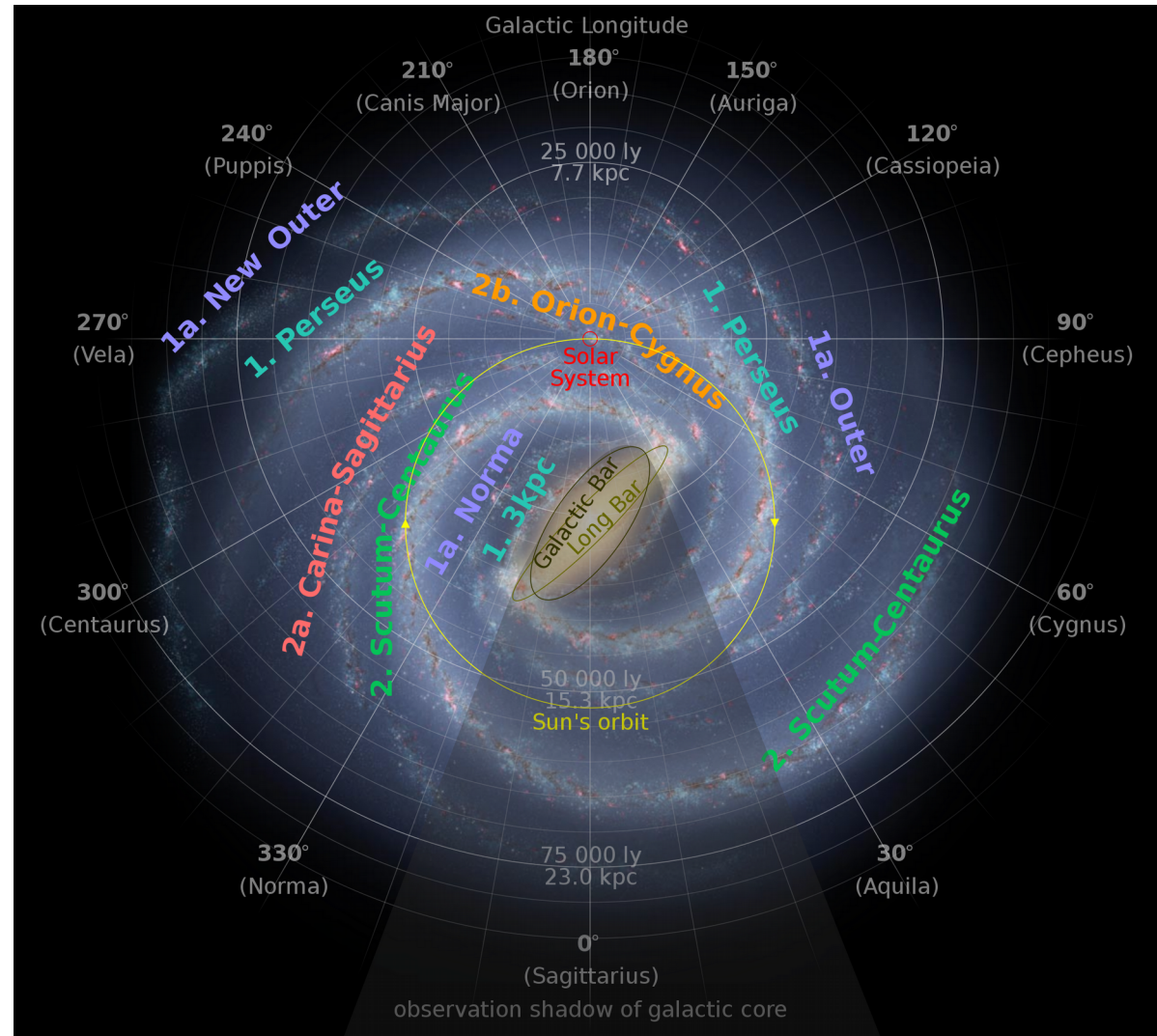
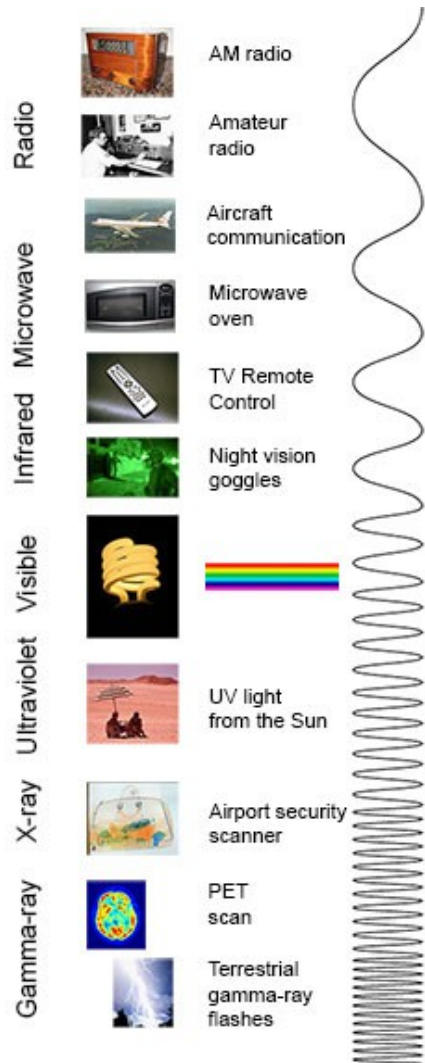


Outline

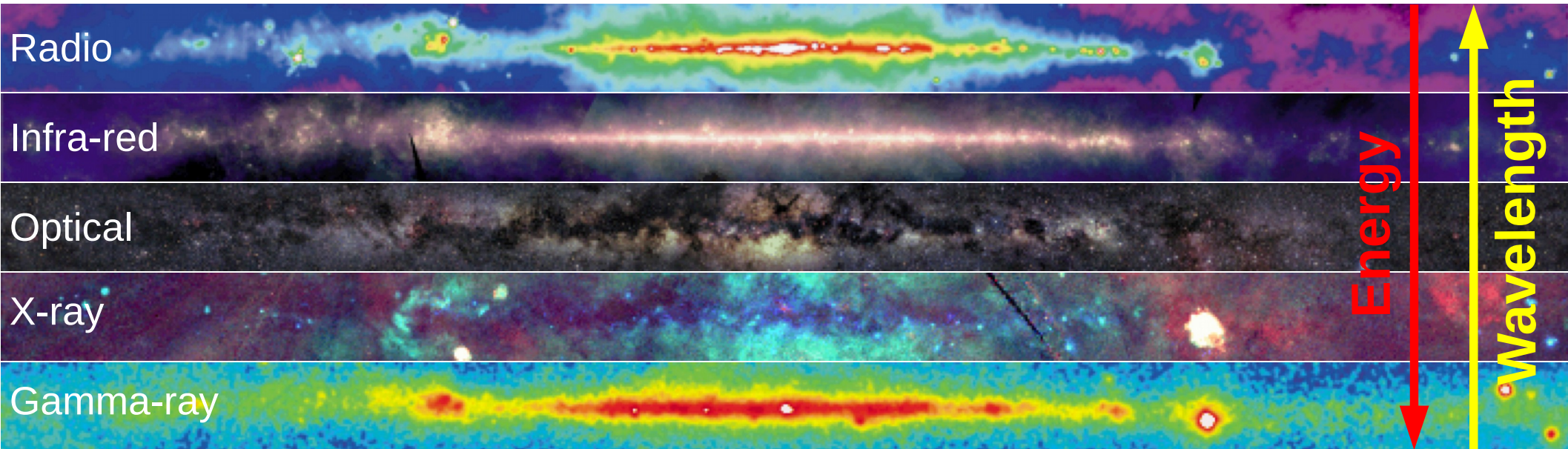
- **Introduction**
- **Astronomie Rayons Gamma à très haute énergie**
- **The Imaging Cherenkov Technique**
- **High Energy Stereoscopic System**
- **Cherenkov Telescope Array**
- **Perspectives et conclusions**

Introduction

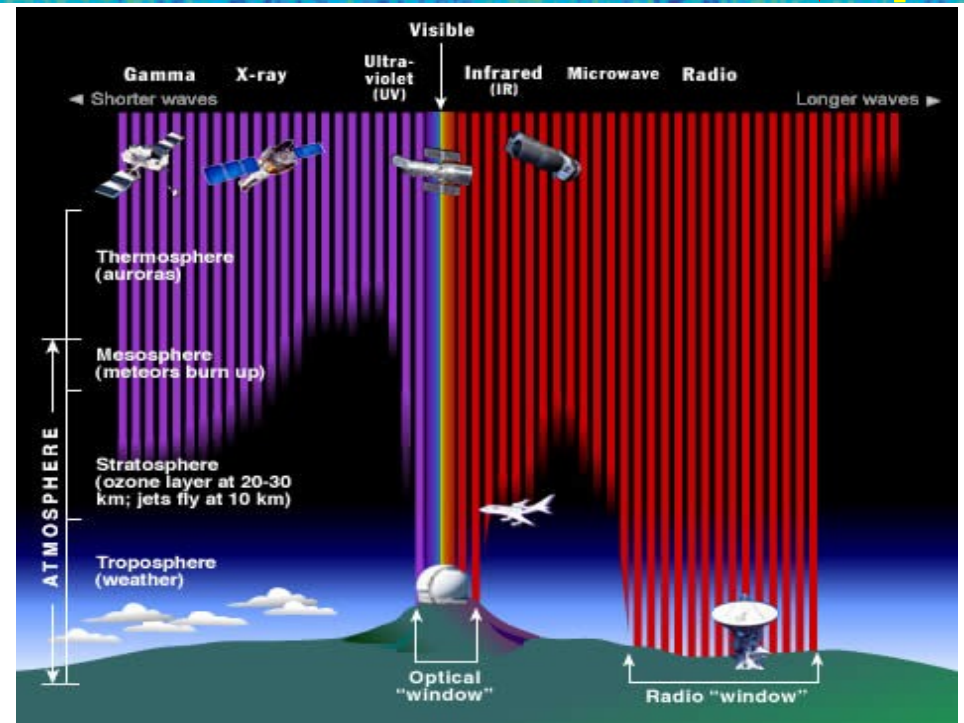
- L'astronomie est la science naturelle la plus ancienne. Il avait commencé avec les observations de la lumière visible des objets célestes par l'œil humain.
- Actuellement, avec l'instrumentation moderne, les astronomes peuvent effectuer des observations du cosmos dans un large spectre allant des fréquences radio aux rayons γ .



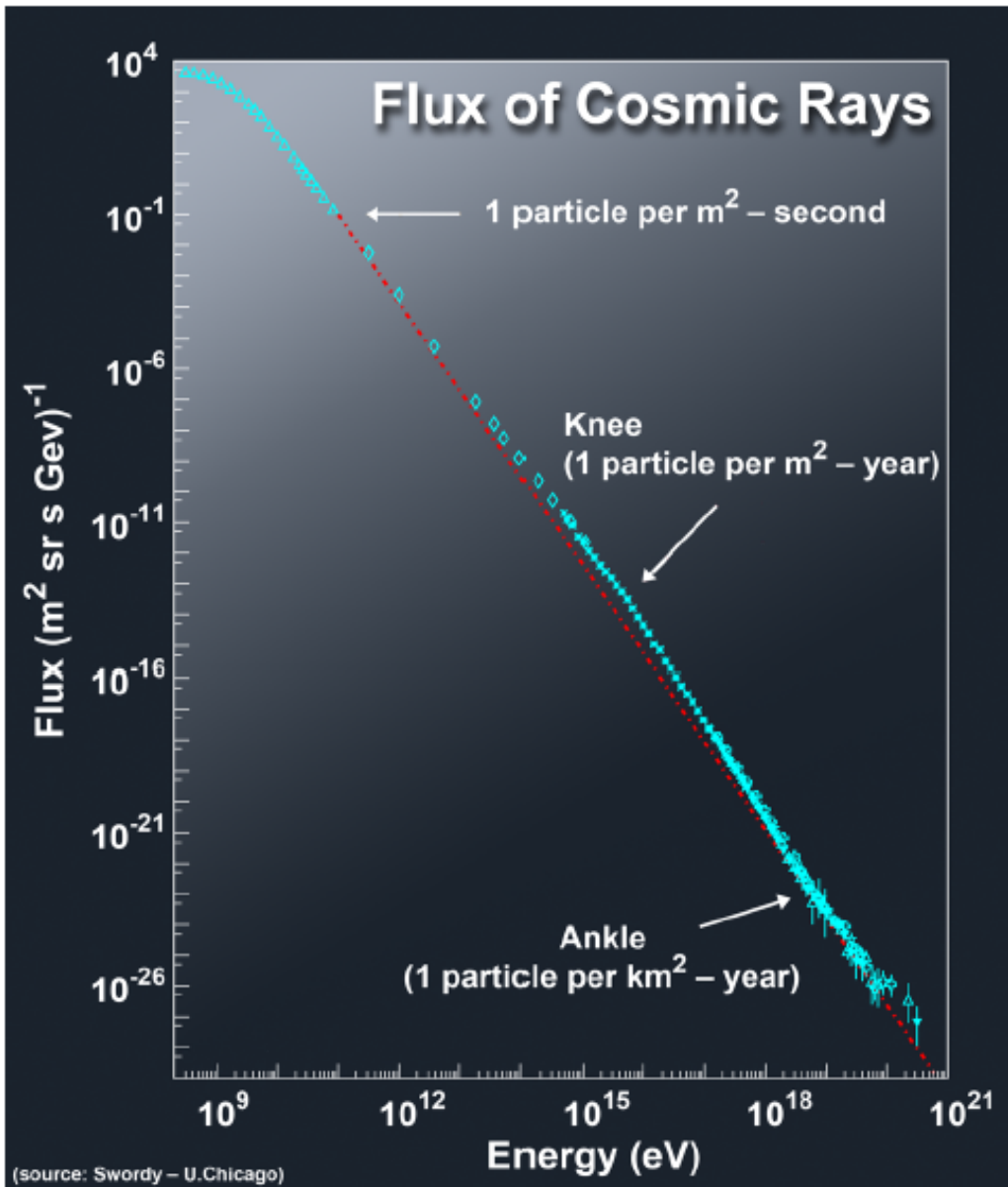
Introduction



- Vue multi-longueur d'onde de la Voie Lactée. L'émission observée dans différentes longueurs d'onde donne des informations importantes sur le cosmos et son évolution.
- Au cours des deux dernières décennies, l'astronomie à très haute énergie (VHE) a largement contribué à notre compréhension des processus hautement énergétiques de l'univers non thermique.



Cosmic-rays

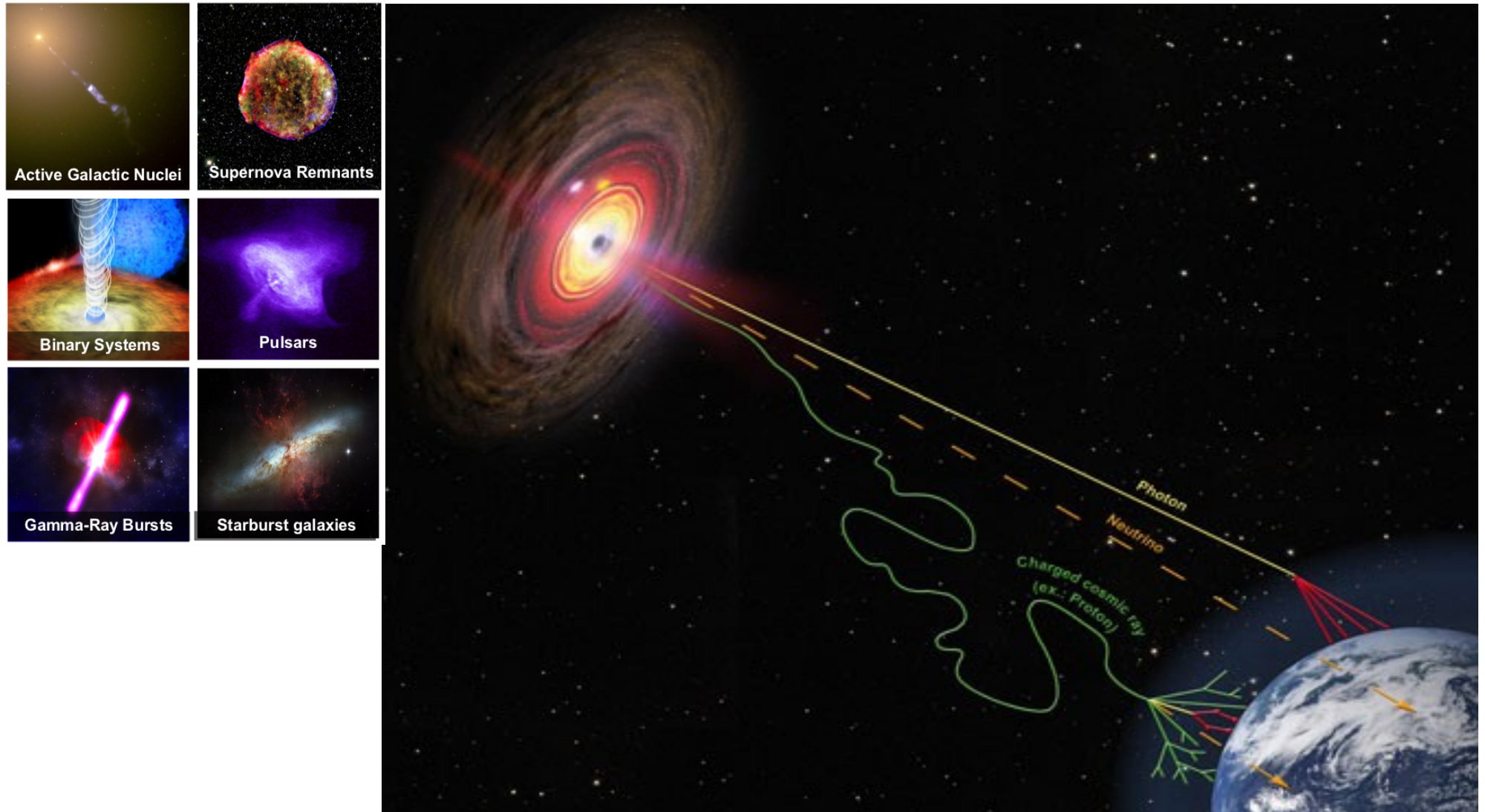


The cosmic-ray spectrum measured from the Earth

$$J_{\odot}^{(p)} = 1.8 \times E_{\text{GeV}}^{-2.7} \text{ GeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

- Les rayons cosmiques (CR) sont des particules provenant de l'espace et interagissant avec l'atmosphère de la Terre de façon isotrope. (99% de noyaux, 1% d'électrons).
- Le spectre RC montre deux caractéristiques distinctes "le genou" et "la cheville".
 - RC jusqu'au genou → Galactique (accélération dans les objets galactiques comme les SNR, accélération de Fermi).
 - RC au-delà de la cheville → Extra-Galactic.
- L'origine des rayons cosmiques: "C'est un mystère centenaire". Les messagers neutres peuvent donner des indices à ce sujet.

Neutral Messengers



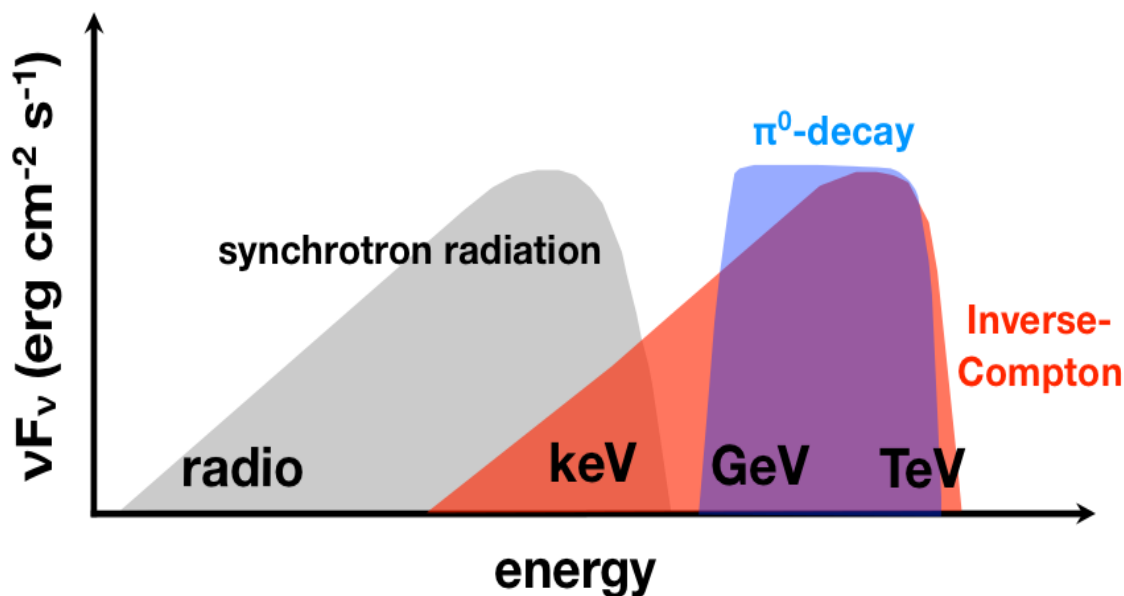
- Les RC chargés sont déviés par des champs magnétiques sur leur chemin
→ ils perdent leurs informations de direction.
- Les photons et les neutrinos (messagers neutres) peuvent être utilisés pour remonter à l'origine de leurs sources astrophysiques.

VHE Gamma-ray Astronomy

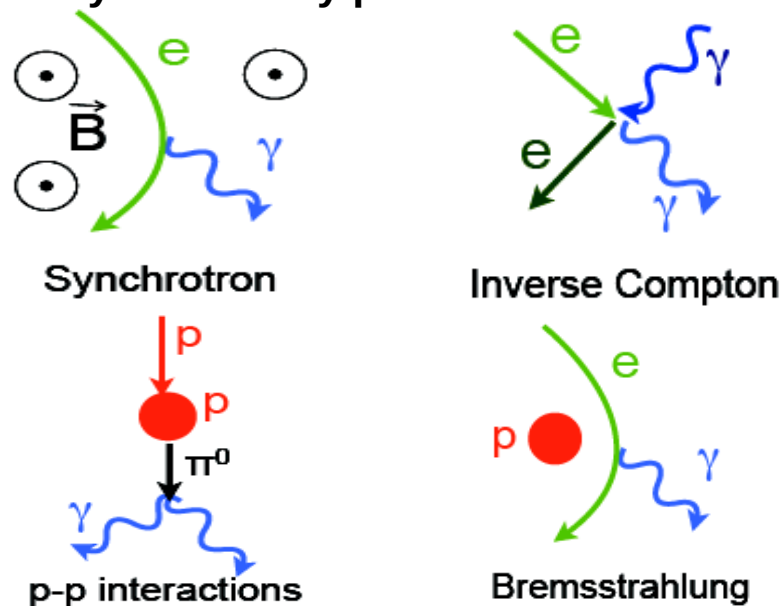
- Le domaine de l'astronomie gamma au-dessus de plusieurs MeV peut être considéré comme l'étude de l'univers non-thermique (un rayon gamma de 1 MeV a besoin de 10^9 K).

Nomenclature of cosmic-rays and γ -ray astronomy

Energy Range (MeV)	Classification	Detection Methods
$E < 10.0$	Low Energy (LE)	Balloons, Satellites
$10.0 < E < 30.0$	Medium Energy (ME)	Space Based Satellites
$30.0 < E < 30 \times 10^3$	High Energy (HE)	Space Based Satellites
$30 \times 10^3 < E < 30 \times 10^6$	Very High Energy (VHE)	Ground Based
$30 \times 10^6 < E < 30 \times 10^9$	Ultra High Energy (UHE)	Ground Based
$E > 30 \times 10^9$	Extremely High Energy (EHE)	Ground Based

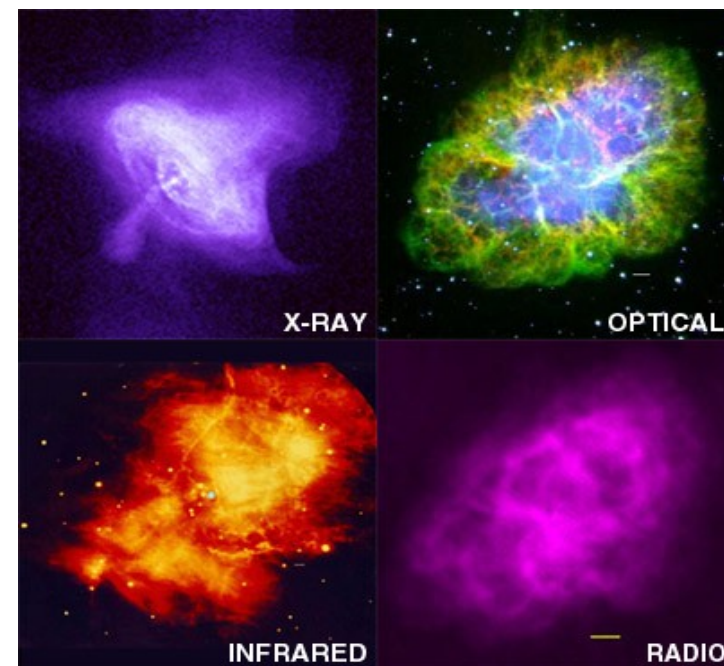
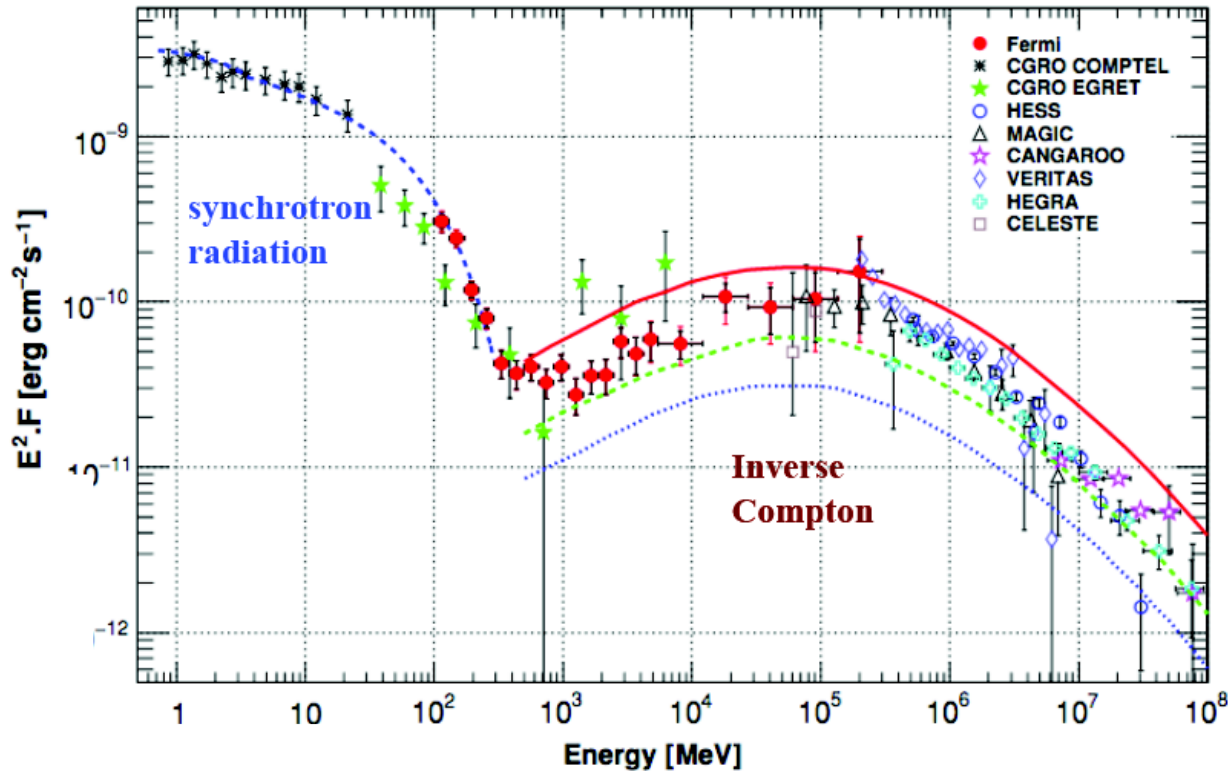
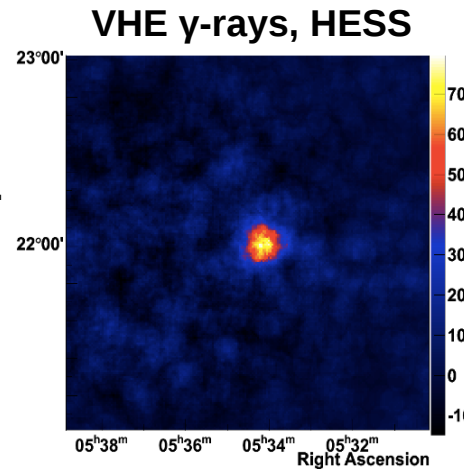


Gamma-ray astronomy production mechanisms



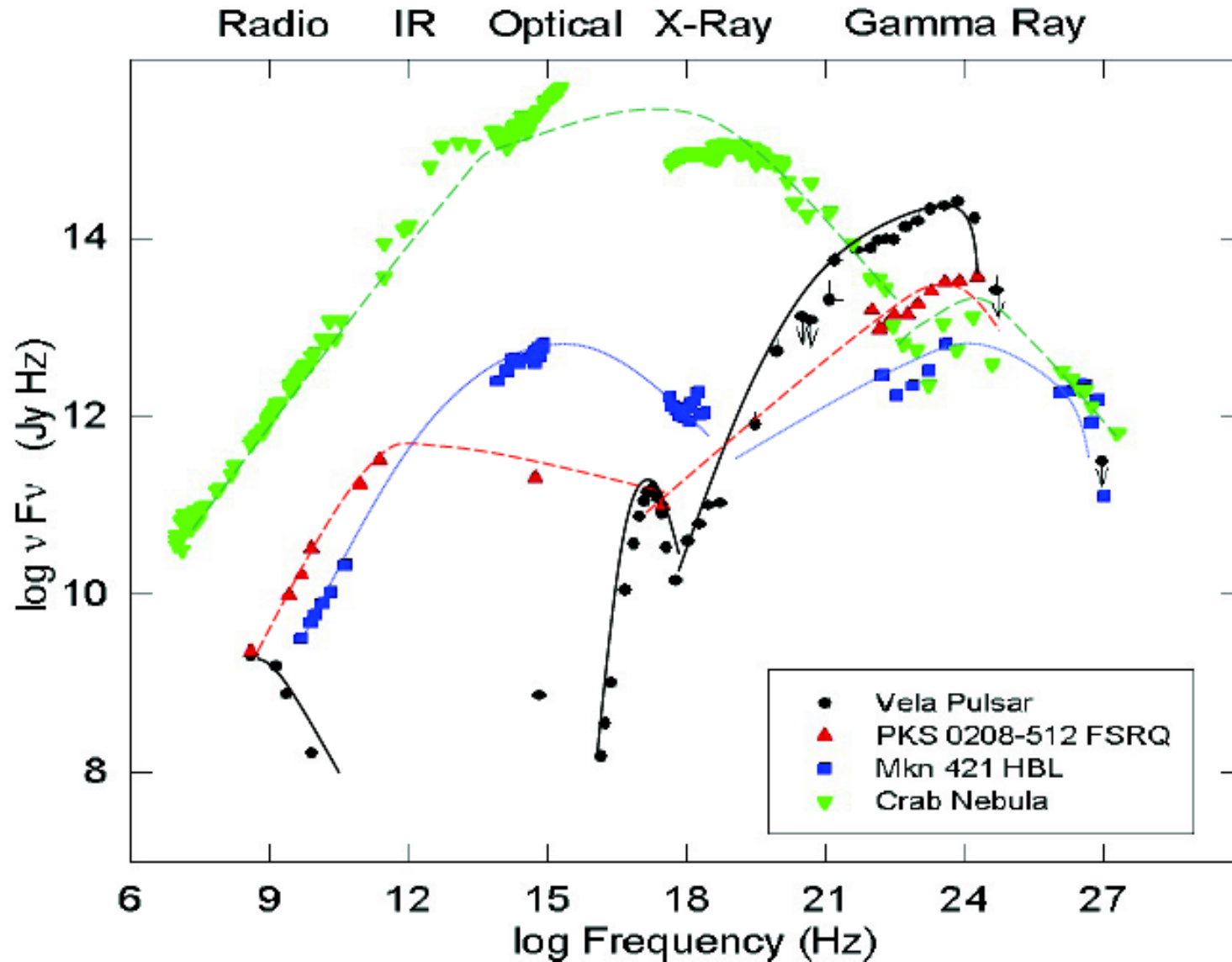
The Crab Nebula

- La nébuleuse du crabe est le reste d'une supernova qui a explosé en 1054. Elle était visible pendant la journée pendant six semaines.
 $F_{\text{crab}} (> 1 \text{ TeV}): \sim 8 \text{ ph. km}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$
- Au centre, il y a une étoile à neutrons (Pulsar du crabe, $\sim 30 \text{ Tour / s}$, 2kpc).
- Autour du pulsar, il y a une Pulsar Wind Nebula (PWN).

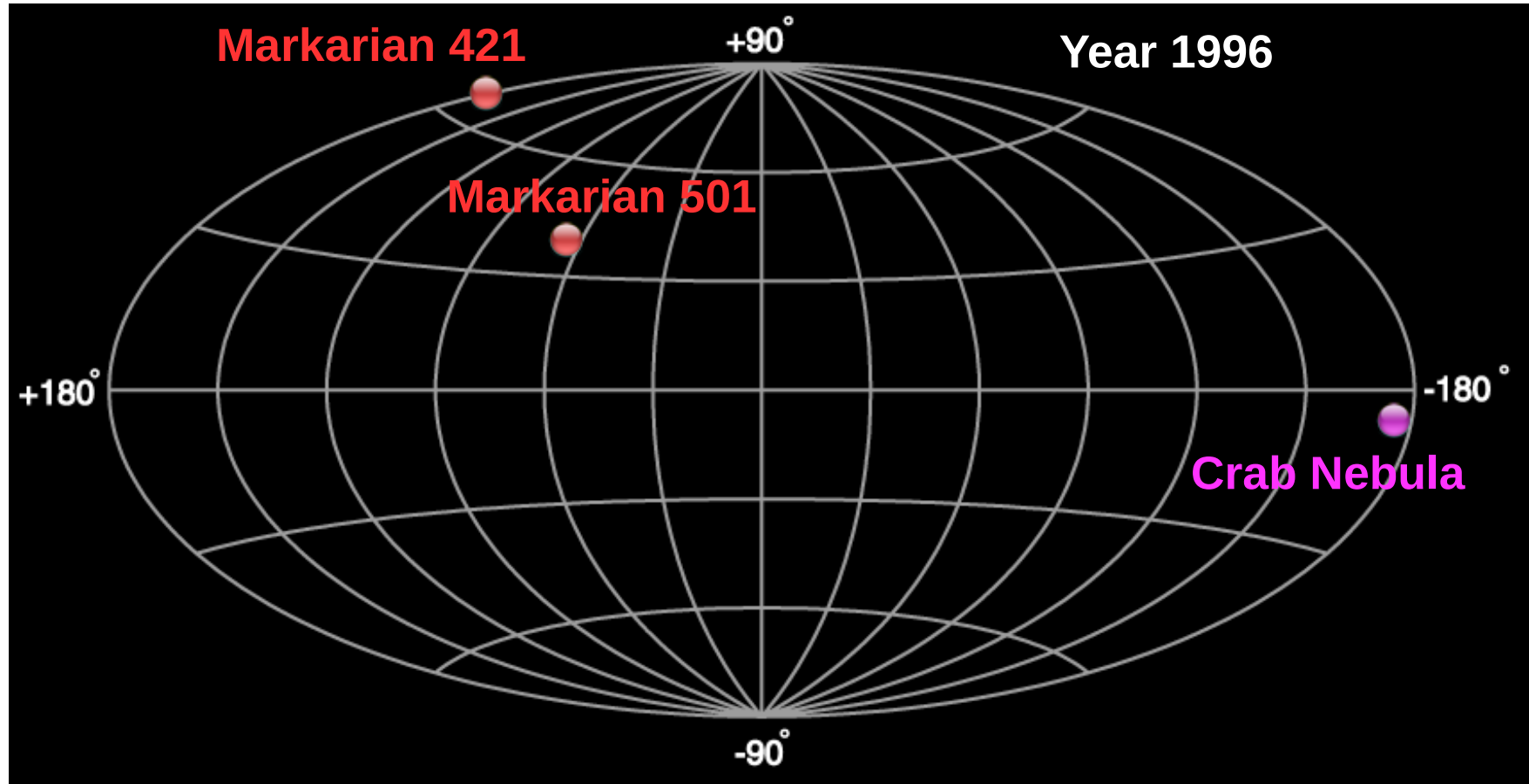


MWL view of VHE sources

- Certaines sources de rayons gamma VHE émettent dans d'autres longueurs d'onde, d'autres non. L'observation de la source dans différentes longueurs d'onde (observations multi-longueurs d'onde) peut fournir des informations importantes sur l'origine des sources.

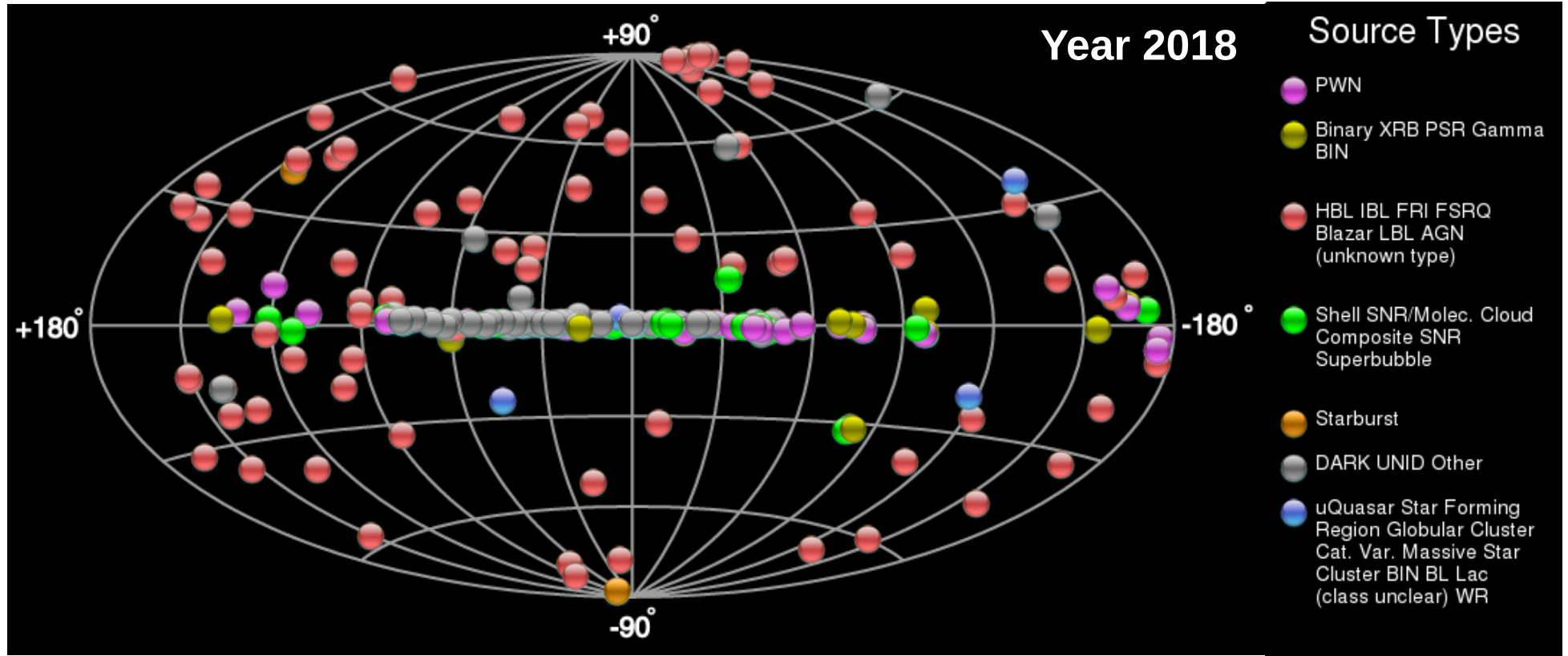


VHE Gamma-ray Astronomy



- En 1996, il n'y avait que trois sources connues de rayons gamma à très haute énergie. Les Markarian sont des sources extra-galactiques (autres galaxies), tandis que la nébuleuse du crabe est une source galactique (située à l'intérieur de la galaxie de la Voie Lactée).
- Une source VHE doit d'abord être détectée (par rapport au bruit de fond). Ensuite, sa morphologie et son spectre sont étudiés. Par la suite, on peut l'identifier (parfois une étude MWL est nécessaire).

VHE Gamma-ray Astronomy



- Les observations ont révélé un grand nombre (~ 210) de sources VHE. La plupart de ces sources ont été clairement identifiées.
- Les sources de rayons gamma VHE "non identifiées" \rightarrow contrepartie multi-longueurs d'onde plausibles (MWL) mais les associations n'ont pas encore été établies avec certitude.
- Les "sources sombres" \rightarrow n'ont pas des contrepartie dans autres longueurs d'onde.

Imaging Cherenkov Technique

Primary Gamma-ray

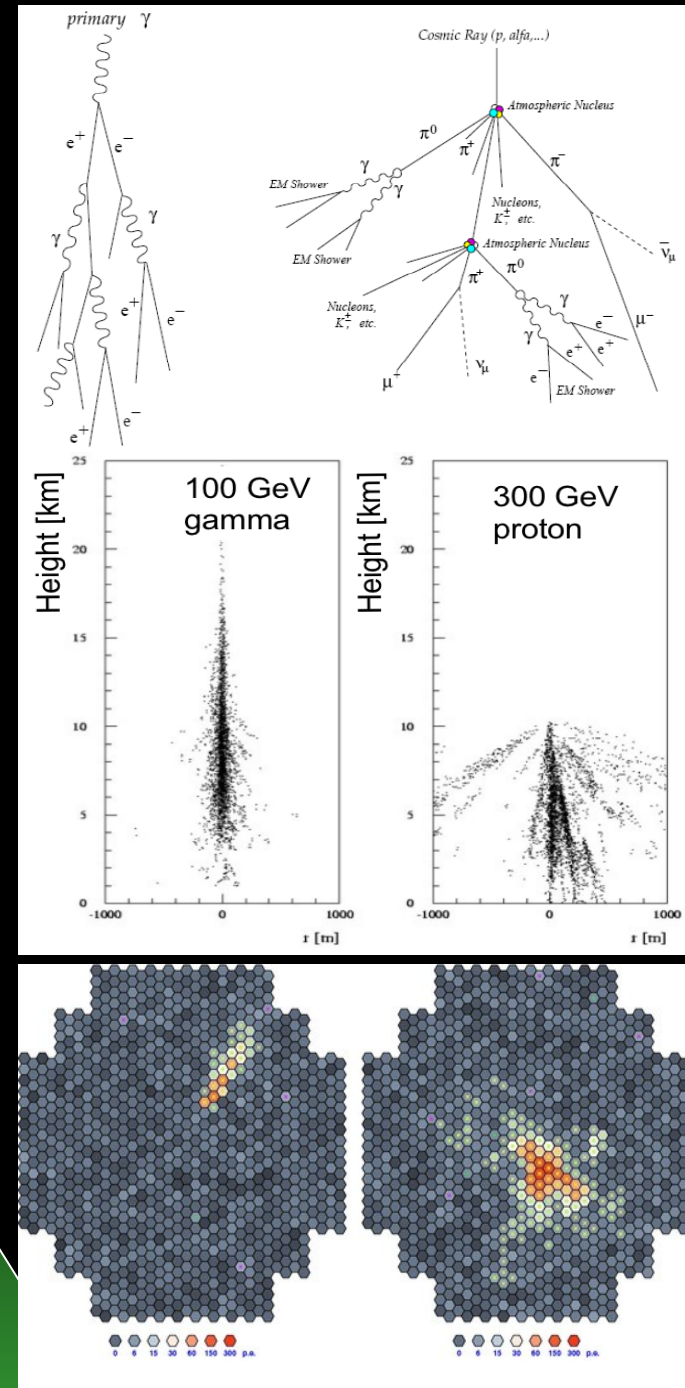
Particle shower

~ 10 km

~1.4°

Cherenkov light

~ 120 m

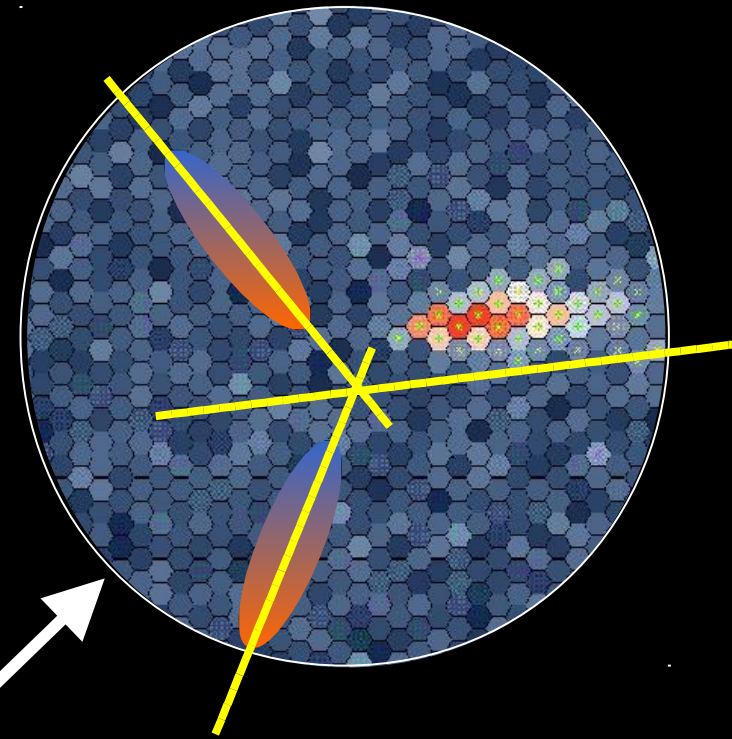


Imaging Cherenkov Technique

Primary Gamma-ray

Particle shower

Cherenkov Light



Hillas Ellipse:

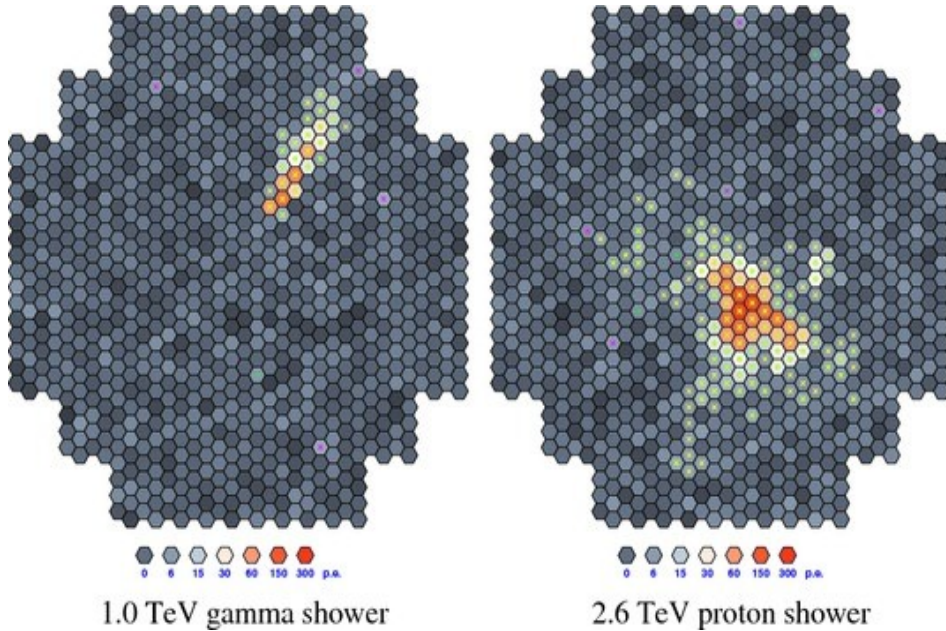
Geometrie → Direction du photon

Intensité → Energie du photon

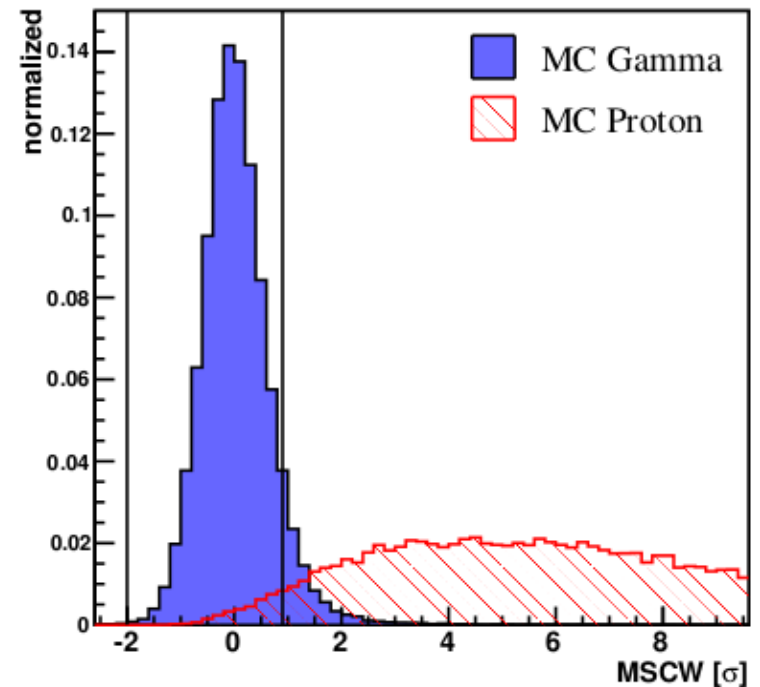
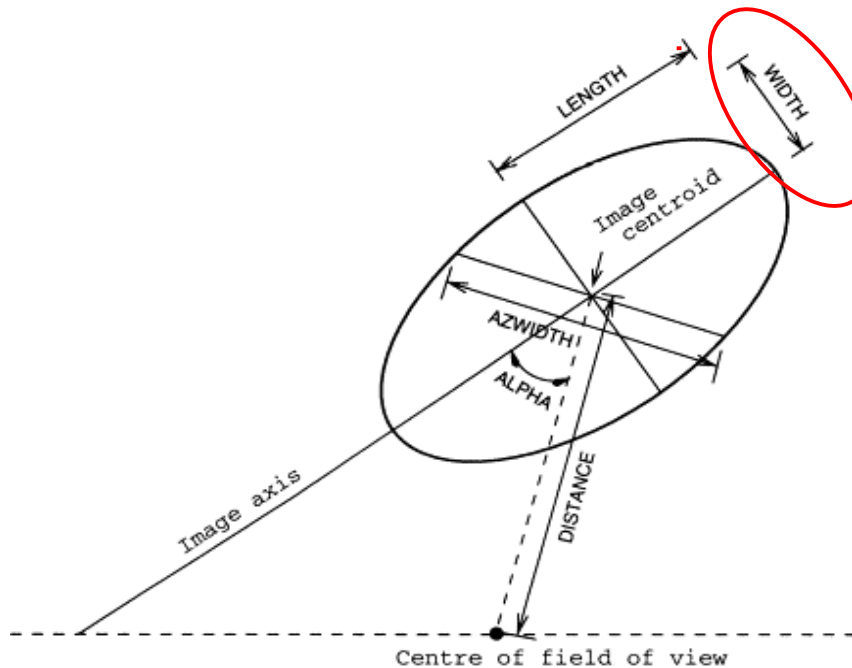
Forme → rejection des RC

**Le système stéréoscopique fournit:
Meilleure réduction du bruit de fond, résolution angulaire et énergétique.**

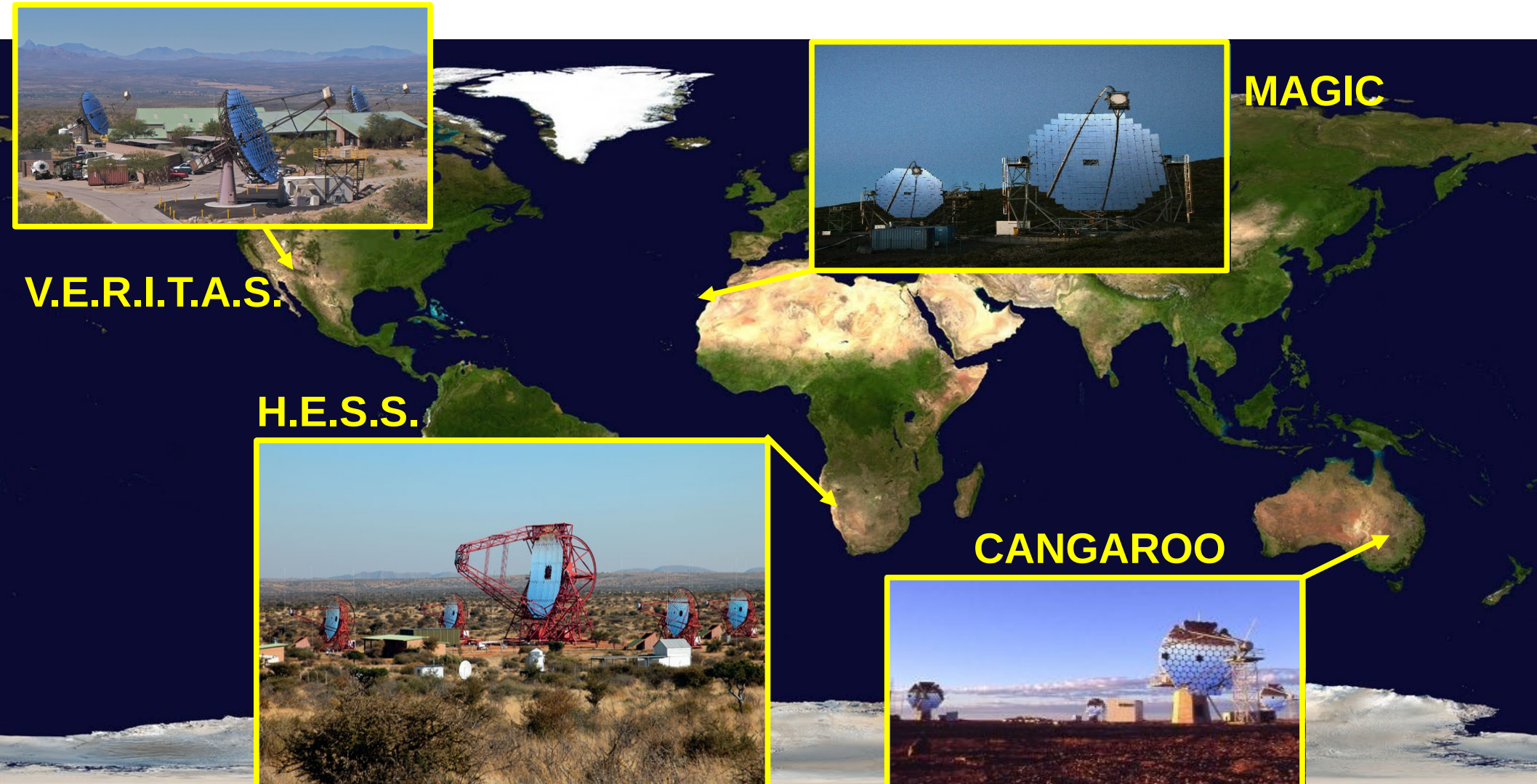
Gamma-ray / Hadron Separation



- Nous nous retrouvons avec des images de type ellipse (paramétrage Hillas) sur la caméra.
- Le taux de rayons gamma est ~ 1000 fois plus petit que celui des rayons cosmiques.
- Les gerbes hadroniques sont plus étalés des gerbe photonique
- Séparation Gamma / Hadron.



Imaging Air Cherenkov Telescopes (IACTs)



Instrument	Lat (°)	Long (°)	Alt (m)	Telescopes		Pixels	FoV (°)	Thresh (TeV)	Sensi- tivity (% Crab)	
				#	Area (m ²)					Total (m ²)
H.E.S.S.	-23	16	1800	4	107	428	960	5	0.1	0.7
H.E.S.S. II				1	614	614	2048	3.2	tbd	tbd
VERITAS	32	-111	1275	4	106	424	499	3.5	0.07	0.7
MAGIC I [†] +II	29	18	2225	2	234	468	576/1039	3.5	0.03	1.0
CANGAROO-III	-31	137	160	3	57.3	172	427	4	0.4	15

High Energy Stereoscopic System



- Hémisphère Sud, vue directe sur le Centre Galactique
- Bonne transparence du ciel, conditions de temps sec

H.E.S.S. Phase I (2002) :

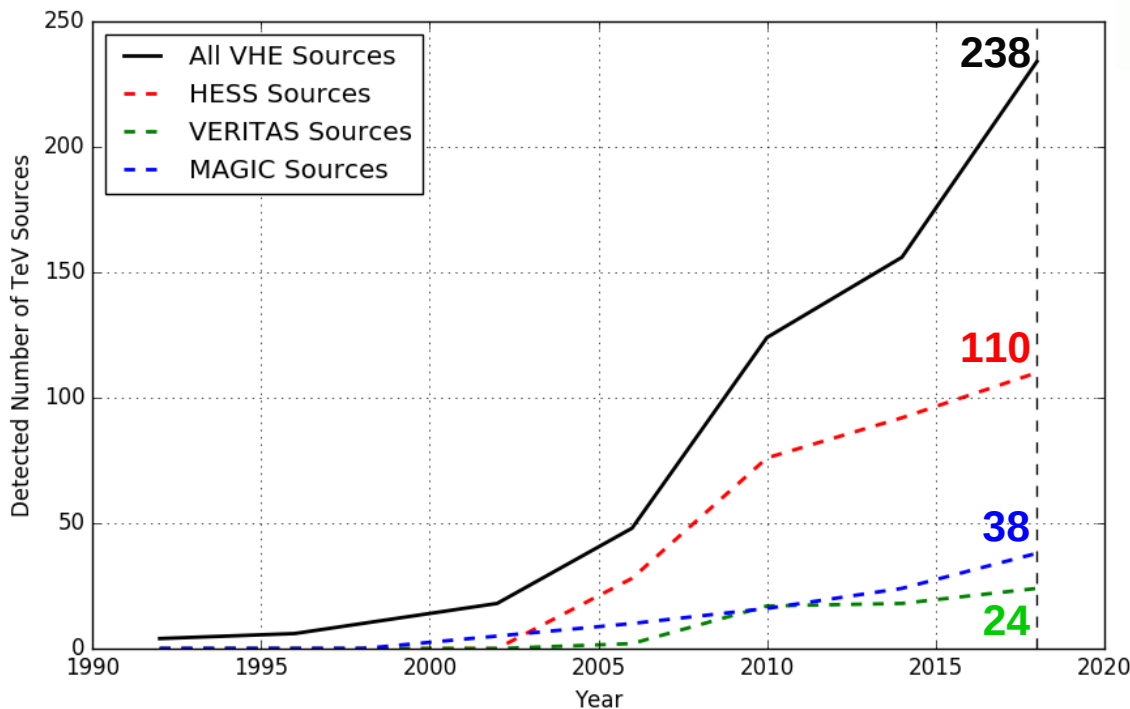
- 4 telescope system (12 m, 107 m²)
- 960 PMTs / cam, FoV 5°
- Energy threshold ~100 GeV
- Angular resolution ~0.1°

H.E.S.S. Phase II (2012) :

- Single large telescope (CT5) (28 m, 600 m²)
- 2048 PMTs, FoV 3.5° (CT5)
- Energy threshold O(30) GeV
- Angular resolution ~0.4°

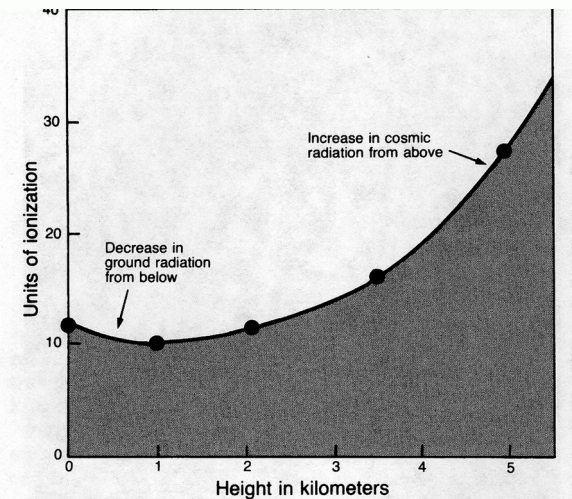
High Energy Stereoscopic System

- Le nom H.E.S.S. et est également destiné à rendre hommage à Victor HESS, qui a reçu le prix Nobel de physique en 1936 pour sa découverte du rayonnement cosmique.
- H.E.S.S. est un consortium international de 14 pays, 40 institutions, > 250 physiciens.



Victor Hess

- In 1912, Austrian physicist Victor Hess took an ionization chamber aloft in balloon and measured background radiation. He found that from 2000 meters to 5300 meters the amount of radiation increased, indicating the radiation came from space. He had discovered "Cosmic Rays."



Readings on ionization chamber Victor Hess carried aloft in the Böhmen. Above four kilometers the ionization rose rapidly indicating "that rays of very great penetrating power are entering our atmosphere from above". These cosmic rays contain the only modern samples of matter from outside our solar system which can be investigated directly.

H.E.S.S. Galactic Plane Survey

- Utilise les données de H.E.S.S. I système de télescope (CT1 – CT4).

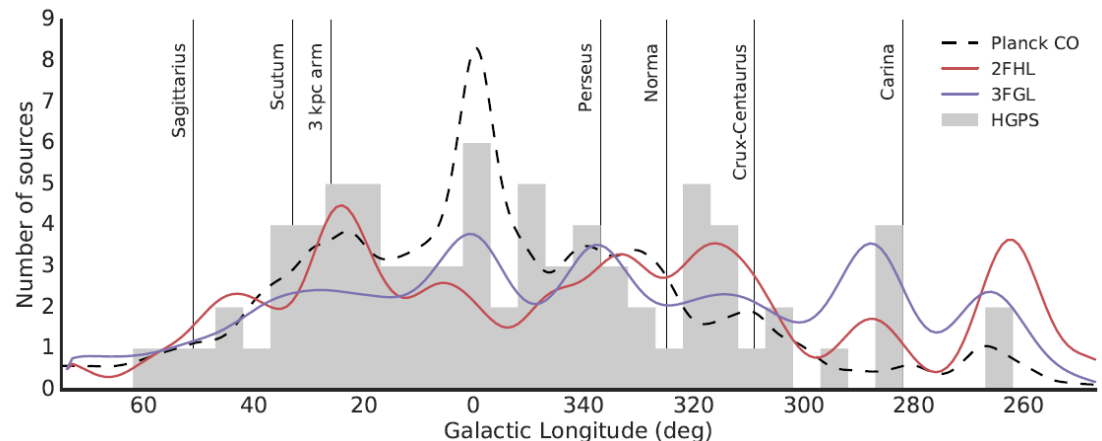
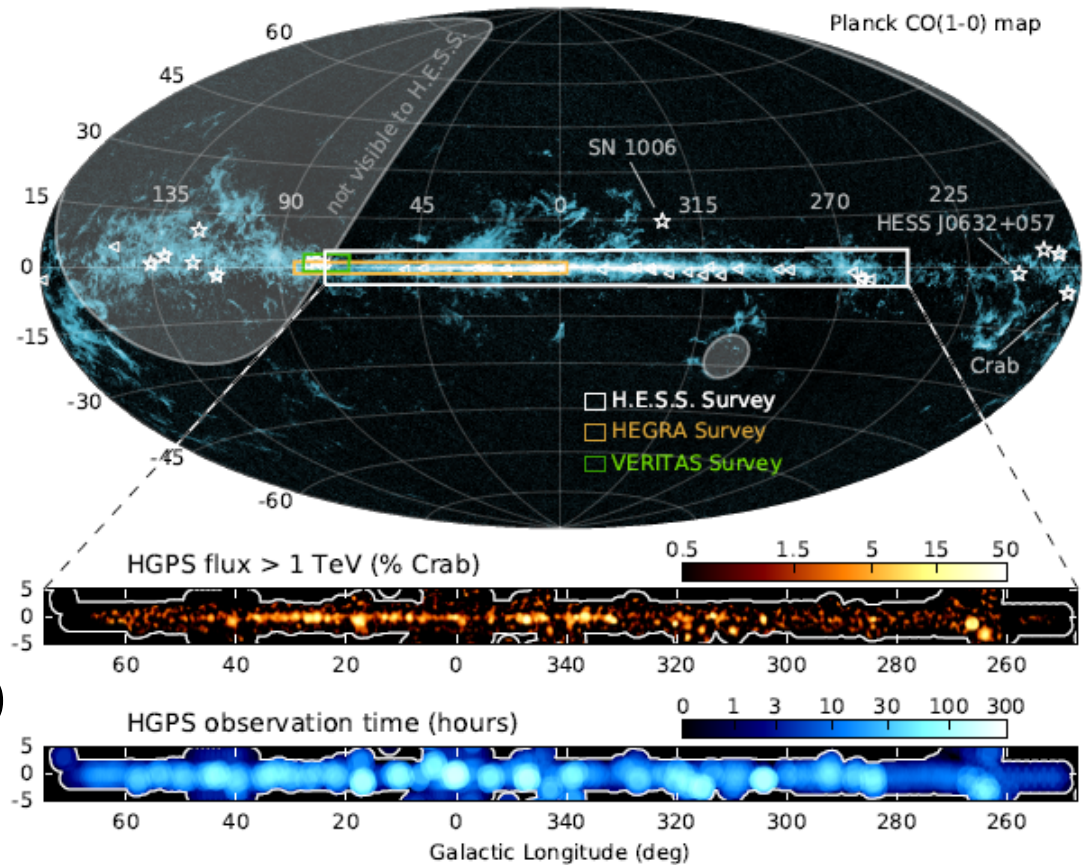
- 2673 heures d'observations (de bonne qualité), années 2004 - 2013.

Exposition inhomogène.

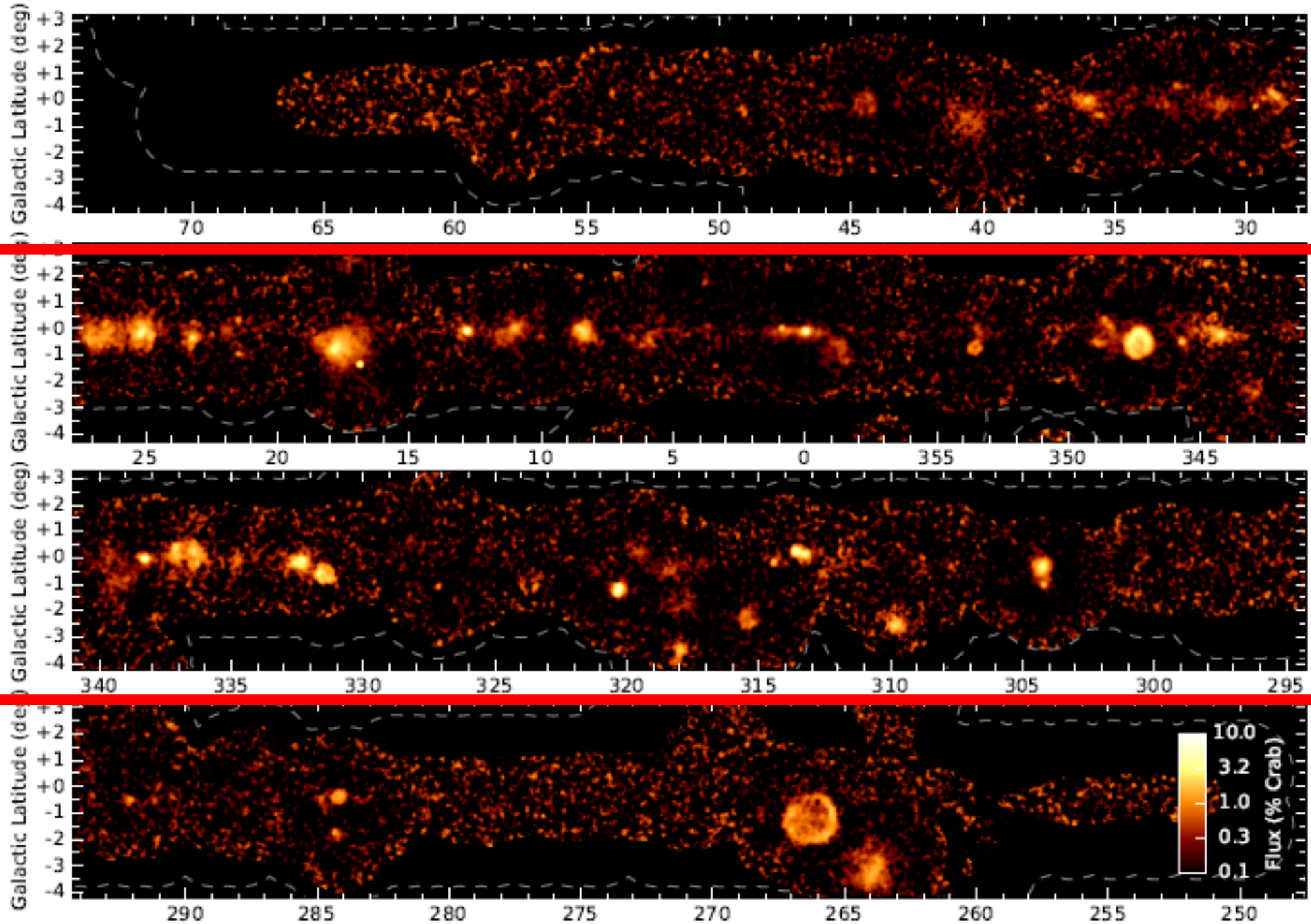
- Couverture du ciel:
 $-110^\circ < l < 65^\circ$ (long. galactique)
 $-3.5^\circ < b < 3.5^\circ$ (lat. galactique)

- Range d'énergie:
 $(0.2 - 100.0)$ TeV

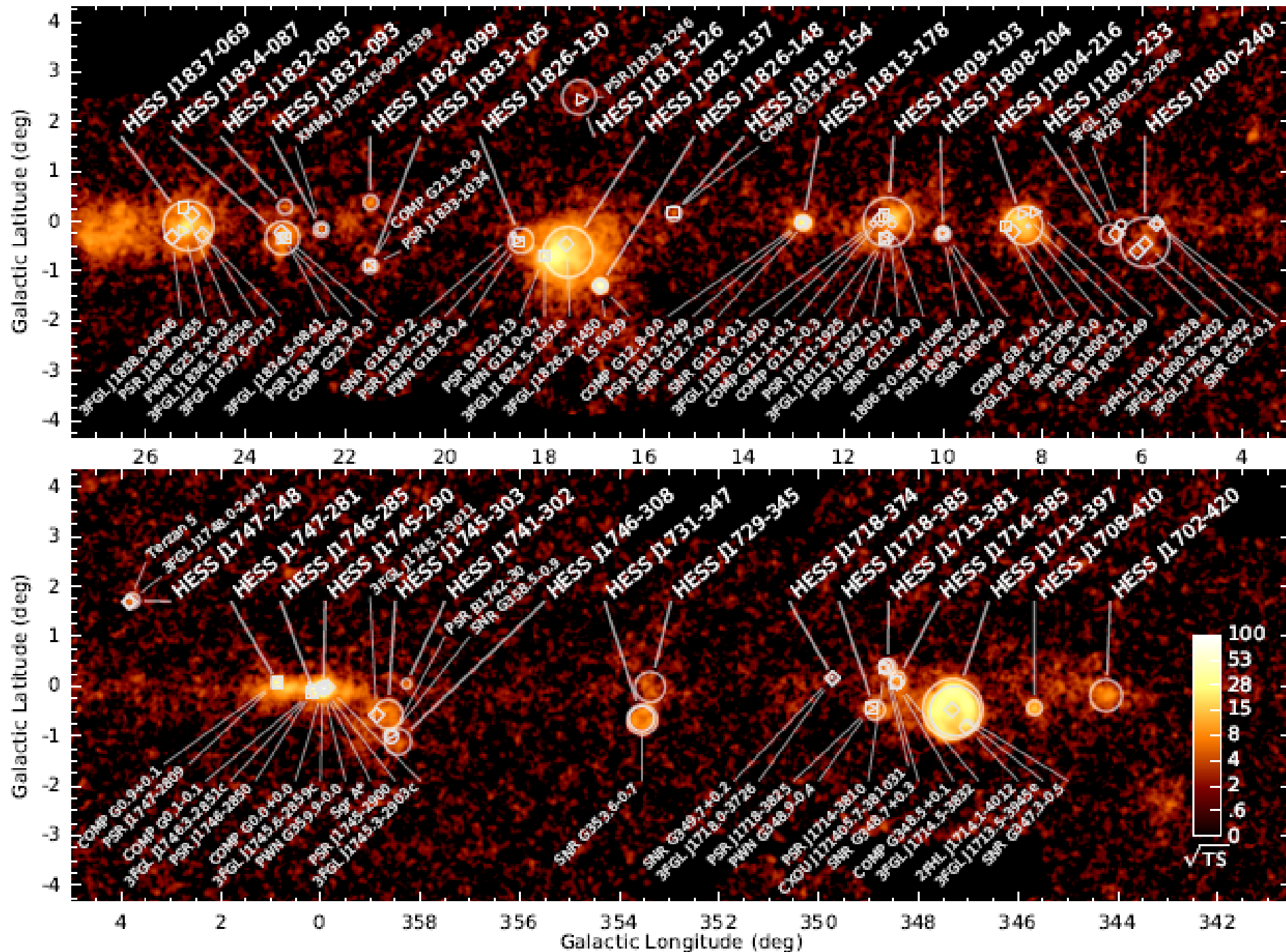
- $R_{68\%} \sim 0.07^\circ$
 (résolution angulaire)



H.E.S.S. Galactic Plane Survey

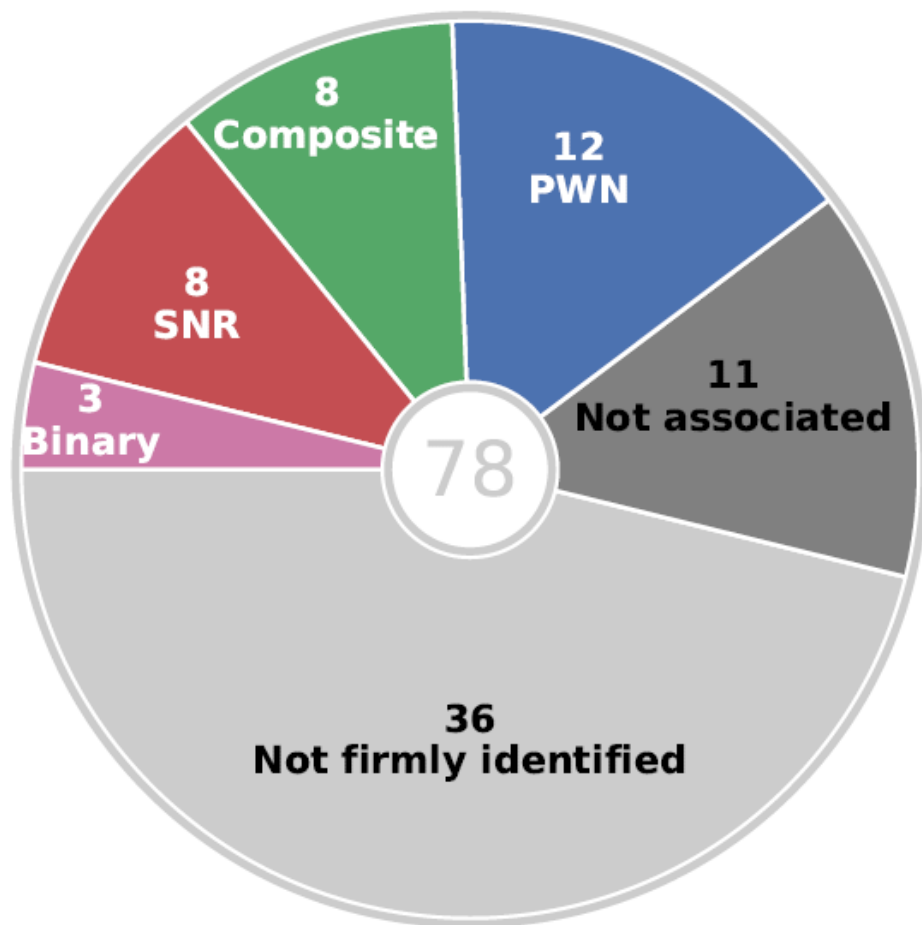


H.E.S.S. Galactic Plane Survey

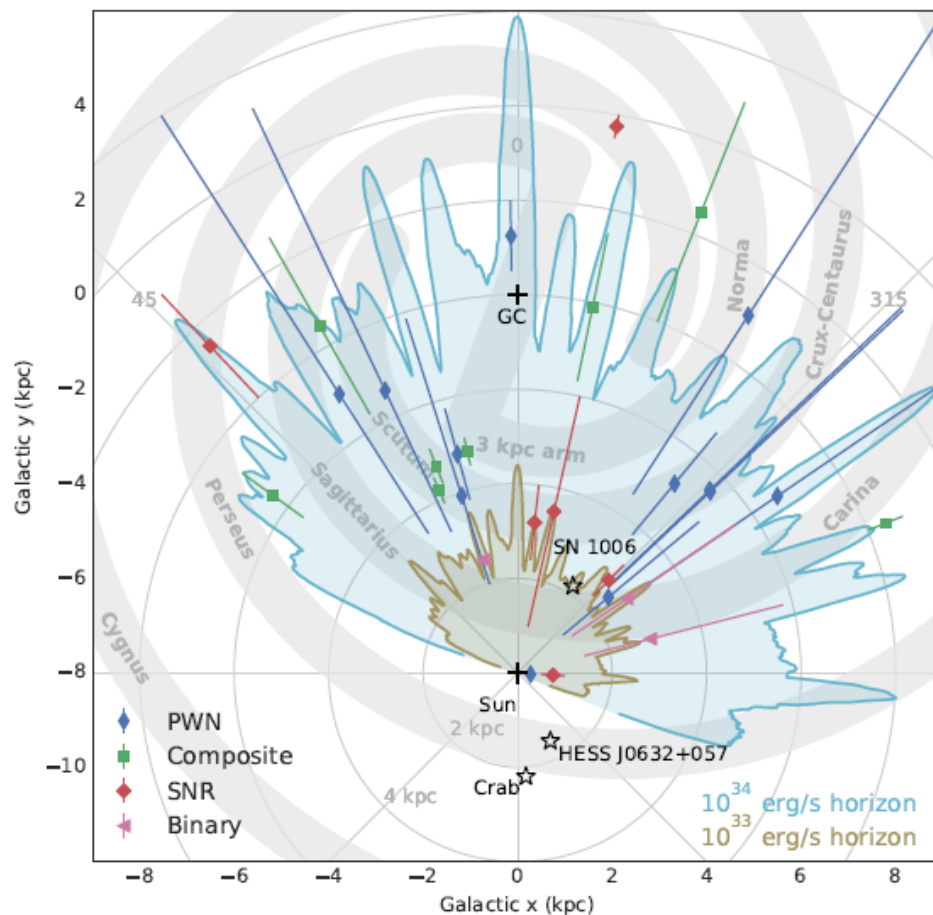


H.E.S.S. Galactic Plane Survey

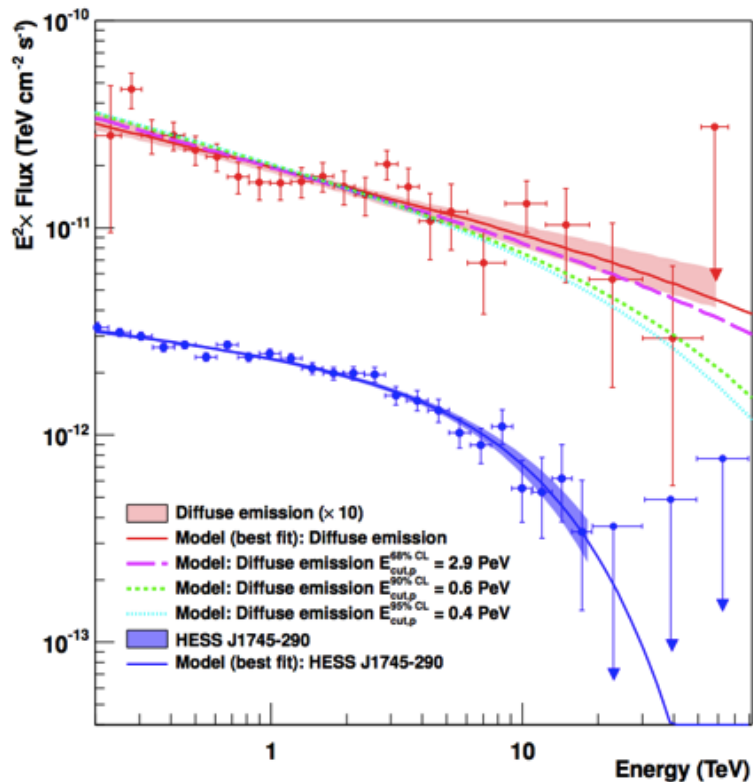
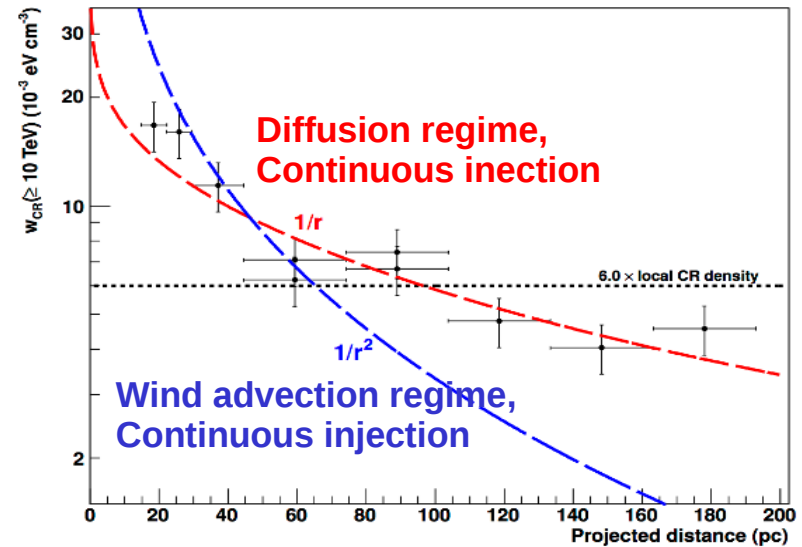
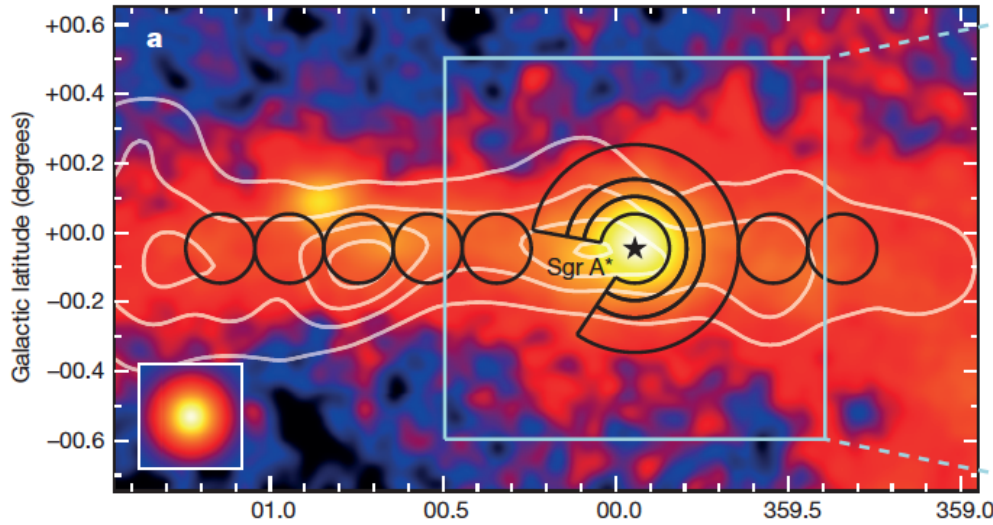
Identification de la source et tableau d'association



L'emplacement de sources H.E.S.S. identifié dans la galaxie



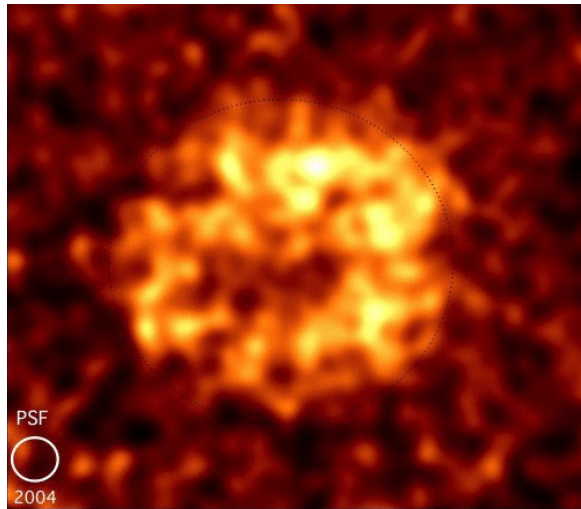
H.E.S.S. Galactic Center PeVatron



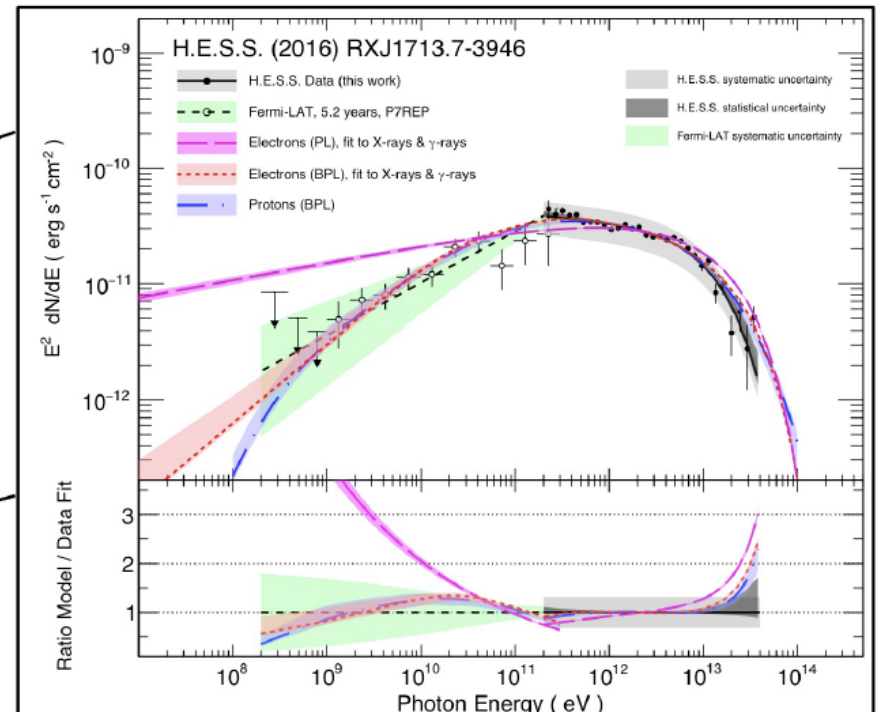
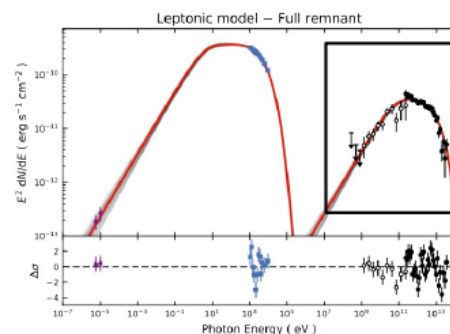
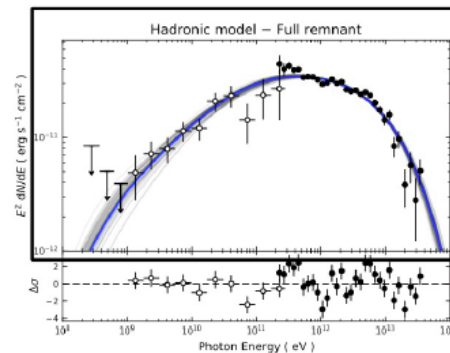
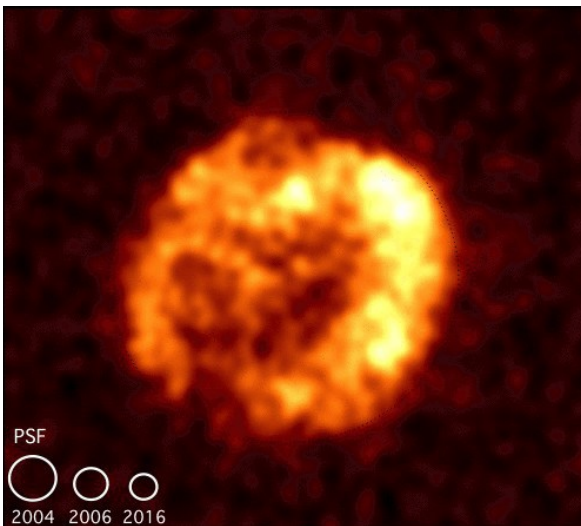
- Source ponctuelle centrale en plus de l'émission étendue (ridge). Source centrale: coupure @ 10 TeV
- Emission diffuse sans coupure > 10 TeV
- Profil d'émission cohérent avec la propagation des protons accéléré autour du trou noir central (Sgr A *) et diffusant (correspondances radiales projetées).
- Population de protons jusqu'à 1 PeV (2.9 PeV @ 68% CL)
- Première détection robuste d'un PeVatron galactique! Accélérateur central situé à moins de 10 pc, mais aucune association claire n'a pu être établie.

SNR RXJ1713.7 – 3946

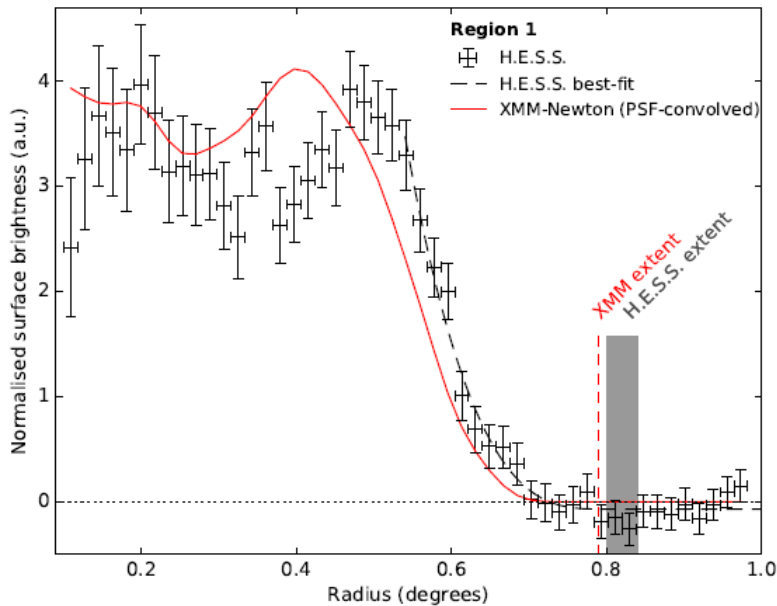
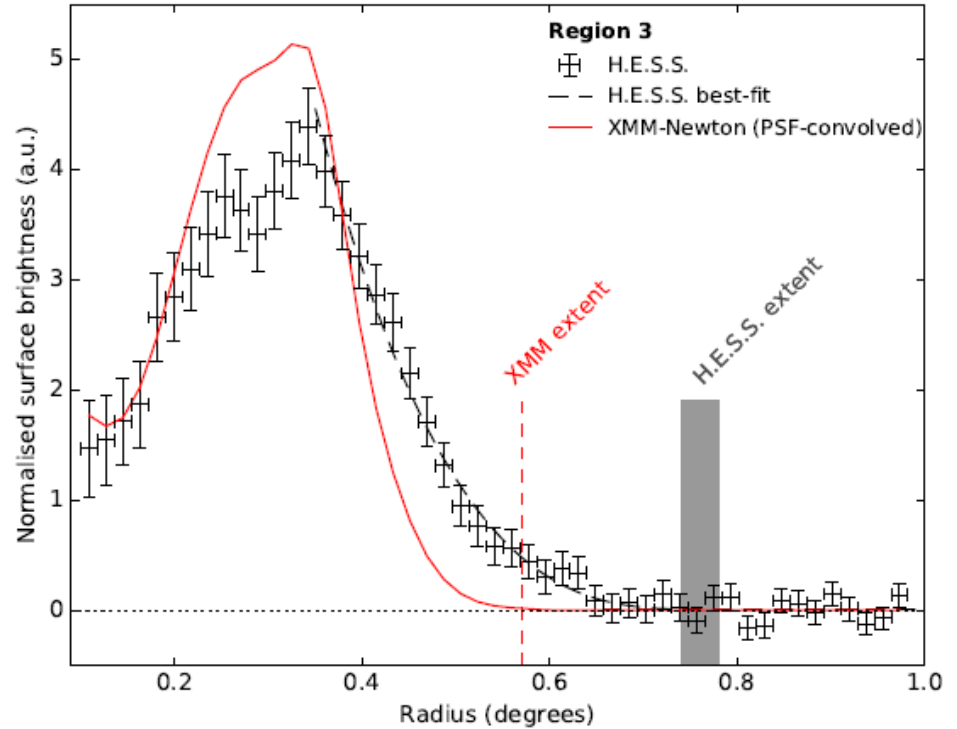
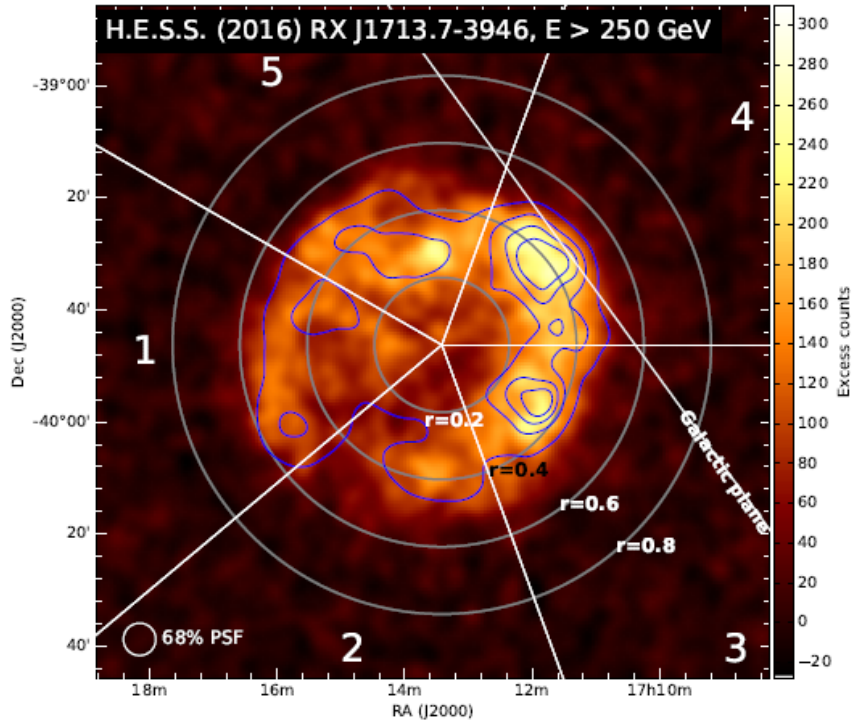
- L'établissement des sources galactiques des CR chargées est l'un des principaux objectifs scientifiques.
- Le paradigme standard est que les jeunes restes de supernova (SNR) sont ces accélérateurs de CR galactiques à haute énergie.
- RXJ1713 est un jeune SNR bien étudié (~ 1600 ans) situé à une distance de ~ 1 kpc.



Improved Point
Spread Function
(PSF)



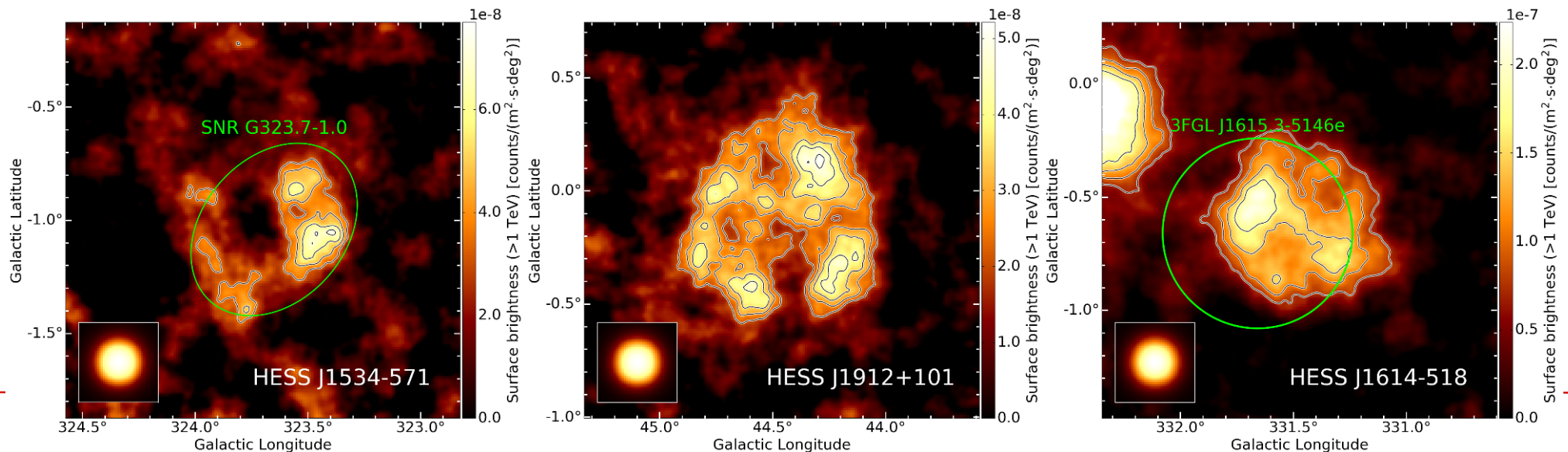
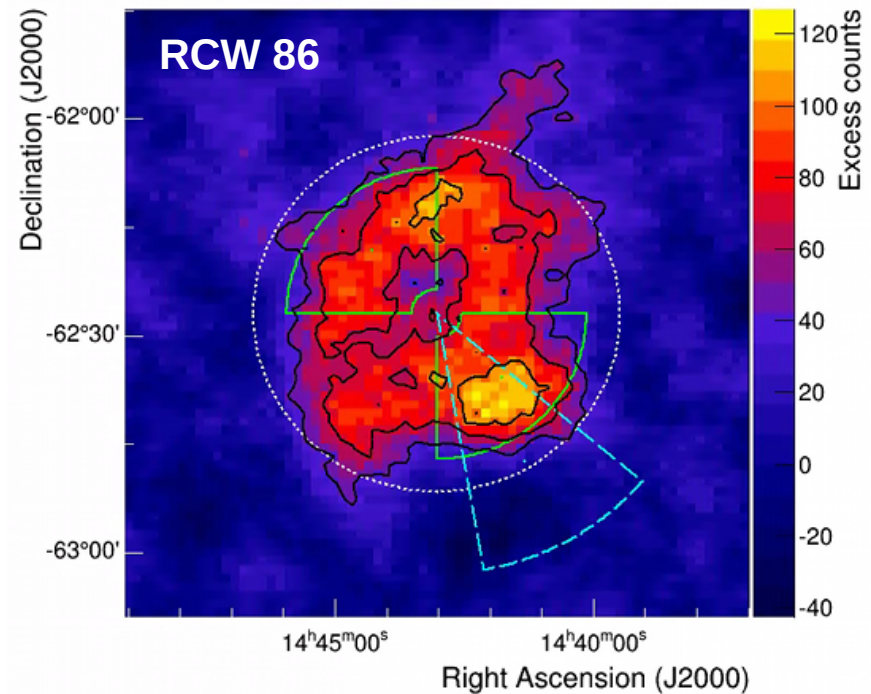
SNR RXJ1713.7 – 3946



- Comparaison des profils radiaux TeV et X-ray. Pas de bonne corrélation.
- Preuve des rayons cosmiques qui s'échappent interagissant avec le milieu interstellaire?
- Les SNR peuvent être des PeVatrons seulement pendant une courte période lorsqu'ils sont jeunes.

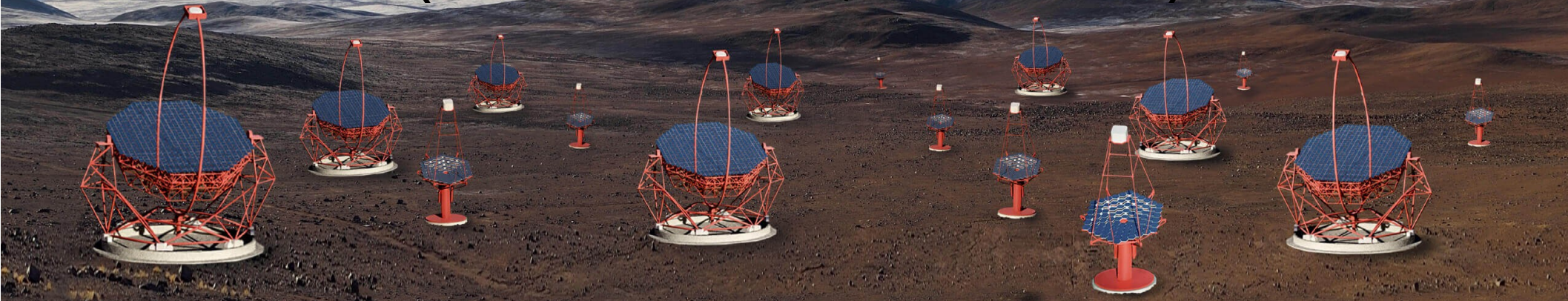
New shell-type SNRs

- Nouveaux shell-SNR résolus par H.E.S.S.
- RCW 86 à partir d'une exposition profonde
 - Bonne corrélation entre TeV et rayons X durs (IC vs synchrotron)
 - Probablement Dominé par processus Leptonique
 - Max energy ~ 3 TeV
- HESS J1534-471, HESS J1614-518 and HESS J1912+101 from HGPS
 - HESS J1912+101 est la seule SNR au TeV sans contrepartie dans autre longueurs d'onde.



Cherenkov Telescope Array

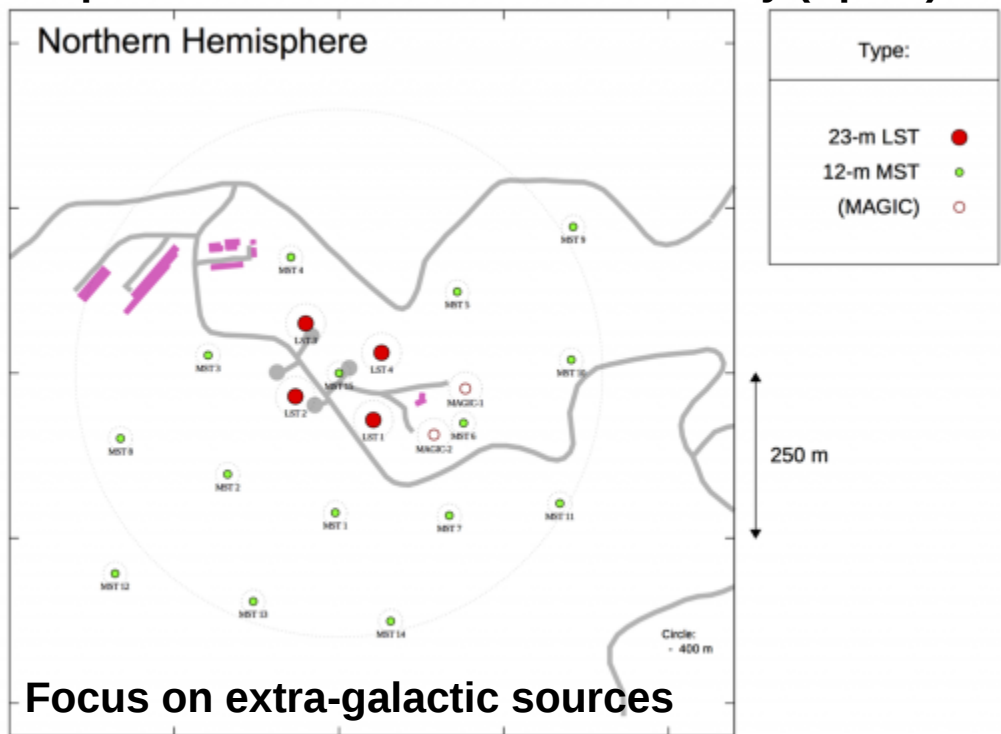
- 10 fois plus sensible que toute expérience existante.
 - Résolution angulaire $< 0,1^\circ$
(pour la plupart de la plage d'énergie)
 - Grand champ de vision $\rightarrow (8^\circ - 10^\circ)$
 - Couverture énergétique $\rightarrow 20 \text{ GeV} - 300 \text{ TeV}$
(ouverture d'une nouvelle fenêtre)
- Rotation rapide (20 s) pour attraper le flares de source transitoire
- Deux sites pour une pleine couverture du ciel
(Site Nord \rightarrow La Palma, Site Sud \rightarrow Chili)



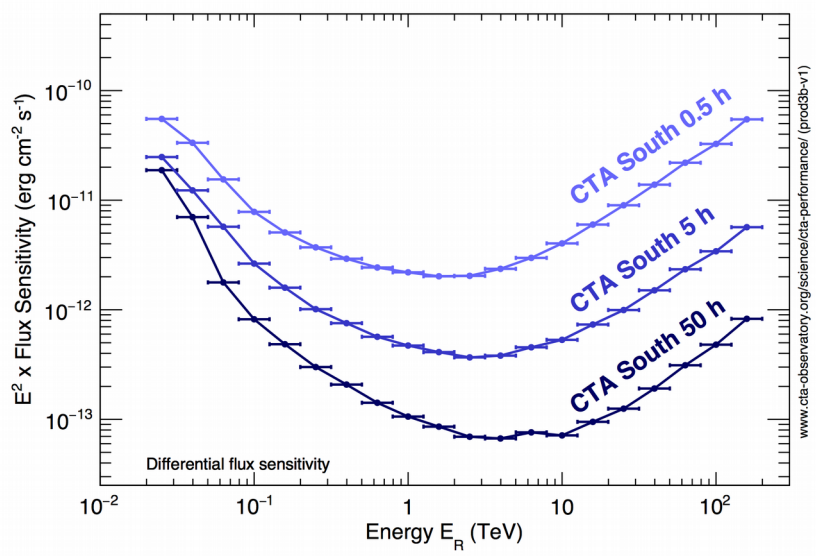
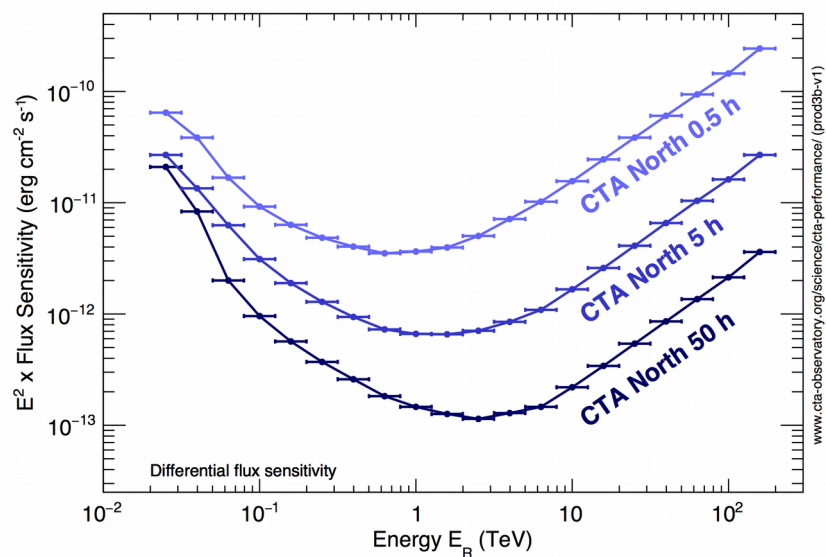
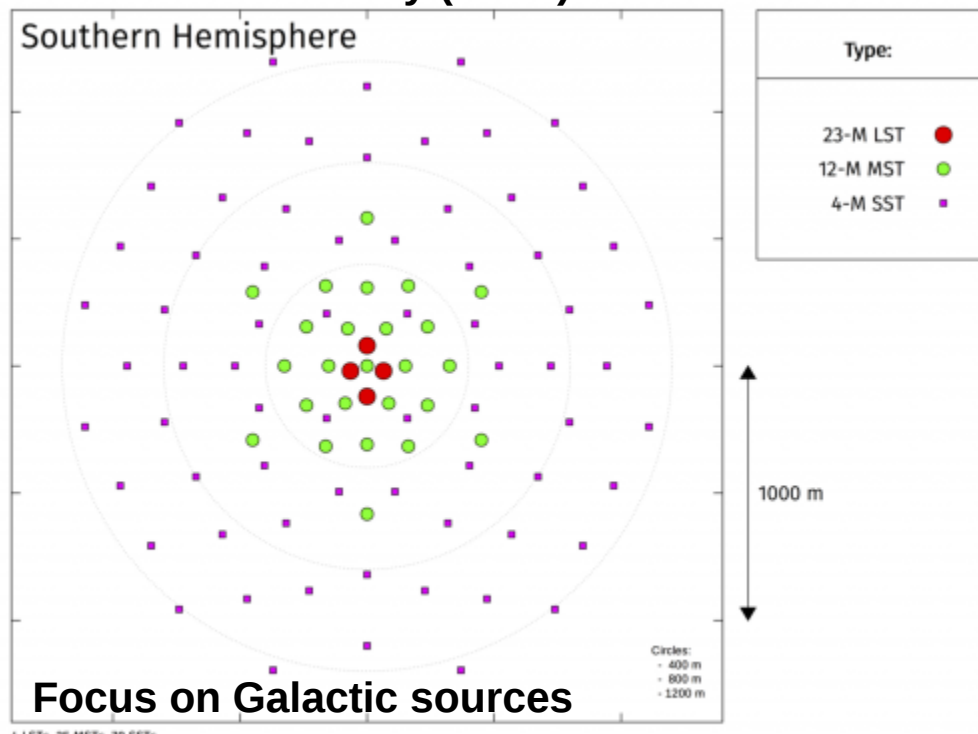
PENSEZ PLUS GRAND !! 100 télescopes

Cherenkov Telescope Array

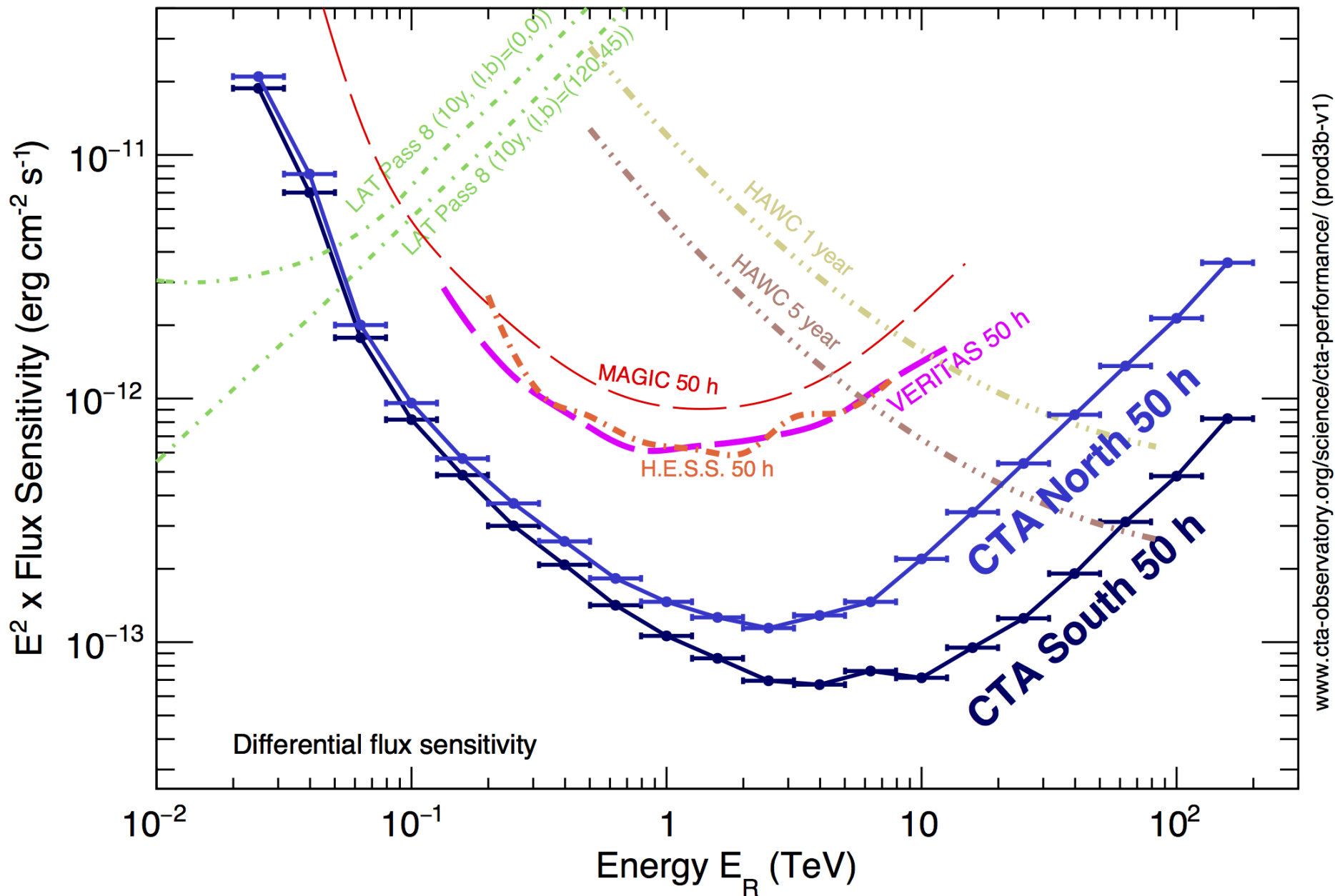
Roque de los Muchachos Observatory (Spain)



Paranal Observatory (Chile)



Cherenkov Telescope Array



Cherenkov Telescope Array

MSTs: Medium energies

$E \sim 1 \text{ TeV} - 10 \text{ TeV}$
12 m diameter

Medium Size
Telescope

SSTs: High energies

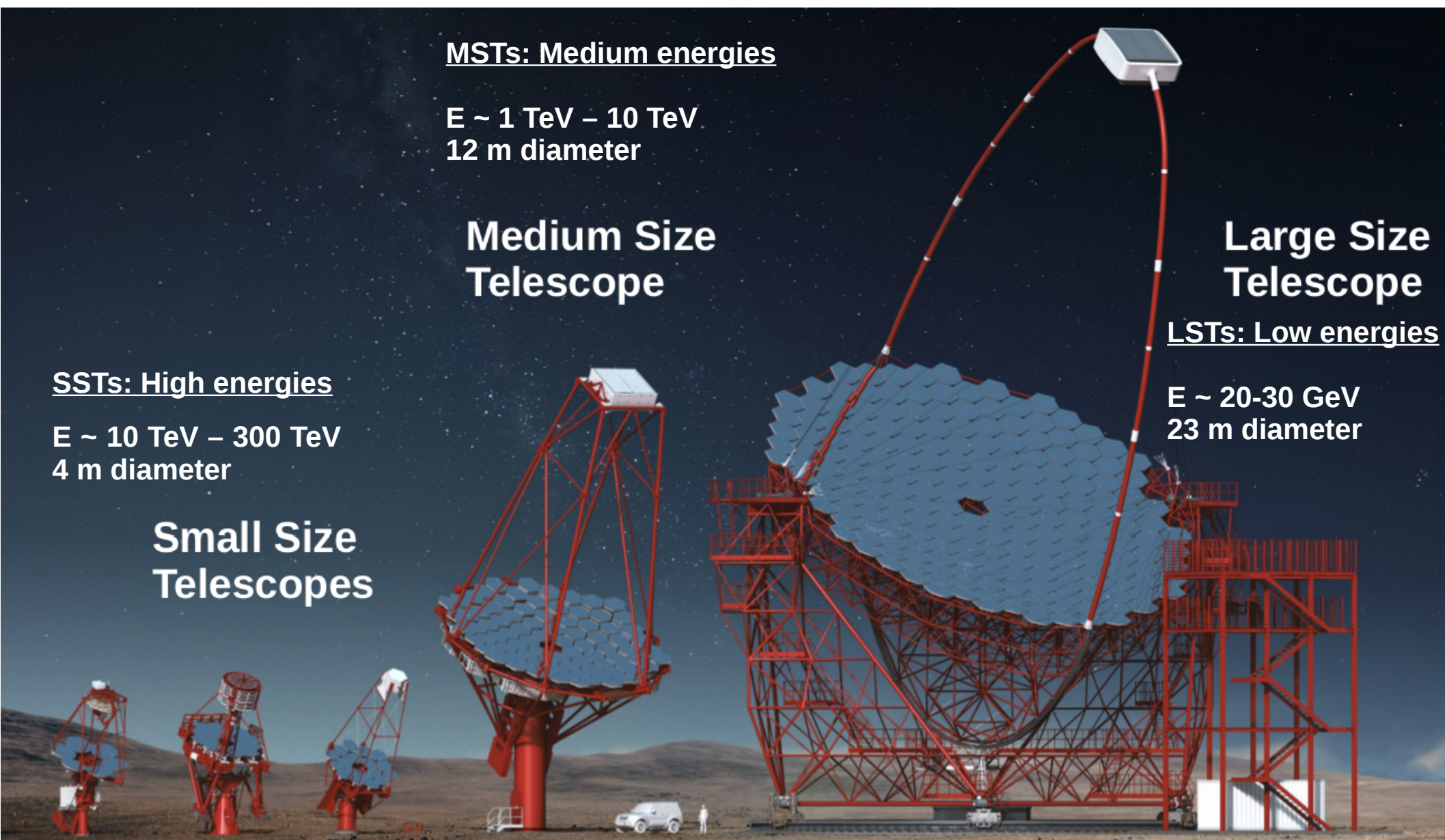
$E \sim 10 \text{ TeV} - 300 \text{ TeV}$
4 m diameter

Small Size
Telescopes

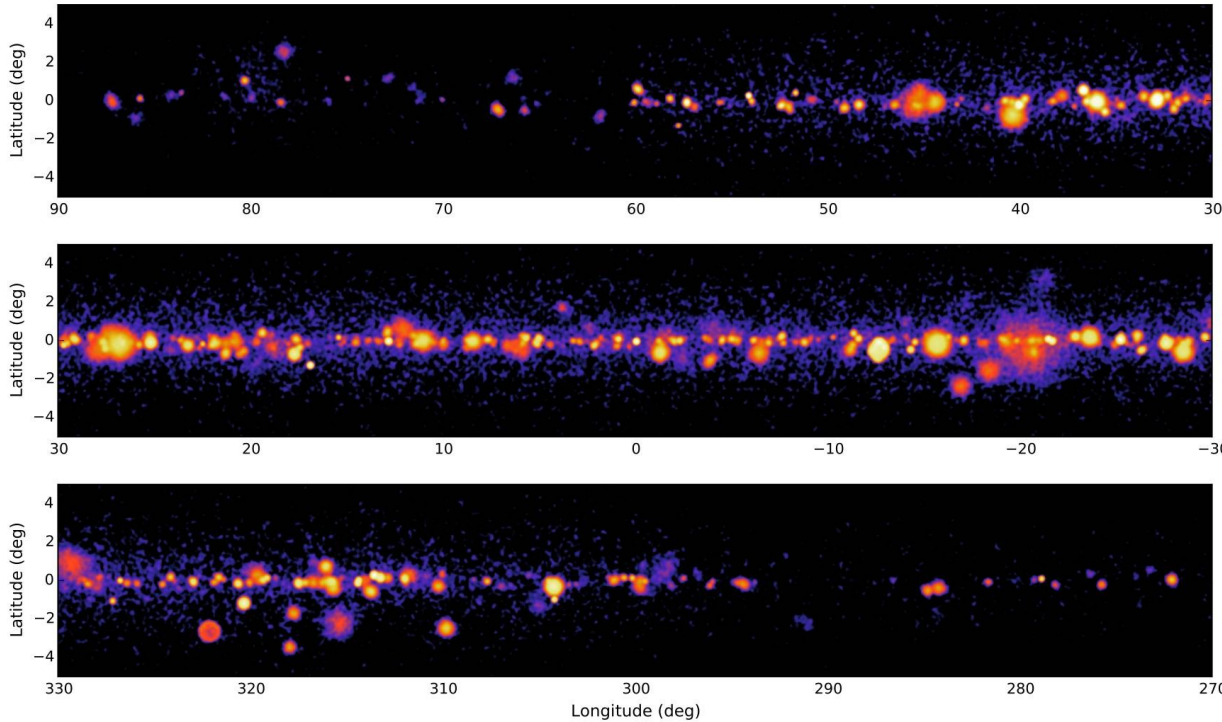
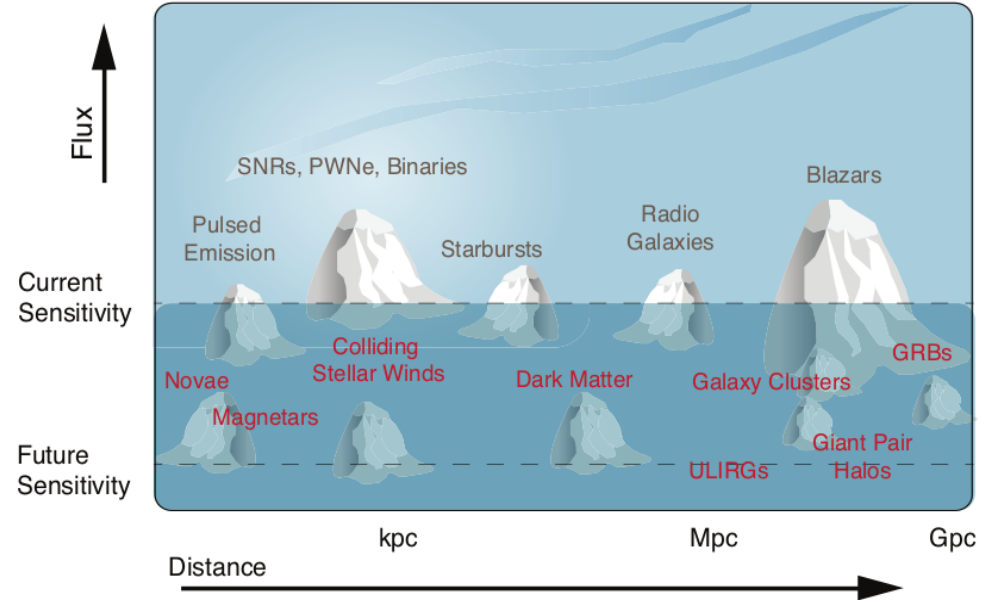
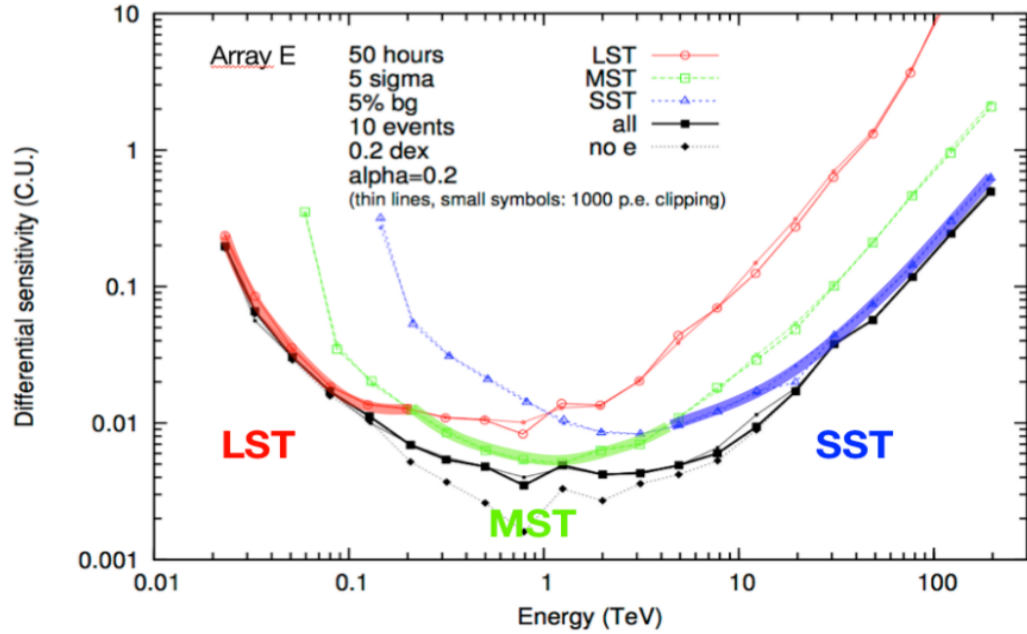
Large Size
Telescope

LSTs: Low energies

$E \sim 20\text{-}30 \text{ GeV}$
23 m diameter



Cherenkov Telescope Array



> 1000 Sources !!!

Activités au CPPM

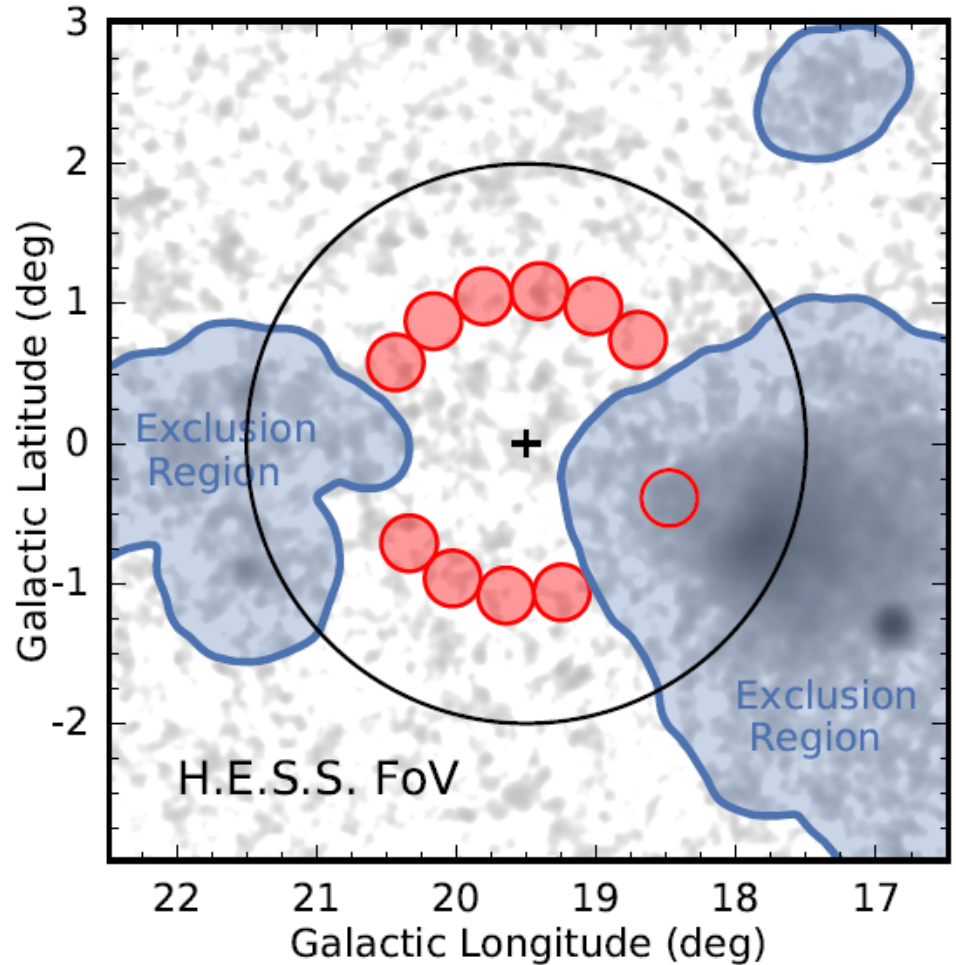
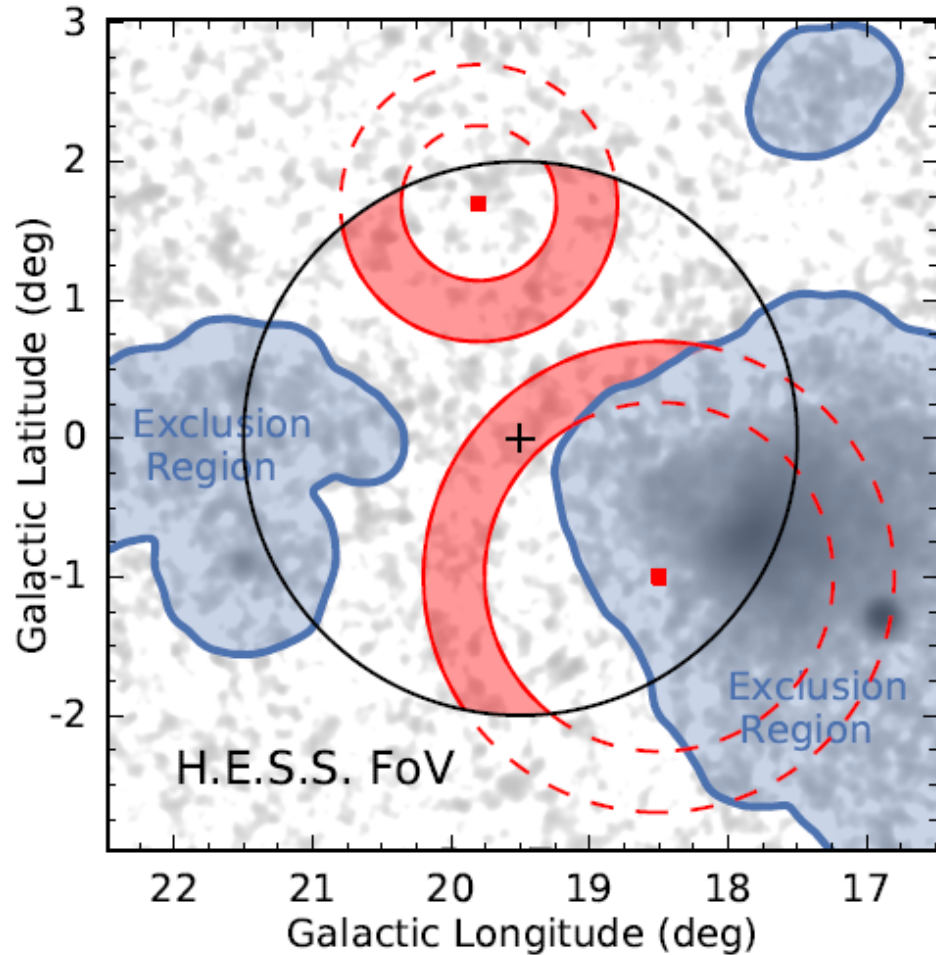
- H.E.S.S. :
 - Analyse des données des sources candidates PeVatron.
 - Recherche des rayons gamma TeV des microquasars (Suivi des alertes d'observation (à partir des données radiographiques et radio)).
- CTA :
 - Recherche de candidats PeVatron dans le futur balayage du plan galactique avec CTA .
 - Simulations Monte Carlo et évaluation des performances CTA.
 - Système d'acquisition de la caméra pour le MST (NectarCam) et LST (LST-CAM).

Perspectives et conclusions

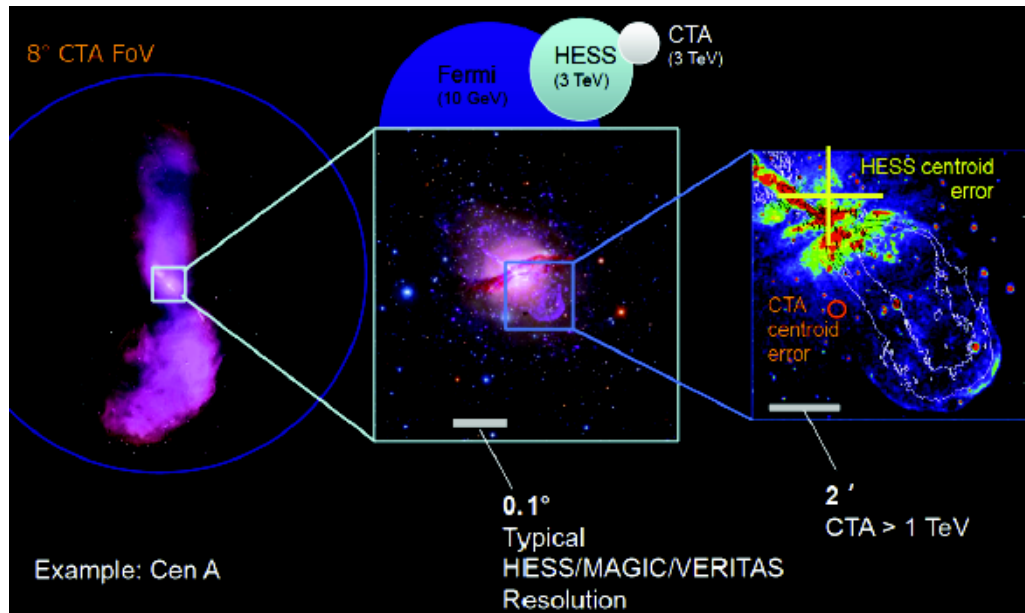
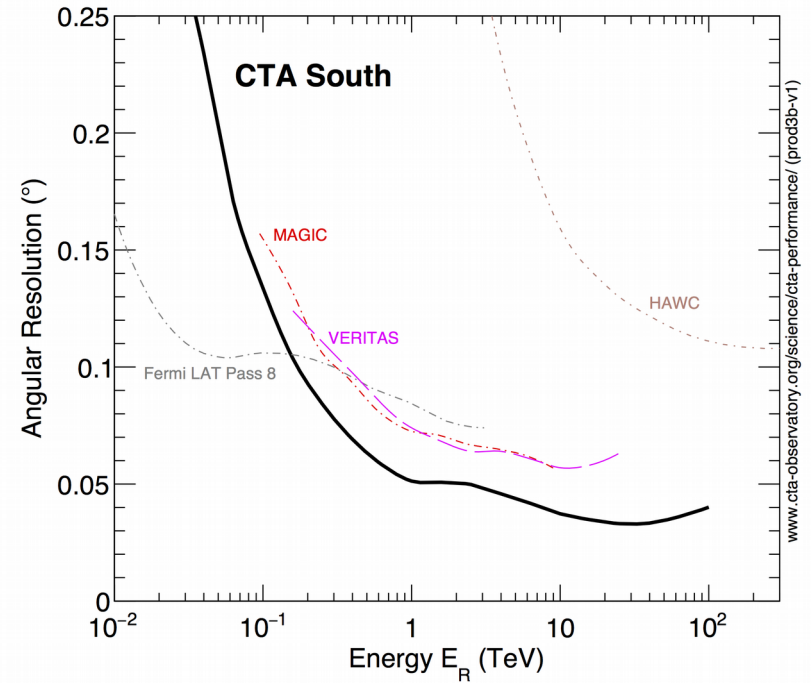
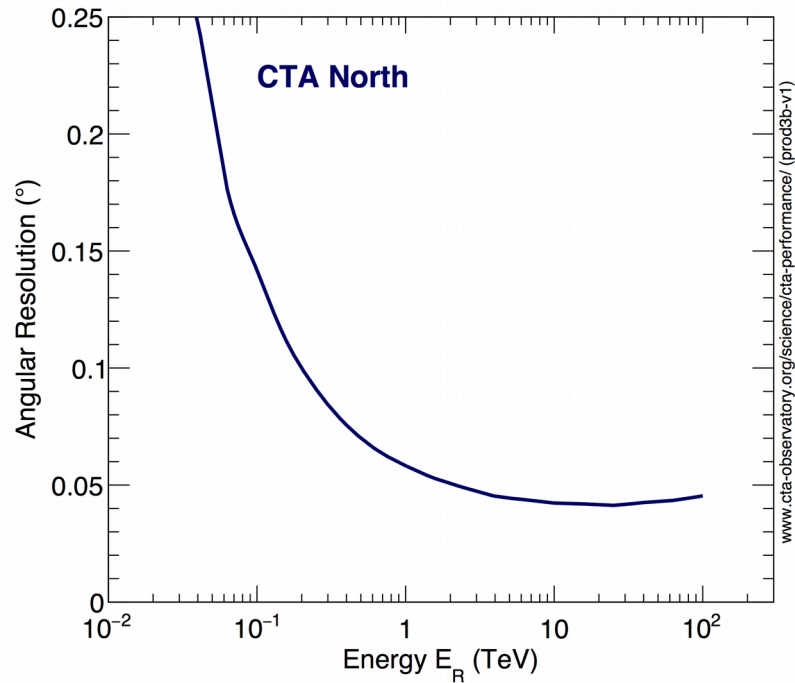
- Grâce à de nombreuses découvertes, l'astronomie gamma VHE est devenue un champ de recherche passionnant.
- Le potentiel scientifique exceptionnel et la puissance de la technique Cherenkov Atmosphérique ont amené au CTA.
- CTA ouvrira de nouvelles fenêtres sur l'Univers avec un potentiel énorme pour de nouvelles découvertes.
- La construction commencera très bientôt!

BACKUP SLIDES

H.E.S.S. Galactic Center PeVatron



Cherenkov Telescope Array



VHE Gamma-ray Production Mechanisms

- Inverse Compton Scattering :

The up-scattering of low energy photons by relativistic e^- (or e^+) to higher energies is called inverse Compton (IC) scattering. It is a very efficient process to increase photon energies up to VHE.

$$E_{\text{boosted}} = \gamma^2 E_{\text{initial}} \quad \text{if} \quad \gamma E_{\text{initial}} \ll m_e c^2$$

Initial Waveband	Initial Frequency (Hz)	Scattered waveband and frequency (Hz)
Radio	10^9	Ultra-Violet, 10^{15}
Far-Infrared	3×10^{12}	X-Rays, 3×10^{16}
Optical	4×10^{14}	Gamma-Rays, 4×10^{20}

Table 2.2: Table of up-scattered photons of different wavebands from an electron population with Lorentz factor of $\gamma = 1000$.

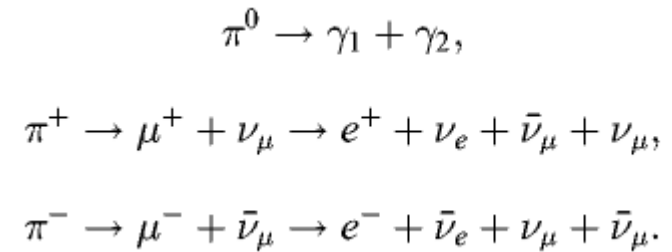
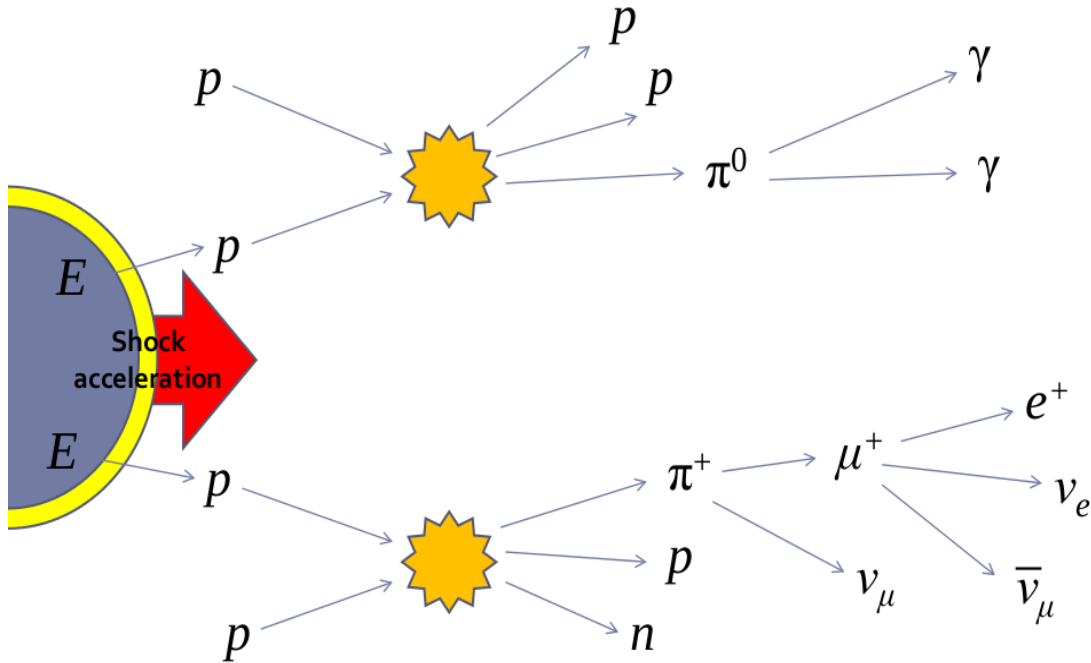
The Thomson regime can be used for 2.7 K CMB photons ($E = 6 \times 10^{-4}$ eV). In this regime, the up-scattered photons follow the spectral shape of the electrons, $\Gamma_\gamma = (\Gamma_e + 1)/2$.

Klein-Nishina regime $\rightarrow \gamma x > 1$ where $x = h\nu / (m_e c^2)$

Electron spectrum in KN regime is harder than in Thomson regime $(\Gamma_{e,\text{KN}} < \Gamma_{e,\text{Thomson}})$

VHE Gamma-ray Production Mechanisms

- Proton-proton Interactions and π^0 Decay

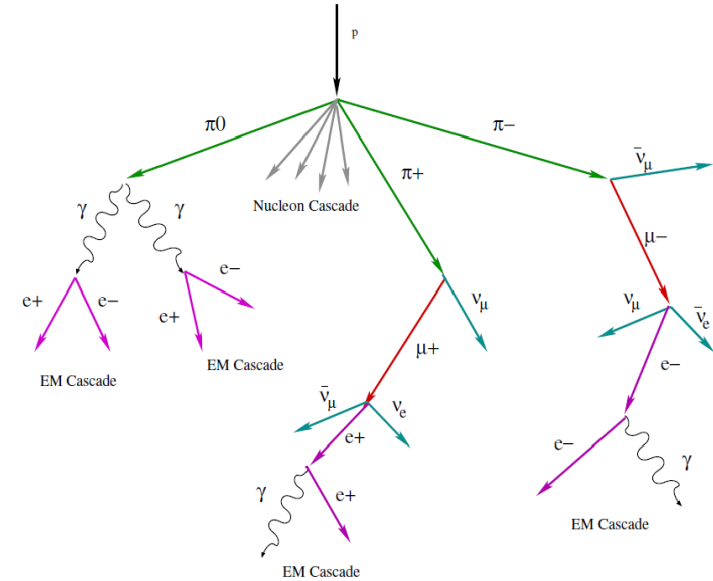
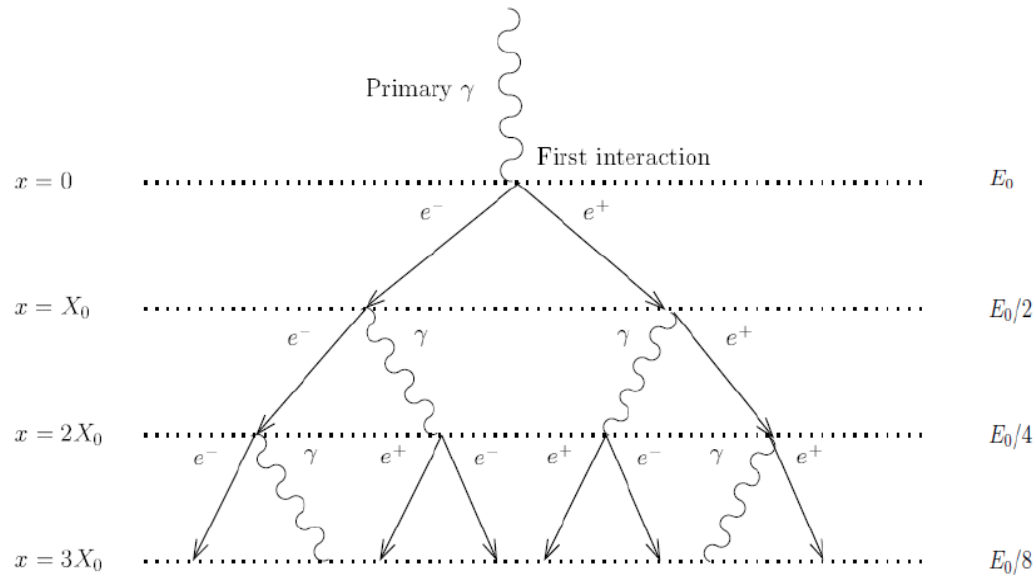


In hadronic interactions, π^0 decay is the most effective gamma-ray production channel.

The spectrum of gamma-rays from π^0 decays follows approximately the spectrum of the parent protons, $\Gamma_\gamma = 4/3(\Gamma_p - 1/2)$. So, gamma-rays carry direct information about the spectrum of progenitor particles (important for investigating the origin of Galactic cosmic-rays).

Expected neutrino flux will be relatively smaller when compared to observed gamma-ray flux.

Air Showers and Cherenkov Radiation



- Electromagnetic showers:

VHE photon enters the atmosphere, it interacts with an atmospheric nucleus resulting in a pair production. e^+ and e^- are deflected by air molecules and emit bremsstrahlung radiation.

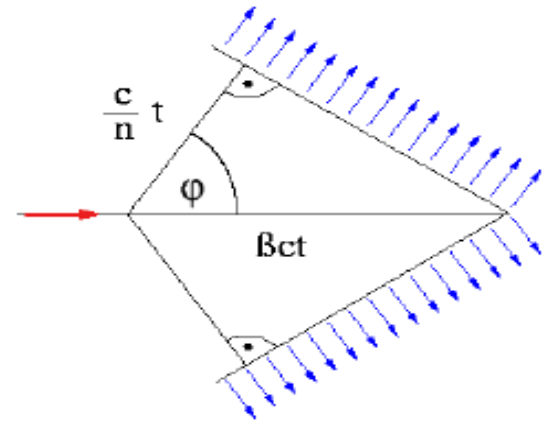
- Hadronic showers :

Hadrons interact nearly only via strong interaction with the atmospheric nuclei, resulting in the production of secondaries, mainly mesons, but also nucleons (neutrons, protons)

- Cherenkov radiation is emitted when a charged particle passes through a dielectric medium at a speed faster than the speed of light in that medium.

$$\cos(\varphi) = \frac{1}{\beta n(\lambda)}$$

$$N(\nu)d\nu = 4\pi^2 \frac{(Zq)^2}{hc^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right) d\nu$$



HESS J1741-302



260 pc

MC 2

11.2 kpc

MC 6

8.4 kpc

MC 5

7.7 kpc

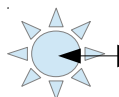
MC 4

7.5 kpc

MC 3

6.7 kpc

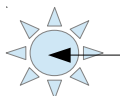
PSR J1741-3016



9 pc

5.0 kpc

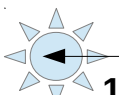
PSR J1739-3023



21 pc

3.4 kpc

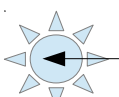
PSR B1737-30
(Dist 3.3 kpc)



11 pc

3.3 kpc

PSR B1737-30
(Dist 0.4 kpc)



1 pc

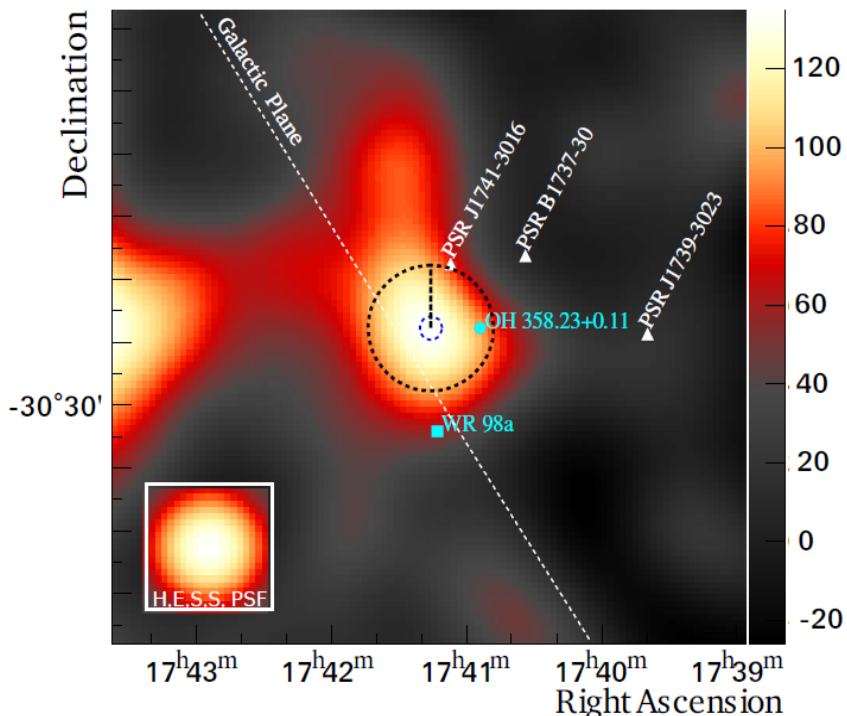
0.4 kpc



Sun

Pulsar Properties

Pulsar Name	R.A.	Dec.	τ_c	\dot{E}	Distance	\dot{E}/d^2	Offset
PSR	hh:mm:ss	dd:mm:ss	kyr	erg s ⁻¹	kpc	erg s ⁻¹ kpc ²	Degree
J1741-3016	17:41:06.96	-30:16:30.0	3340	5.2×10^{31}	5.02	2.06×10^{30}	0.1
B1737-30	17:40:33.84	-30:15:43.2	20.6	8.2×10^{34}	0.4	5.1×10^{35}	0.19
J1739-3023	17:39:39.80	-30:23:12.0	159	3.0×10^{35}	3.41	7.6×10^{33}	0.35
					3.28	2.6×10^{34}	



OH/IR star OH 358.23+0.11
(Distance = 0.4 - 4.0 kpc)

Wolf-Rayet (WR) binary WR 98a
(Distance 1.6 kpc)

No nearby or spatially coincident SNR