

**Синхрофазотрон  
и  
релятивистская  
ядерная физика**

**А.И.Малахов**

Юбилейное совещание,  
посвященное 100-летию со дня  
рождения В.И.Векслера и 50-  
летию запуска  
синхрофазотрона

10.09.2007 г.

**ЛАБОРАТОРИЯ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
ИМ. В.И.ВЕКСЛЕРА И А.М.БАЛДИНА**



**П**ОСТАНОВЛЕНИЕМ КОМИТЕТА  
ПО ЛЕНИНСКИМ ПРЕМИЯМ  
В ОБЛАСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР  
ОТ 22 АПРЕЛЯ 1959 ГОДА  
ПРИСУЖДЕНА ЛЕНИНСКАЯ ПРЕМИЯ

*ВЕКСЛЕРУ Владимиру Иосифовичу, академику,  
директору Лаборатории высоких энергий Объеди-  
ненного института ядерных исследований,  
ЗИНОВЬЕВУ Леониду Петровичу, начальнику  
отдела той же лаборатории, ЕФРЕМОВУ  
Дмитрию Васильевичу, заместителю начальника  
Главного управления по использованию атомной  
энергии при Совете Министров СССР, КОМАРУ  
Евгению Григорьевичу, директору Научно-иссле-  
довательского института, МОНОСЗОНУ Науку  
Абрамовичу, начальнику отдела, СТОЛОВУ  
Анатолию Михайловичу, начальнику лабора-  
тории, сотрудникам того же института,  
МИНЦУ Александру Львовичу, академику,  
директору Радиотехнического института  
Академии наук СССР, ВОДОПЬЯНОВУ Федору  
Алексеевичу, РУБЧИНСКОМУ Самуилу  
Менделеевичу, старшим научным сотрудниками*



*того же института, КОЛОМЕНСКОМУ Андрею  
Александровичу, ПЕТУХОВУ Валентину  
Афанасьевичу, РАБИНОВИЧУ Матвею  
Самсоновичу, старшим научным сотрудникам  
Физического института имени П. Н. Лебедева  
Академии наук СССР,— за создание синхрофазо-  
трона на десять миллиардов электронов-вольт.*

*Настоящий диплом выдан*

**ВЕКСЛЕРУ**

*Владимиру Иосифовичу*



Председатель Комитета  
по Ленинским премиям в области  
науки и техники  
при Совете Министров СССР

Ученый секретарь Комитета  
по Ленинским премиям в области  
науки и техники  
при Совете Министров СССР

МОСКВА

*А. Песменков* (А. ПЕСМЕНКОВ)

*И. А. Жуванков* (И. А. ЖУВАНКОВ)







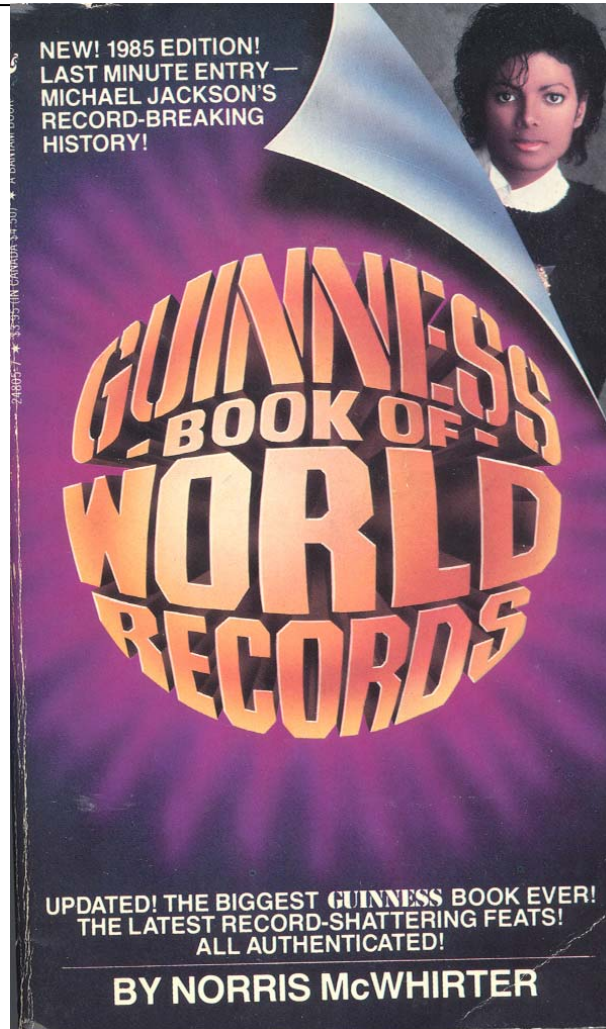
## Ленинская премия 1959 г.

*В.И.Векслер, Ф.А.Водопьянов, Д.В.Ефремов,  
Л.П.Зиновьев, А.А.Коломенский, Е.Г.Комар,  
А.Л.Мици, Н.А.Моносзон, В.А.Петухов,  
М.С.Рабинович, С.М.Рубчинский, А.М.Столов*

*За создание синхрофазотрона на  
десять миллиардов электрон-  
вольт*

# Heaviest Magnet

The heaviest magnet is one measuring 196 ft in diameter, with a weight of 40,000 tons, for the 10 GeV synchrophasotron in the Joint Institute for Nuclear Research at Dubna, near Moscow.



## GUINNESS 1985 BOOK OF WORLD RECORDS

Editors and Compilers  
**NORRIS McWHIRTER**  
(ROSS McWHIRTER 1955–1975)

1985 EDITION:

DAVID A. BOEHM, American Editor

MARIS CAKARS, Sports Editor

CYD SMITH, Assistant Editor

JIM BENAGH, Sports Contributor



BANTAM BOOKS  
TORONTO • NEW YORK • LONDON • SYDNEY • AUCKLAND





# Релятивистская ядерная физика



СБОРНИК

КРАТКИЕ  
СООБЩЕНИЯ  
ПО  
ФИЗИКЕ

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 получать 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-



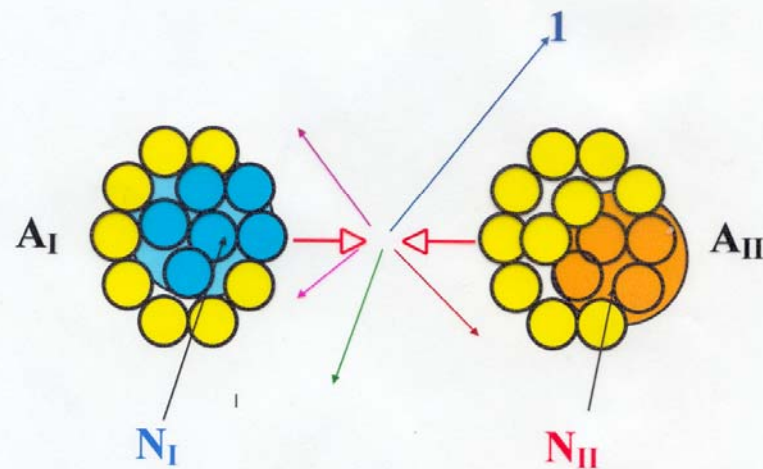
Более чем один нуклон ядра **I** принимает участие во взаимодействии (А.М.Балдин)

Величина  $N_I = \lambda A_I$ , эффективное число нуклонов в ядре **I**, участвующих во взаимодействии, называется **кумулятивным числом**

$$0 \leq N_I \leq A_I$$

Кумулятивная область  $\rightarrow N_I > 1$

## Cumulative effect

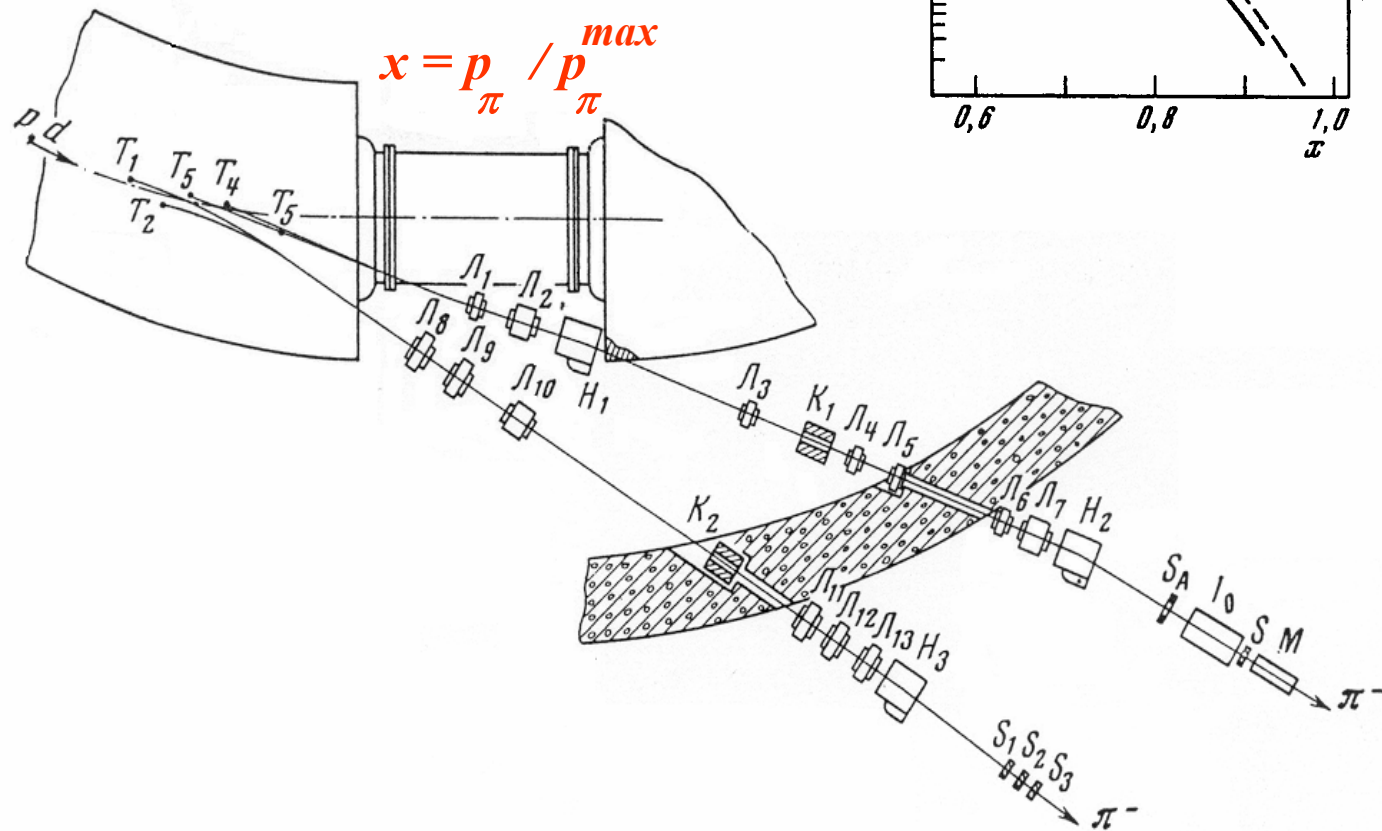
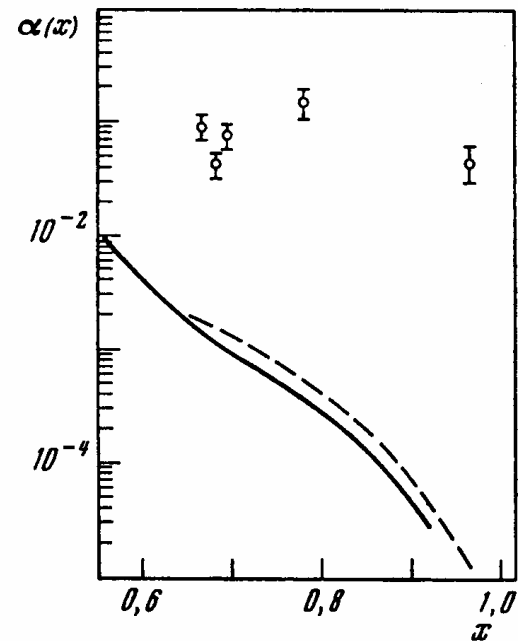


$N_{I, II} > 1 \leftarrow$  CUMULATIVE region





$$\alpha(x) = \frac{d\sigma(d + Cu \rightarrow \pi^- + \dots)}{d\sigma(p + Cu \rightarrow \pi^- + \dots)}$$

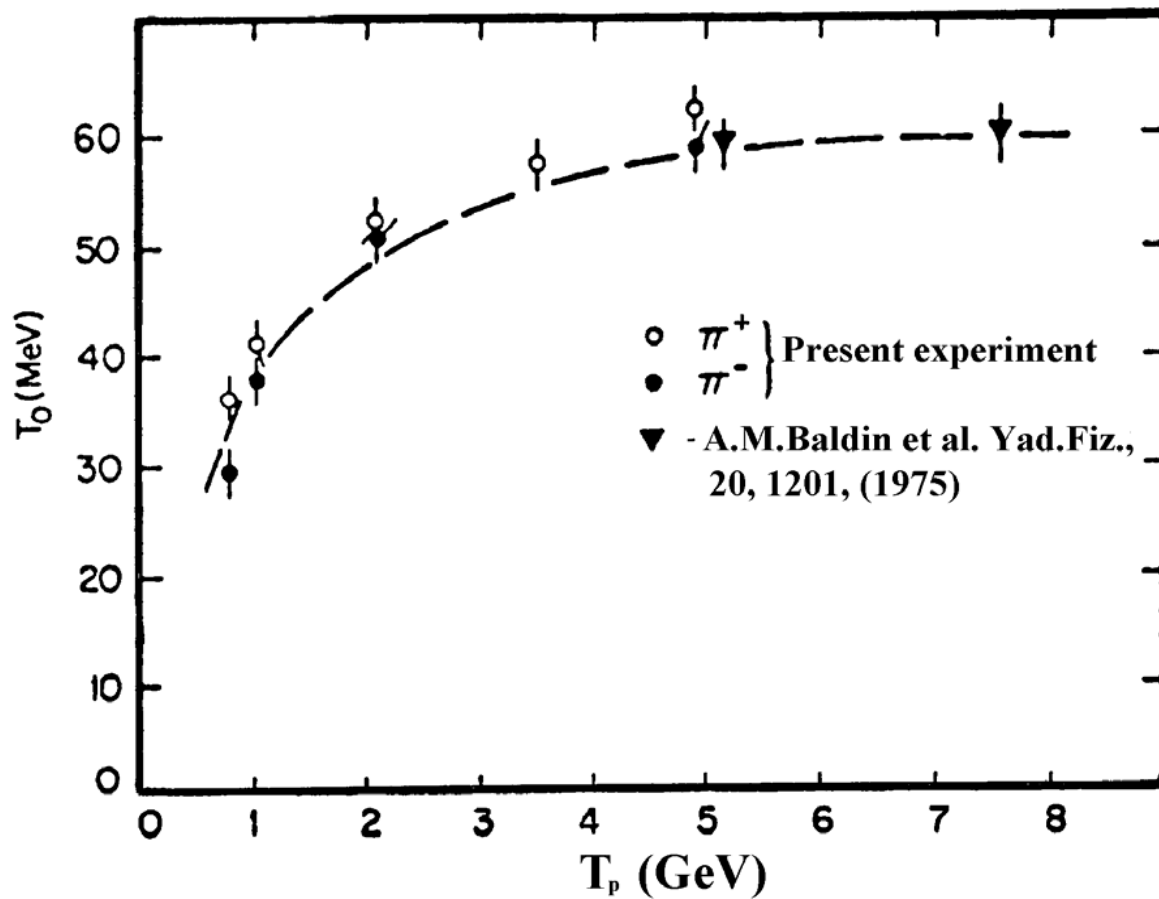


## **КУМУЛЯТИВНОЕ МЕЗОНООБРАЗОВАНИЕ**

**А.М.БАЛДИН, С.Б.ГЕРАСИМОВ, Н.ГИОРДЭНЕСКУ, В.Н.ЗУБАРЕВ,  
Л.К.ИВАНОВА, А.Д.КИРИЛЛОВ, В.А.КУЗНЕЦОВ, Н.С.МОРОЗ,  
В.Б.РАДОМАНОВ, В.Н.РАМЖИН, В.С.СТАВИНСКИЙ, М.И.ЯЦУТА**

***ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ***

***(Поступила в редакцию 5 февраля 1973 г.)***



Зависимость параметра  $T_0$  для пионов под углом  $180^\circ$  для p-Cu столкновений от энергии налетающих протонов  $T_p$ . Сечение образования пионов представлено в виде  $E \cdot d\sigma/dp^3 = C \cdot \exp(-T/T_0)$ , где  $T$  кинетическая энергия пионов в л.с.



Эксперименты показали следующую зависимость для сечений образования кумулятивных частиц для всех ядер от *He* до *U*:

$$\sigma (A_I A_{II} \rightarrow h_1 + \dots) = k \cdot A_I^n \cdot A_{II}^{m(x)} \cdot \exp(-x/\langle x \rangle)$$

$$b_{II} > b_{II} \gg 1$$

$$0.5 \leq x \leq 3.3$$

(Кумулятивный эффект:  $x > 1$ )

$$m(x) = 2/3 + x \quad (0.5 \leq x \leq 1)$$

$$m(x) = 1 \quad (x > 1)$$

$\langle x \rangle \approx 0.14 \Rightarrow$  Размер мульти-кварковой системы, из которой излучаются кумулятивные частицы

Ядерная кварк-партоновая структурная функция:

$$G(x) \sim \exp(-x/\langle x \rangle)$$

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

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

$$u_i = p_i / m_i$$

$$u_k = p_k / m_k$$

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

# Baldin Classification of Nuclear Interactions

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

**Classical Nuclear Physics**

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

**Transition region**

$$b_{ik} \gg 1$$

**Quark Gluon Systems**



## Инвариантное определение адронных струй

Струя является кластером адронов с относительно малыми  $b_{ik}$ .

Ось струи (единичный четырехмерный вектор):

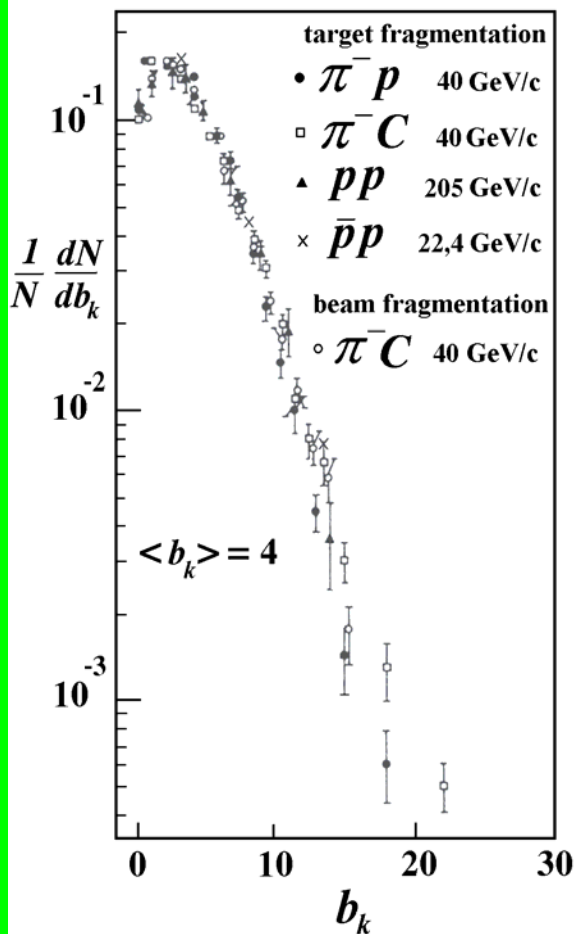
$$V = \Sigma(u_i / \sqrt{(\Sigma u_i)^2})$$

$$V_0^2 - V^2 = 1.$$

Суммирование производится по всем частицам, принадлежащим к выбранной группе (кластеру) частиц

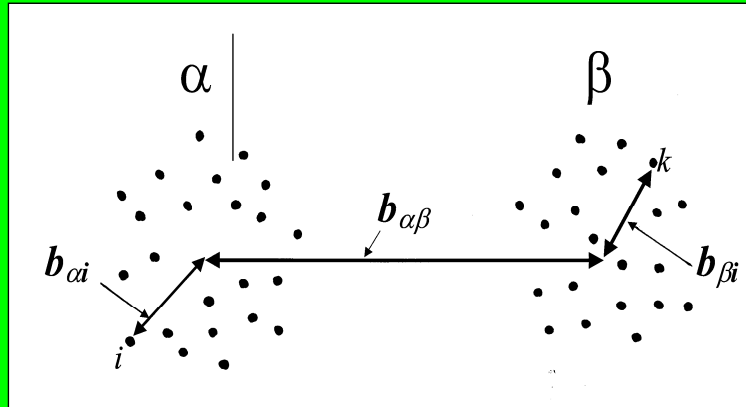
Можно ввести квадрат четырехмерной скорости частицы относительно оси струи:

$$b_k = - (V - u_k)^2.$$



- Распределения  $\pi$  - мезонов по  $b_k$  в струях в адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях при высоких энергиях **УНИВЕРСАЛЬНЫ**. Они не зависят ни от энергии столкновения, ни от типа фрагментирующей системы ( $p, \pi, p^-, C, \dots$ )
- $\langle b_k \rangle = 4$  характеризует среднюю четырехмерную скорость  $\pi$ -мезонов относительно оси струи в процессе фрагментации различных кварковых объектов
- Открытая **УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ** свойств четырехмерных адронных струй указывает на то, что адронизация кварковых систем определяется динамикой взаимодействия цветного заряда с КХД вакуумом

## Принцип ослабления корреляций



$$W \rightarrow W_{\alpha} \cdot W_{\beta}$$

$$b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty$$

$$\alpha = I, \quad \beta = II$$

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

$$d^2 \sigma / db_{III} dx_1 \rightarrow F_I \cdot F_{II}(b_{III}, N_I),$$

$$b_{III} = (u_{II} - u_I)^2$$

$N_I$  –кумулятивное число

Для того чтобы изучать  $F_{II}$ , не обязательно ускорять ядра



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

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}(d^3\sigma/d^3p) = \\ & \alpha(N_I) \quad \alpha(N_{II}) \\ = & \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{A}_I \cdot \mathbf{A}_{II} \cdot \mathbf{exp}(-\Pi/\mathbf{C}_2) \end{aligned}$$

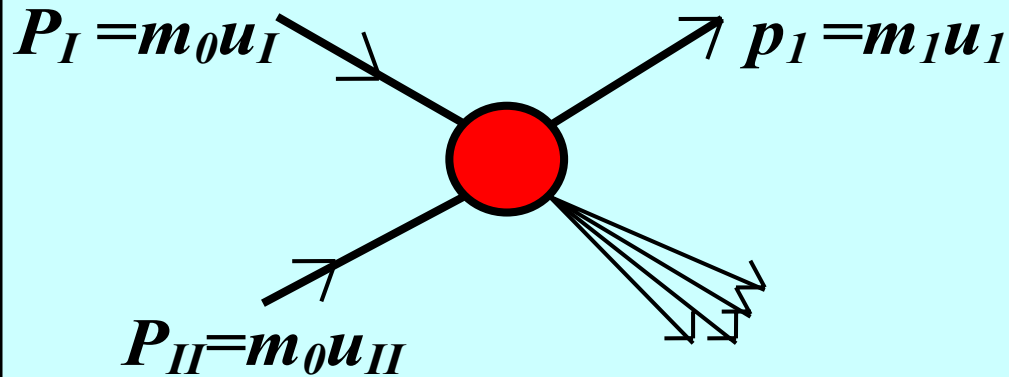
$$\alpha(N_I) = 1/3 + N_I/3$$

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

$$\mathbf{C}_1 = 1,9 \cdot 10^4 \text{ mb GeV}^{-2} \mathbf{c}^3 \mathbf{sr}^{-1}$$

$$\mathbf{C}_2 = 0.125 \pm 0.002$$

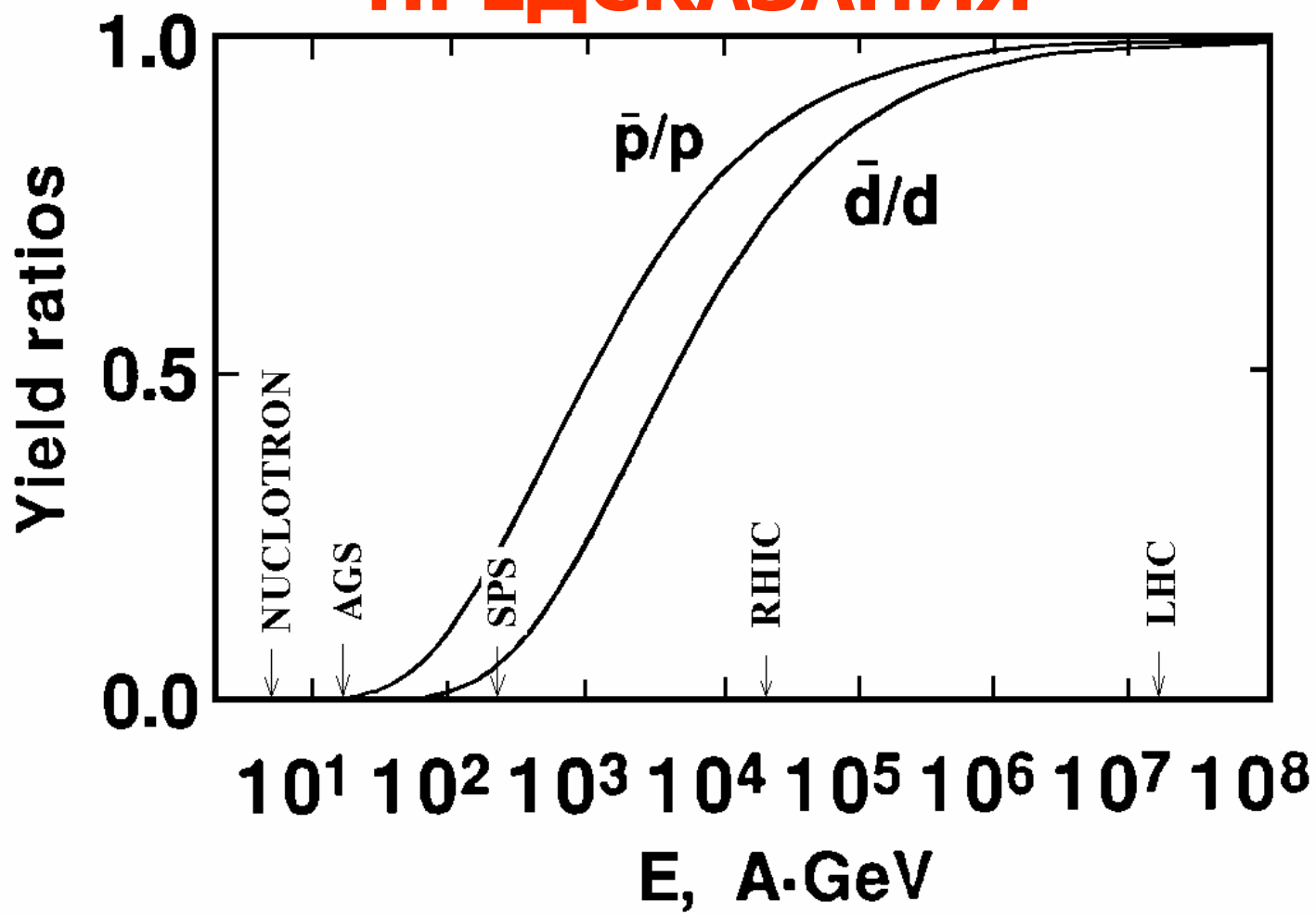
$$I + II \rightarrow 1 + \dots$$

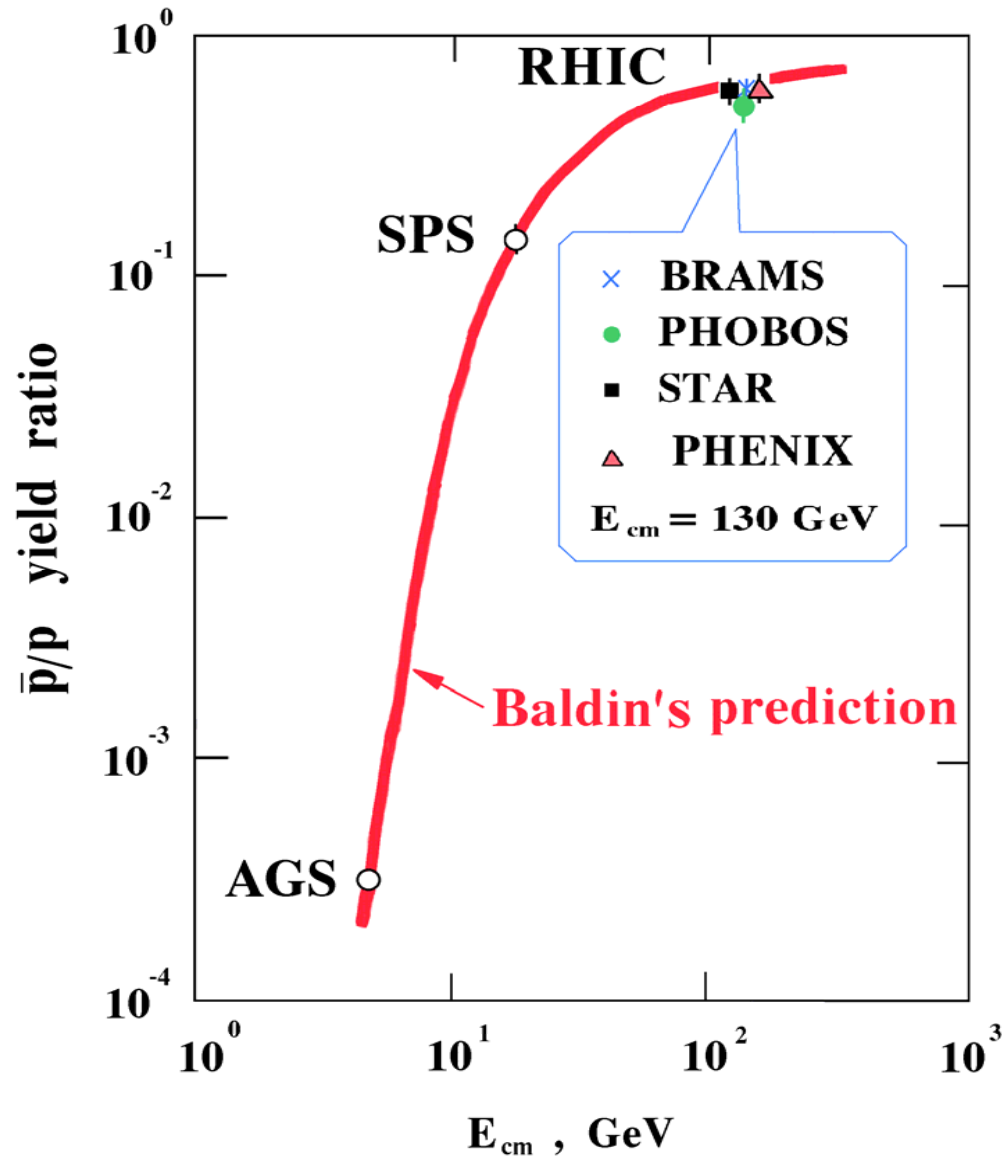


$$\begin{aligned} (N_I P_I + N_{II} P_{II} - p_1)^2 &= \\ &= (N_I m_0 + N_{II} m_0 + \Delta)^2 \end{aligned}$$

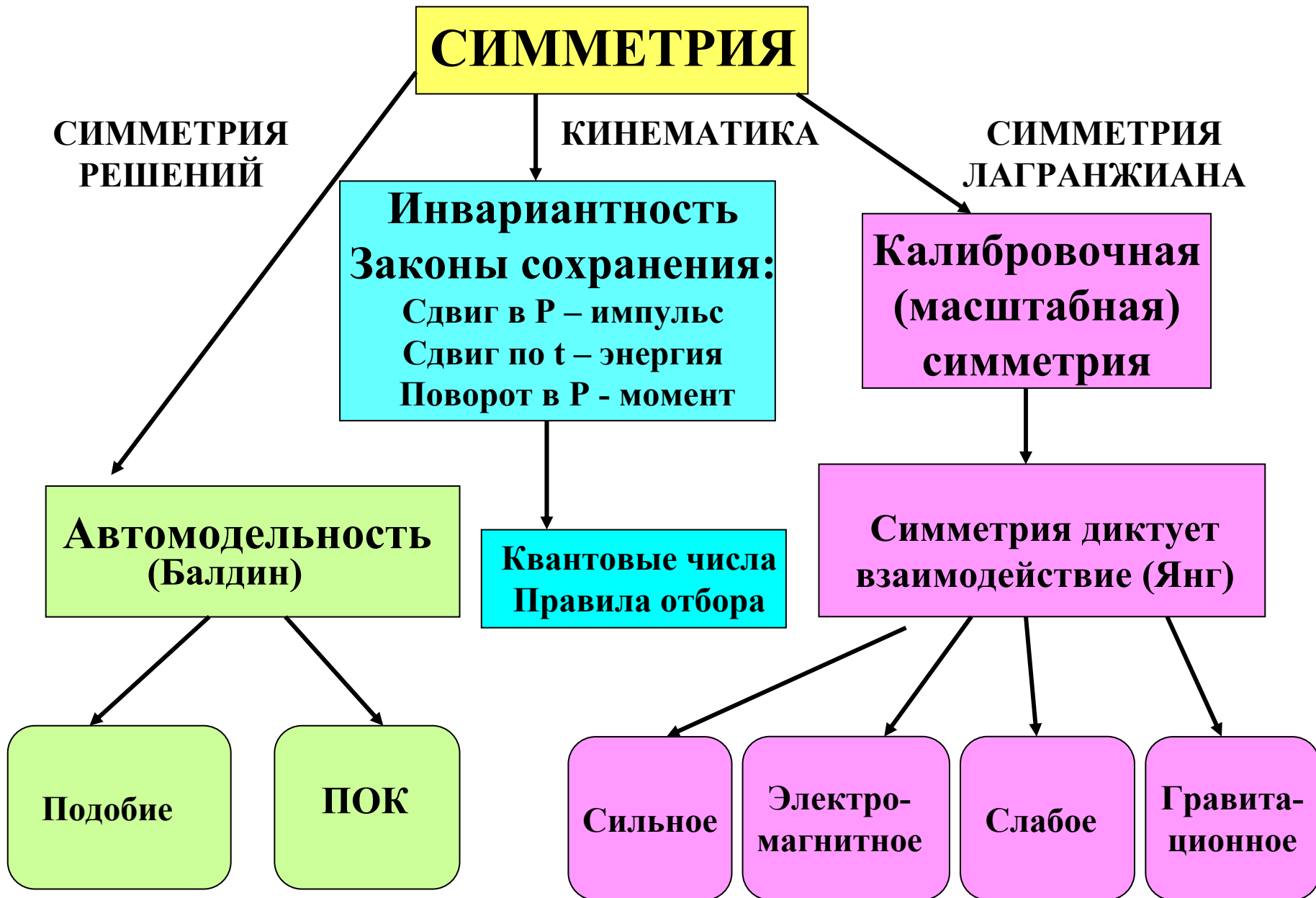
$\Delta$  - масса частицы, обеспечивающей сохранение квантовых чисел (барионного числа, странности и др.)

# ПРЕДСКАЗАНИЯ











сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

Д2-85-206

Н.Н. Боголюбов

ЦВЕТНЫЕ КВАРКИ -  
НОВАЯ СТУПЕНЬ ПОЗНАНИЯ МИКРОМИРА

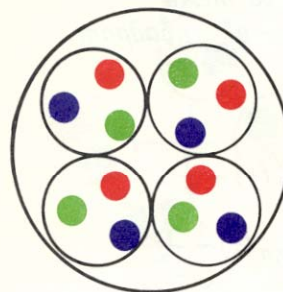
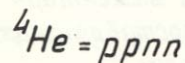
Доклад, прочитанный на общем собрании  
Академии наук СССР  
18 марта 1985 года

1985

16

## Кварки в ядрах

Проблема - объяснение основных закономерностей ядерных сил, исходя из фундаментальных хромодинамических сил, действующих между цветными кварками и глюонами.



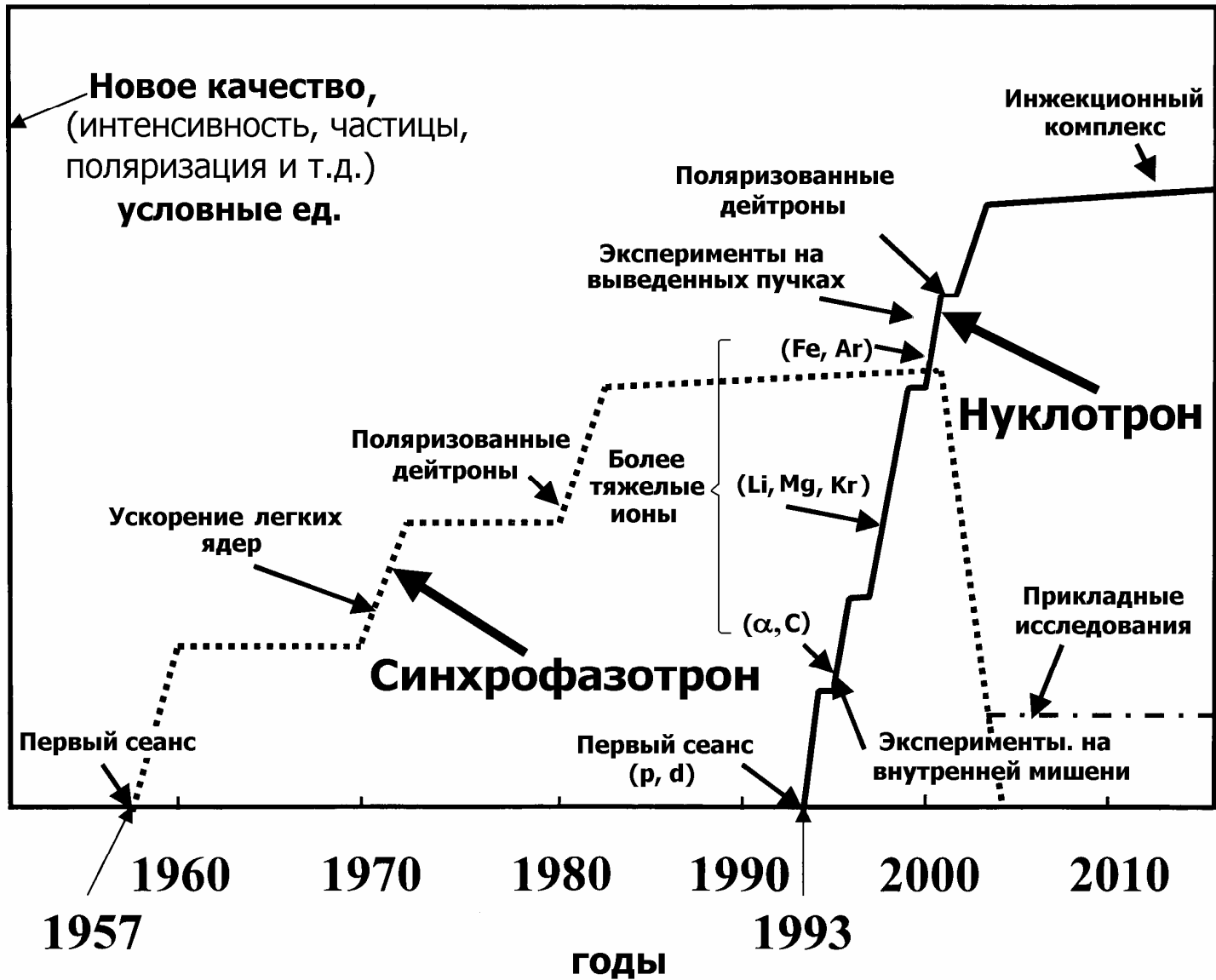
Новая задача -  
поиск проявлений  
кварковых степеней  
свободы ядер  
(„скрытый цвет“)

12 - кварков

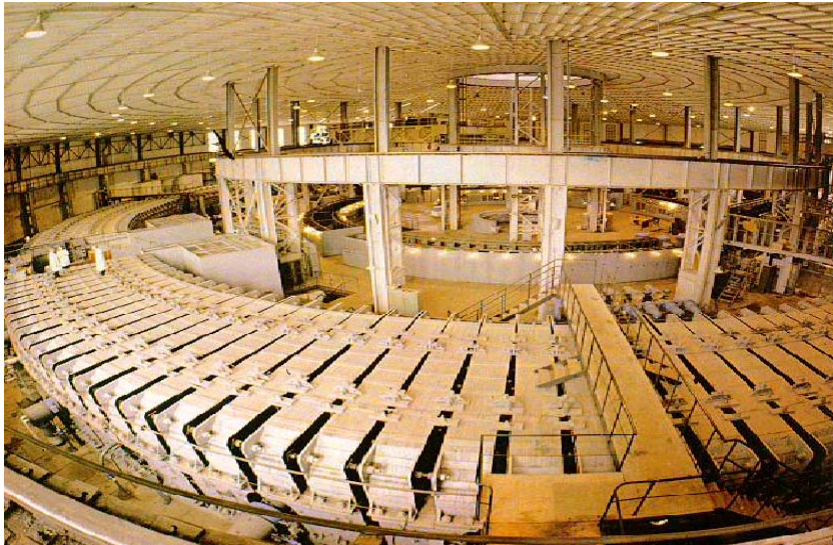
Опыты с релятивистскими ядрами

в Дубне  $\Rightarrow$  Релятивистская ядерная физика -  
(1971) - новая область исследований на  
стыке физики ядра и физики  
Балдин элементарных частиц.

Изучение кварк-глюонной структуры атомных ядер.



**Эксперименты с  
релятивистскими  
ядрами**



**Эксперименты с  
поляризованными  
пучками**

**Прикладные  
исследования**

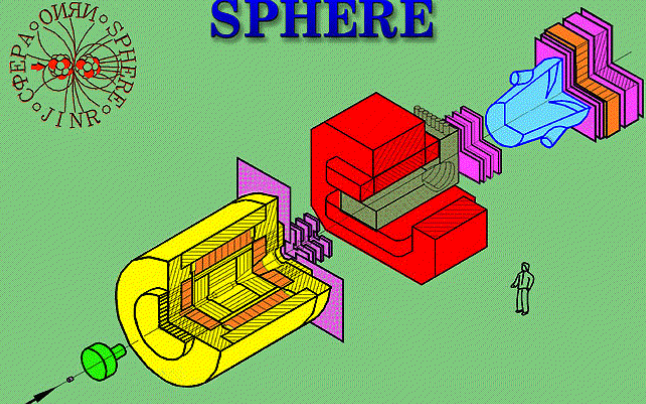
# Эксперименты с релятивистскими ядрами

---

- Структура нуклона
- Структура ядра
- Влияние ядерной среды на рождение частиц
- Модификация ядерной материи
- Гиперядра и  $\eta$ - ядра



**SPHERE**

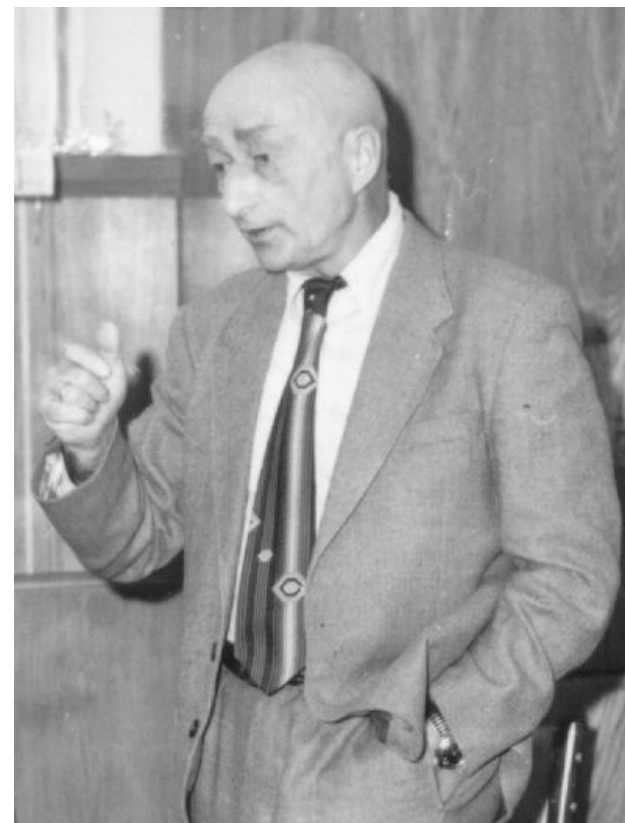


**ПИКАСО, ЛНС, рНе3,  
БЕККЕРЕЛЬ, ДЕЛЬТА,  
ЭТА-ЯДРА**



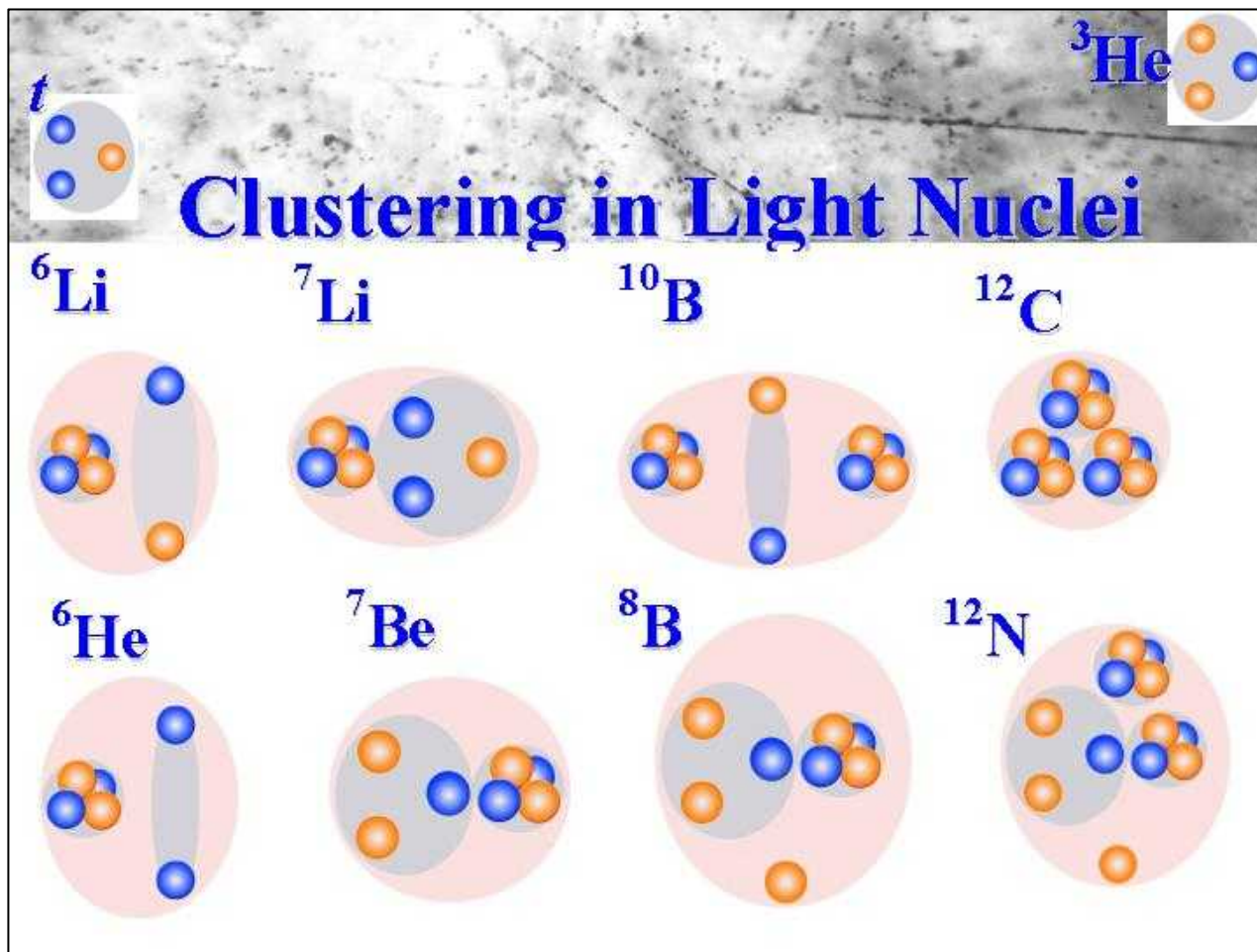
## Наблюдение эффекта полного разрушения ядер

**Был обнаружен новый эффект полного разрушения ядер Ag и Br в ядерной эмульсии, облучаемой протонами и легкими ядрами в энергетической области от нескольких ГэВ до несколько сотен ГэВ под руководством К.Д.Толстова.**





# Эксперименты с релятивистскими ядрами

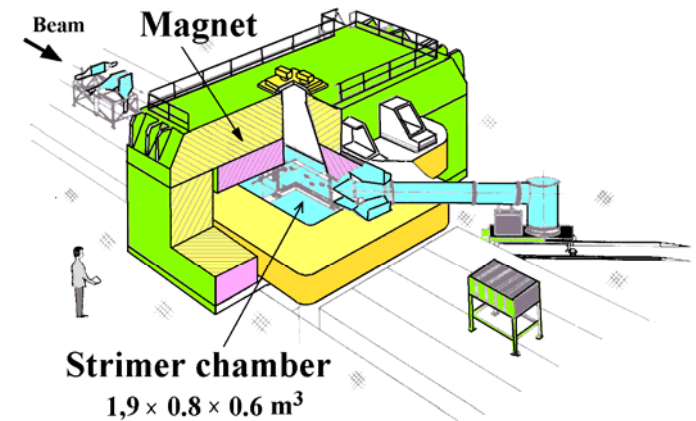
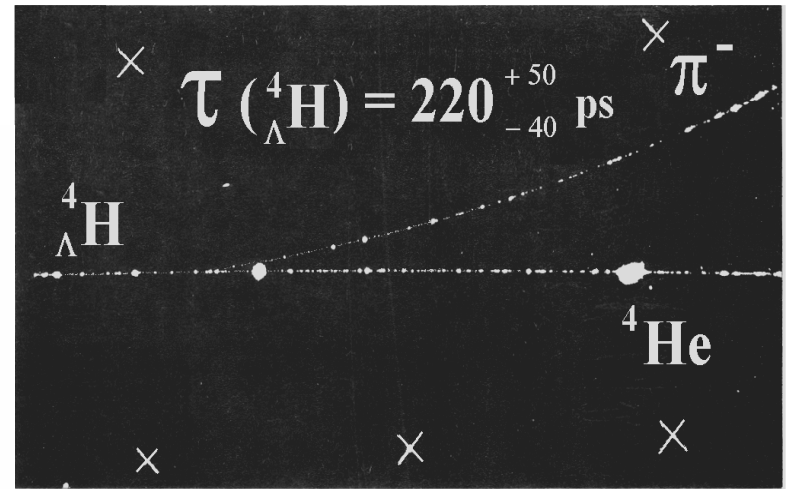


**Проект  
БЕККЕРЕЛЬ**

# Эксперименты с релятивистскими ядрами

## • Гиперядра

Beam	Hyper-nuclei	Energy (GeV/nucleon)	Cross sections ( $\mu\text{b}$ )	
			Theory	Experiment
${}^3\text{He}$	${}^3_{\Lambda}\text{H}$	5.14	0.03	$0.05^{+0.05}_{-0.02}$
${}^4\text{He}$	${}^3_{\Lambda}\text{H}$	3.7	0.06	$< 0.1$
	${}^4_{\Lambda}\text{H}$	2.2	0.08	$< 0.08$
${}^6\text{Li}$	${}^3_{\Lambda}\text{H}$	3.7	0.29	$0.4^{+0.4}_{-0.2}$
	${}^4_{\Lambda}\text{H}$	3.7	0.2	$0.3^{+0.3}_{-0.15}$
${}^7\text{Li}$	${}^7_{\Lambda}\text{Li}$	3.0	0.11	$< 1$
	${}^6_{\Lambda}\text{He}$	3.0	0.25	$< 0.5$

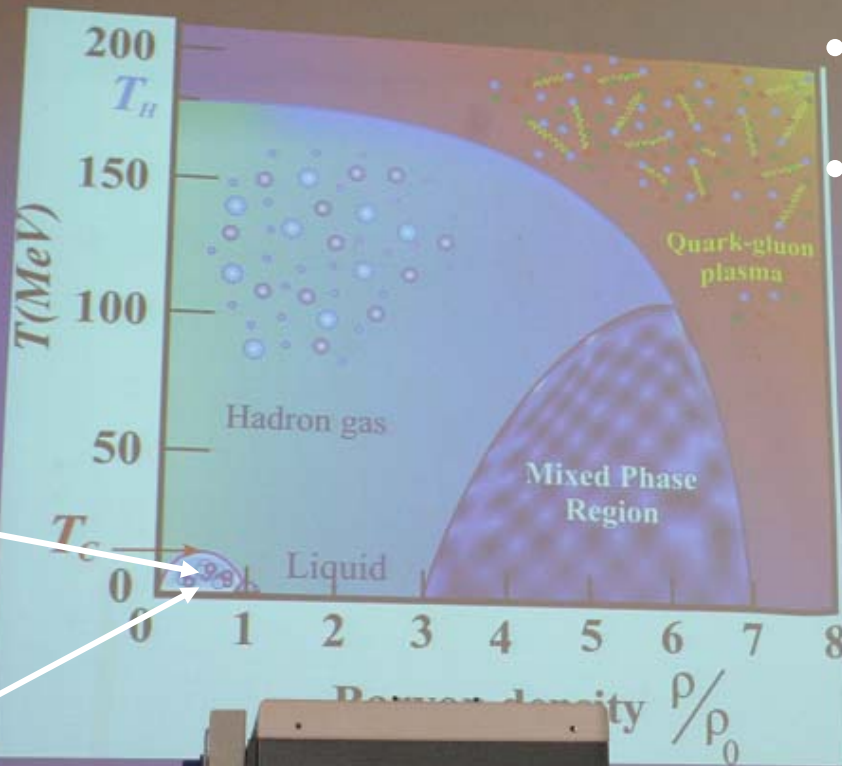


**GIBS**

# Эксперименты с релятивистскими ядрами

## Проект ФАЗА

- Горячие ядра
- Мультифрагментация
- Фазовый переход типа газ-жидкость, газ-туман



**GAS**  
17 MeV

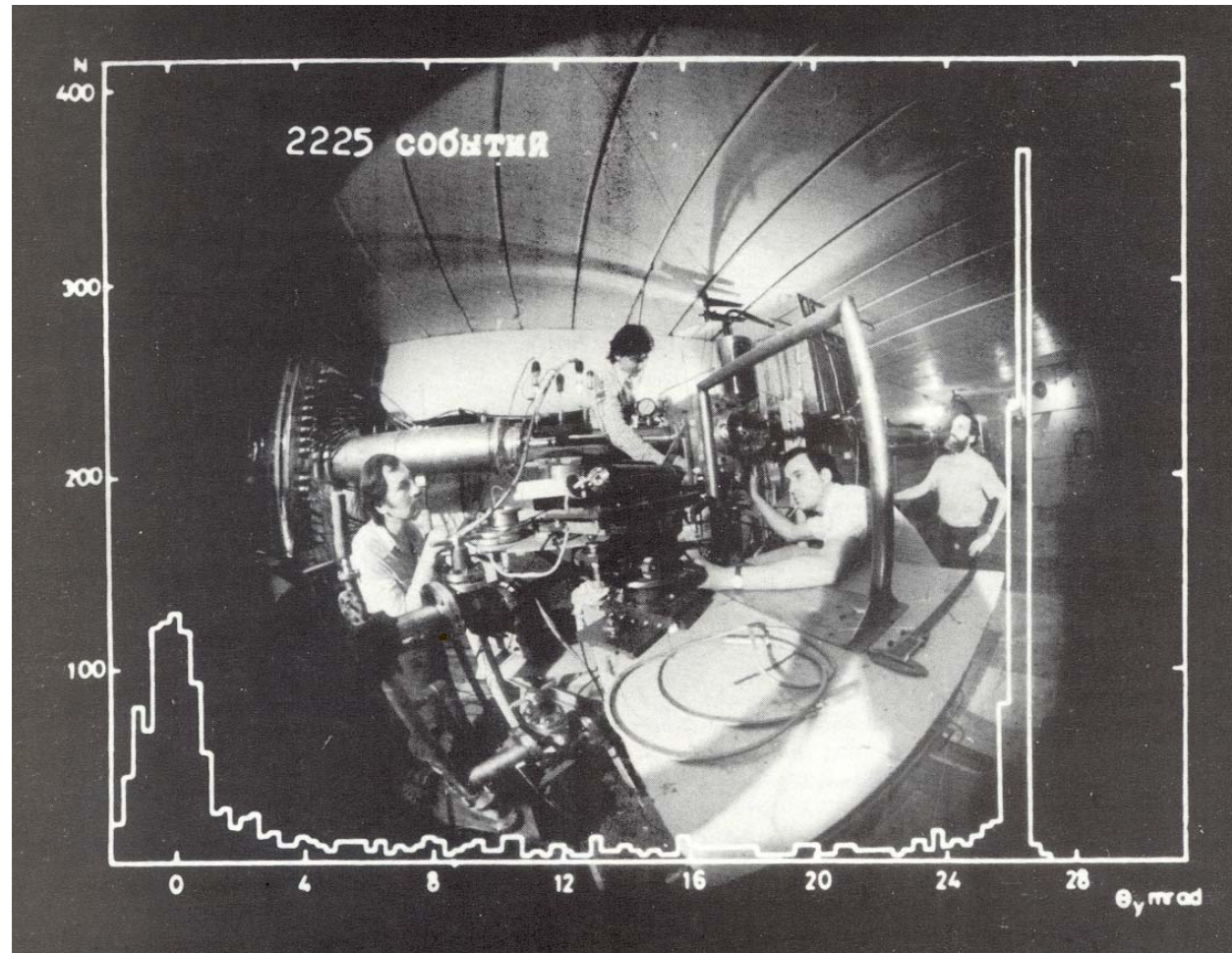
**FOG**  
5-7 MeV

28.05.2005





# КАНАЛИРОВАНИЕ



*A.V. Manakov*  
Proceedings of the XIIIth International Seminar on High Energy Physics Problems

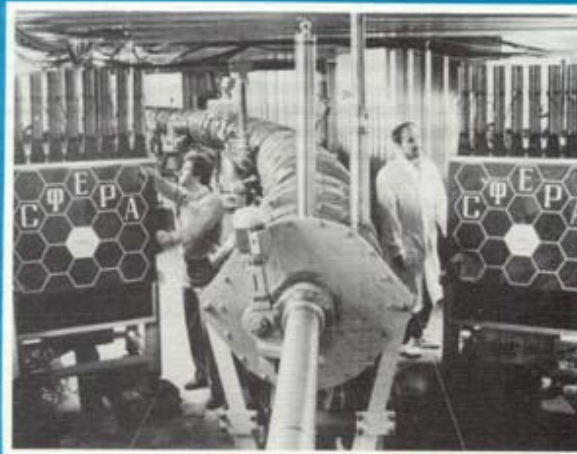
# RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS & QUANTUM CHROMODYNAMICS VOL. I



Editors: A.M. Baldin and V.V. Burov

Proceedings of the XIII International Seminar  
on High Energy Physics Problems

# RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS AND QUANTUM CHROMODYNAMICS VOL. I



Editors: A.M. Baldin and V.V. Burov

Proceedings of the XIV International Seminar  
on High Energy Physics Problems

# RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS AND QUANTUM CHROMODYNAMICS VOL. I



Editors: A.M. Baldin and V.V. Burov





Релятивистская ядерная ф  
от сотен МэВ до ТэВ



**STARÁ LESNÁ**

ACADEMIA



**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА:  
ОТ СОТЕН МЭВ ДО ТЭВ**

**RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS:  
FROM HUNDREDS MeV TO TeV**



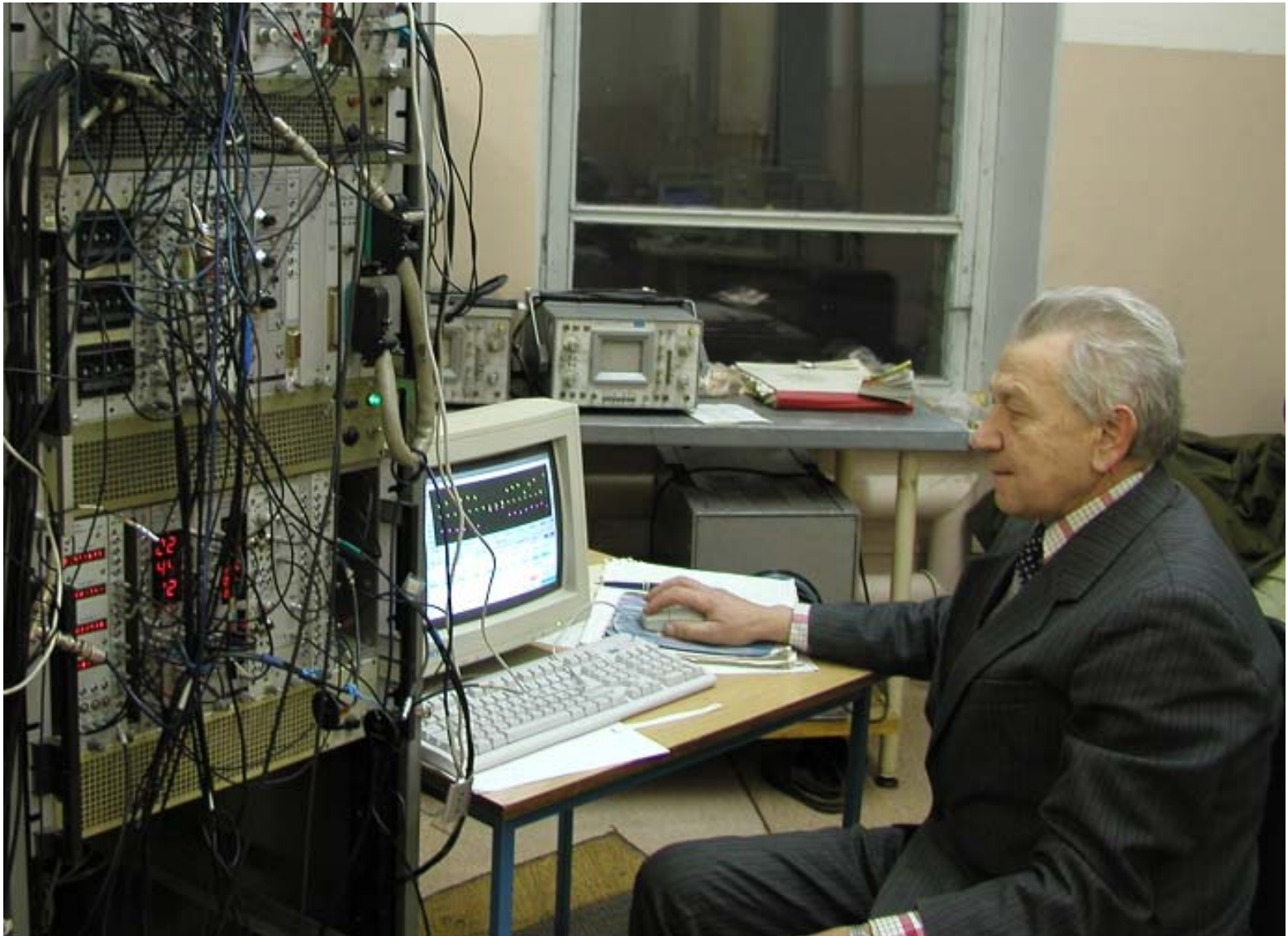
**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ  
ЯДЕРНАЯ  
ФИЗИКА:  
от СОТЕН МэВ до ТэВ  
Том 1**

**RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS:  
from HUNDREDS of MeV to TeV  
Volume 1**



# Эксперименты с поляризованными пучками

---

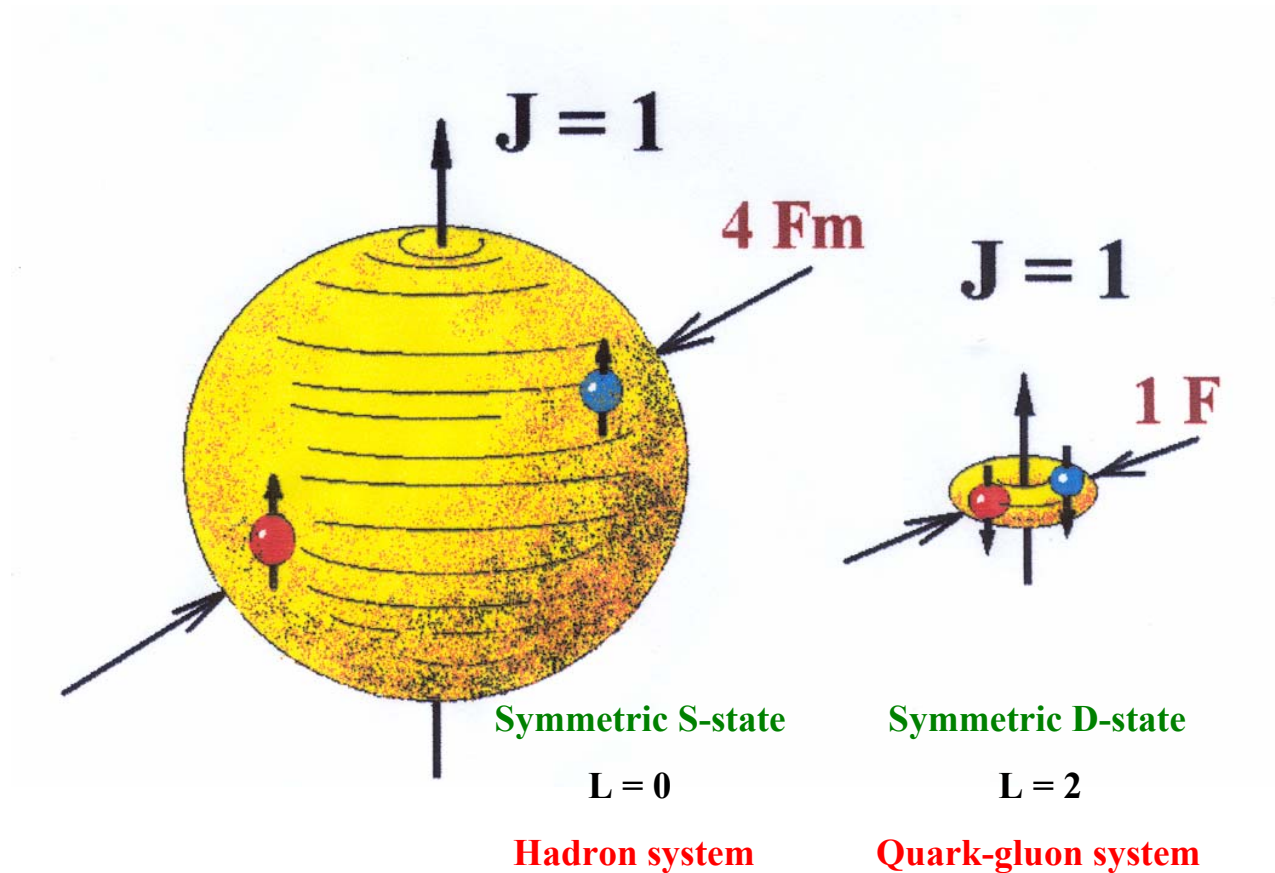


# Эксперименты с поляризованными пучками

---

- Спиновая структура амплитуды  $np$  – рассеяния вперед
- Спиновая структура дейтрона на малых расстояниях
- Спиновая структура трехнуклонных систем

# Спиновая структура дейтрона на малых расстояниях





# Эксперименты с поляризованными пучками





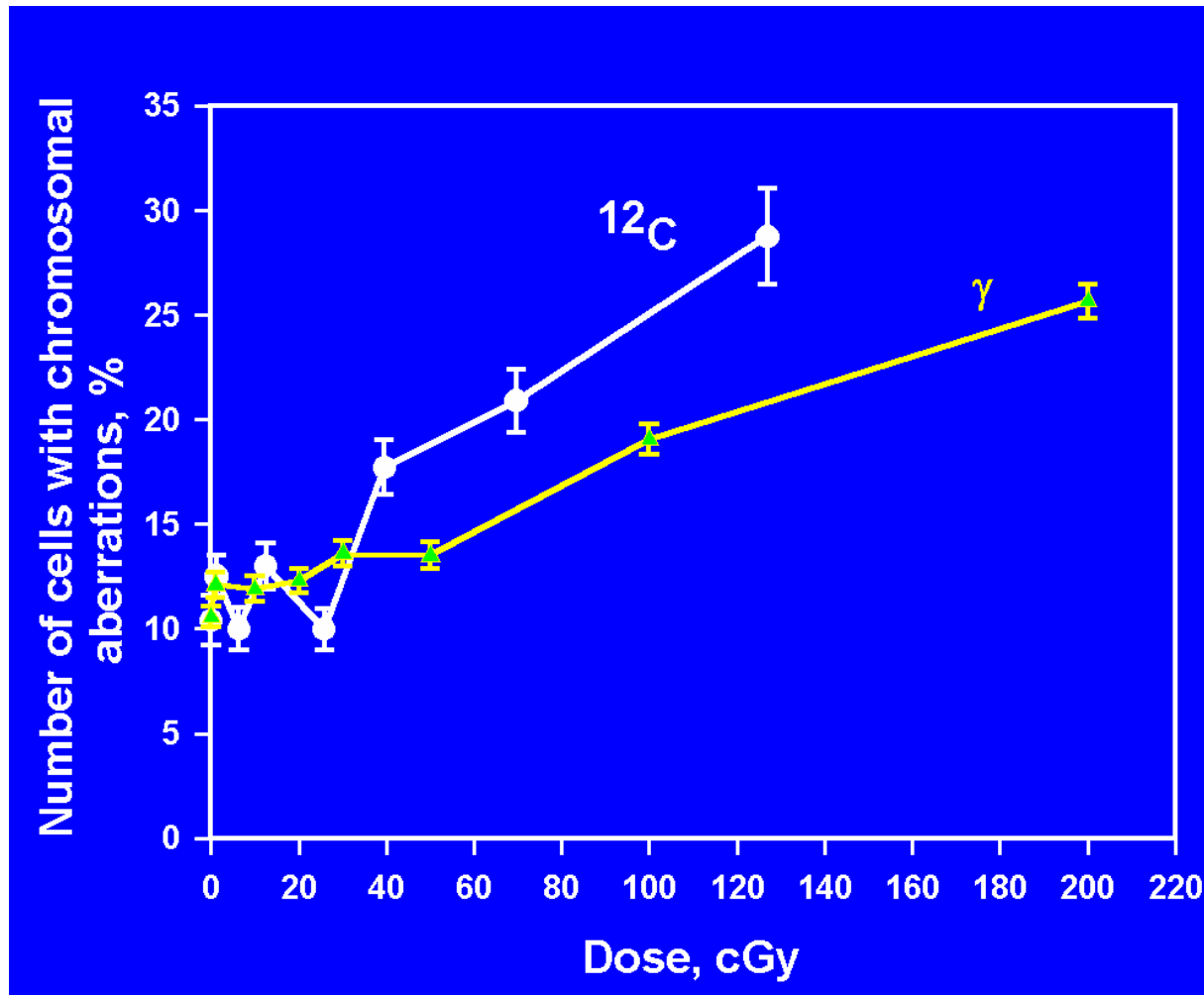
# Прикладные исследования

---

- **Радиобиология и космическая медицина**
- **Влияние пучков ядер на микроэлектронику**
- **Трансмутация радиоактивных отходов**
- **Электроядерный способ генерации энергии**
- **Использование пучка углерода для терапии онкологических заболеваний**

# Прикладные исследования

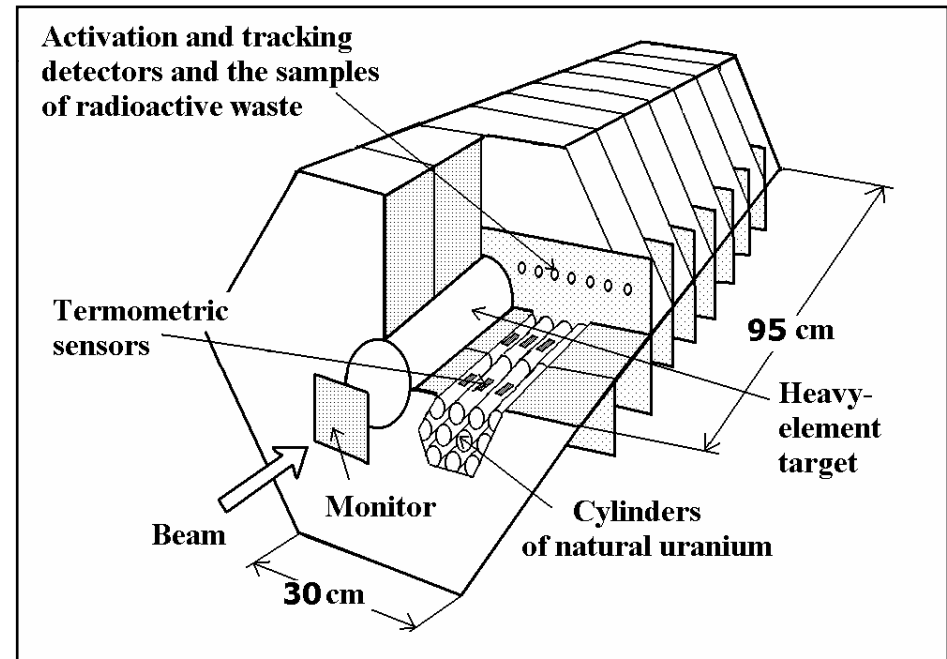
- Радиобиология и космическая медицина



# Прикладные исследования

- Трансмутация радиоактивных отходов
- Электроядерный способ генерации энергии

## Проект Энергия +Трансмутация



## Пользователи СИНХРОФАЗОТРОНА:

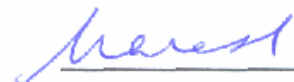
«...мы получили пучки отличного качества и стабильности в течение всего сеанса ...»

**Ч. Пердрисат, В.Пунджаби (США),  
Э.Томази-Густавсон (Франция). Октябрь  
2001.**

«...последний сеанс по измерению  $\Delta\sigma_L(pr)$  был на этот раз крайне успешен. Я очень доволен этим.» **Ф.Легар (Франция).  
Октябрь 2001**

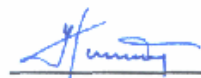
"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ЛВЭ

  
\_\_\_\_\_ А.И.Малахов  
31.10.02

"СОГЛАСОВАНО"

Отв. за радиац. контроль в ЛВЭ

  
\_\_\_\_\_ А.Д.Никитин  
"31" октября 2002 г.

"СОГЛАСОВАНО"

Зам. директора-гл. инженер ЛВЭ

Отв. за радиац. безопасность в ЛВЭ

  
\_\_\_\_\_ А.Д.Коваленко  
"31" окт 2002 г.

## РАСПИСАНИЕ работы синхрофазотрона с 4 по 15 ноября 2002 г.

### ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ДЕЙТРОНЫ

Время работы	Режим ускорителя	Руководитель работ (эксперимента), <u>ответственный за РБ</u>	Лица с правом вести персгов с нач. смен СФ	Остальные члены бригады
1	2	3	4	5
04.11. 8-16	Цикл 4ГА.	Смирнов А.А.	по графику дежурств	по графику дежурств
16-20	Настройка ЛУ-20, полярису, Включение МВ, ВП-1, 4В, 1В. Проверка блокировок, запоров, систем сигнализации РБ	Говоров А.И., Фимушкин В.В. Смирнов А.А., Нефедьев И.Я. Нач.смен СФ	- " -	- " -