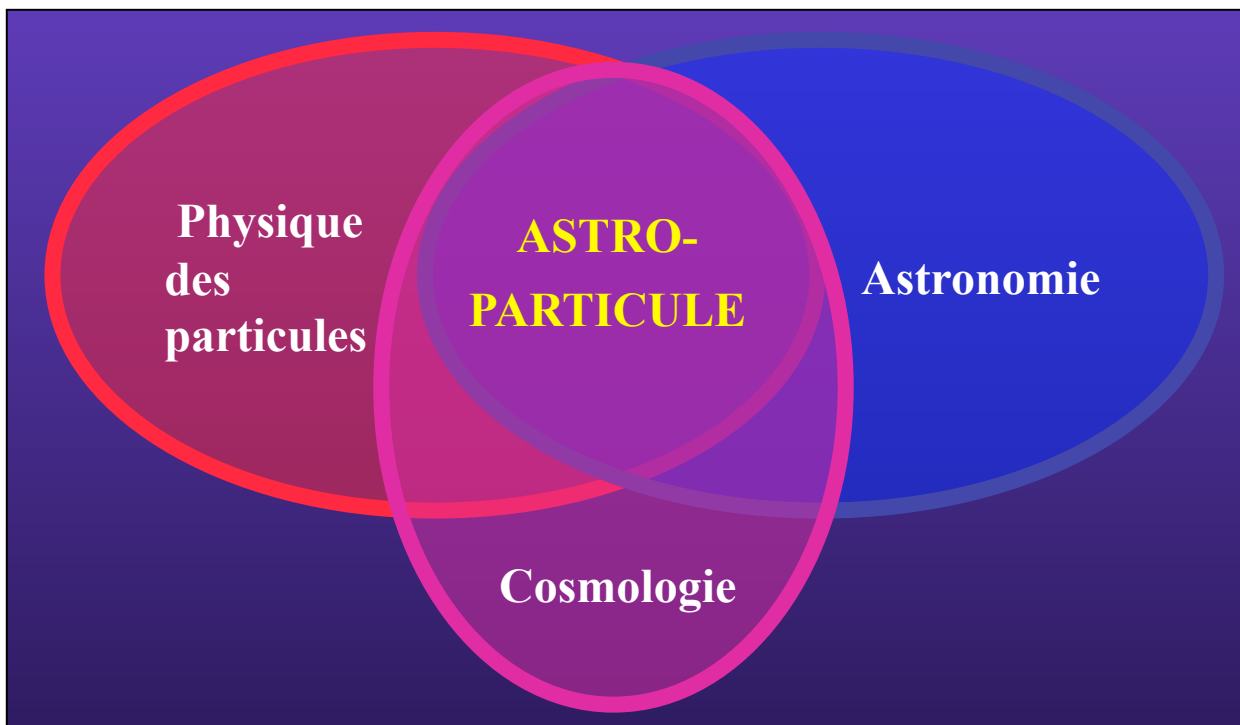


# Astroparticule

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay

# Astroparticule



- Composition de l'Univers ?
- Son évolution ?
- Phénomènes extrêmes ?



# Astroparticule

**Physique** : science qui a pour objet l'étude de la matière et de ses propriétés fondamentales

## Physique des particules

infiniment petit des constituants de la matière

## Astrophysique

infiniment grand de l'Univers

## Astroparticule

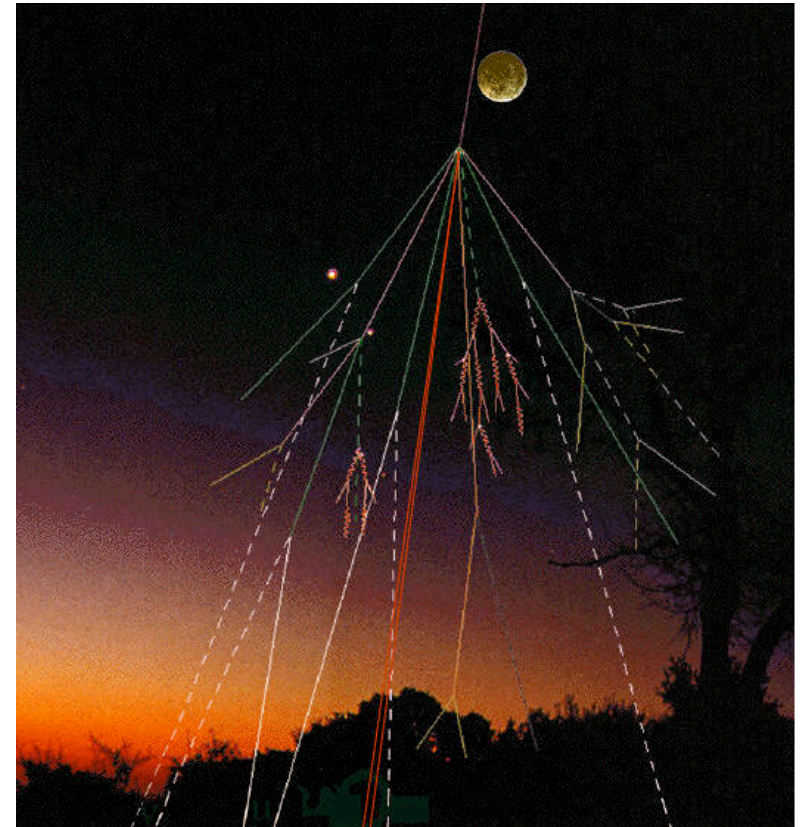
science qui a pour objet l'étude de l'Univers à partir des outils de la physique des particules et de l'astrophysique

particules chargées  
protons, noyaux

neutrinos

photons

ondes gravitationnelles



# Astroparticule



## 1) Approche **multi-messager**

### **Rayons cosmiques**

- Découverte (1912 - 1938)
- Expériences actuelles

## 2) **Neutrinos cosmiques**

- Saga solaire
- Neutrinos « haute énergie »

## 3) **Astronomie gamma**

### **Ondes gravitationnelles**

*ou l'Univers violent...*

# Observations multi longueurs d'onde



1 km

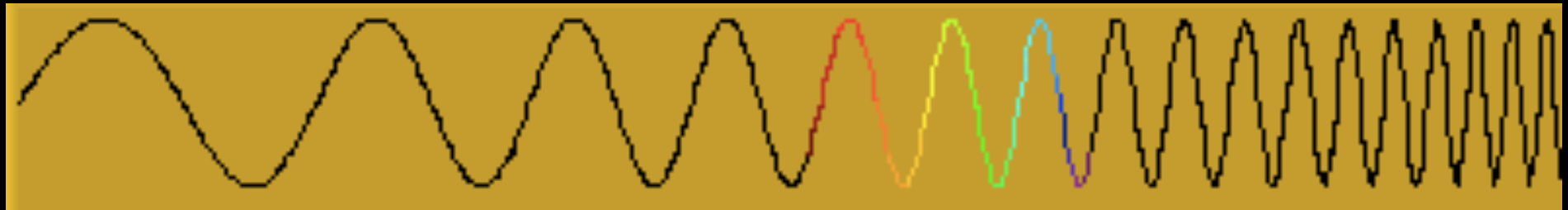
1 m

1 mm

1  $\mu\text{m}$

0,1  $\mu\text{m}$  10 nm

0,01 nm



Radio

Infrarouge

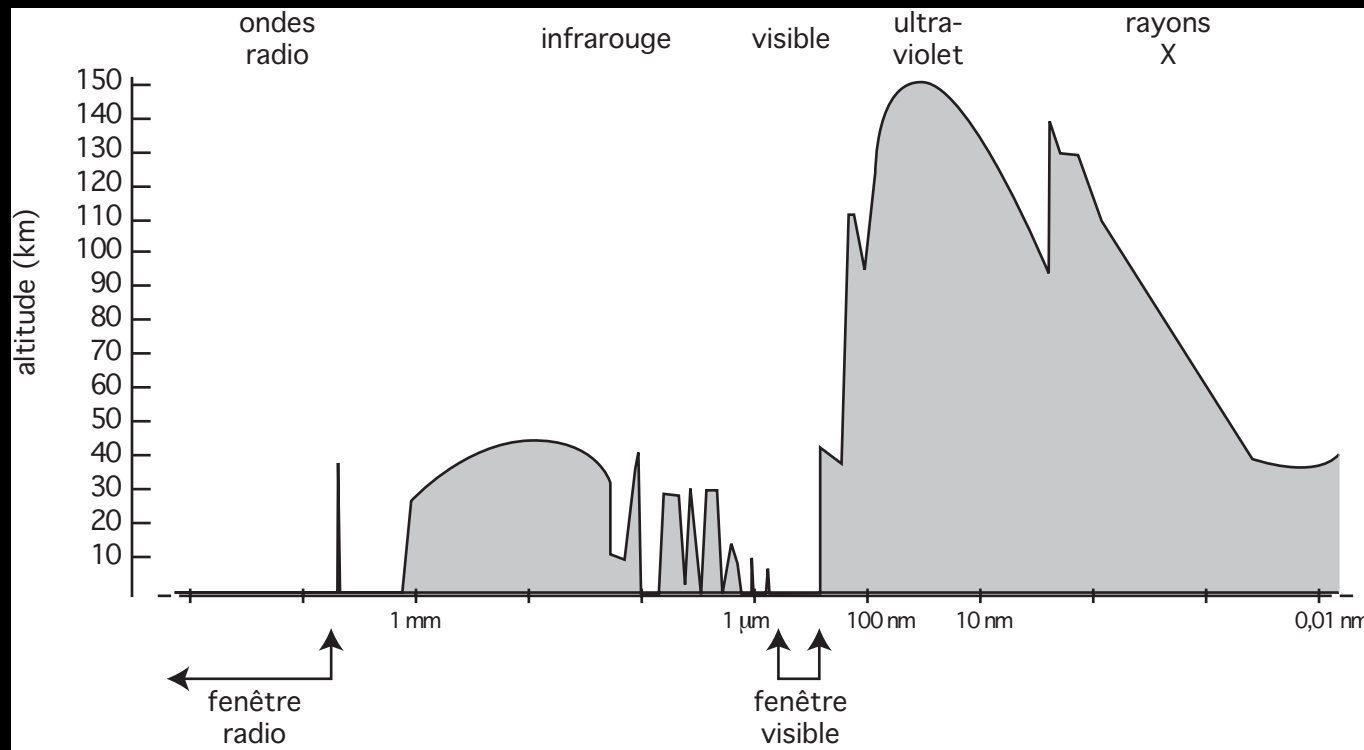
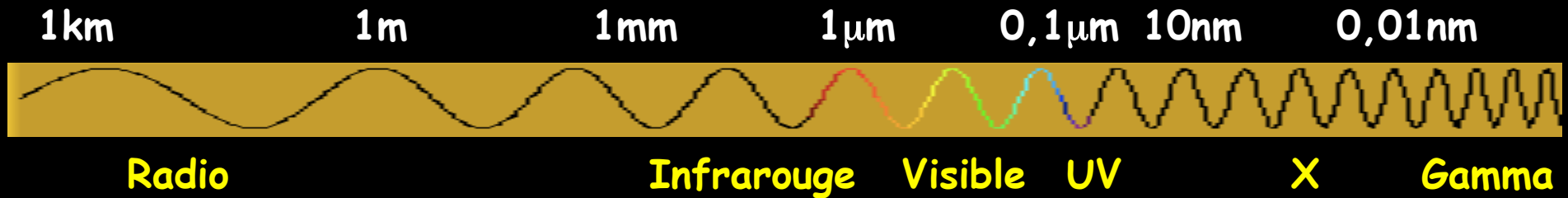
Visible

UV

X

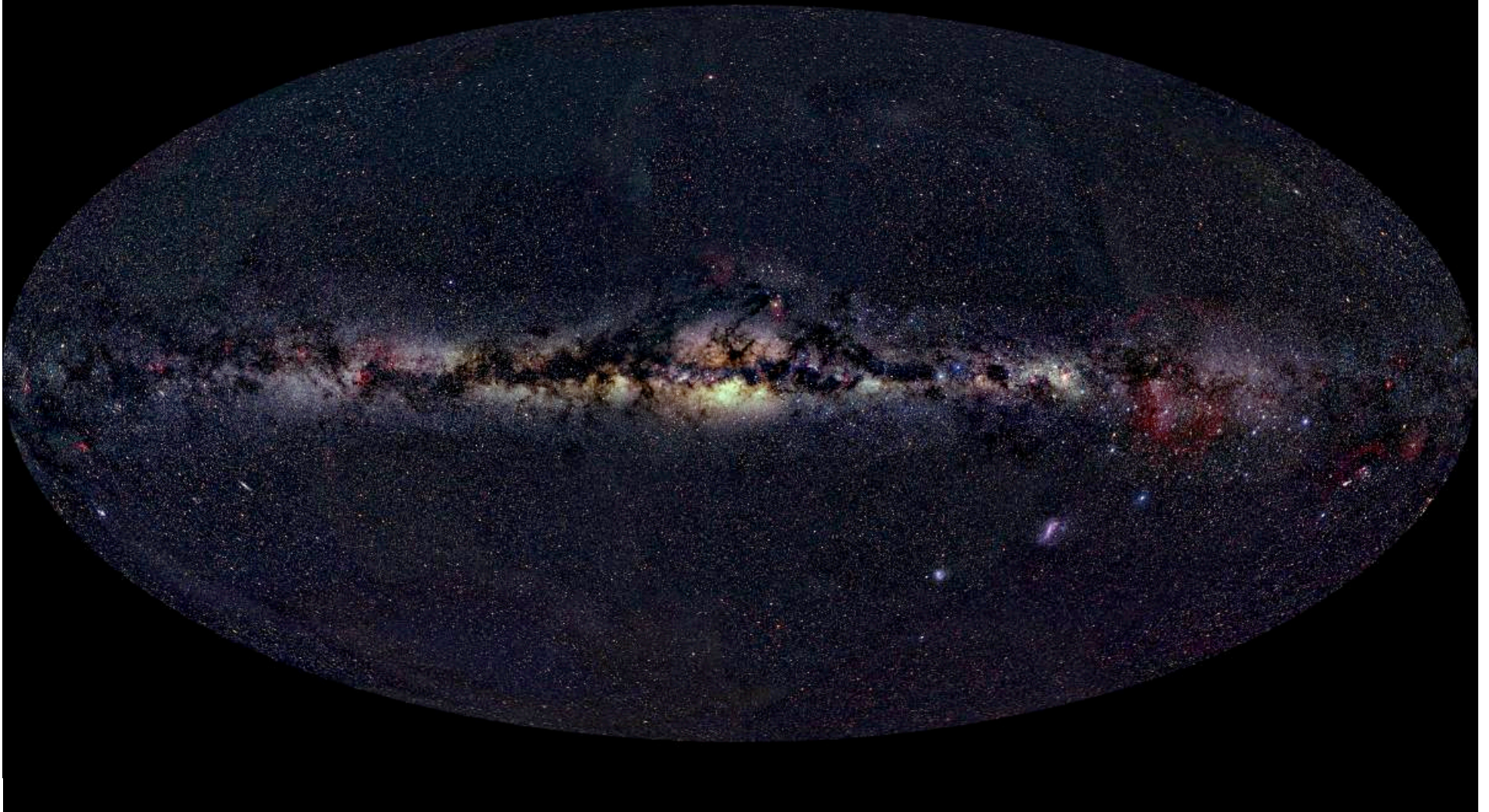
Gamma

# Observations multi longueurs d'onde





# Voie Lactée en « visible »

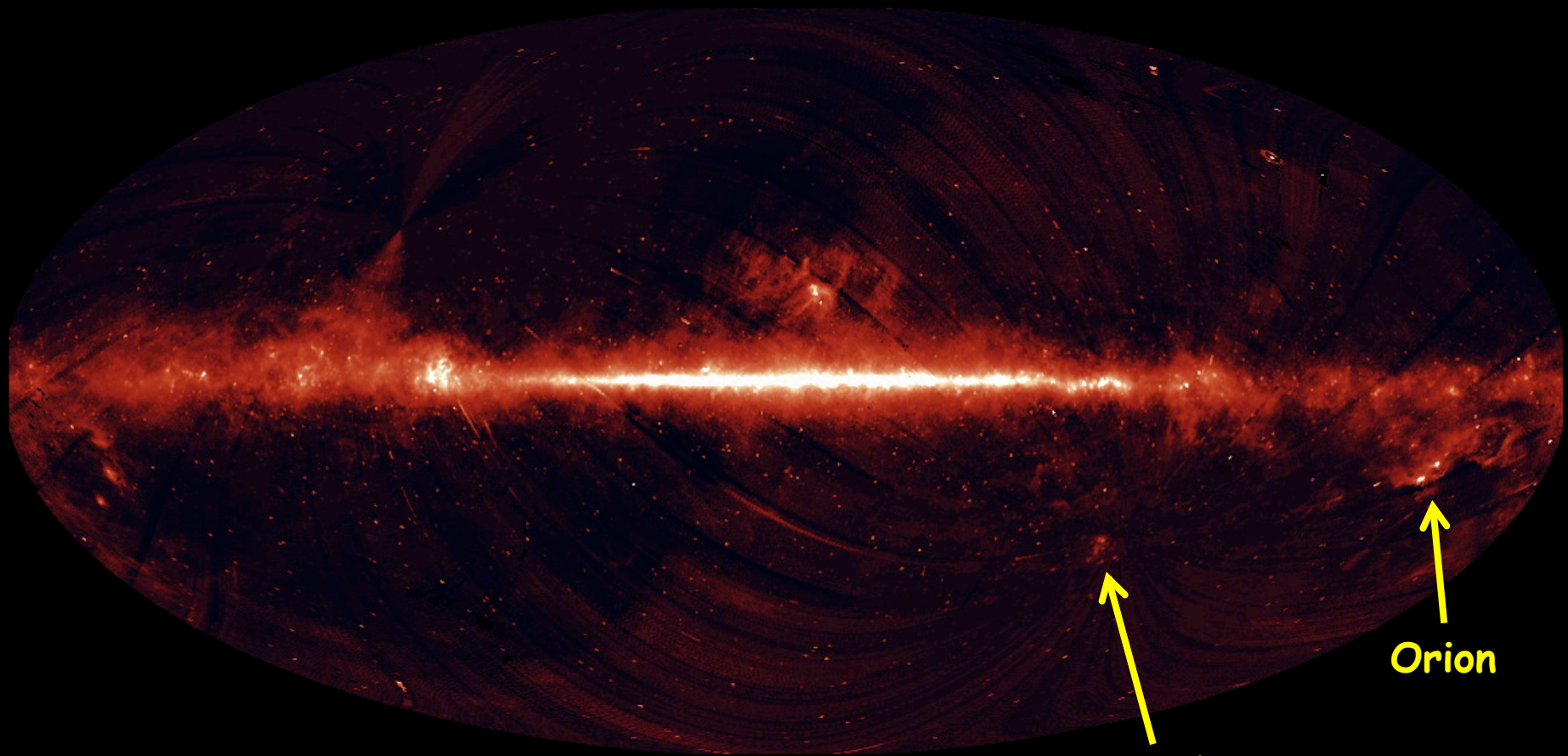


# Voie Lactée en IR proche





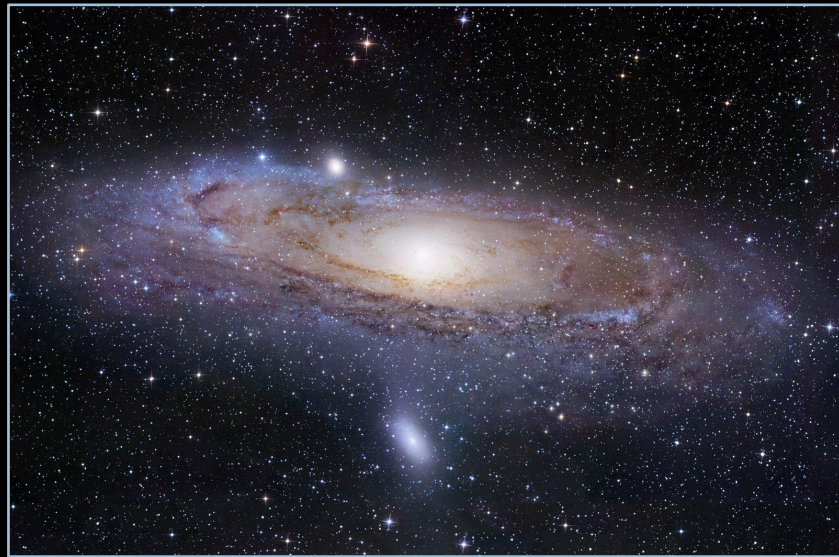
# Voie Lactée en IR lointain



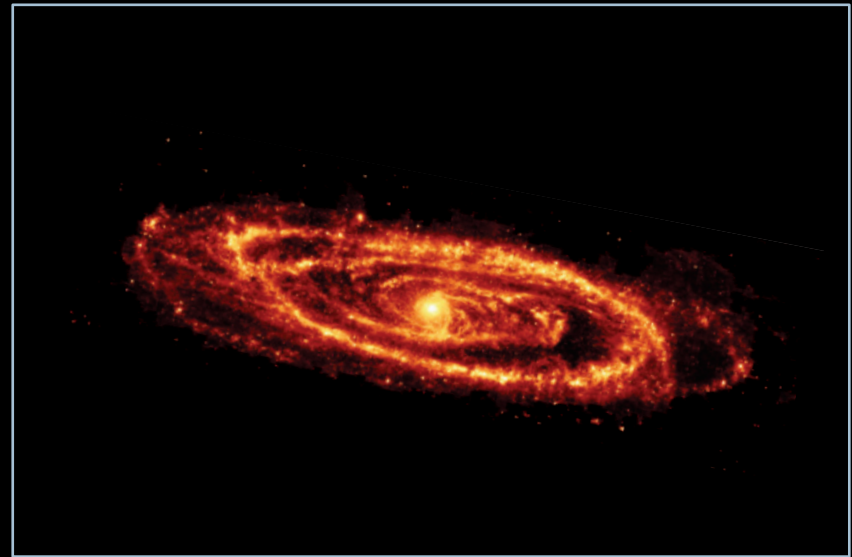
grand nuage  
de Magellan

Orion

# Andromède



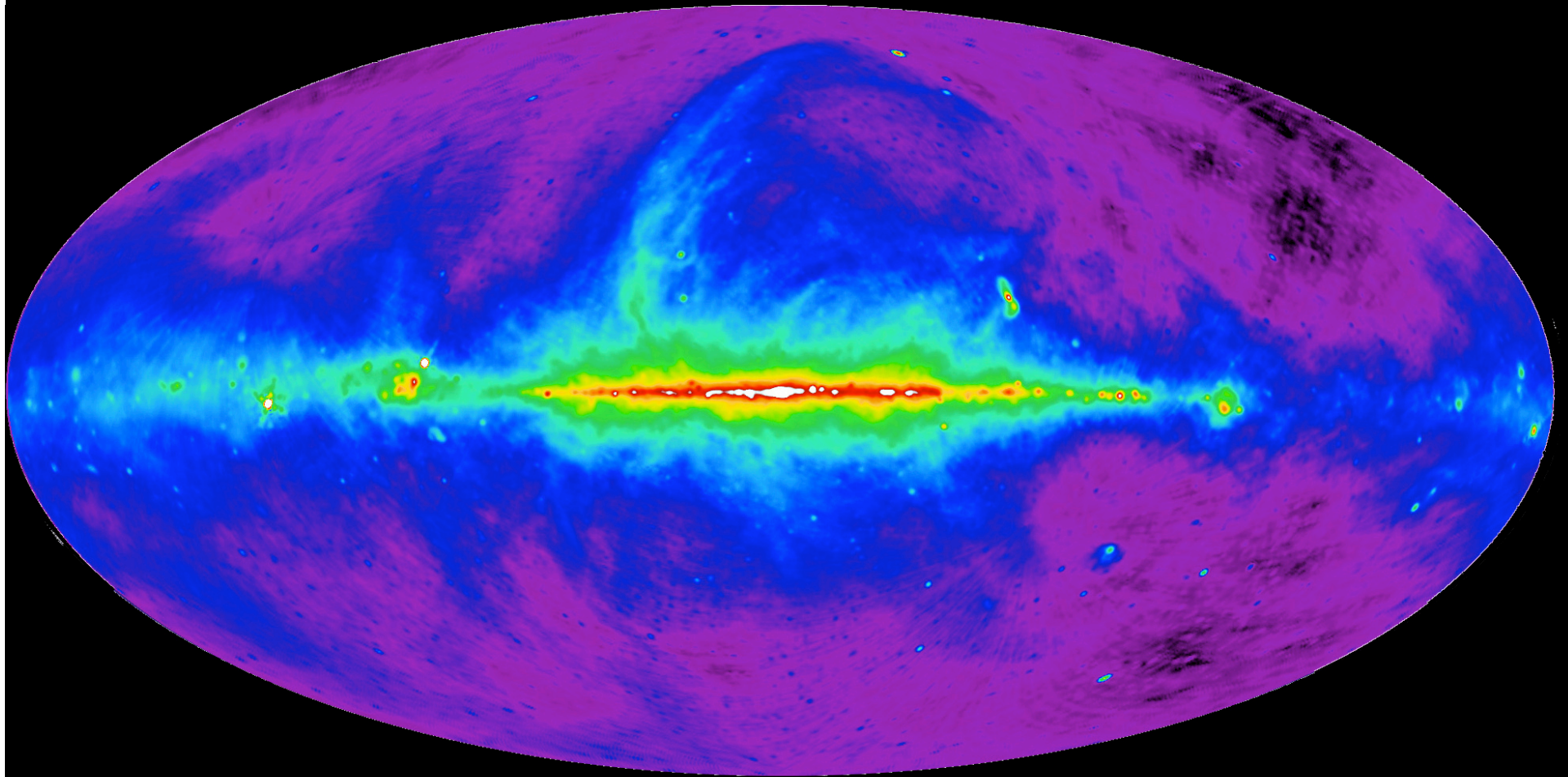
visible



infrarouge

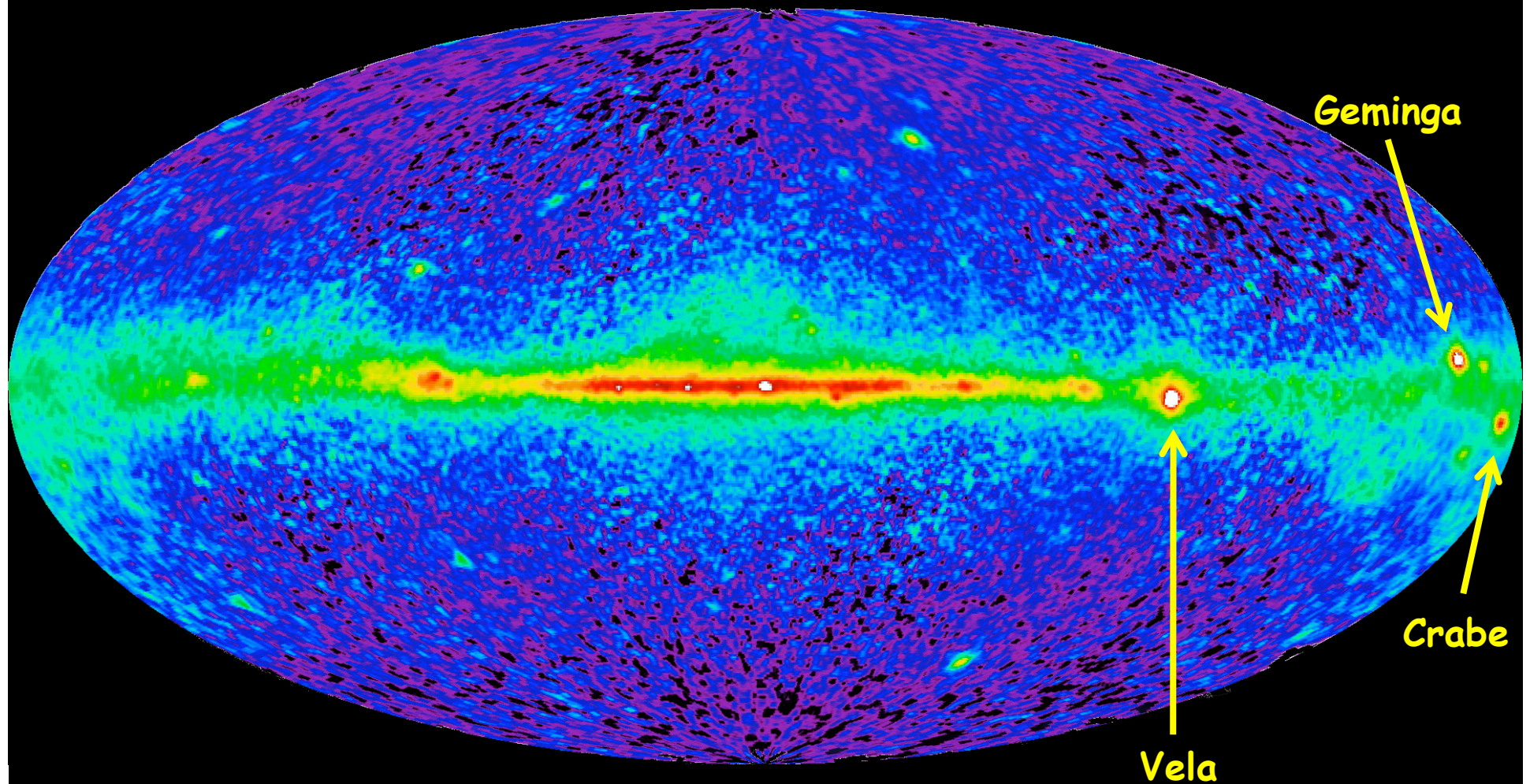


# Voie Lactée en radio



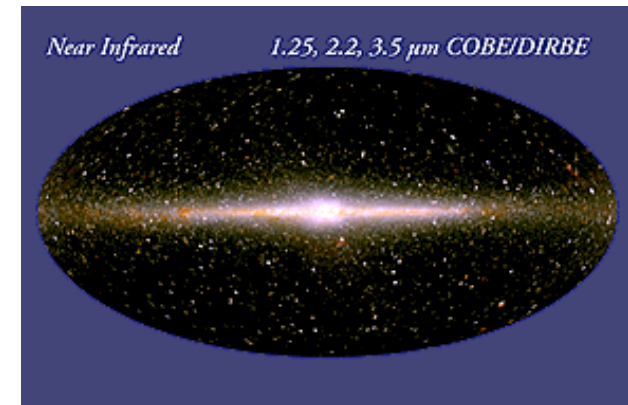
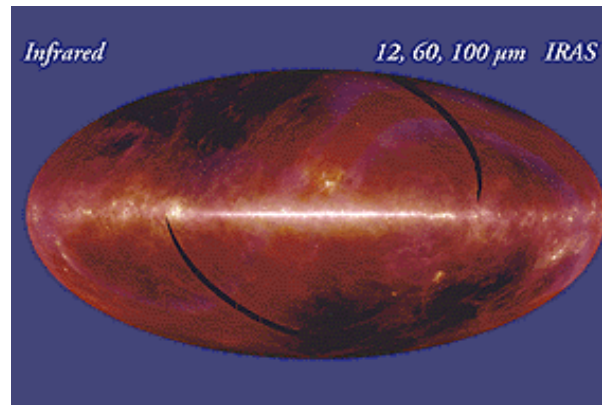
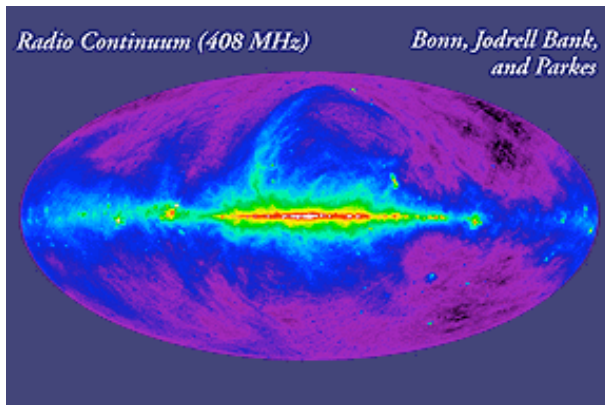


# Voie Lactée en gammas

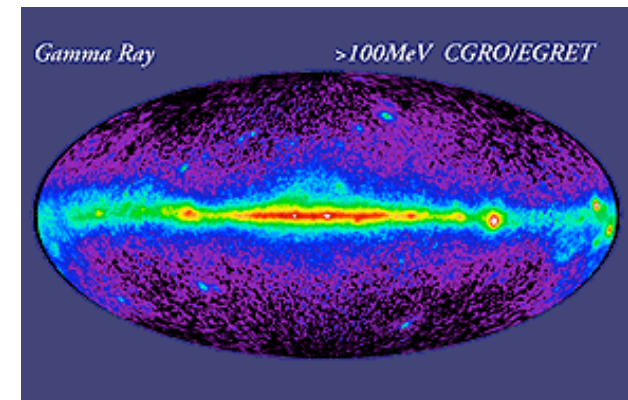
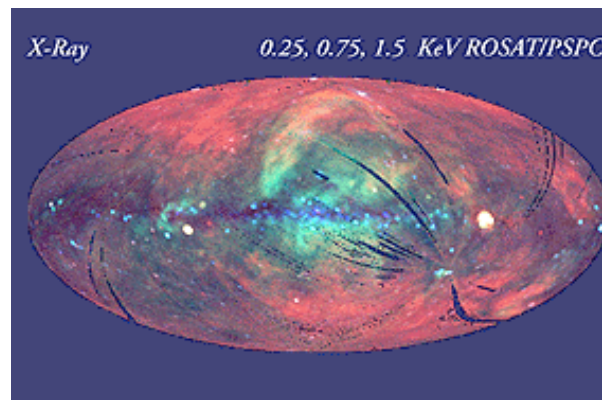
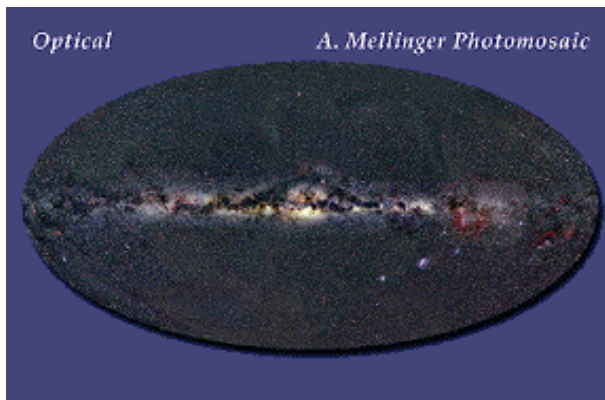




# Univers en multi-longueurs d'onde



## Les différentes facettes de la Voie lactée



# Astroparticule



## 1) Approche **multi-messager**

### **Rayons cosmiques**

- Découverte (1912 - 1938)
- Expériences actuelles

## 2) **Neutrinos cosmiques**

- Saga des neutrinos du Soleil
- Neutrinos « haute énergie »

## 3) **Astronomie gamma**

**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*

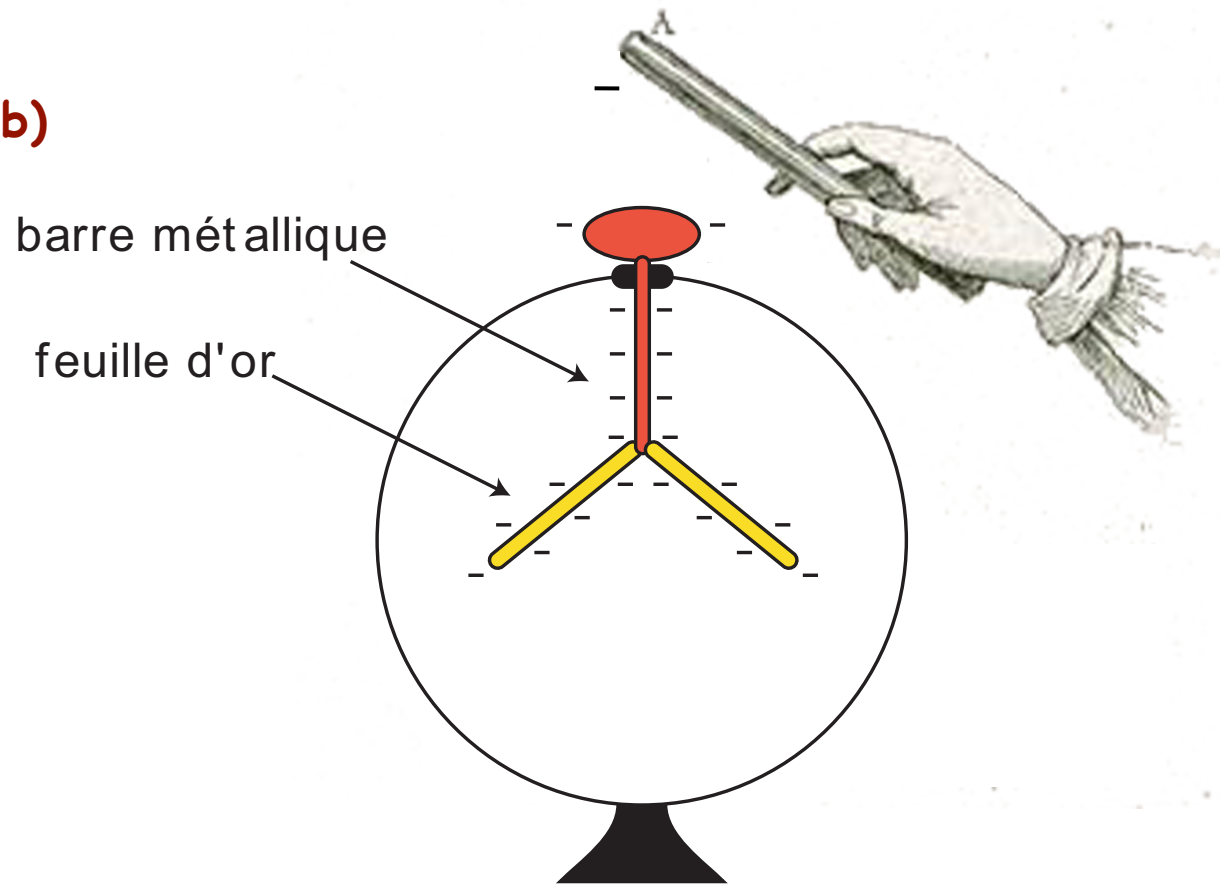
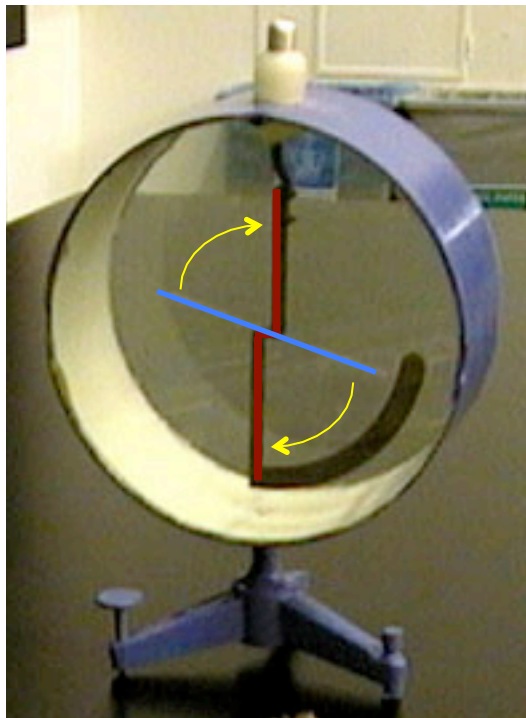




Découverte des  
rayons cosmiques

# Découverte des rayons cosmiques

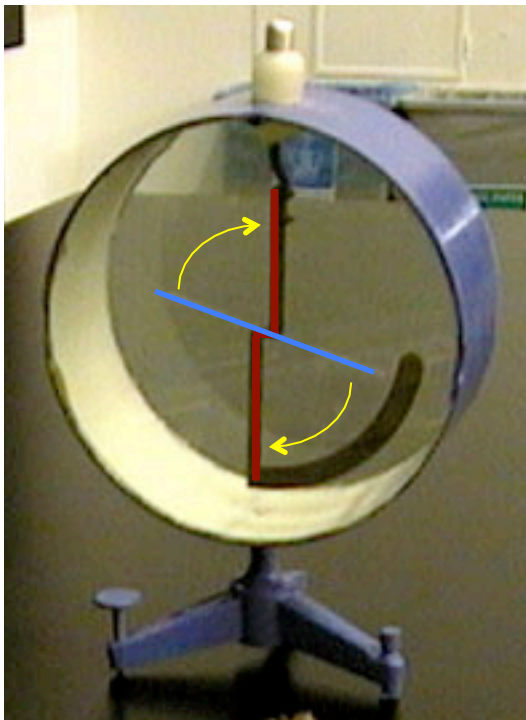
1901  
(voire 1785, Coulomb)



électroscope chargé

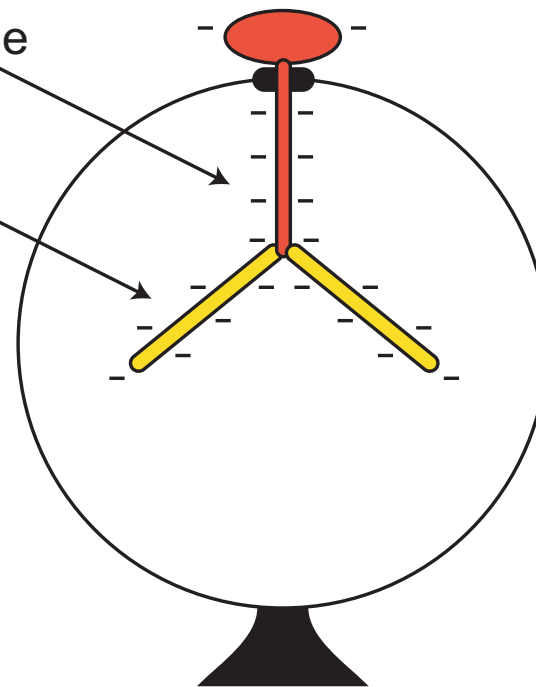
# Découverte des rayons cosmiques

1901  
(voire 1785, Coulomb)



barre métallique

feuille d'or

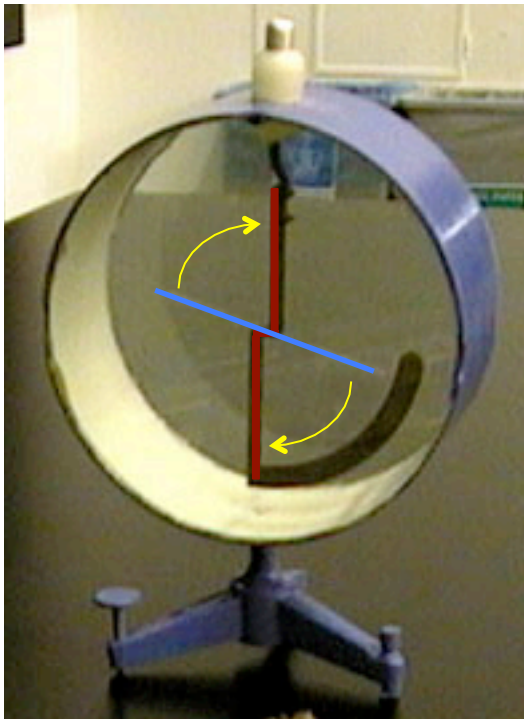


électroscope chargé



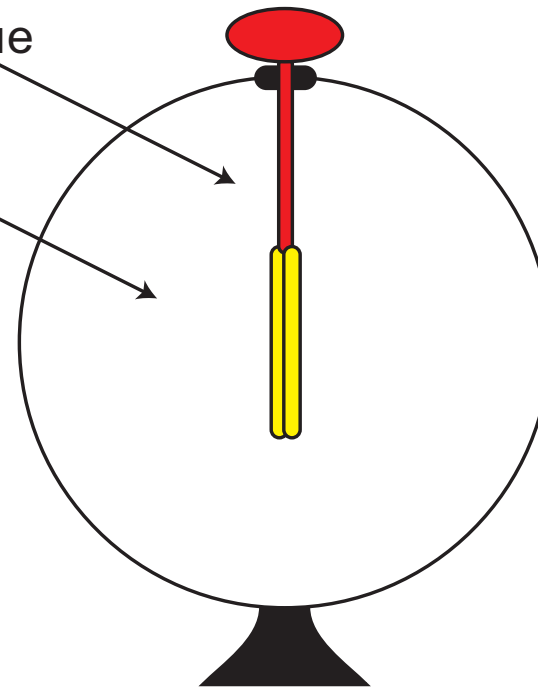
# Découverte des rayons cosmiques

1901



barre métallique

feuille d'or



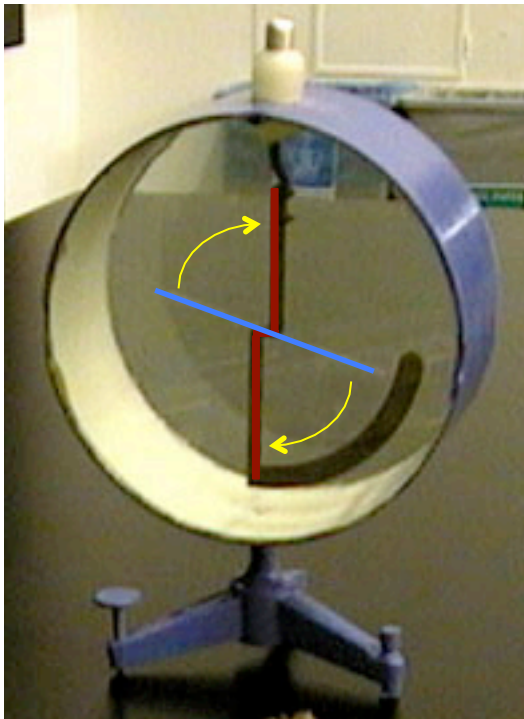
décharge spontanée !



# Découverte des rayons cosmiques

1901

Découverte d'un **rayonnement ionisant** à la surface de la terre  
(décharge spontanée des électroscopes)



Air conducteur car ionisé (Faraday)  
par un rayonnement intense?  
particules chargées « naturelles » ?

→ **radioactivité naturelle** des roches (Rutherford)

# Découverte des rayons cosmiques

1909

Mesure en haut de la tour Eiffel  
(père Théodor Wulf)

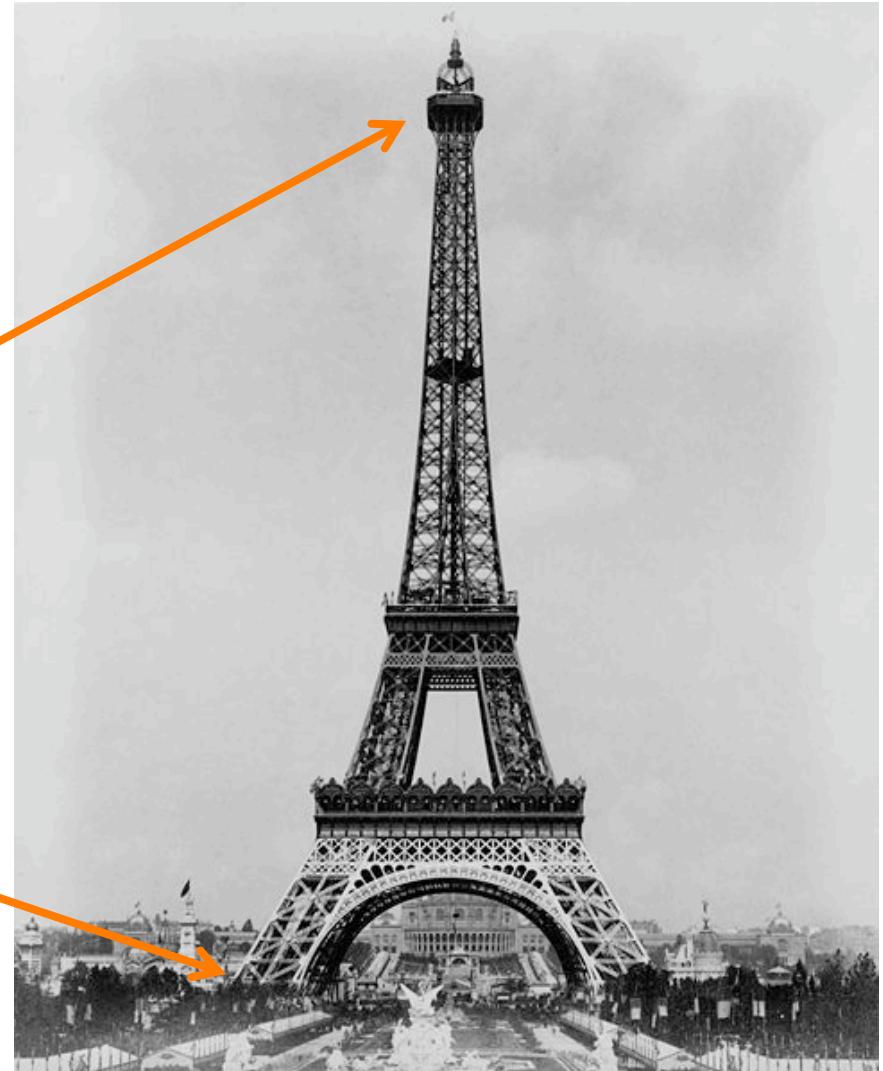
en haut

prédiction 0,4 ions / cm<sup>3</sup>/s

mesure 3,5 ions / cm<sup>3</sup>/s

au sol

mesure 6 ions / cm<sup>3</sup>/s



# Découverte des rayons cosmiques

1911-1913

Victor Hess  
à l'assaut du ciel

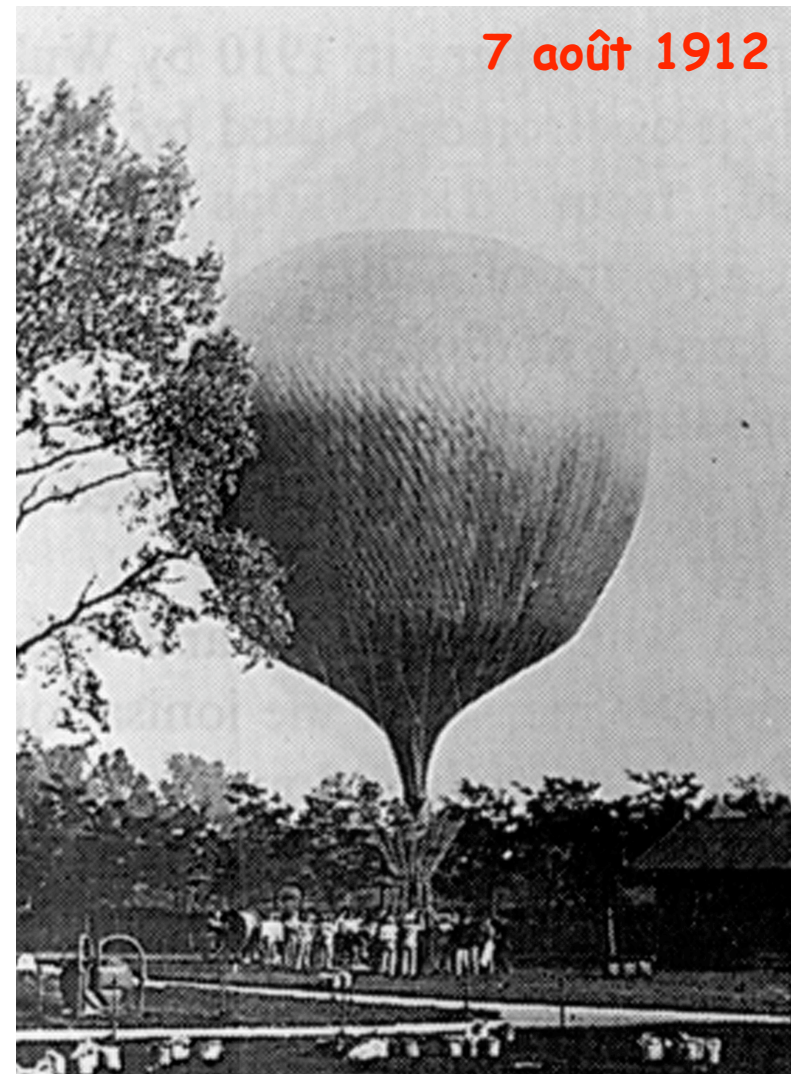
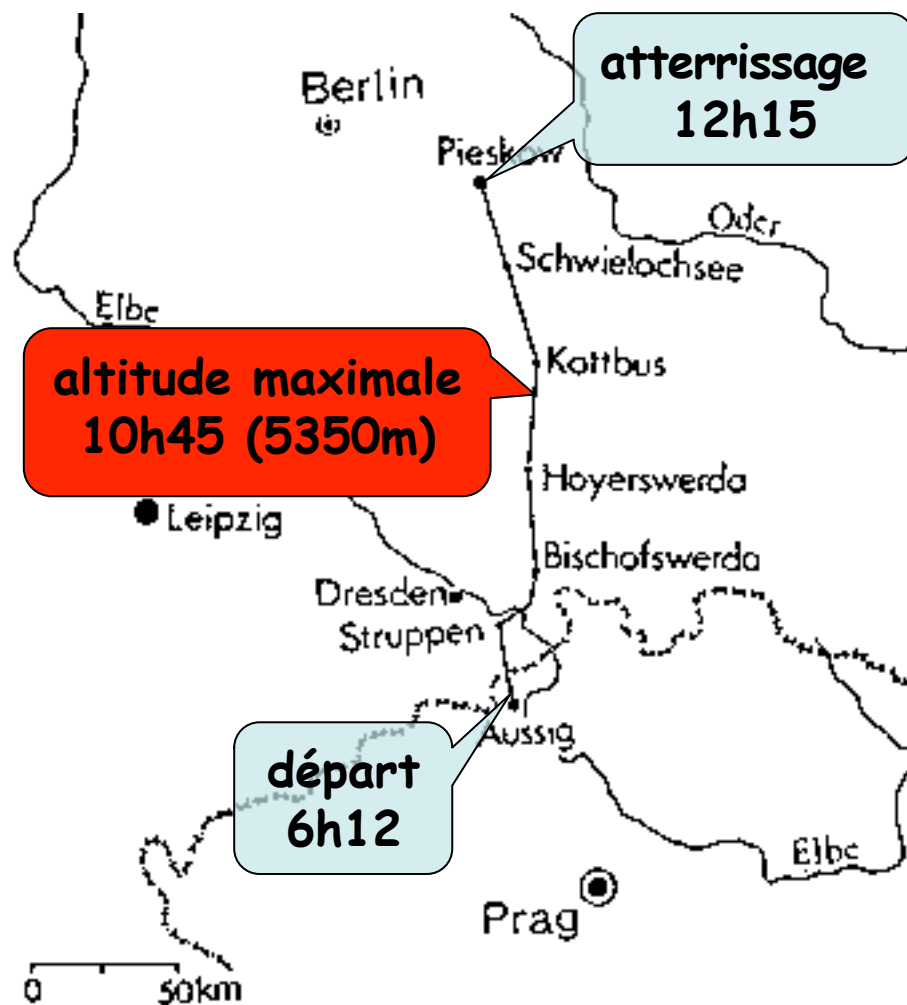
10 vols en ballon

17 avril 1912

éclipse de soleil  
→ ne vient pas du soleil



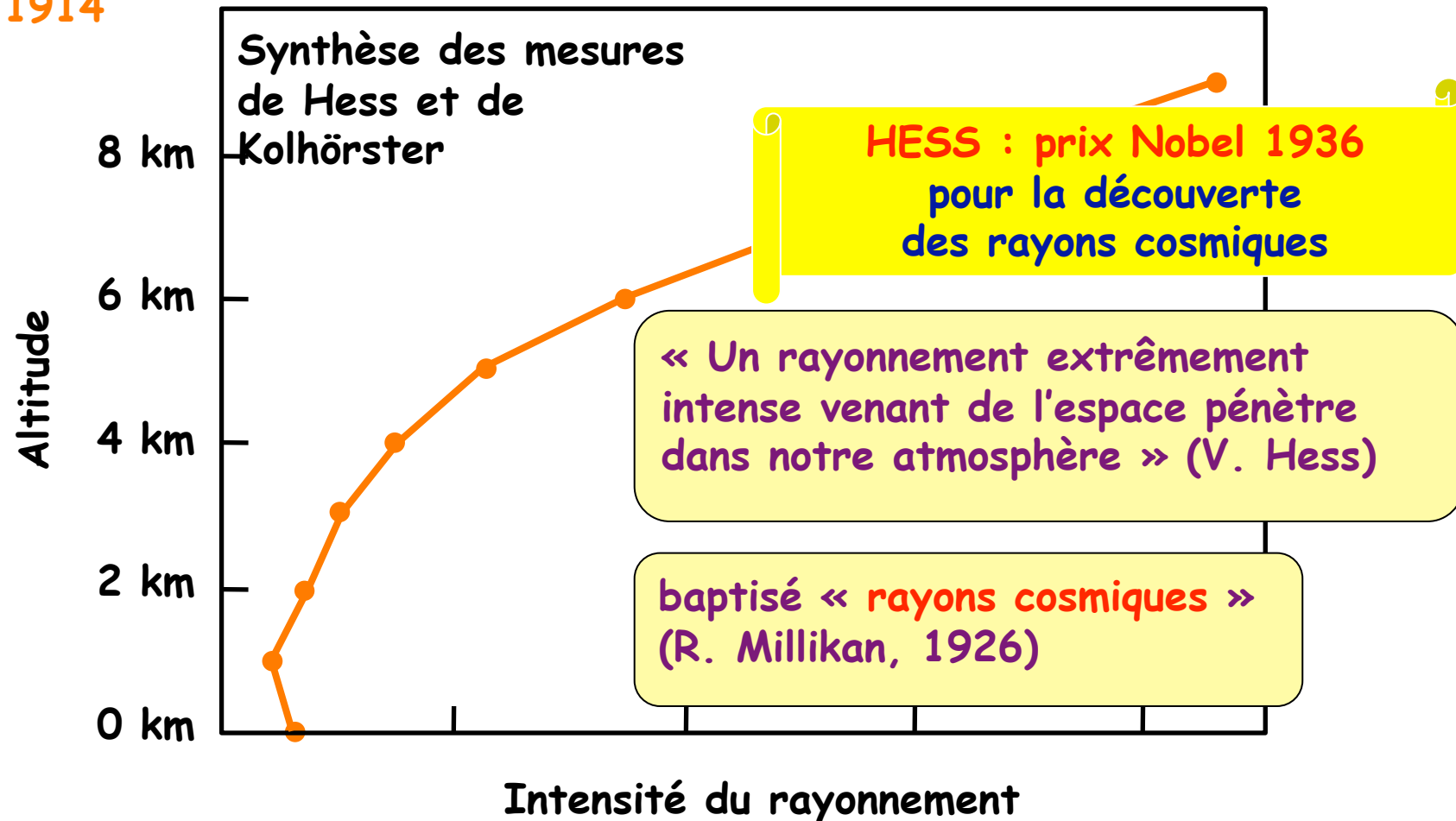
# Découverte des rayons cosmiques





# Découverte des rayons cosmiques

1914



# Chargés ou neutres?

Millikan



Les rayons cosmiques sont neutre (rayons gammas). C'est pour cela qu'ils sont si « pénétrants ».

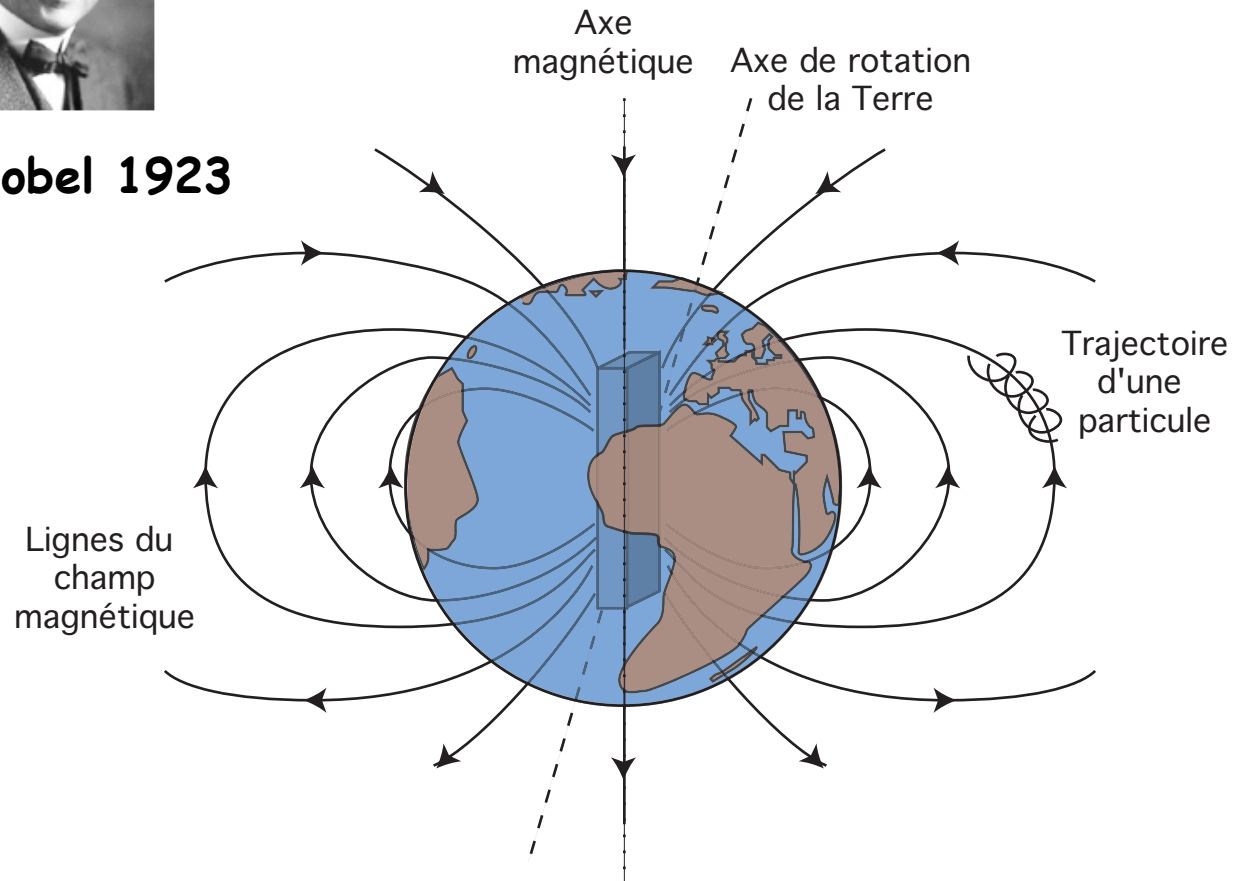
Les rayons cosmiques sont chargés. C'est pourquoi ils sont si énergétiques (accélération par champs électro-magnétiques)

Compton



Nobel 1923

Nobel 1927

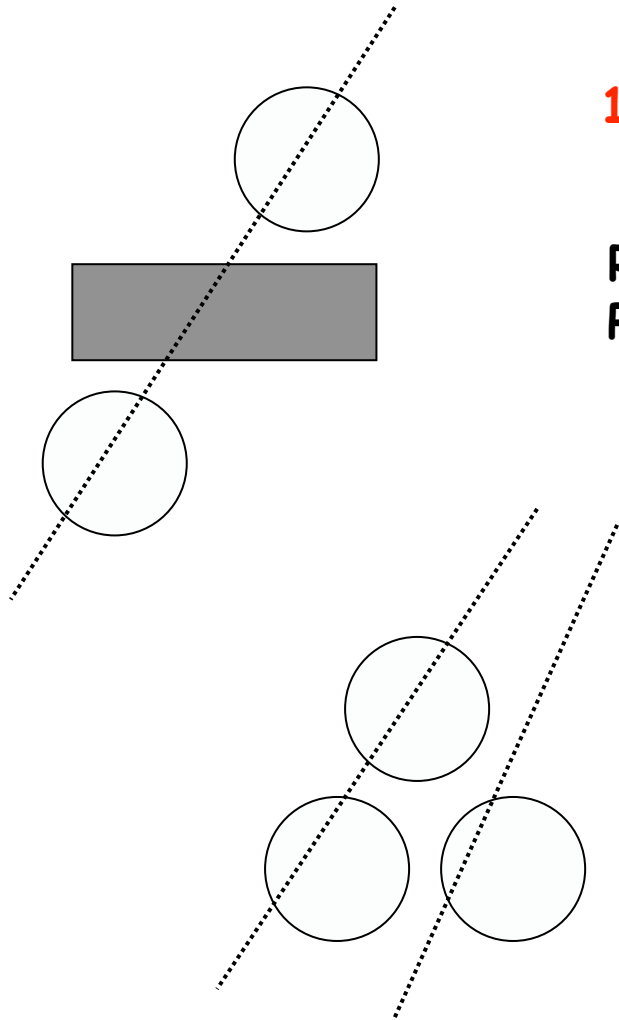


**1932:**  
expédition Compton  
autour du globe  
(Nouvelle-Zélande  
→ Antarctique)

# Détecteurs de coïncidences

1933 (Rossi)

Réduction des déclenchements fortuits  
Particules traversent 1m de Pb  $\rightarrow \mu$



Plusieurs particules simultanées !  
(au delà de proba d'après taux de fortuits)

# Gerbes atmosphériques

1938

Pierre AUGER

Etude des rayons cosmiques les plus énergétiques (plaques de plomb)  
Simultanéité sur grandes distances (40 cm ... 1 m ... 300 m)

« averses de rayons cosmiques »  
« grandes gerbes atmosphériques »

énergie maximale :  $10^{15}$  eV

2000

énergie maximale :  $3 \times 10^{20}$  eV = 50 J



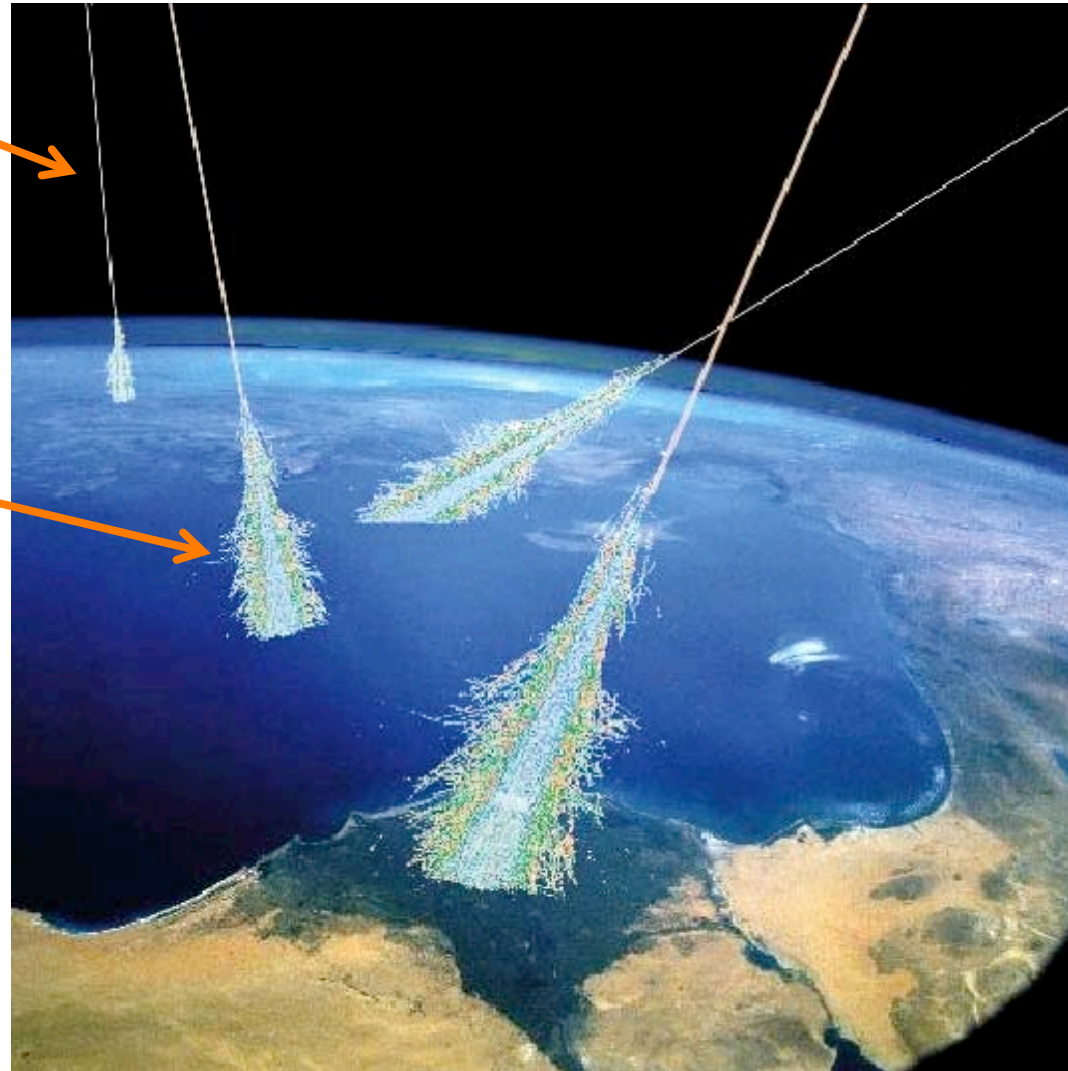


# Gerbes atmosphériques

particule cosmique  
(proton)



gerbe  
atmosphérique



# En résumé

1912

Découverte des rayons « cosmiques »



1932

Particules chargées

1938

Découverte des gerbes atmosphériques  
( $E = 10^{15}$  eV!)

1946

Première exp.



# « Rayons » cosmiques ?

NON



Photons (lumière) = rayons

Rayons cosmiques  $\neq$  rayons

(appellation due  
à Millikan)

OUI  
(hors système  
solaire)



# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

⇒ **déflexion** par les champs magnétiques  
(galactiques et intergalactiques)

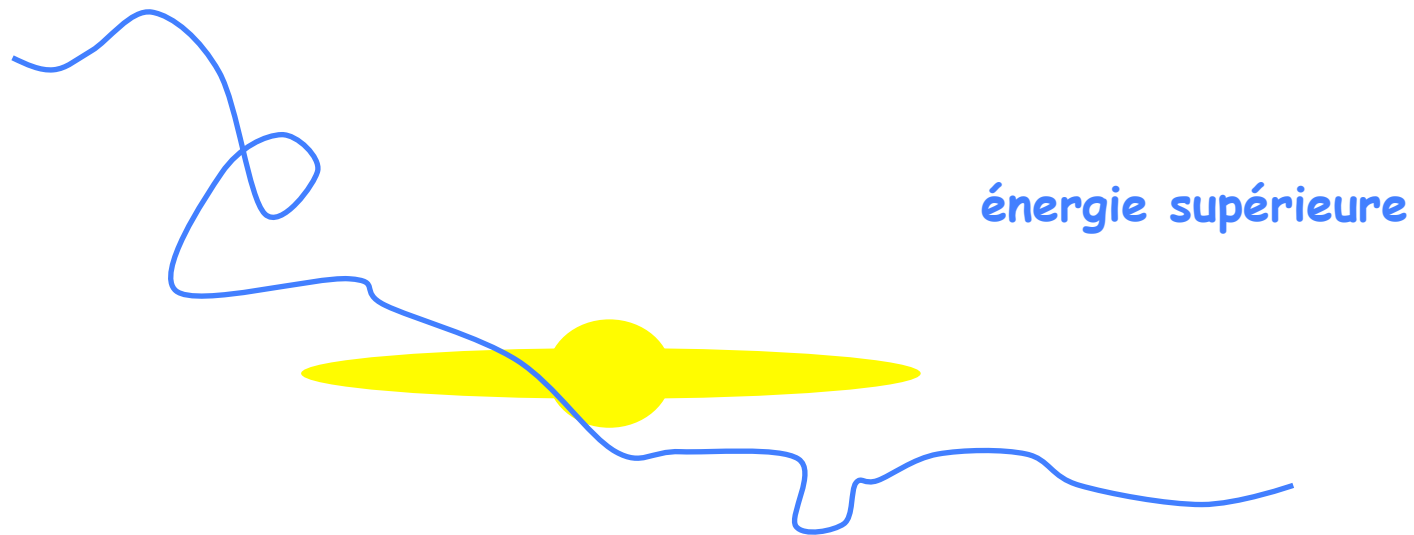


basse énergie

# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

⇒ **déflexion** par les champs magnétiques  
(galactiques et intergalactiques)



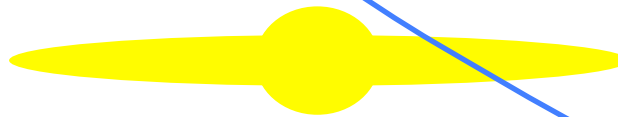
# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

⇒ **déflexion** par les champs magnétiques  
(galactiques et intergalactiques)

« Astronomie » des  
rayons cosmiques  
**uniquement**  
à haute énergie !

très grande énergie !

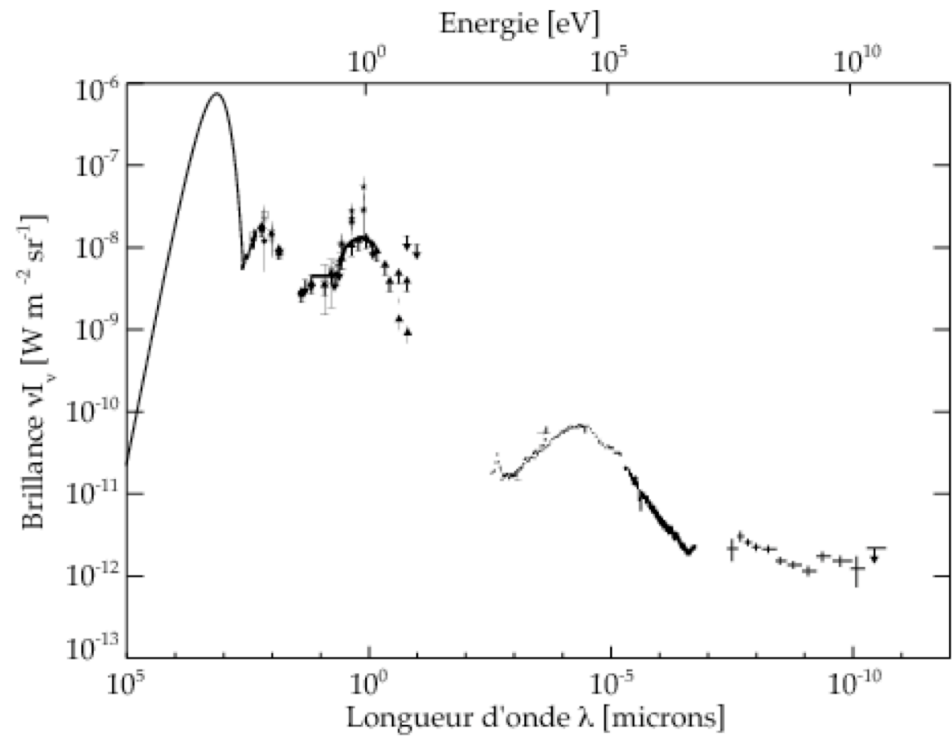
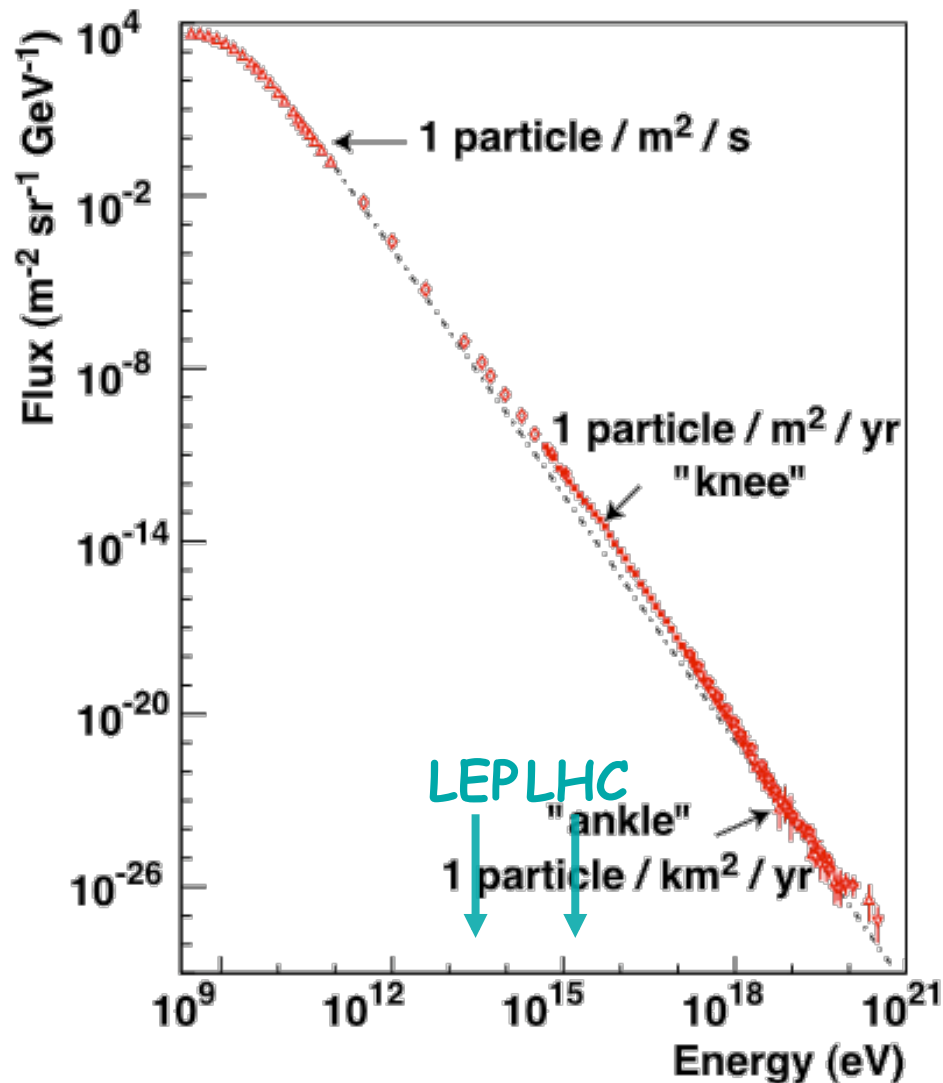






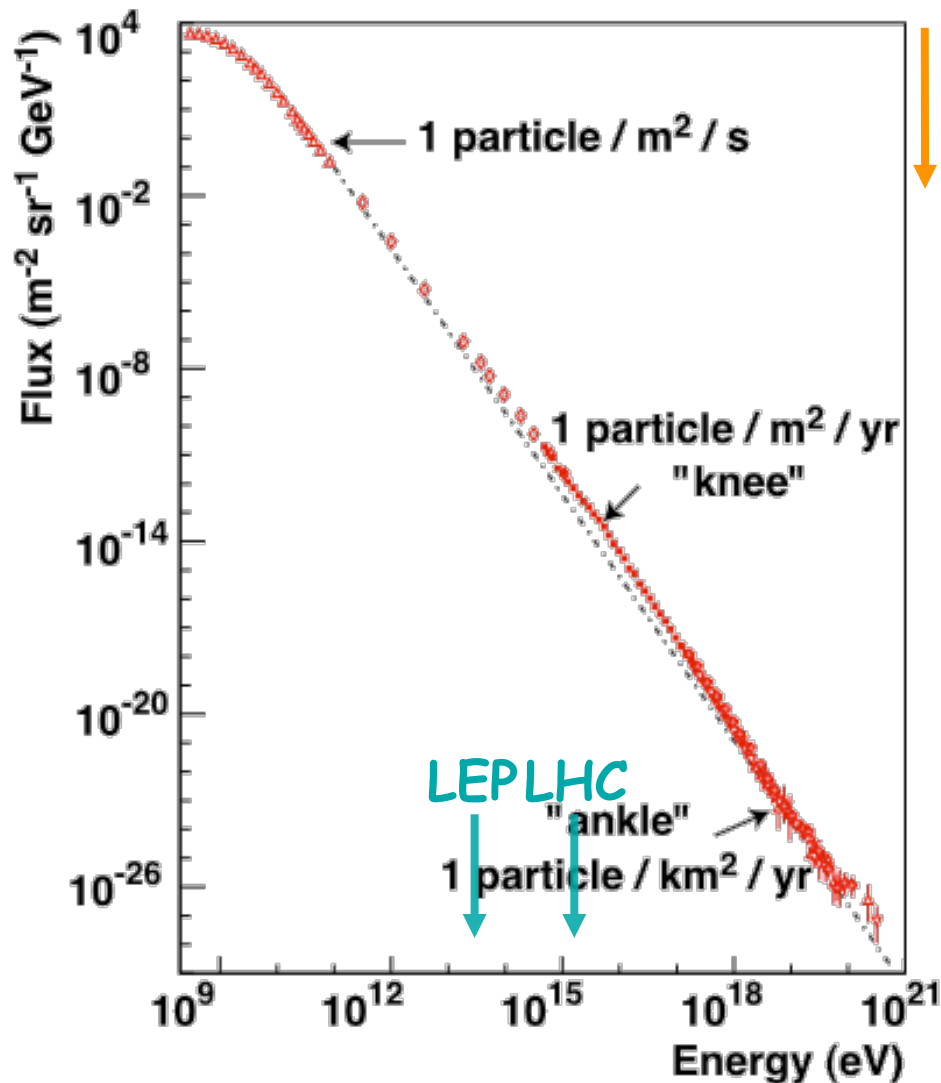
Rayons cosmiques:  
énergie et accélération

# Spectre des rayons cosmiques





# Spectre des rayons cosmiques



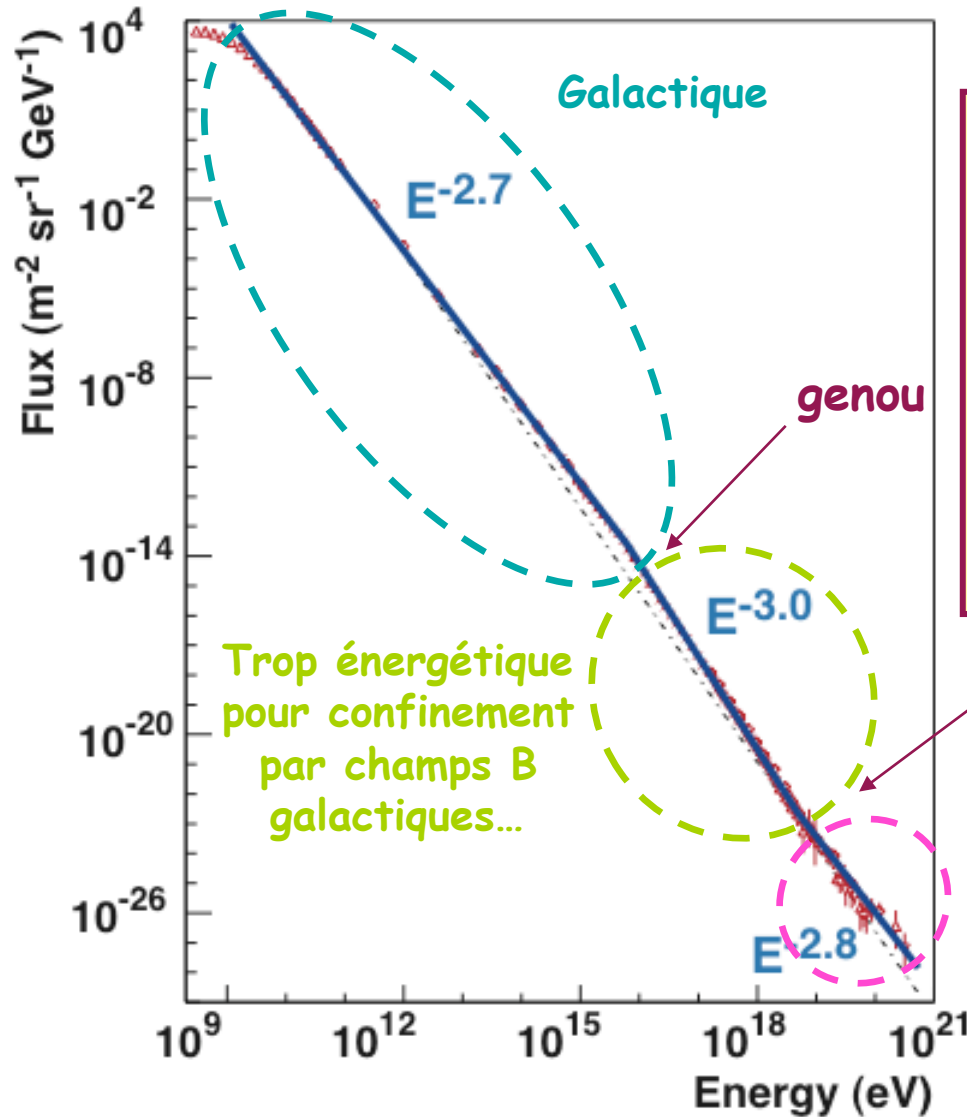
$E < 10^{14}$  eV

Flux élevé: détection de particule primaire (AMS sur l'ISS)

$E > 10^{14}$  eV

Atmosphère → cascades atm. (AGASA, Fly's eye Auger)

# Spectre des rayons cosmiques



$$\frac{dN}{dE} = E^{-\alpha} \quad \text{pour } E > 10 \text{ GeV}$$

Accélération  
à la source  
2.0 – 2.2

Propagation  
(confinement)  
 $\sim 0.6$

# Mécanisme d'accélération

Spectre en  $E^{-\gamma}$  produit par chocs successifs avec petit gain en énergie:

- gain  $\Delta E/E = \xi$  à chaque collision  
n collisions }  $E_n = E_0(1+\xi)^n$

- nb de collisions pour atteindre énergie E :  $n = \frac{\ln(E/E_0)}{\ln(1+\xi)}$

- probabilité de sortir de région accélératrice à chaque collision :  $\mathcal{P}_{esc}$   
probabilité de survie après k collisions :  $(1 - \mathcal{P}_{esc})^k$

- nb de particules accélérée au delà de énergie E :

$$N(>E) \propto \sum_{k=n}^{\infty} (1 - \mathcal{P}_{esc})^k = (1 - \mathcal{P}_{esc})^n / \mathcal{P}_{esc} = \exp \left[ \frac{\ln(E/E_0)}{\ln(1+\xi)} \ln(1 - \mathcal{P}_{esc}) \right] / \mathcal{P}_{esc}$$

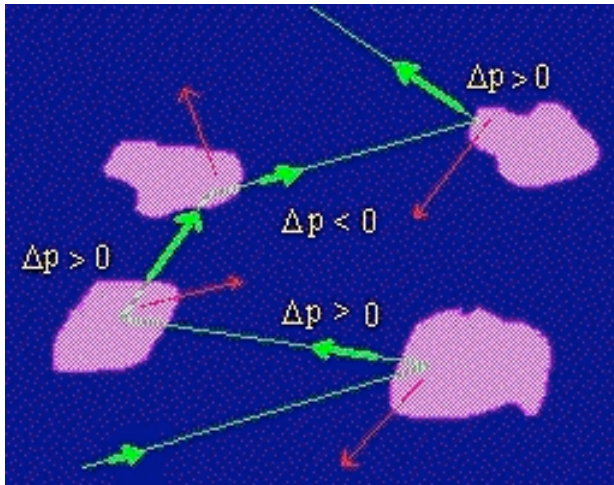
$$N(>E) \propto \frac{1}{\mathcal{P}_{esc}} \left[ \frac{E}{E_0} \right]^{-\alpha}$$

$$\text{où } \alpha \equiv - \frac{\ln(1 - \mathcal{P}_{esc})}{\ln(1 + \xi)} \sim \frac{\mathcal{P}_{esc}}{\xi}$$

# Mécanisme d'accélération

1949 : accélération de Fermi

Accélération stochastique de particules  
sur inhomogénéités magnétiques



Collisions frontales  $\Rightarrow$  Gain d'énergie  
Collisions arrières  $\Rightarrow$  Perte d'énergie

Collisions frontales + probables  
 $\Rightarrow$  Gain d'énergie en moy.



# Mécanisme d'accélération

- Dans ref du nuage :

$$E'_1 = \gamma (E_1 - \beta p_{1x})$$

$$E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos\theta_1)$$

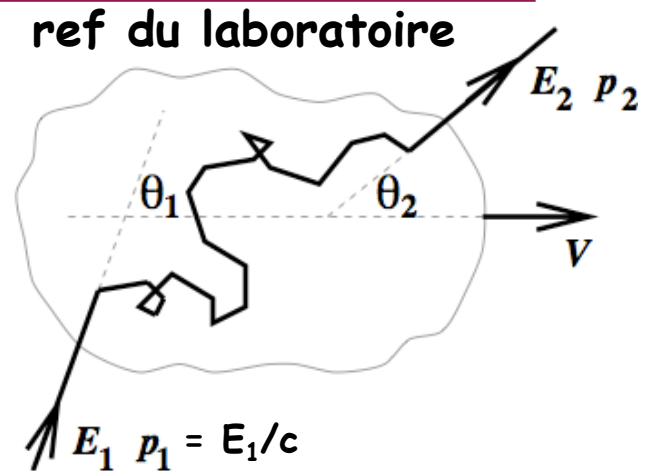
$$\beta = V/c$$

$$\gamma^2 = 1/(1-\beta^2)$$

- Collision élastique dans nuage :  $E'_2 = E'_1$

- Dans ref. du laboratoire :

$$E_2 = \gamma E'_2 (1 + \beta \cos\theta'_2)$$



$$\text{gain } \xi = \frac{\Delta E}{E} \equiv \frac{E_2 - E_1}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos\theta_1 + \beta \cos\theta'_2 - \beta^2 \cos\theta_1 \beta \cos\theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$

- Or  $\frac{dP}{d\cos\theta_1} = \frac{c - V\cos\theta_1}{2c}$   $\frac{dP}{d\cos\theta'_2} = \text{cst}$

$$= \int_0^\pi \cos\theta_1 \frac{dP}{d\cos\theta_1} d\cos\theta_1 = -\beta/3$$

$$\langle \cos\theta'_2 \rangle = 0$$

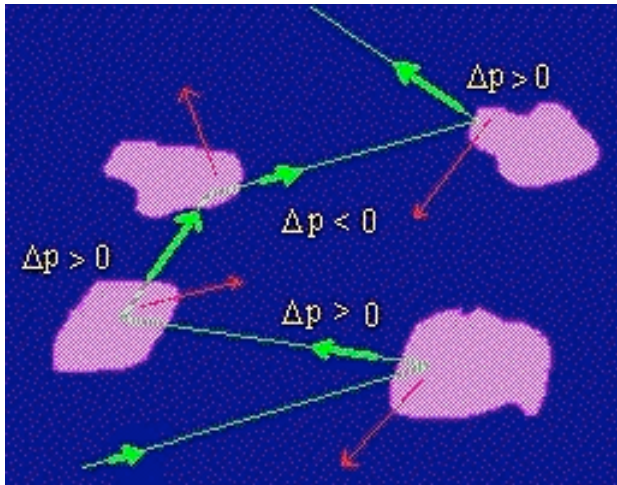


$$\langle \xi \rangle \sim \beta^2/3$$

# Mécanisme d'accélération

1949 : accélération de Fermi

Accélération stochastique de particules  
sur inhomogénéités magnétiques



Collisions frontales  $\Rightarrow$  Gain d'énergie  
Collisions arrières  $\Rightarrow$  Perte d'énergie

Collisions frontales + probables  
 $\Rightarrow$  Gain d'énergie en moy.

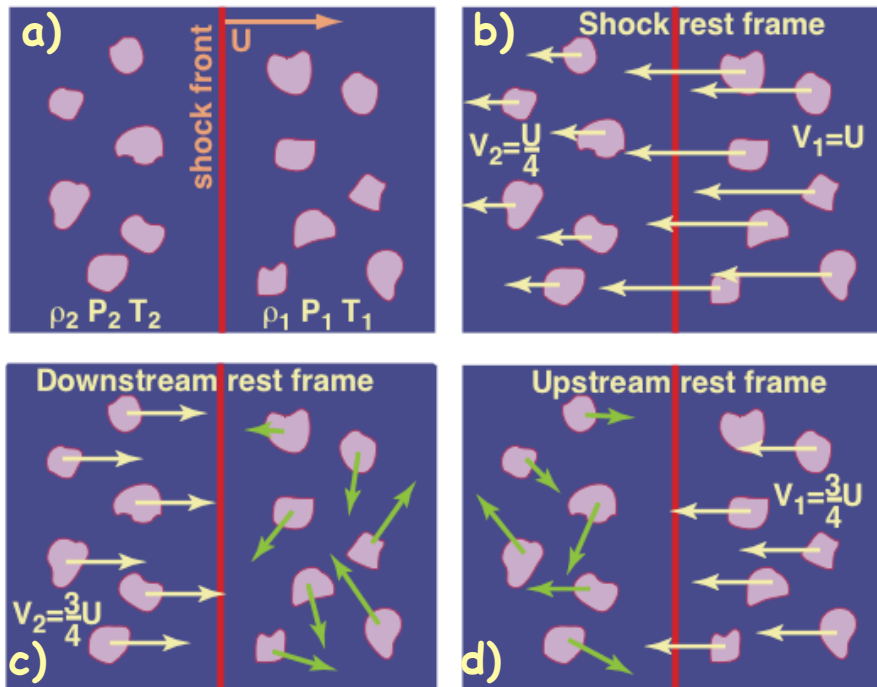
$$\Delta E/E \propto \beta^2 \quad \beta = v/c \sim 10^{-4}$$

« Second ordre »

Lent et peu efficace

# Mécanisme d'accélération

1970's : accélération de Fermi du premier ordre  
 Accélération par onde de choc



Conservation du nb de particules :

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$$

onde de choc :  $\rho_2/\rho_1 = (\gamma+1)/(\gamma-1)$   
 Fully ionized plasma ( $\Leftrightarrow$  gaz idéal)  
 $\gamma = 5/3$  and  $v_1/v_2 = 4$

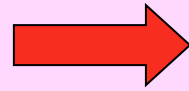
$\Rightarrow$  Passage répété de part et d'autre de l'onde de choc

$\Rightarrow$  Gain en énergie rapide

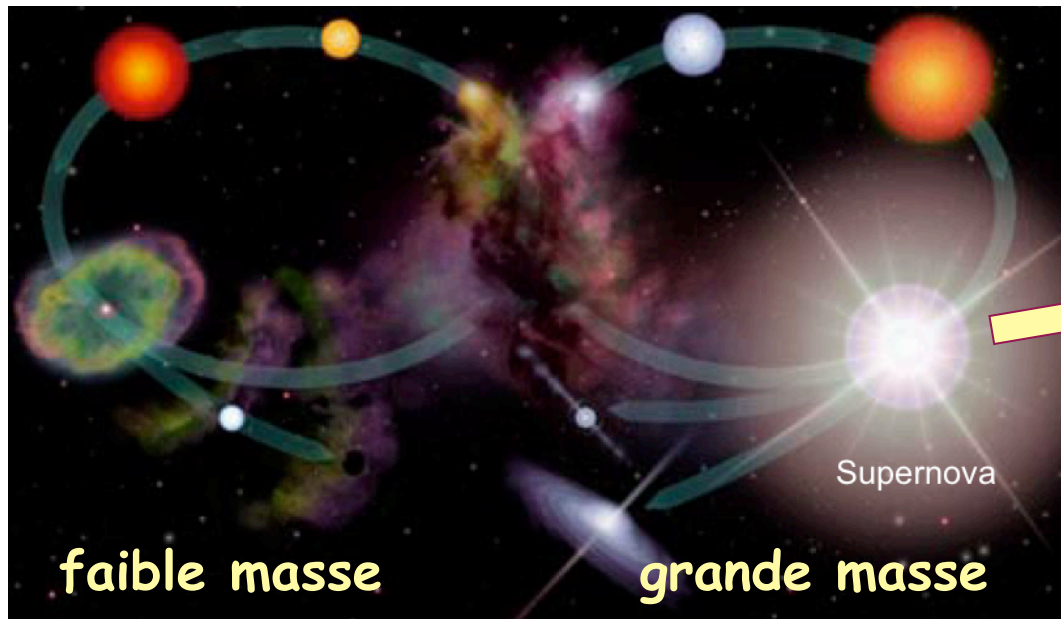
$$\Delta E/E \sim 4\beta/3 (\sim 10^{-1})$$

« Premier ordre »

# Ondes de choc ?



# Supernovae !



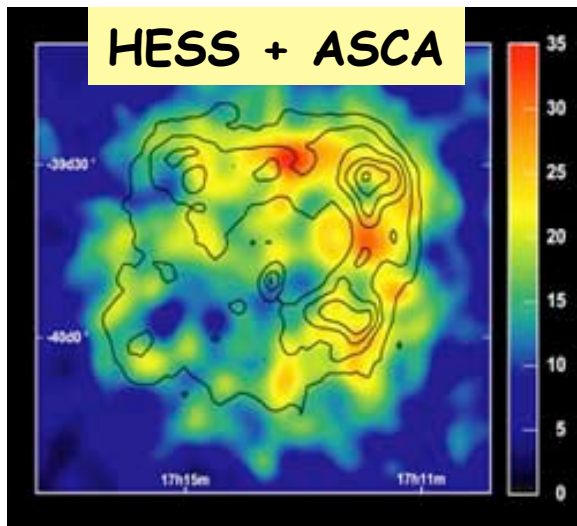
vie brève  
mort extrêmement violente  
des étoiles massives



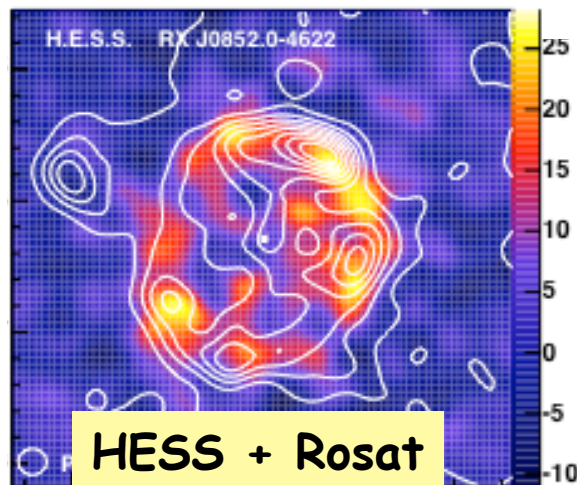
1 SN II / 50 ans dans notre galaxie



# HESS : première confirmation



F. Aharonian et al., 2004 Nature 432, 75



F. Aharonian et al., 2005 A&A 437, L7



ASCA / ROSAT : contours en X  
( $E \sim 1 \text{ keV}$ )

HESS : couleurs en gamma  
( $E \sim 1 \text{ TeV}$ )

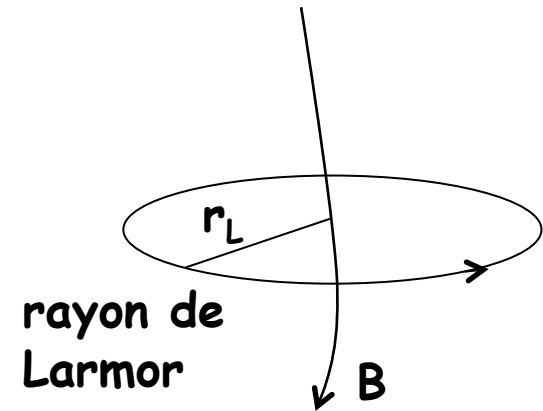
coïncidence spatiale →  
restes de SN = accélérateurs  
de particules multi TeV

# Limitation énergétique

Particule doit rester dans région accélératrice  
i.e. où champ magnétique B

$$q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = m \mathbf{v}^2 / r_L$$

$$q B = m v / r_L = p / r_L$$

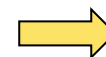


Particule ultra-relativiste :  $p \sim E/c$  donc  $r_L = E / (qBc)$

E augmente  $\rightarrow r_L$  devient  $>$  que taille R de région accélératrice

Région de taille R :

$$E < E_{\max} = ZeBcR$$



faut grand B et R

# Limitation énergétique

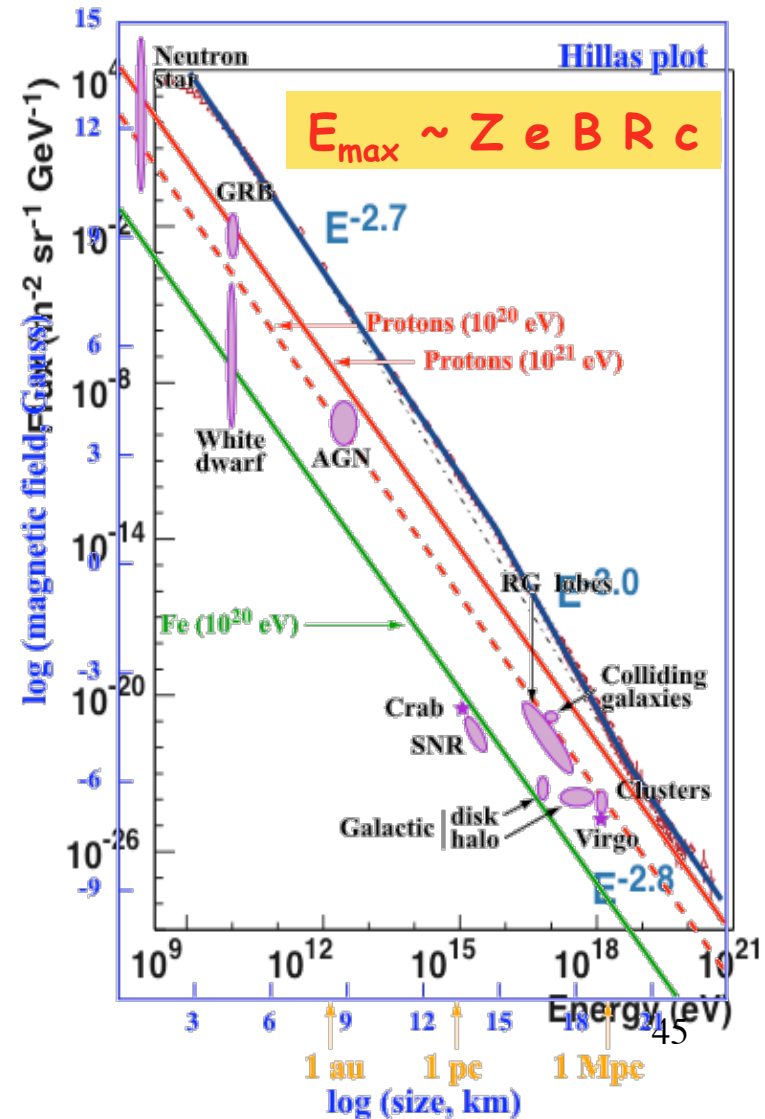
Restes de supernova :  
 →  $E_{\max} \sim 10^{15}$  eV (genou)

Rayons cosmiques  $10^{15} - 10^{20}$  eV !

$$E_{\max} = Z \frac{B}{1 \mu\text{G}} \frac{R}{1 \text{ Mpc}} 9.3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$$

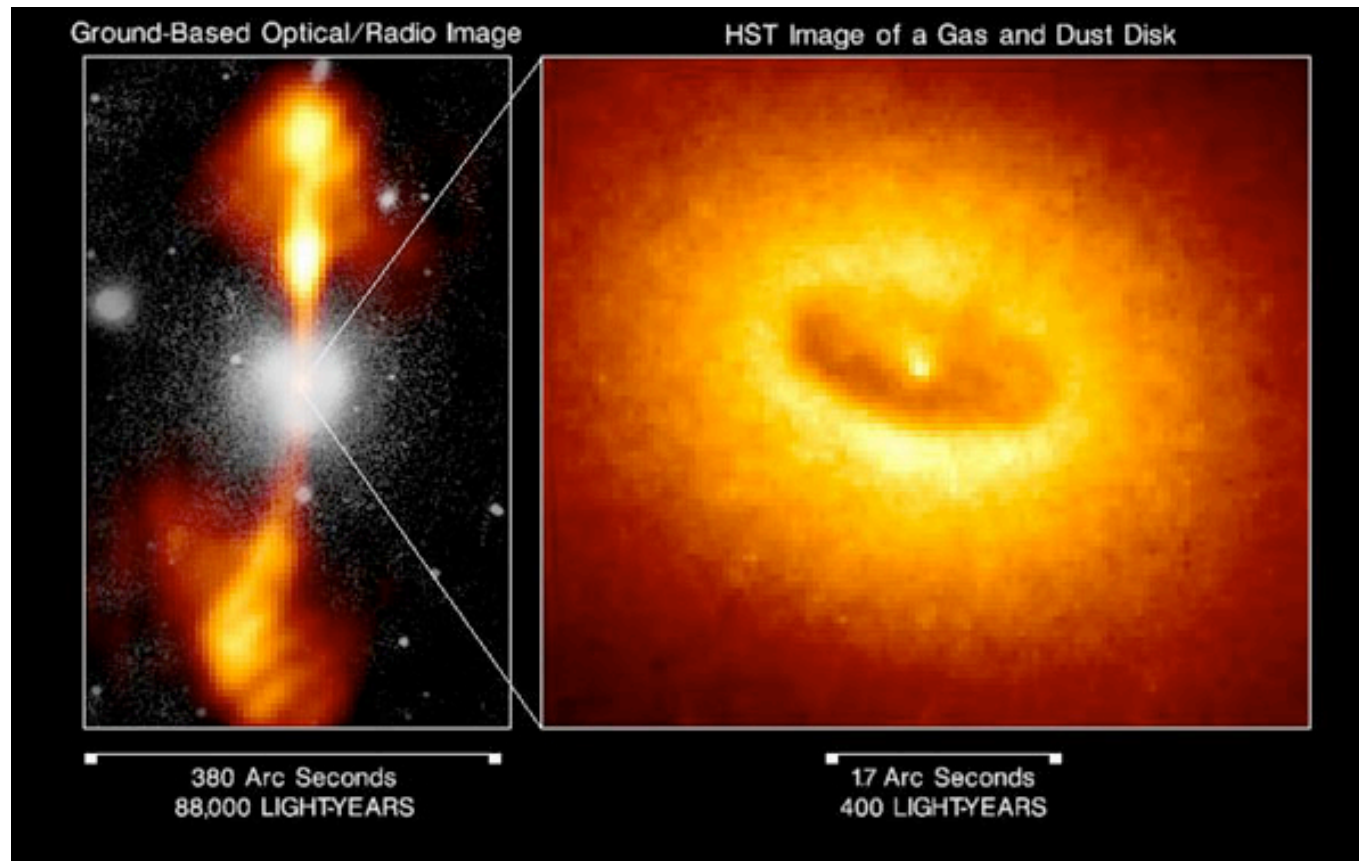
$B_{\text{gal}}$  typique

→ Voie lactée insuffisante pour rayons les plus énergétiques




# Sources au delà de $10^{15}$ eV

## Active Galactic Nuclei

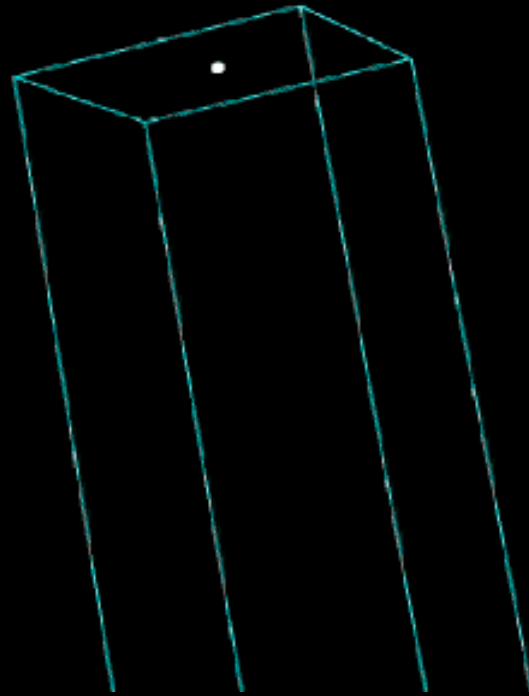






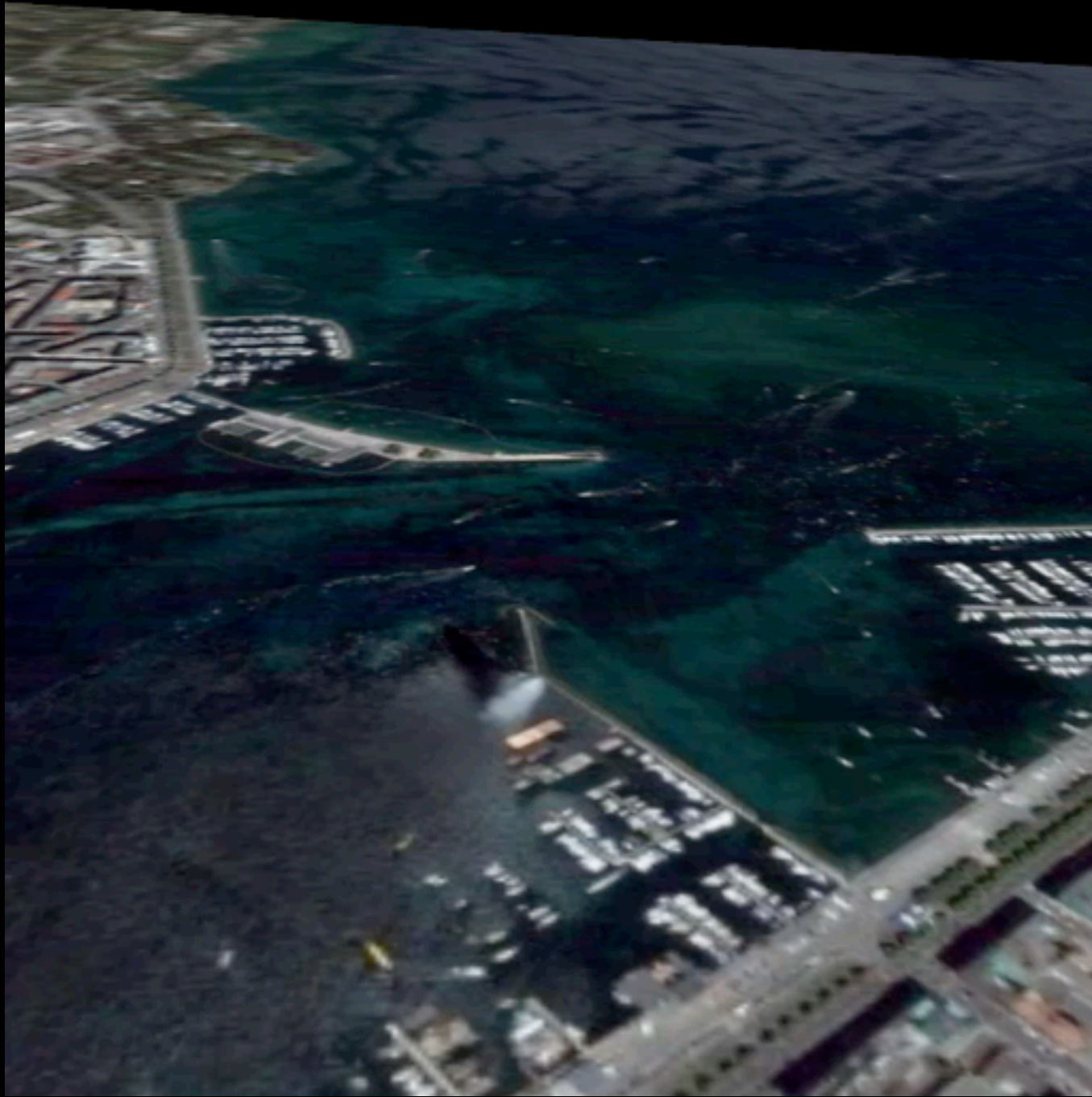
Rayons cosmiques:  
détection

# Gerbes atmosphériques



proton de  $10^{12}$  eV



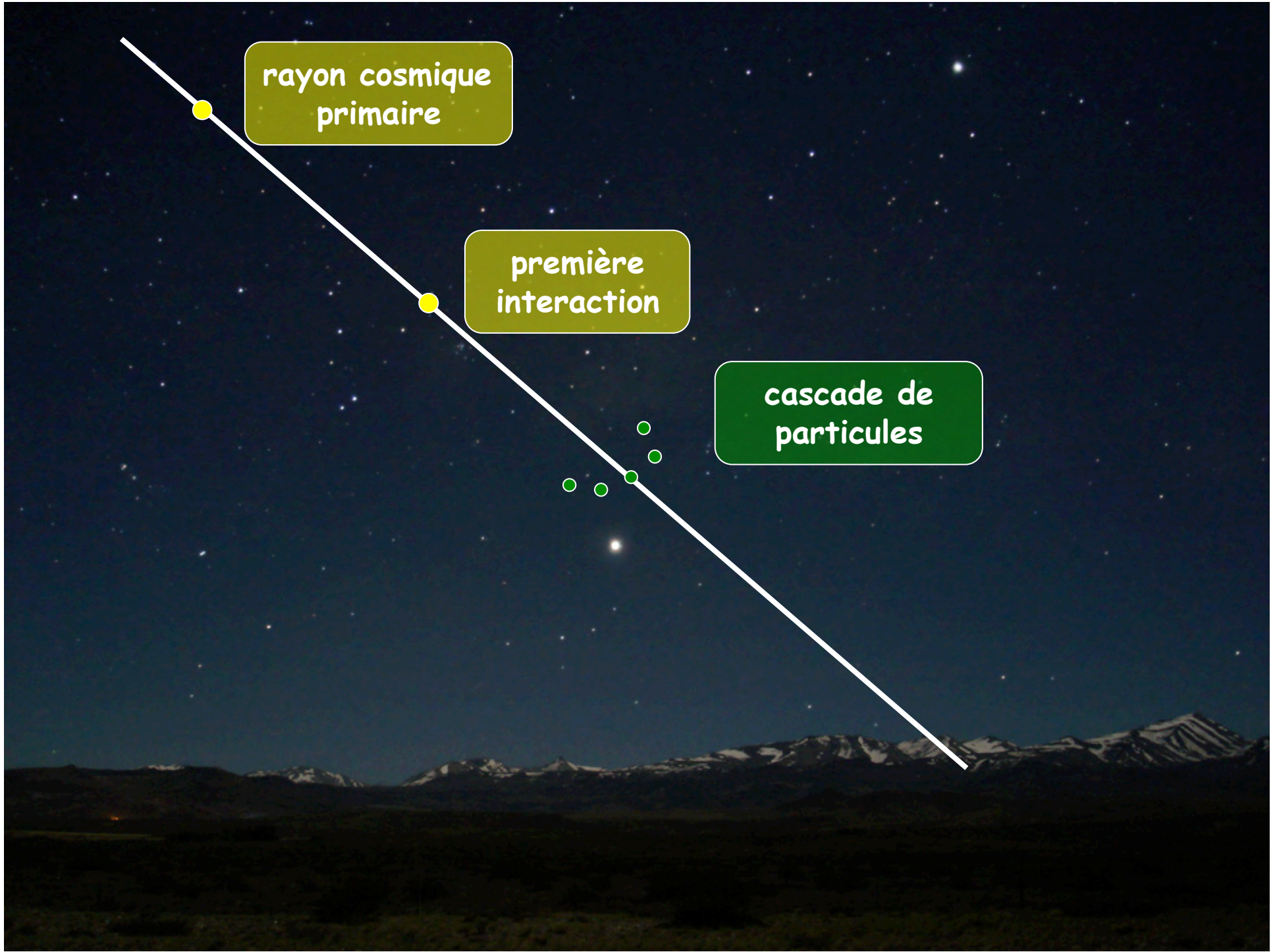


proton  
 $10^{18}$  eV

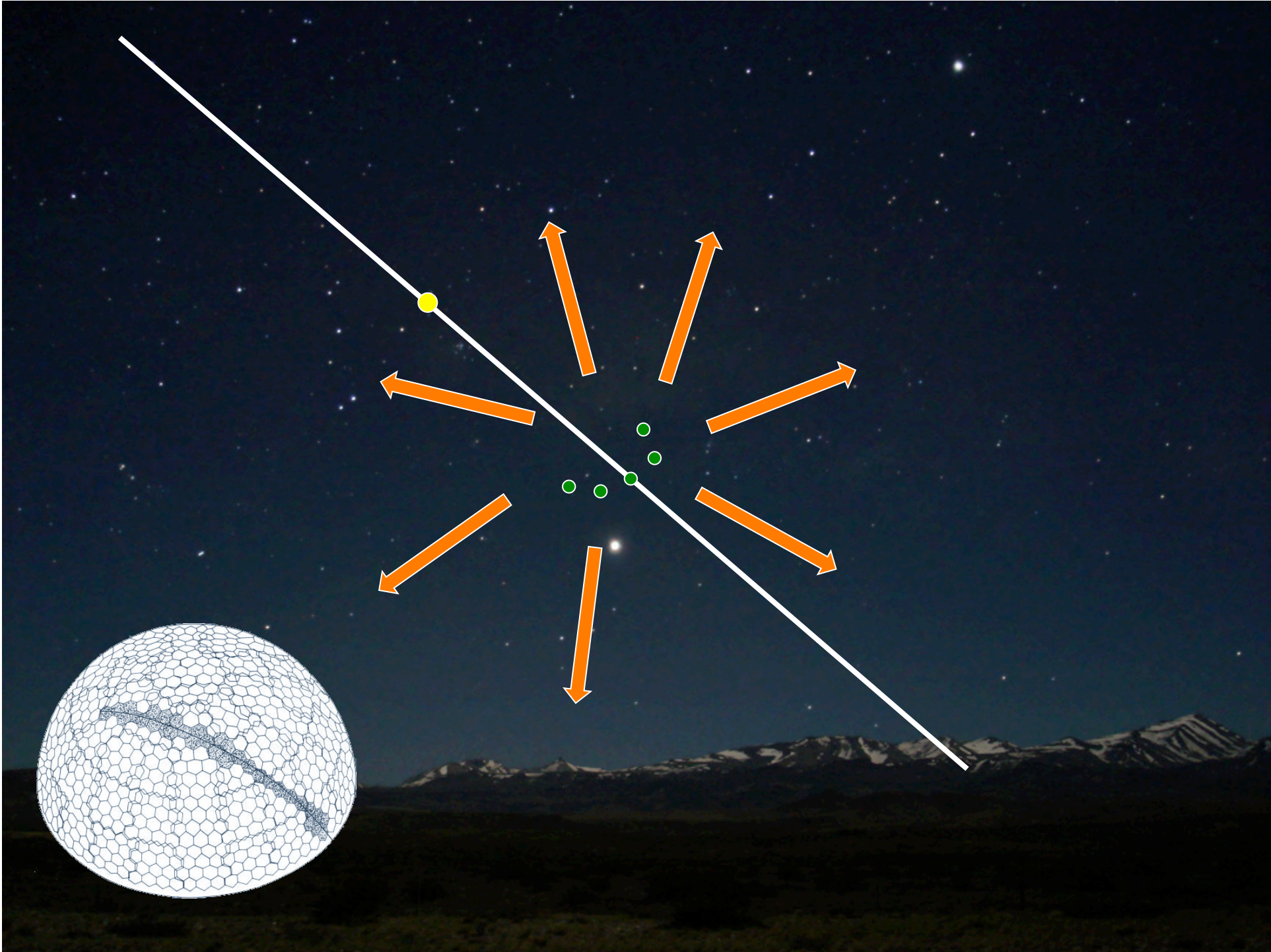
rayon cosmique  
primaire

première  
interaction

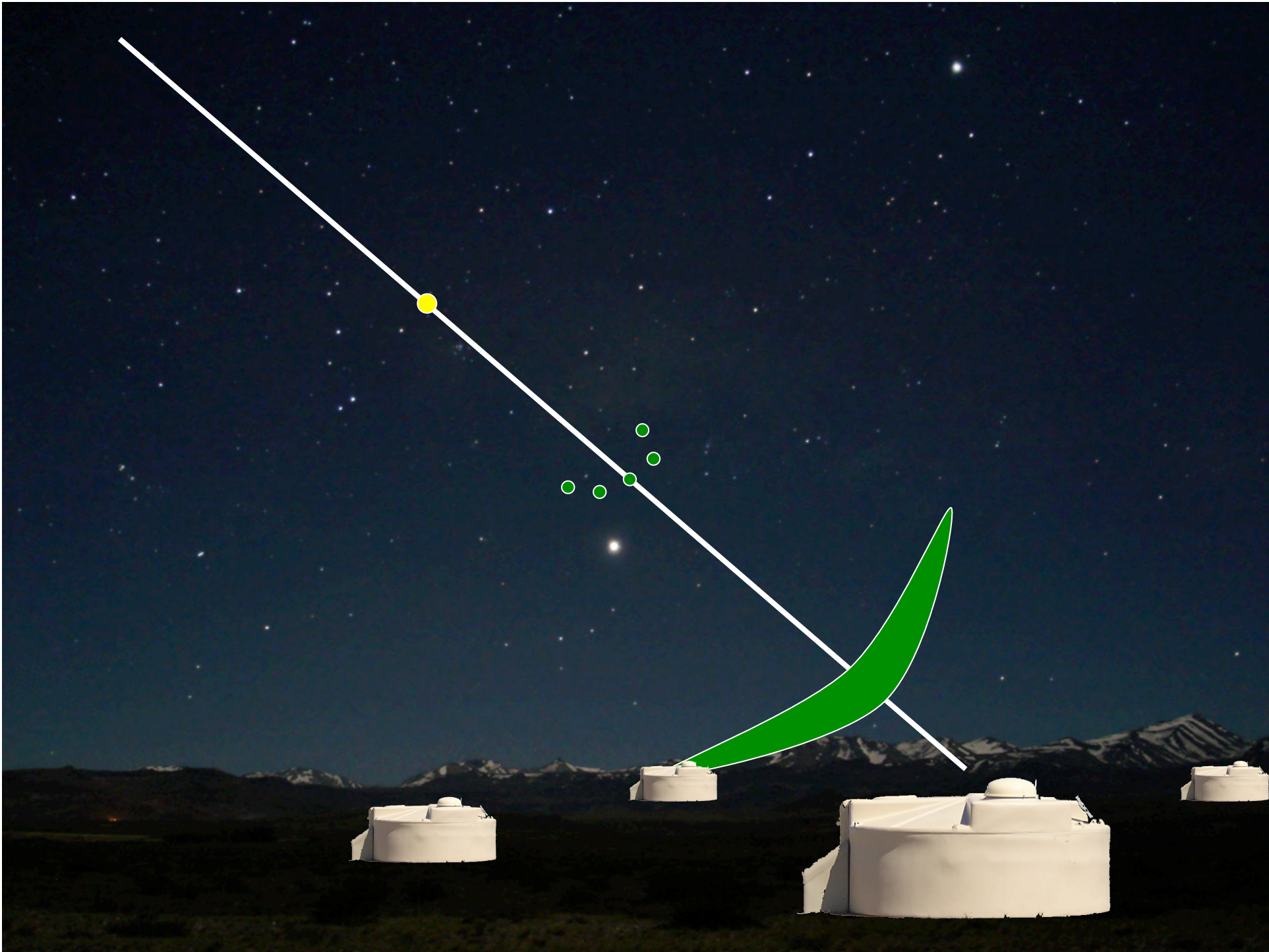
cascade de  
particules



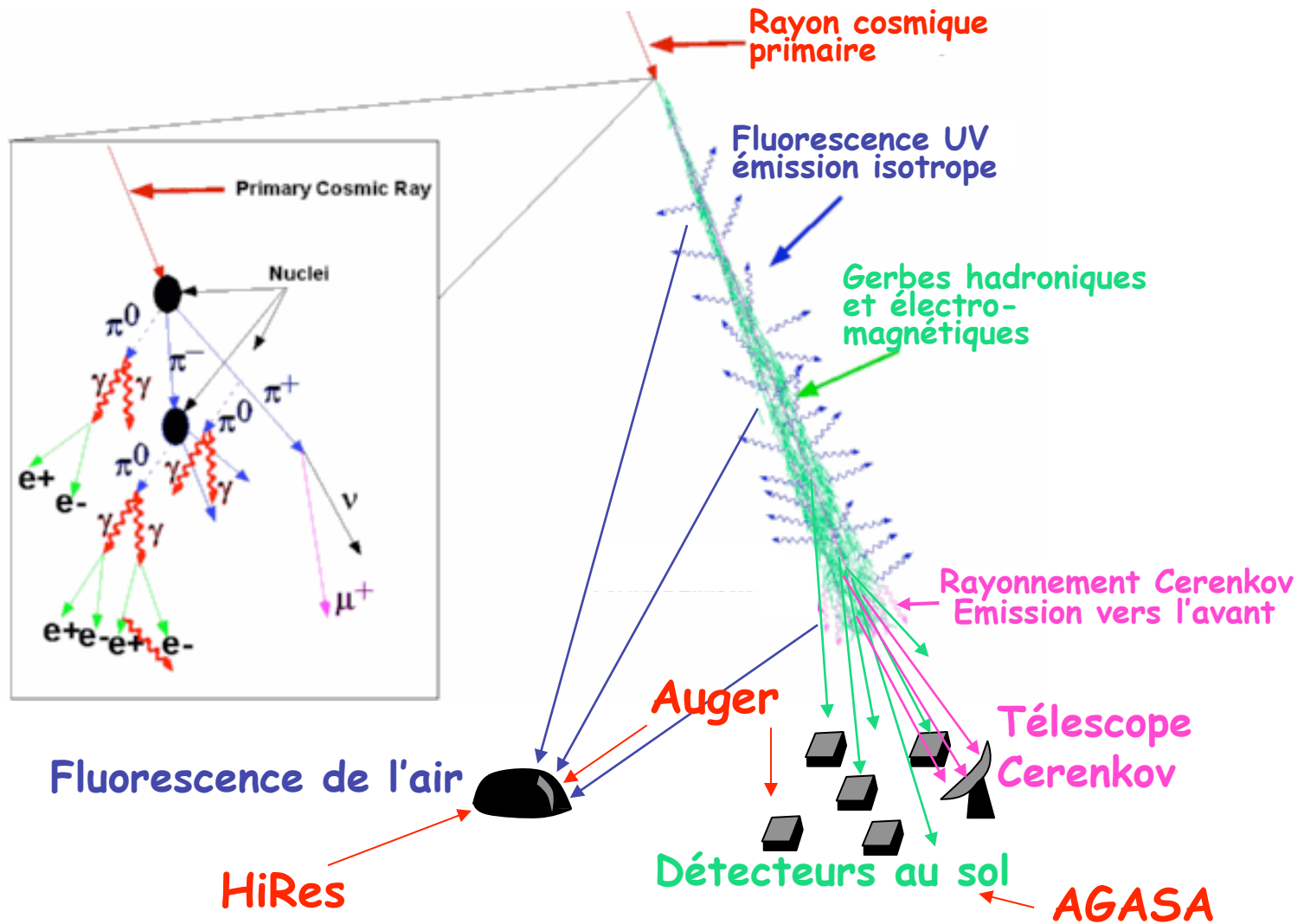








# Détecteurs de rayons cosmiques



# Techniques de détection

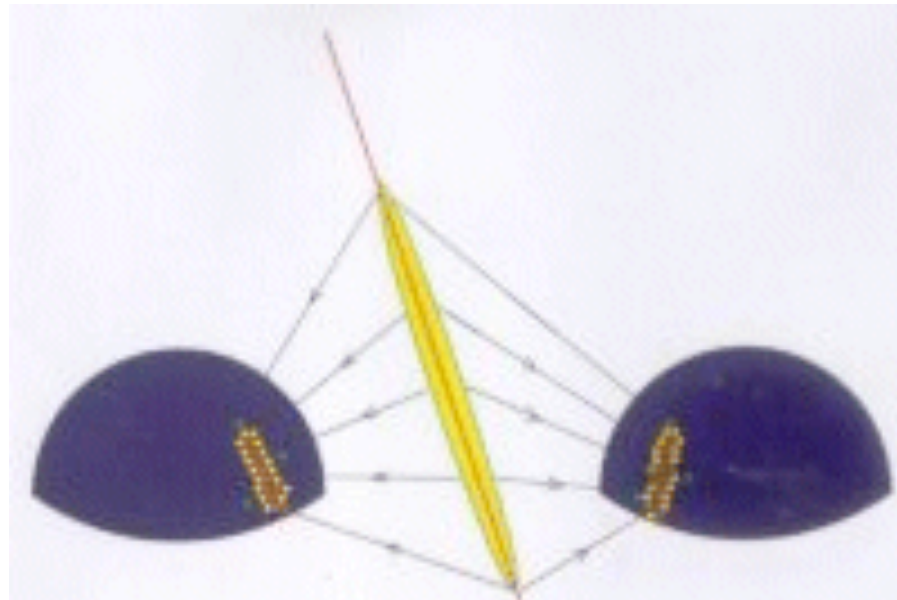
Uniquement  
par nuits claires  
et sans lune

(lumière UV)

Trajectoire à partir de  
géométrie + timing  
ou  
mode dual (mieux)

Miroirs sphériques +  
PMT au plan focal

*Fluorescence de l'air*



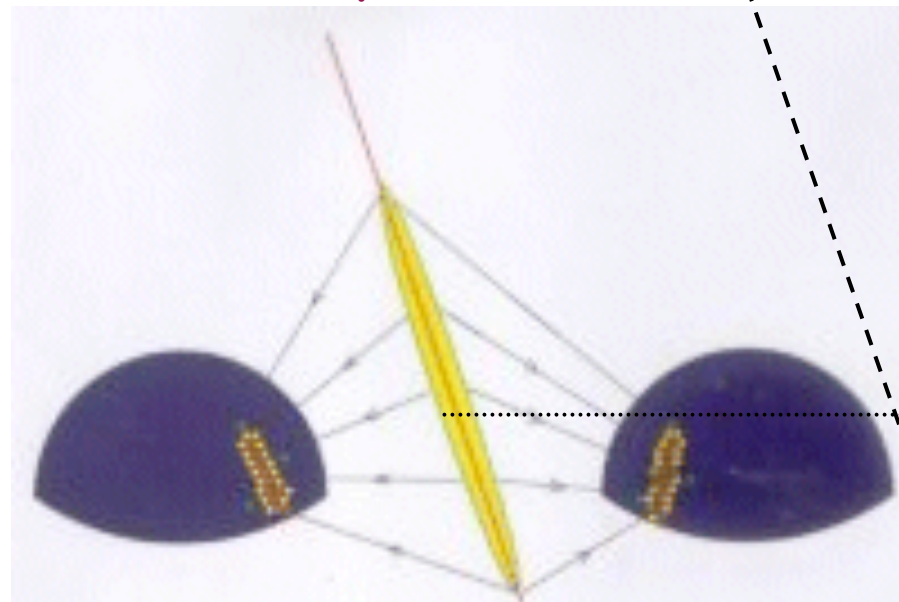


# Techniques de détection

Energie par largeur  
de la gerbe

Nb de photo-électrons reçus  
→ nb d'électrons  $N_e$  émis  
selon profondeur  $X$   
d'atmosphère traversée

Miroirs sphériques +  
PMT au plan focal



Fluorescence de l'air

$X_{\max}$

X

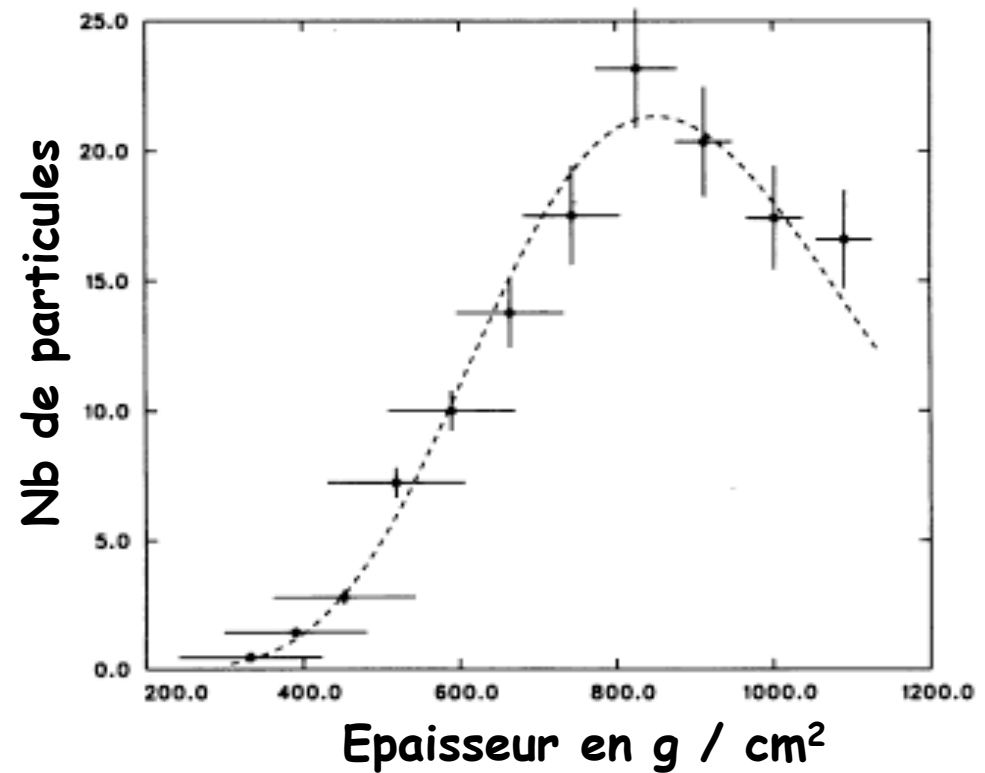
# Techniques de détection

Energie par largeur  
de la gerbe

Nb de photo-électrons reçus  
→ nb d'électrons  $N_e$  émis  
selon profondeur  $X$   
d'atmosphère traversée

$$E_{em} = 2(\text{MeV} / \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) \int N_e(X) dX$$

$E_{tot} = E_{em} (1+15\%)$   
pour tenir compte de énergie  
emportée par  $\mu$ ,  $\nu$ , hadrons.



# Techniques de détection

Caméra  
(PMT)

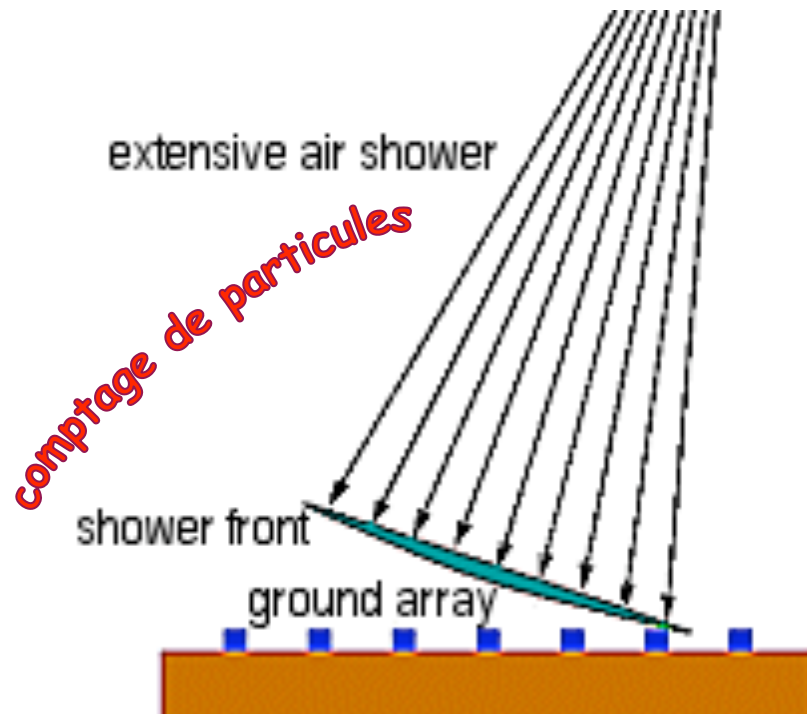


Fluorescence de l'air

Miroirs

HiRes  
(Utah)

# Techniques de détection



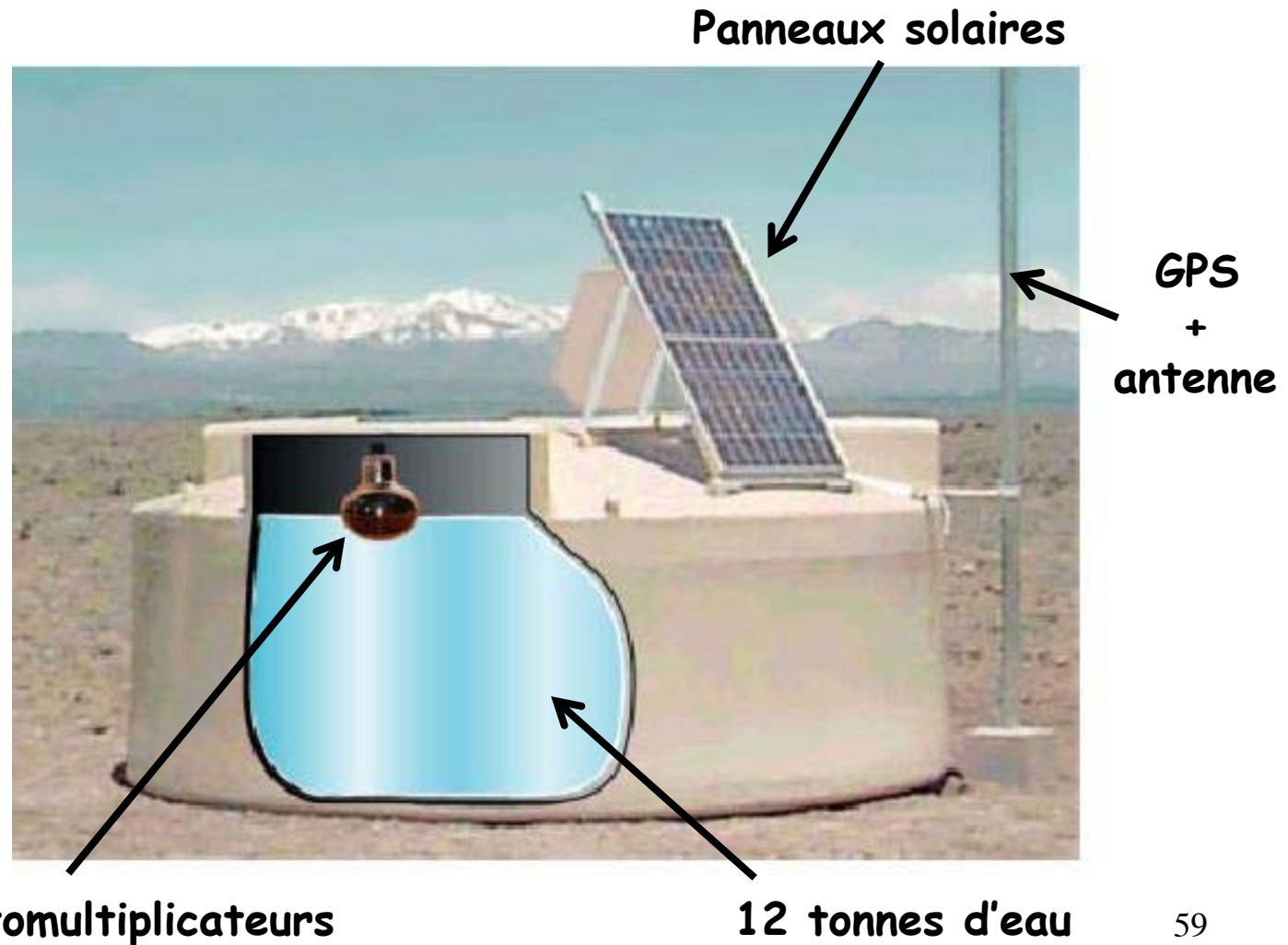
Trajectoire déterminée  
à partir des temps d'arrivée  
du front d'onde  
sur détecteurs au sol

Energie déterminée  
à partir des comptages

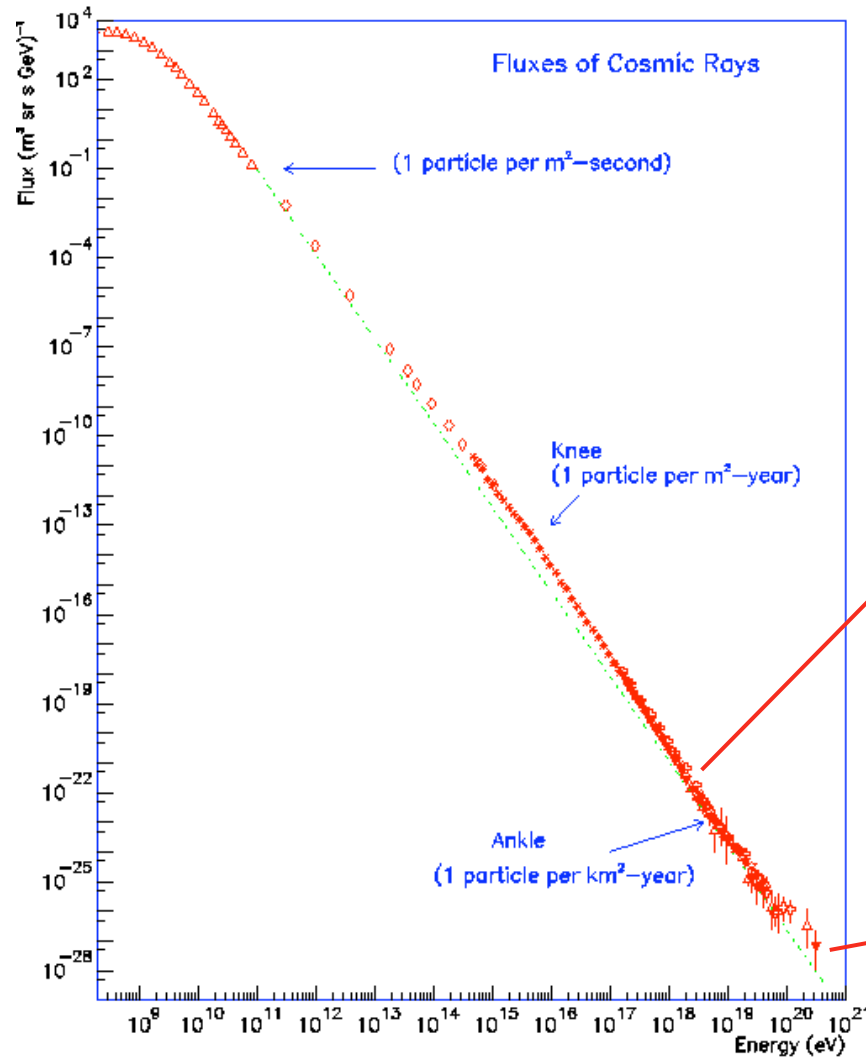


# Techniques de détection

*comptage de particules*

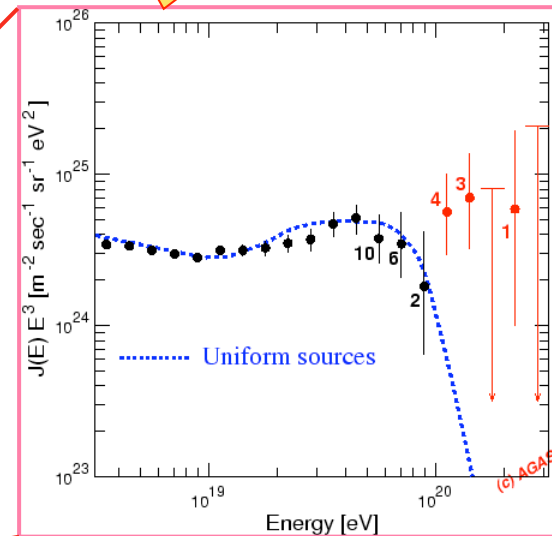


# Ultra High Energy Cosmic Rays



AGASA : 17 evts à  $E > 5 \times 10^{19} \text{ eV}$   
 HiRes : 2 events ( $\sim 20$  attendus)

inter-calibration !

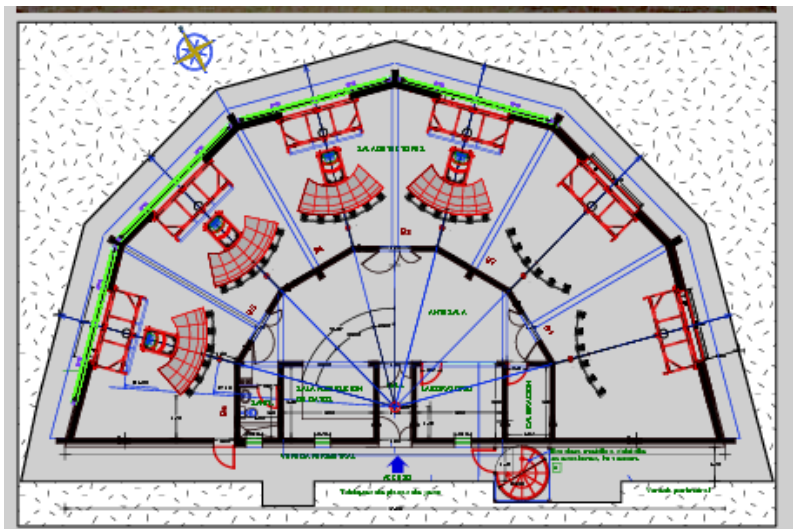


$E_{\text{max}} = 3.2 \cdot 10^{20} \text{ eV} = 50 \text{ J} !$

# AUGER

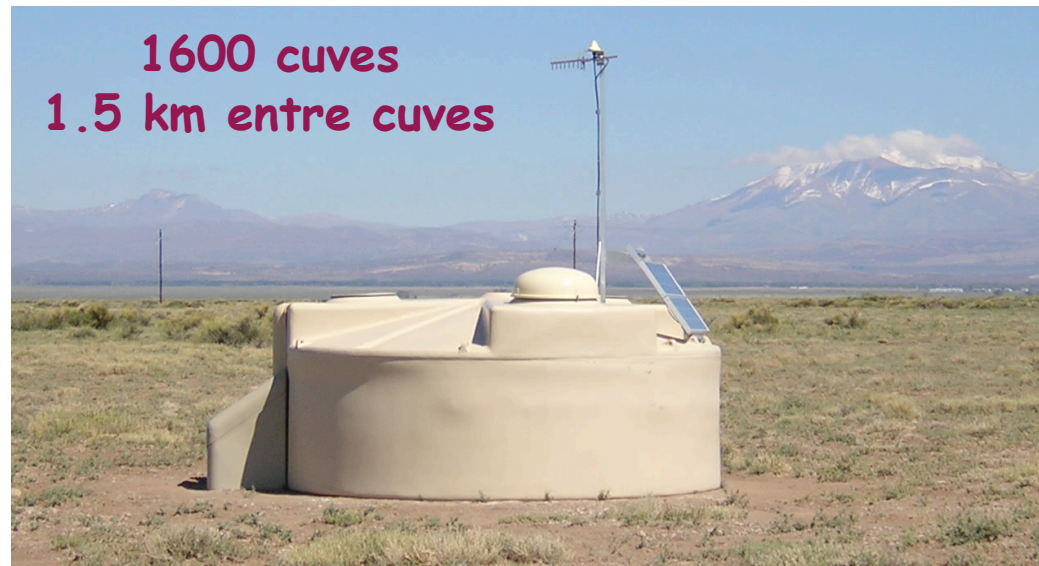
Fluorescence de l'air + détecteurs au sol  
sur 3000 km<sup>2</sup>  
de pampa argentine

4 stations de  
téléscopes pour la fluorescence



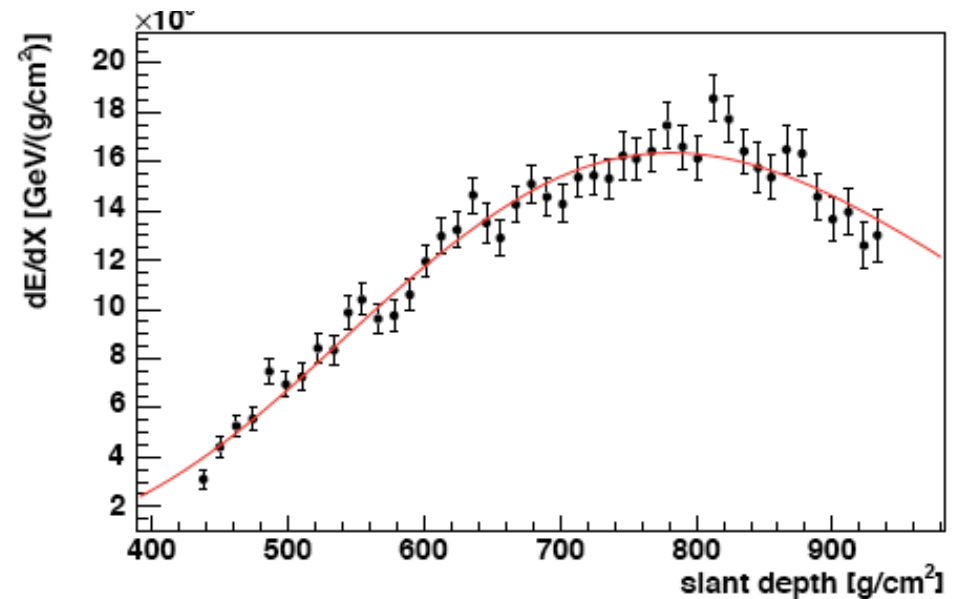
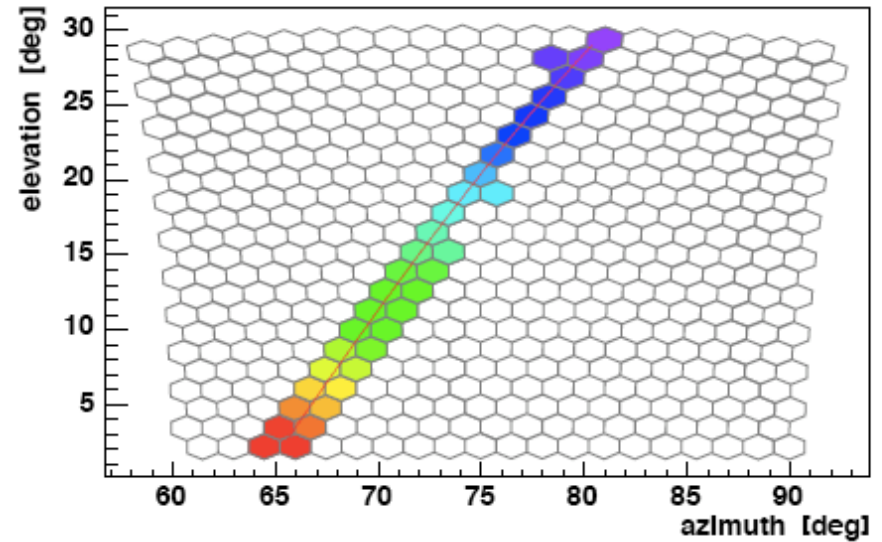
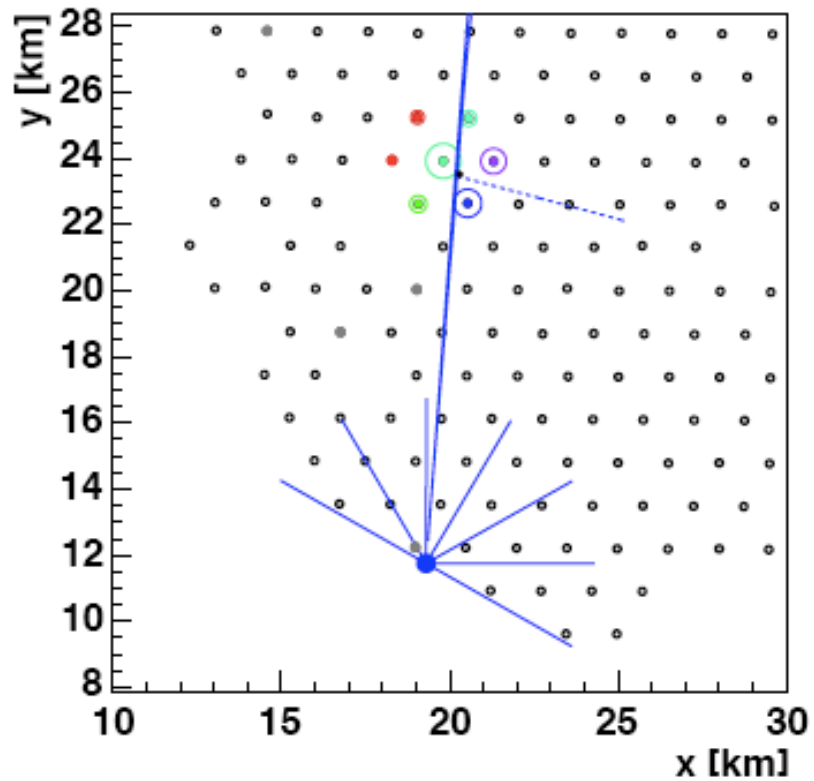
June 2009

1600 cuves  
1.5 km entre cuves



# AUGER

événement hybride  
 $\theta = 30^\circ$ ,  $E \sim 8E_{\text{eV}}$



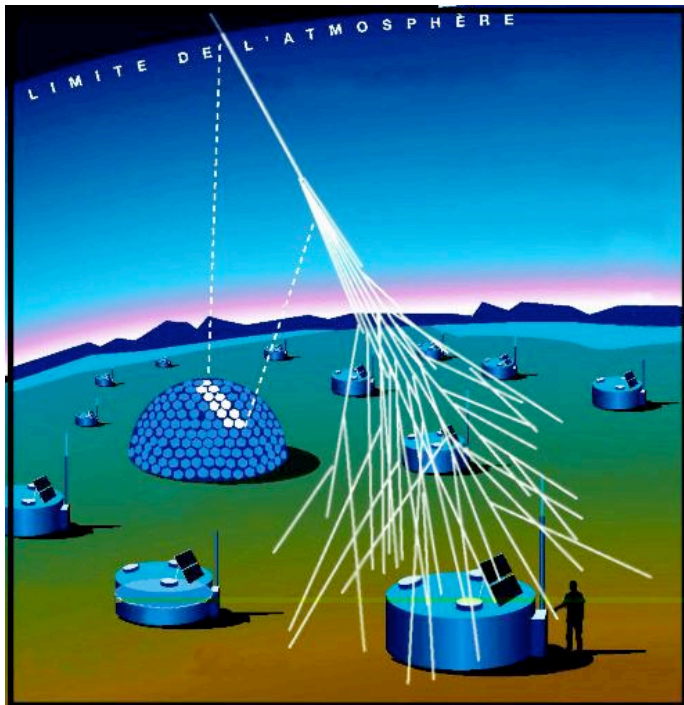


# AUGER

$10^{19}$ eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	2°	1°	0,4°
$\Delta$ impact	80 m	400 m	35 m
$\Delta E / E$	18%	15%	5%

$10^{20}$ eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	1°	1°	0,4°
$\Delta$ impact	40 m	400 m	30 m
$\Delta E / E$	7%	10%	3%

# AUGER

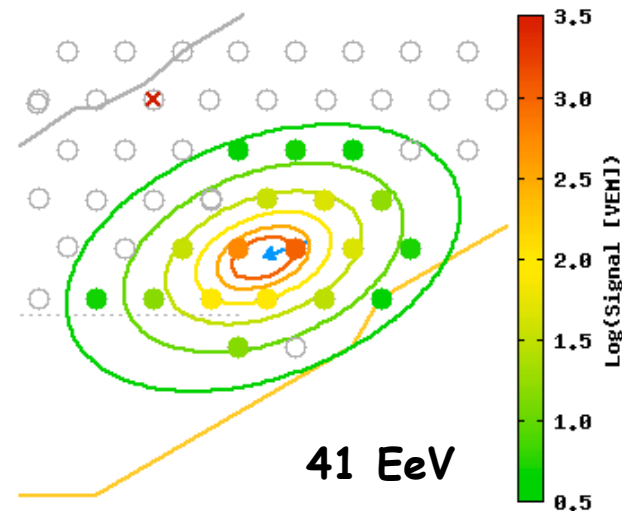


## Auger Sud

- complet
- >1 million d'événements enregistrés
- $E_{\max} \sim 2 \cdot 10^{20}$  eV

## Auger Nord ?

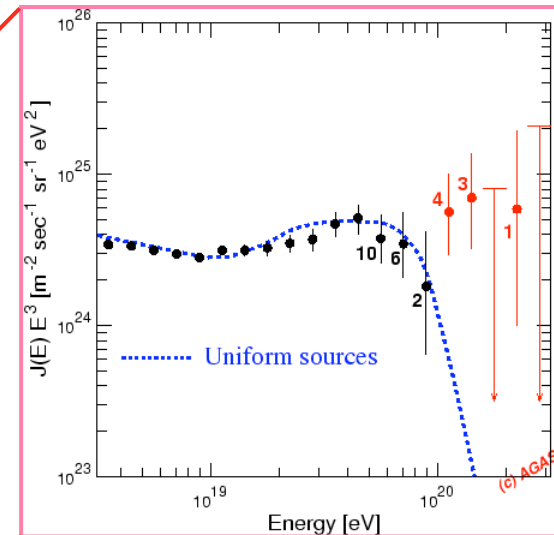
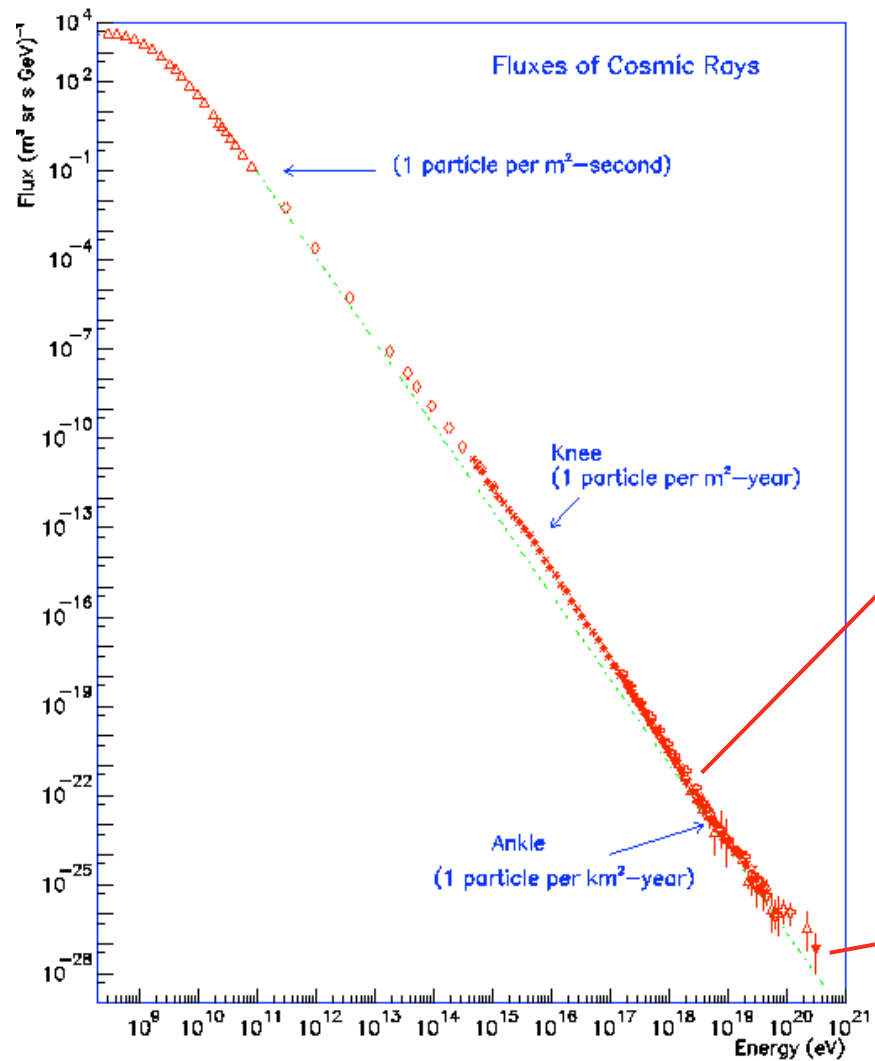
- statistique plus grande (super-amas local)
- test de l'isotropie



A vibrant, multi-colored starry night sky serves as the background. The stars are densely packed and vary in color, including bright blues, oranges, and whites. The text 'Auger: quels résultats?' is written in a bold, yellow, sans-serif font, centered on the image. The word 'Auger' is on the top line, and 'quels résultats?' is on the bottom line, both slanted slightly to the right.

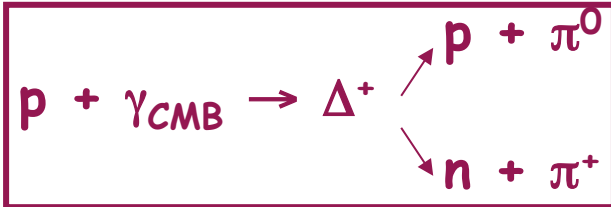
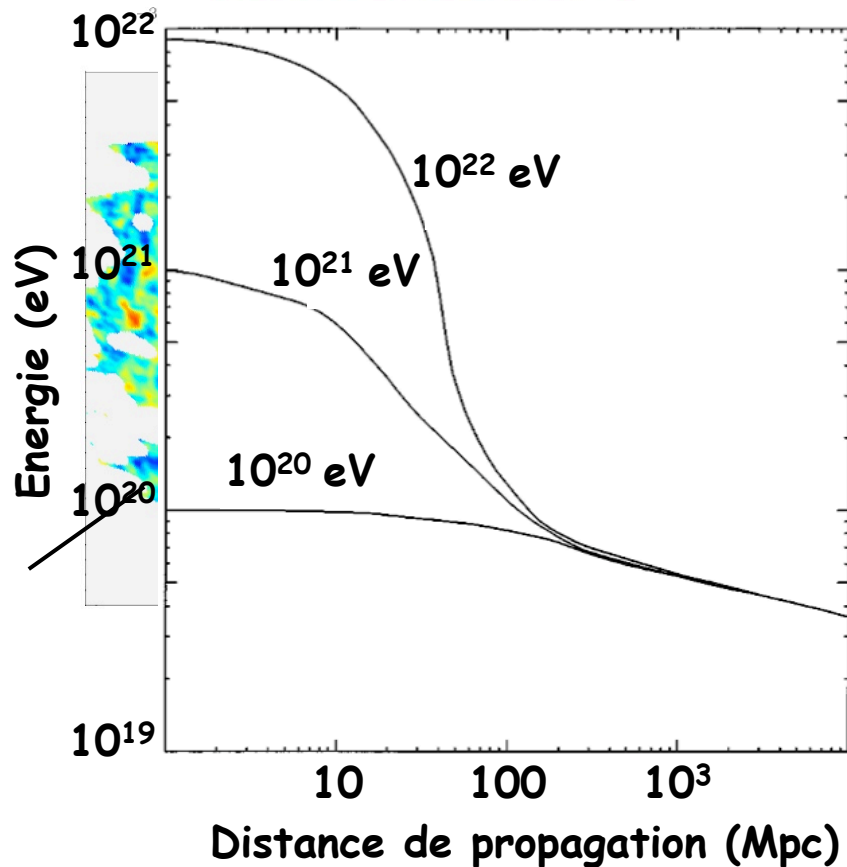
Auger:  
quels résultats?

# La « fin » du spectre





# GZK (Greisen Zatsepin Kuzmin) cut-off



Processus possible  
énergétiquement ( $>5 \times 10^{19}$  eV)



Univers **opaque** aux rayons cosmiques

Sources avec  $E > E_{\text{GZK}}$  sont à  
 $d < 100$  Mpc (amas local)

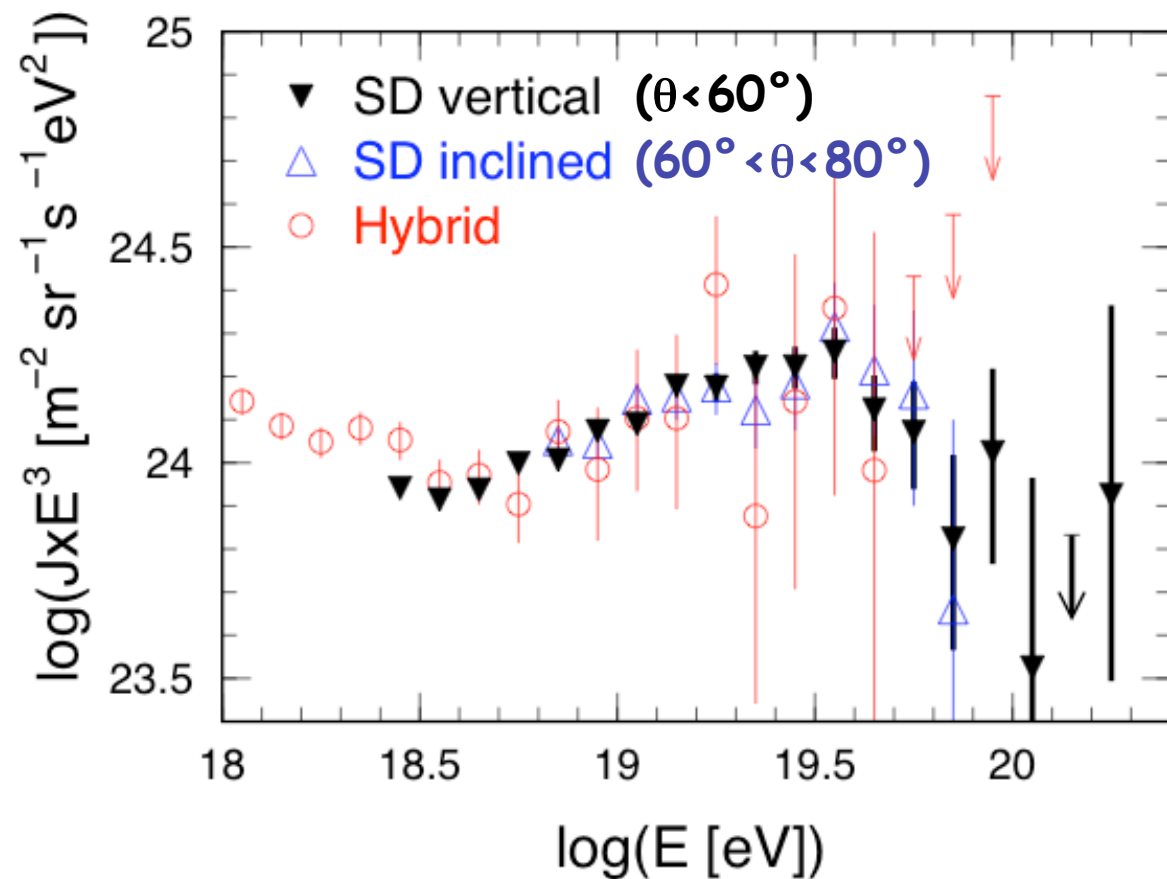
# AUGER - spectre UHE

3 lots indépendants

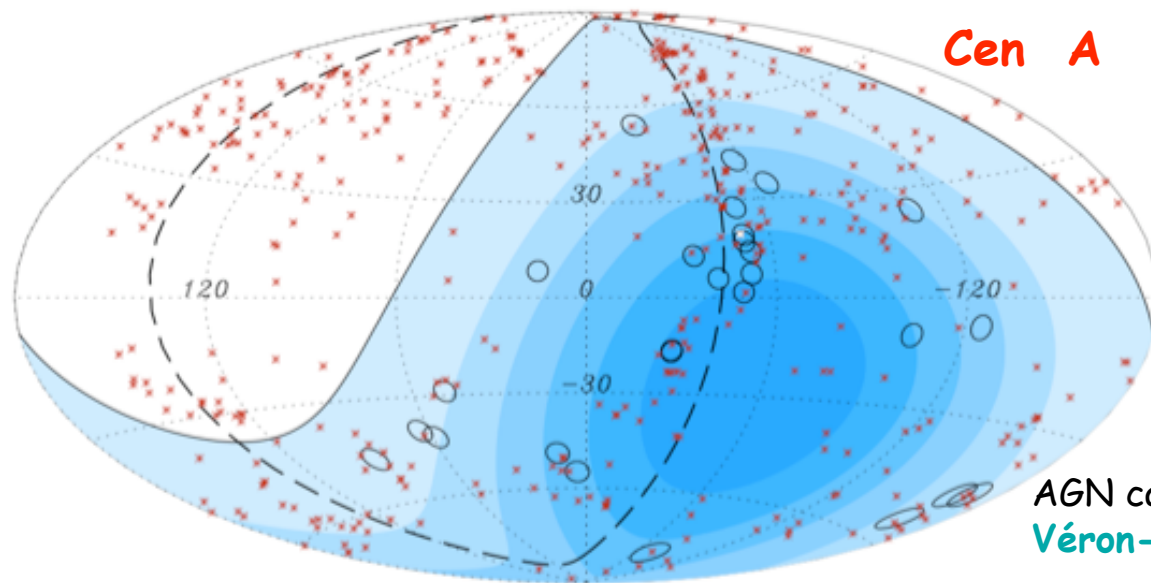
Présence de  
coupure GZK

spectre plat  
au delà de  $4 \cdot 10^{19}$  eV  
exclu à  $6\sigma$

Rayons cosmiques  
proviennent  
de sources lointaines



# AUGER - origine des UHECR



Bonne résolution angulaire  
 ( $< 1^\circ$ )  
 ⇒ Etude des anisotropies

- Evts  $E > 57 \text{ EeV}$
- ✗ AGNs  $d < 71 \text{ Mpc}$

AGN catalog:  
 Véron-Céty and Véron, *A&A* 2006, 455 773

	Number $E > 57 \text{ EeV}$	Number correlated within $3^\circ$	Expected if isotropy
Total sample	27	20	5.6
Excluding galactic plane	21	19	5.0

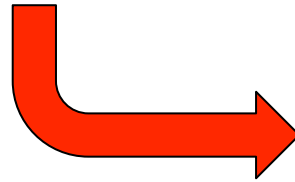
Premiers indices de  
 corrélation des UHECR  
 avec sources astronomiques

# autres messagers...

particules chargées  
protons, noyaux

Confirmations indépendantes?

Autres preuves, autre approche



**autres  
messagers**

photons  
de haute  
énergie

ondes gravitationnelles

neutrinos



# Astroparticule

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay

# Astronomie multi-messagers

## Photons

Propagation en **ligne droite**  
mais proviennent surtout  
des **milieus ténus**



## Rayons cosmiques (p)

Propagation **chaotique** (B)  
mais **ultra haute**  
**énergie**

## Neutrons

$\tau \sim 15 \text{ mn}$   
 $d_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$  à  $E = 10^{18} \text{ eV}$

## Neutrinos

Propagation quasi infinie  
Propagation en ligne droite  
**MESSAGER IDEAL**  
milieux denses  
lointains

# Astronomie multi-messagers

## Photons

Propagation en **ligne droite**  
mais proviennent surtout  
des **milieux ténus**



libre parcours moyen  
d'un  $v = \infty$

2 s pour sortir

libre parcours moyen  
d'un photon = 1 cm

100 000 ans pour sortir

## Neutrinos

Propagation quasi infinie  
Propagation en ligne droite  
**MESSAGER IDEAL**  
milieux denses  
lointains

# Astroparticule

1) Approche **multi-messager**  
**Rayons cosmiques**



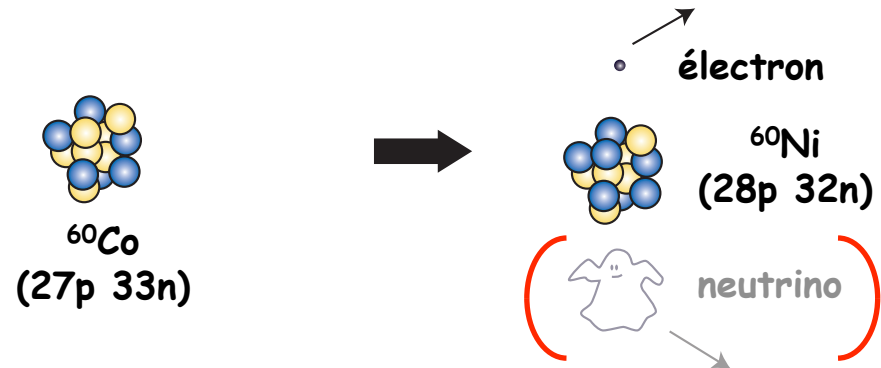
2) **Neutrinos cosmiques**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Astronomie neutrinos

3) **Astronomie gamma**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*



# Rappel historique

- **Mystère de la désintégration  $\beta$  :**



énergie variable de  $e^-$ : non-conservation de  $E$ ? autre particule?  
(1930)

Bohr

Pauli (« n »)

- **Découverte du neutron :**  $^4_2\text{He} + ^9_4\text{Be} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + n$  Chadwick (Nobel 1935)  
(1932)

- **Baptême du « neutrino » de Pauli :** Interprétation désintégration  $\beta$  par Fermi  
(1933)

# Sources de neutrinos

Radioactivité croûte terrestre :  $10^7 \nu / s / m^2$

Etre humain :  $4000 \nu / s$

Soleil :  $10^{38} \nu / s$

Supernova type II :  $10^{58} \nu / s$

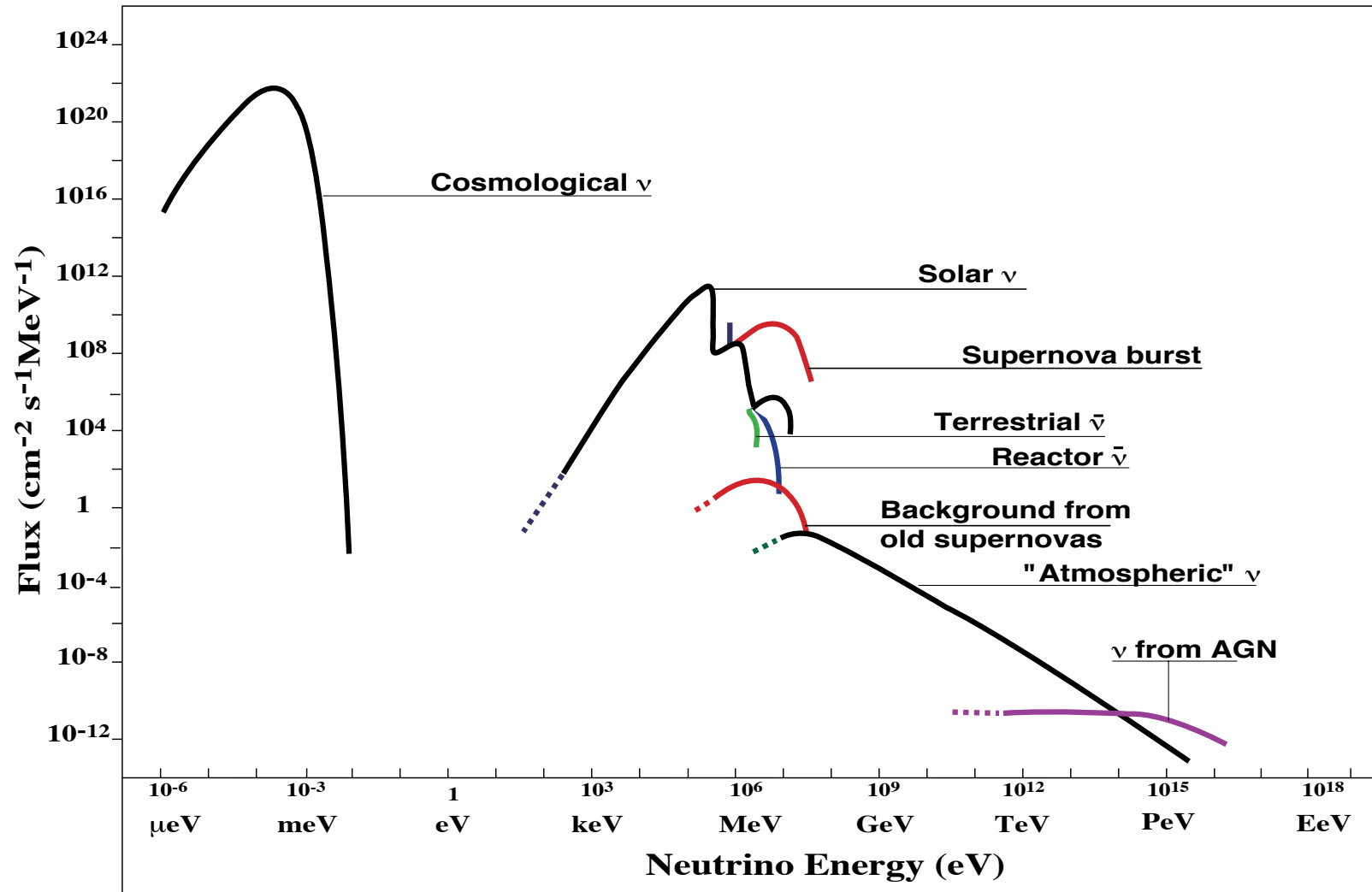
Gerbes atmosphériques :  $100 \nu / m^2 / s$

Big Bang :  $300 \nu / cm^3$

Réacteurs et accélérateurs ...

Cataclysmes cosmiques ...

# Sources de neutrinos



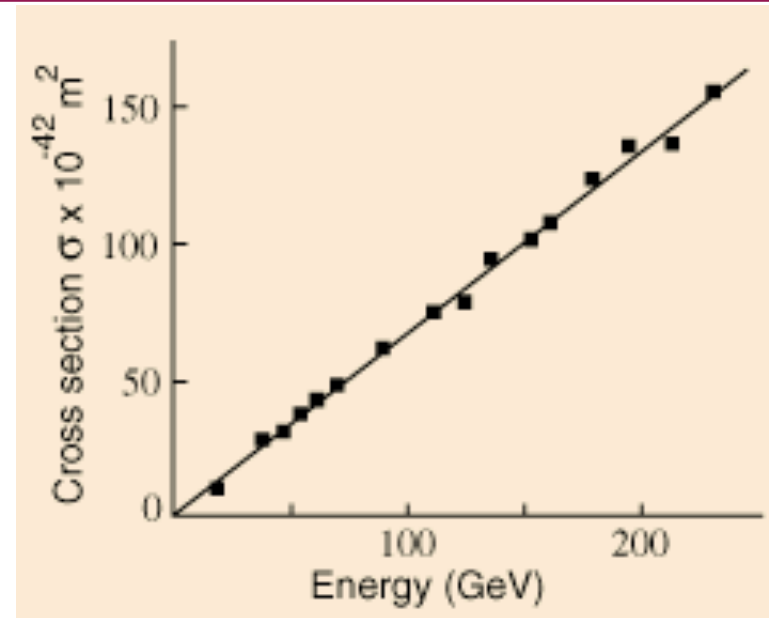
# Section efficace d'interaction

$$\sigma = 0.7 \cdot 10^{-38} \times E \text{ (GeV) cm}^2$$

Nb d'interaction par unité de longueur :

$$N = \sigma \rho / u$$

$\swarrow$  masse d'un nucléon  
 $\searrow$  densité massique



Libre parcours moyen  $d = 1/N$

$$d_{\text{eau}} = \frac{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{(10^{-47} \text{ m}^2)(1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})} = 2 \cdot 10^{17} \text{ m}$$

$$d_{\text{plomb}} = \frac{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{(10^{-47} \text{ m}^2)(11400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})} = 2 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

1 année-lumière !  $\leftarrow$

pour  $E$  ( $\beta$  decay)  $\sim 1 \text{ MeV}$   $\sigma \sim 10^{-47} \text{ m}^2$



# Rappel historique

- Très faible interaction : source intense + grand détecteur (1956)

réacteur nucléaire  
 $10^{13} \bar{\nu} / \text{s} / \text{cm}^2$


cuve 200l d'eau + cadmium  
 $\bar{\nu} + \text{p} \rightarrow \text{n} + \text{e}^+$



( $\Delta t = 5 \mu\text{s}$ )

$\sim 3 \nu / \text{heure}$

« Détection du neutrino libre: une confirmation »  
Cowan et Reines (Nobel 1995)



# Saga solari

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 1859: géologues et biologistes (dont Darwin)



$t_{\text{Terre}}$ : au moins 300 millions d'années

- 1850: refroidissement de la Terre par transfert radiatif (Lord Kelvin)



$t_{\text{Terre}} \sim 100\,000$  ans

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

- Source d'énergie du Soleil: **Chimique ?**

Sur Terre, chaleur reçue  $F \sim 1400 \text{ W/m}^2$   
 $d_{\text{Terre-Soleil}} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$

Luminosité  $L = 4\pi d^2 F$   
 $L \sim 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$

**durée de vie:**  $t_{\text{Soleil}} \sim N_p \times E_p / L \sim 10^{57} \times 1 \text{ eV} / 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$



$\sim 10 \text{ 000 ans !}$

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

- Source d'énergie du Soleil: **Gravitationnelle ?**

$$\text{E pot. } U = - \int_0^R \frac{GM(r)dm}{r} = - \frac{3GM^2}{5R}$$

$$\text{Luminosité } L = 4\pi d^2 F \\ L \sim 3.10^{26} \text{ W}$$

**durée de vie:**  $t_{\text{Soleil}} \sim U / L \sim (7.10^{-11})(2.10^{30})^2 / (7.10^8) / 3.10^{26} \text{ W}$



$\sim 10$  millions d'années



# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

- Source d'énergie du Soleil: Nucléaire ?

En. de liaison par nucléon  $B \sim 1\text{MeV}$

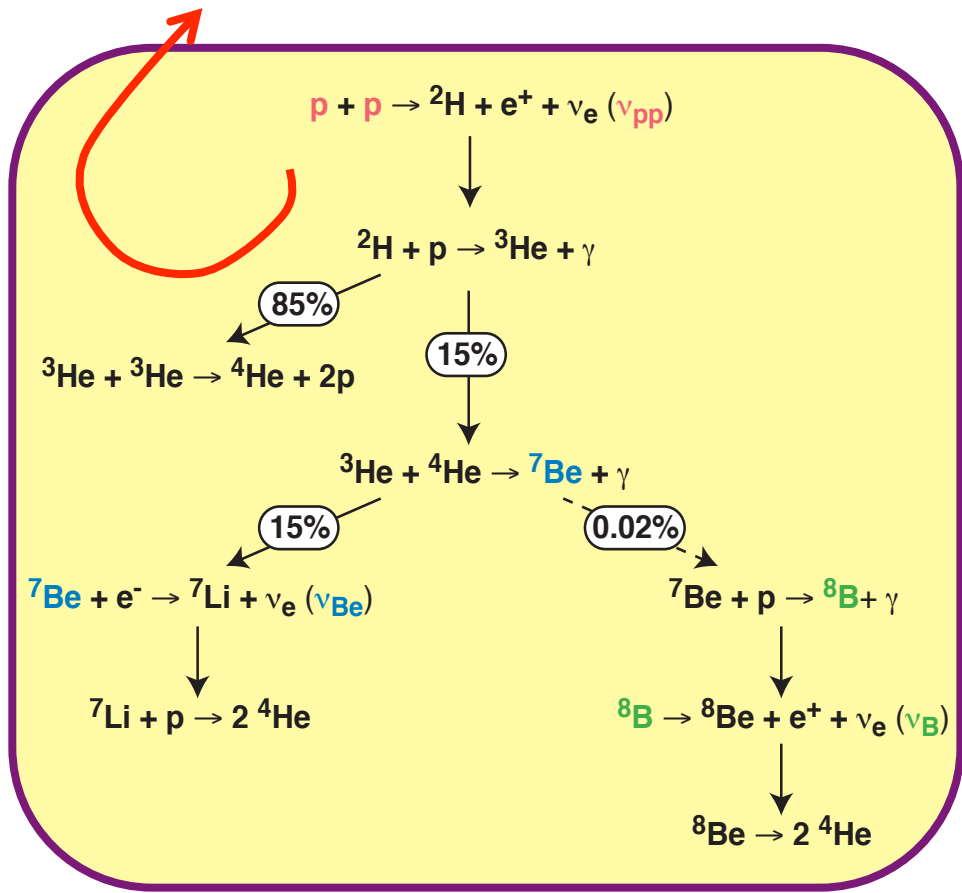
Luminosité  $L = 4\pi d^2 F$   
 $L \sim 3.10^{26}\text{W}$

durée de vie:  $t_{\text{Soleil}} \sim N_p \times B / L \sim 10^{57} \times 1\text{MeV} / 3.10^{26}\text{W}$

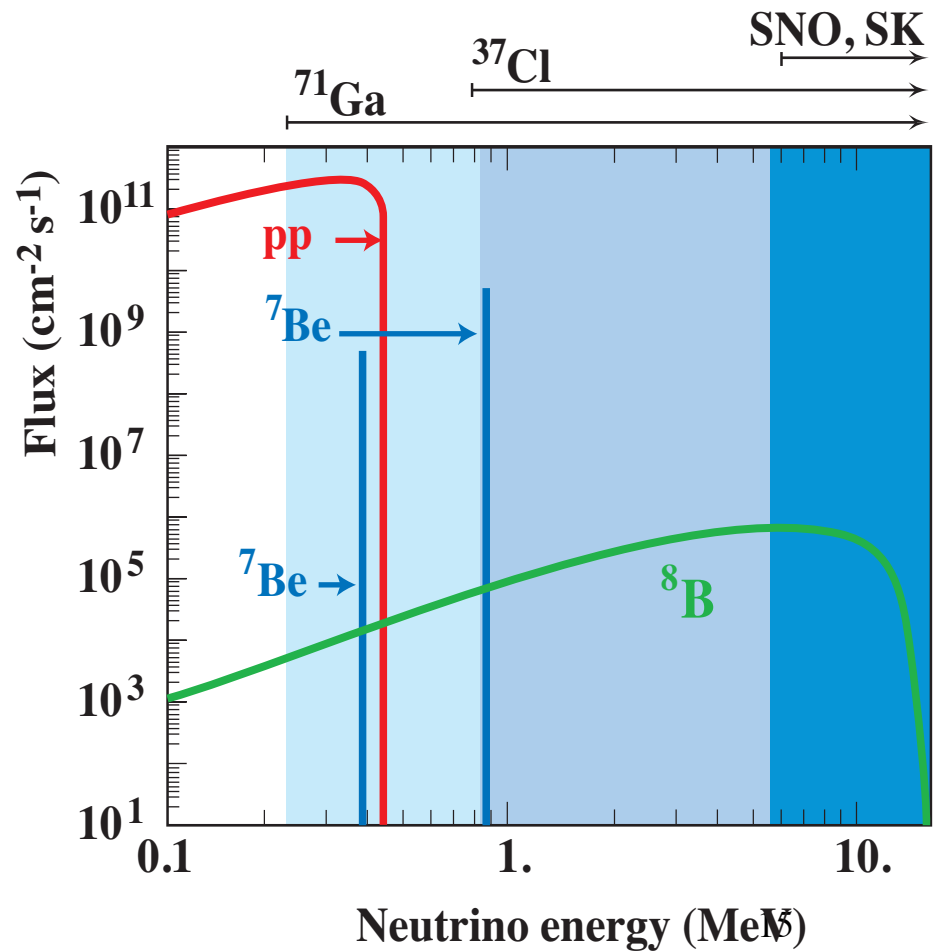


$\sim 10$  milliards d'années

# Neutrinos solaires



1960: Bahcall



# Neutrinos solaires

Homestake  
Ray Davis

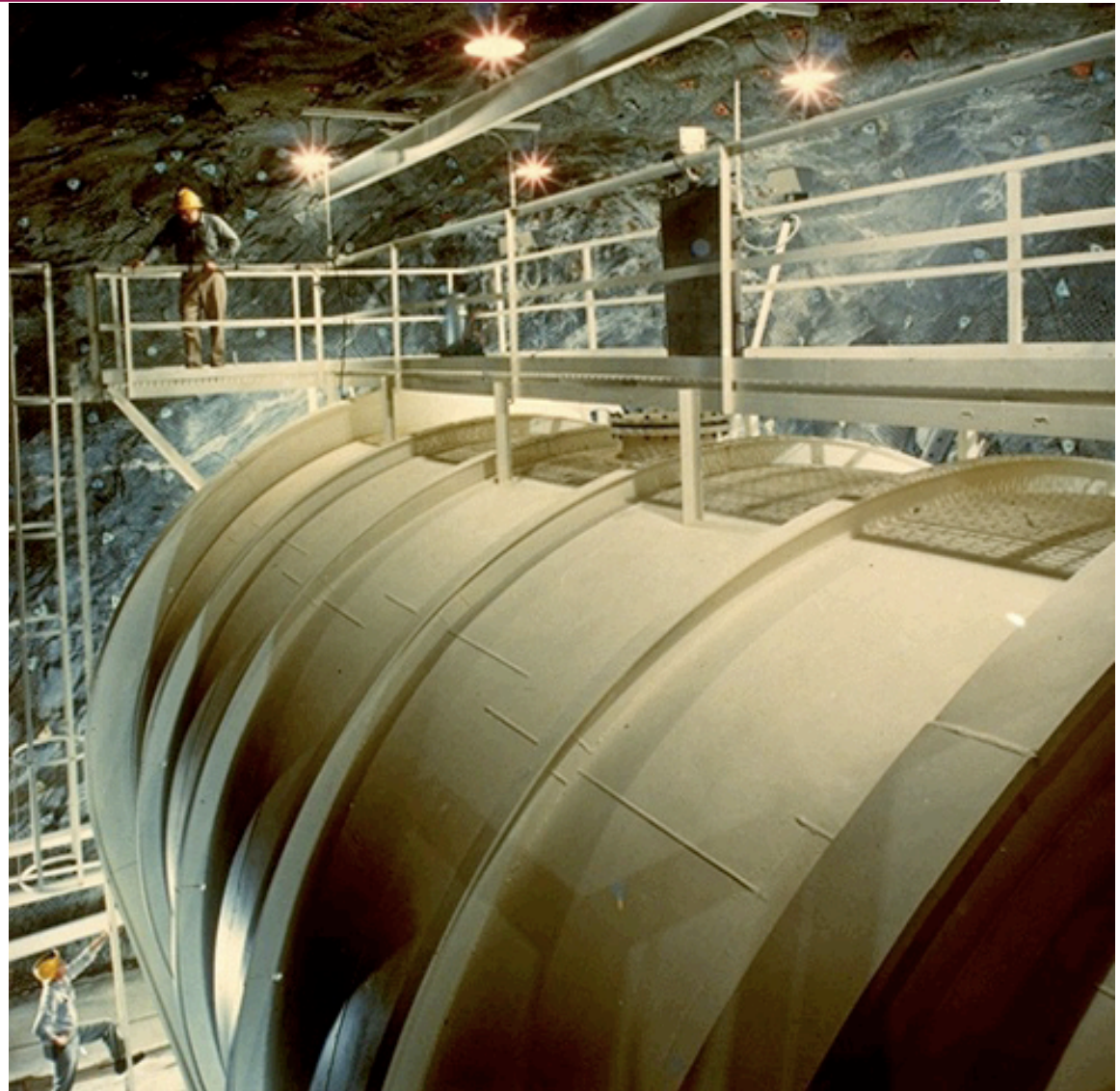
650 tonnes de  $C_2Cl_4$

1v/jr ( $10^{18}$  traversant cuve)

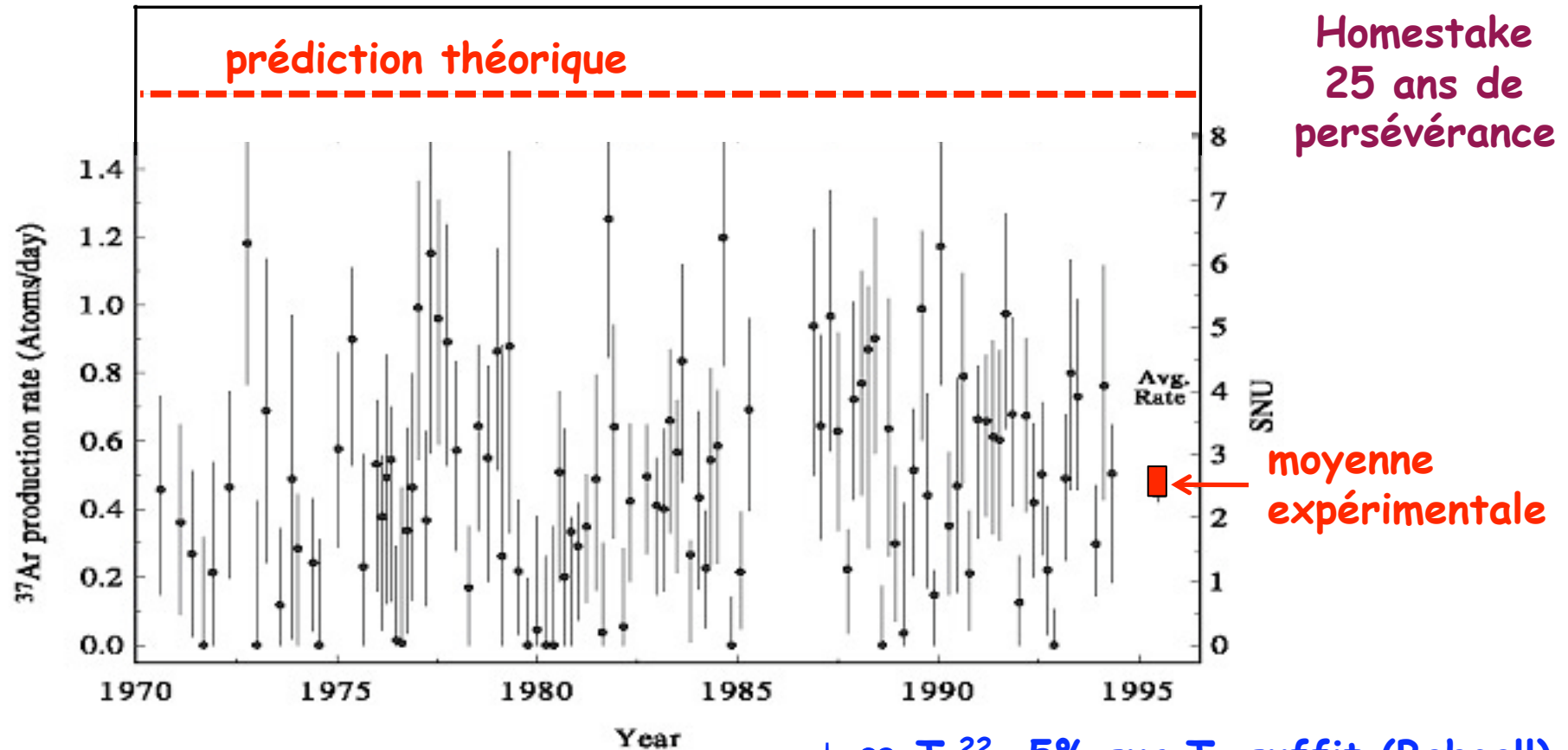


radioactif  $\tau_{1/2} \sim 1$  mois

→ « Recherche de  $\nu$  en provenance du Soleil » (1968)



# Neutrinos solaires

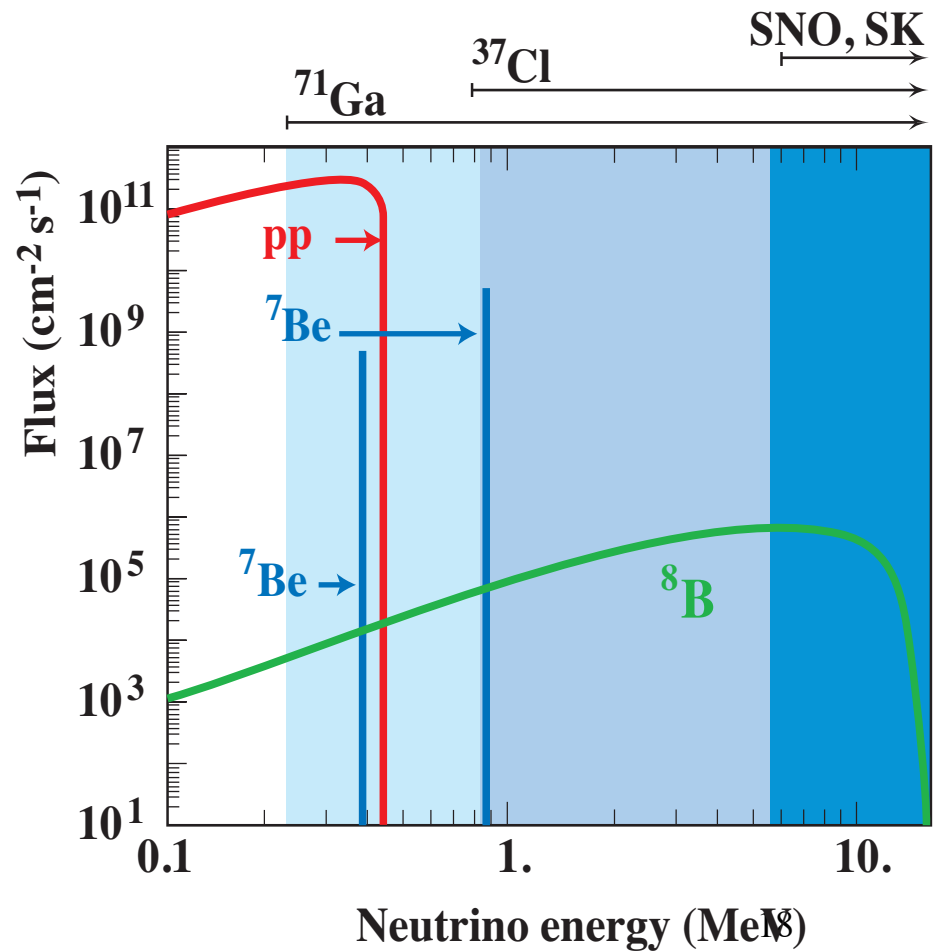
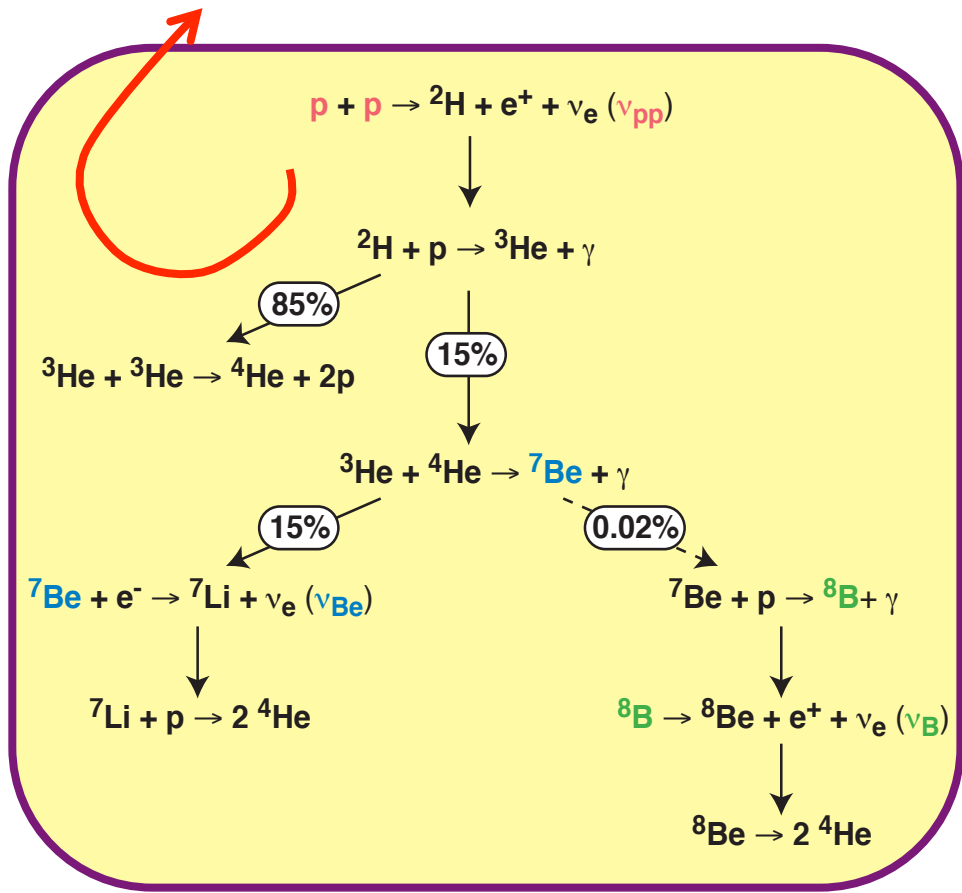


flux détecté = 1/3 flux prédit

$\phi \propto T_c^{22}$ , 5% sur  $T_c$  suffit (Bahcall)

pb expérimental? (Davis)

# Neutrinos solaires





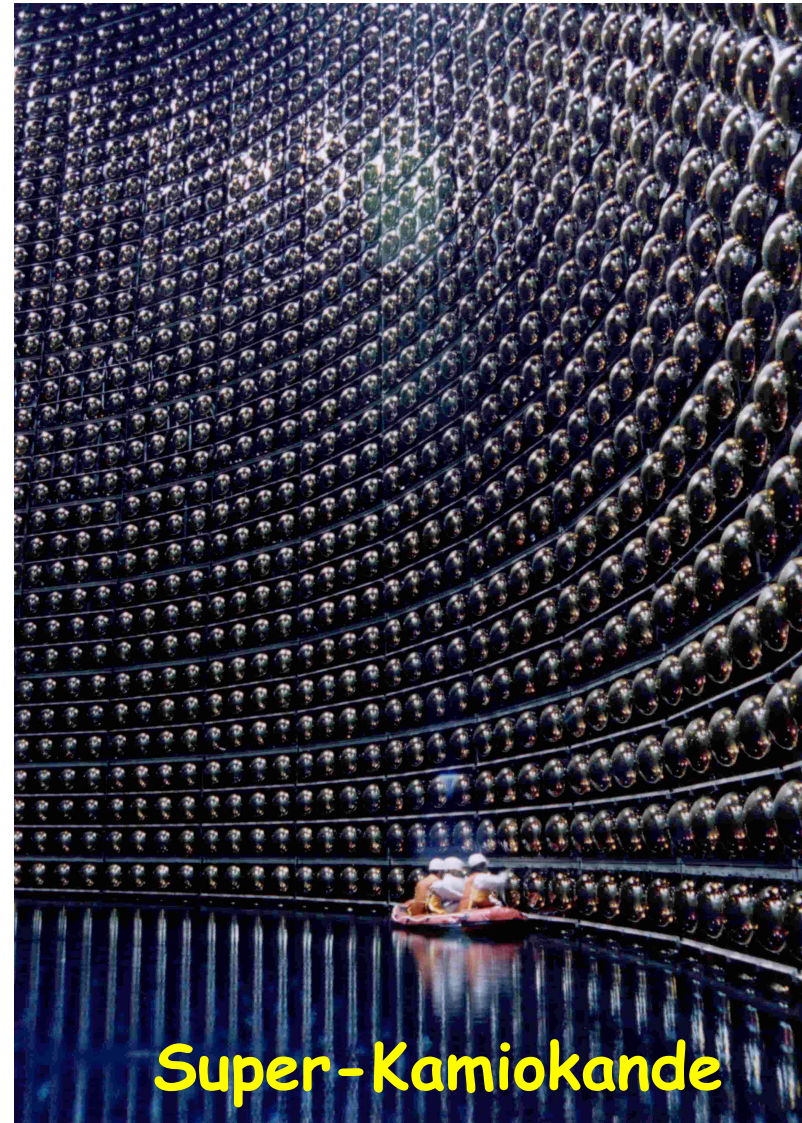
# Neutrinos solaires

- Expérience temps-réel et directionnelle:  
(Super) Kamiokande



seuil = 6.5 MeV

(1986)



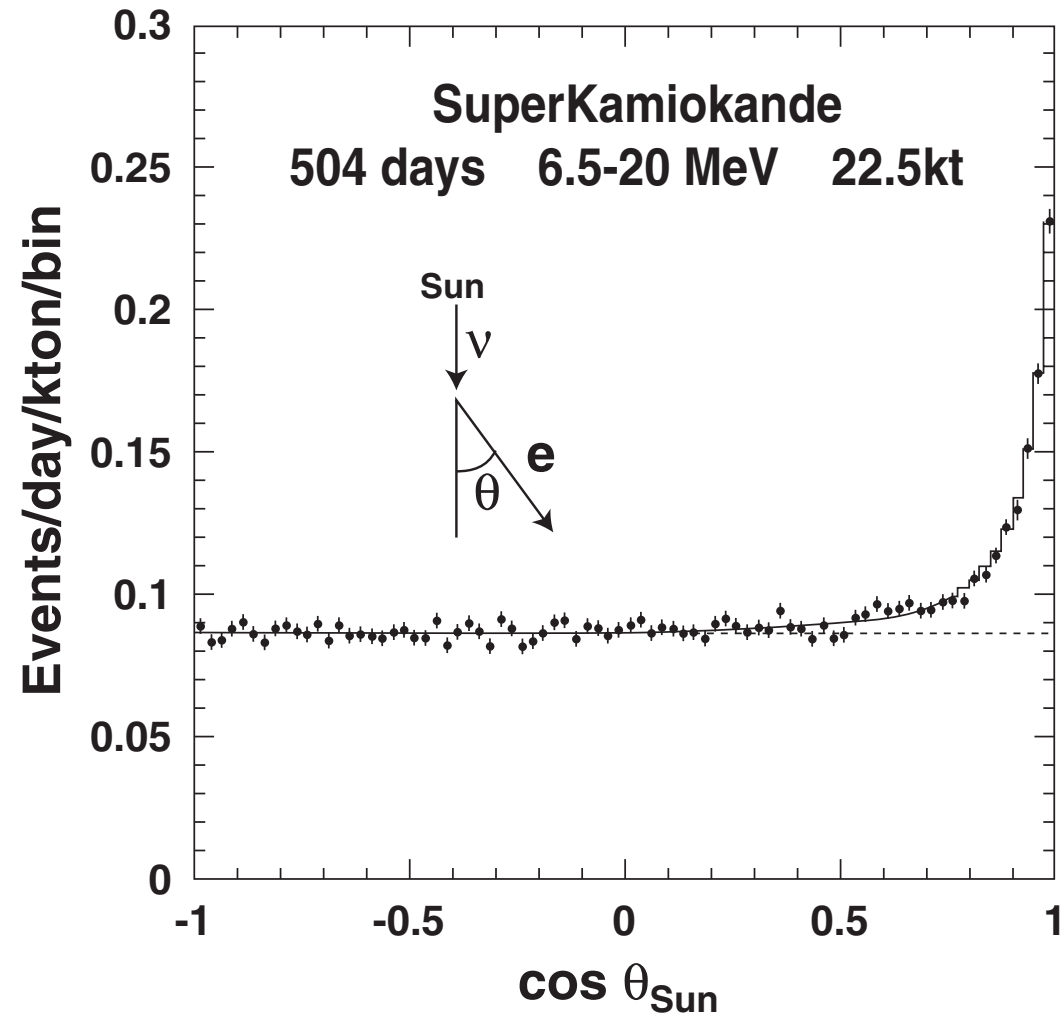
Super-Kamiokande

# Neutrinos solaires

## SuperKamiokande

- origine solaire confirmée
- déficit persistant

$$\frac{\text{data}}{\text{modèle}} = 0.4$$



# Neutrinos solaires

- Expérience temps-réel et directionnelle:  
(Super) Kamiokande



seuil = 6.5 MeV

(1986)

- Expériences au Gallium (SAGE, GALLEX)

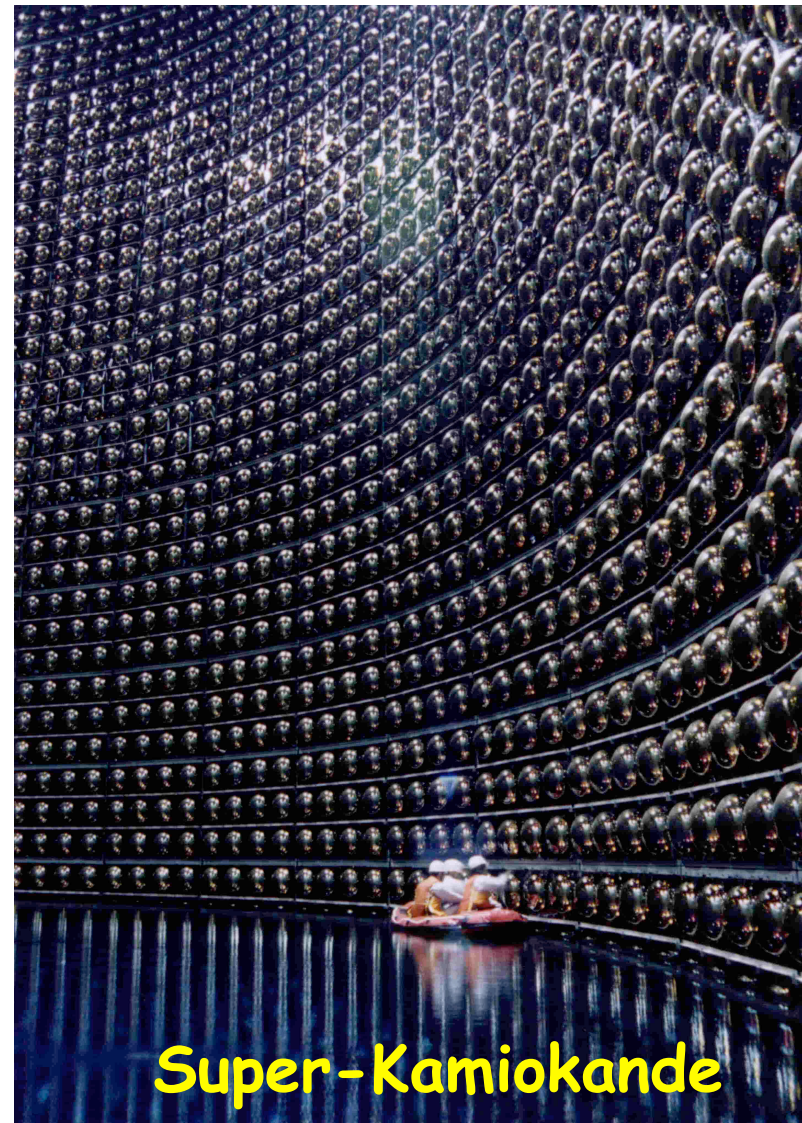


→ sensibilité aux  $\nu_{pp}$

(1991-1997)

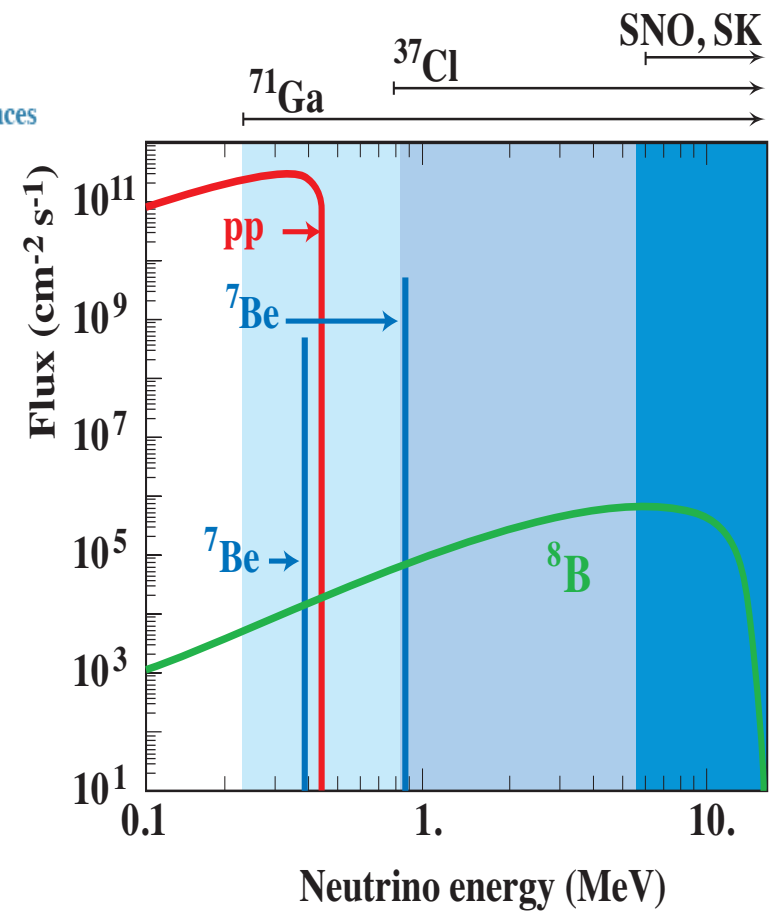
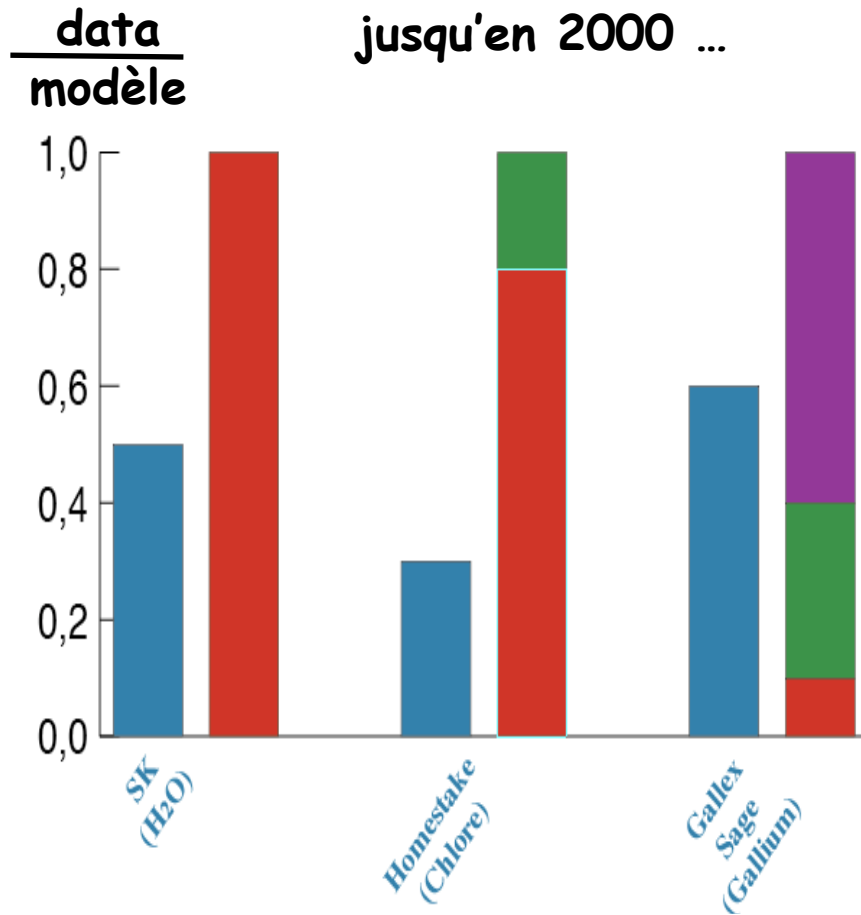
(exp. radiochimique)

➔ Il manque 40% des  $\nu$



Super-Kamiokande

# Neutrinos solaires





# Neutrinos solaires: une piste

- 3 familles de neutrinos** ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )
- LEP (largeur du boson Z)
  - Big Bang Nucleosynthesis

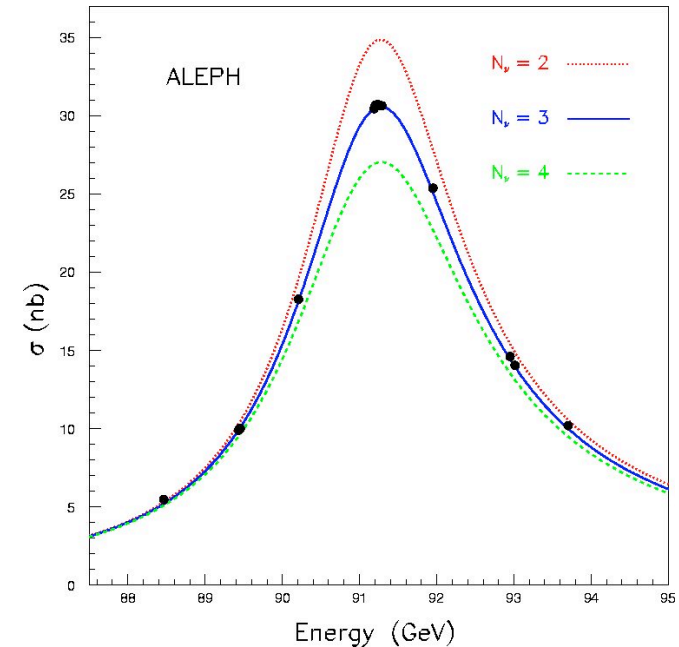
Etats propres (masse)  $\neq$  états propres (saveur)



propagation



détection



$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k V_{\alpha k} |\nu_k\rangle$$

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$

cas simplifié à 2 familles  
 $m_1 \neq m_2$



# Neutrinos solaires: une piste

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \end{aligned}$$

- $|\nu_i(t)\rangle = |\nu_i(t=0)\rangle e^{i(px-Et)}$  **propagation état propre**

- $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + m_i^2 / 2E_i \approx p + m_i^2 / 2E$  **pour  $\nu$  relativiste ( $m \ll E$ )**

- $|\nu(t)\rangle = e^{i(px-Et)} \left( \cos\theta |\nu_1\rangle e^{-im_1^2 t / 2E} + \sin\theta |\nu_2\rangle e^{-im_2^2 t / 2E} \right)$

$$|\nu(t)\rangle = e^{i(px-Et-(m_1^2+m_2^2)t/4E)} \left( \cos\theta |\nu_1\rangle e^{i\delta m^2 t / 4E} + \sin\theta |\nu_2\rangle e^{-i\delta m^2 t / 4E} \right)$$

**où**  $\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

- **Probabilité qu'un  $\nu_e$  émis par le Soleil soit encore un  $\nu_e$  au niveau de la Terre**

$$P_{\nu_e}(t) = \left| \langle \nu_e | \nu(t) \rangle \right|^2 = \left| \cos^2\theta e^{i\delta m^2 L / 4E} + \sin^2\theta e^{-i\delta m^2 L / 4E} \right|^2$$

# Neutrinos solaires: une piste

- $P_{\nu_e}(t) = \left| \langle \nu_e | \nu(t) \rangle \right|^2 = \left| \cos^2 \theta e^{i\delta m^2 L / 4E} + \sin^2 \theta e^{-i\delta m^2 L / 4E} \right|^2$

$$P_{\nu_e}(t) = \left| e^{-i\delta m^2 L / 4E} + 2i \cos^2 \theta \sin \frac{\delta m^2 L}{4E} \right|^2$$

$$\begin{aligned} \sin^2 \theta &= 1 - \cos^2 \theta \\ \sin x &= (e^{ix} - e^{-ix}) / (2i) \end{aligned}$$

$$P_{\nu_e}(t) = \left| \cos \frac{\delta m^2 L}{4E} - i \sin \frac{\delta m^2 L}{4E} + 2i \cos^2 \theta \sin \frac{\delta m^2 L}{4E} \right|^2$$

$$P_{\nu_e}(t) = \cos^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} + \sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \cos^2 2\theta$$

$$P_{\nu_e}(t) = 1 - \underbrace{\sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \sin^2 2\theta}_{>0}$$

Pontecorvo 1958 :  
« une piste pour réduire  
le flux des  $\nu$  solaires... »

Note:  $\delta m=0 \rightarrow$  pas d'oscillation

# Neutrinos solaires: une piste

- $P_{\nu_e}(t) = 1 - \sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \sin^2 2\theta$

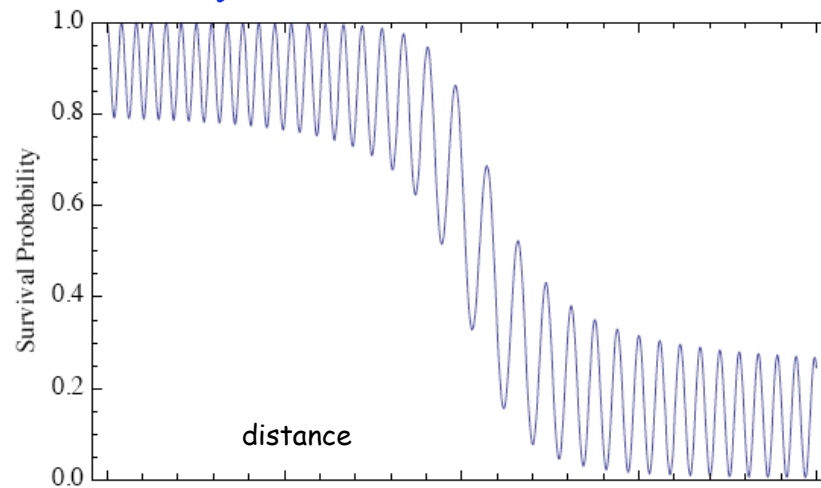
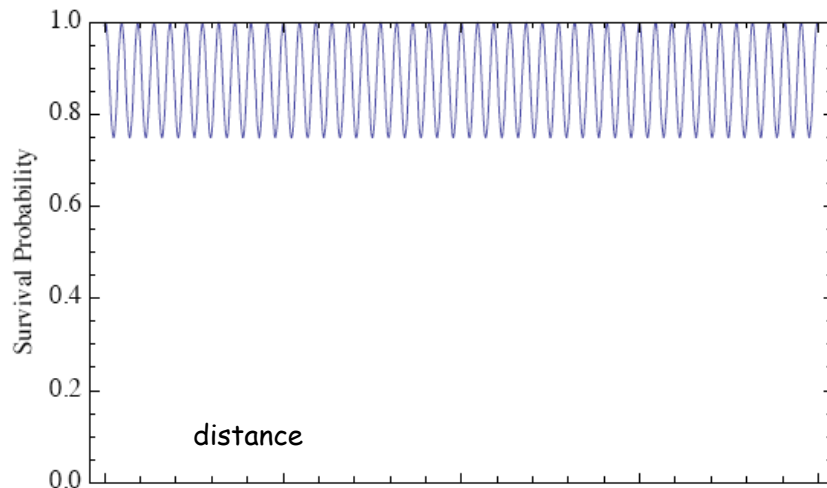
$$\Rightarrow 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$$

en moyenne si

$$L_{\text{Terre-Soleil}} \gg L_{\text{osc}} = 4\pi E / \delta m^2 \quad (= 4\pi \hbar c E / \delta m^2 c^4)$$

- **Forte amplification de la réduction de flux par effet MSW dans le Soleil**

(augmentation de la masse effective des  $\nu_e$  quand  $\rho_e \rightarrow \infty$   
avec pour effet que  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  en sortie du Soleil)



# Neutrinos solaires: une piste

- $P_{\nu_e}(t) = 1 - \sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \sin^2 2\theta$

$$\Rightarrow 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$$

en moyenne si

$$L_{\text{Terre-Soleil}} \gg L_{\text{osc}} = 4\pi E / \delta m^2 \quad (= 4\pi \hbar c E / \delta m^2 c^4)$$

- Forte amplification de la réduction de flux par effet MSW dans le Soleil

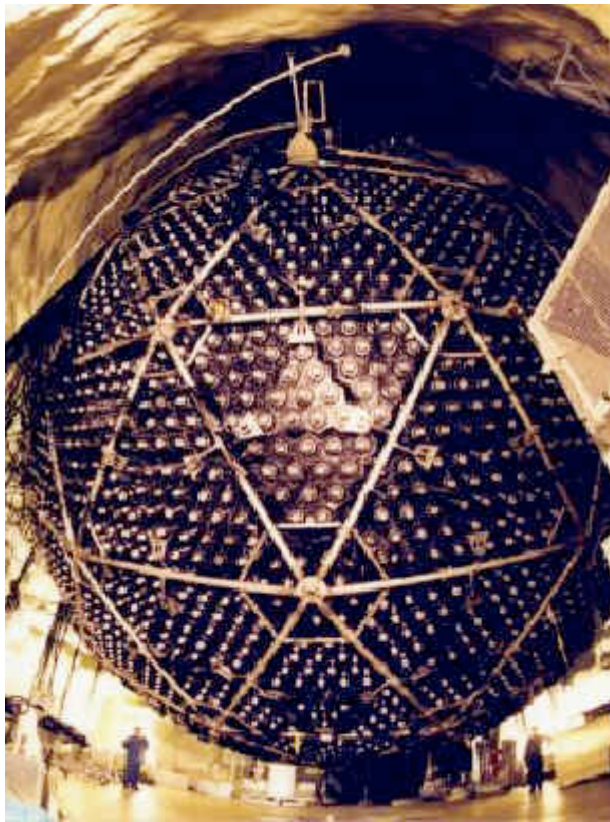
(augmentation de la masse effective des  $\nu_e$  quand  $\rho_e \rightarrow \infty$   
avec pour effet que  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  en sortie du Soleil)



Faut détecter les différentes saveurs de  $\nu$  !

# Neutrinos solaires: énigme résolue

**SNO**: mille tonnes de  $D_2O$   $\longrightarrow$  Sensibilité aux différents saveurs de  $\nu$



2000m sous terre



Diffusion élastique (DE)



Courant chargé (CC)



Courant neutre (CN)

Radiochimique : CC uniquement sur Cl ou Ga,  $\nu_e$

Cerenkov: DE avec sensibilité aux  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$   
(taux  $\nu_e = 6x$  taux  $\nu_\mu$  ou  $\nu_\tau$ )

18 juin 2001:

Flux total (CN) en accord avec modèles solaires

Mais 2/3 des  $\nu_e$  du Soleil  $\rightarrow \nu_\mu$  ou  $\nu_\tau$  lorsqu'ils atteignent la Terre

Nobel 2002 (Davis, Koshiba)



# Neutrinos solaires: énigme résolue



Oscillation neutrinos solaires

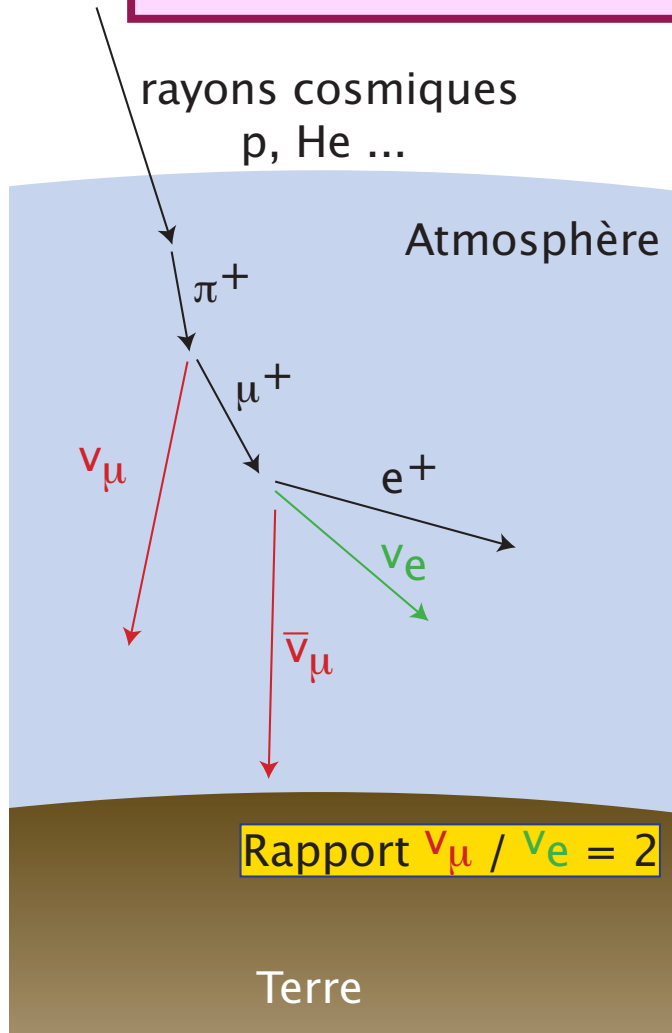
$$\delta m_{12}^2 \sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \sim 34^\circ$$

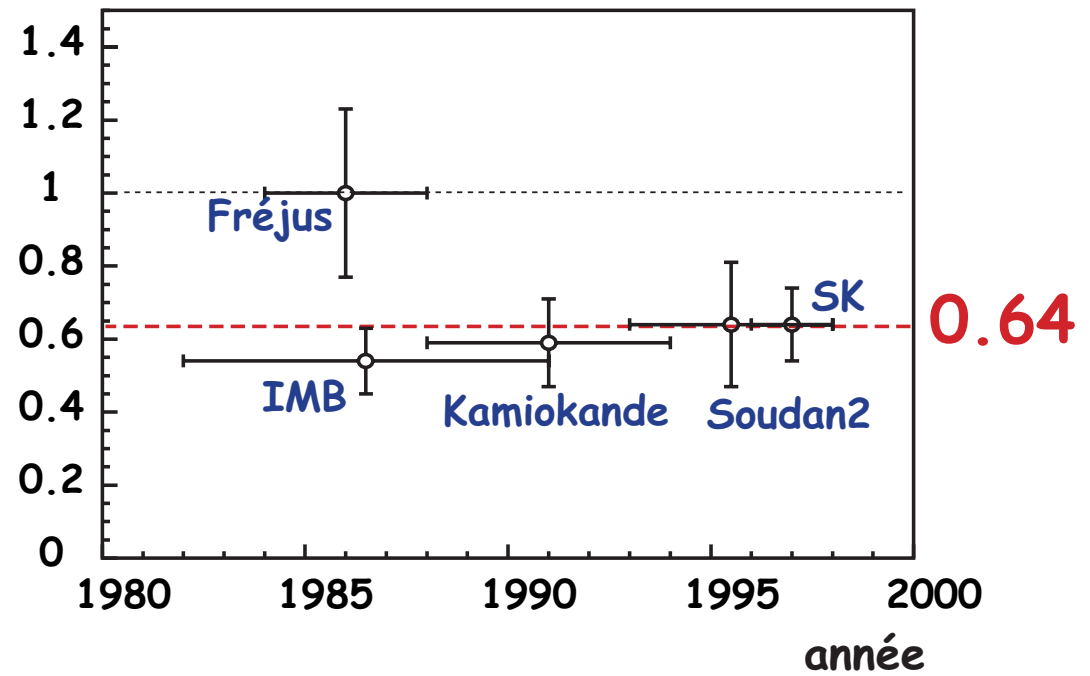


# Autres oscillations

# Neutrinos atmosphériques

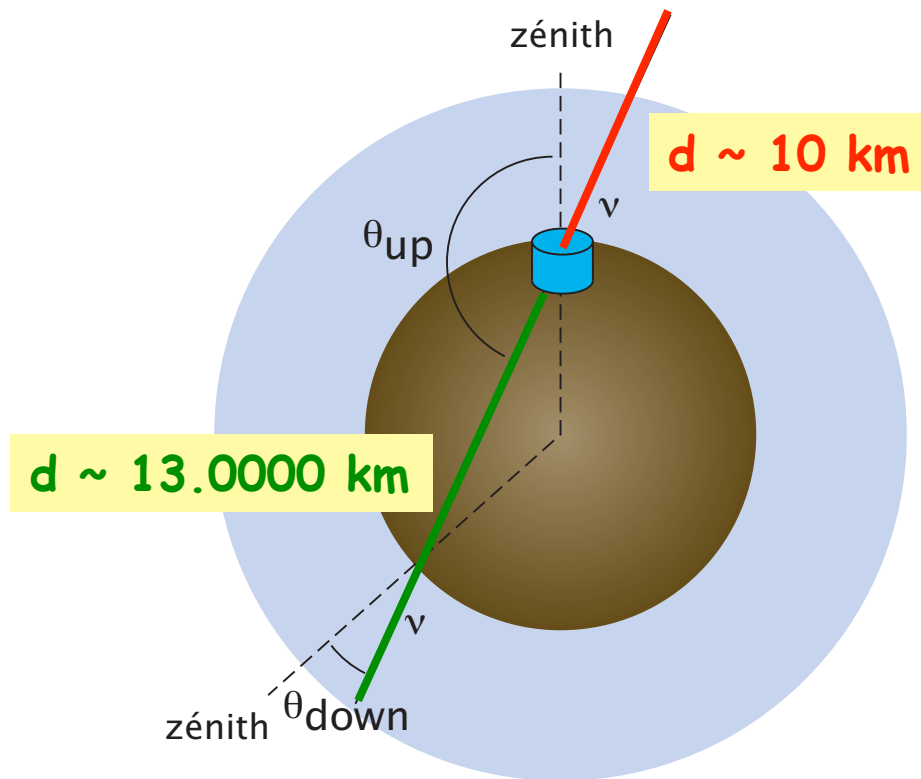


$\frac{(\mu / e) \text{ data}}{(\mu / e) \text{ MC}}$



# Neutrinos atmosphériques

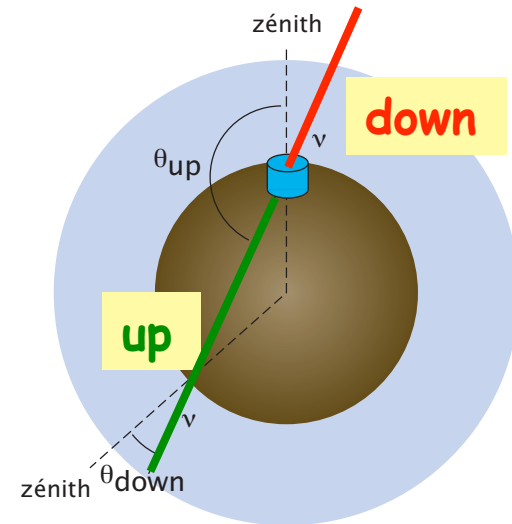
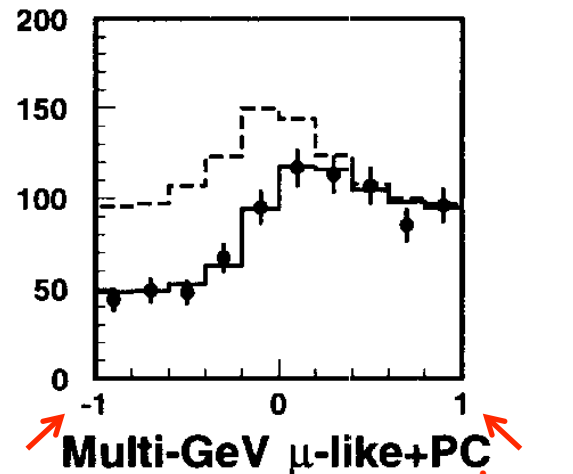
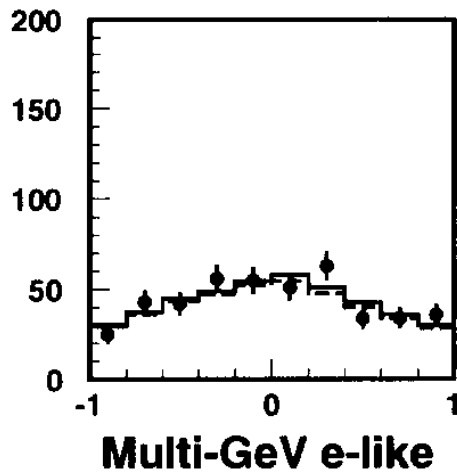
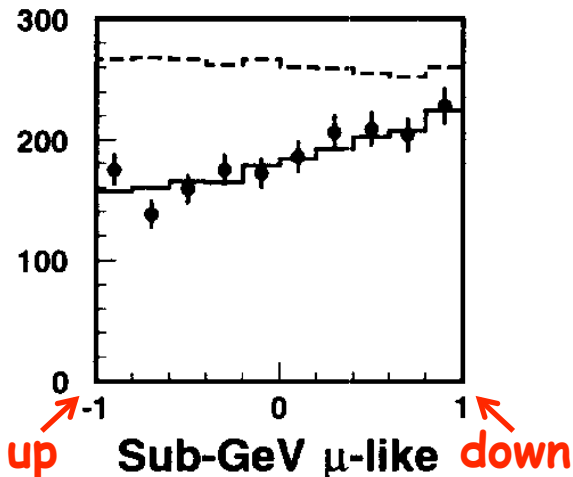
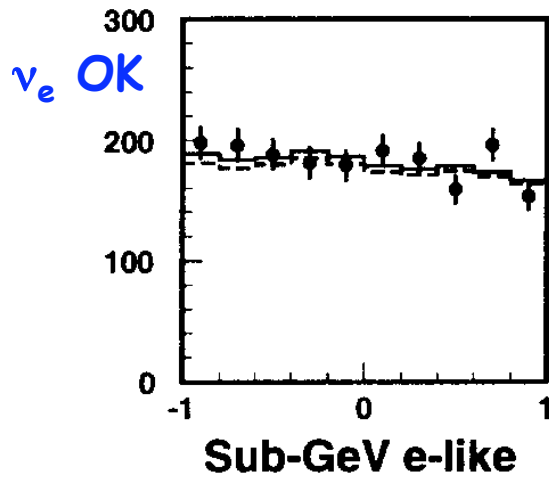
Dépendance angulaire  
au niveau du détecteur



Détection possible d'oscillations  
si  $L_{osc}$  ( $= 4\pi\hbar c E / \delta m^2 c^4$ )  
du même ordre de grandeur que  
diamètre  $\Phi$  de la Terre

Note: pour  $E \sim 1\text{GeV}$  et  
 $\delta m^2_{12} \sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2$ ,  
 $L_{osc} \gg \Phi_{terre}$   
donc condition non remplie  
pour cas « solaire »

# Neutrinos atmosphériques



Déficit de  $\nu_\mu$   
ayant traversé la Terre

oscillation  
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



# Oscillations des neutrinos

## Oscillation neutrinos solaires

$$\delta m_{12}^2 \sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \sim 34^\circ$$

## Oscillation neutrinos atmosphériques

$$\delta m_{23}^2 \sim 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} \sim 45^\circ$$

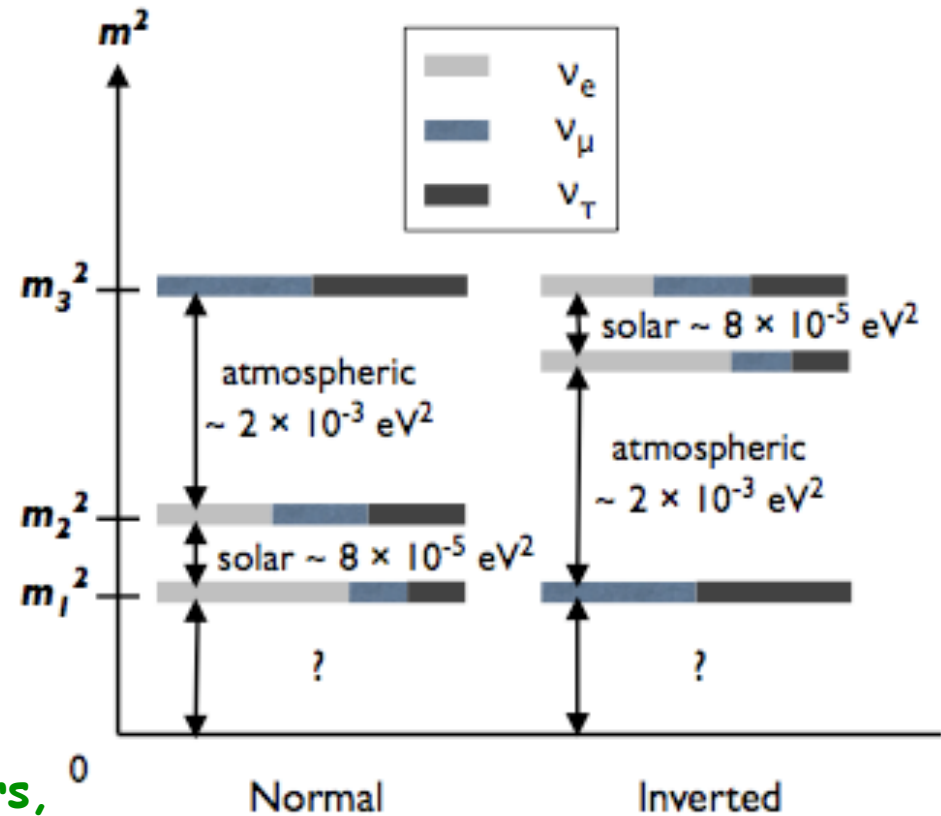
# Bilan oscillations des $\nu$

- $m_\nu$  non nulle (oscillations)
- Contraintes sur  $\delta m^2$  et non sur  $m$

$\nu$  atmosphériques  $\Rightarrow$   
 $>1 \nu$  a  $m > 0.05 \text{ eV}$  ( $\sqrt{\delta m^2_{23}}$ )

Limites en laboratoire  
 (désintégration  $\beta$  du Tritium):  
 $m(\nu_e) < \sim 2 \text{ eV}$

- Or  $n_\nu \sim n_\gamma \sim 3 \cdot 10^9 n_p$  dans l'Univers,  
 donc pour  $m_\nu \sim 0.1 \text{ eV} = 10^{-10} m_p$   
 la masse totale des  $\nu$  ( $n_\nu m_\nu$ ) serait de  
 l'ordre de la masse totale des étoiles !



# Physique des neutrinos

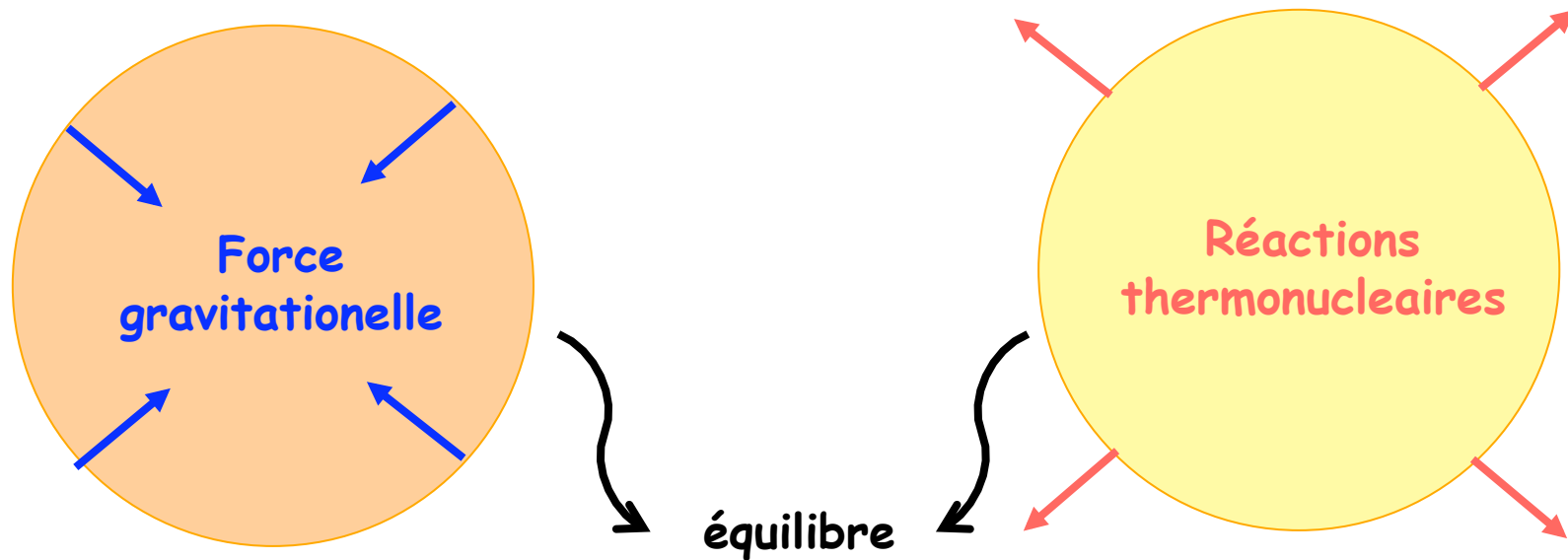
- **Mesure masses**
- **Mesure  $\theta_{13}$**
- **Violation de CP?**  
comparaison  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  et  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$

**Certaines réponses dans exp. terrestres,  
mais astro neutrino apporte environnement unique  
pour sonder les propriétés fondamentales des neutrinos.**

The background is a dark blue space scene. A galaxy with purple and pinkish-red hues is visible, curving across the middle. Several bright stars are scattered throughout, with one prominent star in the lower-left quadrant showing a four-pointed diffraction pattern.

**Neutrinos  
et supernovae**

# Evolution stellaire



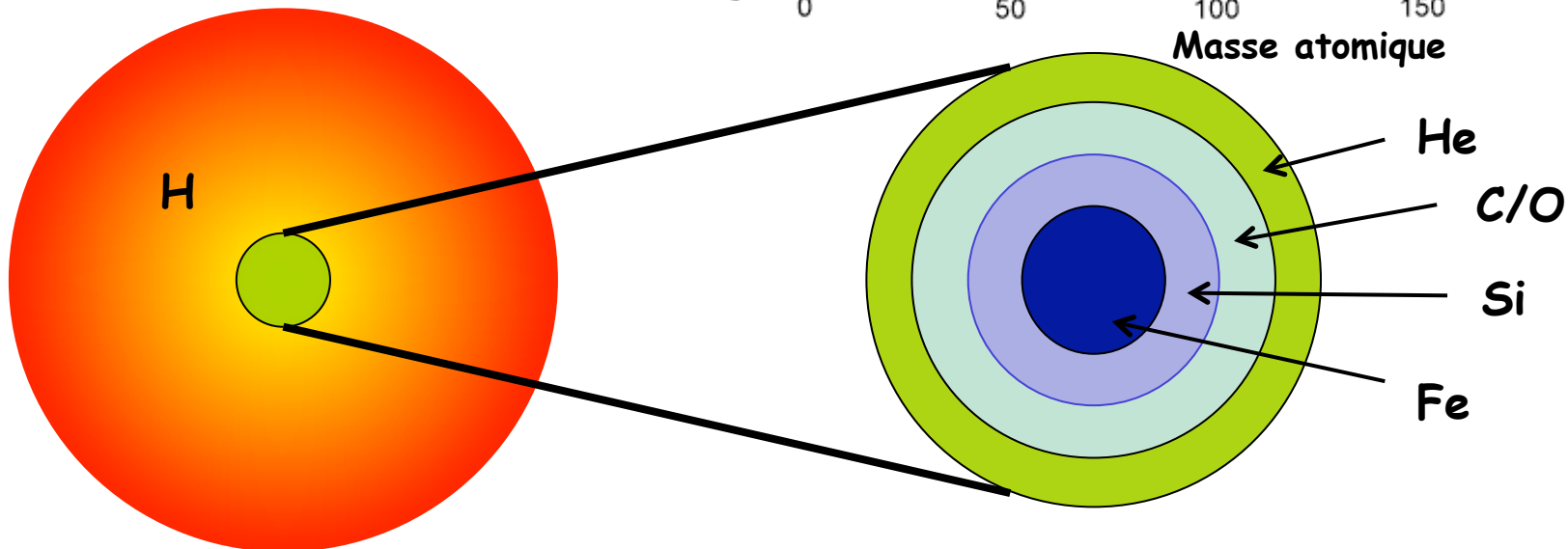
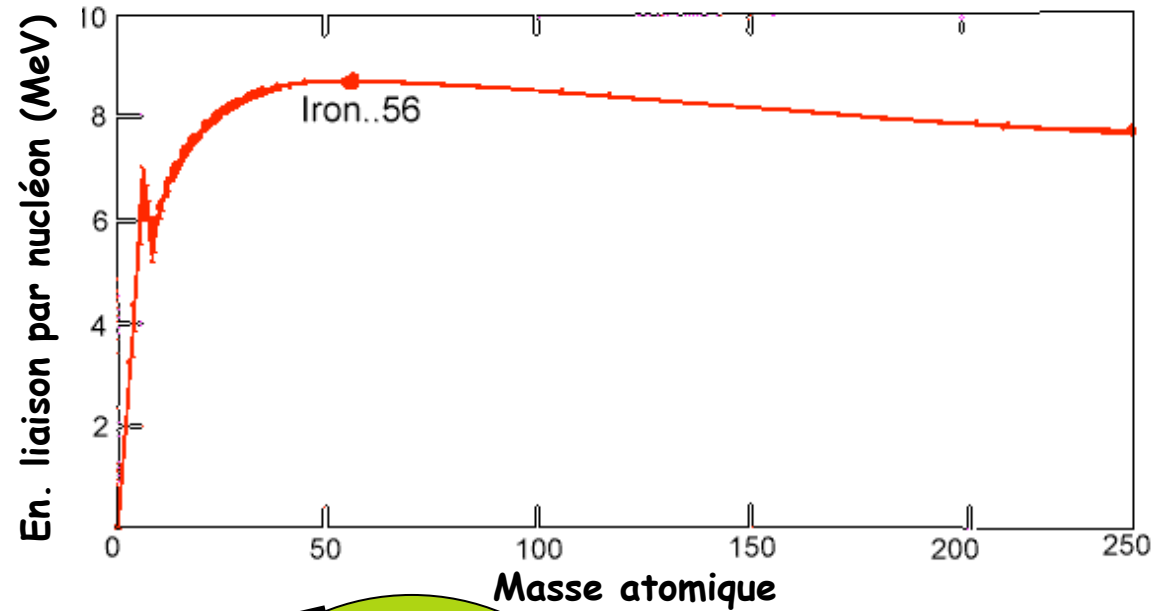
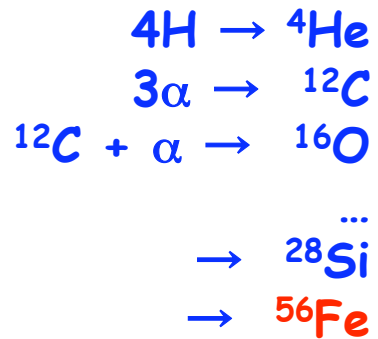
Disparition du carburant

- compression du cœur
- T augmente
- Déclenchement réaction suivante (si masse suffisante pour atteindre la température nécessaire)



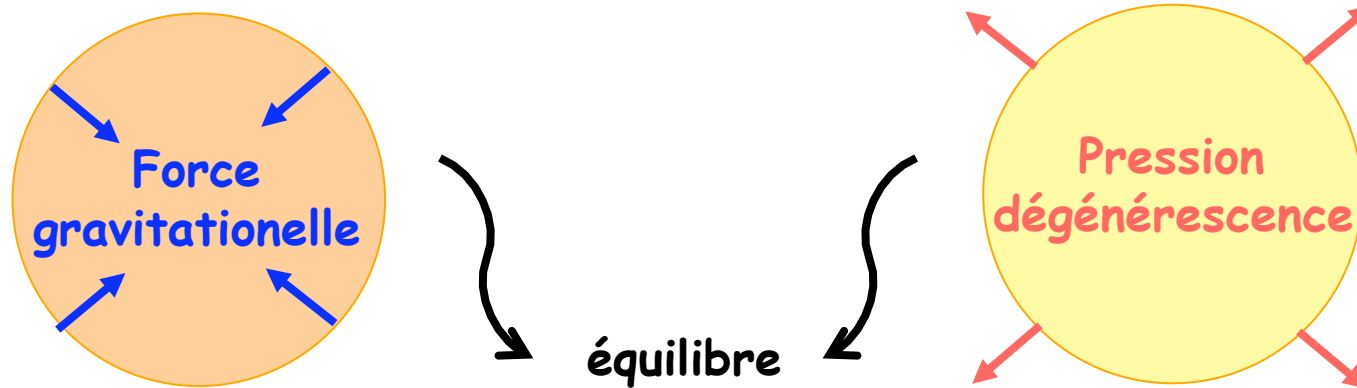
# Evolution stellaire

Etoiles de masse initiale  
> 8 masses solaires

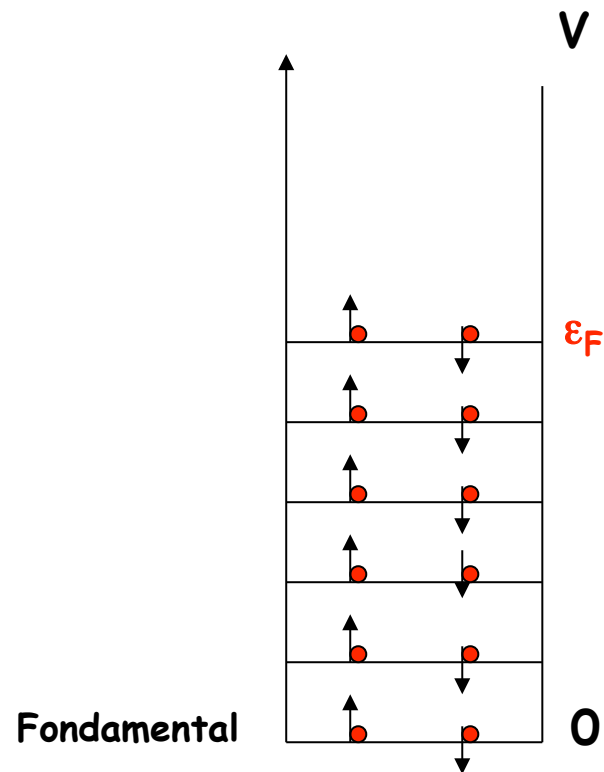


# Evolution stellaire

En l'absence de réaction nucléaire, pression de dégénérescence quantique



# Evolution stellaire



Principe d'exclusion de Pauli:

deux fermions ne peuvent pas se trouver dans le même état

« énergie incompressible »

$$\epsilon_F \sim n^{2/3} / m$$

donc d'abord

pression de dégénérescence  
due aux électrons

puis pression de dégénérescence  
due aux neutrons

# Evolution stellaire

Combustion de Si → augmentation masse du cœur de Fe  
(pression de dégénérescence des  $e^-$ )  
→ augmentation densité

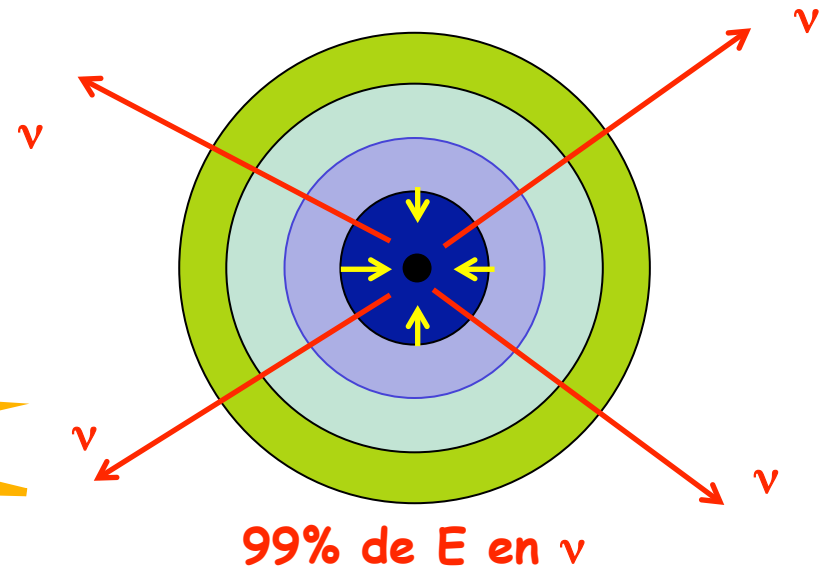
Capture électronique:  $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Diminution de pression de dégénérescence ( $\epsilon_F$ ) des  $e^-$

Effondrement du cœur de l'étoile

Arrêt brutal ( $\epsilon_F$  des neutrons)  
Onde de choc et émission de  $\nu$

**Supernova**



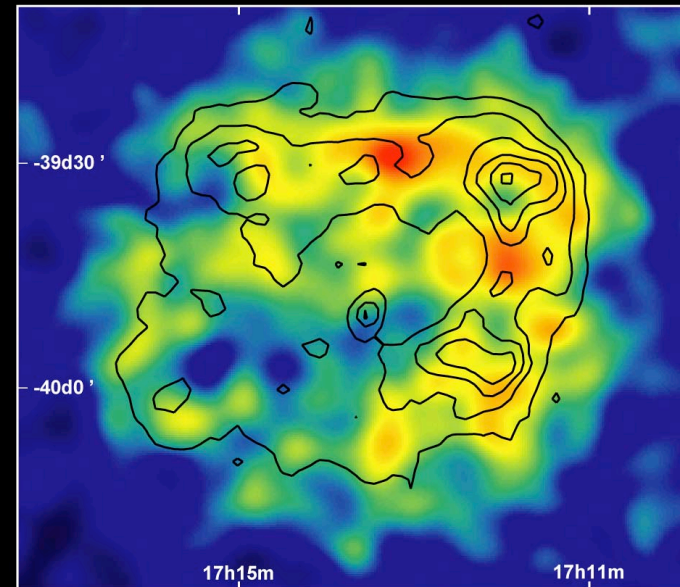




galaxie  
lointaine



reste de  
SN  
(HESS)



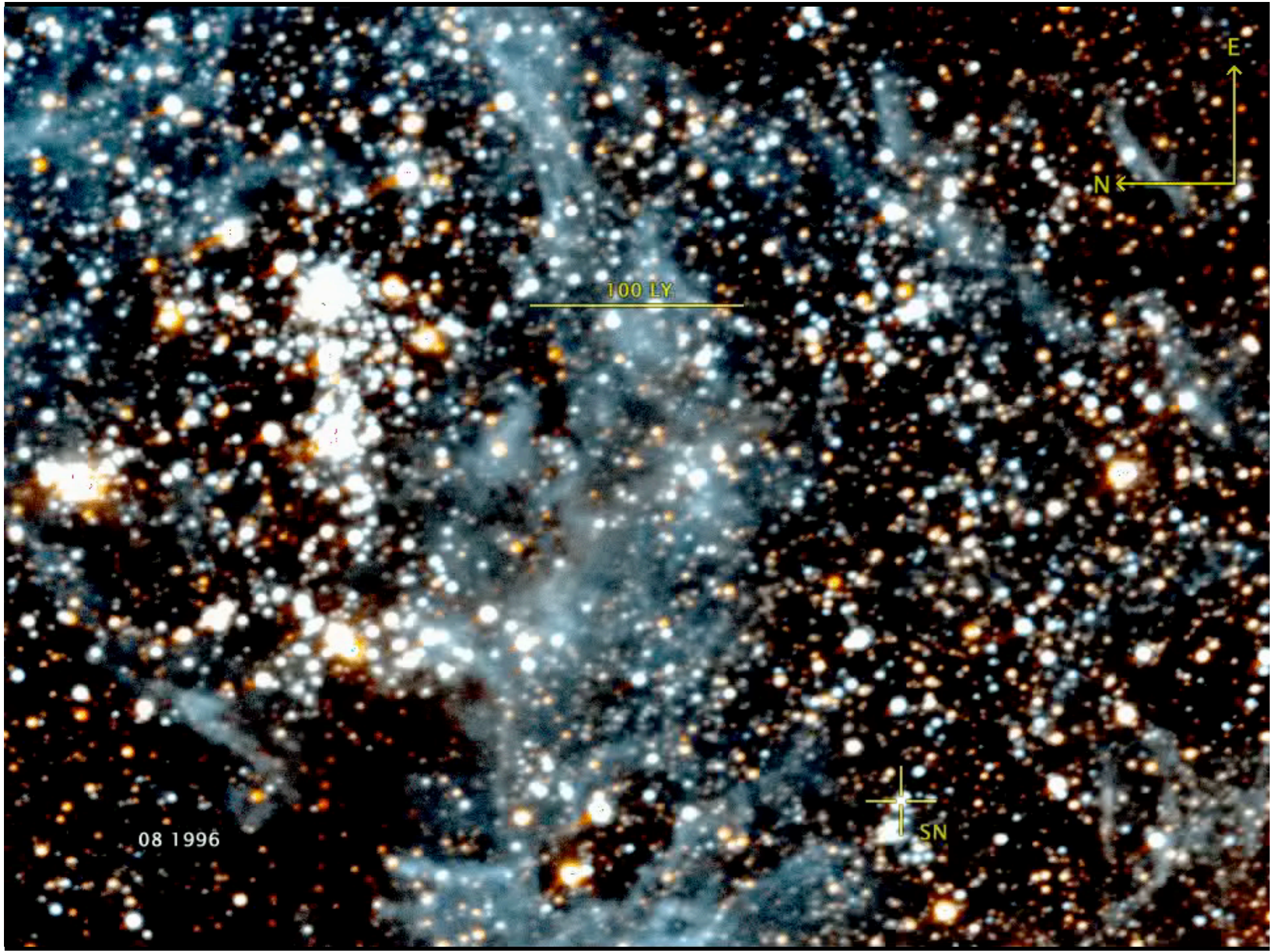
© Anglo-Australian Observatory



SN 1987A

© Anglo-Australian Observatory





100 LY

N

E

SN

08 1996

# 1987A

23 février 1987: ~20 neutrinos en provenance de SN1987A en  $\Delta t=10s$   
dans les détecteurs Kamiokande et IMB

Or  $E = \gamma mc^2$  où  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$

donc vitesse  $V$  des  $\nu$  d'énergie  $E$  :  $V = c\sqrt{1 - (mc^2/E)^2}$

et durée  $t$  du trajet :  $t = \frac{d}{V} \approx \frac{d}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} (mc^2/E)^2 \right)$

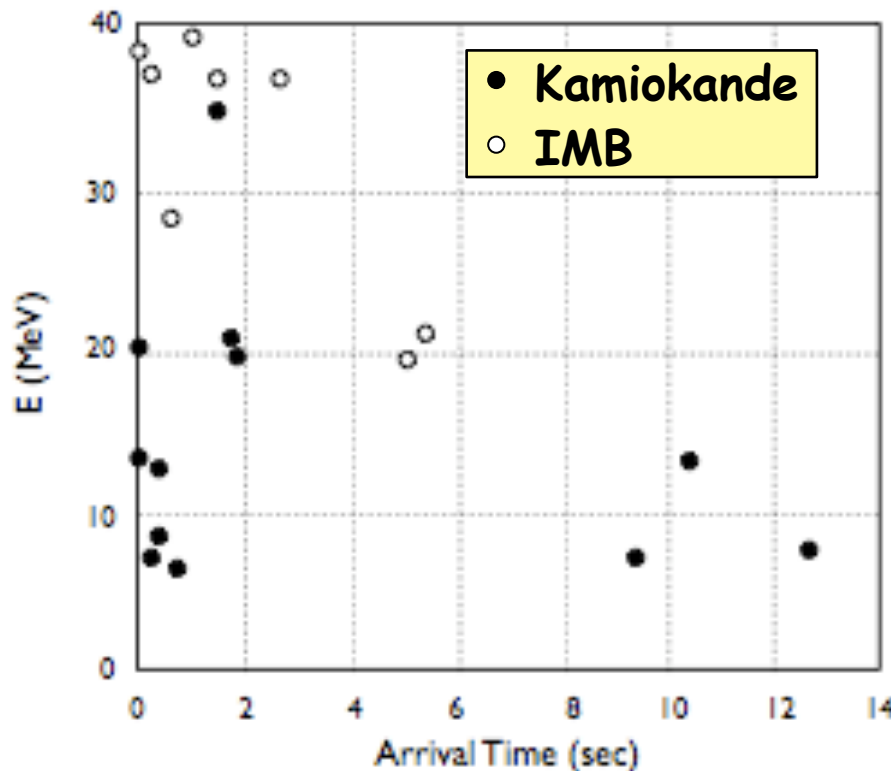
Donc contrainte sur  $m_\nu$  à partir de  $\Delta T/\Delta E$  :

$$\frac{dt}{dE} = \frac{d}{c} \left( \frac{mc^2}{E} \right) \left( \frac{-mc^2}{E^2} \right) = -\frac{1}{E} \frac{d}{c} \left( \frac{mc^2}{E} \right)^2$$

# 1987A

23 février 1987: ~20 neutrinos en provenance de SN1987A en  $\Delta t=10s$   
dans les détecteurs Kamiokande et IMB

Donc contrainte sur  $m_\nu$  à partir de  $\Delta T/\Delta E$  : 
$$\Delta t = -\frac{\Delta E}{E} \frac{d}{c} \left( \frac{mc^2}{E} \right)^2$$



$d = 160.000 \text{ a.l.} \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ m}$   
 $E \sim 20 \text{ MeV} \sim \Delta E$   
 $\Delta t < 12s$

→  $m(\nu_e) < 13 \text{ eV}$  (compétitif en 87)

$d$  galactic → contraintes  $\sim \text{eV}$   
sur  $m(\nu_e, \nu_\mu \text{ et } \nu_\tau)$  !



The background of the image is a deep space scene filled with numerous stars of various colors (blue, white, red) and several prominent galaxies. A large, bright purple and pink nebula is visible in the upper left, and a blue and white jet of light emanates from a central galaxy. The overall scene is dark and rich with celestial detail.

**Astronomie  
neutrino**



# Astronomie neutrinos

Début XXI<sup>e</sup> siècle:

neutrinos solaires

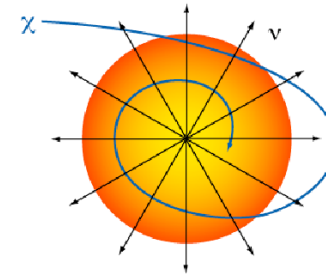
neutrinos atmosphériques

~20 neutrinos de SN1987A

# Astronomie neutrinos

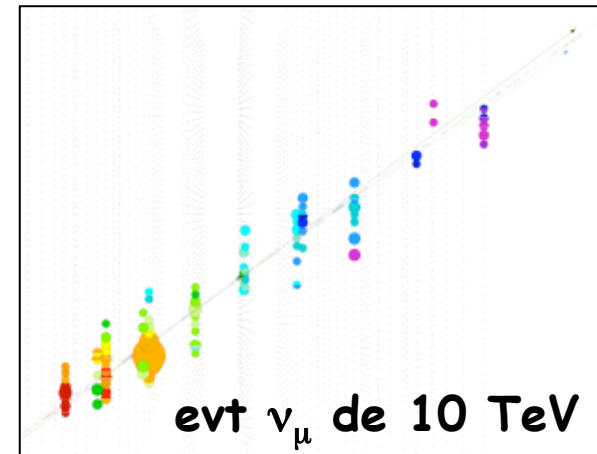
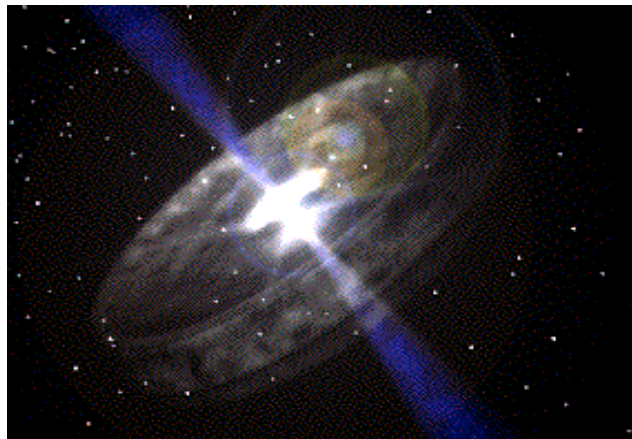
**Basse énergie (10 GeV - 1 TeV):**

- matière noire de milieux denses (concentration de neutralinos & annihilation)
- $\nu$  de supernovae (+ de stat)



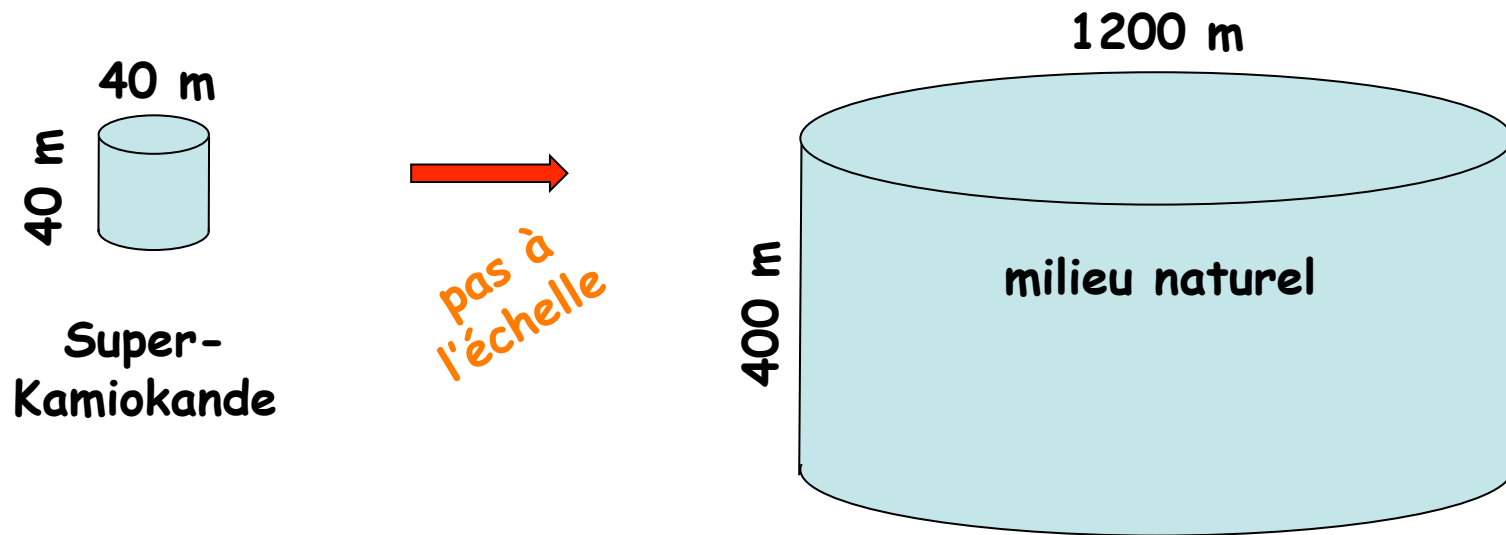
**Haute énergie (> 1 TeV):**

- $\nu$  de sources galactiques ou extragalactiques (cf. rayons gamma)
- $\nu$  aux énergies PeV & EeV !



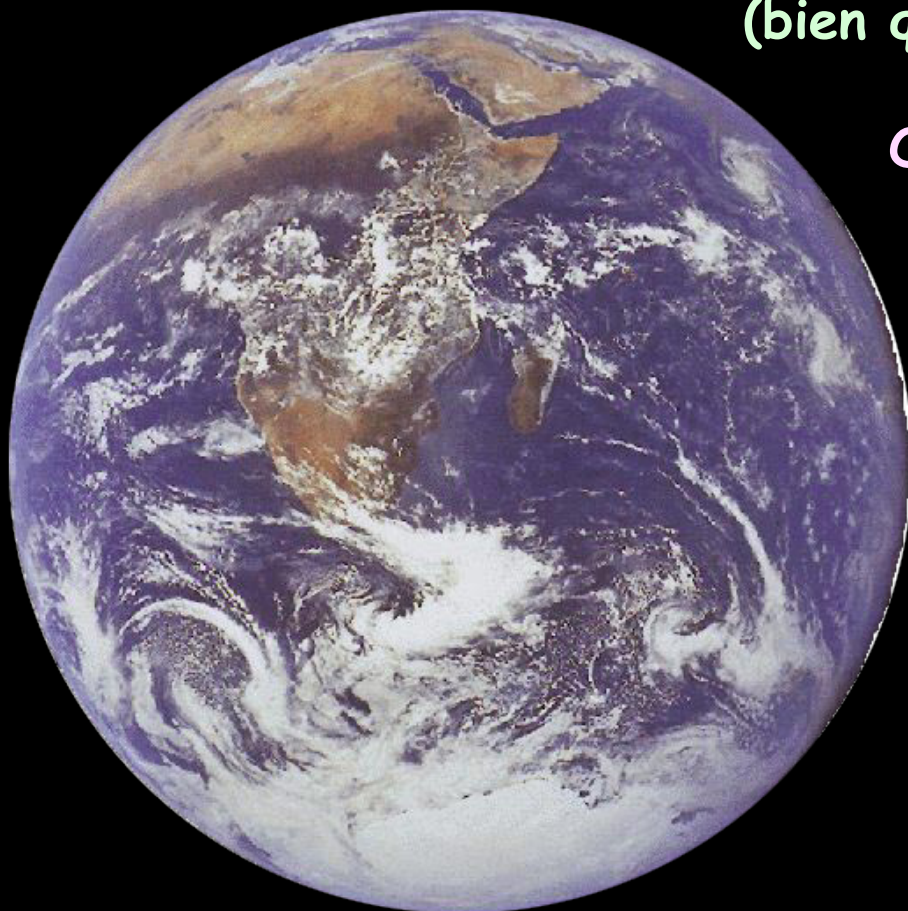
# Astronomie des neutrinos

pour aller plus loin: détecteurs 10.000 fois plus massifs que SK !



# « Telescope » à neutrinos

Très faible section efficace d'interaction des  $\nu$   
(bien que croissante avec l'énergie)

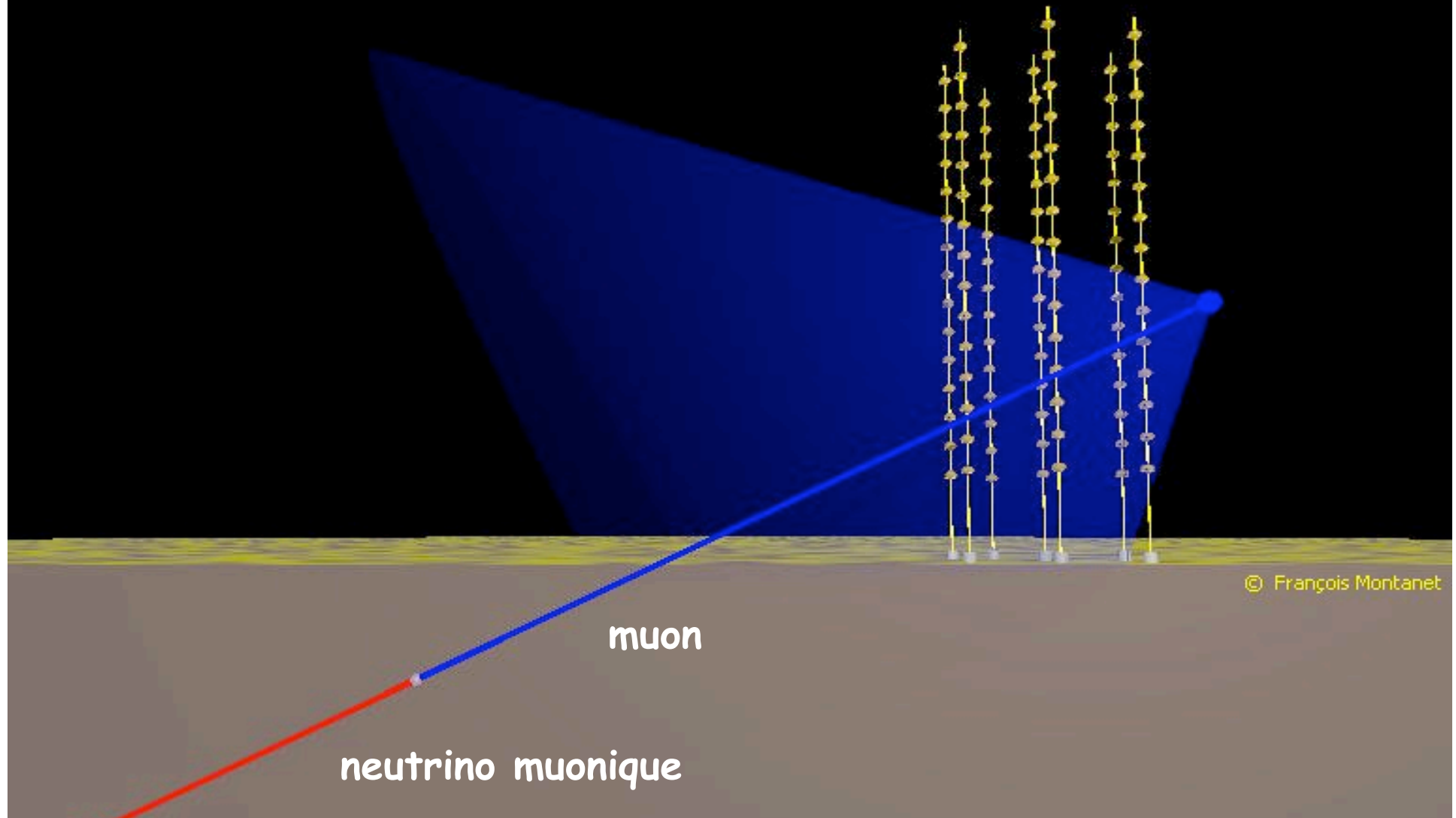


Oscillations donc  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$   
en proportion égale au niveau de  
la Terre

Les  $\mu$  et  $\tau$  produits peuvent  
traverser une grande quantité  
de matière (plusieurs km)

⇒ La Terre comme détecteur

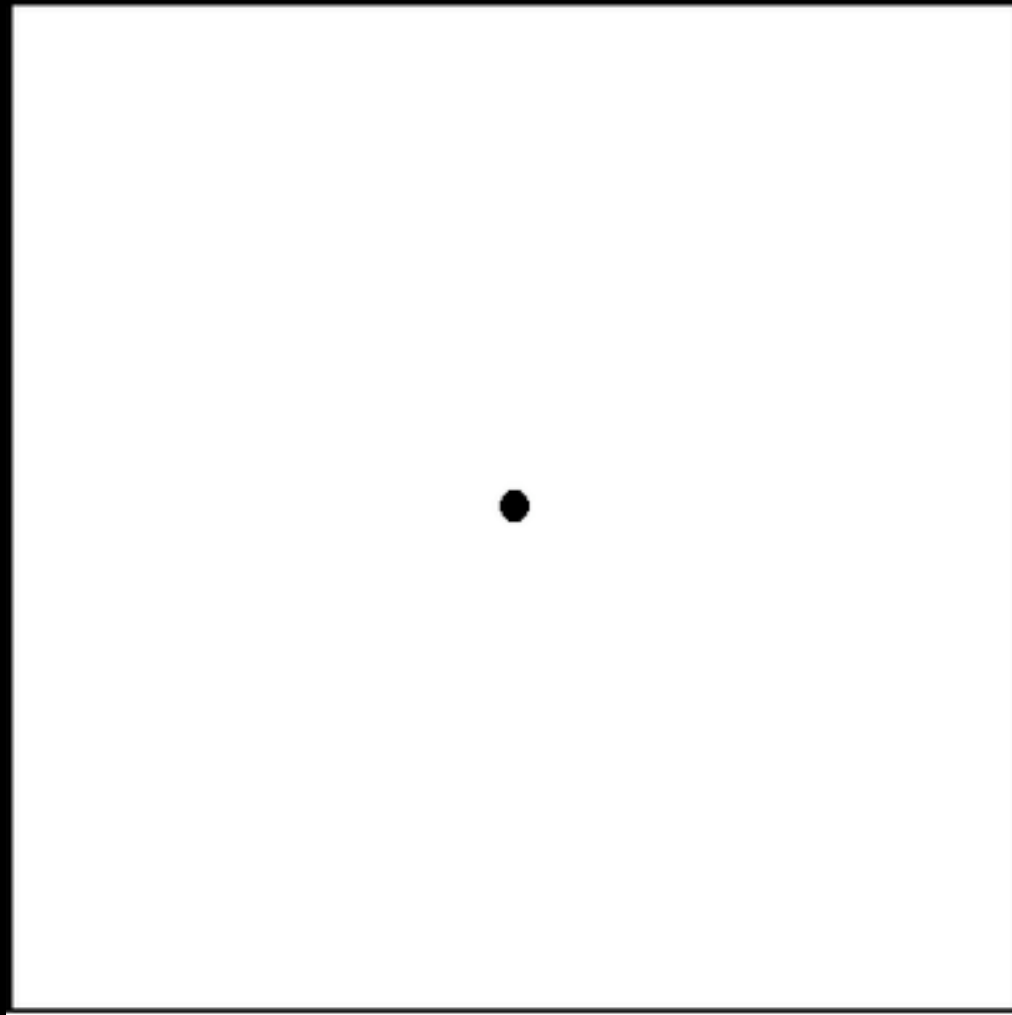
# « Telescope » à neutrinos





# Effet Cerenkov

à l'arrêt



# Effet Cerenkov

progression  
lente

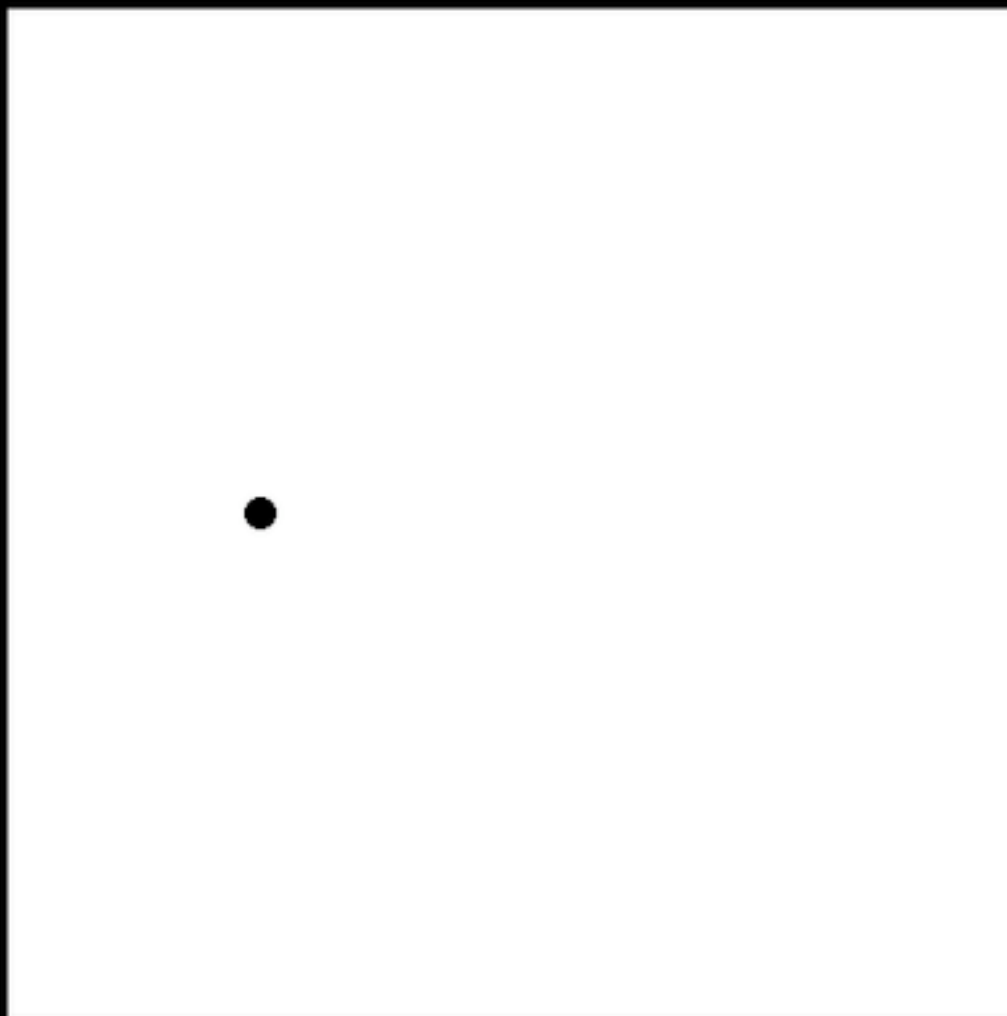
(effet  
Doppler)



# Effet Cerenkov

progression  
rapide

(onde de  
choc)

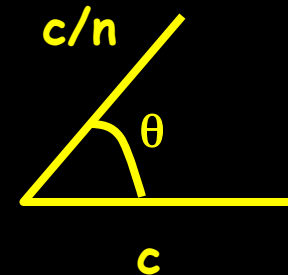


$v$  lumière =  $c/n$

$v$  particule  $\sim c$

$\cos \theta = (c/n)/c$

$\theta = 1^\circ$  air  
 $42^\circ$  eau



# Effet Cerenkov

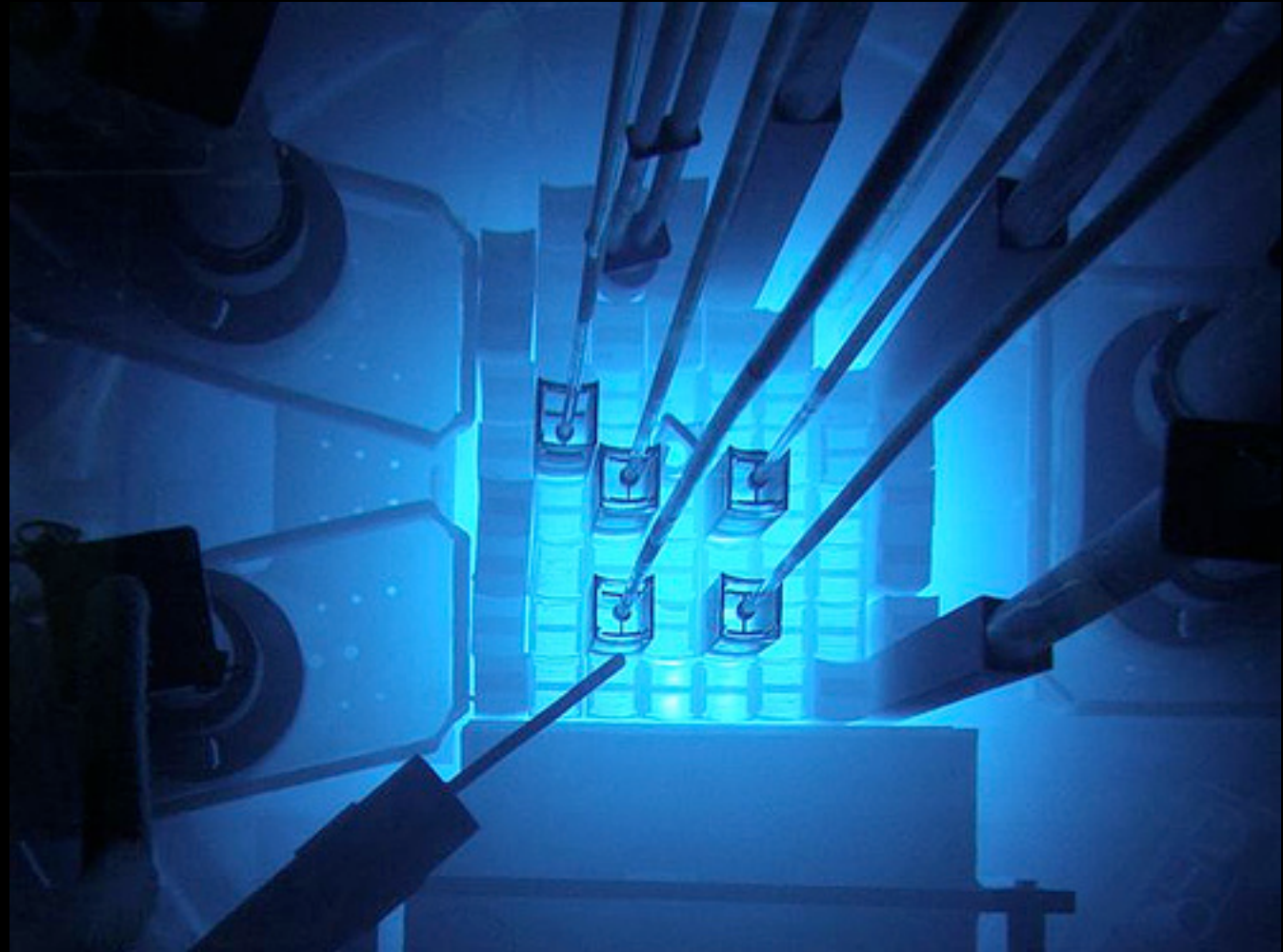
analogie sonore

Mur du son  
Bang supersonique



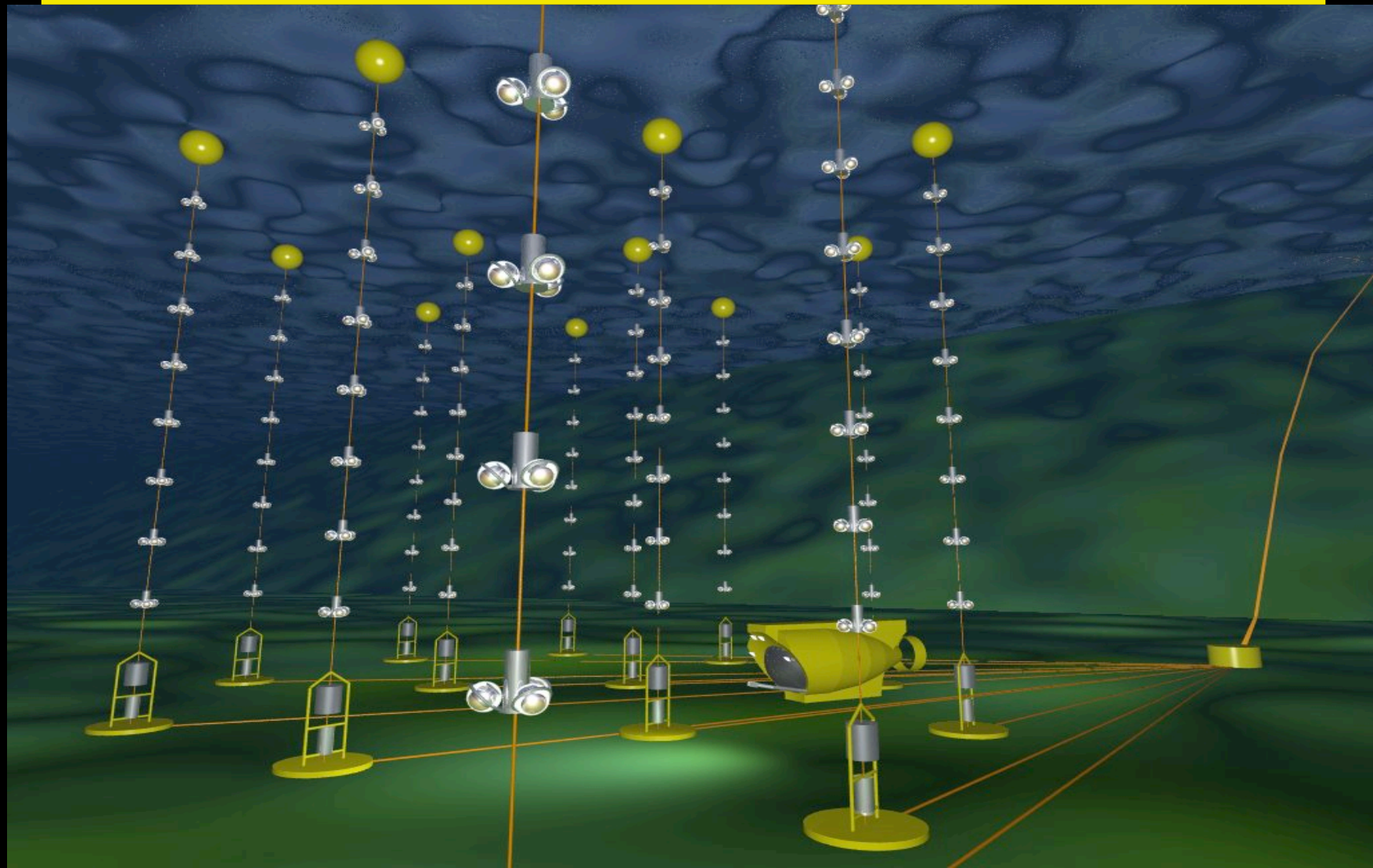
# Effet Cerenkov

Lumière bleue



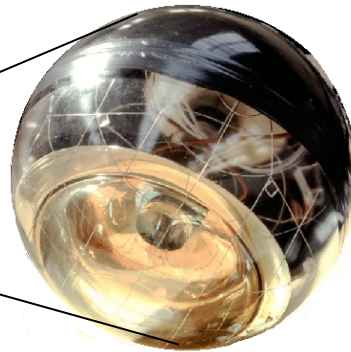
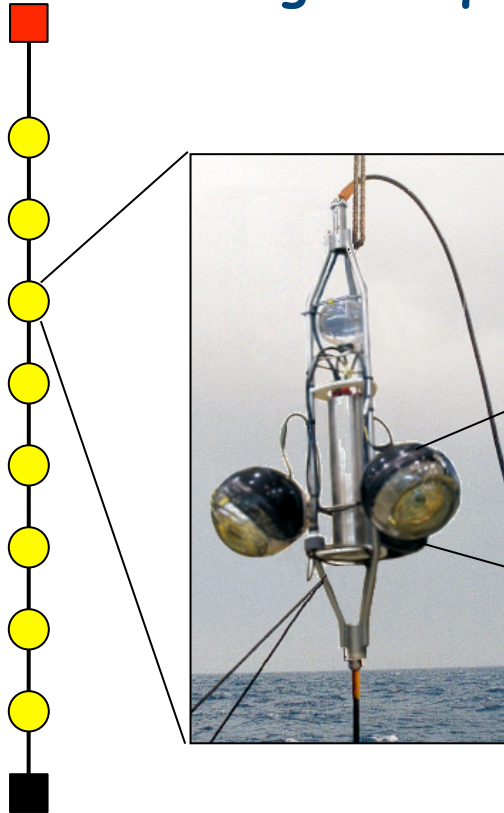


# « Télescope » à neutrinos



# Detecteurs

## Lignes équipées de modules optiques (PMT)



- $d_{OM-OM}$ : Seuil en E
- # de OM: Résolution en E
- $d_{inter\ ligne}$ : Volume effective (E max)





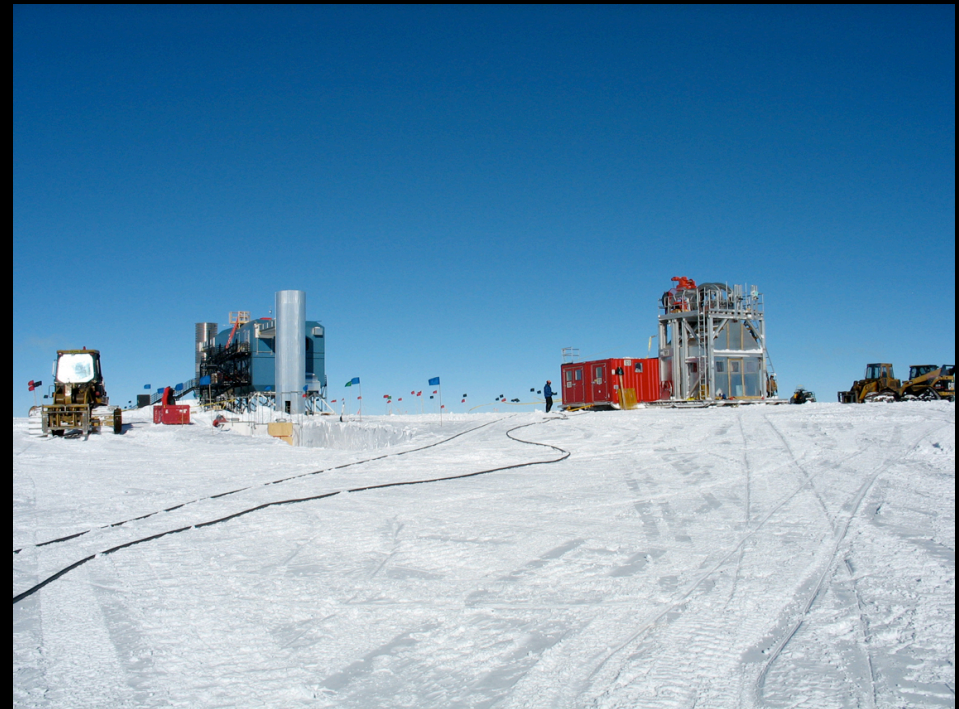


# « Téléscopes » à neutrinos



**Antares**  
0.1 km<sup>2</sup> x 400m  
meilleure résolution angulaire  
(0.2°)

**Ice Cube**  
1 km<sup>2</sup> x 1 km  
meilleure sensibilité  
(moins d'absorption)



New South Pole Station

First IceCube string

IceCube Laboratory

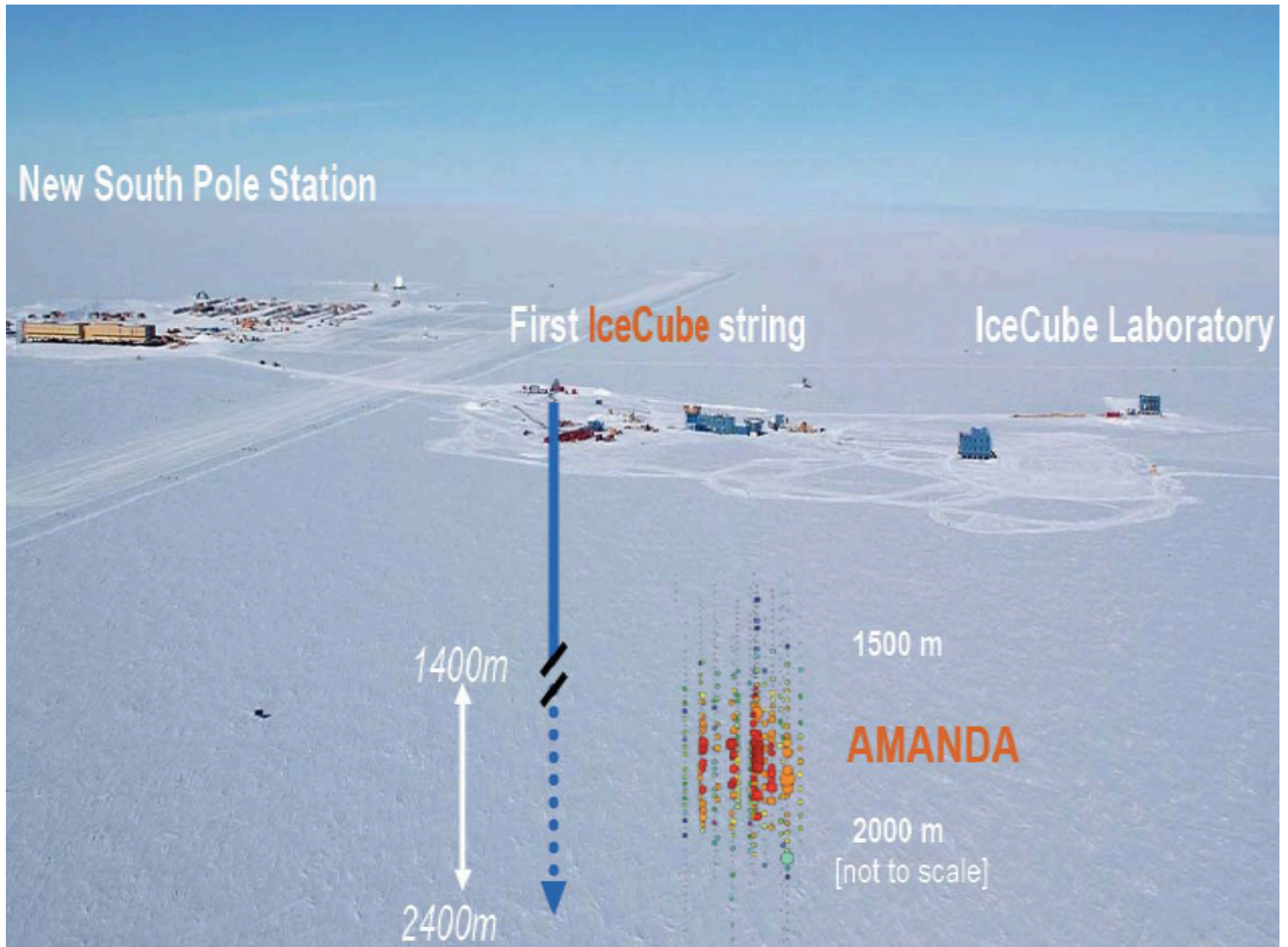
1400m

2400m

1500 m

**AMANDA**

2000 m  
[not to scale]

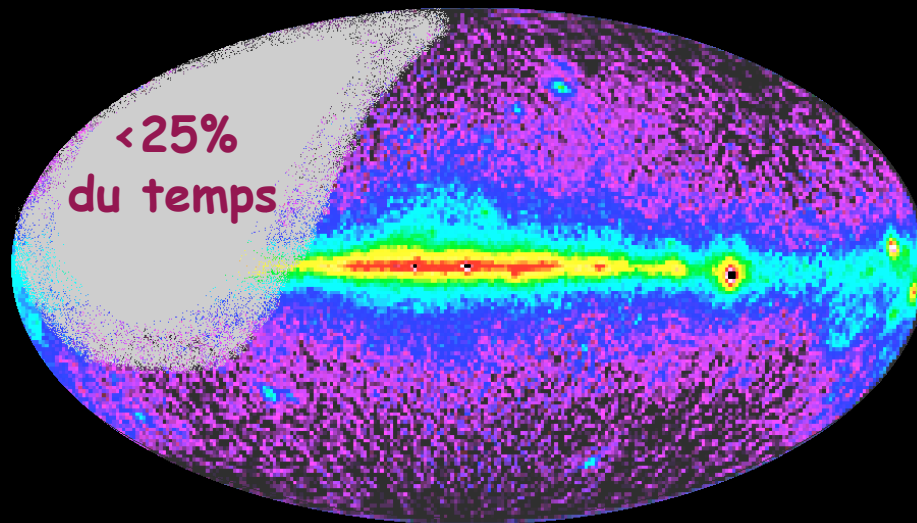




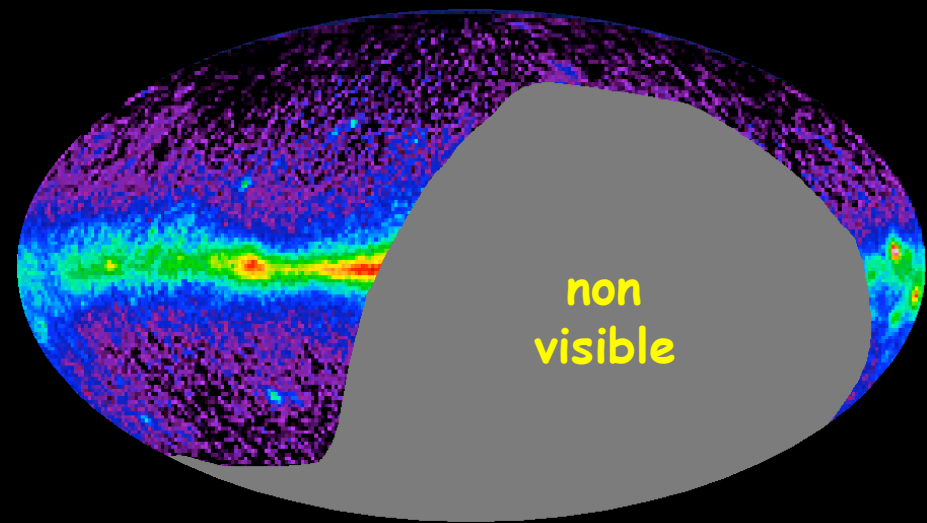


# « Téléscopes » à neutrinos

Antares  
(43° North)

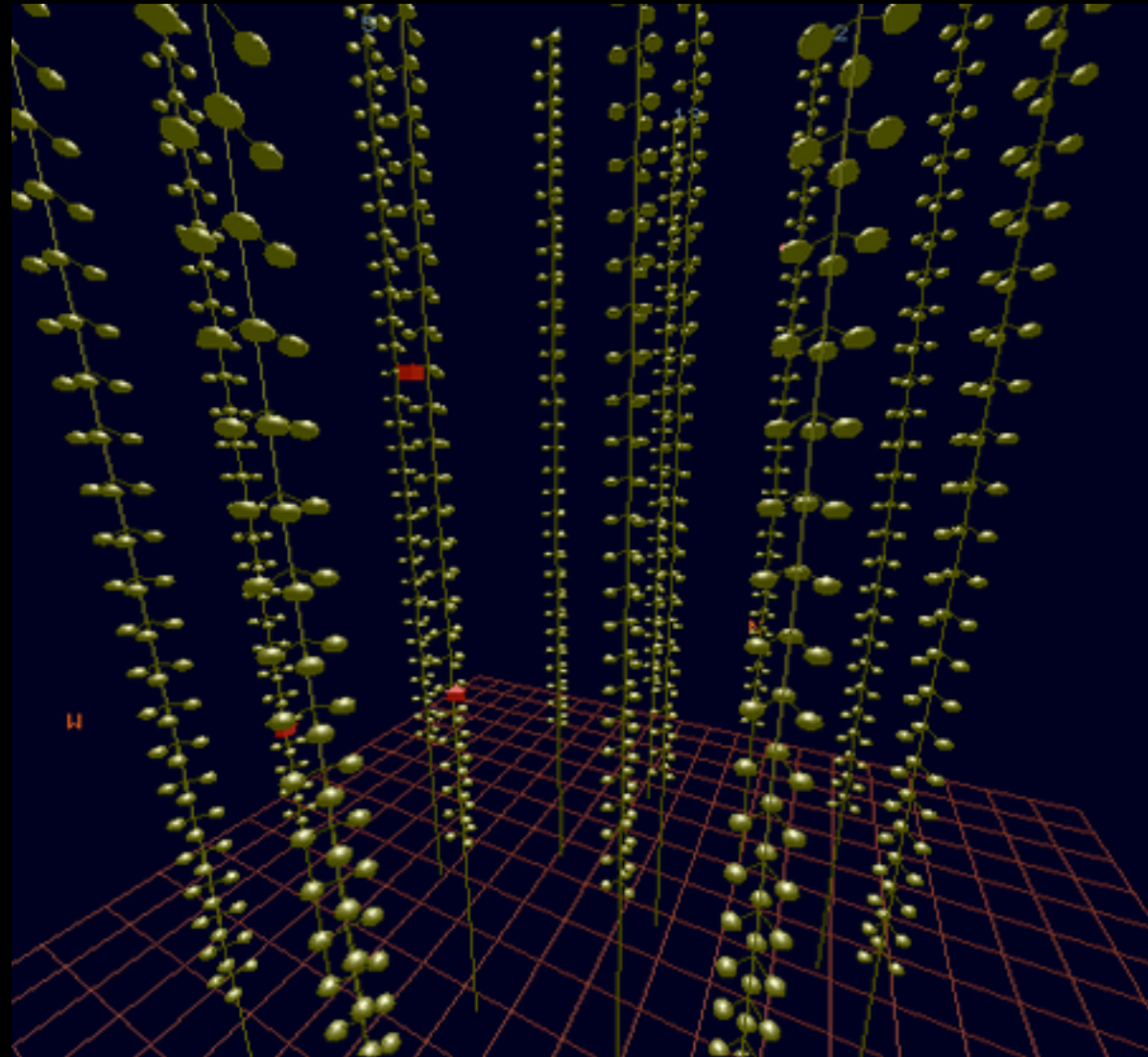


Ice Cube  
(pôle Sud)



Intercalibration possible sur  $0.6\pi$  steradians

# « Téléscopes » à neutrinos



# « Téléscopes » à neutrinos

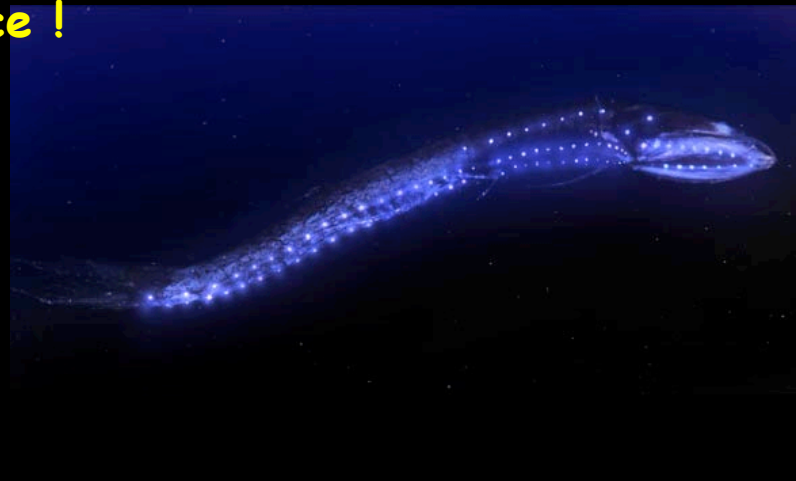
Scintillement du télescope :

radioactivité naturelle



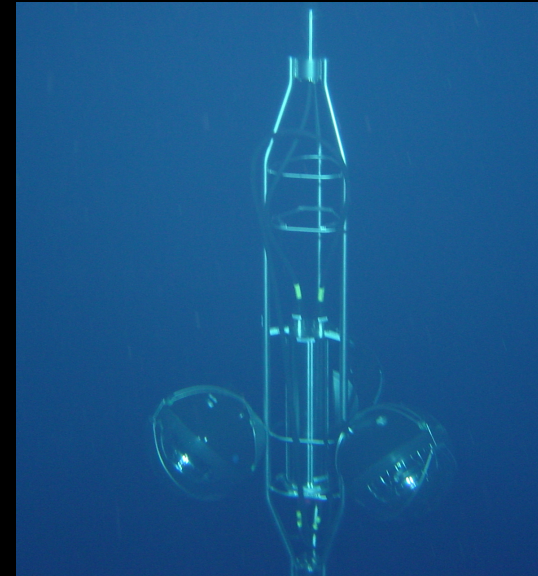
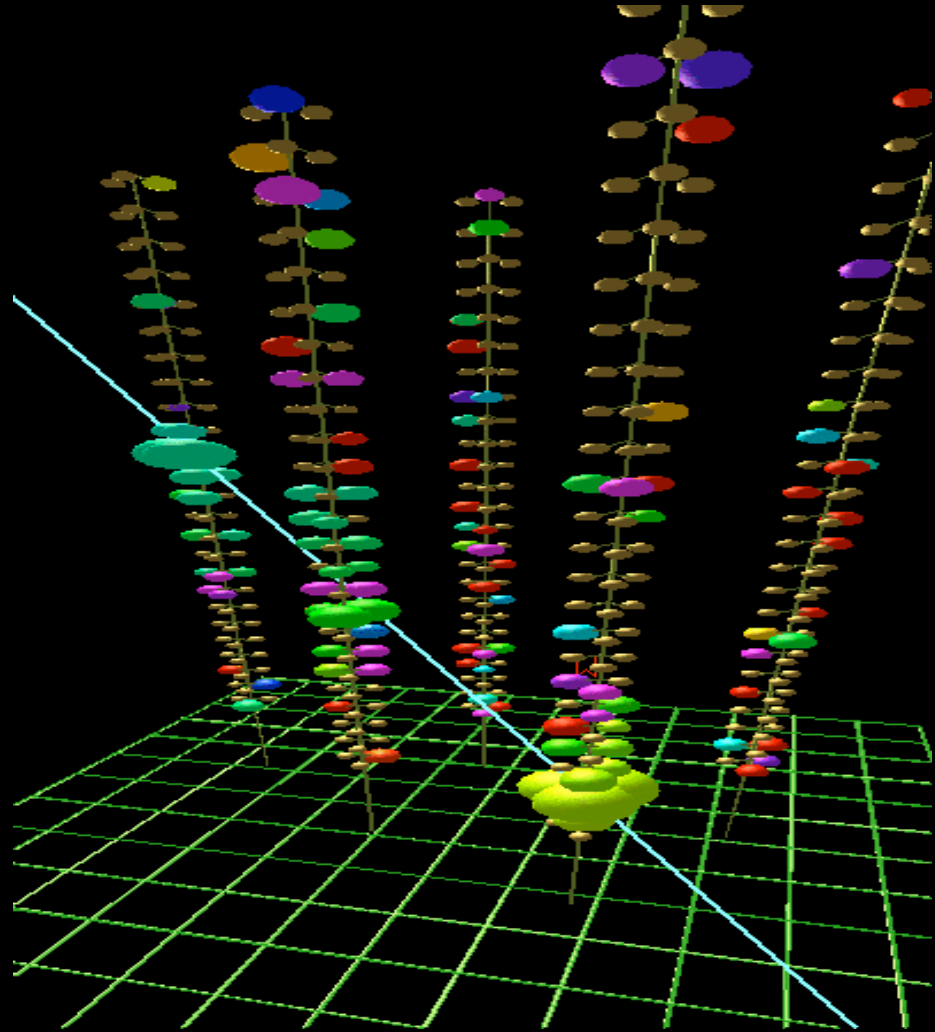
© DeepSeaPhotography.Com

bioluminescence !



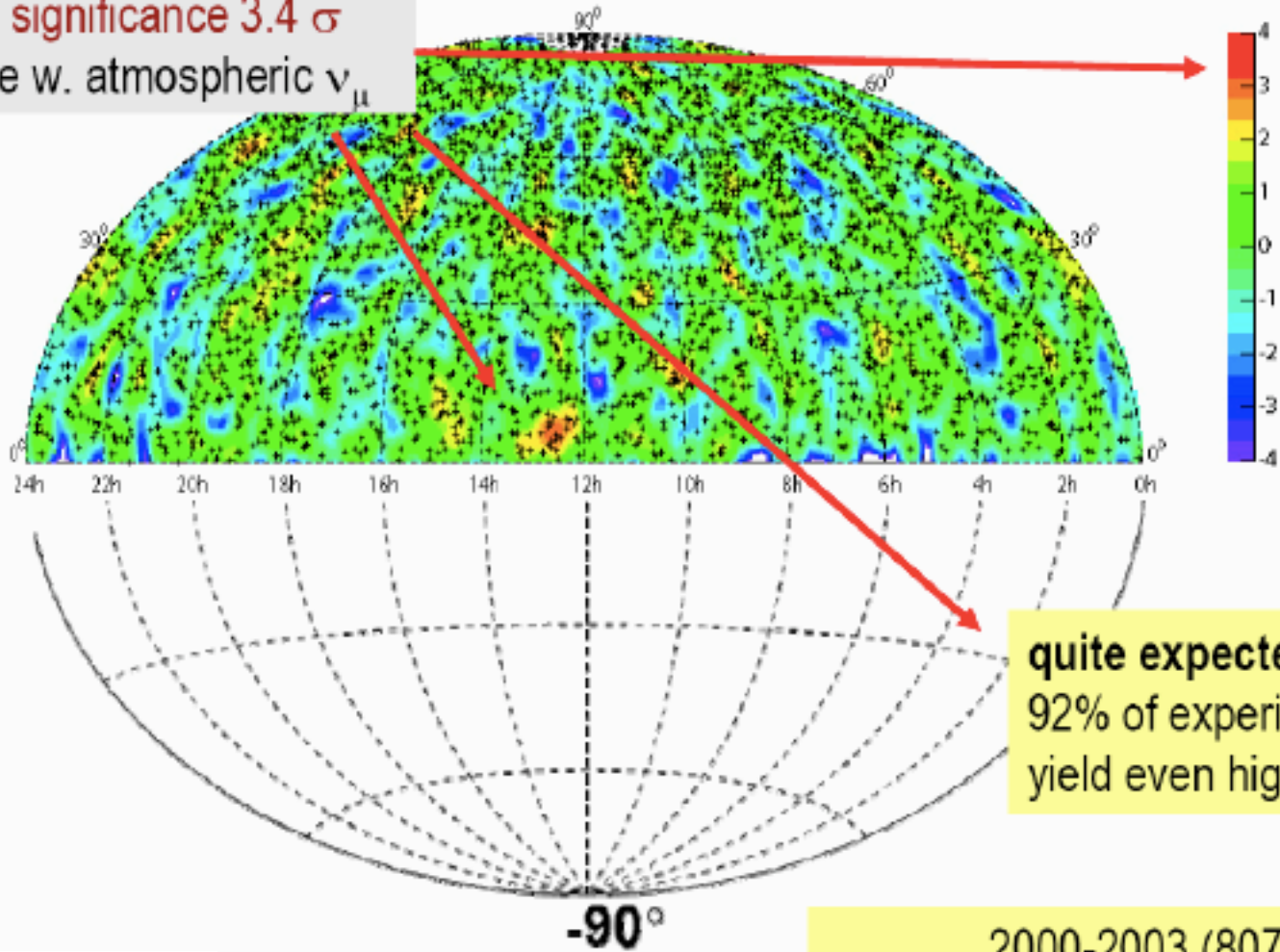
© DeepSeaPhotography.Com

# « Téléscopes » à neutrinos





Maximum significance  $3.4 \sigma$   
compatible w. atmospheric  $\nu_{\mu}$



quite expected ...  
92% of experiments would  
yield even higher maximum

2000-2003 (807 days)  
3329  $\mu$  from northern hemisphere  
3438  $\mu$  expected from atmospheric  $\nu_{\mu}$

AMANDA

# Status & perspective de astro $\nu$

**ANTARES, AMANDA:** 0,1 km<sup>2</sup>

Preuve de faisabilité des télescopes à  $\nu$

Observation possible des flux diffus de neutrino (AGNs)

(limites actuelles de AMANDA au niveau des prédictions les + optimistes)

Aucune source ponctuelle à ce jour...

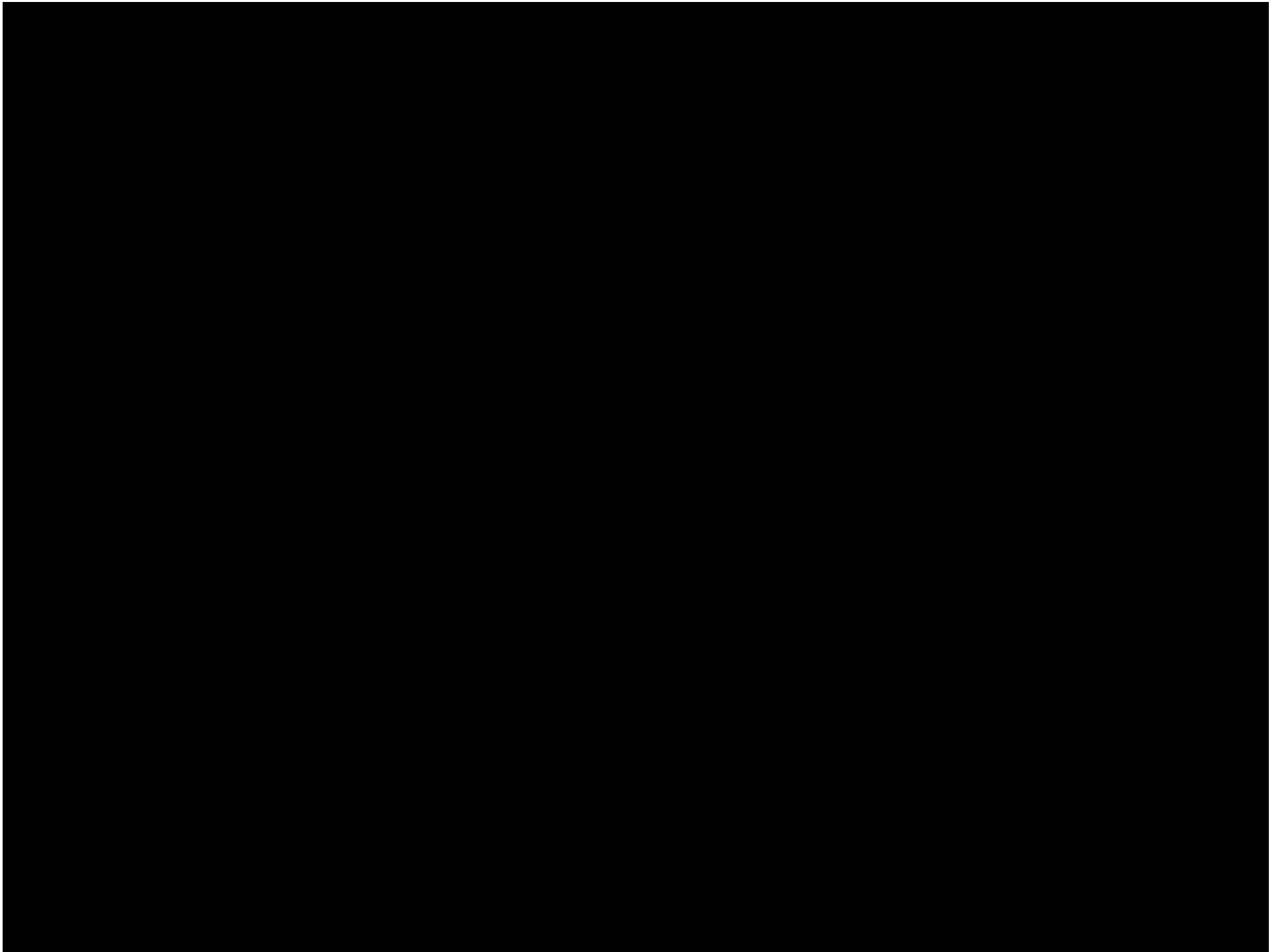
**Astro  $\nu$  (sources ponctuelles) requière 1 km<sup>3</sup>**

**IceCube:** 80 lignes de 1km de long sur  $\sim 1$  km<sup>2</sup>

Juillet 2009: 40 lignes en fonctionnement (complet en 2011)

**KM3:** "design study" avec FP7 (réseau KM3Net)

Etude conjointe ANTARES, NESTOR, NEMO



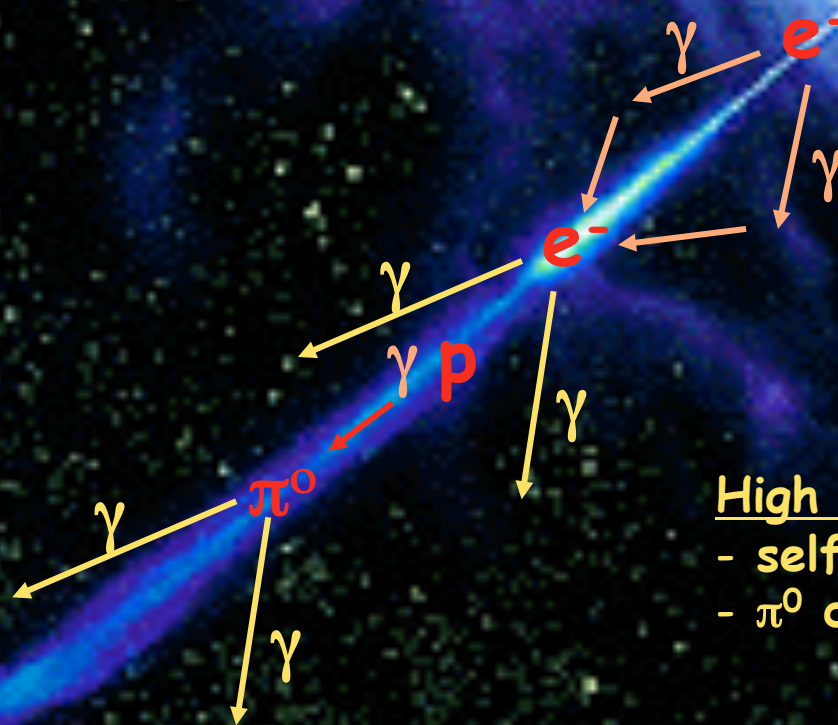
# Blazars

Low energy emission (X-ray) :  
Synchrotron emission of  $e^-$  in jet

VARIABILITY !



Size  $\sim \Gamma c t_{\text{var}}$   
( $\Gamma > 10$ )



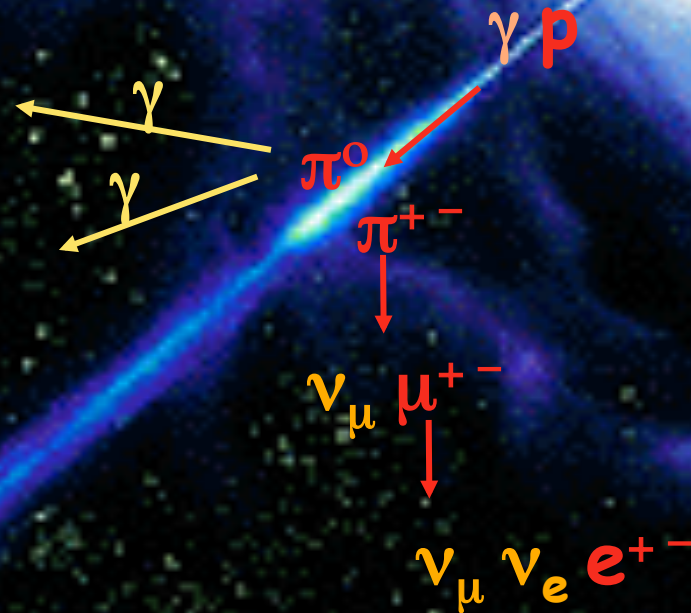
High energy emission ( $\gamma$ -ray):  
- self-compton (electro-magnetic) ?  
-  $\pi^0$  decay (hadronic) ?



# High energy sources

High energy emission ( $\gamma$ -ray):

- ~~self-compton (electro-magnetic) ?~~
- $\pi^0$  decay (hadronic) ?



High energy  
 $\nu$  sources



# Astroparticule

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay

# Astroparticule

1) Approche **multi-messager**  
**Rayons cosmiques**

2) **Neutrinos cosmiques**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Astronomie neutrinos



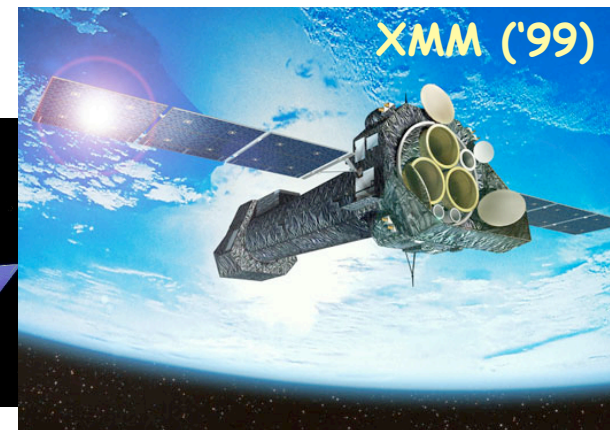
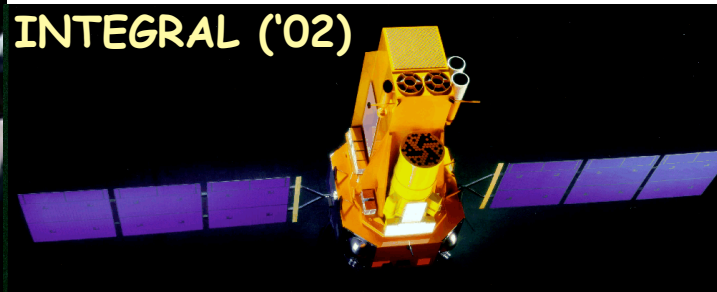
3) **Astronomie gamma**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*

# Astronomie des rayons gamma

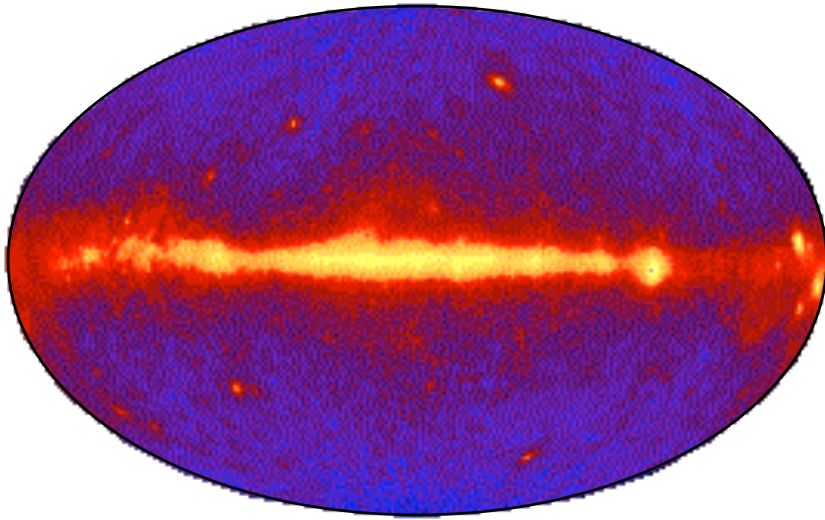
Etude des  
accélérateurs cosmiques

- protons haute énergie (rayons cosmiques)  
  dévies (B) jusqu'à  $10^{18}$  eV
- neutrinos haute énergie  
  aucune source détectée
- photons haute énergie (rayons gamma)

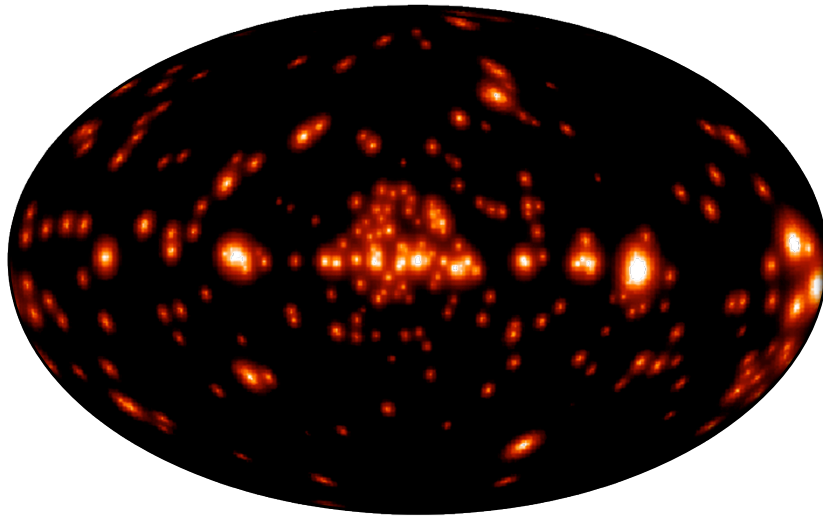
- 1952 Prédiction de HE émission en gamma du disque galactique
- 1958 Première détection d'un rayon gamma cosmique (éruption solaire)
- 1968 Détection du disque galactique et de la nébuleuse du Crabe  
  Toujours aucun gamma EXTRA-galactique



# EGRET ( $E > 100 \text{ MeV}$ )



Emission diffuse galactique:  
interaction milieu interstellaire  
et rayons cosmiques

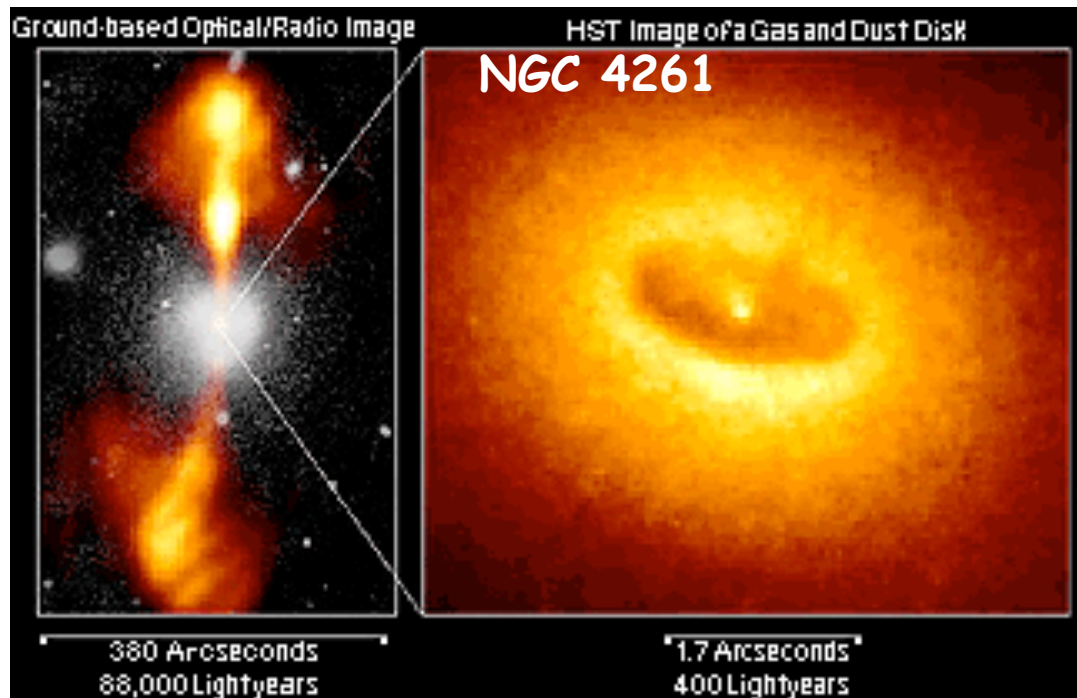


## Sources ponctuelles

- Jets de noyaux actifs de galaxie
- Sources galactiques (pulsars, binaires, restes de supernovae ...)
- Sources non identifiées (170/270)  
→ observatoire Fermi

# Active Galactic Nuclei (AGN)

- AGN : galaxie avec trou noir central de  $10^8 - 10^9 M_{\odot}$
- 10% - jets radio (éjection relativiste de plasma)
  - 1% - blazars (tous les cas d'AGNs dans EGRET !)





# Trous noirs

## Cas stellaire

- épuisement du combustible nucléaire  
équilibre gravité  $\leftrightarrow$  pression quantique des électrons  
→ naine blanche
- disparition des électrons ( $e + p \rightarrow n + \nu$ )  
effondrement gravitationnel du cœur  
équilibre gravité  $\leftrightarrow$  pression quantique des neutrons  
→ étoile à neutrons ( $M_{NS} < 0.7 M_{sun}$ )
- effondrement gravitationnel  
→ trou noir

augmentation de la densité

# Trous noirs

Approche en mécanique classique du trou noir

Rien (pas même la lumière) ne peut s'échapper

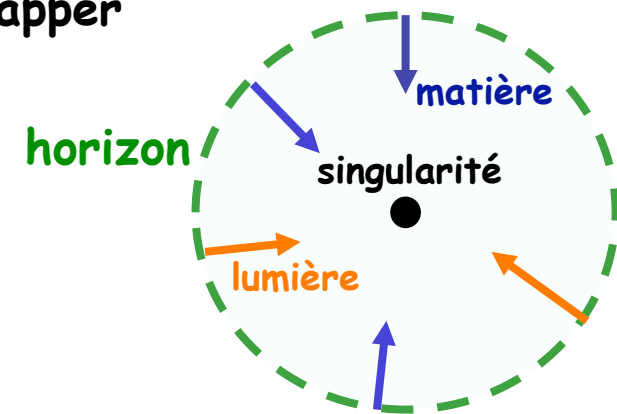
$$E_T = E_G + K < 0$$

$$-\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}mv^2 < 0$$

$$-\frac{2GM}{r} + c^2 < 0$$

$$r < \frac{2GM}{c^2}$$

rayon de Schwarzschild  $R_S$

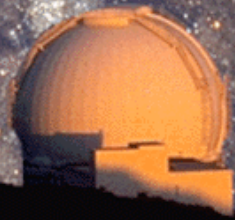


$R_S = 3$  km pour le Soleil

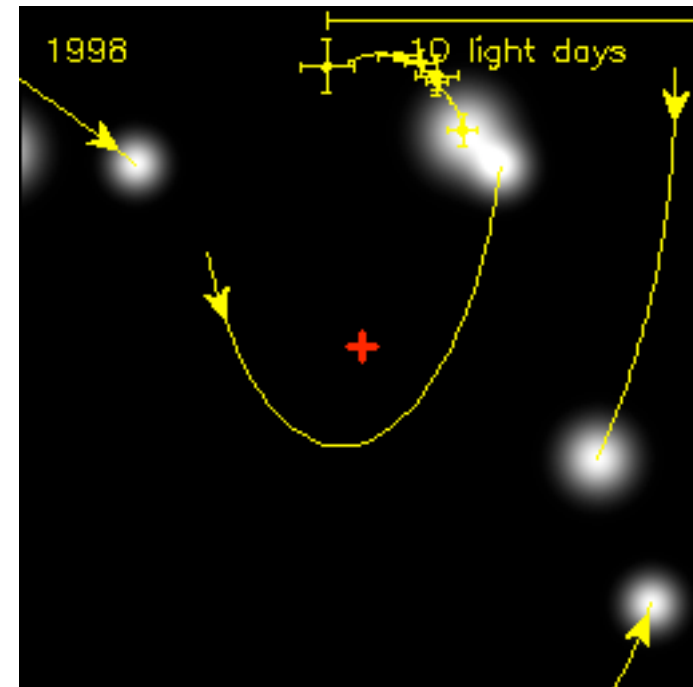
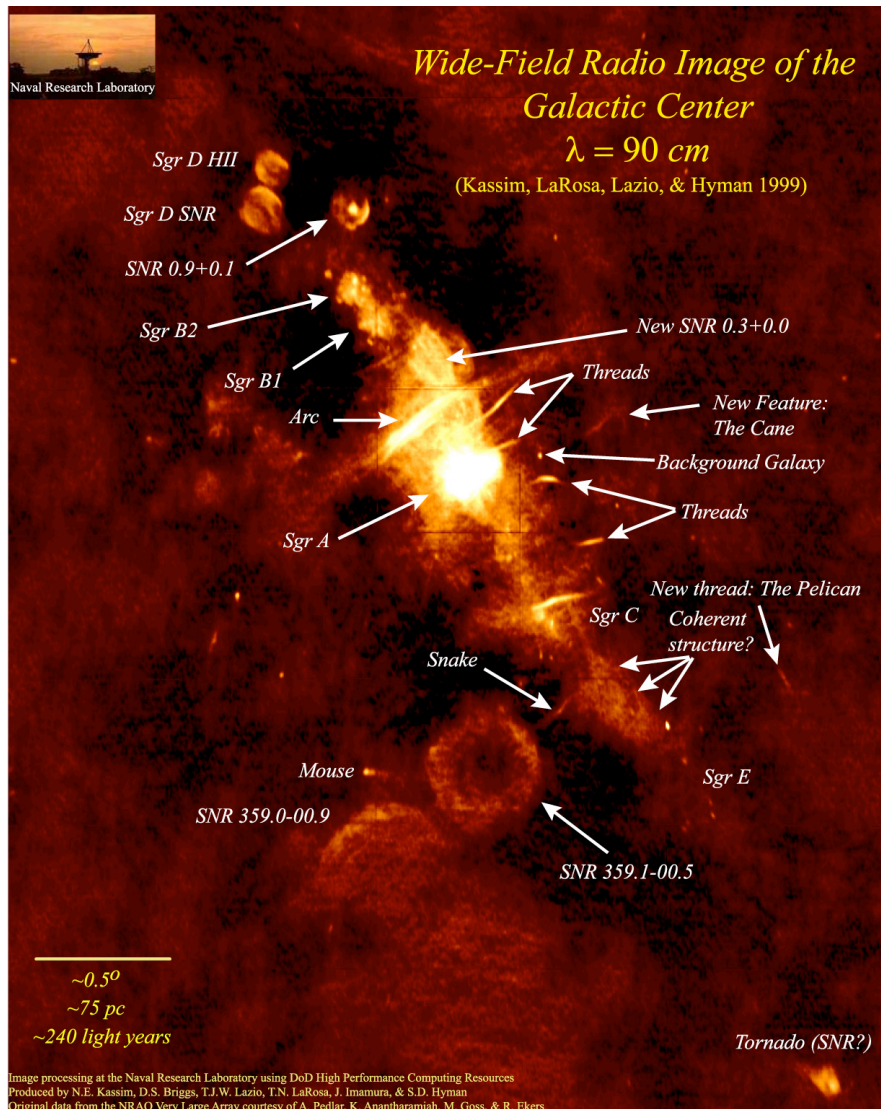
$R < R_S$  : étoile s'effondre en un état de densité d'énergie infinie

(Oppenheimer et Snyder, 1939)

# Trou noir dans la voie lactée



# Au centre de la Voie lactée



orbites planétaires → 4 millions  $M_{\odot}$   
 dans rayon  $< 0.3 \text{ u.a.} = 44 \cdot 10^6 \text{ km}$

→ trou noir supermassif !

# Trous noirs supermassifs

Au cœur de la plupart (toutes?) les galaxies

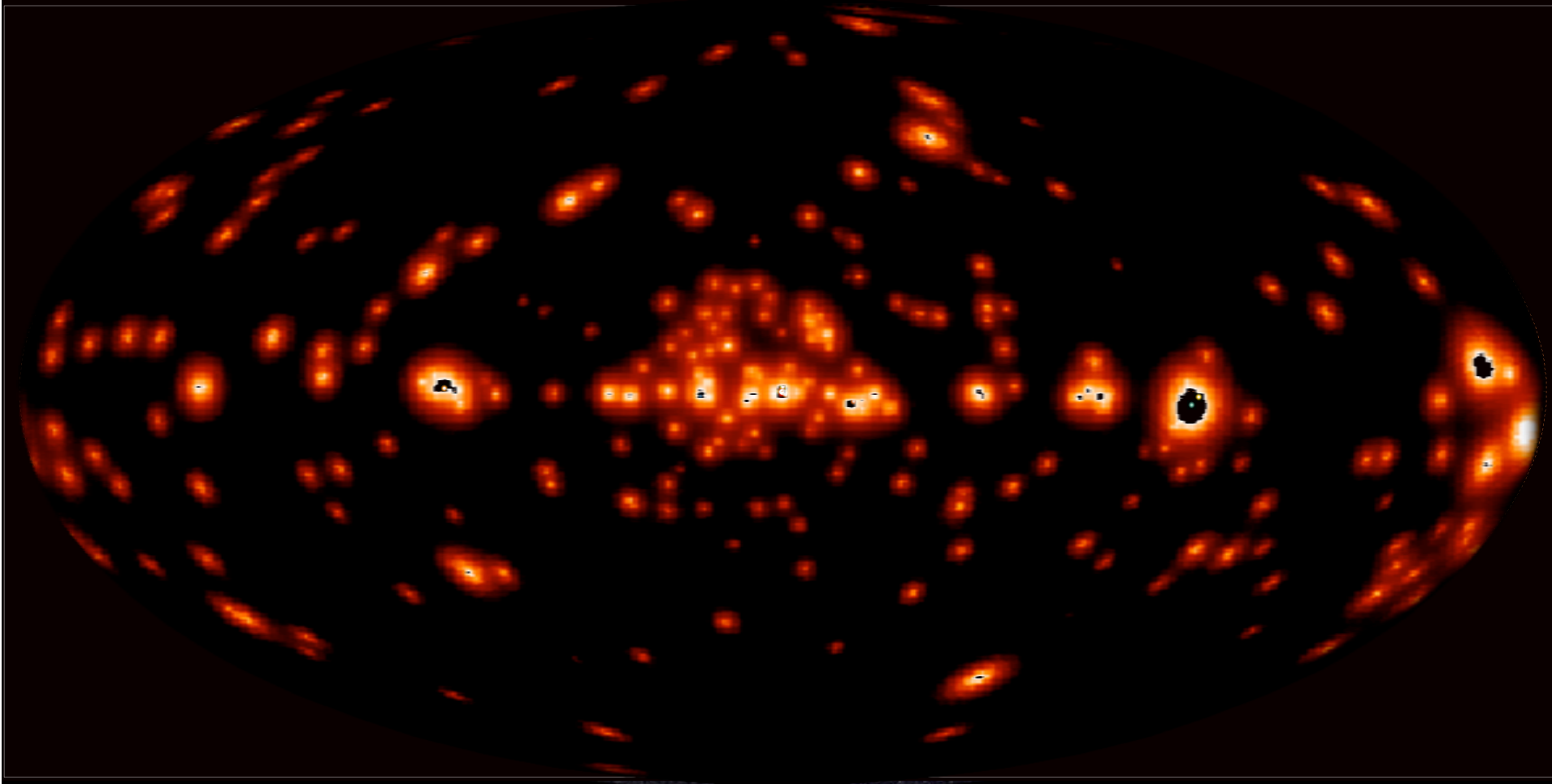
Formation de ces trous noirs supermassifs ?  
forte connexion avec histoire de la formation des galaxies



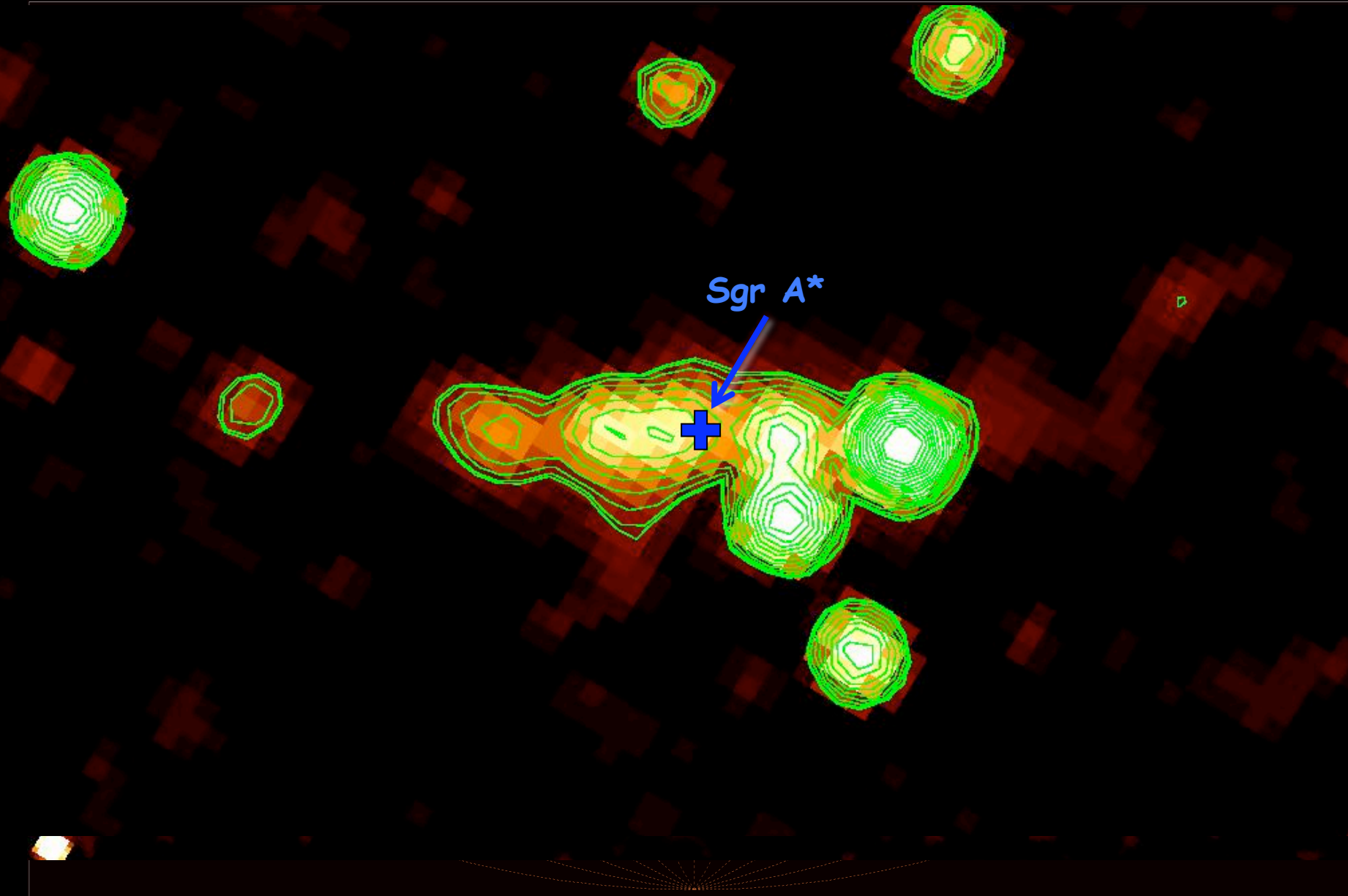
# Au centre de la Voie lactée

**Aujourd'hui un trou noir aujourd'hui léthargique,  
mais il n'y a pas si longtemps...**

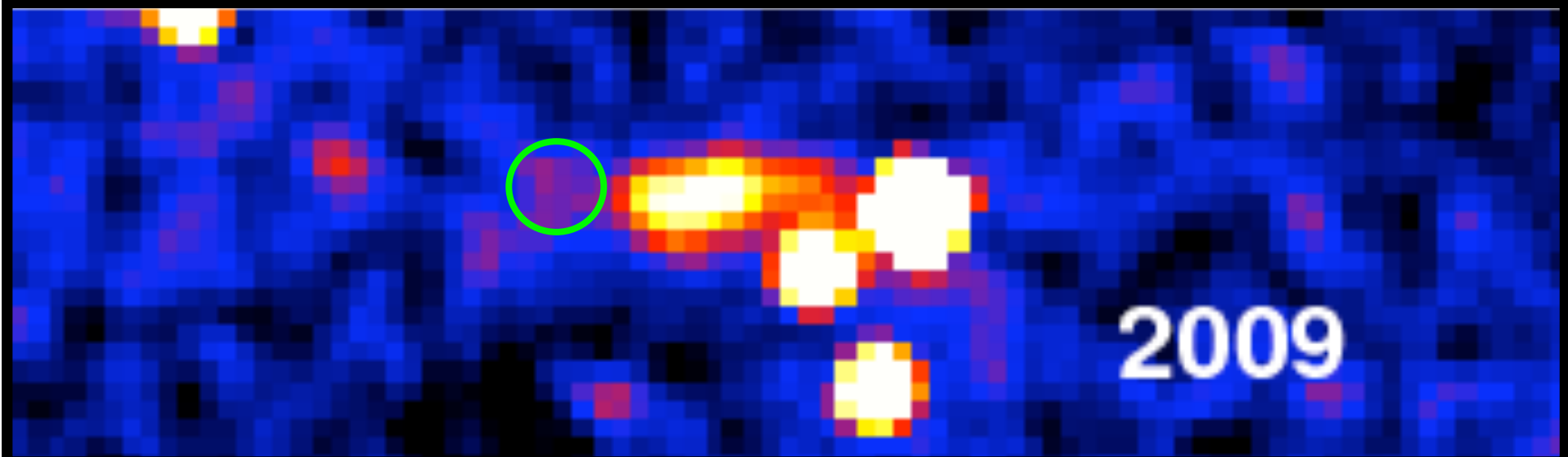
**Plan de la Galaxie (20- 40 keV)  
avec INTEGRAL**



# Zoom sur le centre galactique



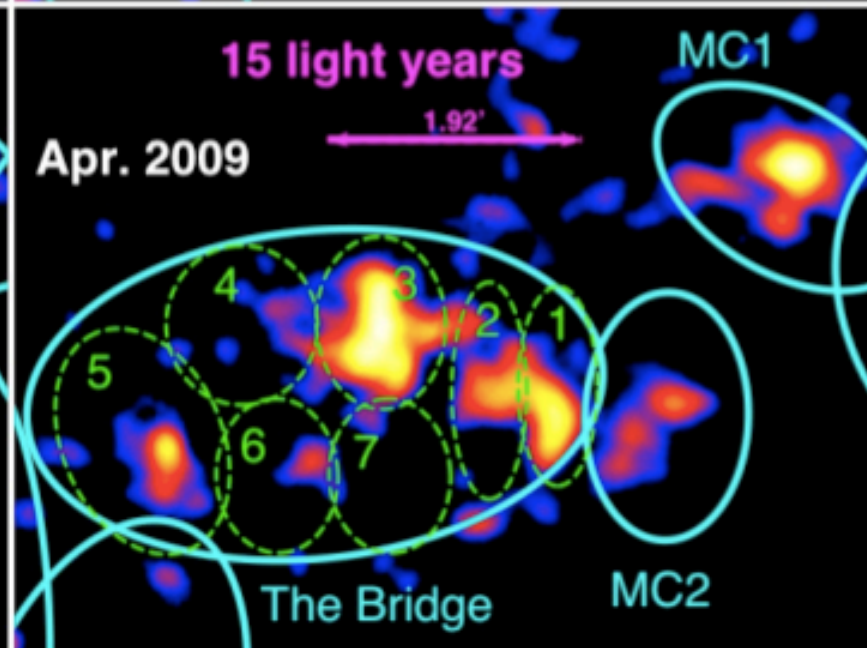
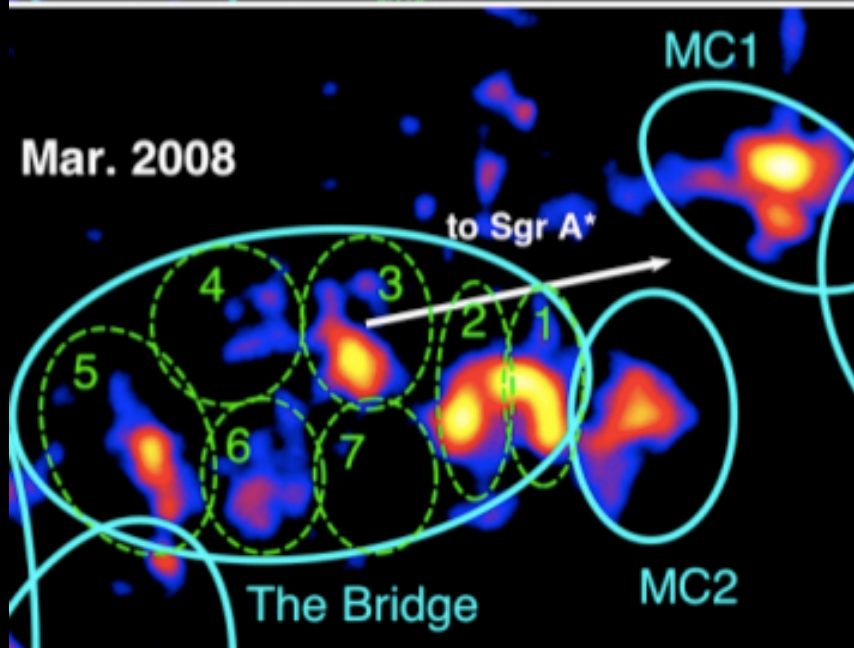
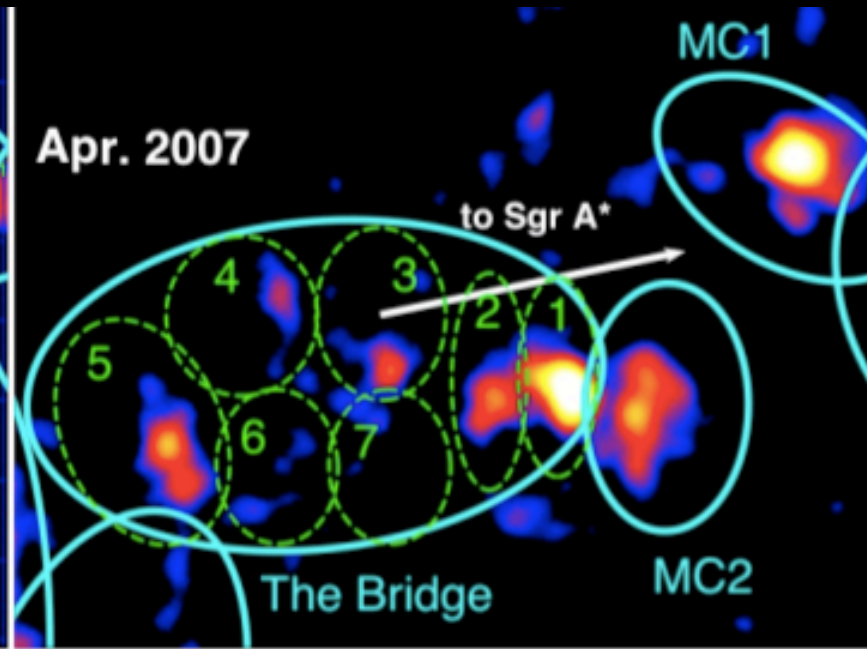
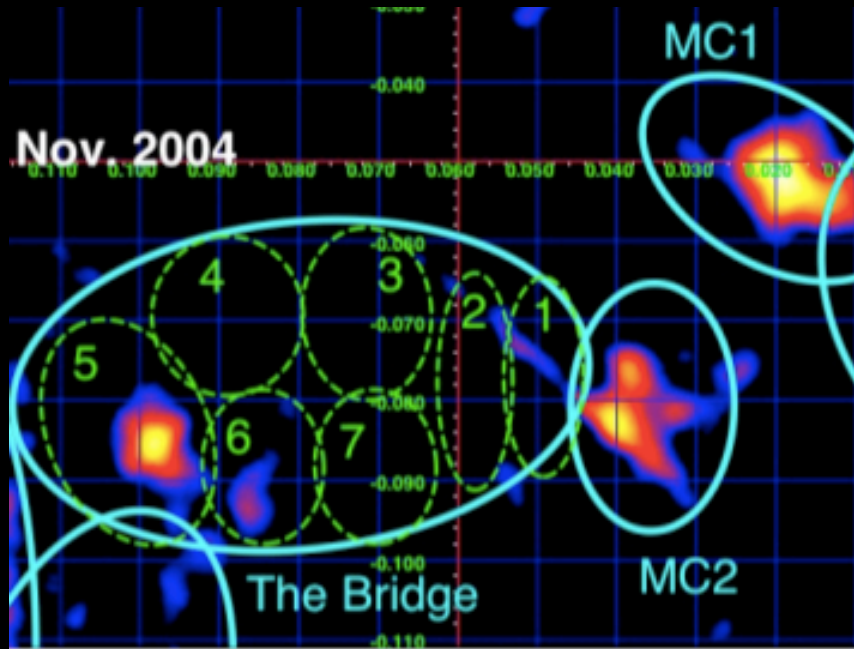
# Variabilité de émission de la source de rayons gamma Sgr B2



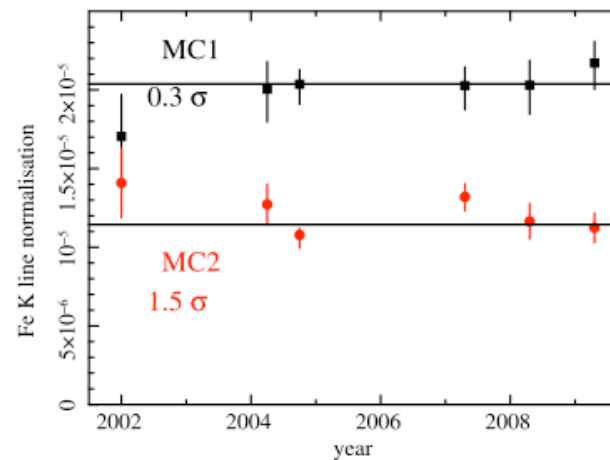
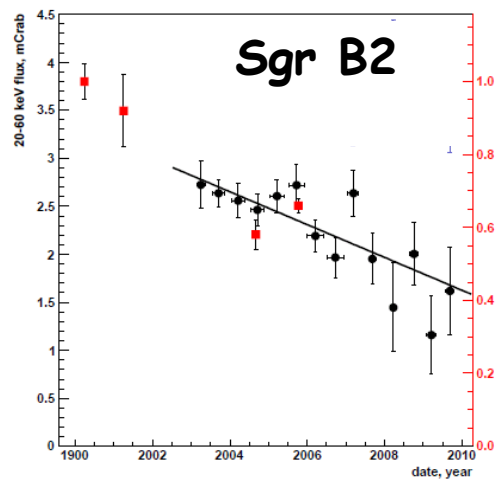
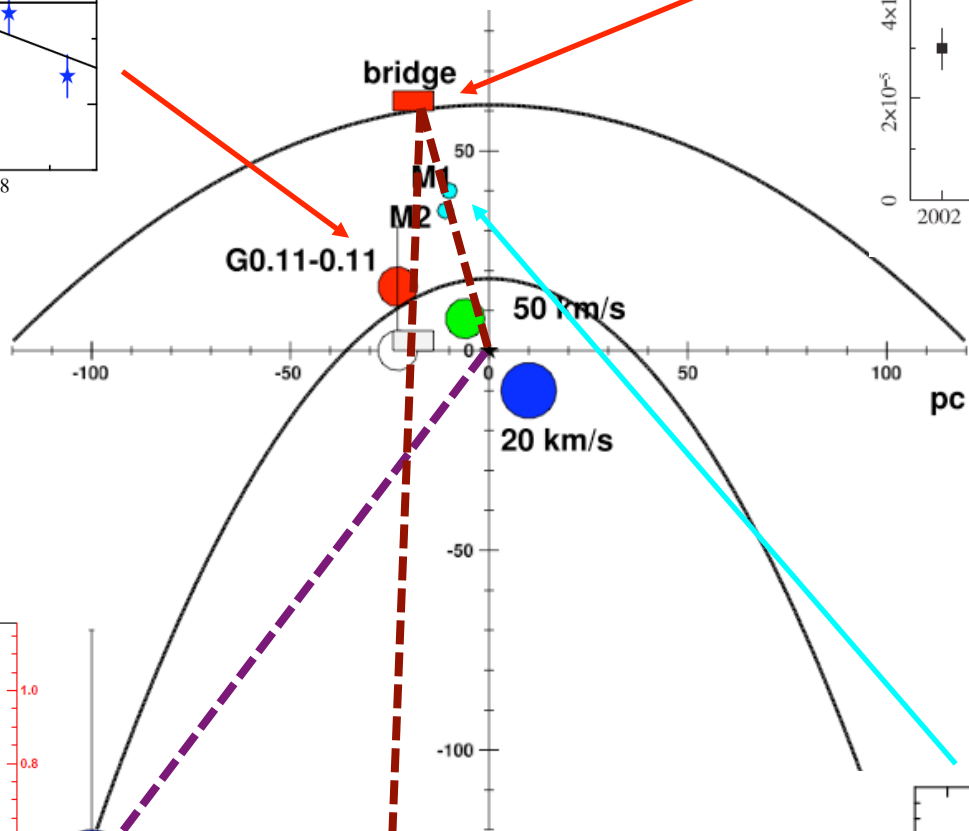
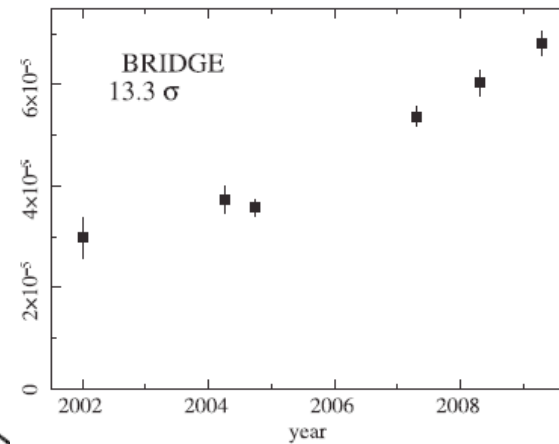
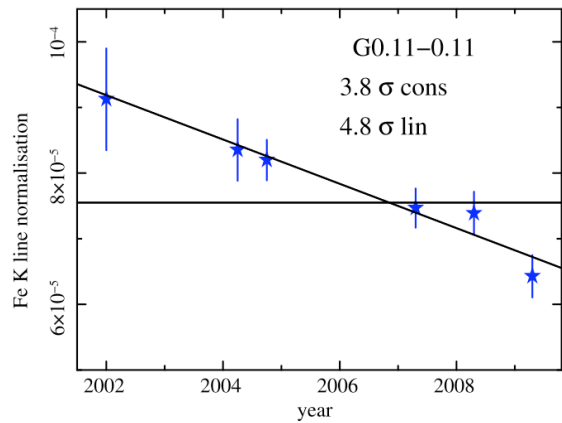
2003-2009 INTEGRAL Survey of the GC (20 Ms)

20 - 60 keV range

(Terrier et al. 2010)



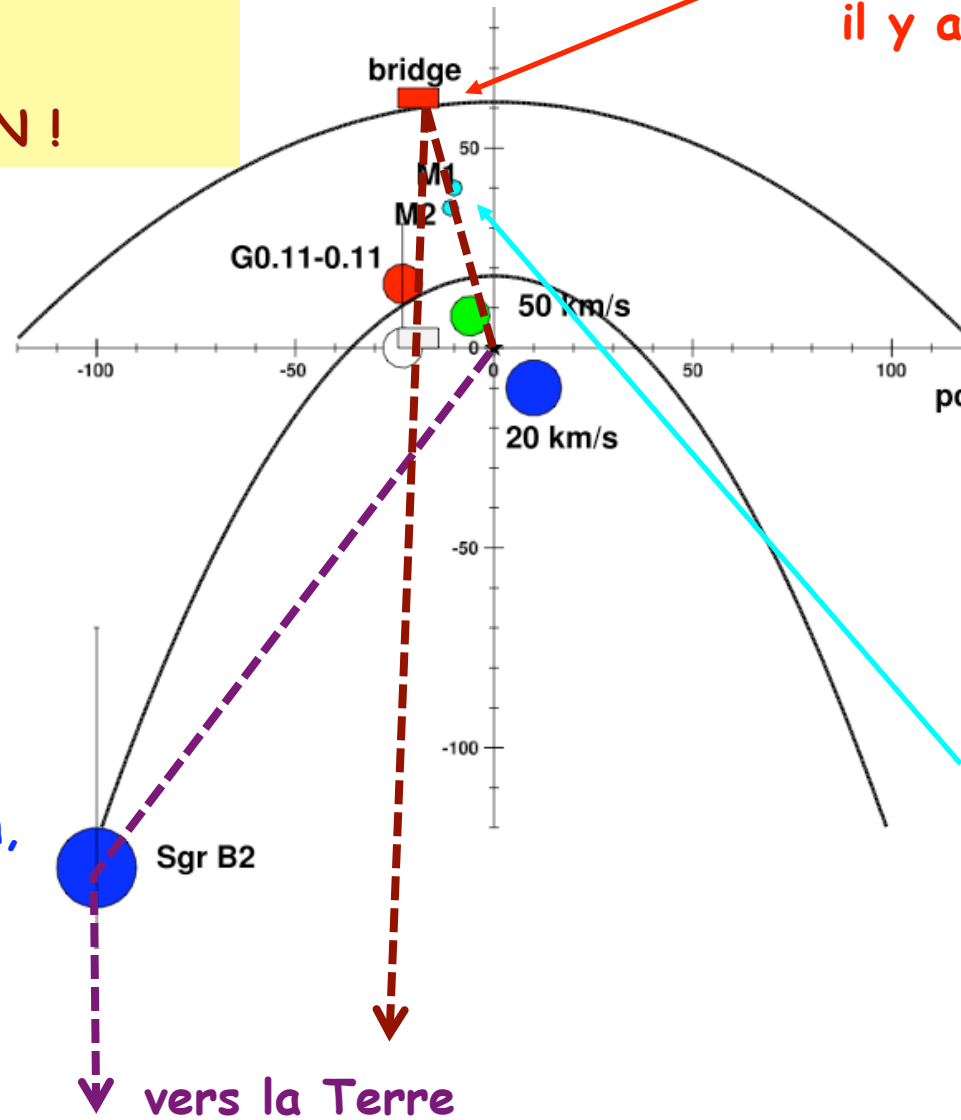




vers la Terre

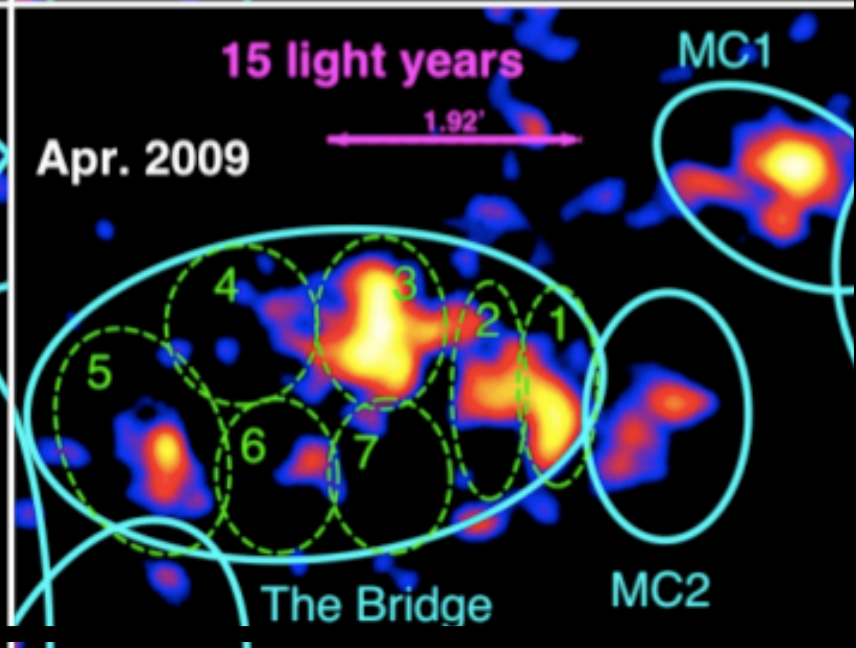
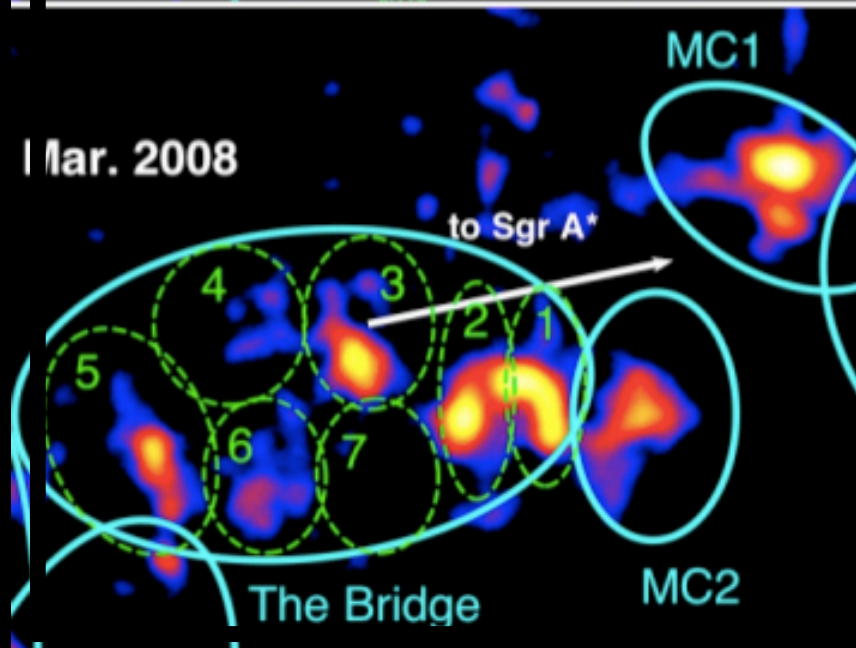
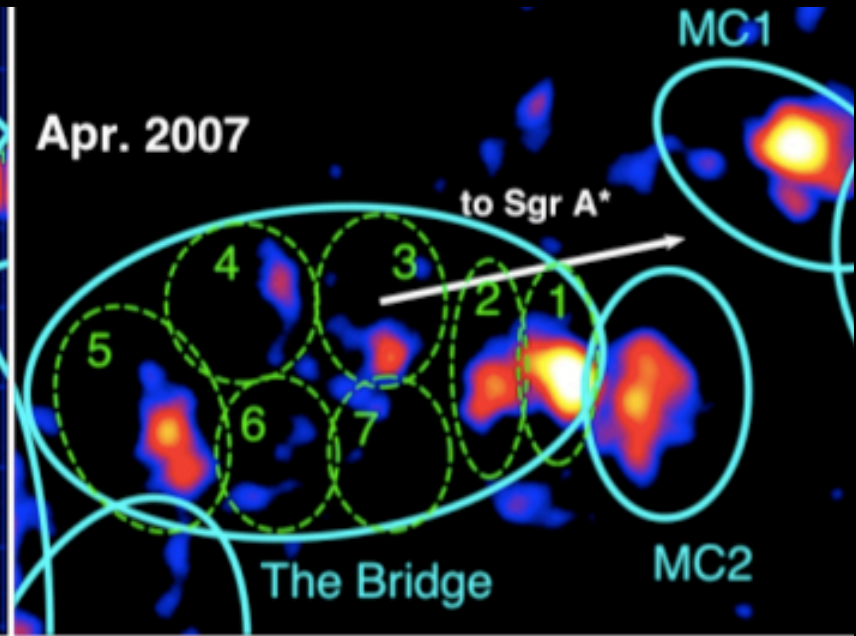
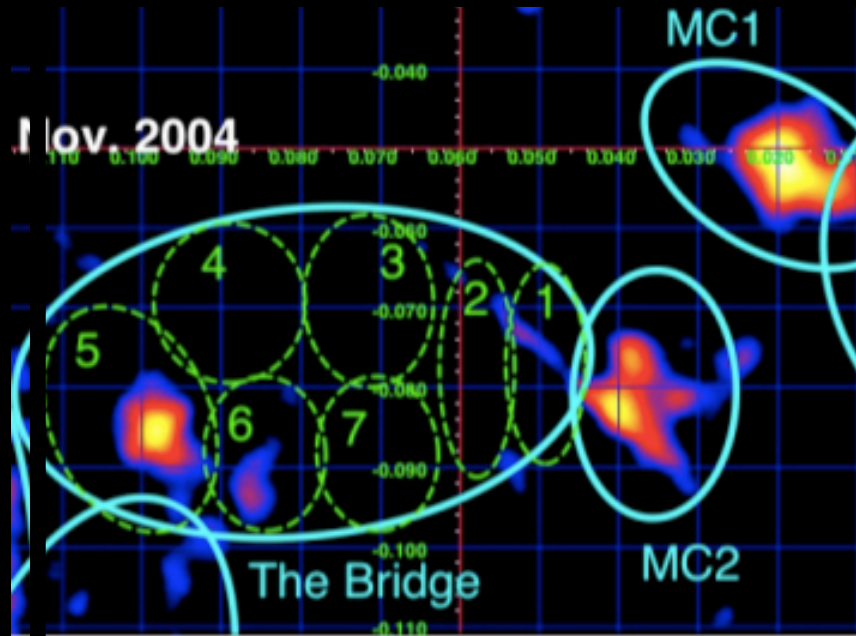
Phase active de Sgr A\*  
 $\Delta t \sim 400$  ans  
 $L \sim 10^{32}$  J/s  
comme les AGN !

Bridge:  
début de l'éruption,  
il y a  $\sim 400$  ans



Sgr B2:  
fin de l'éruption,  
il y a  $\sim 100$  ans

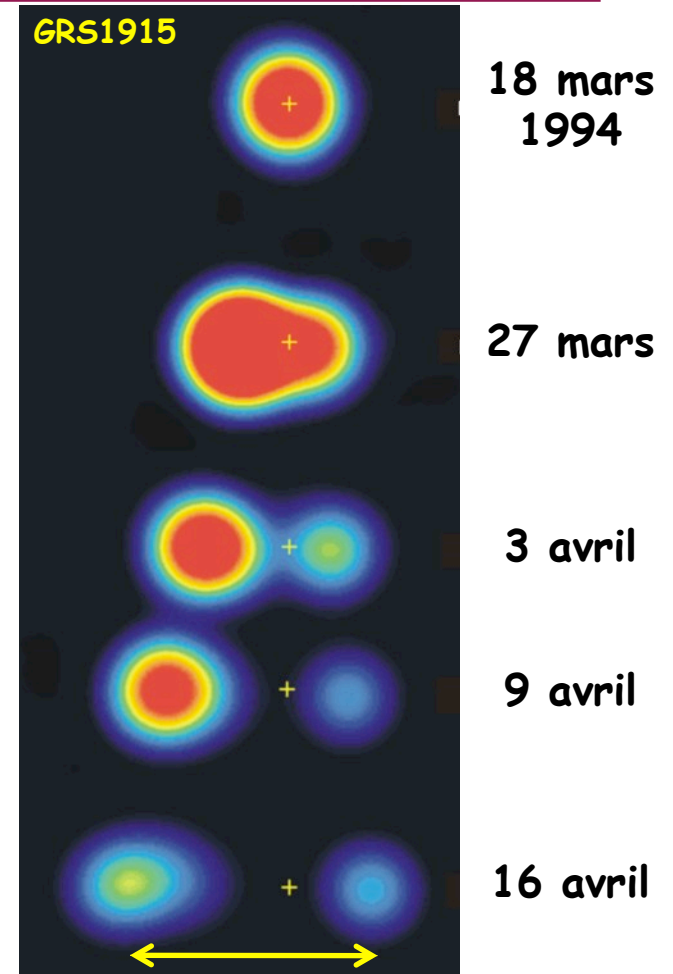
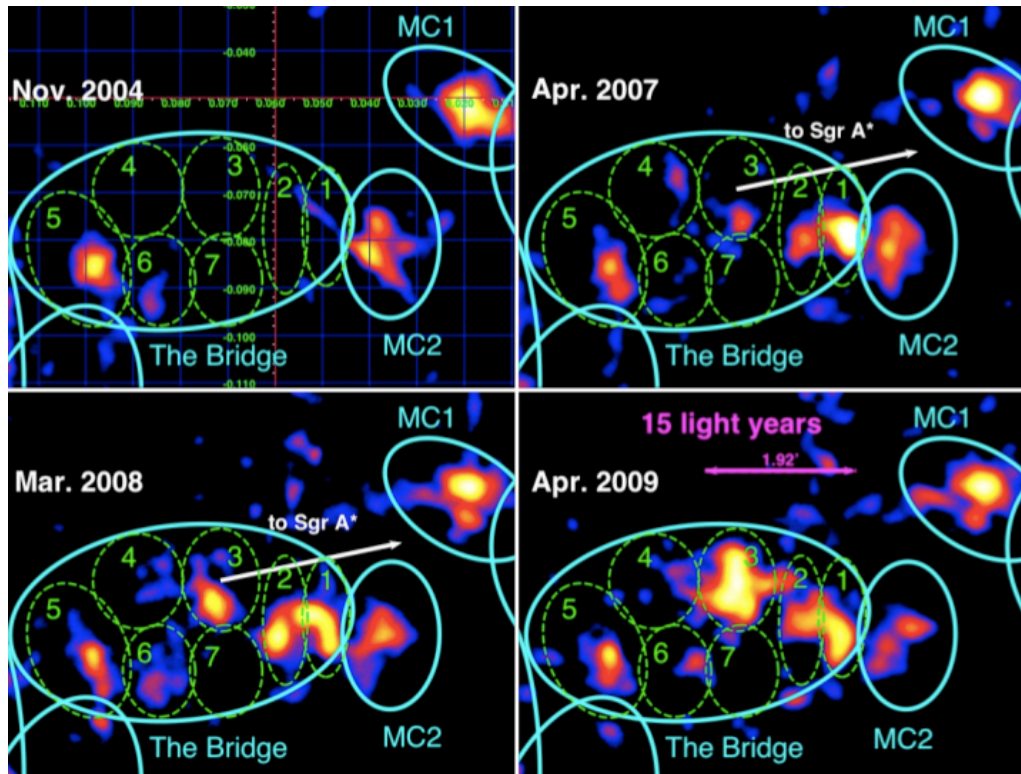
au cœur de  
l'éruption





**Plus vite  
que la lumière ?**

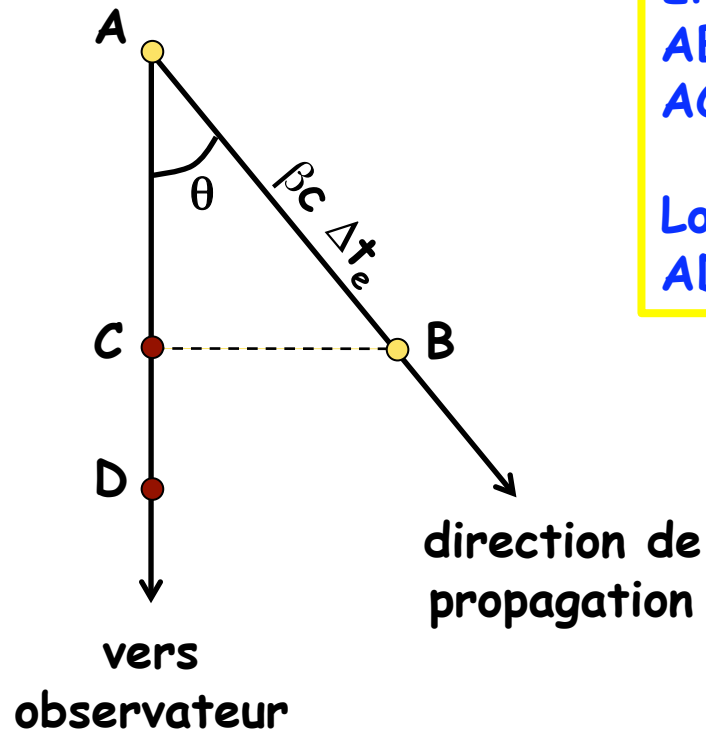
# Déplacements supraluminiques !?



$10^4$  u.a. = 2 mois lumière



# Déplacements supraluminiques !?



Emission du 1<sup>er</sup> photon en A, puis du 2<sup>nd</sup> en B  
 $AB = \beta c \Delta t_e$   
 $AC = \beta c \Delta t_e \cos \theta$

Lors de émission du 2<sup>nd</sup> photon, le 1<sup>er</sup> est en D  
 $AD = c \Delta t_e$

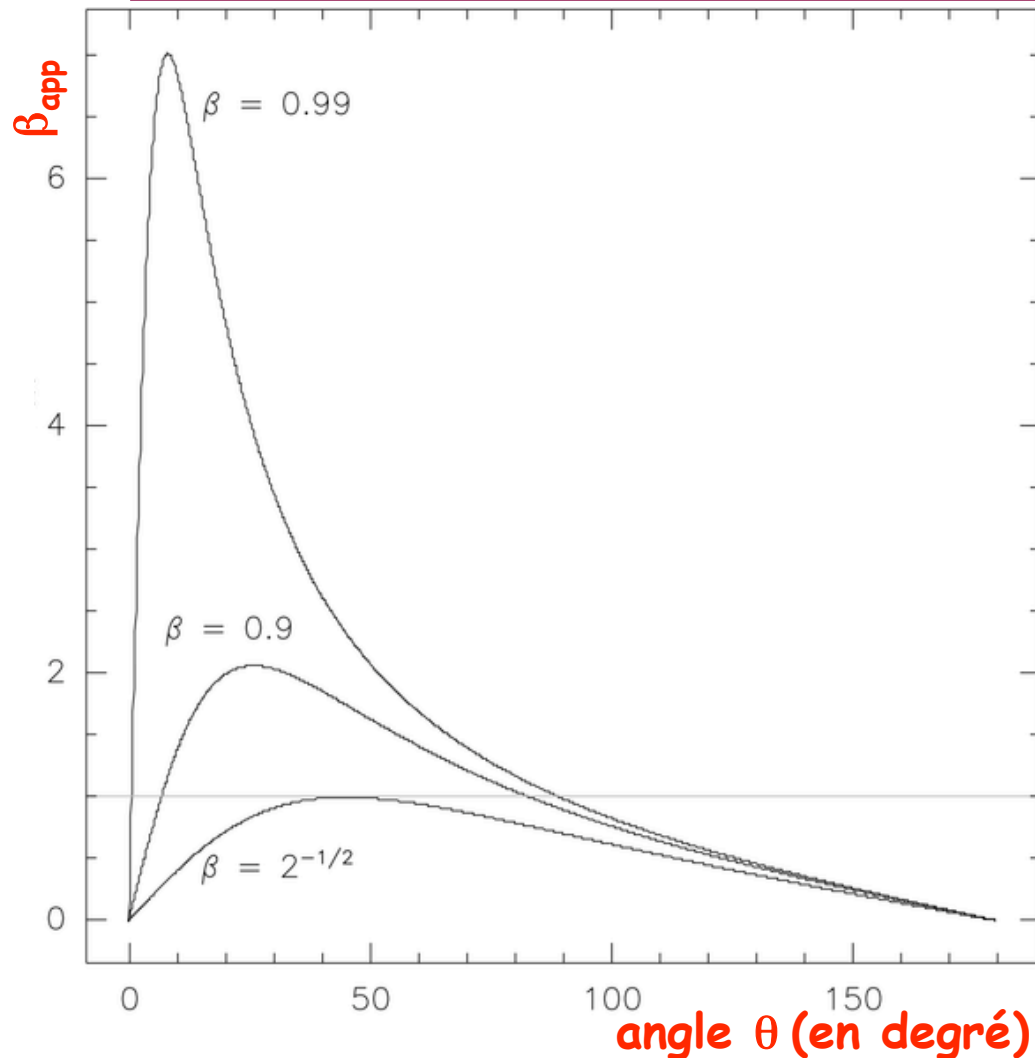
Différence entre les temps d'arrivée:  
 $t_2 - t_1 = DC / c = \Delta t_e (1 - \beta \cos \theta)$

Séparation en projection sur le ciel:  
 $CB = \beta c \Delta t_e \sin \theta$

**Vitesse apparente**

$$\beta_{app} = CB / (t_2 - t_1) = \beta \sin \theta / (1 - \beta \cos \theta)$$

# Déplacements supraluminiques !?



Déplacement supraluminique  
APPARENT

Uniquement dans certaines  
configurations  
( $\theta$  petit,  $\beta$  grand)

The background of the image is a deep space scene featuring a prominent galaxy with a bright, yellowish-white core and a reddish-brown dust lane. The galaxy is surrounded by a field of stars, some of which are bright and have prominent four-pointed diffraction spikes. The overall color palette is dark, with the galaxy's colors providing a focal point.

**Trous noirs  
cosmiques**

# Trous noirs



Ground



HST • WFPC2

# Trous noirs



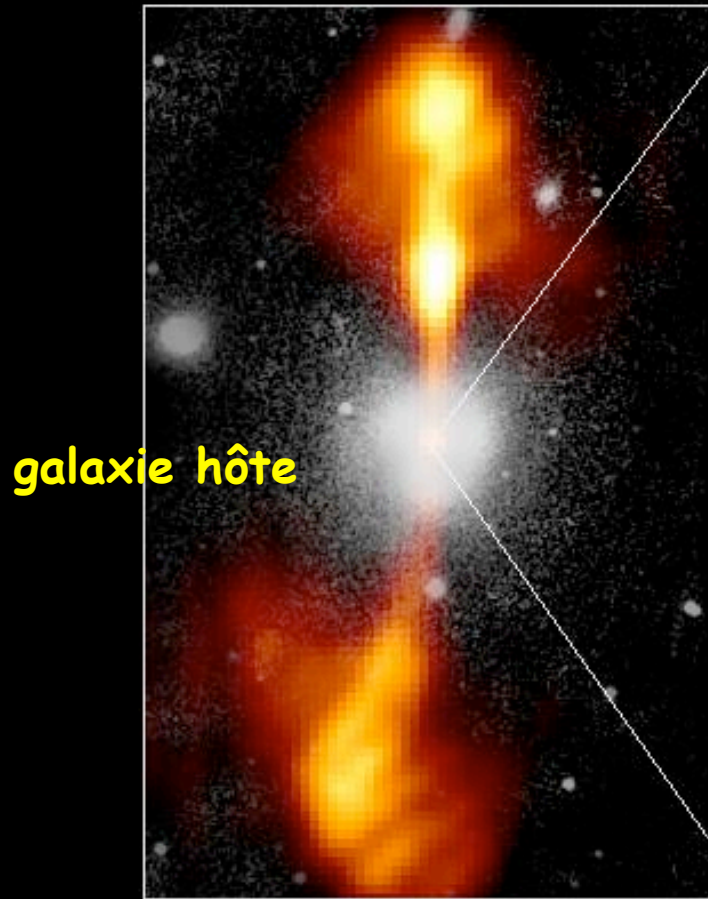
**M87 :**  
**des jets de matière**



# Core of Galaxy NGC 4261

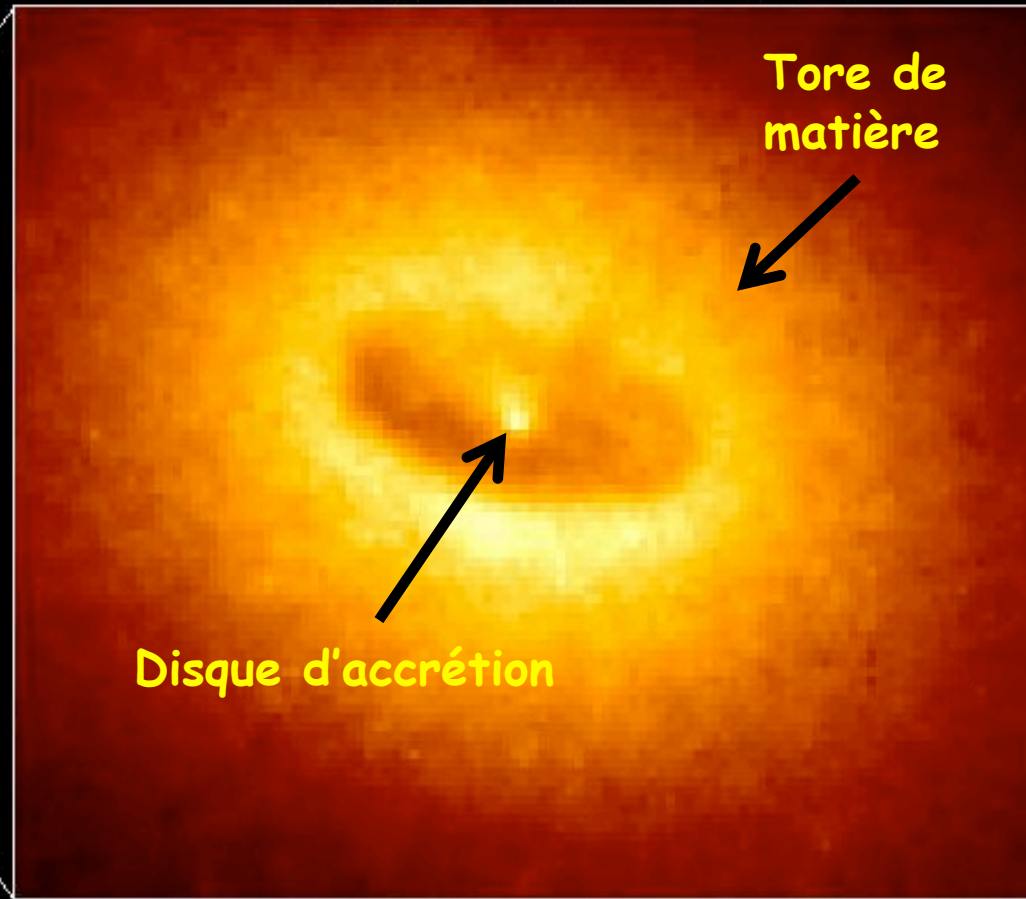
tous les AGNs de EGRET Hubble Space Telescope  
sont des blazars !  
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



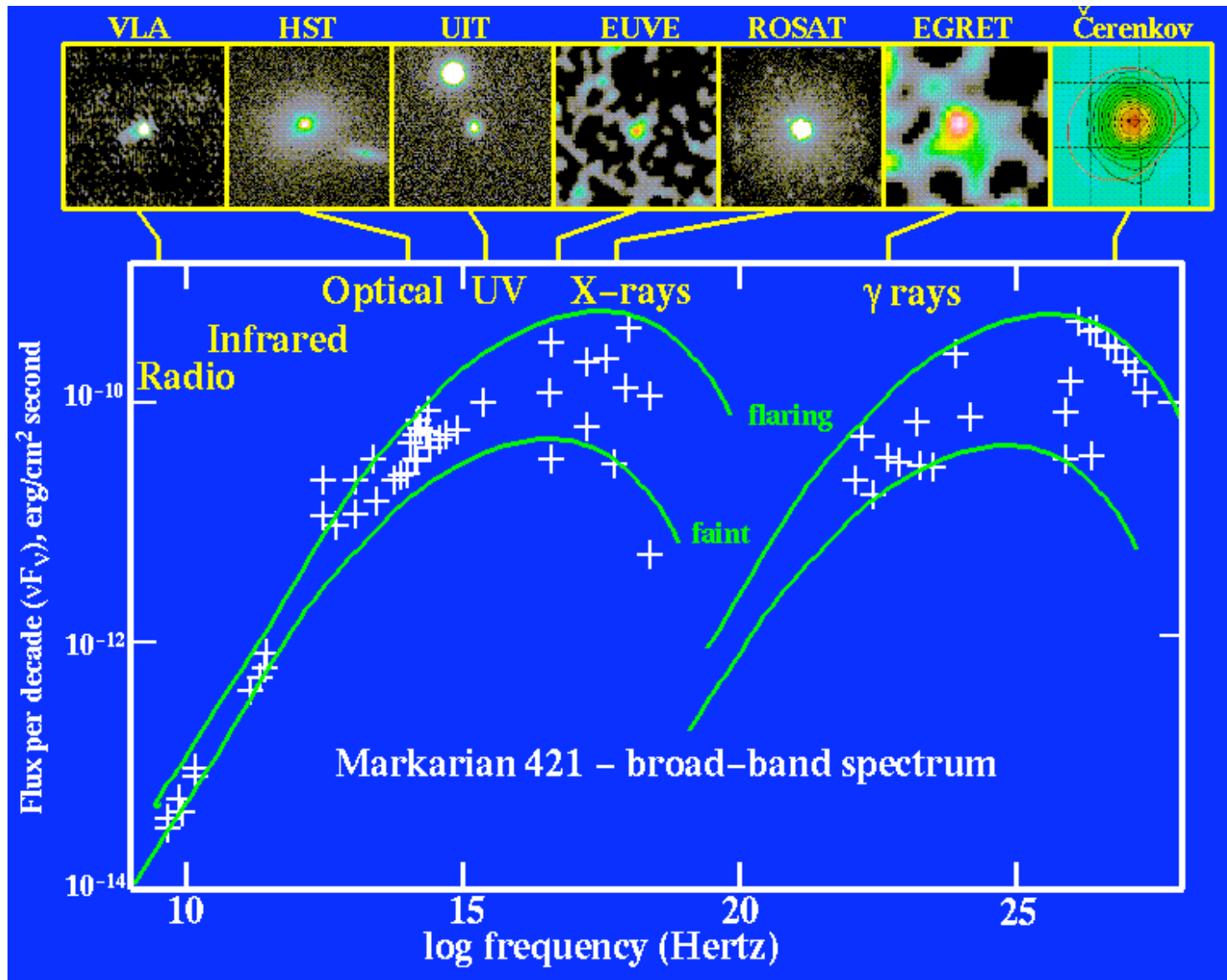
380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS

# Markarian 421 : blazar « voisin »



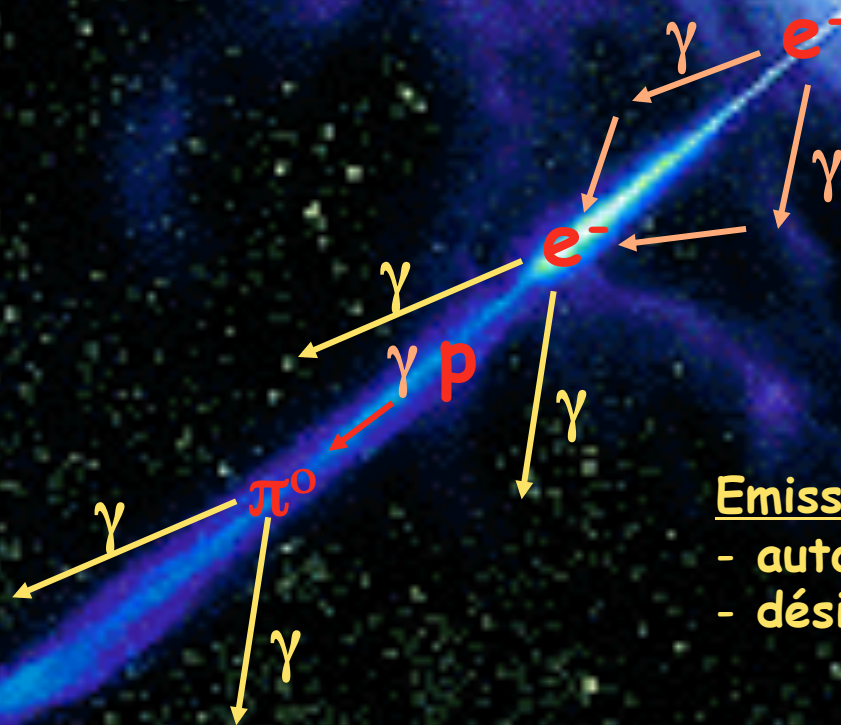
# Blazars

Emission basse énergie (rayons X) :  
émission synchrotron des  $e^-$  du jet

**VARIABILITÉ !**



taille  $\sim \Gamma c t_{\text{var}}$   
( $\Gamma > 10$ )



Emission haute énergie (rayons  $\gamma$ ):

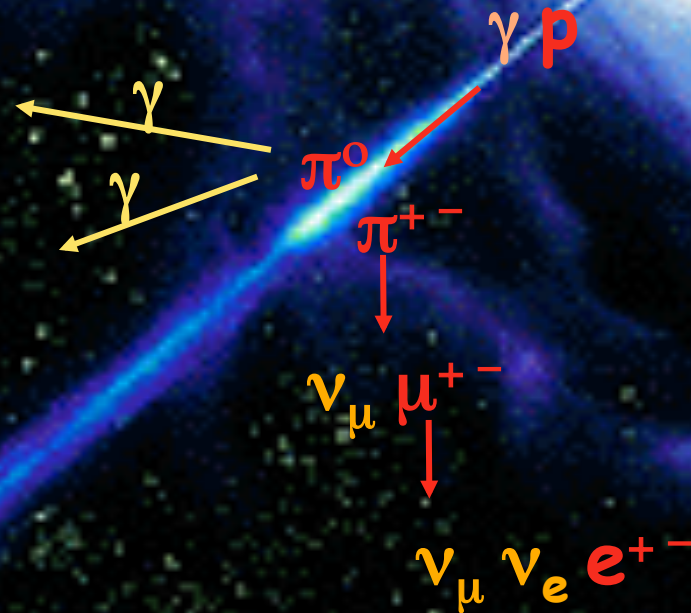
- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique) ?



# Blazars

Emission haute énergie (rayons  $\gamma$ ):

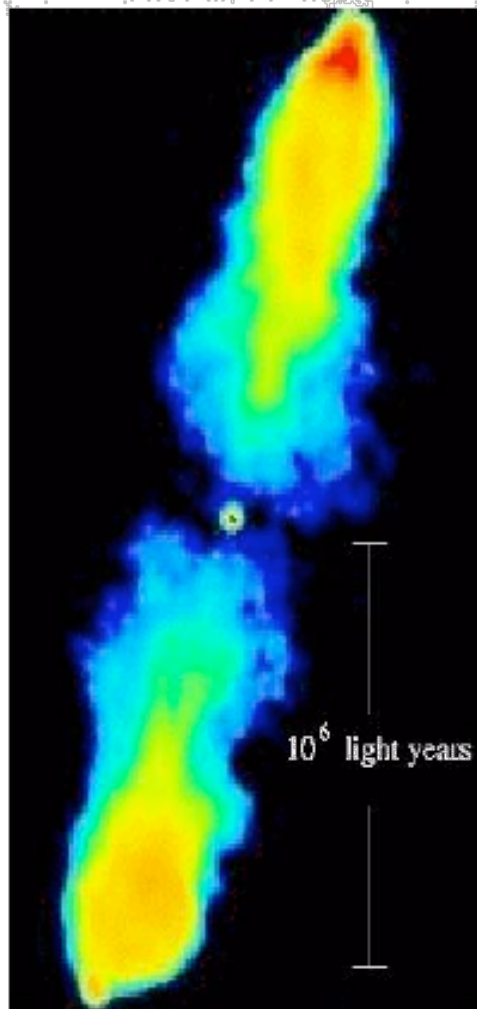
- ~~auto-compton (électromagnétique) ?~~
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique) ?



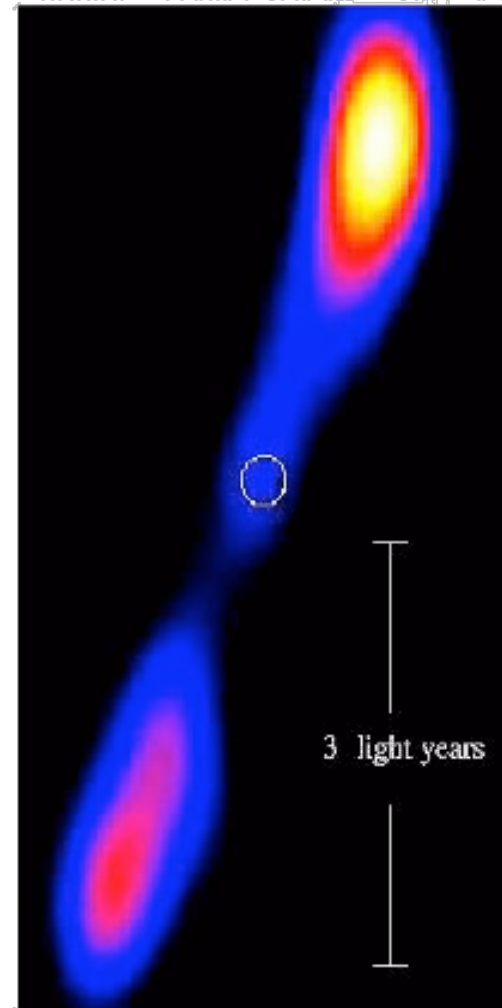
Sources de  $\nu$   
de haute énergie !

# Quasars et Microquasars

QUASAR 3C 223

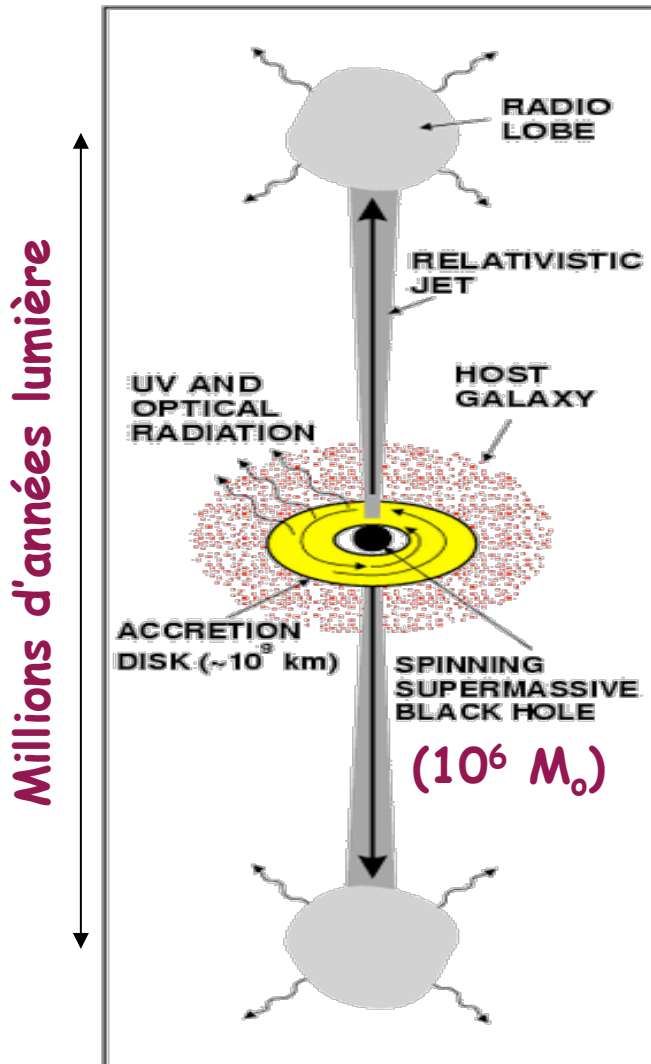


MICROQUASAR 1E1740.7-2942

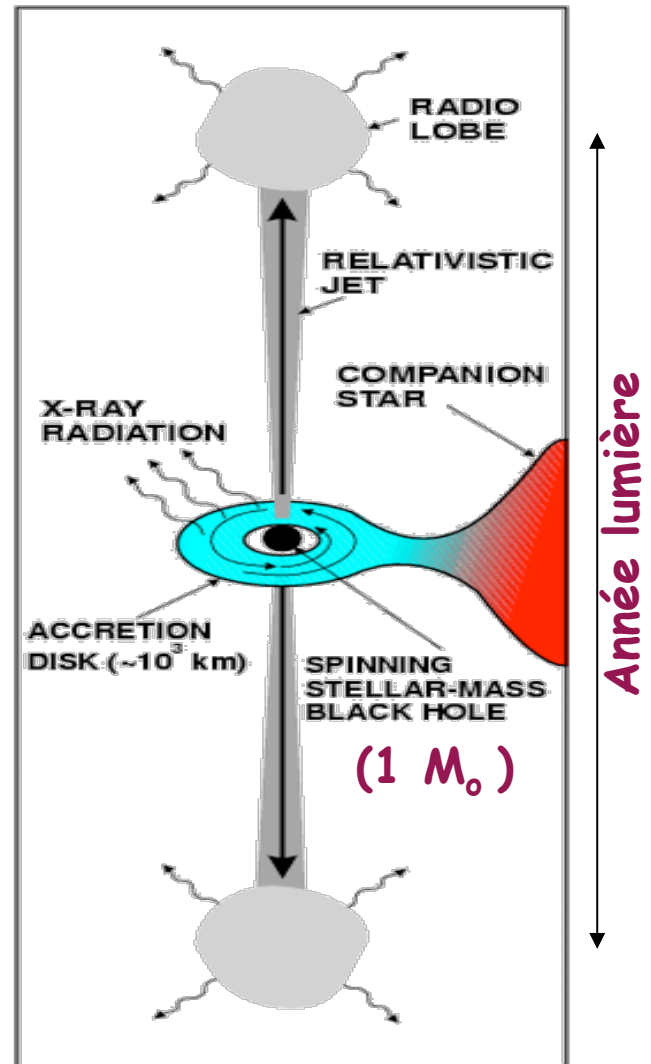




# QUASAR



# MICROQUASAR



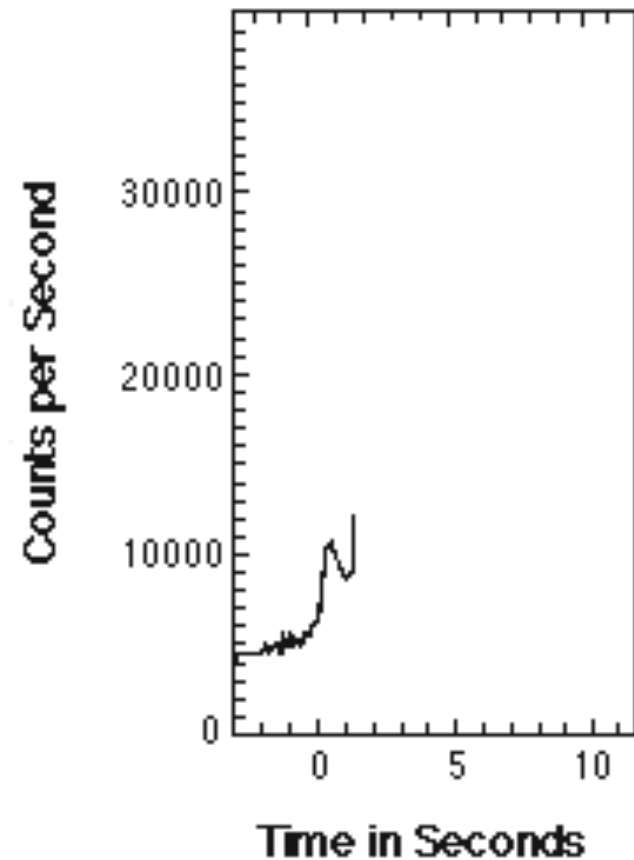
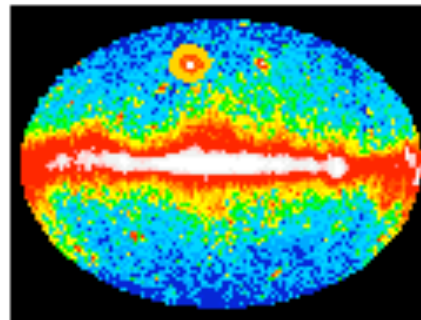
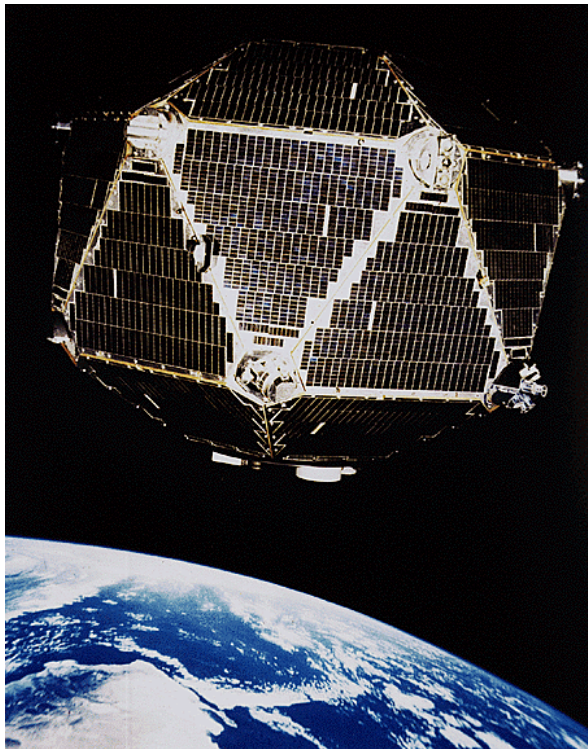
$$R \propto M_{BH}$$

$$T \propto M_{BH}^{-1/4}$$

Mirabel & Rodriguez

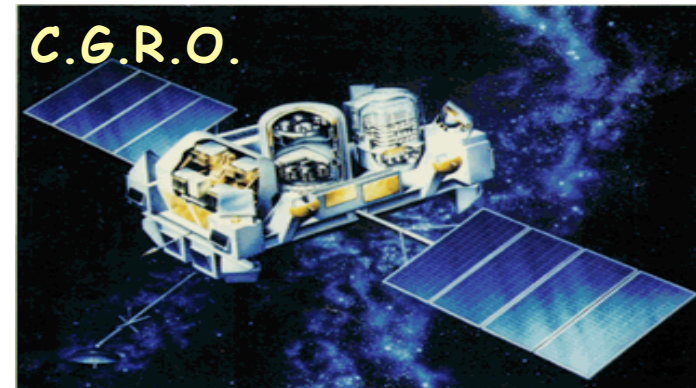
# Sursauts Gamma (GRB)

**1967** Découverte fortuite par les satellites VELA  
d'émission spontanée de rayons gamma (16 events),  
Publication en **1973**



# Gamma ray bursts (GRB)

1991 Observation avec les satellites  
C.G.R.O (EGRET, BATSE...)  
& BeppoSAX



objets les plus brillants de l'univers, émettant surtout à haute E  
 $10^{44}$  à  $10^{47}$  J  $\sim 1 M_{\odot}c^2$

→ émission collimatée ?

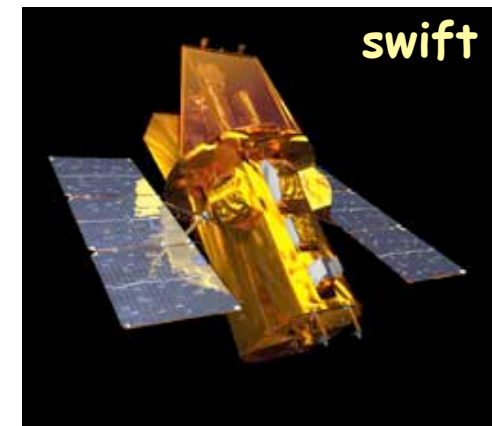
$\Delta t$  de 10ms à quelques secondes

$\Delta L$  (en 5s) = 1.500.000 km = 0.01 u.a.

→ région compacte

→ trous noirs, étoiles à neutrons

2009 (>3000 sursauts) toujours mal compris...



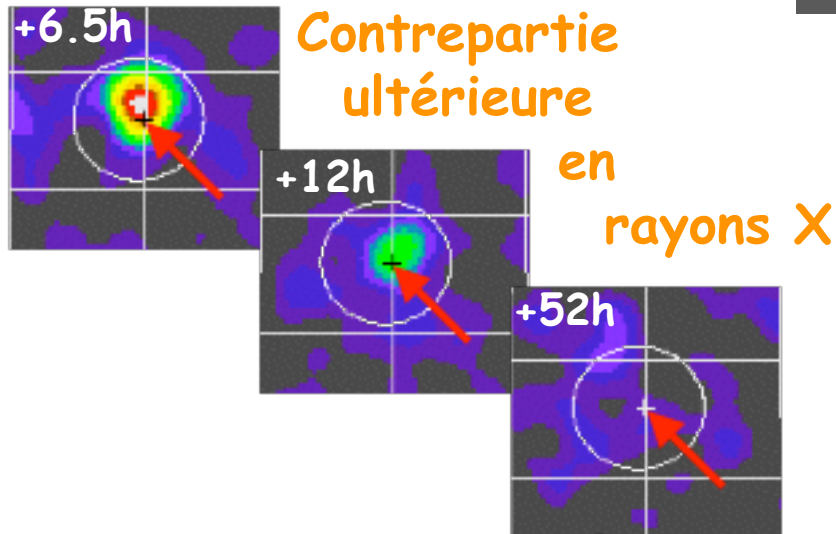
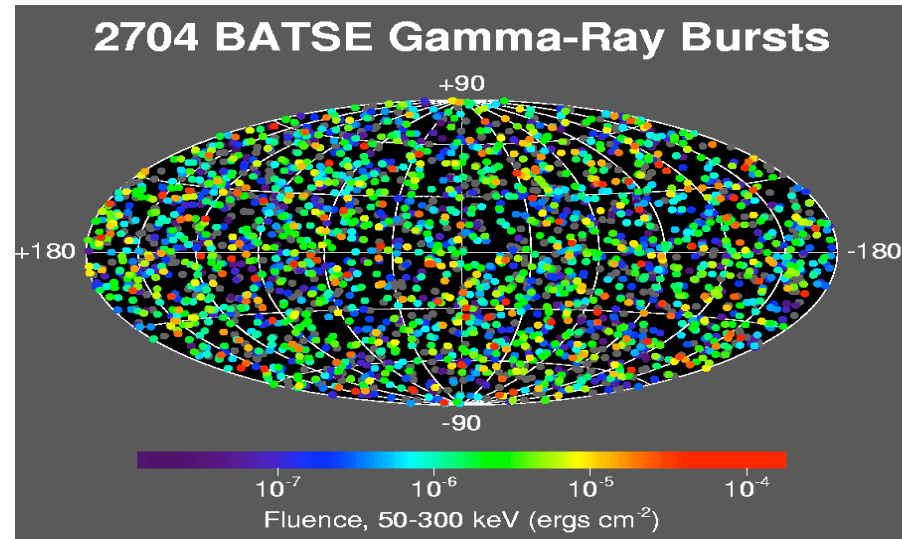
# Localisation des sursauts

Long débat, mais

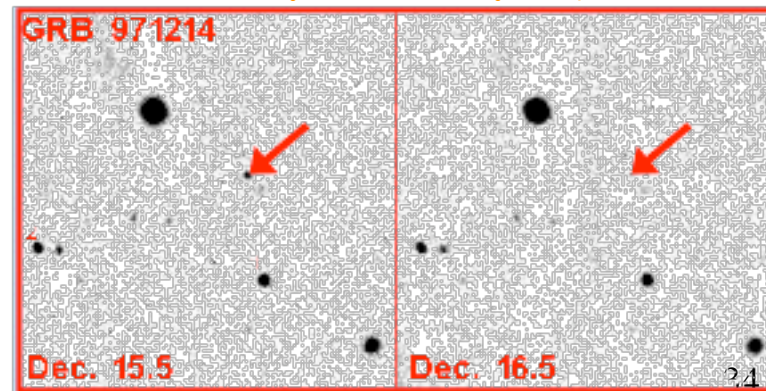
Isotropie  
+  
Contreparties optiques




Phénomènes cosmologiques  
( $z = 0.43$  à  $6.3$ )



Contrepartie optique



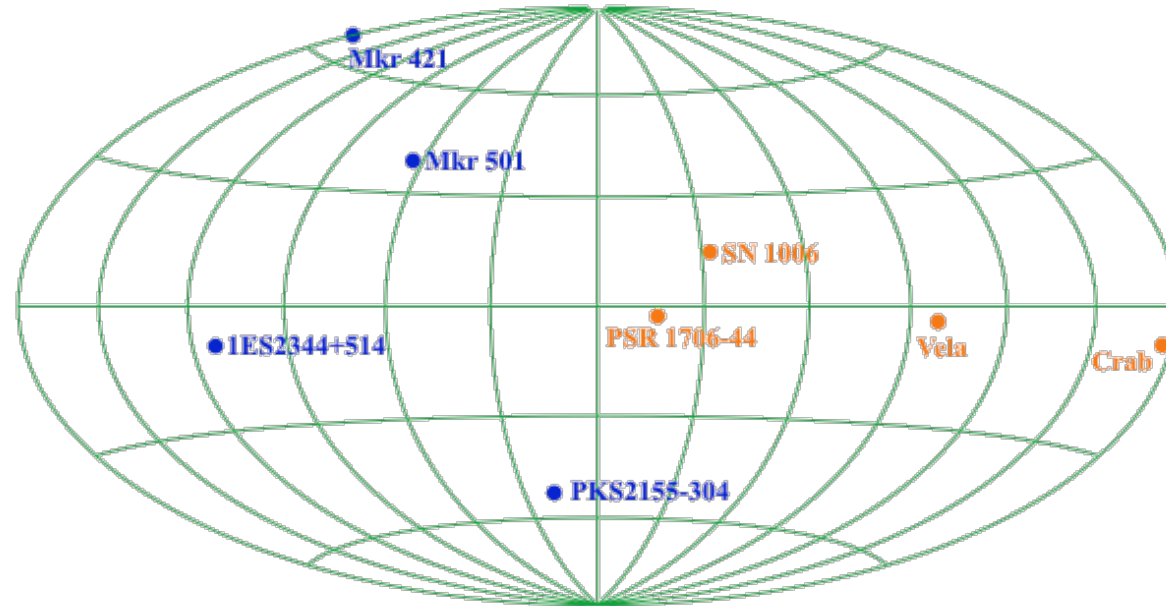
The background of the image is a dark, starry space. In the upper left, there is a bright, glowing star with a lens flare effect. A faint, blue and purple nebula or galaxy structure is visible in the center-left. The right side of the image is a solid black vertical bar.

**Aux plus  
hautes énergies**



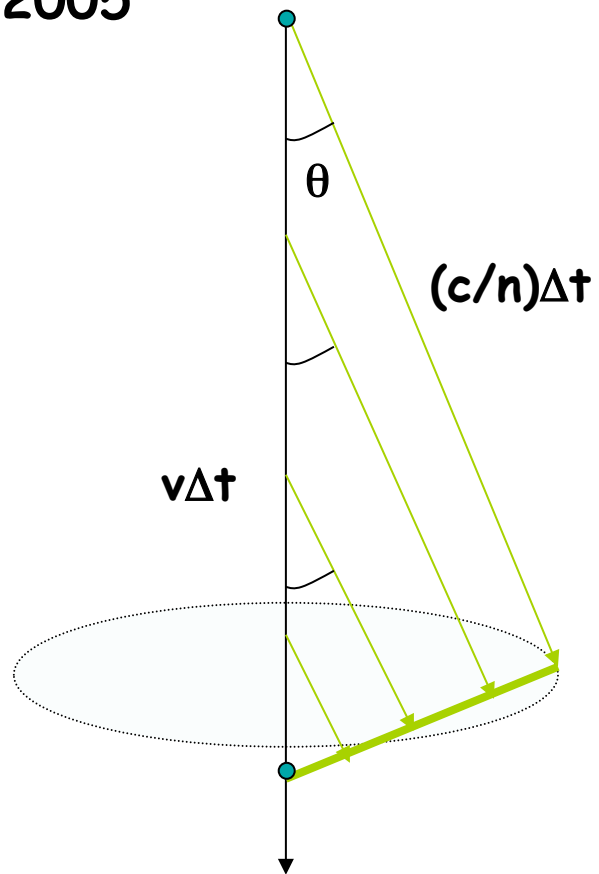
# Le ciel au TeV

2003



# Le ciel au TeV

2005

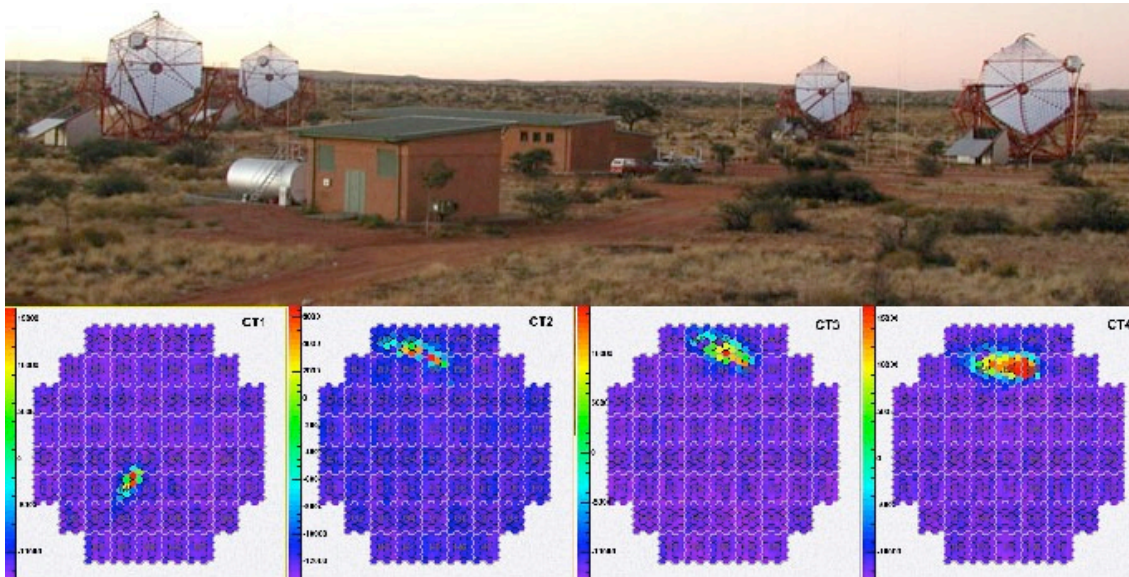


Détection des gammas de haute énergie par leur émission Cerenkov dans l'atmosphère

$$\cos \theta = (c/n) / v = 1^\circ \text{ (air)}$$

# Le ciel au TeV

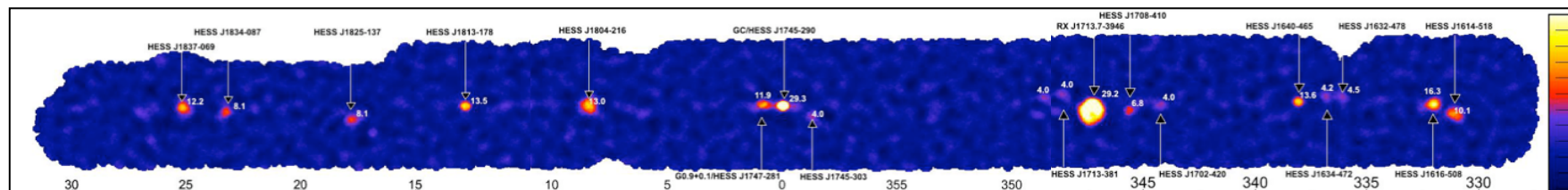
2005



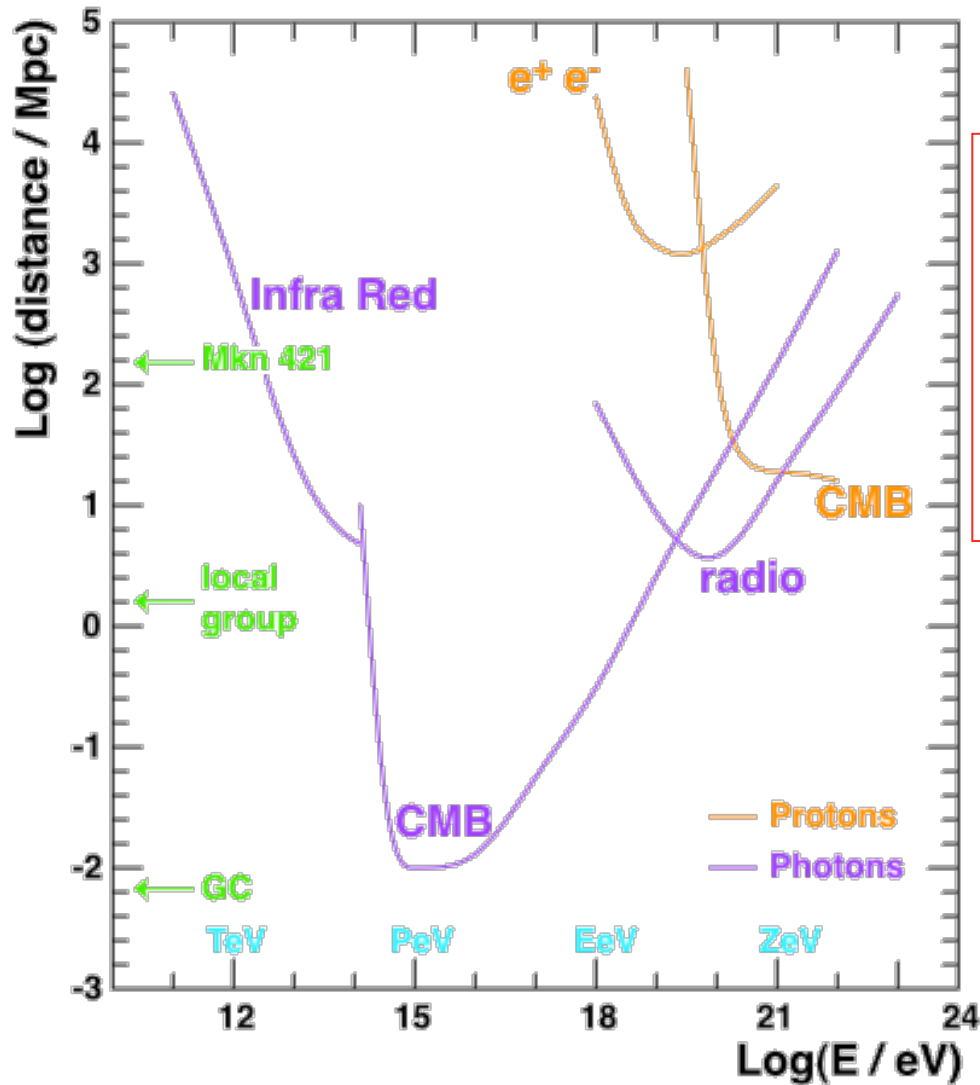
vue  
stéréoscopique

**HESS:**  
Relevé du plan galactique

plusieurs dizaines de nouvelles sources  
- SNRs, binaires X, pulsars  
- certaines sans contrepartie aux autres  $\lambda$



# « Horizon » Gamma



coupure GZK

Raison principale  
pour absence  
de sources  
extragalactiques au TeV

# Astroparticule

1) Approche **multi-messager**  
**Rayons cosmiques**

2) **Neutrinos cosmiques**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Astronomie neutrinos

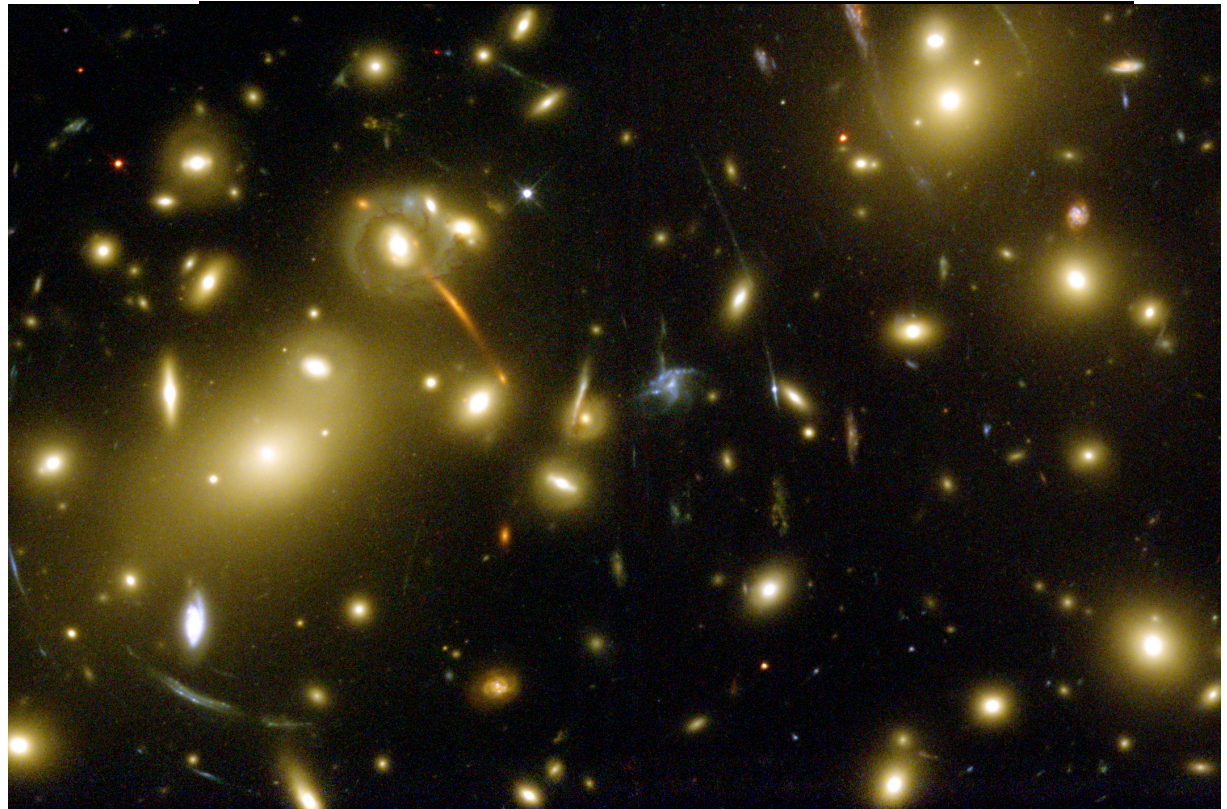
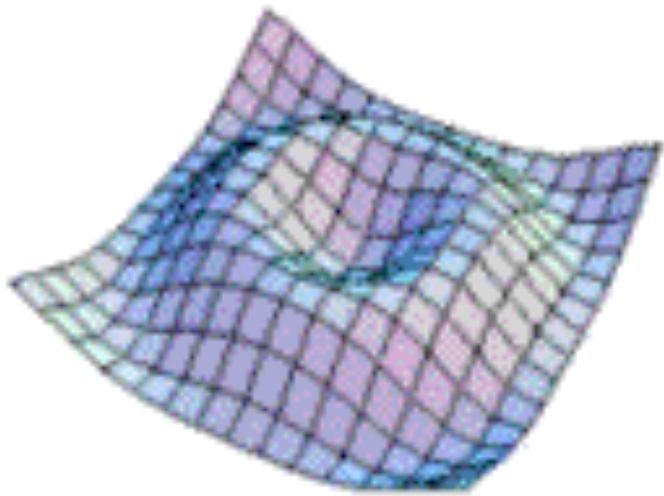
3) **Astronomie gamma**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*





# Gravitation et espace-temps

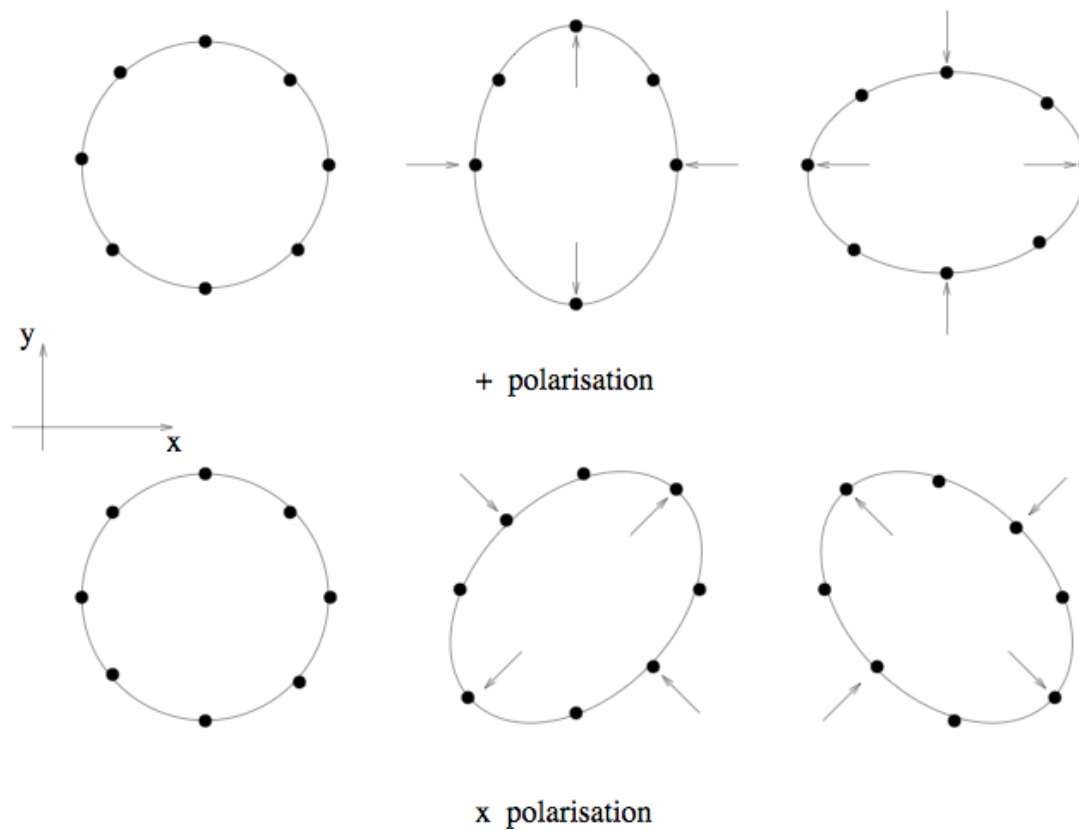
Un espace-temps courbe ( $\neq$  relat. restreinte)



# Ondes gravitationnelles

relativité générale → ondes gravitationnelles

- prédiction dès 1918
- 2010 : pas une seule détection (*pourquoi ?*)

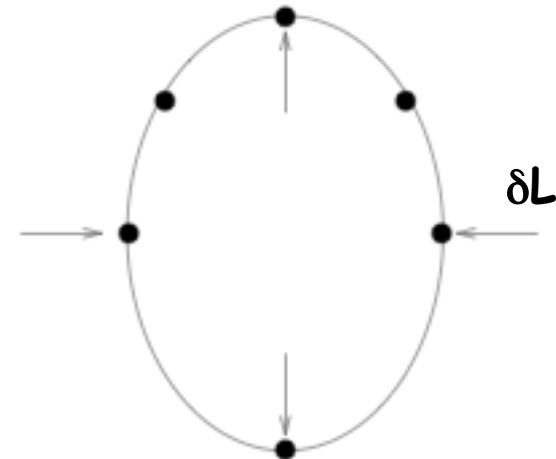


# Ondes gravitationnelles

$$h = \delta L / L$$

Variation de longueur due à onde gravitationnelle

Longueur totale

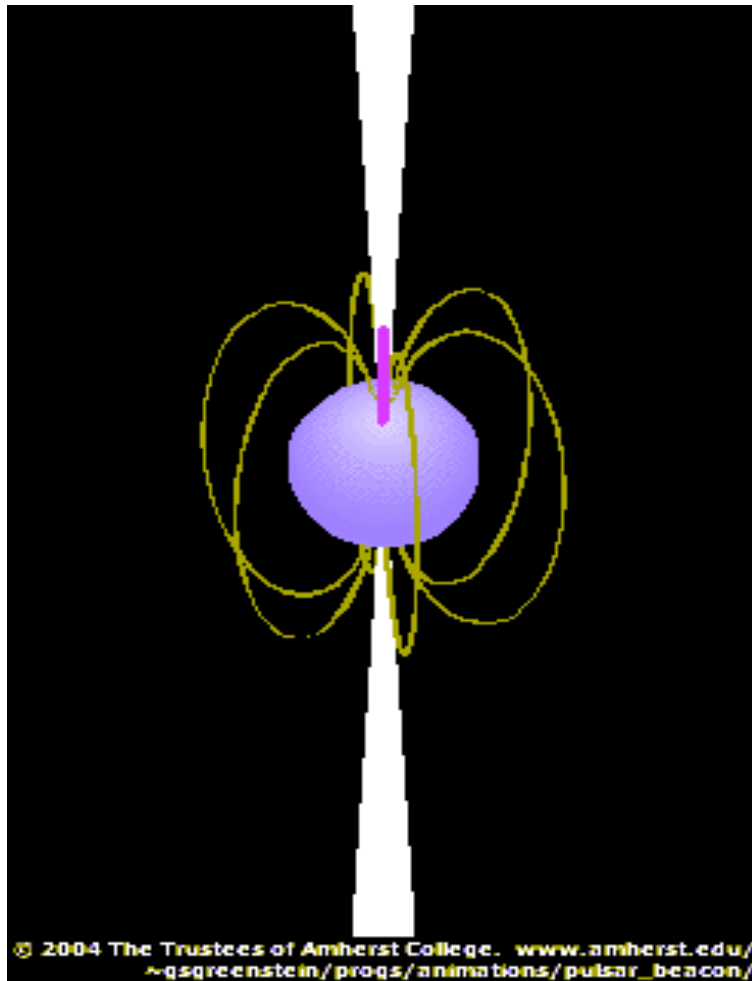


Explosion SN dans amas de la Vierge (15 Mpc):  
 $h \sim 10^{-21}$  à  $10^{-24}$

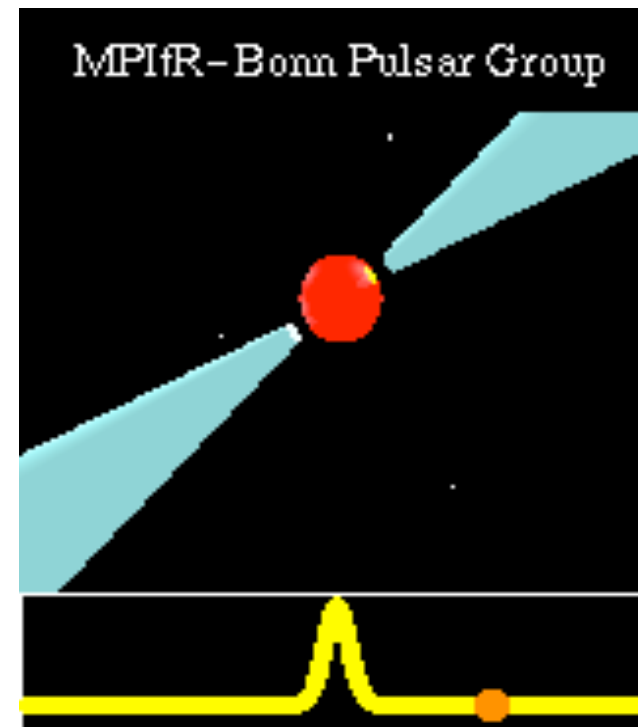
Système de deux trous noirs (10 Mpc):  
 $h \sim 10^{-22}$  à  $10^{-23}$

Pour  $L_{\text{terre-soleil}} = 150.10^6$  km:  $\delta L \sim 0,15$  nm

# Hulse et Taylor



Pulsar 1913+16 découvert en 1974  
 $T = 59 \text{ ms}$   
précision meilleure que horloges atomiques!

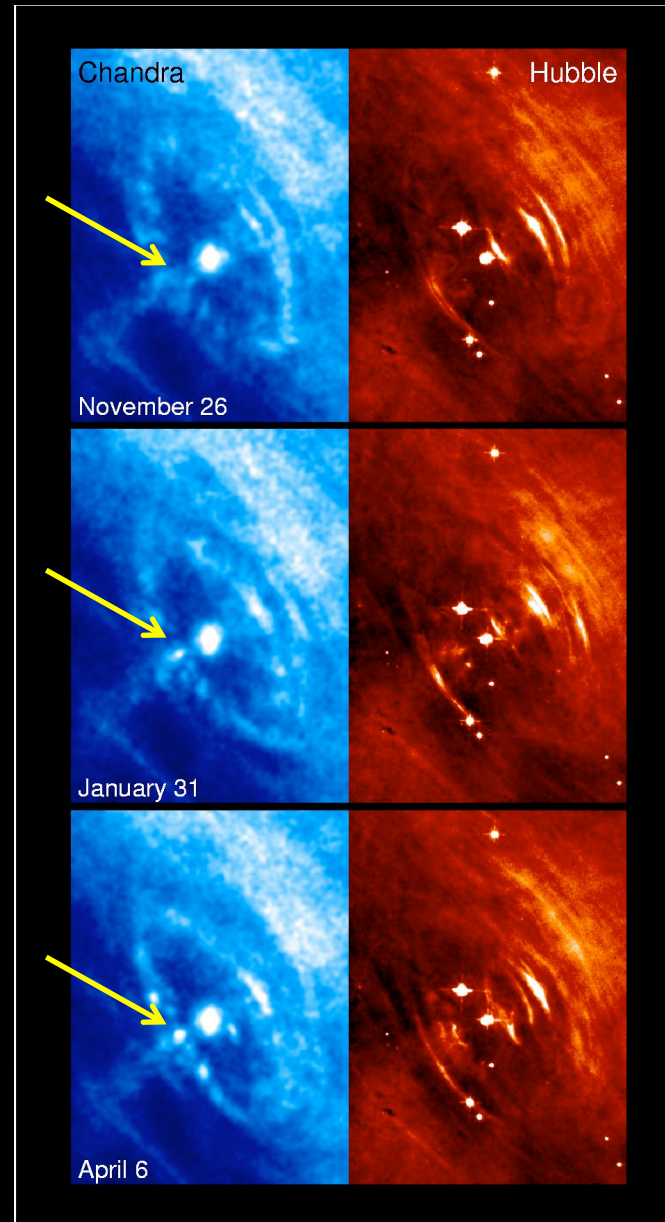




# Pulsar du Crabe



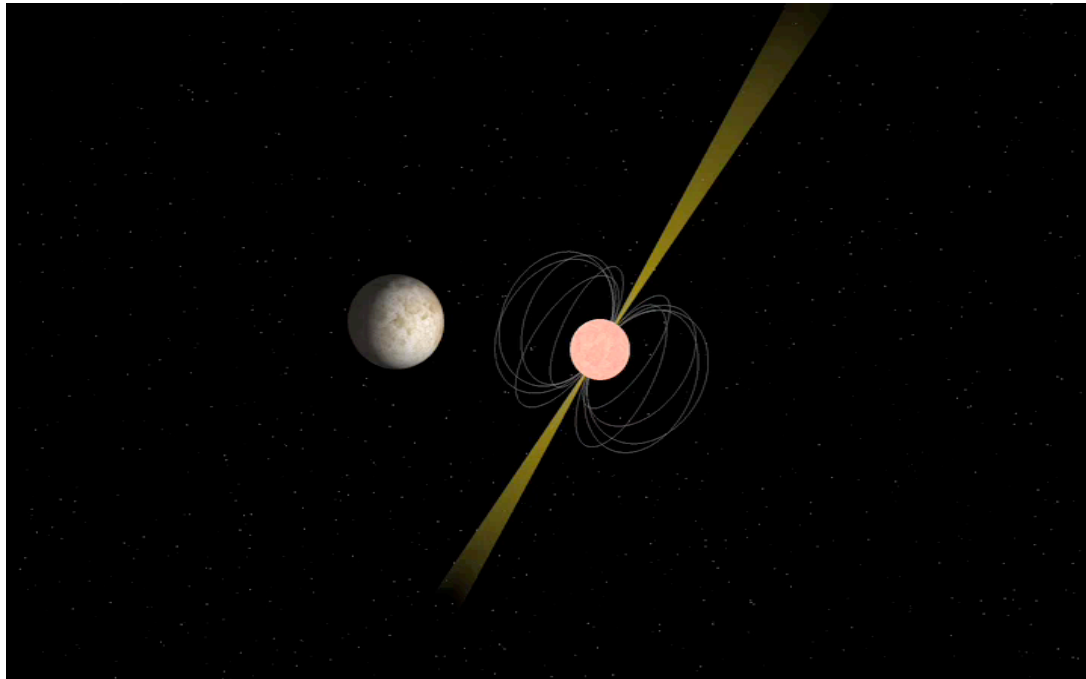
Hubble - optique (rouge)  
Chandra - rayons X (bleu)



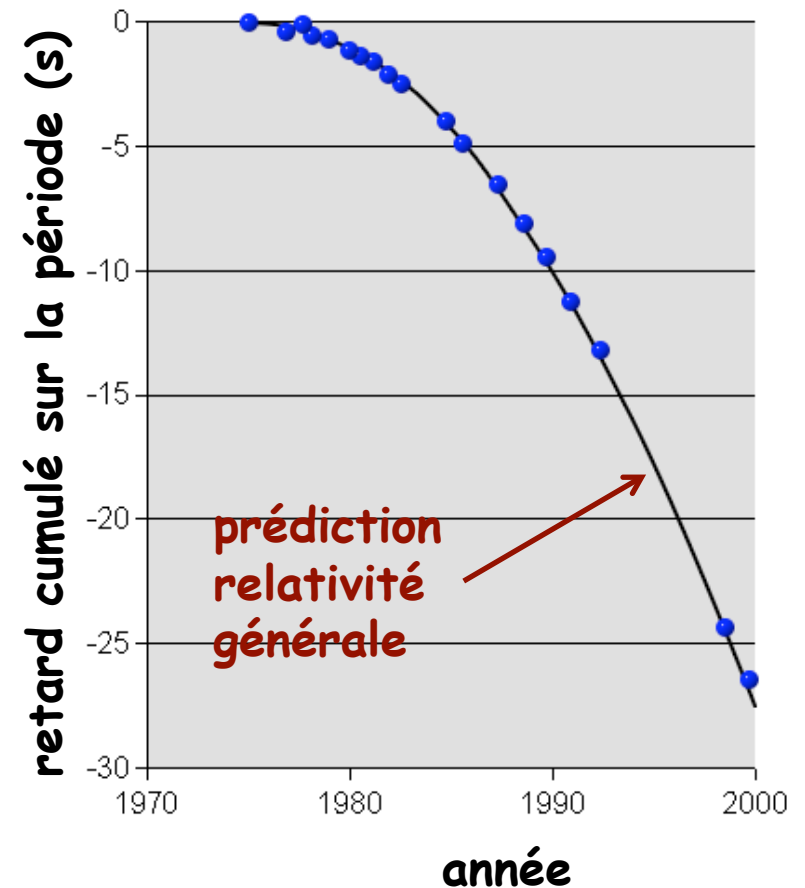


# Hulse et Taylor

Pulsar 1913+16 :  
perturbation périodique  $T \sim 8$  h  
→ compagnon



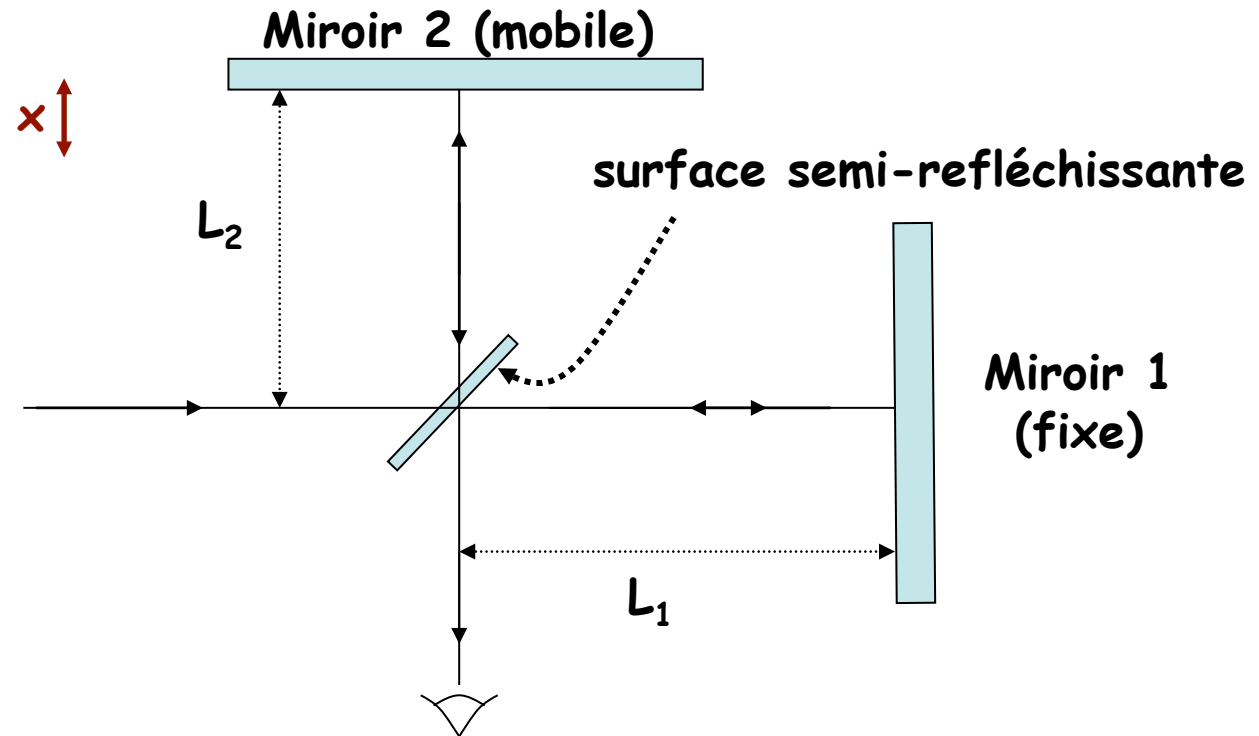
→ Prix Nobel 1993



$\Delta T = 76 \cdot 10^{-6}$  s/an,  $\Delta a = 3,5$  m/an  
coalescence dans 300.000.000 ans

# Détection des ondes gravitationnelles

Interférométrie



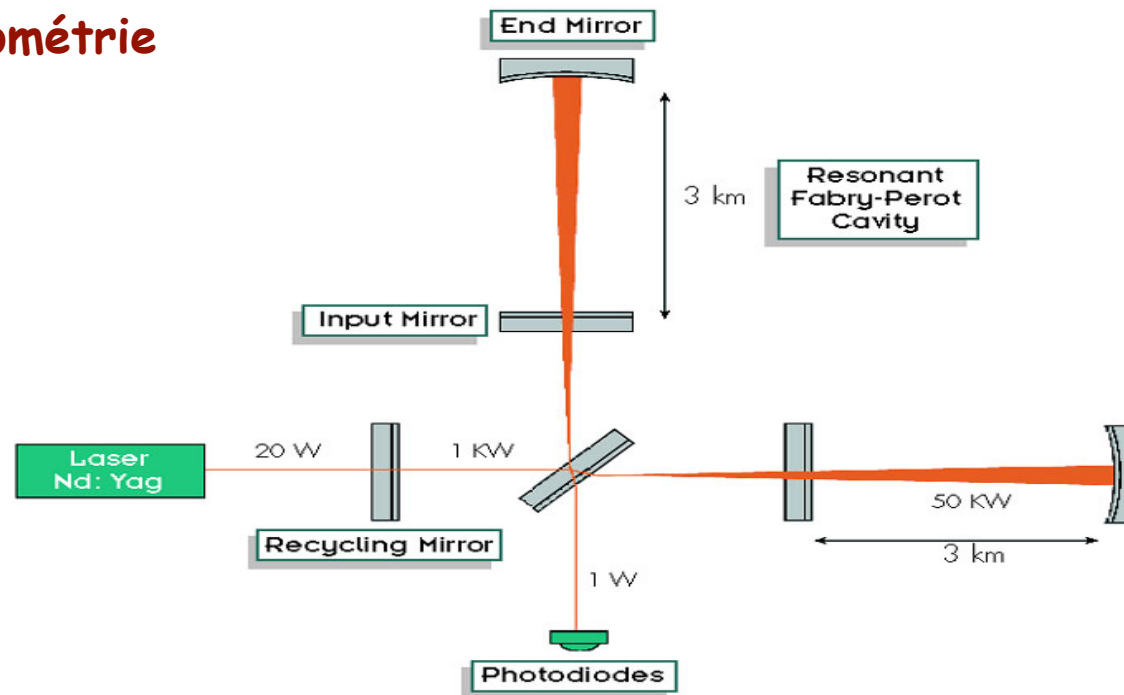
performance actuelle:  
 $\delta L \sim 10^{-15} \text{ m}$

$$x = m \lambda / 2$$

Donc pour  $h = 10^{-21}$  faut détecteur de  $L = \text{milliers de km}$

# Détection des ondes gravitationnelles

## Interférométrie



Miroir de recyclage:

$$L = 3 \text{ km} \rightarrow L \text{ effectif} = 3000 \text{ km}$$

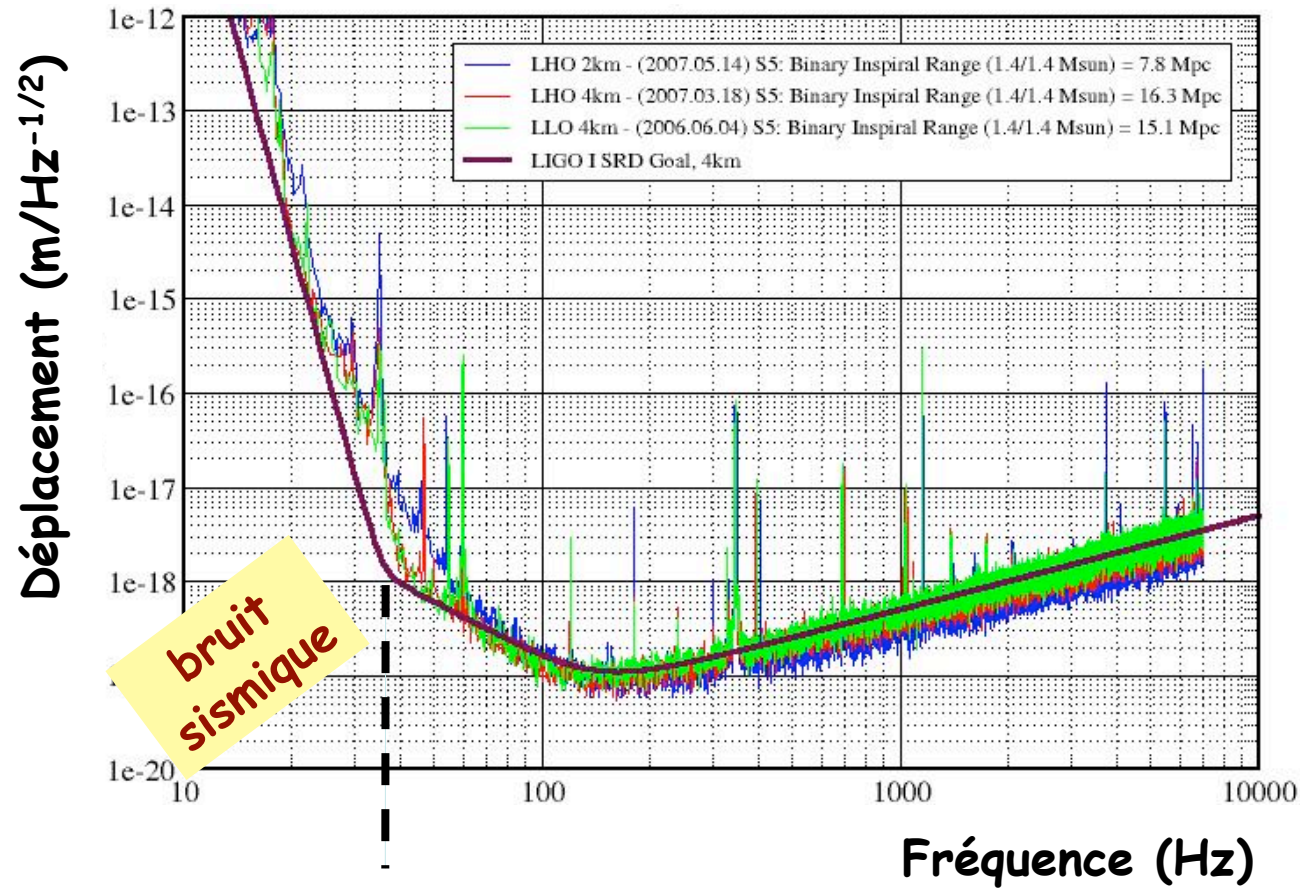
# Virgo (Pise)





# Détecteurs terrestres

## Sensibilité atteinte par LIGO





# Détecteurs terrestres

$\nu > 30 \text{ Hz}$

causalité  $\rightarrow L_{\text{MAX}} (\text{source}) = c/\nu < 10^4 \text{ km}$

soit taille  $<$  taille min d'une naine blanche  
~ étoile à neutron ou trou noir

donc limité

- aux astres les plus compacts
- aux phénomènes peu fréquents

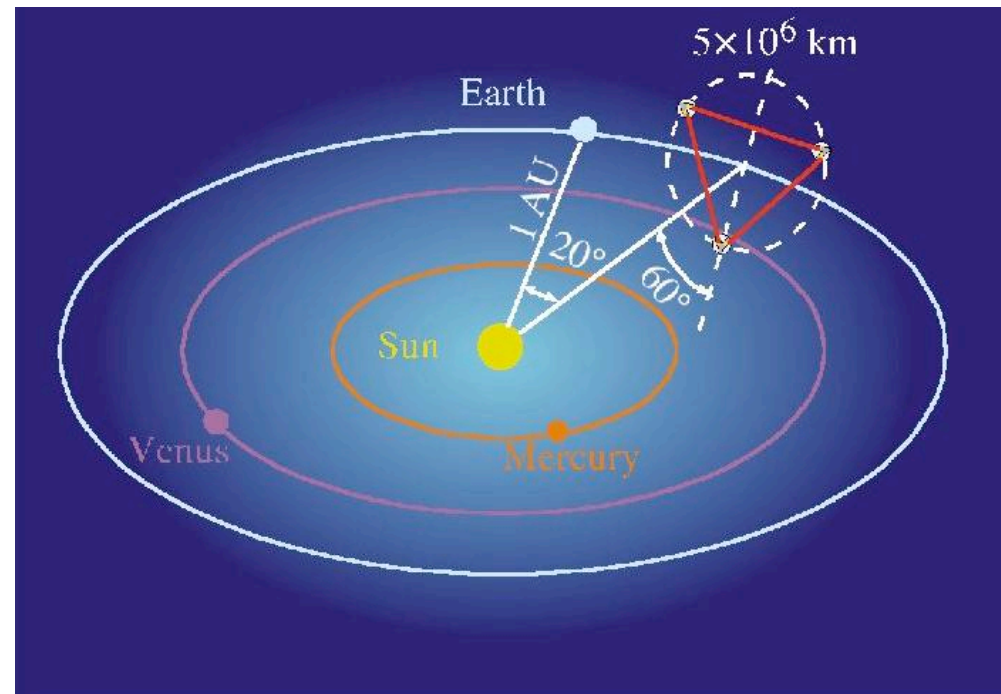
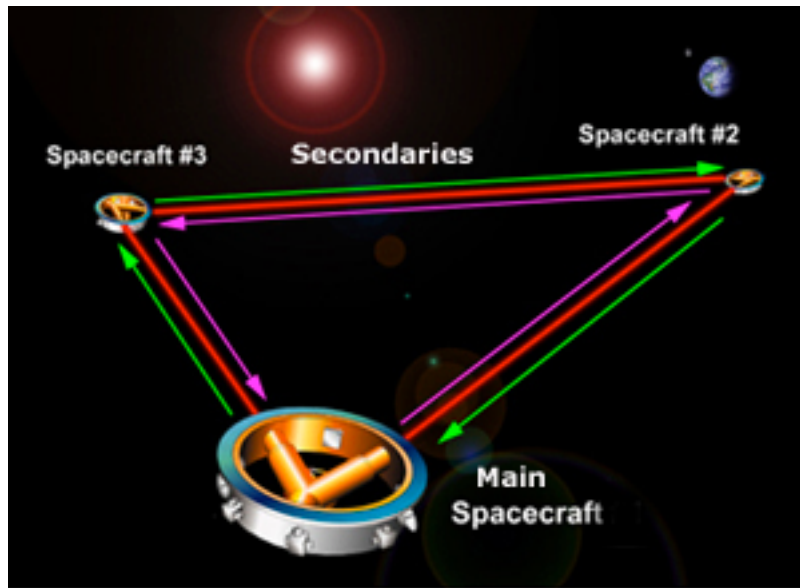
pour couvrir

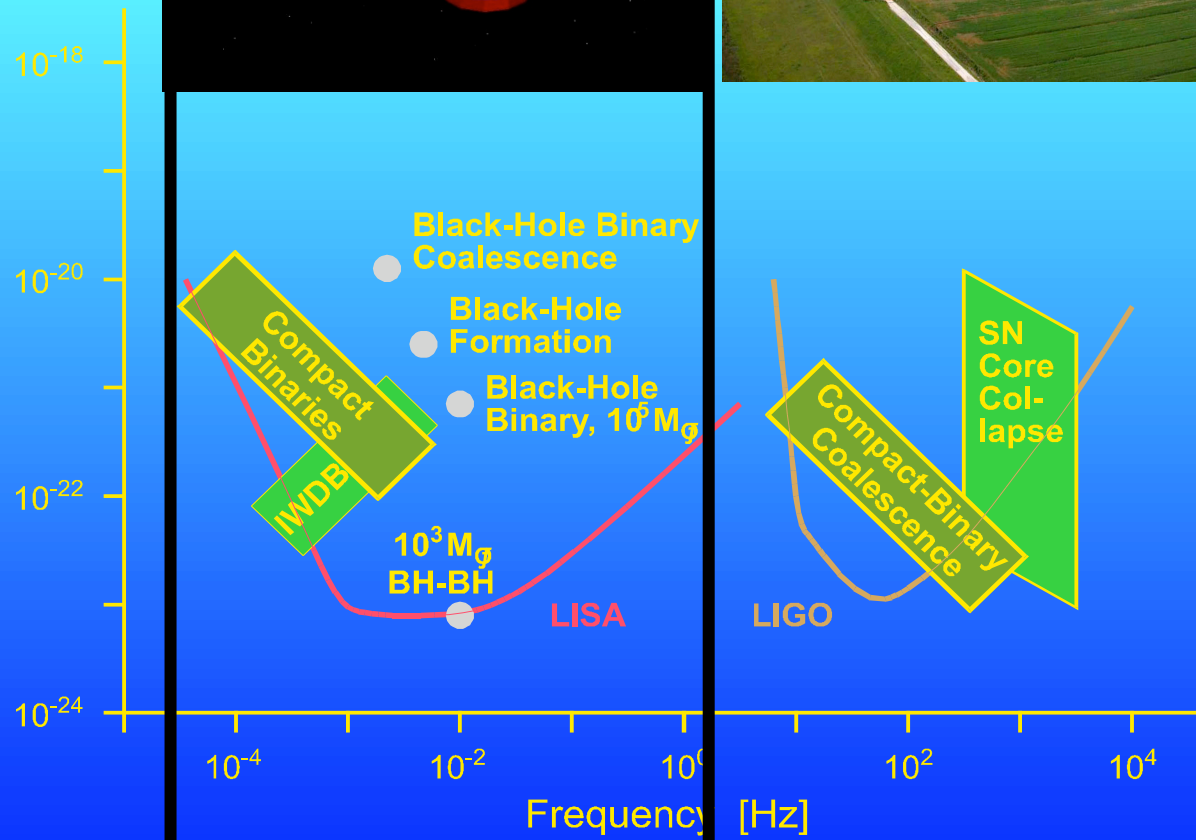
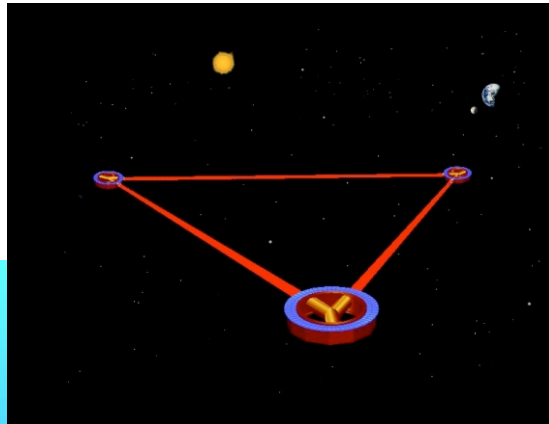
- coalescence de trous-noirs massifs ( $10^3 M_{\odot}$ )
- naines blanches

$\rightarrow$  freq. plus basse

$\rightarrow$  dans l'espace !

# LISA





# Conclusion

Approche **multi longueur d'onde** élargie à **multi messagers**,  
particulièrement en **astroparticule**,  
pour étude des phénomènes physiques

**Photons** de haute énergie: indiquent les sources des particules accélérées

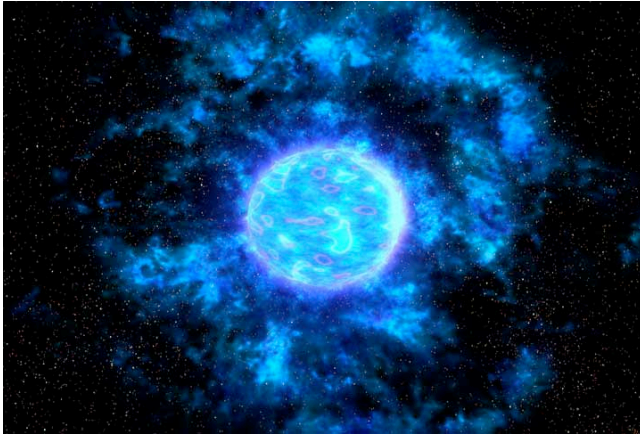
**Protons**: propriétés énergétiques et info sur accélérateurs cosmiques

**Neutrinos**: processus à l'origine des émissions des AGNs, des supernovae...

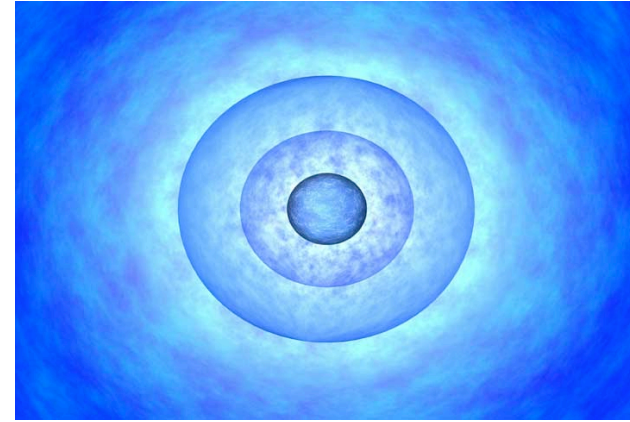
**Ondes gravitationnelles**: mouvement des corps massifs



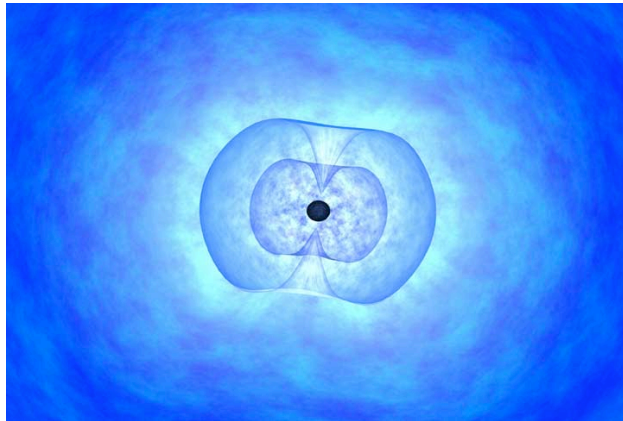




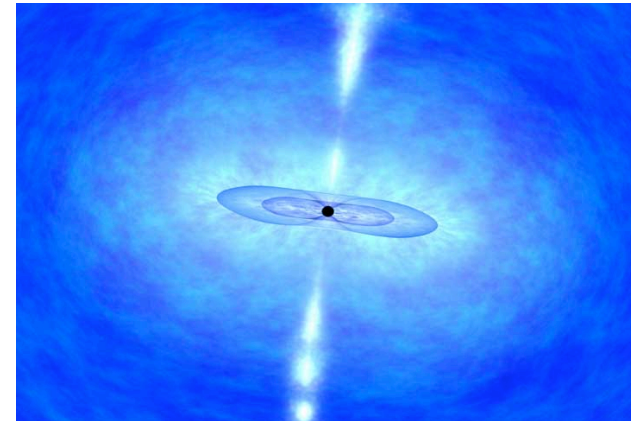
**Etoile massive:  
explosion en fin de vie**



**Effondrement du cœur  
en trou noir**

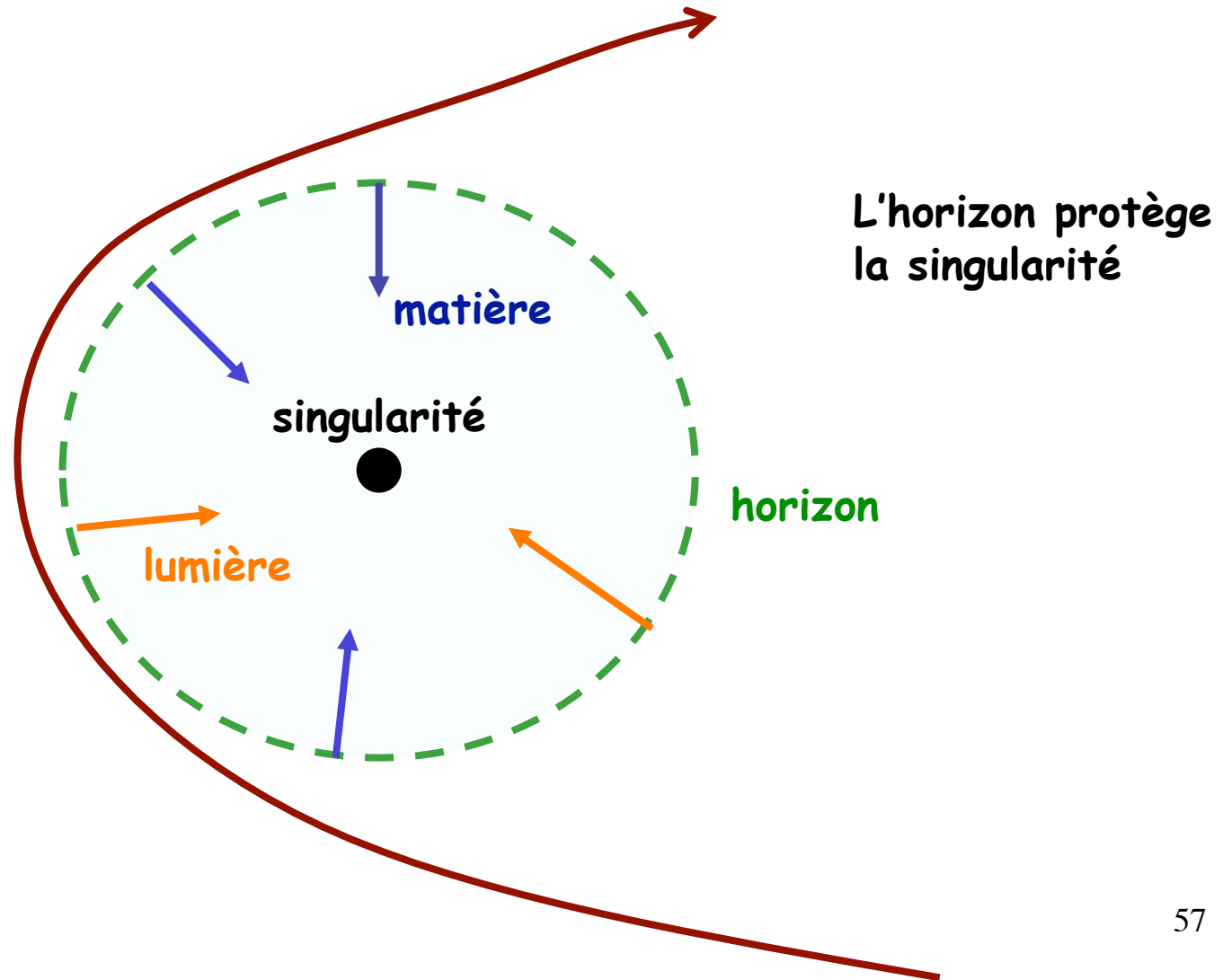


**Effondrement non uniforme,  
création de jets de particules**

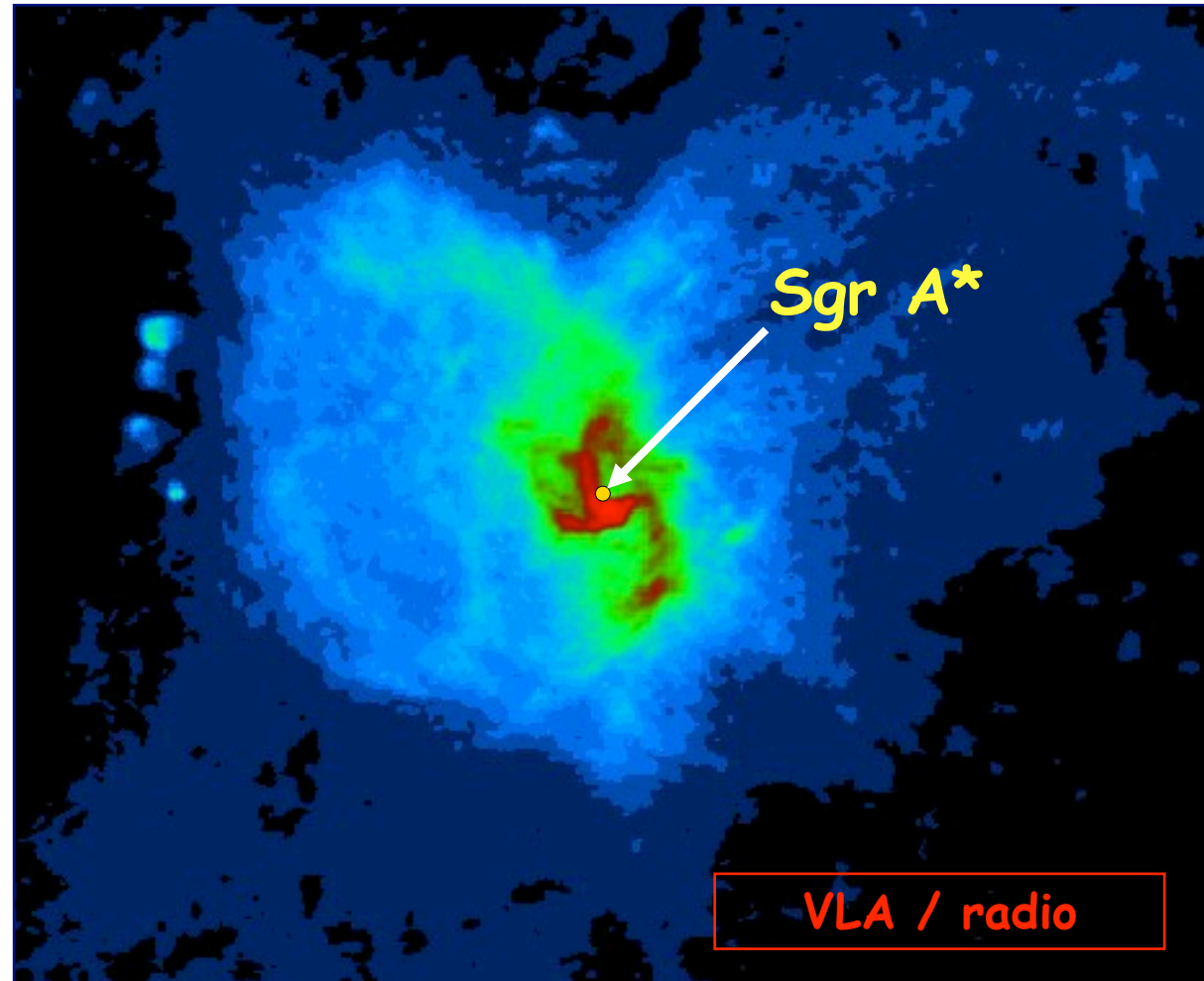


**Interaction des jets et couches externes,  
accélération des particules**

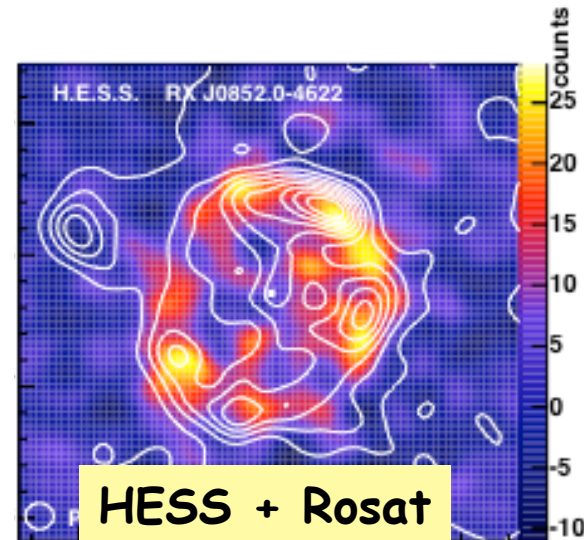
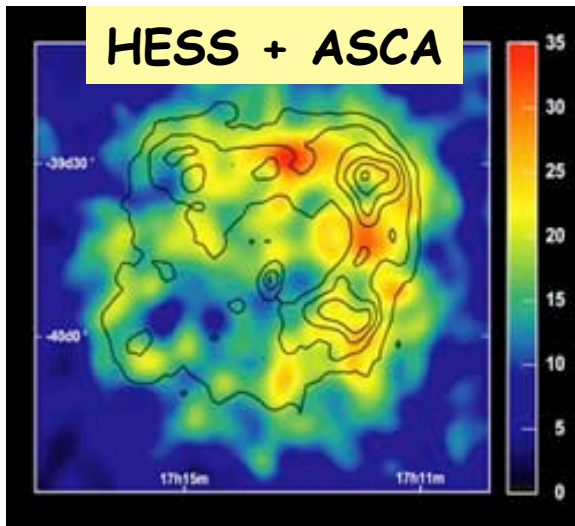
# Trous noirs



# Au centre de la Voie lactée



# Le ciel au TeV



Confirmation des restes de SN  
en tant qu'accélérateurs cosmiques