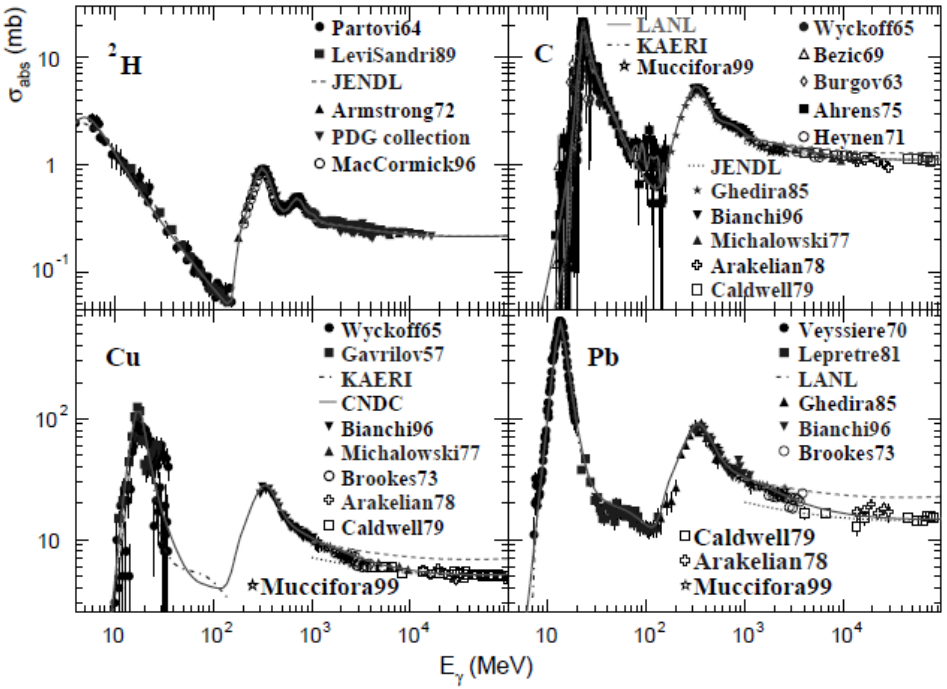
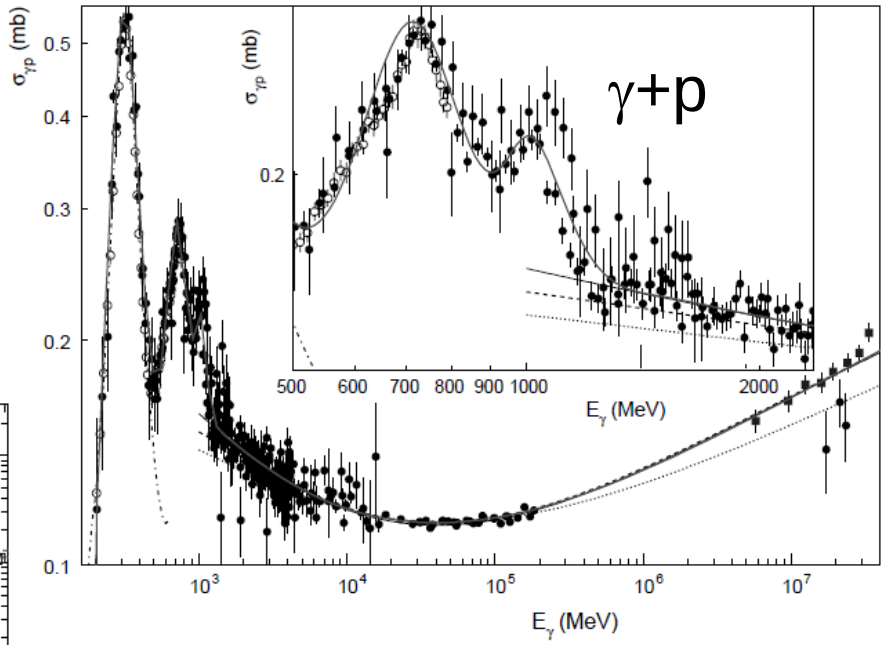
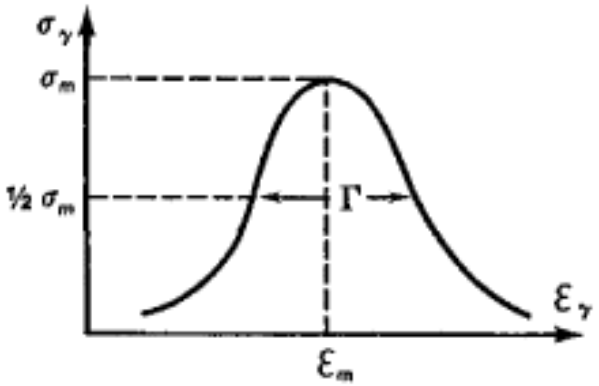
Фотоядерные реакции

- γ+A $\rightarrow$ адроны
- Гигантский резонанс

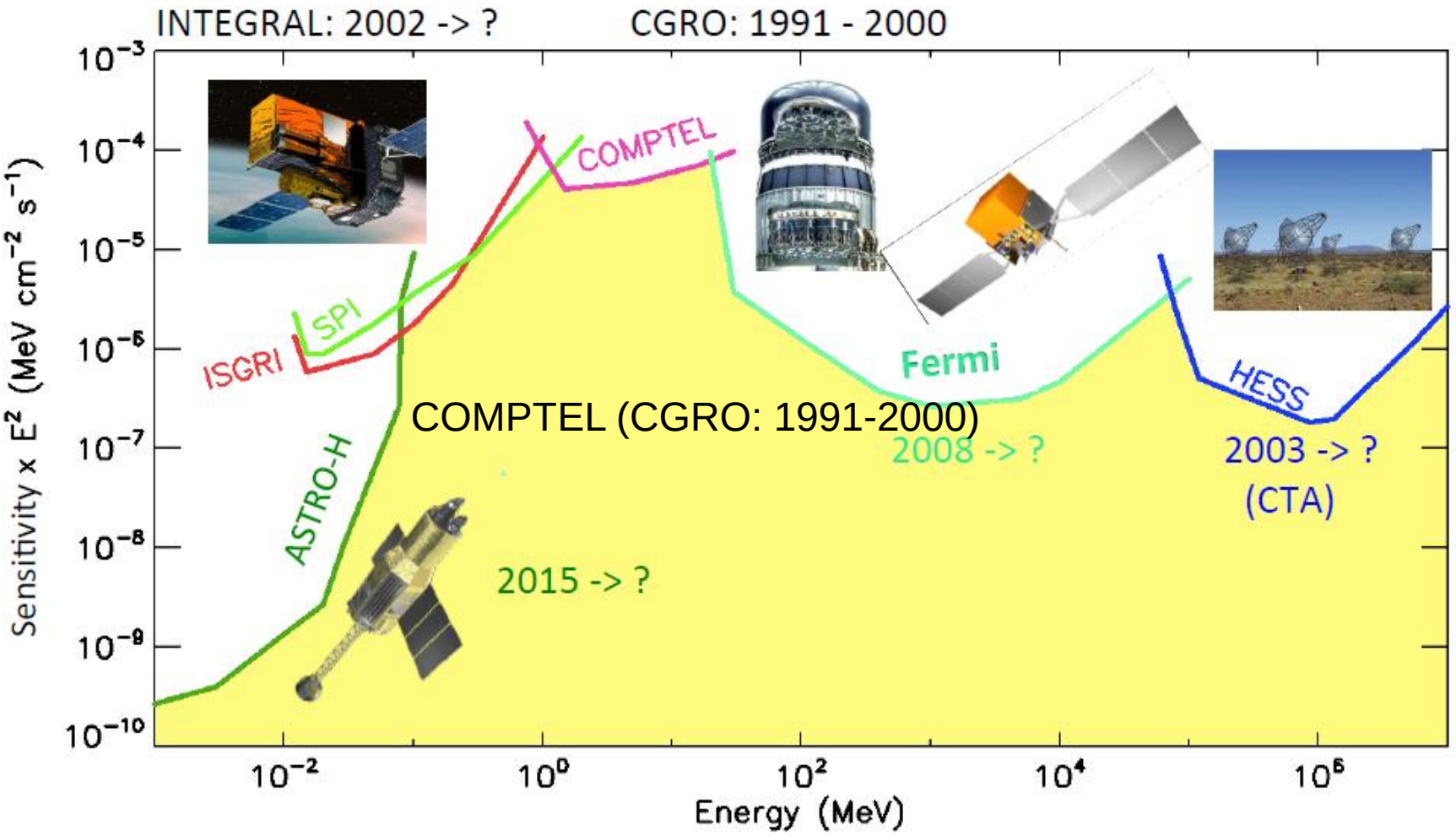






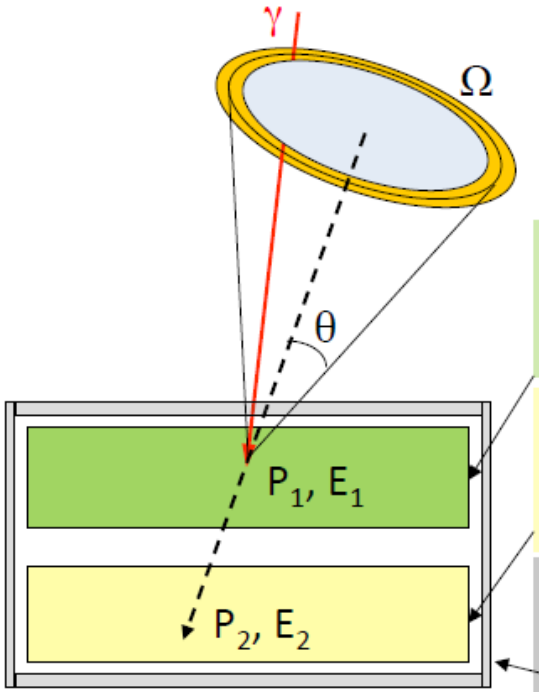
$\varepsilon_m \cong 34\ A^{-1/6}$ МэВ; Γ=4-8 МэВ

Комптоновские телескопы



- The “MeV domain” (100 keV − 100 MeV) remains largely unexplored

Принцип работы



$$E_\gamma = E_1 + E_2$$
$$\cos\theta = 1 + m_e c^2[1/(E_1+E_2)-1/E_2]$$

Tracker. Low-Z material for Compton scattering and minimum Doppler broadening ⇒ Si

Calorimeter. High-Z material for an efficient absorption of the scattered photon

Anticoincidence detector to veto charged-particle induced background

COMPTEL (CGRO: 1991-2000)

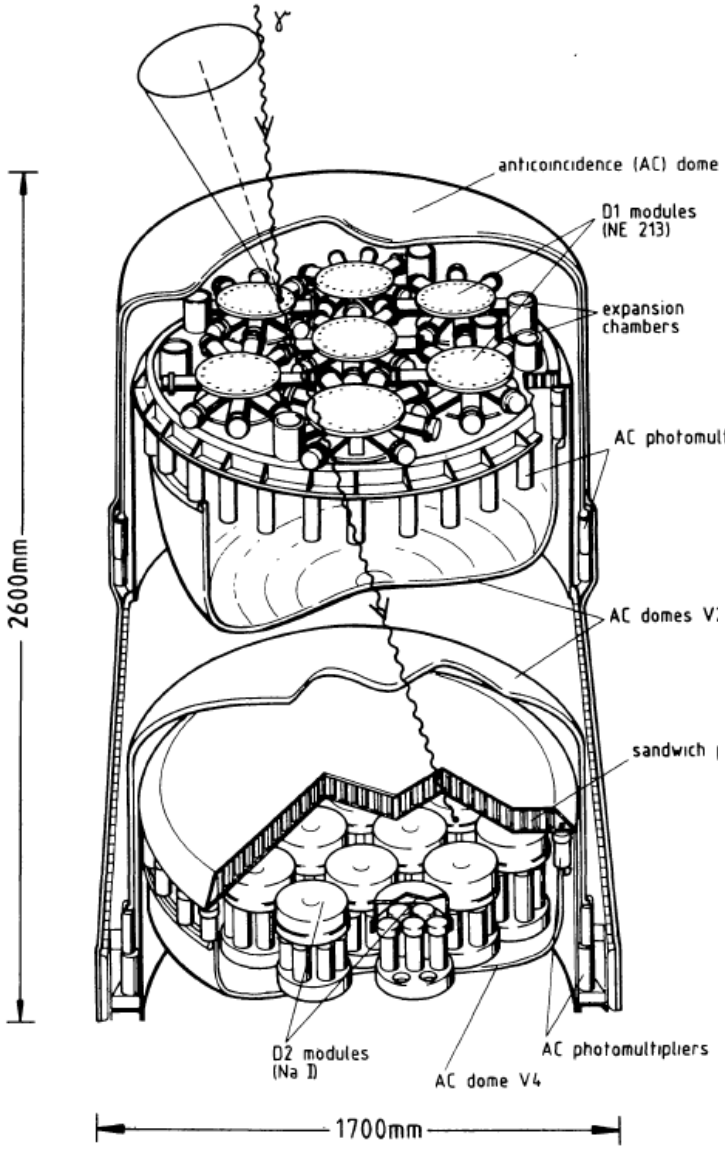


FIG. 2.—Schematic view of COMPTEL

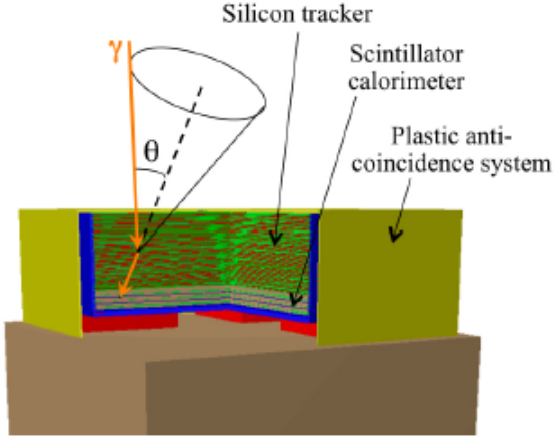
E: 1-30 МэВ
Ang.res: 1-2 град.
FoV: 1 стерадиан
En.res: 9% (1 МэВ)
Seff = 10-50 см^2

$$\cos\bar{\varphi} = 1 - \frac{m_0c^2}{E_2} + \frac{m_0c^2}{E_1 + E_2}$$

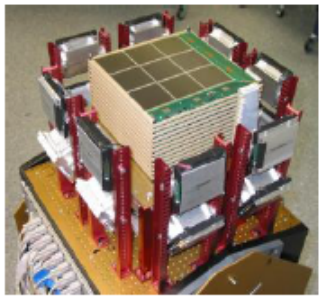
1. The energy loss E_1 of the Compton electron in the upper detector.
2. The location of the interaction in the upper detector.
3. The pulse shape of the scintillation pulse in the upper detector.
4. The energy loss E_2 in the lower detector.
5. The location of the interaction in the lower detector.
6. The time of flight of the scattered gamma ray from the upper to the lower detector.
7. The time of the event.

- 3 concepts discussed in detail at the 2nd AstroMeV workshop in Nov. 2013

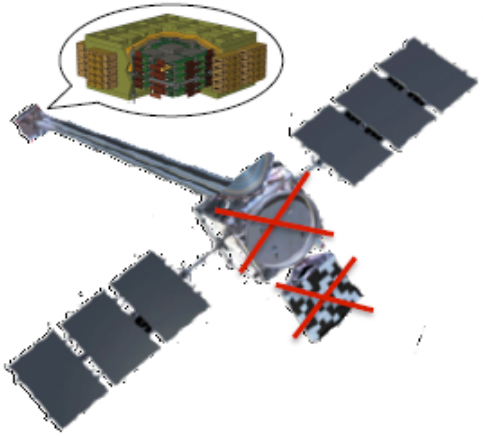
PACT (*Pair and Compton Telescope*; Tatischeff et al.)



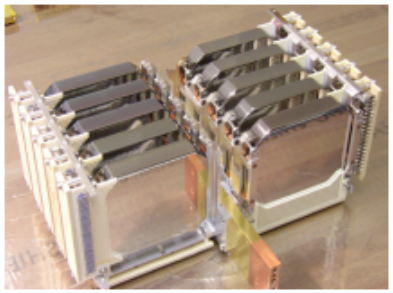
Si DSSDs + $CeBr_3$ scintillators
Heritage: MEGA, GRIPS M2/ M3 (MPE), AGILE, Fermi/LAT



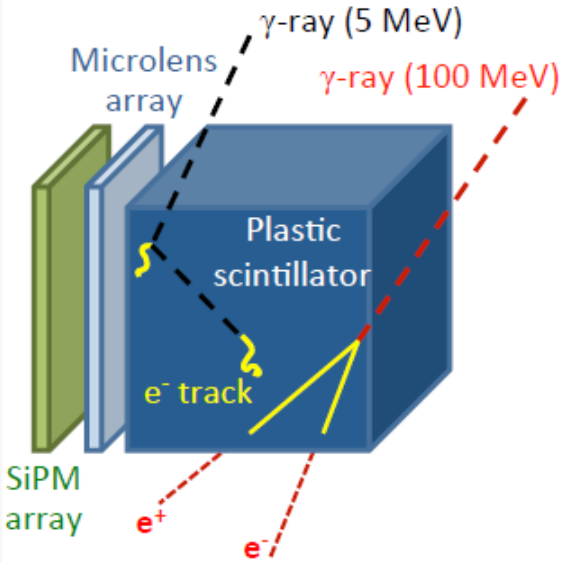
asCi (*all sky Compton imager*; von Ballmoos et al.)



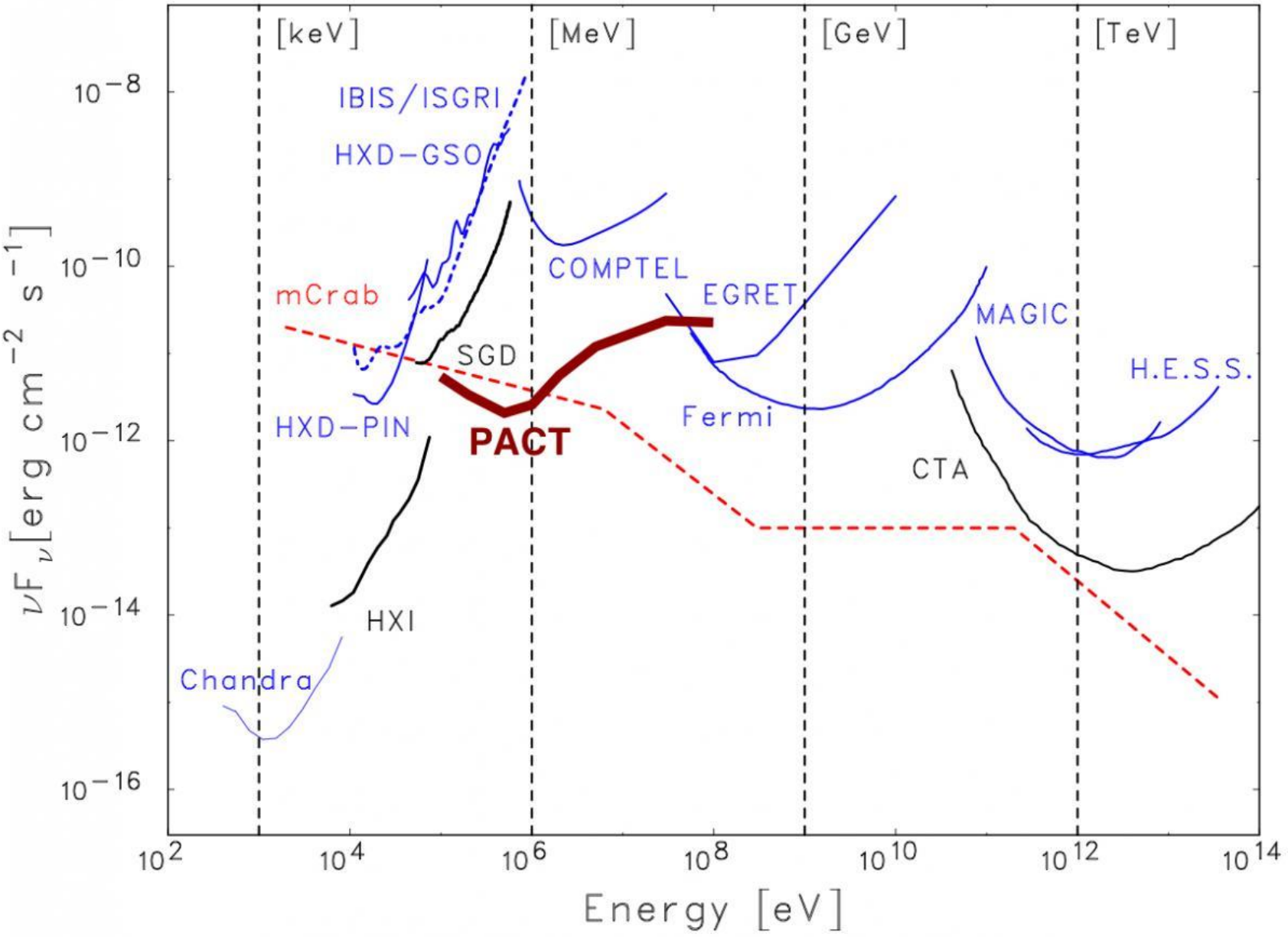
Ge-strip detectors
Heritage: NCT/COSI (UC Berkeley), DUAL M3



Gamma Cube (Lebrun et al.)



Novel concept: imaging ionization traces in a plastic scintillator
Very interesting! But not mature enough for M4


[keV]
[MeV]
[GeV]
[TeV]
IBIS/ISGRI
HXD−GSO
COMPTEL
EGRET
MAGIC
H.E.S.S.
mCrab
SGD
HXD−PIN
PACT
Fermi
CTA
HXI
Chandra
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
νF_ν [erg cm^{-2} s^{-1}]
10^2
10^4
10^6
10^8
10^{10}
10^{12}
10^{14}
Energy [eV]

Пар-конверсионные телескопы

- Fermi-LAT (Large Area Telescope)

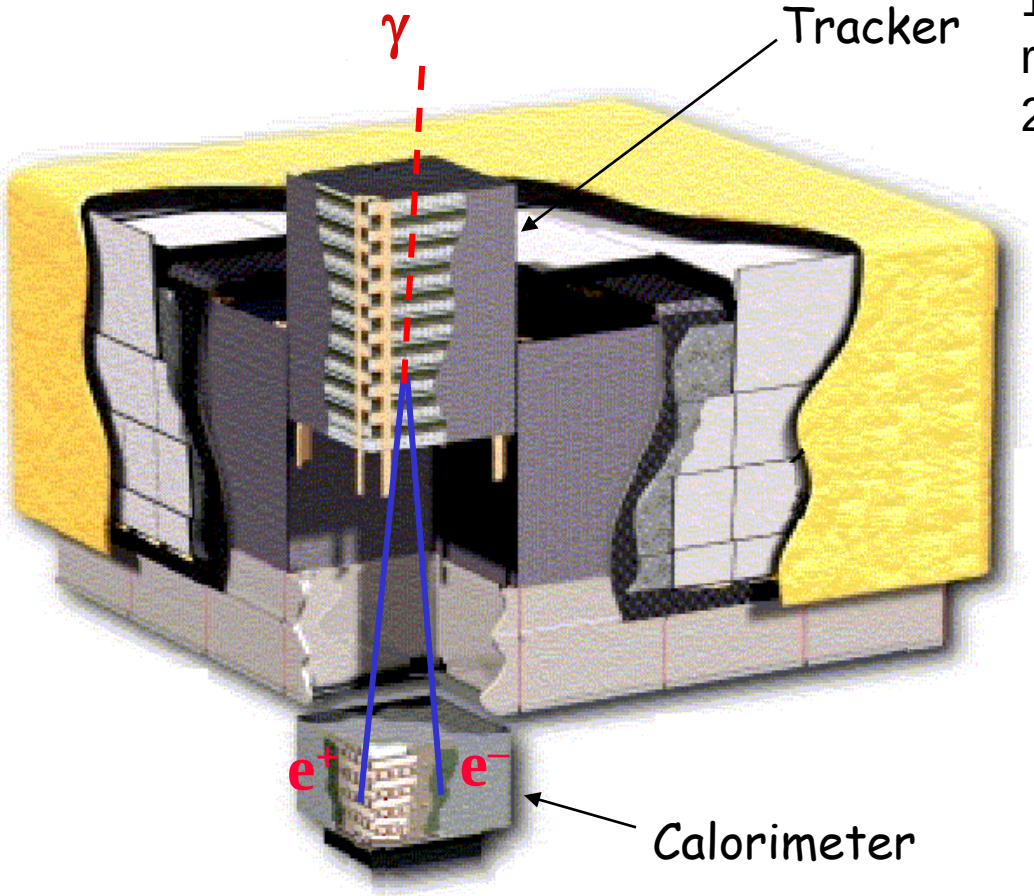


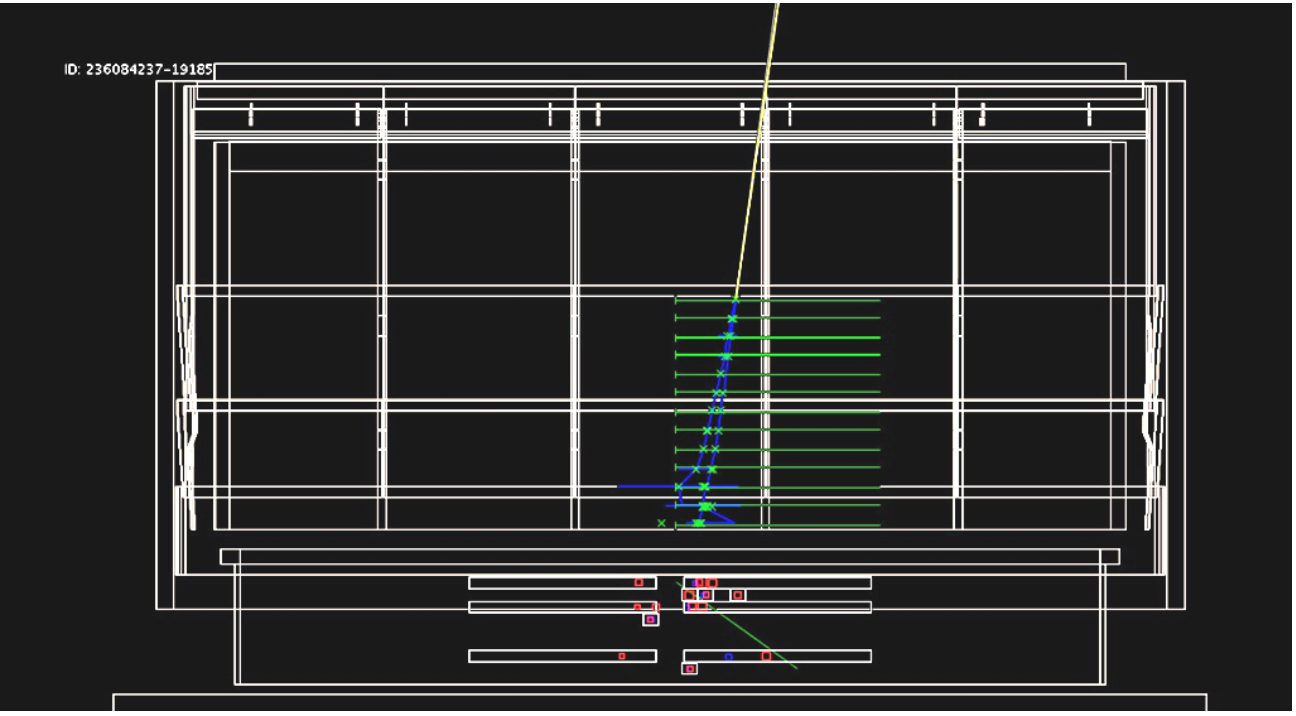
Figure 1. Schematic diagram of the LAT. The telescope's dimensions are 1.8 m × 1.8 m × 0.72 m. The power required and the mass are 650 W and 2789 kg, respectively.

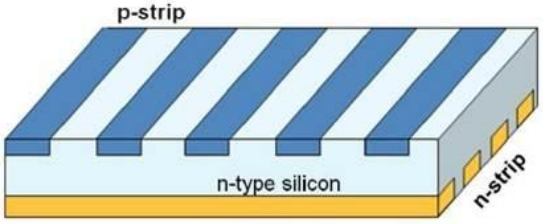
Precision Si-strip Tracker (TKR) 18 XY tracking planes. Single-sided silicon strip detectors (228 mm pitch) Measure the photon direction; gamma ID.

Hodoscopic CsI Calorimeter(CAL) Array of 1536 CsI(Tl) crystals in 8 layers. Measure the photon energy; image the shower.

Fermi-LAT (продолжение)

For each event, the LAT measures three quantities: arrival direction, energy, and arrival time.





The green crosses show the detected positions of the charged particles, the blue lines show the reconstructed track trajectories, and the yellow line shows the candidate gamma-ray estimated direction. The red crosses show the detected energy depositions in the calorimeter.

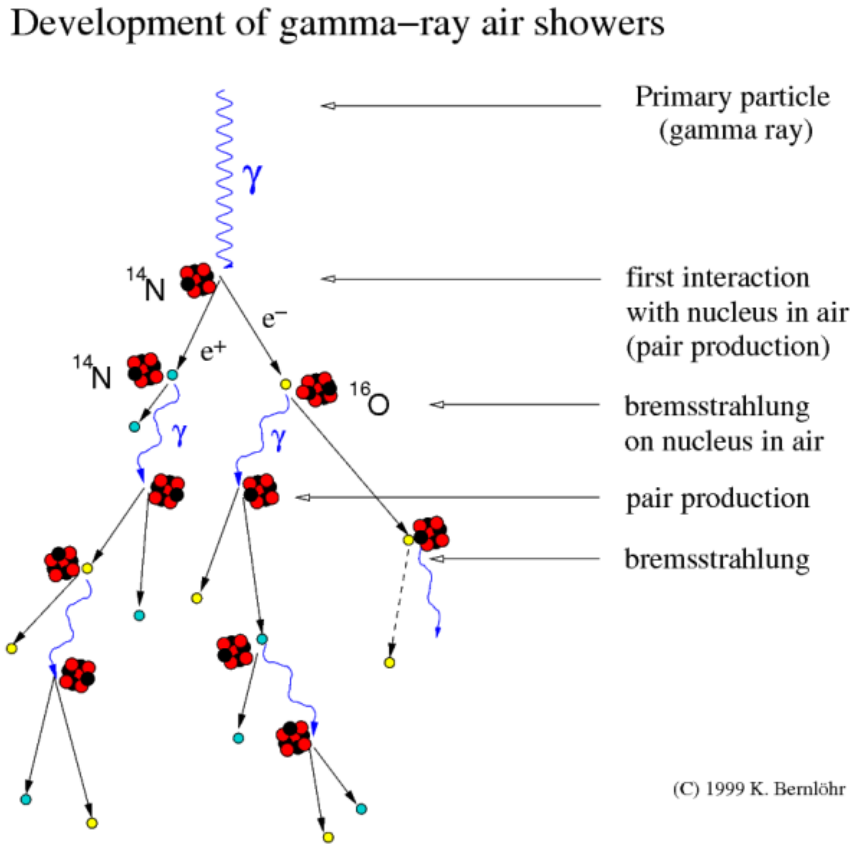
Fermi-LAT (продолжение)

E: 20 МэВ - 300 ГэВ
Ang.res: 1-2 град.
FoV: 2.4 стерадиан (~20% всего неба)
Seff = 9500 см^2

Energy resolution (equivalent Gaussian 1σ):
100 MeV–1 GeV (on-axis) 9%–15%
1 GeV–10 GeV (on-axis) 8%–9%
10 GeV–300 GeV (on-axis) 8.5%–18%
>10 GeV (>60◦ incidence) 6%
Single photon angular resolution on-axis, 68% containment radius:
>10 GeV 0.◦15
1 GeV 0.◦6
100 MeV 3.◦5

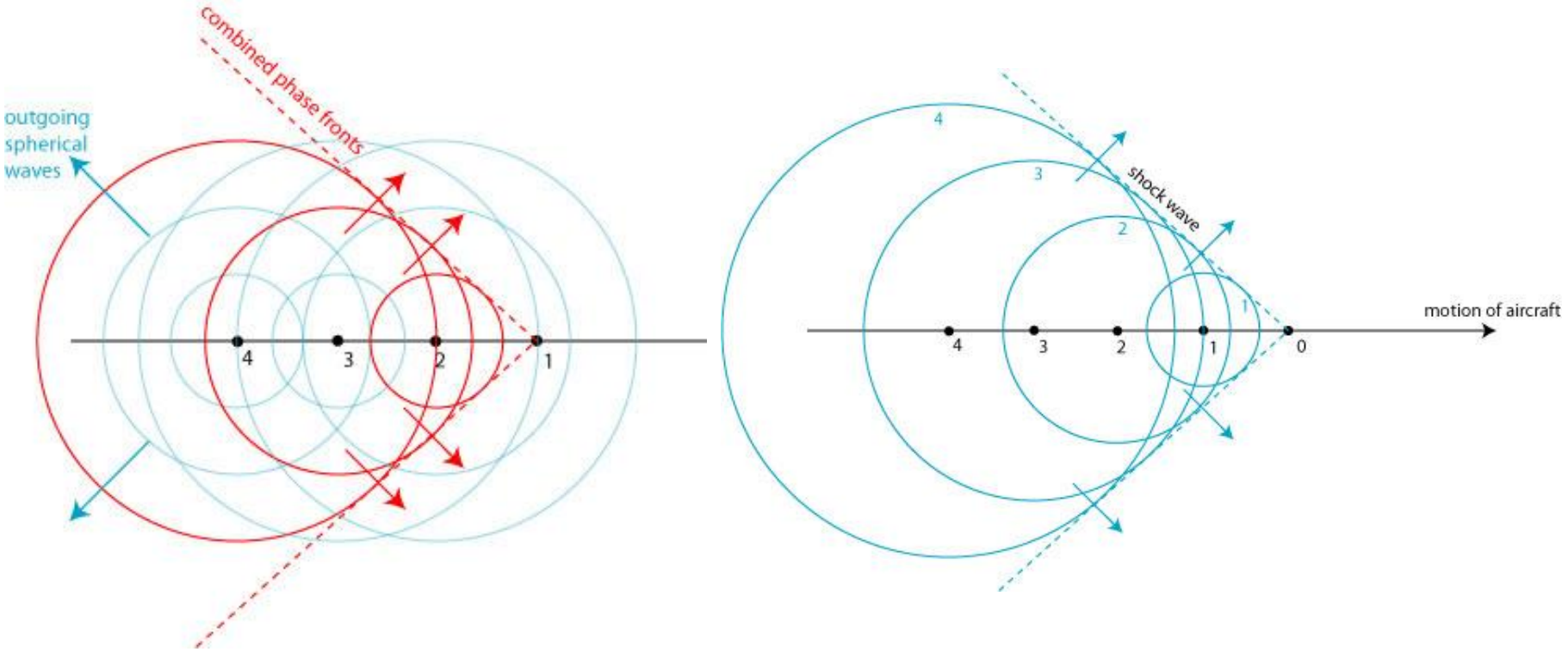
Телескопы высоких энергий

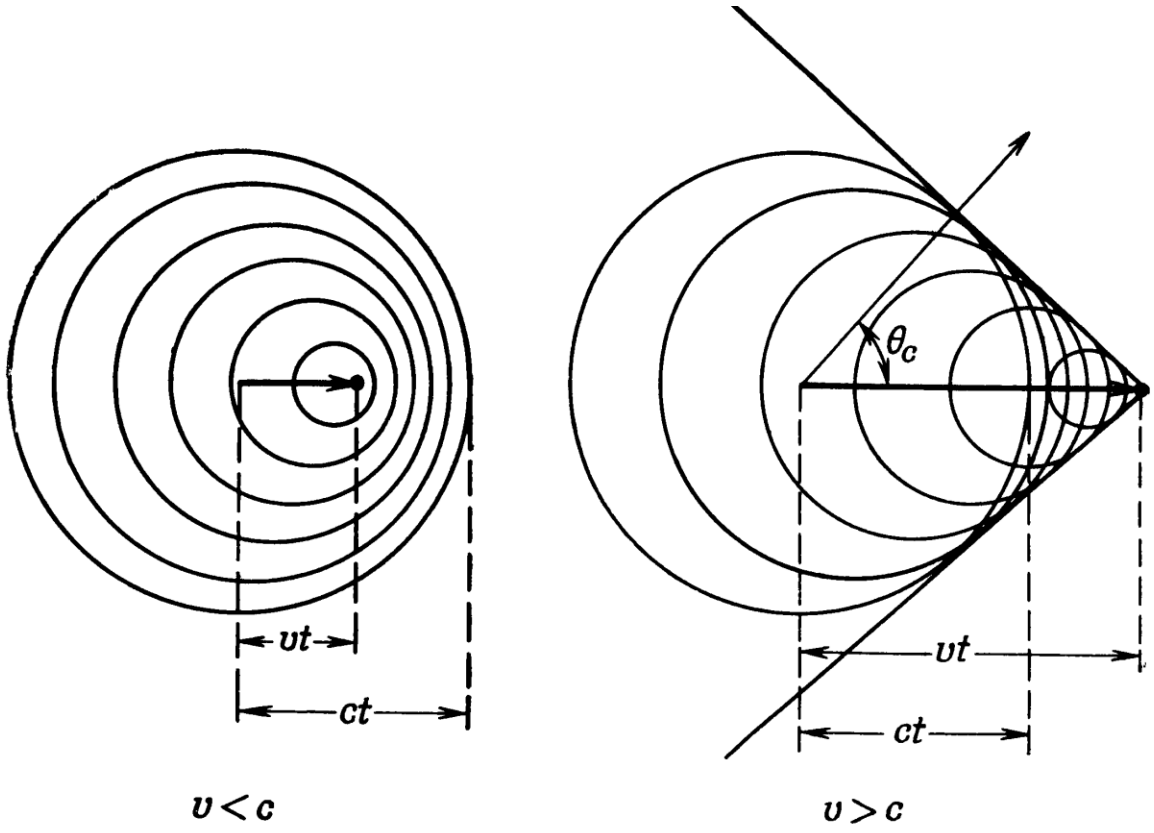
- Черенковские телескопы
- VHE γ взаимодействует с атмосферой, рождая e^-, e^+
- e^-, e^+ порождают электромагнитный каскад



Излучение Вавилова-Черенкова (Нобелевская премия 1958 г: Черенков, Франк, Тамм)

- v > c/n - излучение Вавилова-Черенкова
- $\cos\theta = c/n$





Ф и г. 14.14. Излучение Вавилова — Черенкова.

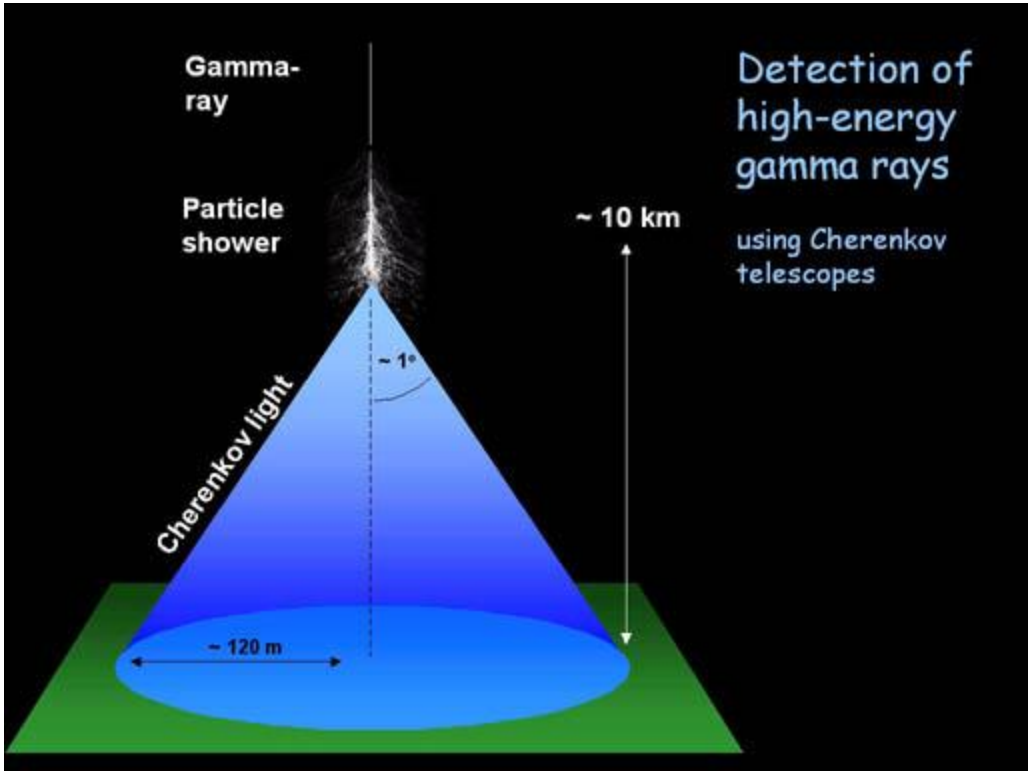
Окружности изображают последовательность волновых фронтов поля частицы для случаев, когда скорость меньше и больше скорости света в среде. При $v > c$ происходит образование «ударной» электромагнитной волны, движущейся в направлении, определяемом черенковским углом θ_c.

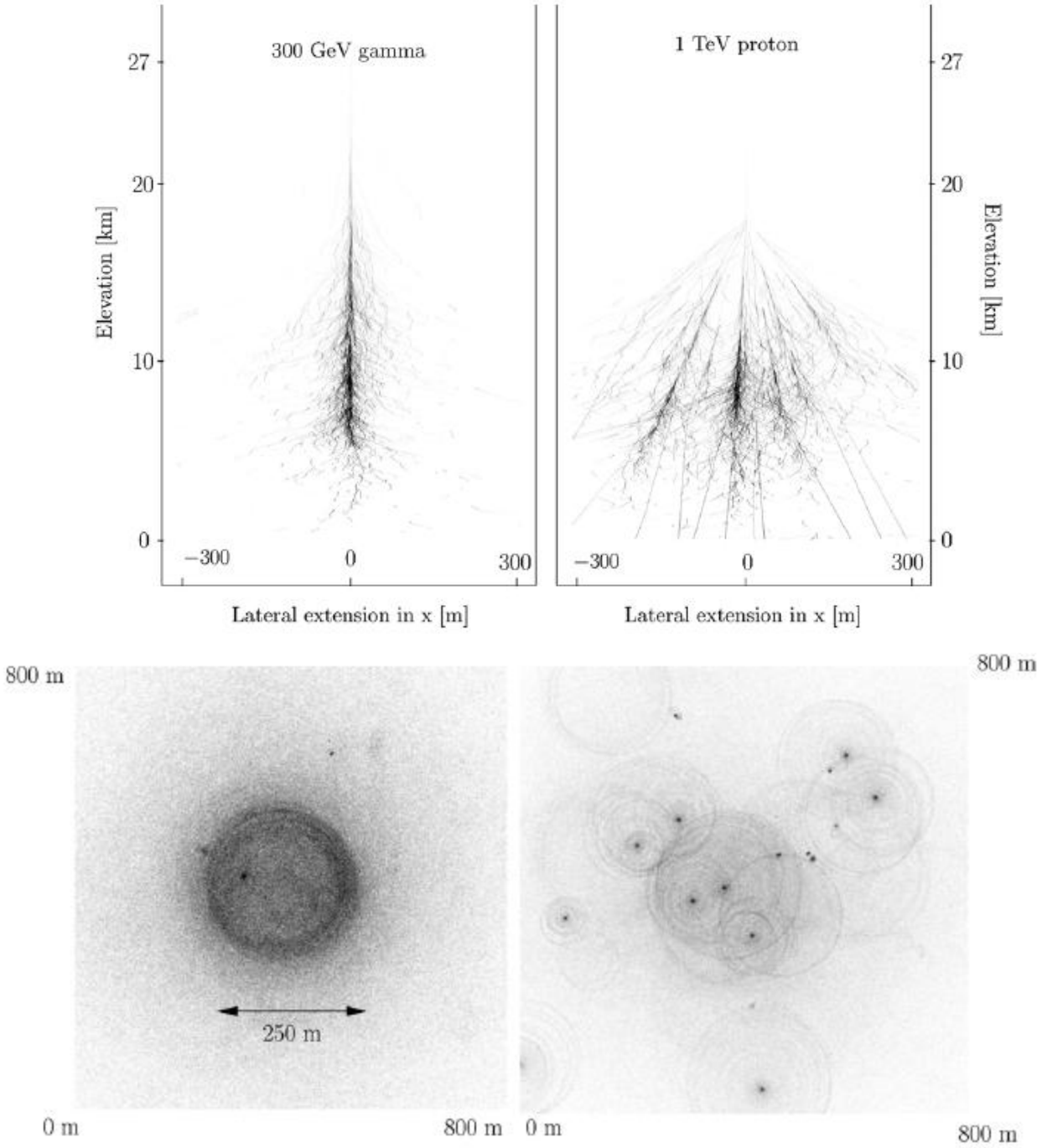
- Спектр черенковского излучения:

$$I(\omega)d\omega = v\frac{e^2}{c^2}\left[1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)}\right]\omega d\omega$$

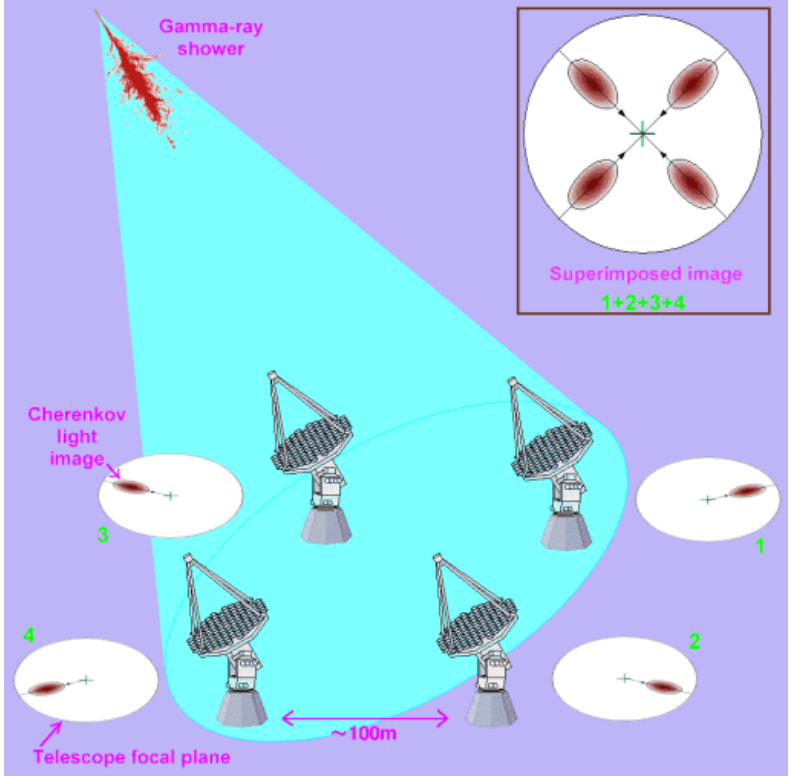
- Основное излучение в области ультрафиолета
- n= 1.0003 (воздух, видимый диапазон): $v_{thr} \cong$ 0.9997c, $E_{thr} = \cong$20 МэВ
- n=1.3 (вода): $E_{thr} = \cong$270 keV

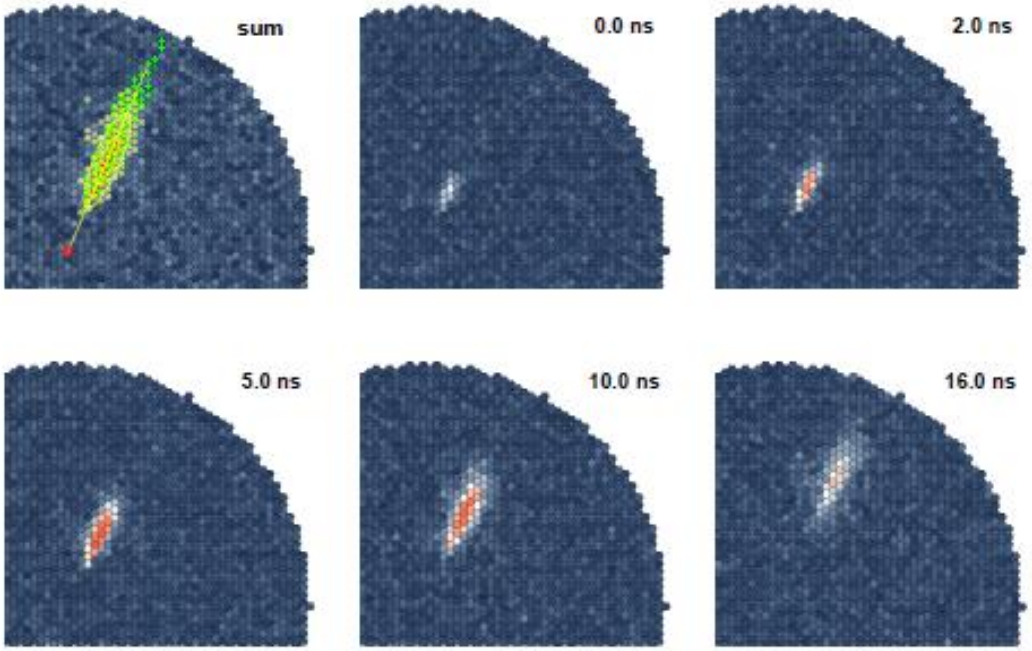
- Максимальное число частиц на ~10 км
- 300-350 нм
- ~100 фотонов/м^2 (1 ТэВ)
- Длительность вспышки ~несколько нс



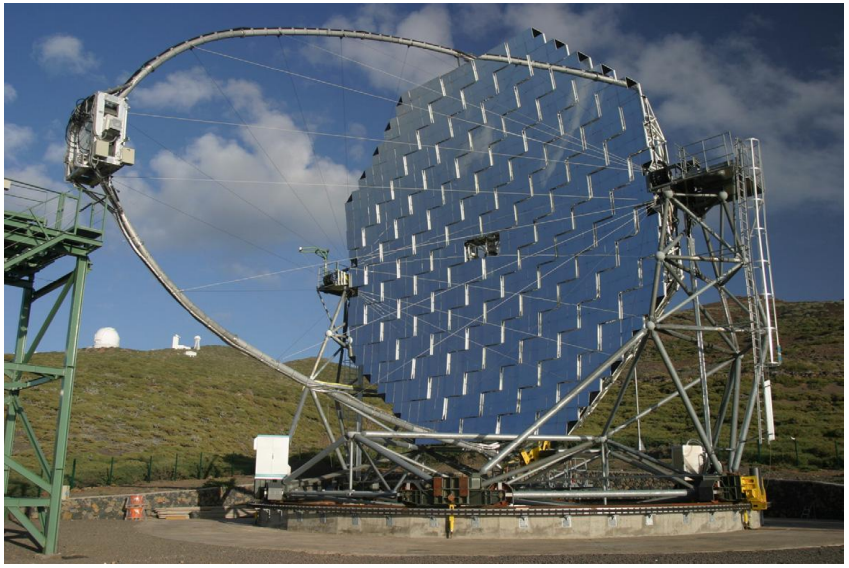

300 GeV gamma
1 TeV proton
Elevation [km]
27
20
10
0
−300
0
300
Lateral extension in x [m]
800 m
0 m
250 m

Imaging


Gamma-ray shower
Superimposed image
1+2+3+4
Cherenkov light image
3
1
4
2
~100m
Telescope focal plane


sum
0.0 ns
2.0 ns
5.0 ns
10.0 ns
16.0 ns

- Работающие в настоящее время: H.E.S.S., VERITAS (12 m), MAGIC (17 m), H.E.S.S. II (28 m)
- Первое детектирование – 1992, обсерватория Whipple, Mrk421 (блазар)
- Ang.res: 1’ (E/100 ГэВ)$^{-1/2}$
- En.res: 15-30 %

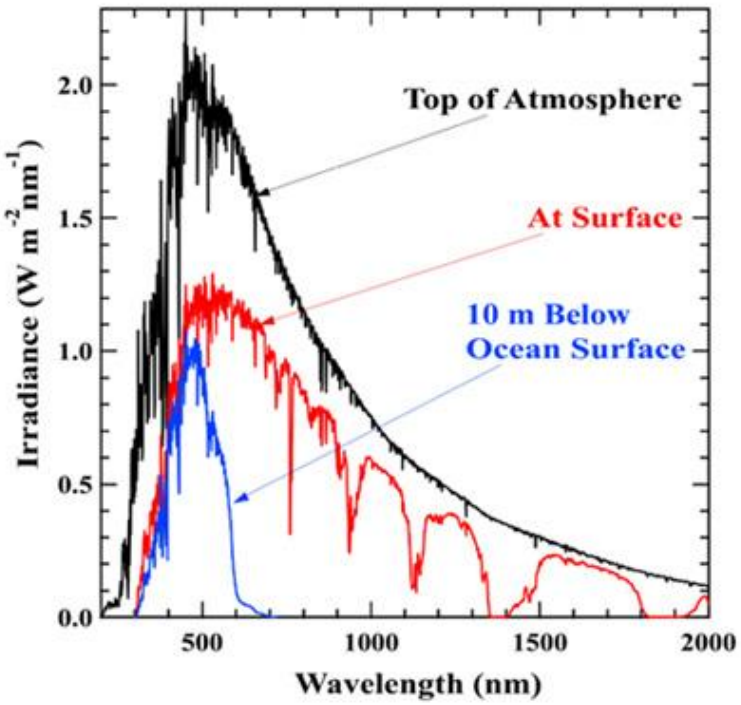


Instrument	Lat (°)	Long (°)	Alt (m)	Telescopes #	Telescopes Area (m^2)	Telescopes Total (m^2)	Pixels	FoV FoV (°)	Thresh (TeV)	Sensitivity (% Crab)
H.E.S.S.	-23	16	1800	4	107	428	960	5	0.1	0.7
VERITAS	32	-111	1275	4	106	424	499	3.5	0.1	0.7
MAGIC I†+II	29	18	2225	2	234	468	576/1039	3.5	0.03	1.0
CANGAROO-III	-31	137	160	3	57.3	172	427	4	0.4	15
Whipple†	32	-111	2300	1	75	75	379	2.3	0.3	15

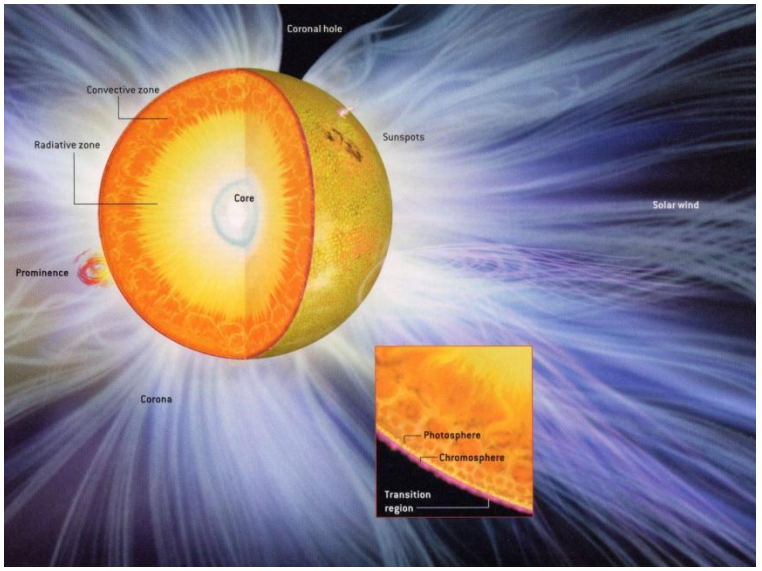
Гамма-излучение Солнца

I Общие сведения о Солнце

- R=696000 км (≅7×10^{10} см), 16’
- M ≅2×10^{33} г
- <ρ>=1.41 г/см^3 ($ρ_c$=149 г/см^3)
- L=3.8 ×10^{33} эрг/с
- Q = 1366 Вт/м^2 (≅1.4×10^6 эрг/см^2/с)
- P (экватор) ≅ 25 дней, P (полюс) ≅ 30 дней
- T_{eff} ≅5770 K



Строение Солнца



Фотосфера

h ≅ 180 km

неионизованный водород

ρ=0.1-5 ×10^{-7} г/см^3 (0.06-3 ×10^{17} атомов/см^3)

ρ*h = 10 г/см^2 (N_H=5.4 ×10^{17} атомов/см^2)

Хромосфера

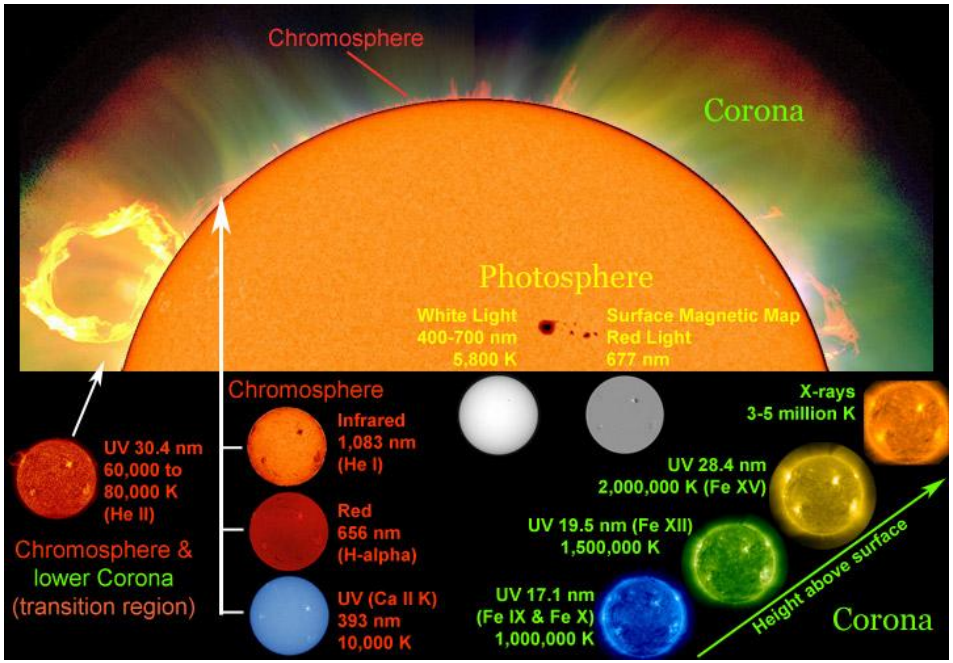
ρ=0.1-1 ×10^{-15} г/см^3 (0.1-1×10^9 атомов/см^3)

h ≅ 2-3 тыс. км

T ~10^6 K

Корона

h ~140 000 км



Гамма-излучение Солнца в спокойном состоянии

I излучения от диска из-за взаимодействия адронной компоненты КЛ с фотосферой
II Extended компонента (<=10 град) – обратное комптоновское рассеяние солнечных фотонов на лептонной компоненте галактических КЛ

Fermi-LAT:
F(>100 МэВ)≅5x10^{-7} фотонов/см^2/с (~10^{-10} эрг/см^2/с) – диск
F(>100 МэВ)≅7x10^{-7} фотонов/см^2/с – протяженная компонента

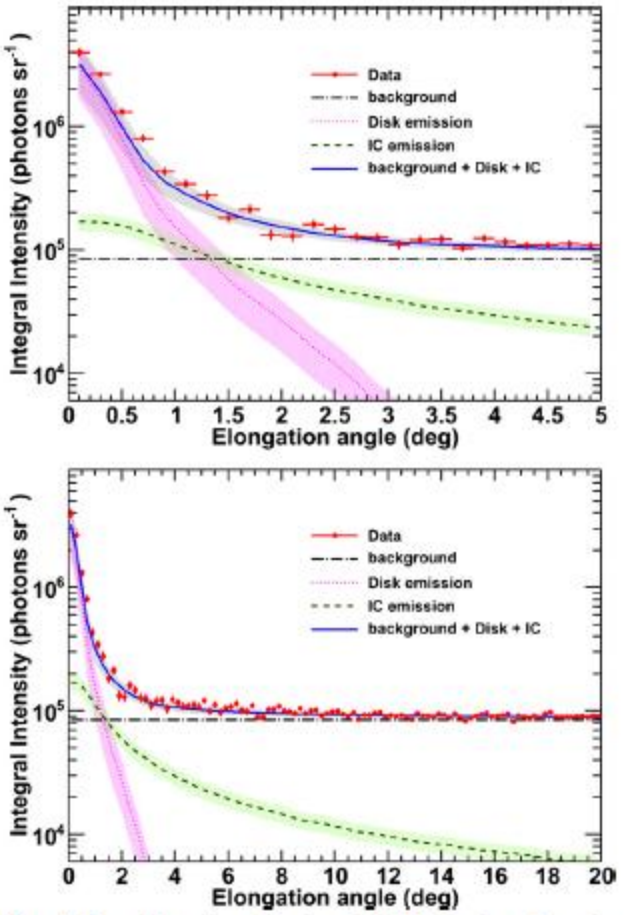
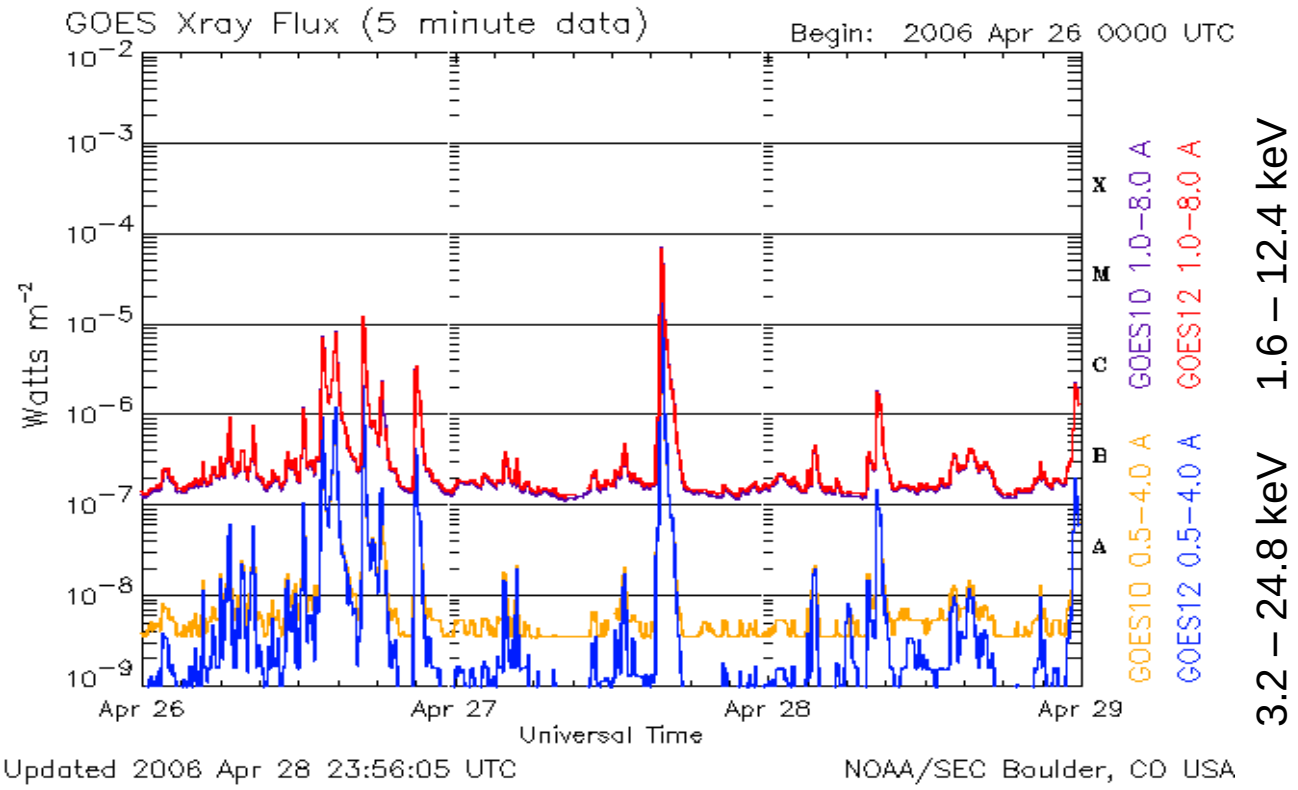


Figure 5. Integral intensity profiles above 500 MeV for elongation angles $\leqslant 5°$ (top) and $\leqslant 20°$ (bottom). Points (red) are the observed counts, dash-dotted horizontal (black) line is the background, dotted (magenta) and dashed (green) lines are the point-like and extended components of the emission, correspondingly. The solid (blue) line is the sum of the background and the two components of the emission. The shaded areas around the lines show total error estimates. See the text for details.

Солнечные вспышки

- Типичная светимость ~10^{27} эрг/с
- Полное энерговыделение до 10^{33} эрг
- Длительность: десятки секунд – десятки минут

Постоянный мониторинг: the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)



Классификация вспышек

After Bhatnagar & Livingston 2005

Hα classification			Radio flux at 5000 MHz in s.f.u.	Soft X-ray class	
Importance Class	Area (Sq. Deg.)	Area 10^{-6} solar disk		Importance class	Peak flux in 1-8 Å w/m^2
S	2.0	200	5	A	10^{-8} to 10^{-7}
1	2.0–5.1	200–500	30	B	10^{-7} to 10^{-6}
2	5.2–12.4	500–1200	300	C	10^{-6} to 10^{-5}
3	12.5–24.7	1200–2400	3000	M	10^{-5} to 10^{-4}
4	>24.7	>2400	3000	X	>10^{-4}

Hα sub-classification by brightness: F – faint, N – normal, B – bright

1 s.f.u. = 10^4 jansky = 10^{-2} W m^{-2} Hz^{-1}

Солнечные вспышки

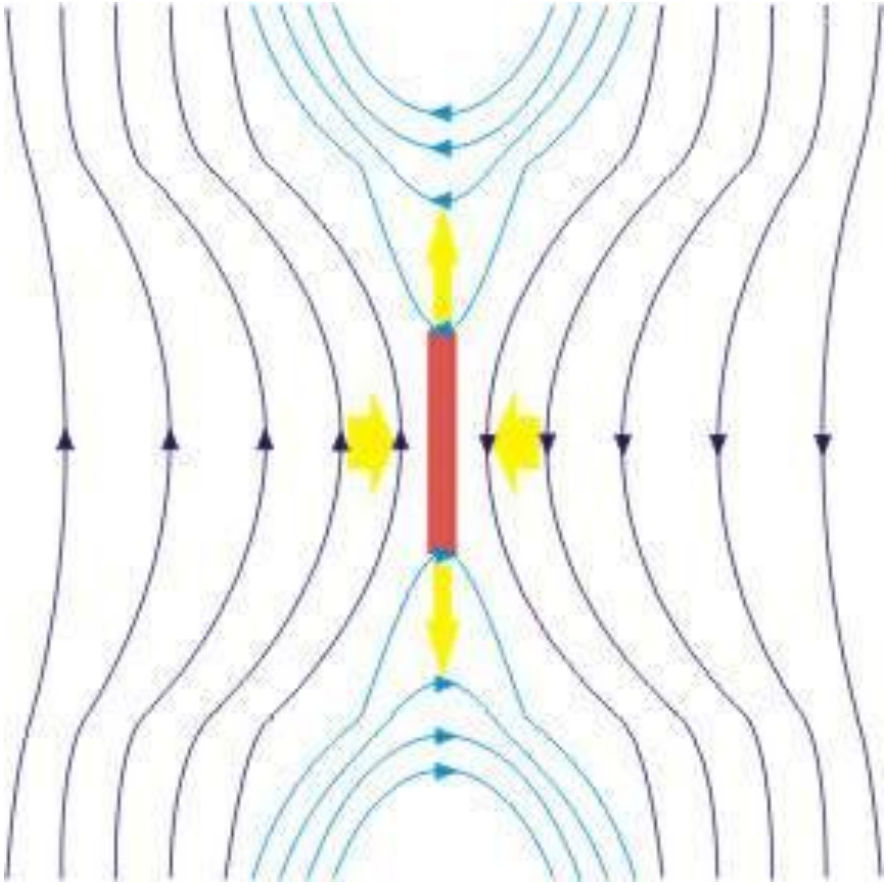
I источник энергии – свободная энергия магнитного поля
II ускорение заряженных частиц до энергий > МэВ
III излучения во всем диапазоне длин волн от радио до гамма

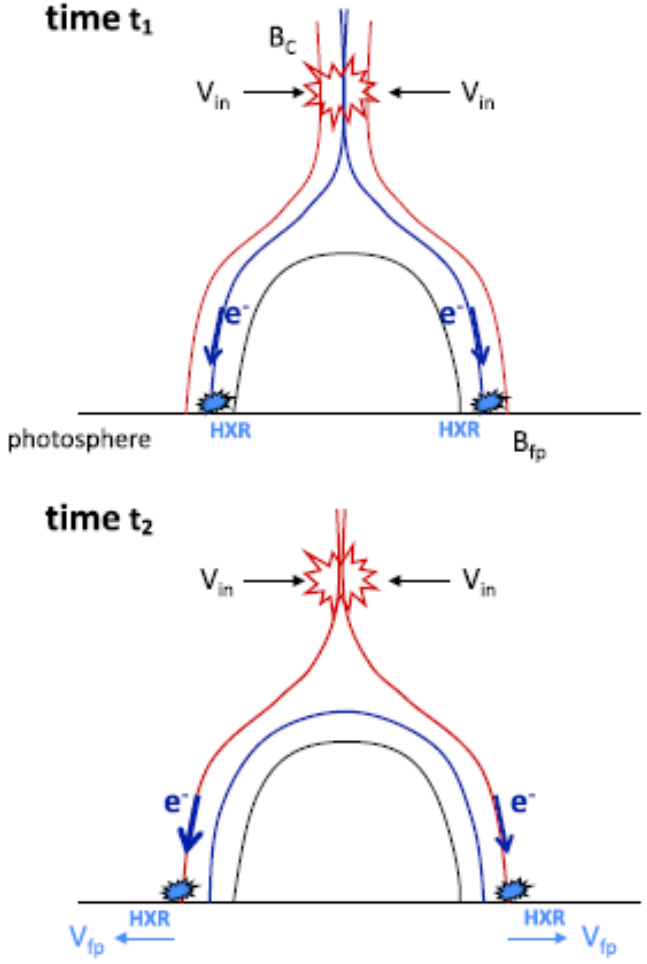
Ускорение частиц – пересоединение магнитных силовых линий

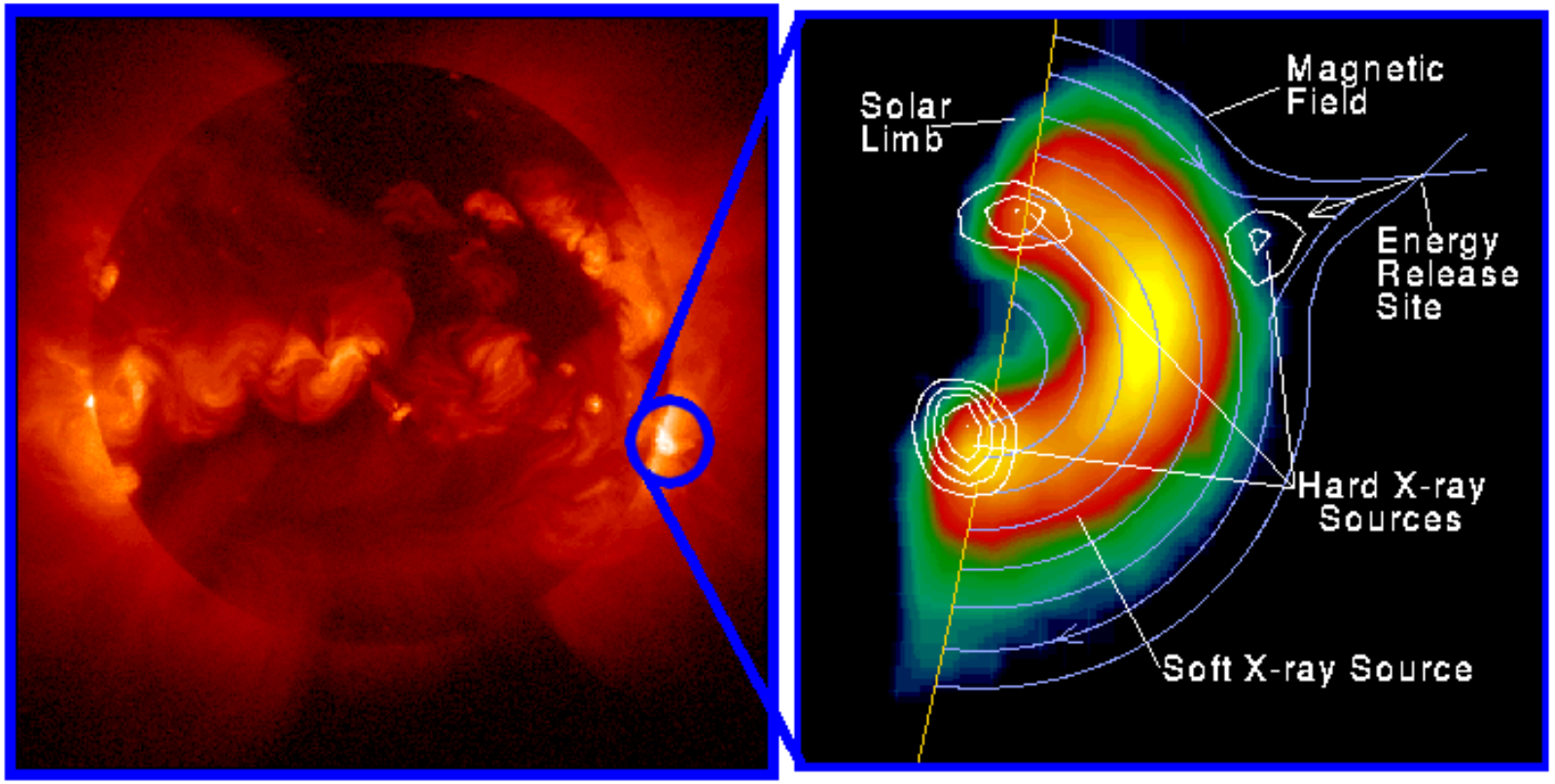
Величина магнитного поля – до нескольких тысяч Гс

Энергия в ускоренных электронах и протонах примерно одинаковая

Пересоединение и вспышечная петля

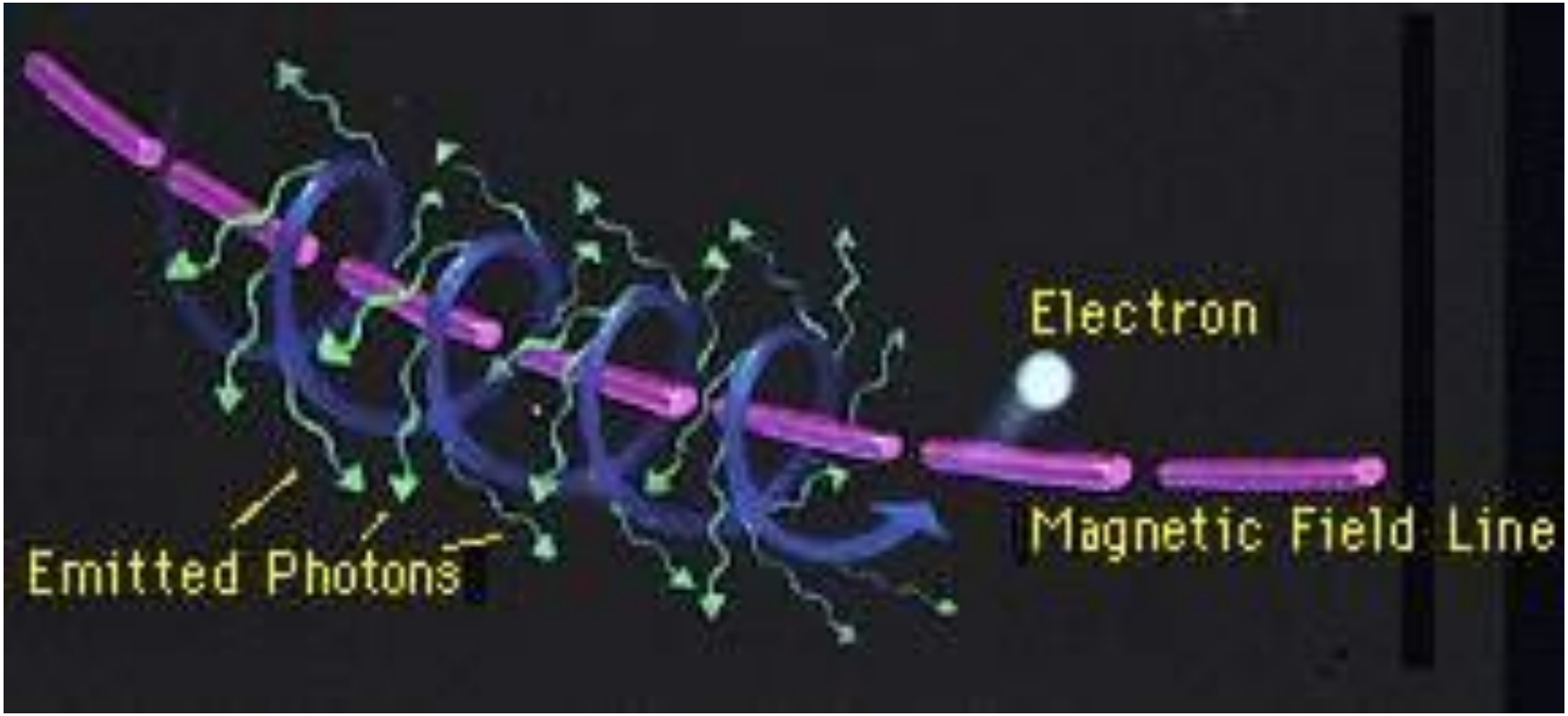




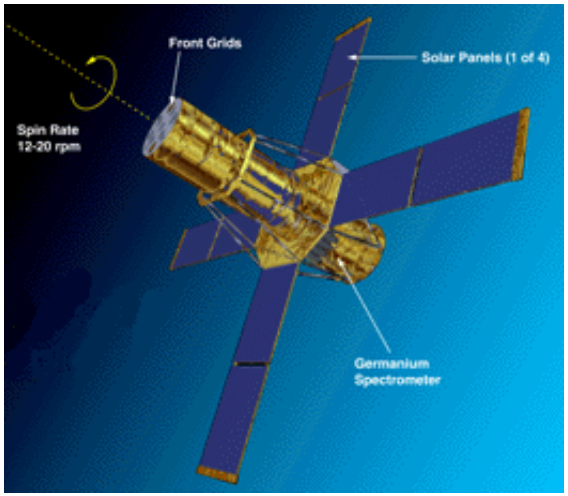


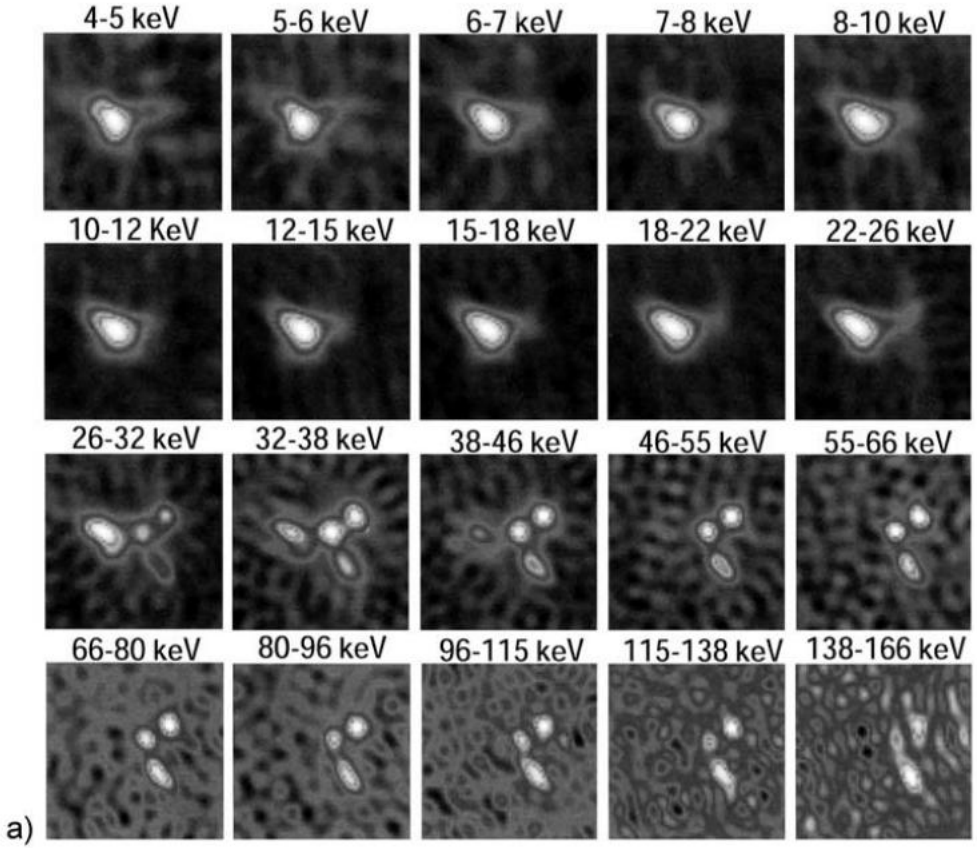
Yohkoh X-ray Image of a Solar Flare, Combined Image in Soft X-rays (left) and Soft X-rays with Hard X-ray Contours (right). Jan 13, 1992.

Гиросинхротронное излучение



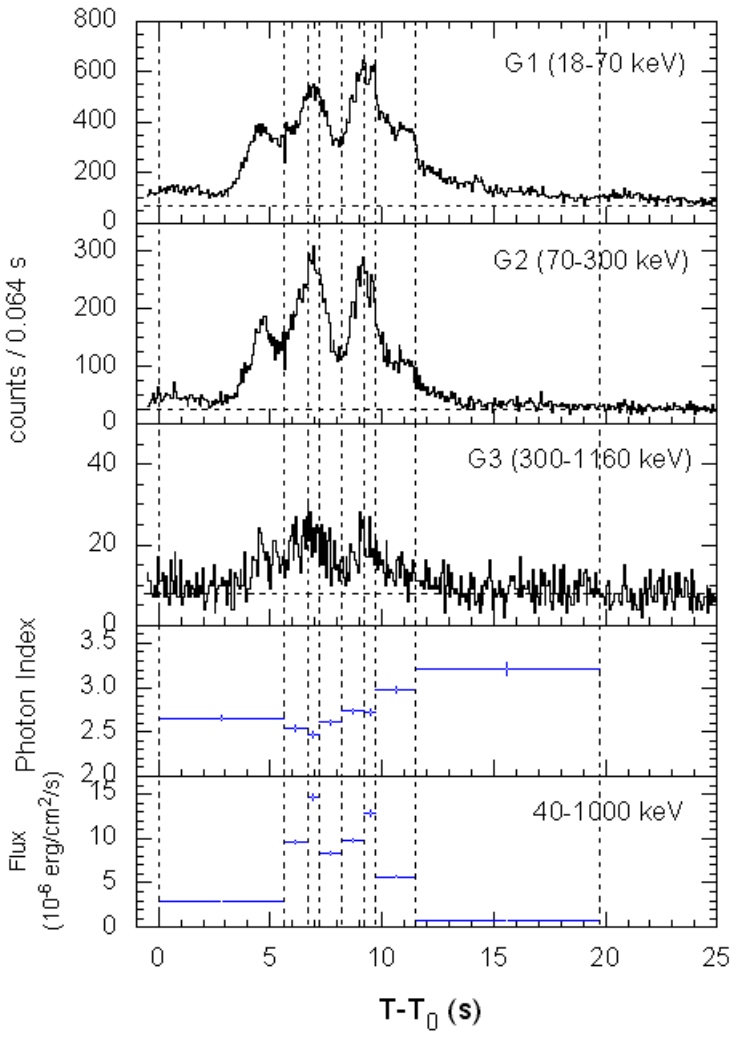
Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI): 2002-



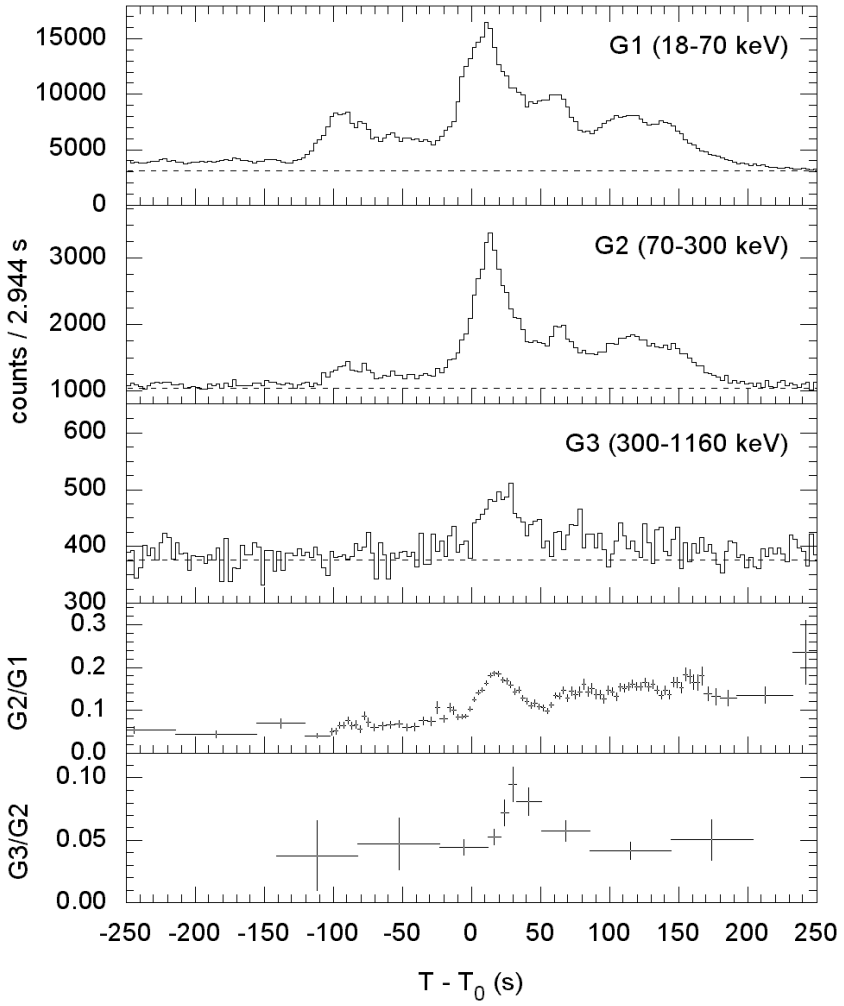


- Ge детекторы
- Диапазон 3 кэВ – 17 МэВ
- Спектральное разрешение кэВ
- Угловое разрешение ~2”
- S_{eff} ~100 см^2
- Imaging spectroscopy

Солнечные вспышки в данных Конус-Винд



SOL2002-03-10T01:34 C5.1

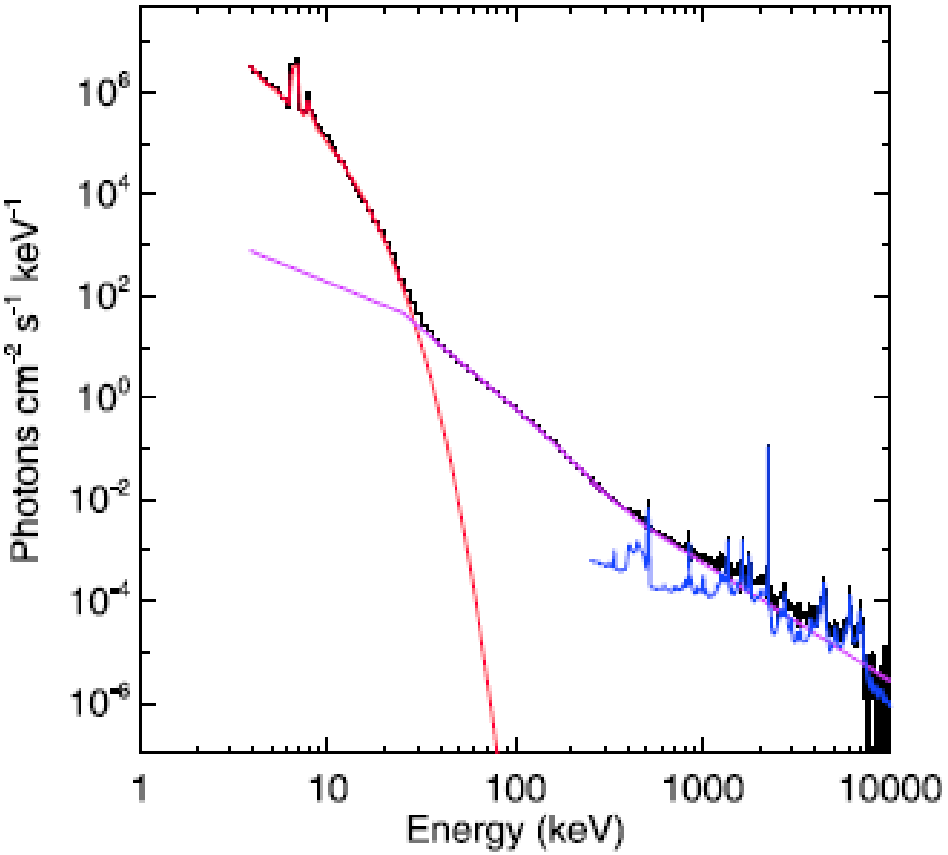


SOL2012-11-08T02:19 M1.7

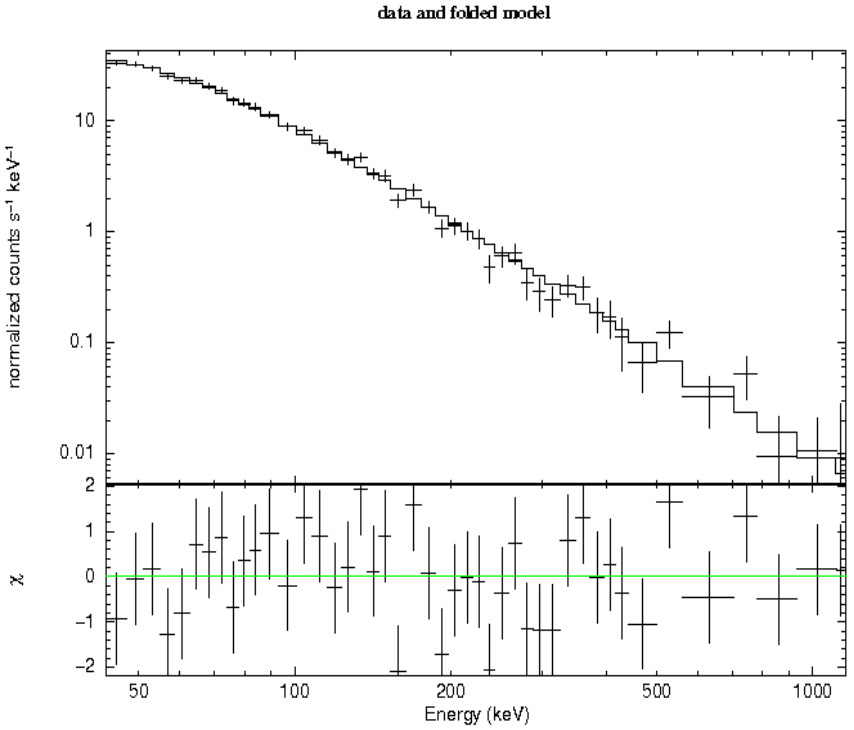
Спектр

Нетепловой спектр – степенной с показателем от 1.7 до 4.5 (средний 2.9)

Тепловой T ~20-40 МК (до 100 МК)



Степенная модель в области >40 кэВ:
$dN/dE \propto E^{-\gamma}$



SOL2002-03-10T01:34
$\gamma = 2.65 \pm 0.03$ ($\chi^2 = 46/55$ dof)