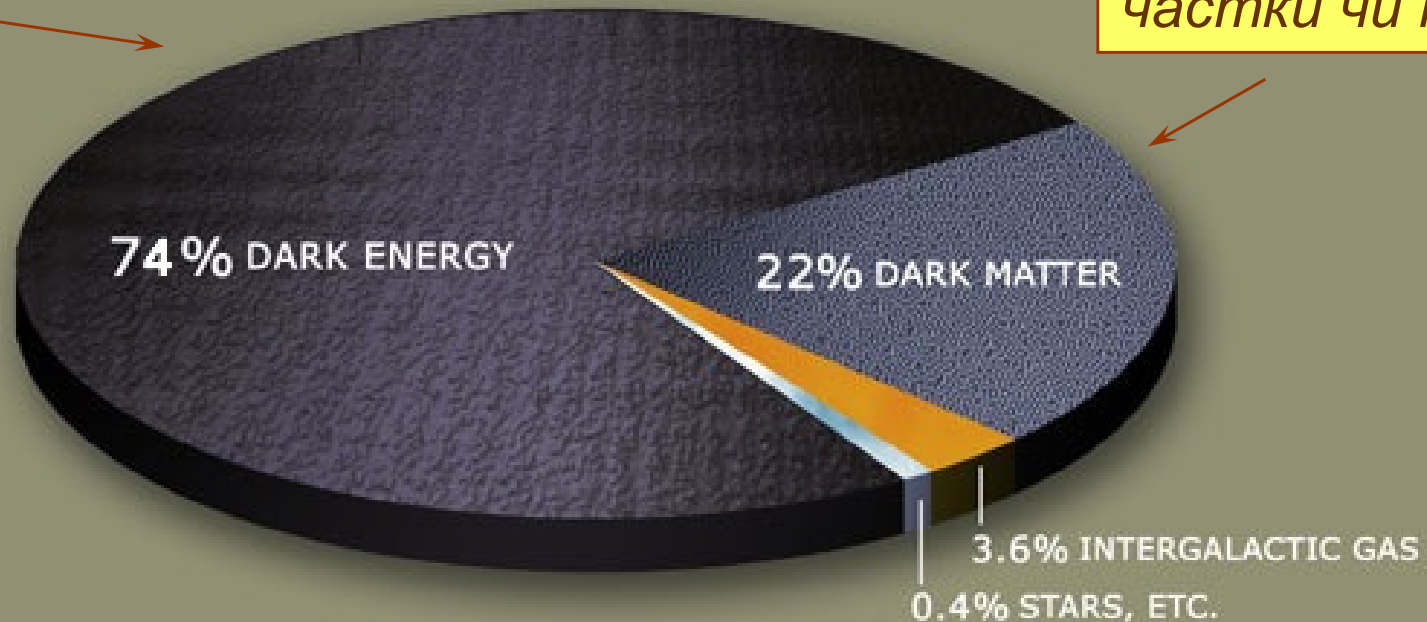


# Астрономія: розширення горизонтів



# Склад Всесвіту

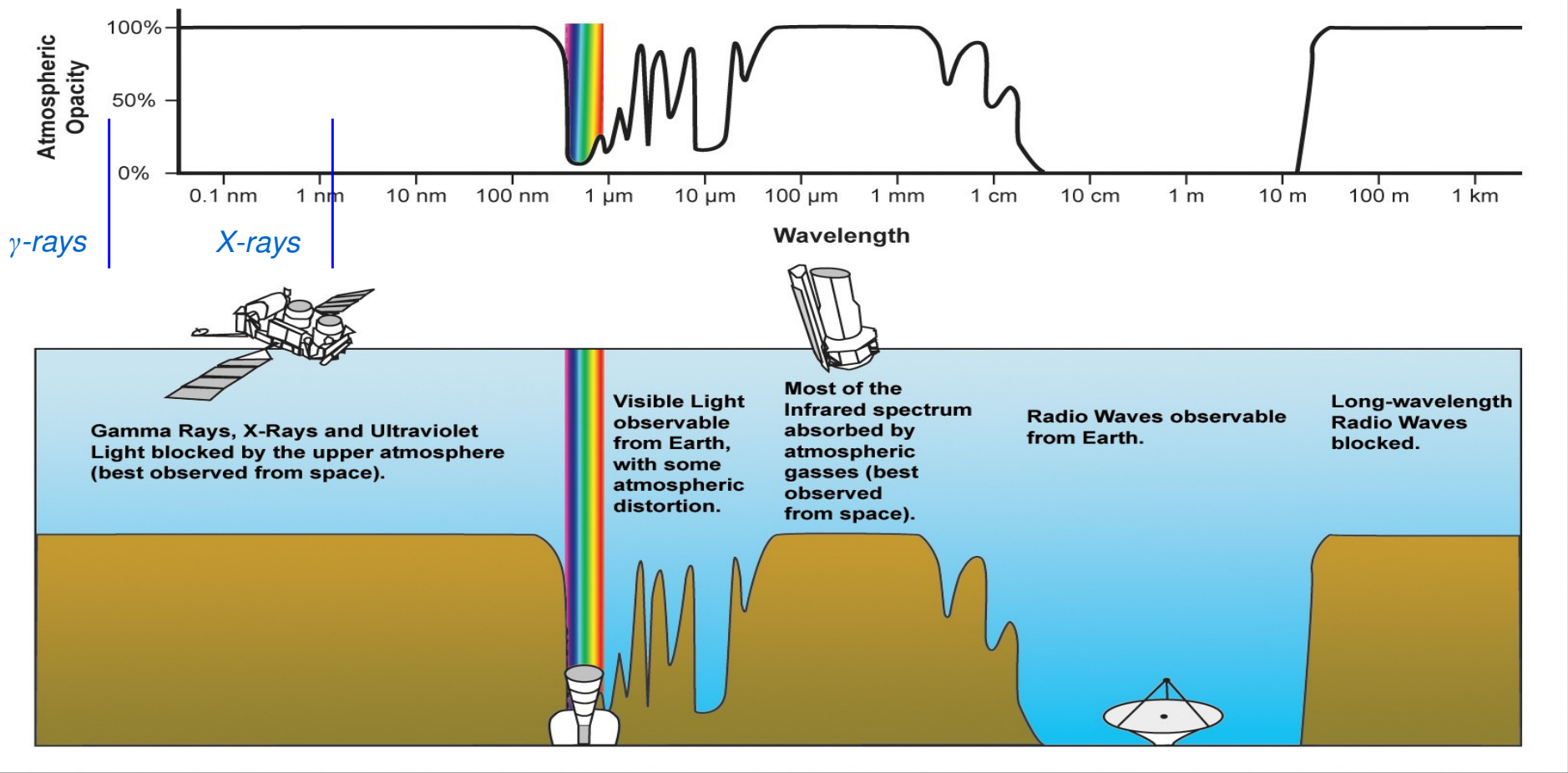
- постійна "космологічна стала"
- змінна "квінтесенція"



частки чи поля

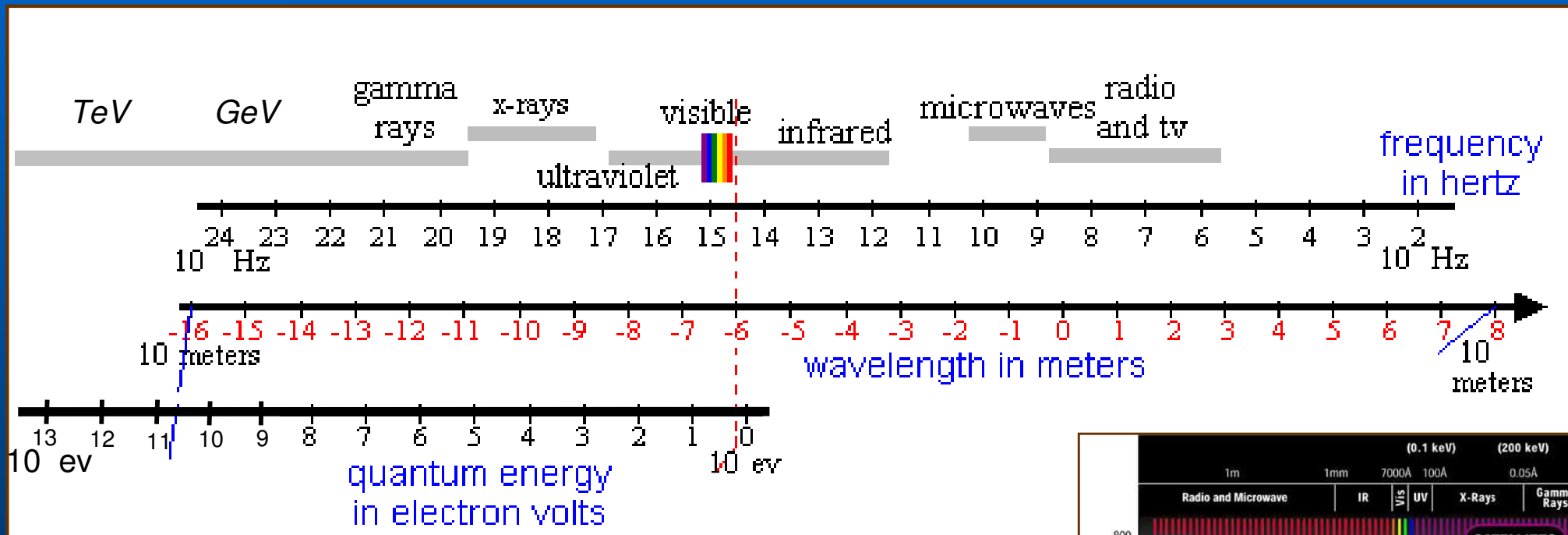
спостережувана речовина

# Погляд у Всесвіт з різних діапазонів

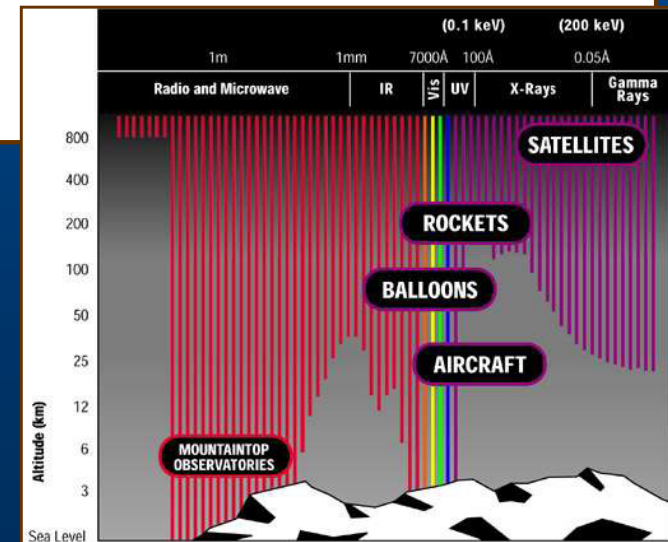


Чи знало б людство про космос, якби наші очі бачили б у діапазоні, в якому атмосфера не є прозорою?

# Діапазони спостережень



видимий діапазон  
(400-700 нм)  
складає 1/50  
діапазону, в якому  
зараз ведуться  
спостереження





Астрономія це перш за все спостереження, тому нові можливості спостережень дають значний поштовх цій науці.

Можливості – це нові “очі” та нові “вікна”.

# Розвиток всіхвильових спостережень

1609 винахід та застосування телескопу

(ІЧ) 1800 Інфрочервоні промені від Сонця (В.Гершель)  
1860-ті Максвелл, Тесла: небесні об'єкти повинні випромінювати в усіх ел.-м. діапазонах

1900  
(КП) 1912 1912 відкриття космічних променів (В.Гесс)

(радіо) 1930 1930-ті радіохвилі від областей Галактики

(рmap) 1942 1942 перша радіокарта неба

(УФ) 1946 1946 УФ випромінювання Сонця (ракета)

(X) 1949 1949 Х-промені від Сонця (ракета)

(γ) 1961 1961 детектування гамма-фону (супутник)

(Xmap) 1970 1970-ті перша карта об'єкту в Х-променях (Einstein)  
1990-ті перша карта неба в Х-променях (ROSAT)

1961 детектування гамма-фону (супутник)

1963 перший черенковський телескоп

1976 перше джерело гамма-променів (супутник)

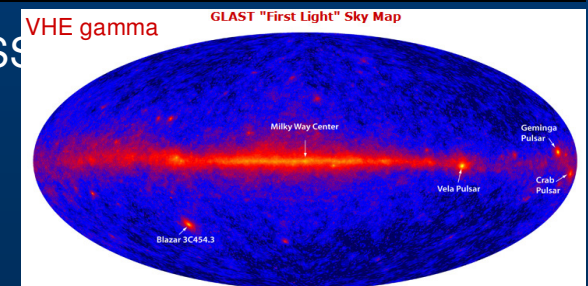
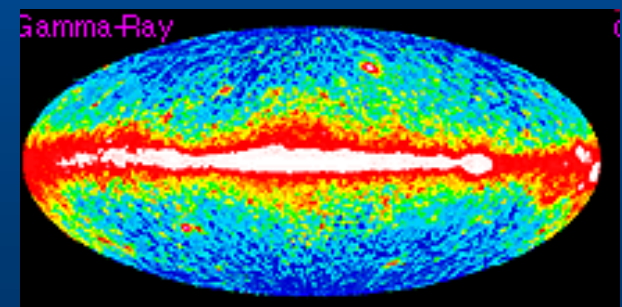
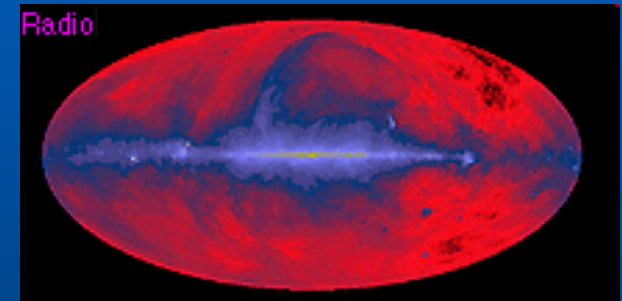
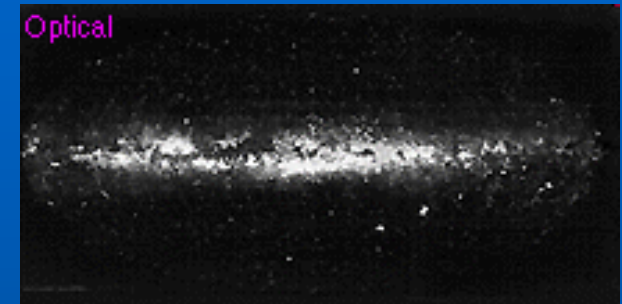
2004 перша карта неба і об'єкта в гамма-діапазоні (HESS)

2008 Телескоп ФЕРМІ (останнє “вікно”)

2000

(γmap) 2004

2008



Найбільш вражаючі відкриття та досягнення – в останнє десятиліття, коли “відкрилися” X та γ

# Астрофізика високих енергій

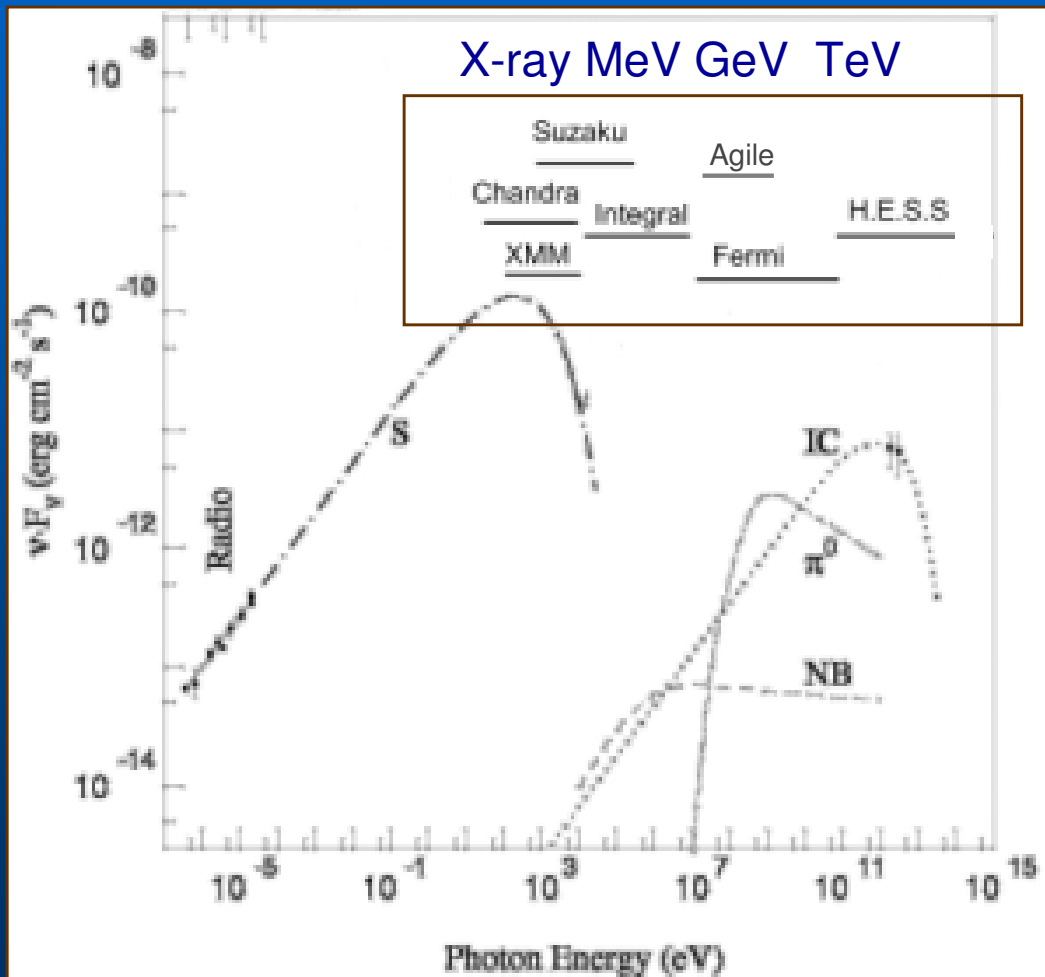
Вивчає високоенергетичні процеси у Всесвіті

*шляхом спостереження  
високоенергетичного випромінювання  
(рентгенівський та гама-діапазони)*

або

*випромінювання від високоенергетичних часток  
(переважно космічних променів)*

# АВЕ: Сучасні експерименти



0.08 – 10 keV	Chandra
0.15 – 15 keV	XMM Newton
0.2 – 600 keV	Suzaku
5 – 80 keV	NuSTAR

20keV – 10 MeV	Integral
30 MeV-50 GeV	Agile
20 MeV – 300 GeV	Fermi
100GeV – 10 Tev	H.E.S.S. MAGIC VERITAS



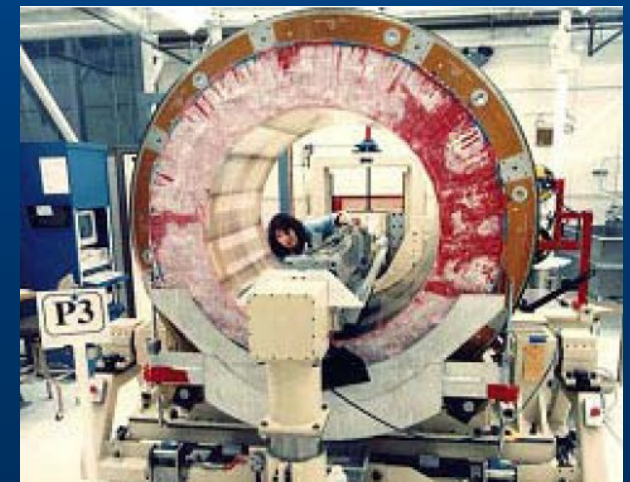
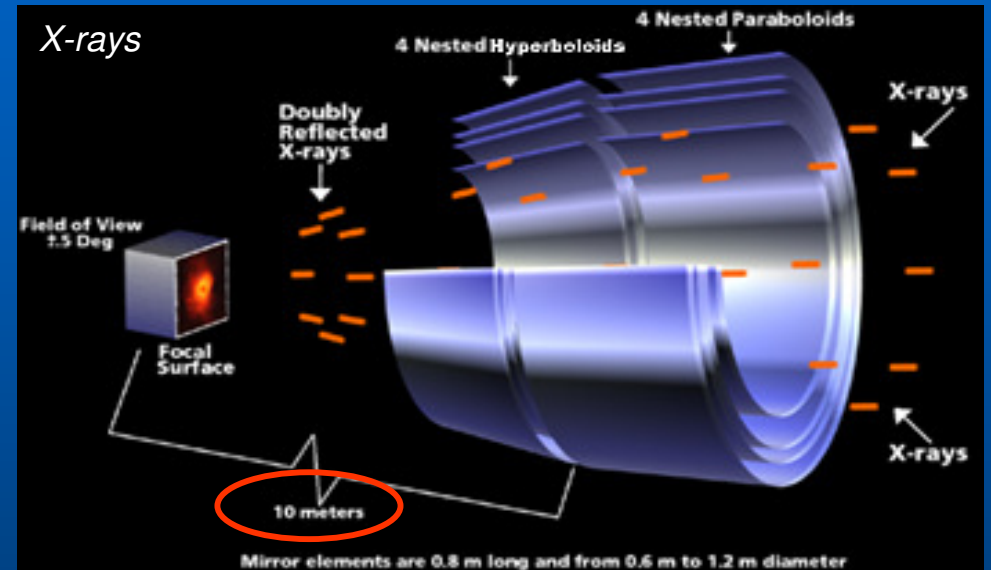
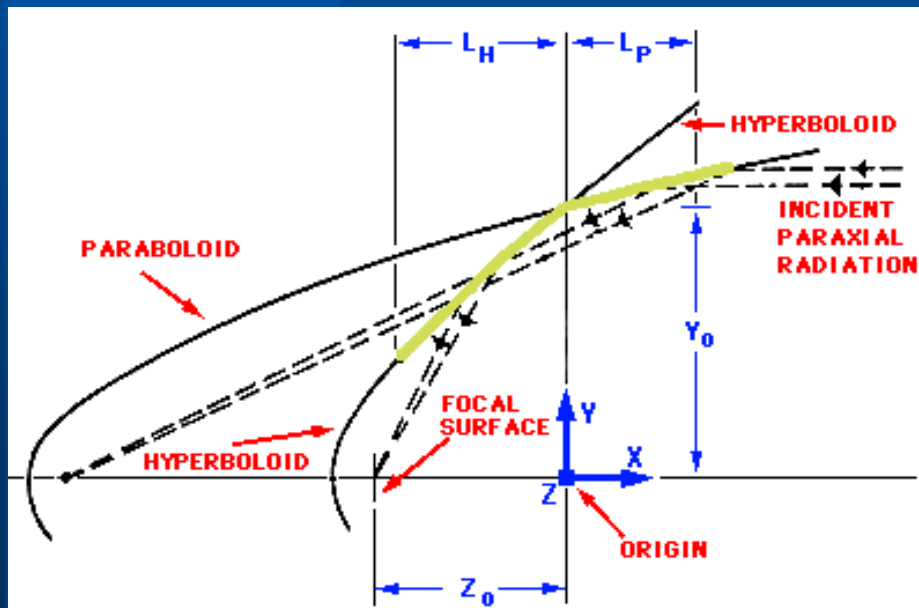
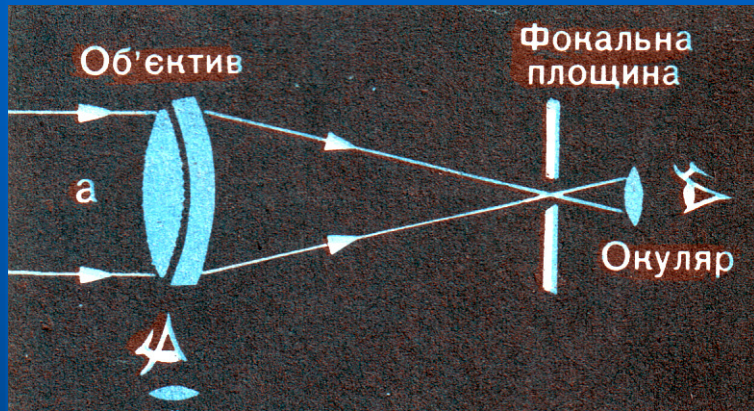
# Рентгенівська астрономія

$$h\nu \sim 0.1-10 \text{ кеВ}$$

$$\nu \sim 10^{17}-10^{19} \text{ Гц}$$

$$\lambda \sim 10^{-9}-10^{-11} \text{ м} \sim 1 \text{ А}$$

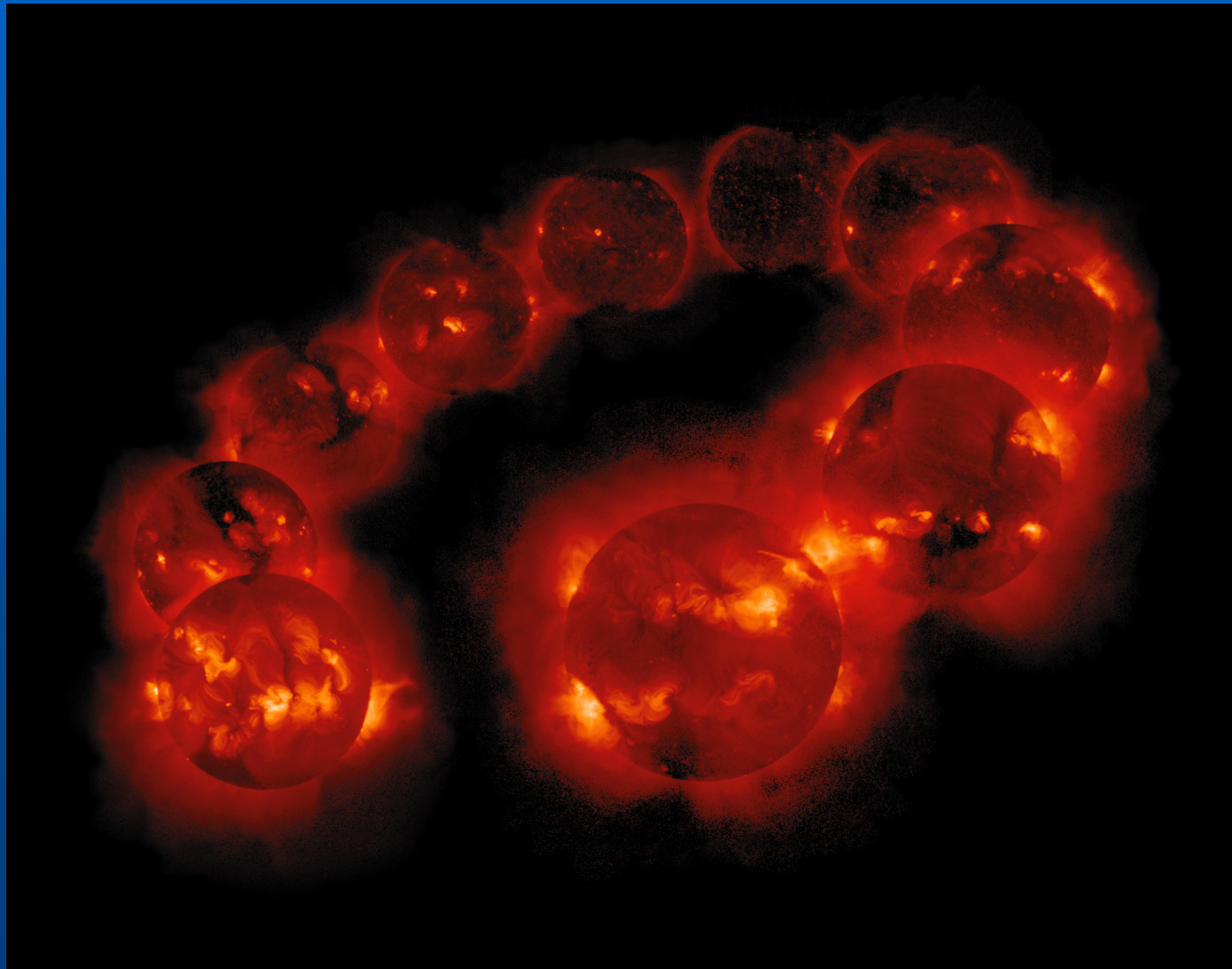
# Принцип фокусування X-променів





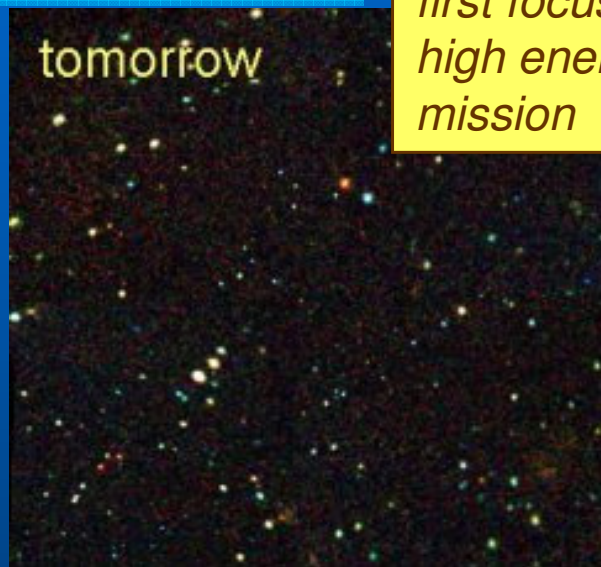
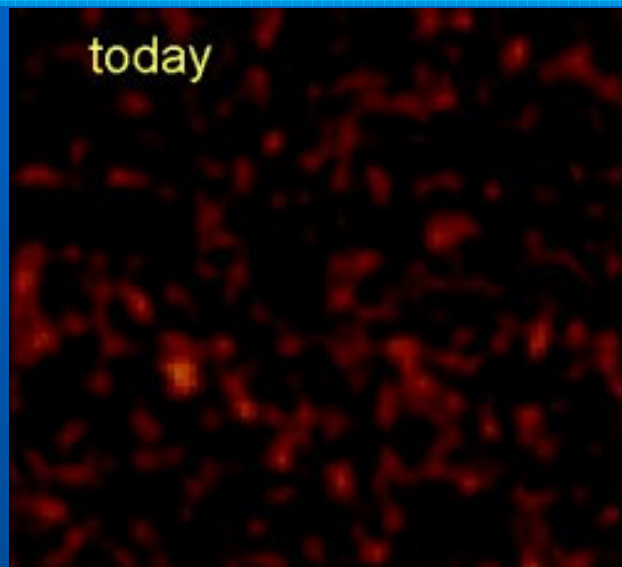
# Рентгенівська “оптика”

# Solar cycle in X-rays

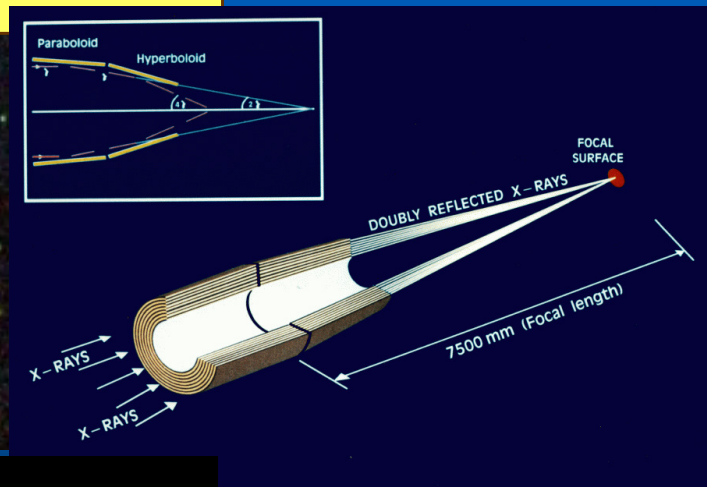


A solar cycle: a montage of ten years' worth of Yohkoh SXT images, demonstrating the variation in solar activity during a sunspot cycle, from after August 30, 1991, at the peak of cycle 22, to September 6, 2001, at the peak of cycle 23. Credit: the Yohkoh mission of Institute of Space and Astronautical Science (ISAS, Japan) and NASA (US).

# Майбутні рентгенівські місії: NuSTAR



*first focusing  
high energy X-ray  
mission*



2011

## NuSTAR

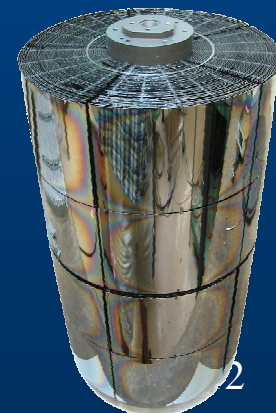
nuclear spectroscopic telescope array



Bringing the high energy universe into focus



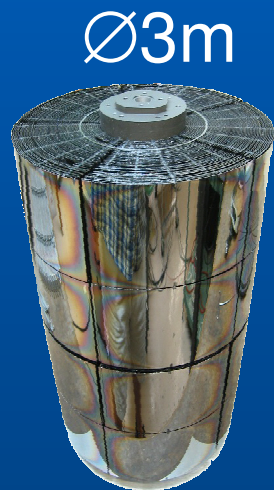
NuSTAR optic





# ATHENA+

XEUS+Constellation-X=>IXO (-NASA)=>ATHENA  
the only X-ray mission for the next decade



Ø3m

angular resolution 5" (goal 3")

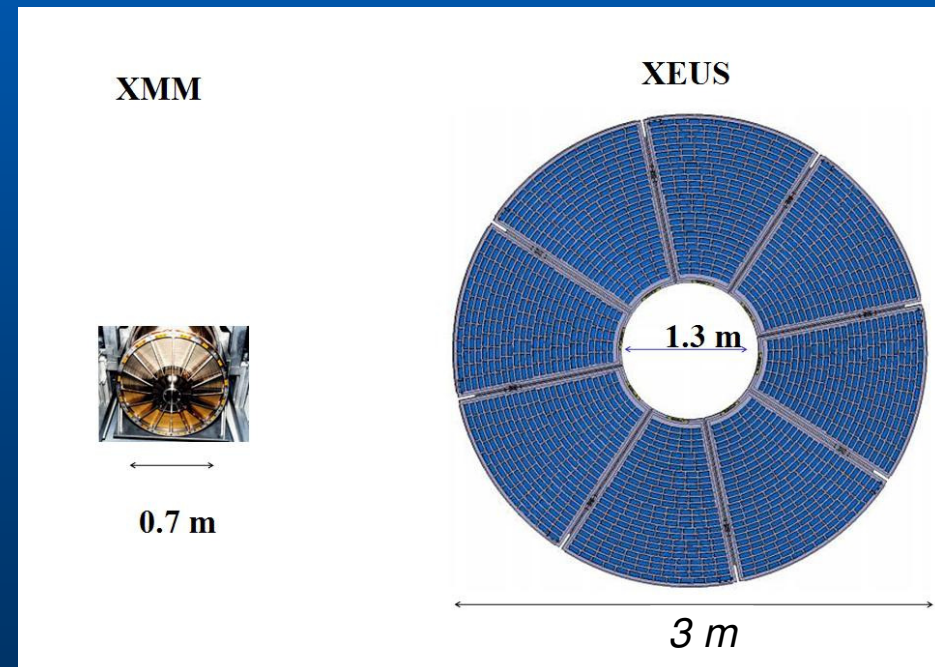
energy resolution 4%

0.3-12 keV

focal length 12 m

effective area 2 m<sup>2</sup>

*no X-ray polarimeter*



# Гама-астрономія

# Поділ гама-діапазону

$h\nu > 100 \text{ кеВ}$   
 $\nu > 10^{19} \text{ Гц}$   
 $\lambda < 10^{-11} \text{ м}$

спостереження ведуться

$h\nu: 0.1\text{--}100 \text{ МеВ}$  (МеВ= $10^6$ )

$0.1\text{--}100 \text{ ГеВ}$  (ГеВ= $10^9$ )

$0.1\text{--}100 \text{ ТеВ}$  (ТеВ= $10^{12}$ )

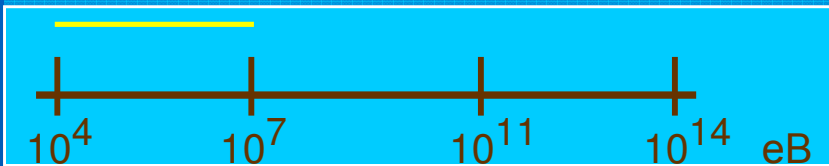
$\nu: \text{до } 10^{30} \text{ Гц}$

$\lambda: \text{до } 10^{-21} \text{ м}$

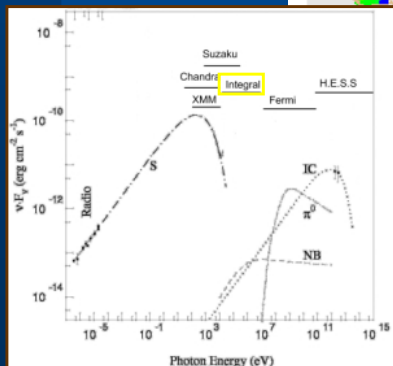
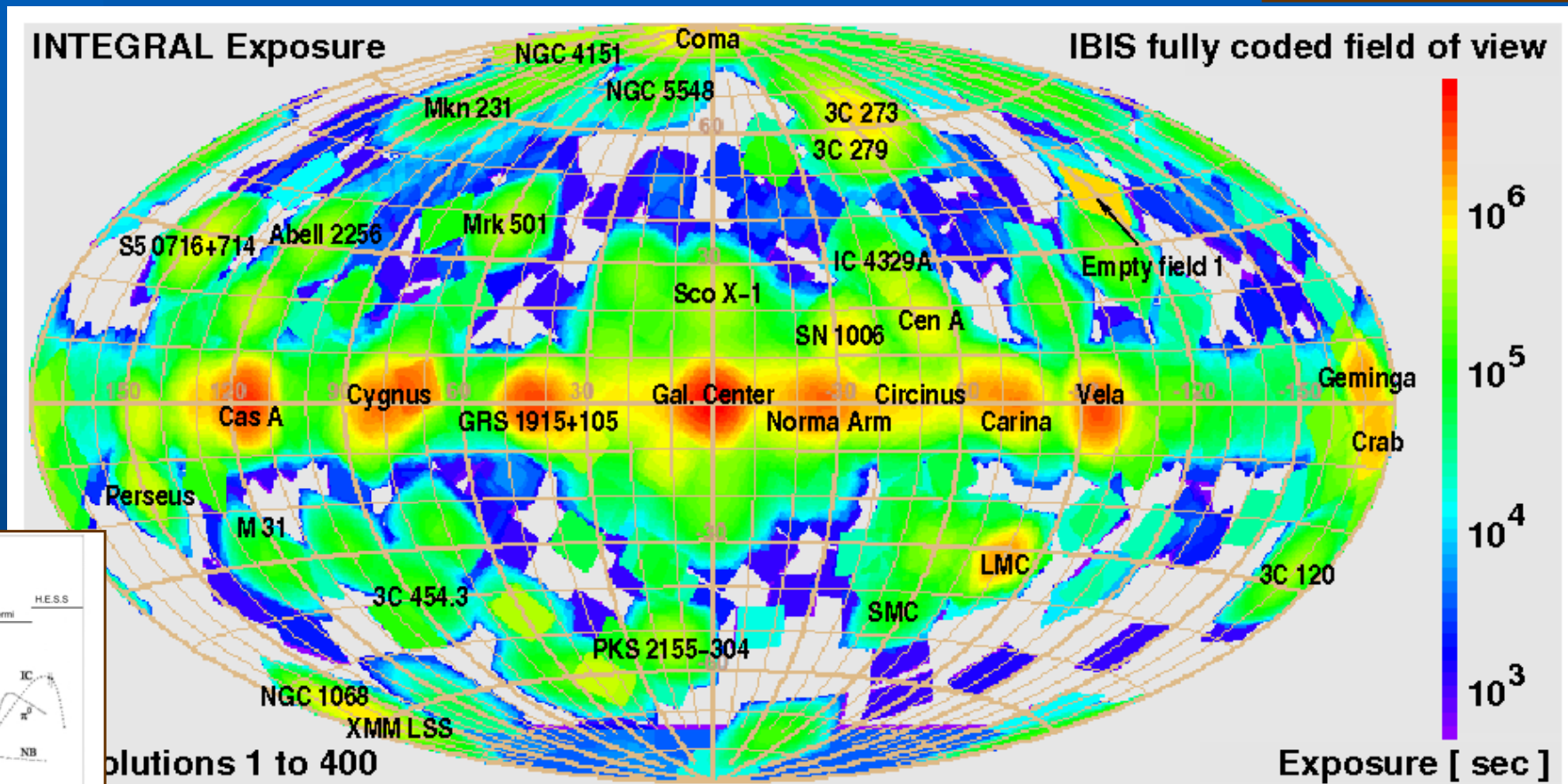
*поділ пов'язаний  
передусім з різними  
методиками спостережень*



# Карта неба (Интеграл)

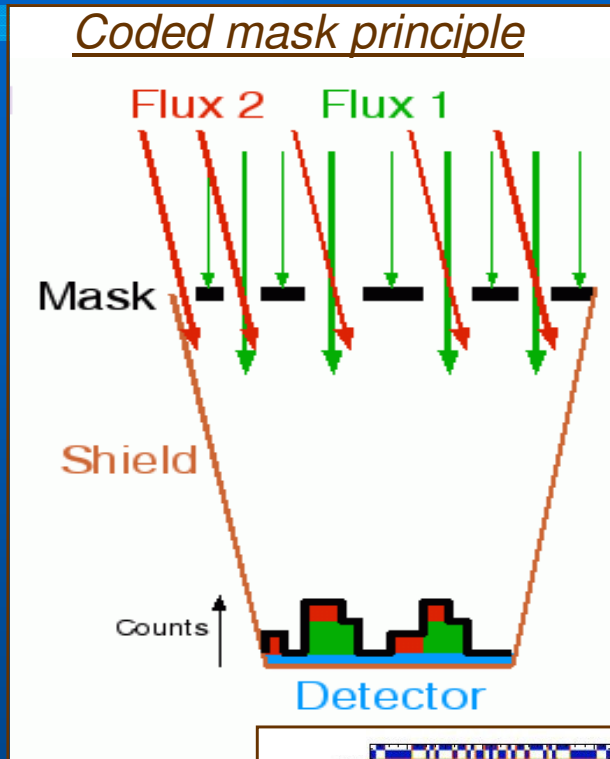


20keV – 10 MeV

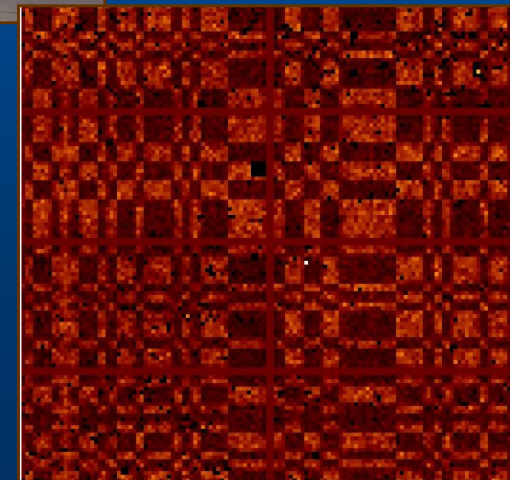
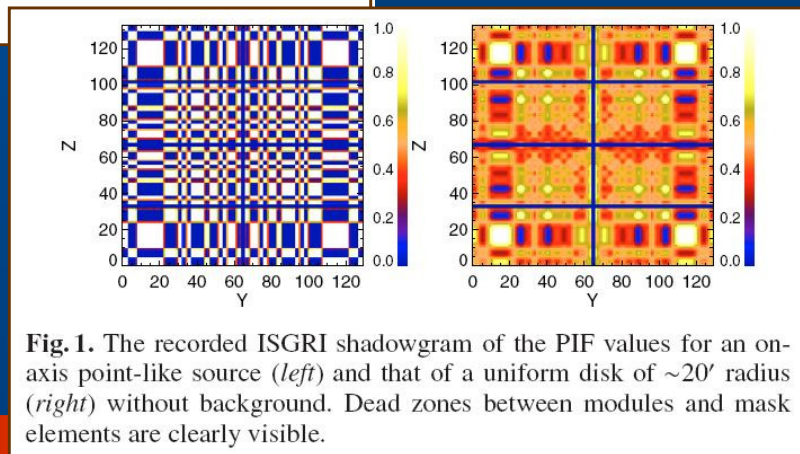


2003-2004

# Принцип детектування в Інтегралі

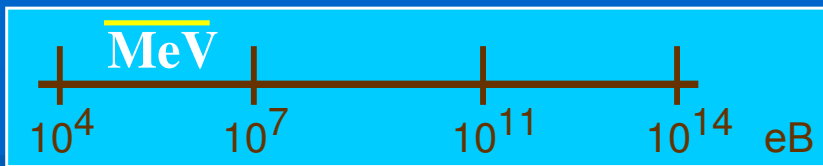


IBIS mask in construction



Crab shadowgram<sup>1/</sup>



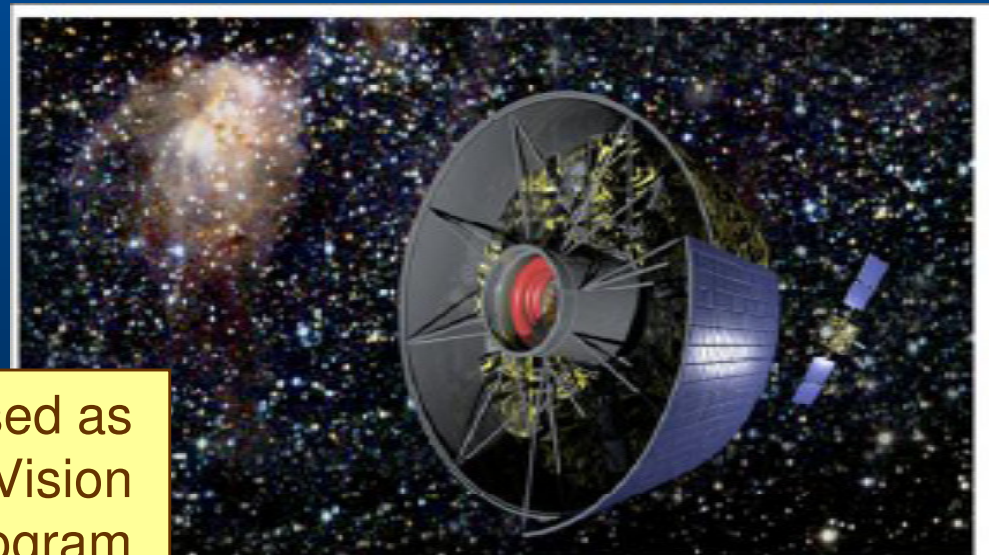


# $\gamma$ - “optics” (MeV)

INTEGRAL uses  
coded mask technic  
*no focusing*

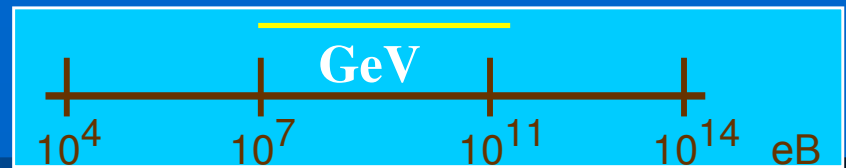
## crystal diffraction for high energy telescopes

- Focusing optics in the hard X-/soft gamma-ray band is crucial for a significant step
- The hard X-ray band ( $E < 80$  keV) can be covered with multilayer mirrors (NuStar, NeXT, Simbol-X).
- The higher energy band ( $> 80$  keV) can be efficiently covered with **Laue lenses** (crystal lenses).

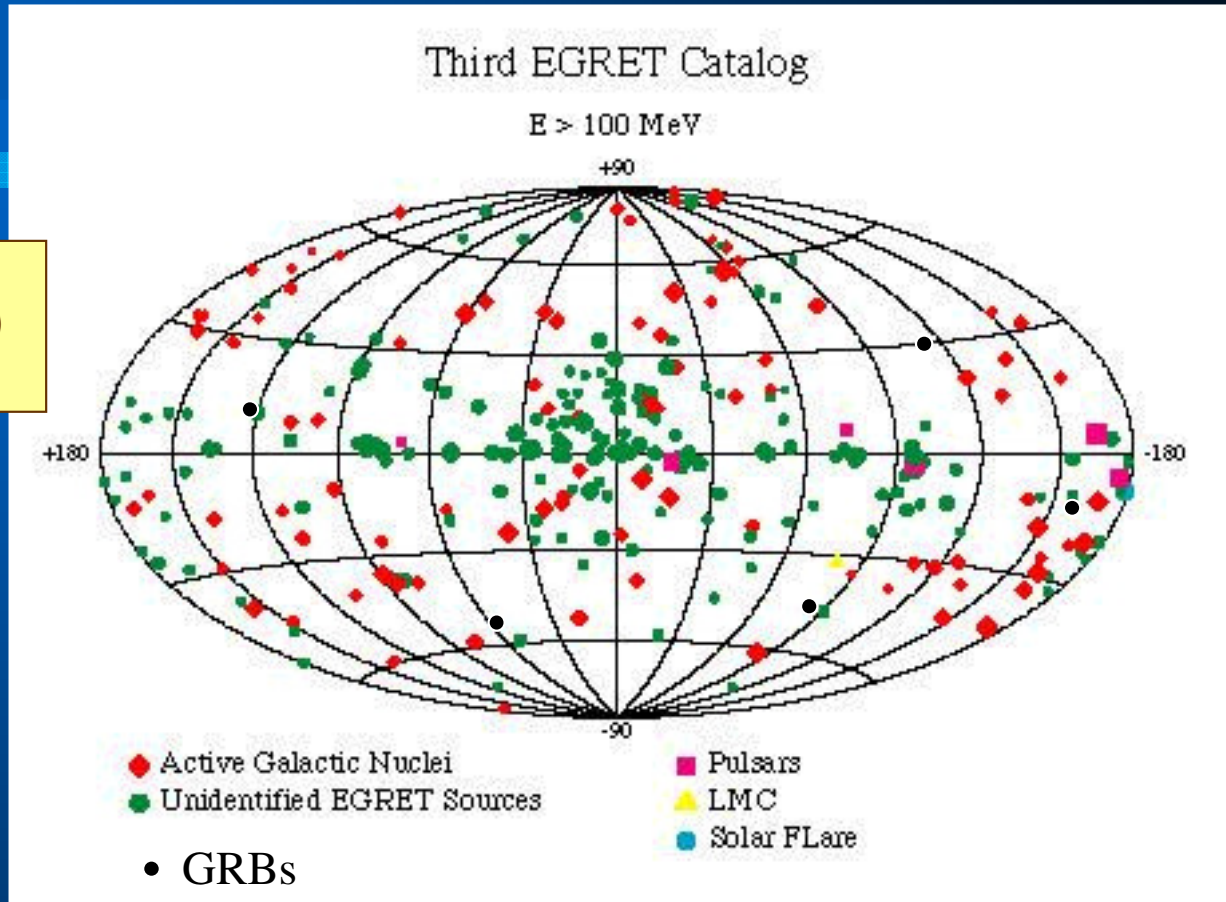


The GRI mission has been proposed as mission for ESAs Cosmic Vision 2015–2025 program.

# EGRET



**3EG catalogue**  
(Hartman+, 1999 )  
270 sources



270 EGRET sources (3EG)

5 Spark Chamber Gamma Ray Bursts

66 High Confidence Blazars

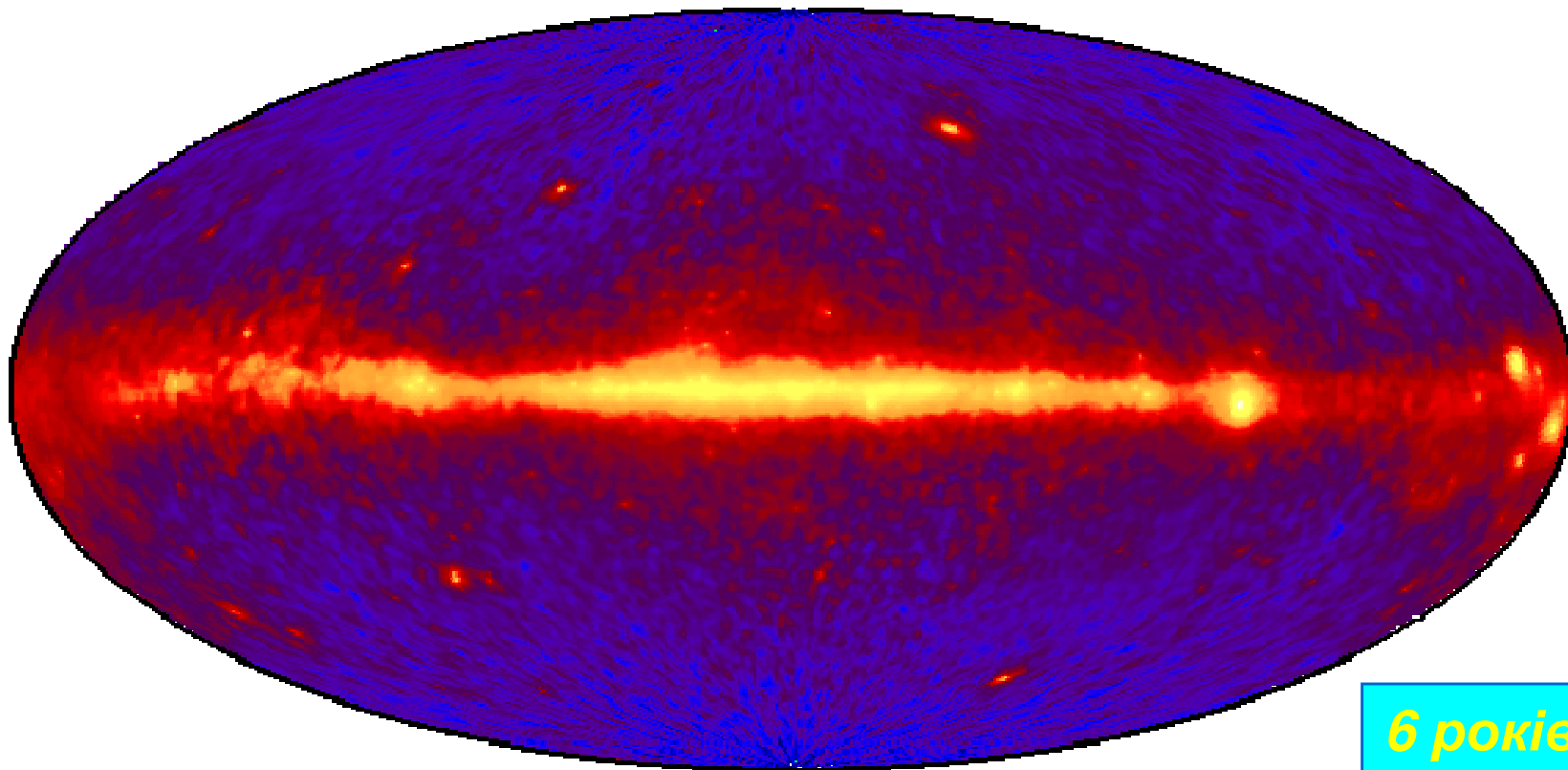
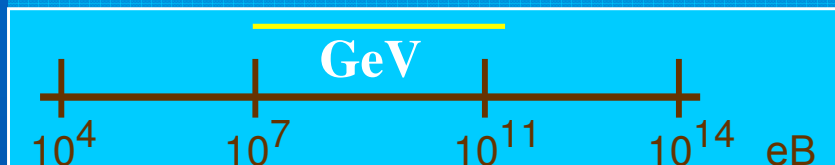
LMC, Cen A, Solar flare, ~170 unIDs

FoV ~ 1/24<sup>th</sup> full sky

2 week pointings

5.7 degree psf at 100 MeV

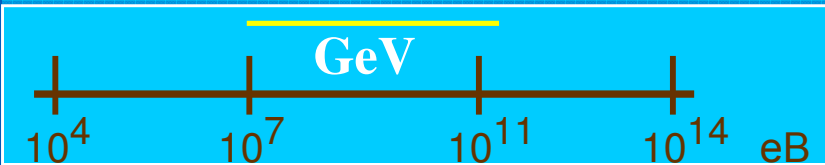
# Карта неба (EGRET)



6 років  
спостережень

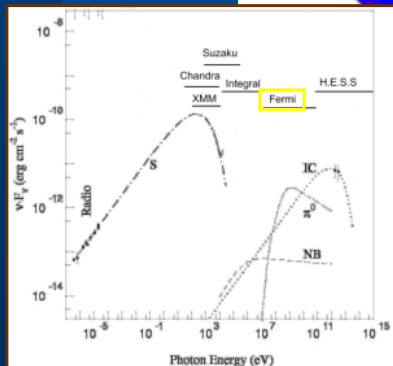
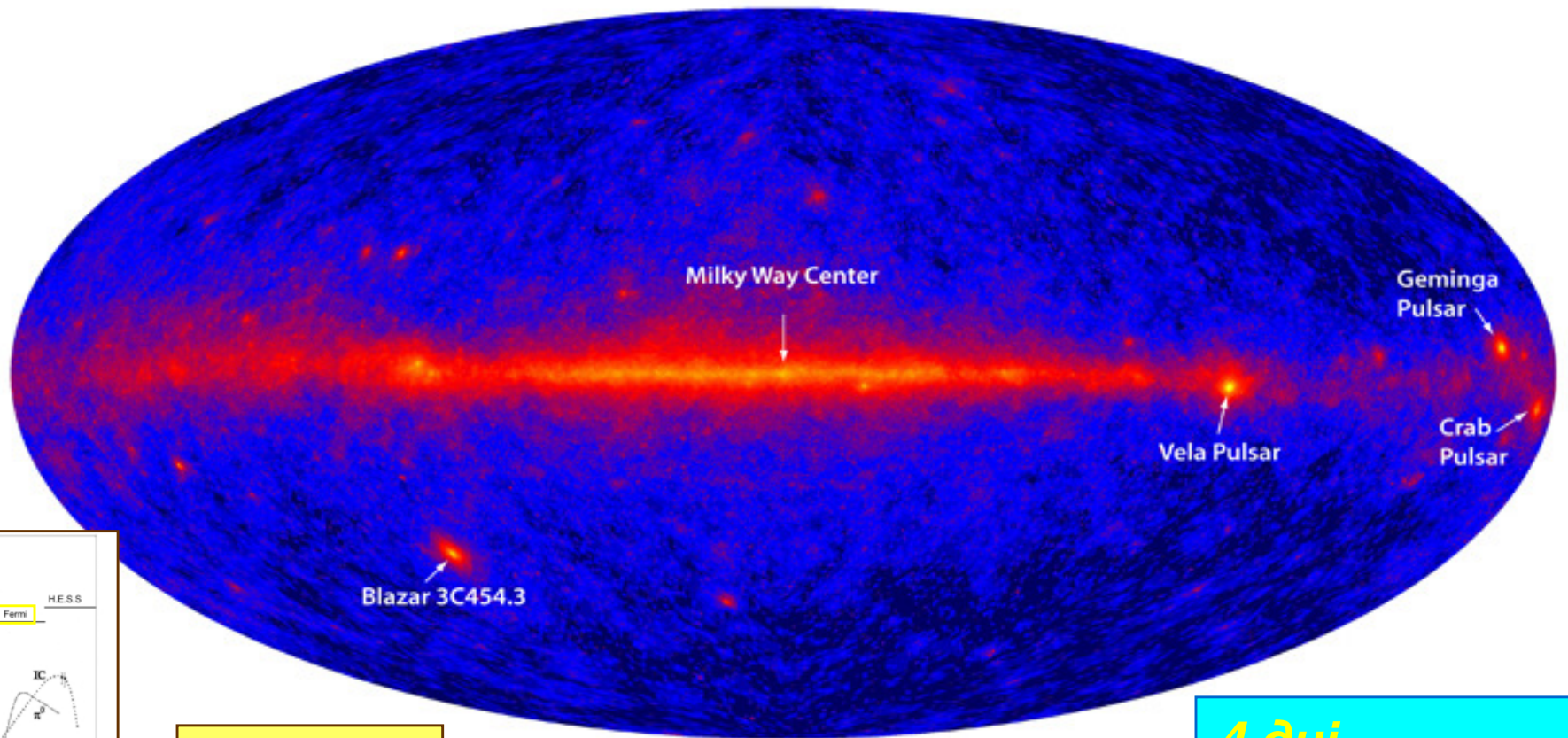


# Карта неба (телескоп Фермі)



GLAST "First Light" Sky Map

20 MeV – 300 GeV

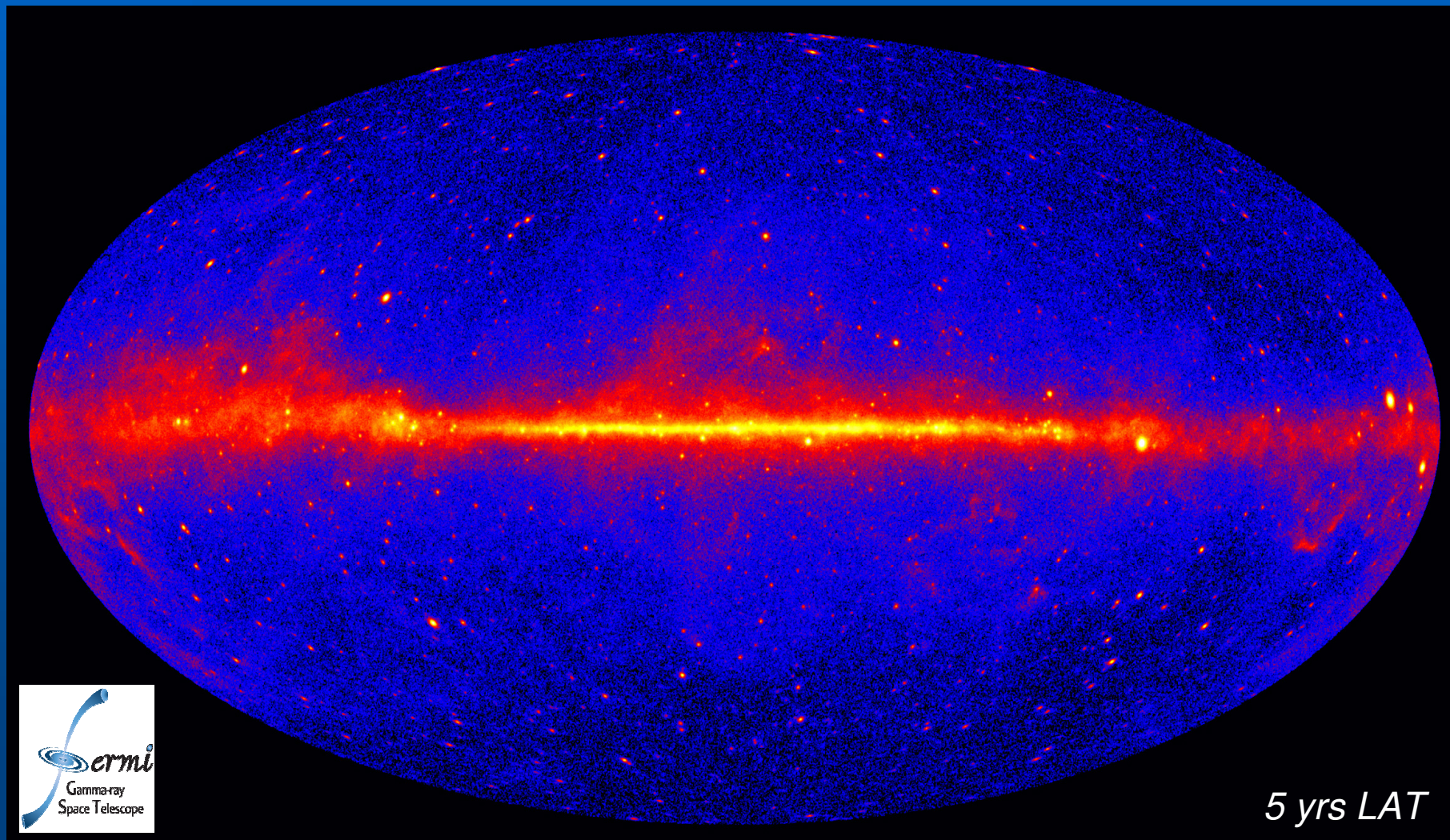


кінець 2008

4 дні спостережень



# Fermi: sky @ $>1$ GeV





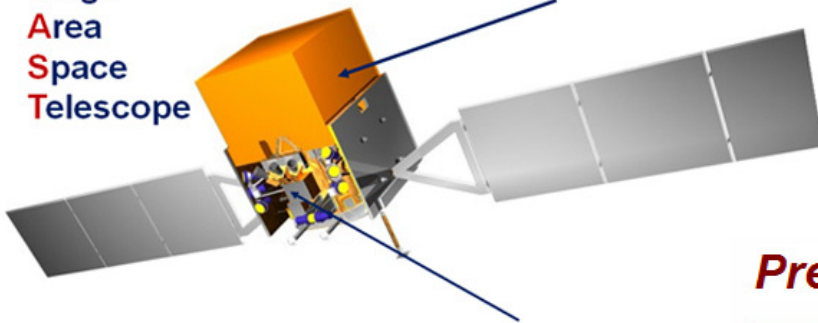
# Принцип детектування в телескопі Фермі

## GLAST Instruments

**GLAST**  
Gamma-ray  
Large  
Area  
Space  
Telescope

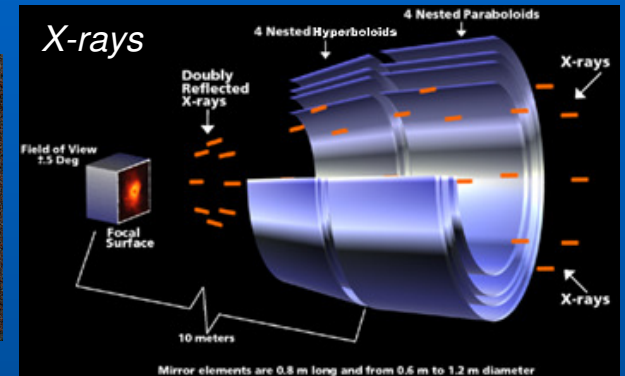
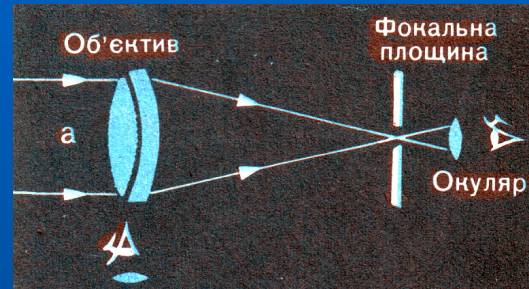
### LAT (Large Area Telescope)

20 MeV+300 GeV



### GBM (Glast Burst Monitor)

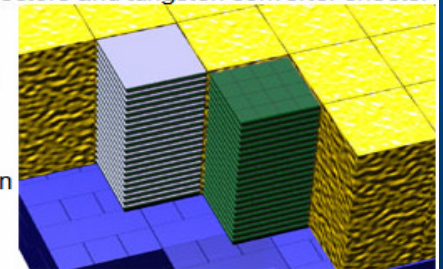
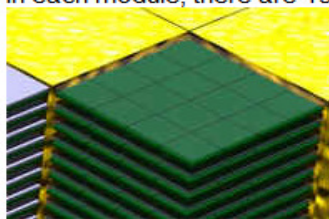
1keV+30 MeV



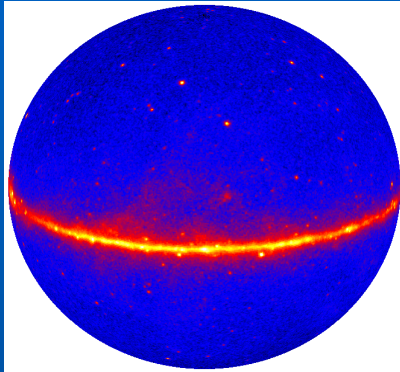
## Precision Tracker

**THE** LAT baseline design for the GLAST tracker consists of a four-by-four array of tower modules. Each tower module consists of interleaved planes of silicon-strip detectors and tungsten converter sheets. Silicon-strip detectors are able to more precisely track the electron or positron produced from the initial gamma-ray than previous types of detectors. SSDs will have the ability to determine the location of an object in the sky to within 0.5 to 5 arc minutes. The pair conversion signature is also used to help reject the much larger background of charged cosmic rays. The high intrinsic efficiency and reliability of this technology enables straight forward event reconstruction and excellent resolution with small tails. These ease-of-use properties will maximize the mission science return for guest observers.

In each module, there are 19 pairs of planes of silicon - in each pair, one plane has the strips oriented in the "x-direction", while the other has the strips oriented in the perpendicular "y-direction". When a particle interacts in the silicon, its position on the plane can therefore be determined in two dimensions. The third dimension of the track is determined by analyzing signals from adjacent planes, as the particle travels down through the telescope towards the calorimeter.

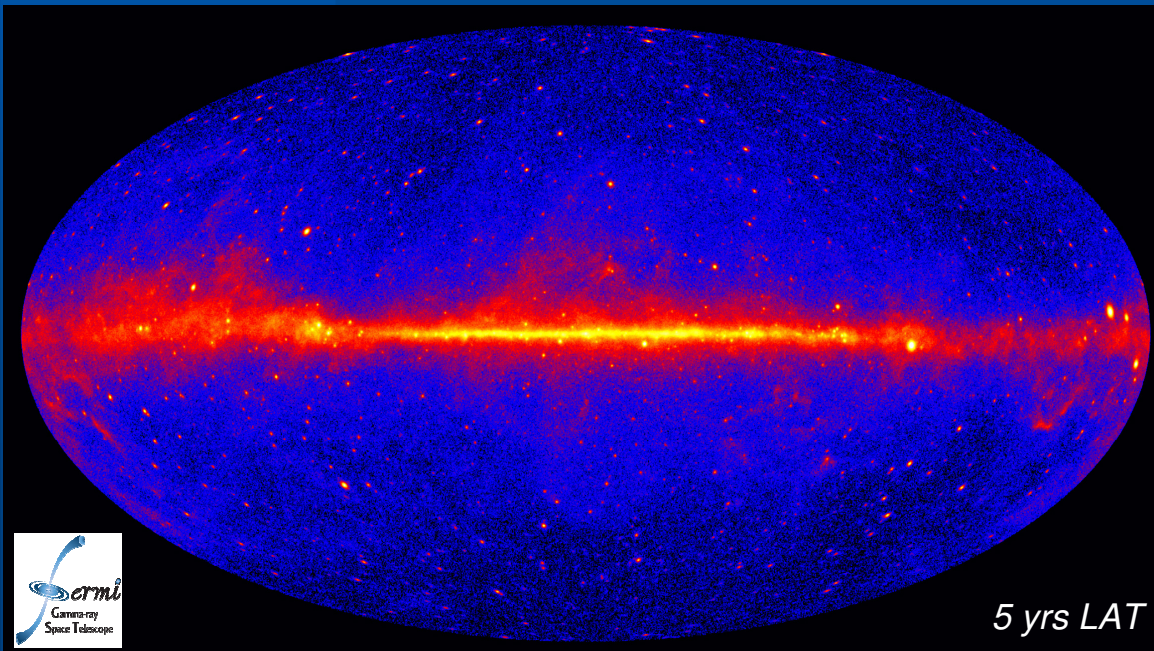


# Fermi: sky @ $>1$ GeV



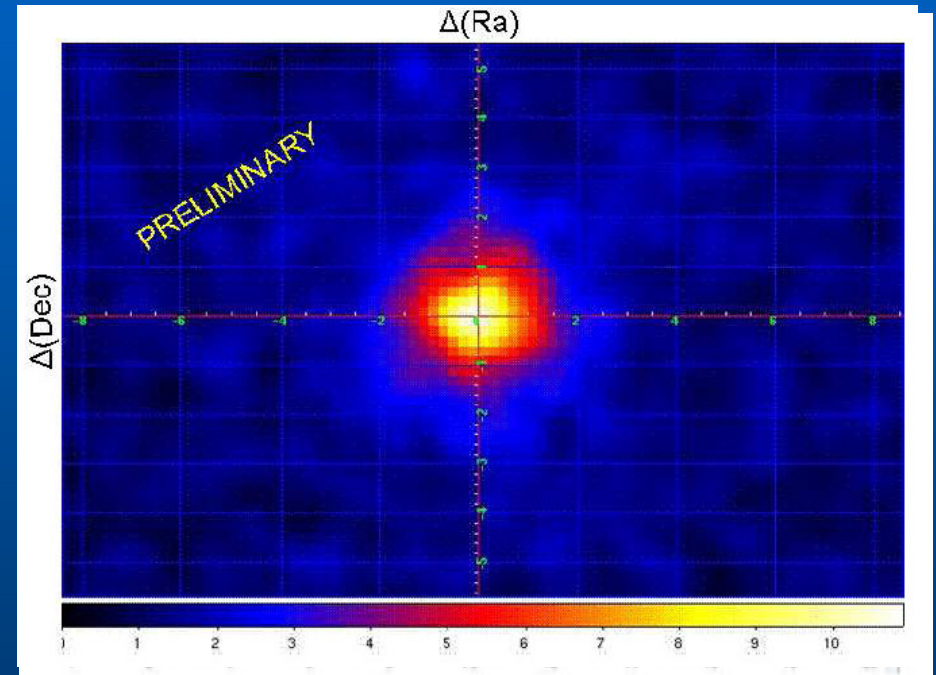
## Sources Detected with Fermi

- Sun, Moon, Earth
- Pulsars (83)
- PWN (3)
- Supernova remnants (7)
- Blazars
  - BL Lac (associated 428, identified 7)
  - Flat Spectrum Radio Quasar (353, 17)
- Other Active Galaxies (~300)
- Unidentified (~600)
  
- Diffuse emission
- CR electrons and positrons spectrum
- CR positron flux and fractions using the Earth MF





# Місяць



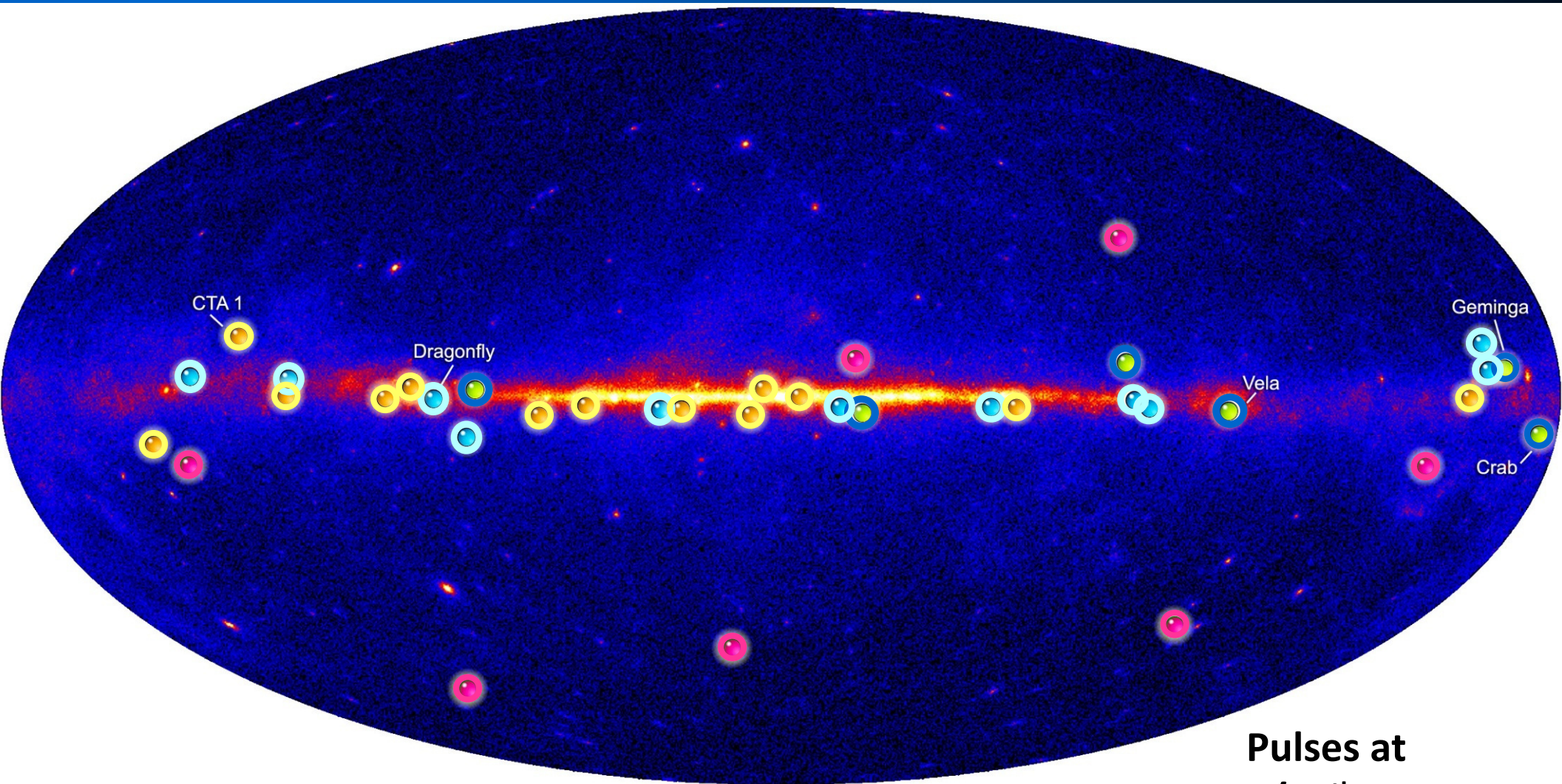
Fermi observations of the Moon

Giglietto, N., for the Fermi Large Area Telescope

Collaboration 2009, arXiv:0912.3734

in a similar fashion:  
 $\gamma$ -rays from asteroids, dust?

# The Pulsing $\gamma$ -ray Sky



Fermi Pulsar Detections  
(as of Jan 2009)

- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

Pulses at  
**1/10<sup>th</sup>** true rate



# Fermi bubble

2010

Gamma-ray emissions

X-ray emissions

Milky Way

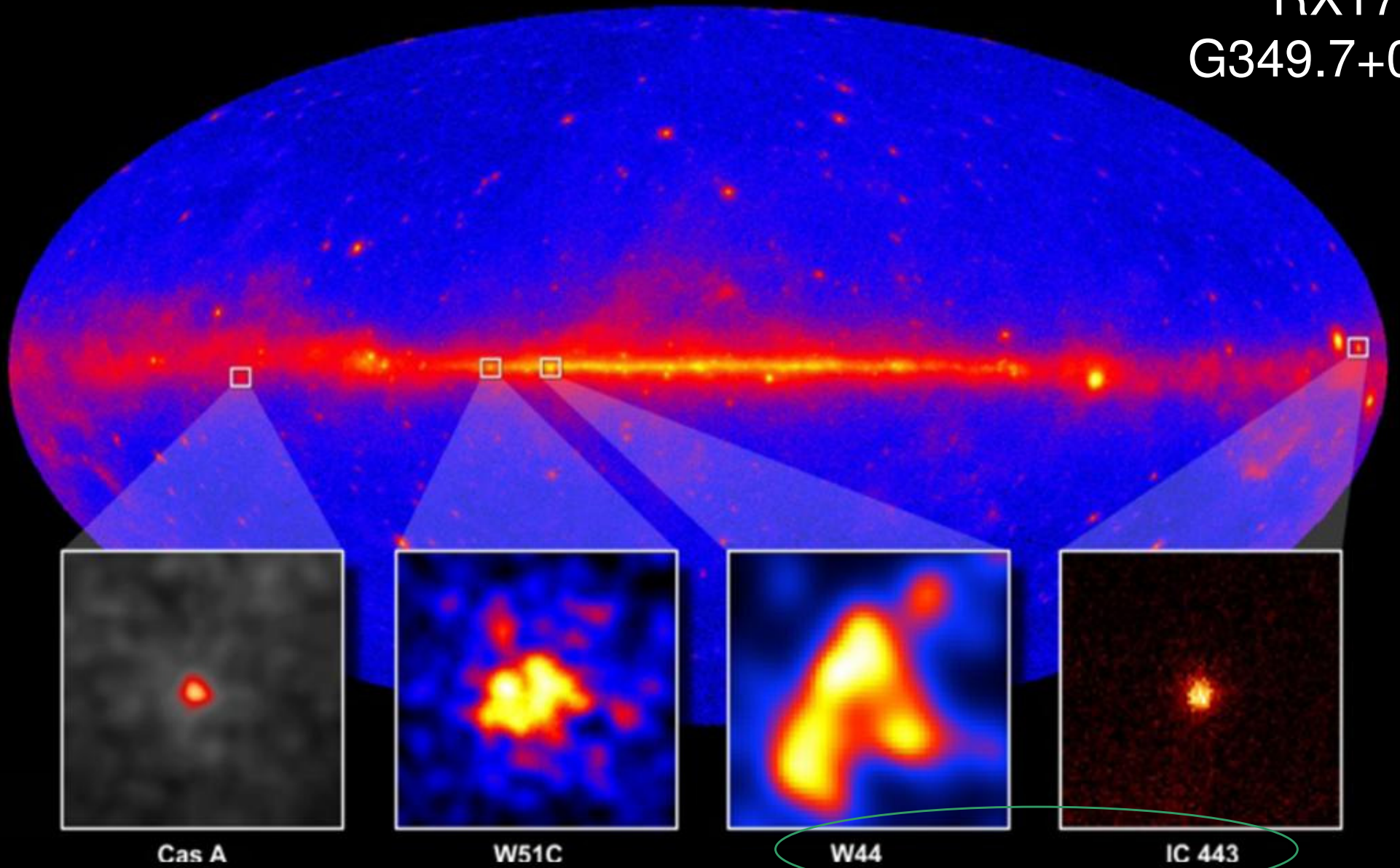
50,000 light-years

Sun

- two enormous  $\gamma$ -ray structures
- at lower galactic latitudes coincide with smaller structures found by ROSAT (1997) and WMAP (2004) “haze”
- nonthermal origin  
(*either accelerated in GC nucleus and injected or 2<sup>nd</sup> order Fermi acceleration in a turbulent medium*)

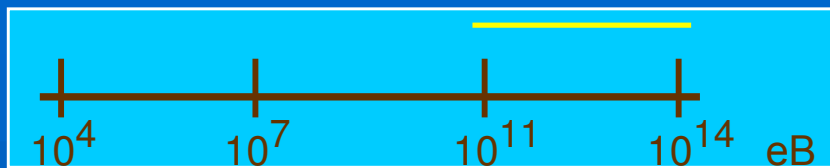
# First GeV Maps of SNRs

W28  
RX1713  
G349.7+0.2



TeV: (HESS & MAGIC – 14 SNRs)





# Черенковське випромінювання

**Черенковське випромінювання** – взаємодія первинних гамма-променів з атмосферою

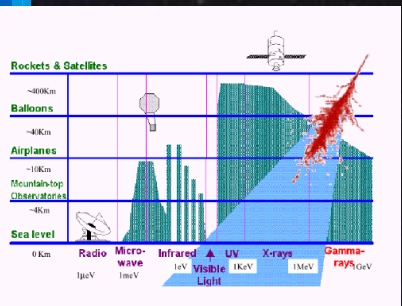
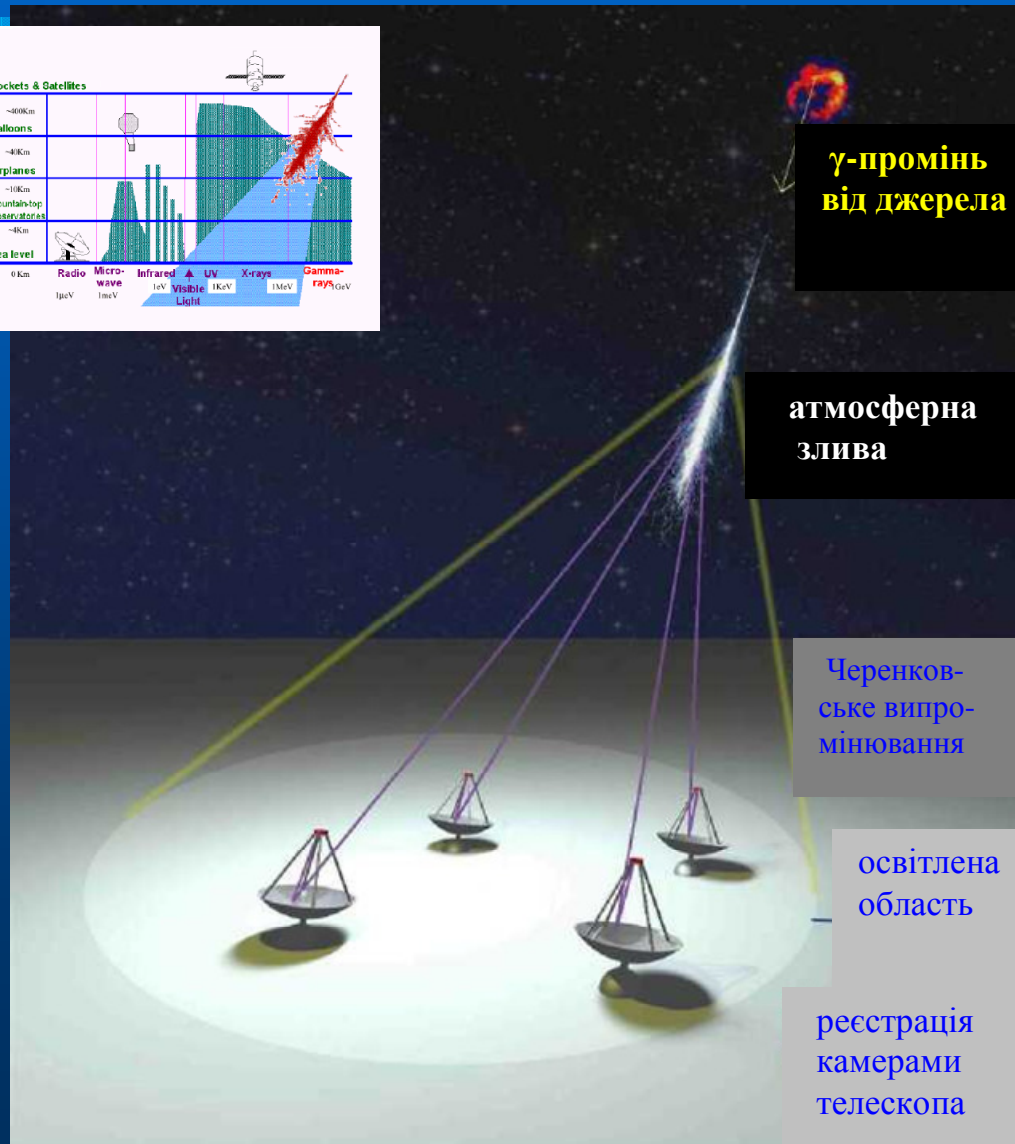
**Умова виникнення:**

$$v_e > c/n$$

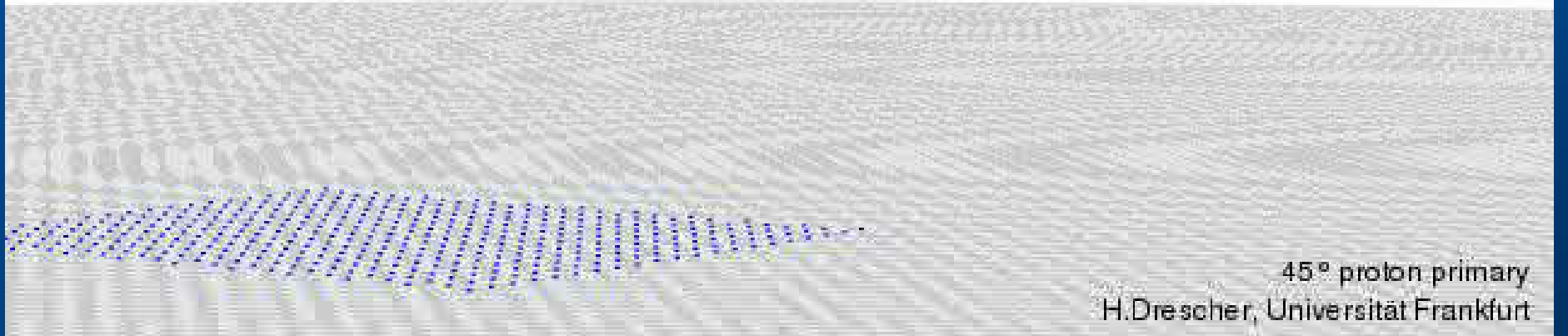
Атмосферна злива:

- вторинне випромінювання
- оптичний діапазон (свічення синього кольору)
- час існування кванта  $\approx 10^{-5}$  с

Дія наземного гамма-детектора базується на реєстрації черенковського випромінювання



time=-266 $\mu$ s



# Перші стаття і телескоп

IL NUOVO CIMENTO

VOL. VII, N. 6

16 Marzo 1958

## On Gamma-Ray Astronomy.

P. MORRISON

*Department of Physics, Cornell University - Ithaca, N. Y.*

(ricevuto il 22 Dicembre 1957)

**Summary.** — Photons in the visible range form the basis of astronomy. They move in straight lines, which preserves source information, but they arise only very indirectly from nuclear or high-energy processes. Cosmic-ray particles, on the other hand, arise directly from high-energy processes in astronomical objects of various classes, but carry no information about source direction. Radio emissions are still more complex in origin. But  $\gamma$ -rays arise rather directly in nuclear or high-energy processes, and yet travel in straight lines. Processes which might give rise to continuous and discrete  $\gamma$ -ray spectra in astronomical objects are described, and possible source directions and intensities are estimated. Present limits were set by observations with little energy or angular discrimination;  $\gamma$ -ray studies made at balloon altitudes, with feasible discrimination, promise valuable information not otherwise attainable.

### 1. - The nature of the problem.

Astronomy is based on information carried by incoming radiation of optical frequencies. The photons in this channel retain the momentum

1957

Крим,  
1960-1965 pp.

2004 – “графічна” (!)

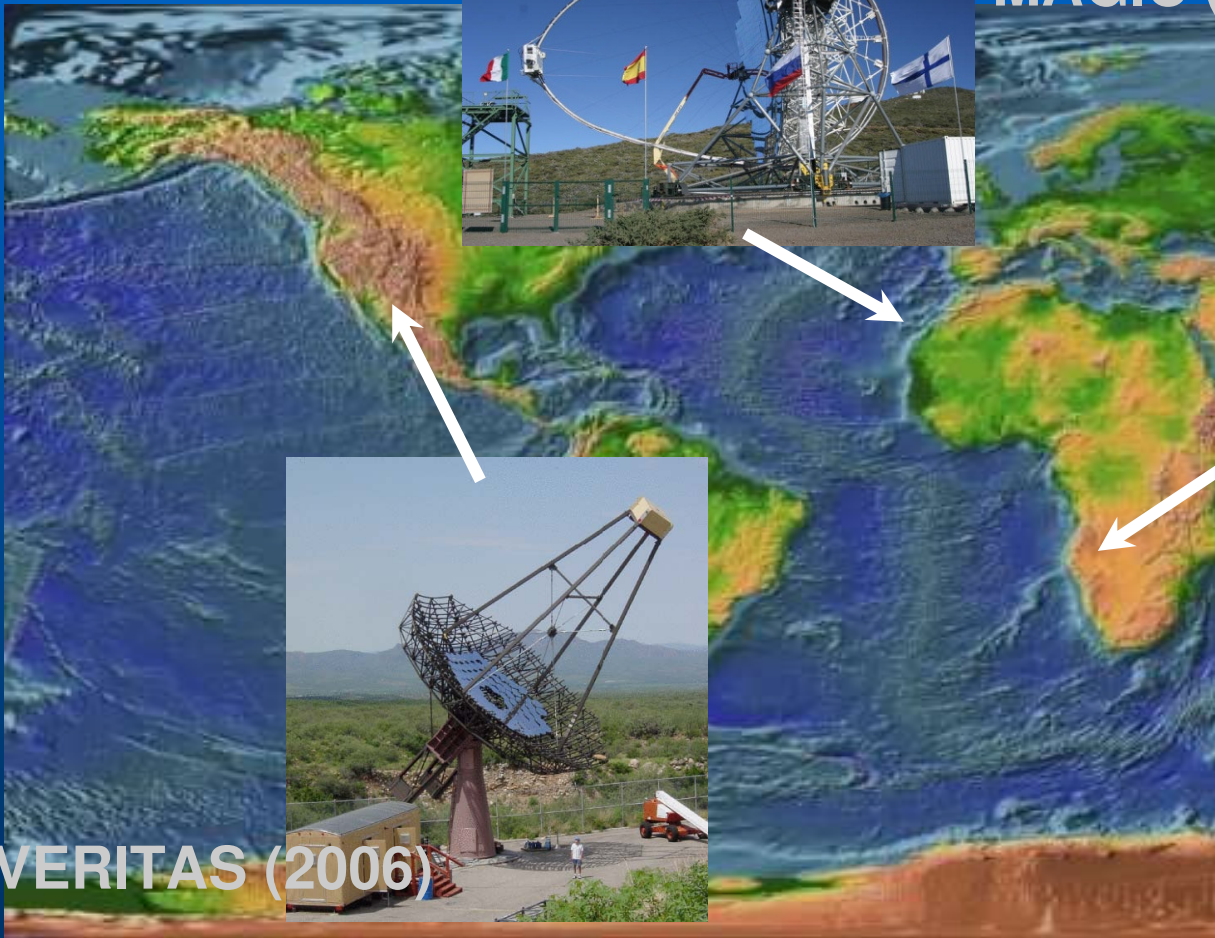




# Second-generation IACTs



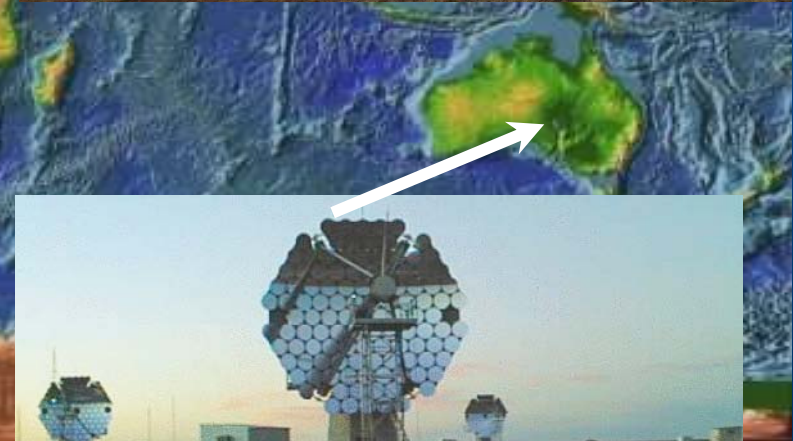
MAGIC (2004)



VERITAS (2006)



H.E.S.S. (2003)



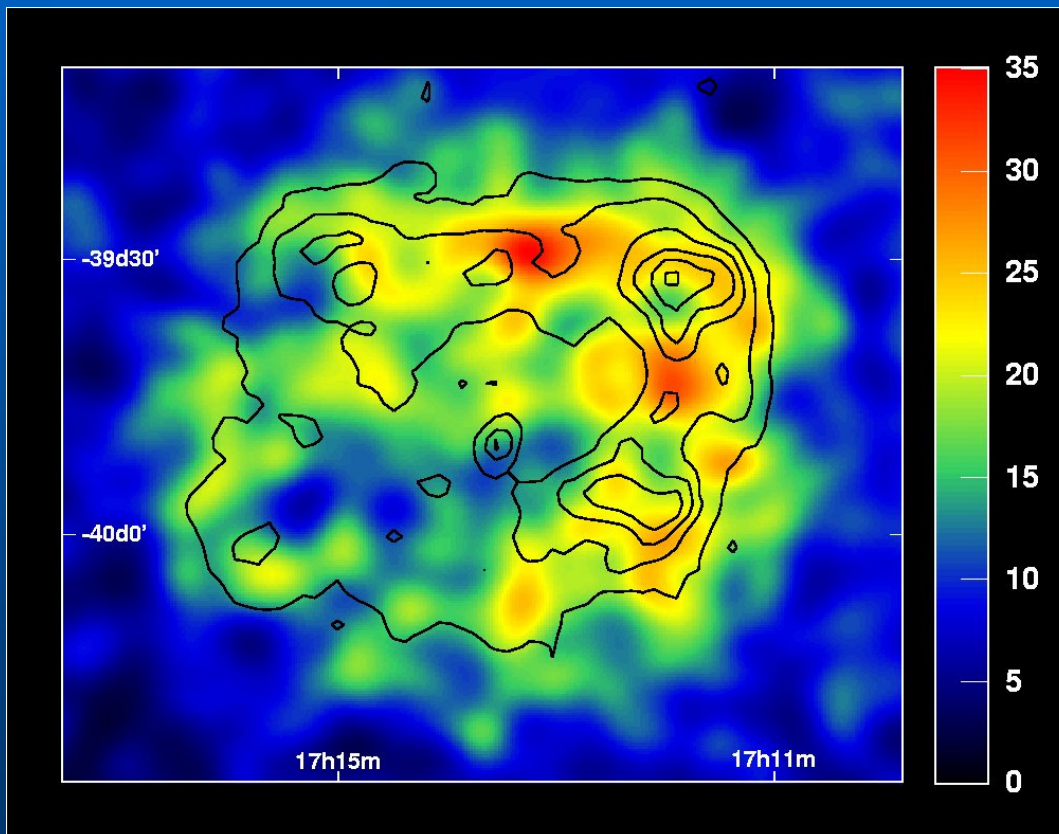
CANGAROO-III (2004)

IACTs established as astronomical tools (experiments → telescopes)

Big step within last few years:

- quantitative (x5 detected sources)
- qualitative (unprecedented high quality)

# Картографування об'єктів. Вперше



## letters to nature

### High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant

F. A. Aharonian<sup>1</sup>, A. G. Akhperjanian<sup>2</sup>, K.-M. Aye<sup>3</sup>, A. R. Bazer-Bachi<sup>4</sup>, M. Bellicke<sup>5</sup>, W. Benbow<sup>1</sup>, D. Berge<sup>1</sup>, P. Berghaus<sup>1,2</sup>, K. Bernlöhr<sup>1,2</sup>, O. Bolz<sup>1</sup>, C. Boisson<sup>6</sup>, C. Borgmeier<sup>7</sup>, F. Breitting<sup>7</sup>, A. M. Brown<sup>1</sup>, J. Bussons Gordo<sup>9</sup>, P. M. Chadwick<sup>1</sup>, V. R. Chitnis<sup>10,20</sup>, L.-M. Chouet<sup>11</sup>, R. Cornils<sup>5</sup>, L. Costamante<sup>1,20</sup>, B. Degrange<sup>11</sup>, A. Djannati-Atai<sup>10</sup>, L. O'C. Drury<sup>12</sup>, T. Ergin<sup>1</sup>, P. Espligat<sup>6</sup>, F. Feinstein<sup>1</sup>, P. Fleury<sup>11</sup>, G. Fontaine<sup>1</sup>, S. Funk<sup>1</sup>, Y. A. Gallani<sup>6</sup>, B. Giebels<sup>11</sup>, S. Gillissen<sup>1</sup>, P. Goret<sup>13</sup>, J. Guy<sup>10</sup>, C. Hadjichristidis<sup>1</sup>, M. Hauser<sup>14</sup>, G. Heinzelmann<sup>5</sup>, G. Henri<sup>15</sup>, G. Hermann<sup>1</sup>, J. A. Hinton<sup>1</sup>, W. Hofmann<sup>1</sup>, M. Holleran<sup>16</sup>, D. Horns<sup>1</sup>, O. C. de Jager<sup>16</sup>, I. Jung<sup>1,14</sup>, B. Khélifi<sup>1</sup>, Nu. Komin<sup>1</sup>, A. Konopelko<sup>17</sup>, I. J. Latham<sup>1</sup>, R. Le Gallou<sup>1</sup>, M. Lemoine<sup>11</sup>, A. Lemiére<sup>6</sup>, N. Leroy<sup>11</sup>, T. Lohse<sup>1</sup>, A. Marcowith<sup>1</sup>, C. Masterson<sup>1,20</sup>, T. J. L. McComb<sup>8</sup>, M. de Naurois<sup>10</sup>, S. J. Nolan<sup>3</sup>, A. Noutsos<sup>3</sup>, K. J. Orford<sup>3</sup>, J. L. Osborne<sup>8</sup>, M. Ouchrif<sup>10,20</sup>, M. Panter<sup>1</sup>, G. Pelletier<sup>15</sup>, S. Pita<sup>6</sup>, M. Pohl<sup>17,4</sup>, G. Pühlhofer<sup>1,14</sup>, M. Punch<sup>6</sup>, B. C. Raubenheimer<sup>16</sup>, M. Raue<sup>3</sup>, J. Raux<sup>10</sup>, S. M. Raymer<sup>3</sup>, I. Redondo<sup>11,20</sup>, A. Reimer<sup>17</sup>, O. Reimer<sup>17</sup>, J. Ripken<sup>5</sup>, M. Rivoal<sup>10</sup>, L. Rob<sup>18</sup>, L. Rolland<sup>10</sup>, G. Rowell<sup>1</sup>, V. Sahakian<sup>1</sup>, L. Saugé<sup>15</sup>, S. Schlenker<sup>7</sup>, R. Schlickeiser<sup>17</sup>, C. Schuster<sup>17</sup>, U. Schwanke<sup>1</sup>, M. Siewert<sup>17</sup>, H. Sof<sup>18</sup>, R. Steenkamp<sup>19</sup>, C. Stegmann<sup>19</sup>, J.-P. Tavernet<sup>10</sup>, C. G. Théoret<sup>6</sup>, M. Tluczykont<sup>11,20</sup>, D. J. van der Walt<sup>16</sup>, G. Vasileiadis<sup>9</sup>, P. Vincent<sup>10</sup>, B. Visser<sup>16</sup>, H. J. Völk<sup>1</sup> & S. J. Wagner<sup>14</sup>

it is generally accepted that the only sources capable of supplying the energy required to accelerate the bulk of Galactic cosmic rays are supernova explosions, and even though the mechanism of particle acceleration in expanding supernova remnant (SNR) shocks is thought to be well understood theoretically<sup>2,3</sup>, unequivocal evidence for the production of high-energy particles in supernova shells has proven remarkably hard to find. Here we report on observations of the SNR RX J1713.7–3946 (G347.3–0.5), which was discovered by ROSAT<sup>4</sup> in the X-ray spectrum and later claimed as a source of high-energy  $\gamma$ -rays<sup>5,6</sup> of TeV energies (1 TeV =  $10^{12}$  eV). We present a TeV  $\gamma$ -ray image of the SNR: the spatially resolved remnant has a shell morphology similar to that seen in X-rays, which demonstrates that very-high-energy particles are accelerated there. The energy spectrum indicates efficient acceleration of charged particles to energies beyond 100 TeV, consistent with current ideas of particle acceleration in young SNR shocks.

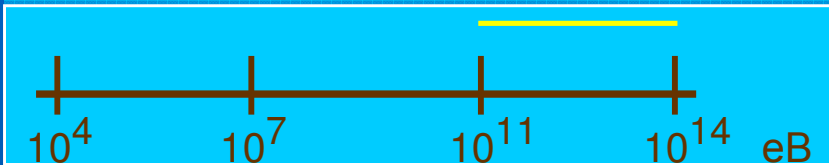
RX J1713.7–3946, together with several other southern hemisphere SNRs, is a prime target for observations with the High Energy Stereoscopic System (HESS), a new system of four imaging atmospheric Cherenkov telescopes located in the Khomas Highland of Namibia. HESS<sup>7,8</sup> (we note that V. F. Hess discovered cosmic rays) exploits the most effective detection technique for very-high-energy  $\gamma$ -rays, namely, the imaging of Cherenkov light from air showers. This technique, which was pioneered by the Whipple collaboration<sup>9</sup>, makes use of the fact that whenever a high-energy  $\gamma$ -ray hits the

2004

**RX J1713.7-3946.** Карта  $\gamma$ -випромінювання (HESS) та рентгенівські контури (ASCA) [Aharonian et al., Nature 2004]

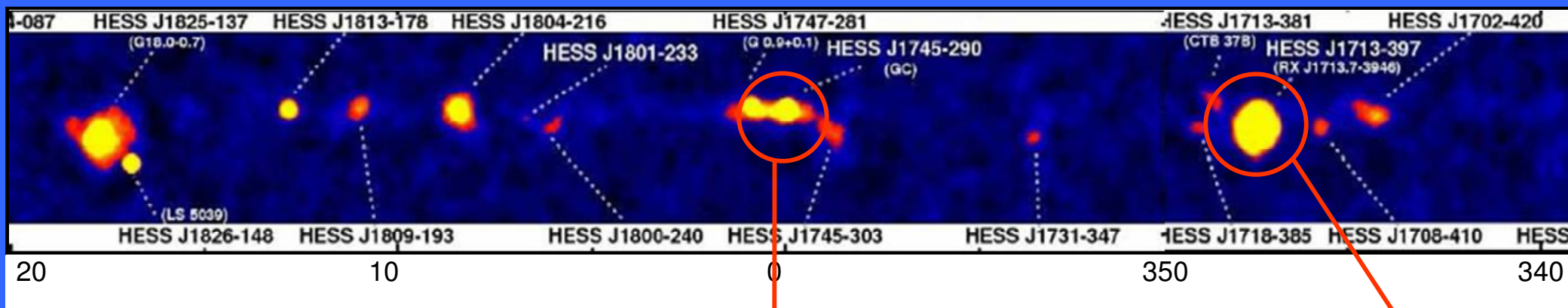


# Карта галактичної площини (HESS)



100 GeV – 100 TeV

Ділянка неба в високоенергетичних гамма-променях (область галактичного центру)



Галактичний центр

RX 1713-397

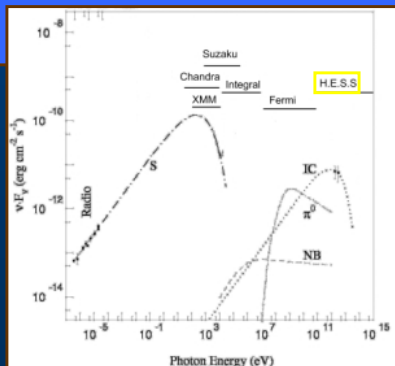
Sources : 40 in GP scan !!  
35 new !!

Typically:

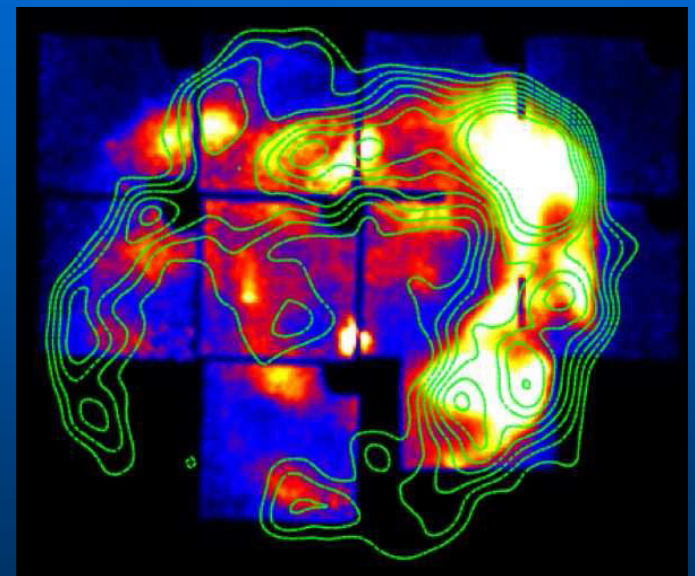
- Shell-type SNRs
- Pulsar-Wind-Nebulae
- Unidentified

З цього ЗН почалася зображувальна гамма астрономія

2003-2004



# Космічні промені



Астрономія це перш за все спостереження...  
 Фотон – лише одна з часток.  
 Як спостерегти невидиме?

# Фотон – носій інформації

“Photons are, by any definition, rather dull specimens in the cosmic particle zoo. However, one can argue that their very dullness, their lack of charge, mass, and momentum, their infinite lifetime, their appearance as a decay product in many processes, their predictability, all combine to make them a valuable probe of the behavior of more exotic particles and their environs in distant, and therefore difficult to study, regions of the universe.” (Weekes, 2003)

## Астрофізика (1609)

## Astroparticle Physics (1912)

## “Фізика темної матерії”

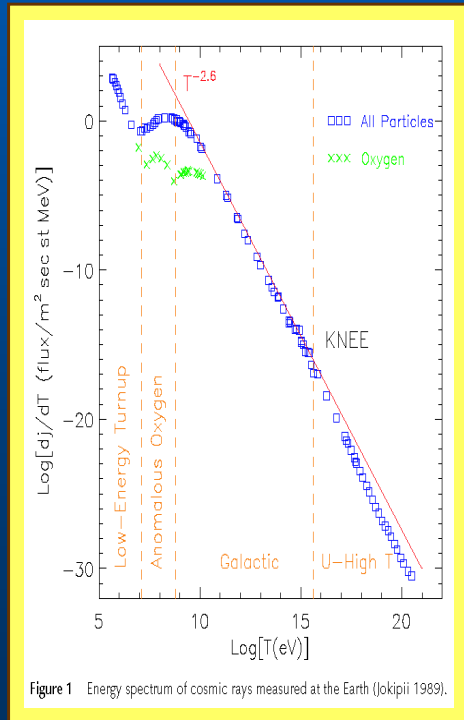
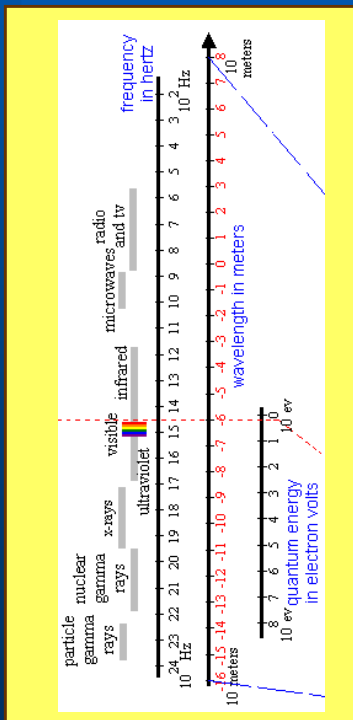


Figure 1 Energy spectrum of cosmic rays measured at the Earth (Jokipii 1989).

р, е, ... – “відчують” МП,  
 автентична інформація з джерел  
 губиться.  
 “Післанці” повинні бути  
 стабільні і нейтральні.  
 Нейтрино – ідеальний кандидат.

Нейтринна астрофізика

Гравітаційні хвилі

4%

22%

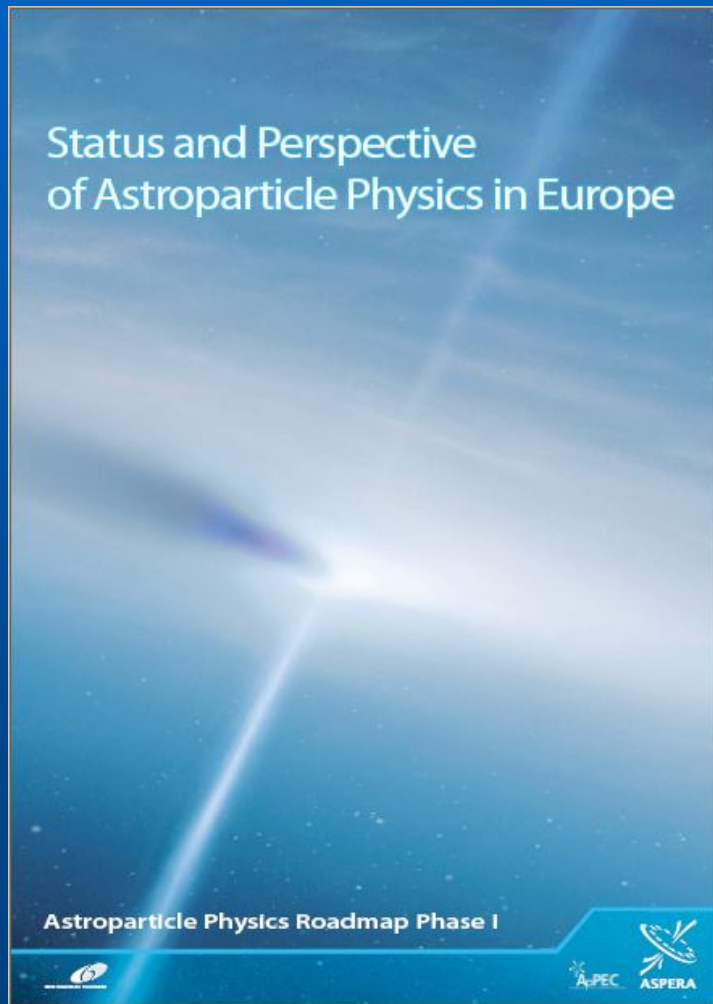


# Космомікрофізика

**Макросвіт про мікросвіт**  
вивчення властивостей елементарних часток за їх виявами у Всесвіті

- Космомікрофізика (*Astroparticle Physics*) – галузь науки на перетині астрофізики високих енергій та фізики елементарних часток
- До 1960-х рр. – забезпечувала основну інформацію для ядерної фізики (напр., відкриття мюона, позитрона)
- Коли були збудовані перші прискорювачі часток, фокус космомікрофізики змістився до астрофізичних аспектів (де, як прискорюються частки, яку роль відіграють в динаміці Галактики та Всесвіту тощо)
- Предметом дослідження є темна матерія, темна енергія, фундаментальні властивості елементарних часток, гравітаційні хвилі, нетрино та космічні промені

# Astroparticle Physics in Europe



January 2007, 147 pp.

## On this document

The Steering Committee of ApPEC (Astroparticle Physics European Coordination) has charged the ApPEC Peer Review Committee (PRC) in 2005 to prepare a roadmap for astroparticle physics in Europe\* which covers the next decade. The need for such a roadmap arises since projects in astroparticle physics move to ever larger sensitivity and scale, with costs of individual projects on the 100 M€ scale or beyond. The roadmap document presented here was prepared by the PRC between October 2005 and January 2007. As a first step towards the roadmap, the state of the experiments in the field was evaluated using a questionnaire filled out by the spokespersons of all astroparticle experiments in Europe, or with European participation (see Appendix 2). Based on this information, on input from the proponents and on presentations given to ApPEC in the last years, the most promising research areas and instrumental approaches were identified. A town meeting in Munich in 2005 served to discuss and iterate these initial concepts with the community at large. The recommendations given in the roadmap were in several stages iterated in particular with the spokespersons of the experiments as well as with the ApPEC Steering Committee. After a large meeting in Valencia (Nov.7/8, 2006), further significant modifications have been prepared by smaller working groups, submitted by individuals and included in the present version.

The resulting ApPEC roadmap marks the first stage (ASPERA Roadmap/Stage I) of a strategy process which foresees a "final" roadmap (ASPERA Roadmap/Stage 3) in July 2008. The next stages will be coordinated within ASPERA, an FP6 ERA-Network, with the aim to give detailed implementation scenarios and priorities.

The present "first stage" roadmap describes the status and desirable options for the next decade and will help to define the financial and organizational conditions to reach the envisaged goals. This represents an important input to the second and third stage of the roadmap process. We argue that physics prospects and worldwide competition suggest a significant increase in funding for astroparticle physics. In 2008, the consolidation of funding options and the further evolved status of the projects will allow much better prioritization and staging recommendations for the 30-800 M€ projects to be constructed after 2010. The ASPERA stage of the roadmap will be supplemented by more detailed data on human resources, budget, milestones and the world situation.

*Europe – in contrast to its geographical meaning – in this roadmap does not include the states of the former Soviet Union (or only insofar as Western groups participate in Russian experiments).*

# Major European initiatives in the next decade

Field/ Experiments	Cost scale per experiment (M€)	Desirable start of construction	Remarks
Dark Matter Search: Low background experiments with 1-ton mass	60-100 M€	2011-2013	2 experiments (different nuclei, different techniques), e.g. 1 bolometric, 1 noble liquid; more than 2 worldwide.
Proton decay and low energy neutrino astronomy: Large infrastructure for p- decay and $\nu$ astronomy on the 100kt-1Mton scale	400-800 M€	Civil engineering: 2012-2013	- multi-purpose - 3 different technological options - needs huge new excavation - most of expenditures likely after 2015 - worldwide sharing
Properties of neutrinos: Double beta experiments	50-200 M€	2013-2015	- explore inverted hierarchy scenario - 2 experiments with different nuclei (and desirably more worldwide) - large cost range due to large range of isotope prices

The high energy universe: <u>Gamma rays:</u> Cherenkov Telescope Array CTA	100 M€ (South) 50 M€ (North)	first site in 2010	Physics potential well defined by rich physics from present gamma experiments
<u>Charged Cosmic Rays:</u> Auger North	85 M€	2009	Confirmation of physics potential from Auger South results expected in 2007
<u>Neutrinos:</u> KM3NeT	250 M€	2011	FP6 Design Study. Confirmation of physics potential expected from IceCube and gamma ray telescopes. Physics Design Report and Proposal expected in 2009.
Gravitational Waves: Third generation ground- based interferometer	300 M€	Civil engineering 2012	Conceived as underground laboratory

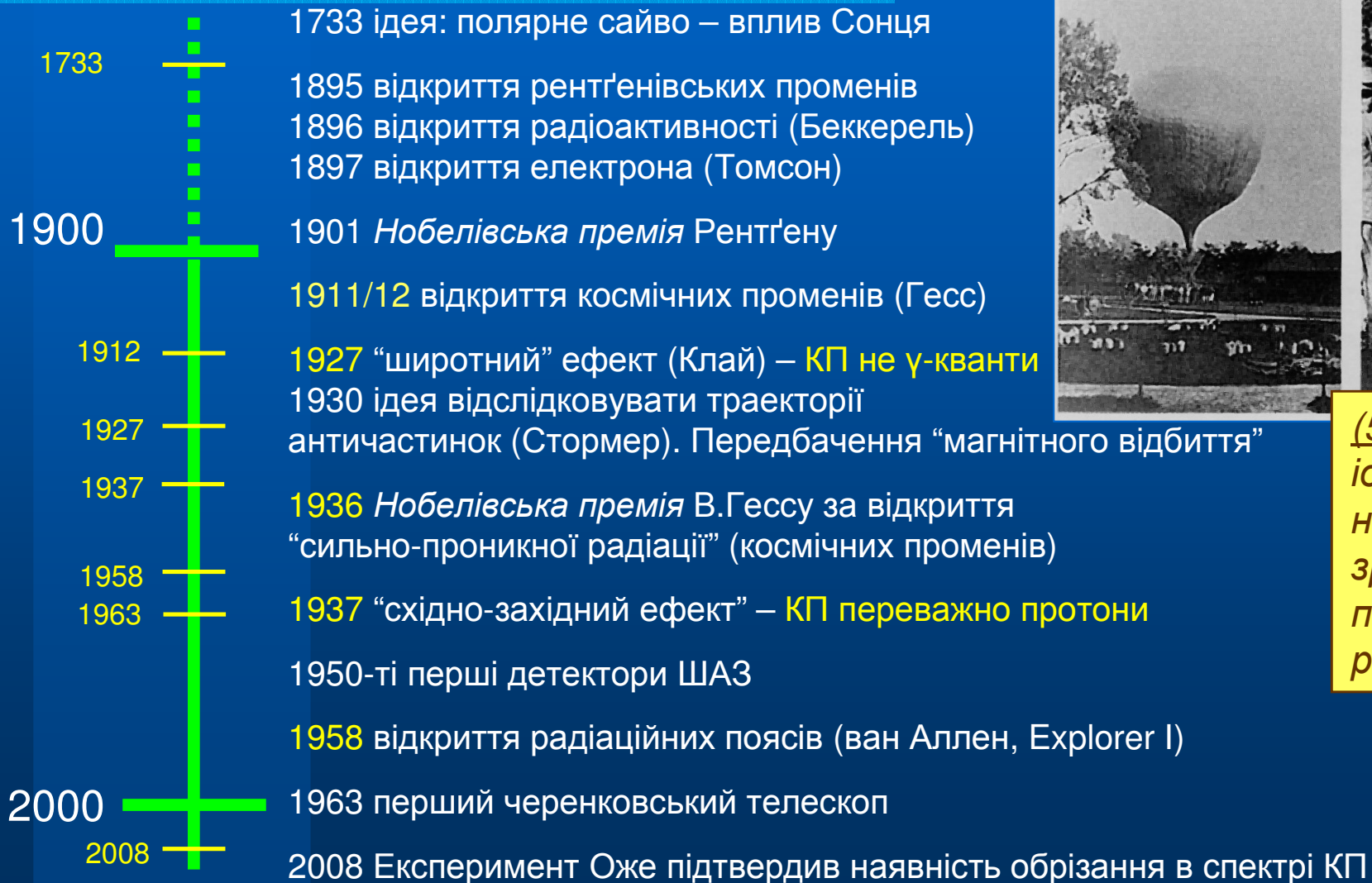
# *Астрофізика космічних променів*

**Космічні промені –  
заряджені частки релятивістських енергій  
позаземного походження**

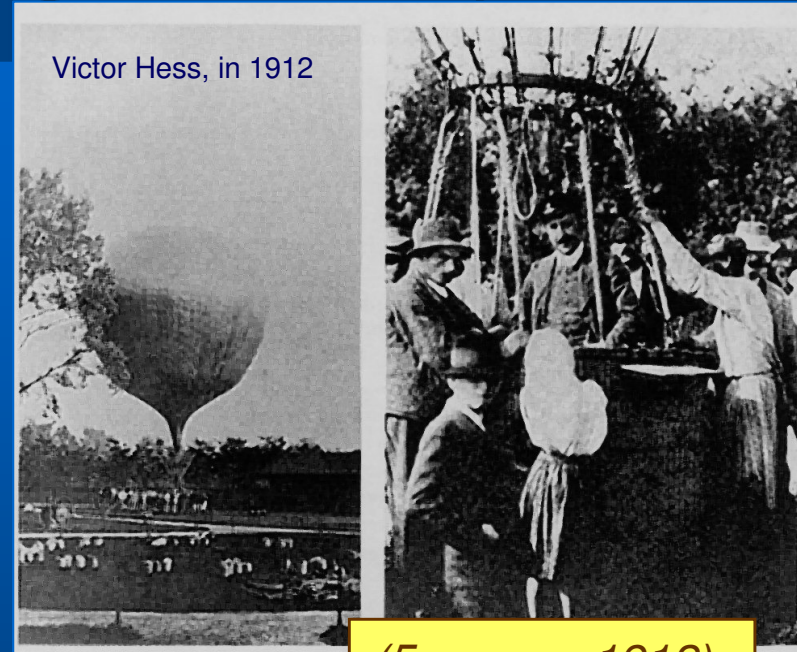
- *Працює з космічними “прискорювачами” – об’єктами, де елементарні частки прискорюються до надвисоких енергій ( $10^{20}$  eV)*
- *Енергії, які ніколи не зможуть бути досягнуті в земних експериментах (Великий адронний колайдер – до  $10^{13}$  eV)*
- *Від успішного експерименту Віктора Гесса, 5 серпня 1912 року, в якому було виявлено космічні промені (КП), минуло 100 років.*
- *Галузь науки, яка набула значного імпульсу в останні 10-15 років.*
- *Це пов’язано передусім з досягненнями в методах та засобах спостережень.*



# Космічні промені: відкриття та розвиток науки



Victor Hess, in 1912



*(5 серпня 1912)  
іонізація газу  
на висоті 5 км  
зросла в 5 разів  
порівняно з  
рівнем моря*

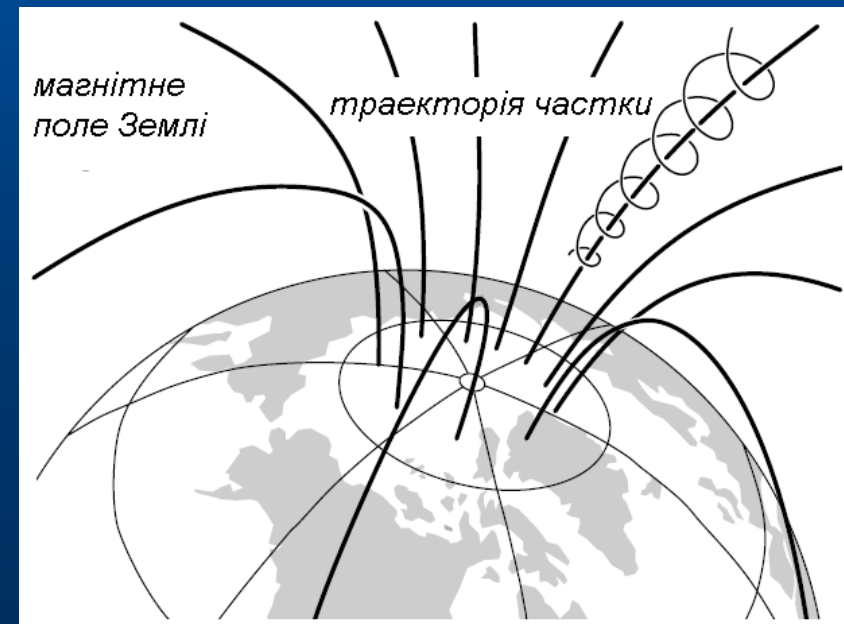


# Полярне сяйво – одне з найвідоміших маніфестацій КП



**Люмінесцентне свічення верхніх шарів атмосфери під дією заряджених часток сонячного вітру**

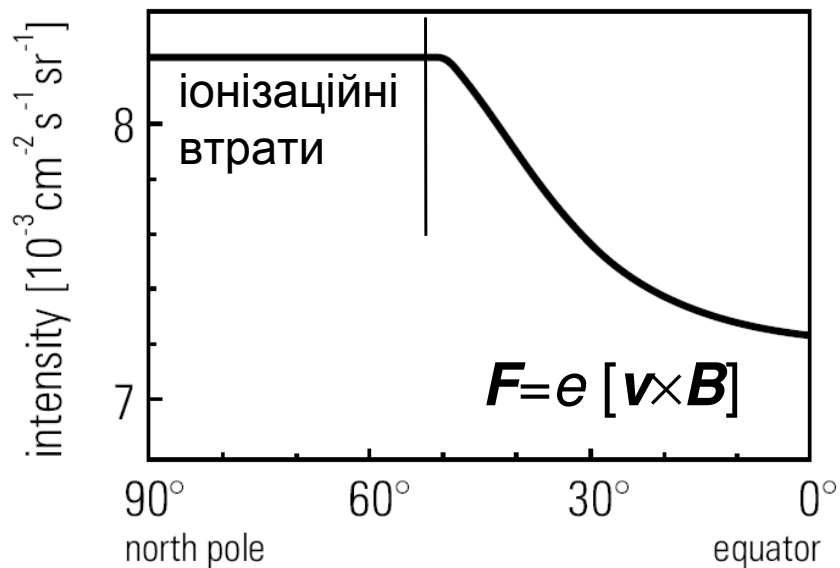
Ще 1733 р. (Майран) висловлювалася ідея, що полярне сяйво зумовлене впливом Сонця, проте його природу пояснили лише у 20 ст.



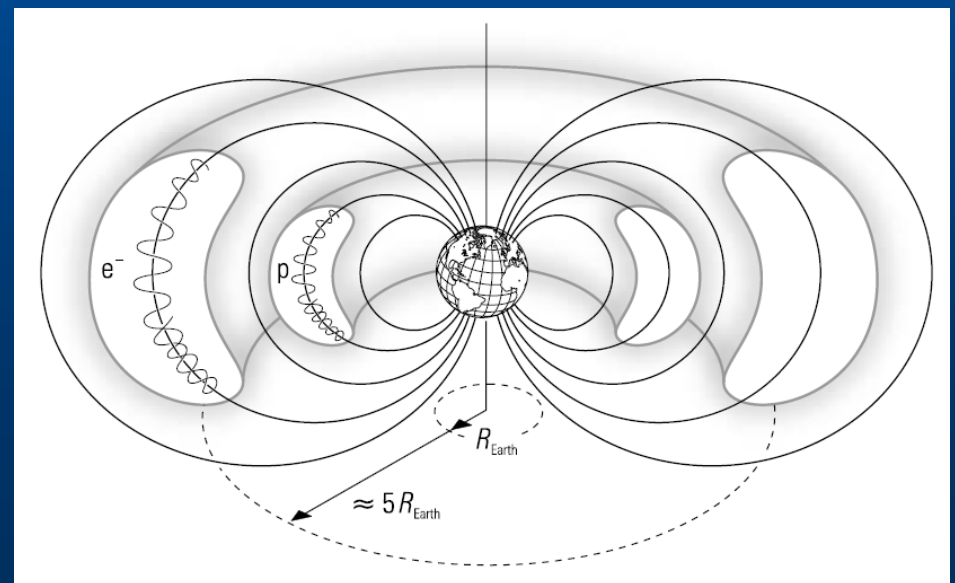
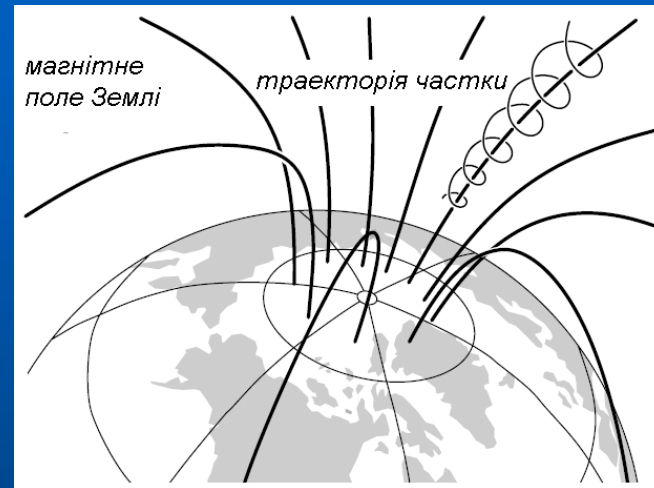


# Широтний ефект: КП – не $\gamma$ -кванти

latitude effect

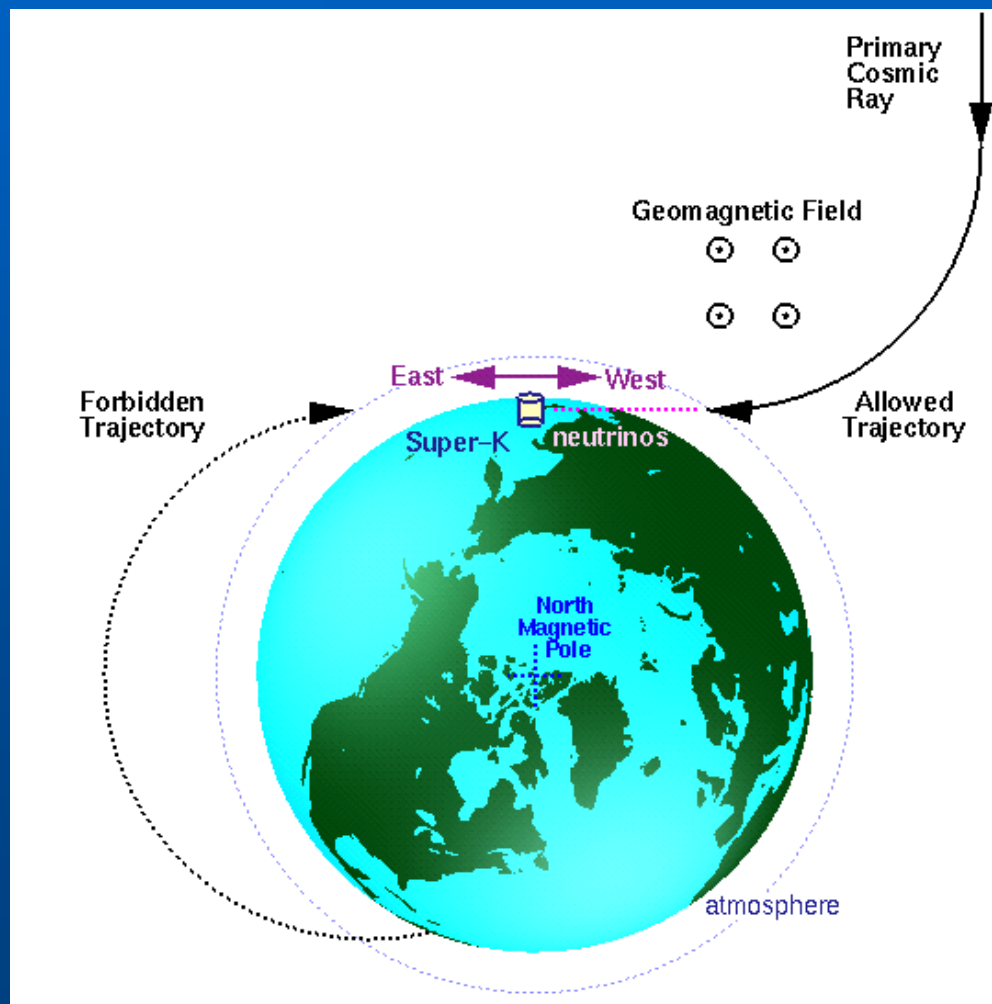


широтний, чи геомагнітний, ефект (1927)



пояси ван Аллена (1958)  
( $E$  від 1 до 1000 МэВ)

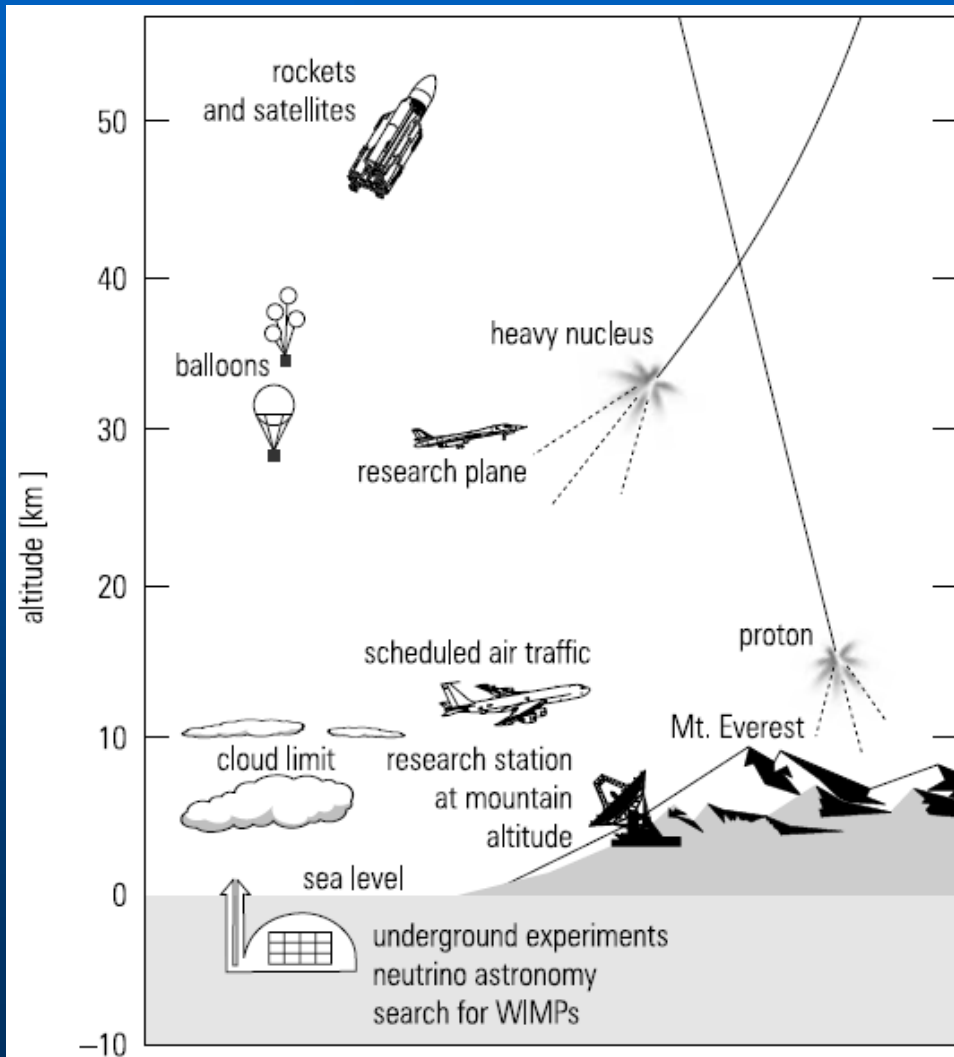
# “Східно-західний ефект”: КП – переважно протони



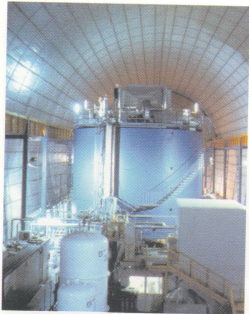
Магнітне поле Землі  
зумовлює  
домінуючий потік КП  
зі **заходу на схід**  
(сила Лоренца;  
правило лівої руки)



# Методи детектування КП



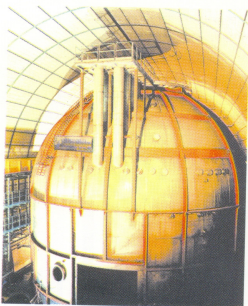
# Gran Sasso - Borexino



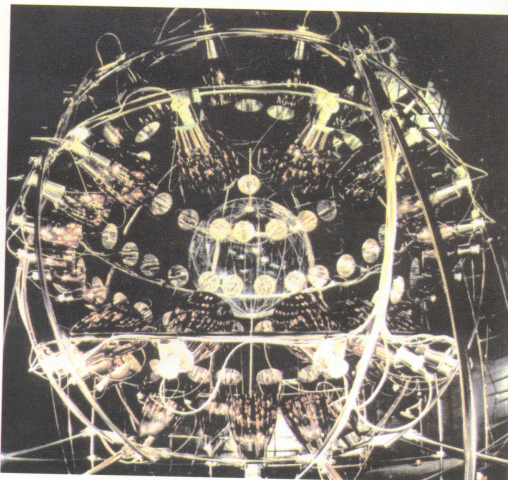
Il CTF (Counting Test Facility), prototipo dell'esperimento Borexino

## L'ESPERIMENTO BOREXINO

BOREXINO è l'esperimento che potrebbe contribuire in maniera decisiva al problema dei neutrini solari. Si tratta infatti di un rivelatore che una volta ultimato sarà in grado di misurare in tempo reale, con altissima statistica, le interazioni dei neutrini solari prodotti nella reazione che coinvolge i nuclei di Be. Questo è uno dei processi che avvengono nel Sole ed è di fondamentale importanza per comprenderne il meccanismo. La fase delle prove preliminari si è conclusa con i risultati del prototipo del rivelatore Counting Test Facility, dedicato allo studio delle schermature necessarie per ridurre il fondo, causato principalmente dalla radiazione naturale della roccia circostante. Il rivelatore sarà costituito da una sfera centrale perfettamente trasparente, contenente circa 300 tonnellate di scintillatore liquido ad un livello di radio purezza di una parte su dieci milioni di miliardi, mai raggiunto sino ad ora; la sfera sarà osservata da 2.200 fotomoltiplicatori racchiusi in una sfera d'acciaio contenente 1.000 tonnellate di liquido schermante. Tutta la struttura sarà immersa in un contenitore con 2.400 tonnellate di acqua estremamente purificata. Ogni giorno interagiranno nell'esperimento circa 50 neutrini.



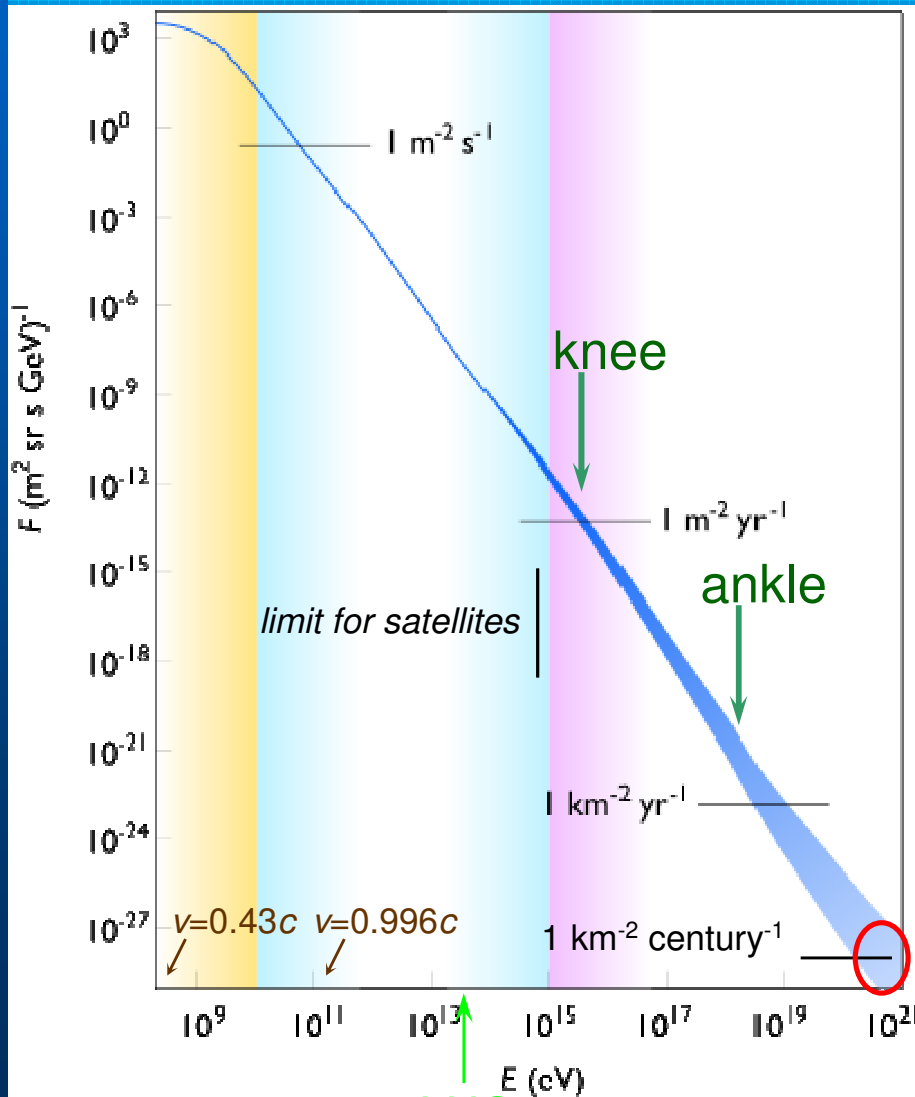
Contenitore esterno di Borexino in fase di costruzione



Struttura interna del CTF prima del riempimento con acqua ultrapura



# Спектр космічних променів



макроскопічна енергія

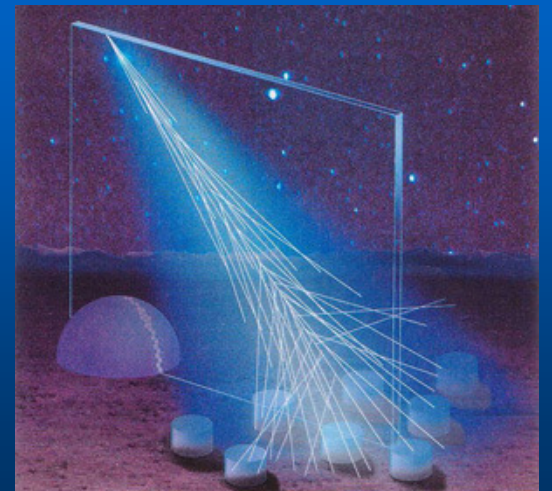
Незважаючи на низькі концентрації ( $<10^{-4} \text{ см}^{-3}$  при типовій  $1 \text{ см}^{-3}$ ), КП відіграють суттєву роль в енергетичному балансі Всесвіту (густина енергії  $w_{cr} \sim w_{gas} \sim w_B$ )

- Спектр КП простягається по енергії більше, ніж на 12 порядків.
- Спектр має степеневий характер; зі змінами нахилу в областях  $3 \cdot 10^{15} \text{ eV}$  ("knee") і  $3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$  ("ankle").

Найвища енергія КП зафіксована до сьогодні, складає понад  $10^{20} \text{ eV}$ , що еквівалентно кінетичній енергії тенісного м'ячика зі швидкістю  $\sim 100 \text{ км/с}$

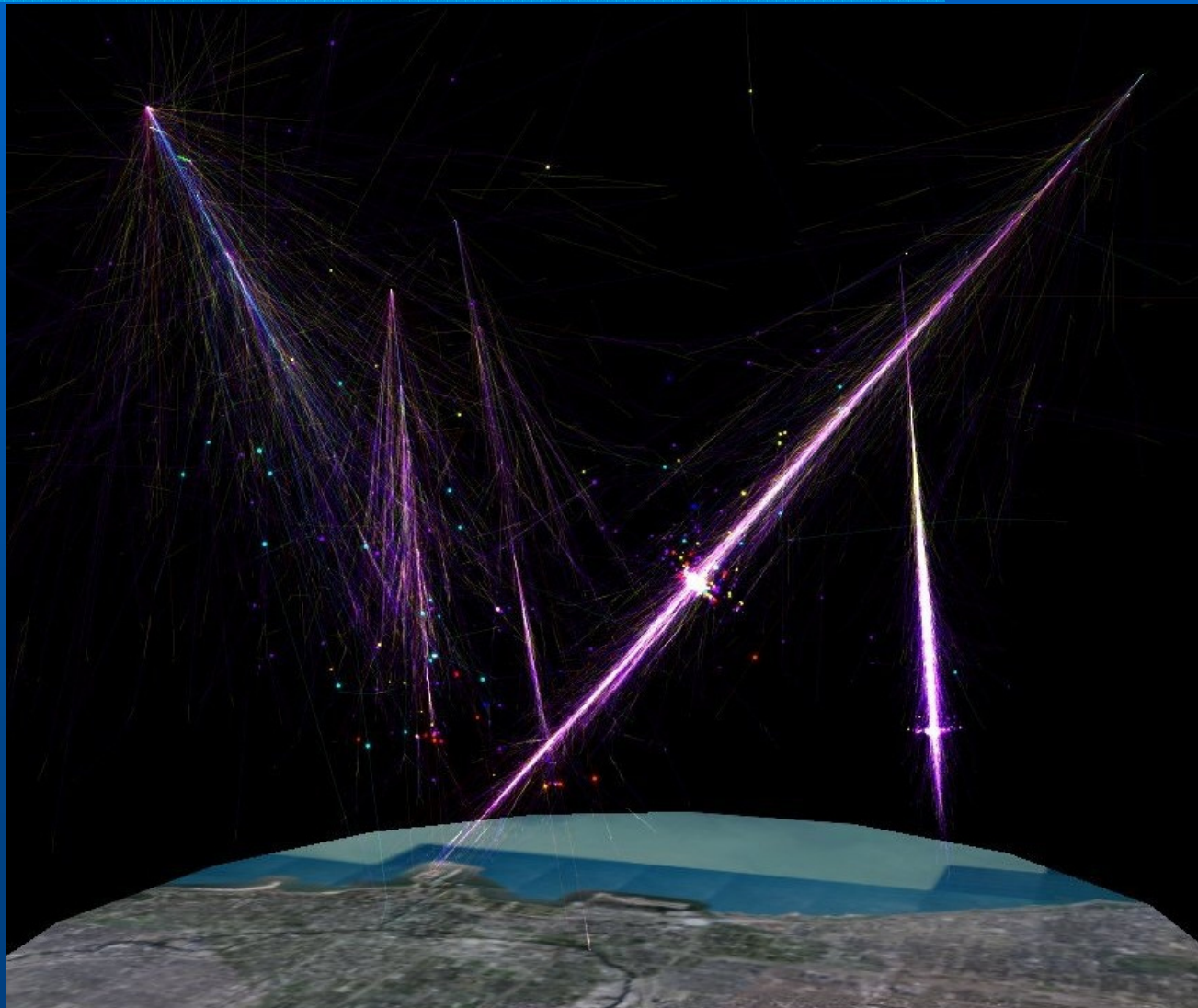


# Космічні промені надвисоких енергій





# Взаємодія первинного променя

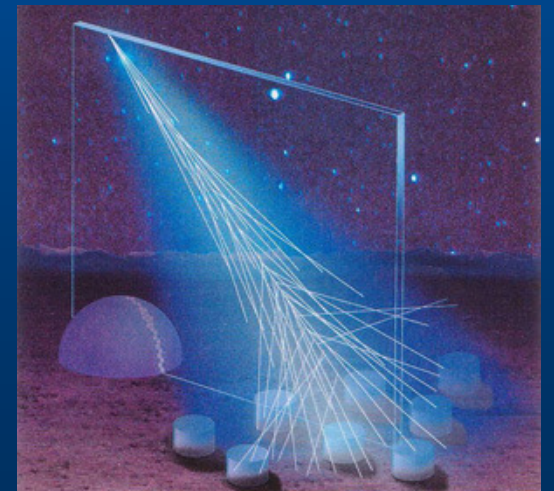


Первинний космічний промінь взаємодіє з елементарними частками в атмосфері, утворюючи

“широку атмосферну зливу”

# Широка атмосферна злива

Космічні промені з надвисокими енергіями спостерігаються шляхом детектування таких широких атмосферних злив

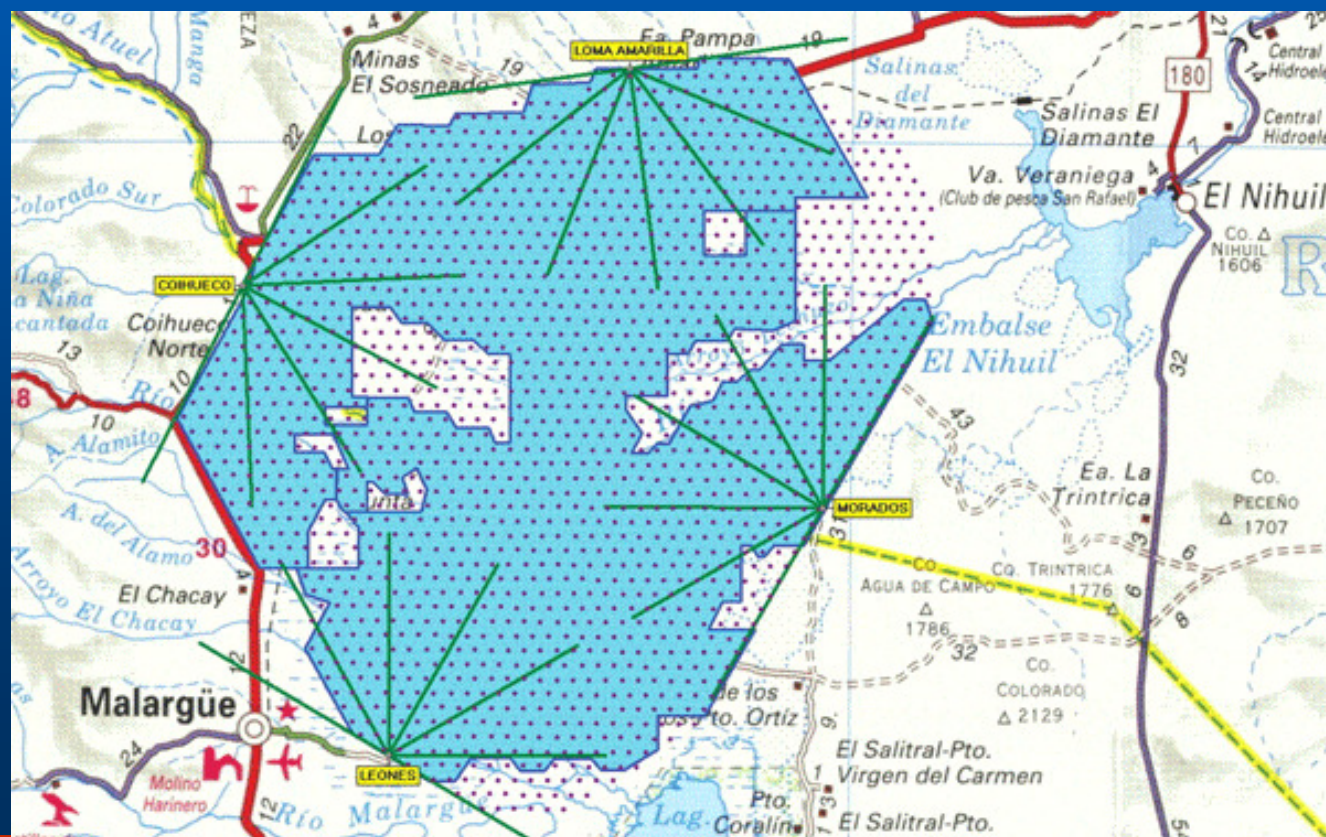




# Эксперимент Оже (з 2004)

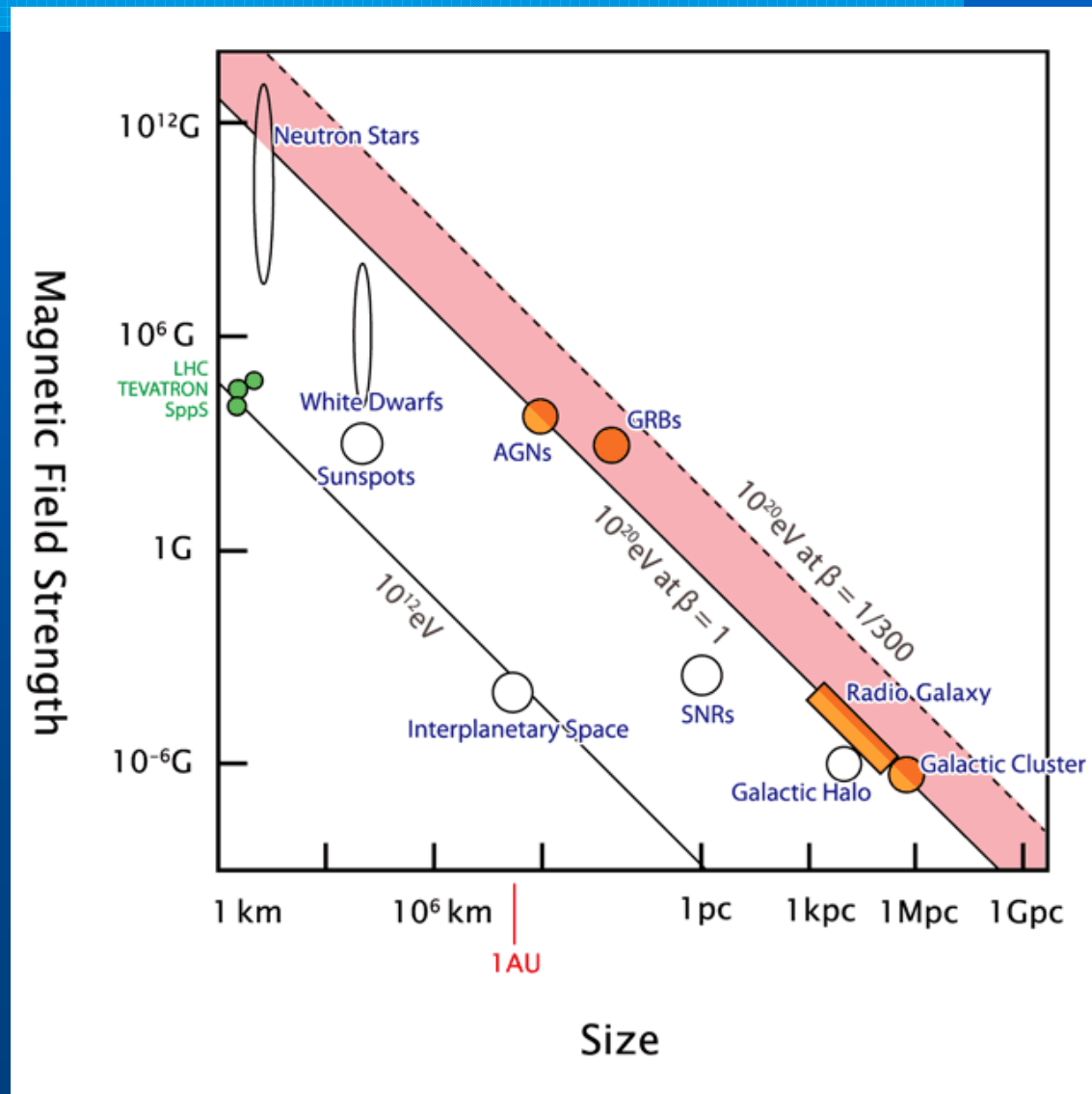


Аргентина  
(детектор  
3000 км<sup>2</sup>)





# Діаграма Гіласа



*Можливі джерела космічних променів надвисоких енергій*

Теоретична верхня межа на енергію частки, визначена розміром та магнітним полем астрономічного об'єкта

# Кінець спектру КП ?

Теорія: повинен існувати кінець спектру космічних променів, якщо немає "близьких" джерел

nucleon

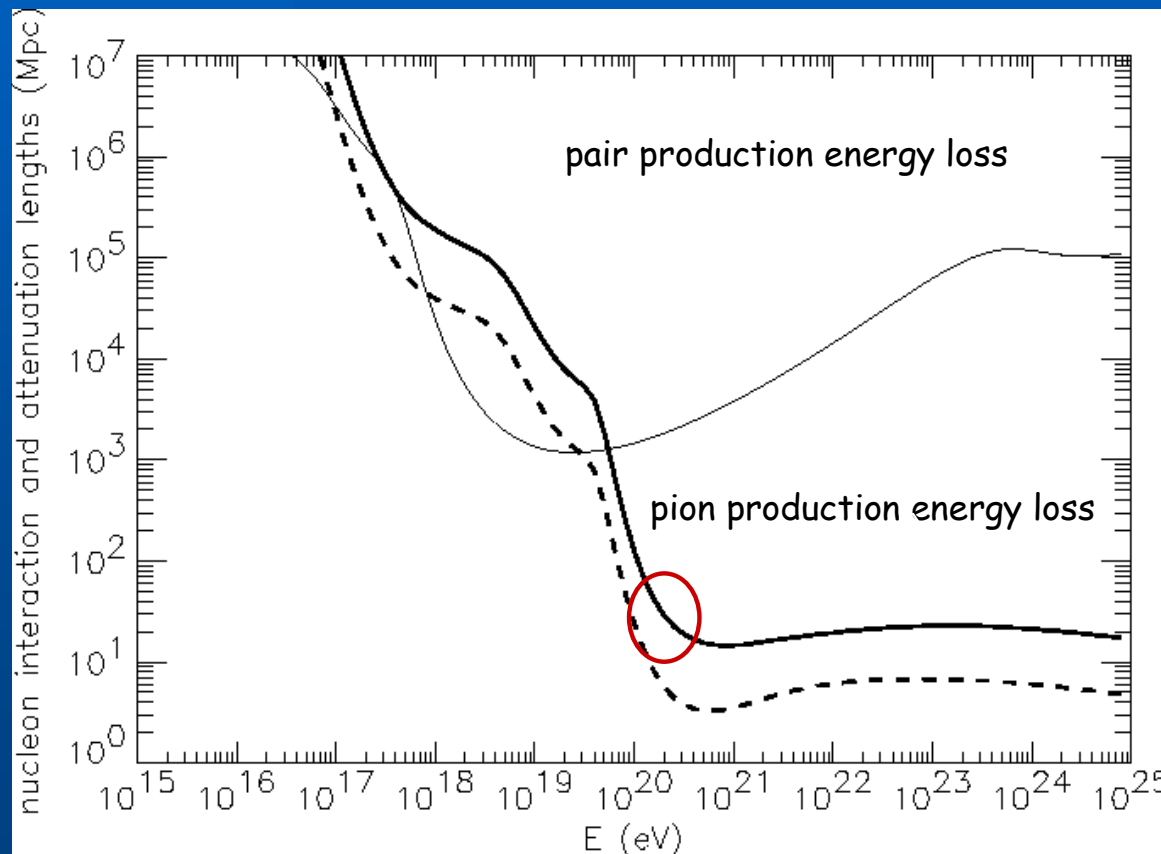
$\gamma$  (CMBR)

Ядро продукує піон внаслідок взаємодії з CMBR.

Частинки з енергіями,  $> 10^{20}$  eV, втрачають енергію на відстані до 50 Мпс

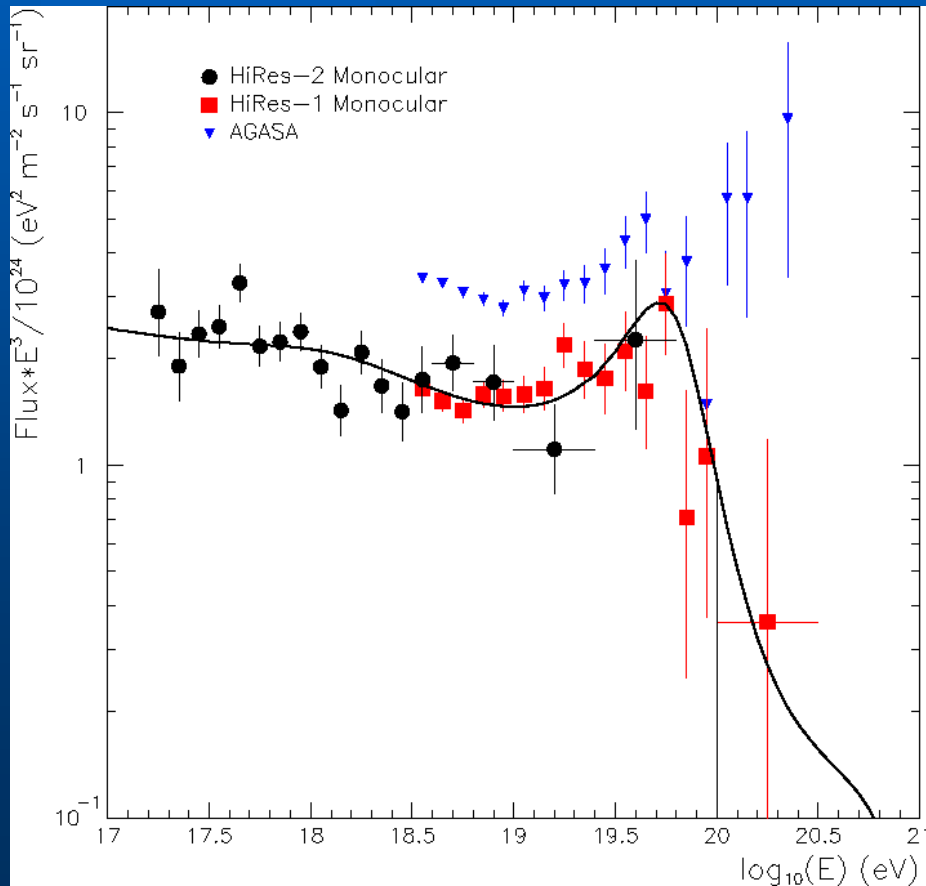
⇒ джерела повинні бути "поряд" ( $< 50$  Мпс)

⇒ якщо спостерігаються такі КП, то проблема: джерел немає на такій відстані

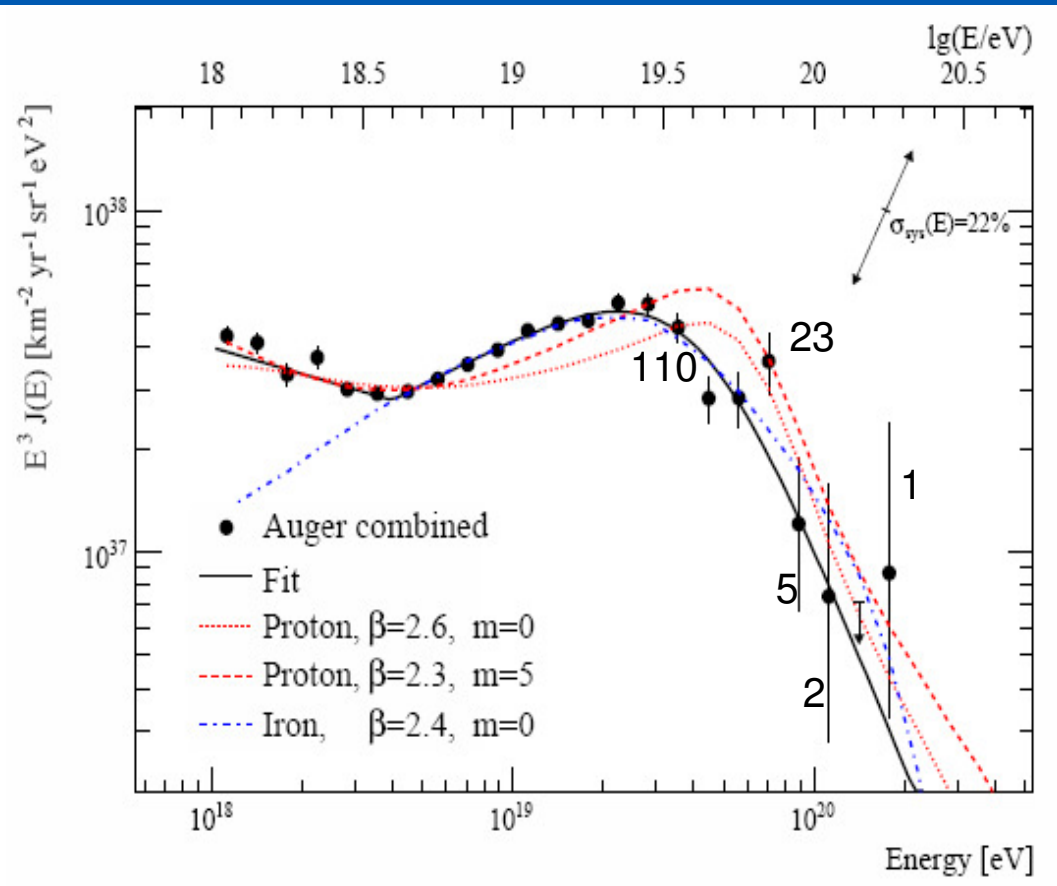


# Спостереження

HiRes+AGASA  
2002



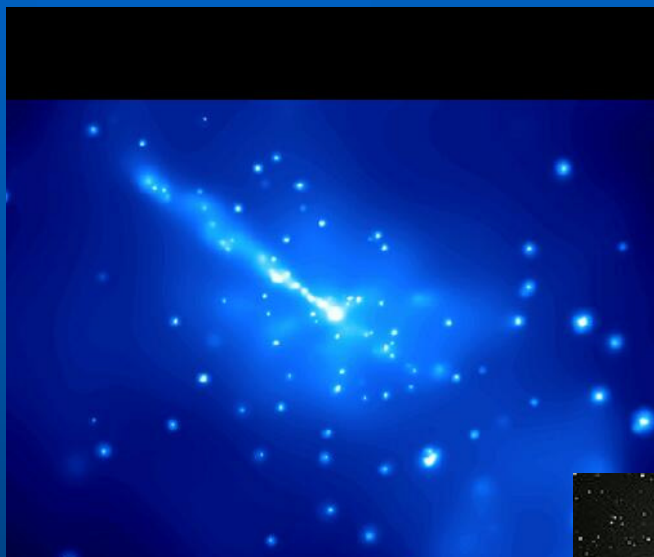
Auger  
2009



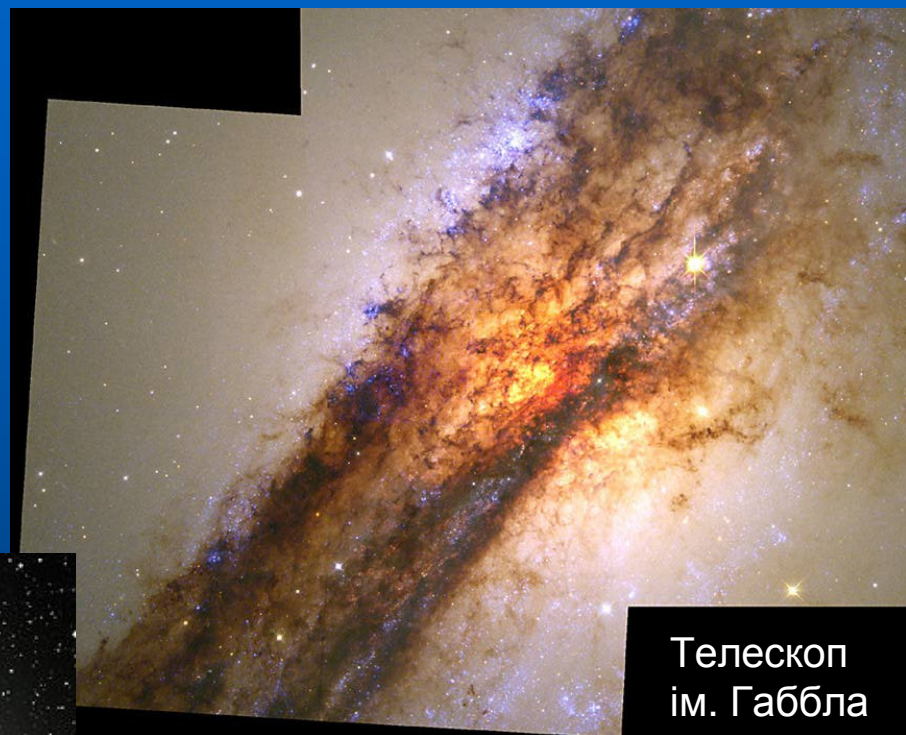
Аргентина  
(детектор  
3000 км<sup>2</sup>)



# Centaurus A – джерело КП надвисоких енергій ?



Рентгенівська обсерваторія Chandra



Телескоп ім. Габбла



Радіотелескоп АРЕХ

$D=4-5 \text{ Mpc}$

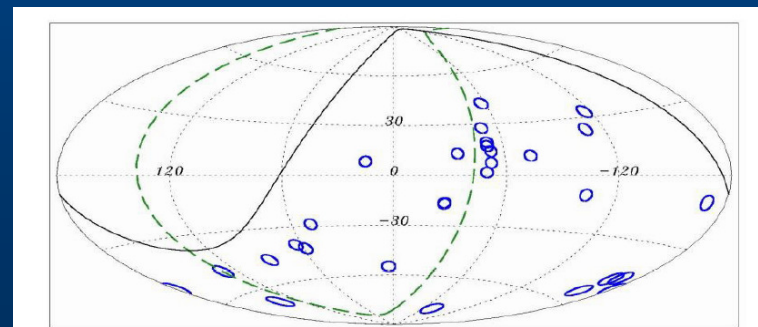
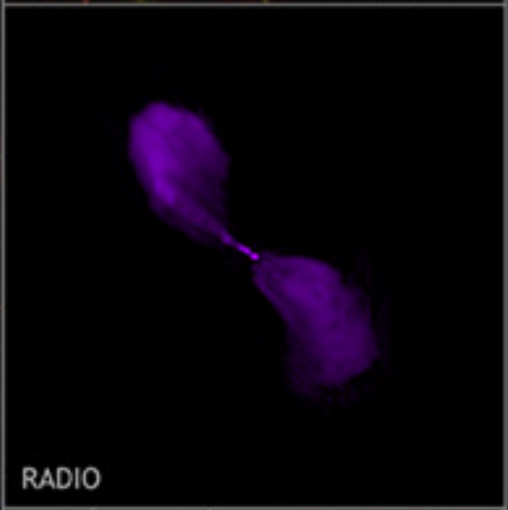
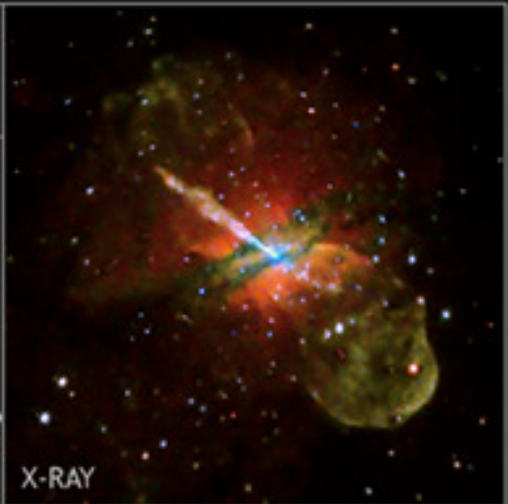
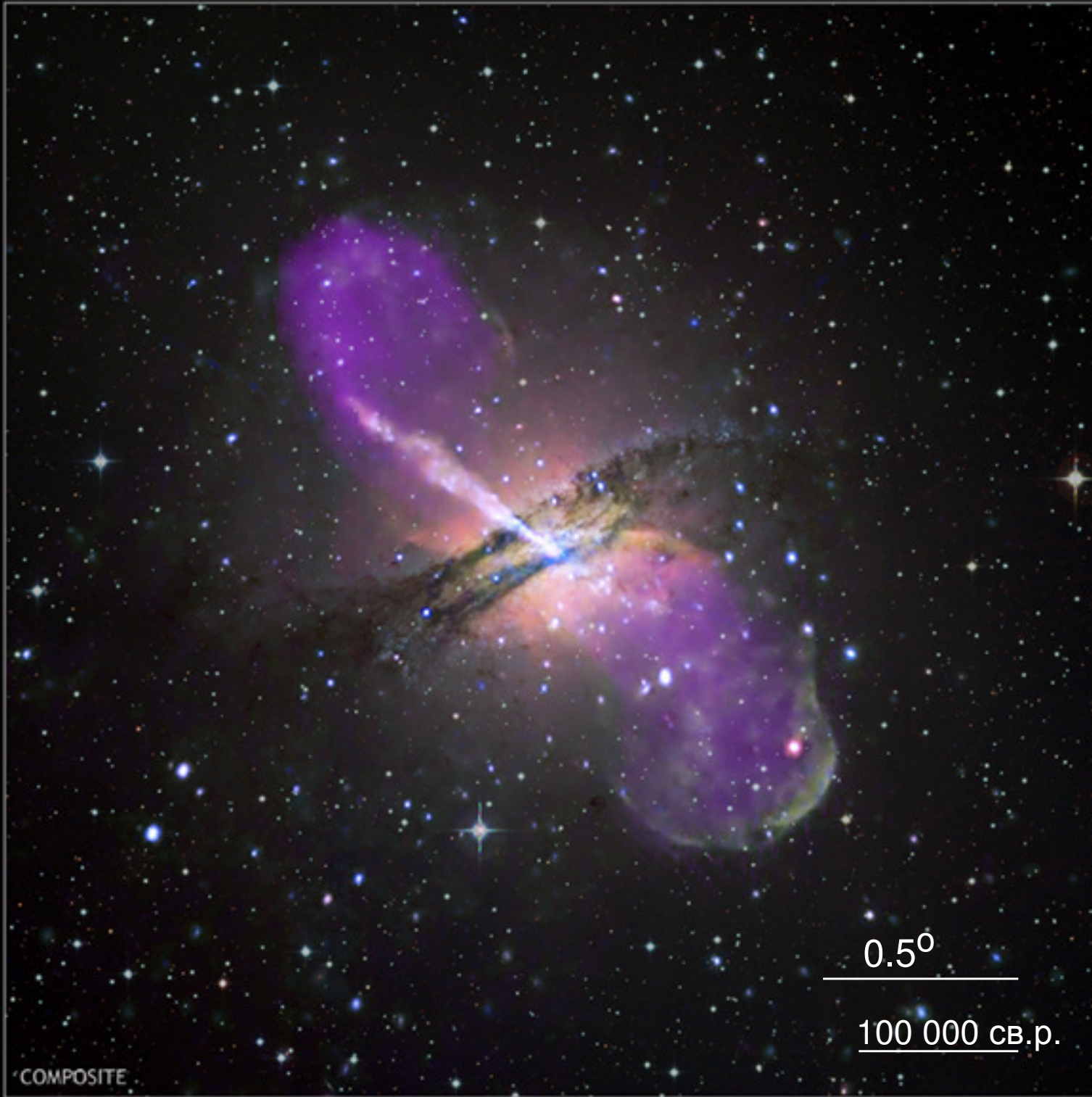


Figure 14. Plot in galactic coordinates showing the high-energy events as small blue circles. The supergalactic plane is indicated by the green dashed line.





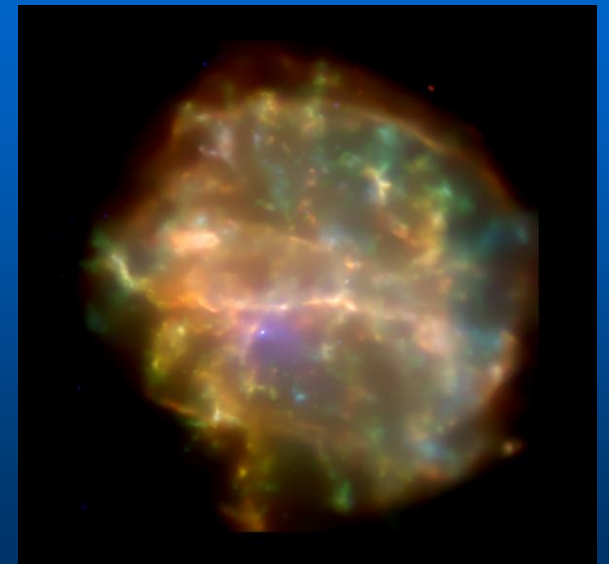
0.5°

100 000 СВ.р.

COMPOSITE

OPTICAL

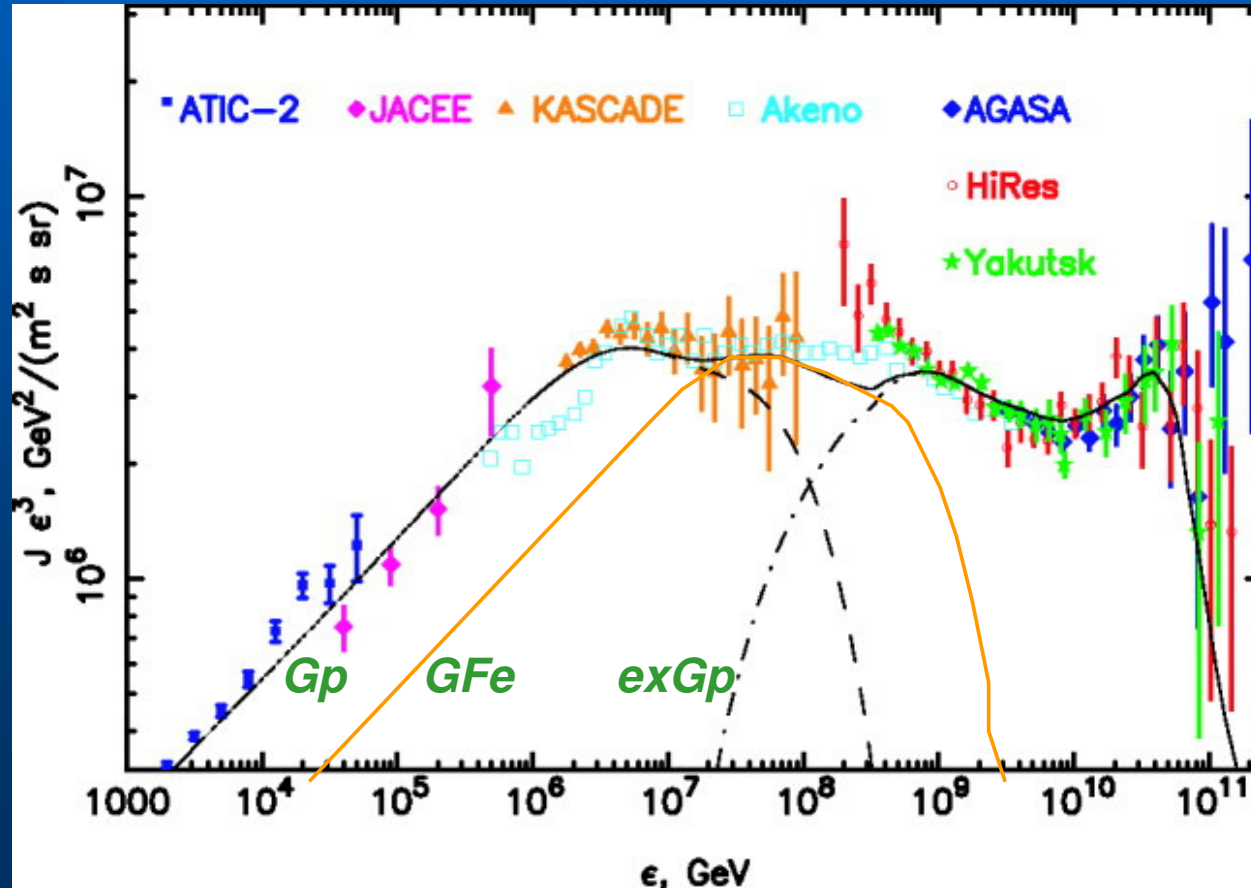
# Галактичні космічні промені





# Компоненти в спектрі КП

## галактична та позагалактична компоненти



Космічні промені з енергіями до  $10^{15}$ - $10^{17}$  eV прискорюються в Галактиці

Основними джерелами космічних променів в Галактиці є залишки наднових зір (ЗН)

# *Від наднової до залишку наднової*

колапс ядра



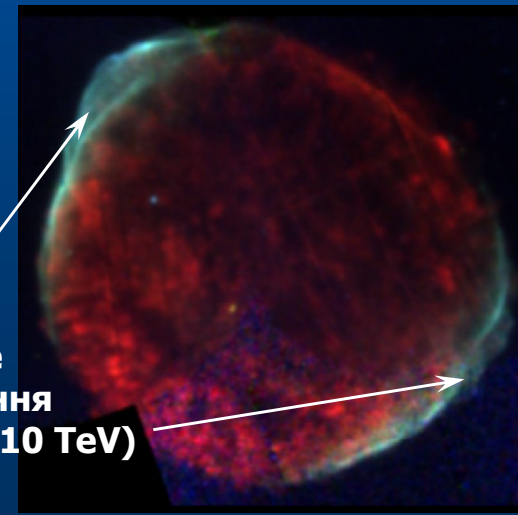
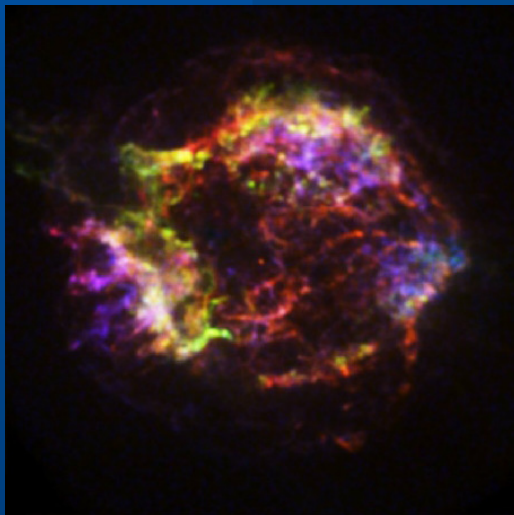
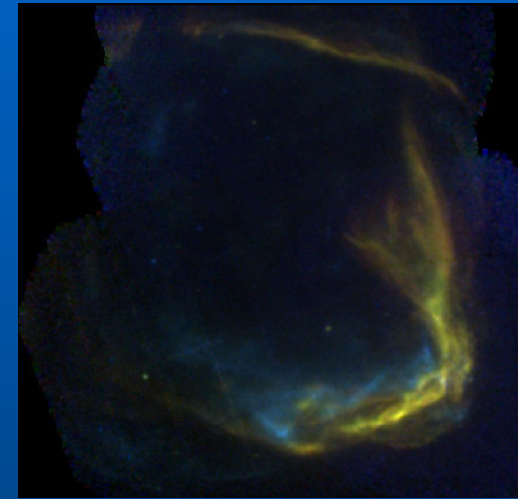
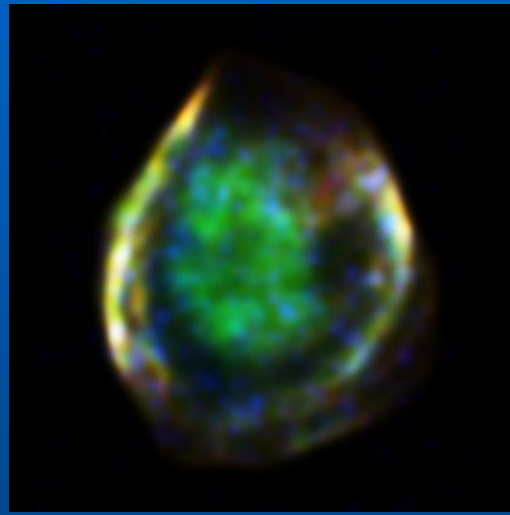
# *Інший тип вибуху (SNIa)*

термоядерний вибух





# Залишки наднових зір



Синхротронне  
випромінювання  
електронів (~ 10 TeV)

Chandra

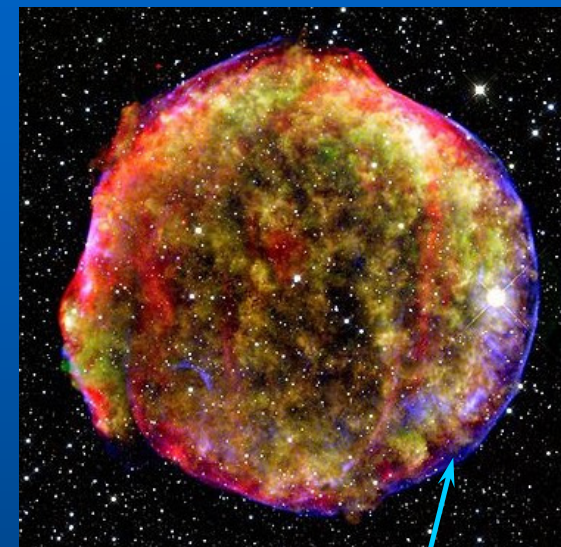
Chandra

XMM

Cas A (Mg XII, Si XIII), G292.2-1.8 (OVII/VIII, Ne, Si XIII),  
E0102-7219 (OVII, OVIII, Ne/Mg), Dem L71 (O, Fe L, Si),  
SN 1006 (O VII, 0.7-2 keV, 2-7 keV), RCW 86 (O VII, 0.7-2  
keV, 2-7 keV) – (RGB channels)

# *Космічні промені в залишках наднових вивчаються за їх випромінюванням*

- Космічні промені суттєво відхиляються магнітним полем Галактики від напрямків на джерела.
- Тому можна аналізувати лише випромінювання КП, яке виникає внаслідок їх взаємодії з
  - магнітним полем,
  - фотонами,
  - зарядженими частинками.

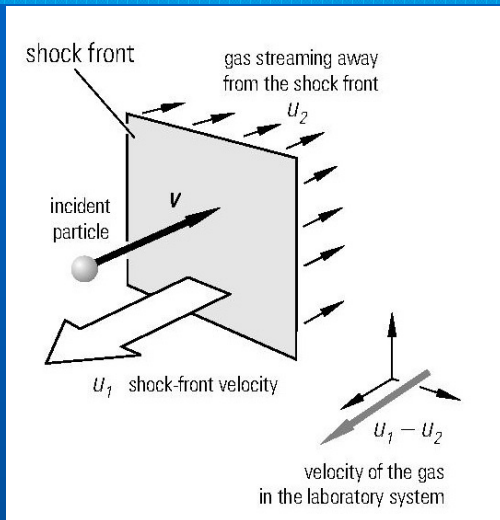


ЗН Тихо Браге (1572)

синій колір –  
випромінювання від КП

вивчення КП  
за їх випромінюванням –  
зв'язок з  
астрофізикою  
високих енергій

# Прискорення часток на фронті ударної хвилі



A particle of velocity  $v$  colliding with the shock front and being reflected gains the energy

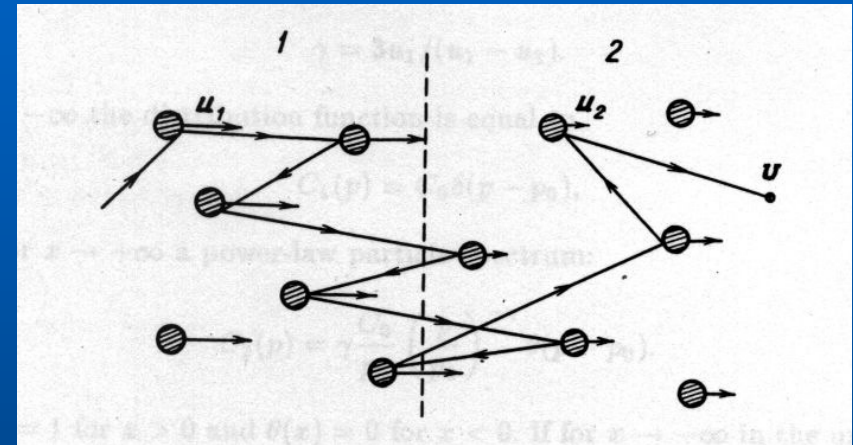
$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{1}{2}m(v + (u_1 - u_2))^2 - \frac{1}{2}mv^2 \\ &= \frac{1}{2}m(2v(u_1 - u_2) + (u_1 - u_2)^2). \end{aligned}$$

Since the linear term dominates ( $v \gg u_1, u_2, u_1 > u_2$ ), this simple model provides a relative energy gain of

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{2(u_1 - u_2)}{v}.$$

$$u_2 = u_1/4 = V/4, \quad \Delta E \sim V, \quad V - \text{shock velocity}$$

ударна хвиля



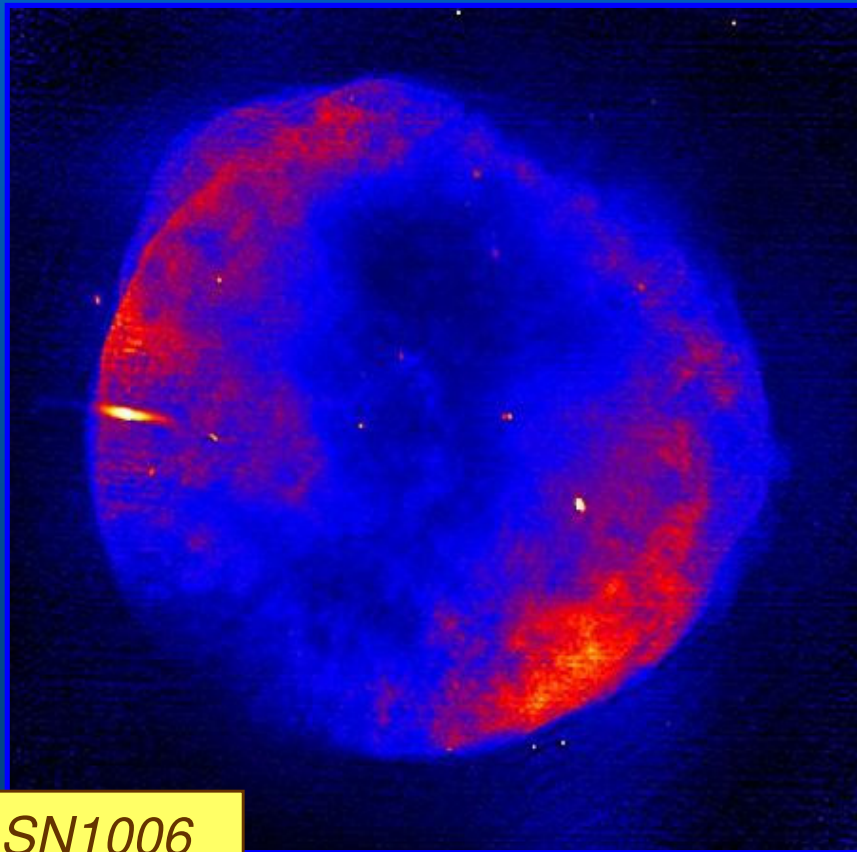
зовнішнє середовище

течія за фронтом

**Статистичний характер прискорення. Під час лобових зіткнень швидкість розсіюючих центрів більша, ніж під час навздогінних. Багаторазовий перетин фронту забезпечує за певний час суттєвий приріст енергії частки.**



# Радіоспостереження залишків наднових зір – з 1950-х років



SN1006



VLA  
Parkes

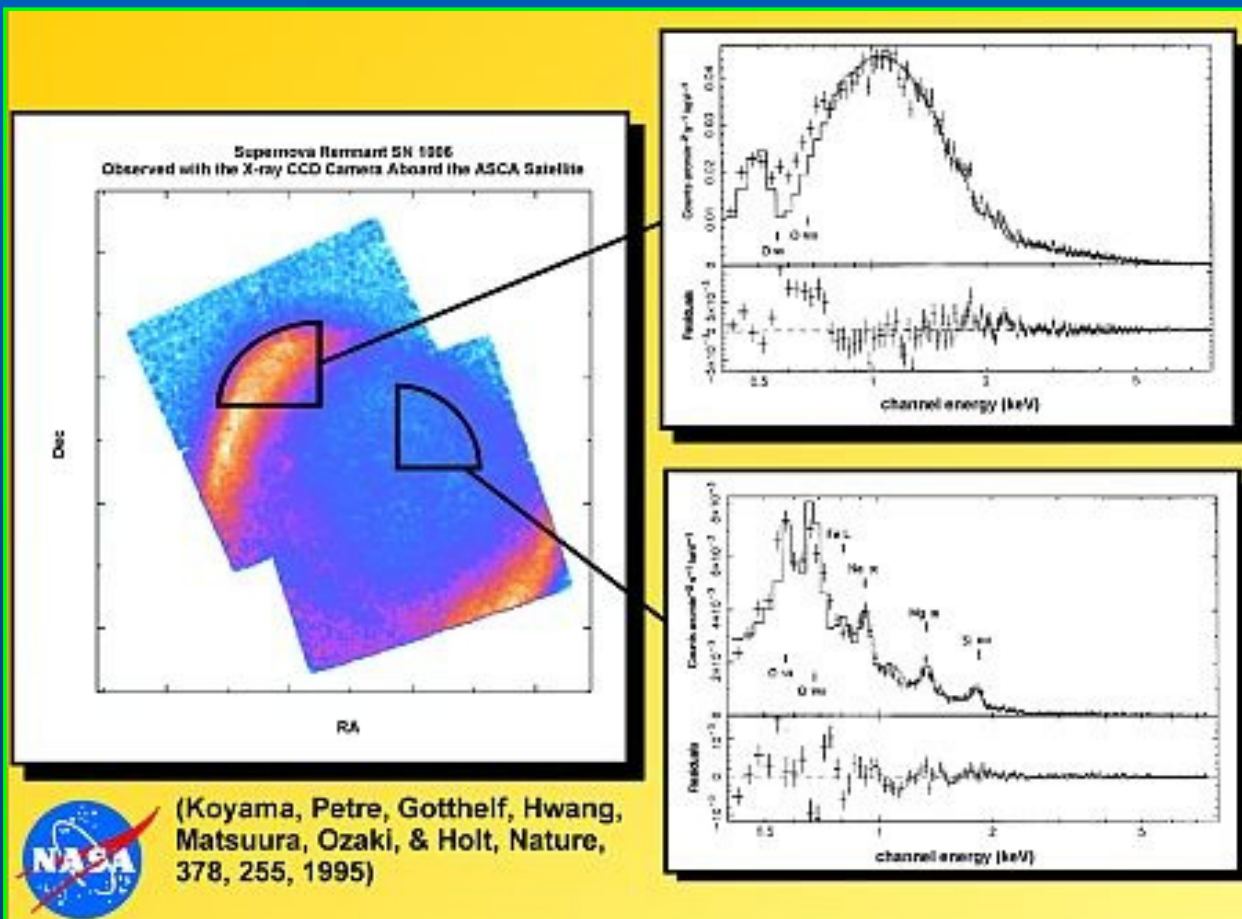




# Відкриття нетеплового рентгену від ЗН

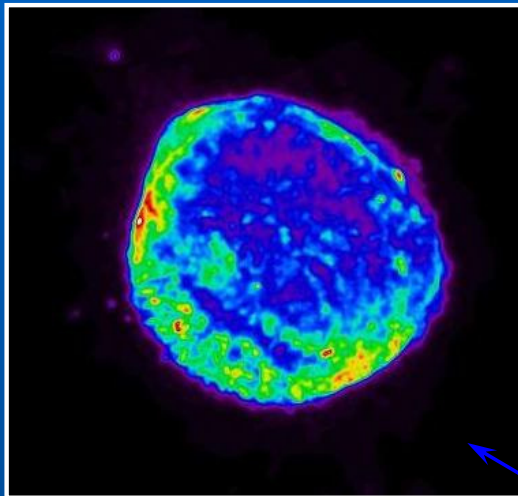
Нетеплове (від релятивістських часток) випромінювання від оболонки та теплове в інших областях:

1995

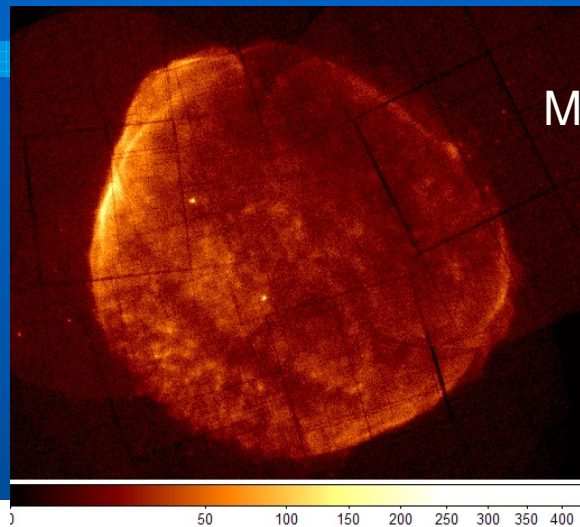


Значного імпульсу вивченню галактичних КП надало відкриття рентгенівського випромінювання від електронів, прискорених на ударній хвилі ЗН.

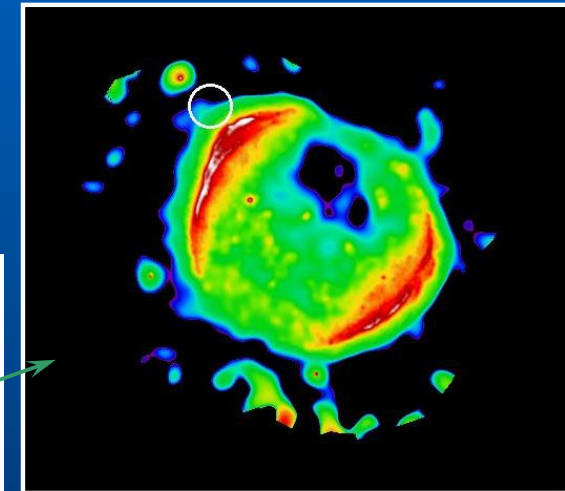
# X-ray images of SN1006



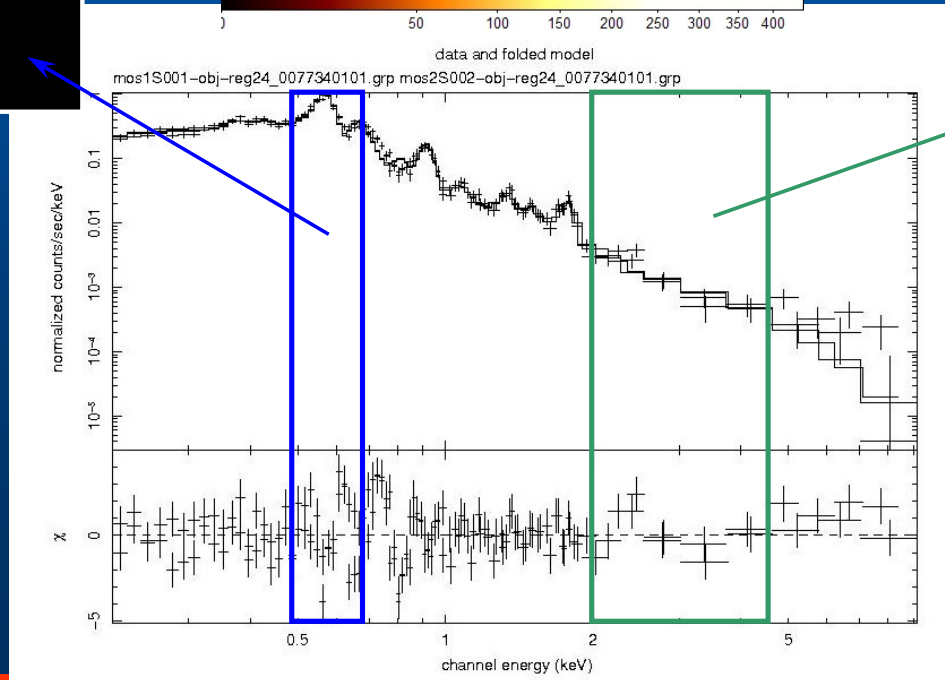
0.5-0.8 keV



Mosaic 0.5-10 keV

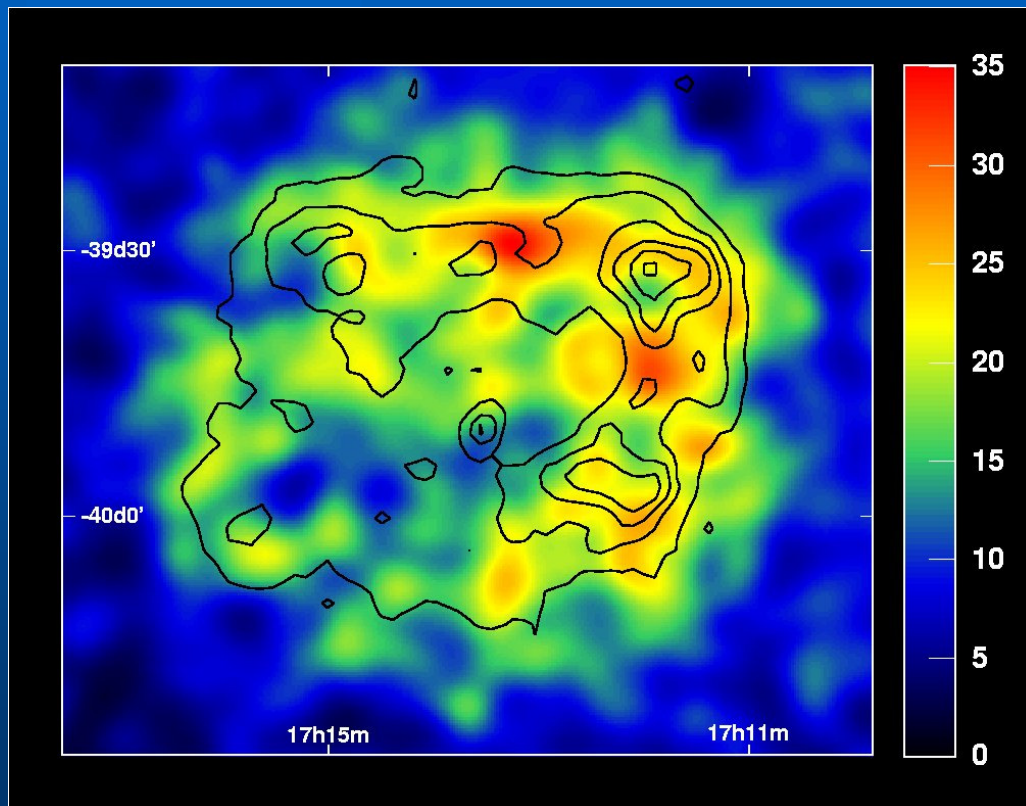


2.0-4.5 keV



випромінюють  
різні  
популяції часток

# Відкриття $TeV$ $\gamma$ -випромінювання ЗН



2004

Наступним суттєвим етапом стала перша карта небесного об'єкта – залишка наднової – в жорсткому гама-діапазоні.

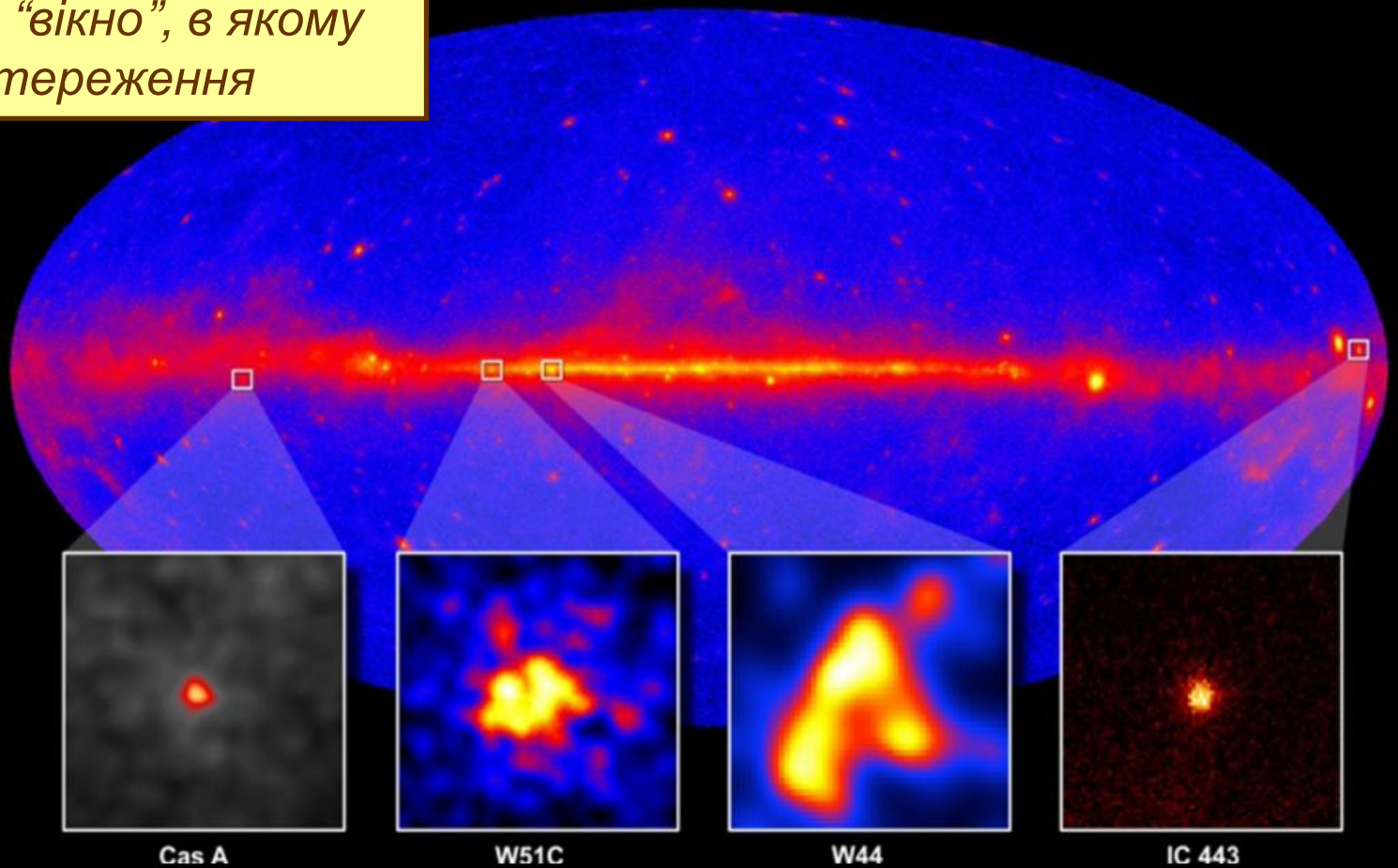
**RX J1713.7-3946.** Карта  $\gamma$ -випромінювання (HESS) та рентгенівські контури (ASCA) [Aharonian et al., Nature 2004]



# Гамма-обсерваторія ім. Фермі

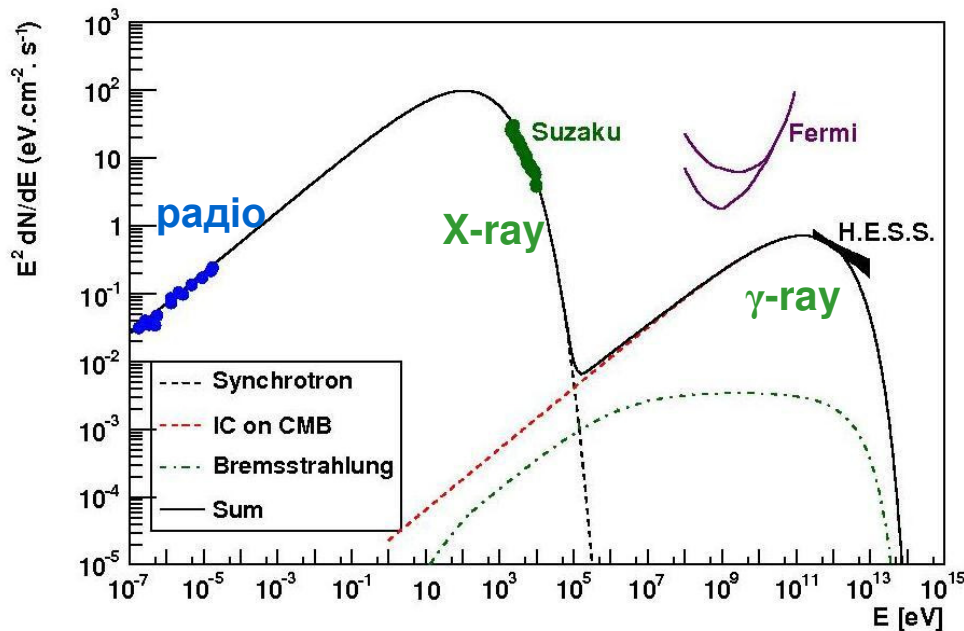
серпень 2008. Перекрито останнє електро-магнітне “вікно”, в якому ще не велися спостереження

First GeV Maps of SNRs

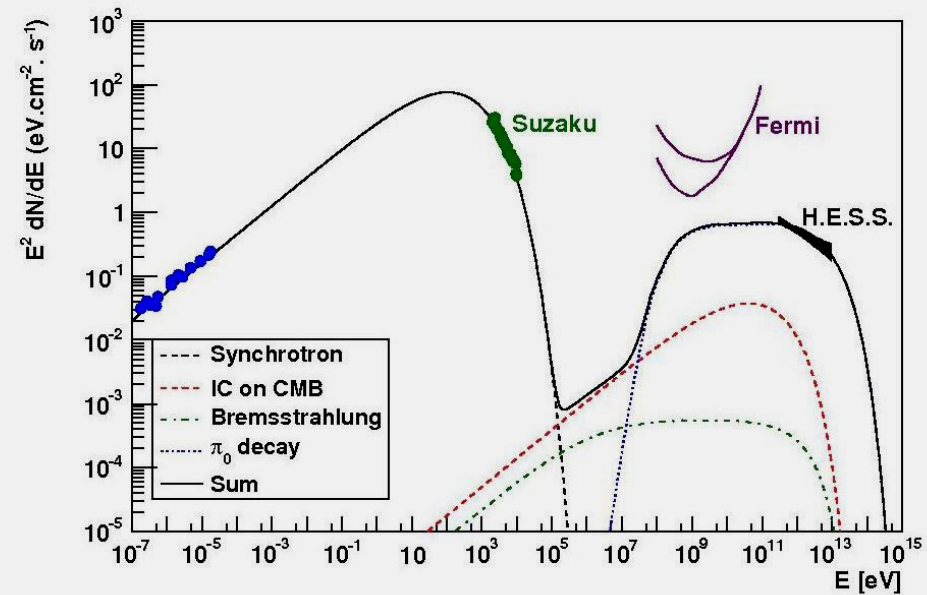


# але: Загадка гама-випромінювання ЗН

[HESS Collaboration 2010, arXiv:1004.2124]



**електронний сценарій**



**протонний сценарій**

Що ж випромінює  
гамма кванти в ЗН ?  
**Карті яскравості –  
важливе джерело  
інформації  
про властивості  
МП та КП**

# Підсумок

- Нині ведуться спостереження в усьому діапазоні електро-магнітного випромінювання
- Розвиток – в спостереженнях інших носіїв інформації, окрім фотона (космічні промені, нейтрино, гравітаційні хвилі)
- Астрофізика високих енергій, космофізика – пріоритетні напрямки сучасних фундаментальних досліджень
- Стан розвитку теоретичних та експериментальних методів досліджень передбачають значний потенціал відкриттів в найближчі 10-15 років