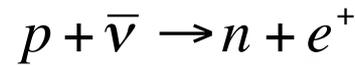


Wolfgang Pauli

# Telegramme envoyé à Pauli juin 1956



1956 : Savannah River



RADIO-SCHWEIZ AG. **RADIOGRAMM - RADIOGRAMME** RADIO-SUISSE S.A.

SB21311 ZHM UW1844 FM BZJ116 MH CHICAGO ILL 56 14 1310

PLC 00253

Erhalten - Rece. **NEWYORK** **NEWYORK** **NEWYORK** **NEWYORK** **NEWYORK**

**VIA RADIO-SUISSE**

Bildarbeit - Transmits

**Brieftelegramm** 74 15. VI. 56 -1 70

LT

NACHLASS PROF. W. PAULI

PROFESSOR W. PAULI

ZURICH UNIVERSITY ZURICH

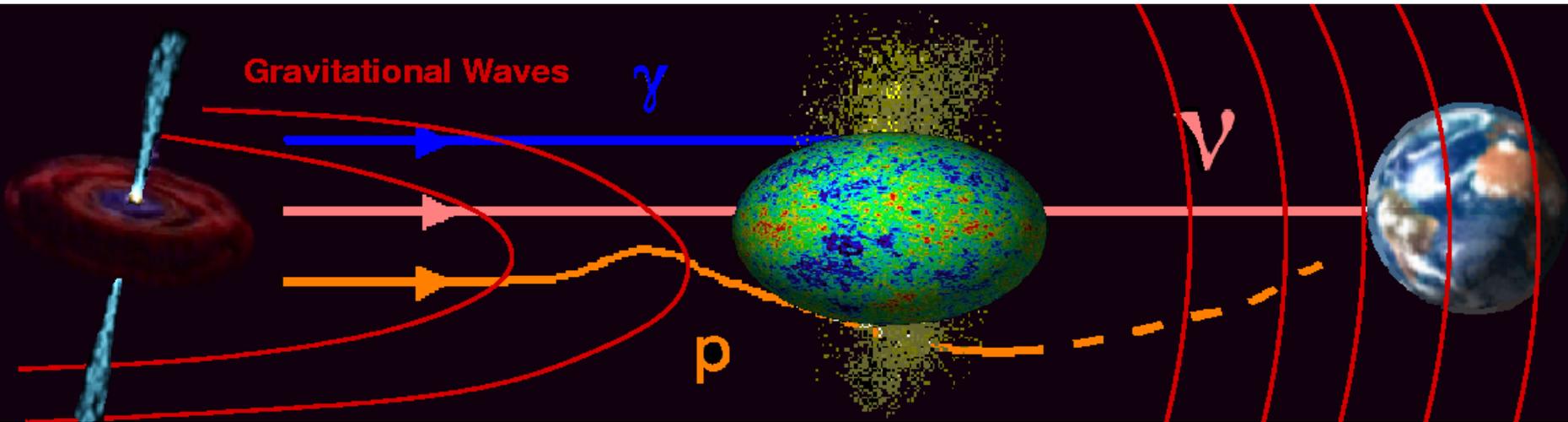
NACHLASS PROF. W. PAULI

Per Post ①

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

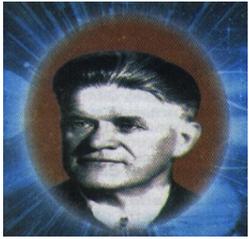
FREDERICK REINES AND CLYDE COWN

# Les messagers du cosmos

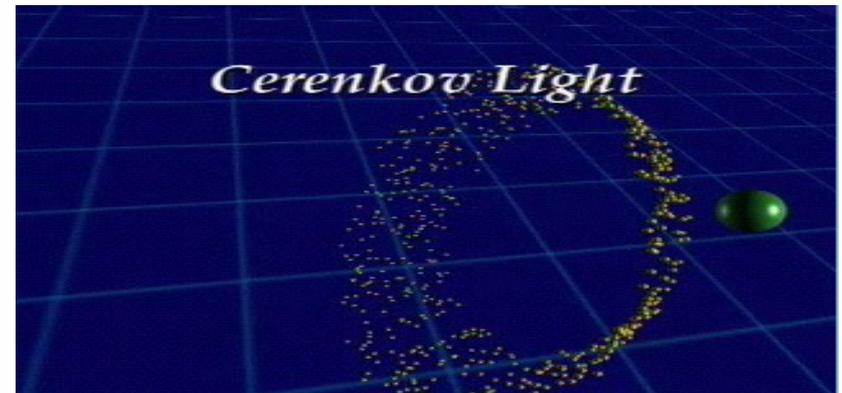
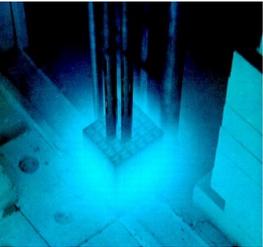
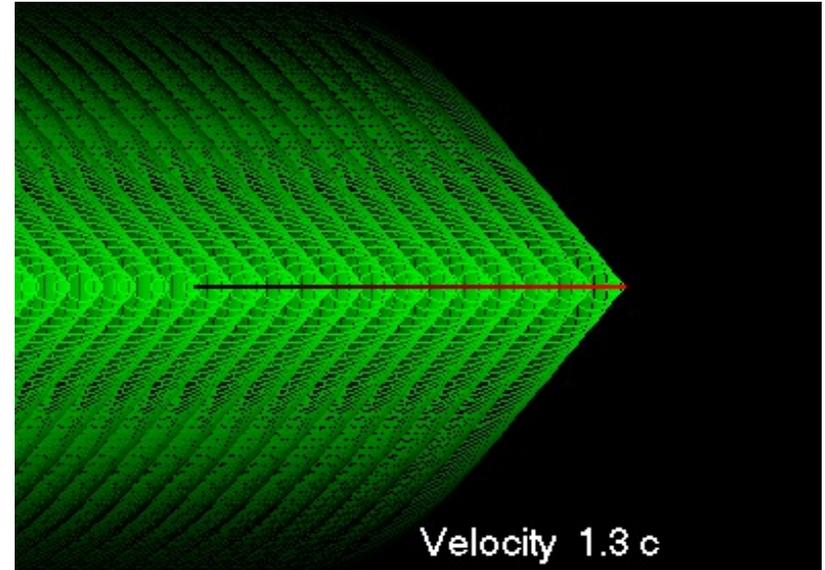


- Les photons (rayonnement électromagnétique) – classique
  - A très haute énergie : rayons gamma
    - Ne permettent pas d'observer sur des distances très grandes  $\rightarrow$  local
    - Ne permettent pas de sonder le cœur des sources
- Les rayons cosmiques chargés – noyaux d'atomes
  - A ultra haute énergie : quelle est leur origine?
- Les ondes gravitationnelles – Viennent d'être observées ! (sept 2015)
- Les neutrinos cosmiques  $\rightarrow$  Observation récente (2012)  
Accès aux distances lointaines, au cœur des sources

# Effet Tcherenkov



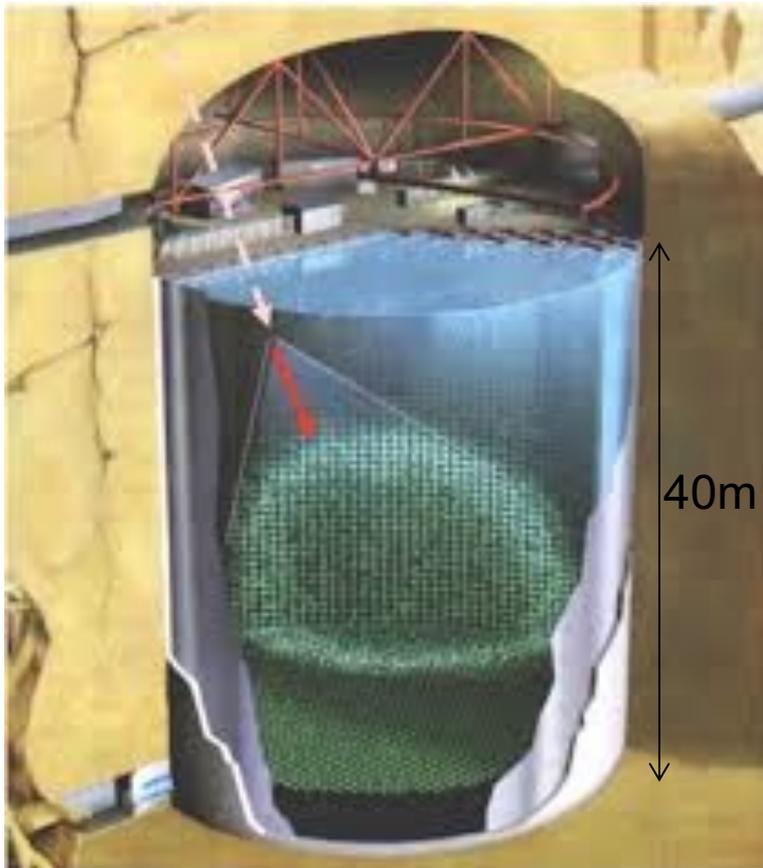
Émission **cohérente** de **lumière** produite par des particules chargées relativistes, observable dans un **milieu transparent**



# Détection directe en temps réel

Kamiokande 1987-1996  
SuperKamiokande 1996 –

Grotte



11 146 photomultiplicateur 20 ''



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

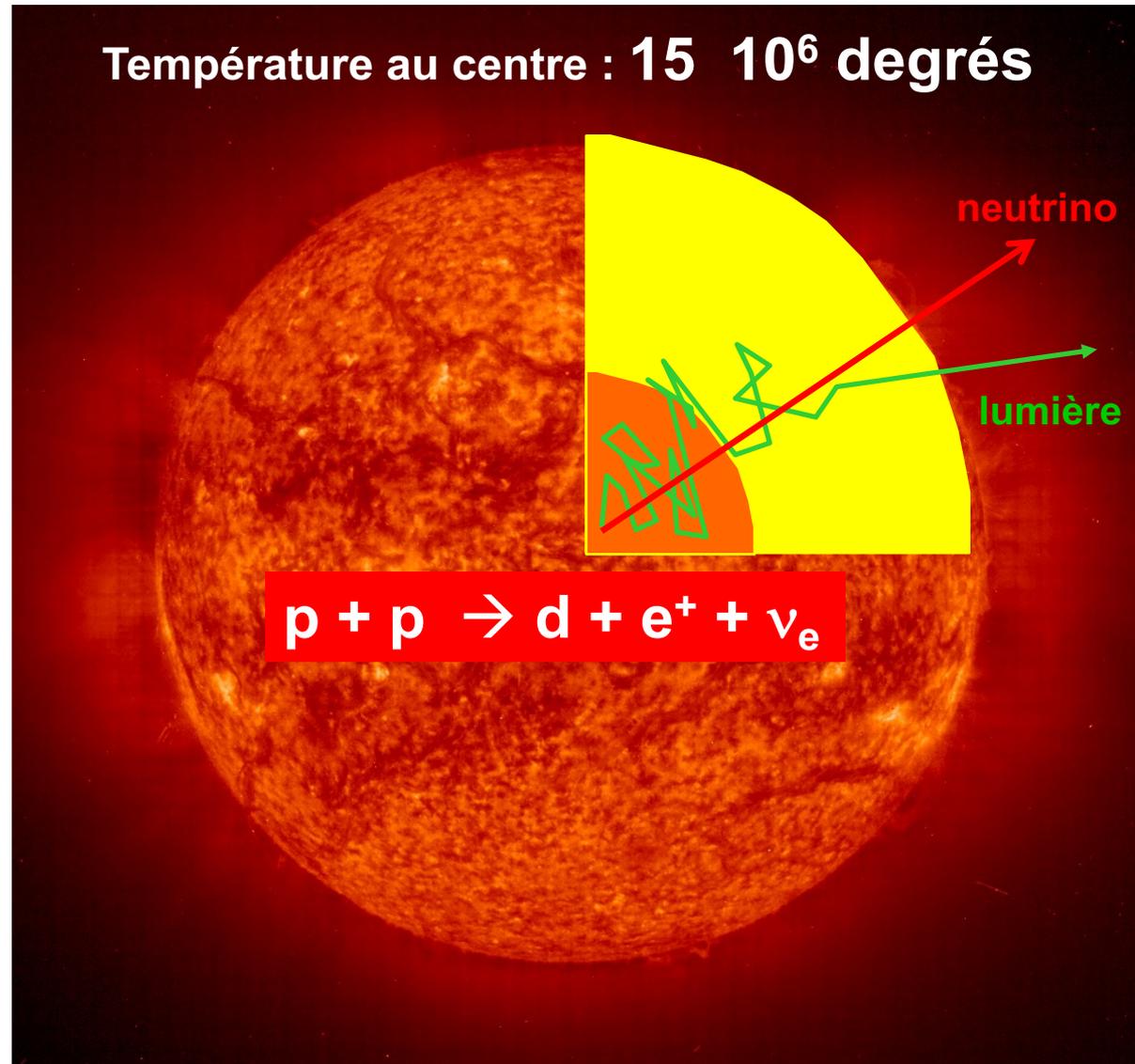
# Les neutrinos comme sondes astrophysiques

Les neutrinos émis par le soleil sont témoins de la synthèse de l'hélium.

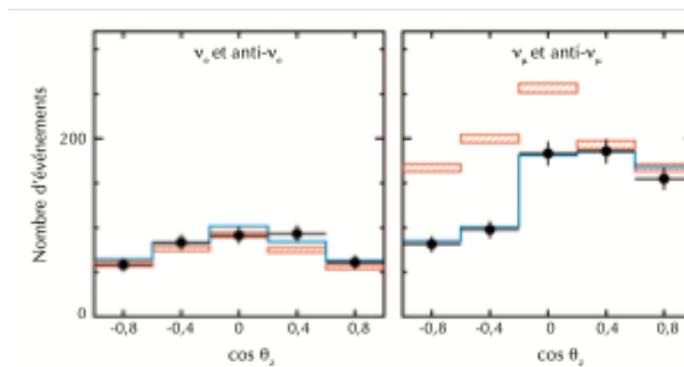
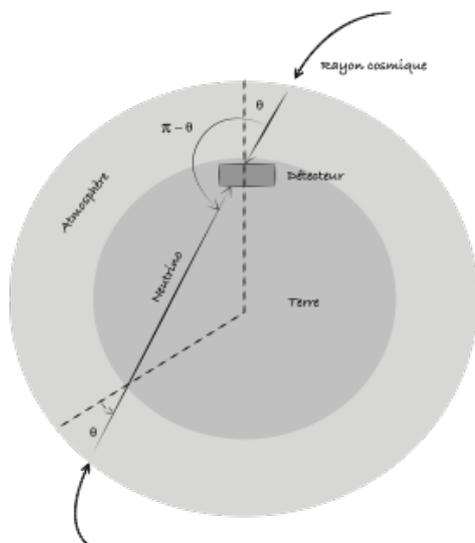
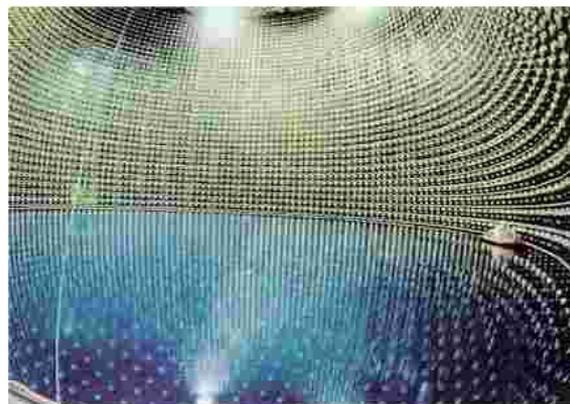
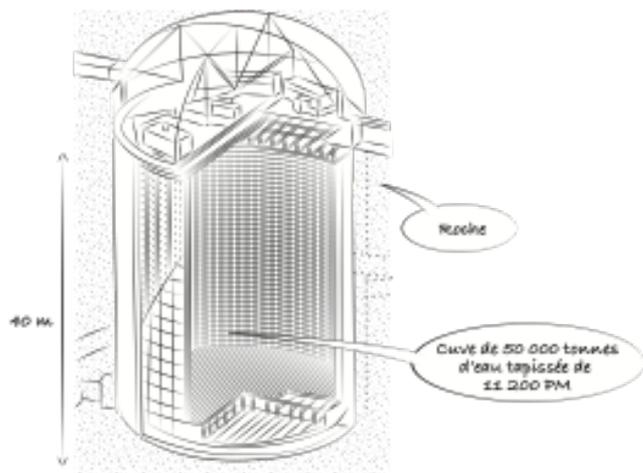
➤ **Composition :**  
73% hydrogène (H)  
25% hélium (He)  
2% autres éléments

Les neutrinos sortent en 2s, arrivent en 8 min sur terre.  
La lumière met  
**170 000 ans**  
à s'extraire du soleil

**60 milliards/s/cm<sup>2</sup>**



# deuxième moitié du prix Nobel 2015 : Super-Kamiokande découverte des oscillations des neutrinos atmosphériques (1998)

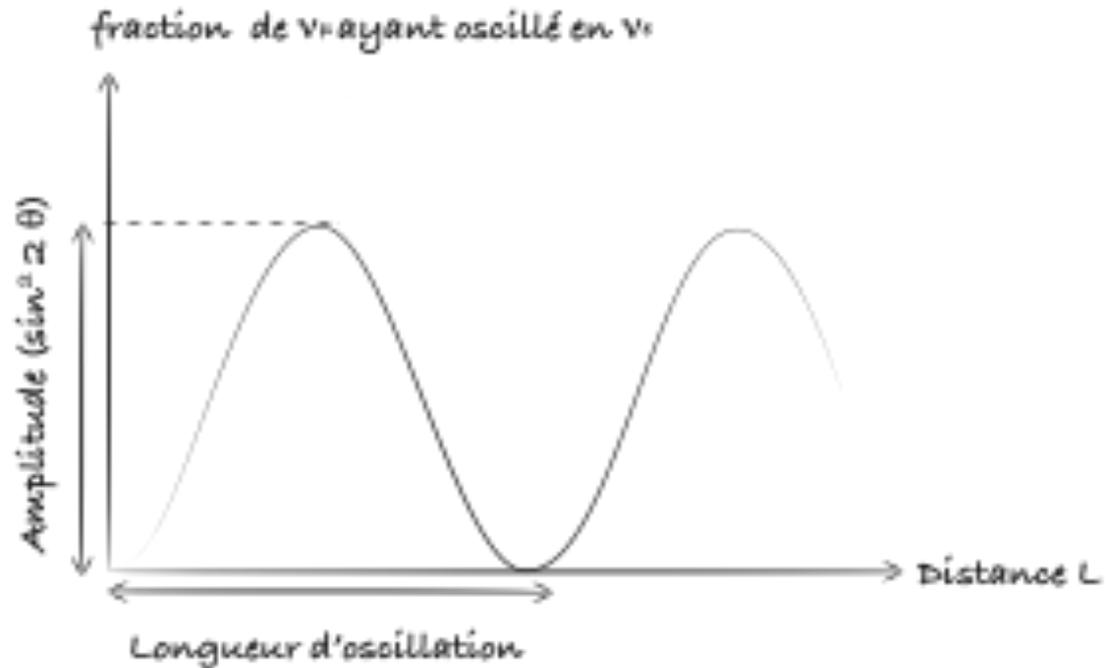


oscillations  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$

# Les oscillations des neutrinos et leurs masses

oscillations

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$$

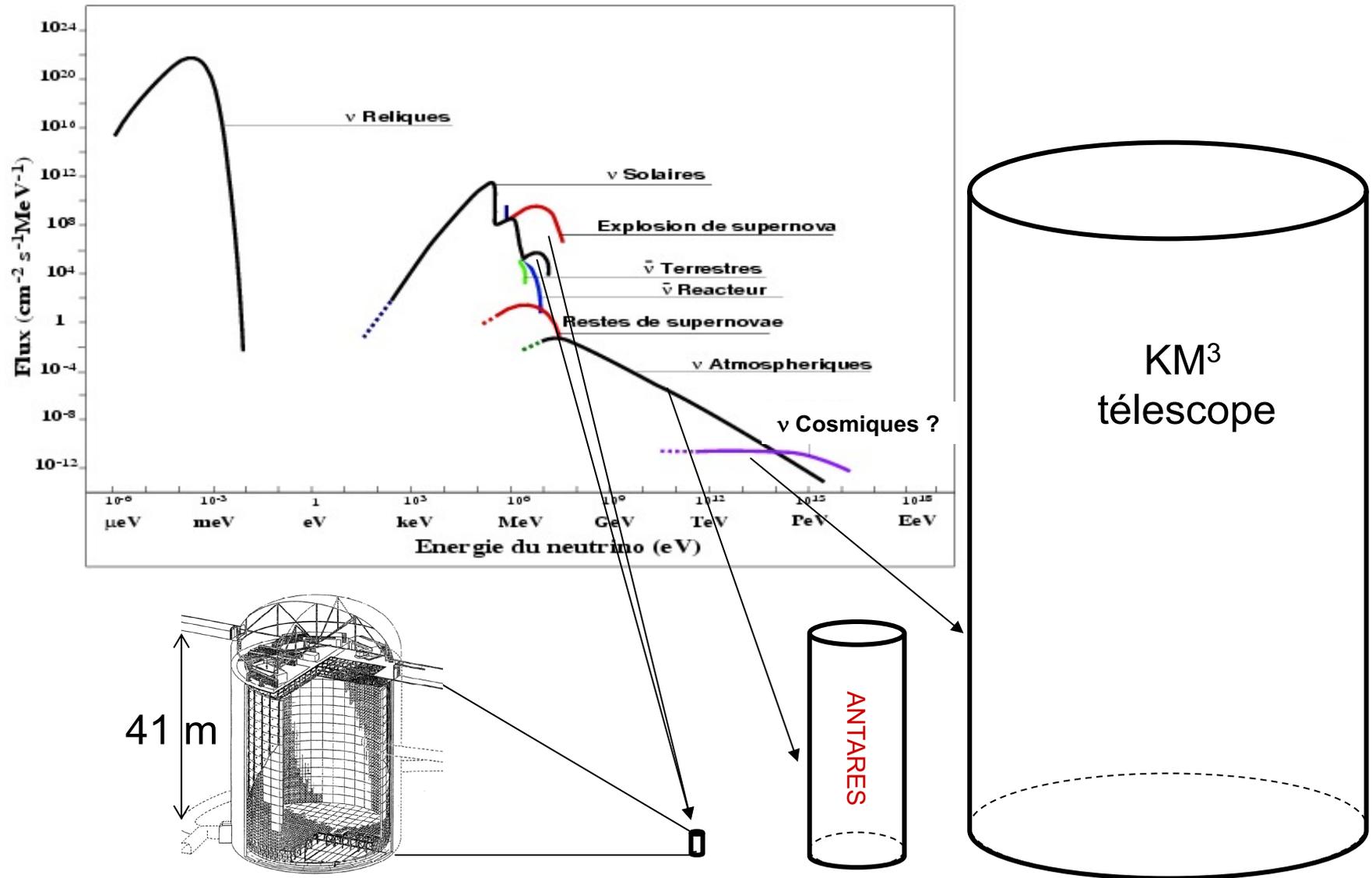


oscillations  $\Rightarrow$  les neutrinos ont une masse !

-> questions :

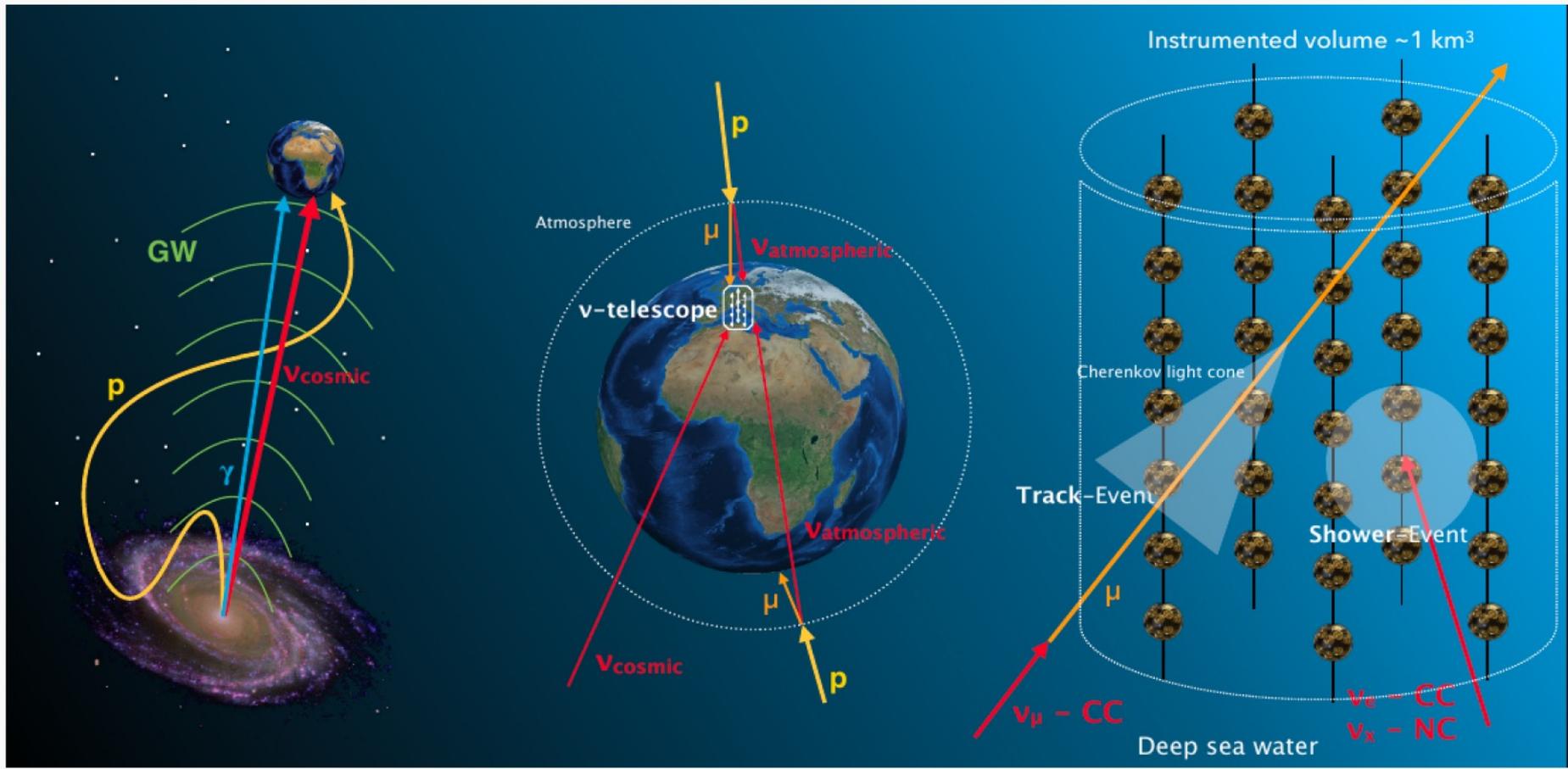
- pourquoi des masses si petites ?
- origine des masses des neutrinos ? (lié à une autre question : les neutrinos sont-ils leurs propres antiparticules ?)

# Défi de la détection à haute énergie



Pas de grotte accessible pour cette taille de détecteur (prohibitif) → milieu naturel

# In short Astronomie des neutrinos

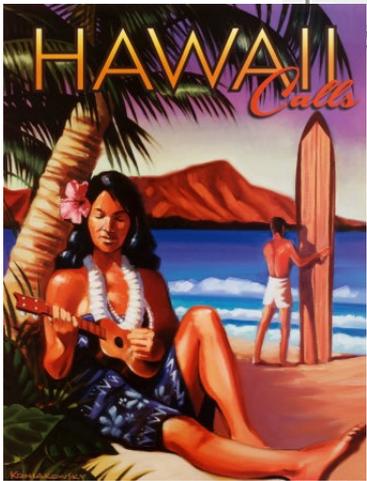
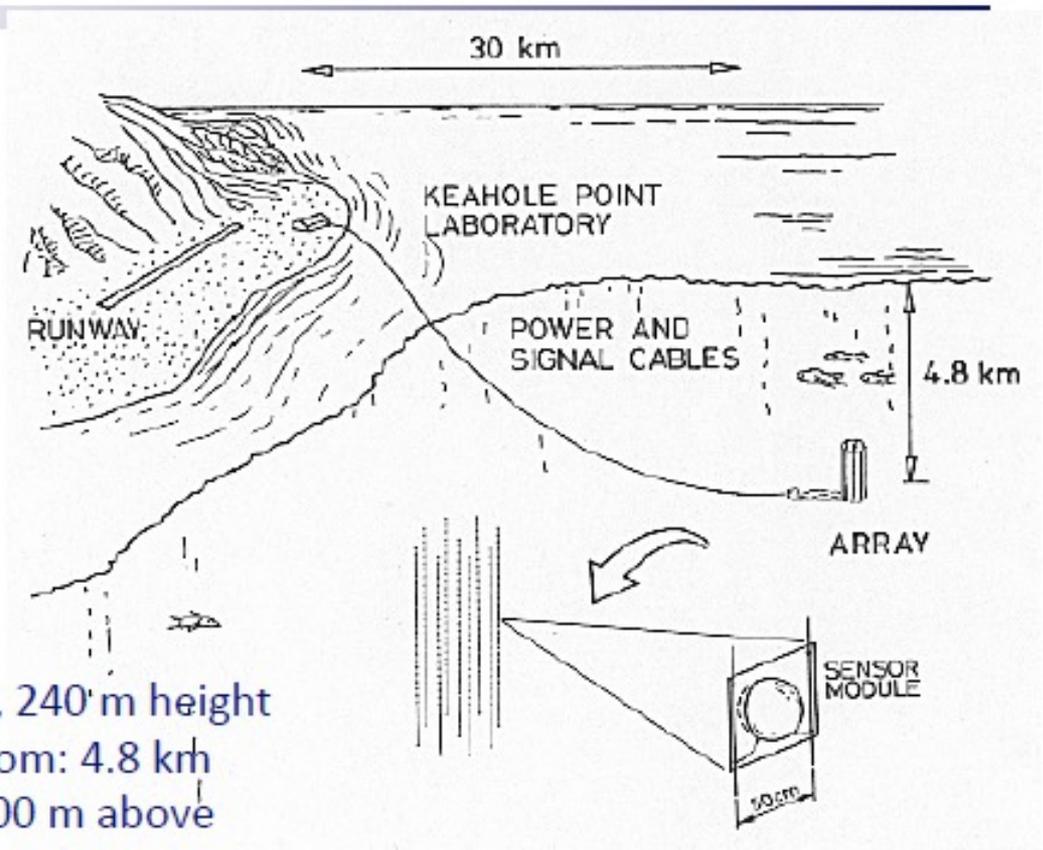




# Années 80 : premier echec aux Etats-Unis



## DUMAND-II (The Octagon)

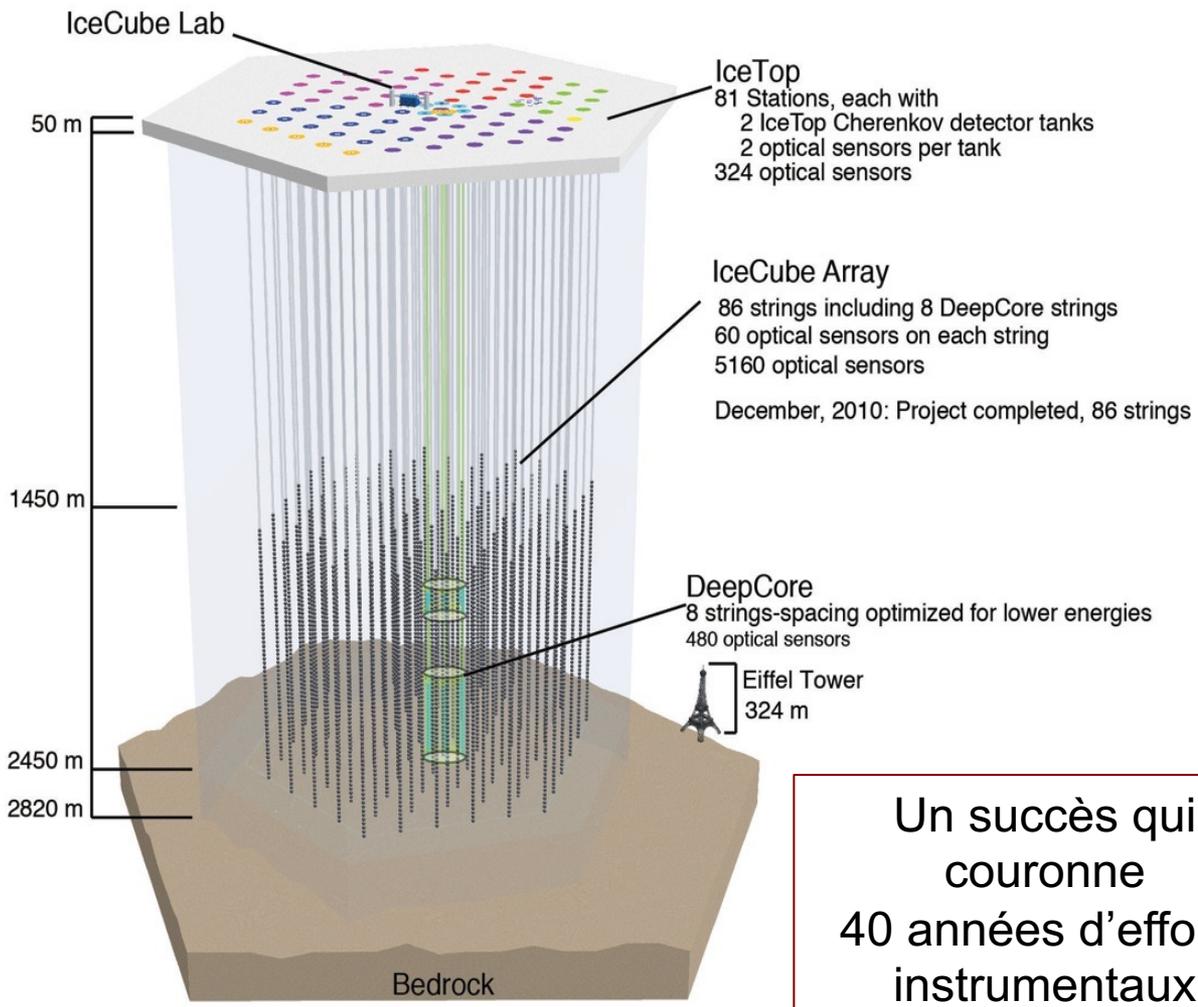


- 9 strings
- 216 OMs
- 100 diameter, 240' m height
- Depth of bottom: 4.8 km
- Lowest OM 100 m above bottom

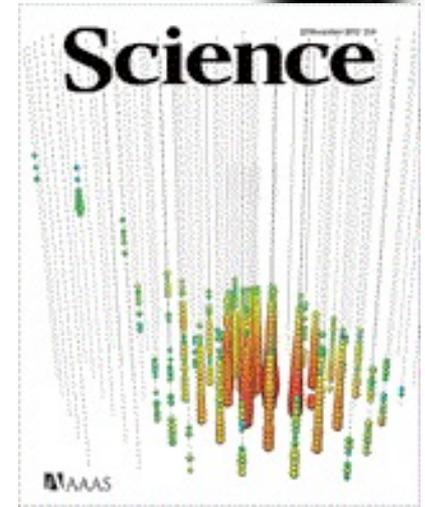
Les prototypes prennent l'eau → pas de financement pour le projet

# Les efforts US se concentrent au Pôle Sud

Détecteur complet depuis décembre 2010.



Un succès qui  
couronne  
40 années d'efforts  
instrumentaux  
et ouvre le domaine !

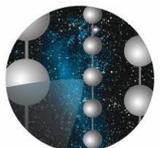
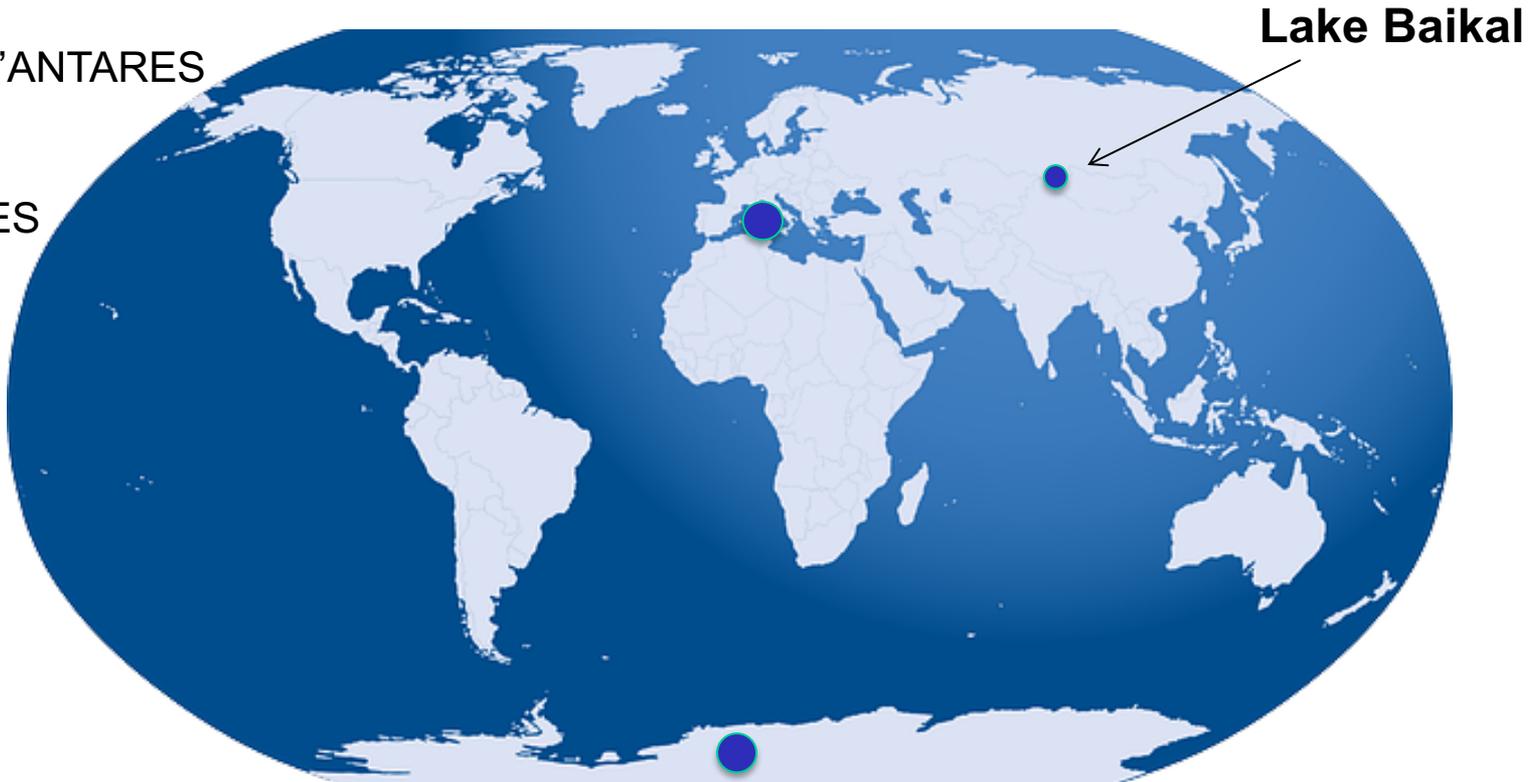


# Les télescopes à neutrinos



Hémisphère Nord : **ANTARES**, 1<sup>er</sup> TN sous-marin au monde (Toulon, 2500m fond)  
8 pays, 31 instituts  
~150 physiciens et ingénieurs

Successeur d'ANTARES  
→ **KM3NeT**  
France, Italie  
>x50 ANTARES

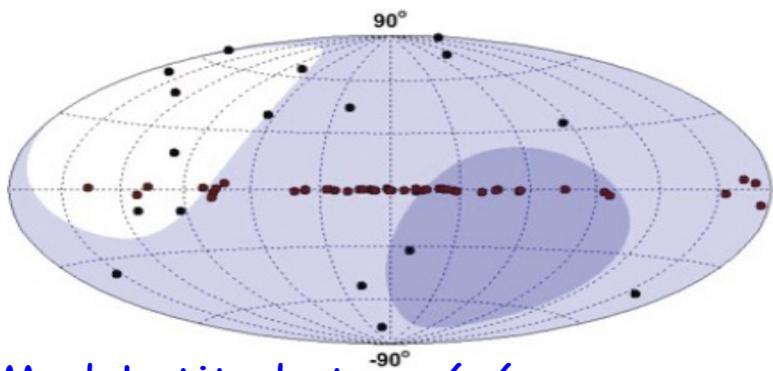


IceCube

Hémisphère Sud: **IceCube**, le plus grand TN (Glace du Pole Sud)  
Leadership américain  
Première observation d'un flux diffus de neutrinos cosmiques  
→ **Domaine ouvert en plein essor !**

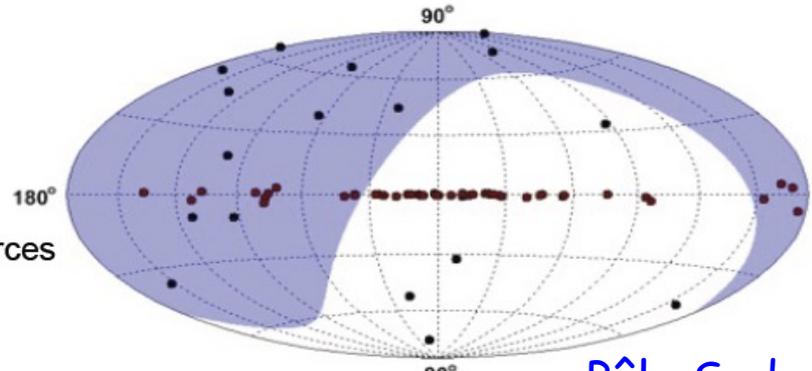
# Un télescope dans chaque hémisphère

Complémentarité des champs de vue



Med. Latitude tempérée

TeV gamma-ray sources  
 ● Galactic  
 ● extragalactic

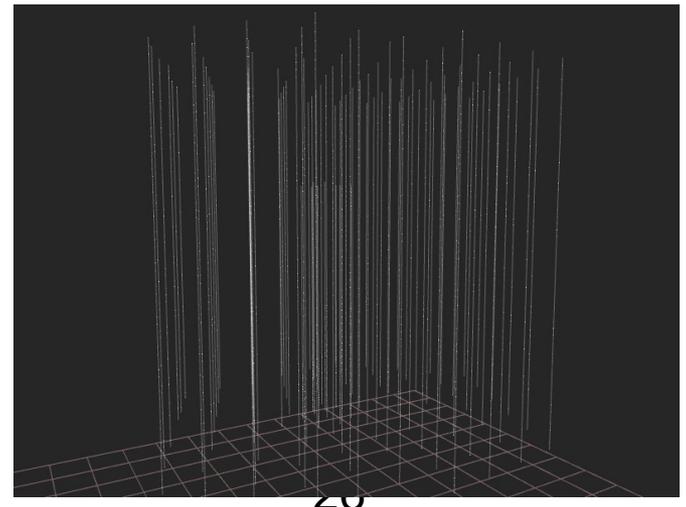
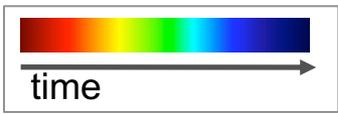
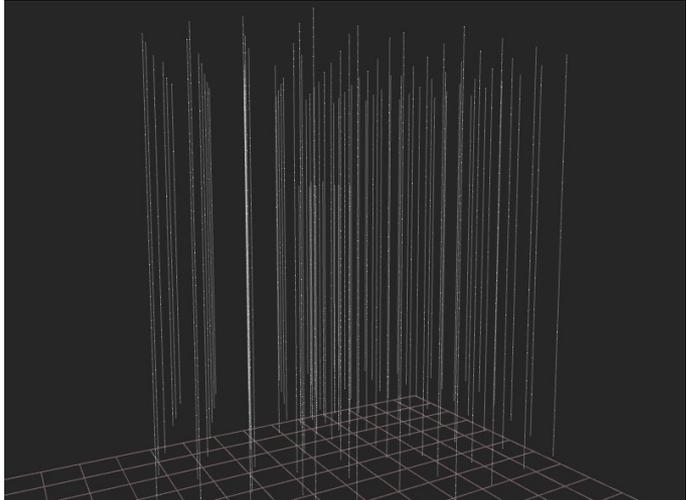


Pôle Sud

différents environnements

Eau : meilleur pouvoir de pointage  
 Activité optique : calibration et sciences associées

Glace : meilleur pouvoir calorimétrique  
 Pas d'activité optique



ZU

# Le détecteur européen ANTARES



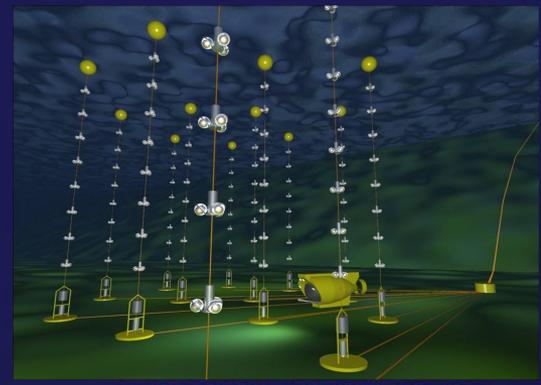
## Toulon



Insitut M.Pacha



## ANTARES



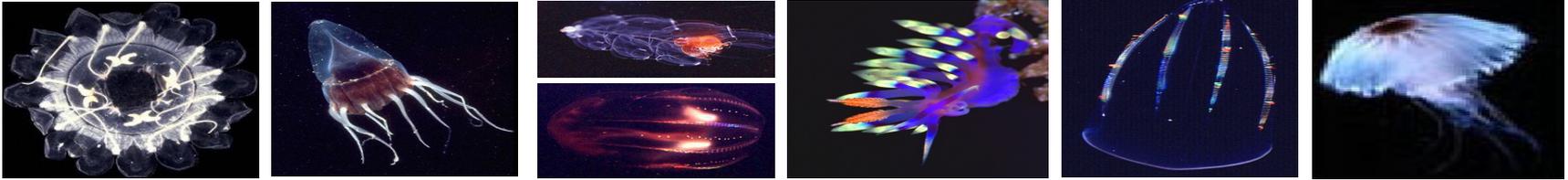
42 50'N, 6 10'E

© 2008 Cnes/Spot Image  
 Image © 2008 DigitalGlobe  
 Image NASA

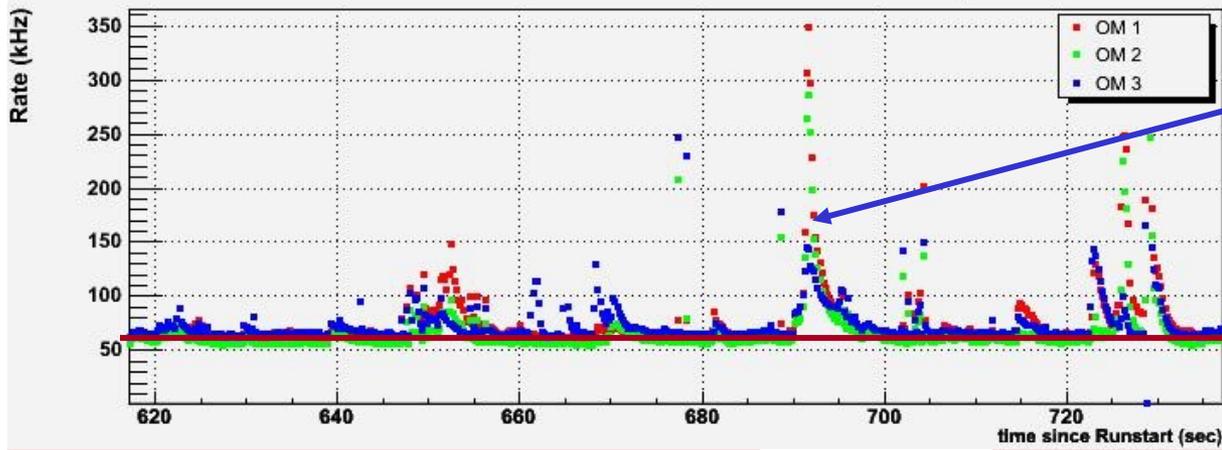




# Bruit de fond optique



Run 27812 Line 1-5 Physics Trigger (thr=tuned, allsamp=1, HRV=500kHz) Line 4 Floor 13 Mon May 21 17:39:37 2007



*Sursauts*

*Ligne de base*

*Ligne de base*

$^{40}\text{K}$

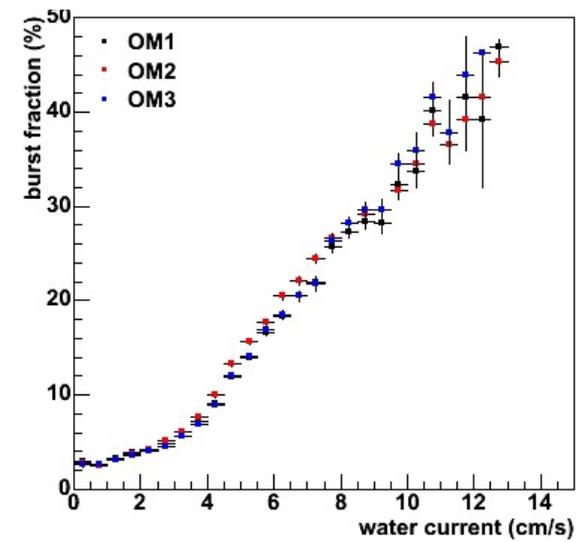
*Bio-luminescence*



*Sursauts de bio-luminescence:*

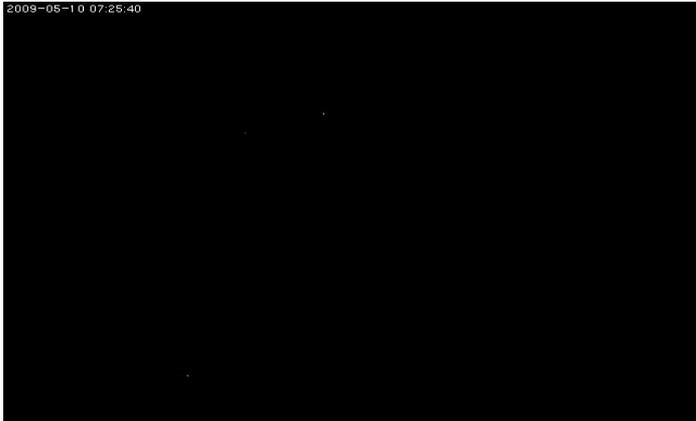


*Espèces animales photo-émettrices*

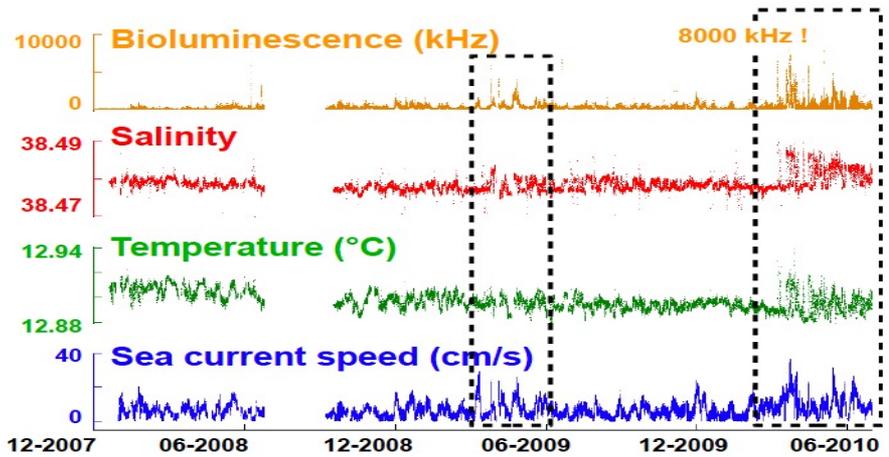
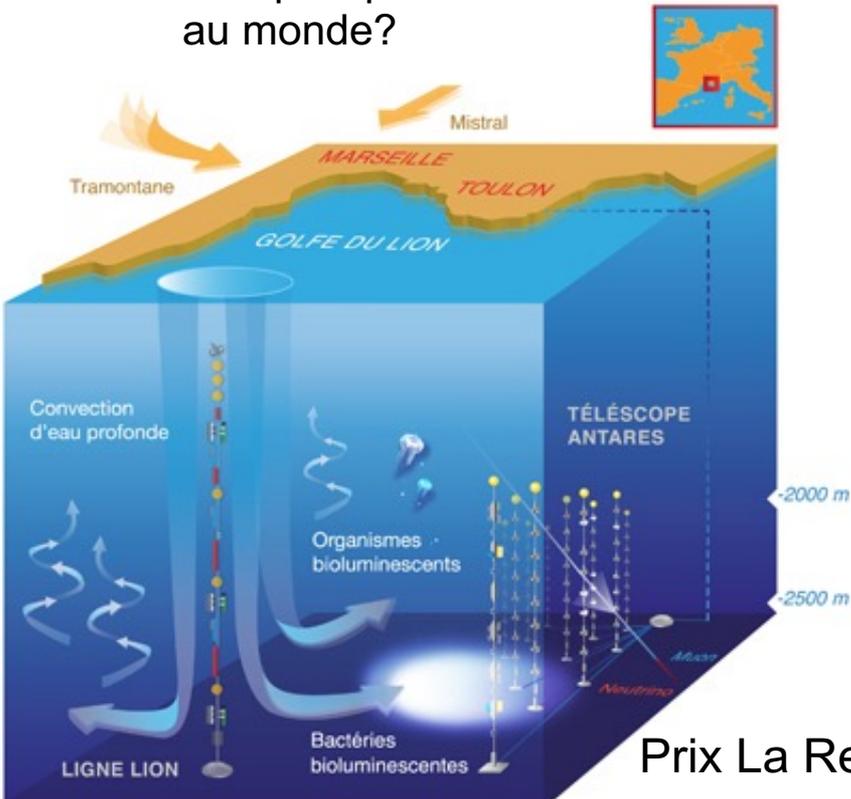


# Observatoire multi-disciplinaire

## Bioluminescence



Web-cam la plus profonde au monde?



Prix La Recherche Categorie "Coup de Coeur" 2014

# Observatoire multi-disciplinaire

## Sismicité en réseau



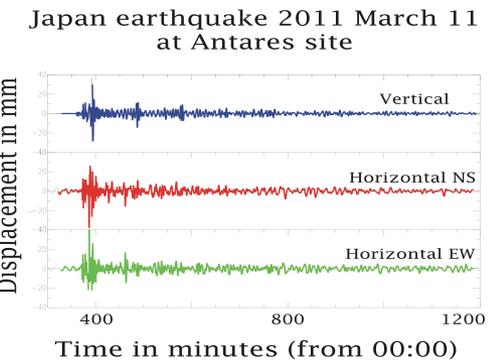
Laboratoire



Déploiement

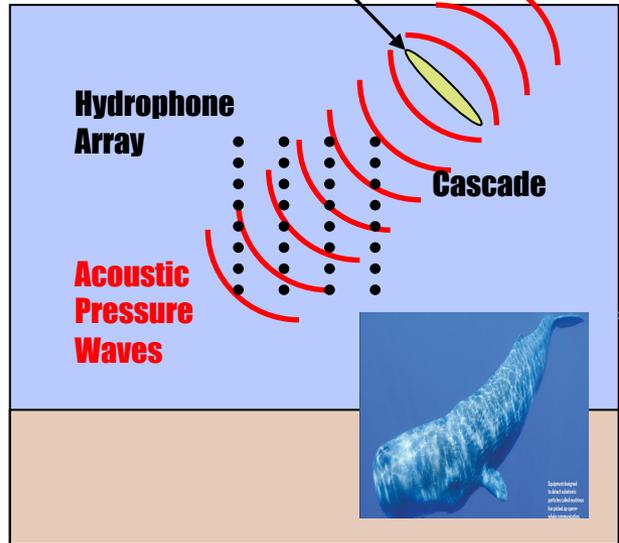


Enterré - site Antares  
(gain en bruit 20 dB)

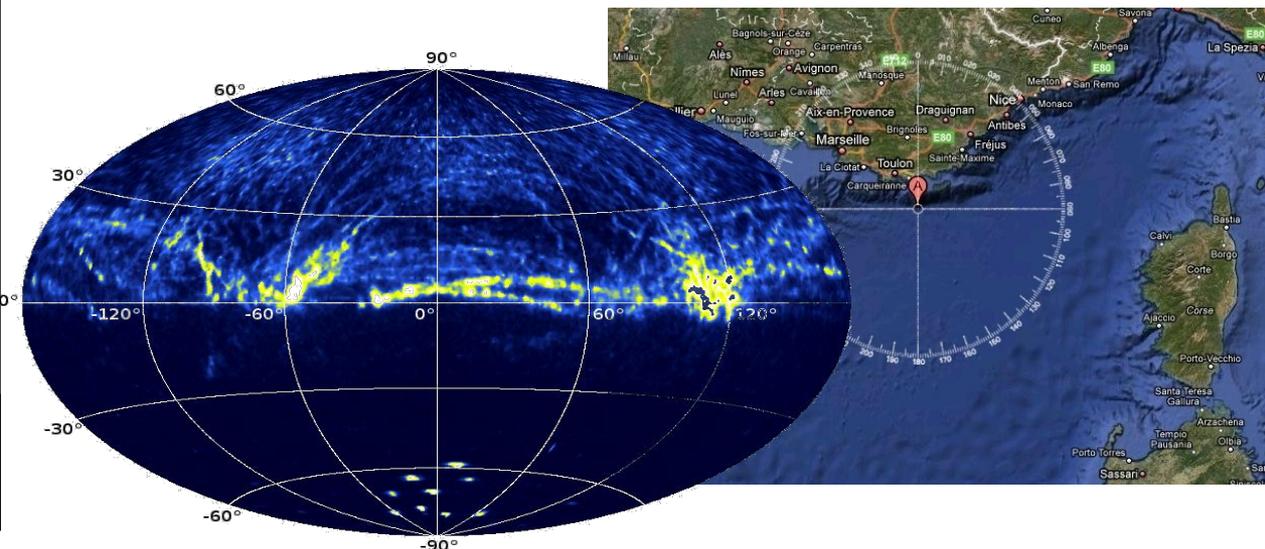


Surveillance acoustique → <http://www.listentothedeep.com> → Film The SNORKKS

neutrino



Les baleines déjeunent à midi !

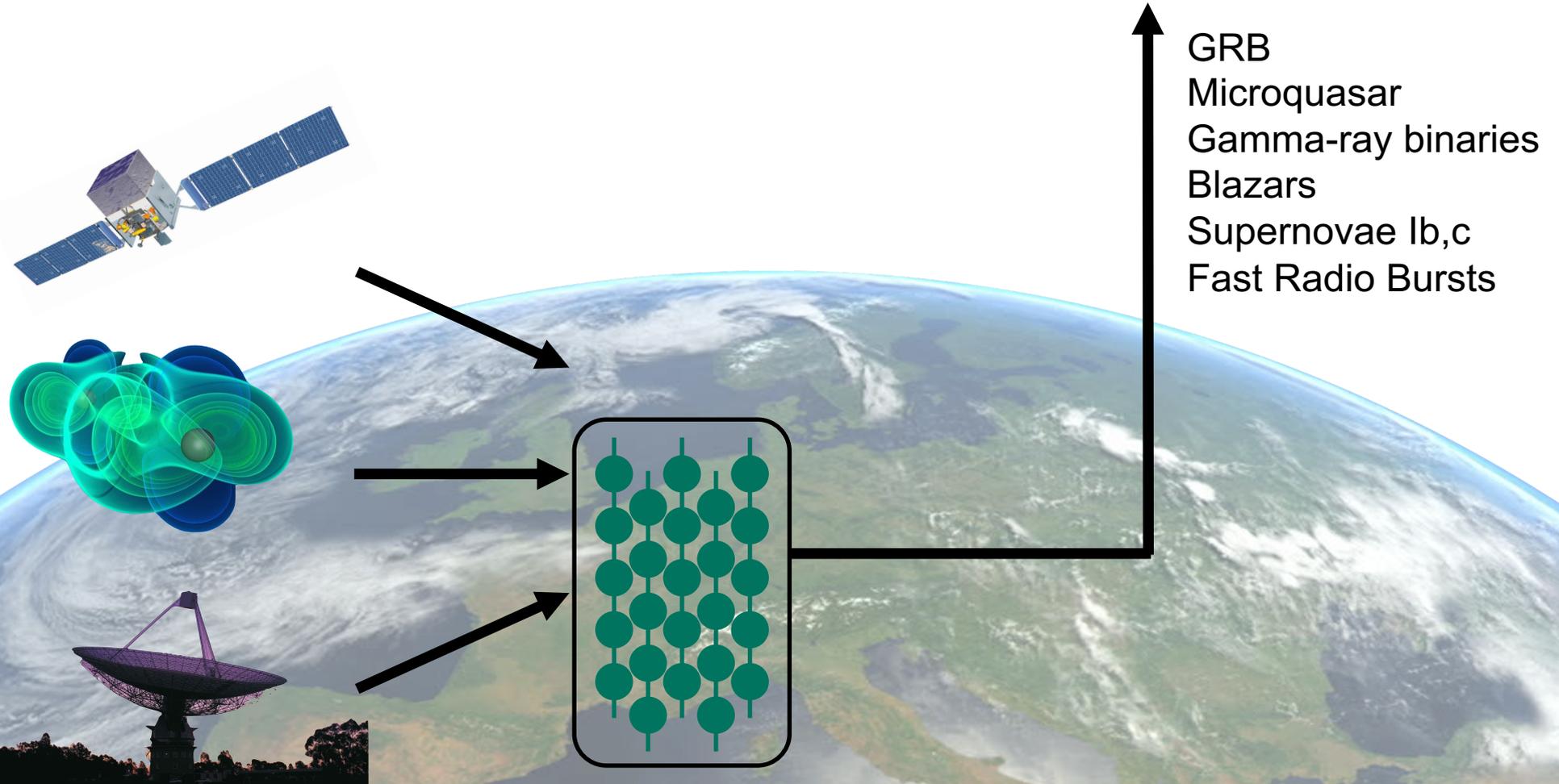


# Le programme multi-messagers

## 1<sup>ERE</sup> APPROCHE:

Recherches spécifiques

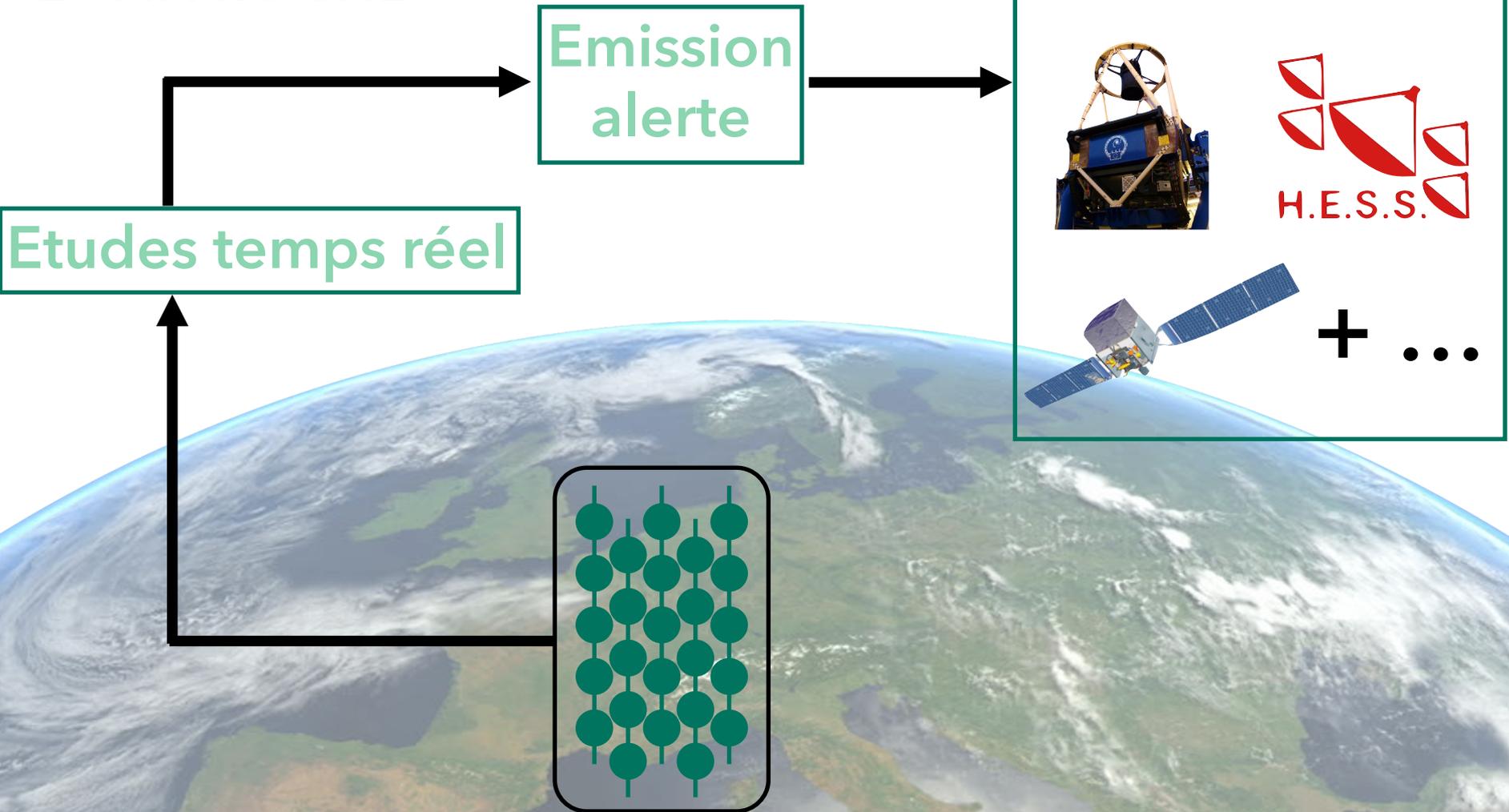
- GRB
- Microquasar
- Gamma-ray binaries
- Blazars
- Supernovae Ib,c
- Fast Radio Bursts



# Le programme multi-messagers: TAtoO

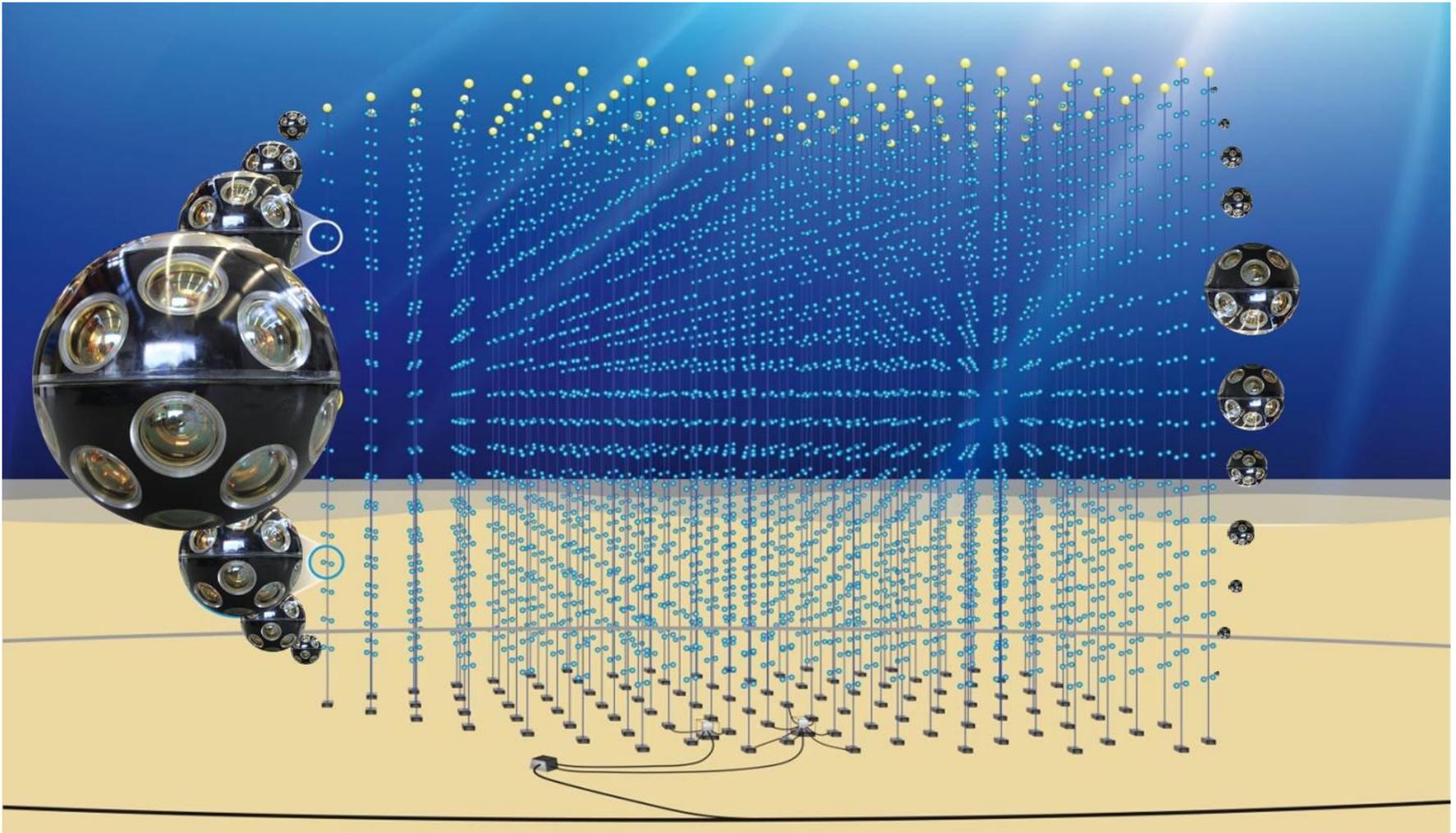
Telescope-Antares Target of Opportunity

2<sup>E</sup> APPROCHE:



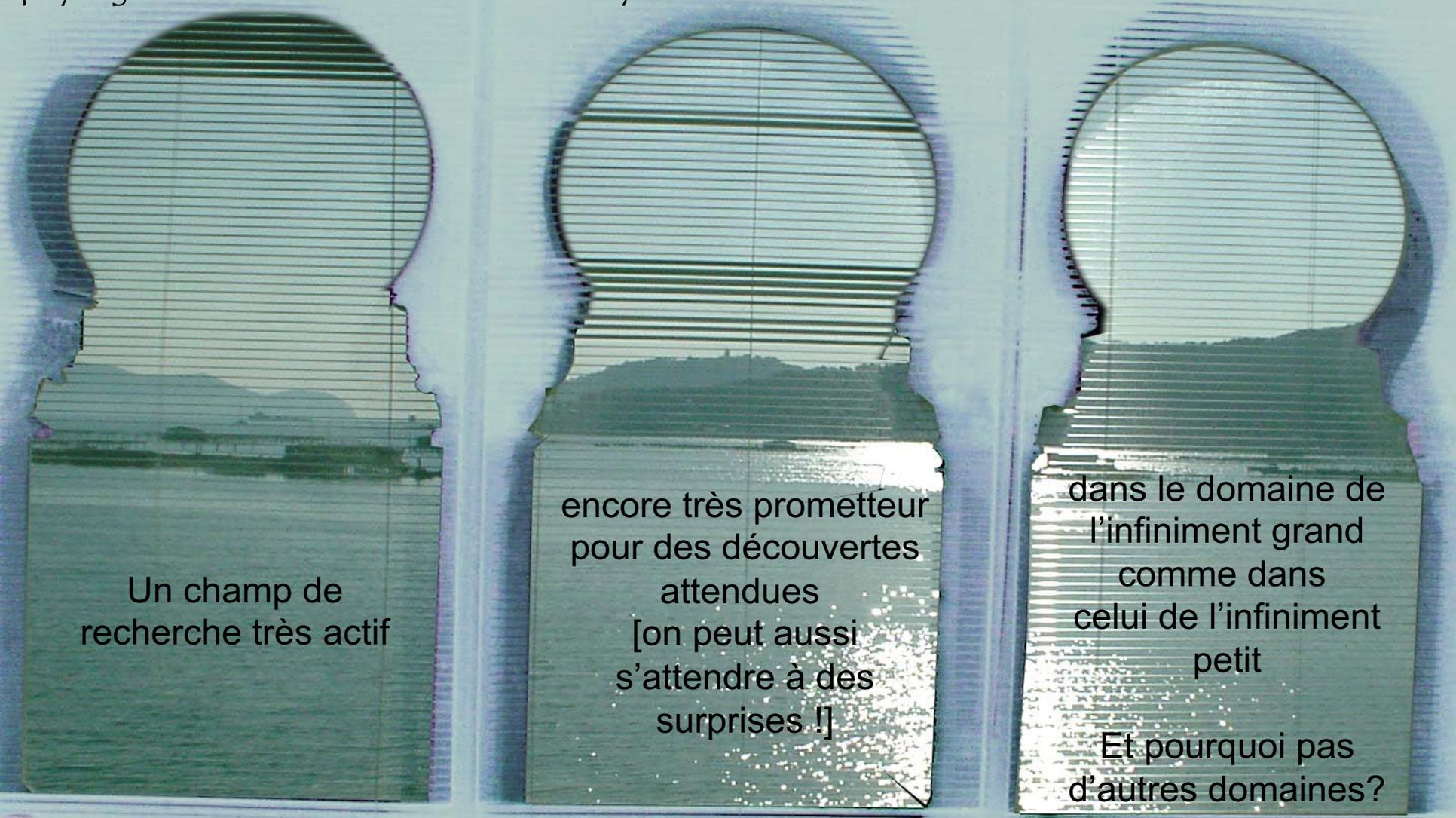
# Télescope de future génération : KM3NeT

ANTARES : une technologie maîtrisée.  
En cours de construction en Méditerranée ...



# Conclusion

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



Un champ de  
recherche très actif

encore très prometteur  
pour des découvertes  
attendues  
[on peut aussi  
s'attendre à des  
surprises !]

dans le domaine de  
l'infiniment grand  
comme dans  
celui de l'infiniment  
petit

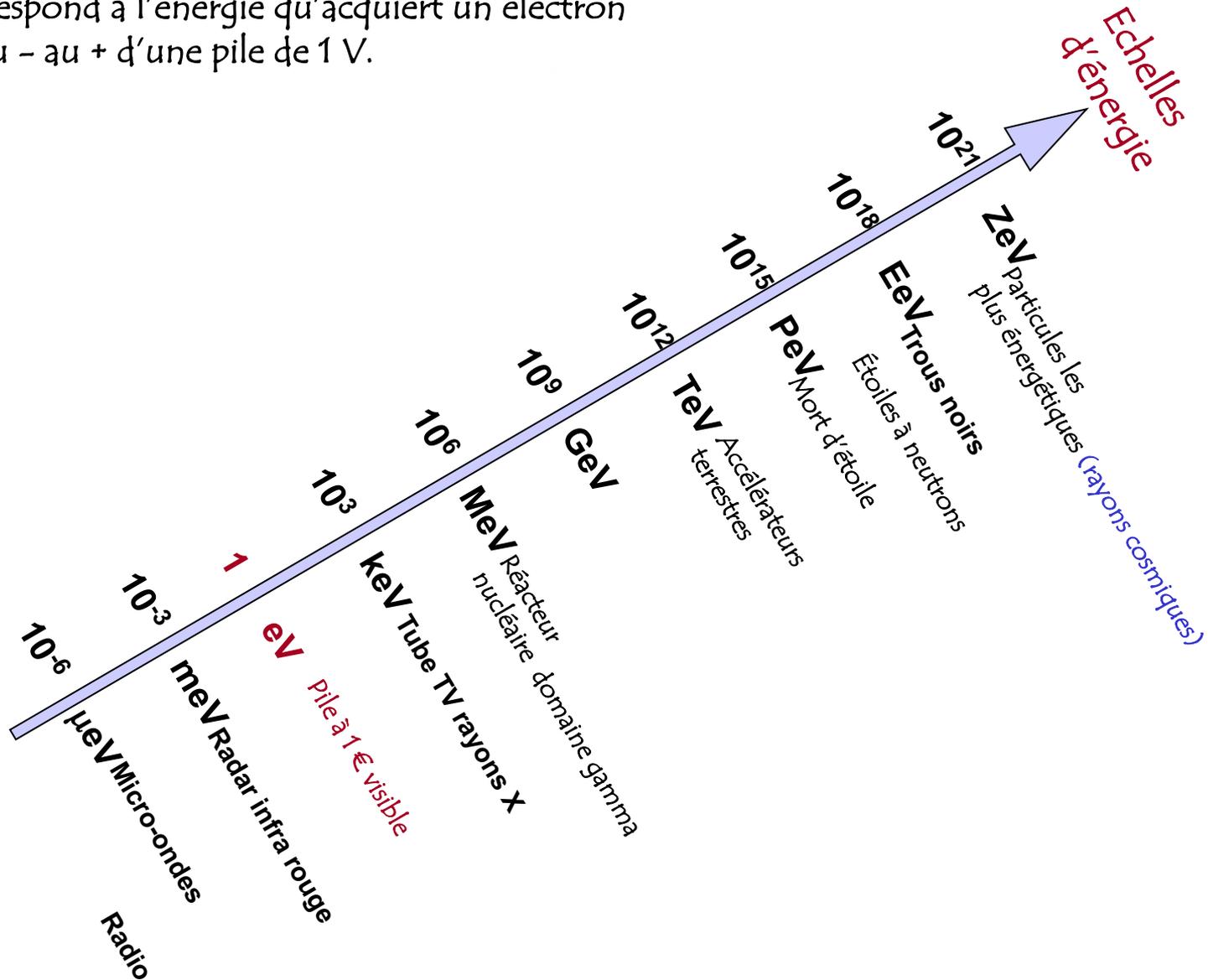
Et pourquoi pas  
d'autres domaines?

The background of the slide is a reproduction of the painting 'The Starry Night' by the Dutch Impressionist painter J.M.W. Turner. The painting depicts a night scene with a dark, turbulent sky filled with swirling, luminous clouds and numerous stars, each rendered as a bright, glowing orb with a yellow center and a blue-green halo. In the foreground, a dark, jagged, and expressive cypress tree stands on the left side. Below the sky, a small town is visible, with a prominent church spire and several houses with glowing windows. The overall style is characterized by visible, energetic brushstrokes and a rich, vibrant color palette.

**MERCI DE VOTRE ATTENTION !**

# Echelle d'énergie

L'unité d'énergie utilisée en physique des particules est l'électron-volt eV.  
Un eV correspond à l'énergie qu'acquiert un électron  
qui passe du - au + d'une pile de 1 V.



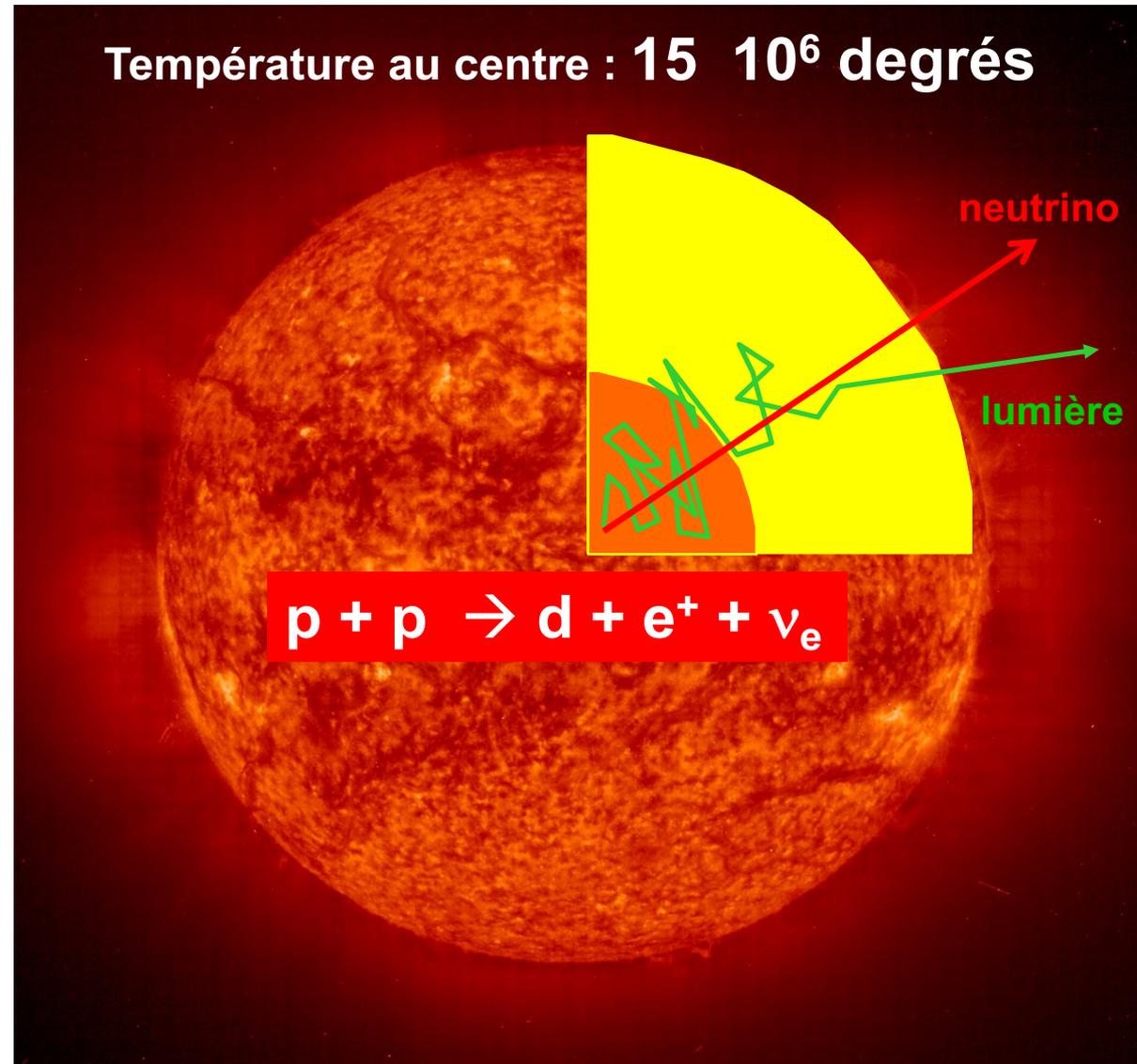
# Les neutrinos comme sondes astrophysiques

Les neutrinos émis par le soleil sont témoins de la synthèse de l'hélium.

➤ **Composition :**  
73% hydrogène (H)  
25% hélium (He)  
2% autres éléments

Les neutrinos sortent en 2s, arrivent en 8 min sur terre.  
La lumière met  
**170 000 ans**  
à s'extraire du soleil

**60 milliards/s/cm<sup>2</sup>**



# Collecter le rayonnement électromagnétique

Radio

Infra-rouge

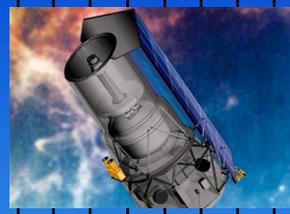
Visible (eV)

Rayons X

Rayons  $\gamma$  ( $10^8$  eV)

$\gamma$ -THE ( $10^{12}$  eV)

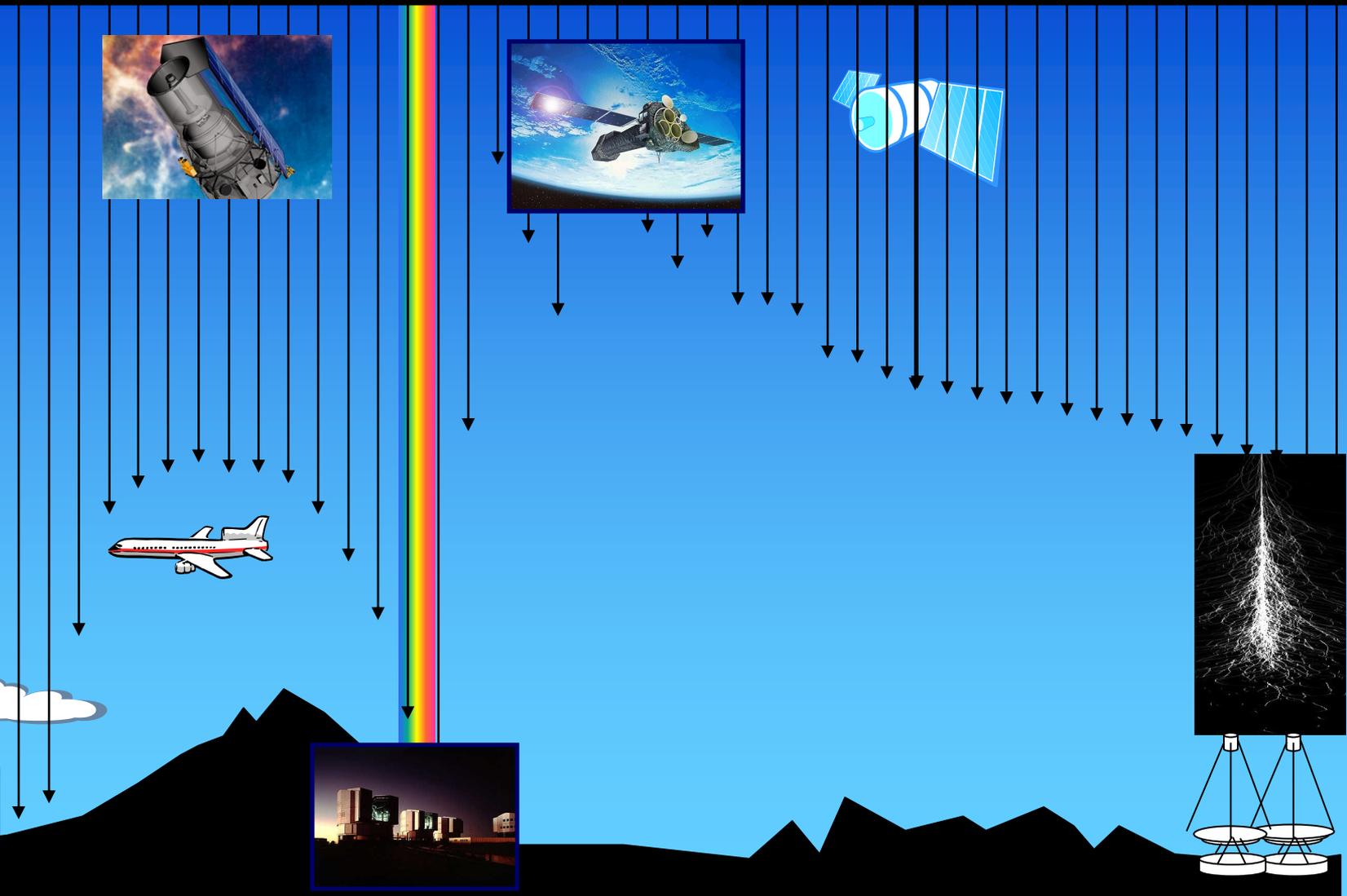
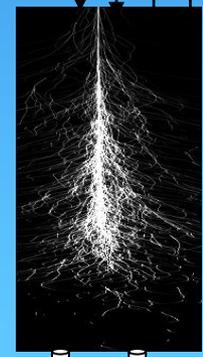
500 km



100 km



10 km



# Sources de $\nu$

## Le Big Bang

$$\rho = 330 / \text{cm}^3$$

$$E_\nu = 0.0004 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ Joules})$$

## SN1987A

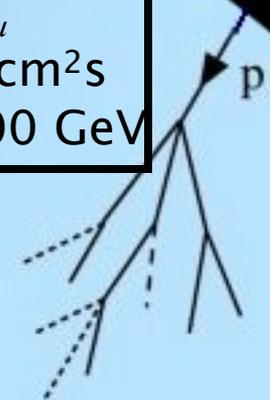
$$E_\nu \sim \text{MeV}$$

## Le Soleil : $\nu_e$

$$\Phi_\nu^{\text{Earth}} = 6 \times 10^{10} \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

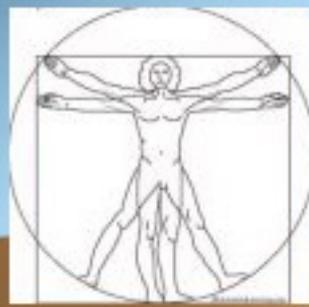
$$E_\nu \sim 0.1 - 20 \text{ MeV}$$

Atmospheric  $\nu$ 's  
 $\nu_e, \nu_\mu$   
 $\Phi_\nu \sim 1 \nu / \text{cm}^2\text{s}$   
 $E_\nu \sim 0.1 - 100 \text{ GeV}$



## Human Body

$$\Phi_\nu = 340 \times 10^6 \nu / \text{day}$$



## Nuclear Reactors

$$E_\nu \sim \text{few MeV}$$



## Earth's Radioactivity

$$\Phi_\nu \sim 6 \times 10^6 \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

## Accelerators

$$E_\nu \sim 0.3 - 30 \text{ GeV}$$

