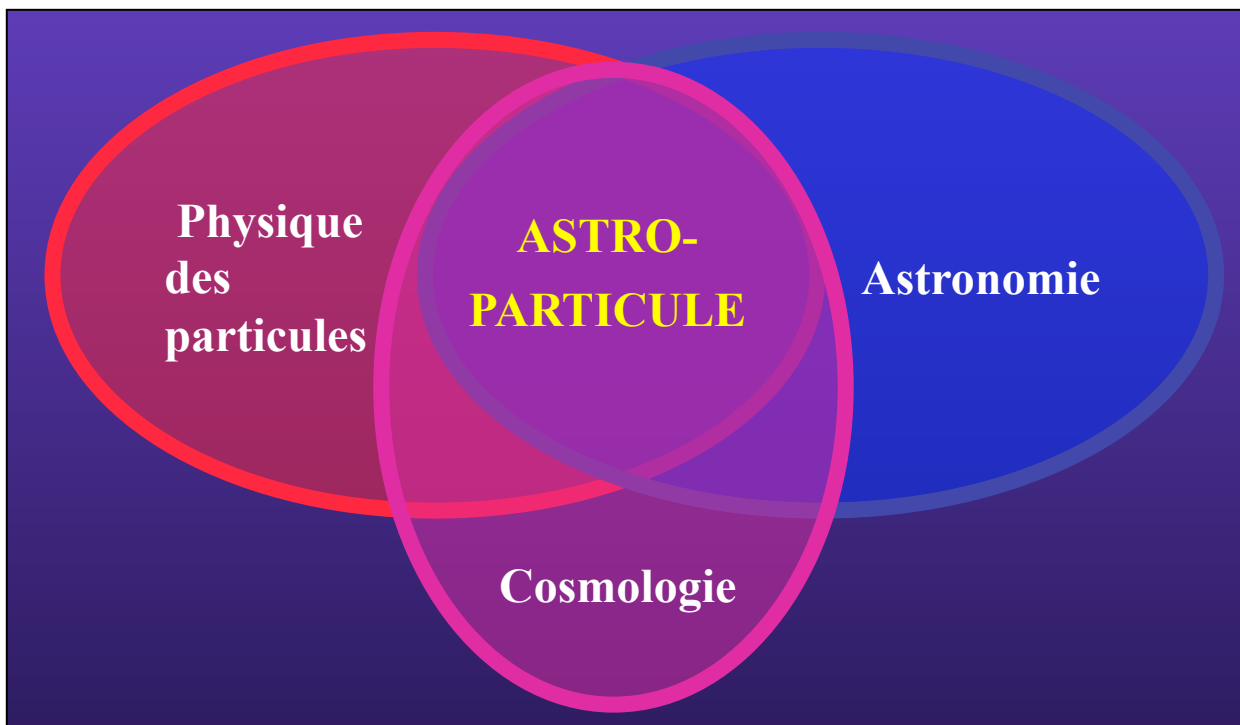


Astroparticule

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

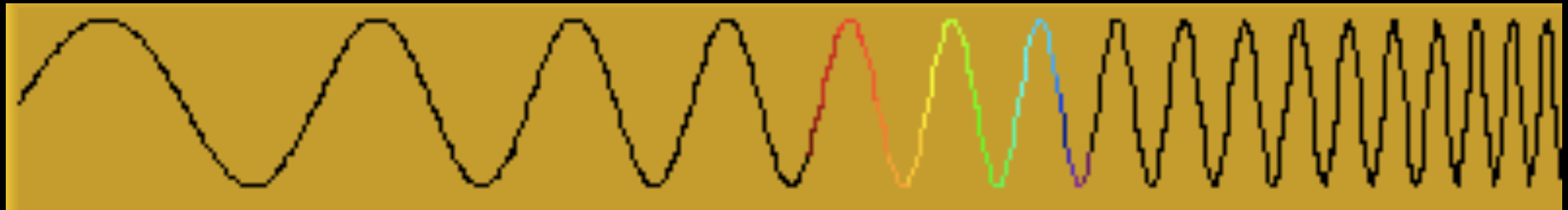
1 mm

1 μ m

0,1 μ m

10 nm

0,01 nm



Radio

Infrarouge

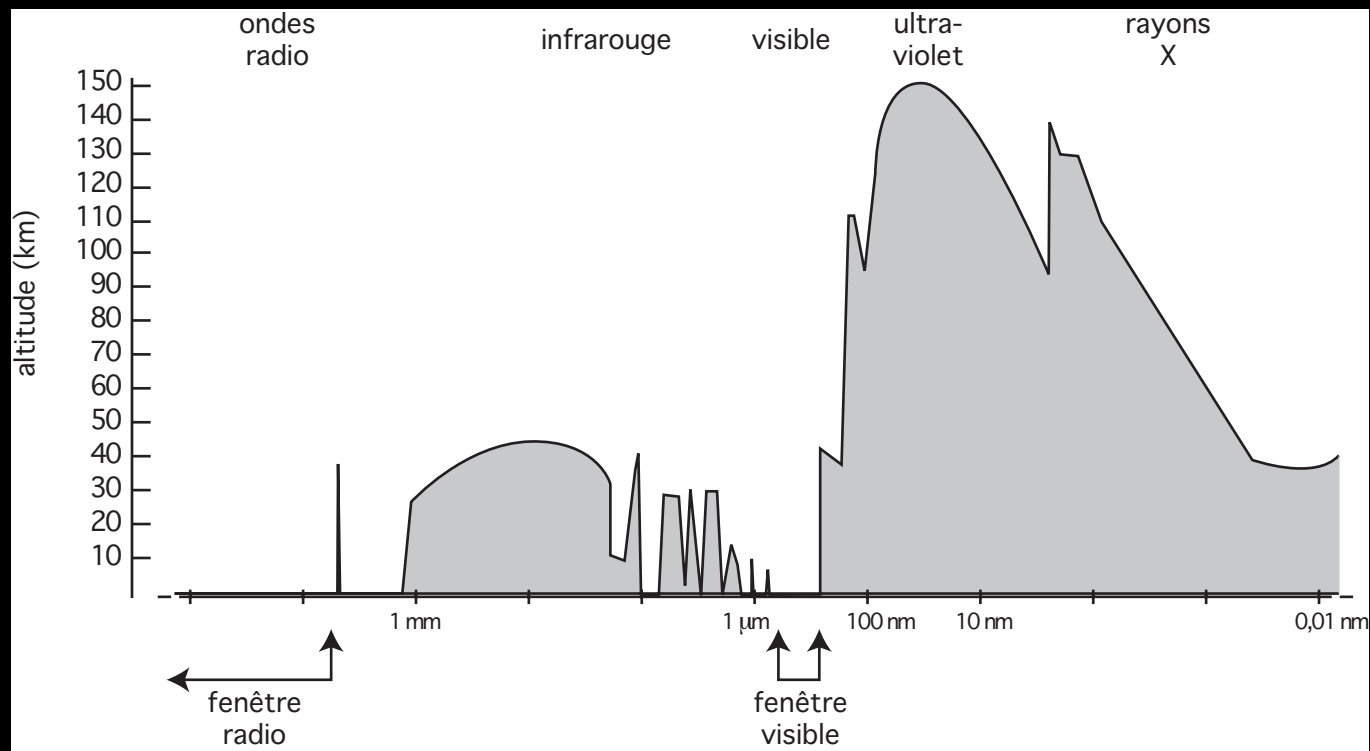
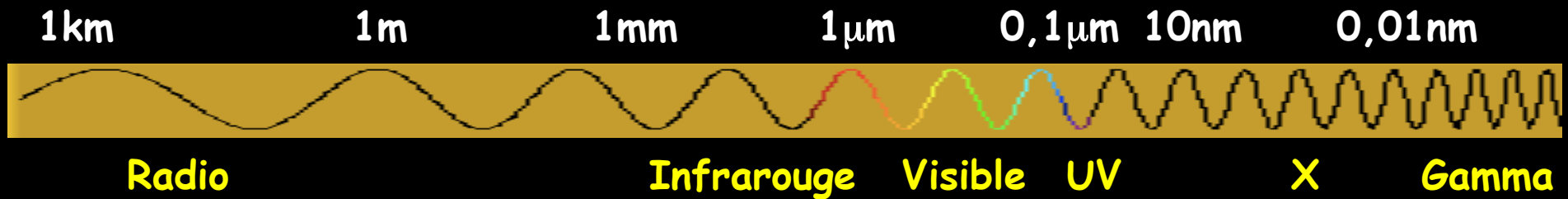
Visible

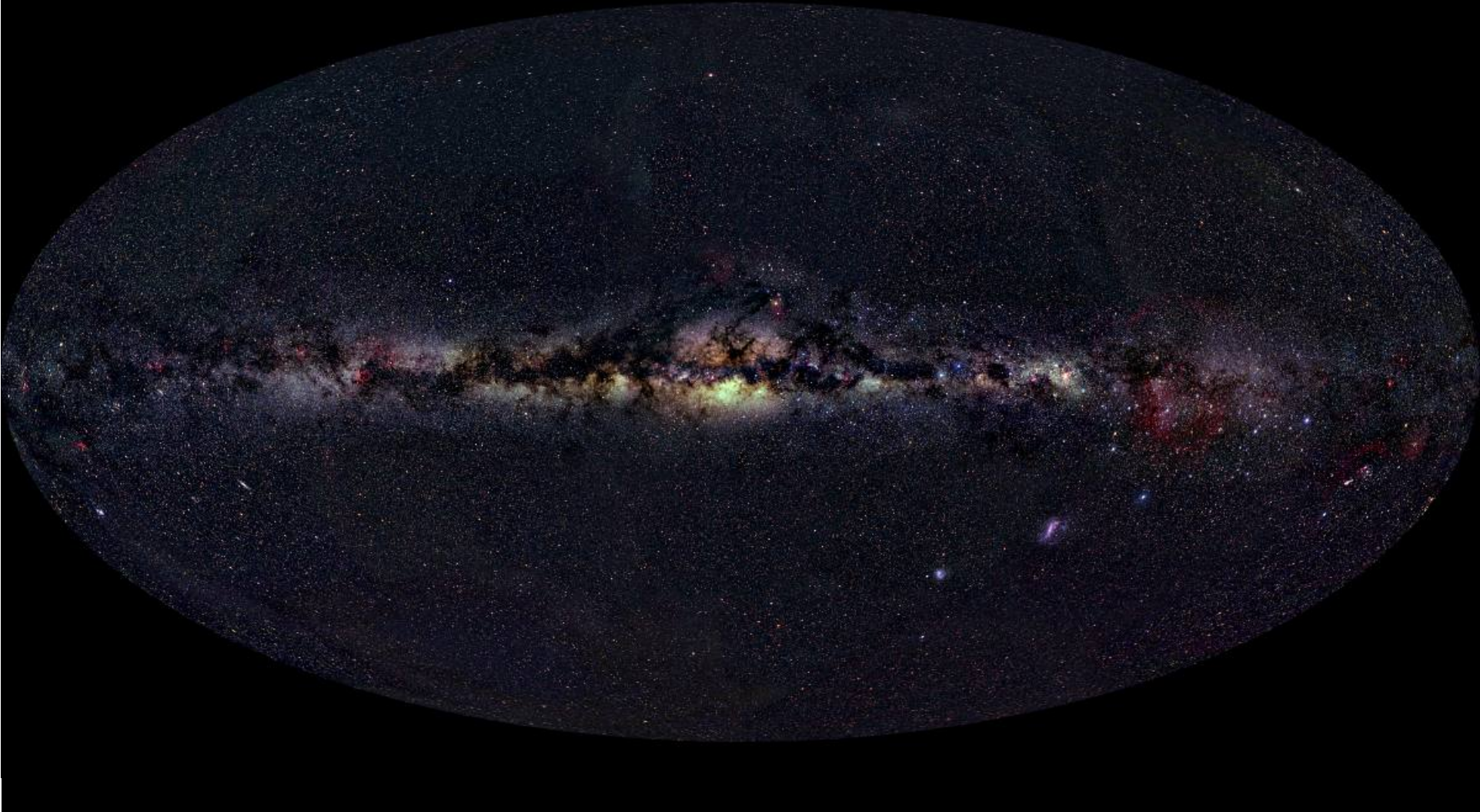
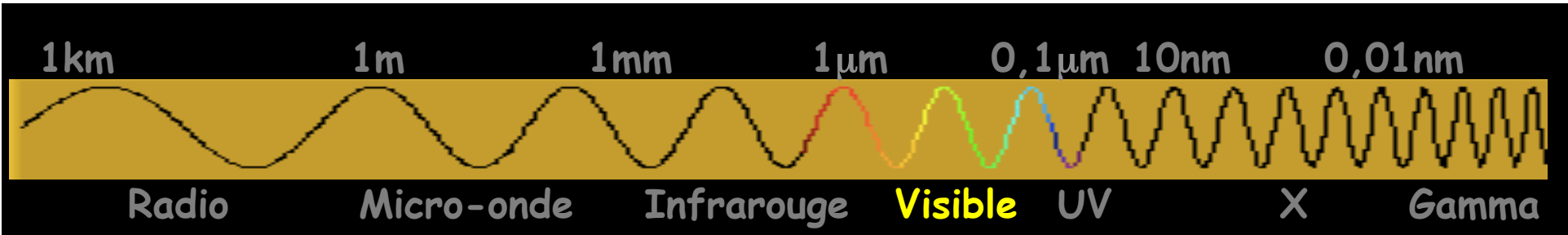
UV

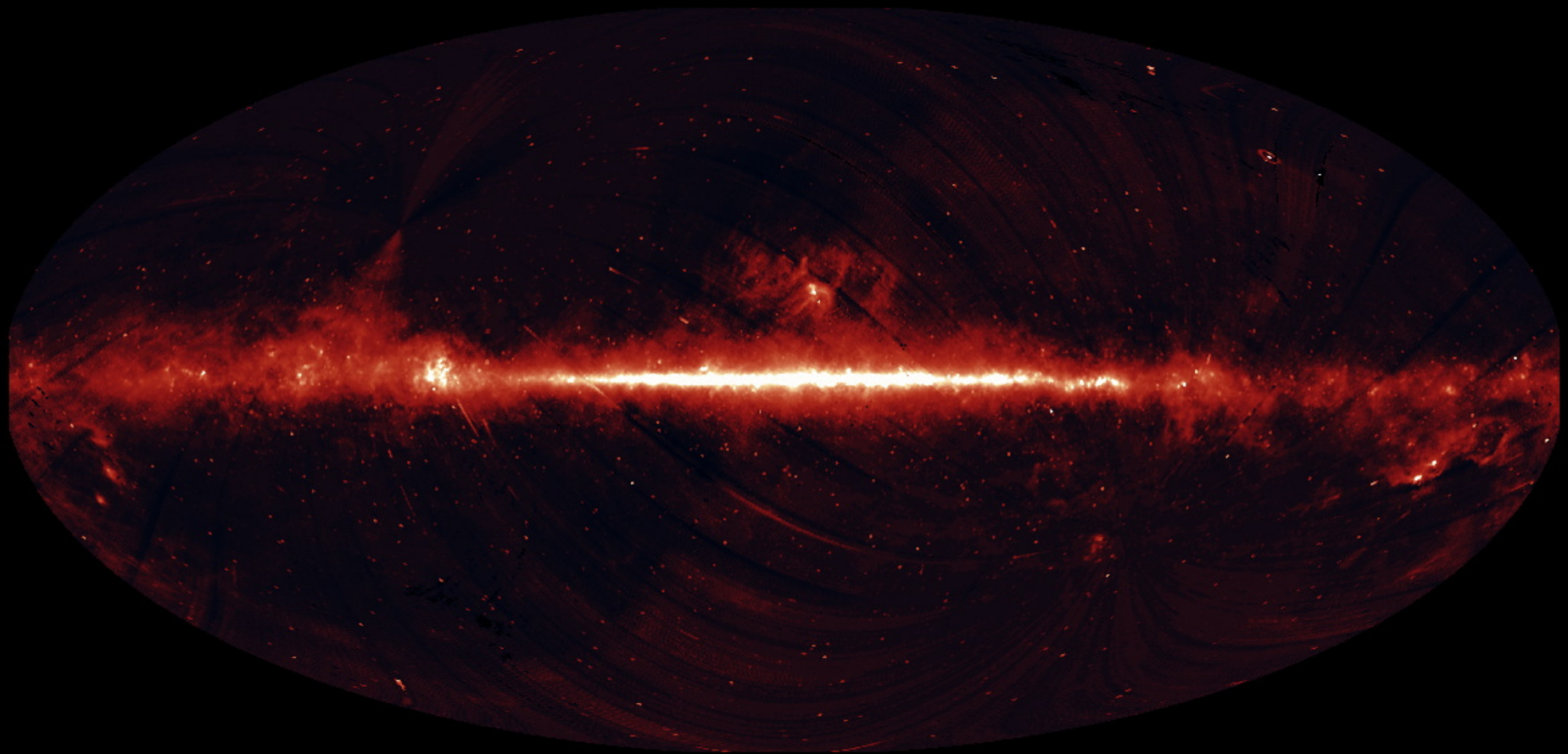
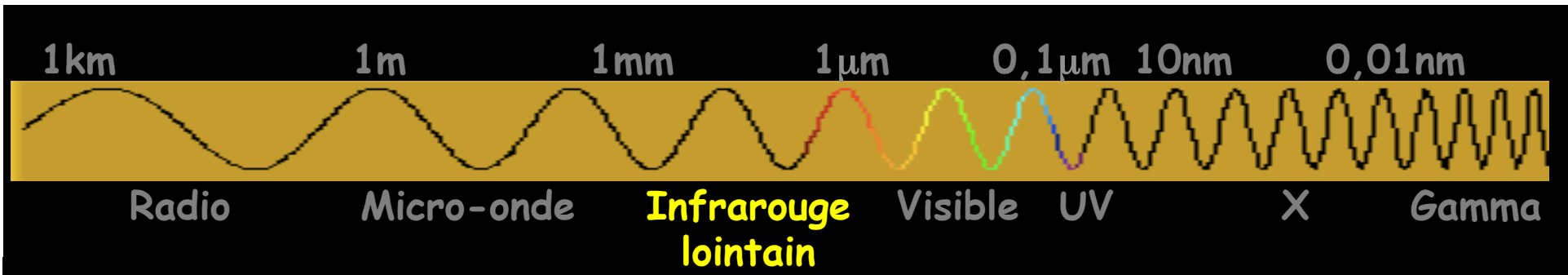
X

Gamma

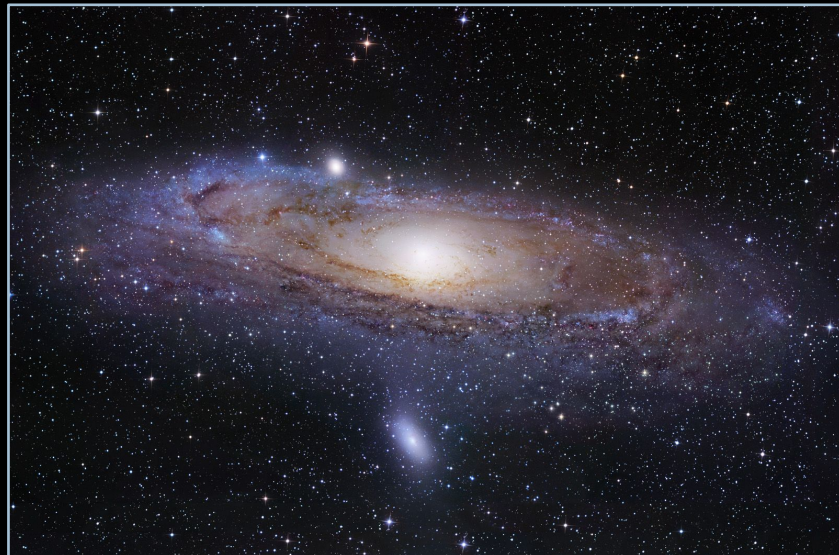
Observations multi longueurs d'onde



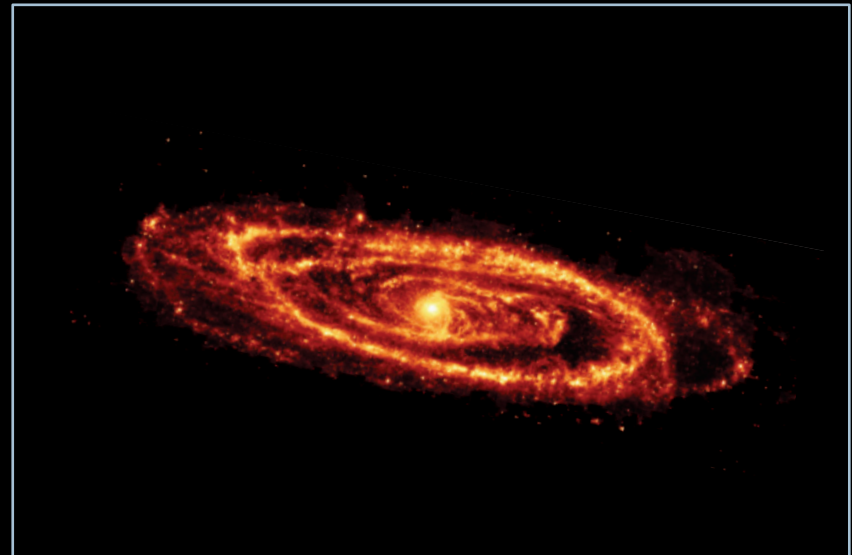




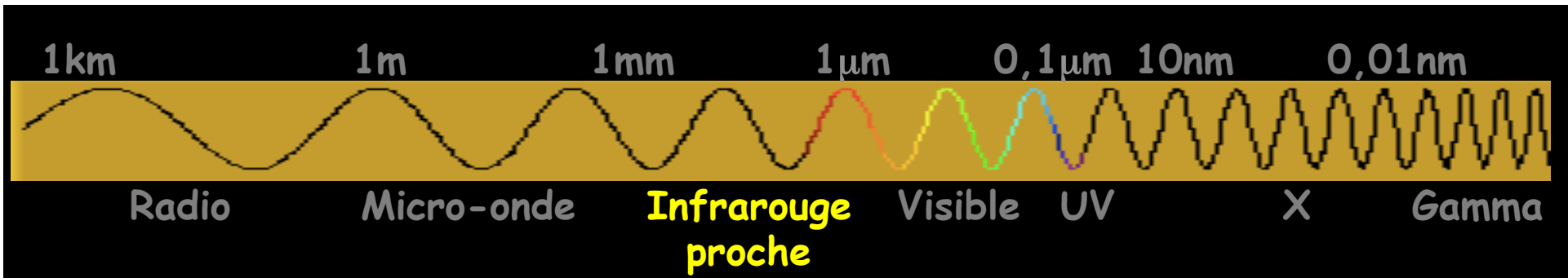
Andromède

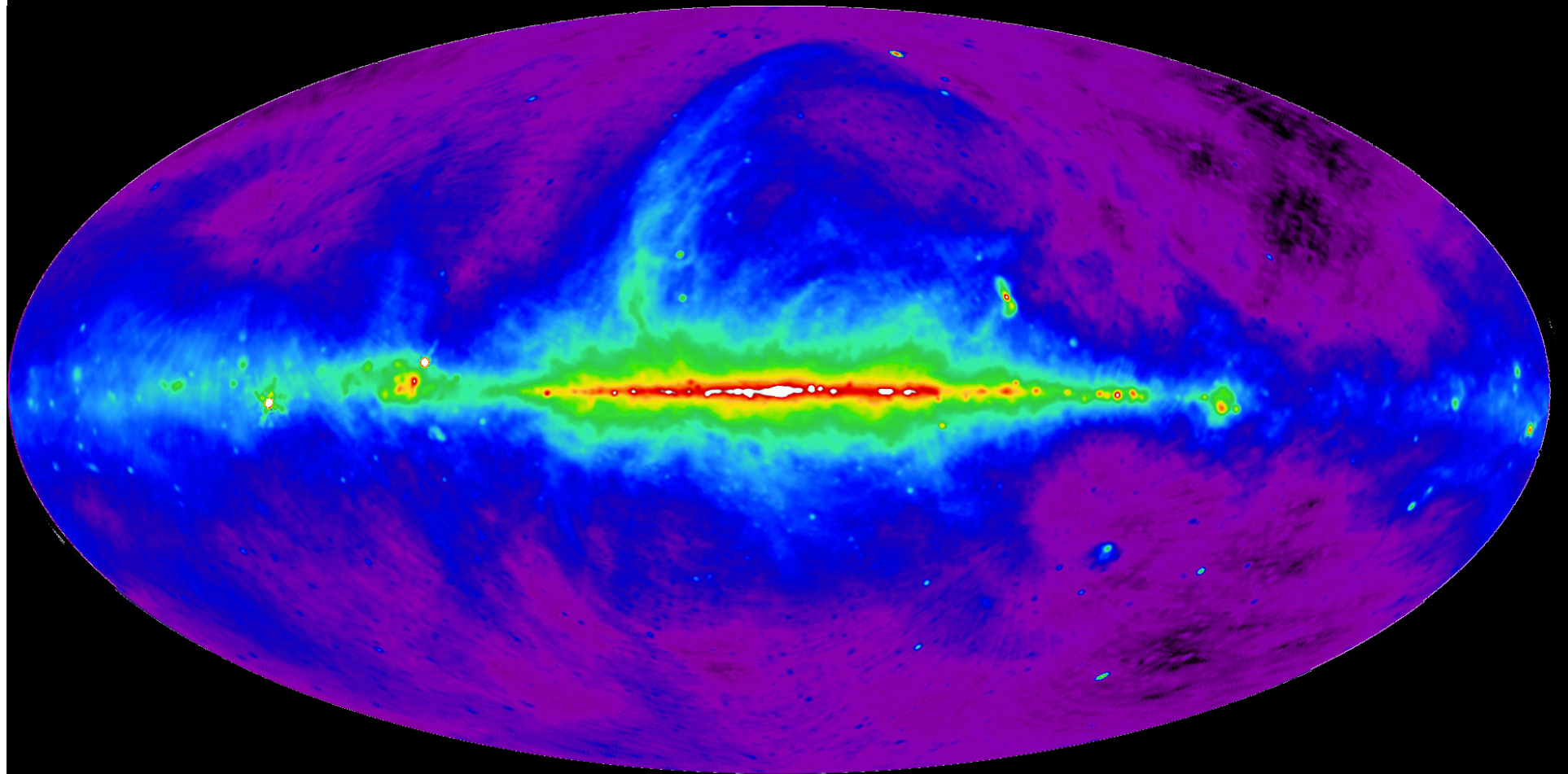
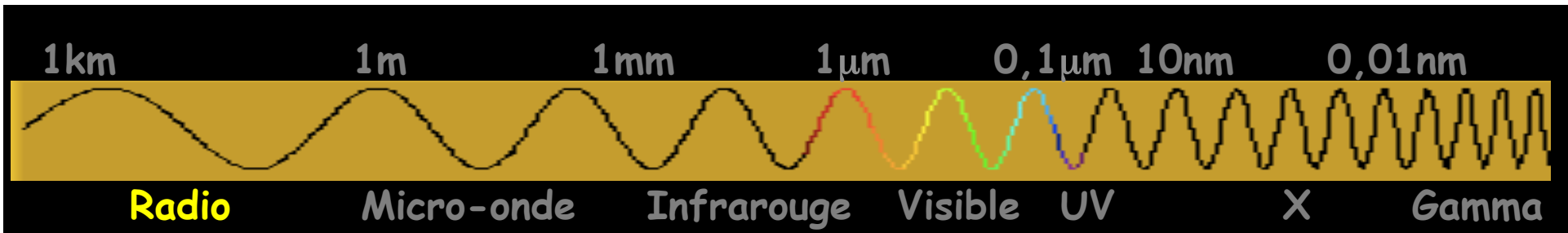


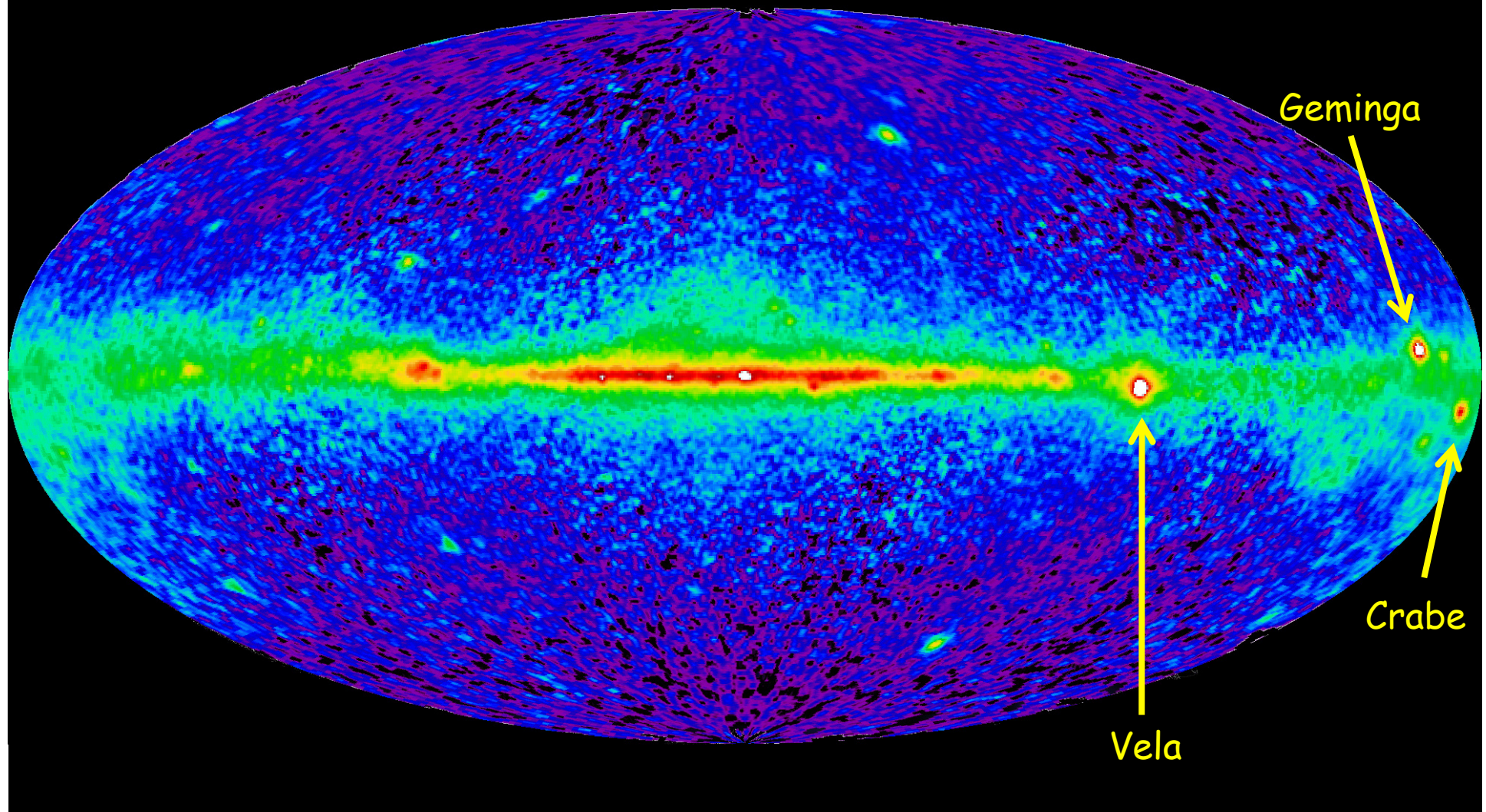
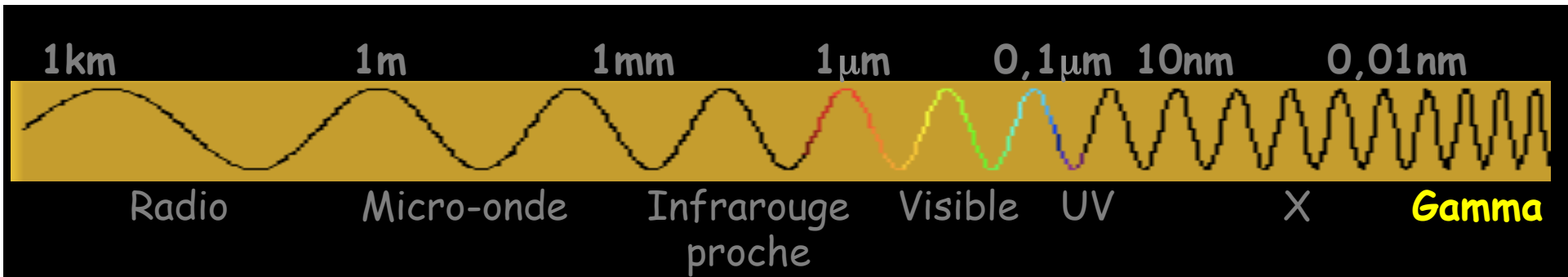
visible



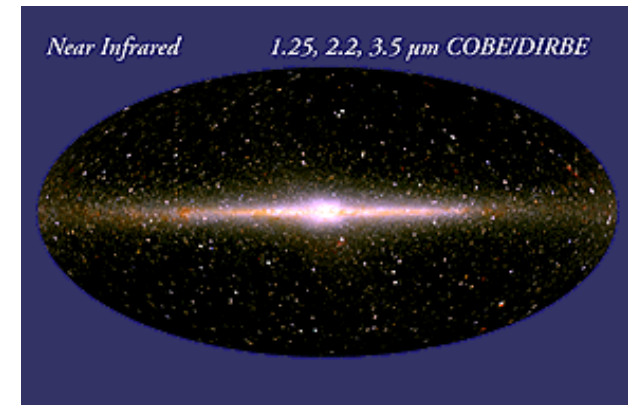
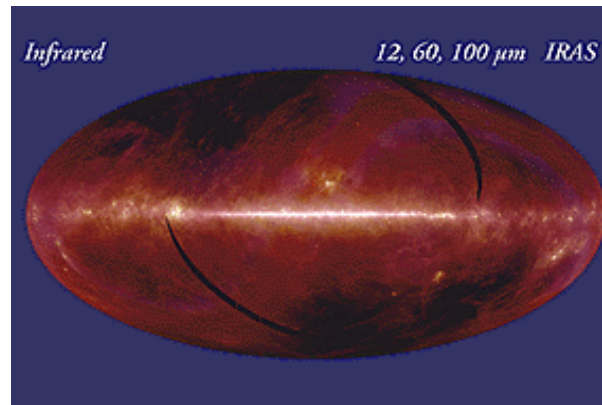
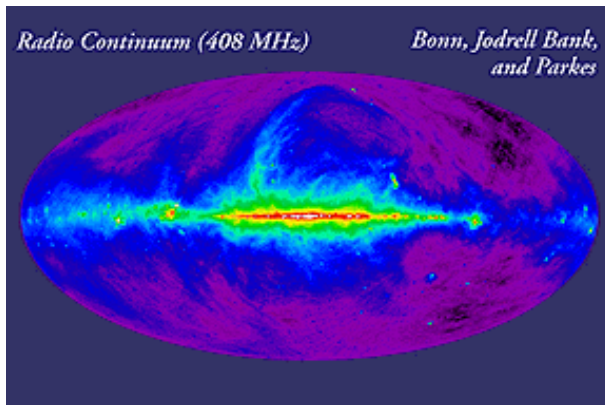
infrarouge



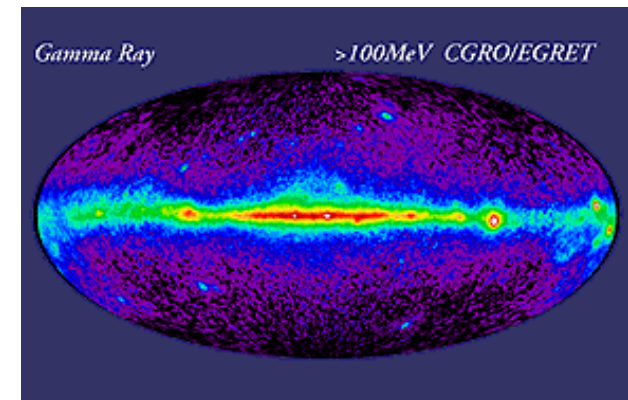
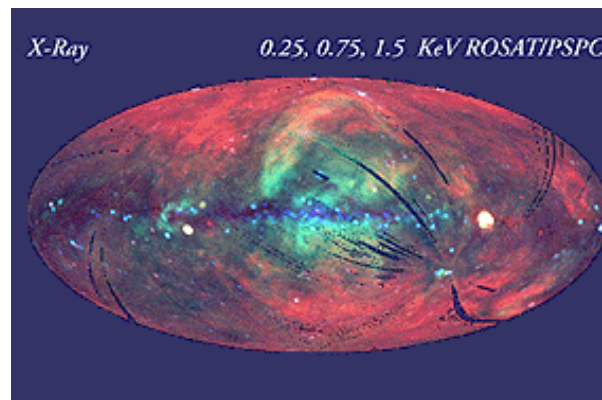
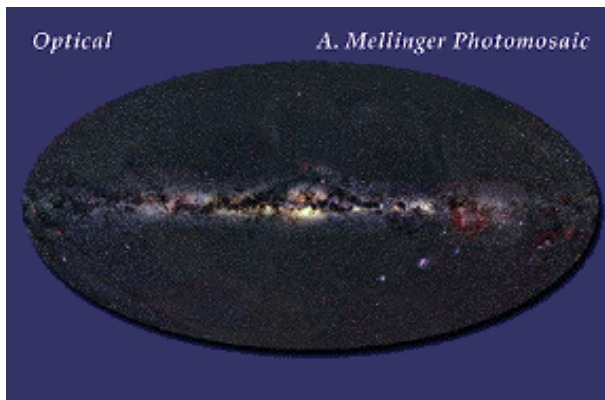




Univers en multi-longueurs d'onde



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

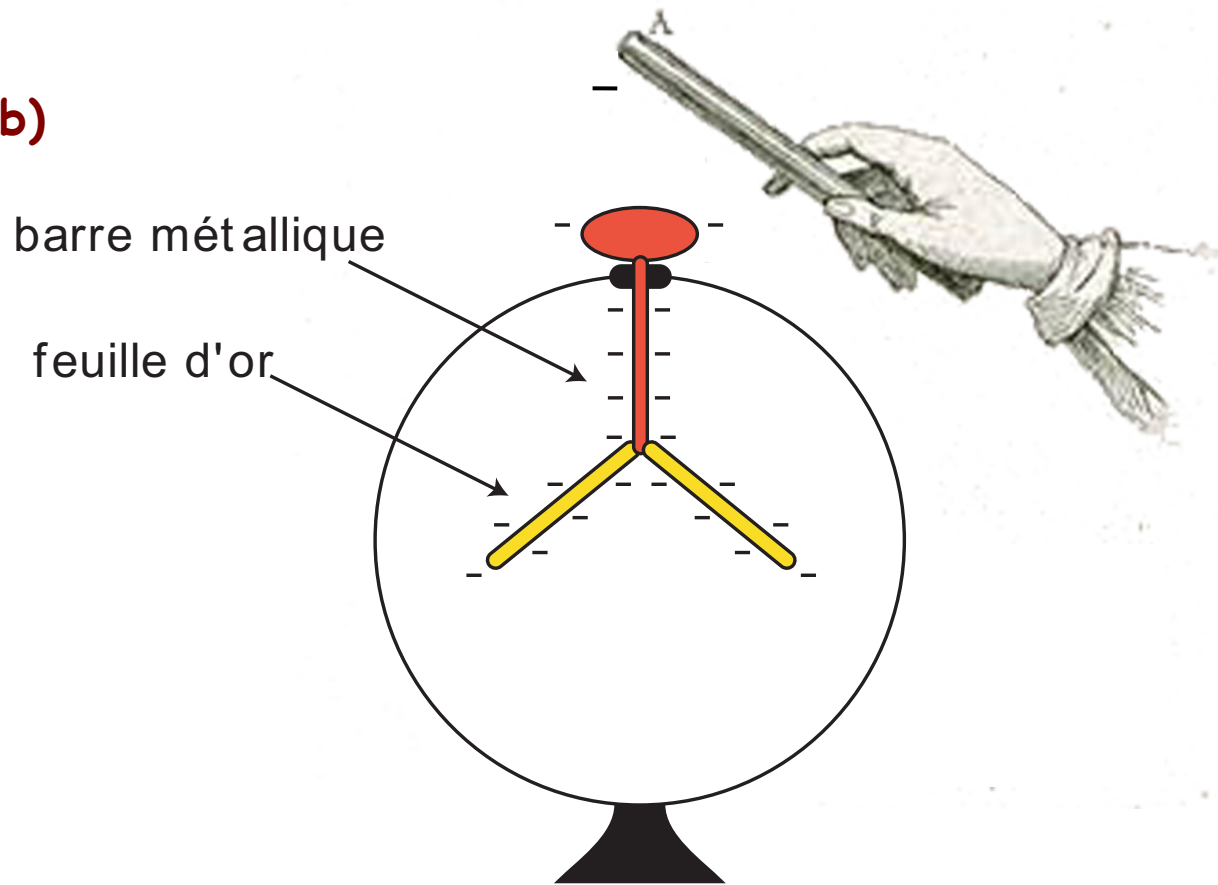
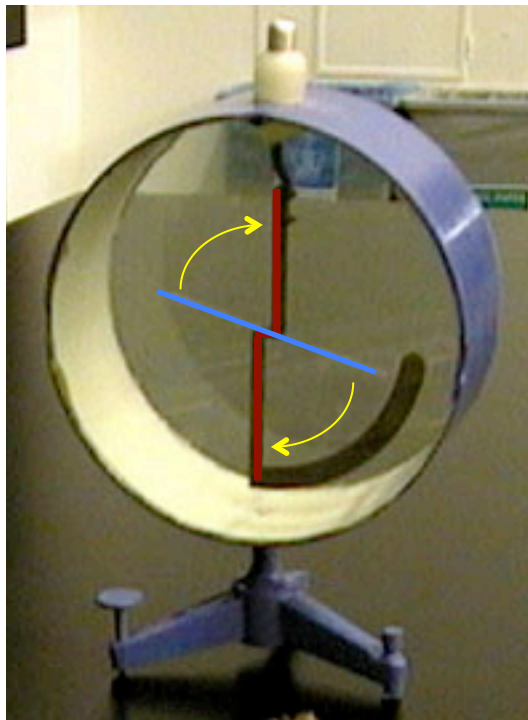
3) Approche **multi-messenger**
Astronomie neutrino
Ondes gravitationnelles
ou l'Univers violent...

A vibrant, multi-colored starry night sky serves as the background. The stars are densely packed, with colors ranging from bright white and yellow to deep blues and oranges. The text is written in a bold, yellow, sans-serif font, slightly tilted 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

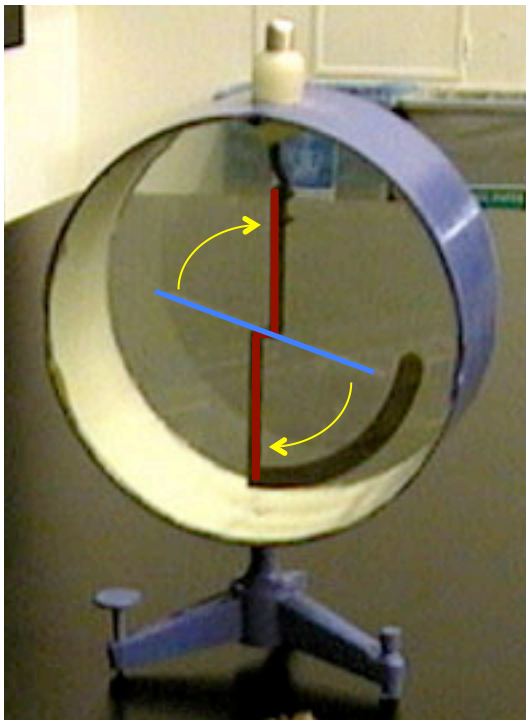
1901
(voire 1785, Coulomb)



électroscope chargé

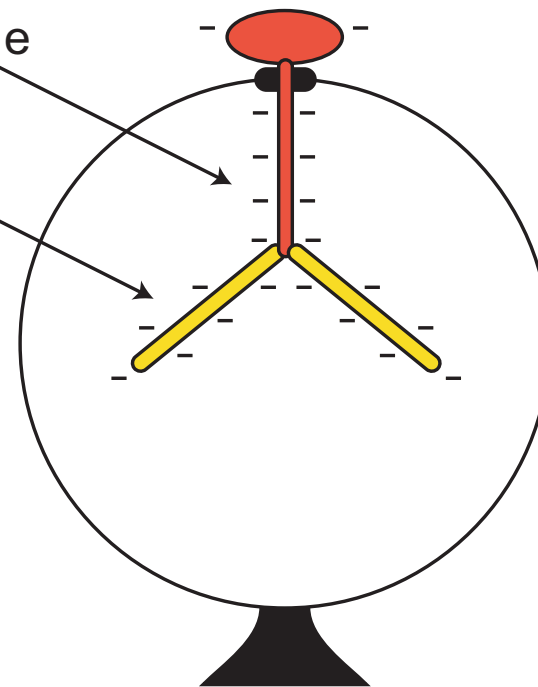
Découverte des rayons cosmiques

1901
(voire 1785, Coulomb)



barre métallique

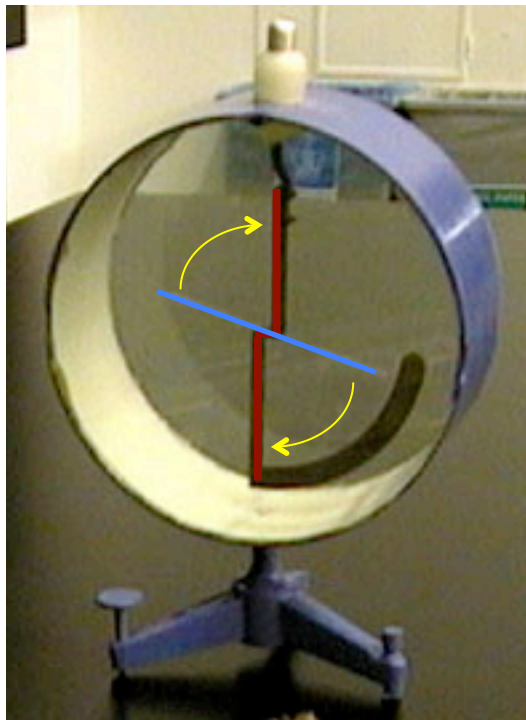
feuille d'or



électroscope chargé

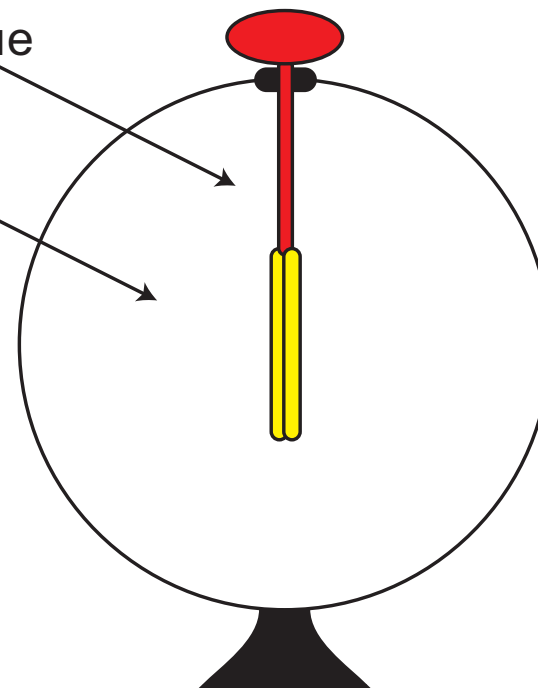
Découverte des rayons cosmiques

1901



barre métallique

feuille d'or

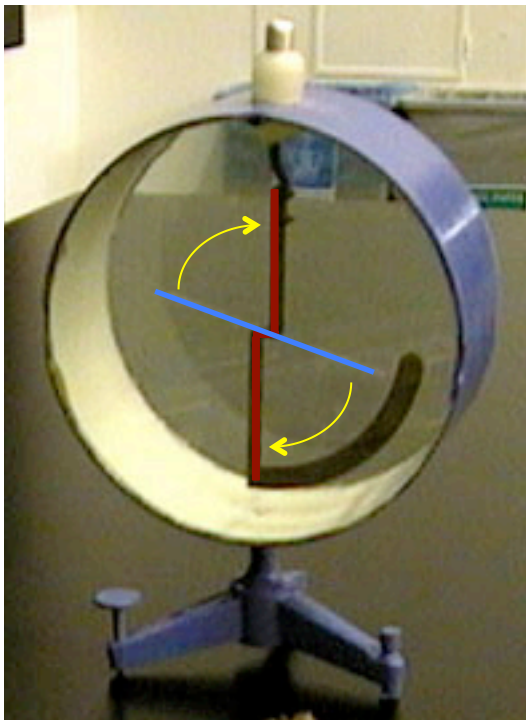


décharge spontanée !

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)

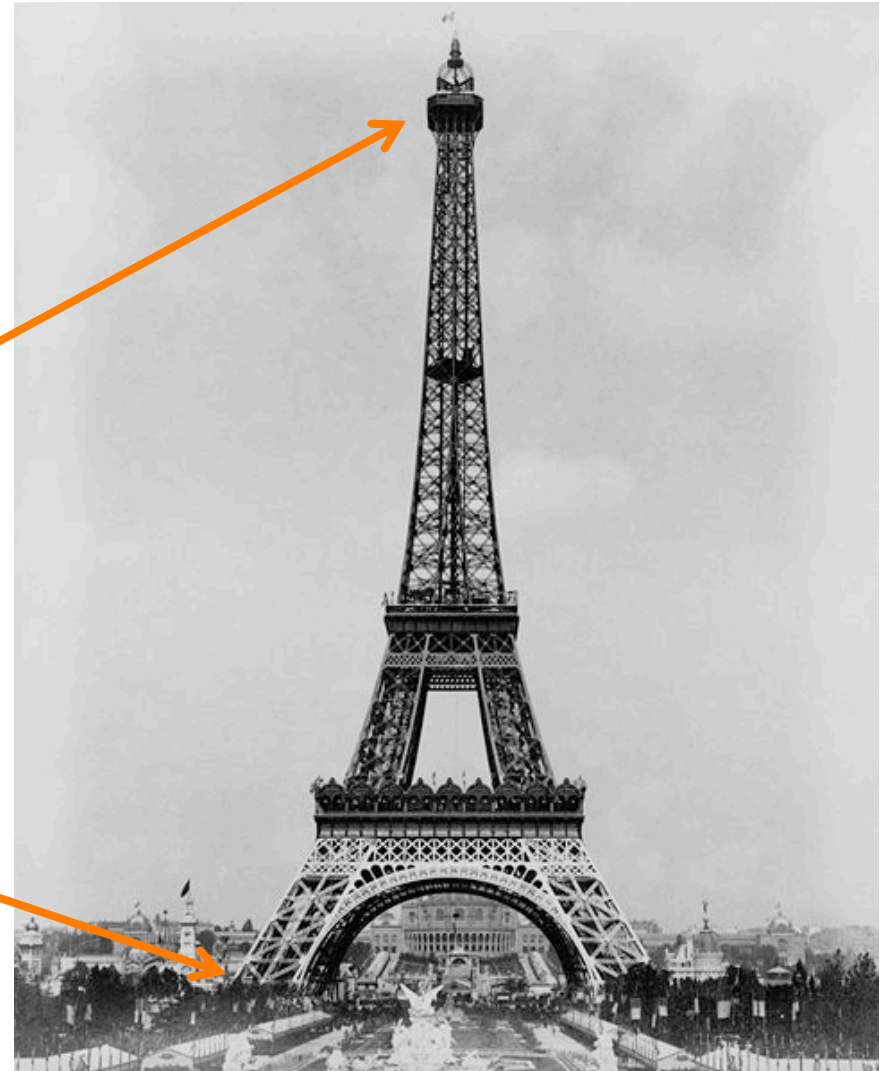
en haut

prédiction 0,4 ions / cm³/s

mesure 3,5 ions / cm³/s

au sol

mesure 6 ions / cm³/s



Découverte des rayons cosmiques

1911-1913

Victor Hess
à l'assaut du ciel

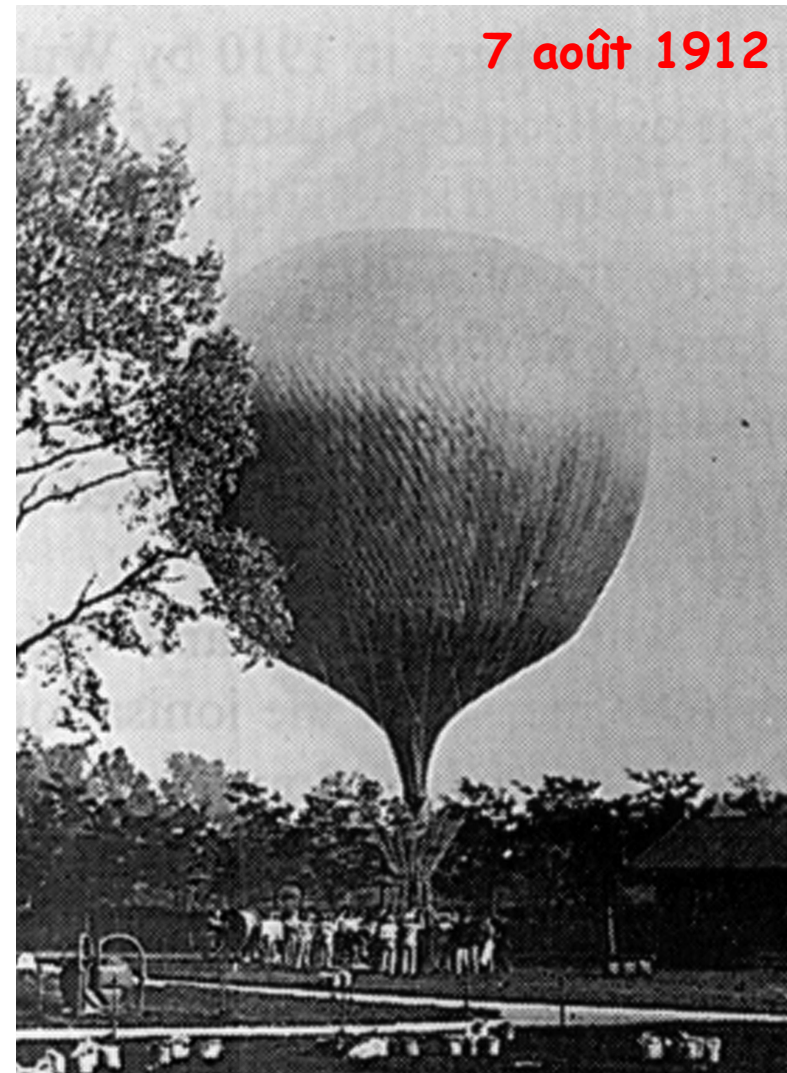
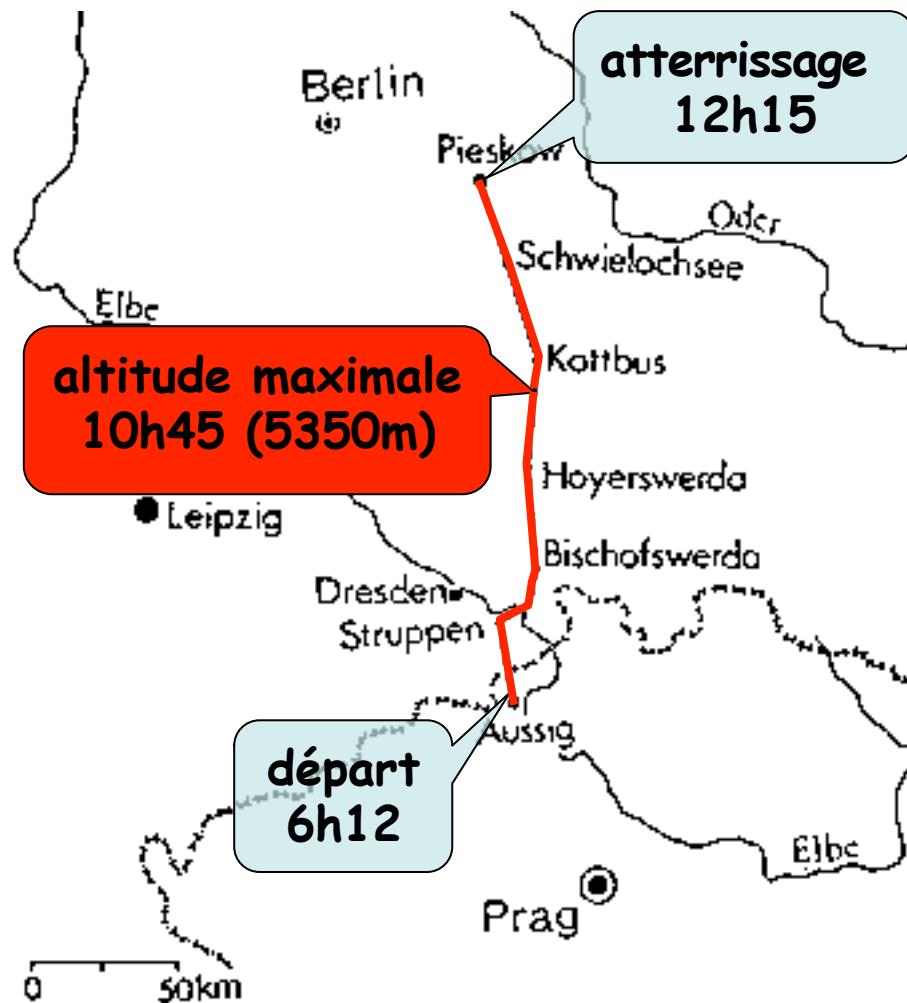
10 vols en ballon

17 avril 1912

éclipse de soleil
→ ne vient pas du soleil

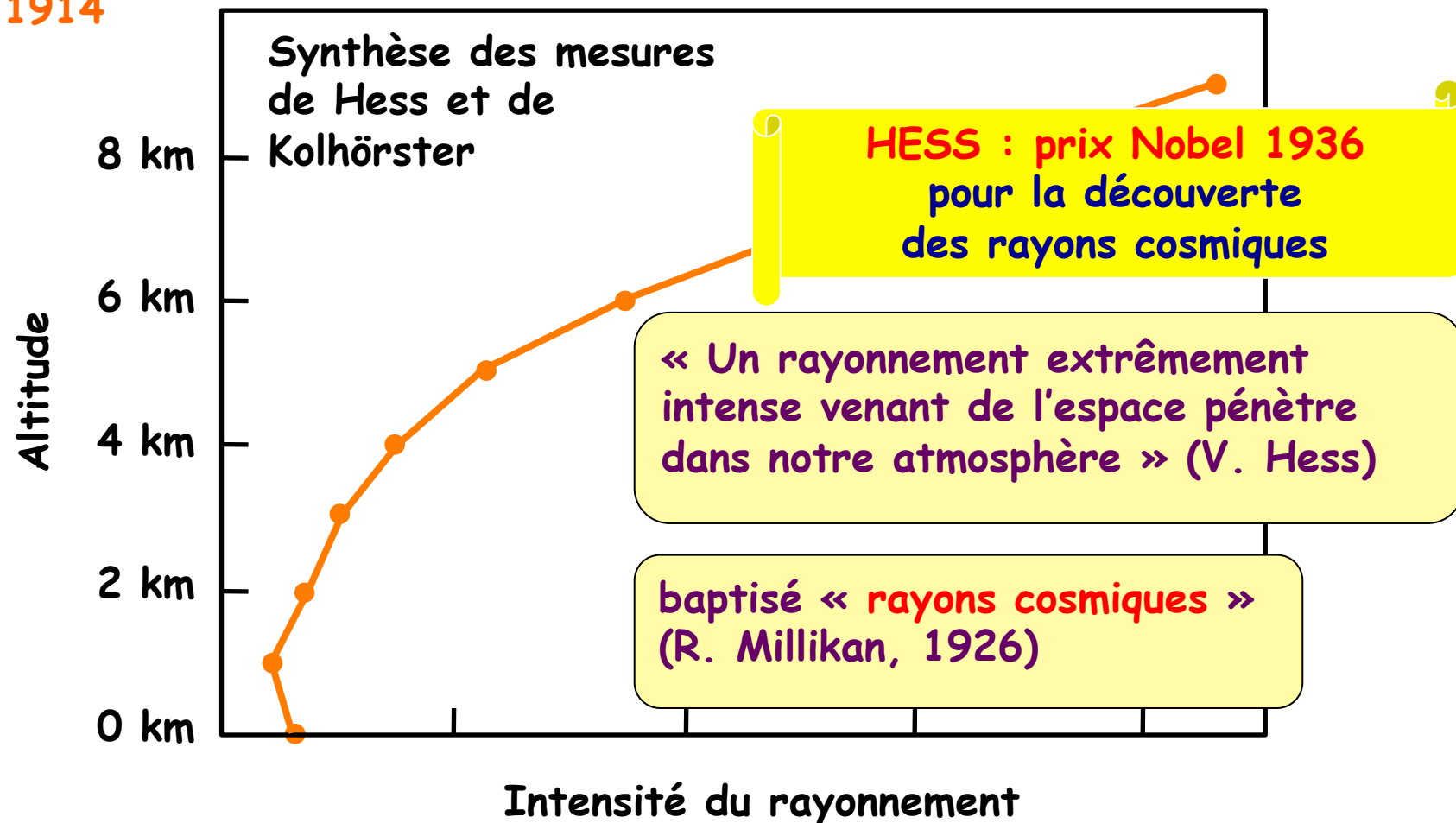


Découverte des rayons cosmiques



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 ».

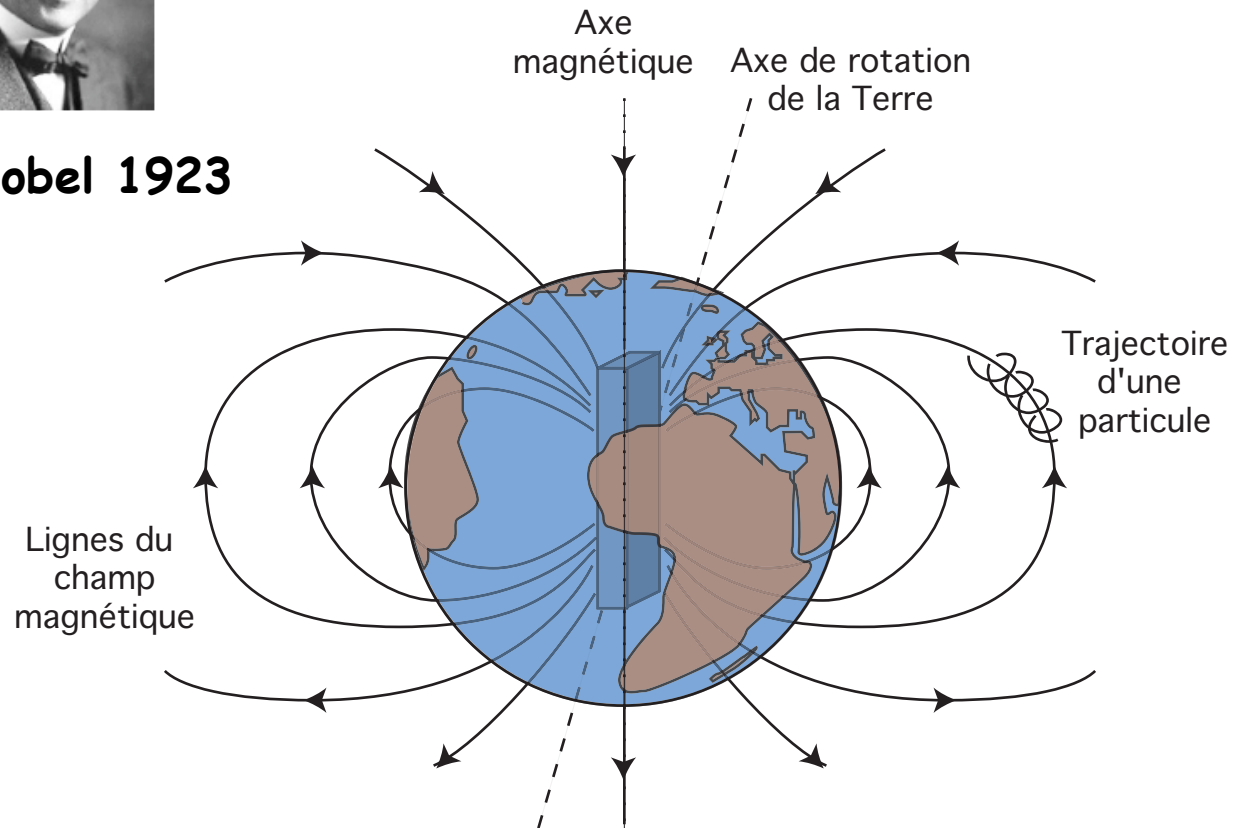
Les rayons cosmiques sont chargés. C'est pourquoi ils sont si énergétiques (accélération par champs électro-magnétiques)

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.

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

Lignes du champ magnétique

Axe magnétique

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

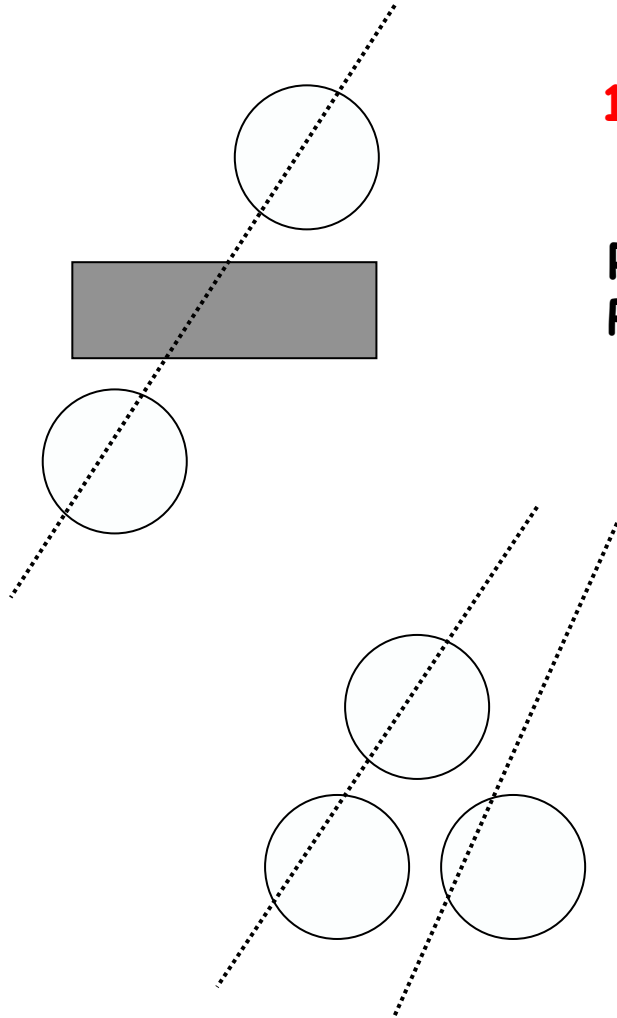
Nobel 1927

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 : 3×10^{20} eV = 50 J

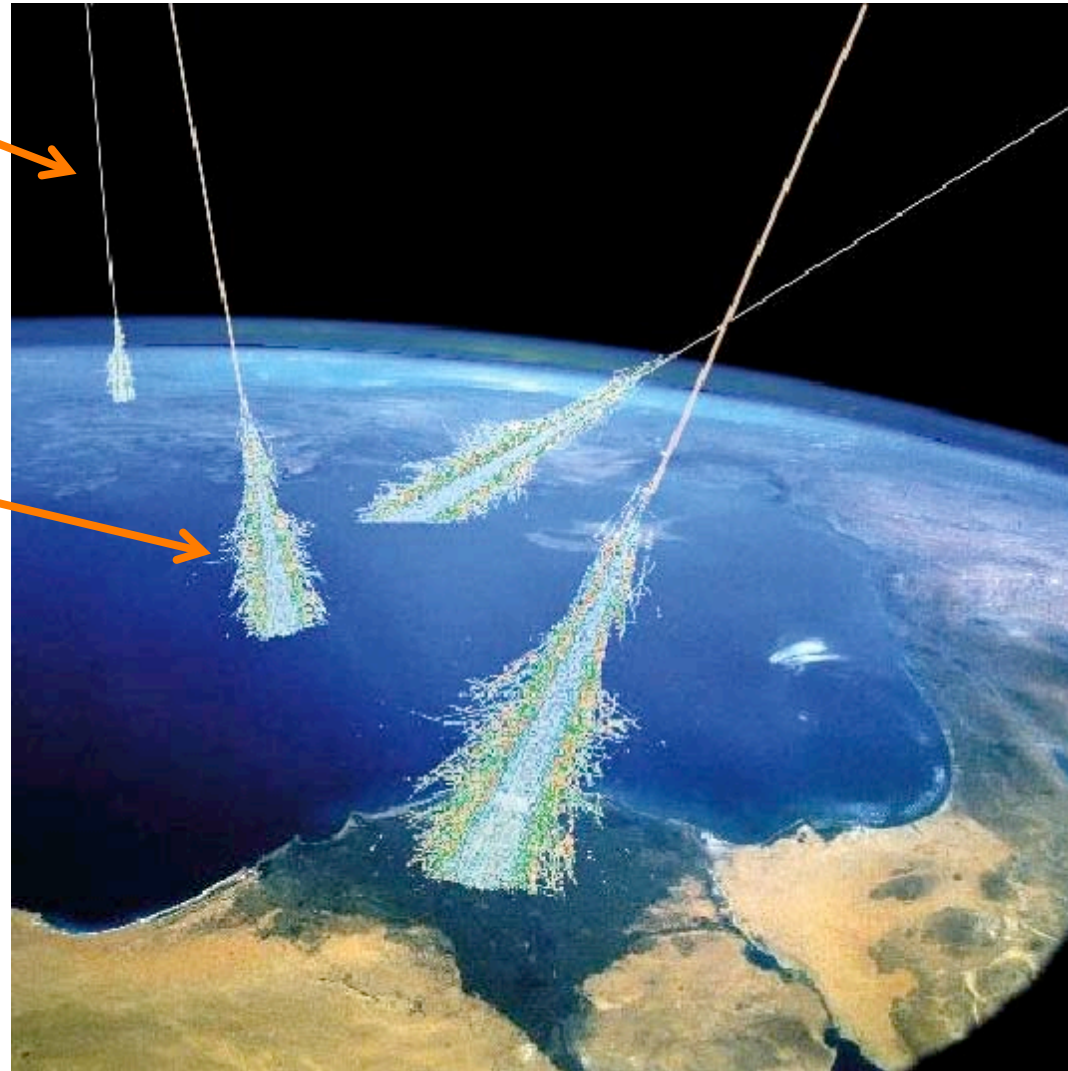


Gerbes atmosphériques

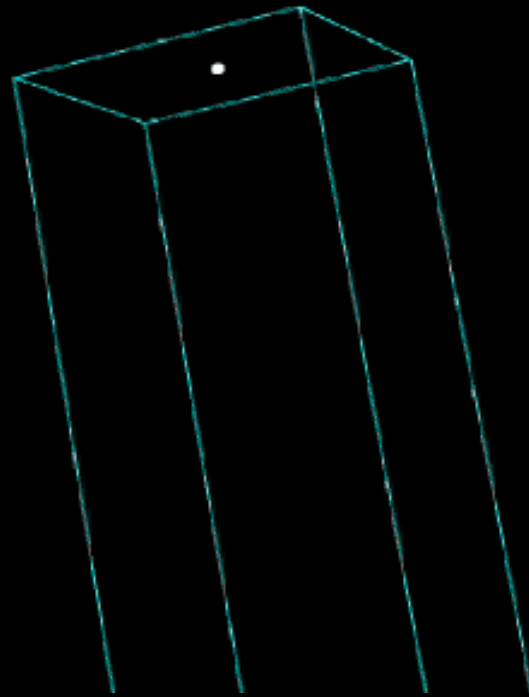
particule cosmique
(proton)



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)

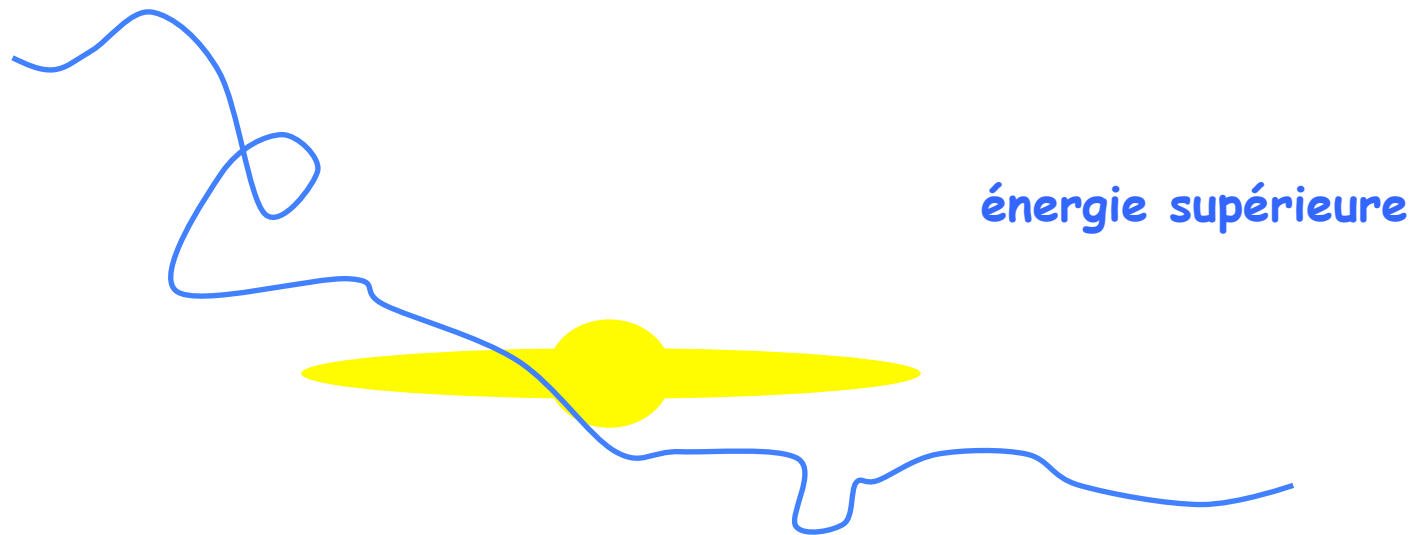


basse énergie

« Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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



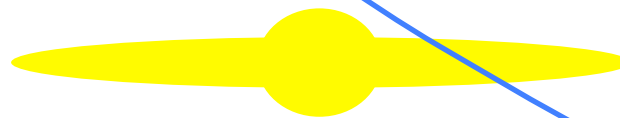
« Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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

« Astronomie » des
rayons cosmiques
uniquement
à haute énergie !

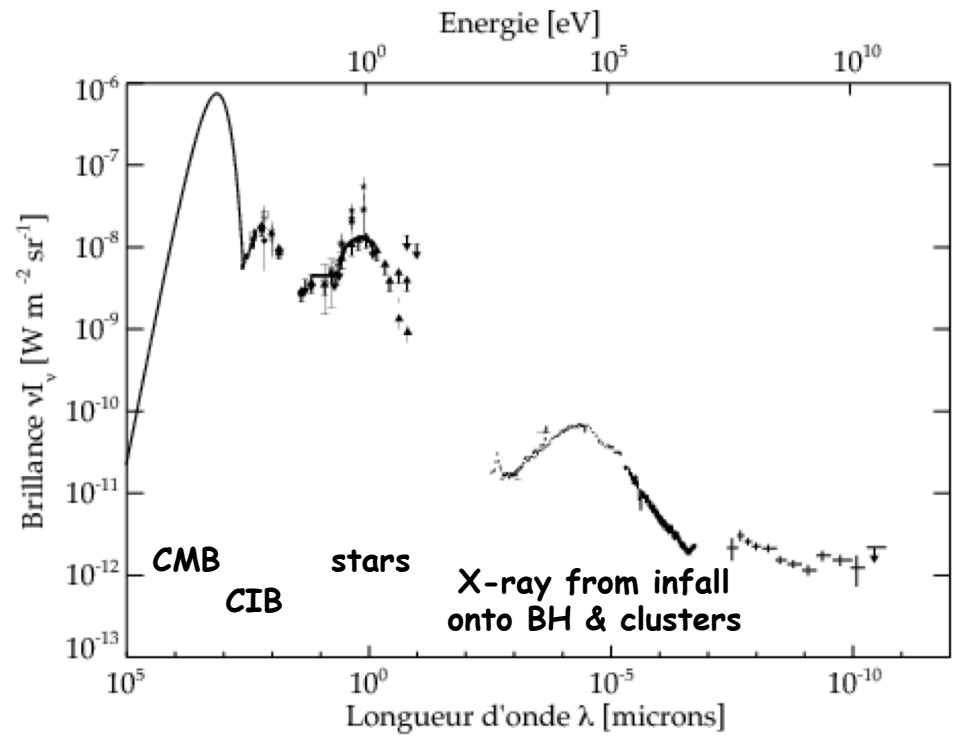
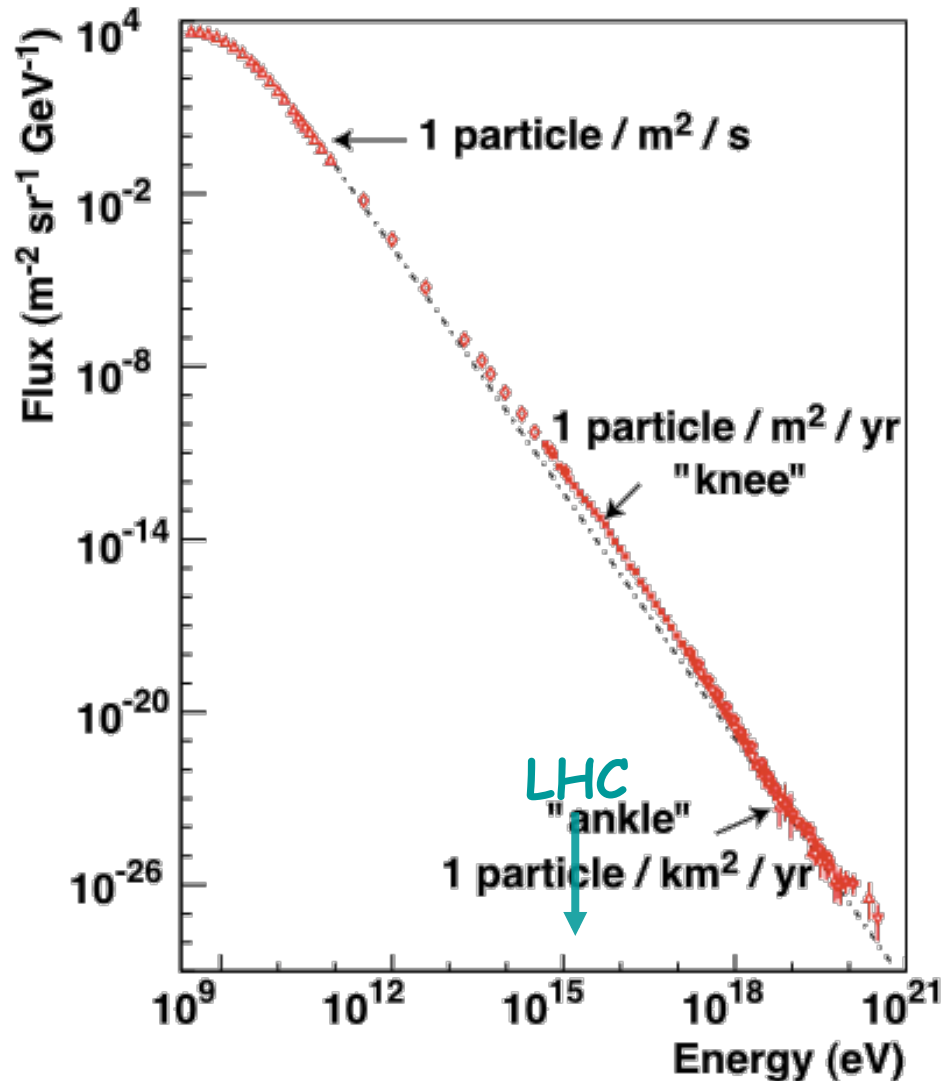
très grande énergie !



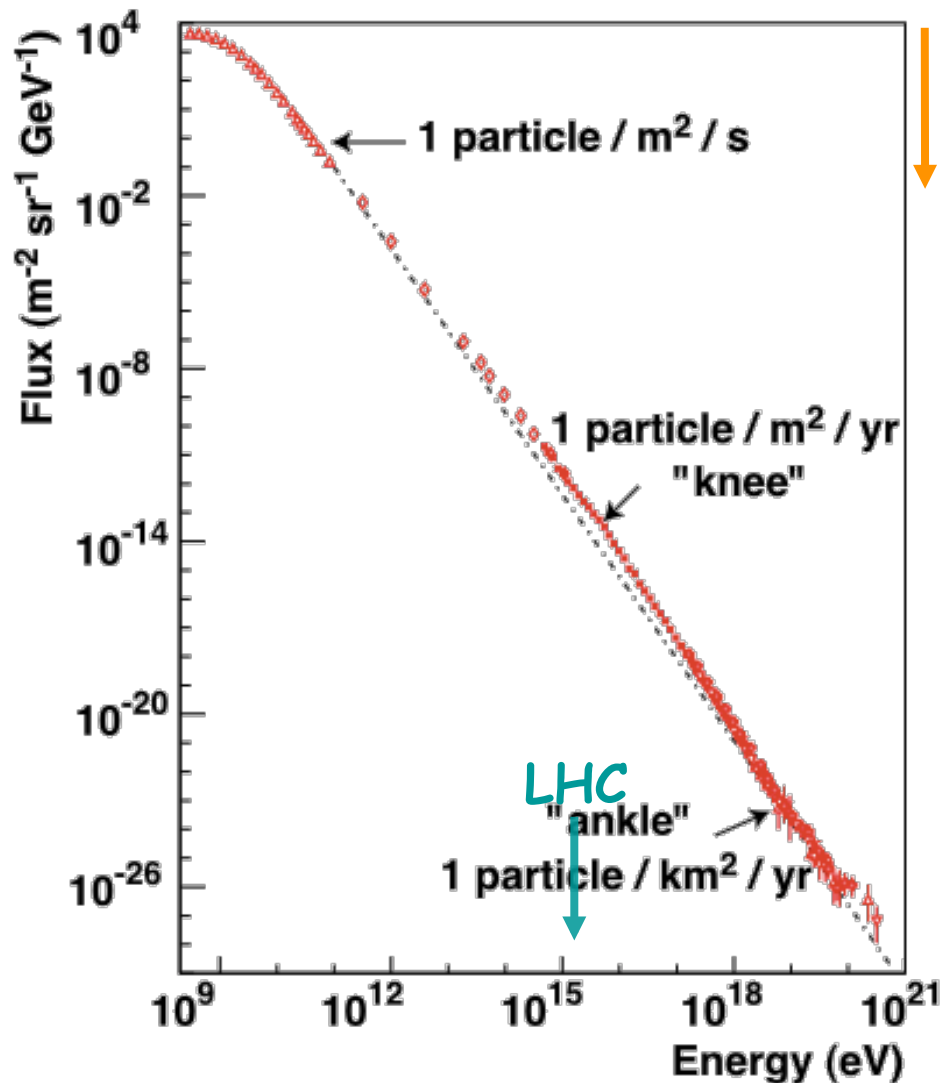


Rayons cosmiques:
énergie et accélération

Spectre des rayons cosmiques



Spectre des rayons cosmiques



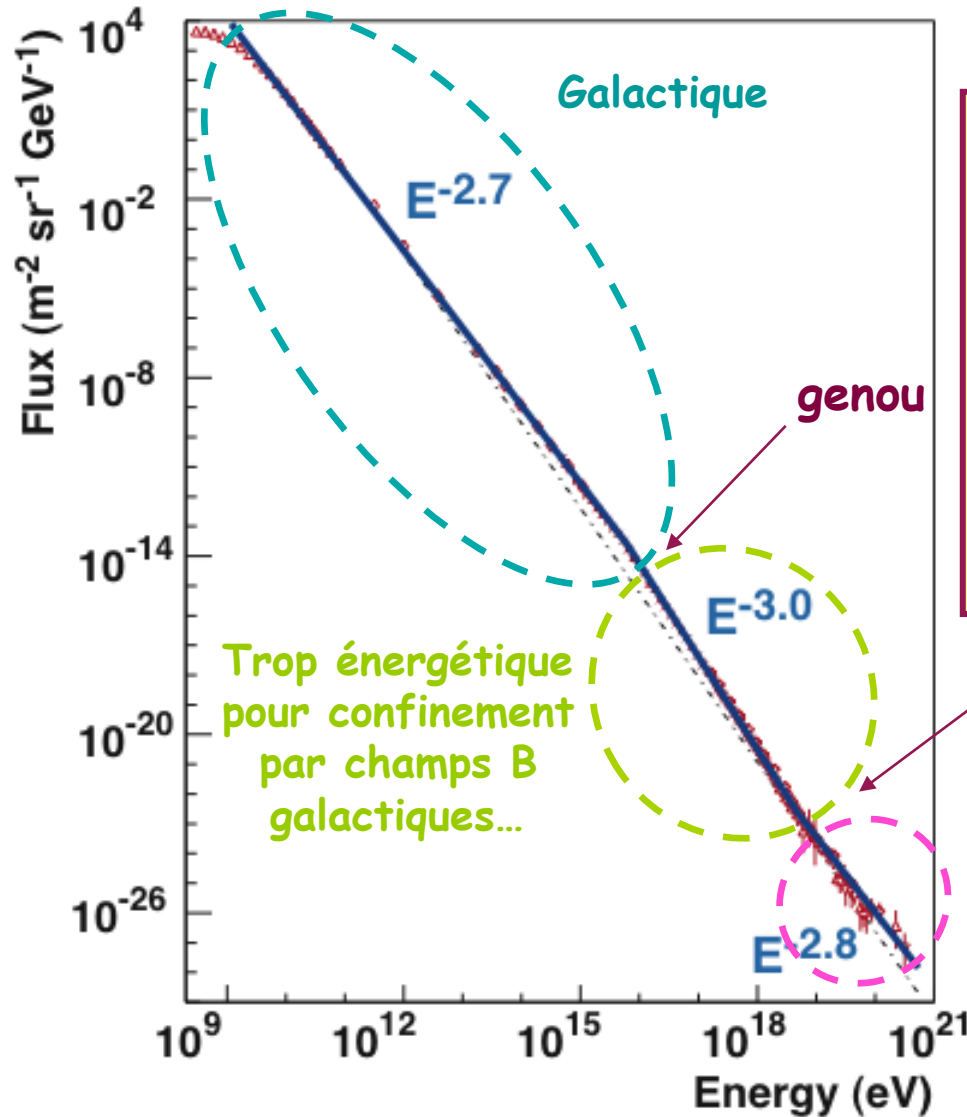
$E < 10^{14}$ eV

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 :

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

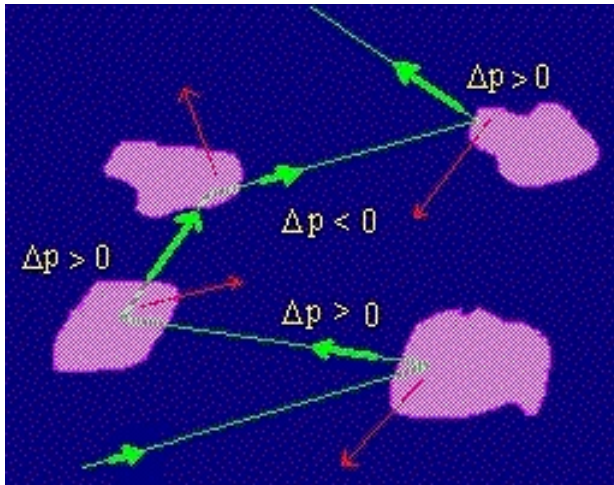
$$N(>E) \propto \frac{1}{\mathcal{P}_{esc}} \left[\frac{E}{E_0} \right]^{-\alpha}$$

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

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

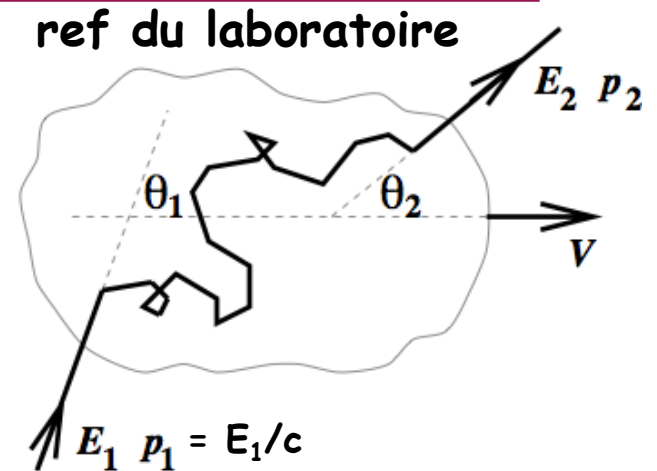
- Dans ref du nuage :
 $E'_1 = \gamma (E_1 - \beta p_{1x}c)$
 $E'_1 = \gamma E_1(1 - \beta \cos\theta_1)$

$$\beta = v/c$$

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

- 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

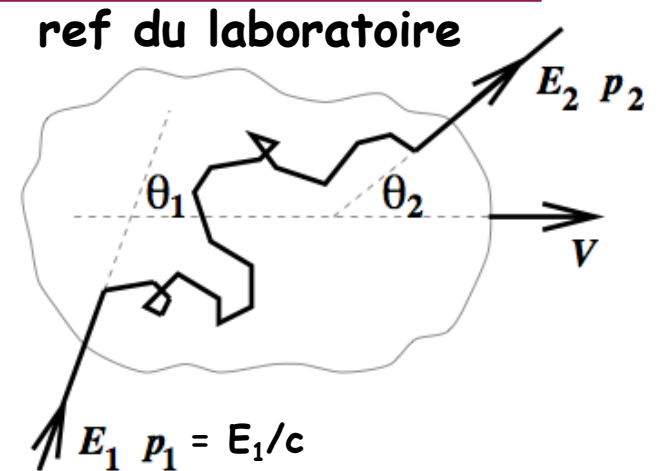
- Dans ref du nuage :
 $E'_1 = \gamma (E_1 - \beta p_{1x}c)$
 $E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos\theta_1)$

$$\beta = v/c$$

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

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

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

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

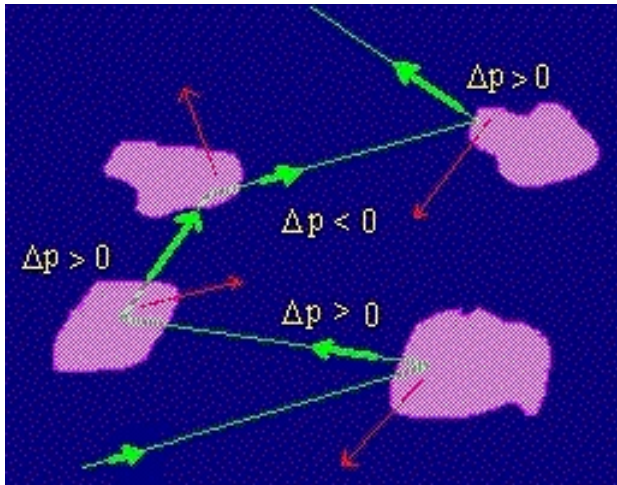
$$\Rightarrow \langle \xi \rangle \sim 4\beta^2/3$$

$$(\beta \ll 1)$$

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.

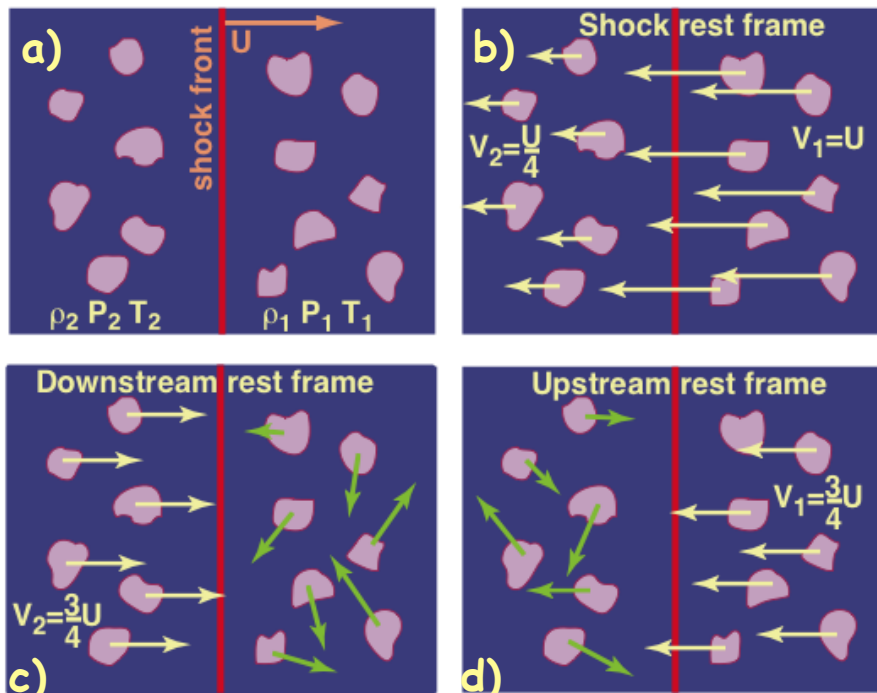
$$\Delta E/E \propto \beta^2 \quad \beta = v/c \sim 10^{-4}$$

« 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

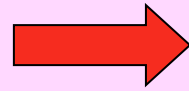
$$\langle \cos\theta_1 \rangle = -2/3 \text{ et } \langle \cos\theta'_2 \rangle = 2/3$$

\Rightarrow Gain en énergie rapide

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

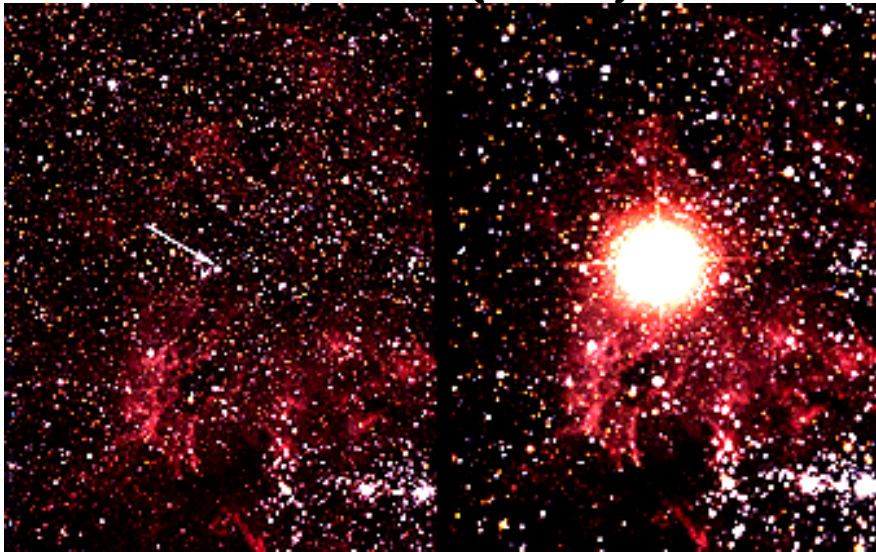
« Premier ordre »

Ondes de choc ?



Supernovae !

SN 1987A (SN II)



quelques
siècles



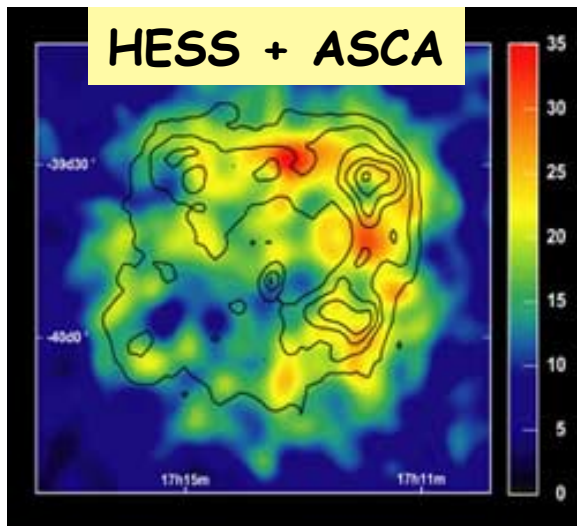
plus
tard

Reste de supernova
du Crabe



1 SN II / 50 ans dans notre galaxie

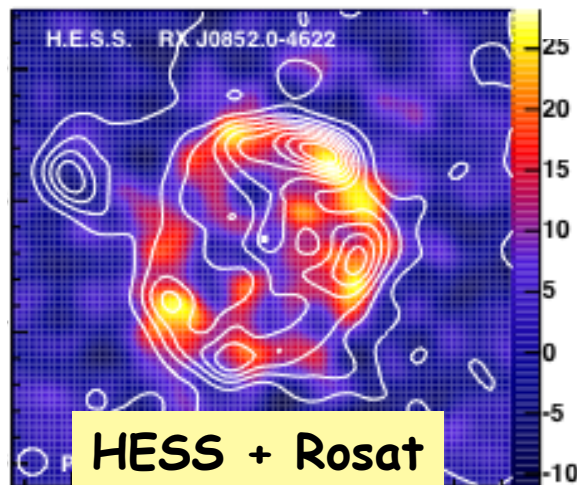
HESS : première confirmation



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)

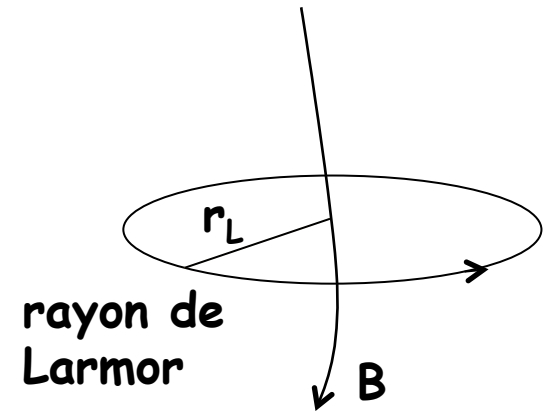
coïncidence spatiale →
restes de SN = accélérateurs
de particules multi TeV

Limitation énergétique

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

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

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

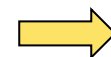


Particule ultra-relativiste : $p \sim E/c$ donc $r_L = E / (qBc)$

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

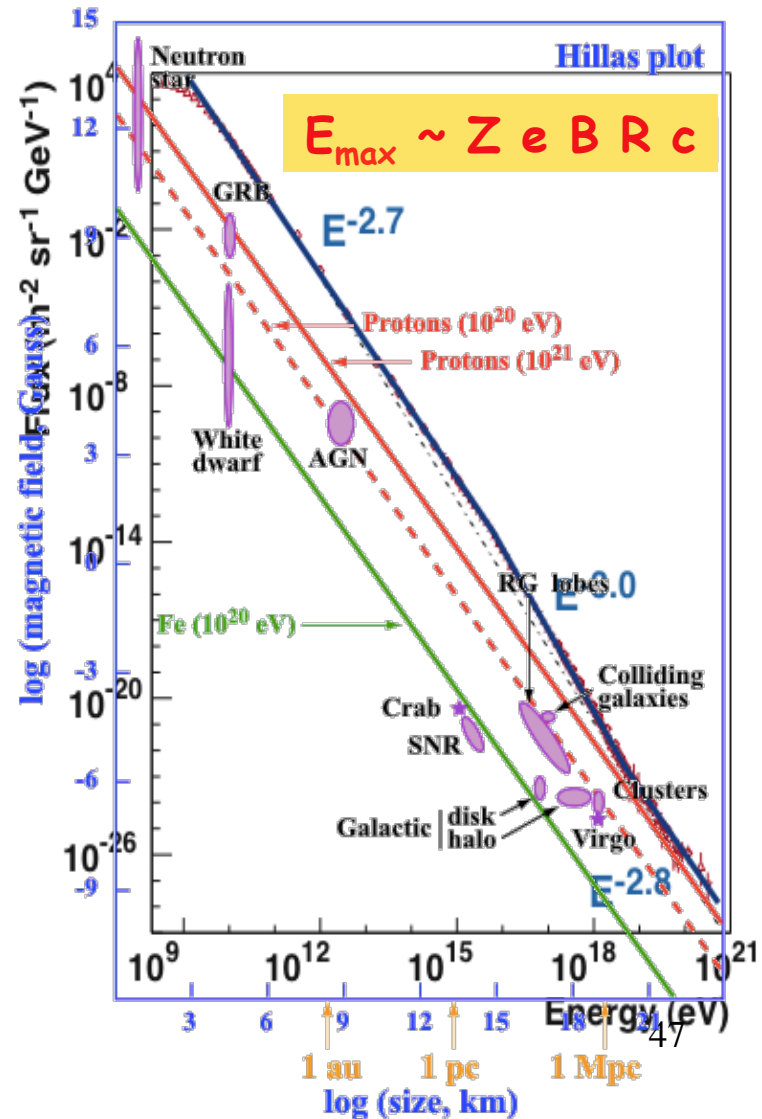
Restes de supernova :
 → $E_{\max} \sim 10^{15}$ eV (genou)

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_{gal} typique \searrow R_{halo} typique

→ Voie lactée insuffisante pour rayons les plus énergétiques



Sources au delà de 10^{15} eV

Active Galactic Nuclei

