



# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

**Michaël De Becker**

**Space sciences, Technologies and Astrophysics Research  
(STAR) institute  
Department of Astrophysics, Geophysics and Oceanography (AGO)**

# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

Qu'est-ce que la radioastronomie?

Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules?

En quoi la radioastronomie nous renseigne-t-elle sur les accélérateurs de particules dans l'Univers?

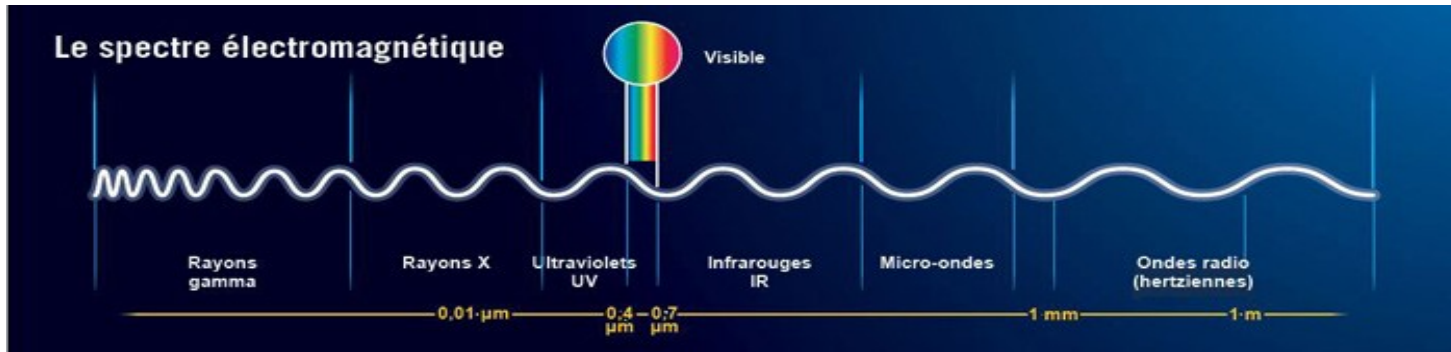
Quels accélérateurs de particules sont bien identifiés?

# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

**Qu'est-ce que la radioastronomie?**

## Qu'est-ce que la radioastronomie?

*Domaine de l'astronomie qui consiste en l'observation, et par extension l'interprétation des phénomènes naturels émettant du rayonnement radio dans l'Univers*



→ *accessibilité d'une source d'information complémentaire vis-à-vis de la lumière dite visible (ou d'autres types de lumière)*

**Remarque:** le volet *interprétation* justifierait davantage de parler d'astrophysique radio, mais on utilise encore régulièrement le mot "radioastronomie".

# Qu'est-ce que la radioastronomie?

## La première découverte... accidentelle



Karl Jansky  
(1905 – 1950)

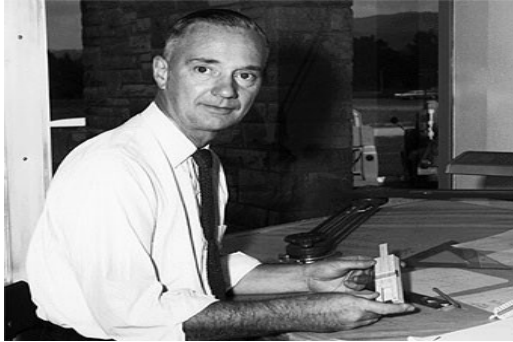


Antenne de télécommunication (sensible à 20 MHz)

- détection d'un signal radio "gênant" avec une récurrence égale au jour sidéral (23h 56m)
- émission radio provenant principalement du centre de la Voie Lactée

# Qu'est-ce que la radioastronomie?

## Le début de l'astrophysique radio...



Grote Reber  
(1911 – 2002)

- *Premières observations de diverses zones du ciel*

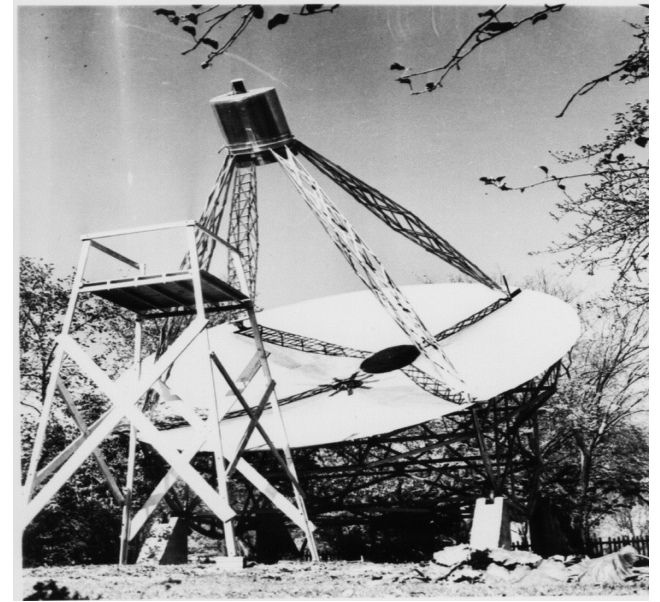
  - détection de plusieurs sources radio brillantes

- *Observations à plusieurs fréquences/longueurs d'onde*

  - découverte importante sur la nature physique de l'émission radio d'une partie importante des sources: "des électrons voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière sont responsables de cette émission radio"

    - **rayonnement synchrotron**

Antenne radio  
construite par G.  
Reber en 1937



# Qu'est-ce que la radioastronomie?

## Le développement de l'astrophysique radio...

Développement de plusieurs installations dédiées à la radioastronomie partout dans le monde...

Quelques exemples...



Dwingeloo, Pays-Bas  
(25m, 1956)



Lovell, UK (76 m, 1957)



Parkes, Australie (64 m, 1957)



Effelsberg, Allemagne  
(100 m, 1971)



## Qu'est-ce que la radioastronomie?

### Le développement de l'astrophysique radio...

Interféromètres permettant de combiner plusieurs antennes simultanément → gain substantiel en qualité de l'imagerie  
(Prix Nobel en 1974, Martin Ryle)



Westerbork Synthesis Radio Telescope,  
Pays-Bas (14 X 25 m, 1970)



Very Large Array, USA  
(27 X 25 m, 1980)



# Qu'est-ce que la radioastronomie?

## Une contribution majeure à l'astrophysique moderne...

- L'ouverture du domaine radio a permis aux astrophysiciens d'accéder à une source d'information complémentaire vis-à-vis de l'astronomie classique  
→ *amélioration substantielle de la vision multi-fréquentielle de l'Univers*
- Les phénomènes mesurés dans le domaine radio sont totalement inaccessibles au domaine dit "visible"  
→ *extension considérable de la portée astrophysique des observations astronomiques*
- Paradoxalement, l'étude du rayonnement de basse énergie a joué un rôle majeur dans l'étude des phénomènes les plus énergétiques  
→ *développement conjoint de l'astrophysique radio et de l'astrophysique des hautes énergies*

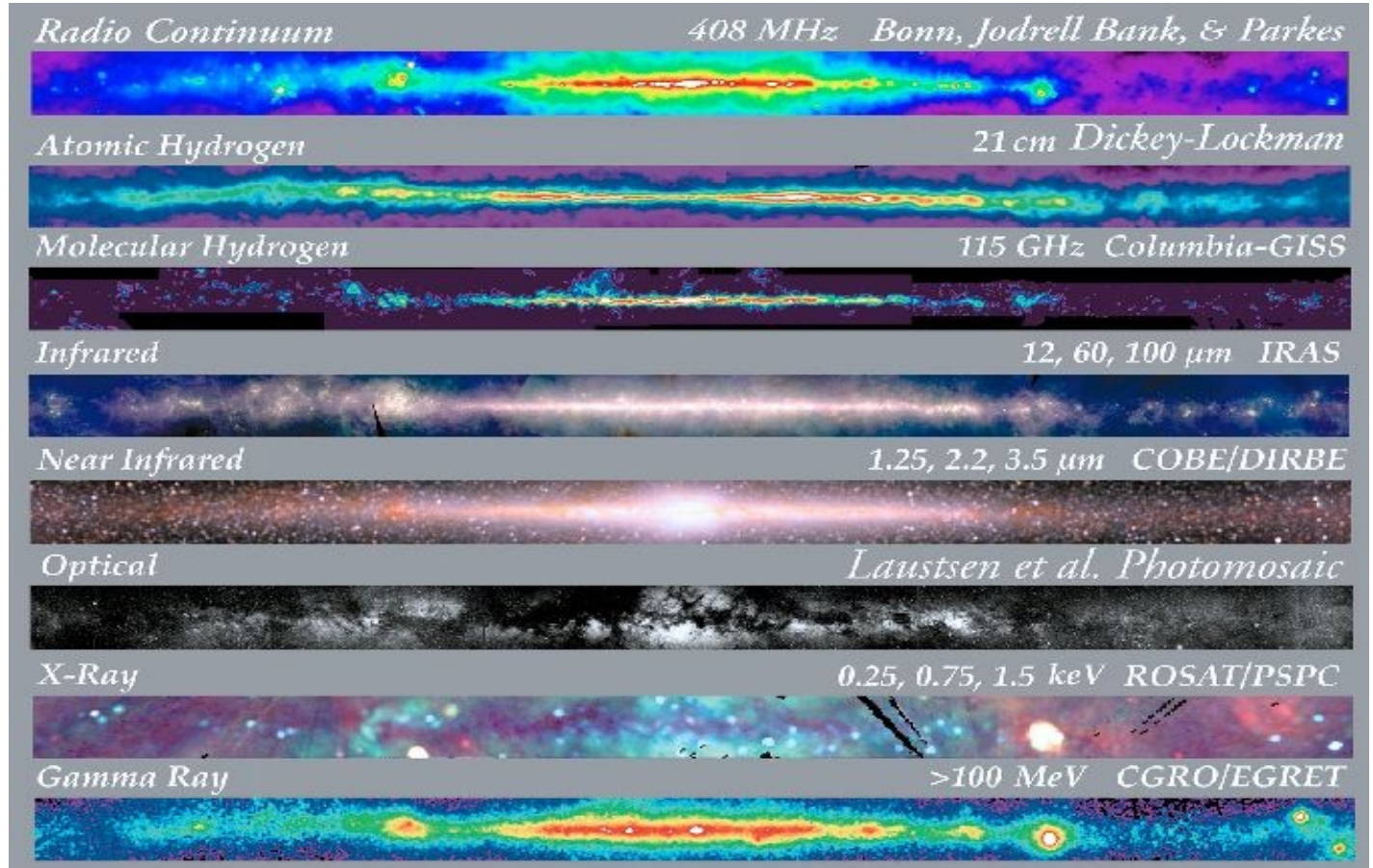
# Qu'est-ce que la radioastronomie?

## Une contribution majeure à l'astrophysique moderne...

- L'ouverture du domaine radio a permis aux astrophysiciens d'accéder à une source d'information complémentaire vis-à-vis de l'astronomie classique  
→ *amélioration substantielle de la vision multi-fréquentielle de l'Univers*
- Les phénomènes mesurés dans le domaine radio sont totalement inaccessibles au domaine dit "visible"  
→ *extension considérable de la portée astrophysique des observations astronomiques*
- Paradoxalement, l'étude du rayonnement de basse énergie a joué un rôle majeur dans l'étude des phénomènes les plus énergétiques  
→ *développement conjoint de l'astrophysique radio et de l'astrophysique des hautes énergies*  
  
→ **Points essentiels pour l'étude des accélérateurs de particules**

## Exemple... Vision multi-fréquentielle de notre Galaxie?

**Similitudes  
associées à des  
processus physiques  
en commun,  
impliquant des  
particules très  
énergétiques !**



# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

**Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules?**

## Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules?

*En toute généralité, tout système physique susceptible de transférer de l'énergie depuis un réservoir donné vers des particules, conduisant à leur accélération*

*→ conversion d'énergie (par exemple énergie mécanique d'un environnement astrophysique donné) en énergie cinétique des particules...*

Quand le transfert d'énergie vers les particules est suffisamment quantitatif, leur énergie cinétique est telle que leur vitesse est proche de celle de la lumière: *on parle de particules relativistes.*

# Que faut-il pour qu'un environnement astrophysique soit un accélérateur significatif de particules?

Réservoir  
d'énergie  
suffisant

*Typiquement, de  
l'énergie mécanique...*



# Que faut-il pour qu'un environnement astrophysique soit un accélérateur significatif de particules?

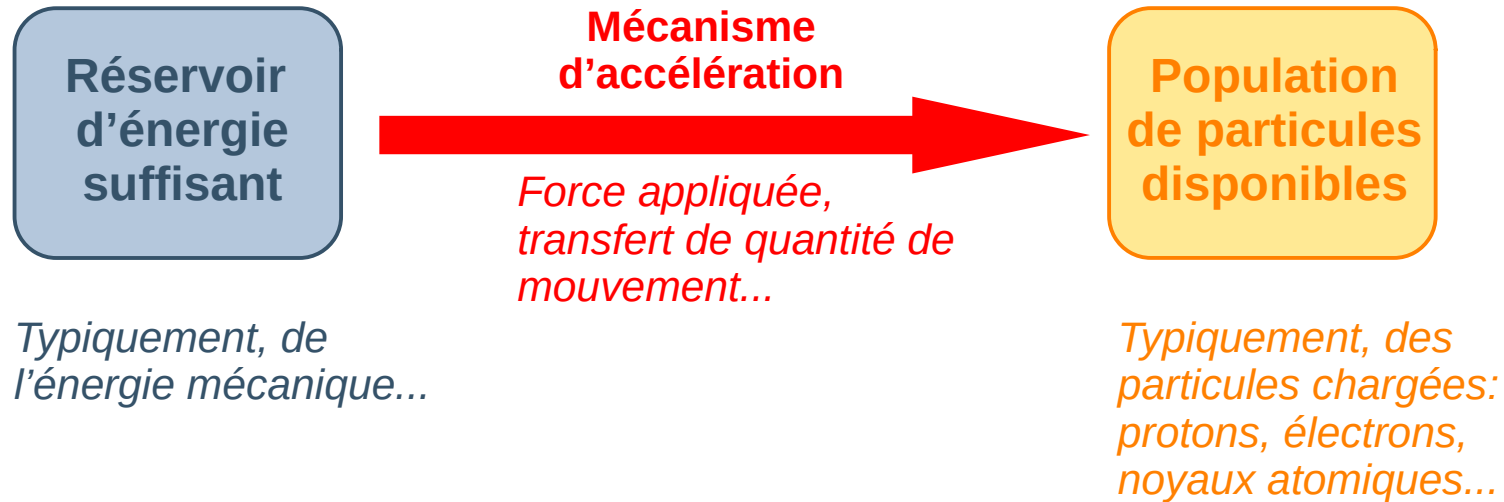
**Réservoir  
d'énergie  
suffisant**

*Typiquement, de  
l'énergie mécanique...*

**Population  
de particules  
disponibles**

*Typiquement, des  
particules chargées:  
protons, électrons,  
noyaux atomiques...*

# Que faut-il pour qu'un environnement astrophysique soit un accélérateur significatif de particules?



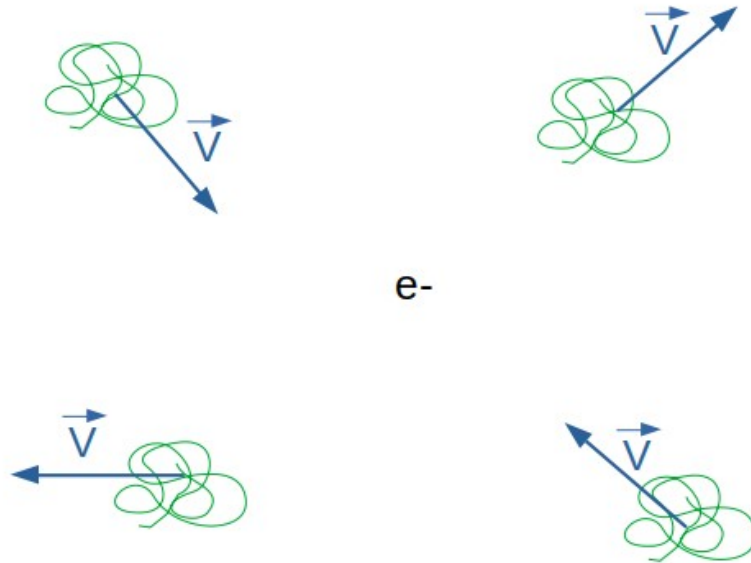
# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs



Enrico Fermi  
(1901 – 1955)

## Le mécanisme de Fermi (version originale)



Déplacement aléatoire de structures turbulentes du champ magnétique (vitesse  $V$ )

Electrons (par ex.) en mouvement  
→ force magnétique affectant leur mouvement

Certaines “collisions” sont plutôt frontales, ou bien arrières, avec transfert de quantité de mouvement

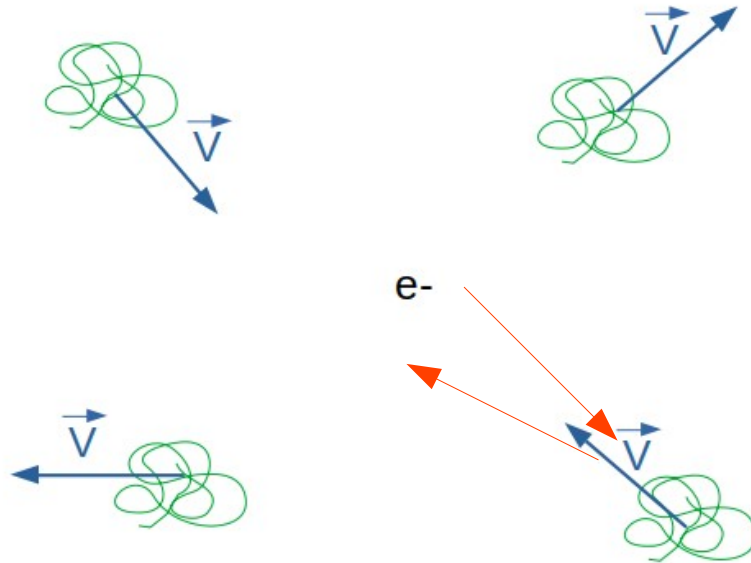
# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs



Enrico Fermi  
(1901 – 1955)

## Le mécanisme de Fermi (version originale)



Déplacement aléatoire de structures turbulentes du champ magnétique (vitesse  $V$ )

Electrons (par ex.) en mouvement  
→ force magnétique affectant leur mouvement

Certaines "collisions" sont plutôt frontales, ou bien arrières, avec transfert de quantité de mouvement

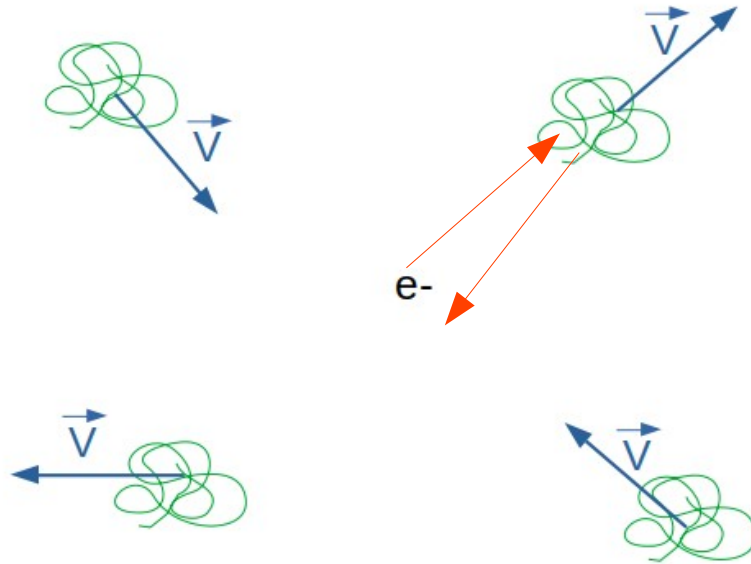
# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs



Enrico Fermi  
(1901 – 1955)

## Le mécanisme de Fermi (version originale)



Déplacement aléatoire de structures turbulentes du champ magnétique (vitesse  $V$ )

Electrons (par ex.) en mouvement  
→ force magnétique affectant leur mouvement

Certaines "collisions" sont plutôt frontales, ou bien arrières, avec transfert de quantité de mouvement

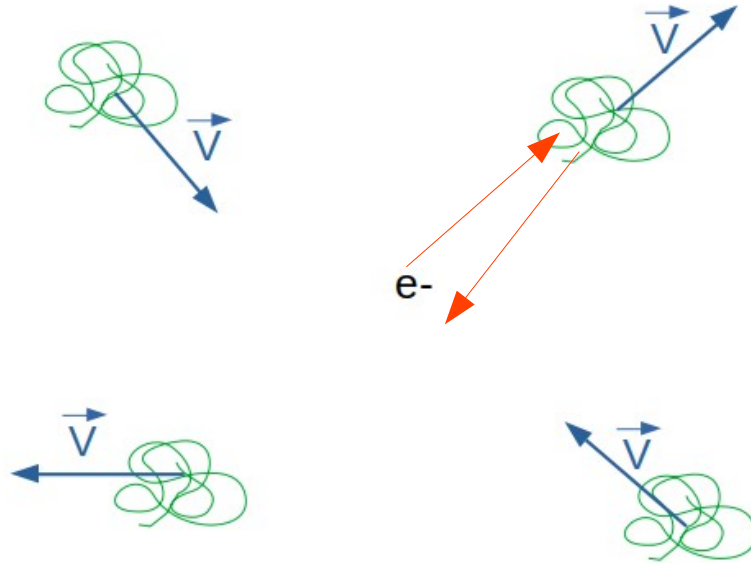
# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs



Enrico Fermi  
(1901 – 1955)

## Le mécanisme de Fermi (version originale)



Traitement statistique des “collisions” avec les structures turbulentes:

→ résultat net: gain fractionnaire en énergie des particules

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \left( \frac{V}{c} \right)^2$$

→ second ordre en  $V/c$

→ pas très efficace, mais significatif

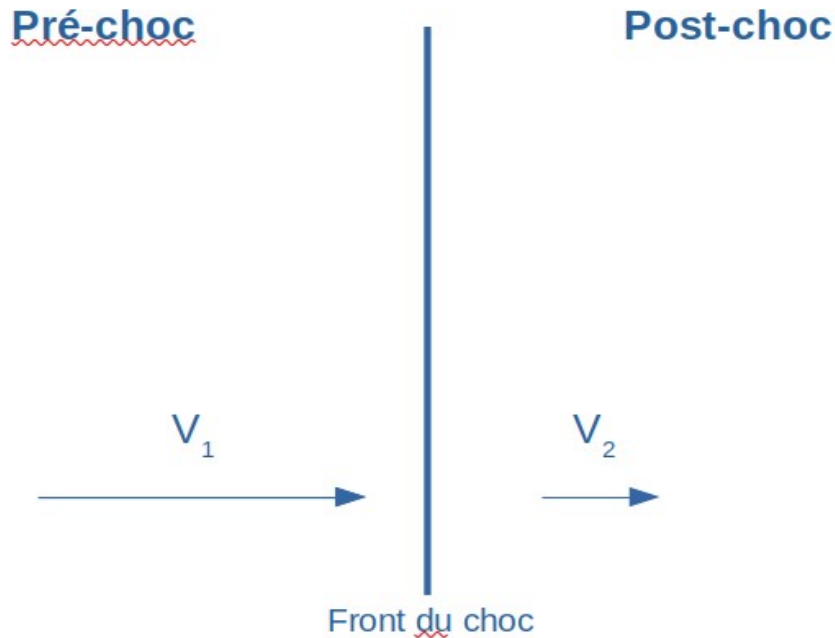
→ Fermi avait déjà souligné l'intérêt d'un mécanisme de premier ordre (uniquement des “collisions” frontales”)



# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs

**L'accélération diffusive par les chocs  
(réponse au besoin de "collisions" frontales uniquement)**



Un observateur se déplaçant avec l'écoulement pré-choc voit la partie post-choc s'approcher

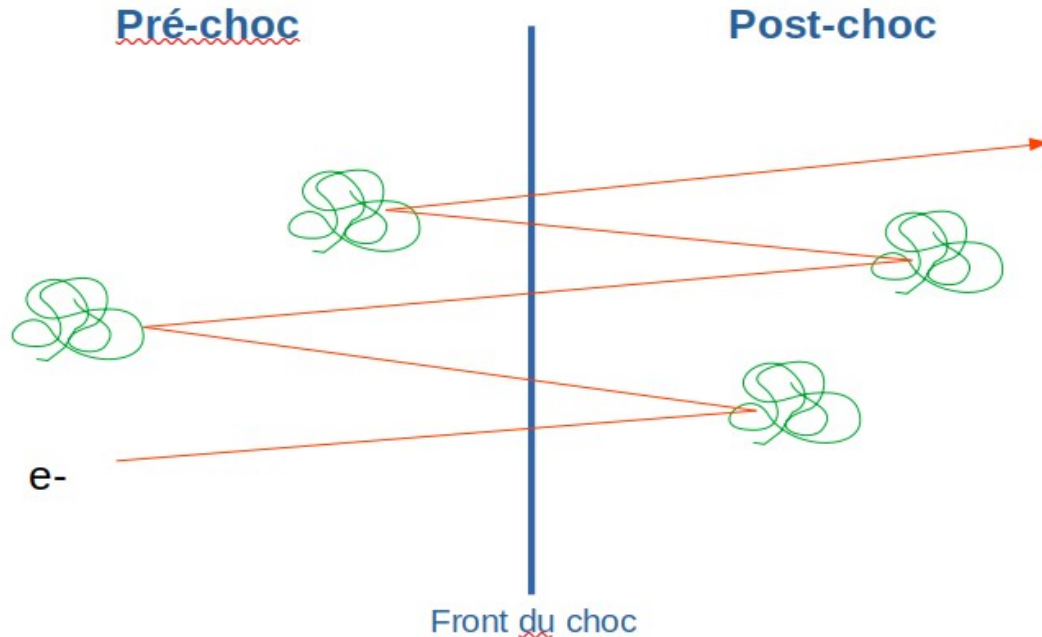
Un observateur se déplaçant avec l'écoulement post-choc voit la partie pré-choc s'approcher

Les vitesses d'approche mesurées par les deux observateurs sont identiques

# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs

**L'accélération diffusive par les chocs  
(réponse au besoin de "collisions" frontales uniquement)**



Un électron (par ex.) avec une vitesse suffisante peut dépasser le front du choc, et subir une "collision" avec la composante turbulente du champ magnétique, et repartir dans le sens opposé...

Collisions frontales → gain net d'énergie (premier ordre)

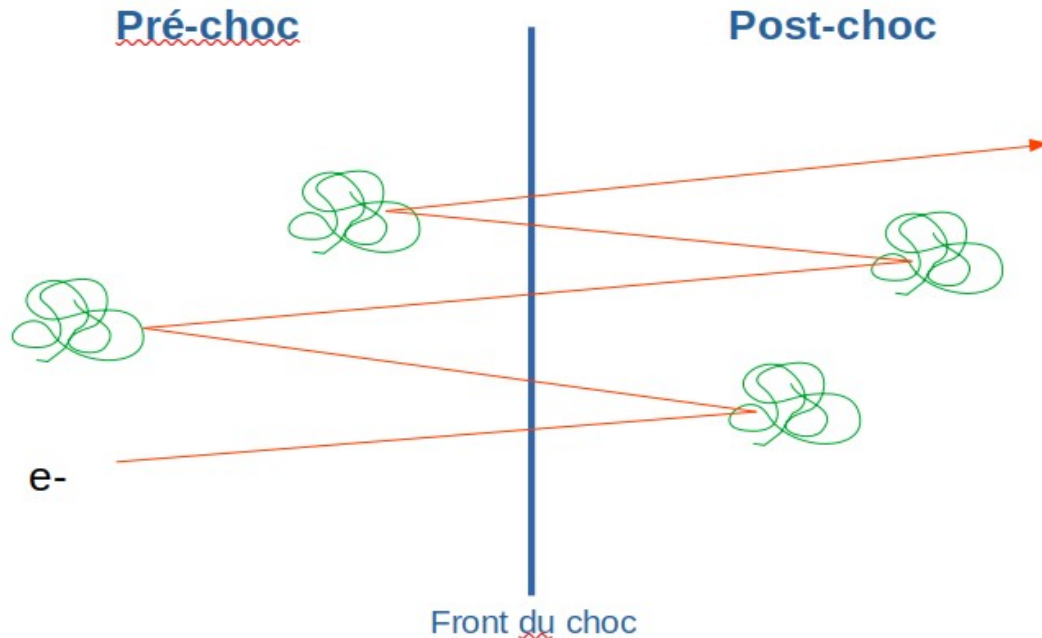
$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{V}{c}$$

→ nettement plus efficace que le mécanisme original de Fermi

# Comment le transfert d'énergie se fait-il vers les particules?

Focus sur une approche majeure: les mécanismes diffusifs

**L'accélération diffuse par les chocs  
(réponse au besoin de "collisions" frontales uniquement)**



Multiples collisions susceptibles de conduire les électrons à retraverser le front du choc  
→ gain cumulé d'énergie très élevé

A chaque interaction avec la turbulence, il y a une probabilité que la particule quitte la zone d'accélération  
→ gain d'énergie cumulé différent selon le temps de séjour de la particule

→ **Présence d'une population de particules aux propriétés très différentes de la population initiale : très énergétiques et distribuées en énergie indépendamment de la température**

# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

**En quoi la radioastronomie nous renseigne-t-elle sur les accélérateurs de particules dans l'Univers?**

## Comment identifier la présence d'électrons relativistes?

Présence d'électrons relativistes

Existence d'un champ magnétique



**Rayonnement synchrotron**

Particule chargée en mouvement dans un champ magnétique

→ force magnétique appliquée

→ accélération communiquée à la particule (mouvement hélicoïdal autour des lignes de champ magnétique)

→ émission de rayonnement (typiquement, ondes radio)

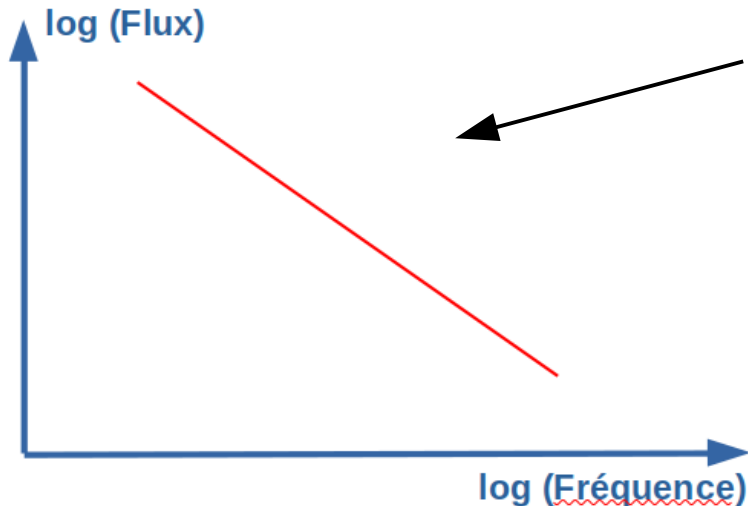
→ **la signature du rayonnement synchrotron dans le domaine radio est attendue lorsque ce phénomène se produit**

## Comment identifier la présence d'électrons relativistes?

Présence d'électrons relativistes

Existence d'un champ magnétique

**Rayonnement synchrotron**



Allure typique d'un spectre de rayonnement synchrotron:

→ le rayonnement synchrotron est un très bon indicateur de la présence d'électrons relativistes, et donc de l'action d'un mécanisme d'accélération de particules

→ **une accélérateur de particules et identifié**



# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

Quelques exemples d'accélérateurs de particules bien identifiés...

# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Dans notre galaxie...

...les plus remarquables: **les résidus de supernova**

Explosion stellaire

- Libération d'énergie mécanique  $\sim 10^{44}$  J ( $\sim 10^{31}$  fois la bombe d'Hiroshima)
- **réservoir d'énergie abondant pour alimenter l'accélération de particules**

Interaction de la matière expulsée avec l'environnement interstellaire

- choc violent, avec vitesse élevée (plusieurs milliers de km/s)
- **site approprié pour l'action d'un mécanisme d'accélération**

Milieu constitué d'un plasma

- **abondance en particules chargées**

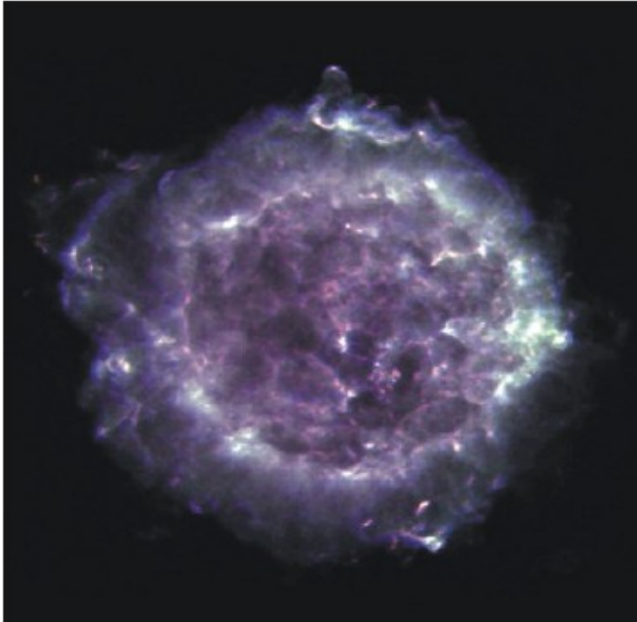
**→ conditions idéales pour un accélérateur de particules**

# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Dans notre galaxie...

...les plus remarquables: les résidus de supernova

**Cas A**  
(SN1667 ?)



**Nébuleuse  
du Crabe**  
(SN1054)

# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Dans notre galaxie...

...un autre cas intéressant: **les étoiles binaires massives à collision de vents**

Expulsion graduelle de matière par une étoile très massive ( $10^{-7}$ – $10^{-5} M_{\text{sol}}$ /an, à 1000 – 3000 km/s): *vent stellaire*

→ puissance mécanique:  $10^{29}$ – $10^{30}$  W ( $\sim 10^{20}$ – $10^{21}$  fois un réacteur nucléaire standard)

→ **réservoir d'énergie abondant pour alimenter l'accélération de particules**

Dans un système binaire, les vents entrent en collision

→ choc violent, avec vitesse élevée

→ **site approprié pour l'action d'un mécanisme d'accélération**

Le vent stellaire est un plasma

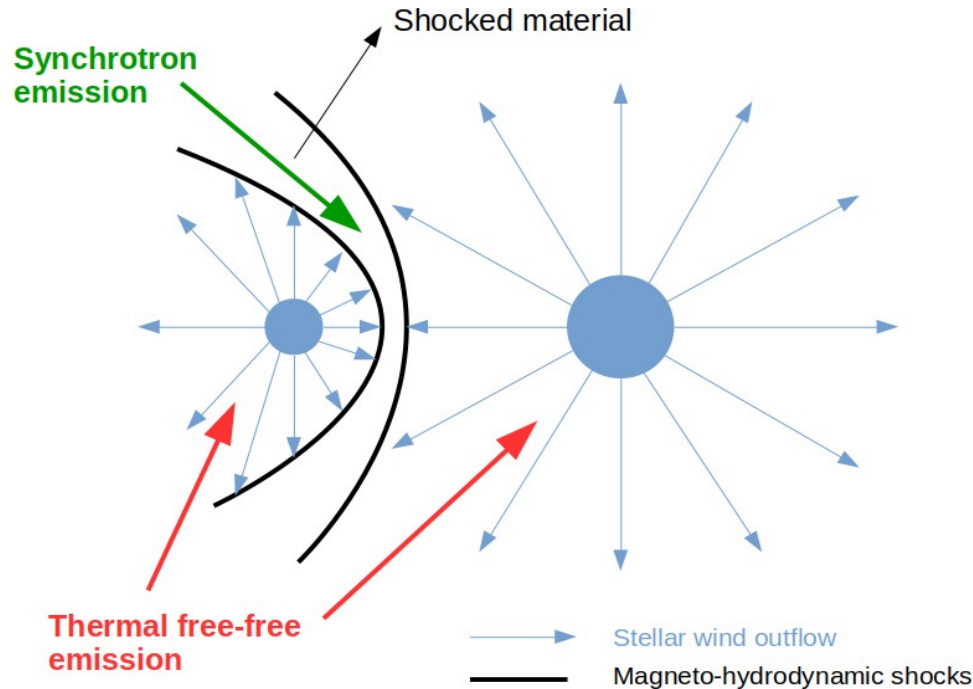
→ **abondance en particules chargées**

→ **conditions idéales pour un accélérateur de particules**

# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Dans notre galaxie...

...un autre cas intéressant: **les étoiles binaires massives à collision de vents**



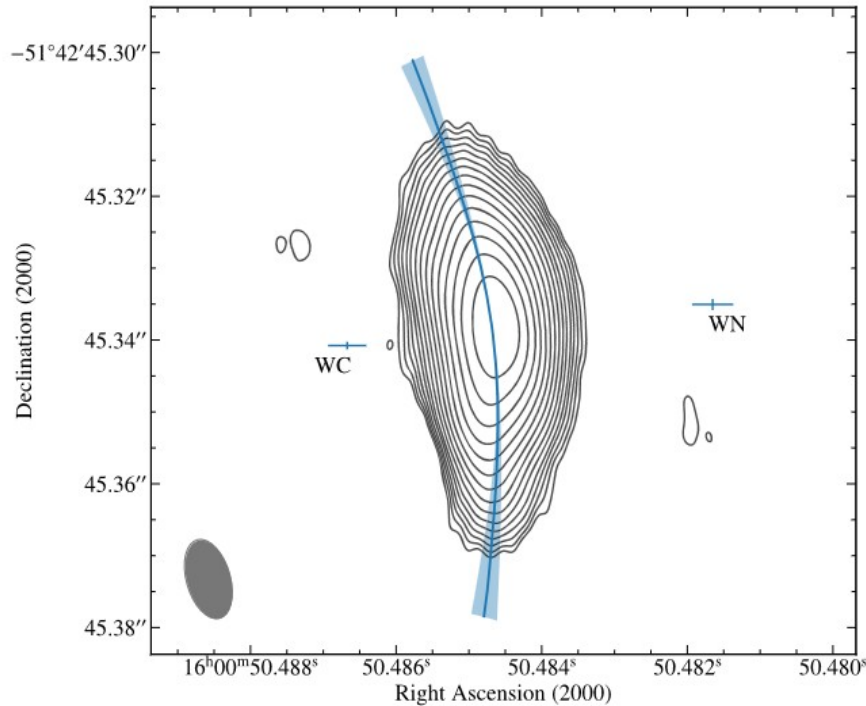
## Vue schématique:

Les vents individuels émettent également du rayonnement radio, mais seule la région de collision des vents émet du rayonnement synchrotron révélateur de l'accélération des électrons relativistes.

# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Dans notre galaxie...

...un autre cas intéressant: les étoiles binaires massives à collision de vents



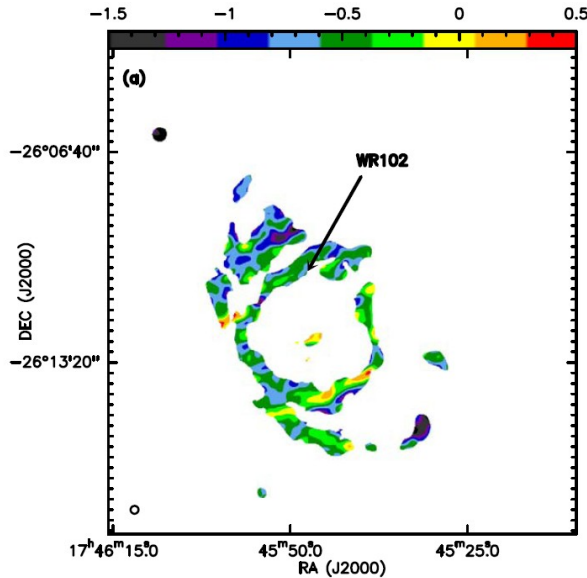
**Apep:** système constitué d'étoiles aux vents extrêmes

*La région d'émission synchrotron coïncide spatialement avec la collision des vents, entre les deux étoiles.*

# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

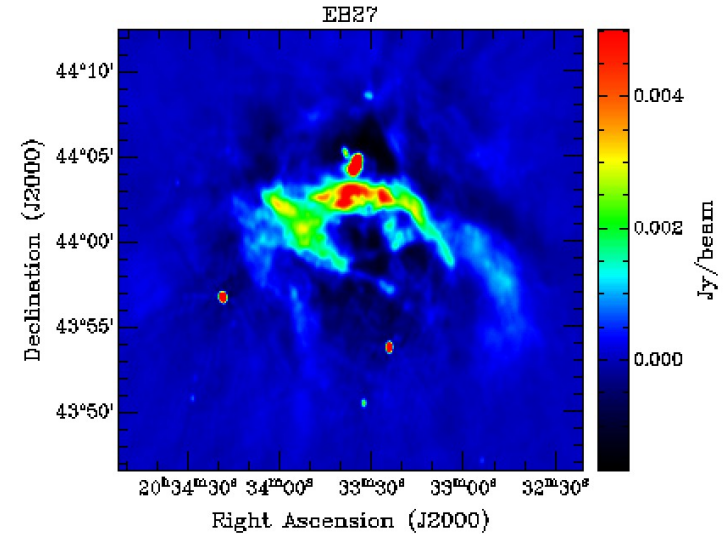
Dans notre galaxie...

...un autre cas intéressant: **interaction des vents stellaires avec le milieu interstellaire**



Vent stellaire intense  
en interaction avec  
un milieu interstellaire  
dense

Vent stellaire d'une  
"étoile en fuite" en  
interaction avec un  
milieu interstellaire  
encore plus dense



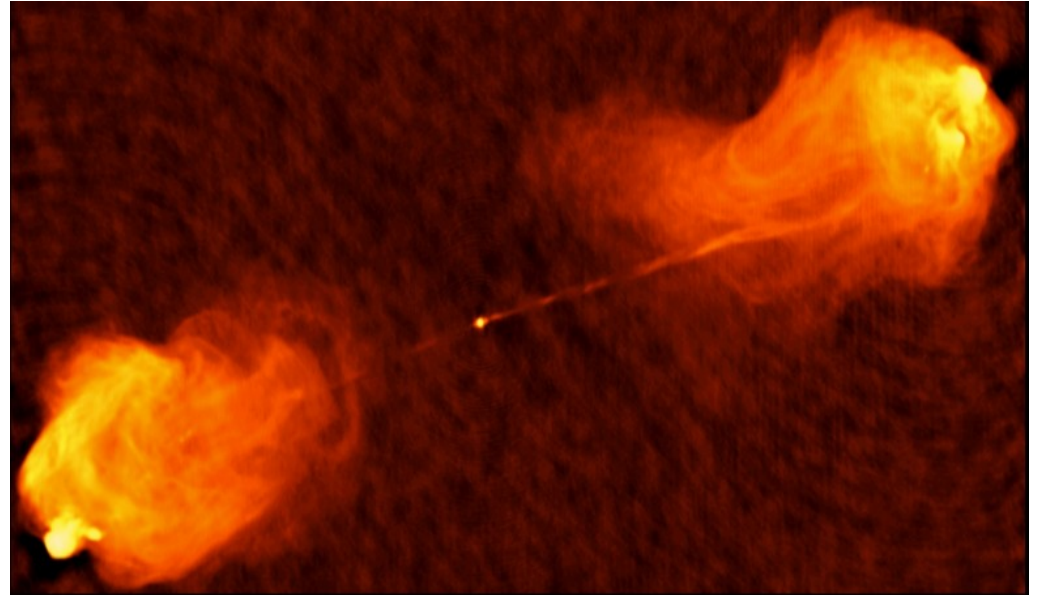
# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Au-delà de notre galaxie...

...un exemple spectaculaire: **les galaxies radio**

Galaxies avec trou noir supermassif en son centre qui produit des jets intenses, avec une vitesse proche de celle de la lumière

Source de rayonnement synchrotron remarquable en ondes radio  
→ accélérateur de particules



**Cygnus A:** galaxie découverte par G. Reber à ~750 Ma.l.



# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Au-delà de notre galaxie...

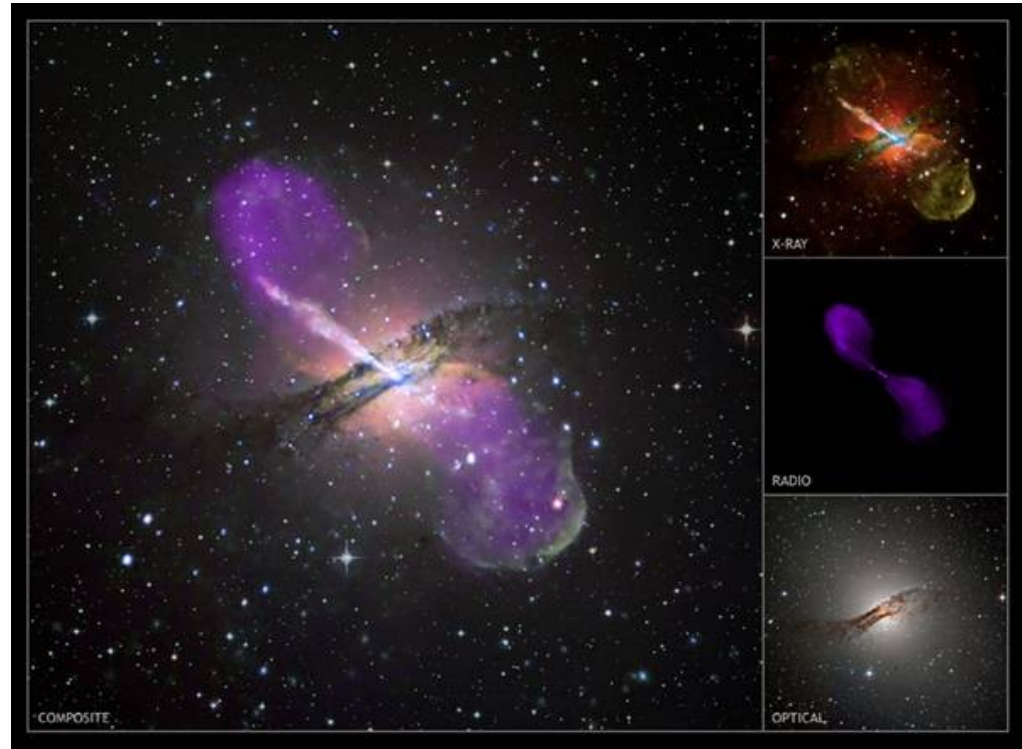
...un exemple spectaculaire: **les galaxies radio**

**Centaurus A** (10 – 16 Ma.l.)

En-bas à droite: image dans le domaine visible

Au milieu à droite: image dans le domaine radio

→ sans l'observation radio, toute la physique des jets, de l'accélération des particules et du rayonnement synchrotron nous échapperait



# Quelques exemples d'accélérateurs de particules...

Au-delà de notre galaxie...

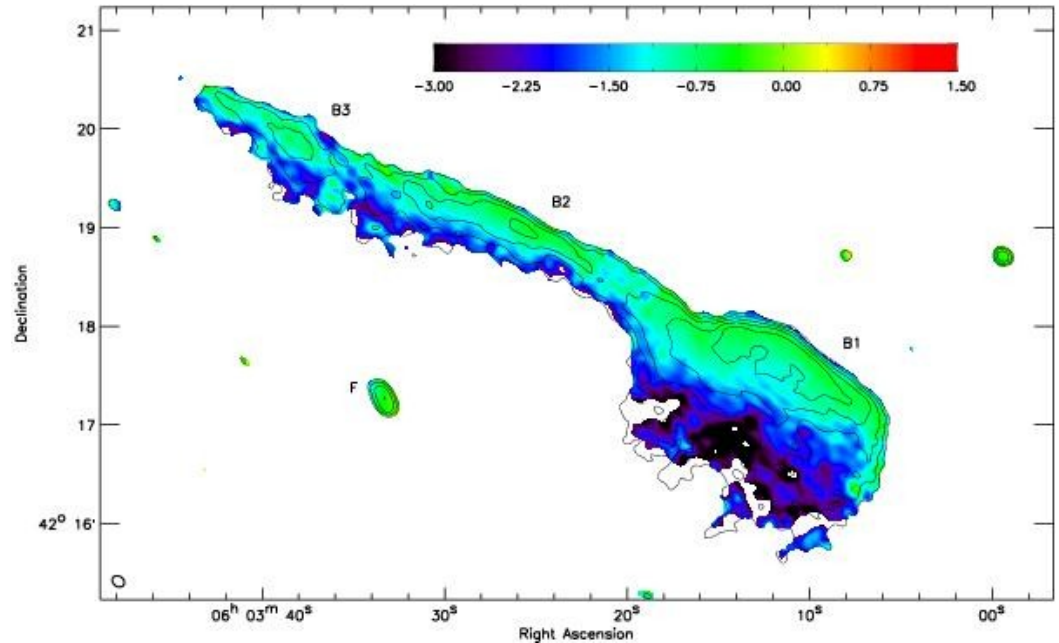
...un autre exemple: les collisions entre amas de galaxies

**Relique radio de la “brosse à dents”** (~ 1 Ga.l.)

Résultat de la collision entre amas de galaxies, conduisent à une structure de choc de 3 à 6 Ma.l.

→ accélération de particules au niveau du choc

→ ensuite, à de grandes distances, réaccélération par Fermi de 1er ordre...



# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

## Résumé

1. L'astrophysique radio a permis d'ouvrir une fenêtre très importante sur notre univers, révélant des processus physiques hors de portée de l'astrophysique classique.
2. Des mécanismes actifs à l'accélération de particules sont identifiés, et leur action peut être révélée par la mesure de rayonnement synchrotron dans le domaine radio.
3. De nombreux environnements astrophysiques donnent lieu à une accélération de particules jusqu'à des vitesses relativistes, tant dans notre galaxie qu'au-delà de ses frontières.

# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

Qu'est-ce que la radioastronomie?

Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules?

En quoi la radioastronomie nous renseigne-t-elle sur les accélérateurs de particules dans l'Univers?

Quels accélérateurs de particules sont bien identifiés?

# La radioastronomie et l'étude des accélérateurs de particules dans l'Univers

**Merci pour votre attention!**