

# *L'origine du rayonnement cosmique galactique*

Le rayonnement  
cosmique

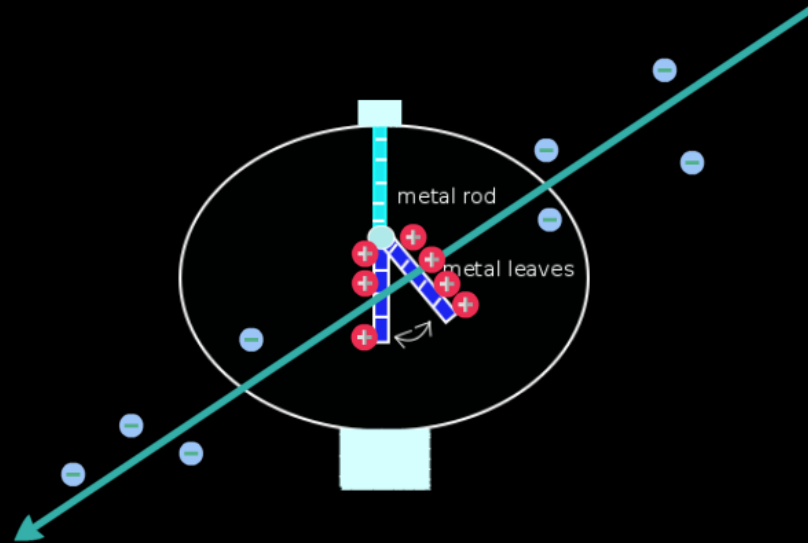
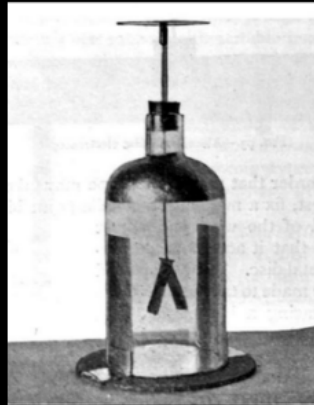
Les accélérateurs  
cosmiques

Comment voir  
l'accélération des  
rayons  
cosmiques ?

# Le rayonnement cosmique



# Il existe un rayonnement ionisant ambiant



D'où vient-il ?

- La Terre
- L'espace

Mesure du taux d'ionisation  
à deux altitudes

T2



T2 < T1

T1



Origine terrestre ?

- Écart moins grand qu'attendu
- D'autres mesures mettent à mal cette hypothèse

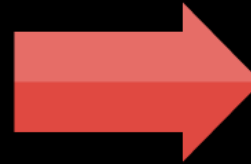
© Horowitz/Pearl (2002)

Mesure du taux d'ionisation  
à deux altitudes

*Théodore Wulf (1909)*

$$T2 < T1$$

T2



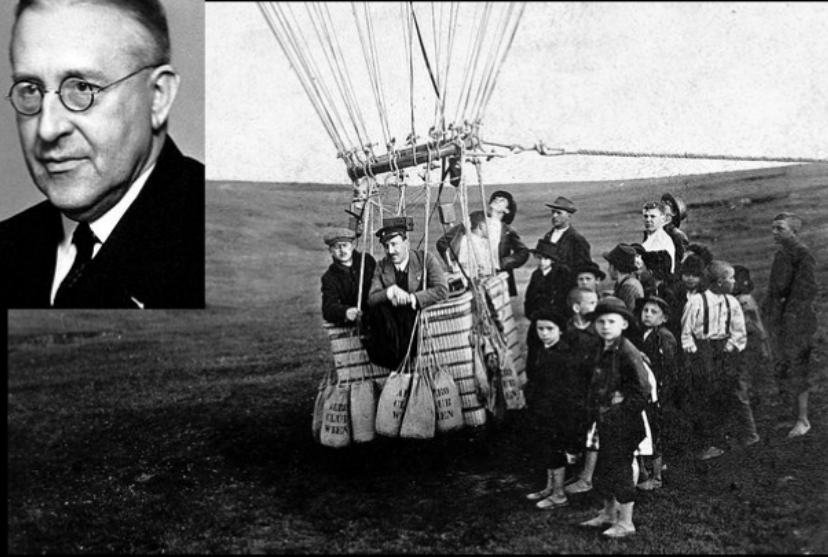
T1



Origine terrestre ?

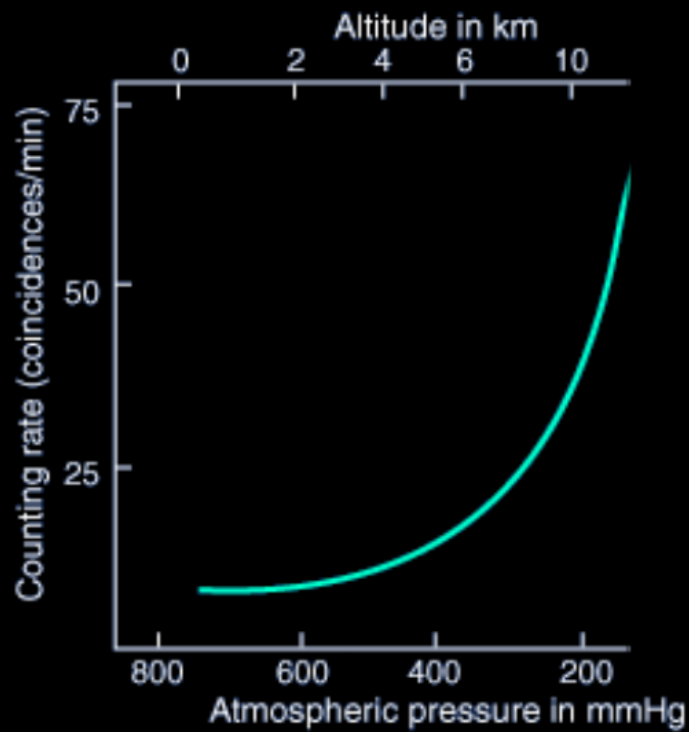
- Écart moins grand qu'attendu
- D'autres mesures mettent à mal cette hypothèse

*Domenico Pacini (1911)*

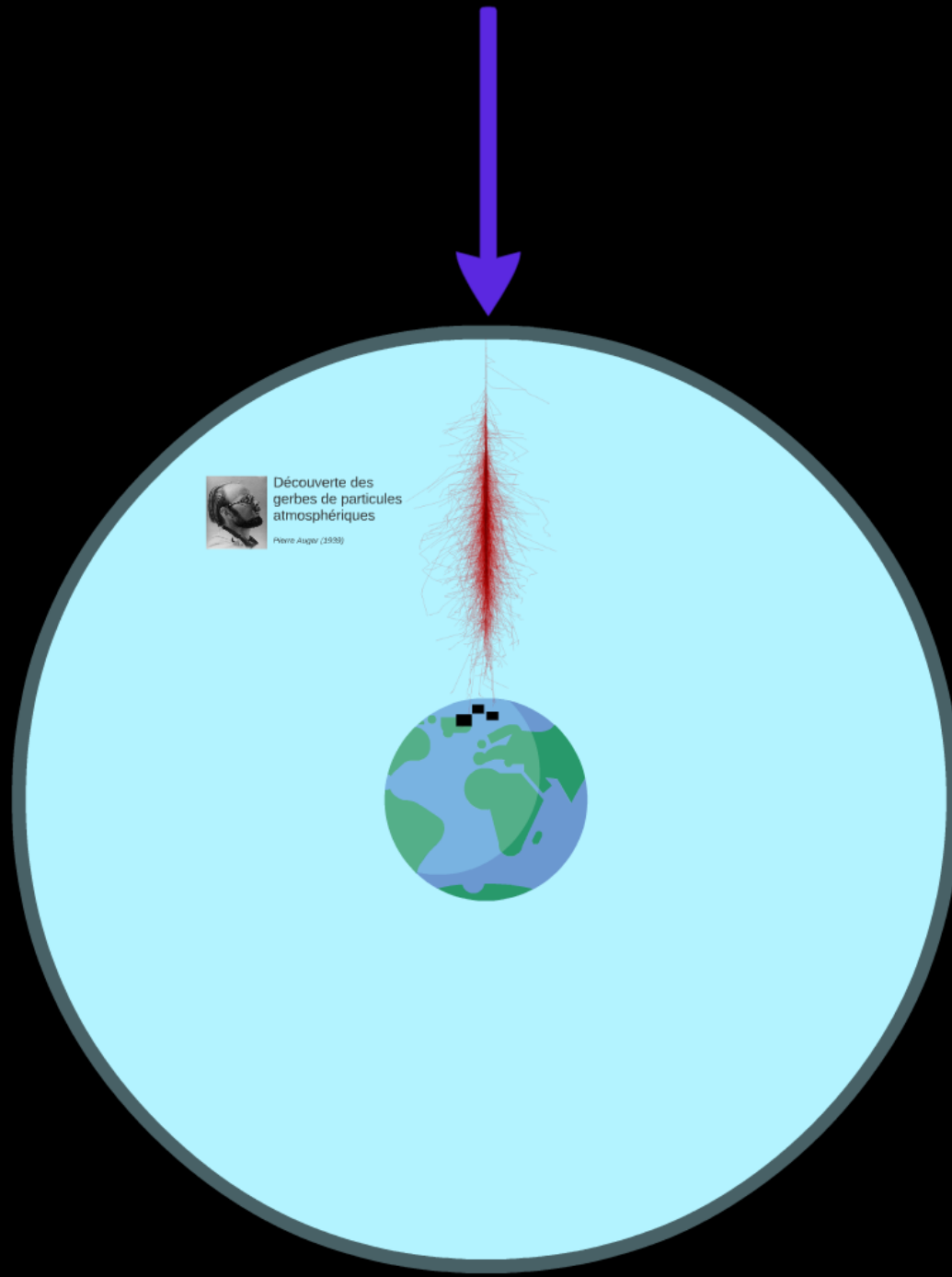


Mesure le taux de rayonnement ionisant en fonction de l'altitude

- 5 km
- Jour et nuit



Prix nobel en 1936



Découverte des gerbes de particules atmosphériques  
Pierre Auger (1938)

Counting rate (coincidences/min)

75

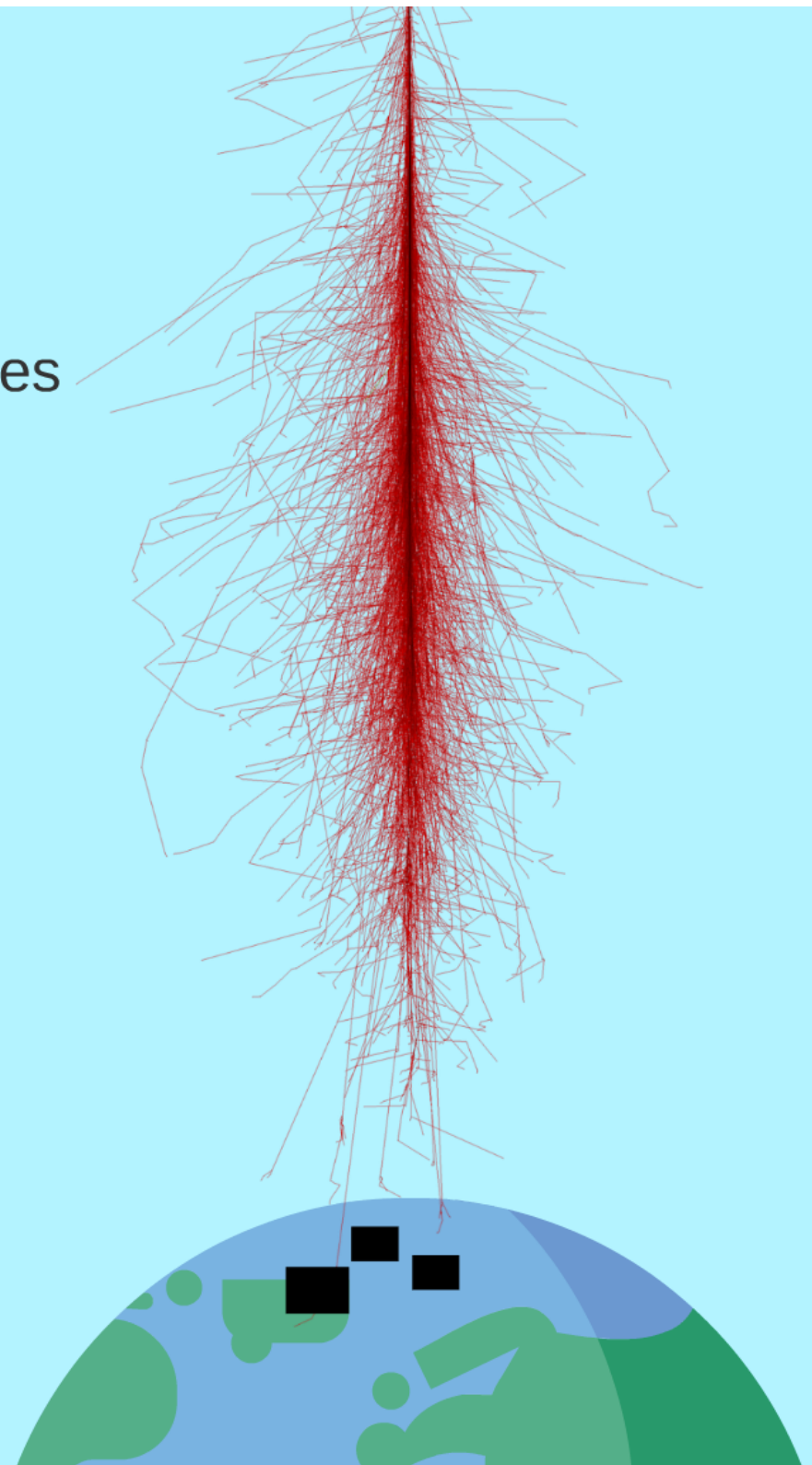
50

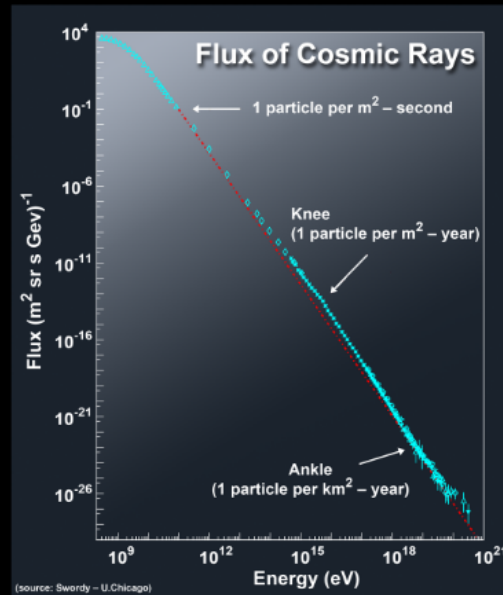
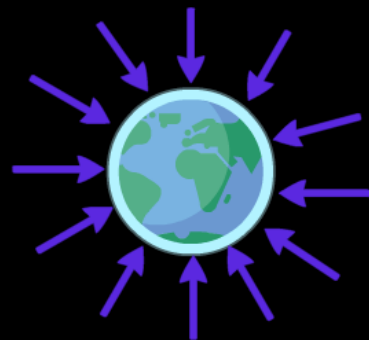
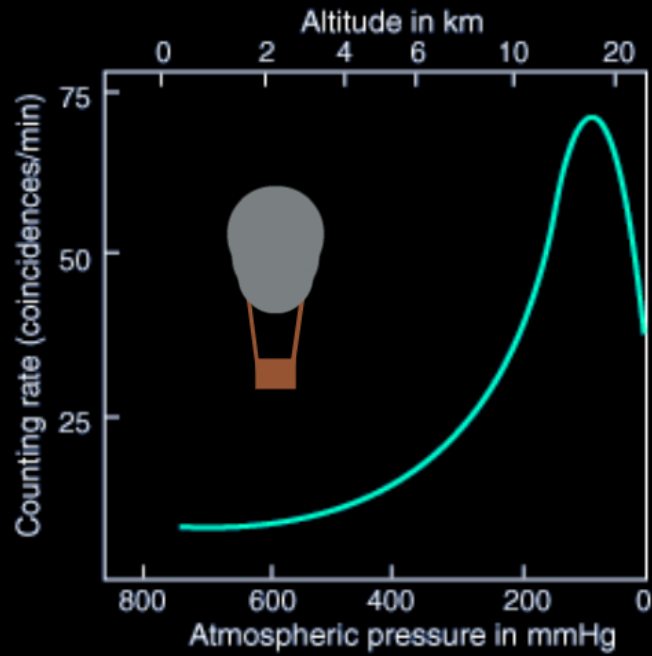
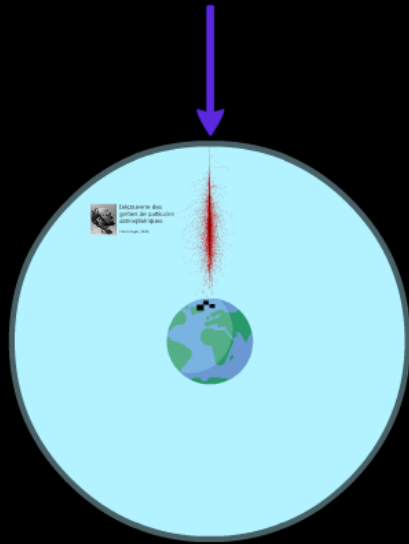
25



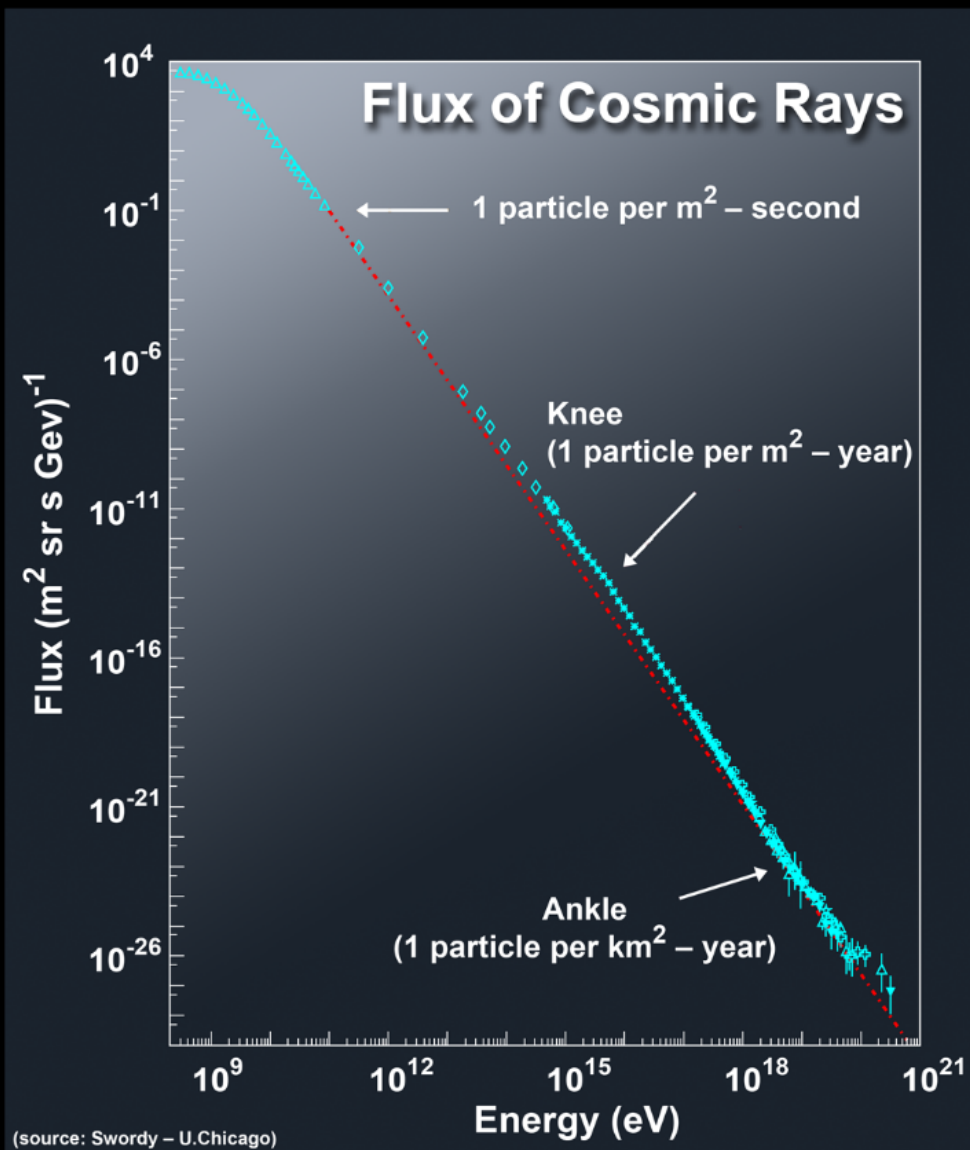
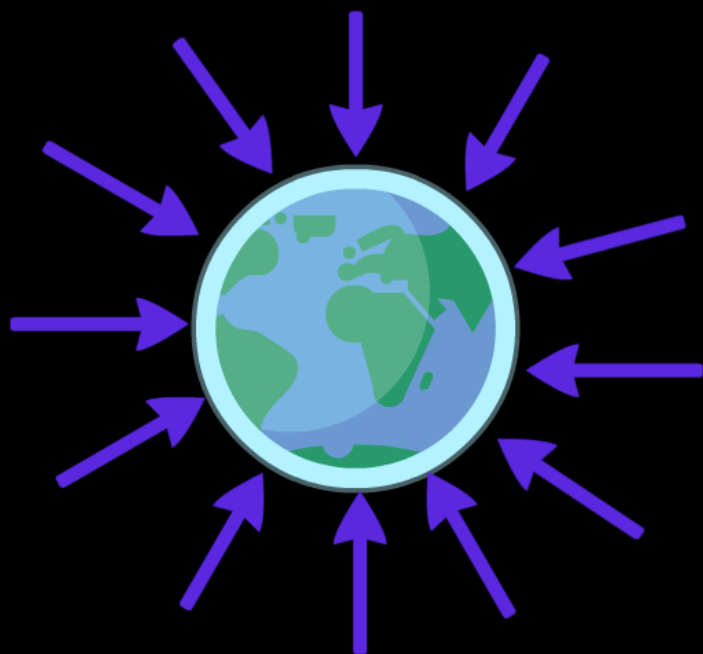
## Découverte des gerbes de particules atmosphériques

*Pierre Auger (1939)*



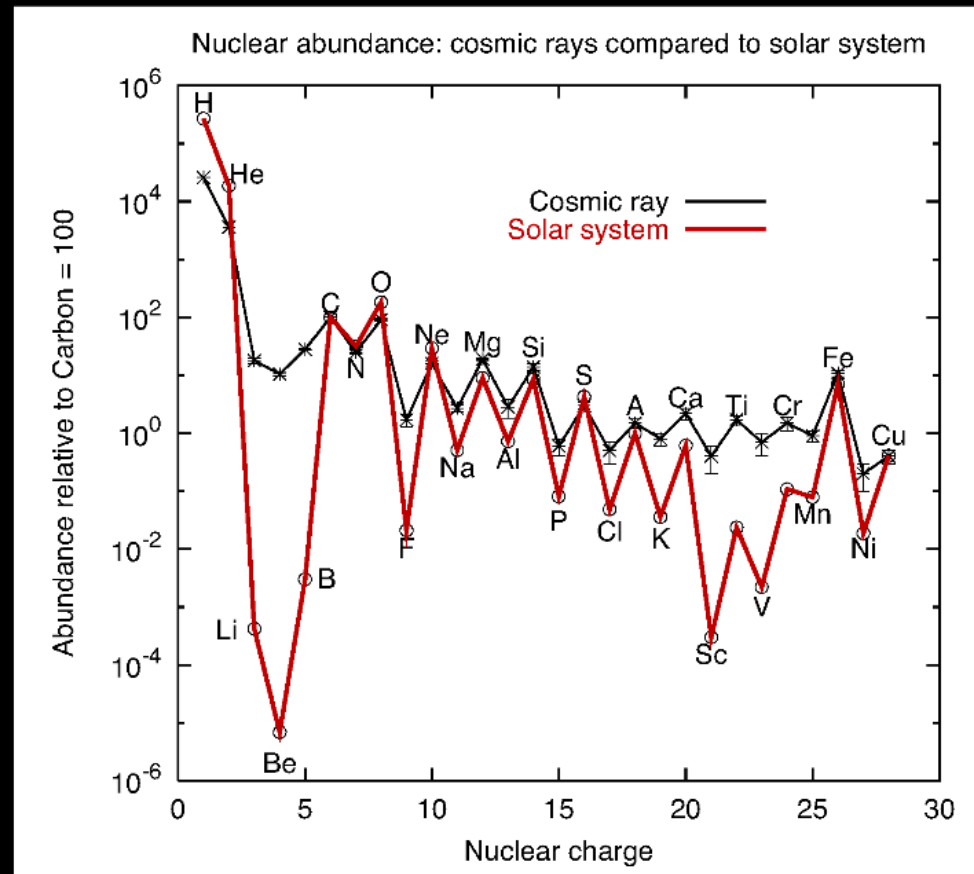




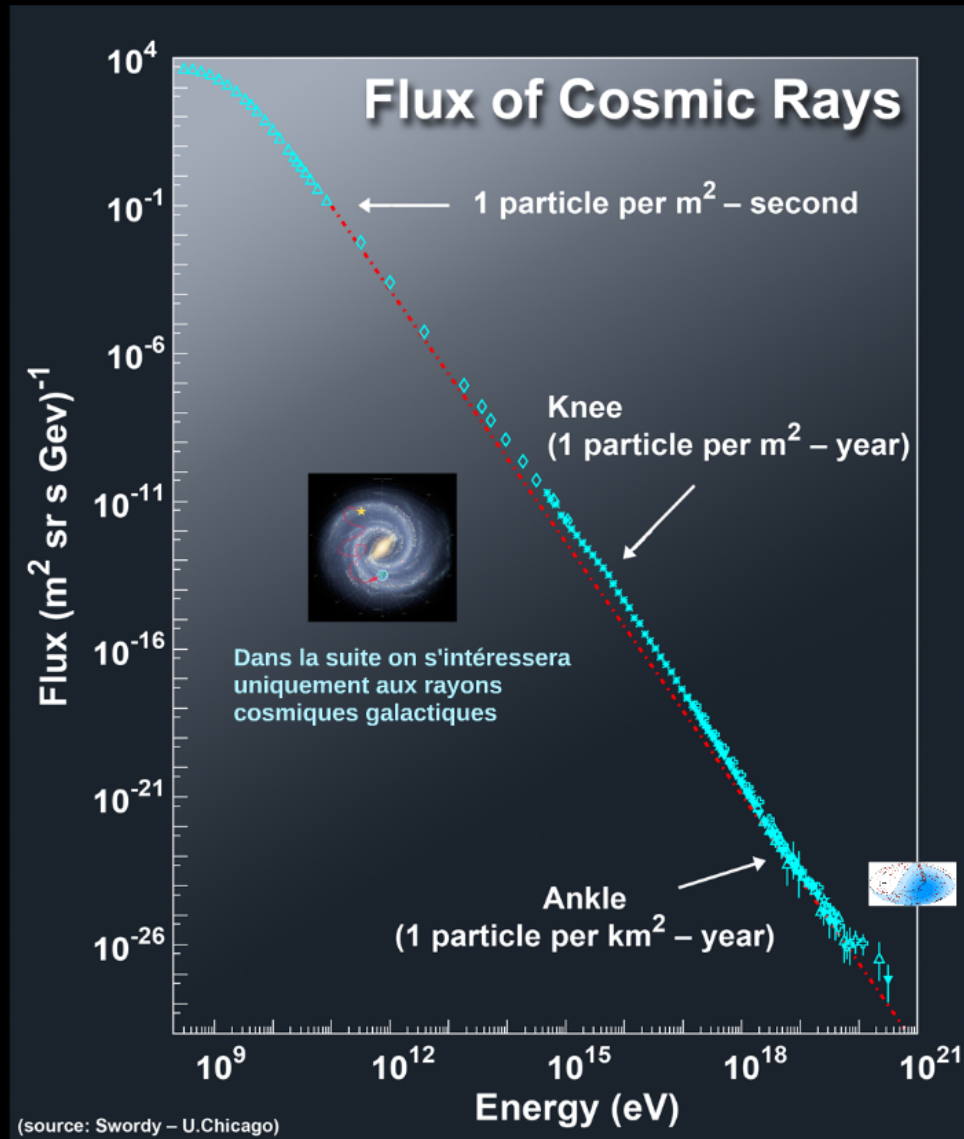


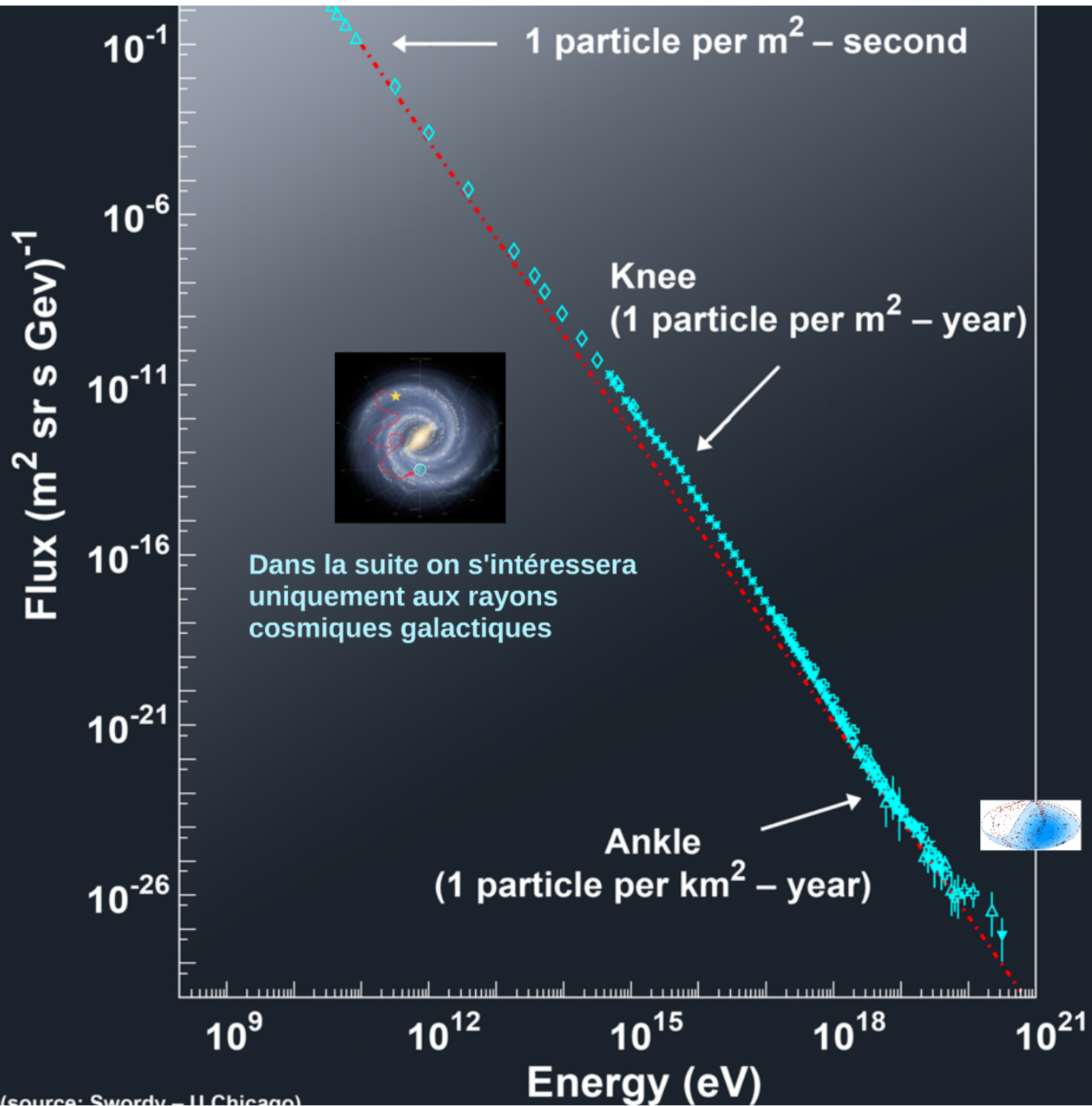
# Composition

- **99 % hadrons**
- **~1% électrons**
- **Mais aussi anti-matière**
  - **Positron**
  - **Anti-proton**
  - **Anti-noyau ?**

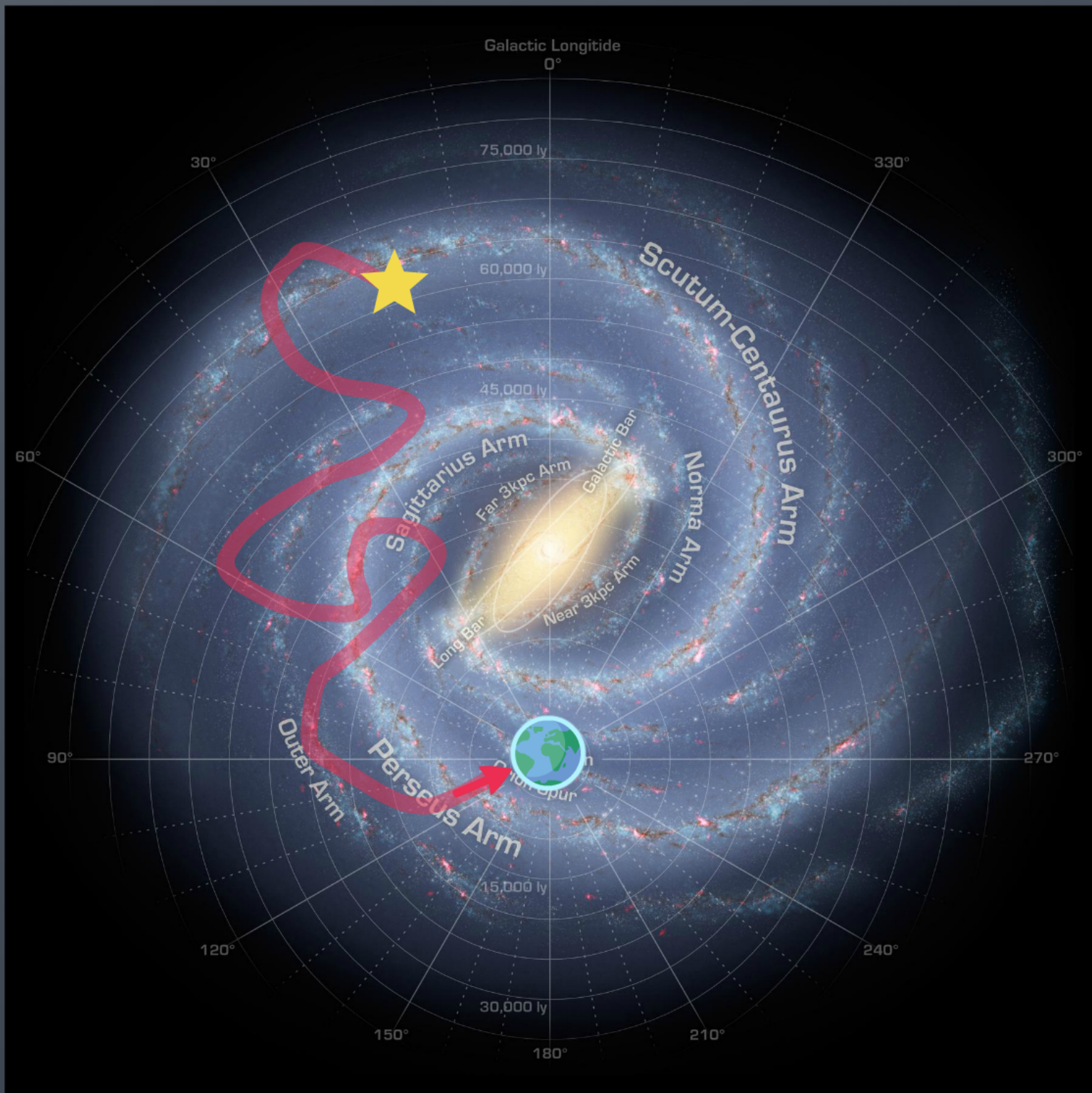


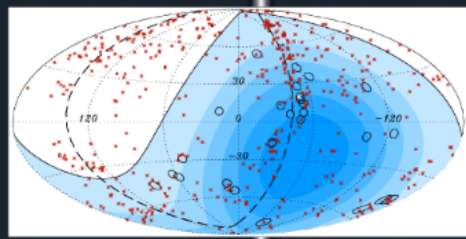
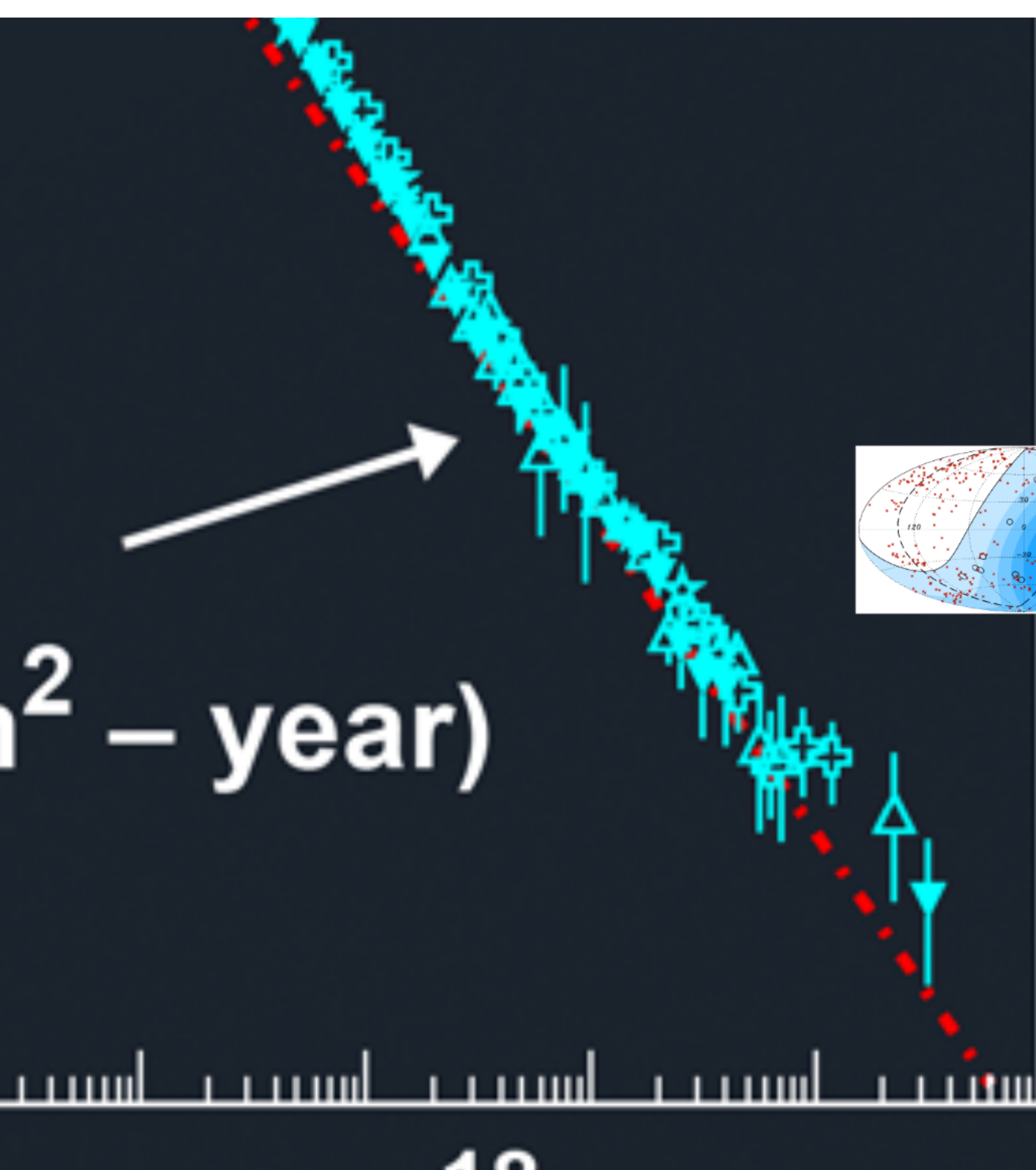
# Origine ?



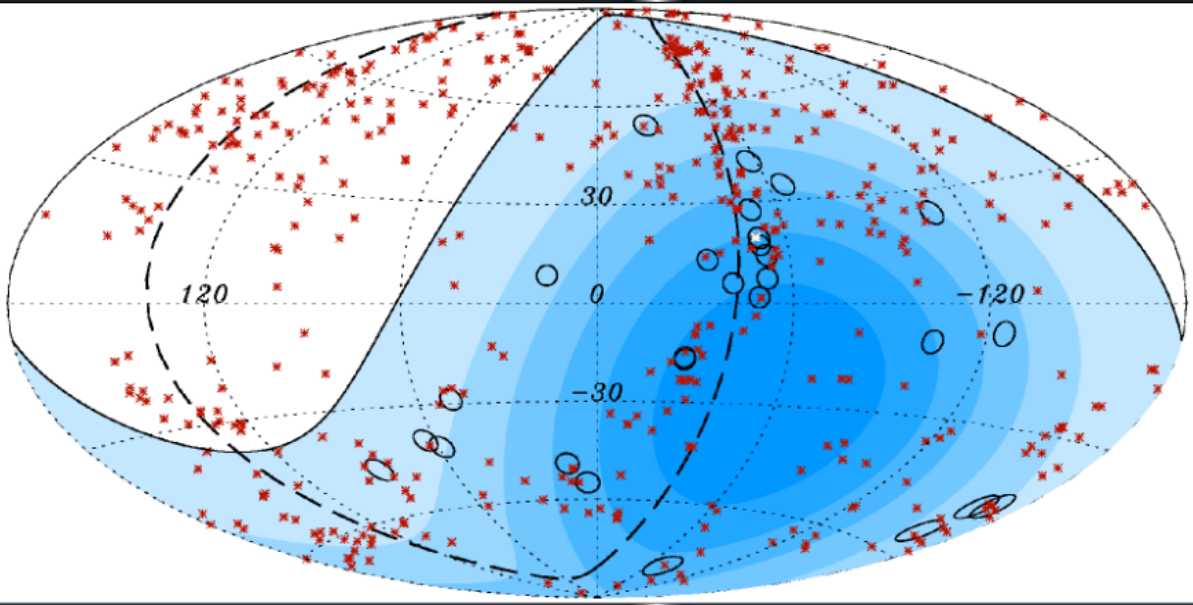


(source: Swerdly - U Chicago)

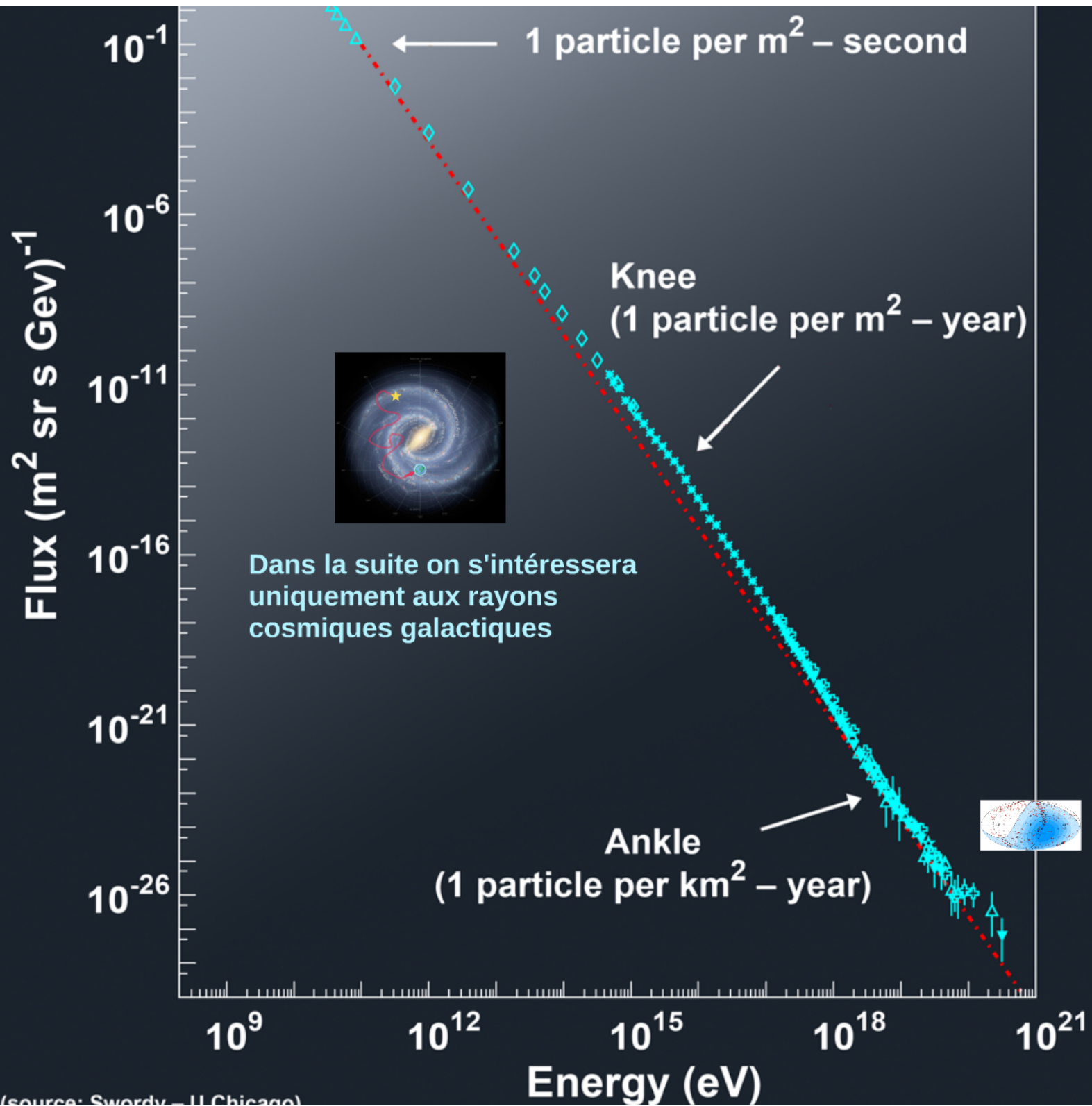




- Propagation en ligne droite
- Direction isotrope
- Origine probablement extragalactique



- Propagation en ligne droite
- Direction isotrope
- Origine probablement extragalactique



(source: Swerdly - U Chicago)



# ***Pourquoi étudier leur origine ?***

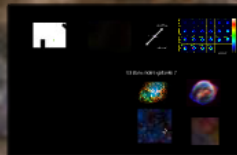
Les rayons cosmiques jouent un rôle fondamental dans l'évolution de beaucoup de systèmes astrophysiques

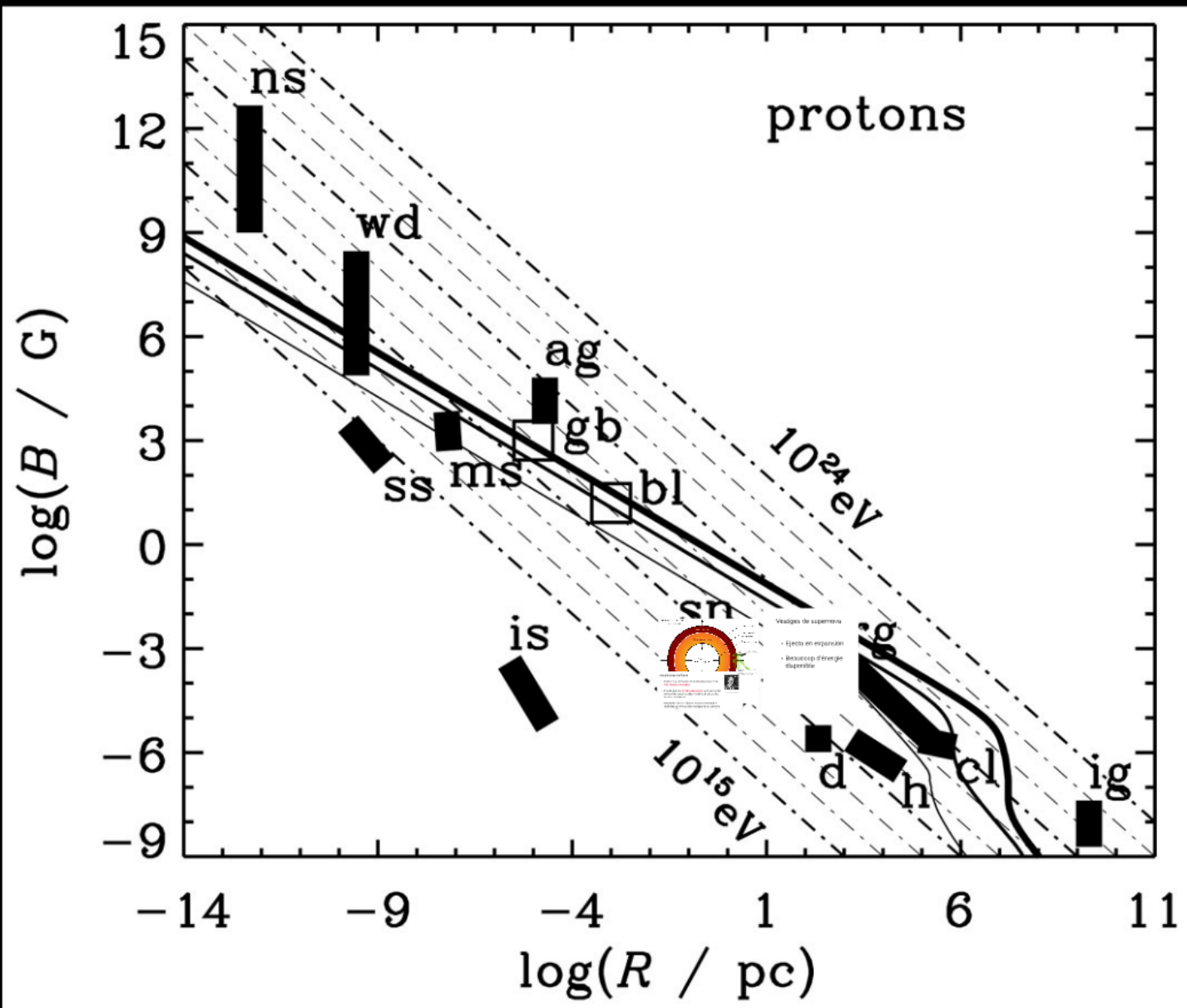
Unique moyen de ioniser l'intérieur des nuages moléculaires (formation stellaire)

L'interaction des rayons cosmiques avec leur environnement permet :

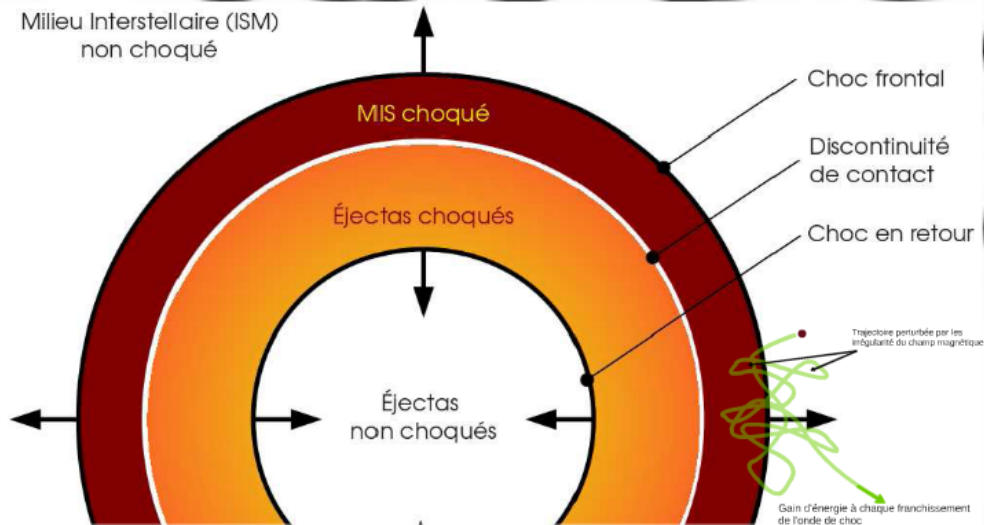
- De déduire la composition de notre galaxie
  - densité et composition de la matière
  - Intensité du champ magnétique
- La recherche indirecte de matière noire

# Les accélérateurs cosmiques





Milieu Interstellaire (ISM)  
non choqué



### Accélération de Fermi

- Permet l'accélération de particules jusqu'à de **très hautes énergies**
- Distribution en **loi de puissance** avec un indice compatible avec les observations directes des rayons cosmiques
- Nécessite des conditions environnementales réalisées au niveau des vestiges de supernova



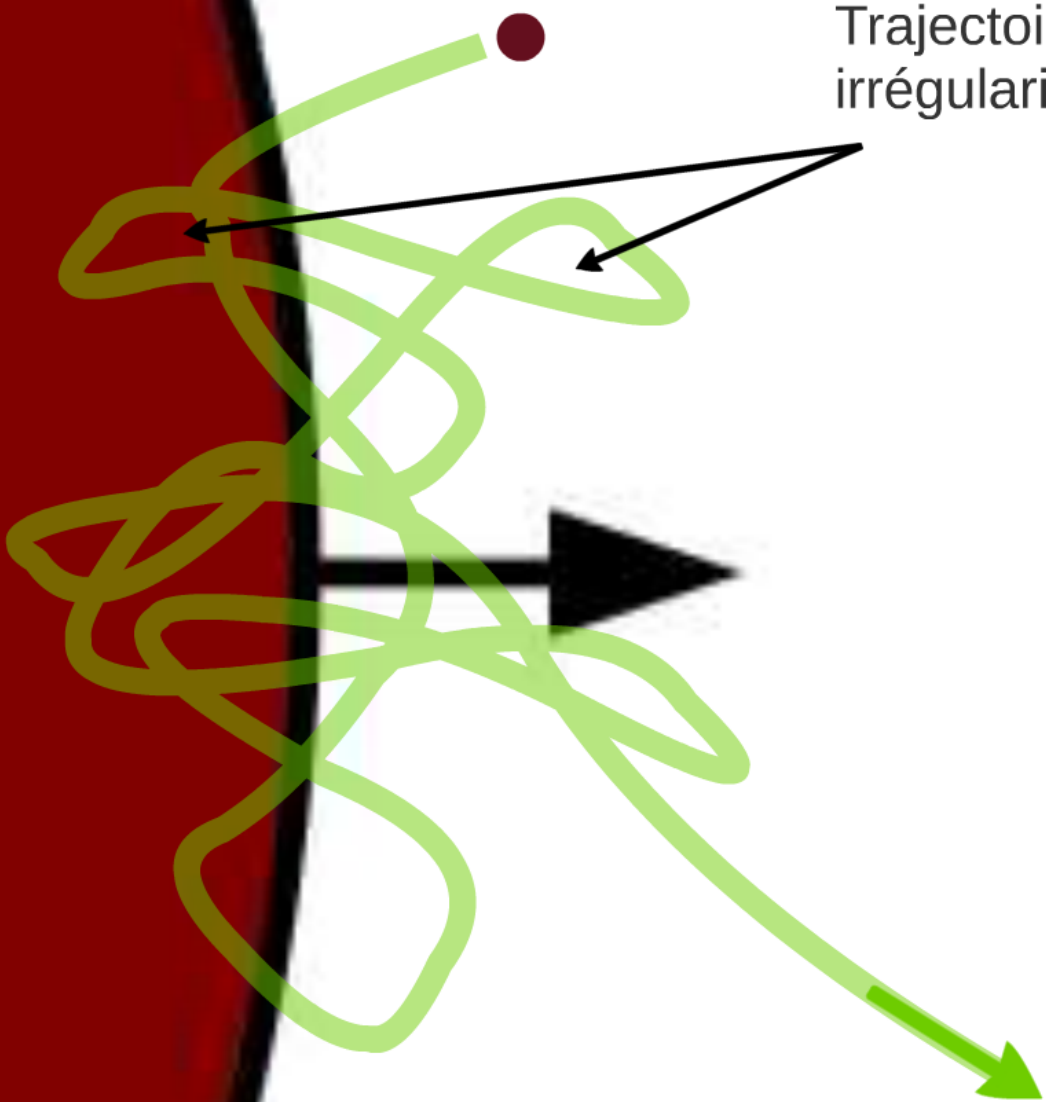
Enrico Fermi

## Vestiges de supernova

- Ejecta en expansion
- Beaucoup d'énergie disponible

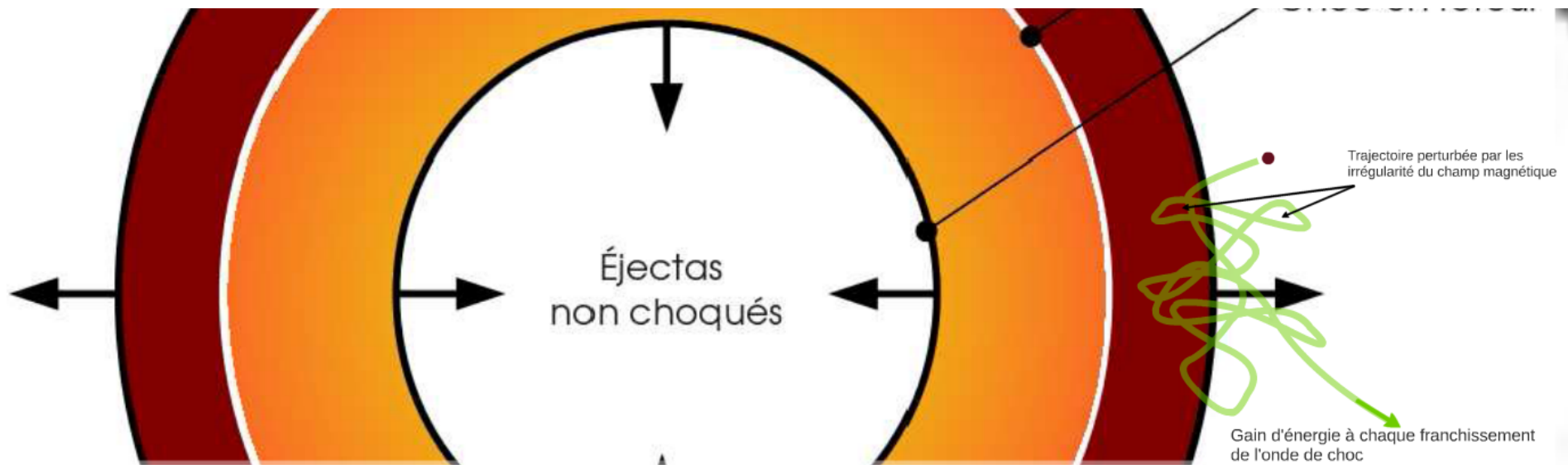


Trajectoire perturbée par les irrégularités du champ magnétique



Gain d'énergie à chaque franchissement de l'onde de choc

Probabilité de s'échapper de plus en plus grande en gagnant de l'énergie



## Accélération de Fermi

- Permet l'accélération de particules jusqu'à de **très hautes énergies**
- Distribution en **loi de puissance** avec un indice compatible avec les observations directes des rayons cosmiques
- Nécessite des conditions environnementales réalisées au niveau des vestiges de supernova

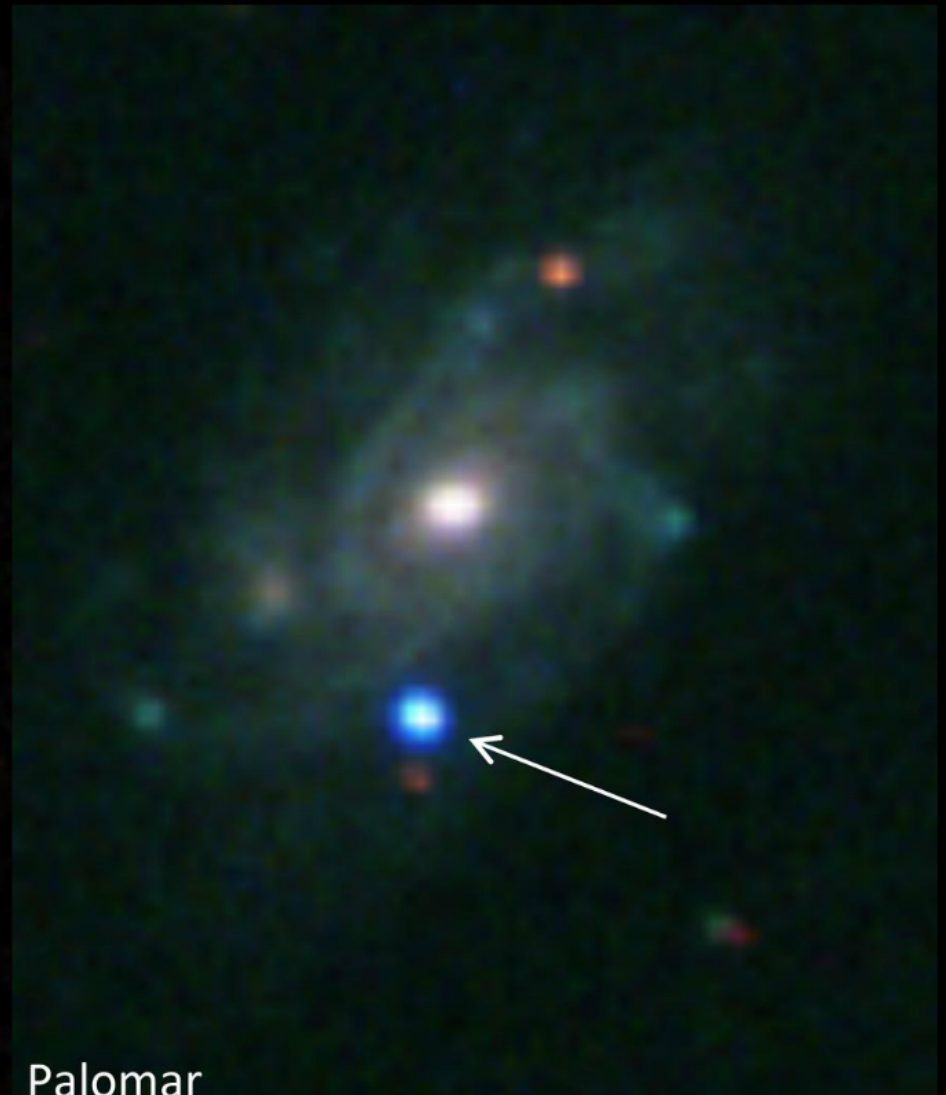


*Enrico Fermi*

# SN 2013cu (iPTF13ast)



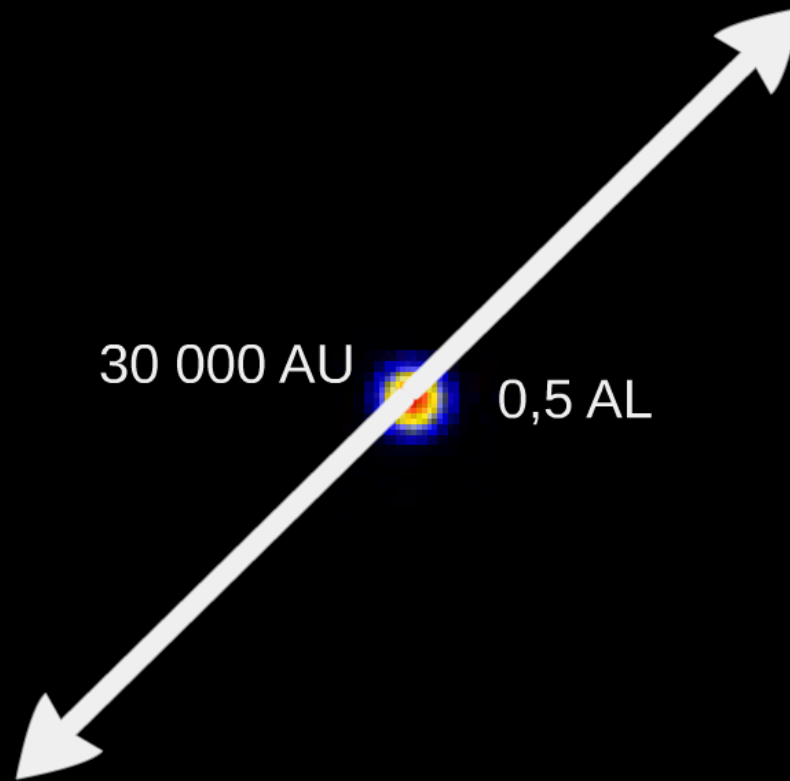
SDSS, prior to supernova explosion



Palomar

Gal-Yam et al. 2014; Nature, May 22, 2014

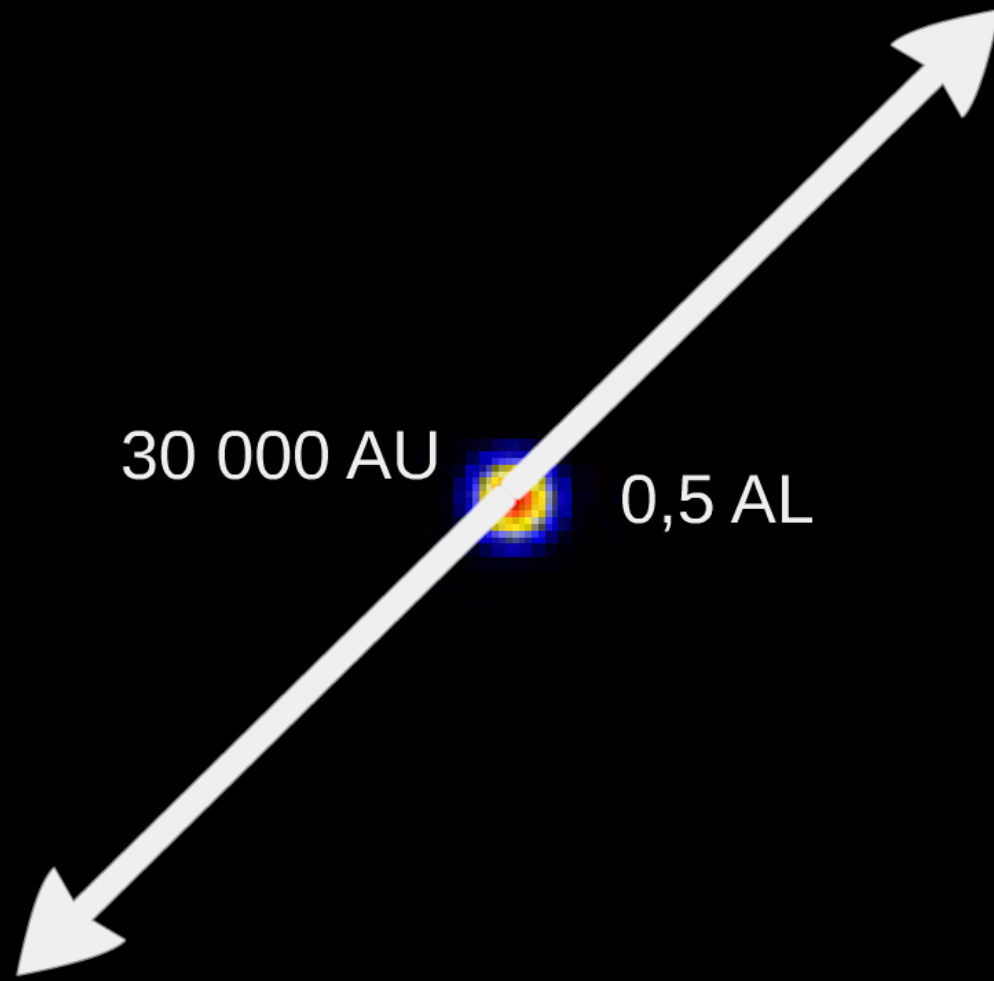
Observation radio  
sur près de 10 ans



SN 1993J

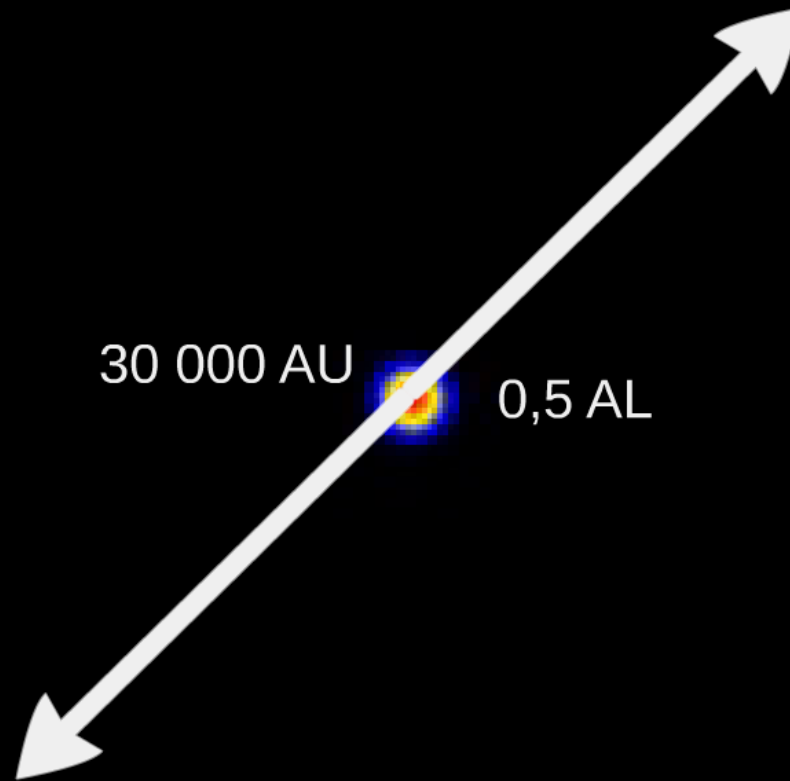


Observation radio  
sur près de 10 ans



SN 1993J

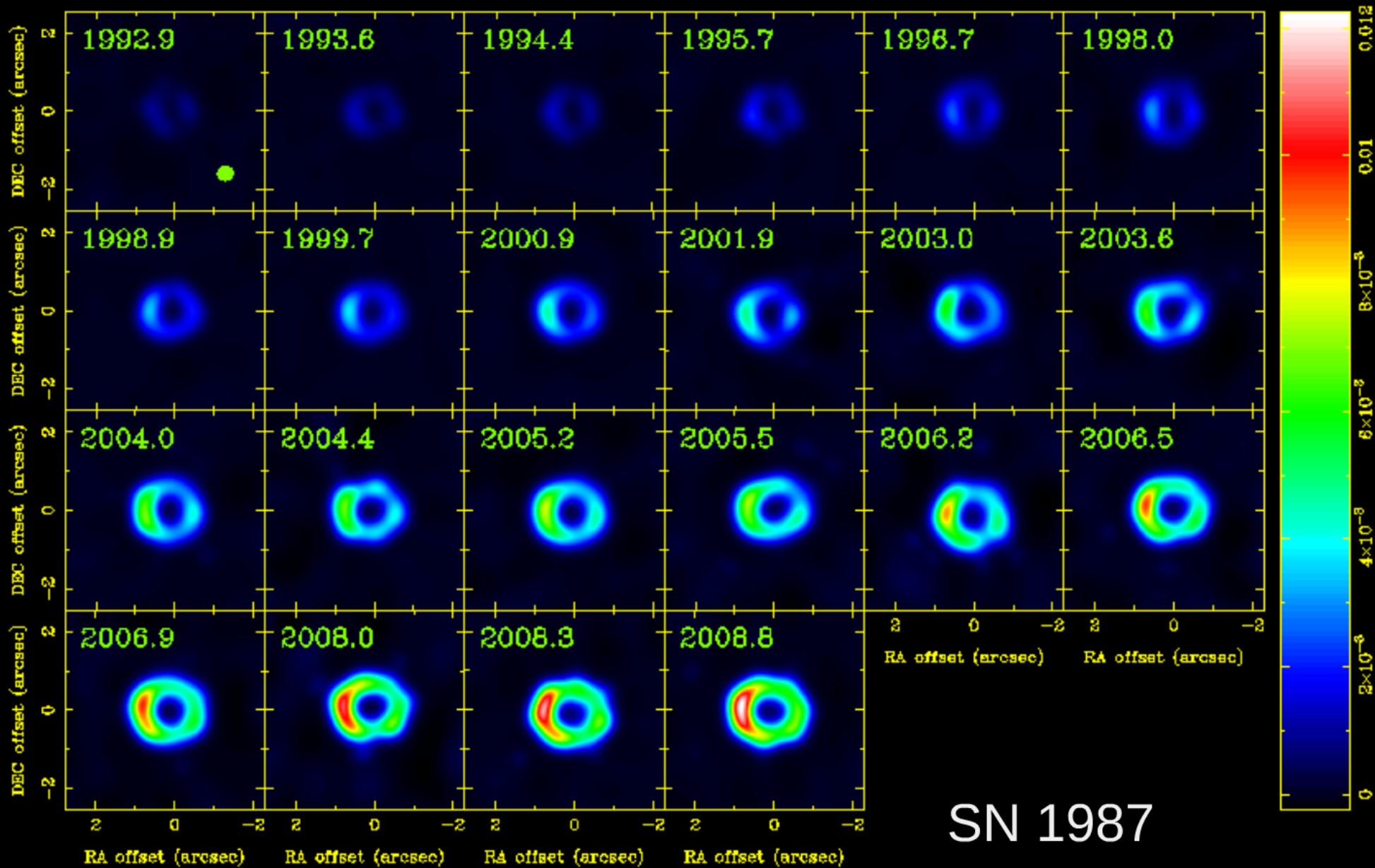
Observation radio  
sur près de 10 ans



30 000 AU

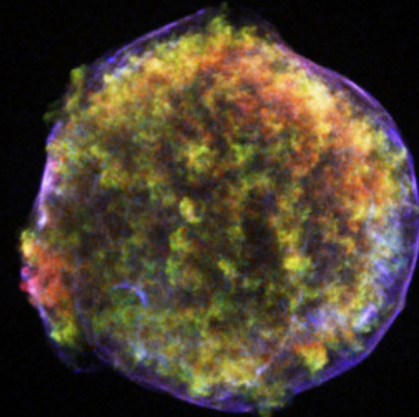
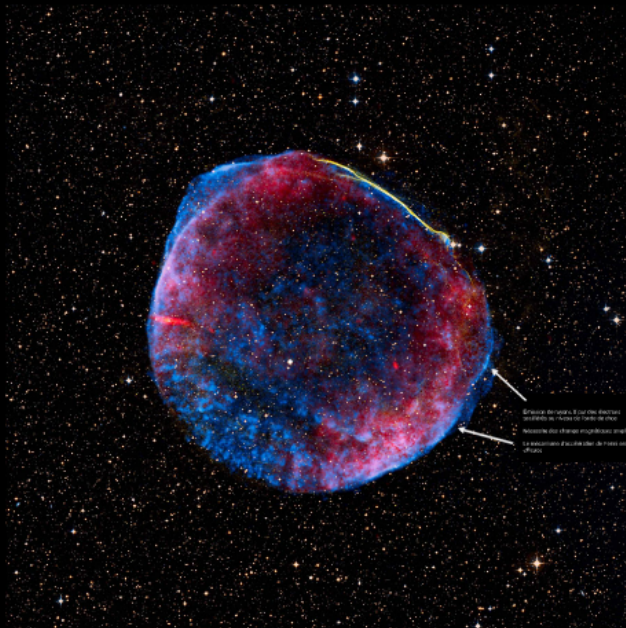
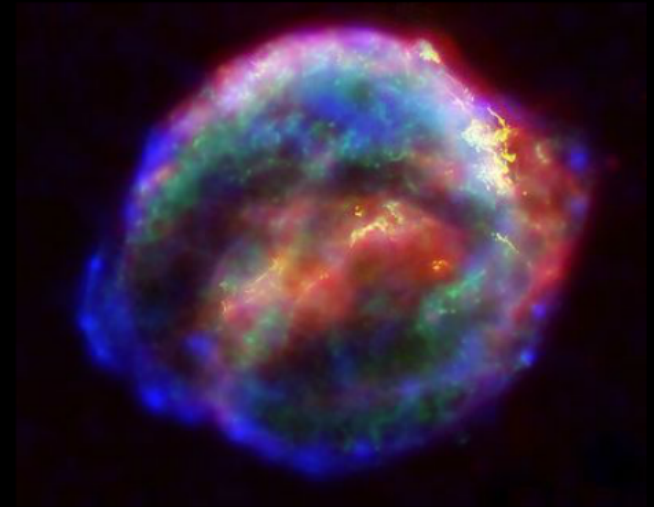
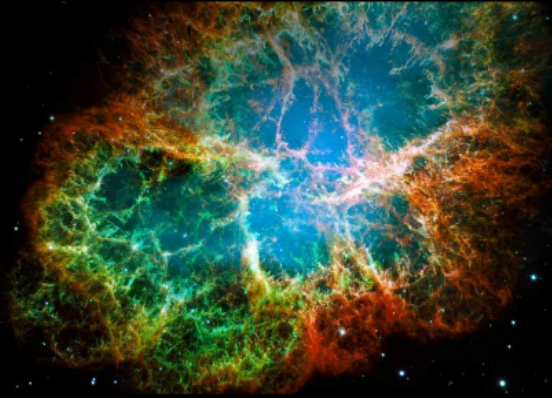
0,5 AL

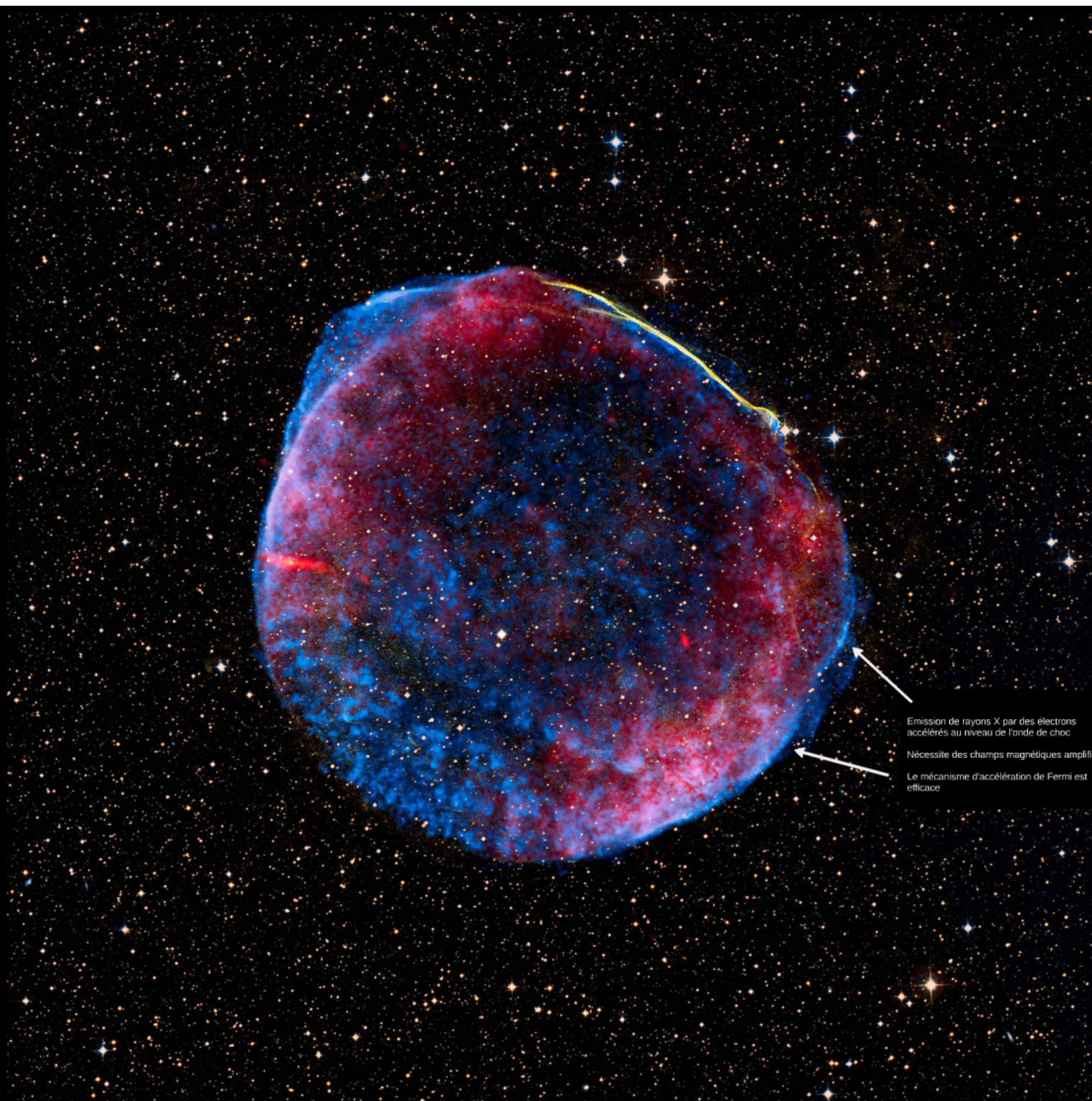
SN 1993J



SN 1987

# Et dans notre galaxie ?

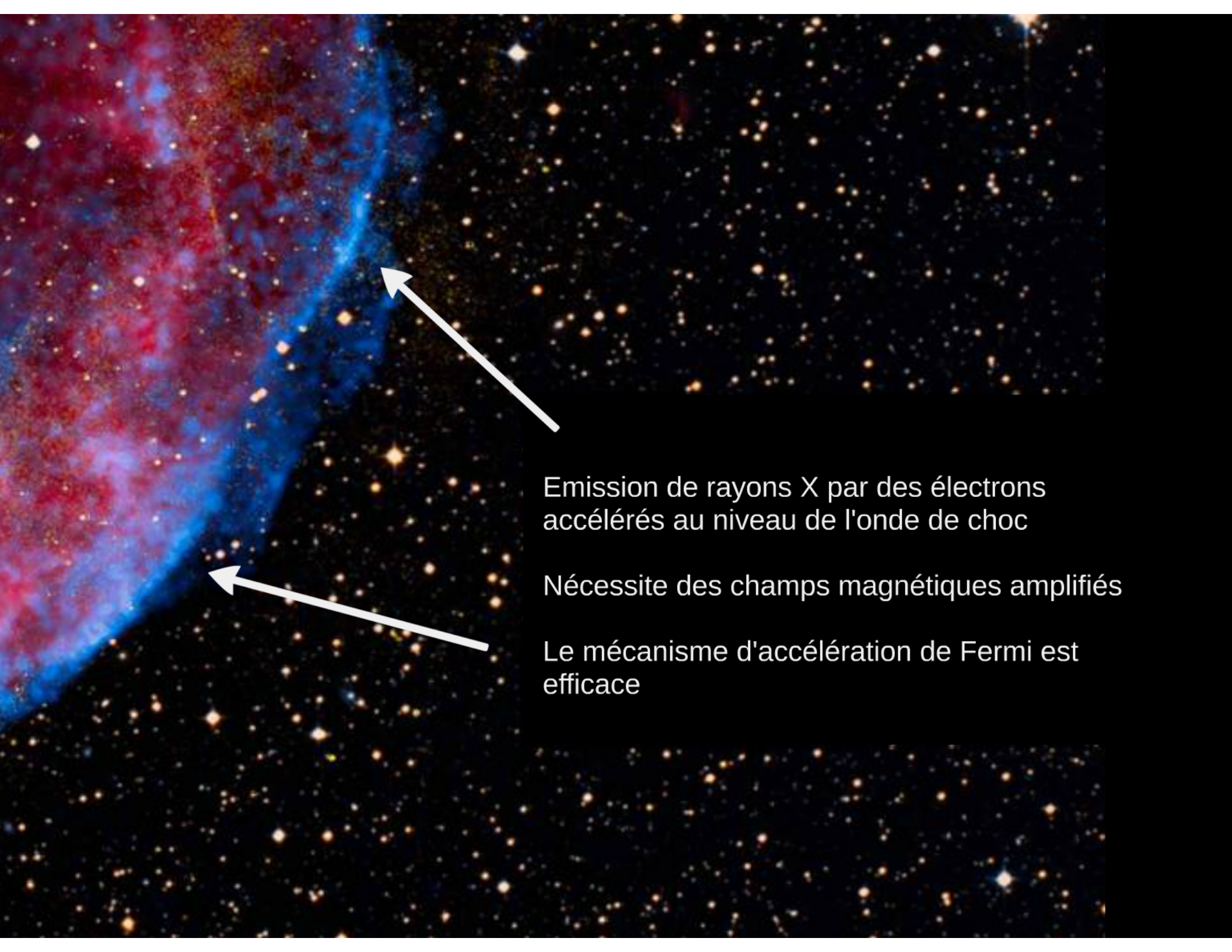




Emission de rayons X par des électrons accélérés au niveau de l'onde de choc

Nécessite des champs magnétiques amplifiés

Le mécanisme d'accélération de Fermi est efficace




Emission de rayons X par des électrons accélérés au niveau de l'onde de choc

Nécessite des champs magnétiques amplifiés

Le mécanisme d'accélération de Fermi est efficace



A magnifying glass with a white frame is positioned over a dark, starry sky. The lens of the magnifying glass is centered on a bright, multi-colored nebula or star-forming region. The text "Comment voir l'accélération des rayons cosmiques ?" is written in white, sans-serif font across the center of the magnifying glass lens. A small, dark rectangular object with some internal structure is visible within the magnified area, partially obscured by the text.

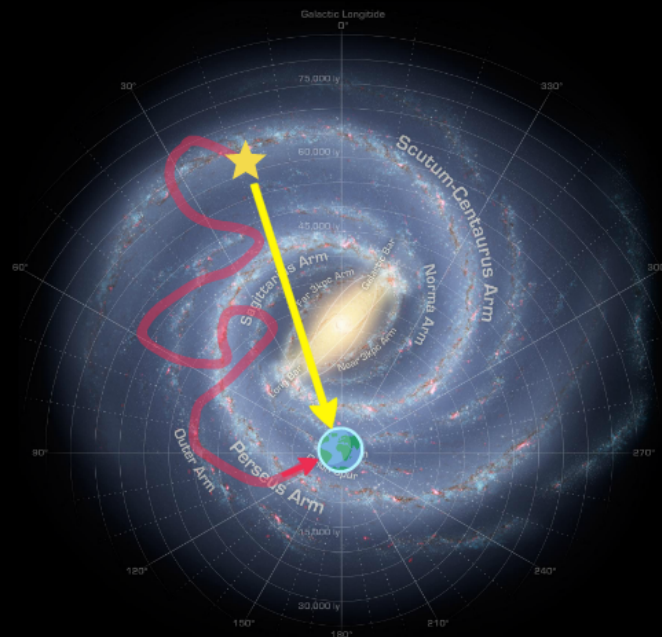
Comment voir  
l'accélération des  
rayons  
cosmiques ?



Les vestiges de supernova sont les accélérateurs de particules les plus probables pour expliquer le flux de rayons cosmiques sur Terre

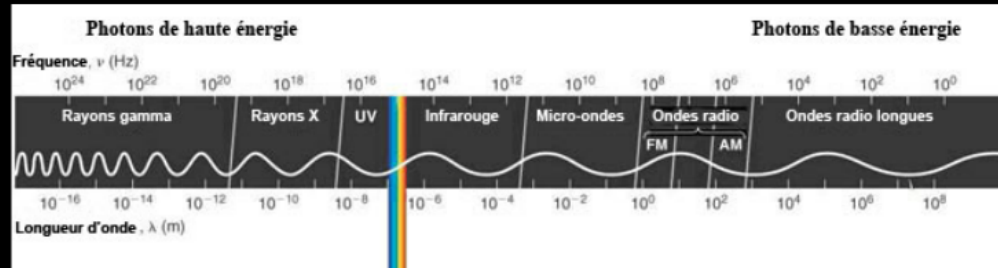
Le mécanisme imaginé par Fermi est efficace pour accélérer des leptons

Qu'en est-il des protons (99% des RC) ?



L'astronomie jusqu'au rayons X ne permet que de voir des processus thermiques et/ou leptoniques...

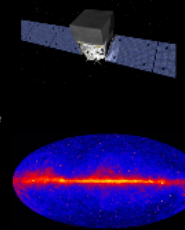
# Avènement de l'astronomie Gamma de précision :



- Dans l'espace :
  - Fermi-LAT
  - AGILE

Détecteur de particules dans l'espace...

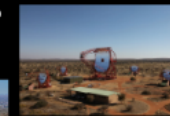
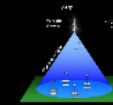
- En service depuis 2008
- Observe le rayonnement gamma entre 100 MeV et 300 GeV
- Balaie le ciel complet



- Sur Terre :
  - H.E.S.S.
  - VERITAS
  - MAGIC

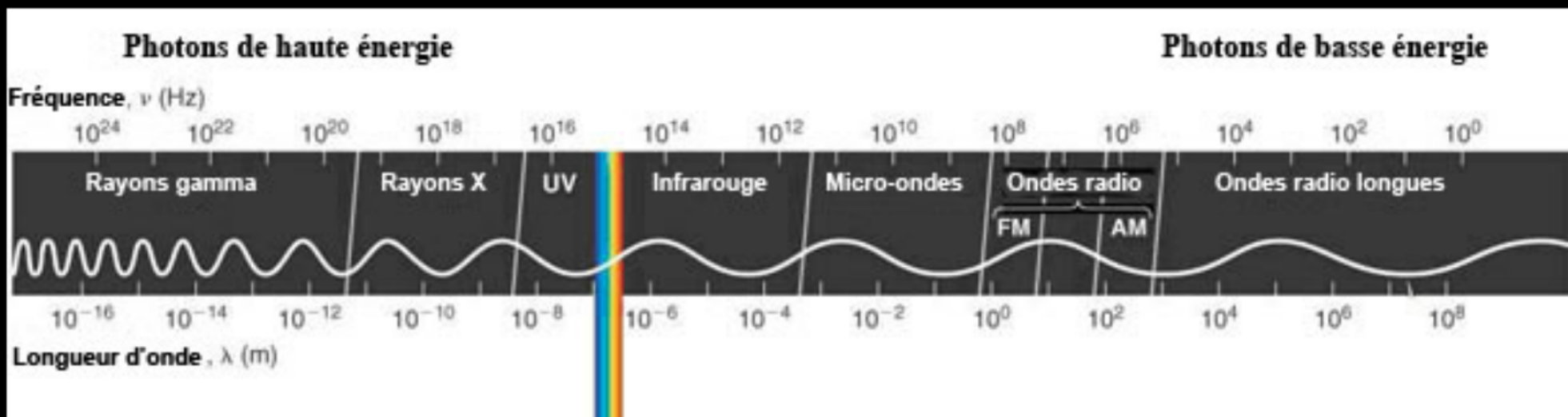
A plus haute énergie il faut redescendre sur Terre

- Réseau de télescopes Tcherenkov
- L'atmosphère fait partie du détecteur
- Détection indirecte des rayons gamma au delà de 100 GeV
- Début des observations : début des années 2000



Expérience H.E.S.S. en Namibie

# ement de l'astronomie Gamma de



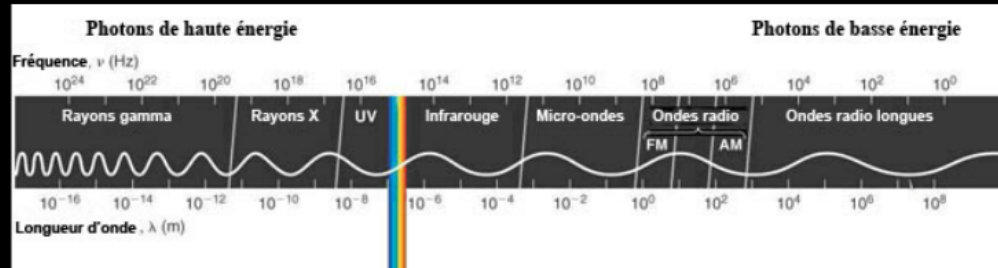
## s l'espace :

- Fermi-LAT

Détecteur de particules dans l'espace...

- En service depuis 2008
- Observe le rayonnement gamma entre 100 MeV et 300 GeV
- Balaye le ciel complet

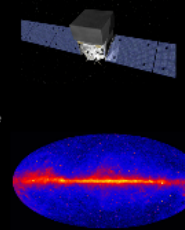
# Avènement de l'astronomie Gamma de précision :



- Dans l'espace :
  - Fermi-LAT
  - AGILE

Détecteur de particules dans l'espace...

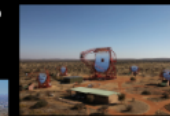
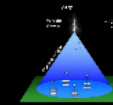
- En service depuis 2008
- Observe le rayonnement gamma entre 100 MeV et 300 GeV
- Balaie le ciel complet



- Sur Terre :
  - H.E.S.S.
  - VERITAS
  - MAGIC

A plus haute énergie il faut redescendre sur Terre

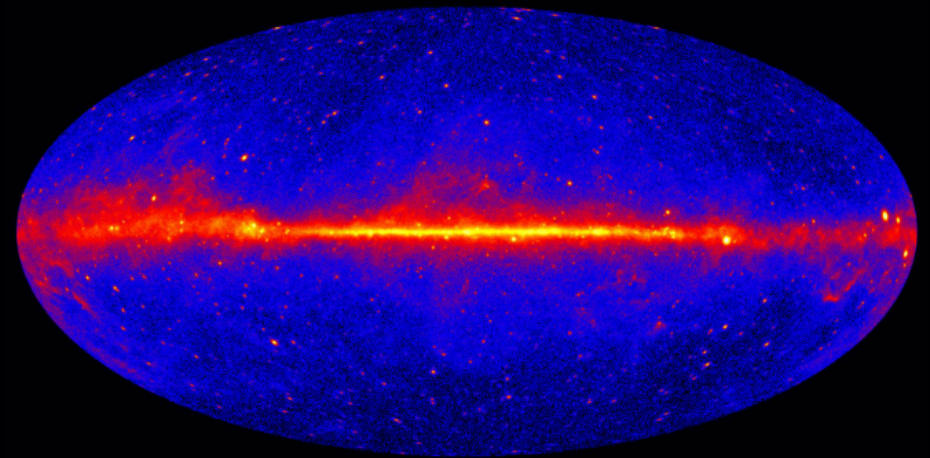
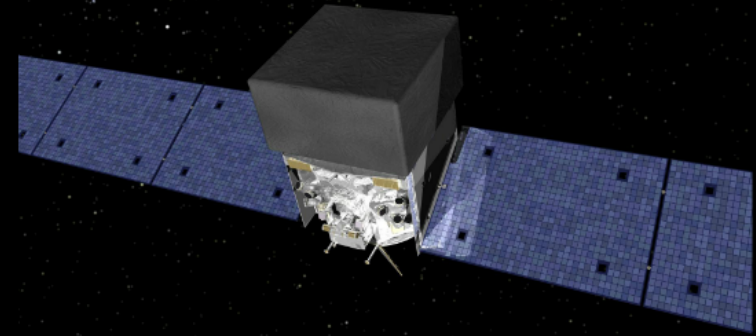
- Réseau de télescopes Tcherenkov
- L'atmosphère fait partie du détecteur
- Détection indirecte des rayons gamma au delà de 100 GeV
- Début des observations : début des années 2000



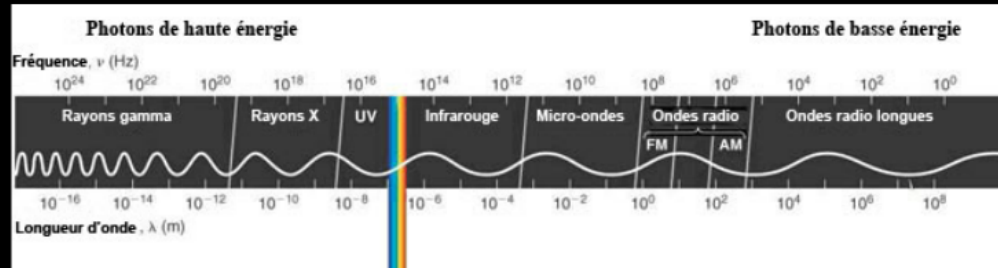
Expérience H.E.S.S. au monde

## Détecteur de particules dans l'espace...

- En service depuis 2008
- Observe le rayonnement gamma entre 100 MeV et 300 GeV
- Balaye le ciel complet



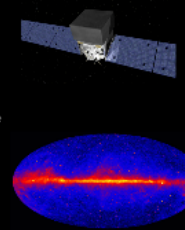
# Avènement de l'astronomie Gamma de précision :



- Dans l'espace :
  - Fermi-LAT
  - AGILE

Détecteur de particules dans l'espace...

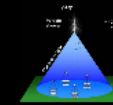
- En service depuis 2008
- Observe le rayonnement gamma entre 100 MeV et 300 GeV
- Balaie le ciel complet



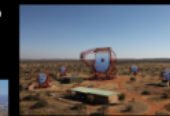
- Sur Terre :
  - H.E.S.S.
  - VERITAS
  - MAGIC

A plus haute énergie il faut redescendre sur Terre

- Réseau de télescopes Tcherenkov
- L'atmosphère fait partie du détecteur
- Détection indirecte des rayons gamma au delà de 100 GeV
- Début des observations : début des années 2000



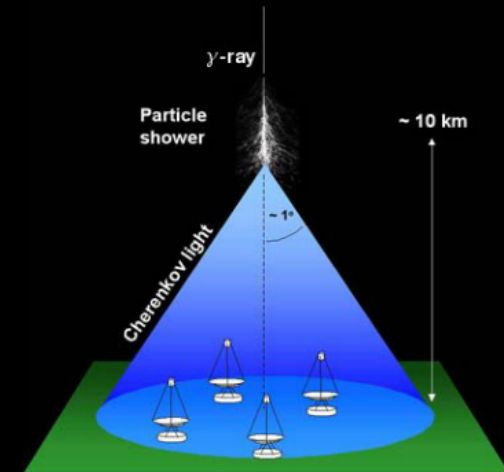
Expérience MAGIC dans les Açores



Expérience H.E.S.S. en Namibie

A plus haute énergie il faut redescendre sur Terre

- Réseau de télescopes Tcherenkov
- L'atmosphère fait partie du détecteur
- Détection indirecte des rayons gamma au delà de 100 GeV
- Début des observations : début des années 2000

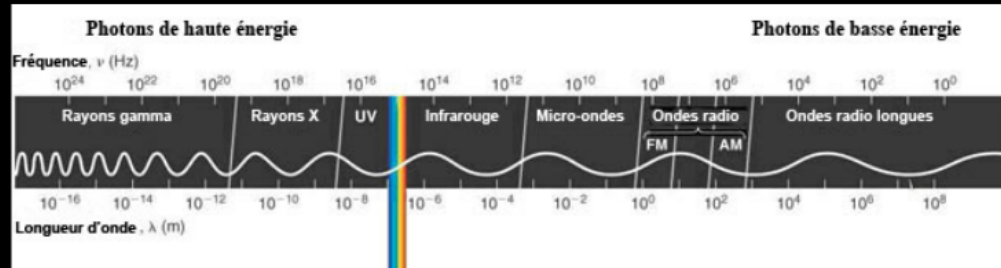


Expérience VERITAS en Arizona



Expérience H.E.S.S. en Namibie

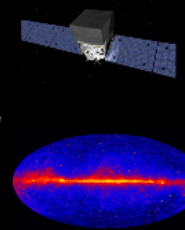
# Avènement de l'astronomie Gamma de précision :



- Dans l'espace :
  - Fermi-LAT
  - AGILE

Détecteur de particules dans l'espace...

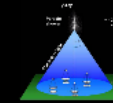
- En service depuis 2008
- Observe le rayonnement gamma entre 100 MeV et 300 GeV
- Balaie le ciel complet



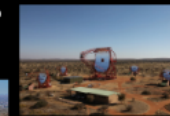
- Sur Terre :
  - H.E.S.S.
  - VERITAS
  - MAGIC

A plus haute énergie il faut redescendre sur Terre

- Réseau de télescopes Tcherenkov
- L'atmosphère fait partie du détecteur
- Détection indirecte des rayons gamma au delà de 100 GeV
- Début des observations : début des années 2000



Expérience MAGIC2005 en Espagne

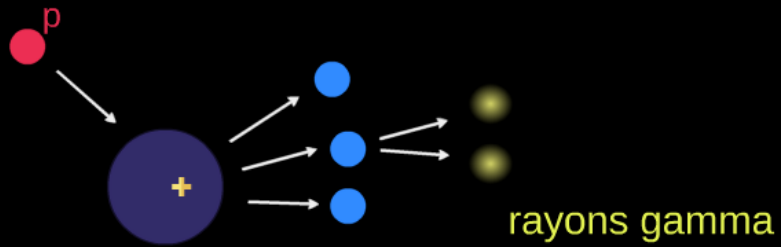


Expérience H.E.S.S. en Namibie

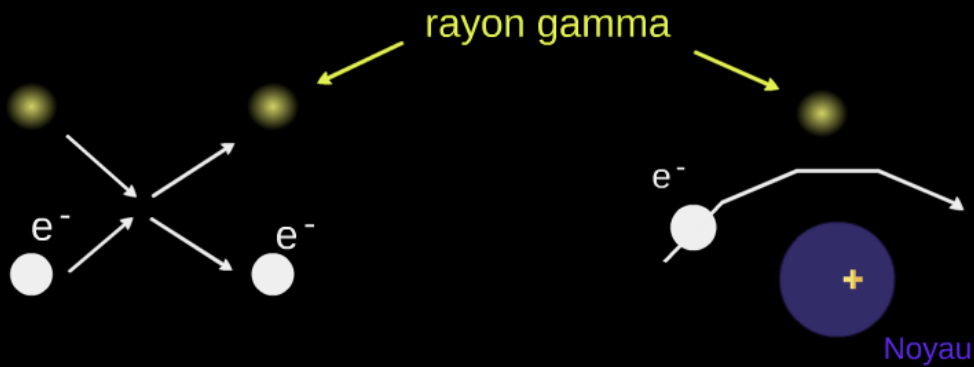


Deux moyens de produire des rayons gamma :

- Processus hadroniques :



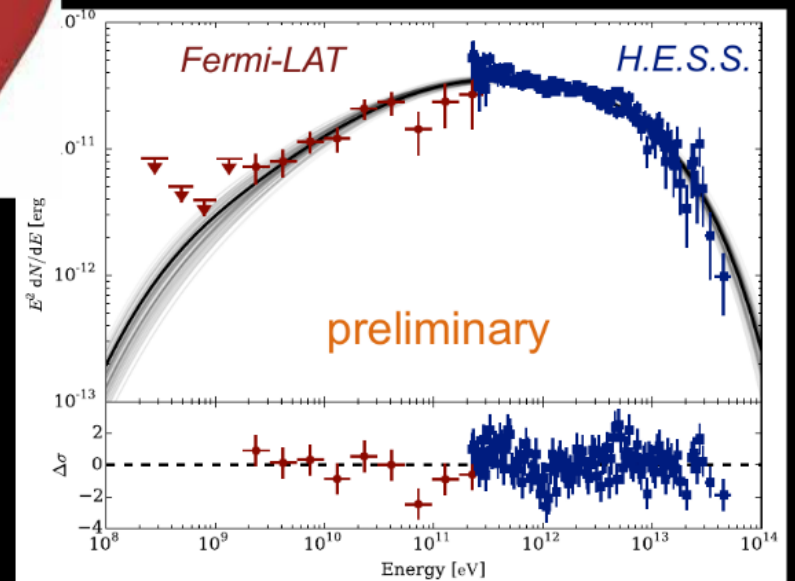
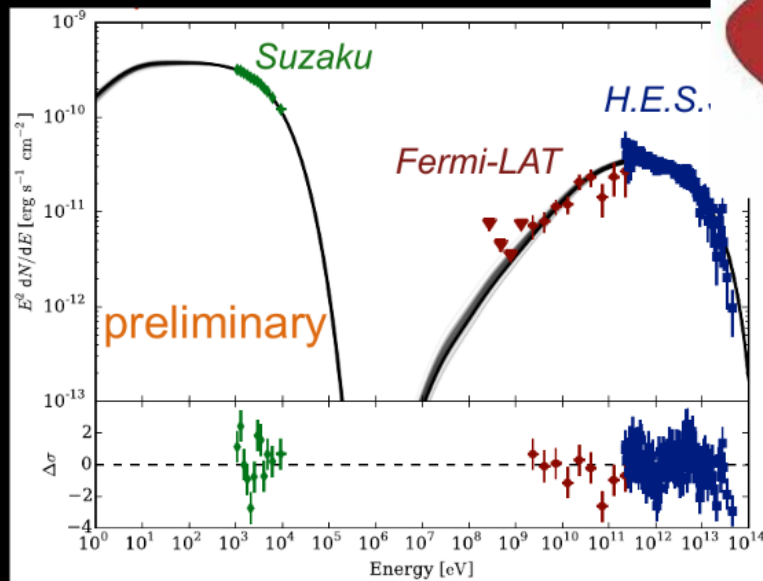
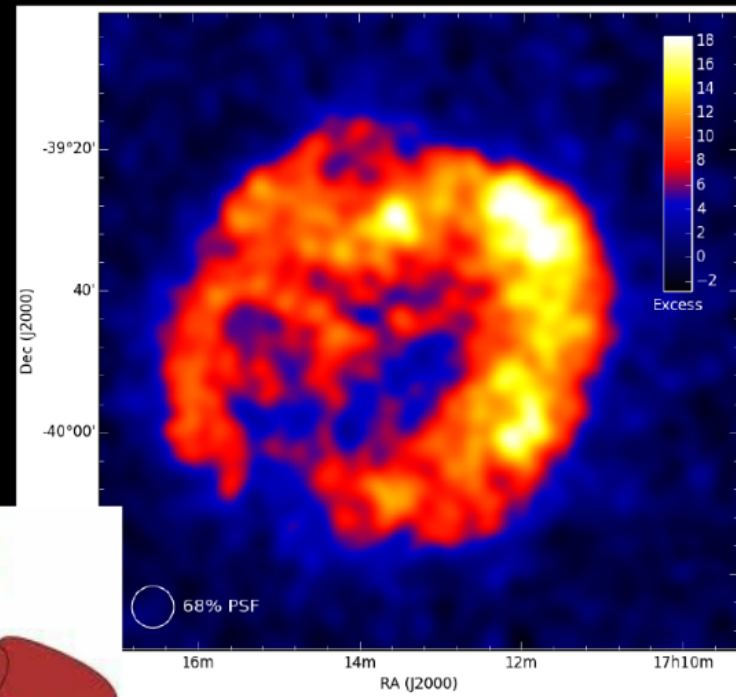
- Processus leptoniques :



# RXJ 1713.7-3946

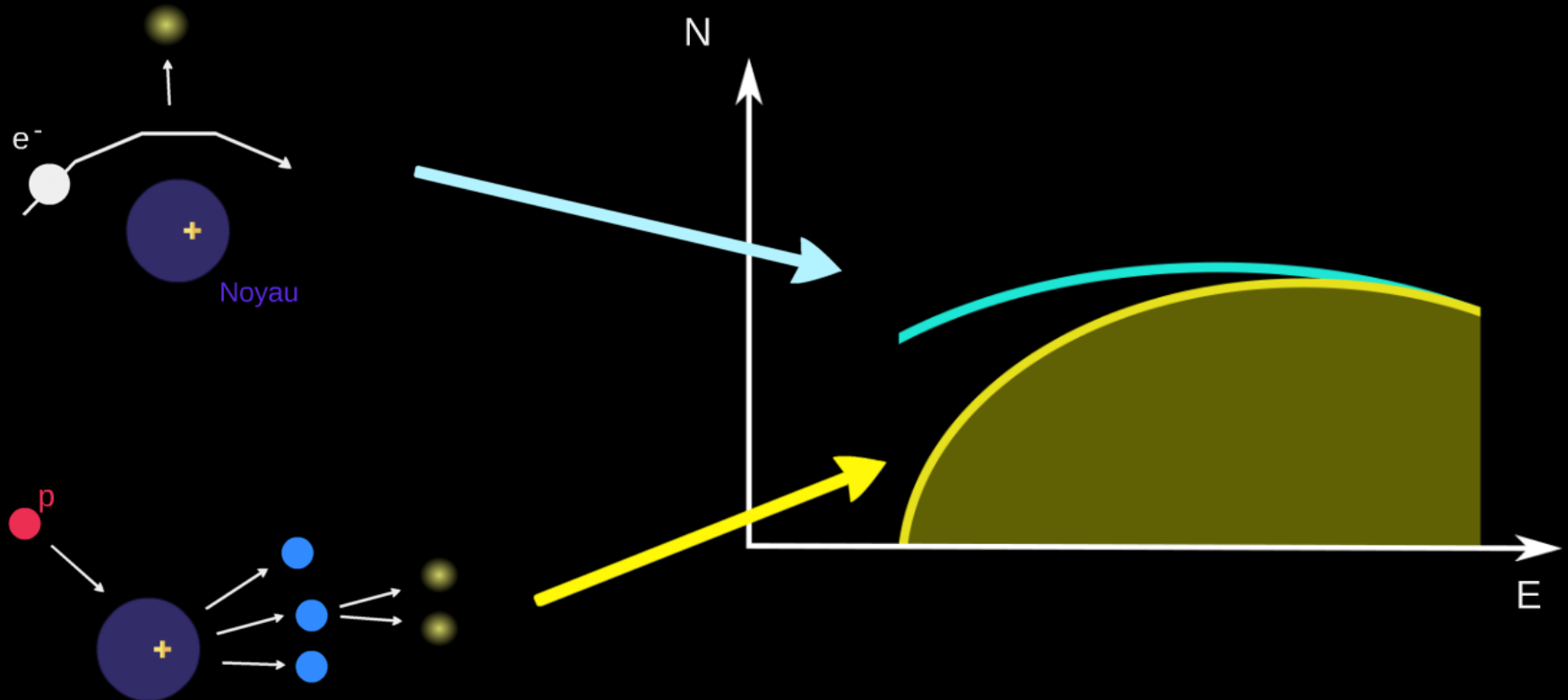
Un vestige très observé :

- ~1600 ans
- Coquille visible à d'autres longueurs d'onde
- Candidat idéal pour sonder l'accélération de rayons cosmiques

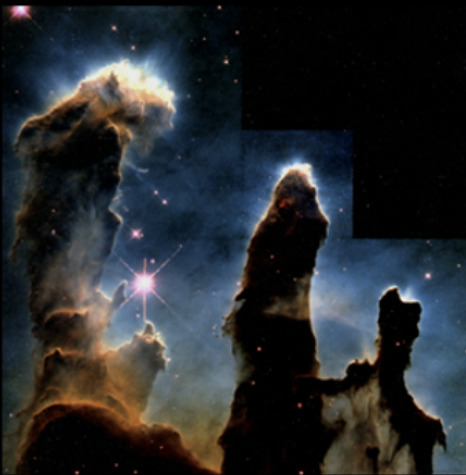
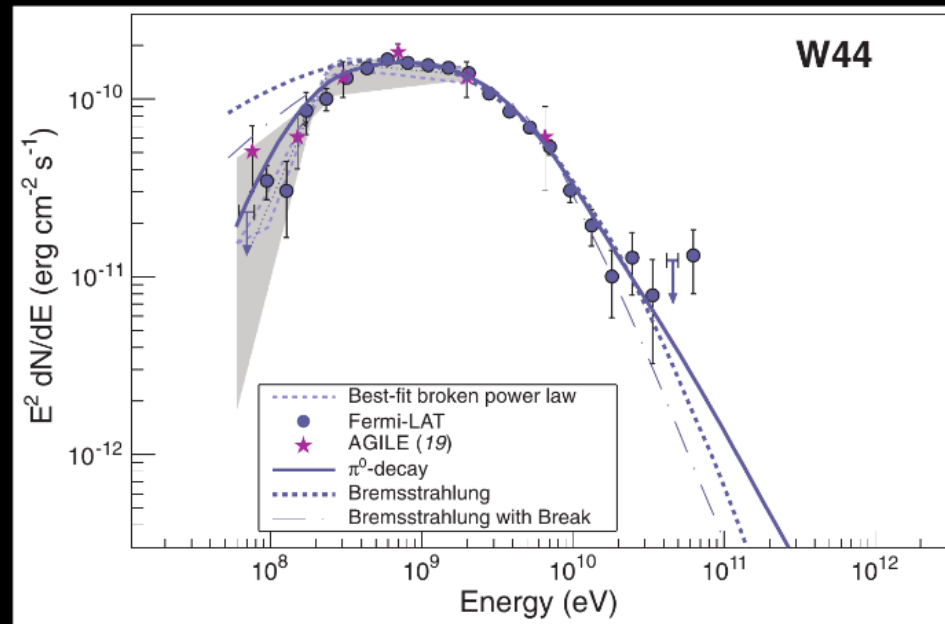
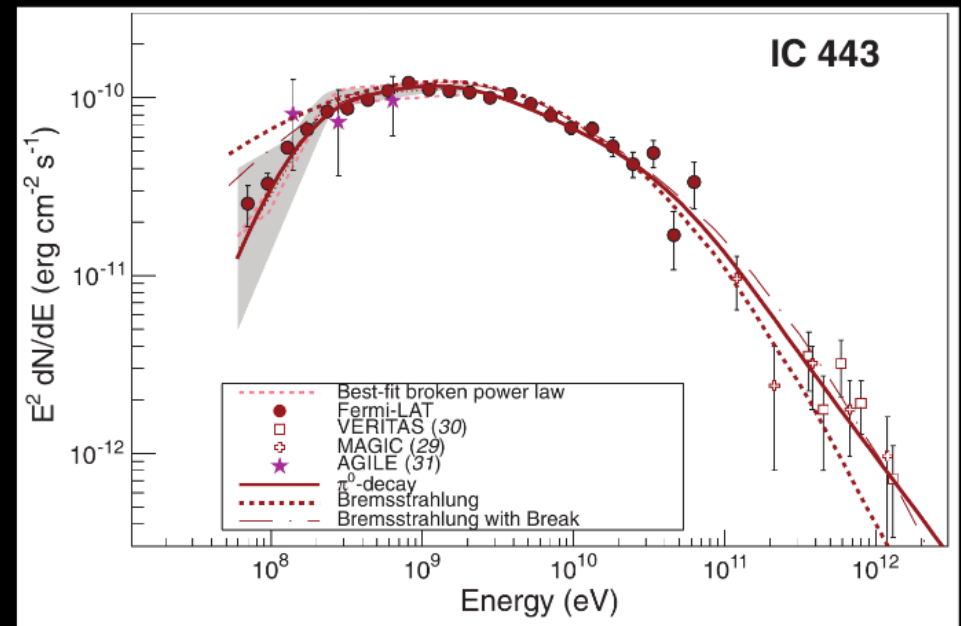
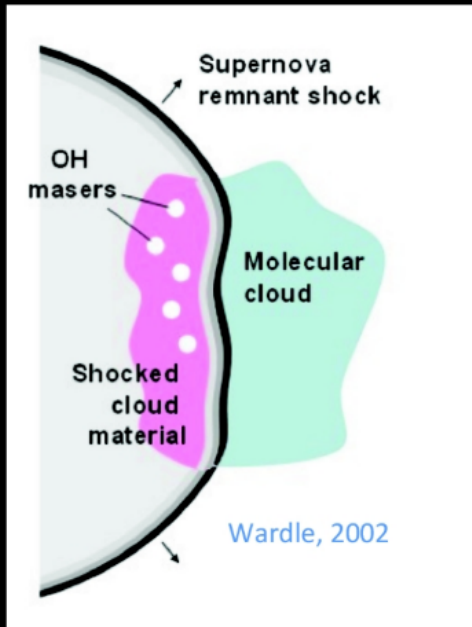


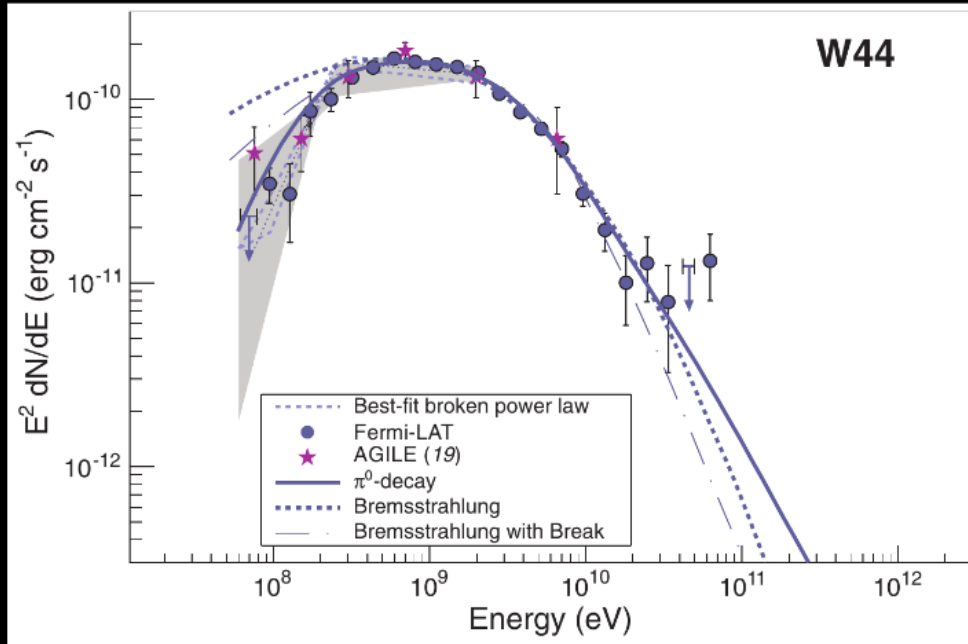
Augmenter la part des interactions hadroniques

La densité est la clé

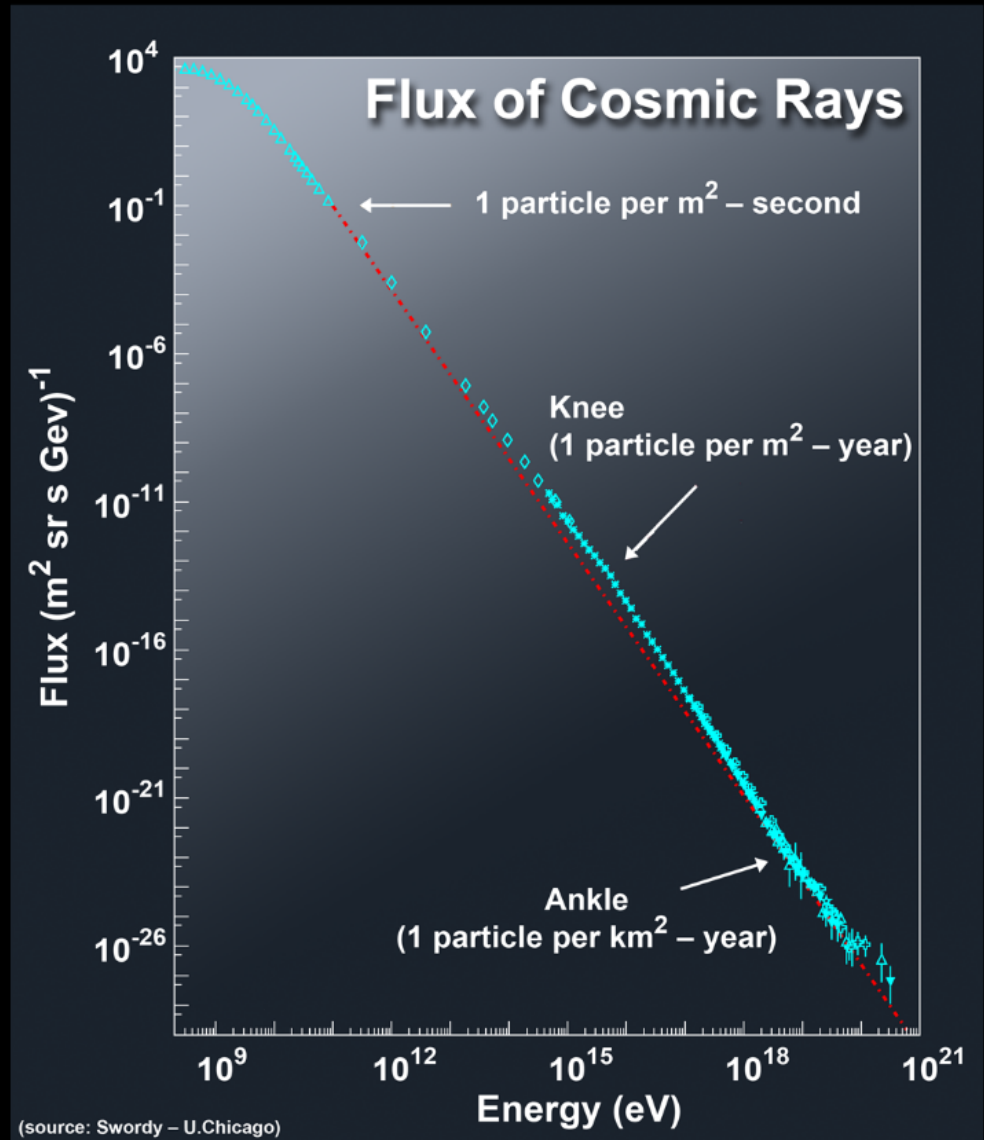


# Vestige de supernova en interaction avec des nuages moléculaires





- Diffusion ?
- Mécanisme d'accélération ?

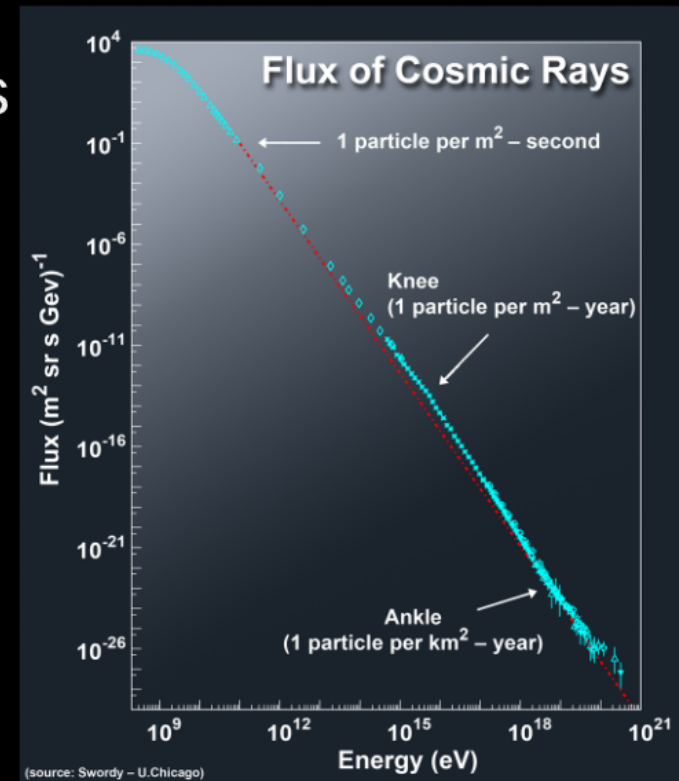


L'accélération des rayons cosmiques de plus hautes énergies se produit probablement durant les premiers siècles du vestige

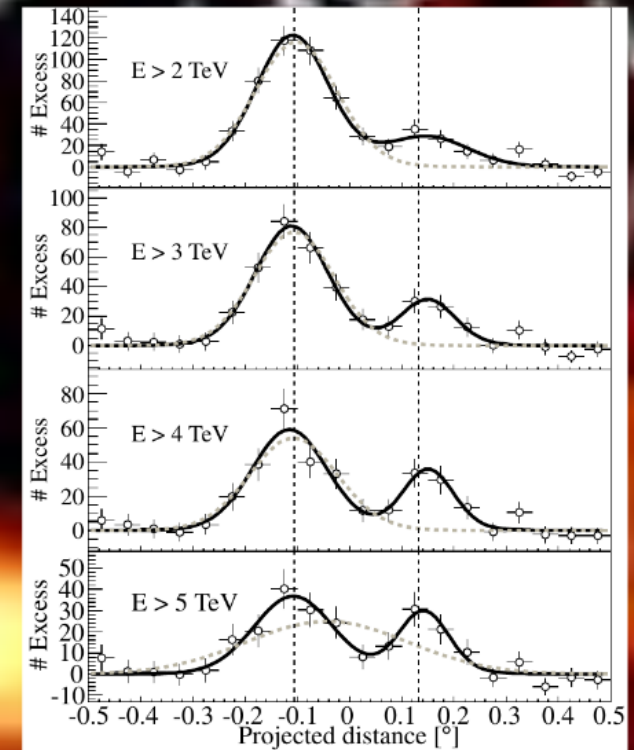
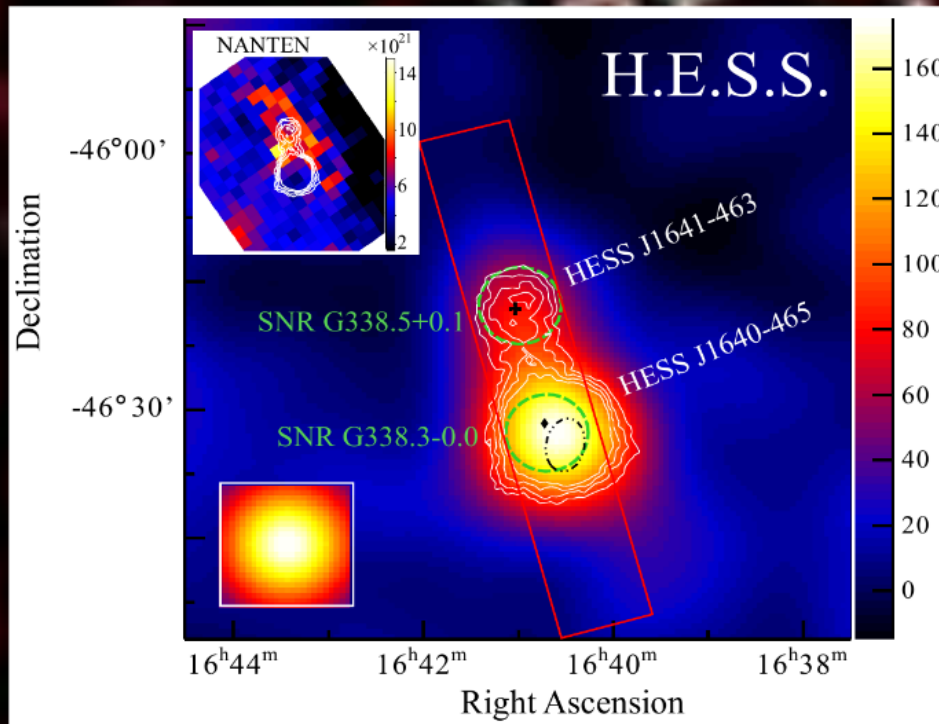
Probablement très peu d'accélérateur "au genou" actuellement dans notre galaxie...

L'environnement est rarifié, donc très peu de flux de rayons gamma

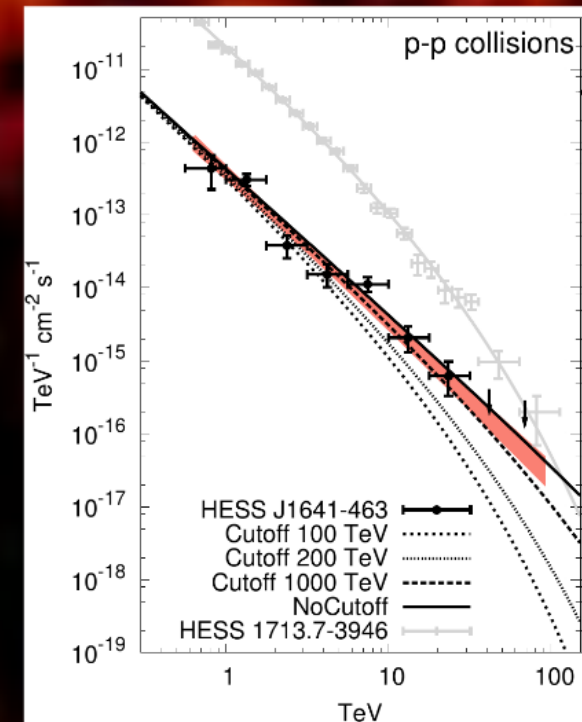
... limite de sensibilité de nos instruments



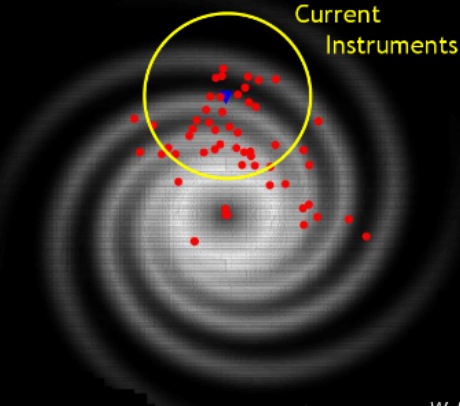




Le spectre gamma ne montre pas de brisure jusqu'à plusieurs dizaines de TeV

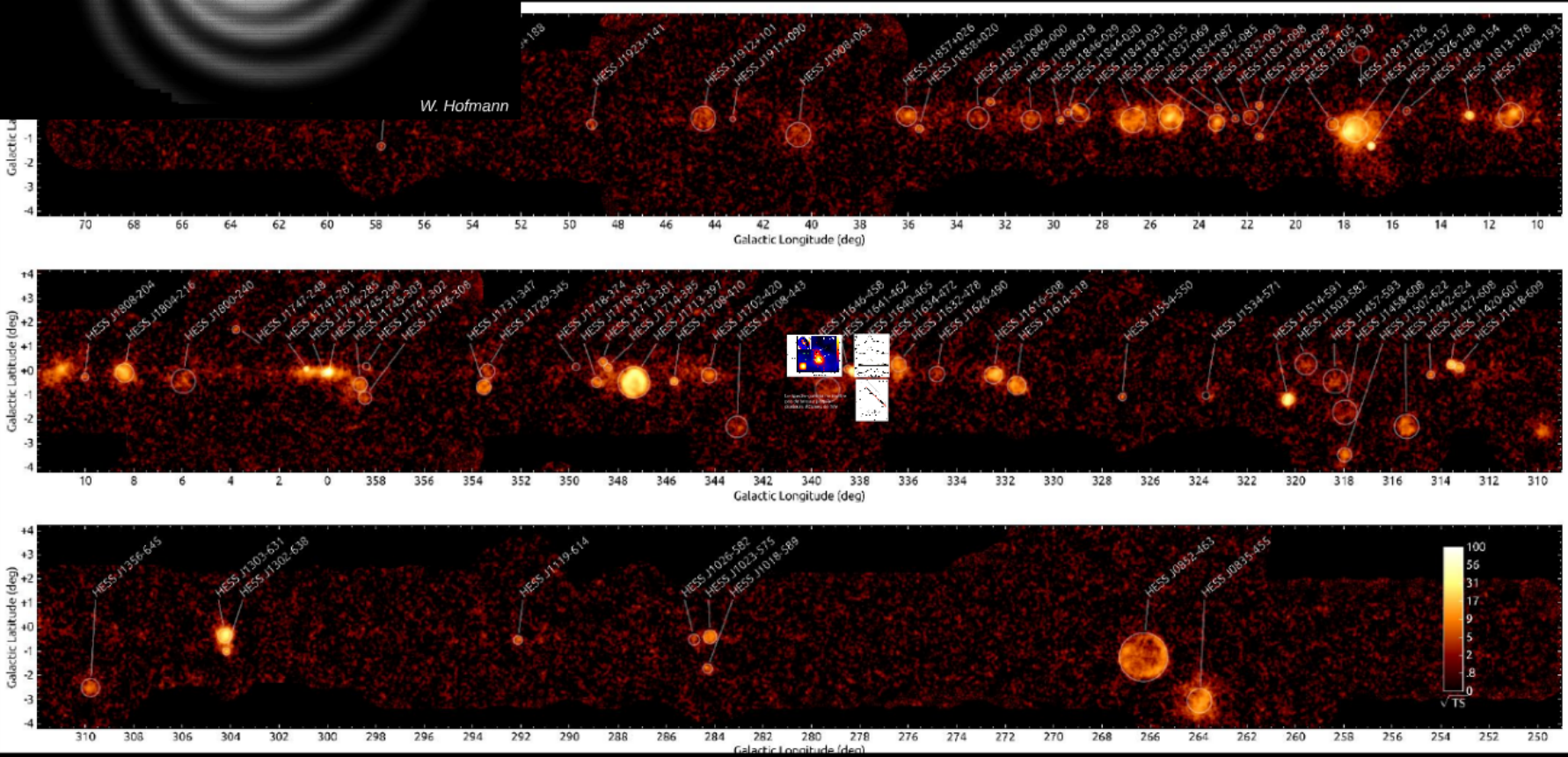




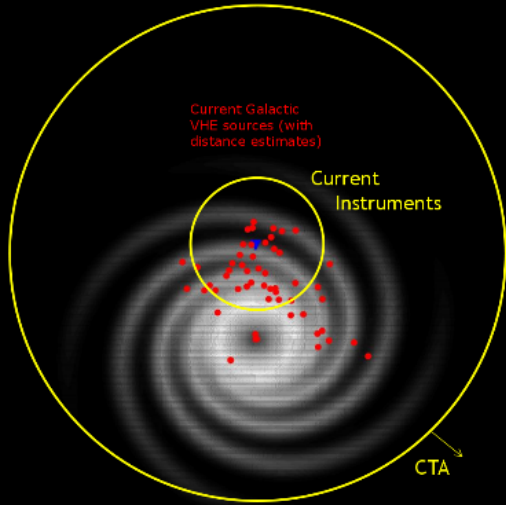
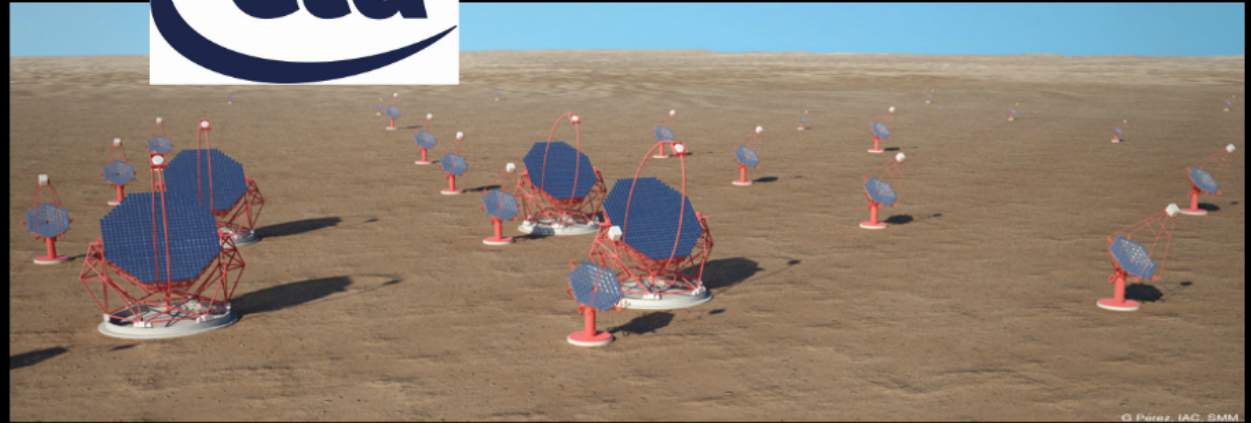


Après plus de dix ans de traque,  
on a quelques candidats...

W. Hofmann



Repoussons les limites !!



**31 Countries**  
**192 Institutes**  
**1270 Members**

# *L'origine du rayonnement cosmique galactique*

Le rayonnement  
cosmique

Les accélérateurs  
cosmiques

Comment voir  
l'accélération des  
rayons  
cosmiques ?

## L'origine du rayonnement cosmique galactique



## Conclusions

- Les rayons cosmiques ont des implications diverses dans beaucoup de champ de l'astrophysique
- La compréhension de leur origine est un enjeu fondamental
- L'astronomie gamma a apporté une nouvelle vision des phénomènes violents de l'Univers
- La compréhension des mécanismes d'accélération, de diffusion, de propagation des rayons cosmiques a largement évolué cette dernière décennie
- La traque des accélérateurs rayons cosmiques galactiques de plus haute énergie se poursuit
- La diffusion et la propagation des rayons cosmiques dans la galaxie sont encore sujettes à de nombreuses incertitudes
- Les nouveaux instruments apporteront certainement leur lot de surprises

