



**Rayons Cosmiques  
Supernovae et leurs vestiges  
Astronomie gamma**

**Matthieu Renaud**

**Chargé de recherche CNRS/IN2P3, LUPM Montpellier**

**Animateur en astronomie *Ciel Aterlà***

# Mon parcours académique

Université de Montpellier (1998–2001) : Licence de Physique

Université de Paris XI–Orsay (2001–2002) : Maîtrise de Physique

Observatoire de Paris-Meudon (2002–2003) : DEA (Master) d'Astrophysique

CEA/SAp & Université Paris VII (2003–2006) : Thèse de doctorat

MPI-K, Heidelberg, Allemagne (2006–2008) : Post-doctorat

Laboratoire APC, Paris (2008–2009) : CDD-Recherche CNRS/INSU

Laboratoire LUPM, Montpellier (2010–...) : Chercheur permanent CNRS/IN2P3

---

Supernovae et leurs vestiges en astronomie  $\gamma$  : Nucléosynthèse et Rayons cosmiques

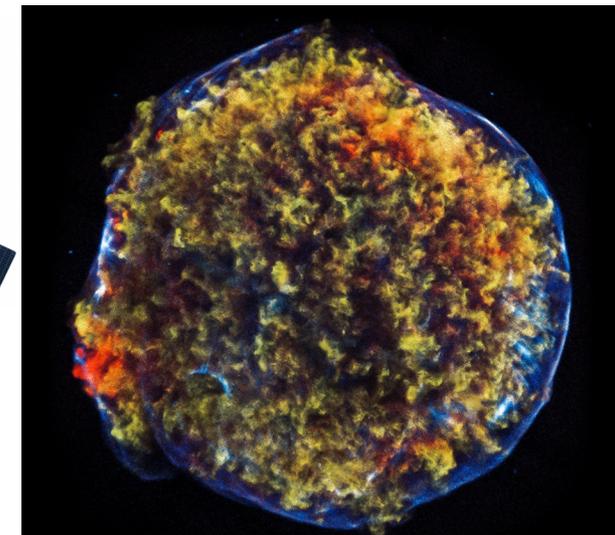
*INTEGRAL*



*Fermi*



H.E.S.S.



# Mon parcours plus « personnel »

Activité indépendante dans l'animation et la diffusion des connaissances en astronomie :

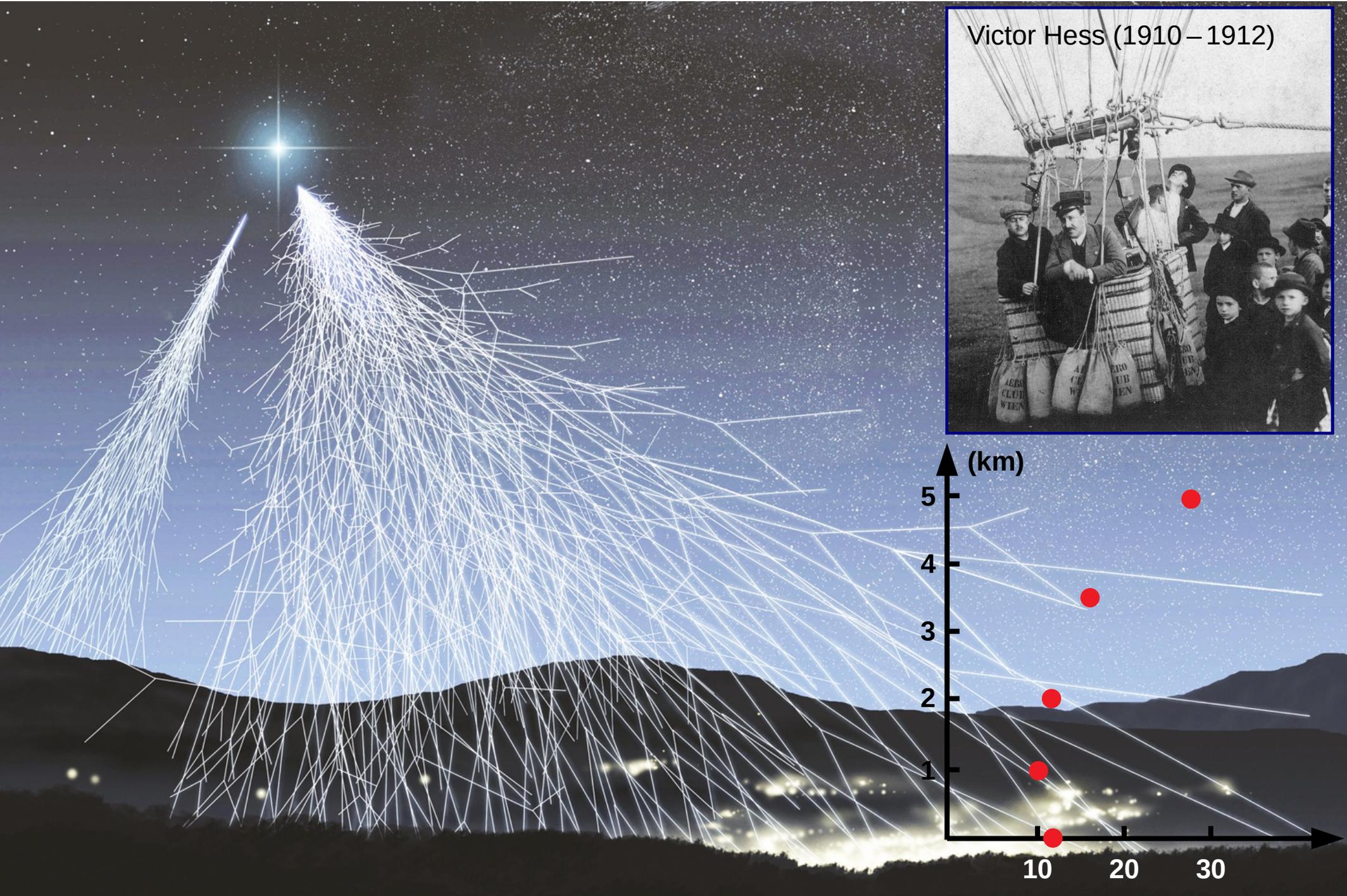
- Randonnées et astronomie en Cévennes
- Soirées d'observation et conférences grand public à La Réunion
- Projets pédagogiques et interventions en milieu scolaire
- Préservation de l'environnement nocturne :  
Implications en milieu associatif (CLEA, APN, SEOR) et institutionnel (PNRun)  
Participation à l'Observatoire de l'Environnement Nocturne de La Réunion (S. Challéat)



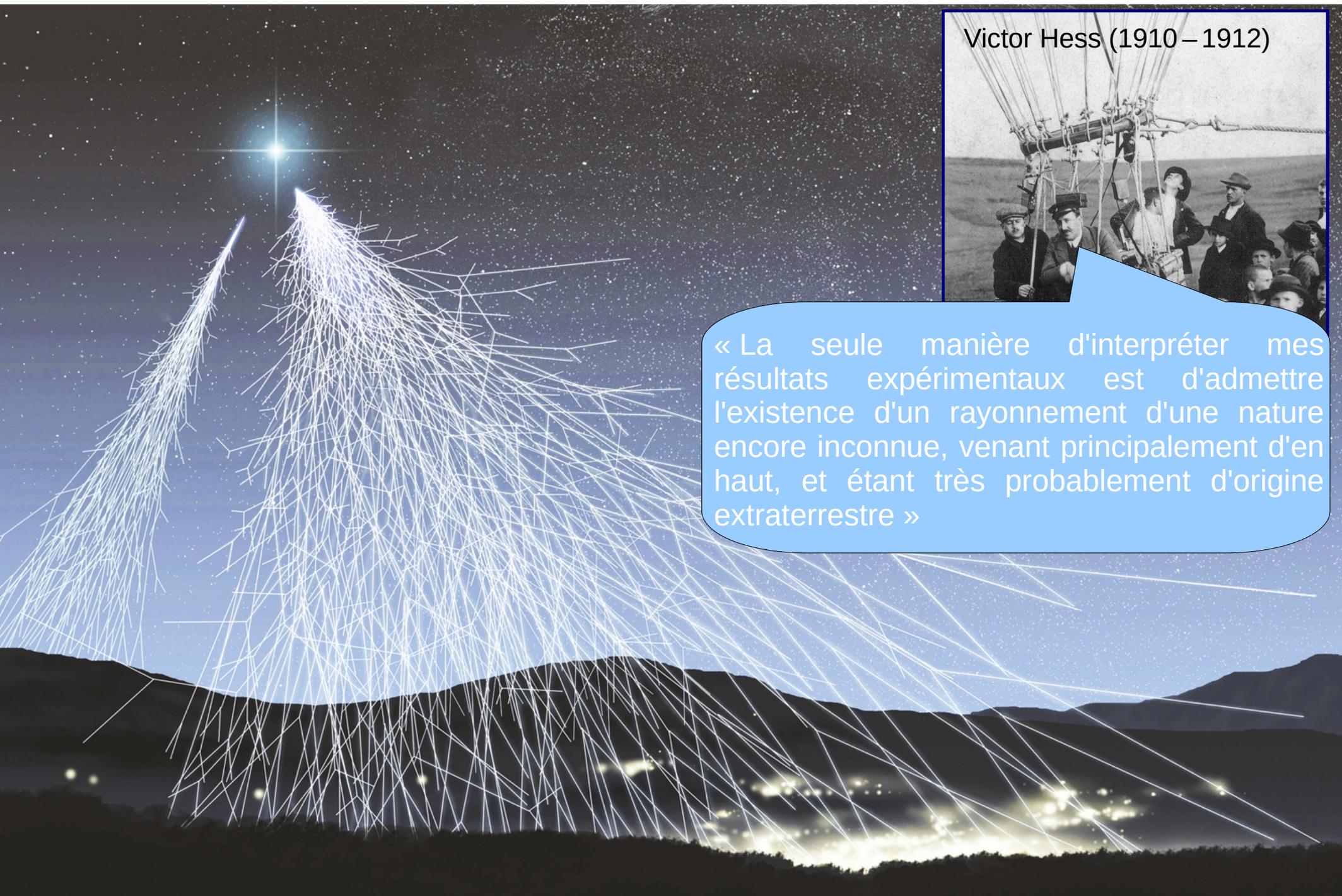
# « Rayons cosmiques » ?



# « Rayons cosmiques » ?



# « Rayons cosmiques » ?



Victor Hess (1910 – 1912)

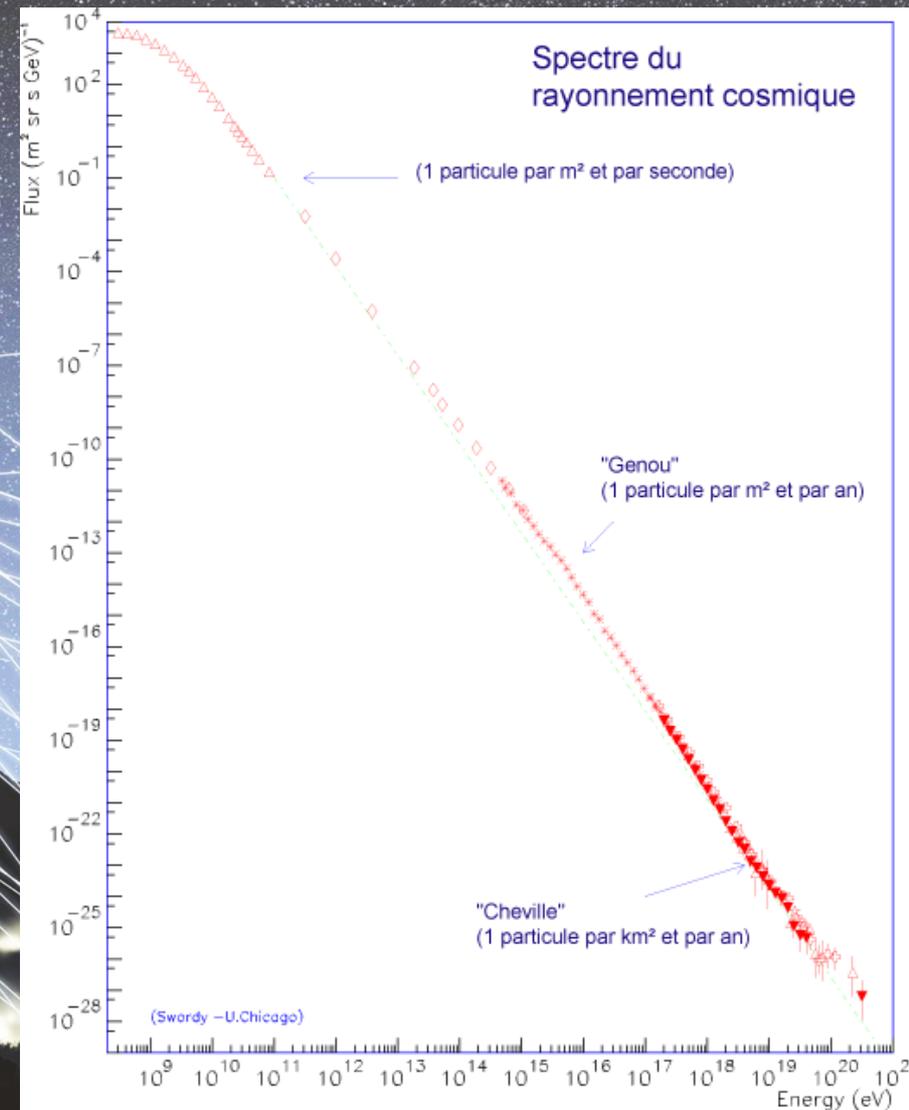
« La seule manière d'interpréter mes résultats expérimentaux est d'admettre l'existence d'un rayonnement d'une nature encore inconnue, venant principalement d'en haut, et étant très probablement d'origine extraterrestre »

# « Rayons cosmiques » ?

On sait aujourd'hui que ces « rayons cosmiques » sont :

- en provenance du cosmos
- des particules et noyaux d'atomes très énergétiques

Quelle est leur origine ?



# « Supernovae et leurs vestiges » ?



SN 1994D

# « Supernovae et leurs vestiges » ?



[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

# « Supernovae et leurs vestiges » ?



Quelque part dans le  
Grand Nuage de Magellan...

Sanduleak -69° 202a

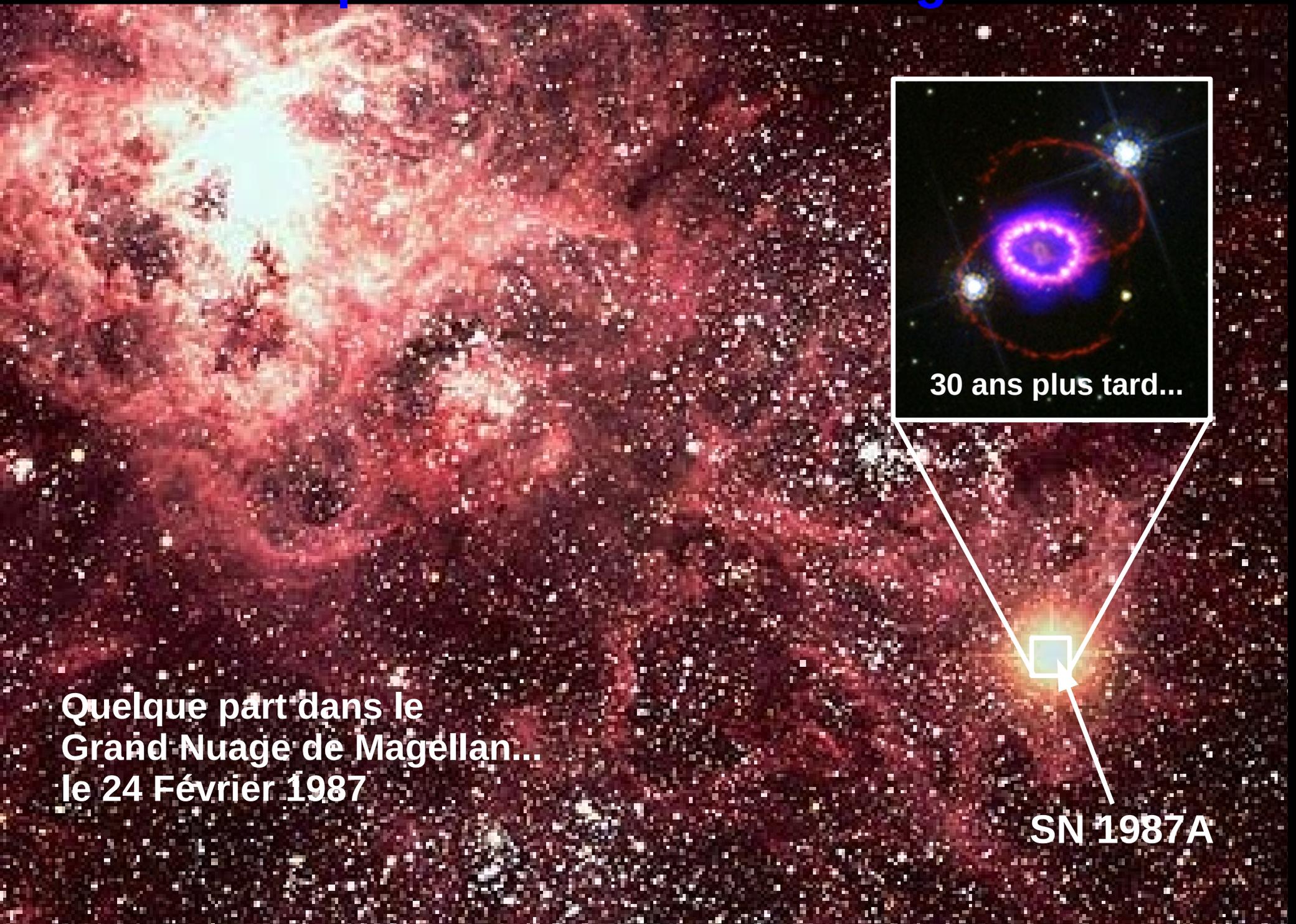
# « Supernovae et leurs vestiges » ?

Quelque part dans le  
Grand Nuage de Magellan...  
le 24 Février 1987



SN 1987A

# « Supernovae et leurs vestiges » ?



Quelque part dans le  
Grand Nuage de Magellan...  
le 24 Février 1987

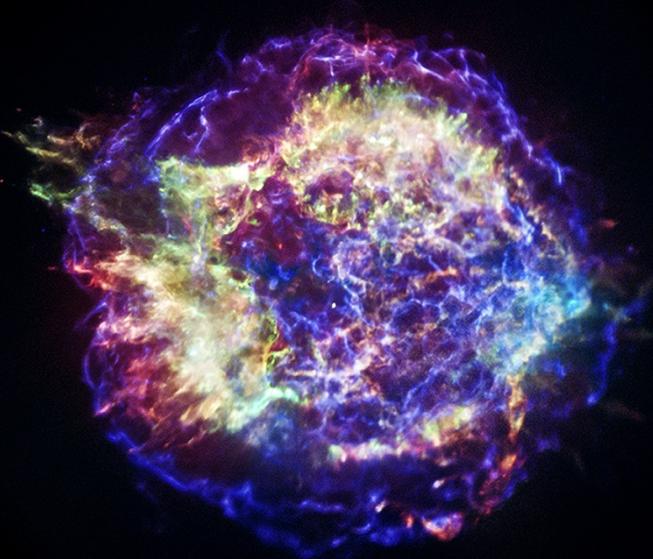
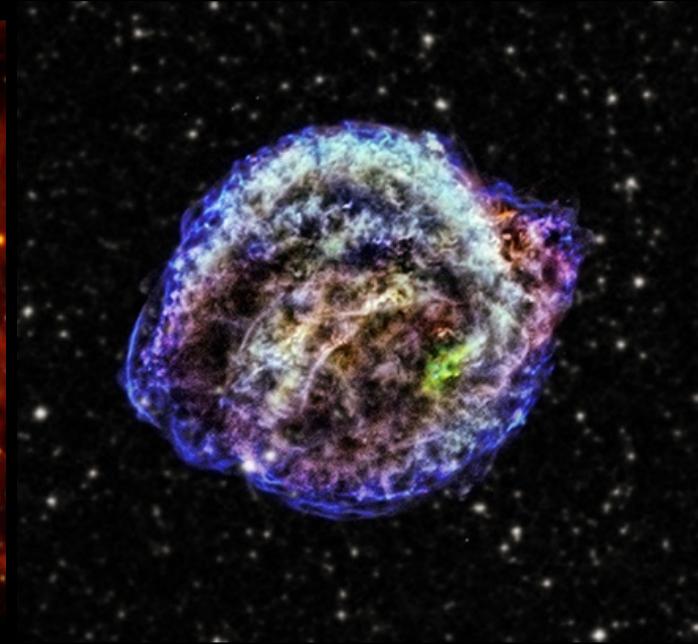
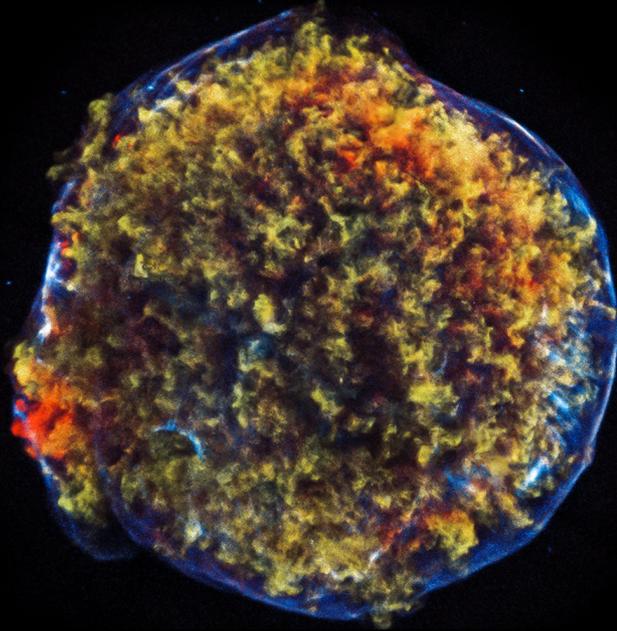
30 ans plus tard...

SN 1987A

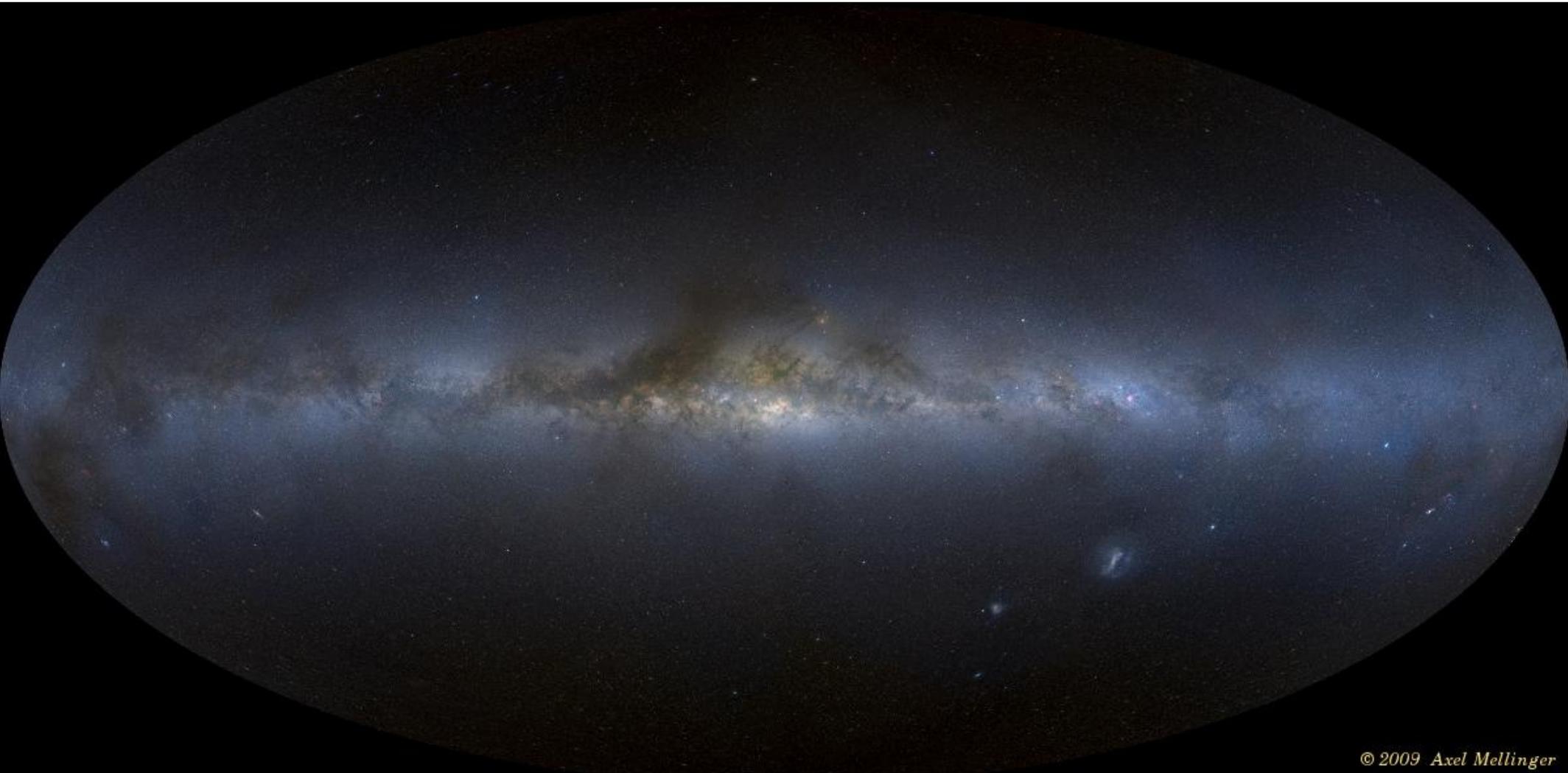
# « Supernovae et leurs vestiges » ?



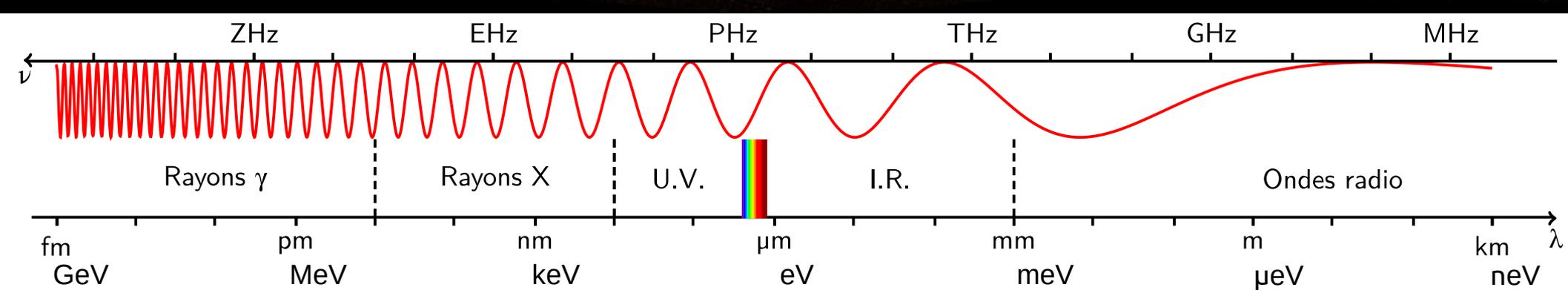
# « Supernovae et leurs vestiges » ?



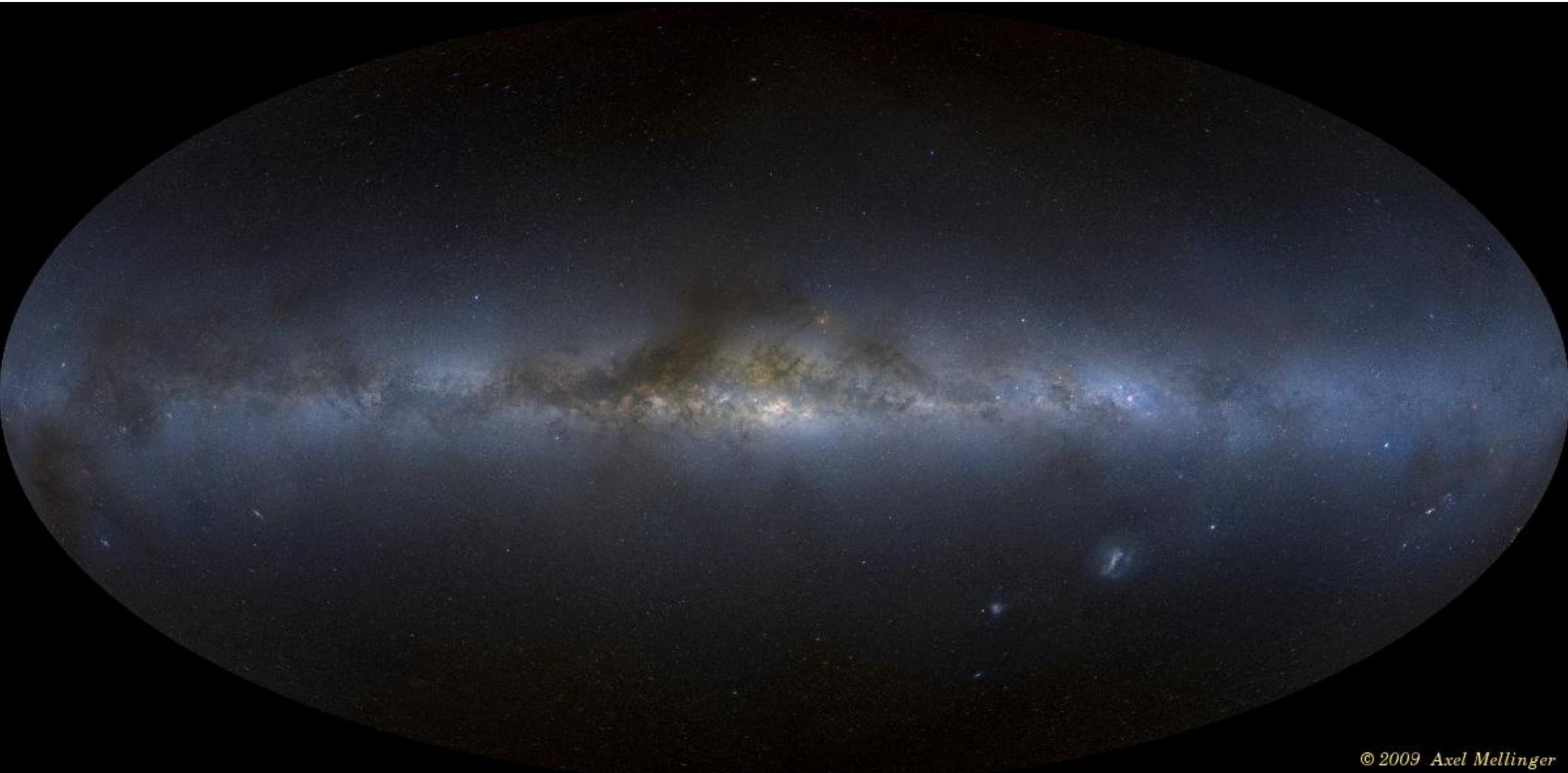
# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?



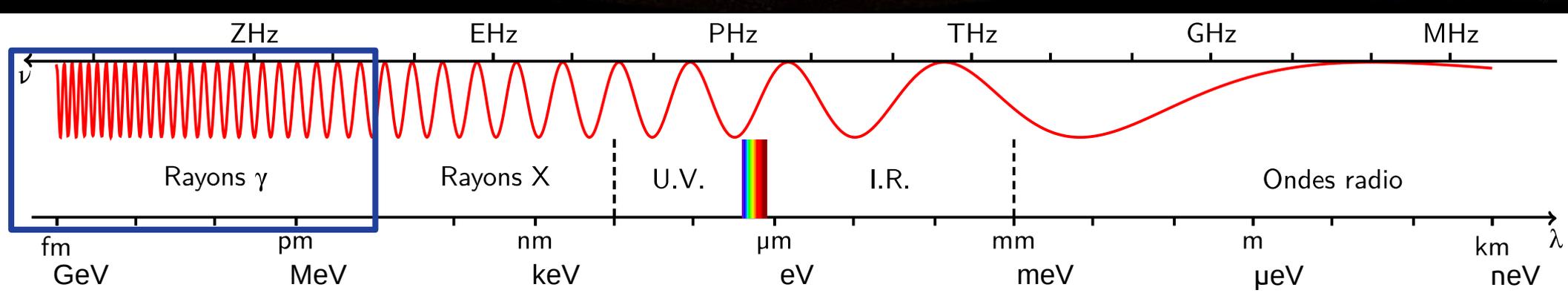
© 2009 Axel Mellinger



# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?

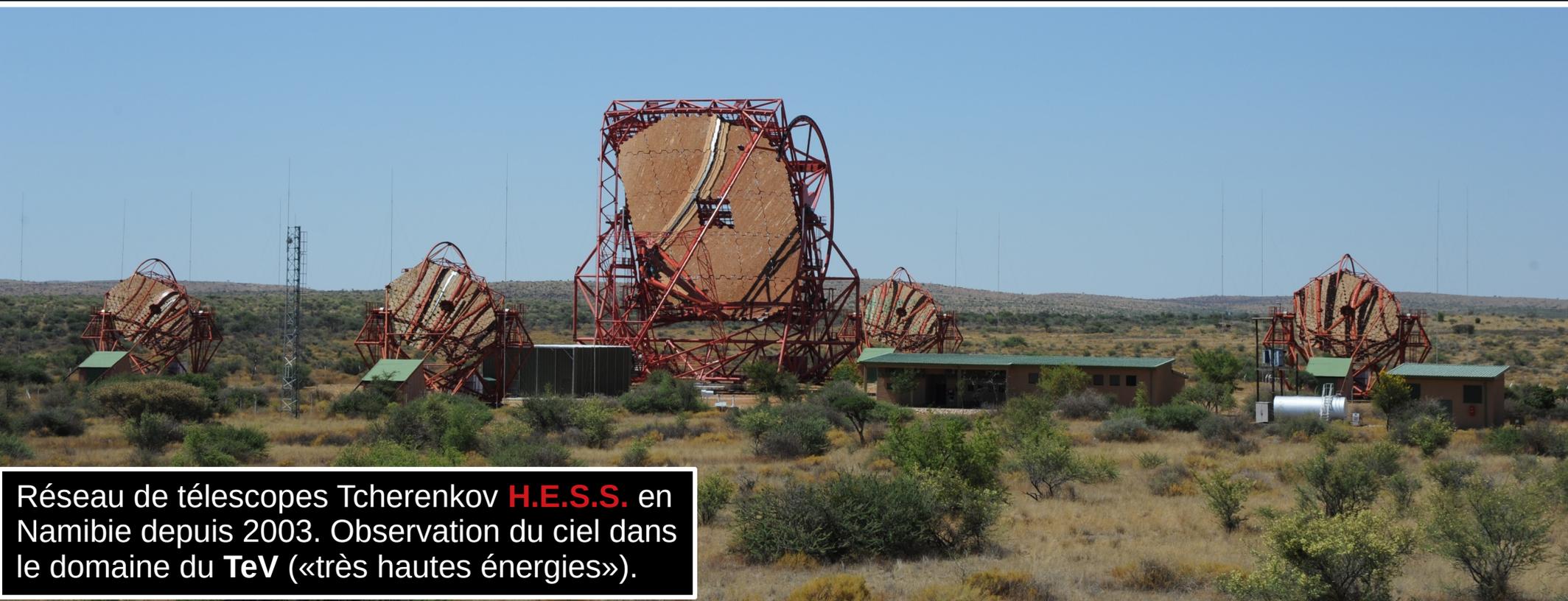
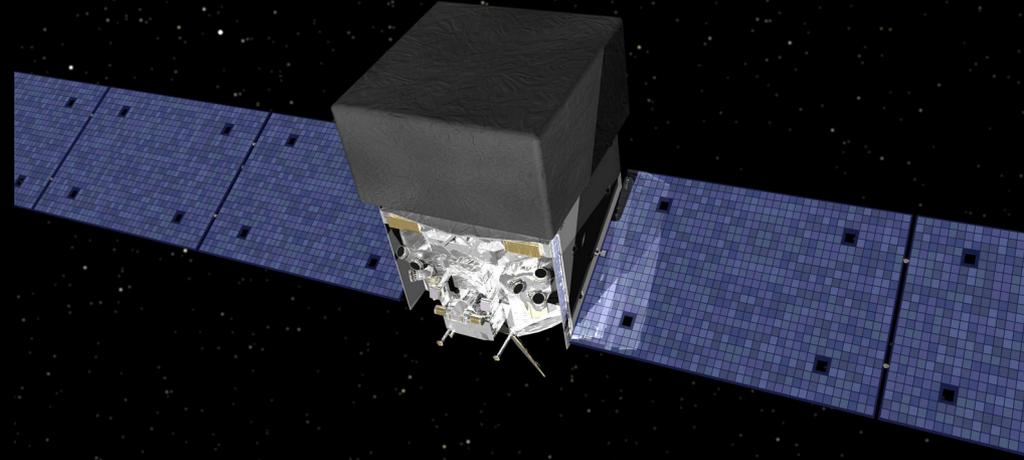


© 2009 Axel Mellinger



# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?

Télescope **LAT** à bord du satellite *Fermi* lancé en 2008. Observation du ciel dans le domaine du **GeV** («hautes énergies»).



Réseau de télescopes Tcherenkov **H.E.S.S.** en Namibie depuis 2003. Observation du ciel dans le domaine du **TeV** («très hautes énergies»).

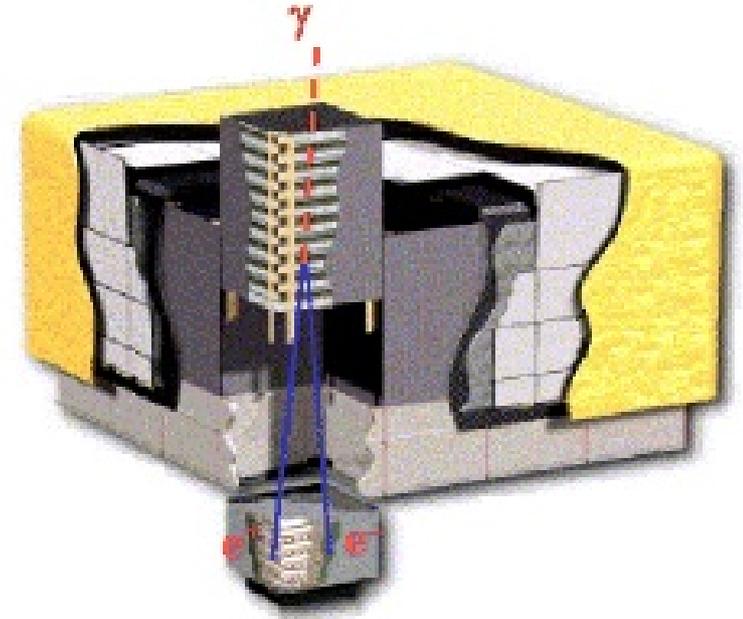
# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?

Techniques d'astronomie classique  
inutilisables à ces énergies

Méthodes de physique des particules

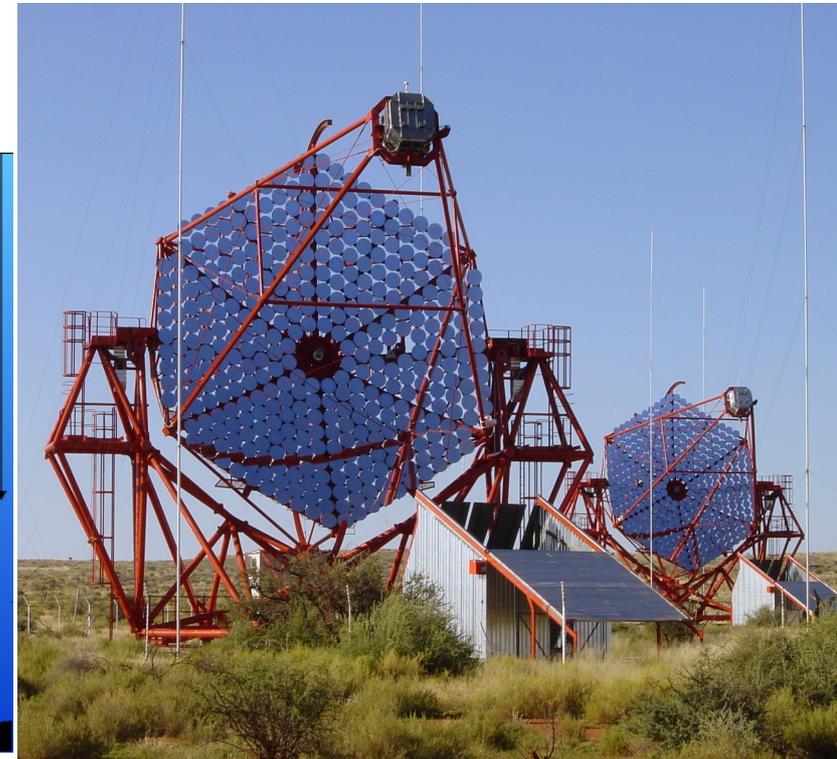
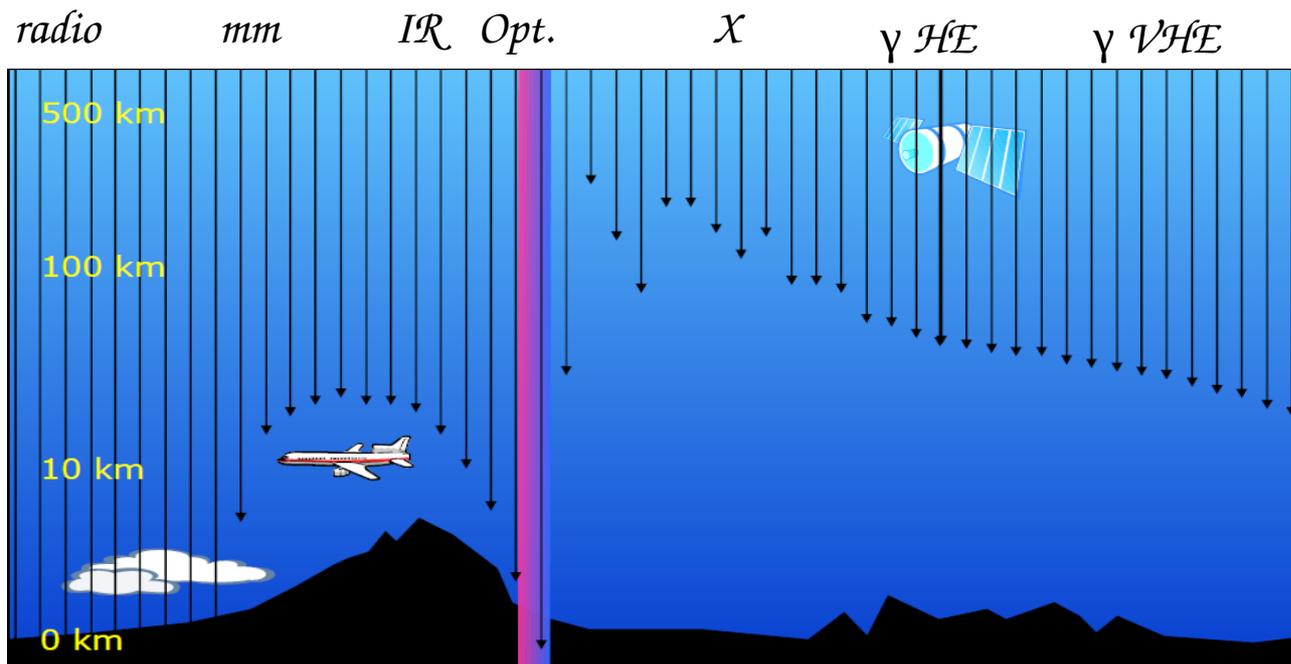
Mesure de l'énergie par un calorimètre

Direction du photon  $\gamma$  obtenue par calcul



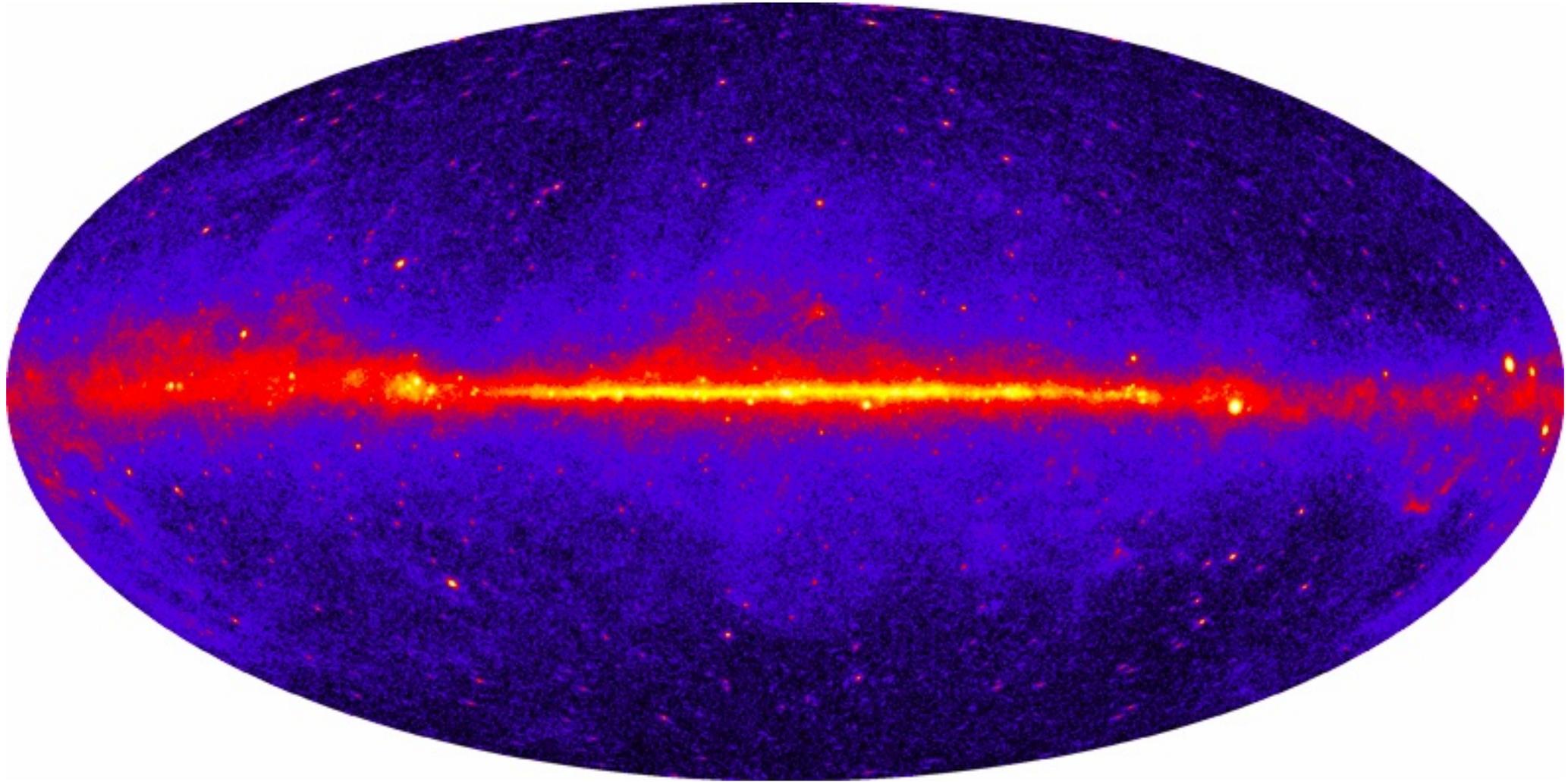
Contraintes en astronomie gamma

Atmosphère opaque et flux très faibles



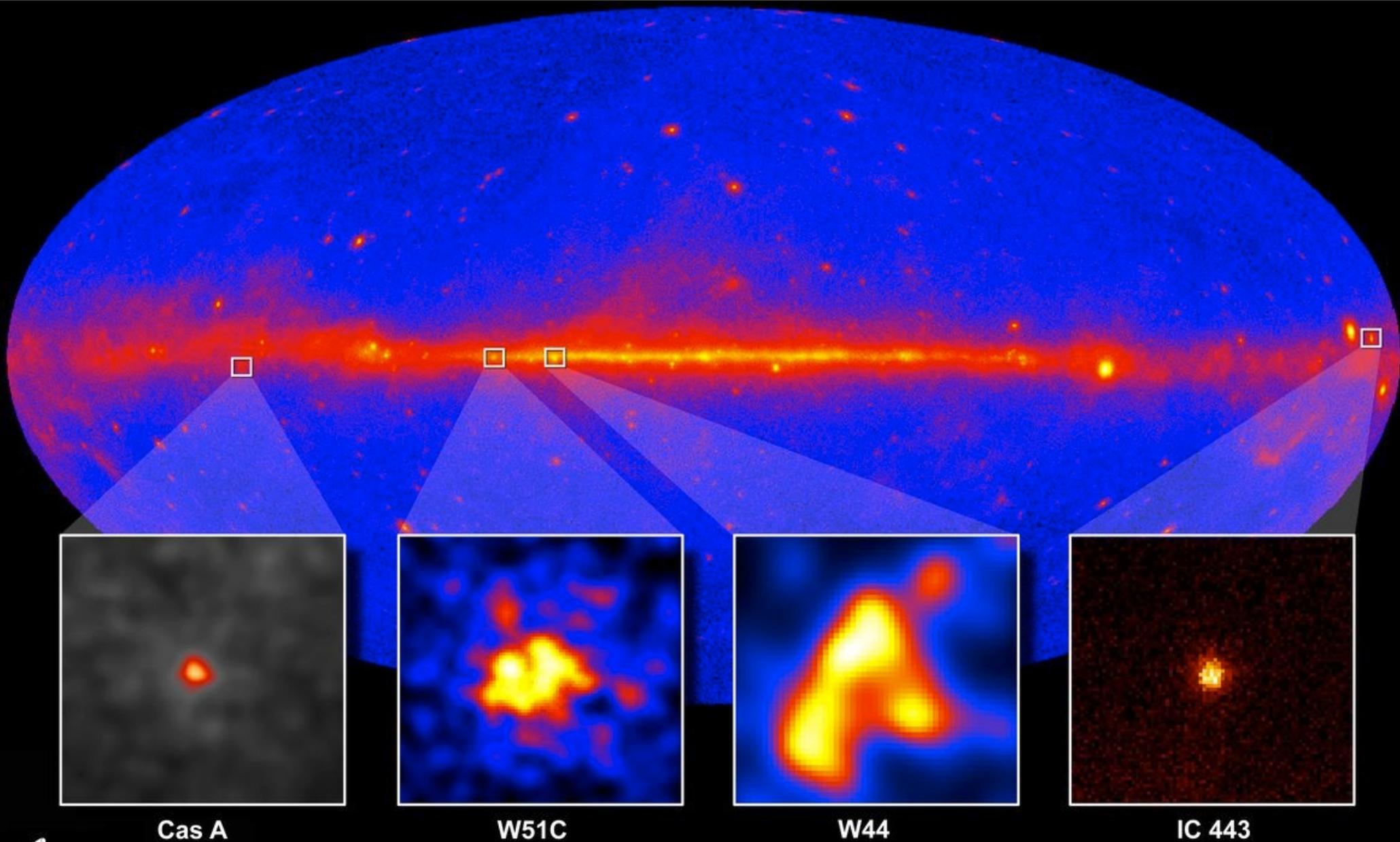
# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?

Carte de tout le ciel vu par le *Fermi*/LAT



# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?

Carte de tout le ciel vu par le *Fermi*/LAT



Cas A

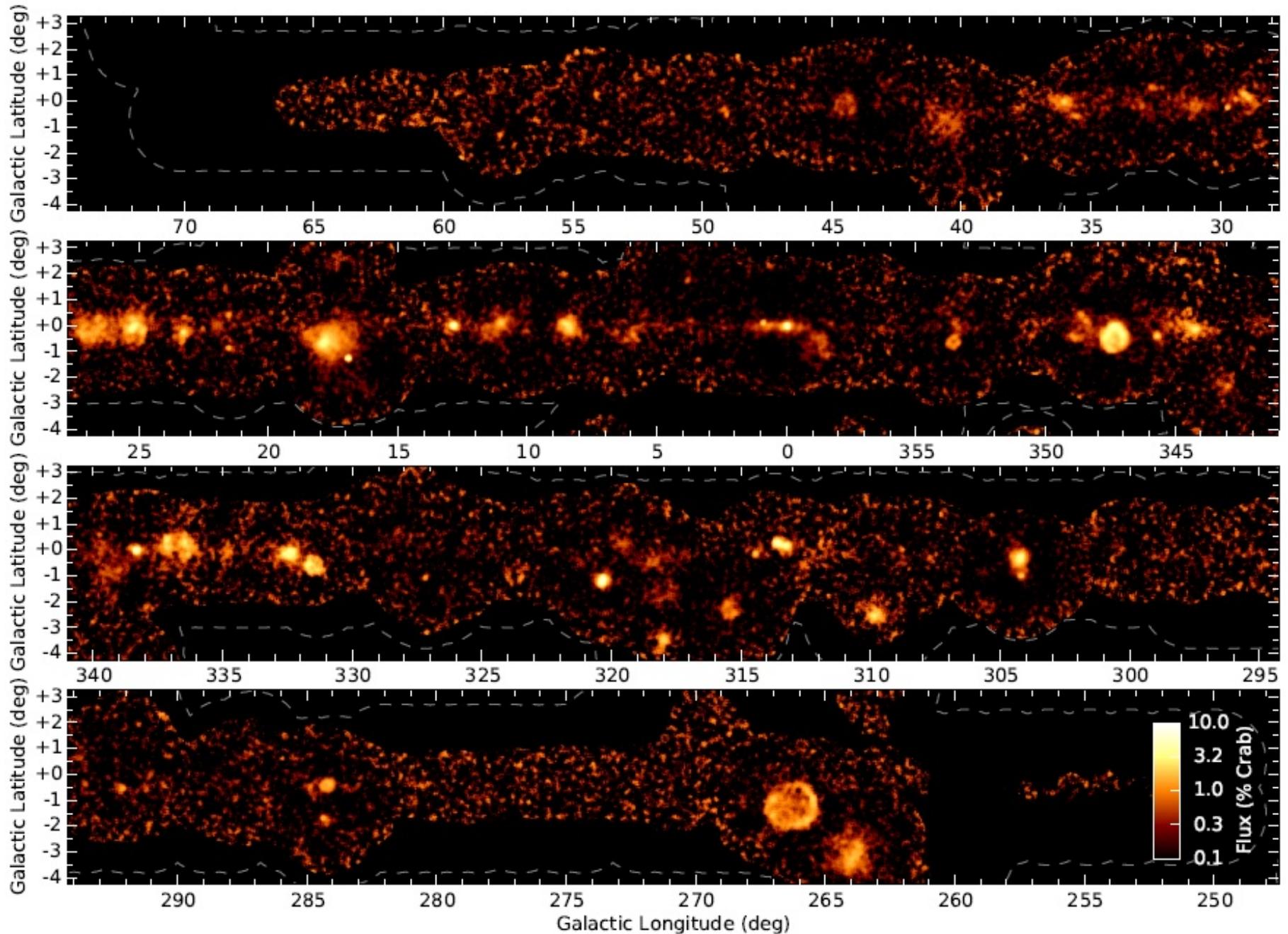
W51C

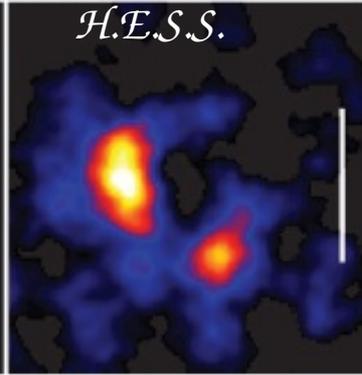
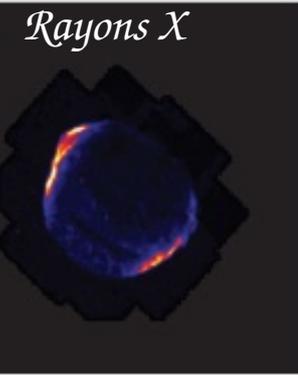
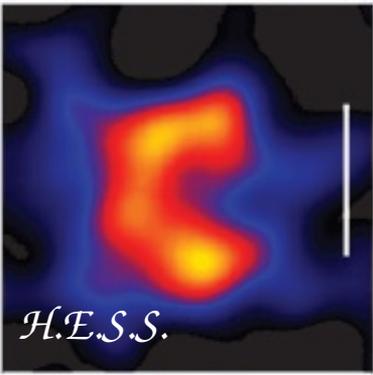
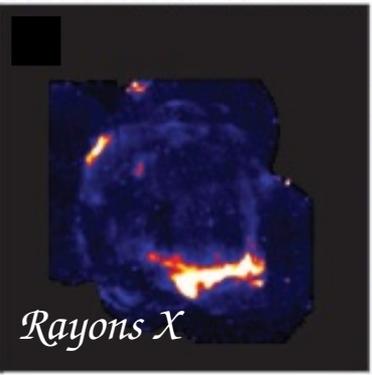
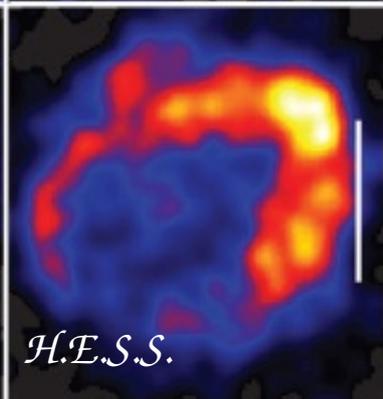
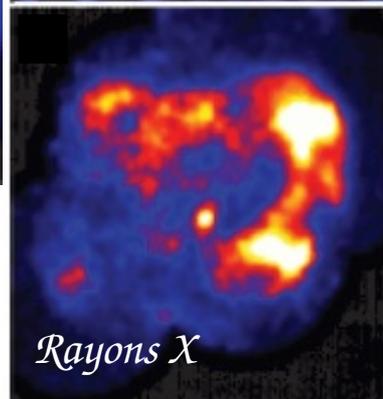
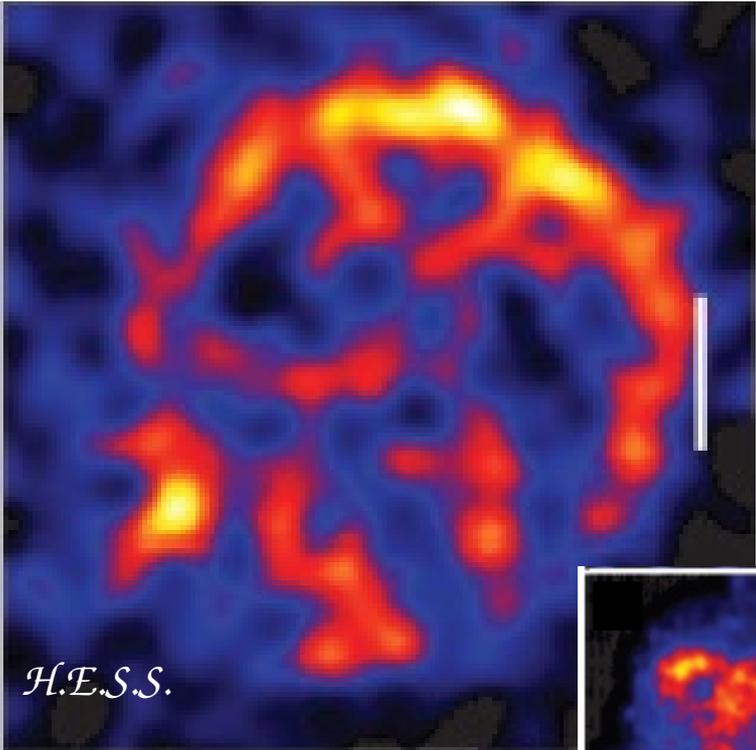
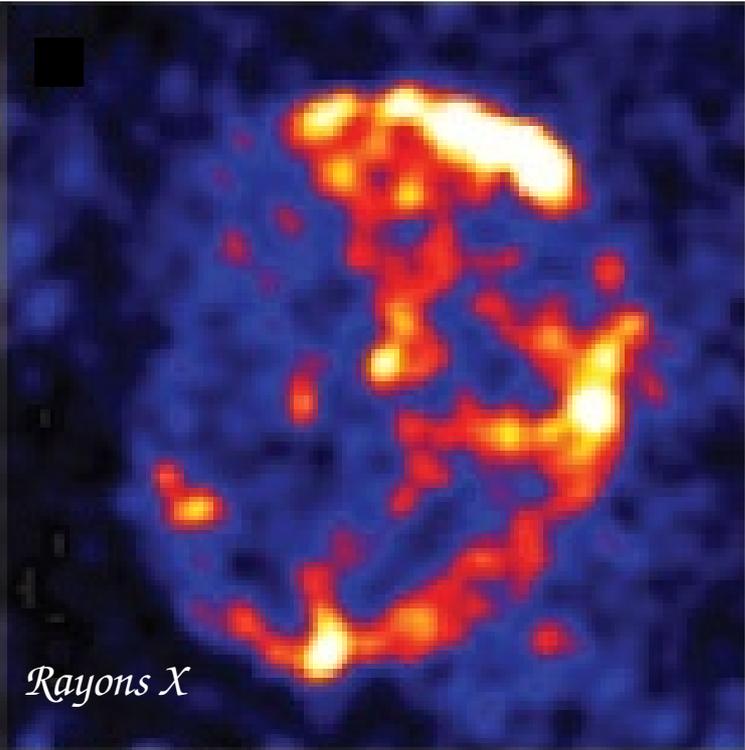
W44

IC 443

# Astronomie... gamma, « $\gamma$ » ?

Carte du Plan Galactique vu par H.E.S.S.





Nature de l'émission gamma ? Les vestiges de SN = sources principales des RCs ?

# Le métier d'astrophysicien... ?

## Le parcours :

**Cinq années d'études après le bac :** à l'Université : Licence de Physique (3 ans) puis Master en Physique/Astronomie/Astrophysique (2 ans) à Besançon, Bordeaux, Grenoble, Lyon, Marseille, Montpellier, Nantes, Nice, Orléans, Paris, Strasbourg, Toulouse.

**Trois années de thèse de doctorat :** travaux de recherche (sous contrat donc salaire) sur une thématique donnée, encadrés par un/des (co-)directeur(s) de thèse au sein d'un laboratoire de recherche. Publication d'articles dans des revues scientifiques. Rédaction d'un manuscrit et soutenance de thèse devant un jury pour valider le diplôme.

**Années de post-doctorat :** continuation des travaux de recherche (sous contrat) en France ou à l'étranger dans un ou plusieurs autre(s) laboratoire(s) de recherche.

**Candidature aux postes ouverts chaque année :** astronome (CNAP), enseignant-chercheur (Universités), chargé de recherche (CNRS).

## En pratique :

**Beaucoup d'informatique :** développement et exploitation de logiciels d'analyse des données des instruments, calculs et simulations numériques. Instrumentation.

**Un peu de « terrain » :** exemple avec les *shifts* en Namibie sur le site de H.E.S.S.

**Travail au sein de collaborations internationales :** Fermi/LAT et H.E.S.S. ~ 200 pers., CTA ~ 1100 pers. ! Bonne connaissance de l'anglais nécessaire pour communiquer. Déplacements réguliers à l'étranger pour participer aux meetings, conférences, symposium.

# En guise de conclusion :

## l'aspect pluri-disciplinaire des rayons cosmiques

La nature des sources à l'origine du rayonnement cosmique reste encore aujourd'hui un mystère...

Les vestiges de supernova, pulsars et sursauts gamma sont au centre des débats. Les observations gamma recèlent la clé...?

Les rayons cosmiques constituent une composante majeure du milieu interstellaire en terme énergétique, et interviennent dans l'ionisation du milieu interstellaire (création de radicaux libres, chimie)

L'ionisation des molécules atmosphériques par les rayons cosmiques pourrait influencer la couverture nuageuse ainsi que la transparence atmosphérique

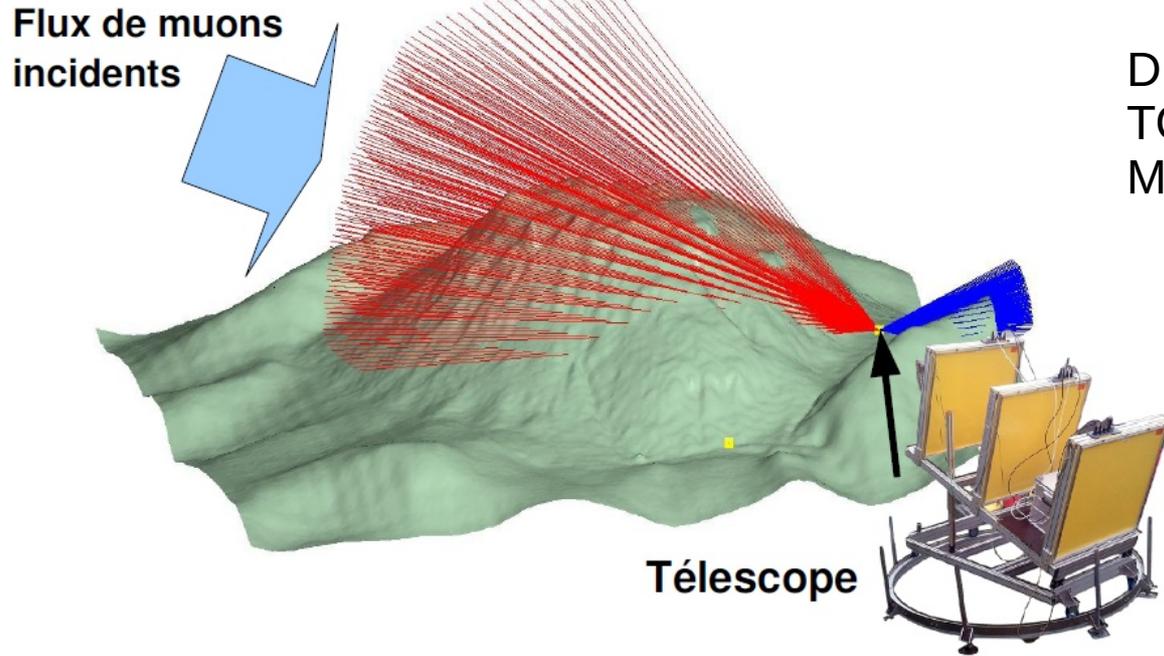
L'effet destructeur des rayons cosmiques sur les liaisons moléculaires affecterait les cellules biologiques

Le  $^{14}\text{C}$  est issu de l'interaction des rayons cosmiques dans l'atmosphère

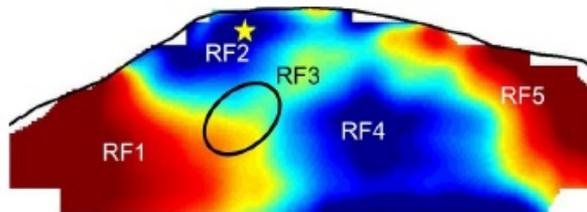
Les muons cosmiques servent à faire la tomographie des... volcans !

# Tomographie muonique des volcans

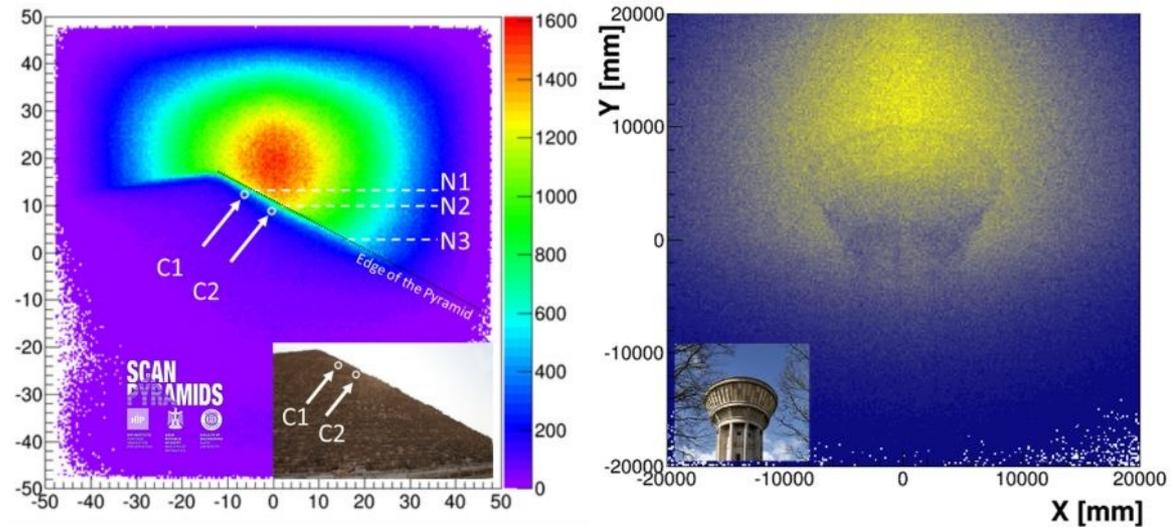
DIAPHANE (Soufrières, Etna, Mont-Terri)  
TOMUVOL (Puy-de-dôme)  
MURAY (Vésuve, Stromboli)



Radiographies  
(densité moyenne)



Autres applications : archéologie



# Le télescope à muons du CEA

## PRINCIPE



Capter à l'aide de détecteurs gazeux un flux de muons venus de différentes directions pendant un laps de temps donné. Puis déduire des variations de ce flux, la variation de densité de la matière traversée : moins il y a de muons détectés, plus il y a de matière. Et former une image « en négatif » de l'objet étudié.

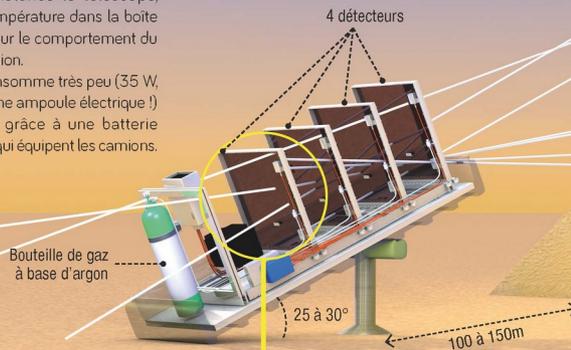
## Du télescope...

Il comprend 4 détecteurs gazeux Micromegas installés en ligne. Chacun capte et amplifie le signal électrique (électrons) produit lorsqu'un muon le traverse (il en arrive 5 à 10 par seconde). Tous les signaux enregistrés sont directement transmis à un nanoPC, équivalent de l'ordinateur d'un smartphone, qui traite l'information brute en temps réel et reconstruit précisément (résolution de 200 microns) la trajectoire de chaque muon. Puis, il communique les

données au laboratoire français du CEA par une connexion Internet 3G, toujours en temps réel.

À noter, le nanoPC permet aussi de contrôler à distance le télescope, ainsi que la température dans la boîte (importante pour le comportement du gaz) et la pression.

L'ensemble consomme très peu (35 W, l'équivalent d'une ampoule électrique !) et fonctionne grâce à une batterie comme celles qui équipent les camions.

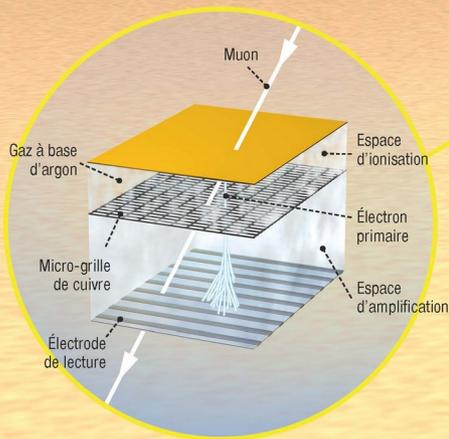


## Détecteur « Micromegas » :

Il peut détecter les muons via les électrons qu'ils arrachent en passant dans le système.

Il se compose d'une plaque sensible contenant un volume de gaz à base d'argon (non toxique, non inflammable) divisé en deux espaces parallèles : espace d'ionisation et espace d'amplification.

En traversant le détecteur, un muon arrache quelques électrons au gaz de l'« espace d'ionisation ». Le signal est alors faible. Mais ces électrons primaires sont accélérés sous l'effet d'un champ électrique (1 kV/cm) créé par des boîtiers de haute tension et traversent une micro-grille de cuivre. Ils atteignent alors l'« espace d'amplification », qui présente un champ électrique 50 fois plus intense, pour subir une nouvelle accélération et obtenir assez d'énergie pour ioniser de nouveau le gaz. En résulte une avalanche de nouveaux électrons (quelques dizaines de milliers) permettant aux pistes de l'électrode de lecture la détection du signal amplifié.



## À SAVOIR



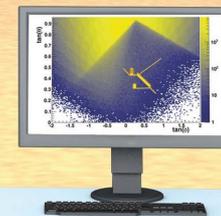
### Qu'est-ce qu'un muon?

Sorte d'électrons lourds découverts en 1936, ces particules élémentaires sont issues des collisions entre les rayons cosmiques de notre environnement galactique et les atomes de l'atmosphère. Elles tombent en permanence sur la Terre à une vitesse proche de la lumière, avec un débit d'environ 10 000 particules par m<sup>2</sup> par minute. À l'instar des rayons X, les muons interagissent peu avec la matière et peuvent, de fait, la traverser très facilement. Pour autant, plus l'objet est épais et/ou dense, plus le nombre de particules déviées ou absorbées sera important. Ici, ils sont donc utilisés comme messagers pour dévoiler les espaces vides d'un objet.

## ... à l'image.

À partir des données envoyées par le nanoPC, une « image en négatif » de l'objet d'intérêt est reconstituée par un logiciel en laboratoire. Elle est issue de l'accumulation de muons captés par le télescope pendant 3 à 4 semaines : beaucoup de muons = peu de matière ; peu de muons = beaucoup de matière.

La qualité de l'image dépend de la distance du télescope à l'objet, de sa résolution angulaire et de son angle par rapport à l'horizon. Par exemple, plus le télescope est horizontal, moins il capte de muons, et plus le temps de mesure doit être long. Il faut donc trouver le meilleur équilibre entre ces trois paramètres.



- Beaucoup de muons captés = peu de matière
- Peu de muons captés = beaucoup de matière

# Quelques références...

## Histoire des rayons cosmiques

« Le roman des rayons cosmiques » J. Paul & J.-L. Robert-Esil, *Ellipses*, 2009

## Evolution stellaire

« Naissance, vie et mort des étoiles » N. Prantzos & T. Montmerle, *Que sais-je ?*, 1998

## Supernovae

« Soleils éclatés : les supernovae », T. Montmerle & N. Prantzos, *Presses du CNRS*, 2000

## Vestiges de supernova

« Historical Supernovae and their Remnants », F.R. Stephenson & D.A. Green, *Oxford Univ. Press*, 2002

Site de l'Irfu/SAP : [http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_visu.php?id\\_ast=2731](http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=2731)

## H.E.S.S.

Site officiel (anglais) : <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>

## Fermi

Site officiel (anglais) : <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>