

Исследование дифракционных

процессов –

история и состояние проблемы

Никитин В.А.

К 100-летию М.А.Маркова.

дифракция  
адронов.

# М.А.Марков, Синхрофазотрон, ОИЯИ

Физическая программа исследований на СФ бала подготовлена к 1952 г группой в составе:

М.А.Марков, И.В.Чувило, В.И.Гольданский, А.А.Коломенский, А.Н.Горбунов, Е.А.Чудаков.

В статье М.А.Маркова «К тематике исследования на установку КМ» отмечается важность измерения сечений упругого рассеяния и множественного рождения частиц наряду с другими задачами .

Говорится о возможности проявления неожиданных эффектов в новой неизведанной области энергии.

«Чтобы задумать и построить такое сооружение, нужна была очень большая смелость».  
Нильс Бор.

### Этапы пути:

1949 г. – начало проектирования; 1952 г. – начало строительства;

1957 г., 16 апреля, 23 часа 40 минут – есть проектная энергия 10 ГэВ !!;

1972 г. – получен выведенный пучок протонов; 1969 г. – ускорение дейтронов; 1981 г. – ускорение ядер от Н до Si; 1983 г. – ускорение поляризованных дейтронов;

2002 г. – Конец работ на СФ.



Синхрофазотрон. Общий вид



Справа налево: В. И. Векслер, М. А. Марков, А. Л. Любимов, Э. О. Оконов.  
60-е годы

## Начало пути – классики и основоположники.

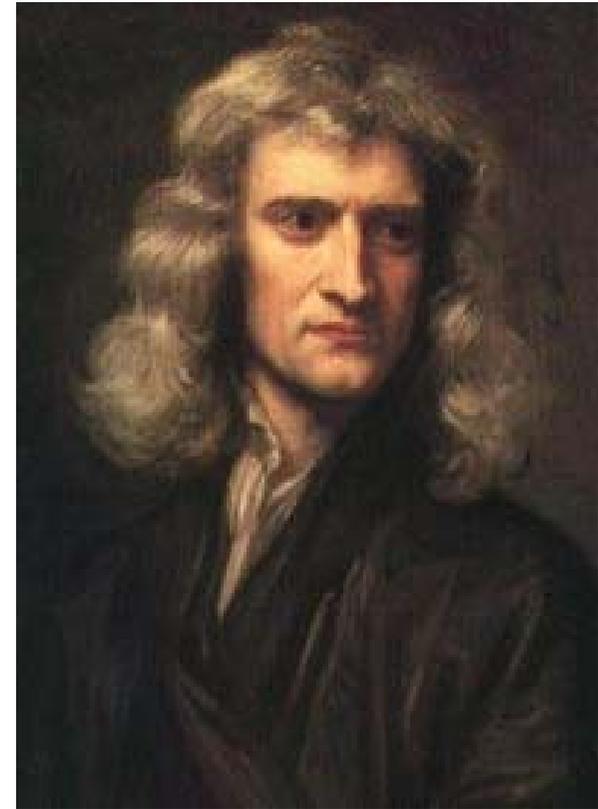


1618 – 1663 гг. Болонья. Священник. Исследовал законы распространения света и огибание им препятствий.

Ввёл понятие дифракции волн. Основной труд по оптике на 553 страницах опубликован в 1665 г посмертно.



Христиан Гюйгенс, 1629 – 1695 гг, Гаага. Продолжил исследования Гримальди. Сформулировал способ математического описания распространения волн при наличии препятствий – Принцип Гюйгенса.



Исаак Ньютон, 1643 – 1727 гг, Вулсторп. Сторонник корпускулярной теории света.

**Корпускулярно-волновой дуализм** - лежащее в основе квантовой механики

положение о том, что в поведении микрообъектов проявляются как корпускулярные, так и волновые черты.

**Свет – волна**: интерференция и дифракция волн.

**Свет – частица**: фотоэффект, рассеяния света на электронах (Комптона эффект) .

**Макс Планк**: световая «частица» (фотон) имеет энергию  $E$  , связанную с частотой  $\nu$  света соотношением:

$E = h \nu$ ,  $E = pc$ ,  $\lambda = c / \nu = hc / E$  ,  $\lambda = h / p$  , где  $h$  — постоянная Планка.

**Луи де Бройль**: для любой (массивной) частицы верна та же формула.

**Опыт показал**, что пучок электронов, падающих на кристалл, даёт дифракционную картину которую нельзя понять иначе, как на основе волновых представлений.

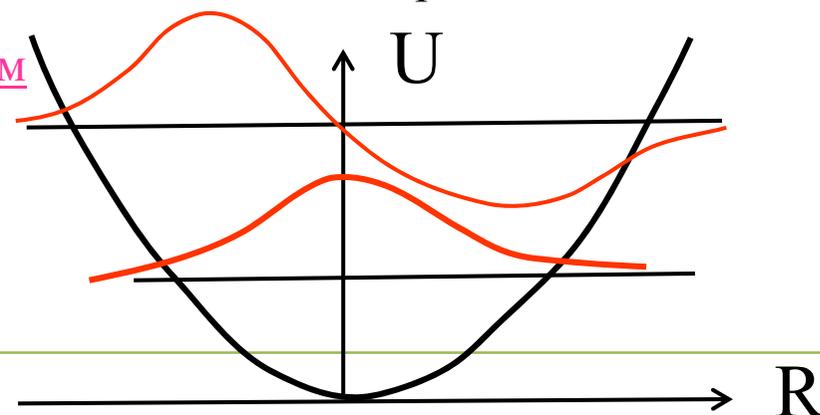
**Особенностью микромира является дуализм**

корпускулярных и волновых свойств.

Стоячие (стационарные) волны электронов в атоме. На орбите укладывается целое число волн.



Макс Планк. 1858 – 1947 гг.  
Киль.  
1919 г., нобелевская премия  
за открытие квантов  
энергии (1900 г.)



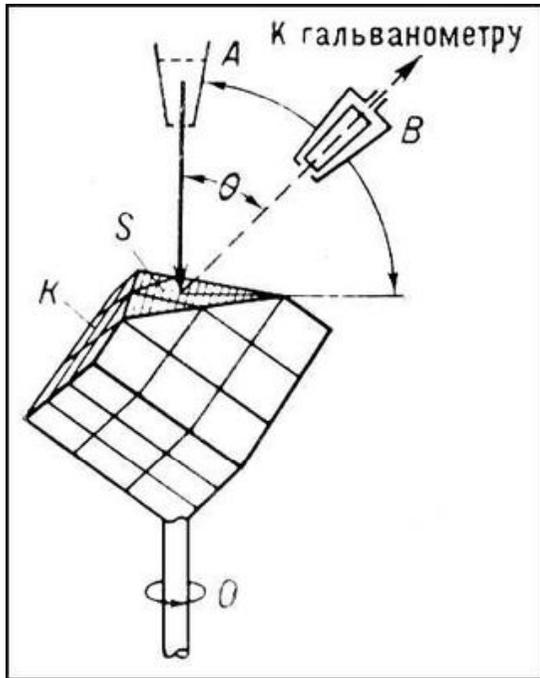
**Луи де Бройль**  
**и волновая природа материи.**



1892 – 1987 гг.  
Родился в г. Дьепп.

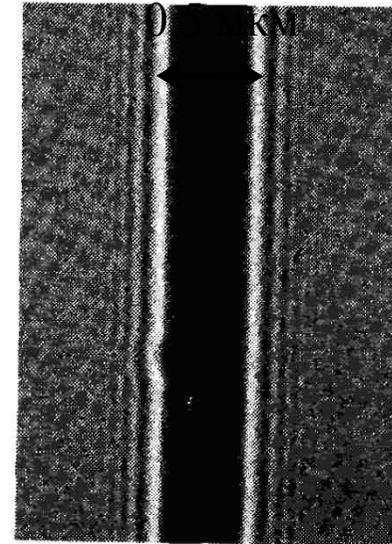
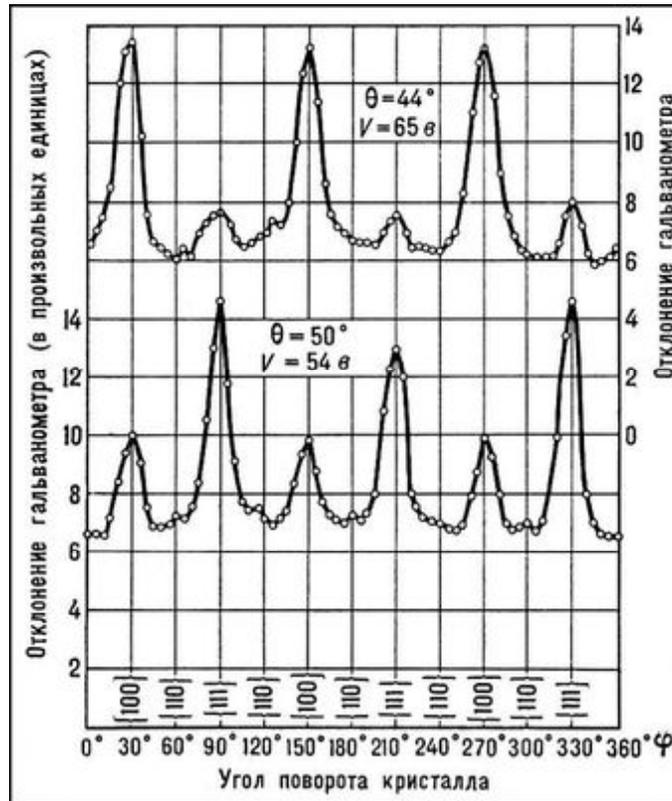
1924 г – защита  
диссертации. Концепция  
частицы – волны.

1929 г – нобелевская  
премия.



Существование электронных волн было экспериментально доказано в 1927 г. К. Дж. Дэвиссоном и Л. Г. Джермером в США и Дж. Томсоном в Англии.

Это открытие привело к созданию в 1933 г. Э. Руской электронного микроскопа.



(a)

Fig. 2. Fresnel image of the biprism wire at 0 exposure times, showing (a) Fresnel fringes interference fringes in the region of the geon

1892 – 1987 гг.

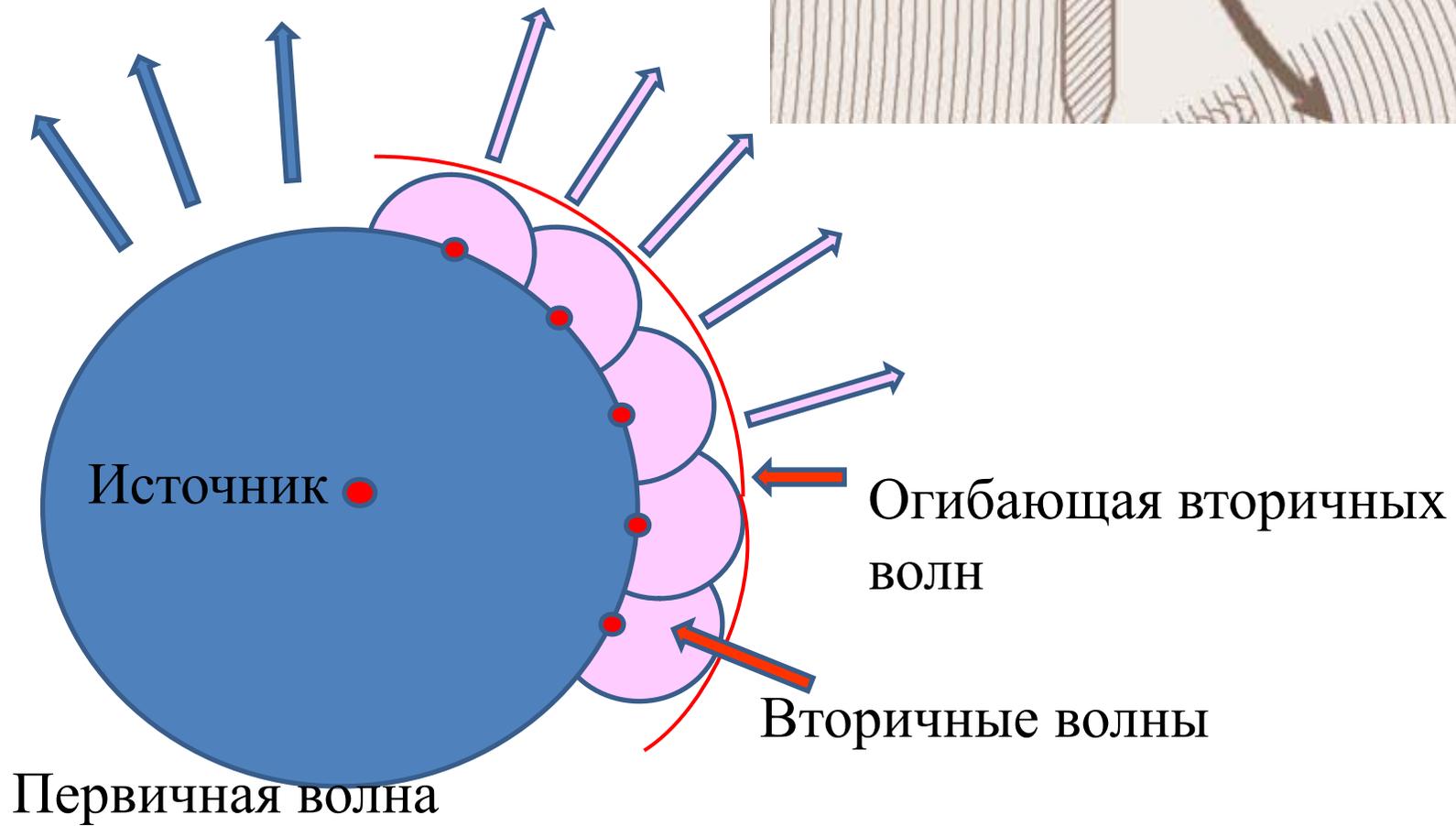
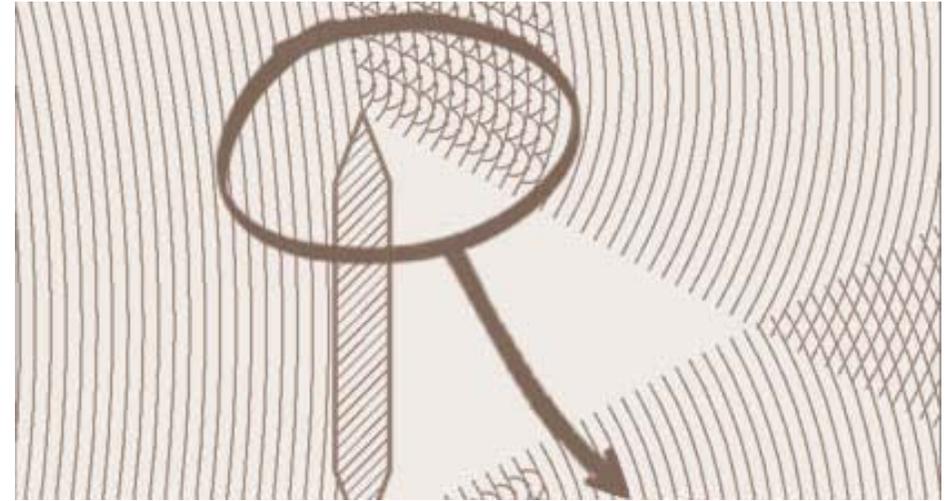
Родился в г. Дьепп.

1924 г – защита диссертации. Концепция частицы – волны.

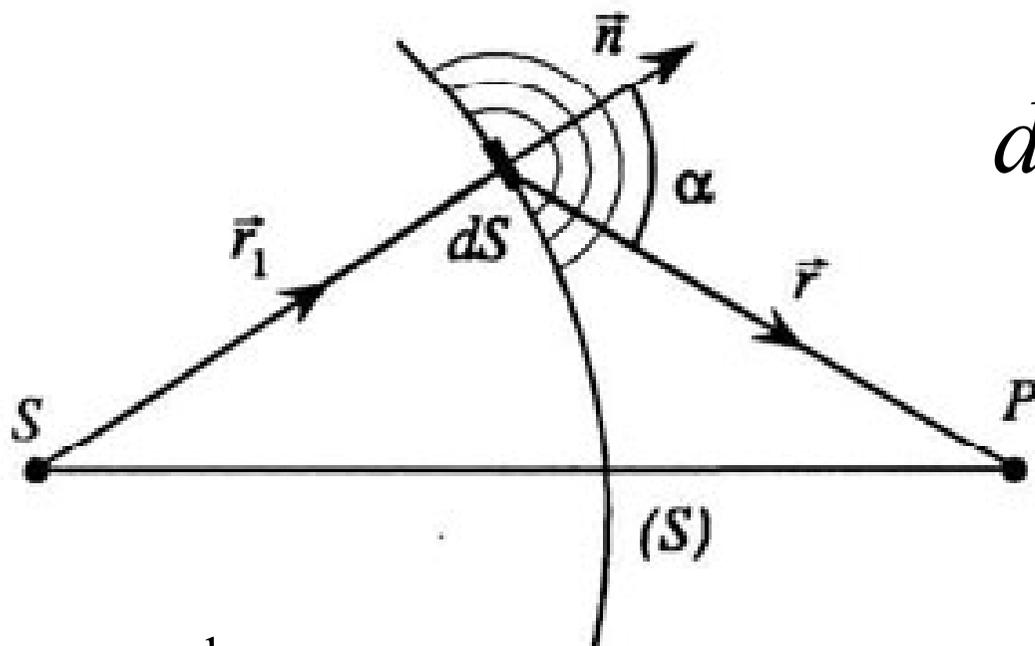
1929 г – нобелевская премия.

Am. J. Phys., Vol. 46, No. 6, June 1

# Принцип Гюйгенса

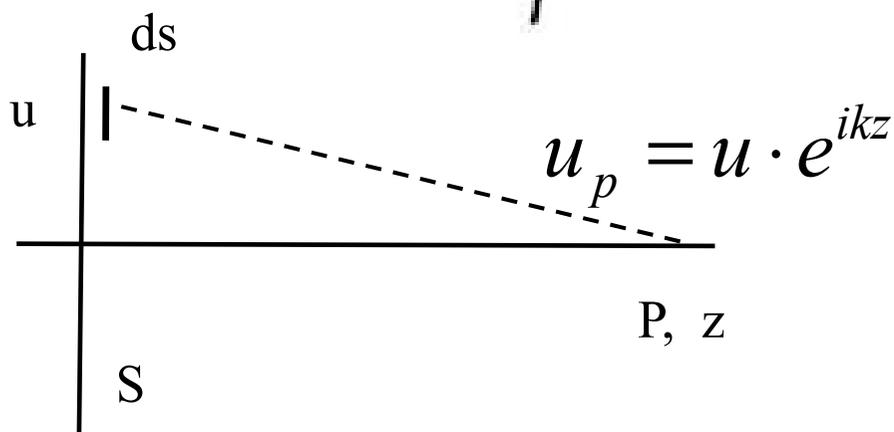


## Принцип Гюйгенса – Френеля.



$$dg = K(\alpha) \frac{f_0(\vec{r}_1) ds}{\lambda r} \exp(ikr).$$

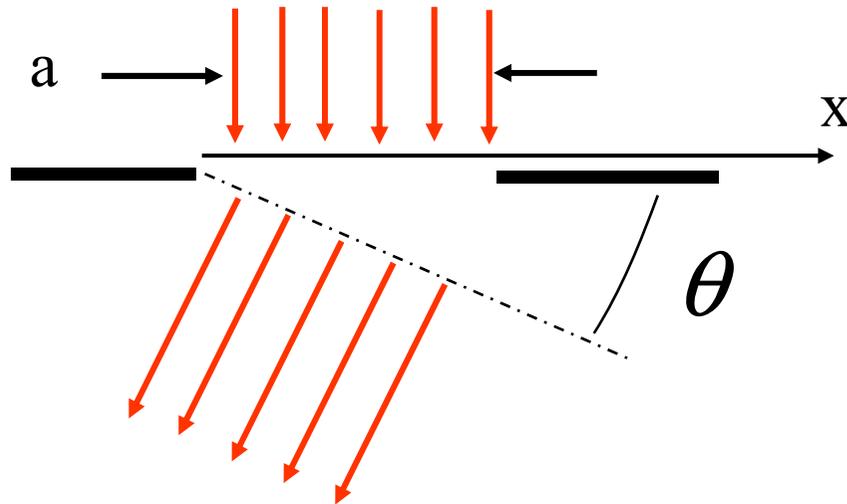
$$g = \iint_S K(\alpha) \frac{f(s)}{\lambda r} \exp(ikr) ds$$



$$u_p = K \int_S u \cdot e^{ikr} \frac{1}{r} ds$$

$$K(0) = \frac{k}{2\pi i}; \quad i = e^{i\pi/2}.$$

# Дифракция волн на щели

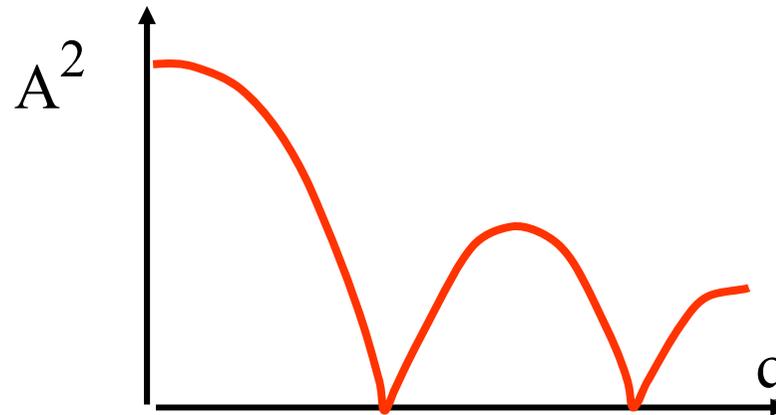


$$\varphi(x) = \omega t - kx \cdot \sin \theta;$$
$$k \sin \theta = q.$$

Амплитуда рассеянной (дифрагировавшей) волны

$$A = c \int_0^a dx \cos \varphi(x) =$$

$$c \frac{ka \sin(qa)}{2\pi i qa}.$$



## Дифракция на диске

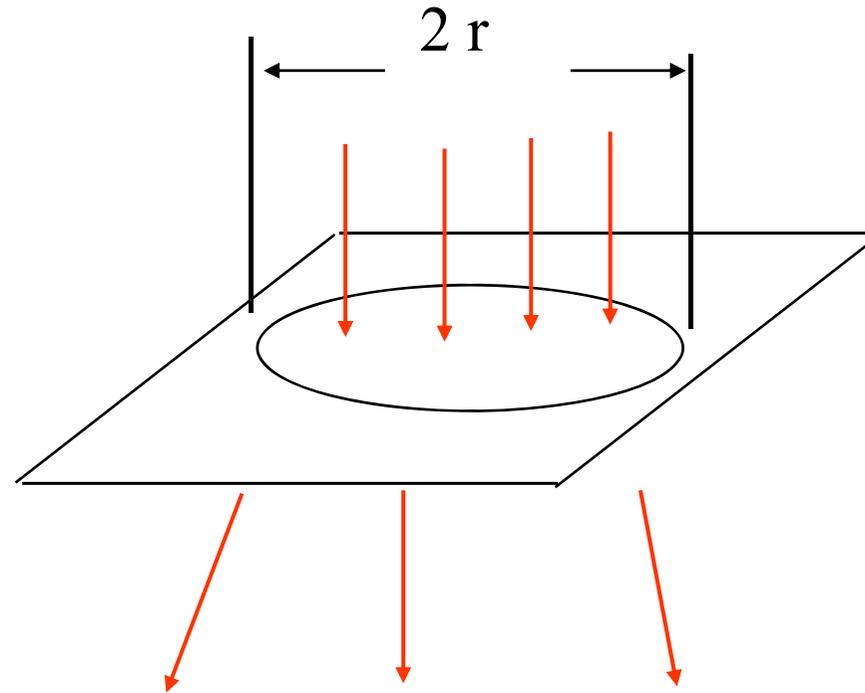
$$A = Cr \frac{J_1(rq)}{rq} \approx$$

$$\left[ J_1(2x) \approx x \exp(-x^2) \right] =$$

$$r \exp\left(\frac{bt}{2}\right); \quad t = -q^2;$$

$$b = \frac{r^2 h^2}{2};$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = A^2 = Cr^2 \exp(bt).$$



$b$  называется параметром наклона дифракционного конуса.

# Экспериментальная установка для наблюдения дифракции света



# Проблемы физики дифракции.

## Проверка постулатов квантовой теории поля.

А) Причинность и её следствие - аналитичность амплитуды рассеяния в комплексной плоскости энергии.

Б) Унитарность  $S$  – матрицы.

В) Лоренц-инвариантность (**квантованное пространство?**) и принцип перекрёстной симметрии  $A(a,a) \rightarrow A(a, \text{anti-}a)$ .

Г) Спектральность – наличие полного базиса для представления волновой функции в гильбертовом пространстве.

Д) Следствие этих постулатов – дисперсионное соотношение между  $\text{Re } A$  и  $\text{Im } A(E)$ .

## Модели.

Оптическая модель, неупругая дифракция, реджистика, кварковый счёт и др.

Поиск решения проблемы адронизации партонов и конфайнмента.

# Упругое рассеяние адронов.

## Дифракция протонов на атомных ядрах.

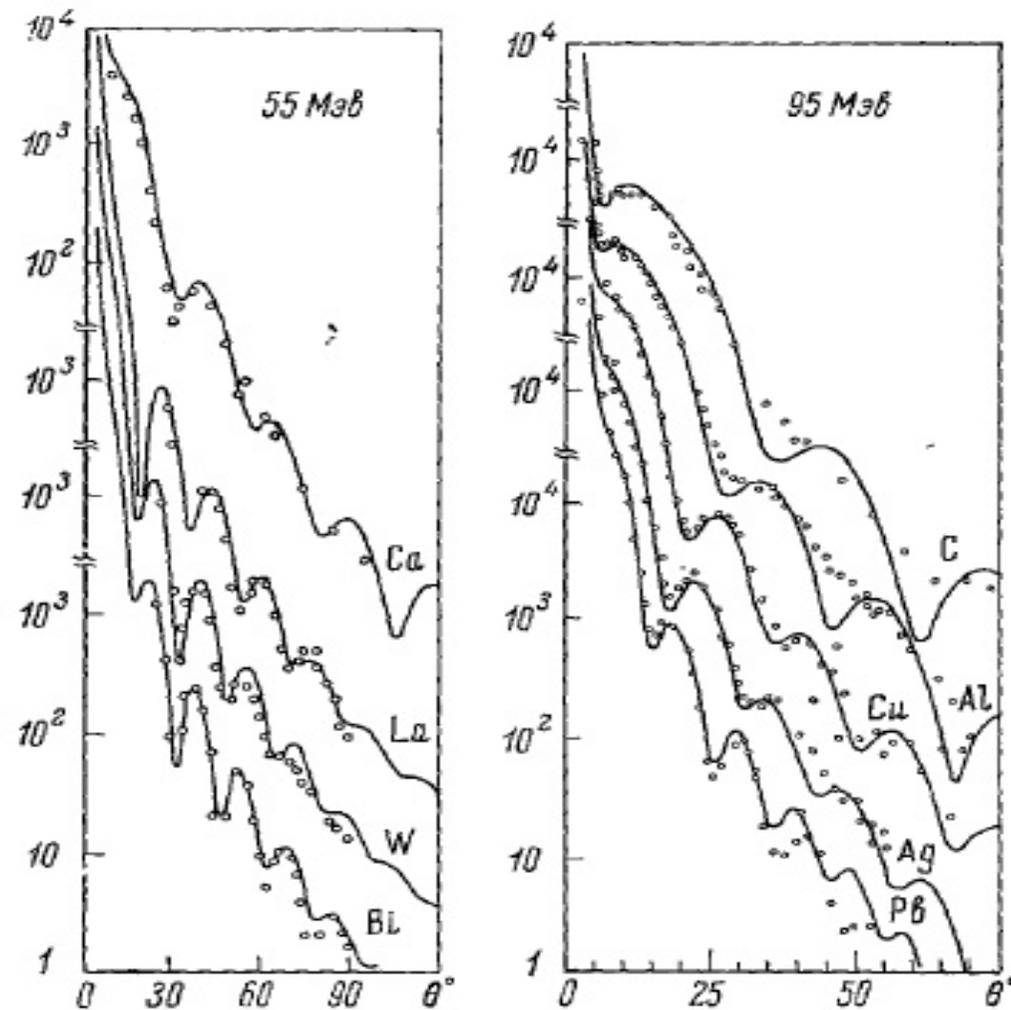


Рис. 1. Дифференциальное сечение упругого рассеяния протонов на различных ядрах (мбарн/стер, система центра масс).

Кружки — экспериментальные данные <sup>4-6</sup>, кривые — расчет по оптической модели <sup>7</sup>.

# Дифракция протонов на ядрах He.

subsequent rise to a secondary maximum at  $|t| = 0.33 \text{ (GeV/c)}^2$ .

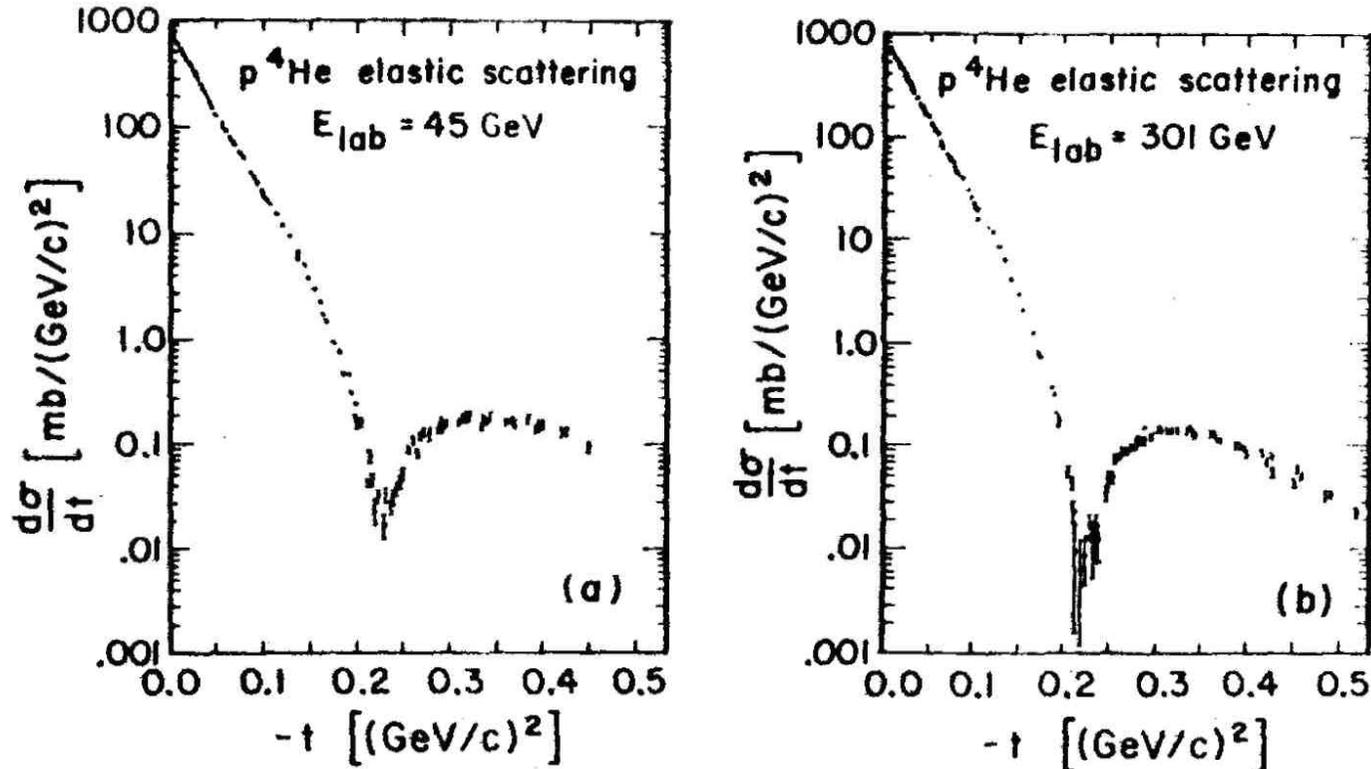


Figure 4: Examples of the differential cross section of  $p^4\text{He}$  elastic scattering: (a)  $E_{\text{lab}} = 45 \text{ GeV}$ , (b)  $E_{\text{lab}} = 301 \text{ GeV}$ .

# Формулировка задачи о рассеянии частиц

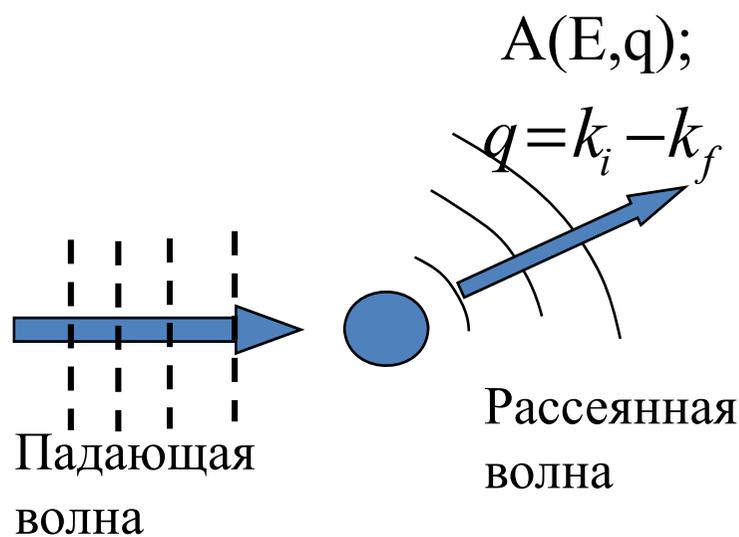
$$\psi = \exp(ik_i r) + A(k_f, k_i) \frac{1}{r} \exp(ik_f r).$$

Падающая волна

Рассеянная волна

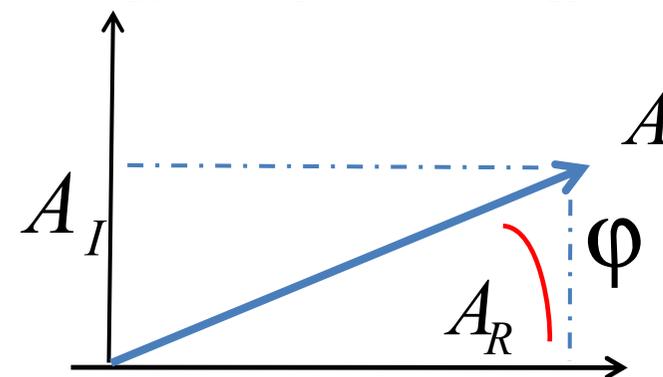
$A$  – амплитуда рассеяния – комплексная величина.

В нерелятивистском случае она находится путём решения уравнения Шредингера для заданного потенциала взаимодействия.



$$A(q) = -\frac{1}{4\pi} \frac{2m}{\hbar^2} \int_V e^{iqr} U(r) dv$$

$$U = U_R + iU_I; \quad A = A_R + iA_I.$$



# Интерференция волн от кулоновского и ядерного рассеяний.

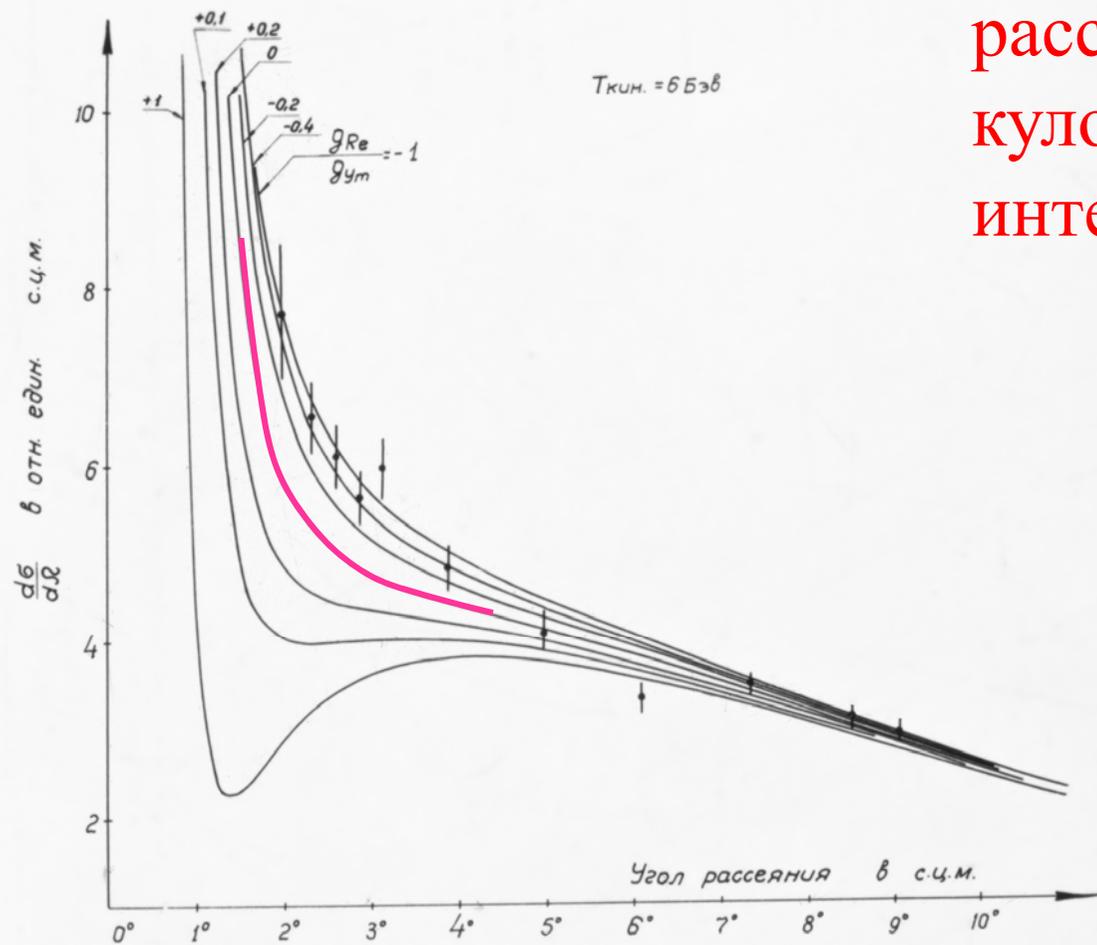
$$\frac{d\sigma}{dt} = |iA_I + A_R + A_C|^2 = A_I \cdot (1 + \rho^2) + 2A_R A_C + A_C^2.$$

$$\text{Im } A(t=0) = \frac{1}{4\sqrt{\pi h}} \cdot \sigma_{tot}; \quad O = \{\text{Im } A(t=0)\}^2$$

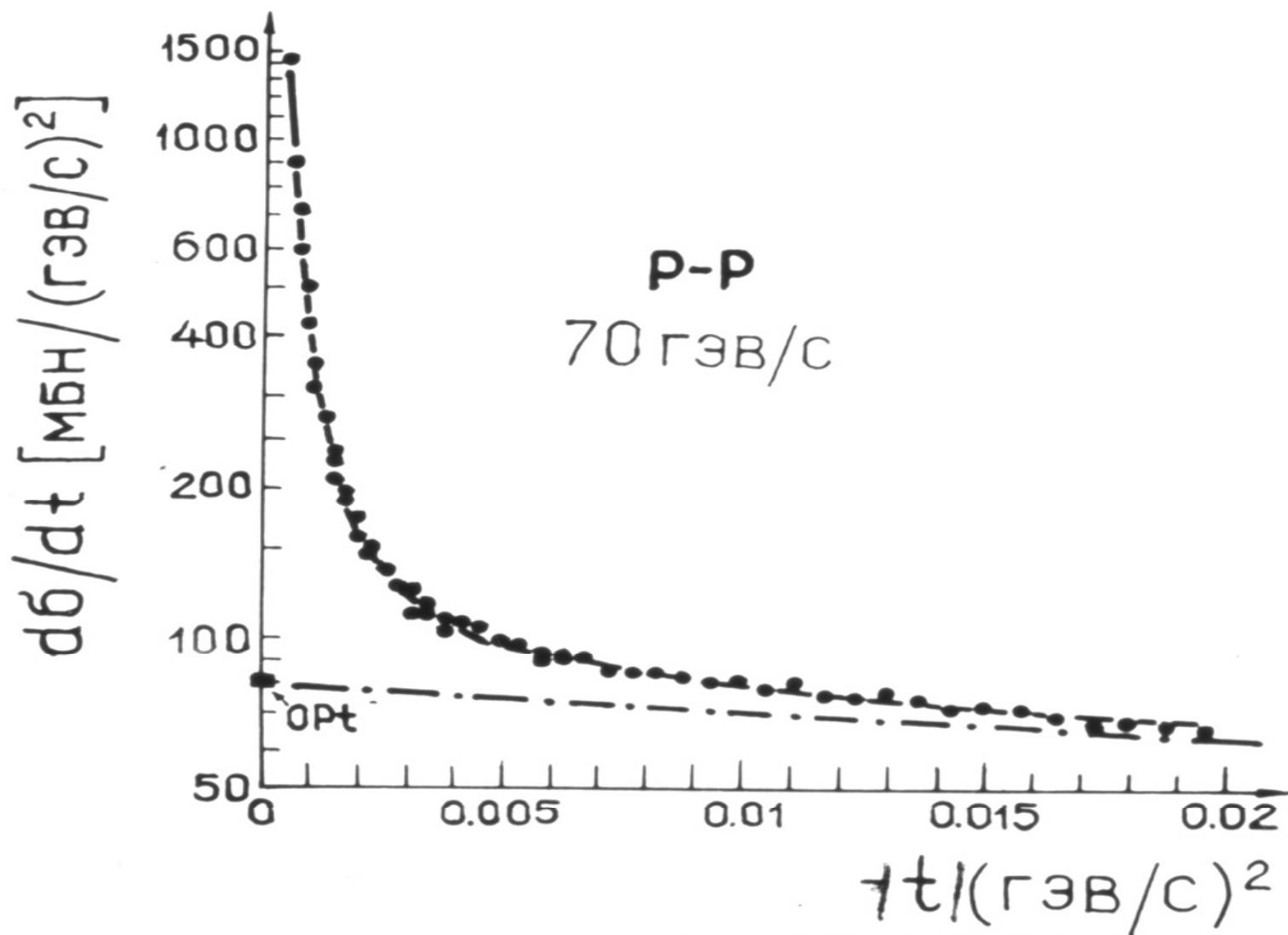
$$A_I = \sqrt{O} \cdot \exp(b \cdot t / 2); \quad A_R = \rho \cdot A_I.$$

$$A_C = \frac{2\alpha \sqrt{\pi h}}{t}, \quad \alpha = \frac{1}{137}.$$

Дифференциальное сечение упругого рассеяния в области кулон-ядерной интерференции.

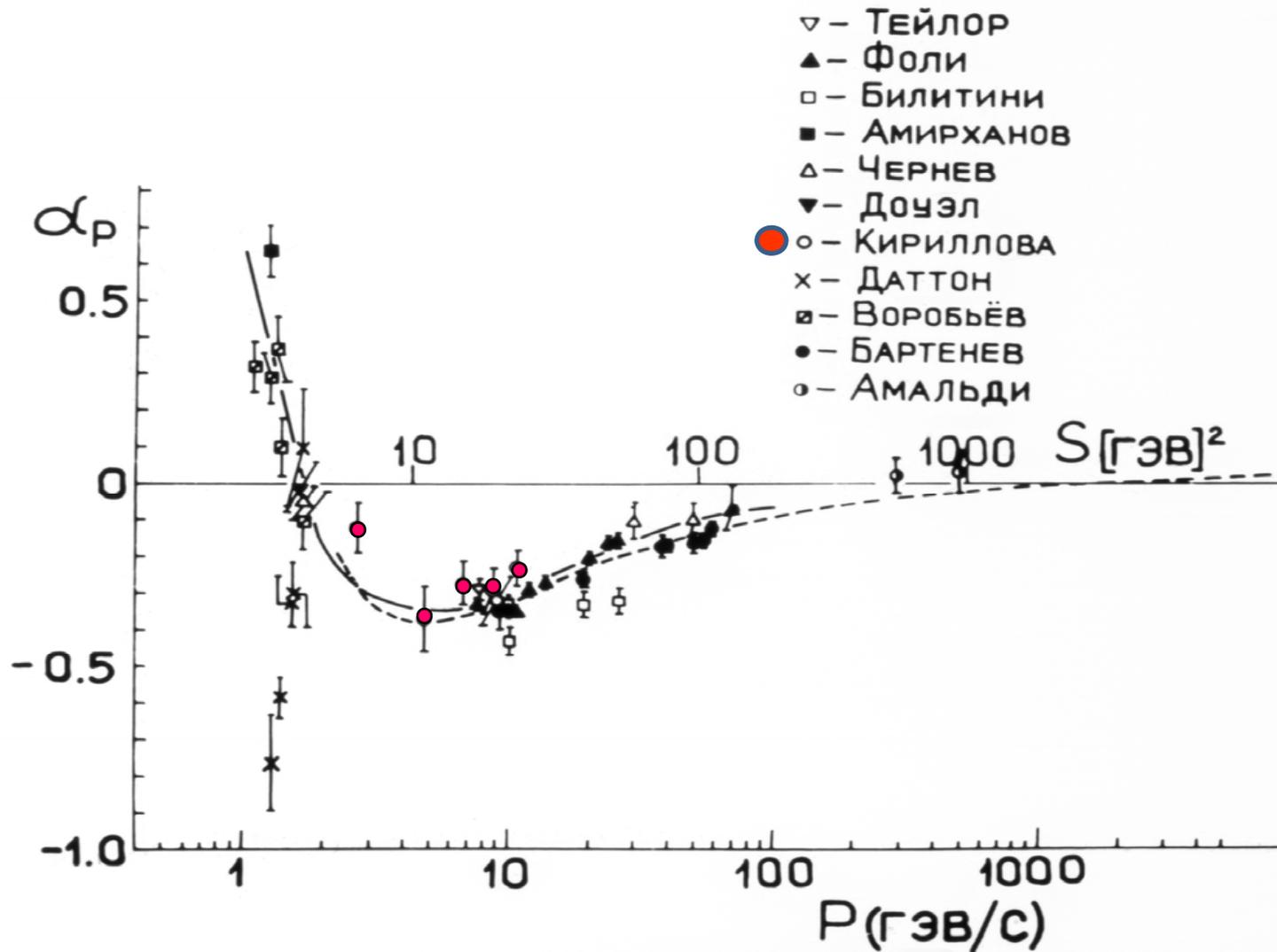


Дифференциальное сечение упругого рр рассеяния.  
Струйная мишень, Si – детекторы.

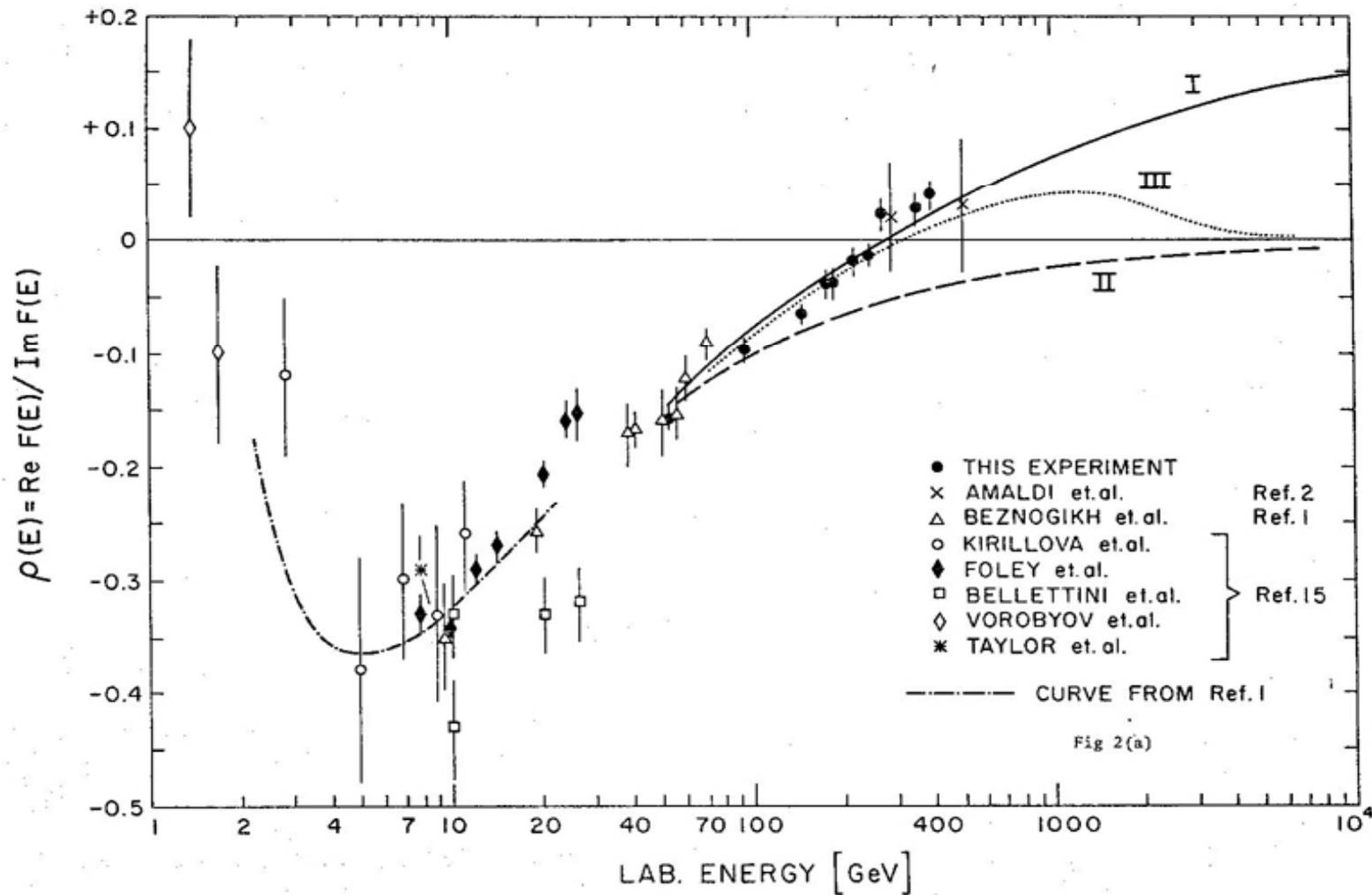


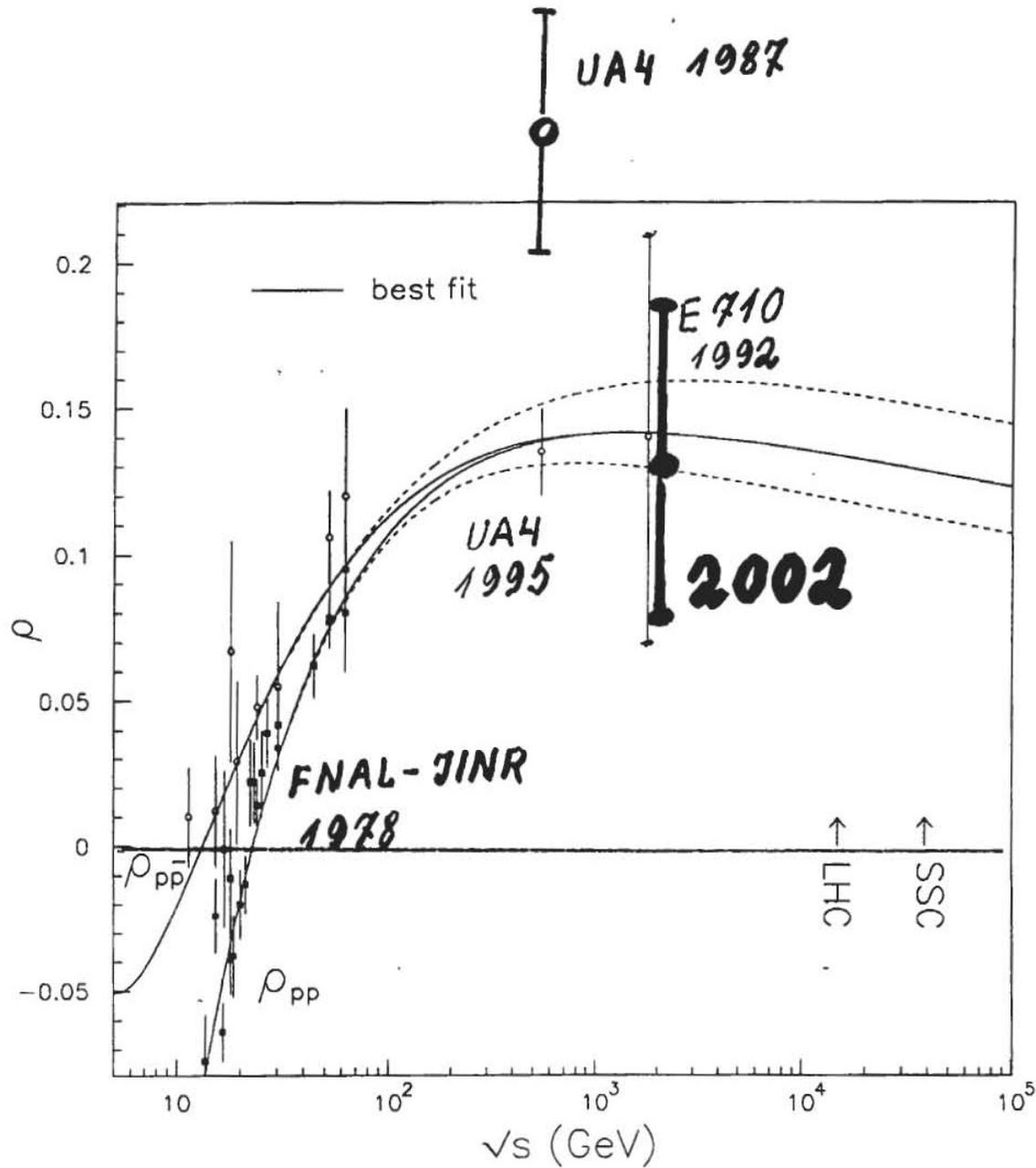
# Действительная часть амплитуды pp рассеяния.

Дисперсионное соотношение между действительной и мнимой частями амплитуды рассеяния



# Действительная часть амплитуды упругого $pp$ рассеяния





Compilation  
of the rho-  
parameter  
data.

Expected  
accuracy of the  
present proposal.

# Теория комплексных моментов - реджистика.

1959 г. Т.Редже.

Связанным состояниям системы ( $e^+p$ ) соответствуют полюса в парциальной амплитуде  $e^+p$  – рассеяния  $A_l(E)$  в плоскости комплексного момента  $l$ .

1961 г. В.Н.Грибов, М.Фруассар.

Применение идеи комплексной амплитуды  $A_l(E)$  для задачи рассеяния релятивистских частиц.

1962 г. Дж.Ф.Чу, С.К.Фраучи.

Понятие траектории Редже  $l(E) = \alpha(E)$  и реджиона. Рассеяние – обмен реджионами.  $E \rightarrow s$  для s-канала,  $E \rightarrow t$  для t-канала.

# Траектории реджионов $\rho$ , $K$ , $\phi$ , $\pi$

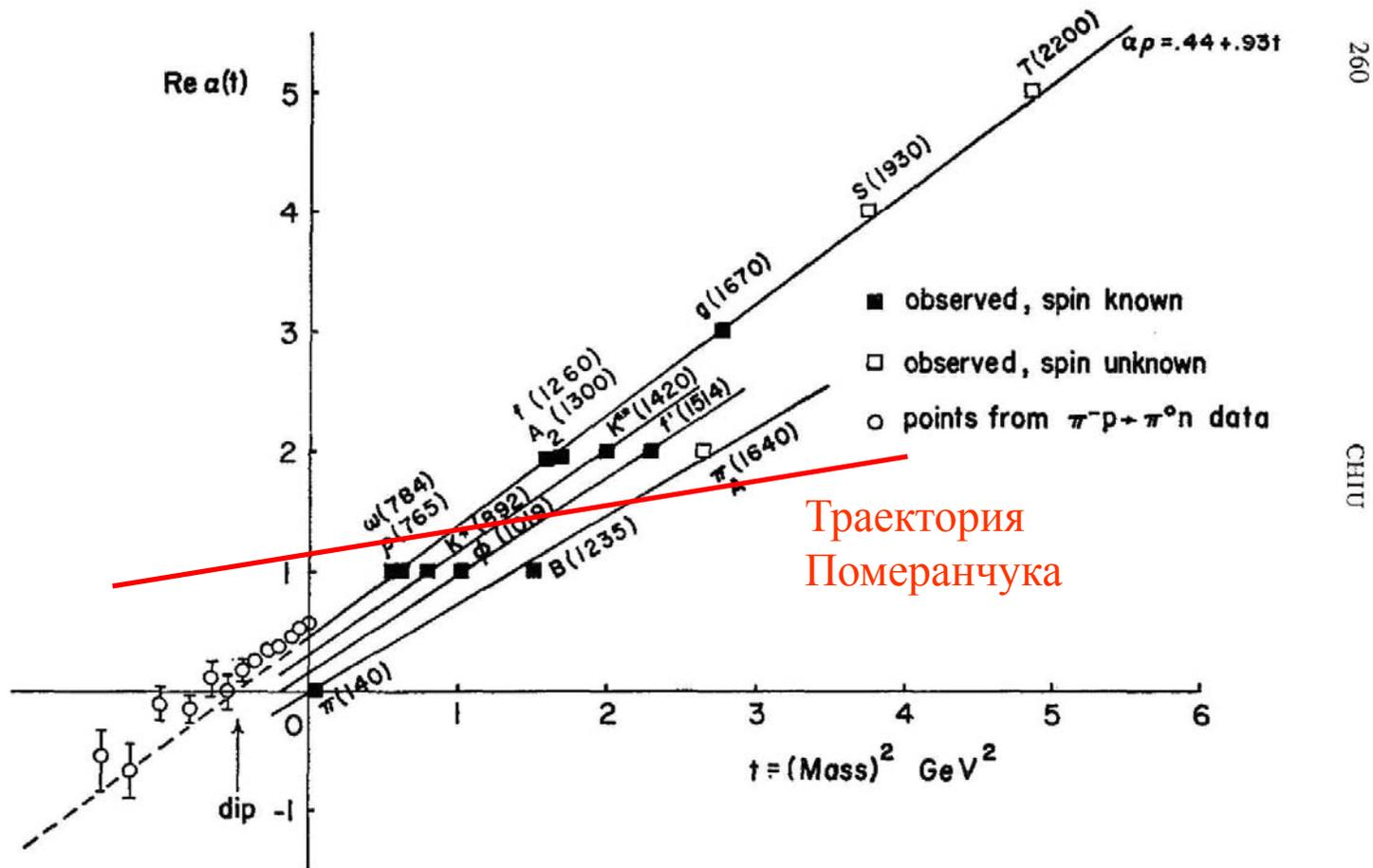


FIGURE 2.1 The  $\rho - A_2 - \omega - f^0$ ,  $K^* K^{**}$ ,  $\phi f'$  and  $\pi B$  exchange degenerate trajectories. (See footnote 1.) Here  $\alpha_\rho = 0$  occurs at  $t \approx -0.5 \text{ GeV}^2$ . Points in the negative  $t$ -region are obtained from  $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$  data [see Höhler et al (95); Arbab et al (96)].

# Адроны – пузыри в вакууме или струны ГЛЮОННОГО ПОЛЯ

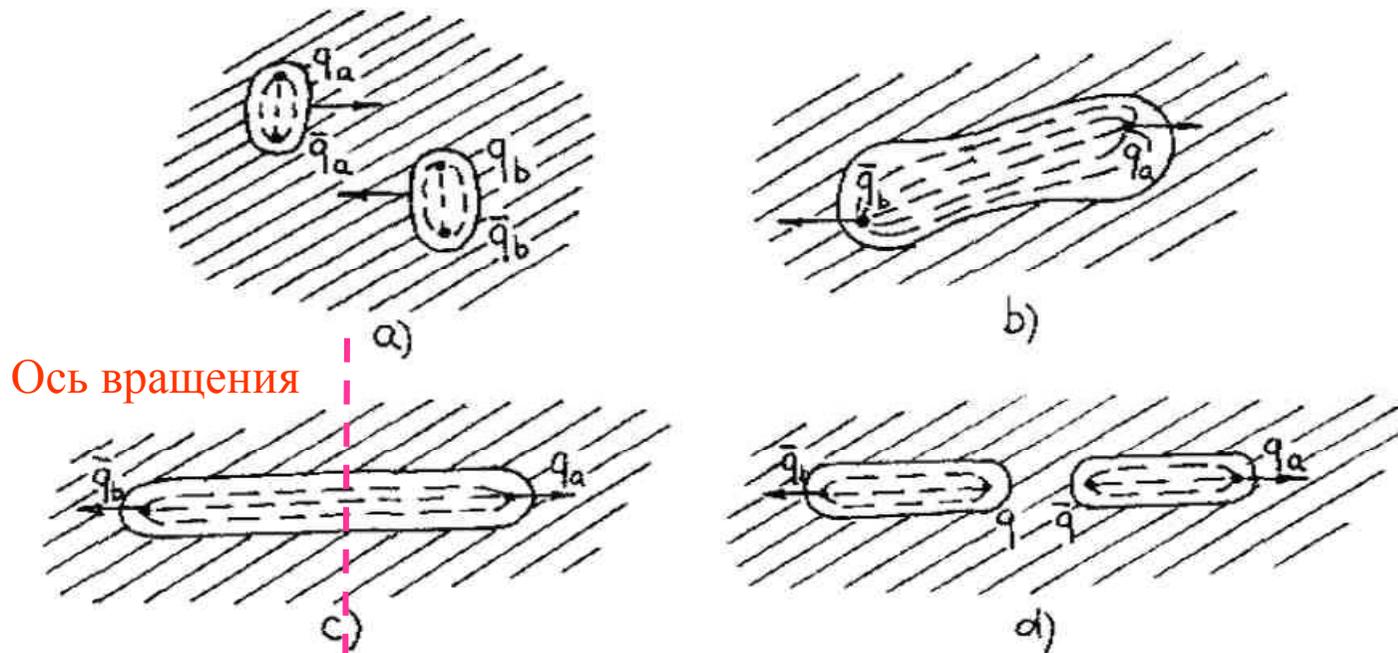


FIGURE 5 The process of production and decay of a colour-tube.

$$J = \left(\frac{m}{m_p}\right)^{1+\frac{1}{n}} \cdot h \quad n=1 - \text{одномерный объект} - \text{струна.}$$

$n=2$  – двумерный объект – диск.

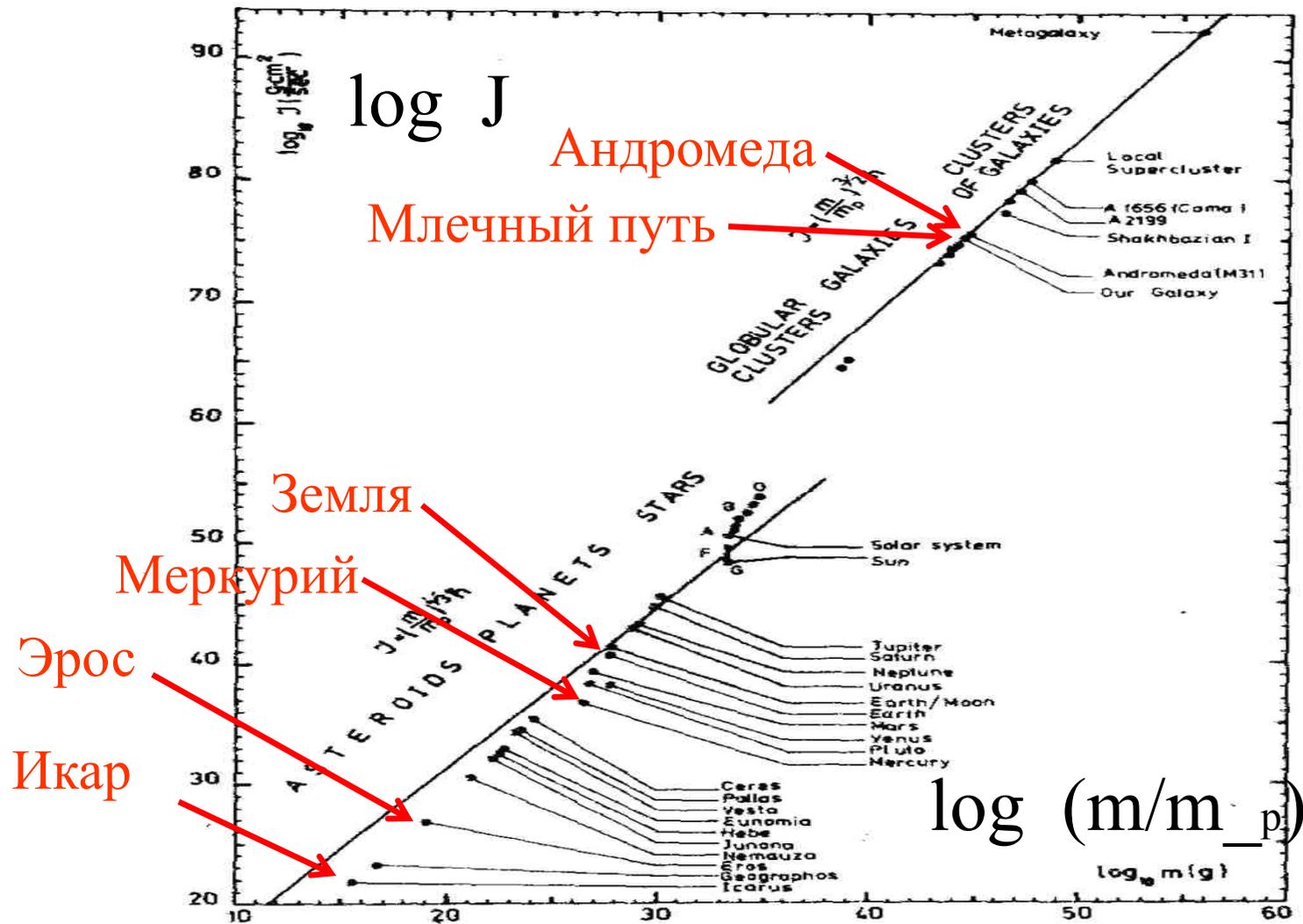
$n=3$  – трёхмерный объект – сфера.

$$J = \left(\frac{m}{m_p}\right)^2 \cdot h$$

$$J = \left(\frac{m}{m_p}\right)^{3/2} \cdot h$$

$$J = \left(\frac{m}{m_p}\right)^{4/3} \cdot h$$

# Траектории Редже астрофизических объектов.



The angular momentum-mass distribution for cosmic objects. Straight lines represent the theoretical predictions from formulae (2) and (3). Data are taken from Tables 1 and 2.

## Теория комплексных моментов или реджистика.

$$\frac{d\sigma}{dt} = f(t)s^{2(\alpha(t)-1)}; \quad \alpha(t) = \alpha(0) + \alpha'(0) \cdot t; \quad \text{Предсказания.}$$

$$\alpha(0) = 1 + \Delta; \quad \alpha', \Delta - \text{parameters.}$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = f(t) \exp(2\alpha' \cdot t \cdot \ln \frac{s}{s_0}) \times \left(\frac{s}{s_0}\right)^\Delta =$$

$$C \cdot \exp(bt) \left(\frac{s}{s_0}\right)^\Delta; \quad b = b_0 + 2\alpha' \cdot \ln \frac{s}{s_0}.$$

$$b = r^2 / 2 - \text{optical approximation.}$$

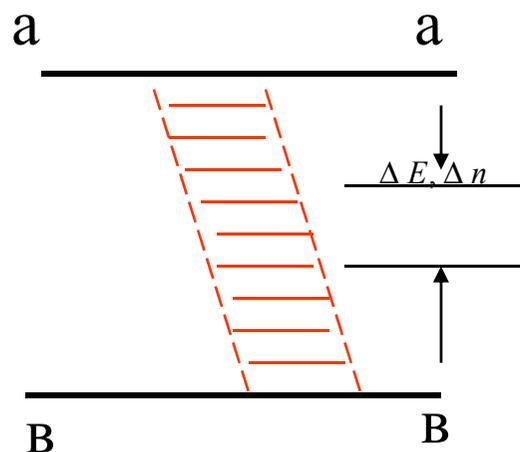
-Универсальное (для всех адронов)  
энергетическое поведение

$$b(E), \sigma_{tot}(E)$$

в асимптотике.

-Логарифмический  
рост параметра  
наклона  
дифракционного  
конуса с ростом  $s$ .

## Наглядное объяснение эффекта сужения конуса в рамках мультипериферической (померонной) модели.



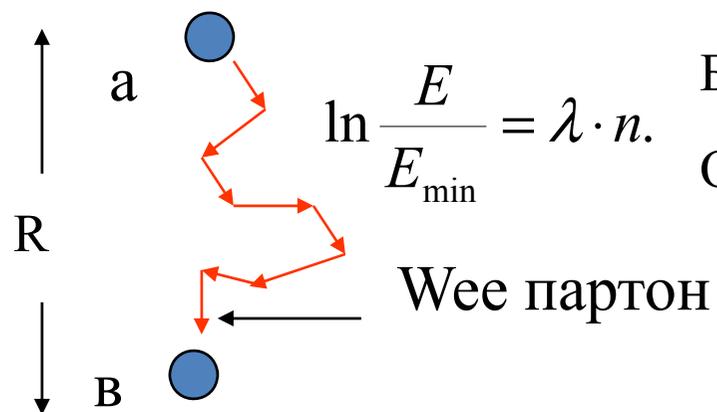
$$\Delta E = \lambda \cdot E \cdot \Delta n; \quad \ln E = c + \lambda n.$$

При  $E = E_{\min}$   $n=0$ .  $c = \ln E_{\min}$

Число шагов  $n$  связано с размером области взаимодействия  $R$   $n=f(R)$ .

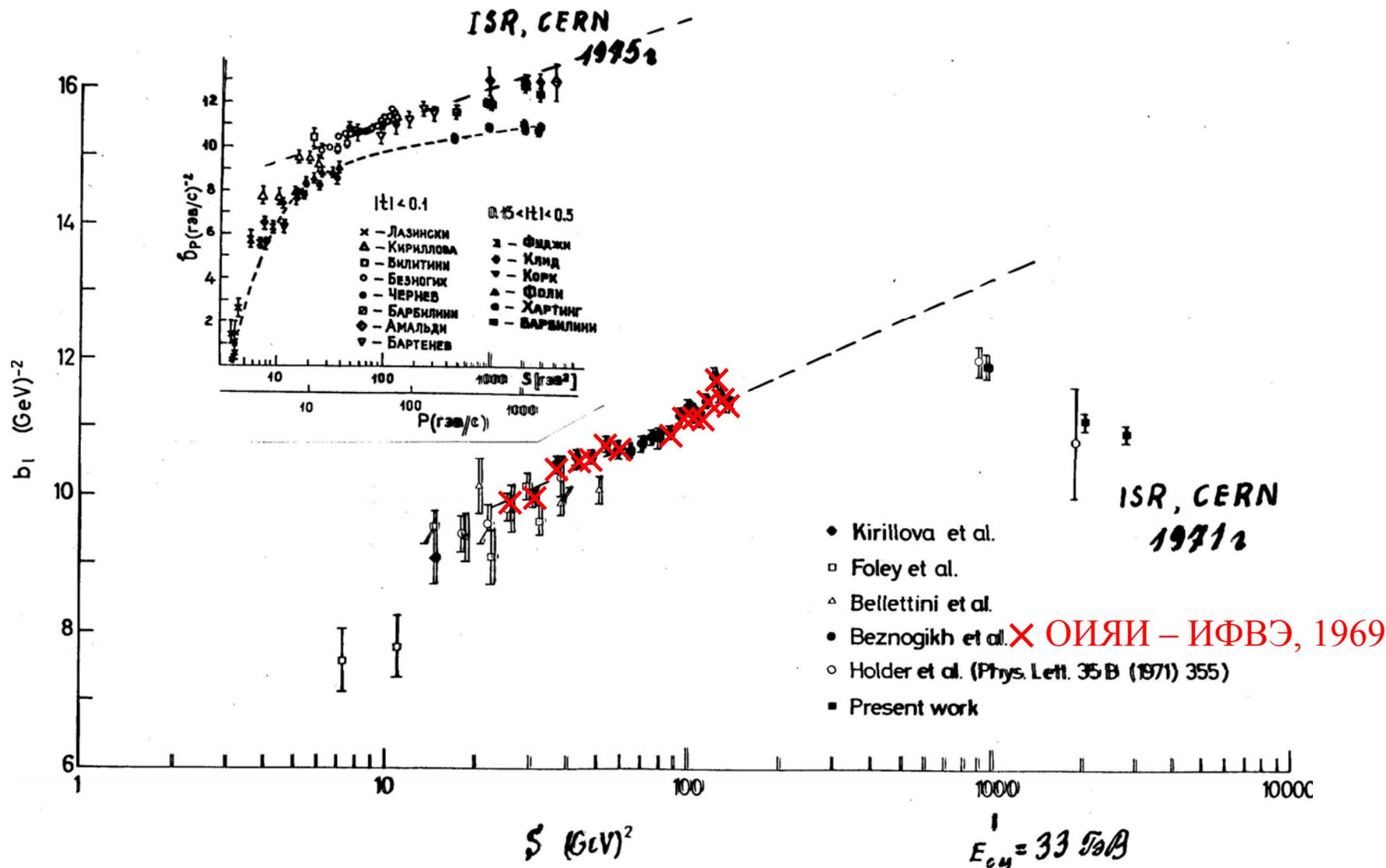
Броуновский вариант  $n = R^2$ ,

Общий случай  $n = R^D$ .

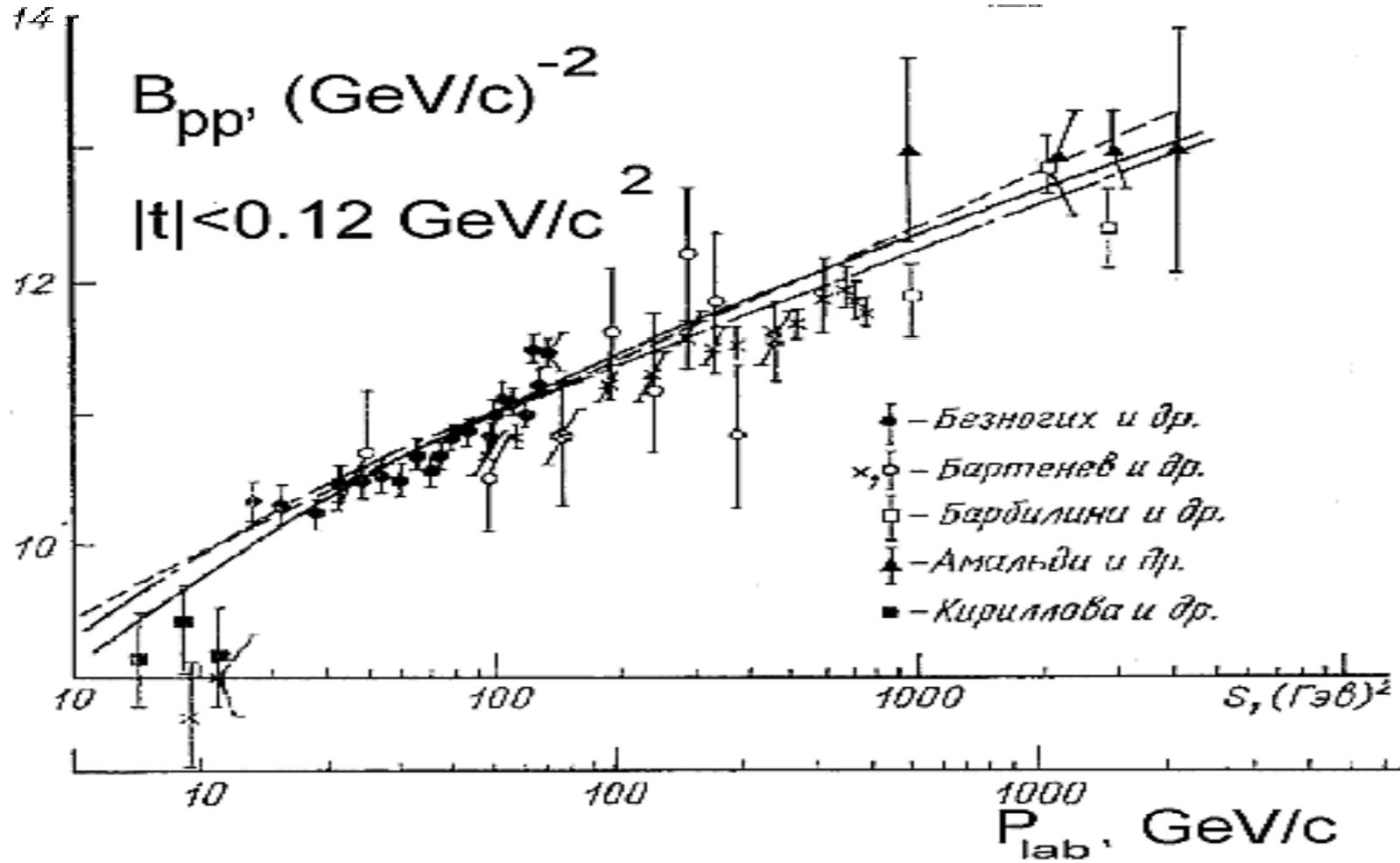


$$b \propto R^2 \propto n = b_0 + b_1 \cdot \left( \ln \frac{E}{E_{\min}} \right)^{\frac{2}{D}};$$

# История измерения $b(E)$ параметра



# Параметр дифракционного конуса pp рассеяния



# Pomeron trajectory parameters.

## Regge theory

$$\alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' \cdot t; \quad \alpha(0) - 1 = \Delta$$

$$\sigma_{\text{tot}}(s) \sim$$

Simple pole –  $(s/s_0)^{\alpha(0)-1}$

Double pole –  $\text{Ln}(s/s_0)$

Triple pole –  $\text{Ln}^2(s/s_0) + C$

2005 – Kovner –  $\alpha(0) - 1 = 0. \dots 0.4. \dots 0.8$        $\alpha(0) - 1 = 0.45$

1988 HERA data (Landshoff) – hard;

1976 BFKL (LO) -  $\alpha(0) - 1 = 0.4$

Landshoff 1984

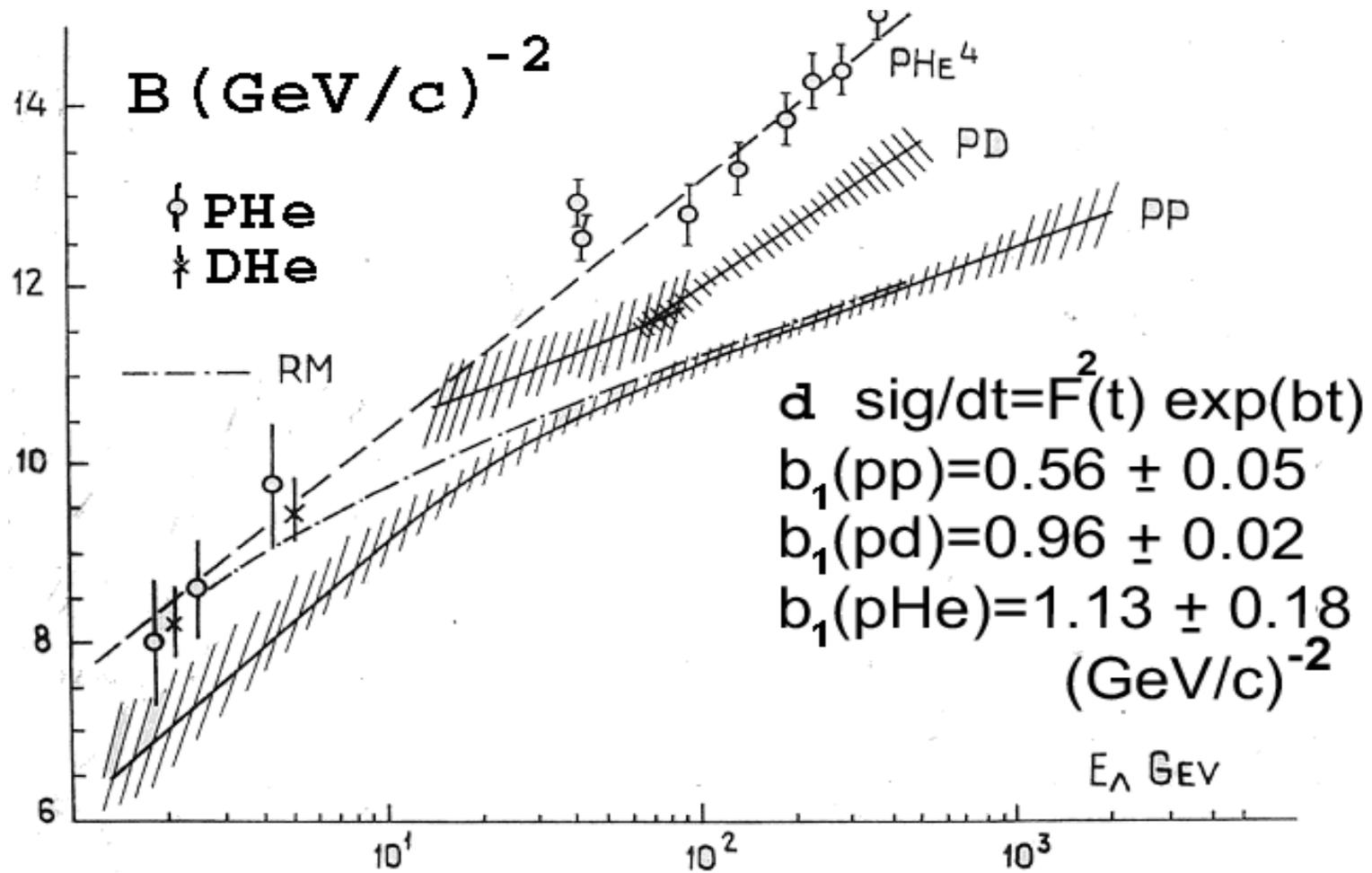
– soft Pomeron

$$\alpha(0) - 1 = 0.08$$

$$\alpha' \approx 0,13$$

$$(\text{GeV} / c)^{-2}$$

Сравнение параметров дифракционного конуса  
 $pp$ ,  $pd$  и  $pHe$  – рассеяния – аномальное сужение конуса  
 рассеяния на ядрах.



# TOTEM Physics

(K. Eggert – Blois EDS conference)

- Current models predict for 14 TeV: 90 - 130 mb
- Aim of TOTEM: ~ 1% accuracy

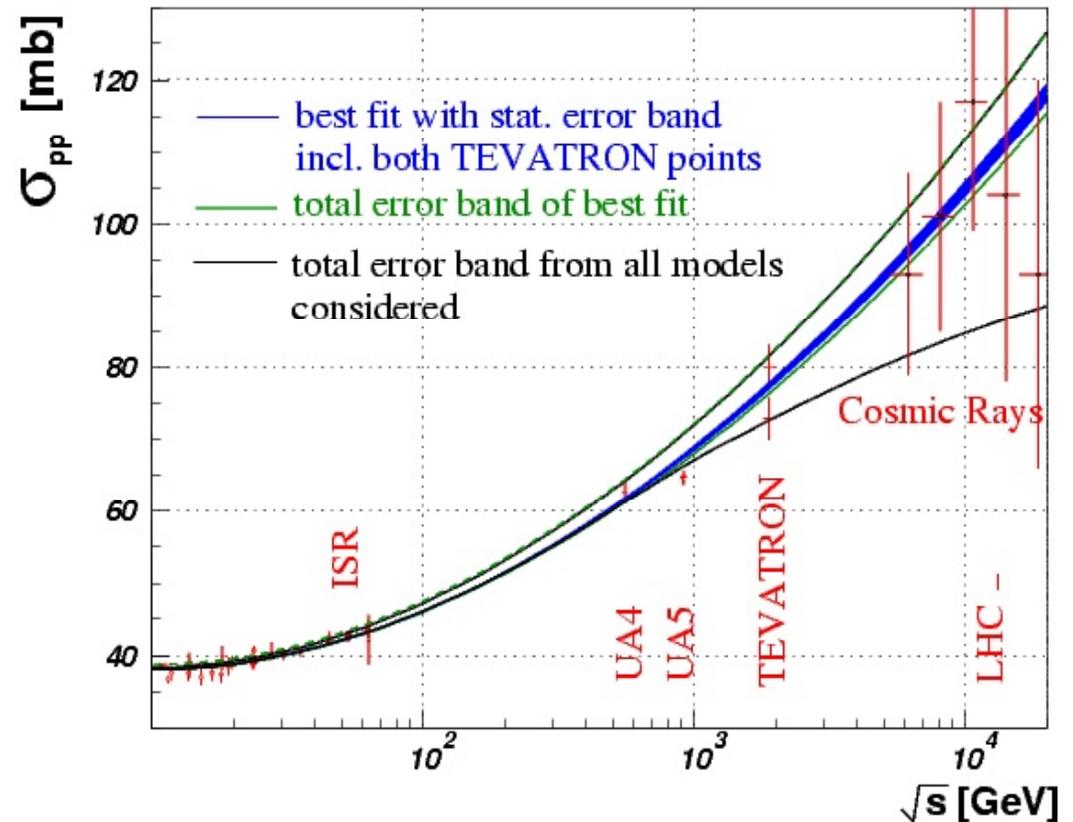
Luminosity independent method:

$$\text{Optical Theorem} \quad L \sigma_{tot}^2 = \frac{16\pi}{1+\rho^2} \times \frac{dN}{dt} \Big|_{t=0}$$
$$L \sigma_{tot} = N_{elastic} + N_{inelastic}$$



$$\sigma_{tot} = \frac{16\pi}{1+\rho^2} \times \frac{(dN/dt) \Big|_{t=0}}{N_{el} + N_{inel}}$$

COMPETE Collaboration:



# Дифракционное возбуждение адронов (неупругая дифракция)

Адроны – протяжённые объекты. Они могут находиться в возбуждённом состоянии. Неупругие процессы (множественное рождение частиц) есть следствие возбуждения внутренних степеней свободы адронов.

Предсказание нового механизма рождения частиц – неупругой дифракции (когерентный процесс). Условие: продольная область взаимодействия должна быть больше размера мишени.

$$p_0, m \quad \text{Мишень. } R. \quad p', m^* \quad q = \frac{m^{*2} - m^2}{2p_0}$$
$$h/q \geq R$$

Для pp взаимодействия при 10 ГэВ/с это условие выполняется для  $m^* < 4$  ГэВ.

И.Я.Померанчук, Е.Л.Фейнберг. ДАН 93, 439 (1953).

Е.Л.Фейнберг. УФН, т. 58, вып. 2, стр. 192 (1956).

# Реджионные диаграммы

$$\sigma_T^{ij} = \left| \begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ \bullet \\ \diagup \\ j \end{array} \right|^2 = \begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \\ j \end{array} = \begin{array}{c} i \\ \text{---} \\ | \\ \alpha(0) \\ | \\ \text{---} \\ j \end{array}$$

$$\frac{d\sigma_{el}^{ij}}{dt} = \left| \begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ | \\ \alpha(t) \\ | \\ \diagup \\ j \end{array} \right|^2 \quad \boxed{\frac{d^2\sigma}{dM_x^2} = \frac{G_{PPP}(t)}{M_x^2 - m_p^2} \left( \frac{s}{M_x^2 - m_p^2} \right)^{2\alpha' t}}$$

$$S \frac{d^2\sigma^{ij}}{dt dM_x^2} = \left| \begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ \bullet \\ | \\ \alpha(t) \\ | \\ \diagup \\ j \end{array} \right|^2 = \begin{array}{c} i \\ \diagdown \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \diagup \\ j \end{array} = \begin{array}{c} i \\ \text{---} \\ | \\ \alpha(0) \\ | \\ \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \alpha(t) \quad \alpha(t) \\ | \quad | \\ j \quad j \end{array}$$

8. Regge diagrams for the total cross section, for elastic scattering and for single diffraction dissociation.

# Неупругая дифракция

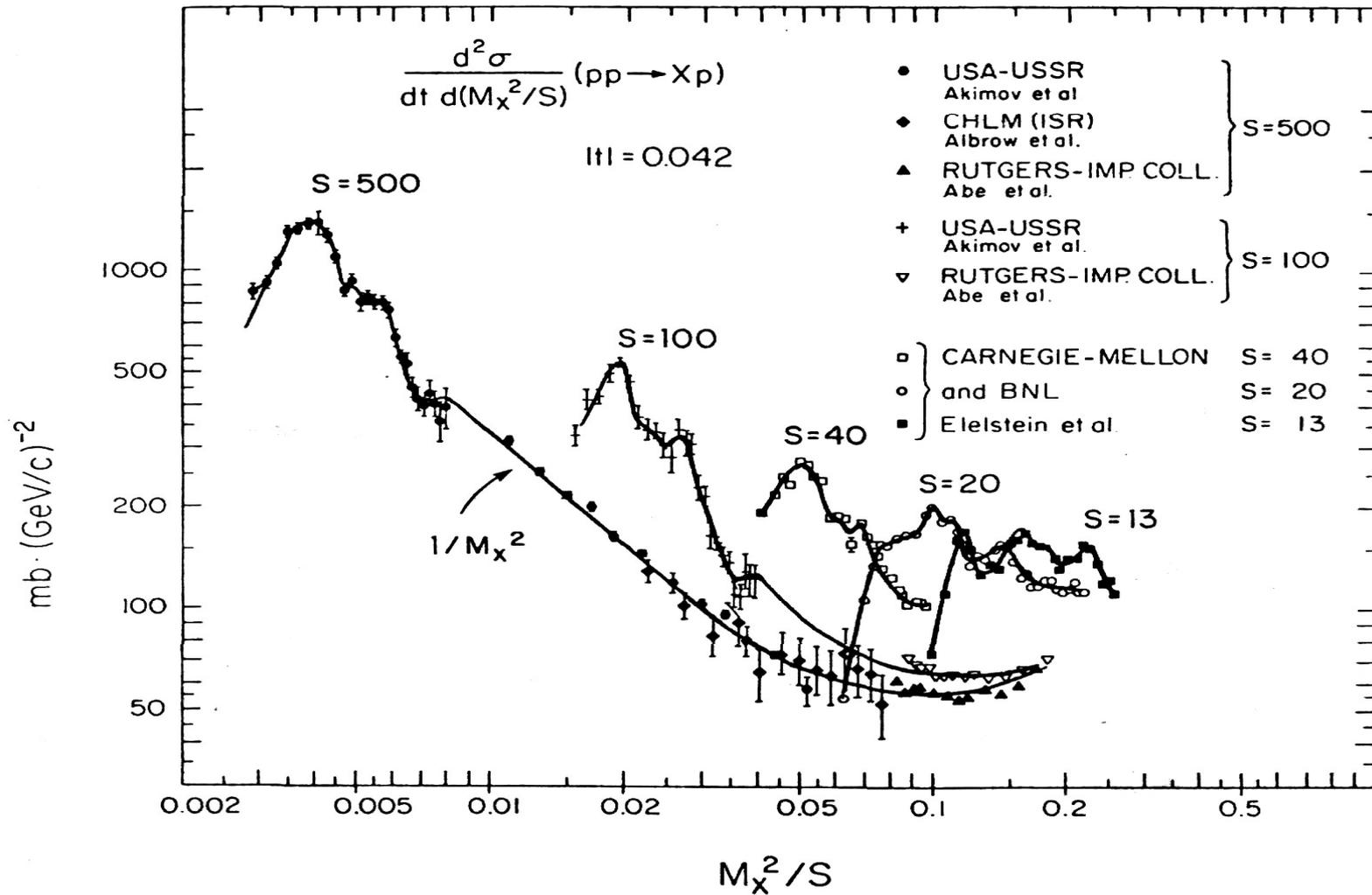
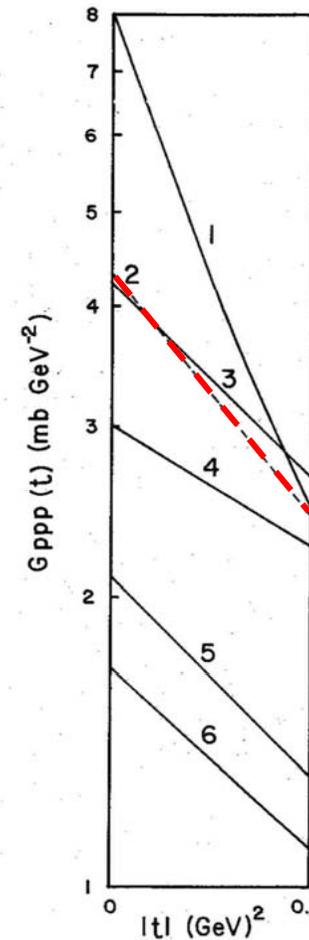
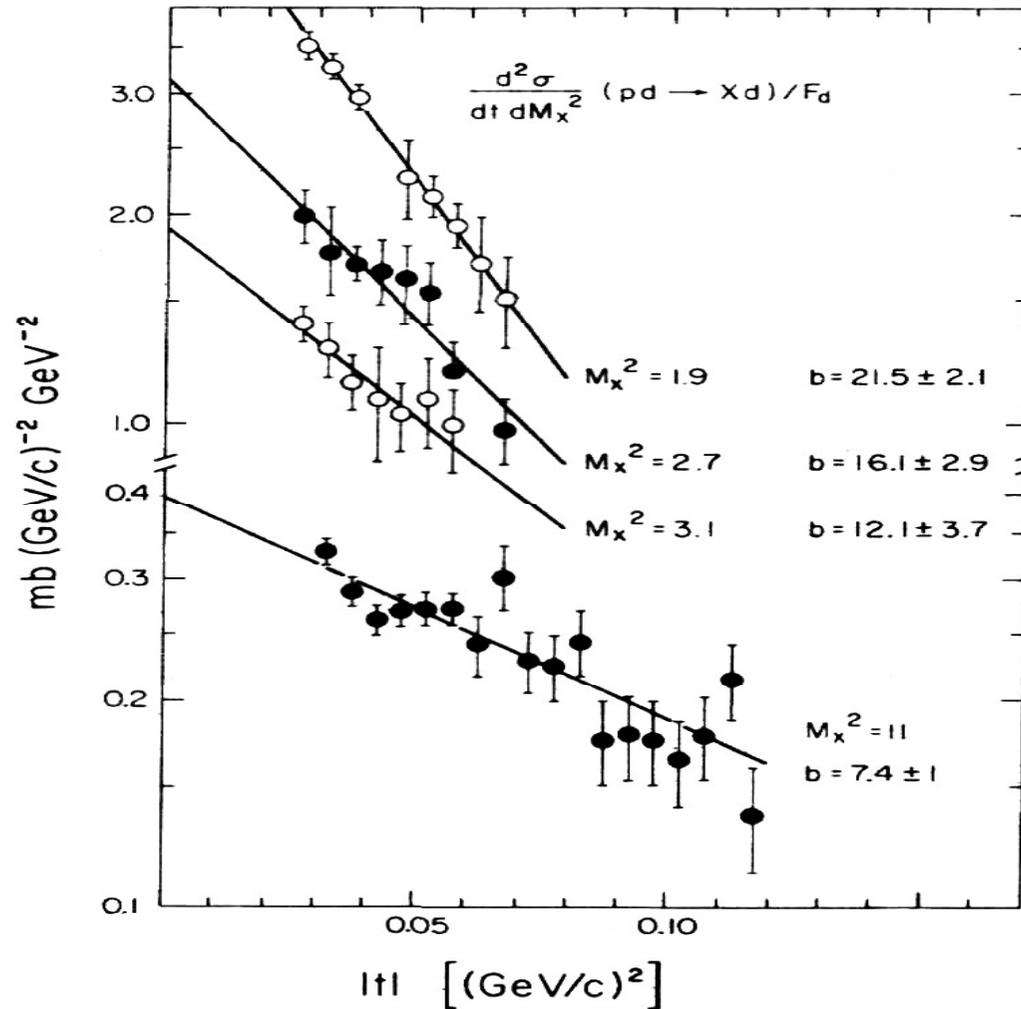


Fig. 2. The invariant differential cross section  $d^2\sigma/dt d(M_x^2/s)$  for  $pp \rightarrow Xp$  at  $t = -0.042 (\text{GeV}/c)^2$ , plotted versus  $M_x^2/s$  at various values of  $s$  (from ref. [2]). As the energy increases, the resonance region moves to smaller values of  $M_x^2/s$  while larger masses enter the diffraction region and form a  $1/M_x^2$  continuum.

# Неупругая дифракция



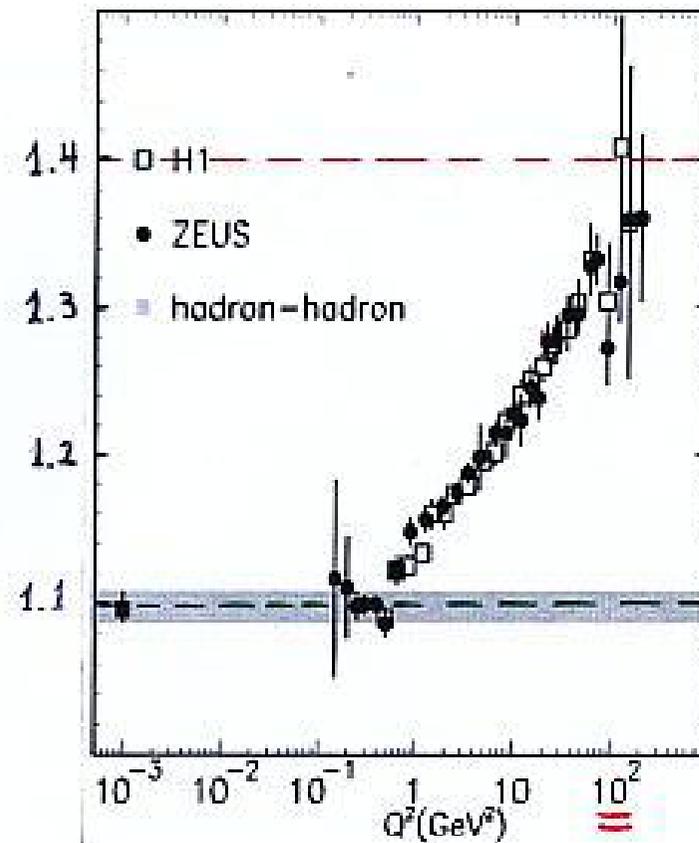
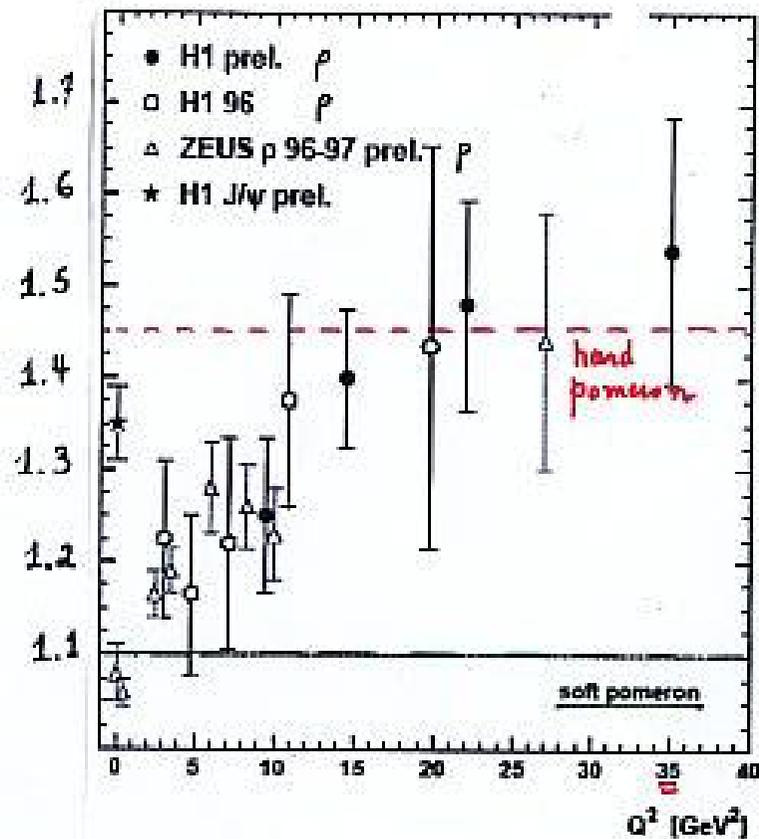
- 1 - Roy - Roberts
- 2 - this paper
- 3 - Amati et al.
- 4 - CHLM (ISR)
- 5 - Capella et al.
- 6 - Kaidalov et al.

Fig.7

FIG. 2. Differential cross sections vs  $t$  for  $pp \rightarrow Xp$ , extracted from  $pd \rightarrow Xd$ , at  $p_{\text{lab}} = 275 \text{ GeV}/c$ , for  $M_x^2 = 1.9, 2.7, 3.1, \text{ and } 11 \text{ GeV}^2$ .



# Параметры померона в глубоко неупругом взаимодействии лептонов с протоном.



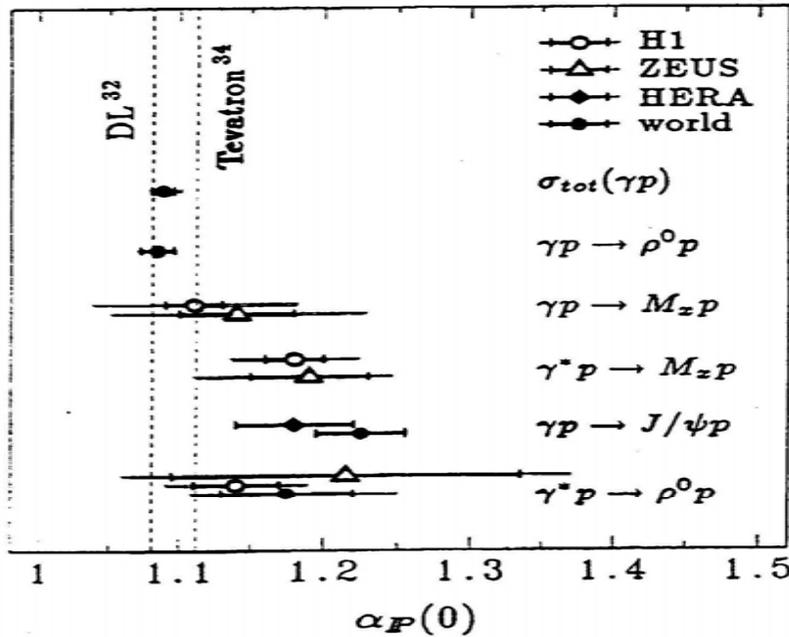


Figure 14: Summary on the Pomeron intercept measurement at HERA. Thick inner bars represent statistical errors, while the total (thin) bars correspond to statistical and systematic errors added in quadrature. Dashed lines show the values obtained from the combined fit of the total hadronic cross sections<sup>32</sup> and from the Tevatron data<sup>34</sup>.

## Проблемы и заключение.

Имеется целый набор возможных значений интерсепта  $\alpha_P(0)$ :

$$DL, \quad \alpha(0)-1=0.080$$

$$BFKL = 4N_c \ln 2 \alpha_s / \pi = 0,4$$

$$КХД = 0,2.$$

Возникает вопрос: сколько существует померонов?

Ответ: померон один, но нет точ-

ной процедуры определения его параметров. Возможные варианты:

Поправки на экранирование при энергии  $< 1$  ТэВ малы и правильное значение даёт DL процедура. Но тогда как быть с  $\gamma$  р данными?

В адронных и ГНР процессах действует один голый померон с  $\alpha(0)-1=0,25$ , но поправки на экранирование (унитаризацию) велики и разные в разных процессах и мы не умеем их вычислять.

Существует BFKL померон с  $\alpha(0)-1=0,4$ , а унитарные поправки (по непонятным причинам) очень большие.

Идея померона не применима для ГНР.

# TOTEM Physics

(K. Eggert – Blois EDS conference)

- Current models predict for 14 TeV: 90 - 130 mb
- Aim of TOTEM: ~ 1% accuracy

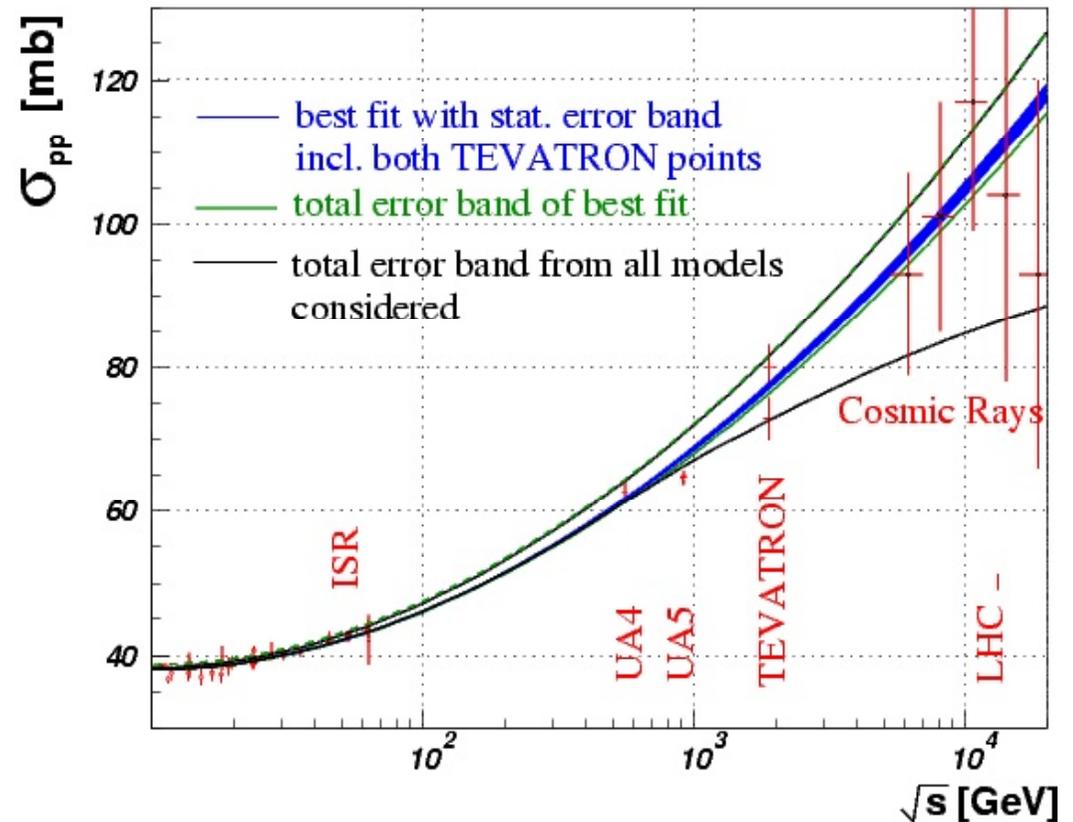
Luminosity independent method:

$$\text{Optical Theorem} \quad L \sigma_{tot}^2 = \frac{16\pi}{1+\rho^2} \times \frac{dN}{dt} \Big|_{t=0}$$
$$L \sigma_{tot} = N_{elastic} + N_{inelastic}$$

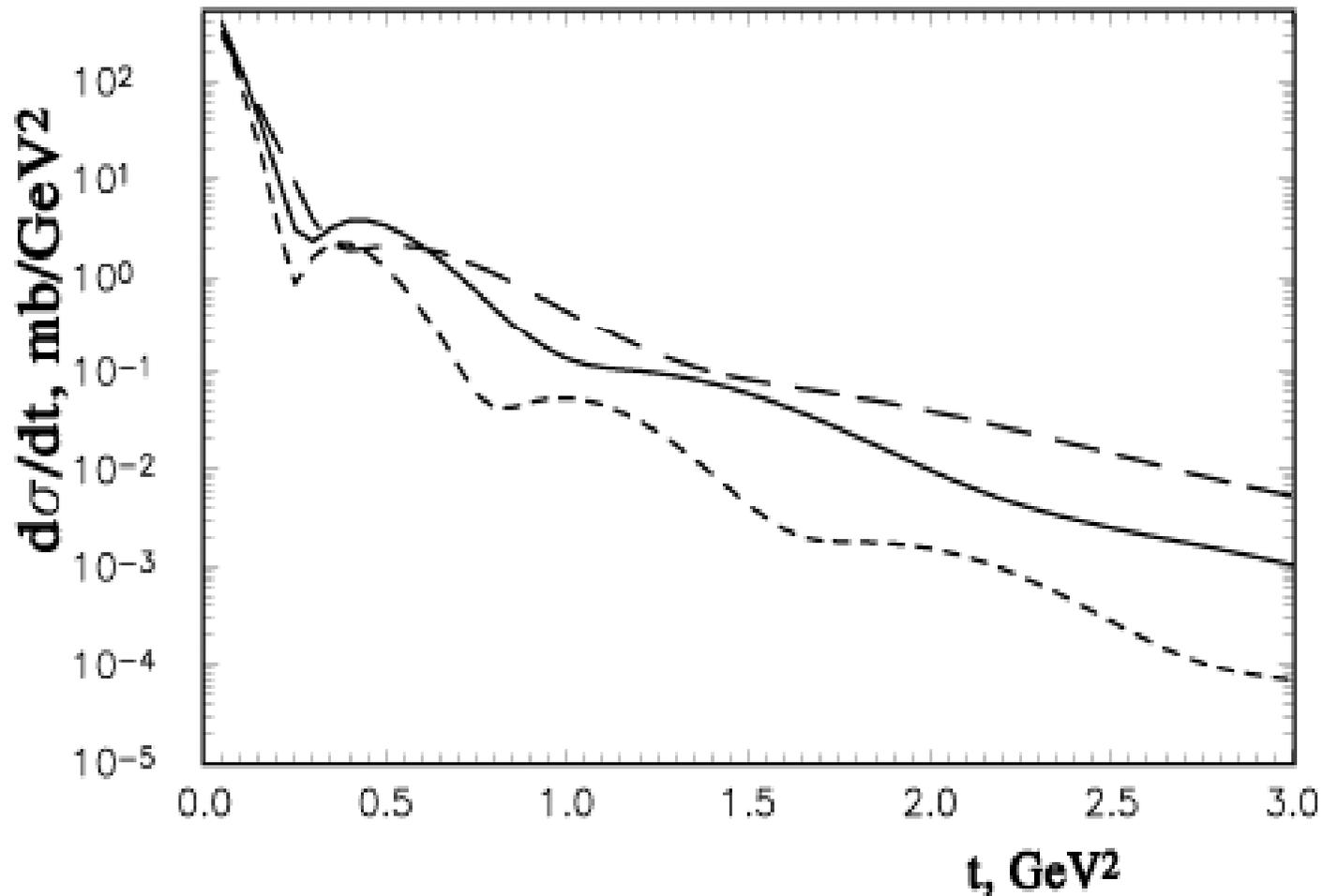


$$\sigma_{tot} = \frac{16\pi}{1+\rho^2} \times \frac{(dN/dt) \Big|_{t=0}}{N_{el} + N_{inel}}$$

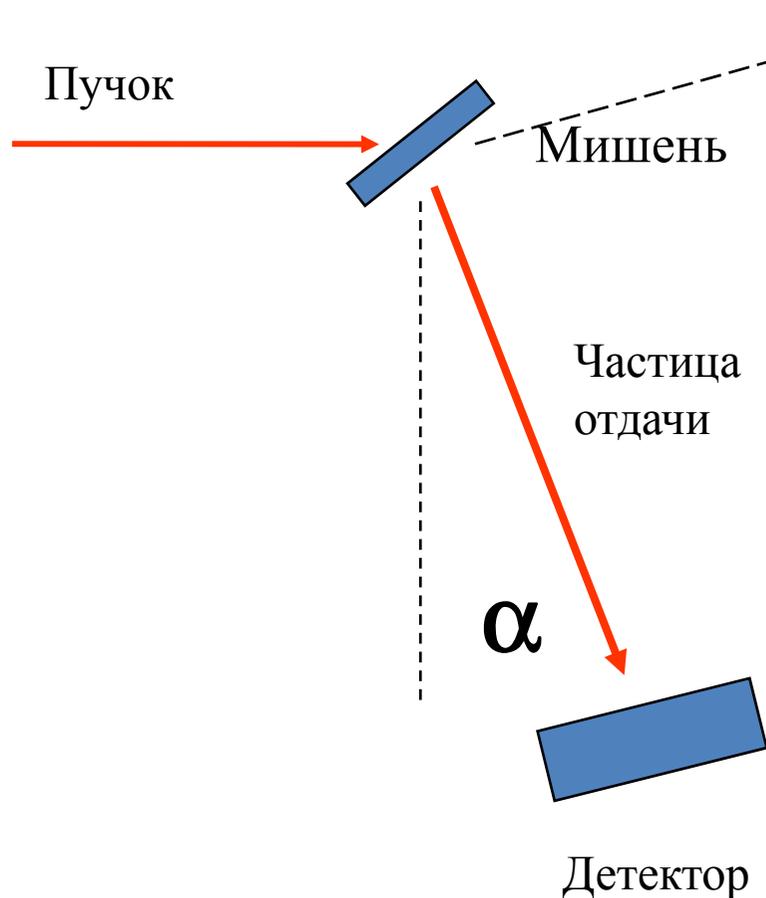
COMPETE Collaboration:



# Диф. сечение упругого $pp$ рассеяния в оптической модели при энергии ЛНС



# Метод тонкой внутренней мишени



$$\Delta E_- < \Delta E_+; \quad \theta_{MS} < \theta_{ACC}.$$

$$h_{TG} \approx 1 \text{ мсм} \quad CH_2.$$

$$I_{EFF} = I_{ACC} \times N_{MULT\ TRAV};$$

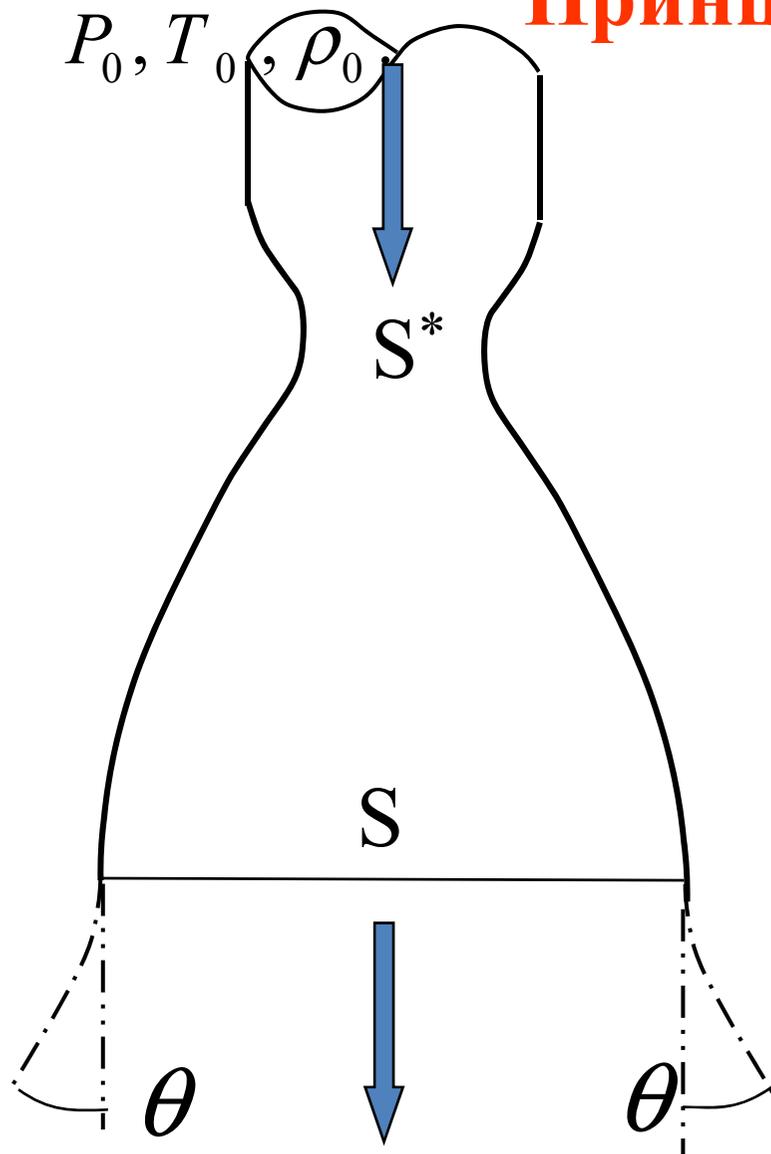
$$N_{MULT\ TRAV} \approx 10^5.$$

$$\Delta\theta_{RES} = \theta_{EL} - \theta_{INEL} \approx 5 \div 50 \text{ мр};$$

$$P_{RECOIL} \approx 2m_{TAR} \cdot \alpha.$$

– indep. of energy.

## Принцип работы сопла Лавалья.



If  $\frac{S}{S^*} \rightarrow \infty$ , then  $M = V / a \rightarrow 0$

$P, T, \rho \rightarrow 0$ .  $a$  – velocity of sound.

$$a = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \sqrt{\gamma R T}.$$

$V \rightarrow V_{\text{lim}}; \theta \rightarrow 0;$

$$V_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} R T_0}$$

M	$\rho / \rho_0$	T/T <sub>0</sub>	P/P <sub>0</sub>	S*/S	Theta
1	0,63	0,83	0,52	1	130°
3	0,08	0,35	0,03	0,2	80°
4	0,027	0,23	0,006	0,1	64°

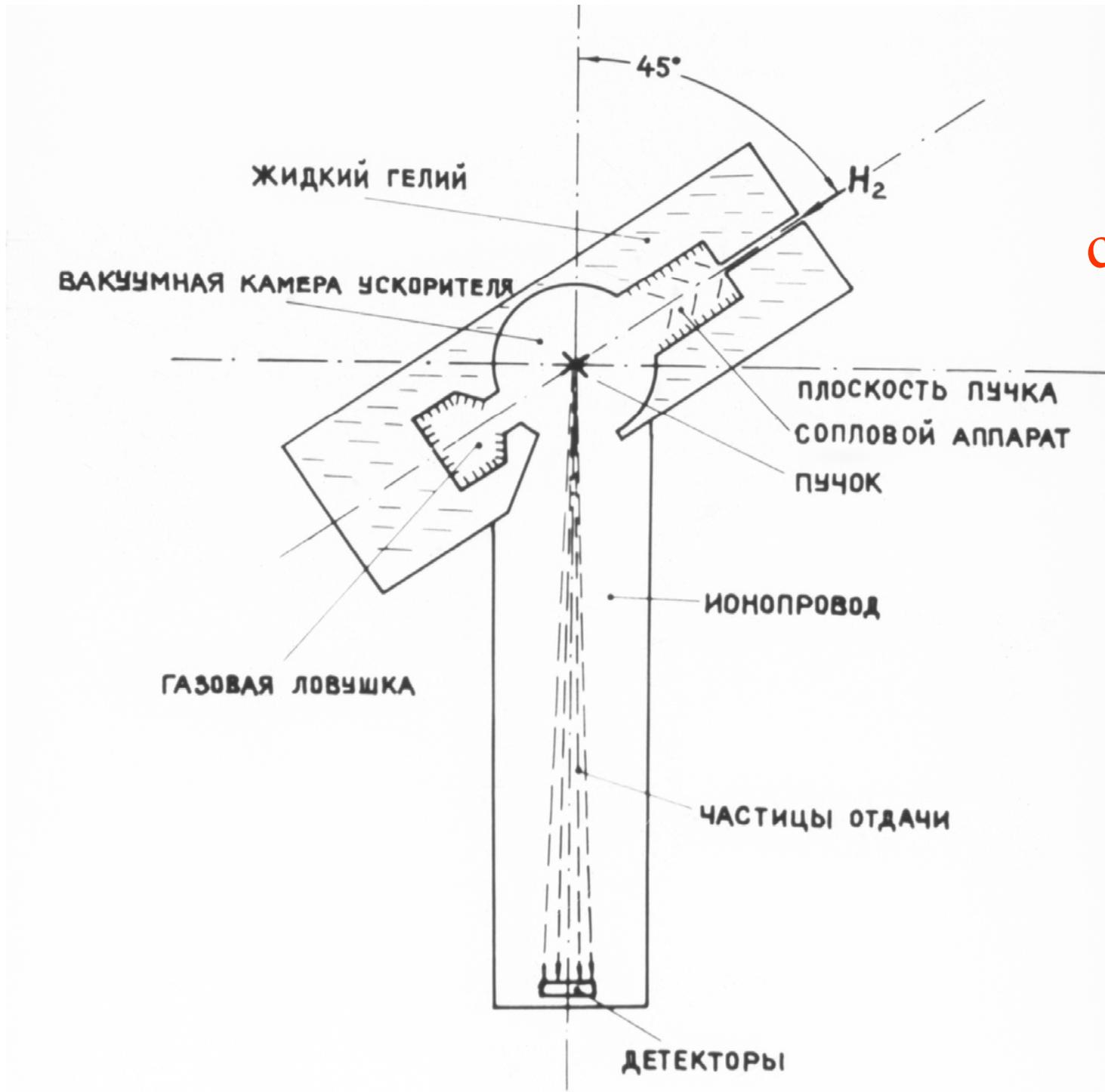
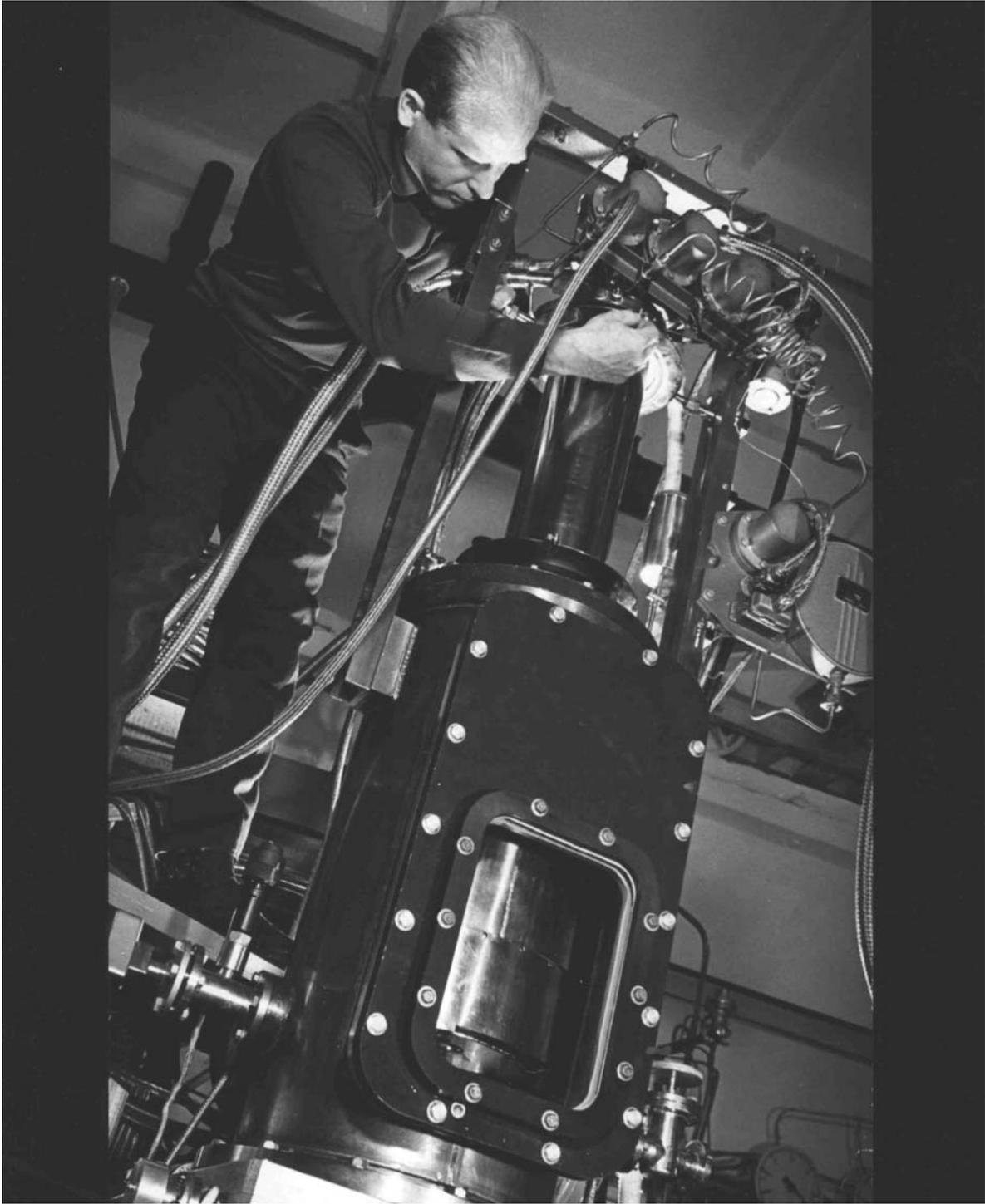


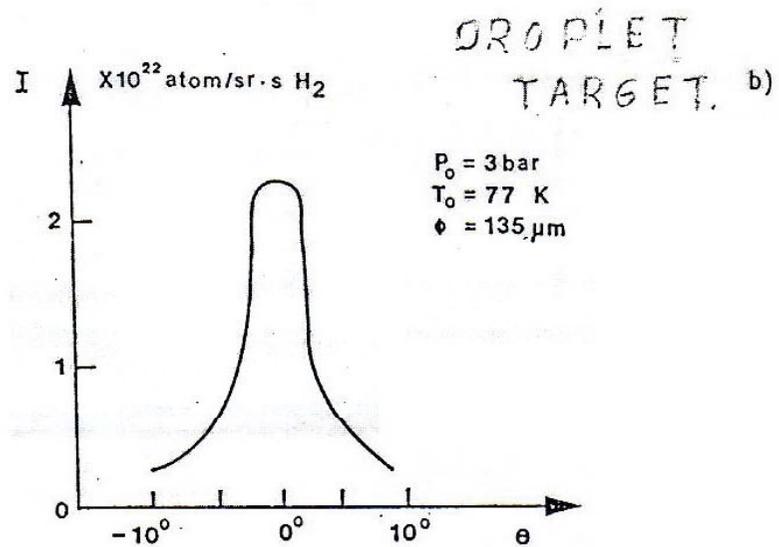
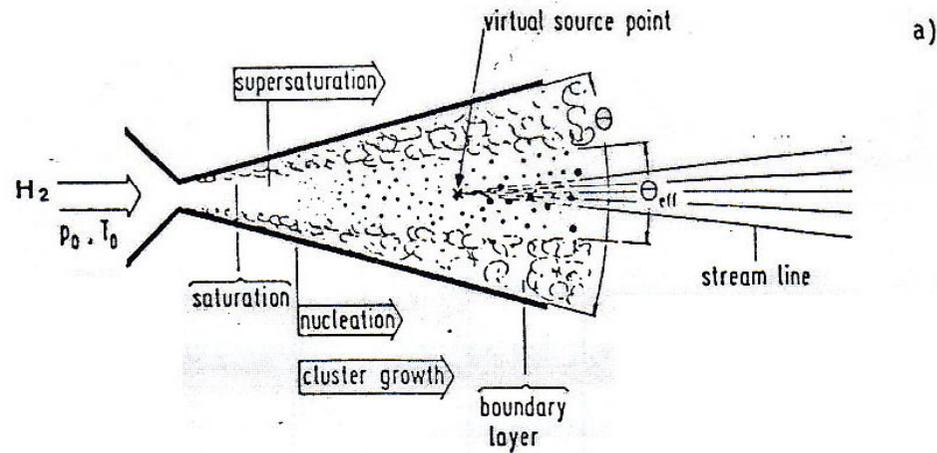
Схема  
установки  
со струйной  
мишенью.



CERN ISR, SPS.

84

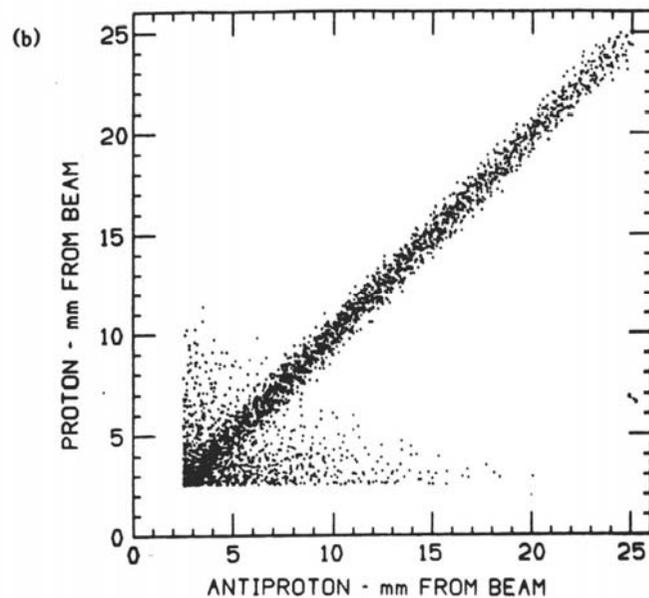
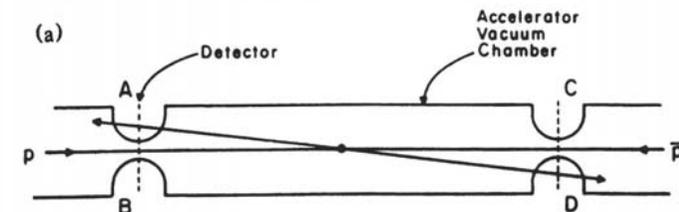
Сопловой аппарат  
на SPS  
в ЦЕРН



# Traditional technique of elastic scattering measurement: experiment at FNAL collider.

VOLUME 68, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW I



(c). correl: beam the be with neglig between ticles culatin the sh that o The b that is side t some tance elastic 2.75 n the ba an acc We ferenti

$$\frac{1}{L} \frac{dN}{dt}$$

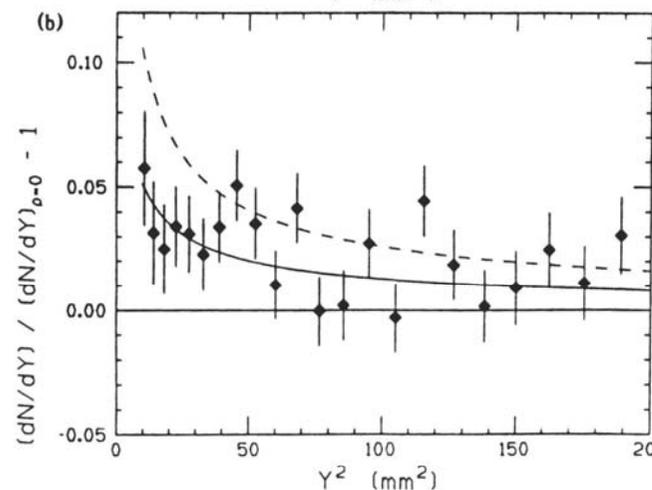
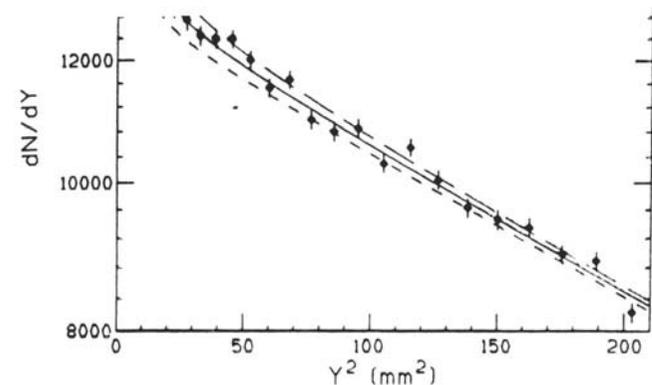


FIG. 3. (a) As for Fig. 2, with only data for  $y^2 < 210 \text{ mm}^2$ . The solid curve is the best fit described in the text ( $\rho = 0.140$ ); the long-dashed and short-dashed curves show values of  $\rho$  of

## **Заключение.**

Исследование дифракции адронов составляет важный раздел физики частиц.

Оно позволяет проверить фундаментальные принципы квантовой теории поля, исследовать структуру адронов и динамику их взаимодействия.

A photograph of a winter scene. A snow-covered path leads through a forest of evergreen trees heavily laden with snow. The sky is a pale blue. In the distance, a person is walking on the path. A street lamp is visible on the right side of the path. The text "Конец. Спасибо." is overlaid in a large, green, outlined font across the center of the image.

Конец.  
Спасибо.