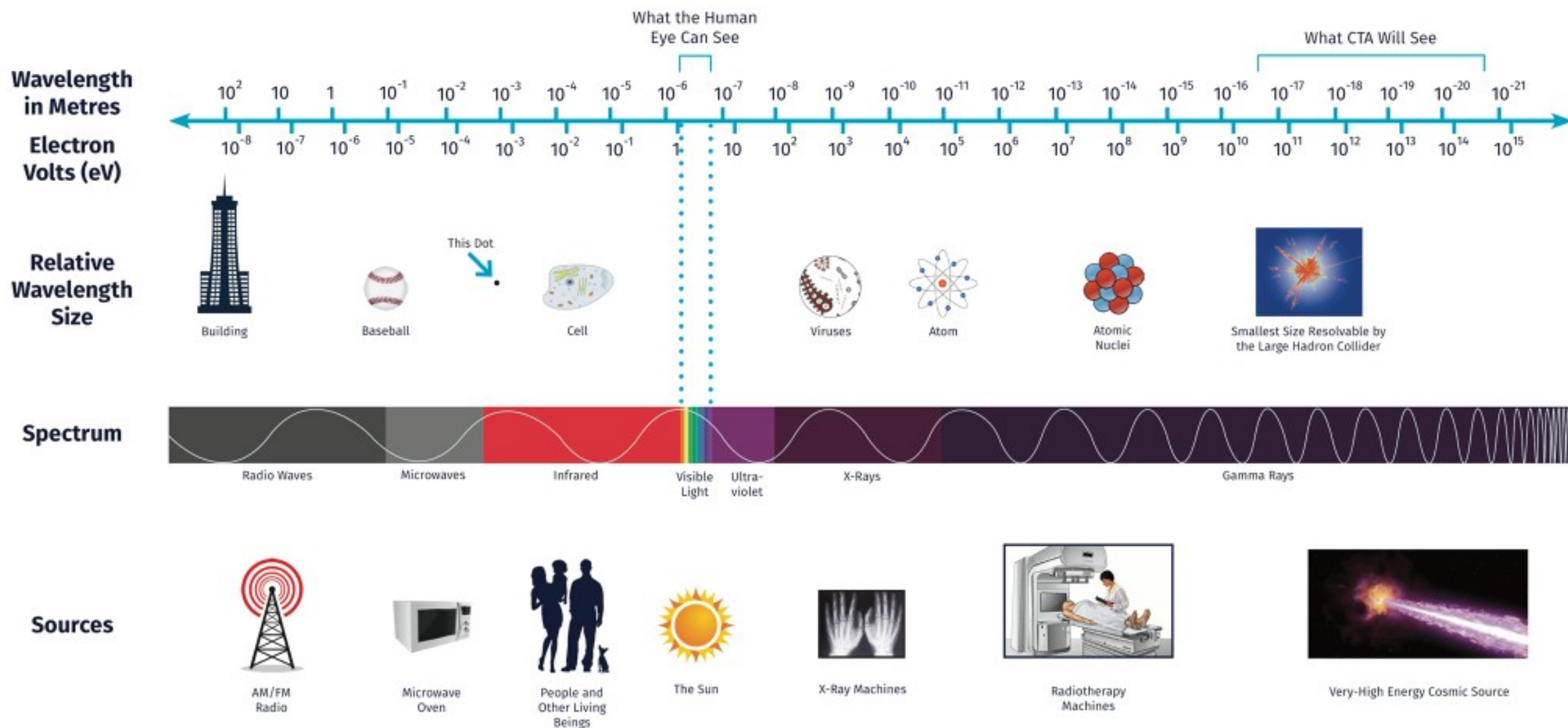


# Accélération de particule et production de gamma

Module Recherche en physique moderne RECH 601

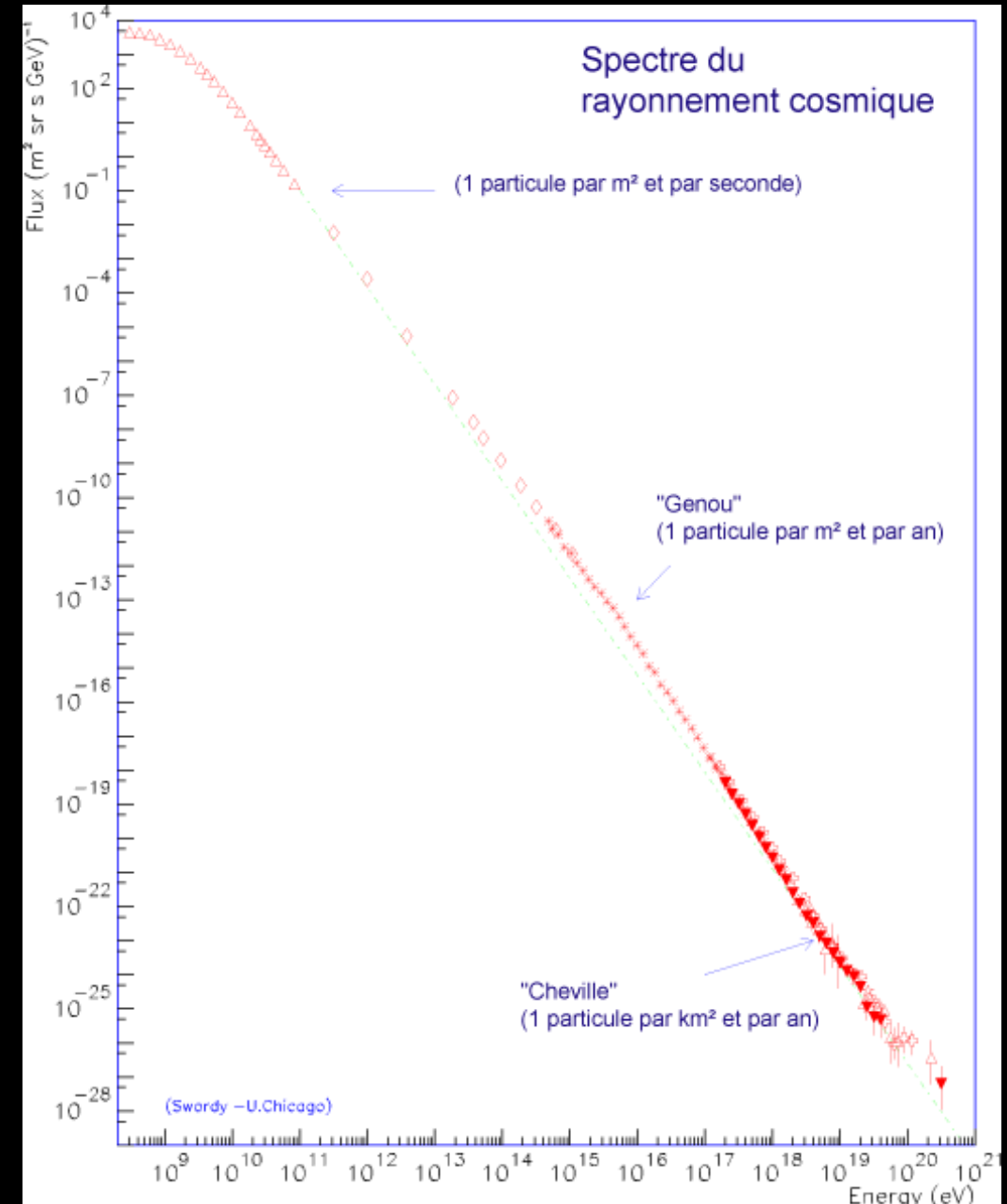
Mathieu De Bony ([lavergne@lapp.in2p3.fr](mailto:lavergne@lapp.in2p3.fr))

# The Electromagnetic Spectrum



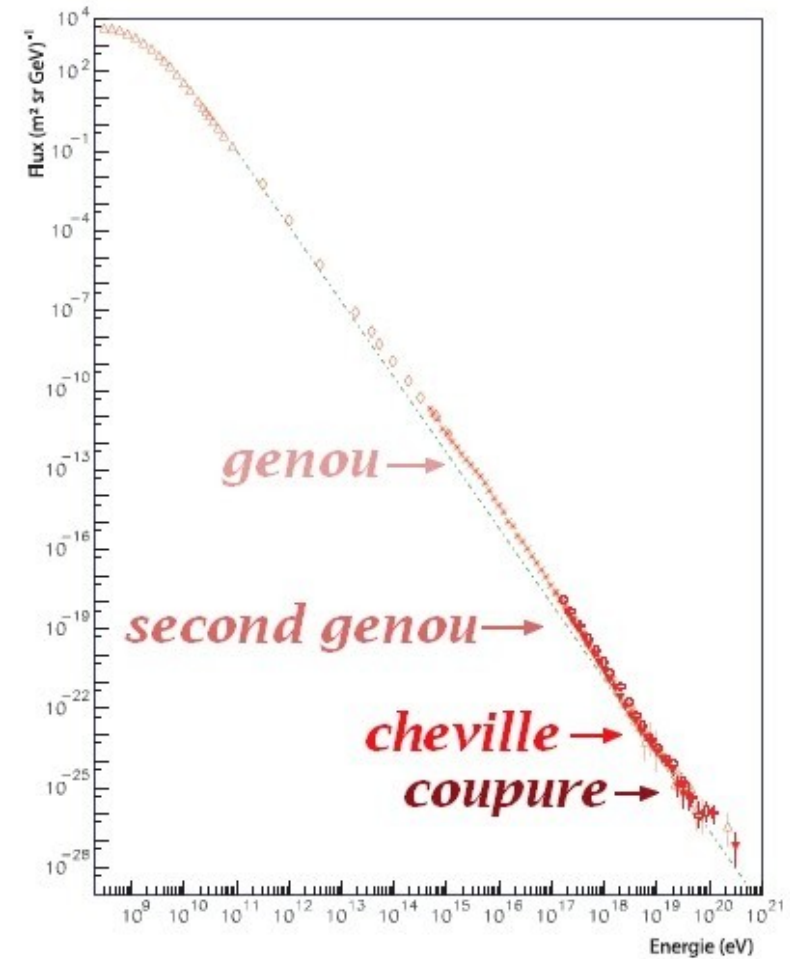
# Rayons Cosmiques

- Presque linéarité sur 12 ordre de grandeur en énergie et 32 en flux
- Questions principales en astrophysique
  - Origine ?
  - Propagation?
  - Composition ?



# Rayons Cosmiques

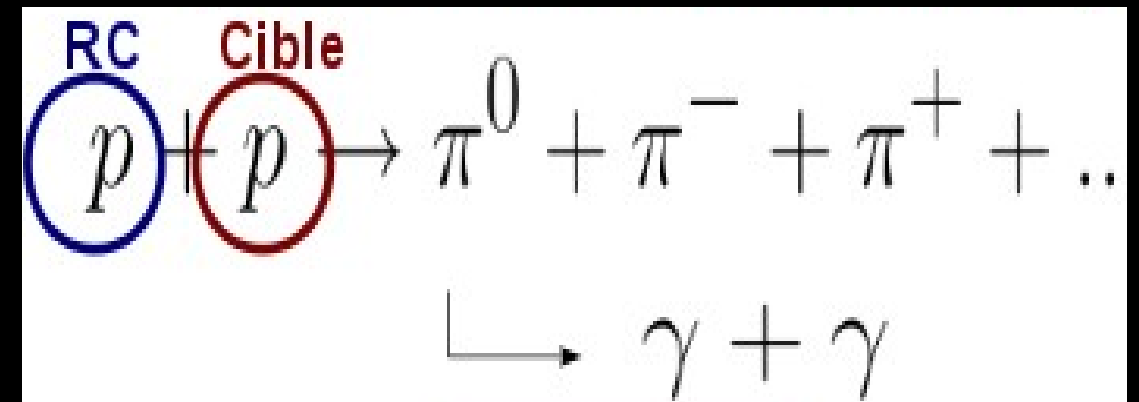
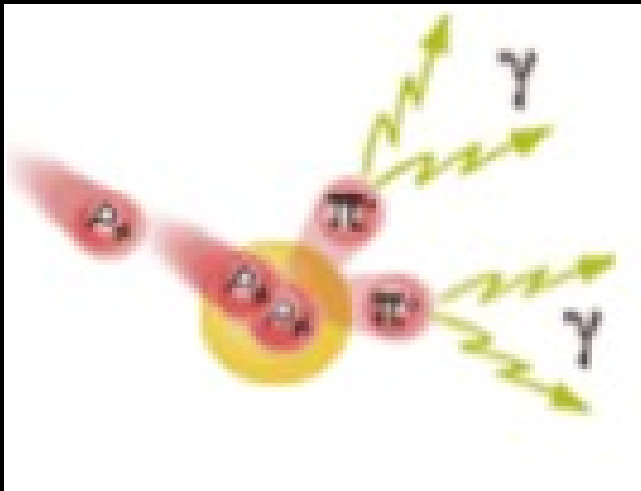
- Origine des particules chargés?
- Avant genou : origine galactique
- Cheville : extragalactique



Spectre en énergie des rayons cosmiques.

# Processus d'émission des Gamma

- Décroissance de  $\pi^0$

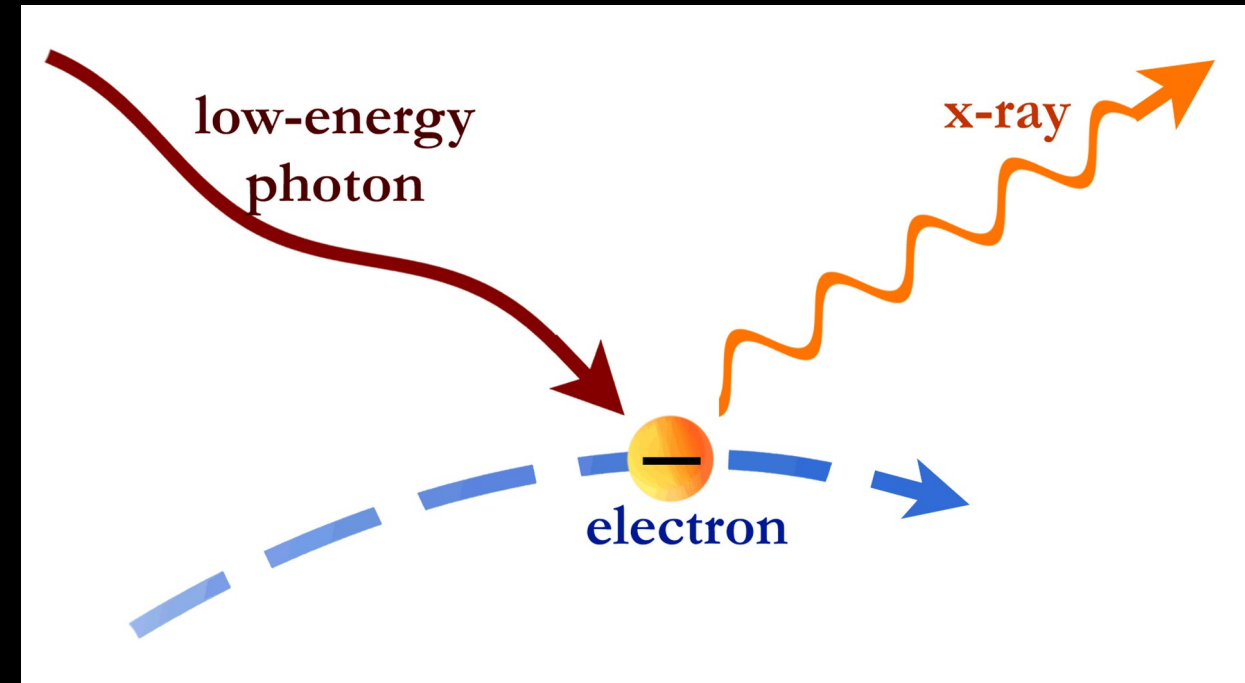


Des protons vont interagir et produire de nombreuses nouvelles particules

# Processus d'émission

- Compton inverse

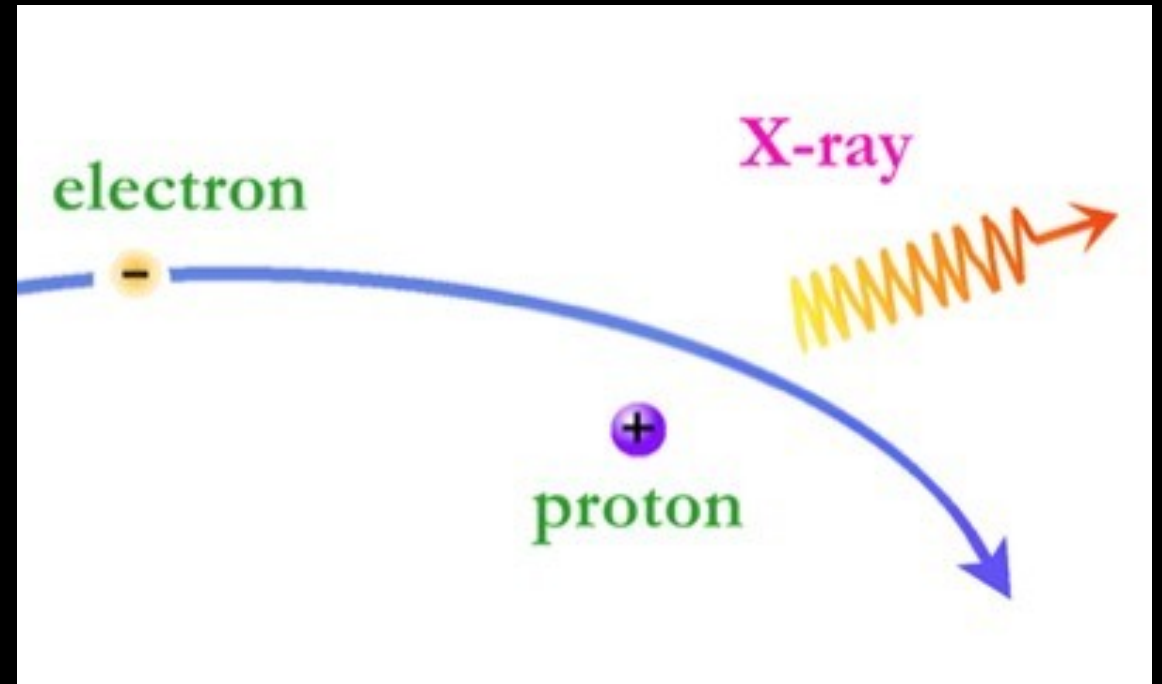
Photon va rentrer en contact avec un électron. L'électron va lui transmettre une partie de son énergie et le photon devient plus énergétique



# Processus d'émission

- Bremsstrahlung (ou rayonnement de freinage)

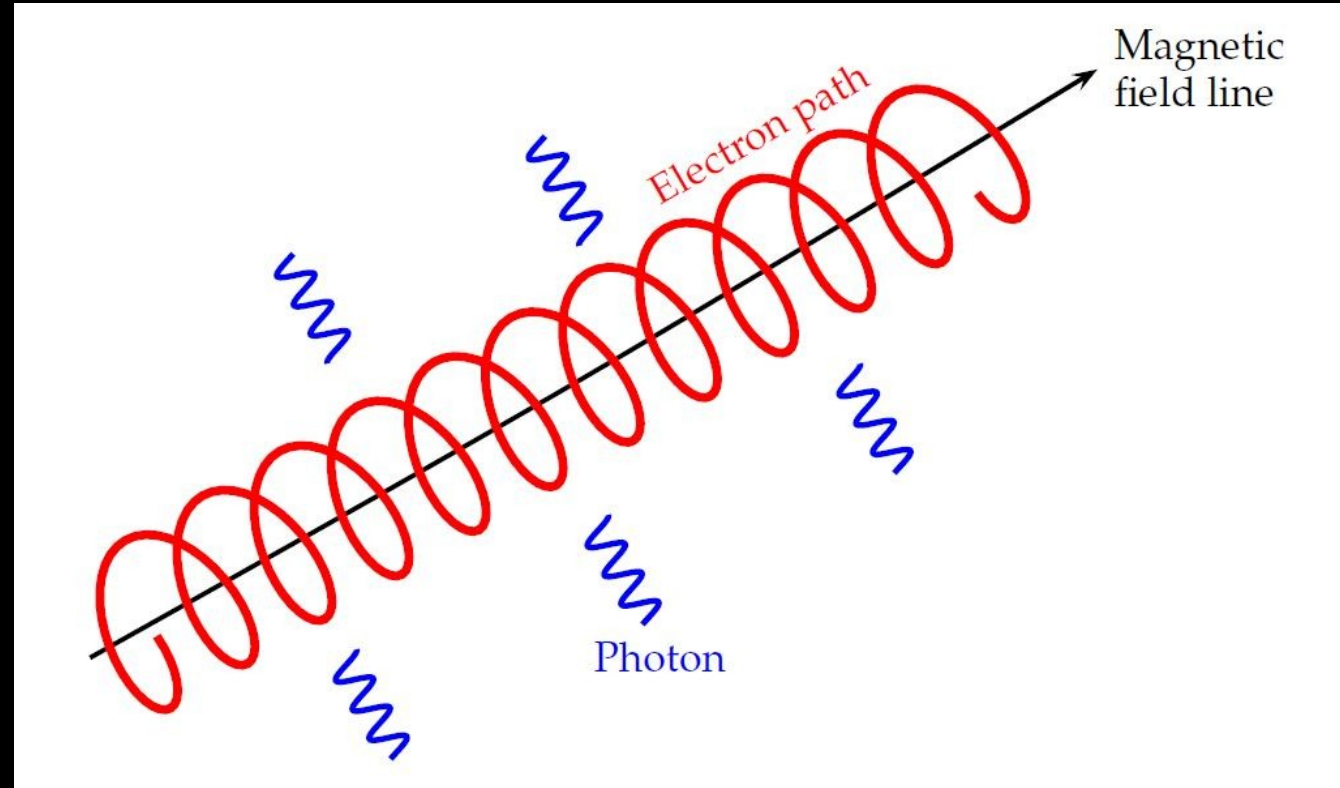
Une particule chargée qui bouge dans un champ électrique est ralentie. Cette perte d'énergie est émise sous forme de rayonnement



# Processus d'émission

- Synchrotron

Une particule qui bouge dans un champs électromagnétique va voir sa trajectoire changer et émettre un rayonnement Synchrotron.



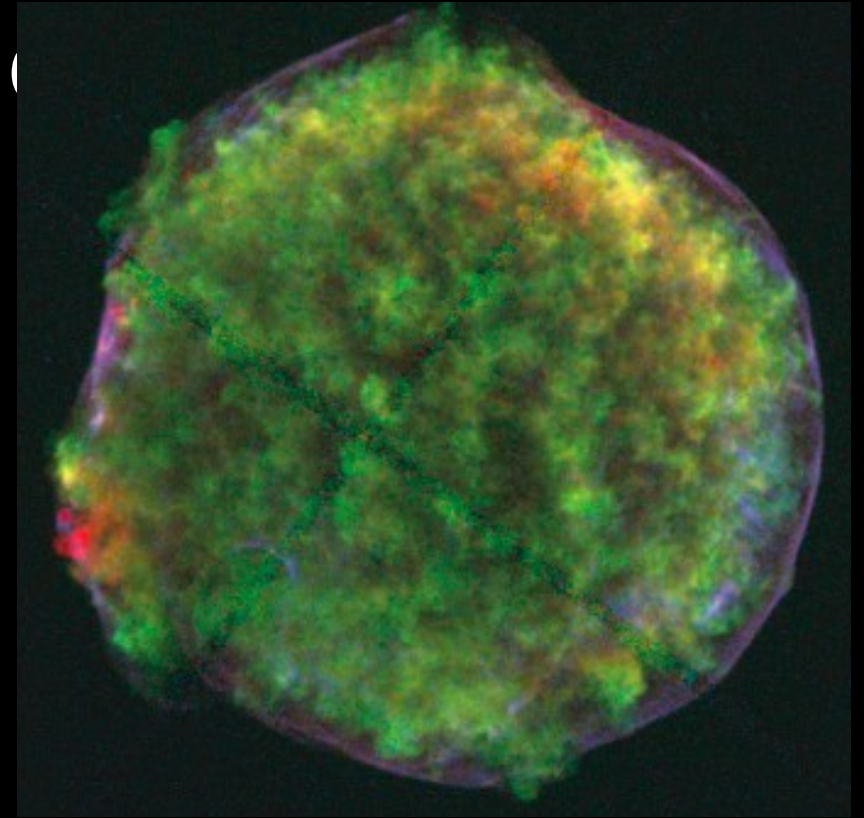


# Sources émettrices de rayonnements gamma

Sources galactiques	Sources extra-galactiques
<ul style="list-style-type: none"><li>• Restes de supenovae</li><li>• Pulsar</li><li>• Emission diffuse</li><li>...</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sursaut gamma</li><li>• Noyaux actifs de galaxie</li><li>...</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matière noire ?</li></ul>

# Les restes de supernova

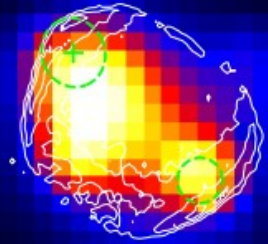
- Une à trois par siècle dans la Voie lactée.
- Tout ou partie de la matière stellaire (éjecta) est projetée à très grande vitesse (quelques 10 000 km/s) dans le milieu interstellaire.



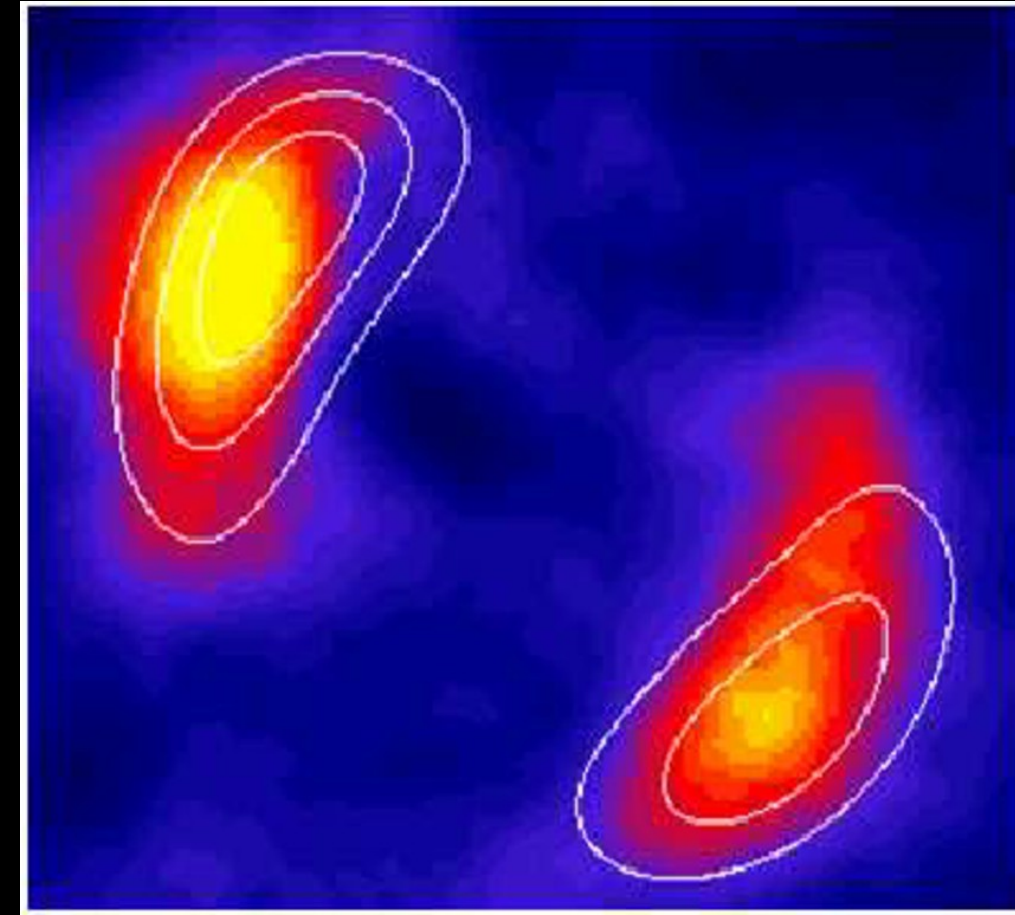
# Un exemple: SN 1006



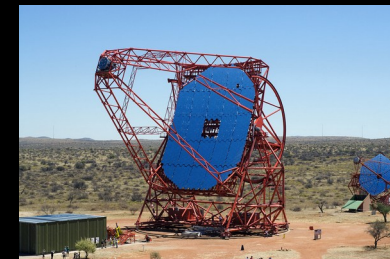
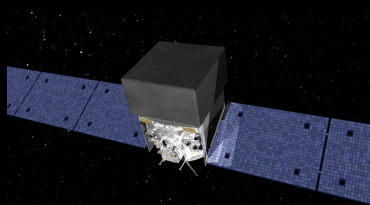
SN 100 observé en rayons X par Chandra.



SN 1006 observé en rayon gamma par Fermi

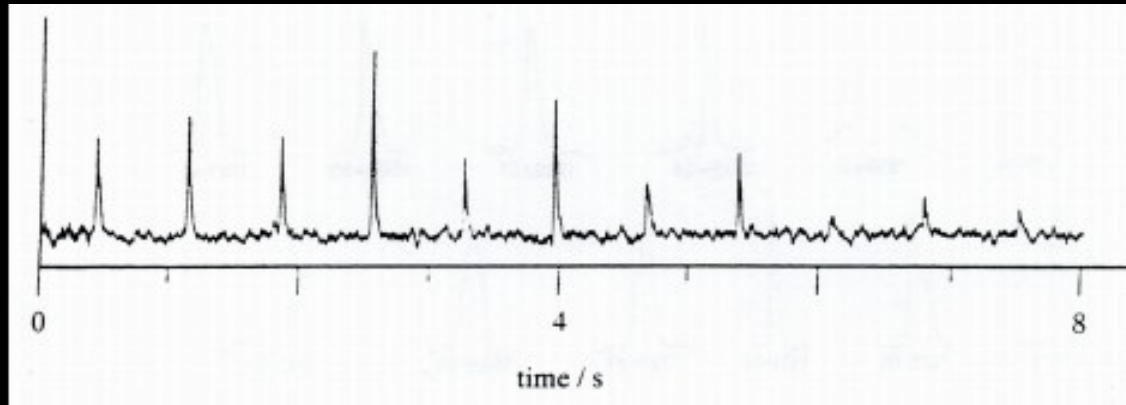


SN 1006 observé en rayon gamma par HESS



# Les pulsars: découverte

1967 : découverte des pulsars par Hewish & Bell



1968 : identification des pulsars comme des étoiles à neutrons en rotation rapide et fortement magnétisée (Gold)

1968 : découverte des pulsars du Crabe et de Vela : lien avec les supernovae



Jocelyn Bell



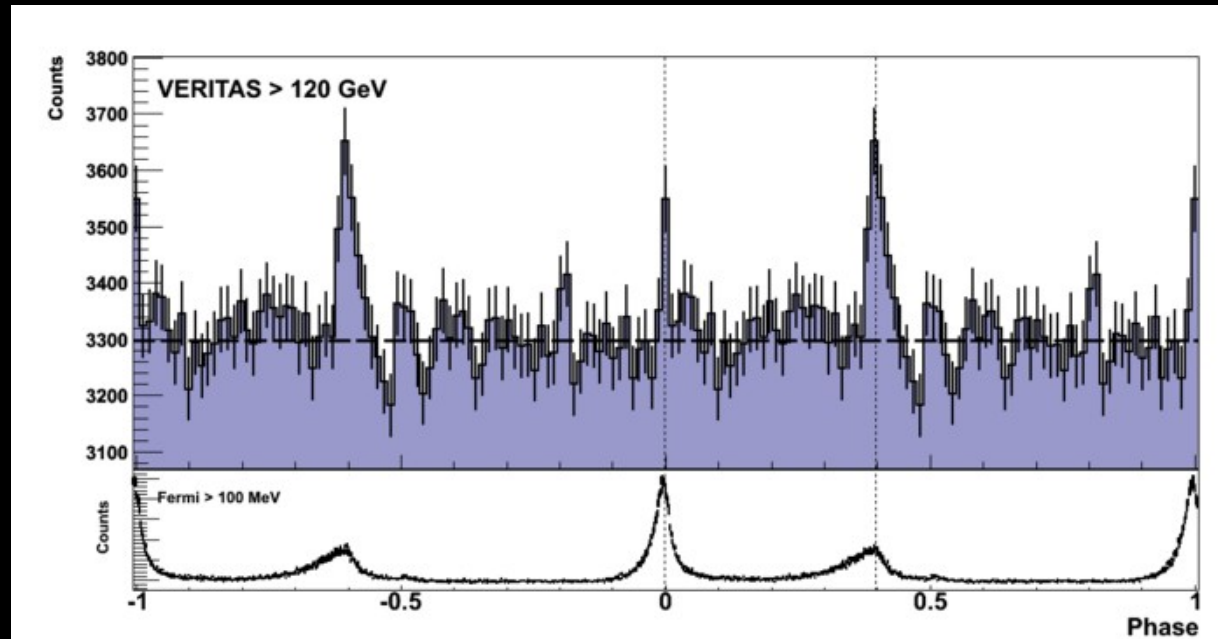
# Les pulsars

- Etoile à neutron (cadavre d'étoile) en rotation rapide qui émet de la matière à ses pôles magnétique.
- Les périodes des pulsars sont très brèves : la plus longue est de 4s, et la plus courte est celle du pulsar du Crabe : 0,033s.

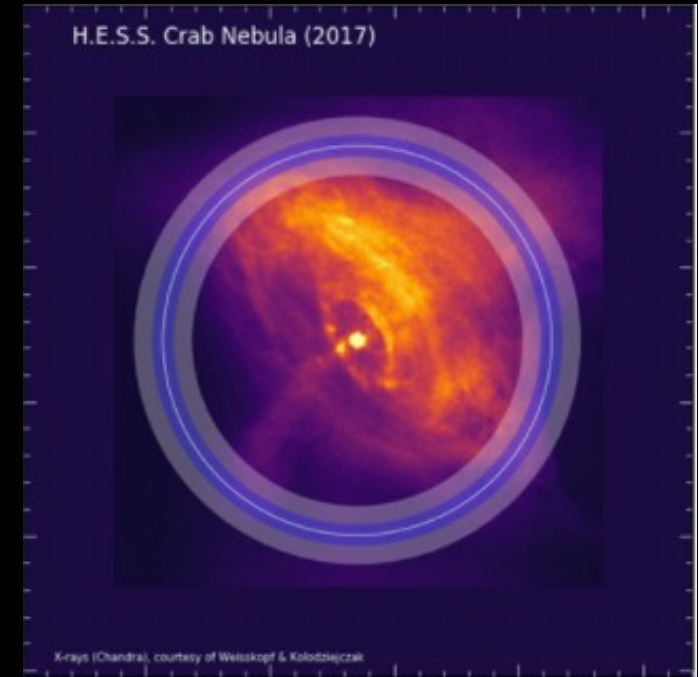


Pulsar du Crabe et sa nébuleuse

# Les pulsars en gamma



Pulsations du Crabe par VERITAS



Cercle bleu  
-> Emission Gamma du  
Pulsar du Crabe par HESS

# Les sursauts gamma

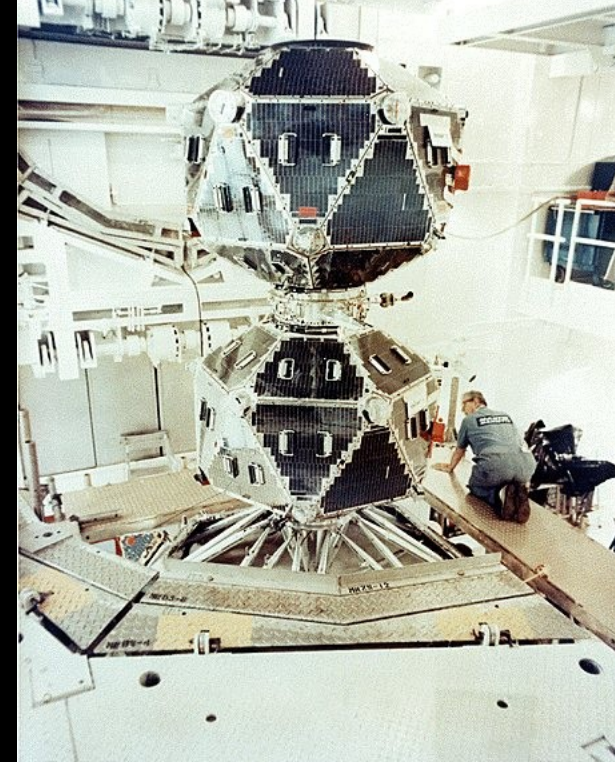
Découvert dans les Années 60 par les satellites VELA

But : surveiller l'émission gamma d'essais nucléaires

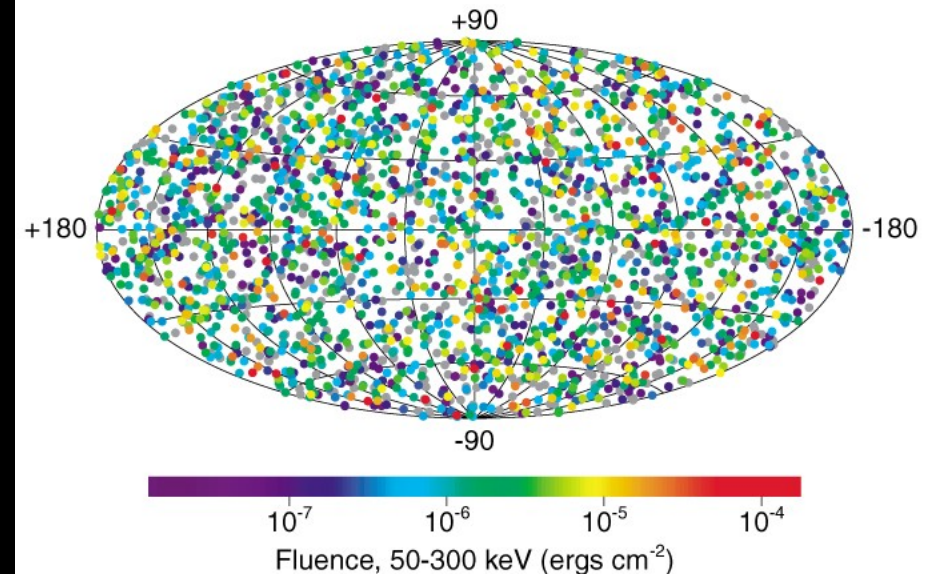
Les flash gamma proviennent de l'espace

déclassifiées en 1973

- Processus encore mal connu
- Flash très bref et intense de rayonnement à toutes les longueurs d'onde
- Emission très grande d'énergie

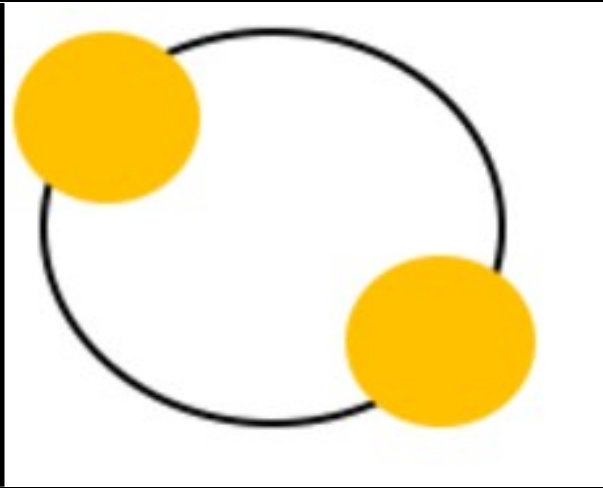


## 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

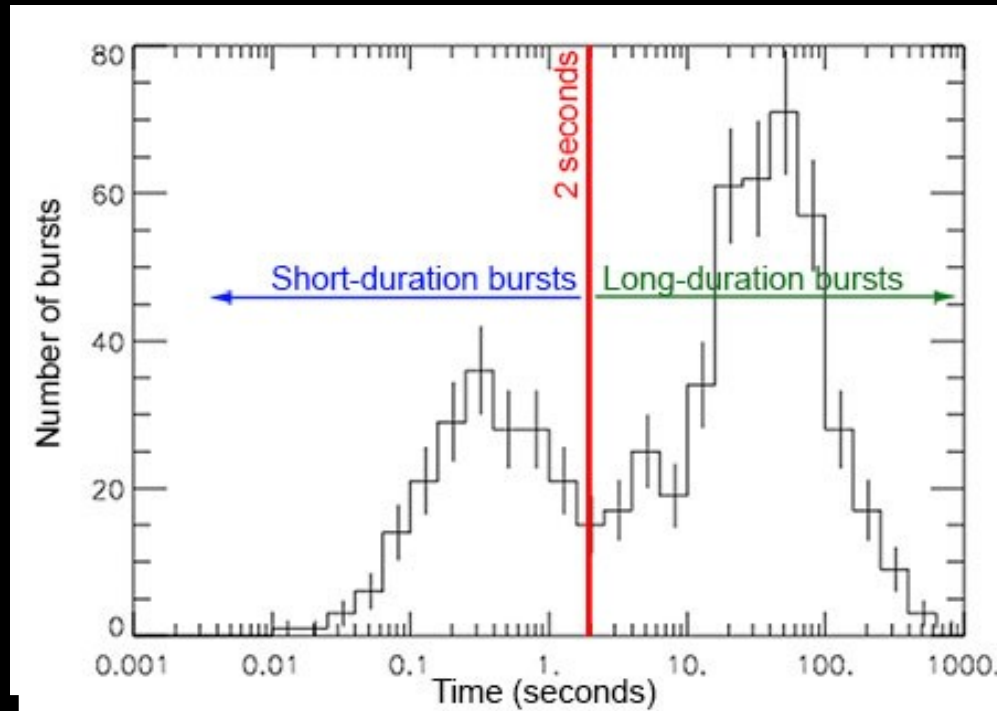


# Les sursauts gamma

Fusion d'objets compacts



2 types de sursaut gamma

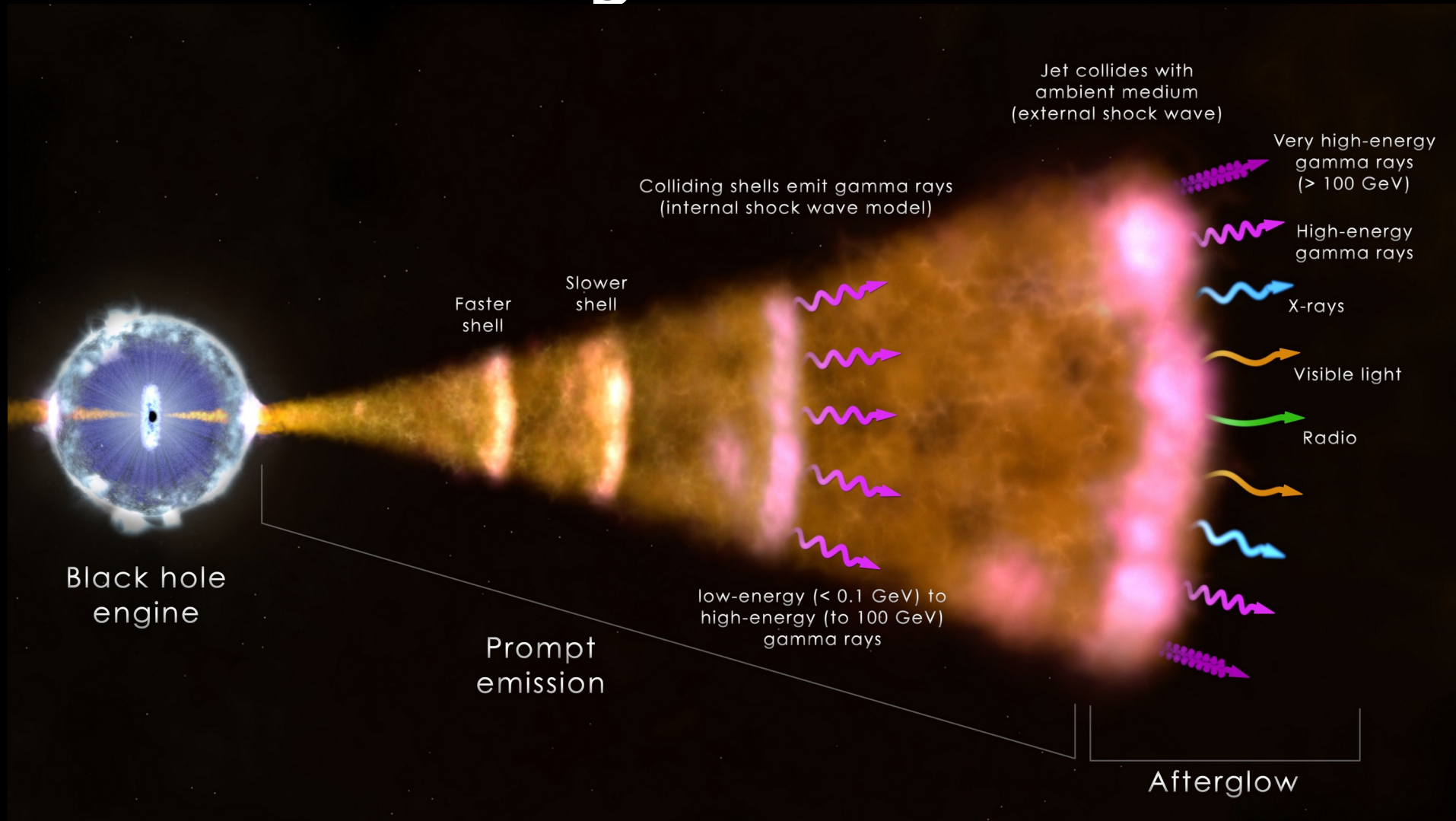


Effondrement d'étoiles massives





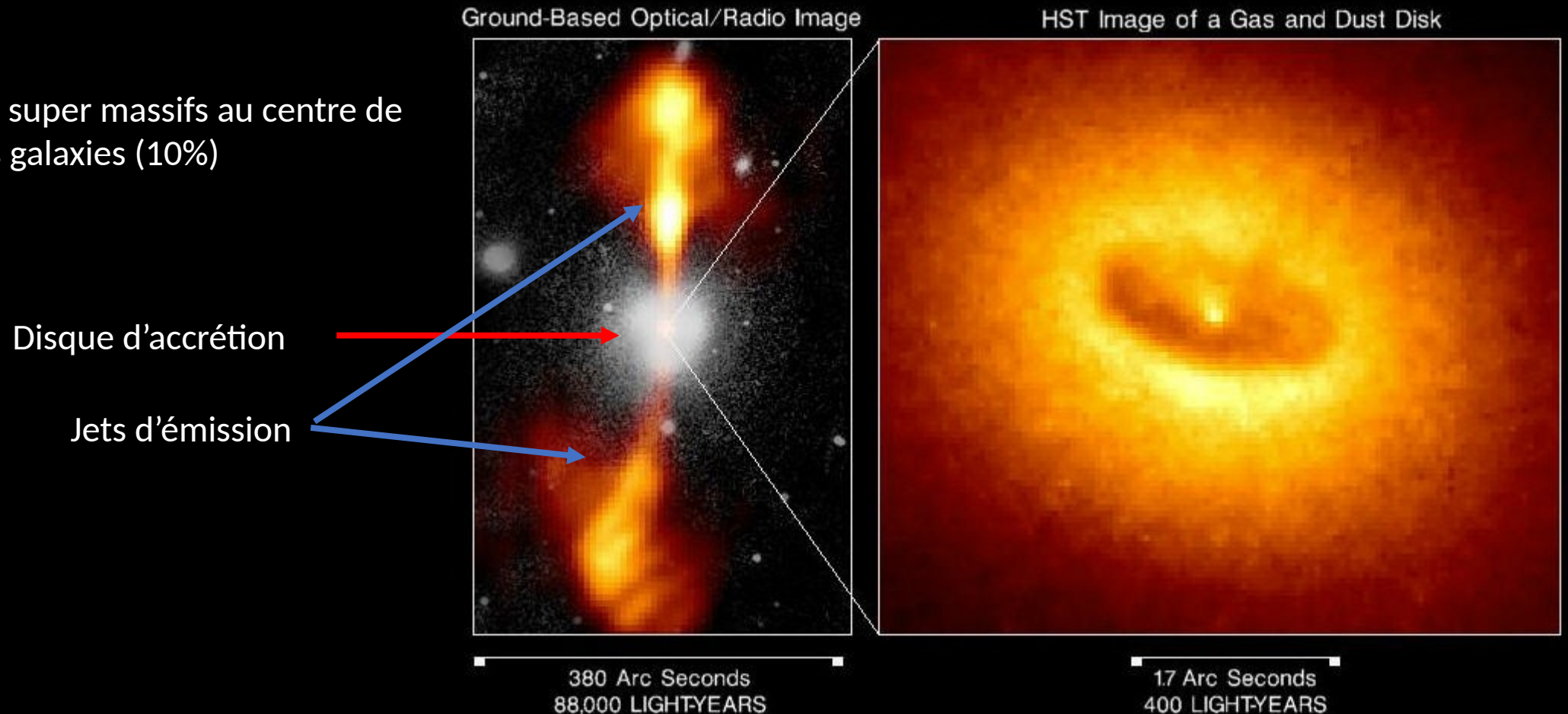
# Les sursauts gamma



Vue d'artiste d'un sursaut gamma

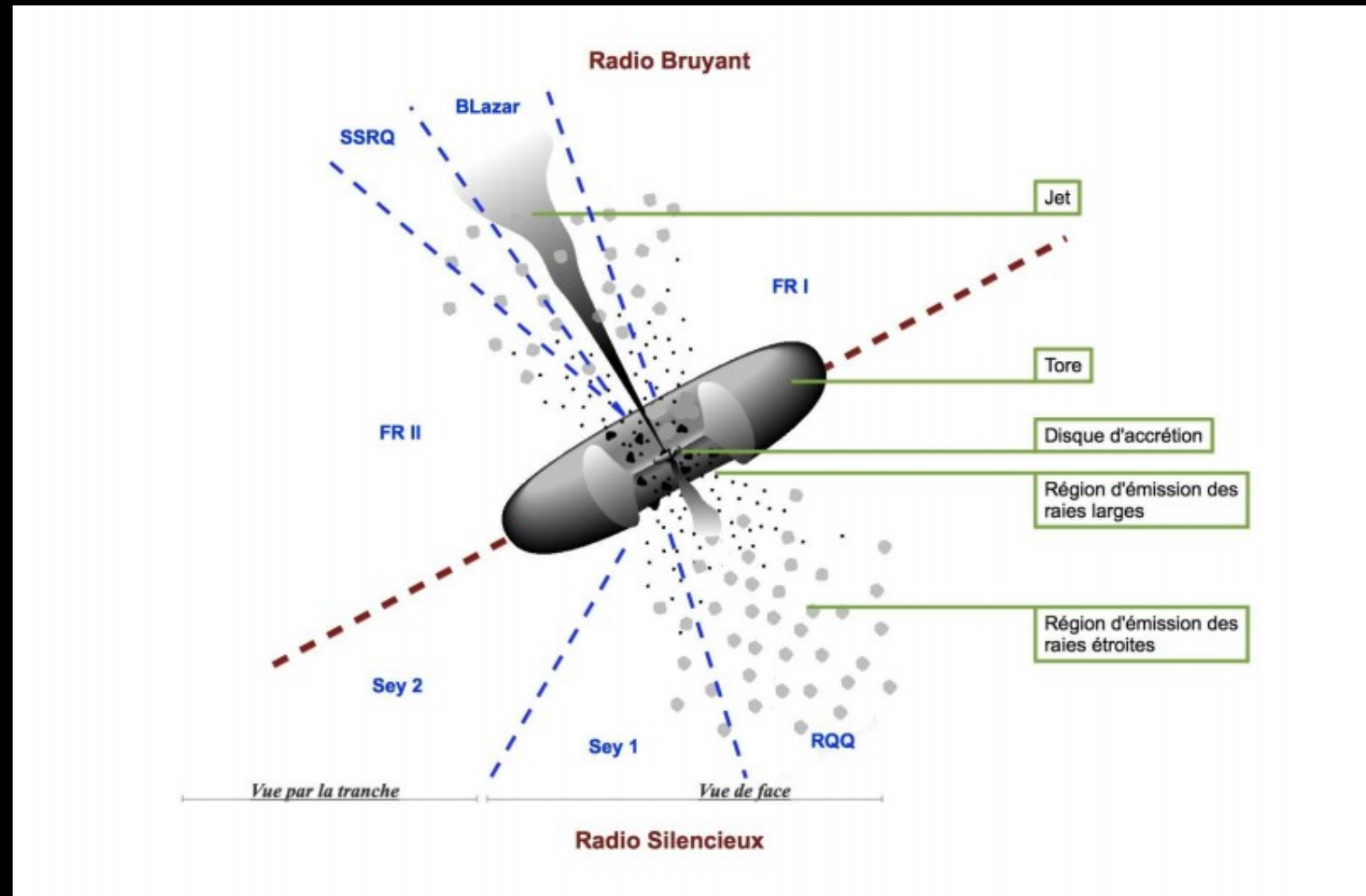
# Les noyaux actifs de galaxies

- Trou noir super massifs au centre de certaines galaxies (10%)



# Les noyaux actifs de galaxies

- 10% des galaxies sont dite actives
- Visible sur tout le spectre





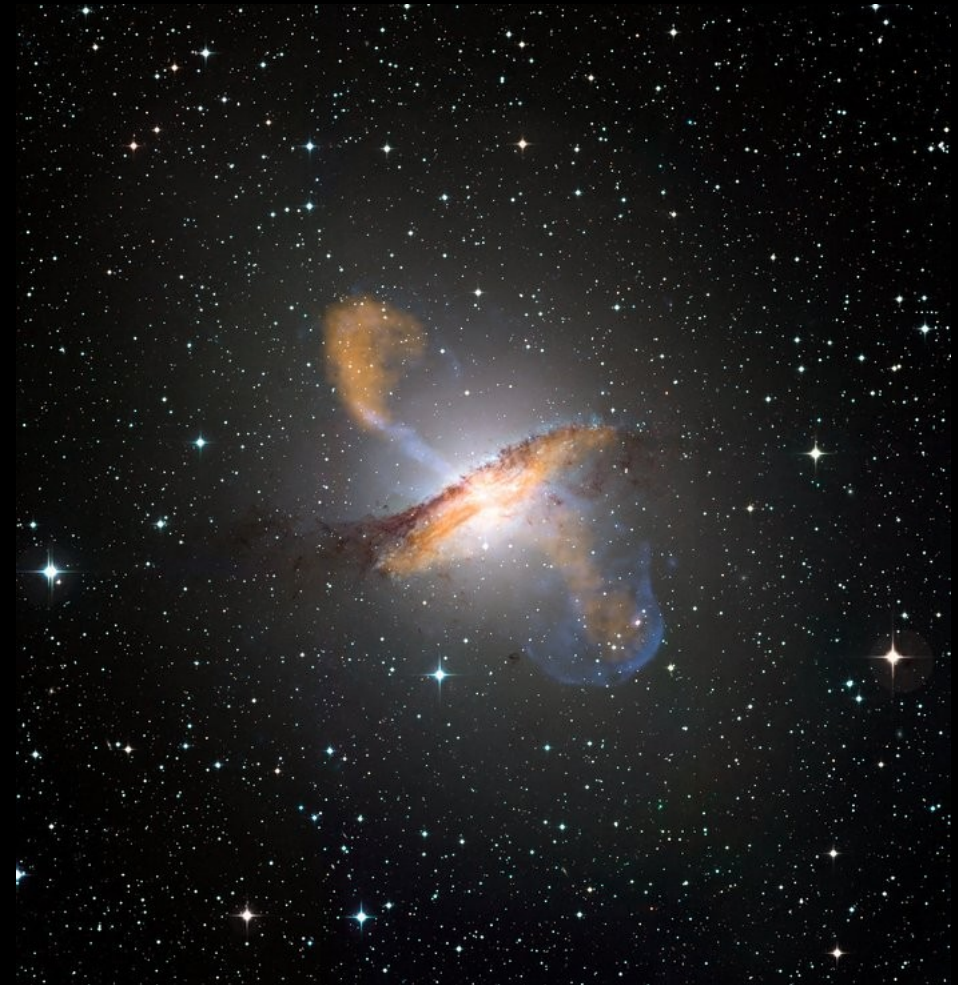
# Centaurus A

Plus proche galaxie radio

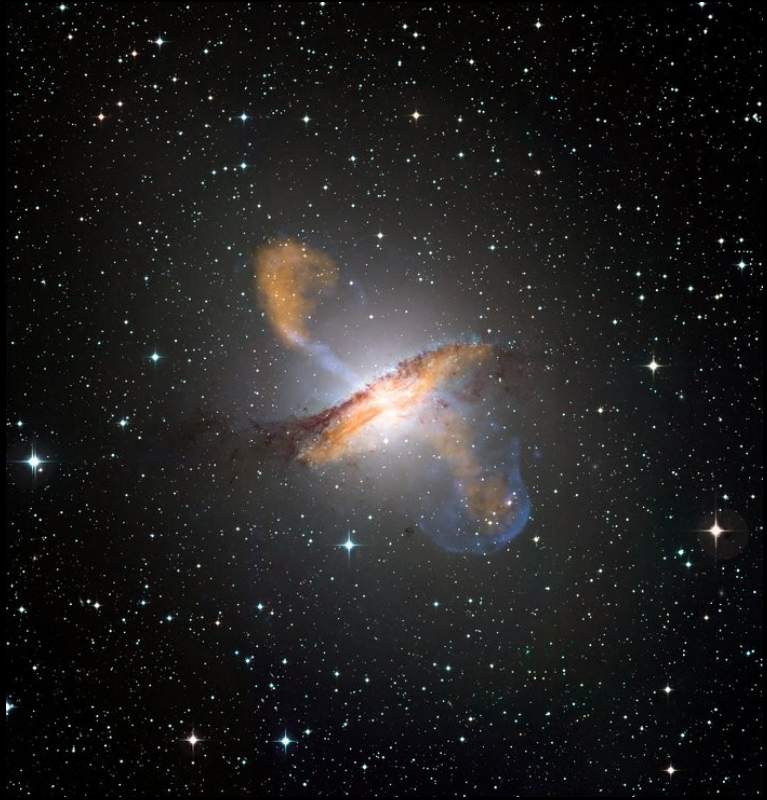
870-microns submillimètre, de LABOC sur APEX, sont montrées en orange.

Les données rayons X de l'Observatoire Rayons X de Chandra sont montrées en bleu.

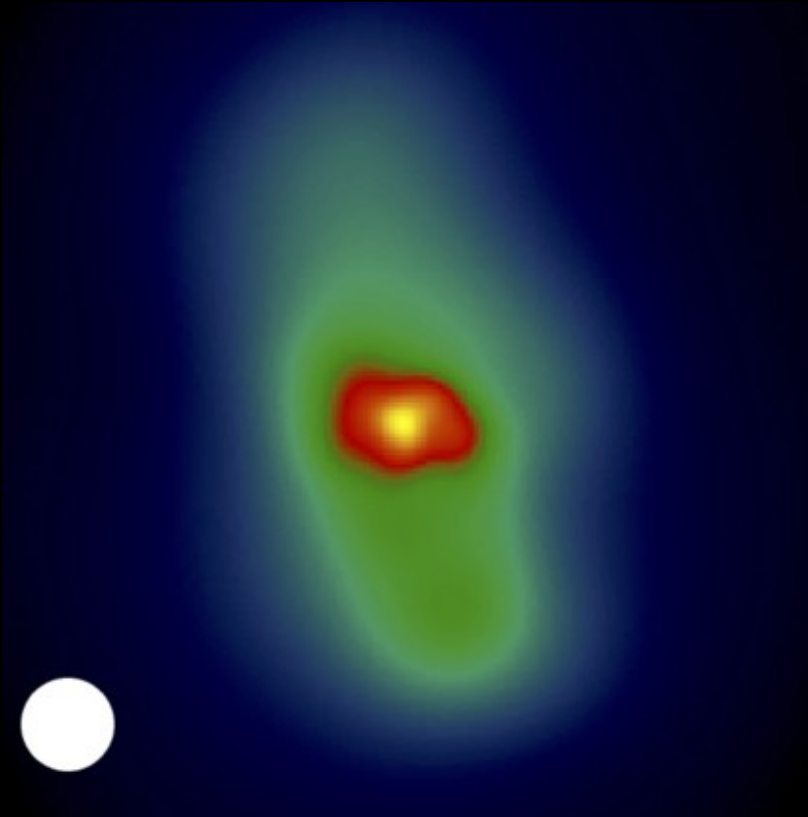
Les données de lumière visible du Wide Field Imager (WFI) du MGP/ESO télescope de 2.2 mètres situé à La Silla



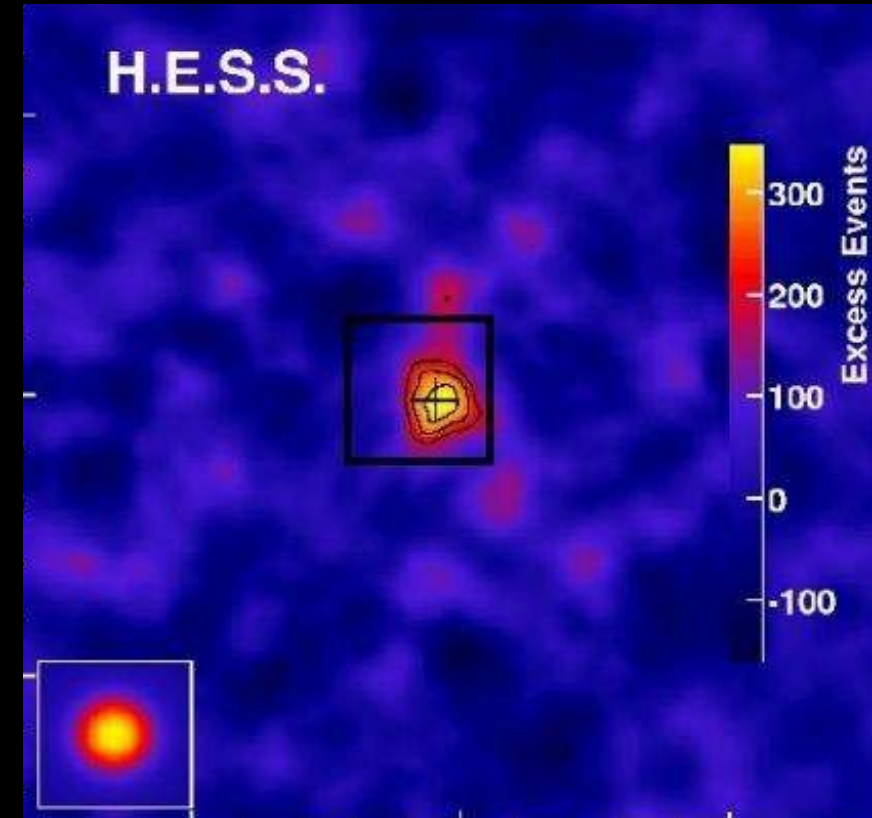
# Centaurus A en Gamma



X, Visible



Fermi-GeV



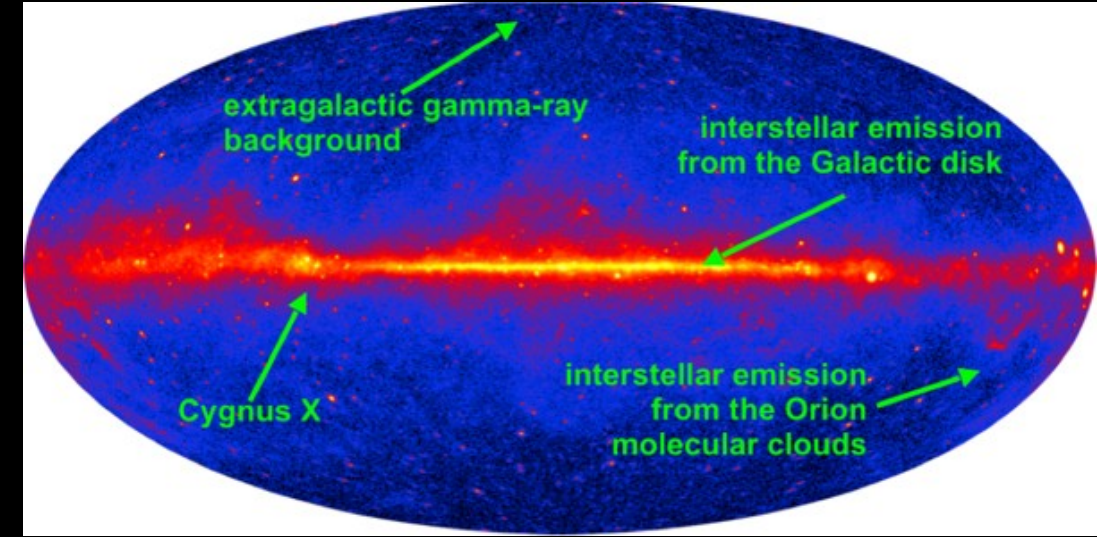
H.E.S.S. TeV



# L'émission diffuse

80% des photons détectés par Fermi LAT proviennent de l'émission diffuse.

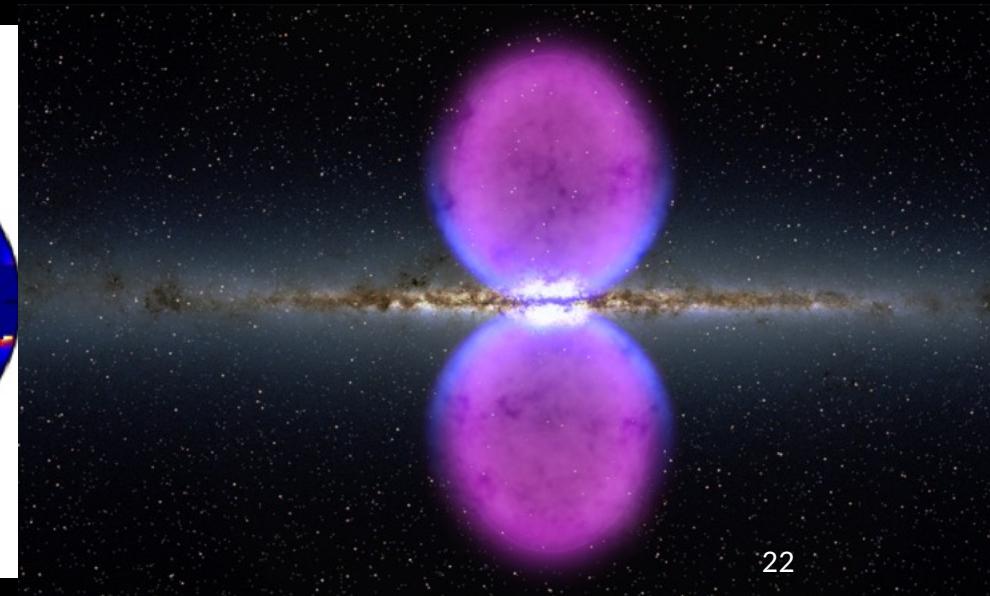
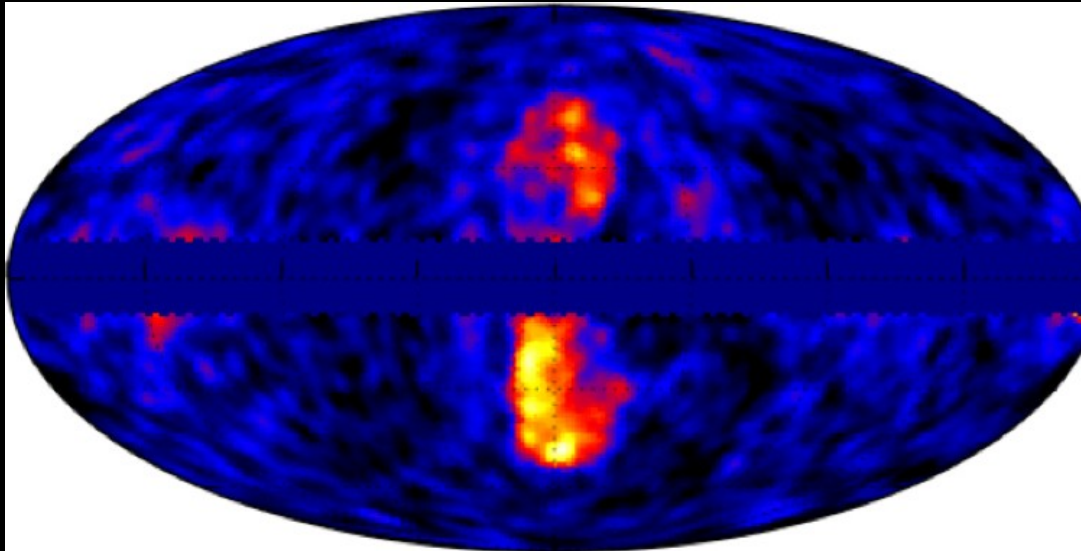
- Interaction RC+gaz
- Fond diffus extragalactique



Fermi bubbles

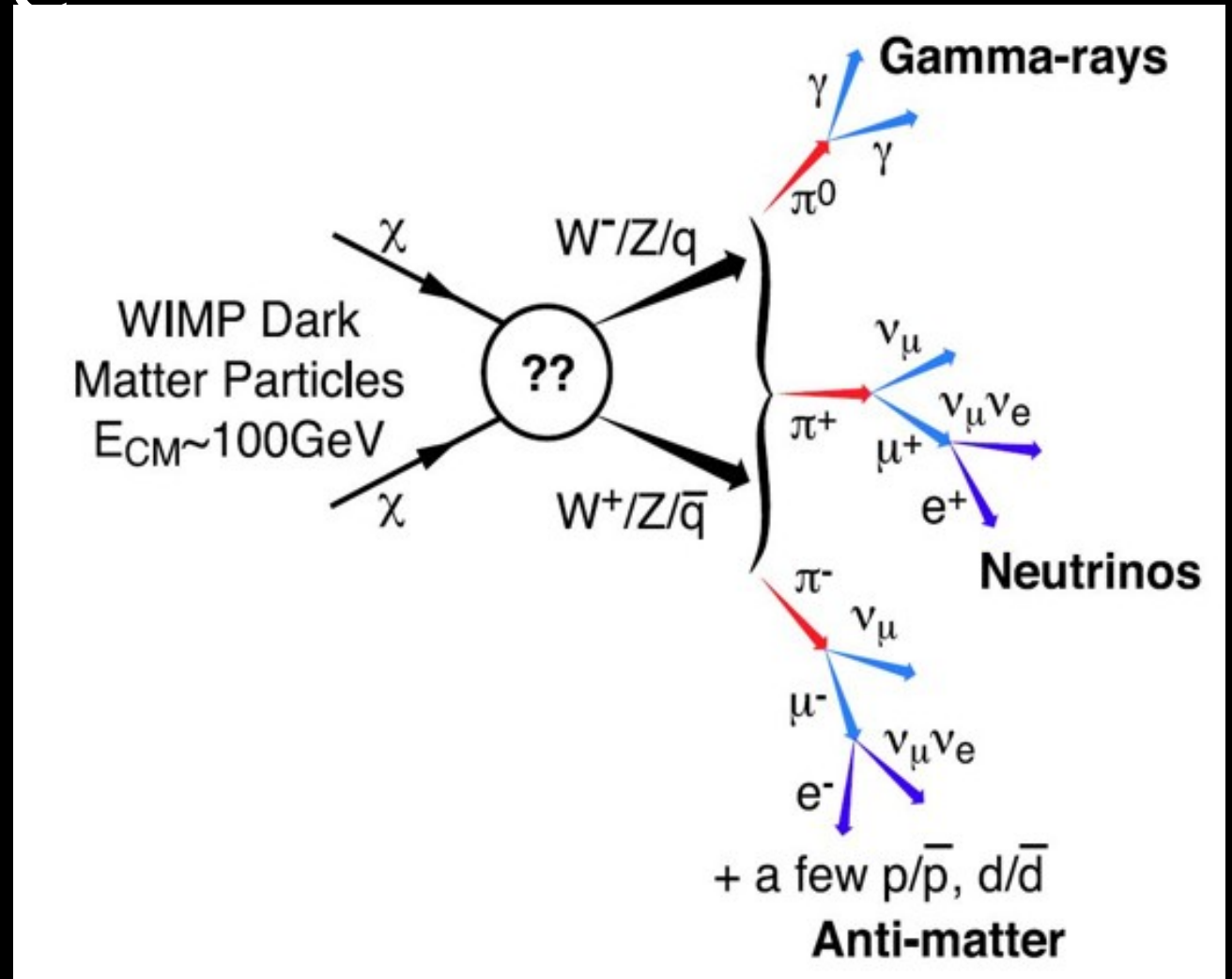
Connection avec le  
Centre Galactique

Reste d'activité?



# La matière noire

- Production de particules détectables par nos instruments (directement ou indirectement)



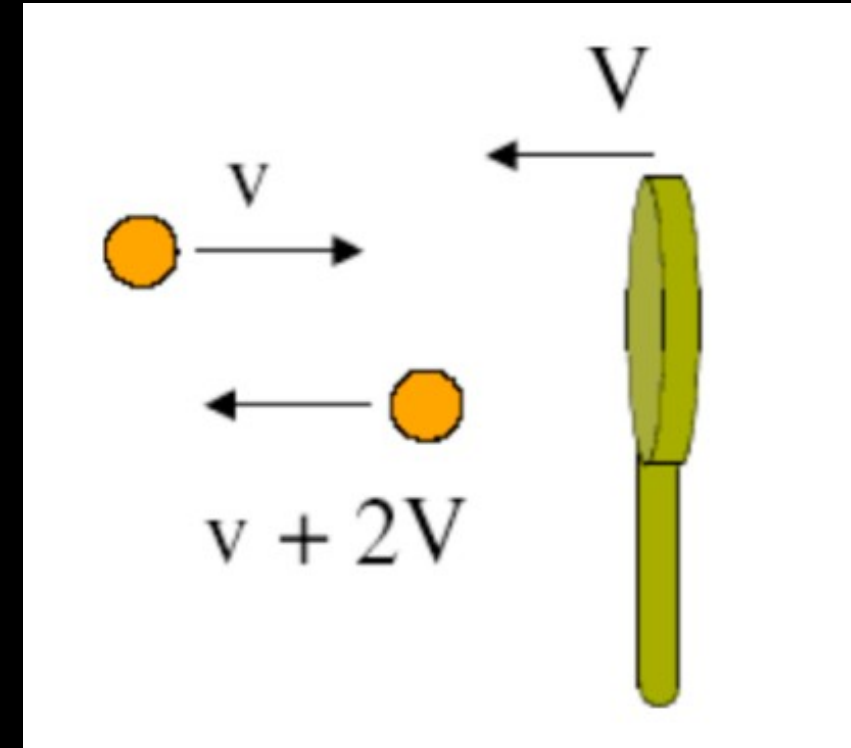
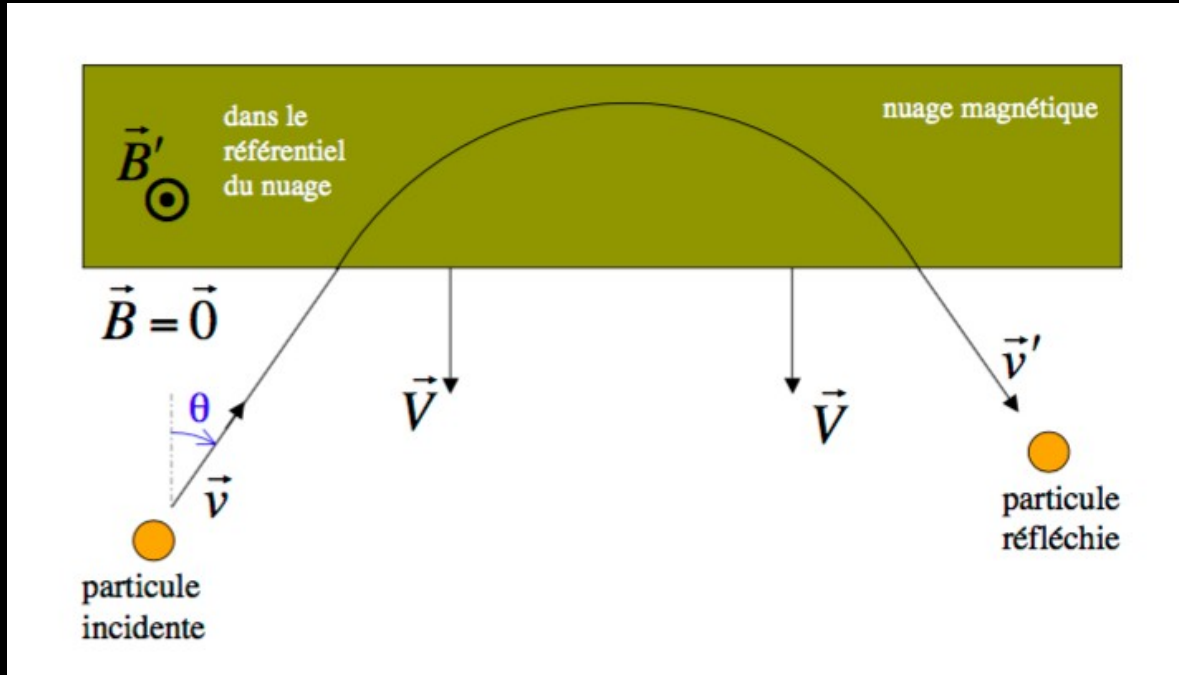
Annihilation de matière noire

Des questions ?



# Accélération des rayons cosmiques

Accélération de Fermi du premier ordre



$$\frac{\Delta E}{E} = -2 \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{V}}{c^2}.$$

# Accélération des rayons cosmiques

Accélération de Fermi du deuxième ordre

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\beta(\cos \theta'_{\text{out}} - \cos \theta_{\text{in}}) + \beta^2(1 - \cos \theta_{\text{in}} \cos \theta'_{\text{out}})}{1 - \beta^2}$$

$$\langle \cos \theta_{\text{in}} \rangle = -\frac{1}{3}\beta$$

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \simeq \frac{4}{3} \beta^2$$