

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется работа

**" Анализ экстремальных состояний ядерной материи в пространстве быстрот Лобачевского. Новое явление - направленное ядерное излучение "**

Раздел: Научно-методические работы

**Коллектив соавторов:**

1. Балдин А. А.
2. Балдина Э. Г.

**В представленный цикл работ входят 12 публикаций:**

1. А. А. Балдин, "Пространство Лобачевского в релятивистской ядерной физике", в трудах Международного семинара "Применение и развитие идей Лобачевского в современной физике" (25-27 февраля 2004 г., Дубна), стр. 103-116.
2. А. А. Baldin, E. G. Baldina, E. N. Kladnitskaya, O. V. Rogachevsky, "Analysis of experimental data on relativistic nuclear collisions in the Lobachevsky space", *Phys. Part. Nucl. Lett.* vol. 1, no. 4(121), pp. 7-16 (2004).
3. E. G. Baldina and A.A. Baldin, "Some Problems of Scaling and Self-Similarity in Relativistic Physics" GSI Report 2007 , ISSN:171-4546 , Изд:GSI Darmstadt, 2007.
4. A.A. Baldin, "Relativistic Multiparticle Interactions in Lobachevsky Geometry. Directed Nuclear Radiation", in proceedings of *XIX International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XIX)*, 29 September – 4 October 2008, JINR, Dubna, Russia, pp. 80–89.
5. A. Baldin, E. Baldina, "Self-Similarity Approach in Relativistic Nuclear Physics" GSI Report 2007-1 , ISSN:171-4546 , Изд:GSI Darmstadt, 194, 2007.
6. A. Baldin and E. Baldina, "Proton Acceleration by High Intensity Laser Field. Self-Similarity Description", GSI Report 2009 , ISSN:171-4546 , Изд:GSI Darmstadt, 2009.
7. A. Baldin and E. Baldina, "Directed Nuclear Radiation", GSI Scientific Report (2009), ISSN:171-4546 , Изд:GSI Darmstadt, p. 420.
8. Baldin, A.A. "Collective Effects in Relativistic Nuclear Physics: Historic Survey and Prospects", XX International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (Baldin ISHEPP XX), Dubna, Russia, Oct.4-9, 2010.- Dubna: JINR, 2010.-p.23.
9. E.G. Baldina, A.A. Baldin, "Relativistically invariant self-similarity approach for description of collective phenomena", EPJ Web Conf. 138 (2017), 05001.
10. Anton A. Baldin, "The ideas of A.M. Baldin on overcoming the reductionism principle in relativistic physics", EPJ Web Conf. 204 (2019), 01001.
11. E.G. Baldina, A.A. Baldin, "Self-similarity approach for prediction and analysis of experiments at the accelerator complex NICA", EPJ Web Conf, 204 (2019), 07003.
12. E. Baldina, A. Baldin, "Lobachevsky space in analysis of relativistic nuclear interactions. New phenomenon—directed nuclear radiation", JINST 15 (2020) C04041.

## **Аннотация**

Анализ релятивистских ядерных столкновений с использованием свойств пространства относительных 4-скоростей и пространства быстрот (пространства Лобачевского) позволил установить связь между геометрическими соотношениями в пространстве Лобачевского и измеряемыми (определяемыми из эксперимента) кинематическими характеристиками.

На основе обработки экспериментальных данных, полученных с помощью пузырьковых камер, обнаружено новое явление – направленное ядерное излучение. Показана связь между основным понятием геометрии Лобачевского - углом параллельности - и экспериментально наблюдаемым направленным ядерным излучением.

Представлены формулы для расчета угловых и импульсных характеристик направленного ядерного излучения для экспериментов с фиксированными мишенями и экспериментов коллайдерного типа.

Найдены общие универсальные свойства распределений частиц в релятивистски инвариантных переменных, характеризующих геометрическое расположение частиц в пространстве Лобачевского.

Использование трехмерного пространства быстрот позволило ввести единообразные релятивистски инвариантные критерии отбора частиц по жесткости взаимодействия. Так, вместо четырех параметров, выделяющих стриппинговые и испарительные нуклоны, достаточно использовать единственный релятивистски инвариантный параметр, определяемый углом между быстротами в пространстве Лобачевского. Использование таких характеристик распределений частиц в пространстве Лобачевского, как дефект, периметр позволяет отбирать частицы, рожденные при помощи различных механизмов. На основе данного подхода предложен релятивистски инвариантный метод выделения струй.

Использование свойств пространства Лобачевского, и в особенности отсутствия геометрического подобия (в отличие от геометрии Евклида), позволило сделать вывод о существовании распределения частиц, образующих треугольники с максимальным отношением площади к периметру. Диапазон быстрот для таких выделенных конфигураций рожденных частиц соответствует так называемой промежуточной области энергий, на изучение которой нацелен ускорительный комплекс NICA ОИЯИ.

## **Результаты, полученные в рамках представленного цикла работ:**

Стремление найти простые законы природы, на основе которых можно объяснить максимально возможное число явлений, играет весьма прогрессивную роль одного из основных принципов фундаментальной науки. Важным этапом в построении теорий является выбор пространства переменных, которые используются для описания явления.

В настоящее время теория ядерных взаимодействий далека от завершенности. По сути, она представляет набор феноменологических моделей и подходов, описывающих имеющиеся экспериментальные данные. Наиболее сложной с точки зрения возможности теоретического описания экспериментальных исследований, на наш взгляд, является

область перехода от описания ядерной материи в терминах протон-нейтронной модели ядра к области, где существенно возбуждение внутренних кварк-глюонных степеней свободы нуклонов.

Релятивистская ядерная физика, возникшая на стыке физики элементарных частиц и физики ядра, нуждается в выборе математически адекватного пространства для изучения процессов взаимодействия и образования частиц. Таким пространством является трехмерное пространство быстрот, соответствующее пространству Лобачевского. Простейшая проекция пространственной быстроты частицы на ось реакции широко используется как в анализе, так и в представлении экспериментальных данных.

Изучение свойств пространства 4-мерных скоростей позволяет формулировать общие закономерности распределений частиц, разрабатывать релятивистски-инвариантные алгоритмы анализа множественного рождения частиц и накладывает ряд ограничений на разрабатываемые модели описания релятивистских столкновений. Применениям геометрии Лобачевского в физике посвящены многолетние исследования (см., например, [1-4]).

### ***Общие характеристики распределений частиц по относительным скоростям.***

При изучении ядерных реакций измеримыми величинами являются импульс, угол, тип регистрируемой частицы, энергия столкновения, сечение реакции и производные от них величины.

В основе определения инвариантной массы, быстроты  $\rho$  и инвариантного сечения

лежит релятивистски инвариантная измеримая скалярная величина  $\frac{P_i P_j}{m_i m_j}$ , где  $P_i, P_j$  – 4-импульсы частиц  $i$  и  $j$ , а  $m_i, m_j$  – их массы.

Быстроты  $\rho$  образуют метрическое пространство – пространство Лобачевского. Изучение свойств этого пространства необходимо для понимания связи 4-мерного пространства энергия-импульс и трехмерного Евклидова пространства, в котором проводятся эксперименты.

Геометрия Лобачевского 3-мерного пространства быстрот определяется на верхней части двухполостного гиперboloида (1). Соотношения между компонентами 4-скорости и быстротами следующие:

$$U^0 = \text{ch } \rho ; |U| = \text{sh } \rho \quad (1)$$

Таким образом, связь энергии, импульса и массы частицы  $E^2 - \vec{p}^2 = m^2$  в пространстве быстрот выглядит следующим образом:  $(\text{ch } \rho)^2 - (\text{sh } \rho)^2 = 1$ .

Быстрота частицы в лабораторной системе отсчета может быть выражена через измеримые величины:

$$\rho = \frac{1}{2} \ln \frac{E + |\vec{p}|}{E - |\vec{p}|} \quad (2)$$

Свойство независимости инклюзивных сечений рождения  $\pi$ -мезонов от множественности было отмечено в [5]. Независимость распределений экспериментально наблюдаемых характеристик частиц от множественности указывает на преобладание механизма независимых нуклон-нуклонных соударений при множественной генерации частиц. Это общее свойство распределений должно быть учтено при создании моделей ядро-ядерные столкновений и при планировании экспериментов, нацеленных на изучение экзотических состояний ядерной материи (кварк-глюонной плазмы и других коллективных эффектов).

Зависимости полных сечений взаимодействия  $\pi$ -мезонов, К-мезонов, протонов от быстроты между налетающей частицей и мишенью приведены на Рис. 1 [6]. Интервал быстрот от 1 до 4, соответствующий импульсу налетающего ядра от 1 до 25 АГэВ/с, определяет переходную область энергий между классической ядерной физикой и квантовой хромодинамикой.



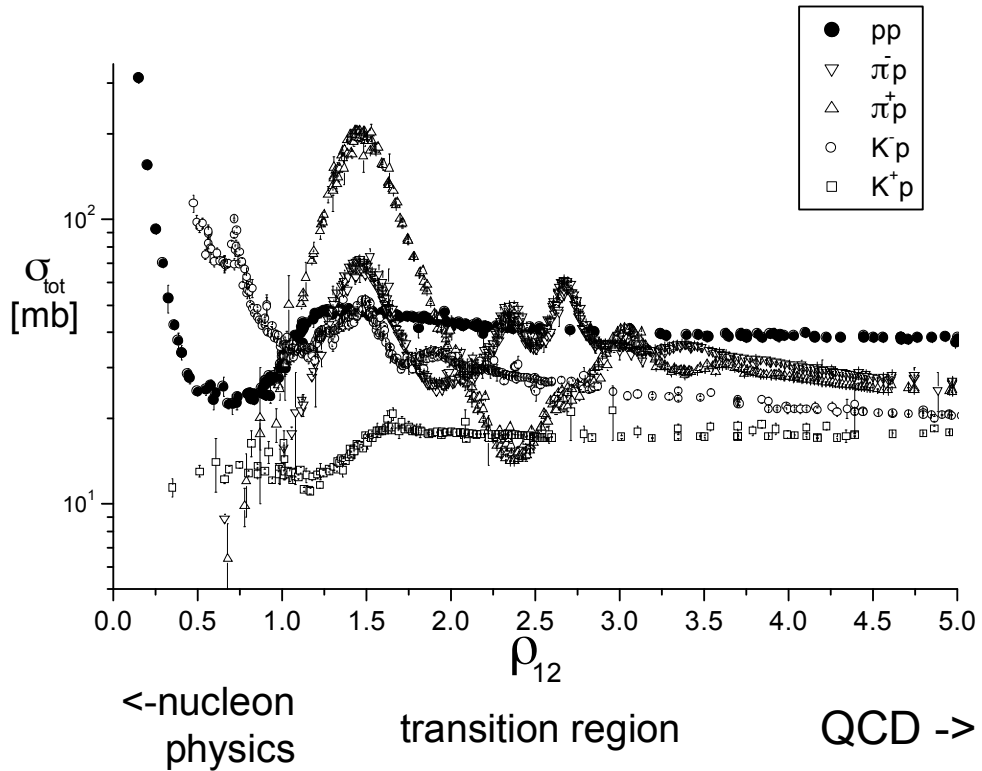


Рис. 1. Полные сечения взаимодействия  $\pi$ -мезонов,  $K$ -мезонов, протонов, как функции относительной быстроты частица-мишень. Данные взяты из [6].

Таким образом, учет неевклидовости пространства скоростей существенен уже при сравнительно малых энергиях адронов (начиная с сотен МэВ) и, следовательно, нерелятивистские механистические образы, использующие понятия об изотропии, термализации и т.п. имеют принципиальные ограничения, связанные с выбором системы отсчета.

### ***Геометрические характеристики распределений частиц в пространстве быстрот.***

Рассмотрение свойств частиц в пространстве  $\rho_{ik}$  является более полным, чем рассмотрение продольной и поперечной проекций этих интервалов. В литературе часто используется представление экспериментальных данных в зависимости от продольной быстроты (проекция на ось реакции) и поперечного импульса (или поперечной массы). Продольная быстрота определяется

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_{||}}{E - p_{||}} \quad , \quad (3)$$

а поперечная масса

$$m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}, \quad (4)$$

где  $p_T$  - поперечный импульс частицы.

Определим поперечную быстроту  $\tau$

$$\text{ch } \tau = \frac{m_T}{m}, \quad (5)$$

Полная быстрота  $\rho$  связана с продольной и поперечной быстротами теоремой Пифагора в пространстве Лобачевского:

$$\text{ch } \rho = \text{ch } y \cdot \text{ch } \tau \quad (6)$$

Свойства пространства накладывают определенные ограничения на область изменения быстрот (следствие метрических характеристик треугольников, построенных из быстрот):

$$\left(\rho_{23}\right)_{\min}^{\max} = |\rho_{12} \pm \rho_{13}|; \quad \left(\rho_{13}\right)_{\min}^{\max} = |\rho_{12} \pm \rho_{23}|; \quad \left(\rho_{12}\right)_{\min}^{\max} = |\rho_{23} \pm \rho_{13}| \quad (7)$$

Простейшим элементом в пространстве является треугольник. Приведем основные соотношения для треугольника, вершинам которого соответствуют быстроты частиц в пространстве Лобачевского (см. Рис.2).

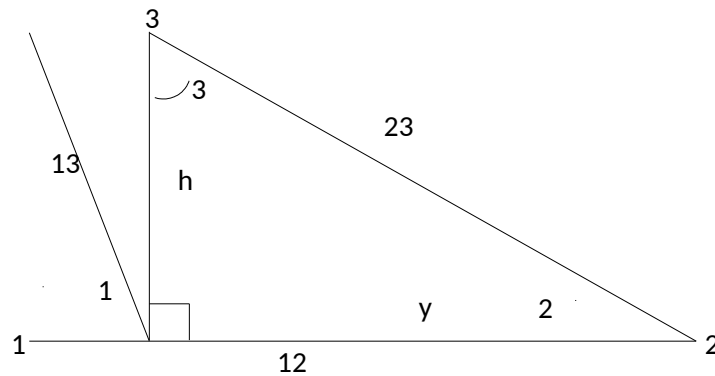


Рис. 2. Симплекс в пространстве Лобачевского. Частицы с быстротами  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  соответствуют вершинам треугольника 123. Стороны треугольника  $\rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{23}$  являются относительными быстротами частиц 1, 2, 3. Если 2 – мишень, покоящаяся в лабораторной системе, тогда угол  $\alpha_2$  равен углу зарегистрированной частицы в лабораторной системе.

Для определения соотношений между сторонами и углами треугольников можно использовать теорему косинусов:

$$ch(\rho_{12}) = ch(\rho_{13}) \cdot ch(\rho_{23}) - sh(\rho_{13}) \cdot sh(\rho_{23}) \cdot \cos(\alpha_3) \quad (8)$$

и теорему синусов:

$$\frac{sh(\rho_{12})}{\sin(\alpha_3)} = \frac{sh(\rho_{13})}{\sin(\alpha_2)} = \frac{sh(\rho_{23})}{\sin(\alpha_1)} \quad (9)$$

Отметим, что высота треугольника  $h$  (см. Рис. 2) определяется

$$sh(h) = sh(\rho_{23}) \cdot \sin(\alpha_2) = sh(\rho_{13}) \cdot \sin(\alpha_1)$$

Таким образом, высота  $h$  совпадает с поперечной быстротой  $\tau$  частицы 3, т.е. является безразмерной релятивистски инвариантной характеристикой поперечного движения.

Обычно при анализе экспериментальных данных зарегистрированные частицы разделяют по критерию «жесткости» взаимодействия. Например, «испарительные» протоны с импульсами менее 300 МэВ относительно мишени и «стрипинговые» протоны, имеющие импульсы, близкие к импульсам налетающей частицы, и лабораторные углы регистрации меньше, например,  $4^\circ$ , относят к результатам «мягких взаимодействий». Рассматривая события в пространстве быстрот, для подобной классификации можно применить единообразный релятивистски инвариантный критерий отбора по удаленности регистрируемой частицы по быстройте как от налетающего ядра, так и от ядра мишени, которая для «мягких процессов» соответствует быстройте  $\sim 0.3$ .

Отметим, что такое релятивистски инвариантное рассмотрение применимо ко всем и относительно всех зарегистрированных частиц, а также, вообще говоря, ко всем точкам пространства быстрот, а не только к двум точкам, соответствующим быстройтам сталкивающихся объектов. Такое рассмотрение особенно актуально при анализе множественного рождения частиц для их возможного разделения на группы (парные корреляции, кластеры, струи, и т.д.).

В любой проективной геометрии, которой является и геометрия Лобачевского, справедлив принцип двойственности, согласно которому утверждения, сформулированные на основе понятия длины отрезков между точками, эквивалентны утверждениям на основе понятия углов между направлениями лучей.

Так, использование углов треугольников в пространстве быстрот позволяет выделять взаимодействия по степени «жесткости». На Рис. 3 представлены распределения протонов по расстояниям  $\rho_{23}$  при отборе по углу  $\alpha_1$  (см. Рис. 2). Области  $\rho_{23}$  в районе 0 и 3, соответствующие областям фрагментации мишени и налетающего ядра, могут быть выделены при помощи отбора по углу между быстротами  $\alpha_1$ .

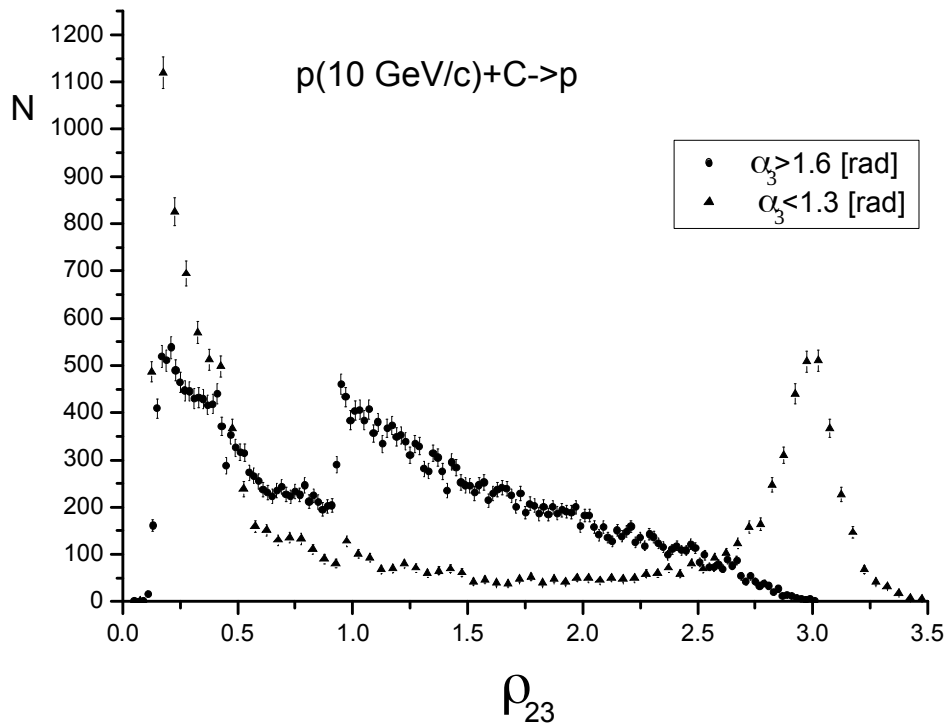


Рис. 3. Распределения  $\rho_{23}$  протонов, отобранных в двух интервалах угла  $\alpha_3$  :  $\alpha_3 > 1.6$  радиан и  $\alpha_3 < 1.3$  радиан в реакции  $p(10\text{GeV}/c)+C$ .

Треугольник характеризуется дефектом, который прямо пропорционален его площади (коэффициент пропорциональности равен квадрату кривизны пространства):

$$defect = \pi - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 \quad (10)$$

Дефект является скалярной характеристикой взаимного расположения троек частиц в пространстве быстрот. Приведем распределение величин дефектов треугольников, образованных всеми возможными тройками зарегистрированных протонов и  $\pi$ -мезонов при взаимодействии протонов с импульсом 10 GeV/c с углеродом (Рис. 4).

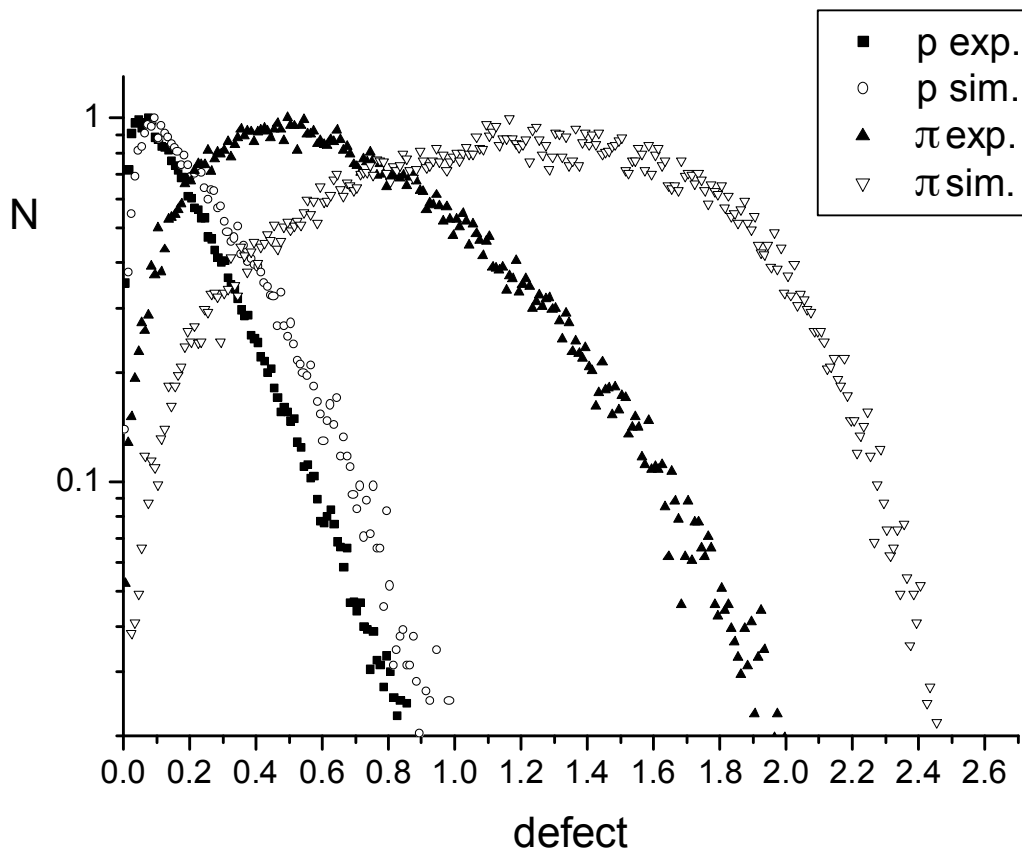


Рис. 4. Нормированные распределения дефектов треугольников, образованных всеми комбинациями протонов и всеми комбинациями  $\pi$ -мезонов, зарегистрированных в реакции  $p(10\text{GeV}/c)+C$ , в сравнении с моделью.

Распределение дефектов троек протонов, как видно из рисунка, имеет вид экспоненциальной функции, т.е. вероятность обнаружить три частицы, «далеко» друг относительно друга (в пространстве быстрот), падает экспоненциально. При этом протоны, полученные с помощью широко используемой в настоящее время модели RQMD [7], практически совпадают с экспериментальными. Распределение троек пионов имеет другой вид – тройки пионов образуют треугольники большей площади в пространстве быстрот, по сравнению с протонами. Отметим, что модель адекватно воспроизводит инклюзивные спектры как протонов, так и пионов. Однако, для конфигураций троек пионов имеются существенные отличия от экспериментальных данных.

Множественная генерация частиц происходит при приближении скоростей их относительного движения к скорости света. Это наводит на размышление о том, что сама проблема возникновения (рождения) частиц может быть рассмотрена с позиций

принципиального ограничения возможности экспериментального наблюдения, обусловленного трехмерностью Евклидова пространства. Связь между 4-мерным пространством Минковского, на основе которого формулируются законы сохранения энергии и импульса, и 3-мерного пространства Евклида, в котором проводится эксперимент, осуществляется при помощи пространства Лобачевского.

Важно подчеркнуть, что в отличие от Евклидова пространства, в пространстве Лобачевского отношение площадей треугольников к периметрам ограничено (см. Рис. 5).

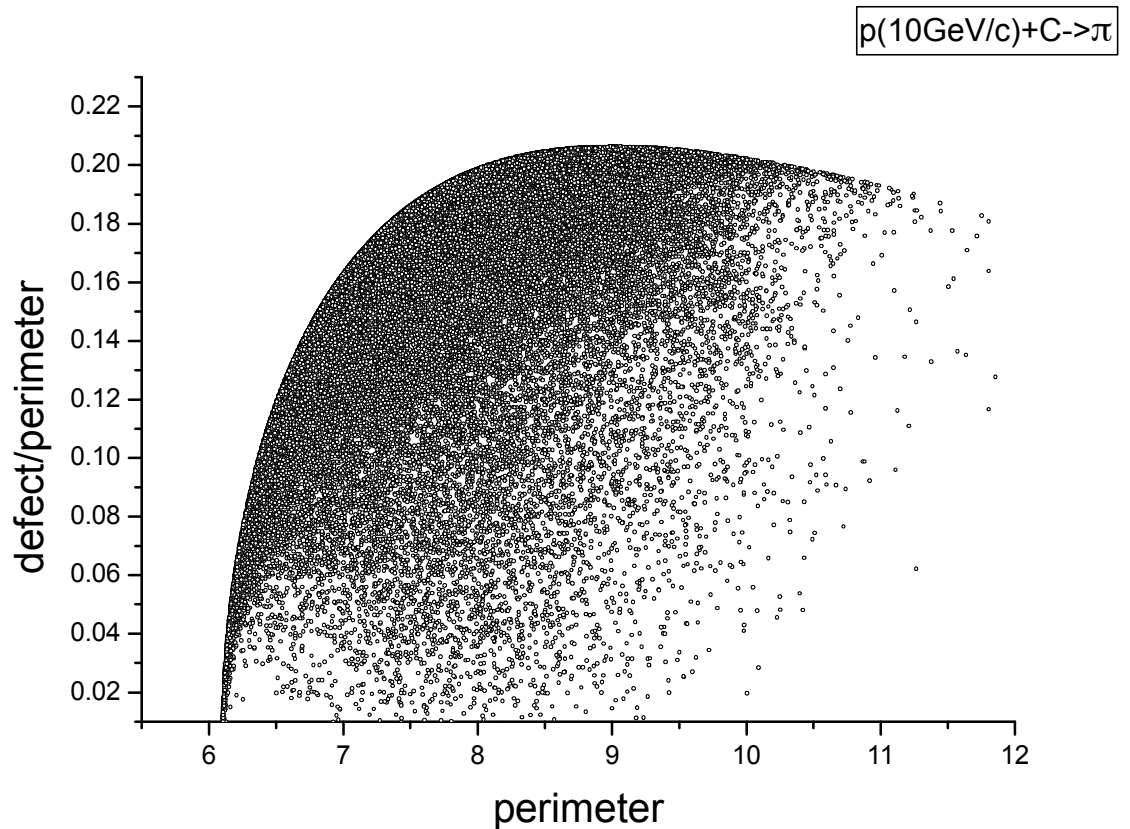


Рис. 5. Отношение дефекта треугольника к его периметру для треугольников  $123$  (см. Рис. 2), где  $1,2$  – взаимодействующие частицы, а  $3$  – зарегистрированный  $\pi$ -мезон в реакции  $p(10\text{ГэВ}/c)+C$ .

Это принципиальное отличие трудно представить себе, опираясь на механистические трехмерные образы, которые, как правило, лежат в основе моделей, претендующих на описание динамики взаимодействия частиц.

## Направленное ядерное излучение

Одной из наиболее замечательных величин, введенных Н.И.Лобачевским для своего пространства, является угол параллельности

$$\Pi_L(h) = 2 \operatorname{arctg}(e^{-h}) \quad (11)$$

Возникает вопрос о значении данного параметра при анализе экспериментальных данных. Каждой величине быстроты в пространстве Лобачевского можно поставить в соответствие угол параллельности (см. формулу выше). Сделаем это для высоты  $h$  треугольника  $123$  (см. Рис.2), где  $1$  и  $2$  – это сталкивающиеся частицы, а  $3$  – регистрируемая частица. На Рис. 6-8 показаны зависимости вероятности регистрации протонов и  $\pi$ -мезонов от переменной  $2\Pi_L - \alpha_3 = \Delta_{12}^3$  (разности двойного угла параллельности и угла при регистрируемой частице в пространстве быстрот). Из рисунков видно, что имеется резко выраженный максимум образования как протонов, так и  $\pi$ -мезонов. Важно отметить, что этот максимум соответствует углу параллельности, вычисленному для быстроты между сталкивающимися объектами.

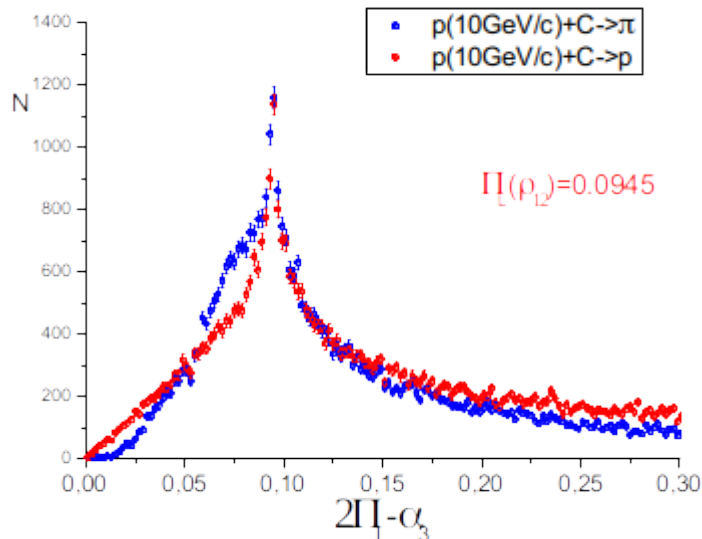


Рис. 6. Вероятность образования протонов и  $\pi$ -мезонов в реакции  $p(10\text{ГэВ}/c)+C$  в зависимости от переменной  $2\Pi_L - \alpha_3$ , где  $\Pi_L$  – угол Лобачевского, вычисленный для высоты  $h$  треугольника  $123$ , а  $\alpha_3$  – угол при регистрируемой частице (см. Рис. 2).

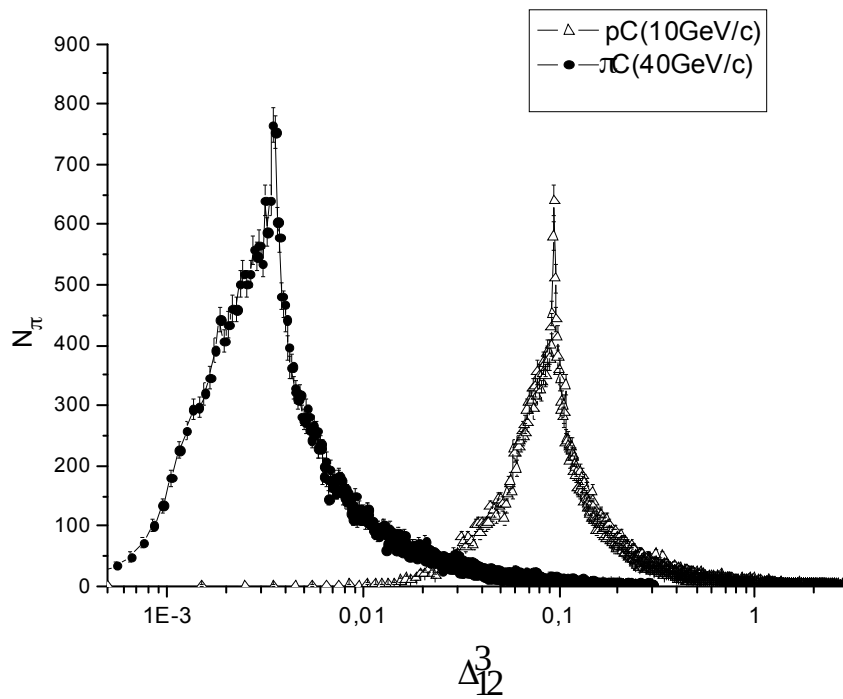


Рис. 7. Пионные распределения для двух реакций:  $p(10 \text{ GeV}/c) + C \rightarrow \pi$  и  $\pi^-(40 \text{ GeV}/c) + C \rightarrow \pi$

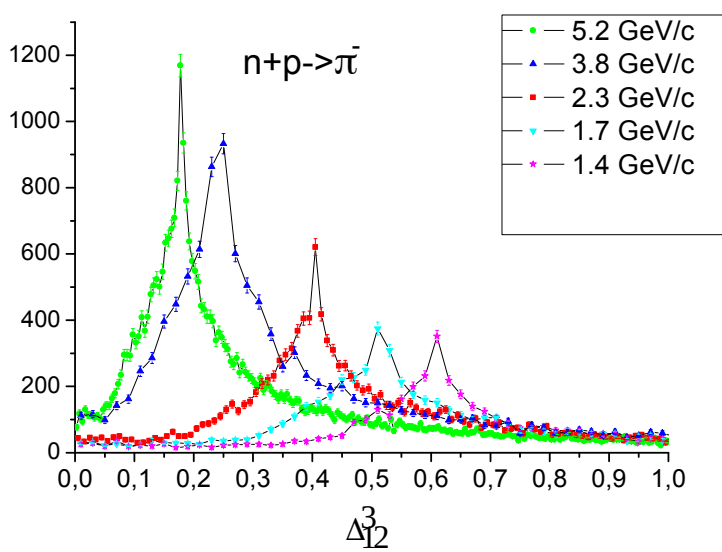


Рис. 8. Пионные распределения при взаимодействии нейтронов в жидководородной камере для разных импульсов нейтронов.



Получены следующие формулы для вычисления углов и импульсов частиц, соответствующих условиям генерации направленного ядерного излучения.

$$\cos \alpha_2 = \sqrt{\frac{1 + th(\rho_{12})}{2}} - sh(h) \sqrt{\frac{1 - th(\rho_{12})}{2}} \quad (12)$$

Угол  $\alpha_2$  совпадает с лабораторным углом регистрации частицы направленного ядерного излучения для фиксированной мишени. Угол  $\alpha_3$  соответствует углу при регистрируемой частице в пространстве относительных быстрот Лобачевского,

$$\alpha_3 = 2 \arcsin \left\{ \sqrt{\frac{1 + th(\rho_{12})}{2}} \sin(\Pi(h)) - \sqrt{\frac{1 - th(\rho_{12})}{2}} \cos(\Pi(h)) \right\} \quad (13)$$

Импульс частицы направленного ядерного излучения  $p_3$  (частицы 3) находится по следующей формуле:

$$p_3 = m_3 \cdot sh(\rho_3) = \frac{sh(h)}{\sin(\alpha_2)} \quad (14)$$

На Рис. 9 показаны экспериментальные точки и кривые, полученные по формулам (12), (14) для угла и импульса направленного ядерного излучения пионов в лабораторной системе.

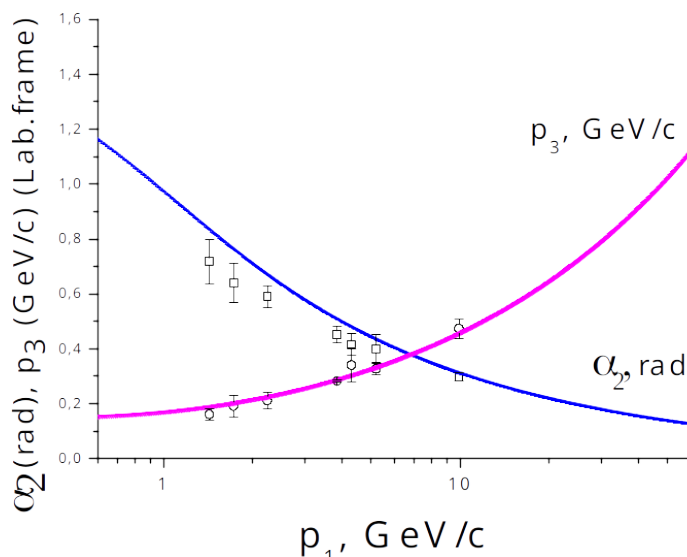


Рис. 9. Предсказание (линии) и экспериментальные данные (точки) для импульса и угла направленного ядерного излучения пионов в лабораторной системе.

Для наблюдения данного явления необходимы установки, имеющие высокое угловое разрешение регистрируемых частиц с достаточно низкими импульсами. Именно поэтому широкий набор данных, полученных с помощью пузырьковых камер, позволил обнаружить данное явление. Следует отметить, что направленное ядерное излучение было зарегистрировано в Протвино на установке СВД: превышение выхода пионов, соответствующее предсказываемым углам, рассчитанным по формулам (12)-(14).

Для случая коллайдерного эксперимента следует ожидать повышенный выход мягких частиц под углами, близкими к  $90^\circ$  в лабораторной системе отсчета.

Первые результаты по направленному ядерному излучению были изложены в 2004 г. на юбилейном семинаре ЛТФ, посвященном 75-летию Н.А.Черникова "Использование геометрии Лобачевского для анализа экспериментальных данных в области релятивистских ядерных реакций" по его представлению. В дальнейшем, результаты, вошедшие в цикл работ, неоднократно обсуждались на семинарах ЛФВЭ и ЛТФ ОИЯИ. Данные работы обсуждались на семинарах в НИЯФ МГУ, Казанском Университете, Институте математики и механики им. Н. И. Лобачевского (Казань), ИФВЭ (Протвино), Университете Бухареста, GSI (Дармштадт), ОИВТ РАН (Москва), Институте ядерной физики АН Республики Узбекистан (Ташкент), СПбГУ (Петергоф), Институте современной физики (Ланчжоу) и др.

Результаты были представлены на международных конференциях ISHEPP (2008-2018) RREPS-2019, ЕМММ-2010, XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (2019), XXXIV и XXXV Международных конференциях "Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом" (2019, 2020) и др.

## Литература

1. В.А.Фок, *Теория пространства, времени и гравитации*. (Гостехиздат, Москва, 1955).
2. А.П.Котельников, *Принцип относительности и геометрия Лобачевского*. В: Памяти Н.И.Лобачевского (Казань, 1927), том 2, стр. 37-64.

3. Н.А. Черников, ЭЧАЯ, **4**, 315 (1973).
4. Я.А.Сморodinский, Е.Л.Сурков, "Геометрия Лобачевского и теория относительности" (М.: Знание, 1971).
5. А.А.Балдин, Е.Н.Кладницкая, О.В.Рогачевский. Краткие сообщения ОИЯИ №2 [94] (1999).
6. [K. Hagiwara et al.](http://www-pdg.lbl.gov/), Phys. Rev. D **66**, 010001 (2002) (<http://www-pdg.lbl.gov/>)
7. H.Sorge, Phys. Rev. C **52**, 3291 (1995).

Председатель НТС ЛФВЭ

Е.А.Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ

С.П.Мерц