

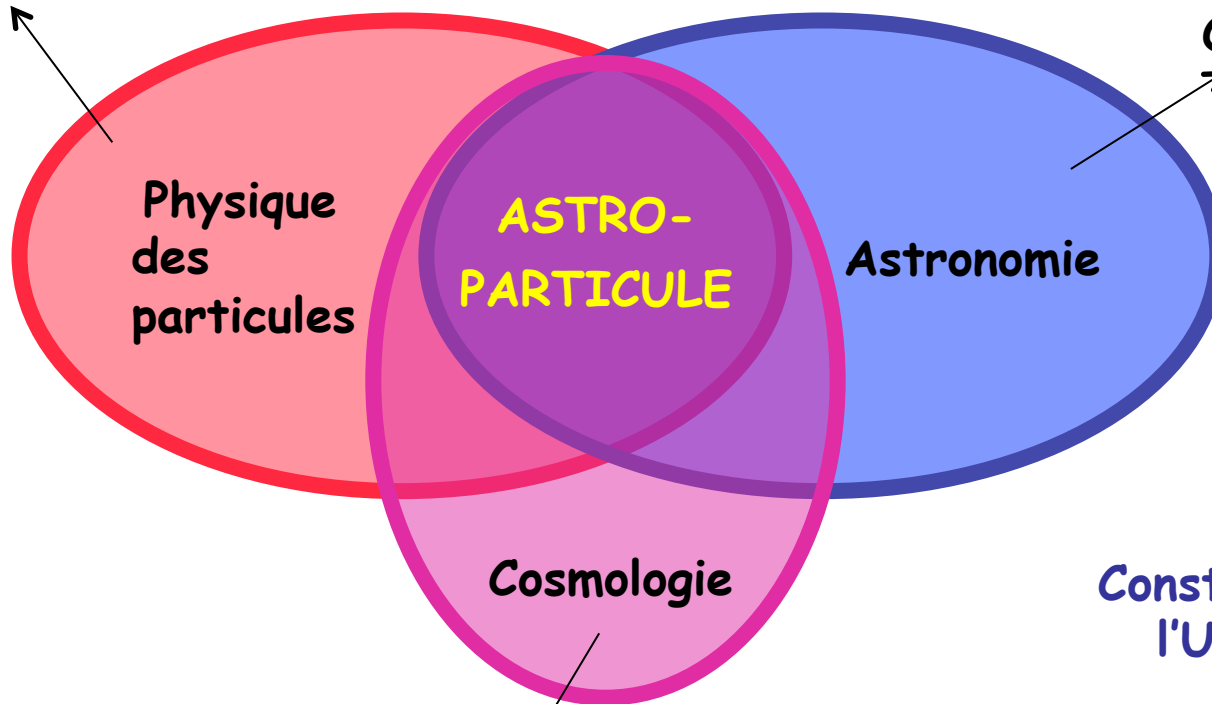
# Astroparticule et neutrinos

## 1/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay  
Bénodet, novembre 2017

# Astroparticule

Techniques d'analyse  
DéTECTEURS



Observations

Physique  
des  
particules

ASTRO-  
PARTICULE

Astronomie

Cosmologie

Constituants de  
l'Univers ?

Phénomènes les plus  
extrêmes ?

Cadre théorique

# Astroparticule



- 1) Approche multi-messagers  
Rayons cosmiques (historique, propriétés)
  
- 2) Rayons cosmiques (état des lieux, derniers résultats)  
Sursauts gamma  
Ondes gravitationnelles
  
- 3) Neutrinos
  - Astronomie neutrino
  - Neutrinos et cosmologie

# Astroparticule

## 1/3

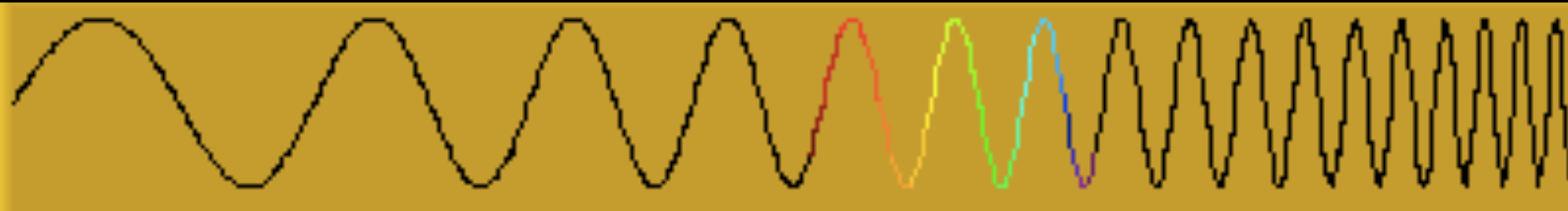


- Approche multi longueurs d'onde
- Découverte des rayons cosmiques
- Rayons cosmiques aux énergies extrêmes  
Mécanismes d'accélération  
Sources cosmiques

# Observations multi longueurs d'onde



1km      1m      1mm       $1\mu\text{m}$        $0,1\mu\text{m}$       10nm      0,01nm



Radio

Infrarouge

Visible

UV

X

Gamma

800nm - 400nm

# Observations multi longueurs d'onde

1 km                      1 m                      1 mm                      1  $\mu$ m                      0,1  $\mu$ m    10 nm                      0,01 nm



Radio

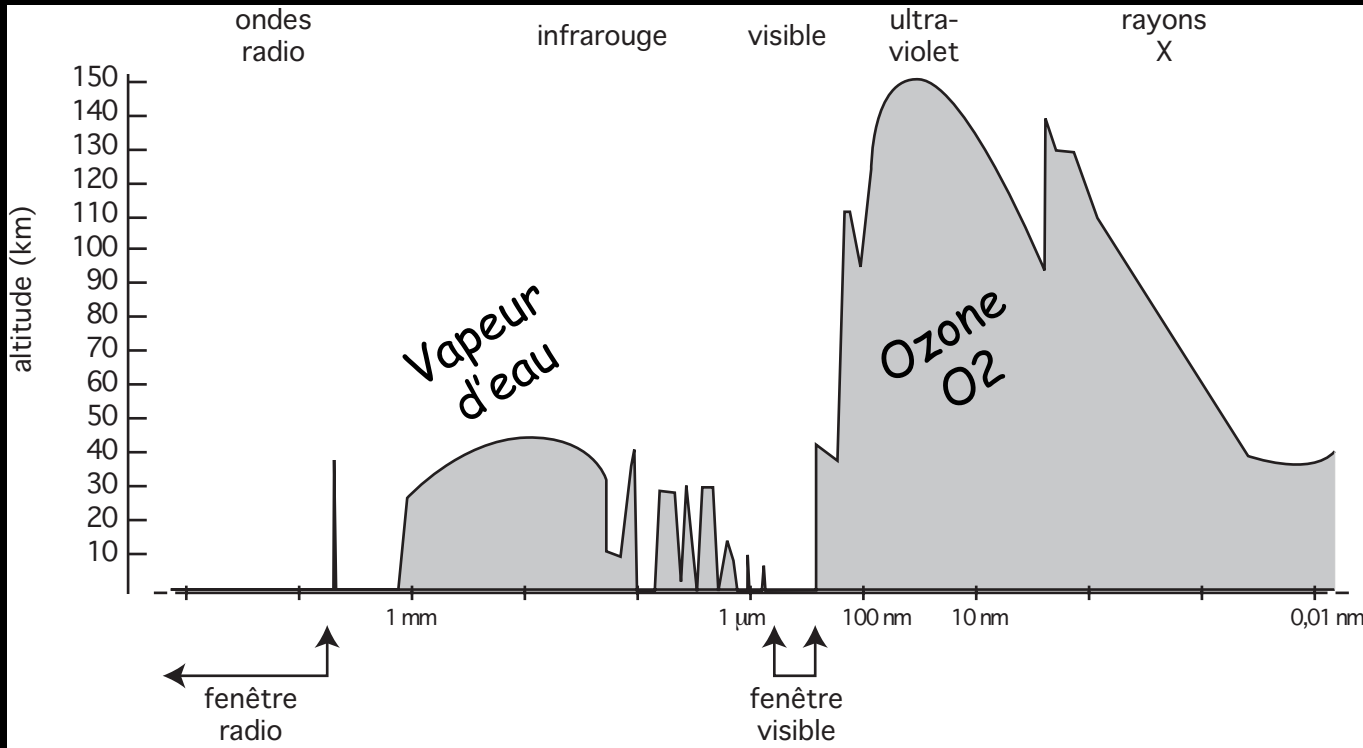
Infrarouge

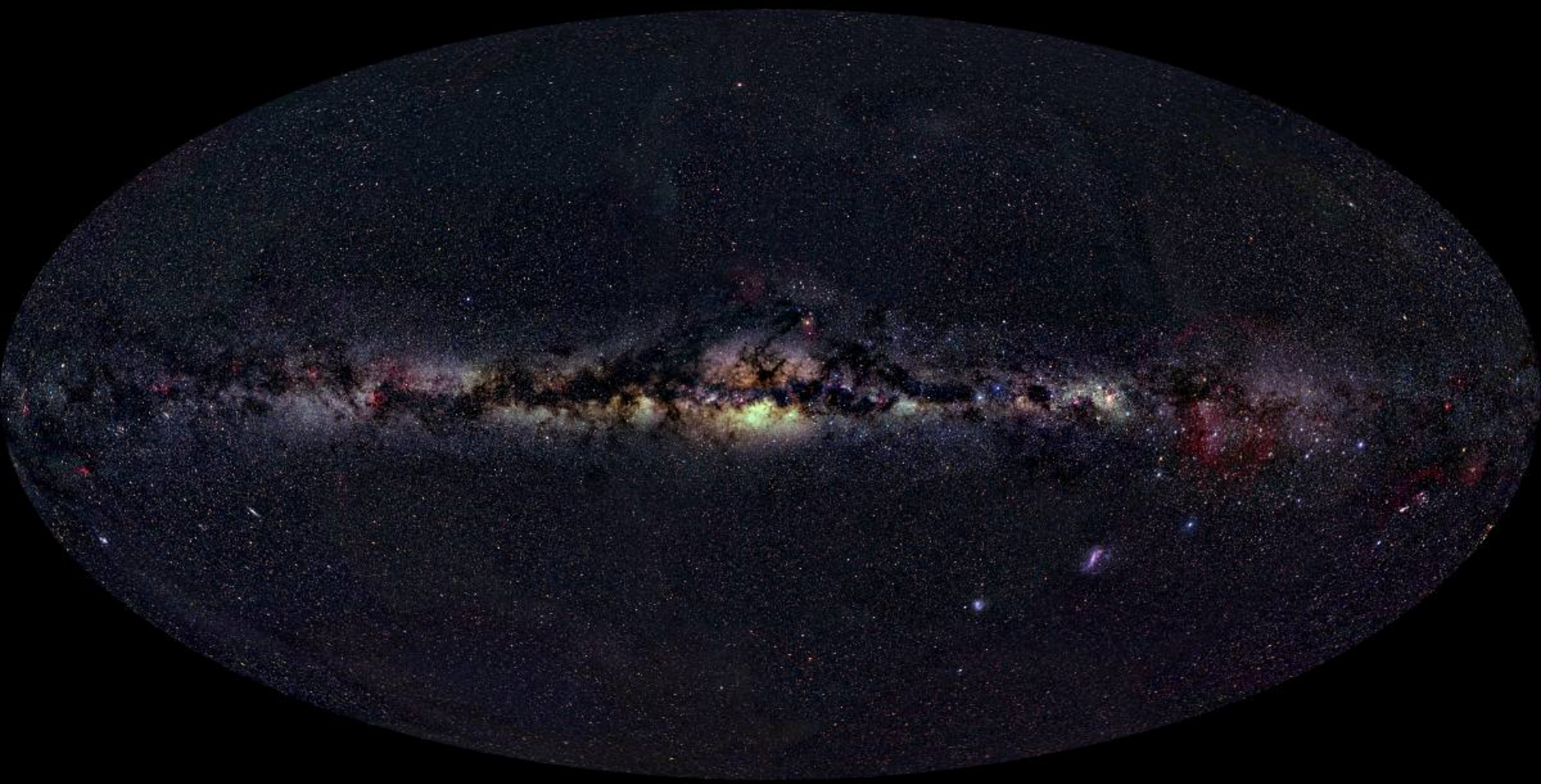
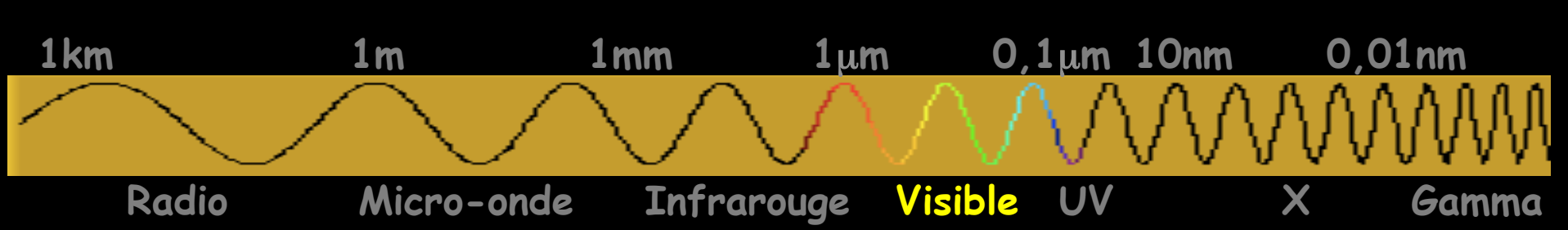
Visible

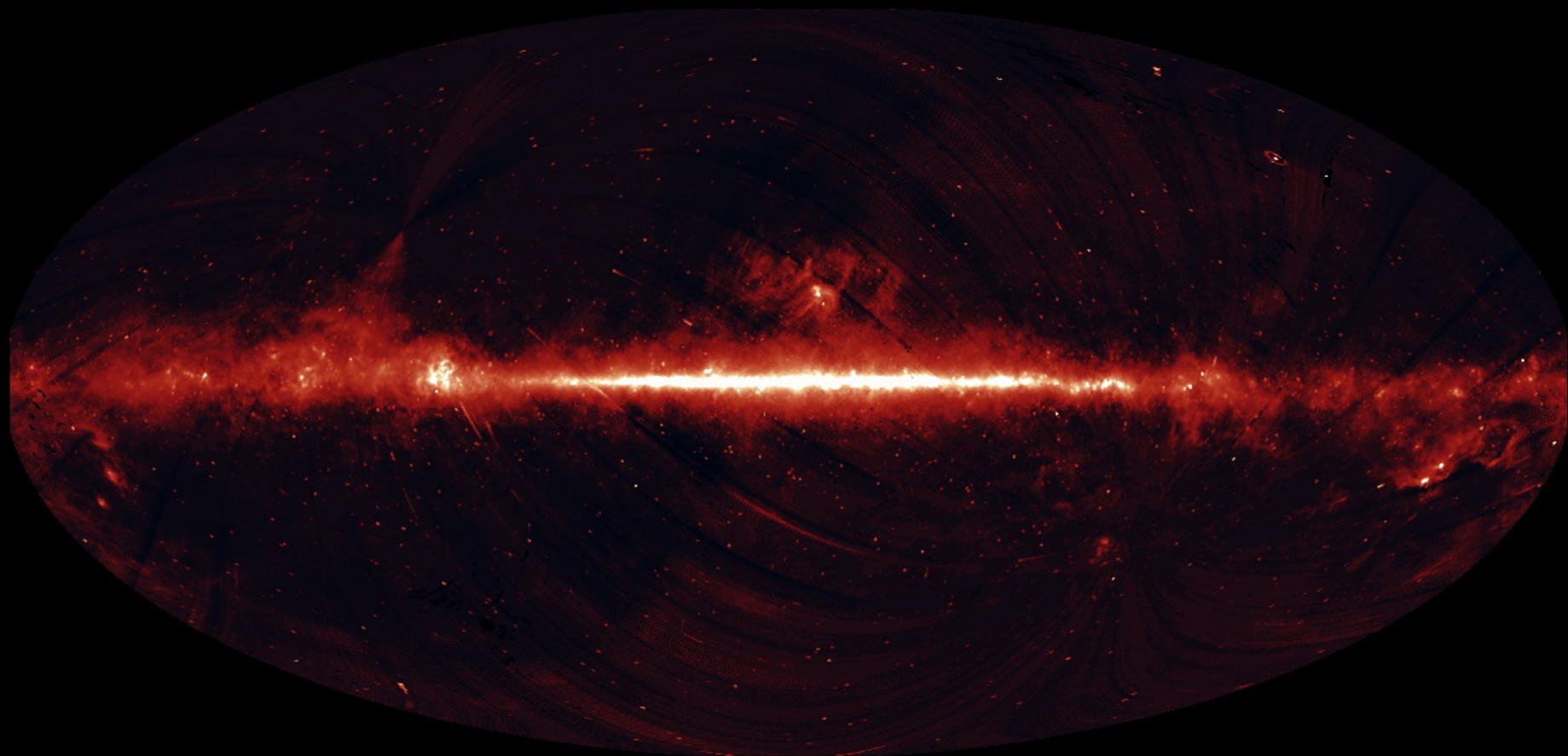
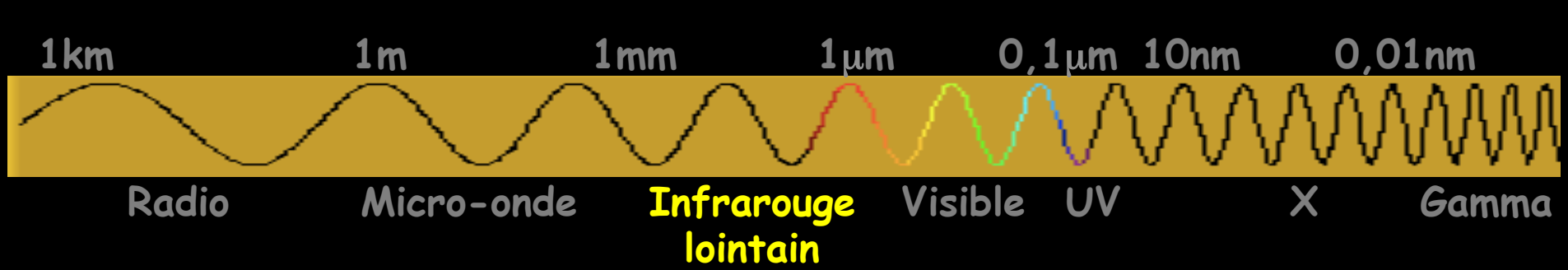
UV

X

Gamma

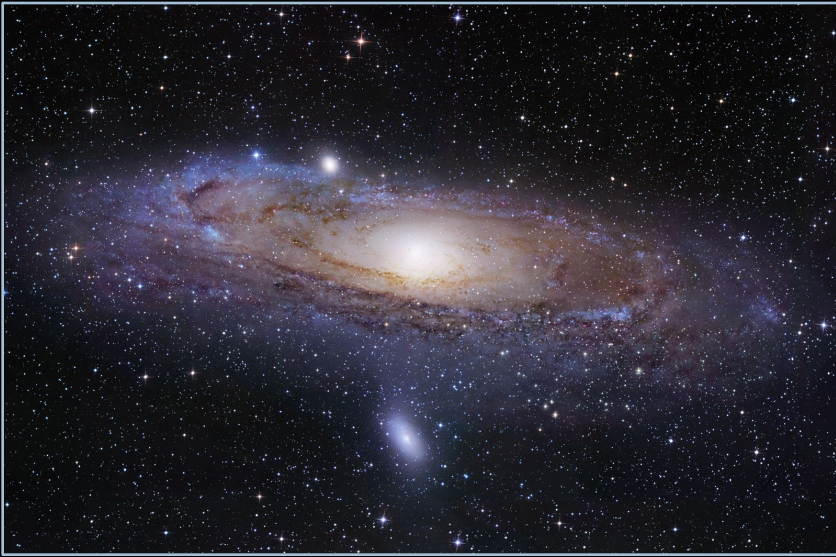




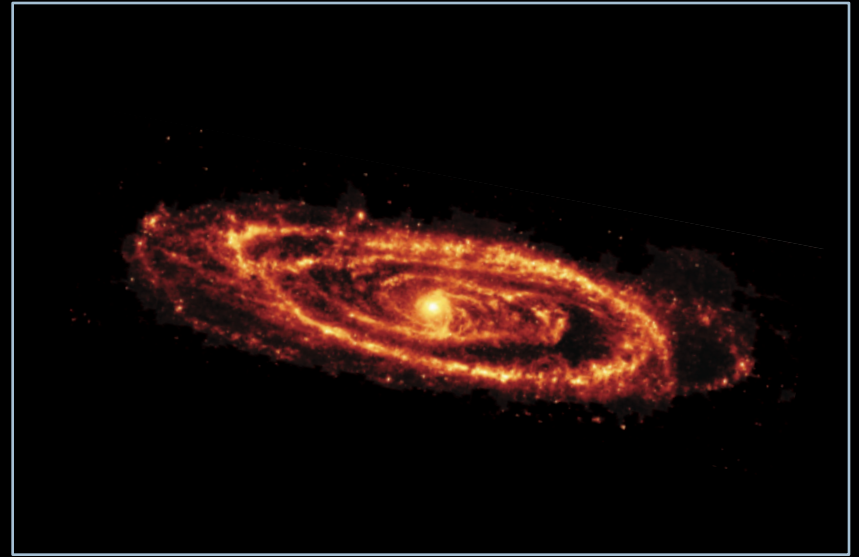




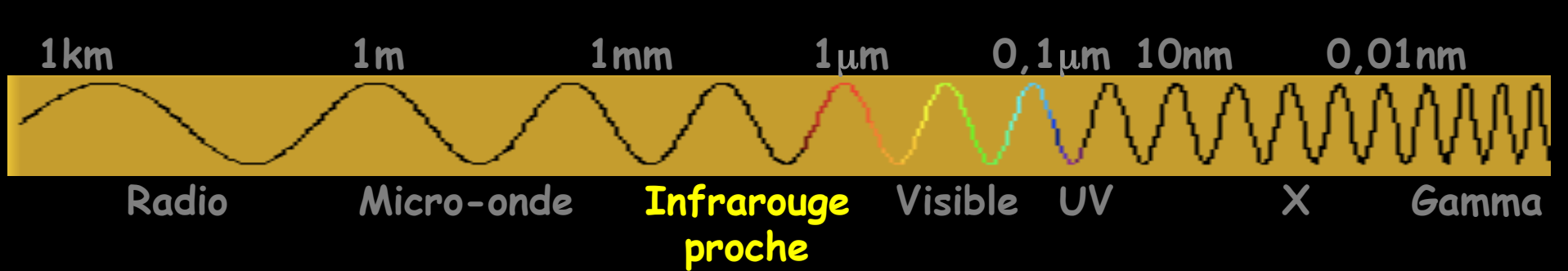
# Andromède

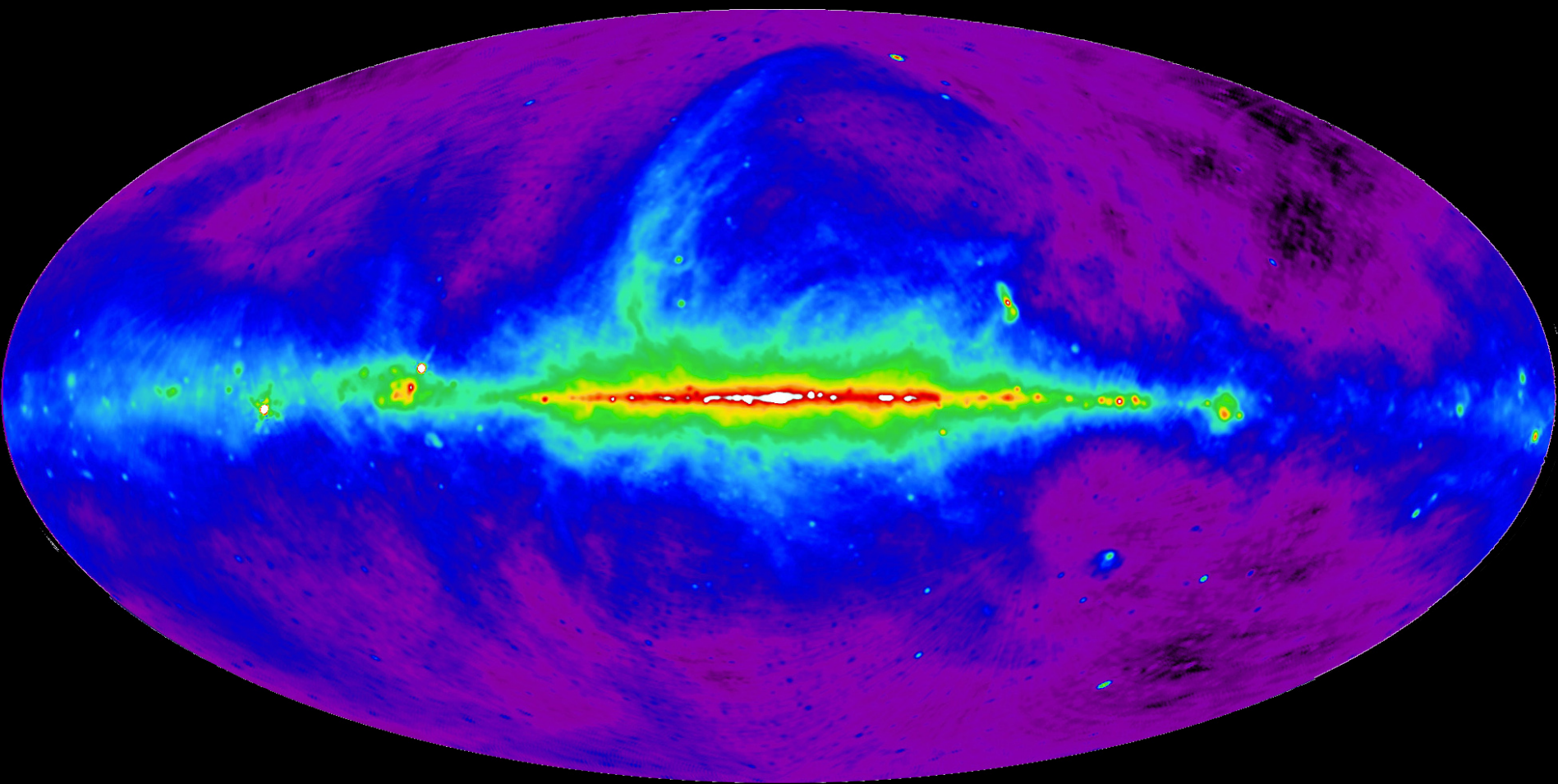
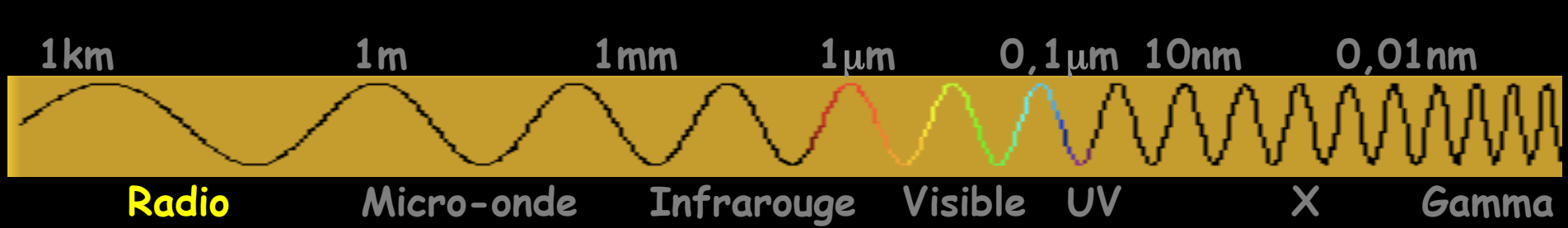


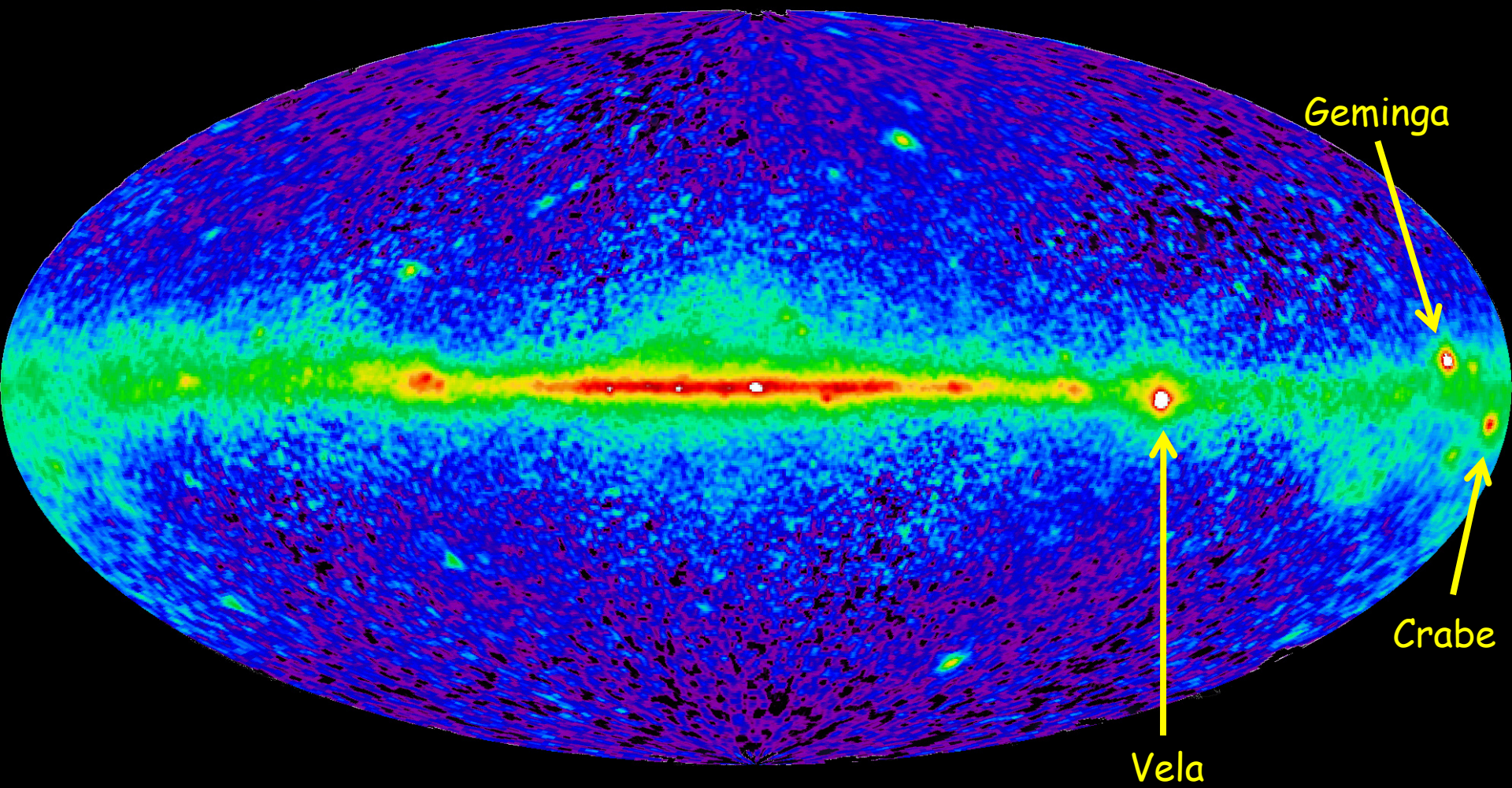
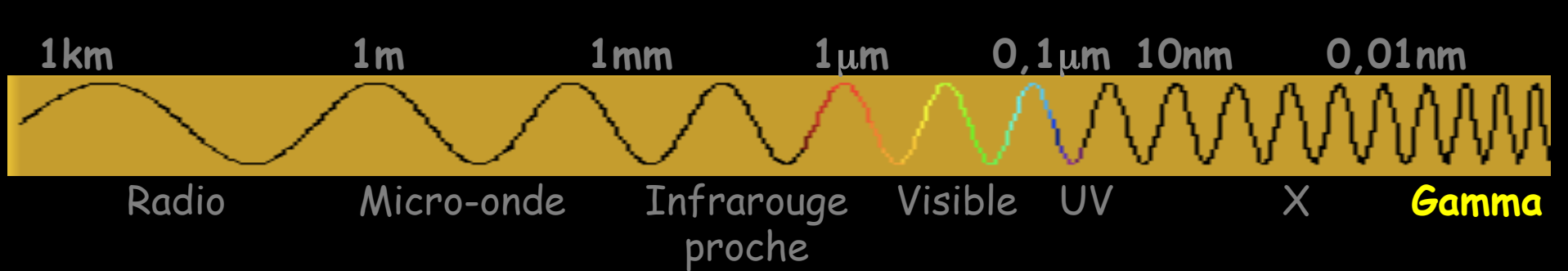
visible



infrarouge



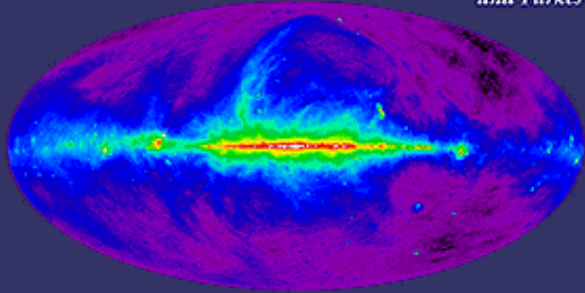




# Univers en multi-longueurs d'onde

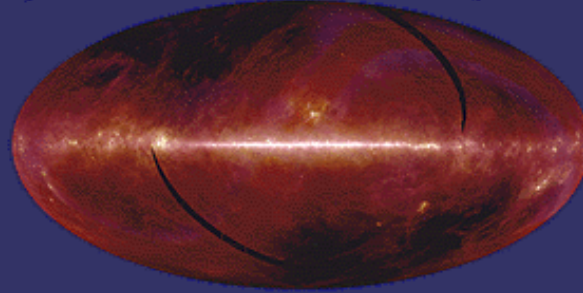
Radio Continuum (408 MHz)

Bonn, Jodrell Bank,  
and Parkes



Infrared

12, 60, 100  $\mu\text{m}$  IRAS



Near Infrared

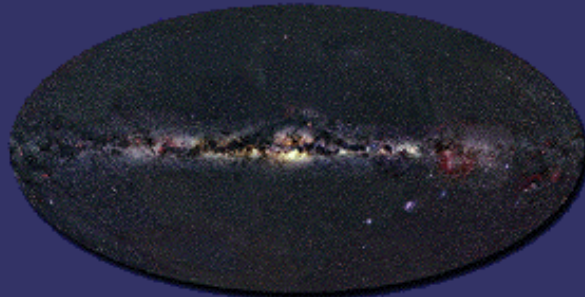
1.25, 2.2, 3.5  $\mu\text{m}$  COBE/DIRBE



## Les différentes facettes de la Voie lactée

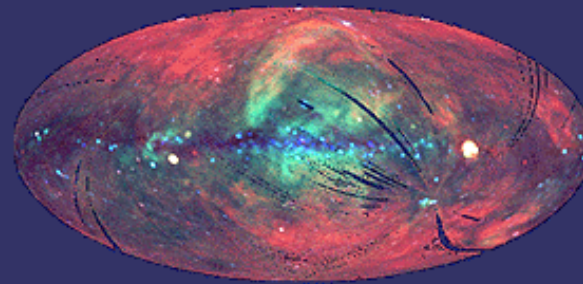
Optical

A. Mellinger Photomosaic



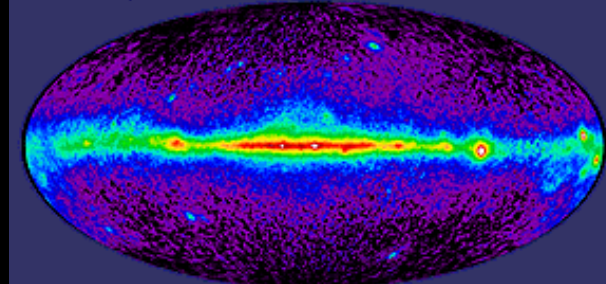
X-Ray

0.25, 0.75, 1.5 KeV ROSAT/SPC



Gamma Ray

>100MeV CGRO/EGRET



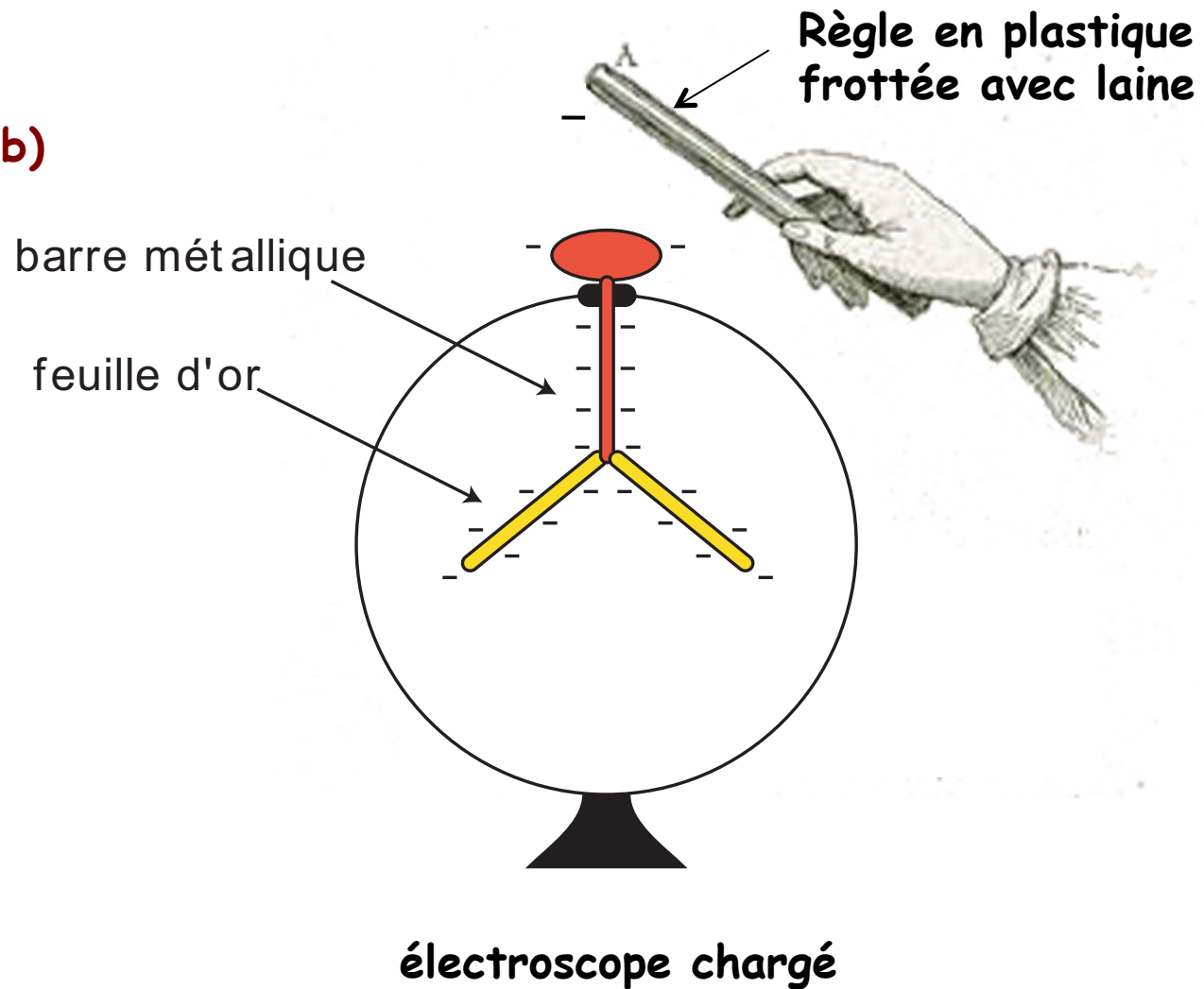
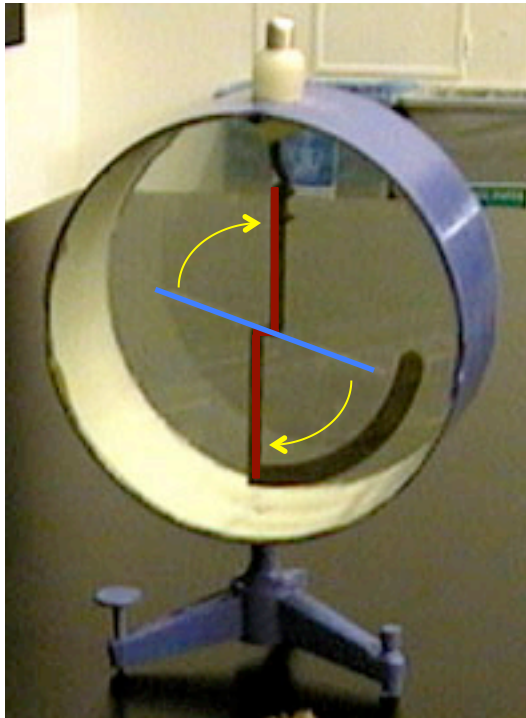
# Astroparticule

## 1/3

- Approche multi longueurs d'onde
- • Découverte des rayons cosmiques
- Rayons cosmiques aux énergies extrêmes  
Mécanismes d'accélération  
Sources cosmiques

# Découverte des rayons cosmiques

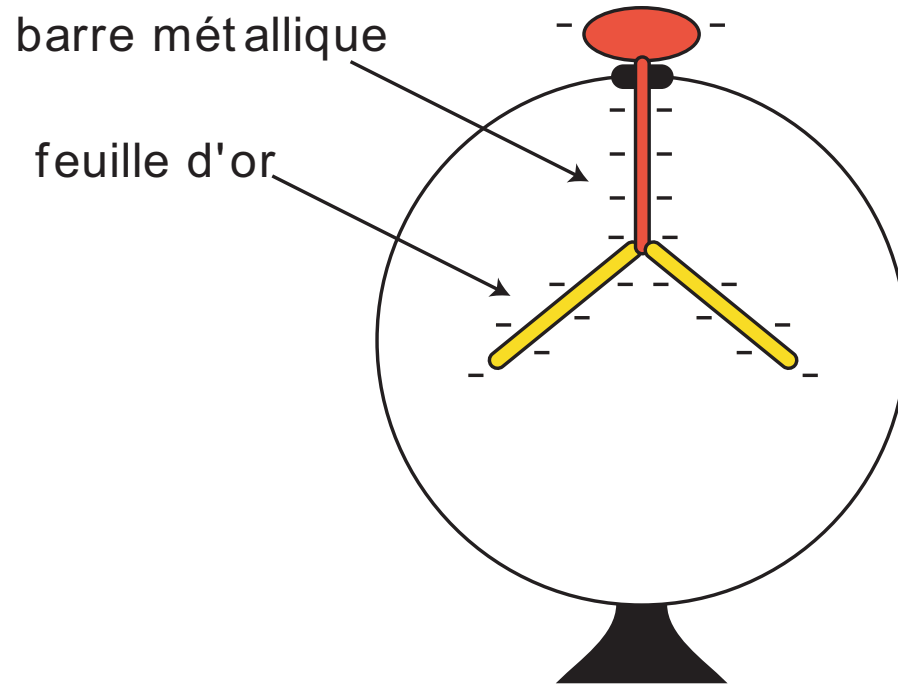
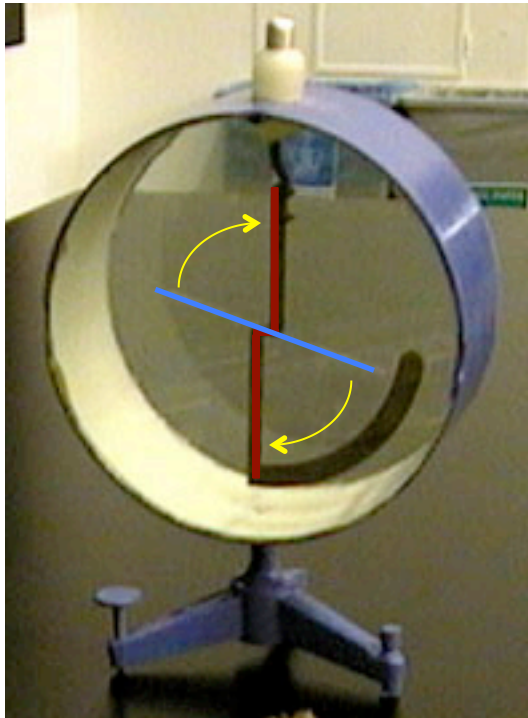
1901  
(voire 1785, Coulomb)



# Découverte des rayons cosmiques

1901

(voire 1785, Coulomb)



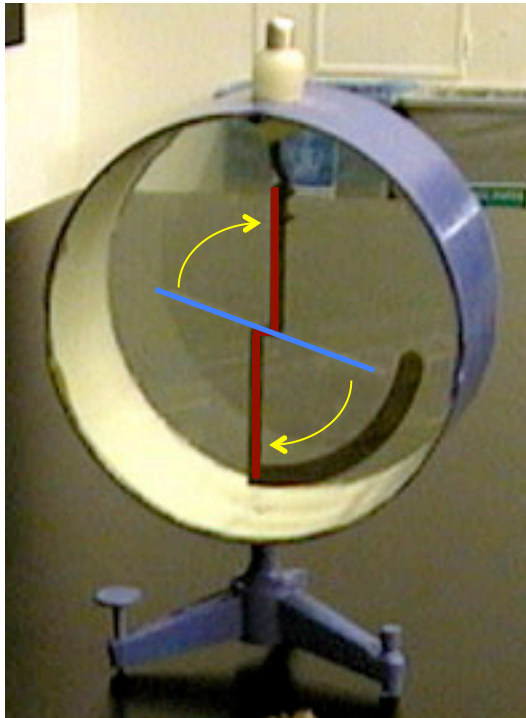
électroscope chargé



# Découverte des rayons cosmiques

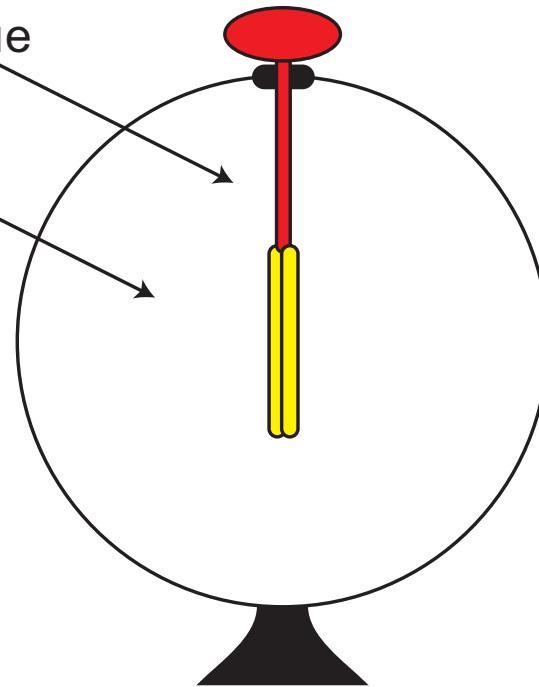
1901

(voire 1785, Coulomb)



barre métallique

feuille d'or

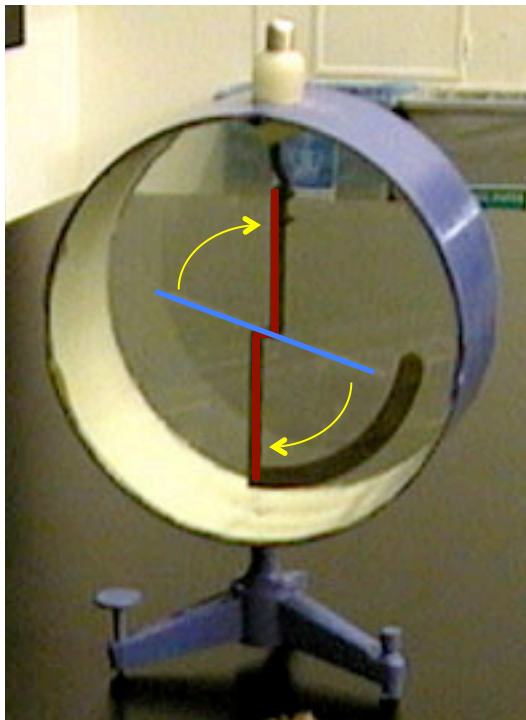


décharge spontanée !

# 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  
mise en cause  
(Rutherford, 1895: Thorium, Uranium, ...)

# Découverte des rayons cosmiques

1909

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

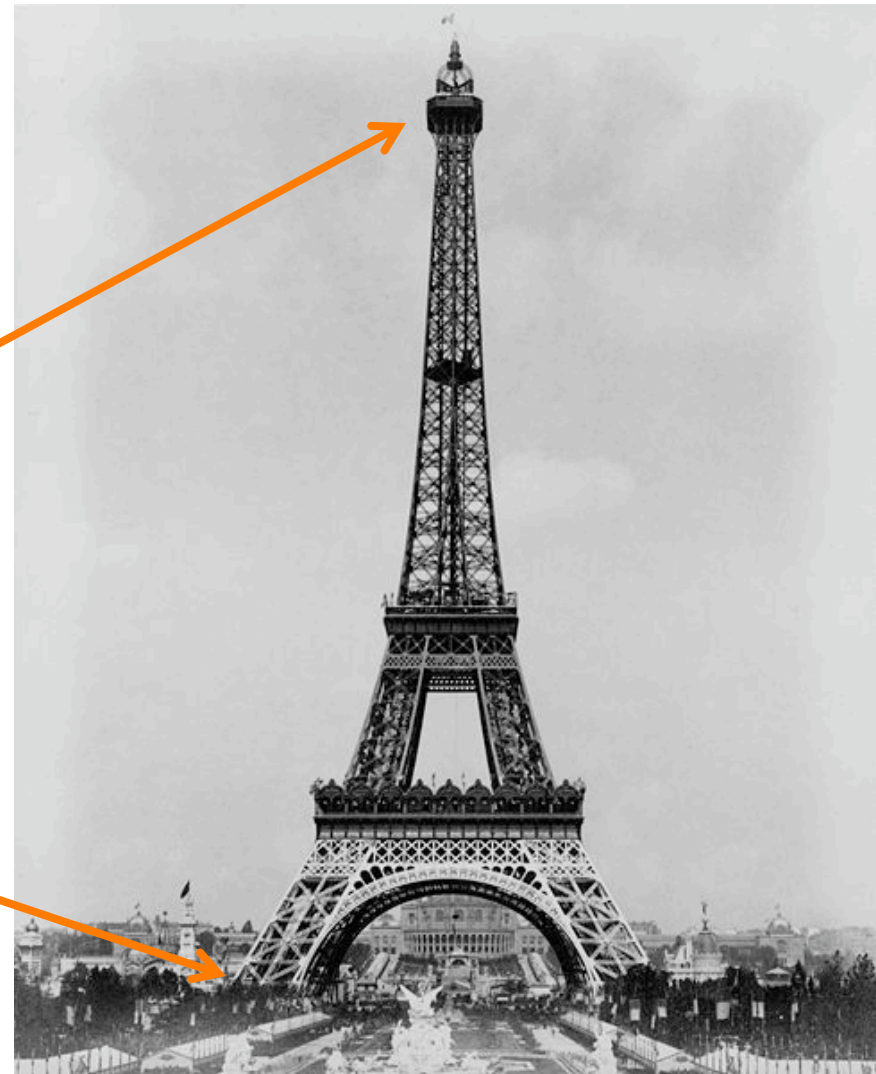
en haut

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

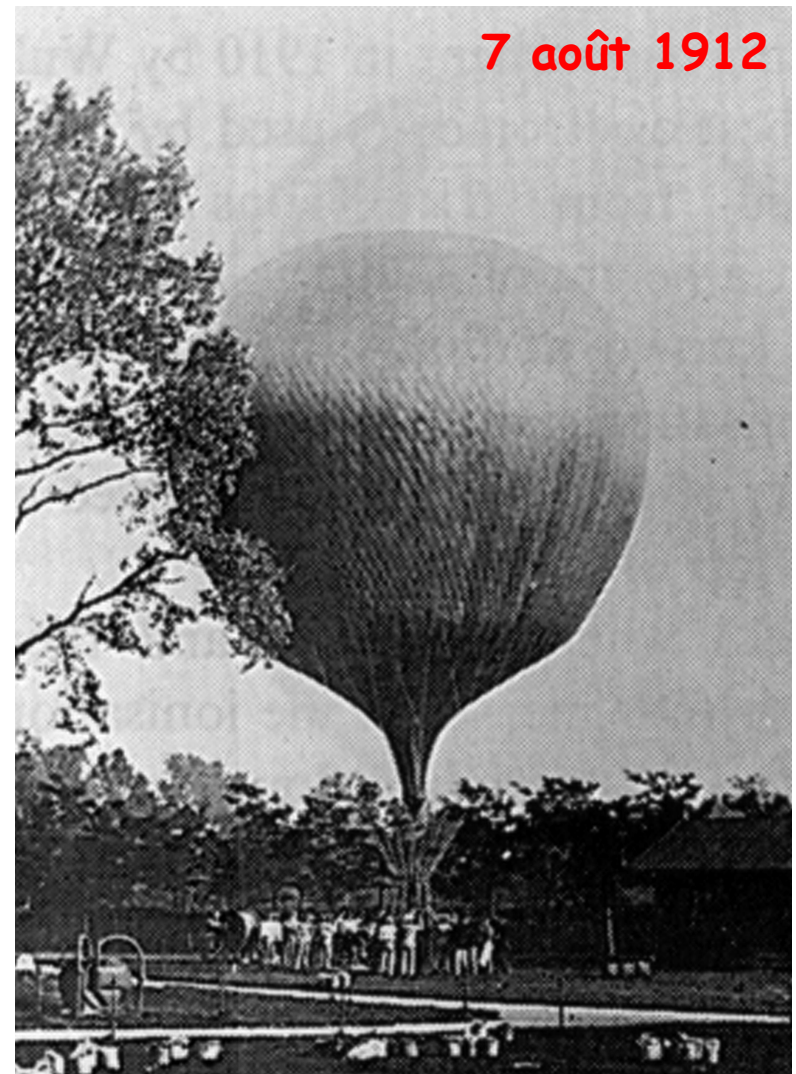
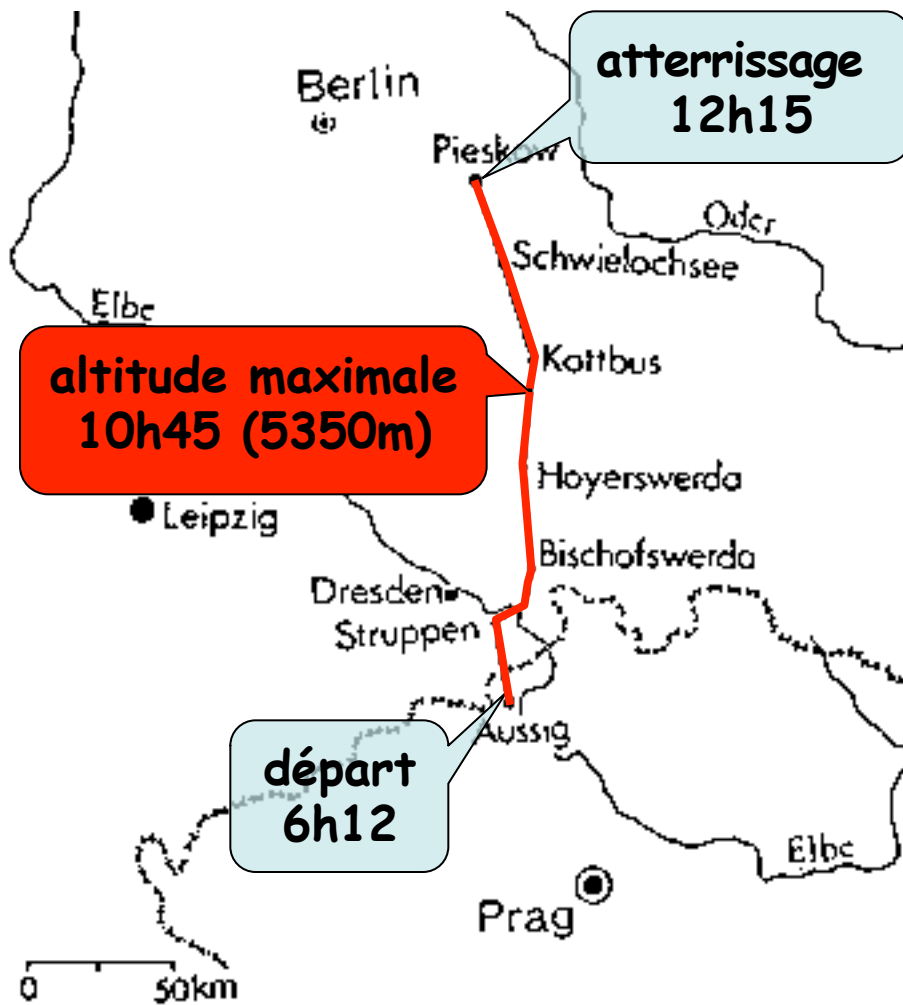
10 vols en ballon

17 avril 1912

éclipse de soleil  
→ ne vient pas du soleil

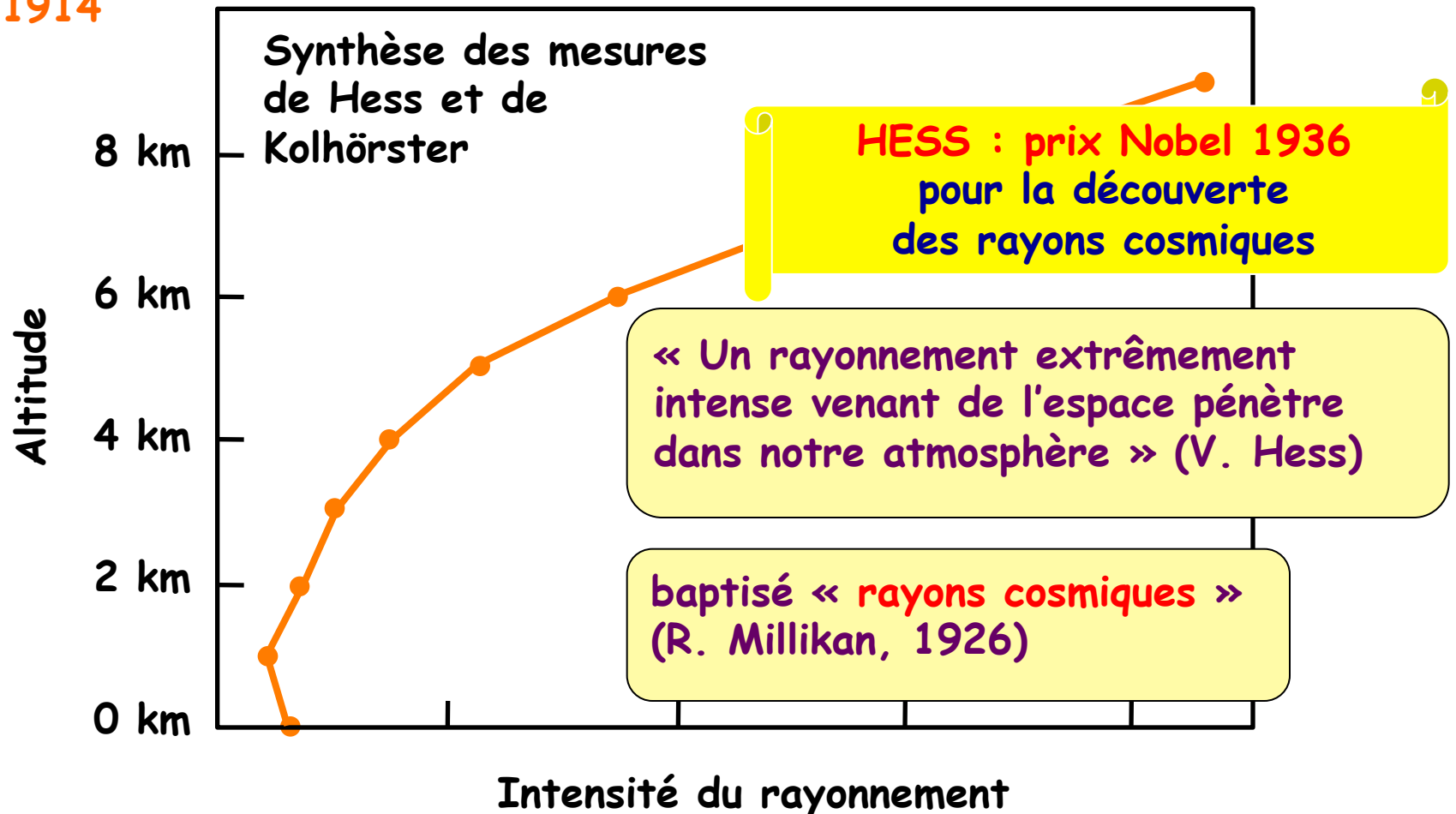


# Découverte des rayons cosmiques



# 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 ».

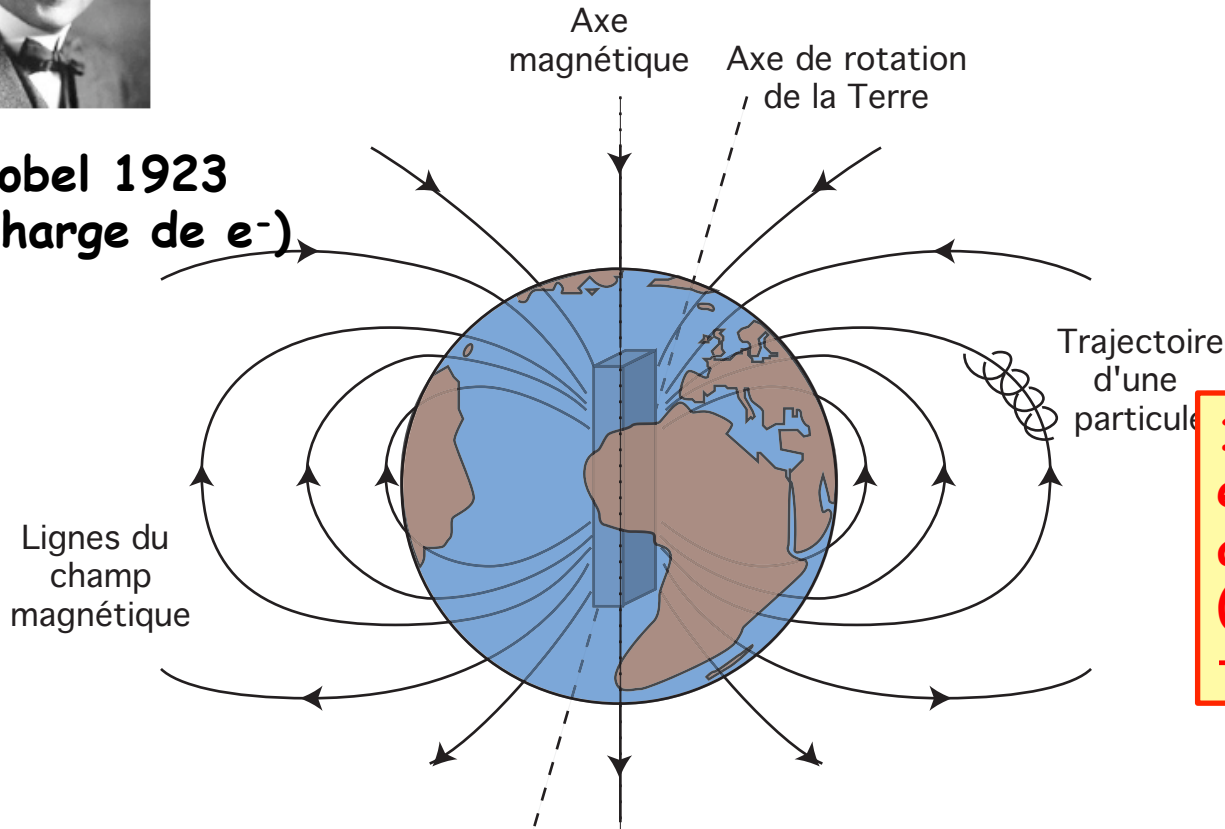
Les rayons cosmiques sont chargés. C'est pourquoi ils sont si énergétiques (accélération par champs électro-magnétiques)

Compton



Nobel 1923  
(charge de  $e^-$ )

Nobel 1927  
(diffusion des X sur noyaux)



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

# Chargés ou neutres?

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

## The New York Times

Copyright, 1932, by The New York Times Company.

VOL. LXXXII...No. 27,370.

Entered as Second-Class Matter, Postoffice, New York, N. Y.

NEW YORK, SATURDAY, DECEMBER 31, 1932.

DECEMBER 31, 1932.

THREE CENTS In New York City. FOUR CENTS Elsewhere, Except Where Shown. 41; 40c., 41.



Nobel 1932

Nobel 1927

Two Nobel Prize Winners

Expound Rival Theories of the Cosmic Ray

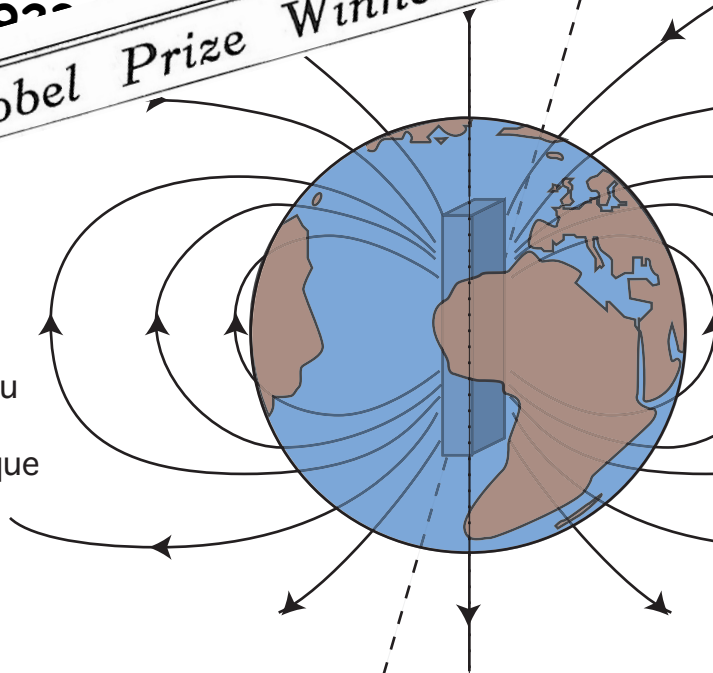
MILLIKAN RETORTS HOTLY TO COMPTON IN COSMIC RAY CLASH

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

THEIR DATA AT VARIANCE

2: édition Compton pour du globe Nouvelle-Zélande (Antarctique)

Lignes du champ magnétique

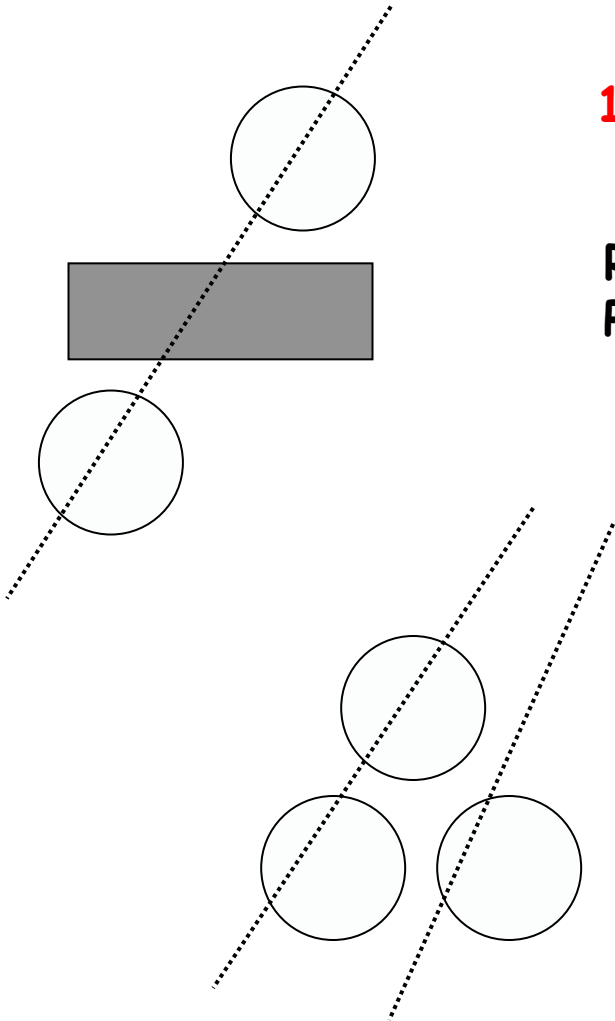




# Détecteurs de coïncidences

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)

« averse de rayons cosmiques »  
« grandes gerbes atmosphériques »

énergie maximale :  $10^{15}$  eV

2000

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

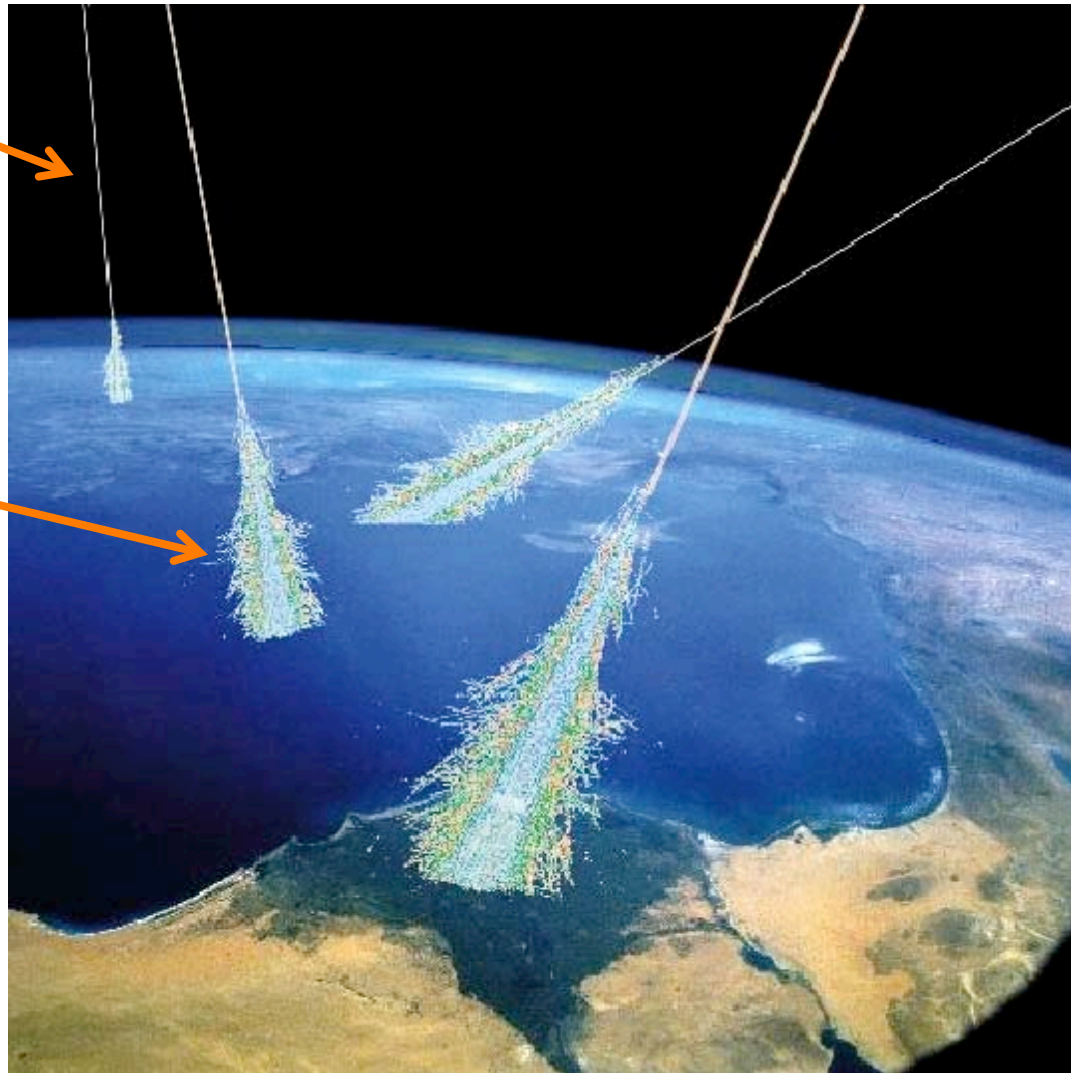


# Gerbes atmosphériques

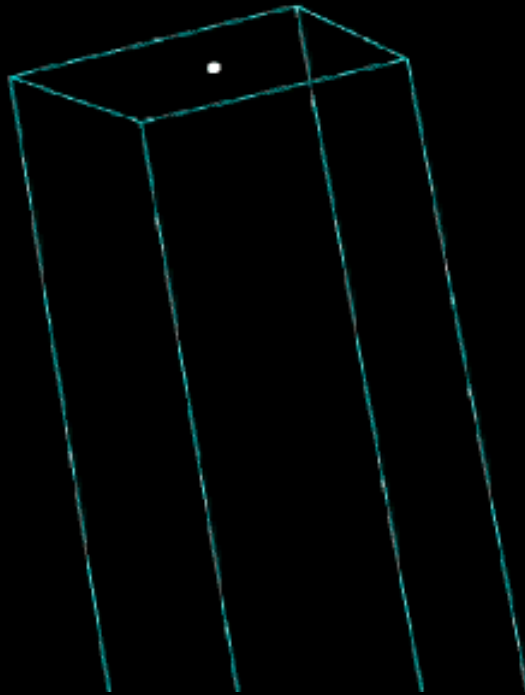
particule cosmique  
(proton)



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!)

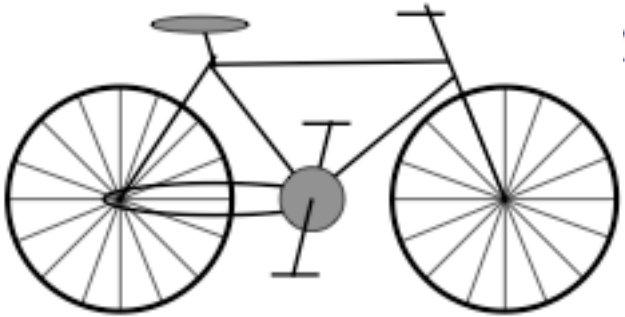
1946

Première exp.



# « 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)

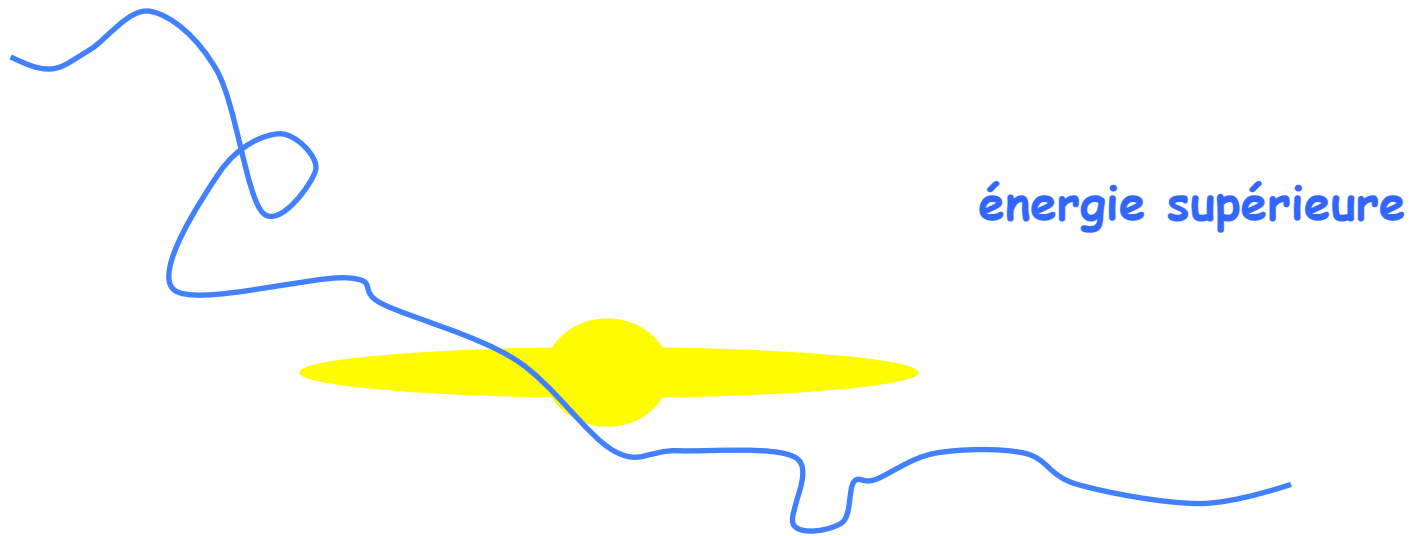


basse énergie

# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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





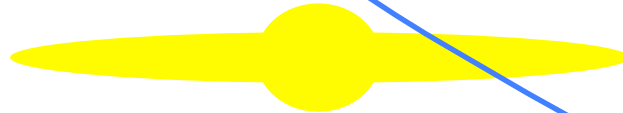
# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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

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

très grande énergie !

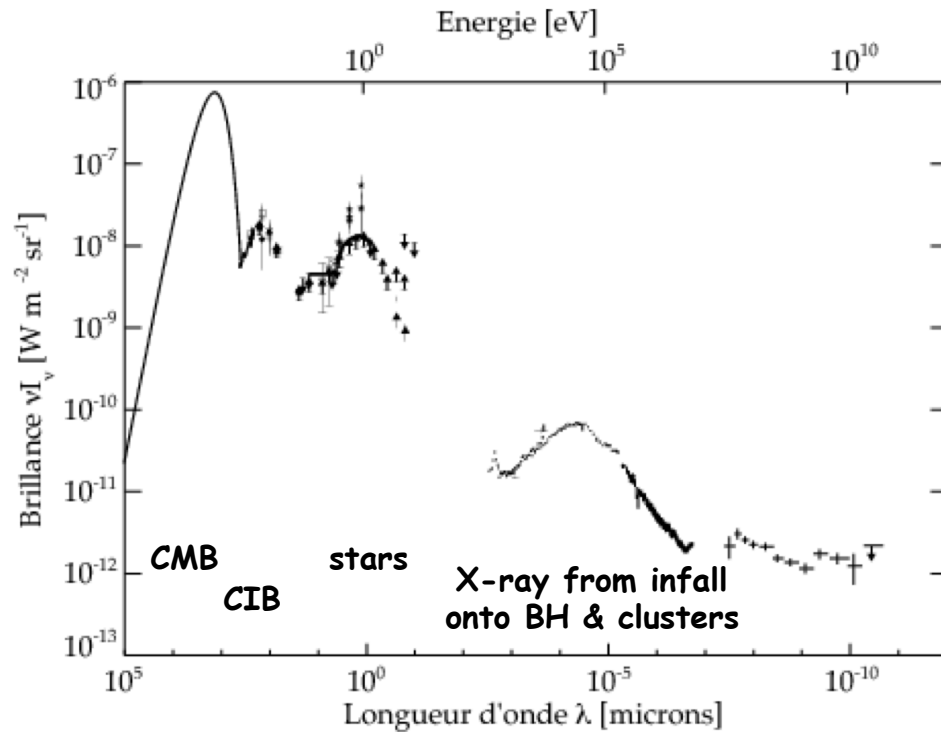
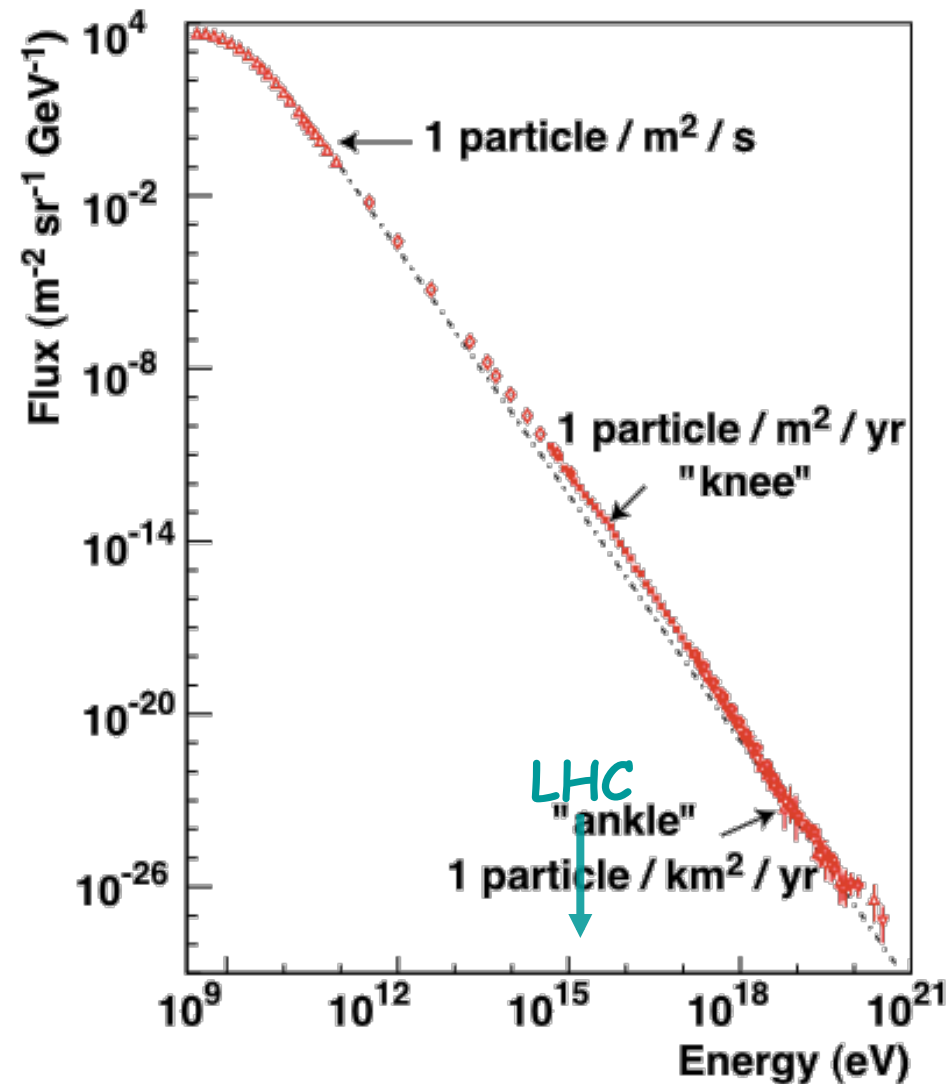


# Astroparticule

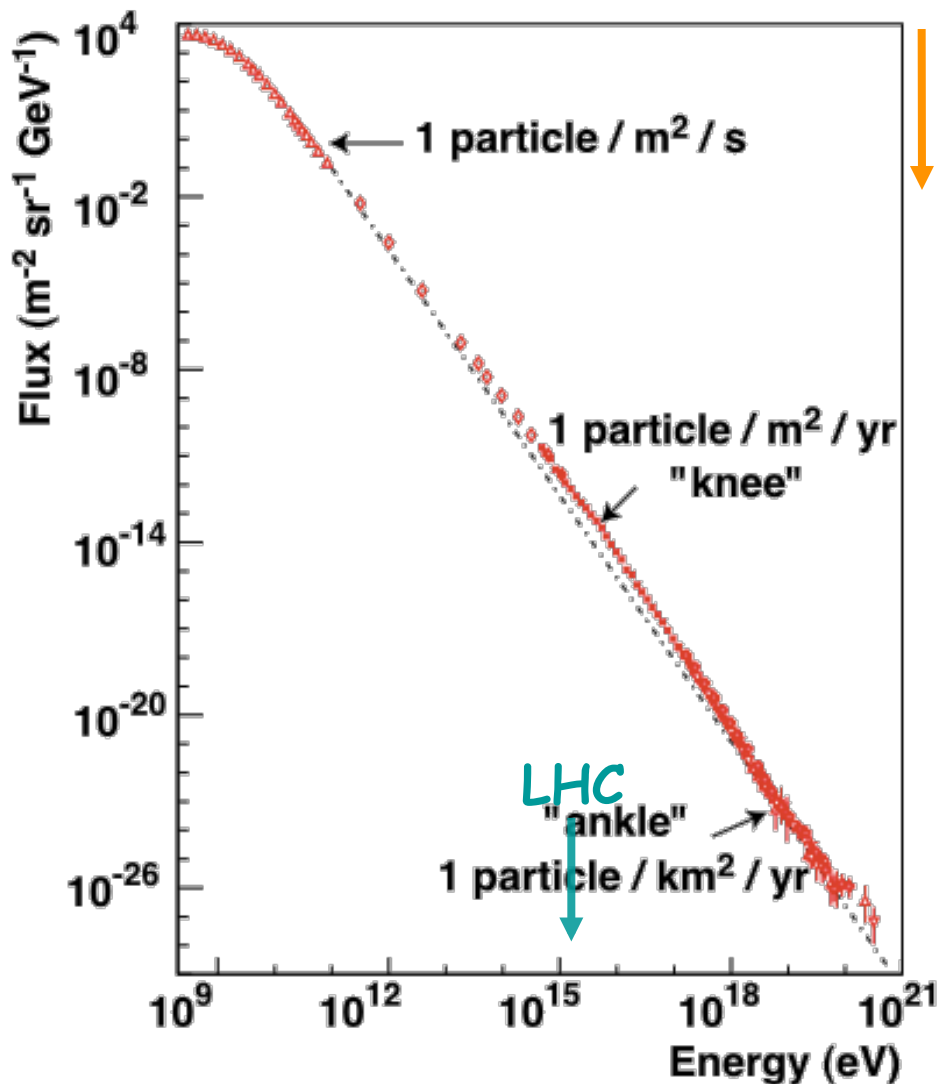
## 1/3

- Approche multi longueurs d'onde
- Découverte des rayons cosmiques
- • **Rayons cosmiques aux énergies extrêmes**  
**Mécanismes d'accélération**  
**Sources cosmiques**

# Spectre des rayons cosmiques



# Spectre des rayons cosmiques



Satellites

Ballons

Détecteurs au sol

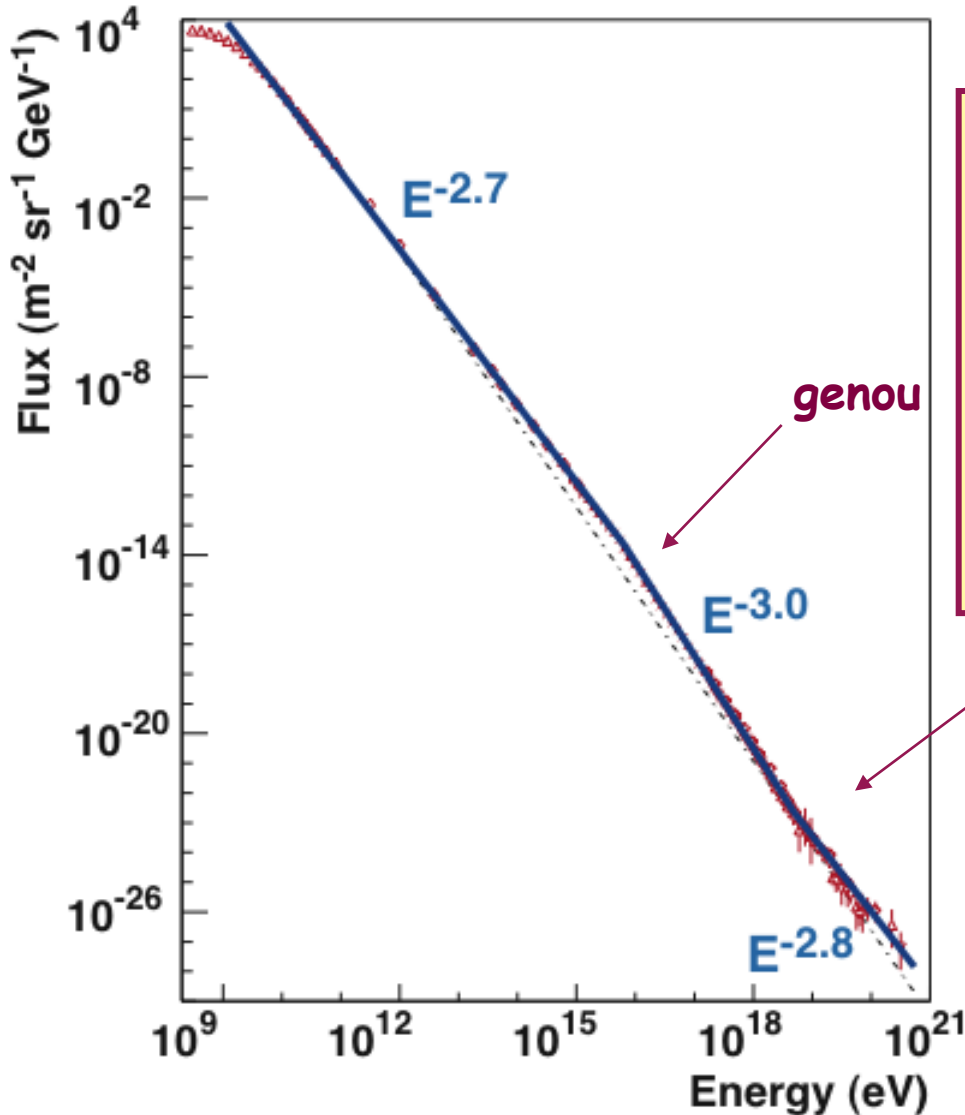
$E < 10^{14}$  eV

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



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

Accélération à la source  
2.0 — 2.2

Propagation (confinement)  
~ 0.6

cheville

# 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 :

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

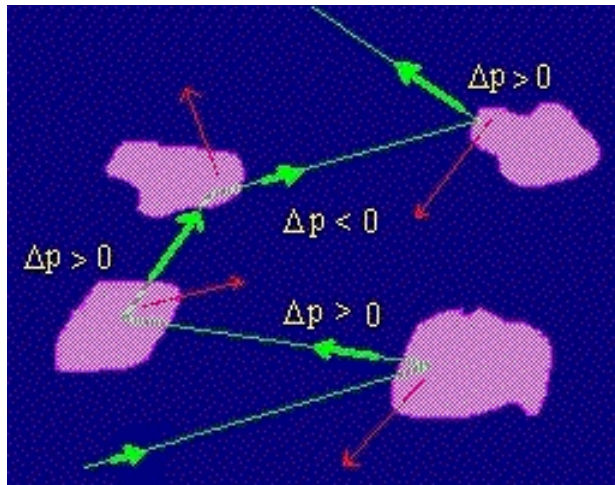
$$N(>E) \propto \frac{1}{\mathcal{P}_{esc}} \left[ \frac{E}{E_0} \right]^{-\alpha}$$

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

# 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 :

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

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

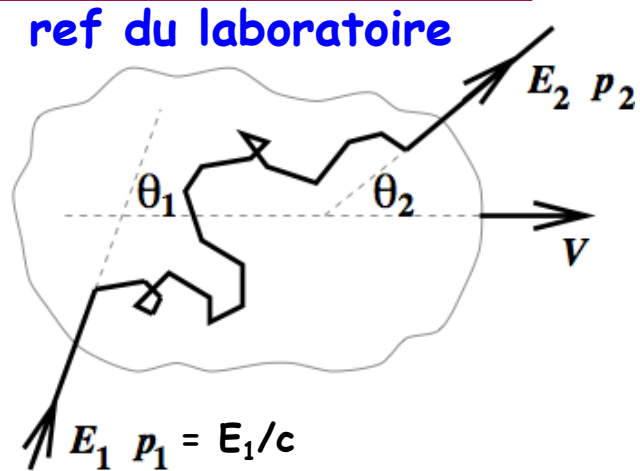
$$\beta = v/c$$

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

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

- Dans ref. du laboratoire :

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



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

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

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

toutes directions équiprobables  
dans ref du nuage

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

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

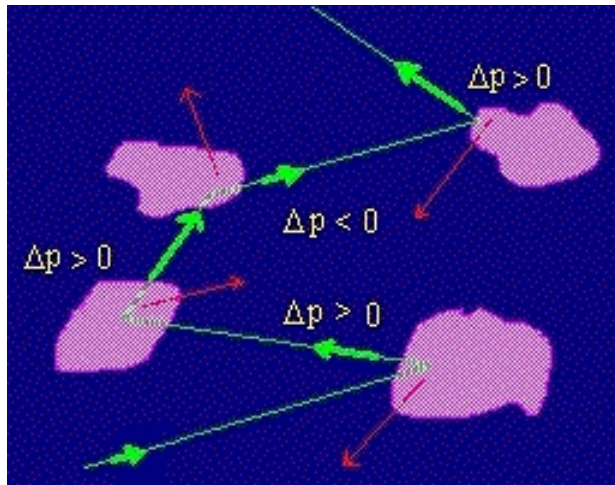
$$(\beta \ll 1)$$



# 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.

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

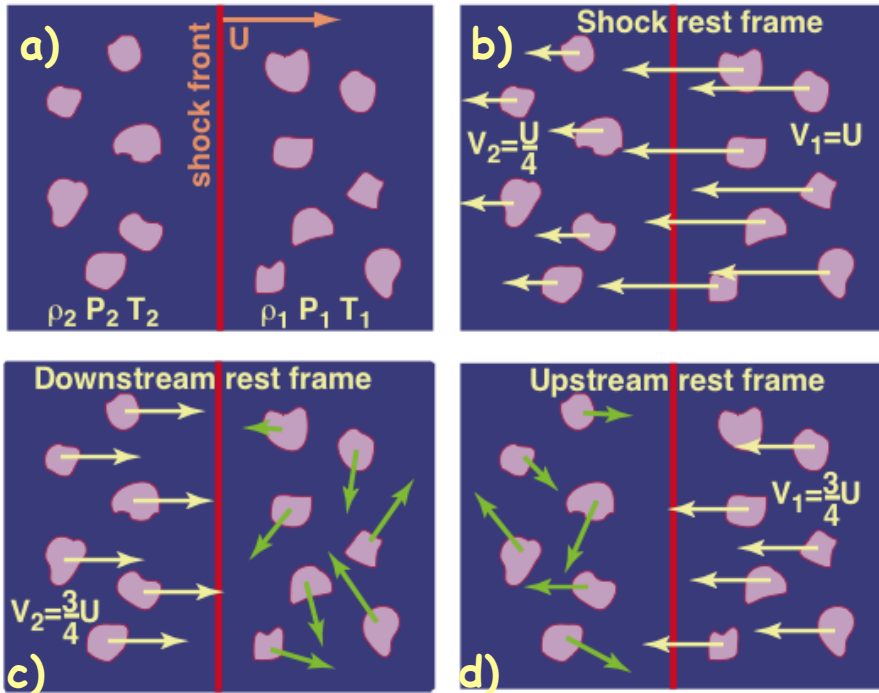
« Second ordre »

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

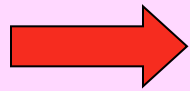
$$\langle \cos\theta_1 \rangle = -2/3 \text{ et } \langle \cos\theta'_2 \rangle = 2/3$$

$\Rightarrow$  Gain en énergie rapide

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

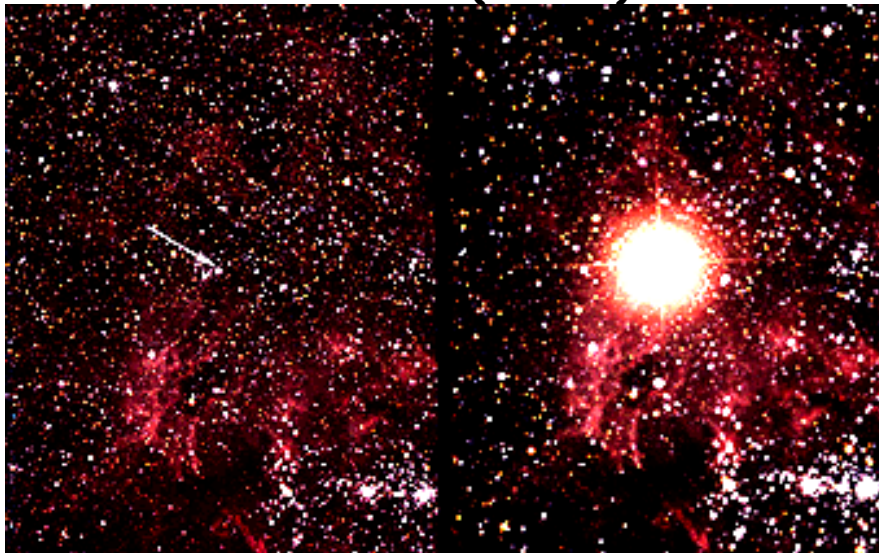
« Premier ordre »

# Ondes de choc ?



# Supernovae !

SN 1987A (SN II)



quelques  
siècles



plus  
tard

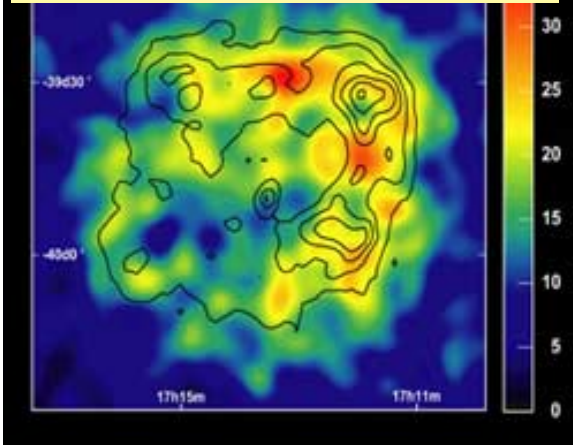
Reste de supernova



1 SN II / 50 ans dans notre galaxie

# HESS : première confirmation

HESS ( $\gamma$ ) + ASCA (X)



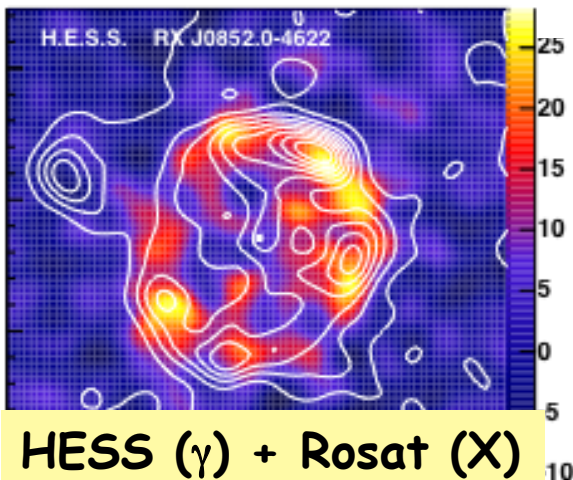
F. Aharonian et al., 2004 Nature 432, 75



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

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

coïncidence spatiale  
→ restes de SN = accélérateurs multi TeV



HESS ( $\gamma$ ) + Rosat (X)

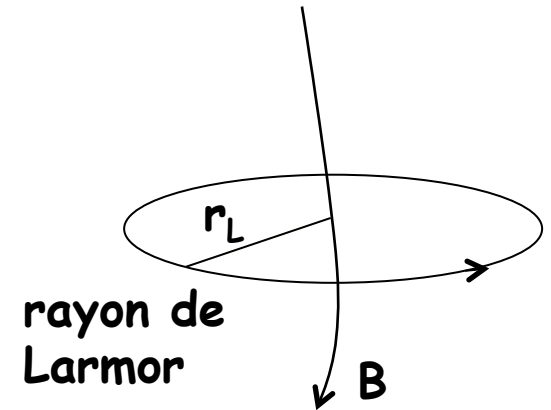
F. Aharonian et al., 2005 A&A 437, L7

# Limitation énergétique

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

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

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



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 :  $E < E_{\max} = ZeBcR$   $\Rightarrow$  faut grand B et R

# Limitation énergétique

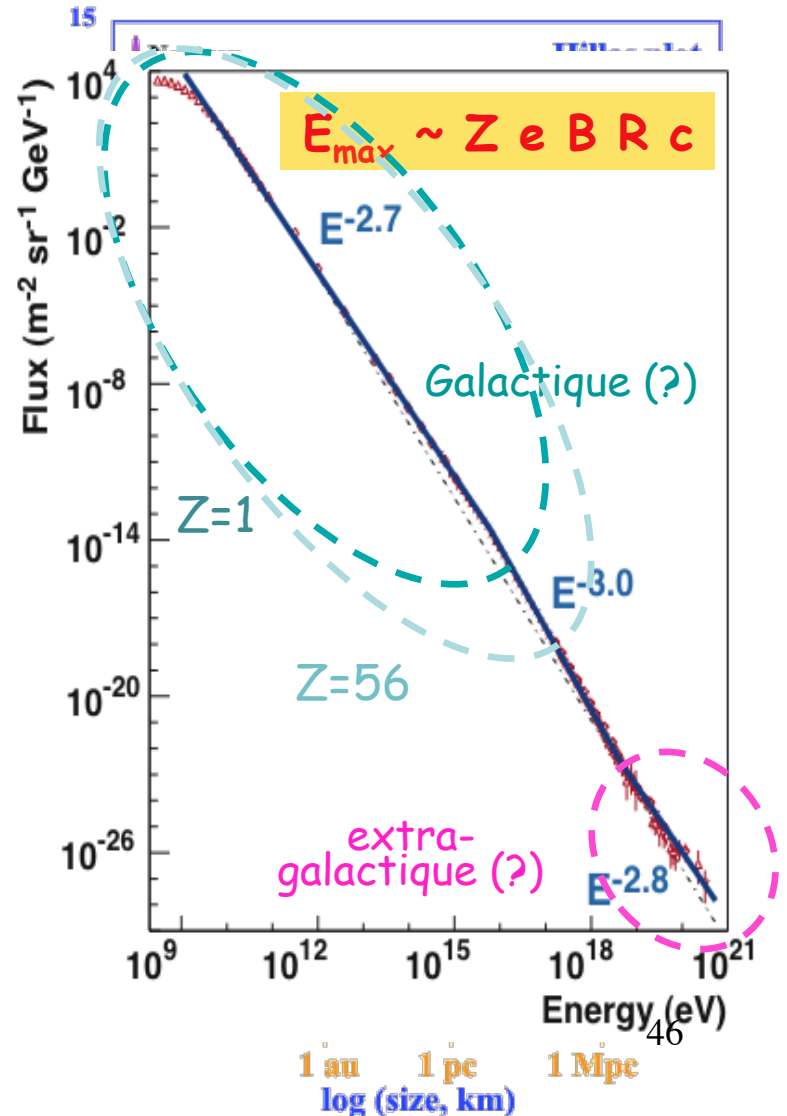
Restes de supernova :  
 →  $E_{\max} \sim 10^{15}$  eV (genou)

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

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

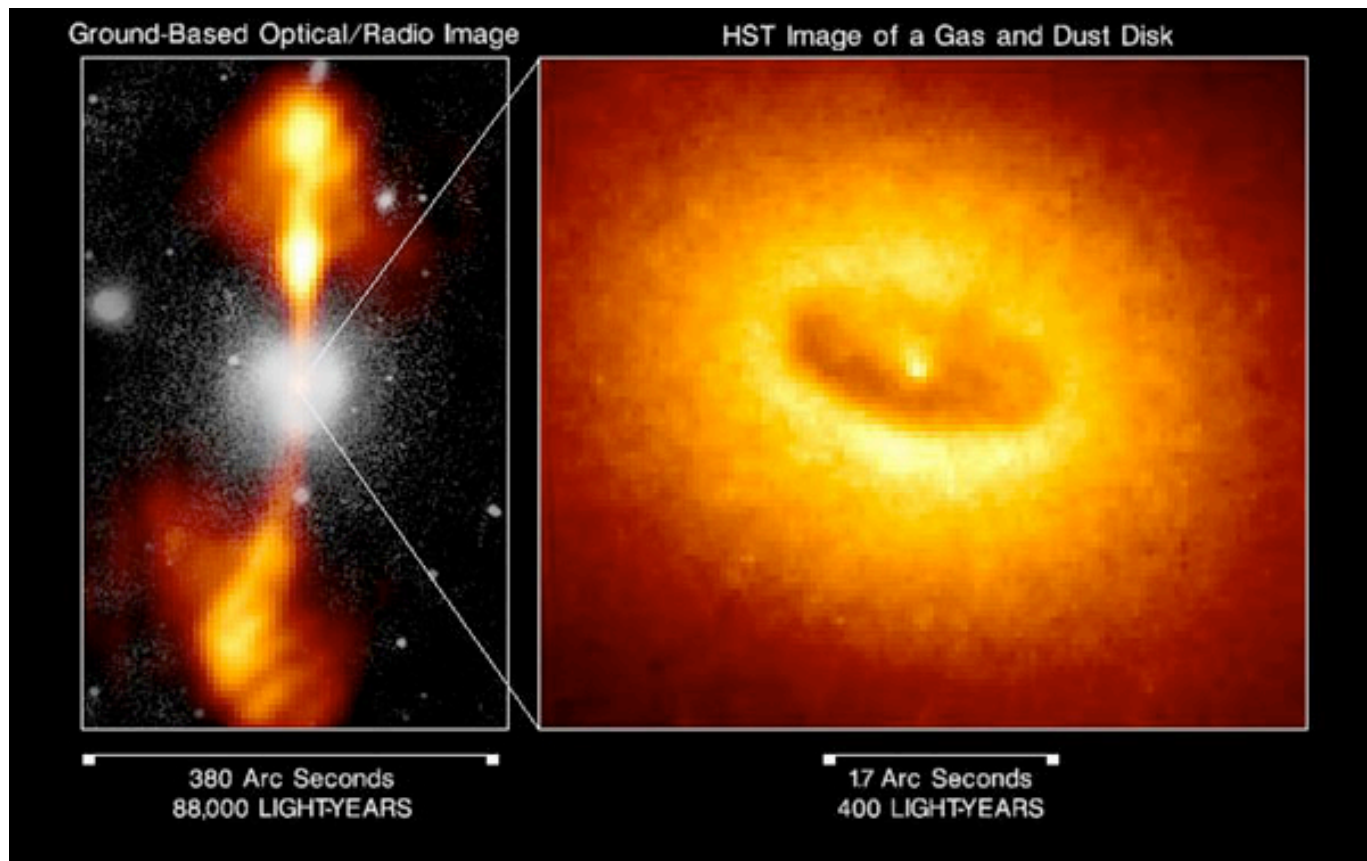
$\swarrow$   $B_{\text{gal}}$  typique       $\searrow$   $R_{\text{halo}}$  typique

→ Voie lactée insuffisante pour rayons les plus énergétiques ( $E_{\max} \sim 20^{21}$  eV)

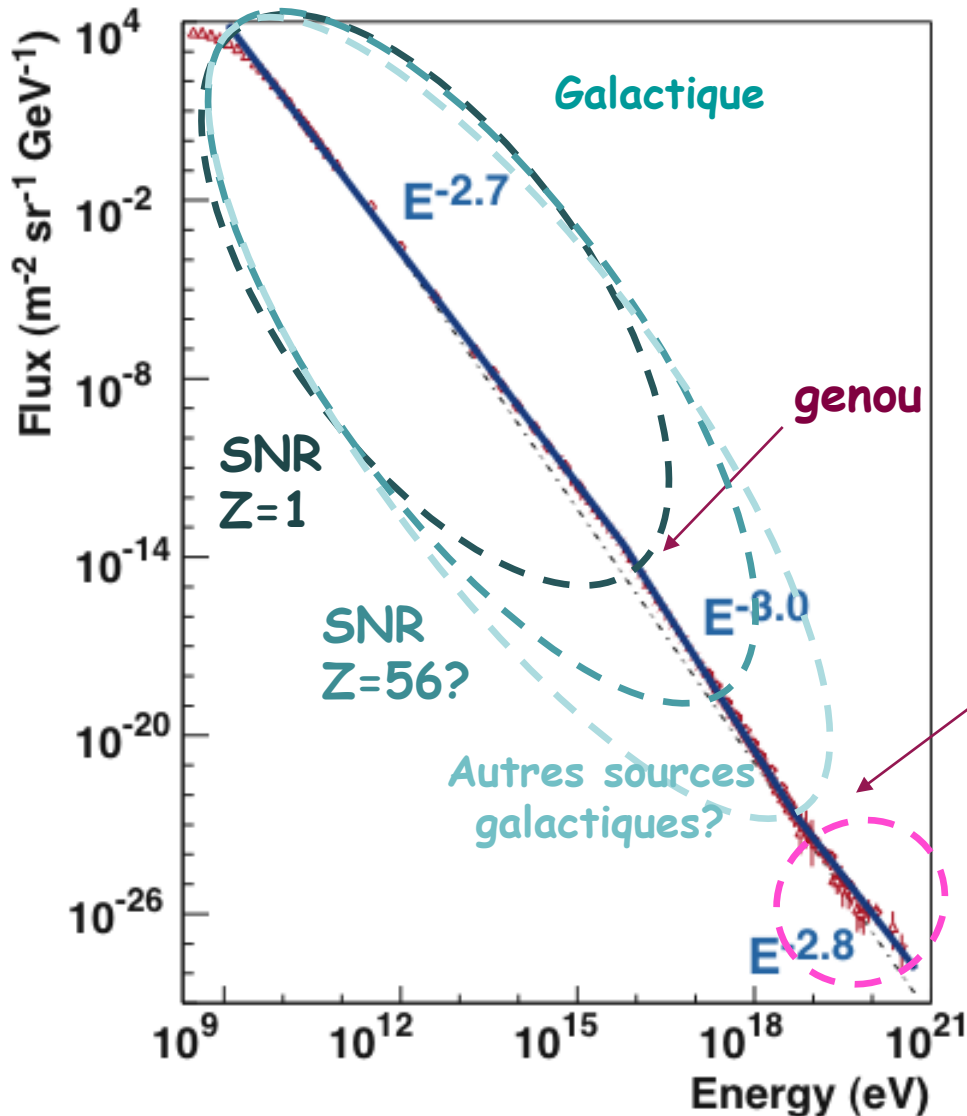


# Sources au delà de $10^{15}$ eV

## Active Galactic Nuclei



# En conclusion

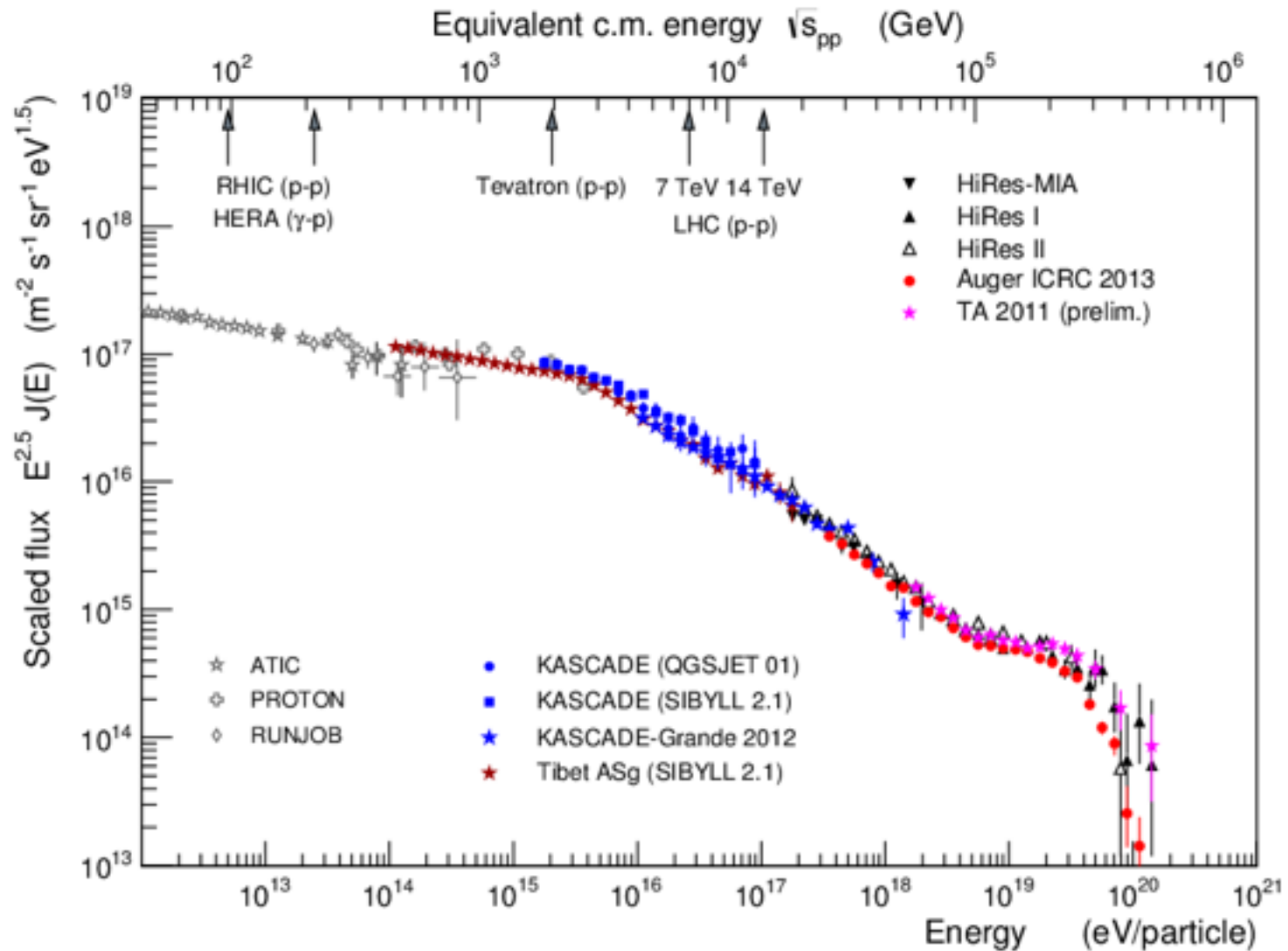


Si origine galactique jusqu'à cheville, genou pourrait être dû à épuisement de l'énergie des sources

Accord avec KASCADE:  
 $E \nearrow \Rightarrow Z \nearrow$   
 pour  $E \sim 10^{16} \text{ eV}$



# En conclusion



# Mécanisme d'accélération

- Dans ref du nuage :

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

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

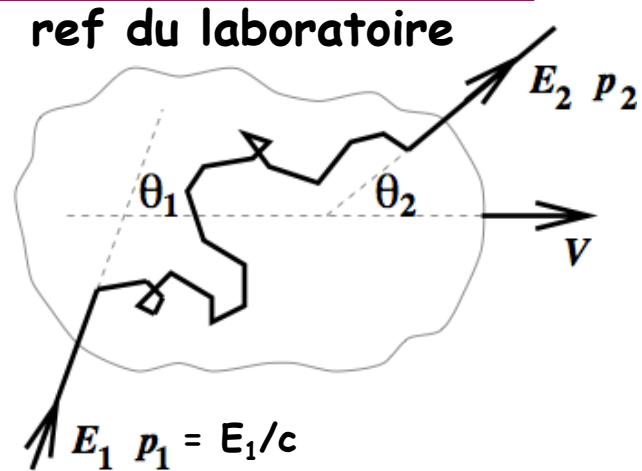
$$\beta = v/c$$

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

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

- Dans ref. du laboratoire :

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



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

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

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

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

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

$$(\beta \ll 1)$$