



# А.Е. Чудаков. 100 лет со дня рождения

---

А.С. Лидванский  
Институт ядерных исследований РАН

А.Е. Чудаков возглавлял Совет по космическим лучам АН СССР (РАН) более 20 лет. И, следовательно, при нем было проведено около 10 конференций подобных этой.

Столетие со дня его рождения пришлось на год между конференциями и ему была посвящена специальная сессия ОФН РАН, но не отметить это событие также и на ВКЛ хотя бы год спустя было бы несправедливо.

Автор представленного сочинения, несомненно, - гений.  
Тем не менее, он заслуживает присуждения ему степени  
доктора Кембриджского университета.



Отзыв Бертрана Рассела на  
«Логико-философский трактат»  
Л. Витгенштейна

- “...his undoubted genius...”  
Prof. J. Linsley (Univ. New Mexico, USA)
- “Chudakov was a ‘gentle giant’, a man of towering physical presence and towering intellect. His contributions to Cosmic Ray Physics were many; indeed, very, very few have done so much important work.”  
Prof. Sir Arnold Wolfendale, Former Royal Astronomer for England (Durham Univ.)
- “From scientific point of view he was always surprising. He could face quite different arguments: physics (with a capability of interpreting ideas, and theories from the point of view of an experimentalist), mathematics, electronics, mechanics.”  
Prof. G. Navarra, (Torino Univ., Italia)

Royal Swedish Academy of Sciences  
Nobel Committee for Physics.

Dear members of the Committee,  
One year ago I suggested Professor Frederick  
Reines as a candidate for the Nobel Prize for  
Physics for 1992. I still regard him as the best candidate. So  
I repeat my suggestion again and all the  
reasons are the same as in my first nomination.  
For your convenience the copy of my letter from the first  
nomination is also enclosed.

December 1992

A. E. Chudakov,  
Professor, Nuclear  
Institute for Research of the Academy  
of Sciences of Russia  
60th October Anniversary  
prospect Z-A  
117312 Moscow  
Russia.

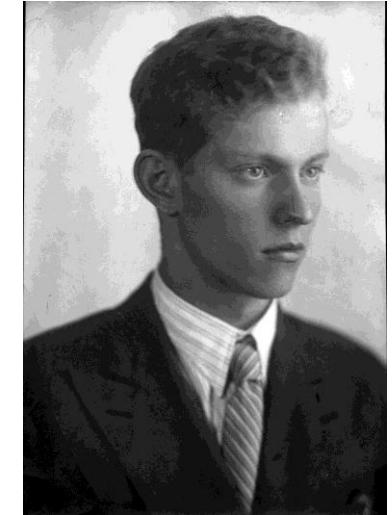
1927



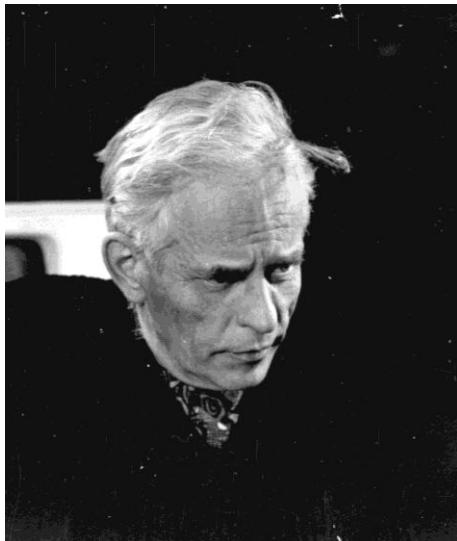
1939



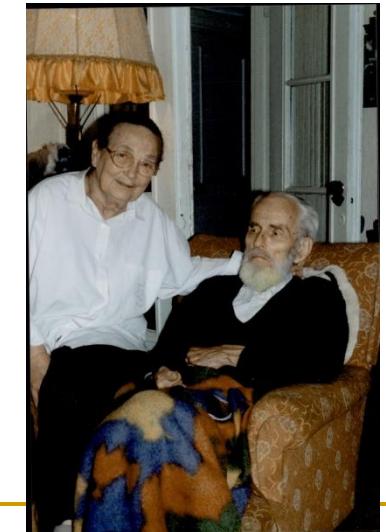
1946



1985



2001





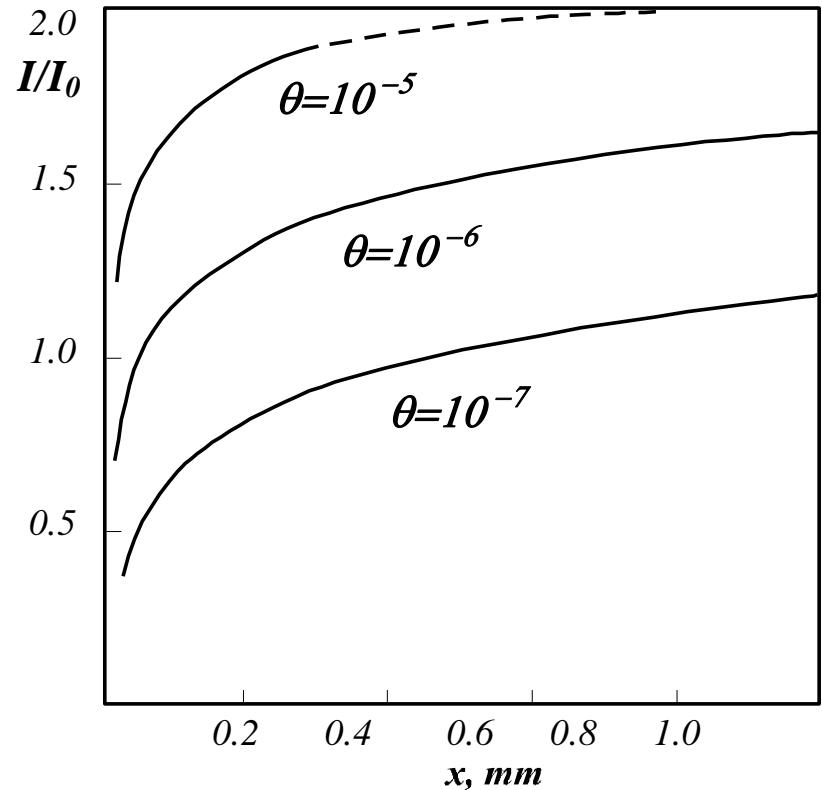
# Чудаков был пионером во многих областях науки

- Физика космических лучей
- Гамма-астрономия
- Нейтринная астрономия
- Геофизика
- Подземная физика

Но он очень небрежно относился к публикации и рекламе своих результатов

# Эффект Чудакова (1949-1955)

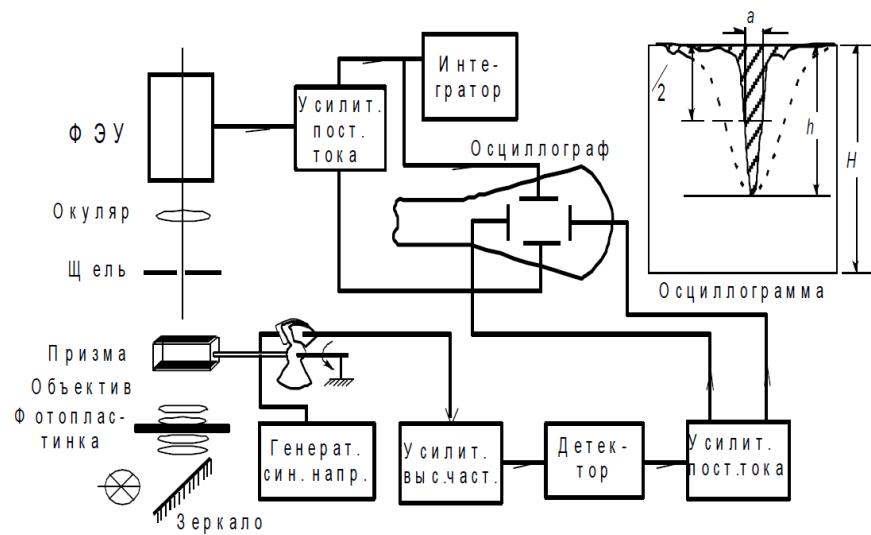
Ионизация электрон-позитронной пары как функция пробега от точки рождения. Для трех значений угла разлета.



Хотя Чудаков предсказал этот эффект (уменьшение ионизационных потерь пары по сравнению с величиной  $2I_0$ ) в 1949 г., он опубликовал результат много позже (как говорят, И.М. Франк настоял на публикации).

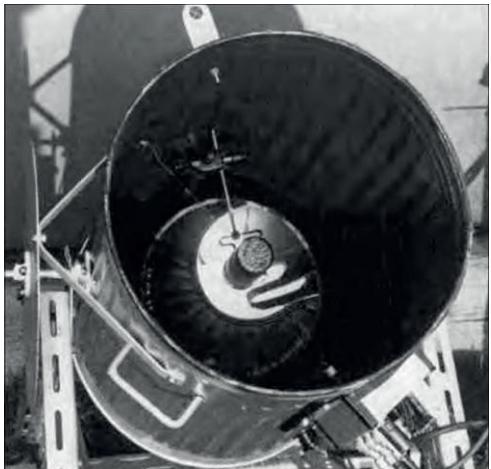
Эффект этот на самом деле универсален. Его учитывают в КХД, где он проявляется как экранировка цветных полей узких пар夸克ов и глюонов.

# Фотометр для измерения почернения следов заряженных частиц в фотоэмulsionиях. Конструкция А.Е. Чудакова

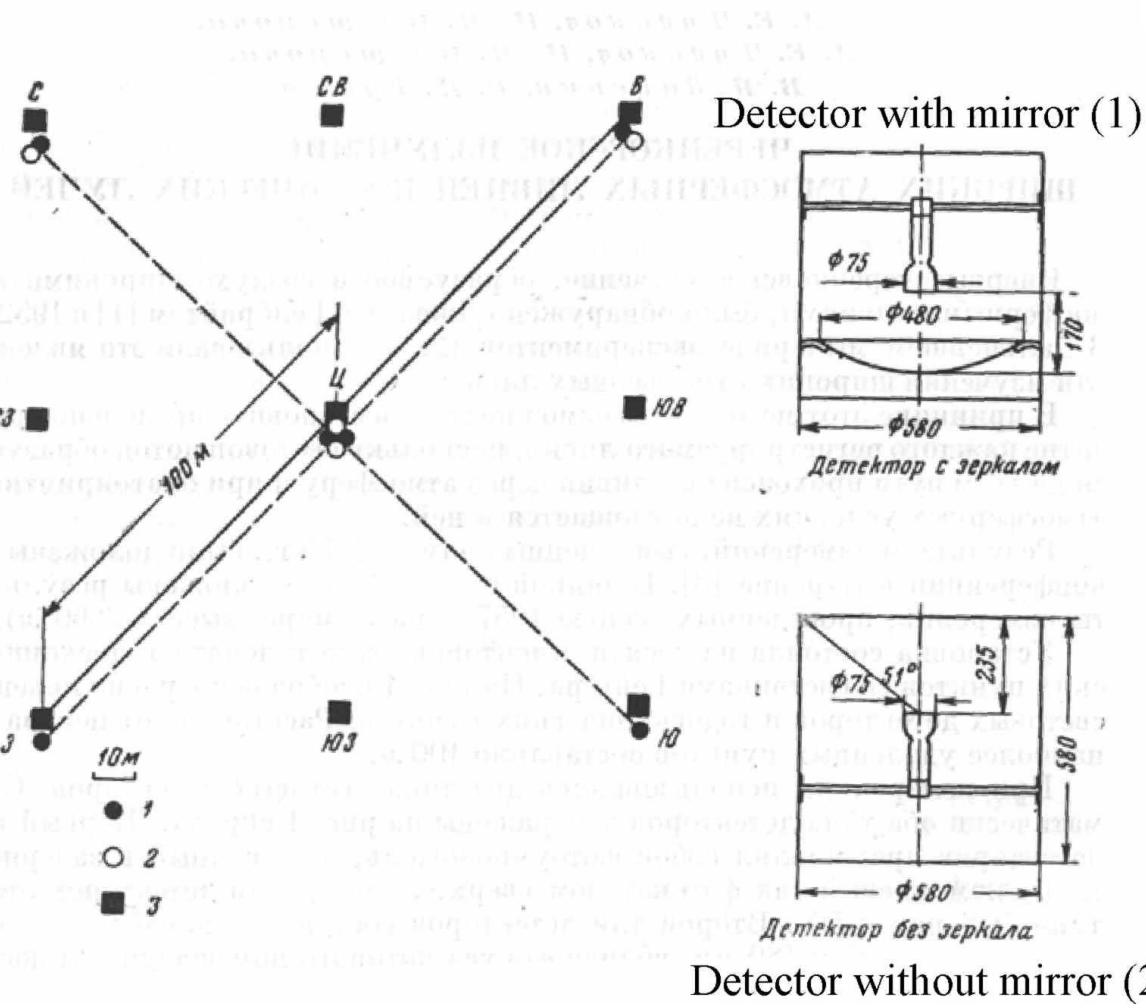


Б. А. Войковский, А. И. Галактионов, М.И. Третьякова,  
А.Е. Чудаков, ПТЭ, № 6, 1957, с. 38

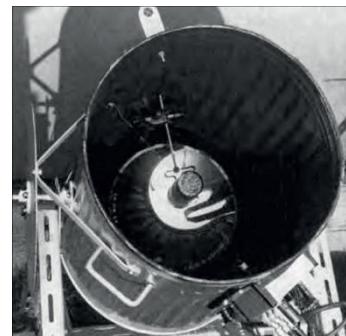
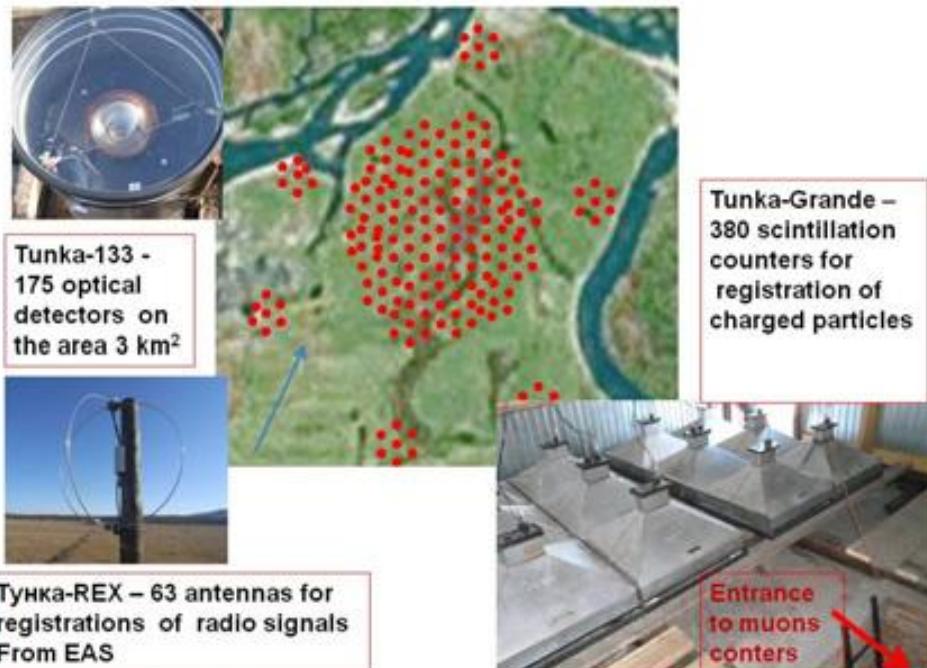
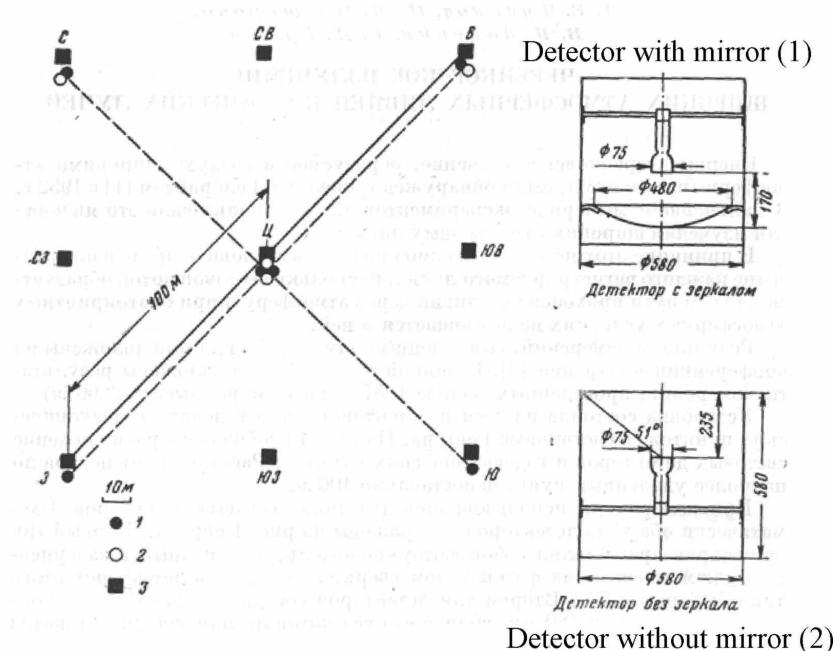
# Эксперимент Чудакова на Памире (1953-1957)



W. Galbright and J. Jelly, 1952.  
A single dustbin with a small  
(25 cm) parabolic mirror and  
5-cm phototube.



Эксперимент Чудакова на Памире (1953-1957) и современный астрофизический комплекс TAIGA (справа) в Тункинской долине. Внизу первый детектор Гэлбрайта и Джелли.



W. Galbright and J. Jelly, 1952.  
A single dustbin with a small (25 cm)  
parabolic mirror and 5-cm phototube.

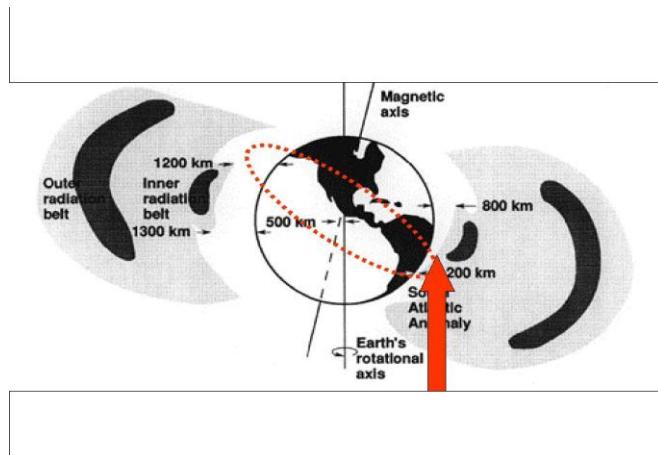
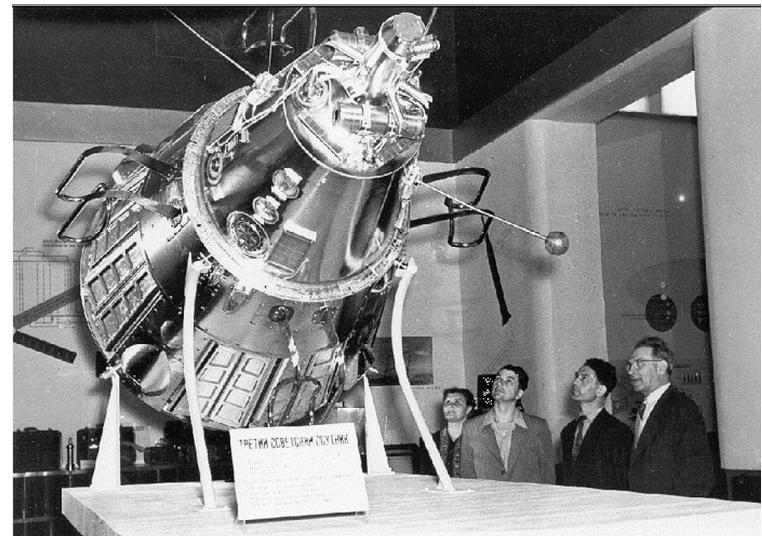
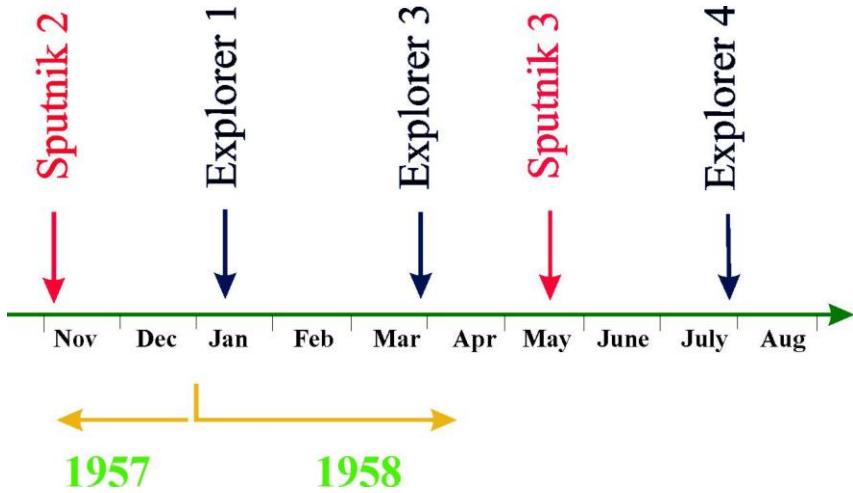
# Спутник-2 : начало исследования космических лучей в космосе

Этот спутник обычно именуют биологическим (собака Лайка). Но на нем были установлены счетчик Гейгера и два фотометра. Впервые в космос был выведен детектор элементарных частиц.

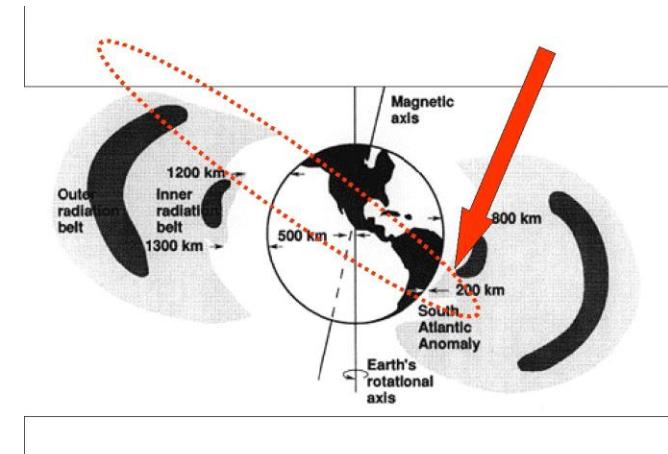


Искусственный спутник земли “Спутник-2”

# Открытие радиационных поясов Земли (1957 - 1958)



Sputnik 2



Sputnik 3

# История несостоявшегося открытия радиационных поясов Вернова:

The Geiger counters of Sputnik 2 (this was the satellite carrying the dog Laika) had detected the trapped radiation near apogee over Australia with KS-5, the first orbiting instrument for cosmic ray studies. But since S.N. Vernov and A.E. Chudakov did not receive the data from the Australian receiving station they did not see the rapid rise in intensity with altitude until much later. At Sydney, Australia, the scientists with

Professor H. Messel, a noted cosmic ray researcher and head of the School of Physics at the University of Sidney, recorded the telemetry signals from Sputnik 2. But they did not have the telemetry code. Asked about this during the Cosmic Ray Congress in 1959, Messel said to Singer '*They would not send us the code and we were not about to send them the data*' (Hess, 1968). This is why in the November 23, 1984, issue of Science, Alex Dessler published an editorial titled '***The Vernov Radiation Belt (Almost)***'.

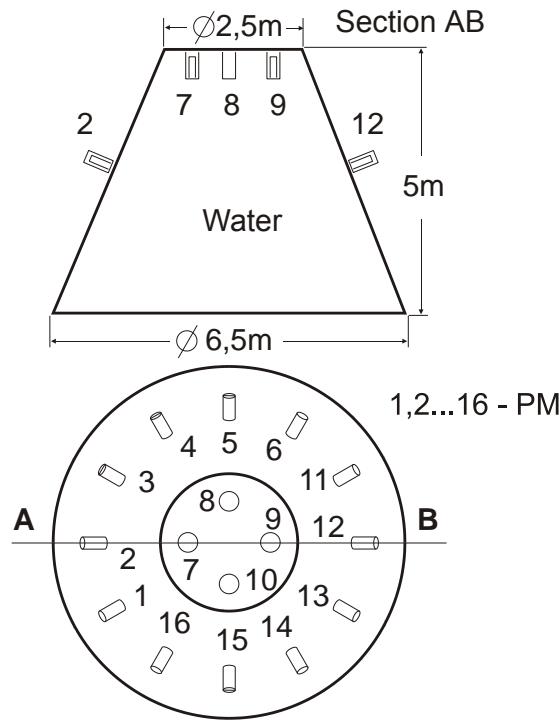
This piece of History re-opens the issue of who, in scientific races, are remembered as the key actor and discoverer: the pioneer who had the idea first, who designed an experiment to check this idea and prove it to be correct, or, the author(s) whose paper passed the refereeing process and who, luckily, first published the results in open literature. In Geophysics it is the latter who wins this 'Guiness Book of Records' competition.

*"From the discovery of Radiation Belts to Space Weather perspectives"*

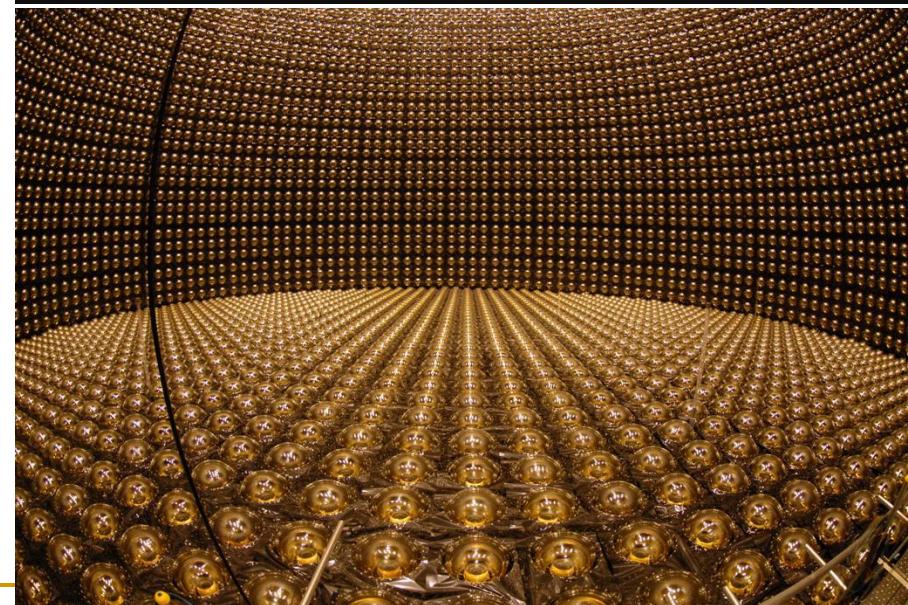
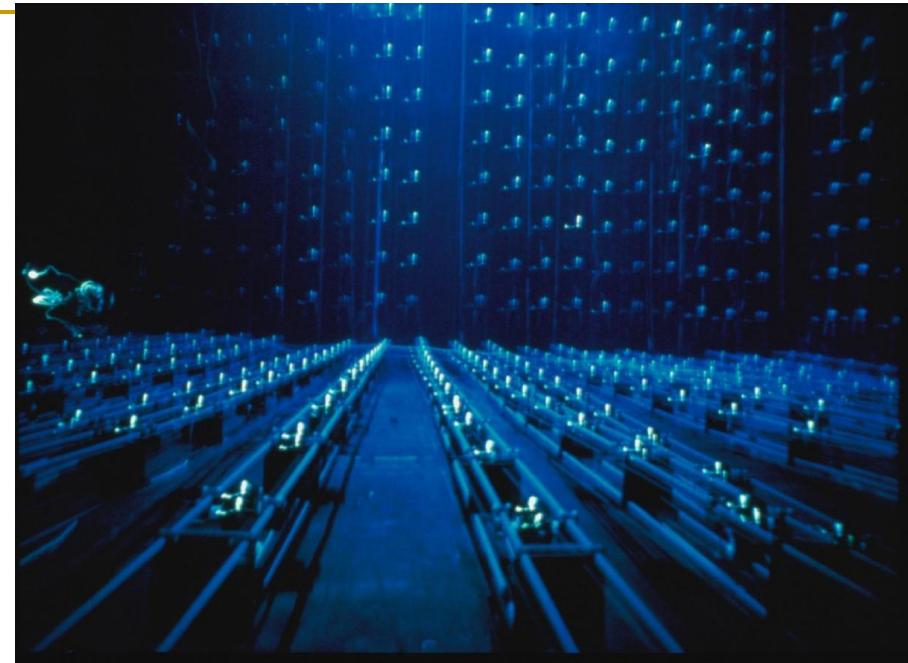
by J.F. Lemaire,

(Proc. "Space Storms and Space Weather Hazards", Crete, Greece, 19-29 June, 2000).

Первый в мире водный  
черенковский детектор  
большого объема (Москва,  
1959-1960) и его потомки



IMB



Super-Kamiokande

В.Л. Дадыкин, ПТЭ, №1, стр. 60.

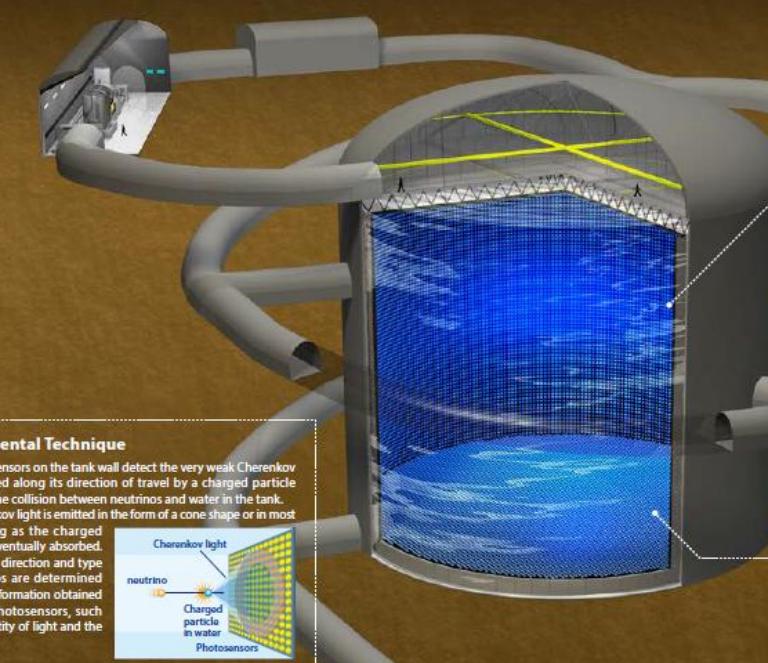
# Проект Гипер-Камиоканде

Размеры:  
высота 60 м, диаметр 74 м  
  
260000 т сверхчистой воды  
  
40000 высокочувствитель-  
ных фотодетекторов,

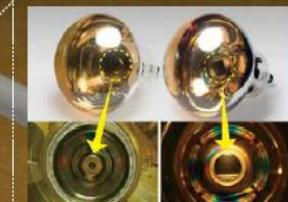
**Hyper-Kamiokande**  
**Peering into the Universe and its elementary particles from underground**

The planned Hyper-Kamiokande detector will consist of an order of magnitude larger tank than the predecessor, Super-Kamiokande, and will be equipped with ultra high sensitivity photosensors. The Hyper-Kamiokande detector is both a "microscope," used to observe elementary particles, and a "telescope," used to study the Sun and supernovas through neutrinos. Hyper-Kamiokande aims to elucidate the Grand Unified Theory and explain the evolution of the Universe through the investigation of proton decay, CP violation (the difference between neutrinos and antineutrinos), and the observation of neutrinos from supernova explosions. The Hyper-Kamiokande experiment is an international research project aiming to become operational in the second half of the 2020s.

Unified Theory and explain the evolution of the Universe through the investigation of proton decay, CP violation (the difference between neutrinos and antineutrinos), and the observation of neutrinos from supernova explosions. The Hyper-Kamiokande experiment is an international research project aiming to become operational in the second half of the 2020s.



**Ultrasensitive Photodetectors**  
We have been developing the world's largest photosensors, which exhibit a photodetection efficiency two times greater than that of the Super-Kamiokande photosensors. These new photosensors are able to perform light intensity and timing measurements with a much higher precision.  
The new Large-Aperture High-Sensitivity Hybrid Photodetector (left), the new Large-Aperture High-Sensitivity Photomultiplier Tube (right). The bottom photographs show the electron multiplication component.



**A megaton water tank**  
The huge Hyper-Kamiokande tank will be used in order to obtain in only 10 years an amount of data corresponding to 100 years of data collection time using Super-Kamiokande. This allows the observation of previously unrevealed rare phenomena and small values of CP violation.



## Первая регистрация переходного излучения – вообще нет публикаций

Во всех Personalia Чудакова написано, что он наблюдал ПИ в 1953 г. при подготовке своих экспериментов с черенковским излучением. То же можно прочесть во многих воспоминаниях и некоторых диссертациях.

Но, по-видимому, он не озабочился опубликовать свои наблюдения. И поэтому в Википедии написано (статья «Переходное излучение»):

«Экспериментально эффект обнаружен в 1958 году в Ереванском физическом институте».

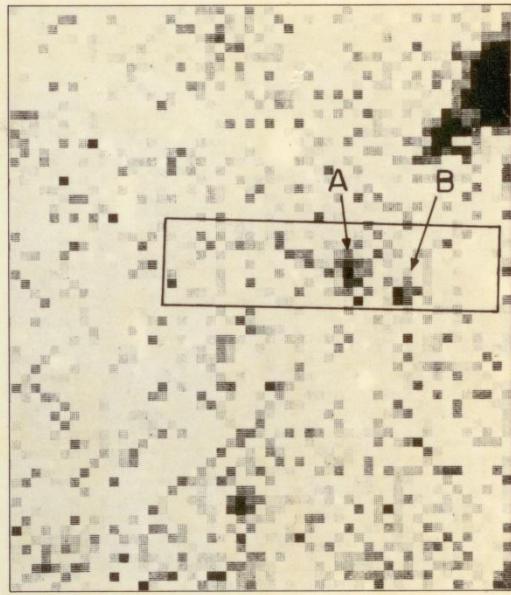
## Гамма-астрономия очень высоких энергий (VHE astronomy)

Первый черенковский гамма-телескоп созданный Чудаковым в Крыму был вообще первым в мире инструментом для наблюдения гамма излучения из космоса. Метод был предложен в работе:

Г.Т. Зацепин, А.Е. Чудаков, О методах поисков локальных источников фотонов высокой энергии, ЖЭТФ, т. 41, вып. 2(8), стр. 655 (1961).

POOLLA V. RAMANA MURTHY &  
ARNOLD W. WOLFENDALE

# Gamma-ray astronomy



Cambridge Astrophysics Series

Durham

July 1986

To Prof. A.E. Chudakov – a founding  
father of the subject – from  
PVRM & AWW.

Durham  
July 1986

To Prof. A.E. Chudakov – a founding  
father of the subject – from  
PVRM & AWW

Первый в мире гамма-теле<sup>с</sup>коп (Кацивели, Крым, 1960- 1963) и отдельные телескопы 3 поколения



HESS



Veritas

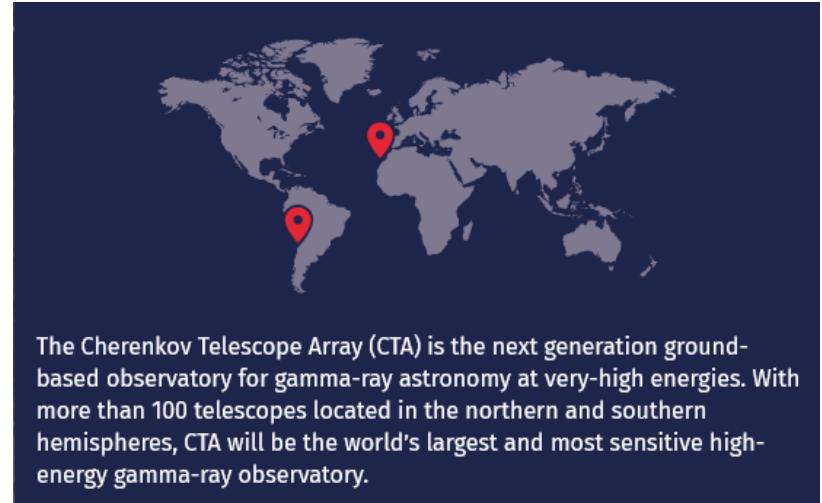


Magic



# Гамма-обсерватория СТА

начало работы обсерватории – 2022  
завершение строительства - 2025



## Проф. Дж. Линсли о приоритете Чудакова в предложении флюoresцентного метода регистрации ШАЛ космических лучей

- ... I tried ... to get clarification from Chudakov himself in his later years about an idea that apparently came to him before it came to others: to observe EAS by means of atmospheric scintillation. In a well-known remark of his at the 1962 Interamerican Symposium in La Paz, Bolivia, published in the Proceedings, he described his idea in some detail, dating it to 1955-57, the time he made pioneering measurements on atmospheric Cerenkov radiation from EAS.

*John Linsley (private communication, 2001)*

Итак, идея возникла у Чудакова в середине 1950-х , публично он озвучил ее в 1962 г. (в замечании к докладу японца К. Суга), а опубликовал в журнале только в 1966 г.

# History of FM development

- 1955-1957 Chudakov is preparing Cherenkov experiment. He studies the ionization glow as a background for it.
- 1962 Chudakov gives publicity to the idea of fluorescent method as a remark at the conference in Bolivia.
- Early 1960-ies. Air glow after atomic bomb tests is under study (Los Alamos). K. Greisen participates in this work.
- 1966 Chudakov's suggestion is published.
- 1967 Cornwall experiment of Greisen (10 modules, 500 PMs with Fresnel lenses  $0.1 \text{ m}^2$ )
- 1976 Three modules of the Utah University are tested at Volcano Runch (mirror 1.8 m и 14 PM in the focal plane. First EAS detection).
- 1981-1993 Fly's Eye (stereoscopic observations since c 1986).

# Первое опубликованное предложение флюоресцентного метода

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
Т. XXX, № 10 СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ 1966

В. А. БЕЛЯЕВ и А. Е. ЧУДАКОВ

## ИОНИЗАЦИОННОЕ СВЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

При ионизационных потерях значительная часть энергии должна идти на возбуждение молекул среды. Когда средой является разреженный газ и безизлучательные переходы маловероятны, энергия возбуждения (порядка половины полных ионизационных потерй?) должна высыпываться. На опыте оказывается, однако, что по каким-то причинам в видимой области спектра лежит лишь крайне незначительная часть общей энергии ионизационных потерь. Измерение выхода ионизационного свечения воздуха проводилось нами в 1955 г. в связи с изучением световой вспышки широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере для определения соотношения черенковского и ионизационного свечений и возможности практического использования последнего для регистрации ШАЛ<sup>1</sup>.

В нашем эксперименте свечение возбуждалось в небольшой герметической алюминиевой камере и регистрировалось через прозрачное окно с помощью фотомножителя ФЭУ-19. Через два тонкостенные окошка через камеру проходил коллимированный пучок электронов распада Р32 со средней энергией 1 МэВ. По выходе из камеры электроны попадали на кристалл стилбена в контакте со вторым ФЭУ-19. Это позволяло регистрировать совпадения, в том числе двинутые во времени, и тем самым определять время высыпывания. Регистрация свечения в камере велась путем счета отдельных световых квантов, первый ФЭУ-19 был специально отобран и имел собственный фон  $\sim 25$  фотозарядов в 1 сек, что позволяло вести как счет совпадений, так и счет квантов по одному каналу.

Основные результаты измерения свечения воздуха, а также азота и аргона при давлении от 0 до 4 атм показаны на рис. 1 (температура комнатная).

По оси ординат отложено число световых квантов, испускаемых релятивистским электроном на 1 см пути в газе \*\*, по оси абсцисс — давление газа. Горизонтальные участки кривых для воздуха и азота показывают,

\* В настоящие время эта проблема опять привлекает внимание в связи с тем, что до сих пор не найдено адекватного метода регистрации ШАЛ с  $E \geq 10^{20}$  эв и использование ионизационного свечения в атмосфере остается одним из наиболее перспективных путей. В США в Корнельском университете под руководством К. Грэйсена начата экспериментальная работа в этом направлении.

\*\* Спектральный интервал регистрируемого свечения определялся ФЭУ. Калиброка чувствительности проводилась путем сравнения с черенковским излучением в тонкой слюдянной пластиине, помещенной на пути электронов в камере при контрольном опыте. На рис. 1 отложено число квантов в условном диапазоне 300—600 нм в предположении, что спектральное распределение интенсивности ионизационного свечения такое же, как черенковское, что в первом приближении не приводит к большой ошибке [2]. Нижний предел интенсивности получится в предположении, что все излучение лежит в области максимума чувствительности SbCs-фотокатода (400—430 нм). В этом случае цифры по оси ординат должны были бы быть умножены на коэффициент 0,5.

В.А. Беляев и А.Е. Чудаков, Ионизационное свечение воздуха и возможности его использования для регистрации широких атмосферных ливней, Известия АН СССР, сер. физ., 1966, v. 30, № 10, стр. 1700.

1702

В. А. Беляев и А. Е. Чудаков

ионизационного свечения растет с высотой. При давлении 200 г·см<sup>-2</sup> оба эффекта дают одинаковый выход, а при более низких давлениях ионизационное свечение преобладает. Для регистрации ШАЛ существенна, однако, не столько разница в световом выходе, сколько в пространственном распределении света на уровне наблюдения. Узкая коллимация черенковского излучения позволяет регистрировать ливни небольшой энергии: от  $10^4$  эв, но при малых присущих параметрах  $r \approx 100$  м [3]. На этих расстояниях ионизационное свечение не дает никакого вклада.

На рис. 2 показано пространственное распределение света от обоих процессов, рассчитанное для вертикального электромагнитного каскада с  $E = 10^{15}$  эв. Расчет черенковского излучения на расстояниях более 1 км от оси ненадежен, так как зависит от предполагаемого энергетического спектра электронов на ранней стадии развития ливня. Возможные экстраполяции указаны пунктиром. Ионизационное свечение переносится где-то в районе 3 км и безусловно доминирует на расстоянии 5 км и более.

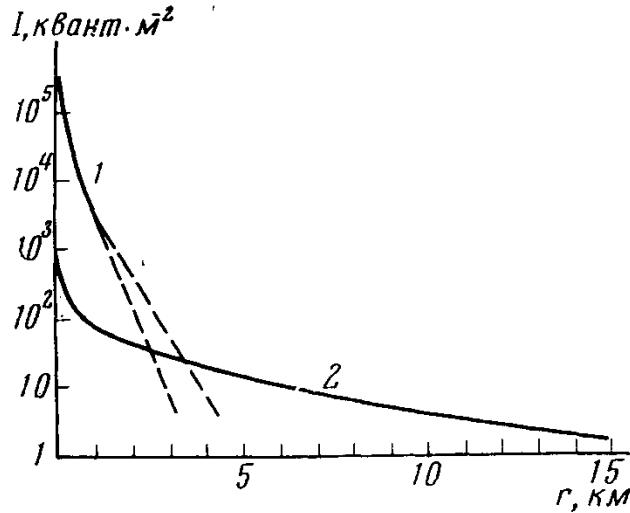
Важно, что расчеты ионизационного свечения не зависят от углового и энергетического распределения частиц в ливне. По форме импульсов, зарегистрированных в нескольких пунктах на расстоянии 10—15 км от оси, в принципе можно определить не только положение оси ливня в пространстве, но и форму каскадной кривой и соответственно энергию, выделенную в атмосфере. Возможна регистрация наклонных и почти горизонтальных ливней.

Оценим энергетический порог регистрации ливней по ионизационному свечению. Установка могла бы состоять из нескольких десятков пунктов, расположенных на расстоянии 10 км друг от друга. Надо учесть фон от свечения ионного неба, площадь фотокатодов ФЭУ в каждом пункте и длительность сигнала (порядка  $(1 \div 2) \cdot 10^{-3}$  сек). При площади фотокатодов 1000 см<sup>2</sup> и превышении сигнала над шумом в 3 раза требуется световой поток  $\sim 3 \cdot 10^5$  квант·м<sup>-2</sup>, что в 3·10<sup>4</sup> раз больше, чем на рис. 2 для  $r = 6$  км. Отсюда следует, что энергетический порог такой установки составит  $3 \cdot 10^{10}$  эв и при  $E = 10^{20}$  эв возможно получать подробную информацию.

### Литература

1. Грип А. Е., Schopere E., Z. Naturforsch., 6a, 698 (1951).
2. Spice W. E., Phys. Rev., 98, 1061 (1955).
3. Засенин В. И., Чудаков А. Е., Ж. эксперим. и теор. физ., 42, 1622 (1962).

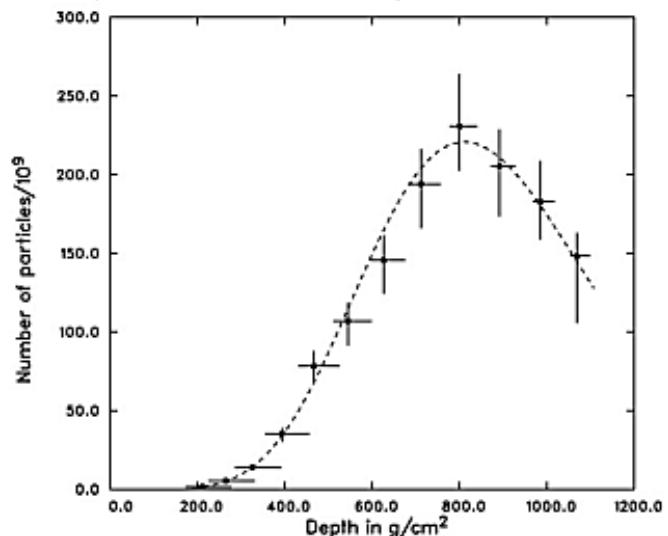
# Флюоресцентный метод (1962-1966)



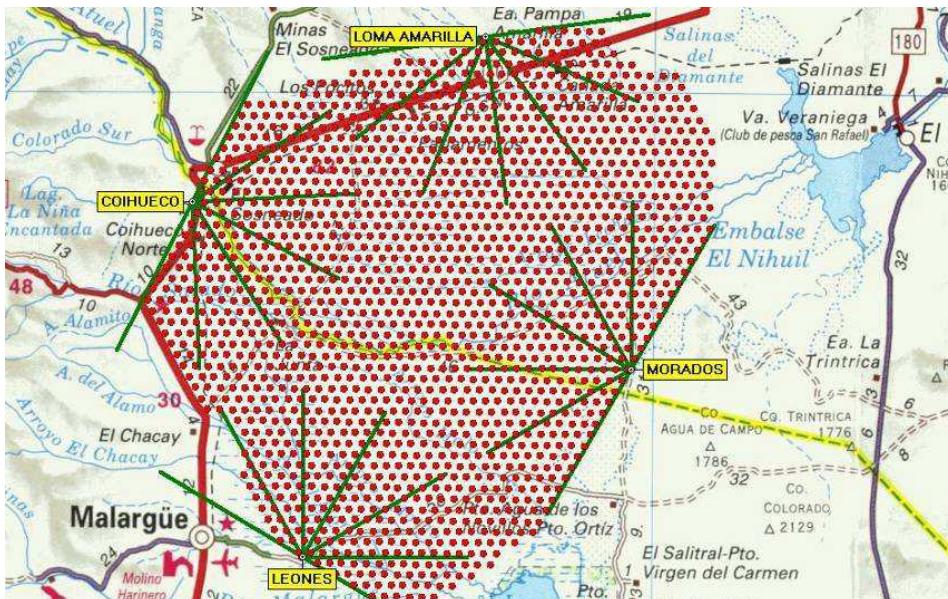
Ионизационное свечение превалирует где-то в районе 3 км и безусловно доминирует на расстояниях 5 км и более. ....  
По форме импульсов зарегистрированных в нескольких пунктах на расстоянии 5-10 км от оси в принципе можно определить не только положение оси ливня в пространстве, но и форму каскадной кривой и соответственно энергию выделенную в атмосфере. Возможна регистрация наклонных и почти горизонтальных ливней.



Fly's Eye and its largest shower



# Установка РАО (Pierre Auger Observatory) и зоны наблюдения ее флюоресцентных детекторов

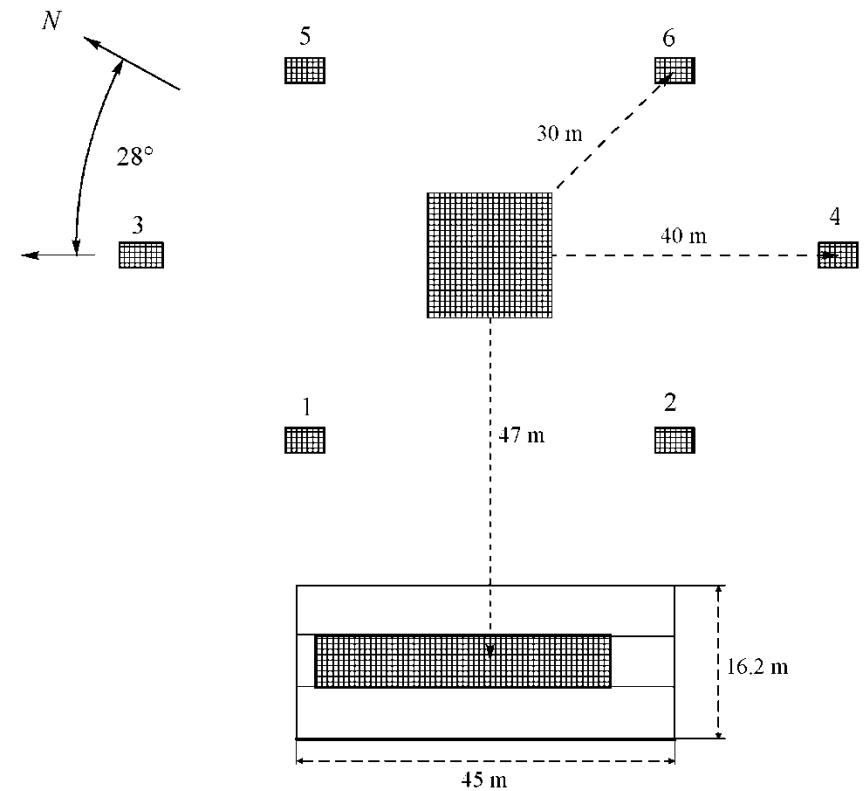
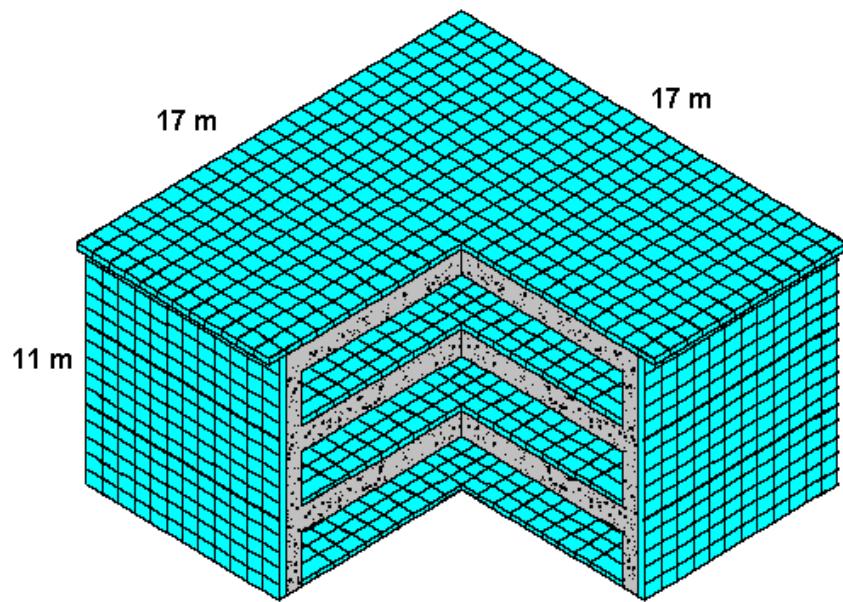
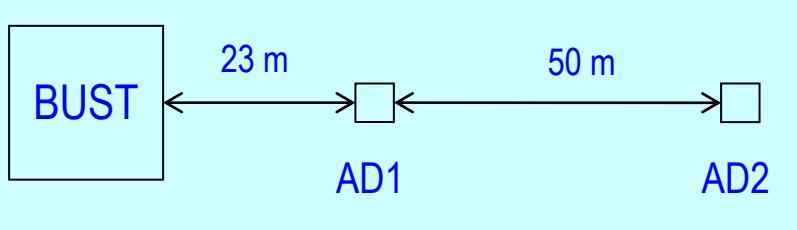


# Baksan: Underground Physics and Cosmic Rays (1964-2001)

## Chronicle of events:

- 1963 – Construction of the Baksan Neutrino Observatory approved;
- 1967 – the beginning of construction;
- 1974 – the Carpet air shower array put into operation;
- 1978 – the Baksan Underground Scintillation Telescope (BUST) put into operation;
- 1993 – the Andyrchi air shower array is constructed above the BUST.

# The BUST and the Carpet facilities



# The flux of vertical neutrinos and parameters of neutrino oscillations

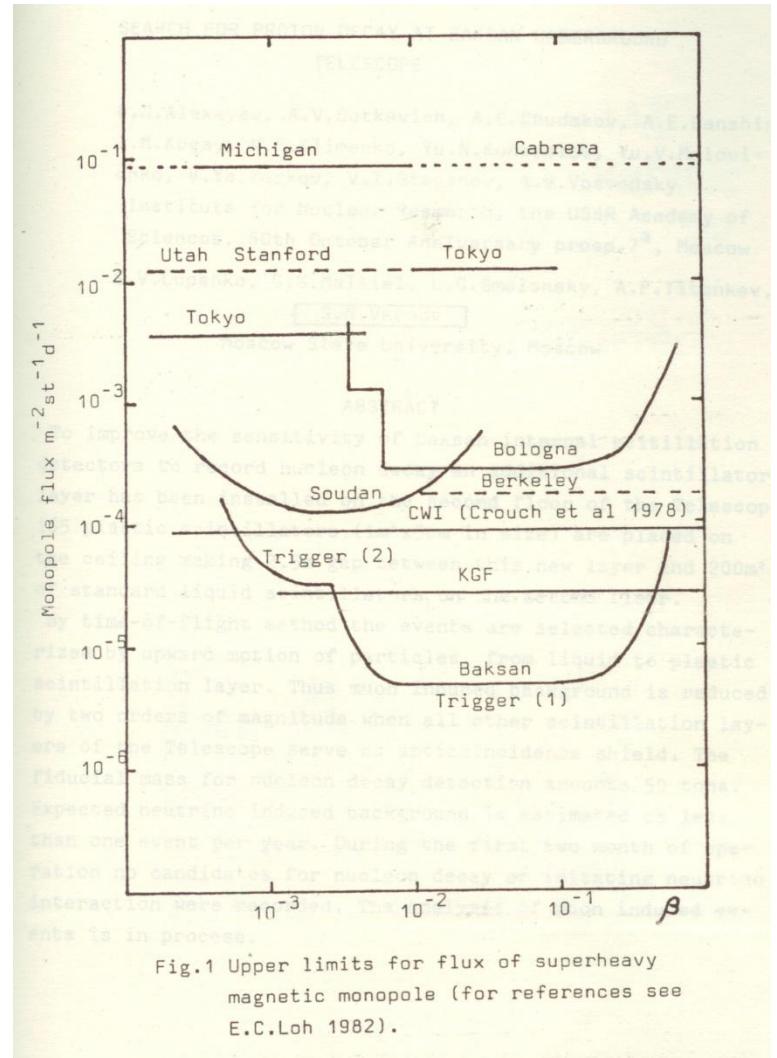
- Vertical intensity of upward-going neutrino-induced muons was measured for the first time (1980). The limits for parameters of neutrino oscillations were obtained (1985-1990).
- М.М. Болиев и др., ЯФ, 34, стр. 1418-1421 (1981).
- М.М. Boliev A.V. Butkevich, A.E. Chudakov, B.A. Makoev, S.P. Mikheyev, V.N. Zakidyshev, Baksan Neutrino experiment, Proc. of Neutrino81 Conf., Honolulu, Hawaii, v. 1, p. 283 – 290.
- Particle Data Group, 1982
- Ratio of measured to expected events  $R = 0.95 \pm 0.22$ . At 90% CL the limit was  $\Delta m^2 \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  (two types of neutrinos and maximum mixing). This limit was stronger than those of other experiments by a factor of 100. But due to small statistics it is rapidly became weaker with decreasing mixing and at  $\sin^2 2\alpha \leq 0.65$  completely disappeared.

# Proton lifetime

- Е.Н. Алексеев и др., Ограничение на время жизни протона по данным Баксанского подземного сцинтиляционного телескопа, Письма в ЖЭТФ, т. 33, вып.12, 664 (1981).
- E.N. Alexeyev, V.N. Bakatanov, A.V. Butkevich, A.V. Voevodsky, A.A. Gitel'son, A.E. Danshin, G.P. Keidan, A.A. Kiryushin, O.I. Petkova, A.E. Chudakov, B.E. Shtern, Lower limit on the proton lifetime according to data from the Baksan Underground Scintillation Telescope, ZhETP Letters, v. 33, no. 12, 651- 653 (1981).
- Some construction changes improving anti-coincidence shield were made for this experiment. Two inner layers of detectors were used to search for proton decays, six outer layers being the anti-coincidence shield.
- The lower limit on proton (neutron) lifetime established in this paper was equal to  $1.25 \cdot 10^{30}$  years (90% confidence level) for all neutrinoless modes of decay.
- The world-best limit approximately for half a year.

# Upper limits on the flux of magnetic monopoles

- The upper limit for the magnetic monopole flux was world-best for almost 20 years.
- First published 1983:
- E.N. Alexeyev et al., Search for slowly moving penetrating particles at Baksan underground telescope, 18<sup>th</sup> ICRC, Bangalore, India, 1983, vol. 5, pp. 52-55.



# Upper limits on the flux of magnetic monopoles

The American-Italian collaboration MACRO (1988-2000) in LNGS

“Its principal goal was to observe magnetic monopoles or set significantly lower experimental flux limits than had been previously available in the velocity range from about  $\beta=10^{-4}$  to unity.”

M. Ambrosio et al., The MACRO detector at Gran Sasso, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 486(3):45 · July 2002

- Thus, the upper limit for the magnetic monopole flux was world-best for almost 20 years. The MACRO collaboration, for which this problem had been the main task, finally succeeded in reaching the level of Baksan, but practically failed to improve it.

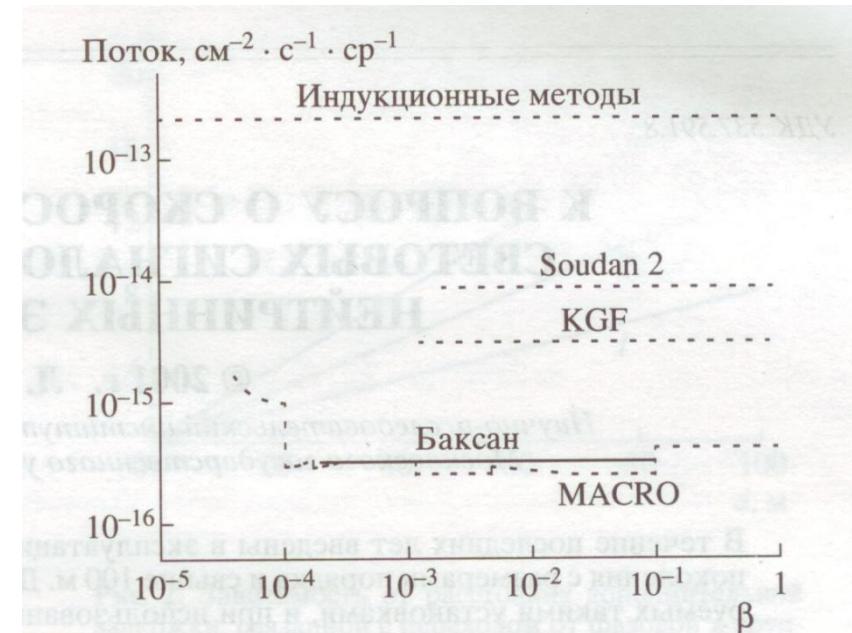


Рис. 2. Ограничение на поток магнитных монополей, полученное в данной работе, в сравнении с результатами других экспериментов.

Поиск магнитных монополей на Баксанском подземном сцинтиляционном телескопе, Изв. РАН, сер. физ. 65, №11, стр. 1662-1663 (2001)

# Inelastic interactions of muons

- Бакатанов В.Н., Новосельцев Ю.Ф., Новосельцева Р.В., Семенов А.М., Стенькин Ю.В., Чудаков А.Е., Сечение фотоядерного взаимодействия при энергии фотонов в диапазоне от 0,9 до 10 ТэВ, Письма в ЖЭТФ, 1988, т. 48, стр. 121-123.

Верешков Г.М., Лалакулич О.Д., Новосельцев Ю.Ф., Новосельцева Р.В., Полное сечение  $\gamma$ -N взаимодействия в области энергий  $\sqrt{s} = 40 - 250$  ГэВ, Ядерная физика, 2003, т.66, вып.3, стр. 591 – 600

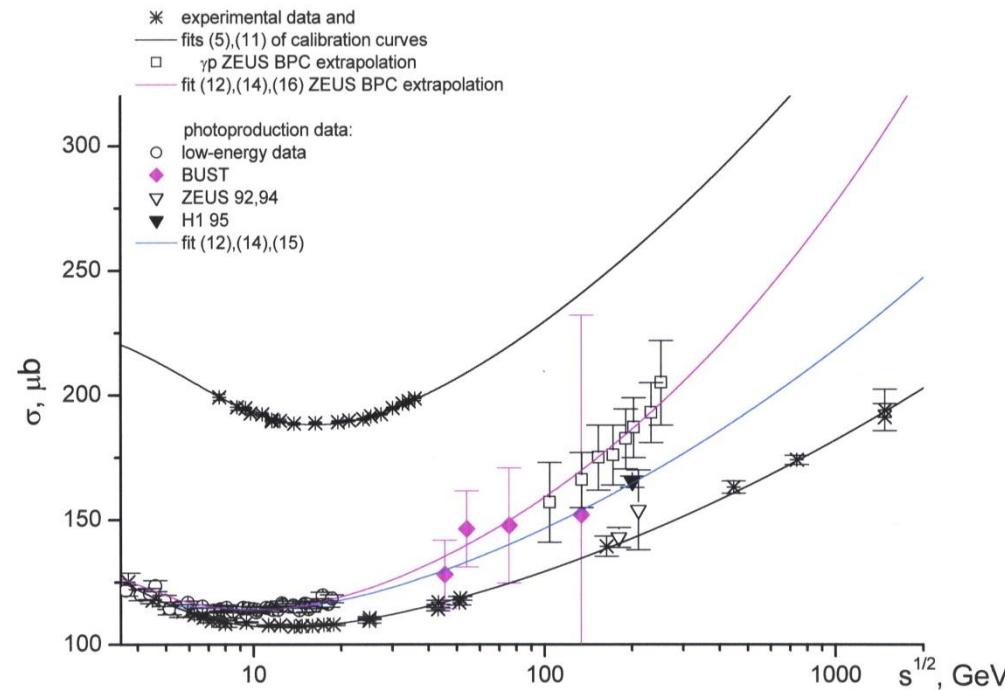
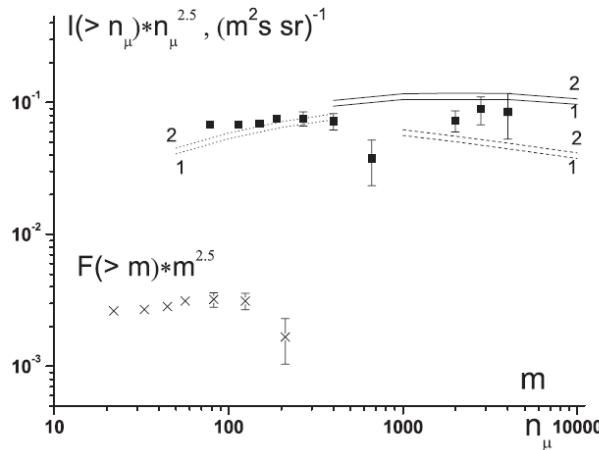


Fig.1. Calibration curves and cross section of  $\gamma p$  interaction.

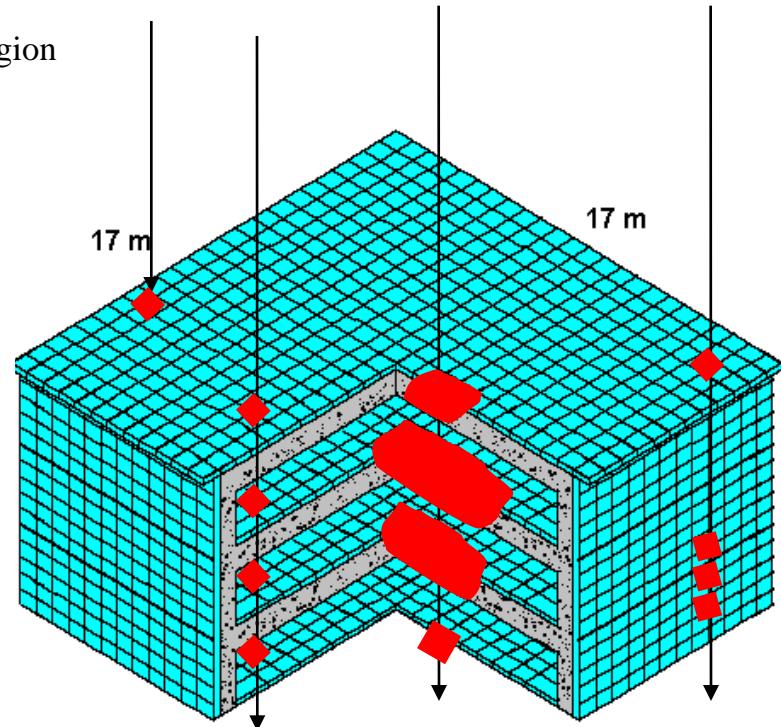
# Muon bundles underground

V.N. Bakatanov, Yu.F. Novosel'tsev, R.V. Novosel'tseva, Observation of "the knee" in cosmic ray energy spectrum with underground muons and the primary mass composition in the range  $10^{15}$ - $10^{17}$  eV, Astroparticle Physics, 1999, v.12, p.19.

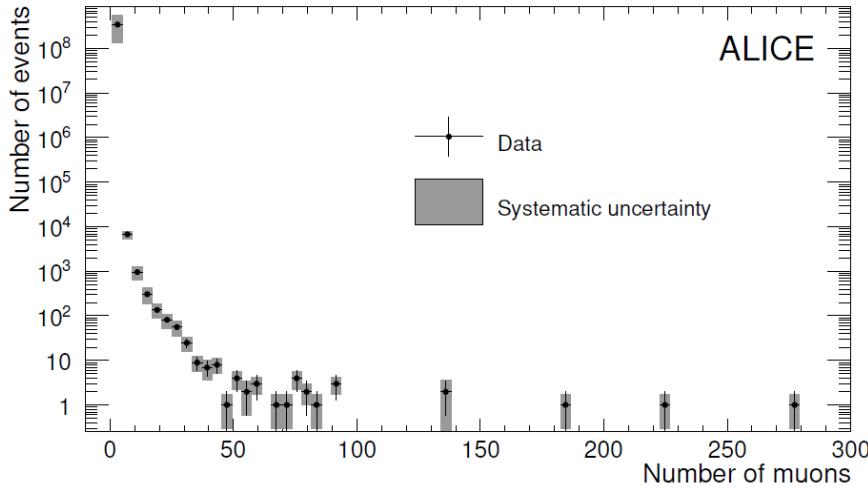
Y.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva and G.M..Vereshkov,  
On the mass composition of primary cosmic rays in the energy region  
 $10^{15}$ - $10^{16}$  eV, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **39** (2012) 105202



**Figure 1.** Squares are the EAS spectrum versus  $n_\mu$  (experimental data). The muon threshold energy is  $E_{th} = 235$  GeV if  $n_\mu < 1000$  and  $E_{th} = 220$  GeV at  $n_\mu > 1000$  [16, 18]. Crosses show the muon multiplicity spectrum obtained in [15] ( $m$  and  $F(m)$  correspond to the multiplicity spectrum). Solid curves are the expected fluxes ( $E_{th} = 220$  GeV) for the case  $E_k = Z \times 3 \times 10^{15}$  eV, dashed curves – the case  $E_k = 3 \times 10^{15}$  eV/nucleus. Dotted curves show the expected fluxes for the case  $E_k = Z \times 3 \times 10^{15}$  eV at  $E_{th} = 235$  GeV. Numbers near curves denote the mass composition variants: 1 is the 'standard' (low energy) composition, 2 is the composition (2).



# Muon bundles underground

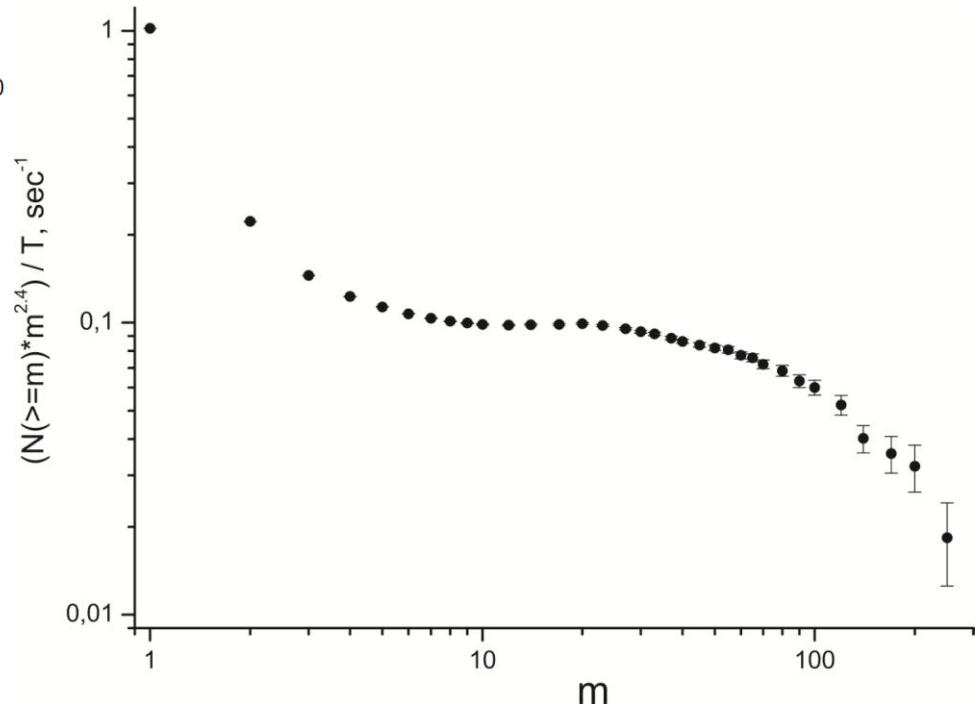


Integral spectrum of BUST multiplicities

$\theta \leq 20^\circ$  for 9.8 years (1984 - 1995).

m	events
100	295
120	166
140	88
170	49
200	30
250	10

## Highest multiplicities

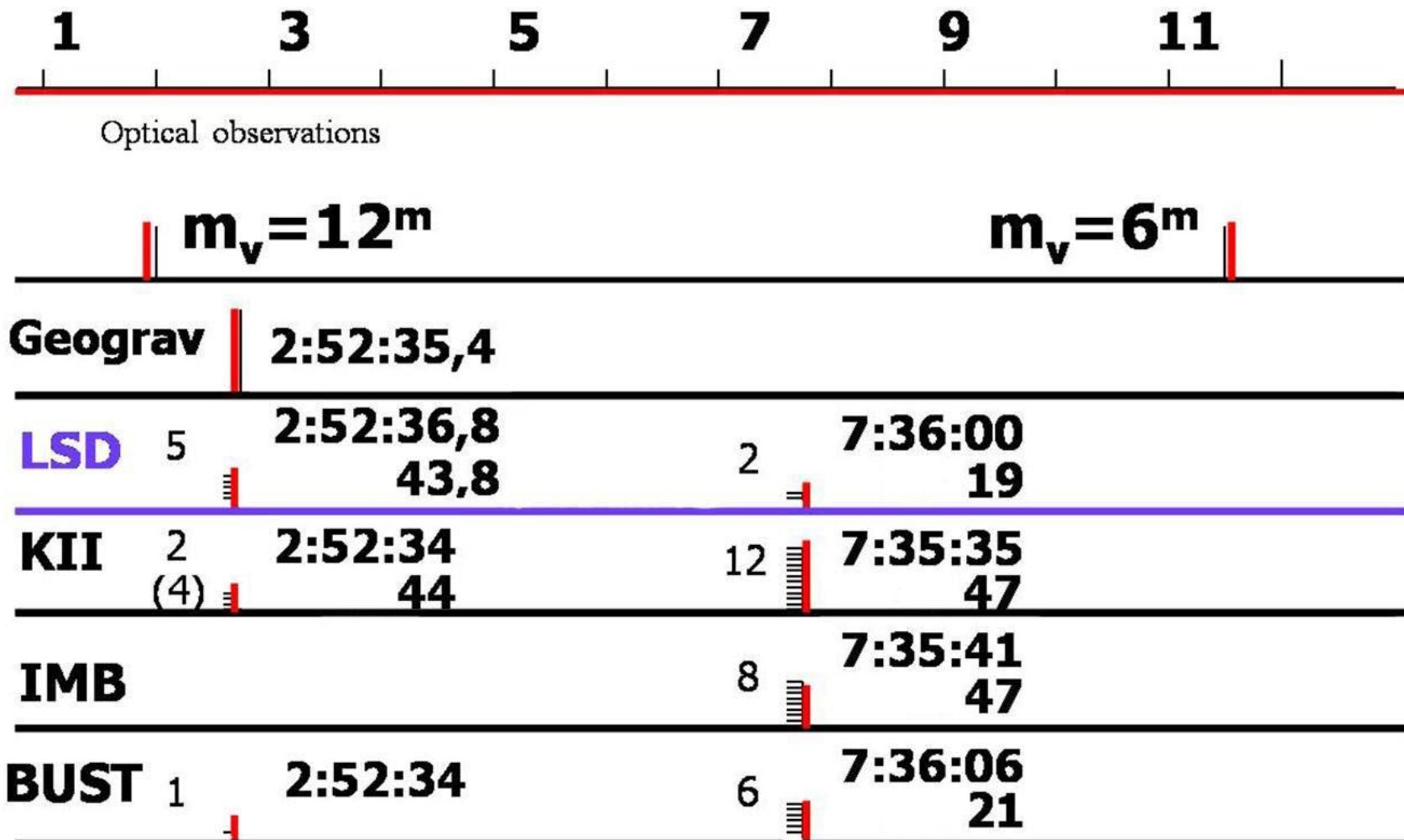


# Neutrino bursts from collapsing stars

- The BUST appeared to be one of four instruments in the world that succeeded in detecting the neutrino signal from collapsing star during explosion of supernova SN1987A in the Large Magellanic Cloud

E.N. Alexeev, L.N. Alexeeva, I.V. Krivosheina, V.I. Volchenko,  
Detection of the Neutrino Signal from SN1987A in the LMC using  
the INR Baksan Underground Scintillation Telescope, Phys.Lett.  
B205 (1988) 209-214.

**February 23, 1987**

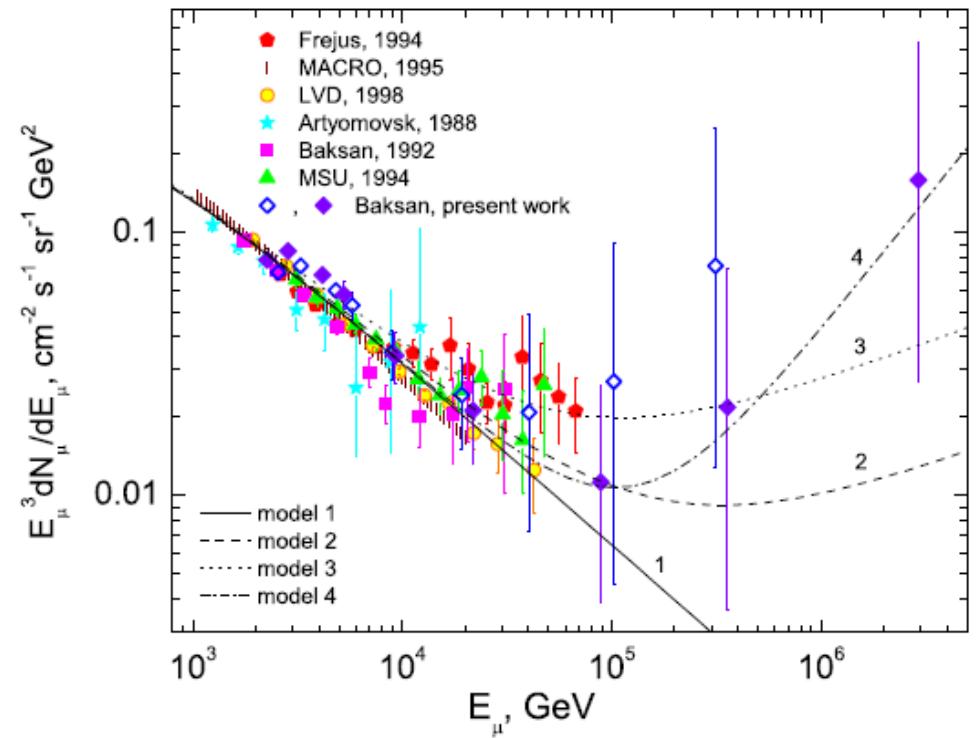
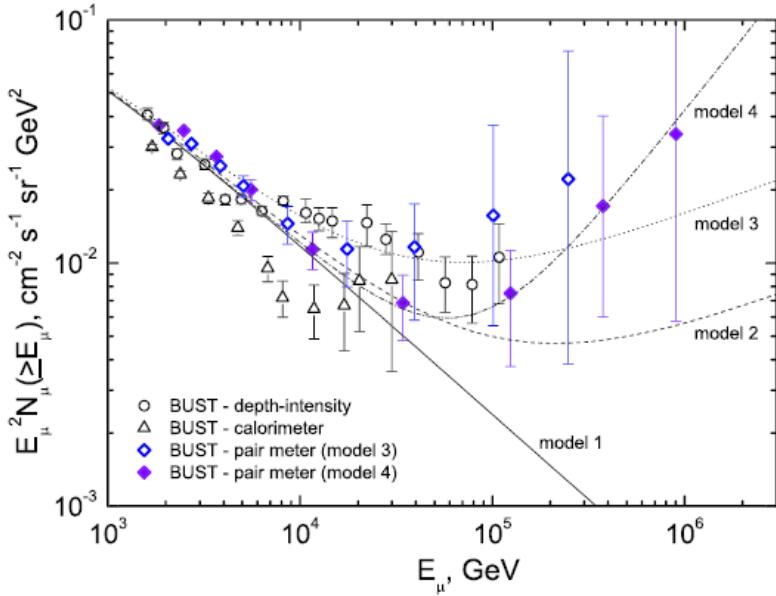


# Energy spectrum of high-energy muons

V.N. Bakatanov, A.E. Chudakov, Yu.F. Novosel'tsev, R.V. Novosel'tseva, A.M. Semenov, Yu.V. Sten'kin.

Study of muon spectrum and muon inelastic scattering at Baksan underground scintillation telescope. Proc. of 21 ICRC, Adelaide, 1990, v.9, p. 375-378.

A.G. Bogdanov, R.P. Kokoulin, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, A.A. Petrukhin,  
Energy spectrum of cosmic ray muons in 100 TeV energy region reconstructed from the BUST data,  
Astroparticle Physics, 36 (2012) 224–236



# Upper limits on the Dark Matter (neutralino) parameters

M.M. Boliev, E.V. Bugaev,  
A.V. Butkevich, A.E. Chudakov,  
S.P. Mikheev, O.V. Suvorova, V.N.  
Zakidyshev, Nucl. Phys. Proc.  
Suppl. (1996) 83-86

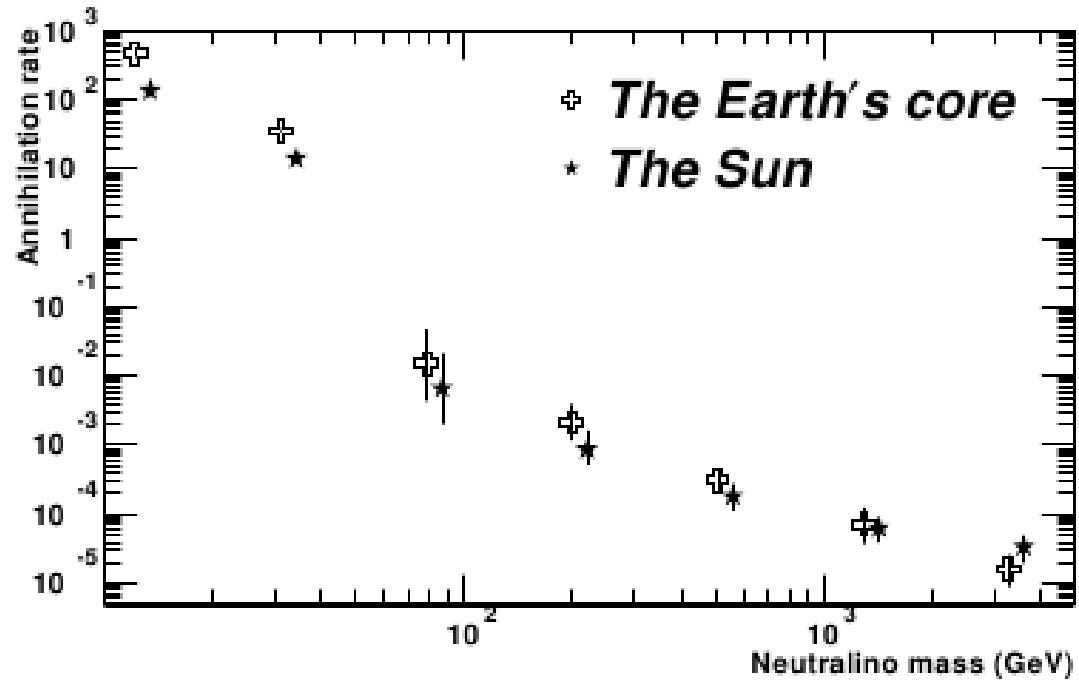
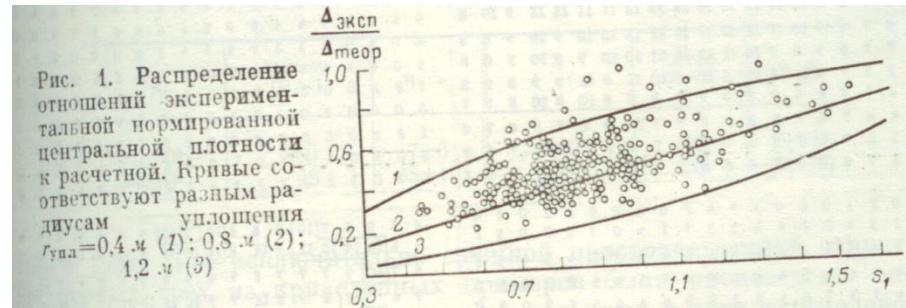


Fig. 4. Upper limits at 90% confidence level on annihilation rate in units of  $10^{15} s^{-1}$  ( $10^{24} s^{-1}$ ) for the Earth's core (crosses) (the Sun (stars)) as a function of neutralino mass. Vertical bars show spread due to variations of another model parameters.

# EAS studies with the Carpet array

- High-precision measurements of LDF and its fluctuations
- E.N. Alexeyev et al., Lateral distribution of electrons in EAS with  $Ne \geq 2 \cdot 10^5$ , 15<sup>th</sup> ICRC, Plovdiv, Bulgaria, v. 8, p. 52 (1977).
- Е.Н. Алексеев и др., Функция пространственного распределения электроновв ШАЛ на высоте 1700 м над уровнем моря, Изв. АН СССР, сер. физ., 1978, т. 42, № 7, стр. 1417-1419.
- Д.Д.Джаппуев и др. Флуктуации формы пространственного распределения ШАЛ на расстояниях < 50 м от оси, ЯФ, 1979, т. 29, №4, стр. 957-961.
- Study of EAS structure near its axis and estimation of the flattening region near the core
- E.N. Alexeyev et al., Structure of the central part of EAS with  $Ne \geq 2 \cdot 10^5$ , 15<sup>th</sup> ICRC, Plovdiv, Bulgaria, v. 8, p. 56 (1977).
- Е.Н. Алексеев и др. Пространственная структура ШАЛ вблизи оси, Изв. АН СССР, сер. физ., 1978, т. 42, № 7, стр. 1420-1424.

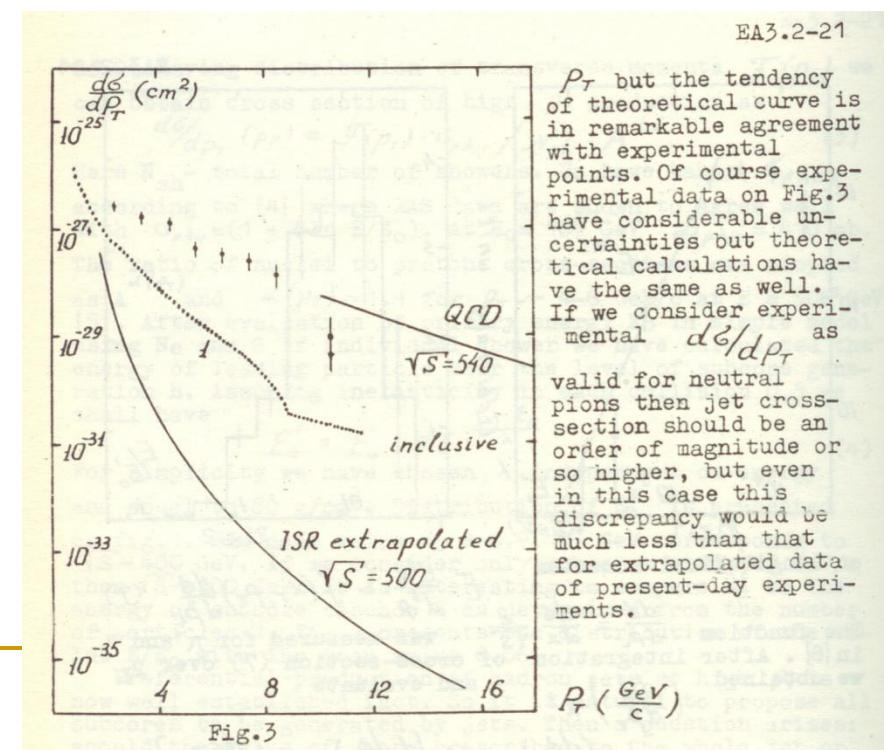


# Multi-core EAS and high transverse momenta in hadron-hadron interactions

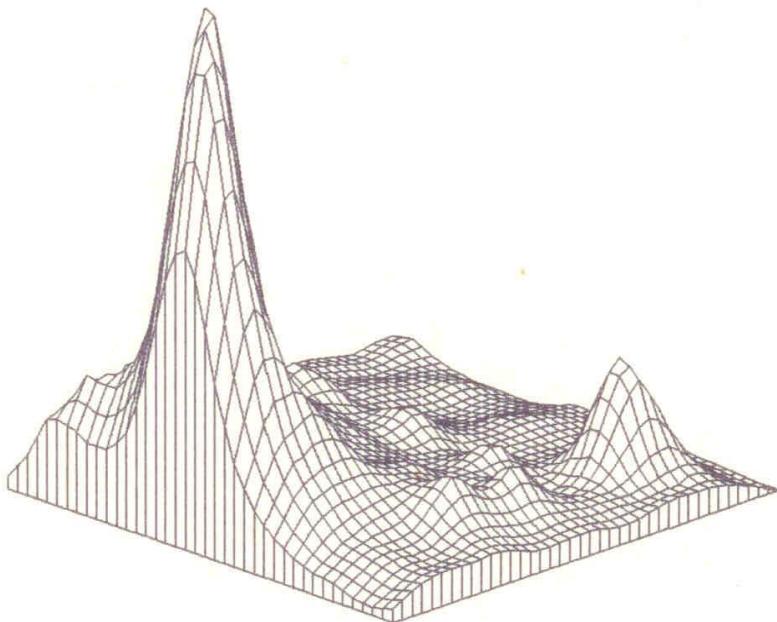
- From the analysis of multicore showers (Carpet) the cross section of generation of high Pt jets at  $\sqrt{S} \sim 500$  GeV is estimated and demonstrated to be in agreement with QCD predictions (1981, at least one year before the similar results of UA1 and UA2 collaborations at the CERN SPS-collider).
- (The plot from this report was reprinted in CERN Courier immediately)

A.E. Chudakov, D.D. Dzhappuyev, A.S. Lidvansky, V.A. Tizengauzen, V.P. Sulakov, G. Navarra, Investigation of EAS with multicore structure, 16<sup>th</sup> ICRC, Kyoto, Japan, v. 8, p. 222 (1979).

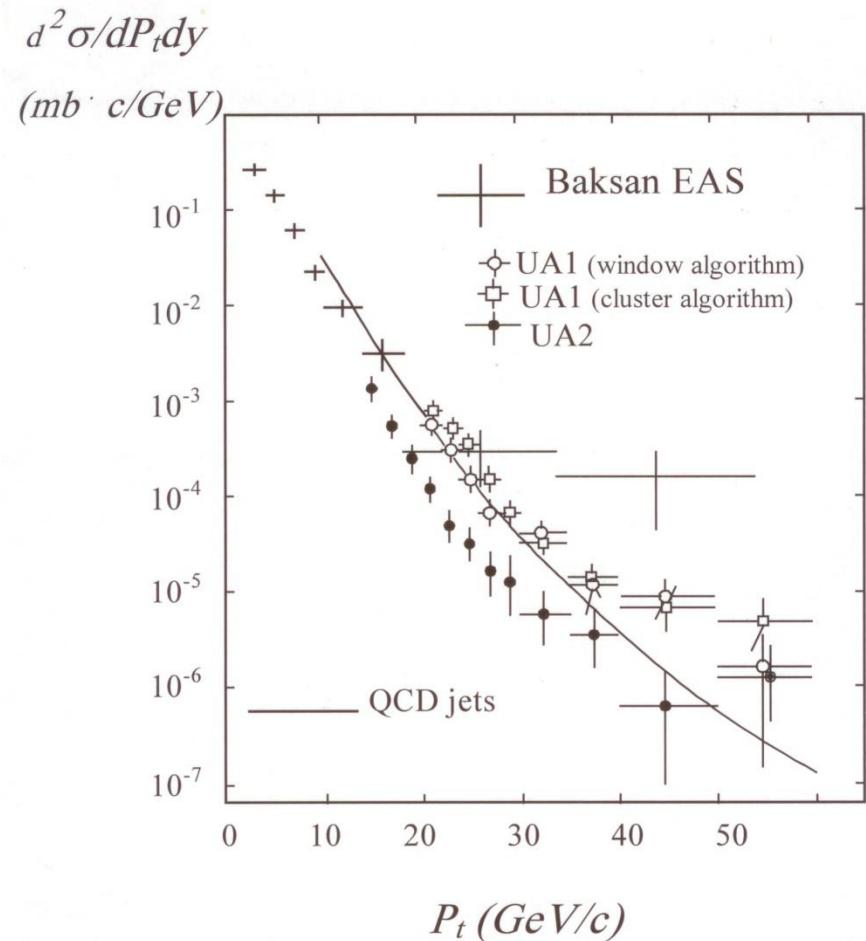
A.E. Chudakov, K. Dobrzynski, E. Krys, A.S. Lidvansky, G. Navarra, V.A. Tizengauzen, J. Wdowczyk. The data on multicore air showers and cross-section of high-Pt jet production at  $\sqrt{S} \sim 500$  GeV, Proc. of 17th ICRC, Paris, 1981, v.6, p. 183-186.



## Первое подтверждение КХД в событиях с большими Pt



Пример многоствольного ливня  
(сглаженная плотность частиц)



Cross-section of high  $P_t$  events in an air shower experiment compared to a calculation for QCD jets and first experiments at CERN SPS collider.

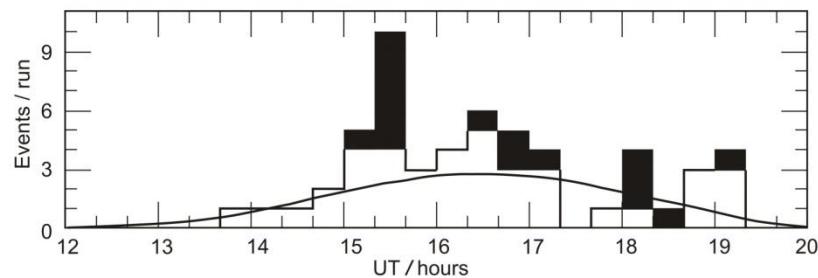
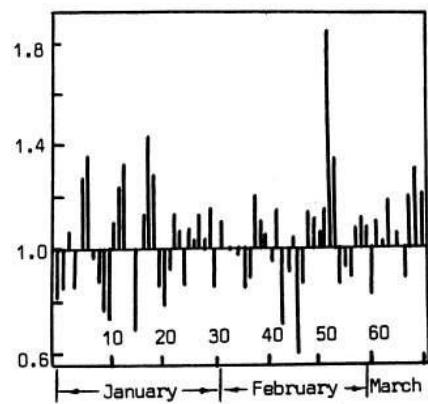
# Gamma-ray astronomy

The Crab Nebula burst on Feb 23, 1989 г.

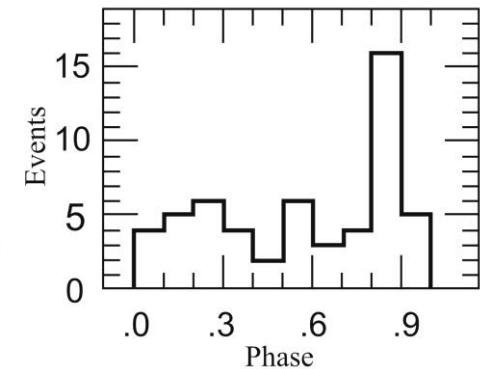
V.V. Alexeenko, A.S. Lidvansky, V.A. Tizengauzen,

A Search for  $> 10^{14}$  eV Gamma Rays from Point Sources at Baksan Air Shower Array,  
Proceed. of Intern. Workshop on Very High Energy Gamma Ray Astronomy, Crimea, 1989,  
ed. by A.A. Stepanyan, D.J. Fegan, and M.F. Cawley, p. 137

- Acharya B.S., Rao M.V.S., Sivaprasad K., Sreekantan B.V., and Vishwanath P.R., First simultaneous detection of PeV energy burst from the Crab Nebula,  
*Nature*, **347** (1990), 364-5.
- V.V. Alexeenko, Yu.M. Andreyev, A.E. Chudakov, Ya.S. Elensky, A.S. Lidvansky, S.Kh. Ozrokov, Yu.V. Stenkin, V.A. Tizengauzen, L.J. Graham, J.L. Osborne, A.W. Wolfendale. The ultra-high energy gamma-ray burst from the Crab Nebula observed by the Baksan EAS array. *Journ. of Phys. G : Nucl. Part. Phys.* **18** (1992) L83-L88.

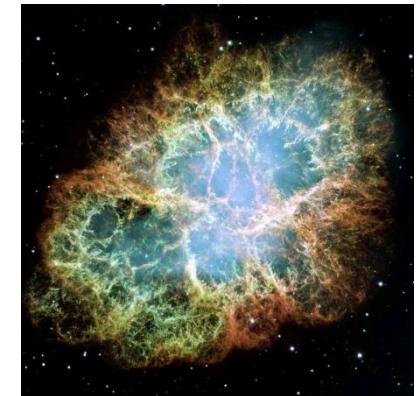
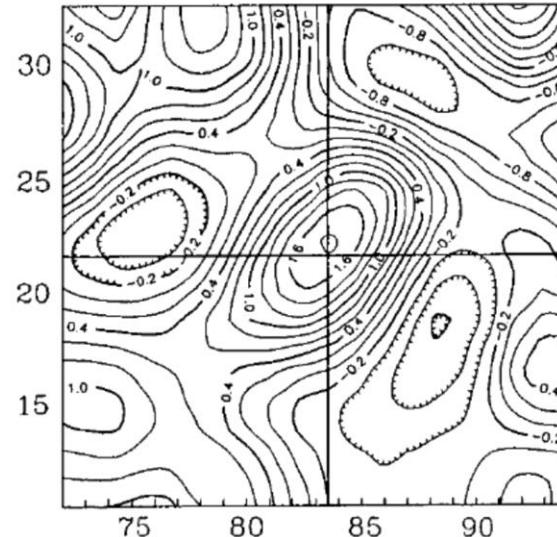
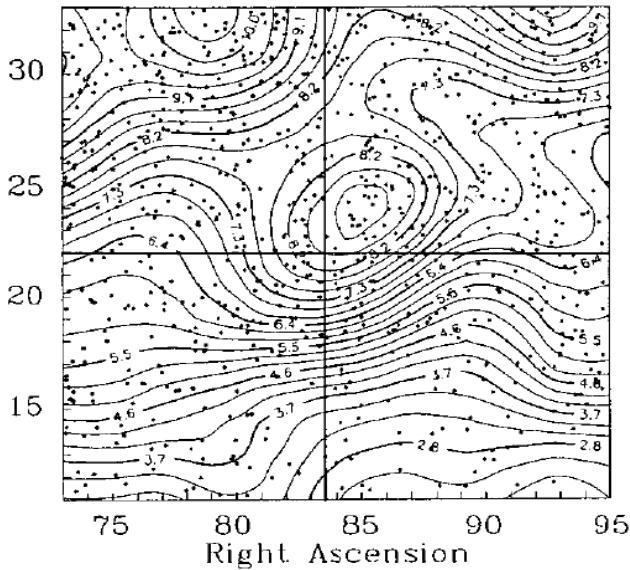


Time dependence of the counting rate in the source cell with a radius of  $2.5^\circ$

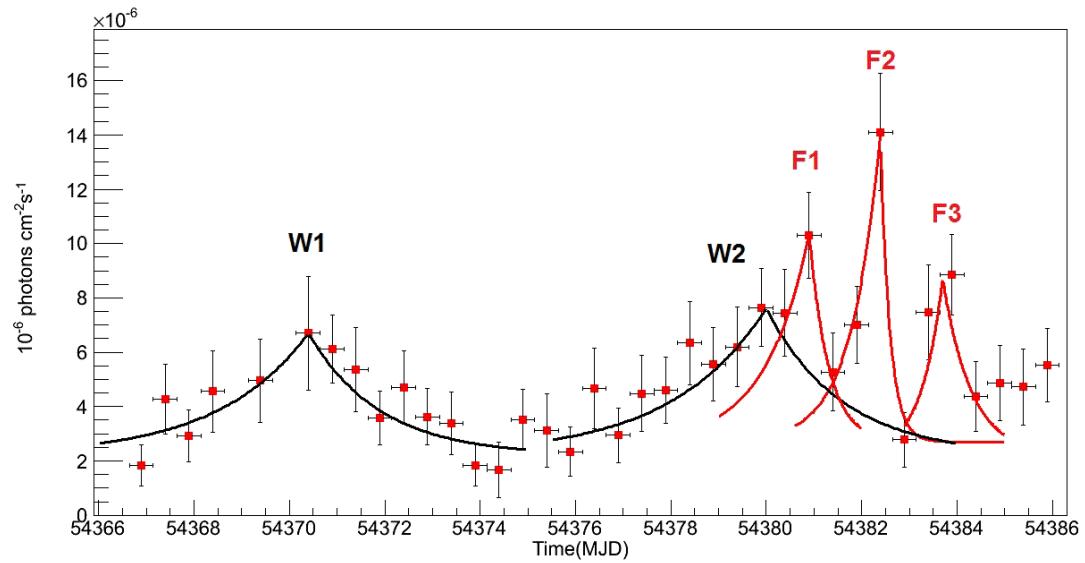
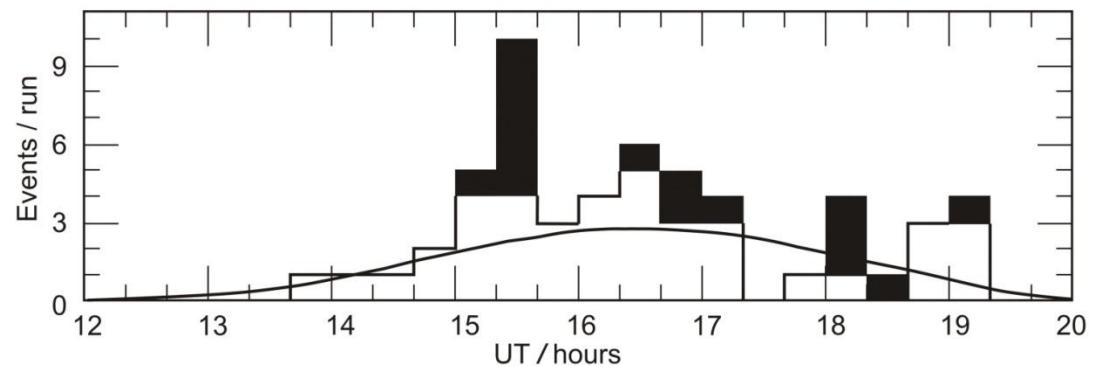
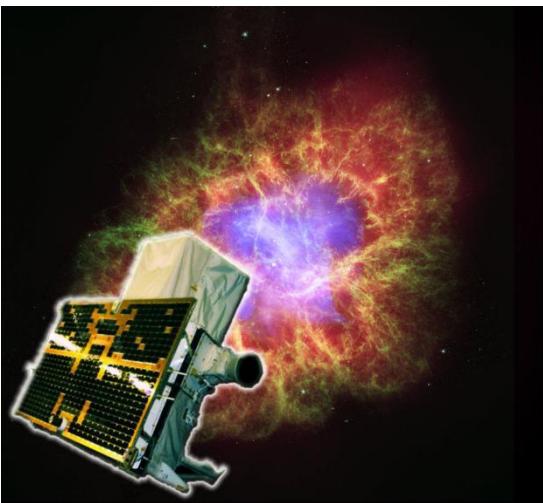


Phase analysis with period of pulsar PSR0531  
(without absolute time reference)

Declination

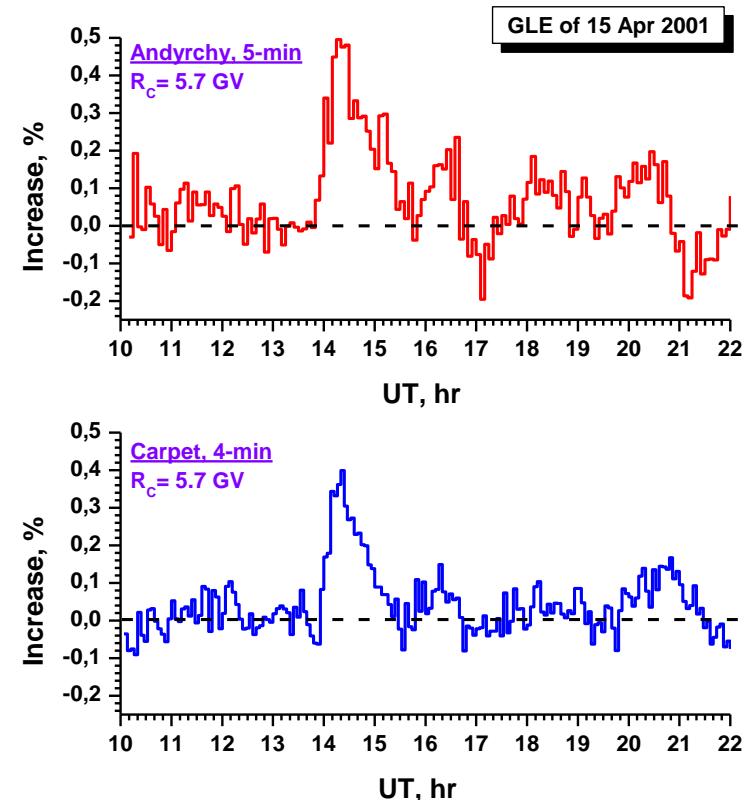
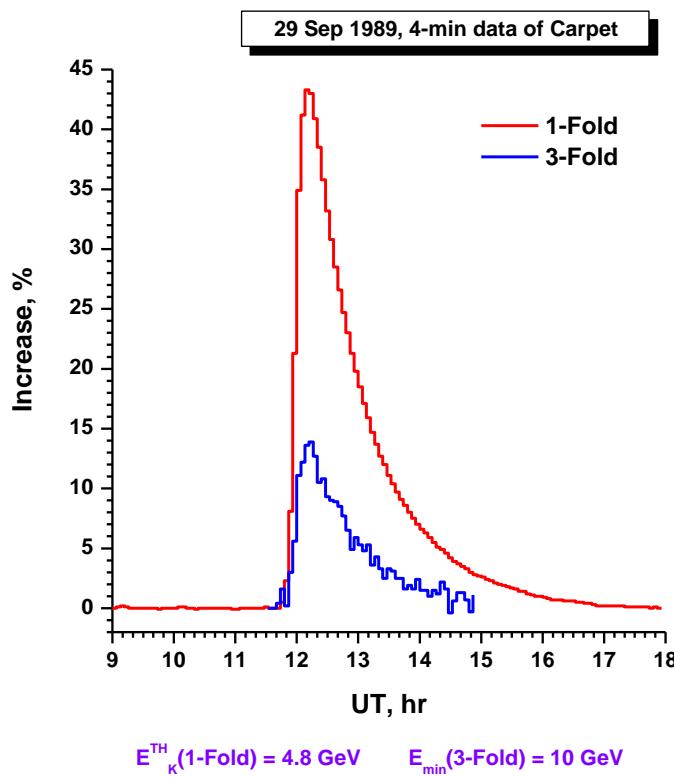


Similar triple time structure of flares for energies differing by a factor of  $10^6$ . Single scale factor (about 20, hours and days, for a period of repetition and duration of pulses).



E. Striani et al., Variable gamma-ray emission from the Crab Nebula: short flares and long “waves”, *Astrophys. Journ.*, 76552, 2013 March 1

# Detection of GLE from solar flares



# Anisotropy of cosmic rays

10 TeV Carpet 1981  
 2.5 TeV BUST 1987  
 100 TeV Andyrchi 2004

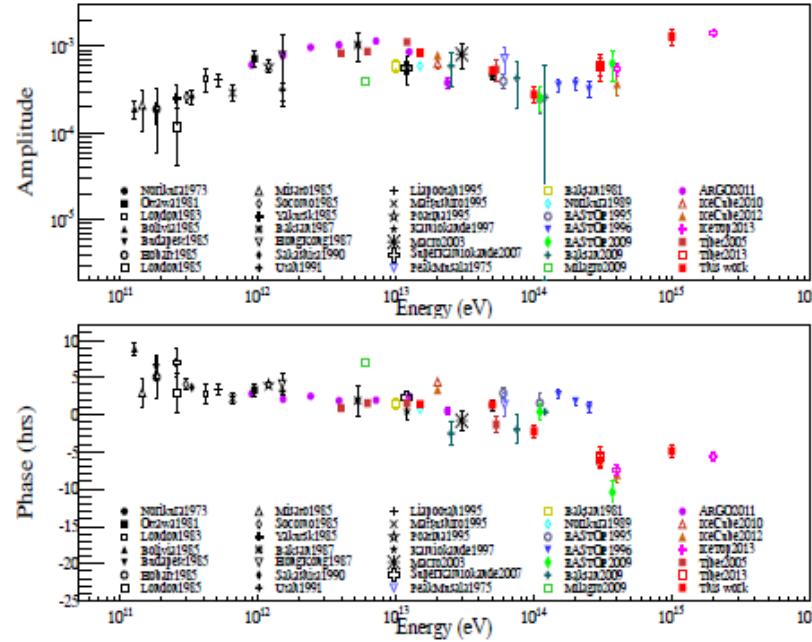
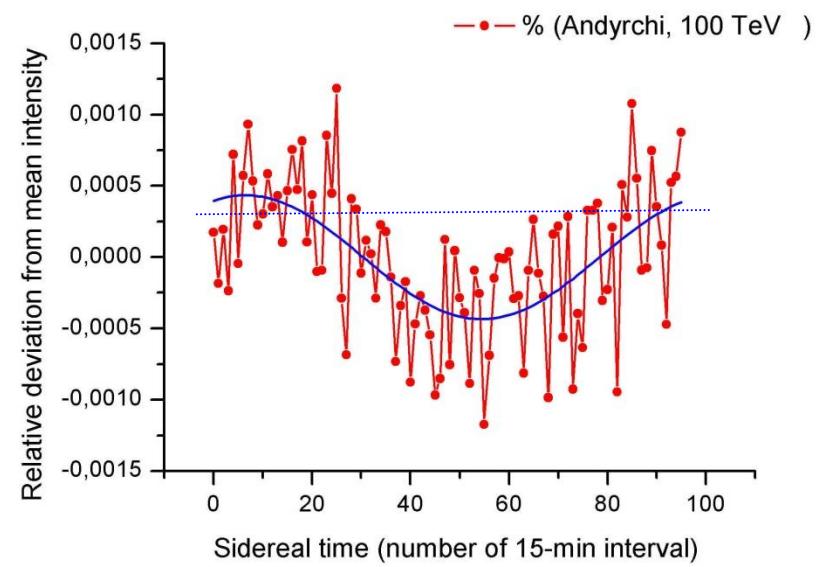
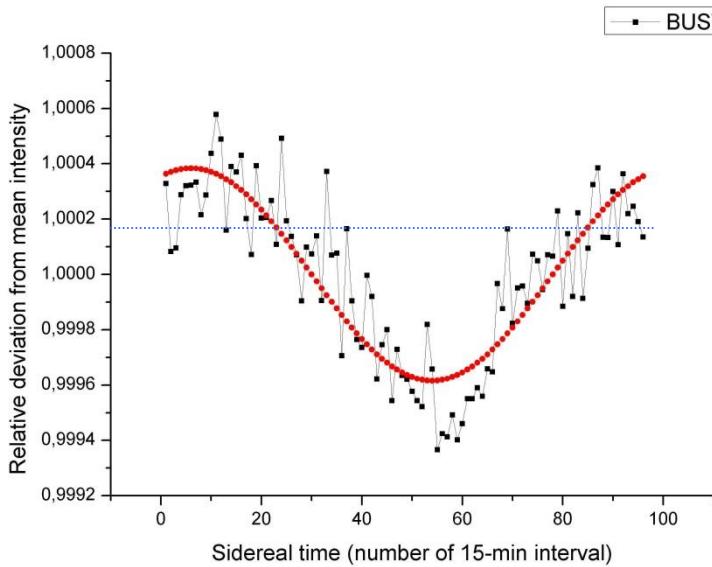


FIG. 5.— The energy dependences of amplitude (top) and phase (bottom), of the first harmonics of the CRs anisotropy obtained in this work, and reported from previous measurements. They are underground muon observations: Norikura(1973) (Sakakibara et al. 1973), Ottawa(1983) (Bercovitch & Agrawal 1981), London(1983) (Thambyahpillai 1983), Bolivia(1985) (Swinson & Nagashima 1985), Budapest(1985) (Swinson & Nagashima 1985), Hobart(1985) (Swinson & Nagashima 1985), London(1985) (Swinson & Nagashima 1985), Misato(1985) (Swinson & Nagashima 1985), Socorro(1985) (Swinson & Nagashima 1985), Yakutsk(1985) (Swinson & Nagashima 1985), Banksan(1987) (Andreyev et al. 1987), HongKong(1987) (Lee & Ng 1987), Sakashita(1990) (Ueno et al. 1990), Utah(1991) (Cutler & Groom 1991), Liapootah(1995) (Munakata et al. 1995), Matsushiro(1995) (Mori et al. 1995), Poatina(1995) (Fenton et al. 1995), Kamiokande(1997) (Munakata et al. 1997), Marco(2003) (Ambrosio et al. 2003), SuperKamiokande(2007) (Guillian et al. 2007), and air shower array experiments: PeakMusala(1975) (Gombosi et al. 1975), Baksan(1981) (Alexeyenko et al. 1981), Norikura(1989) (Nagashima et al. 1989), EASTOP(1995,1996,2009) (Aglietta et al. 1995, 1996, 2009), Baksan(2009) (Alekseenko et al. 2009), Milagro(2009) (Abdo et al. 2009), IceCube(2010,2012) (Abbasi et al. 2010, 2012), IceTop(2013) (Aartsen et al. 2013), ARGO-YBJ(2015) (Bartoli et al. 2015), Tibet(2005,2013) (Amenomori et al. 2005b; Amenomori et al. 2013).

# Anisotropy of cosmic rays: in high-energy muons (underground) and in small-size EAS (on the ground surface)



First harmonic of sidereal daily wave as measured by the BUST  
(threshold for primaries 2.5 TeV) and air shower Andyrchi array  
(100 TeV)

# Variations of cosmic rays during thunderstorms

Disturbances in secondary cosmic ray intensity during thunderstorms were first discovered in pioneering experiment in 1985 г.

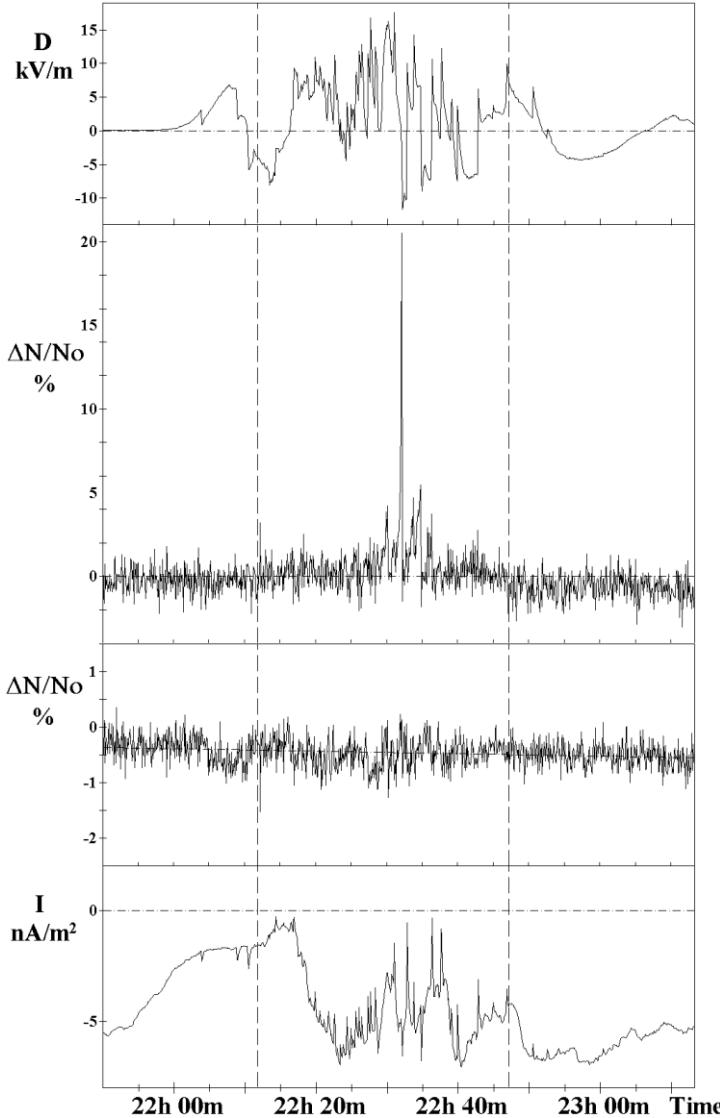
Alexeyenko, V.V., Chudakov, A.E., Sborshikov, V.G., and Tizengauzen, V.A., Short perturbations of cosmic ray intensity and electric field in atmosphere, Proc. 19th ICRC, La Jolla, 1985, vol. 5, pp. 352-355.

The experiment restarted again at a new level in 2000.

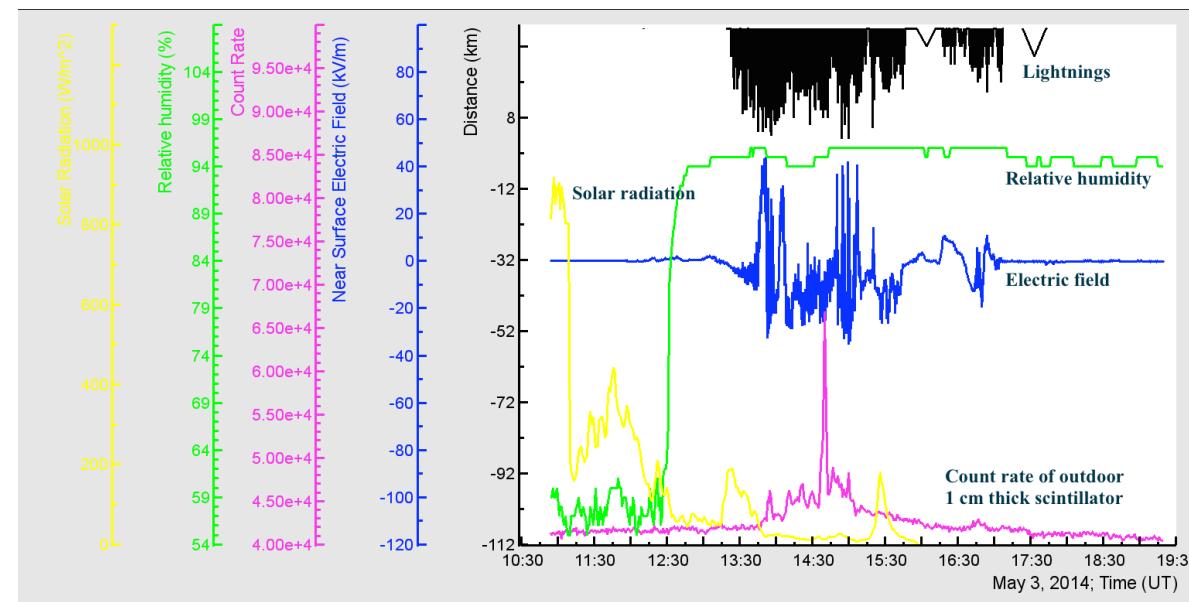
V.V. Alexeenko, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, and V.B. Petkov, Transient Variations of Secondary Cosmic Rays due to Atmospheric Electric Field and Evidence for Pre-Lightning Particle Acceleration, Physics Letters A, 2002, vol. 301, issues 3-4, pp. 299-306.

At the moment this line of research represents the separate field of science. The specialized annual TEPA (Thunderstorm Elementary Particle Acceleration) workshops are carried out at Nor-Amberd (Armenia).

# Strong enhancement of the soft component on September 7, 2000, Baksan Valley.

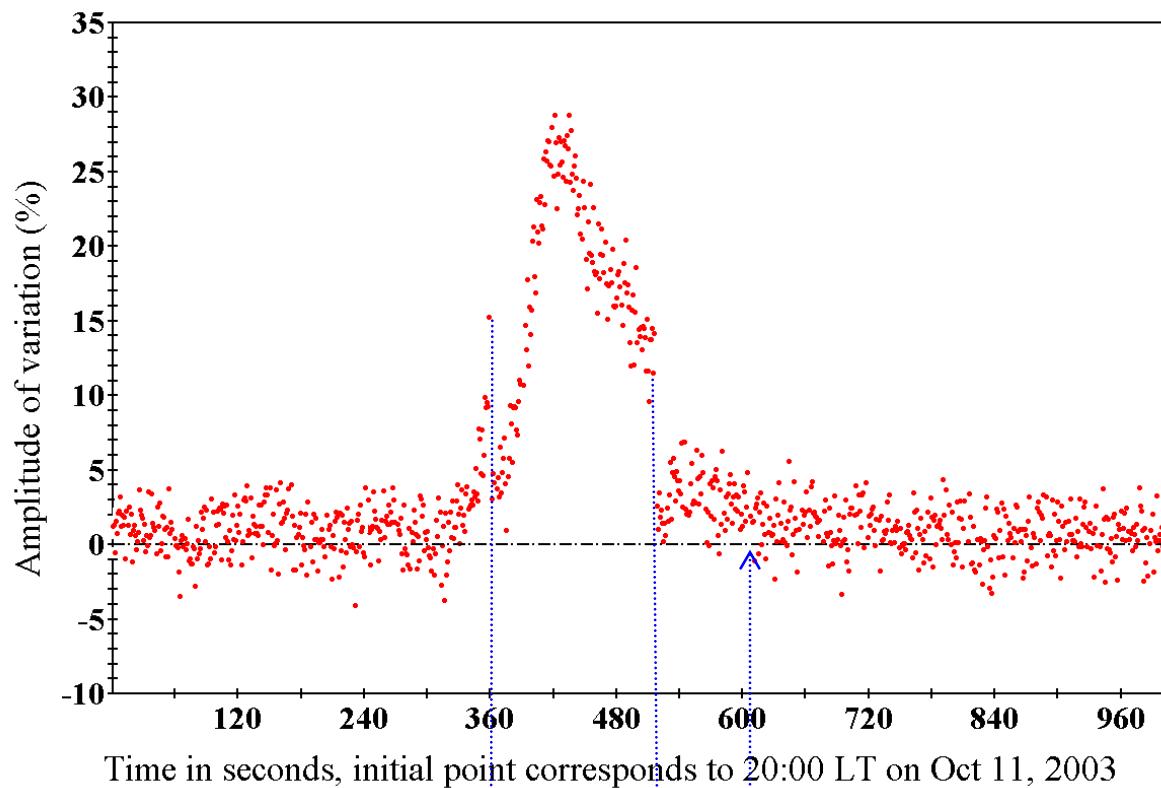


Mt. Aragats experiment in Armenia. Very similar example of TGE.

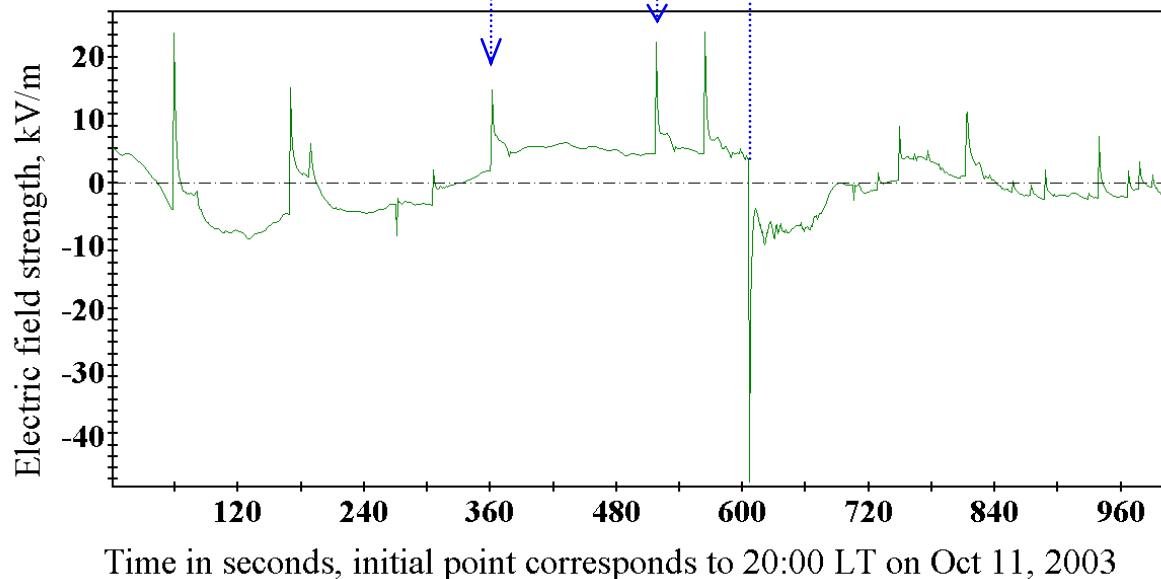


## Record enhancement during thunderstorm on October 11, 2003

Estimates of minimal distance to two lightning strokes exerting strong effect on the intensity are 4.4 and 3.1 km. Other lightning discharges, including very near, give no such an effect.

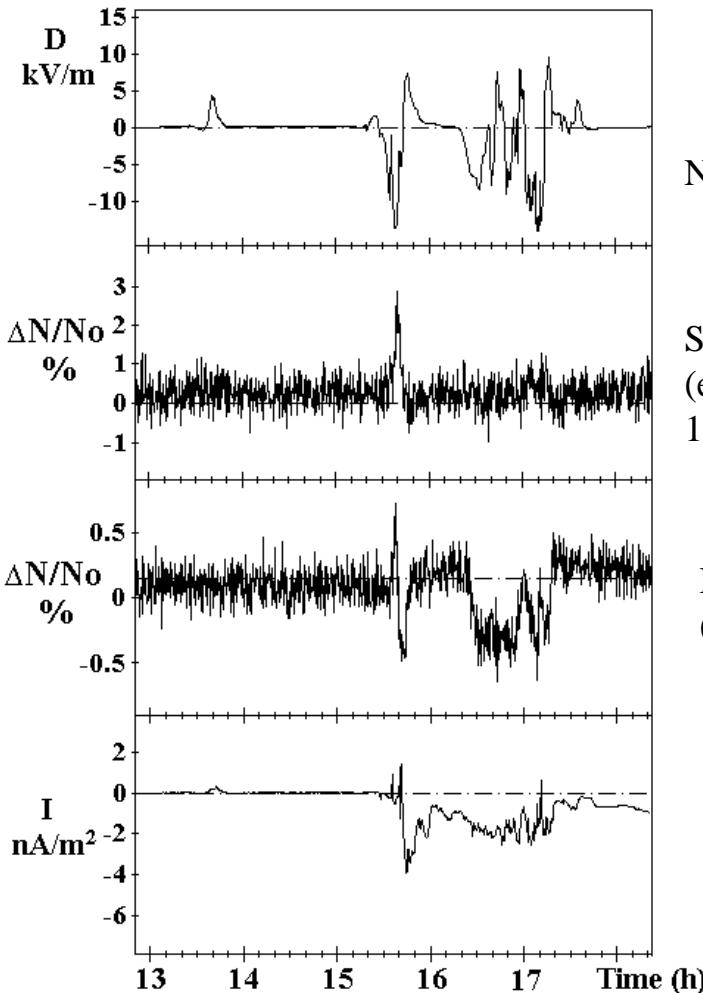


Time in seconds, initial point corresponds to 20:00 LT on Oct 11, 2003



Time in seconds, initial point corresponds to 20:00 LT on Oct 11, 2003

Two strong variations of muons on one day of a year separated by seven years:  
 September 24, 2000 and 2007. In the latter event sharp variations associated with  
 lightning discharges are observed

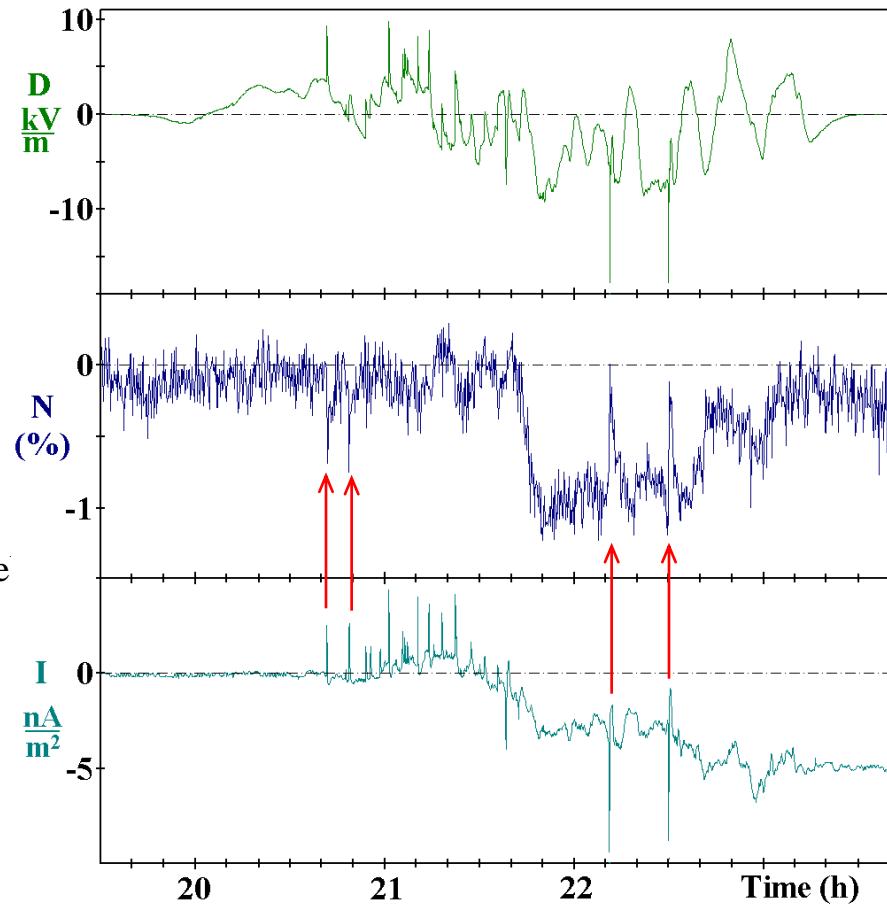


Near ground field

Soft component  
 $(e^-, e^+, \gamma)$   
 10-30 MeV

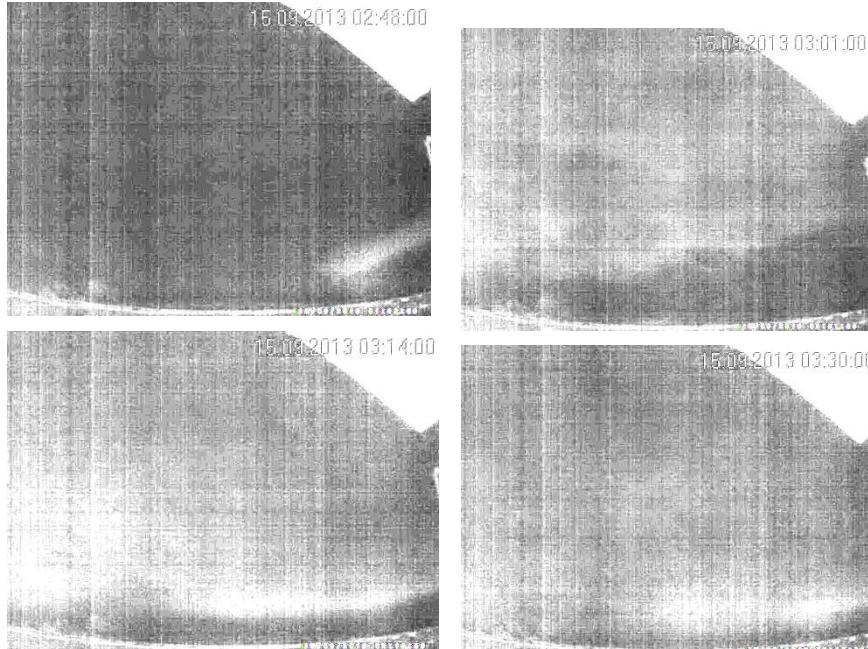
Hard component  
 (muons > 100 MeV)

Precipitation  
 electric current

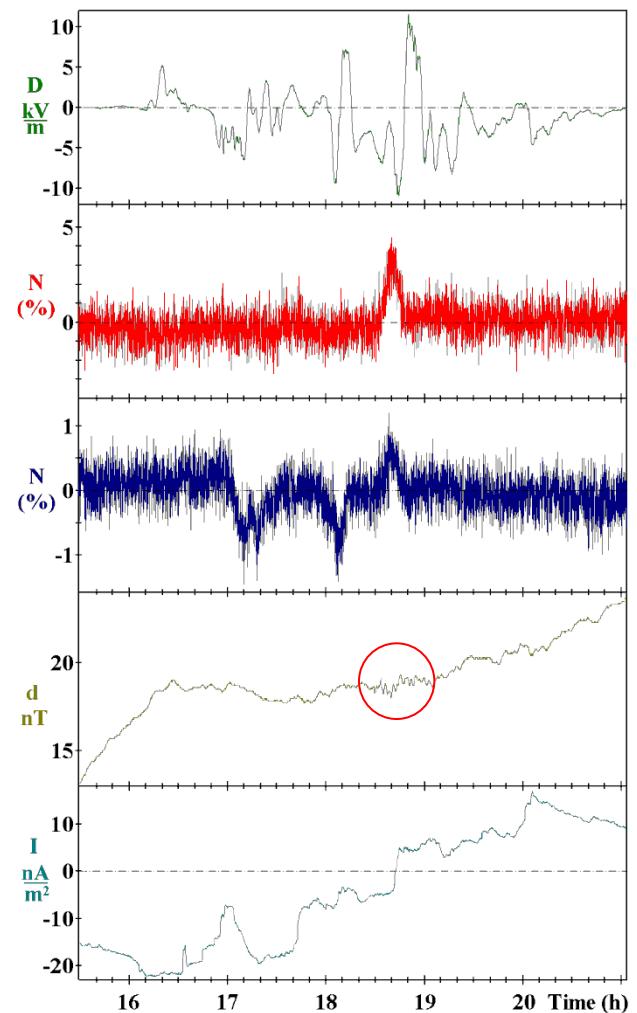


# CR Variations during thunderstorms: geomagnetic pulsations and new type of high-altitude discharge coincident with muon intensity disturbances

The event on September 15, 2013.



The event on October 15, 2007



# The Summary of Chudakov's Pioneering Achievements

- He predicted a new physical effect (Chudakov effect), which turned out to be of universal nature;
- He was the first who observed an interesting physical effect predicted by other people (transition radiation);
- He discovered (together with S.N. Vernov) the outer radiation belt, a new physical object (area in space) of fundamental importance for space exploration, environment and physical studies;
- He was a founding father for several branches of modern science, like gamma ray astronomy and underground physics, where his ideas predetermined the future development in both direction and methods of investigations.

# Из некролога Чудакову :

- Он всей своей деятельностью оказывал огромное влияние на формирование склада мышления , научного мировоззрения и стиля работы многих поколений физиков, работающих в области космических лучей. При этом в настоящее, не лучшее для отечественной науки время, когда сплошь и рядом величайшей доблестию считается быть на уровне мировых тенденций и достижений (что на самом деле означает прозябание в хвосте пелетона), особенно поучителен пример ученого, который во всех своих начинаниях был пионером и, как правило, опережал мировой уровень на многие годы.

УФН, 2001, т. 171, № 5