

МНОГОФАКТОРНАЯ ПРИРОДА АНОМАЛЬНО СЛАБОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АДРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В СВИНЦОВЫХ КАЛОРИМЕТРАХ

**Борисов А.С.¹, Каневская Е.А.¹, Коган М.Г.¹,
Мухамедшин Р.А.², Пучков В.С.¹, Ёрмамадов Ш.Г.³**

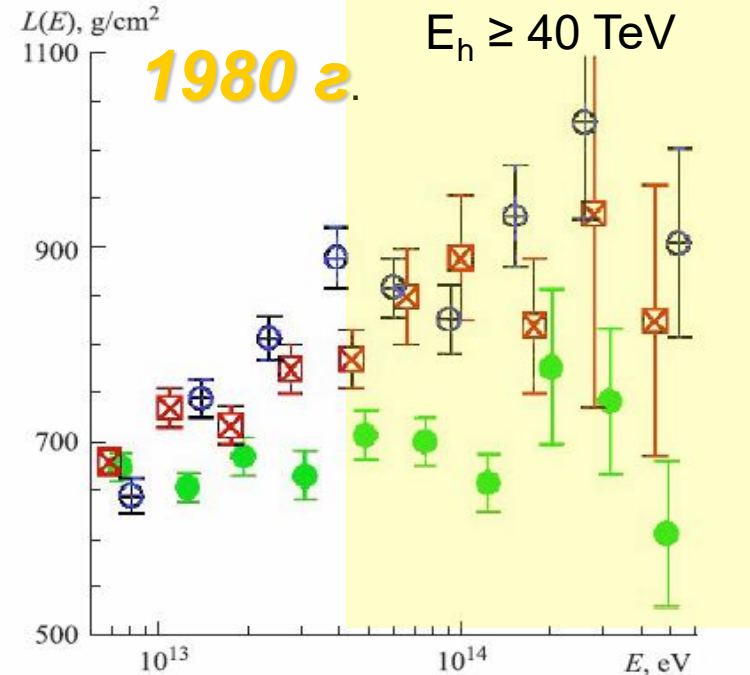
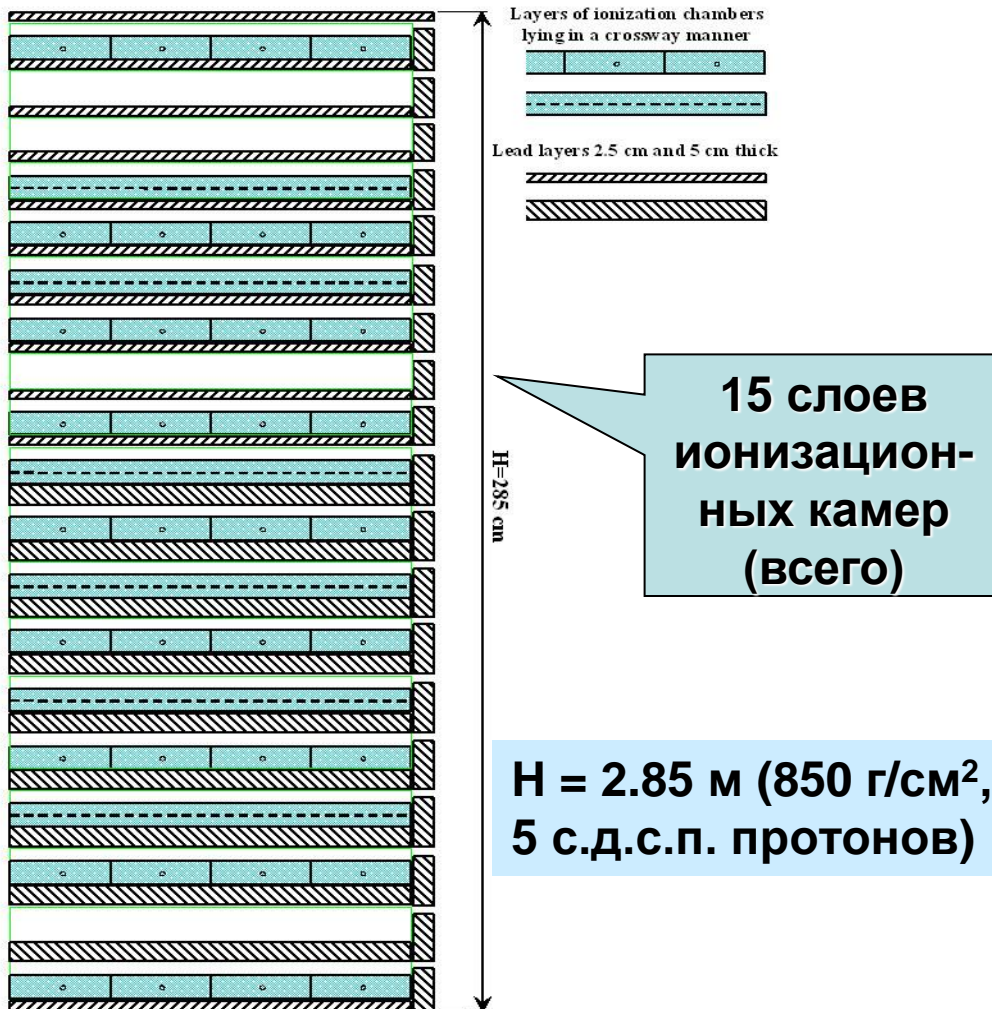
¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Россия,
Москва*

² *Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), Россия,
Москва*

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

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

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



Длина поглощения $L(E)$ 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 ($\sigma_{h \rightarrow c}^{prod} \approx 30\% \sigma_{hPb}^{inel}$).

Гипотеза: длиннопробежная компонента

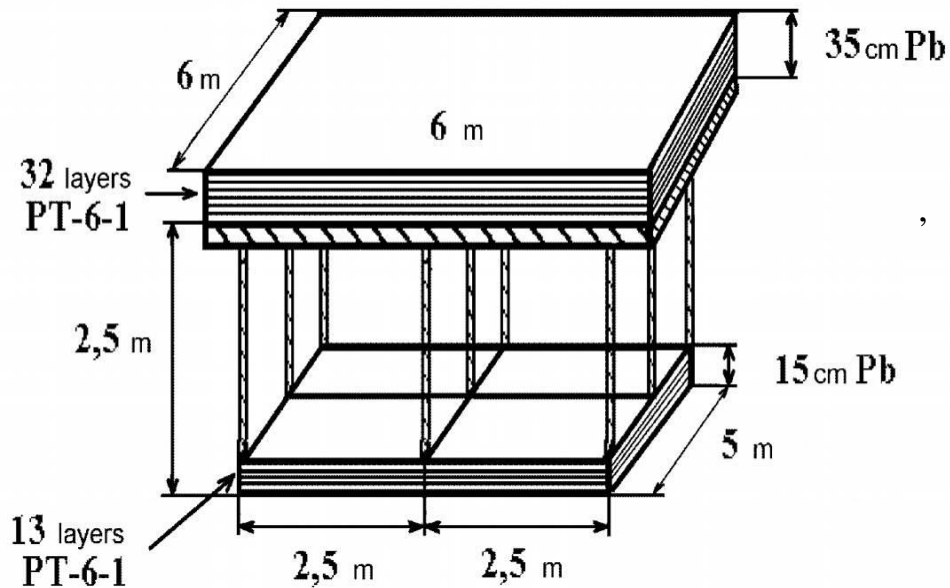
И.М.Дремин & В.И.Яковлев (ФИАН) предложили два возможных объяснения эффекту:

- **значительный вклад чармированных частиц ($D^{0\pm}$, Λ_c);**
(отметим: сечения рождения σ_c^{prod} at $\sqrt{s} < 20$ ГэВ, измеренные в то время на ускорителях, были слишком малы, а именно: $\sigma_c^{\text{prod}} \sim 10 \mu\text{b}$).
- **проявление кварковой странной материи, т.е., существование странглетов).**

Оба кандидата могут эффективно проносить энергию вглубь свинцового калориметра.

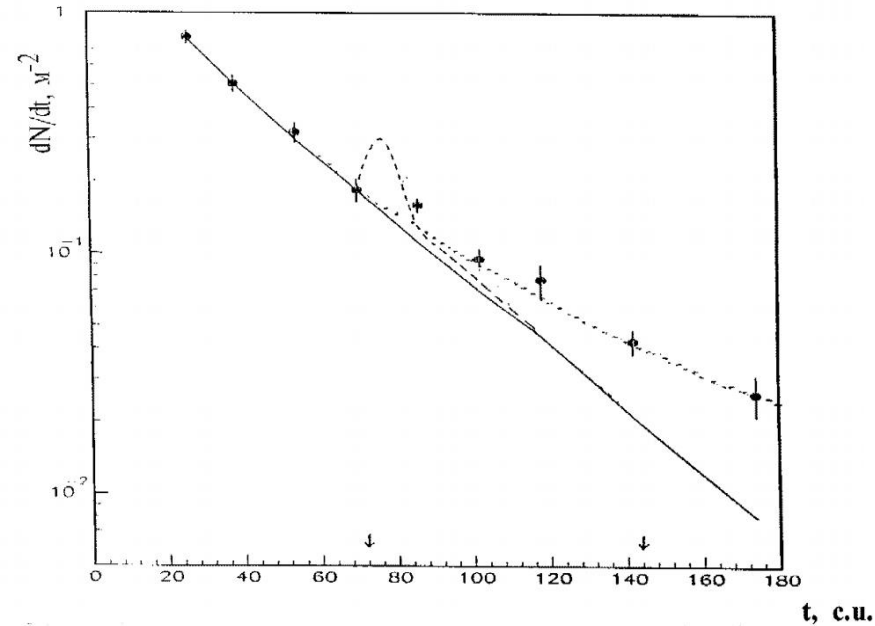
Конструкция 2-ярусной РЭК для проверки чармированной природы проникающих адронов

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

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 модели **QGSJETII** за исключением х-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 Pb-калориметрах.

Стандартная методика эксперимента “Памир” включала:

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

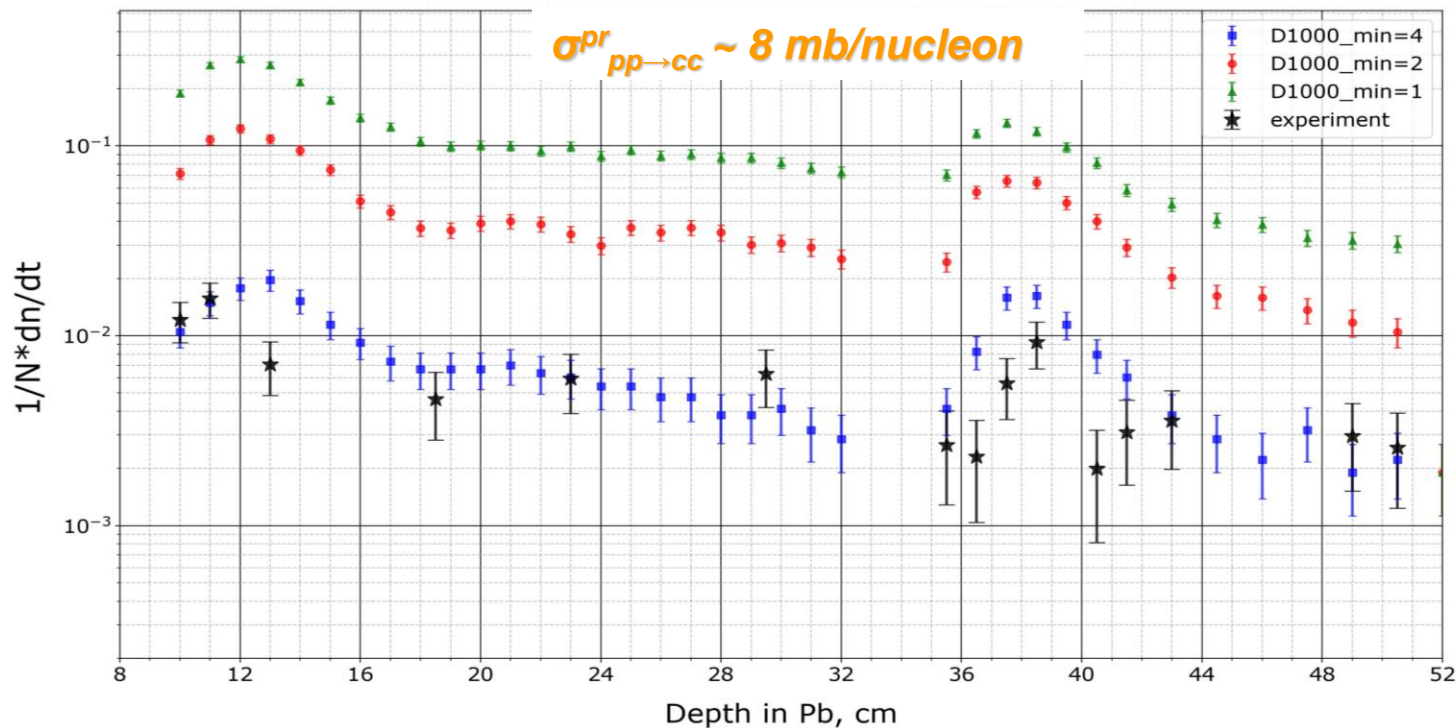
Новая методика: отбор и подсчет только отдельных пятен почернения только отдельных пятен почернения на каждой пленке данного уровня наблюдения (глубины слоя в камере) с помощью невооруженного глаза, усиленного лишь 2х лупой.

Преимущества новой методики, подтвержденные моделированием:

- высокая чувствительность к определению параметров кривой поглощения адронов;
- увеличивает статистику экспериментальных данных (повышает устойчивость к флуктуациям и ошибкам);
- не предполагает использование стандартной фотометрической процедуры, что особенно важно, учитывая неопределенные денситометрические характеристики новых рентгеновских пленок РТ-6Ф, 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 $D_{1000_{min}} \geq 0.04$, определенными при “фотометрировании” с использованием диафрагмы большого радиуса ($R = 1 \text{ мм}$).

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.

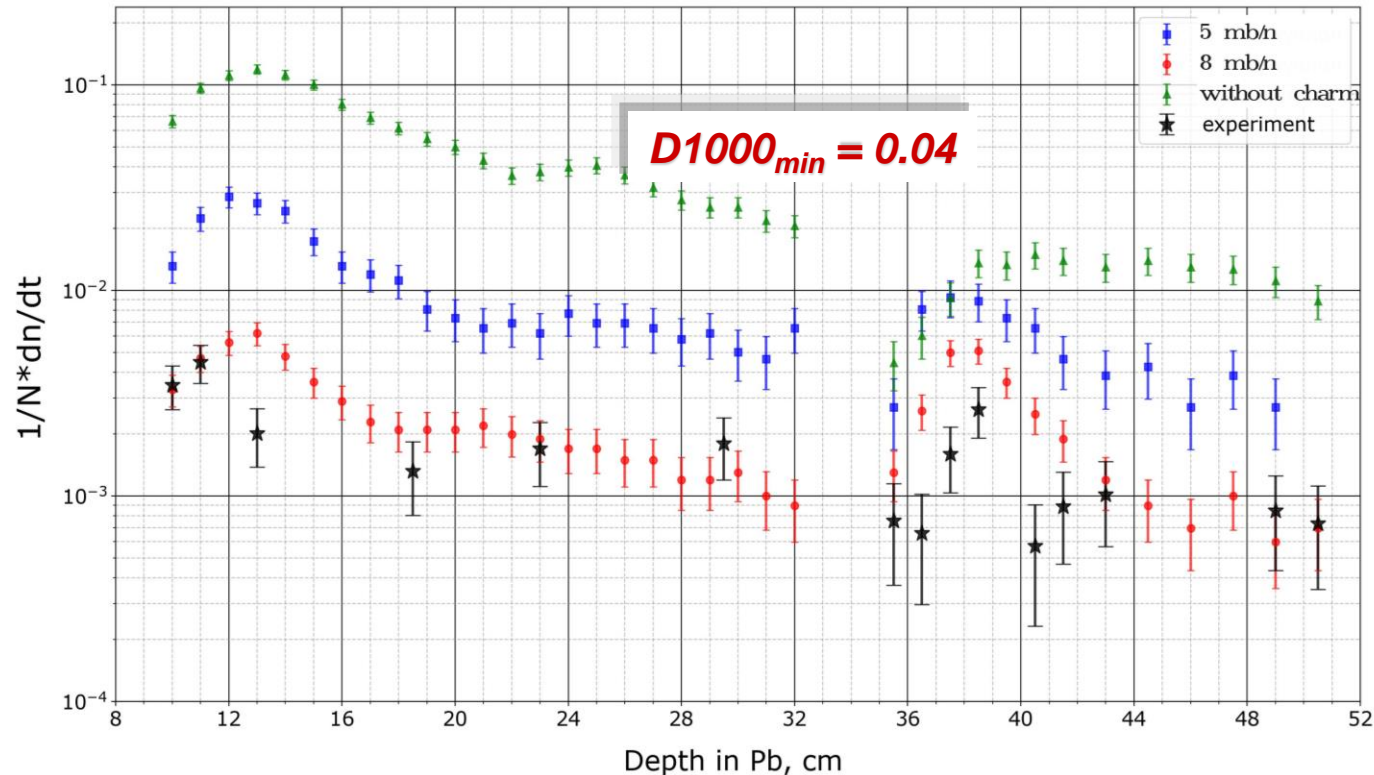
Распределение числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения в ТШ 2-РЭК, выраженной в см, для 3-х пороговых значений оптической плотности $D1000_{min} = 0.01/0.02/0.04$

Критерии отбора

Эксперимент: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой.

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

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.

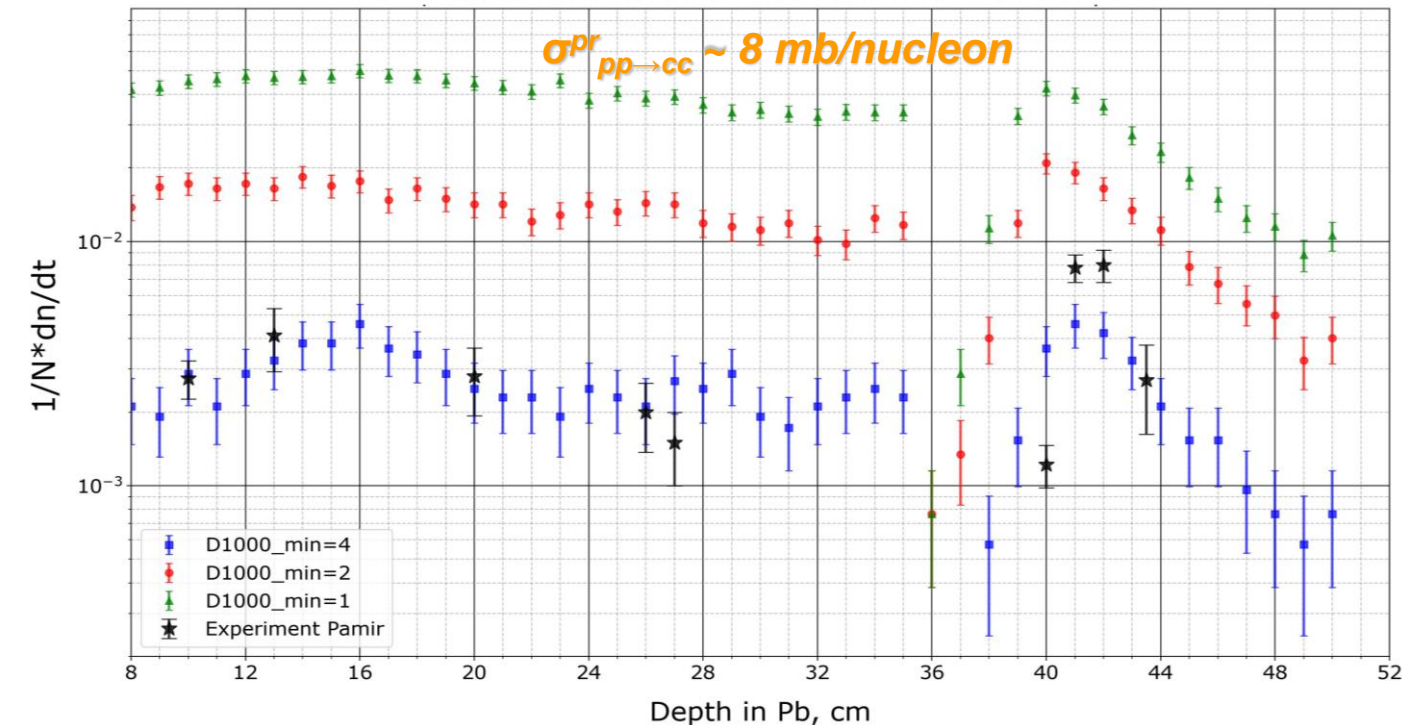
Распределение числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения в ТШ 2-РЭК, выраженной в см, для 3-х значений сечений рождения чарма $\sigma^{Pr}_{pp \rightarrow cc} \approx 0./5./8. \text{ mb/n}$

Критерии отбора

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

Моделирование: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой.

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.

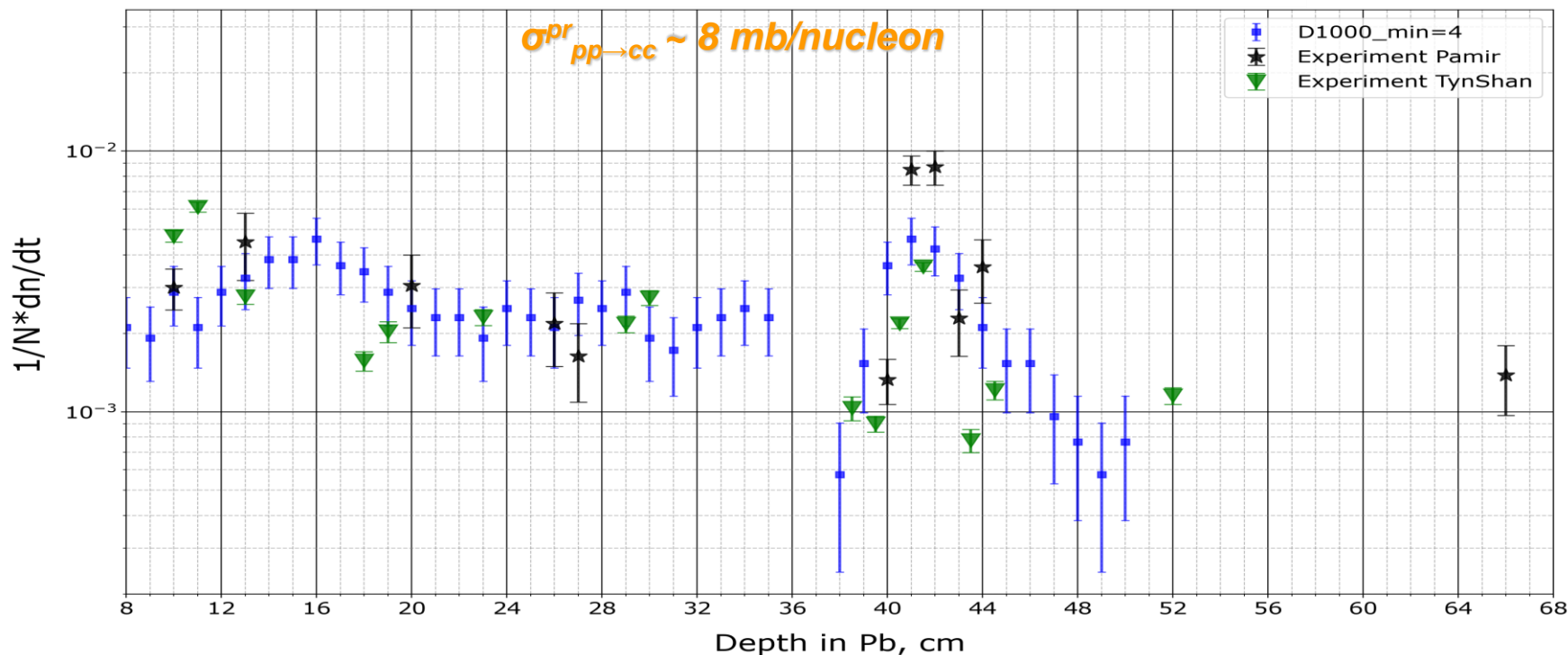
Распределение числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения в Памирской 2-РЭК, выраженной в см, для 3-х пороговых значений оптической плотности $D1000_{min} = 0.01/0.02/0.04$

Критерии отбора

Эксперимент: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой

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

Объединенные результаты экспозиции 2-ярусных РЭК на ТШВНС и на Памире в сравнении с модельными расчетами



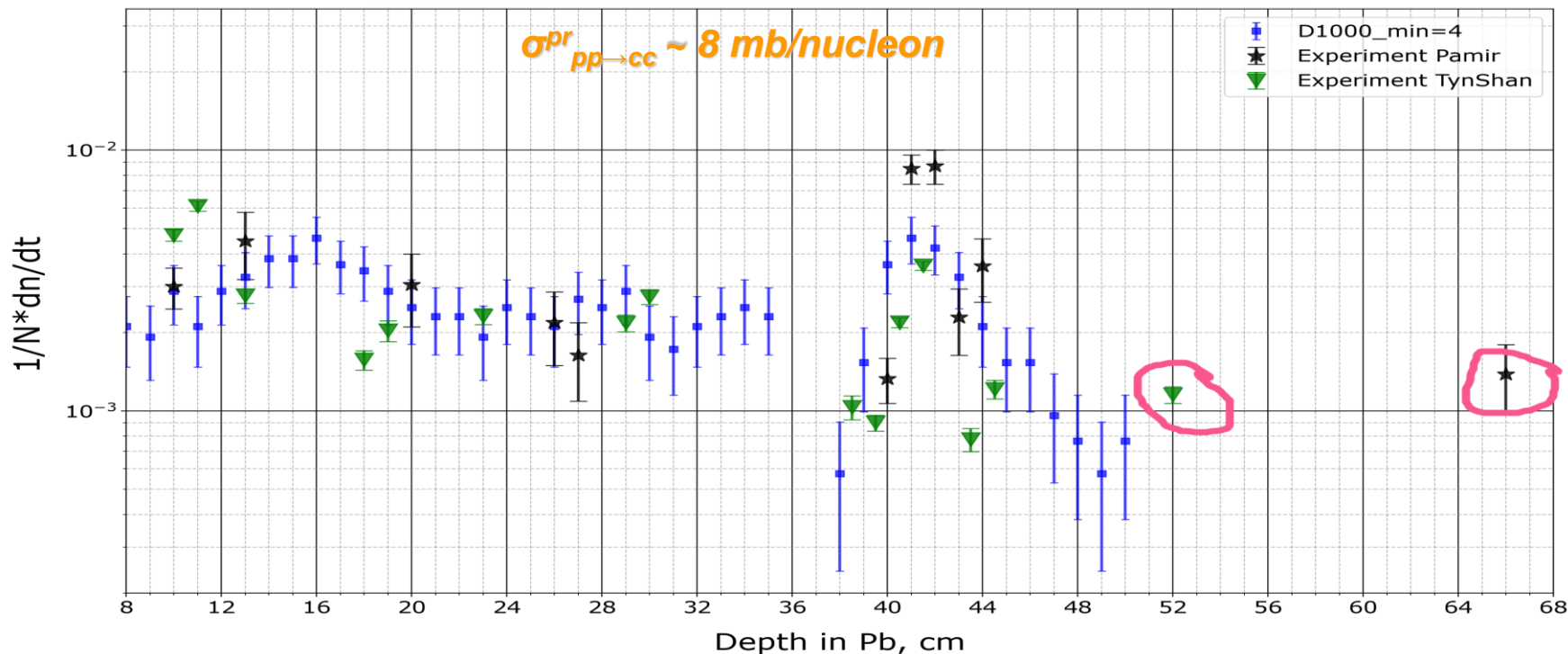
Распределения числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения, выраженной в см, в 2-РЭК обоих типов

Критерии отбора

Эксперимент: пятна почернения отбираются невооруженным глазом, усиленным лупой

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

Объединенные результаты экспозиции 2- ярусных РЭК на ТШВНС и на Памире в сравнении с модельными расчетами



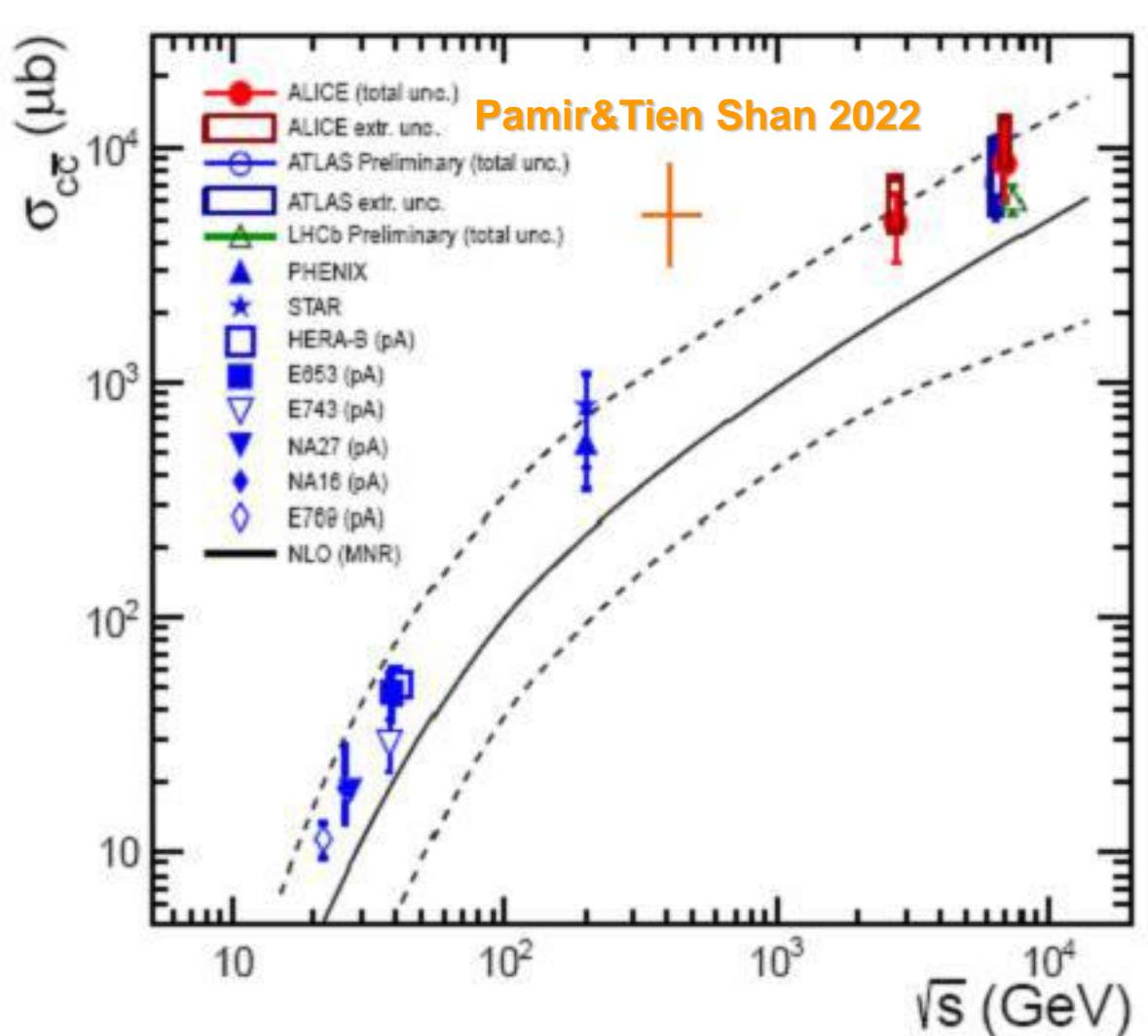
Распределения числа пятен потемнения, нормированное на одну пленку, по глубине t слоев наблюдения, выраженной в см, в 2-РЭК обоих типов

!!! Наблюдается значительный избыток адронов на предельно больших глубинах в обеих РЭК . !!!

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 ($E_{th} \geq 4 \text{ ТэВ}$), рентгеноэмulsionные 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.

Напротив, в коллайдерных экспериментах наблюдают лишь центральную кинематическую область рождающихся частиц и вынуждены экстраполировать свои данные в ненаблюдаемую ими переднюю фрагментационную область ('forward region'), где $x_F \geq 0.1$.

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

Выводы

- Характер и положение особенностей на кривых поглощения, полученных в обоих экспериментах с 2-ярусной РЭК и в результате модельных расчетов, хорошо согласуются друг с другом, что свидетельствует о правильной интерпретации данных экспериментов как наблюдение рождения и распада чармированных частиц.
- 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 ($x_{\text{lab}} \geq 0.1$)

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

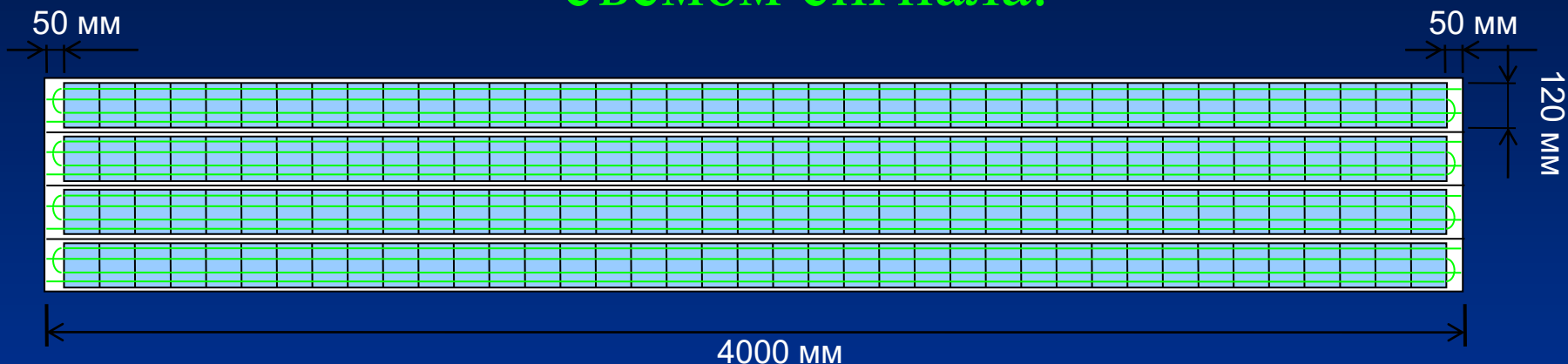
Важно: учет более реалистичных и жестких спектров возможно уменьшит эту величину

- Избыток адронных каскадов в глубине свинцовых калориметров может быть объяснен вкладом чармированных частиц только частично, дополнительными источниками этого избытка возможно являются странглеты, испускаемые странными кварковыми звездами, или пучки высокоэнергичных прямых мюонов, генерируемые очарованными адронами в атмосфере.

Перспективы:

- Продолжение исследований на ТШВНС, связанных с изучением особенностей поглощения высокоэнергичных адронов КЛ на больших глубинах свинцового поглотителя с помощью 2-ярусного сцинтилляционного/ионизационного калориметра.
- Модернизация 2-ярусной РЭК путем замены чувствительного элемента с р/пленки на протяженные (12 x 400 см) пластиковые сцинтилляционные счетчики с оптоволоконным съемом сигнала или ионизационные камеры.

Конструкция большеразмерных пластиковых сцинтилляционных счетчиков с оптоволоконным съемом сигнала.

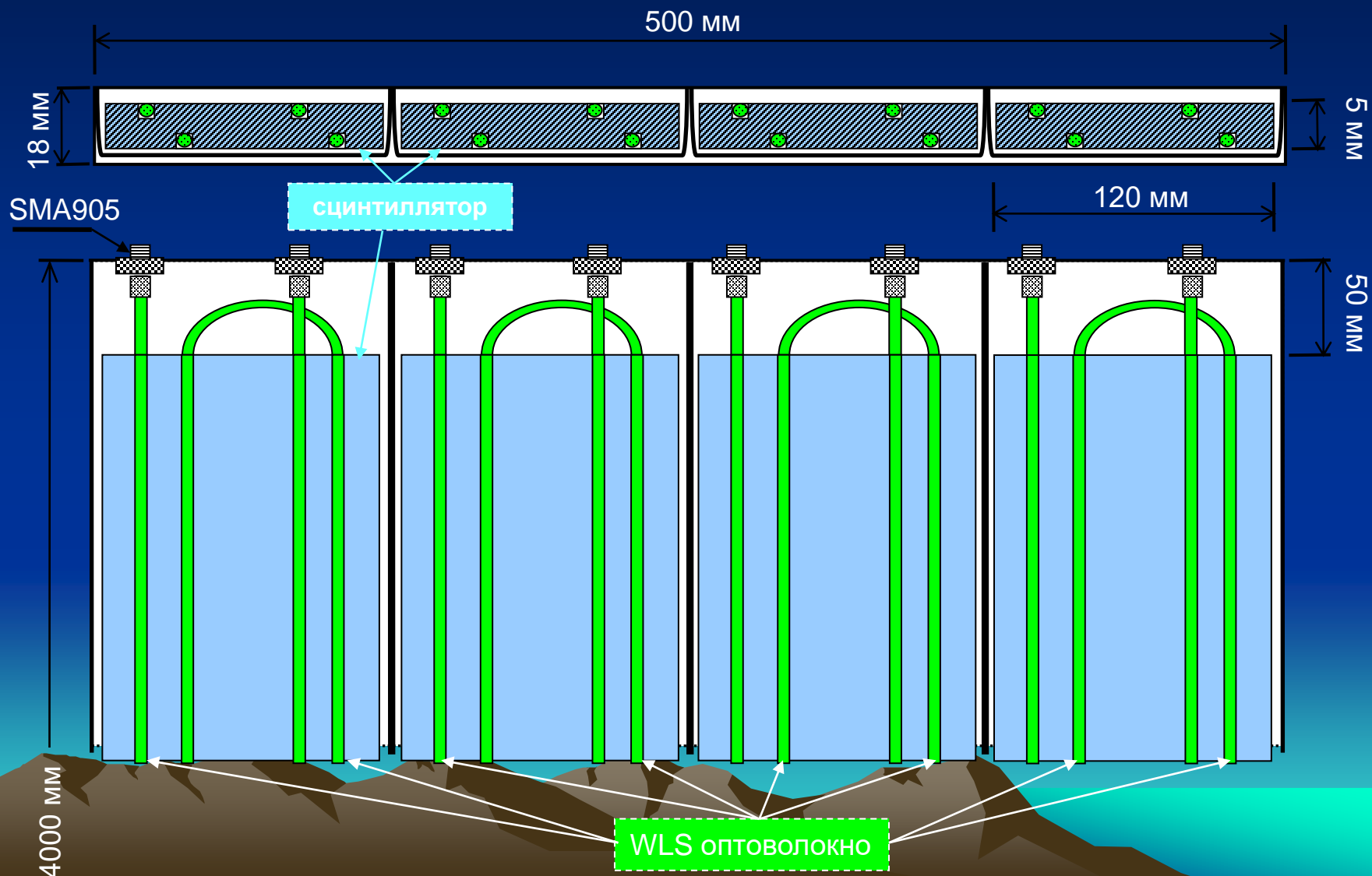


Расположение сцинтилляционных пластин размером $10 \times 12 \times 0.5 \text{ см}^3$ в модуле

На каждом торце модуля имеется по 8 (восемь) - по числу нитей оптоволоконна в модуле (4 x 2) – стандартных оптомеханических разъемов SMA 905, в которые заделываются концы каждого фибера для последующей передачи светового сигнала по экранированному кварцевому оптоволокну к фото-электронному преобразователю.

Преобразование оптических сигналов в электронно-цифровые будет происходить в удаленных термостатированных многоканальных низковольтных электронных блоках, основными компонентами которых станут современные pin-фотодиоды (либо кремниевые фотоумножители) и интегрированные с усилителями быстродействующие АЦП (предполагаемый разработчик – НПП “Пульсар”).

Конструкция большеразмерных пластиковых сцинтилляционных счетчиков с оптоволоконным съемом сигнала.



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!