

НА ПУТИ К РЕШЕНИЮ ЗАГАДКИ ДЛИННОПРОБЕЖНЫХ АДРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Борисов А.С.¹, Галкин В.И.², Денисова В.Г.¹, Каневская Е.А.¹, Коган М.Г.¹,
Мухамедшин Р.А.³, Пучков В.С.¹, Ёрмамадов Ш.Г.⁴

¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Россия, Москва*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», (МГУ),
Россия, Москва*

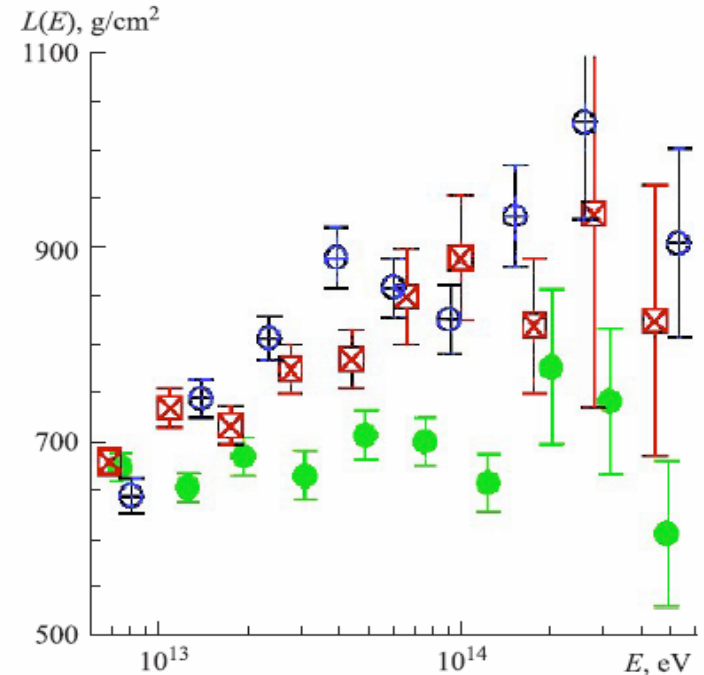
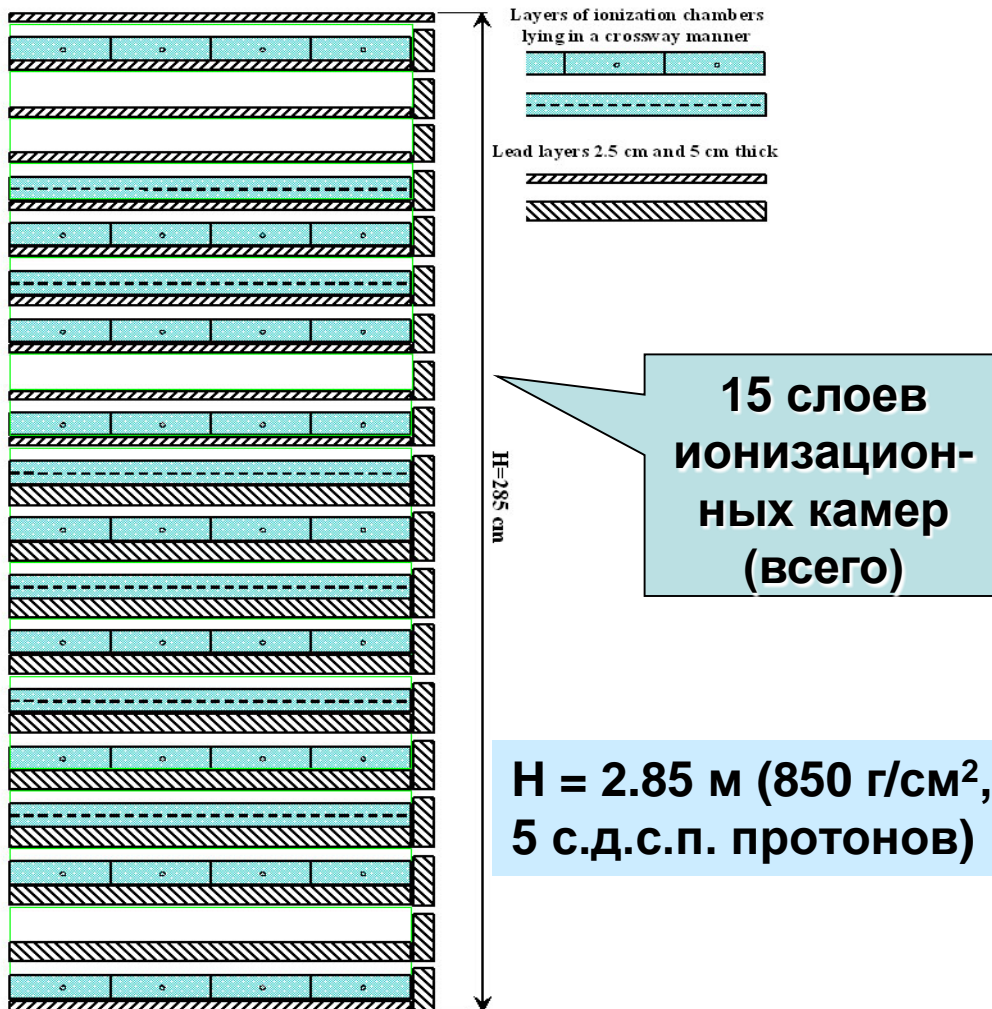
³ *Институт ядерной физики РАН (ИЯИ РАН), Россия, Москва*

⁴ *Физико-технический институт им. С.У. Умарова НАН РТ, Таджикистан,
Душанбе*

**37-я Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ-2022),
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия**

Большой ионизационный калориметр в составе установки ШАЛ на ТШВНС в 1973 – 1974 гг.

Схема БИК со Pb-поглотителем, $S = 36 \text{ м}^2$



Длина затухания $L(E)$ адронов в стволах ШАЛ по данным БИК: крестики в кружках – эксперимент, кружки – Монте-Карло без чарма (по моделям для низко-энергичных адронов), квадратики с косыми крестами – Монте-Карло с чармом ($\sigma_{h \rightarrow c}^{prod} \approx 30\% \sigma_{hPb}^{inel}$).

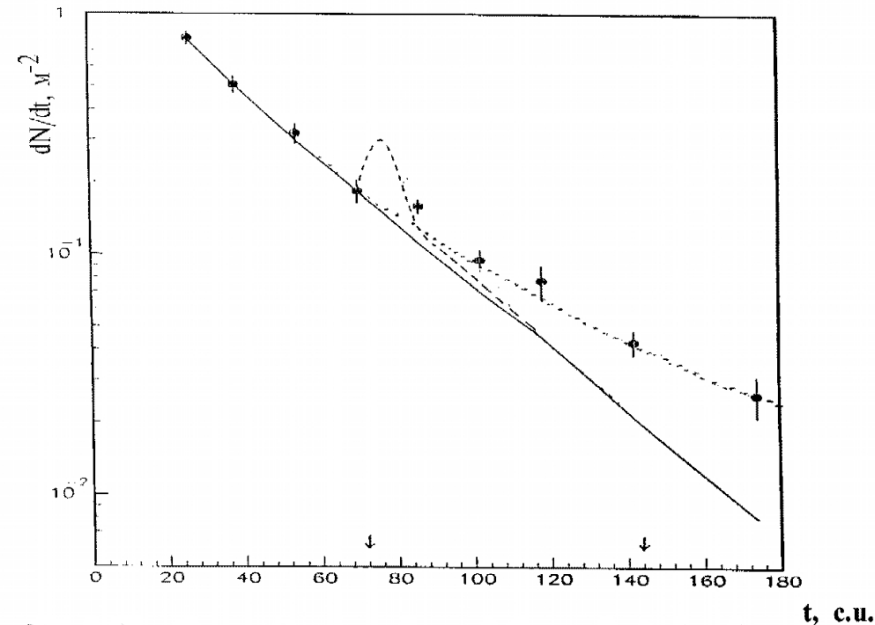
Конструкция 2-ярусной РЭК для проверки чармированной природы проникающих адронов

Гипотеза: Избыточные каскады образуются чармированными частицами ($\sigma_{\Lambda_c, D}^{\text{prod}} \approx 3$ мбн/нуклон при $E_L \geq 20$ ТэВ, $x_{\text{lab}} \geq 0,1$)
/Фейнберг, Дремин, Яковлев/



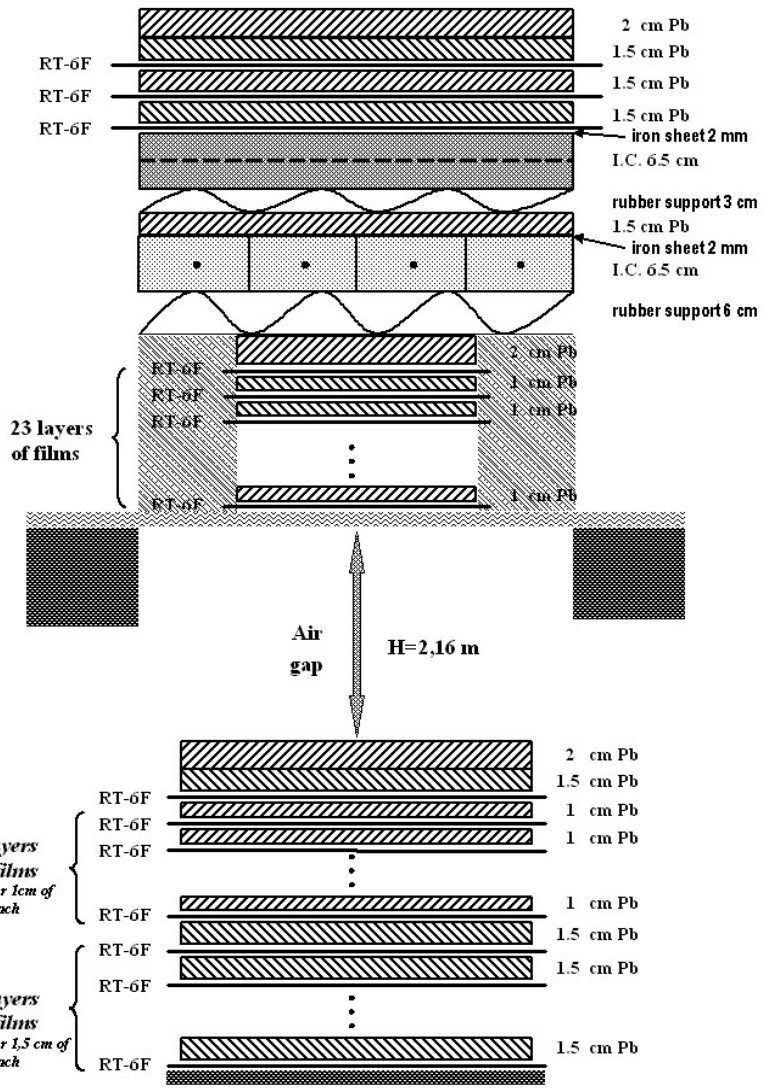
- Схема и фото (1993 г.) 2-ярусной РЭК с воздушным зазором 2.5 м

$$H = c\tau\gamma = c\tau \frac{E}{m} \approx 2.5 \text{ м}$$



- Распределение точек зарождения каскадов в глубокой однородной свинцовой РЭК и в 2-ярусной РЭК с 2,5-метровым воздушным зазором.

Двухъярусная РЭК с 2,2-метровым воздушным зазором на ТШВНС (3340 м н.у.м.)



➤ **Схема 2-ярусной РЭК на ТШВНС**
 $S_{\text{верх}} = 48 \text{ m}^2$, $S_{\text{ниж}} = 32 \text{ m}^2$, $E_{\gamma}^{\text{th}} \approx 6 \text{ TeV}$

➤ **Верхний/нижний ярусы РЭК с 2,2 м зазором (собрана на ТШВНС в 2004 г.)**

Моделирование отклика 2-ярусной РЭК с помощью программного кода *ECSim2.0@FANSY1.0* с учетом рождения чарма

- МК код **FANSY 1.0** (Р.А. Мухамедшин, ИЯИ РАН) – феноменологическая модель адронных взаимодействий, созданная на основе современных теоретических представлений о кварк-глюонных струнах и позволяющая варьировать параметры сечений рождения адронов с чармом (во многом близкая к модели **QGSJETII**, за исключением x -спектров вторичных частиц, включая чармированные, которые оказались более мягкими в сравнении с последними данными **LHC**).
- МК код **ECSim 2.0** основан на программном пакете **GEANT 3.21** и позволяет вычислять отклик РЭК заданной конфигурации с учетом всех деталей экспериментальной методики, используемой в эксперименте “Памир”.

Новая методика обработки данных РЭК при анализе поглощения адронов в свинцовых калориметрах.

Стандартная методика эксперимента “Памир” включала:

Восстановление адронных каскадов в РЭК с использованием фотоденситометрических процедур, выполняемых на микрофотометрах с диафрагмами радиуса $R = 84 \mu\text{m}$;

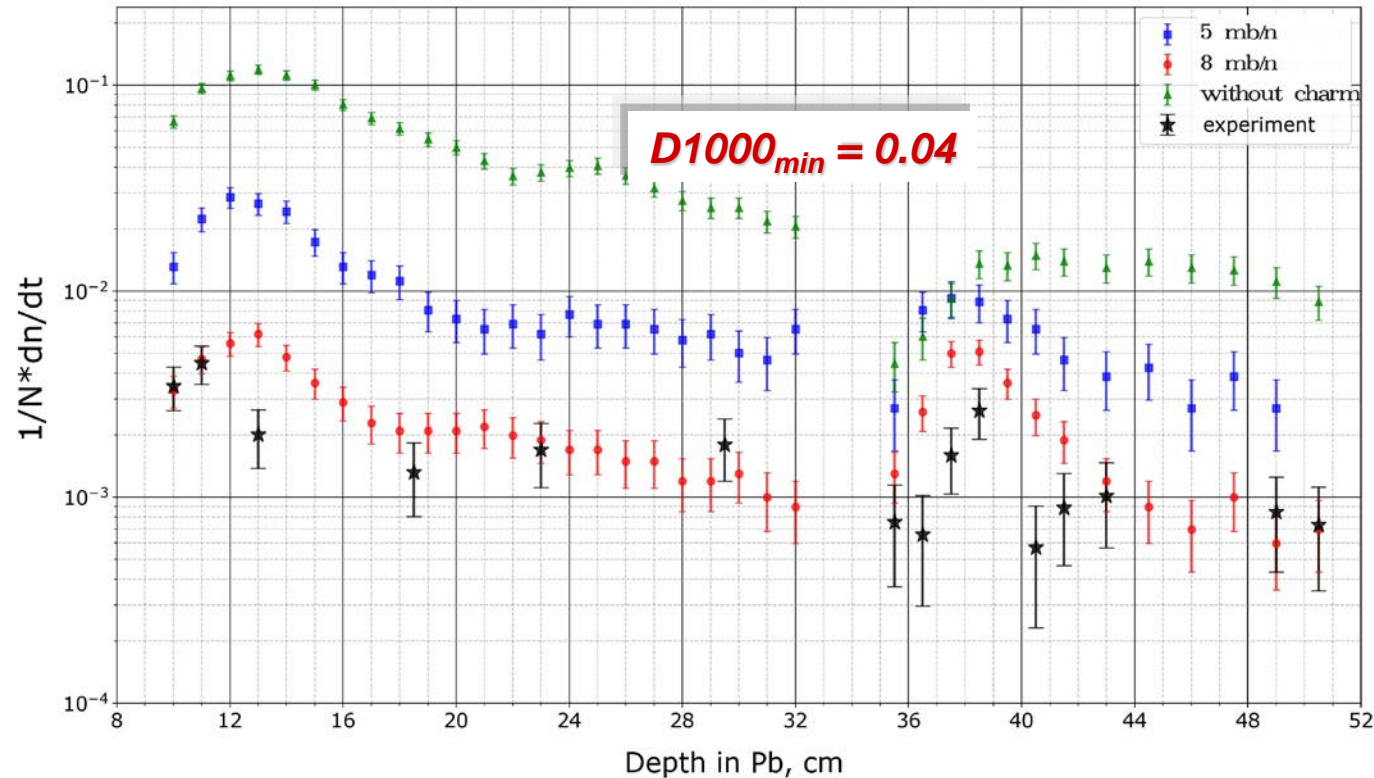
Новая методика: отбор и подсчет только отдельных пятен почернения на каждой пленке данного уровня наблюдения (глубины в камере) с помощью невооруженного глаза, усиленного лишь лупой.

Преимущества новой методики, подтвержденные моделированием:

- чувствительна к определению параметров кривой поглощения адронов;
- увеличивает статистику экспериментальных данных;
- не предполагает использование стандартной фотоизмерительной процедуры, что особенно важно, учитывая неопределенные денситометрические характеристики новых рентгеновских пленок, используемых в последних экспериментах;
- позволяет избежать неопределенности, связанные с восстановлением адронных каскадов (более устойчива к систематическим погрешностям).

Важно: наш анализ показал, что критерии отбора пятен потемнения в эксперименте дают такой же результат, что и при моделировании, если отбираются пятна с почернениями $D1000_{min} \geq 0.04$, определенными при “фотометрировании” с использованием диафрагмы большого радиуса ($R = 1 \text{ mm}$).

Чувствительность ТШ 2-ярусной РЭК к сечению рождения чармированных частиц



Доли нуклонов и пионов среди падающих частиц выбираются равными 60% и 40%, соответственно. Также учитывается угловое распределение падающих адронов.

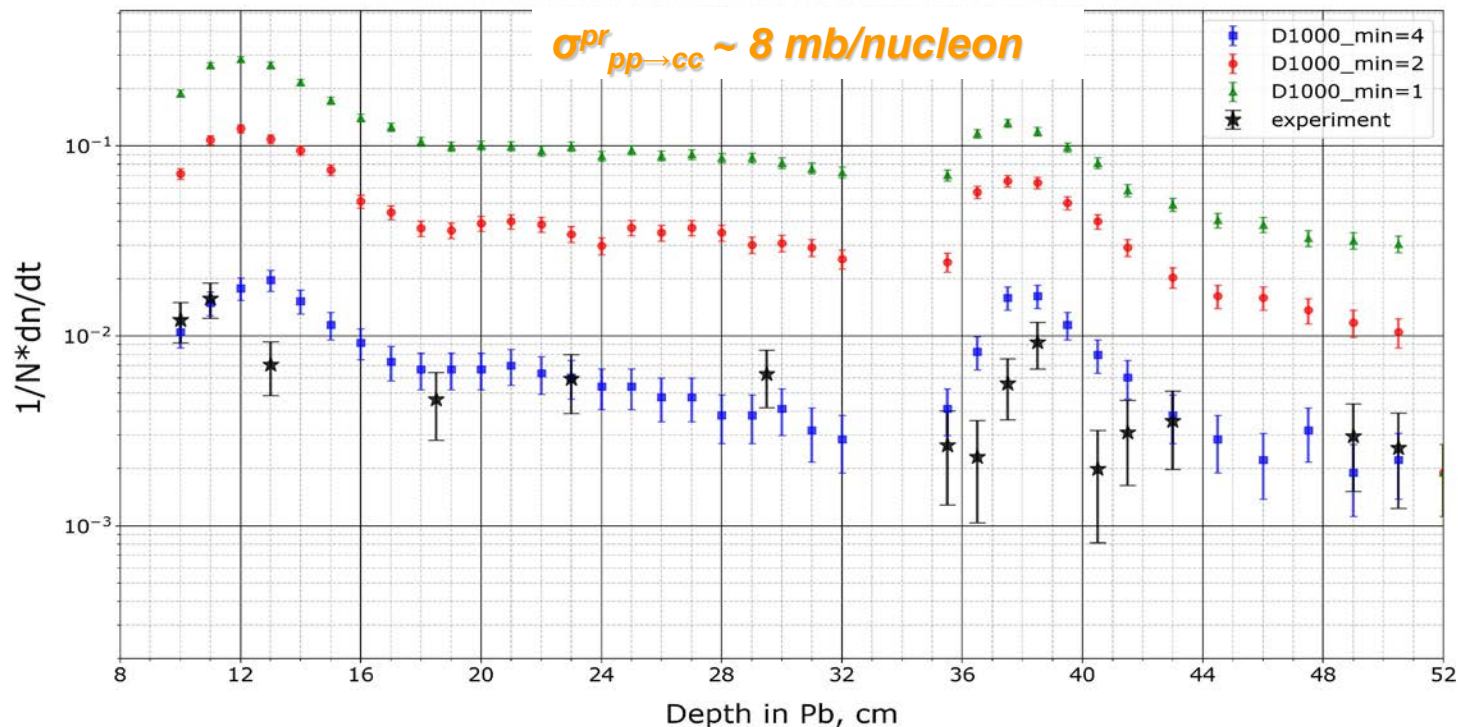
Распределение числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения в ТШ 2-РЭК, выраженной в см, для 3-х значений сечений рождения чарма $\sigma^{pr}_{pp \rightarrow cc} \approx 0/5/8 \text{ mb/n}$

Критерии отбора

Эксперимент: порог по оптической плотности $D1000_{min} = 0.04$

Моделирование: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой.

Сравнение ТШ экспериментальных данных (1-годовая экспозиция 2-ярусной РЭК) с различными сериями модельных расчетов



Доли нуклонов и пионов среди падающих частиц выбираются равными 60% и 40% соответственно. Также учитывается угловое распределение падающих адронов.

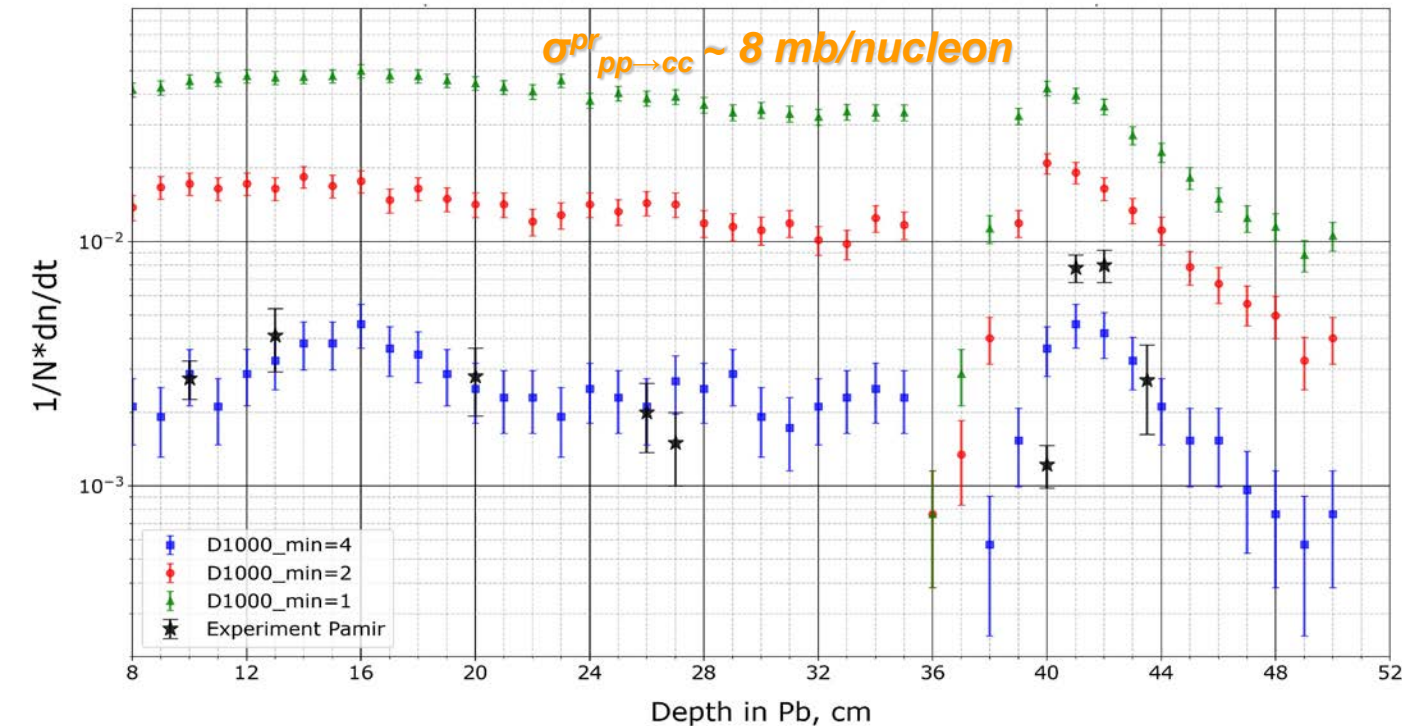
Распределение числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения в ТШ 2-РЭК, выраженной в см, для 3-х пороговых значений оптической плотности $D1000_{min} = 0.01/0.02/0.04$

Критерии отбора

Эксперимент: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой.

Моделирование: порог по оптической плотности $D1000_{min} = 0.01/0.02/0.04$

Результаты годичной экспозиции 2-ярусной РЭК на Памире в сравнении с модельными расчетами



Доли нуклонов и пионов среди падающих частиц выбираются равными 70% и 30%, соответственно. Также учитывается угловое распределение падающих адронов.

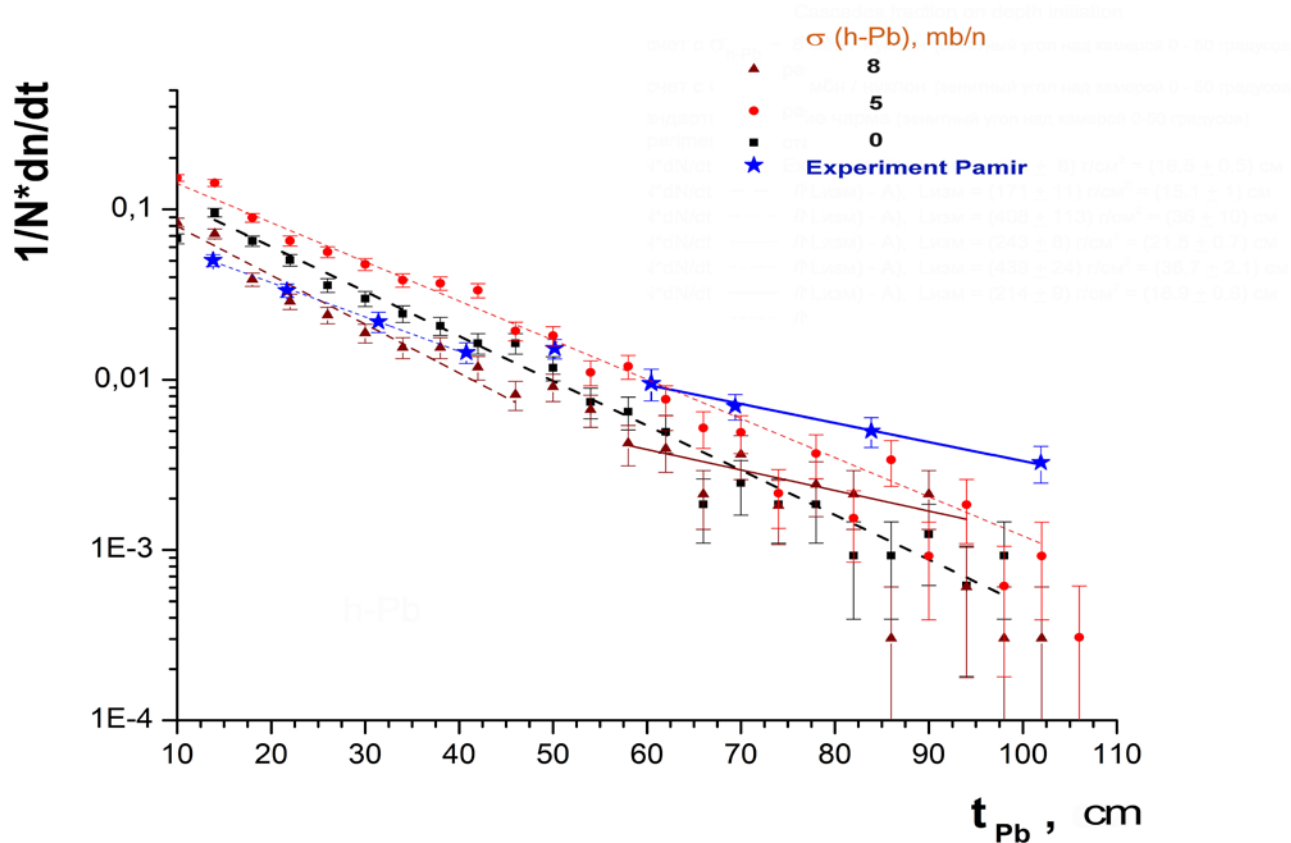
Распределение числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения в Памирской 2-РЭК, выраженной в см, для 3-х пороговых значений оптической плотности $D1000_{min} = 0.01/0.02/0.04$

Критерии отбора

Эксперимент: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой

Моделирование: порог по оптической плотности $D1000_{min} = 0.01/0.02/0.04$

Анализ экспериментальных данных, полученных с помощью глубокой однородной свинцовой РЭК толщиной 110 см на Памире

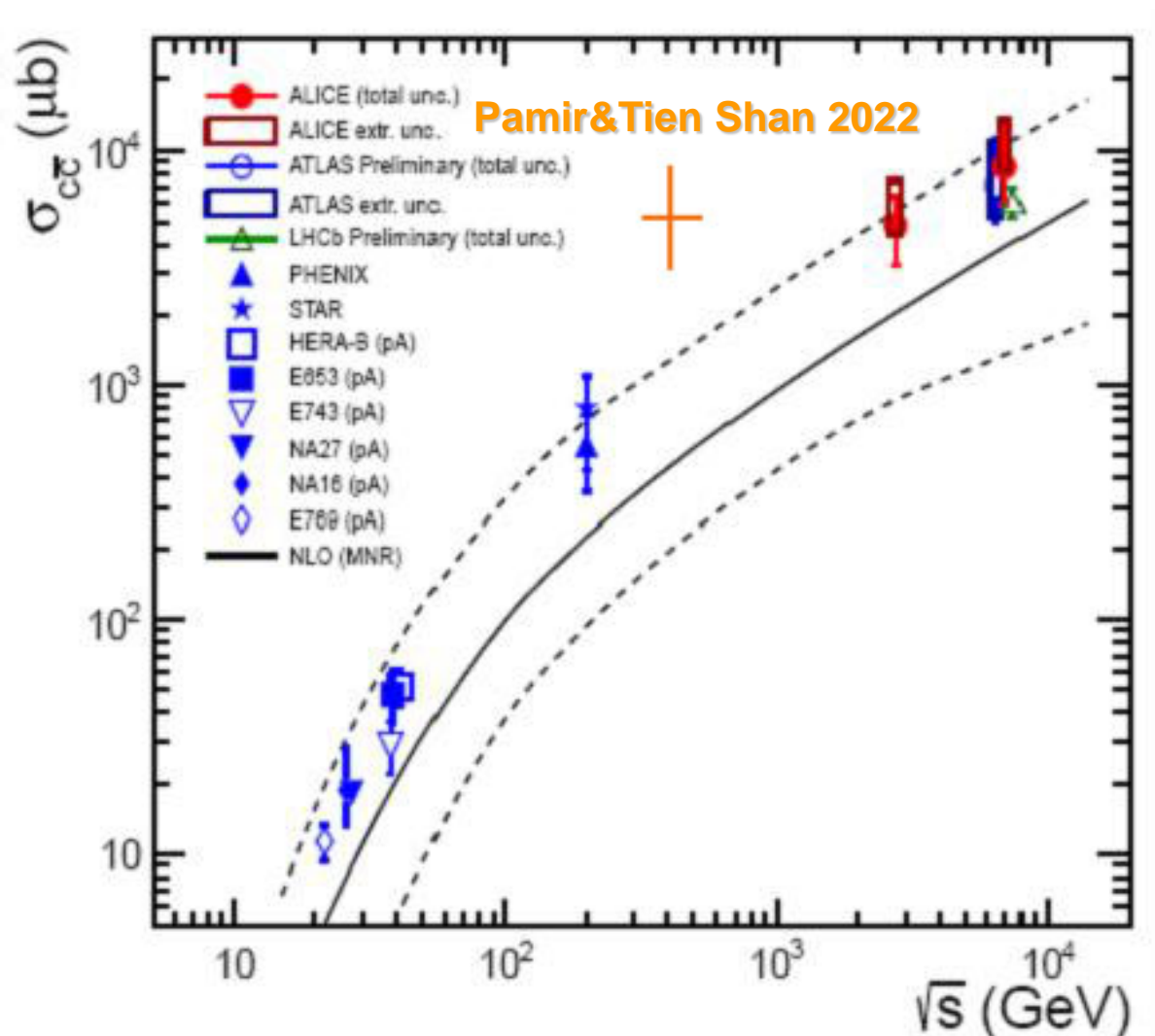


Распределение точек зарождения адронных каскадов в однородных РЭК. Экспериментальные точки представлены голубыми звездами. Модельные данные получены для $\sigma^{pp} \sim 8$ (треугольники), 6 (кружки) and 0 (квадраты) мбн/нуклон при $x_{\text{Lab}} \gtrsim 0.1$ в предположении, что доля нуклонов и пионов среди падающих частиц составляет 70% and 30% , соответственно.

Recent RHIC and LHC results

$$\sigma_{cc}^{\text{tot}}(2.76 \text{ TeV}) = 4.8 \pm 0.8 (\text{stat.})_{-1.3}^{+1.0} (\text{syst.}) \pm 0.06 (\text{BR}) \pm 0.1 (\text{FF.}) \pm 0.1 (\text{lum.})_{-0.4}^{+2.6} (\text{extr.}) \text{ mb.}$$

$$\sigma_{cc}^{\text{tot}}(7 \text{ TeV}) = 8.5 \pm 0.5 (\text{stat.})_{-2.4}^{+1.0} (\text{syst.}) \pm 0.1 (\text{BR}) \pm 0.2 (\text{FF.}) \pm 0.3 (\text{lum.})_{-0.4}^{+5.0} (\text{extr.}) \text{ mb.} \quad (12\% \sigma^{\text{inel}})$$



The total charm production cross section at $\sqrt{s} = 2.76$ and at 7 TeV was evaluated by extrapolating from the central rapidity range to the full phase space.

Simulations: perturbative-QCD calculations accounting for Next-to-Leading Order (NLO) corrections

Важное замечание.

В силу высокого энергетического порога ($E_{th} \geq 4 \text{ ТэВ}$), рентгеноэмульсионные эксперименты позволяют наблюдать рождение наиболее быстрых частиц в переднем кинематическом конусе ($x_{Lab} > 0.1$), т.е. они позволяют изучать фрагментационную область налетающей частицы, в которую выделяется подавляющая доля энергии при энергиях ЛНС:

!!! Эксперименты с РЭК должны рассматриваться как дополнительные по отношению к коллайдерным !!!

Выводы

- Калориметрические эксперименты в космических лучах с 2-ярусными РЭК достаточно чувствительны к сечению рождения чарма в переднем конусе, не доступном для наблюдения в коллайдерных экспериментах.
- Сечение рождения чармированных частиц в передней кинематической области ($x_{lab} \geq 0.1$)

$$\sigma_{pp \rightarrow \text{charm}} \sim 8 \text{ мбн/нуклон}$$

Важно: учет более реалистичных и жестких спектров возможно уменьшит эту величину

- Избыток адронных каскадов в глубине адронных калориметров может быть объяснен вкладом чармированных частиц только частично, дополнительными источниками этого избытка возможно являются странглеты или пучки высокоэнергичных прямых мюонов.

A scenic landscape featuring a range of mountains with prominent snow-capped peaks under a clear blue sky. In the foreground, a calm, deep blue lake stretches across the bottom of the frame. The middle ground shows brown, rocky slopes leading up to the base of the mountains.

Спасибо за внимание!