

Эксперименты по поиску плотной барионной материи

А.Малахов

*Лаборатория физики высоких энергий ОИЯИ
malakhov@ihe.jinr.ru*

Седьмые черенковские чтения
Москва, ФИАН, 15 апреля 2014 г.

**В 70-х годах прошлого века в Лаборатории
высоких энергий ОИЯИ по инициативе академика
А.М.Балдина возникло новое направление:
«Релятивистская ядерная физика»**

СБОРНИК

КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ
ПО
ФИЗИКЕ

№ 1 январь 1971

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Ордена Ленина

Физический институт им П.Н. Лебедева

Краткие сообщения по физике № 1 январь 1971

МАСШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ АДРОННЫХ
СТОЛКНОВЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ
ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ
РЕЛЯТИВИСТСКОМ УСКОРЕНИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ
ИОНОВ

А. М. Балдин

Пучки частиц высоких энергий до последнего времени получались исключительно на протонных и электронных ускорителях, т.е. при ускорении частиц, обладающих единичным зарядом. Ускорение частиц, обладающих зарядом большим единицы, как известно, в принципе дает возможность получить энергию ускоряемых частиц (при одинаковых параметрах ускорителя) большую, чем энергия протонов, в число раз, равное кратности заряда. Так, например, на Дубненском синхрофазотроне, рассчитанном на получение протонов с энергией 10 Гэв, можно получить ядра гелия с энергией 20 Гэв, а ядра неона (заряд 10 e) с энергией 100 Гэв. Возникает естественный вопрос, не получатся ли в результате столкновения с мишенью ядер, например, неона, обладающих энергией 100 Гэв, пучки вторичных частиц, полученные пока только на Серпуховском ускорителе?

Утвердительный ответ на этот вопрос означал бы, что с помощью ускорения тяжелых ядер, обладающих более высоким зарядом, можно было бы сравнительно дешевым способом в короткие сроки получить пучки частиц рекордно высоких энергий.

Цель настоящей заметки – рассмотреть этот вопрос и сделать определенные предсказания.

Обычно на вопрос о возможности передачи большой энергии составным ядром отдельному (например, сво-

...с помощью ускорения тяжелых ядер, обладающих более высоким зарядом, можно было бы сравнительно дешевым способом в короткие сроки получить пучки частиц рекордно высоких энергий.

№ 1 январь 1971

январь 1971

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Ордена Ленина

Физический институт им П.Н. Лебедева

НЫХ
ЧЕНИЯ
РИ
АРЯДНЫХ

него време-
и электроя-
ц, обладаю-
обладающих

цы, как известно, в принципе
ить энергию ускоряемых час-
метрах ускорителя) большую,
число раз, равное кратности
а Дубненском синхрофазотро-
не, расщепление протонов с энергией
10 Гэв, мож... ядра гелия с энергией 20 Гэв,
а ядра неона... с энергией 100 Гэв. Возни-
кает естественный вопрос, не получатся ли в резуль-
тате столкновения... ядра, например, неона,
обладающих энергией... пучки вторичных частиц,
полученные пока только... Серпуховском ускорителе?

Утвердительный ответ на этот вопрос означал бы, что с помощью ускорения тяжелых ядер, обладающих более высоким зарядом, можно было бы сравнительно дешевым способом в короткие сроки получить пучки частиц рекордно высоких энергий.

Цель настоящей заметки – рассмотреть этот вопрос и сделать определенные предсказания.

Обычно на вопрос о возможности передачи большой энергии составным ядром отдельному (например, сво-

$$\mathbf{I+II} \rightarrow 1+2+3+\dots$$

$$b_{ik} = - (u_i - u_k)^2$$

$$u_i = p_i/m_i$$

$$u_k = p_k/m_k$$

$$i, k = \mathbf{I, II, 1, 2, 3, \dots}$$

Классификация ядерных столкновений с помощью b_{ik}

$$b_{ik} \sim 10^{-2}$$

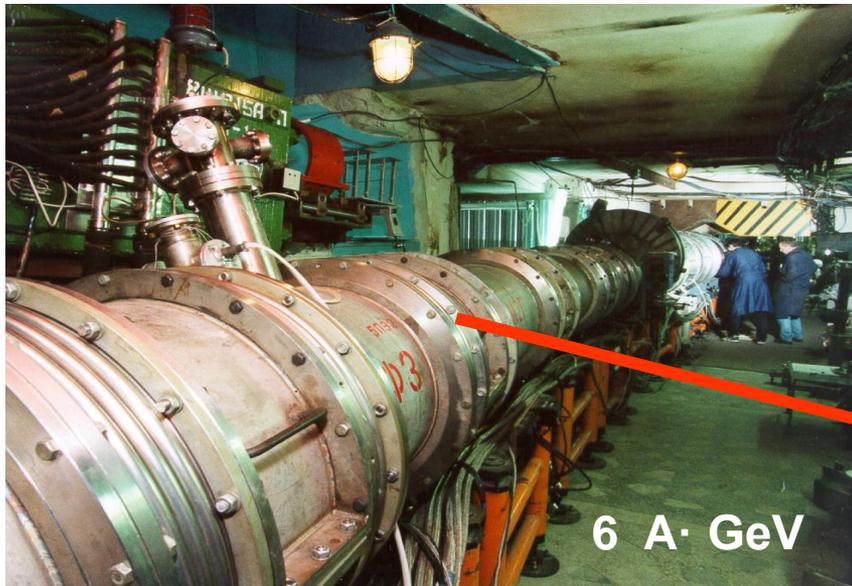
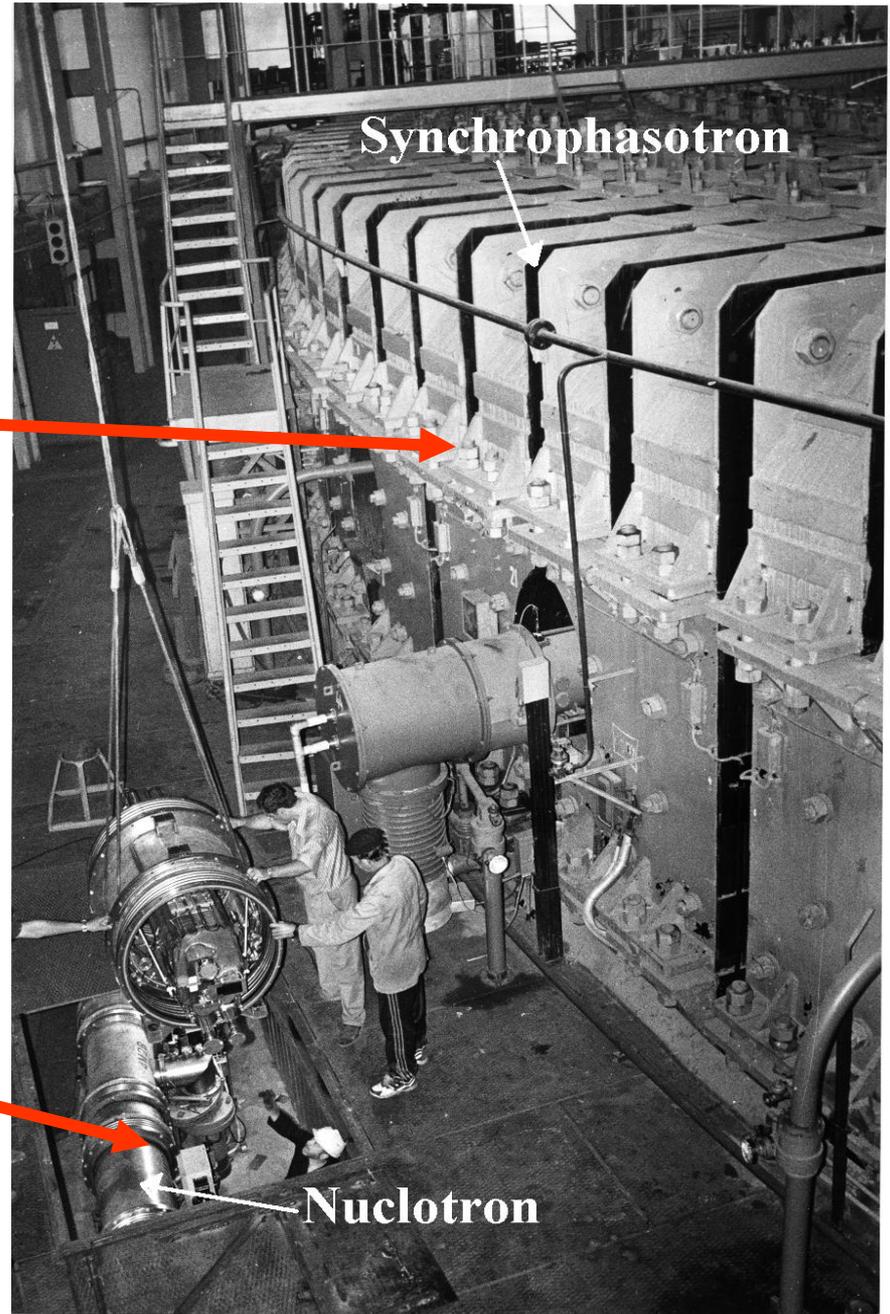
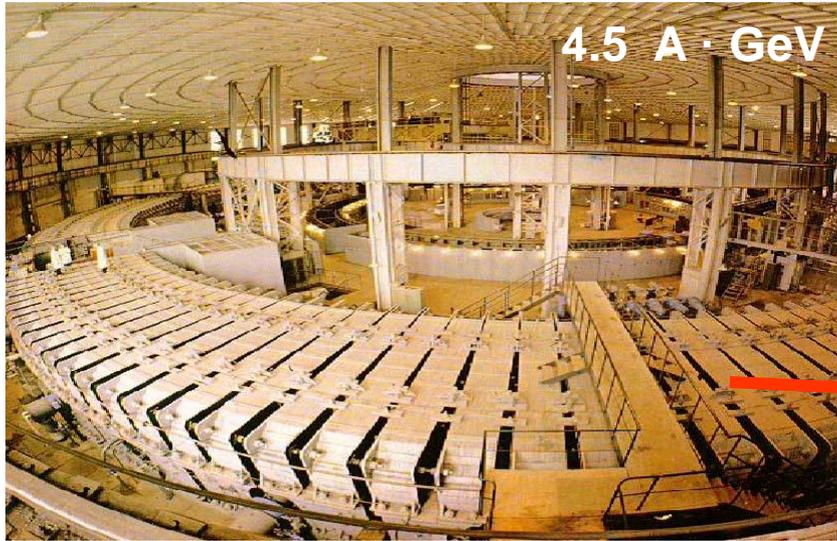
классическая ядерная физика

$$0.1 \leq b_{ik} < 1$$

промежуточная (переходная) область

$$b_{ik} \gg 1$$

ядра следует рассматривать как
кварк-глюонные системы



**А.М.Балдин предложил изучать взаимодействия ядер при высоких энергиях в пространстве четырехмерных скоростей.
Этот подход оказался весьма плодотворным.**

За короткое время доклада трудно изложить полностью возможности этого подхода. Поэтому я ограничусь только одним результатом, который позволяет хорошо описать отношение выходов антибарионов к выходам барионов в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях.



А.Малахов . Седьмые черенковские чтения, Москва, ФИАН, 15 сентября 2014 г.



Joint Institute for Nuclear Research

**XXII INTERNATIONAL BALDIN
SEMINAR ON HIGH ENERGY
PHYSICS PROBLEMS**
*Relativistic Nuclear Physics
& Quantum Chromodynamics*



September 15-20, 2014, Dubna, Russia

International Advisory Committee

A. Andrianov (Russia)
A. Antonov (Bulgaria)
Ts. Baatar (Mongolia)
C. Ciofi degli Atti (Italy)
T. Donnelly (USA)
S. Dubnichka (Slovak Republic)
M. Gazdzicki (Poland)
P. Giubellino (CERN)
H. Gutbrod (Germany)
P. W.-Y. Hwang (Taiwan)
V. Kadyshesky (JINR)
V. Kekelidze (JINR)
A. Logunov (Russia)
H. Machner (Germany)
L. Majling (Czech Republic)
V. Matveev (JINR)
Y. Musakhanov (Uzbekistan)
Sh. Nagamiya (Japan)
Ch. Perdrisat (USA)
W. Plessas (Austria)
L. Pondrom (USA)
G. Roepke (Germany)
G. Salme (Italy)
V. Savrin (Russia)
L. Schroeder (USA)
P. Senger (Germany)
A. Shebeko (Ukraine)
A. Slavnov (Russia)
B. Slowinski (Poland)
H. Stocker (Germany)
A. Thomas (USA)
H. Toki (Japan)
E. Tomasi-Gustafsson (France)
I. Tserruya (Israel)
V. Voronov (JINR)
Nu-Xu (USA)
G. Zinoviev (Ukraine)

- Quantum chromodynamics at large distances
- Relativistic heavy ion collisions
- Hadron spectroscopy, multi-quarks
- Cumulative and subthreshold processes
- Structure functions of hadrons and nuclei
- Dynamics of multiparticle production
- Polarization phenomena, spin physics
- Studies of exotic nuclei in relativistic beams
- Applied use of relativistic beams
- Accelerator facilities: status and perspectives
- New project NICA/MPD (Nuclotron-based Ion Collider Facility/ Multipurposed Detector) at JINR
- Progress in experimental studies in high energy centers - JINR, CERN, BNL, JLAB, GSI, etc.

Organizing Committee

V. V. Burov (co-Chairman), A. I. Malakhov (co-Chairman),
S. G. Bondarenko (Vice-Chairman), E. P. Rogochaya (Scientific Secretary),
E. N. Russakovich (Secretary), A. A. Baldin, I. V. Boguslavsky, S. B. Gerasimov,
A. D. Kovalenko, V. K. Lukyanov, Yu. A. Panebratsev, E. B. Plekhanov,
N. M. Piskunov, O. V. Teryaev, V. D. Toneev, A. S. Vodopianov, P. I. Zarubin,
I. G. Zarubina

Addresses for Correspondence

Dr. Elena Rogochaya, E-mail: ishepp@theor.jinr.ru
Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics
Joint Institute for Nuclear Research
141980 Dubna RUSSIA

URL

<http://relnp.jinr.ru/ishepp/>

Visas, accommodation, travel details

Mrs. Elena Russakovich, E-mail: rusakovich@jinr.ru
International Department
Joint Institute for Nuclear Research
141980 Dubna RUSSIA
Tel.: +7(49621)63890 ; Fax: +7(49621)65891

Некоторое время назад мы с А.М.Балдиным опубликовали статью с предсказаниями выхода частиц в результате столкновений ядер при высоких энергиях.



В настоящее время начали появляться соответствующие экспериментальные данные вплоть до энергий Большого адронного коллайдера (LHC). В этом сообщении дается сравнение предсказаний, сделанных ранее с последними экспериментальными данными.

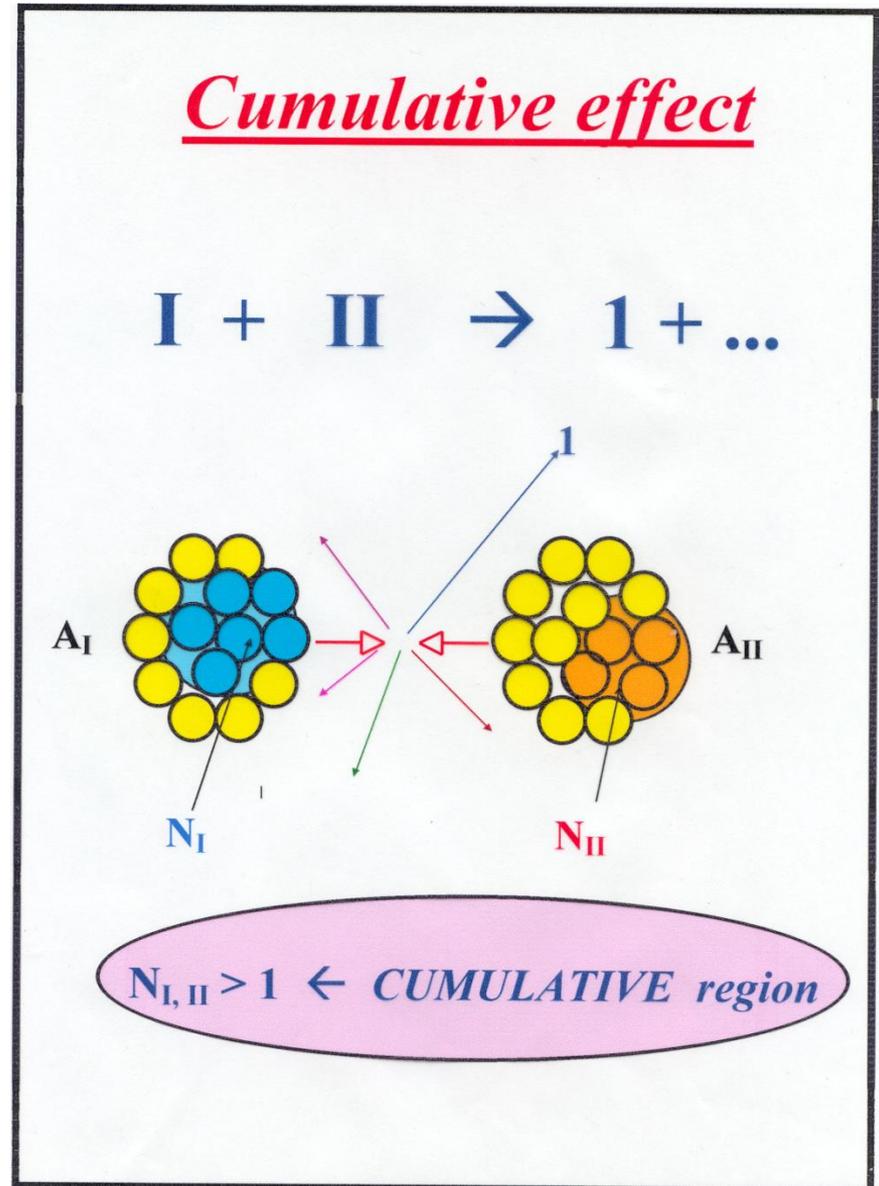


В соответствии с предположением А.М.Балдина более чем один нуклон в ядре **I** может принимать участие во взаимодействии.

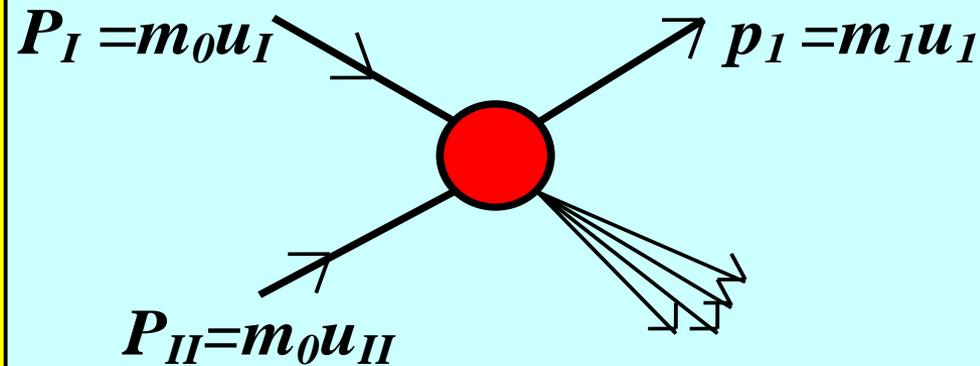
Величина $N_I = \lambda \cdot A_I$ - эффективное число нуклонов внутри ядра **I**, участвующих во взаимодействии называется кумулятивным числом

$$0 \leq N_I \leq A_I.$$

Кумулятивная область $\rightarrow N_I > 1$.



$$I + II \rightarrow 1 + \dots$$



$$(N_I P_I + N_{II} P_{II} - p_1)^2 = (N_I m_0 + N_{II} m_0 + \Delta)^2$$

Δ - масса частицы,
обеспечивающей сохранение
барионного числа, странности
и других квантовых чисел

СИММЕТРИЯ

СИММЕТРИЯ
РЕШЕНИЙ

КИНЕМАТИКА

СИММЕТРИЯ
ЛАГРАНЖИАНА

Инвариантность
Законы сохранения:
Сдвиг в P – импульс
Сдвиг по t – энергия
Поворот в P - момент

**Калибровочная
(масштабная)
симметрия**

**Симметрия диктует
взаимодействие (Янг)**

**Автомодельность
(Балдин)**

**Квантовые числа
Правила отбора**

Подобие

ПОК

Сильное

Электро-
магнитное

Слабое

Гравита-
ционное

$$\Pi = \min\left[\frac{1}{2} \sqrt{(u_I N_I + u_{II} N_{II})^2}\right],$$

N_I и N_{II} - кумулятивные числа для ядер I и II
 u_I и u_{II} - четырехмерные скорости этих ядер.

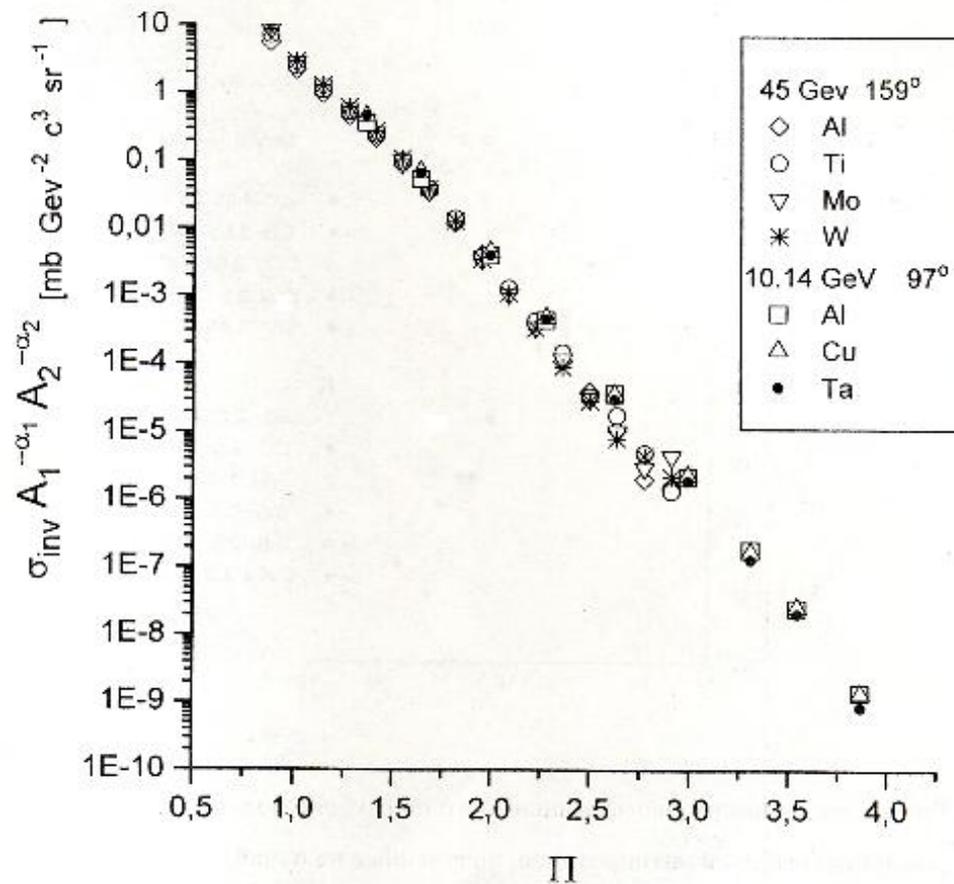
A.M.Baldin, A.A.Baldin. Phys. Particles and Nuclei, v.29, No.3 (1998) p.232.

A.M.Baldin, A.I.Malakhov, and A.N.Sissakian. Physics of Particles and Nuclei, Vol.32. Suppl. 1, 2001, pp.S4-S30.

$$E d^3\sigma/dp^3 = C_I A_I^{\alpha(N_I)} A_{II}^{\alpha(N_{II})} \exp(-\Pi/C_2),$$

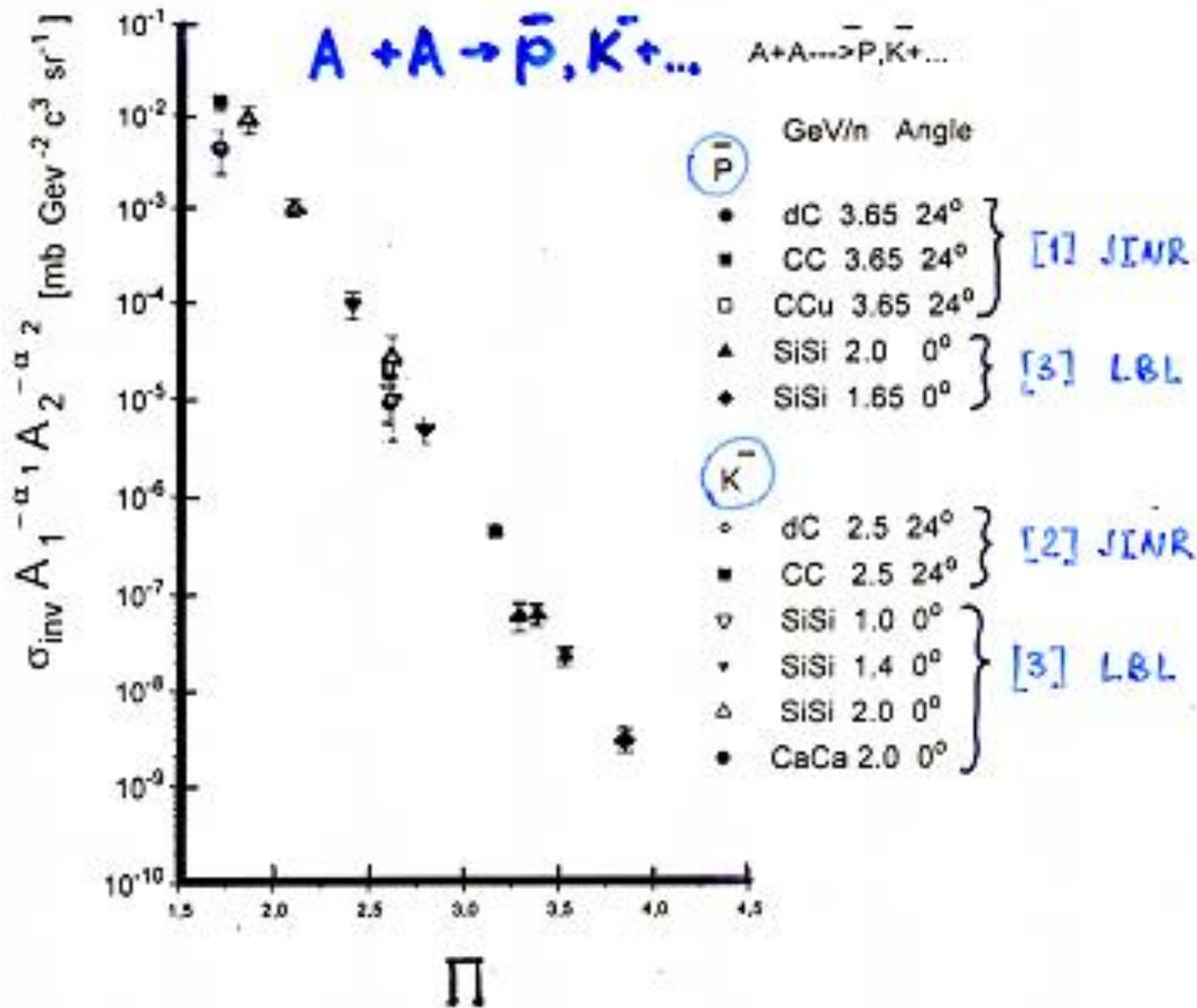
где $\alpha(N_I) = 1/3 + N_I/3$, $\alpha(N_{II}) = 1/3 + N_{II}/3$,

$$C_1 = 1.9 \cdot 10^4 mb \text{ GeV}^{-2} c^3 st^{-1} \text{ и } C_2 = 0.125 \pm 0,002$$



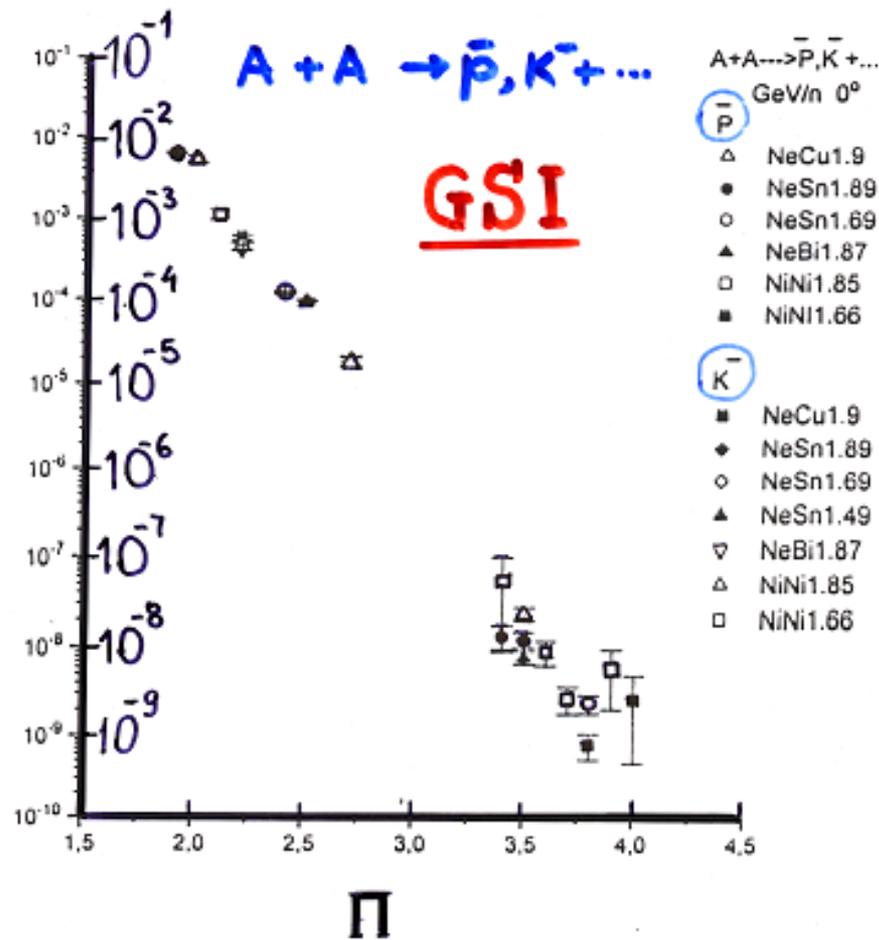
The experimental data on cumulative pion production were obtained at the ITEP and IHEP accelerators in dependence on similarity parameter Π . The experimental data are normed on A dependences.

A.M.Baldin, A.A.Baldin. Phys. Particles and Nuclei, v.29, No.3 (1998) p.232.



A.M.Baldin, A.A.Baldin. Phys. Particles and Nuclei, v.29, No.3 (1998) p.232.

$$\sigma_{inv} A_I^{-\alpha_I} A_{II}^{-\alpha_{II}} [\text{mb GeV}^{-2} \text{c}^3 \text{sr}^{-1}]$$

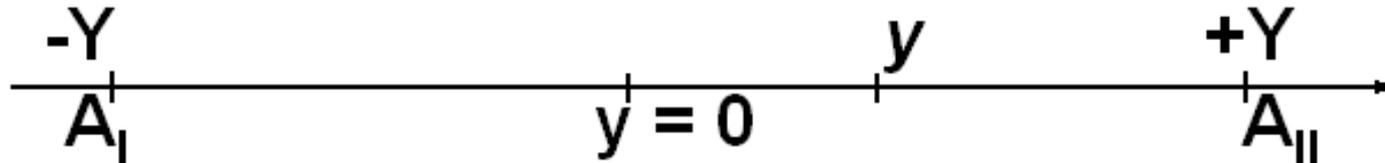


A.M.Baldin, A.A.Baldin. Phys. Particles and Nuclei, v.29, No.3 (1998) p.232.

$$\Pi^{\min} \Rightarrow d\Pi/dN_{\perp} = 0; d\Pi/dN_{\parallel} = 0$$

In the central rapidity region ($y = 0$)

$$(u_{\perp} u_{\parallel}) = (u_{\perp} u_{\parallel})$$



$$N_{\perp} = N_{\parallel} =$$

$$N = [1 + \sqrt{1 + (\Phi_{\delta}/\Phi^2)}] \Phi,$$

where

$$\Phi = (1/m_0)[m_T \text{ch} Y + \Delta]^{1/2} \text{sh}^2 Y$$

$$\Phi_{\delta} = (\Delta^2 - m_1^2)(4m_0^2 \text{sh}^2 Y)$$

and

$$\Pi^{\min} = N \cdot \text{ch} Y$$

$$\Pi_{\min} = \min [1/2\sqrt{(u_I N_I + u_{II} N_{II})^2}]$$

$$(N_I m_0 u_I + N_{II} u_{II} m_0 - m_1 u_I)^2 = (N_I m_0 + N_{II} m_0 + \Delta)^2$$

$$N_I \cdot N_{II} - \Phi_I N_I - \Phi_{II} N_{II} = \Phi_\delta,$$

$$\Phi_I = [(m_1/m_0)(u_I u_I) + \Delta/m_0]/[(u_I u_{II}) - 1]$$

$$\Phi_{II} = [(m_1/m_0)(u_{II} u_I) + \Delta/m_0]/[(u_I u_{II}) - 1]$$

$$\Phi_\delta = (\Delta^2 - m_1^2)/[2m_0^2((u_I u_{II}) - 1)].$$

$$[(N_I/\Phi_{II}) - 1][(N_{II}/\Phi_I) - 1] = 1 + [\Phi_\delta/(\Phi_I \cdot \Phi_{II})]$$

$$d\Pi/dN_I = 0, \quad d\Pi/dN_{II} = 0.$$

$$F_I = [(N_I/\Phi_{II}) - 1], \quad F_{II} = [(N_{II}/\Phi_I) - 1].$$

$$F_I \cdot F_{II} = 1 + \Phi_\delta/(\Phi_I \cdot \Phi_{II}) = \alpha$$

$$d\Pi/dF_I = 0, \quad d\Pi/dF_{II} = 0.$$

$$4\Pi^2 = N_I^2 + N_{II}^2 + 2N_I \cdot N_{II} \cdot (u_I u_{II})$$

$$4\Pi^2 = (F_I + 1)^2 \Phi_{II}^2 + (F_{II} + 1)^2 \Phi_I^2 + 2\Phi_I \cdot \Phi_{II} \cdot (F_I + 1) \cdot (F_{II} + 1) \cdot (u_I u_{II})$$

$$F_{II} = \alpha/F_I, \quad d(4\Pi^2)/dF_I = 0$$

Baldin A.M., Malakhov A.I.
JINR Rapid Communications,
No.1(87)-98, 1998, pp.5-12.

$$F_I^4 + F_I^3 [1 + (u_I u_{II})/z] - (\alpha/z) \cdot F_I [(u_I u_{II}) + (1/z)] - \alpha^2/z^2 = 0$$

$$z = \Phi_{II}/\Phi_I$$

$$I \leftrightarrow II: \quad z \rightarrow (1/z); \quad F_I \rightarrow (\alpha/F_{II}).$$

$$F_{II}^4 + F_{II}^3 [1 + (u_I u_{II})z] - z\alpha \cdot F_{II} [z + (u_I u_{II})] - \alpha^2 z^2 = 0.$$

In the central rapidity region $(u_I u_I) = (u_I u_{II}) \rightarrow z=1 \rightarrow$

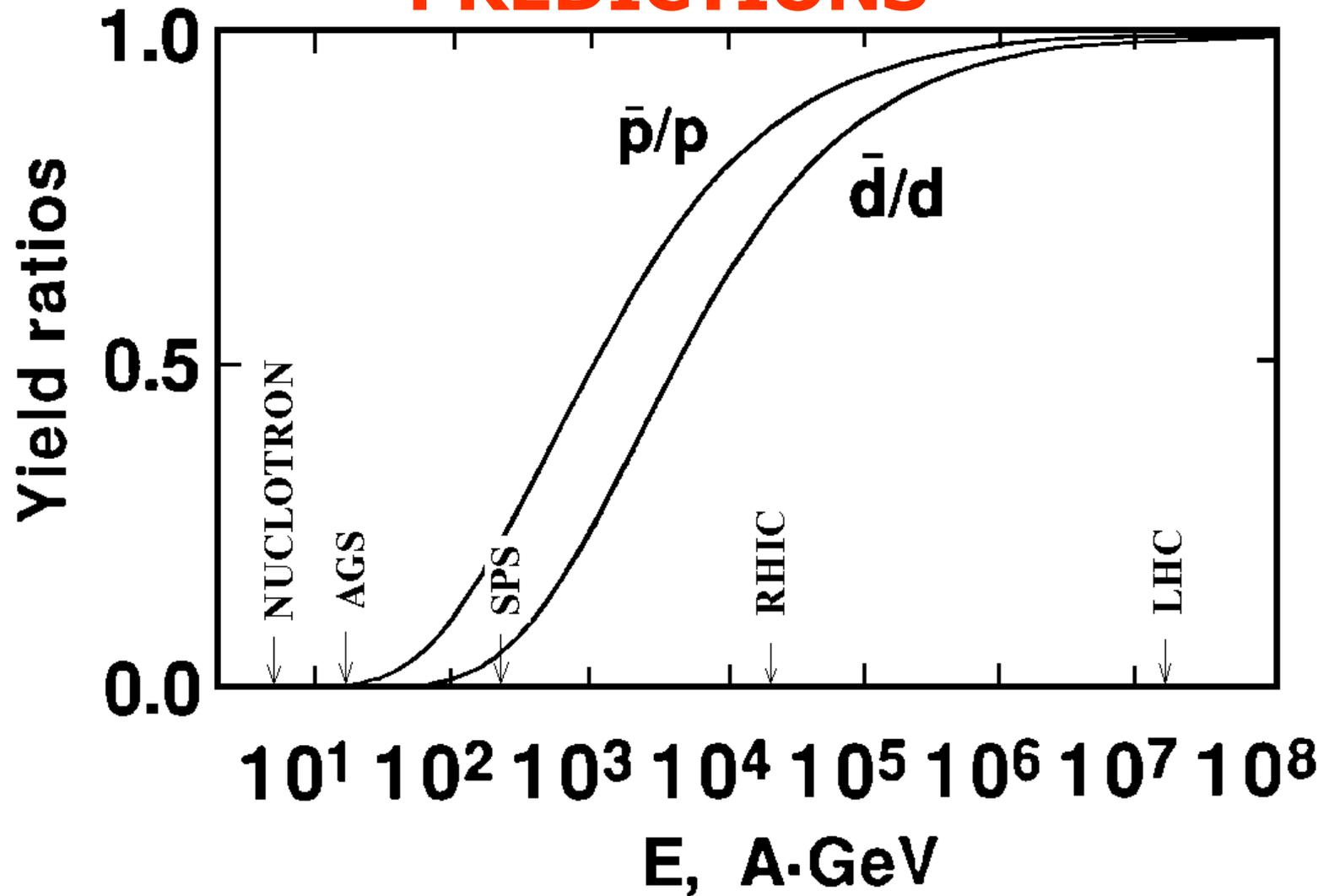
$$F_I = F_{II}, \quad \Phi_I = \Phi_{II} = \Phi$$

$$F_I = F_{II}, \quad (N_I/\Phi - 1) = (N_{II}/\Phi - 1), \quad N_I = N_{II} = N$$

$$F^2 = \alpha, \quad F_I = F_{II} = \sqrt{\alpha} = \sqrt{1 + (\Phi_\delta/\Phi^2)}$$

$$N_I = N_{II} = N = (1+F) \cdot \Phi = [1 + \sqrt{1 + (\Phi_\delta/\Phi^2)}] \cdot \Phi$$

PREDICTIONS



Asymptotics

$$s/(2m_I m_{II}) \approx (u_I u_{II}) = ch2Y \rightarrow \infty$$

$$\Pi_{\infty}^{\min} = (m_T/2m_0)[1 + \sqrt{1 + (\Delta^2 - m_1^2)/m_T^2}]$$

$$N_{\infty} \rightarrow 0$$

Аналитическое представление параметра Π позволяет сделать следующие заключения:

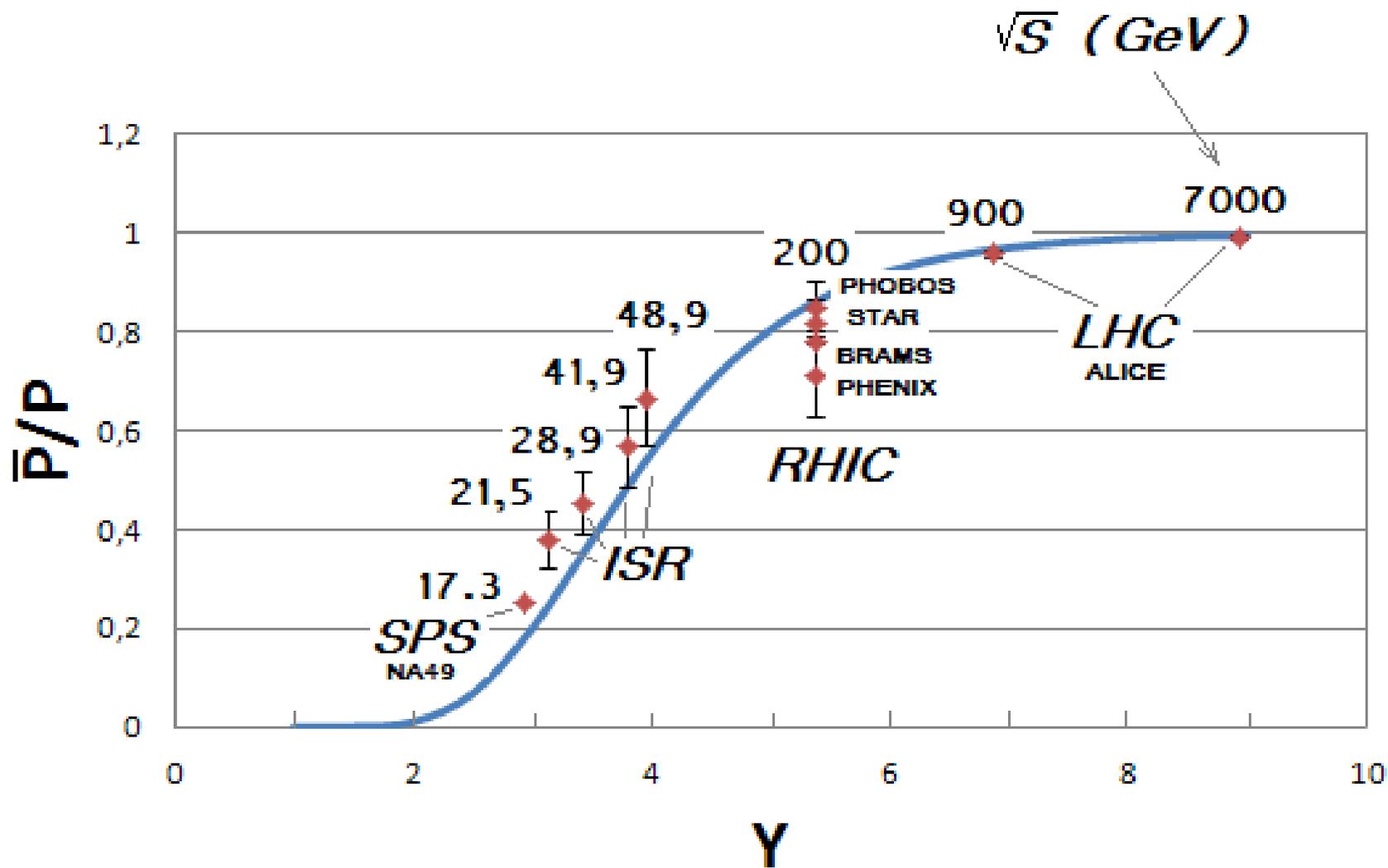
- Существует предел параметра Π при высоких энергиях
- Отношение сечений рождения античастиц и антиядер к сечениям рождения частиц и ядер стремится к единице с ростом энергии
- Эффективное число нуклонов, участвующих в реакции уменьшается с ростом энергии
- Вероятность наблюдения антиядер и фрагментов в центральной области быстрот мала

$$\text{Ratio} = \frac{\int C_1 \cdot A_I^{\alpha(N_I)} \cdot A_{II}^{\alpha(N_{II})} \cdot \exp\left(-\frac{\Pi_1}{C_2}\right) dm_T}{\int C_1 \cdot A_I^{\alpha(N_I)} \cdot A_{II}^{\alpha(N_{II})} \cdot \exp\left(-\frac{\Pi_2}{C_2}\right) dm_T} = \exp\left(-\frac{\Pi_1 - \Pi_2}{C_2}\right)$$

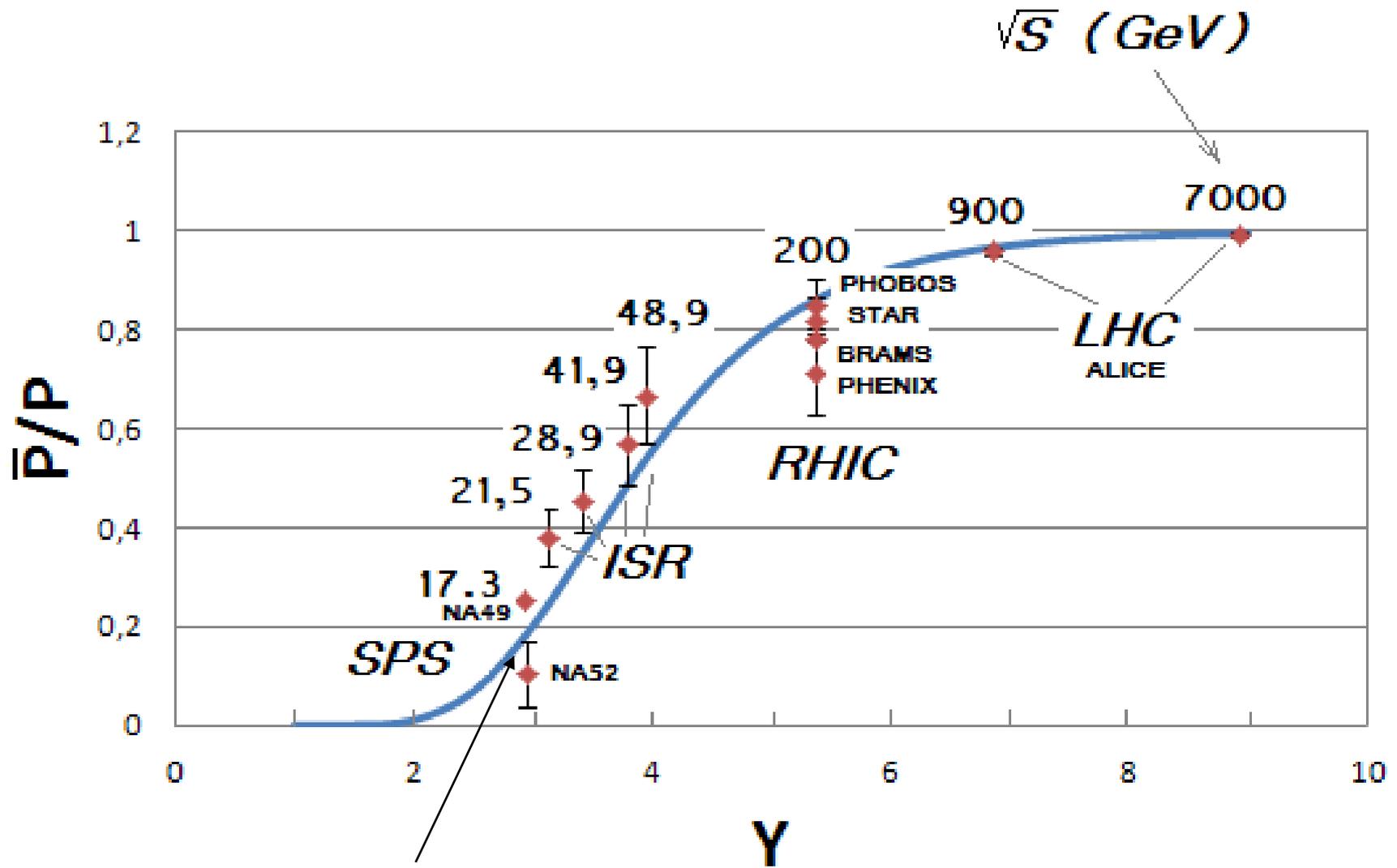
Для барионов $\longrightarrow \Pi_2 = \left[\frac{m_{1T}}{m_0} \text{ch}Y - \frac{m_1}{m_0} \right] \frac{\text{ch}Y}{\text{sh}^2 Y}$

Для антибарионов $\longrightarrow \Pi_1 = \left[\frac{m_{1T}}{m_0} \text{ch}Y + \frac{m_1}{m_0} \right] \frac{\text{ch}Y}{\text{sh}^2 Y}$

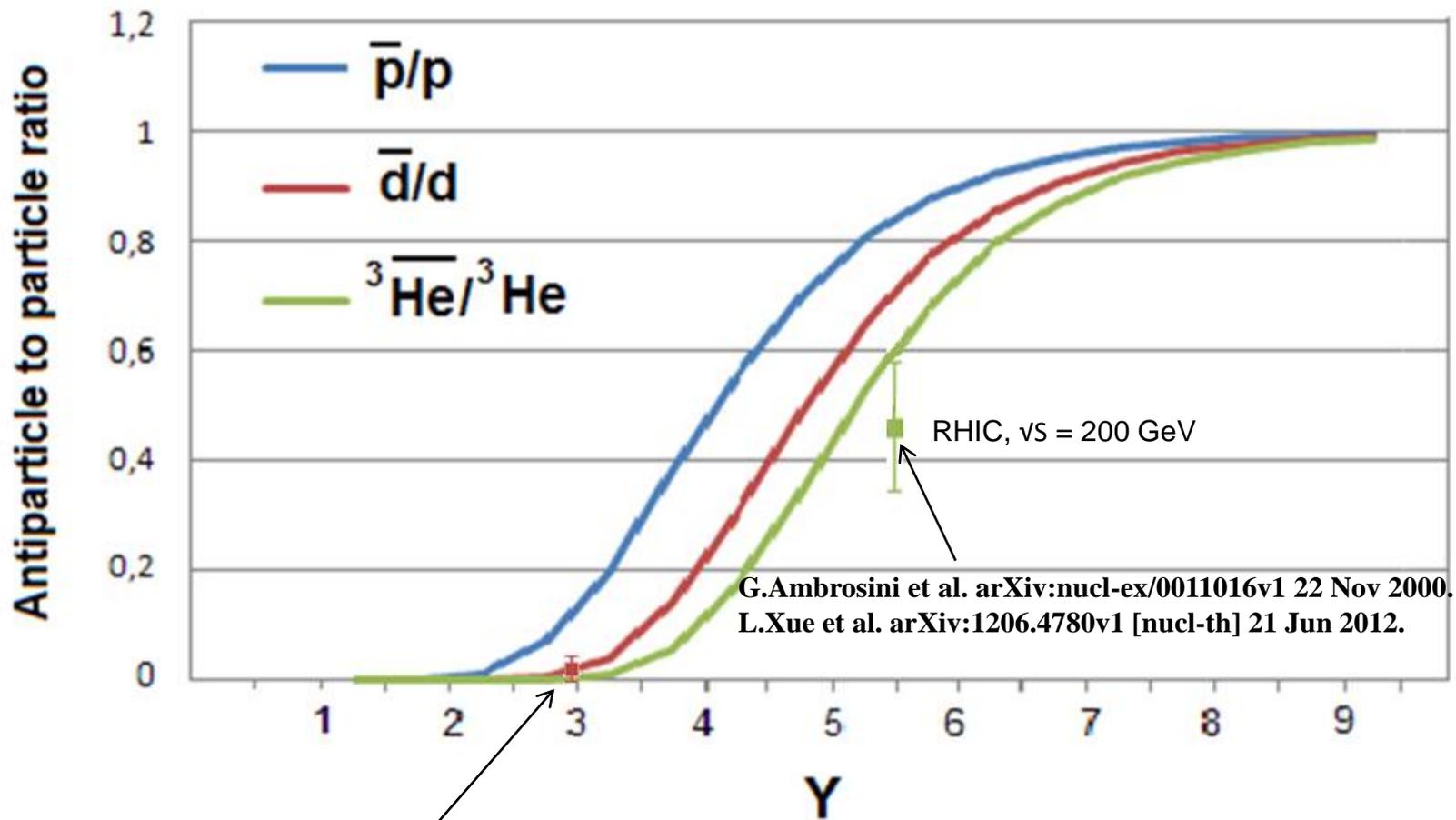
$$\Pi_1 - \Pi_2 = -2 \frac{m_1}{m_0} \frac{\text{ch}Y}{\text{sh}^2 Y}$$



◆ — Nuclear Physics A 859(2011) 63-72.
<http://hepdata.cedar.ac.uk/view/p7907>.



Nuclear Physics A610 (1996) 306c-316c (SPS, NA52).



Physical Review C 85 (2012) 044913 (SPS, NA49). SPS, $\sqrt{s} = 7,3$ GeV

Заключение

- Описание ядерных взаимодействий в пространстве четырехмерных скоростей и введение параметра подобия позволяет предсказать с хорошей точностью отношение выходов антиядер к выходам ядер в широкой области энергий от нескольких ГэВ на нуклон до энергий LHC в центральной области быстрот.
- Для детальной проверки этого подхода необходимы более точные экспериментальные данные по рождению антиядер и ядер.
- В дальнейшем разработанный подход позволит описать выходы любых частиц в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях в центральной области быстрот

Спасибо за внимание!