



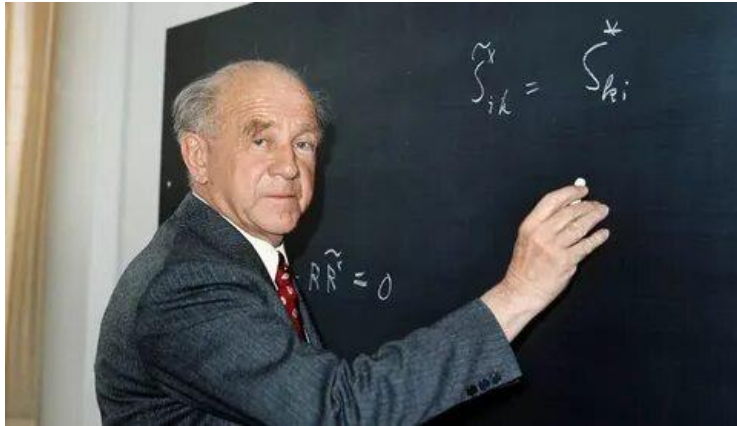
Релятивистская ядерная физика на ускорительном комплексе ЛФВЭ ОИЯИ

Антон Балдин

02.06.2025

Ускорительный комплекс NICA





*В.Гейзенберг.
Физика и философия*

«Мы должны помнить, что то, что мы наблюдаем, - это не сама природа, а природа, которая выступает в том виде, в каком она выявляется благодаря нашему способу постановки вопросов.»

ПРИРОДА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ*)

В Гейзенберг

Поскольку при взаимодействиях частиц высоких энергий их число не сохраняется, вопрос о составных частях элементарных частиц может оказаться бессмысленным, и вполне возможно, динамика окажется центральной проблемой.

Ответ на вопрос «Что такое элементарная частица?» следует искать прежде всего в эксперименте, хотя вопрос этот требует также и философского рассмотрения. Поэтому я начну с краткого обзора важнейших экспериментальных результатов, полученных за последние пятьдесят лет. Из этого обзора будет видно, что беспристрастный анализ известных результатов уже дает определенный ответ на поставленный выше вопрос; теория же, как мы увидим дальше, не в состоянии добавить что-либо существенное к этому ответу.

НЕПРАВИЛЬНО ПОСТАВЛЕННЫЕ ВОПРОСЫ

Однако меня больше занимает физика, чем философия. Я начну с того, что, по моему убеждению, развитие теоретической физики частиц с самого начала ведется неверно; это обусловлено прежде всего неправильно поставленными вопросами.

Первым делом я упомяну о существовании тезиса о том, что наблюдаемые частицы, такие, как протон, пион и гиперон, состоят из еще более малых частиц: кварков, партонов, глюонов, очарованных частиц или чего-то еще, причем эти более малые частицы ненаблюдаемы. Совершенно очевидно, что здесь был задан вопрос: «Из чего состоит протон?», причем спрашивающий забыл о том, что сама фраза «состоит из» сохраняет достаточно ясный смысл только в том случае, если частицу можно раздробить на части малым количеством энергии — гораздо меньшим, чем масса покоя разрушаемой частицы.

*) Werner Heisenberg, The Nature of Elementary Particles, Phys. Today 29 (3), 32 (March 1976). Перевод В. А. Белоконоя.

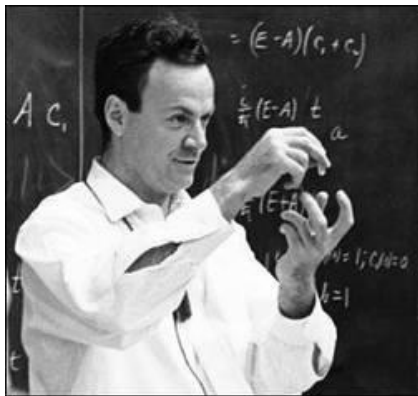
Что такое «элементарная частица»

Robert Hofstadter

1961, "Electron Scattering and Nuclear Structure".



W. McAllister & Robert Hofstadter, "Elastic Scattering of 188 MeV Electrons from Proton and the Alpha Particle," *Physical Review*, V102, p. 851 (1956).



Richard Feynman

The [parton](#) model 1969



Nuclear Physics **18** (1960) 310—317, © North-Holland Publishing Co., Amsterdam
Not to be reproduced by photoprint or microfilm without written permission from the publisher

POLARIZABILITY OF NUCLEONS

A. M. BALDIN

P. N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences, Moscow, USSR

Received 18 December 1959

Abstract: Estimates of dipole polarizabilities of nucleons and the values they involve are given on the basis of data on photo-production of π -mesons and the Compton effect on nucleons. It is indicated that no upper estimate of neutron polarizability exists at present. The preliminary experimental data now available may be interpreted as indicating that a neutron has an abnormally large polarizability. The effects leading to the inapplicability of the impulse approximation for describing the reaction $\gamma + d \rightarrow p + n + \gamma'$ are estimated. It is pointed out that the measurement of the cross section of the reaction $\gamma + d \rightarrow d + \gamma'$ would yield an answer for the value of neutron dipole polarizability † .

1. Introduction

As is well known from classical electrodynamics, the interactions of photons with a system of charges may be described by a fairly small number of real parameters provided the wavelength of the photon considerably exceeds the dimensions of the system and the photon's frequency is essentially less than the resonance frequencies of the system. These constants fully determine the behaviour of the system in static or slowly changing fields and are expressed through the charge, the magnetic moment and electric and magnetic polarizability tensors.

These characteristics may in particular be considered for the nucleon¹⁾. Of especial interest are the electric and magnetic polarizabilities of the nucleon since these are its "structural" characteristics. The aims of the present paper are: a) determination of the frequency region of photons for which the interaction of a nucleon and electromagnetic field may be described by four constants (charge, magnetic moment, electric and magnetic polarizability) with satisfactory accuracy (say, 5 %), b) discussion of possible estimates of the magnitude of the polarizability on the basis of the available experimental data and discussion of the experiments which might be worthwhile for specifying polarizability quantities.

Релятивистское обобщение критерия применимости понятия «элементарная частица» на основе закона сохранения четырехимпульса

$$P_1 + P_2 = P_3 + P^*$$

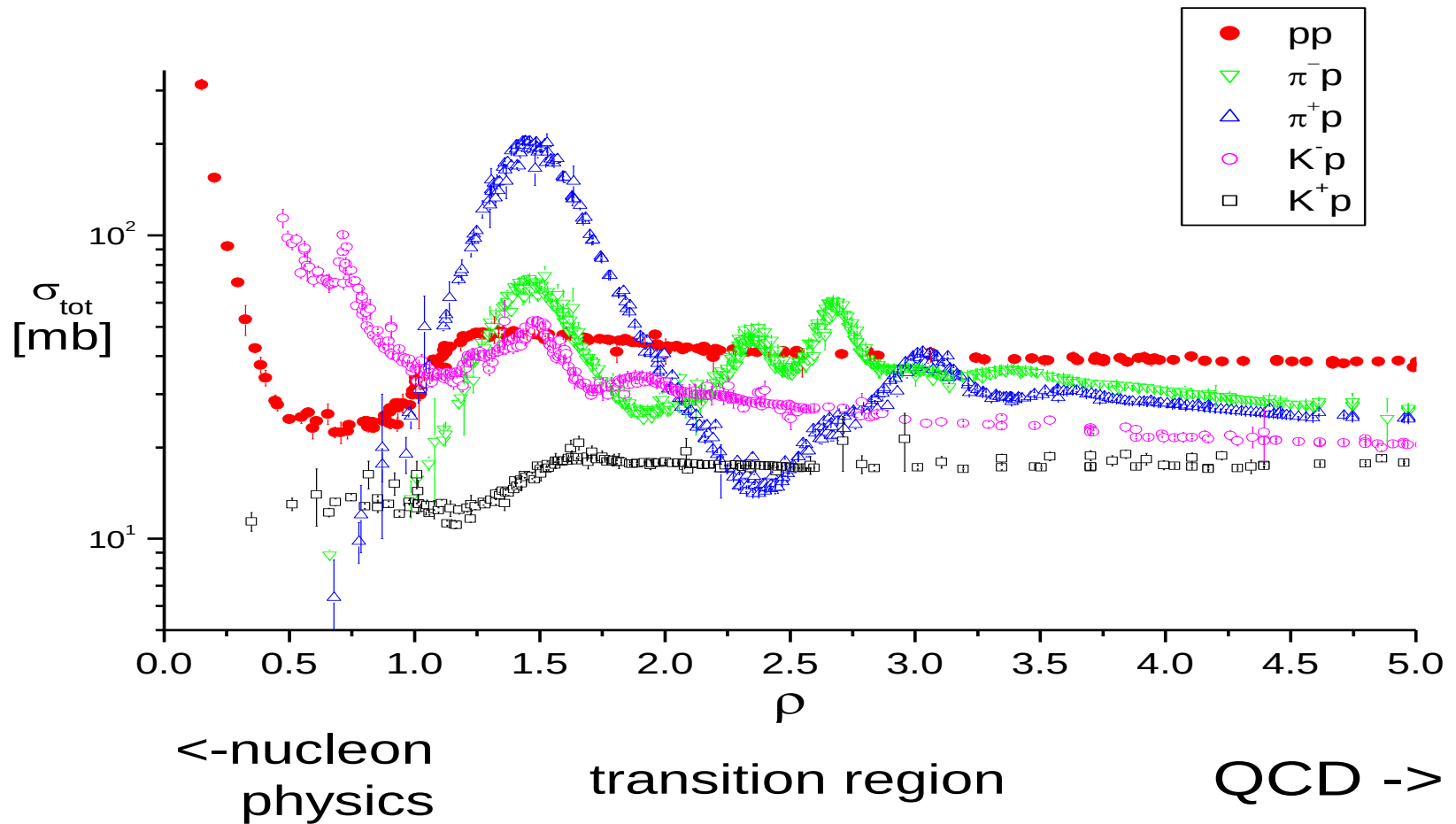
$$(P_1 + P_2)^2 = (P_3 + P^*)^2$$

Порог образования возбужденного состояния одной из сталкивающихся частиц:

$$(P_3 + P^*)^2 = (m + m^*)^2$$

$$b_{12} = -(U_1 - U_2)^2 = \frac{(m^* - m)}{m} \cdot \left[4 + \frac{(m^* - m)}{m} \right] \ll 1$$

- область $0 \leq b_{ik} \leq 10^{-2}$
нерелятивистской ядерной физики, где нуклоны можно считать точечными объектами;
- область $b_{ik} \sim 1$
возбуждения внутренних степеней свободы адронов;
- область $b_{ik} \gg 1$
должна, в принципе, описываться квантовой хромодинамикой.



$$b_{ik} = 2[(U_i U_k) - 1] = 2\left[\frac{P_i P_k}{m_i m_k} - 1\right] = 2\left[\frac{E_i E_k - \vec{p}_i \vec{p}_k}{m_i m_k} - 1\right] = 2[\text{ch } \rho_{ik} - 1]$$



Процессы за пределами кинематики на свободном нуклоне

Синхроциклотронная Лаборатория -> ЛЯП ОИЯИ

Г.А. Лексин (1957)

Рассеяние на ядре за пределами кинематики свободного нуклона

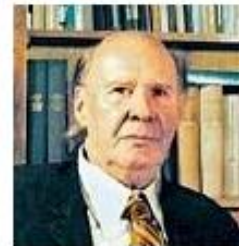


Ажгирей, Мещеряков и др. (58)



Д.И. Блохинцев (1958)

флуктуации ядерного вещества



Кумулятивный эффект: предсказание и открытие

SLAC (1968-69):

Партоны и масштабная инвариантность (скейлинг) в нуклонах

ЛВЭ ОИЯИ:

А.М. Балдин (1971)

Предсказание: партоны в ядрах могут нести импульс нескольких нуклонов



Группа В.С. Ставинского (1971)

Экспериментальное открытие кумулятивного эффекта



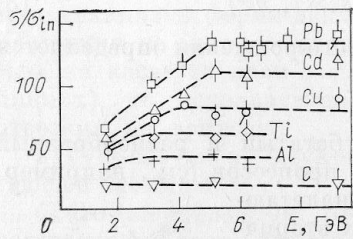


Рис. 2. Энергетическая зависимость сечения кумулятивного рождения протонов на разных ядрах

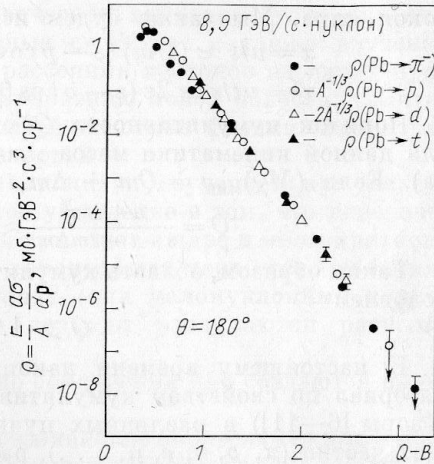


Рис. 3. Универсальность формы спектра кумулятивного процесса; V -барионное число кумулятивной частицы

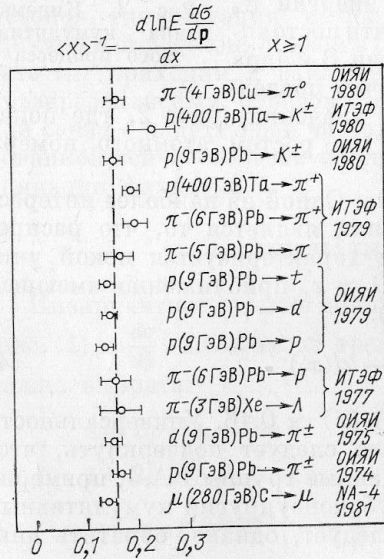


Рис. 4. Универсальность наклона спектра кумулятивного рождения по переменной x

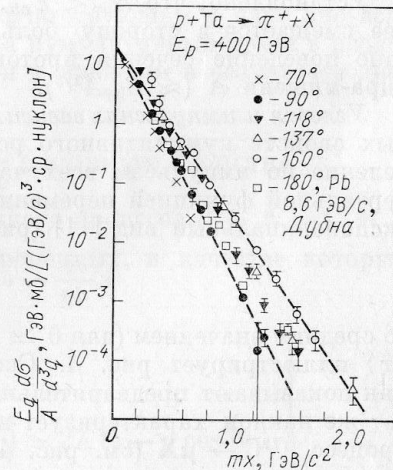


Рис. 5. Изменение наклона в зависимости от угла вылета

мание на то, что выражение (1) не передает всей угловой зависимости. При фиксированном значении x сечение с уменьшением угла падает [12] (рис. 5).

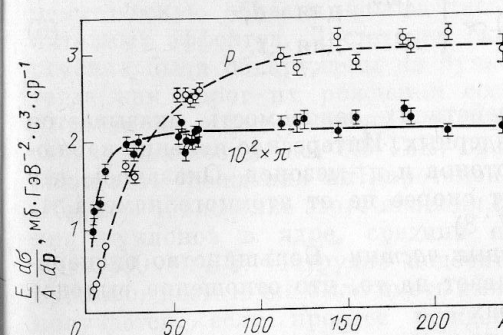


Рис. 6. Зависимость сечения кумулятивного рождения пионов и нуклонов от атомного номера, $p = 0,5$ ГэВ/с

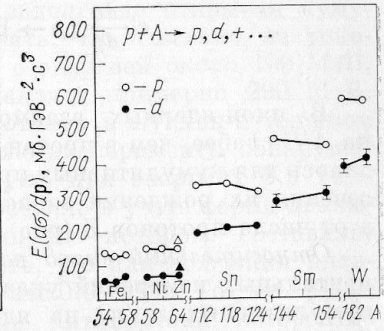


Рис. 7. Изотопический эффект сечения для кумулятивных протонов и дейтерия

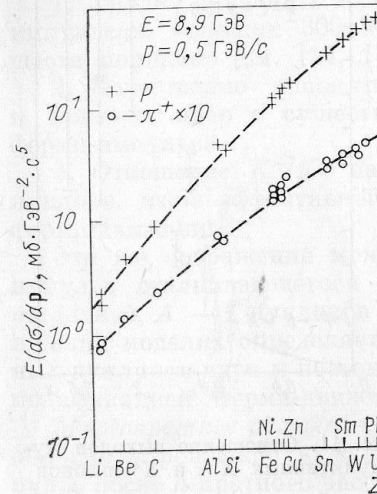


Рис. 8. Изотопический эффект сечения для кумулятивных π^+ -мезонов

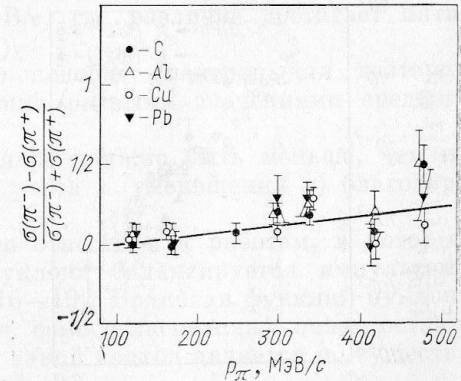


Рис. 9. Отношение выходов кумулятивных π^- и π^+ -мезонов

установлено, что $\varepsilon d\sigma/dp \sim A$. Более сложная зависимость наблюдается для рождения адронов в адронных пучках (рис. 6):

$$\varepsilon \frac{d\sigma}{dp} \sim \begin{cases} A & \text{для тяжелых ядер,} \\ A^{n>1} & \text{для легких ядер} \end{cases} \quad (5)$$

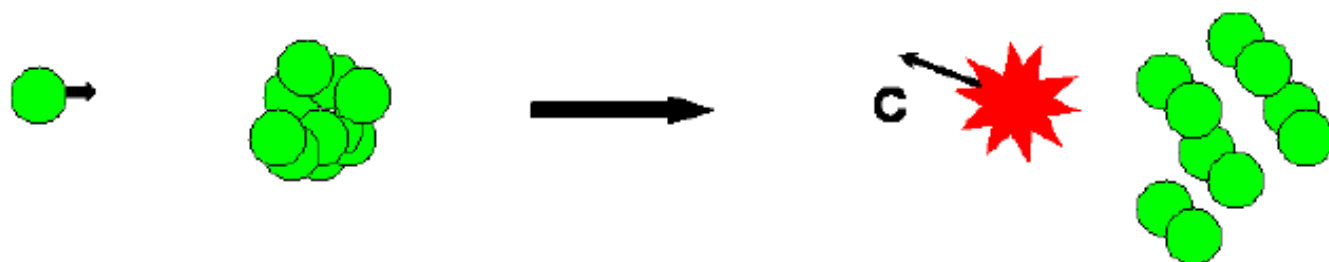
A -зависимость является наиболее специфической характеристикой кумулятивного процесса. Для точечных частиц (γ , e , μ)

Источник возникновения кумулятивных частиц

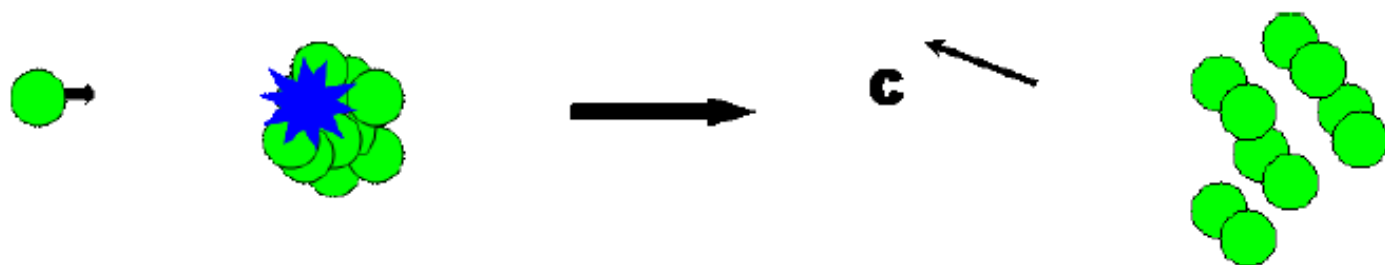
Классификация моделей

А.В.Ефремов, ЭЧАЯ, Т.13,613,(1982)

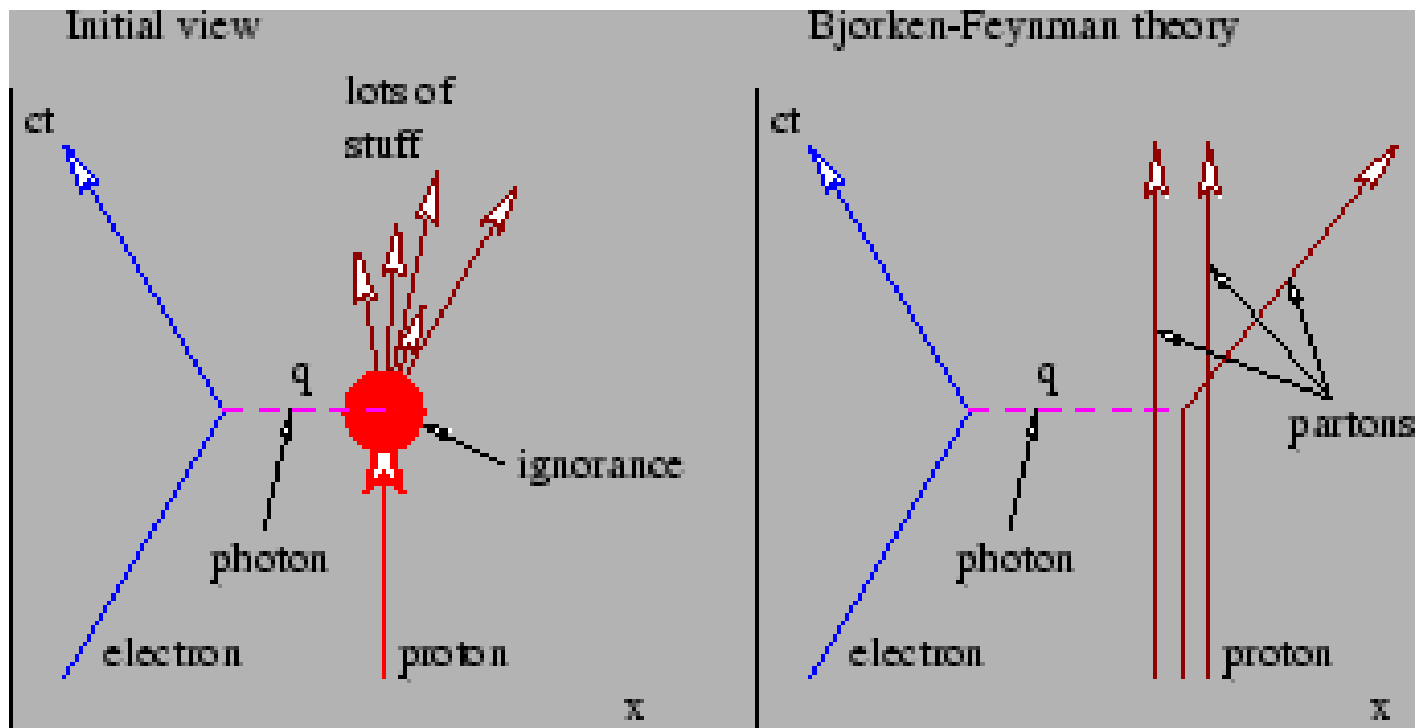
Модели с горячим флуконом



Модели с холодным флуконом



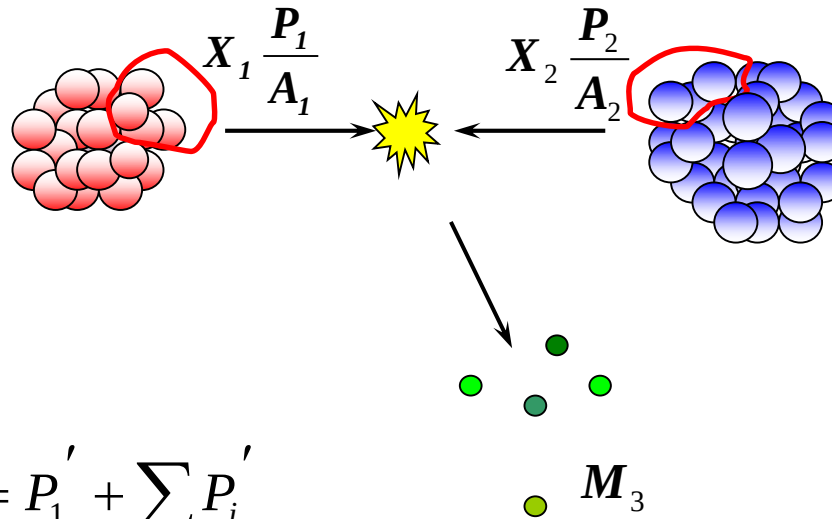
Термин флукон - впервые в работе *Д.И.Блохинцев, ЖЭТФ, Т.33,1295,(1957)*



$$x = -\frac{q^2}{2P_2 q}$$

Хорошо известная переменная Бьоркена используется для автомодельного описания неупругого e^+p взаимодействия. При этом было постулировано, что можно пренебречь всеми импульсами и массами вторичных частиц.

Автомодельное решение для релятивистских взаимодействующих частиц



$$X_1 P_1 + X_2 P_2 = P'_1 + \sum P'_i$$

$$\left(X_1 M_1 u_1 + X_2 M_2 u_2 - M_3 u_3 \right)^2 = \left(M_1 X_1 u'_1 + M_2 X_2 u'_2 + \sum_{k=4} M_k u_k \right)^2$$

Принцип ослабления корреляций в пространстве относительных 4-скоростей позволяет пренебречь относительным движением

нерегистрируемых частиц $2 \sum_{k,l} (\gamma_{kl} - 1) M_k M_l$

Автомодельное решение для релятивистских взаимодействующих частиц

$$X_1 X_2 (\gamma_{12} - 1) - X_1 \left(\frac{M_3}{M_p} \gamma_{13} + \frac{M_4}{M_p} \right) - X_2 \left(\frac{M_3}{M_p} \gamma_{23} + \frac{M_4}{M_p} \right) = \frac{M_4^2 - M_3^2}{2 M_p}$$

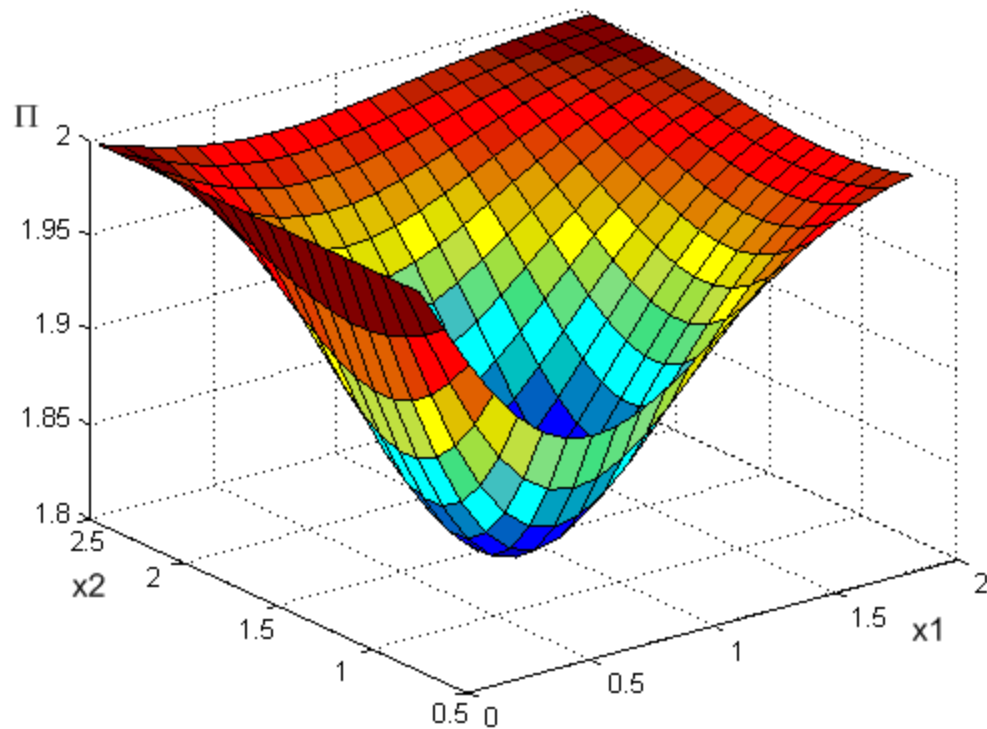
В случае рождения античастицы массой M_3 необходимо ввести частицу массой M_4 равной M_3 для соблюдения сохранения квантовых чисел.

X_1 и X_2 получаются из минимума Π и используются для построения универсального описания зависимостей.

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(X_1^2 + X_2^2 + 2 X_1 X_2 \gamma_{12} \right)^{1/2} \quad S = (P_1 + P_2)^2$$

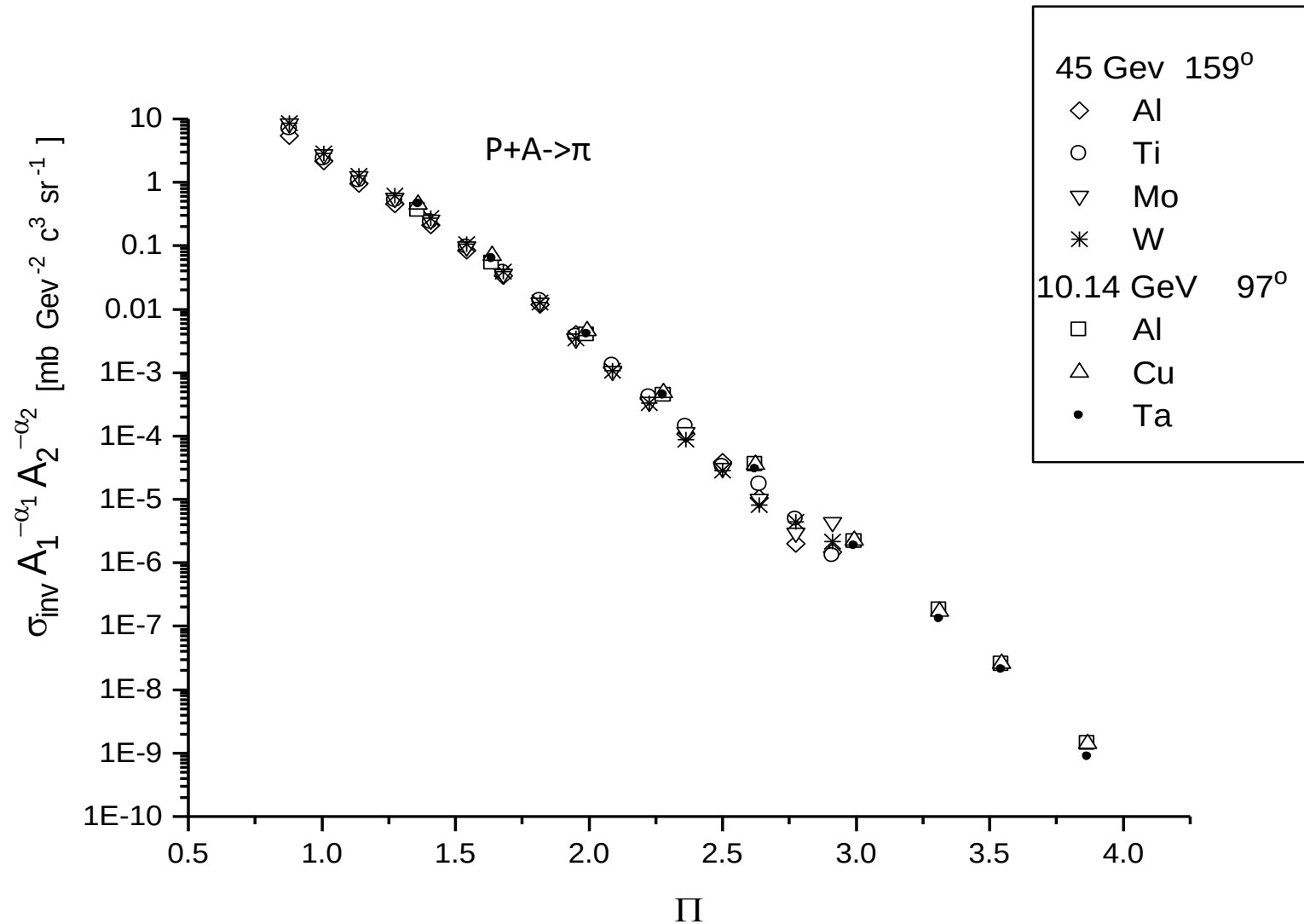
$$E \frac{d^3 \sigma}{d^3 p} = C_1 A_1^{\alpha(X_1)} A_2^{\alpha(X_2)} f(\Pi)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(X_1^2 + X_2^2 + 2X_1X_2\gamma_{12} \right)^{1/2}$$



$$E \frac{d^3 \sigma}{d^3 p} = C_1 A_1^{1/3 + X_1/3} A_2^{1/3 + X_2/3} \exp\left(-\Pi/C_2\right)$$

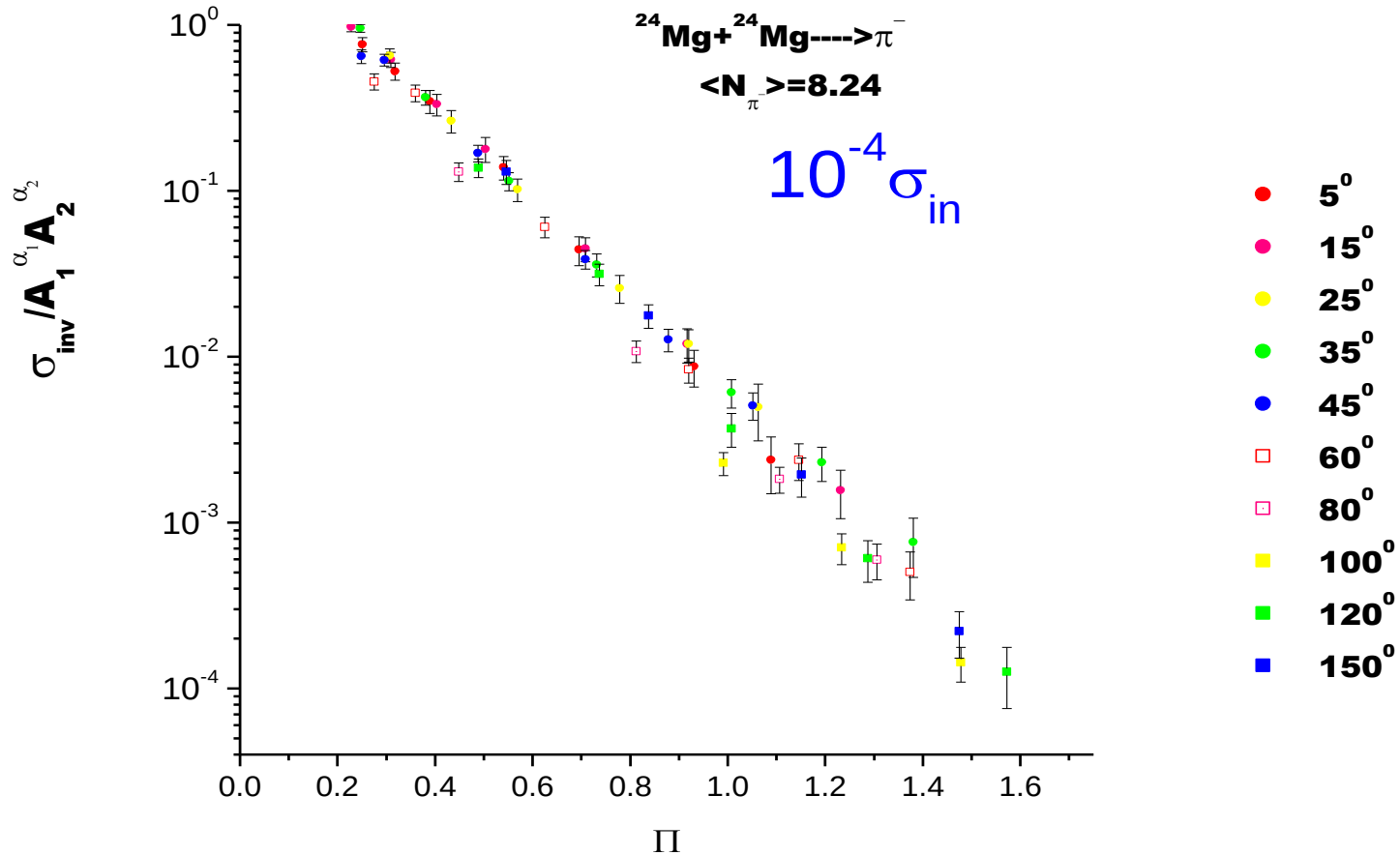
Кумулятивные процессы



S.V.Boyarinov, et al. Yad. Fis. , v.57, N8, (1994) ,1452-1461.

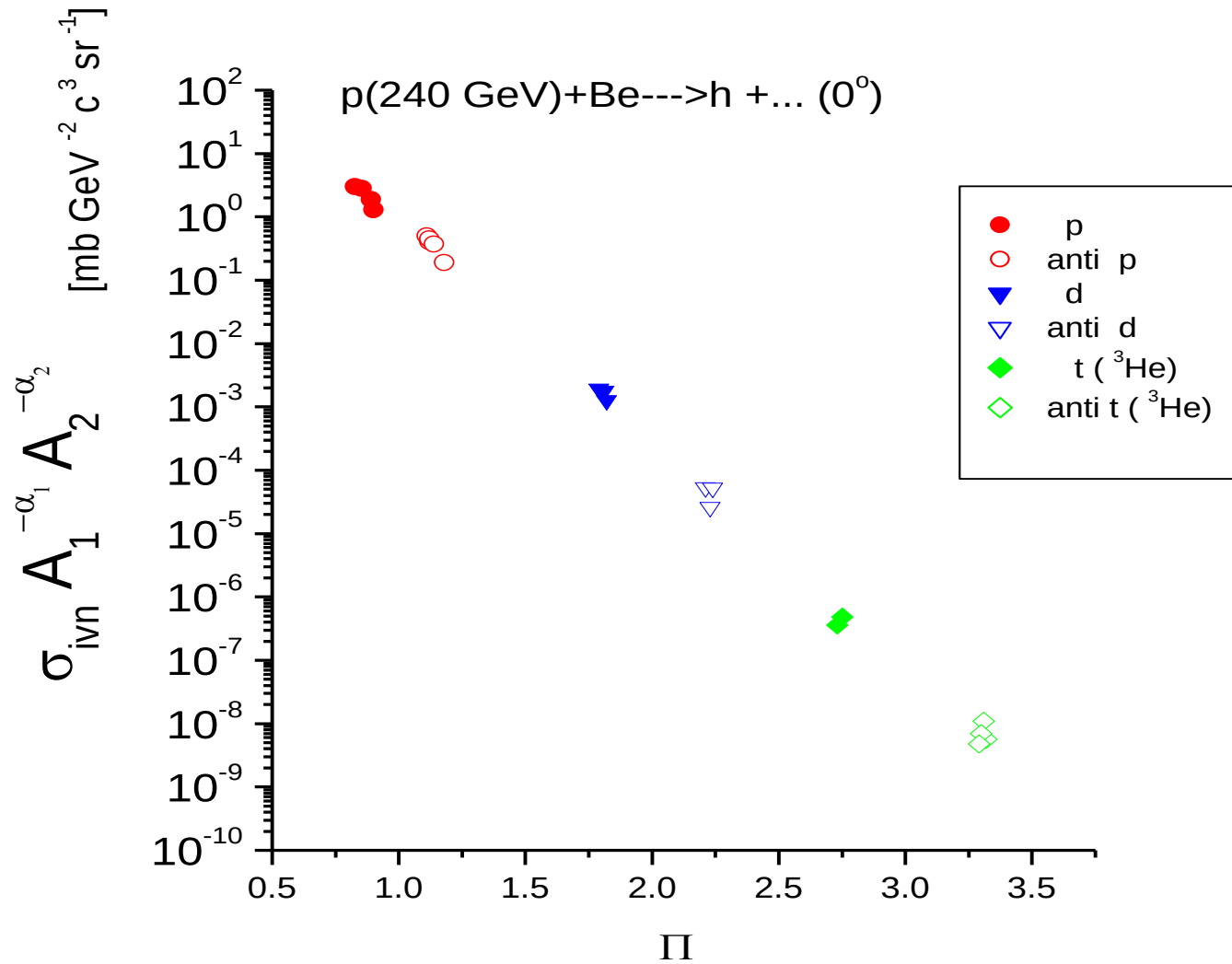
O.P.Gavrishchuk et al. Nucl. Phys., A523 (1991) 589.

Инклюзивные спектры пионов в событиях с большой множественностью



A.A.Baldin, E.N.Kladnitskaya, O.V. Rogachevsky, JINR Rapid Comm., (1999), N.2 [94]-99, p.20.
 M.Kh.Anikina, et al., Phys. Lett. B., (1997), v.397, p.30.

Рождение антиматерии



Установка СПИН (ИФВЭ, Протвино)



High- P_T region

The A-dependence of the form $A^{(1+X_2)/3}$ well describes the dynamic dependence of the cross sections on X_2 , while it fails to describe a stronger dependence on the mass number of the nucleus observed in this experiment.

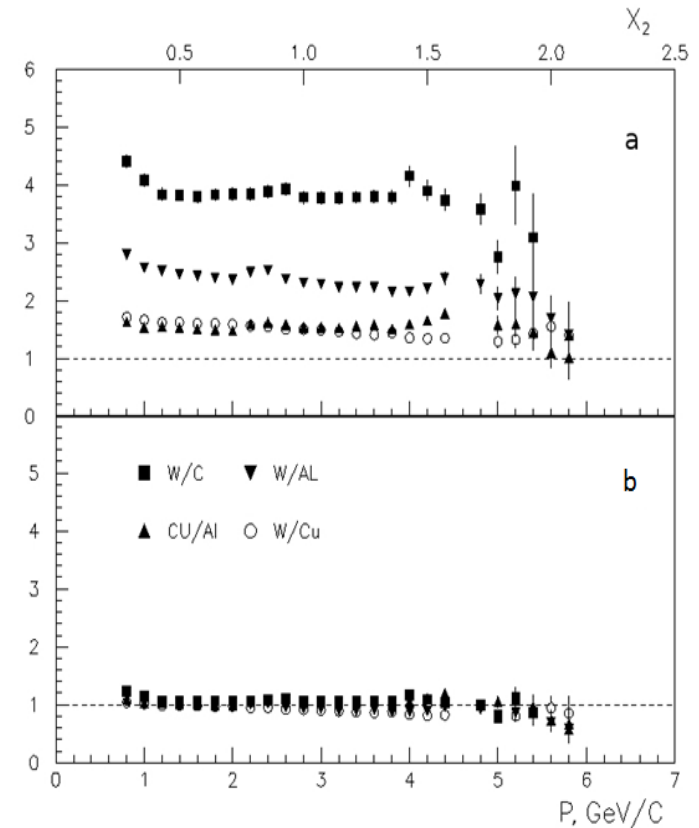
Figure. Ratio of cross sections of negative pion production on different nuclei multiplied by inverse A-dependence.

(a)

$$A^{(1+X_2)/3}$$

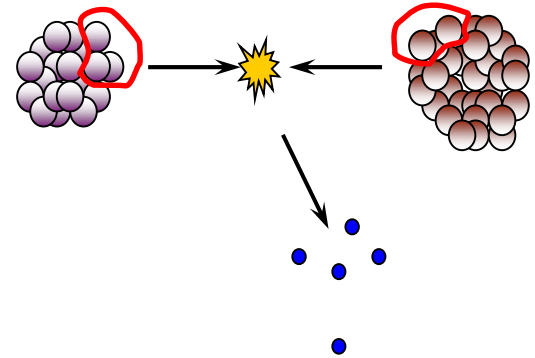
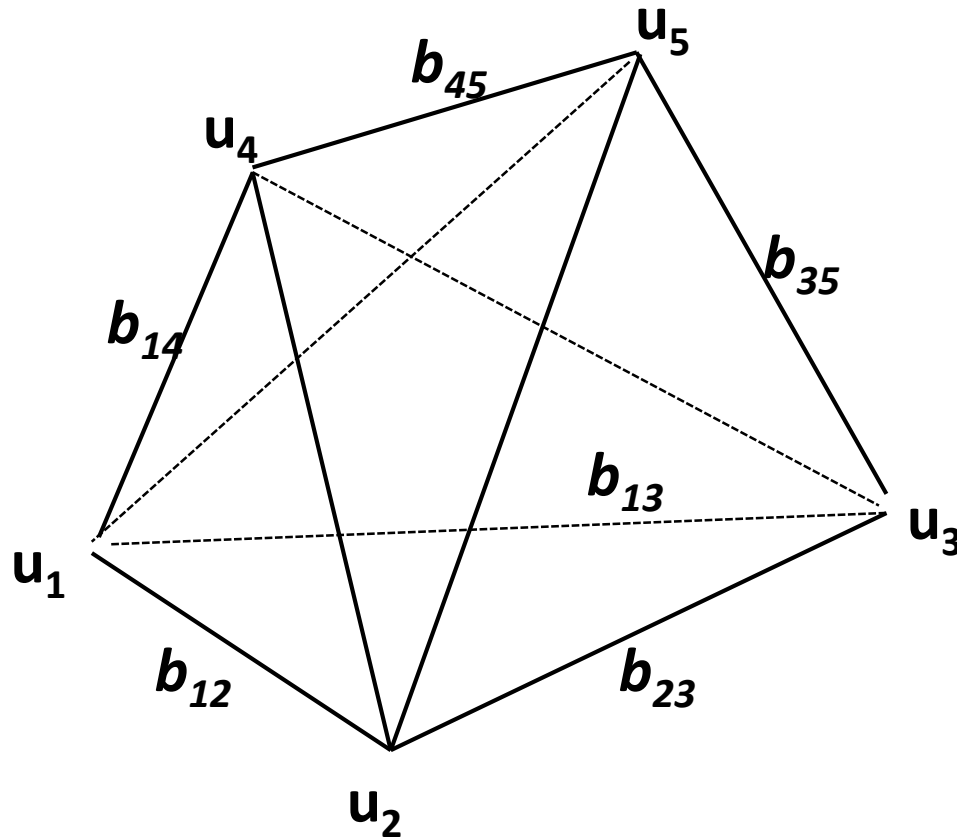
(b)

$$A^{(2.45+X_2)/3}$$



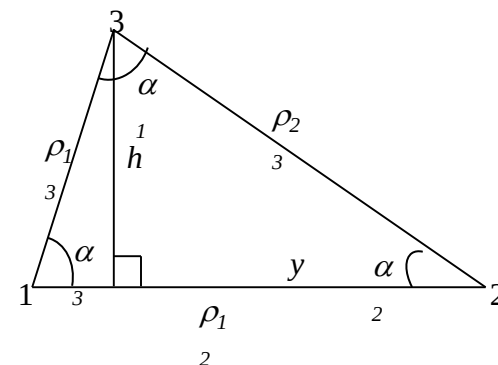
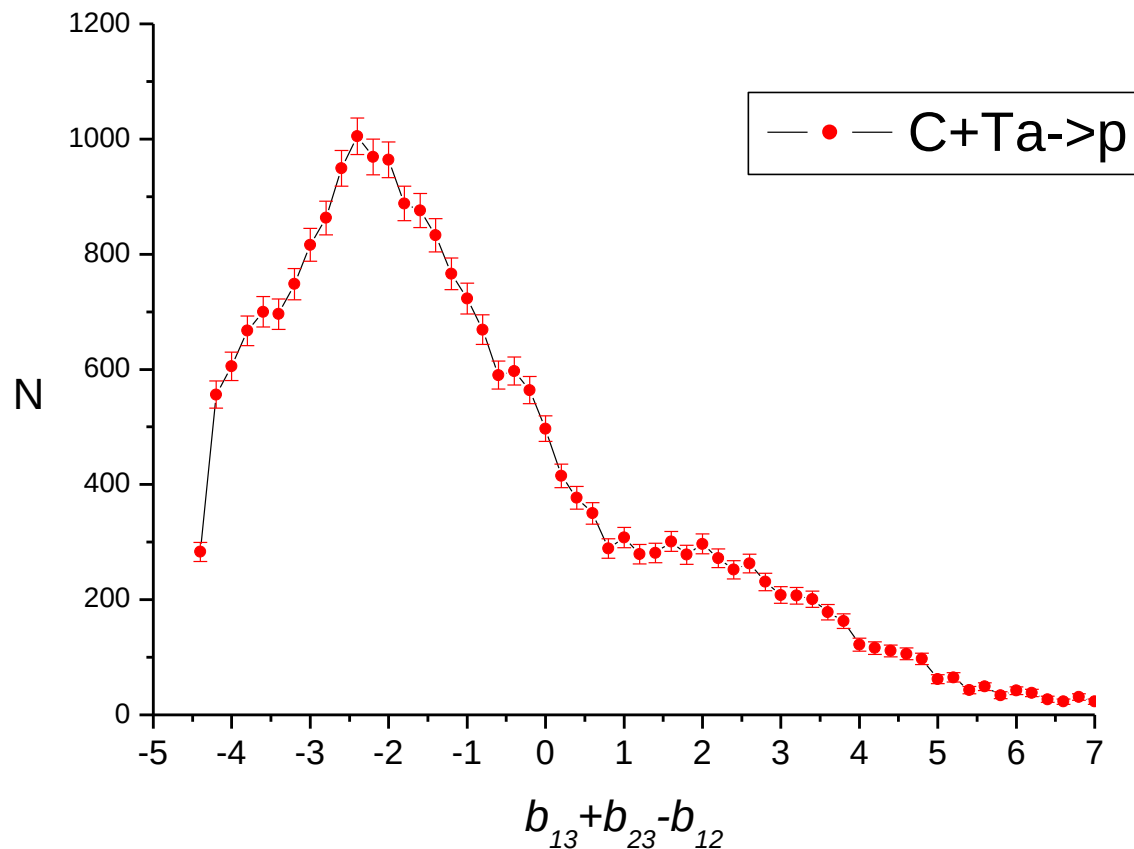
- V. V. Ammosov, et al., Phys. At. Nucl. **76**, 1213 (2013).

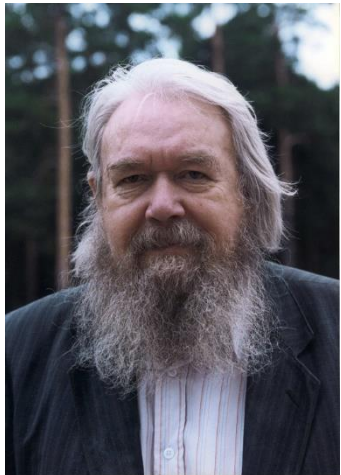
- Идея А.М.Балдина о рассмотрении множественного рождения частиц в пространстве относительных 4-скоростей



Пространство b_{ik} - не метрическое пространство !
 Соотношение $b_{12} + b_{13} \geq b_{23}$
 вообще говоря, неверно.

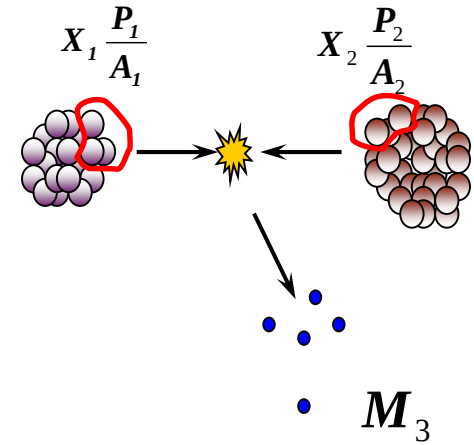
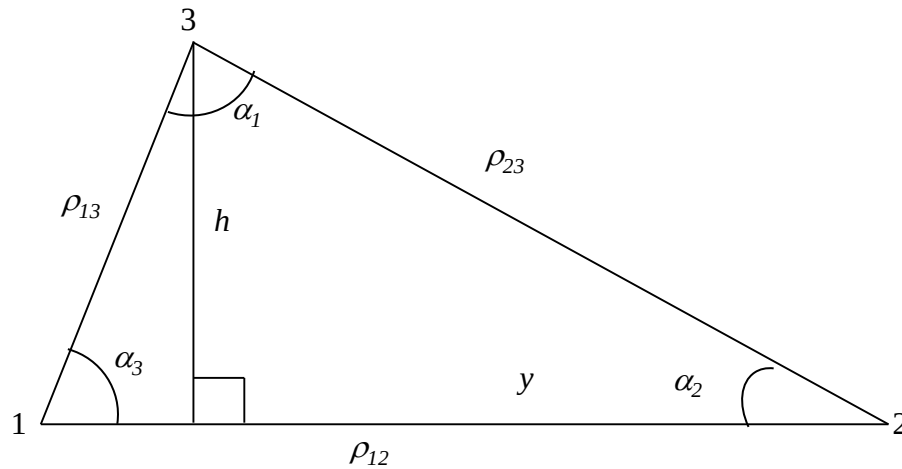
$$\min \left[- \sum_k \left(v_\alpha - u_k^\alpha \right)^2 - \sum_i \left(v_\beta - u_i^\beta \right)^2 \right]$$





*Н.А. Черников, Физика элементарных
частиц и атомного ядра, 1992, т.23, вып.5*

Однако приходится слышать: «Зачем нам изучать Лобачевского, если мы можем все подсчитать по известным формулам теории относительности?». На это я отвечаю, следуя Ф.Клейну [42, с.144]: «Современный принцип относительности физиков есть то же самое, что и теория группы Лоренца. В свою очередь, группа Лоренца изоморфна группе изометрий пространства Лобачевского». К этому я обычно добавляю: изучение геометрии Лобачевского окупается сторицей, так как это приводит к глубокому пониманию теории относительности, наделяет ее сильными и неизвестными ей самой методами и устанавливает тесную связь теории относительности с многовековой историей проблемы параллельных [47]. Получается так, что физики, подчас сами того не зная, все-таки пользуются геометрией Лобачевского, но в плохом изложении, т.е. суррогатом. Выгоды же никакой не получается: легче выучить предмет, чем его суррогат.



Продольная быстрота

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_{\parallel}}{E - p_{\parallel}}$$

Поперечная масса

$$m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

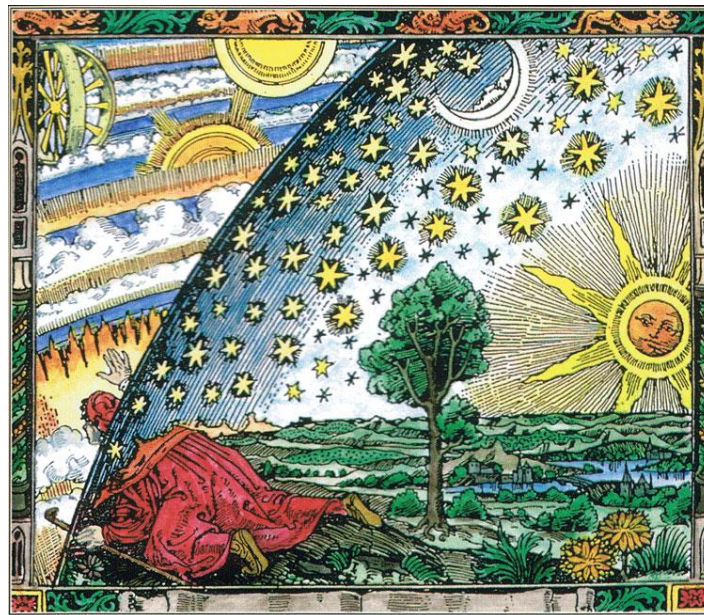
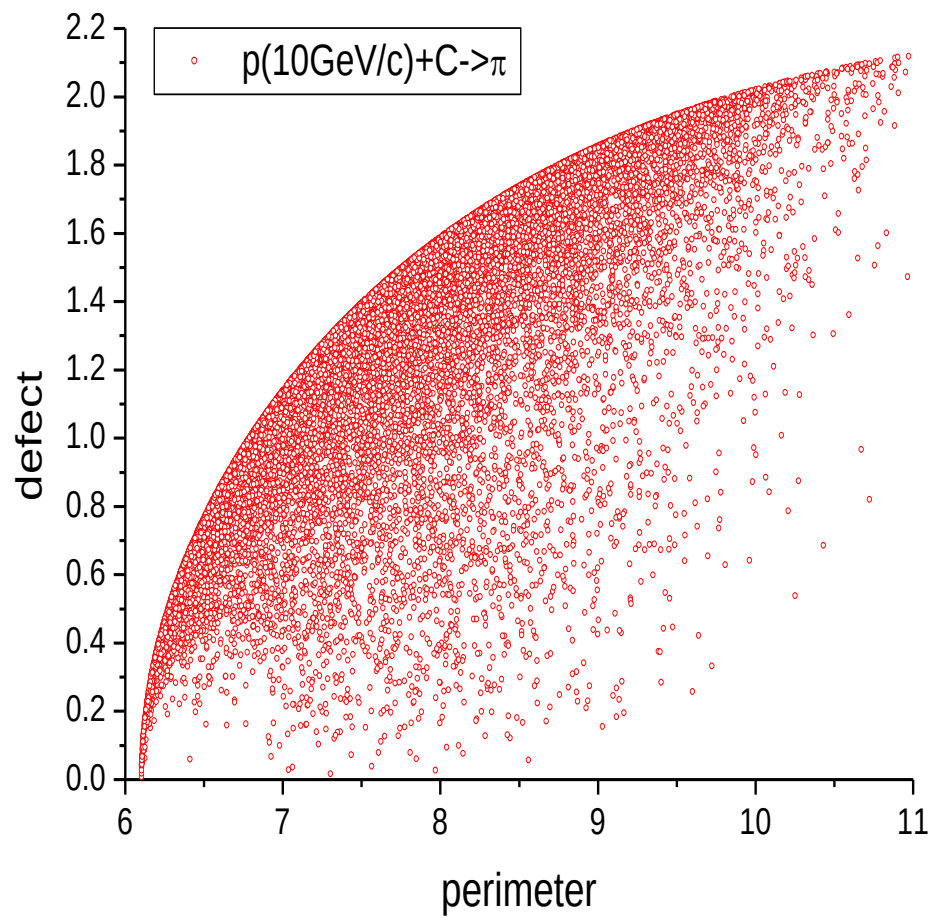
$$\text{ch } \rho = \text{ch } y \cdot \text{ch } h$$

Поперечная быстрота

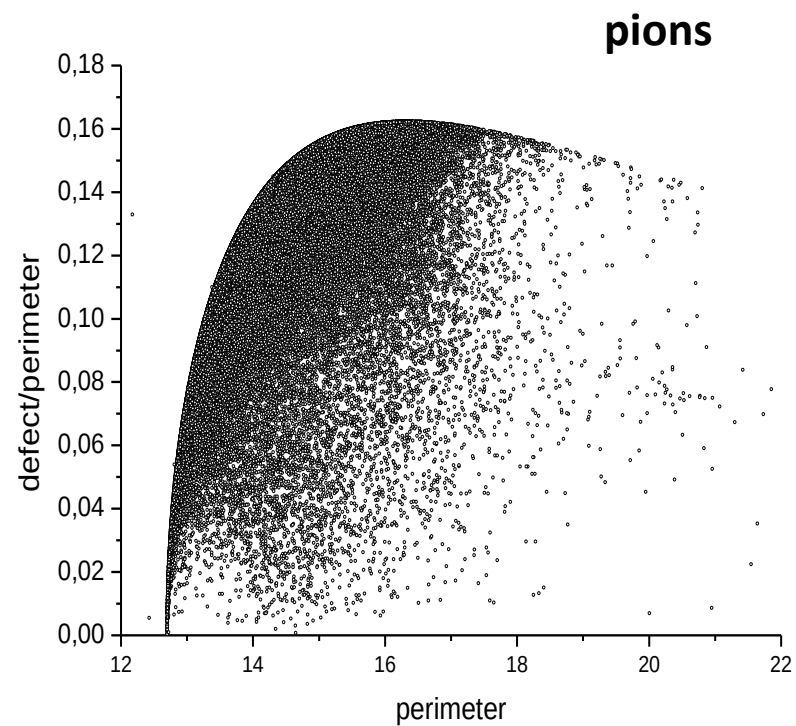
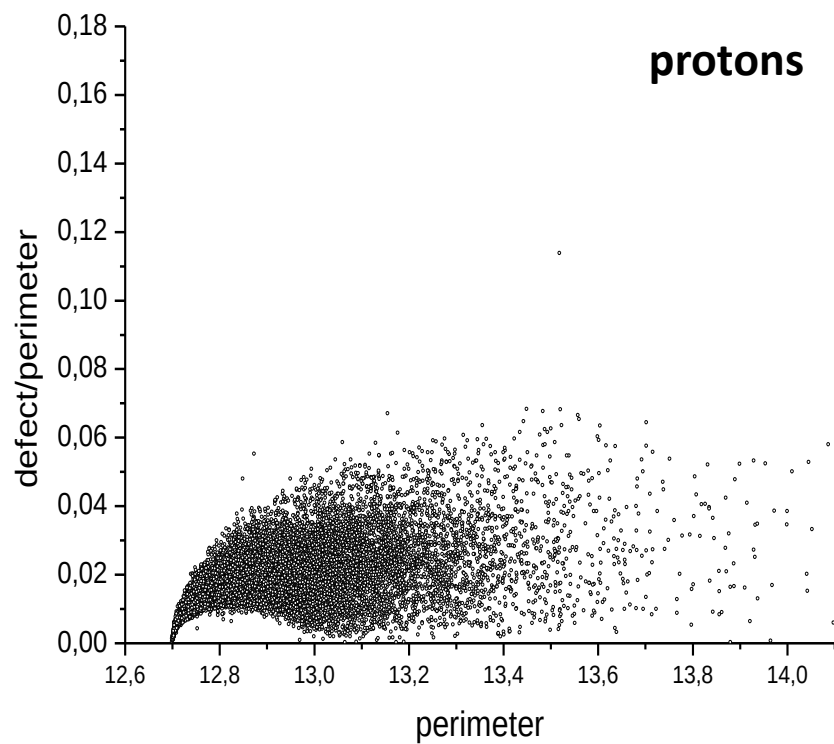
$$\text{ch } h = \frac{m_T}{m}$$

$$\text{дефект} = \pi - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3$$

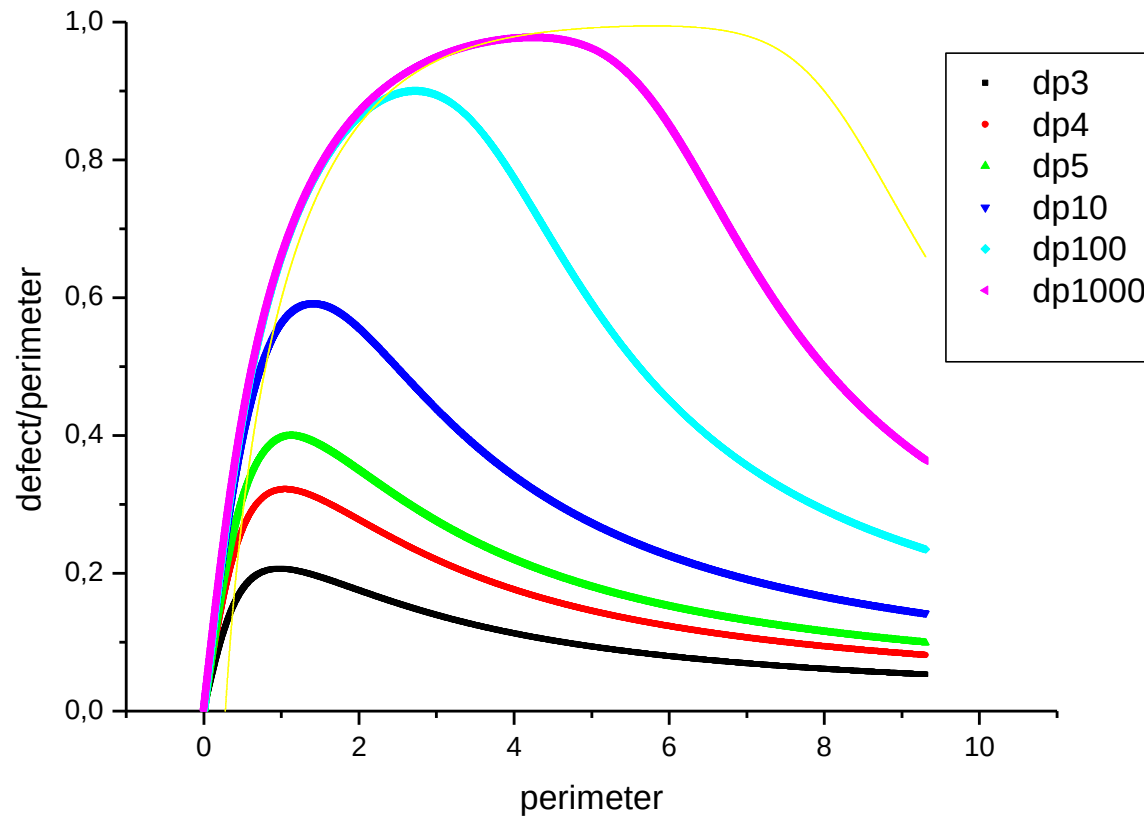
$$\text{периметр} = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3$$



π^-C (40 GeV/c)

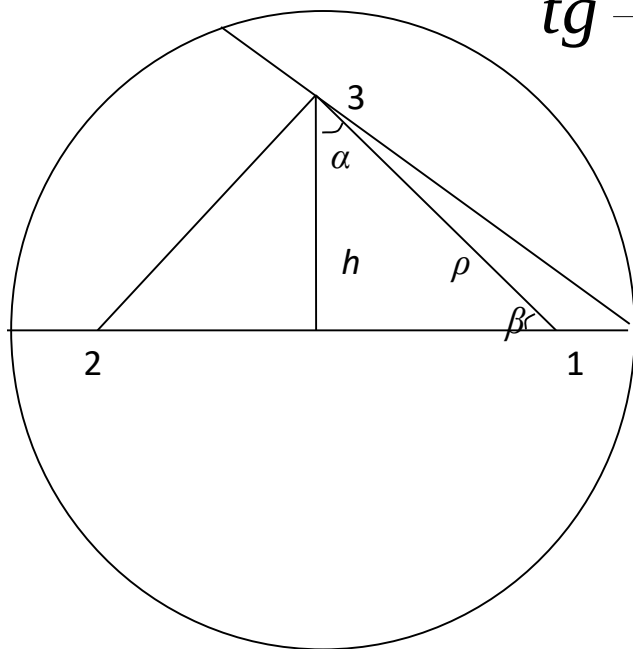


Особенность геометрии Лобачевского

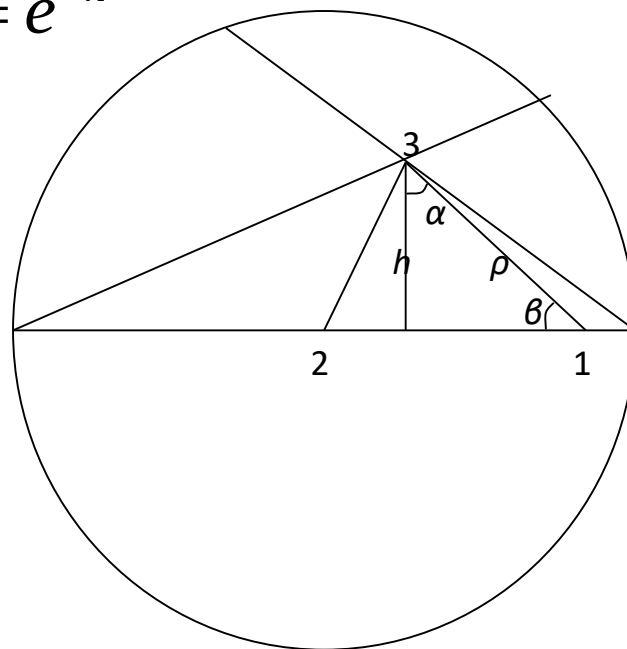


Правильные многоугольники с числом сторон $n=3, 4, 5, 10, 100, 1000$ вписанные в окружность

$$\operatorname{tg} \frac{\Pi_L(h)}{2} = e^{-h}$$



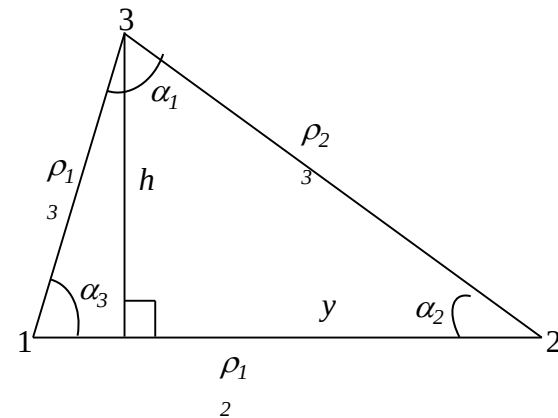
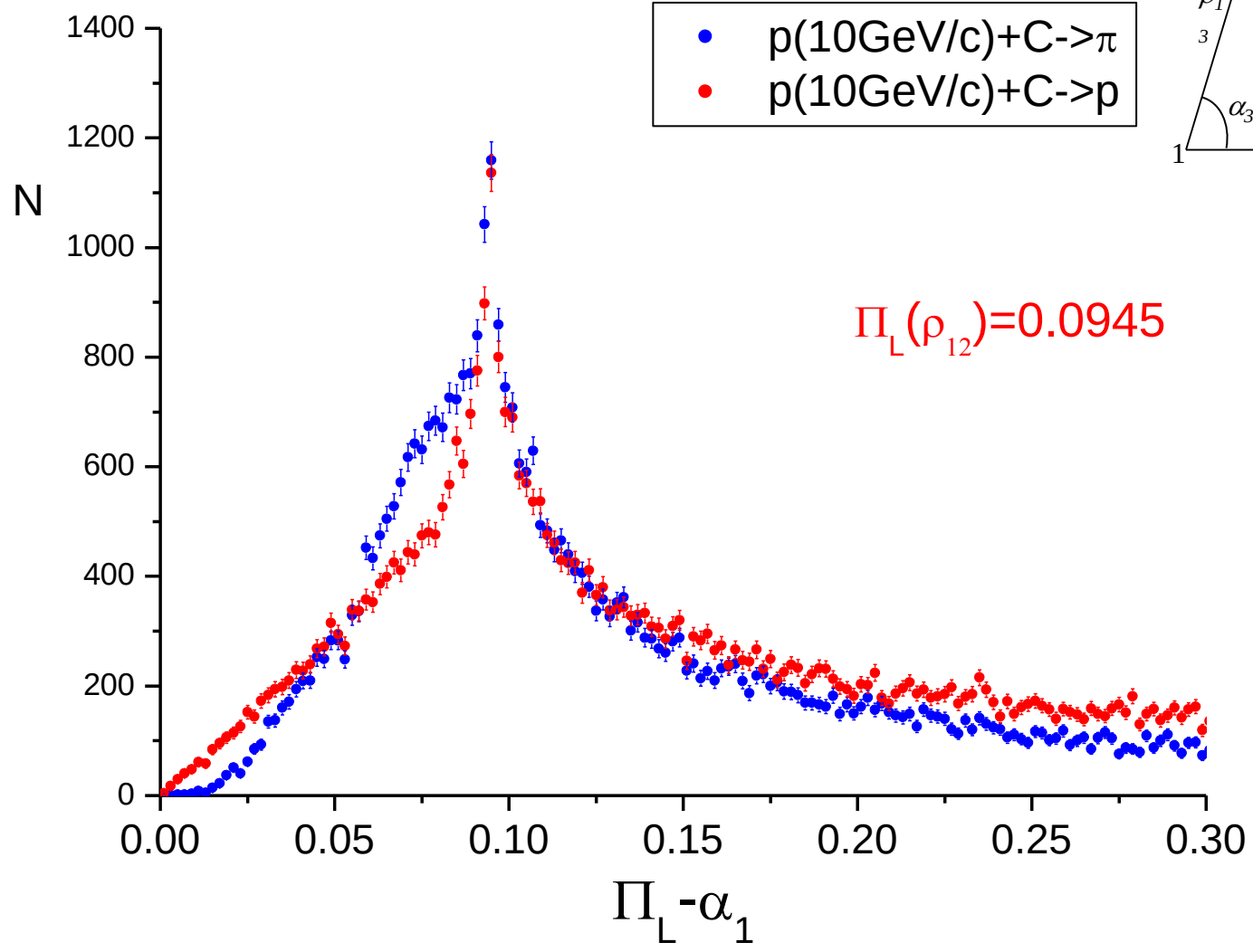
Коллайдерная мода

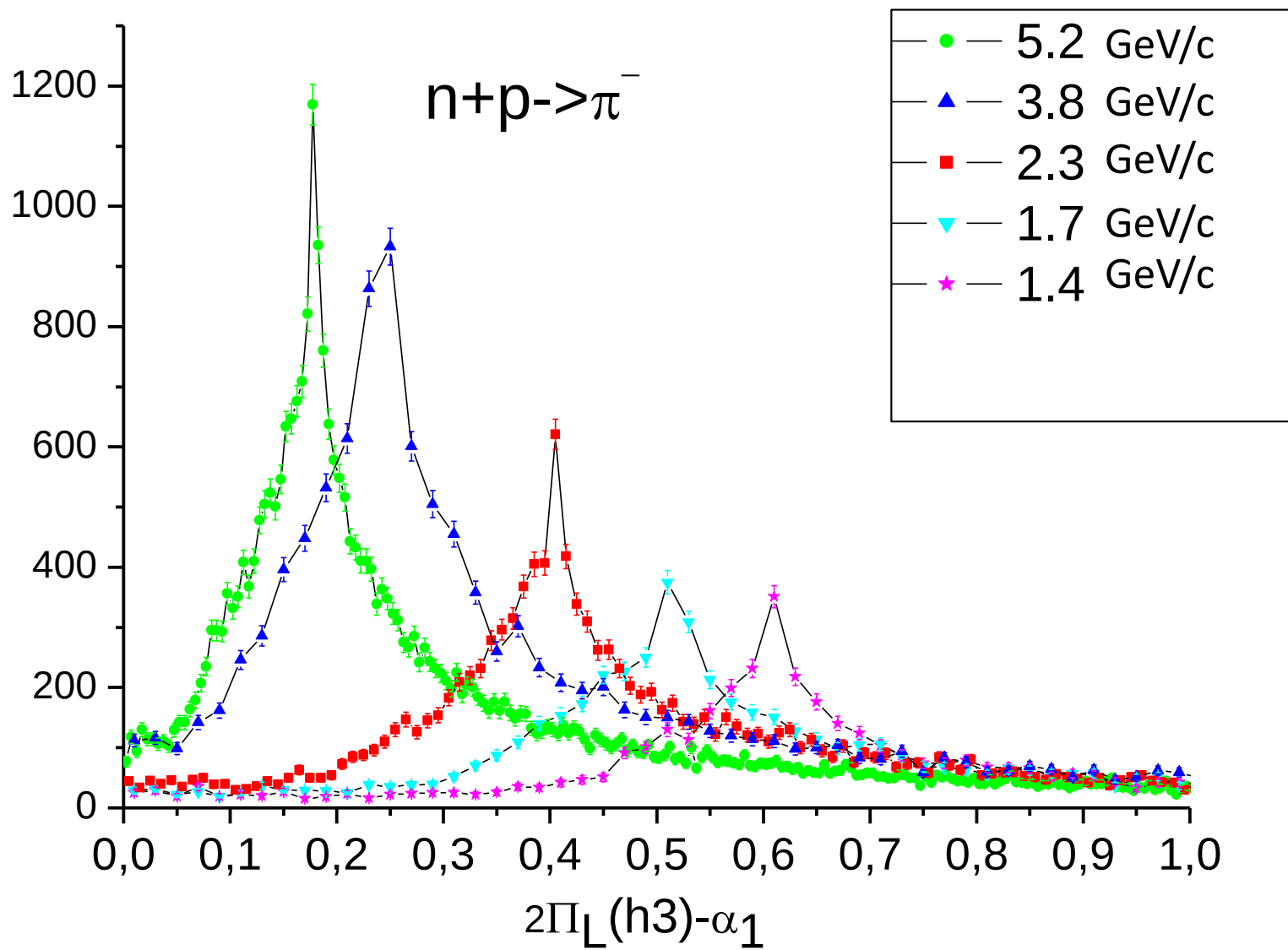


Неподвижная мишень

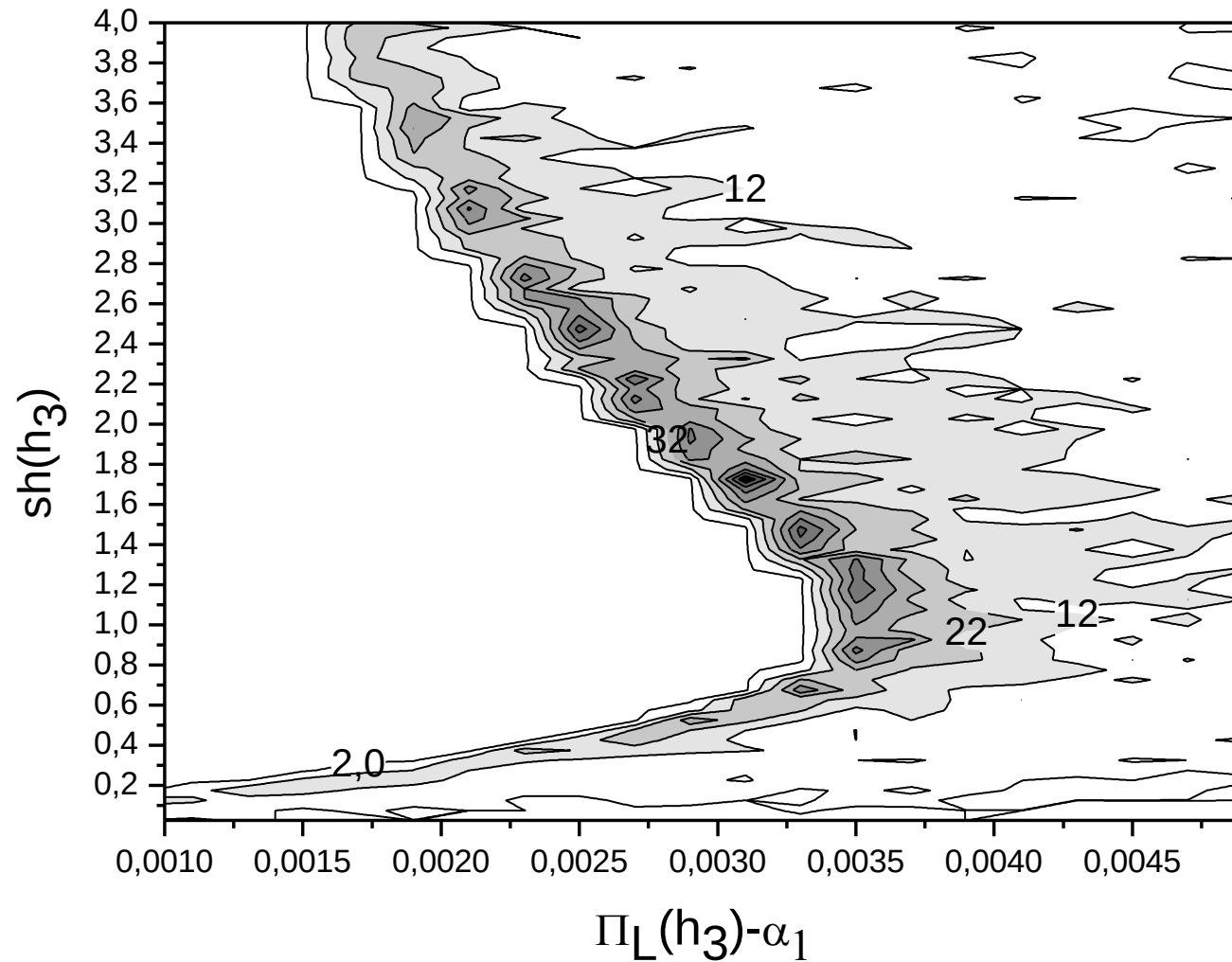
Угол параллельности

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

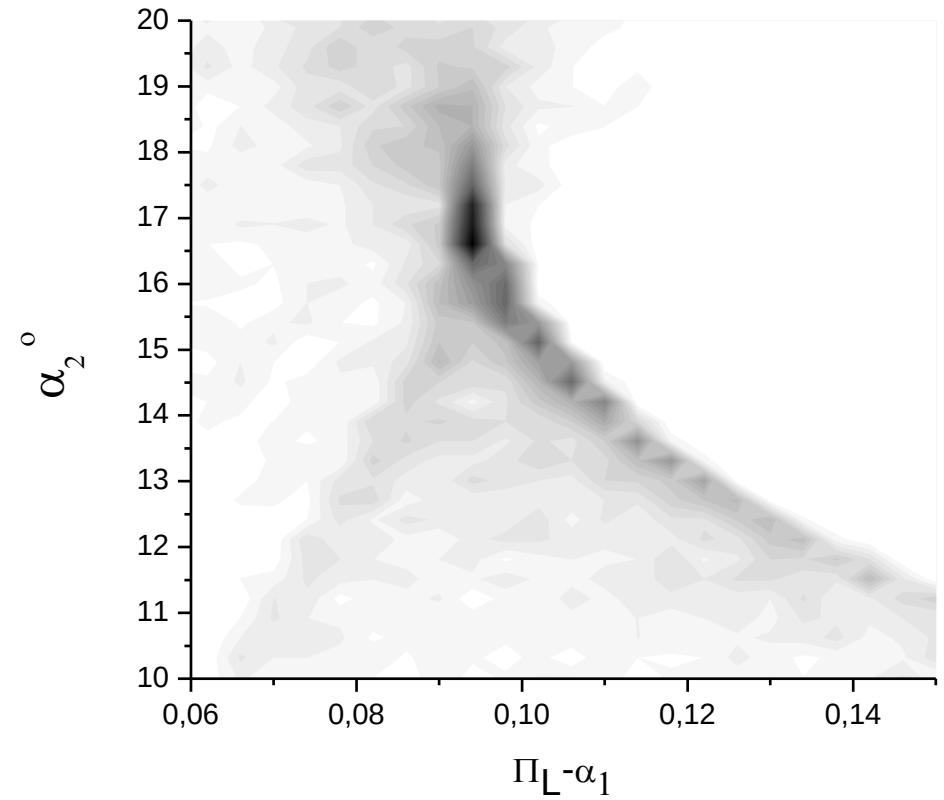
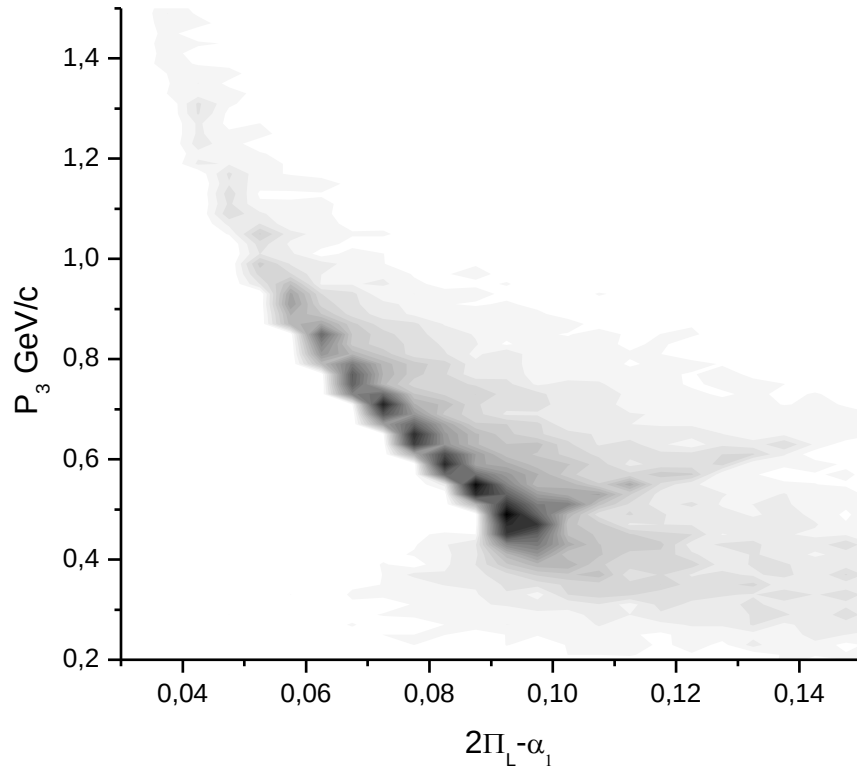




$$\pi^-(40\Gamma\text{эВ}/c)+C\rightarrow\pi^-$$



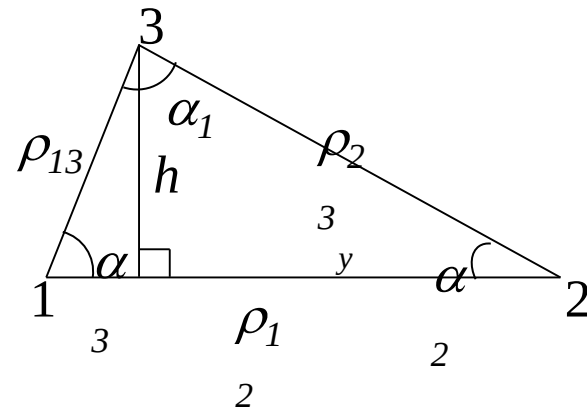
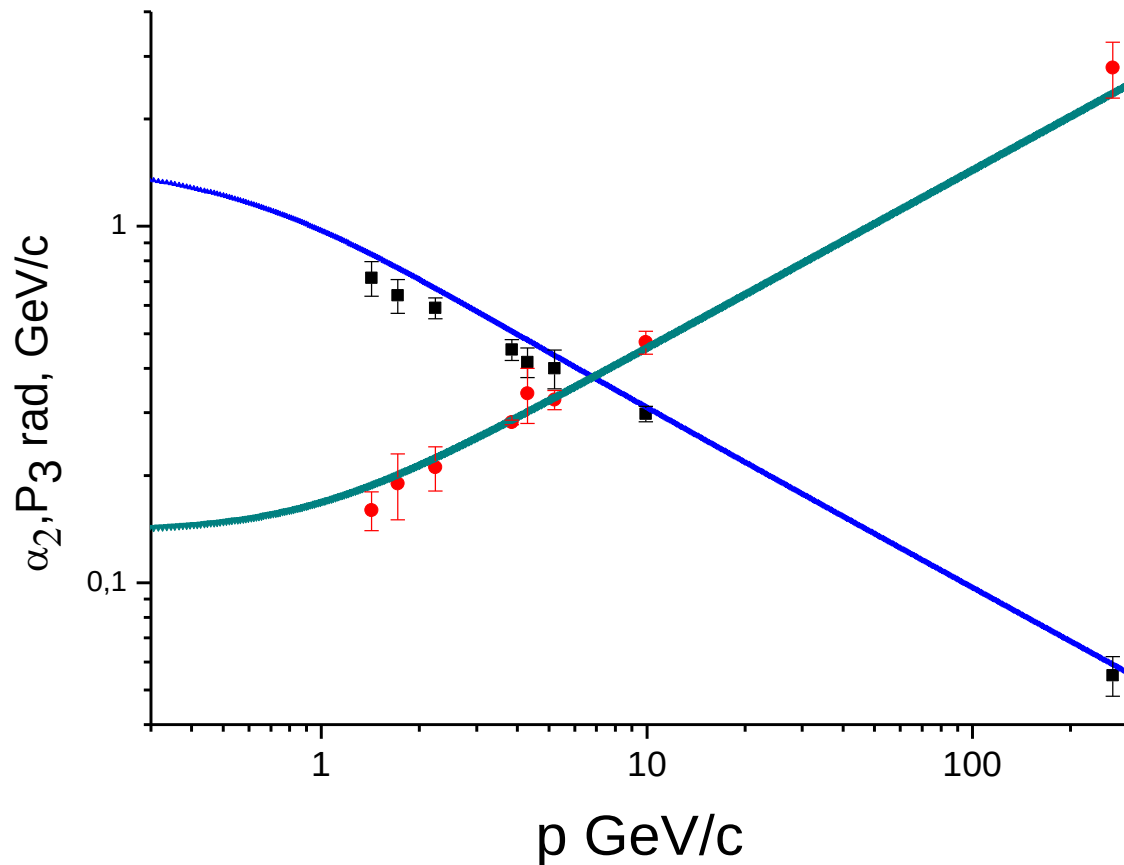
$$p(10\Gamma\text{эВ}/c)+C\rightarrow\pi^-$$



Направленное ядерное излучение

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

$$P_{23} = m_3 \cdot sh h / \sin \alpha_2 \quad sh(h) = \sqrt{th(\rho_{12} / 2)}$$





Jurgen Schukraft

ALICE CERN

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Nuclear Physics A 967 (2017) 1–10

NUCLEAR
PHYSICS A

www.elsevier.com/locate/nucphysa

QM2017: Status and Key open Questions in Ultra-Relativistic Heavy-Ion Physics

Jurgen Schukraft

CERN, Div. EP, CH-1211 Geneva 23, Switzerland; schukraft@cern.ch

“And we also learned that the d.o.f. of the Quark-Gluon Plasma are definitely not (quasi-free) quarks and gluons.”

Мы узнали, что степени свободы кварк-глюонной плазмы – это точно не (квази-свободные) кварки и глюоны.

“In the dash to new machines and higher energy, the question of the onset - exactly when (in time) and where (in energy or volume) we first produced the QGP - has been left behind, unanswered. It may yet turn out that there is actually no clearly identifiable onset, that the transition is continuous and gradual in terms of volume (starting with pp) or energy density.”

В погоне за новыми машинами и более высокими энергиями вопрос о начале – когда (по времени) и где (по энергии или объему) мы впервые получаем КГП был оставлен без ответа. Может оказаться, что на самом деле не существует однозначного начала, что переход непрерывный и постепенный с точки зрения объема (начиная с pp) или плотности энергии.

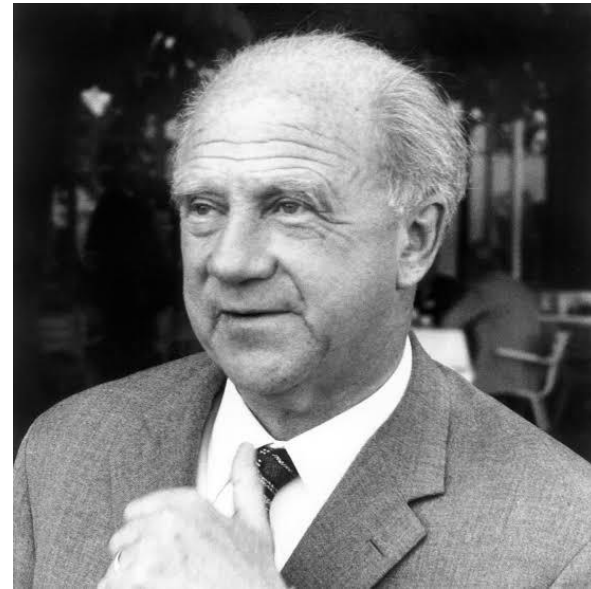
In any case, the old paradigm that we study hot and dense matter properties in heavy ion collisions, cold nuclear matter modifications in p-nucleus, and use pp primarily as comparison data, appears no longer sensible.

We should examine a new paradigm, where the physics underlying soft ‘collective’ signals (including apparently hadronisation!) is the same in all high energy reactions, from e+e- to central AA. This physics may be a generic property of all strongly interacting many-body systems ($N \geq 2?$), even if it is obvious and dominant only in AA and barely discernible in pp.

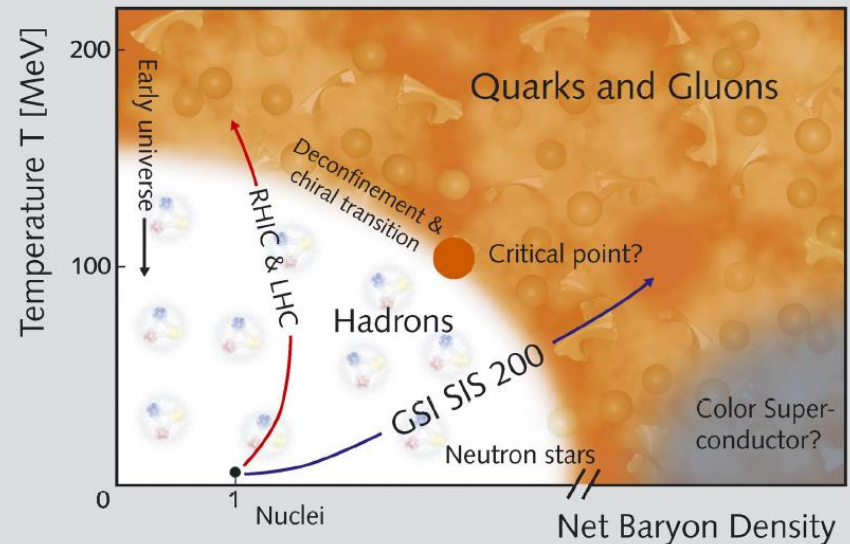
В любом случае, старая парадигма о том, что мы изучаем свойства горячей плотной материи в тяжелоионных столкновениях, преобразования холодной ядерной материи в протон-ядерных столкновениях и используем pp, прежде всего, для сравнения, больше не является разумной. Необходимо изучить новую парадигму, в которой физика, лежащая в основе мягких «коллективных» сигналов (включая, вероятно, и адронизацию!) такая же, как во всех высокоэнергетических реакциях, начиная от e+e-, и до центральных AA столкновений. Эта физика может быть общим свойством всех сильно взаимодействующих систем многих тел ($N \geq 2?$), даже если она очевидна только в AA столкновениях и едва различима в pp.

The major axiom consists in that in calculating some quantities, e.g. the energy, the frequency, and so on, one should use the relations between observable quantities only.

W. Heisenberg



W. HEISENBERG. ÜBER DIE STABILITÄT
UND TURBULENZ VON FLÜSSIGKEITEN
DISSERTATION 1923 ANN. D. PHYSIK
74 (1924) PP. 577-627.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Ускорительный комплекс NICA имеет большой потенциал открытий новых фундаментальных закономерностей в сильных взаимодействиях благодаря широкому спектру возможностей постановки экспериментов в коллайдерной моде, на выведенных пучках с фиксированной мишенью и на внутренних пучках Нуклотрона.
- Наряду с традиционным изучением жестких экзотических процессов с большими передачами импульсов представляется важным изучение мягких процессов с надежной идентификацией продуктов реакции.
- Анализ данных, полученных при помощи пузырьковых камер, дает хорошую основу для верификации моделей, используемых для планирования новых экспериментов.



...ИСЦЕЛИТЬ НОВЕЙШЕЕ ПОКОЛЕНИЕ
ОТ СЛЕПОГО, НЕОБДУМАННОГО ПРИСТРАСТΙΑ
К ПОВЕРХНОСТНОМУ И ИНОЗЕМНОМУ, РАСПРОСТРАНЯЯ
В ЮНЫХ УМАХ УВАЖЕНИЕ К ОТЕЧЕСТВЕННОМУ
И УБЕЖДЕНИЕ, ЧТО ТОЛЬКО ПРИНОРОВАНИЕ ОБЩЕГО,
ВСЕМИРНОГО ПРОСВЕЩЕНИЯ К НАШЕМУ НАРОДНОМУ БЫТУ,
К НАШЕМУ НАРОДНОМУ ДУХУ МОЖЕТ ПРИНЕСТИ
ИСТИННЫЕ ПЛОДЫ ВСЕМ И КАЖДОМУ.

С.С.УВАРОВ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!