



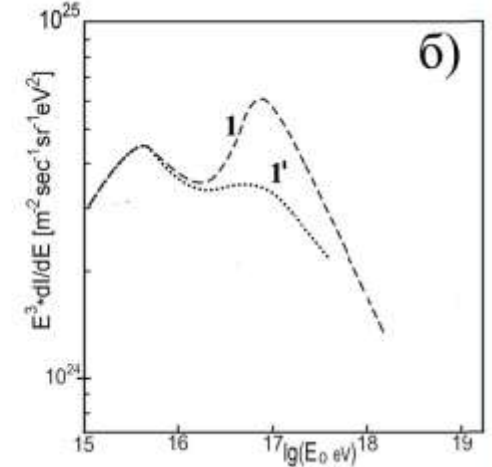
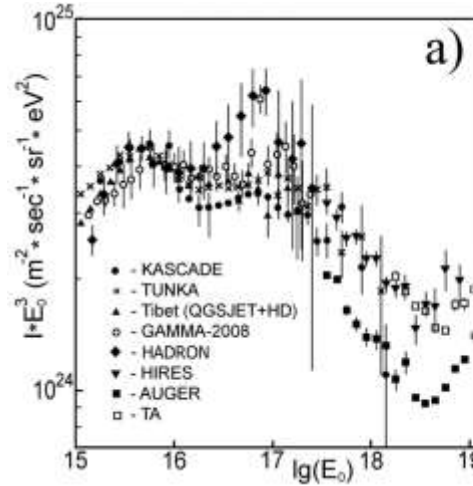
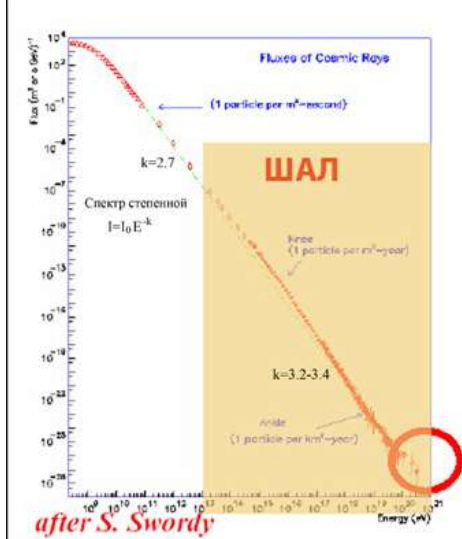
Колено в спектре ШАЛ и структура нуклона.

Шаулов С.Б. - ФИАН. МФТИ.

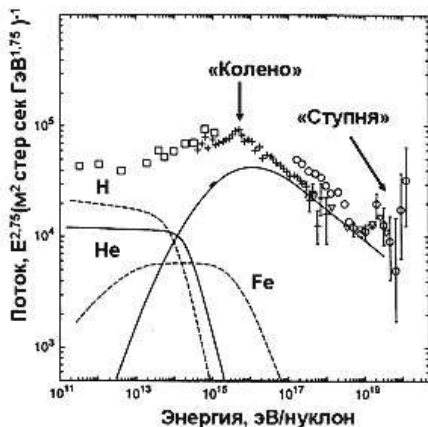
1. Проблема колена в спектре ШАЛ.
2. Модели колена.
3. Рост сечения pp -взаимодействия .
4. Структура протона. Диск или бублик?
5. Ядерный скейлинг и структура ядер.
6. Нарушение скейлинга в стволах ШАЛ.
7. Заключение.



Спектр космических лучей



Источников КЛ много- миллионы и они разные.
 Состав сложный: от p до Fe и энергии излома разных компонент отличаются в ~30 раз.



Астрофизика: диффузия КЛ и ограничение их ускорения могут и должны приводить к изменению наклона спектра КЛ, но плавному.



Модель одиночного близкого источника вроде бы разрешает противоречие, но...



Колено в спектре ШАЛ

Нарушение скейлинга в спектрах адронов ШАЛ на Тянь-Шане (эксперимент АДРОН) противоречит всем астрофизическим моделям с утяжелением ядерного состава КЛ.



Интерпретация.

На данный момент есть два варианта, позволяющих как то разрешить противоречия:

1. Астрофизический: Колено в КЛ формируется экзотической компонентой КЛ типа частиц гипотетической странной кварковой материи – Странглетов, излучаемых близкой кварковой звездой.
2. Ядернофизический: К нарушению скейлинга приводит изменение ядерного каскада (ШАЛ).



Сечение взаимодействия протонов и его зависимость от энергии.

Сечение - это площадь: $\sigma = \pi R^2$, где R - эффективный радиус протона. Эффективный потому что протон не шарик и его радиус и сечение зависят от энергии. Сечение измеряется в барнах: $1 \text{ бн} = 10^{-24} \text{ см}^2$.

Как сечение зависит от энергии? Чем больше скорость, тем меньше время взаимодействия и сечение σ должно уменьшаться, т.е. **сечение должно падать с энергией $\sigma \sim 1/v \sim 1/p \sim 1/E$.**

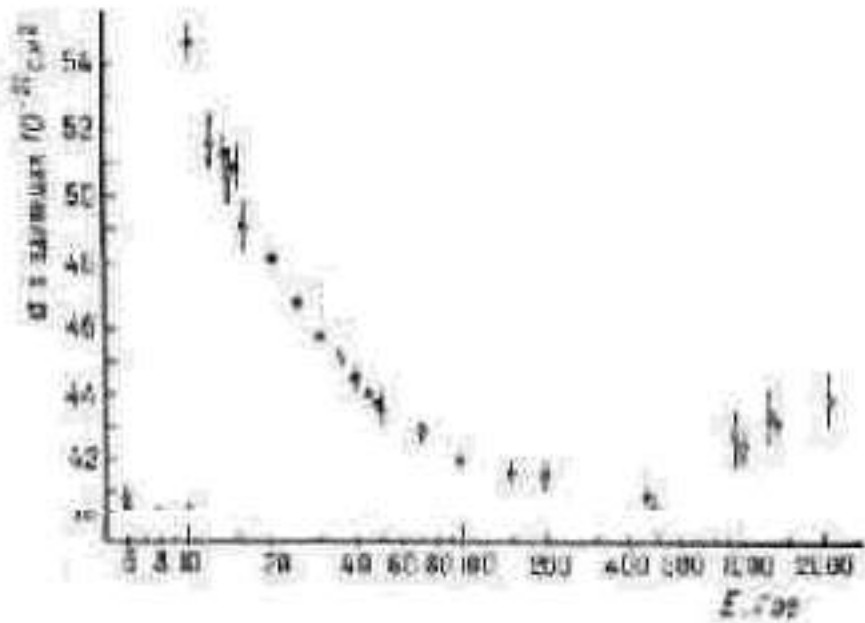
Падение сечений подтверждалось экспериментами, пока на ускорителе в Серпухове (ISR) не был обнаружен удивительный эффект.

Сечение взаимодействия π^- и K^- мезонов, начиная с энергий 30-35 ГэВ, перестают уменьшаться, а сечение K^+ мезонов начинает увеличиваться!



Проверка “Серпуховского” эффекта.

Серпуховский эффект был подтвержден в ряде экспериментов.



Сечение взаимодействия протон-антипротон.

Сенсация, вызванная ростом сечений, потребовала пересмотра представлений о характере взаимодействий частиц в области высоких энергий.

Каким образом?

В квантовой теории поля (КТП) взаимодействие описывается с помощью обмена виртуальными частицами.

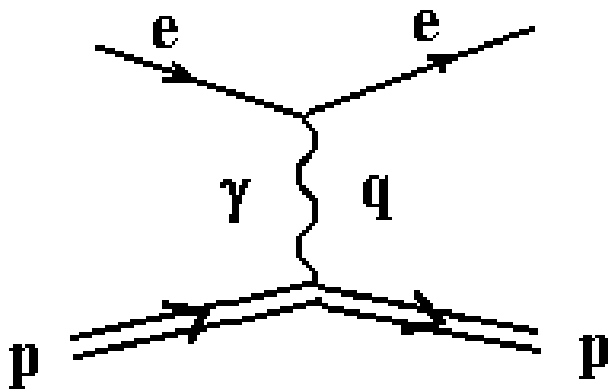


Виртуальные частицы.

Виртуальной называют частицу, для которой $E^2 \neq p^2c^2 + m^2c^4$, т.е. для нее нарушается закон сохранения энергии .

Это возможно из за соотношения неопределенности $\Delta\tau \cdot \Delta E > h$.
но на короткое время.

Взаимодействие элементарных частиц описывается с помощью обмена виртуальными частицами.



Например, в случае атома водорода

энергия виртуальных фотонов

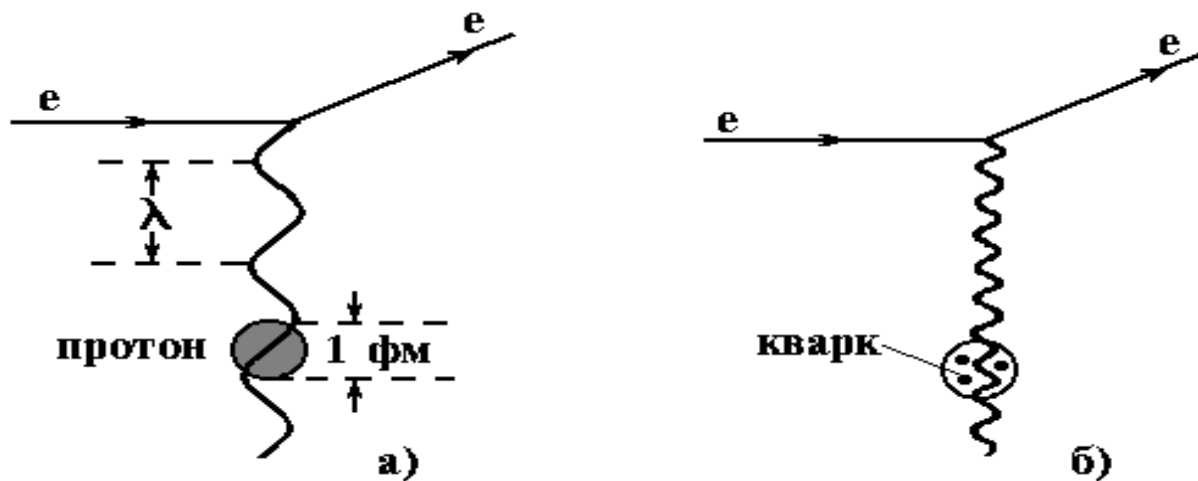
$E_\gamma = 0$, но импульс $q_\gamma > 0$.



Экспериментальное разрешение

Энергетическое разрешение опыта определяется длиной волны виртуального фотона, q - импульс виртуального фотона.

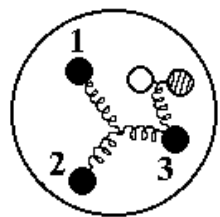
$$\lambda = h/q$$



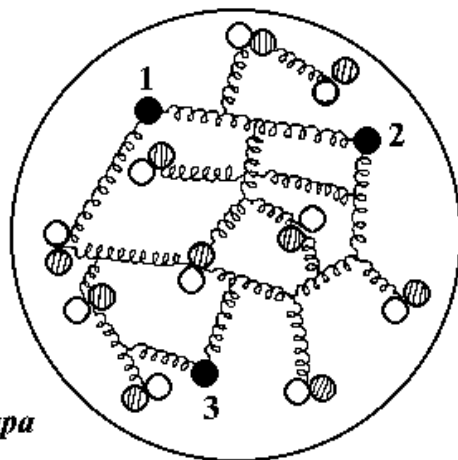
Если довести разрешение до 0.1 размера протона ($\lambda = 0.1$ фм), то будет «видно», что протон состоит из трех кварков.



Структура нуклона



(а)



(б)

- - валентный кварк
- /● - кварк-антикварковая пара
- ~~~~~ - глюон

Если повысить разрешение до 0.01 фм, то вместо нескольких кварков внутри протона обнаружится множество кварк-антикварковых пар и еще большее количество глюонов. Мы увидим, что в состав протона входят следующие партоны:

1. Валентные кварки;
2. Морские кварки;
3. Глюоны.

Взаимодействие между протонами осуществляется через партоны и рост сечения с энергией определяется увеличением числа партонов с ростом энергии, т.е. с ростом разрешения.

Таким образом КХД объяснила рост сечения взаимодействия.



Упругое и неупругое сечения.

Упругие процессы -

частицы меняют лишь направление движения. рождения вторичных частиц не происходит.

Неупругие процессы –

рождаются вторичные частицы. Неупругие процессы доминируют при высоких энергиях.

Тем не менее упругое рассеяние должно неизбежно возникать из-за волновых свойств частиц. Волновые свойства (волны де Бройля) приводят к явлению *дифракции*.

Можно привести аналогию со светом. За абсолютно поглощающим («чёрным») шариком, образуется не геометрическая тень, а интерференционная картина чередующихся максимумов с светлым пятном в центре.

Полное сечение взаимодействия $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}}$.

Соотношение $\sigma_{\text{el}} / \sigma_{\text{tot}} + \sigma_{\text{inel}} / \sigma_{\text{tot}} = 1$ называется условием унитарности.



Модель черного диска.

Как выглядит протон при высоких энергиях?

Американские физики Мартин Блок и Фрэнсис Халзен опубликовали в журнале *Physical Review Letters* (2006) статью, в которой утверждают, что протон при высоких энергиях, выглядит как черный диск.

Протон похож на хоккейную шайбу, которая с ростом энергии превращается в грамофонную пластинку.

В пределе

$$\sigma_{el} = \sigma_{inel} = 1/2 \sigma_{tot}$$



Рост доли упругого сечения

И.Дремин (ФИАН) выдвинул альтернативную модель. Сравнивая данные ISR (Протвино) и LHC (эксперимент TOTEM) Дремин обнаружил удивительный эффект.

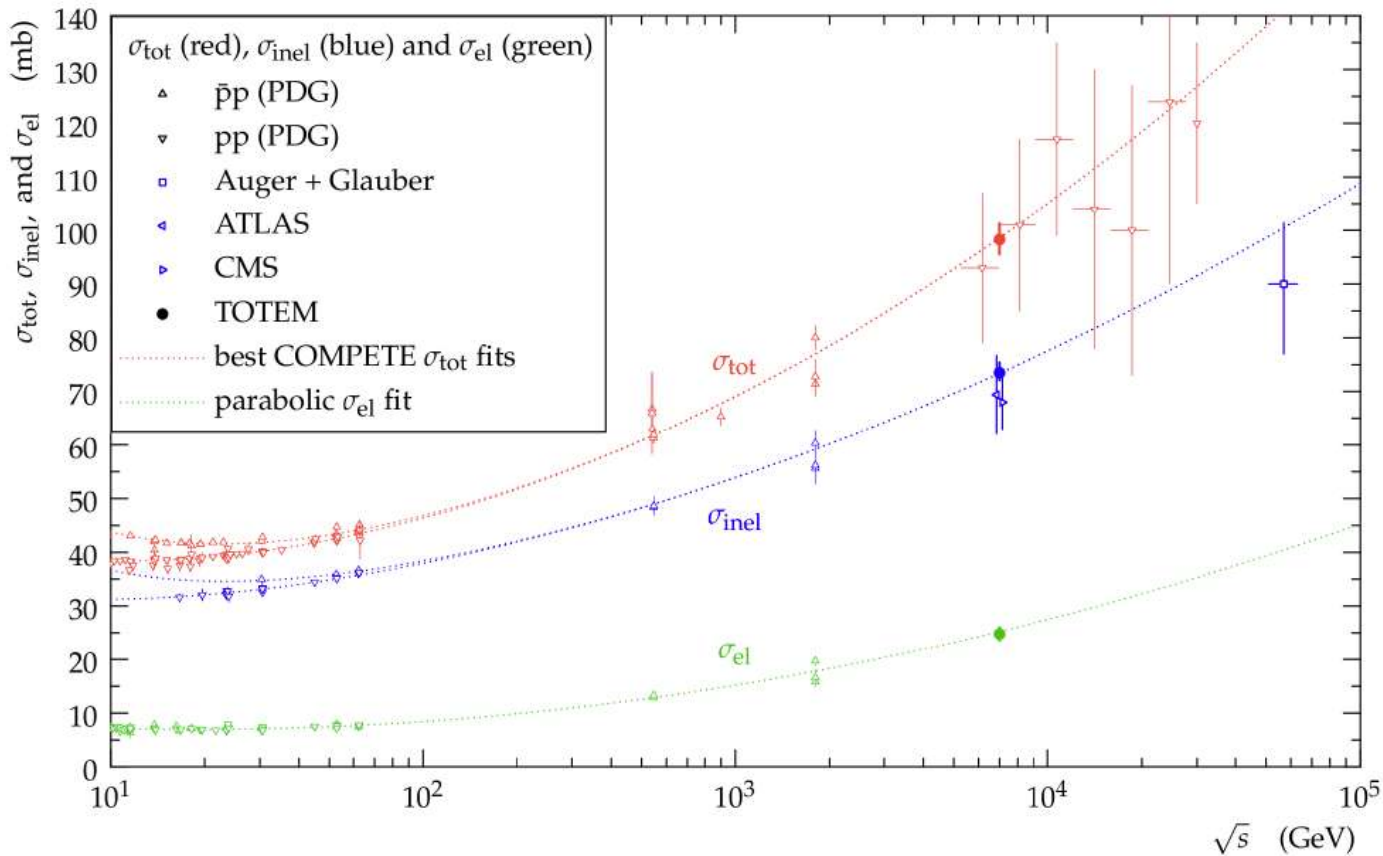
Упругое сечение в pp растет быстрее неупругого!

Из его модели следует, что с ростом энергии протонный диск превращается в бублик!

При этом условие $\sigma_{el} = \sigma_{inel} = 1/2 \sigma_{tot}$ сохраняется.



Эксперимент TOTEM (ЛНС)- данные о сечениях в pp-взаимодействиях.



Полное сечение (**красный цвет**), упругое (**зеленый**) и неупругое (**синий**) в зависимости от энергии.



Результаты экспериментов

Сечения в мбн (10^{-27} см)	ISR (Протвино) (15.4 ГэВ)	LHC (7000ГэВ)	LHC (8000ГэВ)
Полное сечение	$40,2 \pm 0.8$	$98,0 \pm 2.5$	$101,7 \pm 2.9$
Неупругое сечение	$33,3 \pm 0.9$	$72,9 \pm 1.5$	$74,7 \pm 1.7$
Упругое сечение	6.9 ± 0.4	$25,1 \pm 1.1$	$27,1 \pm 1.4$
Доля упругого сечения	$0,17 \pm 0.01$	$0,25 \pm 0.02$	$0,27 \pm 0.02$
Отношение $\sigma_{el}/\sigma_{inel}$	$0,21 \pm 0.02$	$0,34 \pm 0.02$	$0,36 \pm 0.02$



Модель с учетом роста доли упругого сечения.

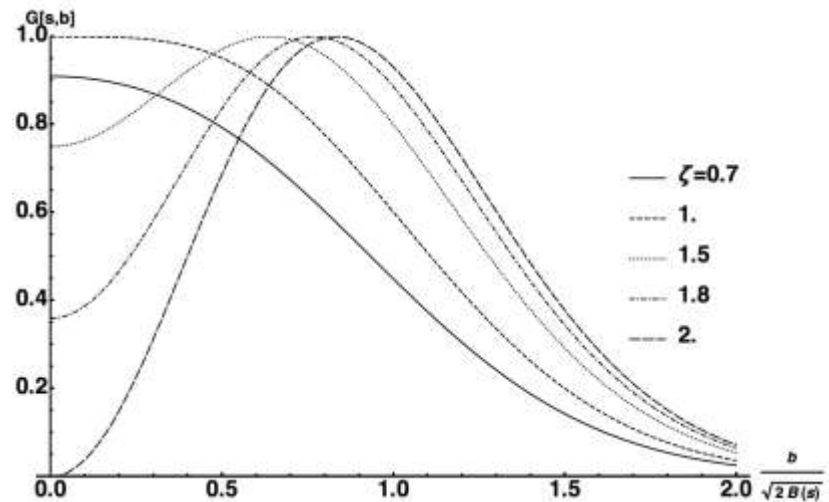
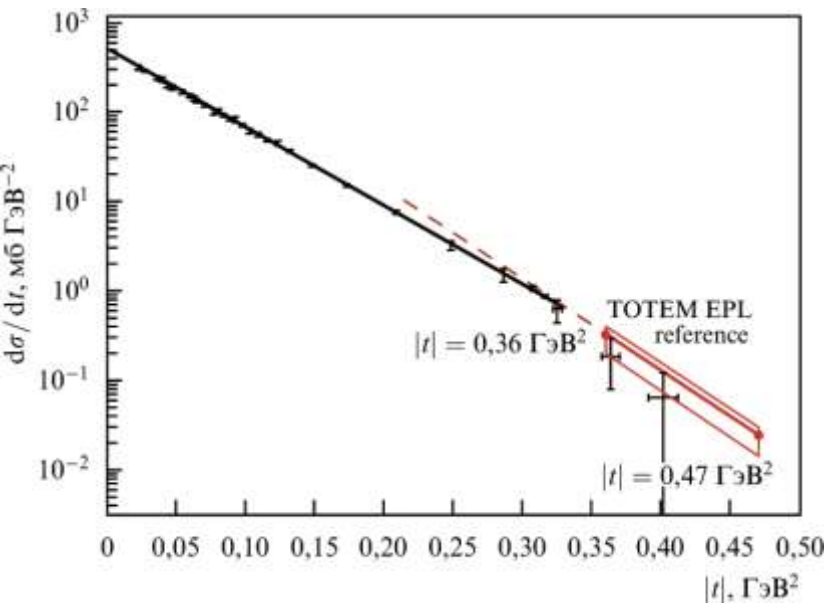
Описание упругого pp-взаимодействия существенно проще чем неупругого, поэтому:
В модели Дремина используется только
-условие унитарности $\sigma_{el}/\sigma_{tot} + \sigma_{inel}/\sigma_{tot} = 1$ И
- анализ упруго сечения в pp.



Выводы

Профиль протона: $G(s,b) = \zeta \exp(-b^2/2B) [2 - \zeta \exp(-b^2/2B)]$,

где B -наклон дифракционного пика, а параметр $\zeta = 1-2$



При $\zeta=2$ поглощение в центре отсутствует полностью. **Протон превращается в тор!**

Рост доли упругого сечения с энергией не имеет теоретического объяснения.



Выводы

Параметр $\zeta = 4\sigma_{\text{tot}}/4\pi B \approx 4 \sigma_{\text{el}}/ \sigma_{\text{tot}}$

При росте ζ до $\zeta = 2$ наступает критический режим

$\sigma_{\text{el}} = \sigma_{\text{inel}} = 1/2 \sigma_{\text{tot}}$, и потемнение в центре протона (при $b=0$)

$G(s, b=0) = \zeta(2-\zeta) = 0$,

т.е. диск превращается в абсолютно черный тор с ростом энергии.

При $\zeta > 2$: $G(s, b=0) < 0$ и протоны должны рассеиваться назад. Проверить на коллайдере сложно, но в космических лучах возможны наблюдаемые следствия.



Чем отличается pp -взаимодействие от
ядро-ядерных взаимодействий?



Кинематика упругих протон-протонных взаимодействий.

Простейшая модель-протоны шарики.

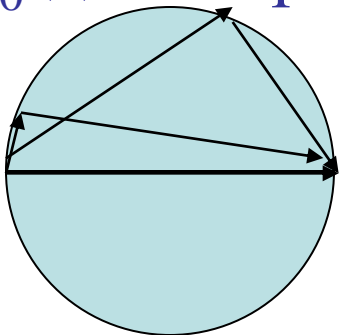
Сечение взаимодействия-площадь: $\sigma = \pi r^2$.

В классике $E = p^2/2m$ и закон сохранения энергии:

$P_0^2 = P_1^2 + P_2^2$ – теорема Пифагора, т.е. угол между P_1 и P_2

прямой, тогда все вершины лежат на окружности, где

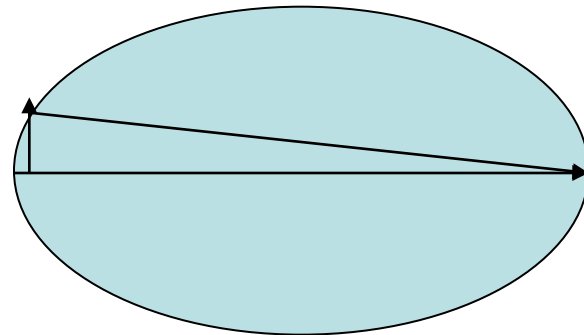
P_0 -диаметр.



Классика

Максимальный угол

$$\Theta < 90^\circ$$



С учетом СТО



Рассеяние на ядрах: $\theta > 90^\circ$!

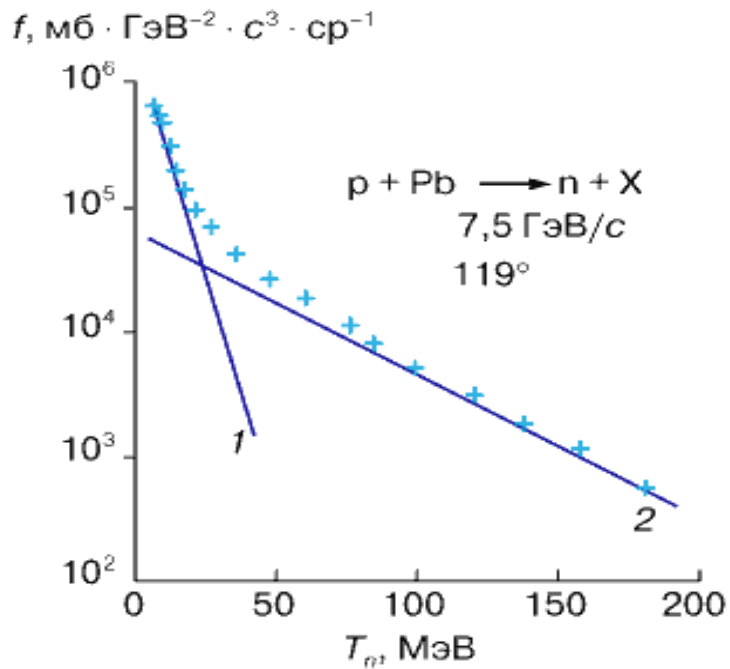


Рис. 1. Зависимость инвариантной функции кумулятивных нейтронов от их кинетической энергии:
1 - испарительные, 2 - кумулятивные нейтроны.

Если p - Pb рассеяние происходит на отдельных нуклонах, то вылет нейтронов назад согласно закону сохранения энергии и импульса **запрещен!**

Сечение рассеяния на угол 119° описывается двумя экспонентами вида $\exp(-T/T_0)$ с
1- $T_0 \approx 5-8$ МэВ – испарение и
2 - $T_0 > 100$ МэВ - кумулятивные нейтроны.

Кумулятивные нейтроны образуются при столкновении налетающей частицы с несколькими нуклонами ядра.

Так шарик для пинг-понга отскакивает от тяжелой стенки **назад**.

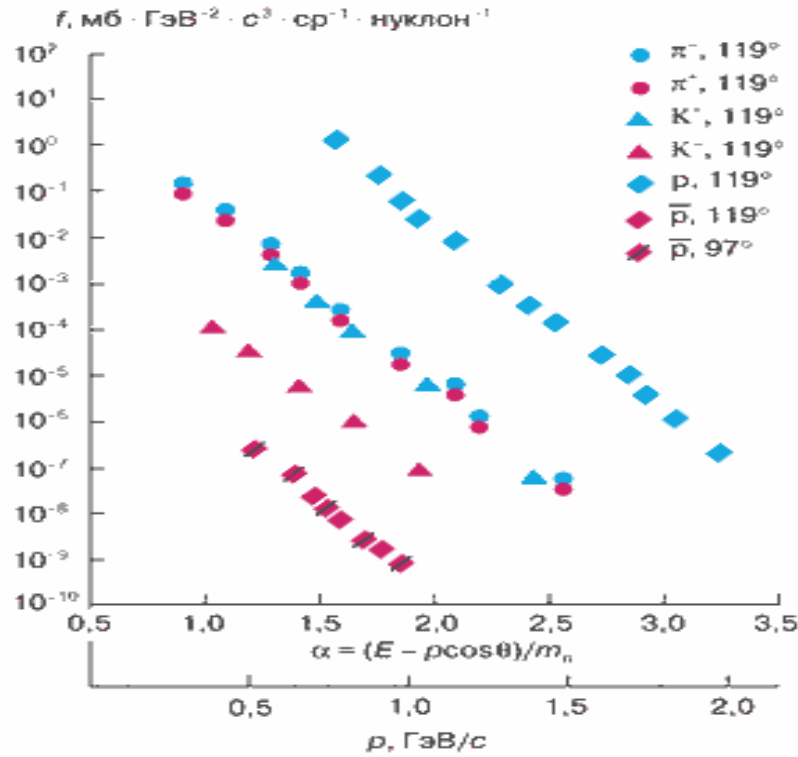


Ядерный скейлинг

Скейлинг – масштабная инвариантность спектров.

Те же спектры, но для p , анти- p , K и π -мезонов.

В эксперименте удалось зарегистрировать взаимодействие p с четырьмя нуклонами.



Г.А.Лексин (ИТЭФ, МФТИ): Чтобы передать вылетающему нуклону импульс 1 ГэВ/с, надо, чтобы нуклоны мишени сблизилась до расстояния $\sim 1/7$ Ферми при расстоянии между кварками в нуклоне ~ 1 Фм. (Размерам 1 Фм соответствует переданный импульс в 140 МэВ/с)

Значит флуктуации в ядре приводят к образованию плотных кварковых мешков из тесных групп нуклонов.

Наклон спектров одинаков для разных кумулятивных частиц, что подтверждает реальность тесных групп нуклонов.

Зависимость сечений от импульса для различных кумулятивных частиц.

α = числу нуклонов в группе взаимодействующей с протоном.

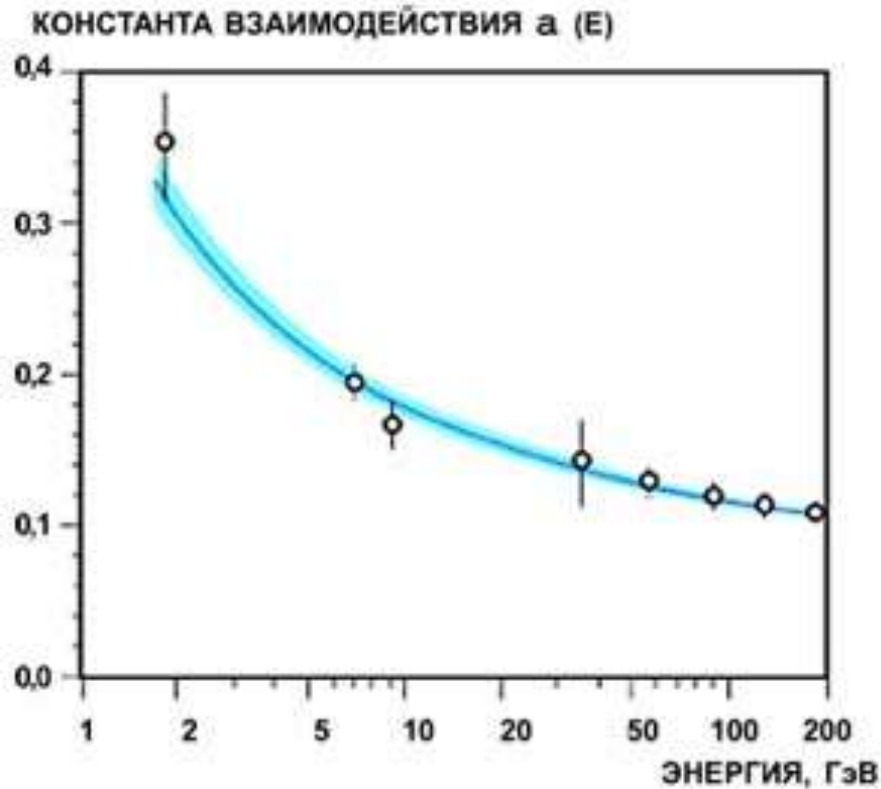


Асимптотическая свобода

Увеличение числа партонов с энергией
в нуклоне и образование плотных кварк-глюонных
групп в ядрах может иметь к прямое отношение к
наблюдаемому росту доли упругого сечения
в связи с удивительным свойством
асимптотической свободы
при взаимодействии кварков и глюонов.



Потенциал взаимодействия кварков φ_{qq} и константа взаимодействия α_s .



$$\varphi_{qq} = \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

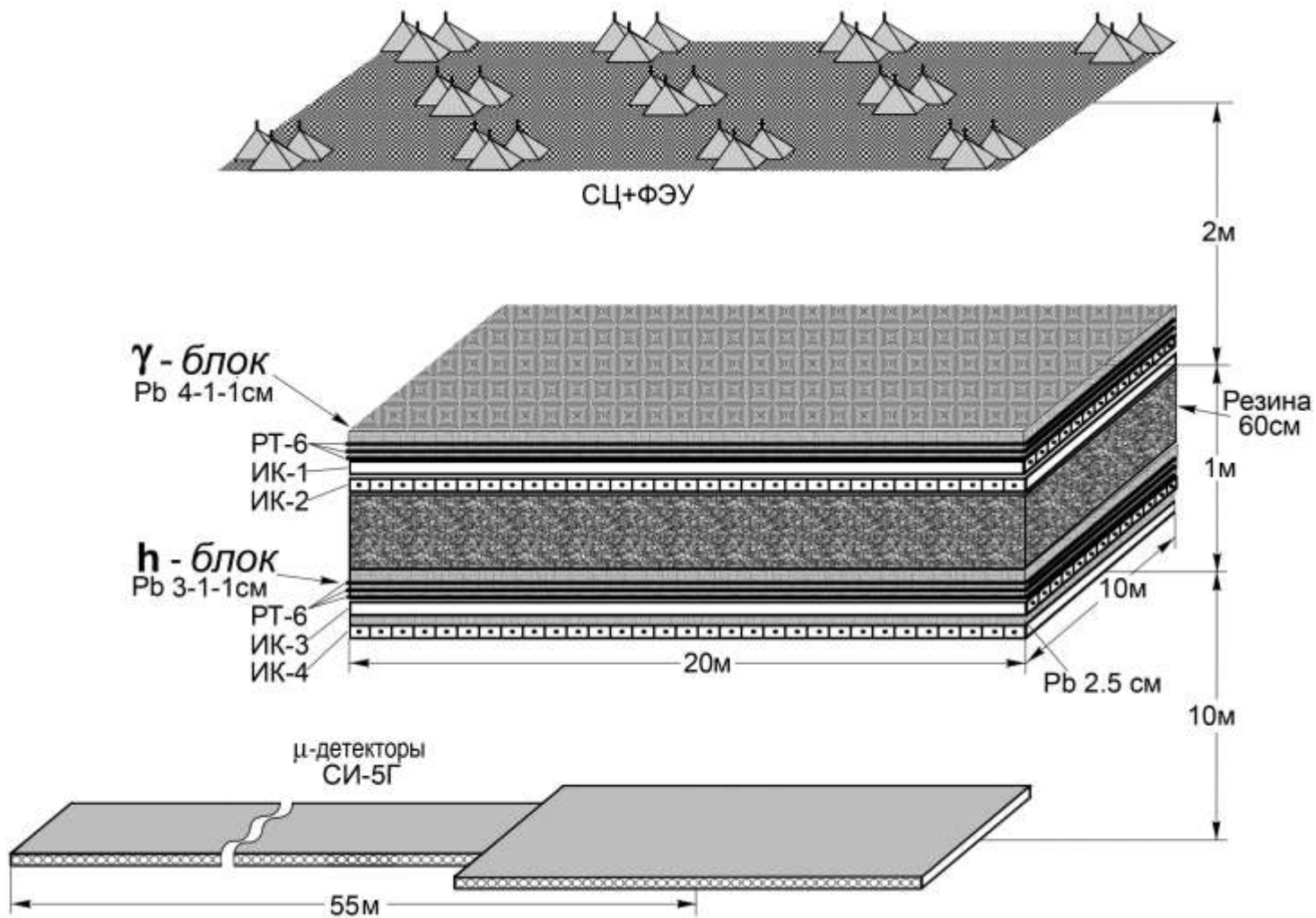
Асимптотическая свобода – взаимодействие кварков на малых расстояниях исчезает!

Достигается при больших переданных импульсах.



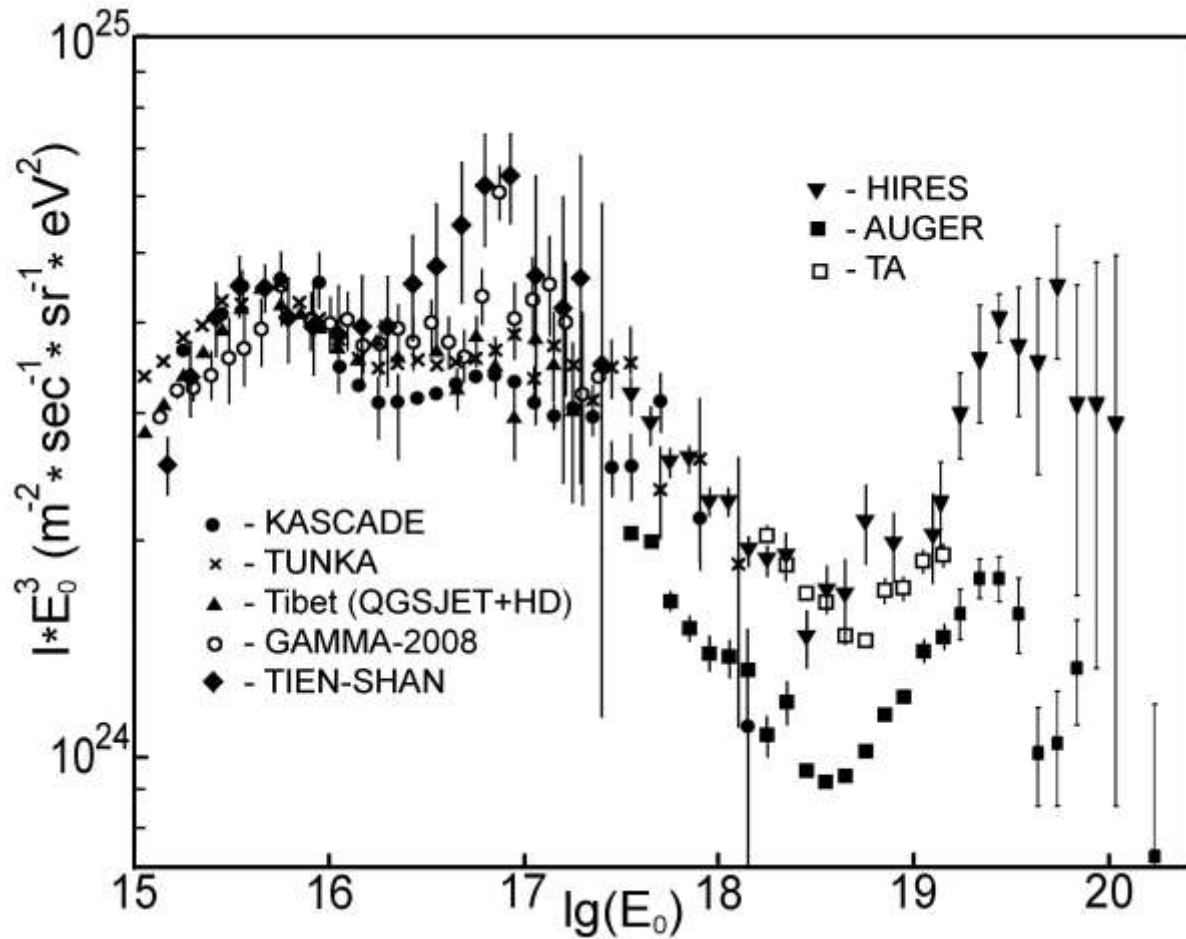
Установка АДРОН - Тянь-Шань

Центральная часть – 200 м²





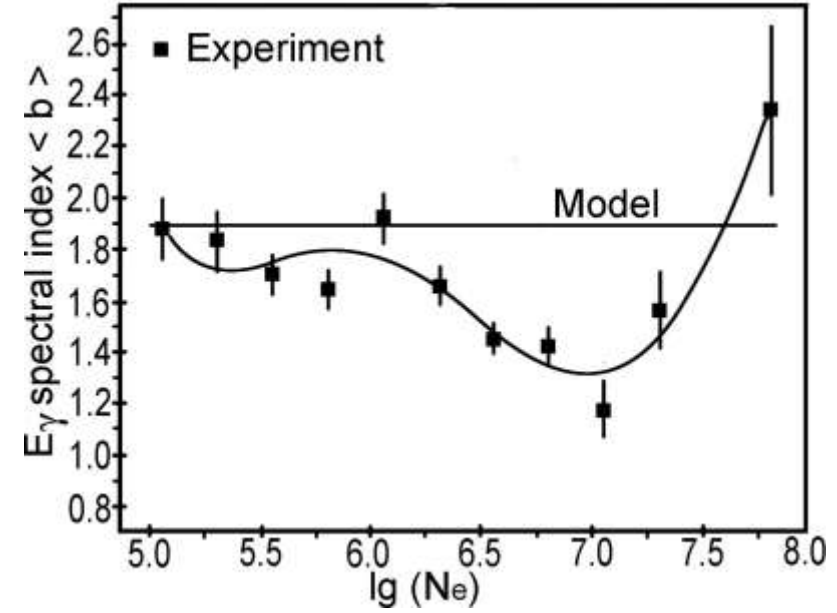
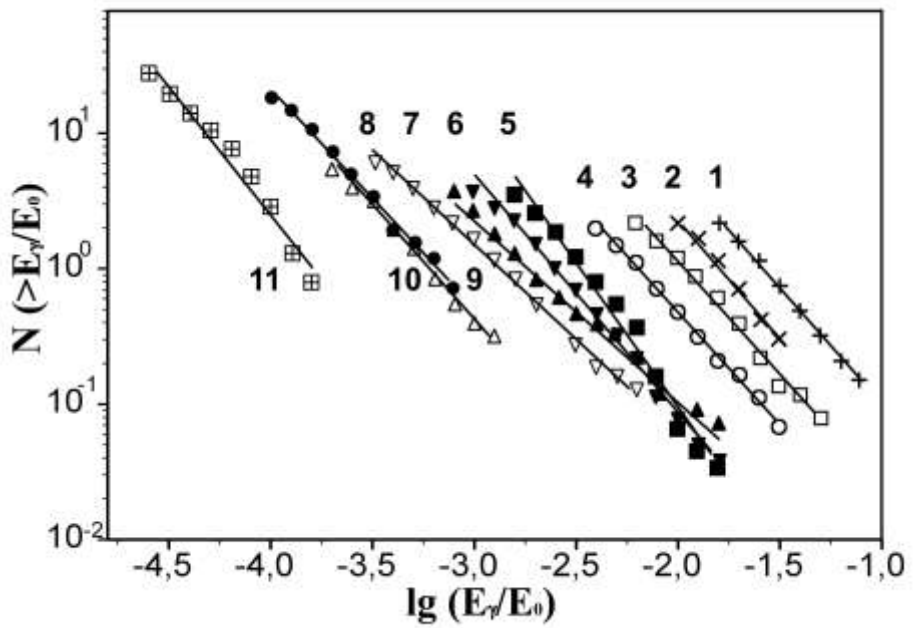
Колено в спектре ШАЛ.





Спектры E_γ (π^0) в зависимости от энергии ШАЛ.

Номера 1-11 обозначают интервалы N_e для $\lg(N_e)=5.0$ to 8.0 , шириной $\Delta \lg(N_e)=0.25$

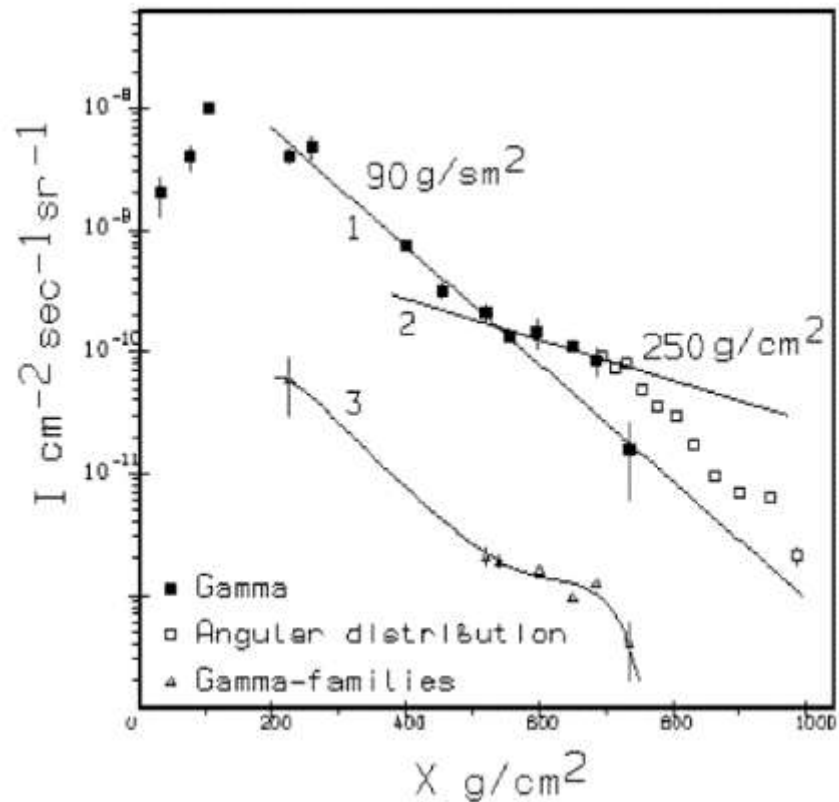


В области колена скейлинг нарушается – спектры становятся жестче (энергия адронов возрастает), что противоречит диффузионной и энергетической моделям КЛ.

Область нарушения скейлинга совпадает с изломом в спектре ШАЛ и такое



Кривая поглощения γ -семейств ($\Sigma E_\gamma > 50$ ТэВ) и γ -квантов ($\Sigma E_\gamma > 5$ ТэВ) в атмосфере по данным экспериментов с РЭК, выполненных на аэростатных, самолетных и горных высотах.



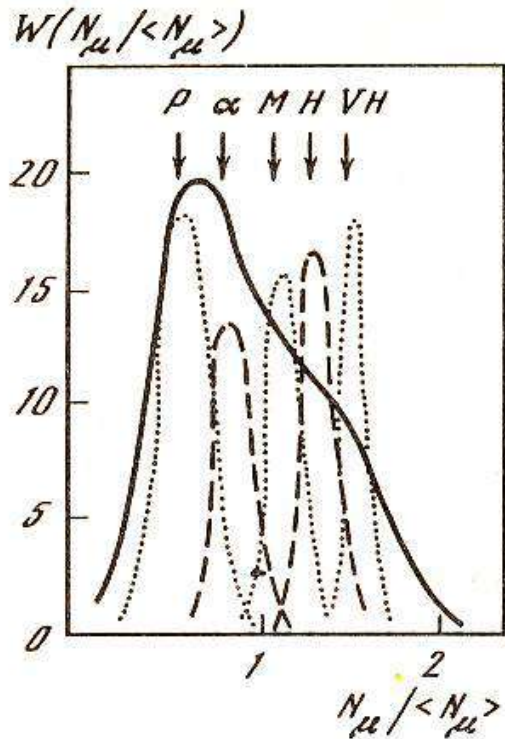
Наблюдаются две экспоненты с $\lambda_{att}^1 = 92 \pm 5$ г/см² и $\lambda_{att}^2 = 252 \pm 29$ г/см²

При фиксированном пороге отбора событий их первичная энергия растет с понижением высоты из-за увеличения ее диссипации на большой глубине в атмосфере.

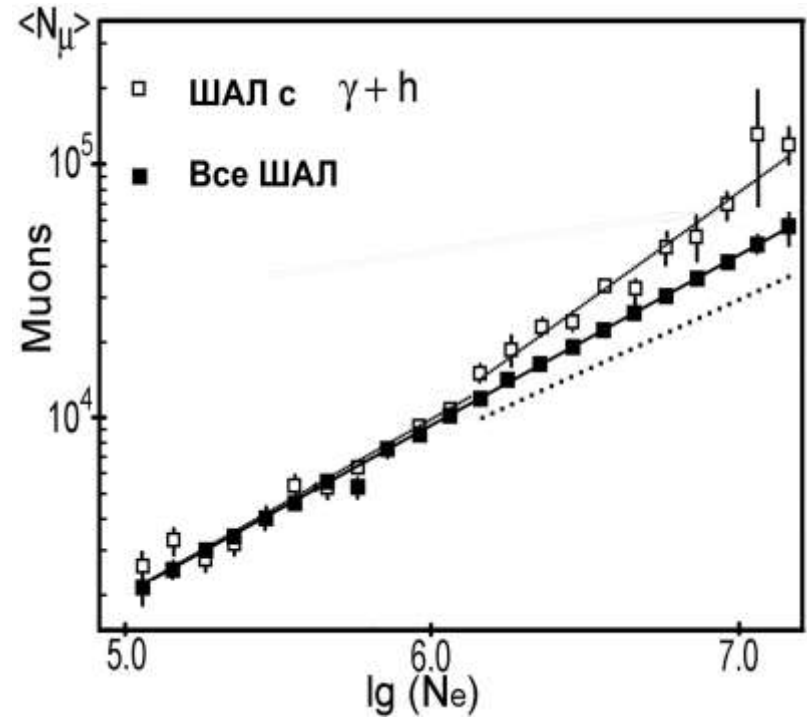
**Скейлинг нарушается
проникающей компонентой ШАЛ.
Энергия адронов увеличивается.**



Мюоны в ШАЛ.



Распределение числа мюонов для разных первичных ядер.



Зависимость $\langle N_\mu \rangle$ от N_e для ШАЛ и ШАЛ с γ -квантами ТэВных энергий. Пунктир – ожидаемая зависимость для ШАЛ с γ -квантами

Избыток мюонов в ШАЛ с γ -квантами противоречит моделям ядерных каскадов в атмосфере.



Ядерно-физическая интерпретация колена в спектре ШАЛ.

1. С увеличением доли упругих взаимодействий уменьшается развитие ШАЛ на уровне наблюдения - Ne .
2. В этом случае спектр искажается, т.к. часть событий перемещается в область меньших энергий.
3. При круто падающем спектре это выглядит как резкий излом. Резкость зависит от скорости увеличения σ_{el}/σ_{tot} .
4. Первый излом при $E_0 \approx 3$ ПэВ относится к протонной компоненте, второй при $E_0 \approx 100$ ПэВ к ядрам железа.



Интерпретация данных эксперимента АДРОН

1. При уменьшении числа неупругих взаимодействий энергия адронов на уровне наблюдения увеличивается (для всех ядер) – появляется **проникающая компонента**.
2. В спектрах адронов это будет выглядеть как **аномальное нарушение скейлинга**.
3. Из за проскоков эффективность генерации γ -семейств ядрами железа увеличивается. Их вклад в ШАЛ с γ -семействами становится основным, что объясняет **избыток мюонов**.



“Экзотика” в космических лучах

- 1) Проскоки ядер тяжелее протонов (группы нуклонов) могут создавать в РЭК события типа Centauro, т.е. группы адронов без γ -квантов (π^0). Заряженных пионов также может не быть, поэтому изотопическая инвариантность не нарушается.
- 2) Ядра в упругих взаимодействиях могут приобретать большой момент импульса. Быстрое вращение ядра приводит к образованию выстройки энергетических центров событий в РЭК (А.Д.Ерлыкин-ФИАН).
- 3) Повторные фронты ШАЛ, задержанные на величину ~ 100 нс и больше можно пытаться объяснить характеристиками ШАЛ образованных первичными ядрами железа. Если верна гипотеза асимптотической свободы, то в таких взаимодействиях поперечные импульсы должны быть большими. Ядро железа рассыпается на десятки нуклонов, образующих каскады в разных направлениях. Поскольку нуклонов много, существует вероятность, что на уровень наблюдения по разным путям придет два или несколько каскадов. Для задержки в 100 нс разность путей, обусловленная большими поперечными импульсами, должна составлять 30 метров. Для вертикальных ливней ($H \approx 30$ км) это много, но на горизонте пути каскада в атмосфере существенно увеличиваются и требования к величине поперечных импульсов снижаются.



Проверка числа проскоков.

Пусть $N_{вз}$ на глубине Тянь-Шаня (700 г/см^2) $N_{вз} = 6$,
а в случае учета проникающего эффекта $N_{вз}=3$.

Из распределения Пуассона

$$P(0) = \exp(-6) = 0.0025 \text{ и}$$

$$P(0) = \exp(-3) = 0.05, \text{ т.е. отличие в } 20 \text{ раз.}$$

При площади установки 200 м^2 (АДРОН) и числе ШАЛ $20 \text{ м}^{-2}\text{год}^{-1}$ таких событий за год должно быть в первом случае **10**, во втором **200**.

Экспериментальное число проскоков позволяет определить реальную степень увеличения доли упругих протон-ядерных взаимодействий.

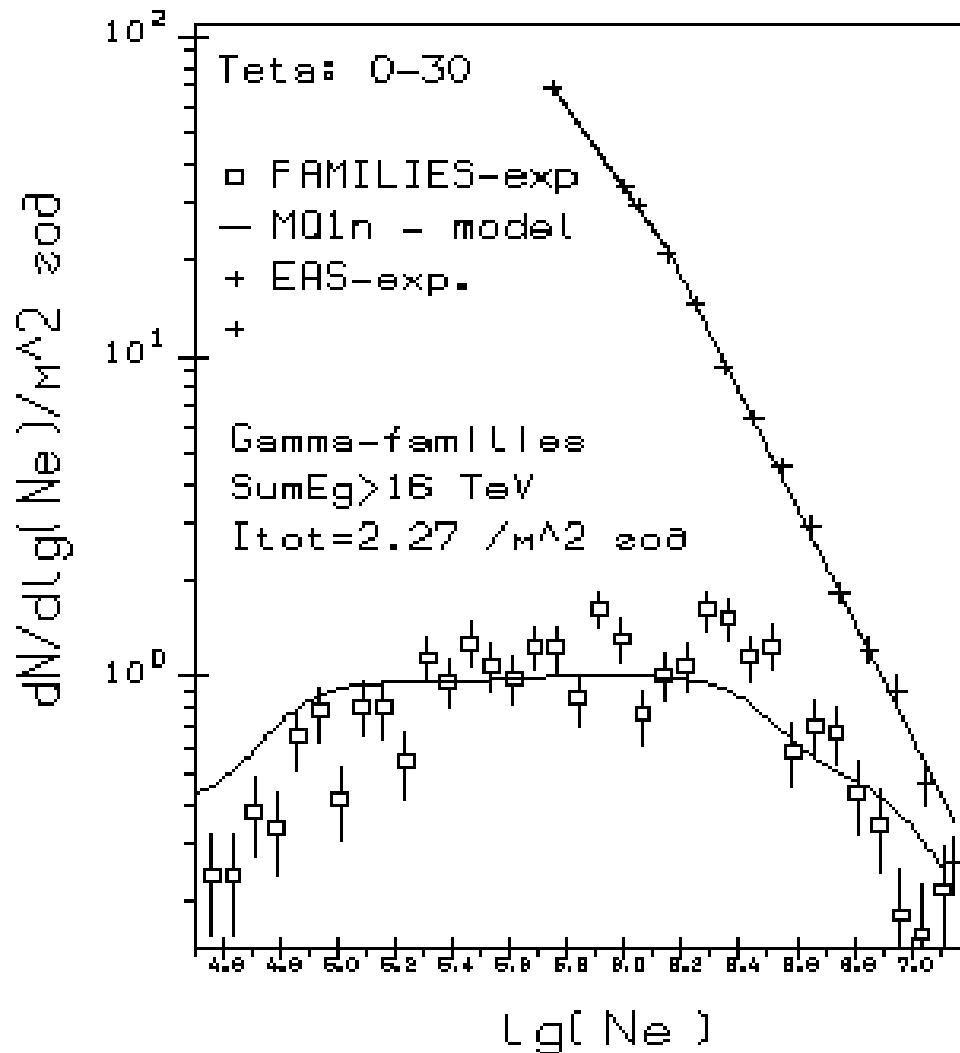


СПАСИБО!





Данные эксперимента АДРОН



В эксперименте АДРОН создавался обычный банк событий с информацией о ШАЛ: s, Ne, N μ .

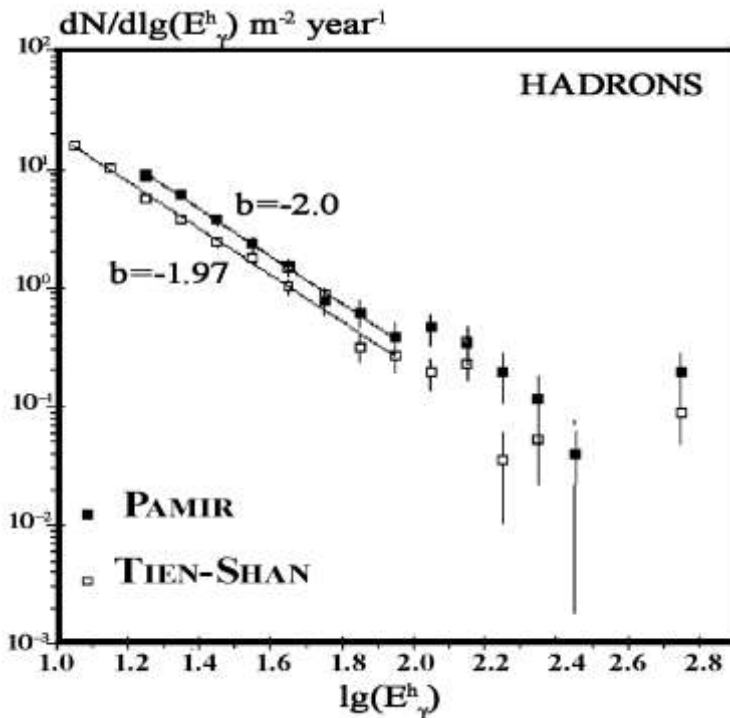
- Кроме того, из этой статистики извлекались события с γ -квантами ТэВных энергий (π^0) – условно ШАЛ, образованные протонами.

В результате

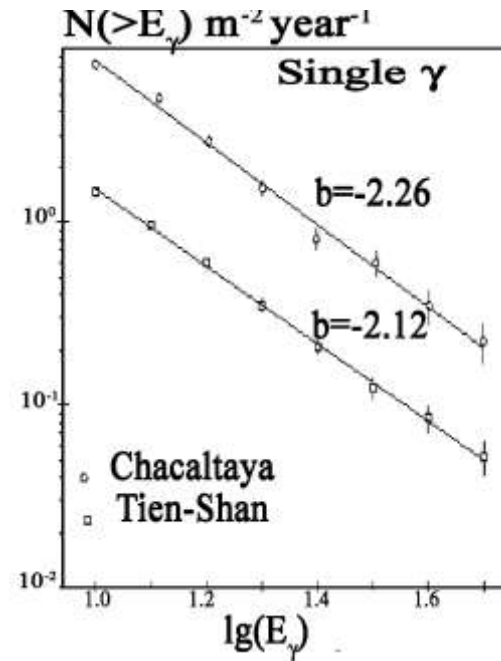
- был построен спектр Ne в области колена и
- впервые получены спектры адронов (гамма-квантов) ТэВных энергий в стволах ШАЛ



Спектры адронов и одиночных γ -квантов.



$$\lambda_{att} = 240 \pm 41 \text{ g/cm}^2$$



$$\lambda_{att} = 111 \pm 18 \text{ g/cm}^2$$

Поглощение адронов и γ -квантов резко отличаются. Длина поглощения адронов λ_{att} в 2.5 раза превышает обычное значение $\sim 100 \text{ г/см}^2$.