

Исследования по физике частиц во встречных ер-столкновениях на коллайдере ГЕРА

1. Цели
2. ер-коллайдер ГЕРА
3. Квази-реальные фотоны
4. Жесткие процессы
5. Электро-слабые взаимодействия
6. Поиски экзотики
7. Итоги

Сотрудничество ФИАН - ДЕЗИ

С именем академика Павла Алексеевича Черенкова тесно связаны исследования сотрудников ФИАН по физике частиц на ер-коллайдере ГЕРА в национальной немецкой лаборатории ДЕЗИ (Гамбург).

В 1983 г. на Международном Конгрессе в Италии (в Риме и Ватикане), где обсуждался (среди прочих) и вопрос о подготавливаемой католической церковью реабилитации «узника инквизиции» Галилео Галилея, П.А.Черенков познакомился с проф. Ф.Зоргелем (в то время директором ДЕЗИ), который, зная о высоком уровне исследований в ФИАНе, предложил создать сотрудничество ОФВЭ – ДЕЗИ для участия в работах на проектируемом в то время коллайдере.

Работы по созданию такого сотрудничества были проведены под руководством П.А.Черенкова, влияние которого было определяющим: создана внеструктурная группа научных сотрудников, получена поддержка Президиума Академии наук, согласован вопрос об авторских правах на результаты исследований, урегулированы финансовые и юридические условия работы в ДЕЗИ, решена проблема получения фондов на материалы для создания некоторых детекторов. В организационных мероприятиях участвовали также сотрудники ОФВЭ П.С.Баранов, А.С.Белоусов, Ф.И.Лебедев и С.В.Русаков.

Сотрудничество ФИАН-ДЕЗИ (продолжение)

П.А. Черенков участвовал и в подготовке физических исследований на коллайдере,. В частности он являлся соавтором проекта эксперимента по измерению полных сечений поглощения фотонов за счет процессов фоторождения адронов.

Деятельность по организации совместных работ была поддержана руководителем ОЯФ академиком **М.А.Марковым** и председателем Научного Совета при Президиуме АН по физике электромагнитных взаимодействий академиком **А.М. Балдиным**.

Группа ФИАНа вошла в коллаборацию H1.

1. Цели

Сильные взаимодействия

кварков и глюонов: КХД, $\alpha_s \sim 0.1$.

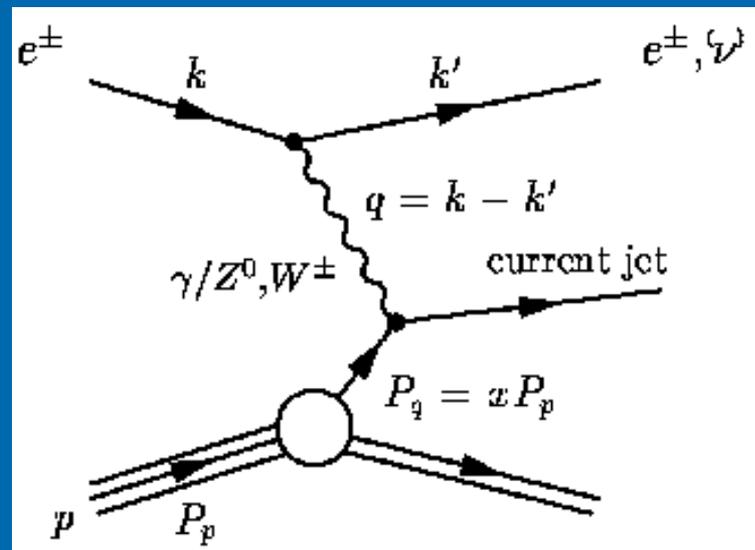
Жесткие процессы:

$P_T > 3 \text{ ГэВ}$, $M > 5 \text{ ГэВ}$, $Q^2 > 10 \text{ ГэВ}^2$

Электрослабые процессы.

Суперсимметрия (Ф-Б), новые частицы.

Мягкие процессы при высоких энергиях.



2. ер-колайдер ГЕРА

Строительство: 1984-1991. Исследования по физике 1992-2007.

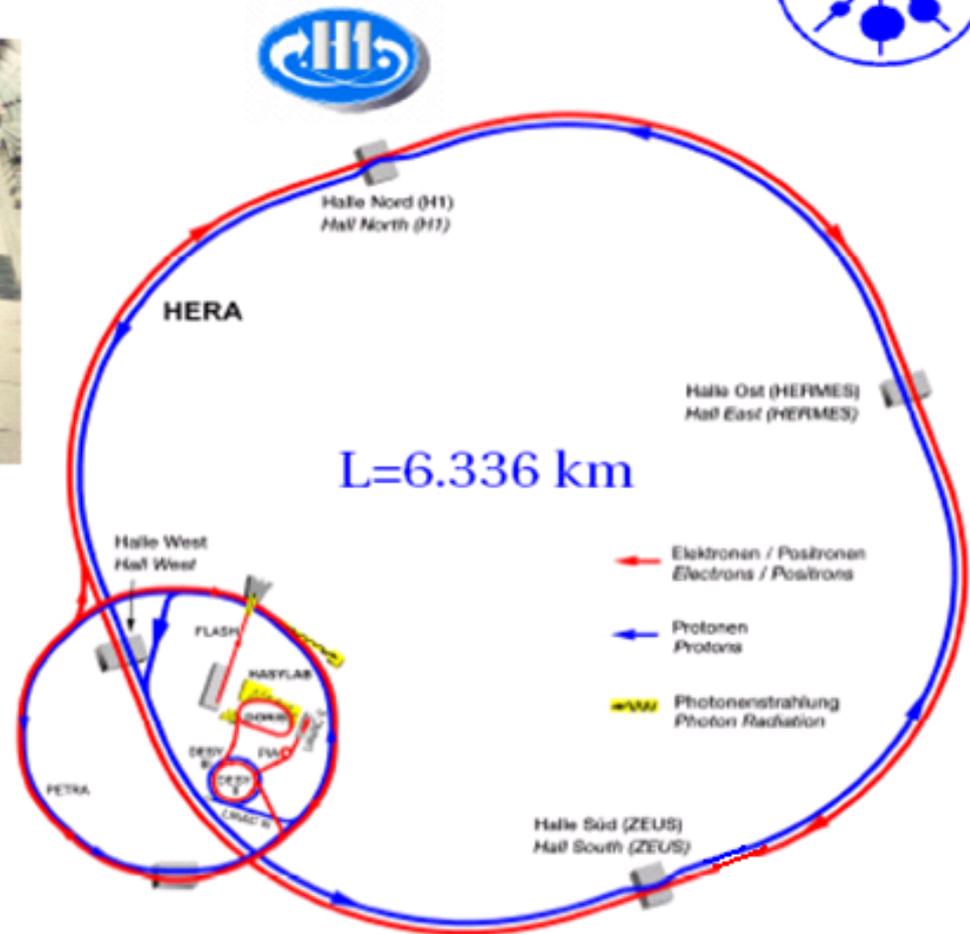
Электрон -- эффективный инструмент
для изучения микромира. ($\alpha^{\text{em}} \cong 1/137$) !



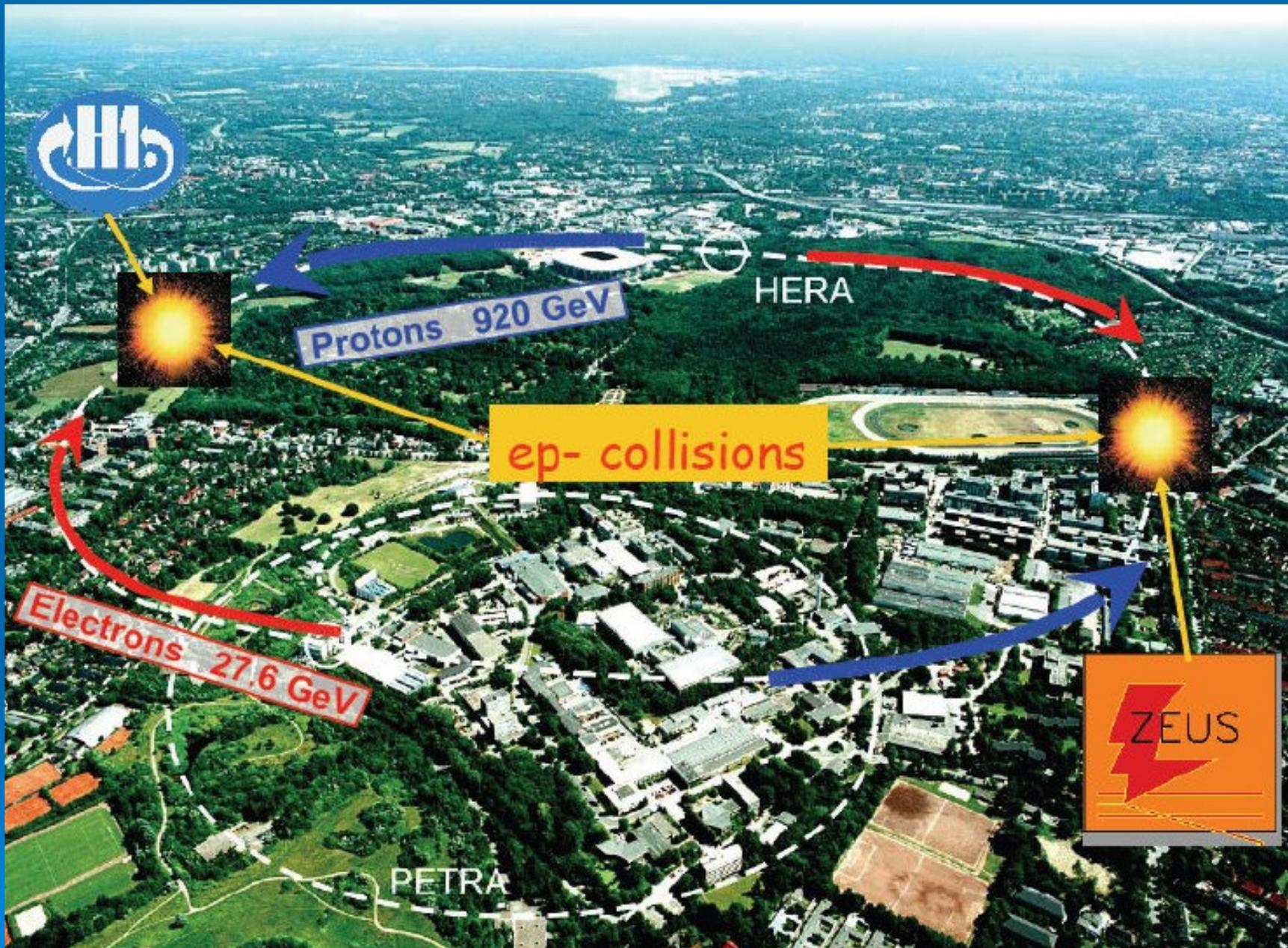
Hadron Elektron Ring Anlage HERA



- World's only ep accelerator and collider
- Operated 1992 - 2007
- p: 460-920 GeV, 110 mA
- e: 27.6 GeV, 45 mA
- 2 ep collider experiments: H1 and ZEUS.



$$\alpha_s = 0.119$$



Встречные ер-столкновения:
 две коллаборации: **H1** и **ZEUS (ZEUS)**

Кинематика

$$e + p \longrightarrow e' + X$$

$$E(e) \sim 27.6 \text{ ГэВ}, k;$$

$$E(p) \sim 920 \text{ ГэВ}, p$$

$$E'(e), k';$$

$$y = \frac{p \cdot q}{p \cdot k}$$

**В системе координат, где
 протон покоится $E(e) \sim 50 \text{ ТэВ}$**

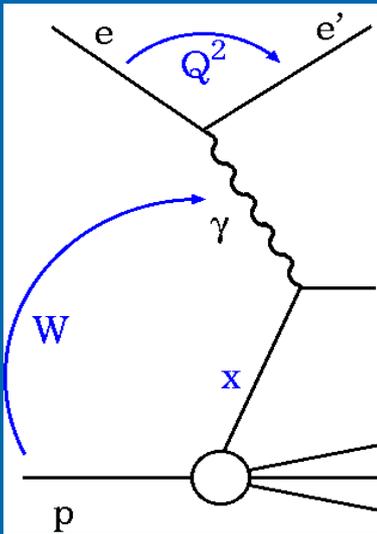
$$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q}$$

$$s = (k + p)^2, \quad Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2$$

**Полная энергия в системе центра масс $W = 319 \text{ ГэВ}$
 (~ на порядок выше, чем в лаборатории SLAC)**

$$W = \sqrt{s} \sim 319 \text{ GeV}, \quad Q^2_{MAX} \sim 10^5 \text{ GeV}^2, \quad \lambda_{MAX} \sim 1/1000 r_{proton}, \quad \Delta \sim 10^{-16} \text{ см}$$

Кинематические границы в переменных Q^2 и x .



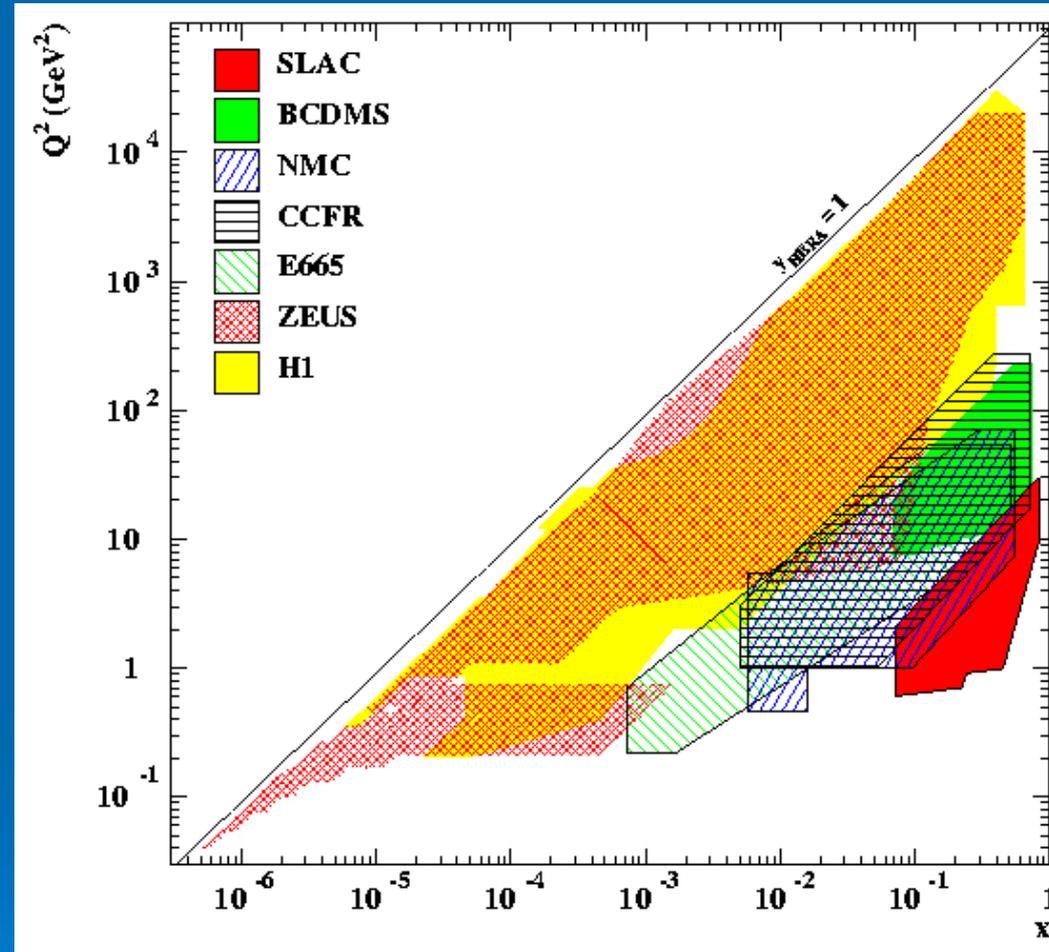
кварк

$$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q}$$

-- доля импульса,
уносимая кварком
(Бьёркен)

$$y = \frac{p \cdot q}{p \cdot k}$$

-- неупругость
($y \cong 1 - E_{e'}/E_e = E_\gamma/E_e$)

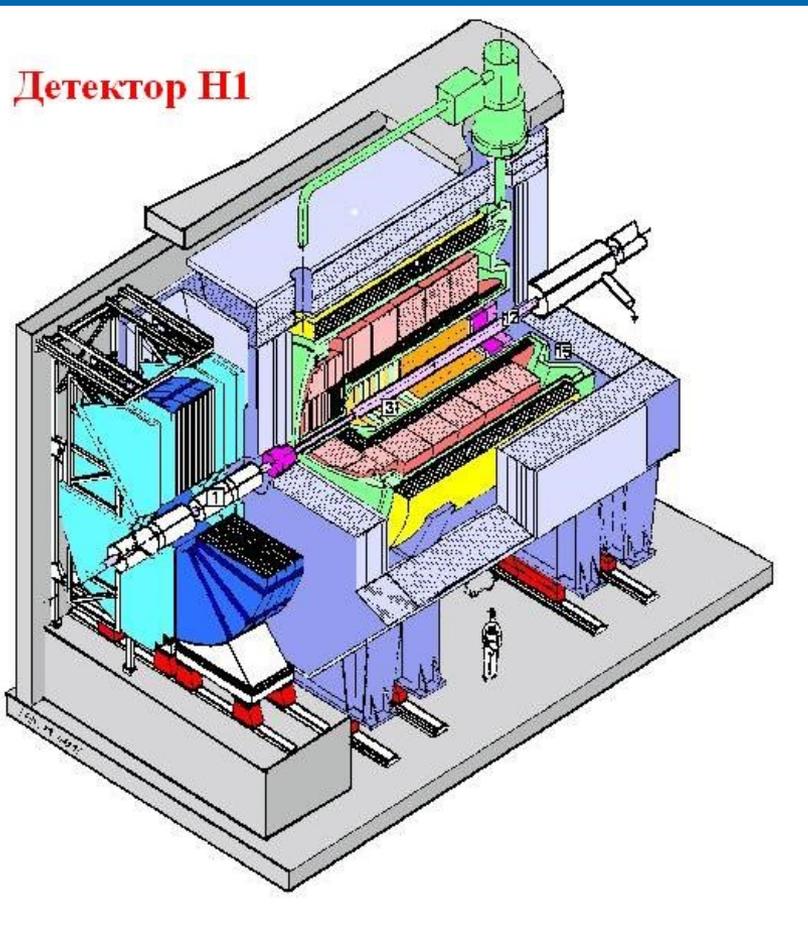


Значительное увеличение
кинематической области
исследований !

$$(x y s = Q^2)$$

Детектор H1

ФИАН – в коллаборации H1



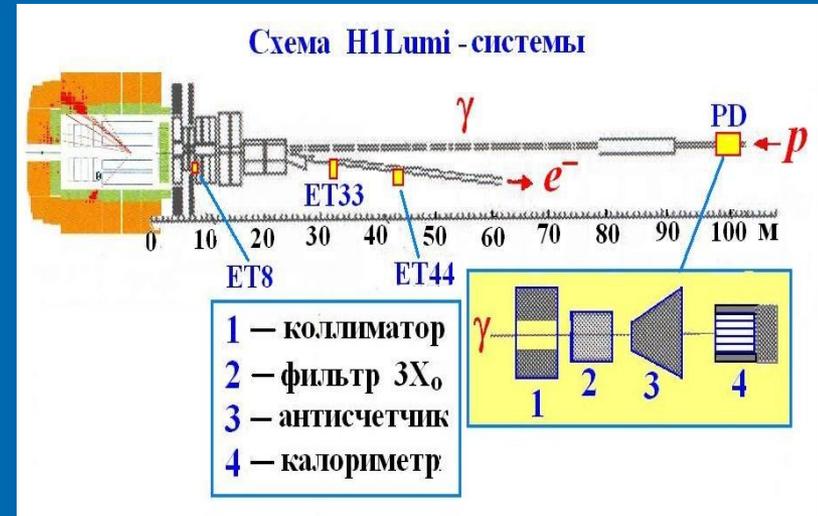
Вклад ФИАН

1. Ядро сверхпроводящего магнита (2000т).
2. Система измерения светимости *ер*-столкновений и мечения фотонов.
3. Обеспечение постоянного измерения светимости
4. Исследование процессов при малых Q^2 .
5. Сборка и наладка элементов детектора.
6. Анализ экспериментальных данных.
7. Участие в разработке программного обеспечения.

Система измерения светимости и мечения фотонов

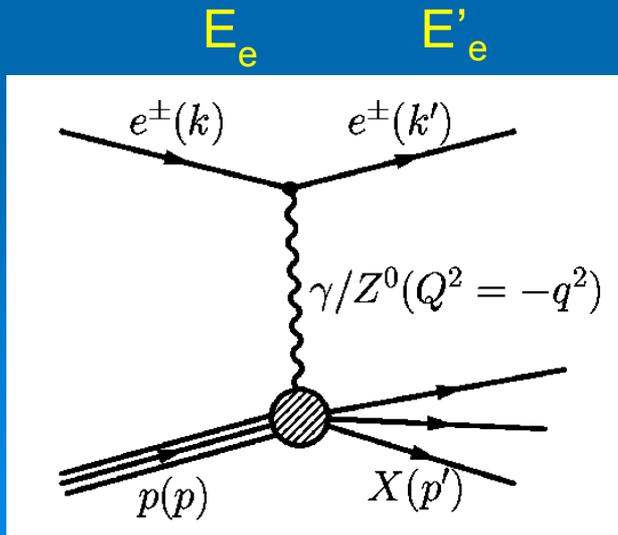
Элементы системы расположены в тоннеле коллайдера на расстоянии ~ 100 , 44 и 37 м. от точки столкновений.

Светимость находится по числу квантов тормозного излучения.



Мечение: определение энергии фотона

$$E_\gamma = E_e - E'_e$$



Фотоны тормозного излучения и электроны отдачи регистрировались черенковскими счетчиками полного поглощения, созданными в ФИАНе на основе радиационно стойких кристаллов КРС.

Светимость $e\bar{p}$ -столкновений $L=4.5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

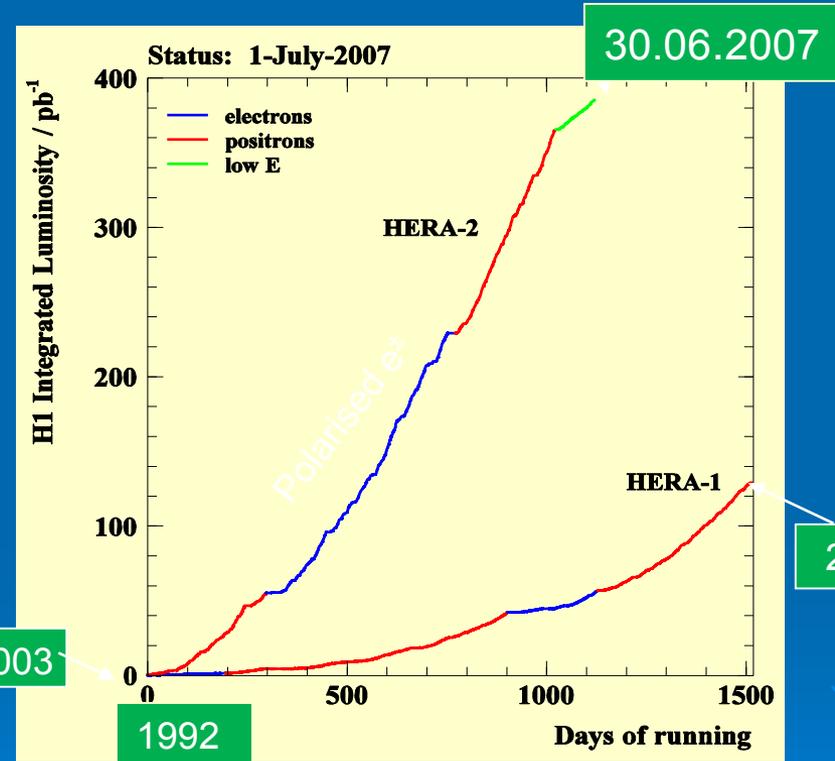
Полная светимость

$$L(H1) = 480 \text{ pb}$$

$$L(ZEUS) = 518 \text{ pb}$$

Суммарная светимость $\sim 1 \text{ fb}$

Использованная светимость
(динамика набора по дням)



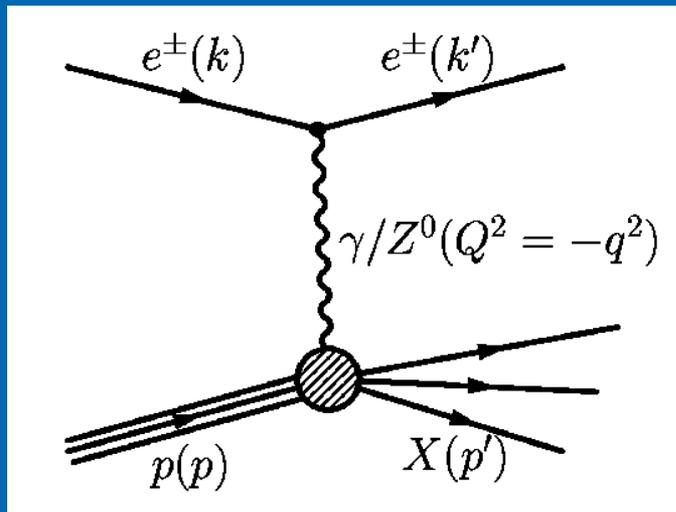
Результаты измерения светимости использованы практически **во всех** выполненных на детекторе H1 работах.

Результаты исследований опубликованы в журналах Phys.Lett., Nucl.Phys. Eur.Phys.J, Zeit.f.Phys. и др. (~150 статей H1 и ~150 - ZEUS) и докладывались на представительных конференциях.

3. Квазиреальные фотоны

$(Q^2 \ll 1 \text{ ГэВ}^2)$

3.1 Полные сечения адронного фотопоглощения $\sigma_{\text{tot}}(W)$.



$\sigma_{\text{tot}}(W)$ - глобальная характеристика электромагнитных взаимодействий адронов (правила сумм и т.д.)

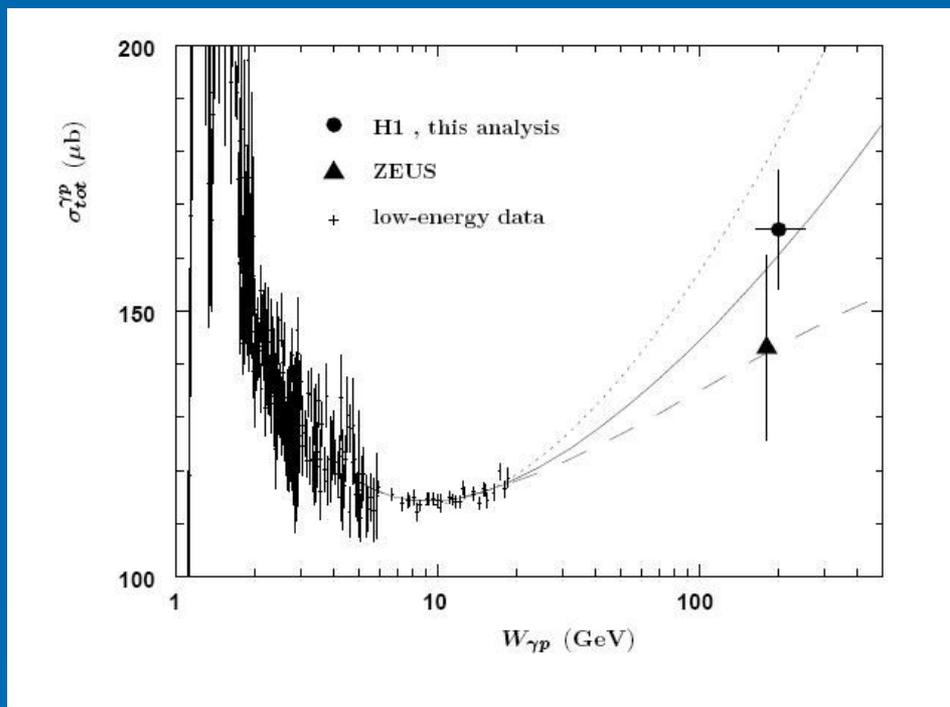
<---адроны

Приближение Вилльямса-Вайцекера:

$$\frac{d\sigma_{ep}}{dy} = \sigma_{\text{tot}}(W_{\gamma p}) \text{Flux}(y) = \sigma_{\text{tot}}(W_{\gamma p}) \frac{\alpha}{2\pi} \frac{1 + (1-y)^2}{y} \ln \frac{Q_{\text{max}}^2(y)}{Q_{\text{min}}^2(y)}$$

$$W_{\gamma p} = \sqrt{s_{\gamma p}} = 2\sqrt{yE_e E_p} \text{ and } Q_{\text{min}}^2(y) = (m_e y)^2 / (1-y).$$

Результаты измерений:



Исключен аномальный
рост сечения с энергией

Параметризация: обмен
полюсом Померанчука

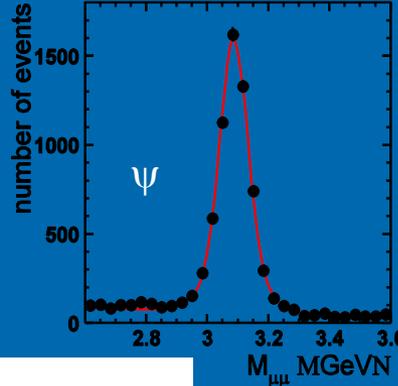
$$\sigma \sim W^{0.16}$$

Путем изучения конечных
адронных состояний найдены
составляющие σ :

упругое (ρ , ω , ϕ), диссоциация γ , диссоциация ρ , двойная диссоциация
(17 \pm)% (26 \pm 5)% (9 \pm 2)% 15% (фиксирована)

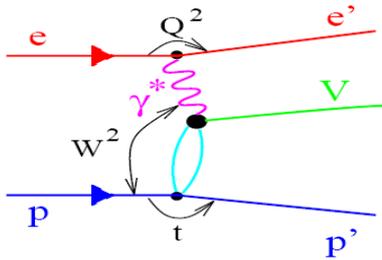
3.2 Упругое фоторождение векторных мезонов ($\rho, \omega, \phi, \psi, \dots$)

Мезоны регистрировались по модам их распадов, например: $\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$



$$\sigma(W) \propto W^\delta$$

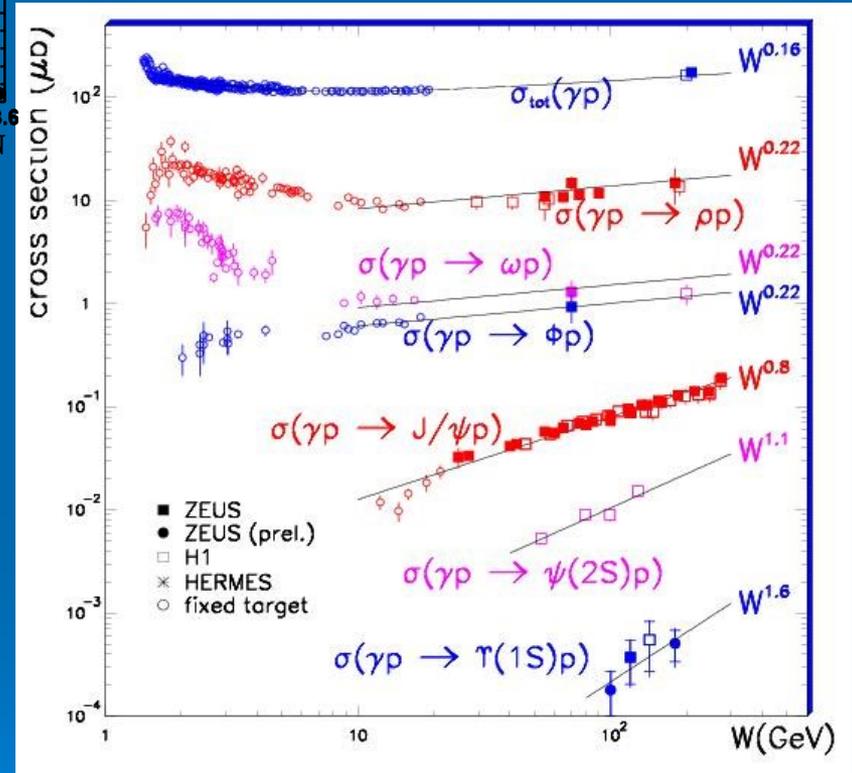
Elastic Vector Mesons production



$$V = (\rho^0, \omega, \phi, J/\psi, \Upsilon)$$

$$V = \gamma \text{ (DVCS)}$$

- $Q^2 = -(e - e')^2$ photon virtuality
- W is γ^*p center of mass (CM) energy
- $t = (p - p')^2$ momentum transfer squared at the proton vertex

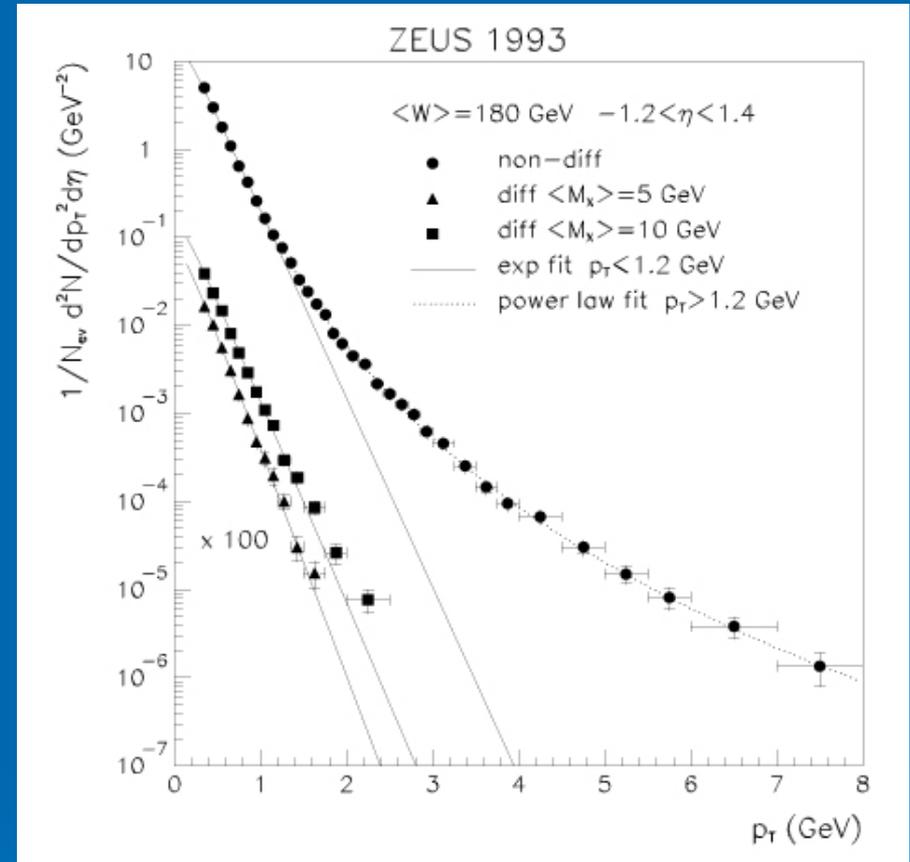
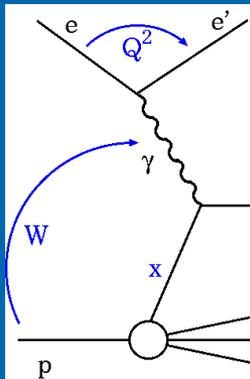


Переход от обмена полюсом Померанчука к двухглюонному обмену.

Переход к большим массам -----> смена мягкого режима на жесткий!

4.3 Инклюзивное фоторождение адронов

$\gamma + p \rightarrow \text{адроны}$



Зависимость распределение адронов конечного состояния по поперечному импульсу P_T становится более слабой при $P_T > 3 \text{ ГэВ}$. Экспоненциальное падение меняется на степенное,

характерное для КХД: $dN/dp^2 \sim (1 + P_T / P_0)^{-n}$, $n \cong 7$.

4. Жесткие процессы

теорема факторизации

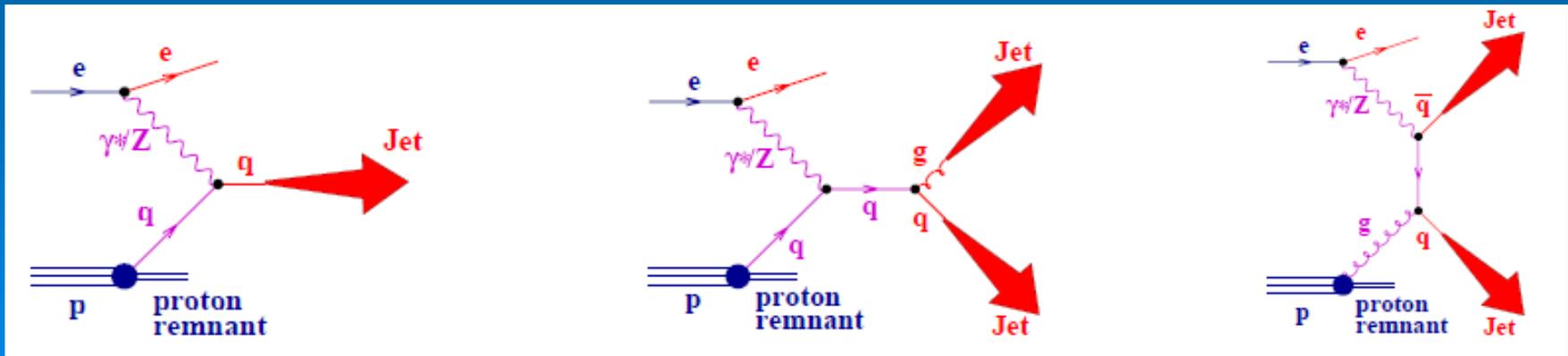
$$\sigma = \sum_{a=q,\bar{q},g} \int dx \cdot f_a(x, \mu_F, \alpha_s) \cdot d\hat{\sigma}_a(x, \mu_F, \mu_R, \alpha_s(\mu_R)) \cdot D(x_p, \mu_F, \alpha_s)$$

распределение
партонов

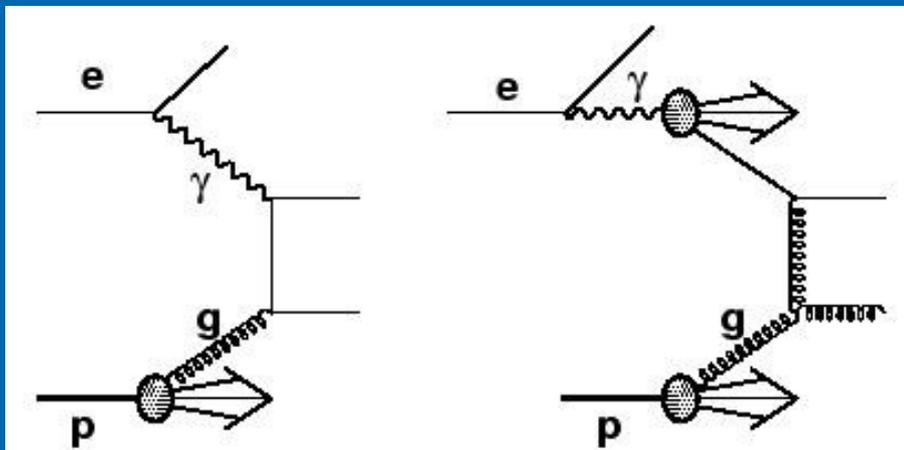
сечение КХД

фрагментация

4.1 Образование струй адронов: 1, 2, 3, ...



Различные алгоритмы (конусный, кластерный и др.) реконструкции струй адронов дают близкие результаты.



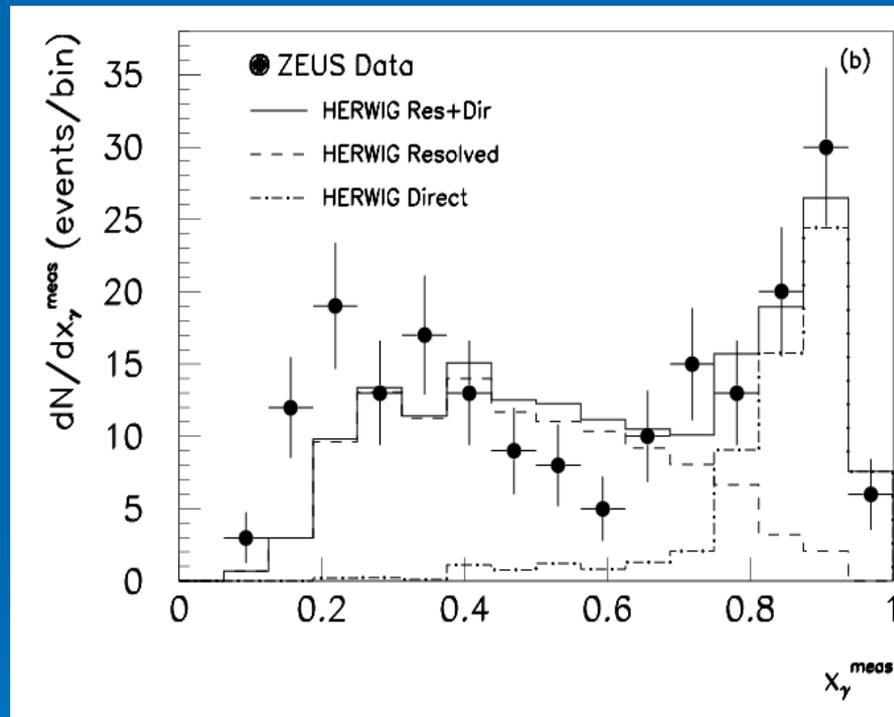
Прямой процесс

Структурный (resolved) процесс

$$x_{\gamma}^{obs} > 0.75$$

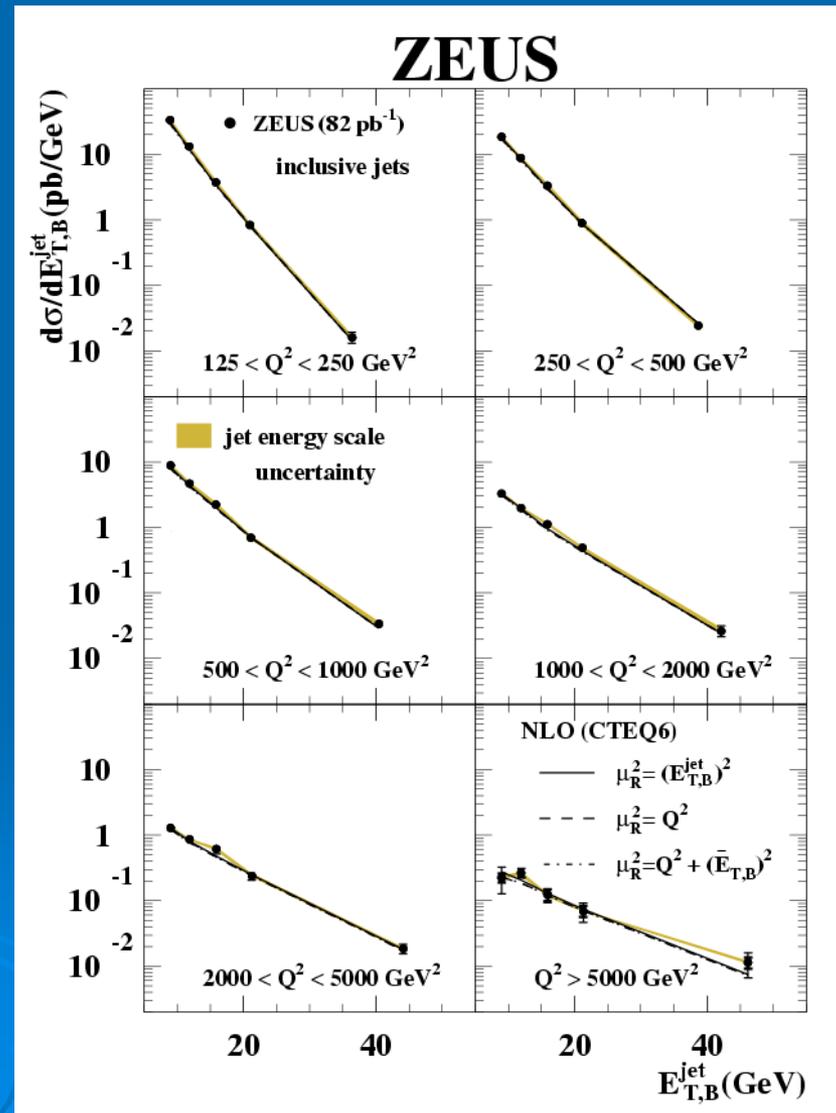
$$x_{\gamma}^{obs} < 0.75$$

$$x_{\gamma}^{obs} = \frac{\sum_{jets} E_T^{jet} e^{-\eta^{jets}}}{2E_{\gamma}}$$



Инклюзивные сечения образования струй
 - хорошее согласие с КХД во втором порядке Т-В
 (NLO)

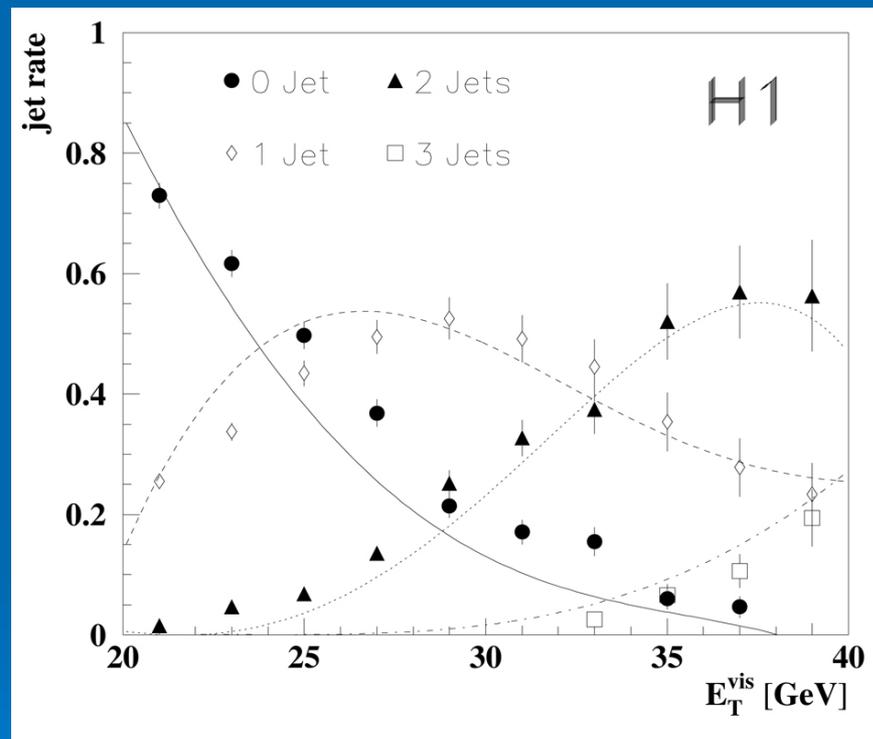
Зависимость сечения
 от поперечной энергии
 струи $E_{T,B}^{\text{jet}}$ при разных Q^2 .



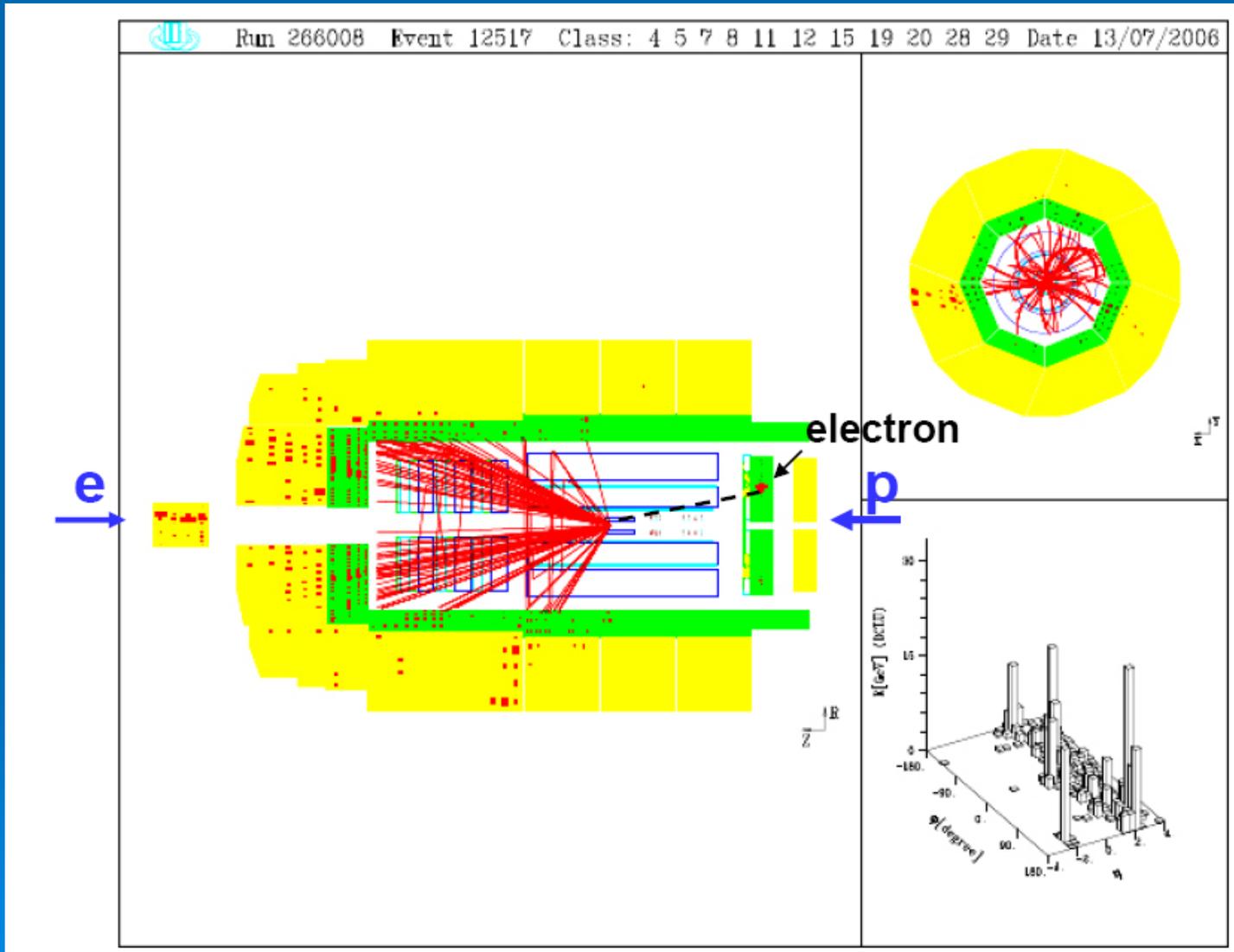
Зависимость числа струй от E_T

Доля многоструйных событий
растет с увеличением
поперечных импульсов.

Многоструйные события и КХД

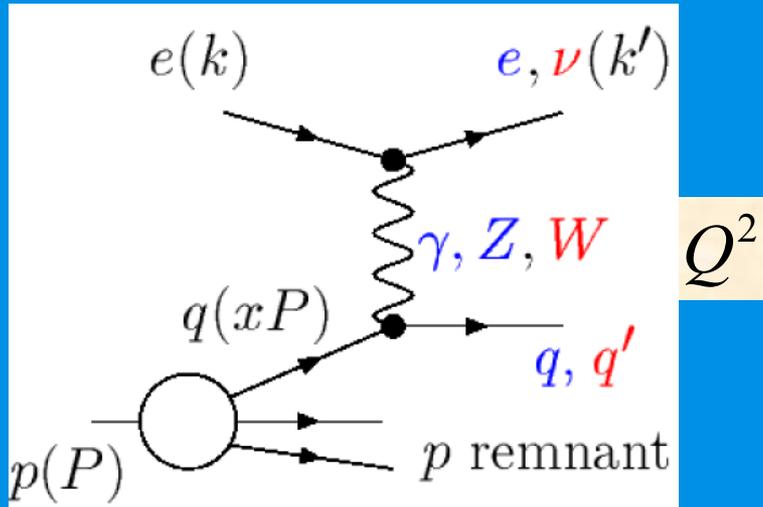


5-струйное событие в детекторе H1



4.2 Глубоко неупругое рассеяние (DIS)

$e + p \rightarrow$ адроны



$$Q^2 = -(k - k')^2$$

$$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q}$$

$$y = \frac{p \cdot q}{p \cdot k}$$

Структурные функции

$F(x, Q^2)$ – динамика

$$\frac{d^2 \sigma^{NC}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} \times \{Y_+ F_2^{NC} \mp Y_- xF_3^{NC} - y^2 F_L^{NC}\}$$

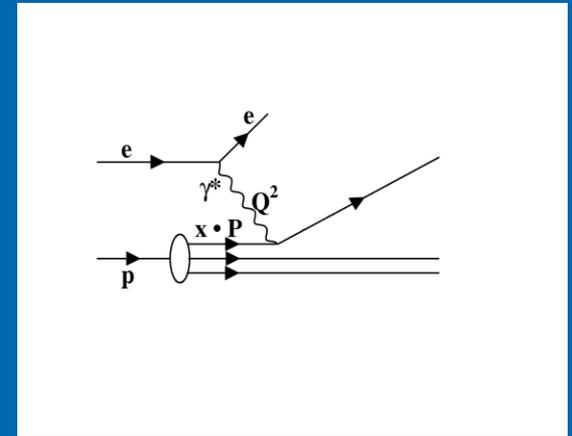
$$Y_{\pm} = 1 \pm (1-y)^2$$

Процесс глубоко неупругого рассеяния в детекторе H1

Событие DIS



←-----протон



$$F_2^{\text{em}}(x, Q^2) \sim \sum_q e_q^2 (q + \bar{q})$$

$y = Q^2 / xs$, the inelasticity parameter, $Y_{\pm} = (1 \pm (1 - y)^2)$

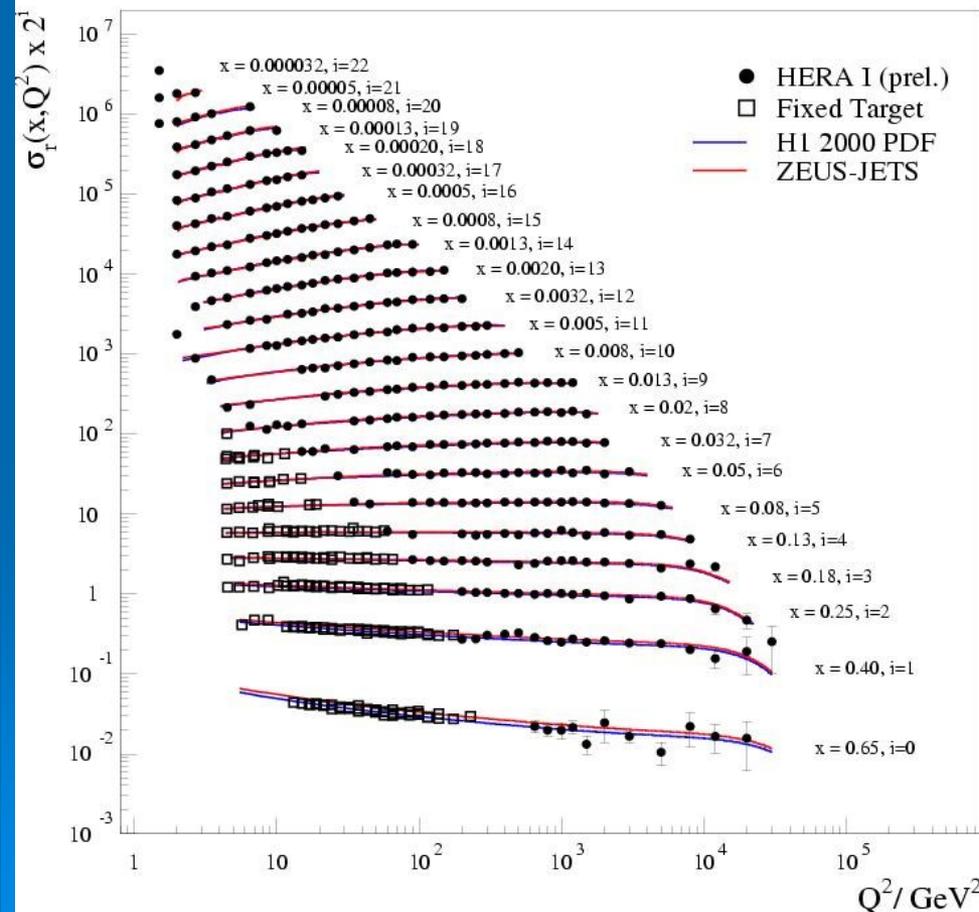
F_2 , F_L , and xF_3 are structure functions of the proton.

- F_L : longitudinal component, damped by y^2 .
- xF_3 : Small at $Q^2 \ll M_Z^2$,

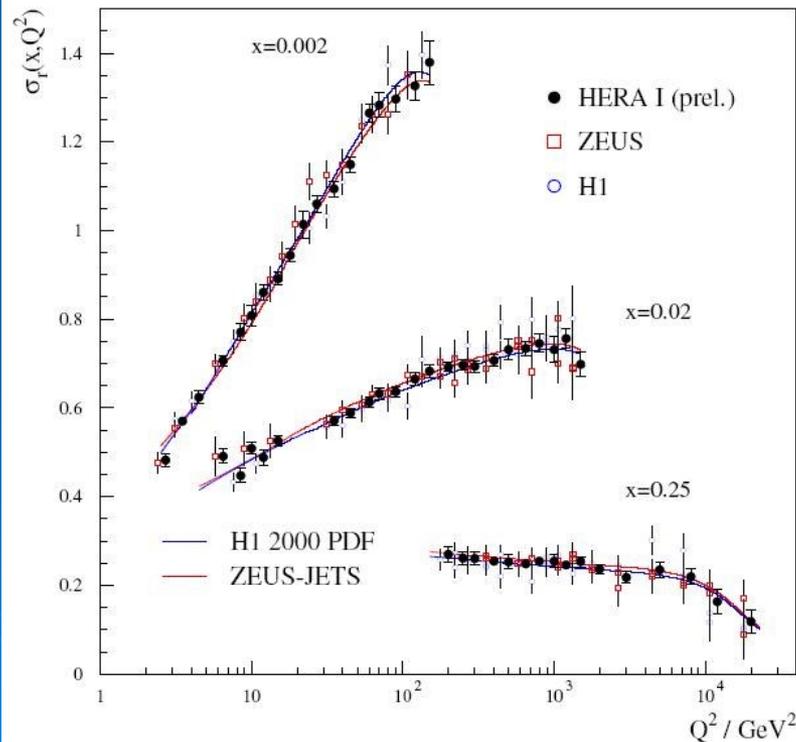
Сечение адронного поглощения виртуальных фотонов σ (DIS)

При малых x сечение σ быстро увеличивается с ростом Q^2

HERA I e^+p Neutral Current Scattering - H1 and ZEUS



HERA I e^+p Neutral Current Scattering - H1 and ZEUS

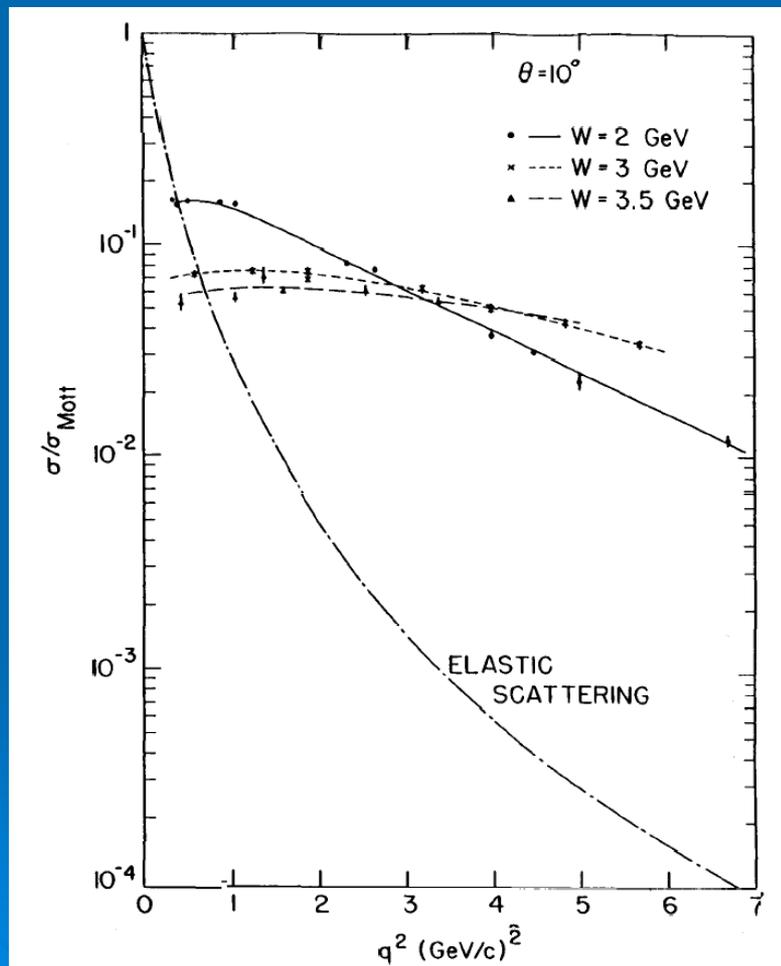
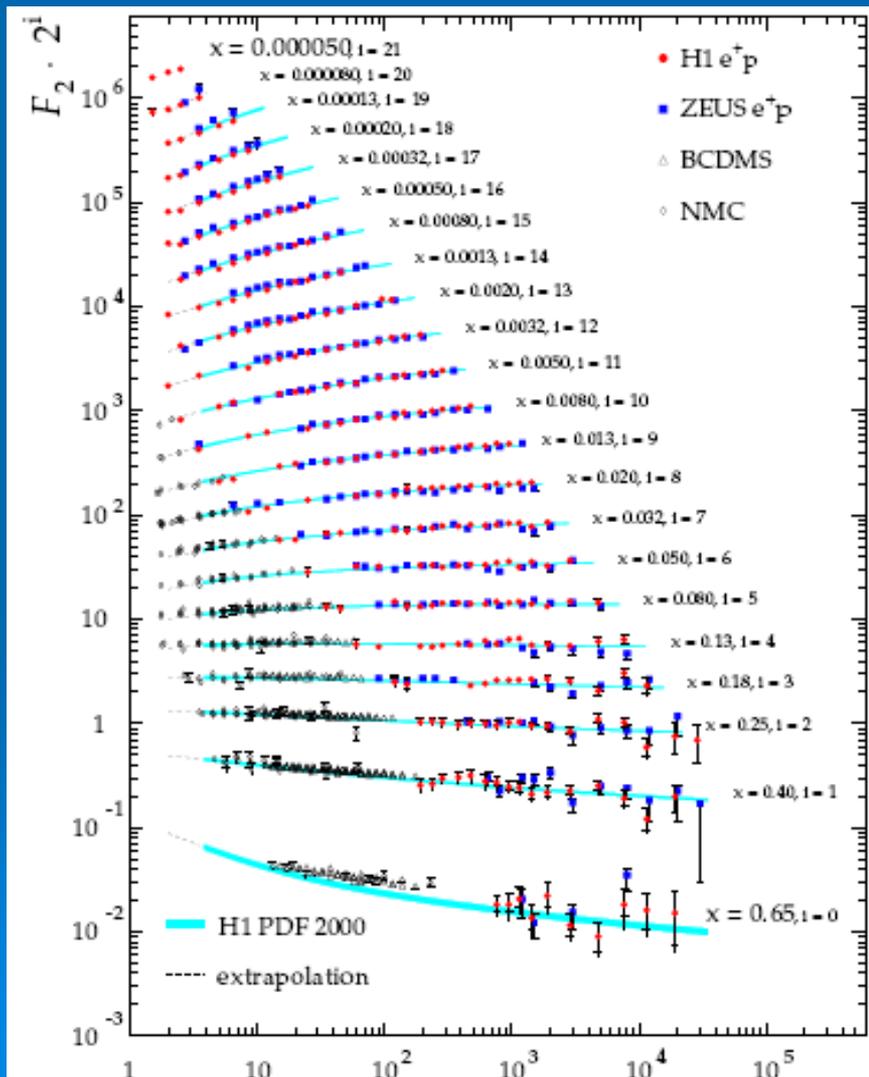


Структурные функции

Результаты обработки

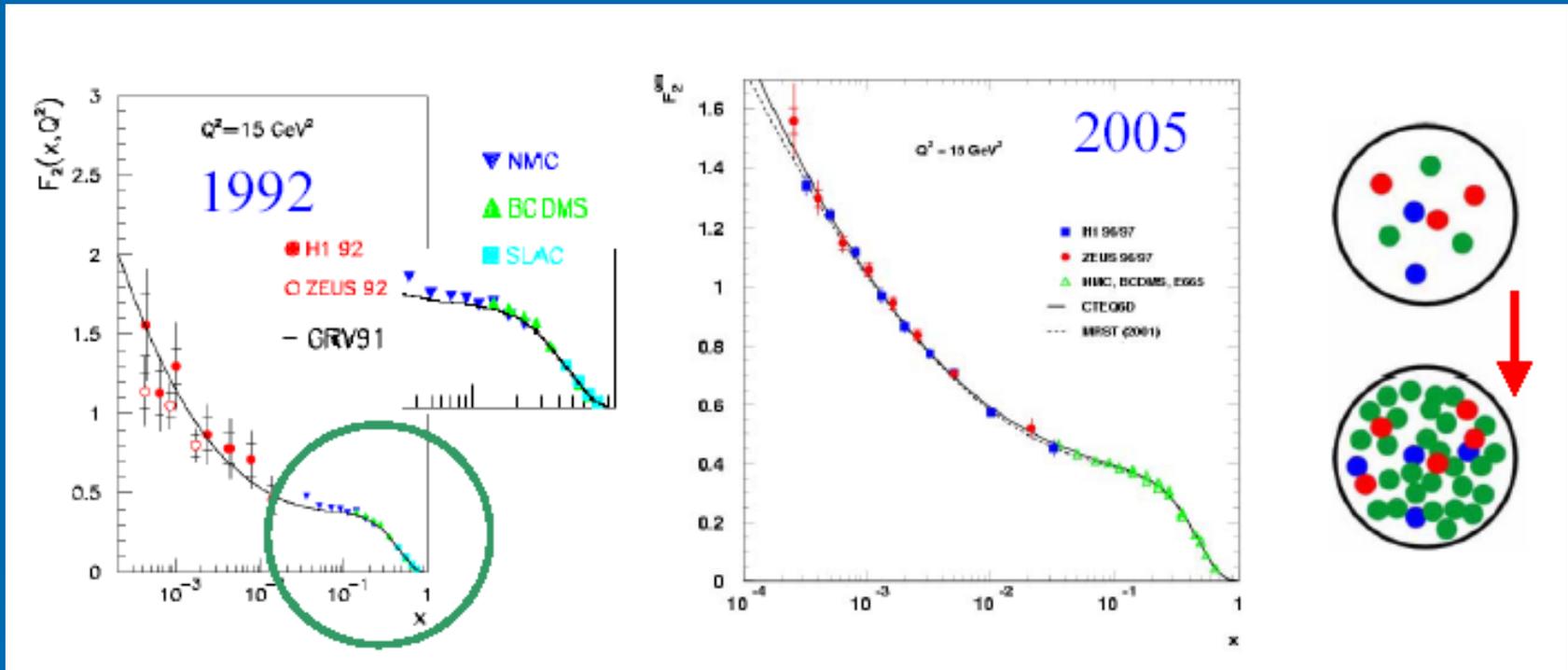
Данные SLAC (~1968)

Taylor, Friedman, Kendall



$Q^2 \text{ (ГэВ}^2)$

Сопоставление старых и новых данных о $F_2(x, Q^2)$



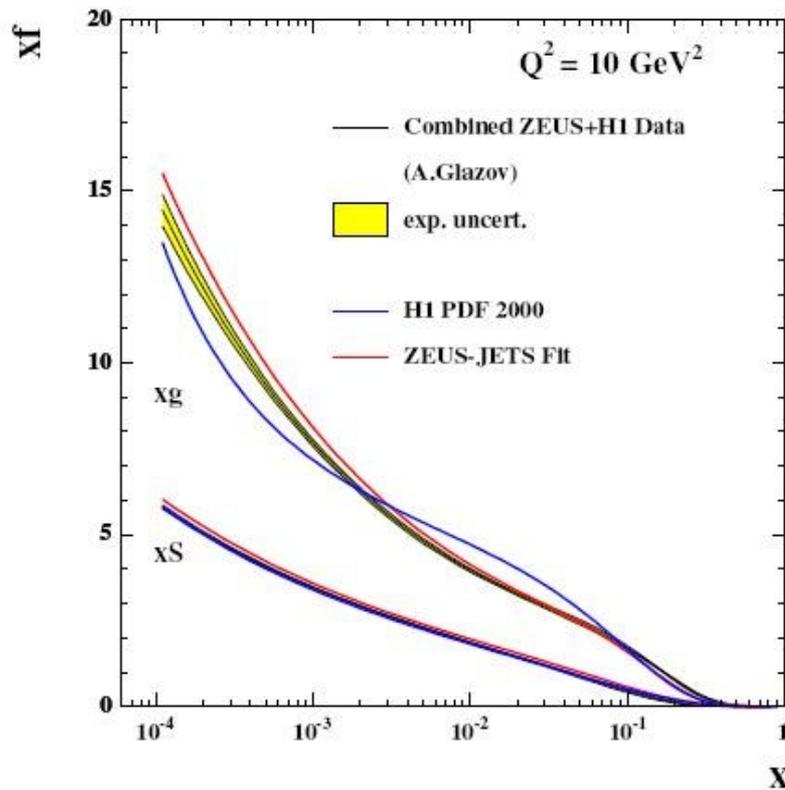
Обнаружено новое явление: сильный рост F_2 при уменьшении x
(«увеличение» числа мягких партонов в протоне)

Обнаружено нарушение масштабной инвариантности при $x < 0.03$!

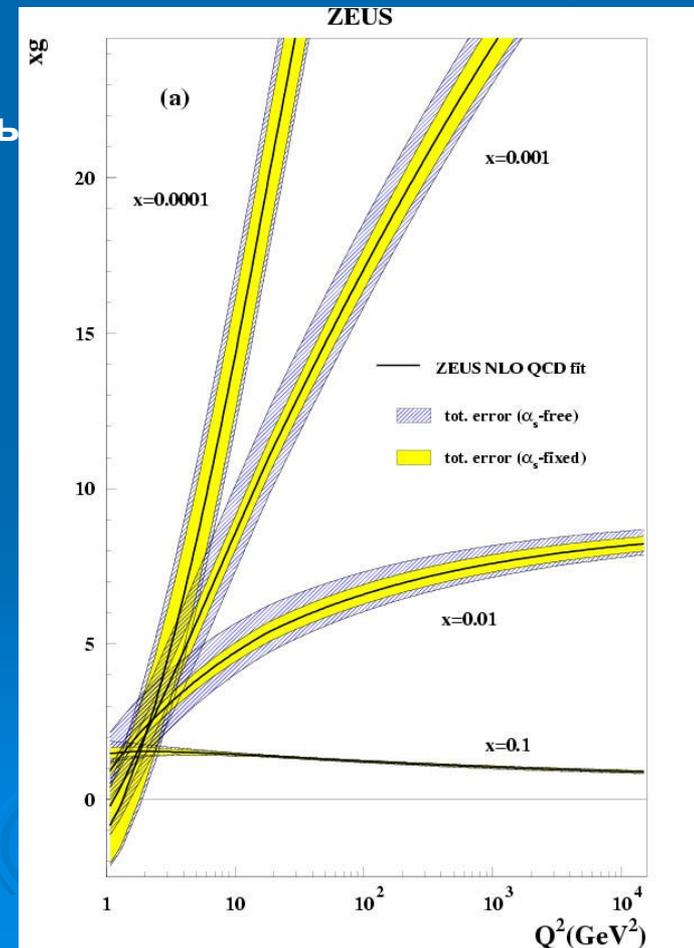
Влияние высших поправок теории возмущений (NLO,)

Определена функция распределения партонов по x в P.

При $x < 10^{-3}$ протон -- это сгусток преимущественно глюонов (Wilczek)

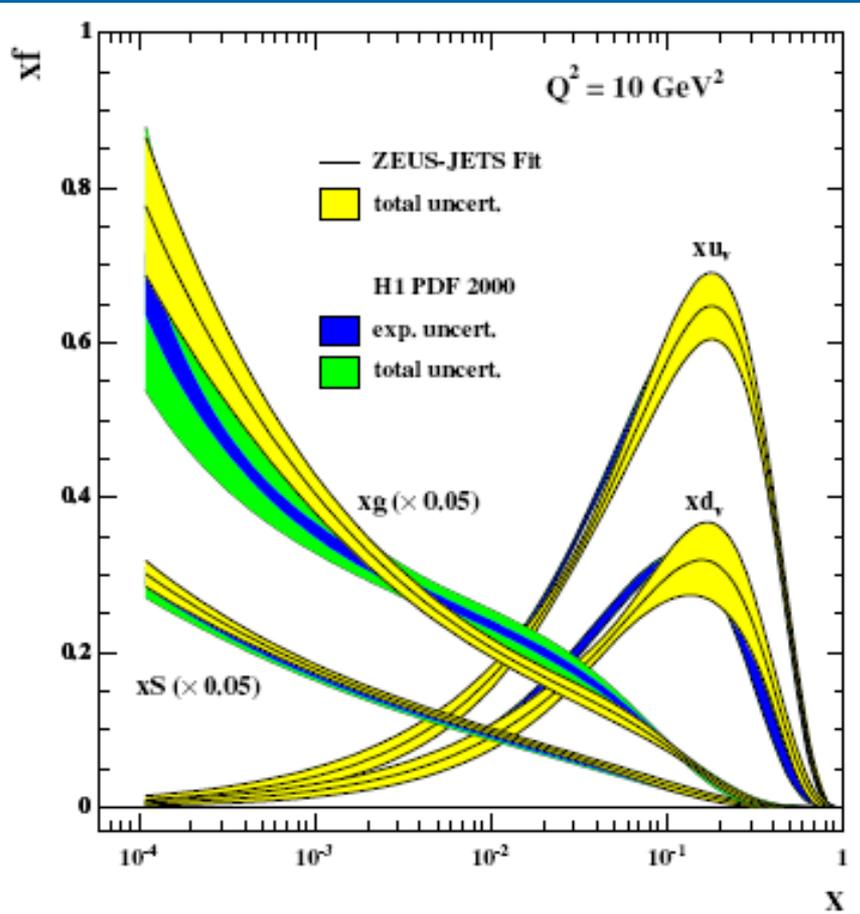


ПЛОТНОСТЬ
ГЛЮОНОВ

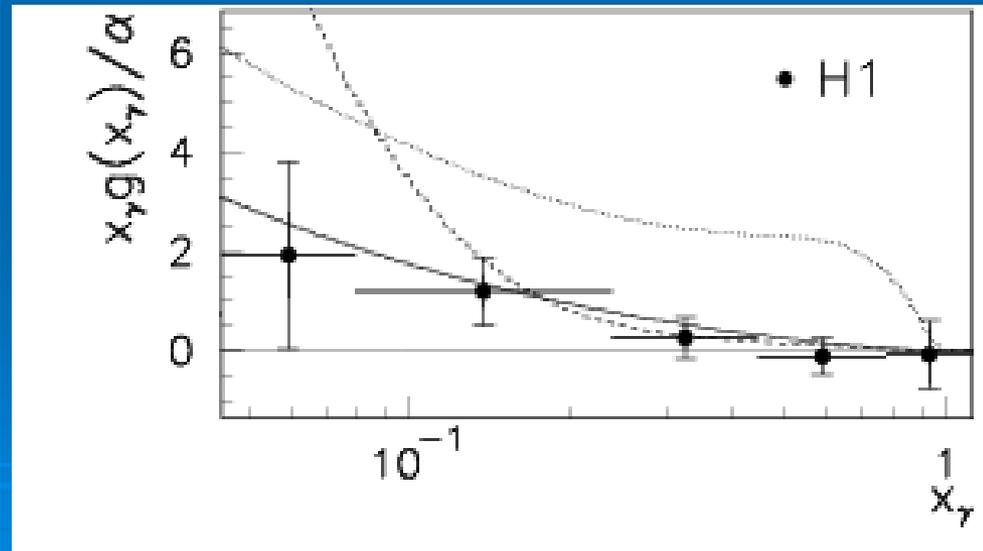


Плотность партонов в P и в фотоне.

u, d, s – кварки, g – глюоны



Распределение глюонов в фотоне

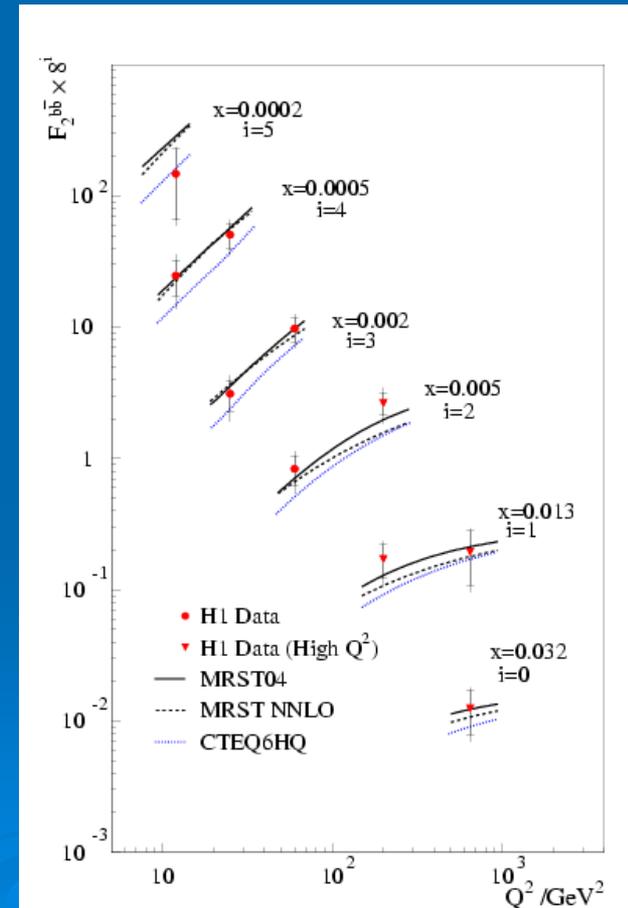
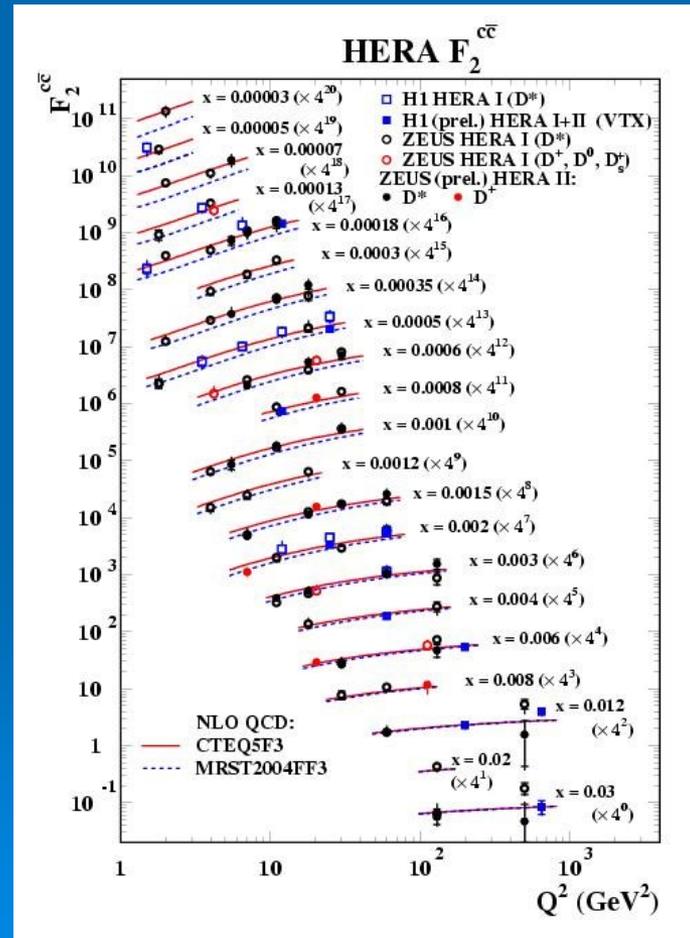
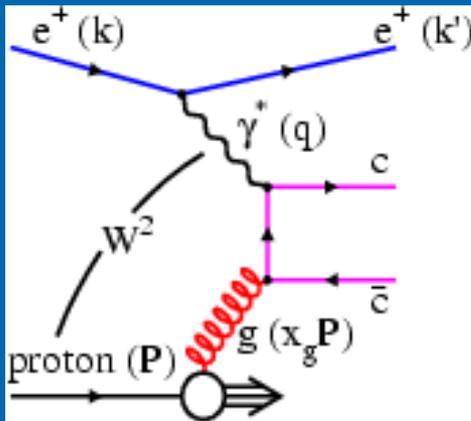


Структурные функции для рождения с и b-частиц

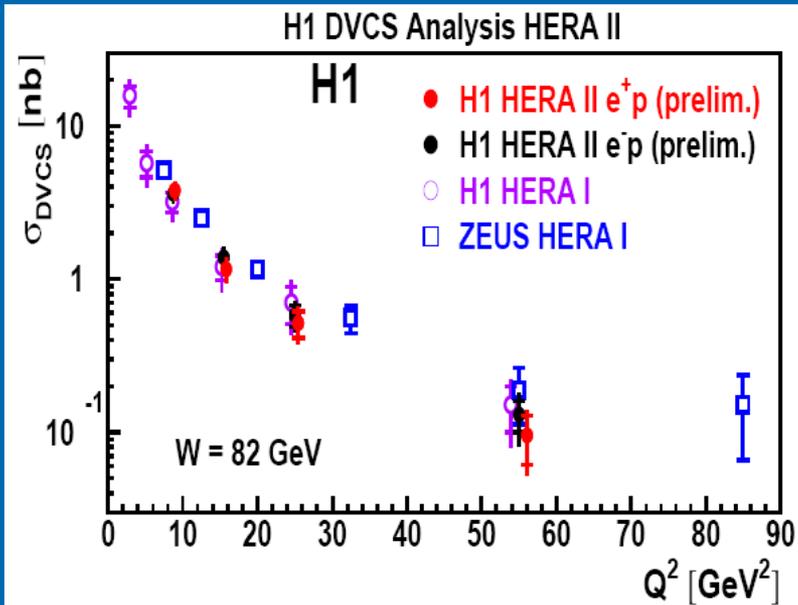
$$F_2^{cc}$$

и

$$F_2^{bb}$$



Комптон эффект на нуклоне.

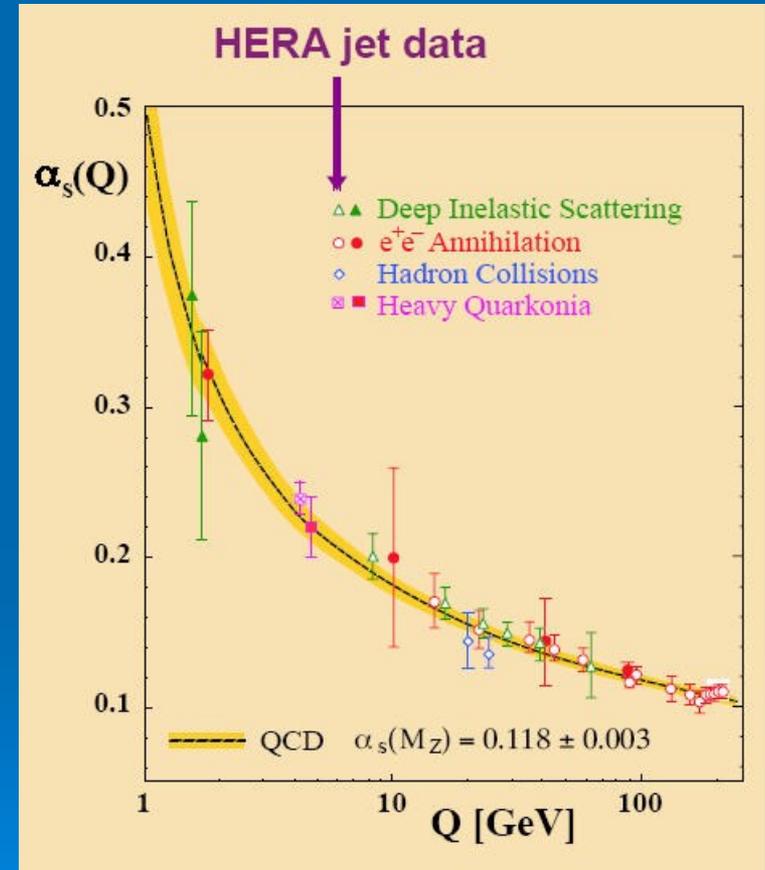
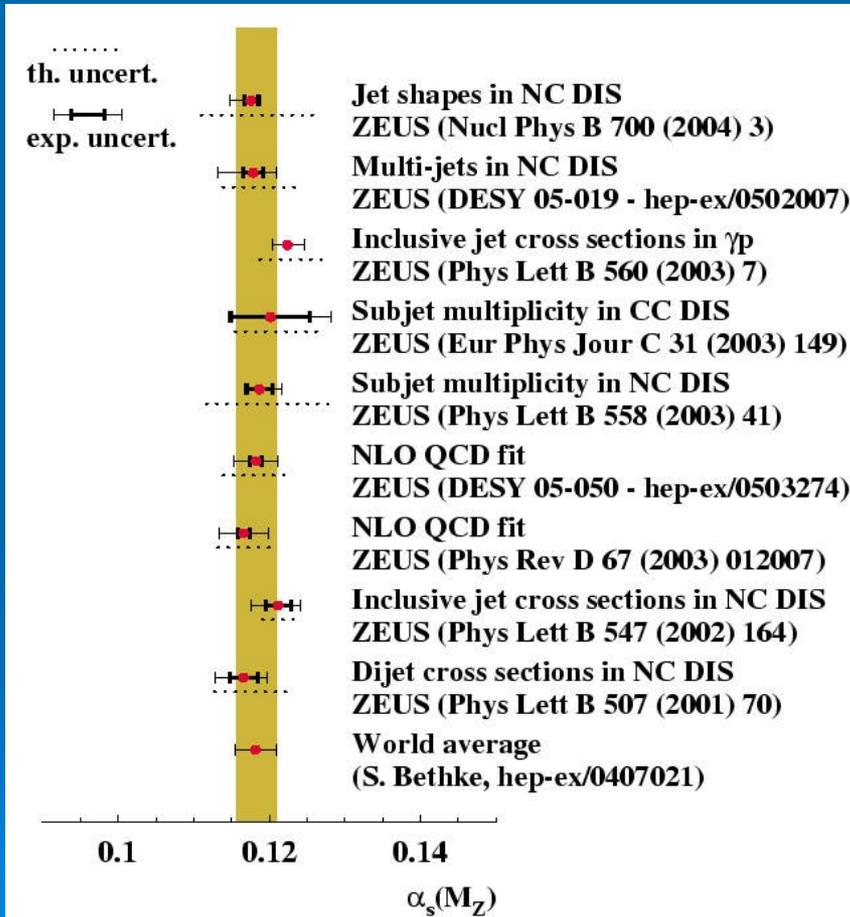


Обобщенные структурные функции.
АНАЛИЗ ВЕДЕТСЯ.

- The $\gamma^*p \rightarrow \gamma p$ cross section as a function of Q^2
- $\sigma \propto 1/(Q^2)^n$
- $n = 1.54 \pm 0.09 \pm 0.04$

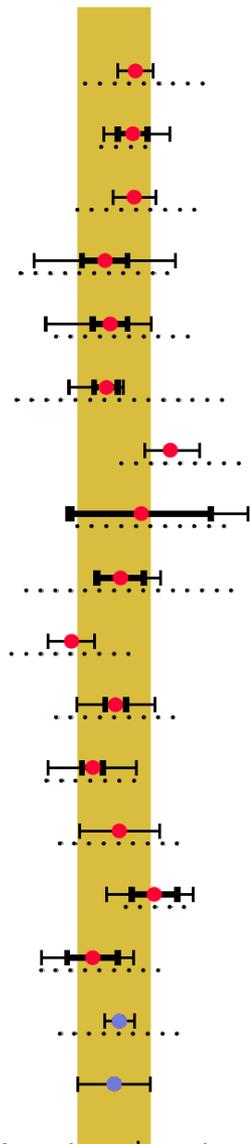
4.3 Определение константы сильного взаимодействия

- 1) F2 (NLO, NNLO), 2) отношение сечений рождения 3 и 2 струй ,
- 3) Ет зависимость инклюзивных сечений для струй и т.д.



$$\alpha_s(M_Z) = 0.1207 \pm 0.0014(\text{ст}) \pm 0.003(\text{эксп}) \pm 0.002(\text{теор}), \quad \text{PDG } 0.1176 \pm 0.002$$

th. uncert.
exp. uncert.



- Event shapes in DIS
H1 (DESY 05-225 - hep-ex/0512014)
- Inclusive jet cross sections in NC DIS
ZEUS prel. (contributed paper to EPS05)
- Inclusive jet cross sections in NC DIS
H1 prel. (contributed paper to EPS05)
- Multi-jets in NC DIS
H1 prel. (contributed paper to EPS05)
- Multi-jets in NC DIS
ZEUS (Eur Phys Jour C 44 (2005) 183)
- Jet shapes in NC DIS
ZEUS (Nucl Phys B 700 (2004) 3)
- Inclusive jet cross sections in γp
ZEUS (Phys Lett B 560 (2003) 7)
- Subjet multiplicity in CC DIS
ZEUS (Eur Phys Jour C 31 (2003) 149)
- Subjet multiplicity in NC DIS
ZEUS (Phys Lett B 558 (2003) 41)
- NLO QCD fit
H1 (Eur Phys J C 21 (2001) 33)
- NLO QCD fit
ZEUS (Eur Phys Jour C 42 (2005) 1)
- NLO QCD fit
ZEUS (Phys Rev D 67 (2003) 012007)
- Inclusive jet cross sections in NC DIS
H1 (Eur Phys J C 19 (2001) 289)
- Inclusive jet cross sections in NC DIS
ZEUS (Phys Lett B 547 (2002) 164)
- Dijet cross sections in NC DIS
ZEUS (Phys Lett B 507 (2001) 70)
- HERA average
(hep-ex/0506035)
- World average
(S. Bethke, hep-ex/0407021)

0.1

0.12

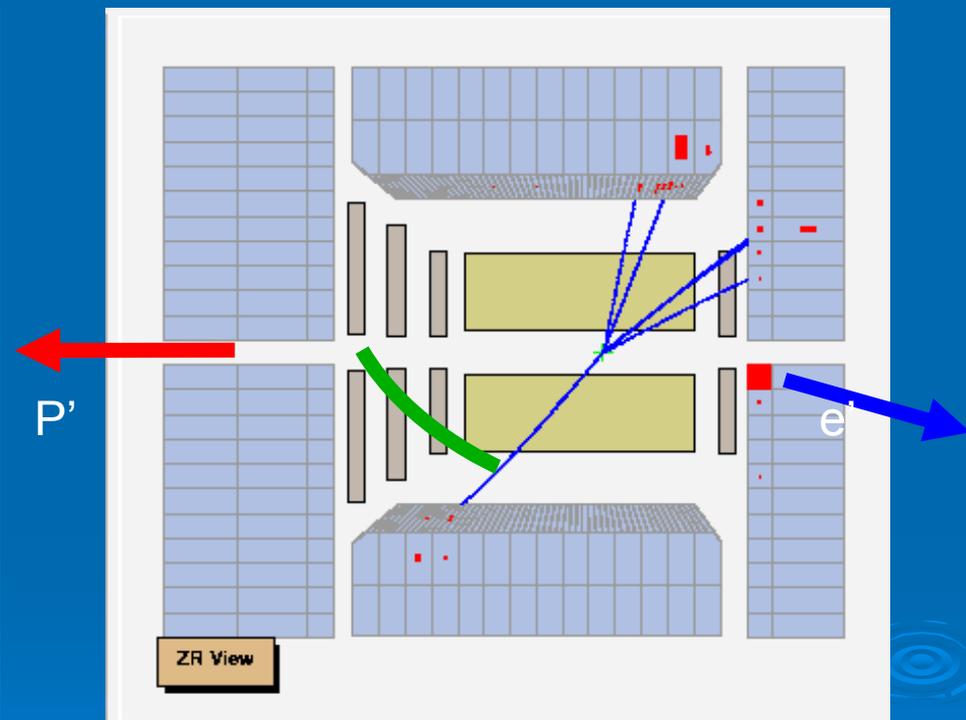
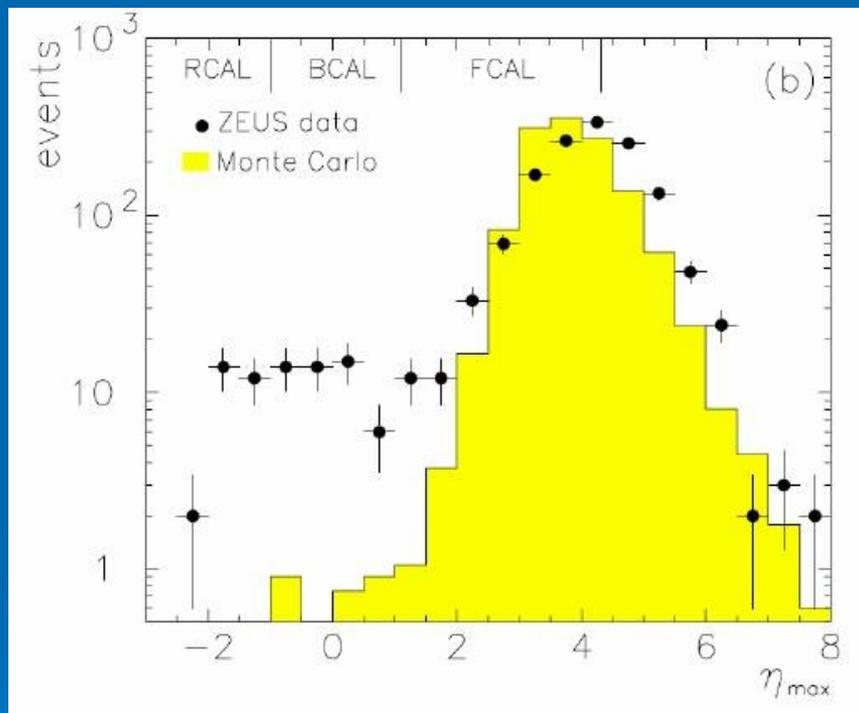
0.14

$\alpha_s(M_Z)$

Точность определения
 α_s сопоставима
с результатам
других экспериментов.

4.4 Дифракция в DIS

Детектор ЗЕВС

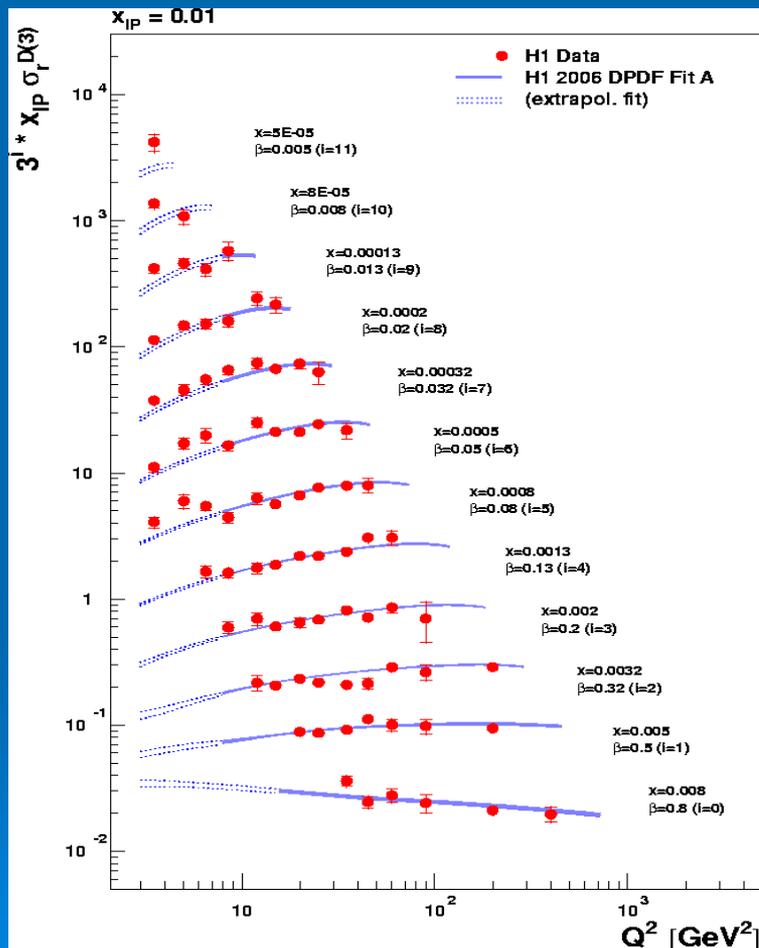


Псевдобыстрота: $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$

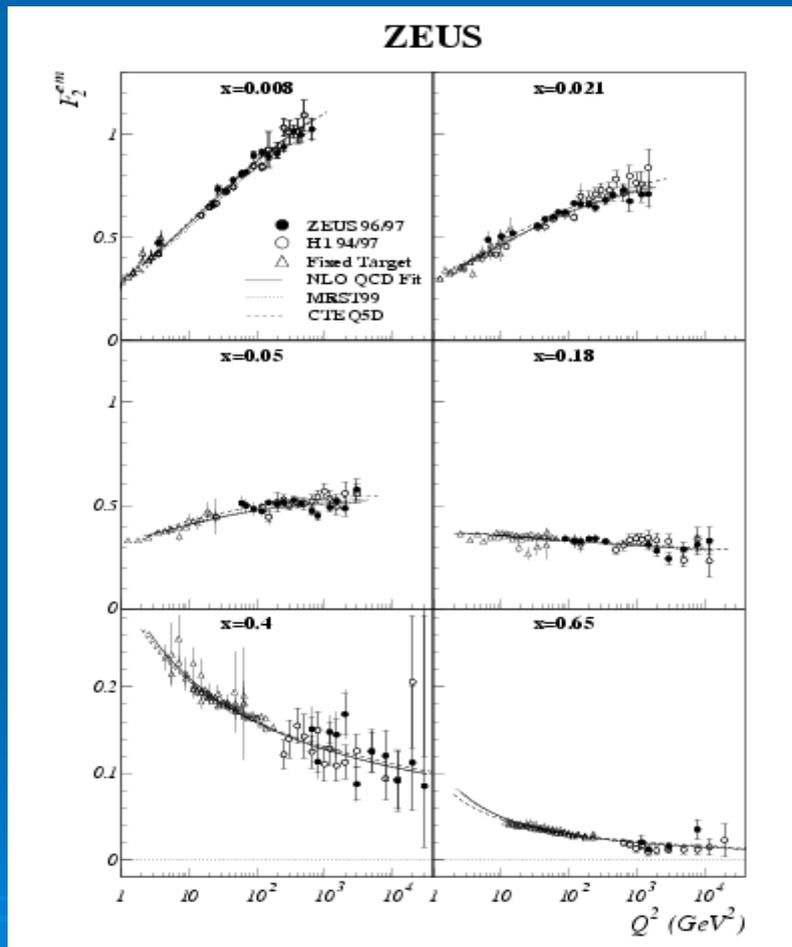
10% событий – дифракция

Сечения и структурные функции для глубоко неупругой дифракции

σ^D



$F_2^D(Q^2)$

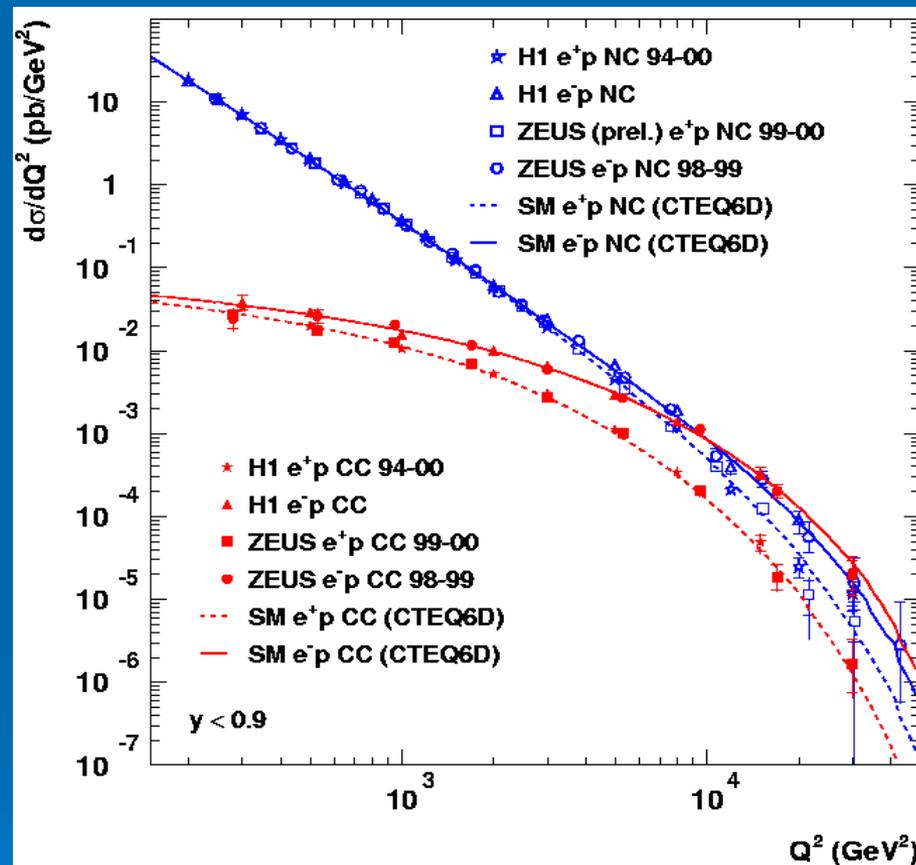
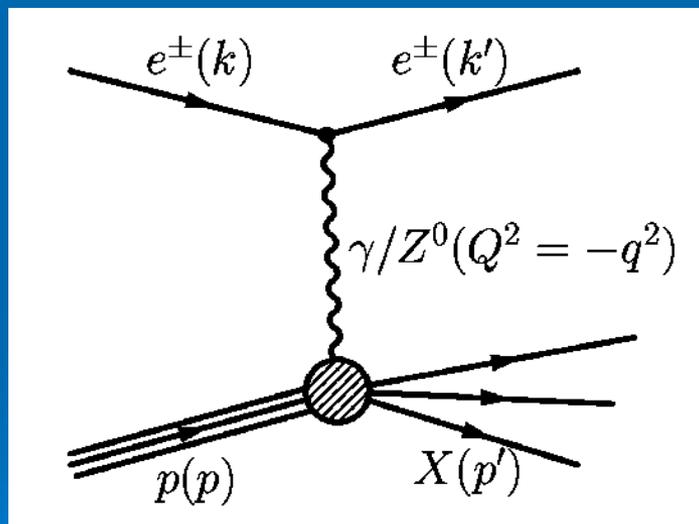


Нарушение скейлинга (NLO)

5. Электро слабые взаимодействия

5.1 Нейтральные токи

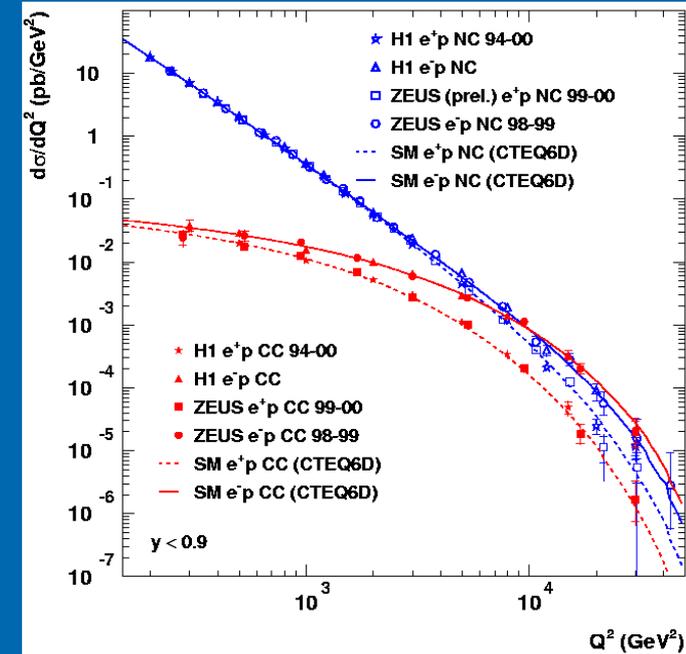
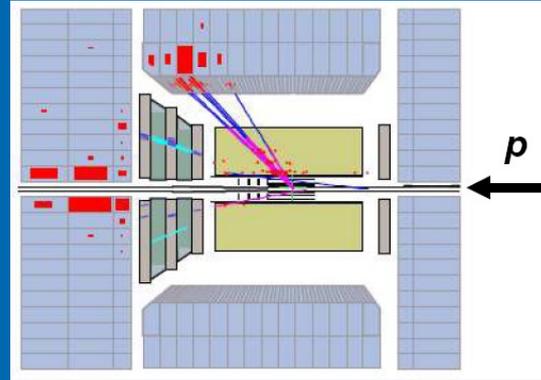
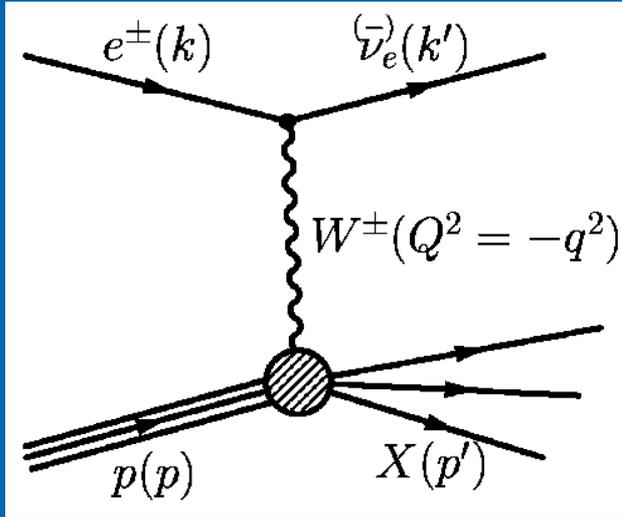
Процесс $e + P \rightarrow e' + X$



Объединение слабых и электромагнитных взаимодействий при $Q^2 > 10^4$ ГэВ²

5.3 Заряженные токи

Процесс $e + P \rightarrow \nu + X$



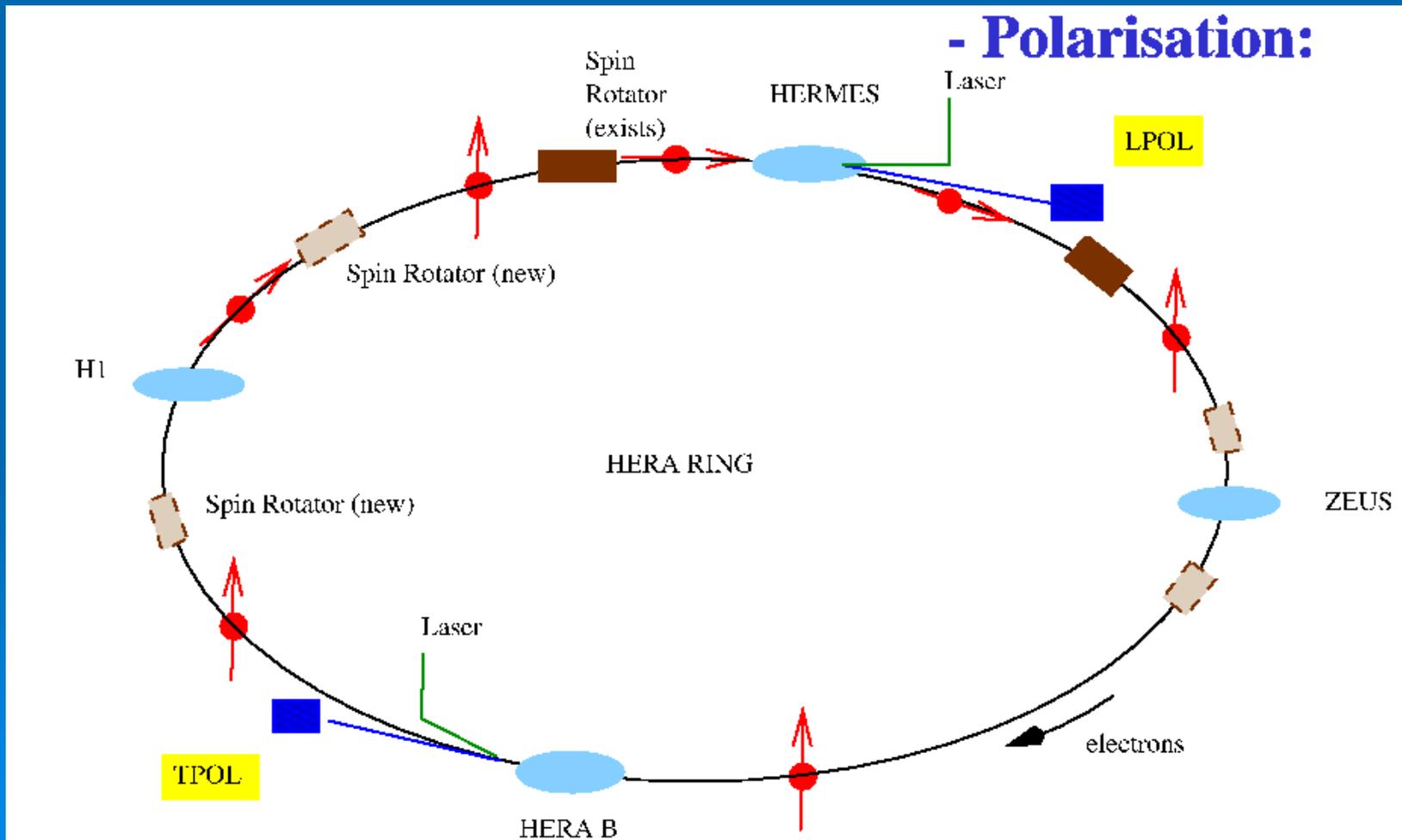
$$\frac{d\sigma_{\text{unpolCC}}^{e^+p}}{dQ^2 dx} = \frac{G_F}{2\pi} \cdot \left(\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right)^2 \left[\bar{u}_i(Q^2, x) + (1-y)^2 d_i(Q^2, x) \right]$$

$$M_W = 82.87 \pm 1.83 (\text{exp})_{-0.16}^{+0.30} (\text{mod}) \text{ GeV}$$

Замедление линейного роста с энергией сечения 4-х фермионного взаимодействия

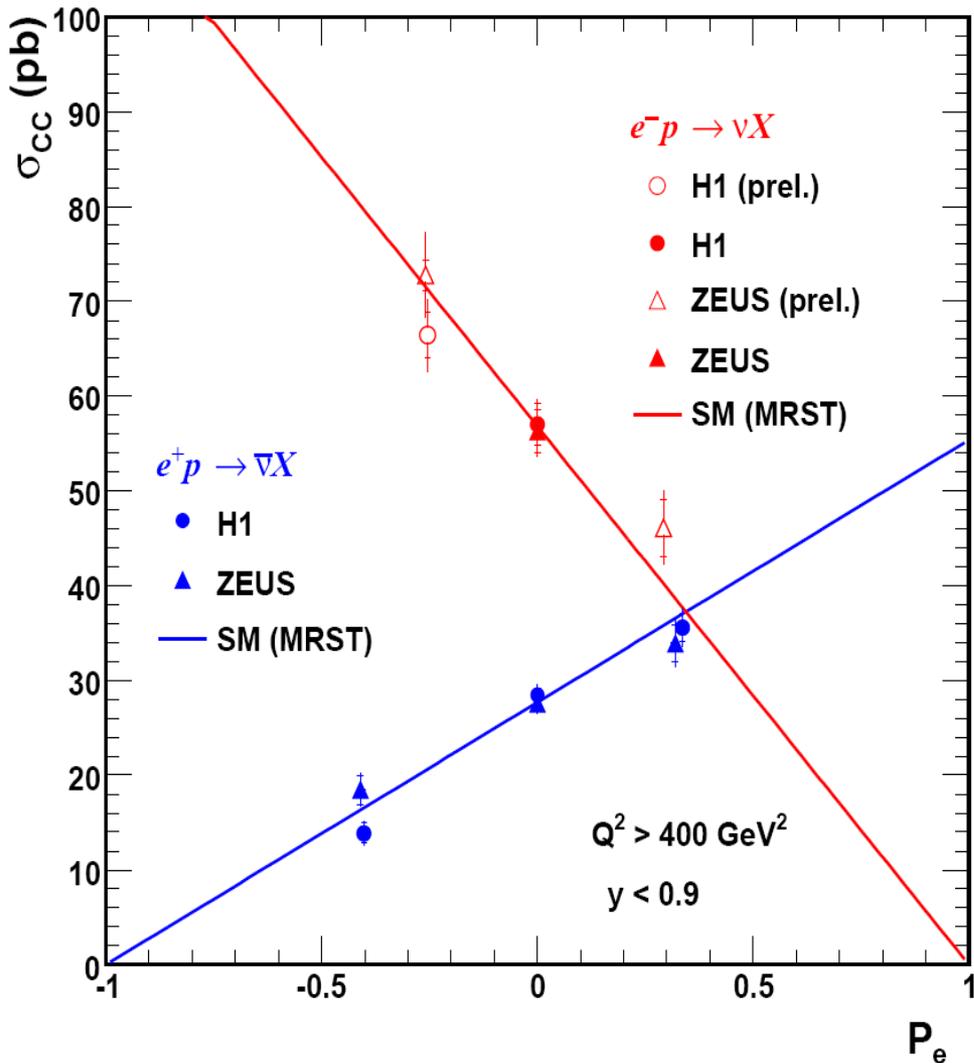
5.3 Поляризационные измерения

е-пучок имеет поперечную поляризацию (Соколов-Тернов).
Имеются устройства для поворота спина для получения
продольной поляризации электронов: $P \cong 40\%$



Результаты поляризационных экспериментов

Charged Current ep Scattering (HERA II)



Стандартная Модель (СМ):

Линейная зависимость сечения заряженных токов от поляризации P_e и отсутствие правых токов.

$$\sigma^\pm(P_e) = (1 \pm P_e)\sigma^\pm(P_e=0)$$

(+ позитроны, - электроны)

$$P_e = \frac{N_{RH} - N_{LH}}{N_{RH} + N_{LH}}$$

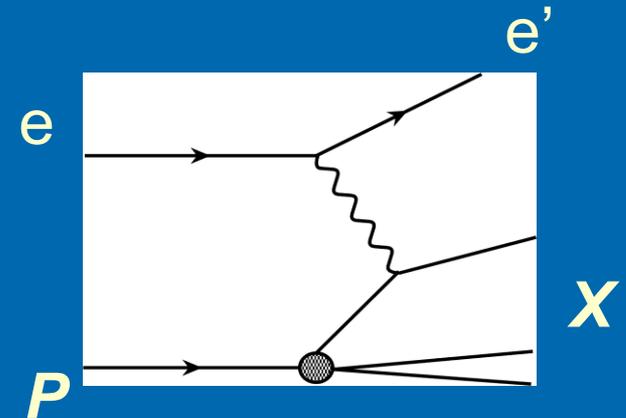
→ Измерения ZEUS и H1 согласуются между собой и с предсказаниями СМ.

→ нет правых СС токов!

6. Поиски экзотики

6.1 Размер кварка

Измерение формфактора кварка в при Q^2 вплоть до $\sim 40000 \text{ ГэВ}^2$ дало:

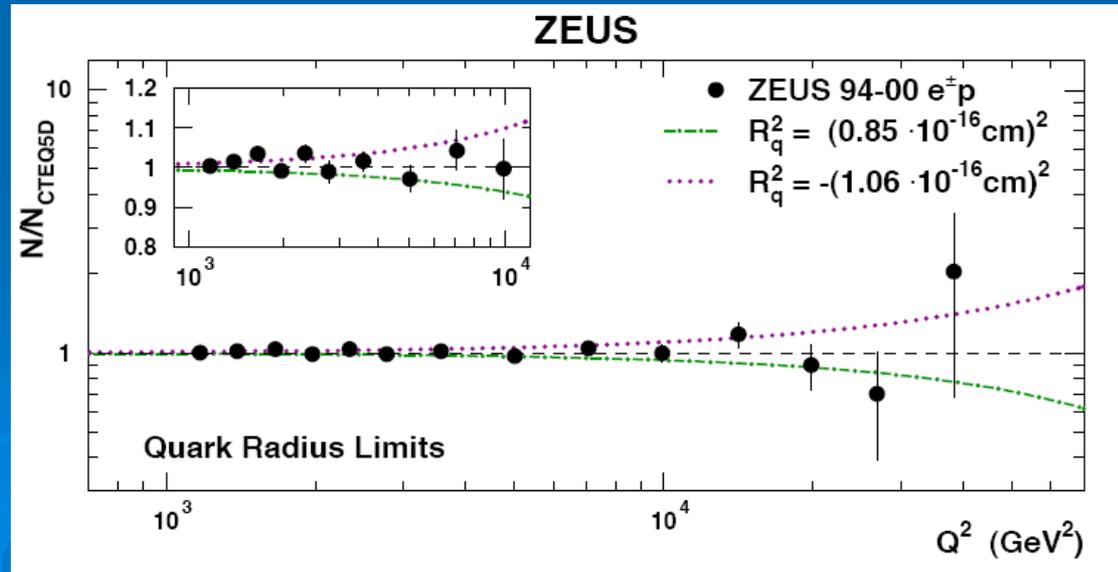


H1

$$R_q < 1.0 \times 10^{-16} \text{ см}$$

ZEUS

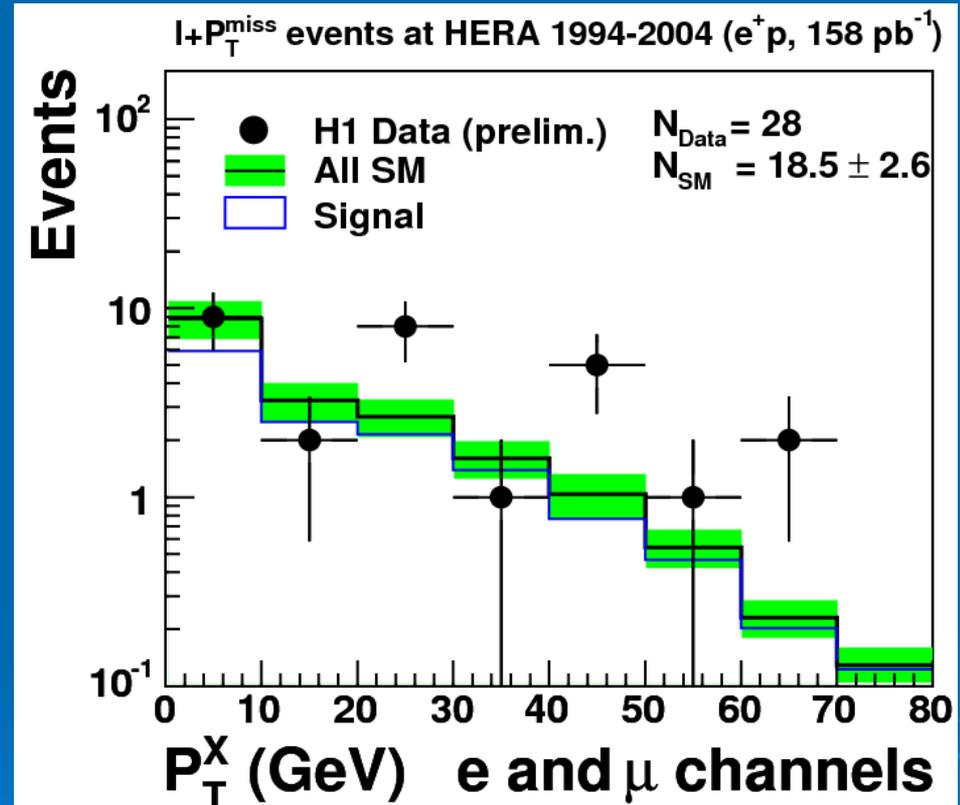
$$R_q < 0.85 \times 10^{-16} \text{ см}$$



6.2 Избыточные мюоны

В событиях e^+p -взаимодействий обнаружено в детекторе H1 при $P_T > 40$ ГэВ превышение выхода μ -мезонов на 2.5 стандартных отклонения по сравнению с предсказаниями Стандартной Модели.

В ZEUS - отклонений нет.

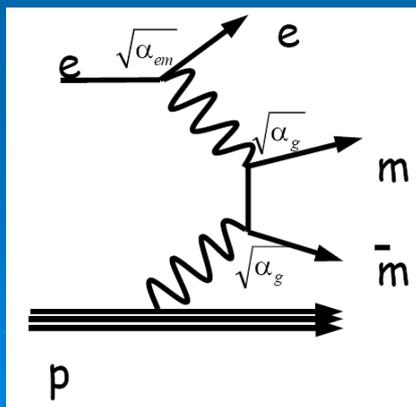
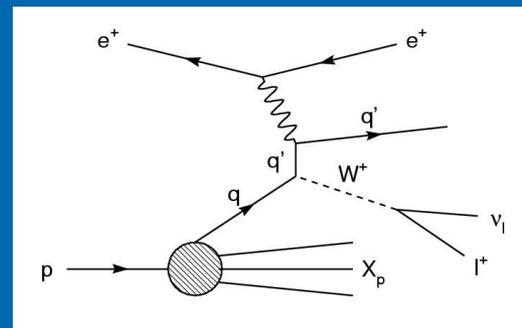
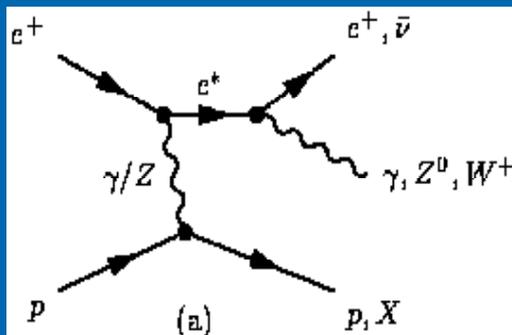
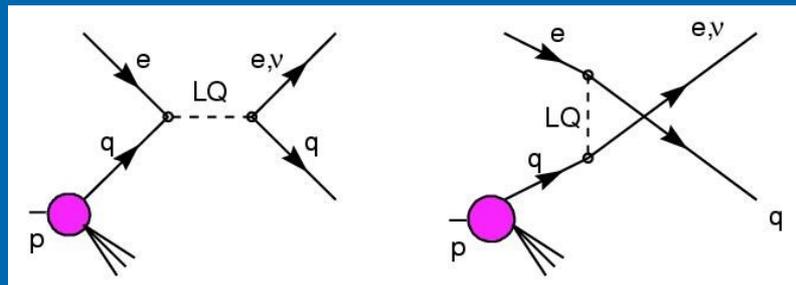


6.3 Гипотетические частицы

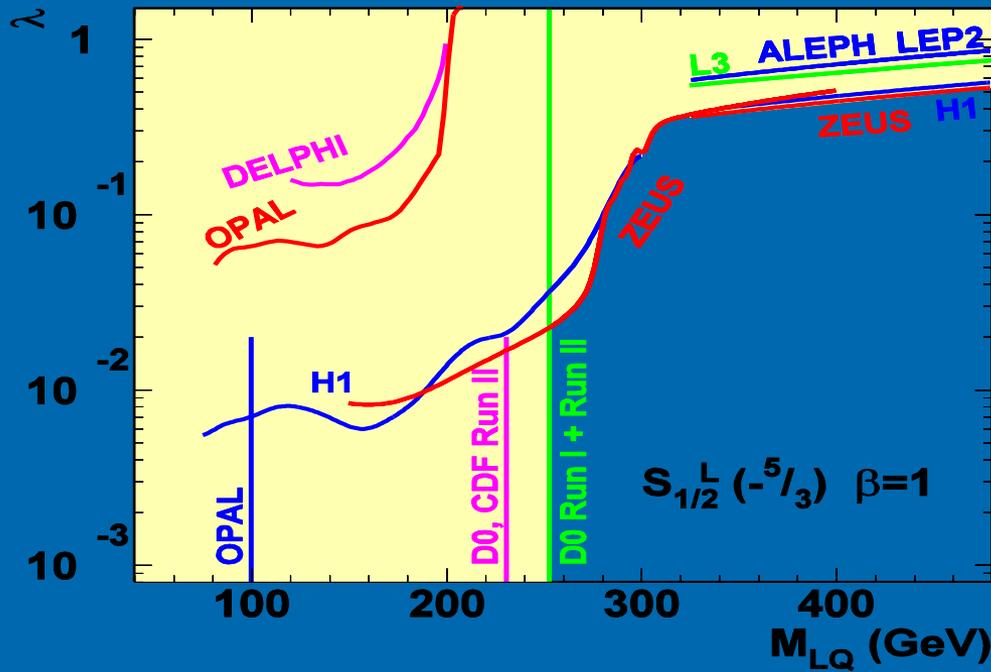
Поиски лепто-кварков LQ, возбужденных e, ν, W, H^{++} , s-кварков, нейтралино, глюино, гравитино, магнитного монополя и др.

не дали положительных результатов

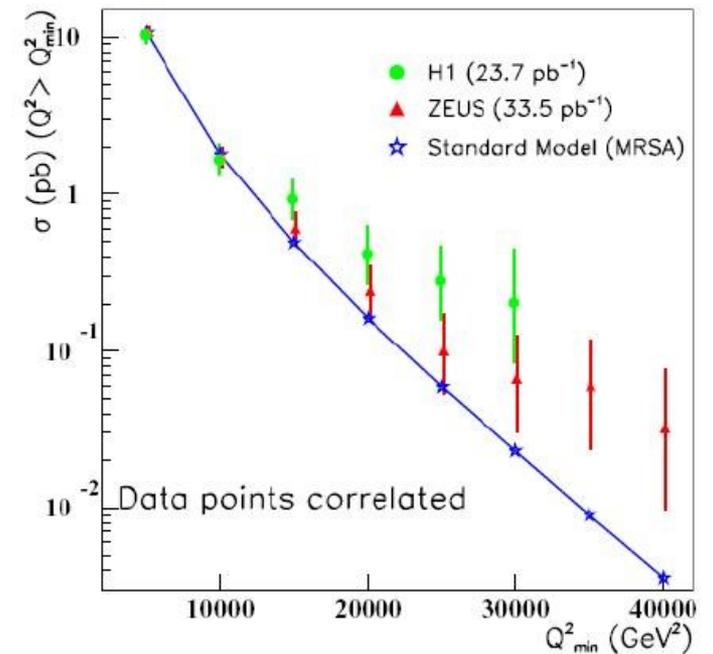
Но установлены ограничения на массы, константы связи и сечения рождения этих частиц в ер-столкновениях.



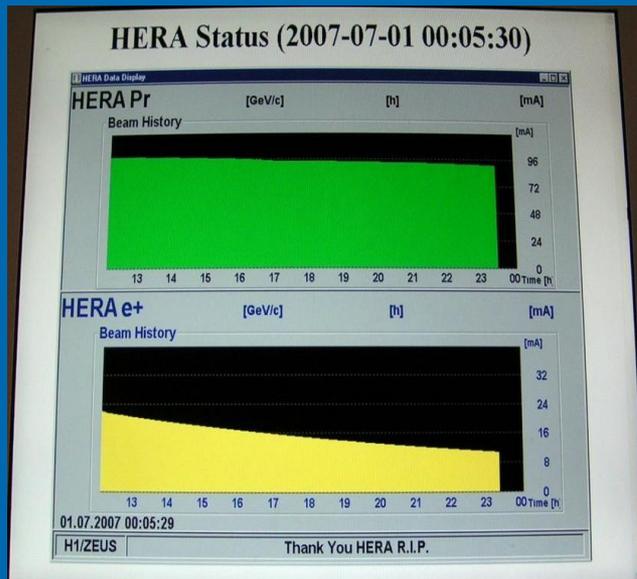
LQ



1994-97 Preliminary NC Cross Sections



7. Итоги



30 июня 2007 г. в 24:00 закончилась эксплуатация коллайдера ГЕРА (см. монитор).

Но исследования продолжаются!

Проводится анализ экспериментальной информации, записанной на магнитных носителях.

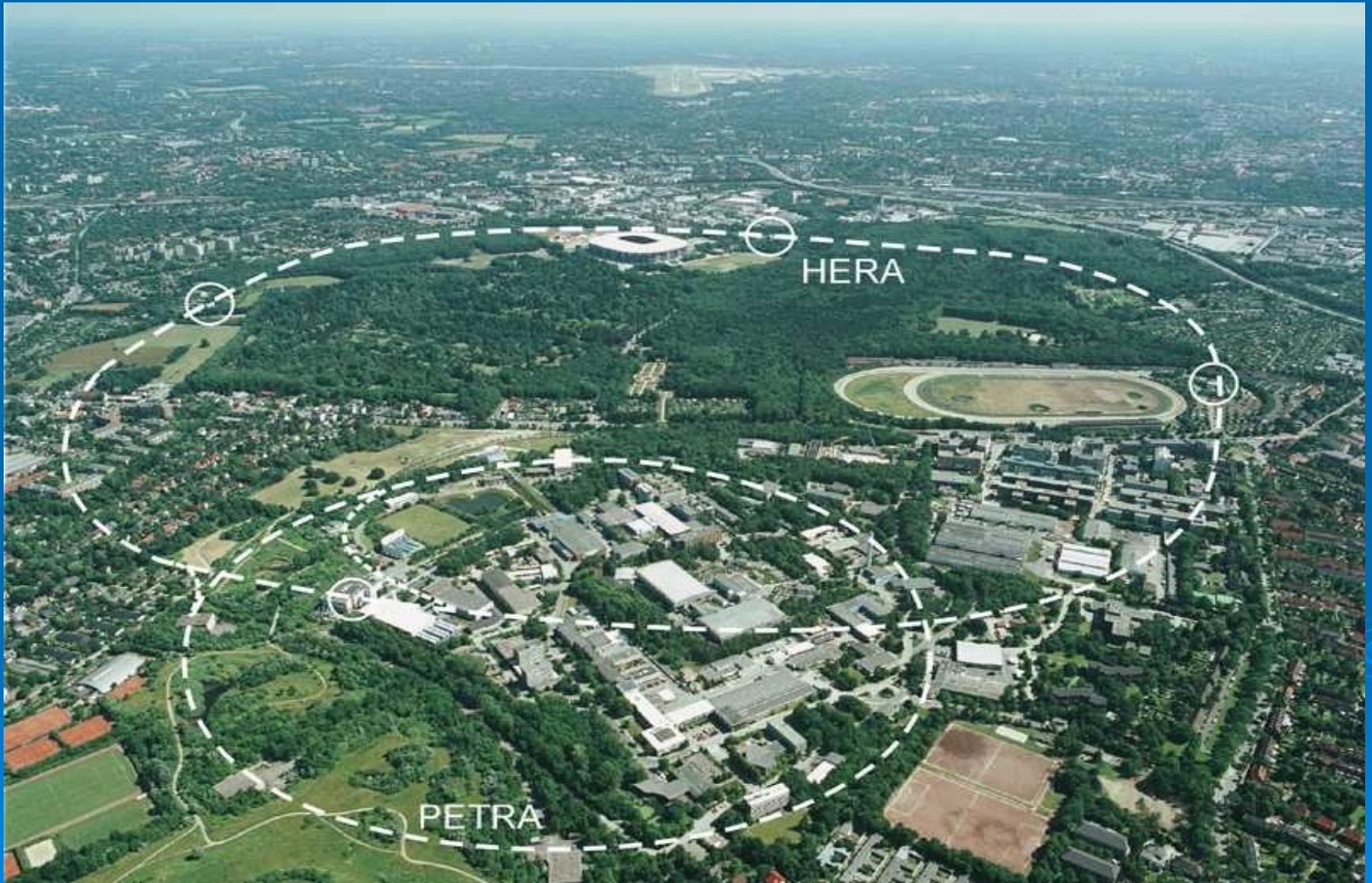
Впереди - еще годы работы (3-5 г.).

Результаты исследований

1. Убедительно продемонстрирована справедливость КХД (высшие поправки по α_s улучшают согласие с экспериментом).
2. Обнаружено явление дифракции в DIS.
3. Прецизионно измерена константа связи α_s сильных взаимодействий.
4. Измерены распределения кварков и глюонов в P и γ .
5. Установлены механизмы фотон-нуклонных реакций при высоких энергиях и больших Q^2 .

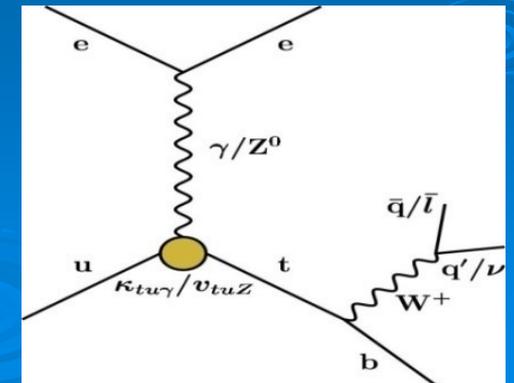
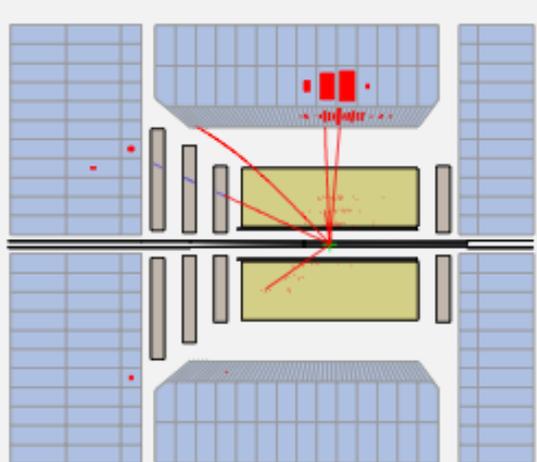
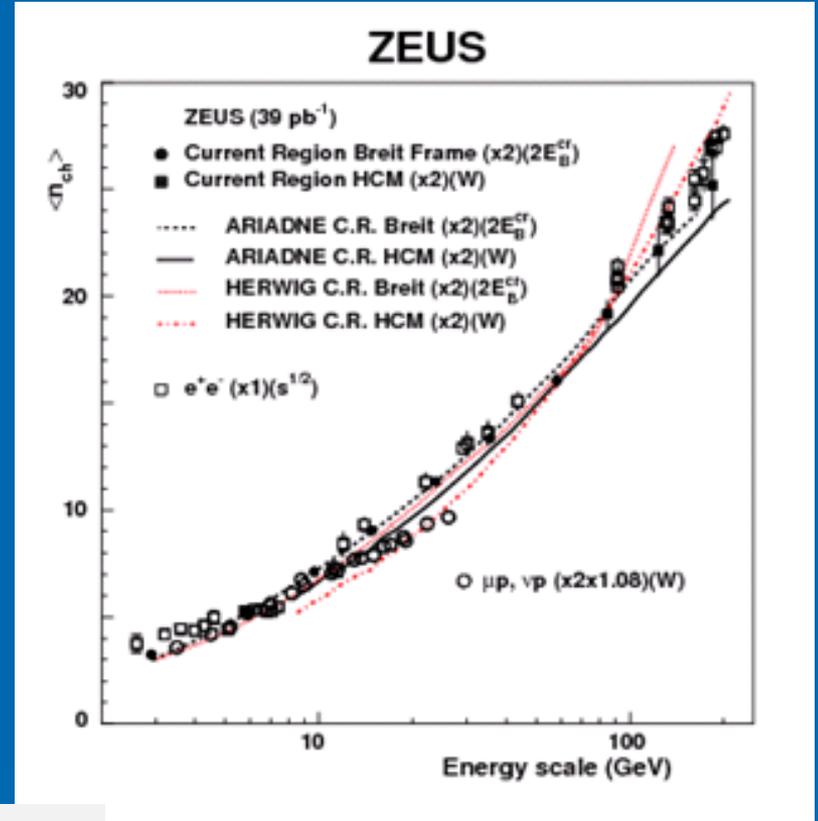
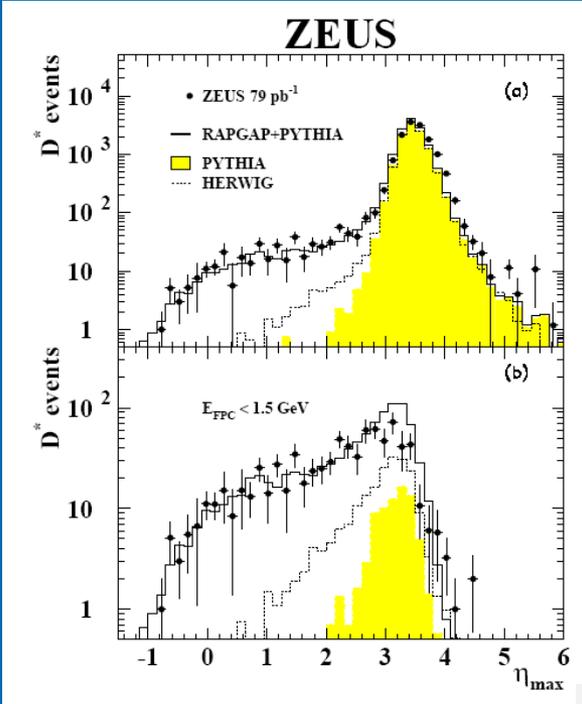
6. Показано, что размер кварка не превышает 10^{-16} см.
7. Доказано, что нет правых токов.
8. Наблюдено подавление роста нейтринных сечений за счет обмена W -бозоном.
9. В исследованной кинематической области отсутствуют отклонения от СМ.
10. Получены ограничения на массы гипотетических частиц, константы взаимодействия и сечения их рождения нейтральными и заряженными токами.

DESY

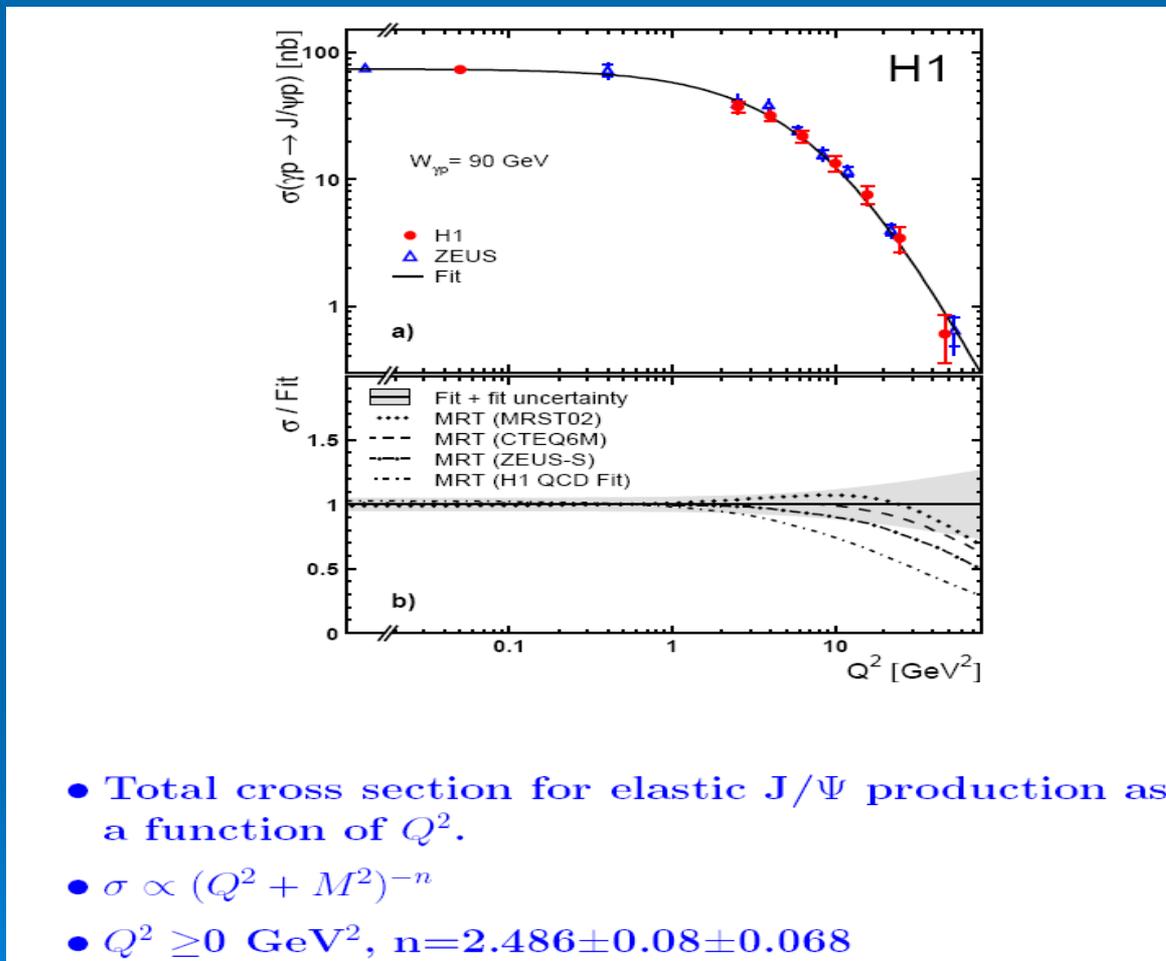


МНОЖЕСТВЕННОСТЬ

Увеличение $n(ch)$ с энергией



Зависимость сечения электророждения Ψ -мезонов от Q^2



- Total cross section for elastic J/Ψ production as a function of Q^2 .
- $\sigma \propto (Q^2 + M^2)^{-n}$
- $Q^2 \geq 0$ GeV², $n=2.486 \pm 0.08 \pm 0.068$

При $Q^2 > 2$ ГэВ² сечение быстро падает с ростом Q^2 .



HERA



PETRA

Группа ФИАН, в которой ведущую роль играют А.С.Белоусов, Е.И. Малиновский и С.В. Русаков, давно и

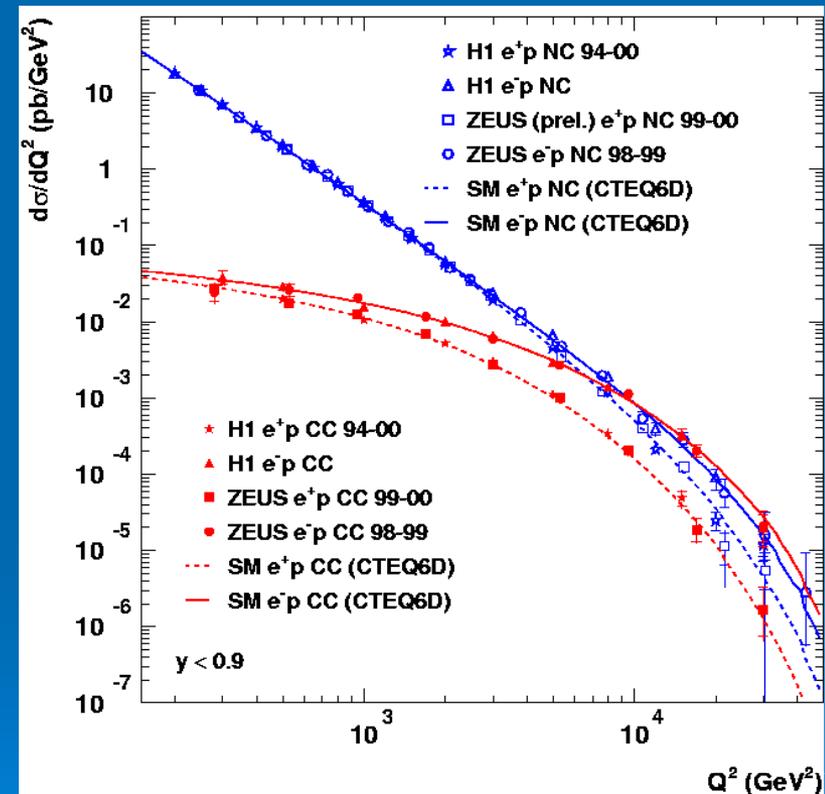
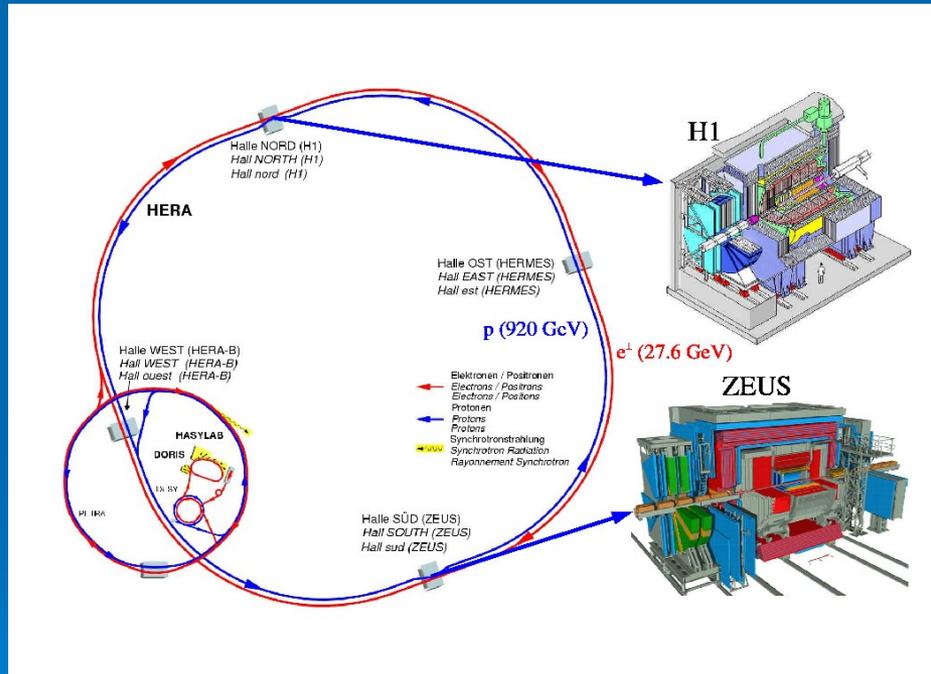
ОБРАЗЕЦ



Запасной рисунок

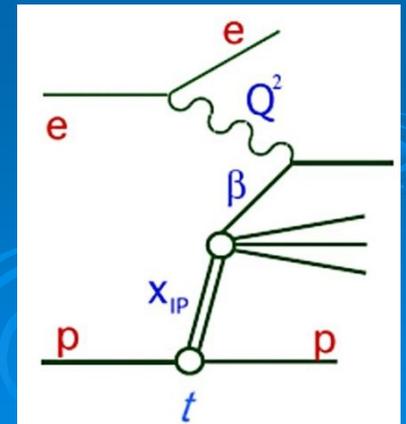
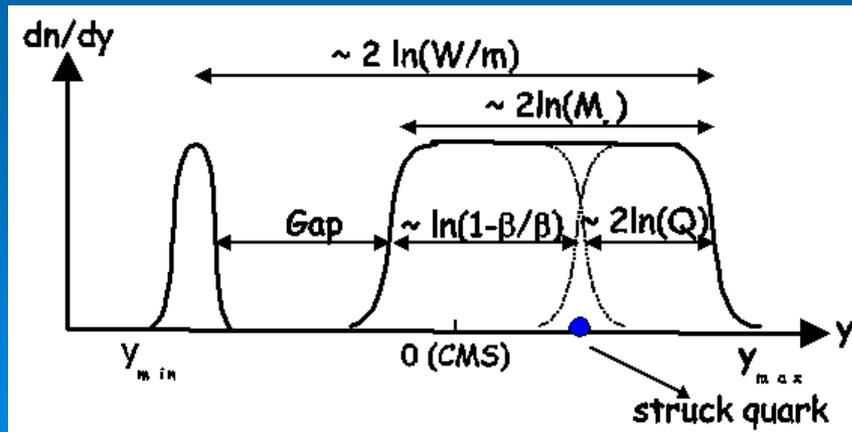
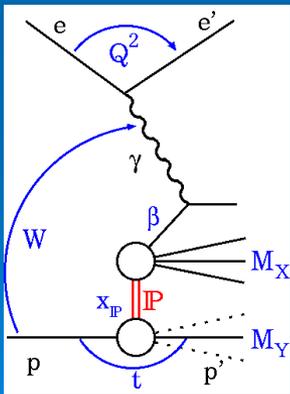
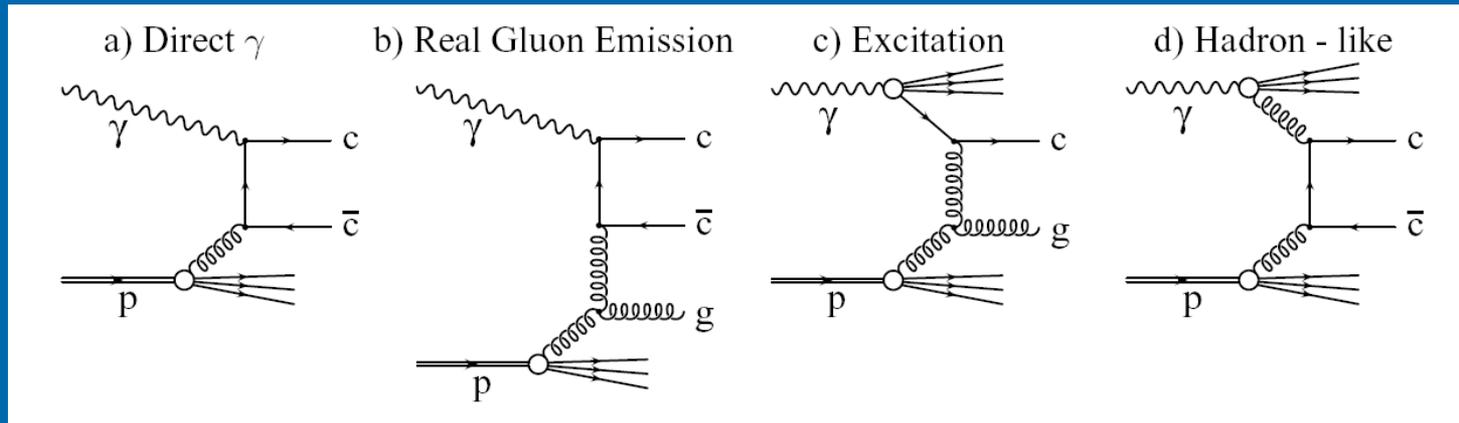
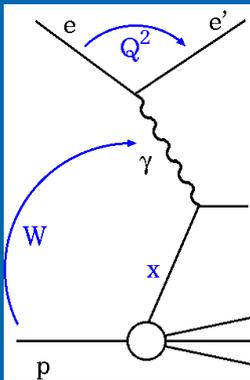
ГЕРА и детектора H1 и ЗЕВС

NC и CC-токи, M_W



$$M_W = 82.87 \pm 1.83 (\text{exp})_{-0.16}^{+0.30} (\text{mod}) \text{ GeV}$$

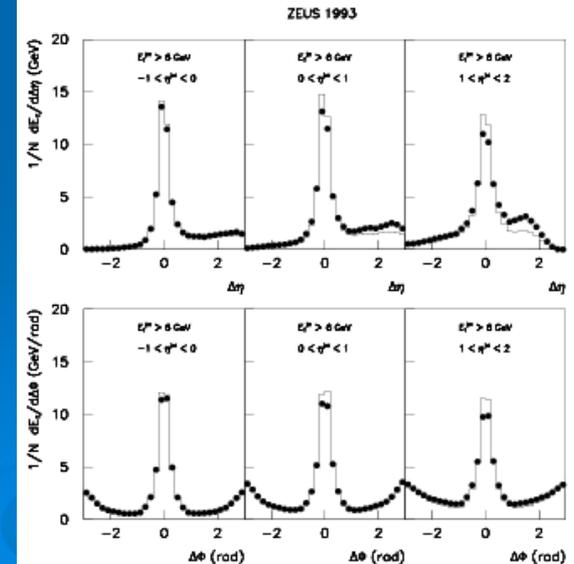
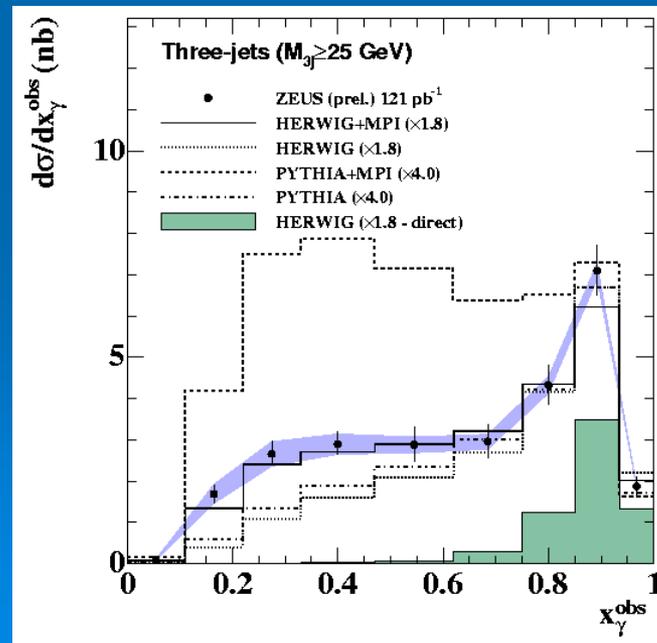
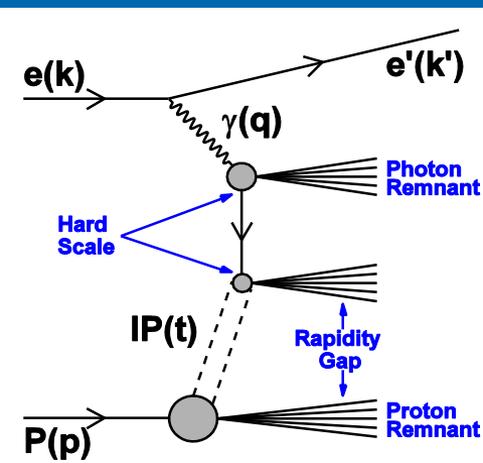
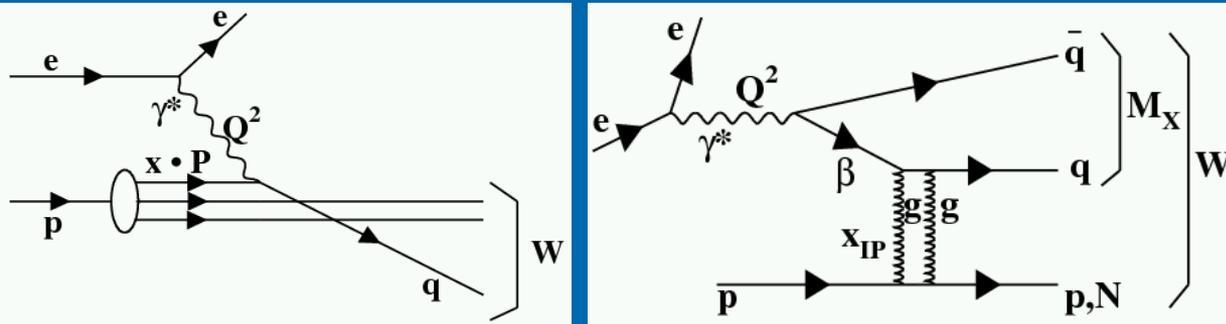
Запасные рисунки



Запасной рис.

DIS

диффракция DIS



Запасной рис

