

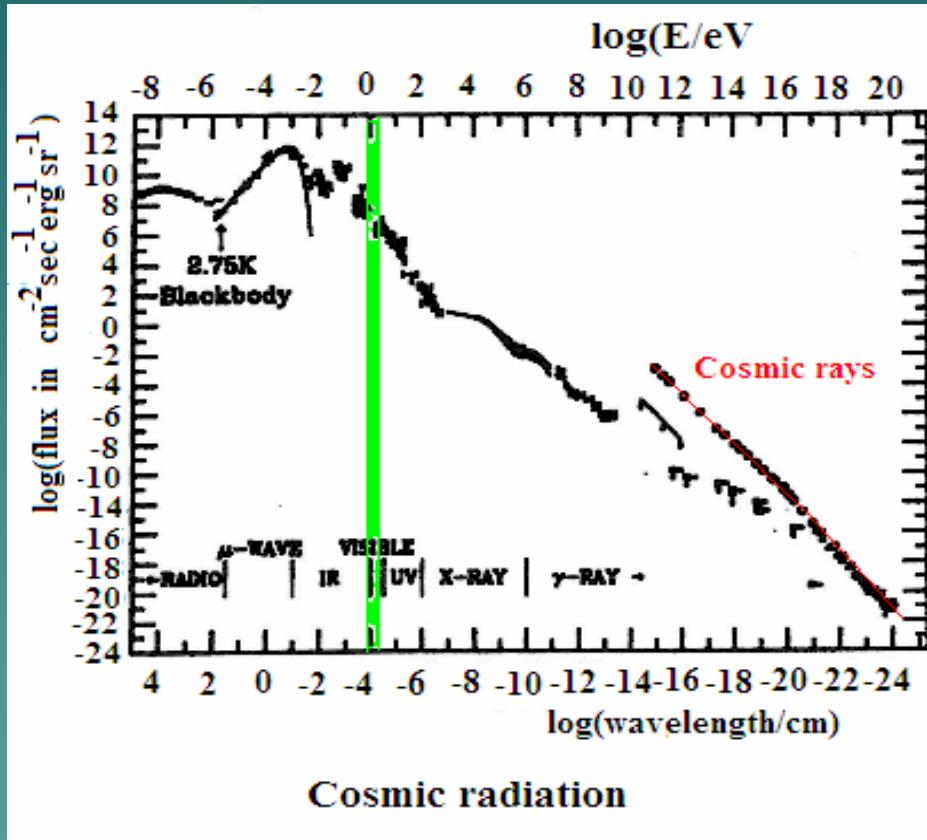
Космические лучи ультравысоких энергий: исследования с помощью наземных установок и детекторов на спутнике Земли

25 октября 2005

Б.А. Хренов на семинаре Б.С. Ишханова



Вселенная заполнена Э.-м. излучением и быстрыми частицами- космическими лучами



Enormous scale of wavelengths.

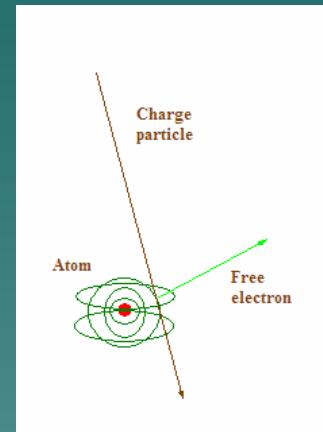
Instrumentation for detection of radiation is changing with the wave length.
At short wavelength (x-ray) dual origin of particles/fields was discovered.

Atomic size- 10^{-8} cm.
Nuclear size- 10^{-13} cm.

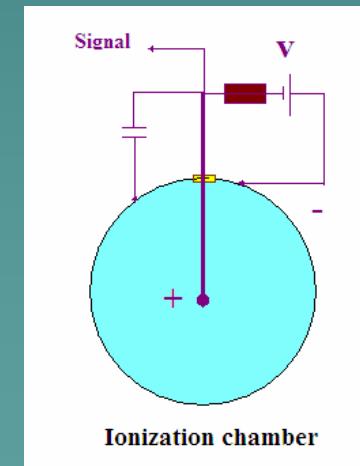
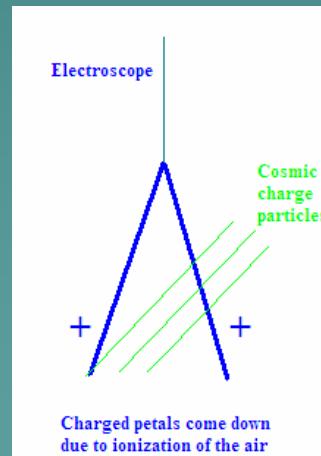
Name “Cosmic rays” is defined for particles having considerable mass.
Sometimes we call high energy gamma-quanta and neutrino also “cosmic rays”.

Ключевые слова для изучения космических лучей- эксперимент и детектор.

Charge particles going through matter produces **ionization**, i.e. making the atom's electrons free. Free electrons in the electric field produce a current which is registered by conventional electric methods.



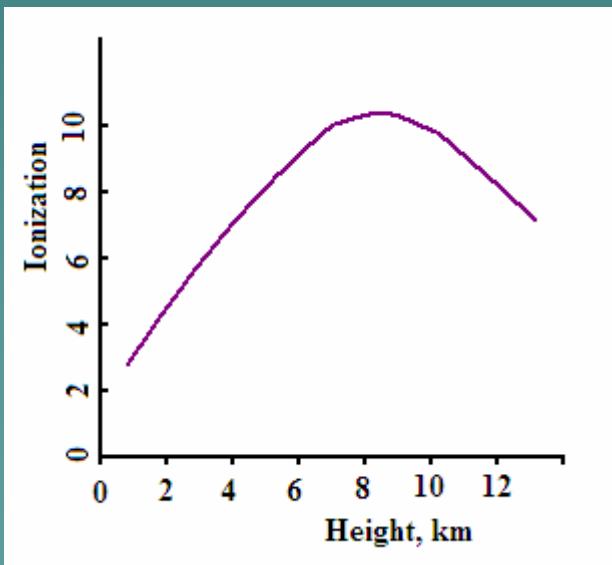
When the cosmic rays were discovered (beginning of 20-th century) 2 very simple methods were used:



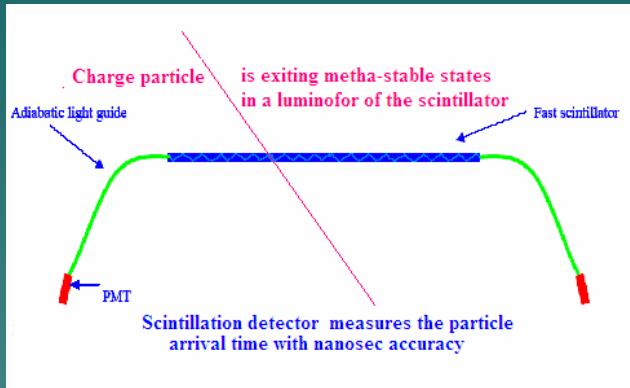


Victor Hess (Austria)
before balloon launching
to discover the cosmic rays
in 1912.

After many discussions and
other experiments V. Hess
results were confirmed and
he got the Nobel prize for
discovery of cosmic rays
in 1936.

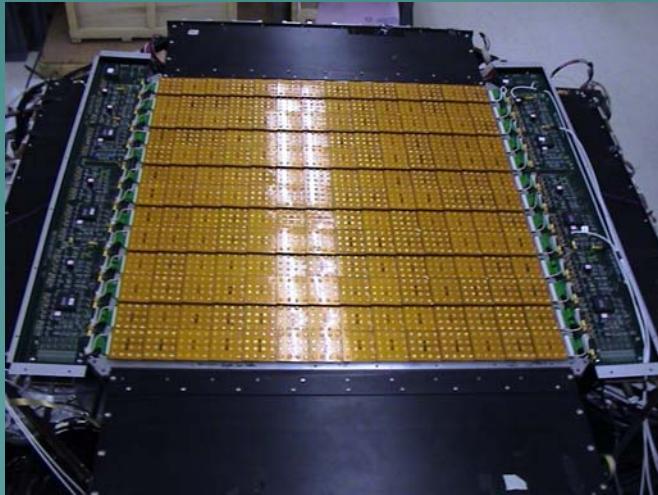


Сегодня – через 100 лет после открытия космических лучей детекторы стали неизмеримо сложнее, обеспечивая высокую точность измерения энергии, направления прихода и заряда космических частиц.



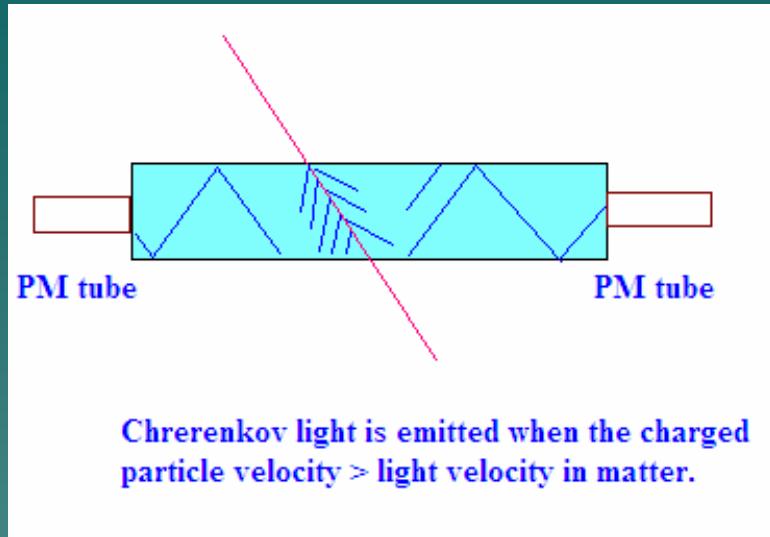
1. Сцинтиляционный детектор.

Timing with nanosec accuracy.
Measurement of ionization.
Particle position measurements.
Excellent for fast triggering.



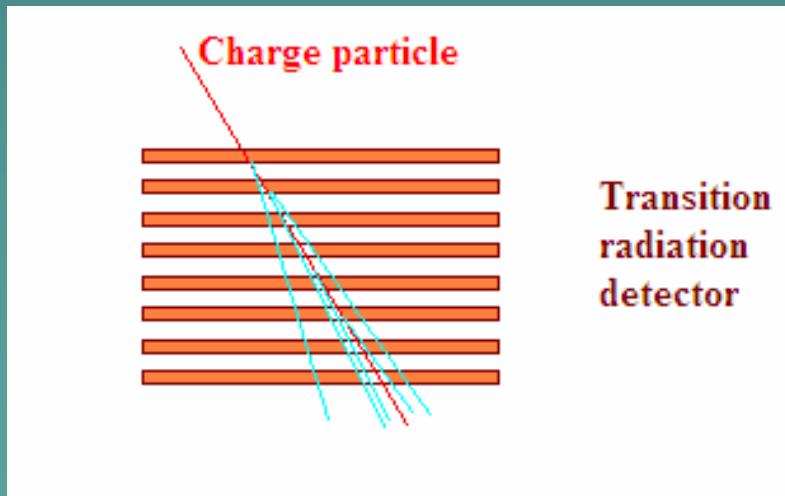
2. Кремниевый детектор.

Excellent particle position measurements.
Ionization measurements.



3. Черенковский детектор.

Having an energy threshold, could be used as a trigger device, separating the fast particles.
Charge and time measurements.

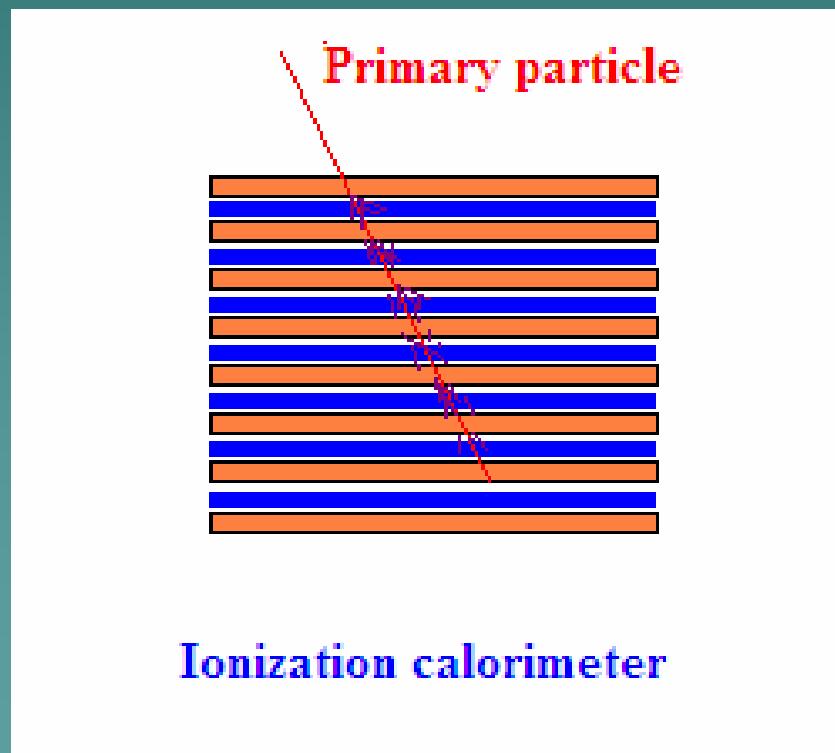


4. Детектор переходного излучения.

At every transition from dense medium to air the radiation in X-ray range is emitted.
Good energy measurements at $E < 10^{14}$ eV.

5. Ионизационный калориметр.

At high energies the primary particle produce a shower of secondary particles. The calorimeter measures an ionization, produced by the secondary particles. It is the only energy estimator of primaries of energy more than 10^{14} eV.

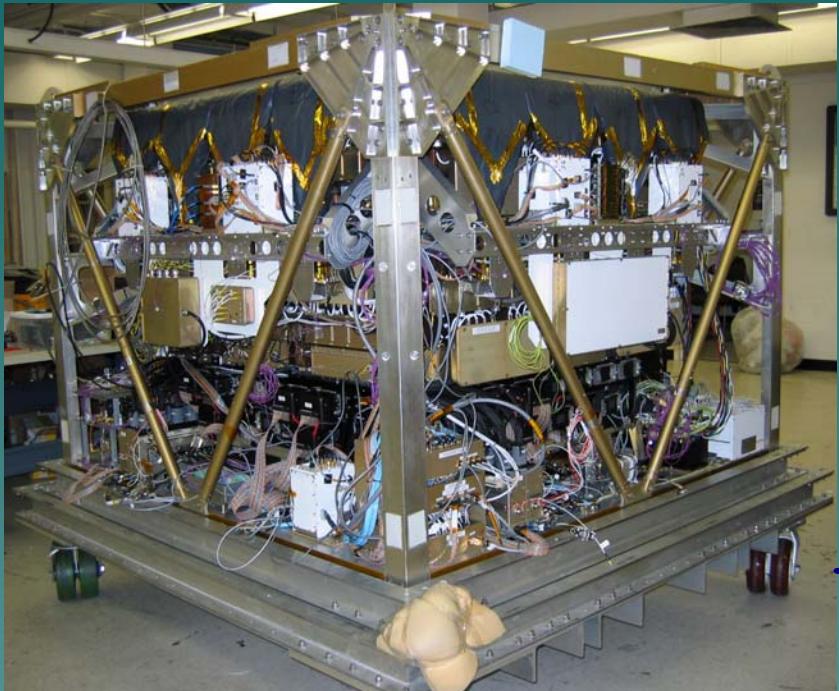


Н.Л. Григоров,
1967

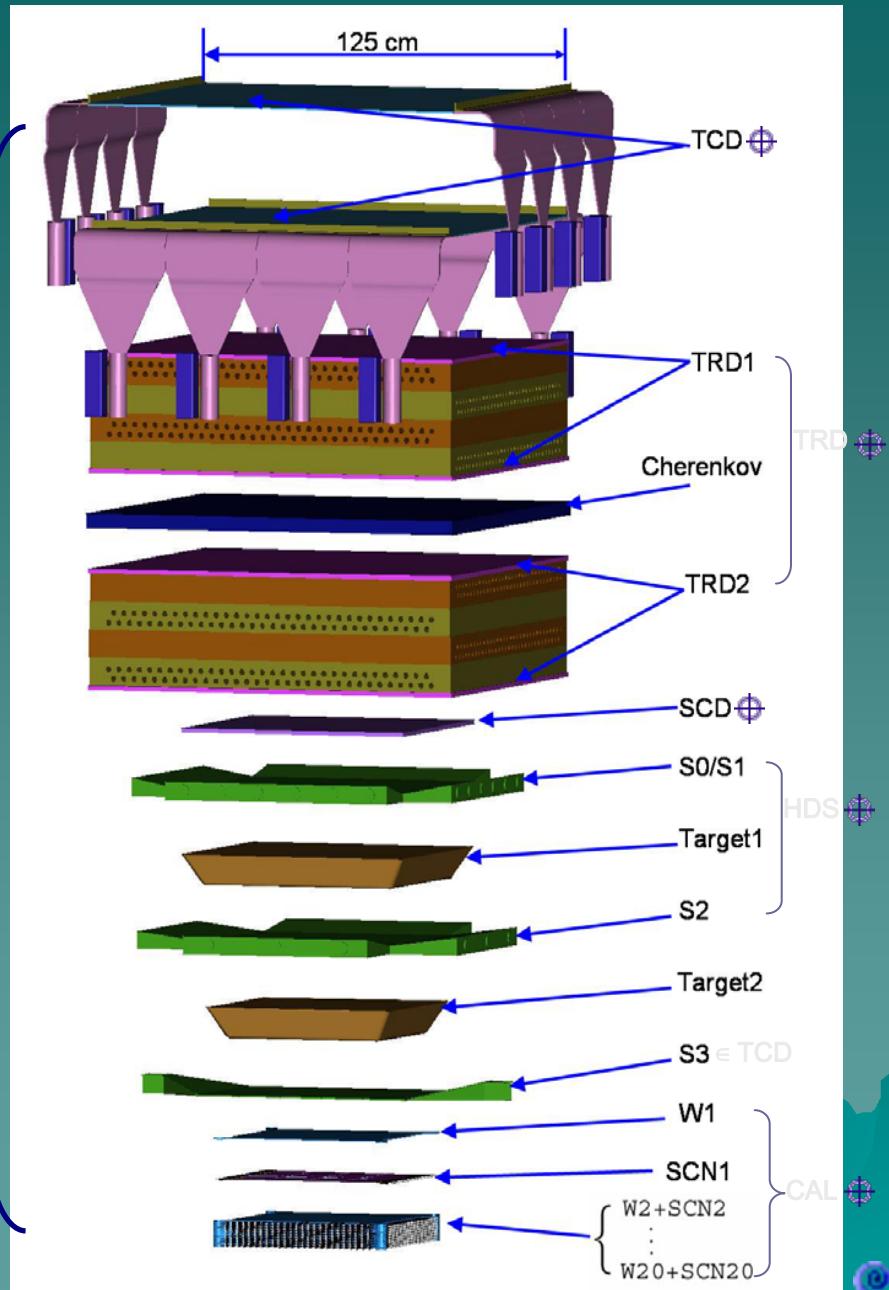


In 1967 at the Calgary ICRC Prof. Grigorov presented the first satellite results on the Cosmic Ray energy spectrum, measured by the space calorimeter. All particle spectrum was measured up to the energy of 10^{15} eV. It is still the highest energy ever measured “directly” in space.

Пример современного детектора: CREAM



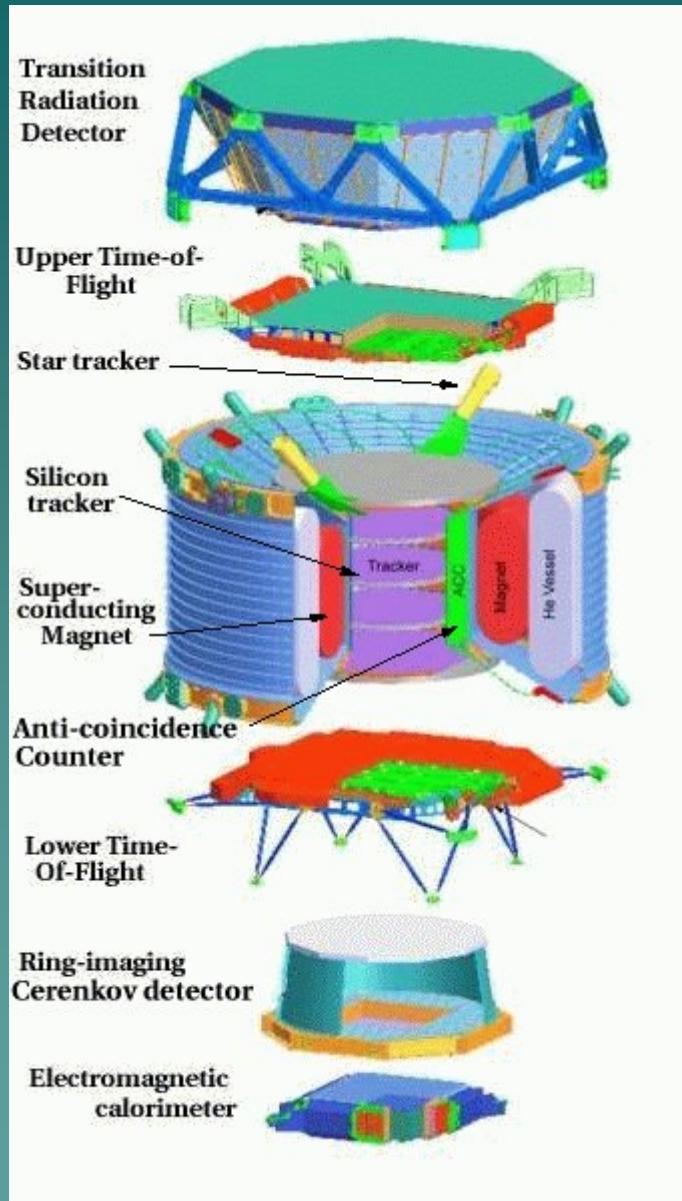
TCD-timing charge detector
(scintillation detector)
TRD-transition radiation detector
measures the primary energy
SCD-silicon charge detector.
At the detector bottom the
calorimeter measures the energy
of the most energetic particles.



Запуск детектора для изучения первичных космических лучей



Самый сложный детектор подготовлен для запуска на МКС: AMS.



Результаты многочисленных экспериментов при энергиях менее 10^{14} эВ позволяют построить достаточно достоверную теорию происхождения КЛ.

Частицы КЛ ускорены в оболочках СН, взрывающихся в Галактике.

Энергетический спектр и ядерный состав КЛ, измеряемый на Земле, отличается от первоначального, так как частицы по пути к Земле проходят через ~ 5 г/см² газа в Галактике.

Энергия в КЛ сравнима с энергией в магнитных полях и газе-поэтому КЛ активно участвуют в кинематике вещества и излучения в Галактике.

Механизм ускорения- многочисленные столкновения заряженных частиц с намагниченными сгустками плазмы, движущимися со значительной скоростью на фронте ударной волны СН.



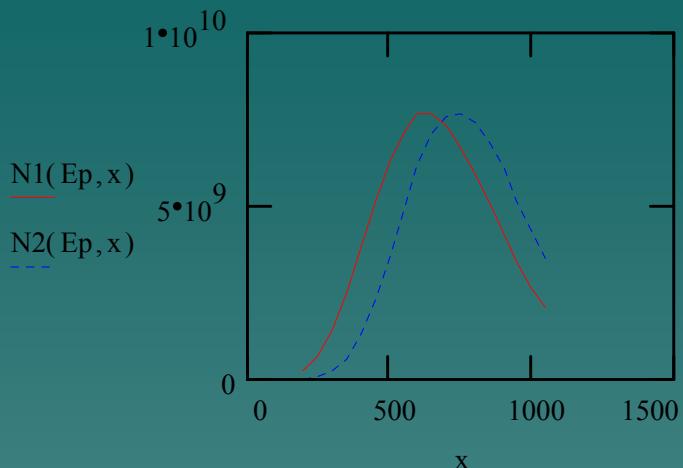
Наблюдение СН 1987 в соседней галактике-
Магеллановом облаке- подтверждает эту теорию

Но при энергиях больше, чем 10^{15} эВ “прямое” наблюдение КЛ (с помощью тех детекторов, которые были показаны выше) становится невозможным из-за слишком малого потока частиц- менее 1 события в год на м^2 .

Другой, «косвенный» метод был открыт и применяется для изучения частиц сверхвысоких энергий (более 10^{15} эВ)- метод наблюдения широких атмосферных ливней (ШАЛ).

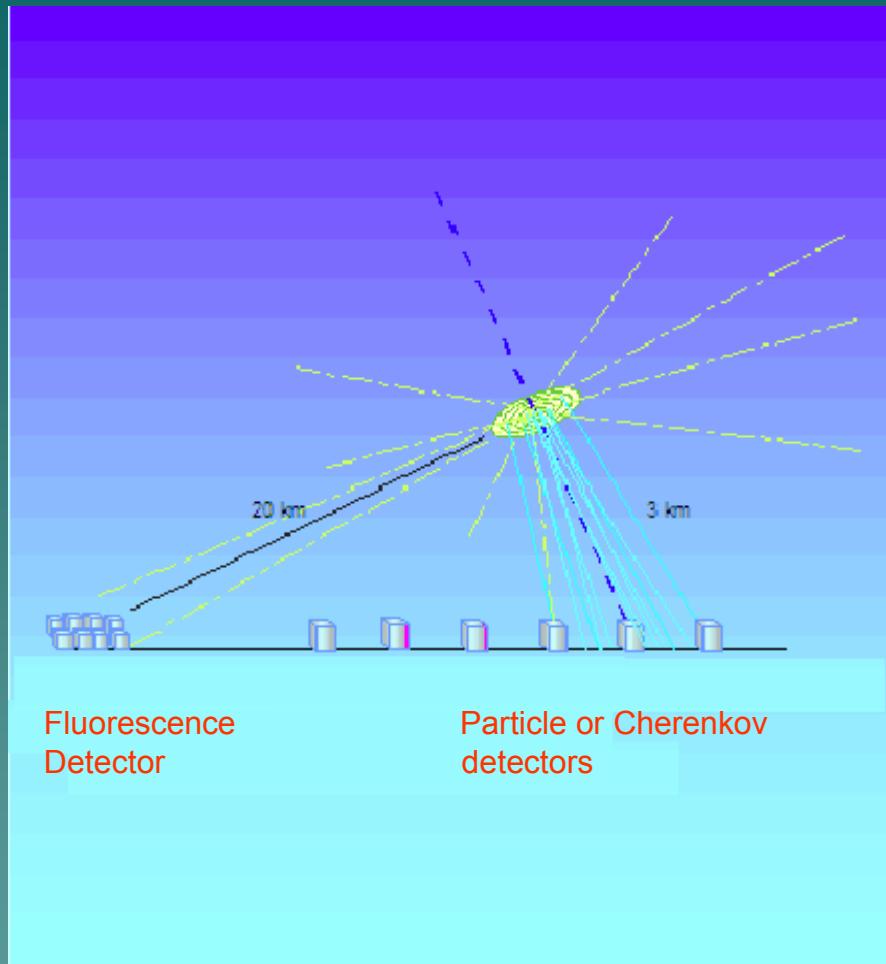
Этот метод позволил изучить КЛ с энергией вплоть до 10^{20} эВ.

Как измеряются ШАЛ



EAS cascades for primary energy 10^{18} eV.
Red curve- primary iron nuclei.
Dotted blue- primary proton.

Extensive Air Showers (EAS) give information on Cosmic Rays starting from energies 10^{14} - 10^{15} eV. Pierre Auger discovered EAS in 1938 measuring the coincidence of detector Separated by hundreds of meters/



The isotropic fluorescence radiation could be measured from space- from the satellites. The innovative technology of space fluorescence detectors is in progress.

The first data on ultra high energy cosmic rays ($>10^{18}$ eV) were obtained in measurements of coincidences of signals in detectors, separated by large distances – up to 1 km. In Soviet Union it was done at the “Pamir” station in late 40-s.



Г.Т. Зацепин (ныне
академик РАН)
проводит кабельную
линию связи между
детекторам с
расстоянием между
ними 1 км (1949 год).

Рассмотрим работу установки ШАЛ на примере

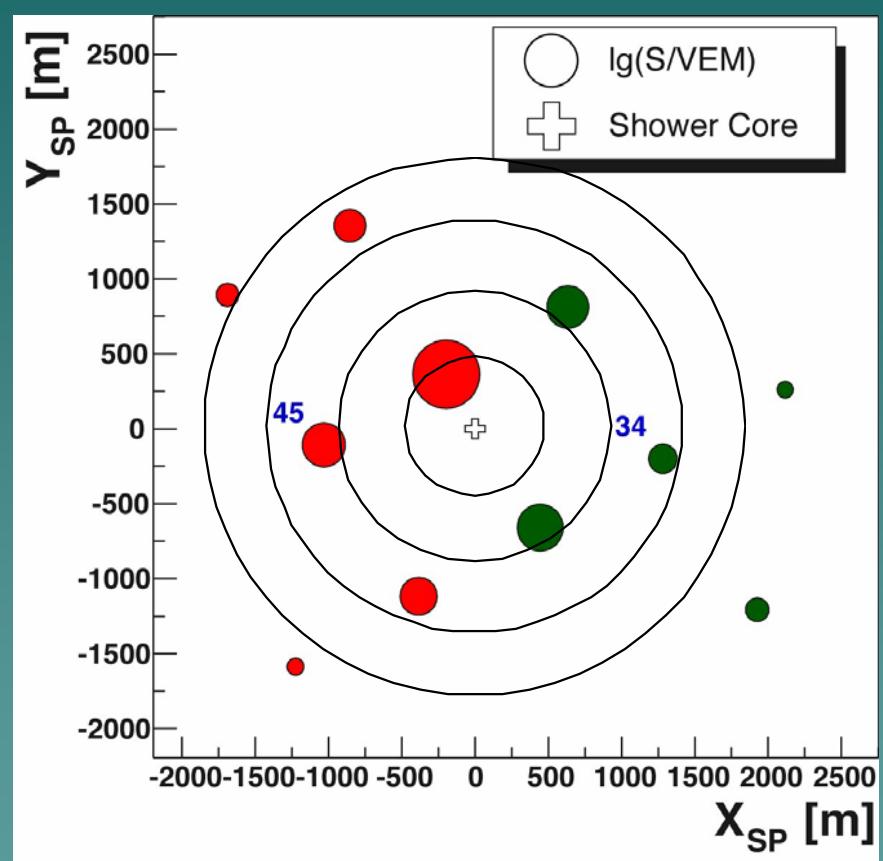
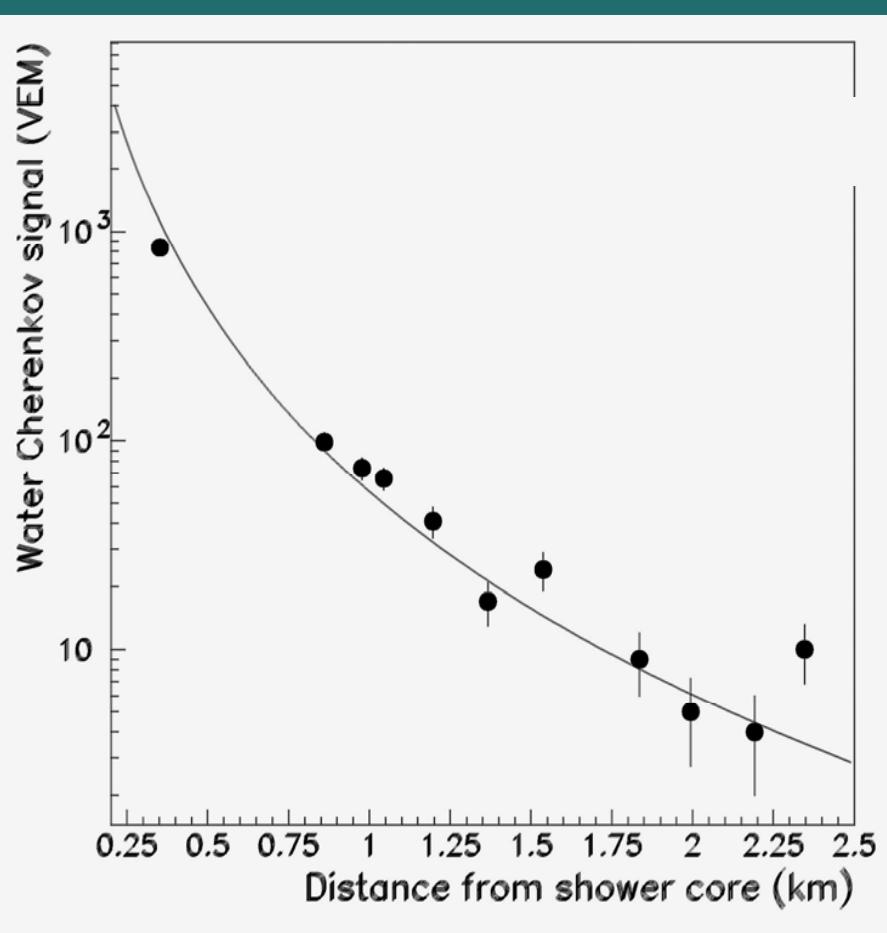
Akeno Giant Air Shower Array
AGASA

*The particle detector
EAS array,
collected the record
exposure of about
3000 km² sr year .*



111 scintillators + 27 muon det.

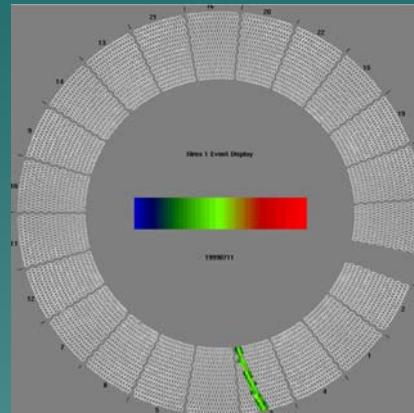
Example of the measurements by array of the particle detectors



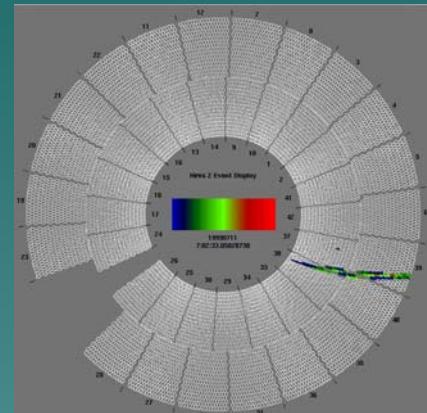
Другой пример: работа установки по измерению флуоресценции атмосферы.

The *High Resolution Fly's Eye* (HiRes)

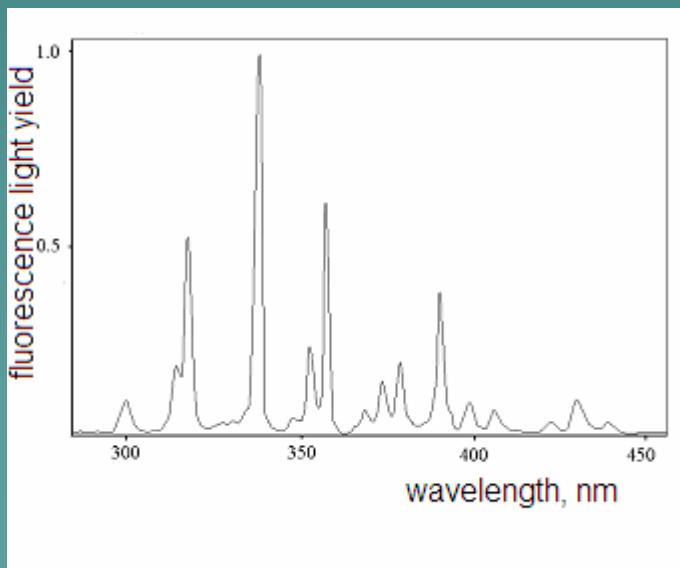
The fluorescence detector array, collected the record exposure, close to the AGASA exposure ($3000 \text{ km}^2 \text{ sr year}$), for the highest energy events ($E > 10^{20} \text{ eV}$).



HiRes 1



HiRes 2

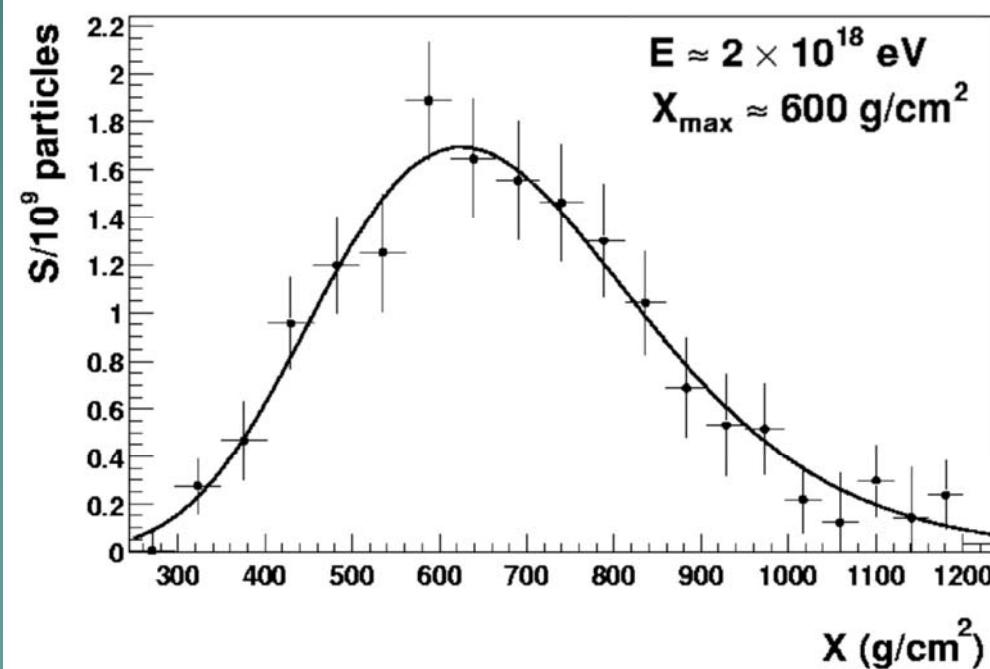
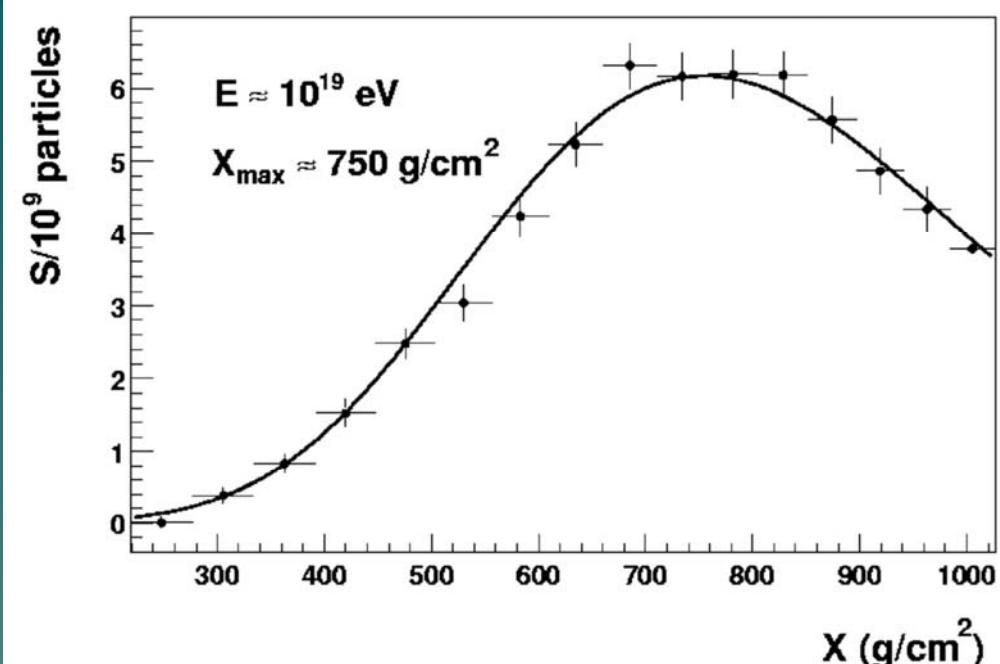


Examples of EAS registration by the fluorescence detector.

Note that results are presented for units of g/cm^2 but measurements are done in meters.

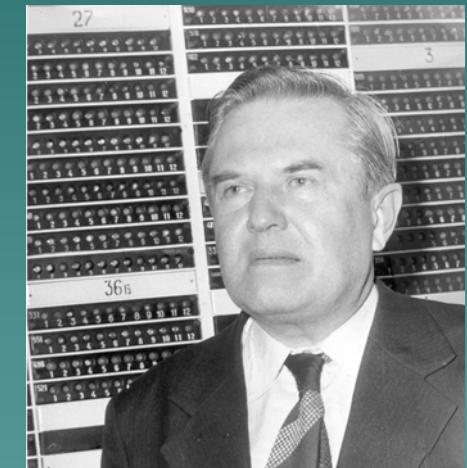
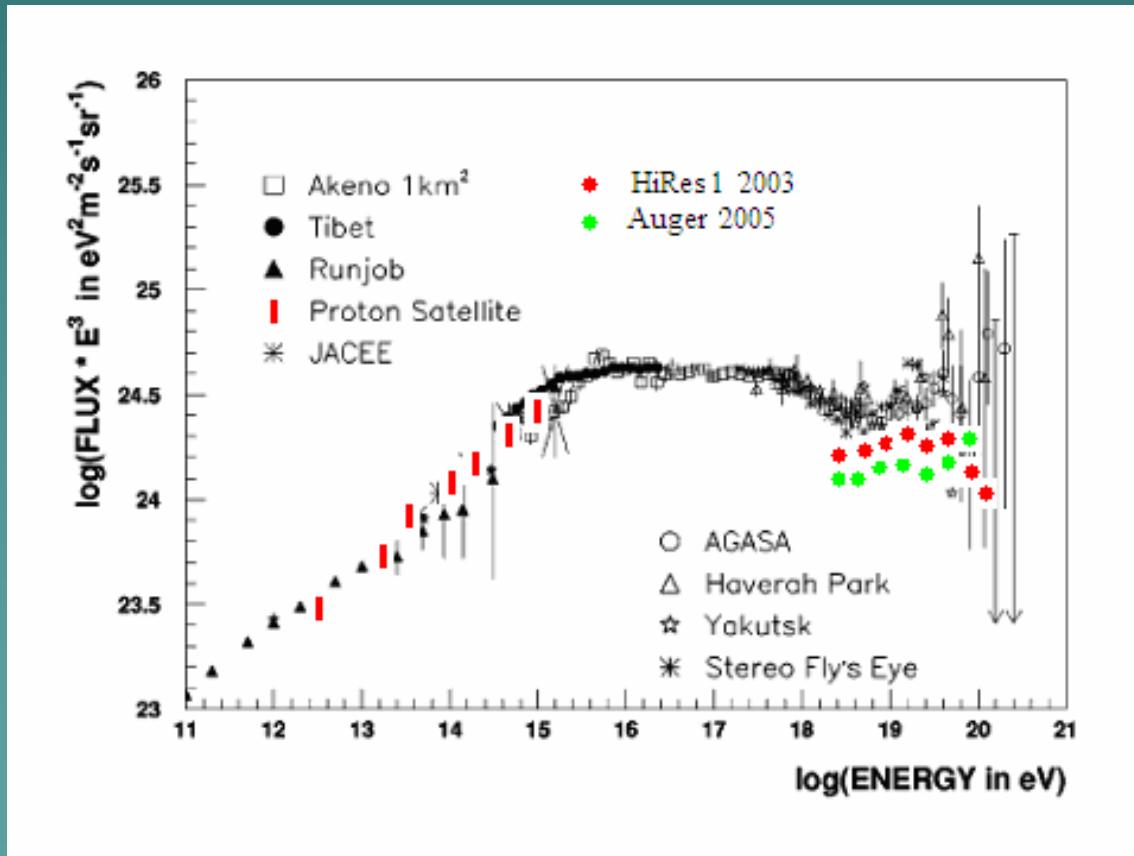
The atmosphere density (the height in atmosphere) for every point has to be known.

The distance to the EAS track and signal absorption at this distance have to be measured.



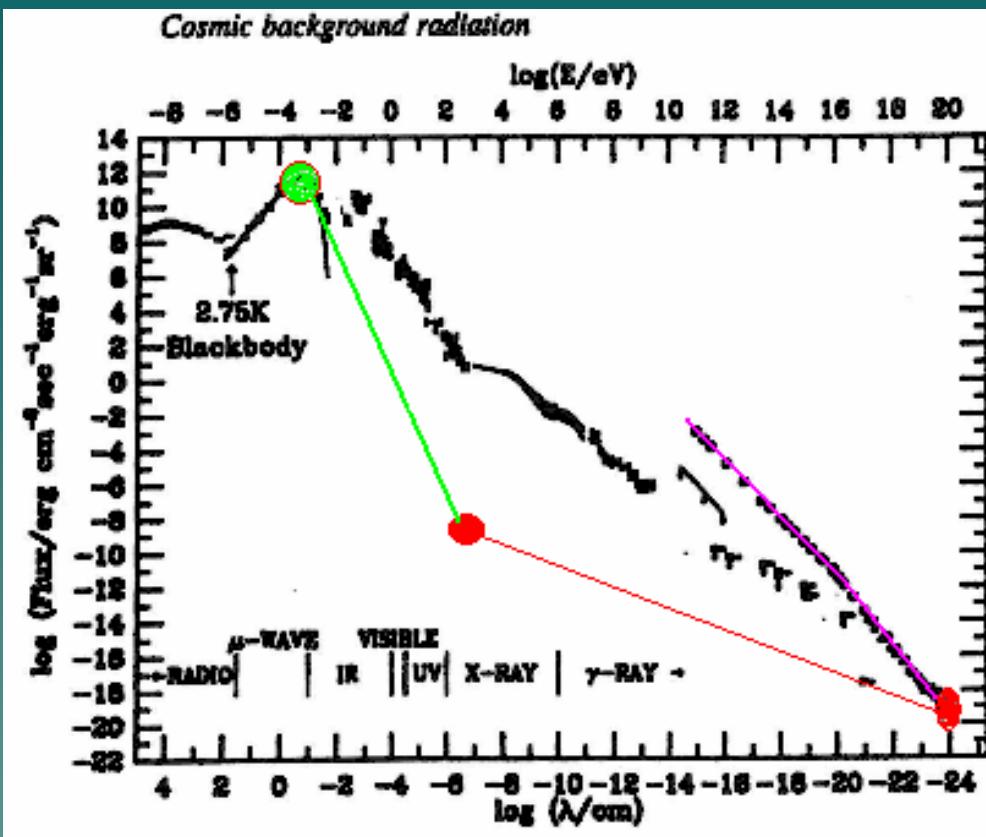
Основные результаты исследования ШАЛ

1. Открытие излома энергетического спектра КЛ при энергии 3×10^{15} эВ (Г.Б. Христиансен, установка МГУ, НИИЯФ).
2. Второй излом при энергии $3-10 \times 10^{18}$ эВ (установка в Якутске, Haverah Park, AGASA, Fly's Eye).
3. Проблема №1-Внегалактическое происхождение КЛ ультравысоких энергий ($> 10^{18}$ эВ).
4. Проблема №2- Обрыв спектра при энергии 5×10^{19} эВ.



Г.Б. Христиансен

Энергетический предел Зацепина-Кузмина-Грейзена



Г.Т. Зацепин, 1967 г.

$$P + \gamma = P + \text{hadrons} \quad E_\gamma = 2E_{\text{ph}} E_p / M_p c^2$$

$$E_{\text{ph}} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ eV} \quad (T = 2.75 \text{ K})$$

In proton rest frame photon energy $E_\gamma > 100$

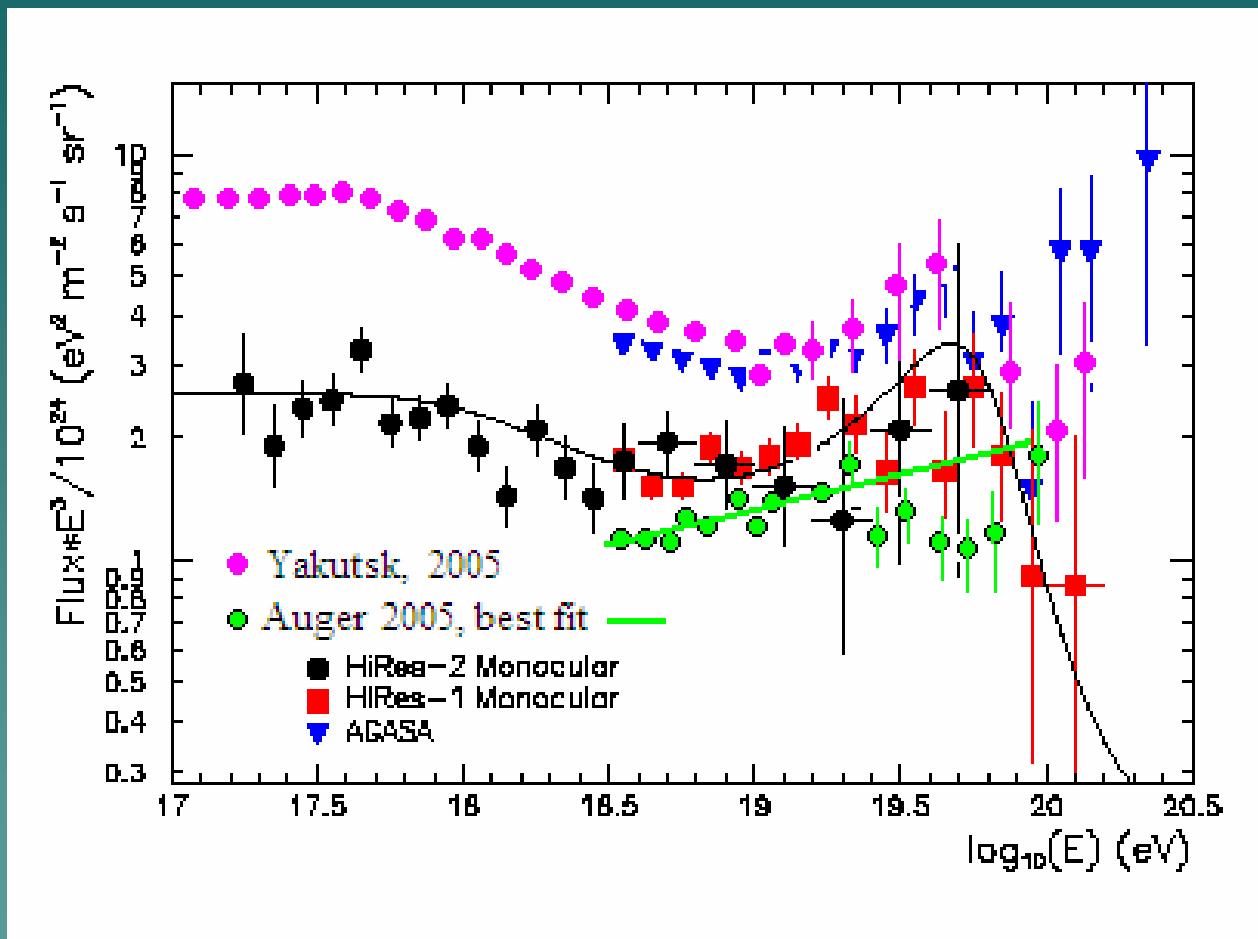
MeV for $E_p > 10^{20}$ eV. $\rho_{\text{ph}} = 500 \text{ cm}^{-3}$

Cross-section of interaction is $\sigma = 10^{-28} \text{ cm}^2$

Interaction free path $L = 1/\sigma \rho_{\text{ph}} = 70 \text{ Mpc}$

Greisen-Zatsepin-Kuzmin made the first estimates of the effect and find the energy limit for protons $E_{GZK} = 5 \times 10^{19} \text{ eV}$.

Современные данные об энергетическом спектре КЛ в области ультравысоких энергий.

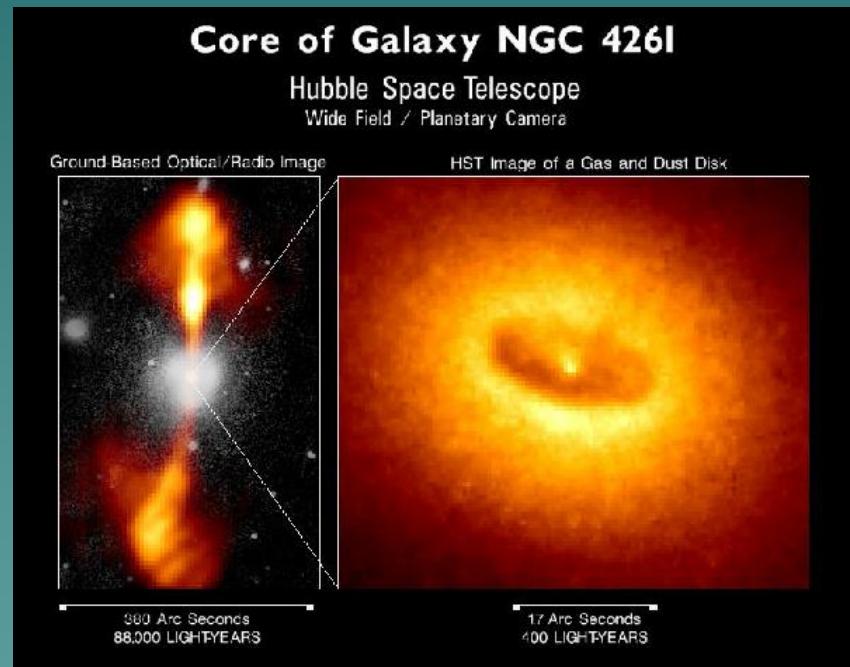
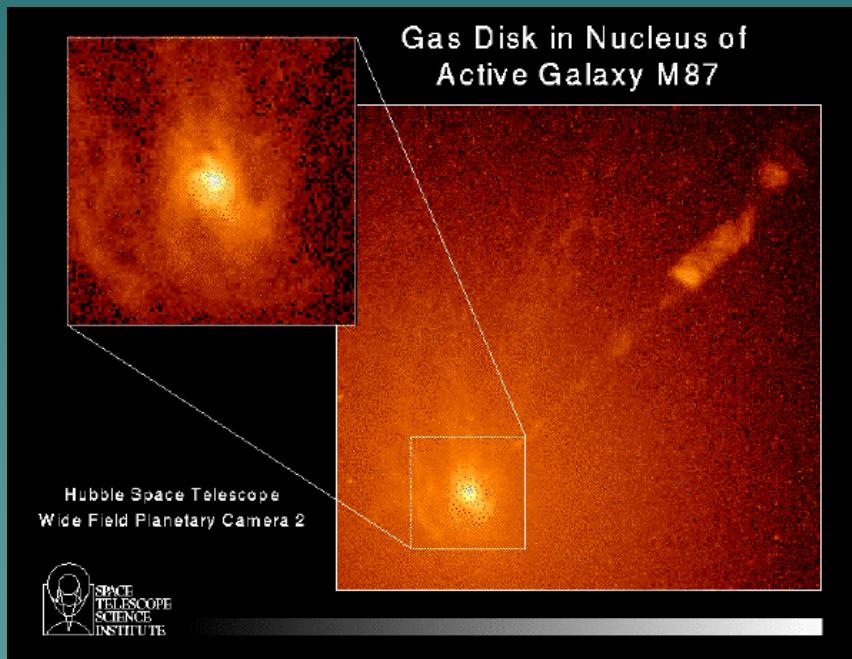


Energy calibration is the main reason of difference in spectra from different experiments. As in case of lower energies the calorimetric data from the atmosphere fluorescence light measurements are decisive.

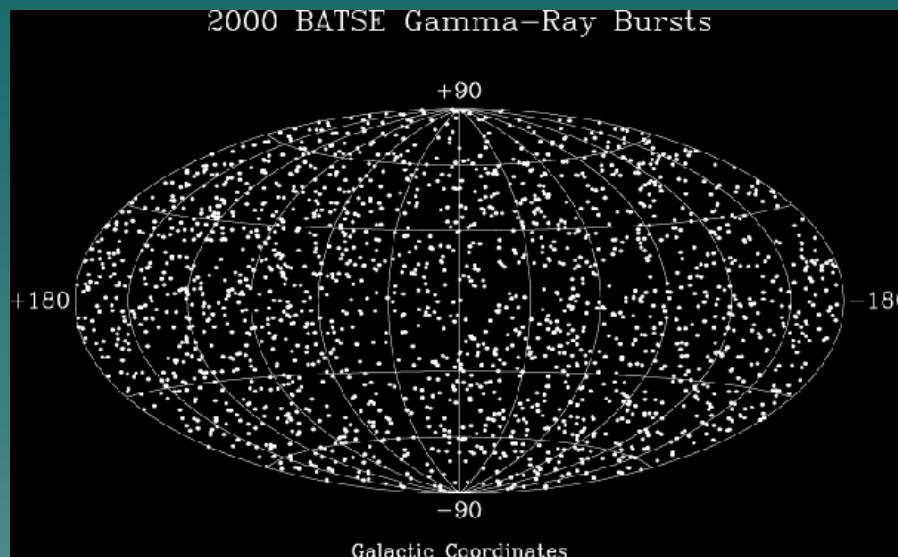
Reasons for systematic errors in particle detector array is a problem

Какие объекты ускоряют частицы до ультравысоких энергий?

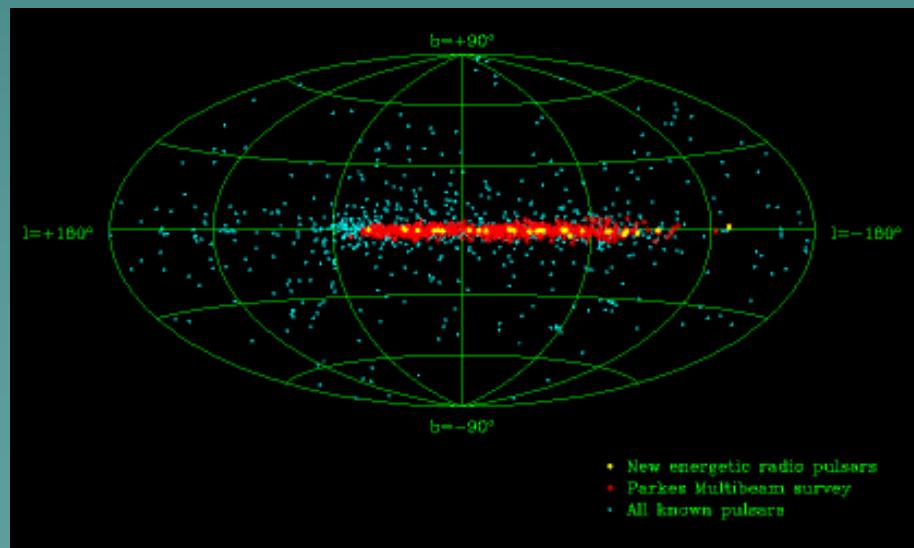
Possible sources: astrophysical accelerators, the objects with the relativistic shocks.
Distance to these sources should be less than 100 Mpc. Local group of galaxies.



Как обнаружить источники частиц? Ответ: наблюдая распределение их направления прихода. Частицы УВЭ слабо отклоняются в магнитных полях

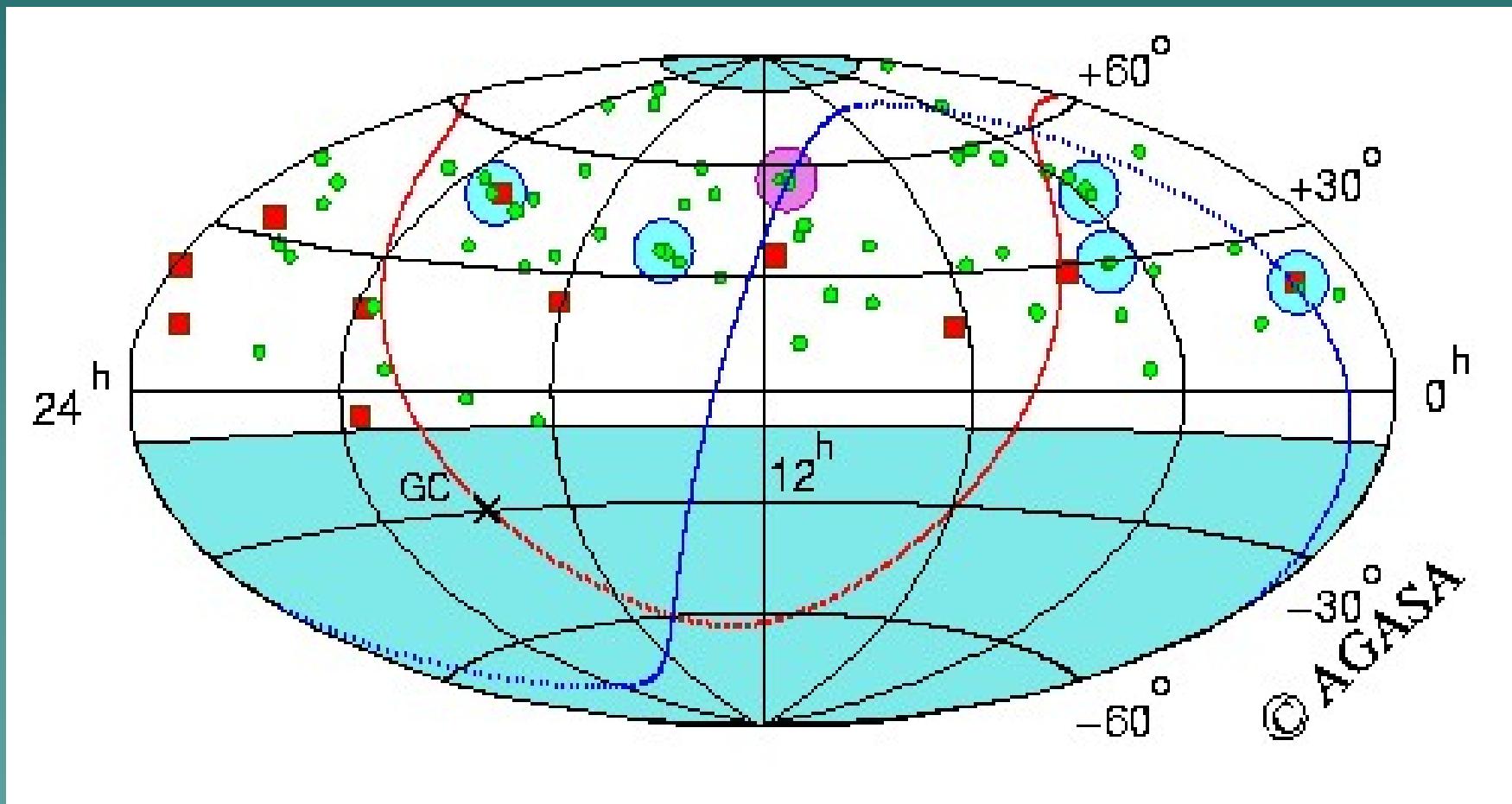


Gamma Bursts
distribution in
Galactic coordinates.
No correlation with
the Galactic plane.



Pulsars distribution
in Galactic coordinates.
Good correlation with
the Galactic plane.

Пример поиска корреляции направления прихода частиц КЛ УВЭ с плоскостью Галактики или с плоскостью местного скопления галактик. Данные установки AGASA.



Самое интересное- могут быть и альтернативные источники частиц УВЭ.

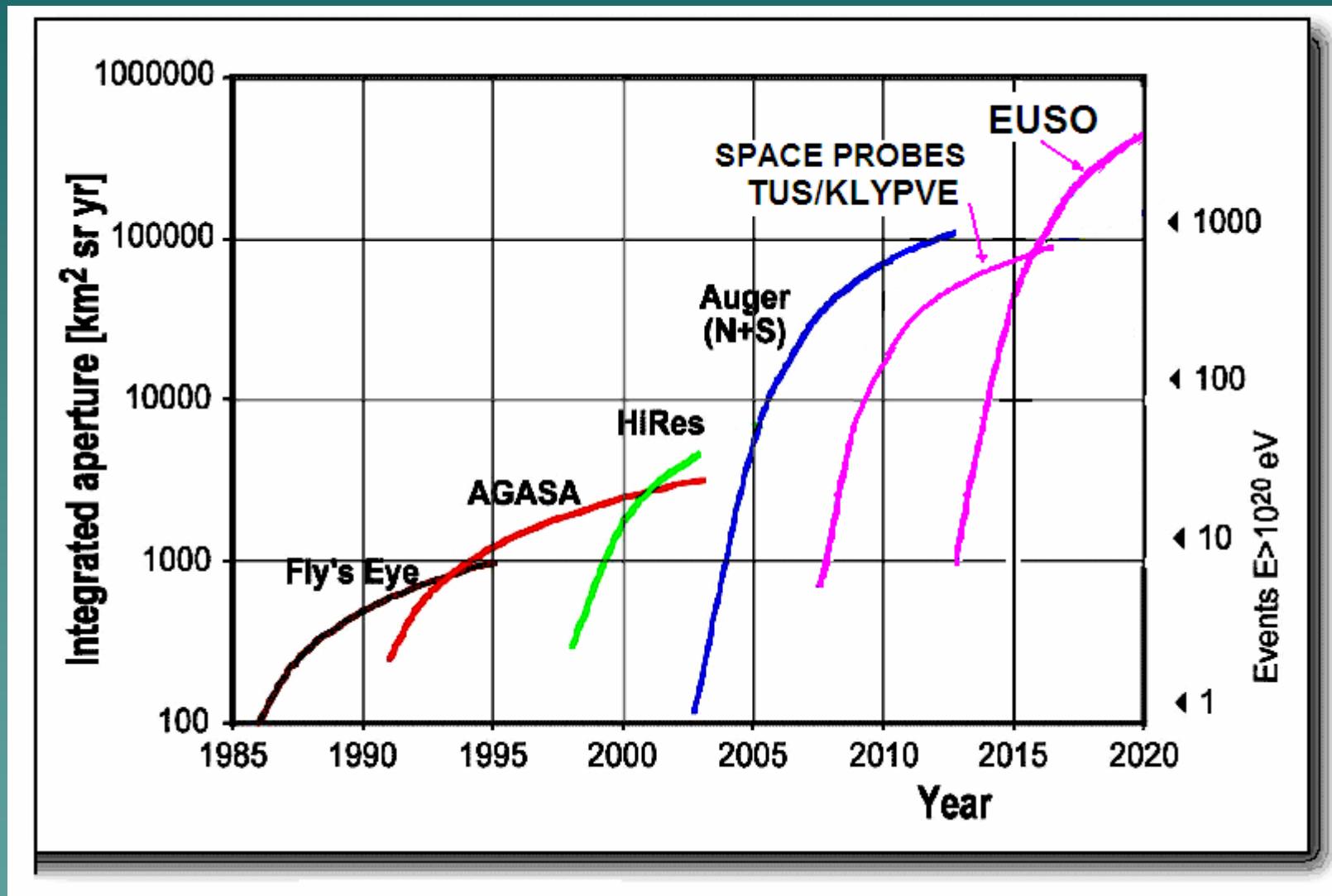
They are the massive particles ($M \sim 10^{24}$ eV) – relics of the Big Bang.

They might be responsible for the Dark Matter. The EECR protons (or gamma quanta) are products of their decay.

Topological defects are the other theoretical source of the massive particles decaying to EECR particles.

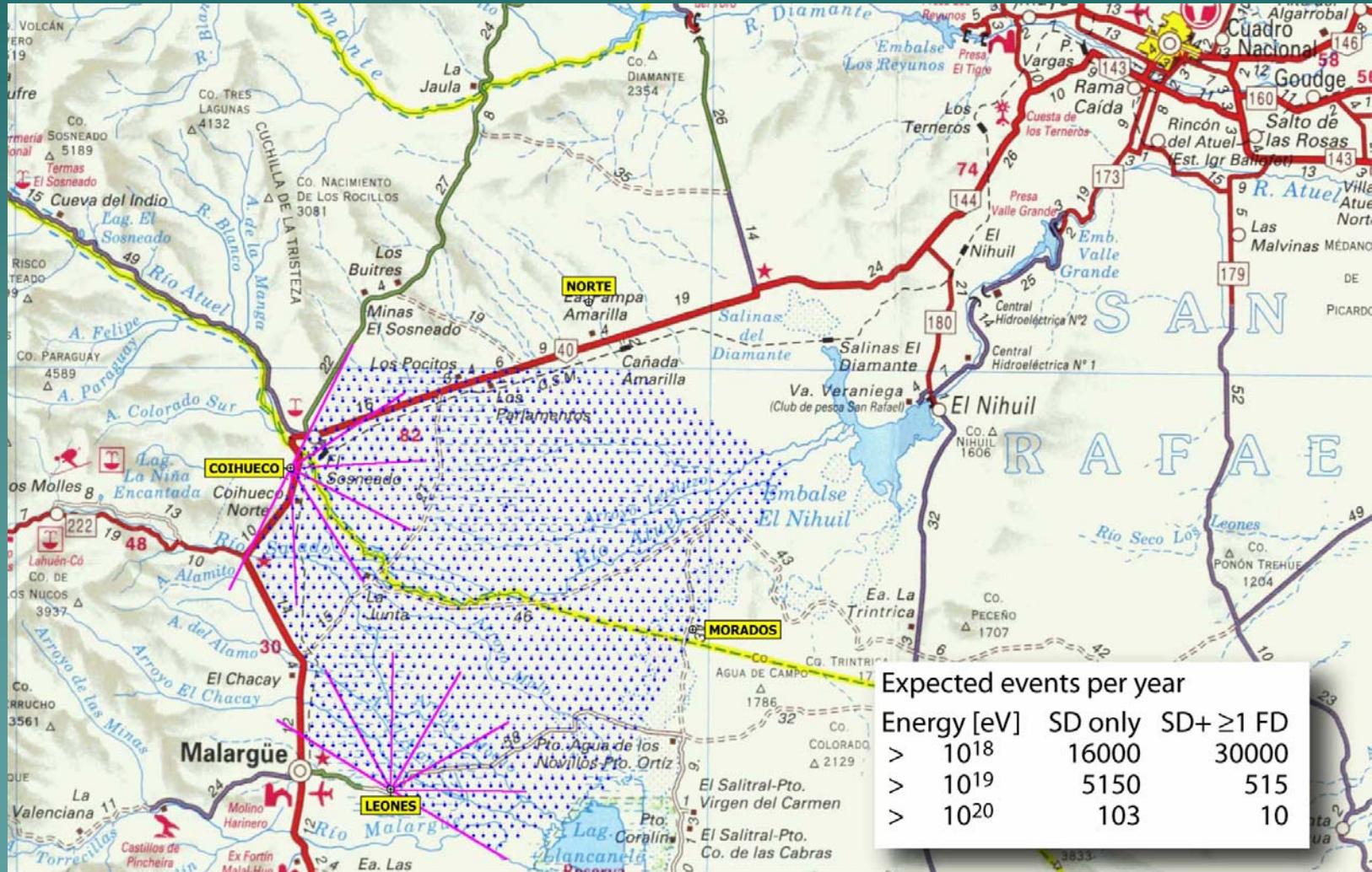
The experimental separation of photons from protons in EECR is the key point in a search for massive particles, producing mainly photons as final decay products. AGASA data on the muon to electron ratio in EAS of the highest energies are against photon origin of primaries.

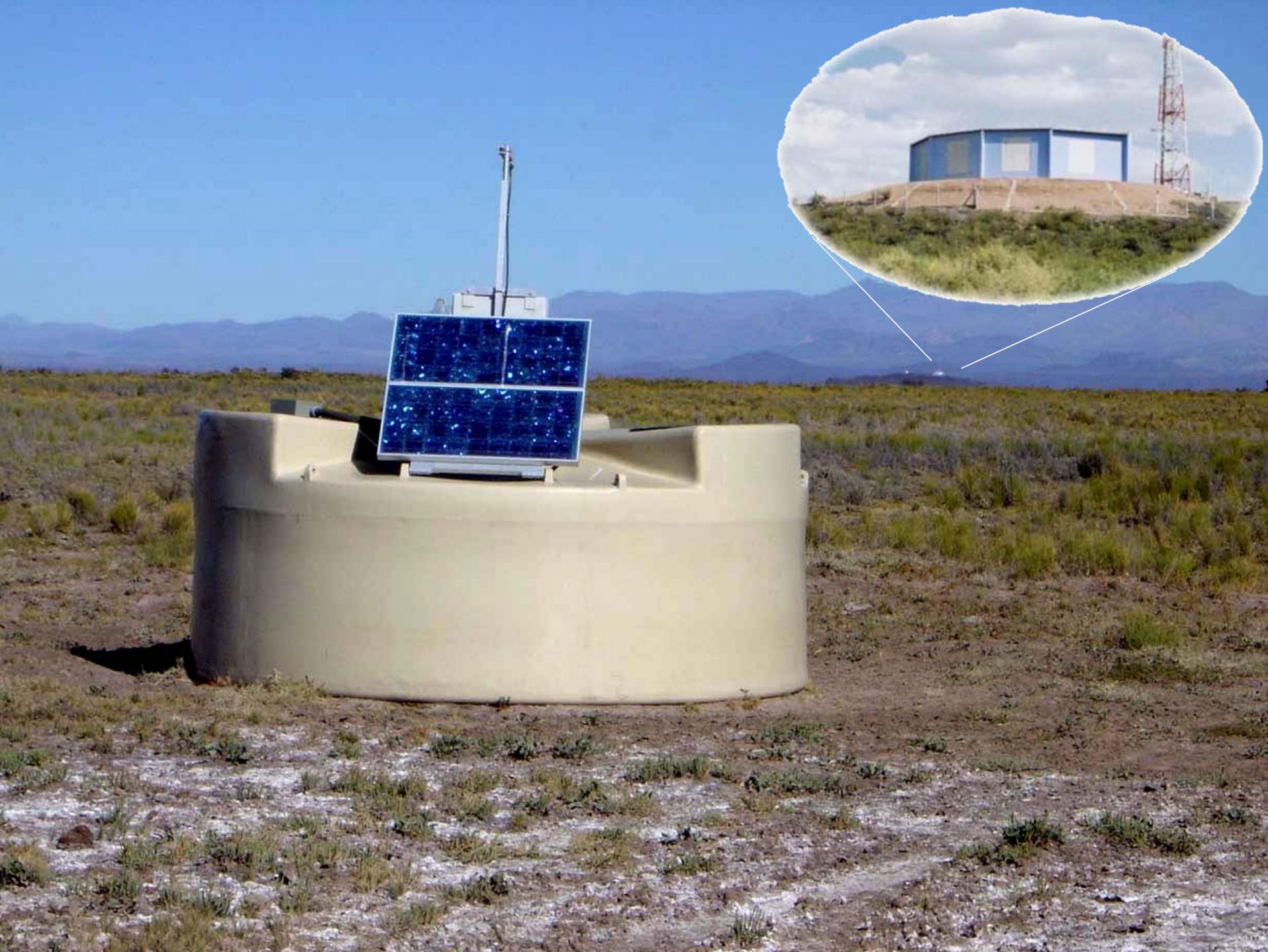
Как будет развиваться эксперимент по КЛ ультравысоких энергий в ближайшие годы



Установка ШАЛ в Аргентине- первая стадия международного эксперимента «Обсерватория Пьер Оже».

1600 water Cherenkov detectors with 1.5 km spacing on 3000 km²
4 stations with 24 fluorescence telescopes





aperture box
shutter
filter UV pass
safety curtain

corrector lens
(aperture x2)

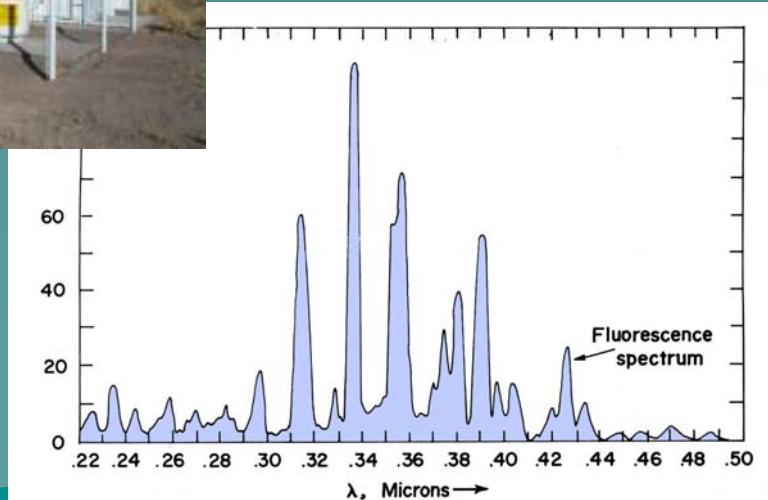
440 PMT camera
1.5° per pixel

segmented
spherical
mirror

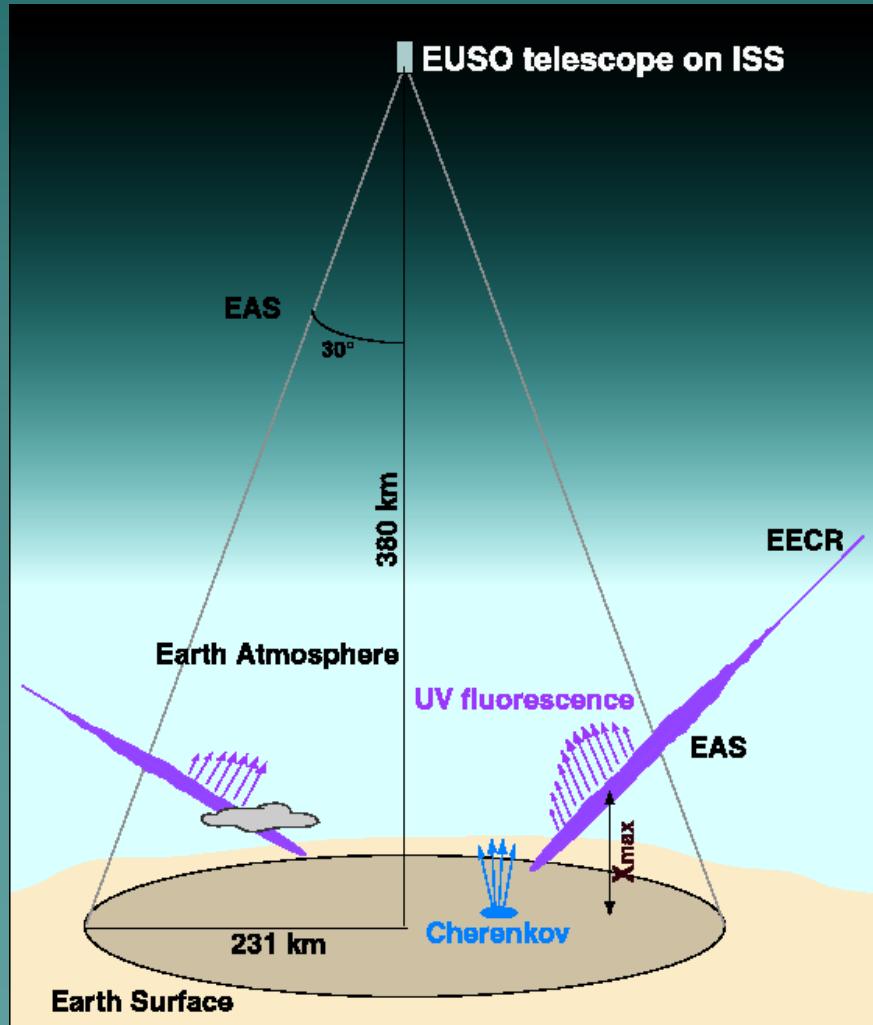
Большое внимание уделяется
мониторингу атмосферы

Calibrated (movable) light
sources, cloud monitors,
lasers, LIDAR,

Balloon sondes



Следующий шаг в эксперименте по КЛ УВЭ – создание космических оптических детекторов. Два направления: «телескоп» и «широкоугольная камера». Принцип действия- наблюдение флуоресцентного и рассеянного черенковского света ШАЛ.



В «телескопе» используется составное зеркало-концентратор большой площади. Преимущества этого направления:

1. Используя большое зеркало-концентратор можно снизить энергетический порог регистрации до 10^{19} эВ и начать измерения новым методом там, где есть данные наземных установок.
2. С порогом 10^{19} эВ можно регистрировать вторичные нейтрино-продукт взаимодействия протонов $E > 5 \cdot 10^{19}$ эВ и искать источники КЛ УВЭ вне предела GZK.
3. Технология большого зеркала-концентратора необходима для развития работ по использованию солнечной энергии.

Наш проект: телескоп (два телескопа) на борту спутника РЕСУРС О.

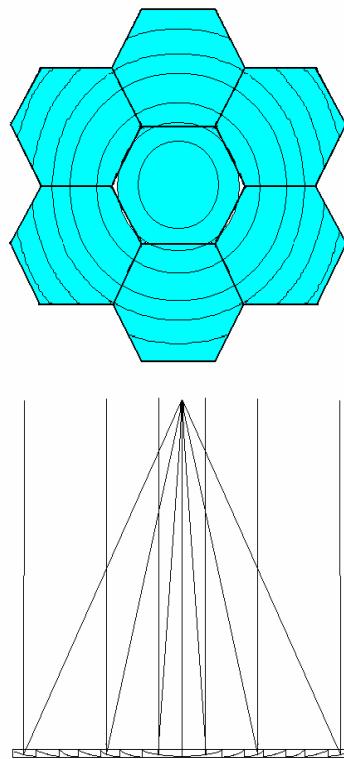


TUS telescopes register an EAS track from board of the Resurs O.

In the 1-st option two instruments observe the same area in atmosphere. It allows to measure twice the same event (errors in measured parameters are checked). In the 2-d option instruments observe twice larger area in atmosphere.

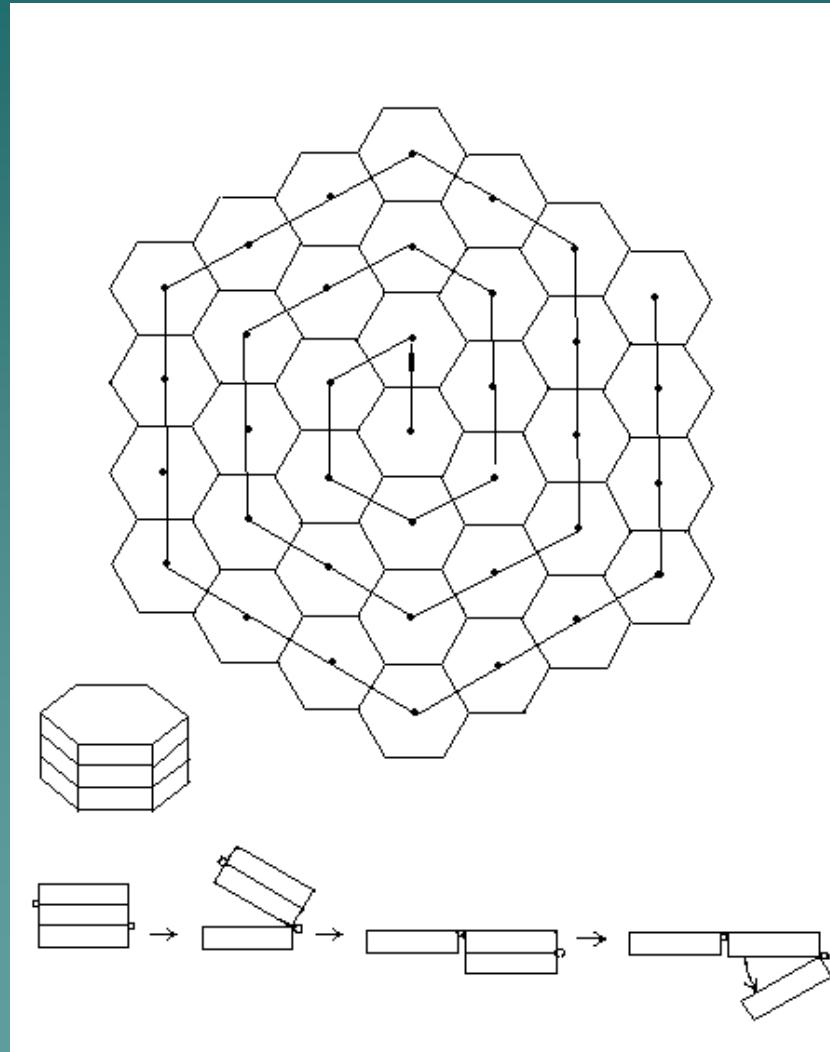
The orbit height is 700 km.

Принцип конструкции составного зеркала-концентратора по типу зеркала Френеля

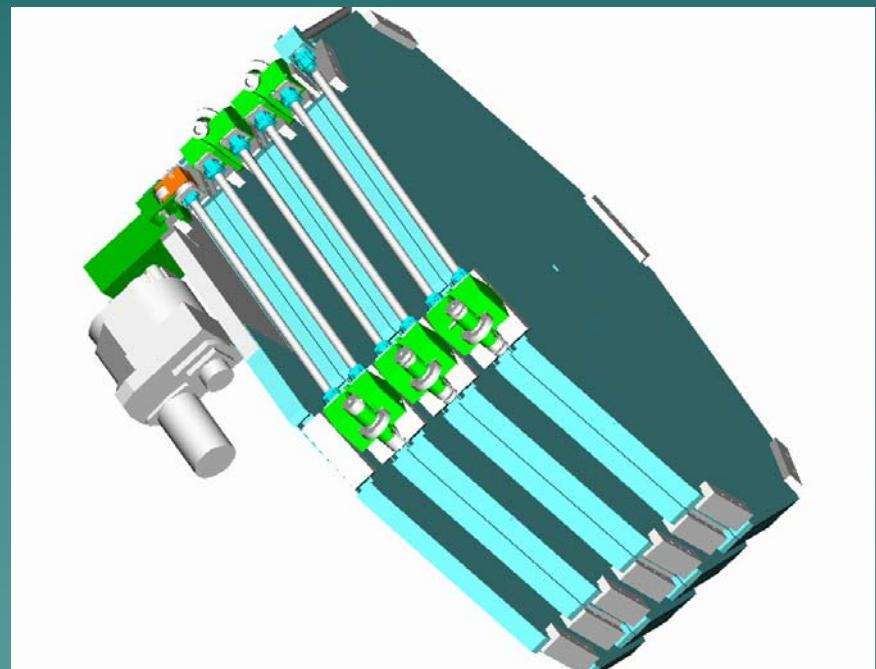
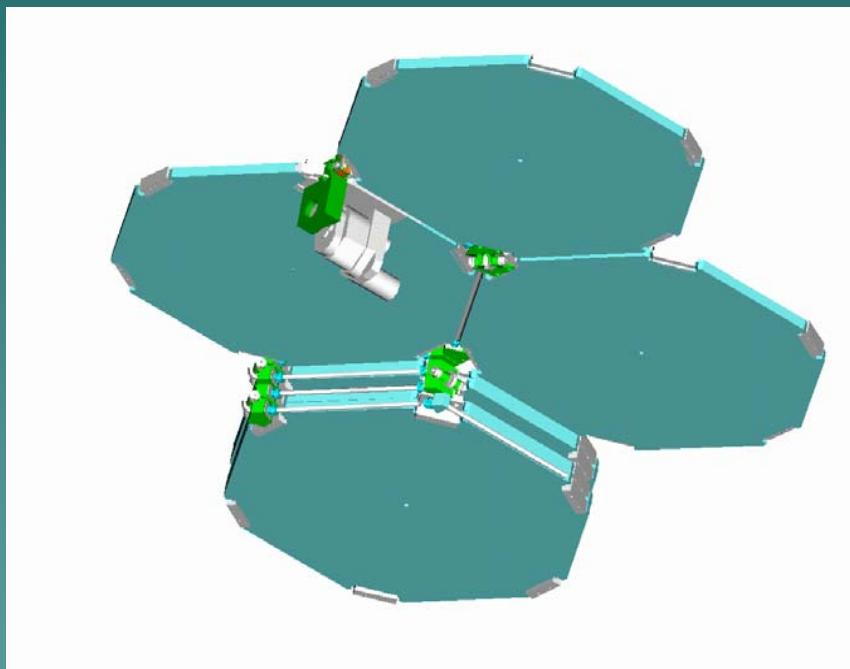


- ◆ The mirror-concentrator mass is less than 20 kg for the mirror area 1.4 m^2 .
- ◆ Accuracy in mirror ring profiles $\pm 0.01 \text{ mm}$.
- ◆ Stability of the mirror construction in the temperature range from -80° to $+60^\circ \text{ C}$.
- ◆ The mirror development mechanism makes the mirror plane with the angular accuracy less than 1 mrad.

Зеркало- концентратор с площадью 10 кв м. (проект КЛПВЭ)

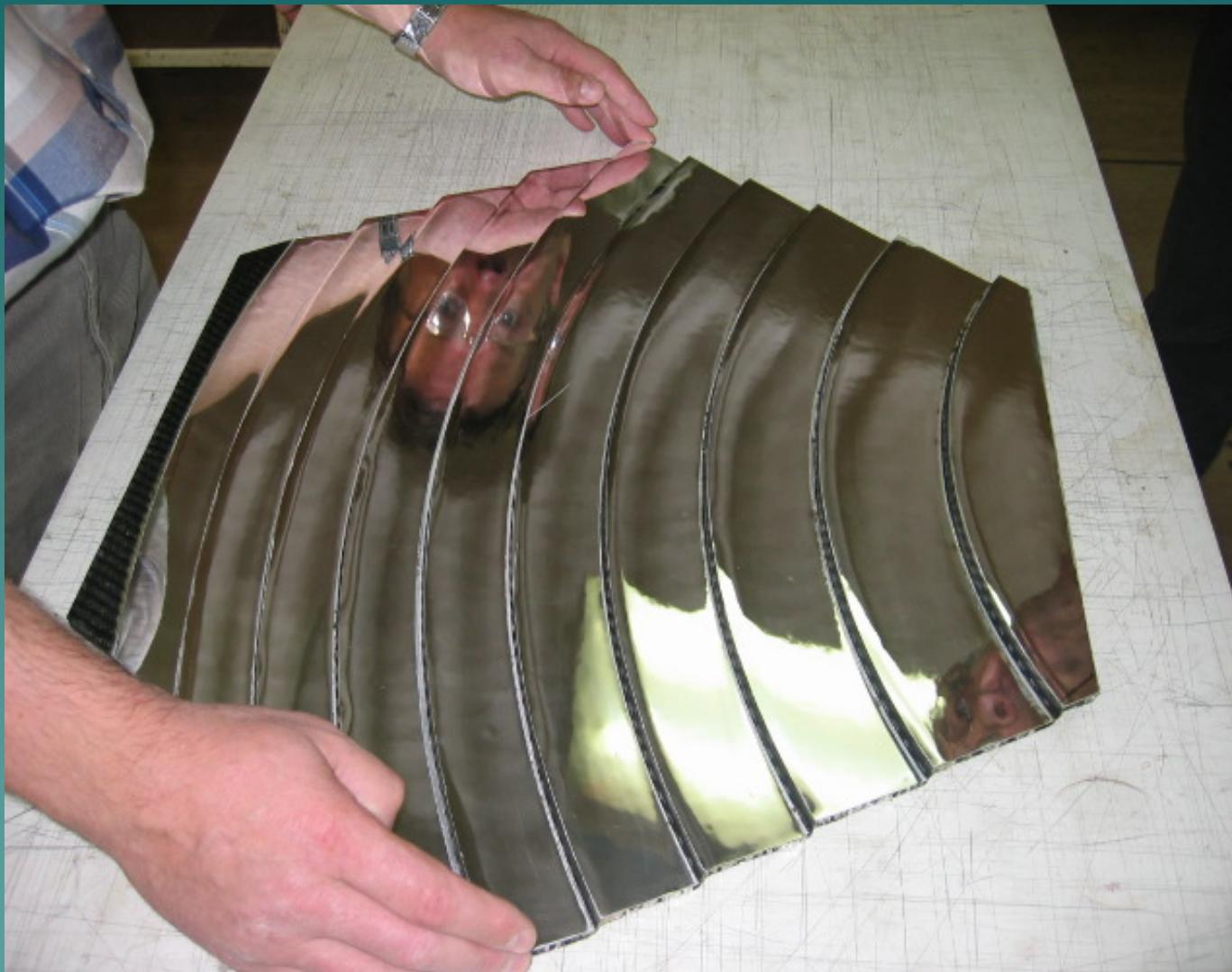


Механизм развертывания зеркала ТУС

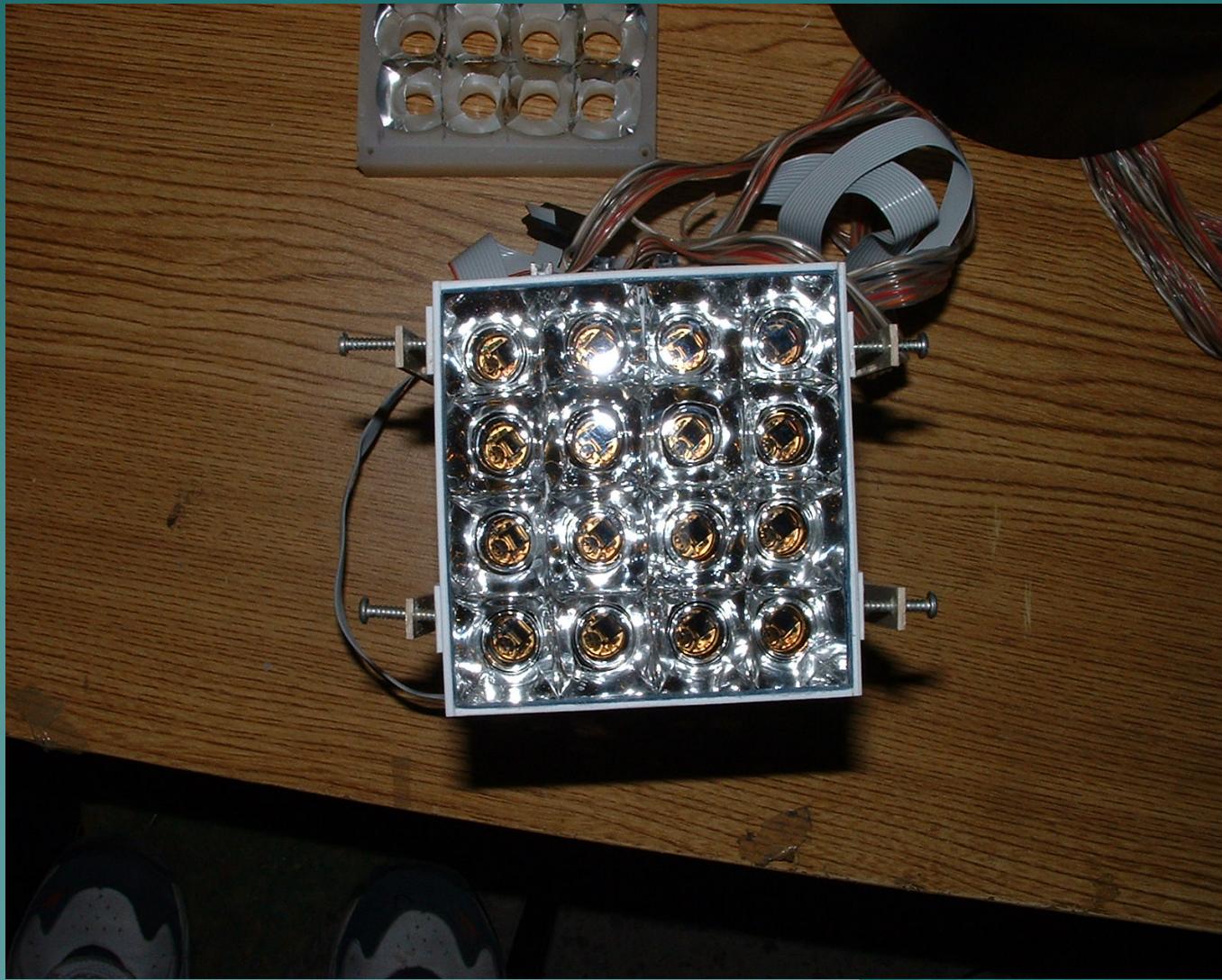


In this mechanism one electric motor moves the segments via axles and cardan joints.

Первый экземпляр сегмента зеркала из углепластика



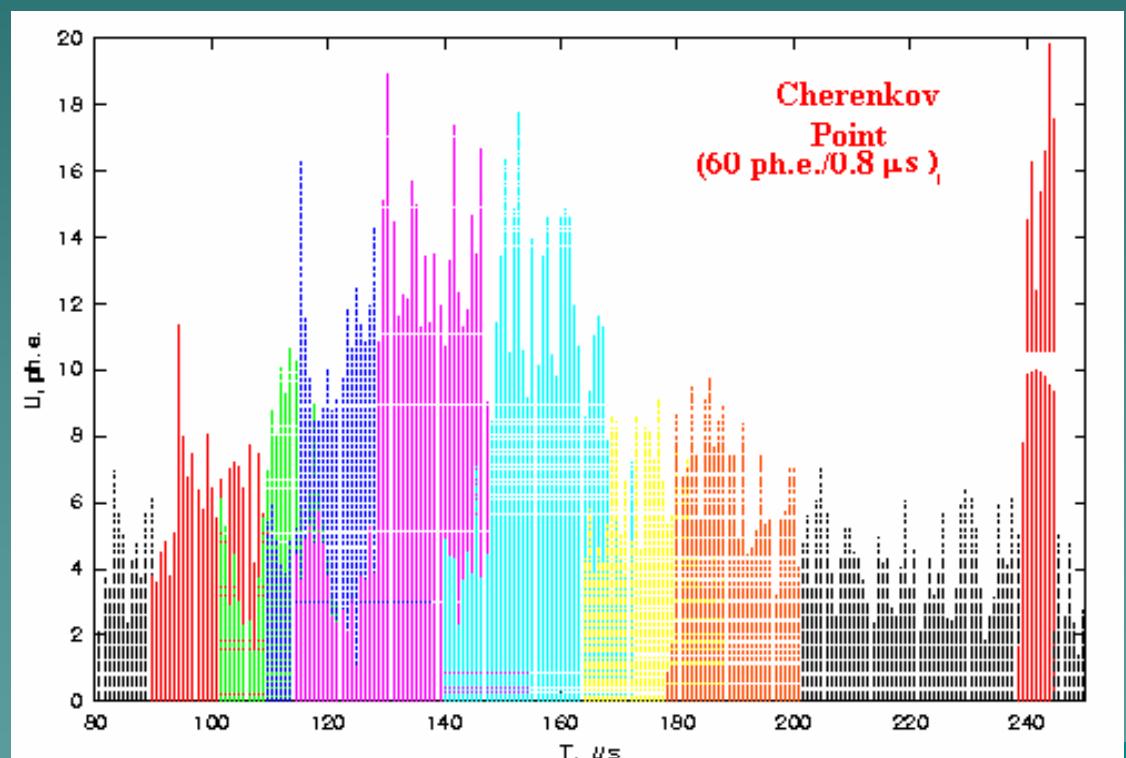
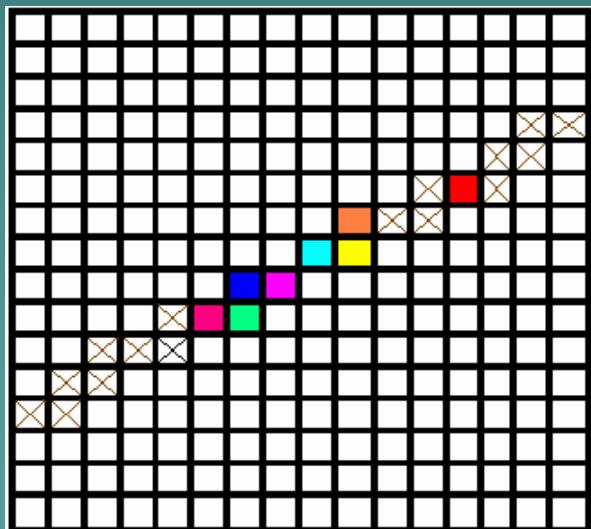
Прототип фотоприемника – мозаика ФЭУ.



Моделирование сигнала в детекторе

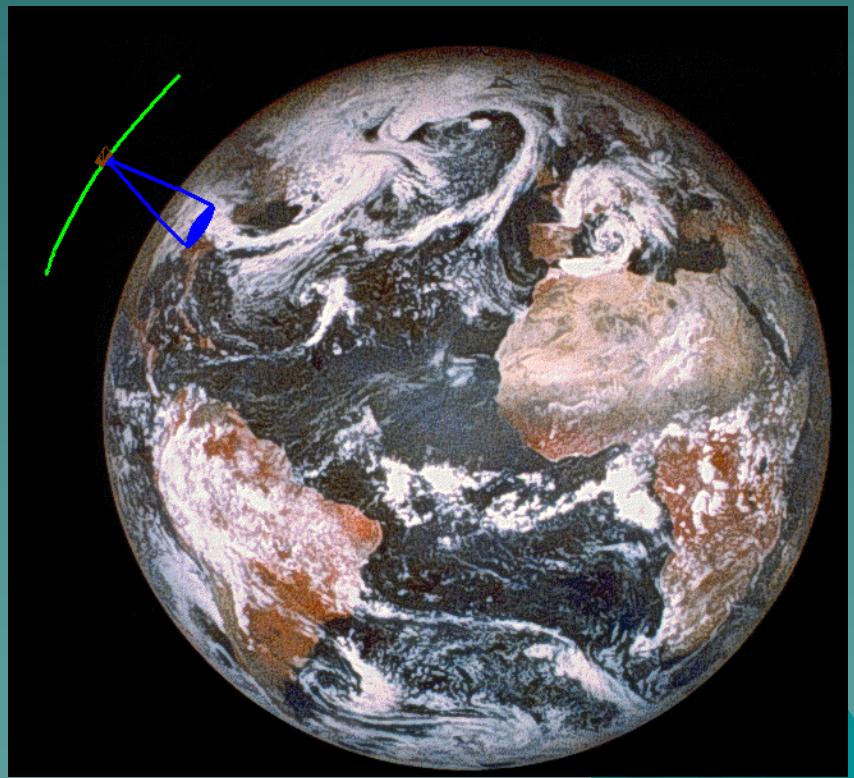
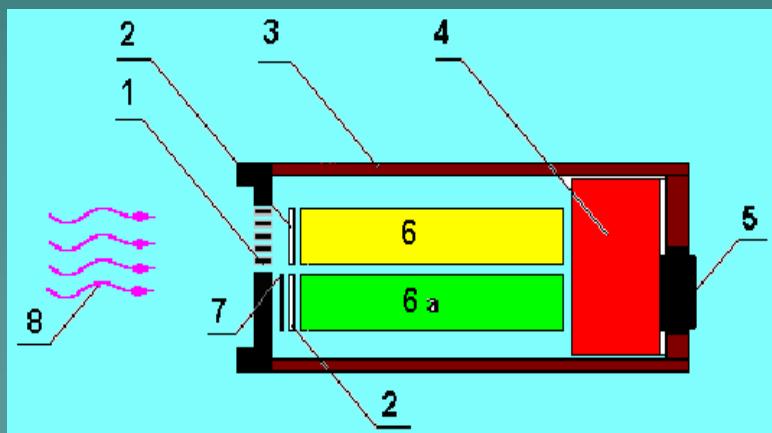
Example of the EAS, “registered” by the TUS detector

$E_0 = 100 \text{ EeV}$, $\theta_0 = 75^\circ$, $\phi_0 = 25^\circ$,
Moonless night; $\sigma E_0 / E_0 \sim 10\%$,
 $\sigma \theta_0 \sim 1.5^\circ$, $\sigma \phi_0 \sim 1^\circ$.

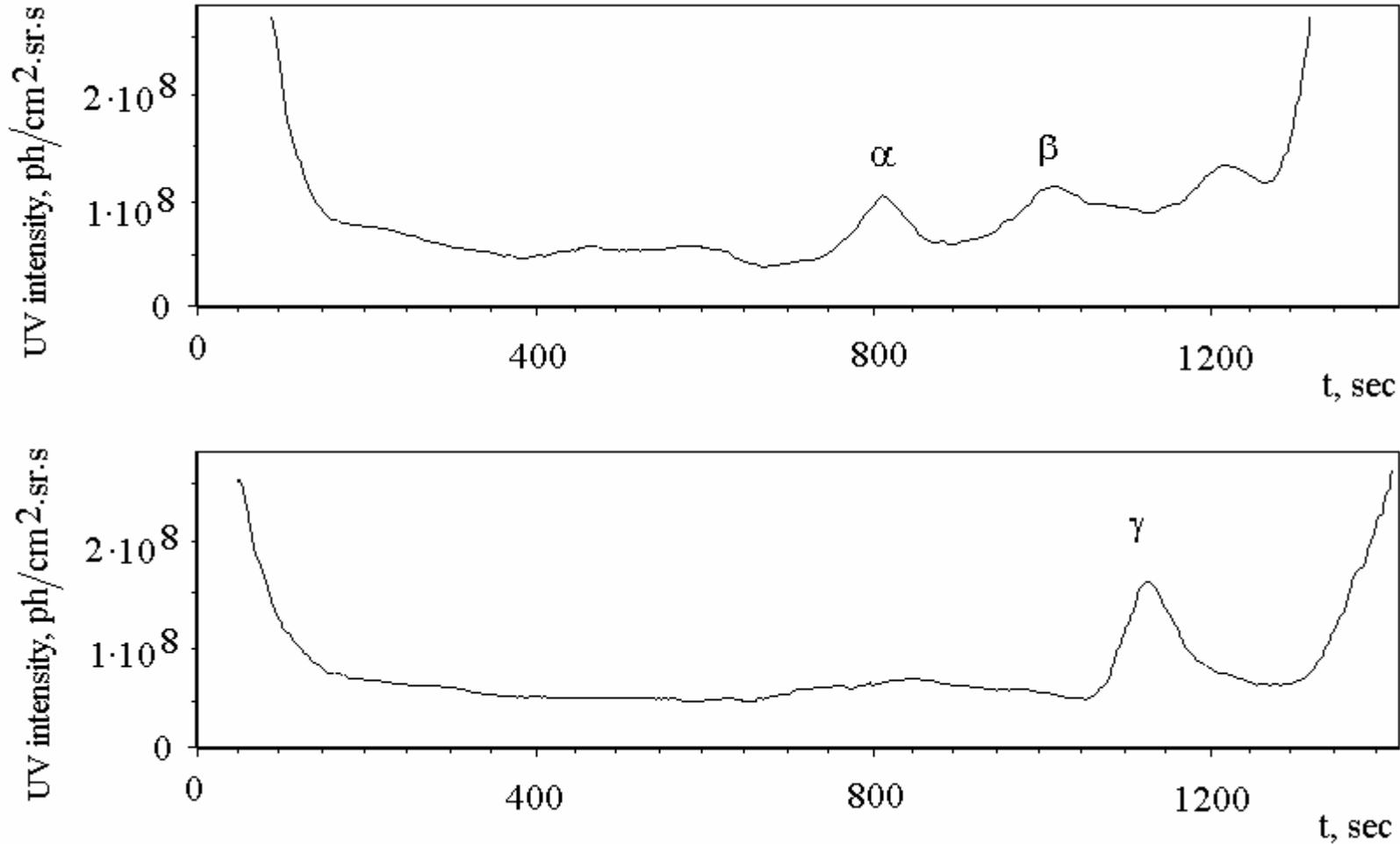


In the space detector the Cherenkov light yield in the cascade curve is negligible, the Cherenkov is scattered only from the clouds or ground (sea).

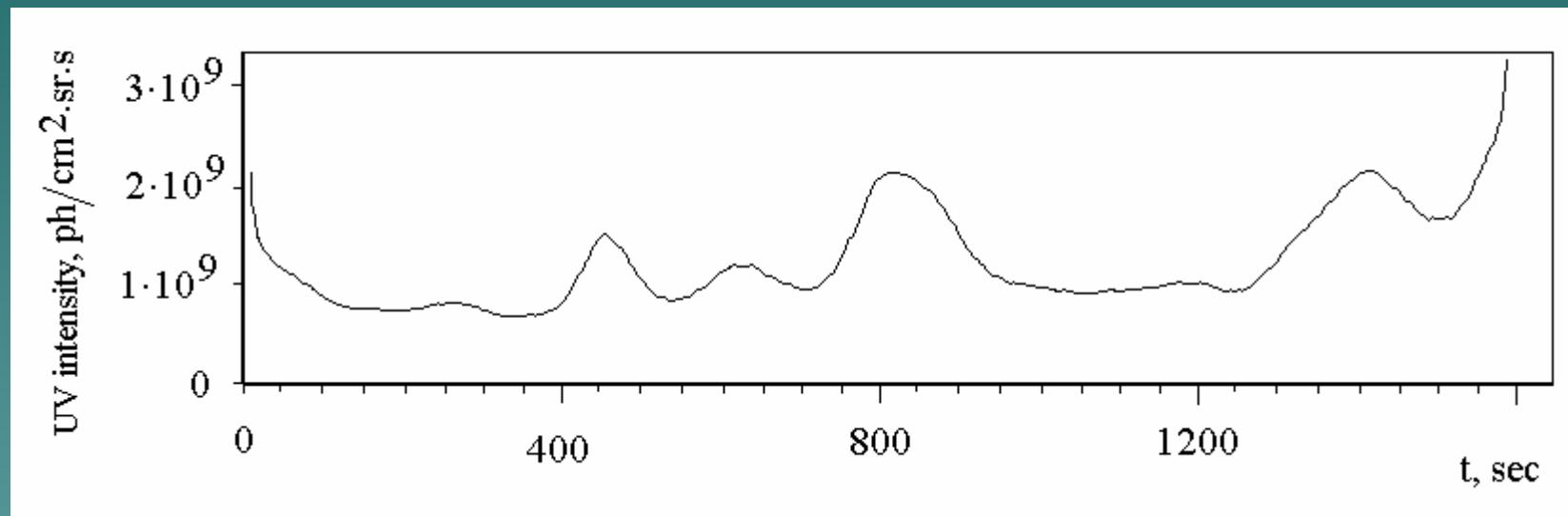
Ячейка фотоприемника работает на спутнике МГУ
«Университетский-Татьяна» в качестве детектора УФ.
Высота орбиты-950 км.



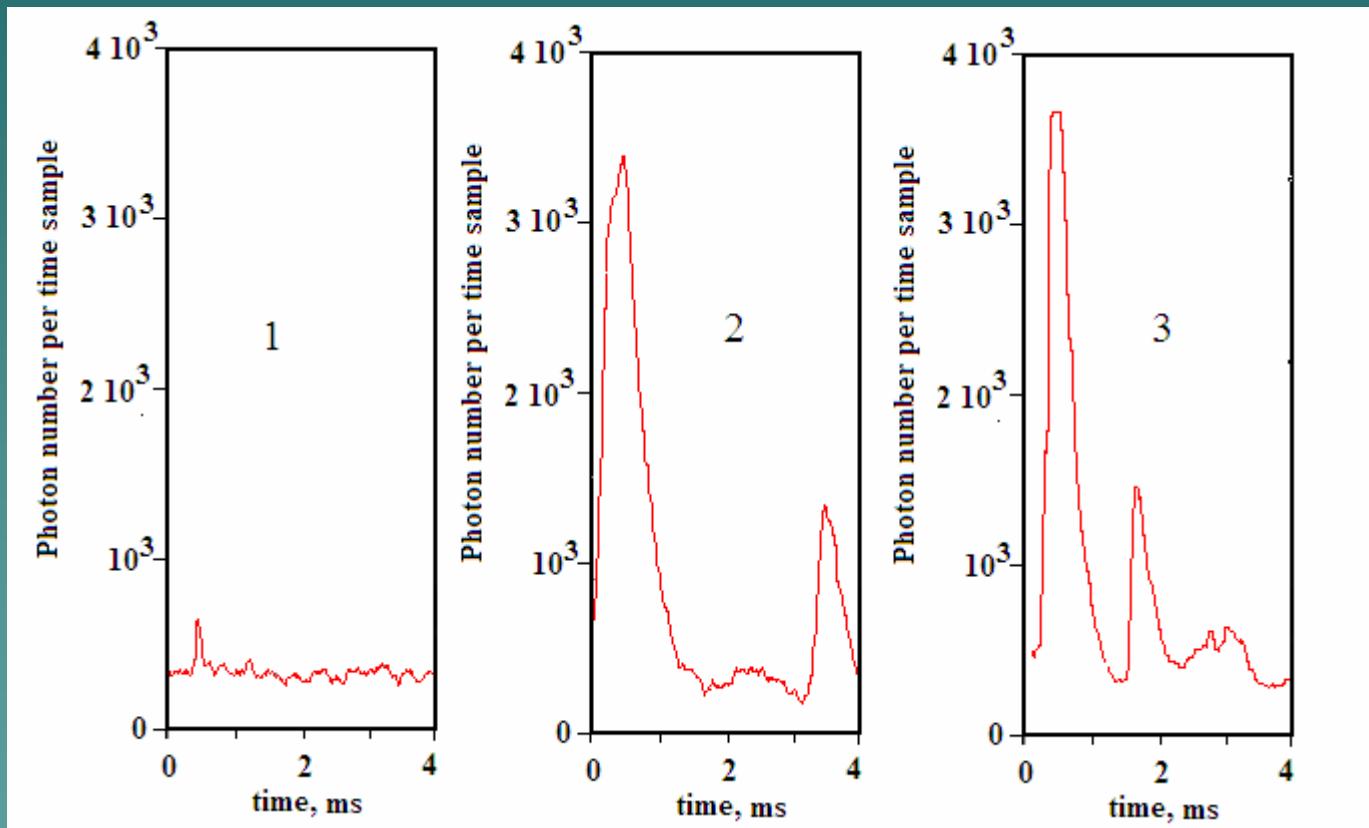
Интенсивность УФ по данным «Татьяны».
Безлунная ночная сторона Земли. Видны пики света от
больших городов.



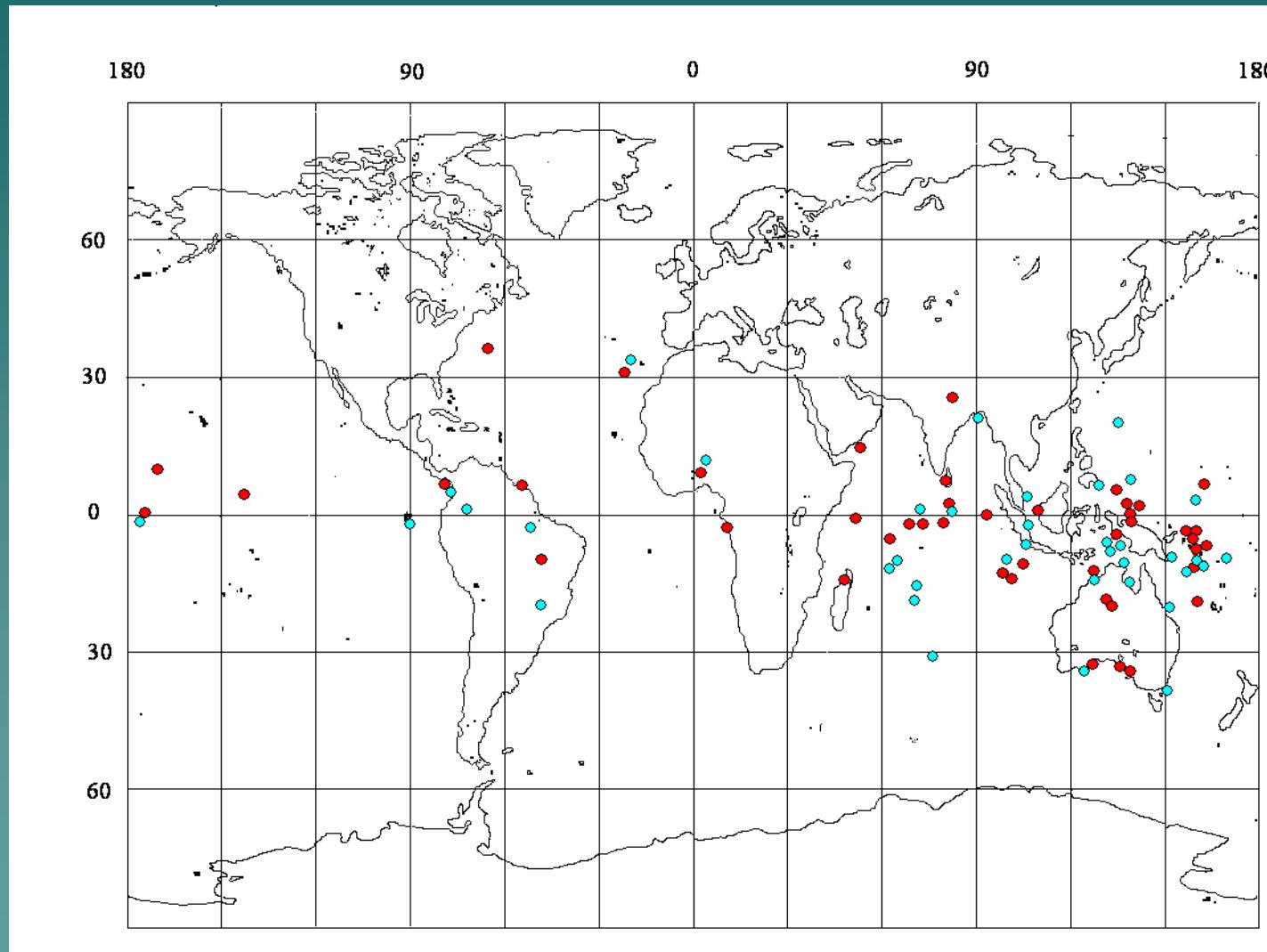
Интенсивность УФ при Луне.



Детектор «Татьяны» позволяет отобрать вспышки УФ.
Показаны осциллограммы с длиной развертки 4 мс.
Найдены вспышки в атмосфере с энергией в УФ 10-100 кJ.



Вспышки УФ концентрируются в районе экватора.
50 из 83 зарегистрированных вспышек оказались
на широтах 10° N- 10° S.



Заключение.

1. Происхождение КЛ УВЭ пока неизвестно, но оба рассматриваемых варианта связаны со строением самых энергичных объектов Вселенной: объектами, содержащими струи релятивистского газа (там происходит ускорение протонов), либо с самим Большим Взрывом (когда вещество находится в виде сверхмассивных частиц Великого Объединения, которые сохраняются в ничтожном количестве на современной холодной стадии развития Вселенной).
2. Чтобы продвинуться в эксперименте по изучению КЛ УВЭ необходимы установки с огромными площадями регистрации- вплоть до размеров Земли.
3. Сегодня создается наземная установка Оже с площадью порядка 3000 кв. км.
4. Будущее- за установками на спутниках Земли, наблюдающих оптическое излучение ШАЛ.