

**“ВККЛ-2020 Россия, Москва,
28 сентября – 2 октября 2020 (удаленка) ”**

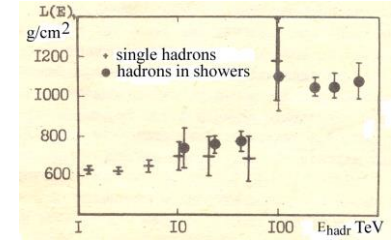
Галактическая модель космических лучей.

Шаулов Сергей.

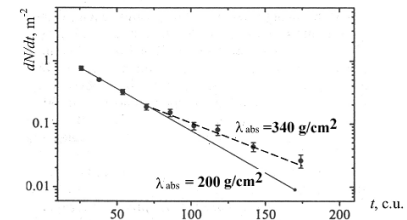
ФИАН-МФТИ

Неядерное происхождение проникающей компоненты в КЛ-эксперимент.

Калориметр- Яковлев. Первое указание на существование проникающей компоненты (ПК).

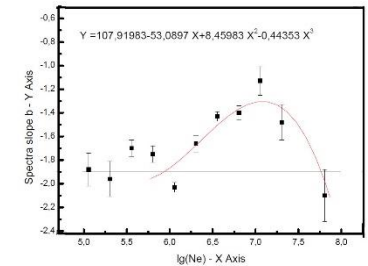


Свинцовые РЭК – ПАМИР (НИИЯФ МГУ)

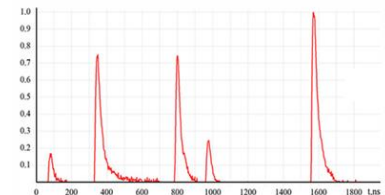


Гибридный (РЭК+ШАЛ) эксперимент АДРОН:

1. ПК в первичных КЛ. 2. Мюоны и γ -семейства в РЭК – неядерное происхождение ПК.
3. Связь ПК с коленом в спектре ШАЛ.



Эксперимент ГОРИЗОНТ-Т: При энергиях выше 10-100 ПэВ ШАЛ состоят из нескольких фронтов. Временной интервал до микросекунд.



Мюоны в эксперименте AUGER.

В эксперименте AUGER приводятся данные о числе мюонов под большими зенитными углами $62-80^\circ$ в сравнении с расчетом по моделям для протонов и ядер Fe. Мюонные данные не согласуются ни с одной ядерной моделью, демонстрируя аномальный избыток мюонов под большими углами.

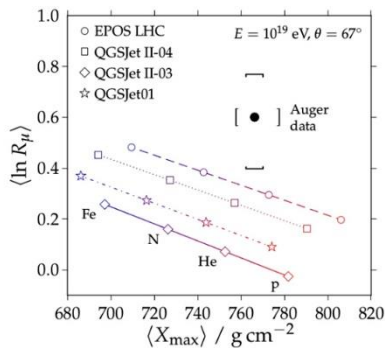


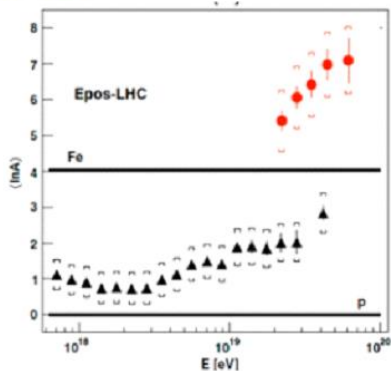
Figure 9: X_{max} vs R_μ , with all hadronic models and primaries shown and Auger data superimposed. Black brackets represent the systematic uncertainty.

Число мюонов в зависимости от положения максимума ШАЛ для эксперимента AUGER и всех адронных моделей.

Преобразование $\langle X_{max} \rangle$ и $\langle X^\mu_{max} \rangle$ в $\ln A$ для модели Epos-LHC.

Сплошные линии – $\ln A$ для протонов и Fe.

$A \approx 10^3$;



Основное требование к КЛ – стабильность.

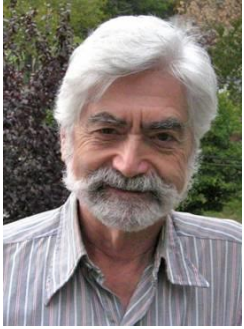
Только стабильные частицы могут преодолевать космологические расстояния от Земли до источников КЛ.

Требование стабильности резко ограничивает число возможных вариантов. Их оказывается всего два, это ядра и квази-ядра, образованные гипотетическими частицами странной кварковой материи (СКМ).

Среди известных адронов, протоны являются наиболее проникающей компонентой КЛ.

Модель кварков и Гипотеза Странной Кварковой Материи

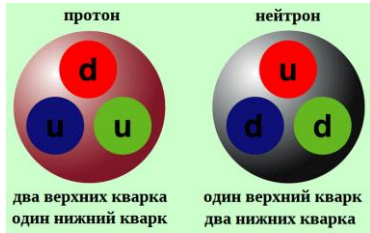
Цвейг



Гелл-Манн



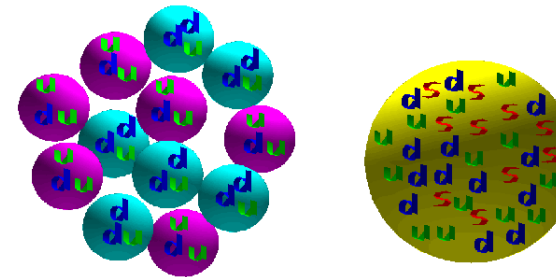
Может ли существовать
кварковое вещество?
Может – $ud+s$



1964



СКМ вместо Fe
Эдвард Виттен
(1984).

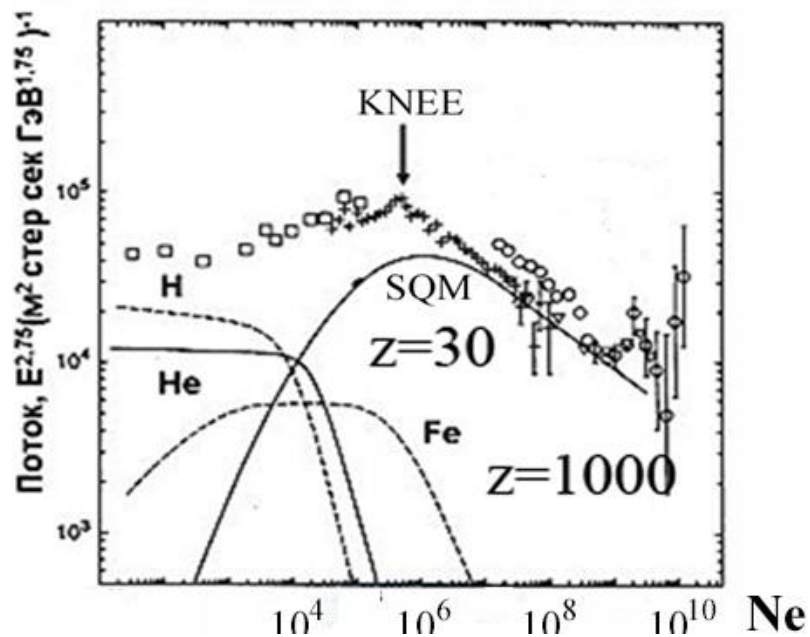


- СКМ может быть стабильной и присутствовать в КЛ.
- СКМ - основное состояние вещества.
- Все ядра нестабильны, но с временами жизни больше Времени жизни Вселенной.

Типы частиц СКМ.

1. $A < 10^3$ - нестабильные частицы СКМ.
2. $10^3 < A < 10^7$ - стабильные, заряженные частицы – странглеты (КЛ).
3. $10^7 < A < 10^{52}$ - стабильные нейтральные частицы СКМ вплоть до странных кварковых звезд.

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 $A > 10^3$.

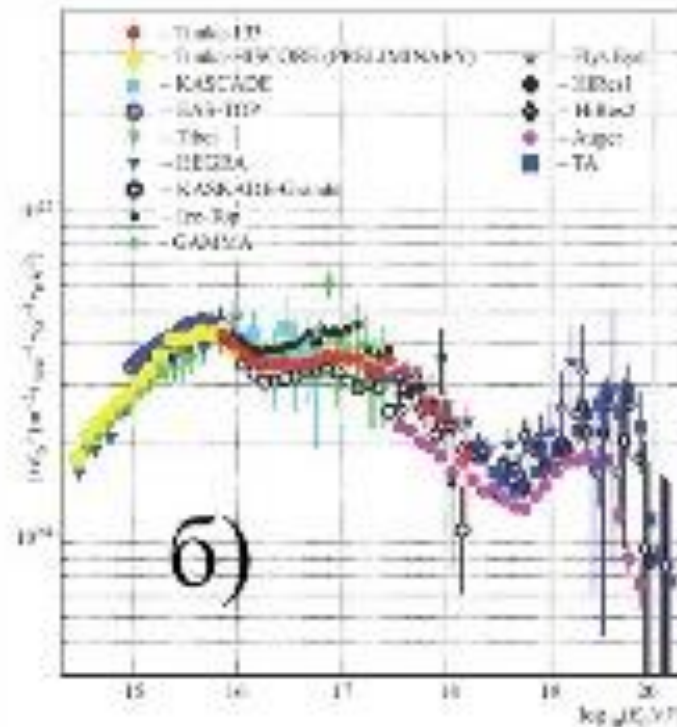
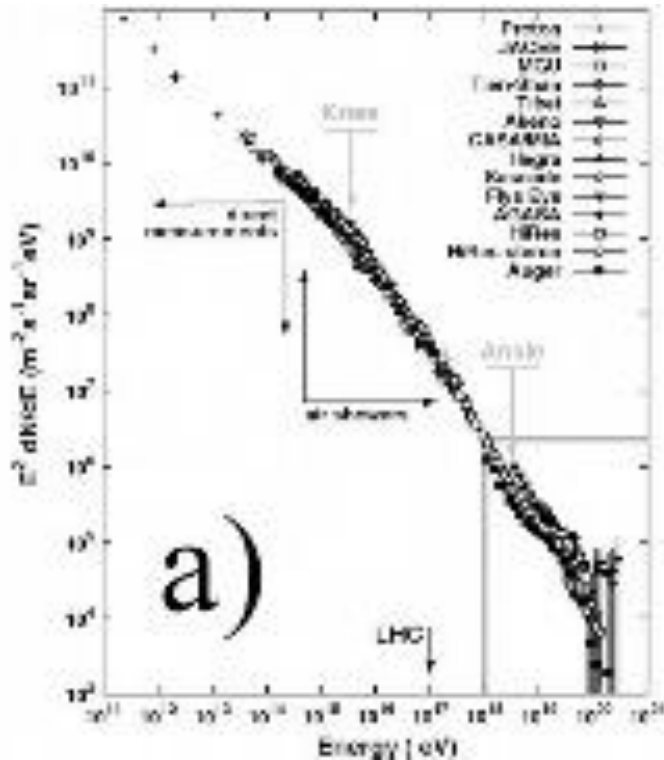
Странглеты: Электрический заряд $Z=30-1000$ при $A=10^3-10^6$;

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.

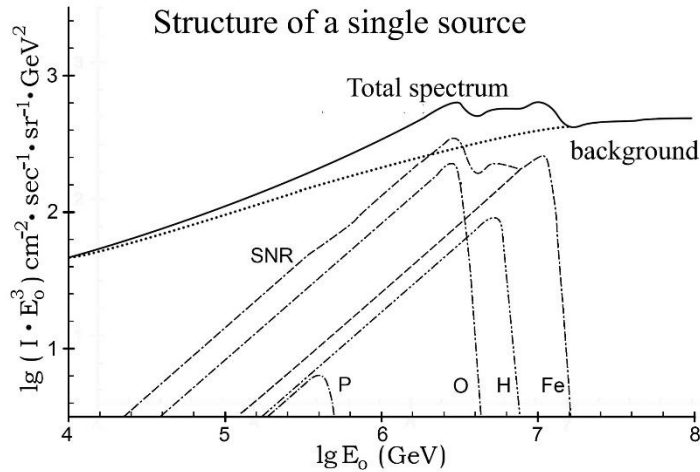
Спектр ШАЛ в зависимости от энергии ядер ПКИ $E_0 = kN_e \alpha$



- 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. (Критика – см. Гинзбург&Сыроватский)

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.

Галактическое происхождение КЛ.

Ядерная компонента ограничена энергией ~ 3 ПэВ (Fe).

Магнитная жесткость обрезания $R \approx 0.1$ ПВ.

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

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

Максимальная энергия КЛ соответствует странглетам с $Z \approx 10^3$ и равна $E_0 \approx 10^{17}$ эВ.

Таким образом все КЛ являются Галактическими.

В этом случае КЛУВЭ отсутствуют – проблема снимается.

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.**

“Экзотика” в КЛ.

Долгое время традиционная модель КЛ существовала не обращая внимания на так называемую "экзотику", это были как бы две разные ветви физики КЛ.

СКМ модель позволяет в общих чертах объяснить как спектр КЛ так и такие явления как события типа

- Centauro,
- выстройка энергетических центров в γ -семействах вдоль прямой (Пучков) и
- образование гало в γ -семействах.

Следствия СКМ модели.

Если СКМ существует в природе, то именно она является основным состоянием вещества (Witten). Ядра при этом нестабильны, но с временами жизни превышающими возраст Вселенной.

Если есть странглеты, то в Галактике должны существовать их источники - **странные кварковые звезды**. Их малая светимость может формировать **темное вещество в галактиках**.

Одновременное наличие во Вселенной ядерного и кваркового вещества предполагает практически бесконечный источник энергии, рассеянной в космосе.

Переход ядер в СКМ - реакция экзотермическая с выделением энергии около 50 МэВ на барионное число (больше чем в термояде).

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.

Для получения более надежных результатов крайне необходимы расчеты ШАЛ, образованных странглетами, **и новые эксперименты.**

Неважно, насколько прекрасна ваша теория, не важно, насколько вы умны.

Если это не соответствует эксперименту, это неправильно.

Ричард Фейнман

Поэтому выбор модели внегалактической или Галактической за экспериментом.

Данные Тянь-Шаня скорее за Галактический вариант.

Спасибо за внимание.

