



Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche



Concours externe spécial de l'agrégation de physique-chimie option physique
Session 2025

François KAMAL YOUSSEF

Sommaire

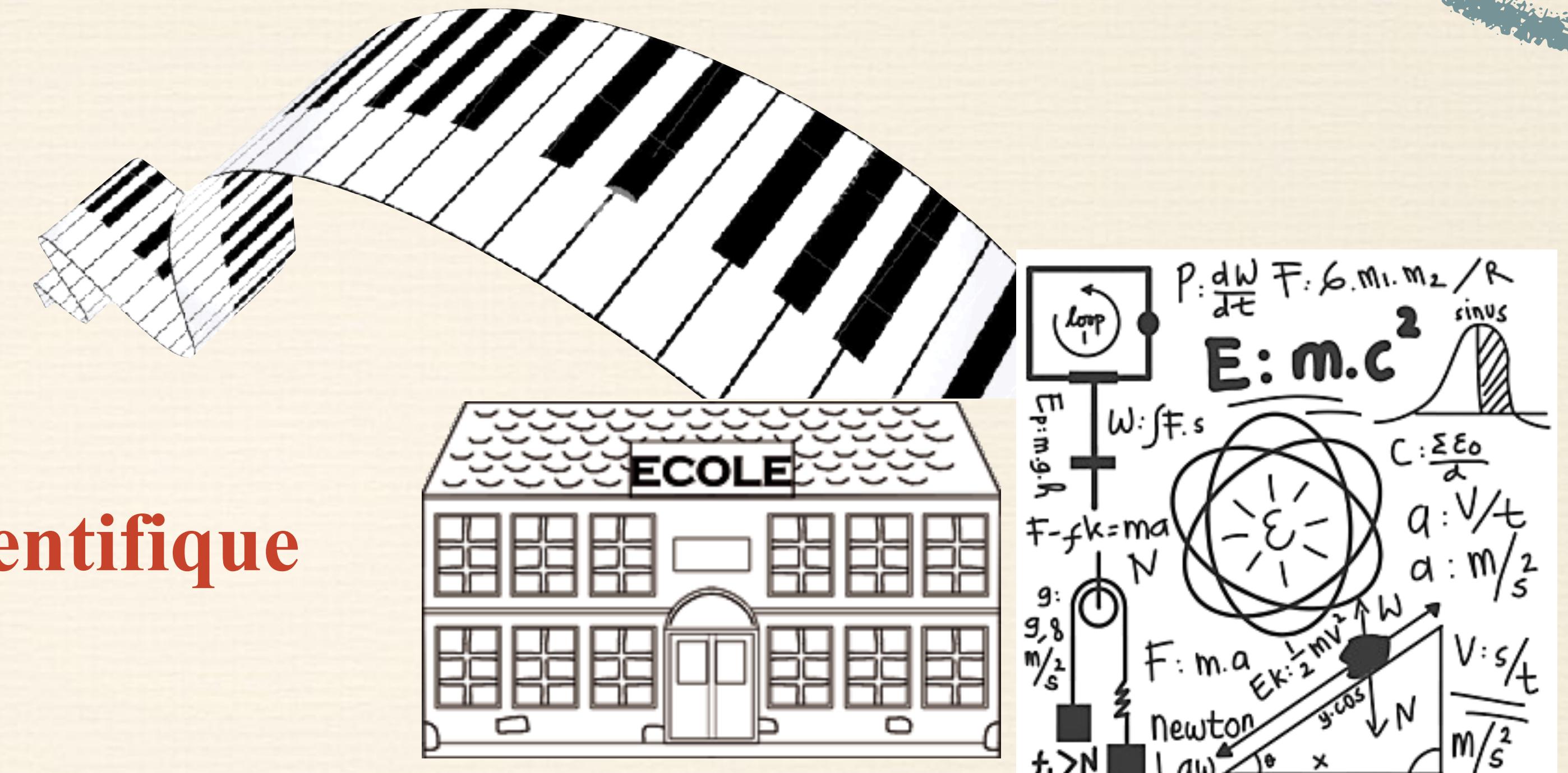
1. Parcours académique

2. Résumé de la thèse

3. Expérience d'animation scientifique

4. Expérience d'enseignement

5. Activité pédagogique



2001 - 2015

- ❖ Bonjour je m'appelle ***
- ❖ Je vais vous présenter brièvement mon parcours académique, suivi d'un résumé de ma thèse. Je parlerai ensuite de mes expériences en médiation scientifique et en enseignement à l'université, avant de conclure par une activité pédagogique que j'ai conçue pour une classe de Terminale.
- ❖ Pendant 14 ans, j'ai fait des études en musique classique et en piano, en parallèle de ma scolarité. Mais depuis mon enfance, j'étais profondément attiré par les mathématiques et la physique. Donc après le baccalauréat, j'ai décidé d'arrêter la musique pour faire de la physique.

Parcours Académique

2015 - 2018

Licence
Physique Fondamentale



UNIVERSITÉ DE NANTES

Stage L3

*Simulation des gerbes atmosphériques
des rayons cosmiques*



Parcours Académique

2018 - 2019

Master
Physique Subatomique



UNIVERSITÉ DE NANTES

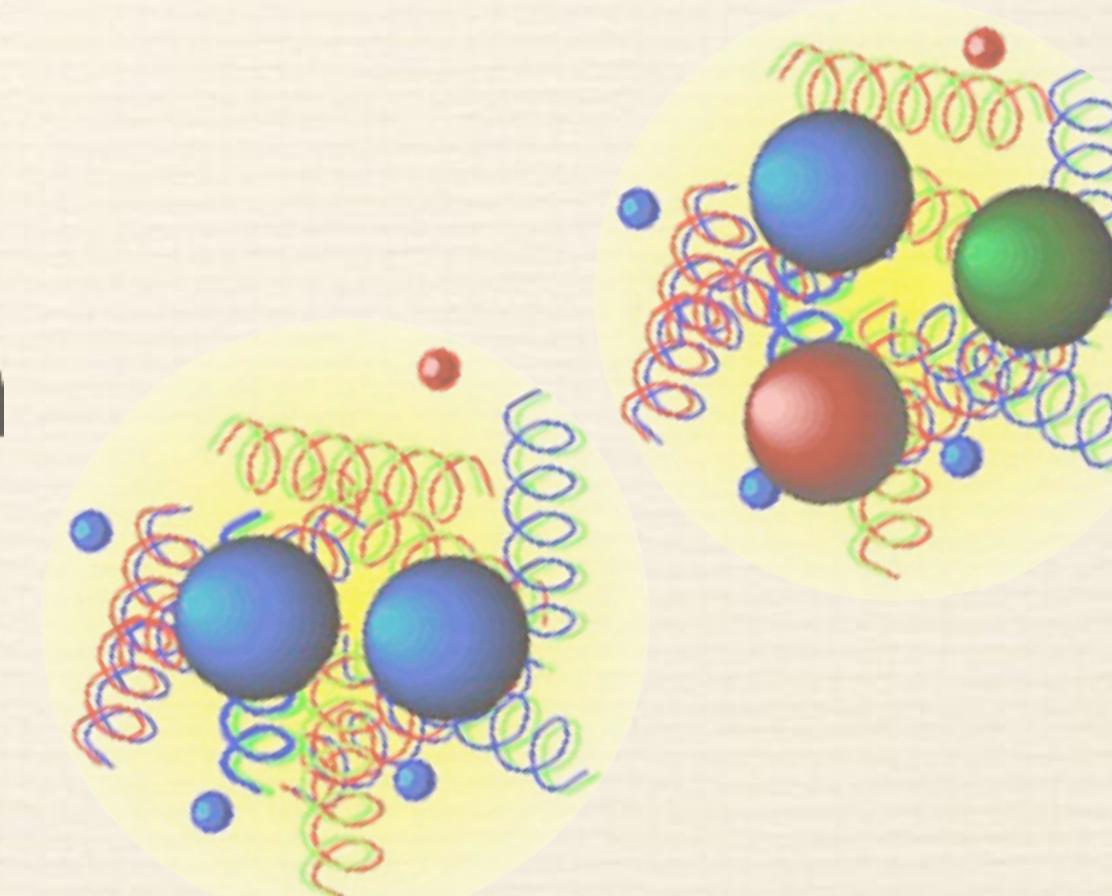


IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Stage M1

*Détermination des masses de mésons et des baryons
en utilisant un modèle théorique de la QCD*

Subatech



Parcours Académique

2019 - 2020

Master
Physique Subatomique



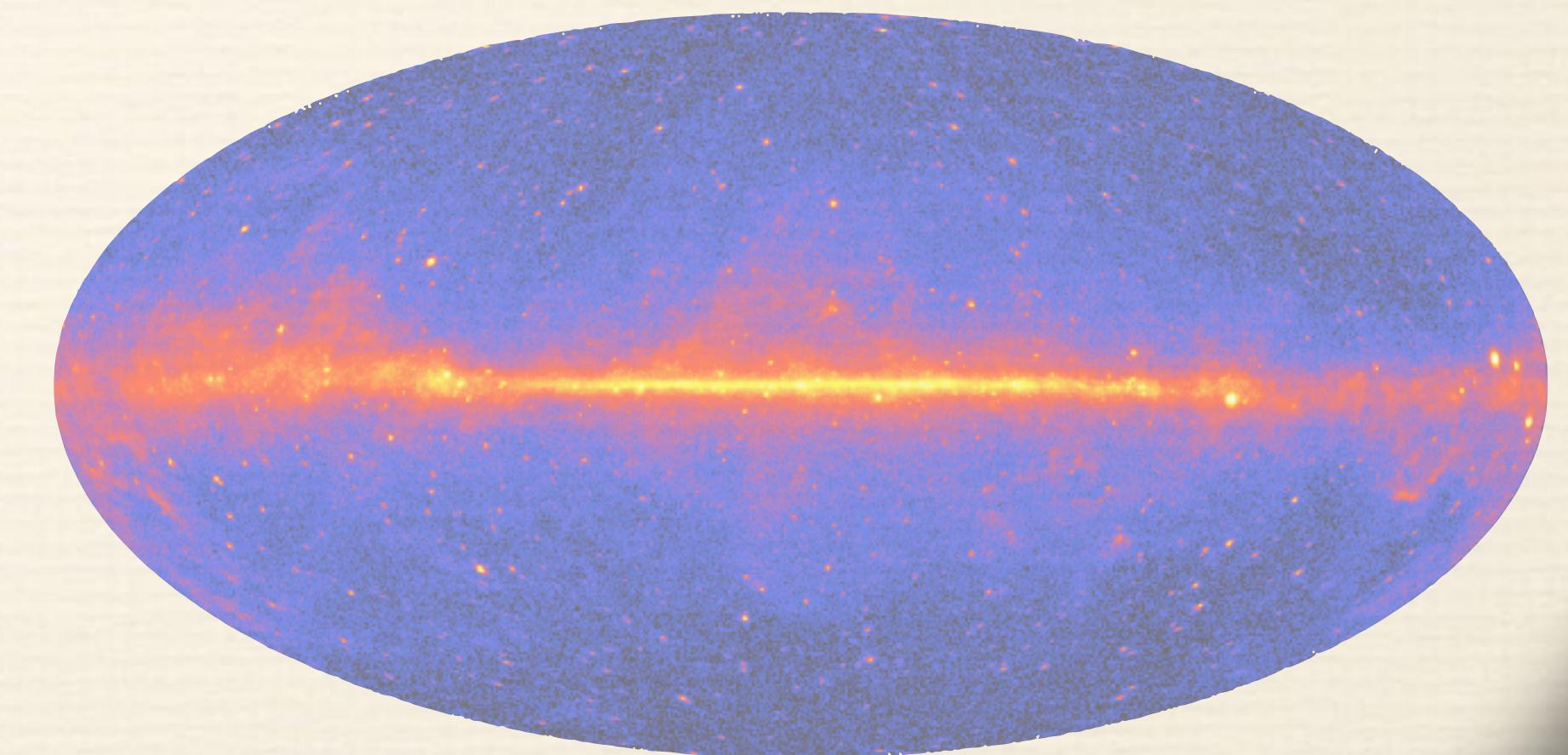
UNIVERSITÉ DE NANTES



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Stage M2

*Émissivité gamma et radio d'un nuage proche
de forme filamentaire*



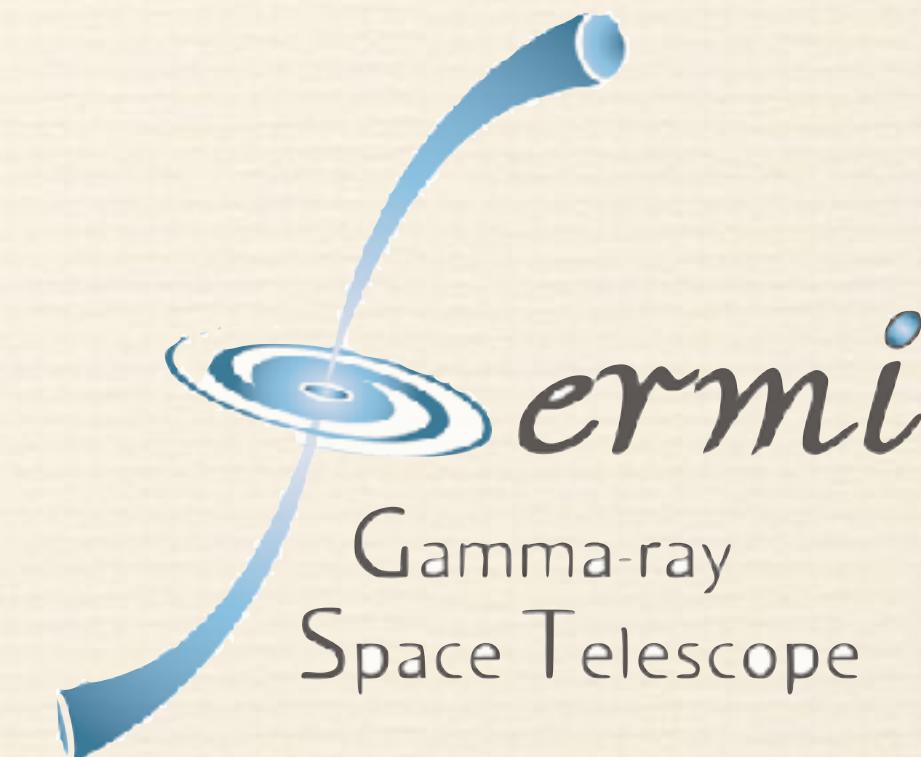
Parcours Académique

2020 - 2024

Doctorat
Astroparticules

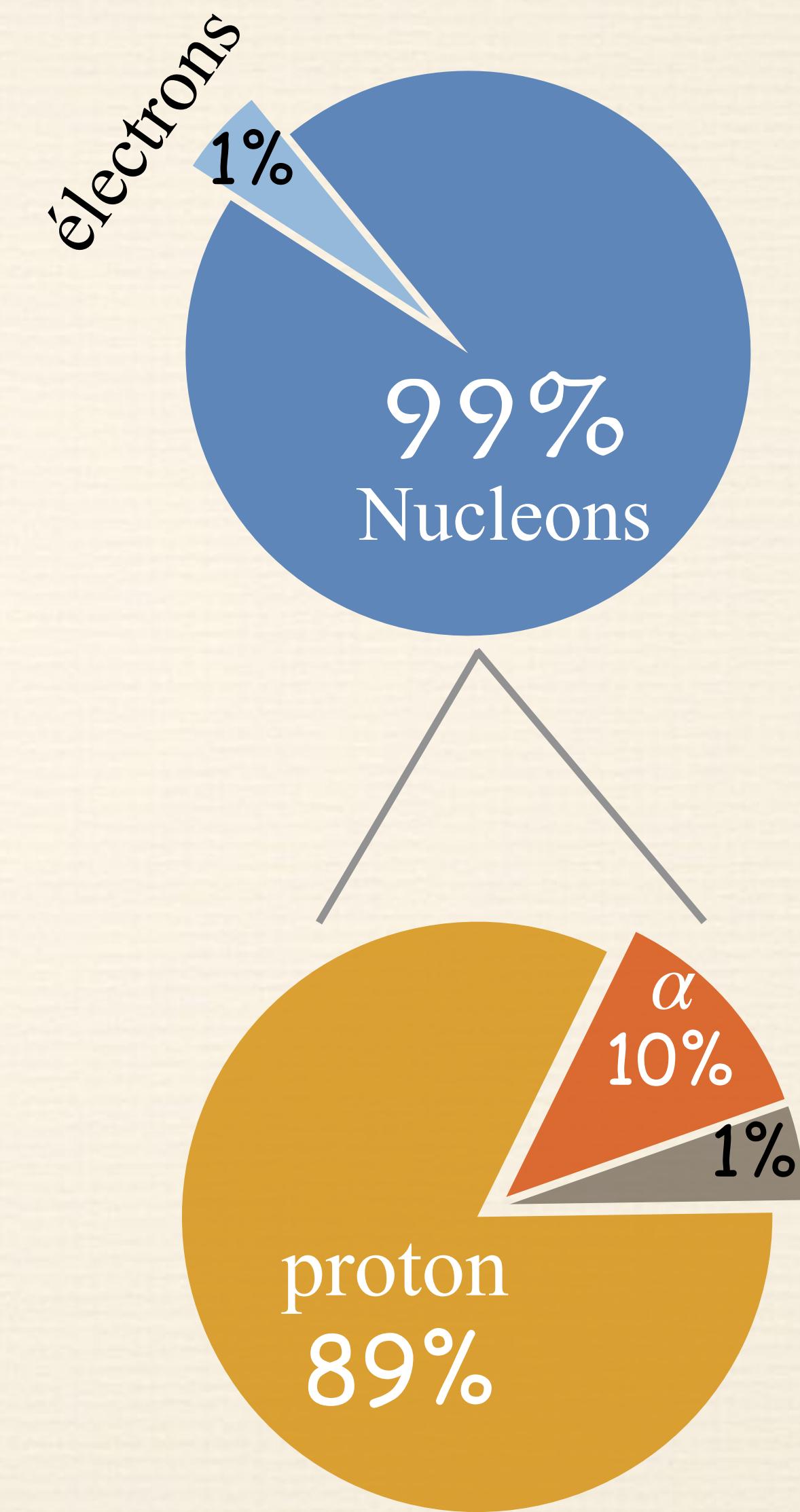
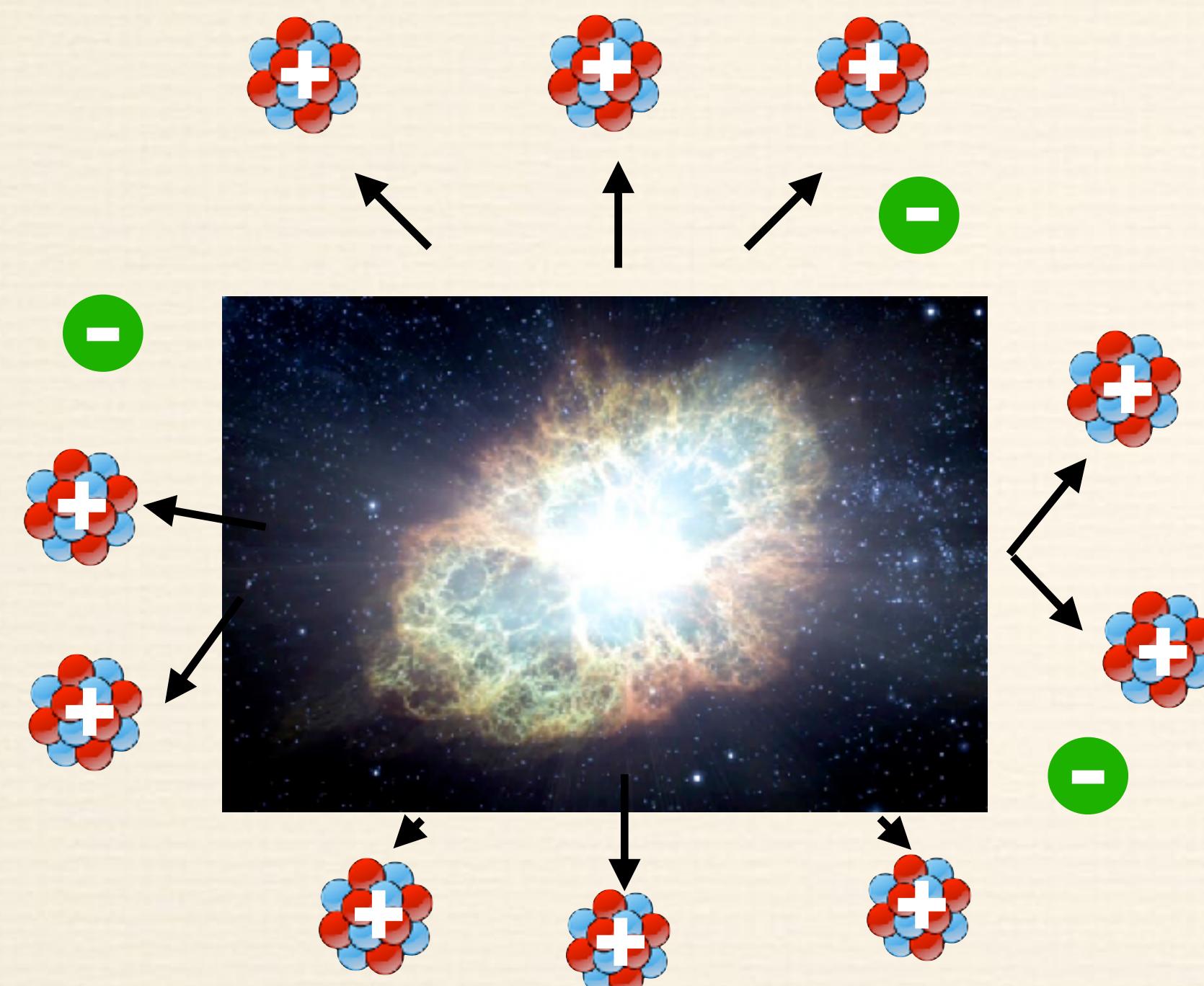


*Le flux et la propagation des rayons cosmiques
dans des nuages atomiques magnétisés*



- ❖ Je suis allé à Nantes pour commencer une licence en physique fondamentale à l’UFR Sciences et Techniques de l’Université de Nantes. À la fin de cette licence, j’ai réalisé un stage au laboratoire Subatech de l’IN2P3, centré sur les simulations de gerbes produites par les rayons cosmiques.
- ❖ J’ai ensuite poursuivi en master de recherche en physique subatomique, toujours à Nantes, en partenariat avec l’école IMT Atlantique. Pendant ce master, j’ai effectué 2 stages. Le premier, à Subatech, était purement théorique qui portait sur un des modèles en chromodynamique quantique. Puis, pour mon 2nd stage, j’ai souhaité explorer un autre aspect de la physique. Après avoir vu les simulations et à la théorie, je voulais faire un stage en physique expérimentale pour bien choisir mon sujet de thèse. C’est ainsi que je suis parti à Paris, au CEA-Saclay, pour ce stage de fin d’études ... qui est ensuite devenu le sujet de ma thèse.
- ❖ En 2020, j’ai donc commencé une thèse en astroparticules à l’Université Paris Cité, au laboratoire AIM du CEA-Saclay, dans la collaboration Fermi.

Les rayons cosmiques

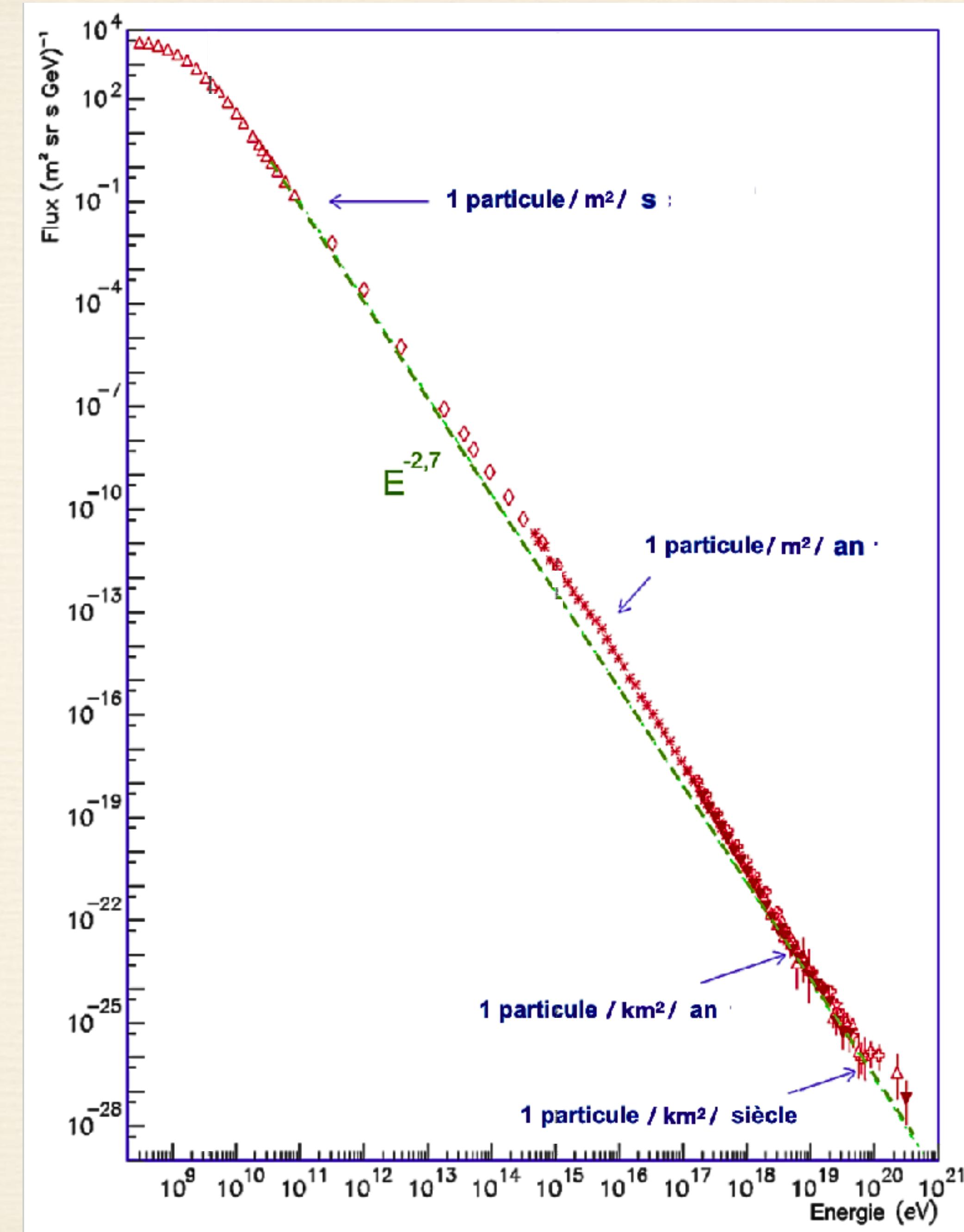


Autres nucléons
Antimatière
Particules neutres

- ❖ Avant de vous présenter mes résultats, je voudrais introduire brièvement quelques notions essentielles.
- ❖ Les rayons cosmiques sont des particules très énergétiques, produites par des phénomènes astrophysiques violents, comme les supernovae ou les noyaux actifs de galaxies. Elles voyagent à des vitesses proches de celle de la lumière et sont composées à 99 % de noyaux — principalement des protons, suivis de particules alpha. On trouve aussi une petite fraction de noyaux plus lourds, d'électrons, de neutrinos et même d'antimatière.

Le spectre des rayons cosmiques

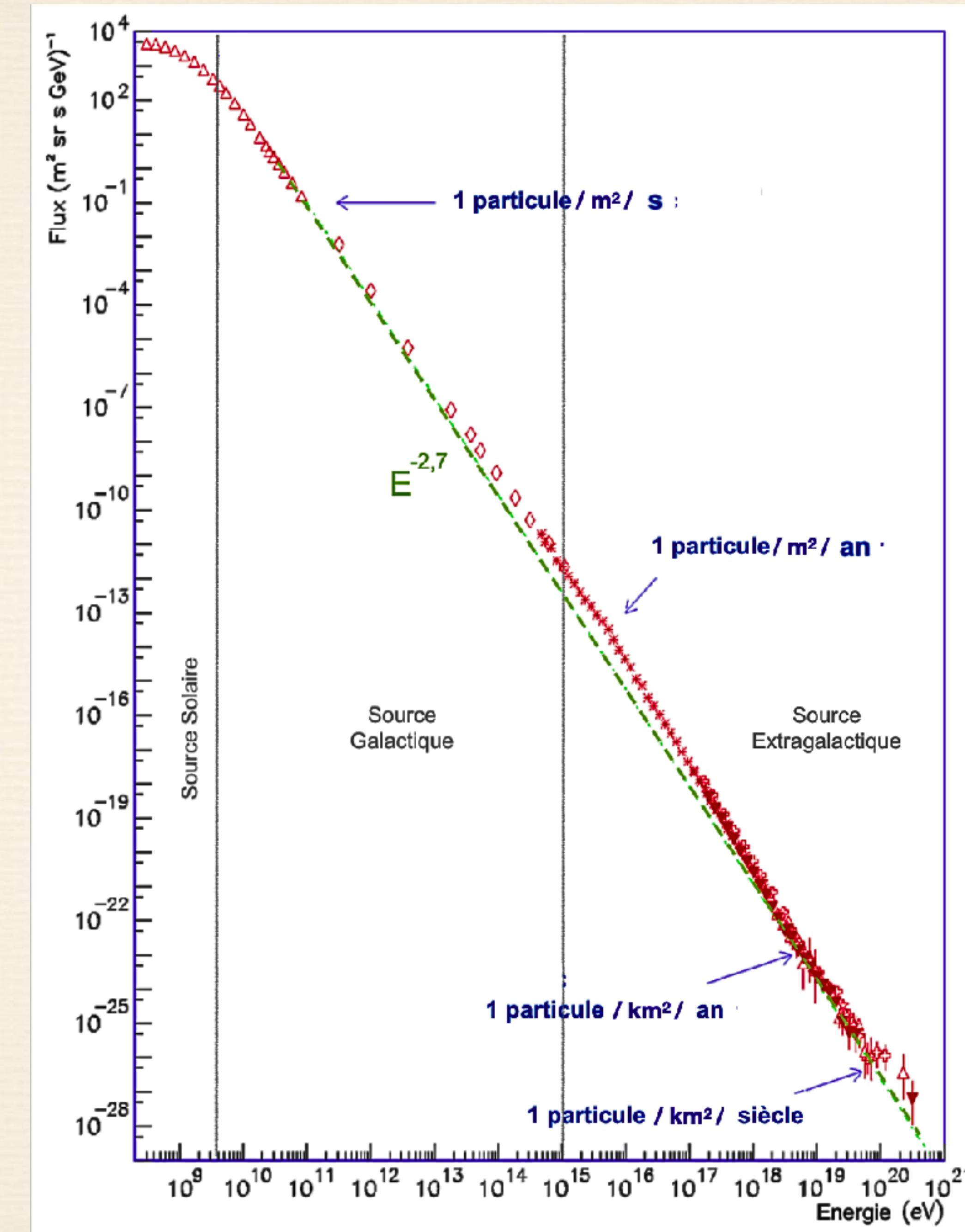
$$\text{Flux} \equiv \frac{dN}{dS dt dE d\Omega}$$



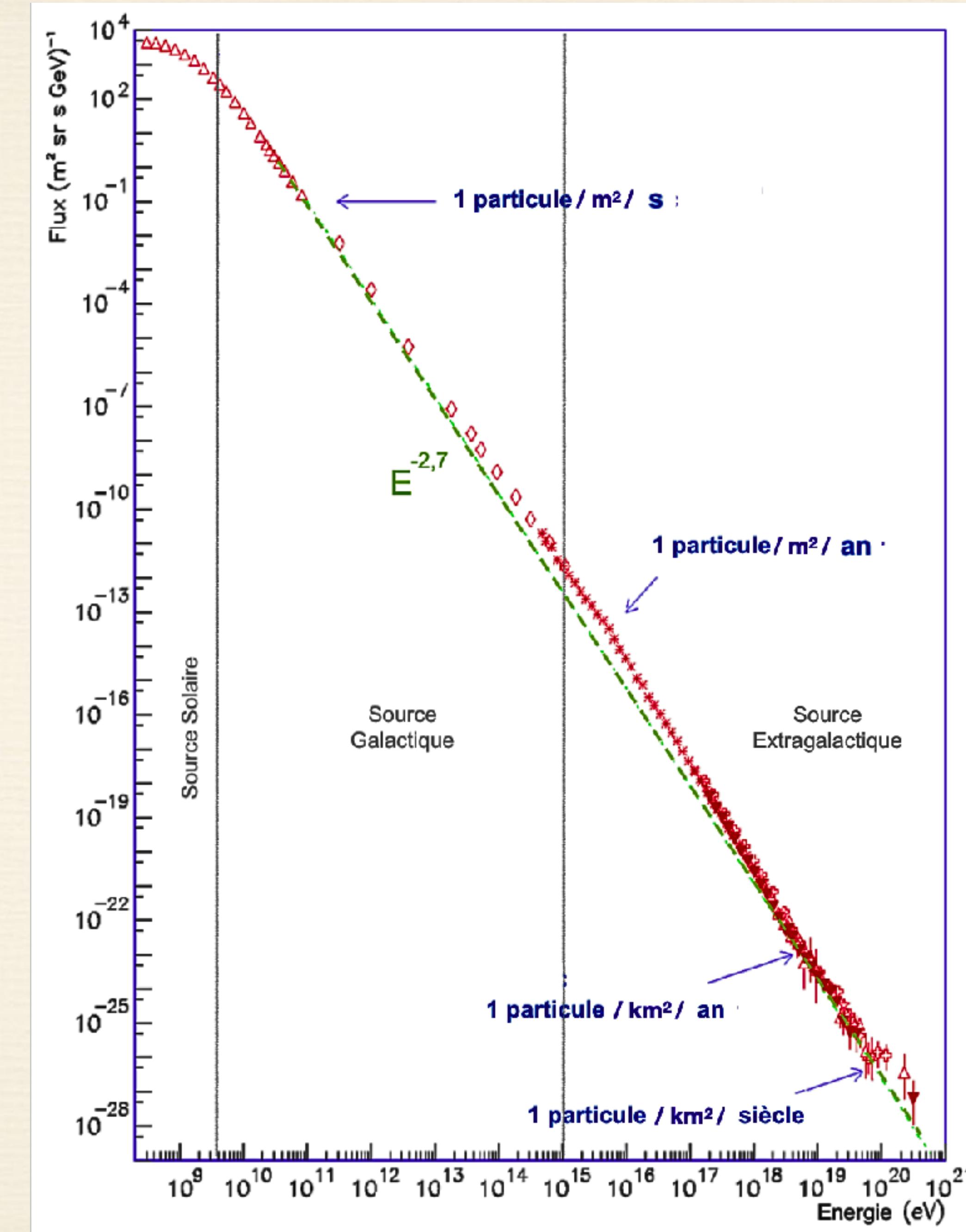
32
13

Le spectre des rayons cosmiques

$$\text{Flux} \equiv \frac{dN}{dS dt dE d\Omega}$$



Le spectre des rayons cosmiques

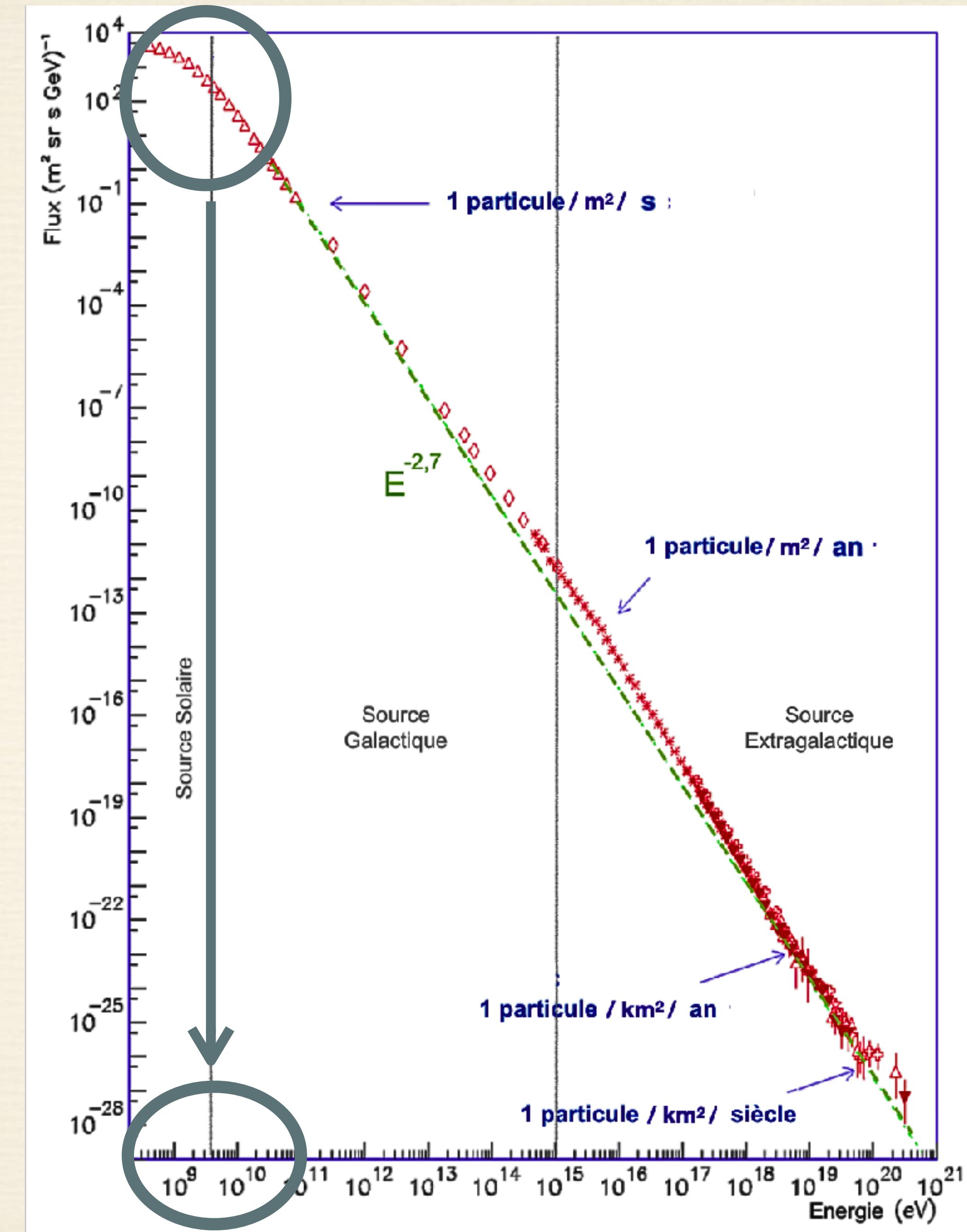


Répartition
d'énergie

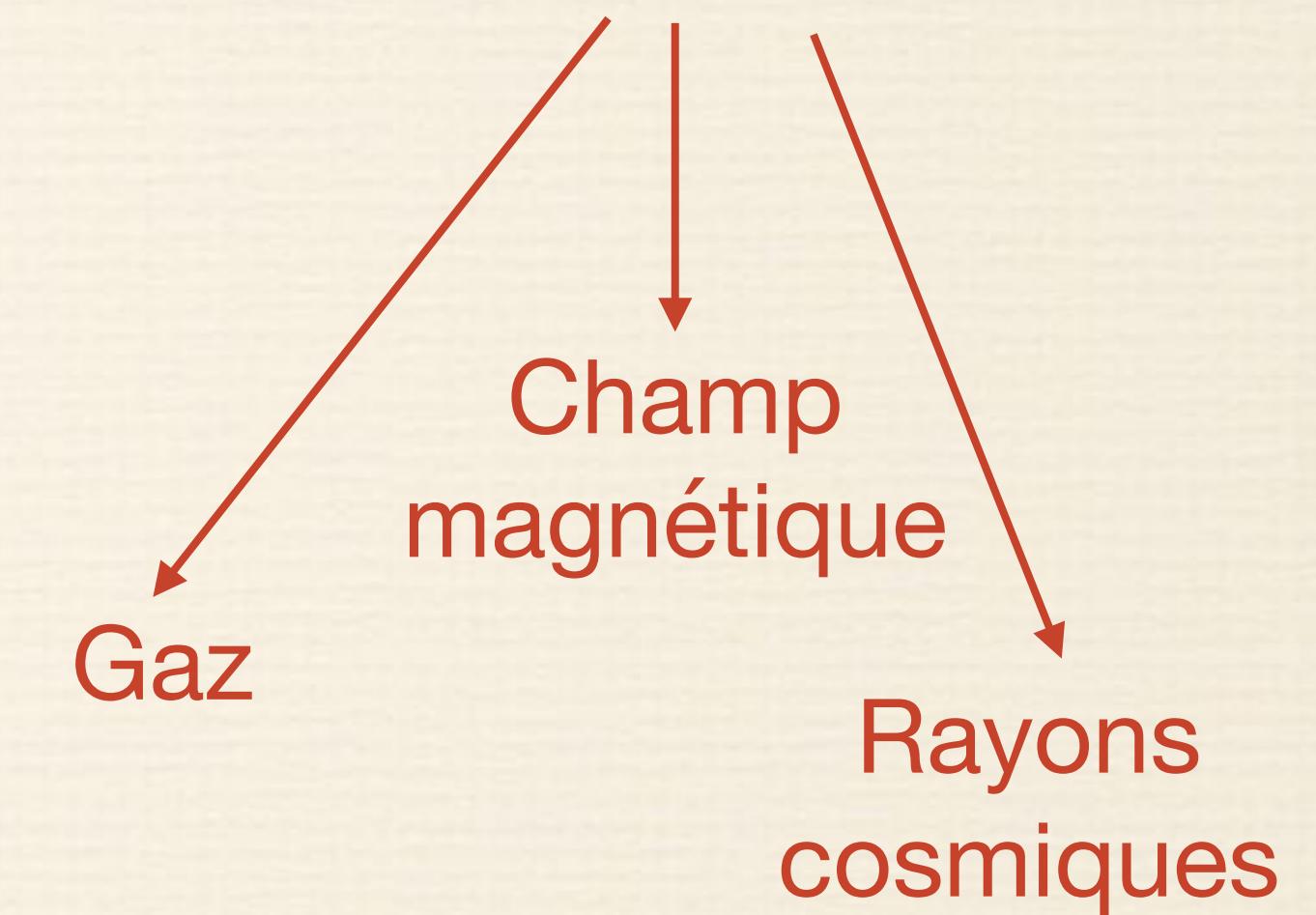
Gaz

Champ magnétique

Le spectre des rayons cosmiques

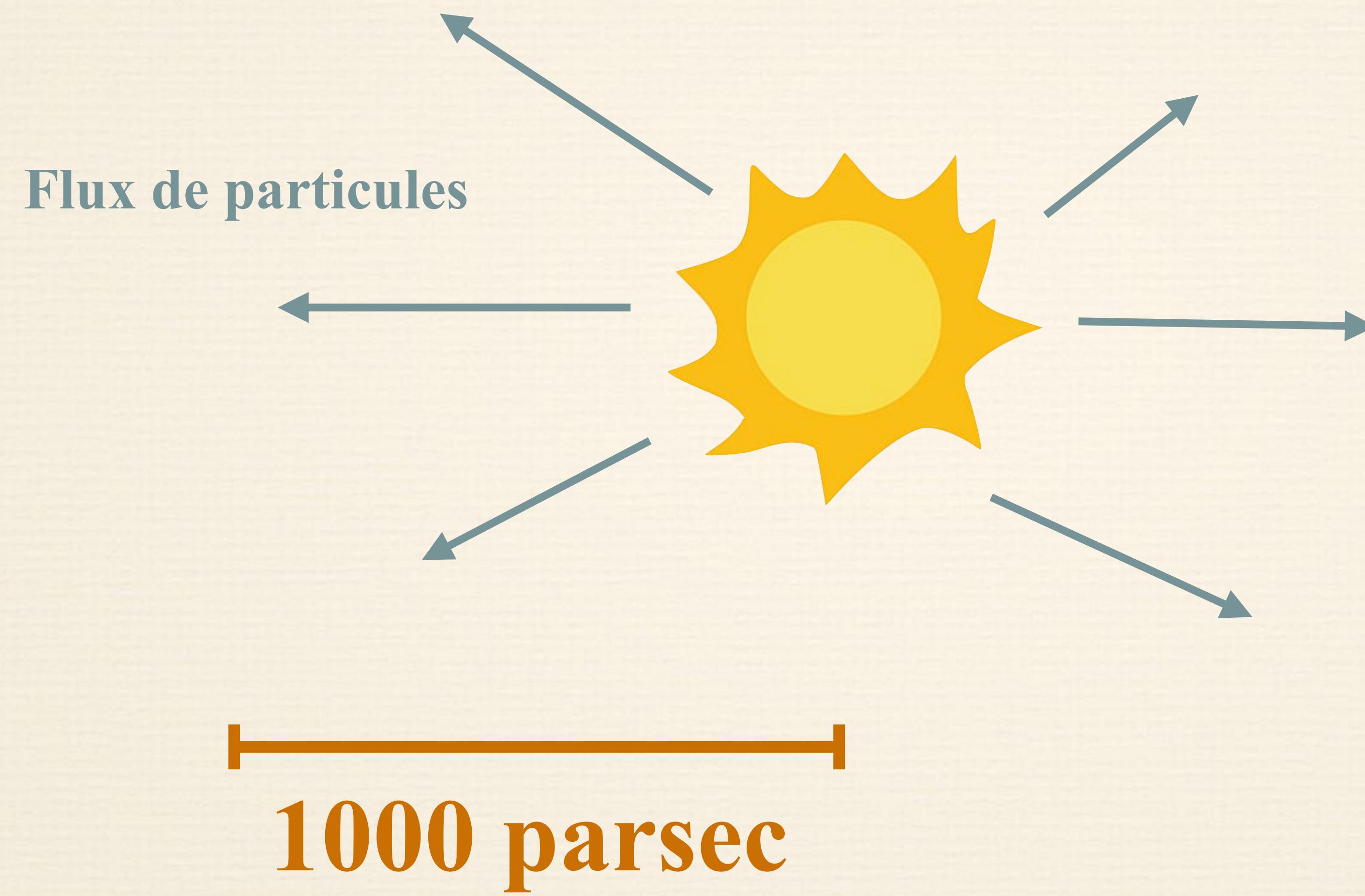


Répartition d'énergie

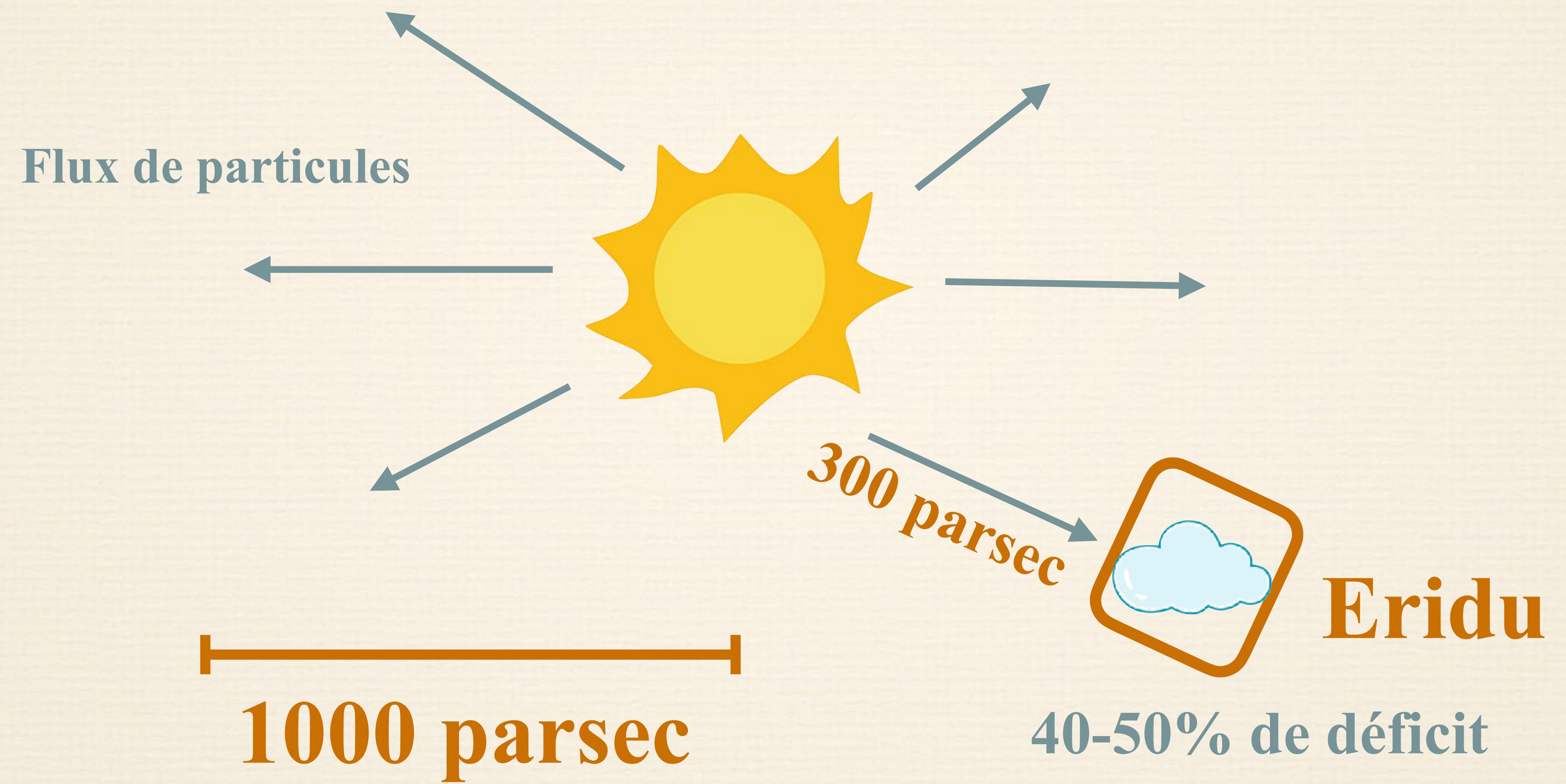


- ❖ Depuis leur découverte, les RC ont suscité l'intérêt des scientifiques à la fois par leur énergie extrême et par leur spectre en énergie, remarquablement stable sur plus de 13 ordres de grandeur.
- ❖ Leur origine dépend de leur énergie : en dessous de 10^{15} eV. ils proviennent essentiellement du Soleil ou de sources galactiques. Au-delà, on pense qu'ils sont d'origine extragalactique.
- ❖ Dans la galaxie, il existe un équilibre entre la gravité qui attire la matière vers le centre et les pressions (ou densités d'énergie) qui poussent vers l'extérieur : pression du gaz, du champ magnétique. En faisant des simulations des évolutions de galaxie les scientifiques n'aboutissaient pas à des bons résultats. Une des erreurs c'est qu'ils ont oublié d'ajouter les RC dans leurs modèles. Les RC autour de 10^{9-10} ont le maximum de densité d'énergie comparable à celle du gaz et du champ magnétique. On parle alors d'équipartition d'énergie. Donc les RC ont un effet non négligeable dans l'évolution des galaxies. C'est pour cela dans ma thèse on s'intéresse aux particules à cette gamme d'énergie.

Propagation ?

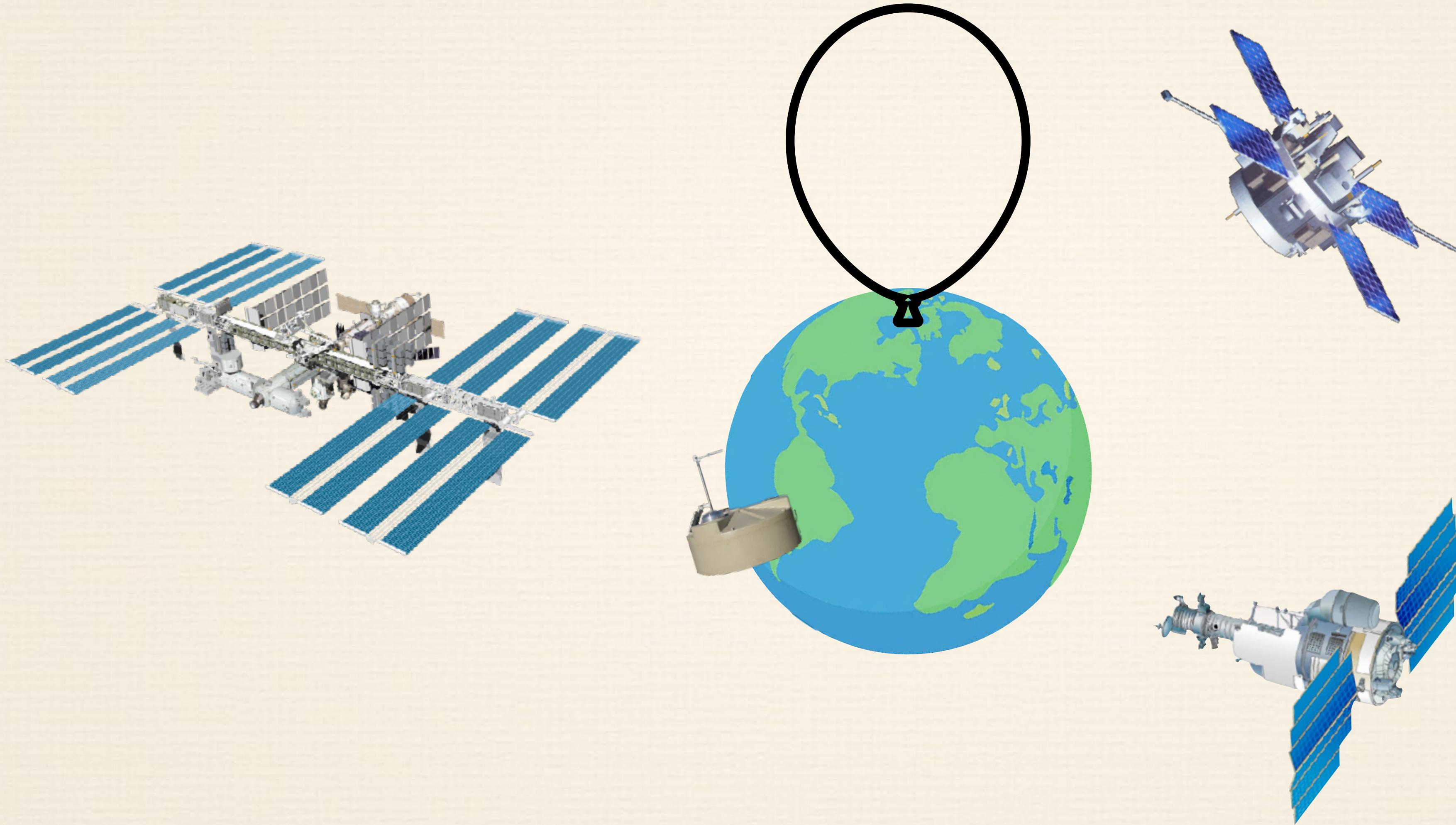


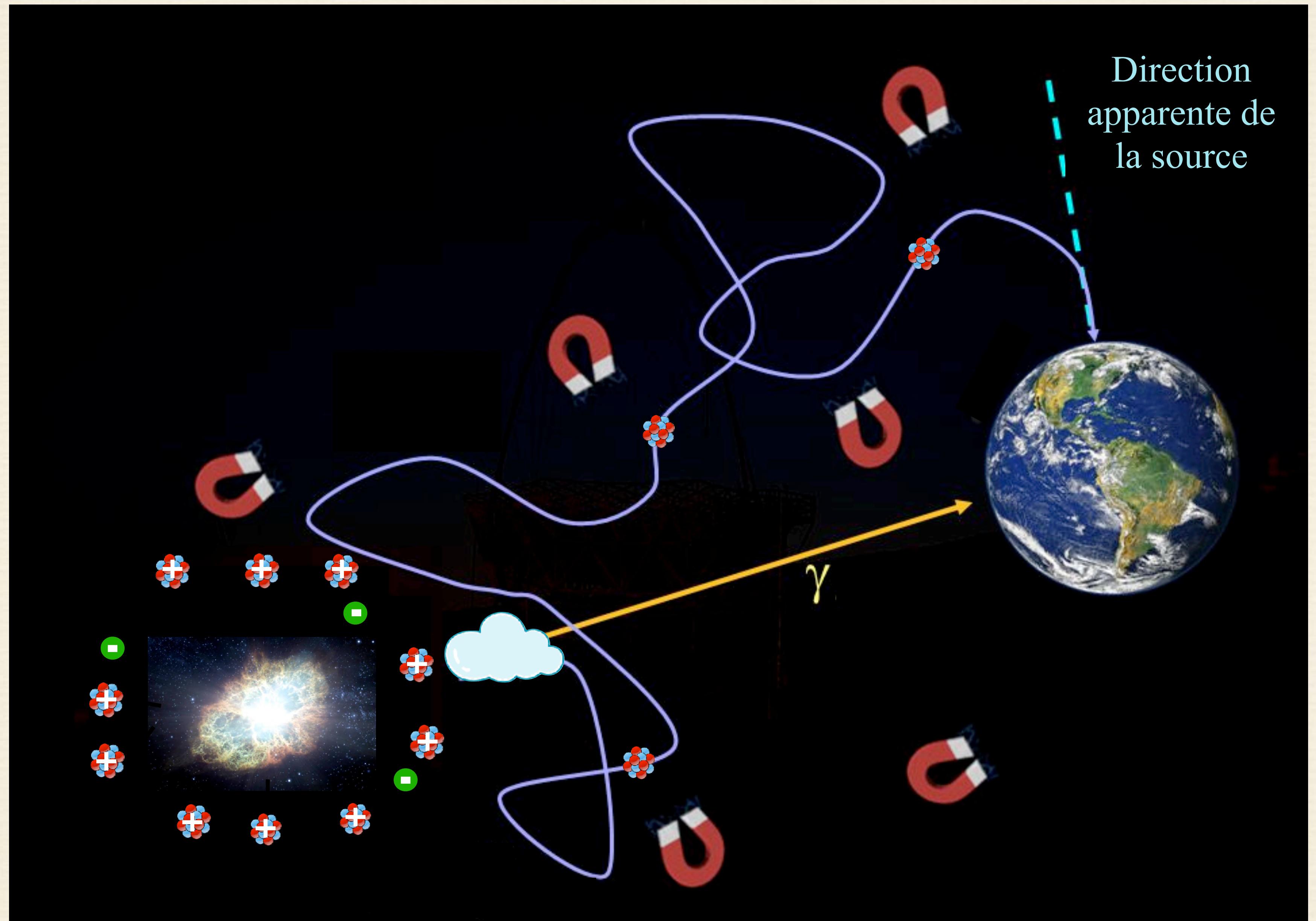
Propagation ?



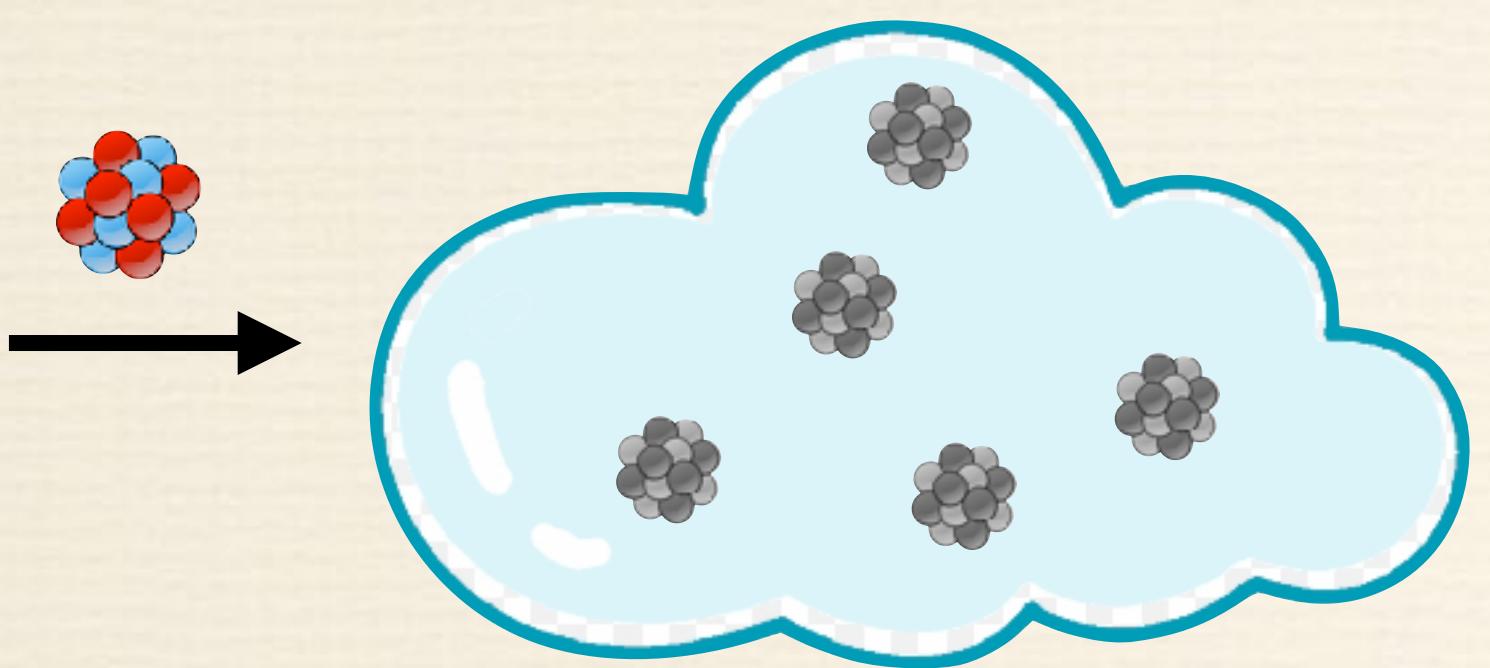
- ❖ Mais pour comprendre comment les rayons cosmiques influencent la galaxie, il faut comprendre comment ils se propagent. Différents modèles existent, et pour les tester, on mesure le flux des RC dans différents nuages interstellaires proches du Soleil.
- ❖ Les résultats ont longtemps montré un flux homogène et isotrope dans un rayon d'environ 1 kpc autour du Système Solaire.
- ❖ Mais en physique, rien ne reste parfait indéfiniment.
- ❖ En 2018, deux ans avant le début de ma thèse, mon équipe a découvert un cas anormal : un nuage appelé Eridu, situé à seulement 300 parsecs, présente un déficit de 40 à 50 % de rayons cosmiques. Ce nuage est pourtant calme, sans turbulence ni activité stellaire intense.
- ❖ C'est ce mystère qui m'a motivé : comprendre pourquoi ce déficit, et ce qu'il peut révéler sur les mécanismes fins de propagation des rayons cosmiques

La détection des rayons cosmiques

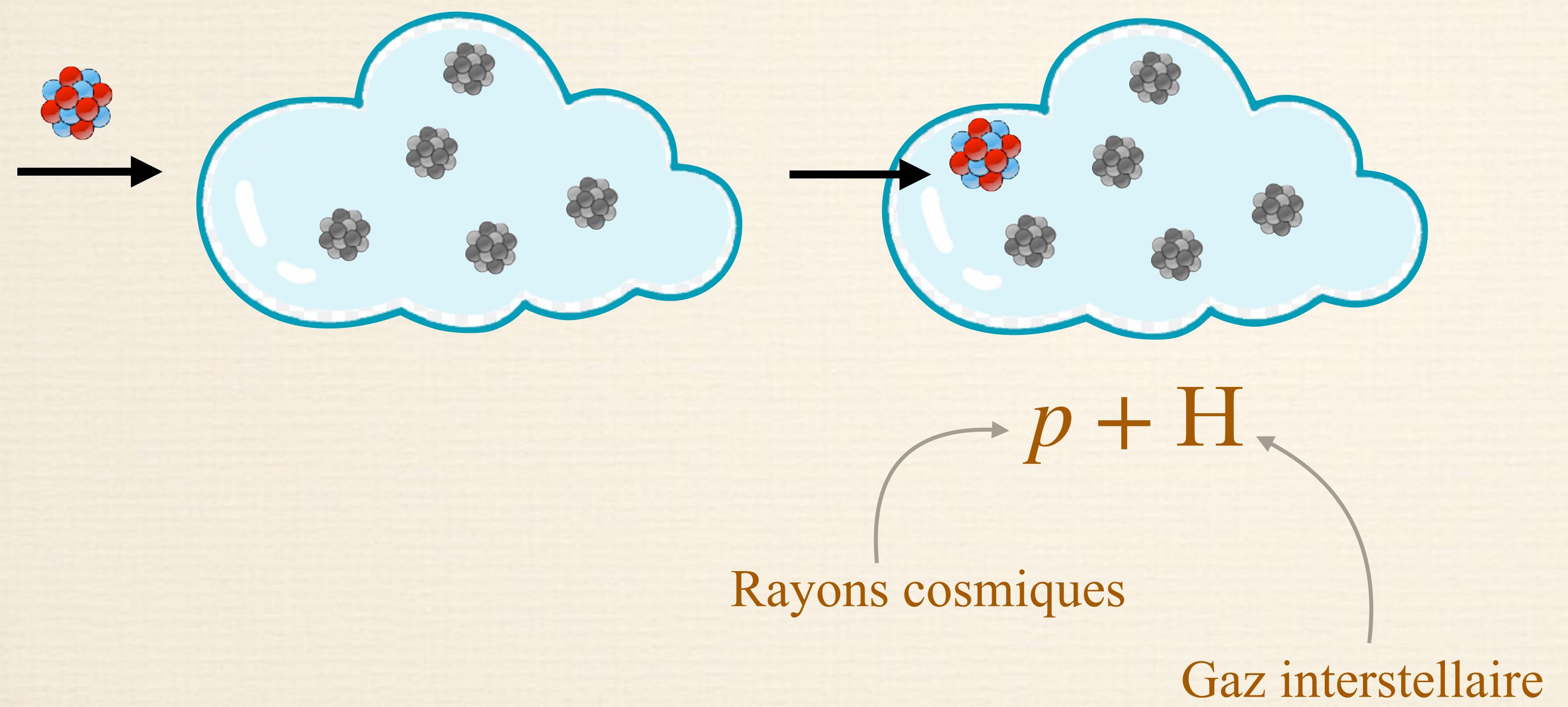




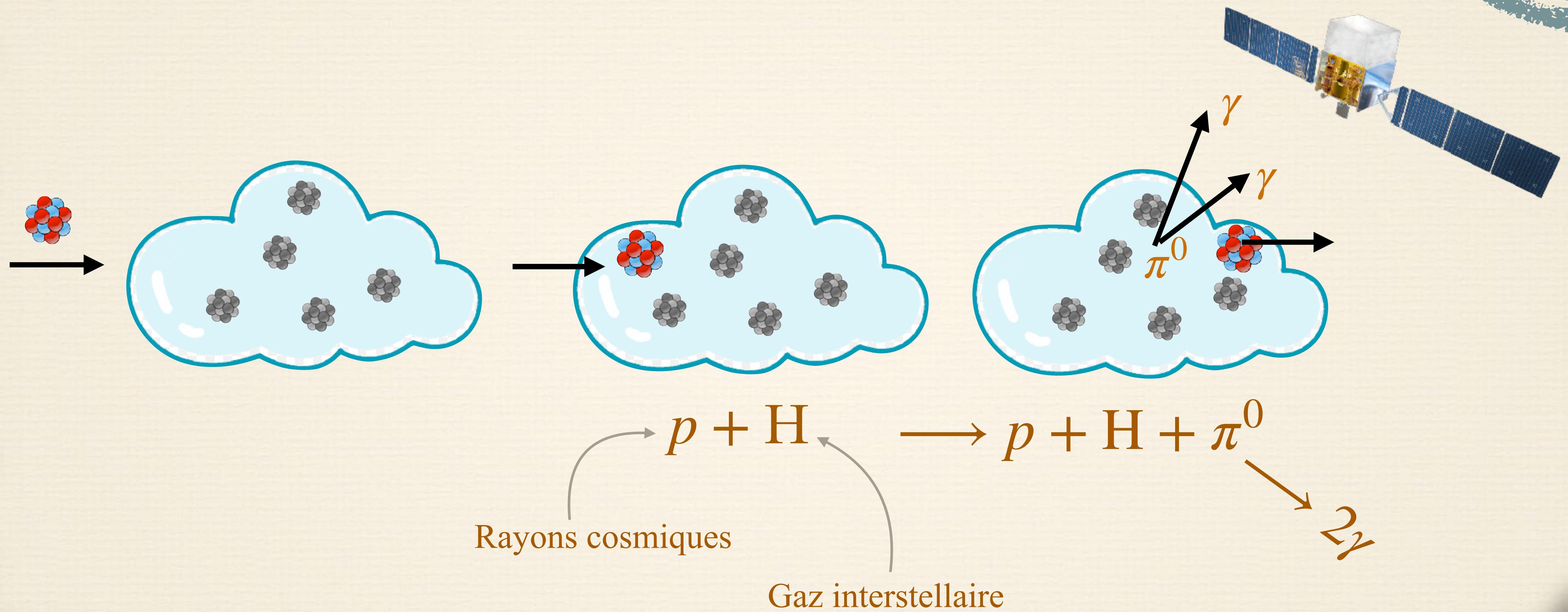
- ❖ Avant d'étudier le nuage d'Eridu, il faut d'abord comprendre comment on détecte les RC. On peut les détecter directement grâce à des détecteurs de particules installés au sol, embarqués dans des ballons stratosphériques, ou à bord de satellites ou de l'ISS.
- ❖ Mais ce type de détection directe est limité au voisinage de la Terre.
- ❖ Dès qu'on veut observer ce qui se passe dans un nuage lointain, c'est un vrai problème. on ne peut pas envoyer des détecteurs là-bas et les rayons cosmiques qu'on observe ici sont déviés par le champ magnétique galactique. Résultat : on ne peut pas remonter leur trajectoire ni identifier leur origine exacte.
- ❖ Alors pour tracer les rayons cosmiques dans un nuage spécifique, on utilise une méthode indirecte → observer les photons gamma, car eux ne sont ni déviés ni absorbés facilement, même sur de très longues distances.
- ❖ Mais comment ces photons gamma sont-ils produits ?

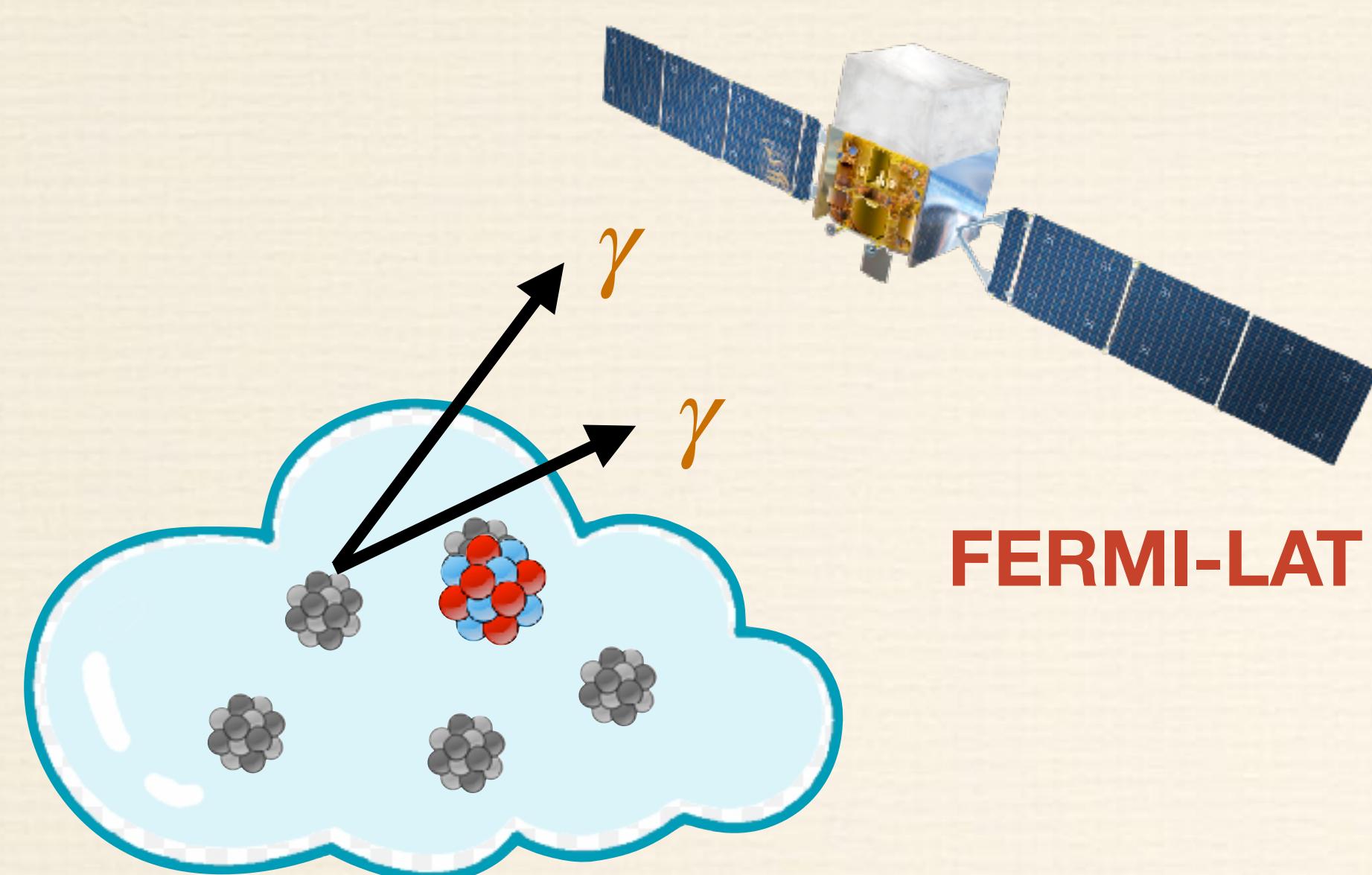


Nuage interstellaire



FERMI-LAT

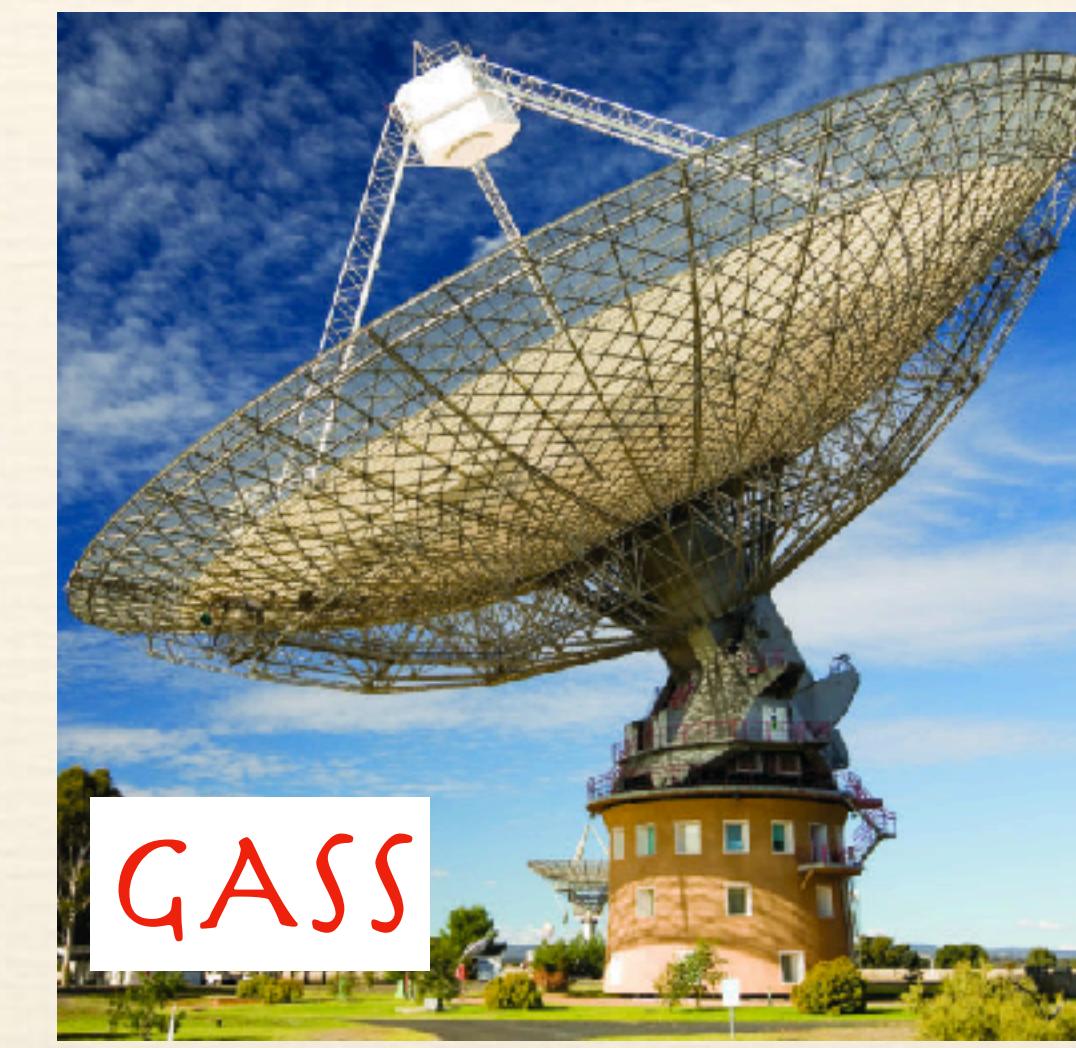
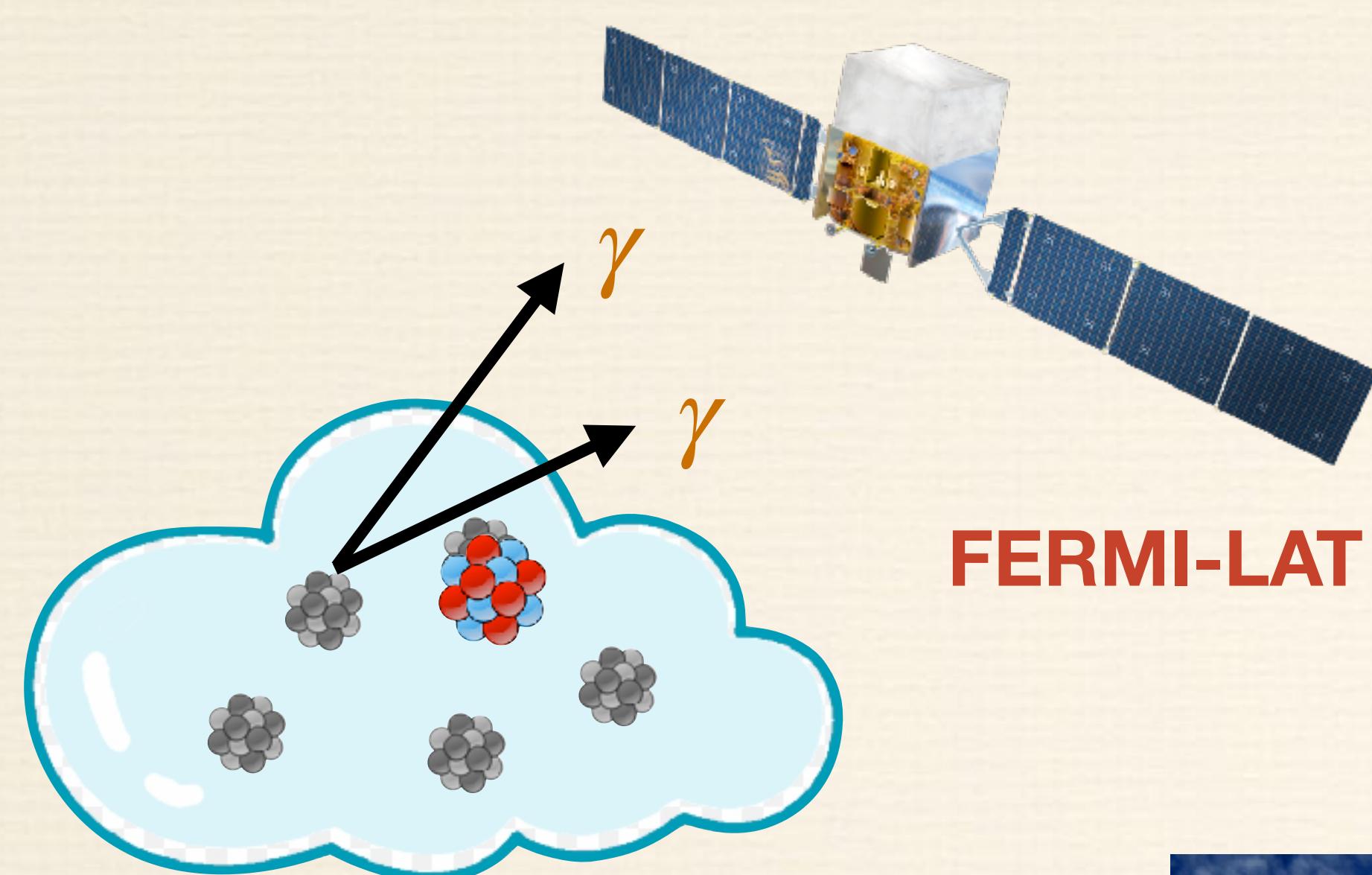




Densité volumique du gaz

$$N_H = \int n_H dL_{\text{visee}}$$

Densité de colonne
de gaz

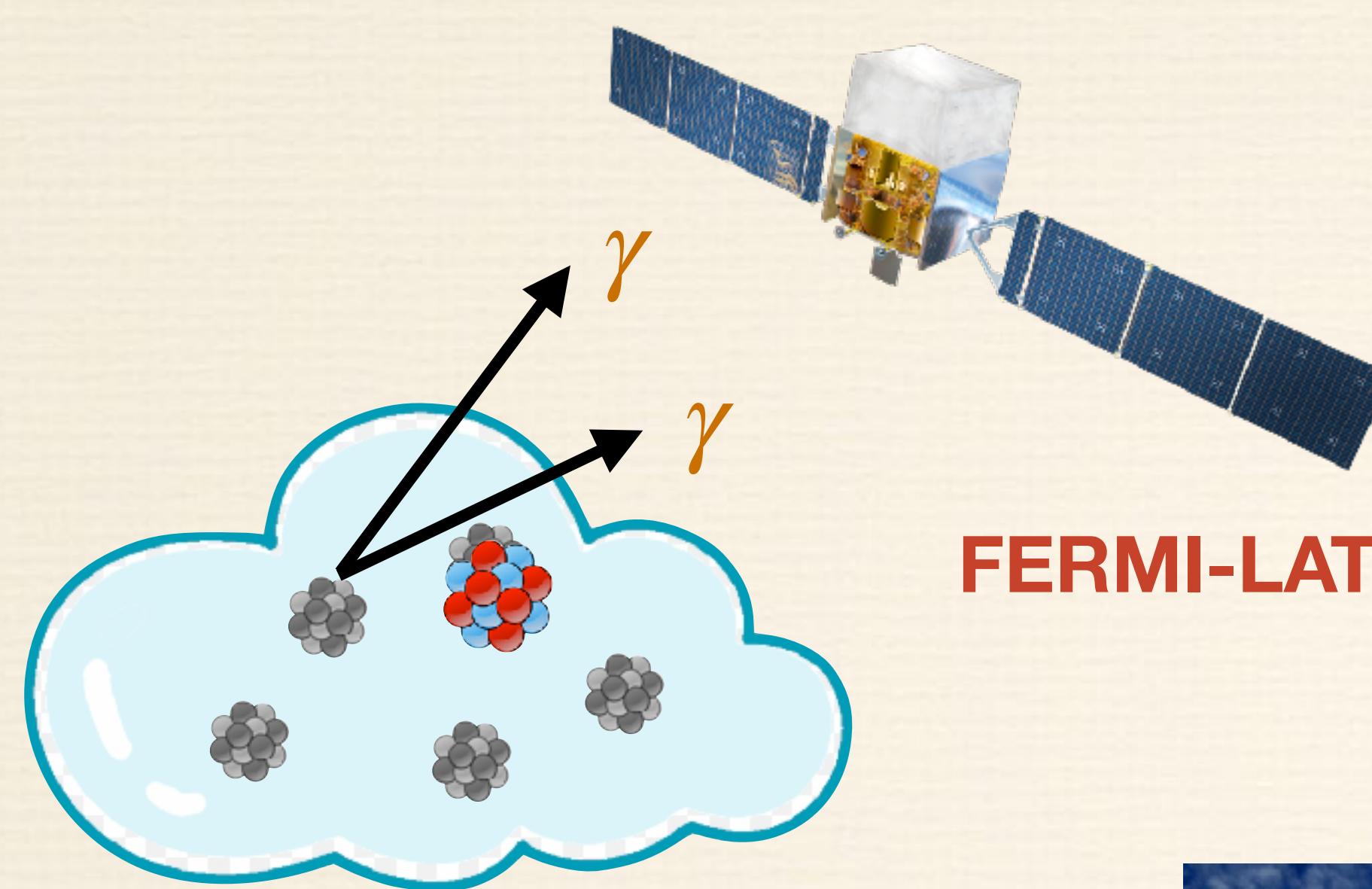


Densité volumique du gaz

$$\overline{N_H} = \int n_H dL_{\text{visee}}$$

Densité de colonne
de gaz

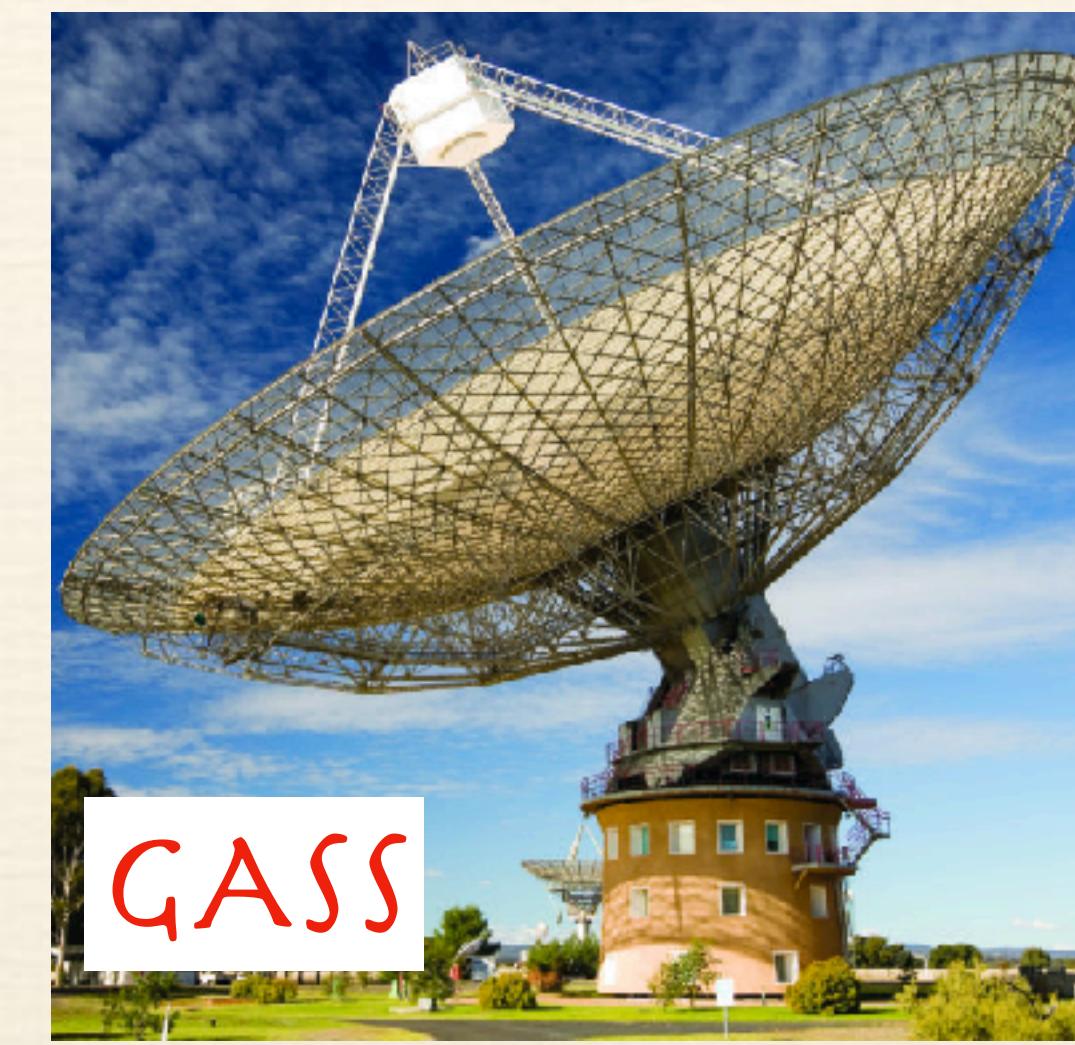
raie radio à 21cm

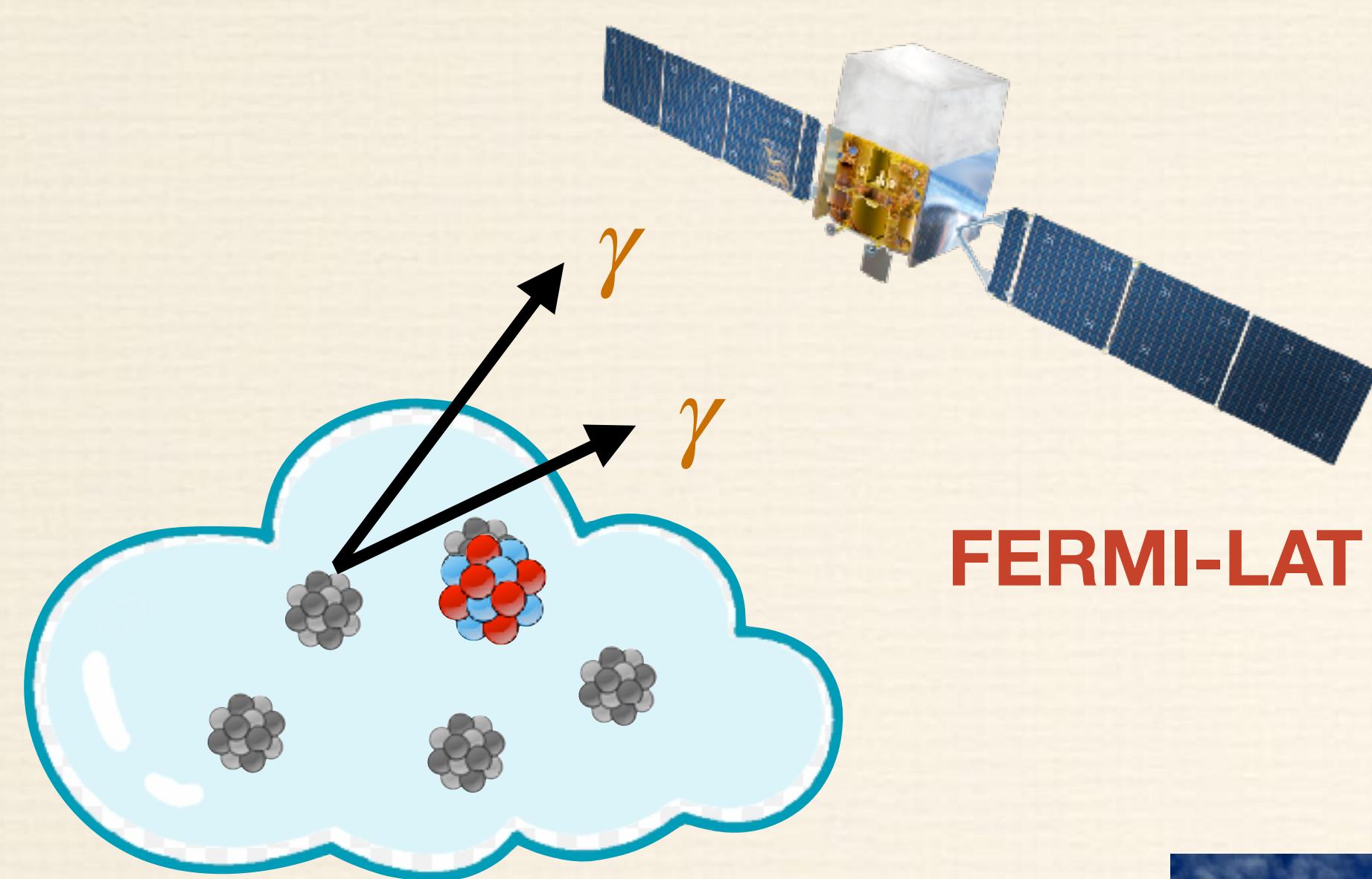


Intensité des photons γ

$$I_\gamma \propto \frac{N_{\text{H}}}{\text{raie radio à 21cm}}$$

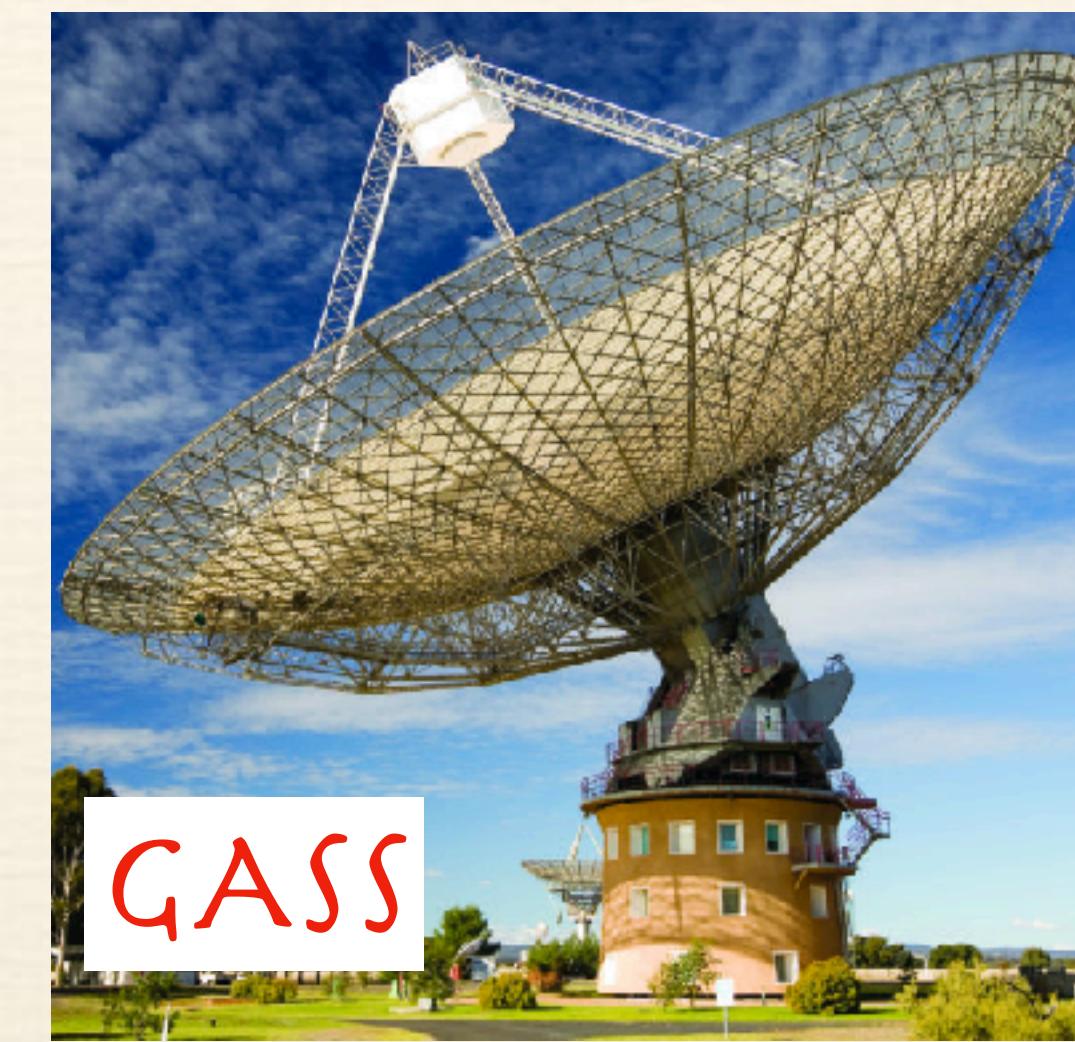
raie radio à 21cm





émissivité gamma par atome de gaz

$$I_\gamma = q_\gamma \frac{N_{\text{H}}}{\text{raie radio à 21cm}}$$

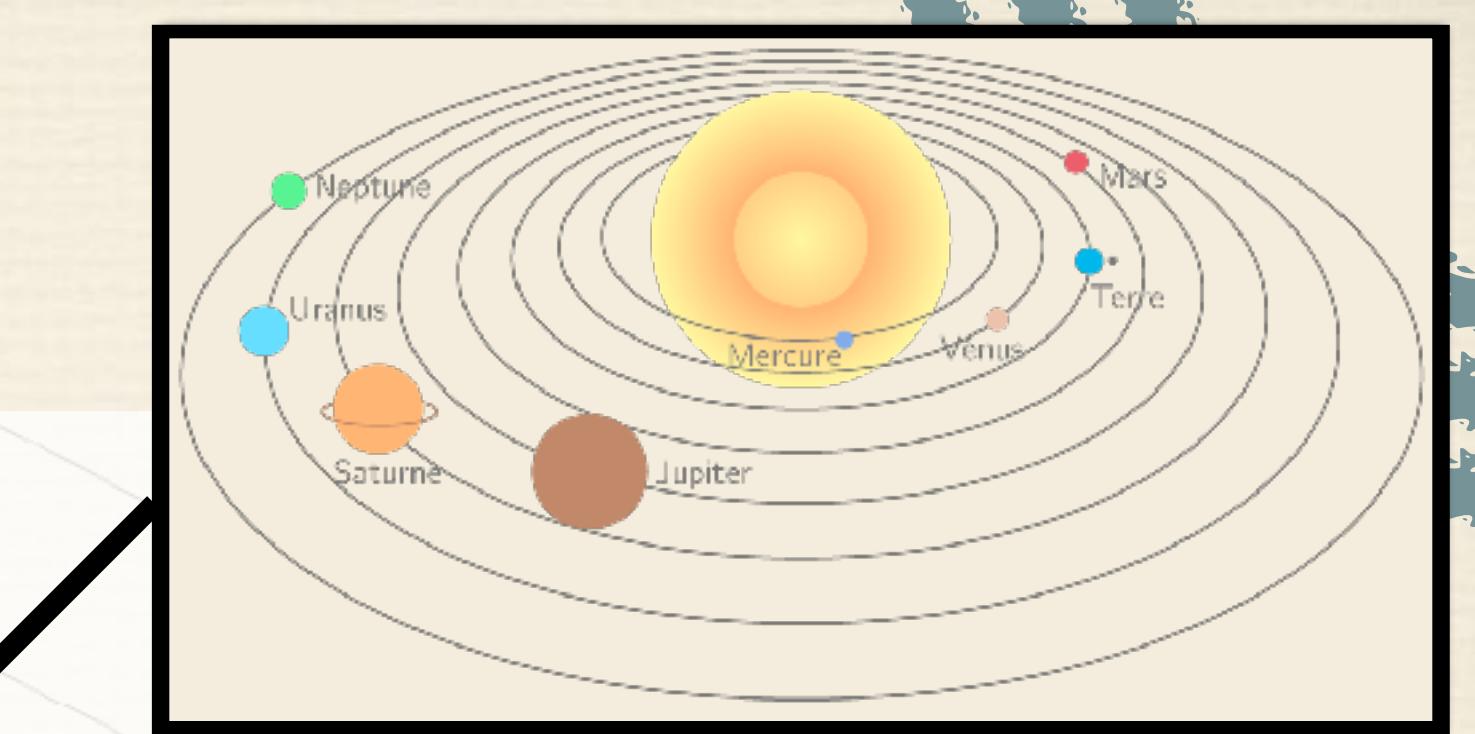


raie radio à 21cm

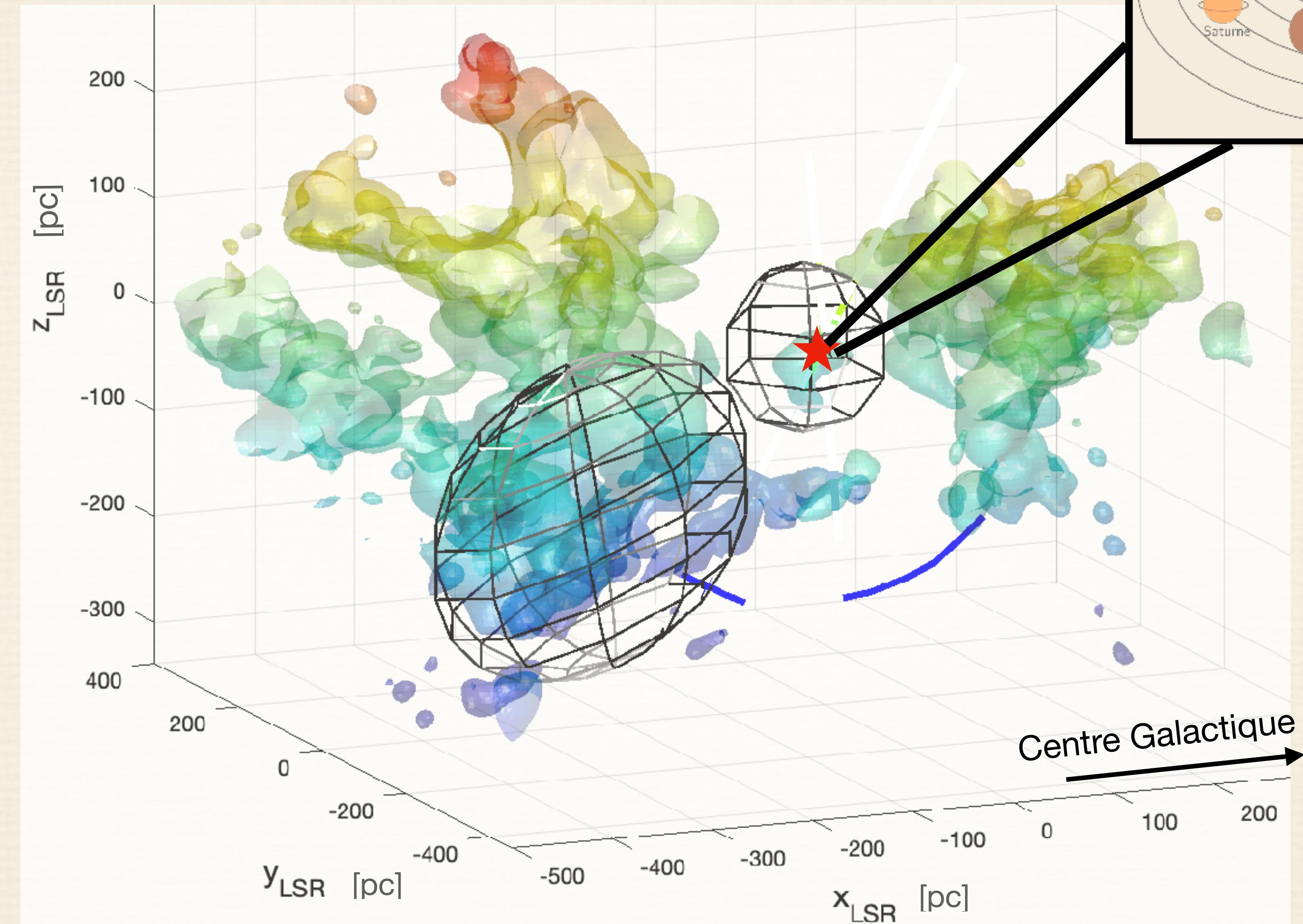
- ❖ Les rayons cosmiques, lorsqu'ils pénètrent dans un nuage interstellaire, peuvent interagir avec les atomes d'hydrogène présents dans le gaz. Prenons par exemple un proton cosmique. Lorsqu'il heurte un proton du gaz, il peut produire un pion neutre, qui se désintègre presque immédiatement en deux photons gamma. Ces photons gamma sont ensuite captés par le satellite Fermi
- ❖ En parallèle, on mesure la quantité de gaz dans le nuage via la densité de colonne. C'est-à-dire l'intégrale de la densité de gaz le long de la ligne de visée, entre l'observateur et le nuage. Cette mesure est faite par des antennes radio, comme le radiotélescope GASS, via la célèbre raie à 21 cm de l'hydrogène. Cette densité de colonne de gaz est mesurée par une antenne radio à 21cm comme GASS.
- ❖ Et ce qu'on observe, c'est que l'intensité des photons gamma est proportionnelle à la densité de gaz
- ❖ Le facteur de proportionnalité dans cette relation, qu'on appelle l'émissivité gamma, est directement lié au flux de rayons cosmiques dans le nuage.
- ❖ Donc la méthode de détection indirecte consiste à combiner l'observation des photons gamma (via Fermi) et l'estimation du gaz (via GASS). on peut déduire le flux local de rayons cosmiques dans un nuage, même lointain

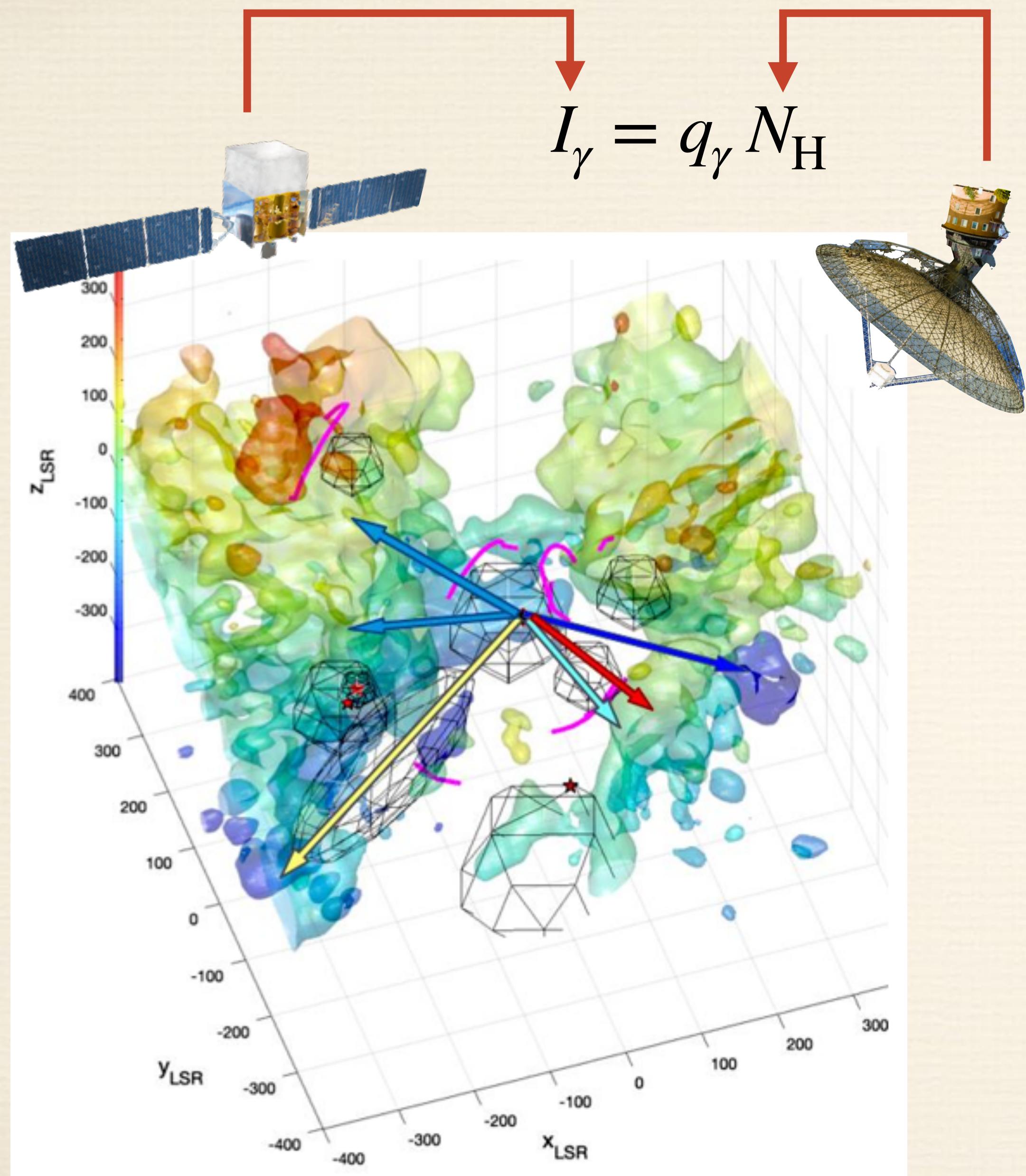
Le milieu local

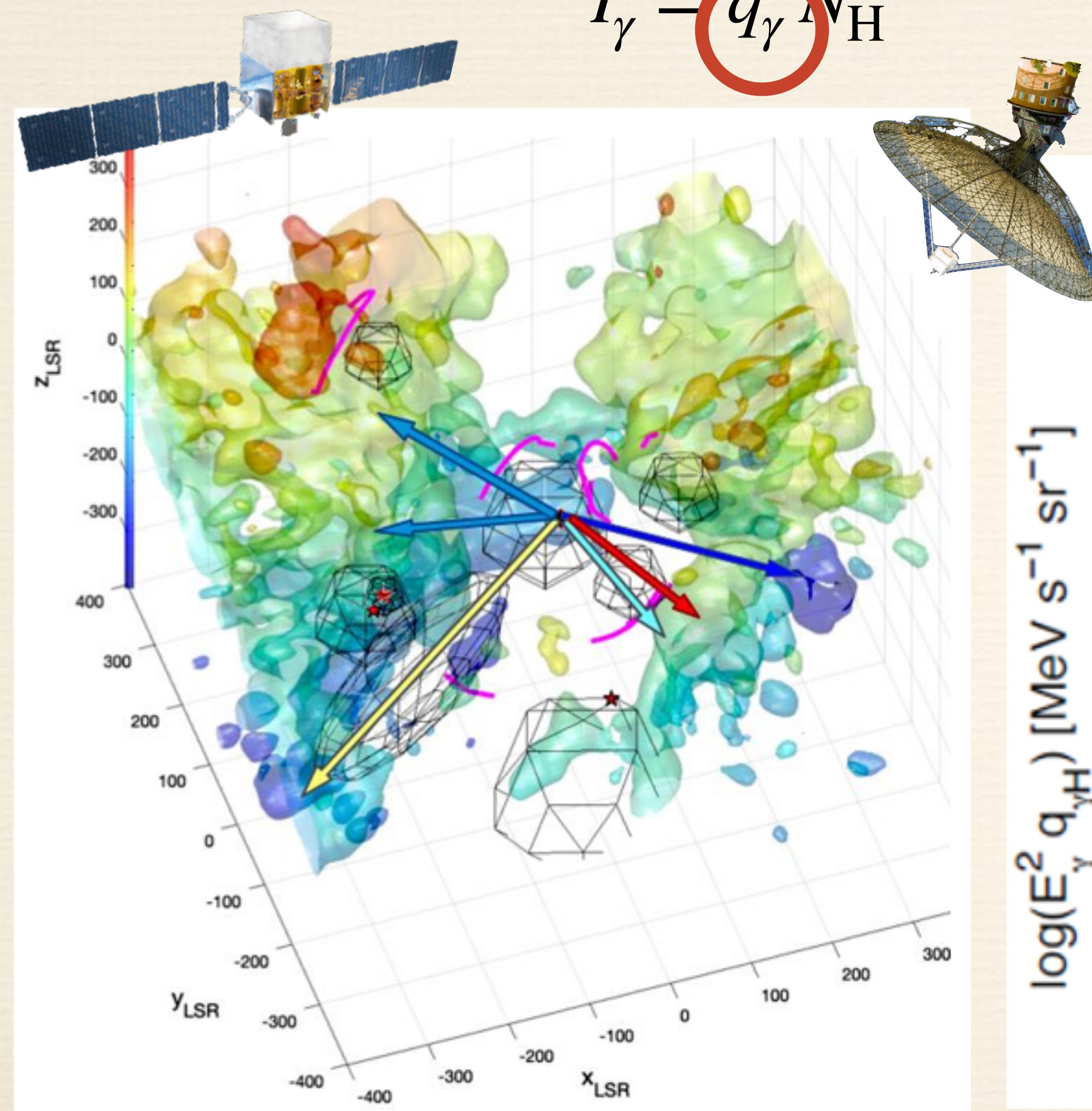
Plan Galactique



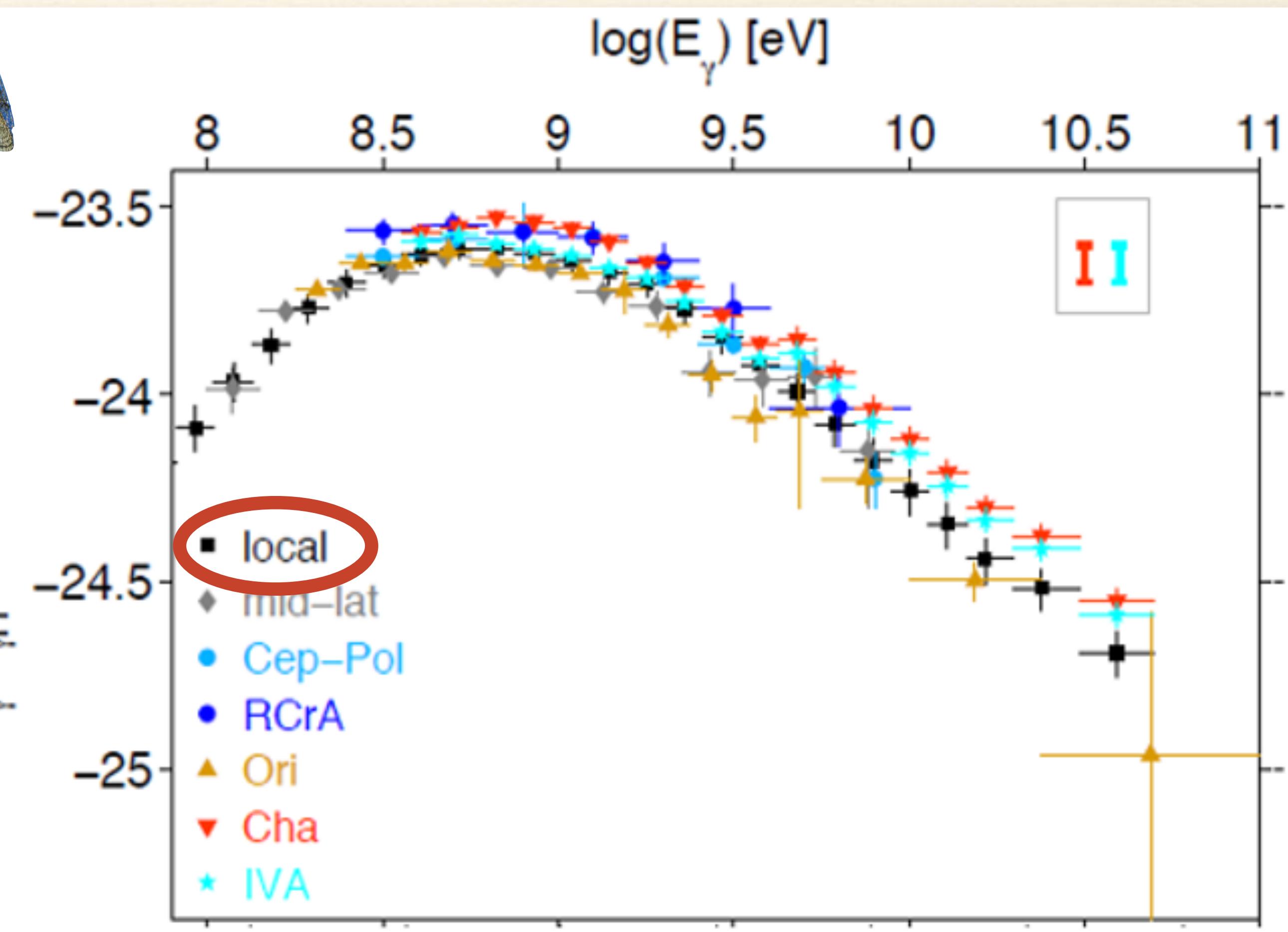
Centre Galactique



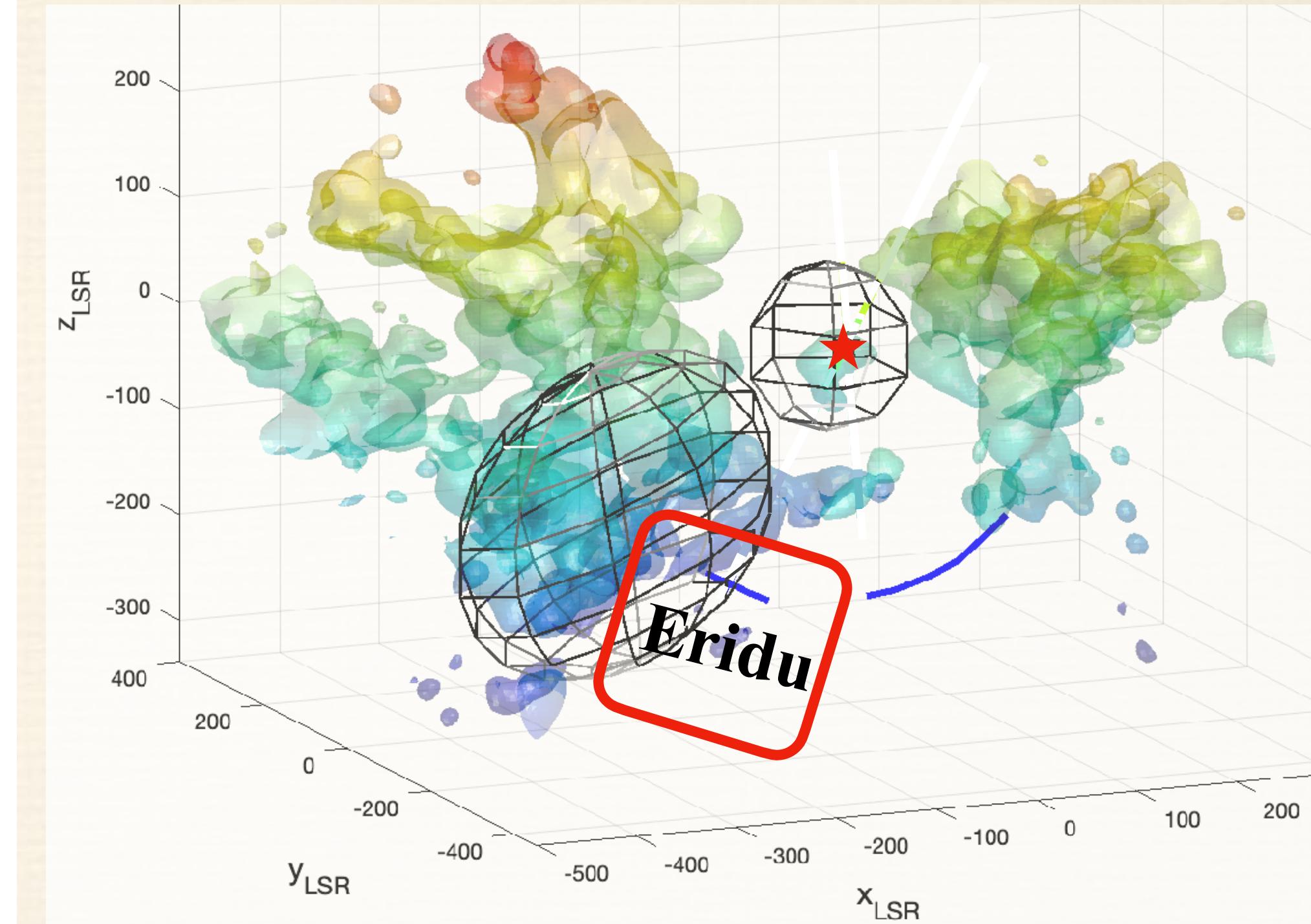
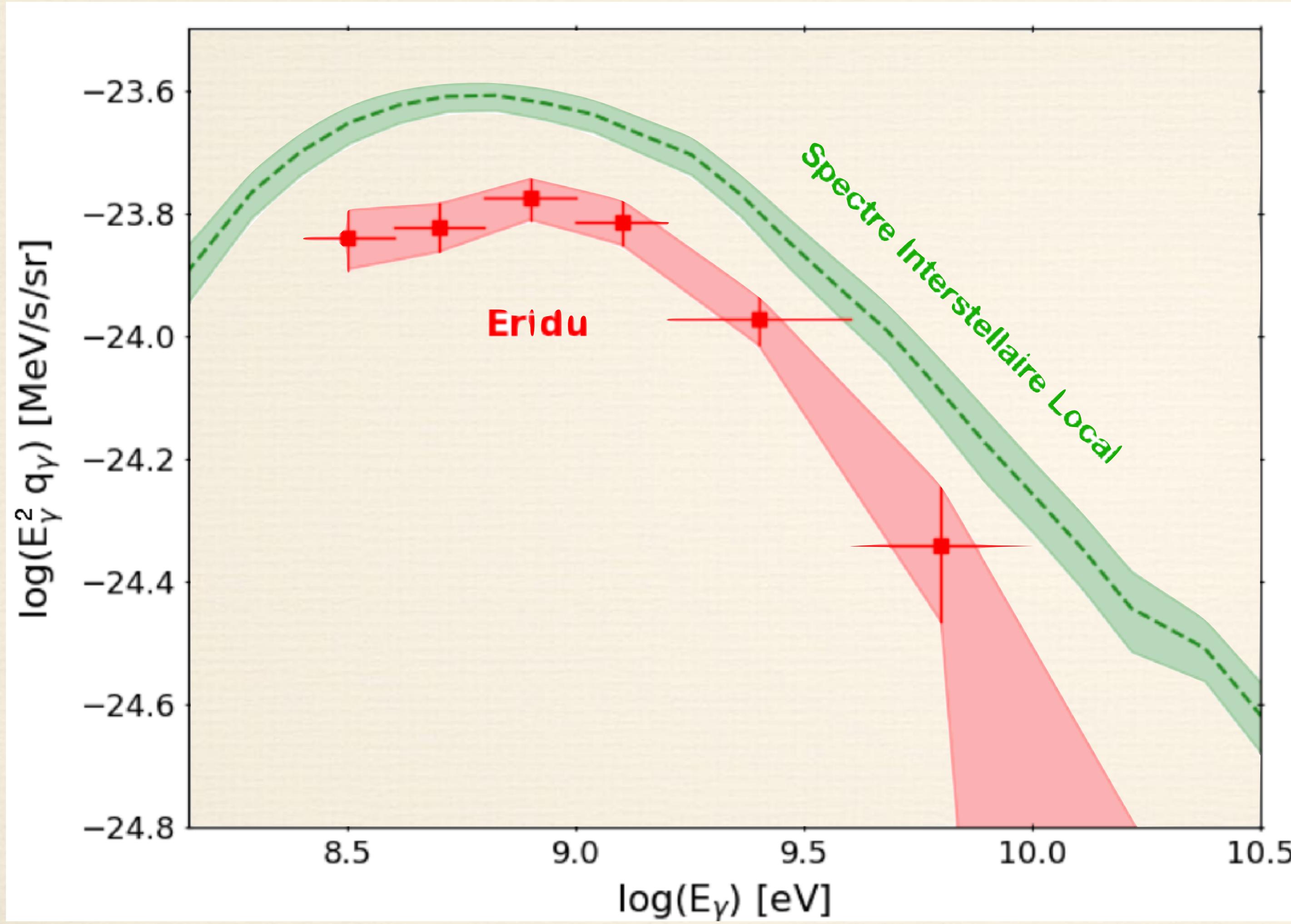




$$I_\gamma = q_\gamma N_{\text{H}}$$

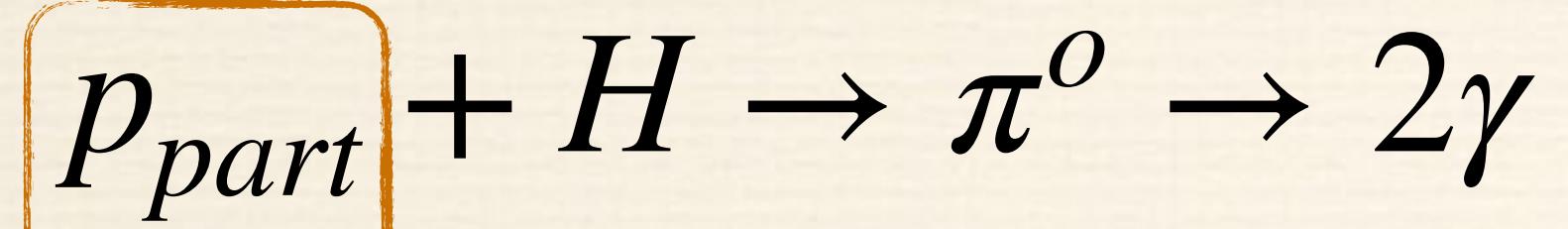


Un déficit de rayons cosmiques !



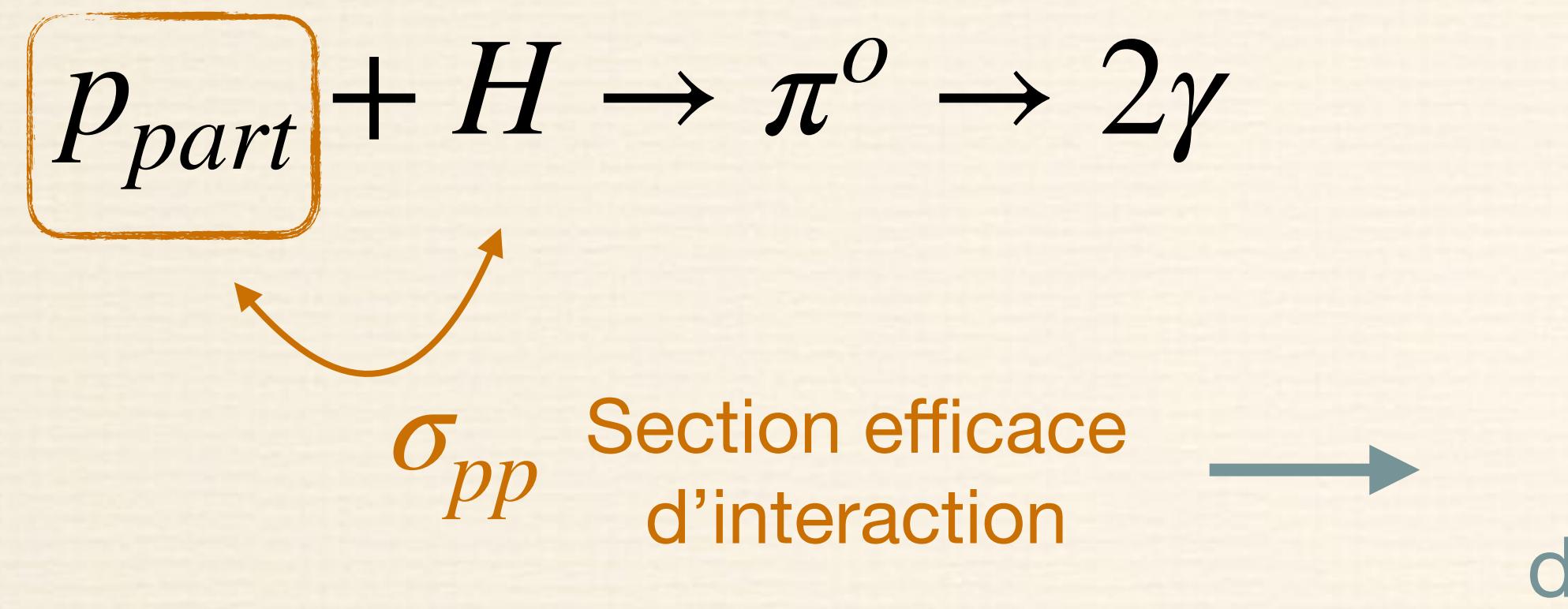
Eridu vs Système Solaire

Flux de particules cosmiques
proche du Soleil



Eridu vs Système Solaire

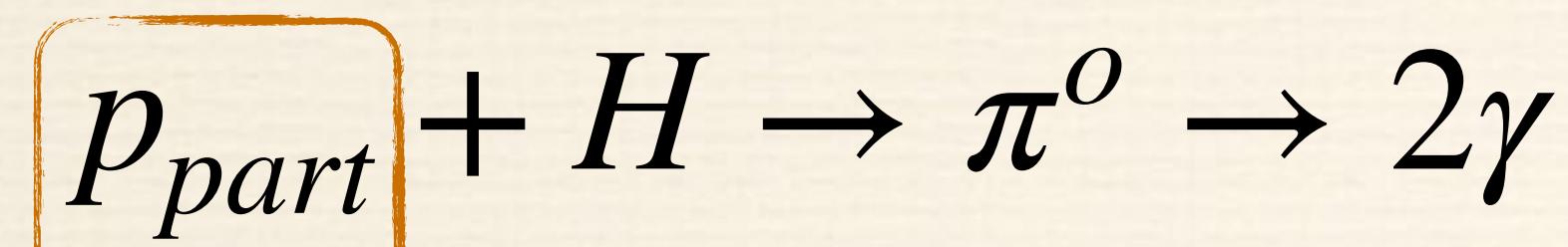
Flux de particules cosmiques
proche du Soleil



2 Modèles
dans $[10^9 - 10^{11}]$ eV

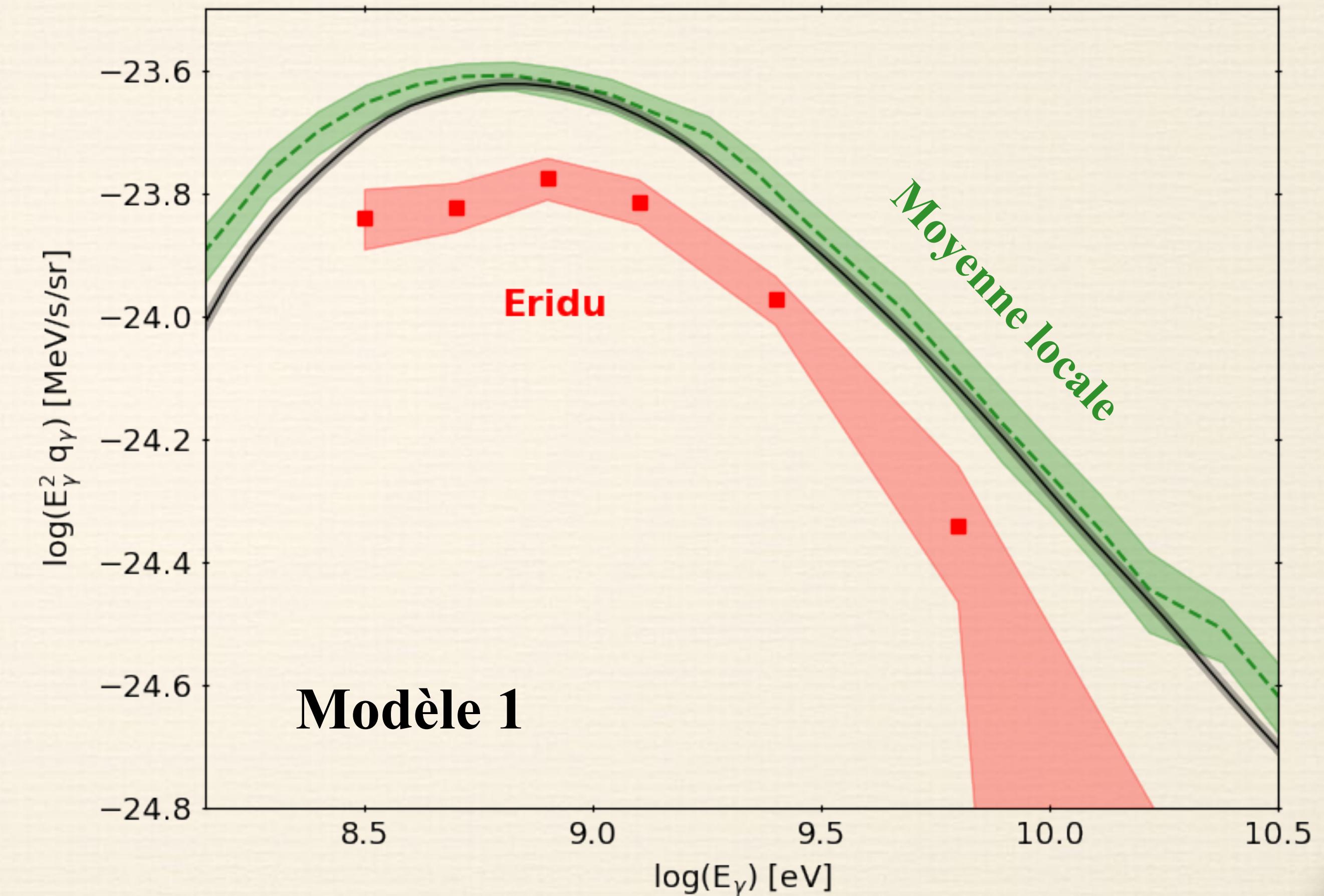
Eridu vs Système Solaire

Flux de particules cosmiques
proche du Soleil



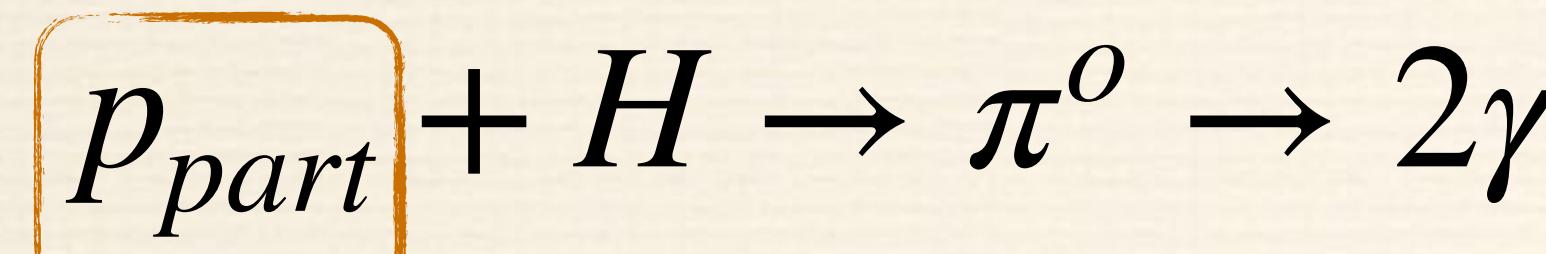
σ_{pp} Section efficace
d'interaction

Résultat 1
Eridu a un déficit



Eridu vs Système Solaire

Flux de particules cosmiques
proche du Soleil

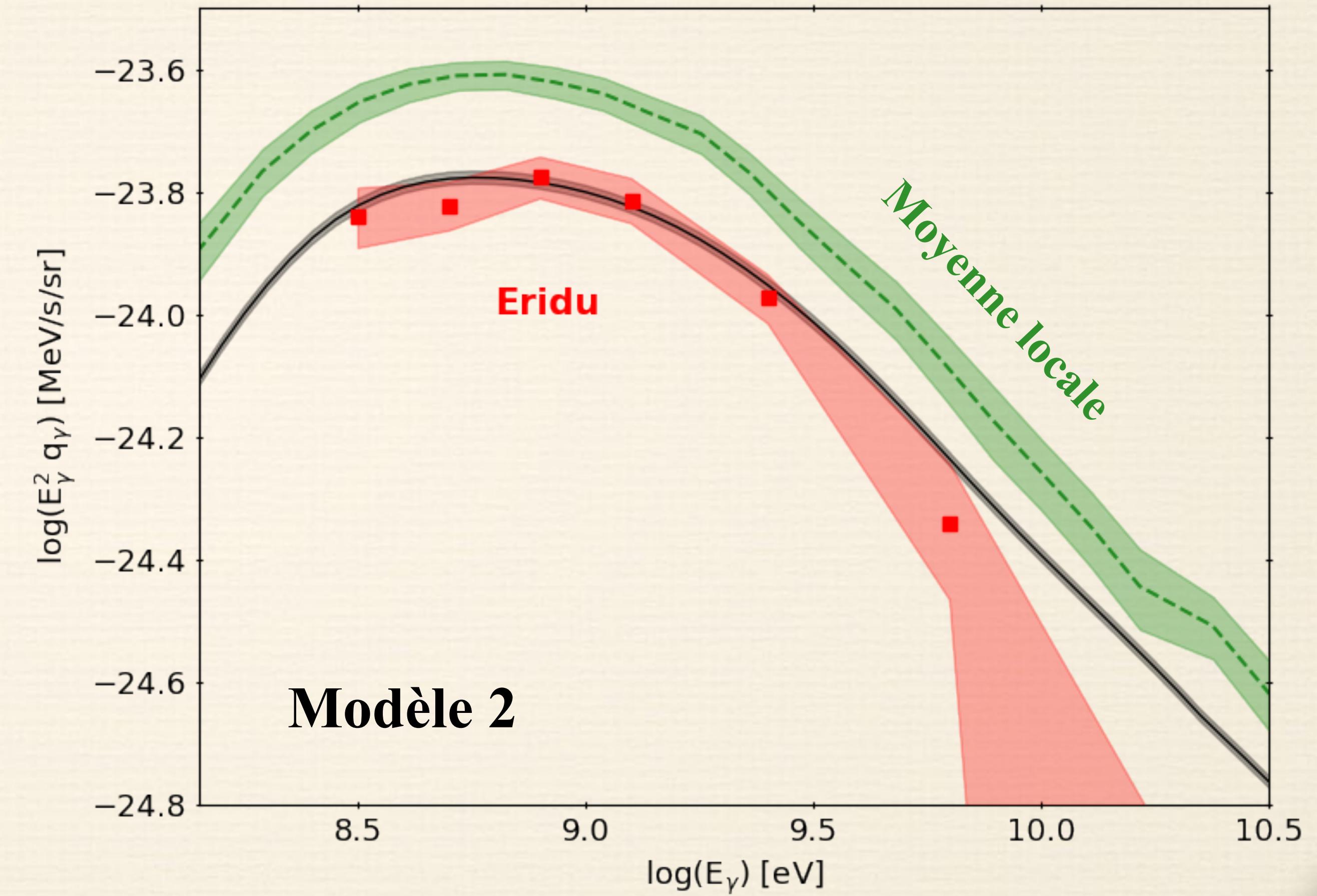


σ_{pp} Section efficace
d'interaction

Résultat 1
Eridu a un déficit

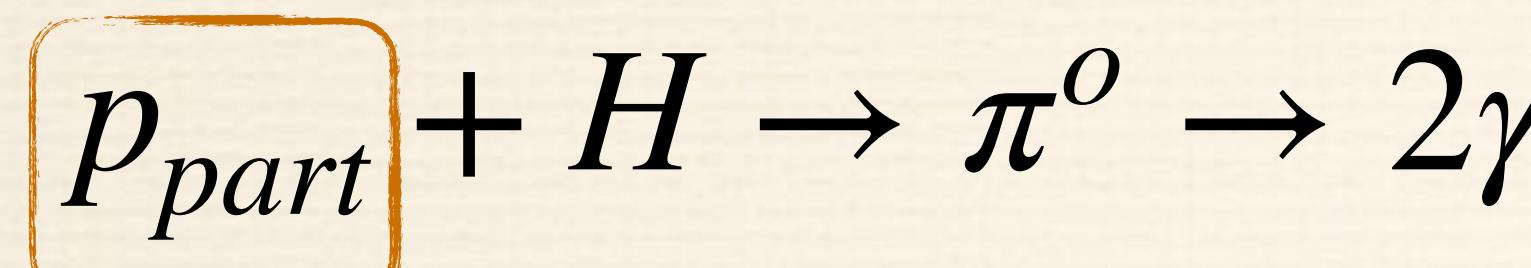
Résultat 2

Les nuages locaux ont un surplus



Eridu vs Système Solaire

Flux de particules cosmiques
proche du Soleil



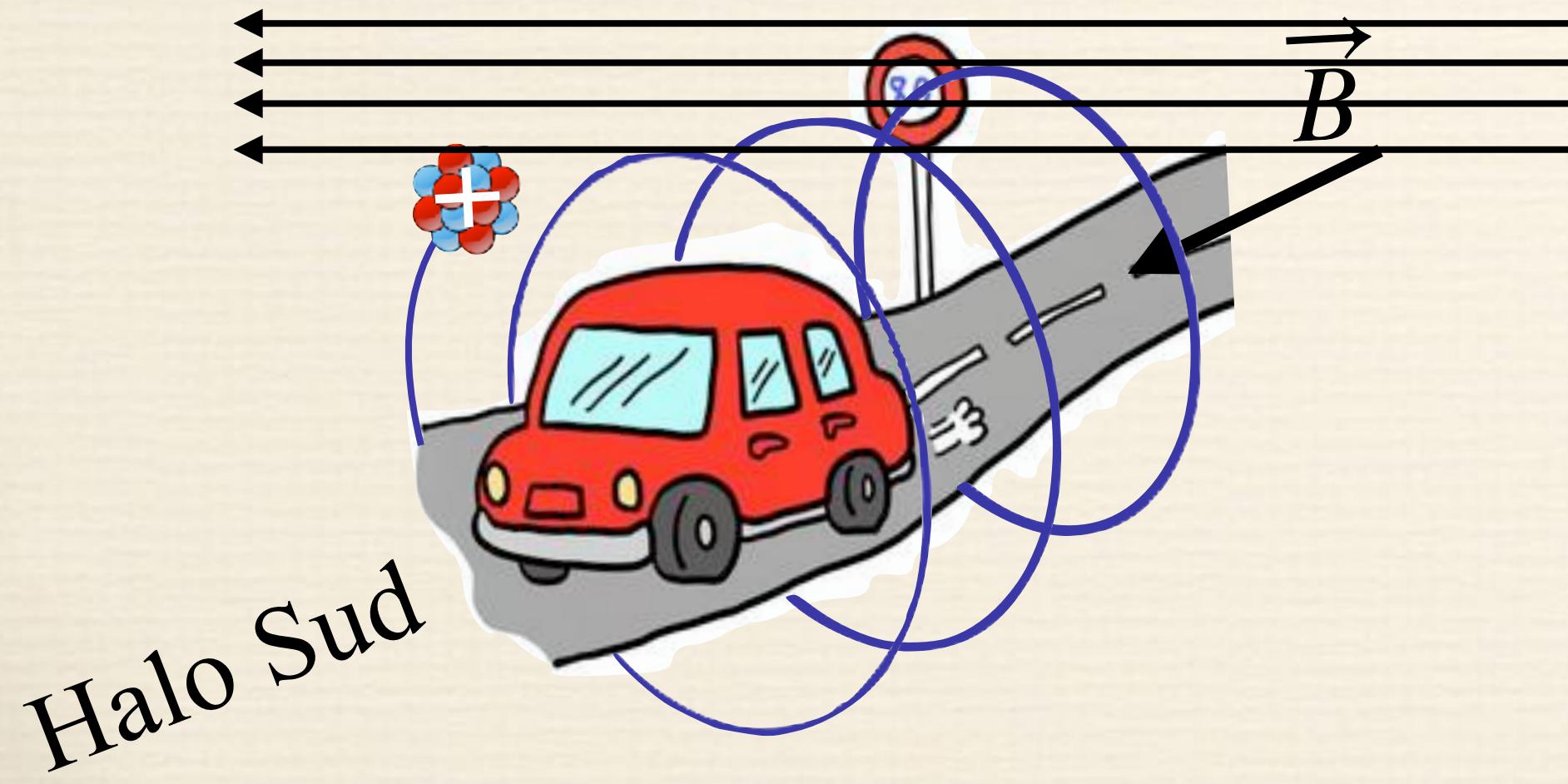
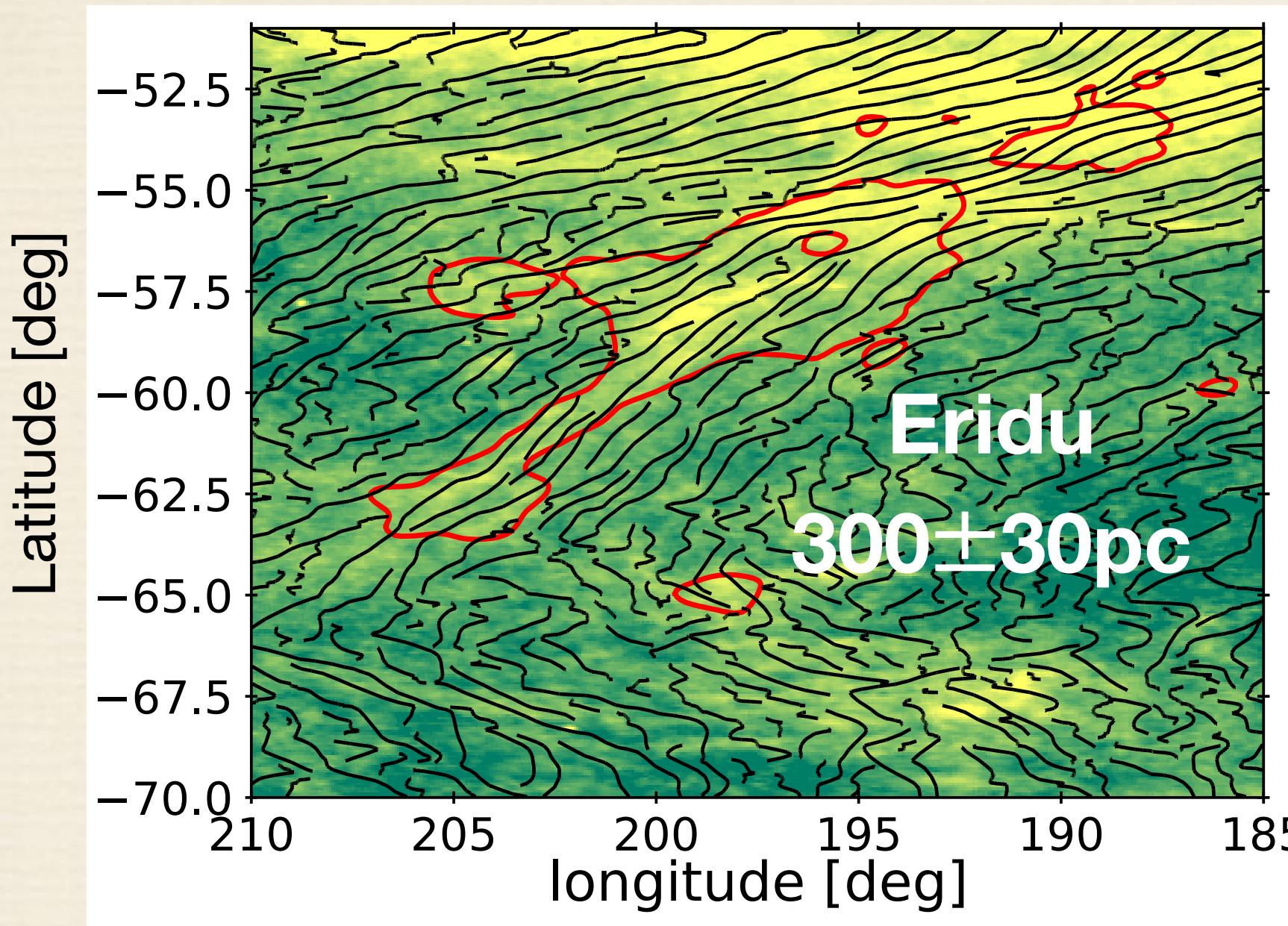
σ_{pp} Section efficace
d'interaction

Résultat 1
Eridu a un déficit

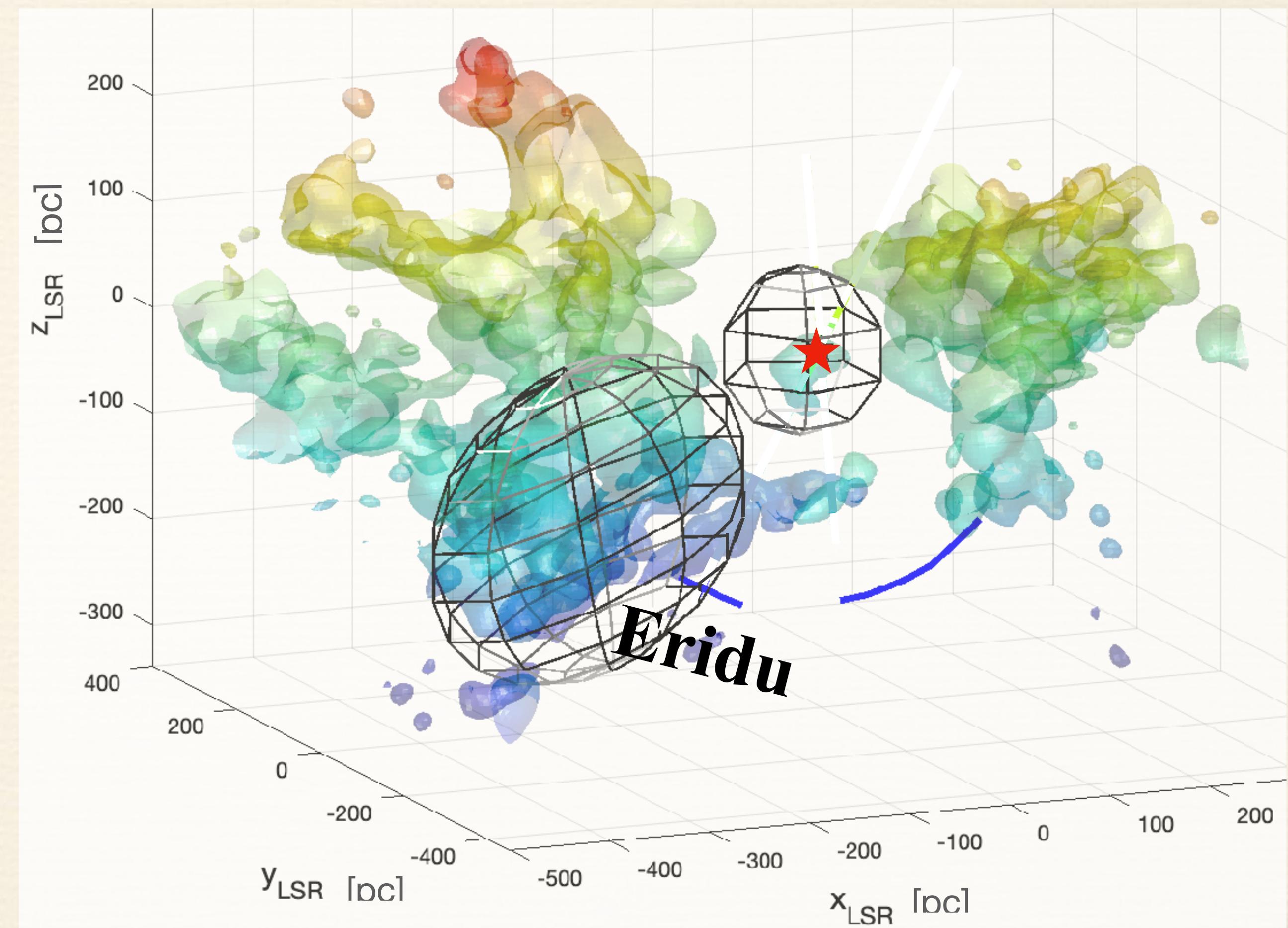
Résultat 2
Les nuages locaux ont un surplus

Résultat Final
il y a 40% d'écart entre les différentes
sections efficaces à cet intervalle d'énergie

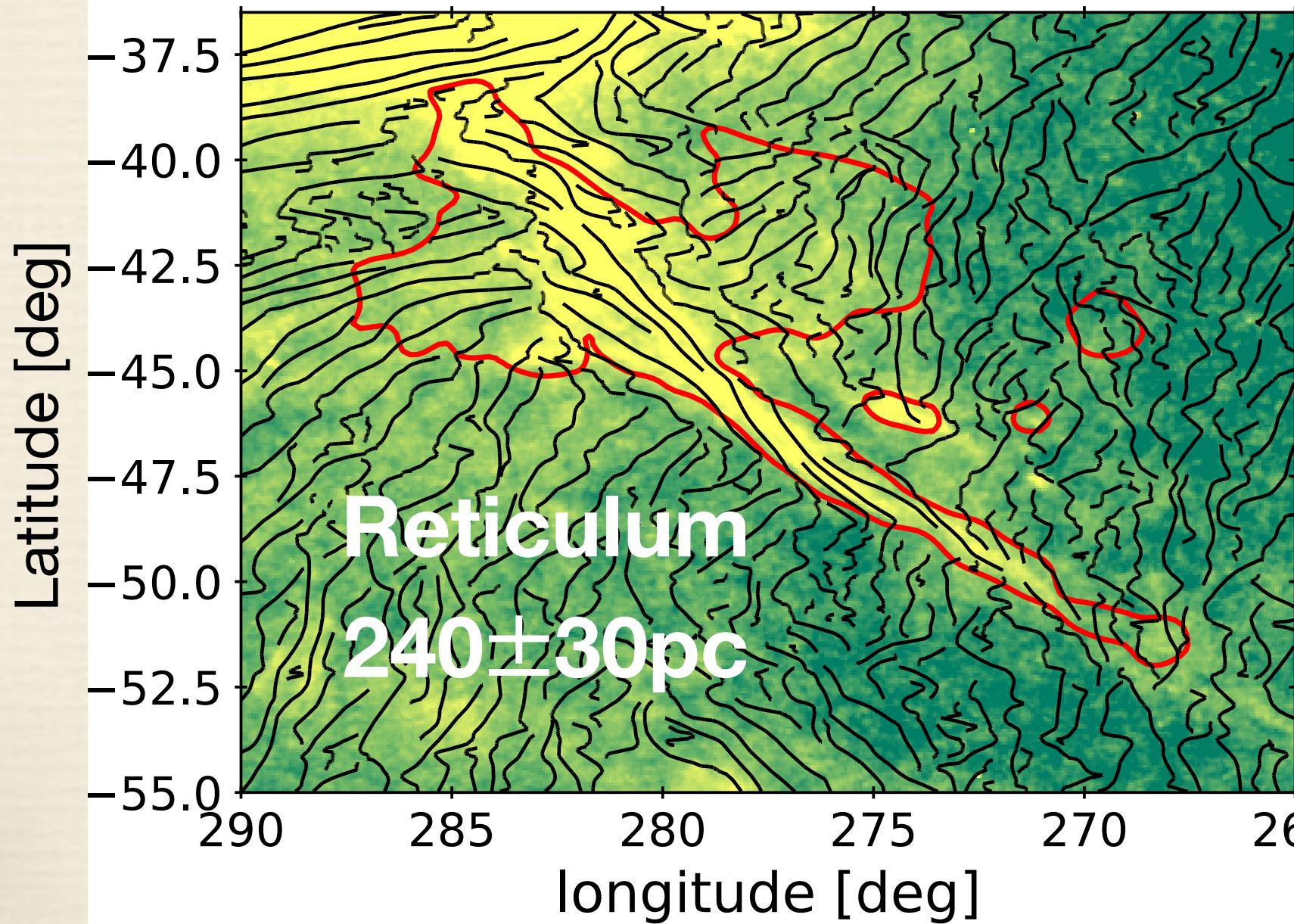
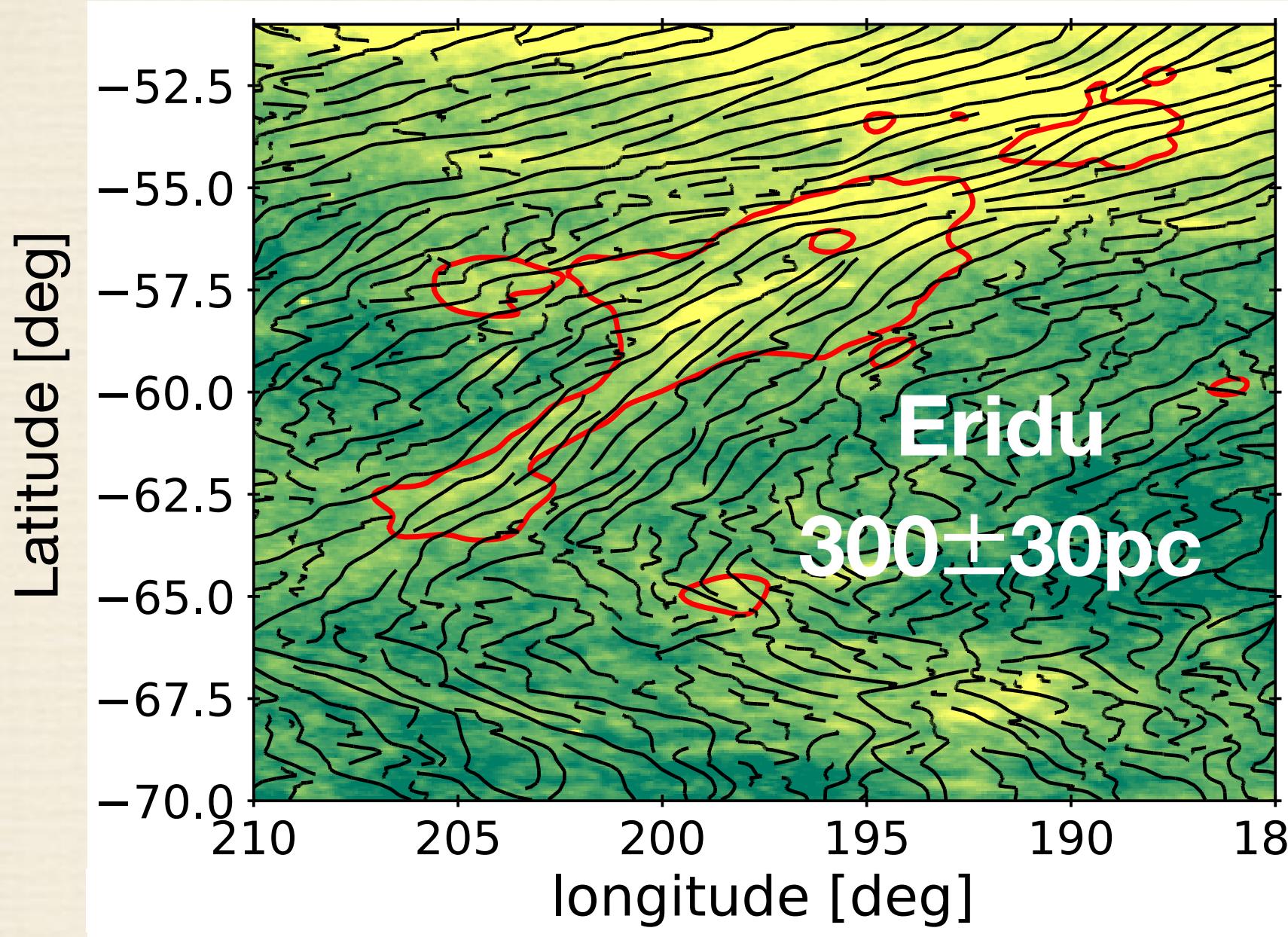
— Champ magnétique \vec{B}



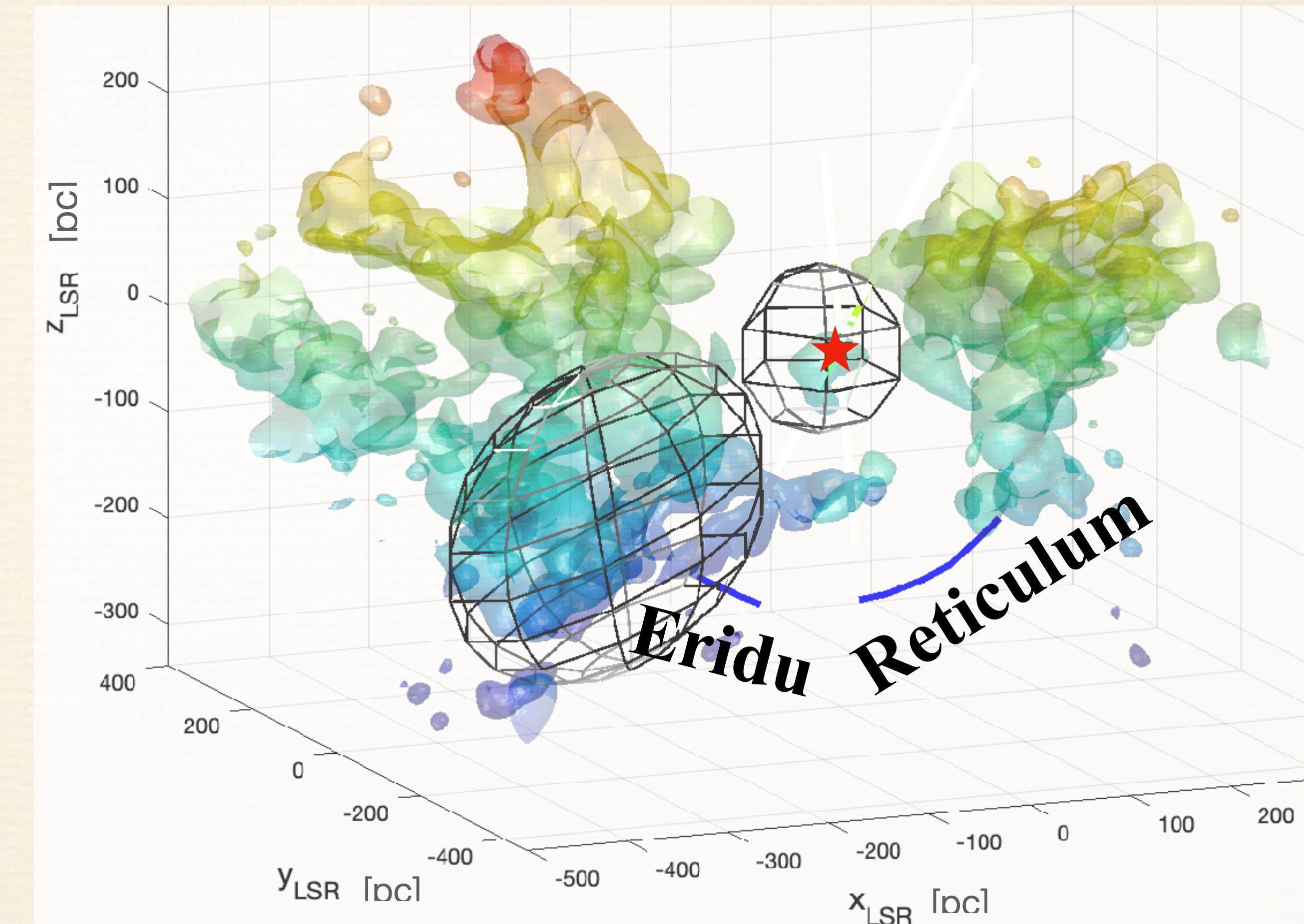
Hypothèse de l'inclinaison



— Champ magnétique \vec{B}

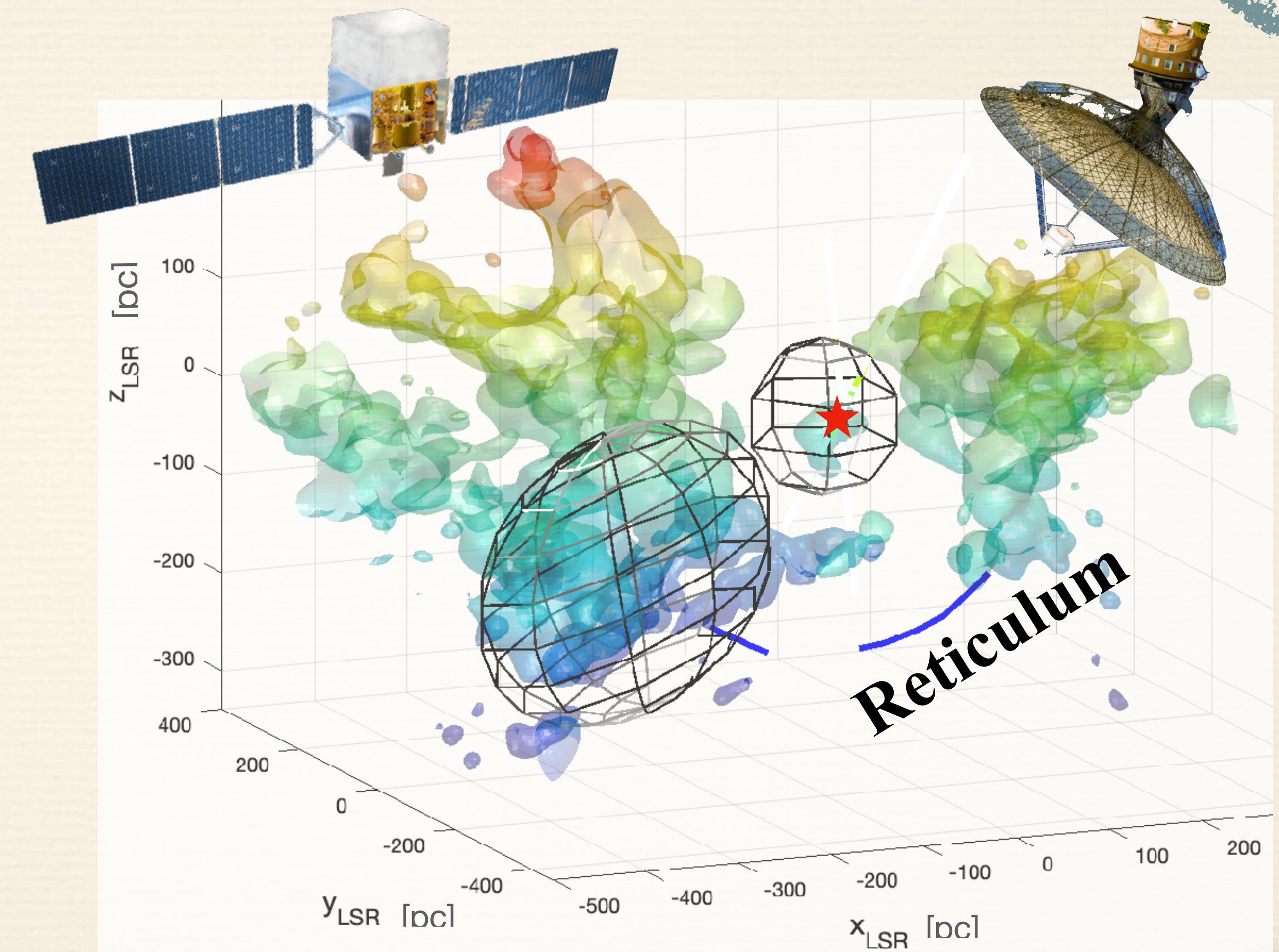
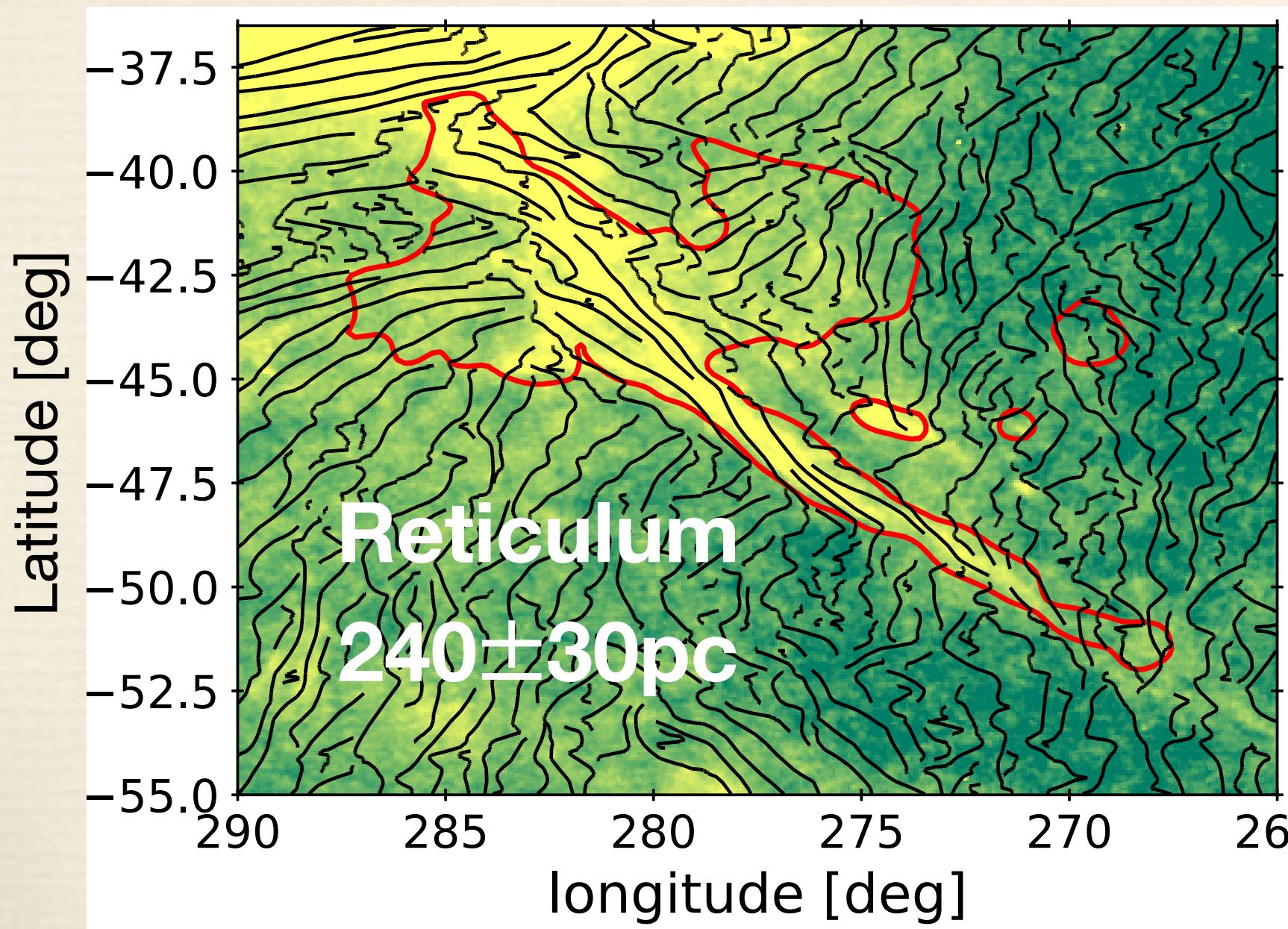


Hypothèse de l'inclinaison

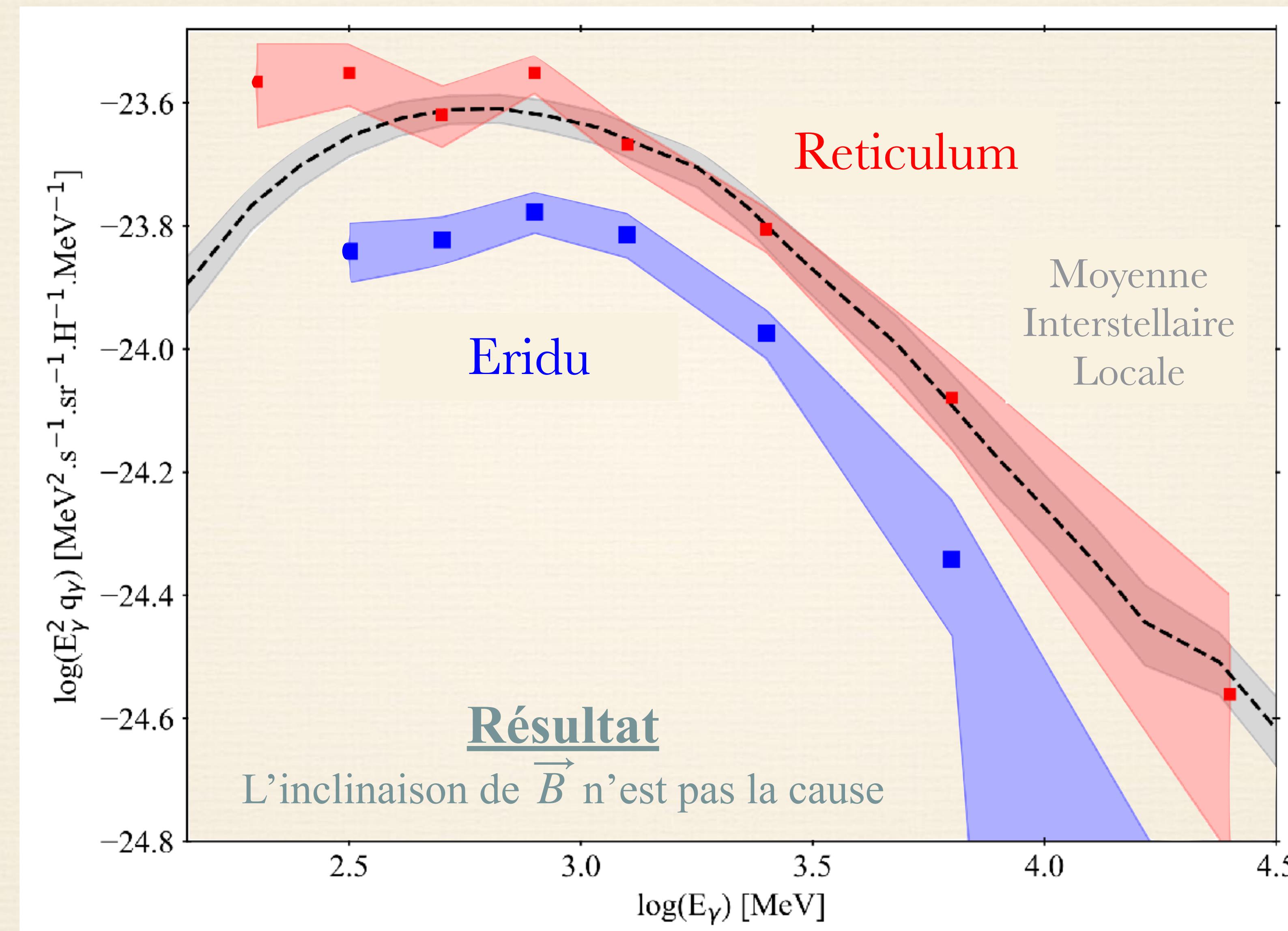


Mesurer le flux de particules dans Reticulum

$$I_\gamma = q_\gamma N_{\mathrm{H}}$$



Eridu vs Reticulum



Et si on creuse plus profondément ..



Et si on creuse plus profondément ..

densité volumique
du gaz n_{gaz}



Et si on creuse plus profondément ..

densité volumique
du gaz n_{gaz}

amplitude du champ
magnétique $|\vec{B}|$



Et si on creuse plus profondément ..

densité volumique
du gaz n_{gaz}

niveau de turbulence dans le
champ de vitesse du gaz

amplitude du champ
magnétique $|\vec{B}|$



Et si on creuse plus profondément ..

densité volumique
du gaz n_{gaz}

niveau de turbulence dans le
champ de vitesse du gaz

amplitude du champ
magnétique $|\vec{B}|$

emmêlement des lignes
du champ magnétique



Et si on creuse plus profondément ..

densité volumique
du gaz n_{gaz}

niveau de turbulence dans le
champ de vitesse du gaz

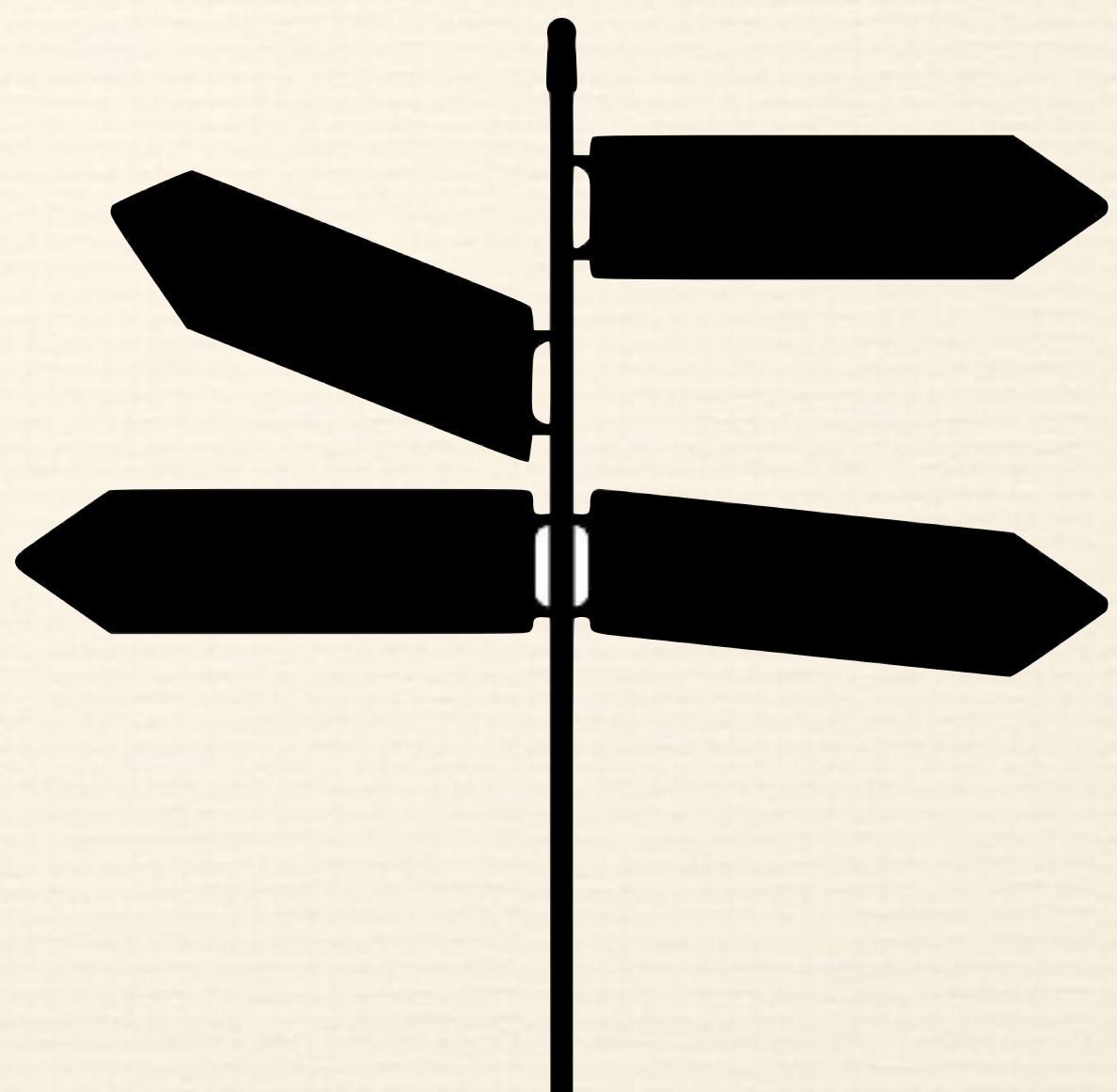
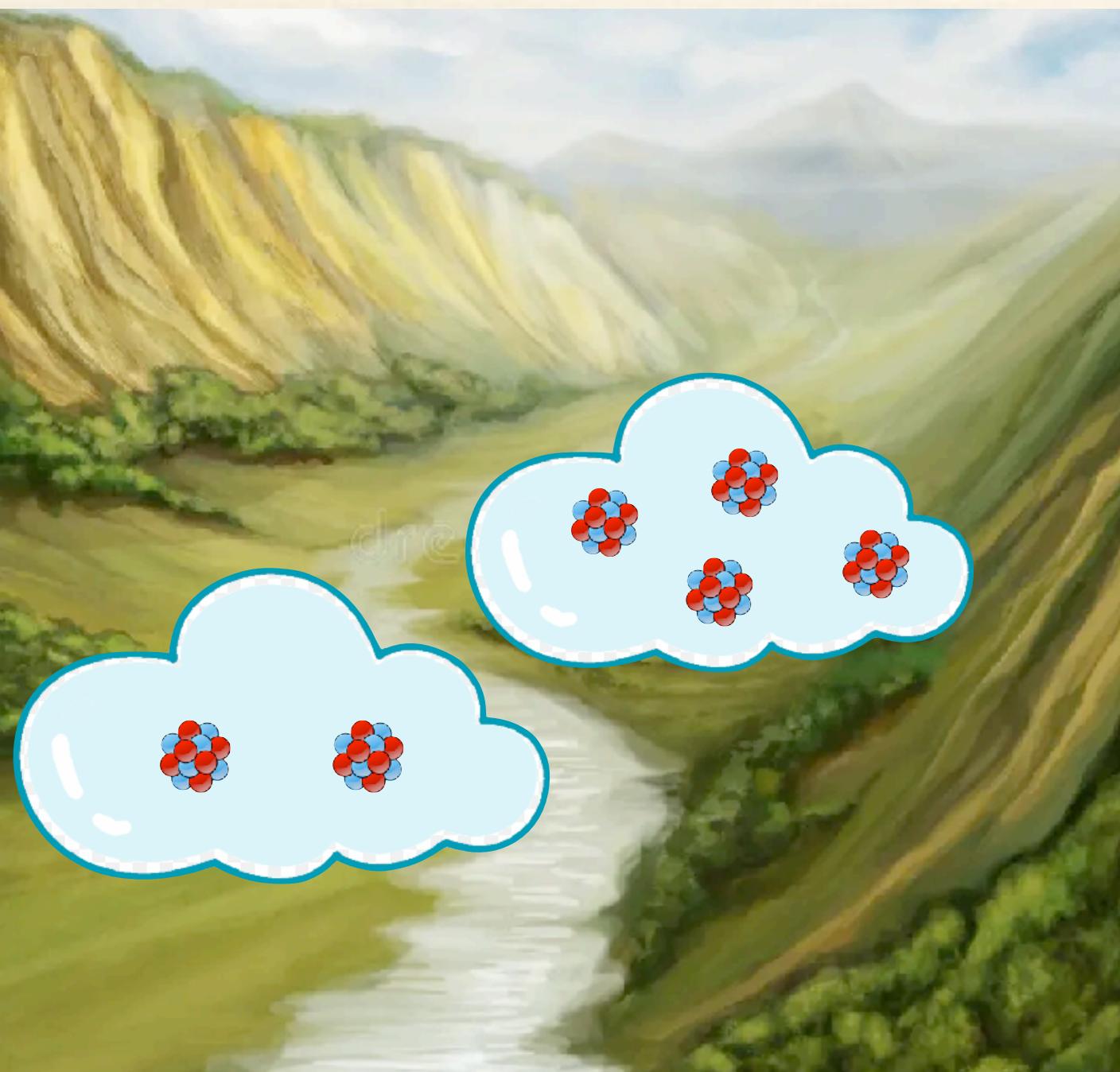
amplitude du champ
magnétique $|\vec{B}|$

emmêlement des lignes
du champ magnétique



**On trouve les mêmes ordres de
grandeur dans les 2 nuages !**

Conclusion



- ❖ Pour conclure, j'ai étudié deux nuages interstellaires qui présentent des caractéristiques très similaires en termes de densité de gaz et de champ magnétique, mais qui montrent une différence marquée dans le flux de rayons cosmiques. Cela suggère que d'autres facteurs influencent la propagation des rayons cosmiques, et qu'ils ne sont pas encore bien identifiés.
- ❖ Les deux nuages se trouvent dans la même région de faible densité autour du Soleil, à une distance comparable, ce qui rend la comparaison pertinente.
- ❖ Eridu est situé à l'extrémité d'une superbulle, formée par plusieurs explosions de supernovae successives. Cela pourrait avoir un impact important sur le flux local de rayons cosmiques.
- ❖ Étudier en détail l'environnement des nuages devient donc une nouvelle voie de recherche, pour mieux comprendre les mécanismes fins de propagation des rayons cosmiques dans la Galaxie.

Animation Scientifique

Evénements organisés par l'association française d'astronomie (AFA)

Ma Thèse en 5 min

- • • • •
- Défis majeur
- Trouver le bon équilibre
- entre rigueur scientifique
- et simplicité
- • • • •

Guide scientifique exposition “Rencontres du Ciel et de l’Espace”

- • • • •
- L’importance d’utiliser
- des analogies visuelles
- et des anecdotes
- • • • •

- ❖ En parallèle de ma thèse, j'ai participé à 2 événements organisés par l'association française d'astronomie
- ❖ Le premier était « Ma thèse en 5 minutes » – à ne pas confondre avec la version en 3 minutes. Ici, le public était non scientifique, très varié, allant de lycéens à des adultes passionnés. Il y avait un temps d'échange après chaque présentation où le public avait le droit de poser des questions
- ❖ J'ai aussi été guide scientifique lors d'une exposition sur la formation de l'Univers, du Système solaire et de la Terre.
- ❖ Ce qui m'a paru le plus difficile au départ, c'était de simplifier sans déformer le contenu scientifique. j'ai aussi compris l'importance des analogies visuelles, des exemples concrets et même des anecdotes, pour capter l'attention d'un public hétérogène

Cours - TD

Enseignement UFR Sciences Biomédicales

2020 - 2023



1ère année de Licence :

- ❖ Mathématiques appliquées
- ❖ Optique géométrique

Parcours Santé (PASS) :

- ❖ Mécanique du point

Cours-TD Maths

UFR Sciences Biomédicales

Défis lors de ma 3e année

Cours-TD Maths

UFR Sciences Biomédicales

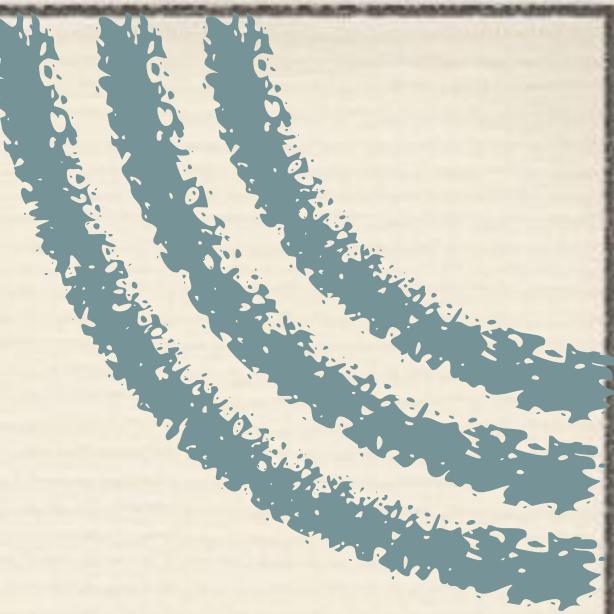
Défis lors de ma 3e année

Rappels

Partie du cours
en Diaporama

Cours-TD Maths

UFR Sciences Biomédicales



Défis lors de ma 3e année

Rappels

TD en petits groupes

✖ Les écarts de niveau se creusaient
certains étudiants perdaient leur motivation

Partie du cours
en Diaporama

Cours-TD Maths

UFR Sciences Biomédicales



Défis lors de ma 3e année

Rappels

TD en petits groupes

✗ Les écarts de niveau se creusaient
certains étudiants perdaient leur motivation

Partie du cours
en Diaporama



- ❖ Accompagnement individuel
- ❖ Les élèves s'entraident entre eux
- ❖ Fixer le temps
- ❖ Correction collective participative

Cours-TD Maths

UFR Sciences Biomédicales



Défis lors de ma 3e année

Rappels

TD en petits groupes

✗ Les écarts de niveau se creusaient
certains étudiants perdaient leur motivation

↓ Au lycée

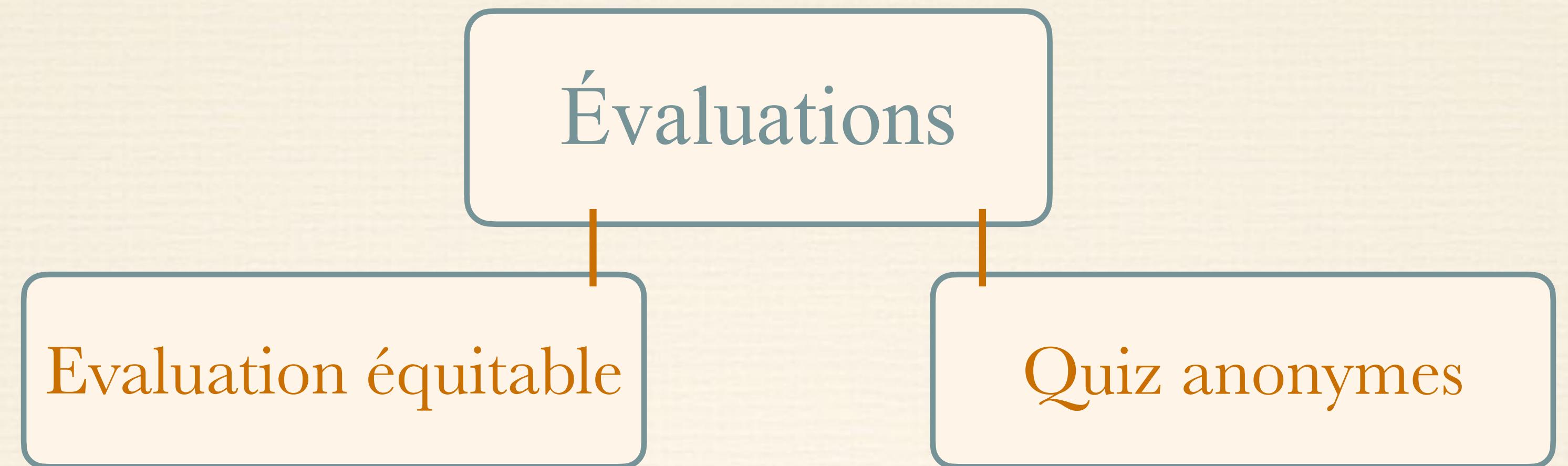
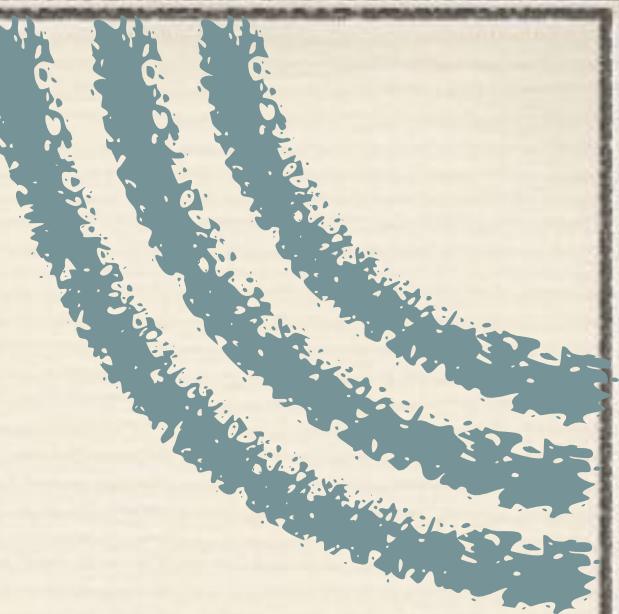
Partie du cours
en Diaporama

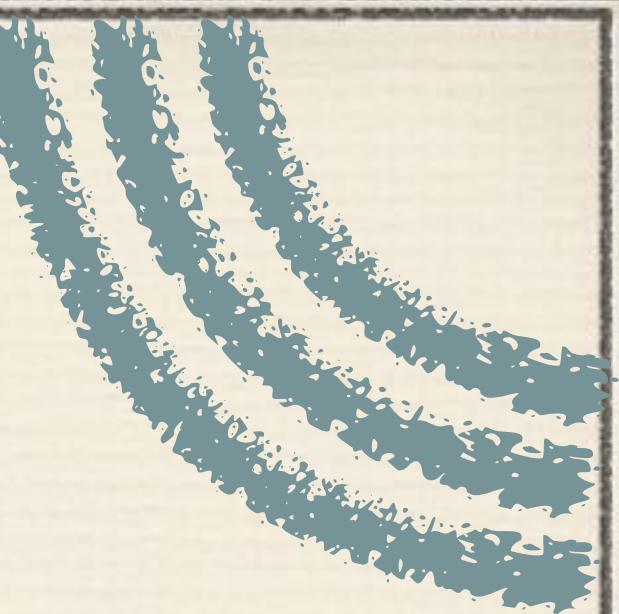
↓ Au lycée

Fiches préremplies



- ❖ Accompagnement individuel
- ❖ Les élèves s'entraident entre eux
- ❖ Fixer le temps
- ❖ Correction collective participative





Évaluations

Evaluation équitable

Quiz anonymes

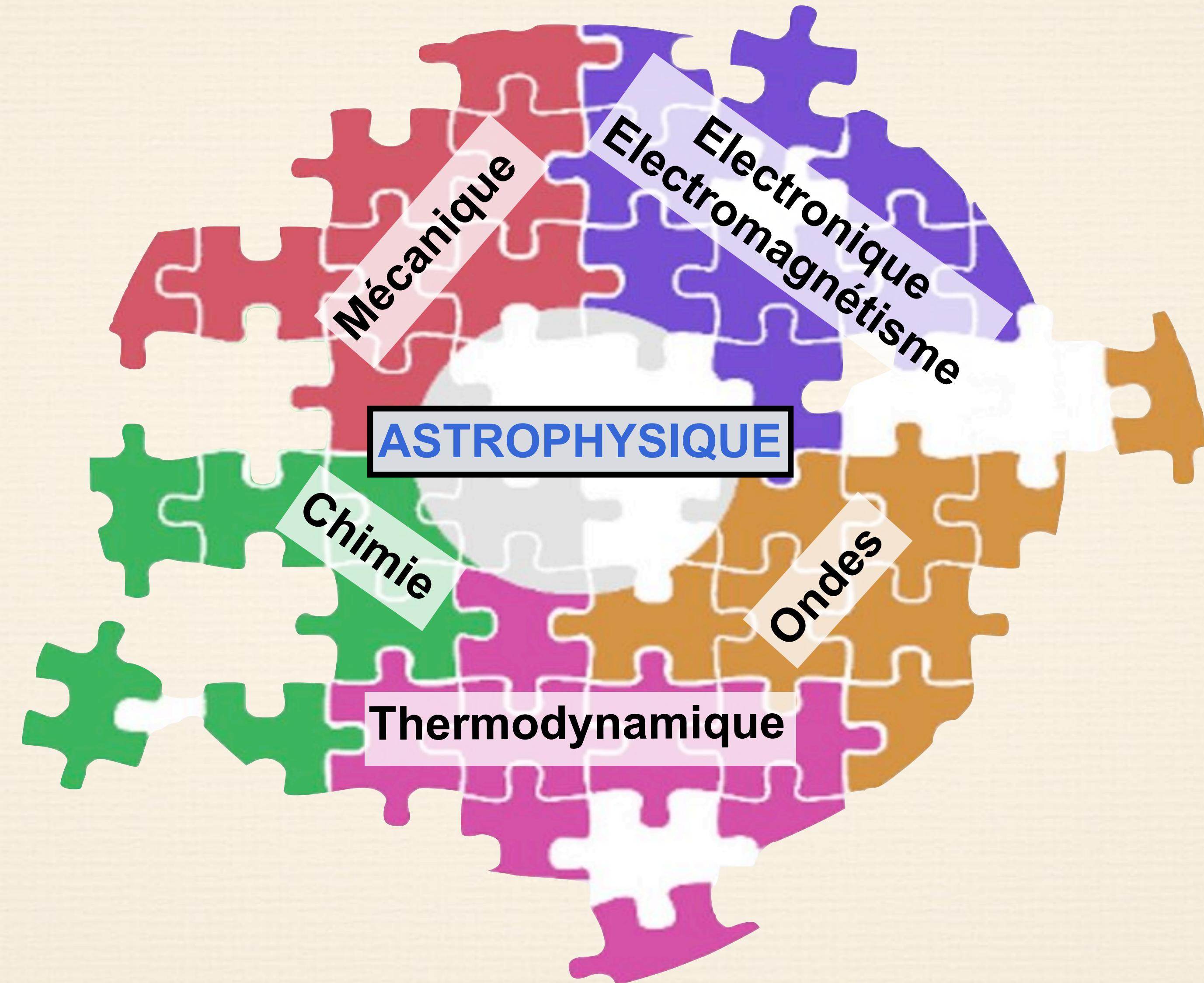
Compétition entre équipes

- ❖ Système de points
- ❖ Récompense finale

- ❖ Pendant mes 3 années de thèse j'ai assuré des enseignements à l'UFR sciences biomédicale à l'université Paris Cité.J'ai eu l'occasion d'encadrer à la fois des cours magistraux en mathématiques pour des étudiants de L1, et des TD d'optique géométrique et de mécanique du point pour le parcours scientifique PASS.
- ❖ Le plus grand défi est survenu en troisième année, avec la première promotion pour laquelle les mathématiques n'étaient plus obligatoires en première ni en terminale.Un quiz diagnostique, organisé par l'université en début d'année, a révélé que près de 80 % des étudiants n'avaient pas suivi de cours de mathématiques au lycée.Résultat : j'avais en face de moi des étudiants qui ne maîtrisaient pas les notions de dérivée, d'intégrale, ni d'exponentielle, alors que le 1er chapitre était sur les équations différentielles. Il m'a donc fallu adapter rapidement ma pédagogie.
- ❖ Je consacrais systématiquement les 30 premières minutes à des rappels fondamentaux, puis j'utilisais un diaporama pour les définitions et les théorèmes, afin de gagner du temps sur la prise de notes. Le support était envoyé juste après le cours. Ce qui me permettait de dédier plus de temps à la résolution d'exercices et faire des applications au tableau.

- ❖ L'équipe pédagogique nous recommandait de faire des TD en groupes, mais dans une classe aussi hétérogène, cela a rapidement montré ses limites. Cette organisation creusait les écarts, certains étudiants se retrouvaient démotivés, d'autres n'osaient pas poser leurs questions. Surtout qu'ils avaient beaucoup de manque de base.
- ❖ Pour contourner cela : ... etc
- ❖ Pour le lycée je pense que c'est ce que je vais faire si je vais faire un travail en groupe. Et au lieu de faire des diaporamas, j'envisage une adaptation de cette méthode : préparer des fiches partiellement remplies, que les élèves complètent avec moi pendant le cours. Cela leur permet de rester actifs tout en ne perdant pas le fil.
- ❖ Côté évaluations, j'ai testé deux formats efficaces que je pourrais transposer au lycée. Le 1er est un type d'évaluation équitable donc au lieu d'imposer trois exercices, j'en proposais cinq, et chacun choisissait trois à résoudre. Ceux qui en faisaient plus bénéficiaient de points bonus. Durant l'année j'ai aussi établi des quiz anonymes car les étudiants avaient un manque de confiance énorme et ils avaient peur de participer. Cela aidait les étudiants à oser participer sans la peur de se tromper, et moi ce qui m'intéressait était d'avoir une idée sur le niveau global de la classe et si les notions sont bien acquises ou pas.
- ❖ Dernière chose, pour créer une dynamique positive,j'ai organisé des compétitions par équipes. Chaque cours je propose un exercice et je donne des points au groupe qui réussit à le faire. à chaque séance, un exercice « défi » était proposé, avec des points attribués au groupe gagnant.Tous les trois mois, une récompense symbolique était offerte au meilleur groupe, puis on mélangeait les équipes.
- ❖ C'est une méthode que je compte reproduire au lycée, car elle motivation les étudiants et leur donne le plaisir d'apprendre.

Activités Pédagogiques

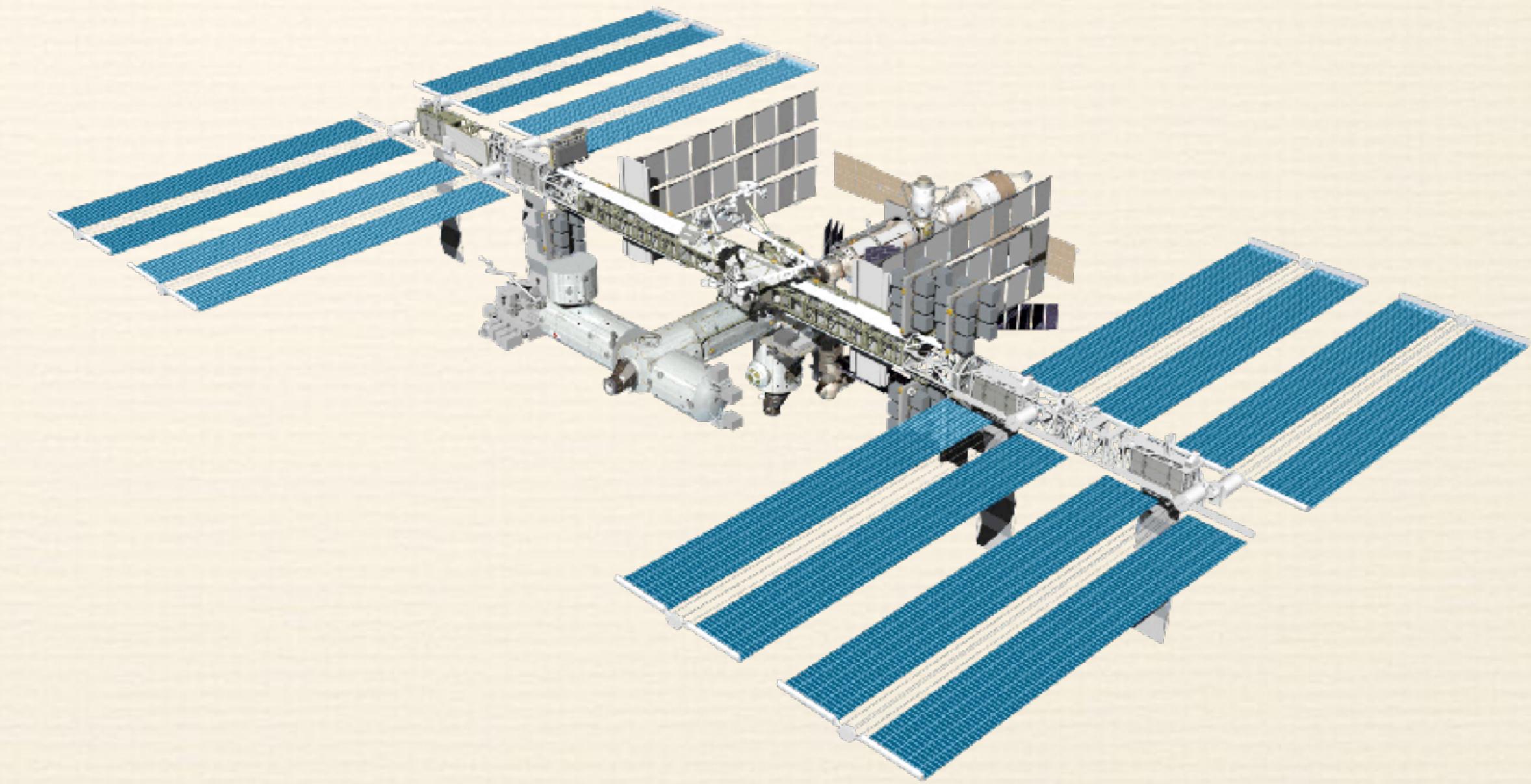


Tle-Géné Spé

Mission ISS2 de l'ESA



**La classe a une mission de concevoir le satellite ISS2
qui sera envoyé en orbite terrestre basse**



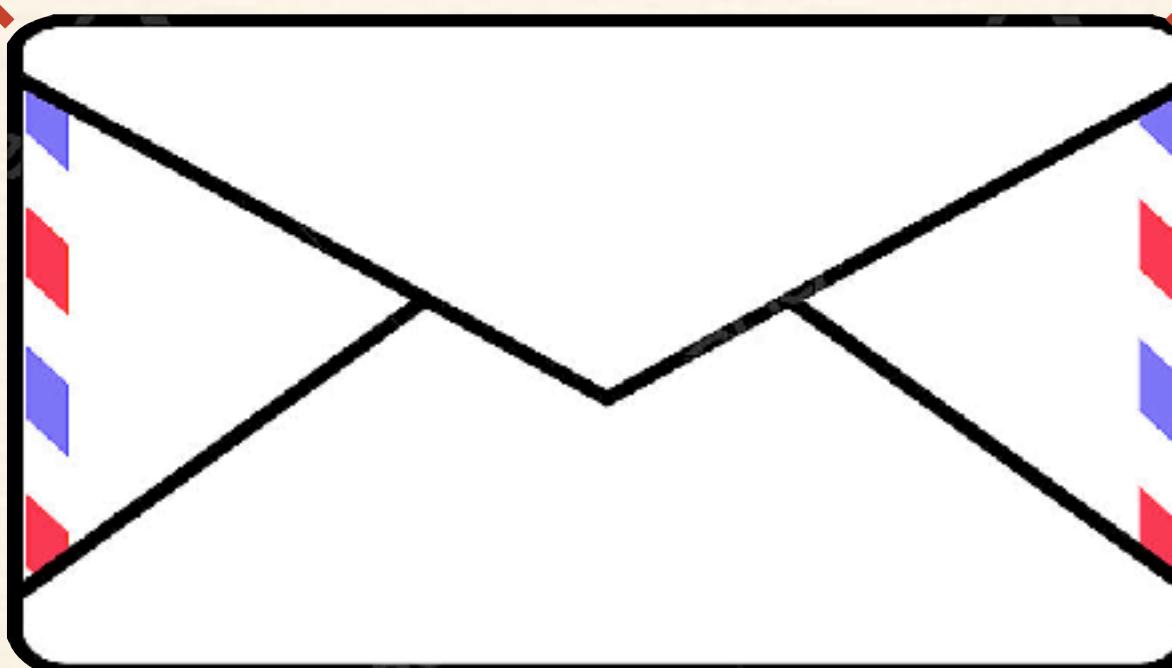


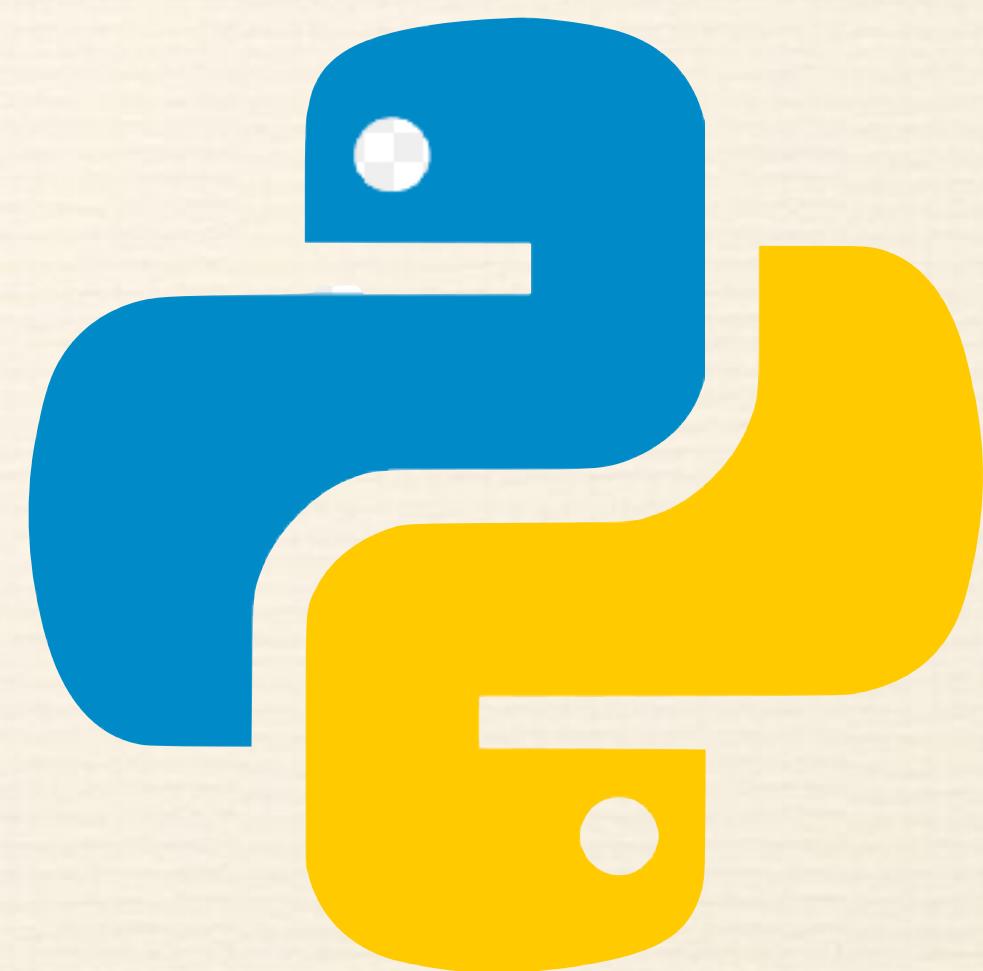
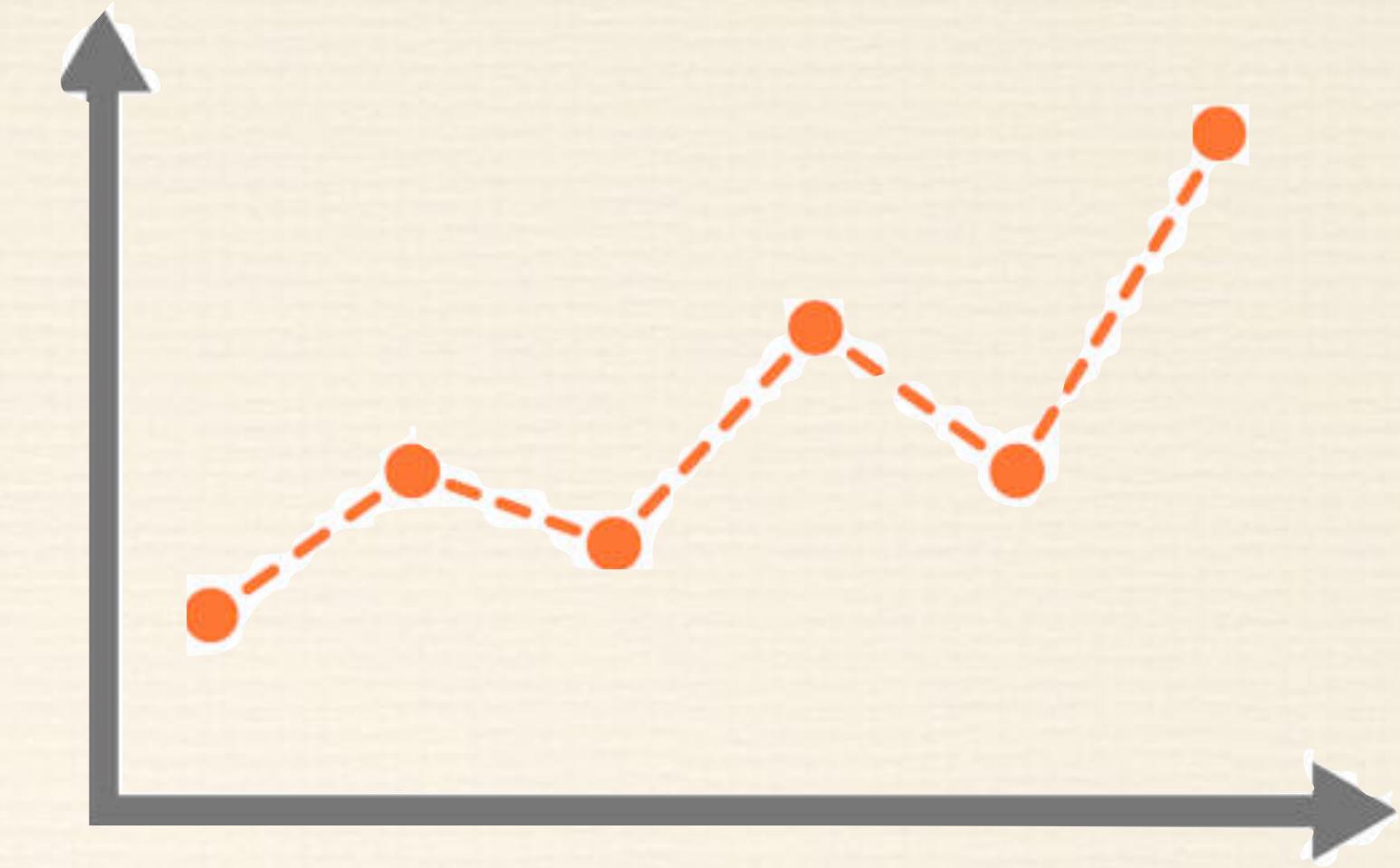
Consignes de la
mission

Formulaire

Références utiles

Quiz (QCM)





1er groupe

Thème 2

"Mouvement et interactions"

Mise en orbite du satellite

- ❖ La vitesse de libération / la période de révolution / le temps d'arrivée en orbite / un bilan énergétique
- ❖ Graphique de plusieurs périodes de révolutions pour différentes altitudes d'orbites

2ème groupe

*Thème 3
"Énergie : conversions et transferts"*

Panneaux solaires

- ❖ La puissance solaire / la surface des panneaux solaires / le rendement / la consommation journalière de ISS2
- ❖ Graphique de l'énergie produite en fonction de la surface des panneaux solaires

3ème groupe

Thème 4 "Ondes et signaux"

Communication

- ❖ La fréquence et la longueur d'onde / le temps de transmission / le diamètre de l'antenne / appliquer l'optique géométrique
- ❖ Graphique de la variation du délai de transmission selon l'altitude du satellite

4ème groupe

*Thème 1
"Constitution et transformations
de la matière"*

Le moteur

- ❖ Le bilan de réaction / l'enthalpie / appliquer la loi du gaz parfaits / analyser les gaz par spectroscopie
- ❖ Graphique de l'énergie dégagée en fonction de la quantité de réactif utilisée

Conclusion

- ❖ Toutes ces expériences ont renforcé ma vocation pour l'enseignement, ainsi que mon envie de transmettre la science autrement par exemple à travers des visites de laboratoires ou des lieux de culture scientifique
- ❖ Dans un monde saturé d'informations, mon rôle ne se limite pas à transmettre des connaissances. Je veux aider les élèves à apprendre à critiquer, à penser, à questionner, à douter... plutôt que simplement appliquer des formules.

Question du Jury

Question





Question du Jury

Supposons que vous souhaitez faire une introduction à l'astrophysique à vos élèves de lycée.

Proposer la structure que pourrait prendre selon vous une telle introduction sur 2 séances de 2h.

Proposer la structure que pourrait prendre selon vous une telle introduction sur 2 séances de 2h.

1er Cours : 30min

30min

1h

2e Cours : 30min

1h30

Astrophysique (générale)

Observations (trigonométrie)

Cours mécanique

Astrophysique (accélérations - forces - ..)

Cours spectroscopie
(lien avec l'astrophysique)

Proposer la structure que pourrait prendre selon vous une telle introduction sur 2 séances de 2h.

1er Cours : 30min

- Astrophysique .. c'est quoi pour eux ?
- Quelques faits :

La lumière

1. 7,5 fois la circonférence de la Terre en 1 seconde.
2. Mais Soleil-Terre = 8 min 19s

Taille univers

Planètes autour étoiles - Nb étoiles par galaxie - Nb galaxies

Bilan de Masse

Matière noire ?

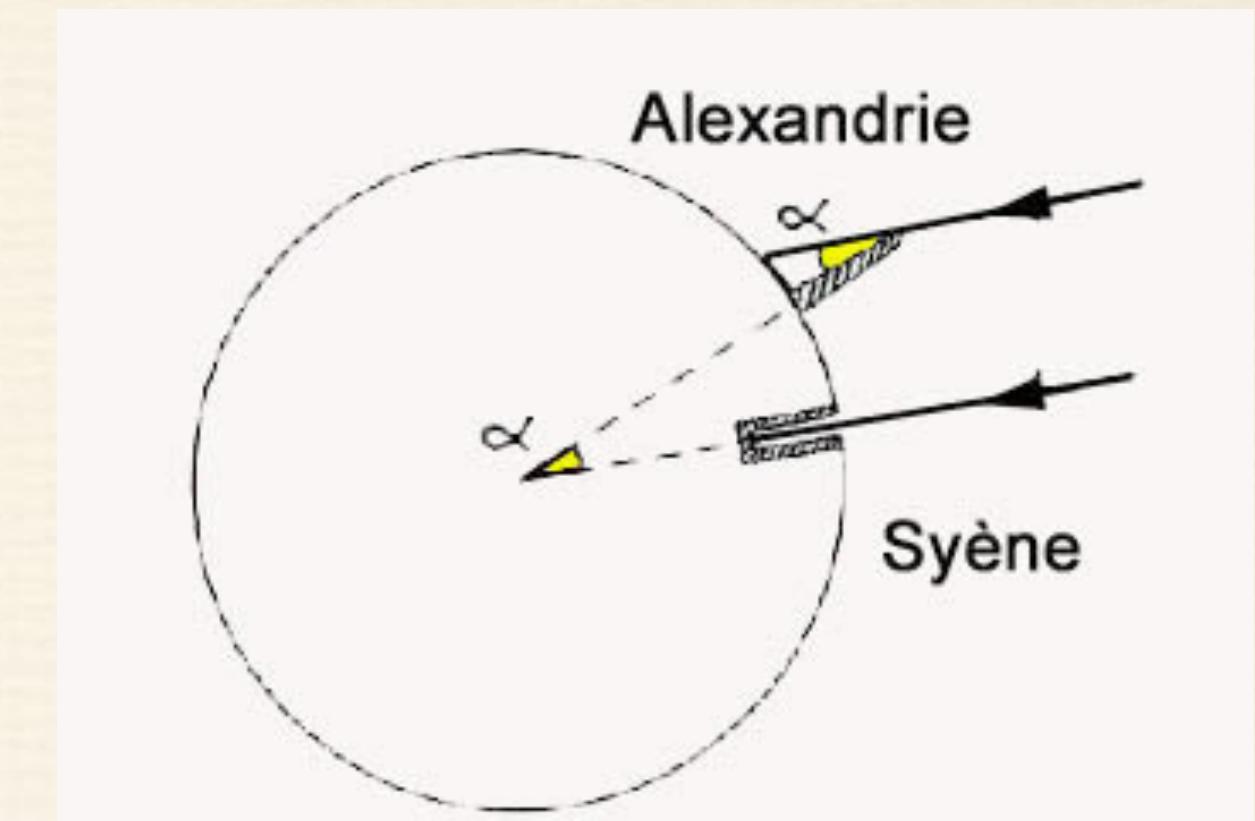
Proposer la structure que pourrait prendre selon vous une telle introduction sur 2 séances de 2h.

1er Cours : 30min

Méthodes de mesures et lien avec les maths

Expliquer la parallaxe pour mesurer la distance des étoiles + video

Calculer le rayon de la Terre - Eratosthène



1er Cours : 1h

Chapitre Force - accélération - ...

Proposer la structure que pourrait prendre selon vous une telle introduction sur 2 séances de 2h.

2e Cours : 30min

Supernovae

Le soleil n'est pas là pour toujours ..

Les rayons cosmiques

1. Le flux sur Terre
2. Aurore boréale
3. Observatoire Pierre Auger

Univers Fixe ?

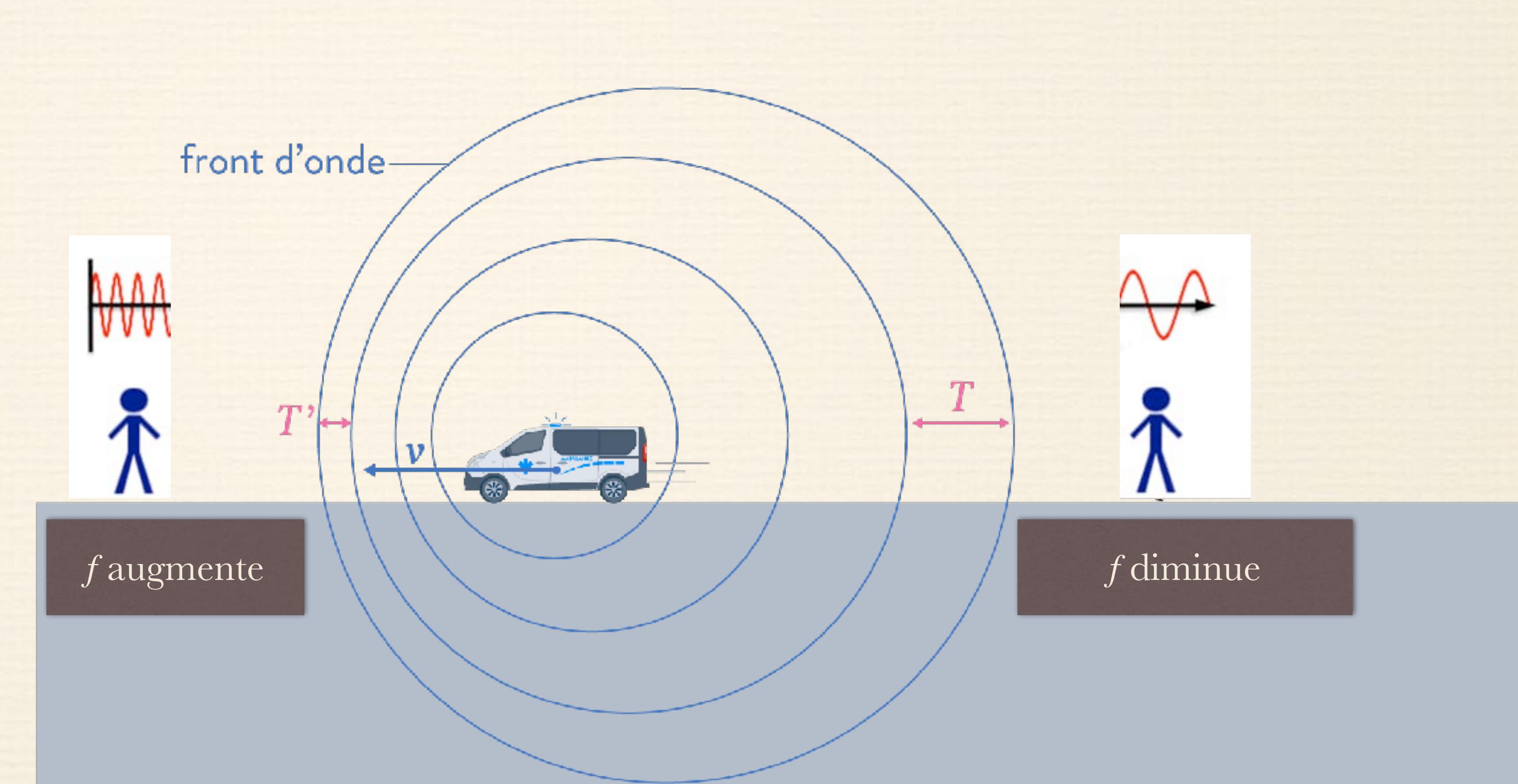
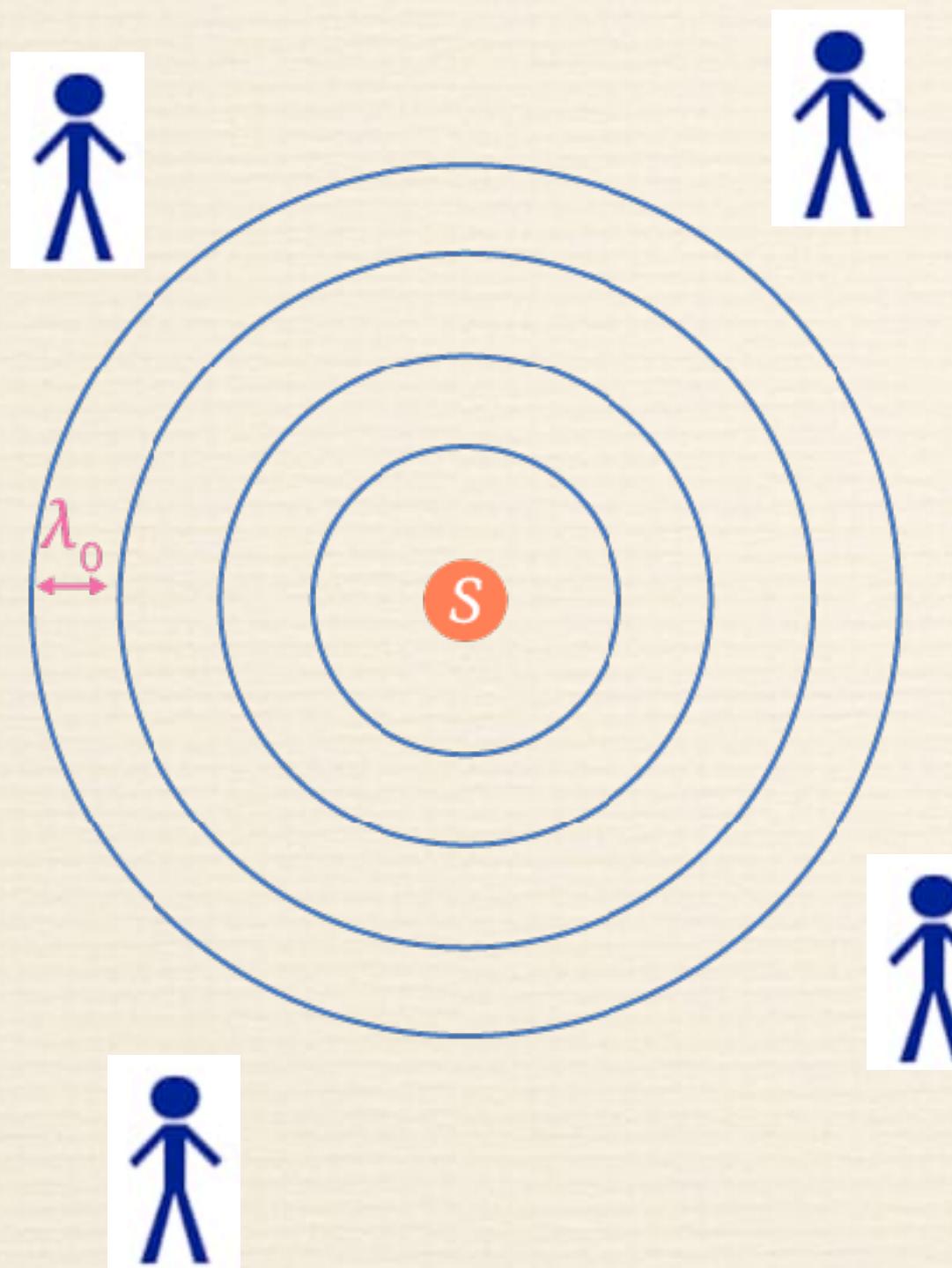
Hubble - Energie noire ?

2e Cours : 1h30

Cours Spectroscopie : détection de présence d'atomes dans l'atmosphère des exoplanètes

Question du Jury

Expliquer l'effet Doppler
(niveau Terminale)



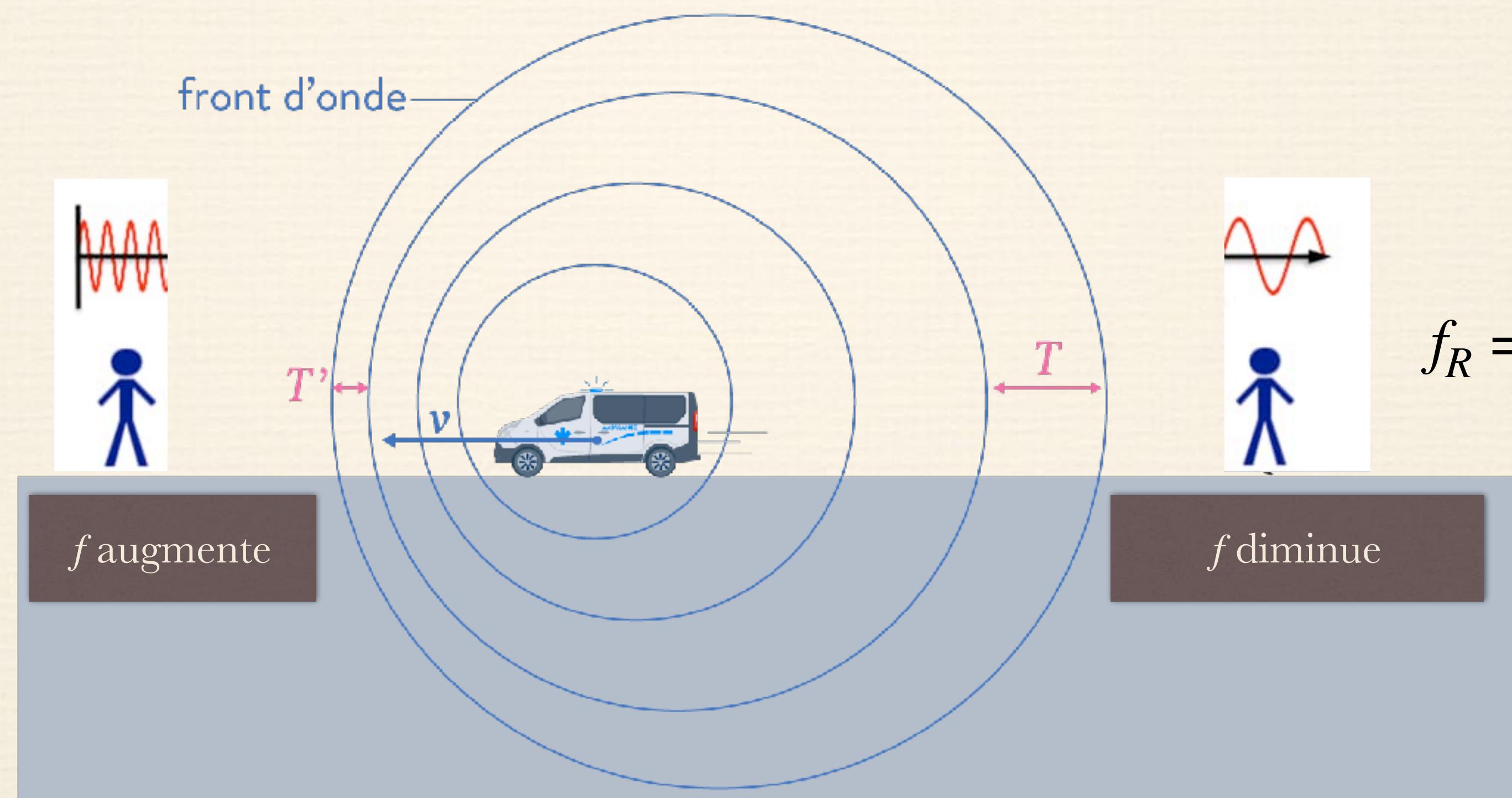
Question du Jury

Expliquer l'effet Doppler
(niveau Terminale)

$$f_R = f_E \left(\frac{v_{son}}{v_{son} - v_{voiture}} \right)$$

$$f_R > f_E$$

Son plus aigu



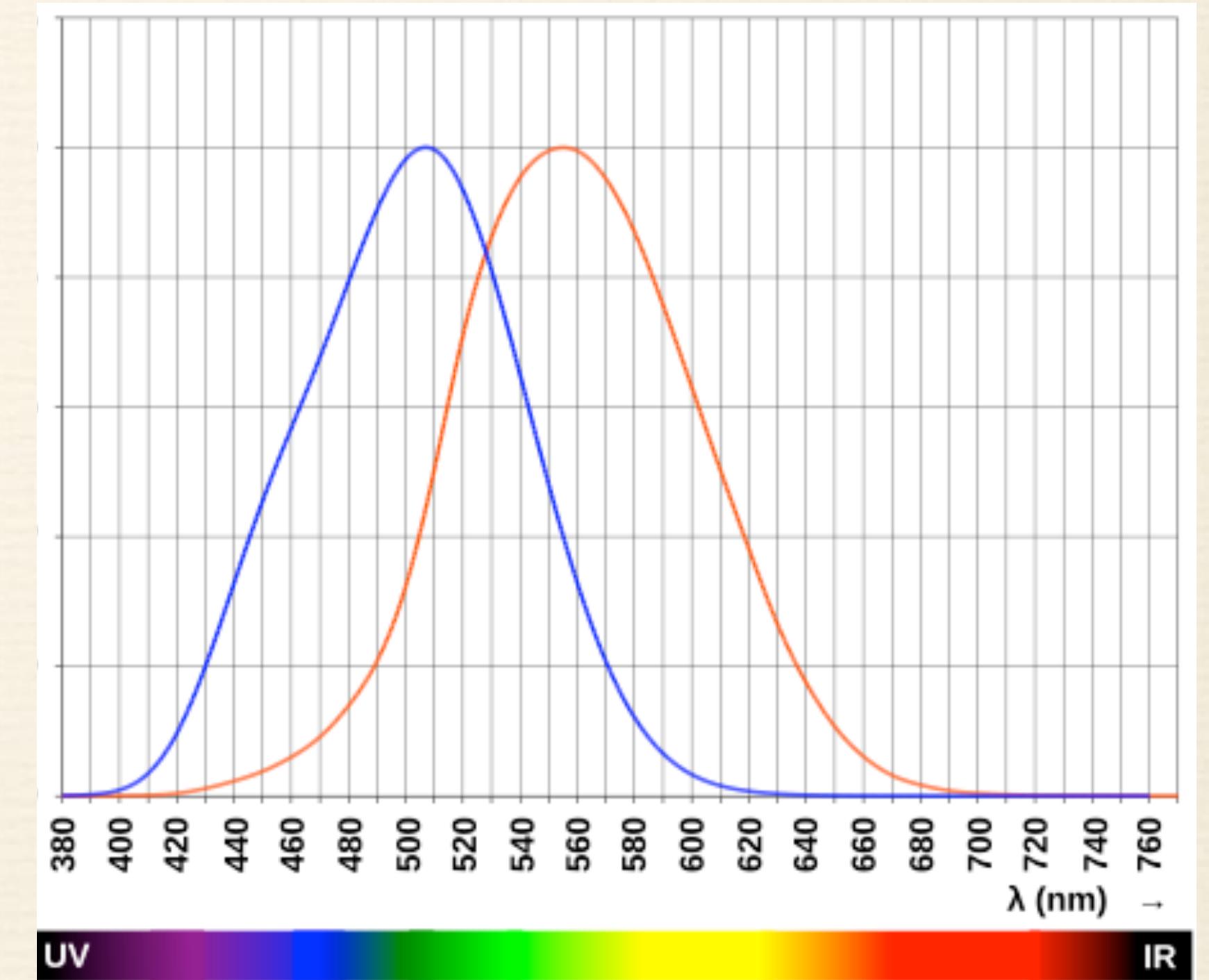
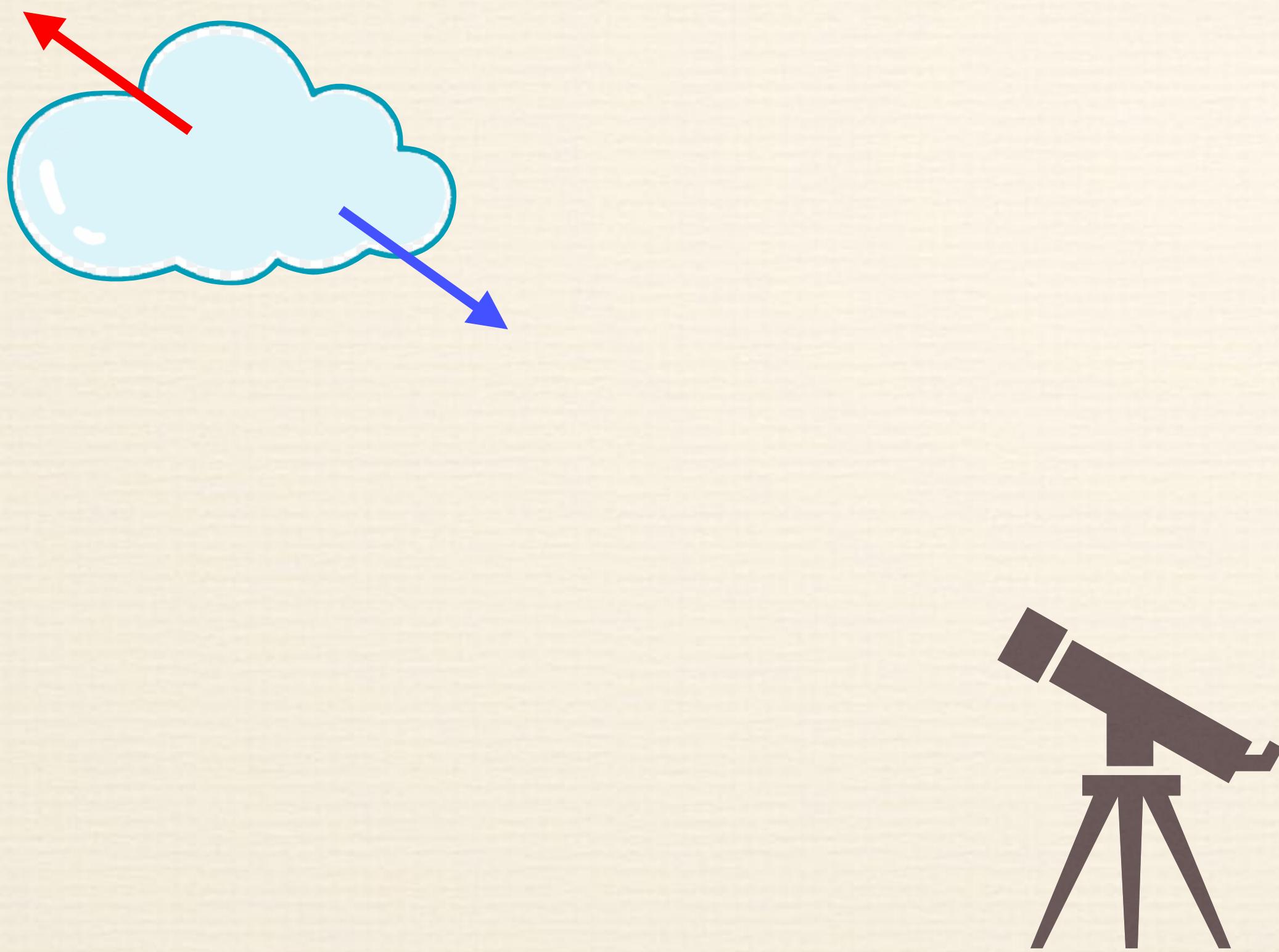
$$f_R = f_E \left(\frac{v_{son}}{v_{son} + v_{voiture}} \right)$$

$$f_R < f_E$$

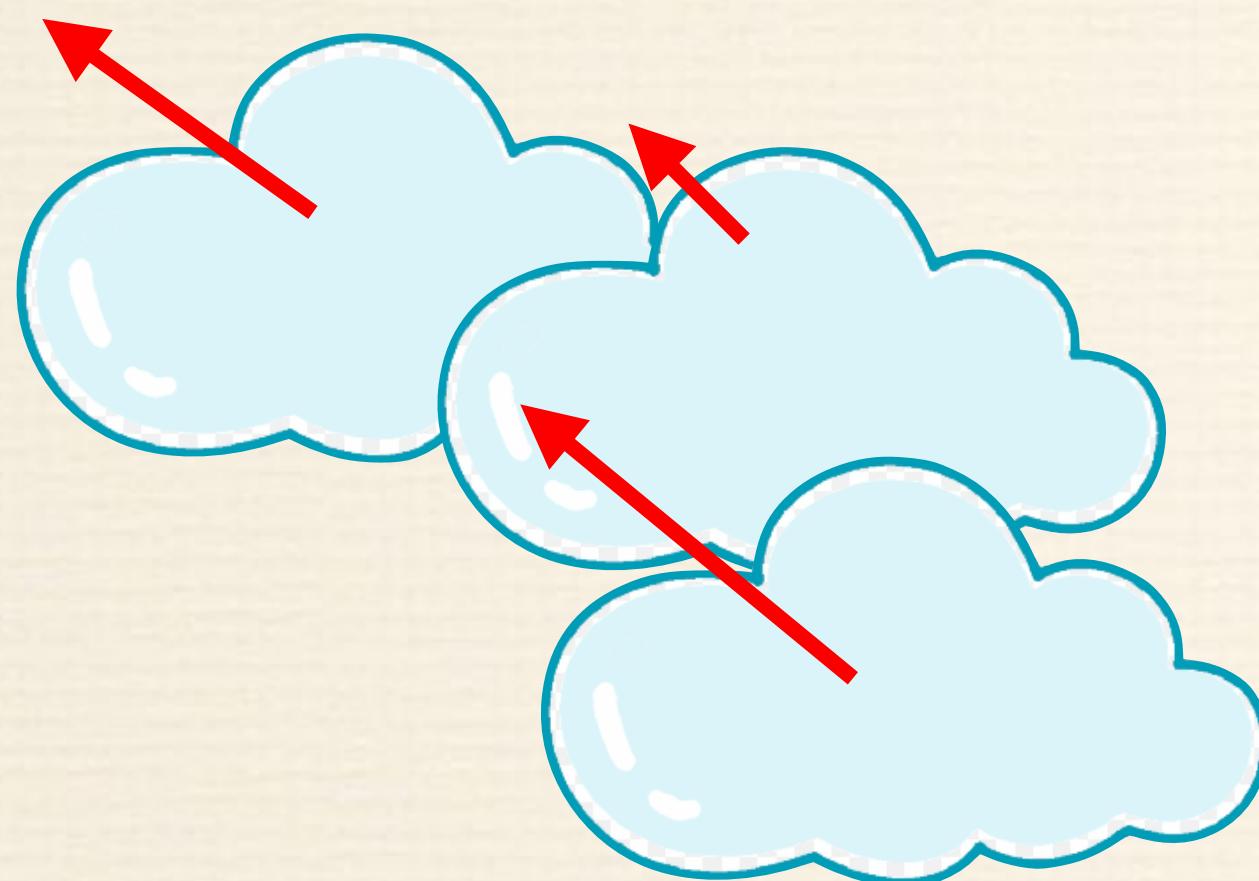
Son plus grave

Expliquer son rôle pour la séparation spectrale (niveau Terminale)

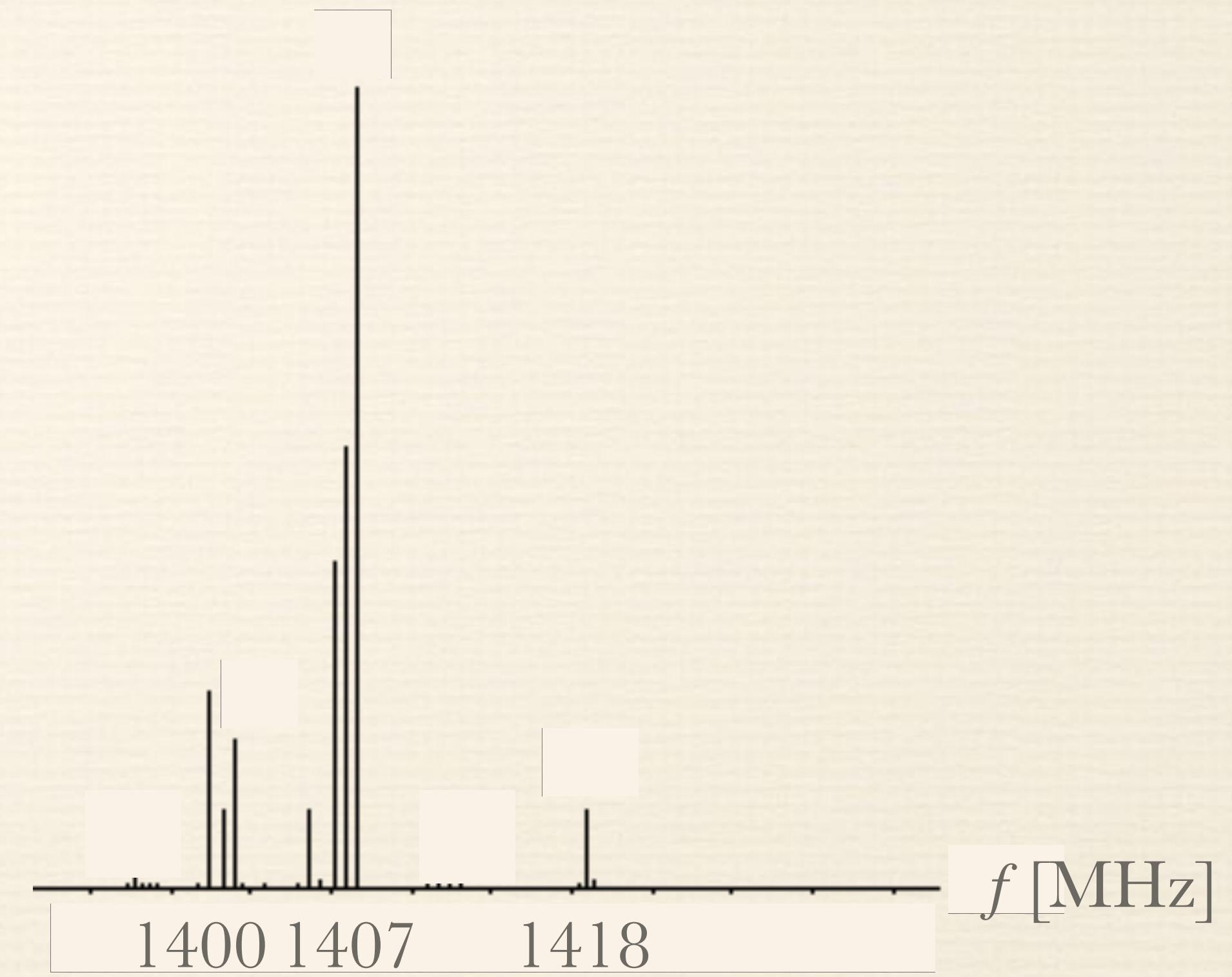
Redshift (décalage vers le rouge)



Expliquer son rôle pour la séparation spectrale (niveau Terminale)



1420 MHz



Question du Jury

Expliquer l'équipartition de l'énergie dans la galaxie
(niveau CPGE)

Gaz chaud

Gaz froid

Gaz turbulent

Champ magnétique

Particules cosmiques

Dans le voisinage solaire, les densités d'énergie sont comparables, de l'ordre de $0,5\text{--}1 \text{ eV cm}^{-3}$

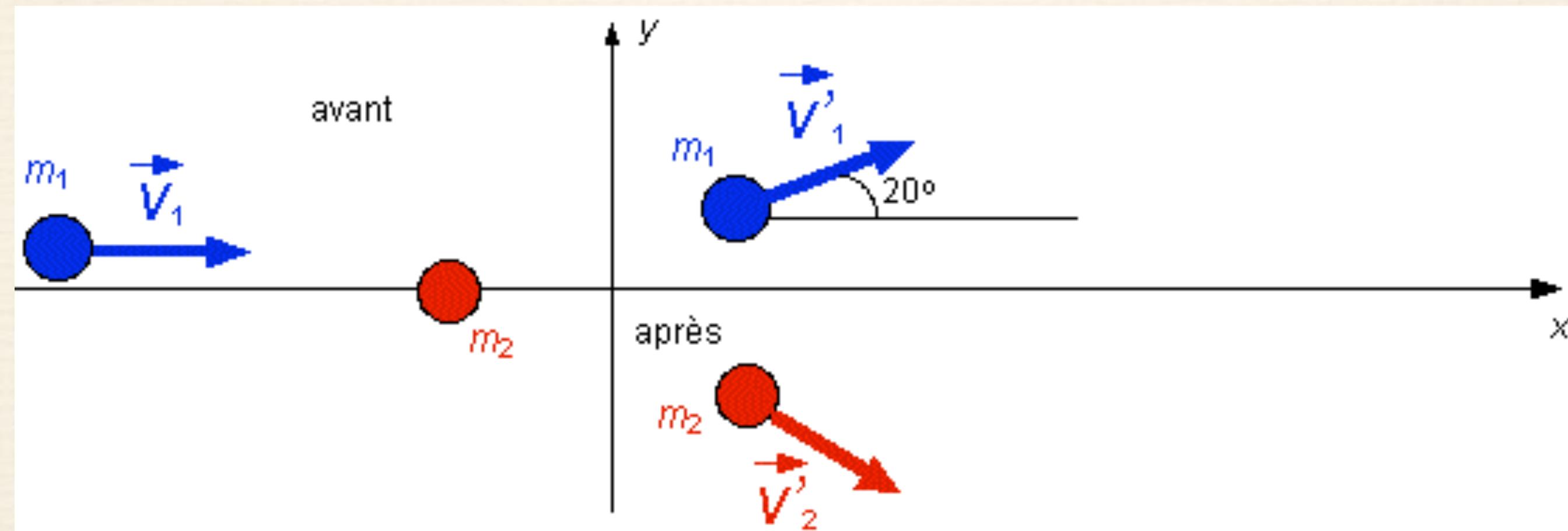
couplage entre \vec{B} et les mouvements du fluide

Confinement



Faire le lien avec le théorème d'équipartition vu par les élèves

Le choc ne pouvait que réduire la différence d'énergie entre les deux particules.
À la suite d'un très grand nombre de chocs, l'énergie ne pouvait donc que tendre vers une égalité en moyenne.



Dans un système à l'équilibre à la température, chaque degré de liberté contribue pour $\frac{1}{2}k_B T$ à l'énergie totale
l'énergie est répartie également entre tous les degrés de liberté, d'où le nom « équipartition »



Pour Question Jury Equipartition

Le théorème d'équipartition donne une équation qui permet de relier la température d'un système macroscopique aux énergies moyennes des particules microscopiques qui le composent. Le théorème permet de calculer l'énergie totale d'un système à une température donnée. On le résume souvent par la formule : $\frac{1}{2}k_B T$ par terme quadratique dans l'expression de l'énergie (Ec est quadratique en v, Ep est quadratique en x par $\frac{1}{2}kx^2$ et énergie gaz diatomique en rotation est quadratique en vitesse angulaire $\frac{1}{2}I\omega^2$

Pour GP monoatomique (3 translation) : $\langle E \rangle = \frac{3}{2}k_B T$

donc pour N atomes : $\frac{3}{2}Nk_B T$ et pour 1 mole $\frac{3}{2}N_A k_B T$ donc la capacité thermique molaire = $\frac{3}{2}N_A k_B = \frac{3}{2}R = 3 \text{ cal/(mol . K)}$ car $c_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V$

Pour diatomique il y a 3 translation + 2 rotations à basse T donc $\frac{5}{2}k_B T$ et à haute T on ajoute 2 vibrations $\frac{7}{2}k_B T$

Pour Question Jury Equipartition 2

Le théorème d'équipartition peut notamment être utilisé pour retrouver la loi des gaz parfaits, la loi expérimentale de Dulong et Petit sur la chaleur spécifique des solides ou caractériser un mouvement brownien. De manière générale, il peut être appliqué à n'importe quel système classique à l'équilibre thermodynamique, quelle que soit sa complexité. En revanche, il est mis en défaut quand les effets quantiques deviennent significatifs, notamment pour des températures suffisamment basses ou des densités élevées.

Dulong et Petit pour solide : vibration dans 3 directions et chaque vibration (oscillateur) a 2 termes quadratiques (E_c et E_p) donc $6ddL$ donc $E=3k_BT$ donc 1 mole : $U=3RT$ avec $C_v=3R$

Brownien : La particule reçoit des chocs aléatoires des molécules du fluide : $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$ donc on trouve la vitesse quadratique moyenne et la constante de diffusion D via Einstein : $D = \frac{k_B T}{\zeta}$ avec ζ coefficient de frottement. Donc on relie le comportement aléatoire macroscopique à l'agitation thermique microscopique

Pour Question Jury Equipartition 3

Dans le voisinage solaire, les densités d'énergie sous forme de photons, de rayonnement cosmique, de champ magnétique et des mouvements du milieu interstellaire sont comparables, de l'ordre de $0.5\text{-}1 \text{ eV cm}^{-3}$.

Forme d'énergie	Densité d'énergie (eV cm^{-3})
rayonnement cosmologique (CMB : $T=2.7 \text{ K}$)	0.265
rayonnement de la poussière	0.31
rayonnement stellaire	0.54
énergie cinétique thermique	0.49
énergie cinétique turbulente	0.22
énergie magnétique	0.89
énergie des rayons cosmiques	0.8

La coïncidence entre ces différentes formes d'énergie, appelée « équipartition », n'est pas fortuite, mais résulte des transferts et des interactions efficaces entre ces composantes.

Par exemple, si la densité d'énergie des rayons cosmiques était beaucoup plus élevée, le milieu interstellaire magnétisé ne serait pas capable de les confiner et ils pourraient s'échapper librement de la Galaxie. La densité d'énergie des rayons cosmiques piégés dans la Galaxie tend donc vers l'équipartition avec l'énergie magnétique.

De la même façon, les densités d'énergie magnétique et cinétique sont comparables très probablement à cause du couplage entre le champ magnétique et les mouvements du fluide (le champ magnétique est amplifié par effet dynamo et par compression dans les ondes de choc).

Enfin, si la densité d'énergie du rayonnement interstellaire n'était pas du même ordre que celle du gaz, la pression de rayonnement qui agit sur la poussière comprimerait le gaz jusqu'à ce que leurs pressions deviennent comparables. Notons cependant que dans les nuages denses où le rayonnement stellaire pénètre peu, l'énergie sous forme de rayonnement devient négligeable par rapport aux autres réservoirs.

Notons aussi que si l'énergie thermique est du même ordre que l'énergie turbulente dans la « bulle locale » chaude où se situe le soleil, la grande majorité du gaz interstellaire est dans la situation inverse où la turbulence l'emporte sur l'agitation thermique : les mouvements turbulents y sont supersoniques, et contribuent de façon majeure à la pression.

❖ Question Jury Doppler :

A $t = 0$ on a 1er bip sonore de la voiture. L'observateur l'entend à $t_1 = \frac{D}{v_{onde}}$ à distance D.

A $t = T_E$ on le 2nd bip. La voiture s'est rapprochée de $d = v_{voit}T_E$. Donc observateur se trouve à $D - d$

$$\text{Alors } t_2 = T_E + \frac{D - d}{v_{onde}}$$

$$\text{Donc } T_R = t_2 - t_1 = T_E - \frac{d}{v_{onde}} = T_E - \frac{v_{voit}T_E}{v_{onde}} = T_E \left(1 - \frac{v_{voit}}{v_{onde}} \right) = T_E \left(\frac{v_{onde} - v_{voit}}{v_{onde}} \right)$$

$$\text{Par } T = \frac{1}{f}$$

$$f_R = f_E \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v_{voit}} \right)$$

Si voiture s'éloigne de $d = v_{voit}T_E$ donc observateur se trouve à $D + d$ et donc $T_R = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d}{v_{onde}}$

- ❖ Les RC ont été découverts au début des années 1900. En 1912, Victor Hess, physicien autrichien, effectue une série de vols en ballon avec un électromètre pour mesurer l'ionisation de l'air à différentes altitudes. L'ionisation augmente avec l'altitude, montrant qu'une source de rayonnement vient de l'espace. Il obtient le Prix Nobel de Physique en 1936 pour cette découverte. « les rayons cosmiques » vient de l'époque où on pensait qu'il s'agissait d'un rayonnement électromagnétique.
- ❖ Le spectre des rayons cosmiques suit une loi en puissance avec plusieurs ruptures.
- ❖ Le genou ($10^{15} eV$) est interprété comme la limite de confinement des particules galactiques. Au-delà de cette énergie, le champ magnétique galactique ne suffit plus à retenir les particules dans la Galaxie → elles s'échappent. Résultat : la densité locale baisse, et le flux chute d'où la rupture de pente. $10^{15} eV$ est l'énergie max que les particules peuvent avoir avec les mécanismes d'accélération de notre galaxie.
- ❖ A la cheville ($10^{18.5} eV$), Le spectre devient plus plat → il y a un changement de population. On pense qu'à ce niveau, les rayons cosmiques extragalactiques commencent à dominer. C'est donc une transition entre sources galactiques et extragalactiques.
- ❖ Le cutoff GZK ($5 \times 10^{19} eV$). Au-delà de cette énergie, les protons interagissent avec les photons du fond diffus cosmologique : $p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$ ou $n + \pi^+$. Ces interactions limitent la distance de propagation des particules très énergétiques ($\sim 100 Mpc$). c'est une coupure physique due à l'Univers lui-même
- ❖ Le CMB est la lumière la plus ancienne de l'Univers, émise environ 380 000 ans après le Big Bang. C'est un rayonnement observable aujourd'hui sous forme de micro-ondes très froides (2,7 K). Il provient du moment où l'Univers est devenu transparent, permettant à la lumière de voyager librement.
- ❖ Dans les premiers instants de l'Univers, il était très chaud et très dense : une sorte de "soupe" de particules (protons, électrons, photons) en interaction constante. Les photons (lumière) étaient sans arrêt absorbés et réémis par les électrons libres → ils ne pouvaient pas se déplacer loin. Mais environ 380 000 ans après le Big Bang, l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que les électrons et les protons s'assemblent et forment des atomes d'hydrogène neutres. C'est ce qu'on appelle la recombinaison. À partir de ce moment-là, les photons ne sont plus bloqués : ils peuvent voyager librement dans l'espace. C'est cela qu'on appelle : l'Univers devient transparent à la lumière.

- ❖ Lien entre flux $\Phi(E)$ et densité d'énergie :

$$u = \frac{4\pi}{c} \int \Phi(E) E dE \quad \text{avec } [\Phi] = m^{-2} s^{-1} sr^{-1} J^{-1} \text{ et } [u] = J/m^3$$

- ❖ Pour un gaz de particules relativistes (Ec dominante par rapport à la masse) : $P = \frac{1}{3} u$

❖ Pour une gaussienne : $f(v) = Ae^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}$ donc $\Gamma = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_v \approx 2.355 \sigma_v$ avec Γ la largeur à mi-hauteur (FWHM) d'un profil spectral gaussien, exprimée en vitesse (souvent en km/s) et σ_v l'écart-type (ou dispersion) de ce profil gaussien, exprimé aussi en vitesse (km/s). Cette dispersion est due à l'agitation thermique, turbulence ... etc.

- ❖ L'opacité ou épaisseur optique de la poussière à la fréquence de 353 GHz τ_{353} : Lorsque le rayonnement est atténué par absorption et diffusion c'est-à-dire une mesure de la quantité de rayonnement absorbée ou diffusée par la poussière le long de la ligne de visée. Plus τ_{353} est élevé, plus la colonne de poussière est dense ou épaisse. À 353 GHz (domaine submillimétrique), cette opacité est dominée par l'émission thermique des grains de poussière. En plus à 353 GHz cette opacité est bien corrélée à la masse de gaz interstellaire, ce qui en fait un bon traceur de matière.

Le champ magnétique terrestre est de l'ordre de **0,5 gauss, soit 5.10-5 tesla**
Le champ magnétique galactique est de l'ordre de 5-10 microGauss

