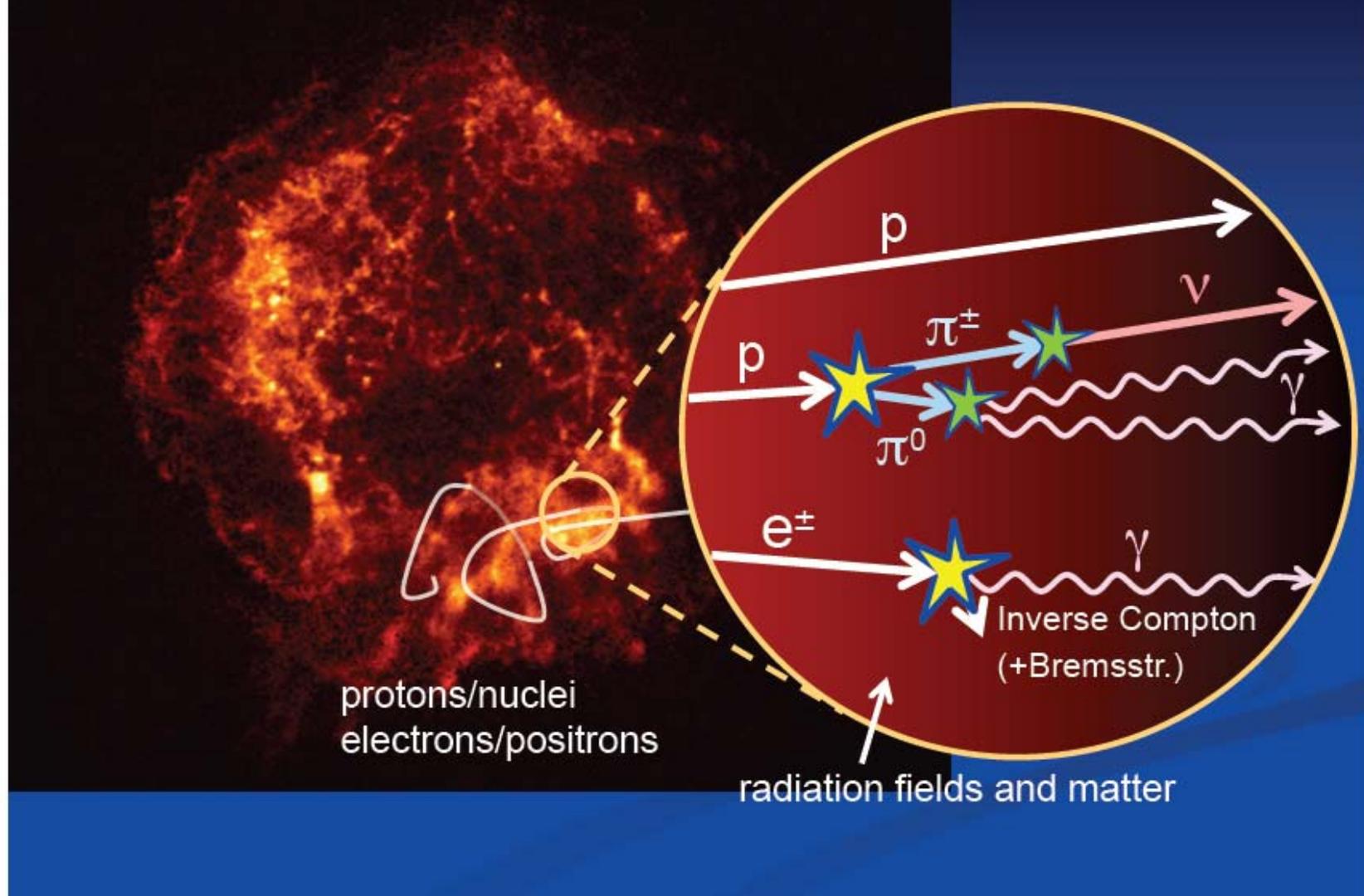


С. Синеговский

**Гамма-астрофизика высоких энергий
2018 г.**

Лекции 22-25

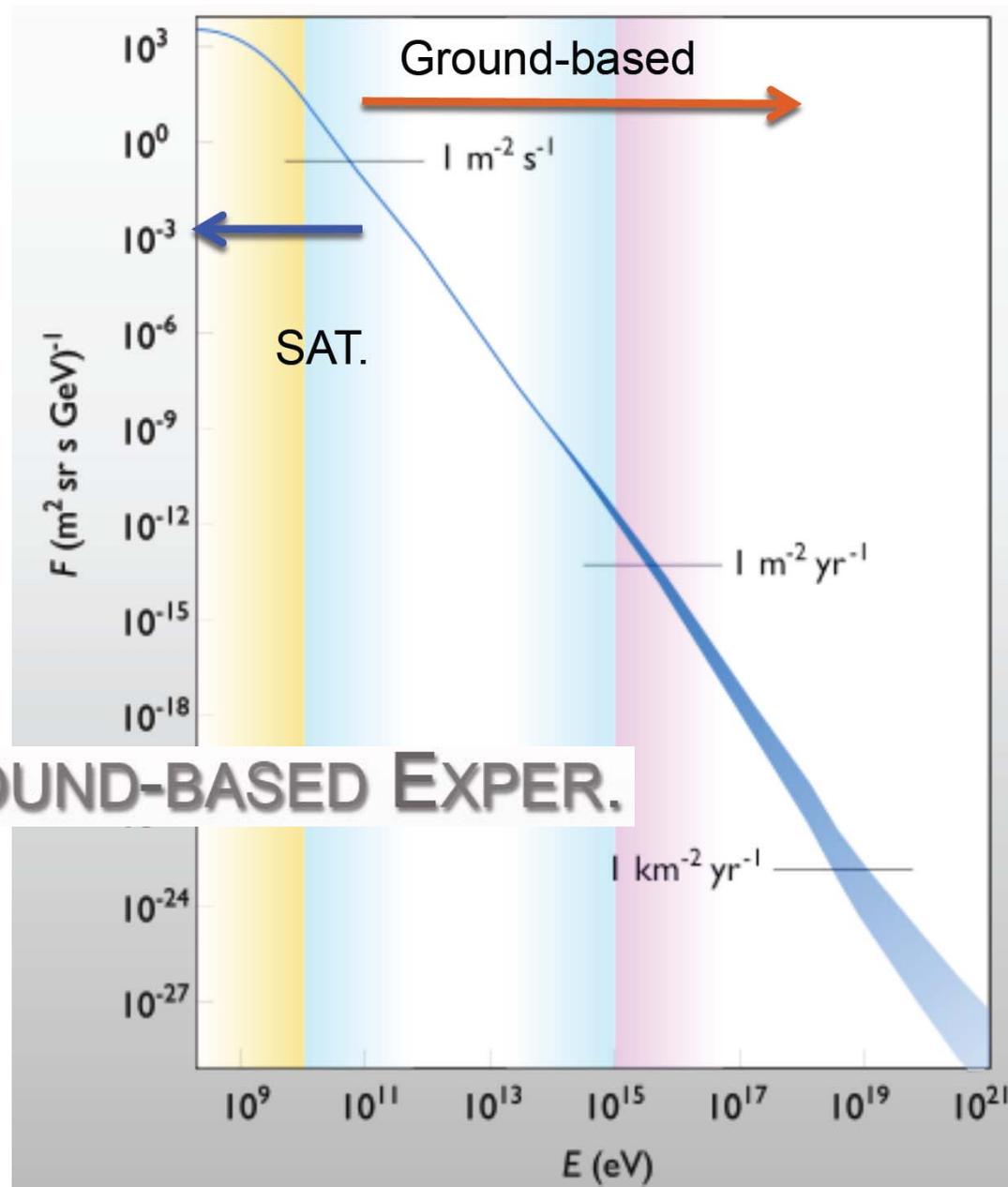
γ -ray production in cosmic accelerators



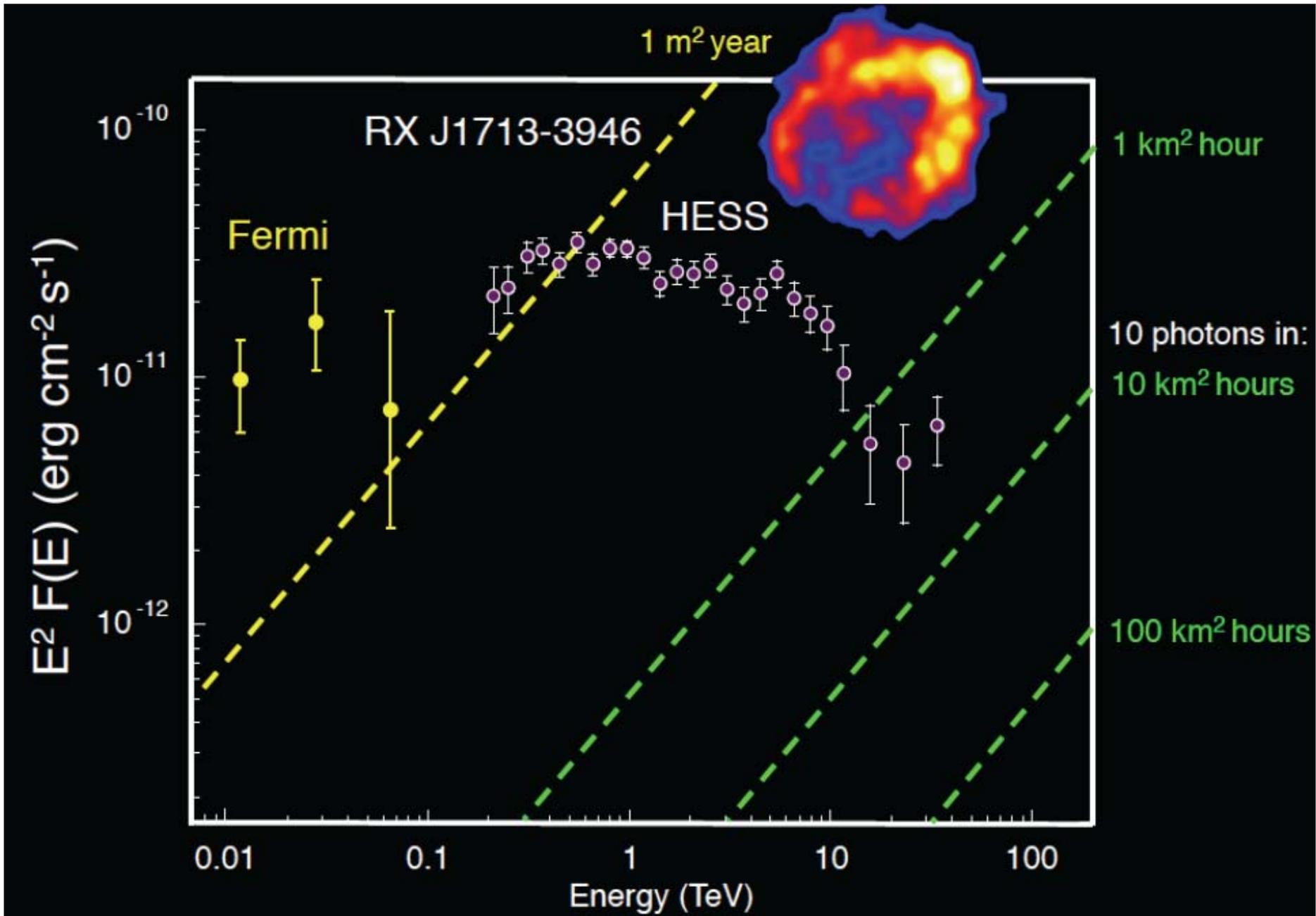
Гамма-астрономия

- поиск локальных галактических источников гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ;
- исследование потоков гамма-излучения от известных источников в области энергии выше 20-30 ТэВ;
- поиск диффузного гамма-излучения Галактики

ИСЗ и наземные установки для регистрации гамма-излучения

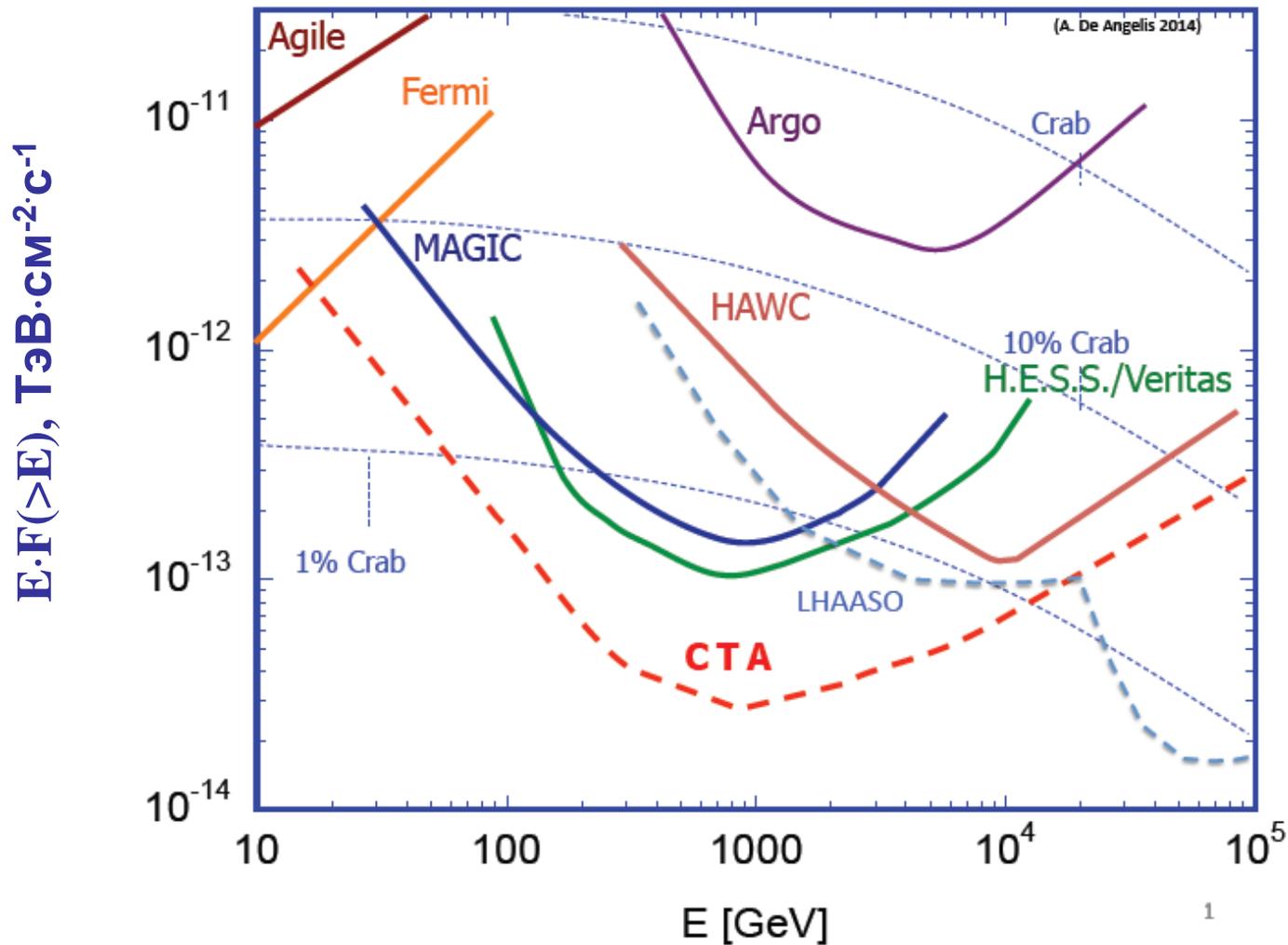


SATELLITE VS. GROUND-BASED EXPER.



Quantity	Fermi	IACTs	EAS
Energy range	20 MeV–200 GeV	100 GeV–50 TeV	400 GeV–100 TeV
Energy res.	5-10%	15-20%	~ 50%
Duty Cycle	80%	15%	> 90%
FoV	$4\pi/5$	$5^\circ \times 5^\circ$	$4\pi/6$
PSF	0.1°	0.07°	0.5°
Sensitivity	1% Crab (1 GeV)	1% Crab (0.5 TeV)	0.5 Crab (5 TeV)

Сравнение характеристик детекторов FermiLAT, IACT и ШАЛ. Чувствительность рассчитана для 1 года работы FermiLAT и установок ШАЛ, и более 50 час для IACT.



Минимальная измеряемая интенсивность источников на уровне 5σ (чувствительность) некоторых действующих и планируемых детекторов гамма-излучения высокой энергии. Характеристики для детекторов ШАЛ и спутниковых детекторов базируются на годовом наборе данных, для черенковских телескопов - на данных за 50 часов.

24.12.2018

Гамма-астрономия ВЭ

7

Диапазоны γ -излучения спектра

Region	Energy
LE/ME	$100 \text{ keV} < E < 100 \text{ MeV}$
HE	$100 \text{ MeV} < E < 100 \text{ GeV}$
VHE	$100 \text{ GeV} < E < 100 \text{ TeV}$
UHE	$100 \text{ TeV} < E < 100 \text{ PeV}$
EHE	$E > 100 \text{ PeV}$

Расстояния до наблюдаемых объектов
(в предположении, что основной
механизм поглощения γ -квантов:

$$R \approx 10 \text{ кпк} \quad \text{для } E \sim 1 \text{ ПэВ};$$

$$R \sim 100 \text{ Мпк}, \quad E < 100 \text{ ТэВ}$$

Region	Energy	Wavelength
γ -ray	$E > 100 \text{ keV}$ Precisely, $E > m_e c^2 = 511 \text{ keV}$	$\lambda < 1 \text{ pm}$ Precisely, $\lambda < \lambda_{\text{COMPTON}}^e = 2.43 \text{ pm}$
X-ray	$100 \text{ eV} < E < 100 \text{ keV}$	$1 \text{ pm} < \lambda < 10 \text{ nm}$
ultraviolet	$10 \text{ eV} < E < 100 \text{ eV}$	$10 \text{ nm} < \lambda < 100 \text{ nm}$
visible	$1 \text{ eV} < E < 10 \text{ eV}$ Precisely, $1.7 \text{ eV} < E < 3.2 \text{ eV}$	$100 \text{ nm} < \lambda < 1 \mu\text{m}$ Precisely, $380 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$
infrared	$1 \text{ meV} < E < 1 \text{ eV}$	$1 \mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$
microwave	$0.1 \mu\text{eV} < E < 1 \text{ meV}$	$1 \text{ mm} < \lambda < 10 \text{ cm}$
radio	$E < 0.1 \mu\text{eV}$	$\lambda > 10 \text{ cm}$

Механизмы генерации γ -излучения (e, p, ядра)

- e^+e^- - аннигиляция (линии): $e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
- тормозное излучение электронов и позитронов
- комптоновское (обратное) рассеяние на электронах
- синхротронное (магнитотормозное) излучение релятив. электронов
- изгибное излучение (сильные магнитных поля + ВЭ электроны)
- рентгеновское характеристическое излучение (возбуждение рекомбинация атомов)
- pp-столкновения (космические лучи) с рождением π^0 ; распад π^0 (линии)
- $p\gamma$ -взаимодействия (фоторождение пионов – пороговая реакция)
- ядерные переходы и распады (линии)
- излучение горячей плазмы ($T \sim 10^{10}$ К) – тепловой спектр (\sim МэВ)

Два класса: (I) **Диффузное излучение** - от взаимодейст. КЛ с веществом и рад. полями (галактическое) или слабых удаленных источников (внегалактическое); в диске – тормозное излучение релятив. электронов и от распада π^0 ; в гало – ICS электронов (КЛ_e) на рад. полях (СМВ, радио, опт., рентг.);

(II) **γ -излучение от локальных источников.**

Характер γ -излучения

Диффузное излучение

- взаимодействие КЛ с веществом
- взаимодействие КЛ с радиационными полями
- рассеяние релятив. электронов на РИ (изотропное рентгеновское)
- от совокупности астрофизических объектов

Наша Галактика - излучение в основном концентрируется в диске

Диффузное в диске: $E_\gamma \leq 100$ МэВ - тормозное изл. релятив. электронов (КЛ);

$E_\gamma \geq 300$ МэВ - γ -кванты от распада π^0 (КЛ + РИ).

Диффузное в гало: ICS электронов на рад. полях (РИ, радио, опти., рентген);
Плотность рад. полей по мере удаления от диска
падает гораздо медленнее, чем плотности вещества (газа)

Некоторые особенности γ -излучения

- $e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ $E_\gamma = 0.511$ МэВ; **малая интенсивность, высокий фон КЛ**
- **тормозное излучение электронов** - $1 \text{ МэВ} < E_\gamma < 100 \text{ МэВ}$;
- **комptonовское рассеяние на электронах** существенно для низких и высоких энергий - $E_\gamma \sim 1 \text{ МэВ}$ и $E_\gamma > 100 \text{ ГэВ}$;
- **синхротронное излучение электронов** $E_\gamma = 1 \text{ МэВ}$;  $E_e = 1 \text{ ПэВ}$, $H = 10^{-5} \text{ Э}$ (10^{-5} Гс)
- **распад π^0** $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ - **рождаются γ -кванты с энергиями** $100 \text{ МэВ} < E_\gamma < 100 \text{ ГэВ}$;
спектр излучения имеет max при $E_\gamma = 67.5 \text{ МэВ}$;

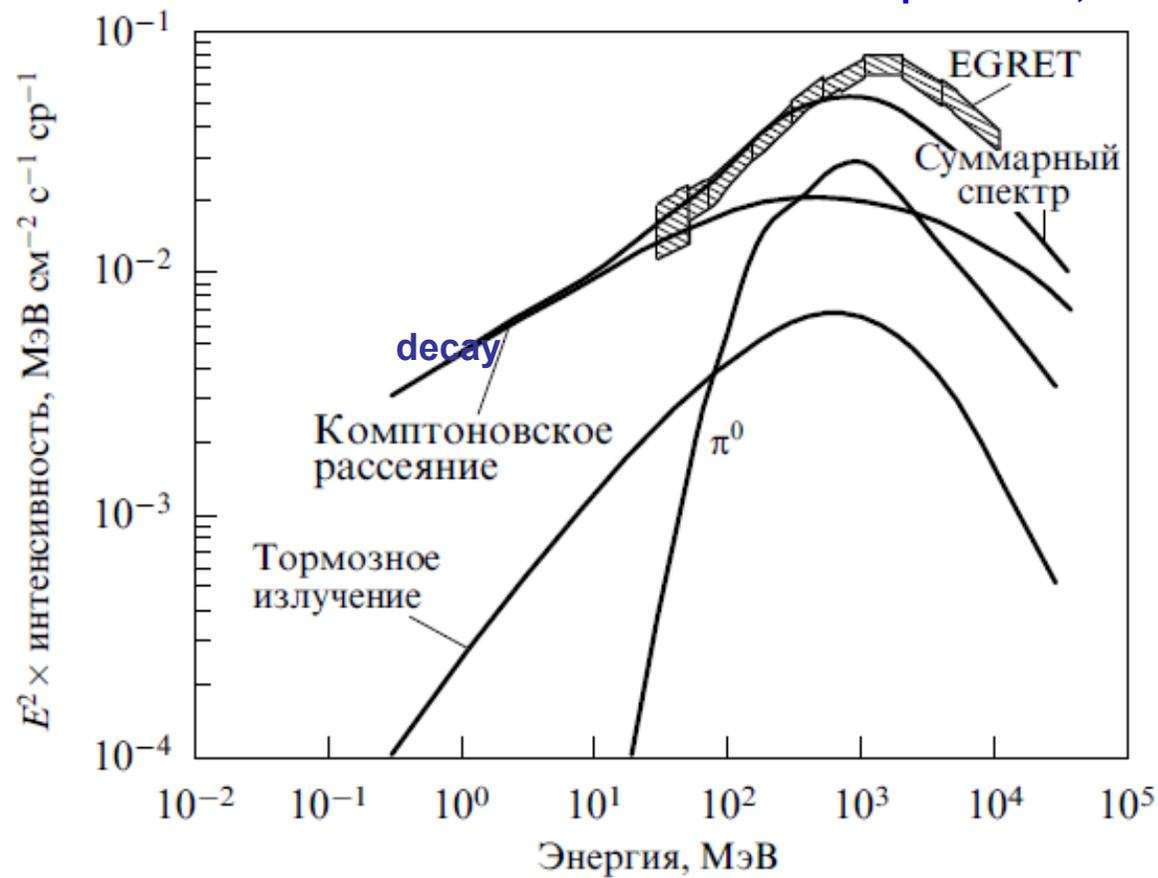
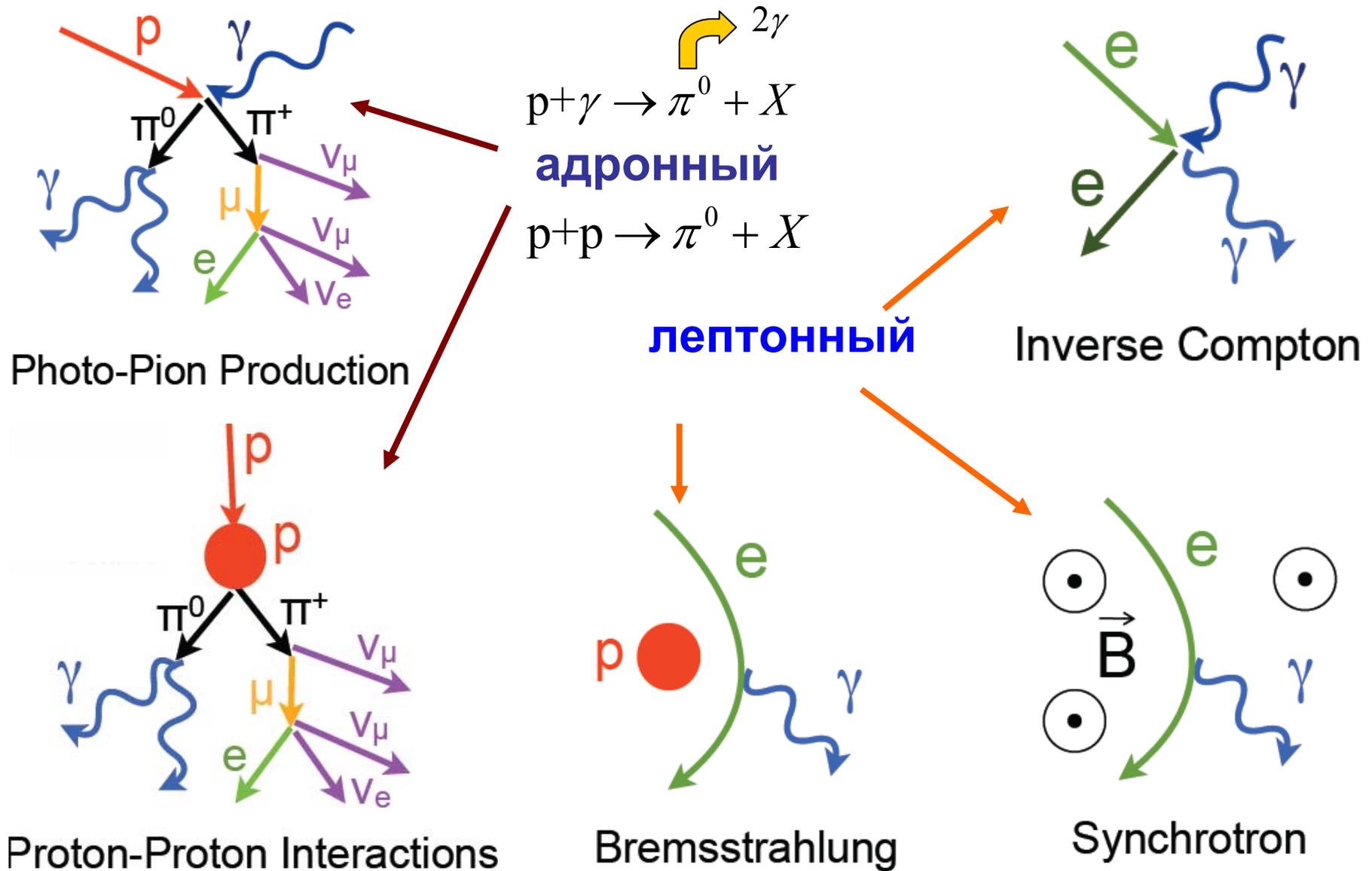


Рис. 2. Спектр диффузного галактического гамма-излучения [19]: данные наблюдений EGRET и результаты соответствующих теоретических расчетов для различных механизмов генерации гамма-излучения.

Механизмы генерации гамма-излучения

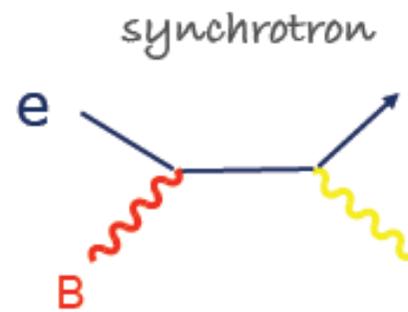


Лептонный механизм

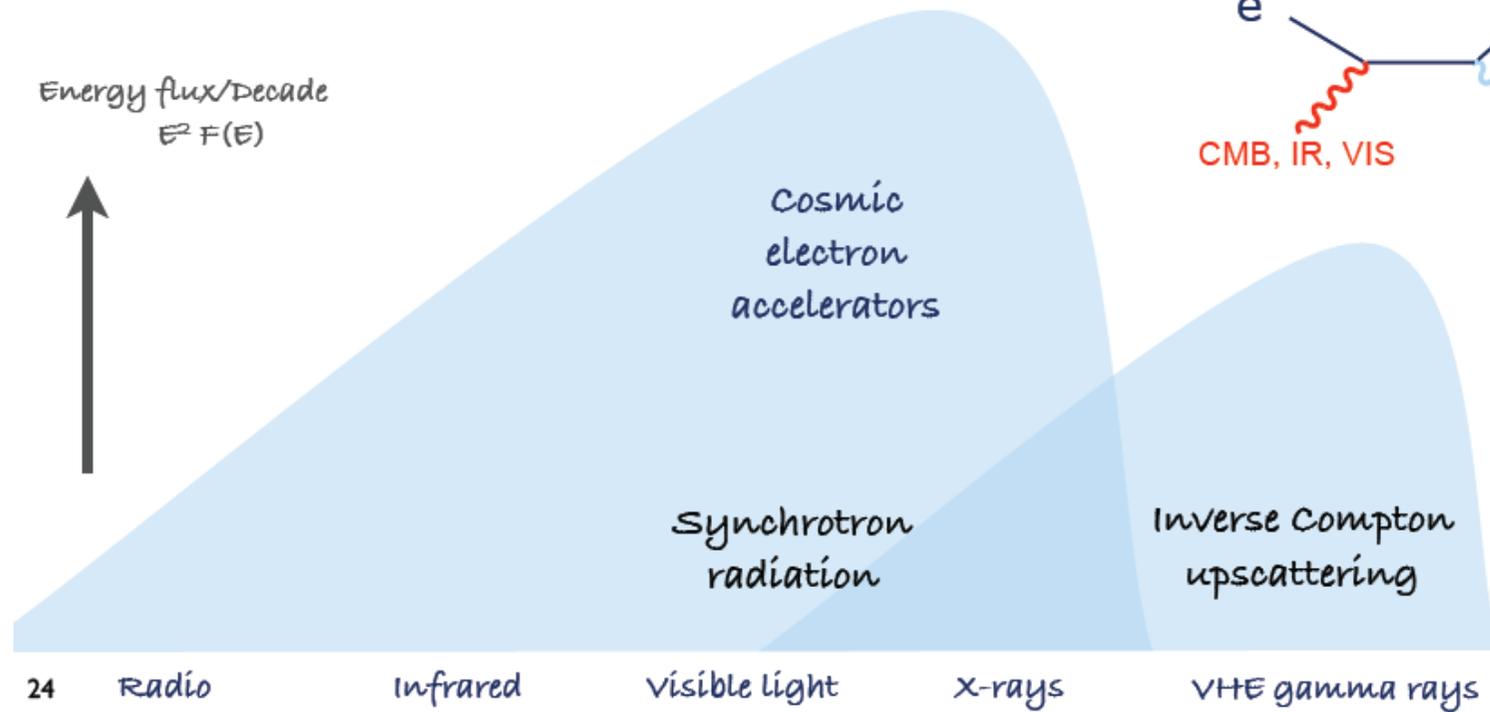
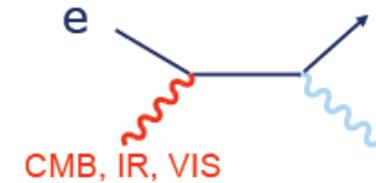
Inverse Compton: $\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$

scattering of electrons on low energy photons:

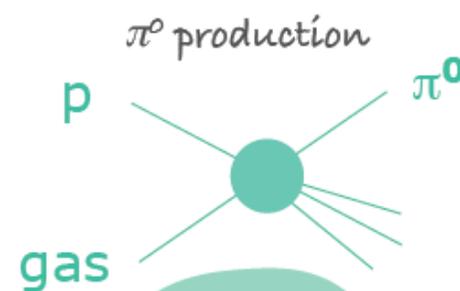
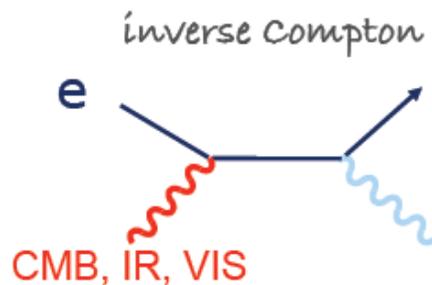
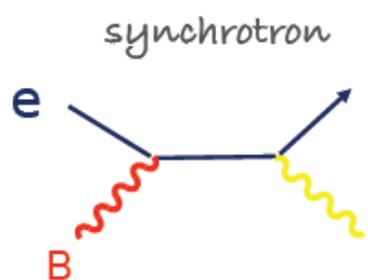
- ✓ Cosmic Microwave Background (CMB)
- ✓ Infrared, optical photons
- ✓ Synchrotron photons



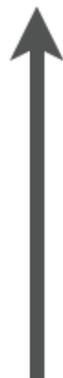
inverse Compton



Адронный механизм



Energy flux/Decade
 $E^2 F(E)$



Cosmic
electron
accelerators

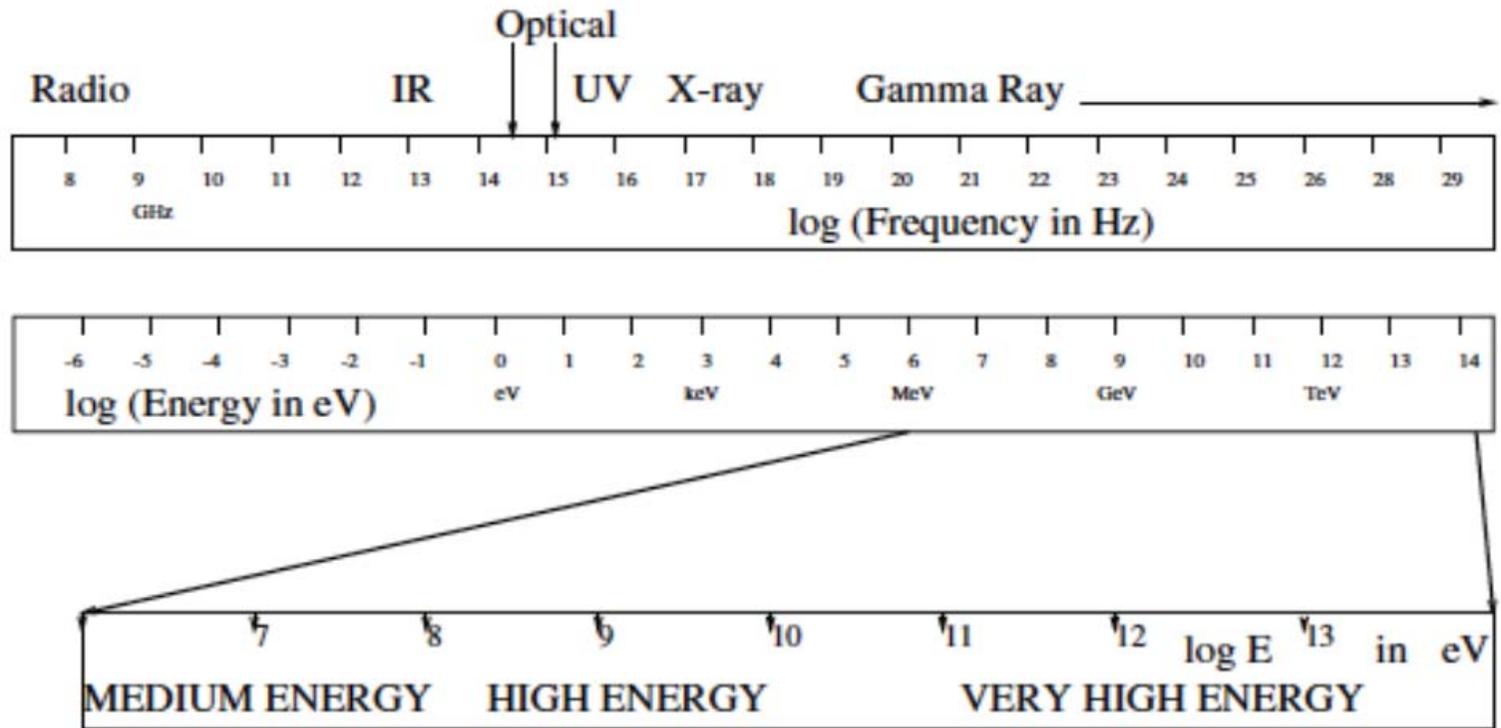
Synchrotron
radiation

Cosmic
proton
accelerators

Inverse Compton
upscattering

24 Radio Infrared visible light X-rays VHE gamma rays

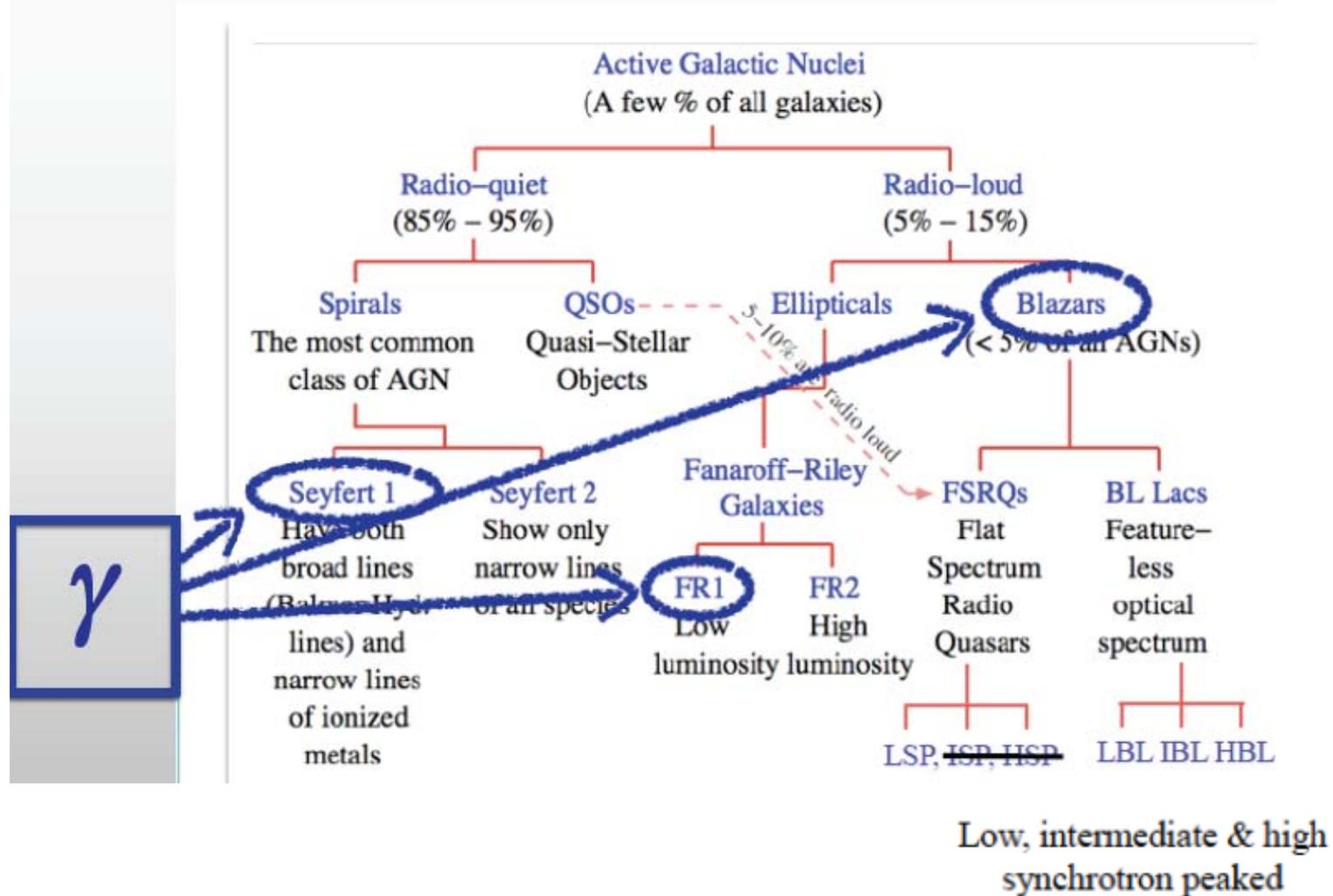
γ -RAY ASTRONOMY DOMAINS



Band	Low/medium	High	Very High	Ultra High
Shorthand	LE/ME	HE	VHE	UHE
Range	0.1–30 MeV	30 MeV–100 GeV	100 GeV–100 TeV	>100 TeV
Typical energy	keV–MeV	MeV–GeV	TeV	PeV–EeV
Environment	Space	Space	Ground-based	Ground-based

Источники гамма-излучения

GAMMA RAY SOURCES



Внегалактические источники γ -излучения

AGN, $E > 100$ ГэВ)

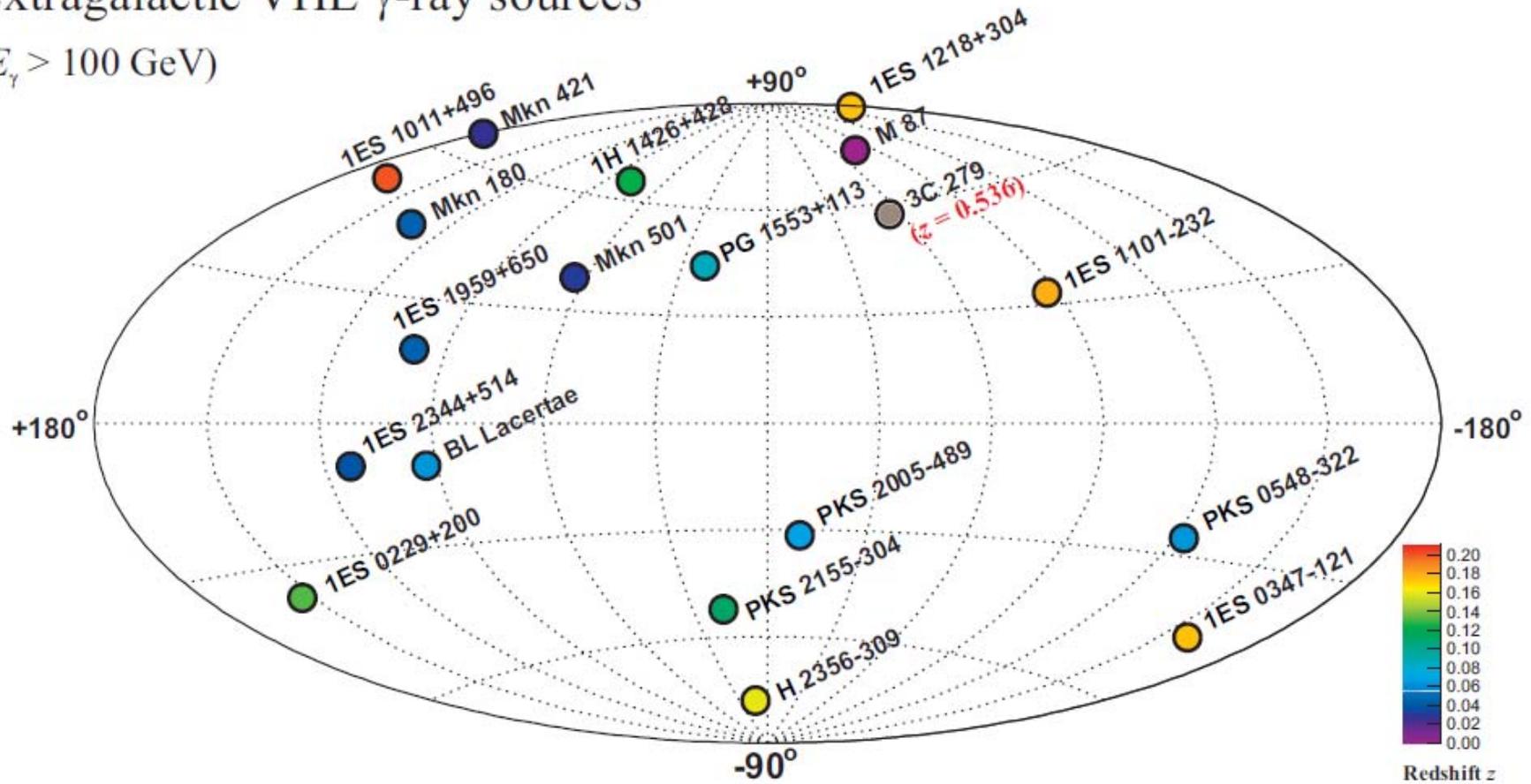
#	Object name	Redshift	Discovery reference
1.	M 87	0.0044	Aharonian et al. A&A 421 (2004) 529
2.	Mkn 421	0.031	Punch et al. Nature 358 (1992) 477
3.	Mkn 501	0.034	Quinn et al. ApJL 456 (1996) L83
4.	1ES 2344+514	0.044	Catanese et al. ApJ 501 (1998) 616
5.	Mkn 180	0.045	Albert et al. ApJL 648 (2006) L105
6.	1ES 1959+650	0.047	Nishiyama, Proc. 26 th ICRC 3 (1999) 370
7.	PKS 0548-322	0.069	Superina et al. 30 th ICRC (2007)
8.	BL Lacertae	0.069	Albert et al. ApJL 666 (2007) L17
9.	PKS 2005-489	0.071	Aharonian et al. A&A 436 (2005) L17
10.	PG 1553+113	0.09	Aharonian et al. A&A 448 (2006) L19 Albert et al., ApJL 654 (2007) L119

11.	PKS 2155-304	0.116	Chadwick et al. ApJ 513 (1999) 161
12.	1H 1426+428	0.129	Horan et al. ApJ 571 (2002) 753
13.	1ES 0229+200	0.14	Aharonian et al. A&A accepted
14.	H 2356-309	0.165	Aharonian et al. Nature 440 (2006) 1018
15.	1ES 1218+304	0.182	Albert et al. ApJL 642 (2006) L119
16.	1ES 0347-121	0.185	Aharonian et al. A&A 473 (2007) L25
17.	1ES 1101-232	0.186	Aharonian et al. Nature 440 (2006) 1018
18.	1ES 1011+496	0.212	Albert et al. ApJL 667 (2007) L21
19.	3C 279	0.536	Teshima et al. 30 th ICRC (2007)

Зарегистрированы IACTs (состояние на 2007), список по красному смещению (наше время $z=0$).

Extragalactic VHE γ -ray sources

($E_\gamma > 100$ GeV)



<http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/>

Эксперименты на космических аппаратах

Космические аппараты (спутники) :

- **Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2)** – первый большой спутник для γ -астрономии (детекторы – искровые камеры и сцинтилляторы)
Запущен в 1972 пробыл на орбите 6 мес.; детально просмотрено небо в диапазоне 20 МэВ - 1 ГэВ.
- **COsmic ray Satellite B (COS-B)**, 1975 - 1982 , 70 МэВ – 5 ГэВ; первая полная карта γ -излучения из диска Галактики и первое детектирование γ -излучения внегалактического объекта – квазар 3C273.
- **Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)** - спутник NASA 1991- 2018 (до 21 года?); состоит из 4х инструментов EGRET, BATSE, COMPTE, OSSE
CGRO наблюдал γ -излучение до 30 ГэВ, обнаружил изотропное распределение космологических GRBs; EGRET открыл большое число внегалактических источников, в частности – блазары как источники HE γ -излучения.
- **ВерроSAX**, 1996 (см. К. Постнов, УФН 169 (1999)) – дополнительные X-телескопы: 2 широкоугольные камеры (WFC, 2-30 кэВ) и узконаправленные спектрометры 0.1-10 кэВ и 2-10 кэВ, до 10^{-12} эргсм $^{-2}$ с $^{-1}$; положение с точностью до 1'.
- **Swift**, 2004 - X-ray и UV-optical telescopes обеспечивают локализацию GRB $\sim 3'$; gamma-ray telescope (Burst and Alert Telescope or BAT) детектируют всплеск, X-ray Telescope (XRT) и UV-Optical Telescope (UVOT) быстро (60-100 с) наводятся на этот участок, что обеспечивает наблюдение перехода от фазы prompt γ -ray к низко частотной фазе после свечения.

Космические аппараты (спутники)

- “Реликт”, COBE (Cosmic Background Explorer), 1992- 2006 – измерение спектра РИ и его анизотропии
- Космический телескоп «Хаббл» (*Hubble Space Telescope, HST*) - 1990
- Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) - спутник NASA 1991- 2000 гг;
4 инструмента:
 - Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)
 - Burst and Transient Source Experiment (BATSE)
 - Compton Telescope (COMPTEL)
 - Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)CGRO наблюдал γ -излучение до 30 ГэВ, обнаружил изотропное распределение космологических GRBs; EGRET открыл большое число внегалактических источников, в частности – блазары как источники HE γ -излучения.
- Chandra 1999 – рентгеновская обсерватория (NASA)
- WMAP 2003
- FERMI LAT 2008 (“наследник” CGRO)
- Planck 2013
- Swift 2004

- **Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2)** – первый большой спутник для γ -астрономии (детекторы – искровые камеры и сцинтилляторы)
Запущен в 1972 пробыл на орбите 6 мес.; детально просмотрено небо в диапазоне 20 МэВ - 1 ГэВ
- **COsmic ray Satellite B (COS-B)**, 1975 - 1982 , 70 МэВ – 5 ГэВ; первая полная карта γ -излучения из диска Галактики и первое детектирование γ -излучения внегалактического объекта – квазар 3C273.
- “Реликт”, **COBE (Cosmic Background Explorer)**, 1992- 2006
- Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)** - спутник NASA 1991- 2000 гг; состоит из 4х инструментов:
 - Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (**EGRET**)
 - Burst and Transient Source Experiment (**BATSE**)
 - Compton Telescope (**COMPTEL**)
 - Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (**OSSE**)
- **WMAP**
- **Planck**

CGRO наблюдал γ -излучение до 30 ГэВ, обнаружил изотропное распределение космологических GRBs; **EGRET** открыл большое число внегалактических источников, в частности – блазары как источники HE γ -излучения.

Fermi Gamma-ray Space Large Area Telescope (FermiLAT)

Космический гамма-телескоп им. Э.Ферми

Телескоп FermiLAT (2008) детектирует γ -кванты с энергией 20 МэВ - 300 ГэВ, используя конверсию γ -квантов в e^+e^- -пару: $\gamma + Z \rightarrow e^+ + e^- + Z$

FoV ~ 20% всего неба. Вторым инструментом на борту спутника - монитор гамма-всплесков (Gamma-ray Burst Monitor)

15 сентября 2008 года телескоп Ферми зарегистрировал рекордную вспышку гамма-излучения - GRB 080916C; расстояние до объекта - 12 млрд. св. лет (созвездие Carina, Южное полушарие) .

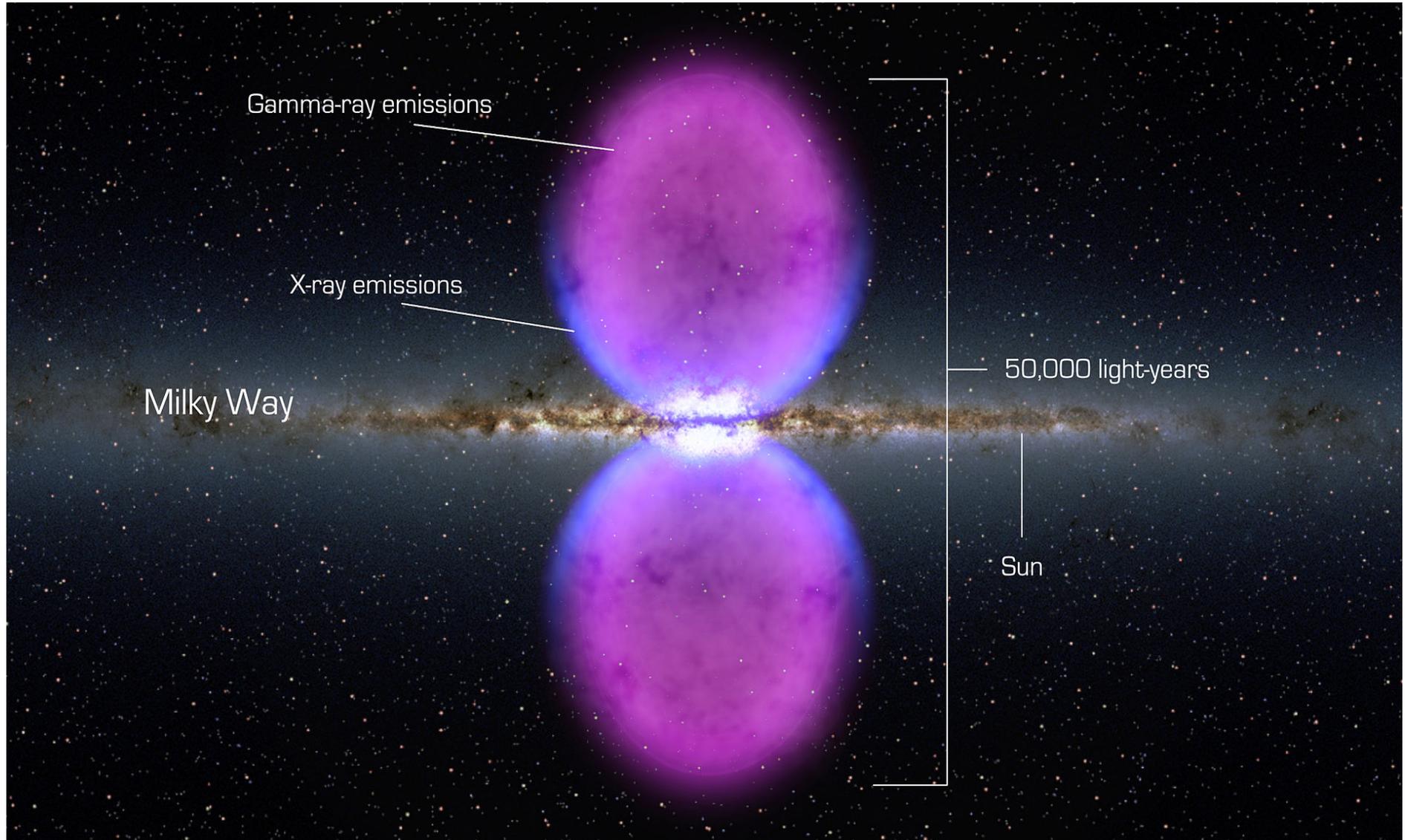
Галактические γ /X-пузыри (bubbles, cocoons)

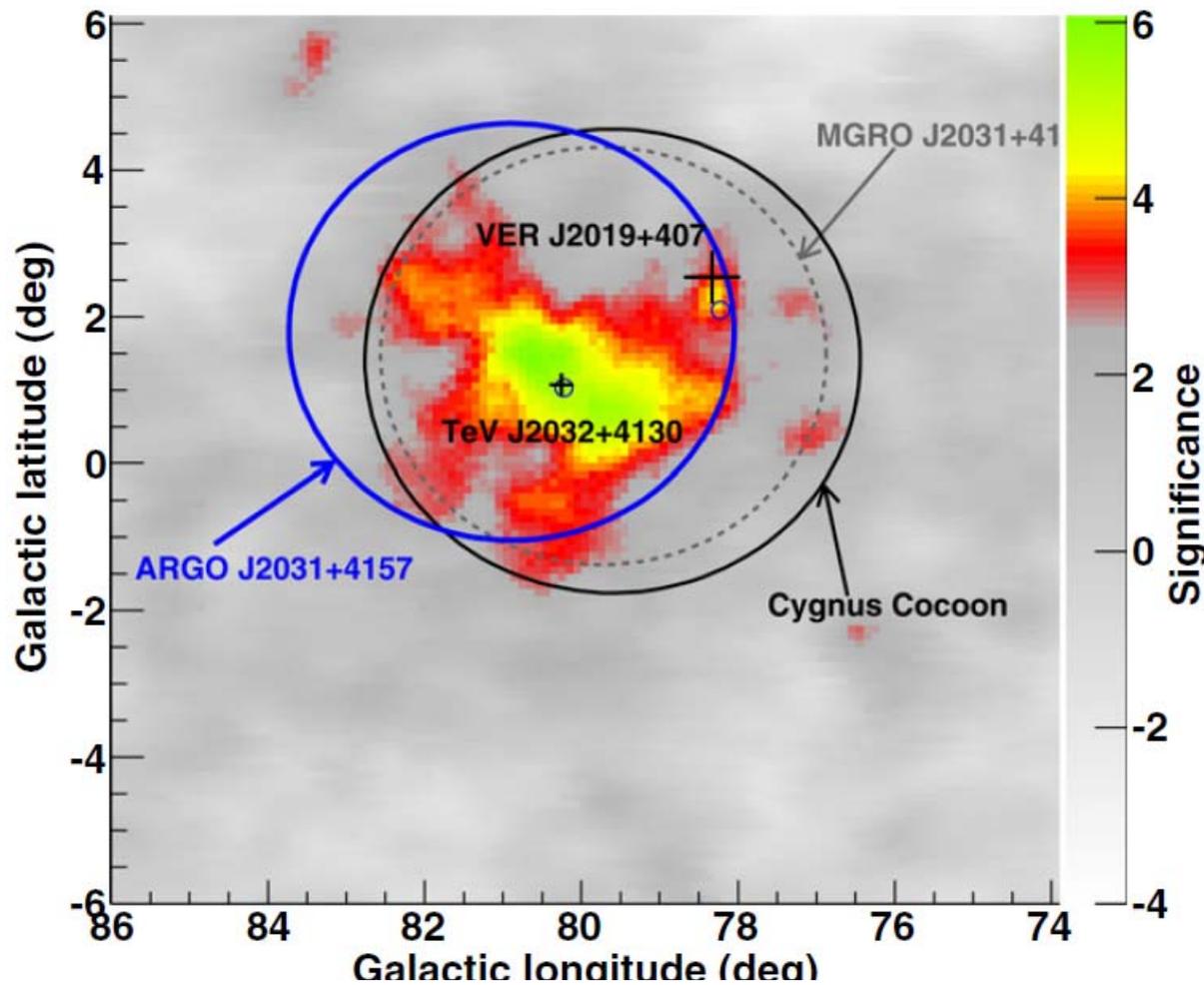
Ноябрь 2010 - сообщение о зарегистрированных FermiLAT двух пузырях (bubbles) в гамма- и рентгеновском диапазонах.

Пузыри (коконы) имеют протяженность около 8 кпк каждый (~ 25 тыс. св.лет) - в центре Галактики, выше и ниже ее плоскости.

Природа этих образований пока непонятна, гипотеза: пузыри возникли в результате активности сверхмассивной чёрной дыры, находящейся в центре Галактики. Предположительно, возраст пузырей составляет миллионы лет.

Milky Way Gamma/X-ray bubbles

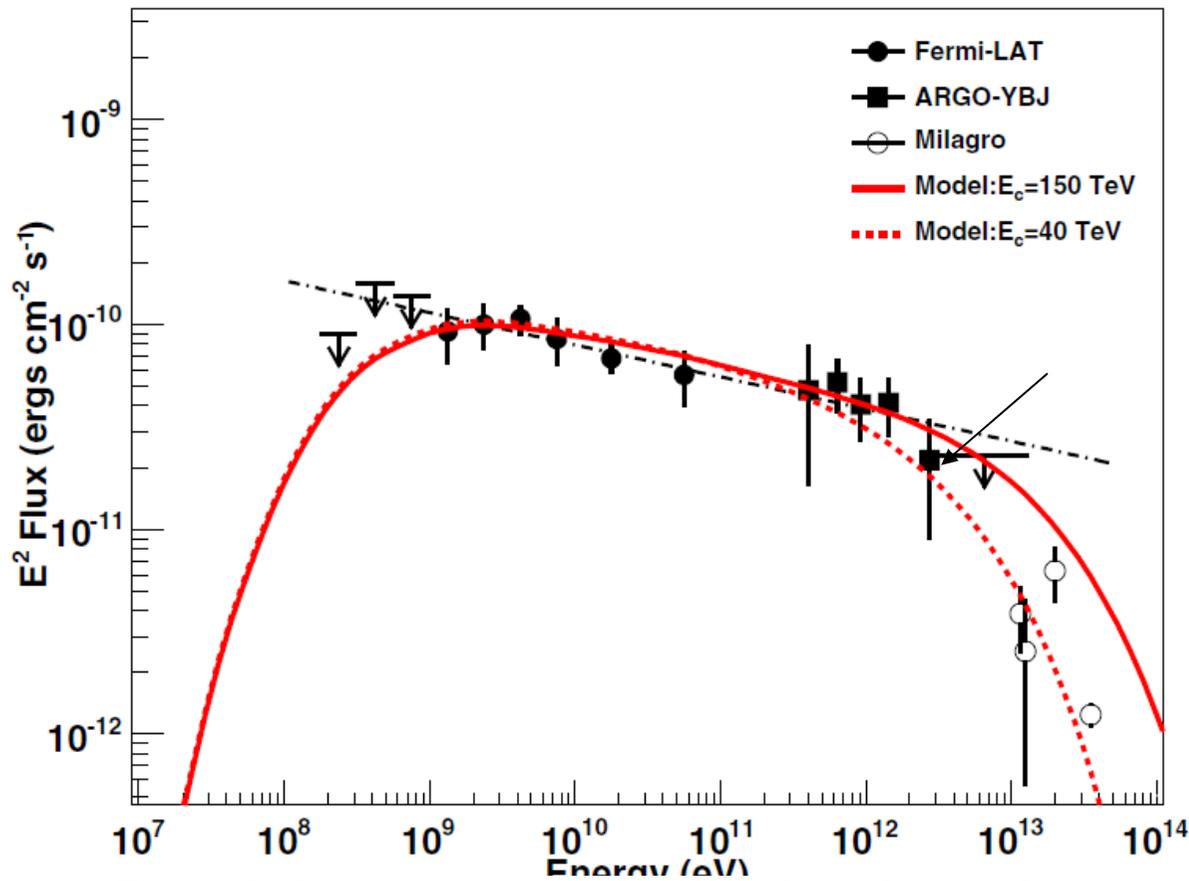




IDENTIFICATION OF THE TeV GAMMA-RAY SOURCE ARGO J2031+4157 WITH THE CYGNUS COCOON

B.Bartoli, ApJ 790:152, 2014

Figure 1. Significance map around ARGO J2031+4157 as observed by the ARGO-YBJ experiment. The large circles indicate the positions of ARGO J2031+4157, MGRO J2031+41, and the Cygnus Cocoon, and the corresponding 68% containment regions (Ackermann et al. 2011; Abdo et al. 2012a). The position and extension of TeV 2032+4130 and VER J2019+407 are marked with crosses (Aharonian et al. 2005; Aliu et al. 2014b, 2013). The small circles indicate the positions of PSR 2021+4026 and PSR 2032+4127.



Адронный механизм

Figure 3. Spectral energy distribution of the Cygnus Cocoon by different detectors. The arrows below 1 GeV indicate the upper limits obtained by *Fermi-LAT* (Ackermann et al. 2011). The points at 12, 20, and 35 TeV are reported by Milagro for MGRO J2031+41 (Abdo et al. 2007a, 2007b, 2009). The lower data point at 12 TeV is the Milagro flux after the subtraction of the TeV J2032+4130 contribution (Ackermann et al. 2011). The dot-dashed line shows the best fit to the *Fermi-LAT* and ARGO-YBJ data using a simple power-law function. The thick solid line is predicted by a hadronic model with a proton cutoff energy at 150 TeV. The dotted line is predicted by a model with cutoff energy at 40 TeV.

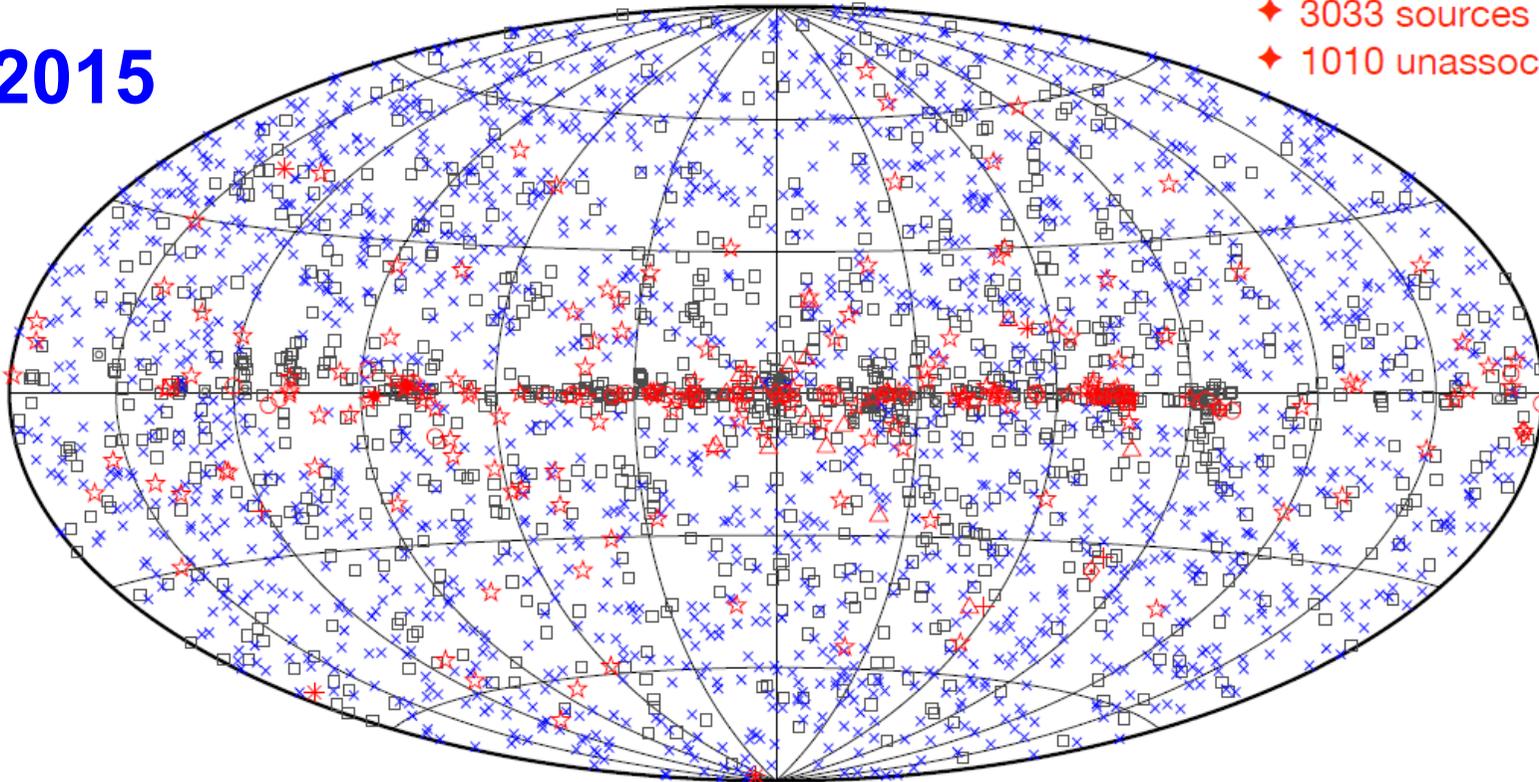
3rd Fermi LAT Catalog

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 218:23 (41pp), 2015 June

ACERO ET AL.

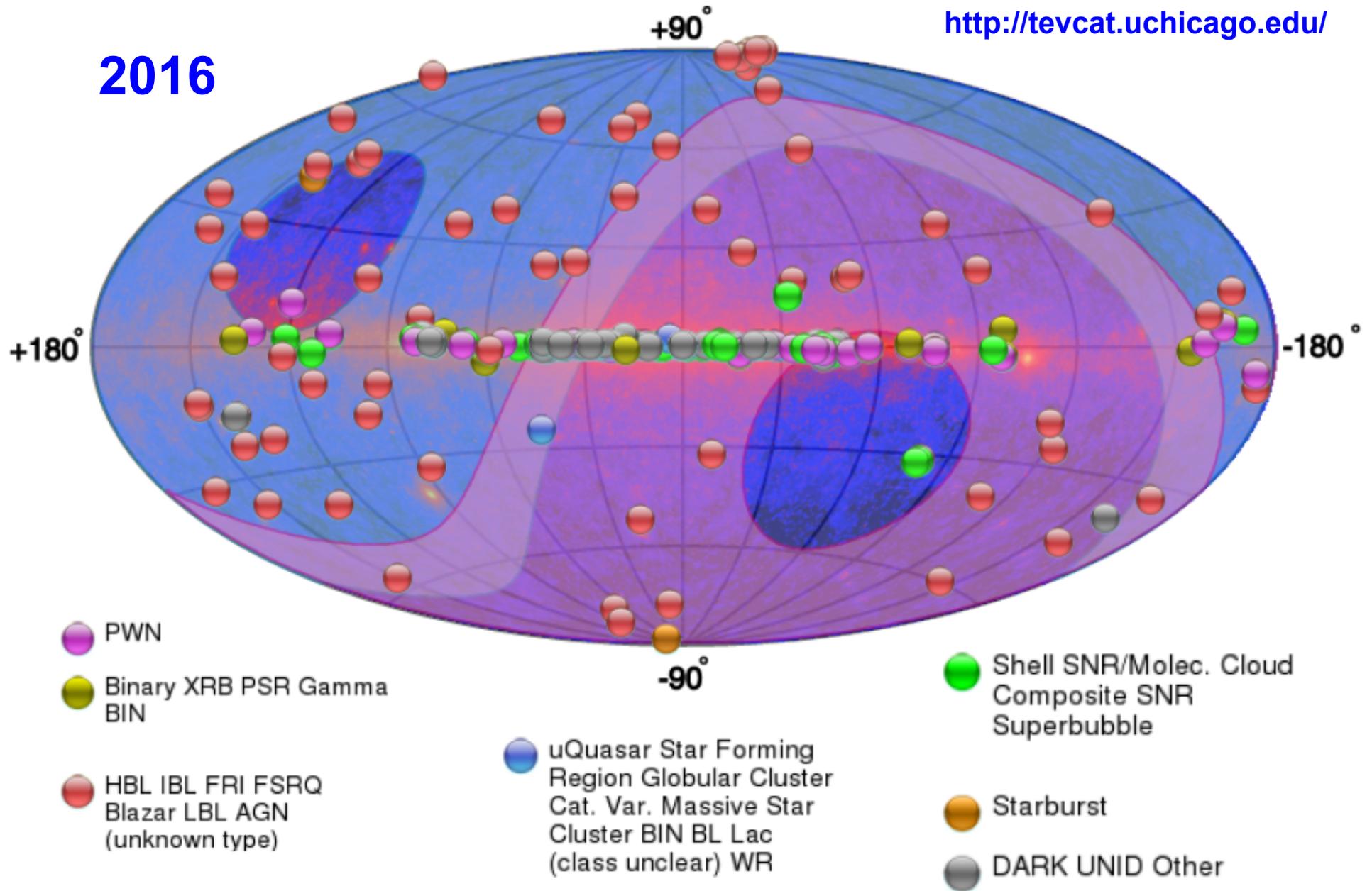
2015

◆ 3033 sources
◆ 1010 unassociated

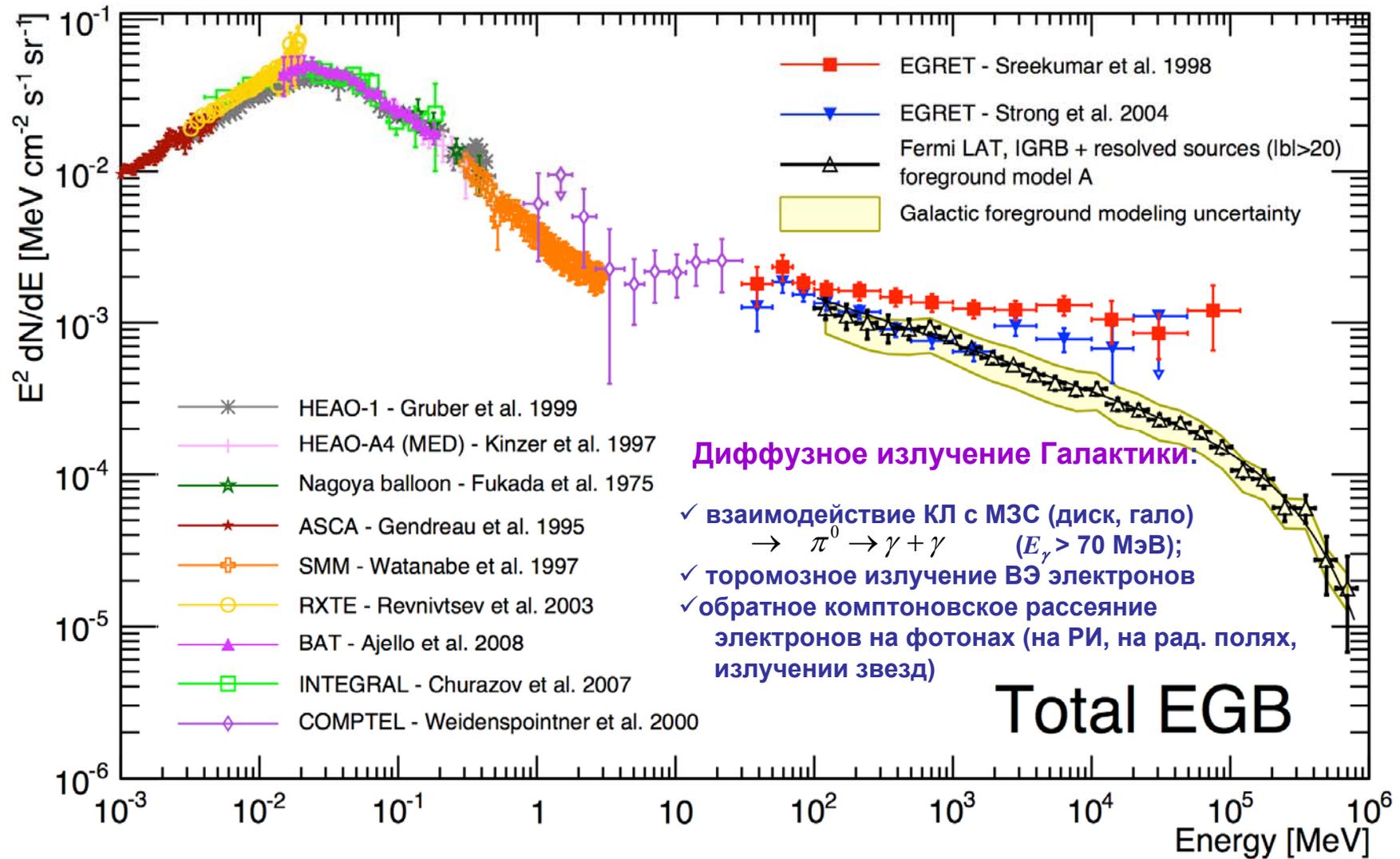


□ No association	▣ Possible association with SNR or PWN	× AGN
☆ Pulsar	△ Globular cluster	* Starburst Galaxy
⊠ Binary	+ Galaxy	○ SNR
★ Star-forming region		◆ PWN
		★ Nova

2016

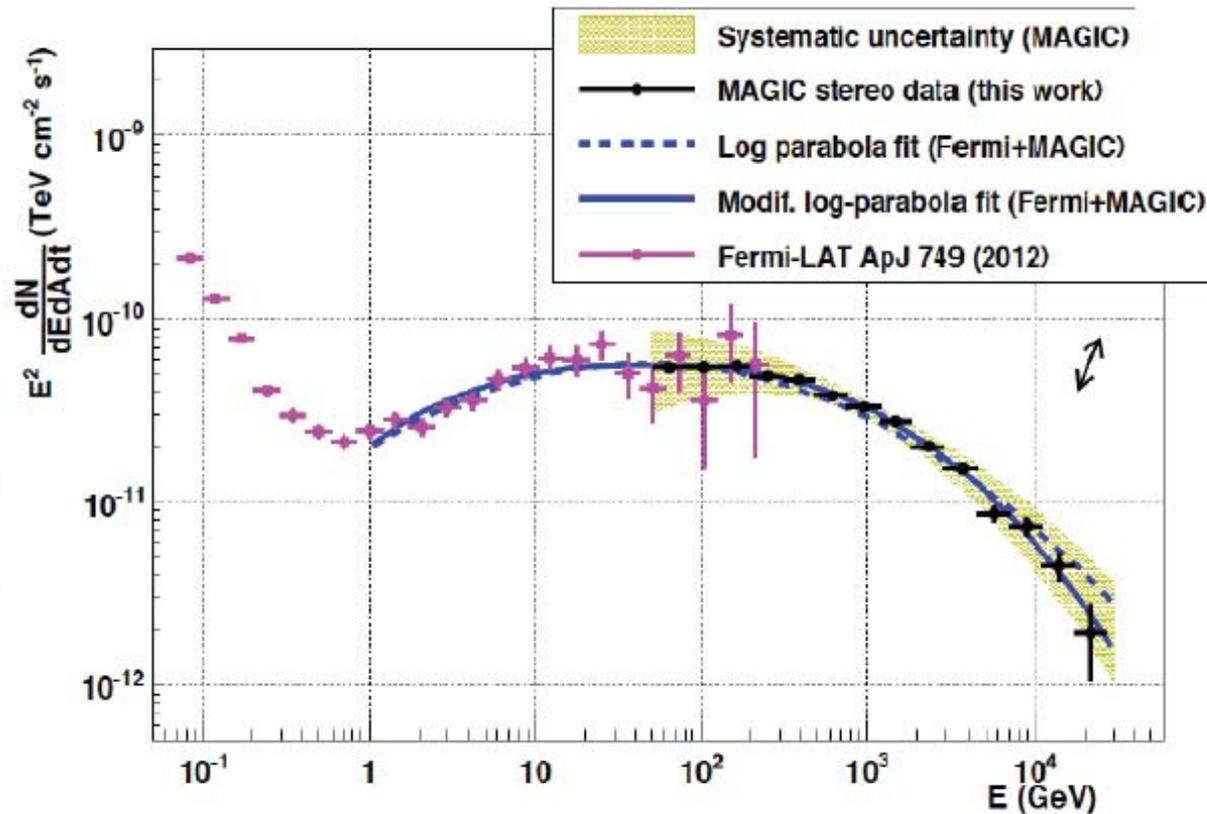


Диффузное гамма-излучение



Излучение НЕ от Крабовидной туманности

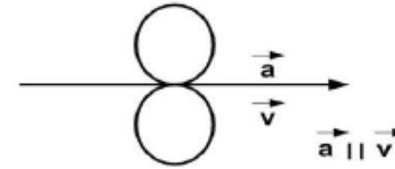
CRAB NEBULA AT VHE



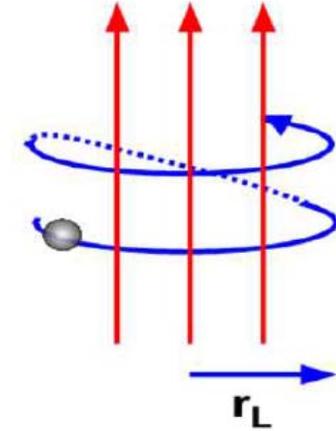
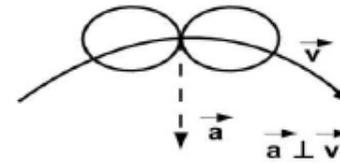
Спектр высокой точности:
50 ГэВ – ~30 ТэВ,
5 бинов на декаду.
• наблюдения при $E > 80$ ТэВ
(исслед. режима КН);
• комбин. фит с данными
Fermi-LAT позволил
восстановить наиболее
точное значение пика IC:
52.5 +/- 1.6 GeV

Синхротронное излучение (1)

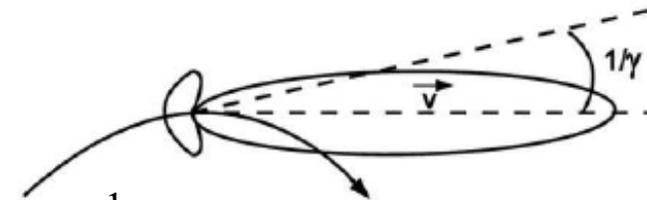
Синхротр. излучение нерелятивистской частицы в направлении ускорения



Синхротр. излучение нерелятивистской частицы в перпендикулярном направлении к ускорению

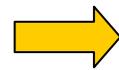


Излучение релятивистской частицы: картина деформируется – возникает анизотропия в направлении вперед

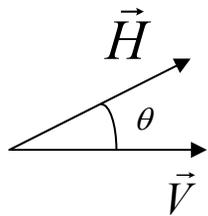


циклотронная частота

$$\omega_L = \frac{eH}{mc}$$



$$\omega_H = \frac{\omega_L}{\Gamma}, \quad \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$



т. к. для релятивистской частицы в системе наблюдателя $\Delta t = \Gamma \Delta t'$

$$r_L = \frac{mc^2 \beta \Gamma}{eH} = \frac{\beta E}{eH} = \frac{pc}{eH}$$

$$F_{L\perp} = \Gamma m \frac{dV_{\perp}}{dt} = e \frac{V_{\perp}}{c} H \sin \theta \quad \Rightarrow \quad a_{\perp} = \frac{eVH \sin \theta}{\Gamma mc}$$

$$\omega_H = \frac{V}{r_L} = \frac{eH}{mc} \sqrt{1-\beta^2} = \frac{ceH}{E}$$

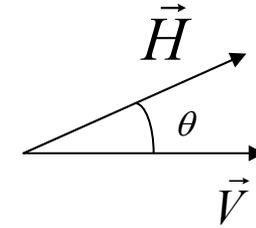
В системе покоя частицы $\omega_L = \frac{eH}{mc}$;

в системе покоящегося наблюдателя $\omega_H = \omega_L / \Gamma$

Синхротронное излучение (2)

$$V_{\perp} = V \sin \theta$$

(θ – питч-угол)



Мощность излучения (лоренц-инвариант) :

$$P_e = P'_e = \frac{2e^2}{3c^3} (a'_{\parallel}{}^2 + a'_{\perp}{}^2) = \frac{2e^2\Gamma^4}{3c^3} (\Gamma^2 a_{\parallel}^2 + a_{\perp}^2)$$

$$(a'_{\perp} = \Gamma^2 a_{\perp}, \quad a'_{\parallel} = \Gamma^3 a_{\parallel})$$

$$\vec{F}_L = \frac{d(\Gamma m \vec{V})}{dt} = \frac{e}{c} [\vec{V} \times \vec{B}] \quad F_{L\parallel} = eV_{\parallel} B / c = 0$$

$$\longrightarrow a_{\parallel} = 0$$

$$F_{L\perp} = \Gamma m \frac{dV_{\perp}}{dt} = e \frac{V_{\perp}}{c} B \sin \theta \quad \longrightarrow \quad a_{\perp} = \frac{eVB \sin \theta}{\Gamma mc}, \quad r_L = \frac{V_{\perp}}{a_{\perp}} = \frac{mcV \sin \theta}{eH \sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{mc^2 \beta \Gamma \sin \theta}{eH}$$

Для $\theta = \frac{\pi}{2}$: $\omega_H = \frac{V}{r_L} = \frac{eH}{mc\Gamma} = \frac{ceH}{E}$

$$P_S(E) = \frac{2e^4 H^2 \beta^2}{3m^2 c^3 (1 - \beta^2)} = \frac{2e^4 H^2 (\Gamma^2 - 1)}{3m^2 c^3} = \frac{2}{3} \frac{e^4 H^2 \left[\left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 - 1 \right]}{m^2 c^3} \sim p^2 \quad (\beta^2 \Gamma^2 = \Gamma^2 - 1)$$

$$P_S(\Gamma) = 2\sigma_T c U_H (\Gamma^2 - 1), \quad \sigma_T = 8\pi r_e^2 / 3 = 6.65 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2, \quad U_H \equiv \frac{H^2}{8\pi} \quad \text{плотность энергии магнитного поля}$$

В случае изотропного распределения усреднение по питч-углам дает 2/3:

$$\langle P_S \rangle = \frac{4}{3} \sigma_T c U_H (\Gamma^2 - 1)$$

Синхротронное излучение (SR) (3)

- SR генерируется релятив. электронами (позитронами) в магнитных полях
- SR направлено вдоль движения электрона – внутри угла $\theta \sim mc^2/E$
- потери энергии на SR происходят малыми порциями
- частота SR может быть большой, классической теории достаточно для описания SR при условии $\omega \ll E_e$

Спектр излучения отдельного электрона:

$$P(\omega) \equiv \frac{dI}{d\omega} = \frac{\sqrt{3}e^3 H_{\perp}}{2\pi mc^2} \frac{\omega}{\omega_c} \int_{\omega/\omega_c}^{\infty} K_{5/3}(x) dx$$

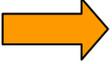
$$\omega_c = \frac{3eH_{\perp}}{2mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2, \quad \frac{dI}{d\omega} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^3 H \sin\theta}{mc^2} F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right), \quad H_{\perp} = H \sin\theta$$

$$x = \omega / \omega_c, \quad F(x) = x \int_x^{\infty} K_{5/3}(x) dx$$

$K_{5/3}(x)$ - функция Макдональда порядка 5/3

Мак $P(\omega)$ приходится на частоту (энергию)

$$\hbar\omega_m = 1.9 \cdot 10^{-20} (H_{\perp} / \text{Э}) (E / \text{ЭВ})^2 \text{ ЭВ}; \quad \omega_m = \frac{1}{\Delta t} = \frac{eH_{\perp}}{mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$$

 $\omega_c = \frac{3}{2} \omega_m$
усред. по питч-углу

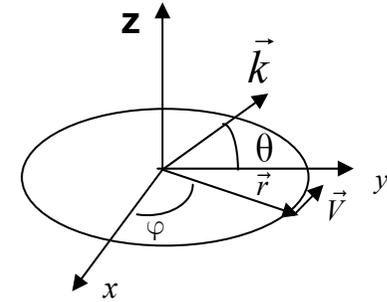
$$\omega_m = 0.29 \omega_c = 2.9 \cdot 10^{-5} (H_{\perp} / \text{Э}) (E / \text{ЭВ})^2 \text{ с}^{-1}$$

Поскольку $H_G < \sim 10^{-5} \text{ Э}$ и энергия электрона МЗС не слишком велика, космическое SR чаще лежит в радиодиапазоне. Например, для $E \sim 10 \text{ ГэВ}$ и $H_G = 10^{-5} \text{ Э}$, частота $\nu_m = 4.6 \text{ ГГц}$, $\omega_m \sim 10^{-6} \text{ ЭВ}$

Угловое распределение синхротронного излучения

Интегрирование по φ дает

$$\frac{d\bar{I}}{d\Omega} = \frac{e^4 H^2 \beta^2 (1 - \beta^2) [2 - \cos^2 \theta - (\beta^2 / 4)(1 + 3\beta^2) \cos^4 \theta]}{8\pi m^2 c^3 \sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \theta}}$$



$$\frac{(d\bar{I} / d\Omega)_{\theta=0}}{(d\bar{I} / d\Omega)_{\theta=\pi/2}} = \frac{4 + 3\beta^2}{8(1 - \beta^2)^{5/2}} \rightarrow \begin{cases} 1/2, & \beta \rightarrow 0 \\ (7/8)\Gamma^5 \gg 1, & \beta \rightarrow 1 \end{cases}$$

сильная анизотропия для ультрарелятив. частицы

В у.р. случае интенсивность (мощность) синхротронного излучения велика в узком интервале углов, для которого мала разность $1 - \vec{n}\vec{V} / c$

$$1 - \vec{n}\vec{V} / c = 1 - \beta \cos \vartheta \approx 1 - \beta(1 - \frac{\theta^2}{2} + \dots) \approx 1 - \beta + \frac{\theta^2}{2} = \frac{2(1 - \beta) + \theta^2}{2} \approx \frac{(1 + \beta)(1 - \beta) + \theta^2}{2} \rightarrow \theta^2 \approx 1 - \beta^2$$

Апертура $\Delta\theta \sim 2\sqrt{1 - \beta^2} = \frac{2}{\Gamma}$, **сильная анизотропия для** $\Gamma \gg 1$

Ультррелятивистская частица излучает в узком конусе вокруг направления \vec{k}

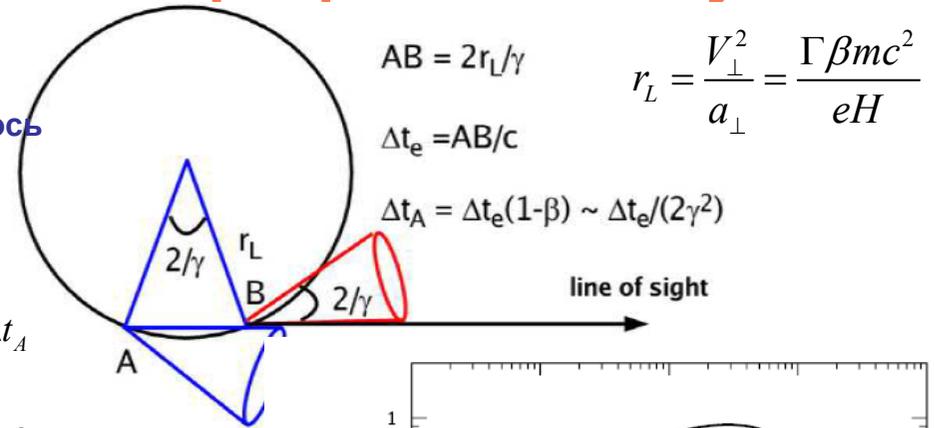
Спектральное распределение синхротронного излучения

Релятив. электрон вращается в магнитном поле (вдоль силовой линии) с питч-углом 90° . Радиус окружности r_L . Наблюдатель может зарегистрировать излучение если ось конуса излучения с апертурой $2/\Gamma$ направлена на него.

$$\Delta t_e = \frac{L}{V} = r_L \sin \theta / V \approx r_L \theta / V = (r_L / V) / \Gamma = 2\pi(\Gamma \omega_H)^{-1} = 2\pi / \omega_L$$

$$\Delta t_A = t_A - t_B = L/V - L/c = \Delta t_e (1 - \beta) \approx 2\pi / (2\Gamma^2 \omega_L)$$

$$\omega_m \sim 2\pi / \Delta t_A$$



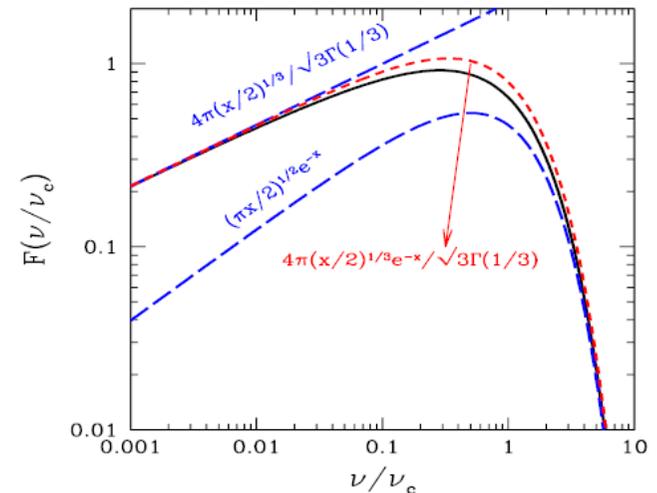
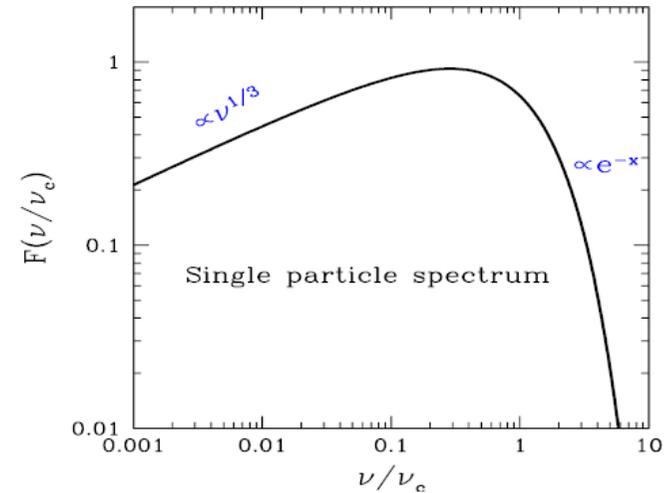
Мощность излучения электрона:

$$\frac{dI}{d\omega} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^3 H}{m c^2} F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right), \quad \omega_c = \frac{3eH}{2mc} \left(\frac{E}{m c^2}\right)^2 = \frac{3\omega_m}{2};$$

$$\omega_m = \frac{2\pi}{\Delta t_A} = \frac{eH}{mc} \Gamma^2 = \Gamma^2 \omega_L = \Gamma^3 \omega_H; \quad F(x) = x \int_x^\infty K_{5/3}(x) dx$$

Низкие частоты $F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \rightarrow \frac{4\pi}{\sqrt{3}\Gamma(1/3)} \left(\frac{\omega}{2\omega_c}\right)^{1/3} \quad (\omega \ll \omega_c)$

Высокие частоты $F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \rightarrow \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{1/2} e^{-\omega/\omega_c} \quad (\omega \gg \omega_c)$



Спектральное распределения имеет максимум при числе оборотов $n \sim \Gamma^3$; основная часть излучения

сосредоточена вблизи $\omega_m \sim n\omega_H = \frac{eH}{mc} \left(\frac{E}{m c^2}\right)^2$

Спектр SR от электронов с распределением по энергии

Выражение

$$\frac{dI}{d\omega} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^3 H}{mc^2} F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$$

надо проинтегрировать по питч-углам и энергетическому спектру электронов в источнике $f(E, \theta) = \frac{dn_e}{dEd\Omega}$.

Будем считать распределение по питч-углам изотропным, а спектр электронов - степенным :

$$f(E, \theta) = n_0 E^{-\alpha} \sin \theta / 4\pi$$

$$J(\omega) = \int_{\omega}^{\infty} \int_{\Omega} \frac{dI}{d\omega} f(E, \theta) d\Omega dE = CH^{(\alpha+1)/2} \omega^{-(\alpha+1)/2},$$

где $C = \frac{2}{3} \frac{\sigma_T c}{(mc^2)^{\alpha-1}} \left(\frac{e}{2\pi m}\right)^{(\alpha-3)/2}$

“Охлаждение” электронов

Электрон за время t_c теряет значительную часть своей энергии, так что лоренц-фактор становится ниже некоторого критического значения Γ_c , определяемого уравнением:

$$mc^2 \frac{d\Gamma}{dt} = -\frac{\sigma_T}{6\pi} H^2 \Gamma^2 c \quad \Rightarrow \quad \Gamma_c \sim \frac{6\pi mc}{\sigma_T H^2 t_c} \quad \Rightarrow \quad \omega_c = \frac{3eH}{2mc} \Gamma_c^2 \sim \frac{54\pi^2 emc}{\sigma_T^2 H^3 t_c^2}$$

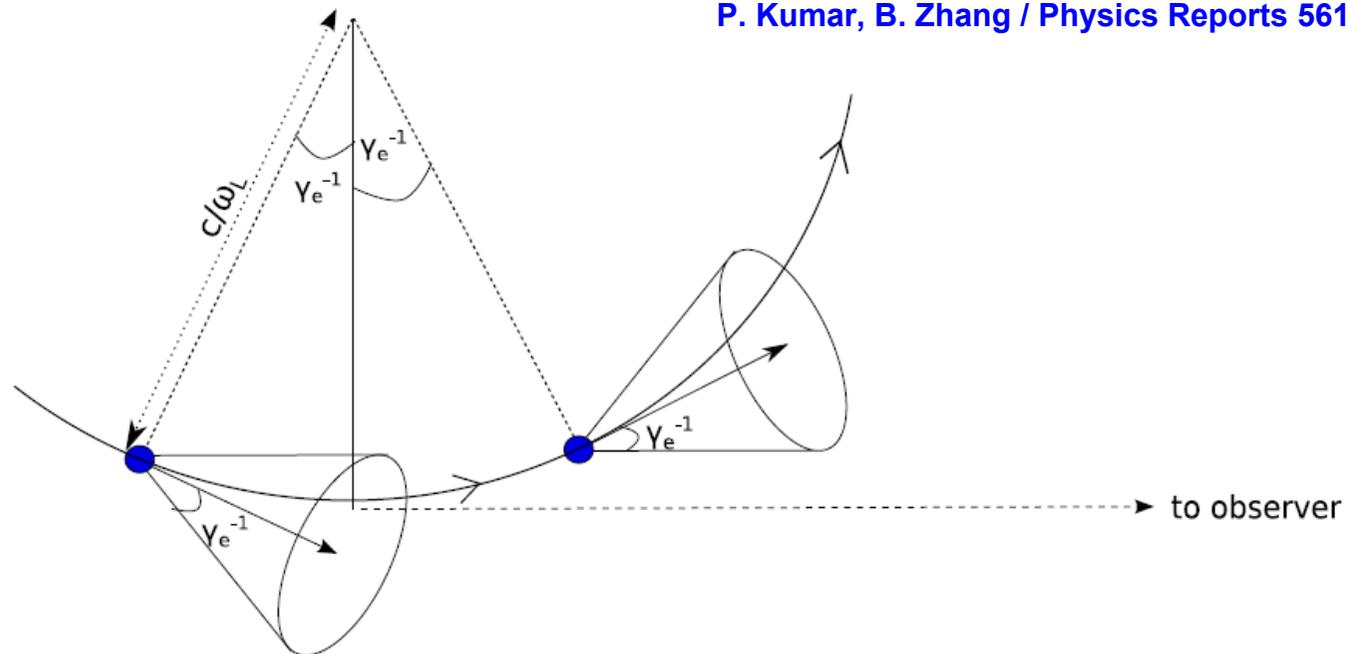


Fig. 3. The figure shows a segment of electron orbit that is moving in magnetic field with LF γ_e . Radiation from the electron is received by a distant observer only for a small segment of the orbit when the electron's velocity vector lies within γ_e^{-1} of the observer line of sight as a result of the beaming of photons in the forward direction in the lab frame (radiation in electron comoving frame is dipolar which covers almost 4π steradians). The observed synchrotron peak frequency for emission from this electron follows from this simple property (Eq. (18)).

2.2.1. Effect of synchrotron cooling on electron distribution

Another characteristic synchrotron frequency is associated with the cooling of electrons (ν_c). Let us consider that electrons are accelerated at some time, and then cool via synchrotron radiation for time duration t_0 . Electrons with LF $\gtrsim \gamma_c$ (defined below) lose a significant fraction of their energy during this time and their LF drops below γ_c

$$\frac{d m_e c^2 \gamma_e}{dt} = -\frac{\sigma_T}{6\pi} B^2 \gamma_e^2 c \quad \text{or} \quad \gamma_c \sim \frac{6\pi m_e c}{\sigma_T B^2 t_0}.$$

The synchrotron frequency corresponding to this LF is defined as the synchrotron cooling frequency, $\nu_c \equiv \frac{3qB\gamma_c^2}{4\pi m_e c} \sim \frac{27\pi q m_e c}{\sigma_T^2 B^3 t_0^2}$.

The power-law index of the synchrotron spectrum changes at ν_c due to the fact that electron distribution function for $\gamma_e > \gamma_c$ is modified as a result of loss of energy. This can be seen from the continuity equation for electrons in the energy space:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{dn_e}{d\gamma_e} + \frac{\partial}{\partial \gamma_e} \left[\dot{\gamma}_e \frac{dn_e}{d\gamma_e} \right] = S(\gamma_e),$$

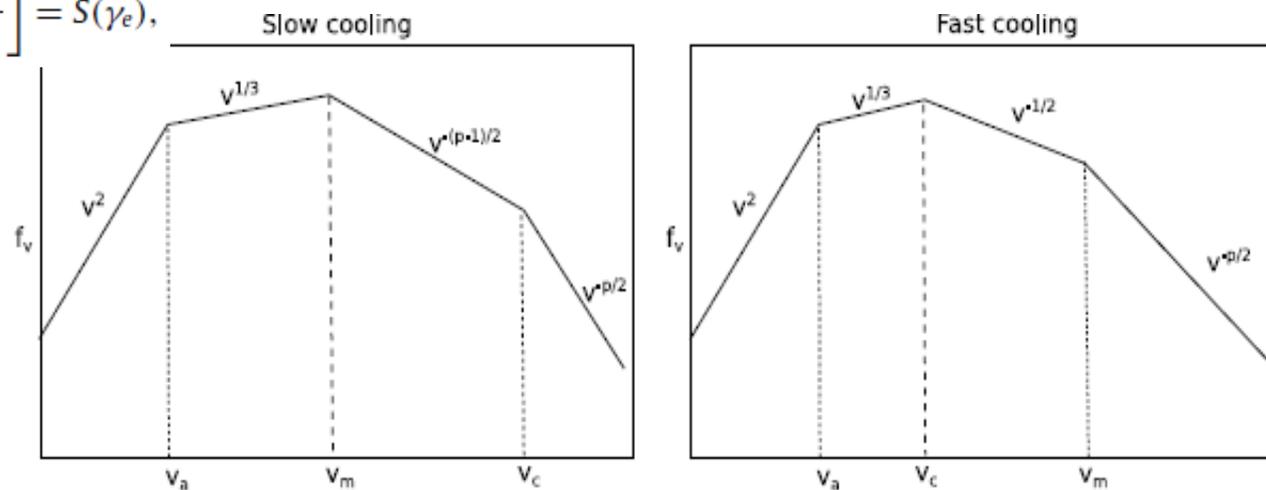


Fig. 5. Synchrotron spectrum for the case where $\nu_a < \nu_m < \nu_c$ is shown in the left panel, and for the case $\nu_a < \nu_c < \nu_m$ in the right panel, e.g. [131].

$$\Gamma_{\text{амп}} P_{\text{syn}} = \frac{2q^4 E^2}{3c^3 m_e^2} = \frac{2q^4 B^2 \gamma_e^2 v_e^2}{3c^5 m_e^2} = \sigma_T B^2 \gamma_e^2 v_e^2 / (4\pi c),$$

The fraction of orbital time when this condition is satisfied is $\sim 1/(\pi \gamma_e)$, and therefore the duration of the radiation pulse received by the observer in each orbit is:

$$\delta t_{obs} \sim \frac{2}{\gamma_e \omega_L} \frac{1}{2\gamma_e^2} \sim \frac{m_e c}{qB\gamma_e^2}, \quad (17)$$

where we used Eq. (1) that relates the comoving time, $\delta t' = \delta t/\gamma_e$, to the observer frame time duration for photon pulse arrival. The inverse of this time is the characteristic frequency for synchrotron radiation which is given by

$$\omega_{syn} \sim \frac{qB\gamma_e^2}{m_e c} \quad \text{and} \quad \nu_{syn} = \frac{\omega_{syn}}{2\pi} \sim \frac{qB\gamma_e^2}{2\pi m_e c}, \quad (18)$$

where ν_{syn} is the cyclic frequency. A more precise treatment has an additional factor $(3/2) \sin \alpha$; α is the pitch angle between the electron's velocity and the magnetic field. The synchrotron spectrum peaks at $\sim \nu_{syn}$. The spectrum below the peak scales as $P_{syn}(\nu) \propto \nu^{1/3}$ (this behavior is determined by the Fourier transform of the synchrotron pulse profile), and it declines exponentially for $\nu > \nu_{syn}$ (see Fig. 4); we refer to [123] for the calculation of synchrotron spectrum. The power per unit frequency $P_{syn}(\nu)$ at the peak of the spectrum is

$$P_{syn}(\nu_{syn}) \sim P_{syn}/\nu_{syn} \sim \frac{\sigma_T B m_e c^2}{2q}. \quad (19)$$

Комптовское рассеяние в системе покоя электрона

$$e + \gamma \rightarrow e' + \gamma' \quad p + k = p' + k', \quad (p + k - k')^2 = p'^2, \quad (p + k)k' = pk;$$

**в системе
покоя e :**

$$m(\omega - \omega') - \omega \omega' (1 - \cos \theta) = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega' = \frac{\omega}{1 + (\omega/m)(1 - \cos \theta)}$$

$$\lambda' - \lambda = (hc/m_e)(1 - \cos \theta) \quad \text{(Комптон, 1922)}$$

или, вводя $x = \omega/m$, $x' \equiv x_1 = \frac{x}{1 + x(1 - \cos \theta)}$, $\frac{\omega}{1 + 2\omega/m} \leq \omega' \leq \omega$

1. Томсоновский режим: $\omega \ll m_e c^2$ $\omega' \approx \omega [1 - (\omega/m)(1 - \cos \theta)] \approx \omega - \Delta\omega(\theta)$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega'} \approx \frac{3}{16\pi} \sigma_T (1 - 2\omega/m)(1 + \cos^2 \theta)$$

В пределе классического томсоновского рассеяния энергия фотона мало меняется, влияние отдачи электрона мало.

2. Режим Клейна-Нишины:

$$\omega > m_e c^2 \quad \frac{d\sigma}{d\Omega'} = \frac{3}{16\pi} \sigma_T \left(\frac{\omega'}{\omega} \right)^2 \left[\frac{\omega}{\omega'} + \frac{\omega'}{\omega} - \sin^2 \theta \right].$$

В пределе высоких энергий фотона ($x \gg 1$) и $\cos \theta \neq 1$ $\Rightarrow x' \rightarrow 1/(1 - \cos \theta)$,

т. е. рассеянный фотон несет информацию об угле рассеяния, но не о начальной энергии.

Формула Клейна-Нишины-Тамма

ТОМСОНОВСКОЕ
рассеяние

В системе покоя электрона:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega'} = \frac{3}{16\pi} \sigma_T \left(\frac{\omega'}{\omega}\right)^2 \left(\frac{\omega'}{\omega} + \frac{\omega}{\omega'} - \sin^2 \theta\right)$$

$\omega \ll m$ (yellow arrow) \rightarrow $\frac{d\sigma}{d\Omega'} \approx \frac{3}{16\pi} \sigma_T (1 - 2\omega/m)(1 + \cos^2 \theta)$

$(\omega/m)\theta^2 \gg 1$ (green arrow) \rightarrow $\frac{d\sigma}{d\Omega'} \approx \frac{3}{16\pi} \sigma_T \frac{m}{\omega(1 - \cos \theta)}$

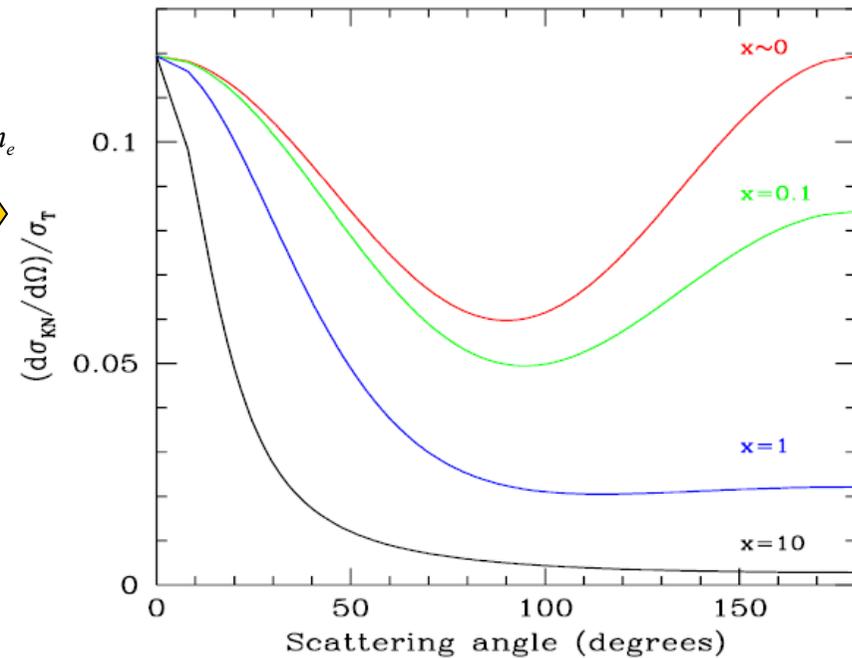
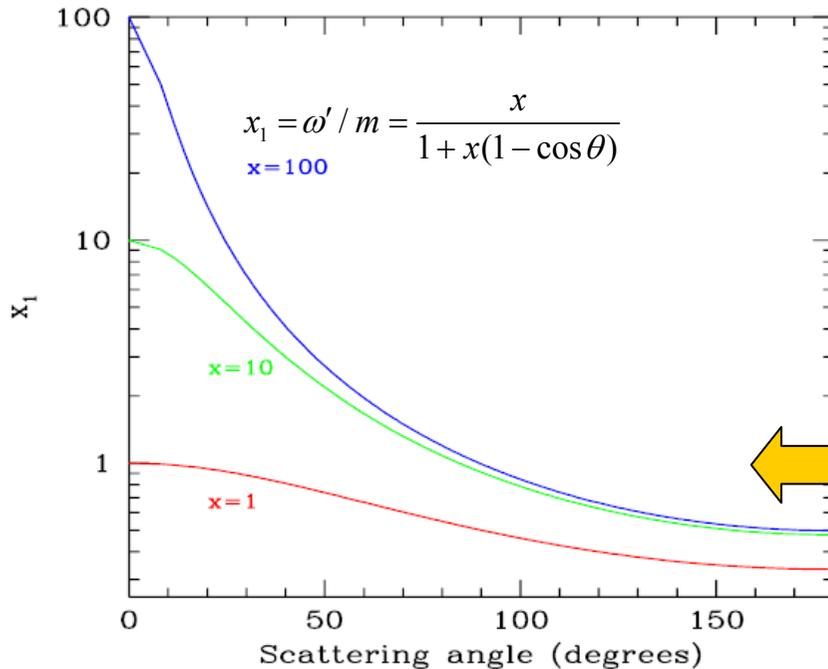
режим КН вне
конуса вперед

$d\Omega' = d\varphi \sin \theta_2 d\theta_2$ – элемент телесного угла
вокруг направления \vec{k}'

$$\sigma_T = \int \frac{d\sigma}{d\Omega'} d\Omega' = \frac{8\pi r_e^2}{3} = 6.65 \cdot 10^{-25} \text{ см}^{-2}$$

$$\frac{d\sigma_{\text{KN}}}{d\Omega} = \frac{3}{16\pi} \sigma_T \left(\frac{x_1}{x}\right)^2 \left(\frac{x}{x_1} + \frac{x_1}{x} - \sin^2 \theta\right)$$

$x_1 = \omega' / m_e$ (yellow arrow) \rightarrow



Энергия рассеянных фотонов как функция θ
для различных ω (для $x \gg 1$ и больших θ).

$$x_1 = \omega' / m_e \approx 0.5$$

строномия ВЭ

Дифф. и полное сечения комптоновского рассеяния на покоящемся электроне

$$\frac{d\sigma}{d\Omega'} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1 + \cos^2 \theta}{\left[1 + \frac{\omega}{m}(1 - \cos \theta)\right]^2} \left(1 + \frac{(\omega/m)^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + (\omega/m)(1 - \cos \theta)]}\right) \quad (1)$$

$d\Omega' = d\varphi d \cos \theta$ – элемент телесного угла вокруг направления \vec{k}'

Дифф. сечение по энергии рассеянного фотона можно получить, используя

$$\omega' = \frac{\omega}{1 + (\omega/m)(1 - \cos \theta)}$$

Интегрируя (1) по азимут. углу, получим

$$\frac{d\sigma}{d\omega'} = \pi r_e^2 \frac{m}{\omega^2} \left[\frac{\omega}{\omega'} + \frac{\omega'}{\omega} + \left(\frac{m}{\omega'} - \frac{m}{\omega}\right)^2 - 2\left(\frac{m}{\omega'} - \frac{m}{\omega}\right) \right] \quad (2)$$

Интегрируя (2) по ω' в пределах $\frac{\omega}{1 + 2\omega/m} \leq \omega' \leq \omega$,

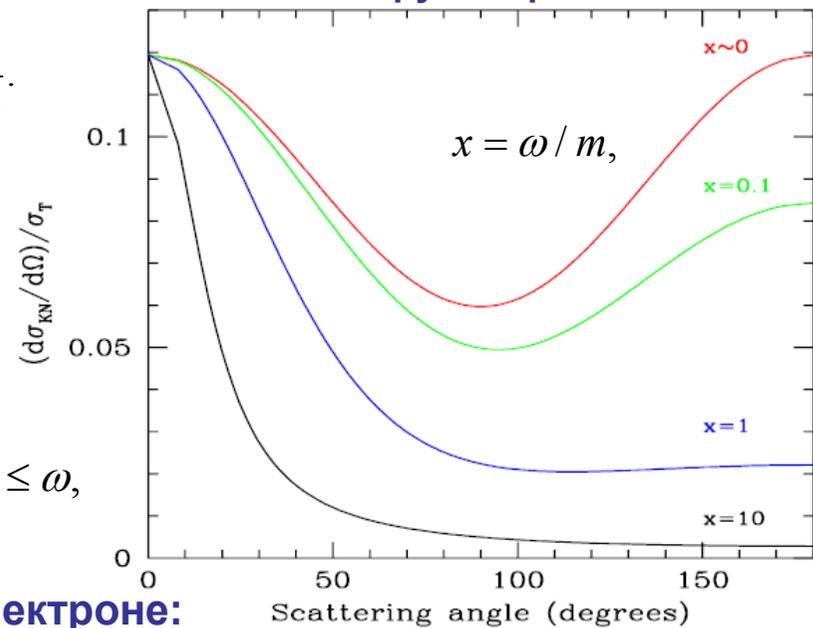
получим полное сечение рассеяния фотона на электроне:

$$\sigma = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1+x}{x^3} \left[\frac{2x(1+x)}{1+2x} - \ln(1+2x) \right] + \frac{\ln(1+2x)}{2x} - \frac{1+3x}{(1+2x)^2} \right\}$$

$\sigma_T = \frac{8\pi(e^2/mc^2)}{3} = 6.65 \cdot 10^{-25} \text{ см}^{-2}$

$x \ll 1$
 \rightarrow
 $\sigma = \sigma_T \left(1 - 2x + \frac{26x^2}{5} + \dots \right)$

$x \gg 1$
 \rightarrow
 $\sigma = \frac{3\sigma_T}{8x} \left(\ln 2x - 2x + \frac{1}{2} \right)$



Асимптотики сечения К-Н-Т

А.И.Ахиезер, В.Б.Берестецкий

Квантовая электродинамика.
М.:Наука, 1969 (с.372)

$$\sigma_{\text{KN}} = \frac{3}{4} \sigma_{\text{T}} \left\{ \frac{1+x}{x^3} \left[\frac{2x(1+x)}{1+2x} - \ln(1+2x) \right] + \frac{1}{2x} \ln(1+2x) - \frac{1+3x}{(1+2x)^2} \right\}$$

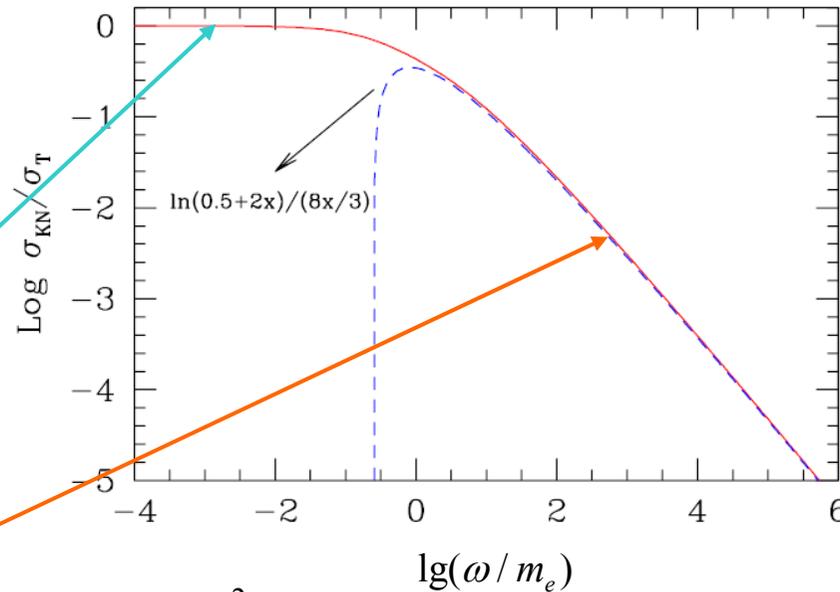
$$\sigma_{\text{KN}} \simeq \sigma_{\text{T}} \left(1 - 2x + \frac{26x^2}{5} + \dots \right); \quad (x \ll 1); \quad \sigma_{\text{KN}} \simeq \frac{3}{8} \frac{\sigma_{\text{T}}}{x} \left[\ln(2x) + \frac{1}{2} \right]; \quad (x \gg 1)$$

Здесь $x = \frac{\omega}{m}$;

у Ахиезера $x = 2\omega / m$ (в ЛС)

и $x \approx 2(\omega / m)^2$ (в СЦМ)

томсоновский режим



$$\frac{d\sigma}{d\Omega'} \approx \frac{r_e^2}{2} \frac{m}{\omega(1-\cos\theta)}, \quad (\omega/m)\theta^2 \gg 1$$

$$\sigma = \frac{3\sigma_{\text{T}}}{8x} \left(\ln 2x - 2x + \frac{1}{2} \right)$$

Обратный комптон-эффект

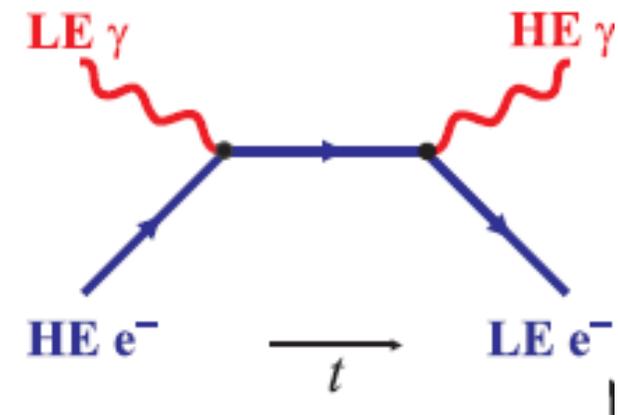
Если электрон ультррелятивистский с энергией $E_e \gg \omega$, то при столкновении с фотоном он теряет энергию, а фотон приобретает ее. Это процесс и называют обратным комптоновским рассеянием (чтобы отличить от прямого комптон. рассеяния, когда покоящемуся электрону передается часть энергии фотона. Реально различие только в кинематике рассеяния: электроны высоких энергий чаще передают энергию низкоэнергетическим фотонам.

В Галактике фоновое диффузное излучение – классич. рассеяние; во внегалактических источниках возможен режим

$$\eta \gg 1$$

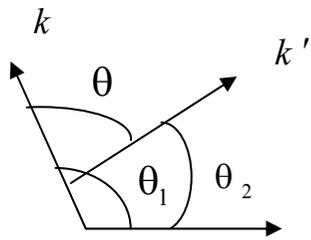
ICS – основной механизм потерь энергии электронов в астрофиз. радиоисточниках; также отвечает за генерацию изотропного рентг. излучения 50-100 кэВ - рассеяние релятив. электронов на РИ (СМВ).

Inverse Compton scattering



Radiative processes in high energy astrophysics
G. Ghisellini, arxiv 1202.5949

Рассеяние на электронах высоких энергий



лс

$$p_e = (E_e, \vec{p}) \quad p'_e = (E'_e, \vec{p}')$$

$$k = (\omega, \vec{k}) \quad k' = (\omega', \vec{k}')$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2$$

$$p + k = p' + k' \quad (p + k)^2 = (p' + k')^2 \quad \Rightarrow \quad p'k' = pk$$

$$k' \times (p + k)k' = p'k' \quad \Rightarrow \quad (p + k)k' = pk$$

$$\omega' = \frac{\omega(1 - |\vec{p}_e| / E_e \cos \theta_1)}{1 - |\vec{p}_e| / E_e \cos \theta_2 + (\omega / E_e)(1 - \cos \theta)} \quad \Rightarrow \quad \omega' \approx E_e / (1 - \cos \theta)$$

В пределе низких энергий электрона $\vec{p} \rightarrow 0$, $E_e \rightarrow m_e$ получим

$$\omega' = \frac{\omega}{1 + (\omega / m)(1 - \cos \theta)}$$

Рассеянный электрон в этом случае:

$$E'_e = m + \frac{\omega'^2(1 - \cos \theta)}{m + \omega'(1 - \cos \theta)}, \quad \cos \alpha = (1 + x) \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2 + x(x + 2)(1 - \cos \theta)}} \quad (x = \omega / m)$$

Отсюда можно получить угловое распределение электронов отдачи (Ахиезер, Берестецкий, Квантовая электродинамика, М.: Наука, 1981)

Другая запись:

$$\omega' = \frac{\omega(1 - \beta_e \cos \theta_1)}{1 - \beta_e \cos \theta_2 + \hbar \omega / (\Gamma m_e c^2)(1 - \cos \theta)},$$

$$\beta_e = |\vec{p}_e| c / E_e,$$

$$\Gamma = E / m_e c^2$$

Максимальная энергия рассеянного фотона

В ЛС: $P_e = (E, \vec{p});$ **при** $\eta = \frac{E\omega}{(mc^2)^2} = \frac{\Gamma\omega}{mc^2} \gg 1$ ($\Gamma = E / (mc^2) \gg 1$)

$$\sigma(E, \omega) = \frac{3mc^2}{8\omega} \sigma_T \ln \left[\left(\frac{2\omega E}{(mc^2)^2} \right) + \frac{1}{2} \right] = \frac{3mc^2}{8\omega} \sigma_T [\ln(2\eta) + 0.5].$$

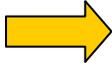
В этом случае в каждом взаимодействии рождается фотон с энергией

$$\omega' = \frac{\omega(1 - |\vec{p}_e| / E_e \cos \theta_1)}{1 - |\vec{p}_e| / E_e \cos \theta_2 + (\omega / E_e)(1 - \cos \theta)} \xrightarrow{\theta \approx \pi, \theta_1 \approx \pi, \theta_2 \approx 0} \omega'_{\max} = \frac{\omega(1 + |\vec{p}_e| / E_e)}{1 - |\vec{p}_e| / E_e + 2(\omega / E_e)} = \frac{\omega(1 + \beta)}{1 - \beta + 2(\omega / E_e)}$$

$$\omega'_{\max} = \frac{\omega(2 - 1/2\Gamma^2)}{1/2\Gamma^2 + 2(\omega / E_e)} = \frac{4\Gamma^2\omega(1 - 1/4\Gamma^2)}{1 + 4\eta} \Big|_{\eta \gg 1} \approx \frac{\Gamma^2\omega(1 - 1/4\Gamma^2)}{\eta} = \Gamma mc^2(1 - 1/4\Gamma^2) = E_e[1 - (mc^2 / 2E_e)^2]$$

линейный рост энергии рассеянного фотона $\omega'_{\max} \sim E_e$, **а следовательно, энергет. потерь электрона в комптоновском рассеянии**

Для мягких же первичных фотонов ($\omega \ll mc^2$) в астрофизическом источнике может выполняться условие $\eta \leq 1$, тогда $\omega'_{\max} \propto \Gamma^2\omega \approx (E_e / mc^2)^2 \omega$ 

Если же $\eta \ll 1$, то $\omega'_{\max} \approx 4(E_e / mc^2)^2 \omega$  **квадратичный рост энергии рассеянного фотона**

Релятивистский электрон $\Gamma = E / (mc^2) \gg 1$

В лс: $P_e = (E, \vec{p});$ **при** $\eta = \frac{E\omega}{(mc^2)^2} \gg 1$

$$\sigma(E, \omega) = \frac{3mc^2}{8\omega} \sigma_T \ln \left[\left(\frac{2\omega E}{(mc^2)^2} \right) + \frac{1}{2} \right] = \frac{3mc^2}{8\omega} \sigma_T \ln(2\eta + \frac{1}{2}),$$

В этом случае в каждом взаимодействии рождается фотон с энергией

$$\omega' = \frac{\omega(1 - |\vec{p}_e| / E_e \cos \theta_1)}{1 - |\vec{p}_e| / E_e \cos \theta_2 + (\omega / E_e)(1 - \cos \theta)} \quad \longrightarrow \quad \omega \leq \omega' \leq 4\omega(E_e / mc^2)^2$$

**Средняя энергия
рассеянного фотона**

$$\langle \omega' \rangle = \frac{4}{3} \left(\frac{E_e}{mc^2} \right)^2 \langle \omega \rangle = \frac{4}{3} \Gamma^2 \langle \omega \rangle$$

При условии $\eta \ll 1$

**рассеяние фотонов на движущихся электронах явл.
классическим (томсоновским) :**

$$\sigma_T = \frac{8\pi(e^2 / mc^2)}{3} = 6.65 \cdot 10^{-25} \text{ см}^{-2}$$

IC in Klein–Nishina regime

When photon energy in electron comoving frame approaches (or exceeds) $m_e c^2$ two effects become important. One of which is that the electron recoil in the scattering can no longer be ignored. The other effect is that the cross-section is smaller than σ_T and it decreases with increasing photon energy as $\sim \nu^{-1}$. See [123] for appropriate equations. One simple consequence of the recoil effect is that the energy of the scattered photon is limited to $\sim m_e c^2 \gamma_e / 2$ (and is no longer $\sim \nu_0 \gamma_e^2$) which is obvious from energy conservation.

Сечение обратного комптоновского рассеяния

В СЦМ:

C. Heiter et al. *Astropart. Phys.* 102 (2018) 39

$$\sigma_{\text{ICS}} = \frac{3}{8} \sigma_{\text{T}} \frac{m_e^2 c^4}{s} \frac{1}{\beta} \xi, \quad \xi_0 = \frac{2}{\beta(1+\beta)} (2 + 2\beta - \beta^2 - 2\beta^3) - \frac{1}{\beta^2} (2 - 3\beta^2 - \beta^3) \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right).$$

$$\beta = [1 - m_e^2 / s] / [1 + m_e^2 / s]; \quad \beta \text{ - скорость электрона в СЦМ после рассеяния.}$$

Дифф. сечение рассеяния по относительной энергии, переданной фотону:

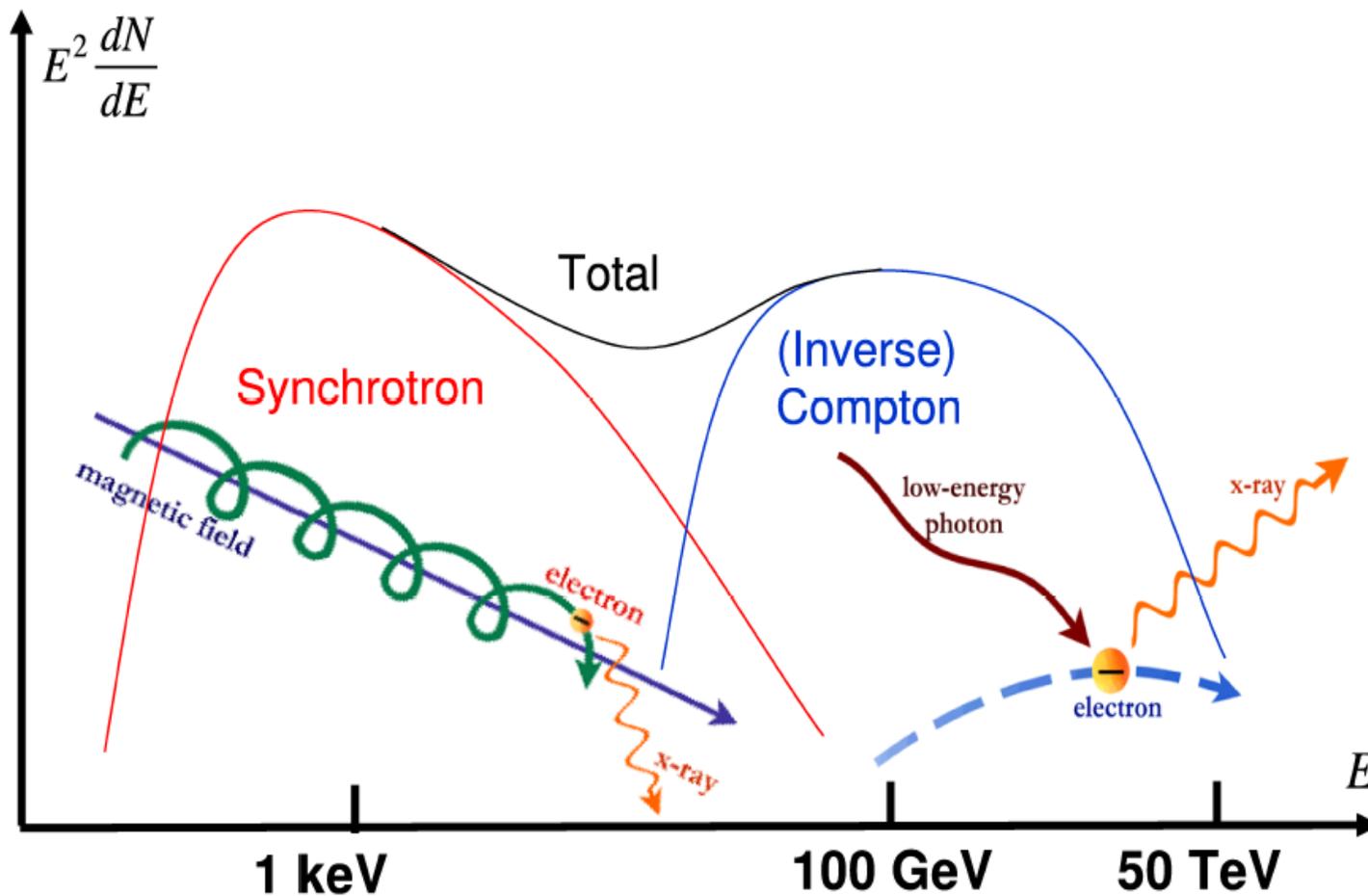
$$\frac{d\sigma_{\text{ICS}}}{dx} = \frac{3}{8} \sigma_{\text{T}} \frac{m_e^2 c^4}{s} \frac{1+\beta}{\beta} \xi_{\text{ICS}}(x)$$
$$\xi_{\text{ICS}}(x) = x + \frac{1}{x} + \frac{2(1-\beta)}{\beta} \left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{(1-\beta)^2}{\beta^2} \left(1 - \frac{1}{x}\right)^2$$

$$E_e' = E_e - E_\gamma + \omega, \quad x = E_e' / E_e, \quad dx = dE_e' / E_e = -dE_\gamma / E_e,$$

β - скорость e после рассеяния меняется в интервале значений

$$(1 - \beta) / (1 + \beta) \leq x \leq 1$$

Спектры γ -излучения в источниках ВЭ



Механизмы поглощения γ -излучения

Взаимодействие с веществом

- комптон-эффект, рождение e^+e^- - пар;

Взаимодействие с фотонным (радиационным) полем

- рождение e^+e^- - пар , $E_\gamma^{th} \approx m_e^2 / \omega$, эВ

Взаимодействие со сверхсильным магнитным полем (например, в NS)

- рождение пары $B > B_0 = m^2 c^3 / e\hbar = 4.4 \cdot 10^{13}$ Гс, $E_\gamma^{th} \geq 4 \cdot 10^{18} \text{ эВ} / B_\perp (\text{Гс})$

$E_\gamma^{th} \approx m_e^2 / \omega$, эВ	ω , эВ	Плотность, см ⁻³	Излучение
$4 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-4}$	400	РИ (реликт. изл.)
10^{11}	2	$5 \cdot 10^{-3}$	свет звезд
$3 \cdot 10^8$	10^3	-	рентген

Расстояния до наблюдаемых объектов
(если $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ - основной механизм
поглощения γ -квантов) :

$R \approx 10$ кпк для $E_\gamma \sim 1$ ПэВ;

$R \sim 100$ Мпк, $E_\gamma < 100$ ТэВ

Некоторые особенности γ -излучения

- ✓ $e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ $E_\gamma = 0.511$ МэВ; малая интенсивность, высокий фон КЛ
- ✓ тормозное излучение электронов - $1 \text{ МэВ} < E_\gamma < 100 \text{ МэВ}$;
- ✓ комптоновское рассеяние на электронах существенно для низких и высоких энергий - $E_\gamma \sim 1 \text{ МэВ}$ и $E_\gamma > 100 \text{ ГэВ}$;
- ✓ синхротронное излучение электронов $E_\gamma = 1 \text{ МэВ}$;  $E_e = 1 \text{ ПэВ}$, $H = 10^{-5} \text{ Э}$ (10^{-5} Гс)
- ✓ распад $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ - рождаются γ -кванты с энергиями $100 \text{ МэВ} < E_\gamma < 100 \text{ ГэВ}$;
спектр излучения имеет max при $E_\gamma = 67.5 \text{ МэВ}$;

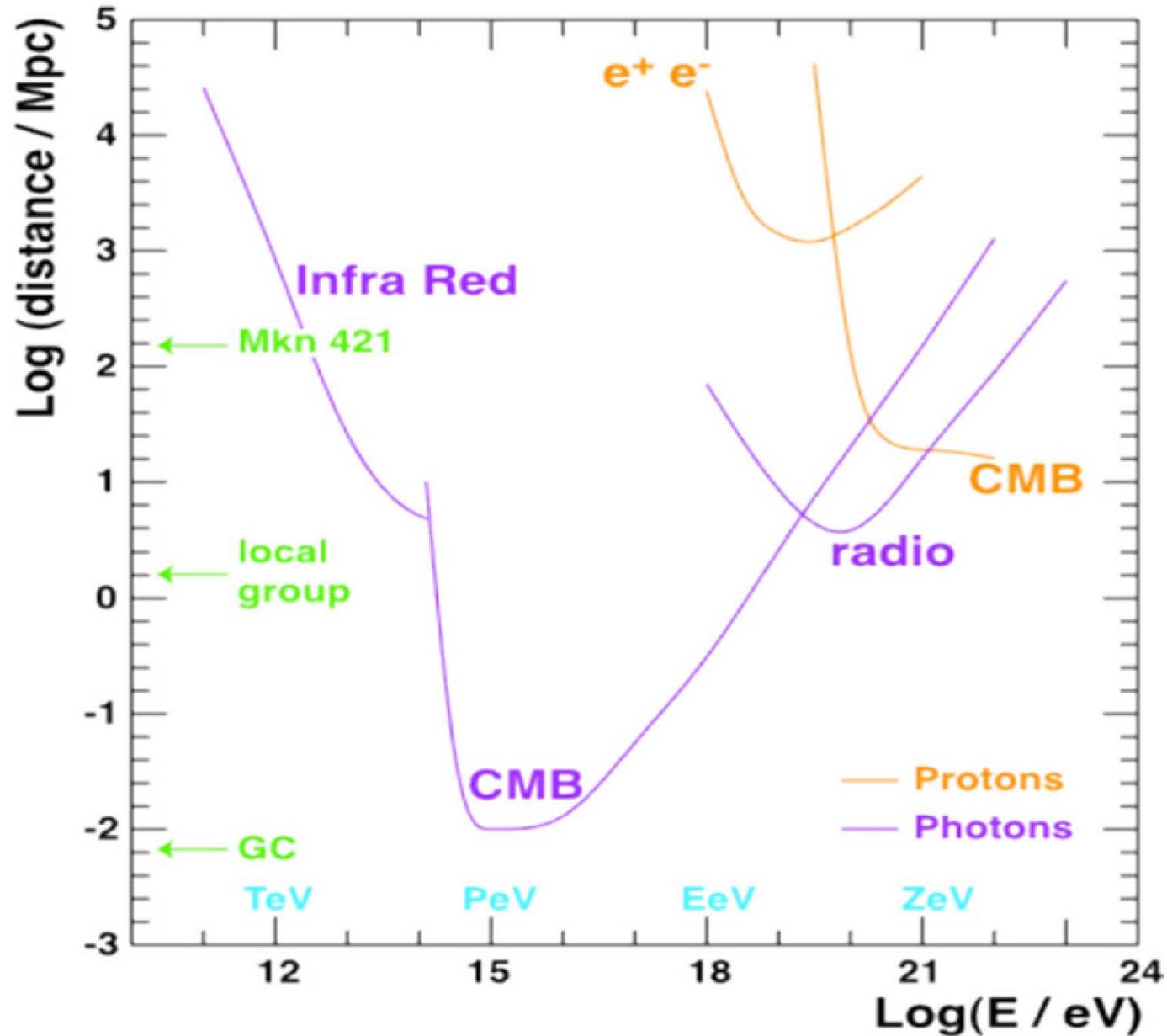
Наша Галактика:

Диффузное в диске: $E_\gamma \leq 100 \text{ МэВ}$ - тормозное изл. релятив. электронов (КЛ);

$E_\gamma \geq 300 \text{ МэВ}$ - γ -кванты от распада π^0 (КЛ + РИ).

Диффузное в гало: ICS электронов на рад. полях (РИ, радио, опт., рентген);
Плотность рад. полей по мере удаления от диска падает гораздо медленнее, чем плотности вещества (газа) .

Средний пробег до взаимодействия p и γ с радиационными полями как функция энергии



B. Baret, V. Van
Elewyck Rep.
Prog. Phys. 74
(2011) 046902

Черенковские гамма-телескопы

Вскоре после открытия черенковского излучения от ШАЛ предпринимались попытки (безуспешные) использовать ЧИ для поиска точечных источников КЛ ВЭ (безуспешные). В 1958 г. после публикации статьи Моррисона о перспективах гамма-астрономии на энергиях ~ 100 МэВ, Дж. Коккони, физик-теоретик из ЦЕРН, высказал идею создания сети детекторов частиц в качестве инструмента (телескопа) для решения задач гамма-астрономии высоких энергий. Два таких эксперимента (в Польше и Боливии) искали дискретные источники, но поскольку порог энергии был высоким ($E > 100$ ТэВ), источники не были найдены. Наконец экспериментаторы поняли, что регистрация электромагнитных каскадов с использованием атмосферного черенковского излучения является перспективной технологией. Группа из ФИАН установила в Крыму сеть из 12 световых детекторов, на которых в течение четырех лет (1960-1964 гг.) проводились наблюдения источников, предложенных Коккони, - радиогалактики и остатки сверхновых). Хотя зарегистрировать γ -излучение или космические лучи не удалось, основа для будущей технологии была заложена.

Первым крупным черенковским телескопом, специально построенным для гамма-астрономии, был телескоп в обсерватории Уиппла (штат Аризона, США, 1968 г.): зеркало $\varnothing 10$ м, камера - 37 ФЭУ. Хотя большая площадь светосбора позволила уменьшить порог энергии, она не привела к значительному улучшению чувствительности. Сигнал от двойной звезды Лебедь X-3 (Суг X-3), с использованием атмосферных черенковских детекторов и детекторов частиц (группы в СССР, Германии и Великобритании) привел к подъему активности в экспериментальной области. Последующее развитие атмосферной черенковской имидж-техники с использованием телескопа Уиппла привело к открытию Крабовидной туманности (1989) – стабильного источника, который стал «стандартной свечой». Это важный результат гамма-астрономии.

1987-2002 - эксперимент HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy);

1992, 1993 - прототипы черенковского телескопа СТ1, СТ2 подтвердили возможности техники ИАСТ (оба телескопа позволяли обнаружить ТэВ-ные источники γ -излучения).

1998 - полная система из 5 одинаковых телескопов (зеркало 8.5 м², камера из 271 ФЭУ). Телескопы были расположены на квадрате со стороной 100 м – 4 по углам, 1 в центре. Стереоскопические наблюдения обеспечивали реконструкцию развития ШАЛ и возможность различать адронные и электромагнитные ливни.

Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope

Высокоэнергичные γ -лучи можно регистрировать с помощью наземных детекторов, которые собирают черенковский свет от заряженных частиц ливня - телескопов, в которых создается изображение регистрируемого черенковского света (IACT).

Телескоп с зеркалом, расположенный внутри светового бассейна ШАЛ, фокусирует черенковский свет на камеру в фокальной плоскости и тем самым «наблюдает» ливень. Площадь зеркала телескопа должна быть достаточно большой, чтобы обнаружить фотоны от ШАЛ и отличить их от фонового света. Эффективная площадь обнаружения черенковского телескопа задается областью светового бассейна ШАЛ ($\sim 10^4$ м² – гектар !).

Камера захватывает и записывает черенковское изображение ливня (image). Необходимым условием качественной записи является мелкозернистая камера, способная разрешать детали развития ливня и дать возможность восстановить его характеристики и обнаружить различия между адронным и электромагнитным ливнем.

Камеры для черенковских телескопов представляют собой матрицы из ФЭУ. Кроме того, требуется большое поле зрения для наблюдения протяженных источников и высокая временная чувствительность к очень коротким импульсам света (10^{-9} с). Необходима также схема триггера, которая позволяет отбирать краткие и компактные черенковские изображения, отсеивая их от фона (ночного неба).

The “*Hillas image parameters*”

In **1985** at the ICRC (La Jolla) **Hillas** suggested to use the “***Hillas image parameters***” to reduce the background

OG 9.5-3

CERENKOV LIGHT IMAGES OF EAS PRODUCED BY
PRIMARY GAMMA RAYS AND BY NUCLEI

A. M. Hillas
Physics Department
University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK.

ABSTRACT

It is shown that it should be possible to distinguish very effectively between background hadronic showers and TeV gamma-ray showers from a point source on the basis of the width, length and orientation of the Cerenkov light images of the shower, seen in the focal plane of a focusing mirror, even with a relatively coarse pixel size such as employed in the Mt. Hopkins detector.

Gamma showers are slimmer, more concentrated and orientated towards the source

“Hillas image parameters”

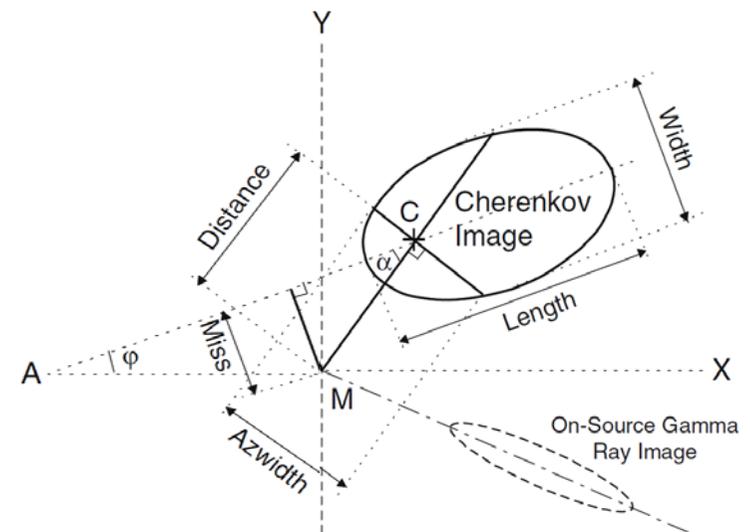
Основные параметры Хилласа

The *solid ellipse* indicates the pixel image contour, *C* is the *centroid* of the image (location of highest brightness) and *M* the *center of the field of view*.

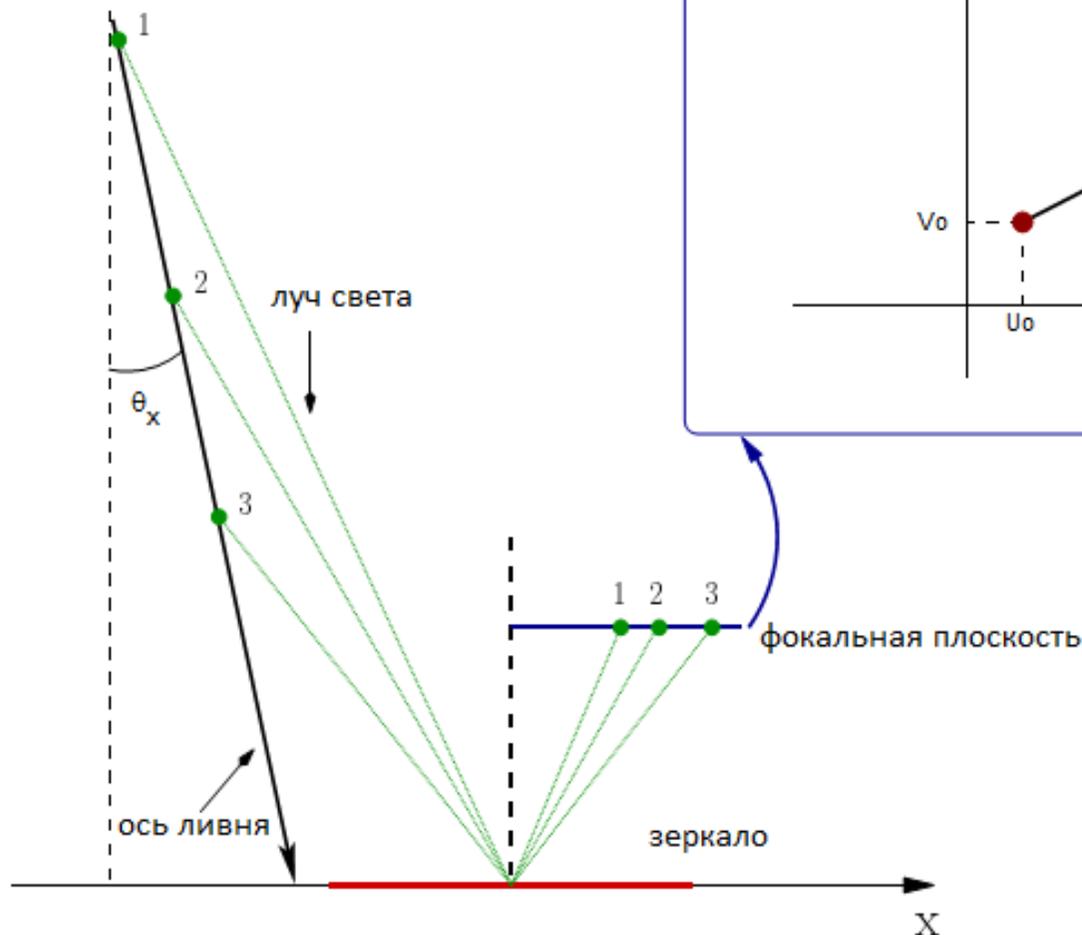
The relevant parameters are the *major and minor axis of the ellipse*, labeled *Length* and *Width* in the plot, the angle α between the major axis and the line connecting the centroid *C* with the center of the field of view *M*, the *Distance* between *C* and *M*, and the two quantities called *Miss* and *Azwidth*.

Miss is the offset or the perpendicular distance between the extension of the major axis of the ellipse and *M*, and *Azwidth* is the azimuthal width of the image as indicated; it is the r.m.s. spread of light perpendicular to the line connecting *C* with *M*. Except for the clean regular elliptic shape this image is also representative for hadronic showers.

The *dashed ellipse* at the lower right with the extension of the major axis intercepting the *center M* of the mirror, labeled *On-Source Gamma Ray Image*, shows the typical narrow elliptic contour of a gamma ray shower when the mirror axis is pointing at the source and the impact parameter is non-zero.



IACT отражает черенковский свет ливня на камеру, используя сферические или параболические зеркала, которая находится в фокальной плоскости зеркала. Параллельные лучи света с равными углами открытия по отношению к оптической оси изображаются одной и той же точкой в фокальной плоскости.

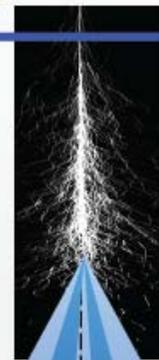


Интенсивность света, измеряемая в определенном положении в камере, соответствует интенсивности черенковского света, достигающего зеркала под конкретным двумерным углом. Черенковский телескоп измеряет угловое распределение света от ШАЛ.

THE IAC TECHNIQUE

Top of the atmosphere

- * Primary CRs (p , α , e^+ , γ ...)
- * Extended Air Showers (EAS)
 - Hadronic showers (>99%)
 - Electromagnetic showers
- * **Cherenkov radiation** emission
 - **optical and near-UV light**
 - **flash duration ~few ns**
- * Light collected by the mirrors
- * Light focalized in the cameras
- * EAS images in the focal planes
- * **Image parameterization** and stereoscopic reconstruction



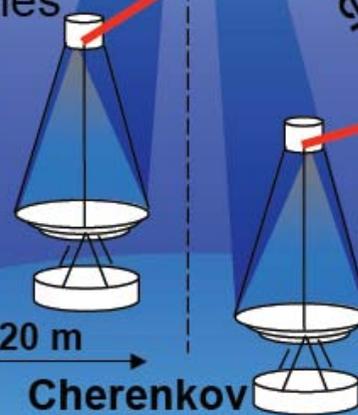
Shower maximum
~ 10 km



Focal plane

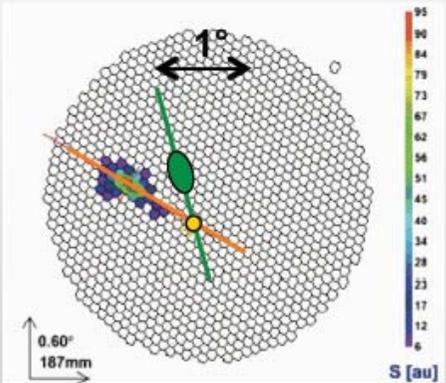
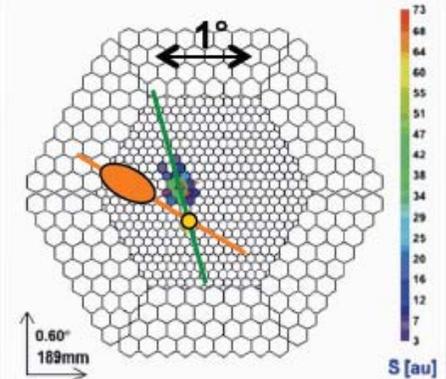
Focal plane

Cherenkov Light



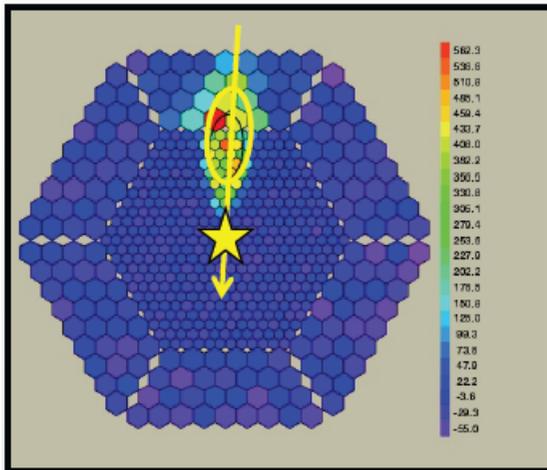
~ 120 m

Cherenkov light pool



Imaging
Atmospheric
Cherenkov
Telescopes

Типичные события на черенковских телескопах (IACT)



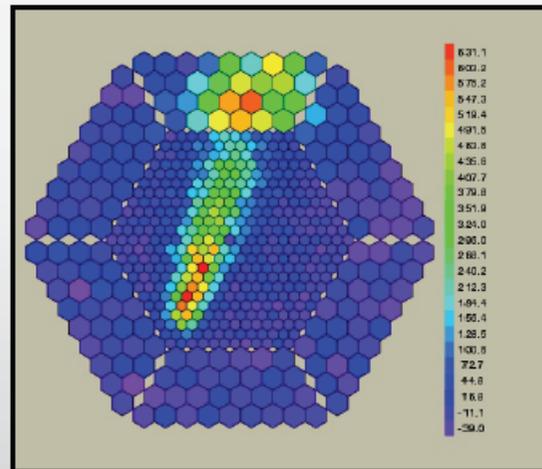
γ -like
(signal!)

- pointing to the source
- compact morphology
- compact time development

Cosmic-rays

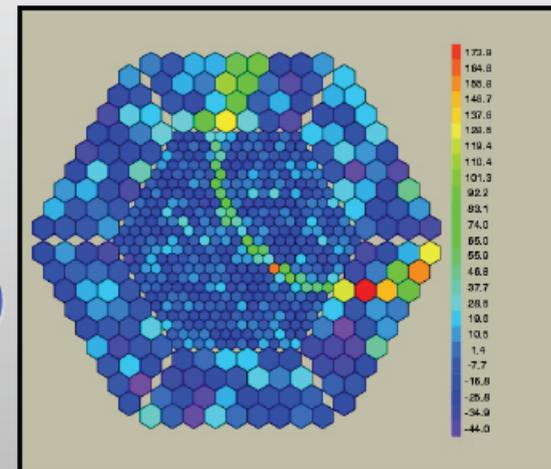
vs

gamma-rays



hadron-like
(background, >99%)

Single Muon



Сравнение ЭМ и h-ливней

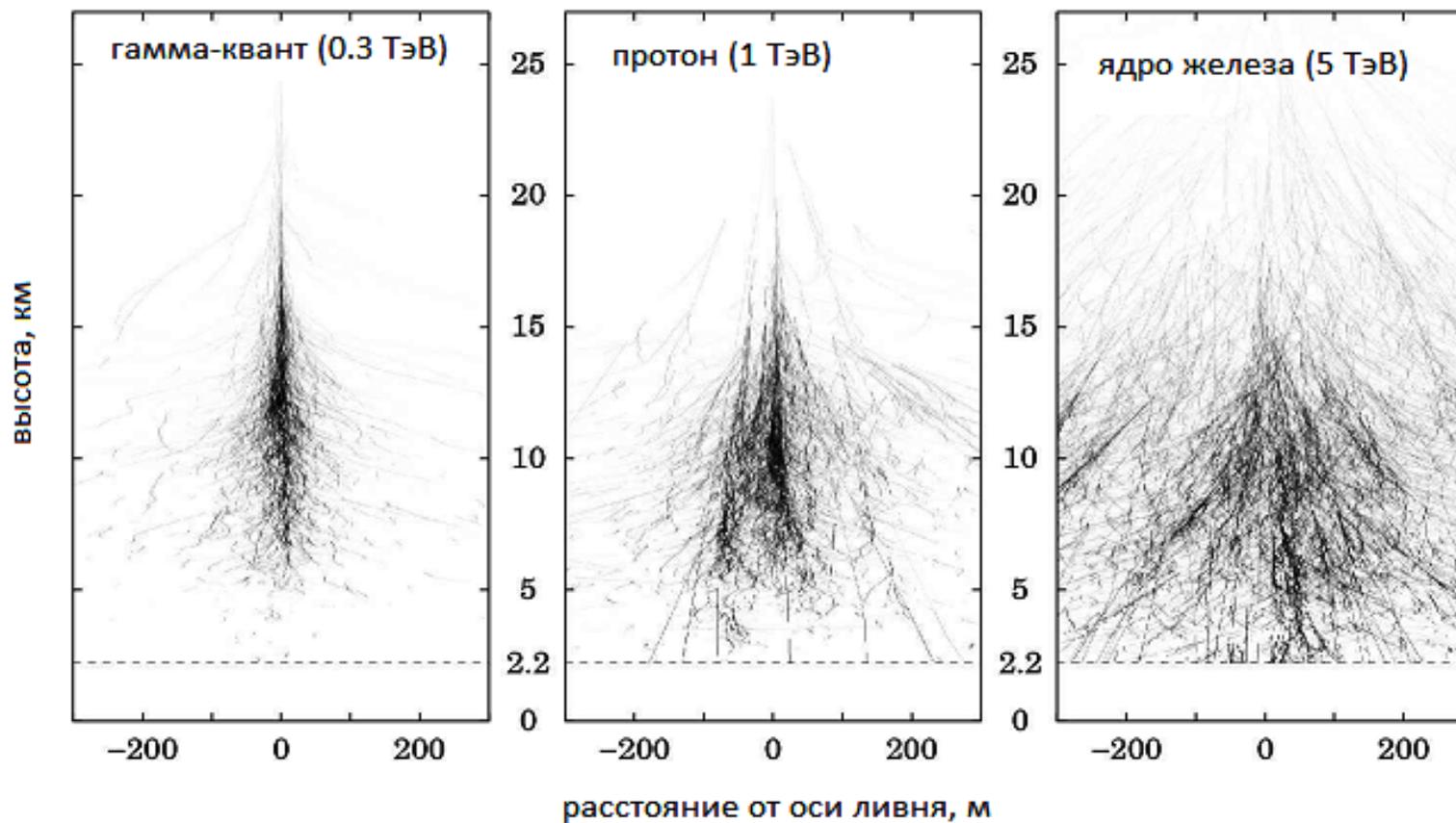
* EM showers:

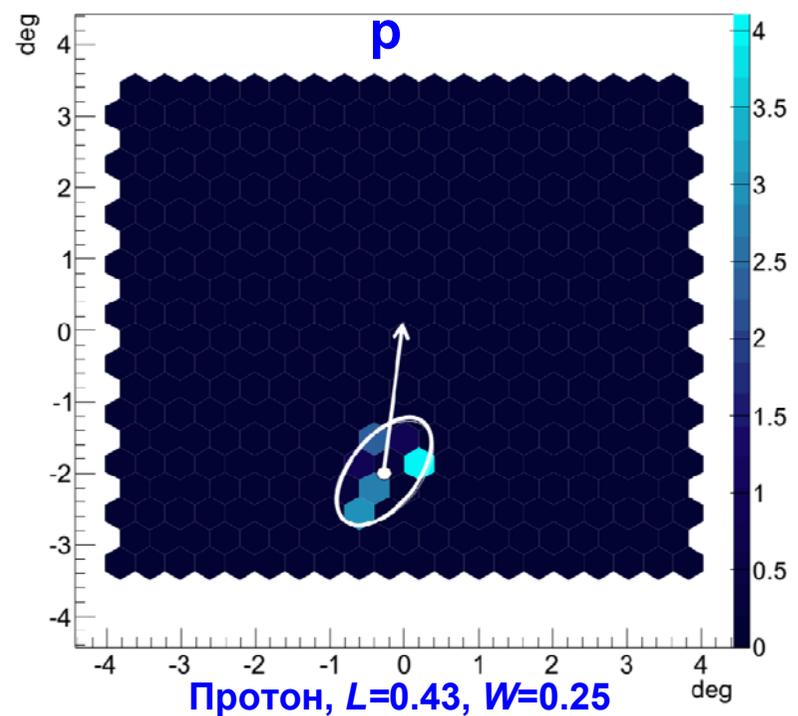
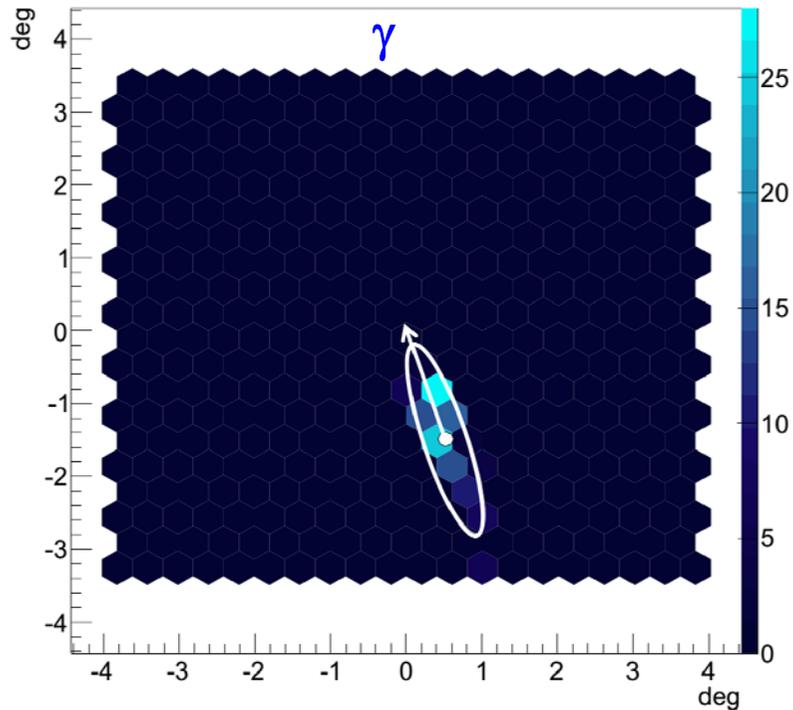
- Main processes:
Bremsstrahlung ($X_0^e = 37 \text{ g/cm}^2$)
 e^\pm pair production ($X_0^\gamma = 7/9 X_0^e$)
- primary interaction at $\sim 20 \text{ km a.s.l.}$
- shower maximum at $\sim 7\text{-}13 \text{ km}$
(for $50 \text{ GeV} < E_\gamma < 10 \text{ TeV}$)
- extension development $\sim 5 \text{ km}$

* Hadronic showers:

- more complex interactions
- main shower components:
hadronic core (π , K, nucleons)
muonic component (π^\pm and K decays)
EM subshowers from π^0 decays

Моделирование γ - и p/Fe-индуцированного ШАЛ

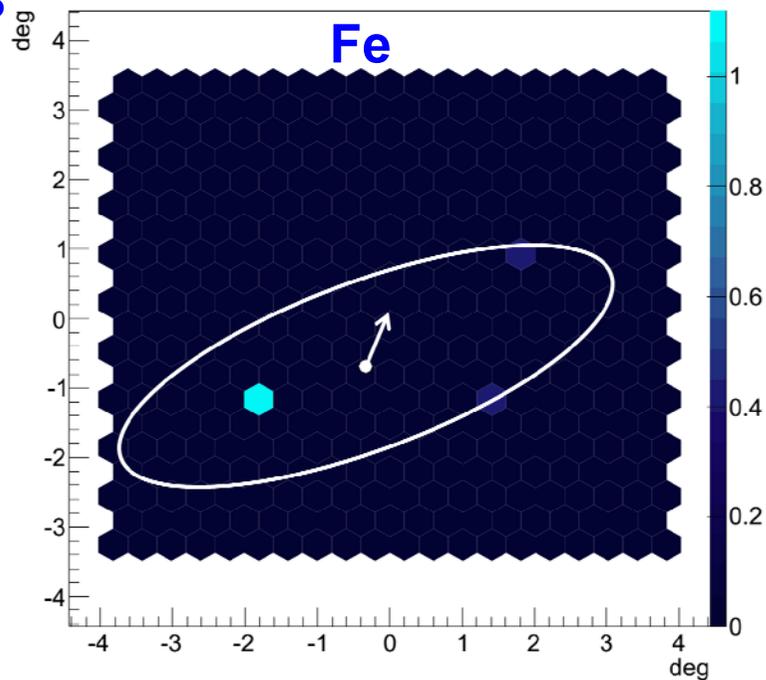




γ -квант, длина=0.69, ширина= 0.15

$E = 2.51$ ТэВ. Распределение интенсивности - эллипс, стрелка показывает направление от центра эллипса на центр камеры.

Эллипсы имиджей протона и железа имеют заметное отклонение от радиальной ориентации, кроме того, имидж Fe имеет характерный для адронных ливней разброс сработавших пикселей.



Железо, $L=1.82$, $W=0.60$

A. Abramowski et al. (HESS Colaboration), Nature 531, 476 (2016)
V. Acciari et al. (Veritas Collaboration), Astrophys. J. 730, L20 (2011)
S. Ansoldi et al. (MAGIC Collaboration), Astrn. Astrophys. 585, A133 (2016)
A. Abdo et al. (MILAGRO), Astrophys. J. 700, L127 (2009)
U.Abeysekara et al. (HAWC Collaboration), arXiv:1701.01778 (2017)

**J. Carr for the CTA Collaboration, EPJ Web of Conferences 121, 04004 (2016);
Roma Int. Conf.mAstropart. Phys. 2014 (RICAP-14)**

CANGAROO, H.E.S.S.

CANGAROO-III -сеть из четырех телескопов \varnothing 10м (2004) (Австралия, Япония)

(Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback)

В 1992 начал работать совместный проект Японии и Австралии CANGAROO (Австралии) – один из пионеров в гамма-астрономии VHE; зеркало \varnothing 3,8 м, камера из 256 ФЭУ; CANGAROO-II (1999): зеркало \varnothing 7м, расширен до 10 м в 2000 году для увеличения светосбора, что позволило продвинуться в область сотен ГэВ, которая оставалась малоизученной (выше диапазона космических гамма-телескопов и ниже наземных черенковских телескопов того времени). CANGAROO-III (2000-2004).

T. Mizukami et al. ApJ 740 (2011) 78

H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) - (2002) 2004 (12 стран)

В 2002 - первый телескоп первой фазы проекта H.E.S.S. (Намибия).

К концу 2003 года были готовы все 4 телескопа, официально запущены осенью 2004 года.

Телескопы расположены по углам квадрата 120×120 м², зеркала 12 м, камеры из 960 ФЭУ. Позднее в центре площадки был установлен телескоп второй фазы - H.E.S.S. II (2012 г.). Он имеет зеркало диаметром 28 метров и камеру из 2048 ФЭУ. Система исследует γ -излучение астрофизических объектов с энергиями от десятков ГэВ до десятков ТэВ.

Более 170 человек из 32 научных институтов и 12 стран: Намибии, ЮАР, Германии, Франции, Великобритании, Ирландии, Австрии, Польши, Чехия, Швеции, Армении и Австралии.

MAGIC, VERITAS

MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope) – 2002/03

Первый большой черенковский телескопа Magic-I, с зеркалом 18м и камерой из 1039 ФЭУ. В 2009 году был добавлен второй телескоп с теми же характеристиками - MAGIC-II, установленный на расстоянии 85м от Magic-I. Благодаря большой поверхности зеркала и хорошему светосбору доступны для регистрации гамма-лучи с энергиями ниже порогов других существующих или планируемых черенковских гамма-телескопов. Достигнут порог в 25 ГэВ.

VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)

В США, на базе обсерватории Уиппла в штате Аризона, в 2003 году началось создание системы VERITAS, установлены 2 телескопа с диаметром зеркал 12м и камерами из 499 ФЭУ. В начале 2007 + 2 таких же телескопов, опубликованы первые результаты.

В 2009 году первый телескоп был перемещен на новую позицию для повышения чувствительности всей системы. Диапазон наблюдений VERITAS лежит в пределах ~ 50 ГэВ - 50 ТэВ .

CURRENT IACT OBSERVATORIES IN THE WORLD



2 Telescopes (17 m)
 $E_{th} \sim 25 \text{ GeV}$
Sens. $\sim 0.6\% \text{ Crab}/50\text{h}$

Unique instrument in
 $30 < E [\text{GeV}] < 200$



4 Telescopes (12 m)
 $E_{th} \sim 150 \text{ GeV}$
Sens. $\sim 0.7\% \text{ Crab}/50\text{h}$



5 Telescopes (1x28m + 4x13 m)
 $E_{th} \sim 50 \text{ GeV}$
Sens. $\sim 0.5\% \text{ Crab}/50\text{h}$

H.E.S.S. - High Energy Stereoscopic System



Первый телескоп первой фазы - 2002; 4 телескопа – осенью 2004.

Figure 1. The HESS array of four imaging atmospheric Cherenkov telescopes located in Namibia.

Телескопы расположены по углам квадрата со стороной 120 м, зеркала \varnothing 12 м, камеры из 960 ФЭУ.

Вторая фаза (H.E.S.S. II, 2012 г.) - телескоп с зеркалом \varnothing 28 м, камера из 2048 ФЭУ. Исследуется гамма-излучение космических объектов в диапазоне энергий от десятков ГэВ до десятков ТэВ;

170 человек из 32 института из 12 стран: Намибии, ЮАР, Германии, Франции, Великобритании, Ирландии, Австрии, Польши, Чехия, Швеции, Армении и Австралии .

F Aharonian et al. Rep. Prog. Phys. 71 (2008) 096901

MAGIC - Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope

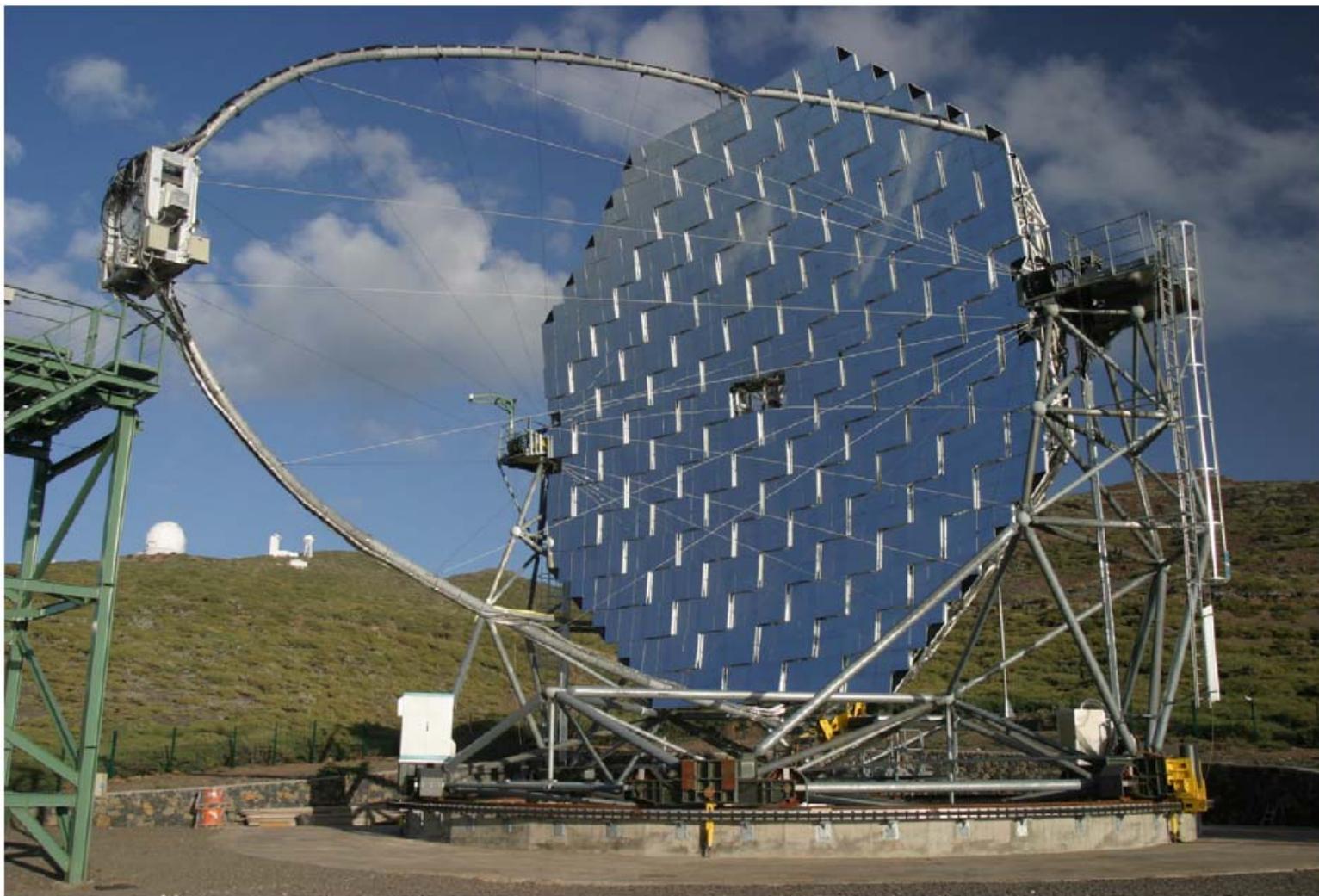


Figure 2. The 17 m diameter single dish MAGIC telescope located on the Canary Island of La Palma.

2 телескопа с диаметром зеркал 18 м, камера из 139 ФЭУ, порог - 25 ГэВ

24.12.2018

Гамма-астрономия ВЭ

69

MAGIC EXPERIMENT

- **Large reflectors**
(2 x 17 m \varnothing)
- **Phase-I: Monoscopic**
operating since fall 2003
- MAGIC-II successfully
commissioned during
2009
- **Phase-II: Stereoscopic**
operating since fall 2009
- MAGIC-I upgrade since
2012



**European Collaboration of ~170 physicists from ~20 institutes in
Germany, Italy, Spain, Switzerland, Finland, Poland, Bulgaria,
Croatia, Japan, India**

Рабочие характеристики MAGIC



MAGIC-I (std mono analysis)

- $E_{th} = 55$ GeV (nominal trigger)
25 GeV (sum trigger)
Analysis threshold ~ 60 GeV
- Best integral Sensitivity 1.6% Crab in 50 h
- Angular resolution: 0.1°
- FOV 3.5°



MAGIC stereo (std stereo analysis)

- $E_{th} = 50$ GeV analysis threshold
25 GeV (sum trigger)
- **Reduced systematics for $E < 100$ GeV**
- Best integral Sensitivity 0.8% Crab in 50 h
- Angular resolution: 0.1°
- FOV 3.5°

THE MAGIC SENSITIVITY

J.Aleksić et al. *Astropart. Phys.*72 (2016) 76

Aleksić et al. (MAGIC) *Astropart. Phys.* 72, 2016

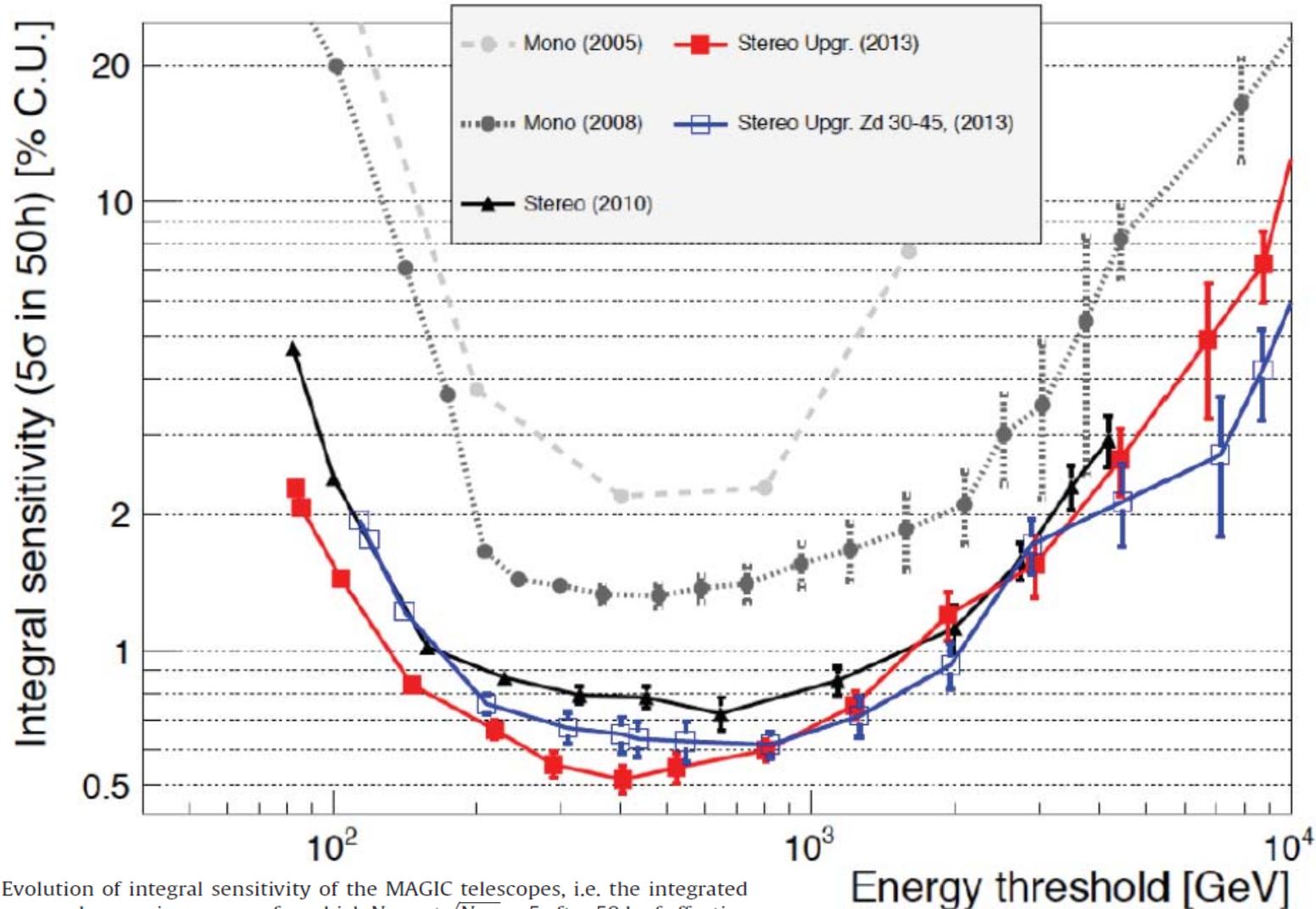


Fig. 17. Evolution of integral sensitivity of the MAGIC telescopes, i.e. the integrated flux of a source above a given energy for which $N_{\text{excess}}/\sqrt{N_{\text{bkg}}} = 5$ after 50 h of effective observation time, requiring $N_{\text{excess}} > 10$ and $N_{\text{excess}} > 0.05N_{\text{bkg}}$. Gray circles: sensitivity of the MAGIC-I single telescope with the Siegen (light gray, long dashed, [11]) and MUX readouts (dark gray, short dashed, [15]). Black triangles: stereo before the upgrade [15]. Squares: stereo after the upgrade: zenith angle below 30° (red, filled), $30-45^\circ$ (blue, empty) For better visibility the data points are joined with broken lines. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System



VERITAS

4 телескопа диаметром 12 м в горах (Mount Hopkins), штат Аризона

arXiv:1207.6003



Figure 3. The recently completed four IACT array VERITAS at Mt Hopkins, Arizona.

на базе обсерватории Уиппла, штат Аризона

VERITAS - Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System

4 телескопа с диаметром зеркал 12м и камерами из 1000 ФЭУ (2007) .
Диапазон наблюдений VERITAS 50 ГэВ - 50 ТэВ .

Характеристики трех гамма-телескопов (IACT)

Instrument	# Tels.	Tel. Area (m ²)	Field of View (°)	Total Area (m ²)	Threshold (TeV)	Ang. res. (°)	Sensitivity in 50h (% Crab)
H.E.S.S.	4	107	5	428	0.1	0.06	0.7
MAGIC	2	236	3.5	472	0.05 (0.025)	0.07	0.8
VERITAS	4	106	4	424	0.1	0.07	0.7

Открытие с помощью телескопа H.E.S.S. γ -излучения от пульсара PWN N157B из БМО

H.E.S.S. - High Energy Stereoscopic System

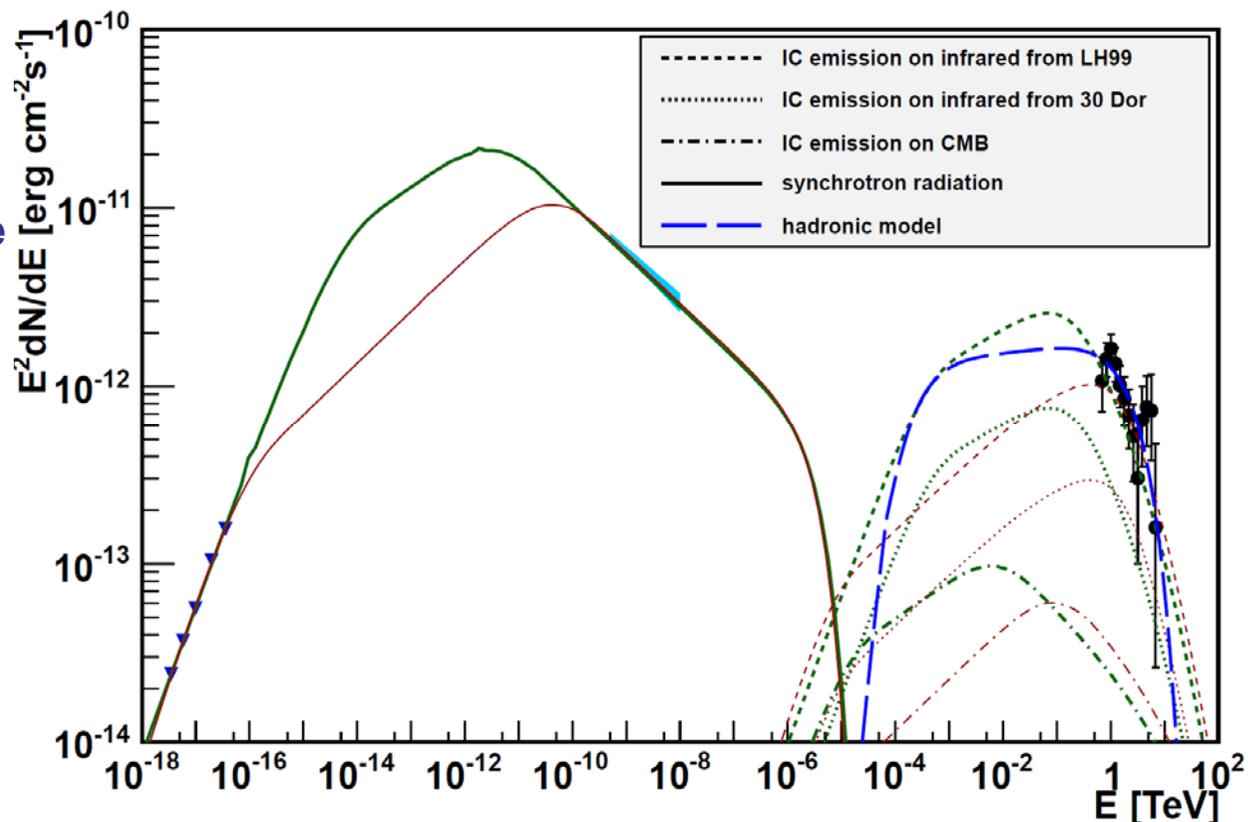
N157B ассоциируется с PSRJ0537-6910

H.E.S.S. Collaboration,
A. Abramowski et al.

arXiv:1208.1636v2

Наблюдалось излучение
с энергиями
600 ГэВ - 12 ТэВ

$$\dot{E} = 4.9 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$$



Энергетический спектр N157B. Радиоизлучение – треугольники (слева), нетепловое рентгеновское излучение - полоса, гамма-излучение ТэВ-ных энергий (измерения H.E.S.S.) – кружки (справа). Модели: зеленая сплошная линия – модель охлаждения с изломами, зависящими от магн. поля и возраста остатка сверхновой; красные тонкие линии – модель, в которой минимизирована энергия электронов; штриховая синяя - адронный сценарий генерации гамма-квантов.

Выводы из данных H.E.S.S.

- ❖ *Galactic Center harbors a hadronic PeVatron* within a few parsec region around Sgr A* (a SMBH in the GC).
- ❖ 1/r type distribution of the CR density implies (quasi-)continuous regime of operation of the accelerator with a power 10^{38} erg/s (on timescales 1 to 10 kyr), a non negligible fraction of the current accretion power.
- ❖ *This accelerator alone can account for most of the flux of Galactic CRs around the “knee”* if its power over the last 10^6 years or so has been maintained at average level of 10^{39} erg/s.
- ❖ Escape of particles into the Galactic halo and their subsequent interactions with the surrounding gas can be responsible for sub-PeV neutrinos recently reported by the IceCube collaboration.

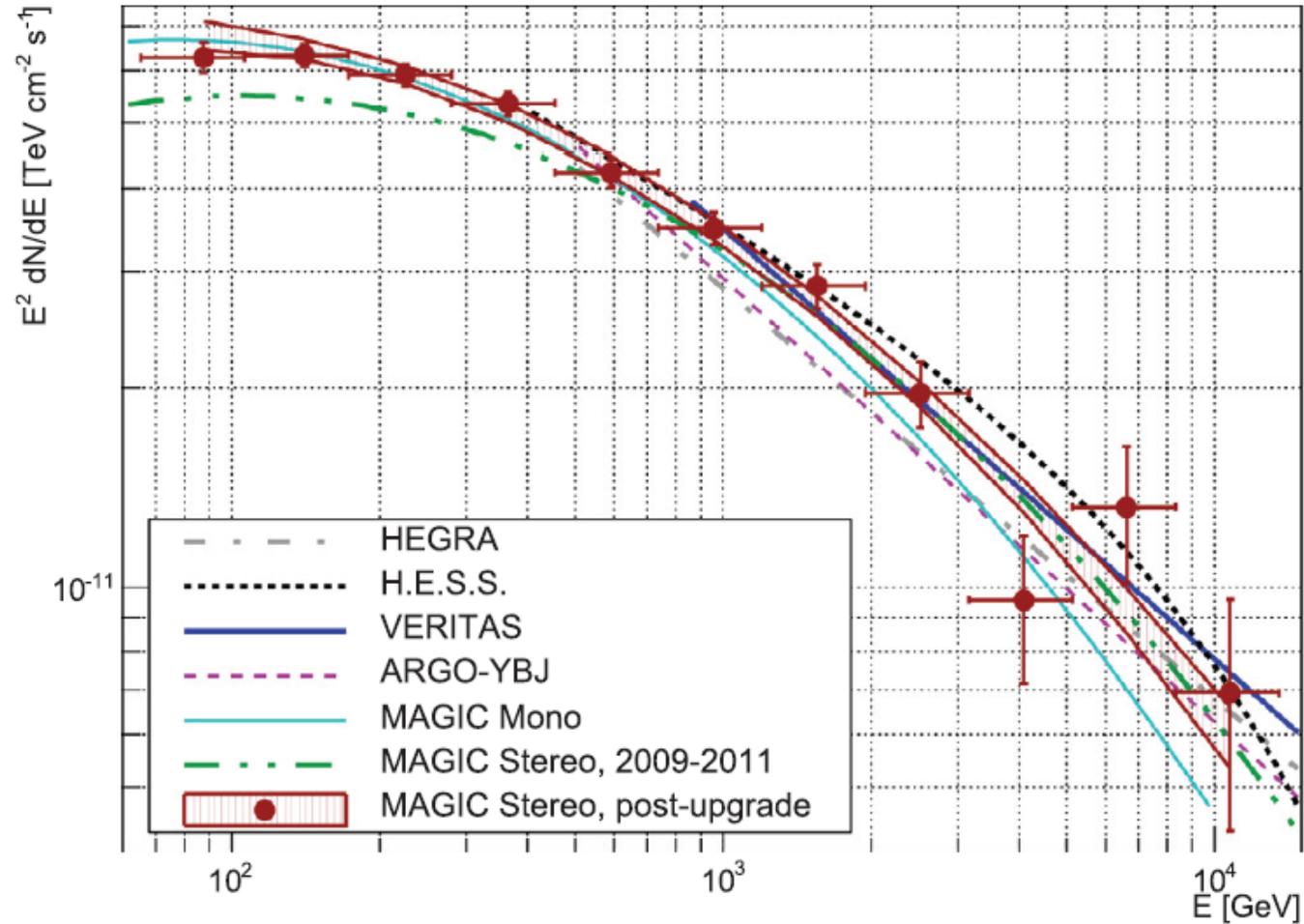


Fig. 13. Spectral energy distribution of the Crab Nebula obtained with the MAGIC telescopes after the upgrade (red points and shading) compared with other experiments: MAGIC-I (cyan solid, [11]), MAGIC Stereo, 2009–2011 (green dot-dot-dashed, [22]), HEGRA (gray dot-dashed, [6]), VERITAS (blue thick solid, [23]), ARGO-YBJ (magenta, dashed, [48]) and H.E.S.S. (black dotted, [7]). The vertical error bars show statistical uncertainties, while the horizontal ones represent the energy binning. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

ARGO-YBJ = Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory @YangBaJing

Цель эксперимента **ARGO-YBJ** – изучение КЛ и гамма-излучение при энергиях 10^{12} - 10^{16} эВ . Низкий порог возможен за счет регистрации ливней малых размеров - обеспечивается by operating a full coverage array в Yangbajing Laboratory (Тибет, КНР) at 4300 м над у.м. (606 г/см² глубины атмосферы). Набирает данные с 2007 г.

Были представлены предварительные результаты измерения энергетического спектра всех частиц (all-particle) и спектров p и He для интервала у 5 ТэВ - 5 ПэВ.

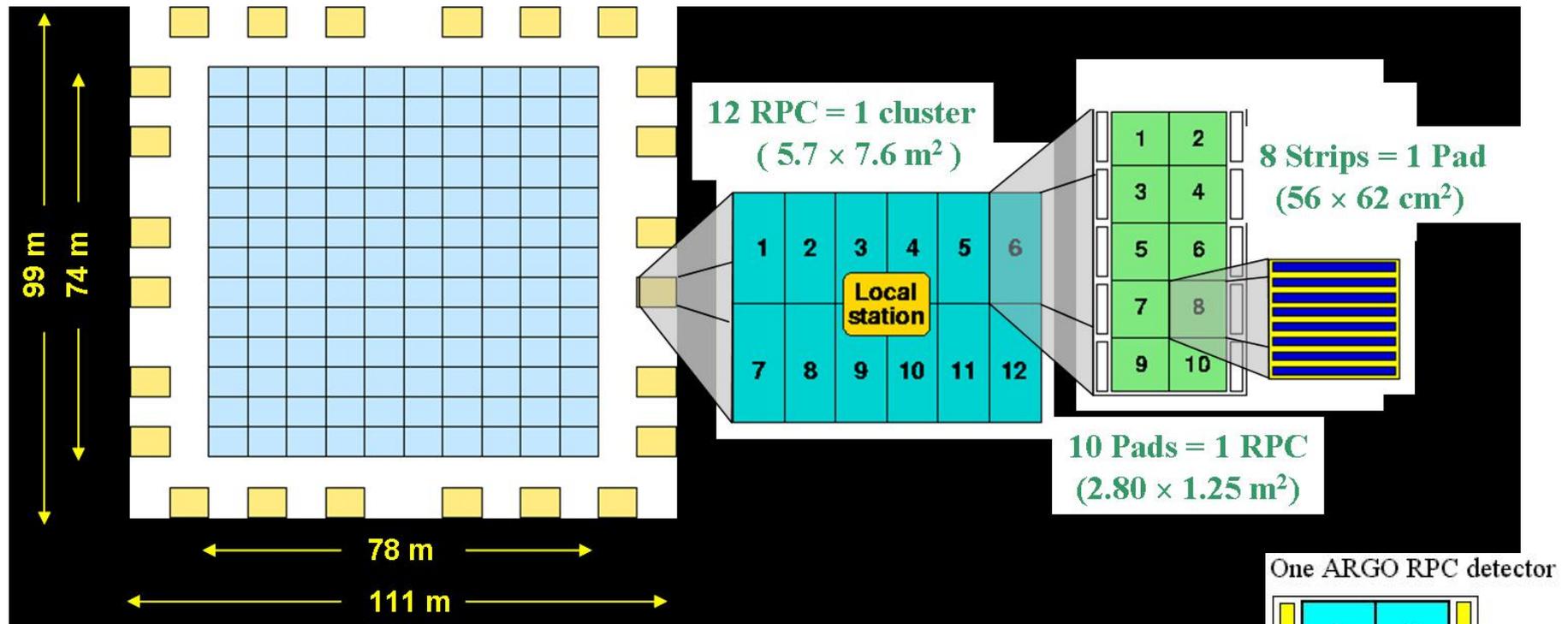
Resistive Plate Chambers (RPC)

Детектор составлен из RPCs (**Resistive Plate Counters**) (~ 93% активной площади ~ 6700 м²), окруженных частично инструментированным (~ 20%) защитным кольцом (кругом); обеспечивает восстановление детальной пространственно-временной картины фронта ливня.

- RPC - Резистивные пластинчатые счетчики (камеры) – быстродействующие газовые детекторы, обеспечивающие регистрацию заряженной частицы
- RPCs состоит из двух параллельных пластин – анода и катода, изготовленных из пластмассы высокого сопротивления; пространство между пластинами заполнено газом.
- Частица, пролетая через камеру, выбивает электроны из атомов газа, электроны бомбардируют другие атомы и создают лавину электронов. Электроды прозрачны для электронов, которые захватываются внешними металлическими пластинами (после короткой, но точно определяемой временной задержки).
- Картина сработавших полос (последовательность сигналов) дает возможность быстрого измерения импульса частицы.
- RPCs сочетают хорошее пространственное разрешение с временным (~1.8 наносекунды).

1836 RPC-камеры собраны в 153 кластера – по 12 RPC в каждом.

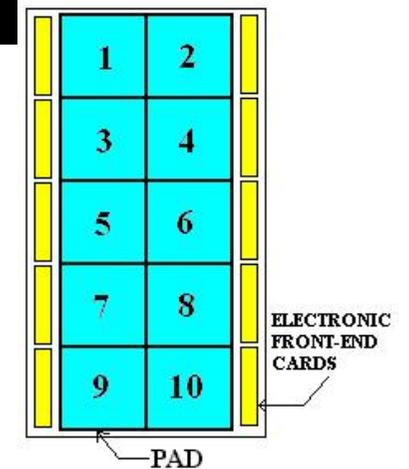
Детектор ARGO-YBJ



1836 RPCs = 153 кластера по 12 камер

80 медных пластин ($6.75 \times 61.80 \text{ cm}^2$) собраны в 10 независимых панелей (по 8 RPCs в каждой) ($55.6 \times 61.8 \text{ cm}^2$) и две большие панели ($139 \times 123 \text{ cm}^2$).

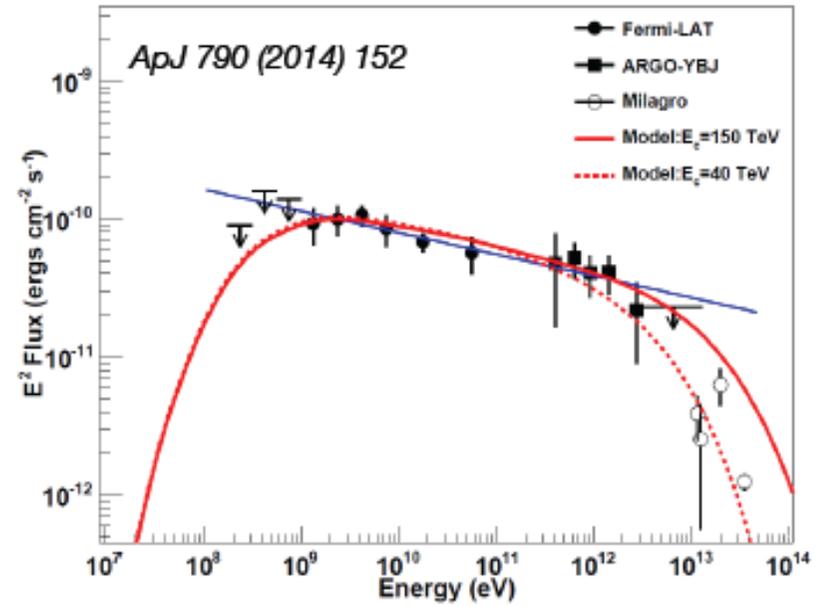
One ARGO RPC detector



ARGO J2031+4157 as the Cygnus Cocoon

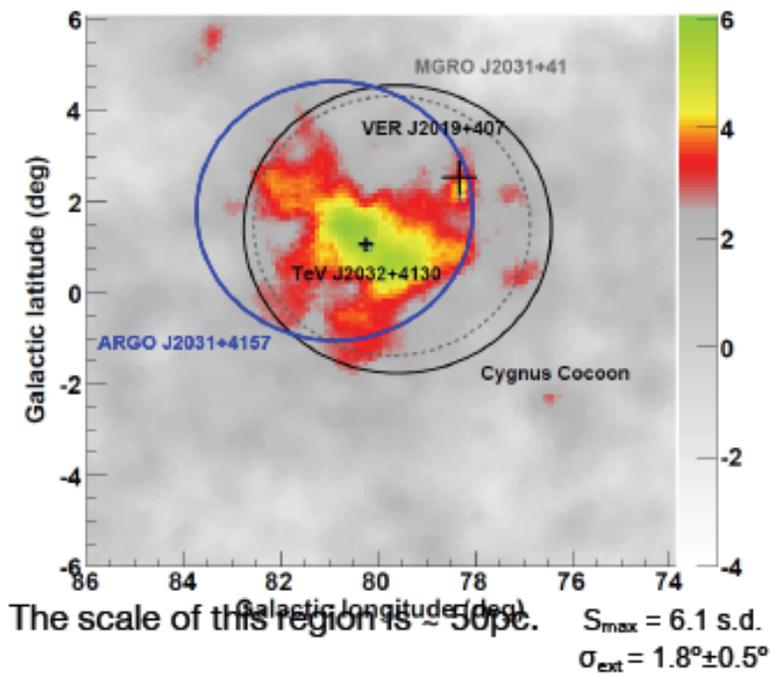
The emission of **ARGO J2031+4157** can be identified as the counterpart of Cygnus Cocoon at TeV energies.

A cocoon of freshly accelerated cosmic rays



Spectrum of ARGO J2031+4157: $dN/dE \propto E^{-2.62 \pm 0.27}$
 Combined Fermi-LAT&ARGO spectrum: $dN/dE \propto E^{-2.16 \pm 0.04}$

The ARGO-YBJ view at TeV energies after reanalysis with the full data-set



A pure hadronic model was assumed with a power law and a cutoff energy $E_c = 150$ TeV.

This discovery seems to confirm a long-standing hypothesis that massive-star forming regions can accelerate particles to relativistic energies.

High Altitude Water Cherenkov Observatory (HAWC)

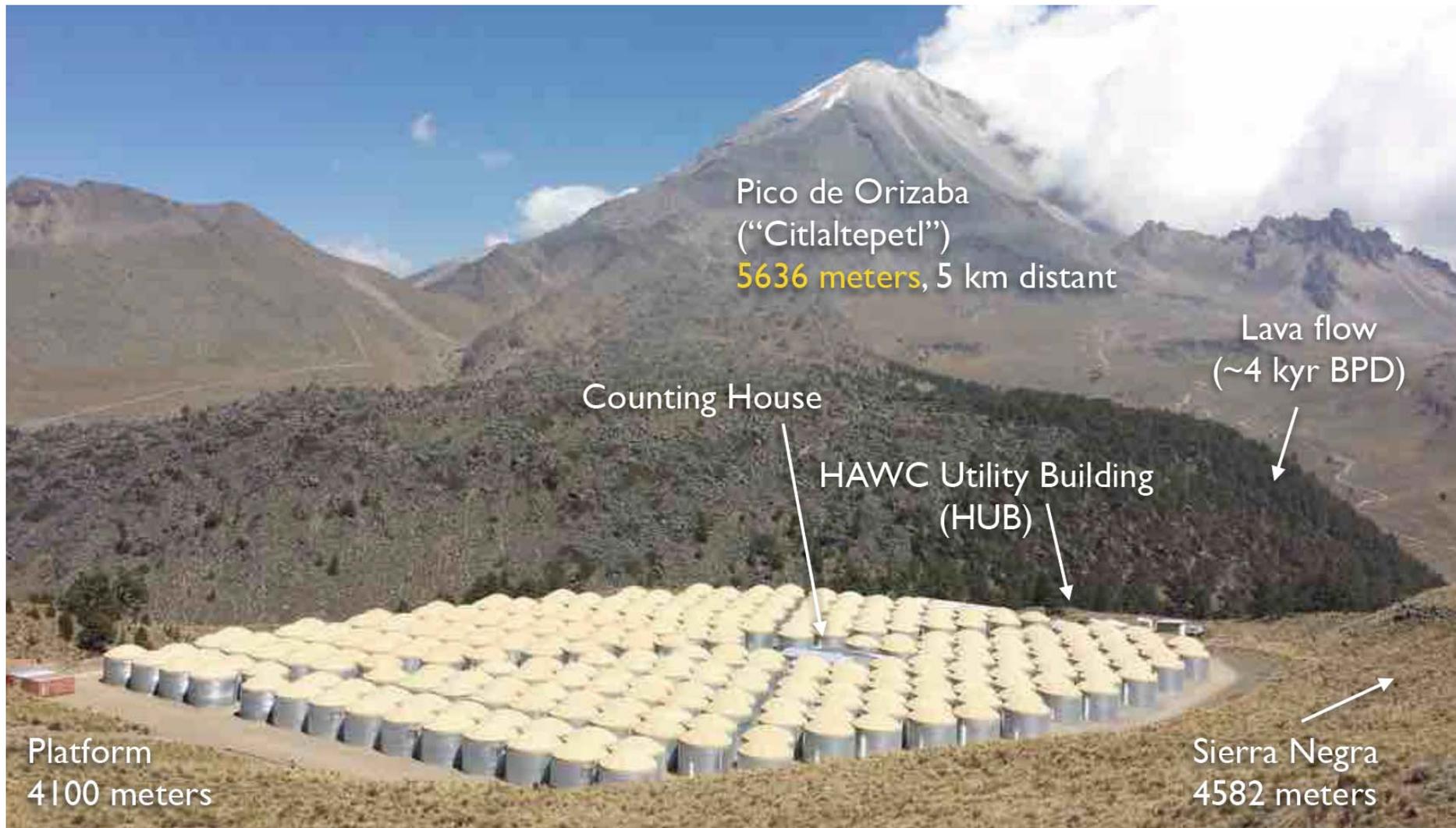
A. Abeyssekara et al. (HAWC Collaboration), arXiv:1701.01778 (2017); 1702.02992

HAWC расположен в центральной Мексике (19° N , центр Галактики – под зенит.углом 48°);
4100 м над у.м.

Установка включает 300 водно-черенковских детекторов (WCDs) – баки $h=5$ м, $\varnothing 7.32$ м. Каждый бак содержит 190 т очищенной воды; 4 смотрящих вверх PMTs смонтированы внизу бака: 10" Hamamatsu R7081- HQE PMT расположен в центре и 3 8" Hamamatsu R5912 PMTs посередине между центром и внешней границей бака (через 120°). Центральный PMT в ~ 2 раза чувств. внешних (более высокая квантовая и больший размер). WCDs наполнены до уровня 4.5 м - на 4.0 м (более 10 рад. длин) выше уровня PMTs.

Большая глубина гарантирует поглощение **электронов , позитронов и фотонов** в слое воды над PMT, т. е. детектор действует как EM-калориметр, обеспечивая точное измерение выделенной EM-энергии. HE-электроны регистрируются через черенковское излучение, а гамма-кванты конвертируются в воде в e^+e^- -пары или теряют энергию в комптоновском рассеянии.

Мюоны также детектируются. Мюоны рождаются в атмосфере в распадах пионов и каонов, генерируемых во взаим. КЛ, уносят большой поперечный импульс, порождая сигнал в PMTs далеко от оси ШАЛ, и таким образом служат полезной меткой для отсеивания адронных ливней. WCDs собраны компактно, чтобы максимизировать плотность чувствительной площади $\sim 60\%$ из 22 000 м² ($\sim 140 \times 140$ м²) инструментированной площади детектора.



Цель – регистрация γ -излучения и КЛ с энергиями 100 ГэВ- 100 ТэВ

HAWC



- **Угловое разрешение зависит от размера события (числа сработавших ФЭУ) и варьируется от 0.2° (68%) для событий, когда срабатывают почти все ФЭУ, до 1° близи порога.**

HAWC+

- **An upgrade of the HAWC high-energy gamma-ray observatory with a sparse array of small outrigger tanks is being investigated [4]. For showers where the core falls outside the array there are ambiguities in the reconstruction between the core position, the shower angle and the shower size or energy.**
- **An outrigger array can determine the core position for showers falling outside the main array elevating the ambiguities and making these showers well reconstructable.**
- **A gain of 3-4 in sensitivity for gammas above 10 TeV can be obtained over what is presently achieved, and such a detector can be built in 2-3 years. Funds are already available.**

Status of ground based gamma-ray observations

Nahee Park, The rapporteur talk on ground-based GR- astronomy, given @ 35th ICRC (2017, Busan, Republic of Korea); 1808.10495

Представлены результаты наблюдений в эксперименте HAWC - каталог 2HWC: найдено 39 источников, из которых 16 более чем на градус в стороне от известных ТэВ- источников из каталога TeVCat.

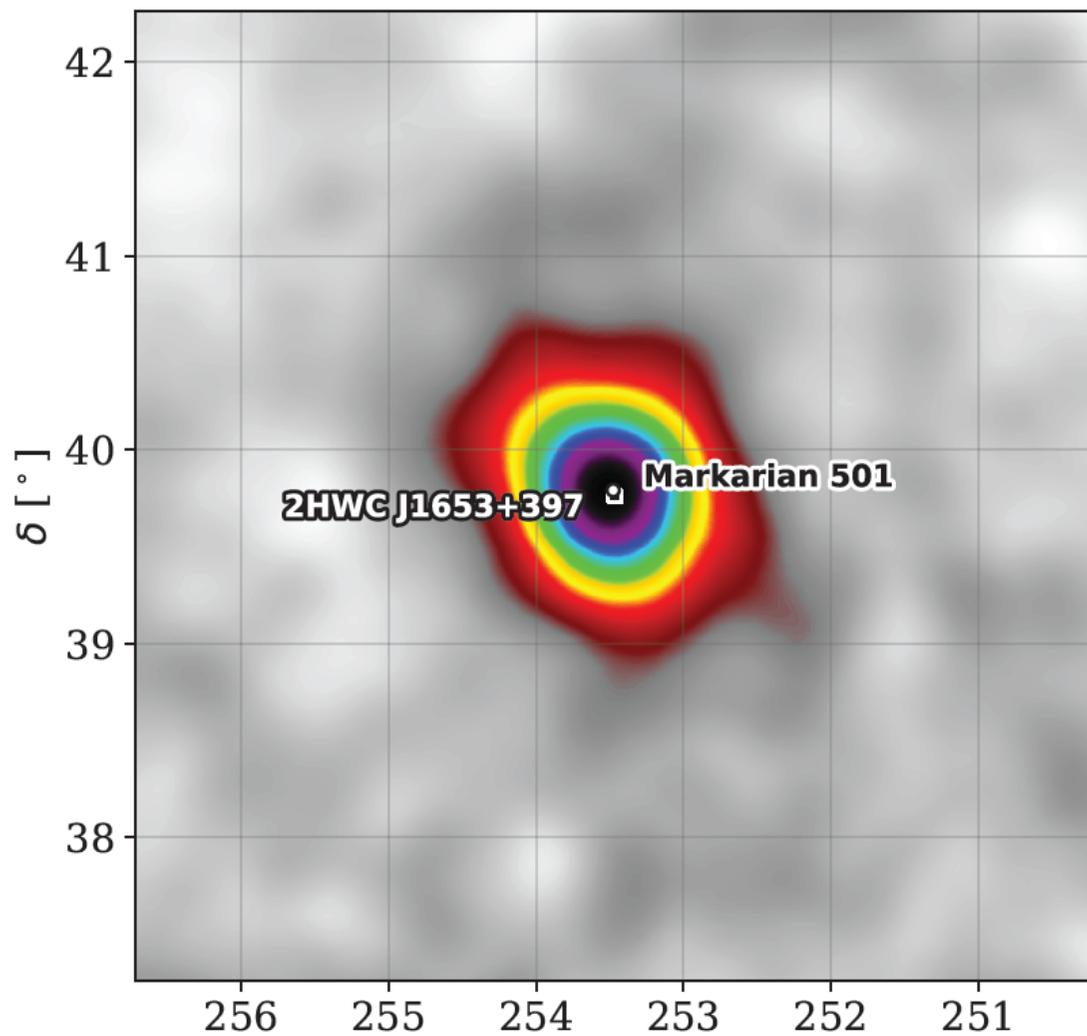
(см. 4 слайда ниже)

Результаты HAWC

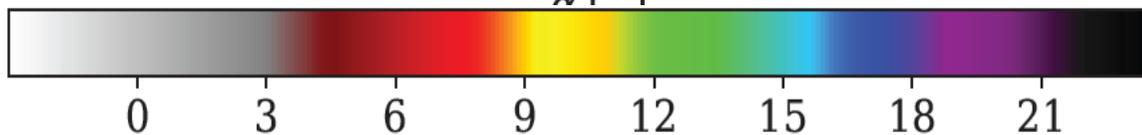
Table 2. 2HWC source list and nearest TeVCat sources. The sources with a * symbol correspond to sources that are not separated from their neighbor by a large TS gap, as defined in section 3.5.

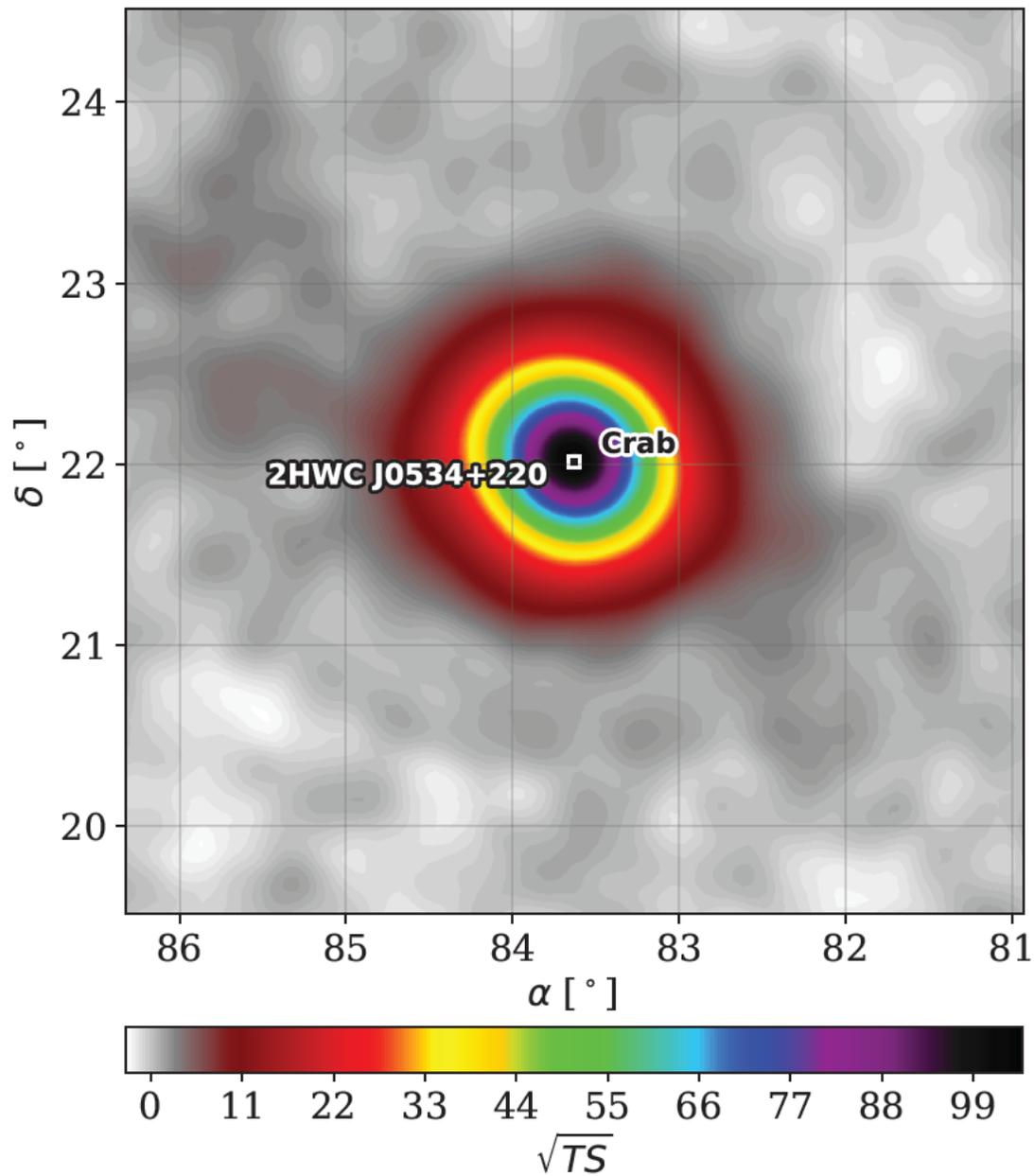
Name	Search	TS	RA	Dec	l	b	1σ stat. unc.	Nearest TeVCat source	
								Dist.	Name
			[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]					
2HWC J0534+220	PS	1.1E+4	83.63	22.02	184.55	-5.78	0.06	0.01	Crab
2HWC J0631+169	PS	29.6	98.00	17.00	195.61	3.51	0.11	0.39	Geminga
2HWC J0635+180	PS	27.4	98.83	18.05	195.04	4.70	0.13	0.97	Geminga
2HWC J0700+143	1.0 $^{\circ}$	29	105.12	14.32	201.10	8.44	0.80	2.98	-
2HWC J0819+157	0.5 $^{\circ}$	30.7	124.98	15.79	208.00	26.52	0.17	7.86	-
2HWC J1040+308	0.5 $^{\circ}$	26.3	160.22	30.87	197.59	61.31	0.22	8.77	-
2HWC J1104+381	PS	1.15E+3	166.11	38.16	179.95	65.05	0.06	0.04	Markarian 421
2HWC J1309-054	PS	25.3	197.31	-5.49	311.11	57.10	0.22	3.27	-
2HWC J1653+397	PS	556	253.48	39.79	63.64	38.85	0.07	0.03	Markarian 501
2HWC J1809-190	PS	85.5	272.46	-19.04	11.33	0.18	0.17	0.31	HESS J1809-193
2HWC J1812-126	PS	26.8	273.21	-12.64	17.29	2.63	0.19	0.14	HESS J1813-126
2HWC J1814-173	PS	141	273.52	-17.31	13.33	0.13	0.18	0.54	HESS J1813-178
2HWC J1819-150*	PS	62.9	274.83	-15.06	15.91	0.09	0.16	0.51	SNR G015.4+00.1
2HWC J1825-134	PS	767	276.46	-13.40	18.12	-0.53	0.09	0.39	HESS J1826-130
2HWC J1829+070	PS	25.3	277.34	7.03	36.72	8.09	0.10	8.12	-

2HWC J1831-098	PS	107	277.87	-9.90	21.86	-0.12	0.17	0.01	HESS J1831-098
2HWC J1837-065	PS	549	279.36	-6.58	25.48	0.10	0.06	0.37	HESS J1837-069
2HWC J1844-032	PS	309	281.07	-3.25	29.23	0.11	0.10	0.18	HESS J1844-030
2HWC J1847-018	PS	132	281.95	-1.83	30.89	-0.03	0.11	0.17	HESS J1848-018
2HWC J1849+001	PS	134	282.39	0.11	32.82	0.47	0.10	0.16	IGR J18490-0000
2HWC J1852+013*	PS	71.4	283.01	1.38	34.23	0.50	0.13	1.37	-
2HWC J1857+027	PS	303	284.33	2.80	36.09	-0.03	0.06	0.14	HESS J1857+026
2HWC J1902+048*	PS	31.7	285.51	4.86	38.46	-0.14	0.18	2.03	-
2HWC J1907+084*	PS	33.1	286.79	8.50	42.28	0.41	0.27	1.15	-
2HWC J1908+063	PS	367	287.05	6.39	40.53	-0.80	0.06	0.14	MGRO J1908+06
2HWC J1912+099	PS	83.2	288.11	9.93	44.15	-0.08	0.10	0.24	HESS J1912+101
2HWC J1914+117*	PS	33	288.68	11.72	46.00	0.25	0.13	1.64	-
2HWC J1921+131	PS	30.1	290.30	13.13	47.99	-0.50	0.12	1.14	-
2HWC J1922+140	PS	49	290.70	14.09	49.01	-0.38	0.11	0.10	W 51
2HWC J1928+177	PS	65.7	292.15	17.78	52.92	0.14	0.07	1.18	-
2HWC J1930+188	PS	51.8	292.63	18.84	54.07	0.24	0.12	0.03	SNR G054.1+00.3
2HWC J1938+238	PS	30.5	294.74	23.81	59.37	0.94	0.13	2.75	-
2HWC J1949+244	1.0°	34.9	297.42	24.46	61.16	-0.85	0.71	3.43	-
2HWC J1953+294	PS	30.1	298.26	29.48	65.86	1.07	0.24	8.44	-
2HWC J1955+285	PS	25.4	298.83	28.59	65.35	0.18	0.14	7.73	-
2HWC J2006+341	PS	36.9	301.55	34.18	71.33	1.16	0.13	3.61	-
2HWC J2019+367	PS	390	304.94	36.80	75.02	0.30	0.09	0.07	VER J2019+368
2HWC J2020+403	PS	59.7	305.16	40.37	78.07	2.19	0.11	0.40	VER J2019+407
2HWC J2024+417*	PS	28.4	306.04	41.76	79.59	2.43	0.20	0.97	MGRO J2031+41
2HWC J2031+415	PS	209	307.93	41.51	80.21	1.14	0.09	0.08	TeV J2032+4130



Region around Markarian 501 :
Equatorial TS maps, for a point
source hypothesis with a spectral
index of -2:7. In this gure and the
followings, the 2HWC sources are
represented by white circles and
labels below the circle; whereas the
source listed in TeVCat are
represented with black squares and
labels above the square symbol.





**Region around Crab Nebula:
2HWC sources are represented by
white circles and labels below the
circle; the source listed in TeV
Cat is represented with black
squares and labels above the
square symbol.**

TAIGA: Tunka-HiSCORE

N. Budnev et al.

EPJ Web of Conferences 191, 01007 (2018)

TAIGA:

Tunka **A**dvanced **I**nstrument for cosmic ray physics and **G**amma-ray **A**stronomy

Tunka-HiSCORE: **H**igh **S**ensitive **C**osmic **O**Rigin **E**xplorer

Астрофизический комплекс TAIGA, расположенный в тункинской долине (50 км от озера Байкал), представляет собой ведущий центр России по исследованию космических лучей высоких и сверхвысоких энергий методом регистрации ШАЛ

TAIGA включает в себя черенковскую установку Tunka-133, на базе которой в настоящее время разворачивается широкоугольная черенковская обсерватория **Tunka-HiSCORE**, установка, регистрирующая радиоизлучение ШАЛ **TunkaRex**, сеть сцинтилляционных станций **Tunka-Grande**, и Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (**IACT**)

Такой комплекс в перспективе позволит получать новые экспериментальные данные в физике космических лучей и гамма-астрофизики.



24.12.2018

Гамма-астрономия ВЭ

93

2 TAIGA-HiSCORE wide-angle Cherenkov array

Each Cherenkov detector of the TAIGA-HiSCORE array includes two containers. In one of them (the Cherenkov container, Fig. 2) there are four photomultipliers (PMT) with a photocathode of 20 to 25 cm diameter (ET9352KB, R5912, or R7081). Each PMT is equipped with a Winston cone made of a high reflective material Alanod 4300 UD, which increases the effective light-collecting area by a factor of four. The FOV of the cone is about 0.6 sr. The light-collecting cones are covered with UV-transparent plexiglass for protection from dust, moisture and frost in winter. To protect the PMTs from sunlight and precipitation the Cherenkov containers are equipped with lids that open and close driven by electric motors. The data acquisition system of the TAIGA-HiSCORE array has a hierarchical structure. The Cherenkov detectors of the array are divided into clusters of approximately 30 detectors each.

The data acquisition system of each cluster includes two parts: the data acquisition electronics of the Cherenkov detectors (Detector DAQ), which is located in the thermally stabilized “electronic containers”, and the central part (Central DAQ), located in the geometrical center of the cluster. Each Cherenkov detector is connected to the central DAQ of the cluster by an optical cable, which serves for the data transmission and synchronization. The synchronization is performed with a subnanosecond accuracy using the hybrid system. It combines the traditional 100-MHz synchronization system and the White Rabbit (WR) Ethernet-based time system [6], . The latter provides the reference to the central clock based on the GPS-disciplined Rubidium Oscillator. The stability of the synchronization is on the order of 0.2 ns. The main components of the Cherenkov detector DAQ are the analog summatoms and 8-channel ADC based on the DRS-4 board, by means of which the signals from the anodes and fifth dynodes of each PMT (for expanding the dynamic range) are digitized with a 0.5-ns step within a 200-ns window after the formation of the trigger. At a moonless night the trigger counting rate of a TAIGA-HiSCORE Cherenkov detector is about 10–15 Hz. The energy threshold of the array is 80–100 TeV for detection of hadronic EASs and 40–50 TeV for detec-

tion of EAS initiated by gamma rays. During the winter season of 2017–2018, 43 Cherenkov detectors of the first and second clusters of the TAIGA-HiSCORE array participated in the data taking (Fig. 3). They are located on an area of 0.4 km^2 with the spacing of 106 m. All Cherenkov containers were tilted southward by 25 degrees to increase the time of observation of the gamma ray source in the Crab Nebula. The EAS parameters are reconstructed using the methods and algorithms developed for processing the data of the Tunka-133 array [9], [10]. The direction of the EAS arrival is determined from the relative time delays of the Cherenkov pulses by each detector. The accuracy of determining the direction of the EAS arrival greatly depends on the number of the detectors triggered. The angular resolution is $0.4\text{--}0.5$ degree[7]s for the events with 4–5 detectors triggered and approximately 0.1 degrees for the events with more than 10 detectors triggered. The accuracy of the reconstruction of the EAS direction was tested by the detection of light from the lidar installed at the ISS [11]. A comparison of the reconstruction results of the ISS position from the TAIGA-HiSCORE array data and from the robotic telescope of the MASTER data located at the same site [12] shows the coincidence with the discrepancy less than 0.1 degree. The primary particle energy is reconstructed from the density of the Cherenkov light flux at 200 m distance from the EAS axis Q_{200} with an accuracy of approximately 15% [10]. Figure 4 (left) shows the preliminary results of the reconstruction of the cosmic-ray energy spectrum from the TAIGA-HiSCORE array data in comparison with the results of our previous experiments in the Tunka Valley, as well as with the results of the ATIC-2 balloon experiment [13] and NUKLON satellite experiment [14]. Figure 4 (right) shows the results of the search the SN 1054 supernova remnant, or the Crab Nebula (further, the Crab) gamma emission in the energy range of 40–100 TeV in the cell of $0.3\text{--}0.4$ degrees in the direction toward the Crab. Preliminarily the number of the detected EAS exceeds the cosmic ray background at the confidence level of 2–2.5.

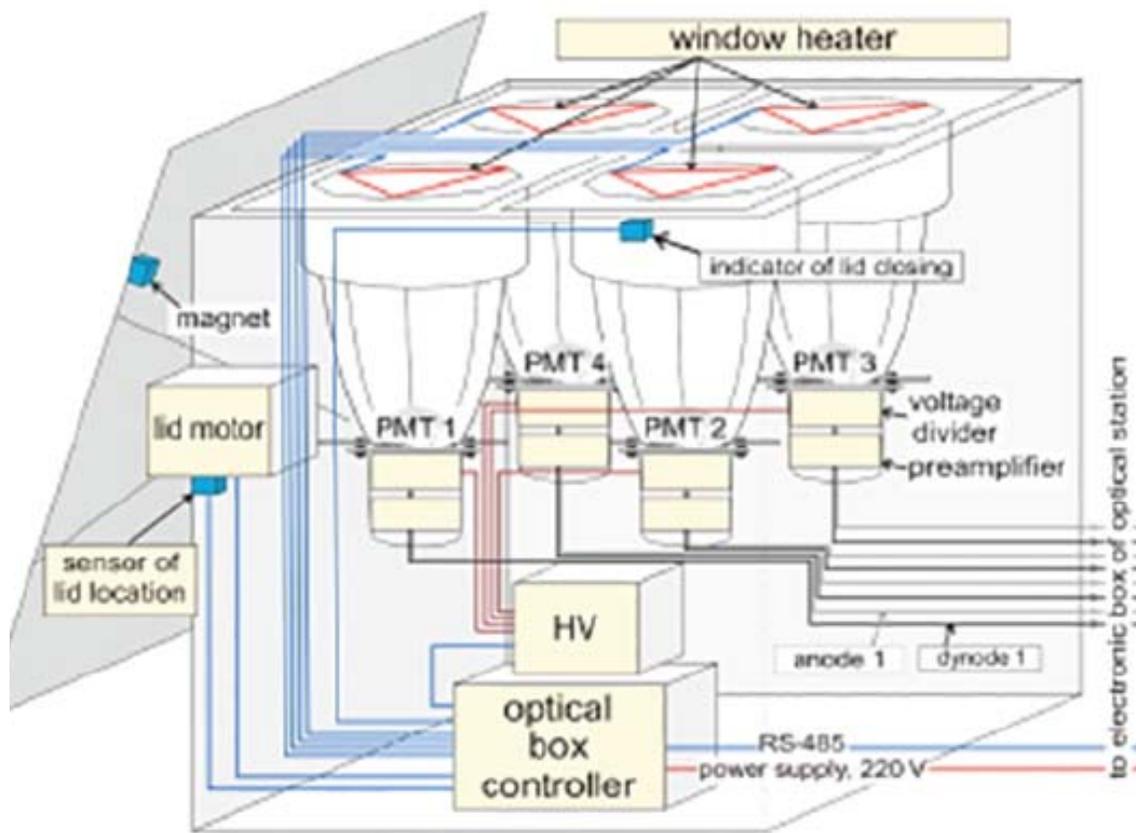


Figure 2. Schematic diagram of the Cherenkov container with the PMT of a Cherenkov detector of the TAIGA-HiSCORE array (left) and its photograph (right).

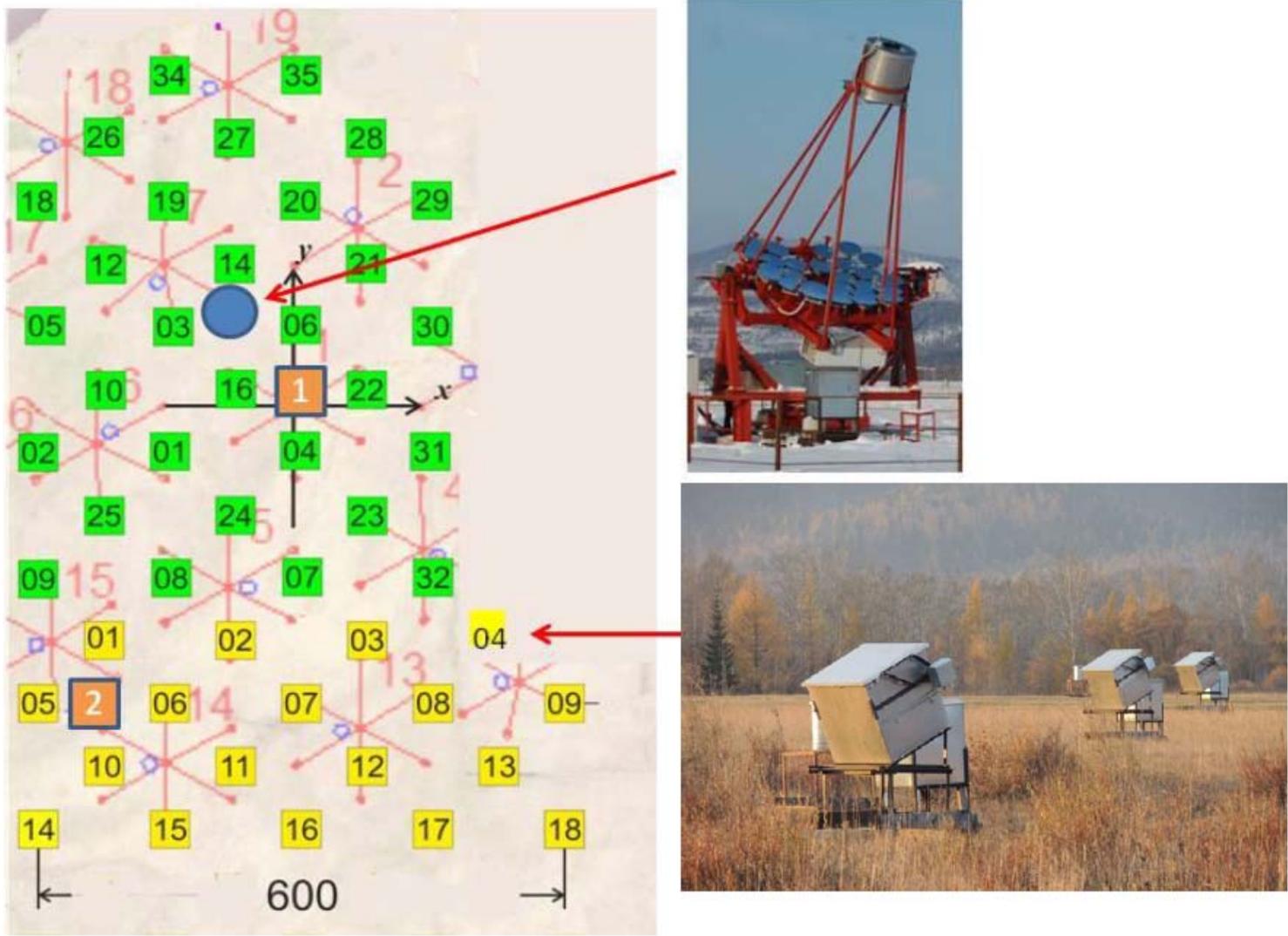


Figure 3. TAIGA-HiSCORE timing array layout since 2017. Cherenkov detectors are shown in green (first cluster) and yellow (second cluster) with the Tunka-133 cosmic ray array (red). Blue circle – first TAIGA-IACT.

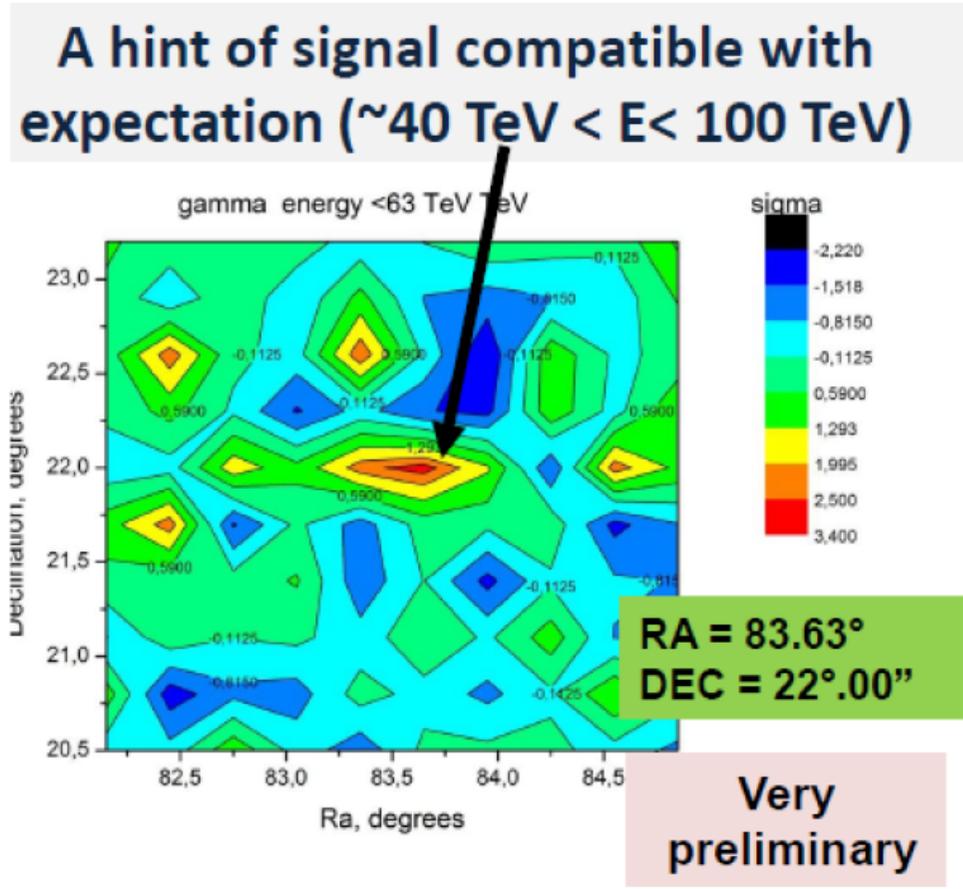
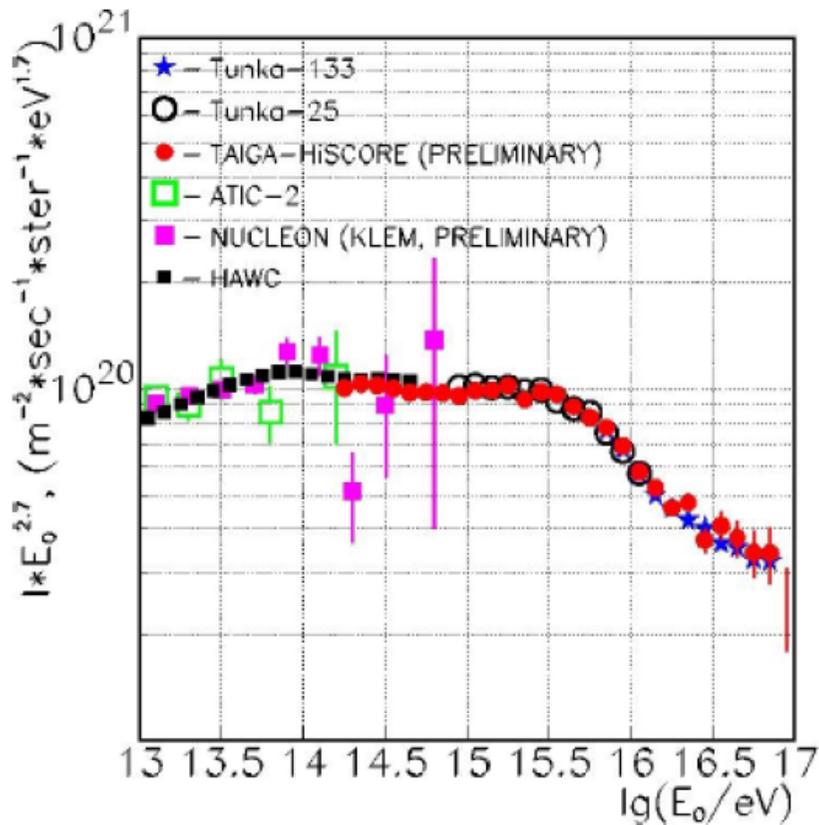


Figure 4. The energy spectrum of primary cosmic rays from the data of the TAIGA-HiSCORE array compared with the results of other experiments (left). The results of search for the EAS excess over the cosmic ray background in the energy range 40–100 TeV in the cell of a 0.3–0.4 degrees in the direction toward the Crab (right).

TAIGA-IACT

Телескоп: зеркало 10 м^2 , фокусное расстояние 4.75 м,
камера - 547 ФЭУ, \varnothing 1.1 м, FoV = $9.7^\circ \times 9.7^\circ$.

Эффективная площадь одного IACT составляет 5 га.

Зима 2017-2018 : $> 10^4$ совместных событий TAIGA (HiSCORE + IACT).

Более 300 событий TAIGA- IACT в направлении ($\sim 0.7^\circ$) на Краб. туманность.

Примеры событий TAIGA-IACT

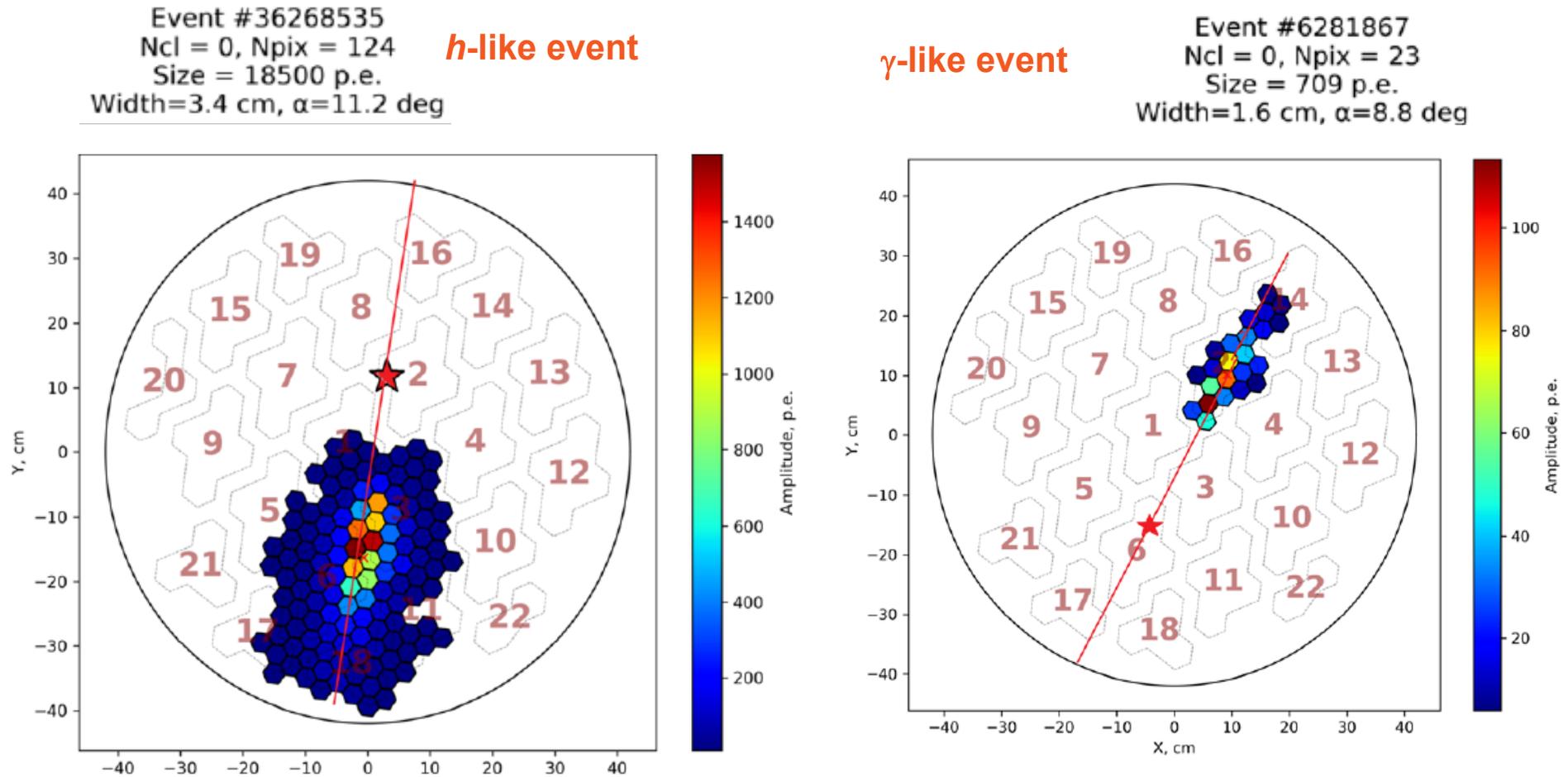


Figure 5. “Hadron-like” event (left), “gamma-like” event ($\text{Gam} < 1^\circ$, $\text{width} < 0.13^\circ$) (right). The star on both plots means the projection of the shower axis position, obtained from the data of the TAIGA-HiSCORE array and recalculated into a coordinate system of the TAIGA-IACT camera.

4 Scintillation and radio arrays as part of the TAIGA gamma observatory

The most significant disadvantage of Cherenkov detectors with regard to the problems of cosmic ray physics and gamma astronomy is that they can operate only on moonless nights in good weather conditions, which reduces the time available for data taking almost by an order of magnitude. Scintillation particle detectors and radio detectors not only allow one the all-day and all-weather observations, but also make it possible to solve several important physical problems; in particular, the data on the muon number are very useful for determining the type of the primary particle that initiated the EAS and especially for distinguishing the gamma rays, since the number of muons in a photon-initiated EAS less than in a proton-initiated EAS. Due to this fact, the Tunka-Grande array was constructed in 2013–2015, consisting of 19 scintillation stations on an area of 1 km^2 [5]; the stations are based on the counters that previously were used as a part of the EAS-TOP and KASCADE-Grande arrays. Each station has surface part with 12 counters of total area 7.5 m^2 and underground part with 8 counters of total area of approximately 5 m^2 . To reliably distinguish an EAS from gamma rays, the total scintillation counters have been developed and tested, they will become the basis of the new TAIGA-Muon array, where the total area of muon detectors will reach $2000\text{--}3000 \text{ m}^2$. For the collection of the scintillation light and its transition to PMT wavelength shifting bars with a cross-section of $5 \times 20 \text{ mm}$ are used. The mean amplitude for a particle passage through the counter is 23.1 photoelectrons; the nonuniformity is less than 15% (minimum-maximum). The time resolution of the counter is at least 5 ns.

Tunka Radio Extension: измерение X_{\max}

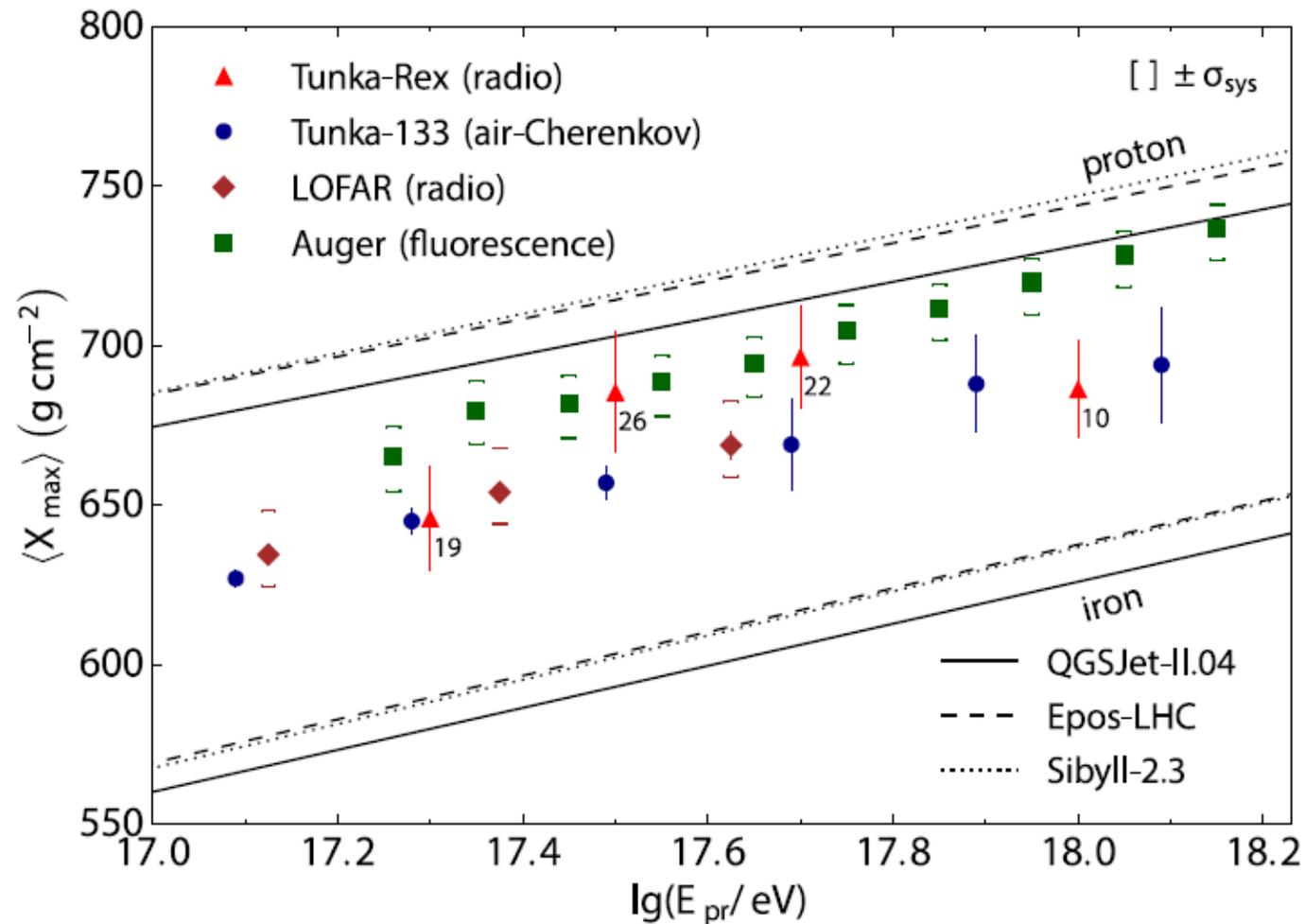


Figure 6. Mean atmospheric depth of shower maximum as a function of energy reconstructed by Tunka-Rex in comparison with other experiments.

Чувствительность детектора TAIGA

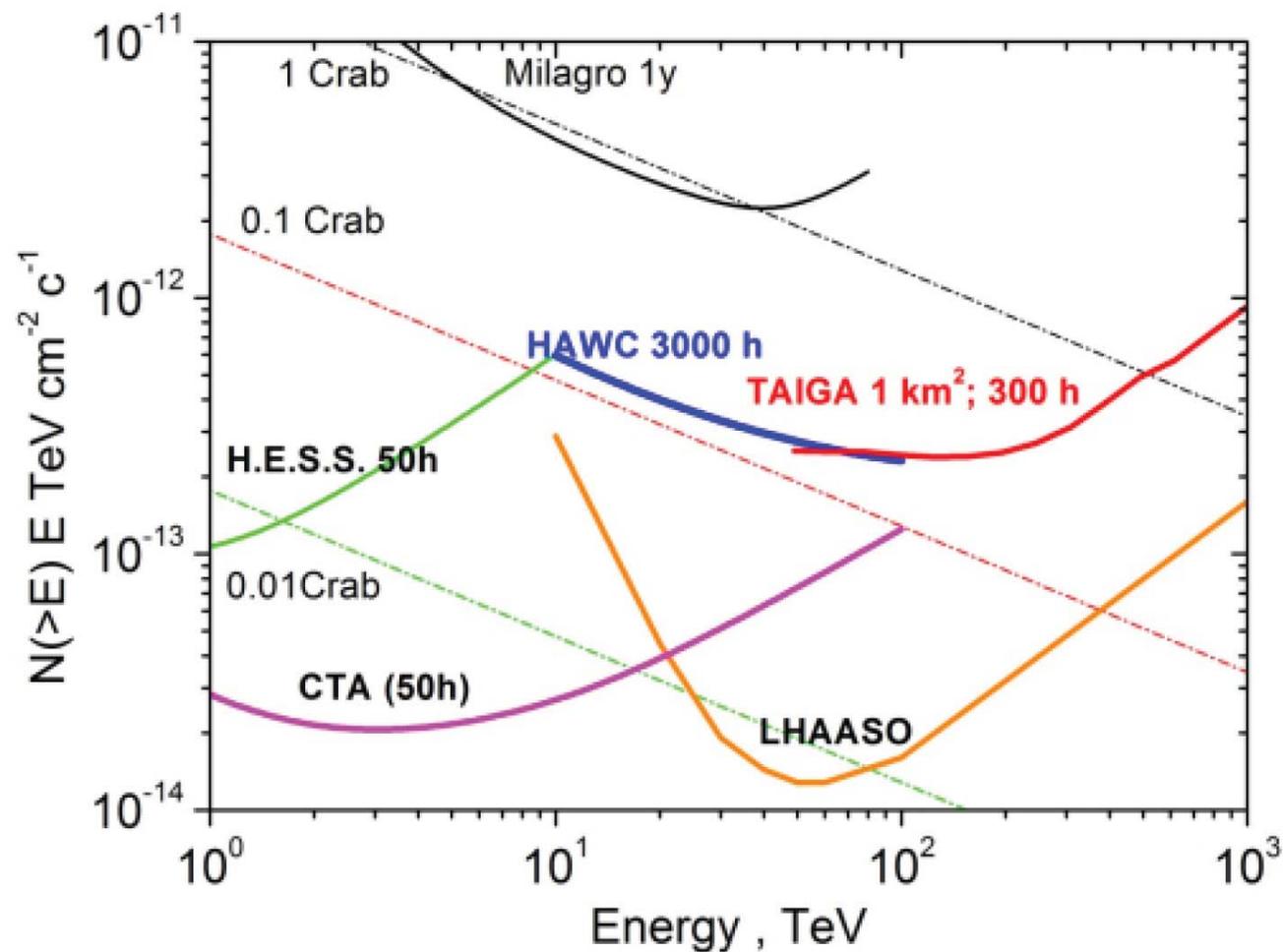


Figure 7. The sensitivity (after 300h) of the 1 km² TAIGA gamma observatory setup

5 Conclusions

Our immediate goal is to construct the first stage of the TAIGA gamma observatory before the end of 2019; it will include 110–120 wide-angle Cherenkov detectors on an area of 1 km², three IACT, and 250 m² of muon detectors. The expected integral sensitivity of this complex for detecting gamma rays with an energy of 100 TeV, given the 300-hour observation of a source, will reach approximately 2.5×10^{-13} TeV cm² s⁻¹ (Fig. 7), which is higher than the sensitivity of the currently operated arrays for detection of high energy gamma rays. First of all, this complex will allow one to prove experimental potential and advantage of the joint operation of the timing and imaging Cherenkov arrays. Then we intend to construct full scale gamma observatory TAIGA with about 1000 timing Cherenkov detectors and 15 imaging telescopes distributed on area of 10 km² about. At the same time one square kilometer pilot TAIGA setup will allow one to study: (1) the high-energy end of the spectrum of the brightest galactic gamma ray sources to search for galactic PeVatrons; (2) the high-energy range in the spectrum of bright extragalactic sources (Mkr421 and some other); (3) the mass composition of the cosmic rays in the “ankle” region (10^{14} – 10^{16} eV) with high statistic and accuracy; (4) the cosmic ray anisotropy in the energy range of 100–3000 TeV, etc. As the TAIGA will be the northernmost gamma observatory, its location provides some advantages for observing the sources with large declinations. For example, the gamma ray source in the Tycho Brahe supernova remnant, being almost inaccessible for the HAWC and LHAASO arrays, will remain within the field of view of the TAIGA detectors for 300 hours per year.

Новый детектор LHAASO

LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) - новое поколение all-sky-инструментов для исследования связи КЛ и гамма-излучения в широком интервале энергий 10^{11} - 10^{17} эВ.

(в 2018 установлены – 33 сцинт. детектора; установка начнет работать с 2021 г.)

- ✓ Гамма-астрономия 500 ГэВ -1 ПэВ: объектная карта неба, протяженные источники, диффузное излучение, вспышки (AGN, GRB)
- ✓ Измерение спектра и хим. состава КЛ (10^{12} – 10^{17} эВ).
- ✓ Изучение феноменологии ШАЛ и проверка адронных моделей
- ✓ Изучение анизотропии КЛ как функции магнитной жесткости на разных угловых масштабах
- ✓ Измерение отношения потоков \bar{p}/p космических лучей в ТэВ-диапазоне
- ✓ Измерение сечений p -air и p - p .
- ✓ Физика Солнца
- ✓ Фундаментальная физика

LHAASO: from γ -Ray Astronomy to Cosmic Rays

LHAASO is an experiment able of acting simultaneously as a **Cosmic Ray Detector** and a **Gamma Ray Telescope**

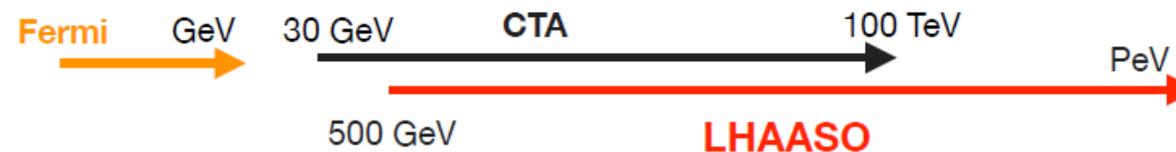
❖ **Cosmic Ray Physics ($10^{12} \rightarrow 10^{18}$ eV):** precluded to Cherenkov Telescopes

- CR energy spectrum
- Elemental composition
- Anisotropy



❖ **Gamma-Ray Astronomy ($10^{11} \rightarrow 10^{15}$ eV):** full sky continuous monitoring

- Complementary with CTA below 20 TeV, with better sensitivity at higher energies and for flaring emission (GRBs), unbiased all-sky survey, extended and diffuse emission.
- Searching for *PeVatrons* (\rightarrow neutrino sources)



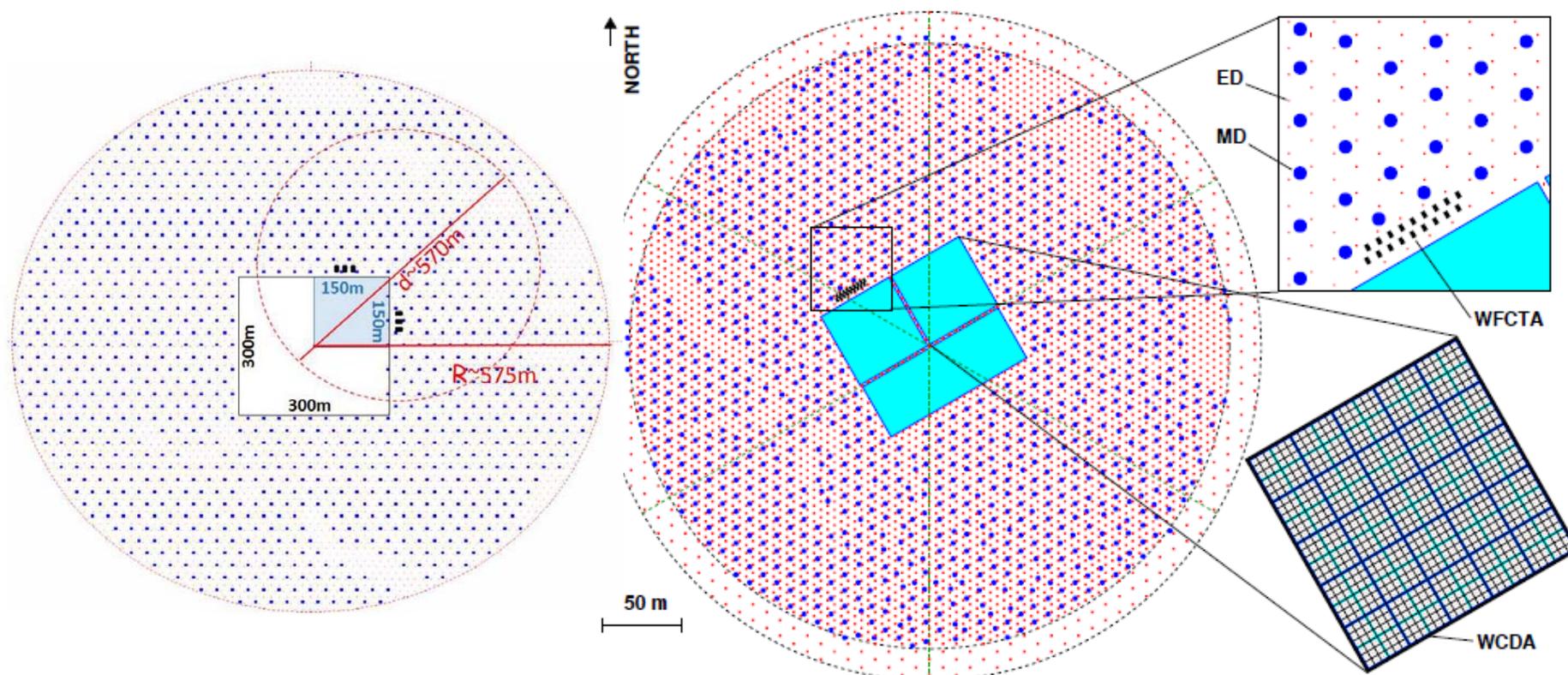
Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO)

A. De Angelis, 1601.02920

- LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) is located at ~ 4400 м над у.м. на широте 30 N, the Daochen site, China. Состоит из следующих компонент:
- 1 км²-установка (LHAASO-KM2A), включающая 5600 сцинт. детекторов с шагом 15 м для регистрации заряженных частиц.
- Площадь 1 км² – 1200 подземных водно-черенковских баков (по 36 м²) , с шагом 30 м для регистрации мюонов (эффект. площадь 4 га=10⁴ м²).
- Поверхностные водно-черенковские детекторы с полной площадью 9·10⁴ м² (LHAASO-WCDA) – в 4 раза больше, чем в HAWC.
- 24 широкоугольных (WFOV) атмосферных черенковских (и флуоресцентных) телескопа (LHAASO-WFCTA).
- 452 плотноупакованных импульсных (burst) детекторов вблизи центра установки – для регистрирования вторичных частиц ВЭ вблизи оси ливня (LHAASO-SCDA).

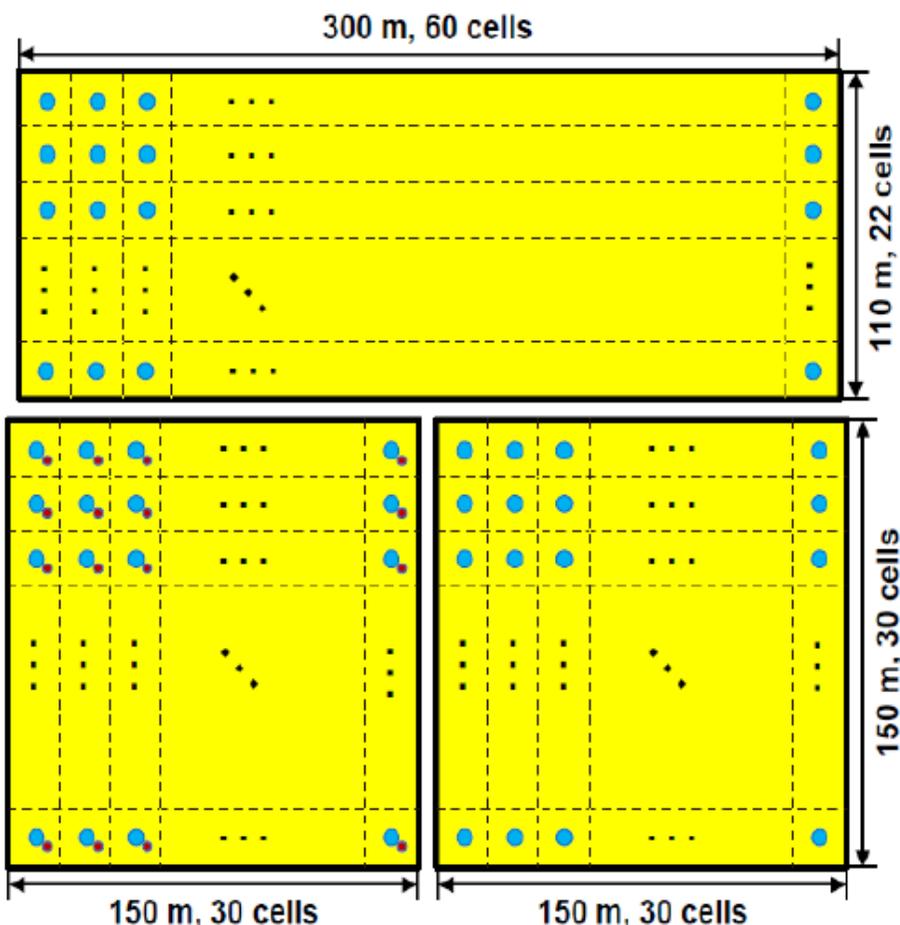
LHAASO (Тибет, 4400 м над у.м.) – это следующий шаг после эксперимента ARGO-YBJ - плотная ШАЛ-установка, оптимизированная для детектирования ливней небольшого размера;

- 1.3 км² массив включает 5195 сцинт. детекторов по 1 м² с шагом 15 м
- На перекрывающейся площади в 1 км² - 1171 подземных водно-черенковских детектора (баки с водой, по 36 м²) с шагом 30 м (WCDA) для регистрации мюонов (полная чувствительная площадь \approx 42 000 м²).
- Поверхностный водно-черенковский детектор занимает общую площадь 80 000 м².
- 18 атмосферных широкоугольных черенковских детекторов (wide field-of-view) и флуоресцентных телескопов (WFCTA).
- Нейтронные детекторы



План детектора WCDA

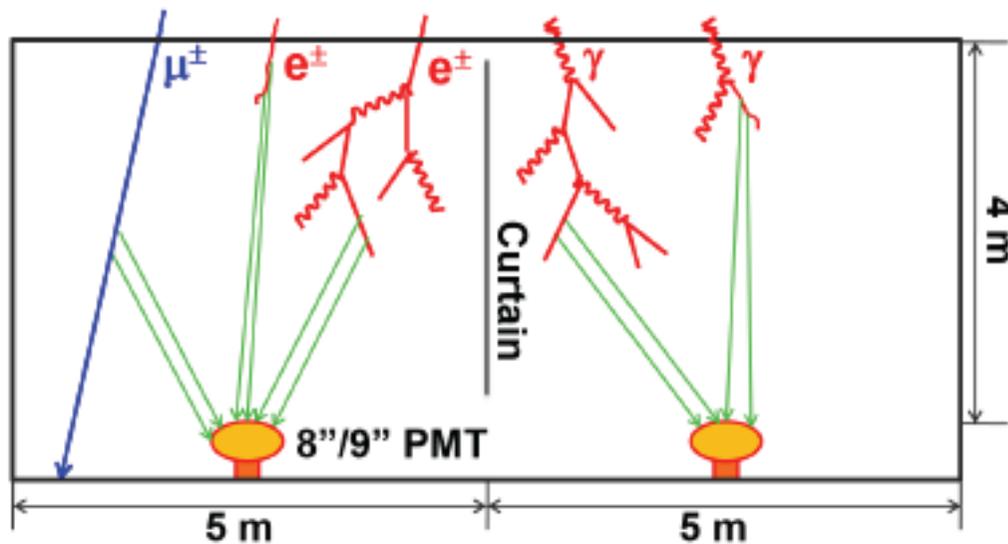
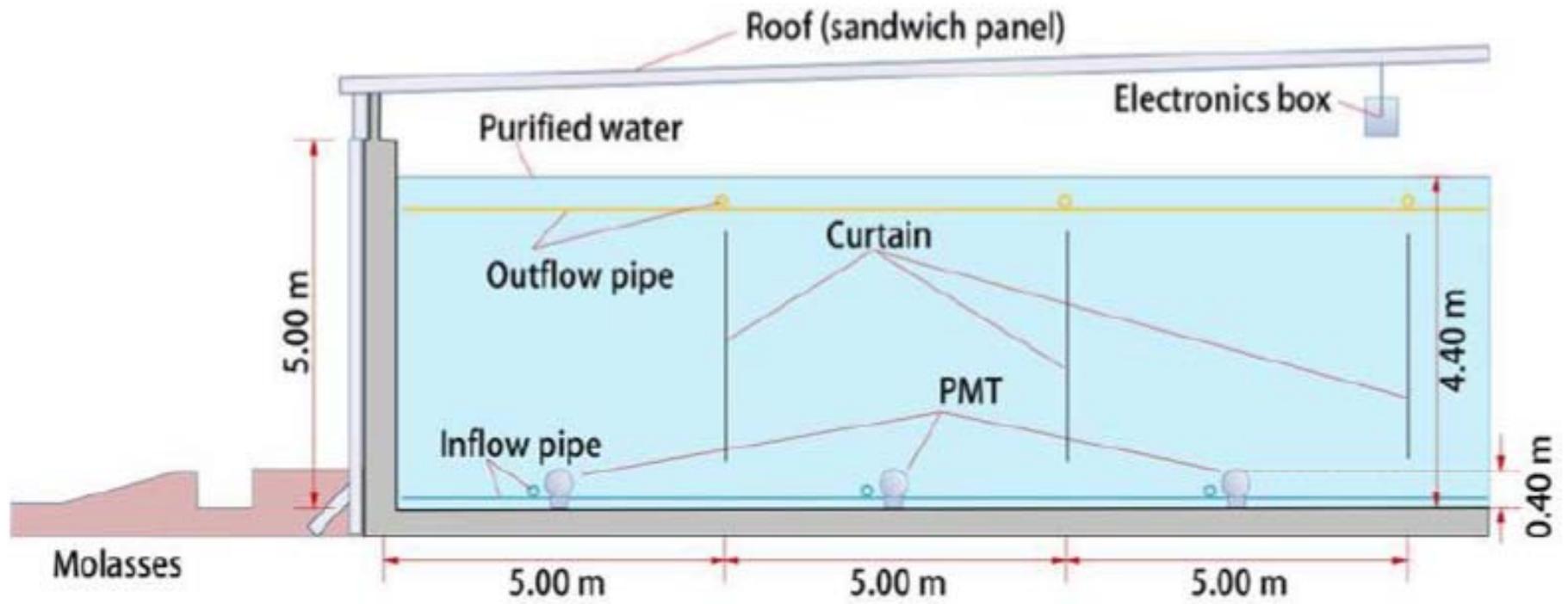
Water Cherenkov Detector Array



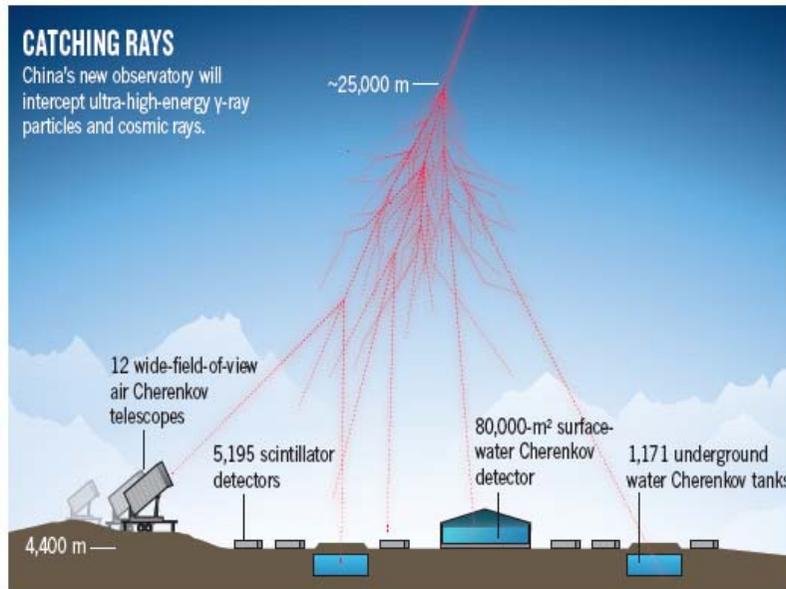
Cell area	25 m ²
Effective water depth	4 m
Water transparency	> 15 m (400 nm)
Precision of time measurement	0.5 ns
Dynamic range	1-4000 PEs
Time resolution	<2 ns
Charge resolution	40% @ 1 PE 5% @ 4000 PEs
Accuracy of charge calibration	<2%
Accuracy of time calibration	<0.2 ns
Total area	90,000 m ²
Total cells	3600

WCDA (эфф. площадь ~ 78 000 м²) состоит из 3120 единиц (ФЭУ) - ячеек, образующих три массива: два по 150×150 м² (по 900 ячеек каждый) и один 300×110 м² (1320 ячеек). Детектор представляет собой бассейн глубиной 4.4 м, каждая ячейка имеет площадь 5×5 м², отделена черной пластмас. перегородкой для ослабления рассеянного света.

Схема базового наполнения бассейна



Status of the experiment



Nature, 543 (2017) 300

- ★ The first pond (HAWC-like) will be completed and instrumented by the end of 2018.
- ★ 1/4 of the experiment in commissioning by the end of 2018 (sensitivity better than HAWC):
 - 6 WFCTA telescopes
 - 22,500 m² water Cherenkov detector
 - \approx 200 muon detectors
- ★ Completion of the installation in 2021.



LHAASO vs other EAS arrays

Experiment	Altitude (m)	e.m. Sensitive Area (m ²)	Instrumented Area (m ²)	Coverage
LHAASO	4410	5.2×10^3	1.3×10^6	4×10^{-3}
TIBET AS γ	4300	380	3.7×10^4	10^{-2}
IceTop	2835	4.2×10^2	10^6	4×10^{-4}
ARGO-YBJ	4300	6700	11,000	0.93 (central carpet)
KASCADE	110	5×10^2	4×10^4	1.2×10^{-2}
KASCADE-Grande	110	370	5×10^5	7×10^{-4}
CASA-MIA	1450	1.6×10^3	2.3×10^5	7×10^{-3}

		μ Sensitive Area (m ²)	Instrumented Area (m ²)	Coverage
LHAASO (♦)	4410	4.2×10^4	10^6	4.4×10^{-2}
TIBET AS γ	4300	4.5×10^3	3.7×10^4	1.2×10^{-1}
KASCADE	110	6×10^2	4×10^4	1.5×10^{-2}
CASA-MIA	1450	2.5×10^3	2.3×10^5	1.1×10^{-2}

- ✓ LHAASO will operate with a coverage similar to KASCADE (about %) over a much larger effective area.
- ✓ The detection area of muon detectors is about 70 times larger than KASCADE (coverage 5%) !
- ✓ Redundancy: different detectors to study hadronic models dependence

(♦) Muon detector area: $4.2 \times 10^4 \text{ m}^2 + 8 \times 10^4 \text{ m}^2$ (WCDA)

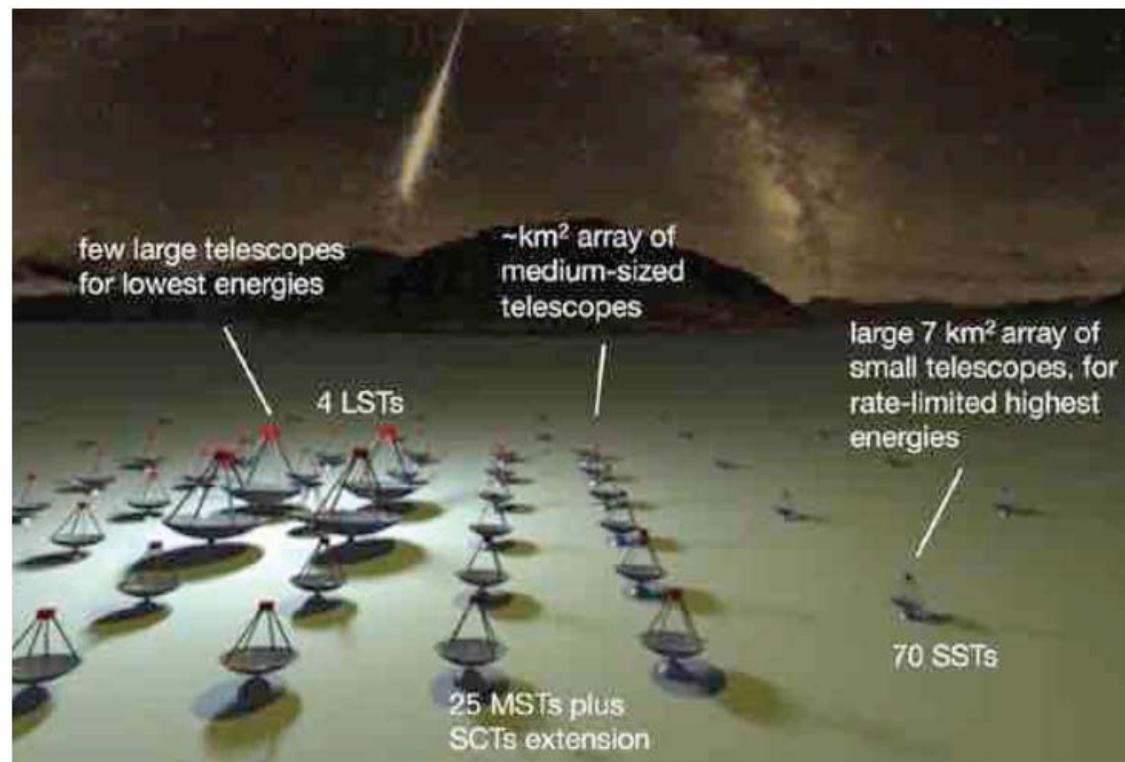
The End

Backup slides

The future: Cherenkov Telescope Array (CTA)

10x more sensitive than current instruments
+ much wider energy coverage and field of view
substantially better angular and energy resolution
telescopes: ~100 (3 sizes)

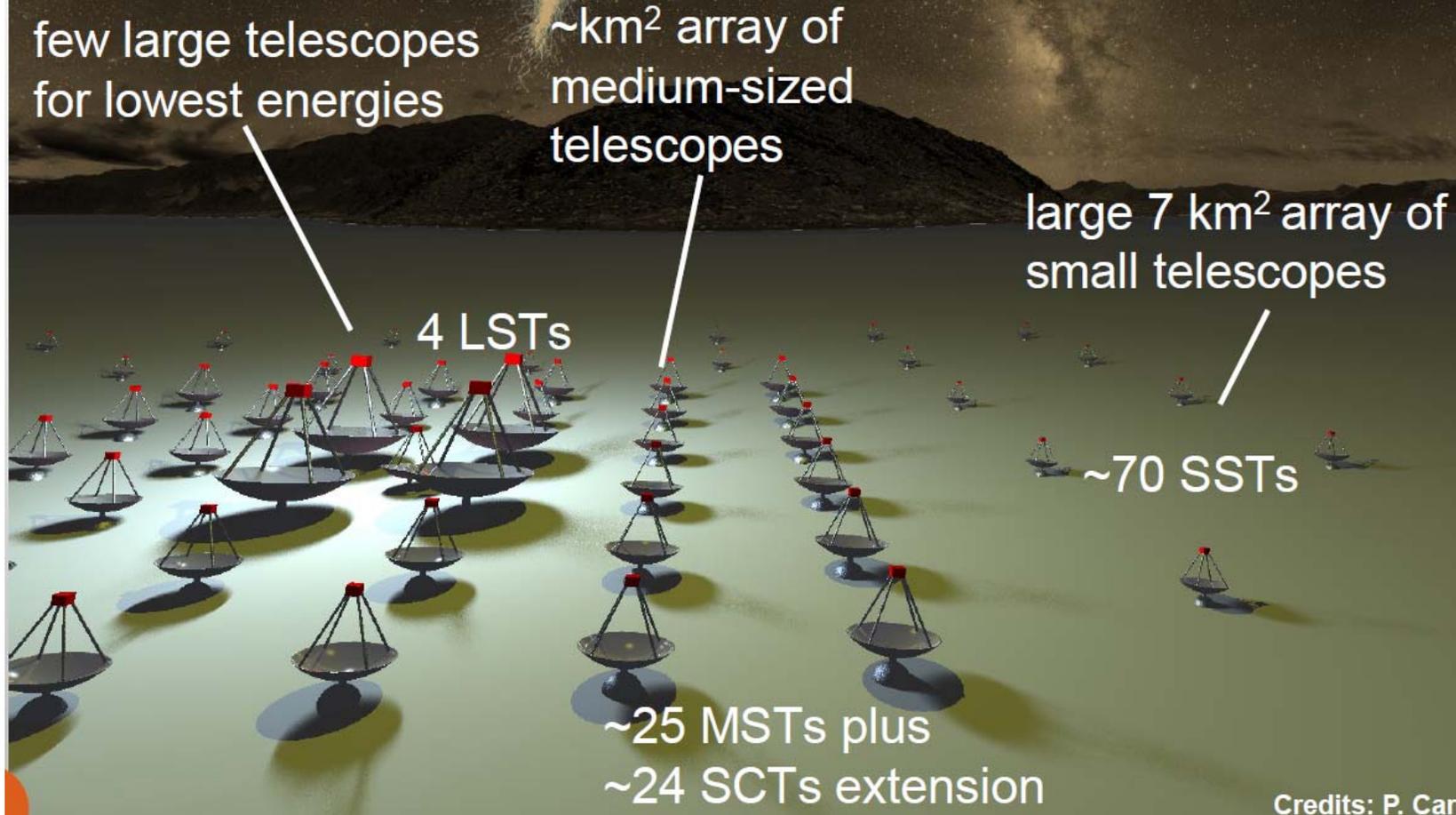
Design: 2008-12
Prototypes: 2013-16,
Construction: 2016-21



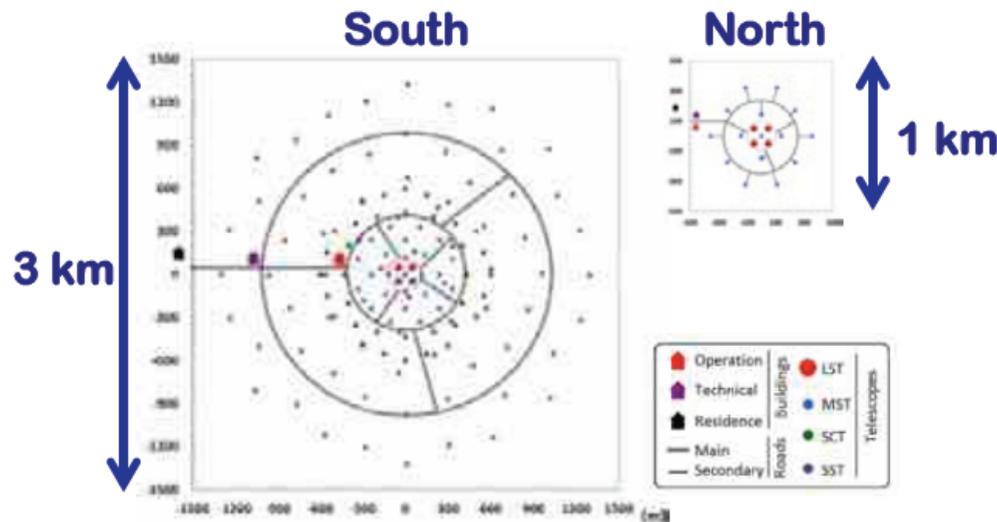
One observatory with 2 sites

Science-optimization under budget constraints:

- Low-energy γ high γ -ray rate, low light yield
→ require small ground area, large mirror area
- High-energy γ low γ -rate, high light yield
→ require large ground area, small mirror area



CTA: one observatory with 2 sites



Characteristics

- 2 sites (north & south)
- 3 telescope size classes
- About 120 telescopes in total
- South U.S. extension with about 25 SCT telescopes

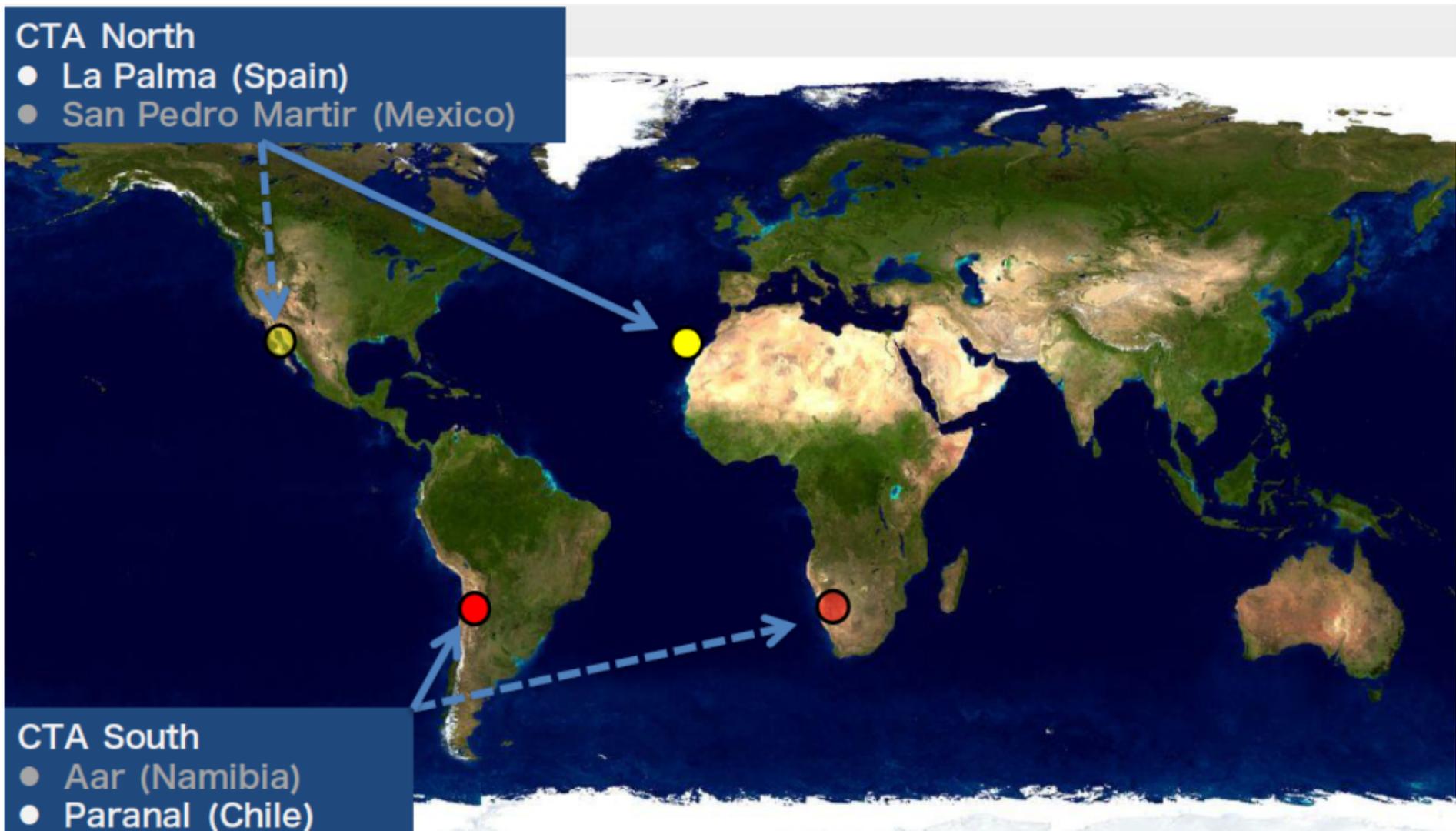


CTA North

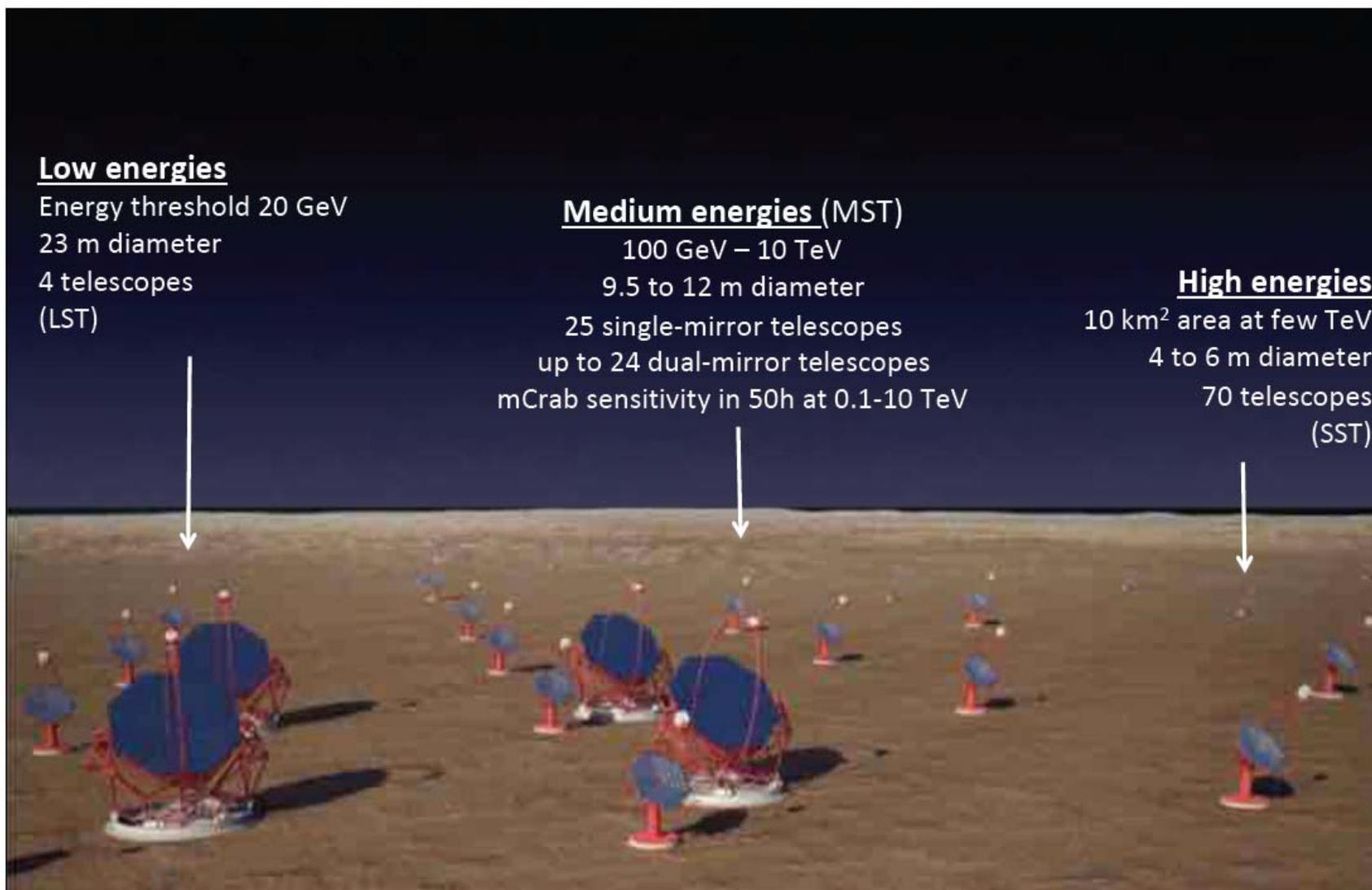
- La Palma (Spain)
- San Pedro Martir (Mexico)

CTA South

- Aar (Namibia)
- Paranal (Chile)



CTA: a multi-telescope Cherenkov array



Science with CTA

Ground-based gamma-ray astronomy is a young field with enormous scientific potential. The possibility of astrophysical measurements at teraelectronvolt (TeV) energies was demonstrated in 1989 with the detection of a clear signal from the Crab (Pulsar Wind) Nebula above 1 TeV with the Whipple Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT). Since then, the instrumentation for, and techniques of, astronomy with IACTs have evolved to the extent that a flourishing new scientific discipline has been established, with the detection of 150 sources and a major impact in astrophysics and more widely in physics. The current major arrays of IACTs: HESS, MAGIC, and VERITAS, have demonstrated the huge physics potential at these energies as well as the maturity of the detection technique.

Many astrophysical source classes have been established, some with many well-studied individual objects, but there are indications that the known sources represent the tip of the iceberg in terms of both individual objects and source classes. The Cherenkov Telescope Array will transform our understanding of the high-energy universe. An advanced member of the suite of forthcoming major astroparticle physics experiments and observatories; CTA will exploit synergies with projects seeking gravitational wave and astrophysical neutrino detection as well as with classical photon observatories. The synergy with the upcoming Square Kilometre Array (SKA) is perhaps the most exciting in terms of mutual scientific benefit. CTA will address a wide range of major questions in and beyond astrophysics, which can be grouped in to three broad themes:

astrophysical source classes have been established, some with many well-studied individual objects, but there are indications that the known sources represent the tip of the iceberg in terms of both individual objects and source classes.