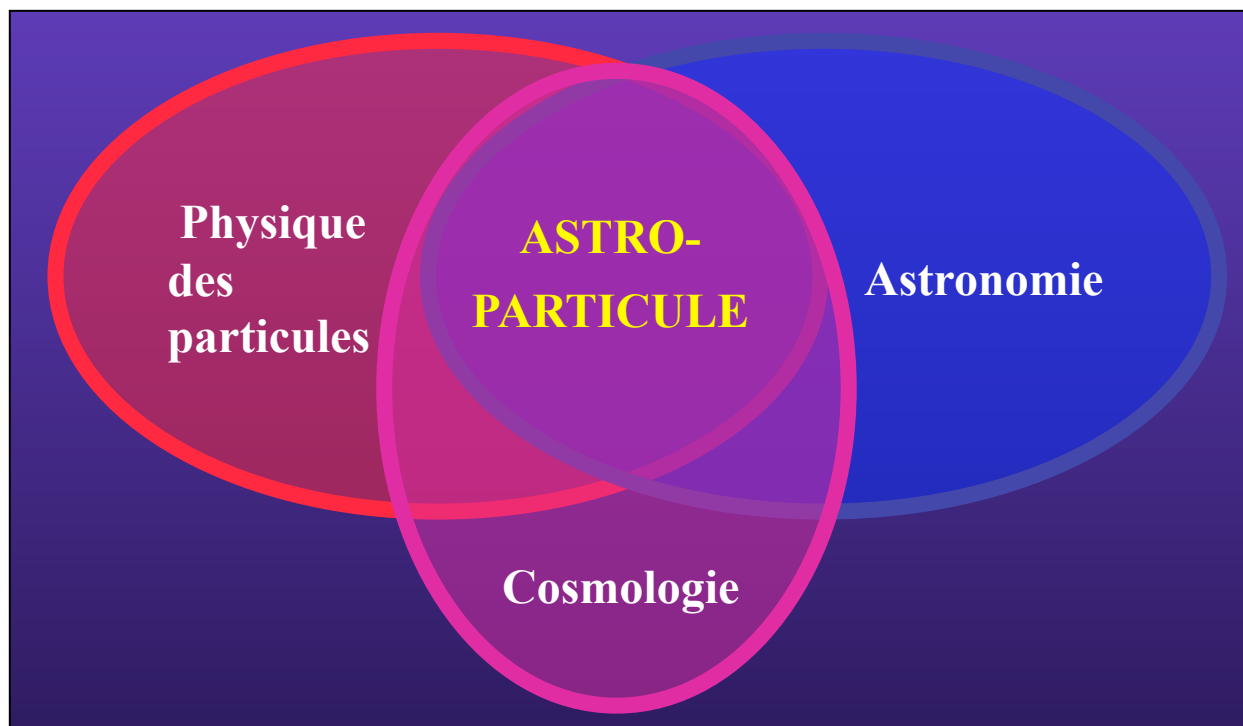


# Astroparticule

## 1/3

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

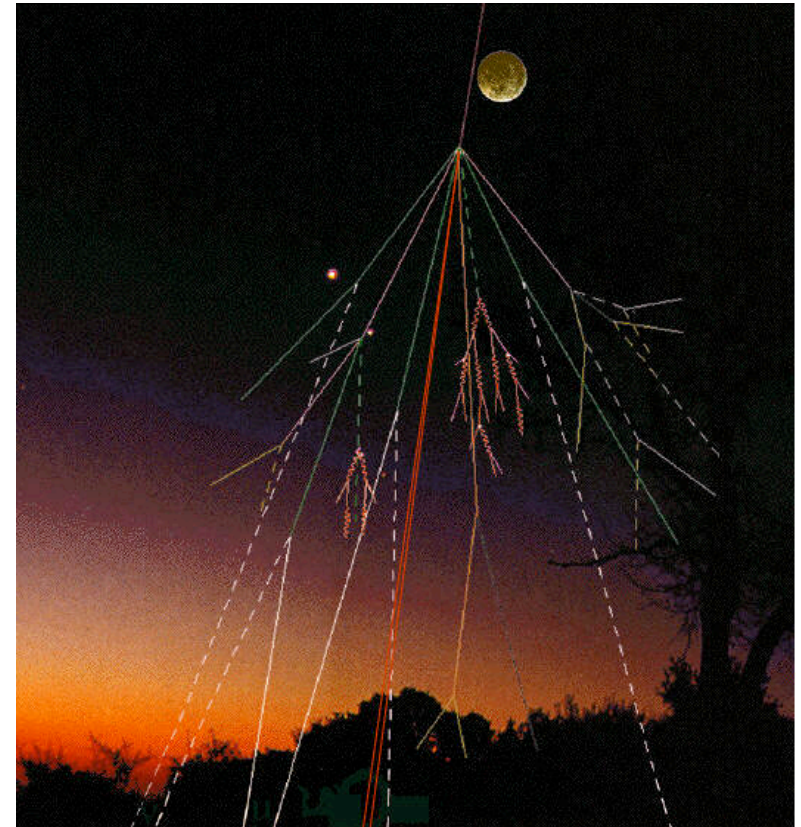
science qui a pour objet l'étude de l'Univers à partir des outils de la physique des particules et de l'astrophysique

particules chargées  
protons, noyaux

neutrinos

photons

ondes gravitationnelles



# Astroparticule



1) Approche **multi-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...*

# Observations multi longueurs d'onde



1 km

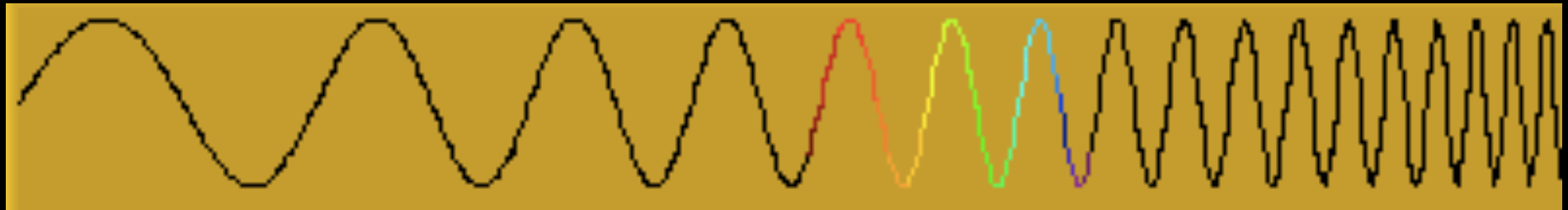
1 m

1 mm

1  $\mu\text{m}$

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

0,01 nm



Radio

Infrarouge

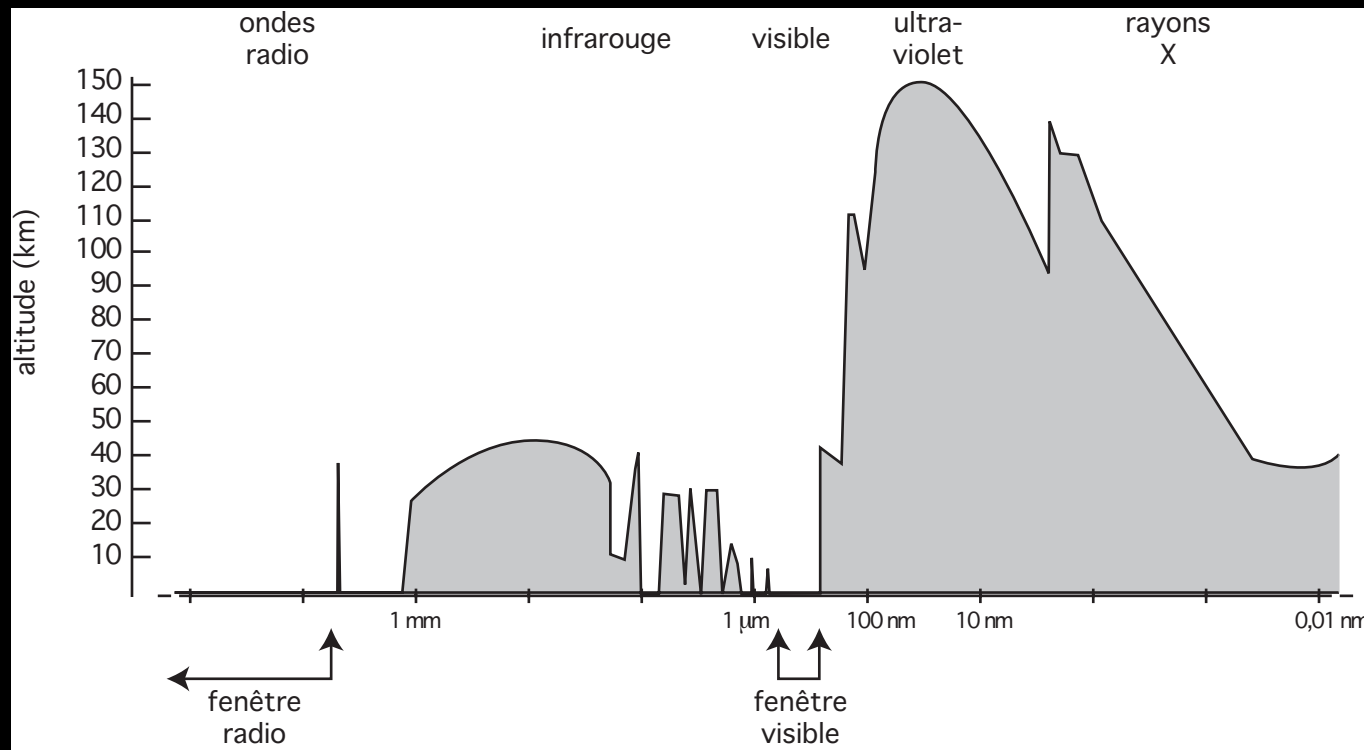
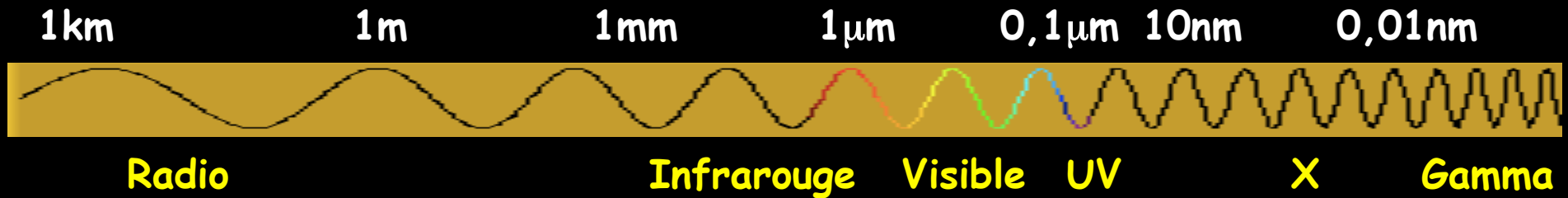
Visible

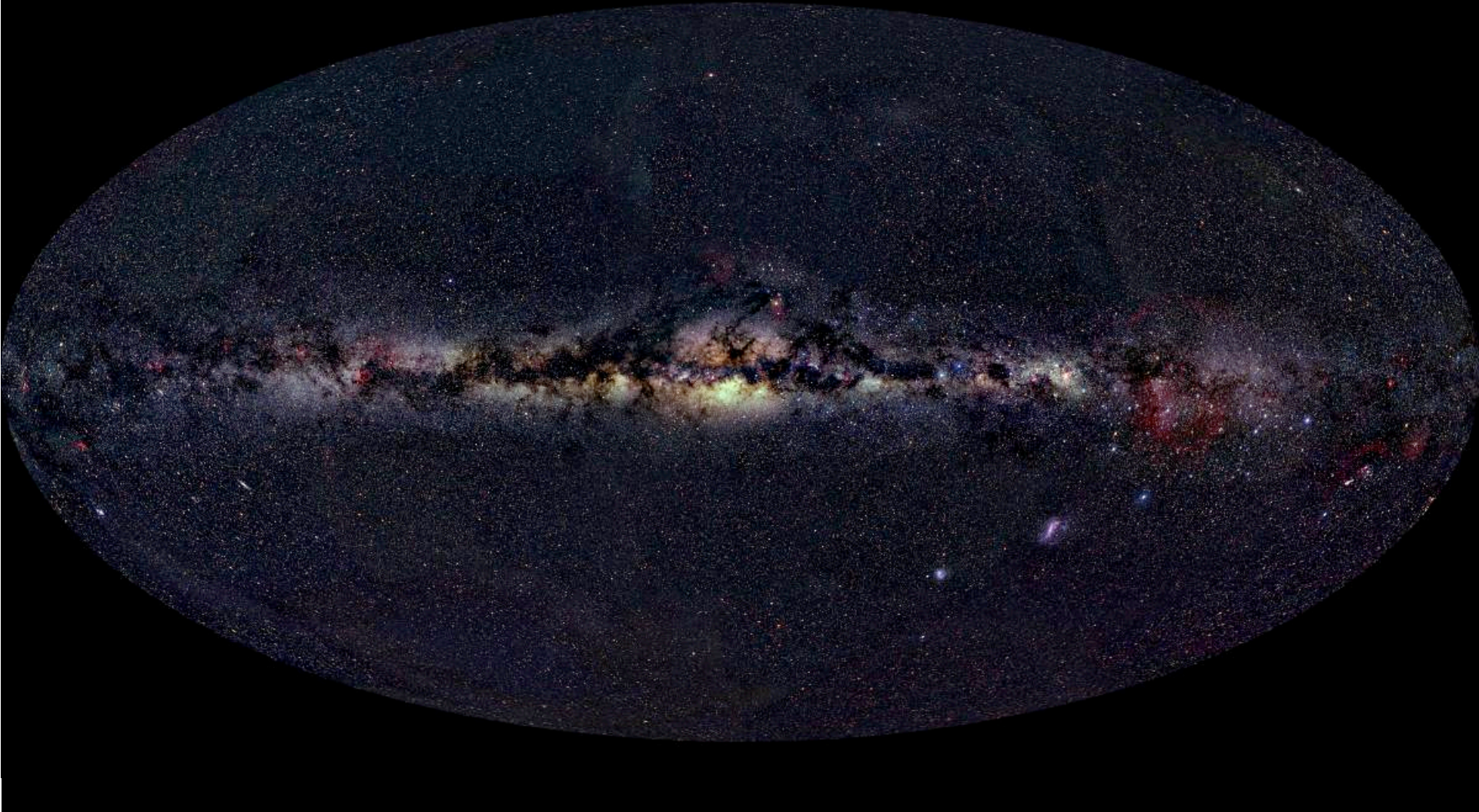
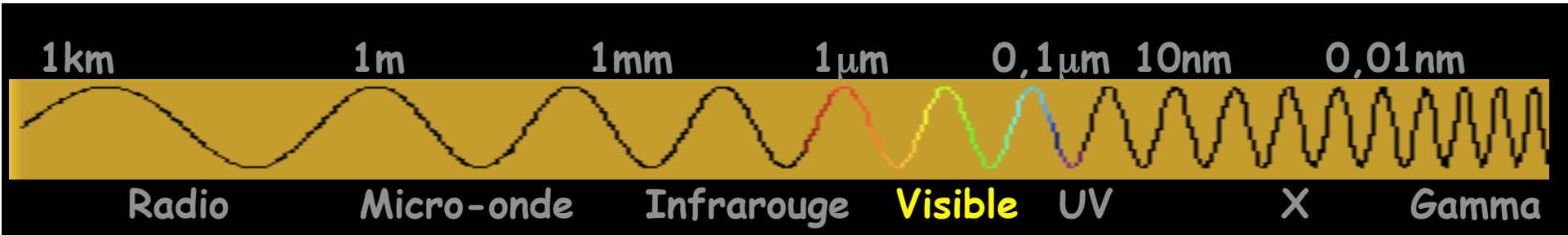
UV

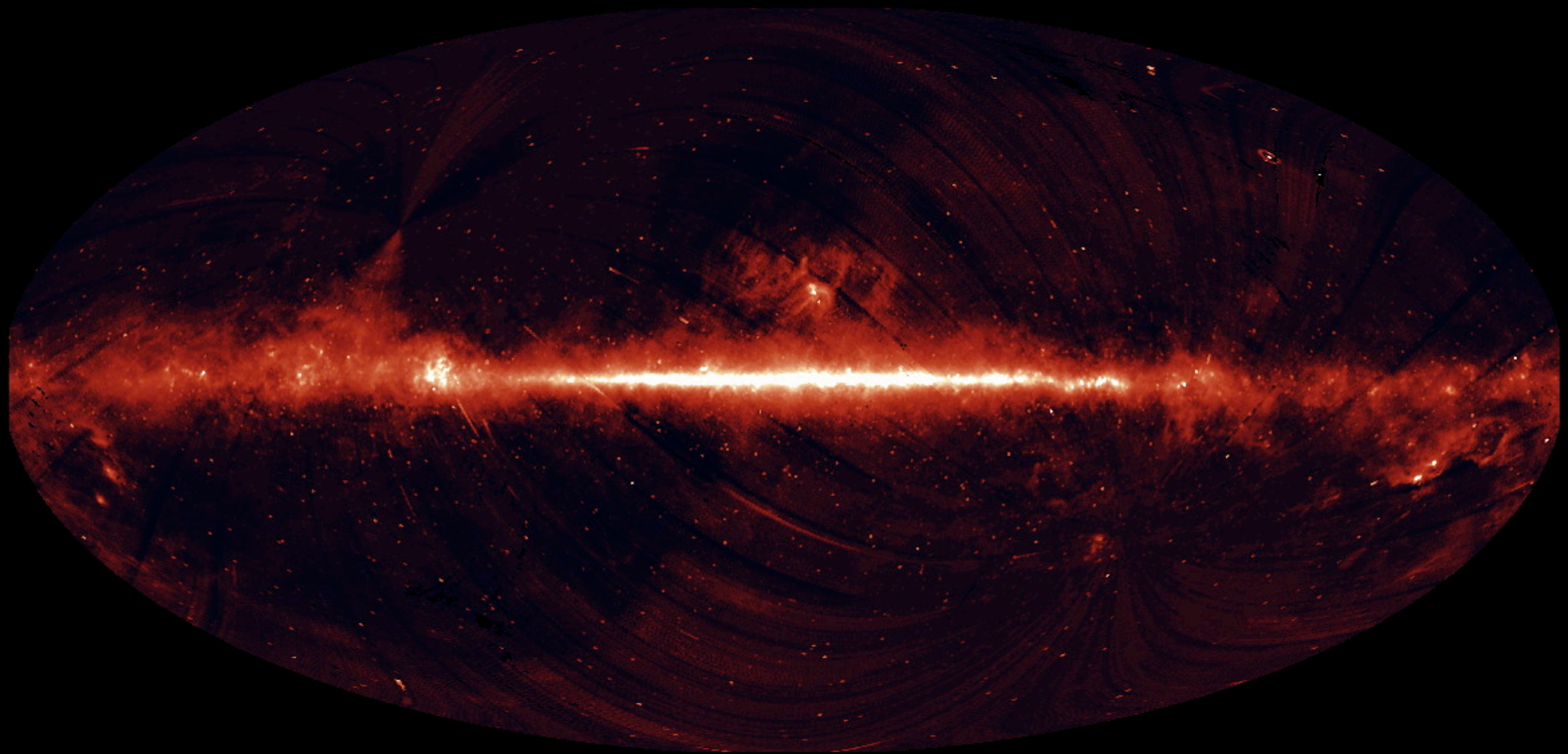
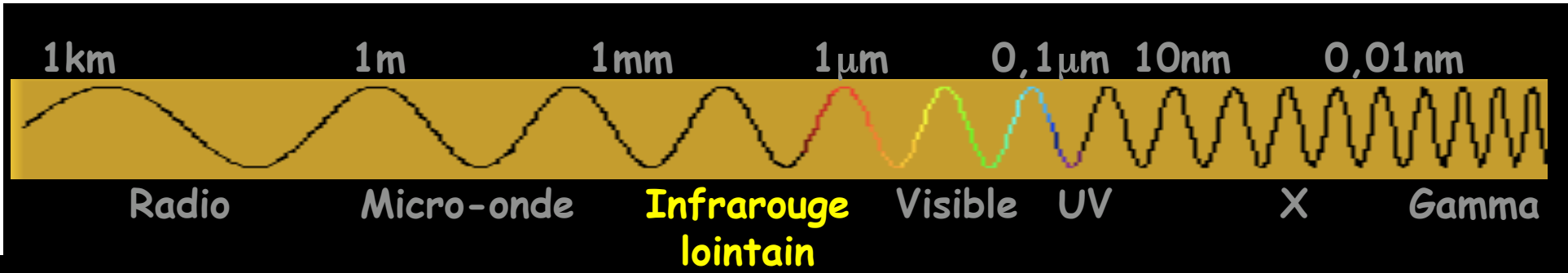
X

Gamma

# Observations multi longueurs d'onde

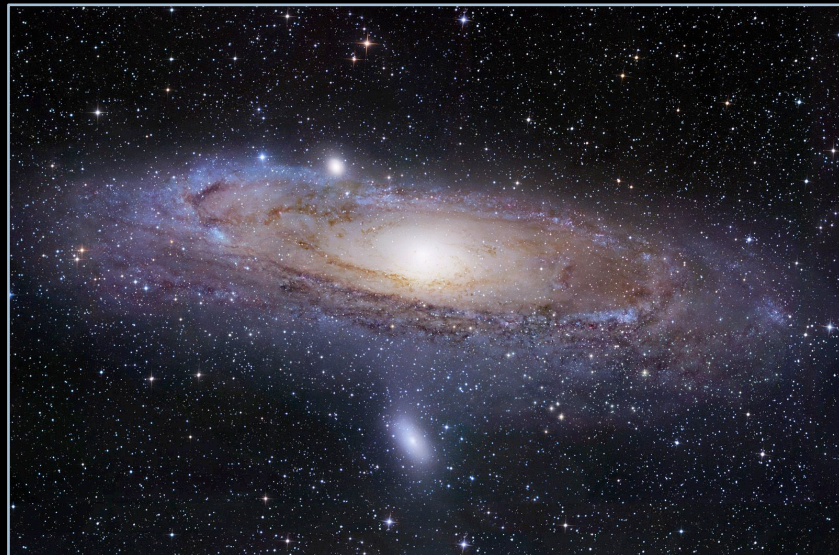




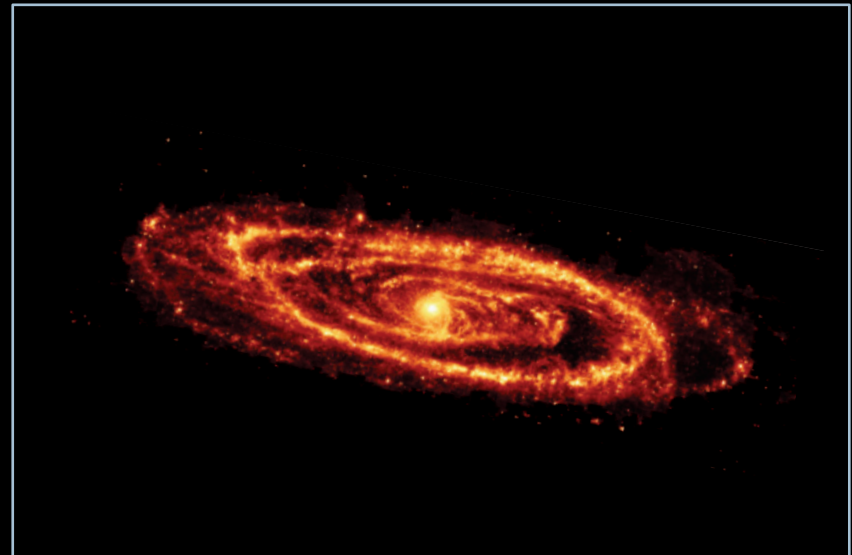




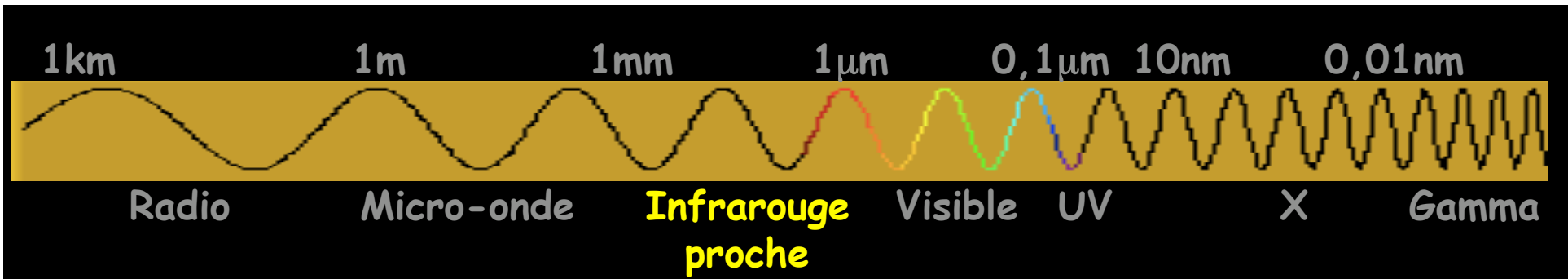
# Andromède

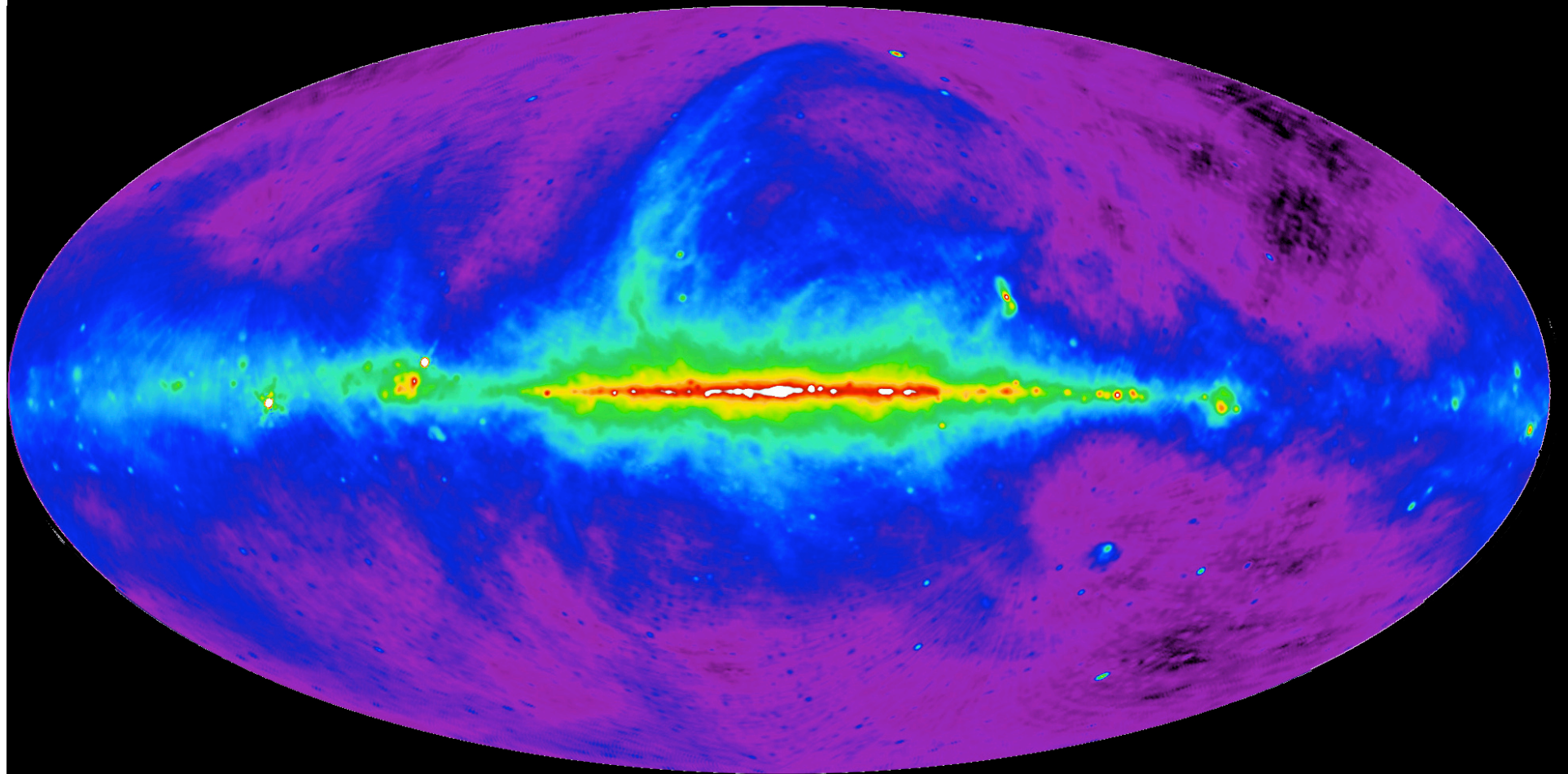
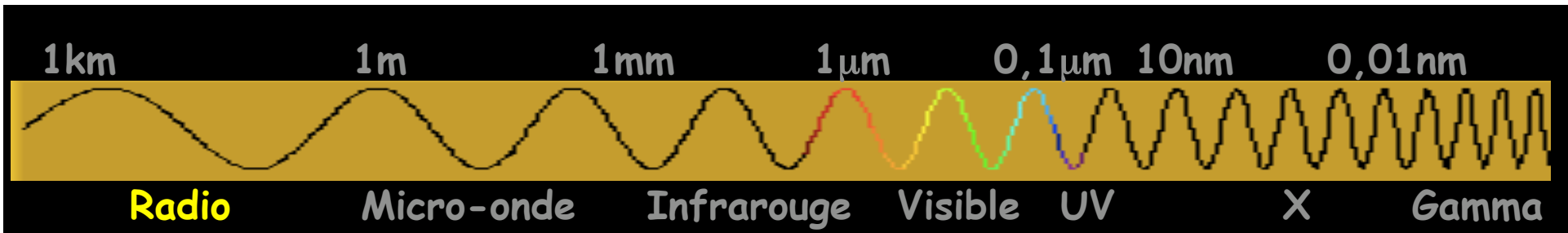


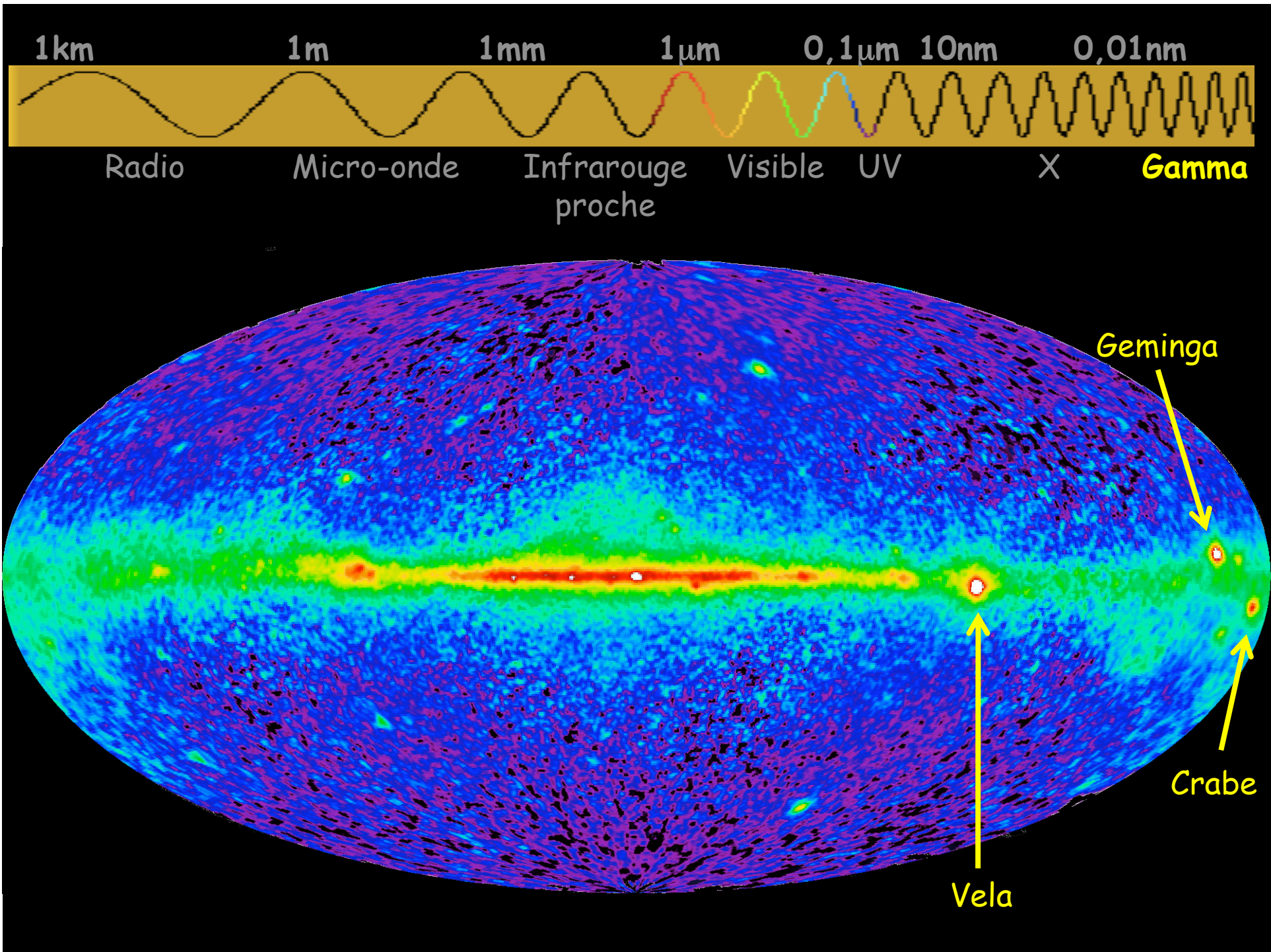
visible



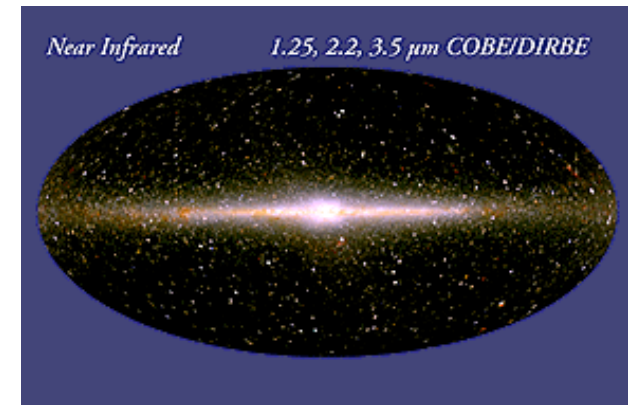
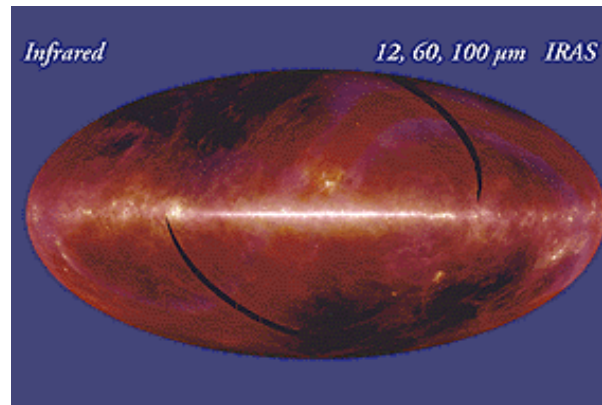
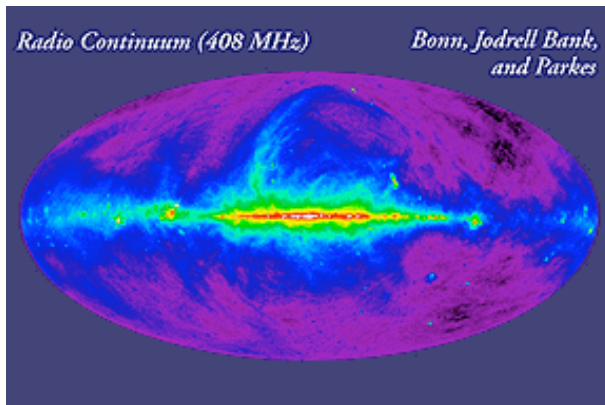
infrarouge



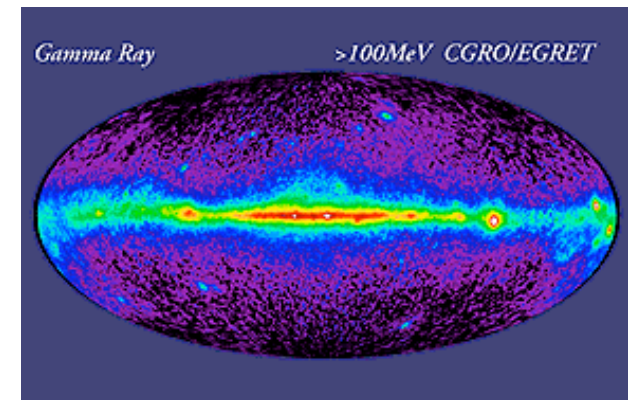
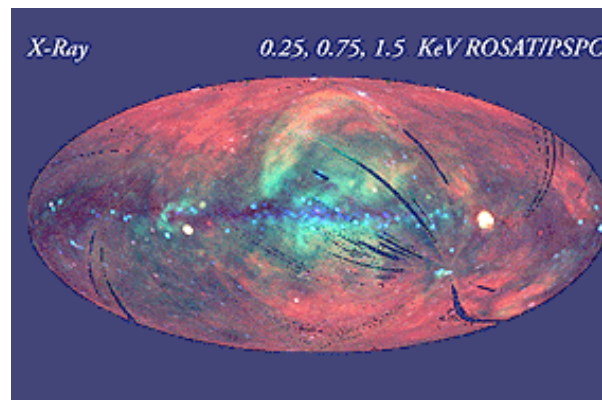
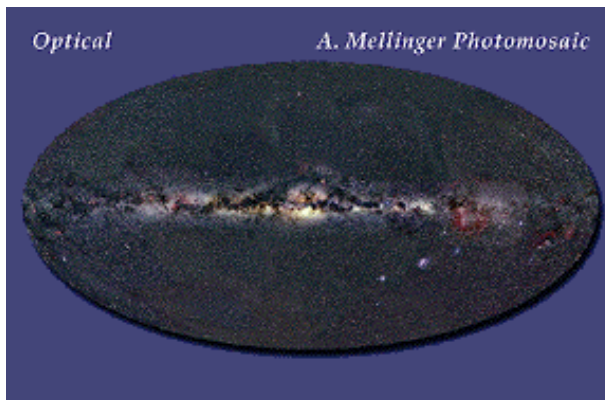




# Univers en multi-longueurs d'onde



## 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

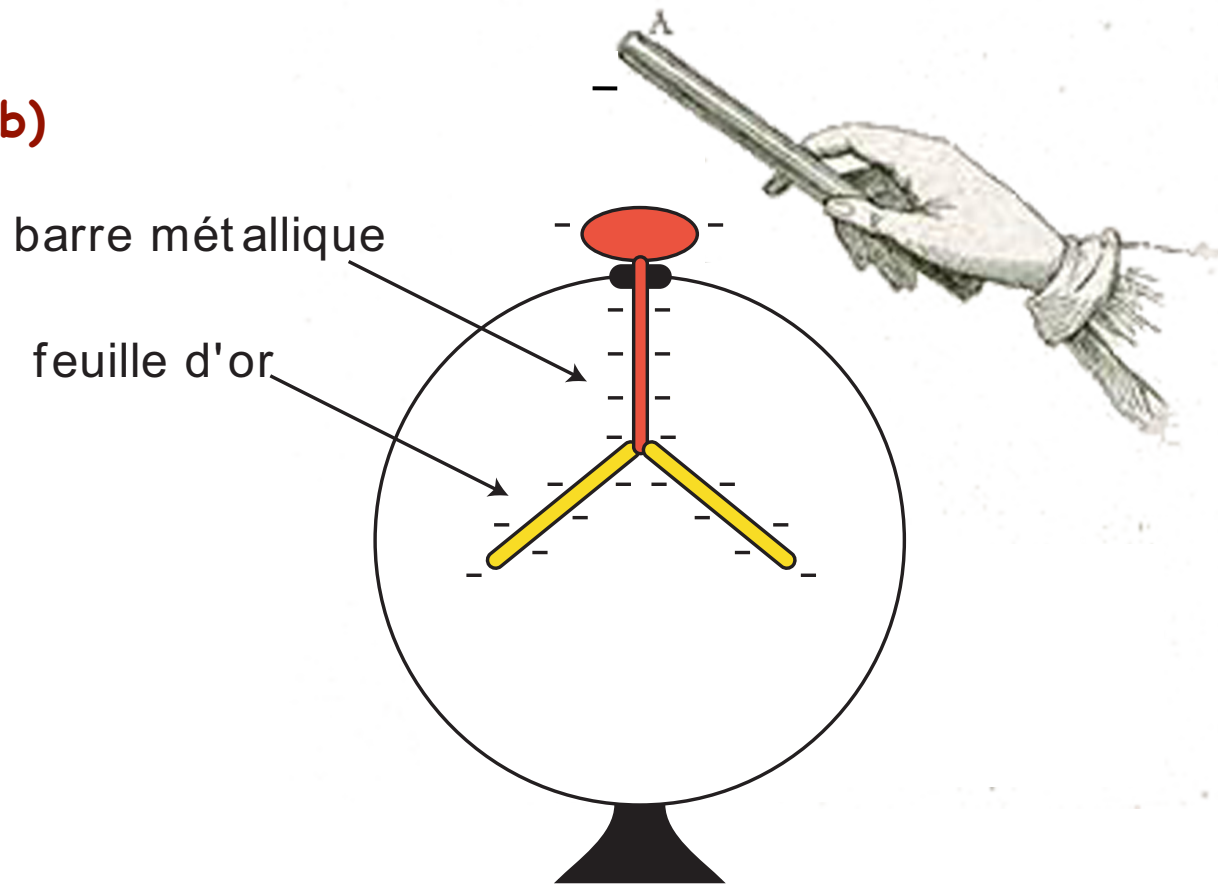
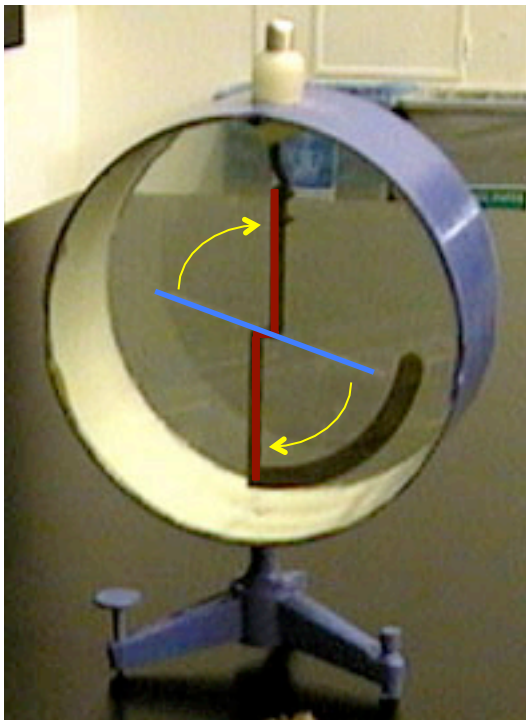
3) Approche **multi-messenger**  
**Astronomie neutrino**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*



Découverte des  
rayons cosmiques

# Découverte des rayons cosmiques

1901  
(voire 1785, Coulomb)

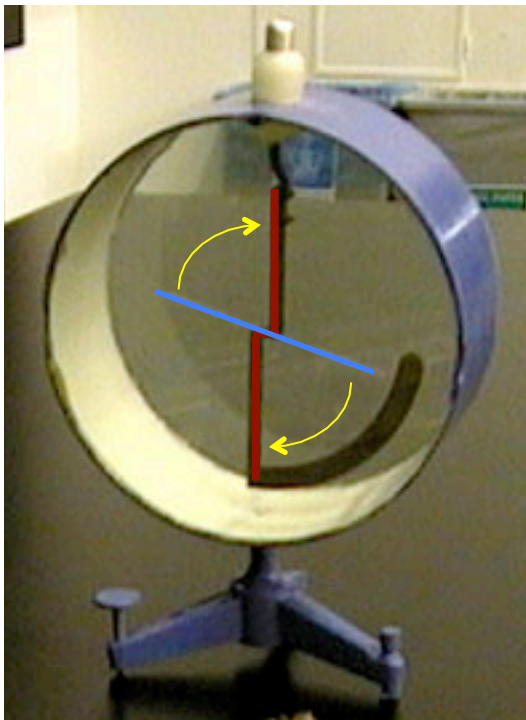


électroscope chargé



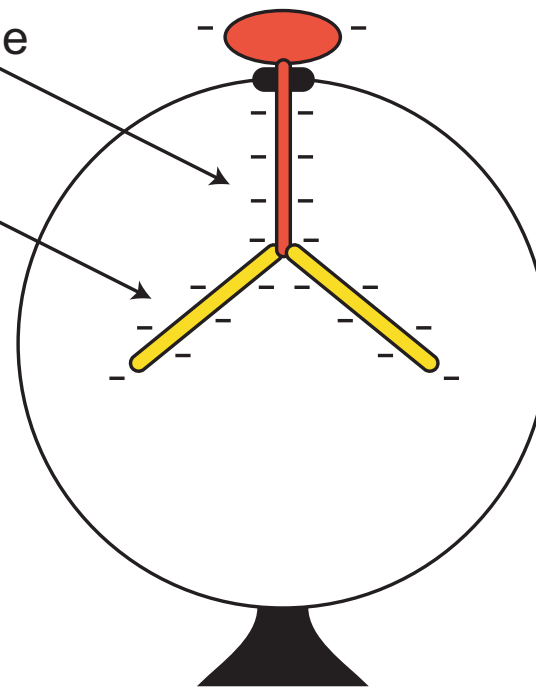
# Découverte des rayons cosmiques

1901  
(voire 1785, Coulomb)



barre métallique

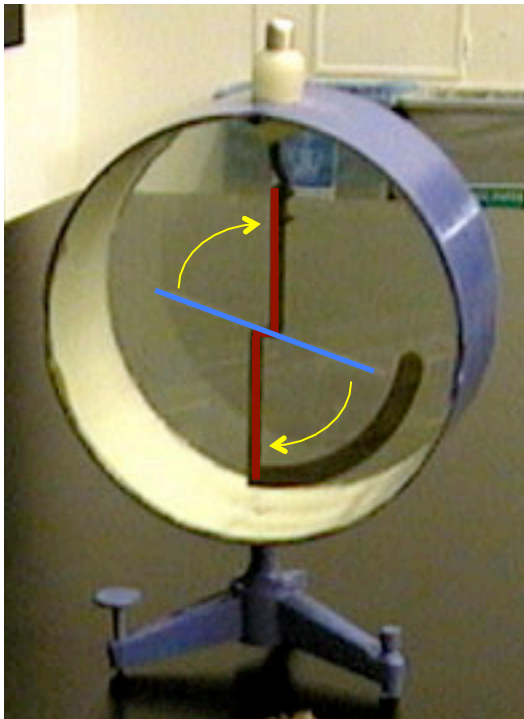
feuille d'or



électroscope chargé

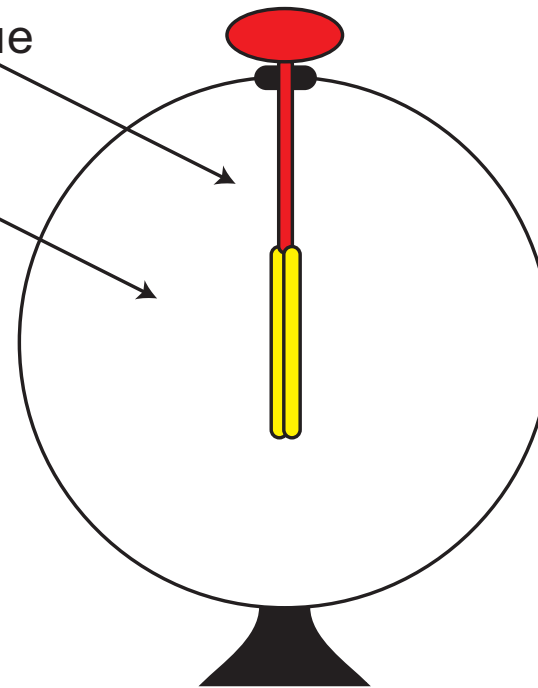
# Découverte des rayons cosmiques

1901



barre métallique

feuille d'or

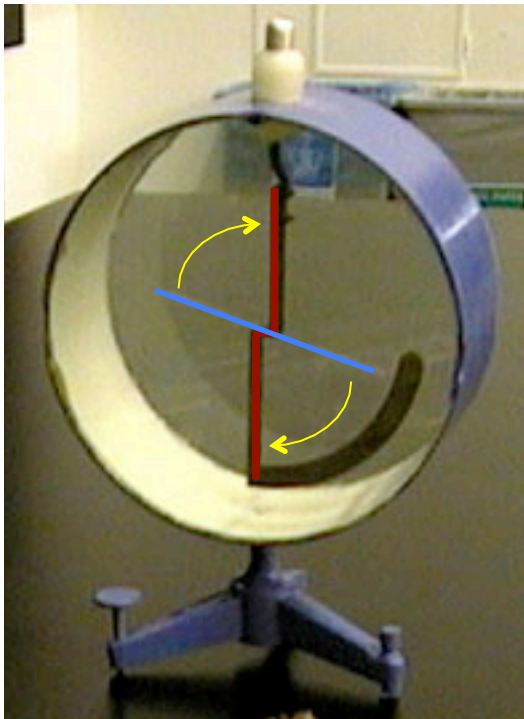


décharge spontanée !

# 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)

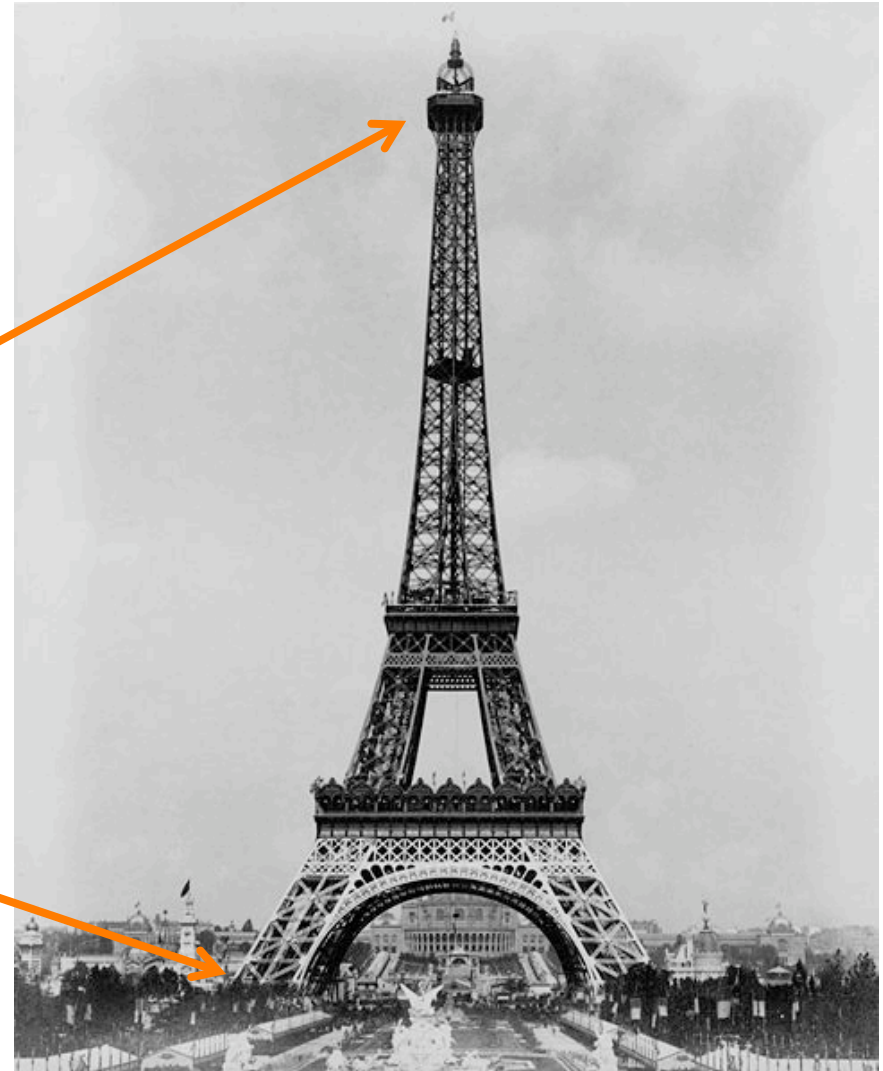
en haut

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

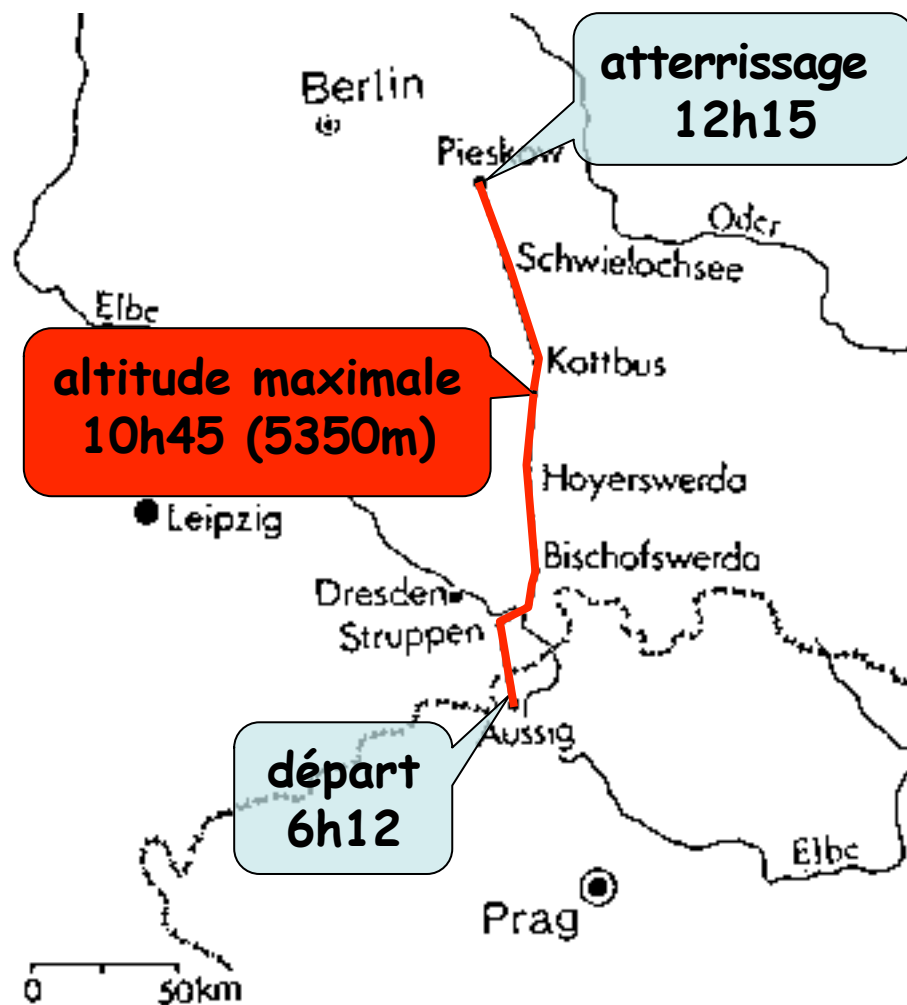
10 vols en ballon

17 avril 1912

éclipse de soleil  
→ ne vient pas du soleil

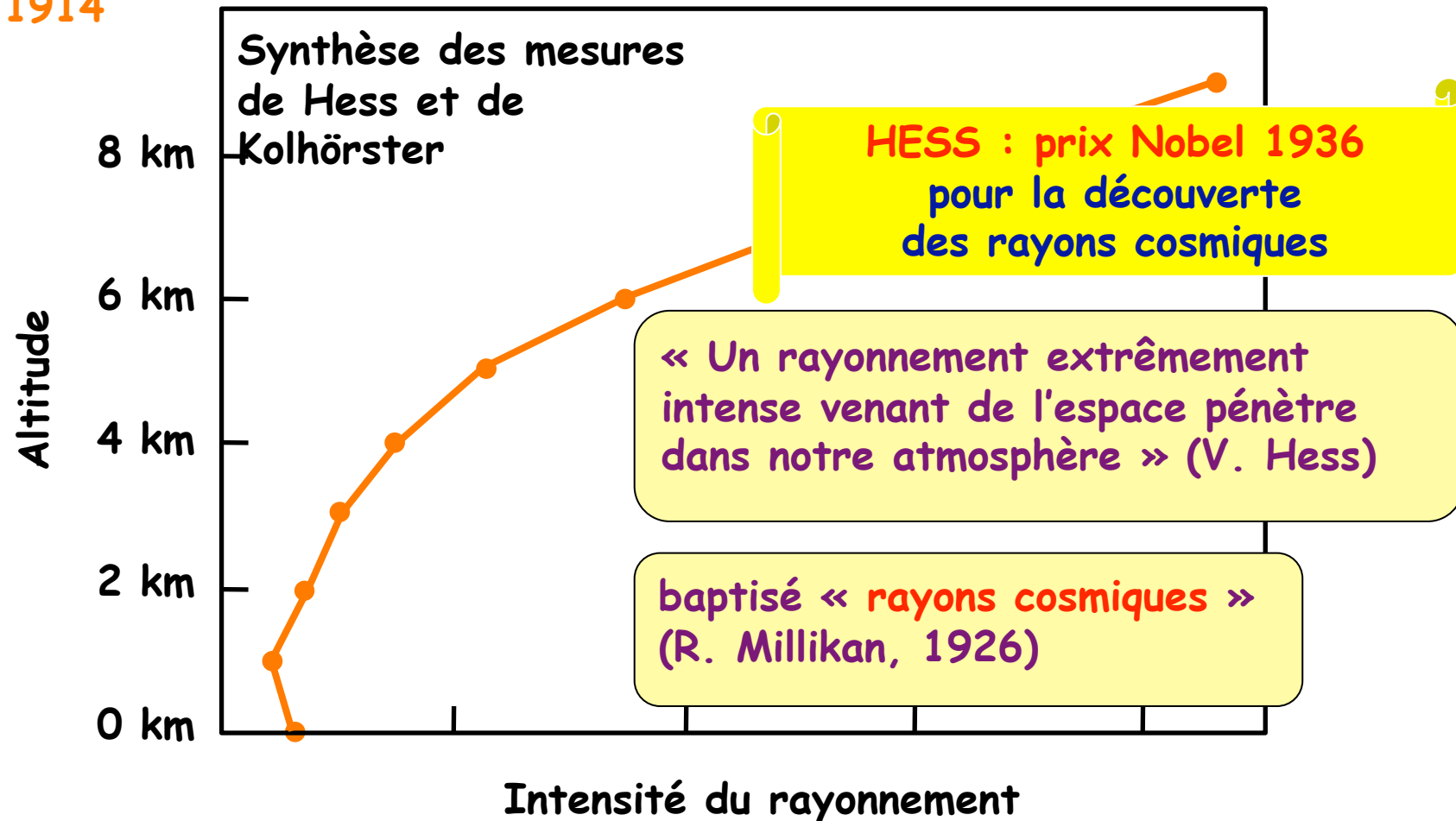


# Découverte des rayons cosmiques



# 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 ».

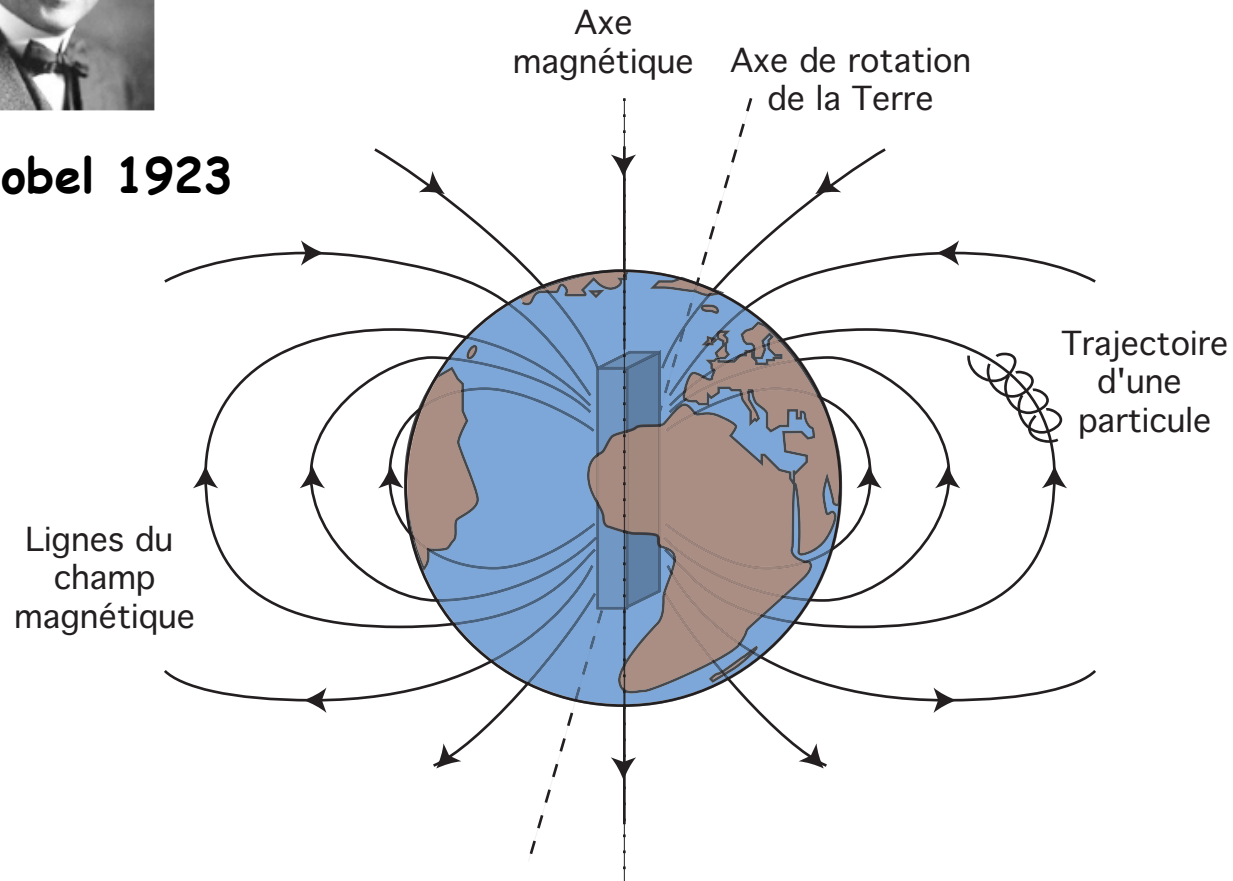
Les rayons cosmiques sont chargés. C'est pourquoi ils sont si énergétiques (accélération par champs électro-magnétiques)

Compton



Nobel 1923

Nobel 1927



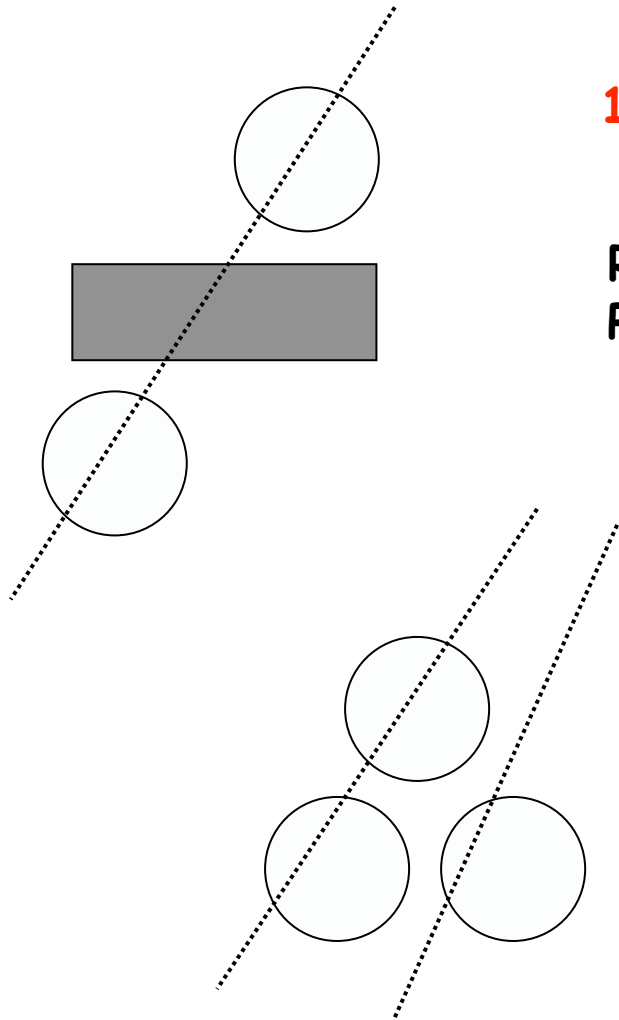
**1932:**  
expédition Compton  
autour du globe  
(Nouvelle-Zélande  
→ Antarctique)



# 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

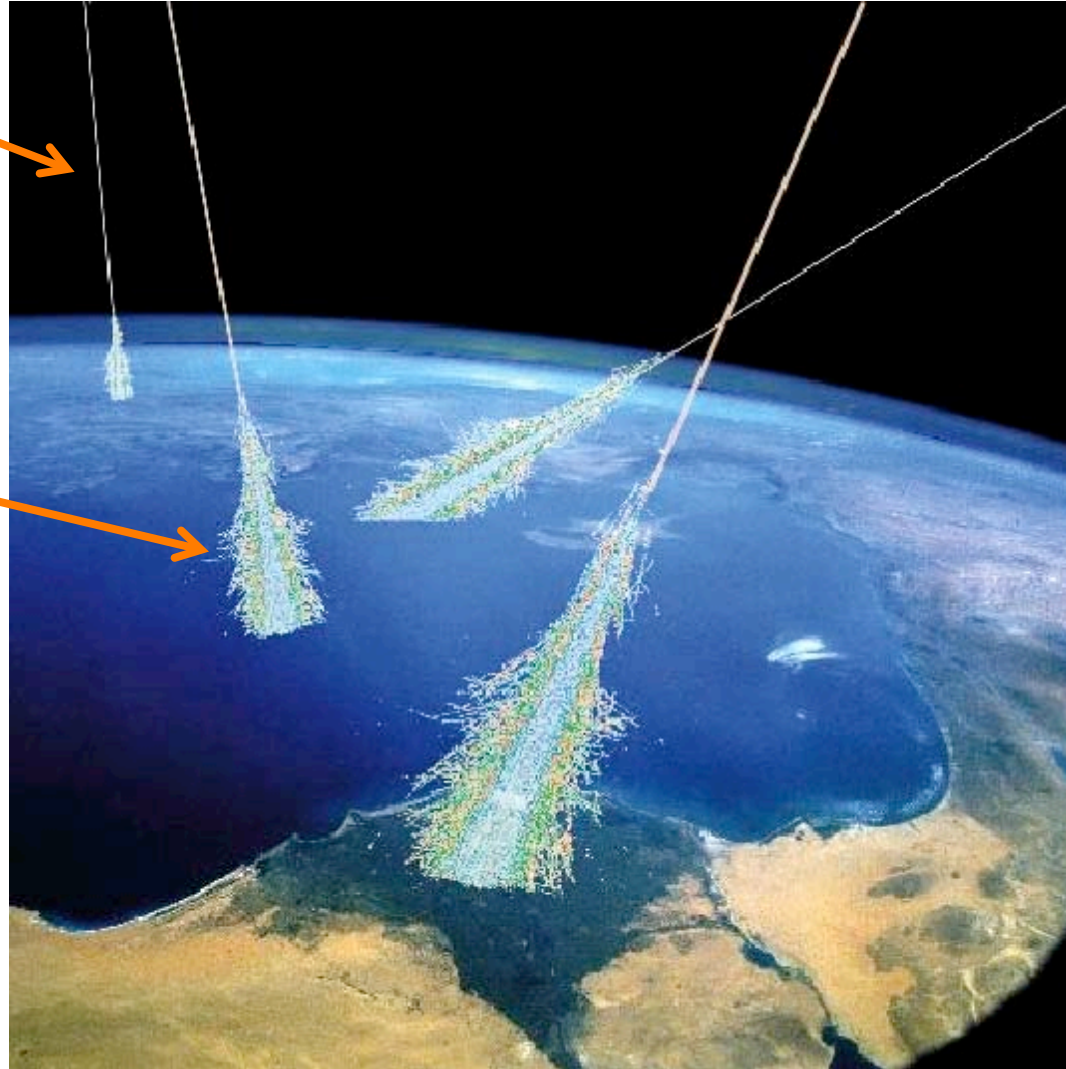


# Gerbes atmosphériques

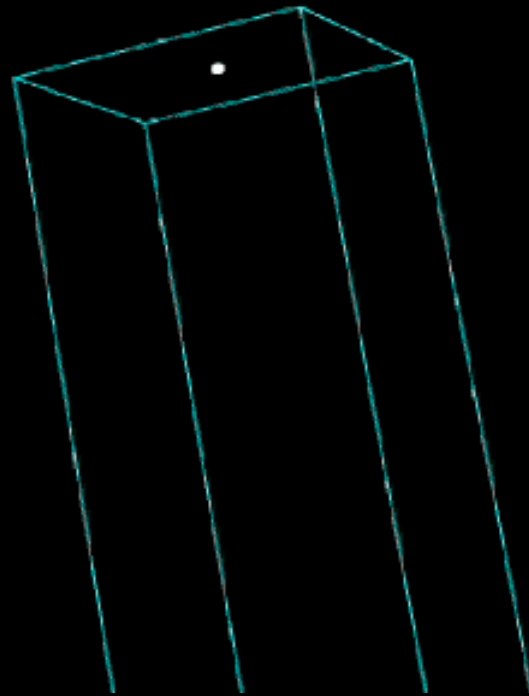
particule cosmique  
(proton)



gerbe  
atmosphérique



# 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)

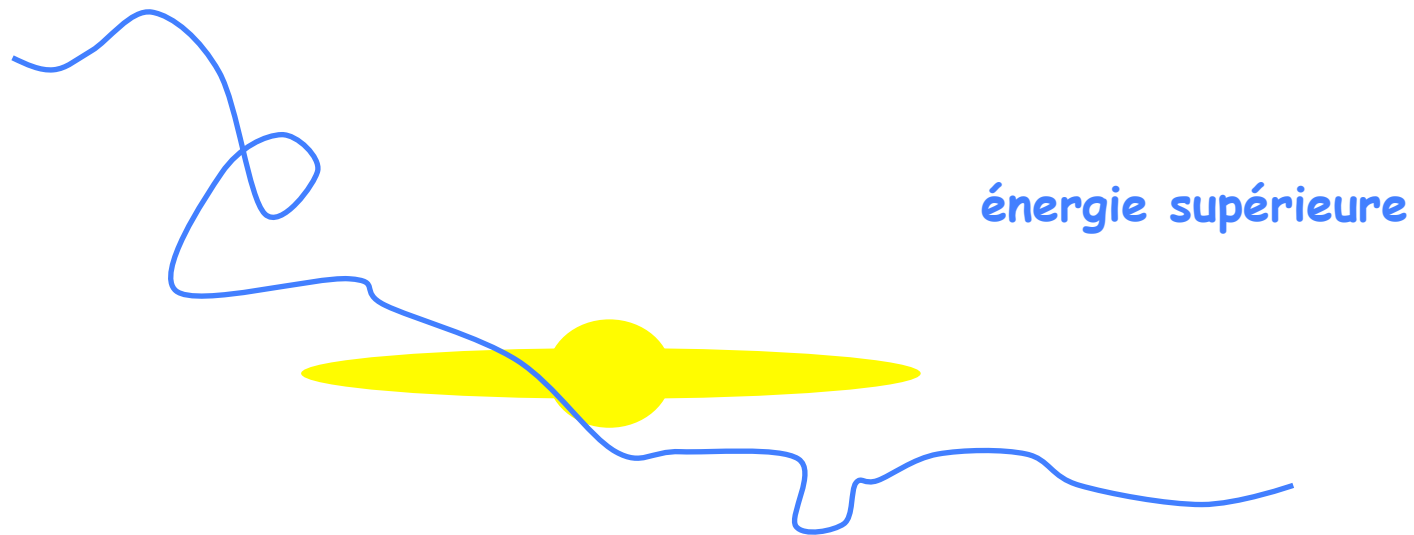


basse énergie

# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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





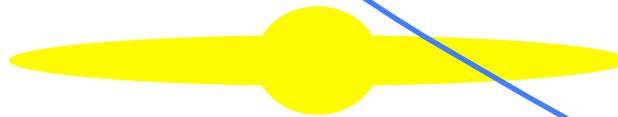
# « Rayons » cosmiques ?

rayons cosmiques = particules **chargées**

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

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

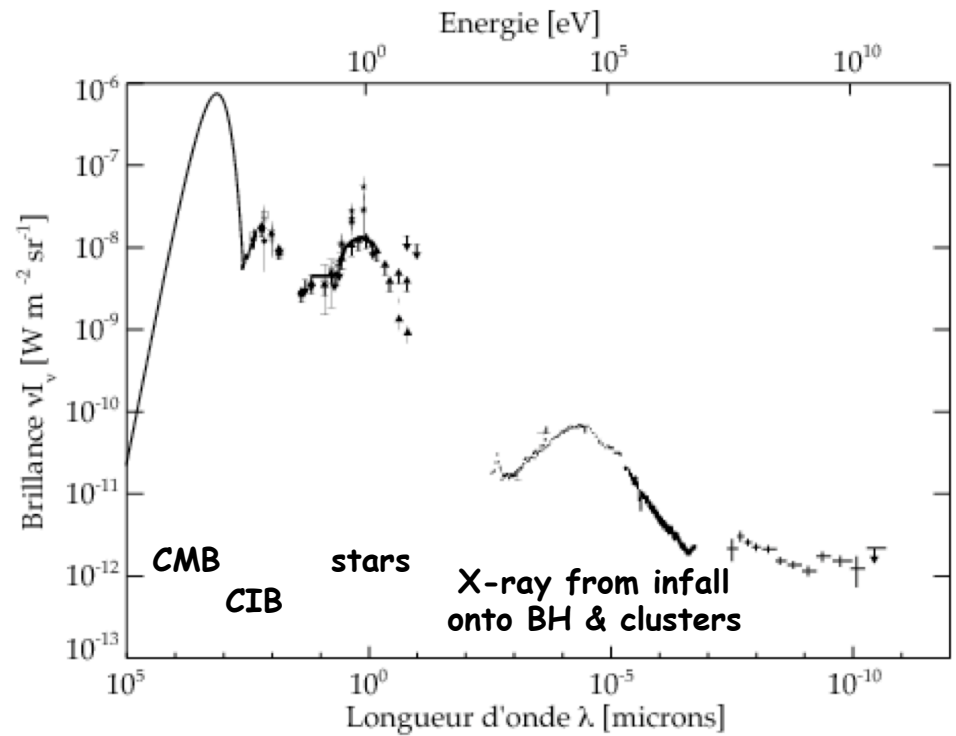
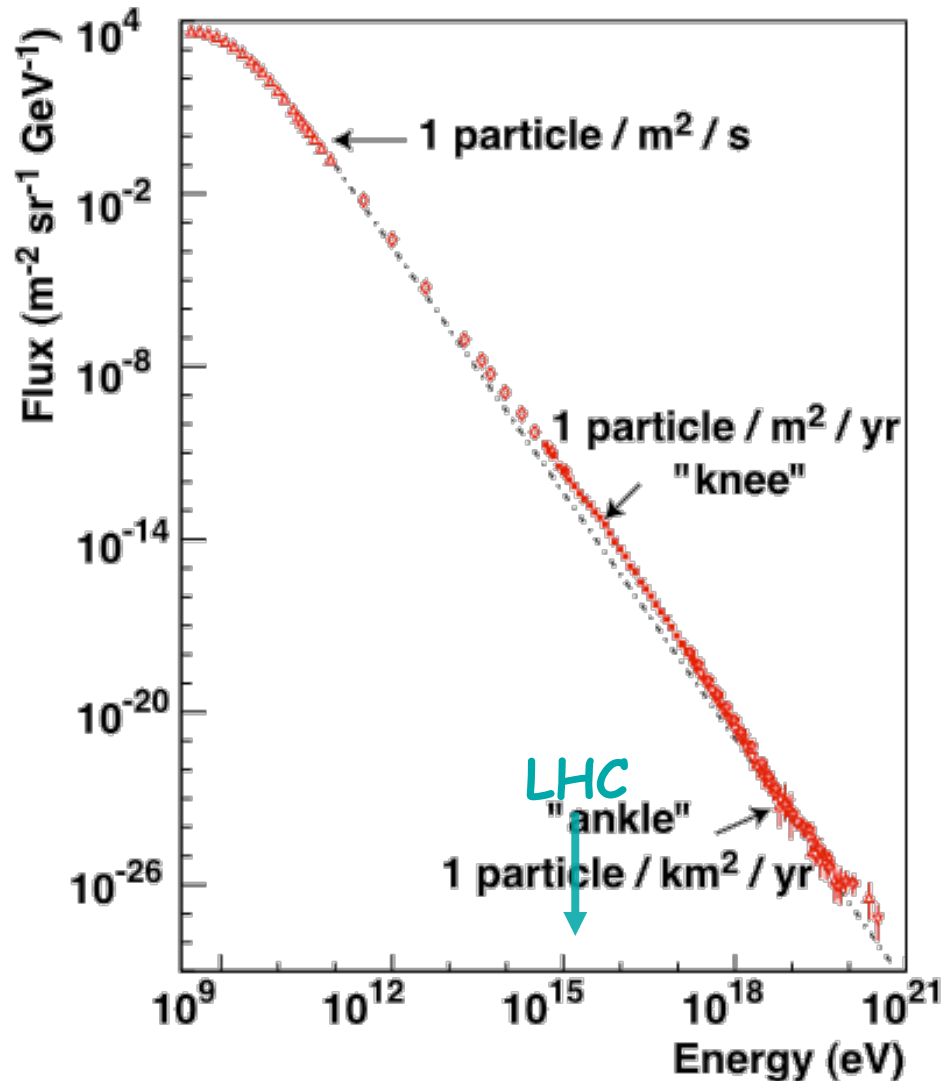
très grande énergie !



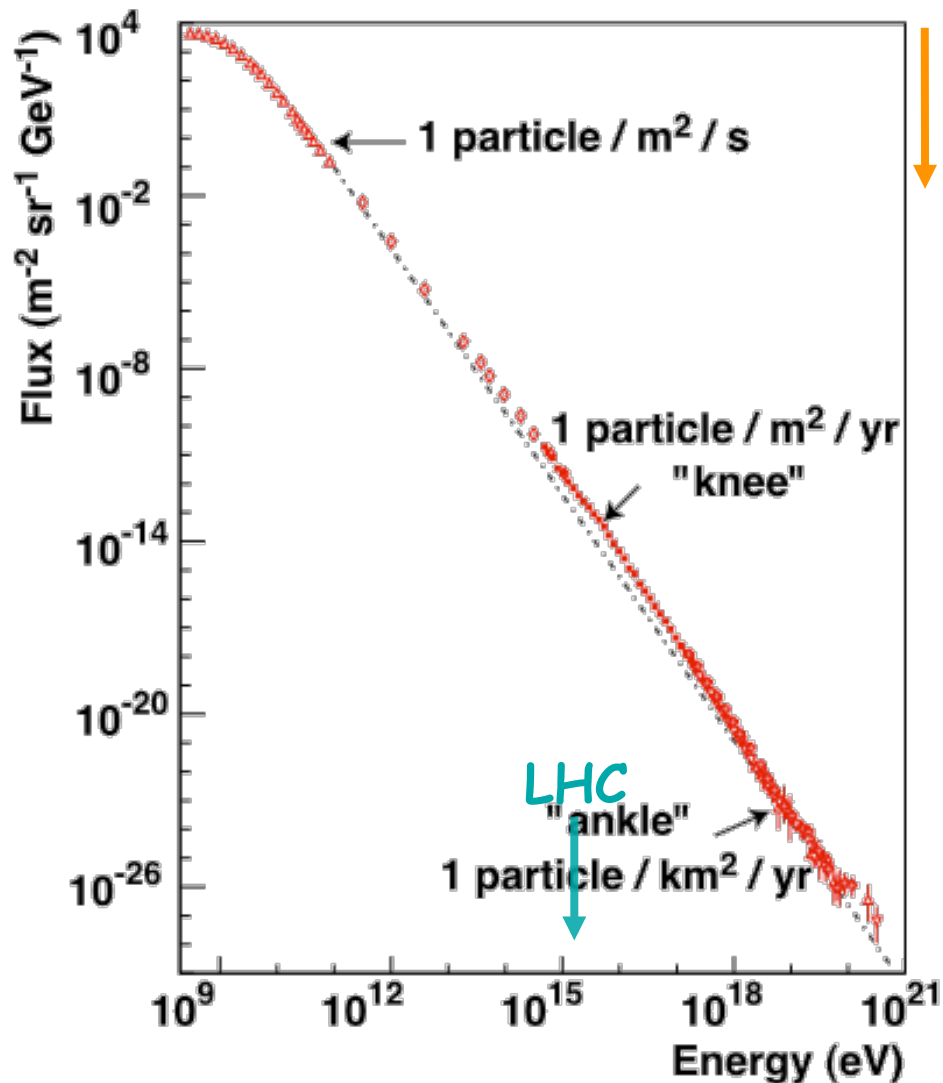


Rayons cosmiques:  
énergie et accélération

# Spectre des rayons cosmiques



# Spectre des rayons cosmiques



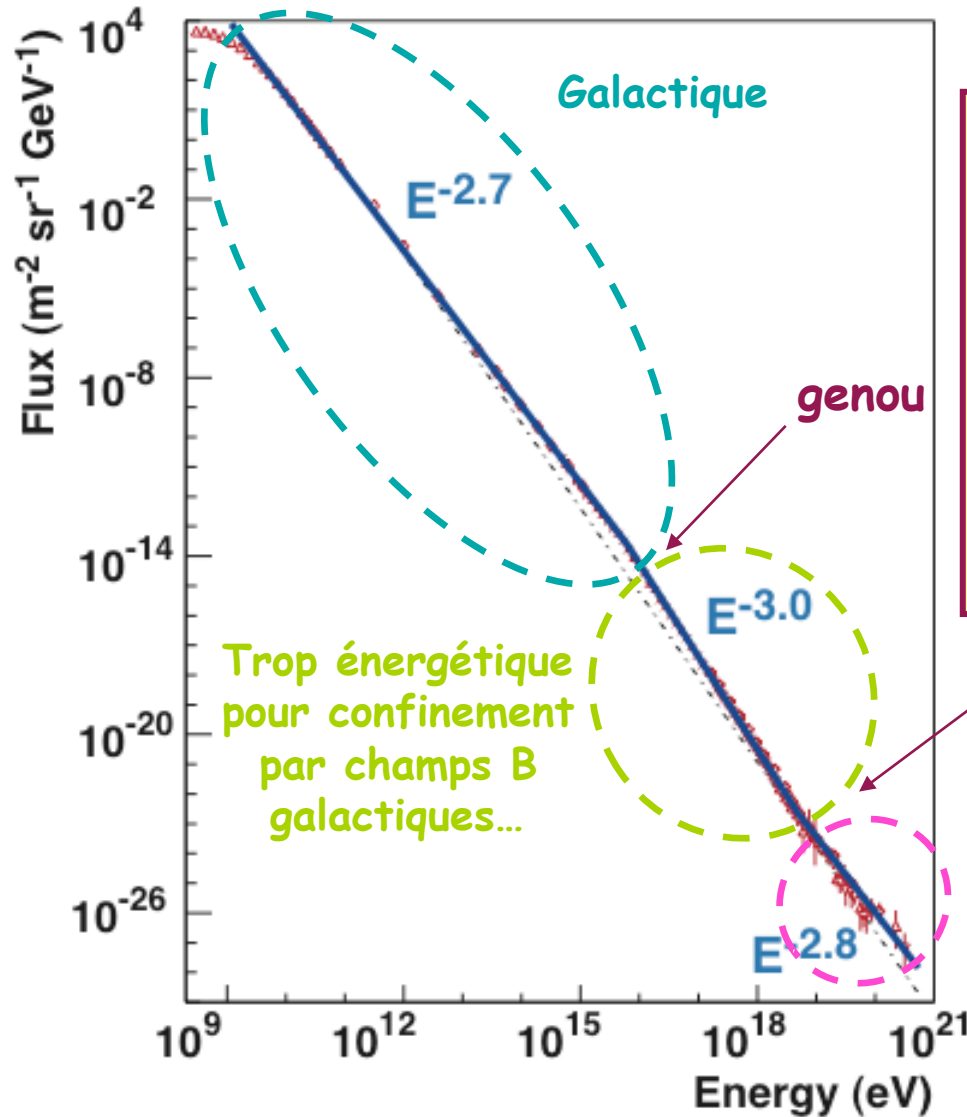
$E < 10^{14}$  eV

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



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

<p>Accélération à la source 2.0 — 2.2</p>	<p>Propagation (confinement) ~ 0.6</p>
---	--

# 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 :

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

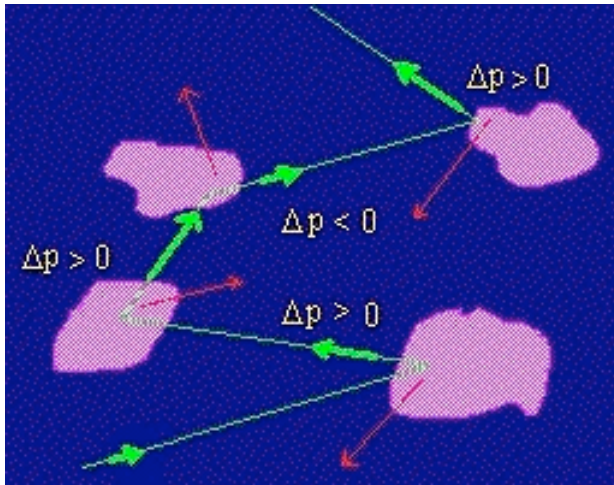
$$N(>E) \propto \frac{1}{\mathcal{P}_{esc}} \left[ \frac{E}{E_0} \right]^{-\alpha}$$

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

# 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 :

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

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

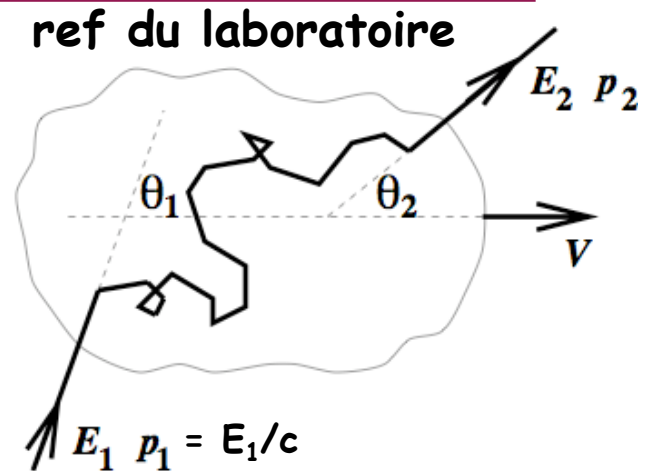
$$\beta = V/c$$

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

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

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

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

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

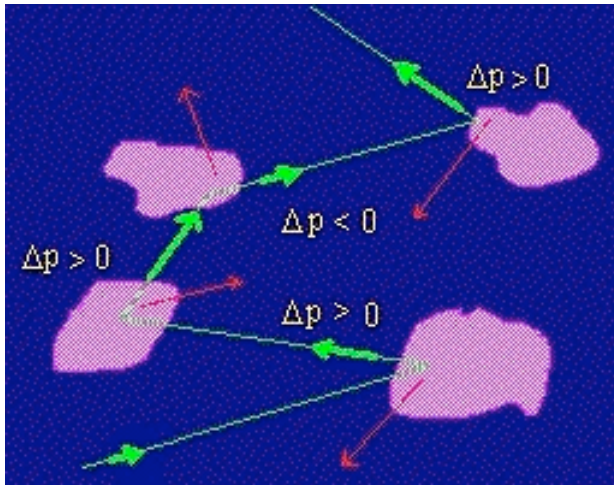
$$(\beta \ll 1)$$



# 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.

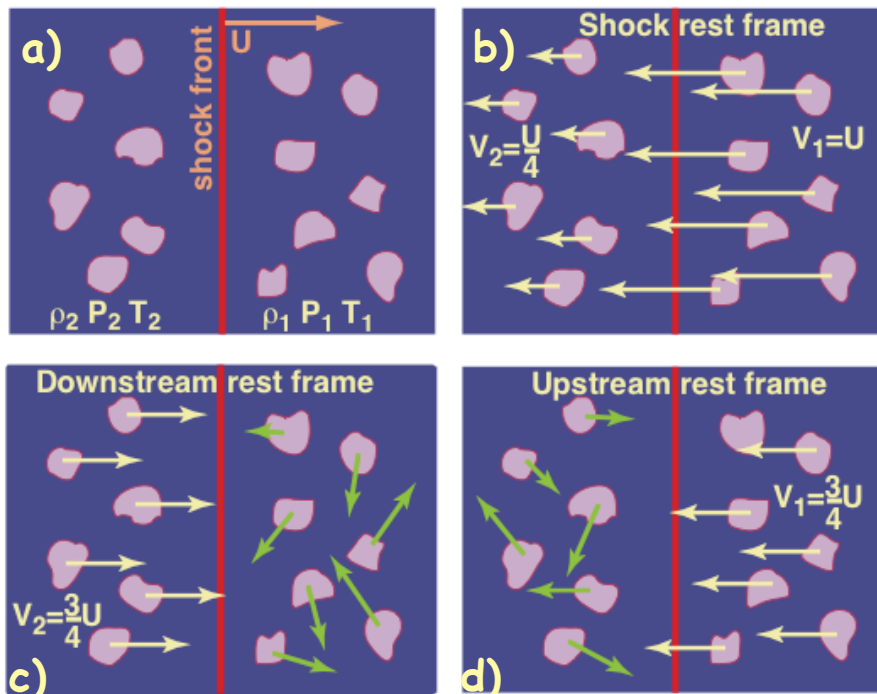
$$\Delta E/E \propto \beta^2 \quad \beta = v/c \sim 10^{-4}$$

« 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

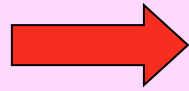
$$\langle \cos\theta_1 \rangle = -2/3 \text{ et } \langle \cos\theta'_2 \rangle = 2/3$$

$\Rightarrow$  Gain en énergie rapide

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

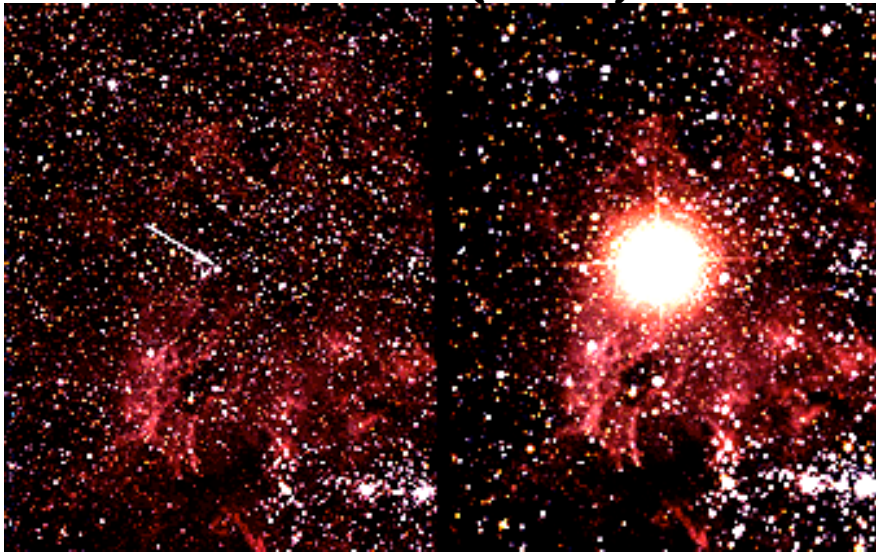
« Premier ordre »

Ondes de choc ?



Supernovae !

SN 1987A (SN II)



quelques  
siècles



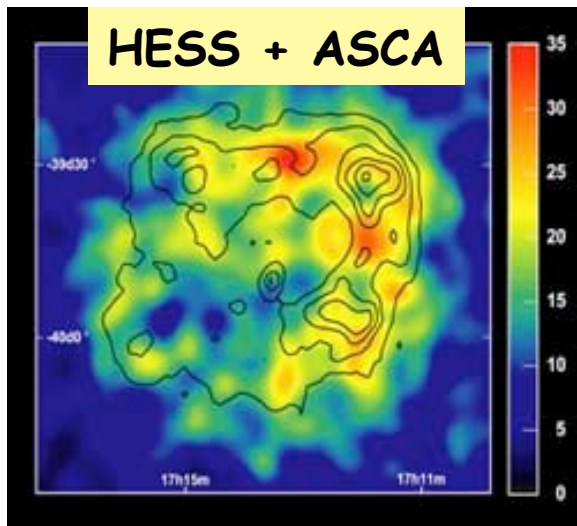
plus  
tard

Reste de supernova  
du Crabe

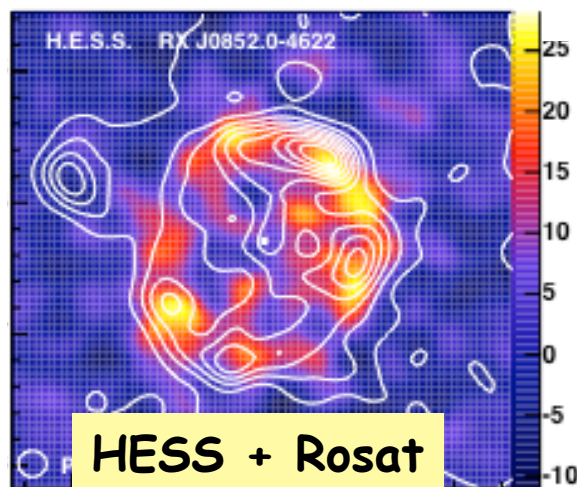


1 SN II / 50 ans dans notre galaxie

# HESS : première confirmation



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



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



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

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

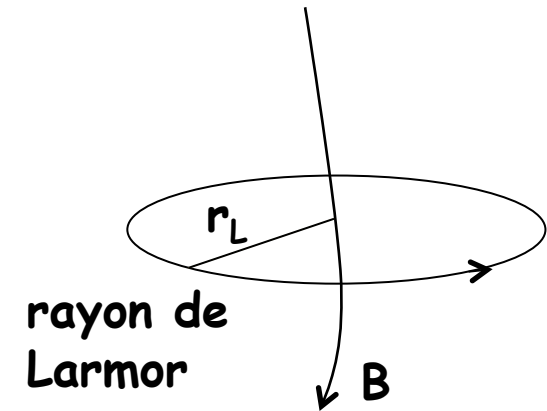
coïncidence spatiale →  
restes de SN = accélérateurs  
de particules multi TeV

# Limitation énergétique

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

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

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

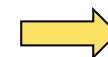


Particule ultra-relativiste :  $p \sim E/c$  donc  $r_L = E / (qBc)$

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

Région de taille R :

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



faut grand B et R

# Limitation énergétique

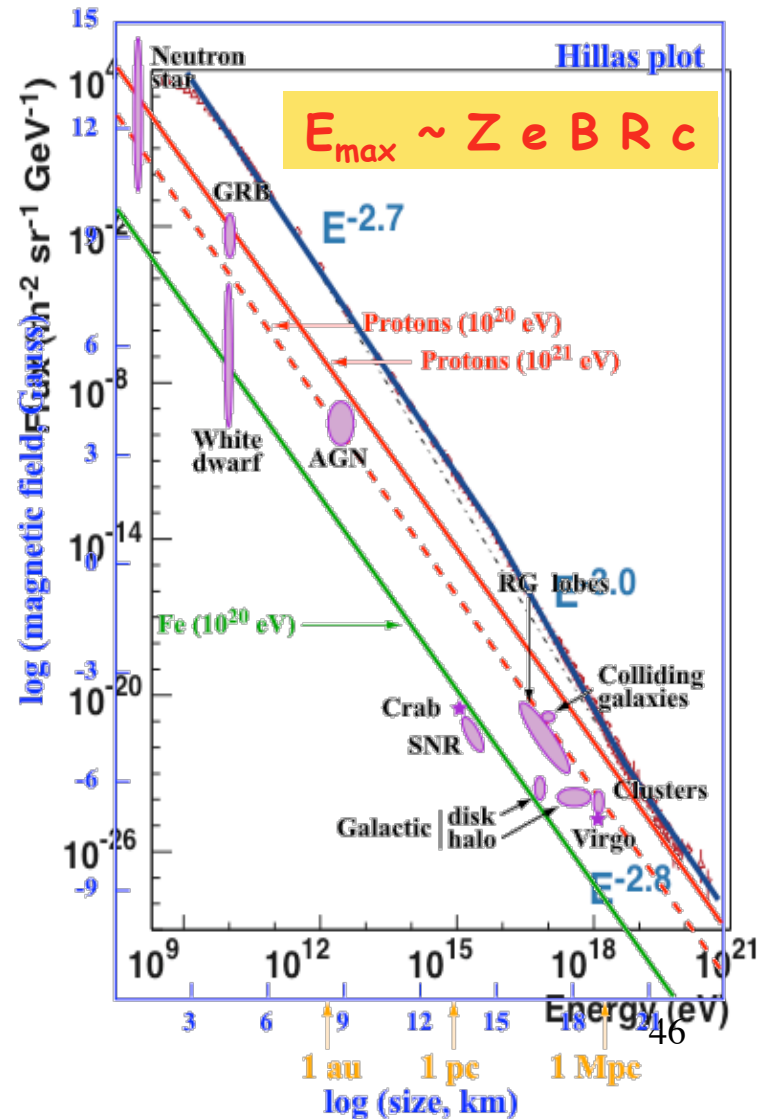
Restes de supernova :  
 →  $E_{\max} \sim 10^{15}$  eV (genou)

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

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

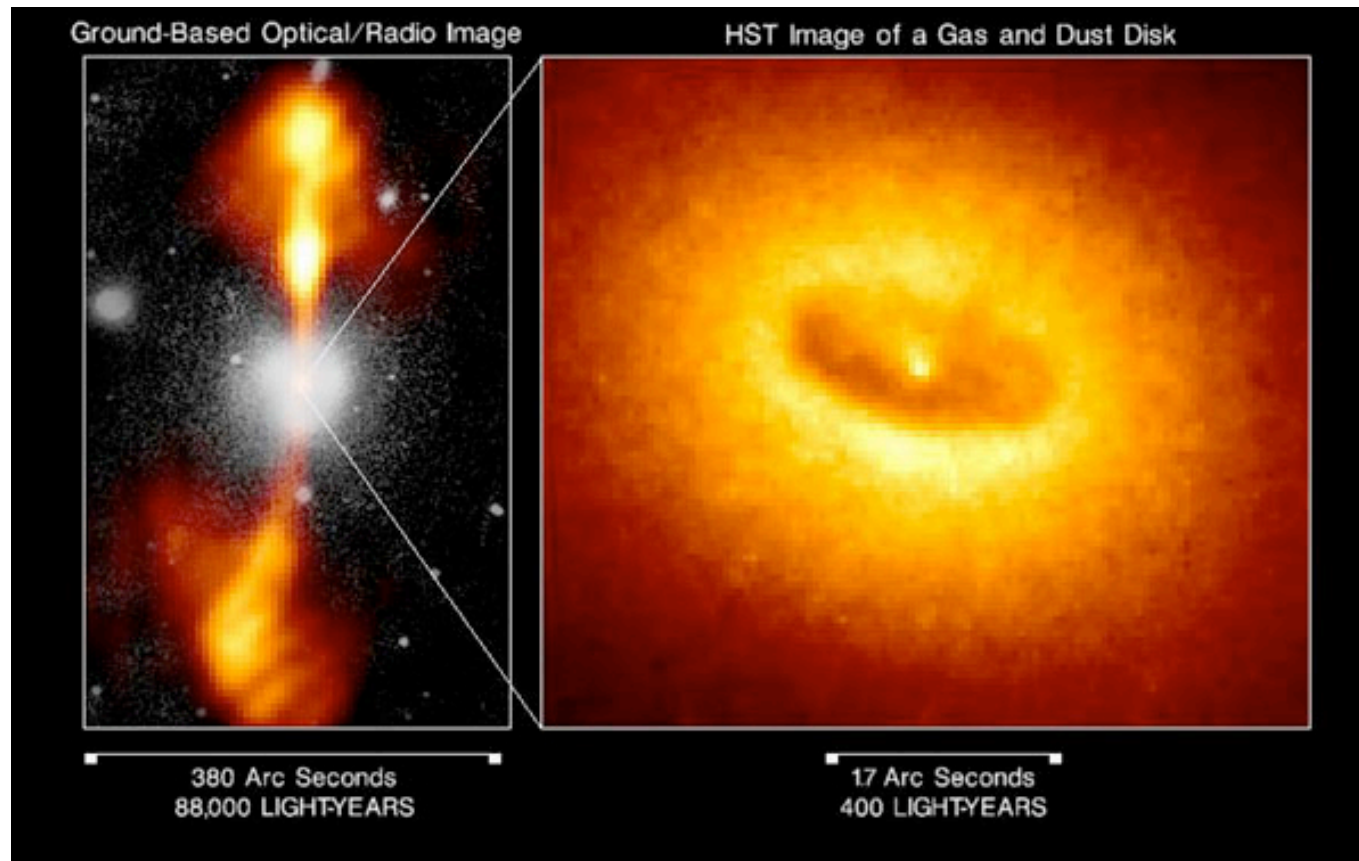
$B_{\text{gal}}$  typique


→ Voie lactée insuffisante pour rayons les plus énergétiques



# Sources au delà de $10^{15}$ eV

## Active Galactic Nuclei





Rayons cosmiques:  
détection



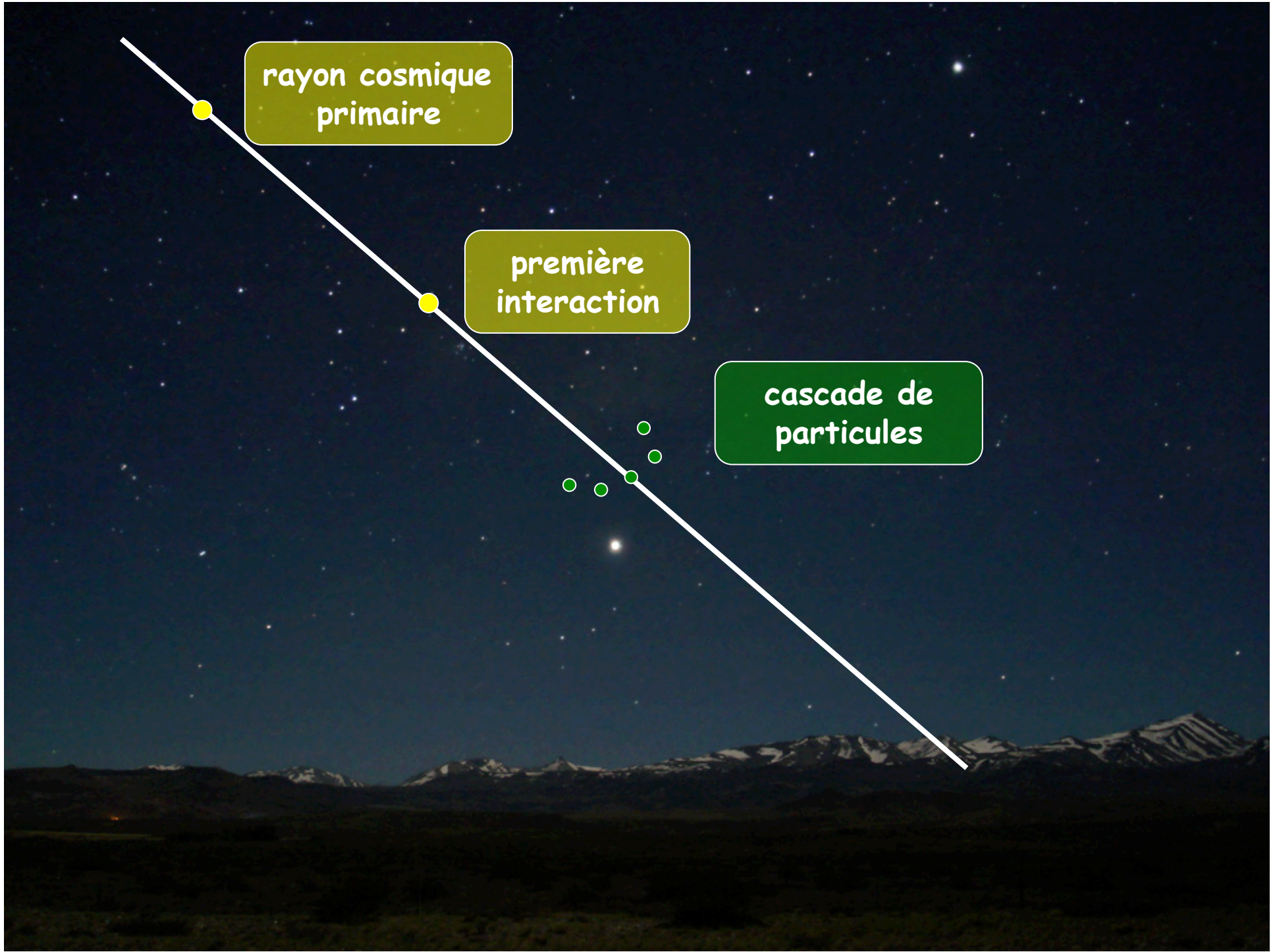


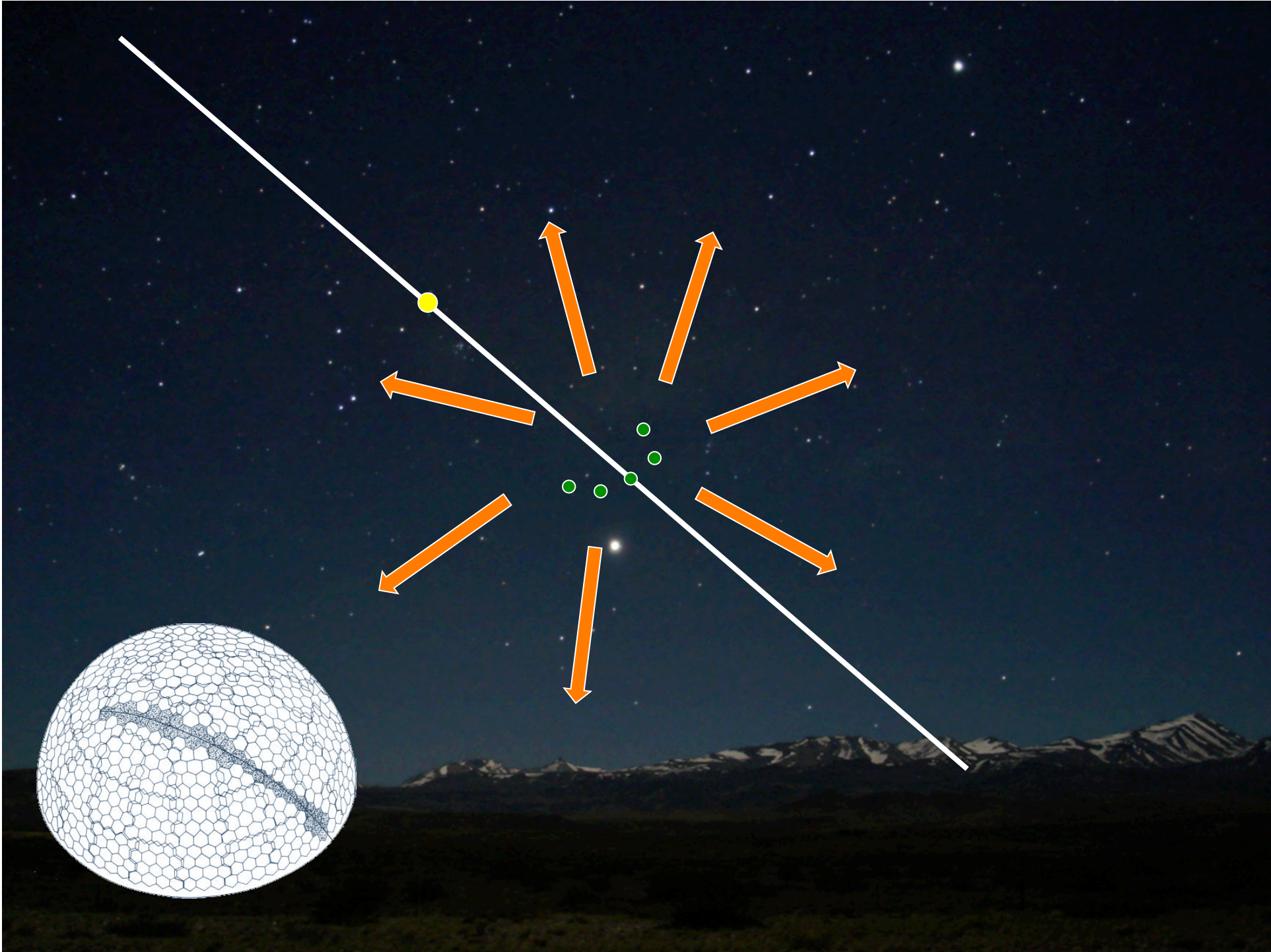
proton  
 $10^{18}$  eV

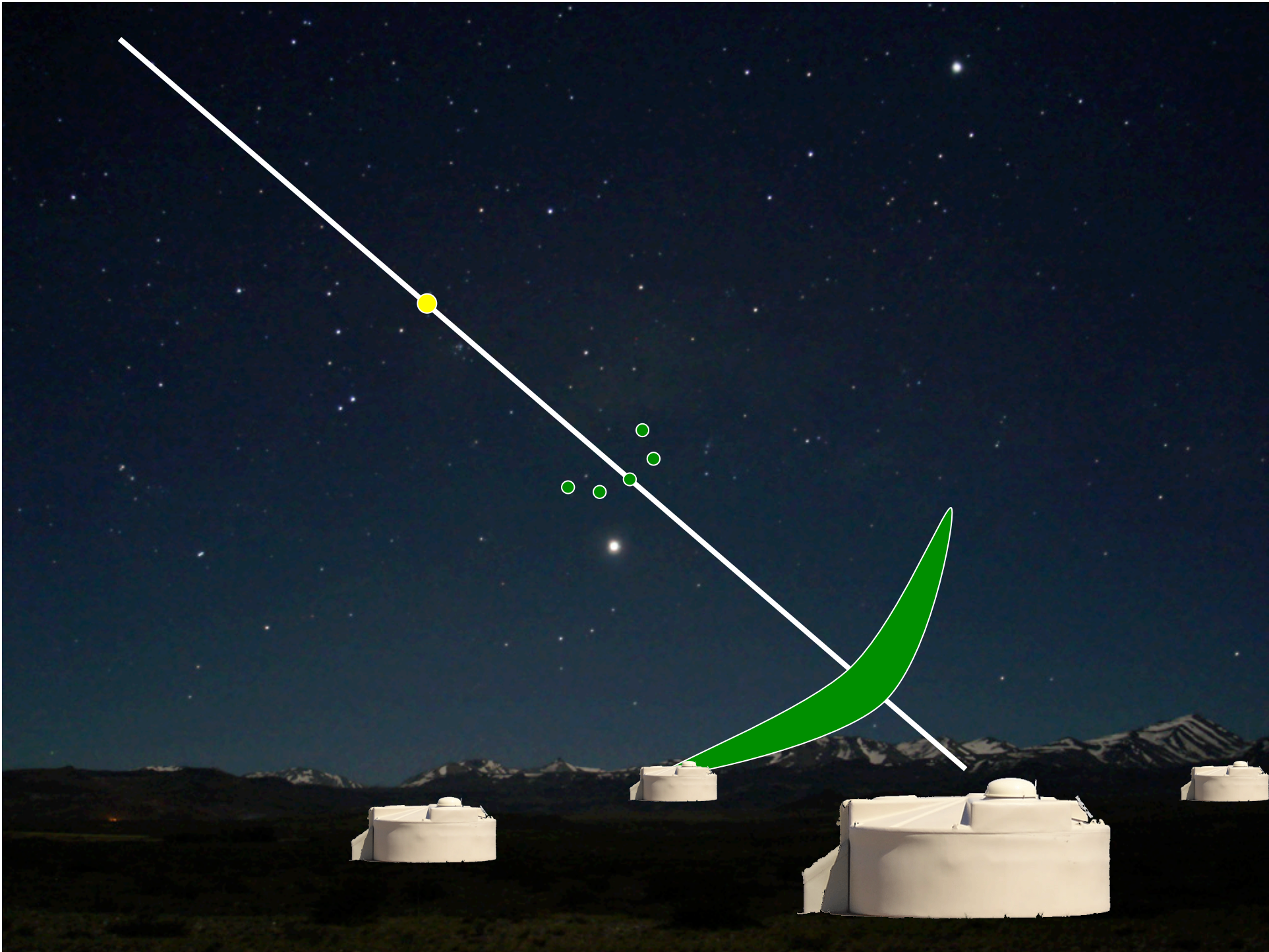
rayon cosmique  
primaire

première  
interaction

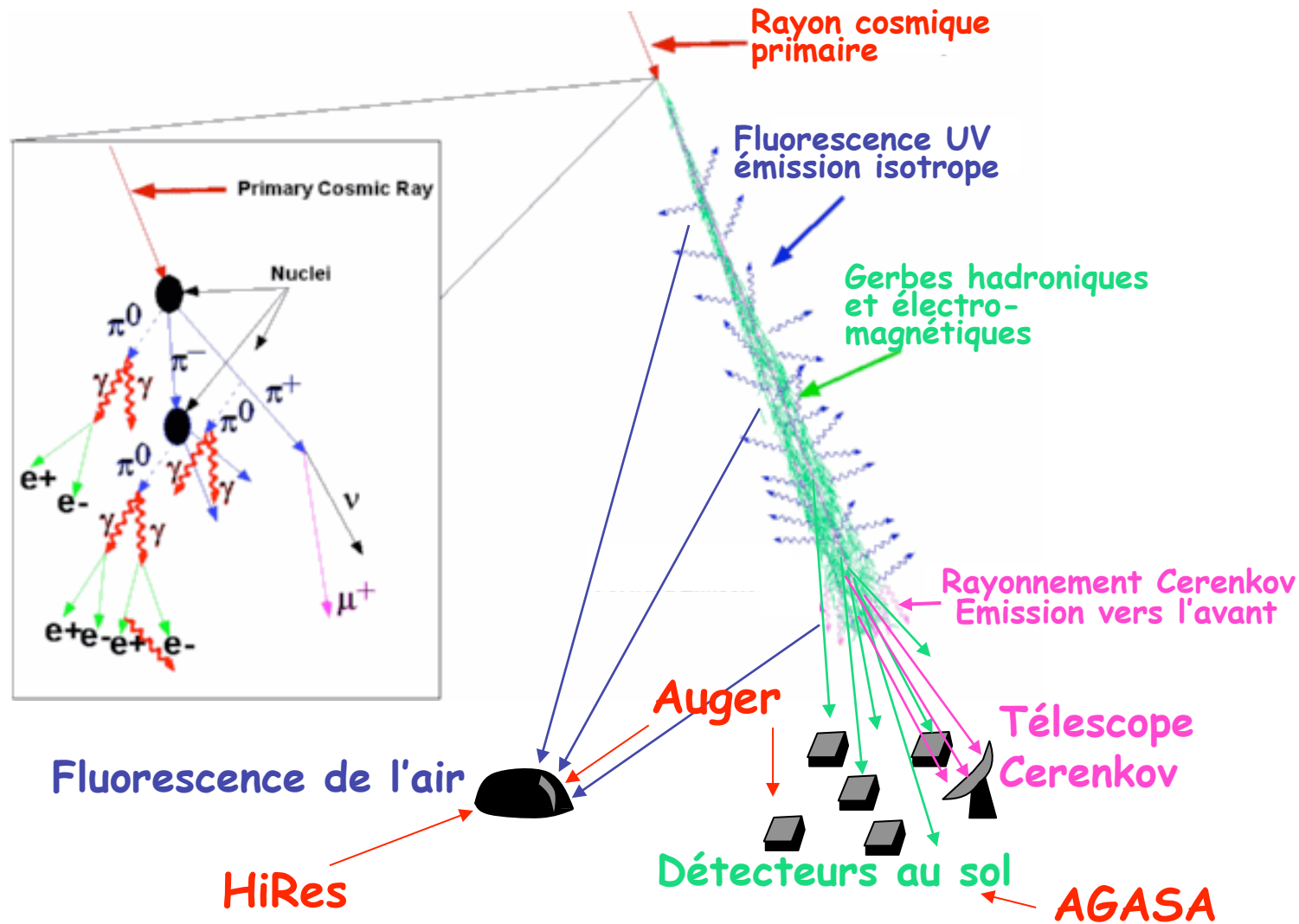
cascade de  
particules







# Détecteurs de rayons cosmiques



# Techniques de détection

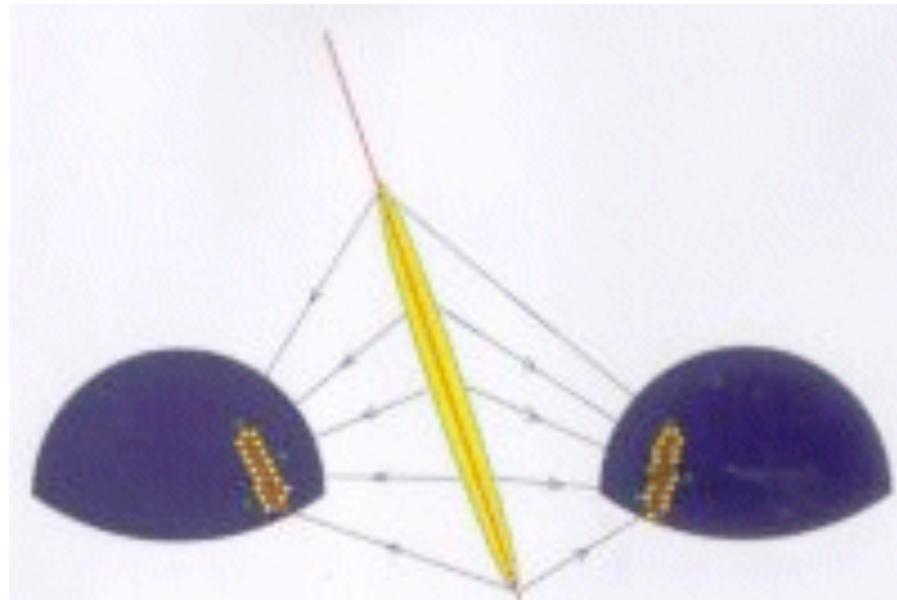
Uniquement  
par nuits claires  
et sans lune

(lumière UV)

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

Miroirs sphériques +  
PMT au plan focal

*Fluorescence de l'air*

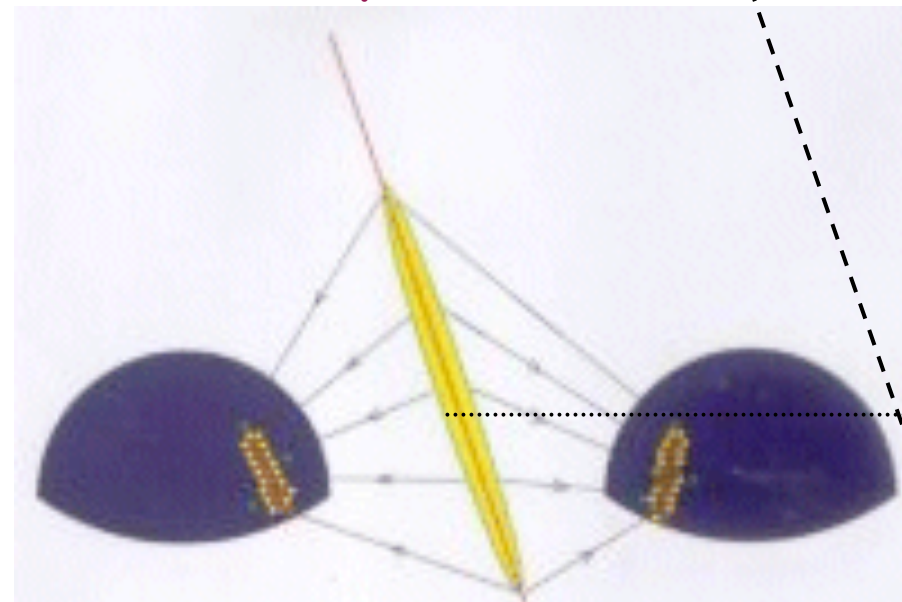


# Techniques de détection

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

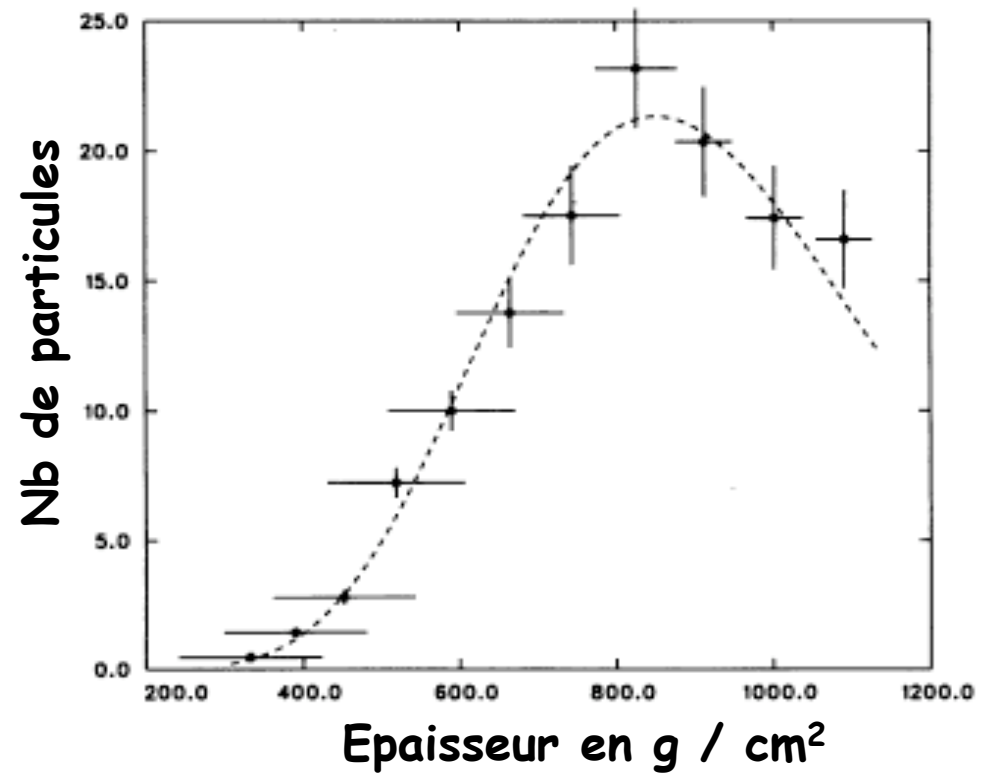
# Techniques de détection

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)

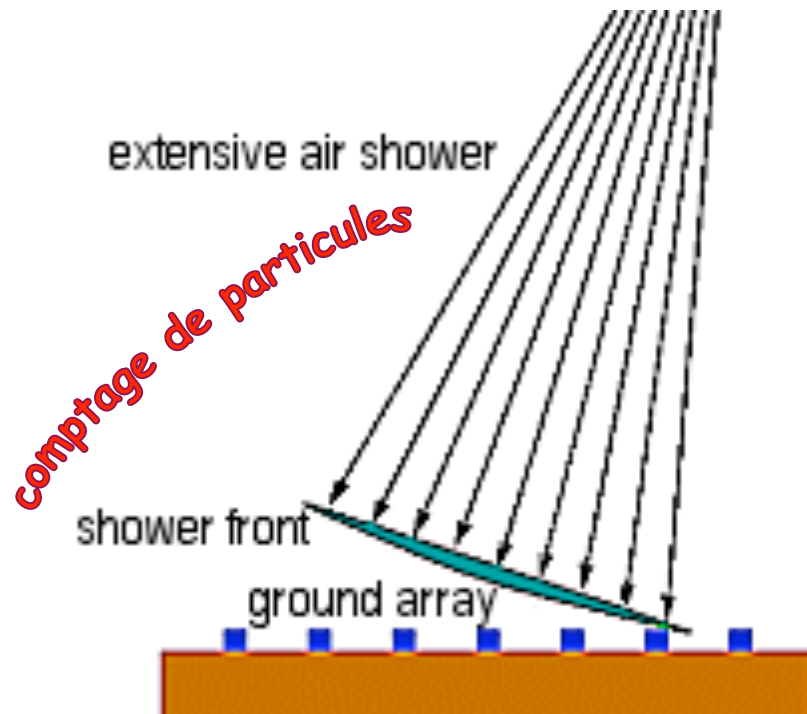


Fluorescence de l'air

Miroirs

HiRes  
(Utah)

# Techniques de détection

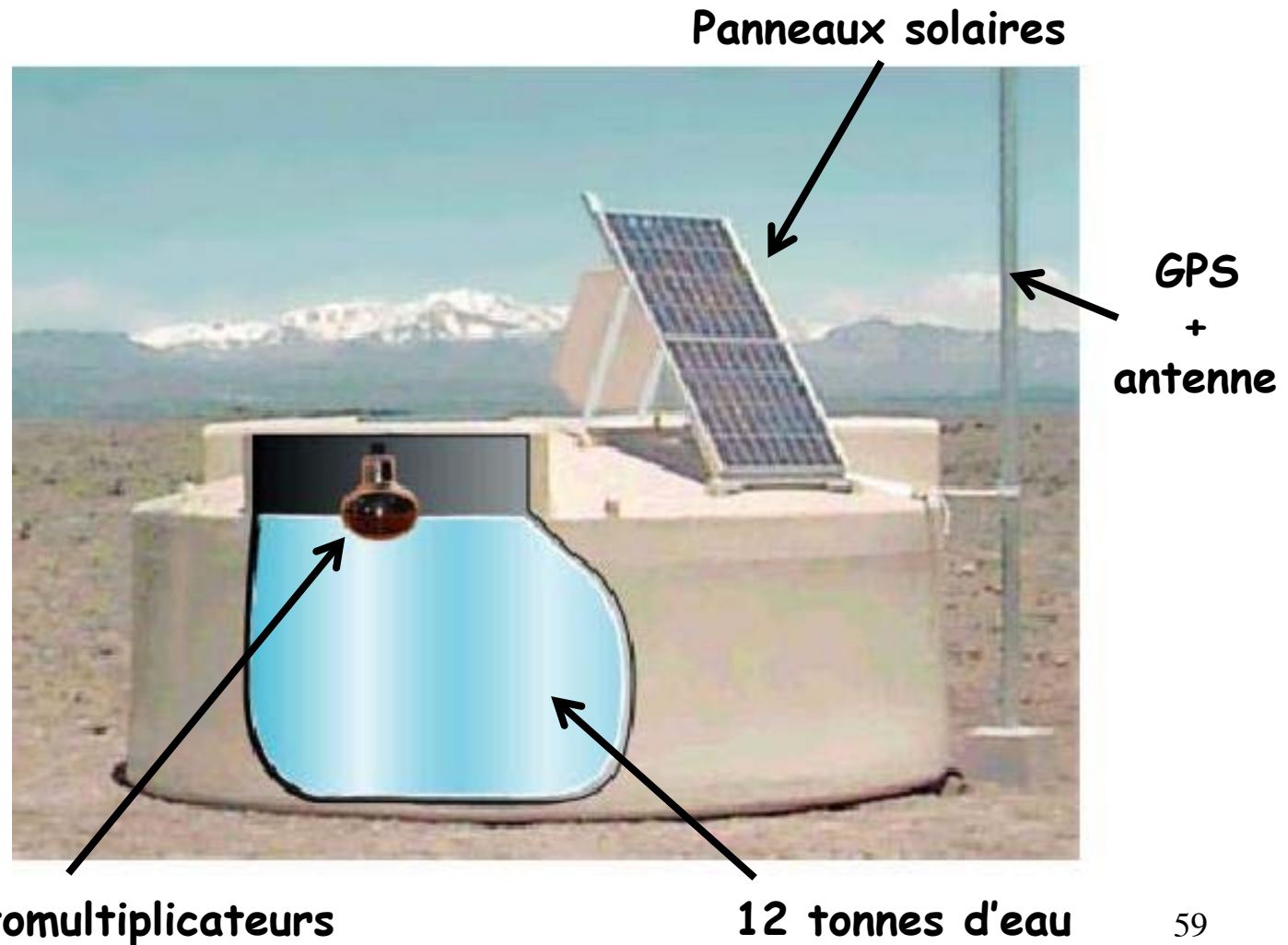


Trajectoire déterminée  
à partir des temps d'arrivée  
du front d'onde  
sur détecteurs au sol

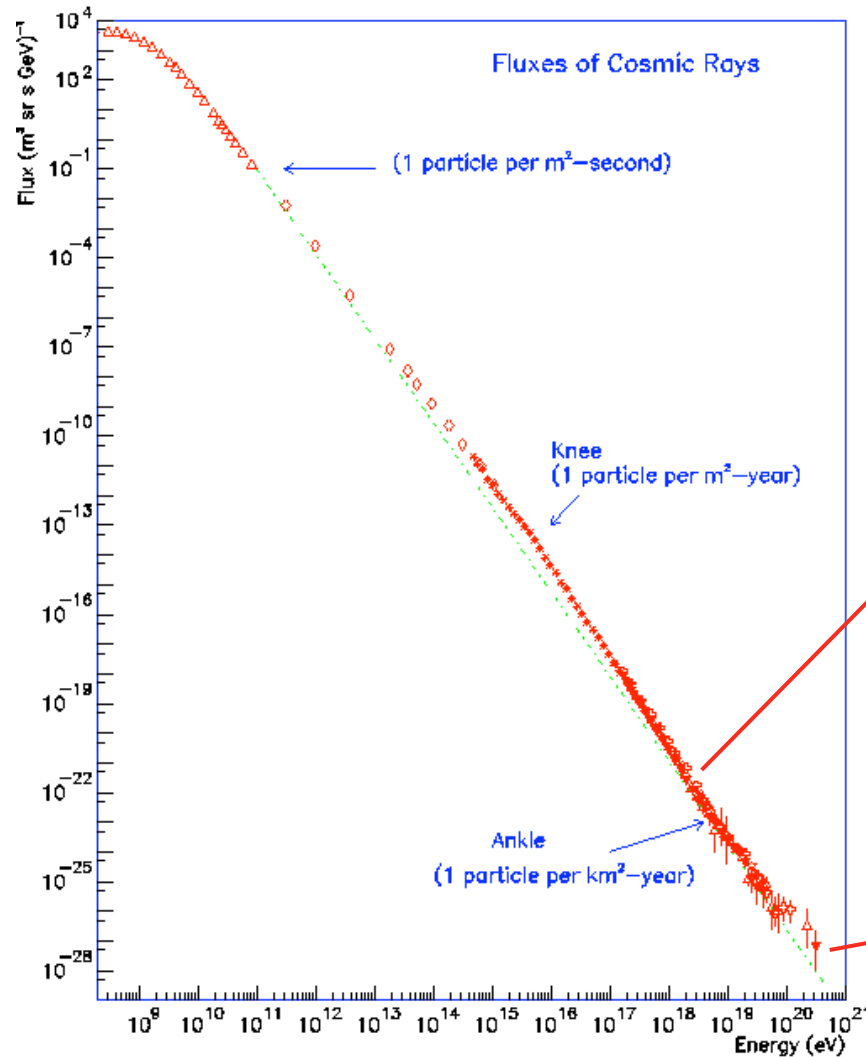
Energie déterminée  
à partir des comptages

# Techniques de détection

*comptage de particules*

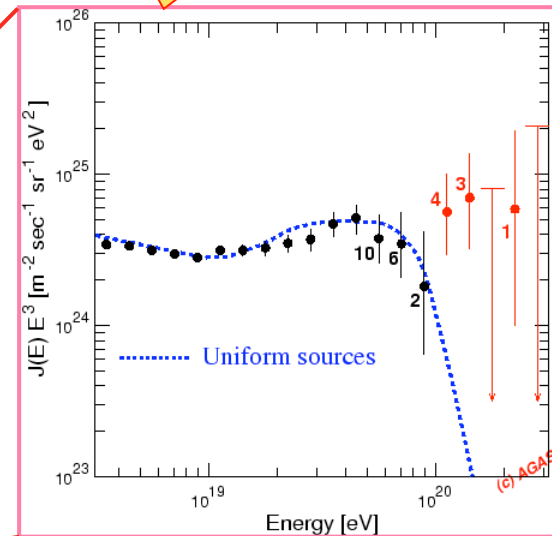


# Ultra High Energy Cosmic Rays



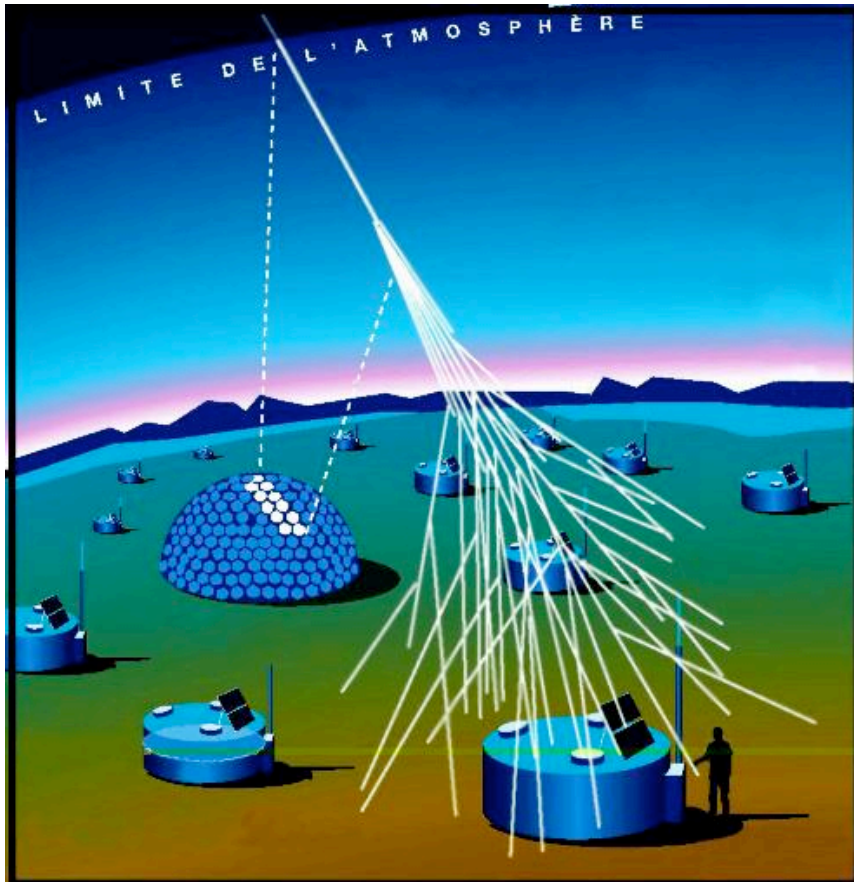
AGASA : 17 evts à E>5x10<sup>19</sup> eV  
HiRes : 2 events (~ 20 attendus)

inter-calibration !

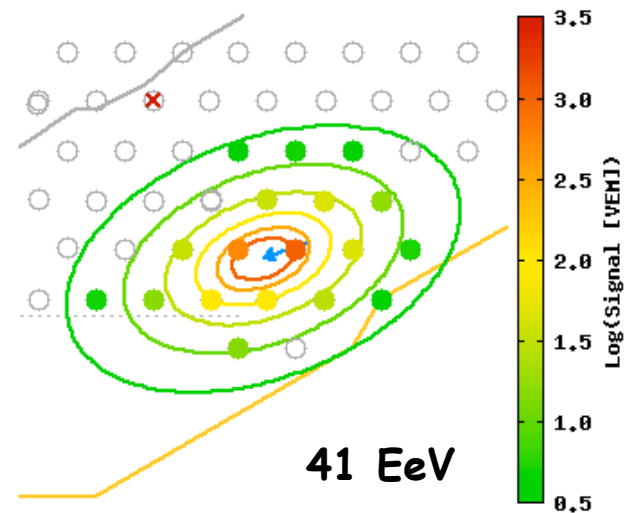


$E_{\max} = 3.2 \cdot 10^{20} \text{ eV} = 50 \text{ J} !$

# AUGER



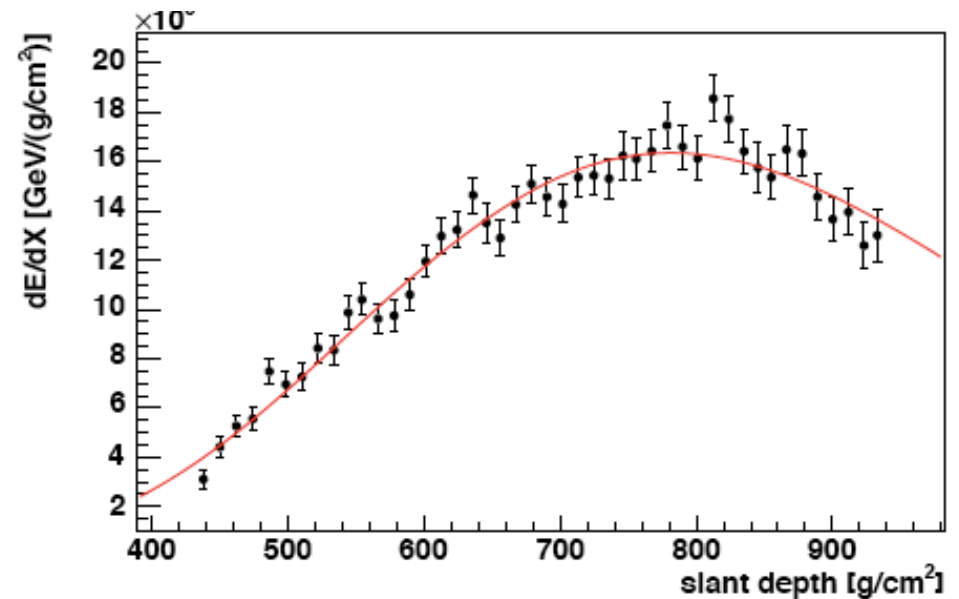
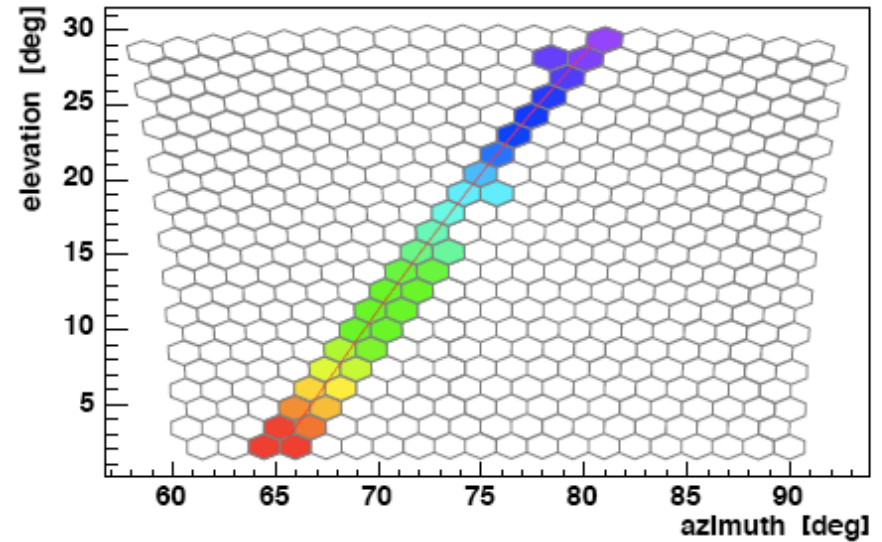
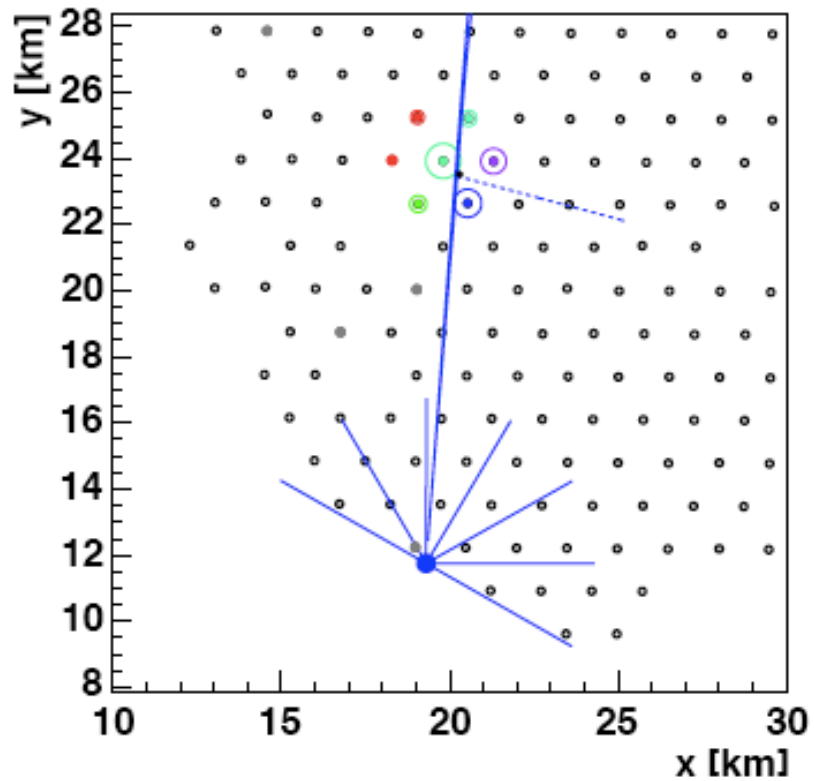
- >1 million d'événements enregistrés
- $E_{\max} \sim 2 \cdot 10^{20}$  eV





# 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%

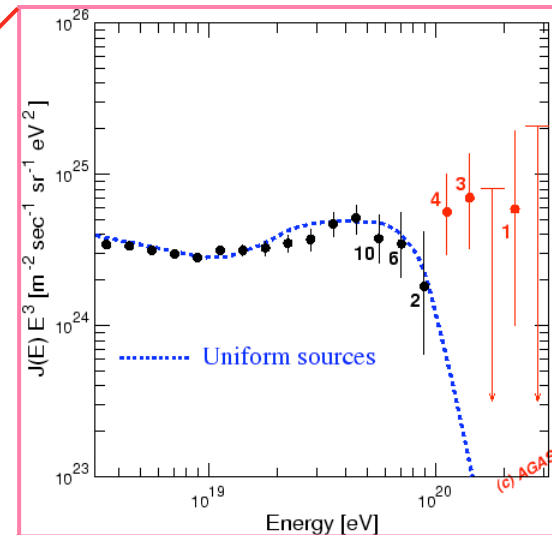
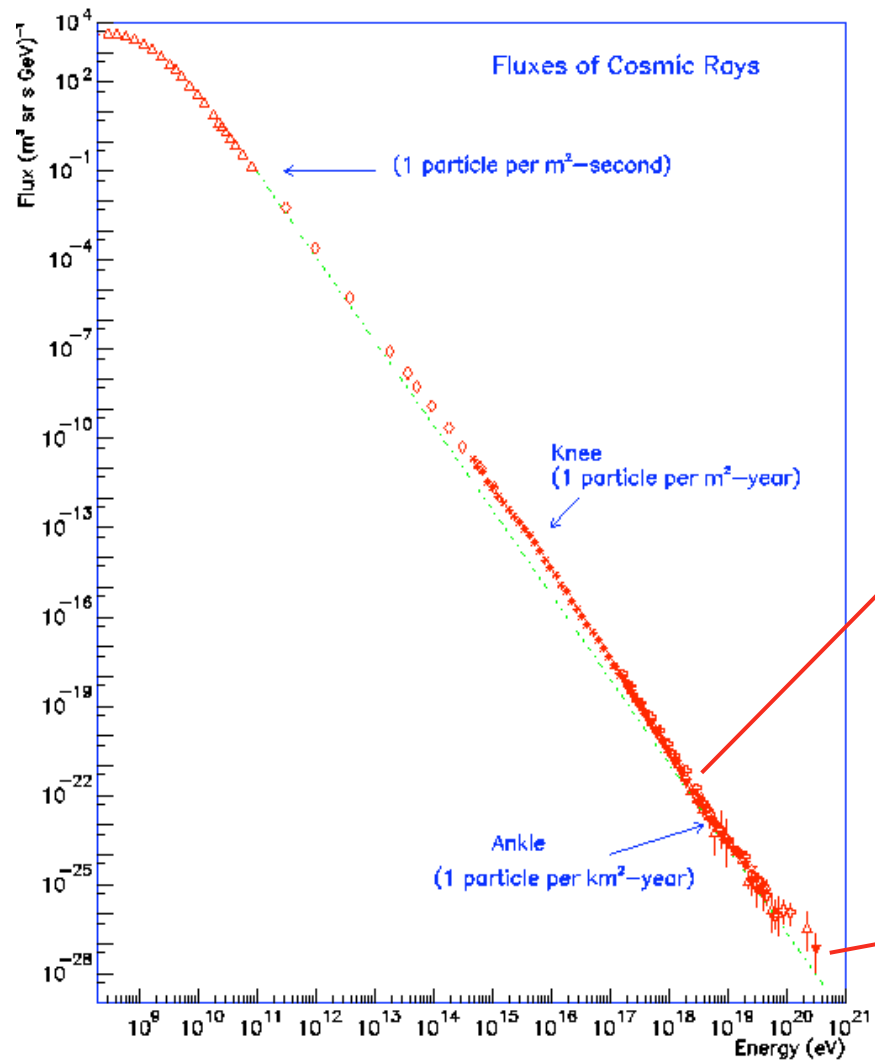
$10^{20}$ eV	détecteur de surface	détecteur de fluorescence	hybride
$\Delta\theta$	1°	1°	0,4°
$\Delta$ impact	40 m	400 m	30 m
$\Delta E / E$	7%	10%	3%



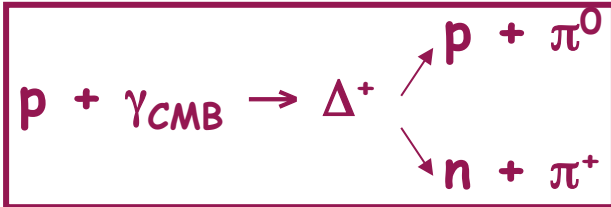
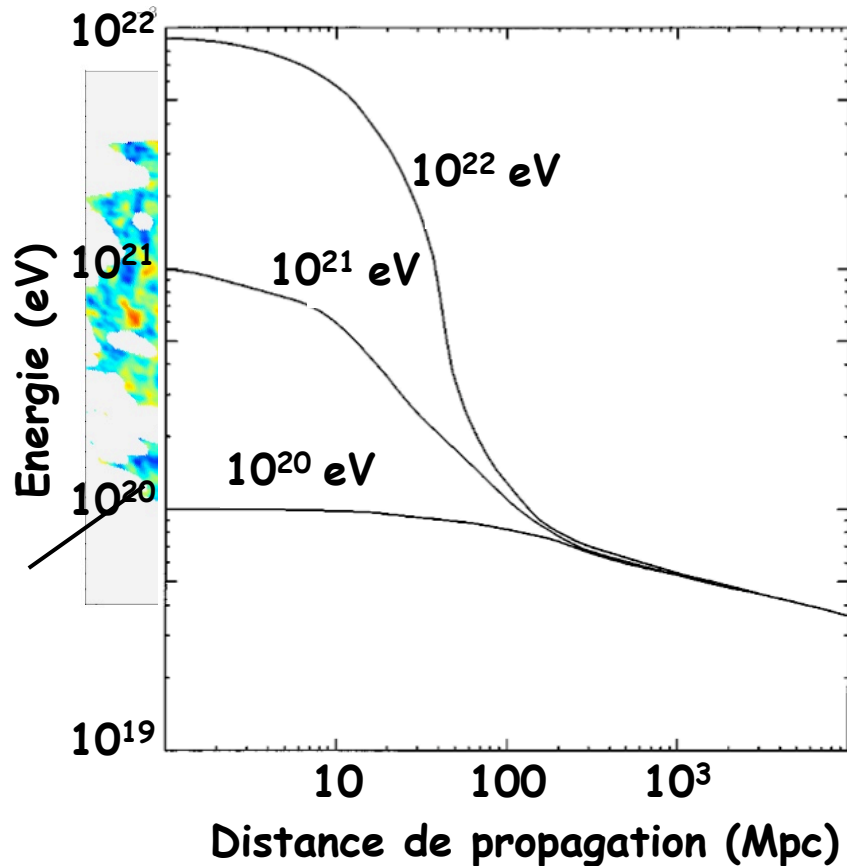
A background image of a starry night sky with numerous stars of various colors (blue, white, orange) and some nebulae. The text 'Auger: quels résultats?' is written in a bright yellow, bold, sans-serif font, centered on the image.

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)

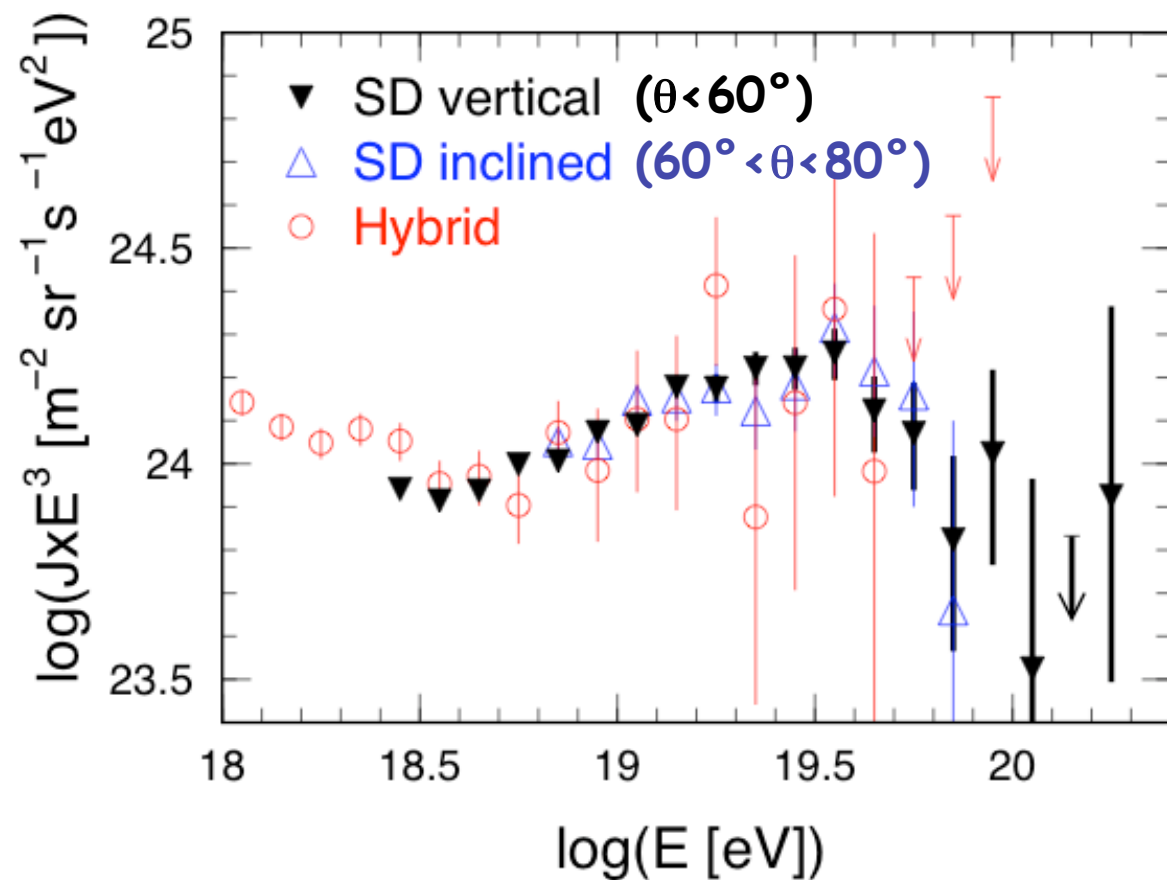
# AUGER - spectre UHE

3 lots indépendants

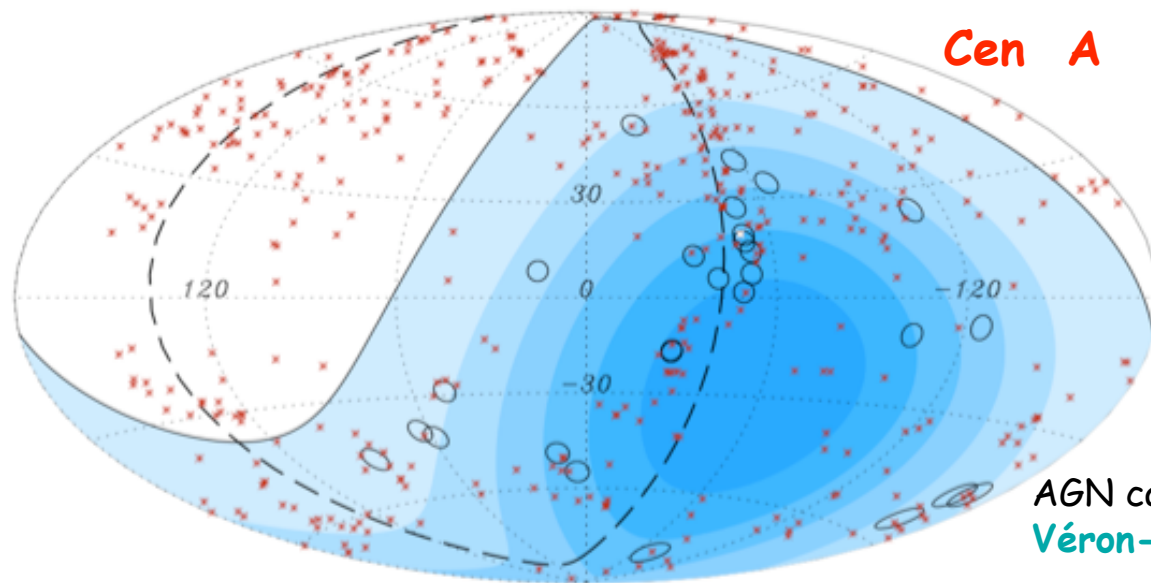
Présence de  
coupure GZK

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  
 correlation des UHECR  
 avec sources astronomiques

... mais non confirmés ...

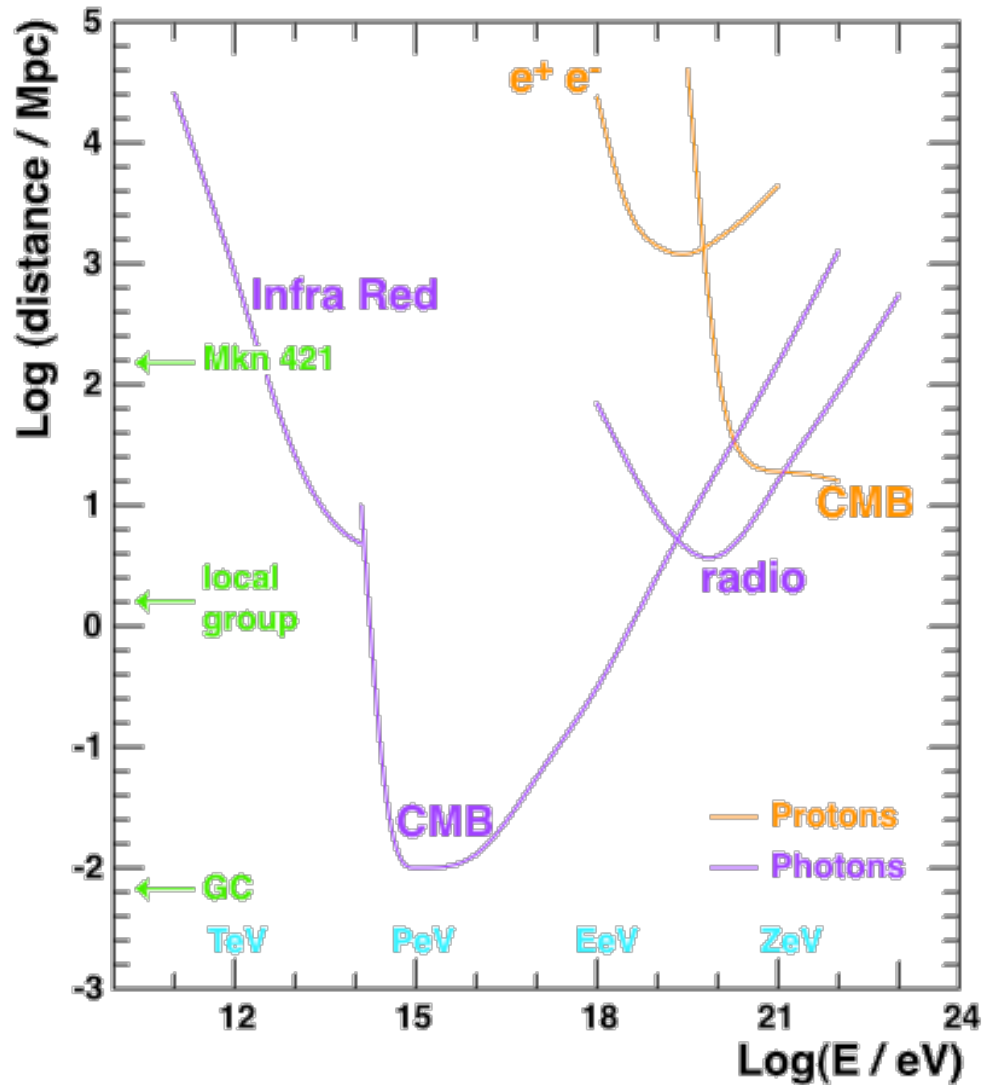
# autres messagers...

*particules chargées  
protons, noyaux*

**Confirmations indépendantes?**

*photons  
de haute  
énergie*

# « Horizon » Gamma



coupure GZK

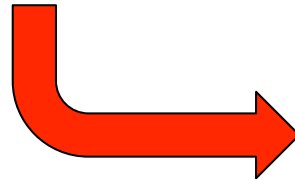
Absence  
de sources  
extragalactiques au TeV

# autres messagers...

*particules chargées  
protons, noyaux*

Confirmations indépendantes?

Autres preuves, autre approche



**autres  
messagers**

*photons  
de haute  
énergie*

*ondes gravitationnelles*

*neutrinos*