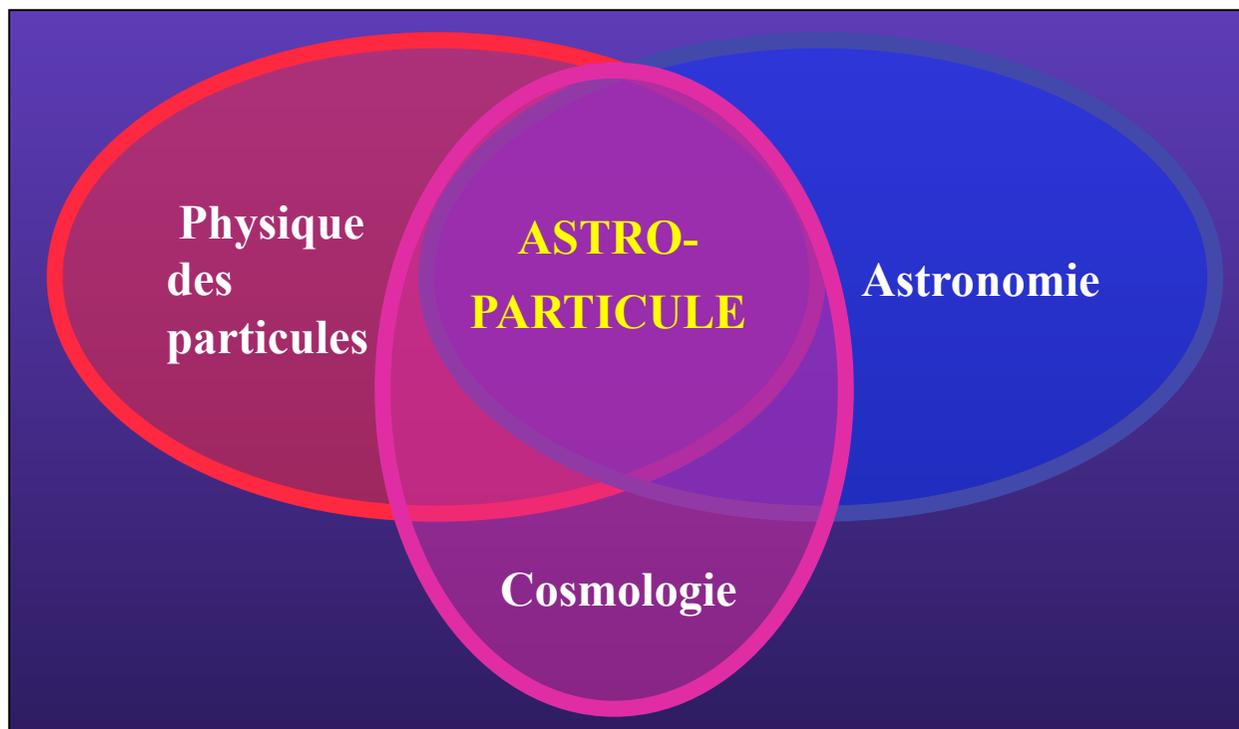


# Astroparticule

## 1/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay  
Bénodet, décembre 2014

# Astroparticule



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

# Astroparticule



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

2) Approche **multi-messagers**  
**Astronomie neutrino**  
**Ondes gravitationnelles**

*ou l'Univers violent...*

3) **Neutrinos (cosmiques ou pas)**

- Saga solaire
- Des neutrinos dans l'atmosphère
- Neutrinos et cosmologie

# Observations multi longueurs d'onde



1 km

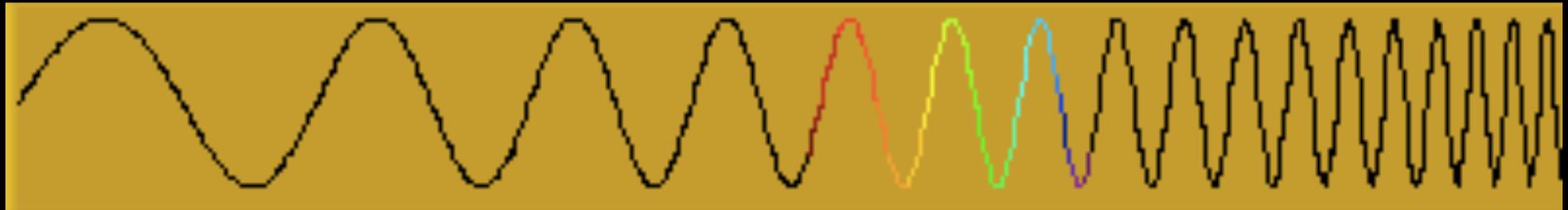
1 m

1 mm

1  $\mu\text{m}$

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

0,01 nm



Radio

Infrarouge

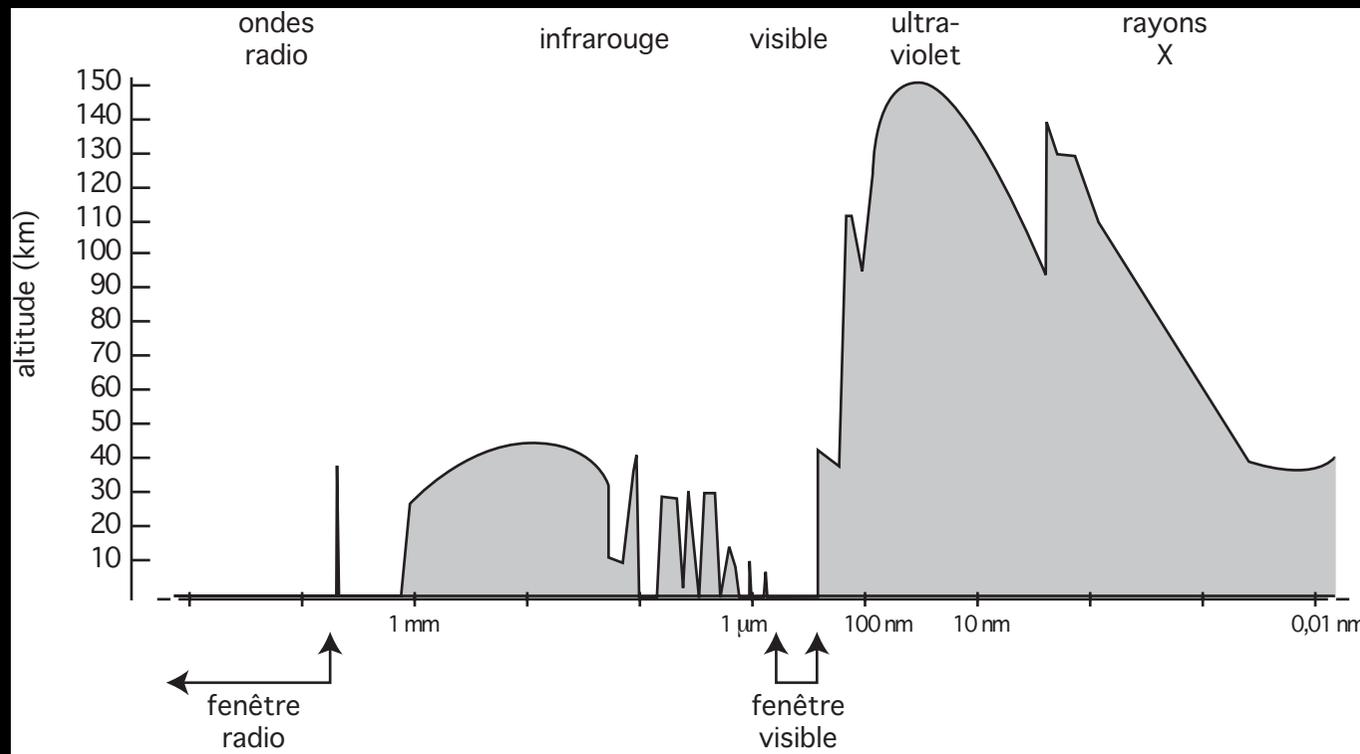
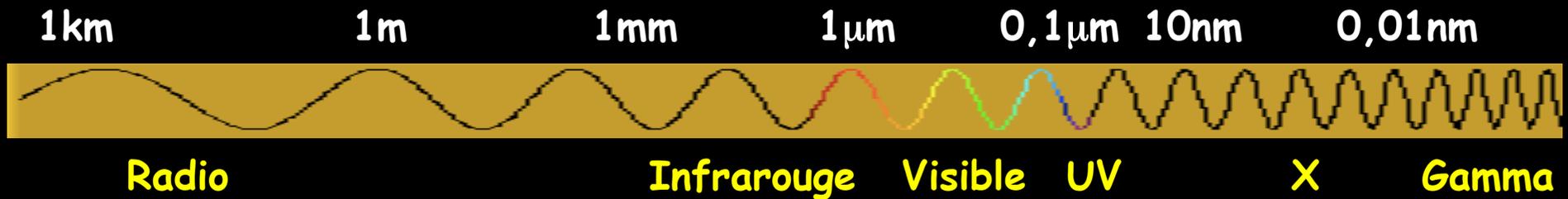
Visible

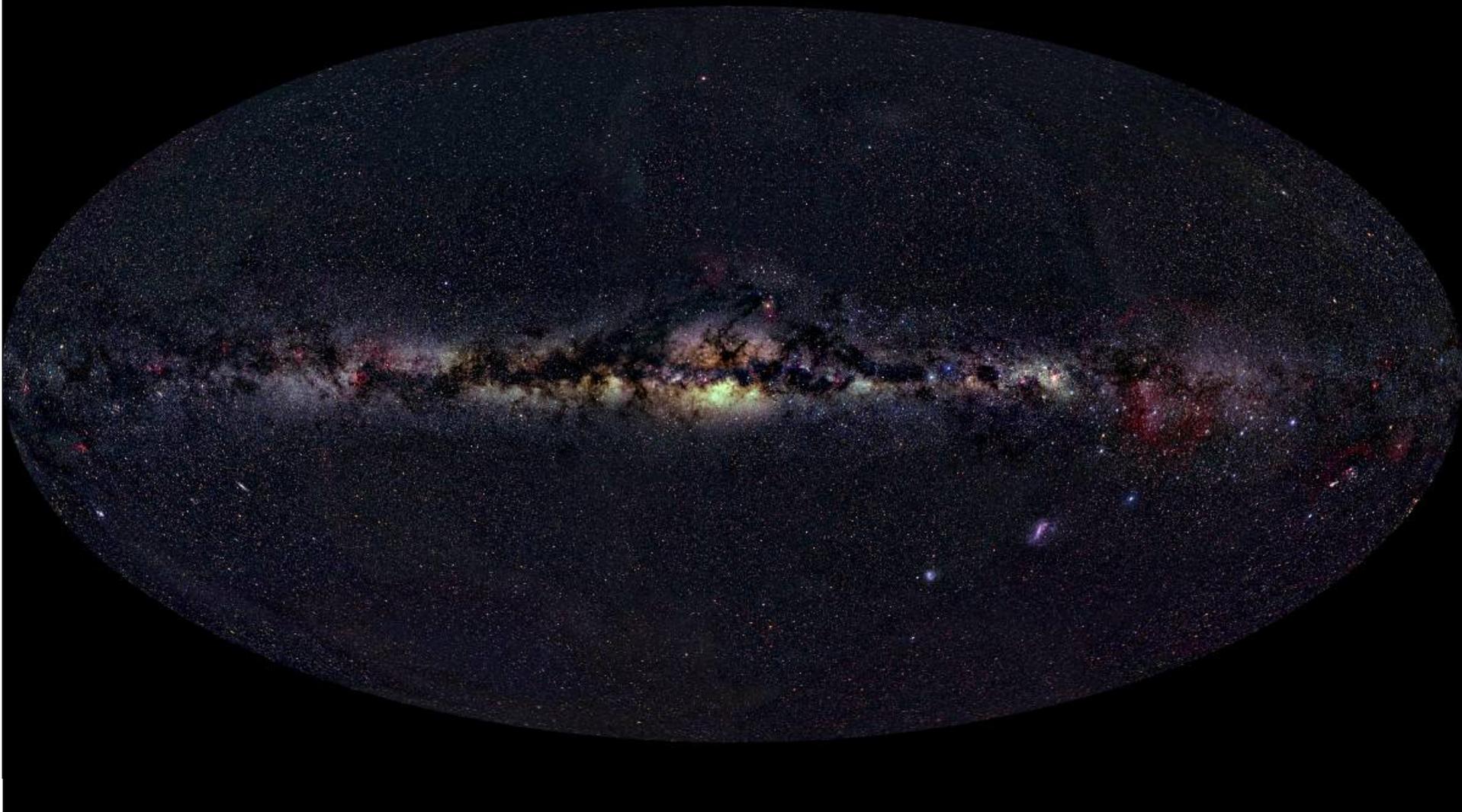
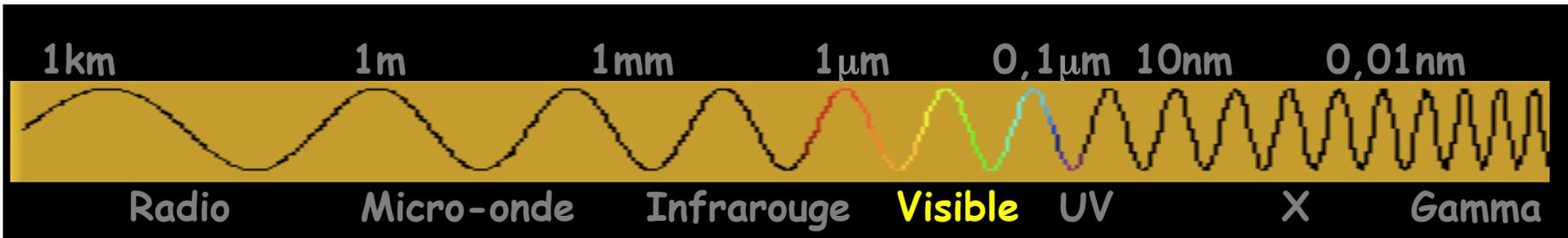
UV

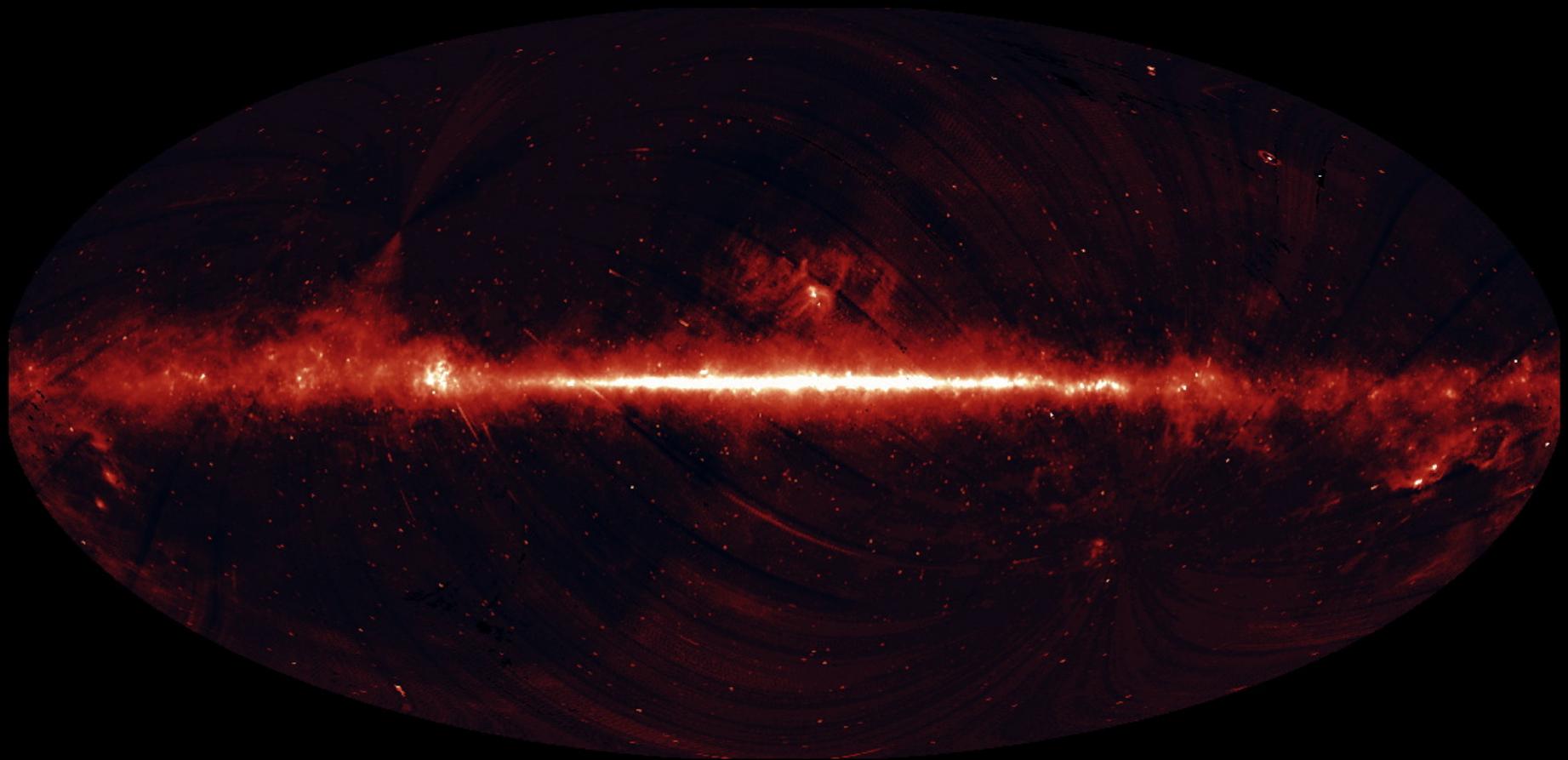
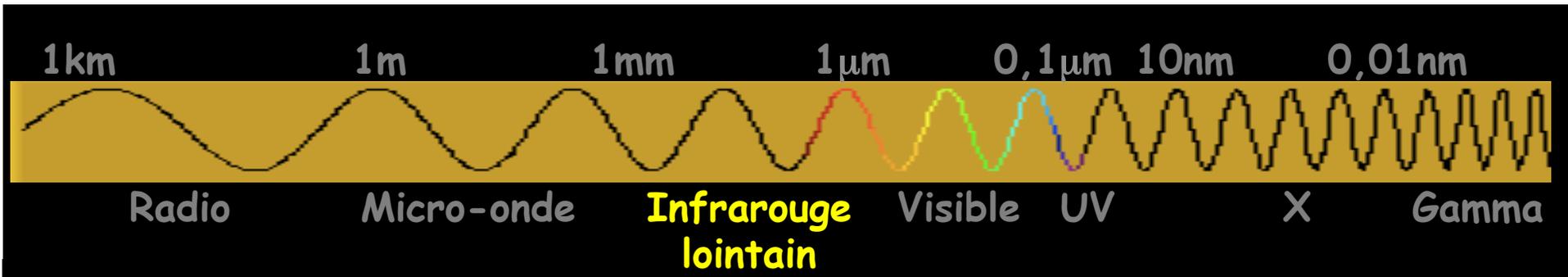
X

Gamma

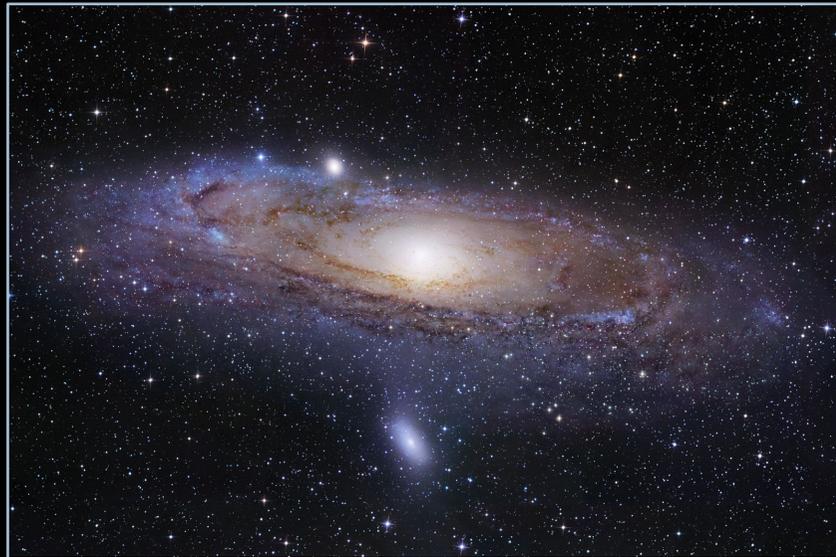
# Observations multi longueurs d'onde



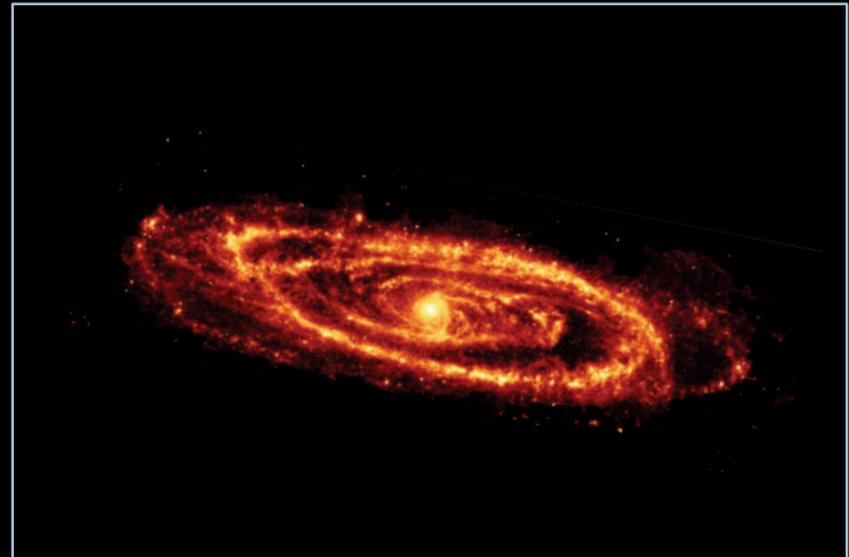




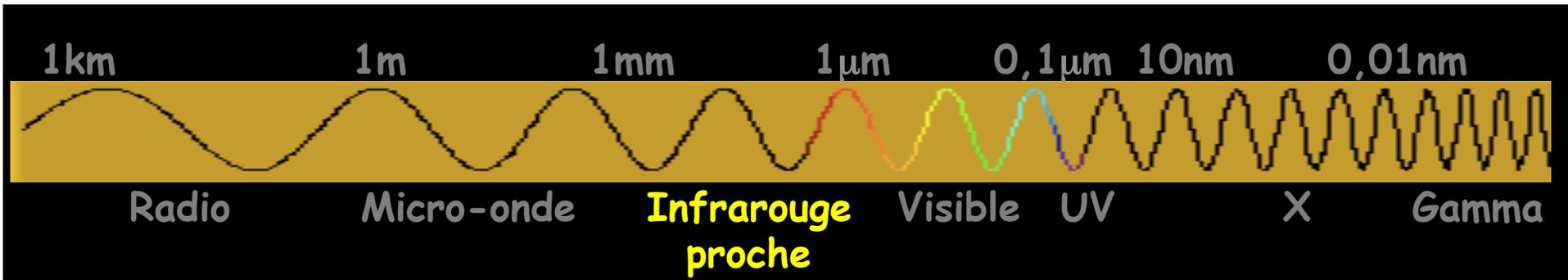
# Andromède

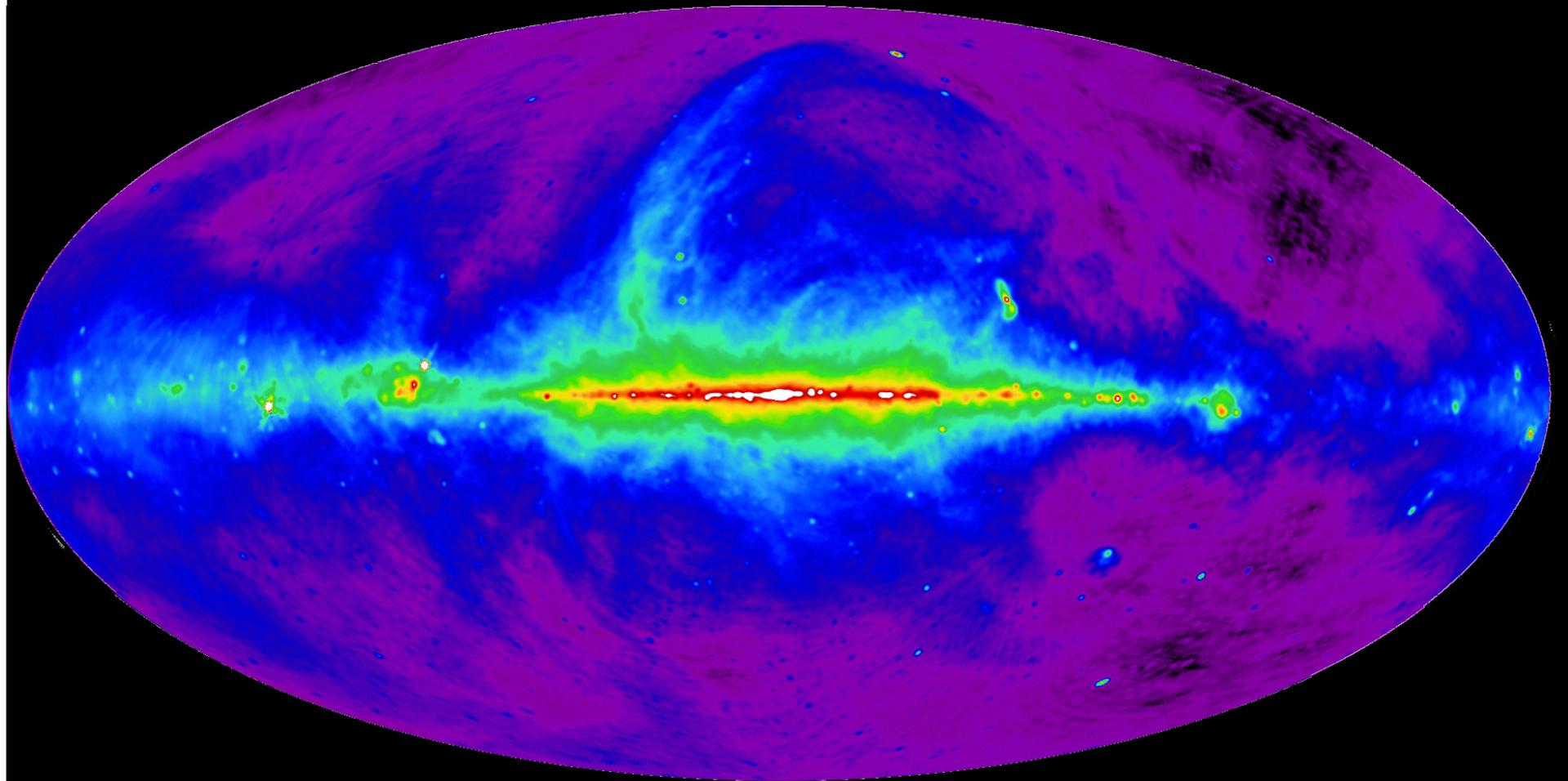
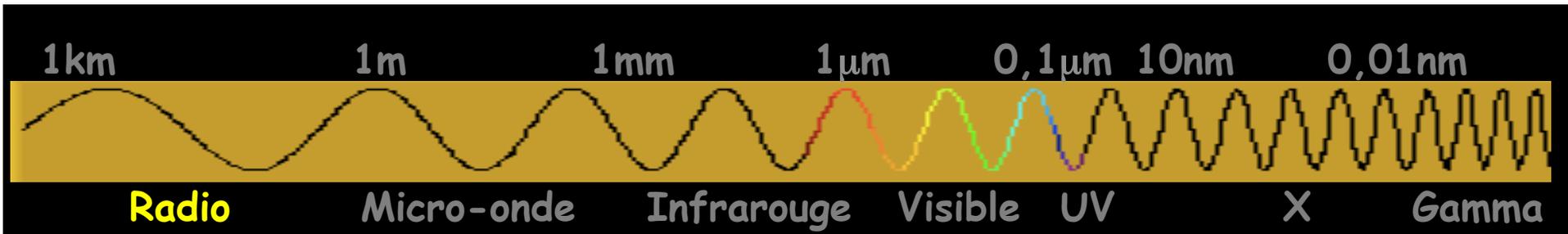


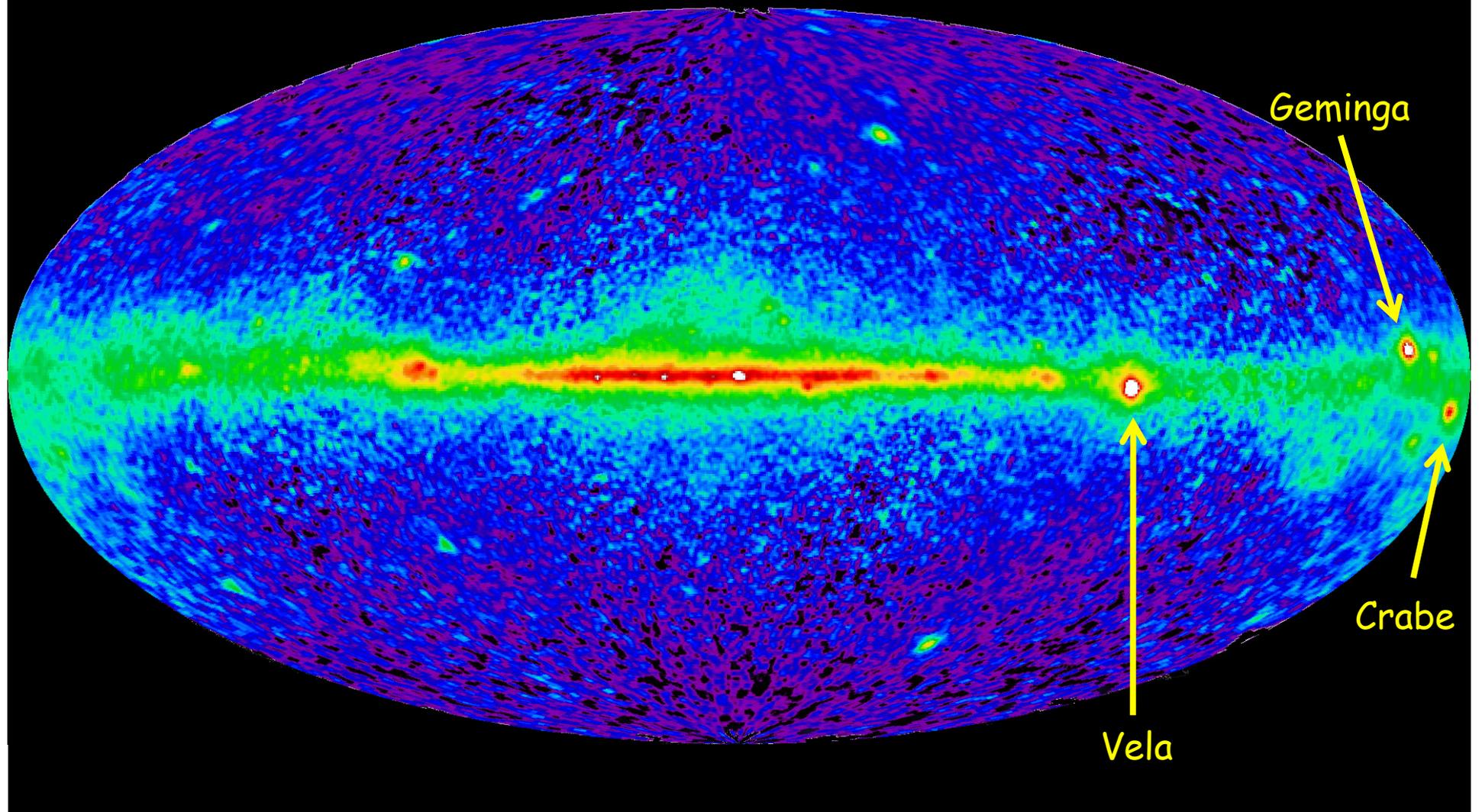
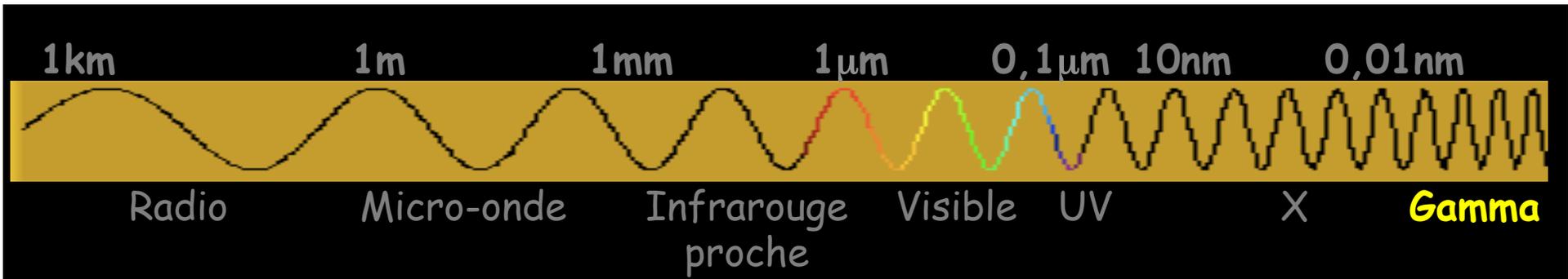
visible



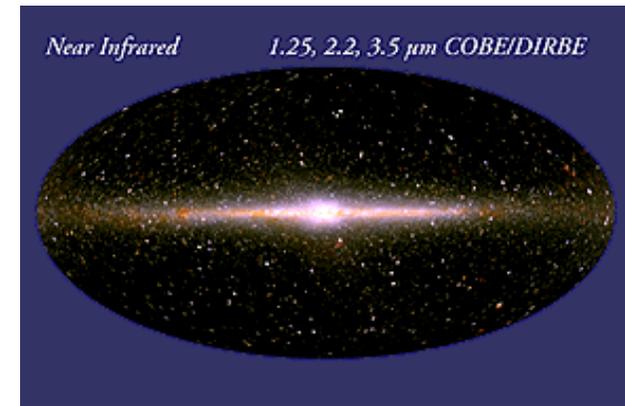
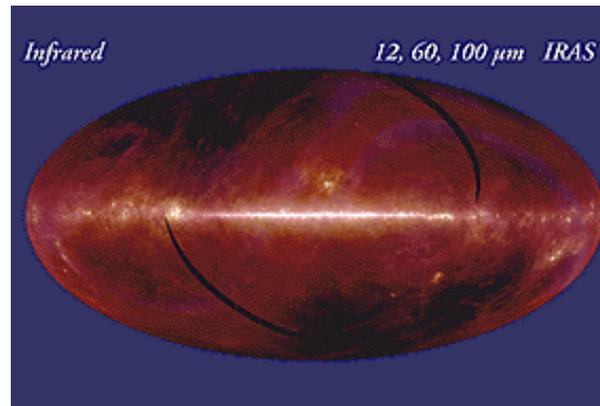
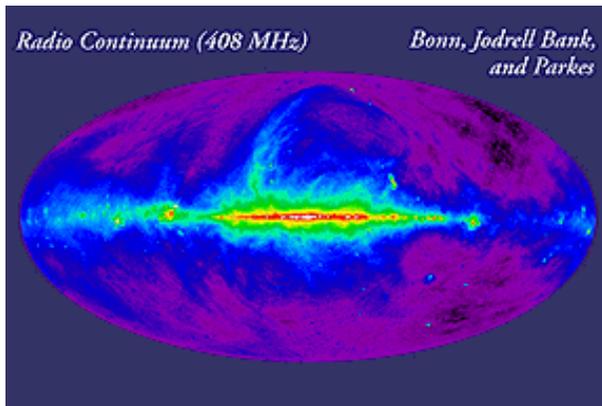
infrarouge



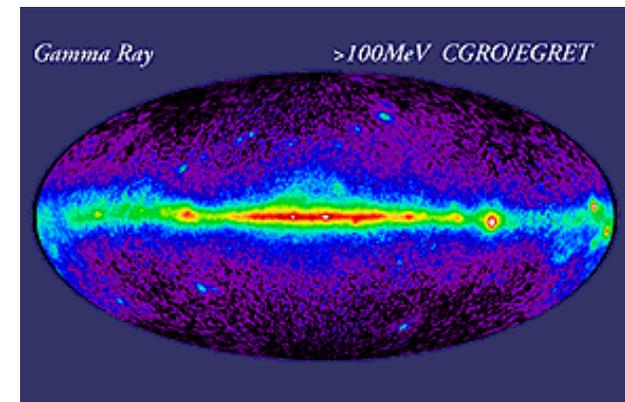
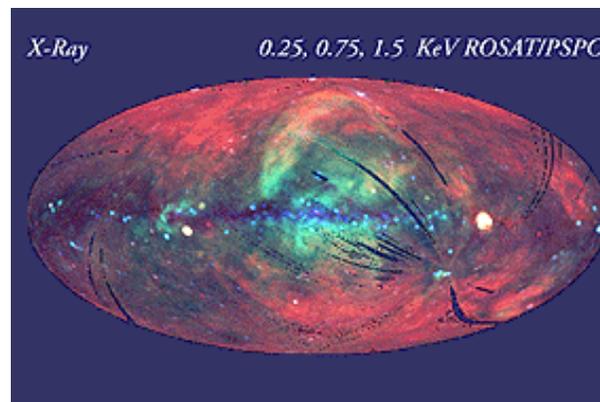
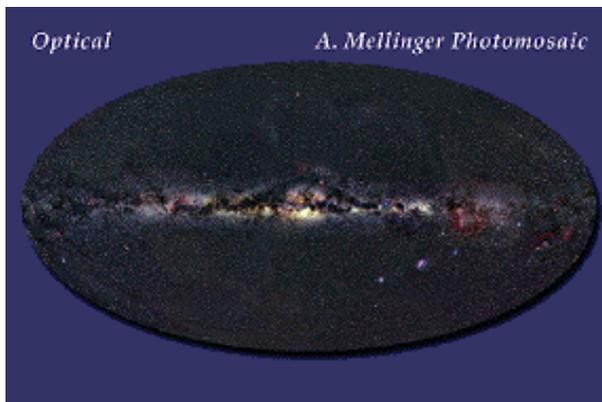




# Univers en multi-longueurs d'onde



## Les différentes facettes de la Voie lactée



# Astroparticule



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

2) **Neutrinos (cosmiques ou pas)**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Neutrinos et supernovae

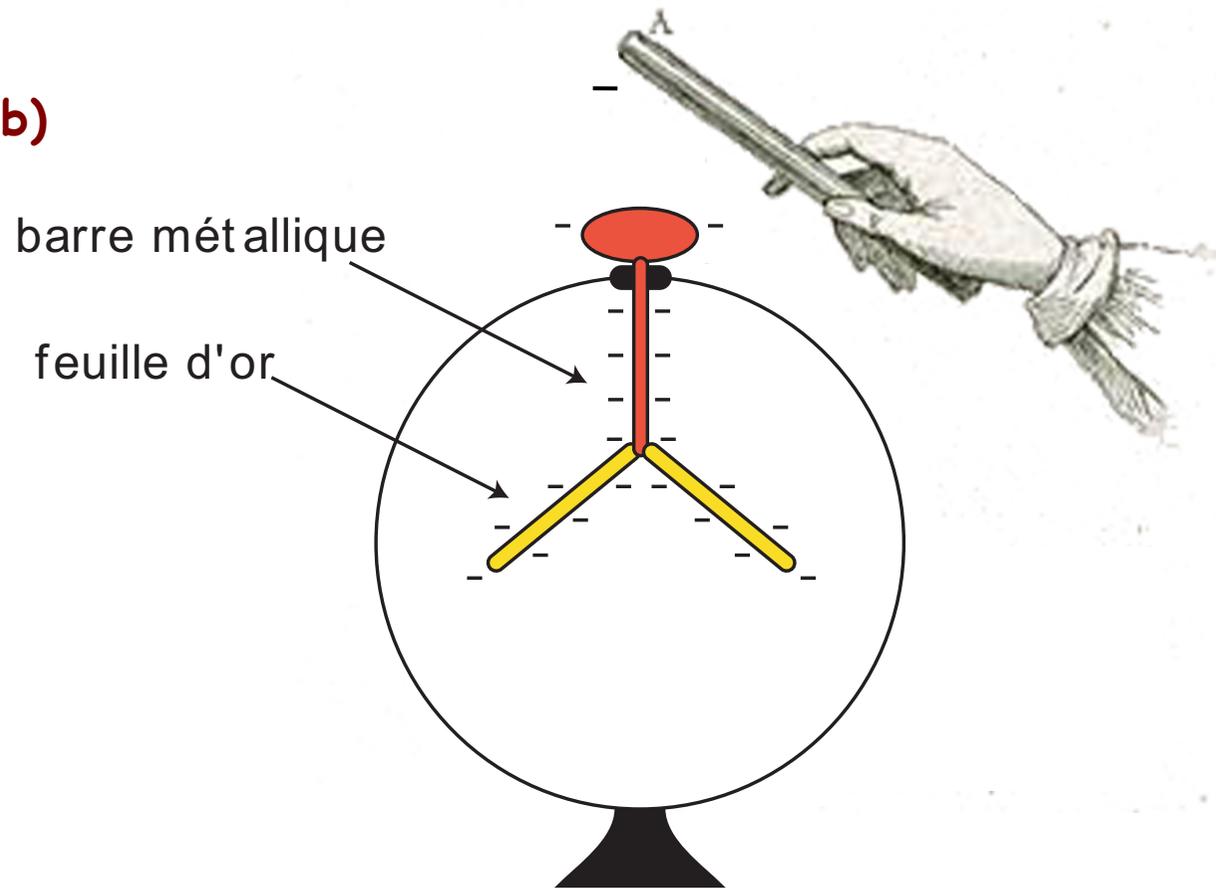
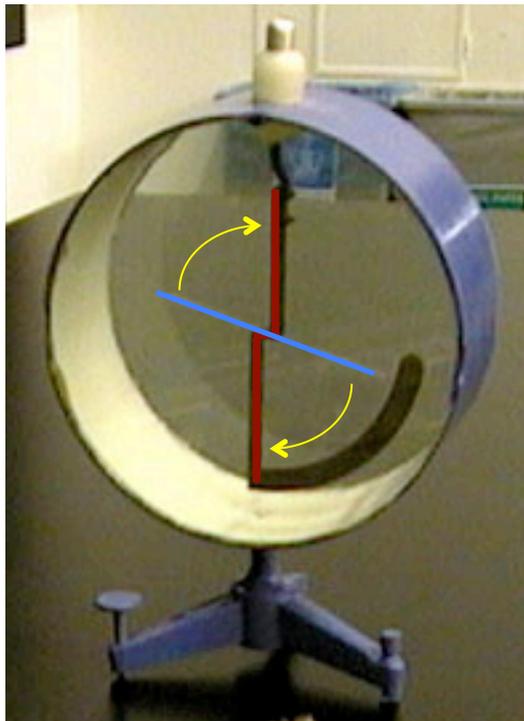
3) Approche **multi-messenger**  
**Astronomie neutrino**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*

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 'Découverte des rayons cosmiques' is written in a bold, yellow, sans-serif font, slanted slightly upwards from left to right. The text is centered horizontally and occupies the middle portion of the image.

Découverte des  
rayons cosmiques

# Découverte des rayons cosmiques

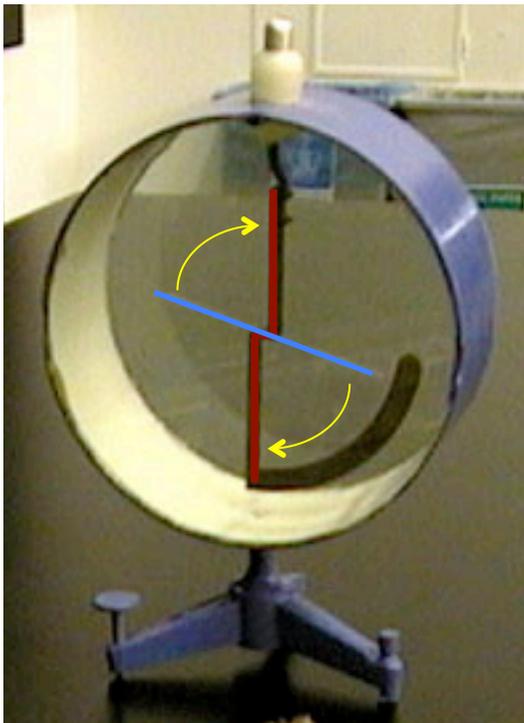
1901  
(voire 1785, Coulomb)



électroscope chargé

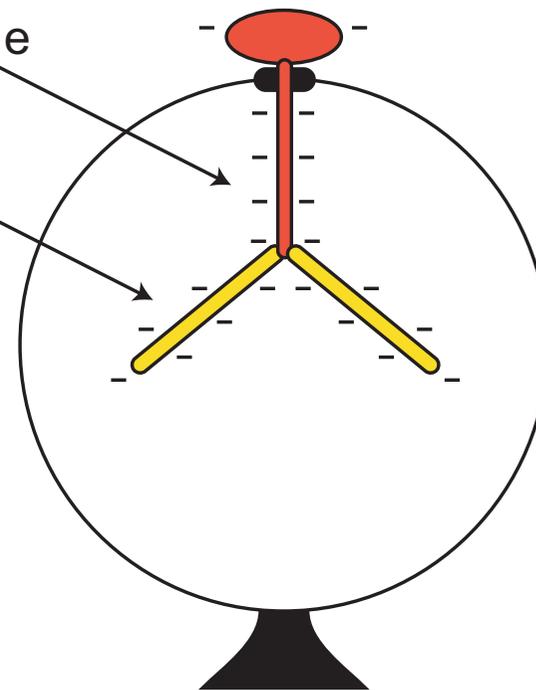
# Découverte des rayons cosmiques

1901  
(voire 1785, Coulomb)



barre métallique

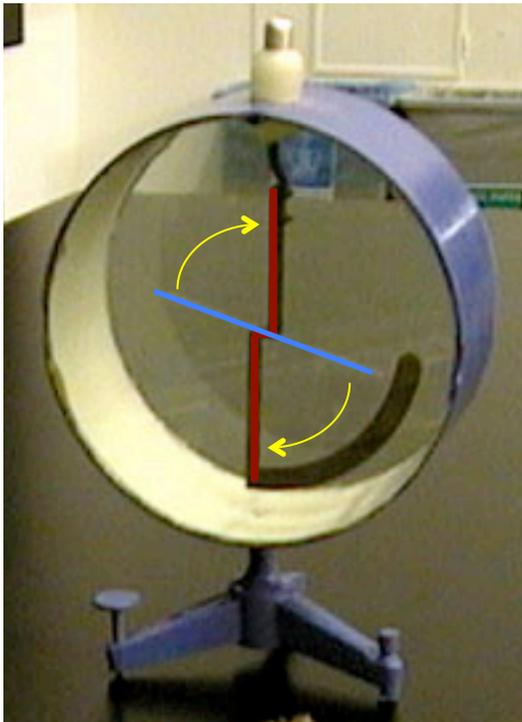
feuille d'or



électroscope chargé

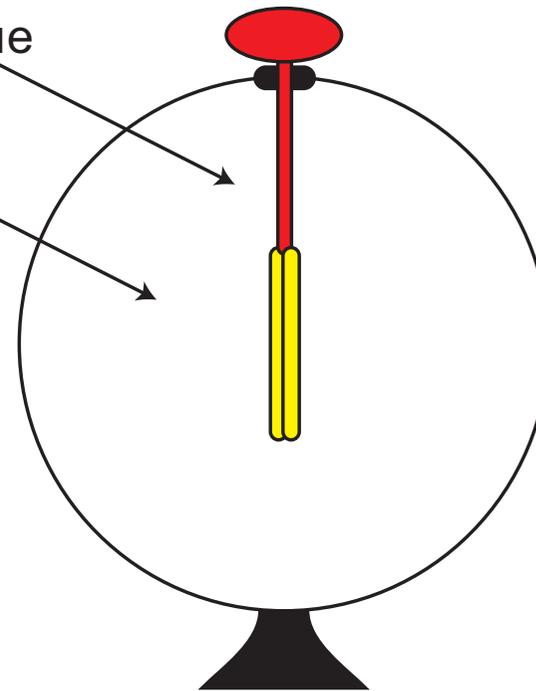
# Découverte des rayons cosmiques

1901



barre métallique

feuille d'or

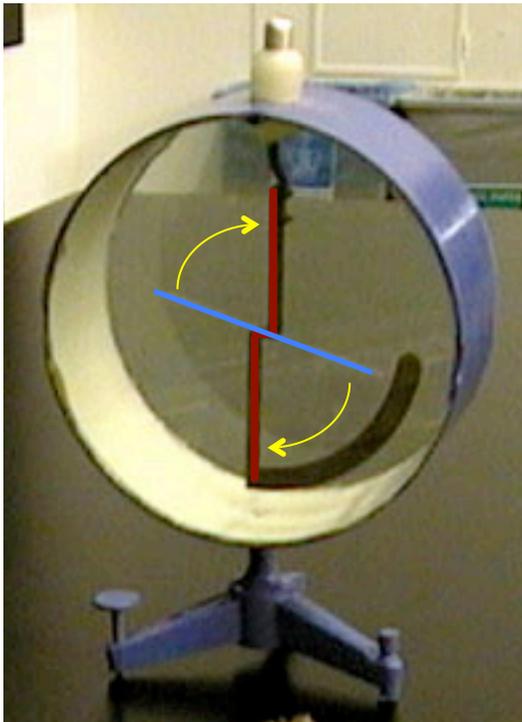


décharge spontanée !

# 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, 1895: Thorium, Uranium, ...)

# Découverte des rayons cosmiques

1909

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

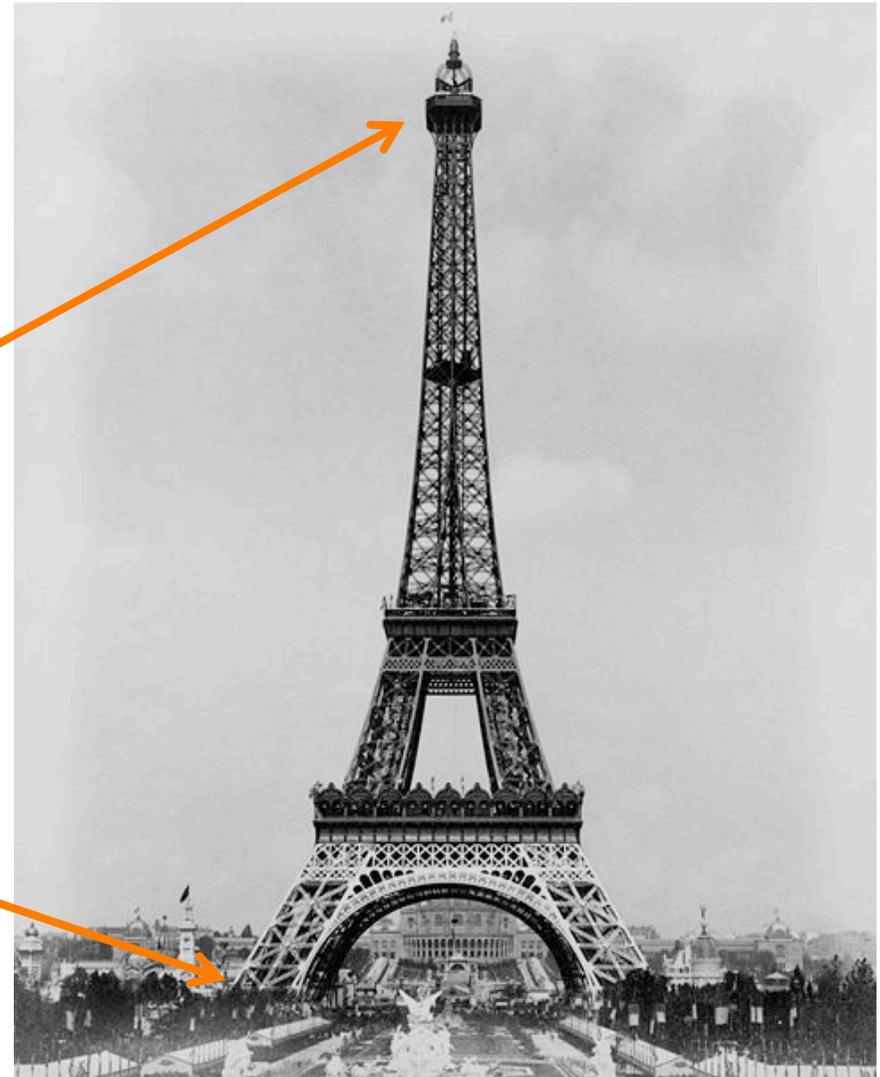
en haut

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

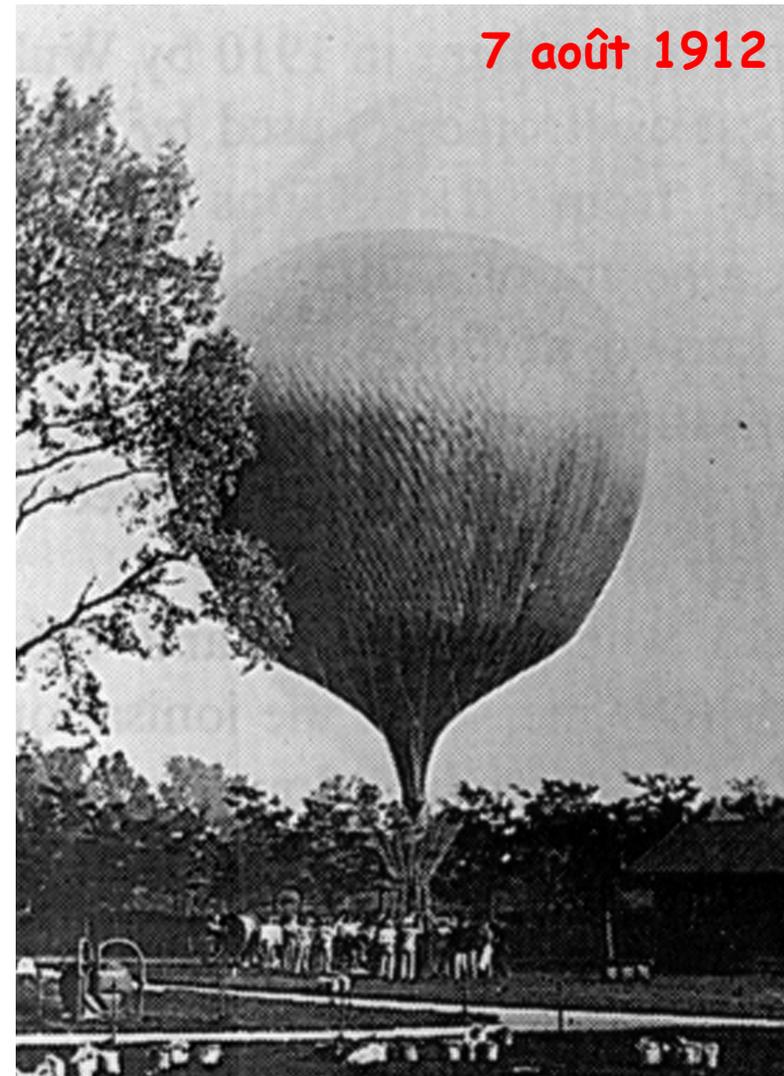
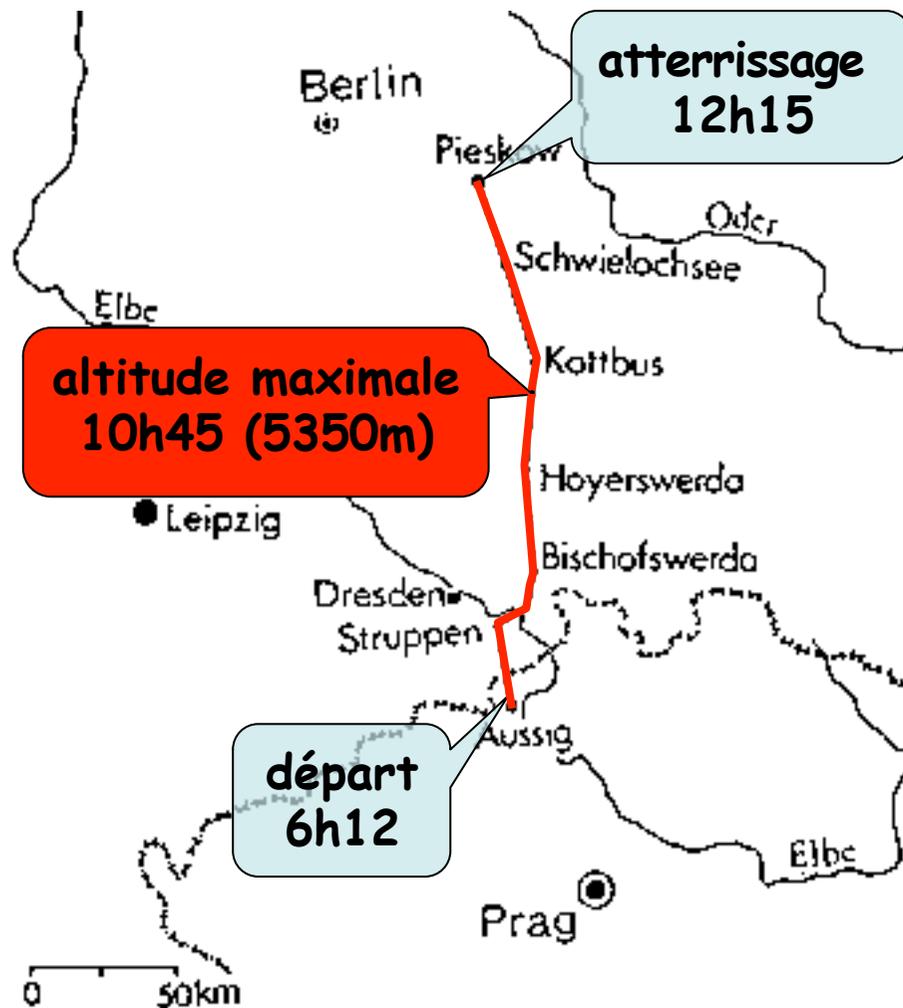
10 vols en ballon

17 avril 1912

éclipse de soleil  
→ ne vient pas du soleil

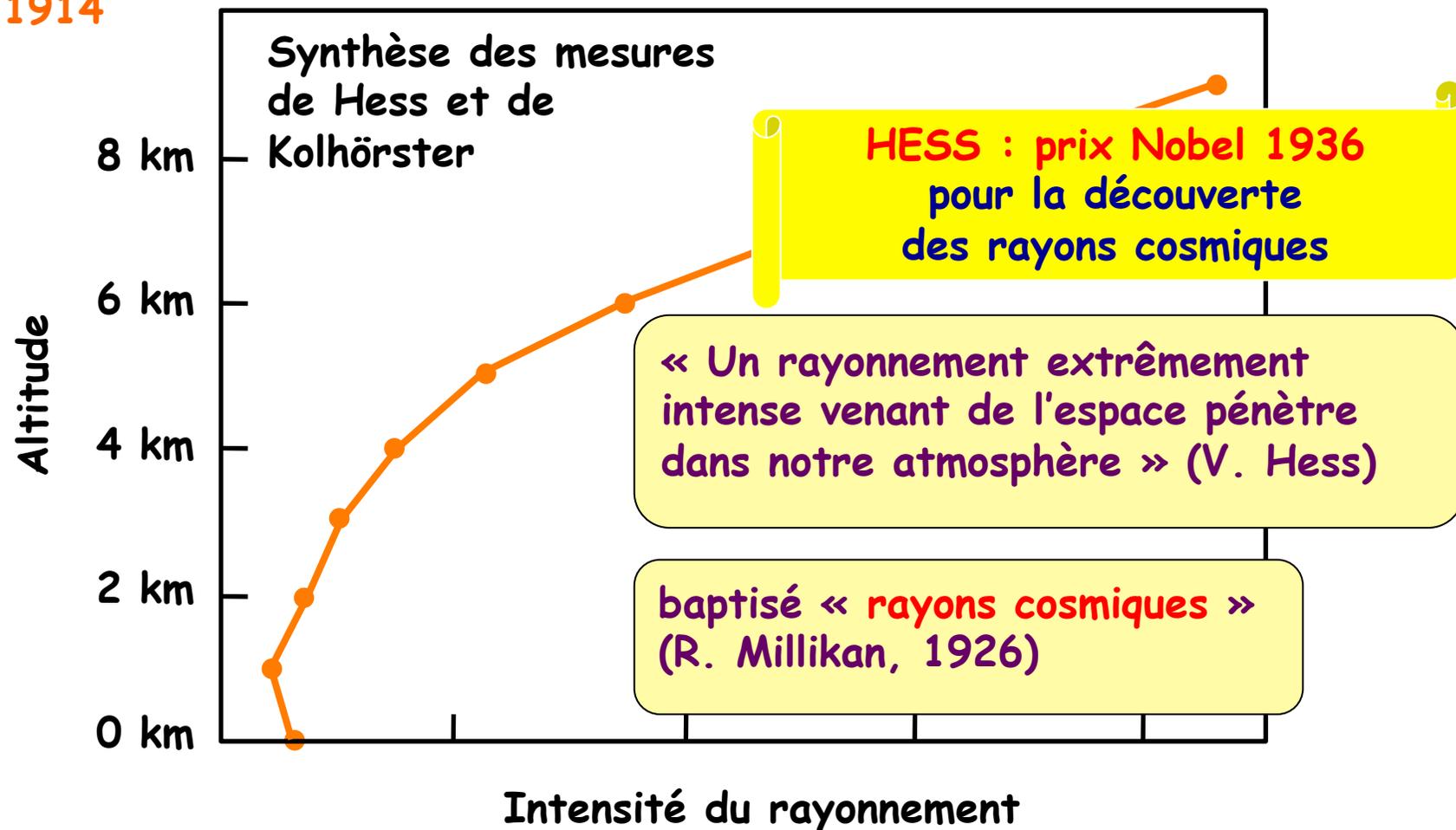


# Découverte des rayons cosmiques



# Découverte des rayons cosmiques

1914



# Chargés ou neutres?

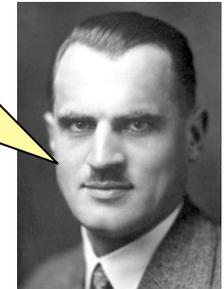
Millikan



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

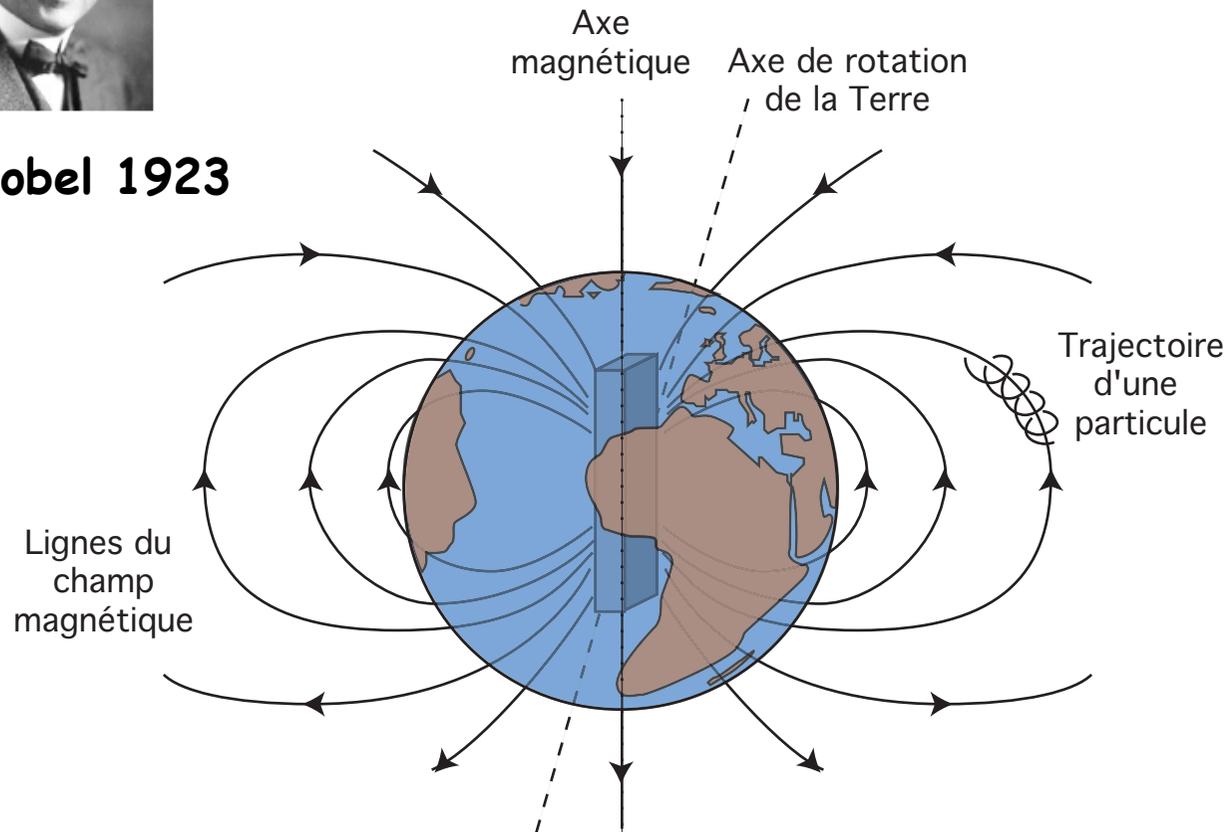
Les rayons cosmiques sont chargés. C'est pourquoi ils sont si énergétiques (accélération par champs électro-magnétiques)

Compton



Nobel 1923

Nobel 1927



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

# Chargés ou neutres?

**The New York Times**

"All the News That's Fit to Print."

VOL. LXXXII...No. 27,370. Entered as Second-Class Matter, Postoffice, New York, N. Y. Copyright, 1932, by The New York Times Company. NEW YORK, SATURDAY, DECEMBER 31, 1932.

THE NEW YORK TIMES, SATURDAY, DECEMBER 31, 1932.

**Two Nobel Prize Winners Expound Rival Theories of the Cosmic Ray**

**MILLIKAN RETORTS HOTLY TO COMPTON IN COSMIC RAY CLASH**

Debate of Rival Theorists Brings Drama to Session of Nation's Scientists.

**THEIR DATA AT VARIANCE**

**Nobel 1927**

**Nobel 1927**

Lignes du champ magnétique

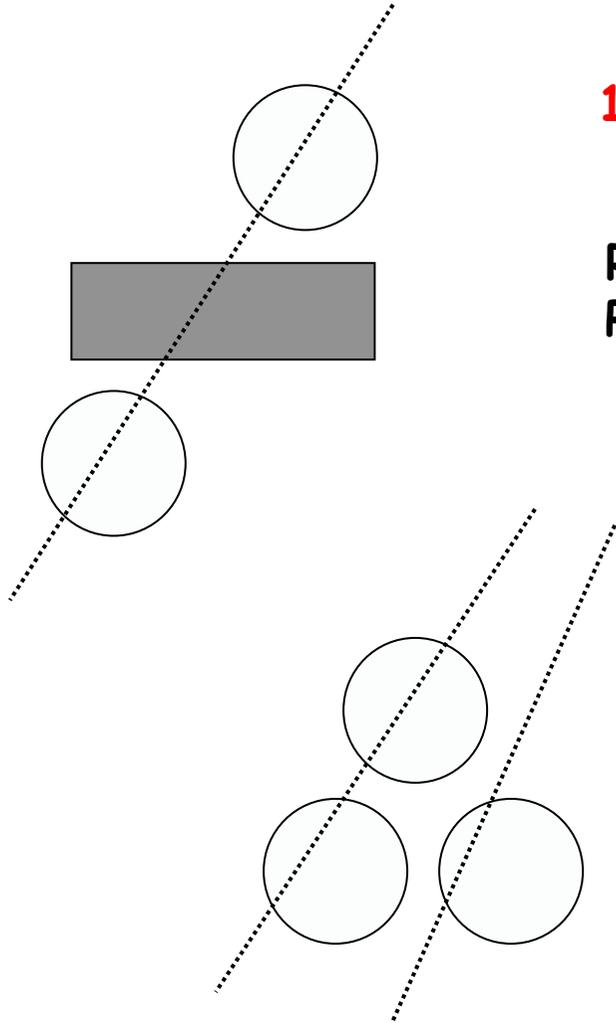
The diagram shows a cross-section of the Earth with magnetic field lines (Lignes du champ magnétique) curving from the magnetic south pole to the magnetic north pole. Cosmic rays are depicted as arrows originating from the top and being deflected by the magnetic field. Some rays are deflected away from the Earth, while others are directed towards the poles. A vertical dashed line represents the magnetic axis (Axe magnétique).

2: édition Compton pour 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

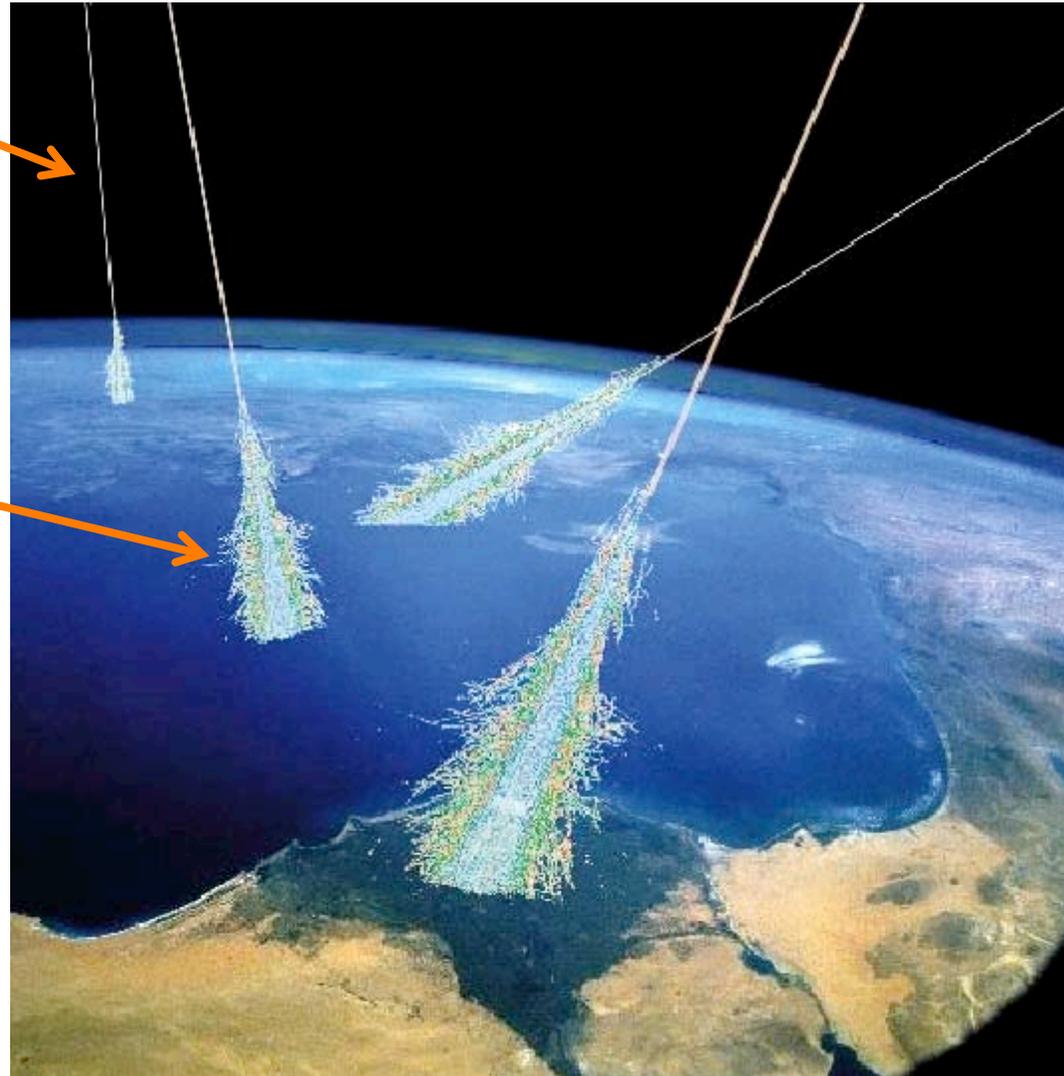


# Gerbes atmosphériques

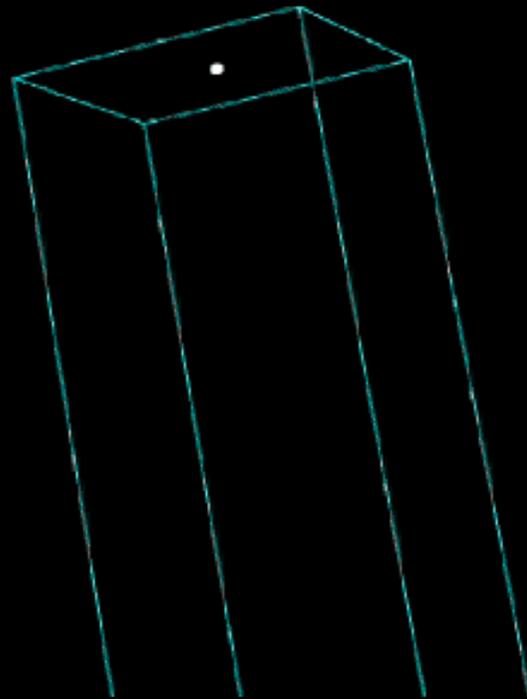
particule cosmique  
(proton)



gerbe  
atmosphérique



# Gerbes atmosphériques



proton de  $10^{12}$  eV

# En résumé

1912

Découverte des rayons « cosmiques »



1932

Particules chargées

1938

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

1946

Première exp.

Zatsepin (Russia)



# « Rayons » cosmiques ?

NON



Photons (lumière) = rayons

Rayons cosmiques  $\neq$  rayons

(appellation due  
à Millikan)

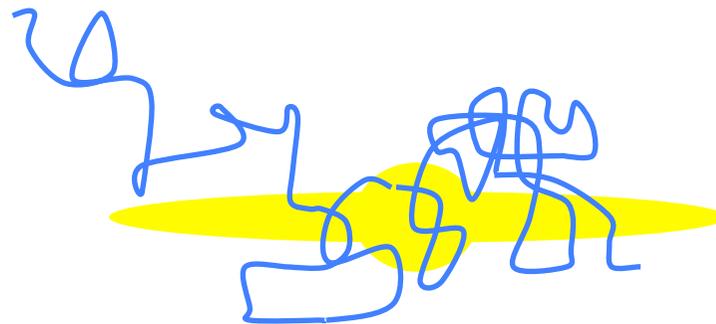
OUI  
(hors système  
solaire)



# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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

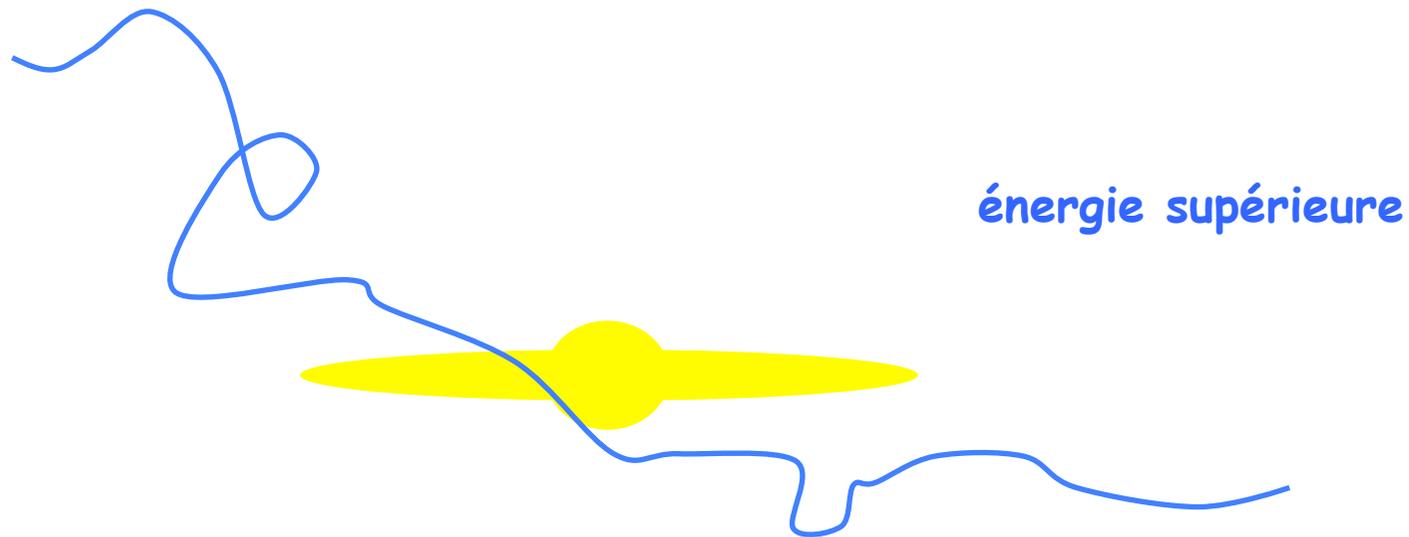


basse énergie

# « 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 !

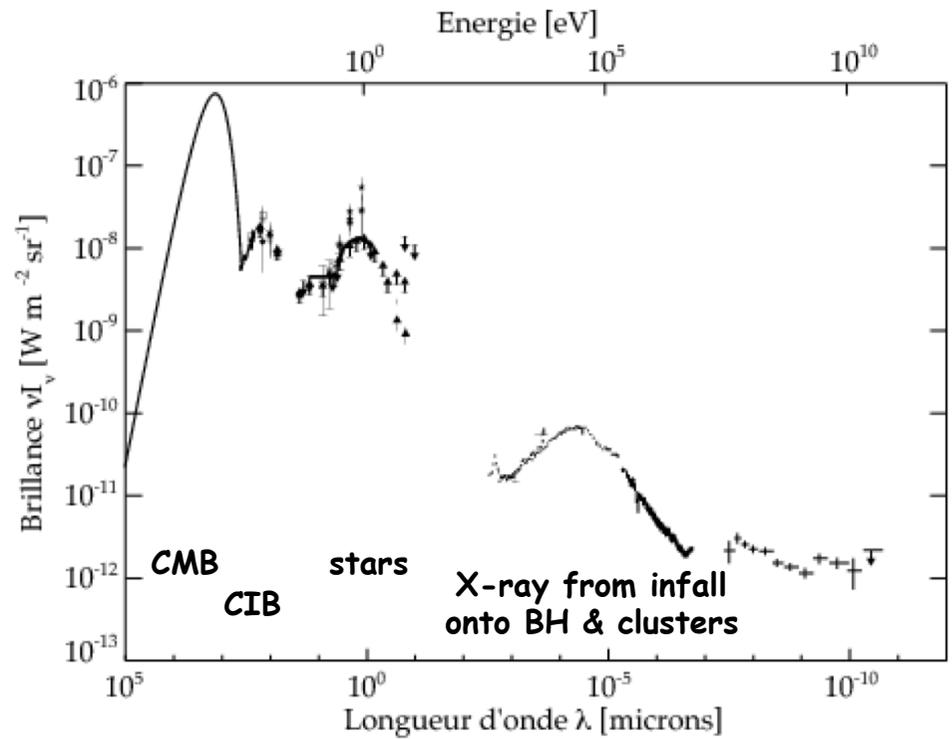
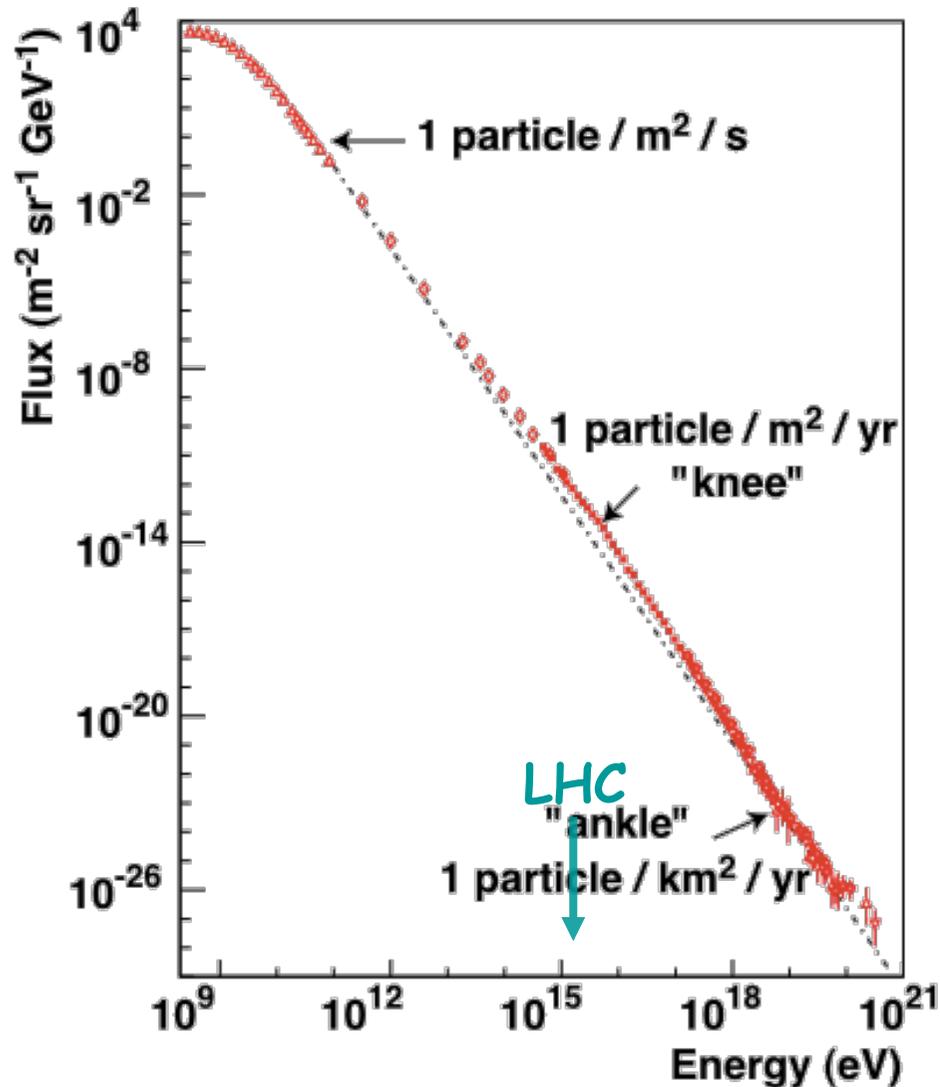
très grande énergie !



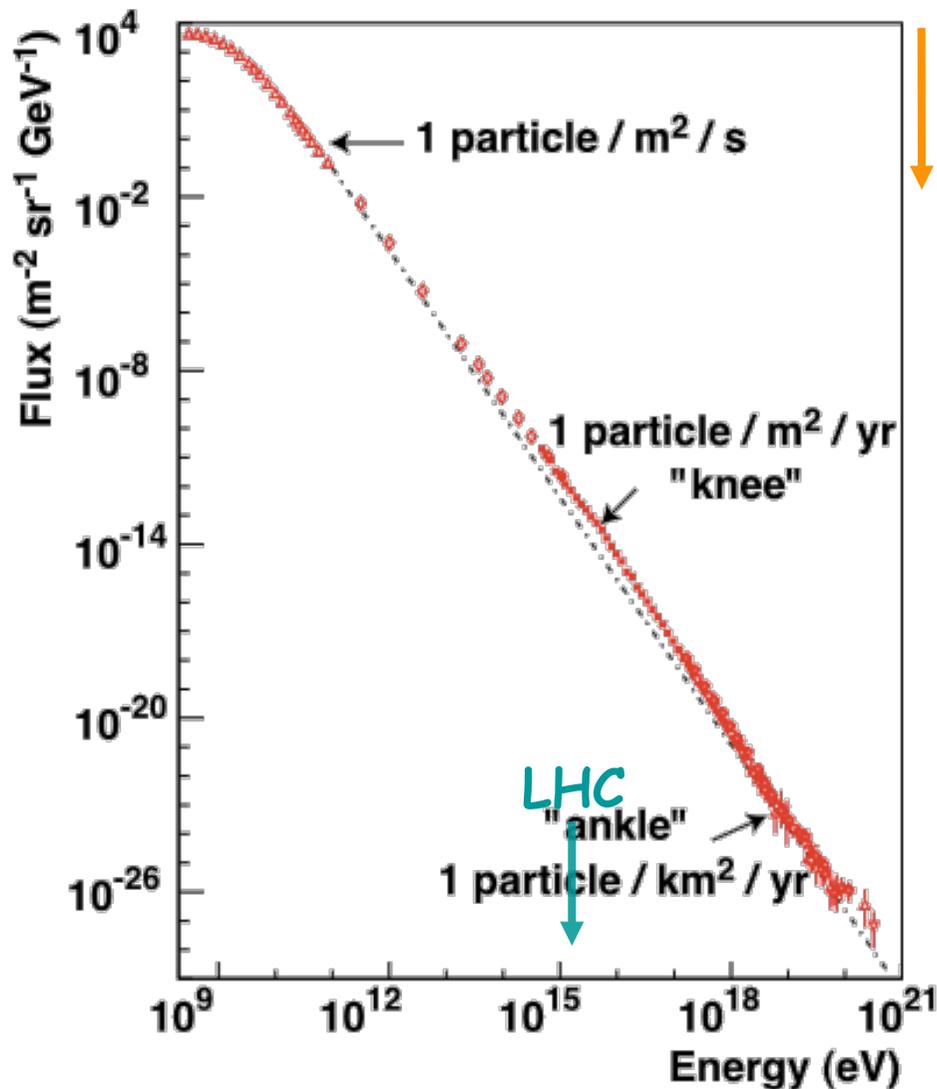


Rayons cosmiques:  
énergie et accélération

# Spectre des rayons cosmiques



# Spectre des rayons cosmiques



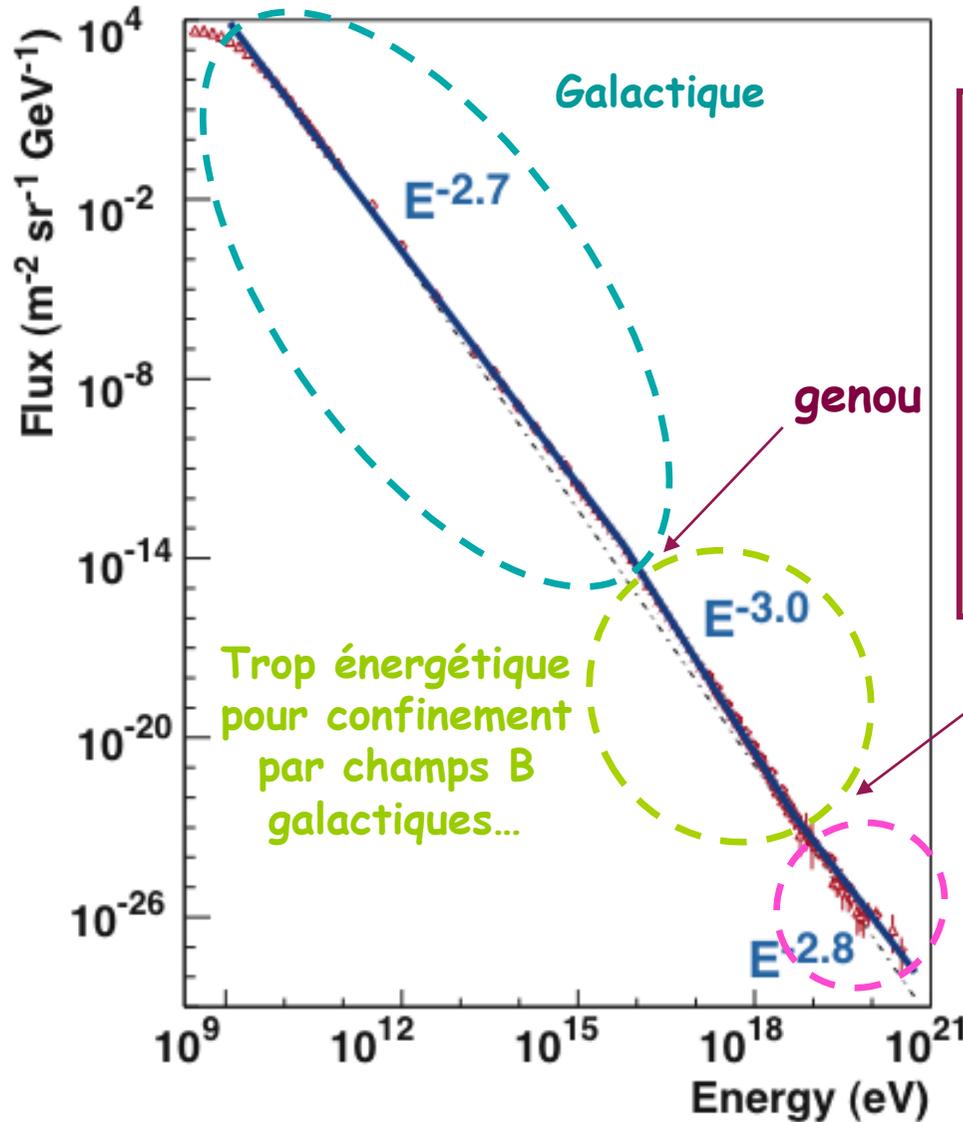
$E < 10^{14}$  eV

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)  
 ~ 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 accélérées au delà de énergie E :

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

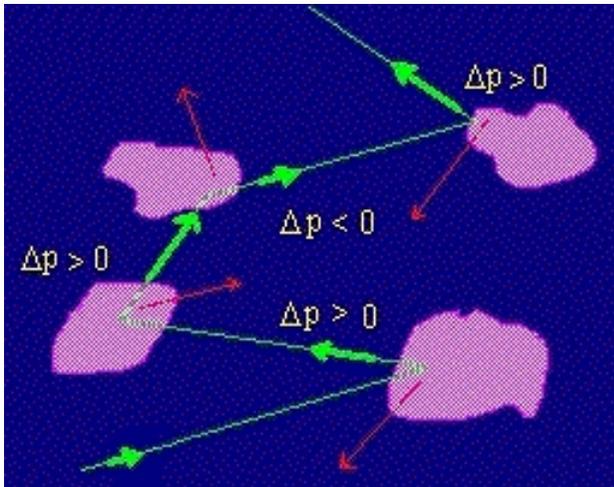
$$N(>E) \propto \frac{1}{\mathcal{P}_{esc}} \left[ \frac{E}{E_0} \right]^{-\alpha}$$

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

# 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

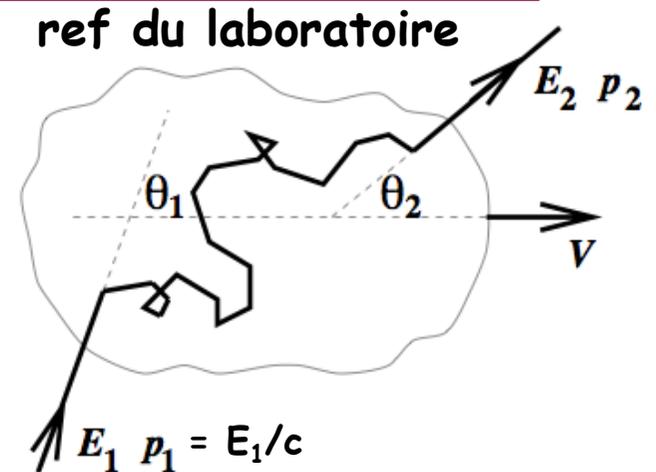
- Dans ref du nuage :  
 $E'_1 = \gamma (E_1 - \beta p_{1x}c)$   
 $E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos\theta_1)$

$$\beta = v/c$$

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

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

- Dans ref. du laboratoire :  
 $E_2 = \gamma E'_2 (1 + \beta \cos\theta'_2)$



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

- Or  $\frac{dP}{d\cos\theta_1} = \frac{c - v\cos\theta_1}{2c}$

toutes directions équiprobables  
dans ref du nuage

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

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

$$\langle \xi \rangle \sim 4\beta^2/3$$

( $\beta \ll 1$ )

# Mécanisme d'accélération

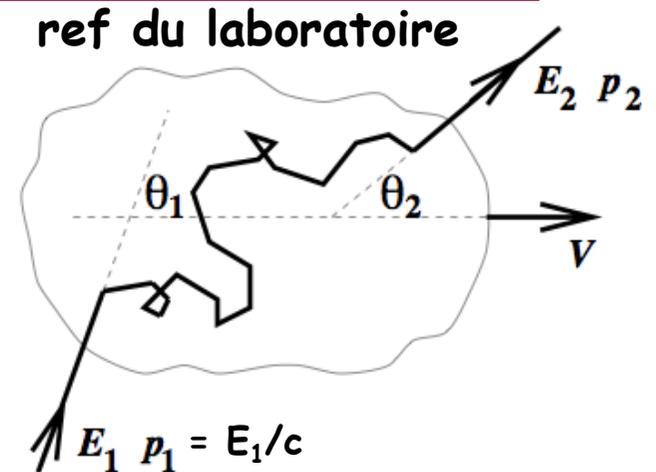
- Dans ref du nuage :  
 $E'_1 = \gamma (E_1 - \beta p_{1x}c)$   
 $E'_1 = \gamma E_1(1 - \beta \cos\theta_1)$

$$\beta = v/c$$

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

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

- Dans ref. du laboratoire :  
 $E_2 = \gamma E'_2(1 + \beta \cos\theta'_2)$



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

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

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

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

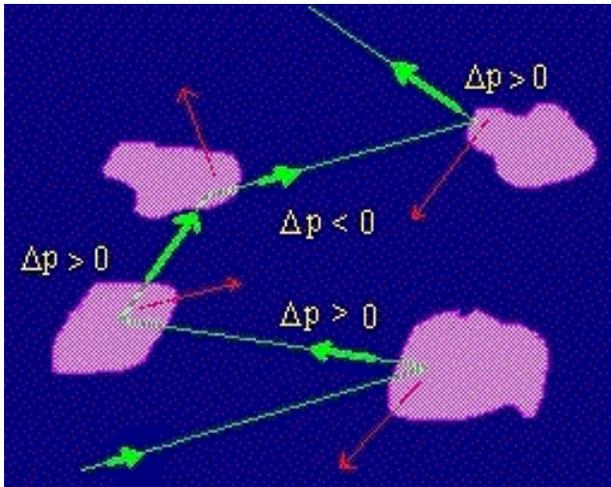
$$\Rightarrow \langle \xi \rangle \sim 4\beta^2/3$$

$$(\beta \ll 1)$$

# 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.

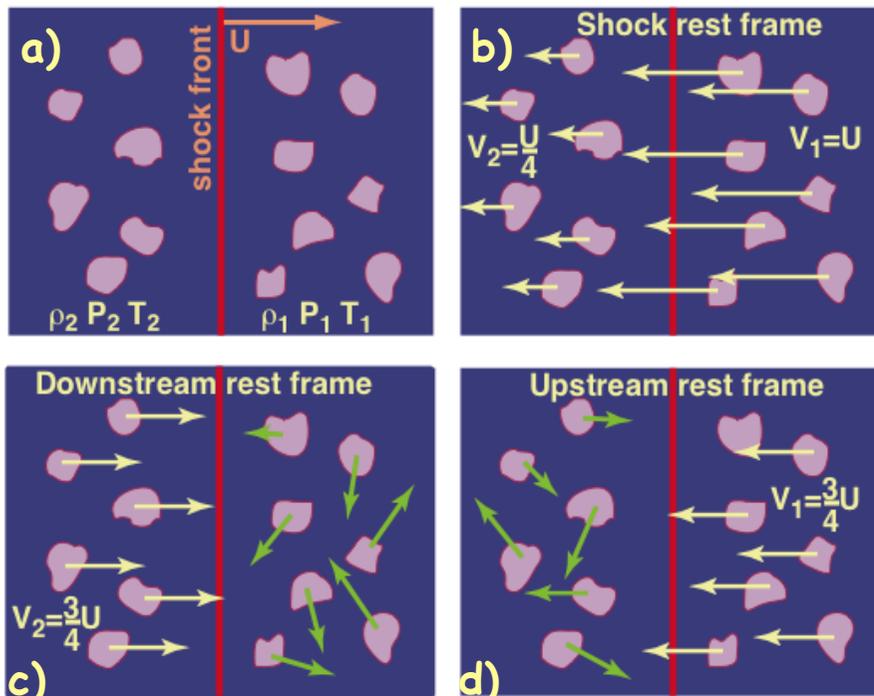
$$\Delta E/E \propto \beta^2 \quad \beta = v/c \sim 10^{-4}$$

« 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 :  $\rho_2/\rho_1 = (\gamma+1)/(\gamma-1)$

Plasma entièrement ionisé ( $\Leftrightarrow$  gaz idéal)

$$\gamma = 5/3 \text{ et } v_1/v_2 = 4$$

Passage répété de part et d'autre  
 de l'onde de choc

$$\langle \cos\theta_1 \rangle = -2/3 \text{ et } \langle \cos\theta'_2 \rangle = 2/3$$

$\Rightarrow$  Gain en énergie rapide

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

« Premier ordre »

Ondes de choc ?



Supernovae !

SN 1987A (SN II)



quelques  
siècles



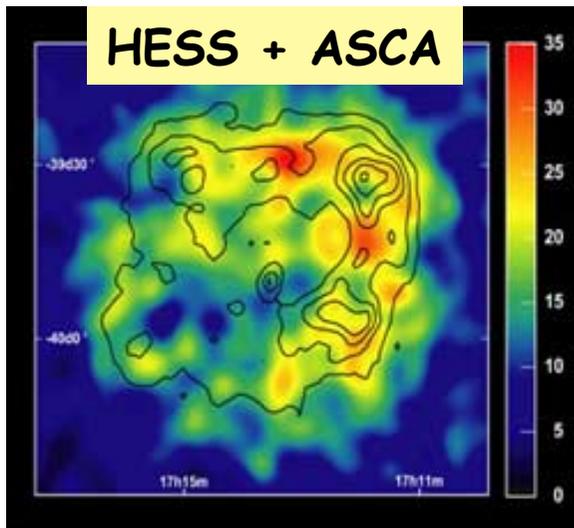
plus  
tard

Reste de supernova  
du Crabe



1 SN II / 50 ans dans notre galaxie

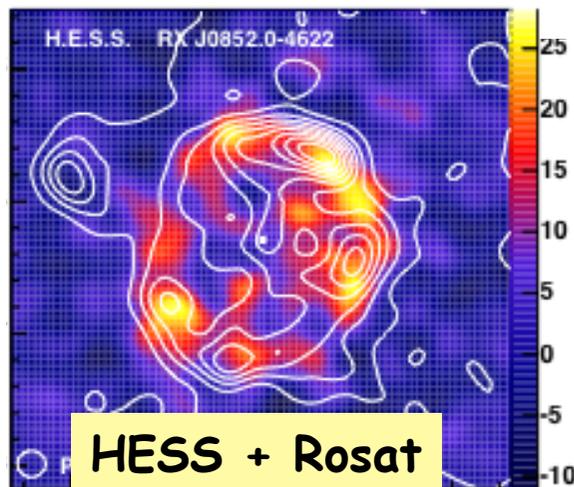
# HESS : première confirmation



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



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



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

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

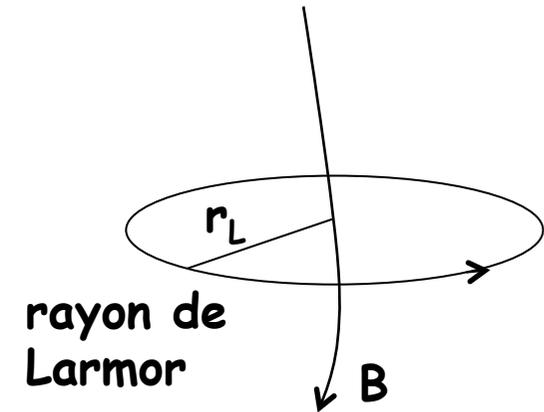
coïncidence spatiale →  
restes de SN = accélérateurs  
de particules multi TeV

# Limitation énergétique

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

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

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

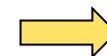


Particule ultra-relativiste :  $p \sim E/c$  donc  $r_L = E / (qBc)$

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

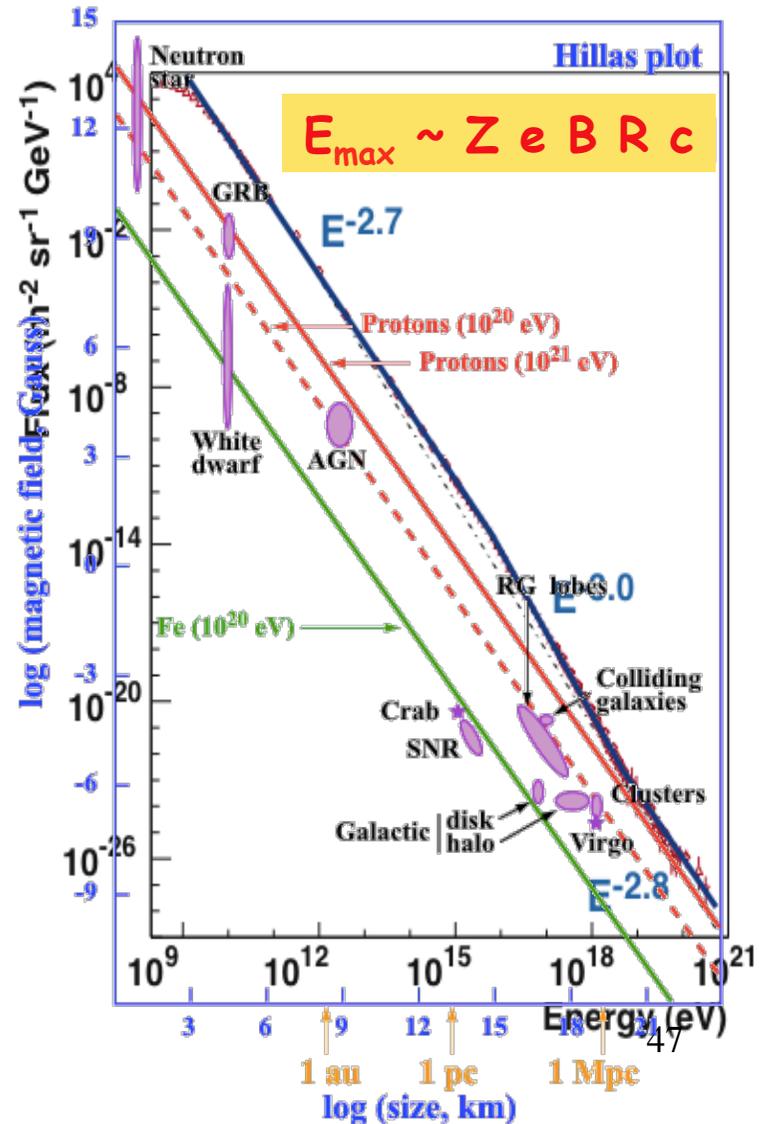
Restes de supernova :  
 →  $E_{\max} \sim 10^{15}$  eV (genou)

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

$$E_{\max} = Z \frac{B}{1 \mu\text{G}} \frac{R}{100 \text{ kpc}} 9.3 \cdot 10^{19} \text{ eV}$$

$\swarrow$   $B_{\text{gal}}$  typique       $\searrow$   $R_{\text{halo}}$  typique

→ Voie lactée insuffisante pour rayons les plus énergétiques



# Sources au delà de $10^{15}$ eV

## Active Galactic Nuclei

