

Тема диссертации:

Анализ электрон-фотонной и адронной компонент широких атмосферных ливней по данным установок НЕВОД-ШАЛ и ПРИЗМА

1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных
частиц, физика высоких энергий

Аспирантка: Южакова Елена Александровна
Научный руководитель: Хохлов Семён Сергеевич,
доцент, к.ф.-м.н.

18 мая 2026 г.

Шарль-Огюстен де Кулон

1785 год – доллар стал официальной валютой в США, Екатерина II подписала «жалованную грамоту дворянству»

Доклад по электричеству и магнетизму во Французскую Королевскую Академию Наук ^[1]

612 MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE ROYALE

TROISIÈME MÉMOIRE

SUR L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME.

De la quantité d'Électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné, soit par le contact de l'air, plus ou moins humide, soit le long des soutiens, plus ou moins idio-électriques.

Par M. COULOMB.

LORSQU'UN corps conducteur électrisé est isolé par des soutiens idio-électriques, l'expérience apprend que l'électricité de ce corps décroît & s'anéantit assez rapidement. L'objet de ce Mémoire est de déterminer suivant quelles loix se fait ce décroissement la connoissance de cette loi est absolument nécessaire pour pouvoir soumettre par la suite, au calcul les autres phénomènes de l'électricité; parce que les expériences destinées à évaluer ces phénomènes, ne pouvant s'exécuter dans un même instant, ne peuvent être comparées entr'elles, fans connoître l'altération qu'elles éprouvent dans le temps qui s'écoule de l'une à l'autre.

Когда проводящее тело наэлектризовано ..., опыт показывает, что электричество в этом теле быстро истощается и разрушается.

Цель этих мемуаров состоит в том, чтобы точно определить, какие законы способствуют этому ослаблению...

Дальнейшие исследования



Поняли, что в воздухе есть ионы

1830 Майкл Фарадей: понятие ионов как носителей заряда для растворов

1850–1870 Гейсслер, Гитторф, Крукс: в газе могут возникать заряженные носители



1890 Дж. Дж. Томсон: проводимость объяснили наличием положительных и отрицательных носителей



Что ионизирует воздух?

1895 Рентген: X-лучи ионизируют воздух



1896 Беккерель, Кюри: радиоактивность тоже ионизирует воздух



Откуда идет излучение?

1899 Эльстер, Гейтель: экранировали электроскоп металлом и увидели уменьшение разряда → ионизация идёт от внешнего проникающего агента

1910 Теодор Вульф: измерения на Эйфелевой башне → маленькое падение ионизации с высотой

1911 Доменико Пачини: измерения под водой, ионизация падает → значимый вклад идёт сверху

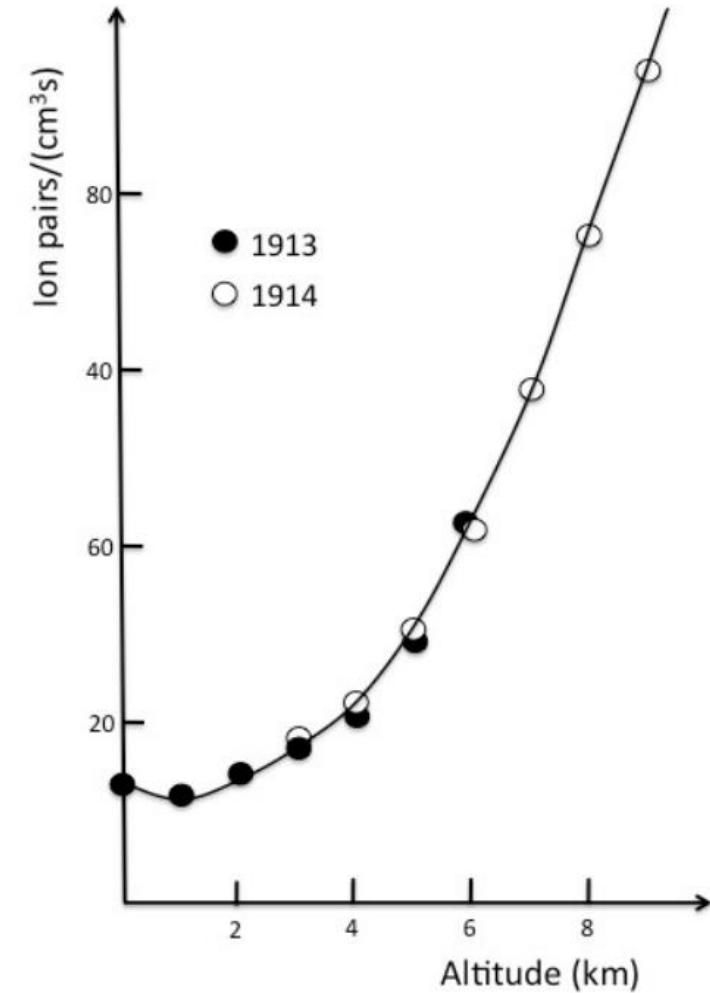
1912 Виктор Гесс: баллонные полёты: на высоте ионизация растёт → источник существенной части излучения вне Земли → открытие космических лучей

Открытие космических лучей

1785 год Кулон – почему электроскоп саморазряжается?

↓
127 лет поисков

↓
1912 год Виктор Гесс – потому что космические лучи ионизируют воздух [2]



Открытие широких атмосферных ливней



1930 Росси, Альварес, Комптон: первичные частицы в основном заряженные

1933 Росси, Боте: разделение на мягкую (электронно-фотонные каскады) и проникающую компоненты (мюоны, 1936 Андерсон)

1938 год, Пьер Оже^[3]

PHYSIQUE NUCLÉAIRE. — *Grandes gerbes cosmiques atmosphériques contenant des corpuscules ultrapénétrants*. Note de MM. **PIERRE AUGER, RAYMOND MAZE** et M^{me} **THÉRÈSE GRIVET-MEYER**, présentée par M. Jean Perrin.

1. De nombreux travaux récents ont montré l'existence dans le rayonnement cosmique de deux espèces de corpuscules; d'une part des électrons des deux signes fortement absorbés par la matière et qui sont pratiquement totalement arrêtés par un écran de 5 à 10^{cm} de plomb, d'autre part des corpuscules nouveaux dont la masse est probablement comprise entre 100 et 200 fois celle de l'électron et dont le pouvoir pénétrant est très supérieur. La question des relations entre ces deux groupes se pose alors de la façon suivante : les deux types de corpuscules atteignent-ils indépendamment la haute atmosphère, ou bien l'un est-il produit secondairement par l'autre au cours de la traversée de la matière. Nous savons par ailleurs que l'un des critères les plus sûrs pour caractériser des rayons secondaires est leur cohérence, c'est-à-dire l'apparition simultanée de plusieurs d'entre eux dans un espace restreint. C'est ainsi qu'une partie considérable du groupe des corpuscules électroniques, au niveau de la mer, est constituée par les branches de gerbes créées dans l'atmosphère par les rayons de grande énergie qui la traversent. Nous avons cherché, par la méthode des compteurs en coïncidence, si les corpuscules pénétrants présentaient une cohérence permettant de prouver leur production secondaire.

«Большие атмосферные космические снопы, содержащие сверхпроникающие корпускулы»,
Comptes rendus

«С помощью метода счетчиков совпадений мы исследовали, демонстрируют ли проникающие частицы согласованность, позволяющую доказать их вторичное образование»

ШАЛ-МГУ на счетчиках Гейгера 1958 год [4]

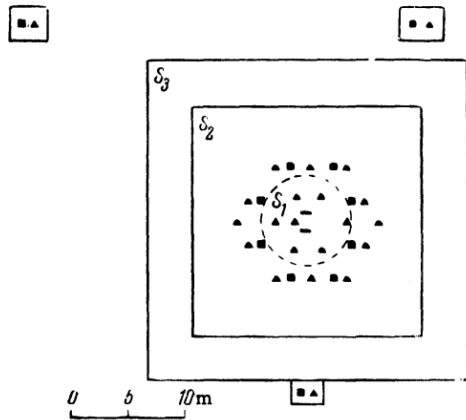


FIG. 1. Diagram of the hodoscope array used for the study of the size spectrum of EAS. ■ – group of 24 hodoscope counters, 330 cm² in area each; ▲ – group of 48 hodoscope counters, 24 of area of 100 cm² each, and 24 of area of 24 cm² each, ■ – master groups.

N - shower size, размер или мощность ливня
 количество электронов на уровне наблюдения (предвестник первичной частицы) на уровне энергии

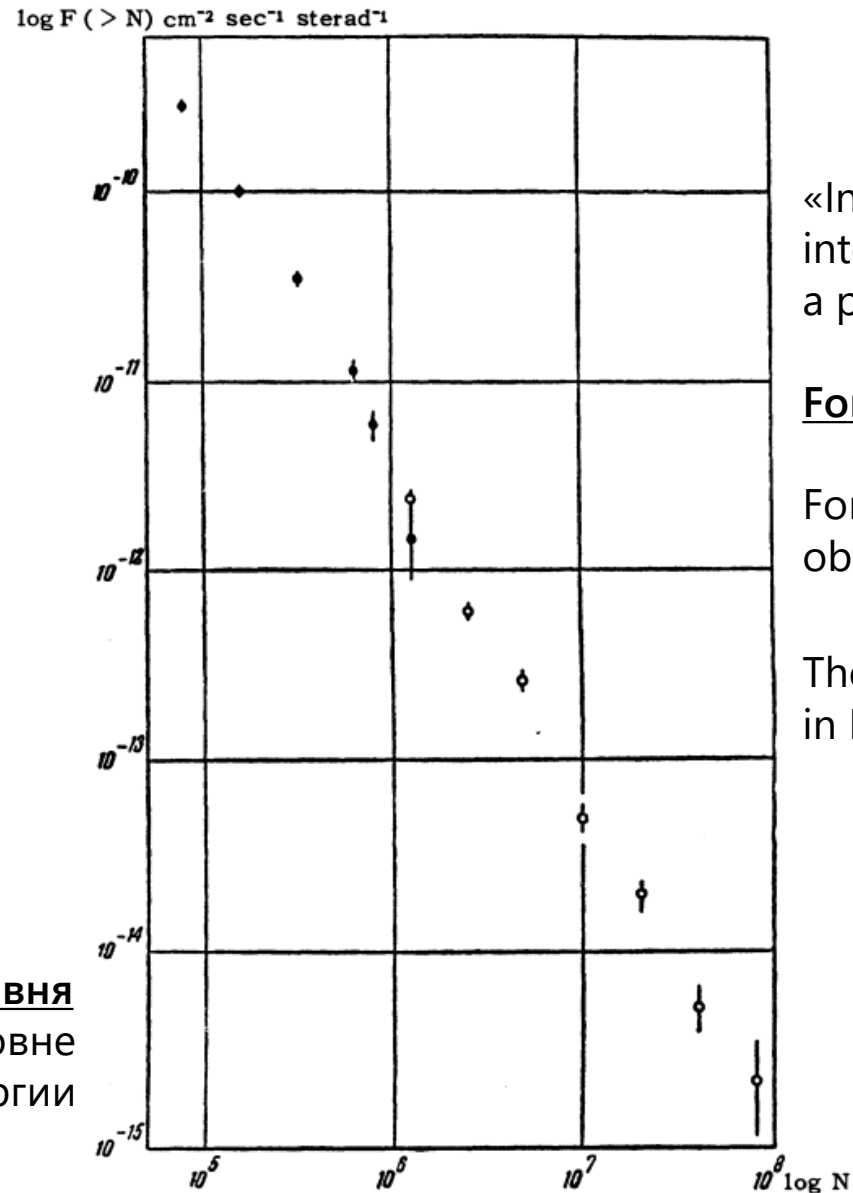


FIG. 2. Integral size spectrum of EAS. ● – measurements of the present experiment, ○ – measurements of reference 7.

«In the region $N = 8 \cdot 10^4$ to $8 \cdot 10^5$ the integral spectrum can be approximated by a power law with an exponent $k = 1.5 \pm 0.1$.

For $N > 8 \cdot 10^5$ the spectrum is steeper.

For the region $N = 8 \cdot 10^5$ to $3 \cdot 10^6$ we then obtain $k = 2.2 \pm 0.3$ »

The measurements were carried at sea level in May 1954.

1958 год – Откуда излом в спектре мощности?

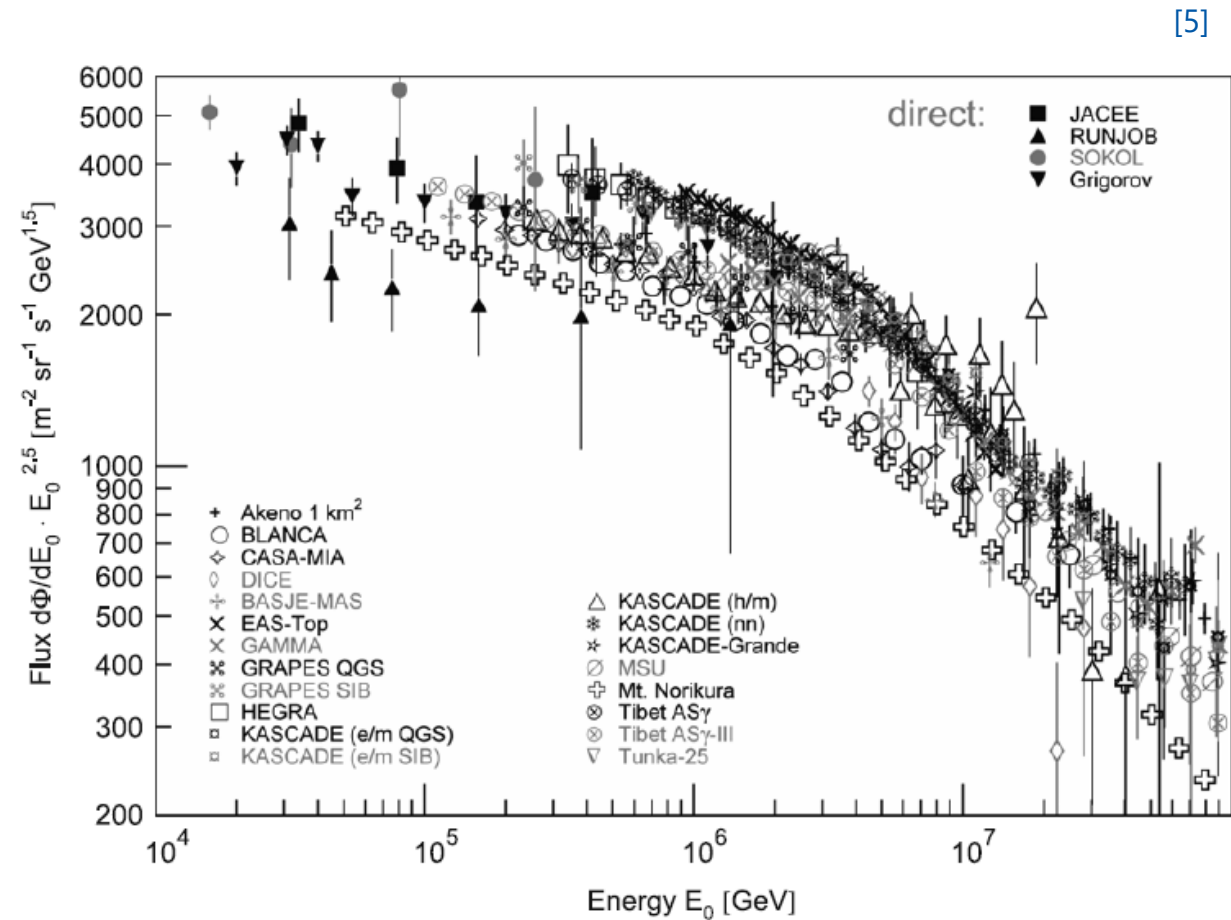
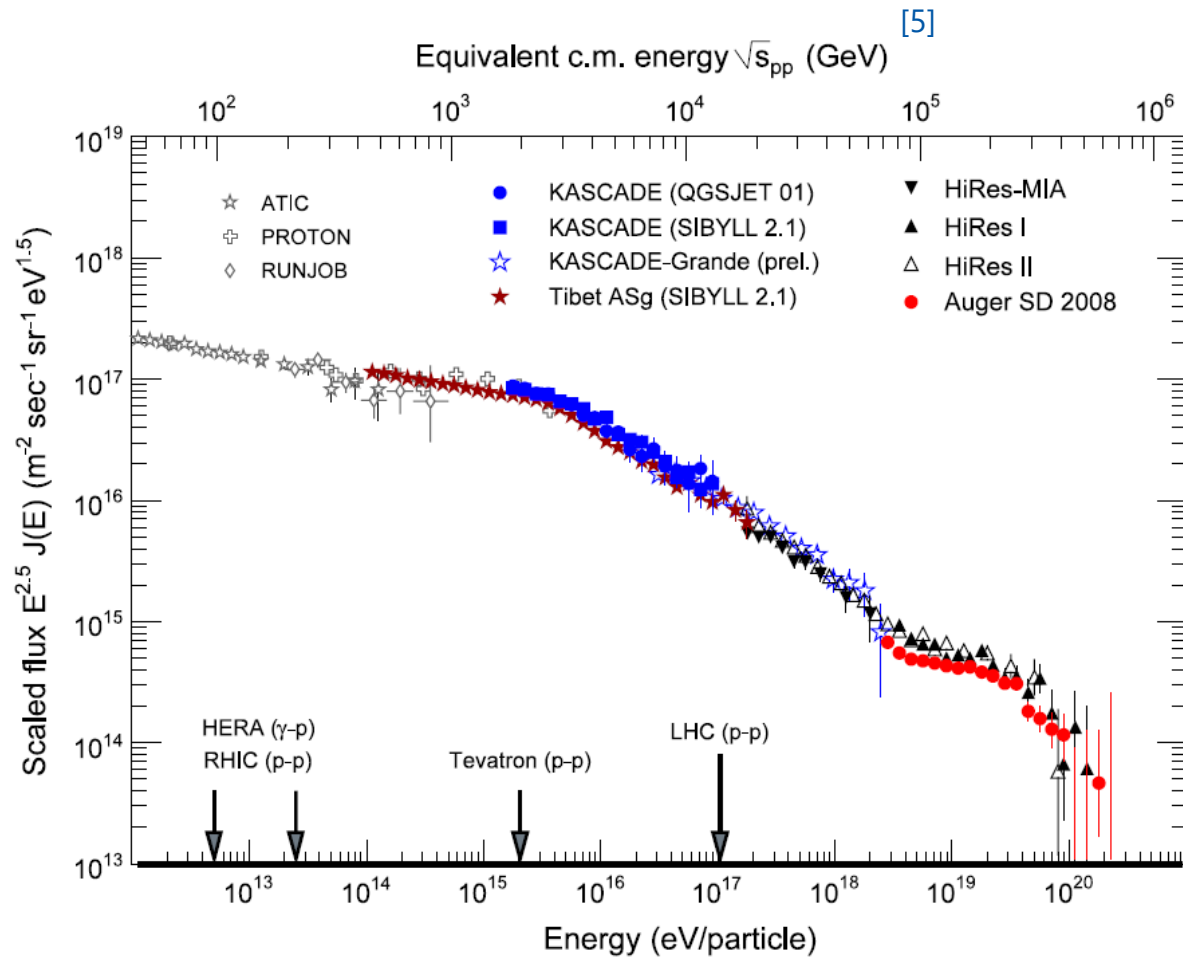


По аналогии 127 лет поисков



2085 год ???

Спектр космических лучей



Откуда «колени»?

Причины^[6]

1. Космологические

- Ограничения на ускорение частиц
- Утечка из Галактики

-Близкий источник

2. Новая физика

3. Нет настоящего колена

Предположения

Частицы не ускоряются/не удерживаются магнитным полем после определенной магнитной жесткости

Поток КЛ от множества далеких источников усредняется → спектр гладкий
Близкий источник → “горка” на фоне общего спектра

При нескольких ПэВ открываются новые каналы взаимодействий, например с нейтрино $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$

Излом – свойство атмосферного каскада и процедуры восстановления энергии (например, рождение тяжелых невидимых частиц при ПэВ которые уносят энергию)

Что искать?



Последовательный излом в спектре компонент:

Протоны ($Z = 1$) ~ 3 ПэВ

Гелий ($Z = 2$) ~ 6 ПэВ

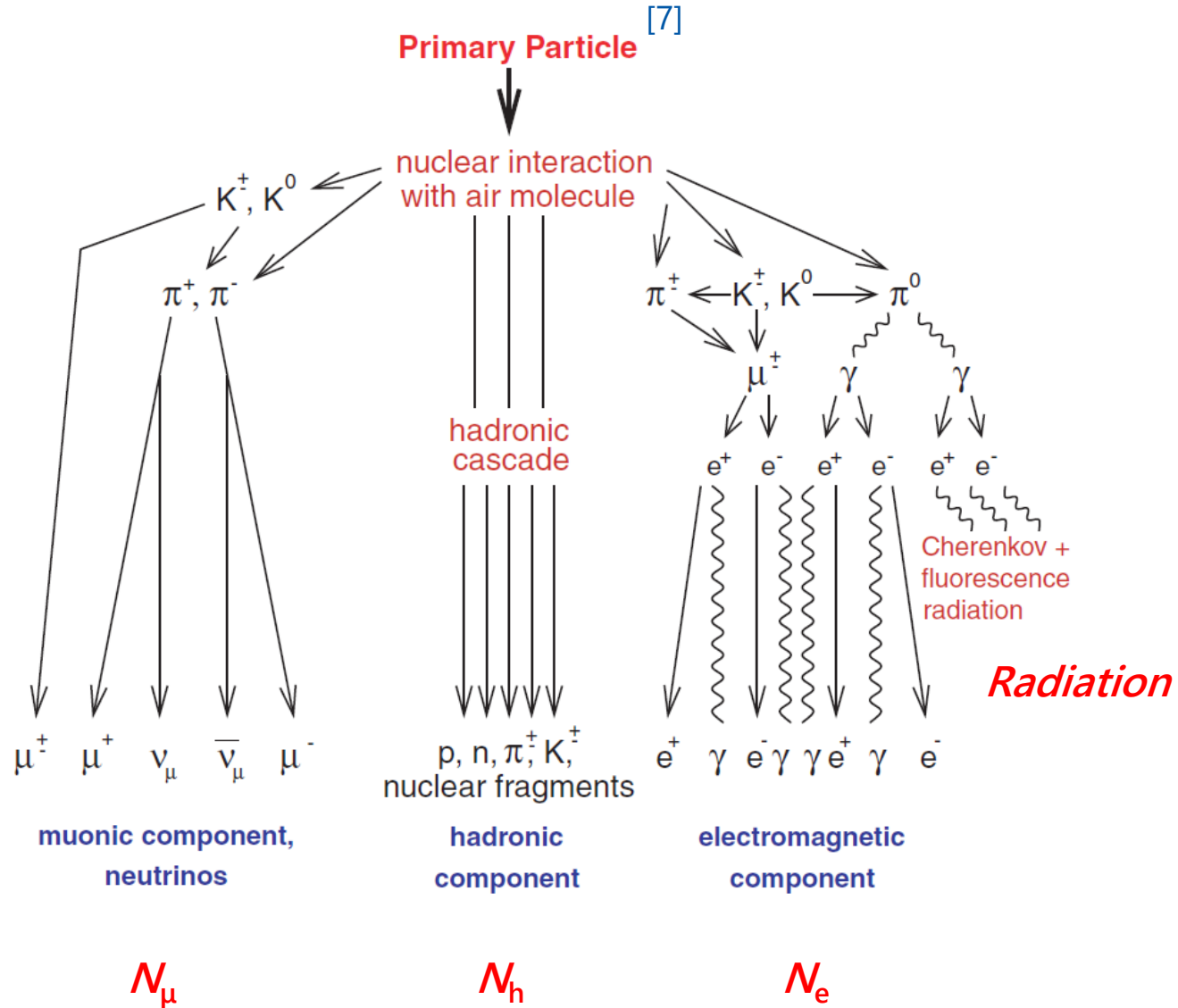
Железо ($Z = 26$) ~ 80 ПэВ

В области колена должны появиться дополнительные особенности: в спектре, массовом составе, анизотропии

Резкое уменьшение легкой компоненты

Восстановить энергию независимыми способами и сравнить положение излома

Широкие атмосферные ливни



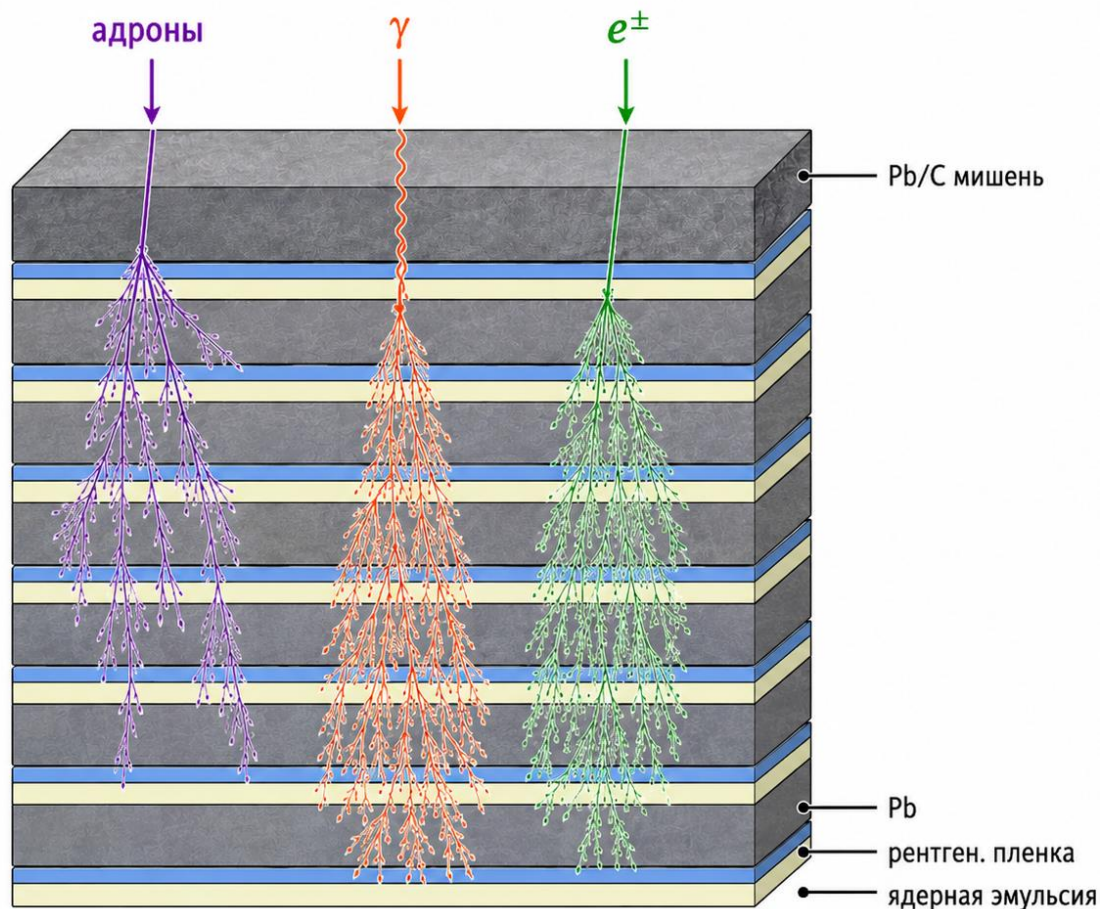
Установки для регистрации ШАЛ:

N_e - очень много

$N_e + \text{Radiation}, N_e + N_\mu$ - достаточно

$N_e + N_h$
 $N_e + N_\mu + N_h$ - очень мало жесьть

Рентген-эмульсионная камера (РЭК)



Свинец – развивает электромагнитный каскад
Углерод – легкая ядерная мишень для адронов

Рентгеновская пленка фиксирует почернение от электромагнитного каскада

Ядерная эмульсия фиксирует тонкую структуру треков

Первые эксперименты

1958-60 г., Mt. Norikura^[8], Япония, 2840 м над уровнем моря

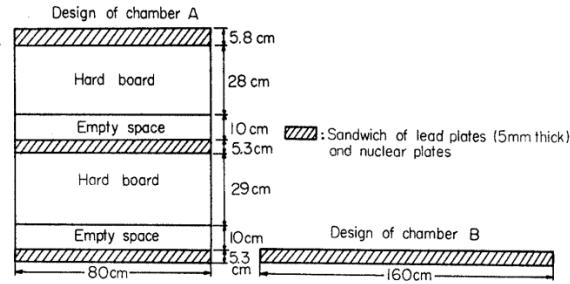
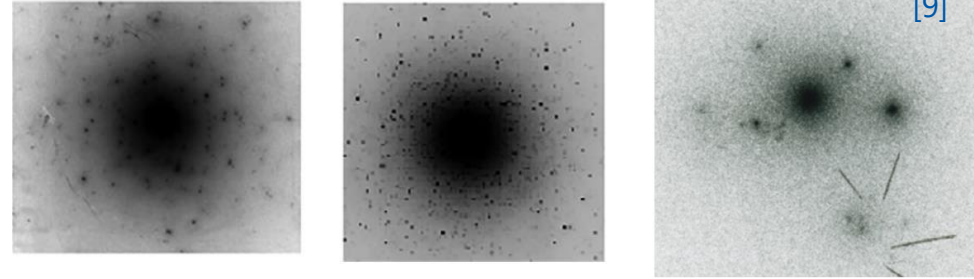


Fig. 2-2. Examples of design of Mountain emulsion chambers.

В ядрах ШАЛ есть высокоэнергичные γ -кванты и γ -семейства, связанные с рождением π_0



$p \approx (14 \pm 5) \%$ ^[10]



1962-1979 г., Mt. Chacaltaya^[11], Боливия, 5200 м

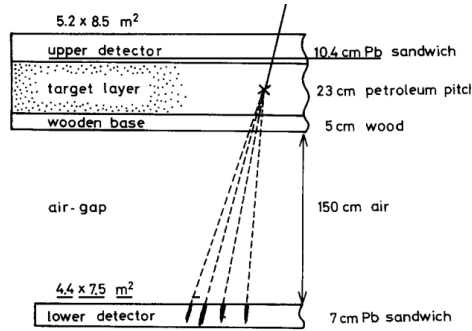
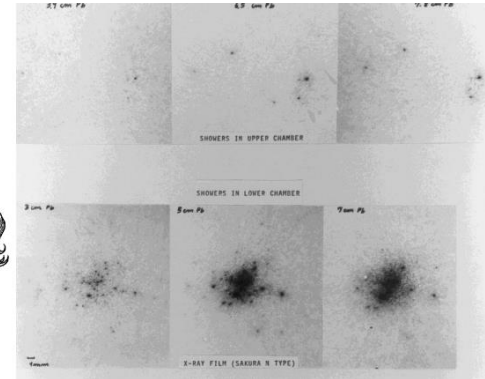
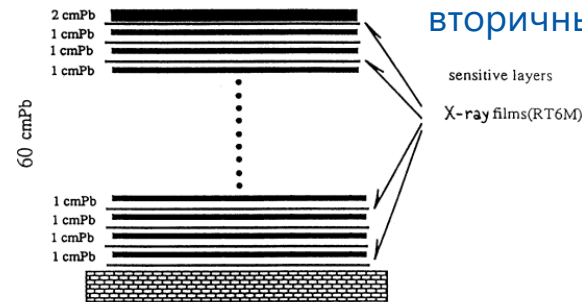


Fig. 2. Chacaltaya emulsion chamber of two-storey structure.

В отдельных событиях видна сильная адронная компонента
Event nicknamed Centauro I

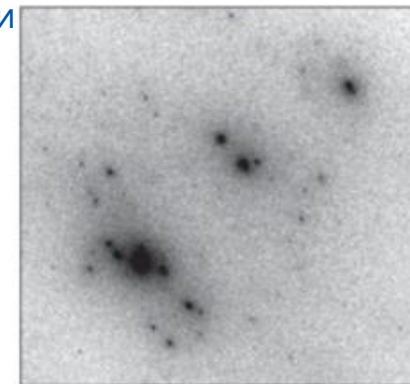


1971-1990 г., Pamir^[13], Памир, 4360 м



Pamir thick lead chamber

Множественное рождение адронов - одно взаимодействие, а не вторичный каскад в ядре мишени



[14]

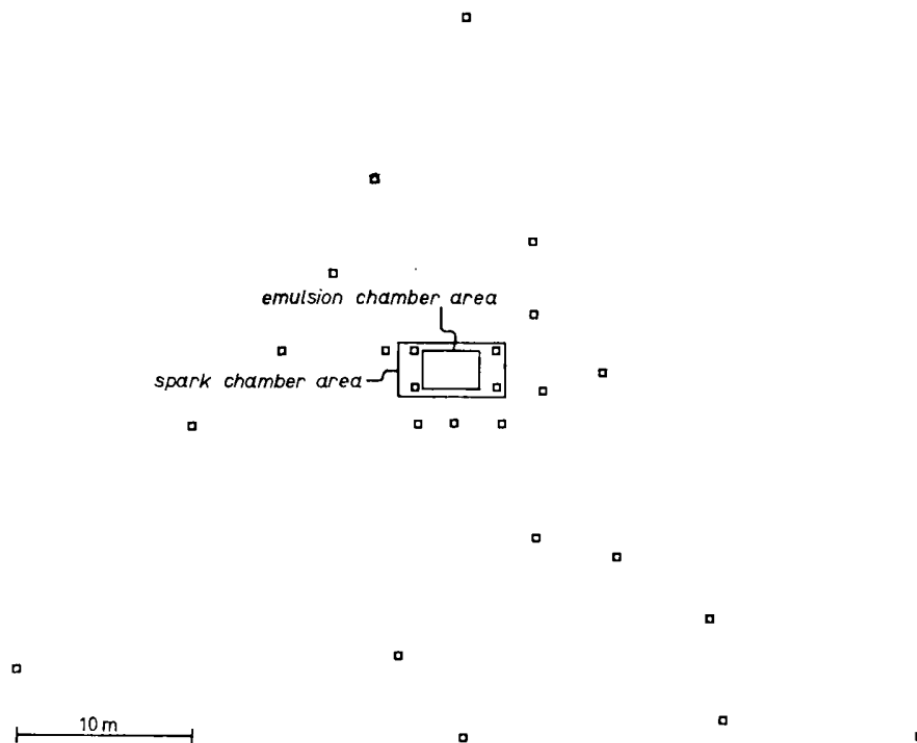
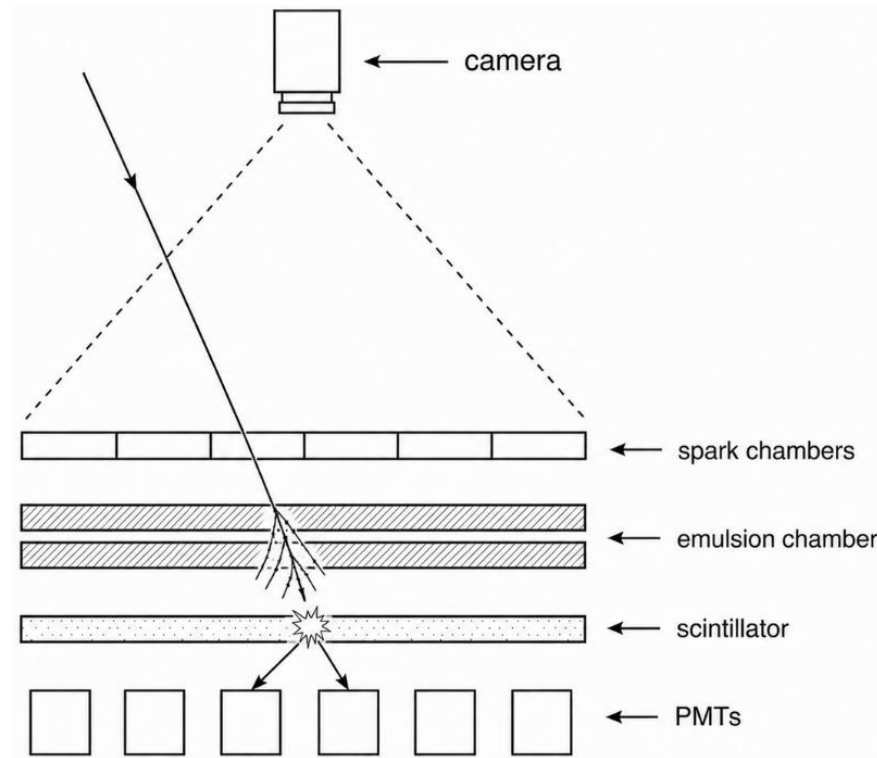


Fig. 1. – Air shower array of the scintillation counters. Each has a plastic scintillator of 0.25 m² unit area.



Треки частиц

ΣE_γ , число пятен, структура ядра

burst-детектор

← camera
← spark chambers
← emulsion chambers
← scintillator
← PMTs

Мощность ШАЛ N_{er}
направление оси

Энергия γ -семейства в ядре
 ΣE_γ

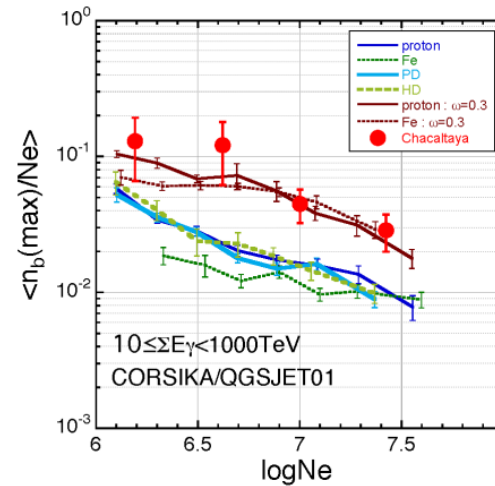
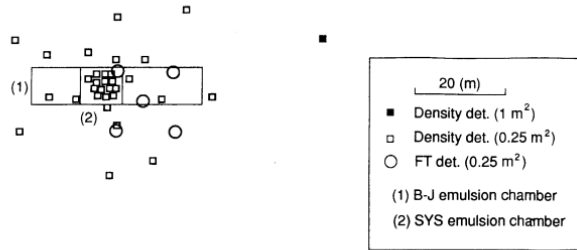
Мощность локального всплеска
 n_b

Гибридные РЭК

Chacaltaya hybrid experiment [15], 1979-1990e



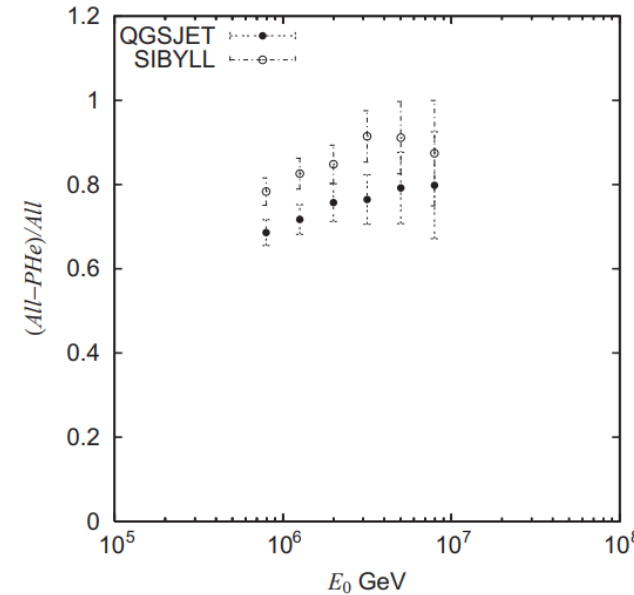
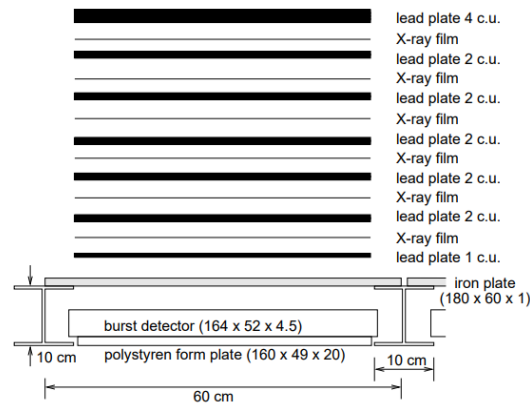
- Массив ШАЛ
- 32 блока РЭК
- burst-детекторы



Корреляции N_e , ΣE_γ , burst-size нельзя объяснить только изменением состава; важна модель адронных взаимодействий [16]

Tibet[17], Янбаджин, Тибет, Китай, 1990-2005e

- Массив ШАЛ
- 6 слоев РЭК
- burst-детекторы

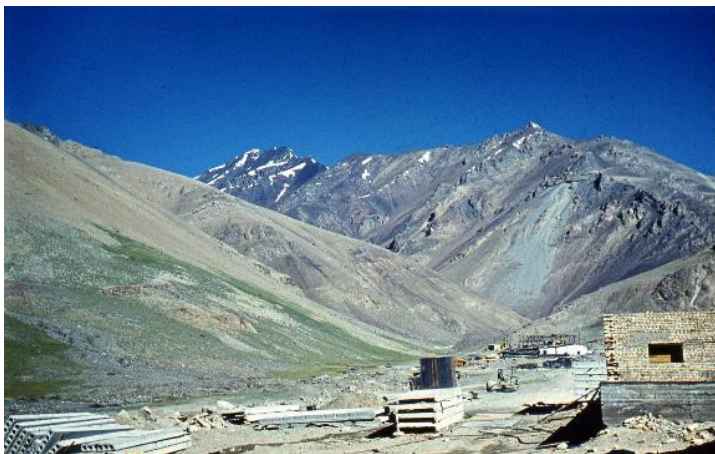
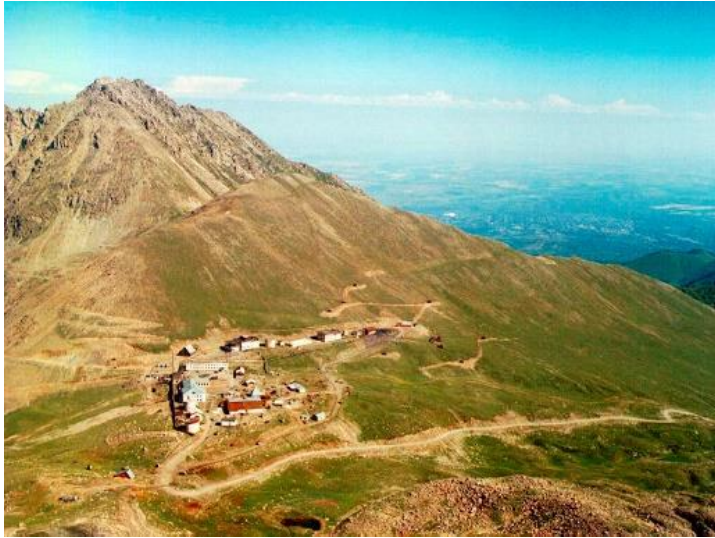


Доля легких элементов в полном спектре оказалась менее 30%. Основной вклад в формирование колена должны давать ядра тяжелее He

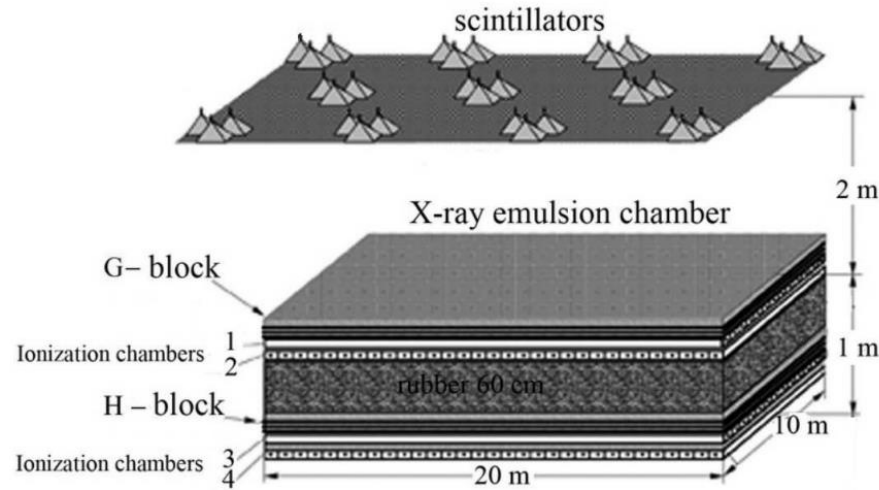
Fig. 13. Fraction of the primary cosmic-rays heavier than helium nuclei obtained by assuming QGSJET and SIBYLL interaction models.

Гибридные РЭК

Tien-Shan / HADRON^[18], 3340, Казахстан, 1985-1991e



- Массив ШАЛ
- РЭК 160 м²
- ионизационные камеры
- мюонный годоскоп



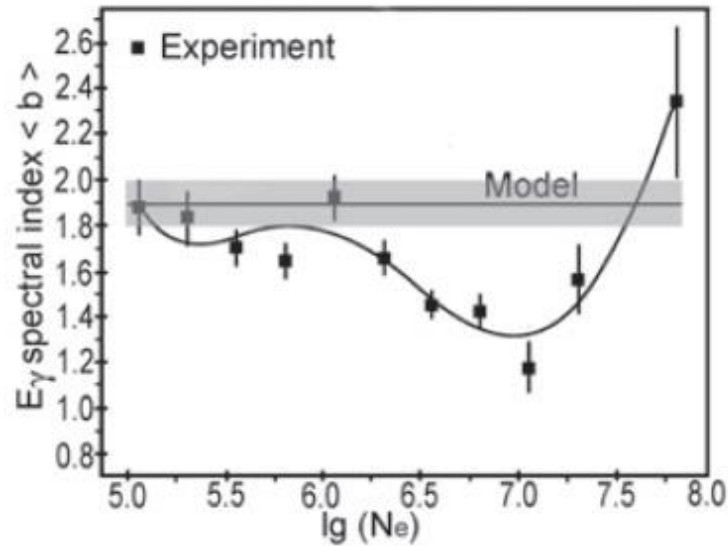
Результаты Tien-Shan

Tien-Shan / HADRON^[18], 3340, Казахстан, 1985-1991e



γ -семейства с большими энергиями должны в основном порождаться **протонами**, после излома при $\lg N_e \approx 6.1$ наклоны спектров уменьшаются, **вклад наиболее энергичных адронов возрастает**, а спектры становятся жестче

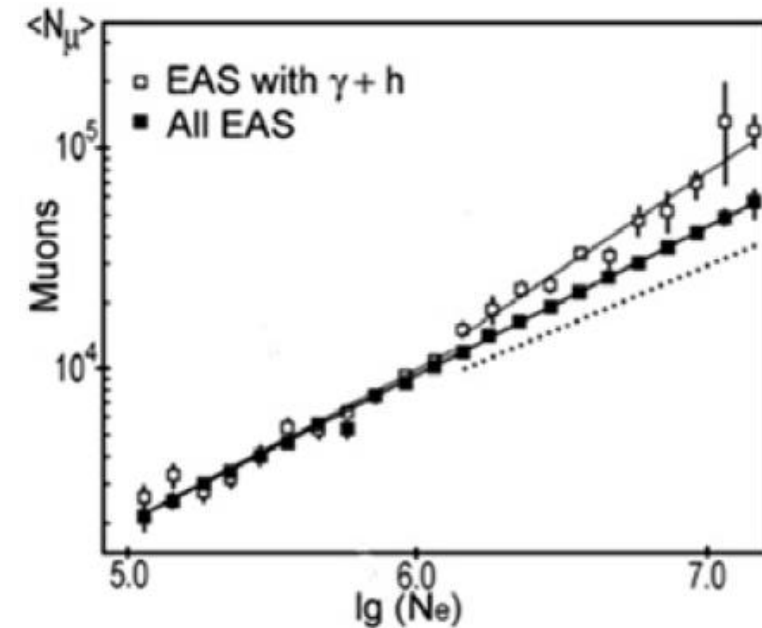
Наклон спектра адронов в зависимости от N_e .



[19]

- 1) В этой области энергий выборка γ -семейств почему-то становится еще более «**протонной**»;
- 2) В области колена появляется или усиливается **проникающая компонента**, которая переносит энергию глубже в атмосферу и эффективнее формирует высокоэнергичные γ -кванты и адроны в ядре ШАЛ.

Протонные ливни должны содержать меньше мюонов, чем ливни от тяжелых ядер
В ливнях, где зарегистрированы γ -семейства, **число мюонов** оказалось **выше**, чем ожидалось



Тоже проникающая компонента?

Модель одиночного близкого источника Vela. Источник может находиться в сферическом слое примерно 200–400 пк от Солнечной системы (2017)

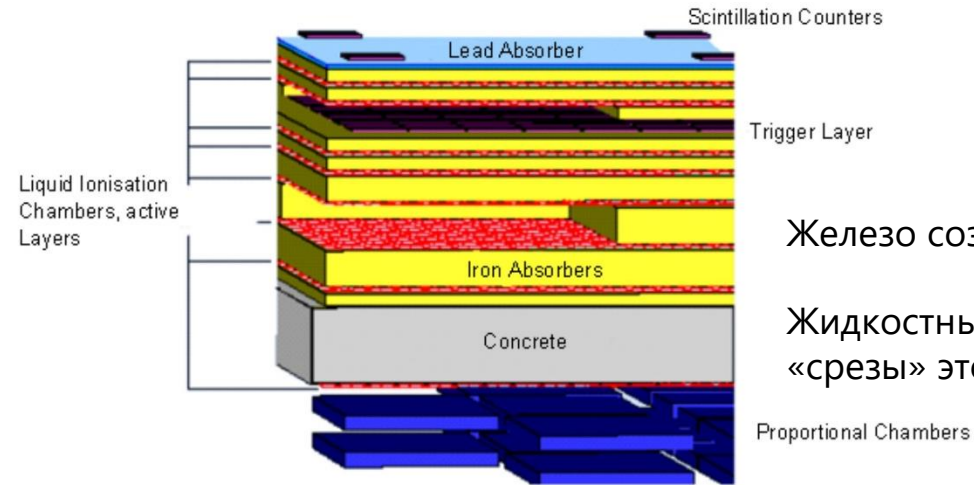
Адронный калориметр

KASCADE и KASCADE-Grande^[20], Karlsruhe, Германия, 110 м н.у.м, 1996-2012гг.



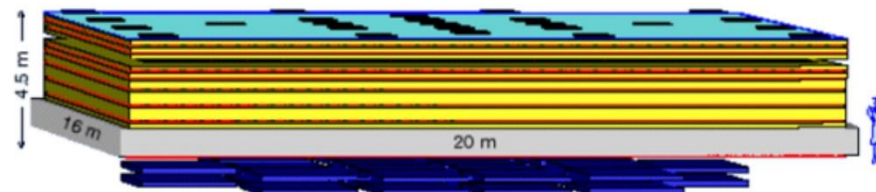
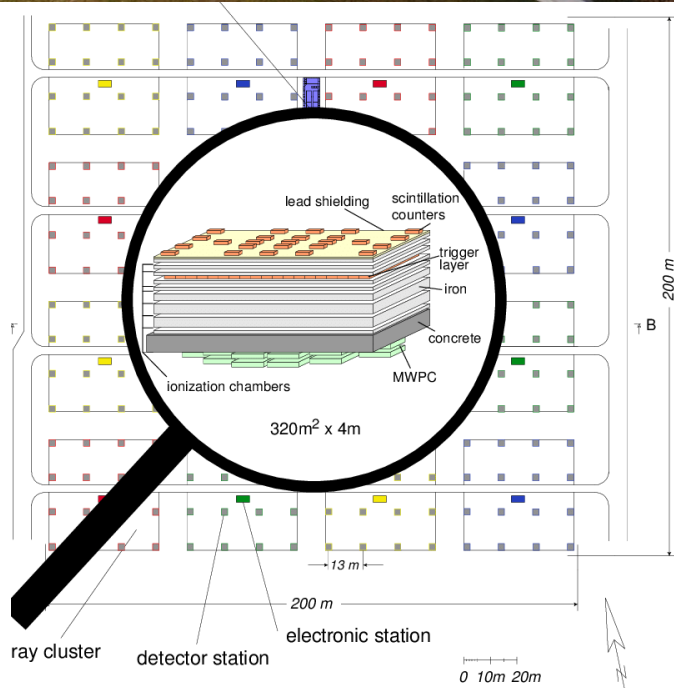
Сэмплирующий калориметр

Свинцовый фильтр для подавления электрон-фотонной компоненты



Железо создает и развивает каскад

Жидкостные камеры измеряли «срезы» этого каскада



Результаты KASADE и KASCADE-Grande



Проверка старых аномалий^[21]

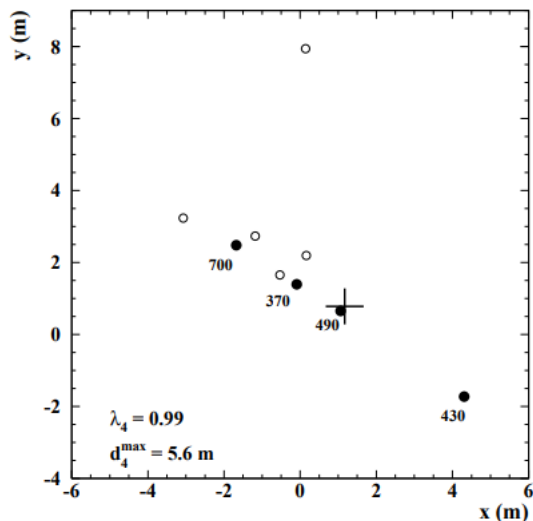


FIG. 1: Example of a measured hadronic shower core (hadron positions in the shower plane) with $\lambda_4 = 0.99$ and $d_4^{\max} = 5.6$ m. 9 hadrons with energies above 100 GeV are reconstructed. For the four most energetic hadrons (full symbols), the energies in GeV are given. The shower core position as reconstructed by the scintillator array is marked by a cross. The active calorimeter area exceeds the area plotted.

Выстроенные события есть,
но они не аномальны

По современной переработке^[24]:

В спектрах протонов и гелия примерно при: $E_{\text{кр}} \approx 4.4$ ПэВ, $E_{\text{кНе}} \approx 11$ ПэВ. Углерод и кремний не показывают значимых изломов

Спектр по суммарной энергии адронов^[22]

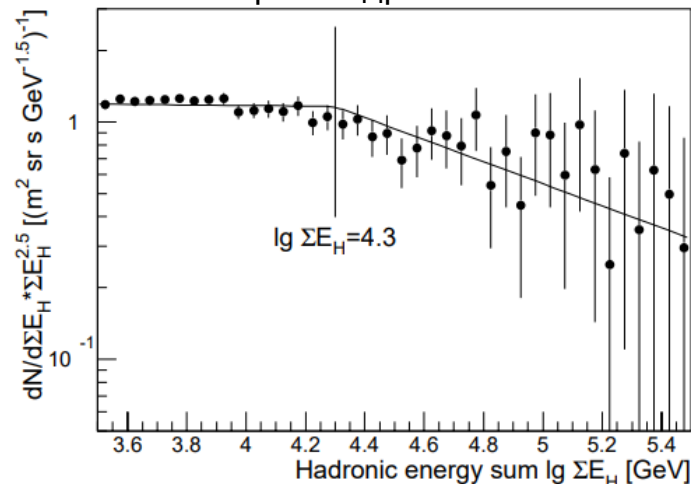
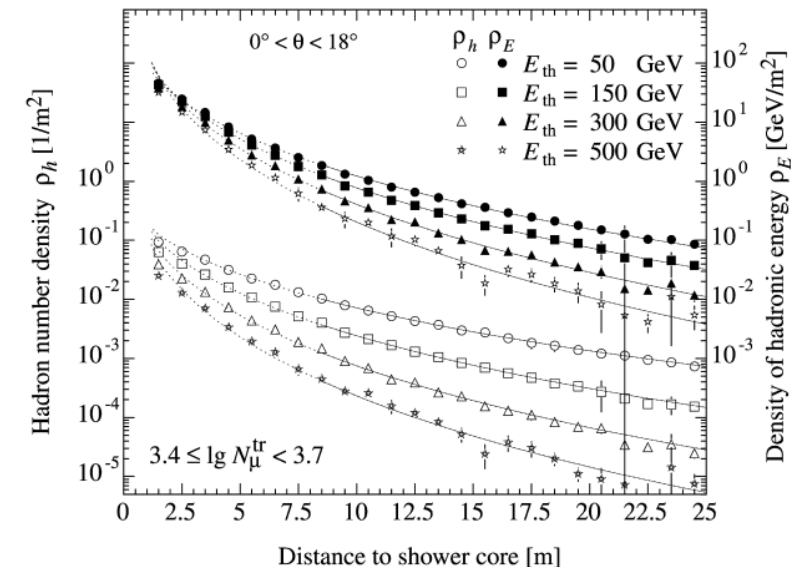


Figure 3: Frequency of showers detected versus total hadronic energy in the shower.

«Колено» наблюдается и в
адронной компоненте

Меняется именно поток ПКЛ, а не просто способ развития одной компоненты ШАЛ

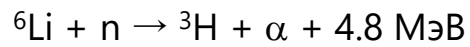
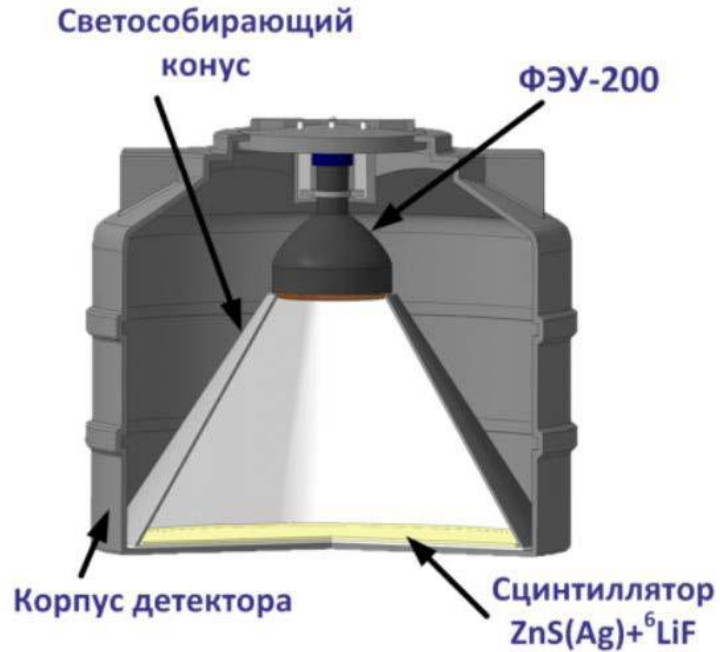
Функция пространственного распределения адронов в ШАЛ^[23]



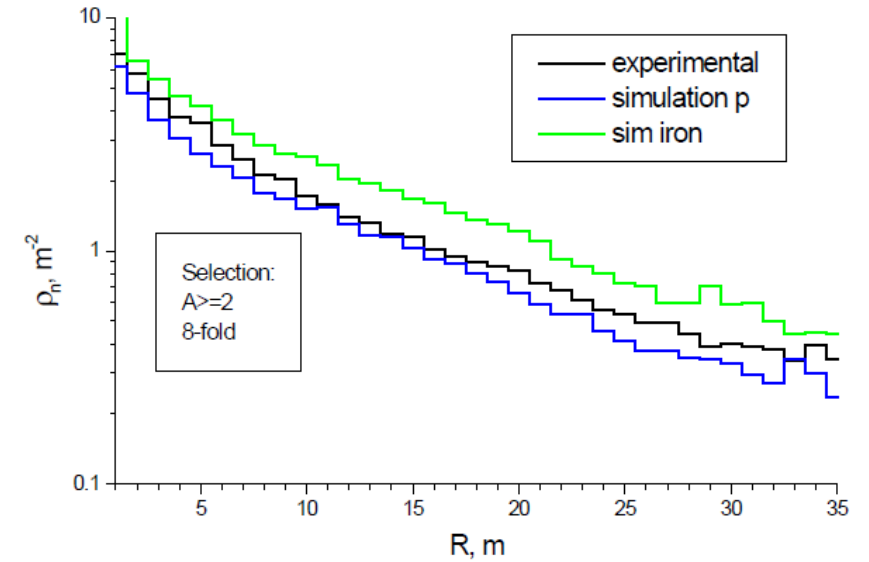
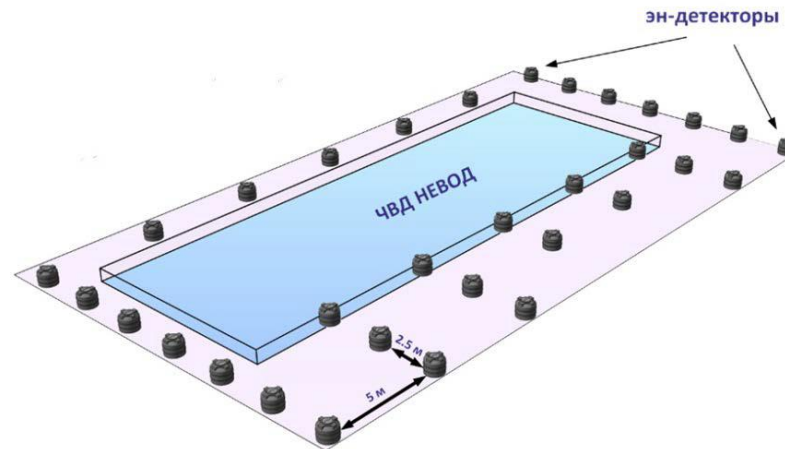
Масштабный радиус $r \sim 10$

Электрон-нейтронный детектор

Primary Spectrum Measurement Array (PRISMA)^[25]



2012, PRISMA-32^[26]



Электрон-нейтронный детектор в горах

PRISMA-YBJ^[27], 2016, ARGO-YBJ, в обсерватории космических лучей Янгбаджинг (YBJ)
Тибет, Китай, 4300 м над уровнем моря

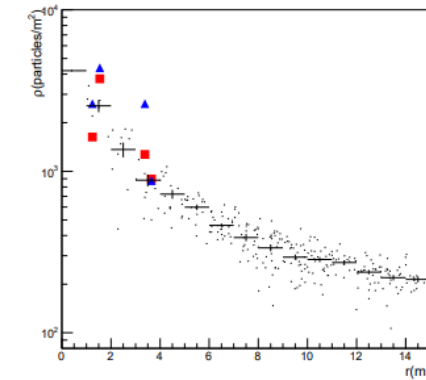
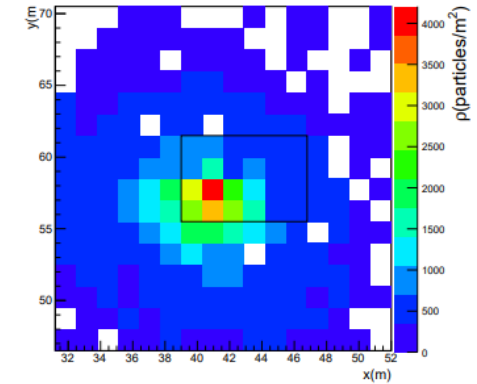
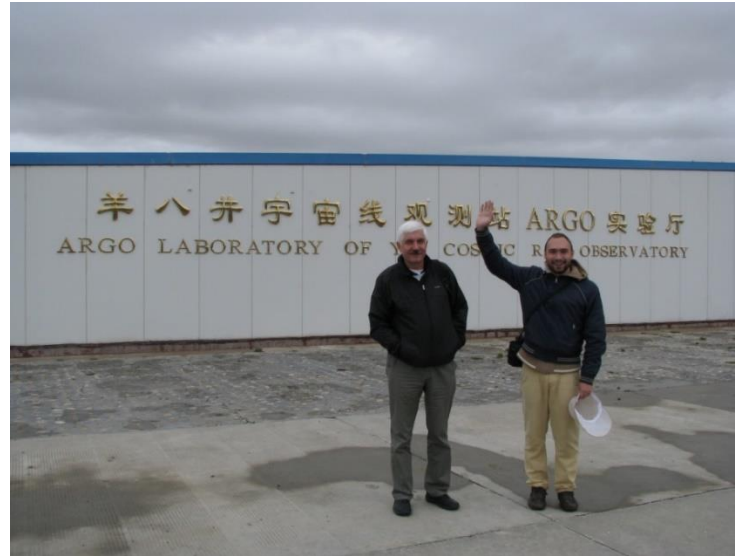


Figure 10: Upper plot: Scatter plot of charged particle density measured by ARGO-YBJ for a coincident event, where each pixel gives the charge delivered by the BigPad. The black rectangle represents cluster 78. Lower plot: Lateral distributions of the recorded particles for the same coincident event. Black dots: charged particle density measured by ARGO-YBJ; Black crosses: profile of the charged particle density measured by ARGO-YBJ; red squares: charged particle density measured by PRISMA-YBJ; blue triangles: neutron density corrected for the detector efficiency and multiplied by 50 as measured by PRISMA-YBJ. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Результаты PRISMA-УВJ



Вероятность нахождения отношения $> e/n$ для различных первичных частиц

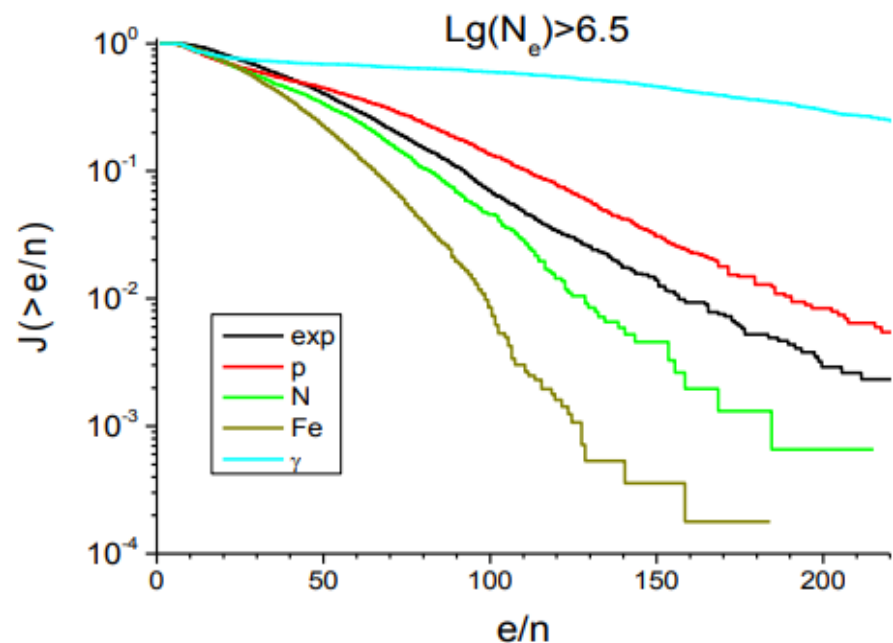


Figure 1: Simulated function $F(>R, A)$ for different primary particles at an altitude of 4300 m in comparison with observation.

Экспериментальные данные очень близки к протонной кривой

[28]

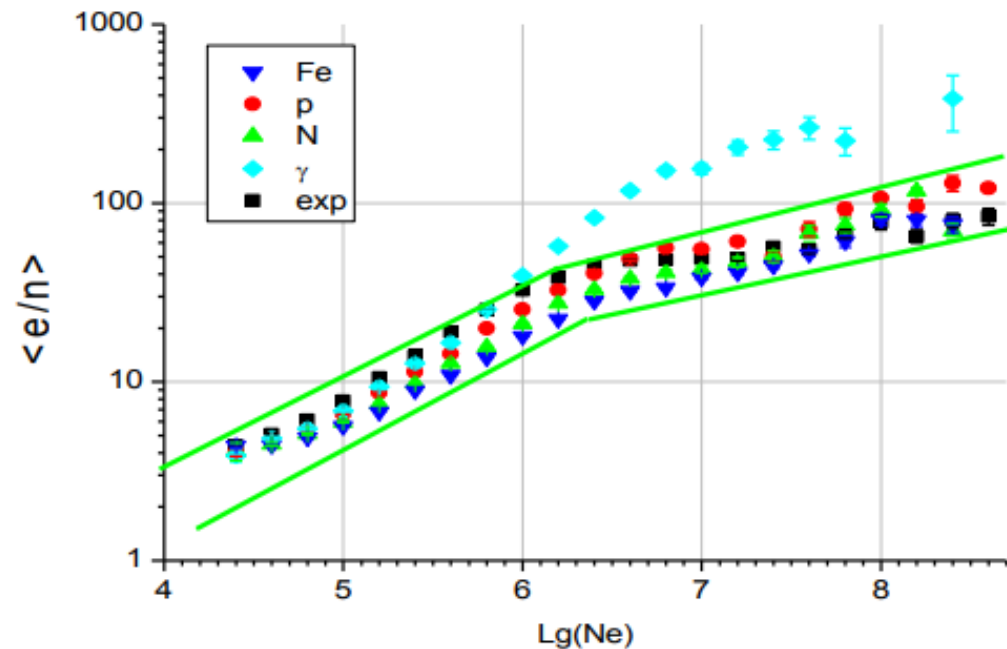


Figure 2: The e/n ratio as a function of N_e : measured and calculated for different A. Green lines indicate a corridor of possible statistical and systematic errors.

В пределах существующих погрешностей мы не видим каких-либо существенных изменений в массовом составе космических лучей при более высоких энергиях до ~ 100 ПэВ.

Электрон-нейтронный детектор в горах

ENDA^[29] в обсерватории LHAASO, Хайцзишань (Haizhishan, 4410 м над уровнем моря)
Даочэн, провинция Сычуань, Китай



[30]

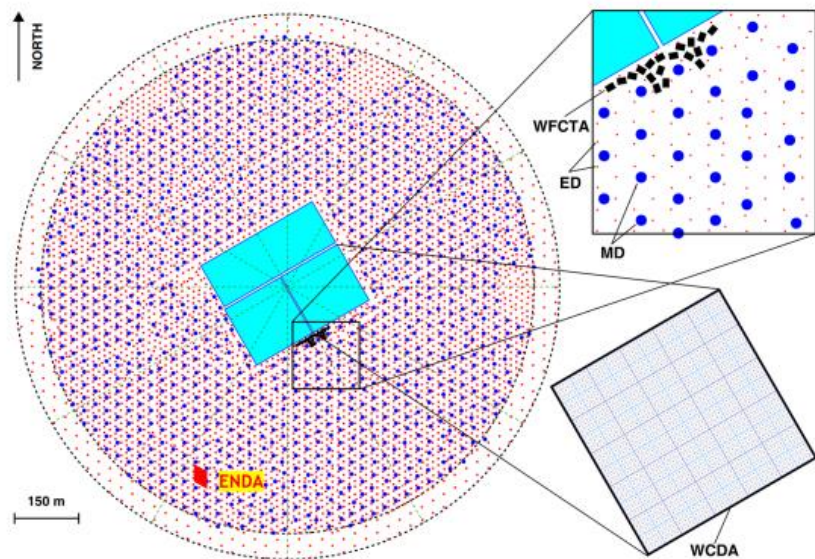


Figure 1: Layout of the LHAASO experiment including ENDA-64.



Figure 2: Photo of ENDA-64 in a bird view.

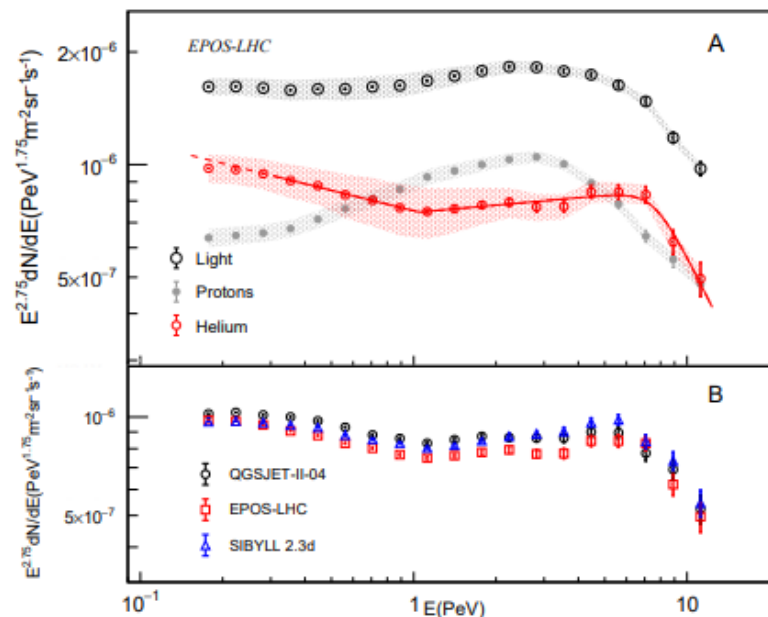


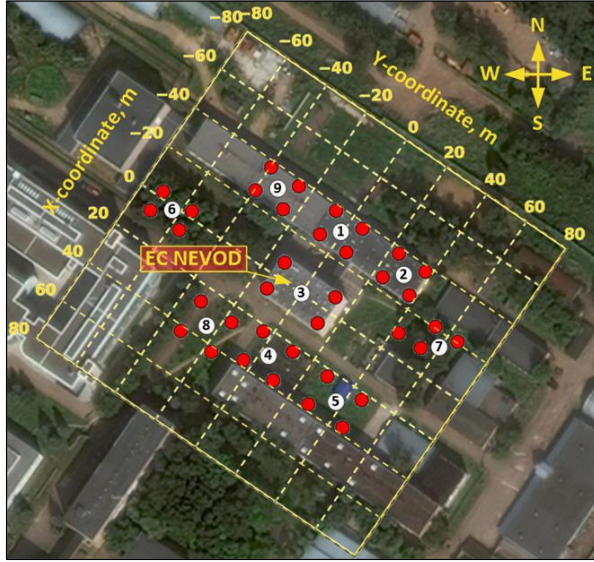
FIG. 2. (A) Energy spectra. The light component flux (Φ_L) and the updated proton flux (Φ_H) are measured with the EPOS-LHC [29] hadronic interaction model assumption. The helium fluxes are derived as $\Phi_{He} = \Phi_L - \Phi_H$ in red. All spectra are multiplied by $E^{2.75}$. Error bars represent statistical uncertainties only, while the systematic uncertainties are shown as shaded bands. The red solid line is the fit to the helium spectrum in the range 0.3 – 13 PeV. The extension in the dashed part helps to indicate how much the first three data points deviate from the single-index power-law, i.e. by 31.7σ , 8.7σ , and 0.7σ , respectively. This implies a possible structure at energies below 0.3 PeV. (B) Helium spectra derived using three hadronic interaction models, multiplied by $E^{2.75}$.

Возможное появление **нового компонента космических лучей** в ПэВ-области, потенциально связанного с галактическими **PeVatrons**

rigidity-dependent
 $E_k(\text{He}) \approx 2E_k(\text{p}) \sim 6 \text{ ПэВ}$.
 LHAASO $\sim 7 \text{ ПэВ}$

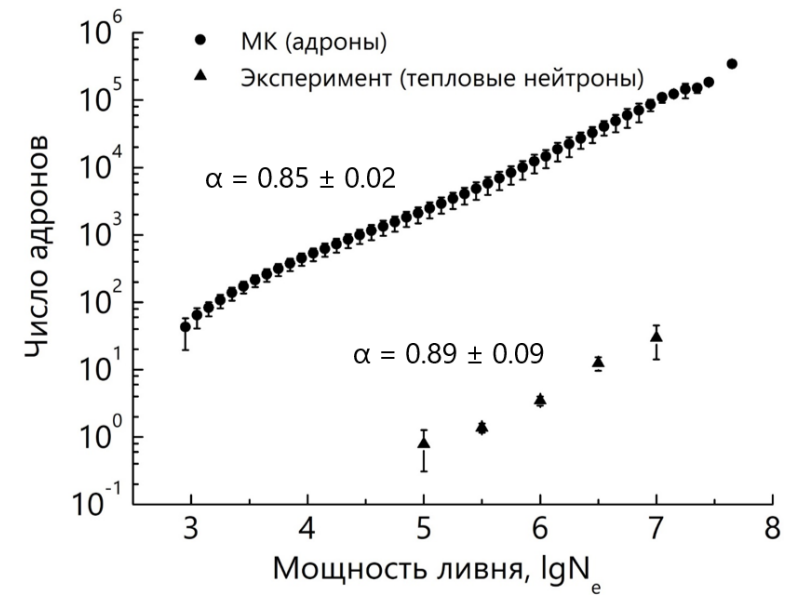
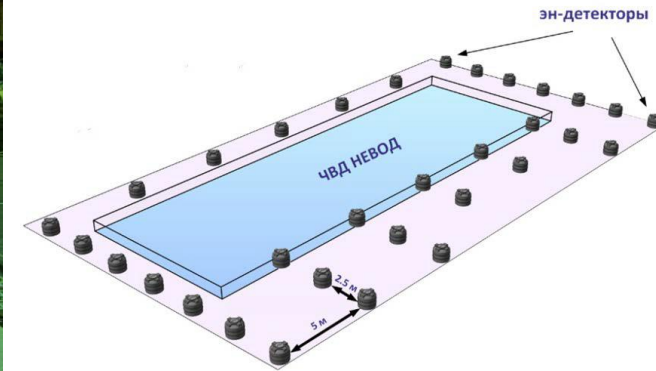
Установка НЕВОД-ШАЛ

Электрон-фотонная компонента ливней



Установка ПРИЗМА

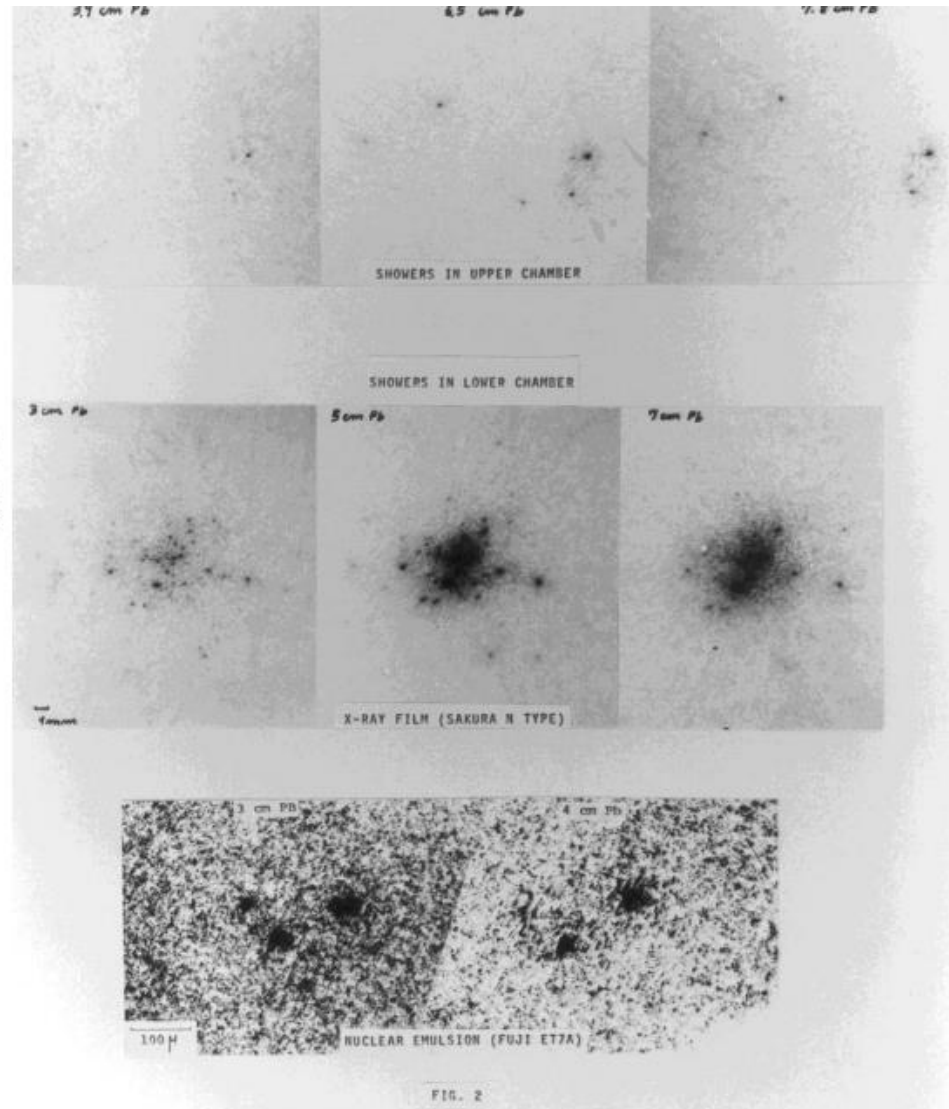
Адронная + заряженная компонента



- [1] Coulomb, C. A. (Charles Augustin). Mémoires sur l'électricité et la magnétisme, 1736-1806; Fossier, ill; Le Gouaz, Yves-Marie, 1742-1816, engraver; Adam, engraver; Burndy Library, donor. DSI; [Académie royale des sciences \(France\) \(1789\)](#).
- [2] C. Grupen. The History of Cosmic Ray Studies after Hess. [Nuclear Physics B \(Proc. Suppl.\) 239–240, 19–25 \(2013\)](#).
- [3] P. Auger, R. Maze, T. Grivet-Meyer, [Comptes rendus 206, 1721 \(1938\)](#).
- [4] G. Kulikov and G. Kristiansen, On the size spectrum of extensive air showers, [JETP 35, 441–444 \(1958\)](#).
- [5] J. Blümer et al. Cosmic rays from the knee to the highest energies. [Progress in Particle and Nuclear Physics 63, 293-338 \(2009\)](#).
- [6] Joerg R. Hoerandel. Models of the Knee in the Energy Spectrum of Cosmic Rays. [Astropart.Phys. 21, 241-265 \(2004\)](#).
- [7] Andreas Haungs et al. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. [Rep. Prog. Phys. 66, 1145 \(2003\)](#).
- [8] Makoto Akashi et. al. Observation of High Energy Jets with Emulsion Chambers: Gamma-Rays on Mt. Norikura. [Progress of Theoretical Physics Supplement, 32, 1–71, \(1964\)](#).
- [9] R.A. Mukhamedshin et al. Analysis of gamma-ray families with halos and estimation of mass composition of primary cosmic radiation at energies 1–100 PeV. [Astroparticle Physics 102, 32–38 \(2018\)](#).
- [10] Y. Fukushima et. al. Extensive air showers accompanied by γ -ray families with $JE_{\gamma,H} \geq 10$ TeV and general extensive air showers. [Phys. Rev. D 39, 1267 \(1989\)](#).
- [11] BRAZIL Group, JAPAN Group. CHACALTAYA Emulsion Chamber Experiment. [Supplement of the Progress of Theoretical Physics 47 \(1971\)](#).
- [12] Janusz Kempa et al. Emulsion chamber observations of Centauros, aligned events and the long-flying component. [Open Physics 10, no. 4, 723-741 \(2012\)](#).
- [13] Puchkov, V. S. et al. The Protons in Primary Cosmic Rays in the Energy Range 10^{15} - 10^{17} eV According to Data from the PAMIR Experiment. 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, [eprint arXiv:1804.07216 \(2011\)](#).
- [14] V. V. Kopenkin et al. Alignment in γ -hadron families of cosmic rays. [Phys. Rev. D 52, 2766 \(1995\)](#).
- [15] N. Kawasumi et. al. Simultaneous observation of families and accompanied air showers at Mt. Chacaltaya. [Phys. Rev. D 53, 3534 \(1996\)](#).
- [16] H.Aoki et al. A study of EAS cores detected by the hybrid experiment at Mt.Chacaltaya. [33 ICRC, Rio De Janeiro \(2013\)](#).
- [17] M. Amenomori et al. Cosmic-ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects. [Advances in Space Research 47, 629–639 \(2011\)](#).
- [18] A.L. Shepetov et al. The rise of muon content in extensive air showers after the 3 PeV knee of the primary cosmic ray spectrum according to data of the Tien Shan mountain installation. [Astroparticle Physics 133, 102642 \(2021\)](#).

- [19] S. Shaulov et al. Investigation of EAS cores. [EPJ Web of Conferences 145, 17001 \(2017\)](#).
- [20] S. Shaulov et al. Scaling violation in interaction of cosmic ray hadrons and the nature of the 3 PeV knee in the spectrum of primary cosmic rays. [J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 48 125202 \(2021\)](#).
- [21] T. Antoni et al. Geometric structures in hadronic cores of extensive air showers observed by KASCADE. [Phys. Rev. D 71, 072002 \(2005\)](#).
- [22] J.R. Horandel et al. First Measurement of the Knee in the Hadronic Component of EAS. http://crd.yerphi.am/files/Conferences/1999/h2_2_41.pdf
- [23] T. Antoni et al. Electron, muon, and hadron lateral distributions measured in air showers by the KASCADE experiment. [Astroparticle Physics 14, 245-260 \(2001\)](#).
- [24] M. Yu. Kuznetsov et al. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays with the KASCADE experiment data and machine learning. [JCAP05 125 \(2024\)](#).
- [25] Yu.V. Stenkin et. al. Neutrons in extensive air showers. *Phys. Atom. Nucl.* 70, p. 1088-1099 (2007).
- [26] D. Gromushkin et. al. The array for EAS neutron component detection. *J. Instrum.* 9, C08028 (2014).
- [27] B. Bartoli et. al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in extensive air showers selected by the ARGO-YBJ experiment. *Astropart. Phys* 81, 49 (2016).
- [28] Stenkin Yu.V. et. al. Primary cosmic ray mass composition above 1 PeV as measured by the PRISMA-YBJ array. 35th International Cosmic Ray Conference – ICRC (2017).
- [29] Hao-Kun Chen et. al. Progress of ENDA and Hybrid Detection of Cosmic Ray by Using ENDA and LHAASO. 38th International Cosmic Ray Conference ICRC (2023).
- [30] LHAASO Collaboration. Precise Measurement of the Cosmic Ray Helium Spectrum above 0.1 PeV. [Phys. Rev. Lett. 136, 121001 \(2026\)](#).

Event nicknamed Centauro I



ISVHECRI 2018, 21-25 MAY, NAGOYA-JAPAN



Cosmic Ray Observatory of the University of Tokyo
(Current : Norikura Observatory)

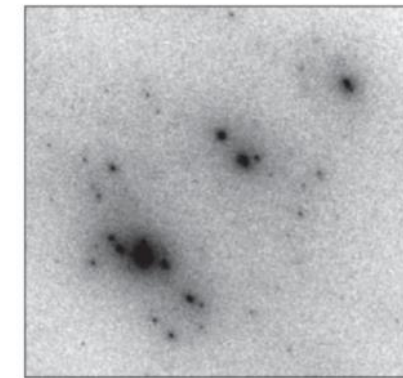


Figure 3. Aligned subgroups of high-energy particles detected in XREC.

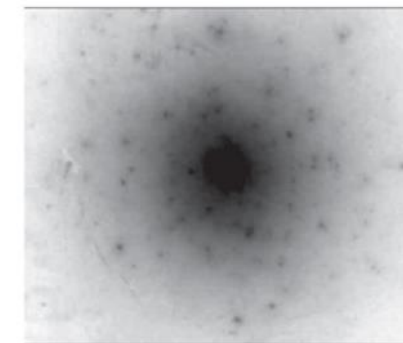


Figure 4. The halo (spot of a continuous darkening in the center of γ -ray family) with a typical size of ~ 1 cm.