О методе ШАЛ

Стенькин Ю.В.

ИЯИ РАН

К нашему сожалению, интенсивность космических быстро падает с ростом энергии и при E≈3 ПэВ она составляет ~1 $м^{-2}$ $год^{-1}$. К тому же Земля экранирована атмосферой.

Понятно, прямым методом измерить спектры и химический состав ПКЛ с помощью калориметра или спектрометра на спутниках не получится при E>3 ПэВ.

Возможно, когда-нибудь удастся создать гигантский калориметр на Луне….

Пока же, мы вынуждены использовать косвенный метод изучения, т.е. измерять не ПКЛ, а вторичные или даже третичные частицы, долетевшие до уровня наблюдения.

Это и есть метод ШАЛ, придуманный около 80 лет назад.

Отметим, что метод был создан в то время, когда считалось, что ШАЛ – это «электронно-фотонный» ливень и он действительно неплохо работает для таких ливней.

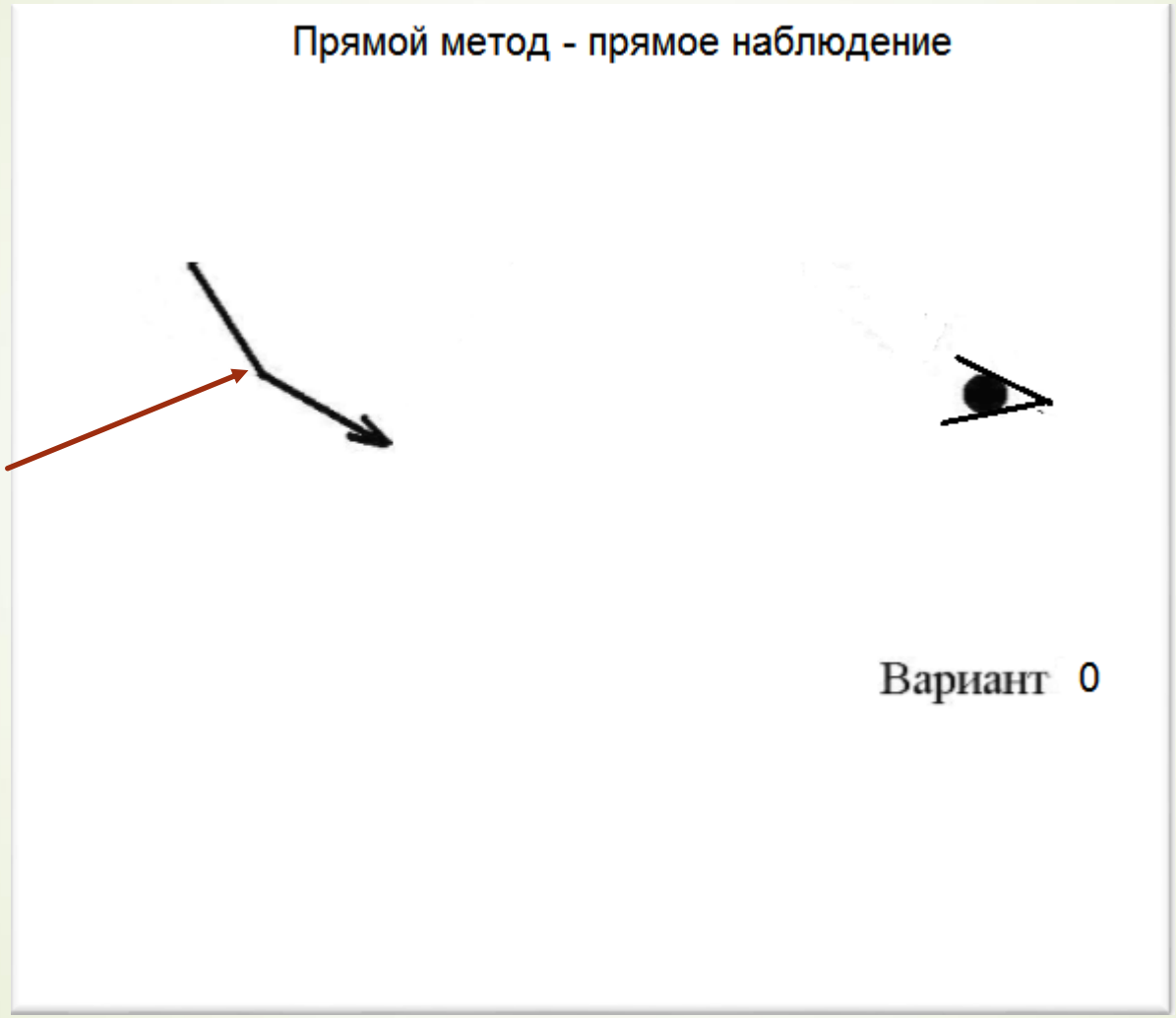
В этом докладе представлены результаты аналитических расчетов профилей ШАЛ и важные выводы на их основе.

Любой косвенный метод имеет свои недостатки и ограничения применимости и об этом нельзя забывать…

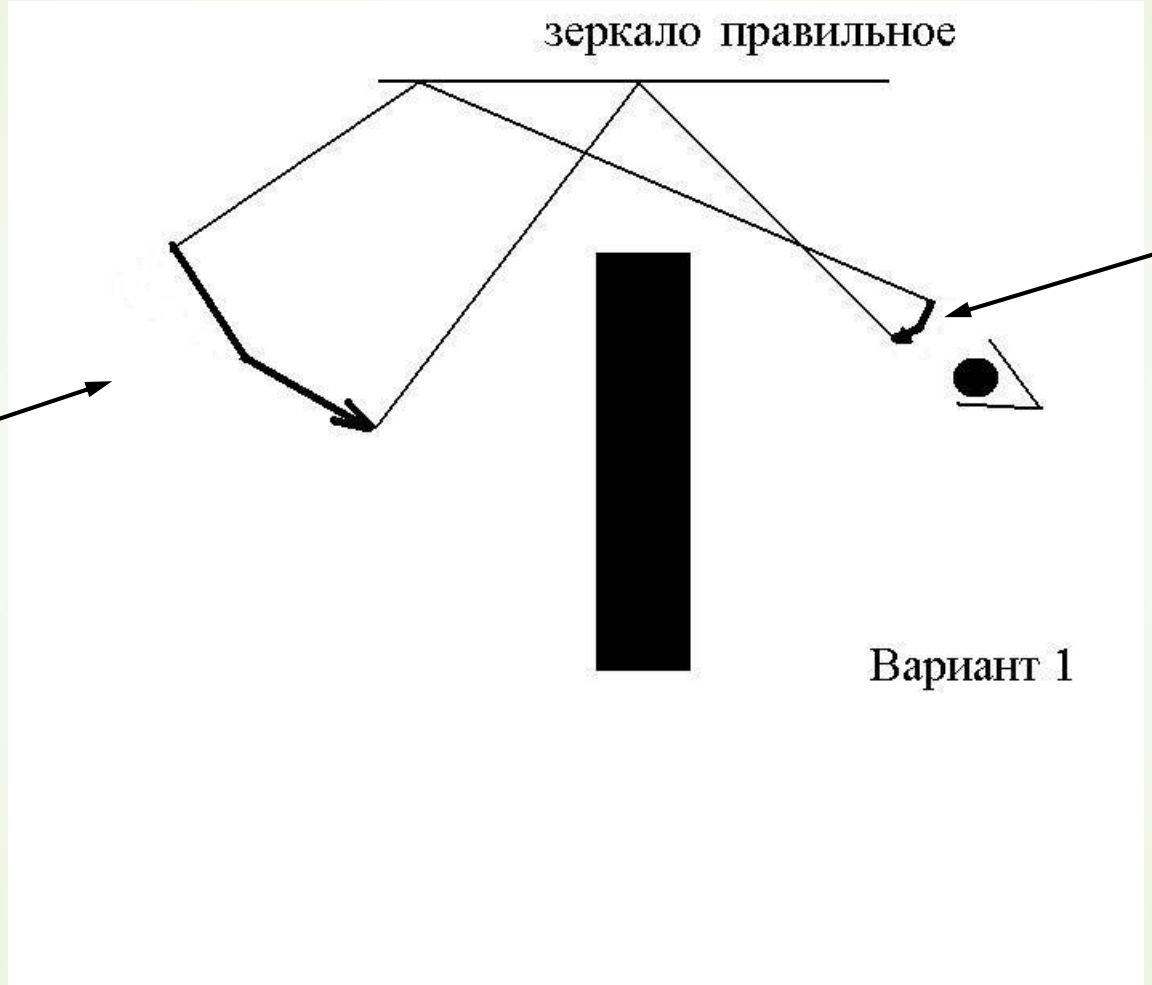
ИИ: при интерпретации данных, полученных косвенными измерениями, важно:

- Анализировать вклад каждой составляющей в итоговую погрешность,
- сравнивать с результатами альтернативных методов измерения,
- учитывать ограничения используемых моделей и законов

Пример прямого наблюдения:



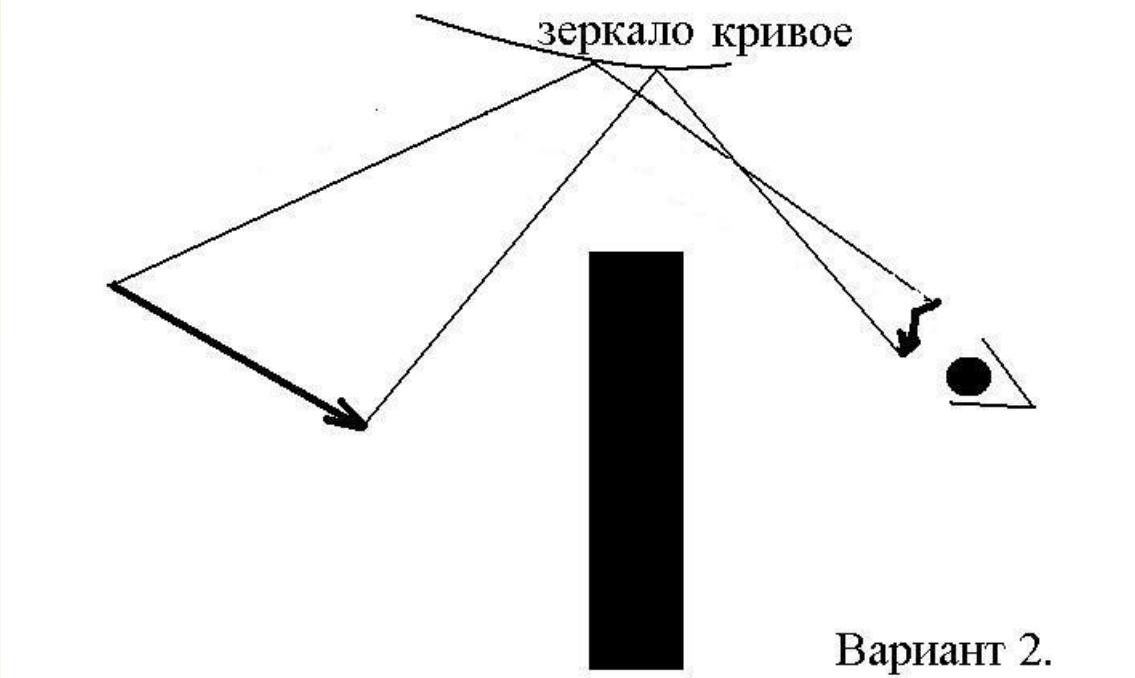
Простейший пример косвенного метода – зеркальный образ:



образ

объект

NB: даже при идеальном зеркале образ искажается – изображение инвертировано!



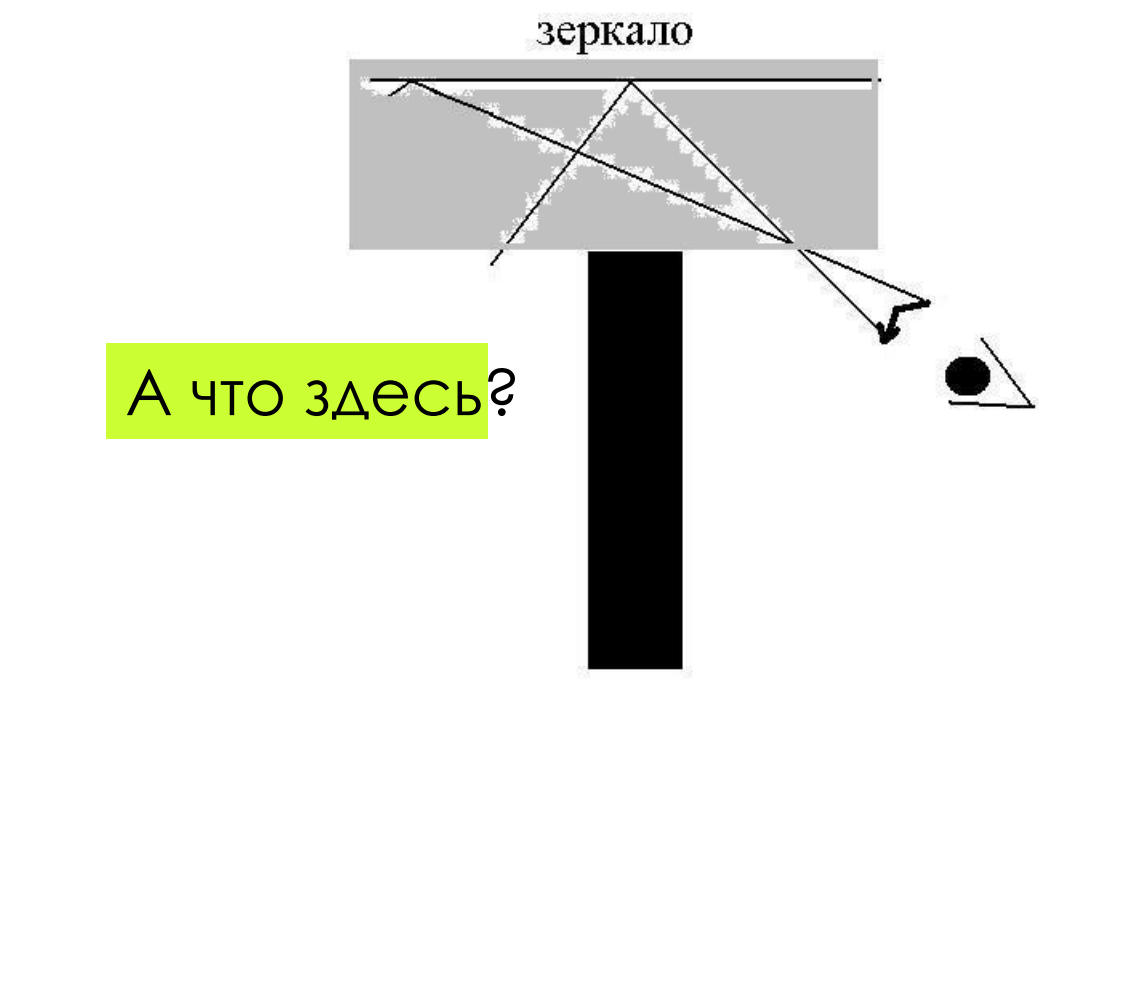
В этом случае возможно любое искажение, как в «королевстве кривых зеркал».

Мы знаем из опыта (из других наблюдений), что таких людей не бывает.

А если бы инопланетянин увидел в свой кривой телескоп такую фигуру?

Вариант 3. Неизвестен объект и неизвестен тип зеркала.

неизвестное



Этот случай соответствует методу ШАЛ!

Переход от первичного степенного спектра ко вторичному и наоборот

Первичный спектр

$$I \sim E^{-\gamma}$$

Вторичная компонента $N_x \sim E^{\alpha}$

$$E \sim N_x^{1/\alpha}$$

Вторичный (измеренный) спектр

$$I \sim N_x^{-\beta}$$

$$\beta = \gamma / \alpha$$

α - характеризует кривизну «шаловского зеркала»

Если α имеет излом (кривое зеркало), то и в наблюдаемом спектре будет «излом».

Таким образом, наблюдение «излома» во вторичной компоненте вовсе не означает наличие такового в первичном спектре.

Если бы излом $\Delta\gamma$ действительно был в первичном спектре, то можно оценить ожидаемую иерархию изломов в разных компонентах ШАЛ: e, h и μ,

т. к. мы знаем «кривизну α » для каждого из них.

$$\alpha_e \approx 1.15 > \alpha_h \approx 1 > \alpha_\mu \approx 0.85$$

$$\Delta\beta_x = \Delta\gamma / \alpha_x$$

$$\Delta\beta_e = 0.43 < \Delta\beta_h = 0.5 < \Delta\beta_\mu = 0.59$$ иерархия

Этого **не** наблюдается, что ставит под сомнение такую гипотезу

Какова же кривизна «шаловского зеркала» в широком диапазоне первичных энергий?

В докомпьютерную эпоху были аналитически рассчитаны каскадные кривые в атмосфере, основанные на неких исходных принципах и законах. Полученные профили ШАЛ в среднем неплохо согласуются с экспериментальными.

К недостатком этого подхода относится трудность учета флуктуаций в развитии ливней, а к плюсам, отсутствие статистических ошибок, свойственных Монте-Карловским расчетам.

- Один из вариантов аналитического расчета был предложен Гайсером и Хилласом [19 ICRC, Plovdiv, **8**,1977], а затем более детально воспроизведен в монографии Rao & Sreekantan “Extensive Air Showers”.

$$N_e=F(x, A, E_0)$$

т.е. это функция трех параметров:
глубины X, массы A и энергии E_0 первичной частицы

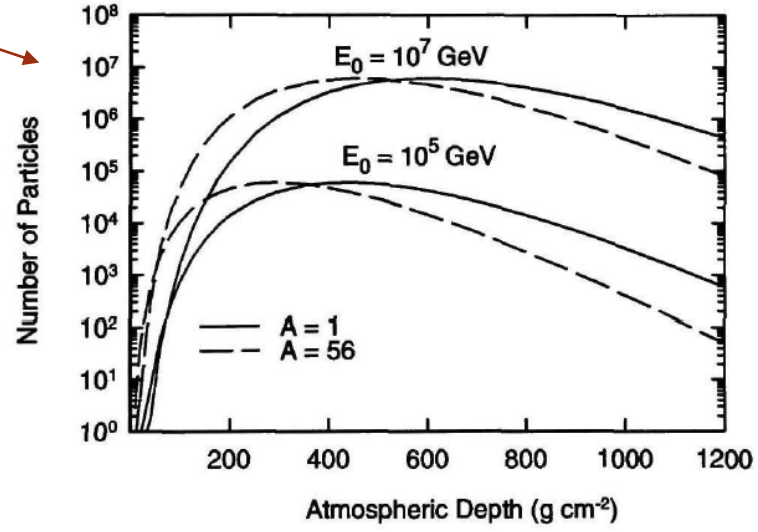
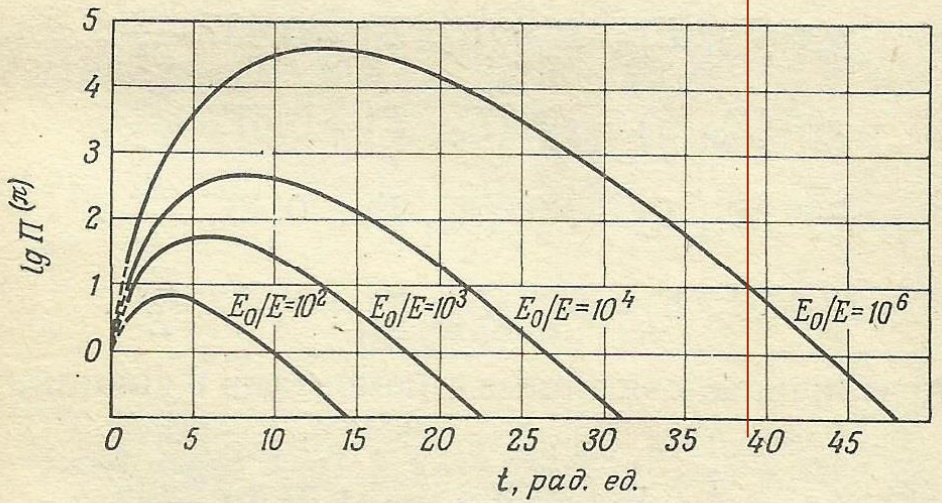


Figure 2.1 Cascade curves for proton and iron primaries from the model of Gaisser & Hillas(1977).

Расчет свойств ШАЛ по формулам Гайсера и Хилласа

Каскадная теория. Расчет для э-м ливней

Sea level



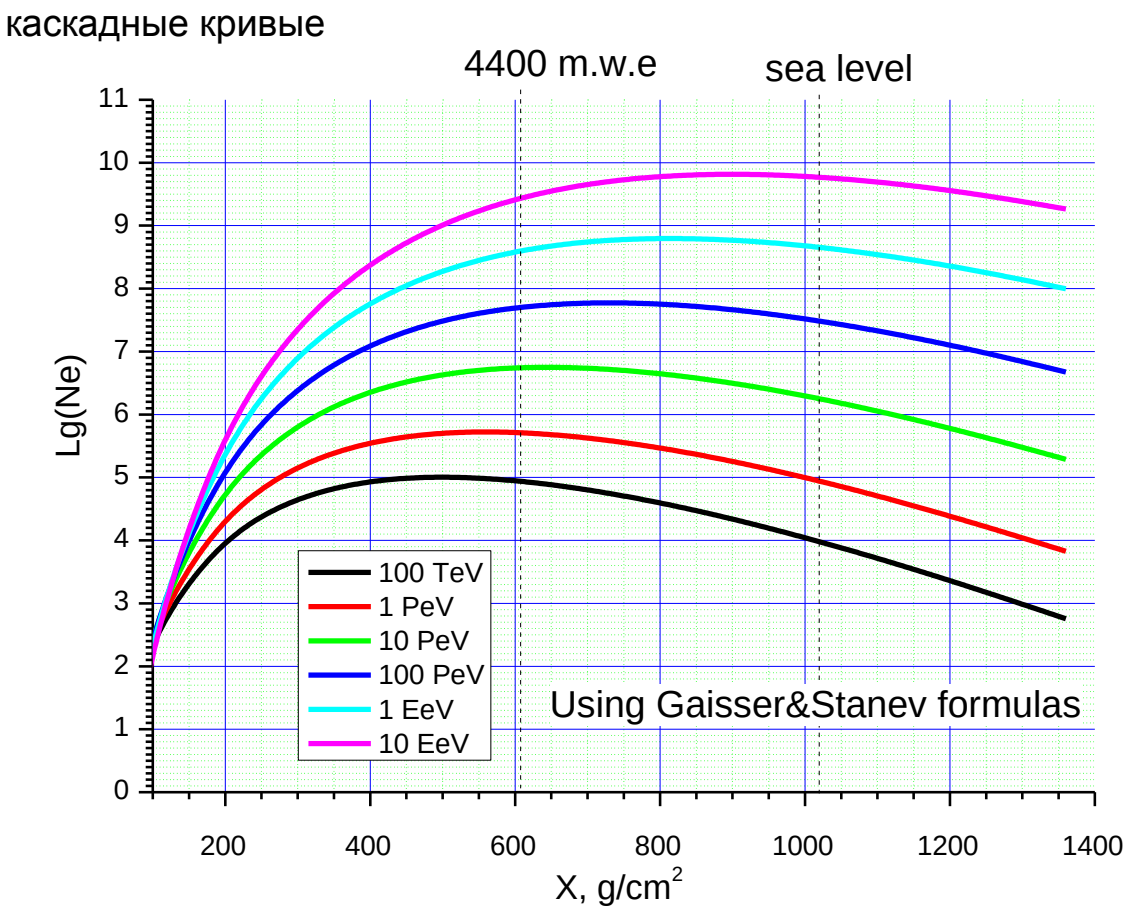
Фиг. В.1. Число электронов с энергией свыше E в ливне, образованном электроном с энергией E_0, $\Pi^{\pi}(E_0, E, t)$, как функция глубины t.

Кривые рассчитаны для различных значений E_0/E в приближении А [5].

Из учебника Хаякавы

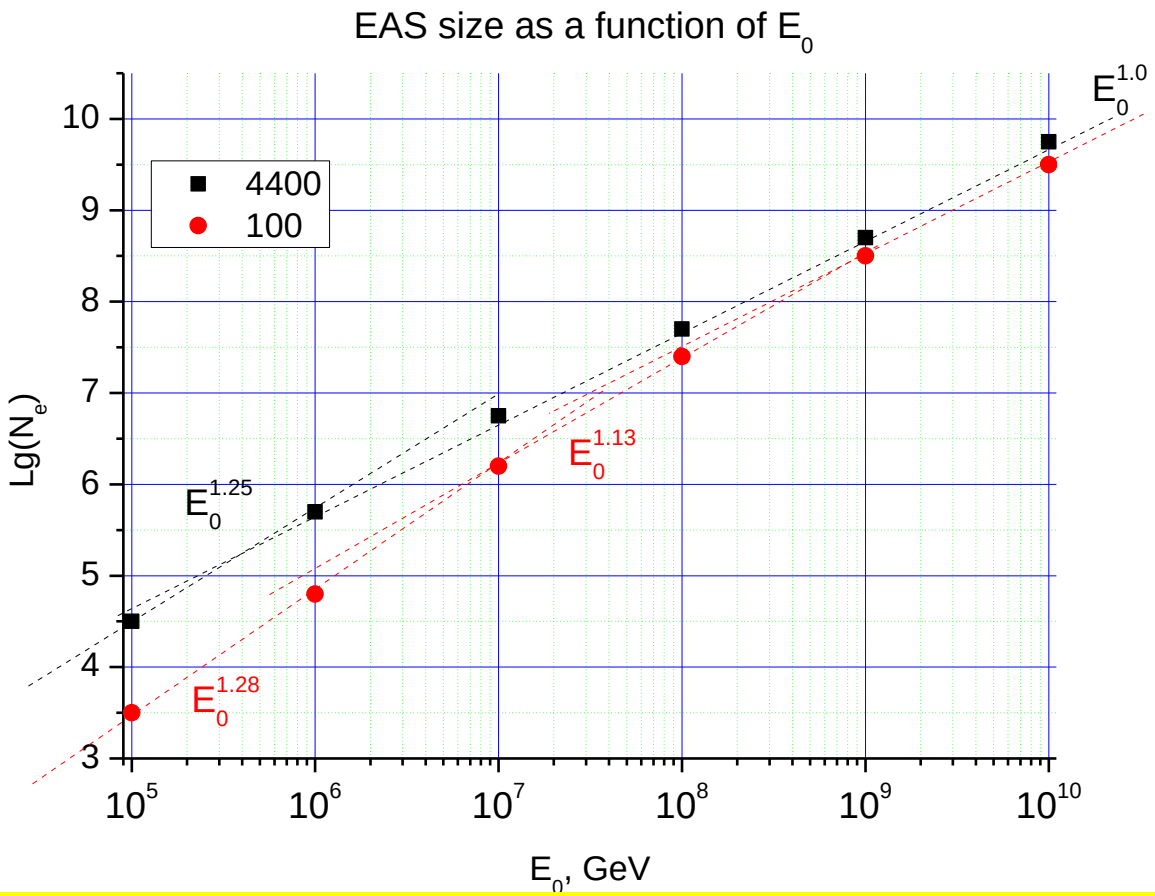
43*

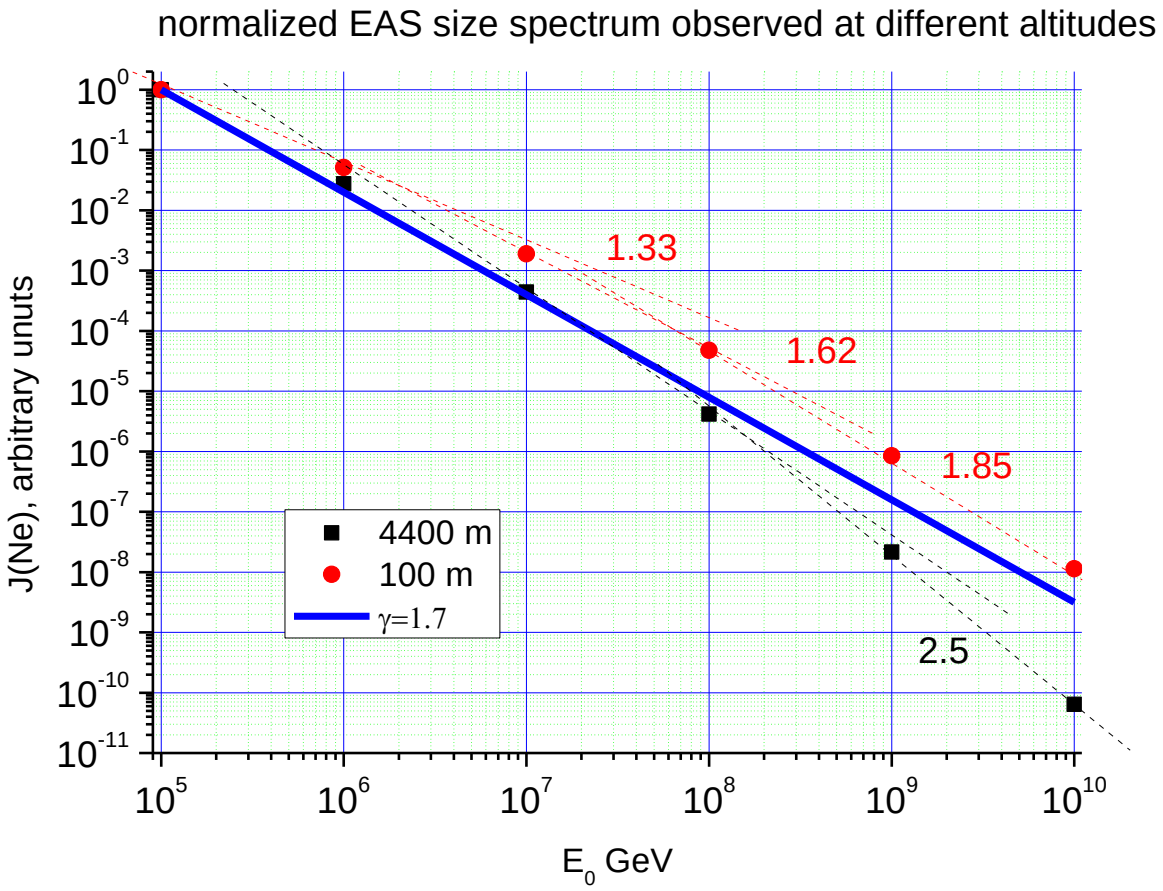
Каскадные кривые ШАЛ для ядер He (как ~ <A>)



Разница в длине э-м и адронного каскадов очевидна. В первом случае максимум сдвигается мало и измерения происходят на экспоненциальном спаде, во втором - нет. Кроме того, в h-каскаде велики флуктуации и максимумов может быть 2 и более, а масса A варьируется от 1 до 56, влияя на X_{max} .

Из анализа полученных каскадных кривых Гайсера&Хилласа можно получить интересные предсказания. Например, зависимость кривизны «шаловского зеркала» α от E_0 для N_e» :

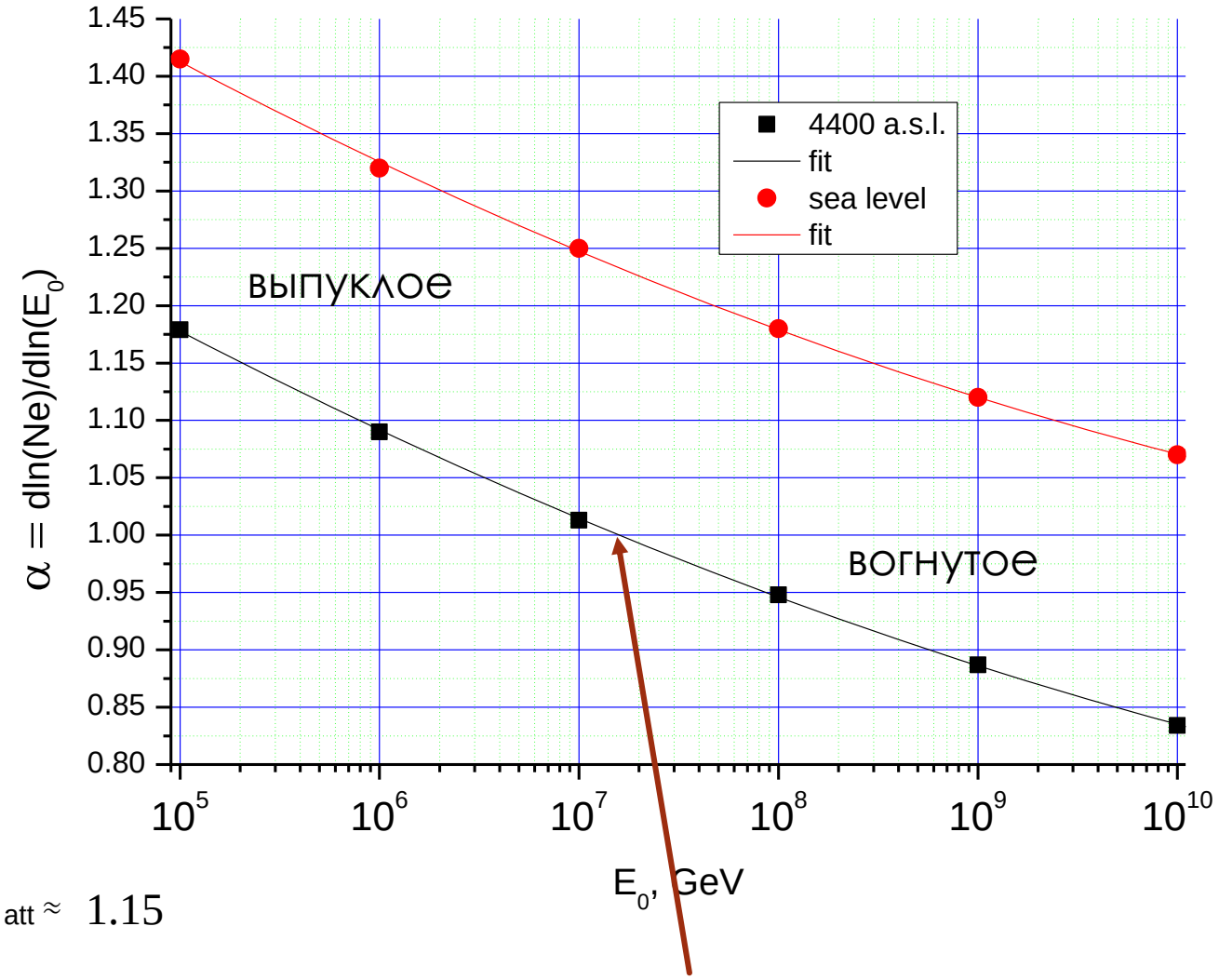




Как видно, зависимость N_e от E_0 (слева) не описывается единым степенным законом, а спектр по N_e не равен спектру по E_0!
К тому же, спектр по N_e зависит от высоты наблюдения и его нельзя фитировать прямой линией.

Усредненная зависимость «кривизны шаловского зеркала α » от E_0 для N_e, полученная из каскадных кривых Гайсера&Хилласа

α =1 соответствует «идеальному зеркалу»



$$\alpha_e = d(\ln(N_e(E_0))/d(\ln(E_0)) \approx 1 + 30.5/\Lambda_{att} \approx 1.15$$

Как видно, α ≠1 на уровне моря везде, α =1 только в одной точке на высоте 4400 м

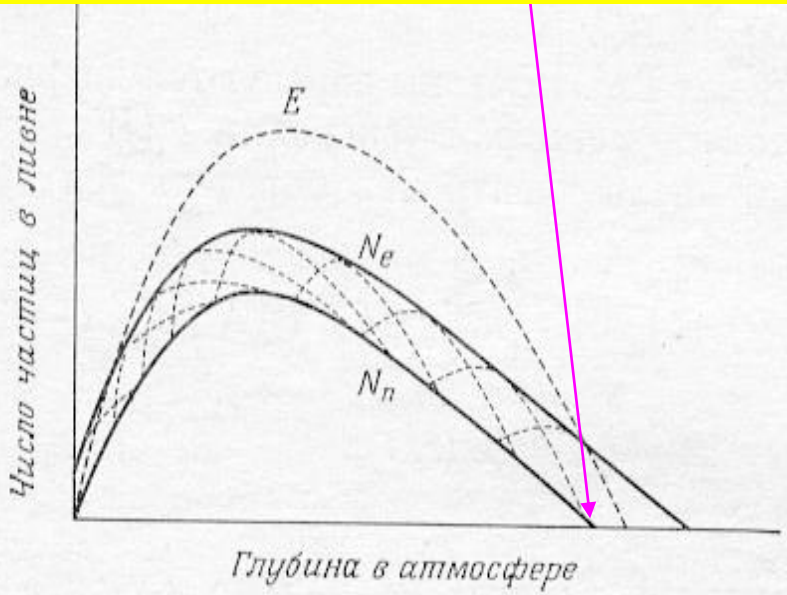
Отсюда следует, что наклоны спектров по N_e на разных высотах имеют разные наклоны.

Проблема усугубляется еще одним важнейшим обстоятельством – нарушением равновесия в адронном каскаде, а значит и в ШАЛ!

Что произойдет в этой точке где исчезает последний каскадирующий адрон???
Это критическая точка ($E_{0к}$) адронного каскада, в которой нарушается равновесие компонент ШАЛ

Учебник «Физика космических лучей. Ч.1» Хаякава (1973)

По этому учебнику учились многие физики, НО в этой схеме содержится ошибка!



Фиг. 5.17. Схематическое изображение развития ШАЛ.
N_n — ядерно-активная компонента; N_e — электронная компонента, сумма многих электронных ливней, обозначенных пунктирными кривыми; E — электронный ливень, образованный фотоном высокой энергии.

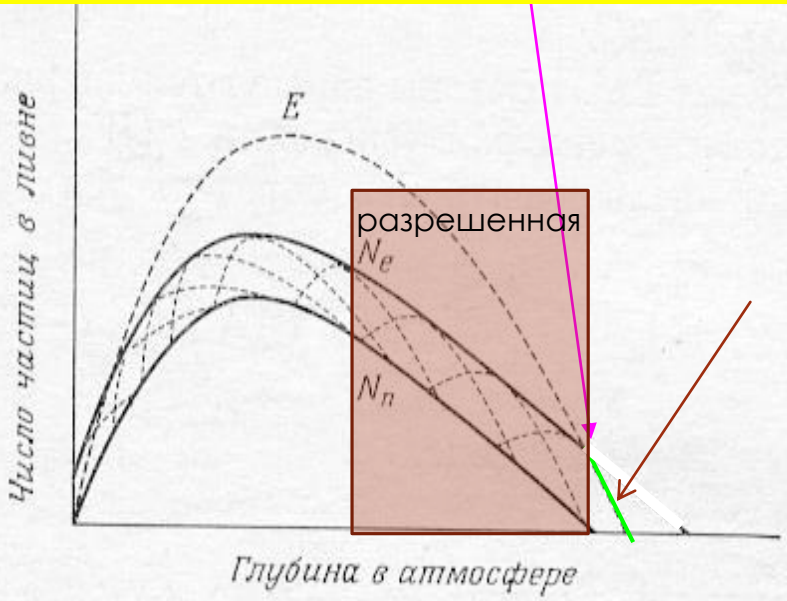
См. Ю.В. Стенькин. Об особенностях продольного развития ШАЛ и о спектре космических лучей. ЯФ. т. 71, №1, (2008).

Проблема усугубляется еще одним важнейшим обстоятельством – нарушением равновесия в адронном каскаде, а значит и в ШАЛ!

Учебник «Физика космических лучей. Ч.1» Хаякава (1973)

По этому учебнику учились многие физики, НО в этой схеме содержится ошибка!

Что произойдет в этой точке где исчезает последний каскадирующий адрон???
Это критическая точка ($E_{0к}$) адронного каскада, в которой нарушается равновесие компонент ШАЛ



Ф и г. 5.17. Схематическое изображение развития ШАЛ.
N_n — ядерно-активная компонента; N_e — электронная компонента, сумма многих электронных ливней, обозначенных пунктирными кривыми; E — электронный ливень, образованный фотоном высокой энергии.

Такую, последнюю стадию развития ШАЛ я назвал *coreless EAS* или *бесствольными* ливнями. Из схемы видно, что при измерении N_n «излома» не будет. Именно поэтому мы стали измерять нейтронную компоненту ШАЛ

См. Ю.В. Стенькин. Об особенностях продольного развития ШАЛ и о спектре космических лучей. ЯФ. т. 71, №1, (2008).

Положение этой критической точки $E_{0к}$ можно было легко оценить еще 70 лет назад, используя метод последовательных поколений, разработанный Г.Т. Зацепиным. Еще тогда было отмечено, что по аналогии с э-м каскадом, в адронном есть своя $E_{кр} \approx 10$ ГэВ, ниже которой адроны перестают каскадировать.

Сейчас это рассчитывается программами типа CORSIKA. Оба метода дают близкие результаты для уровня моря: $E_{0к} \approx 100$ ТэВ/нуклон. Это значит, что для первичного протона нижний предел применимости метода ШАЛ равен 100 ТэВ, а для ядер железа это 56*100 ТэВ=5.6 ПэВ!

Т. о. существует переходная область 0.1 – 5.6 ПэВ когда часть ШАЛ уже достигла равновесия, а другая часть (тяжелые ядра) – еще нет. Верхний порог (железный) задает искомый нижний предел применимости метода ШАЛ на уровне моря. На самом деле это плавный переход из-за наличия флуктуаций, поэтому реально метод ШАЛ на уровне моря работает корректно только выше ~10 ПэВ.

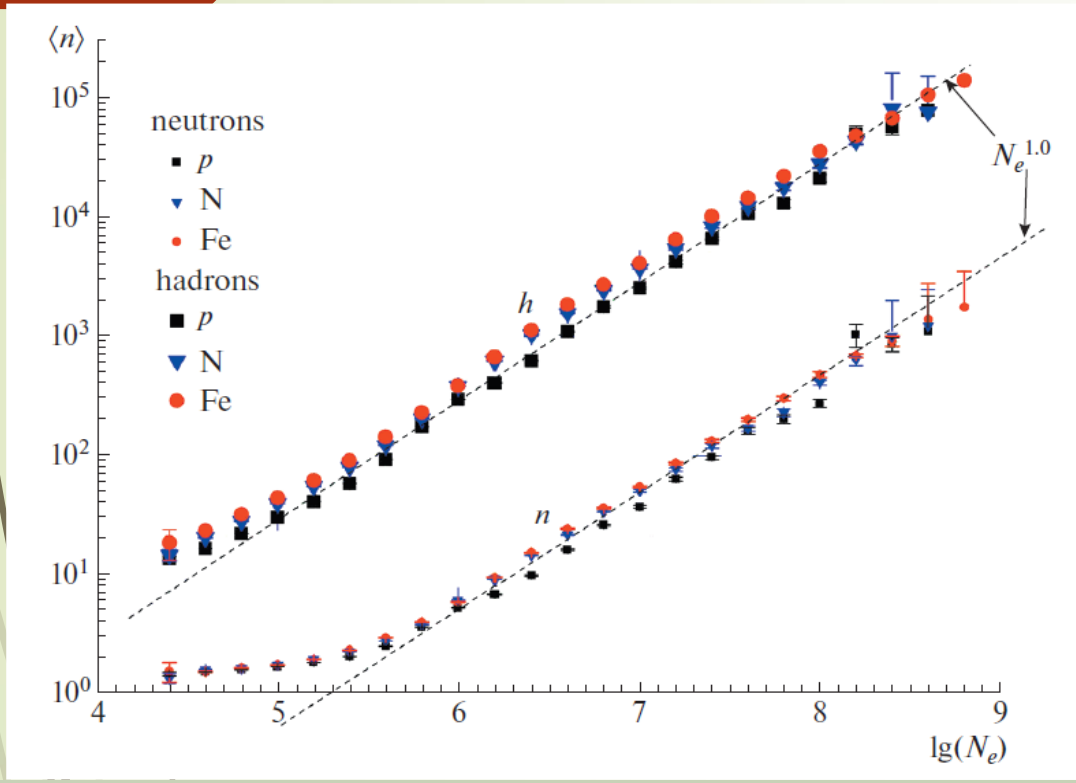
ENDA -LHAASO

M-C for ENDA-64

4400 m a.s.l.

Спектры ШАЛ по нейтронам (experiment):

ENDA-64



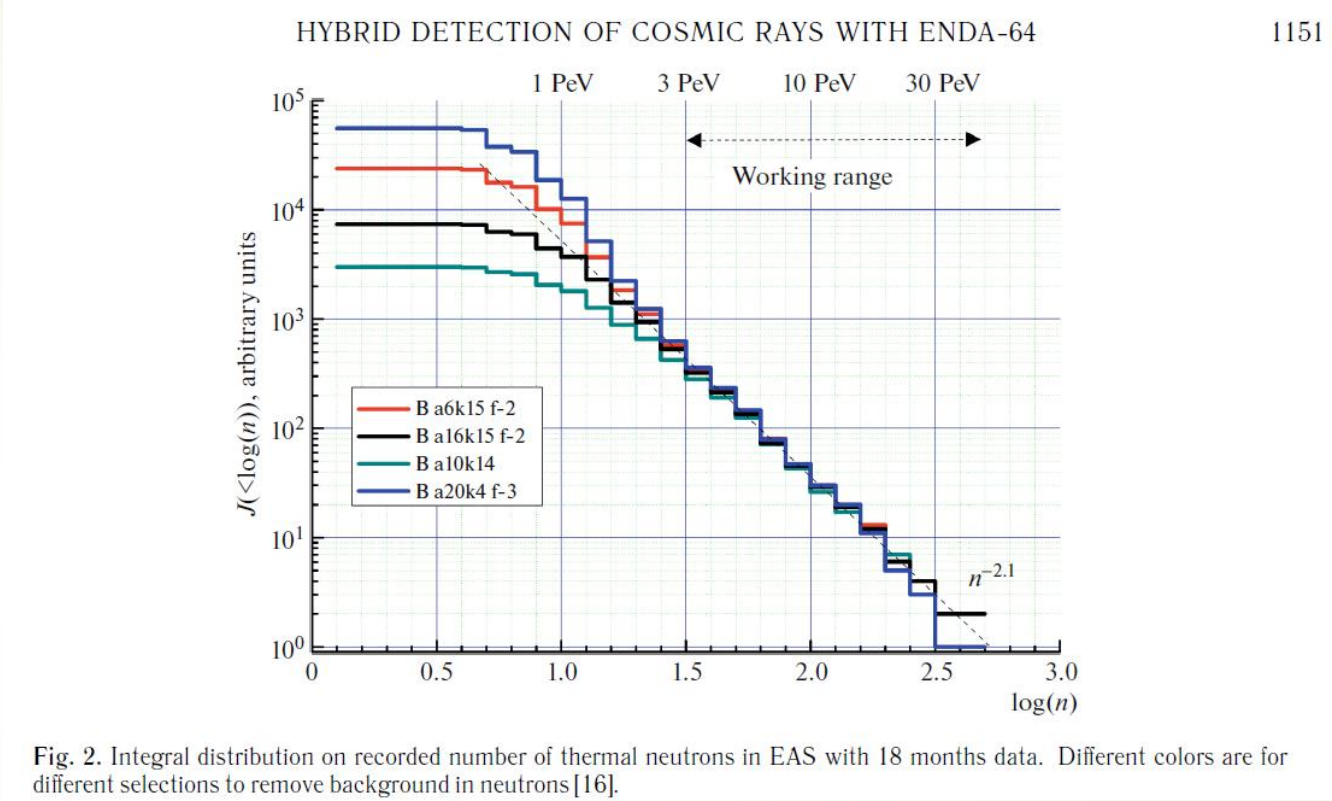


Fig. 2. Integral distribution on recorded number of thermal neutrons in EAS with 18 months data. Different colors are for different selections to remove background in neutrons [16].

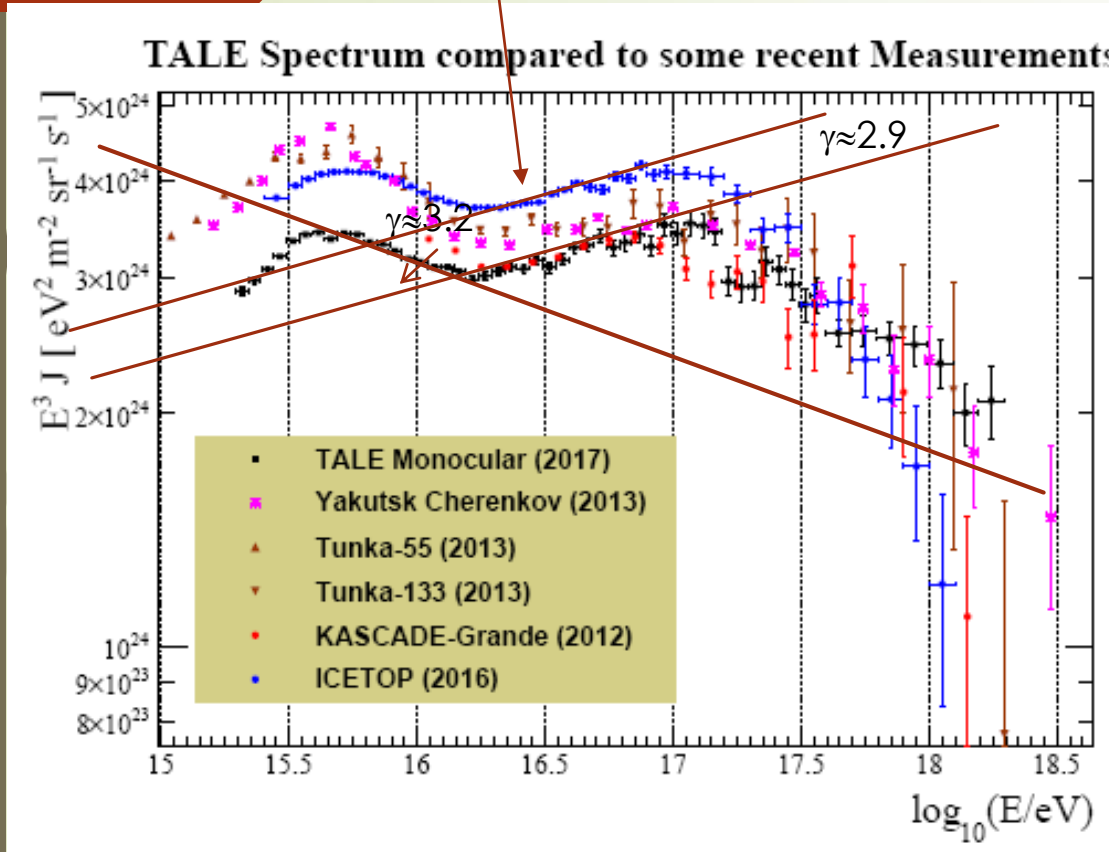
Wei Gao, et al. *Physics of Atomic Nuclei, 2025, Vol. 88,*

1. Stenkin & Shchegolev *J. Phys.: Conf. Ser.* **1181**, 012021 (2019).

Нейтроны, а значит и энергичные адроны появляются именно в области «излома». Равновесие достигается при E > ~3 ПэВ и только при этой энергии метод ШАЛ начинает правильно работать и спектр выходит на истинный наклон. Измерения ниже 3÷10 ПэВ классическим методом ШАЛ не корректны.

Experimental data compilation

Выход на истинный наклон



arXiv:1803.01288v1 [astro-ph.HE] 4 Mar 2018

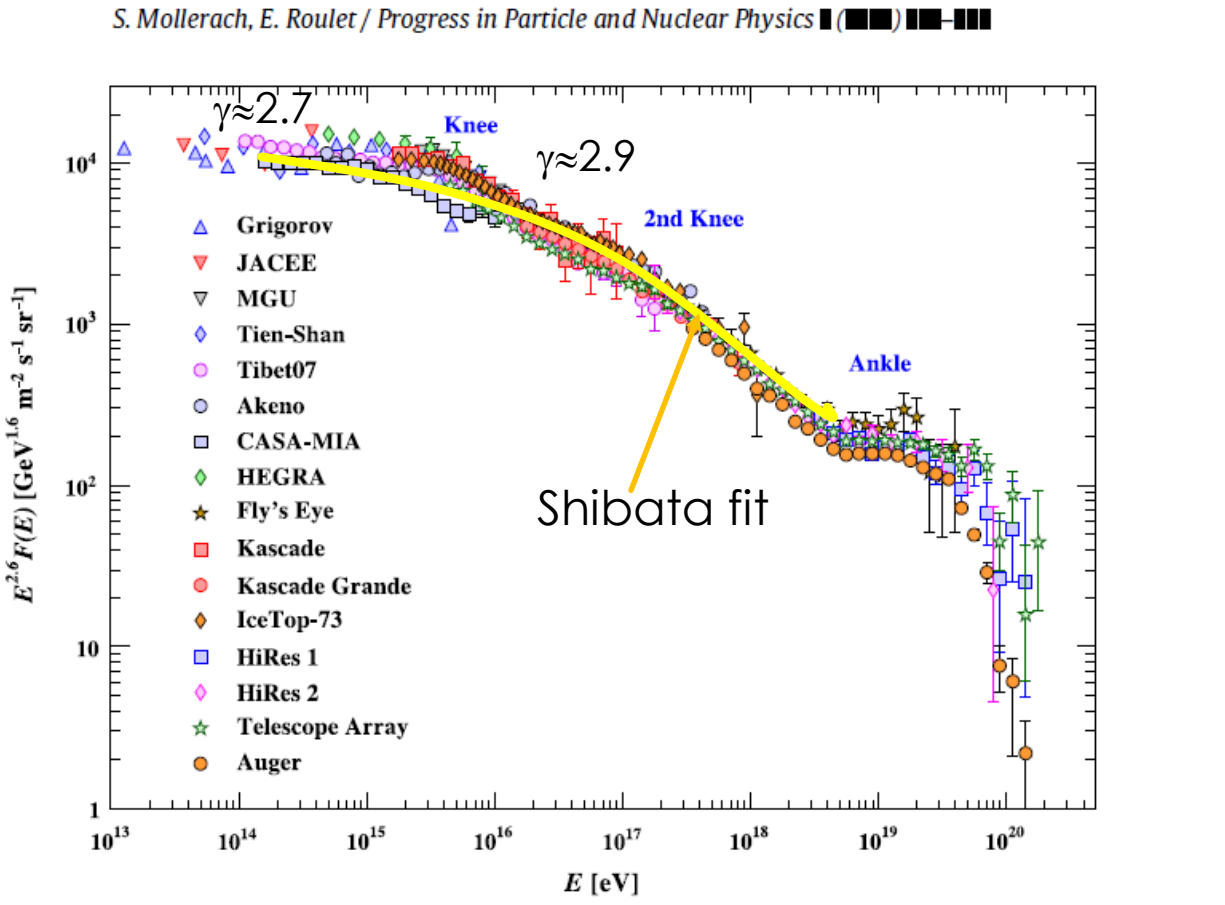


Fig. 4. Differential CR spectrum, multiplied by $E^{2.6}$ so as to make it flatter, as a function of energy (taken from [28]).

Я не утверждаю, что наклон спектра не изменяется!
Похоже, плавное изменение есть, но нет «бугра» в Пэвной области

Заключение

- Феноменология электромагнитного и ядерного каскадов имеет принципиальные различия.
- Использование косвенного метода вообще и тем более, разработанного для другого класса событий, приводит к систематическим ошибкам измерений и интерпретации результатов. Область применимости метода ШАЛ следует четко обозначить для каждой установки.
- Это ошибки метода измерения, а не отдельных исследователей, поэтому ошибочные результаты могут совпадать.
- Для решения проблемы требуется полноценное измерение адронной компоненты, что позволяет исключить из обработки бесствольные ливни и получить правильный результат в рабочей области метода ШАЛ.
- Спектры, измеренные в разрешенной области энергий (>~10 PeV) корректны.

СПАСИБО
за внимание!