



**ВККЛ-2024 01-05.07.2024**



- **КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ О ВОЗМОЖНОМ СУЩЕСТВОВАНИИ СТРАННОЙ КВАРКОВОЙ МАТЕРИИ.**
- Шаулов СБ., Жуков В.В., Куприянова Е.А., Рябов В.А. Щепетов Л.А..

**Существование странной кварковой материи (СКМ) и странных кварковых звезд (СКЗ) является одной из наиболее горячих проблем современной астрофизики.**

Методы решения: **1. Поиск СКЗ: Астрономия.**

**2. Поиск СКМ: Космические лучи.**

# Кварковая модель и гипотеза странной кварковой материи (СКМ).

- Открытие кварков породило вопрос: **Может ли в природе существовать стабильная Странная Кварковая Материя (СКМ)?**
- Ответ: **Теоретически ДА**, но в системе  $UD+S$  кварков при больших барионных числах  $A \geq 10^3$  вплоть до  $A \sim 10^{57}$  – Странные Кварковые Звезды (СКЗ).

**Эдвард Виттен:** E.Witten, [Cosmic separation of phases, Phys. Rev. D 30, 272 \(1984\)](#)



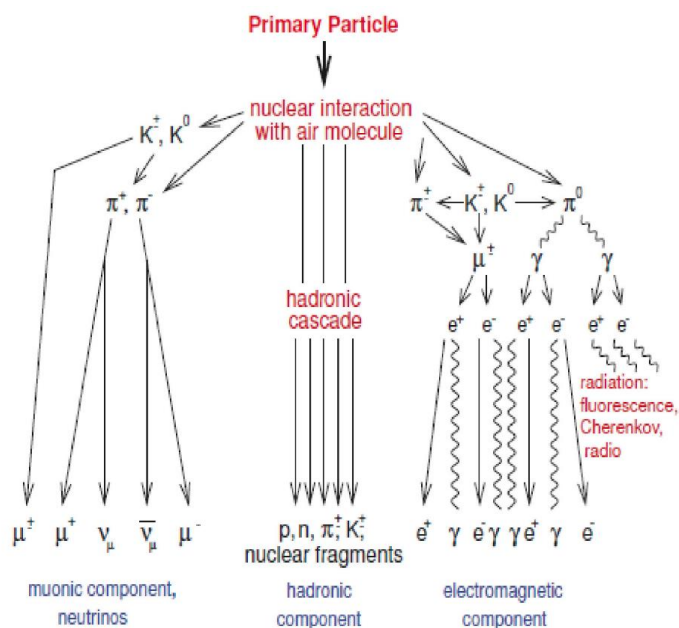
**Рассмотрел фазовый переход Кварк-Глюонной Плазмы (КГП) в адроны.**

**Вывод: Должны были образоваться две фазы: ядерные звезды (ЯЗ) и кварковые (СКЗ).**

**Космические лучи (КЛ): ЯЗ** - ядра от протонов до ядер железа, **СКЗ** - квазиядра (странглеты) с  $A=10^3-10^{10}$  и положительным электрическим зарядом  $Z=30-10^4$ .

# Модель ядерно-электромагнитного каскада (Г.Т.Зацепин-1948).

Основная проблема экспериментов с ШАЛ –  
определение первичной энергии  $E_0$  и типа первичного ядра.



- Электромагнитная компонента ШАЛ ( $e^\pm, \gamma, \mu, \nu$ ) позволяет определять полное число электронов (заряженных частиц)  $N_e$  и  $E_0 \approx k N_e \gamma$ .

- **Основная информация** о типе первичного ядра ( $p, He, CNO, Si, Fe$ ) заключена в спектрах адронов ствола ШАЛ размером в десятки сантиметров.

- **РЭЖ** – единственный прибор, позволяющий изучать индивидуальные спектры адронов в стволе ШАЛ, т.е. получать практически полную информацию о наиболее энергичной их части.

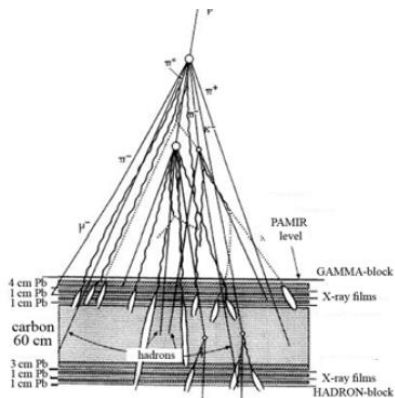
Каскад в атмосфере.

# регистрации ШАЛ.



**Решетка:** Регистрирует электромагнитную компоненту ШАЛ.

Состав первичных КЛ зависит от модели.  
Пример: KASCADE – уровень моря.



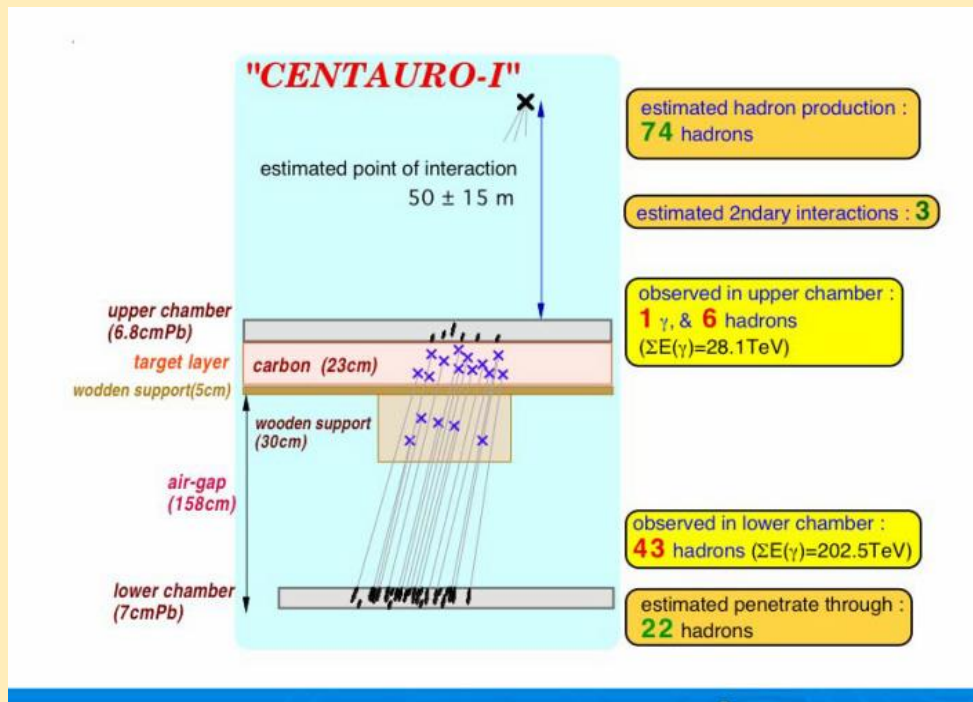
**РЭК:** Регистрирует индивидуальные адроны и их энергии ( $E_\gamma > 1$  ТэВ) внутри стволов ШАЛ.  
Состав первичных КЛ зависит от наклона адронных спектров.

Пример: АДРОН – уровень 3330 м.н.у.м

**РЭК** дает максимально возможные сведения о стволах ШАЛ. Эта информация существенно превышает возможности решеточных установок в определении состава КЛ.

# Космические лучи: поиск СКМ

- Первое указание о возможном присутствии СКМ в КЛ появилось в работе Бьеркена и МакЛеррана (1979), объяснивших происхождение событий в рентгеноэмульсионной камере (РЭК) на г. Чакалтайа, получивших название “кентавры”. Наиболее характерное событие приведено на рисунке.

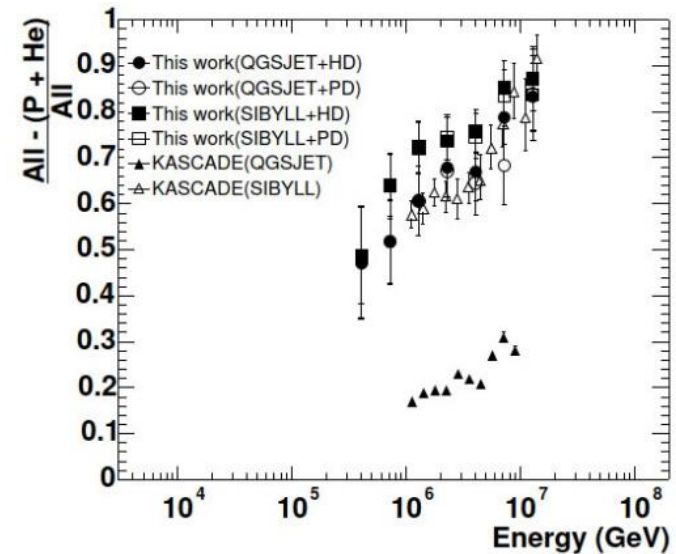
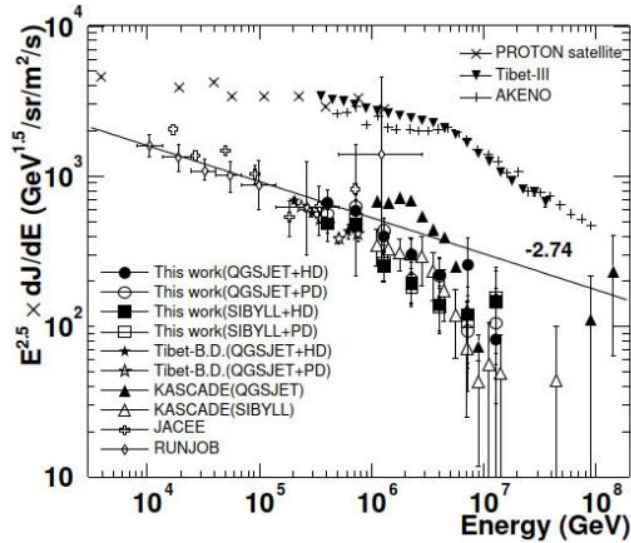


**В событии зарегистрировано 43 адрона ( $\pi^\pm$ ) и только 1 гамма квант ( $\pi^0$ ). Еще 22 адрона должны были пройти без взаимодействия. Ожидаемое число  $\pi^0$  - 30.**

**Очевидое нарушение изотопинвариантности вызвало бурю эмоций.**

**Объяснение с помощью частиц СКМ [Бьеркен, МакЛерран] предполагает распад странглета на гипероны, что устраняет нарушение изотопической инвариантности.**

# Магнитная жесткость излома ядерных спектров - $R \approx 0.1$ ПВ.



Спектр протонов по данным стволков в эксперименте  $AS\gamma$ .

Зависимость от энергии доли ядер тяжелее гелия.

На рисунках приведены данные  $AS\gamma$  и KASCADE при использовании моделей взаимодействия SIBILL и QGSJET.

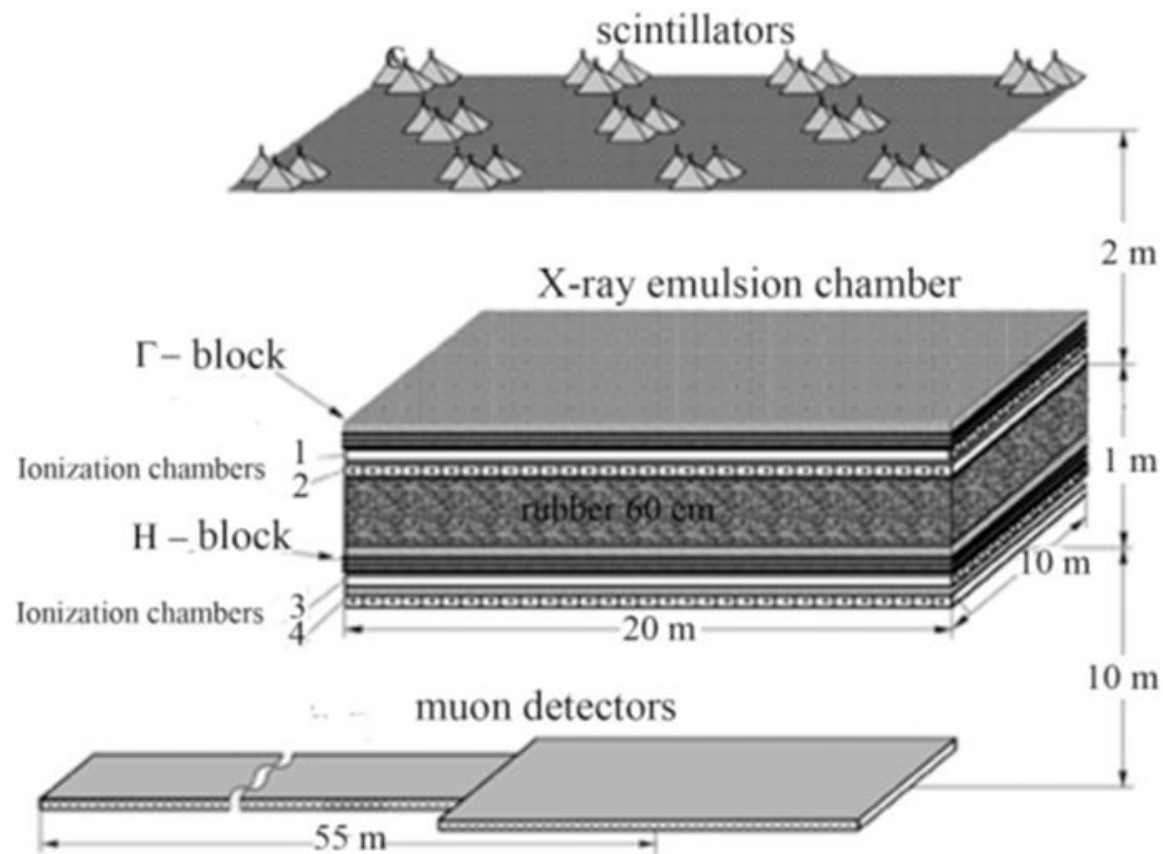
Данные  $AS\gamma$ , полученные из анализа стволков ШАЛ согласуются для обеих моделей.

Данные KASCADE по ШАЛ отличаются в три раза для двух моделей SIBILL и QGSJET.

# Эксперимент АДРОН

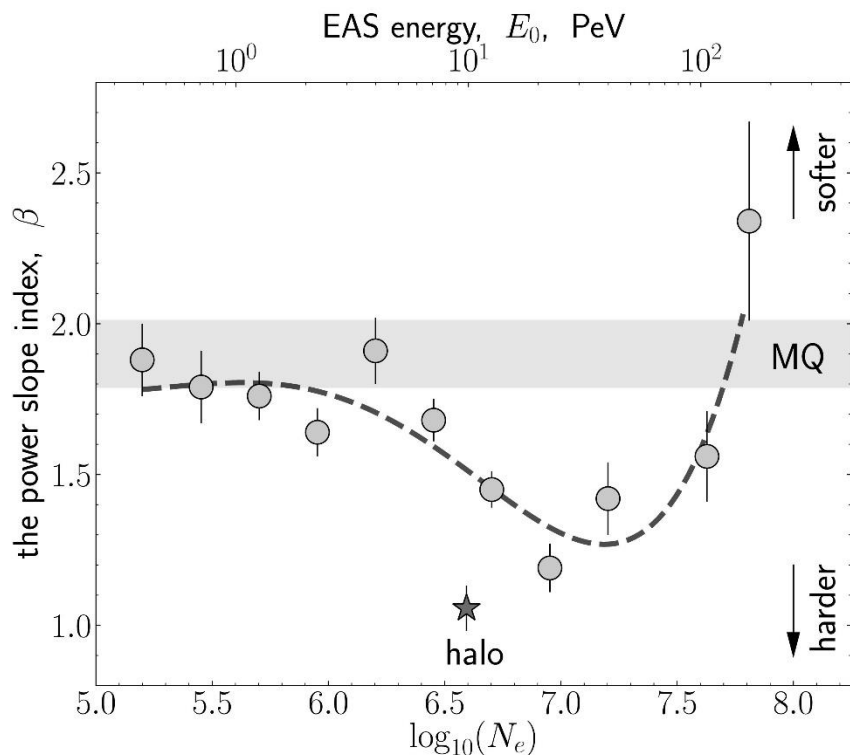
- Эксперимент АДРОН уникален – впервые получен банк событий РЭК+ШАЛ, включая мюоны.
- В связи с отсутствием временной селекции событий в РЭК, сопоставление событий в РЭК с ШАЛ проводилось статистически путем сравнения местоположения событий и их углов с использованием критерия Неймана-Пирсона. Дополнительный отбор ложных ШАЛ проводился по данным локализованных толчков в ионизационных камерах.
- В результате впервые были получены сопоставленные события РЭК+ШАЛ с долей фона не более 10%.
- Гибридные установки существовали на г. Чакалтайа и Тибете, но только на Тянь-Шане была получена статистика сопоставленных событий, что и позволило получить уникальные результаты.
- Надежность процедуры сопоставления была подтверждена путем проведения сопоставления с заведомо ложными координатами и углами событий.

# Эксперимент АДРОН – умная установка.





# Нарушение скейлинга в спектре адронов.



Наклон спектра адронов в зависимости от  $N_e$ .

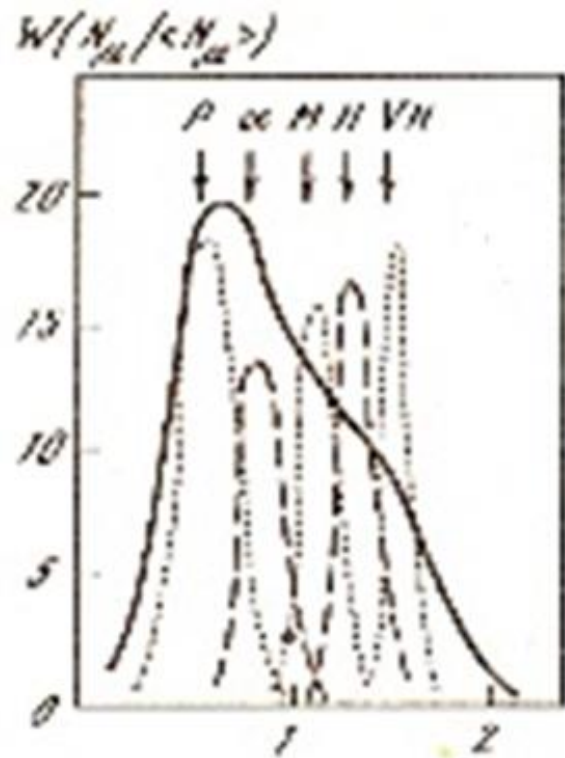
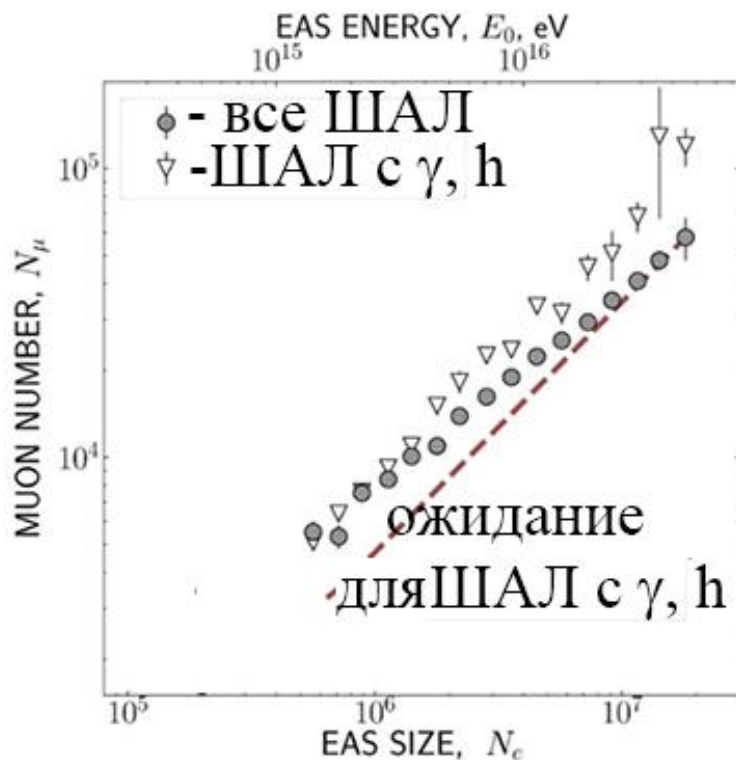
Наклон спектра  $E^\beta$  уменьшается с  $\beta = -1.9$  (Fe) до  $\beta = -1.2$  (протоны), средняя энергия адронов увеличивается – **проникающая компонента**.

**Изменение наклона спектра адронов совпадает с положением колена – 3 ПэВ.**

В области нарушения скейлинга появляются гамма семейства с гало ( $\beta = -1.06$ ).

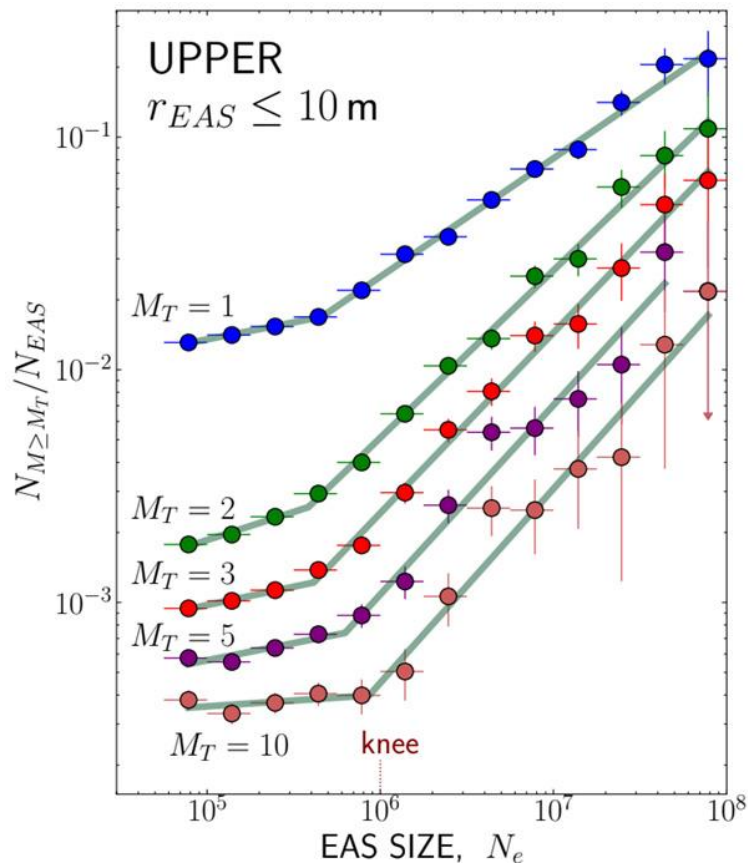
**Нарушение скейлинга объясняется изменением состава КЛ. Изменение ядерного взаимодействия противоречит данным ЛНС.**

# Избыток мюонов в ШАЛ с гамма-адронными семействами (эксперимент АДРОН).



Эксперимент.

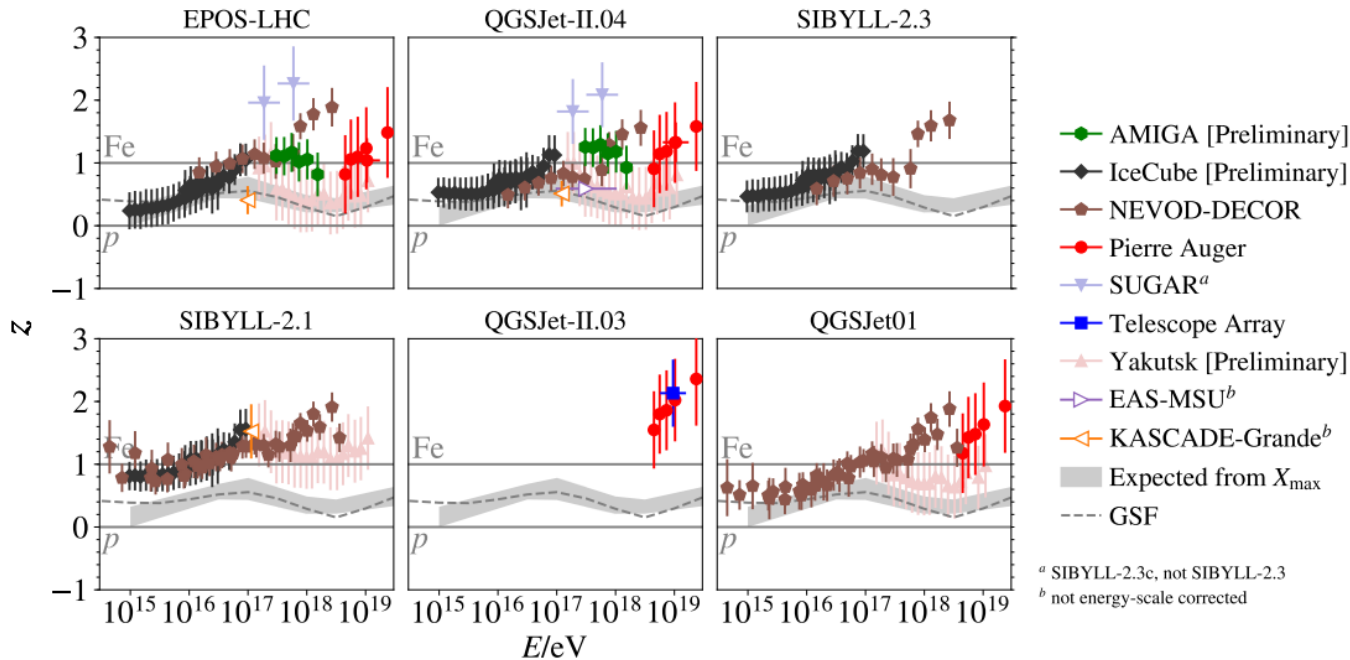
Оценка вклада ядерных компонент в  $N_\mu / \langle N_\mu \rangle$  для данного  $N_e$ .



- Отношение числа ШАЛ, в которых наблюдался сигнал от мюонных взаимодействий в подземном детекторе ТШВНС, NM, к общему количеству зарегистрированных ливней NEAS, в зависимости от размера (числа частиц) в ливне  $N_e$  и минимальной множественности нейтронных сигналов  $M_T$ .

# Combining muon measurements

(WHISP: Working group in Hadronic Interactions and Shower Physics)

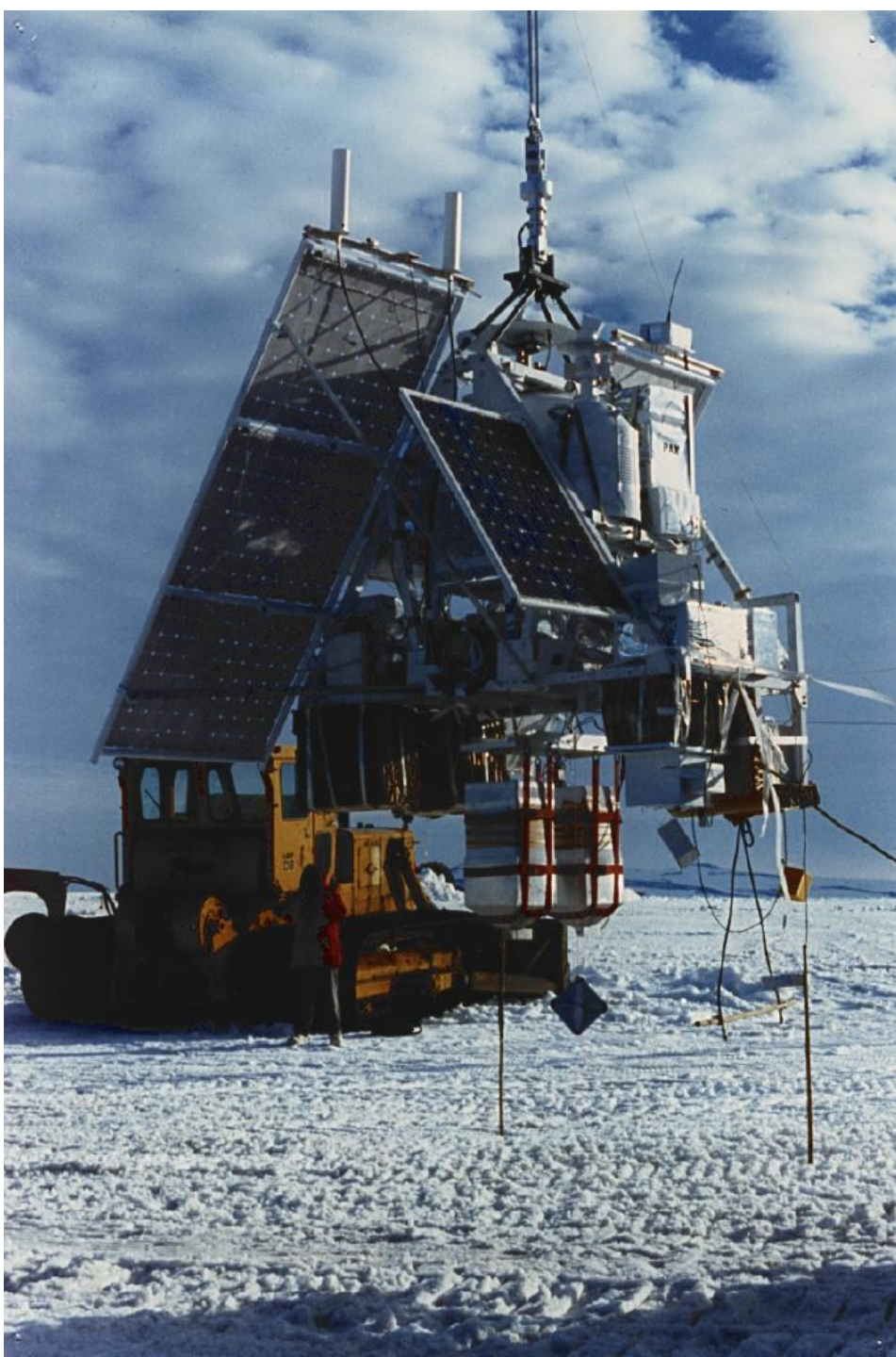


$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{det}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}{\ln(N_{\mu Fe}^{sim}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}$$

**Lorenzo Cazon. 36th International Cosmic Ray Conference -ICRC2019-**

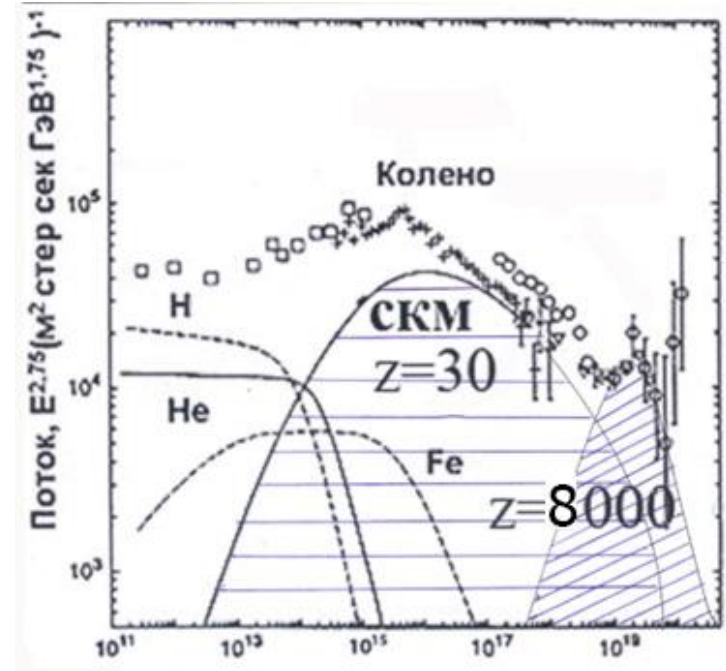
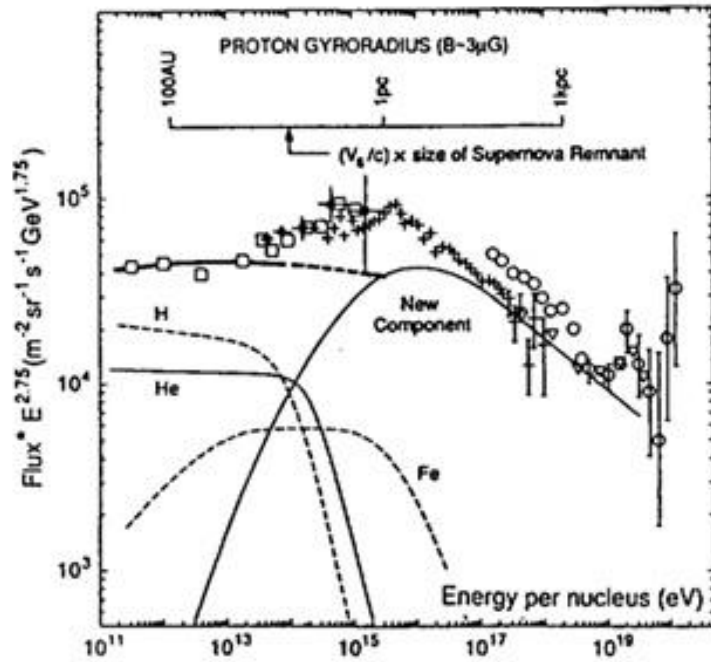
# Изменение ядерного состава КЛ в области колена.

- Нарушение скейлинга в области колена (увеличение энергии вторичных адронов) и избыток мюонов в ШАЛ с гамма-семействами в этой же области колена означает, что колено формируется неядерной компонентой.
- Вывод о наличии избытка мюонов в колене подтверждается современными данными подземного нейтронного монитора.
- Избыток мюонов ( $\mu$ on puzzle) наблюдается в эксперименте Оже вплоть до максимальных энергий, что можно рассматривать как наличие неядерной компоненты вплоть до конца спектра КЛ.
- **Вариант стабильной неядерной компоненты единственный – это СКМ.**



## Пуск JASIN-10 в Антарктиде

Yoshiyuki Takahashi (for the JACEE Collaboration),  
 Elemental Abundance of High Energy Cosmic Rays,  
 Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 60B (1998) 83-92



## JACEE

**Магнитная жесткость  
 обрезания  $R \approx 0.1$  ПВ.  
 Ядерная компонента  
 ограничена энергией  
 $\sim 3$  ПэВ (Fe).**

**Максимальная энергия КЛ  
 $E_{\max} \approx R \cdot Z_{\max} \approx 0.1 \cdot 8 \cdot 10^3 \approx 10^{18}$  эВ.  
 Максимальное значение  $Ne$   
 для КЛ  $Ne^{\max} = 10^{11}$   
 ( $E_0^{\text{яд}} \sim 2 \text{ ГэВ} \cdot 10^{11} \sim 10^{20}$  эВ).**

- Колено в спектре КЛ образуется казиядрами, т.е. стабильными, положительно заряженными частицами СКМ ( $Z=30-10^4$ ).
- Ядерный спектр КЛ ограничен энергиями  $E_0 \sim 3$  ПэВ.
- При энергиях  $E_0 = 3-10^3$  ПэВ спектр формируется квазиядрами, максимальная энергия КЛ  $10^{18}$  эВ.
- Значения  $N_e^{\max} \approx 10^{11}$  в ШАЛ ( $E_0 \sim 10^{20}$  эВ в яд. модели) формируются квазиядрами с энергиями  $10^{18}$  эВ ( $A=10^{10}$ ,  $Z=10^4$ ) за счет большого сечения взаимодействия ( $\sigma \sim 10^3$  барн) и повышенной генерацией электромагнитной компоненты.
- Обрезание спектра КЛ при  $N_e^{\max} \approx 10^{11}$  обусловлено нулевым электрическим зарядом ( $Z=0$ ) квазиядер с барионными числами  $A > 10^{10}$ . Зануление заряда объясняется проникновением электронов внутрь казиядер, т.к. при  $A > 10^{10}$   $\lambda_{\text{compt}}^{e^-} < R_{\text{str}}$
- Все КЛ имеют Галактическое происхождение.
- КЛ ультра высоких энергий и внегалактическая компонента КЛ отсутствуют.



## **Фундаментальные следствия.**

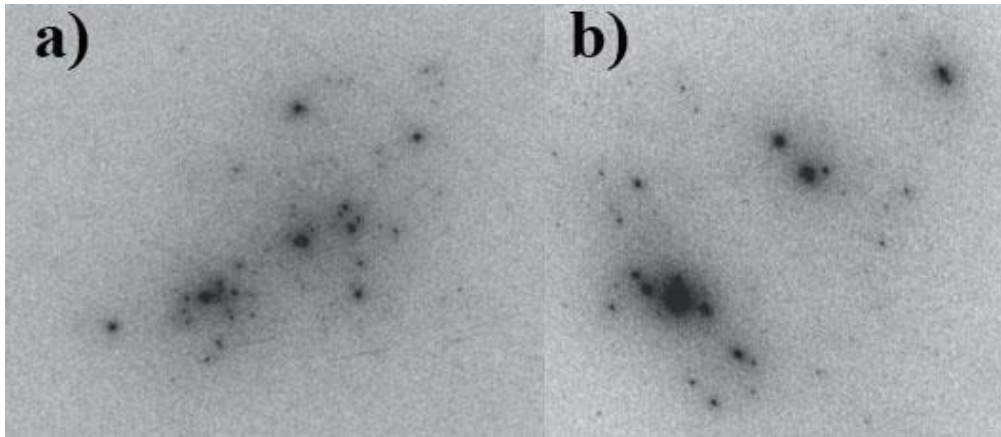
- СКМ основное состояние вещества вместо ядер Fe.
- Все ядра, включая протоны, нестабильны с временами жизни, превышающими время существования Вселенной.
- Остывшие странные кварковые звезды и  $uds$  кварковые образования меньших размеров могут формировать темную материю.

**Спасибо за внимание.**



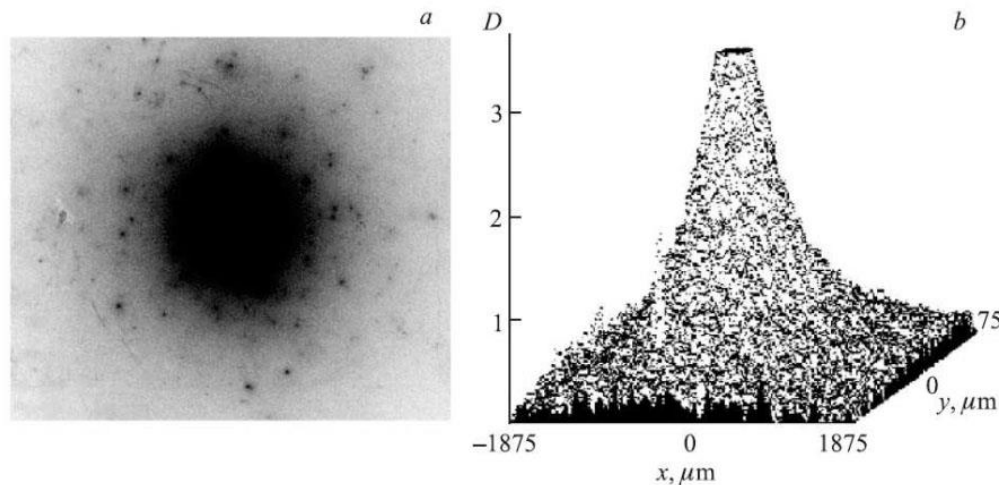


# Эксперимент ПАМИР (РЭК)



**Нарушение  
азимутальной  
симметрии.**

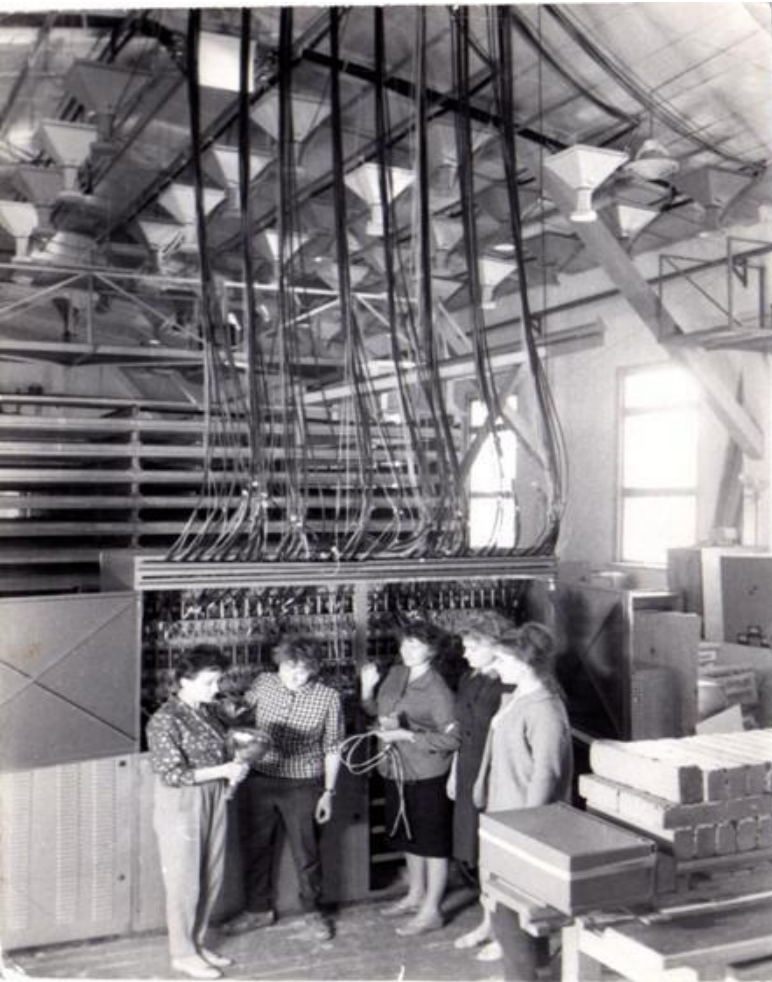
Выстроенность энергетически  
выделенных центров вдоль прямой.



**Гало в супер семействах.**

Адронная проникающая  
способность при  
электромагнитных поперечных  
импульсах.

# Проникающая компонента в калориметре.



Первое указание на проникающую компоненту в ШАЛ было получено в Тянь-Шаньском калориметре Яковлевым с сотрудниками. В 1980 году было обнаружено увеличение длины поглощения каскадов в свинце с 800 до 1100 г/см<sup>2</sup> при энергии адронов 100 ТэВ.

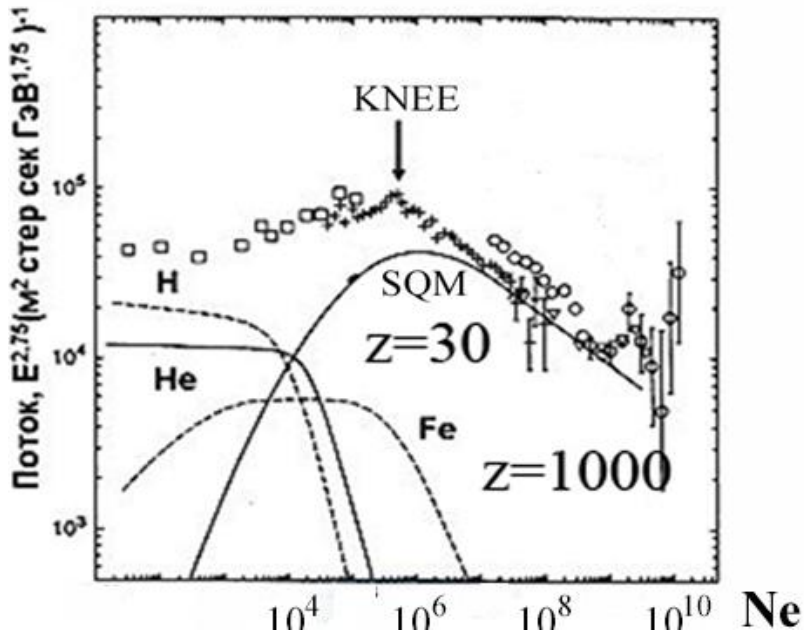


Зависимость  $\lambda_{\text{abs}}$  от энергии адронов.

## Лидирующий чарм.

- Условия регистрации событий в эксперименте АДРОН принципиально отличаются от калориметрических данных.
- В калориметре каскад развивался в свинце , что позволяло объяснять затягивание каскада лидирующим чармом.
- В эксперименте АДРОН каскад развивается в атмосфере на высоте 2-3 километров над установкой, поэтому влияние чарма не сказывается.

# СКМ модель – состав КЛ и сечение.



КЛ имеют сложный состав:

- до  $N_e=10^6$  это ядра;
- выше  $N_e=10^6$  это стабильная неядерная компонента.

Стабильная компонента – частицы странной кварковой материи (СКМ) при барионных числах  $A > 10^3$ .

Странглеты: Электрический заряд  $Z=30-1000$  при  $A=10^3-10^6$ ;

Размер:  $R=R_0 \cdot A^{1/3}$ ;

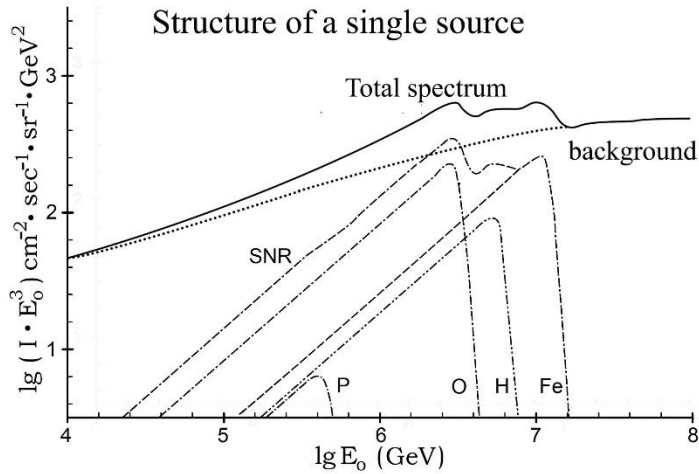
Взаимодействие:  $\sigma_{\text{геом}} = \pi R_0^2 \cdot A^{2/3}$  - в  $6-2 \cdot 10^3$  раз  $> \sigma_{\text{Fe}}$

Поэтому  $\lambda_{\text{вз}}$  в атмосфере для странглетов – несколько грамм.



# Спектр космических лучей в СКМ модели.

1. Резкость излома при 3 ПэВ.
2. Отсутствие странглетов при  $E_0 < 3$  эВ.



Причина может быть связана с метостабильностью странглетов (S). По оценкам (Keith E, Ma E, NIP 4, 381,1996) -время жизни S:  $\tau_S = 10^6$  лет  $\ll \tau_{\text{кл}} = 10^7 - 10^8$  лет. Тогда вклад дают только близкие источники.

**Модель близкого одиночного источника – Ерлыкин&Волфиндейл.**

**Резкость излома при 3 ПэВ и пороговый характер спектра S объясняется близостью и малым числом источников: 1-2.**

# Почему странглеты не проявляют себя в экспериментах с ШАЛ?

Взаимодействия странглетов существенно отличаются от ядерных. Из-за большого геометрического размера странглеты должны взаимодействовать часто, но с малым коэффициентом неупругости порядка  $K_{in}=10^{-2}-10^{-3}$ .

В каждом взаимодействии выделяется относительно небольшая энергия порядка десятков ТэВ, но на длине взаимодействия протона  $\lambda_{вз} \sim 100$  г/см<sup>2</sup> таких взаимодействий набираются десятки.

**В результате суммарный ШАЛ напоминает ШАЛ группы ядер CNO (Bjorken&Mak-Lerran) .**

## Локальное нарушение скейлинга.

- Странглеты с минимальными значениями барионного числа  $A=10^3$  находятся на грани стабильности. Попадая в атмосферу, они взаимодействуют с ядрами воздуха, теряют стабильность и распадаются на гипероны.
- При этом странглеты могут генерировать жесткие спектры  $\gamma$ -квантов, регистрируемых в РЭК (Шаулов\_1996). С ростом барионного числа стабильность странглетов повышается и распады прекращаются при некотором значении  $A$ , соответствующем  $N_e=10^7-10^8$ .
- Появление струй гиперонов в ограниченном интервале  $N_e$  может объяснить локальное нарушение скейлинга, образование гало в  $\gamma$ -семействах и события типа Centauro.

# Избыток мюонов в ШАЛ с $\gamma$ -семействами.

- Отличие характеристик взаимодействия для ядер и странглетов может также объяснить избыток мюонов, который наблюдается в ряде экспериментов при разных первичных энергиях КЛ (АДРОН, НЕВОД, AUGER).
- Избыток мюонов в эксперименте АДРОН наблюдается в области нарушения скейлинга, т.е. в области где могут образовываться струи, состоящие из сотен гиперонов, образованных при распаде странглетов, , которые в свою очередь распадаются на нуклоны, К-мезоны, пионы и мюоны.
- Учитывая большое число взаимодействий в таких струях , можно ожидать, что общее число мюонов, образованных странглетами, может превышать их число в ядерных каскадах. На длине  $100 \text{ г/см}^2$  мюонов может набраться больше чем в случае каскада образованного протонами. Причем часть гиперонов может проникать достаточно глубоко и имитировать мюоны.

# Чем определяется обрезание спектра КЛ?

Барионное число странглетов меняется в широком диапазоне  $A=10^3-10^7$ .

Электрический заряд  $Z$  сначала растет от  $Z=30$  до  $Z \approx 1000$  ( $A=10^3-10^6$ ), а затем уменьшается до  $Z=0$  при  $A=10^6-10^7$  из за того, что концентрация  $uds$  кварков сравнивается при увеличении  $A$  ( $n_u=n_d=n_s$ ).

Частицы СКМ при  $A > 10^7$  стабильны и нейтральны.

При  $Z=0$  ускорение странглетов прекращается и спектр КЛ обрезается.

# Происхождение лодыжки в спектре КЛ.

Максимальные значения  $N_e$  формируются наиболее тяжелыми странглетами с барионными числами  $A=10^6-10^7$  за счет их большого геометрического сечения и соответствуют наблюдаемым в эксперименте максимальным значениям  $N_e$  порядка  $N_e \sim 10^{10}-10^{11}$ .

В области  $A=10^6-10^7$  сечение взаимодействия увеличивается с ростом  $A$ , но энергия  $E_0$  уменьшается из за уменьшения электрического заряда с  $Z=10^3$  до  $Z=0$ . При этом  $N_e$  тоже уменьшается и **в конце спектра число событий увеличивается примерно вдвое – лодыжка.**

## Основной вывод для КЛ.

Наиболее важный вывод СКМ модели для КЛ заключается в том, что все КЛ в этом случае имеют Галактическое происхождение и одинаковый с ядрами механизм ускорения на ударных волнах.

В результате энергия КЛ не должна превышать нескольких сотен ПэВ.

Как уже отмечалось, величина  $N_e$  при этом может быть достаточно большой из-за большой массы и геометрического сечения взаимодействия странглетов.

- СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



# Strangelets : small lumps of SQM

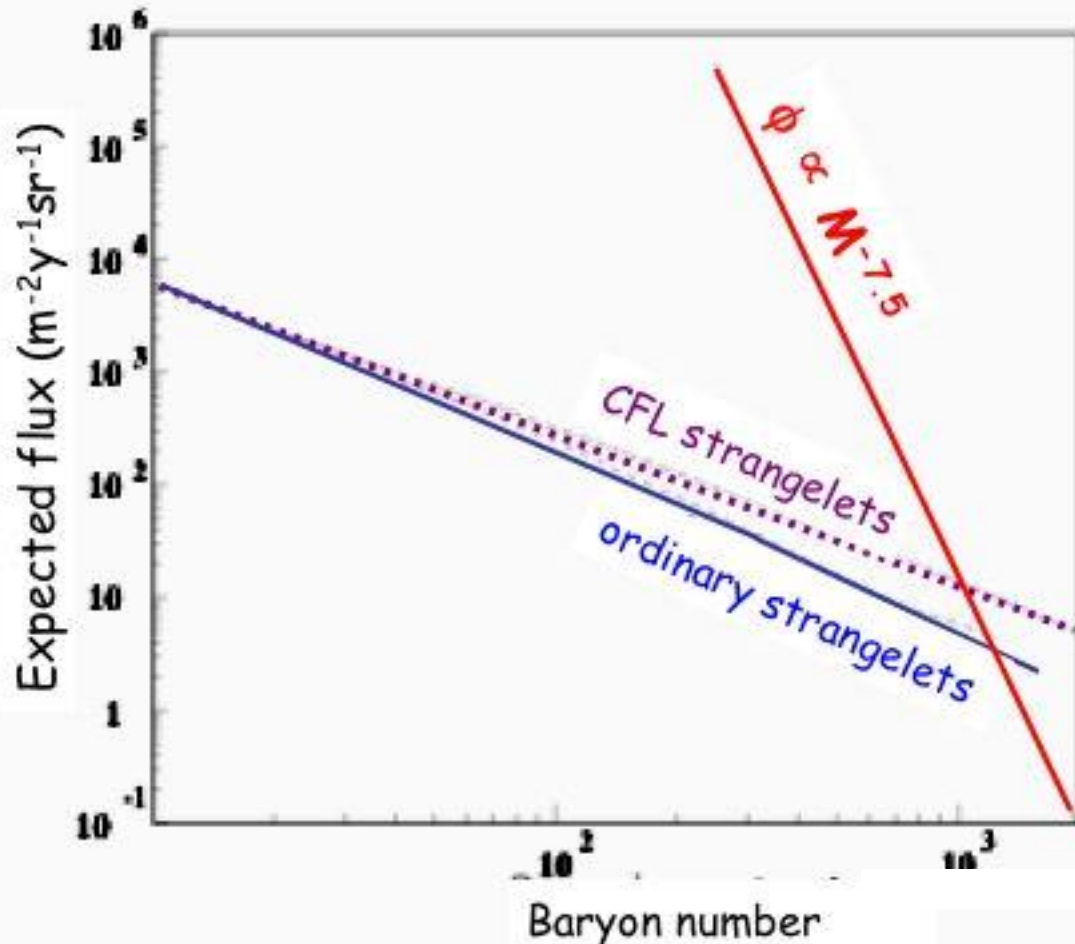
-  $\sim 300 < A < 10^6$

Produced in collisions of strange stars

R. Klingenberg J. Phys. G27 (2001) 475

-charged

Accelerated as ordinary nuclei



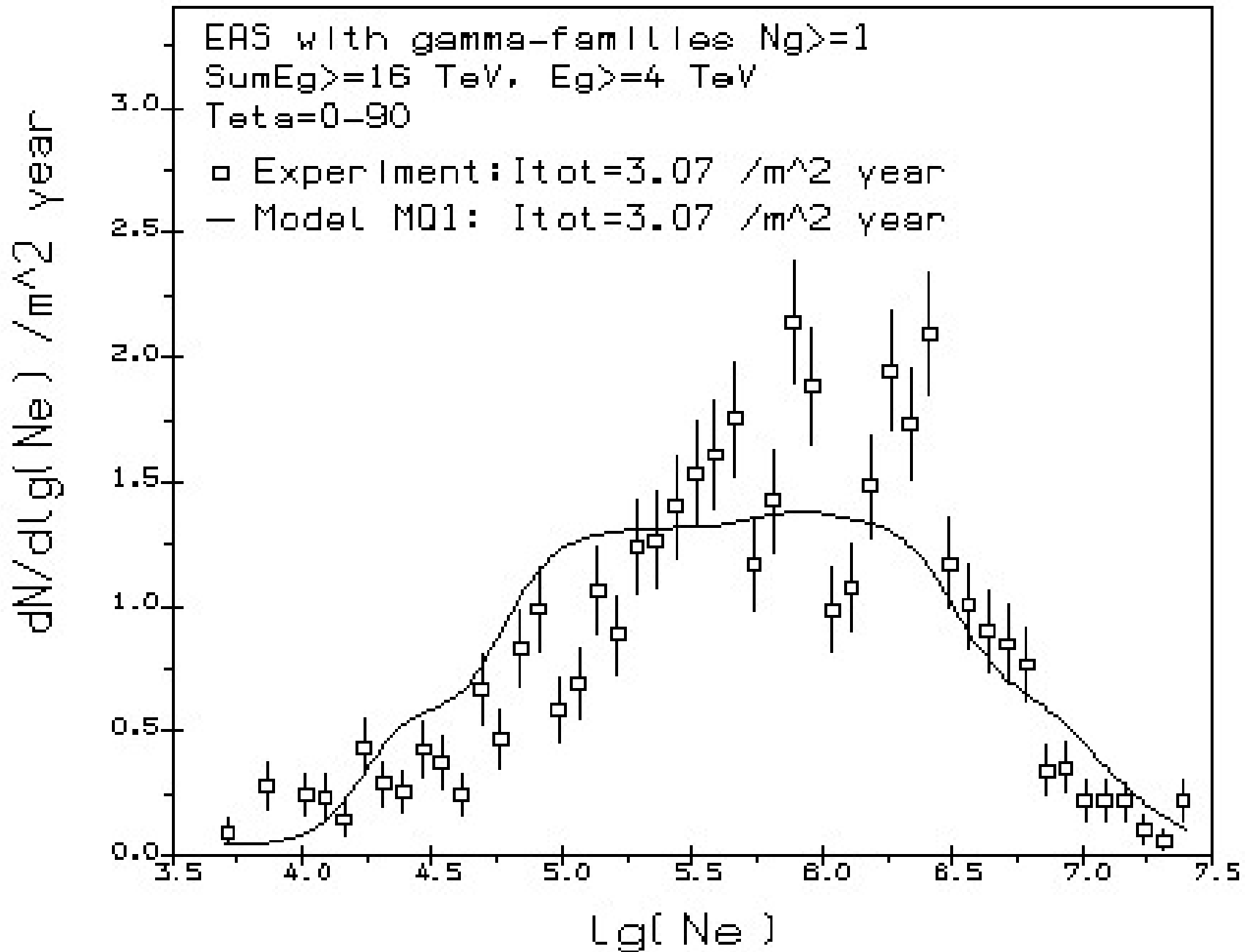
Strangelets as ultra-high energy cosmic rays?

Madsen & Larsen, PRL 90 (2003) 121102

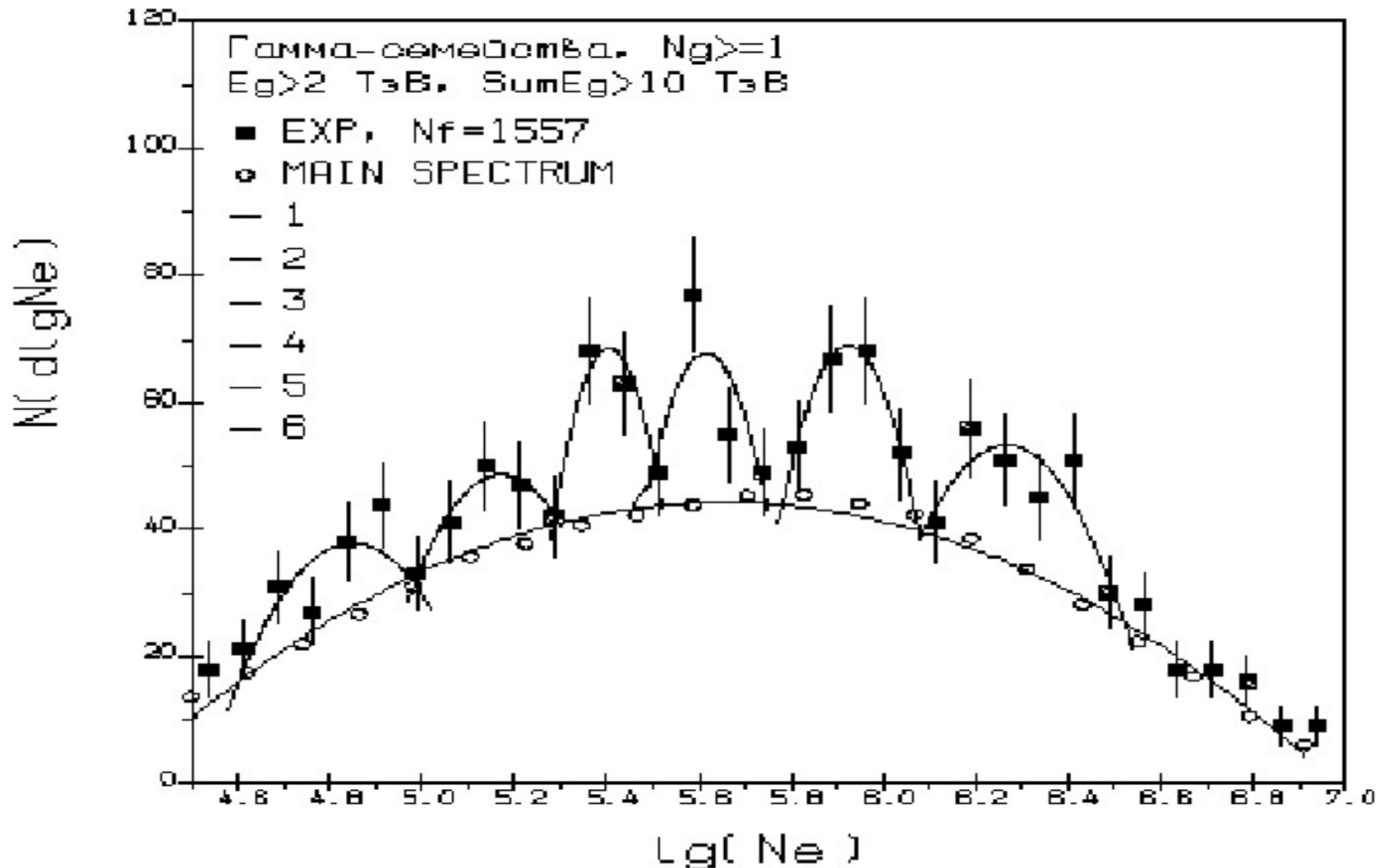
G. Wilk et al. hep-ph/ 0009164 (2000)

J. Madsen et al. Phys.Rev.D71 (2005) 014026

- Strangelets have low  $Z/A$
- CFL and non-CFL strangelets differ wrt.  $Z$
- Experimental verification/falsification of –  
Strangelet existence
- Realistic from AMS-02 [2008-?]
- Possible from lunar soil search [2005] –  
( $A,Z$ )-relation (CFL or ordinary)
- Optimistic, but not impossible from AMS-02 or lunar soil search
- Possible explanation of UHECR's



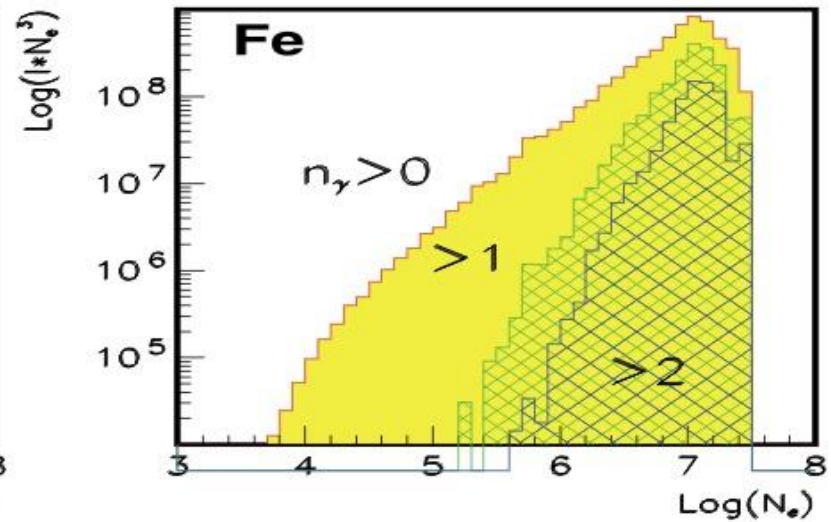
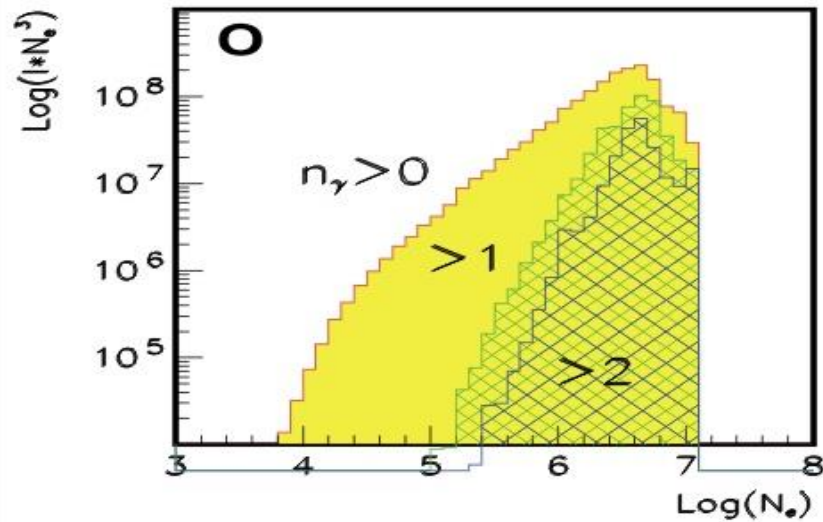
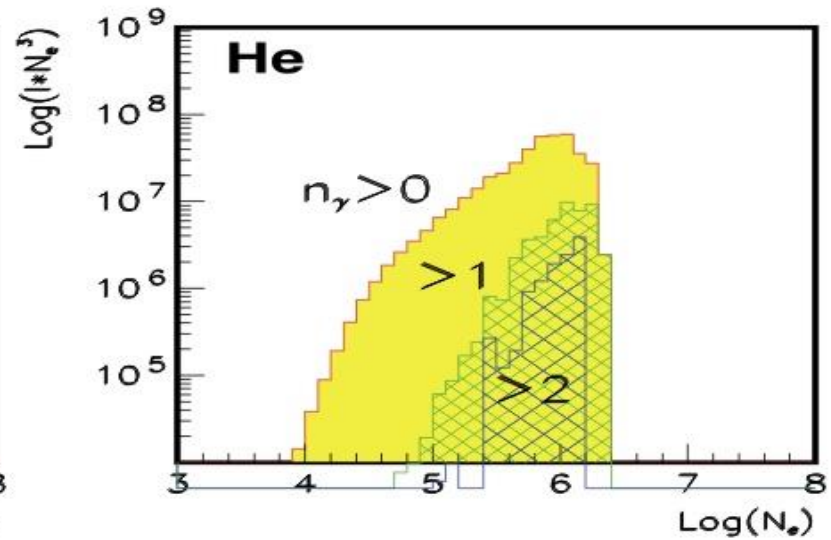
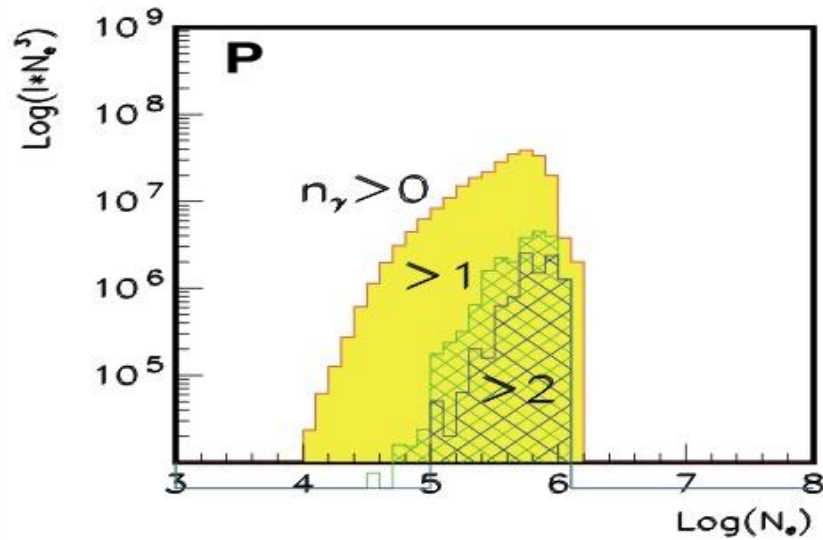
# Аппроксимация пиков в экспериментальном спектре



# A.D.Erlykin<sup>1,2</sup> and A.W.Wolfendale<sup>2</sup>

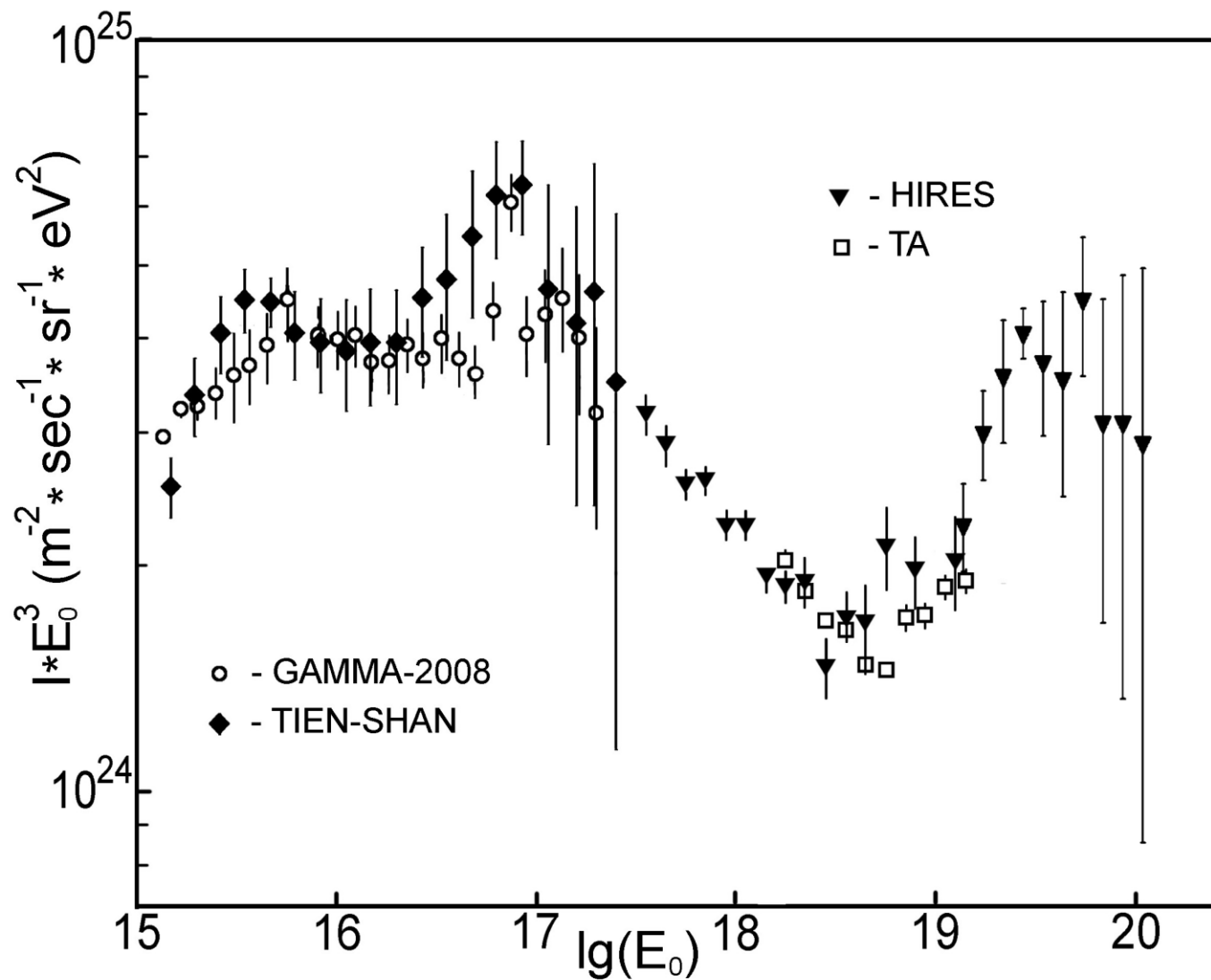
- Due to the strong energy dependence of
- the probability  $P(E)$  the size spectra of
- EAS containing g-quanta and g-families
- **are flatter** than those for all EAS.
- If primary spectra have an energy cut-off
- then EAS size spectra presented
- in  $\log(I_{Ne3})$  vs.  $\log Ne$  coordinates
- look like real **spectral lines**.

# Spectra of EAS with $\gamma$ - families



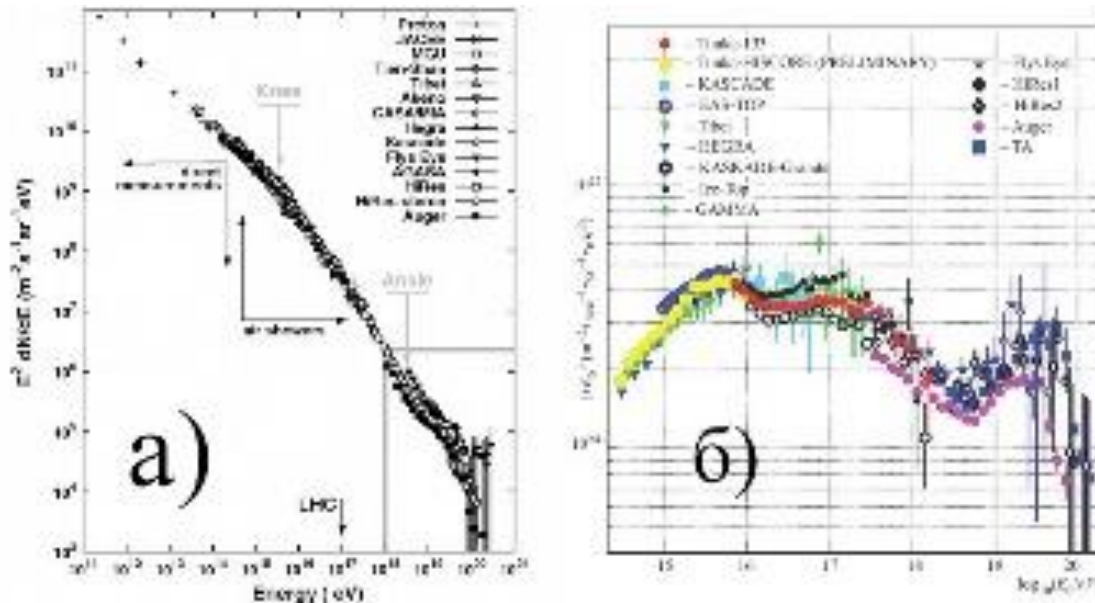
# Comments

- Spectral 'lines' are more distinct in the spectrum of EAS with  $\gamma$ -families than in the total spectrum of EAS  
(  $S/N \approx 1.3$  vs.  $S/N \approx 0.5$  )
- In spite of the lower statistics of EAS with g-families  
**the confidence level of the signal is the same**  
as in the spectrum of all EAS.





# Спектр ШАЛ в зависимости от энергии ядер ПКИ $E_0 = kN_e \alpha$

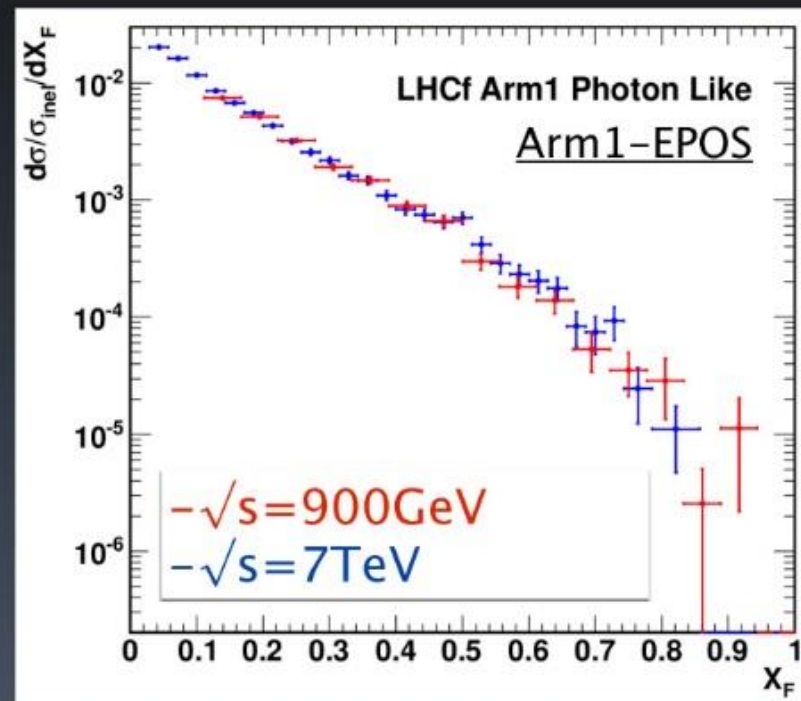
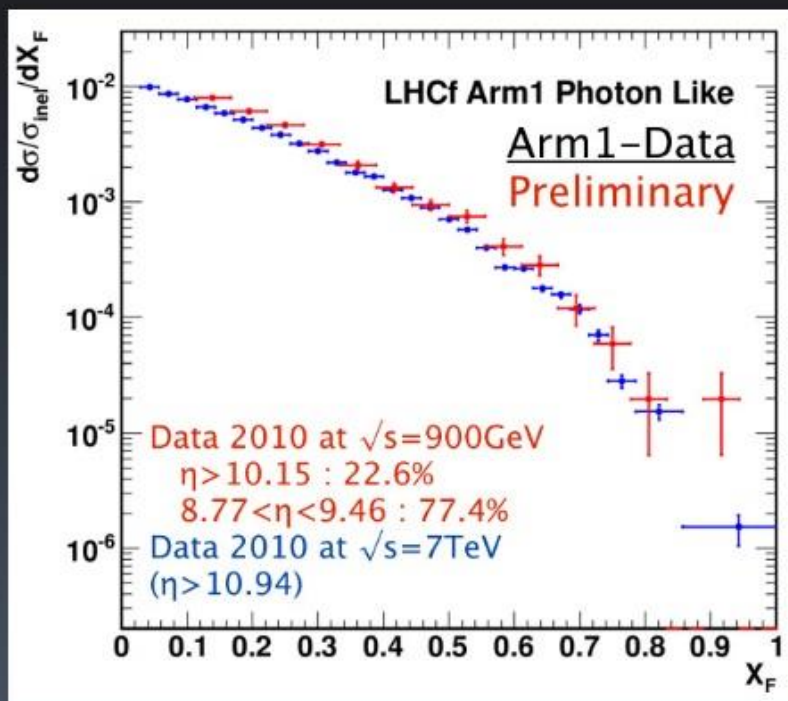


а) Спектр КЛ умножен на  $E^2$ , б) спектр умножен на  $E^3$ .  
 Колено – излом спектра при энергии 3 ПэВ.

- 1) Экспериментально измеряется  $N_e$ ,  $E_0$  – расчет по ядерной модели.
- 2)  $E_{\max} = 10^{18}$  эВ - максимальная энергия ускорения ядер в Галактике.
- 3) В результате возникает проблема КЛУВЭ и внегалактическая модель их происхождения.

# Экспериментальные (LHCf) и модельные (EPOS) спектры $\gamma$ от распада $\pi^0$ при $\theta \approx 0$ .

## Feynman scaling of the photon spectra



$$\frac{1}{\sigma_{\text{inel}}} \frac{d\sigma_\gamma}{dX_F} \Big|_{\eta < \text{limited}} \propto \frac{1}{\sigma_{\text{inel}}} \frac{d\sigma_\gamma}{p_T dp_T dX_F} \langle p_T \rangle dp_T$$