

# Energie Extrême et Rayons Cosmiques

Corinne Bérat

Laboratoire de Physique Subatomique et  
de Cosmologie, Grenoble

◆ Qu'appelle-t'on « énergie extrême » ?

◆ L'histoire des rayons cosmiques


◆ Les rayons cosmiques

◆ Les grandes gerbes atmosphériques

◆ Les rayons cosmiques aux énergies extrêmes

◆ Origine et propagation des rayons cosmiques aux énergies extrêmes

◆ Le projet EUSO



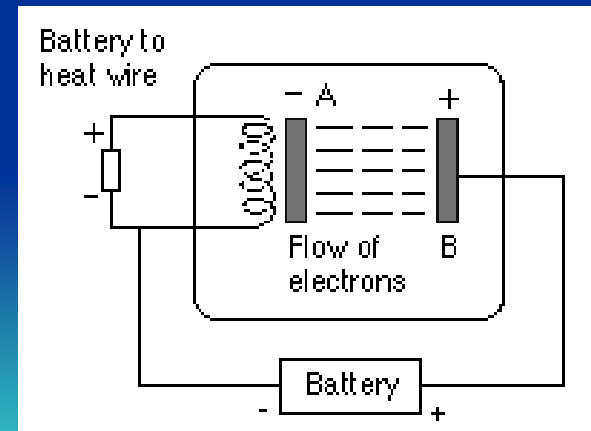
**Qu'appelle-t'on  
Energie Extrême ?**

## Energie et infiniment petit

- ◆ Exprimée en **Joule** dans le domaine macroscopique
- ◆ Energie = force (N) par longueur (m)
- ◆ Exprimée en **électron-Volt (eV)** dans le domaine des particules
  - L'électron-Volt (eV) est l'énergie acquise par un électron qui passe, dans le vide, d'un point à un autre ayant une différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

0,000 000 000 000 000 000 16 J



## eV, keV, MeV... ZeV

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

### Besoin d'autres unités !

- o 1 000 eV = 1 keV
- o 1 000 000 eV = 1 MeV
- o 1 000 000 000 eV = 1 GeV
- o 1 000 000 000 000 eV = 1 TeV
- o  $10^{15}$  eV = 1 PeV
- o  $10^{18}$  eV = 1 EeV
- o  $10^{21}$  eV = 1 ZeV

## Energie des particules dans la nature

### ◆ 0,03 eV

- énergie d'une molécule d'oxygène ou d'azote dans l'air

### ◆ 0,67 eV

- énergie nécessaire à un proton ou un neutron pour échapper à l'attraction terrestre

### ◆ 1000 - 15 000 eV , 200 000 eV

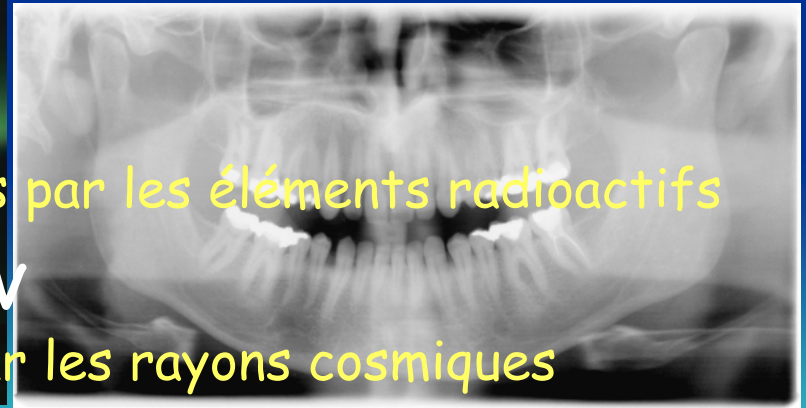
- énergie typique d'un électron dans une aurore polaire
- ...d'un X d'une radio dentaire !

### ◆ 1 - 10 MeV

- énergie des particules émises par les éléments radioactifs

### ◆ 1 MeV - 100 000 000 000 GeV

- Domaine d'énergie couvert par les rayons cosmiques



## Energie des particules dans les accélérateurs (exemple du CERN)

- ◆ **ISR : Intersecting Storage Rings**
  - le premier collisionneur proton-proton à être mis en service (1971) fournissant au maximum 31 GeV par faisceau.
- ◆ **SPS : Super Proton Synchrotron**
  - Synchrotron à protons, atteignant des énergies de 450 GeV.
- ◆ **LEP : Large Electron-Positron collider**
  - Faisceaux atteignant 100 GeV, collisions  $e^+e^-$  à 200 GeV
- ◆ **LHC : Large Hadron Collider**
  - En construction, pour obtenir des collisions proton-proton à une énergie de 14 000 GeV (14 TeV).

## Energie extrême

- ◆ Au cours des décennies écoulées, une demi-douzaine de détecteurs ont observé une vingtaine de rayons cosmiques dont les énergies atteignent ou dépassent

$$10^{20} \text{ eV} = 100\,000\,000\,000 \text{ GeV}$$

- correspond à plusieurs dizaines de joules !
  - énergie macroscopique exceptionnelle pour une particule microscopique
  - Loin devant l'énergie du futur LHC :  $7 \cdot 10^{12}$  eV par faisceau
- ◆ Extrêmement énergétiques et ... extrêmement rares !
  - ◆ Selon nos connaissances présentes, aucun mécanisme astrophysique connu n'est capable d'accélérer des particules à de telles énergies.



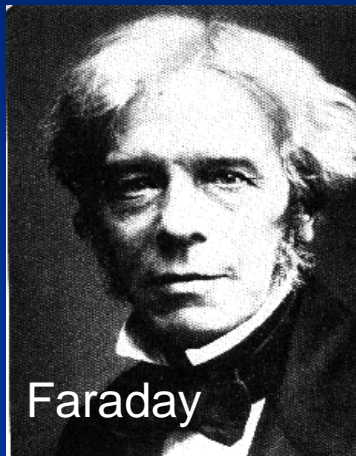


**L'histoire des  
rayons cosmiques**

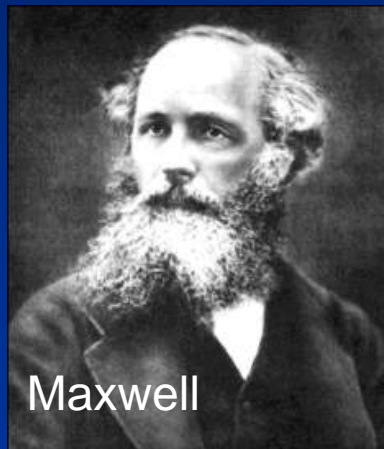
## Contexte scientifique

### ◆ au XIXe siècle

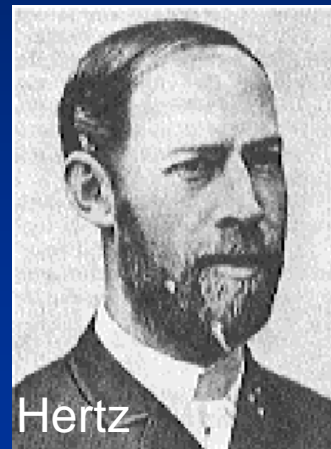
- Unification électricité et magnétisme
- Identification de la nature de la lumière (onde EM)



Faraday



Maxwell



Hertz

- Matière : théorie atomique primitive (noyau et électrons inconnus)

### ◆ À la fin du XIXe siècle, nouveaux rayonnements

- Rayons cathodiques, rayons X, rayonnement radioactif, rayons cosmiques

## Rayonnements : lumière ou matière ?

### ◆ Rayonnement cathodique

- des physiciens dont Crookes, Perrin et Thomson étudient le comportement des rayons cathodiques en présence d'aimants et de champs électriques  $\Rightarrow$  les rayons sont déviés
- J. J. Thomson conclut que ces rayons sont des particules négatives qu'il appelle «**électrons**» (1898)

### ◆ Rayons X

- Découverts par Röntgen en 1895
- Nature incertaine jusqu'à Von Laue (1912)

### ◆ Radioactivité

- Découverte par Becquerel en 1896 (uranium)
- 1898-1900 P. et M. Curie, E. Rutherford et P. Villard comprennent qu'il y a plusieurs types de radioactivité ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

## Découverte des rayons cosmiques

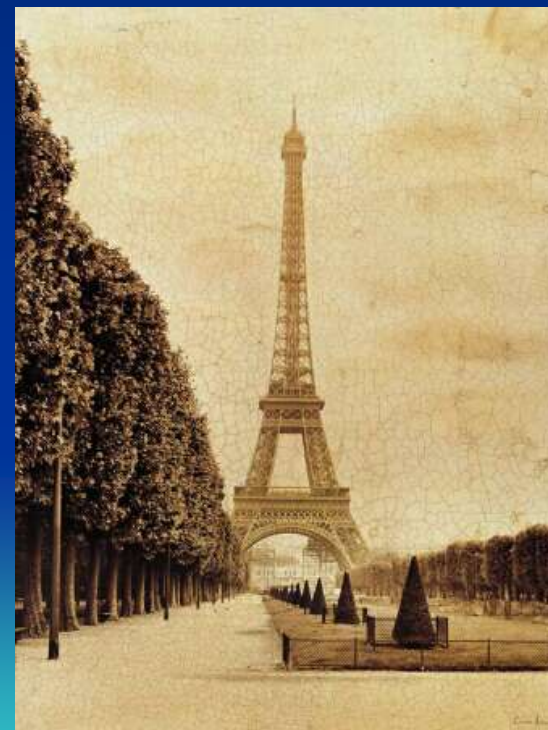
### ◆ 1901

- Wilson remarque que les électroscopes se déchargent tout seuls sous terre aussi bien que sur terre, c'est la radioactivité naturelle (Rutherford), effet dominant.

### ◆ 1910

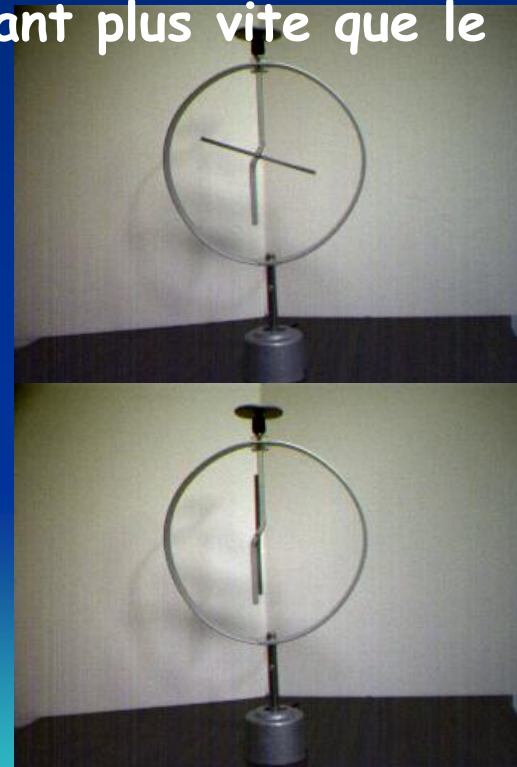
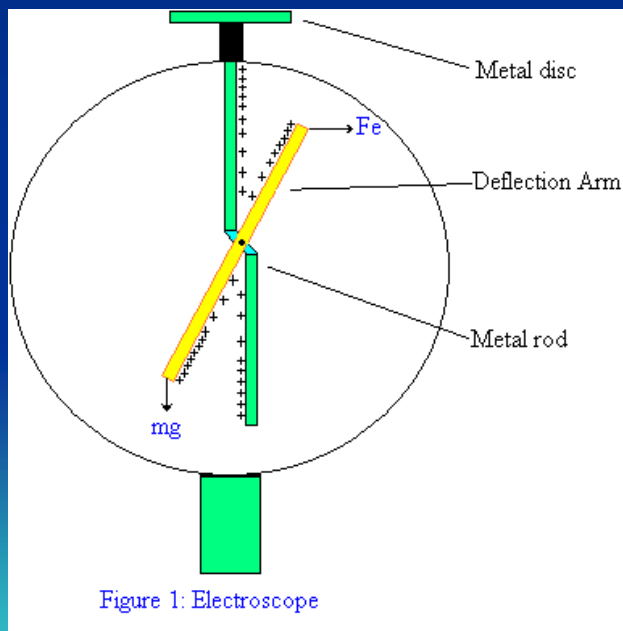
- Le père Wulf fait des études en montant à la tour Eiffel : l'électroscope se décharge moins vite, mais pas autant que ce qui était prévu (en 80 m d'épaisseur d'atmosphère, il n'y a que la moitié du rayonnement qui passe.)

→ • Donc « ça » vient d'au dessus...



## L'électroscope

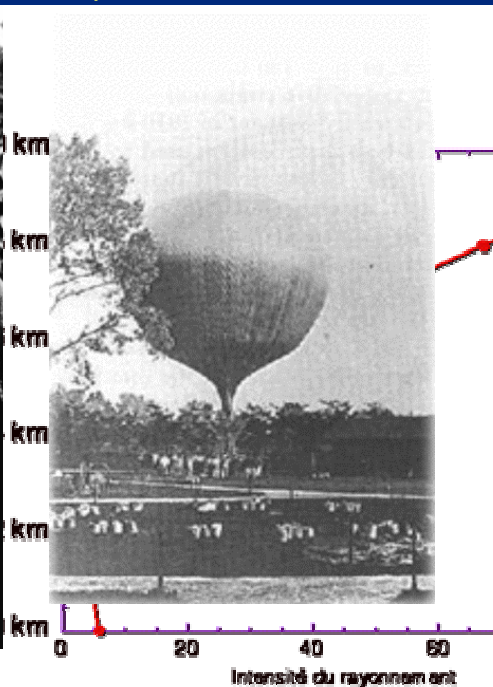
- ◆ Électroscope chargé  $\Rightarrow$  les « bras » se repoussent
- ◆ Soumis à un rayonnement énergétique, l'air se trouve partiellement ionisé et les charges sont évacuées
- ◆ L'électroscope se décharge d'autant plus vite que le rayonnement est plus intense



## Découverte des rayons cosmiques

✦ 1912 :

- Victor Hess monte en ballon à 5350 m : découverte du rayonnement cosmique.



Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Strahlung.

✦ 1914 :

- Kolhörster monte à 9 Km

## Nature des rayons cosmiques ?

### ◆ 1925 :

- Robert Millikan pense que les rayons de Hess sont des rayons gamma  $\Rightarrow$  « rayons cosmiques »

### ◆ 1929 :

- W. Bothe et W. Kohlörster, utilisant des compteurs Geiger montrent que les rayons de Hess sont chargés  $\Rightarrow$  matière !!  
mais Millikan est prix Nobel et ne veut pas en démordre...
- Skobeltzyn montre aussi que c'est de la matière grâce aux chambres à brouillard  
mais rien n'y fait...

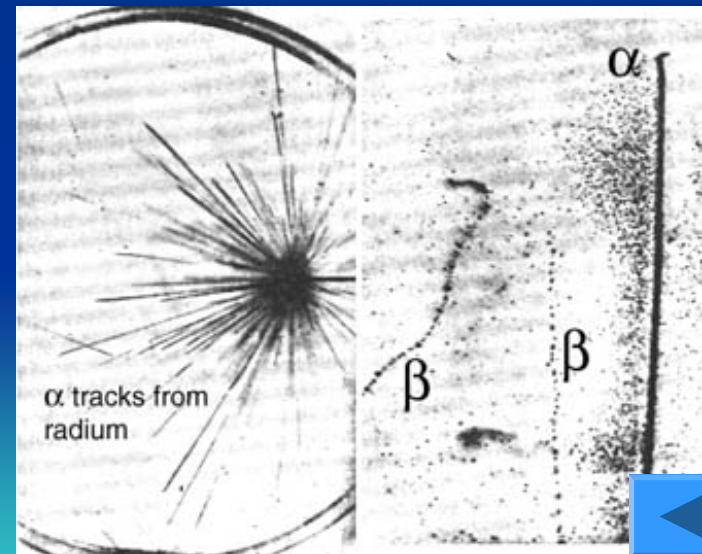
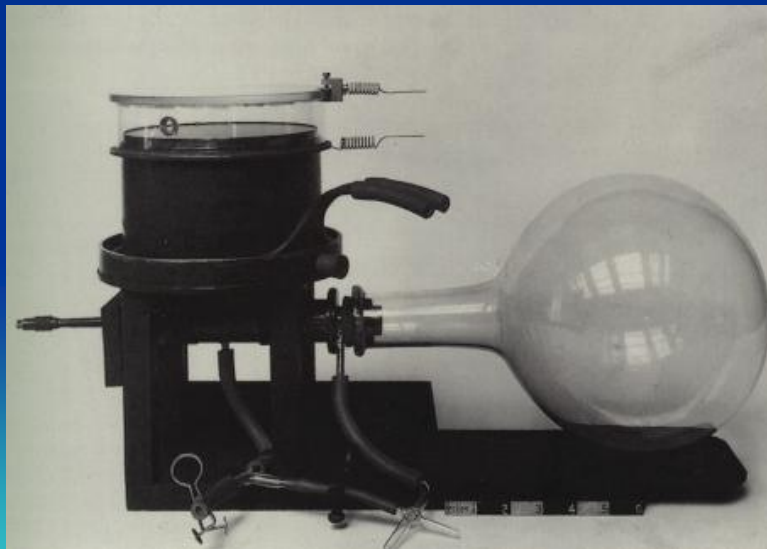
### ◆ 1930 :

- Compton (un autre prix Nobel) fait rendre raison à Millikan, grâce à l'effet de latitude (effet du champ magnétique terrestre) : il envoie 60 chercheurs dans le monde le vérifier...



## Chambre à brouillard de Wilson

- Un gradient de température est établi entre le haut et le bas d'une enceinte isolée thermiquement et remplie d'un mélange d'air et de vapeur d'alcool.
- Avant de se condenser sur le fond, les vapeurs d'alcool traversent une zone de sursaturation. Dans cette zone, les ions produits par les interactions des particules ionisantes (électrons, positrons, alpha, pions, etc...) avec le gaz se comportent comme des germes de condensation le long des trajectoires.
- Par l'analyse des trajectoires (longueur, densité, profil,..) on peut sélectionner les différents types de particules et caractériser leur comportement par leurs interactions avec la matière.

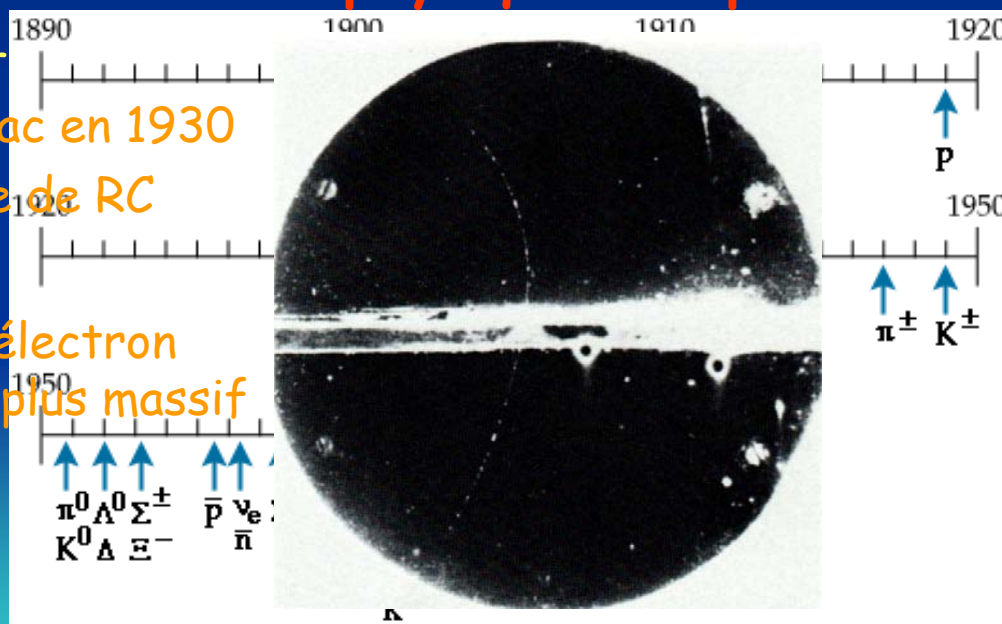




## Découverte de nouvelles particules

- ♦ Au sol, on ne voit que les particules secondaires, issues de l'interaction des rayons cosmiques (RC) avec l'atmosphère.
- ♦ Les RC ont ainsi permis la découverte de nombreuses particules ⇒ **naissance de la physique des particules**

- 1932 : positon  $e^+$ 
  - Prédit par Dirac en 1930
  - dans une trace de RC
- 1936 : muon  $\mu$ 
  - Semblable à l'électron mais 200 fois plus massif
- 1947 : pion  $\pi$ 
  - au pic du Midi

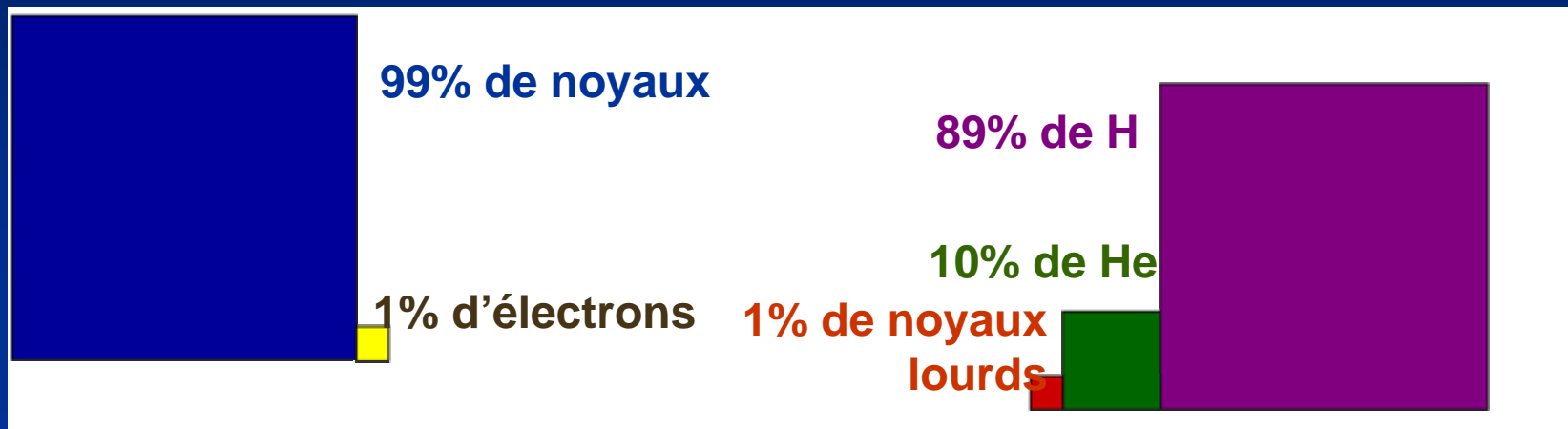


# Les rayons cosmiques



## Nature des rayons cosmiques

- ◆ particules ordinaires : noyaux, électrons, photons, neutrinos
- ◆ **Composition** : ~ composition de la matière de l'univers



- ◆ Les rayonnements cosmiques représentent 1/3 de la radioactivité naturelle totale
- ◆ Cas des neutrinos :
  - 100000 milliards de  $\nu$  traversent votre corps chaque seconde
  - Un seul arrêté par votre corps pendant toute votre vie

## Rayons cosmiques primaires et secondaires

### ◆ Primaire

- toute particule qui arrive sur terre venant de l'espace

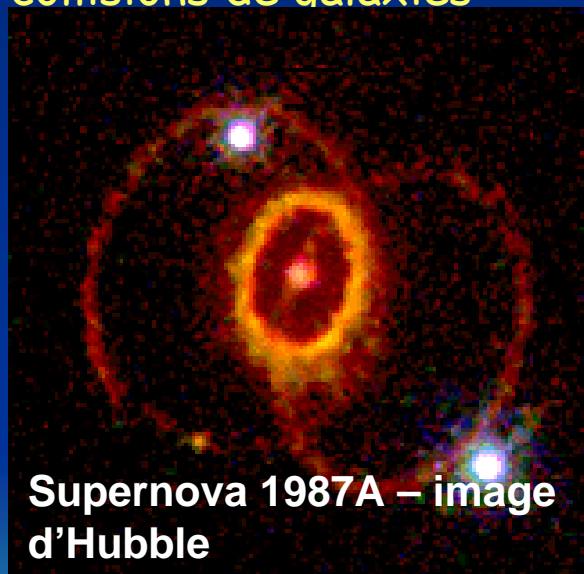
### ◆ Secondaire

- Particules détectées sur terre = principalement produits d'interaction de rayons cosmiques primaires avec la partie supérieure de l'atmosphère ⇨ appelés « secondaires »
  - Essentiellement des muons, des électrons, des photons
- Les rayons cosmiques secondaires sont
  - des particules
  - venant des couches supérieures de l'atmosphère

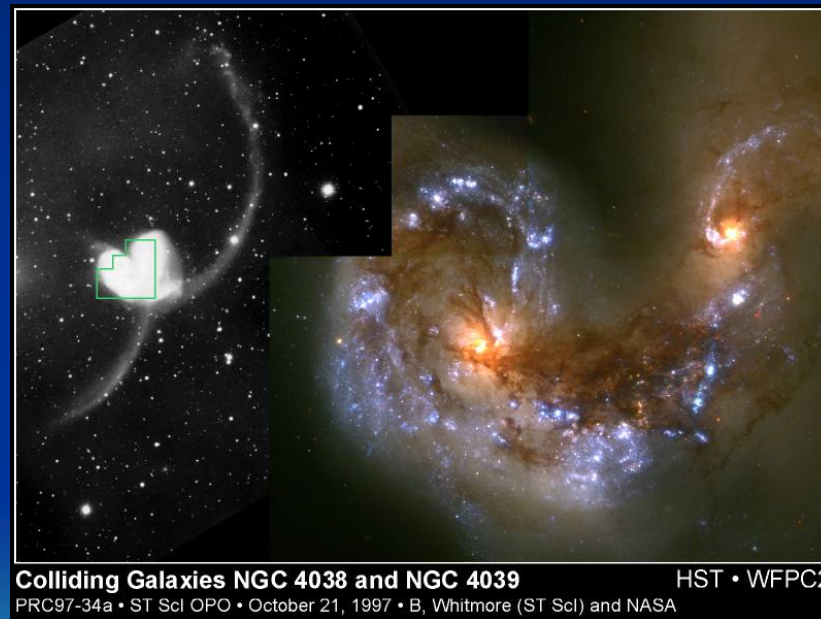
### ◆ Les RC secondaires sont produits par de véritables rayons cosmiques ! D'où viennent-ils ?

## Origine des rayons cosmiques

- ◆ Particules produites par des mécanismes astrophysiques plus ou moins violents
  - réactions de fusion au coeur des étoiles
  - supernovae (effondrement d'étoiles à bout de « carburant »)
  - collisions de galaxies



Supernova 1987A – image d'Hubble



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039 HST • WFPC2  
PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B. Whitmore (ST ScI) and NASA

- phénomènes exceptionnels provoqués par des trous noirs se trouvant au centre de certaines galaxies (noyaux actifs)

## Propagation des rayons cosmiques

- ◆ L'origine des cosmiques chargés reste encore hypothétique
  - Impossible de repérer la source d'un cosmique chargé du fait qu'il a traversé le champ magnétique de la galaxie, voire le champ magnétique intergalactique !
- ◆ Champs magnétiques
  - galactiques -> estimations
    - De l'ordre du microgauss
    - D'intensité variable selon la position
  - Intergalactiques  $\Rightarrow$  Incertitude bien plus grande
    - De l'ordre du nanoGauss (?)

## Propagation des rayons cosmiques

### ◆ Rayon gyromagnétique

- $R_{\text{gyro}} = E/B$  : rayon du cercle décrit par la particule d'énergie  $E$ , en négligeant le rayonnement de freinage, dans un champ uniforme  $B$

### ◆ Angle d'inflexion

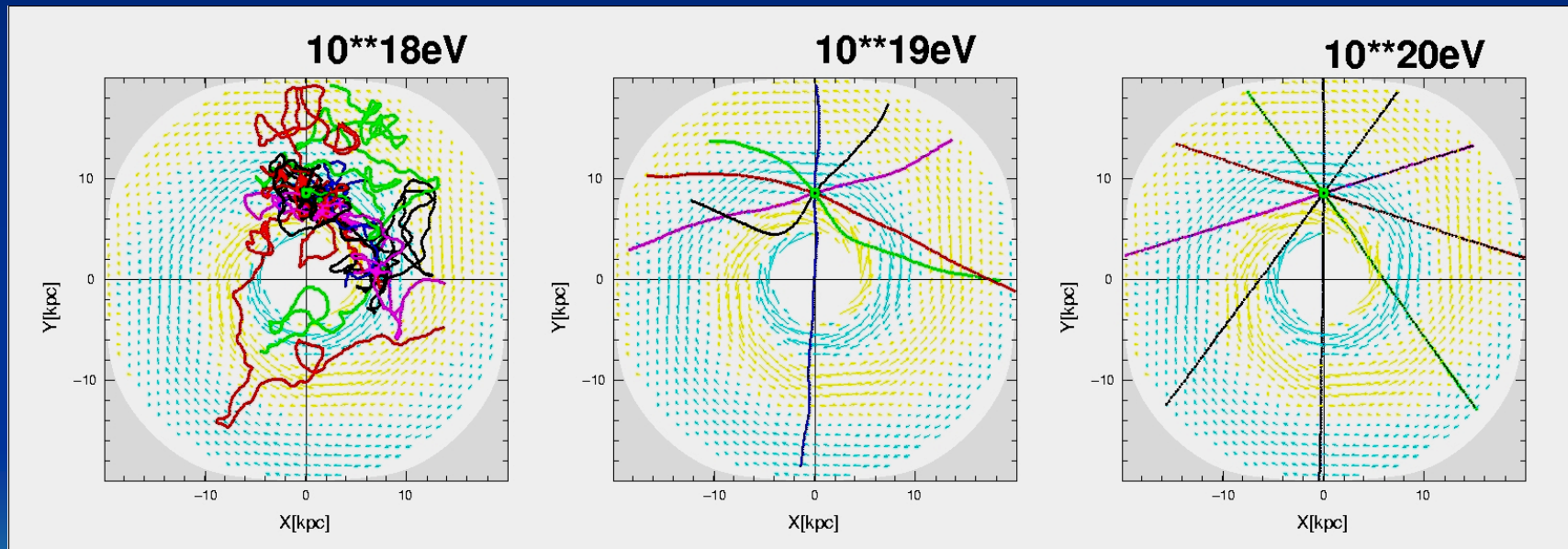
- Après avoir parcouru une distance  $d$  perpendiculairement au champ, la particule a infléchi sa trajectoire d'un angle  $\theta = d/R_{\text{gyro}} = dB/E$ .
- En unités appropriées, ceci donne :

$$\theta^{\circ} = \frac{d(\text{Mpc})B(\text{nG})}{E/(3 \cdot 10^{19} \text{ eV})} = \frac{d(\text{kpc})B(\mu\text{G})}{E/(3 \cdot 10^{19} \text{ eV})}$$

1 pc (parsec)  $\sim 3 \cdot 10^{13}$  km ;  $\emptyset$  de notre galaxie : 25 kpc

## Propagation des rayons cosmiques

angle de déflexion inférieur à  $1^\circ$  pour une énergie  
 $\sim 10^{20}$  eV

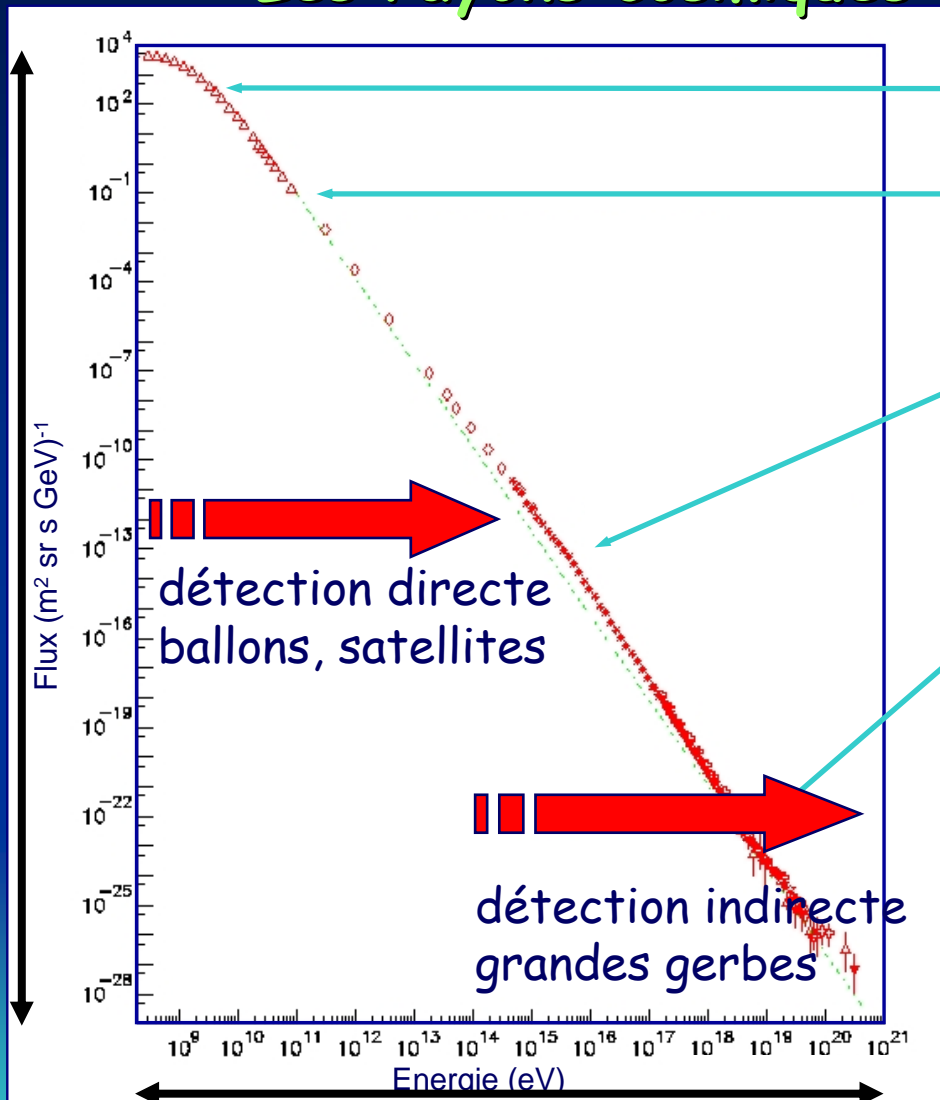




## Des messagers fort utiles

- ◆ Particules cosmiques transportant avec elles des informations (leur énergie, direction, composition chimique etc...)
  - ⇒ mécanismes qui sont à leur origine.
- ◆ Seul moyen dont nous disposons pour comprendre ces derniers !
  - l'astrophysique échappe complètement au contrôle de l'expérimentateur : les phénomènes qu'il veut étudier ne lui sont accessibles qu'indirectement.
  - Seuls "messagers" permettant d'étudier les phénomènes astrophysiques à distance :
    - ondes émises par les objets de l'étude (étoiles, galaxies etc...)
    - les rayons cosmiques.

## Les rayons cosmiques aujourd'hui



origine solaire  
Le flux mesuré s'étend sur  
32 ordres de grandeurs  
1 particule par  $\text{m}^2$  par sec  
De la taille d'un cheveu à 10  
milliards d'année lumière  
Le « genou »  
1 particule par  $\text{m}^2$  par an

La « cheville »  
1 particule par  $\text{km}^2$  par an

L'énergie mesurée s'étend sur  
12 ordres de grandeur  
De la taille d'un cheveu à  
100.000 km  
Flux :  
4 RC /  $\text{cm}^2/\text{s} \sim 1 \text{ kg}/\text{an}$ ,  
<< 40 000 tonnes/an (météorites).

- ◆ Qu'appelle-t'on « énergie extrême » ?
- ◆ L'histoire des rayons cosmiques
- ◆ Les rayons cosmiques

- ◆ Les grandes gerbes atmosphériques
- ◆ Les rayons cosmiques aux énergies extrêmes

- ◆ Origine et propagation des rayons cosmiques aux énergies extrêmes
- ◆ Le projet EUSO