

ВККЛ-2022 27.06 – 2.07

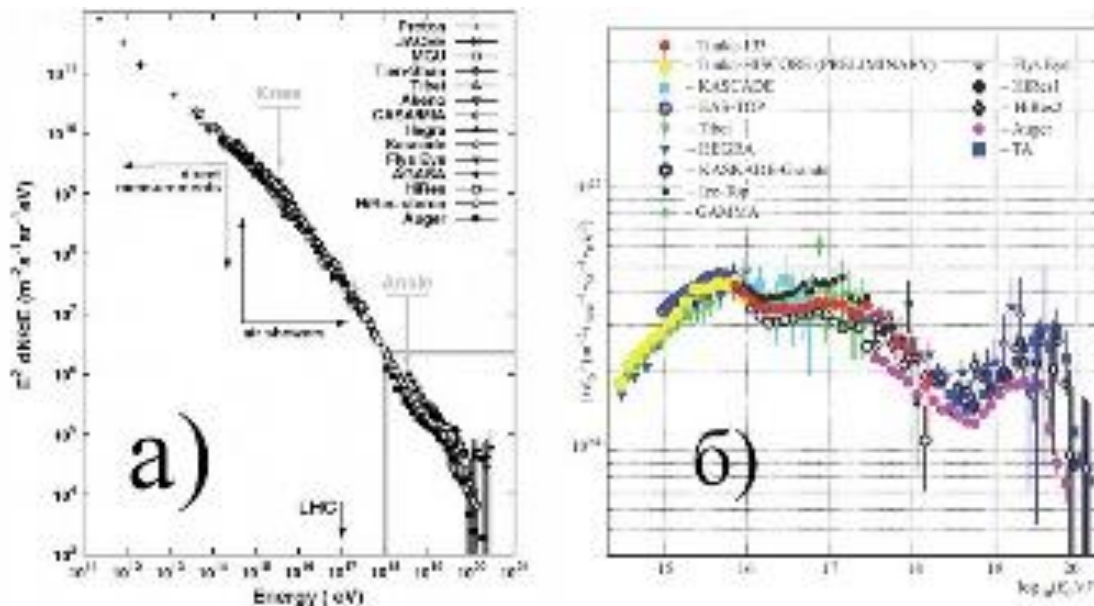


Происхождение галактической компоненты космических лучей.

Шаулов Сергей.
ФИАН-МФТИ

Гудкова Е.Н., Жуков В.В., Куприянова Е.А.,
Пятовский С.Е., Рябов В.А., Щепетов А.Л.

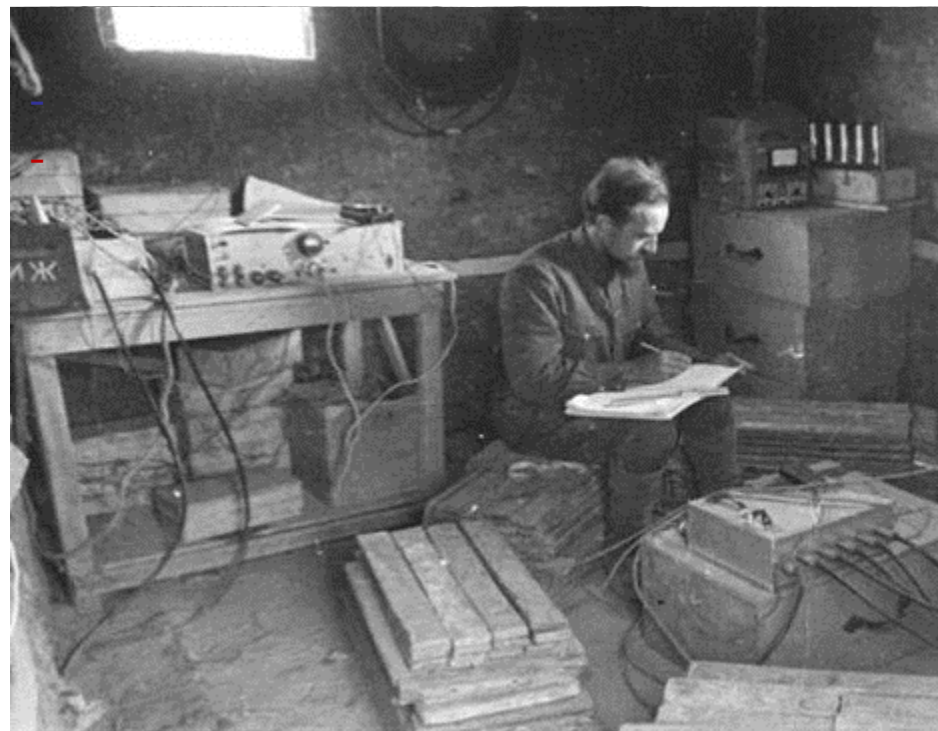
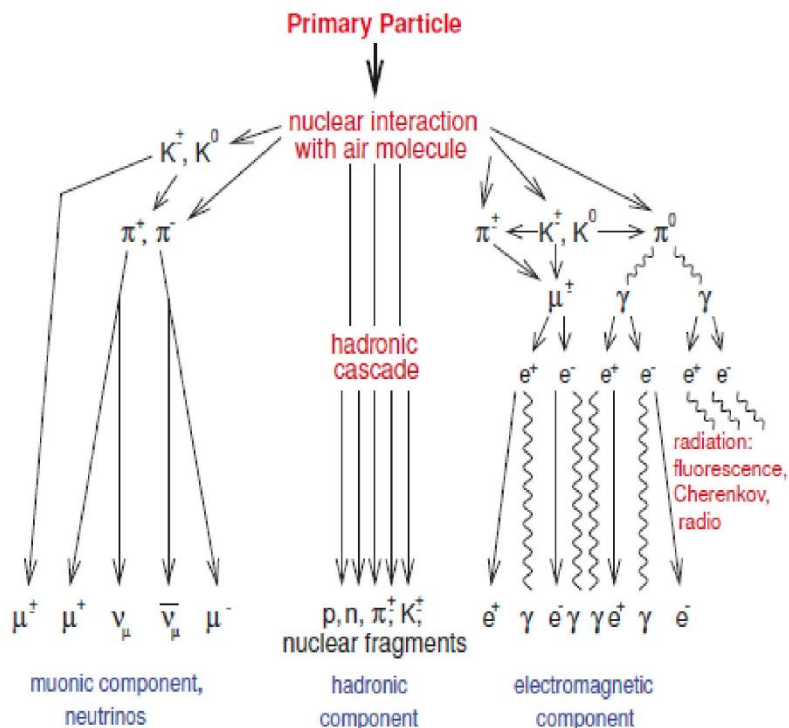
Спектр ШАЛ в зависимости от энергии ядер ПКИ $E_0 = kN_e^\alpha$



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.

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

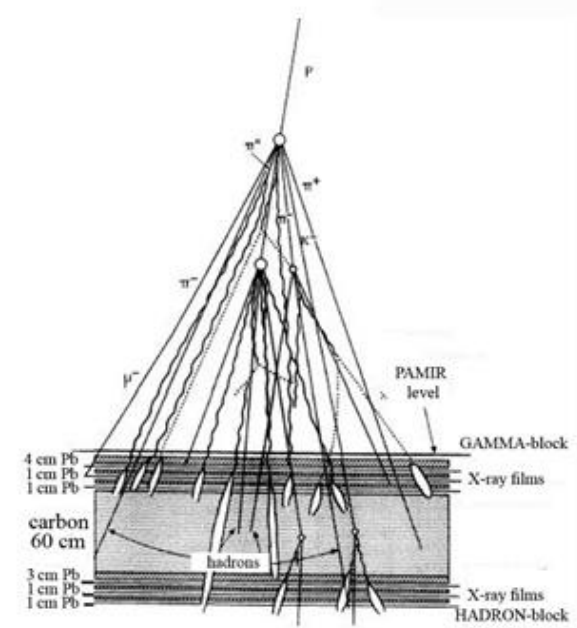
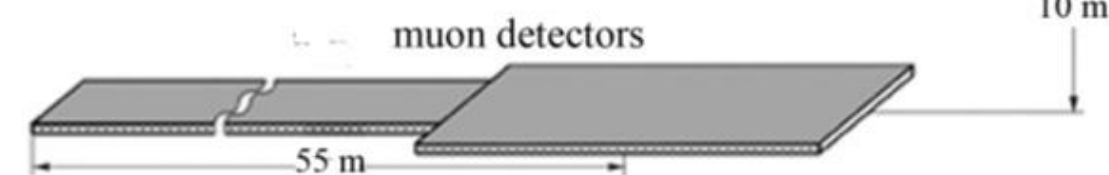
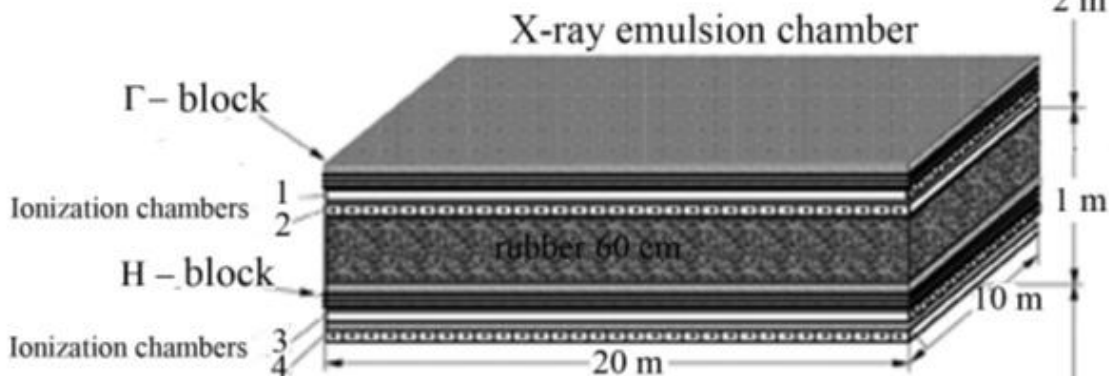
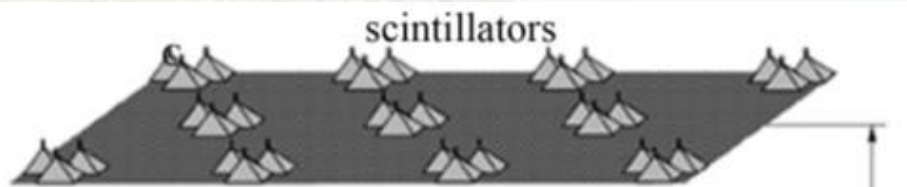


Каскад в атмосфере.

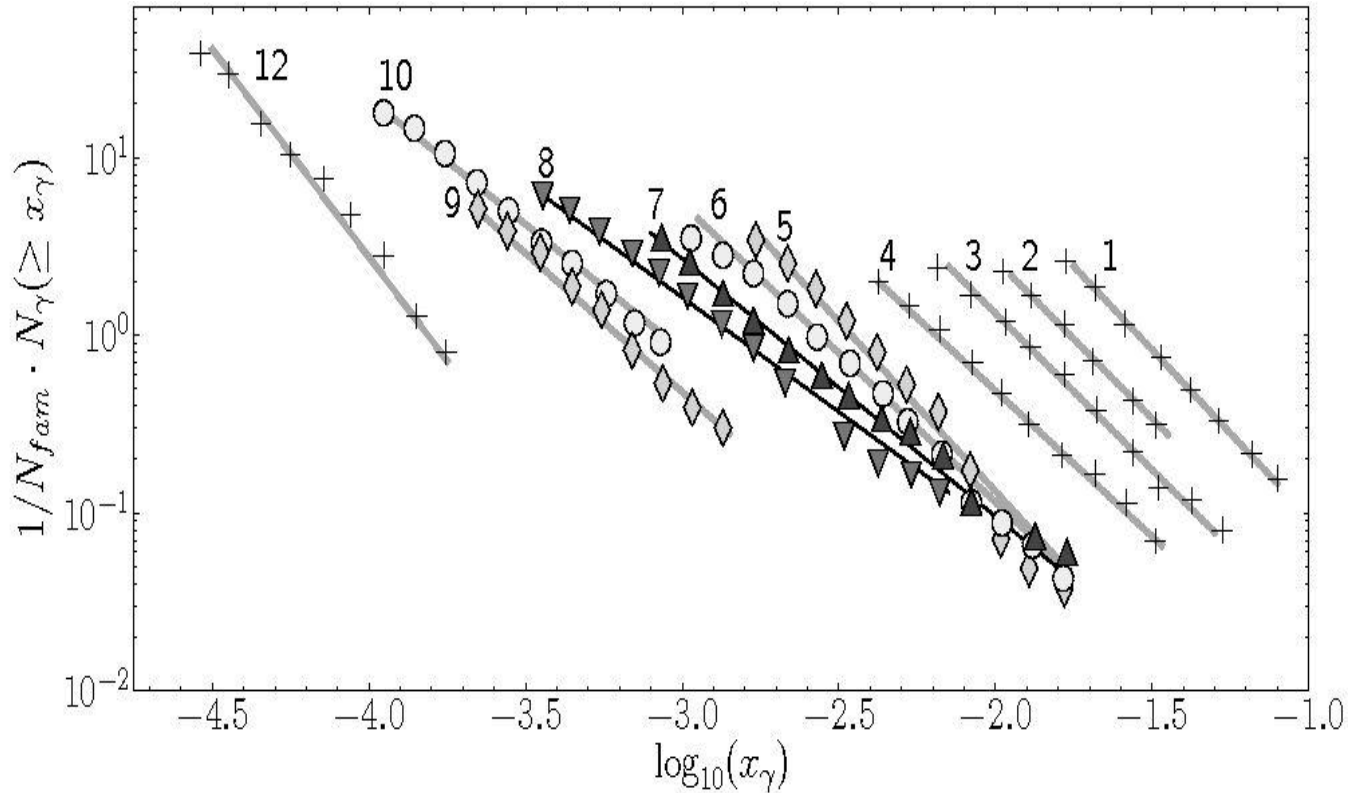
-ШАЛ формируется в основном электромагнитной компонентой (e^\pm , γ , μ , ν) и имеет размеры в десятки и сотни метров. ФПР позволяет определять N_e и E_0 .

-**Основная информация** о типе первичного ядра (p , He , CNO , Si , Fe) заключена в стволах ШАЛ размером в десятки сантиметров. **РЭК** – единственный прибор, позволяющий изучать индивидуальные спектры адронов в стволе ШАЛ.

Установка АДРОН



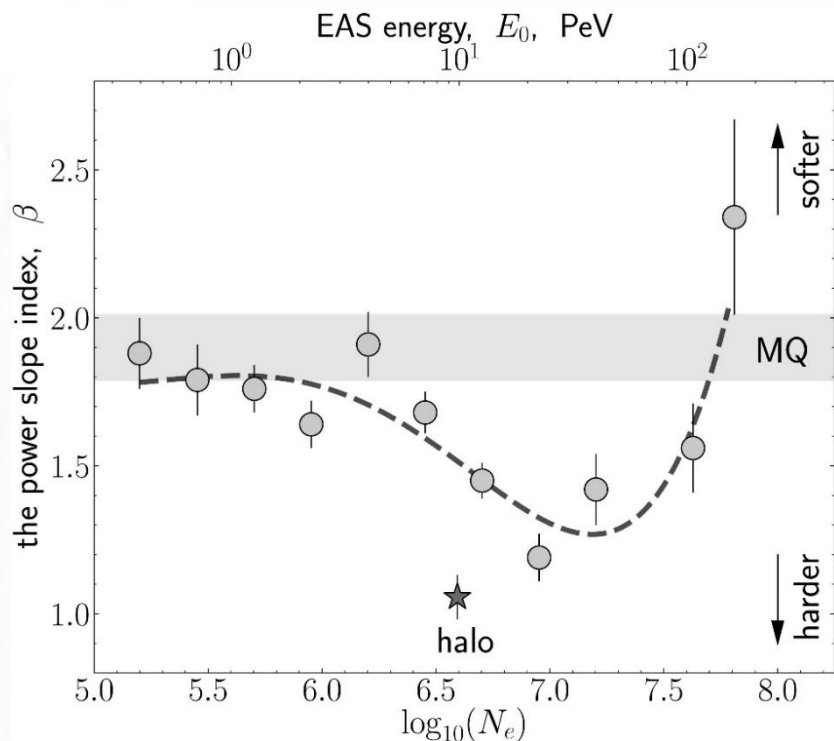
Спектры адронов.



Цифры в порядке возрастания означают интервал $\lg Ne$ в
Интервале $\lg Ne=5-8$ через 0.25.

$$X_{\gamma} = E_{\gamma} / E_0$$

Нарушение скейлинга в спектре адронов.



Наклон спектра адронов в зависимости от N_e .

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

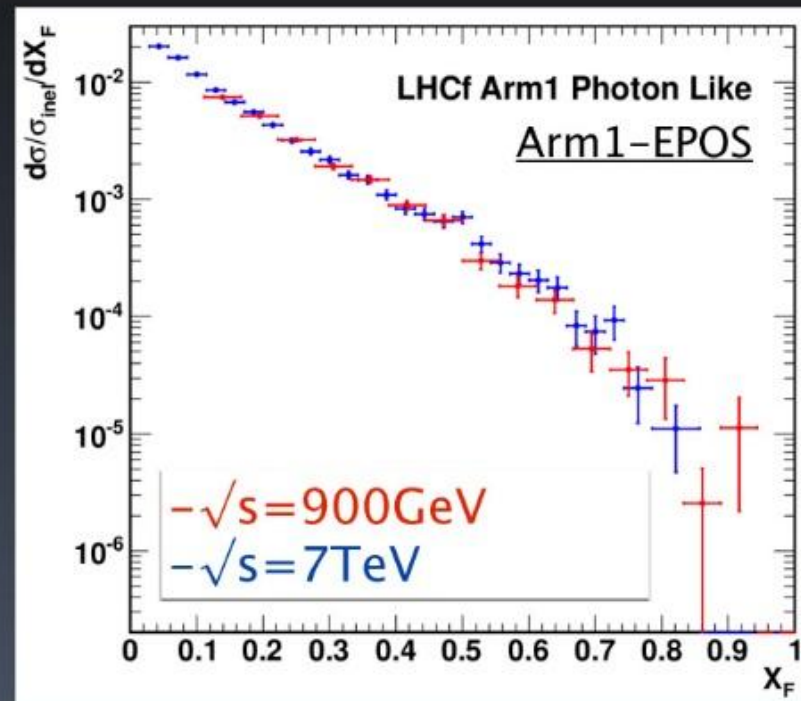
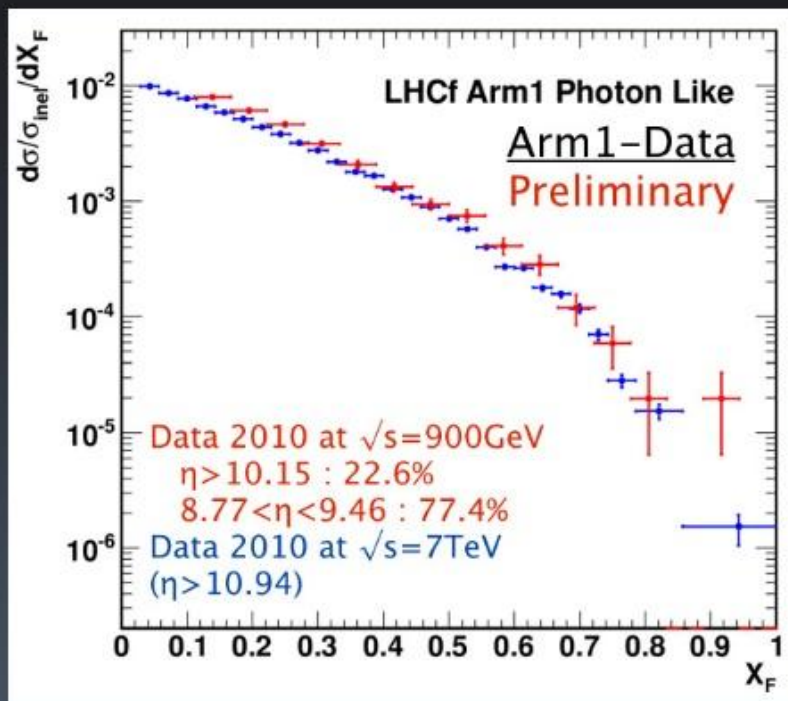
Изменение наклона спектра адронов совпадает с положением колена – 3 ПэВ.

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

Нарушение скейлинга можно объяснить изменением взаимодействия (противоречит данным ЛНС), либо состава КЛ.

Экспериментальные (LHCf) и модельные (EPOS) спектры γ от распада π^0 при $\theta \approx 0$.

Feynman scaling of the photon spectra

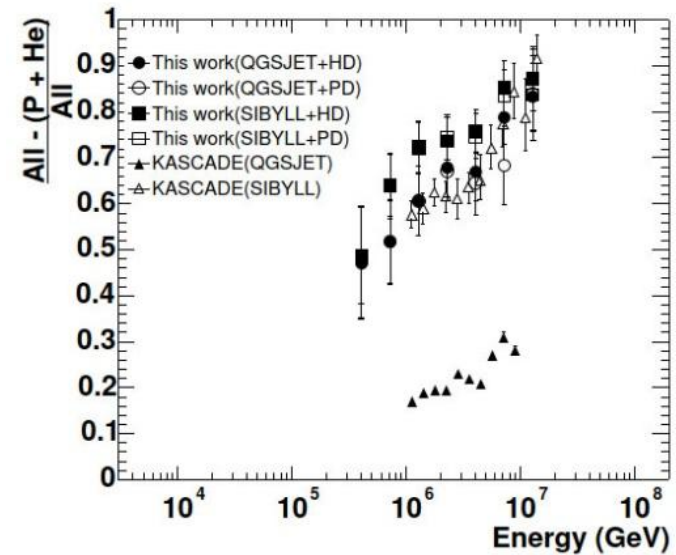
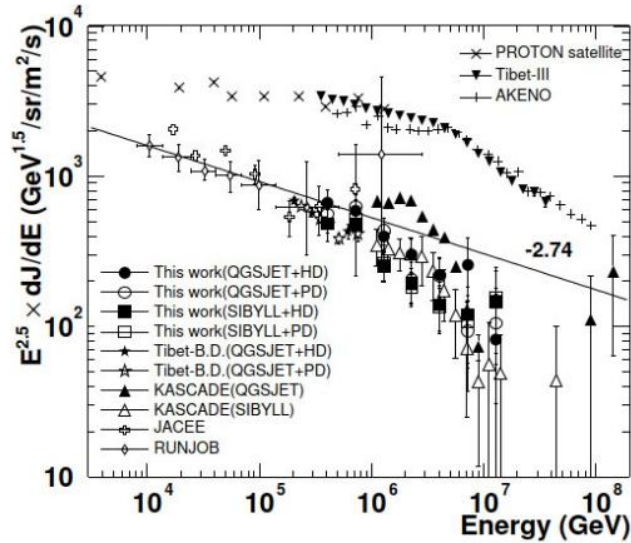


$$\frac{1}{\sigma_{\text{inel}}} \frac{d\sigma_\gamma}{dX_F} \Big|_{\eta < \text{limited}} \propto \frac{1}{\sigma_{\text{inel}}} \frac{d\sigma_\gamma}{p_T dp_T dX_F} \langle p_T \rangle dp_T$$

Изменение ядерного состава КЛ в области колена.

- Характер нарушения скейлинга в колене предполагает появление проникающей компоненты, т.е. условно протонов, доля которых должна увеличиваться за изломом в интервале $N_e=10^6-10^7$.
- Нарушение скейлинга в области колена противоречит модели излома спектра протонов при энергии 3 ПэВ (эксперимент KASCADE).
- Вывод подтверждается данными $AS\gamma$.

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



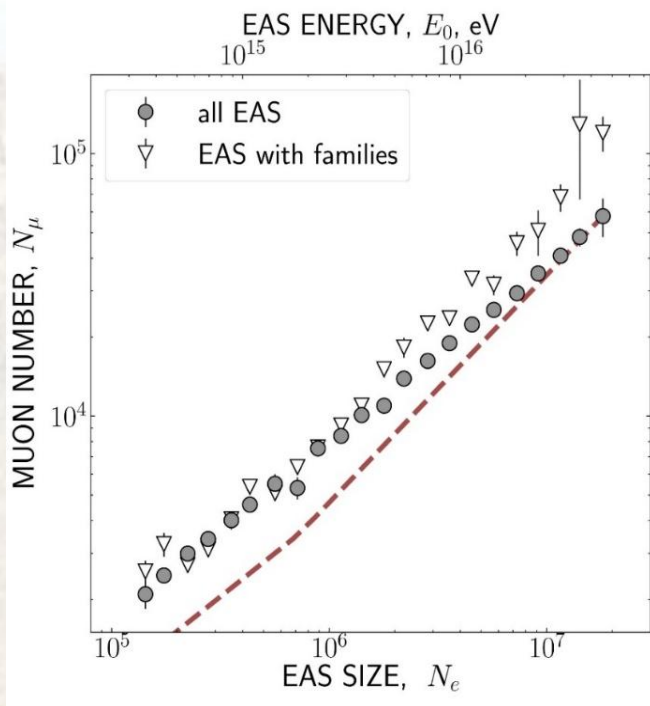
Спектр протонов по данным стволов в эксперименте АСγ.

Зависимость от энергии доли ядер тяжелее гелия.

На рисунках приведены данные АСγ и KASCADE при использовании моделей взаимодействия SIBILL и QGSJET.

Данные АСγ, полученные из анализа стволов ШАЛ согласуются, данные KASCADE по ШАЛ отличаются в разы для двух моделей.

Мюоны для всех ШАЛ и ШАЛ с гамма семействами.



Максимальное число мюонов наблюдается в ШАЛ с гамма семействами, (протоны-?), что в два раза превышает ожидаемое количество ($2 \cdot 10^4$ вместо 10^4) и в 1.5 раза больше $\langle N_\mu \rangle$ для всех ШАЛ.

ПРОТИВОРЕЧИЕ (в рамках ядерного каскада): рост доли протонов и увеличение числа мюонов в этих же событиях.

$\langle N_\mu \rangle$ от N_e .

▽ - ШАЛ с γ – (протоны)

◻ - все ШАЛ

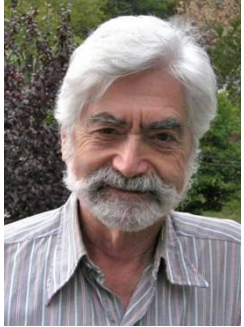
-- - ожидание для ШАЛ с γ

Неядерная компонента космических лучей.

- Нарушение скейлинга – противоречит росту числа мюонов в ШАЛ с γ ;
- Возникает соблазн – объяснить колесо появлением стабильной неядерной компоненты.
- **Вариант единственный** – частицы странной кварковой материи (СКМ):
 - стабильные при больших адронных числах $A=10^3-10^8$ и
 - несущие положительный электрический заряд $Z=30 - 1000$
 - **странглеты.**

Кварковая модель и гипотеза странной кварковой материи (СКМ).

Цвейг

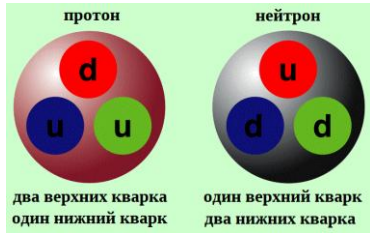


Гелл-Манн



Может ли существовать СКМ?

ДА – $ud+s$

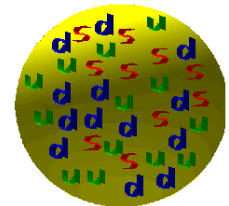
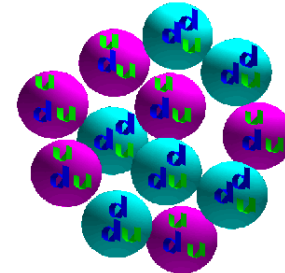


1964



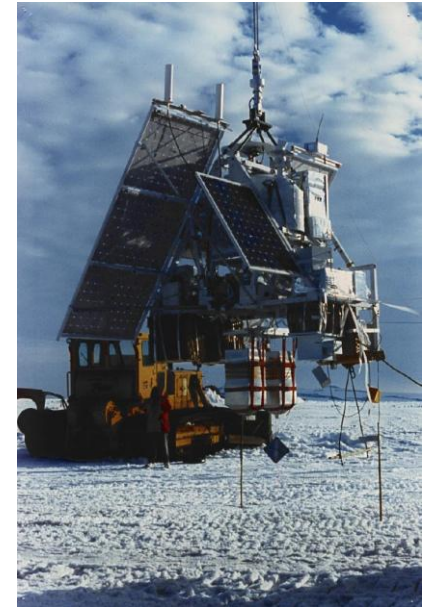
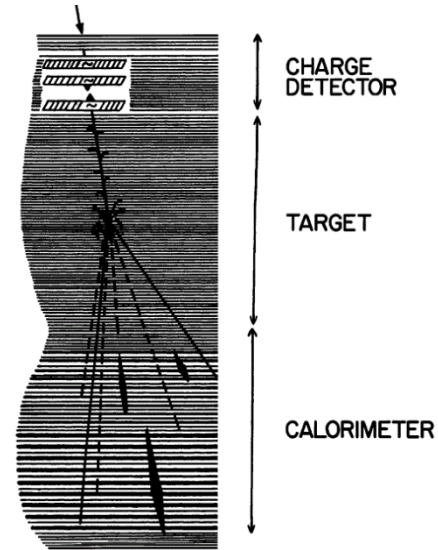
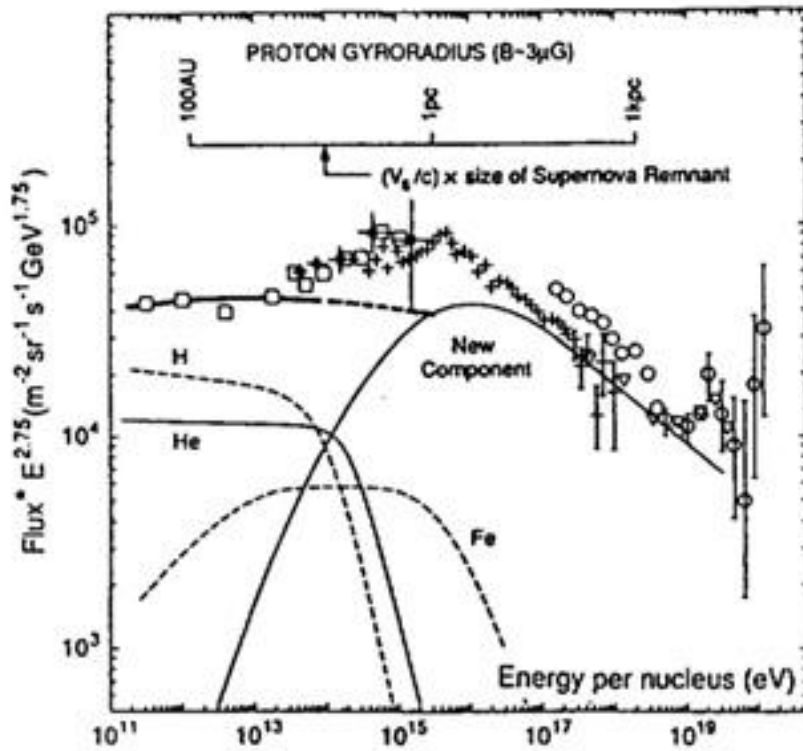
СКМ вместо Fe –
основное состояние
вещества.

Edward Witten(1984).



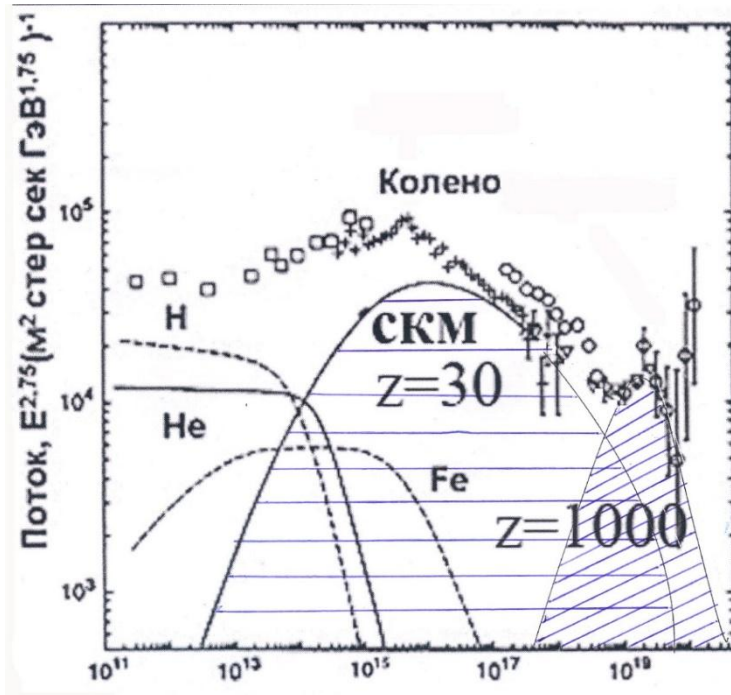
- СКМ может быть стабильной,
- СКМ основное состояние вещества.
- Все ядра, включая протоны, нестабильны с временами жизни, превышающими время существования Вселенной.

Спектр КЛ предложенный JАСЕЕ.



Новая компонента – это стабильные, заряженные частицы
СКМ – странглеты.

СКМ-модель космических лучей



Магнитная жесткость обрезания $R \approx 0.1$ ПВ.

Ядерная компонента ограничена энергией ~ 3 ПэВ (Fe).

Максимальная энергия КЛ
 $E_{\max} \approx R \cdot Z_{\max} \approx 0.1 \cdot 10^3 \approx 100$ ПэВ.

Максимальное значение N_e для галактической компоненты 10^9 .

Важное свойство модели СКМ:

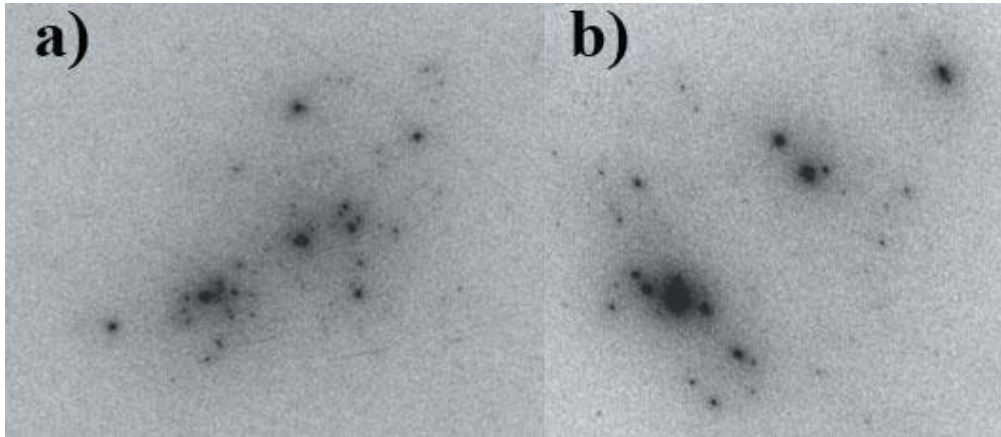
Ядра и квази-ядра (странглеты) ускоряются одинаковым образом на ударных волнах Галактики.

Эксперименты ПАМИР и АДРОН-вклад в развитие метода РЭК и РЭК+ШАЛ.

- Без эксперимента ПАМИР не было бы эксперимента АДРОН.
- Хочу выразить искреннюю благодарность всем участникам сотрудничества ПАМИР и в первую очередь его организаторам Н.А.Добротину, С.А.Славатинскому и Ю.А.Смородину.
- Многолетняя эксплуатация установки АДРОН на Тянь-Шане стала возможной благодаря усилиям всего коллектива станции и многих сотрудников ФИАН, которым я особенно благодарен.

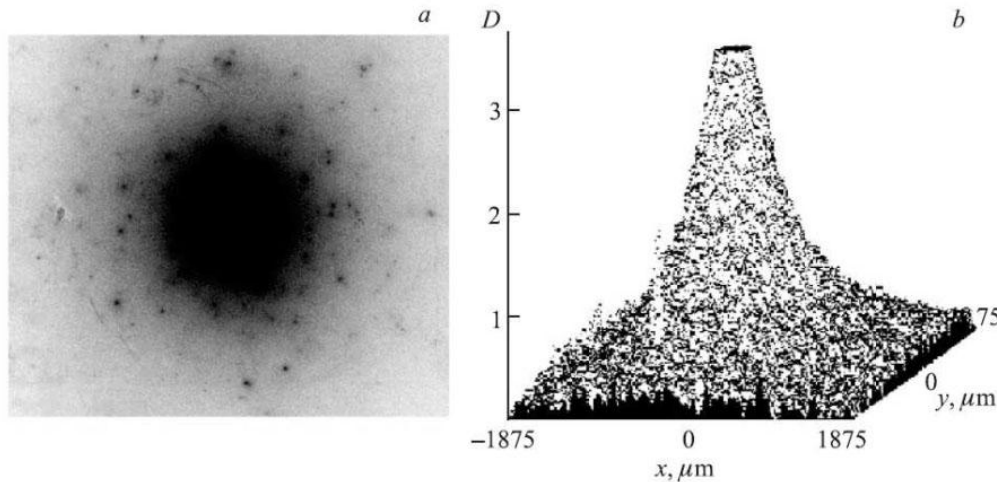
**Экспериментальные данные,
которые могут подтвердить
СКМ-модель.**

Эксперимент ПАМИР (РЭК)



**Нарушение
азимутальной
симметрии.**

Выстроенность энергетически
выделенных центров вдоль прямой.



Гало в супер семействах.

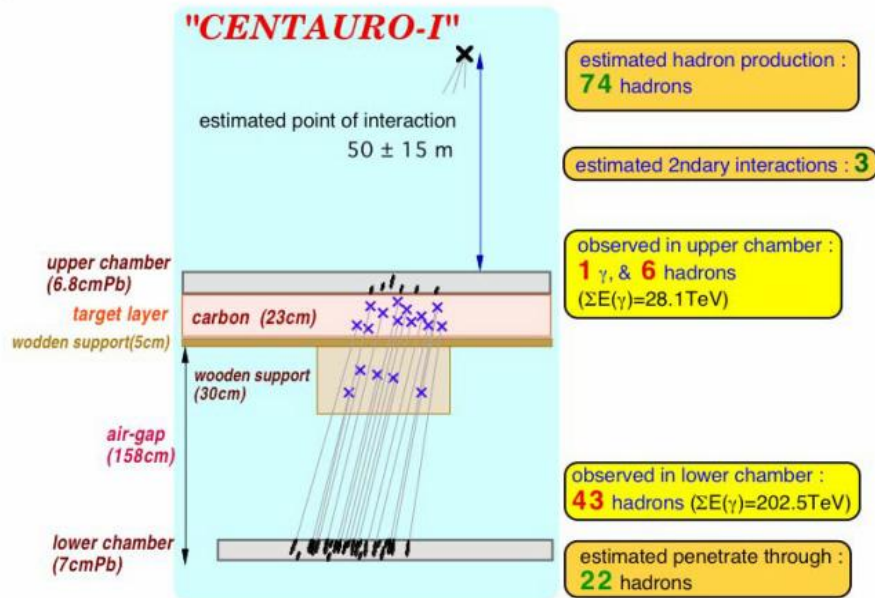
Адронная проникающая
способность при
электромагнитных поперечных
импульсах.

Чакалтайа - CENTAURO события.

Нарушение изотопической инвариантности:

В событии 1 гамма квант (π^0) 43 адрона (π^\pm) и еще 22 адрона должны были пройти без взаимодействия.

Ожидаемое число π^0 - 30.

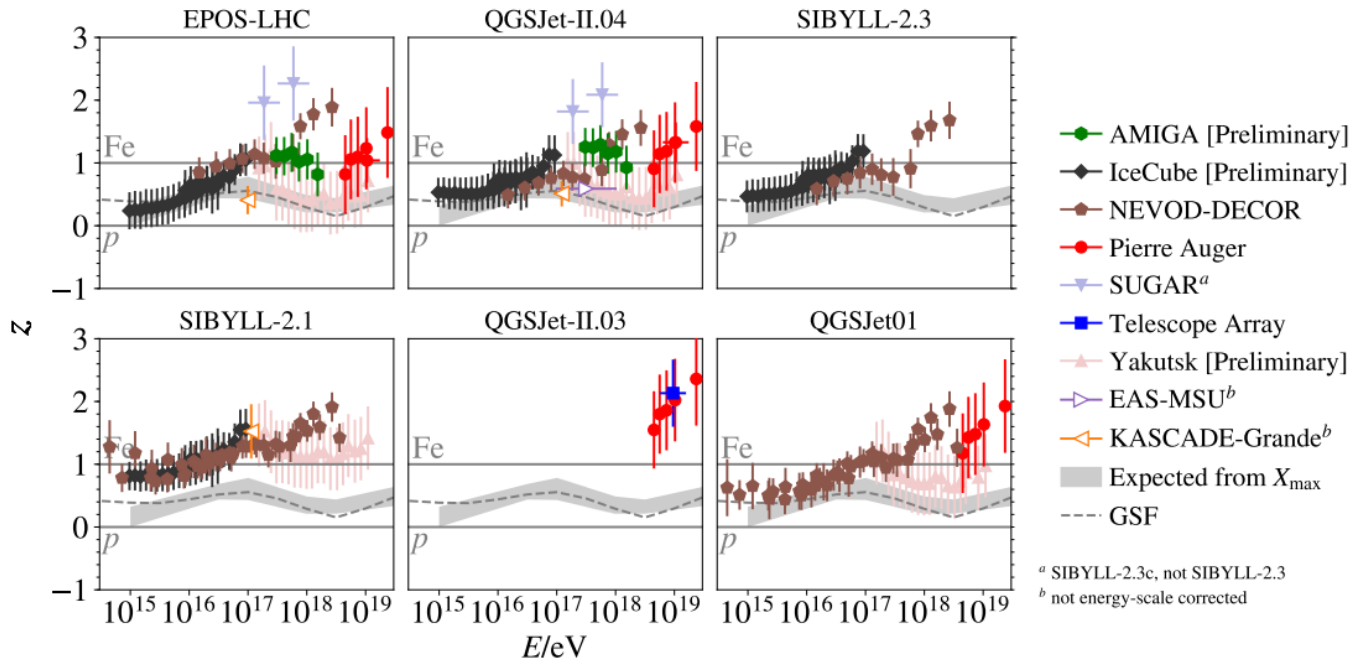


**Странгдеты
распадаются
на гипероны, поэтому
 π^0 могут отсутствовать**

•

Combining muon measurements

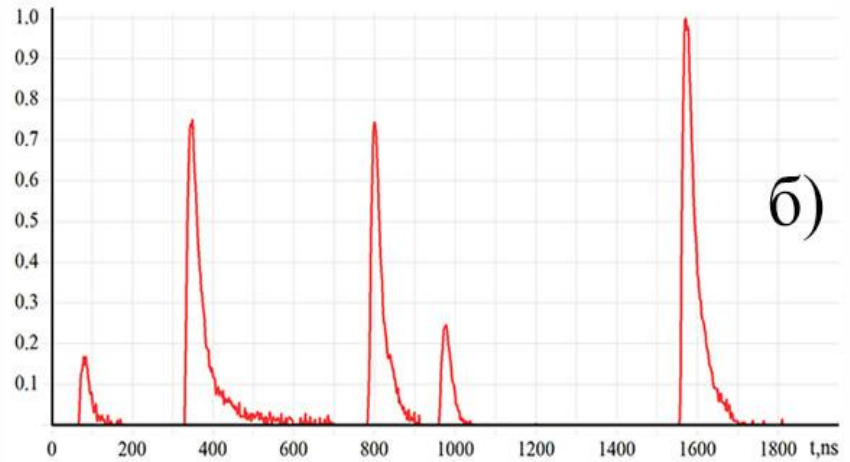
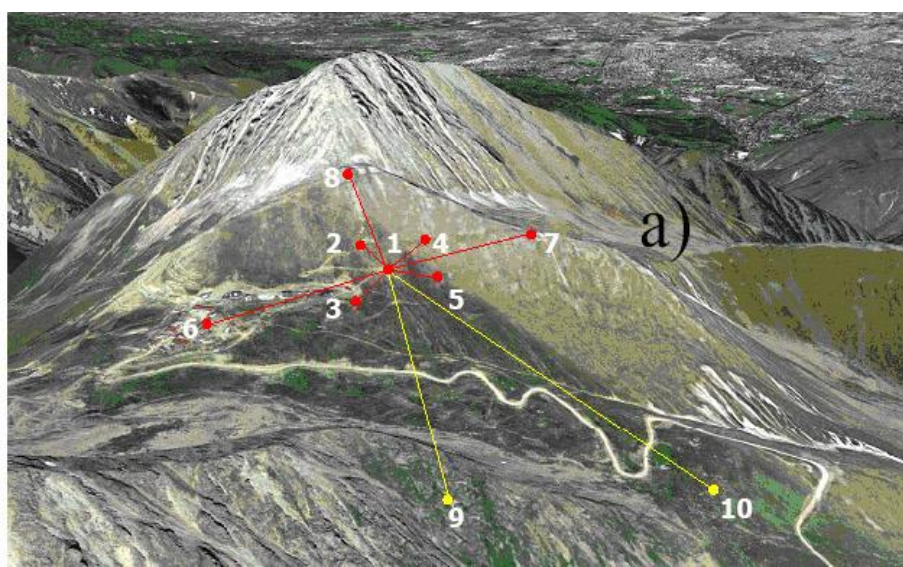
(WHISP: Working group in Hadronic Interactions and Shower Physics)



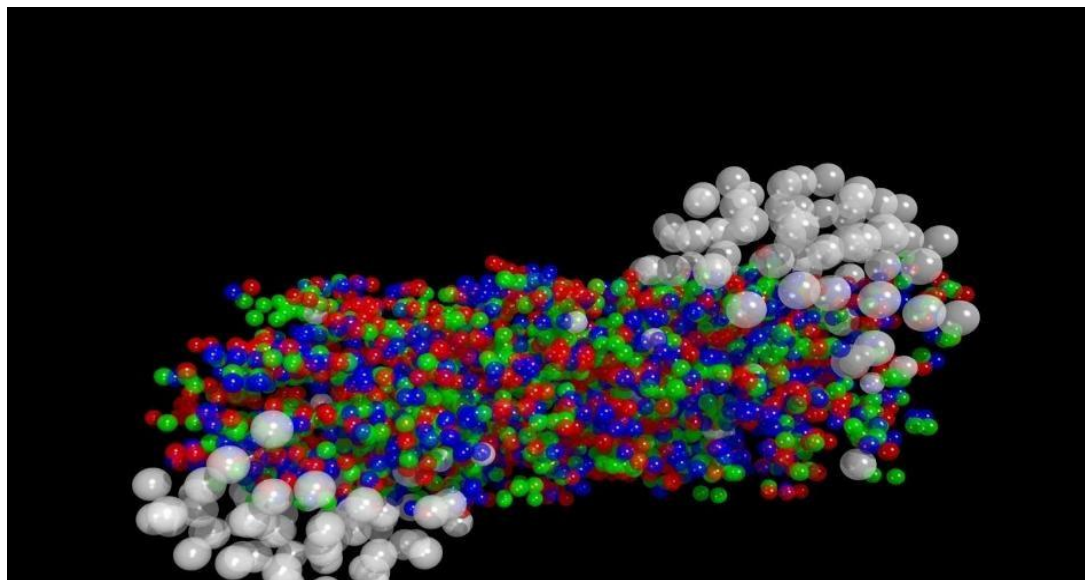
$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{det}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}{\ln(N_{\mu Fe}^{sim}) - \ln(N_{\mu p}^{sim})}$$

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

Эксперимент ГОРИЗОНТ-Т (Тянь-Шань).

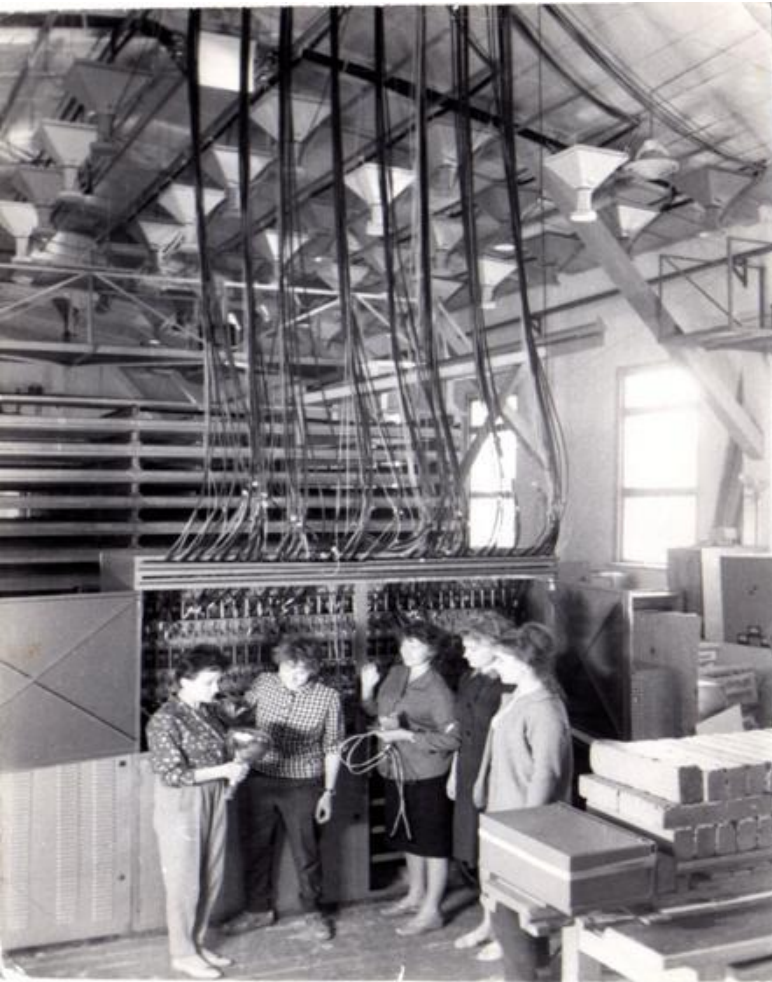


Наблюдаются ШАЛ с несколькими фронтами, задержанными на сотни наносекунд.



Спасибо за внимание.

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/см² при энергии адронов 100 ТэВ.

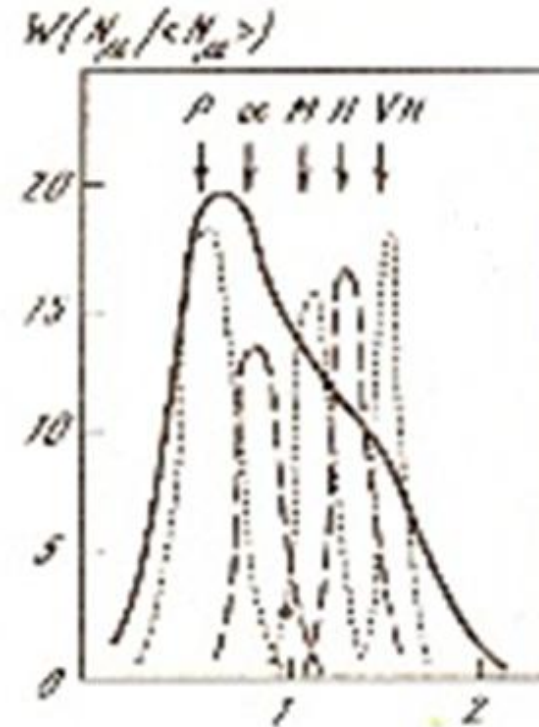
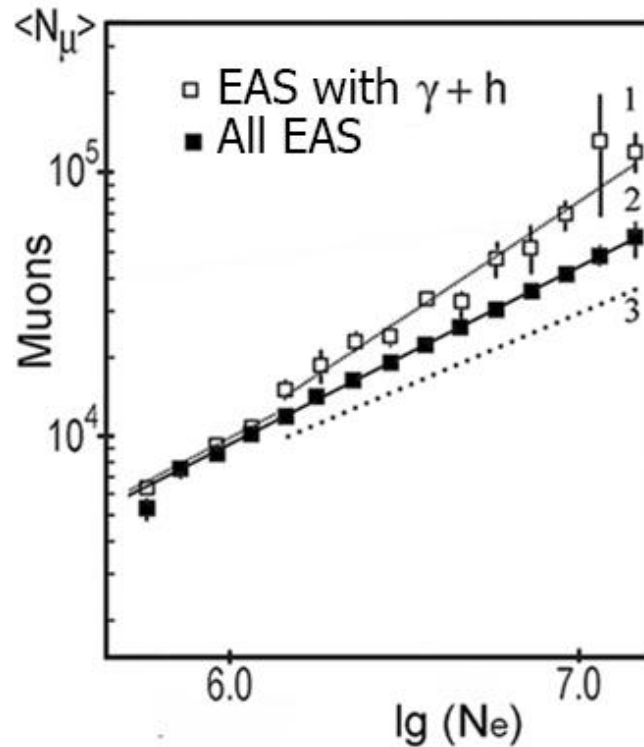


Зависимость λ_{abs} от энергии адронов.

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.

Excess of muons in EASs with gamma-hadron families (experiment HADRON).



Experiment.

1-EAS with γ , h.

2 - All EAS.

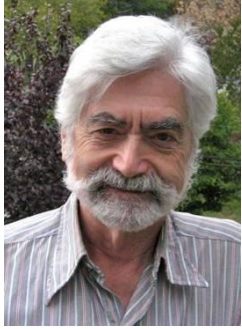
3-Expected dependency.

Estimation of the contribution of nuclear components

$N_{\mu} / \langle N_{\mu} \rangle$ for a given N_e .

Модель кварков и Гипотеза Странной Кварковой Материи

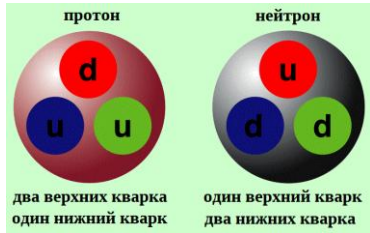
Цвейг



Гелл-Манн



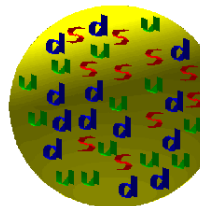
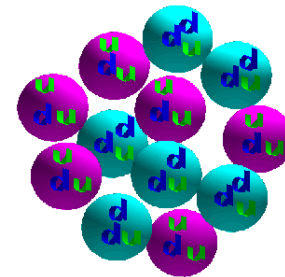
Может ли существовать
кварковое вещество?
Может – $ud+s$



1964

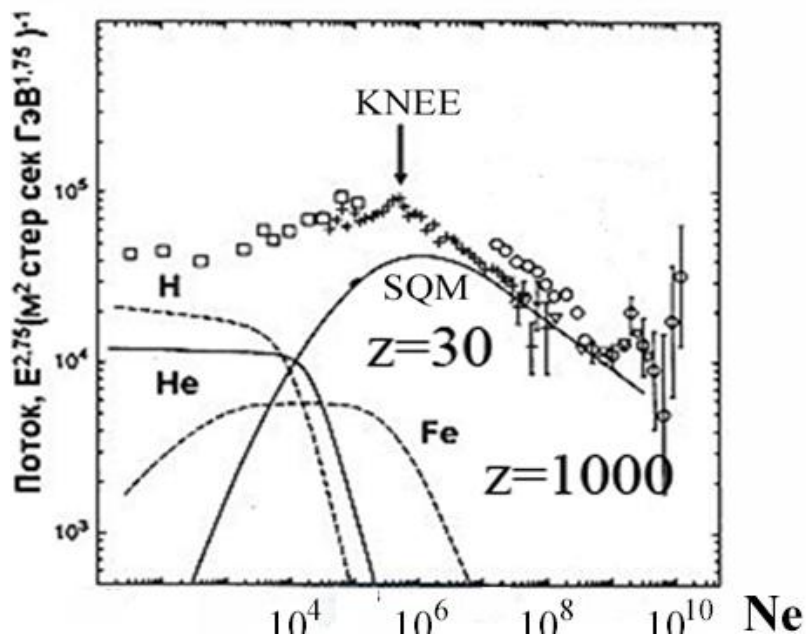


СКМ вместо Fe
Эдвард Виттен
(1984).



- СКМ может быть стабильной и присутствовать в КЛ.
- СКМ - основное состояние вещества.
- Все ядра нестабильны, но с временами жизни больше Времени жизни Вселенной.

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 $A=10^3-10^6$;

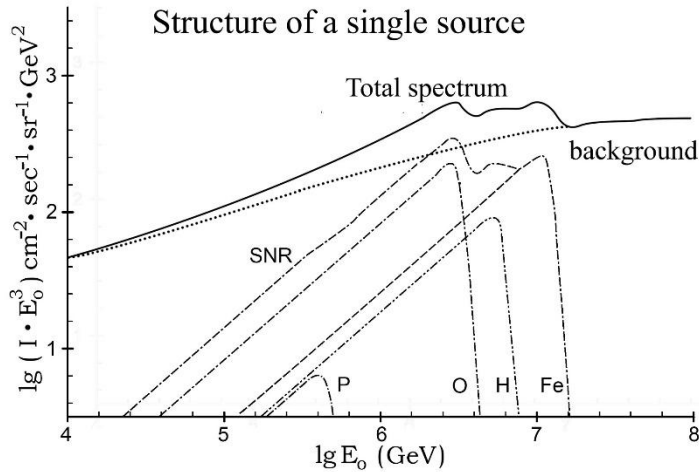
Размер: $R=R_0 \cdot A^{1/3}$;

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/см² 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 γ -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 γ -семействах и события типа Centauro.

Избыток мюонов в ШАЛ с γ -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 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.