

ЭТОТ ЗАГАДОЧНЫЙ ПРОТОН

Алексей Дзюба

Старший научный сотрудник ОФВЭ НИЦ «КИ» - ПИЯФ

11 апреля 2017 г.



**ПАМЯТИ ЯКОВА
ИСААКОВИЧА АЗИМОВА**
(22.05.1938 – 06.12.2016)

«Яков Исаакович как никто, понимал экспериментальную ситуацию в физике частиц. Он любил общаться с экспериментаторами, мог оценить достоверность того или иного эксперимента. Многие сотрудники Теоретического Отдела обращались к нему за консультацией»

(из [некролога](#))



Я ХОЧУ РАССКАЗАТЬ О ТОМ,

- Что точно измеряя спектр водорода, можно измерить радиус протона;
- Что эту же величину можно измерить, рассеивая электроны на протонах;
- Что повышая энергию электронов, можно рассмотреть внутреннюю структуру протона;
- Что можно использовать и другие частицы-пробники: протоны, нейтрино;
- Про загадки: кваркового пленения, массы протона, спина протона;
- Про мюонный водород и загадку радиуса протона;
- И про наш новый эксперимент: что и как мы хотим измерить.

КАК УСТРОЕНО ВЕЩЕСТВО

Характерная энергия связи электронов в атоме

$$10^{-18} - 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1.602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4; m_e = 511 \text{ кэВ}, m_p = 938.27 \text{ МэВ}$$

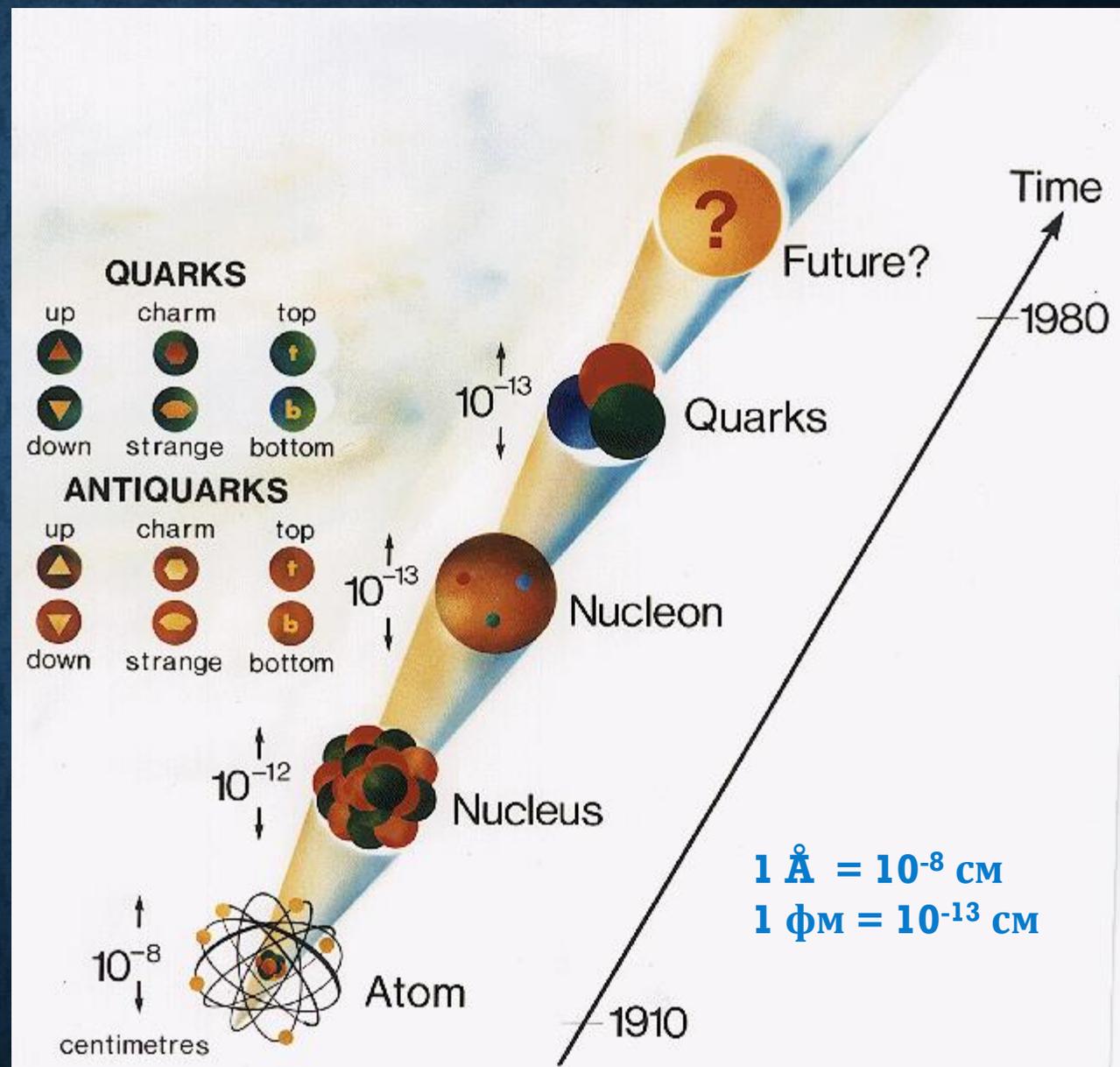
Атом – квантовая механика (электромагнитное взаимодействие)

Атомное ядро – связанная система протонов и нейтронов (сильное взаимодействие). Для него характерны:

α -распады – сильное вз-е,

β -распады – слабое вз-е,

γ -распады – электромагнитное вз-е.



СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА

(серия Балмера)

397 410

434 нм

486 нм

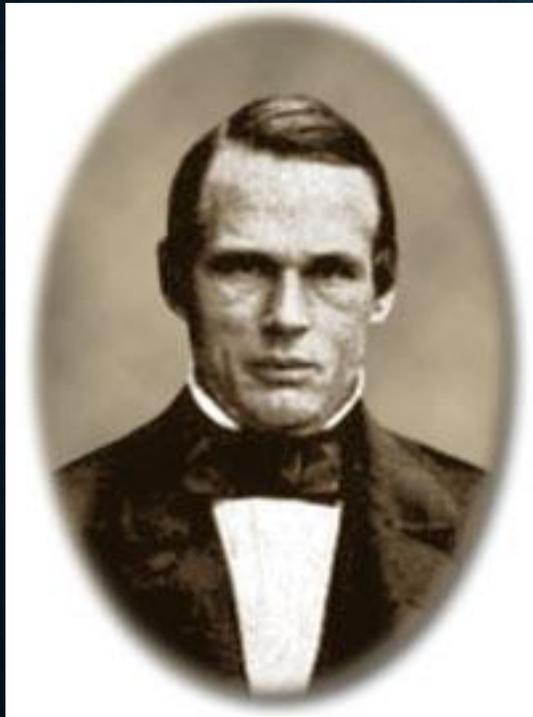
656 нм

2,86 эВ

2,55 эВ

1,89 эВ

Андрес Йонас Ангрстрём



Измерил спектр водорода

Йохан Якоб Балмер



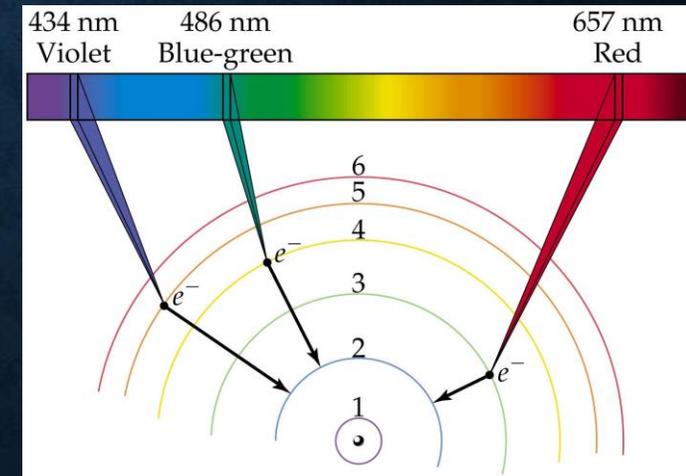
- Была совершенно непонятна природа дискретных линий атомов
- Кроме серии Балмера были обнаружены серии: Лемана, Пашена, Бреккетта, Пфунда
- В 1909 году Э.Резерфорд открывает атомные ядра
- Планетарная модель атома несовместима с законами классической физики

КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД



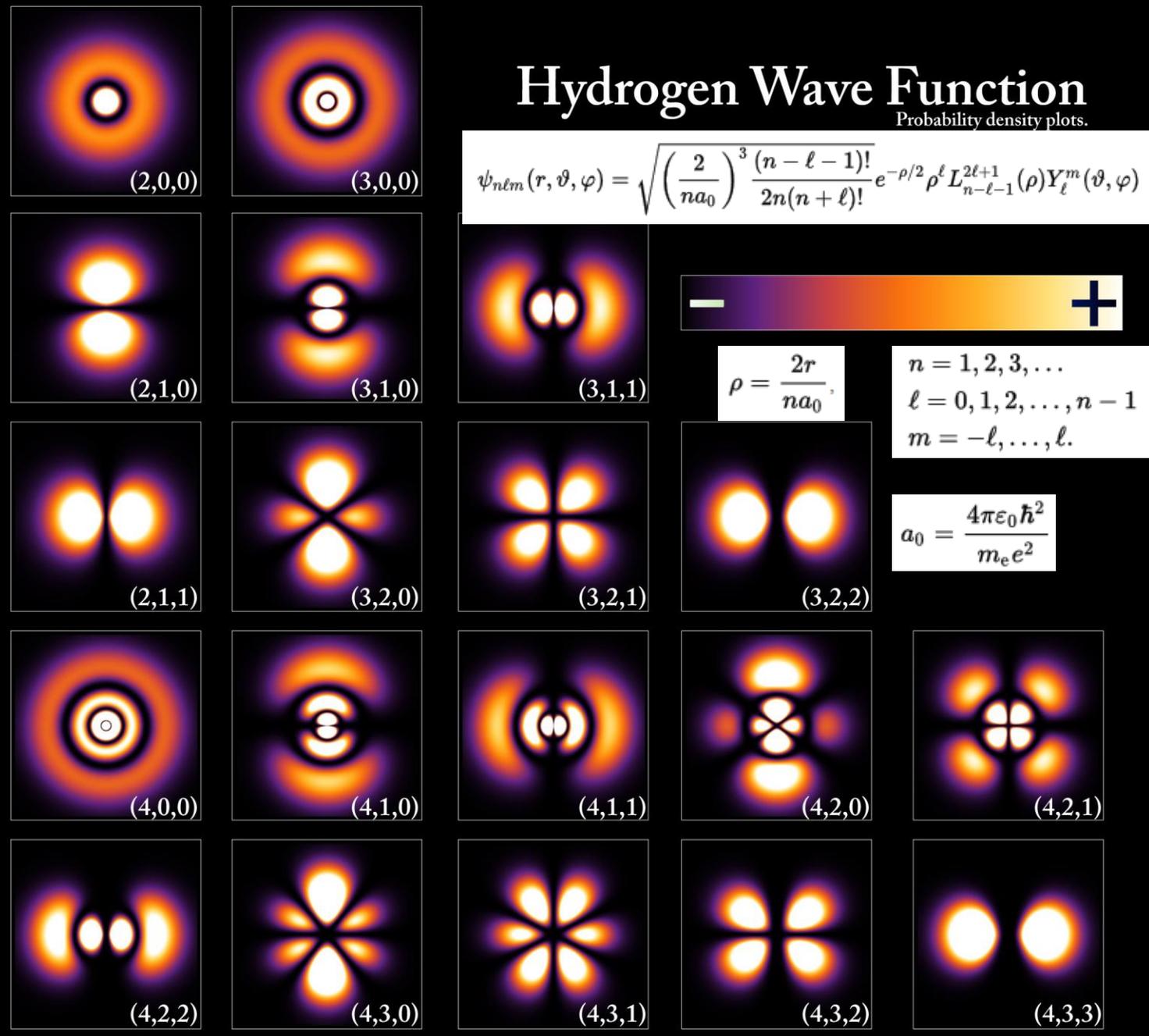
Нильс Бор

- Атом может находиться только в особых состояниях с определенной энергией
- Излучение и поглощение энергии атомом происходит скачком
- Правило отбора орбит: $mvr = nh, n=1,2,3,\dots$
- Квазиклассический подход
- 1924 г. Луи де Бройль предлагает распространить принцип корпускулярно-волнового дуализма на частицы с массой покоя



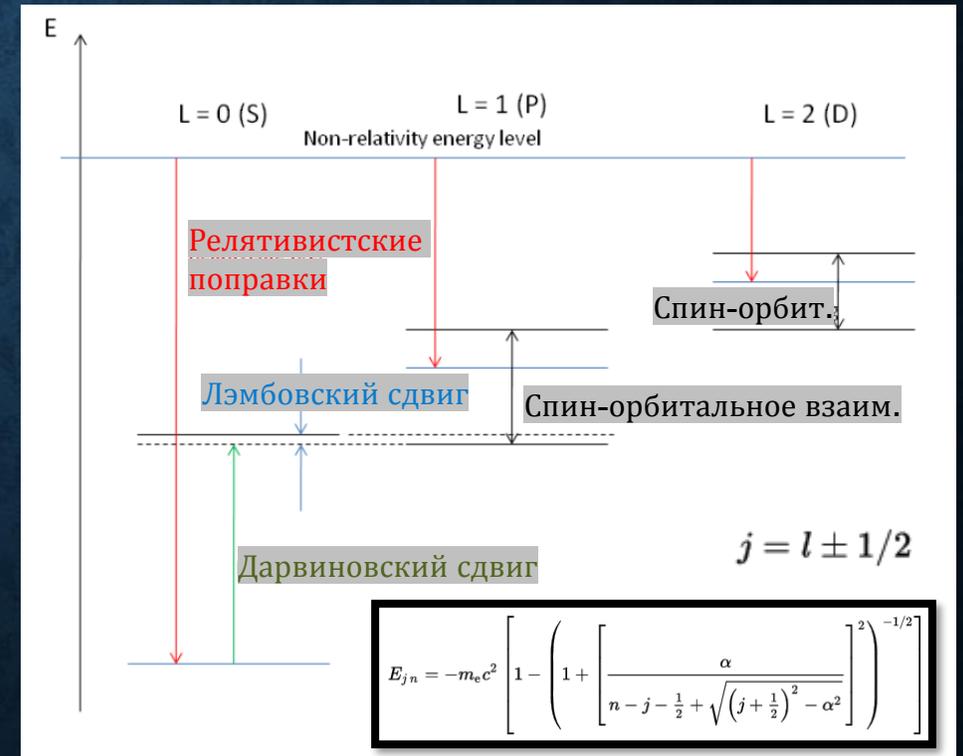
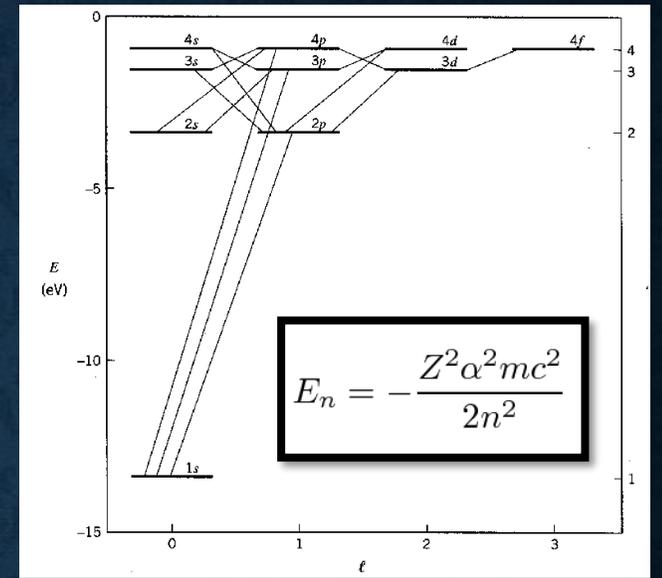
КАК УСТРОЕН АТОМ ВОДОРОДА

- 1926 г. Эрвин Шредингер записывает волновое уравнение для волн-материи и решает его
- Квантовые [целые] числа (n, l, m) получаются натуральным образом
- Энергия связи зависит только от n
- При $n = 2$ вероятность найти электрон вблизи протона для $l = 0$ много больше чем для случая $l = 1$ (запомним это)
- Нерелятивистский подход



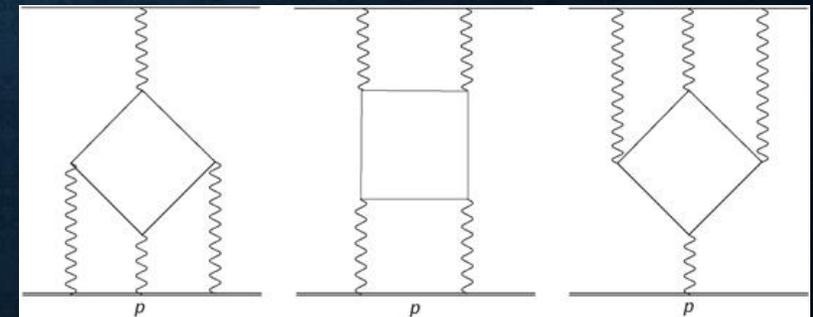
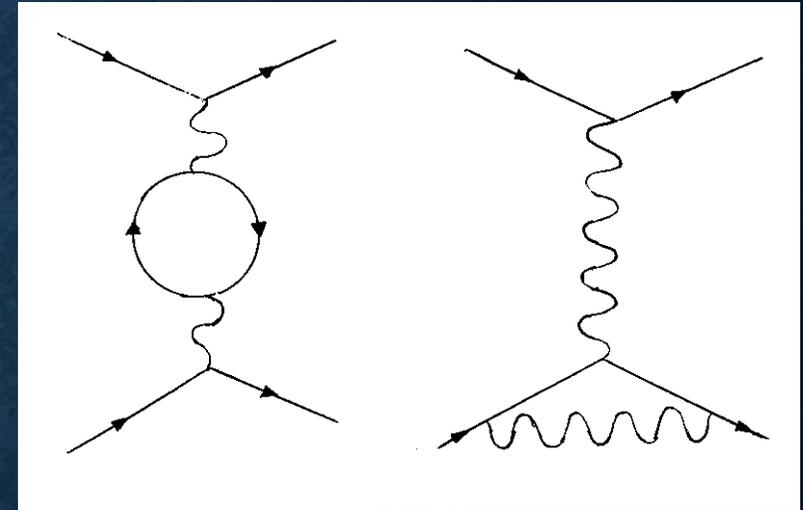
ВСЁ НЕ ТАК ПРОСТО...

- Важно учесть: спин электрона и его взаимодействие с угловым моментом электрона, релятивистские поправки
- Уравнение Дирака (релятивистская квантовая механика) для водородоподобных атомов имеет аналитическое решение
- Можно разложить гамильтониан релятивистского электрона и посмотреть на отдельные вклады
- Также существует сверхтонкое расщепление (например, 1S-уровня) из-за взаимодействия спинов электрона и протона [не показано на диаграмме]
- Результат таких расчетов $E(^2S_{1/2}) = E(^2P_{1/2})$,
не согласуется с экспериментом (сдвиг Лэмба)



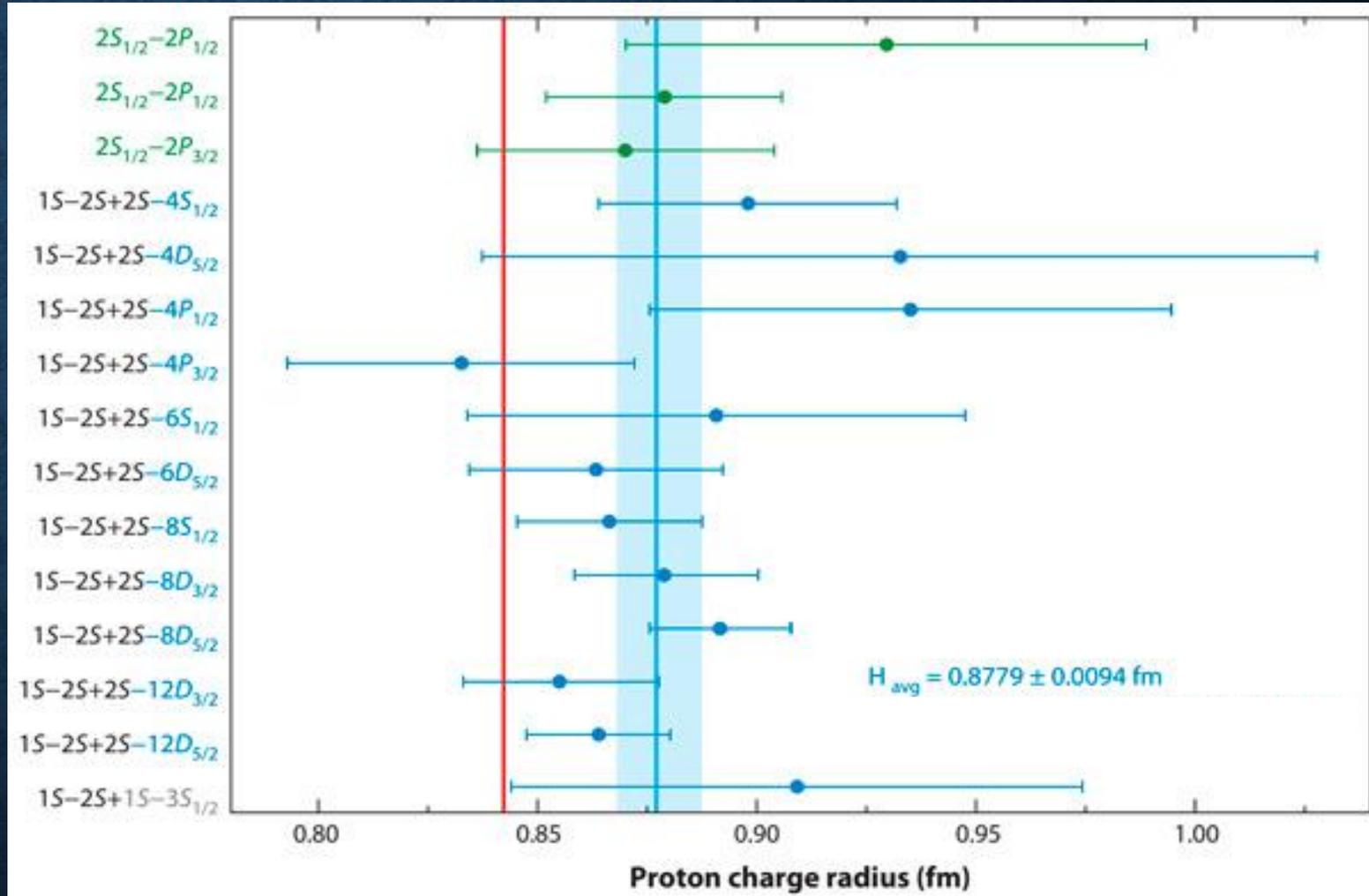
ПРИРОДА ЛЭМБОВСКОГО СДВИГА

- Результат взаимодействия атома с нулевыми колебаниями электромагнитного поля, т. е. не равными нулю среднеквадратичными значениями его напряженностей
- Электрический заряд электрона (!) оказывается эффективно как бы «размазанным», что приводит к сдвигу уровня
- Открыт Лэмбом и Р.Резерфордом (1947), объяснен Бете
- Первое подтверждение эффектов квантовой электродинамики (КЭД)
- Диаграммы Фейнмана очень удобный язык для КЭД.
- Можно рассчитать вклады высших диаграмм
- «Неточечность» (природная!) протона тоже дает отдельный небольшой вклад в относительный сдвиг уровней с одинаковыми n и j



ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА ПРОТОНА

- Измерения через Лэмбовский сдвиг
- Измерение через пары уровней – совместное измерение радиуса протона и постоянной Ридберга.
- Отличный пример косвенных измерений!
- Можно ли измерить иначе?
– Да!



ПРЯМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО РАДИУСА ПРОТОНА

- Рассеяние потока пробных частиц
- Корпускулярно-волновой дуализм
- Длина волны (частицы пробника) \sim размер исследуемого объекта

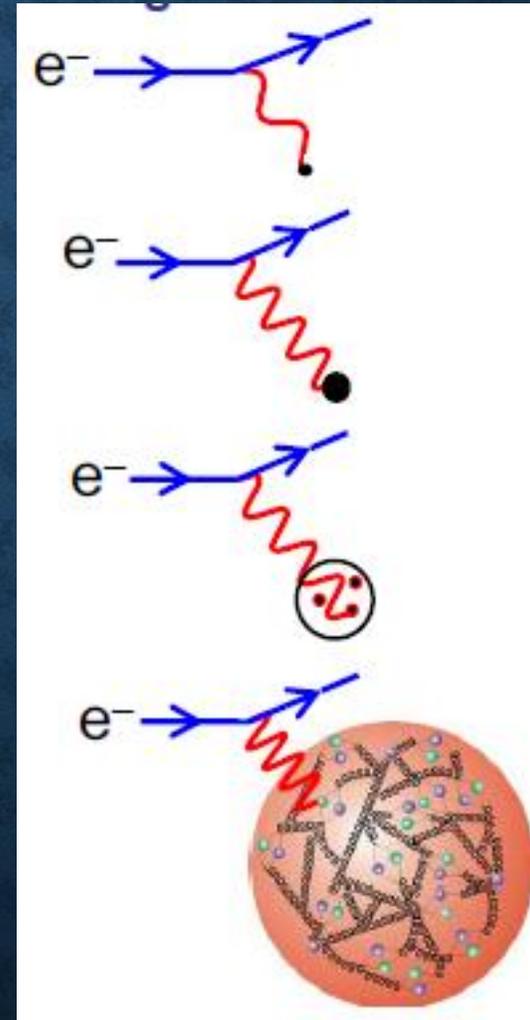


ПРЯМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО РАДИУСА ПРОТОНА

- Рассеяние потока пробных частиц
- Корпускулярно-волновой дуализм
- Длина волны (частицы пробника) \sim размер исследуемого объекта



$E(e^-)$



- Точечный объект
- Протяженный объект с конечным размером
- Три валентных кварка
- Кварк-глюонное море

Большие энергии электрона – меньшие (по размеру) структуры

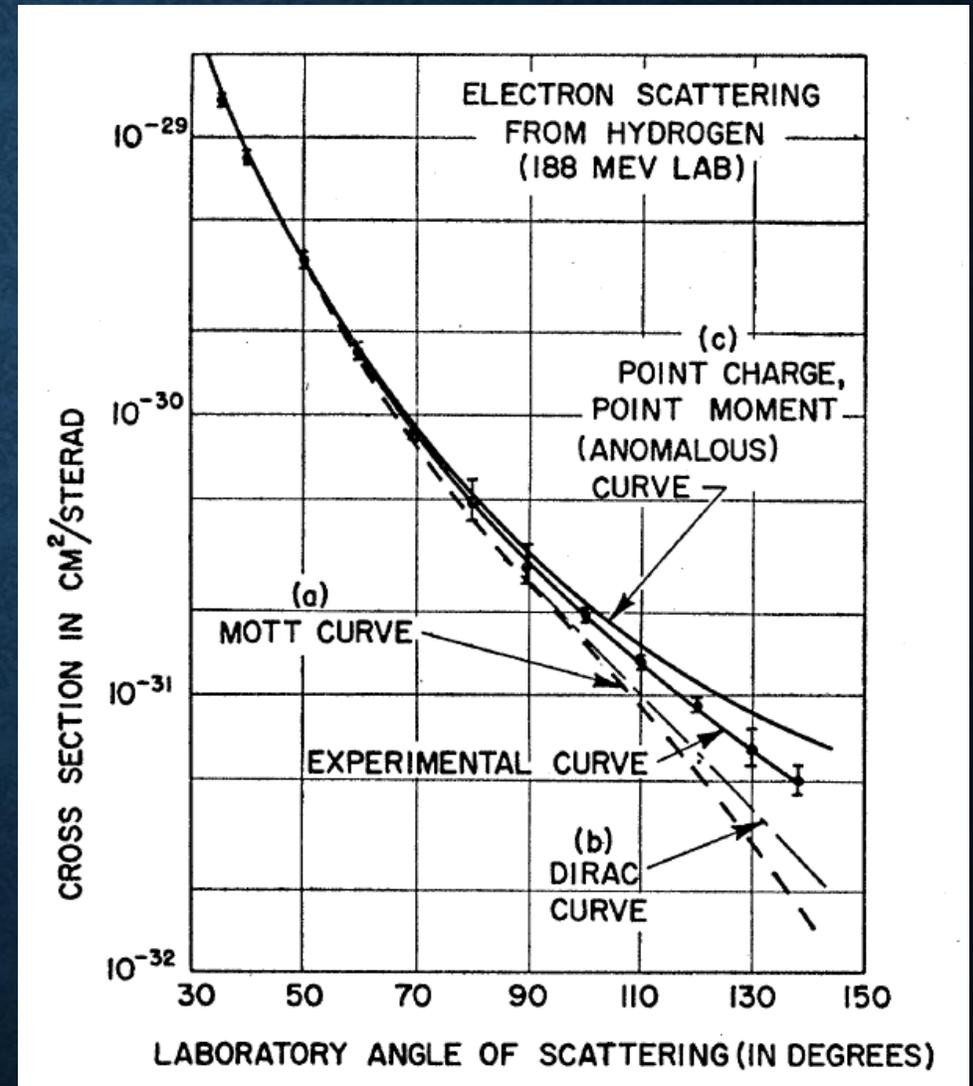
ОПЫТ ХОФШТАДТЕРА (1956)

- Малые энергии электронов (протон -- точечная частица без спина, очень массивная). Формула Резерфорда.
- Увеличиваем энергию – нужно учесть квантово-механическое перекрытие между волновыми функциями налетающего и рассеянного электронов. Формула Мотта.
- Поправка на энергию отдачи протона и участие спина протона и спина электрона.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \theta / 2} \frac{E_3}{E_1} \left(\underbrace{\cos^2 \frac{\theta}{2}}_{\text{Rutherford}} - \underbrace{\frac{q^2}{2M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}}_{\text{Proton recoil}} \right) \left(\underbrace{\cos^2 \frac{\theta}{2}}_{\text{Electric/Magnetic scattering}} + \underbrace{\frac{q^2}{2M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}}_{\text{Magnetic term due to spin}} \right)$$

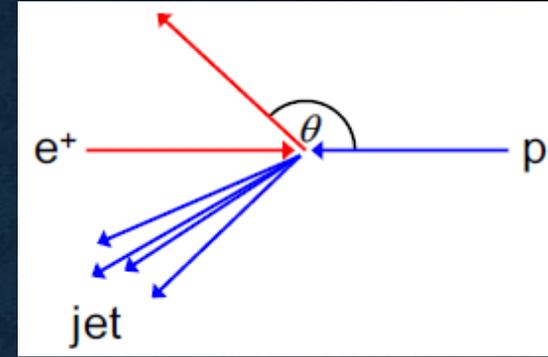
- Заряд протона «размазан» по некоторому объему пространства -- области радиусом порядка $\sim 0.8-0.9$ ферми = $8-9 \times 10^{-14}$ см

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \theta / 2} \frac{E_3}{E_1} \left(\frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{(1 + \tau)} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2\tau G_M^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$



ГЛУБОКО НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ

- При увеличении энергии электрона окажется, что при рассеянии он имеет дело не с чем-то «размазанным», а с точечными частями протона (*валентные кварки*)

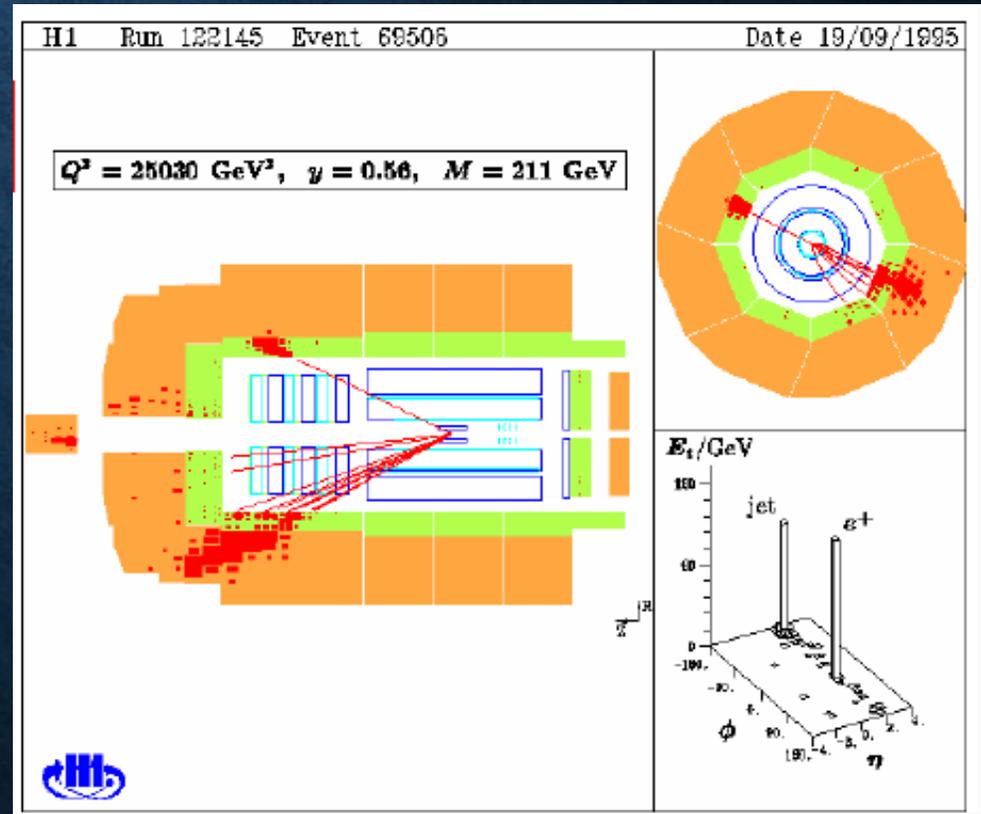


$$\frac{d^2\sigma}{dE_3 d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \theta/2} \left[\frac{1}{v} F_2(x, Q^2) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{2}{M} F_1(x, Q^2) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

- Две *структурные функции* для их описания
- Еще более увеличивая энергию, мы увидим *морские кварки*

★ DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) Laboratory, Hamburg, Germany

e^\pm 27.5 GeV 820 GeV p $\sqrt{s} = 300$ GeV



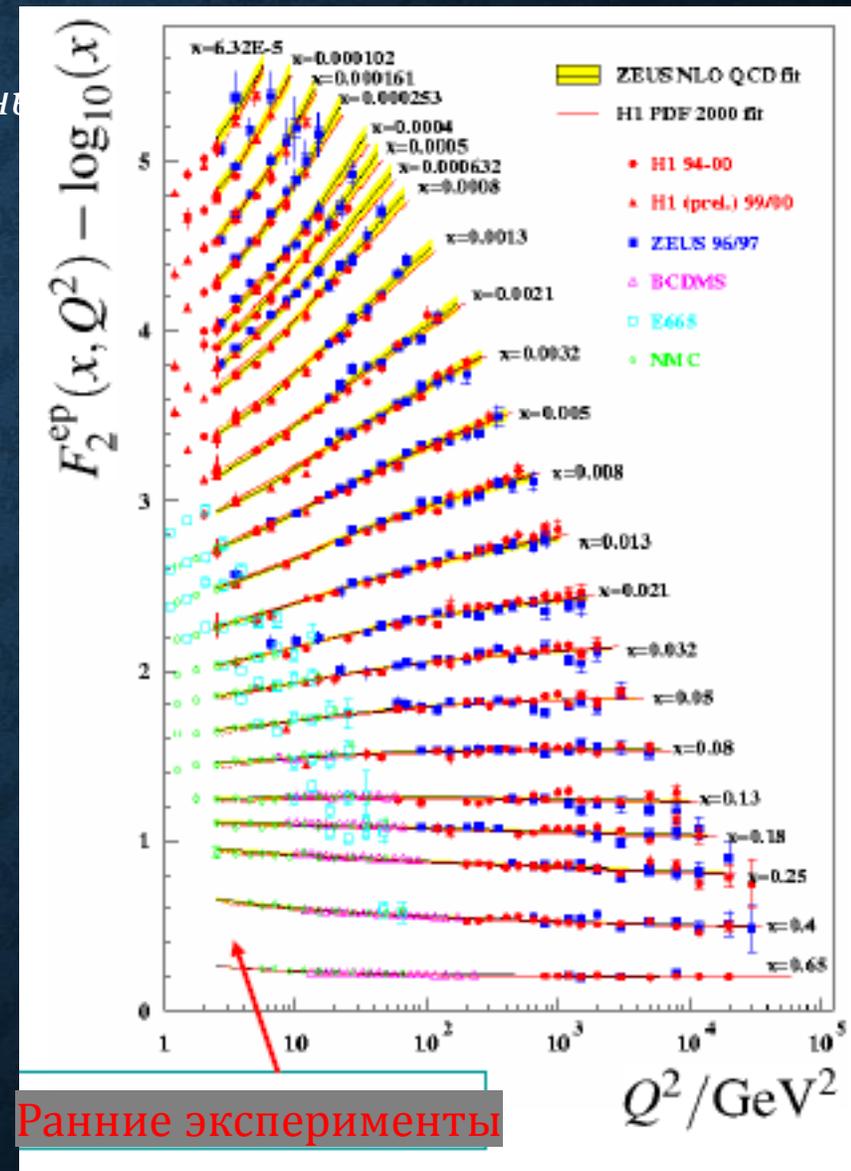
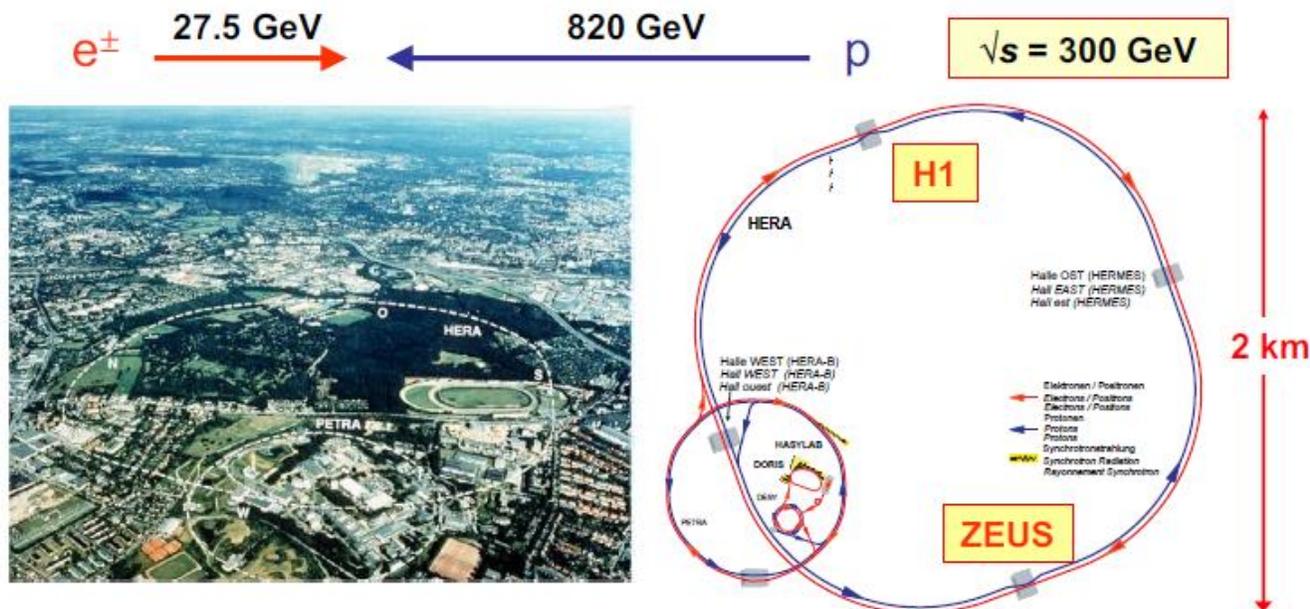
ГЛУБОКО НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ

- При увеличении энергии электрона окажется, что при рассеянии он имеет дело не с чем-то «размазанным», а с точечными частями протона (*валентные кварки*)

$$\frac{d^2\sigma}{dE_3 d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \theta/2} \left[\frac{1}{v} F_2(x, Q^2) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{2}{M} F_1(x, Q^2) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

- Две *структурные функции* для их описания
- Еще более увеличивая энергию, мы увидим *морские кварки*

★ DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) Laboratory, Hamburg, Germany



Ранние эксперименты

ПАРТОННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

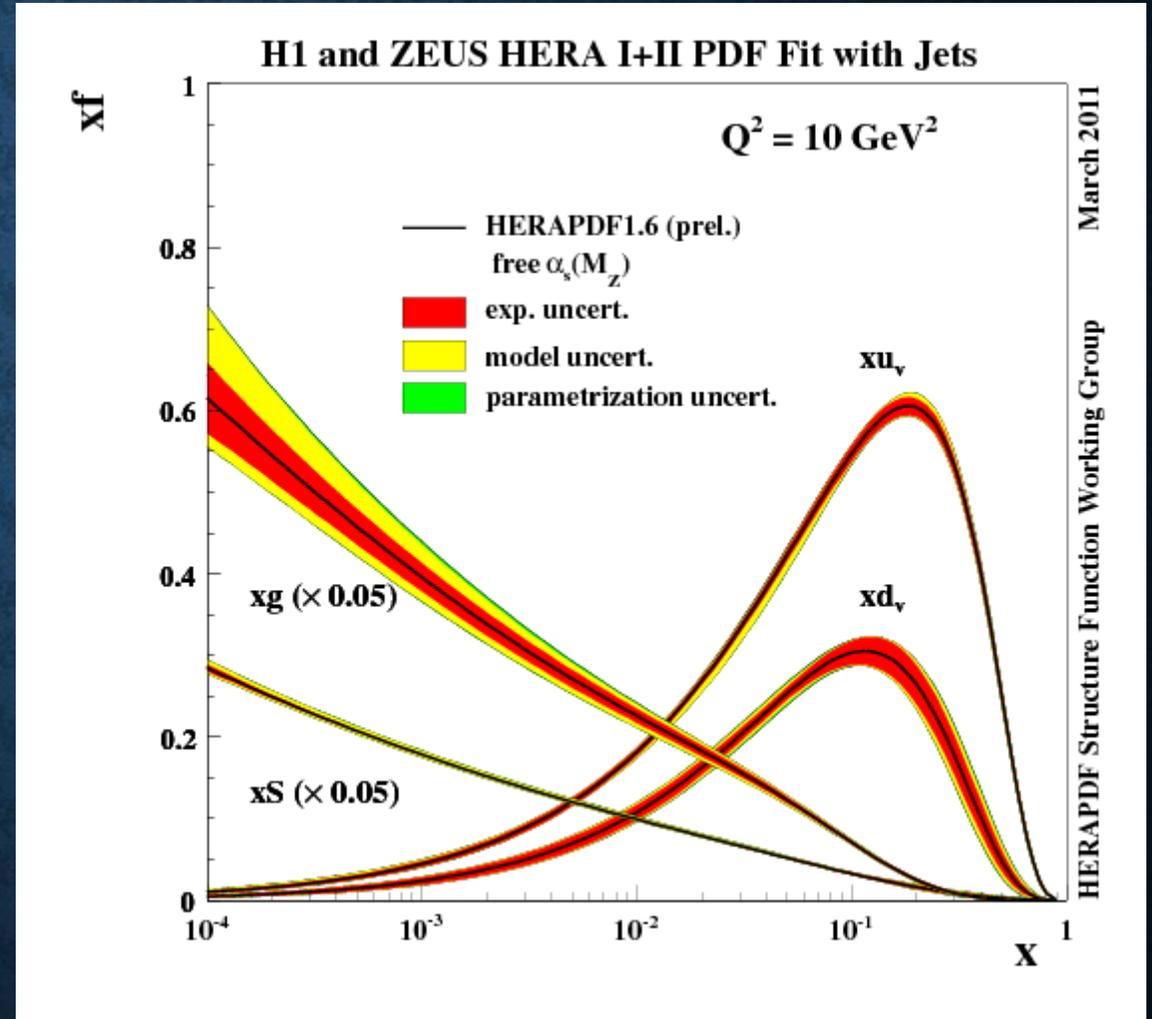
Свойства кварков:

- точечные частицы (как электроны);
- спин = $\frac{1}{2}$;

Протон намного сложнее, чем комбинация $\{uud\}$, они окружены «морем» из кварков и глюонов;

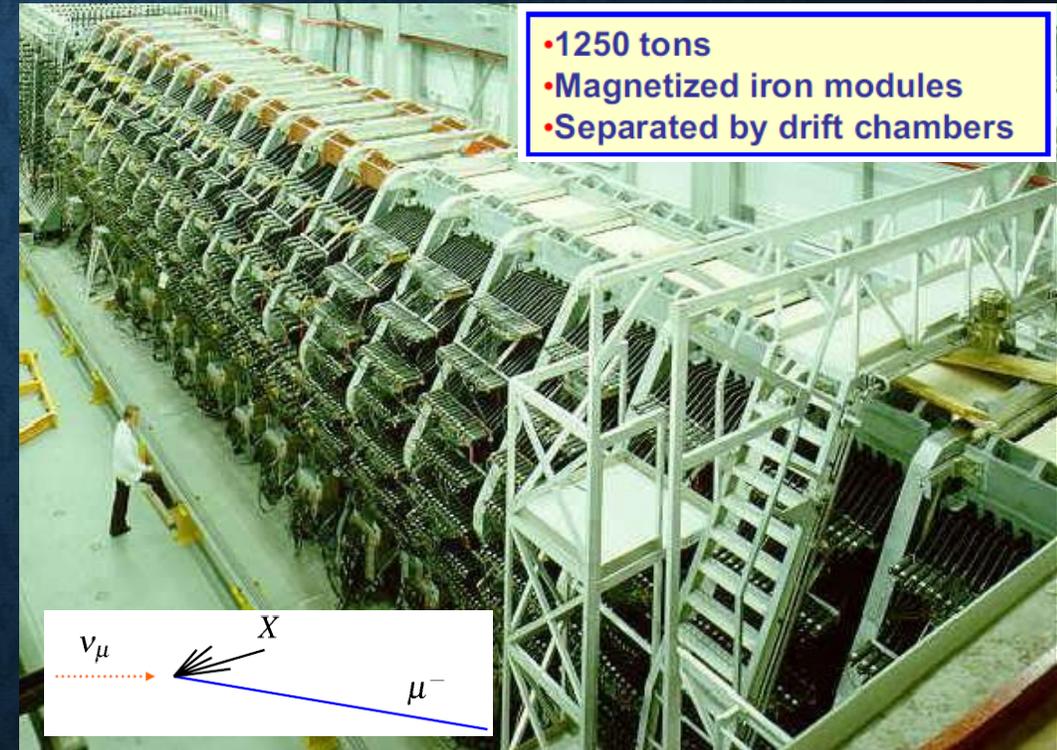
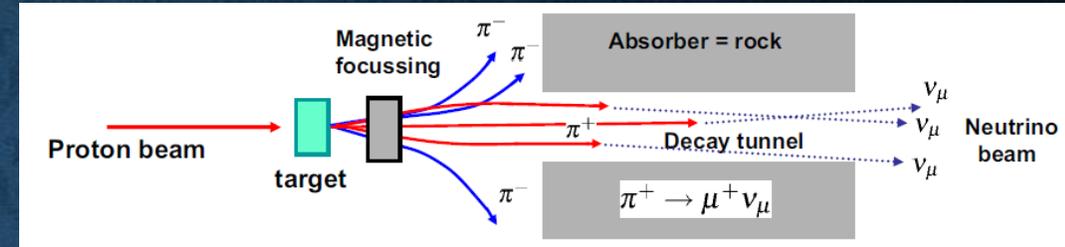
- несут примерно 50% импульса протона (остальное за глюонами).

Партонные распределения: какую долю импульса протона (x) несет партон (кварк или глюон), получающий от электрона импульс Q



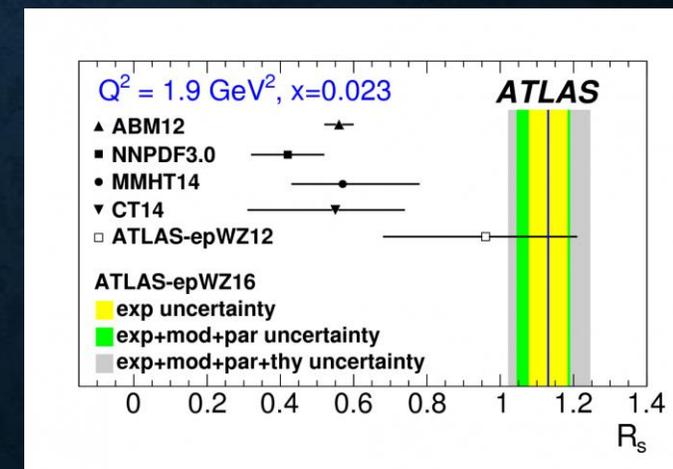
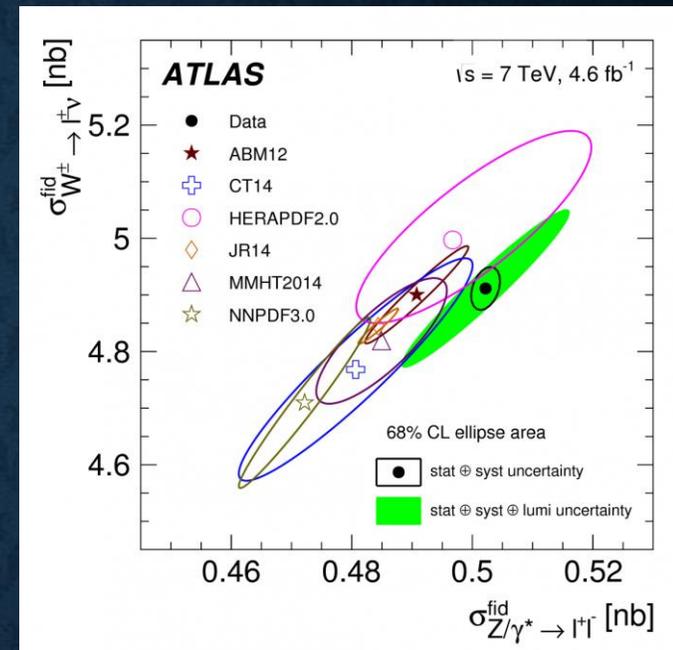
ДРУГИЕ ЧАСТИЦЫ-ПРОБНИКИ: НЕЙТРИНО

- Протоны $\rightarrow \pi^+$ -мезоны \rightarrow мюонное (анти)нейтрино.
- Глубоко неупругое рассеяние нейтрино.
- Нейтрино взаимодействуют с d и u кварками (обмен W^+ с образованием адронов и μ^-), а антинейтрино с u и \bar{d} (обмен W^- с образованием адронов и μ^+).
- Измеренное число валентных кварков 3.0 ± 0.2 .
- Электроны – обмен γ (зависит от заряда)
- Нейтрино – обмен W^\pm (не зависит от заряда).
- Можно извлечь сумму квадратов зарядов кварков.
- Эксперимент CDHS (ЦЕРН 1976-84 гг.).
- Измерение заряда кварка!



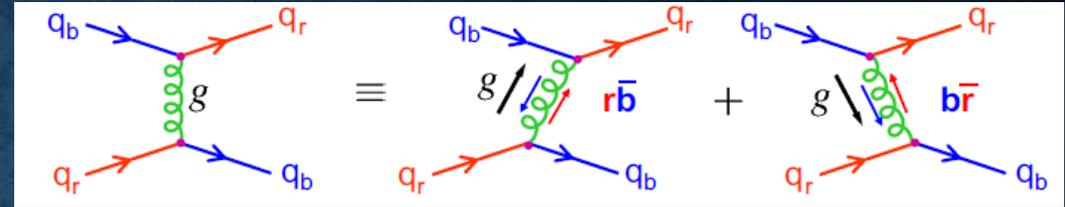
НАСКОЛЬКО ПРОТОН СТРАННАЯ ЧАСТИЦА?

- Частицей-пробником может выступать и сам протон.
- Энергии БАК достаточны, чтобы изучать кварк-глюонное море.
- Каков вклад странных (s -) кварков в это море?
- Масса s -кварка порядка 100 МэВ.
- Сложный анализ. Изучаются редкие «необычные» процессы: рождение тяжелых калибровочных бозонов (W^\pm и Z^0).
- Регистрация «несбалансированного» мюона из $W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ или пика для распада $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- s -кварков (с $x \sim 0,01$) примерно столько же сколько u и d .
- Результаты ν -рассеяния (большие x) соотношение $\sim 1/2$
- <https://atlas.cern/updates/physics-briefing/how-strange-proton>



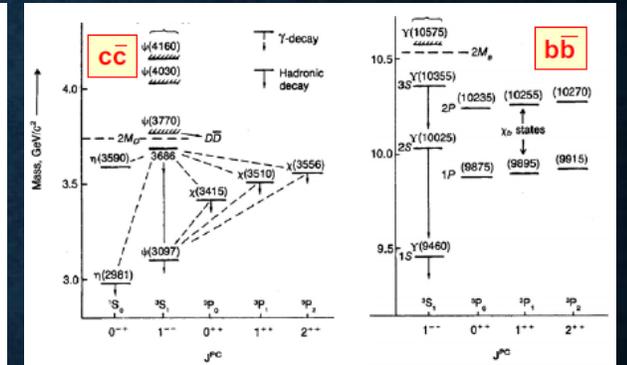
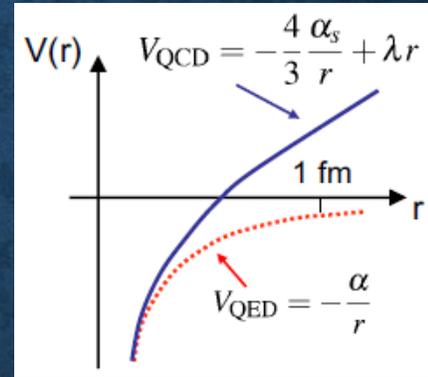
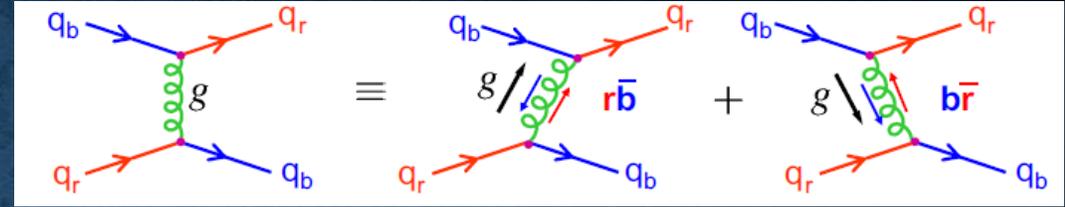
ВРОДЕ ВСЁ ХОРОШО! В ЧЁМ ПРОБЛЕМА?

- Квантовая хромодинамика (КХД) – теория сильного взаимодействия, которое очень сильно зависит от масштаба энергии рассматриваемых процессов. Методы КХД очень хорошо работают при высоких энергиях.



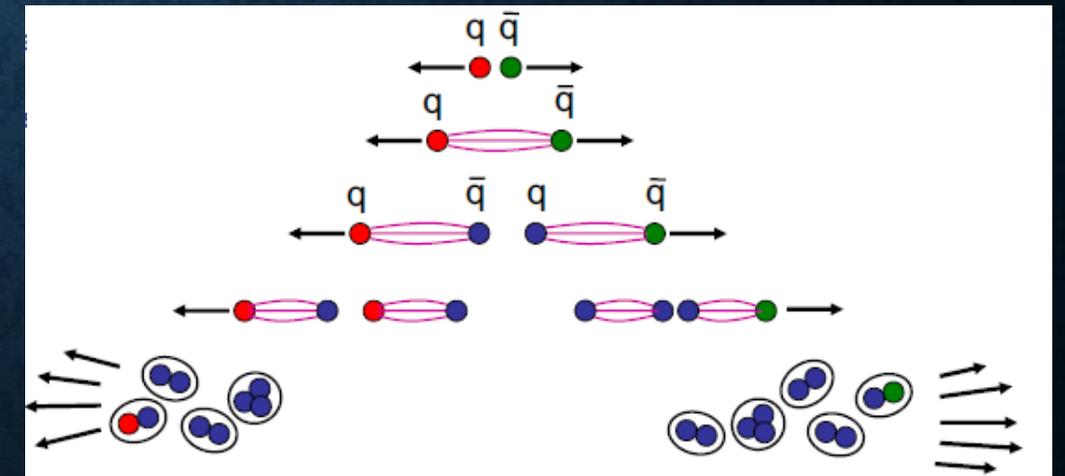
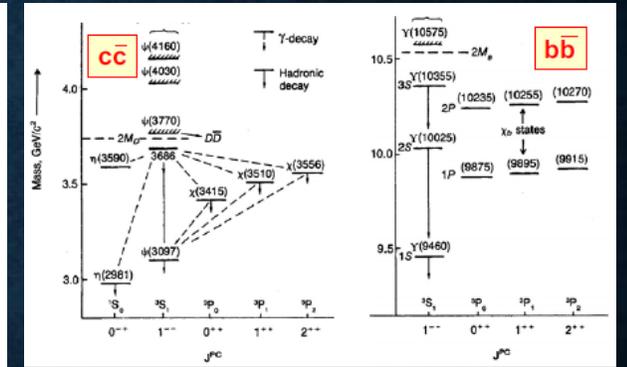
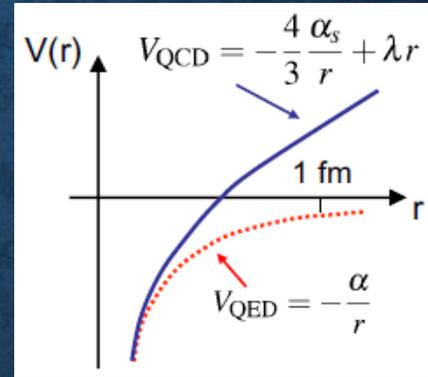
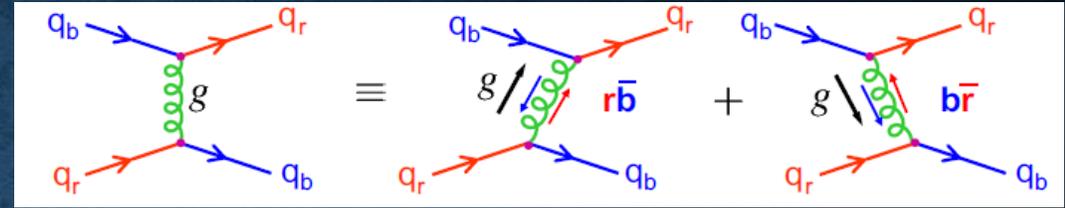
ВРОДЕ ВСЁ ХОРОШО! В ЧЁМ ПРОБЛЕМА?

- Квантовая хромодинамика (КХД) – теория сильного взаимодействия, которое очень сильно зависит от масштаба энергии рассматриваемых процессов. Методы КХД очень хорошо работают при высоких энергиях.
- Явление *асимптотической свободы*. На малых расстояниях (или при высоких энергиях, что, собственно, одно и то же) кварки ведут себя почти как свободные частицы.



ВРОДЕ ВСЁ ХОРОШО! В ЧЁМ ПРОБЛЕМА?

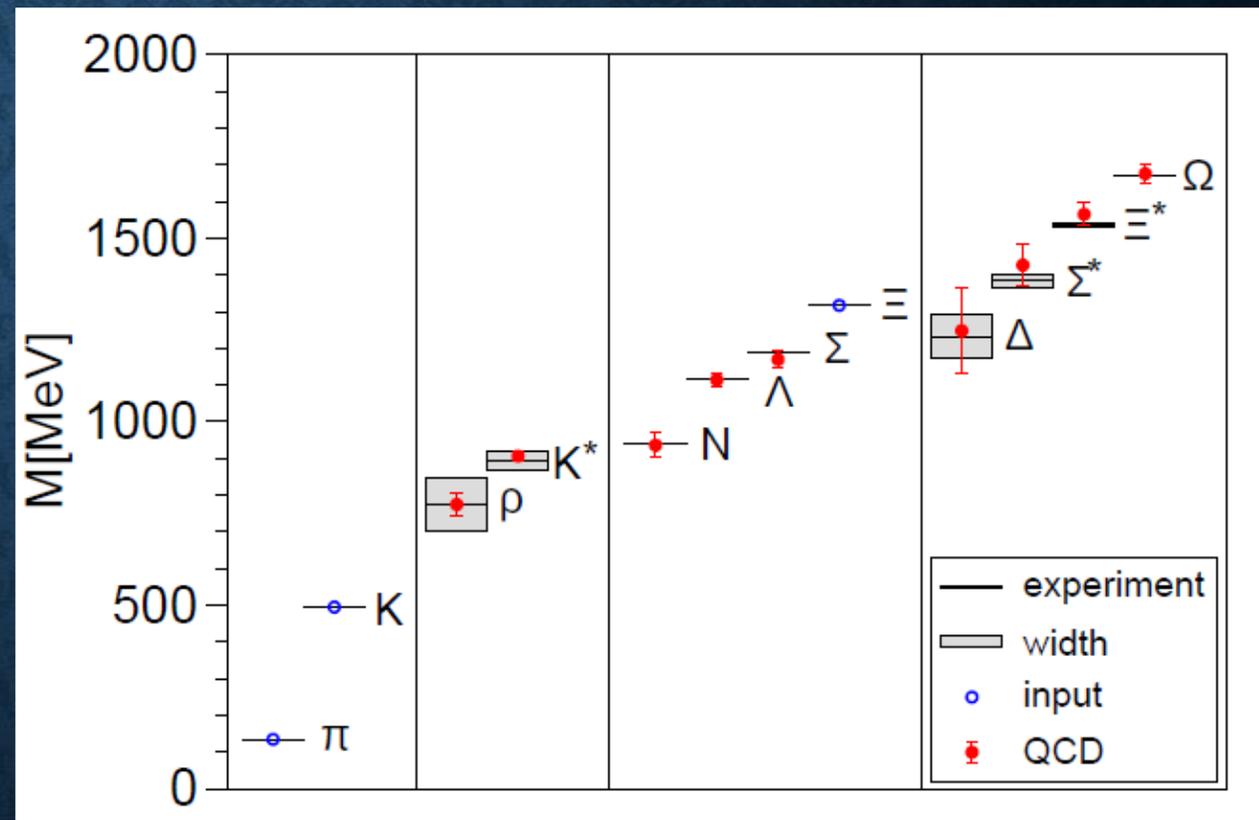
- Квантовая хромодинамика (КХД) – теория сильного взаимодействия, которое очень сильно зависит от масштаба энергии рассматриваемых процессов. Методы КХД очень хорошо работают при высоких энергиях.
- Явление *асимптотической свободы*. На малых расстояниях (или при высоких энергиях, что, собственно, одно и то же) кварки ведут себя почти как свободные частицы.
- *Кварковое пленение (конфайнмент)* подтверждено расчетами решеточной КХД, но математически не доказано. Поиск доказательства — одна из семи «задач тысячелетия».



ЗАГАДКА МАССЫ ПРОТОНА

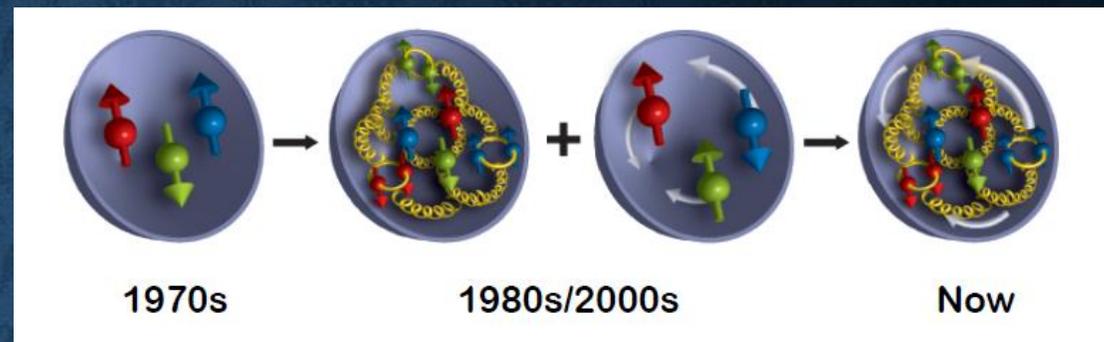
- В области малых энергий КХД – сильно нелинейная теория. Расчеты затруднены.
- Масса протона в 80-100 раз больше масс трёх кварков, какими мы их видим в экспериментах по рассеянию электронов (так называемый *токовый режим*).
- Кварки в нуклоне (*конституентный режим*) одеты в кварк-глюонную «шубу», которая и обеспечивает большую массу протона.
- Существует несколько подходов к расчетам массы адронов.
- Расчеты «КХД на решетках» обеспечивают, пожалуй, лучшую точность, но нуждаются в вводных параметрах.

Очень сложно рассчитать «макропараметры» протона: массу, спин, радиус.

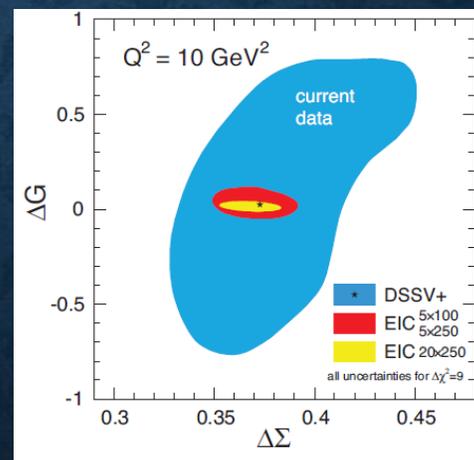


ЗАГАДКА СПИНА ПРОТОНА

- Кварки несут $\sim 30\%$ спина протона (кварковая поляризация, $\Delta\Sigma$). Какова роль глюонов и орбитального движения кварков и глюонов? Как кварки и глюоны распределены в координатном и импульсном пространствах?
- Глюонная поляризация $\Delta G = (0 \pm 20\%)$ имеет большие неопределенности, особенно за счет области малых x .
- Орбитальный угловой момент партонов (L_q и L_g) неизвестен, но может быть измерен (как и глюонная поляризация) на будущем электрон-ионном коллайдере в США (BNL или JLab).
- Первые физические результаты в 2027 году (?)



$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g$$



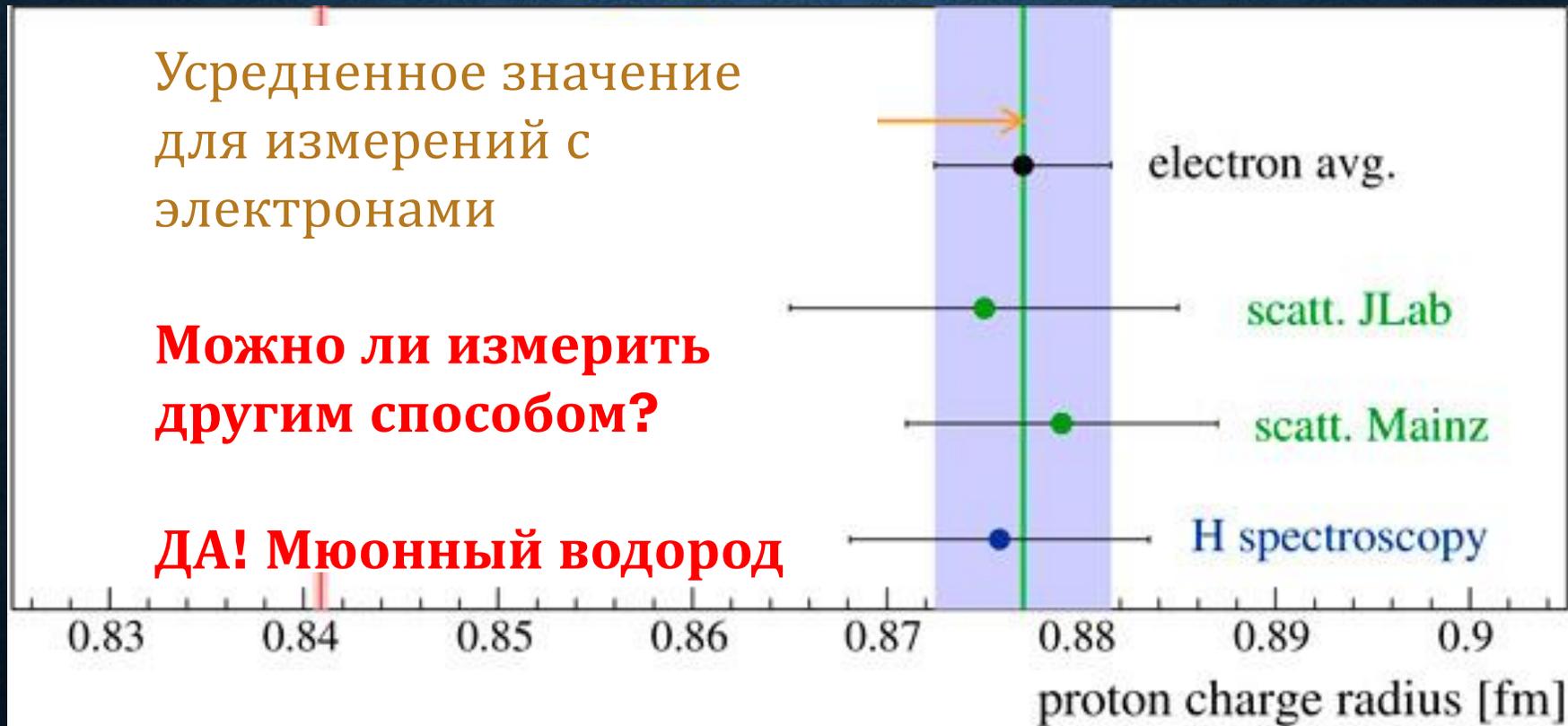
Экспериментаторы надеются на будущем ЭИК на порядок улучшить точность для ΔG

ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО РАДИУСА ПРОТОНА ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОНОВ

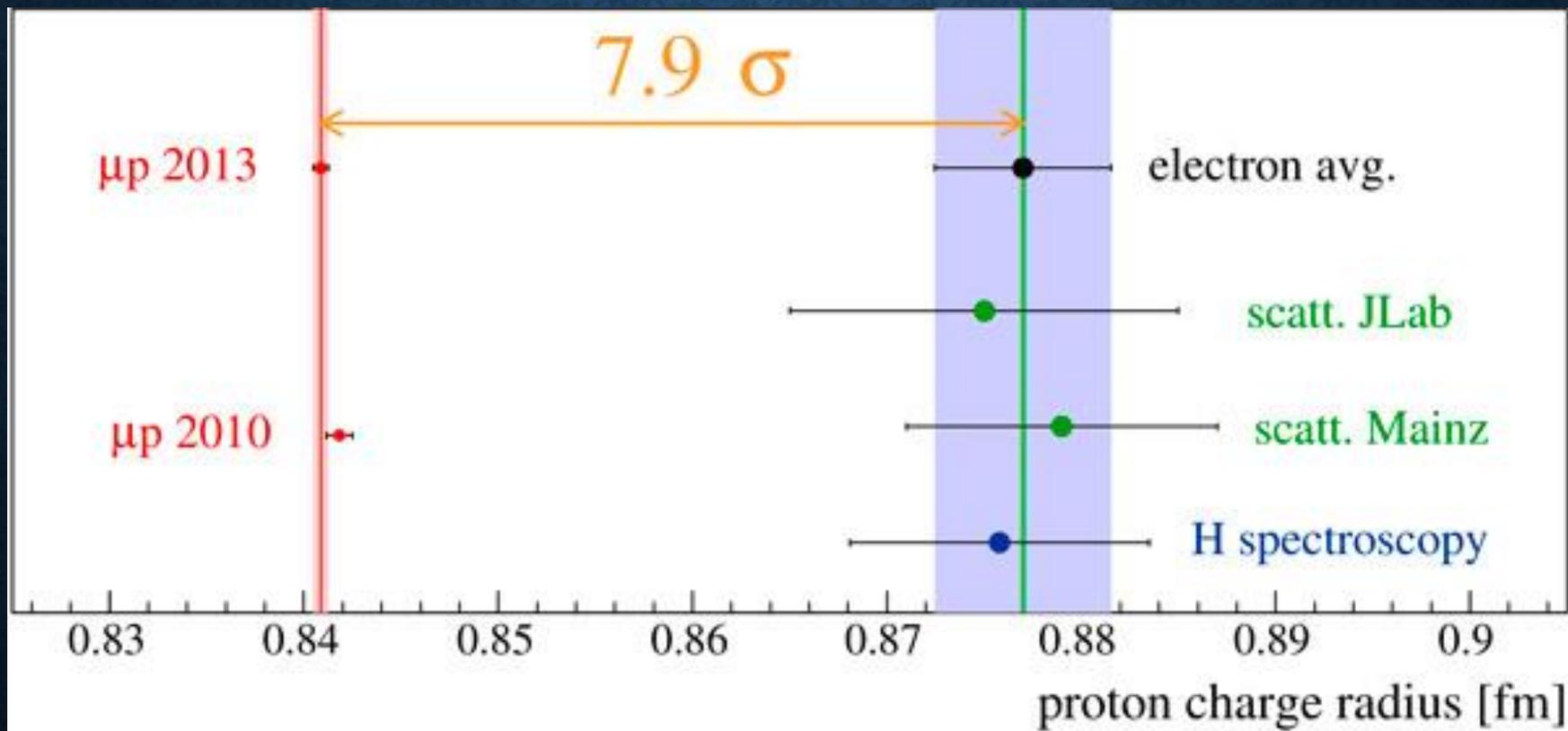
Усредненное значение для измерений с электронами

Можно ли измерить другим способом?

ДА! Мюонный водород

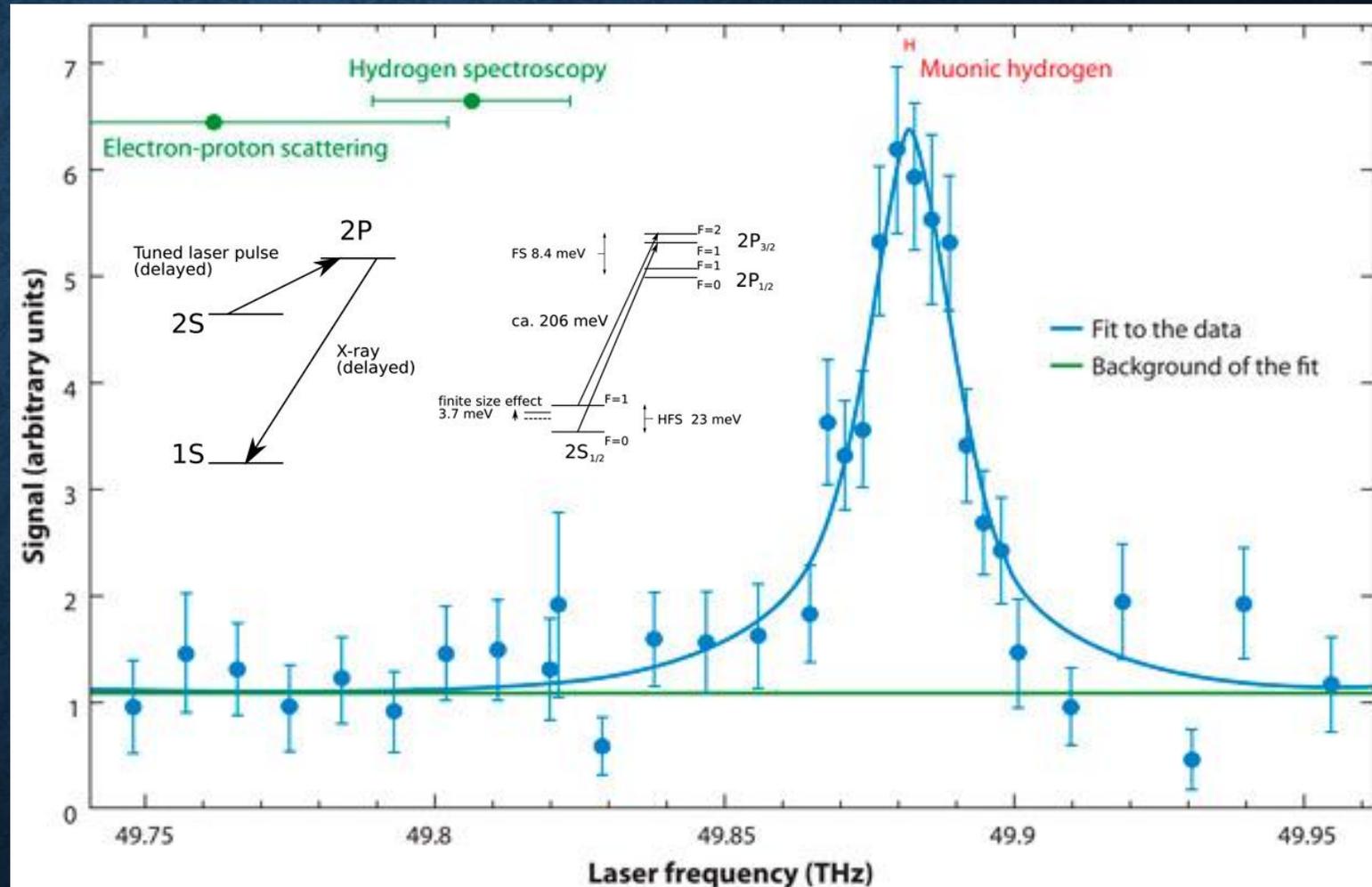


ЗАГАДКА РАДИУСА ПРОТОНА



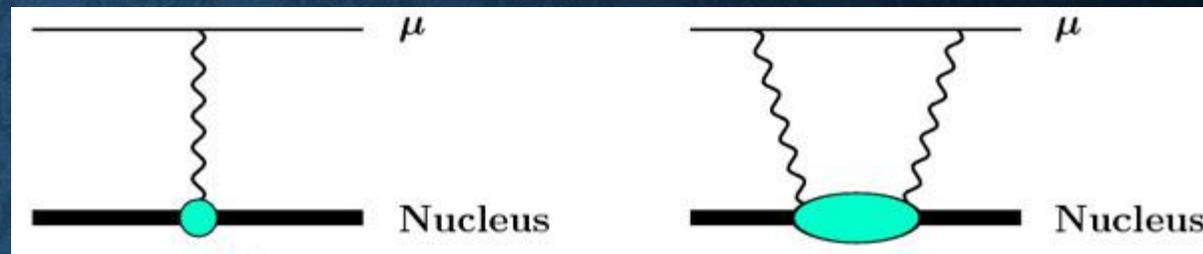
КАК РАБОТАЕТ МЮОННЫЙ МЕТОД

- Мюон намного тяжелее электрона, располагается ближе к ядру и лучше «чувствует» его.
- В PSI научились хорошо получать мюонный водород (поштучно и с высокой частотой).
- После остановки мюона в камере индуцируется $2S \rightarrow 2P$ переход (лазер с f_1)
- Регистрация фотона от перехода $2P \rightarrow 2S$. Резонанс по f_1
- Сначала не могли найти, так как искали при $f_1 = 49,75-49,80$ ТГц !



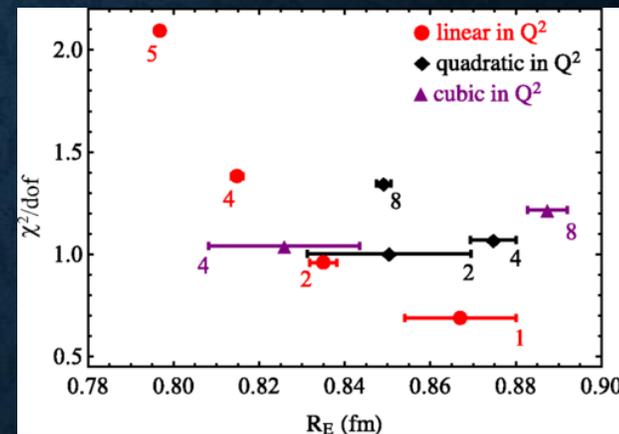
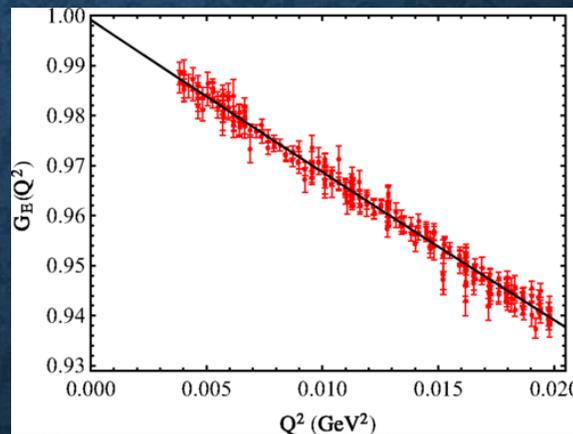
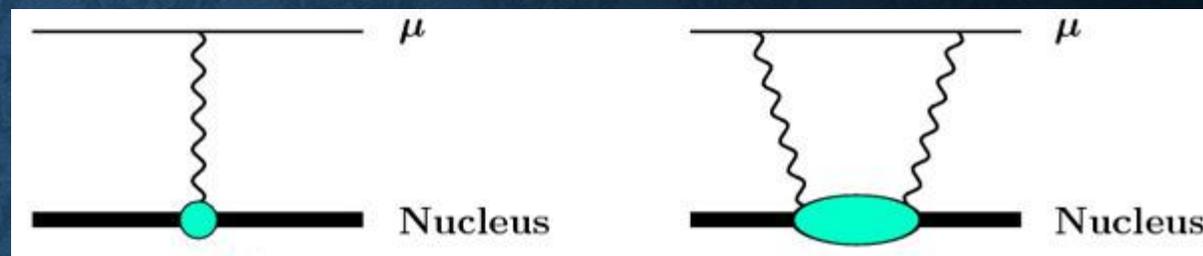
КАК МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ СТОЛЬ СУЩЕСТВЕННОЕ РАСХОЖДЕНИЕ?

- Неправильный теоретический расчет.
Однако неточности, связанные с вкладом обмена двумя фотонами (~10% эффекта)



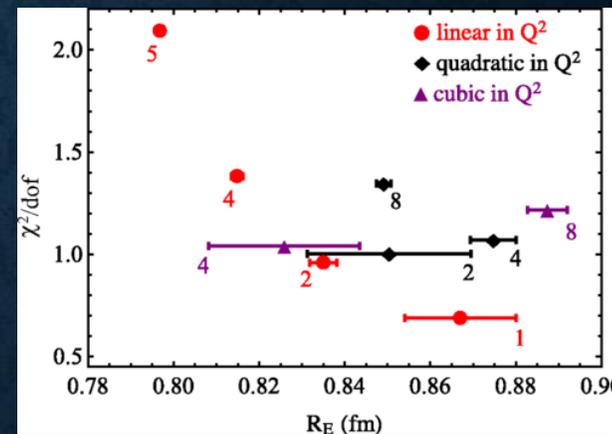
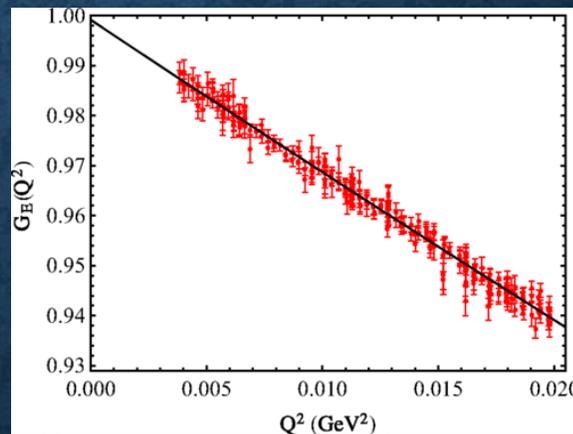
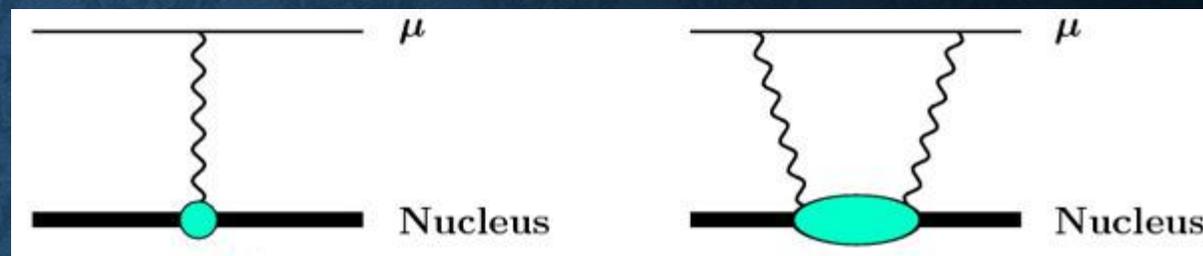
КАК МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ СТОЛЬ СУЩЕСТВЕННОЕ РАСХОЖДЕНИЕ?

- Неправильный теоретический расчет. Однако неточности, связанные с вкладом обмена двумя фотонами (~10% эффекта)
- Найти ошибку в процедуре обработке данных по электрон-протонному рассеянию. Необходимо сделать проверочный эксперимент.



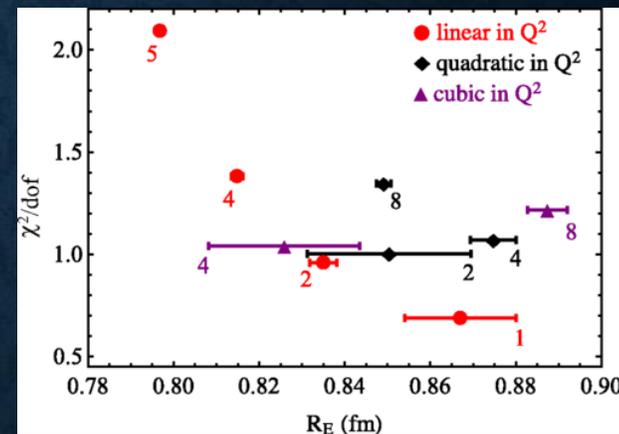
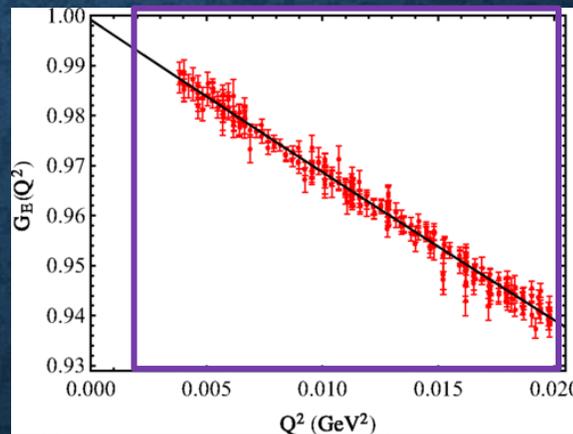
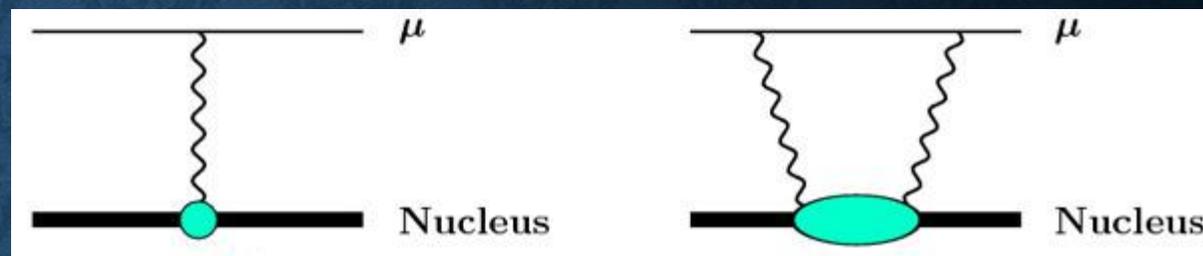
КАК МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ СТОЛЬ СУЩЕСТВЕННОЕ РАСХОЖДЕНИЕ?

- Неправильный теоретический расчет. Однако неточности, связанные с вкладом обмена двумя фотонами (~10% эффекта)
- Найти ошибку в процедуре обработке данных по электрон-протонному рассеянию. Необходимо сделать проверочный эксперимент.
- Новая физика – существование новых неизвестных в Стандартной Модели частиц, которые нарушают лептонную универсальность



КАК МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ СТОЛЬ СУЩЕСТВЕННОЕ РАСХОЖДЕНИЕ?

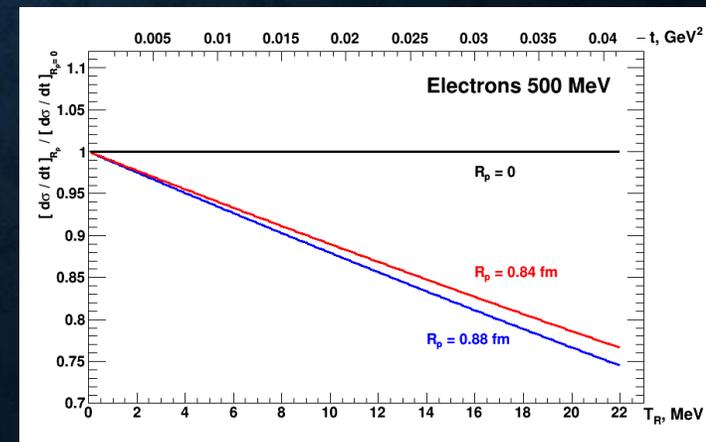
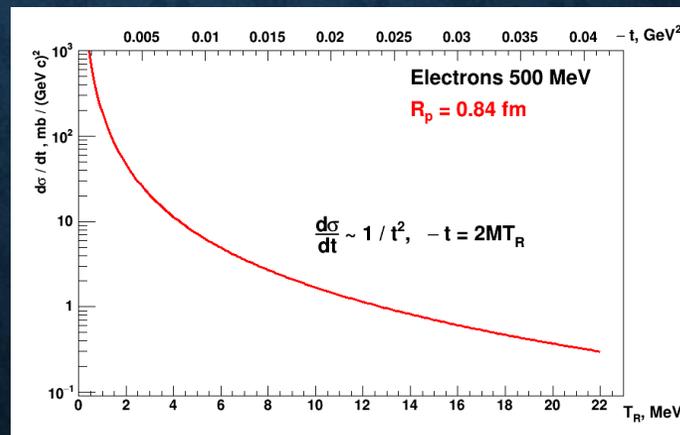
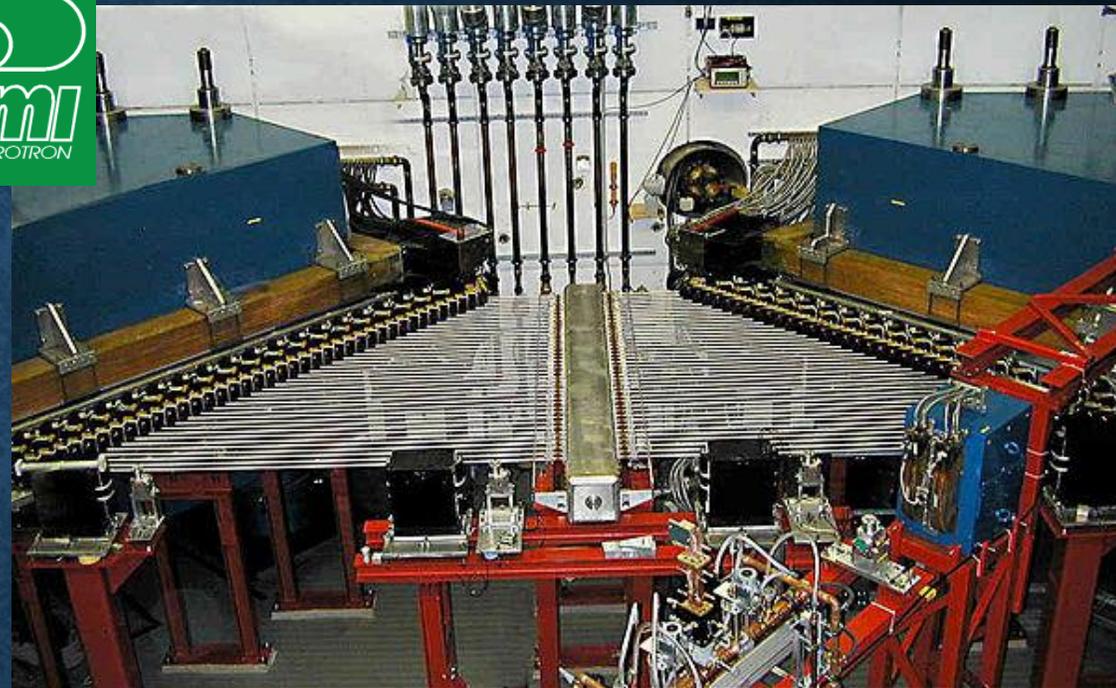
- Неправильный теоретический расчет. Однако неточности, связанные с вкладом обмена двумя фотонами (~10% эффекта)
- Найти ошибку в процедуре обработке данных по электрон-протонному рассеянию. Необходимо сделать проверочный эксперимент.
- Новая физика – существование новых неизвестных в Стандартной Модели частиц, которые нарушают лептонную универсальность



Мы хотим измерить электрон-протонное рассеяние в области малых Q^2 от 0,002 до 0,02 ГэВ² с очень высокой точностью (до 0,1-0,2%)

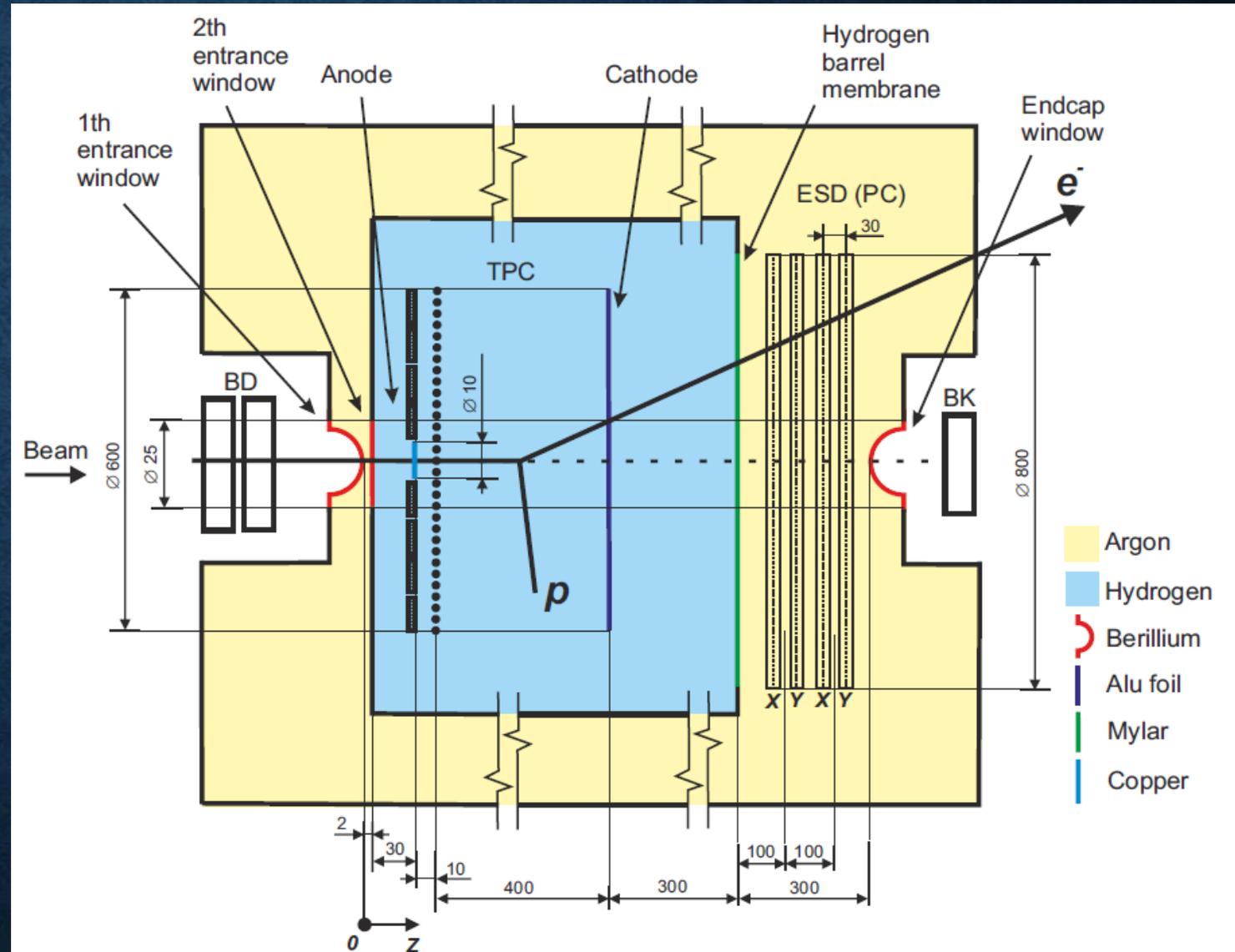
ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ

- Измерения планируются на ускорителе электронов MAMI (Университет Майнца, Германия)
- Энергии электронов: 500 и 720 МэВ
- Частота прихода электронов: 2 МГц
- Технология активной водородной мишени
- Давление в камере: 20 атм.
- Регистрация начального и рассеянного электронов
- Относительные и абсолютные измерения



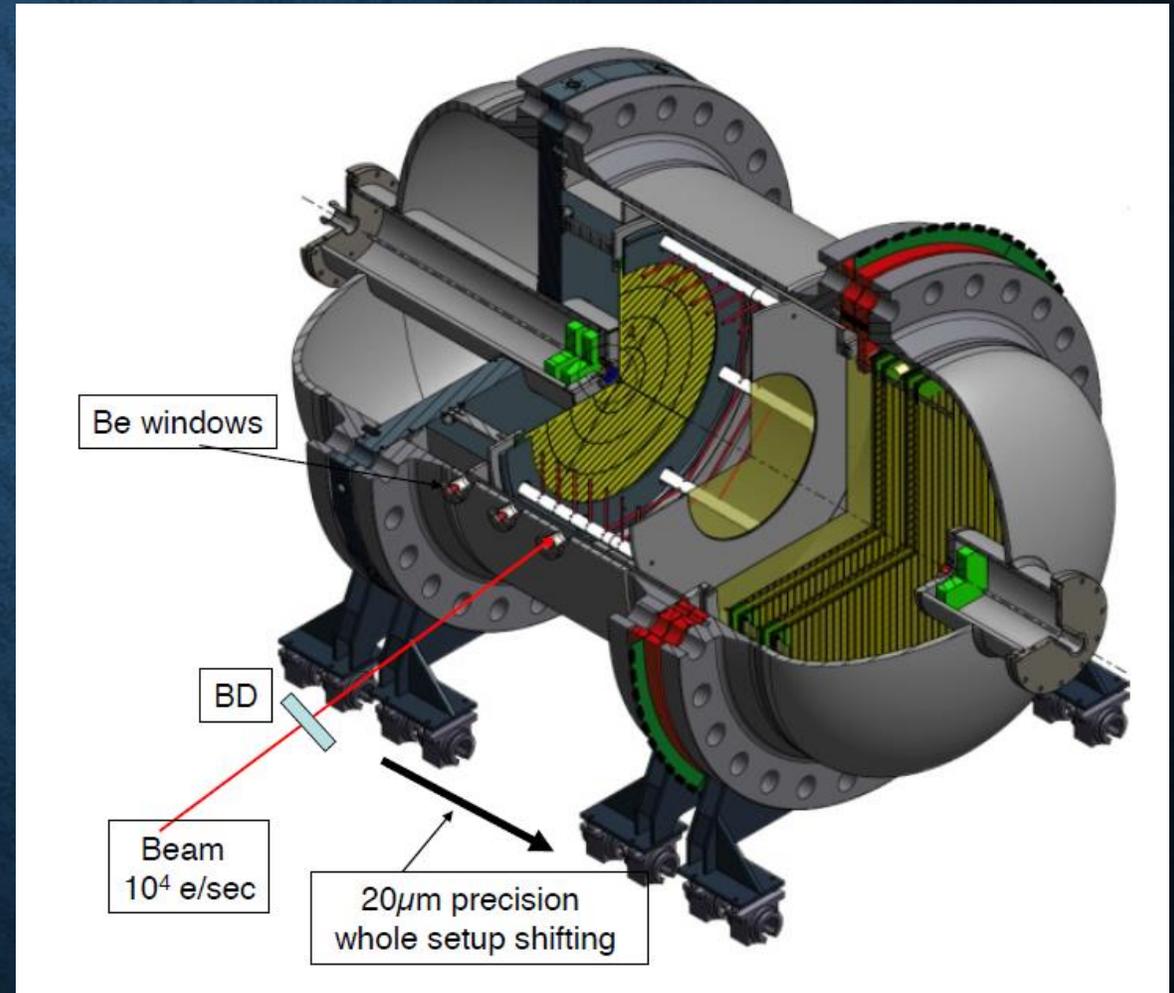
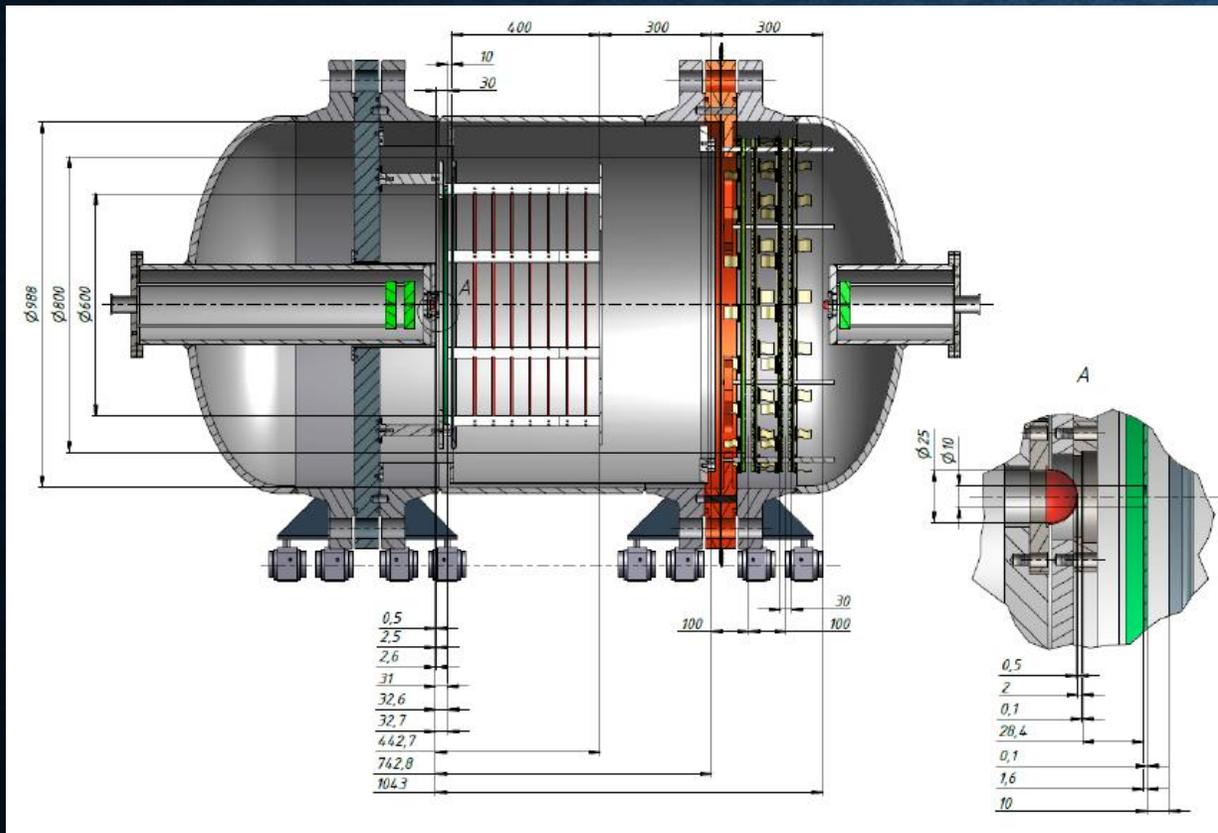
МЕТОД ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННОЙ КАМЕРЫ

- Водородный объем высокого давления (одновременно мишень и детектор).
- Однородное электрическое поле.
- Регистрация амплитуды сигнала на анодах и времени его прихода при известной энергетической, временной калибровке и соответствующих измерениях скорости дрейфа позволит вычислить кинетическую энергию и угол вылета протона.
- Регистрация протонов отдачи – меньшие теоретические погрешности при извлечении сечения (вероятности) упругого рассеяния.
- Регистрация трека рассеянного электрона многопроводочными камерами (ESD) даст понимание какой из ~ 200 входящих электронов рассеялся.

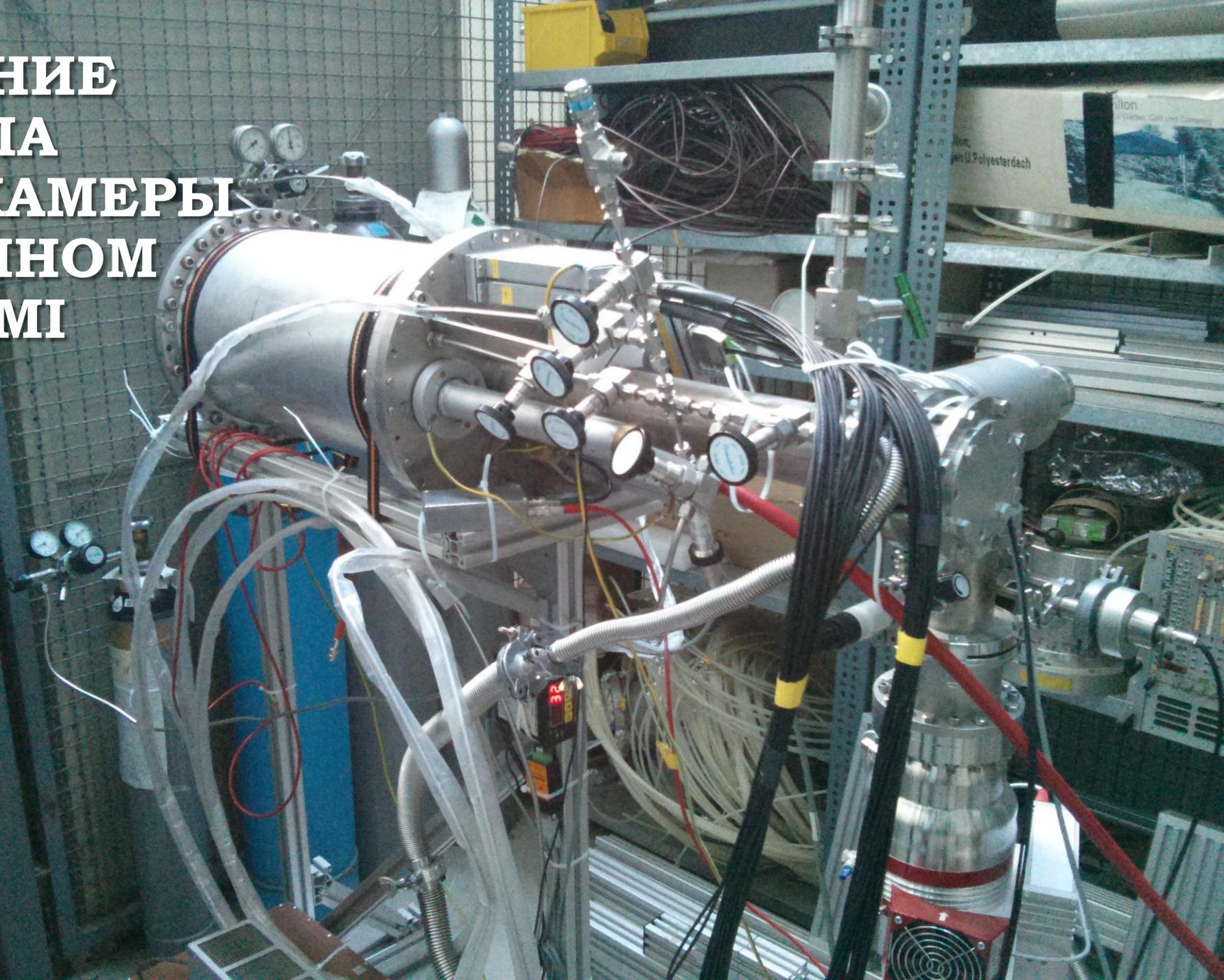


СПЕЦИАЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА СКОРОСТИ ДРЕЙФА

Модель детектора, который сейчас создается в ПИЯФ

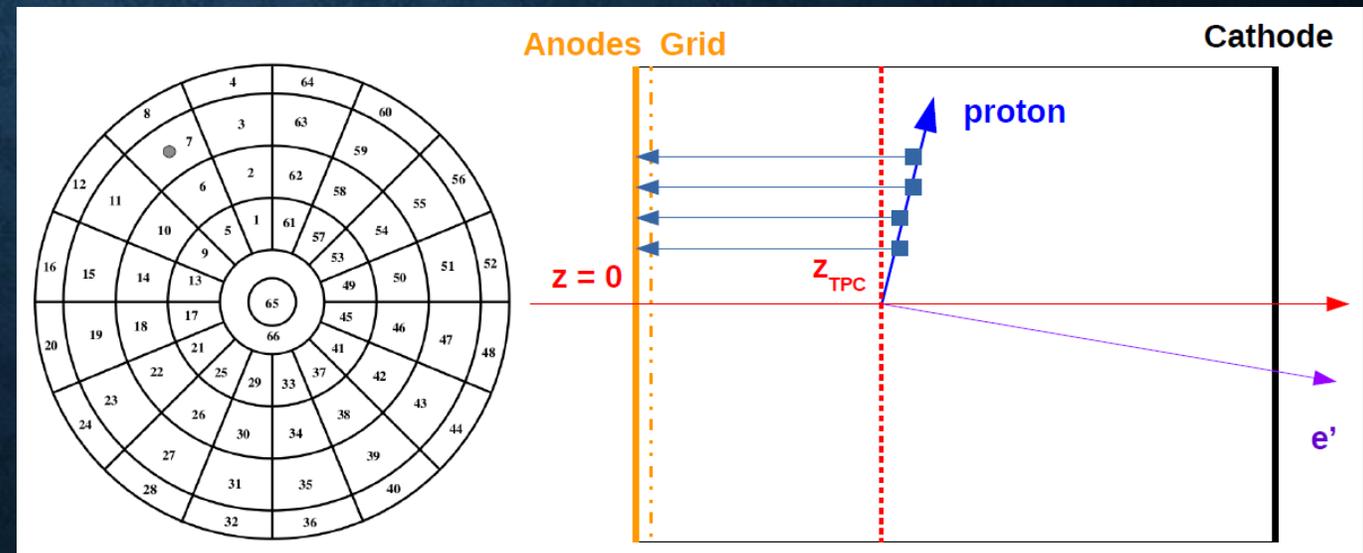
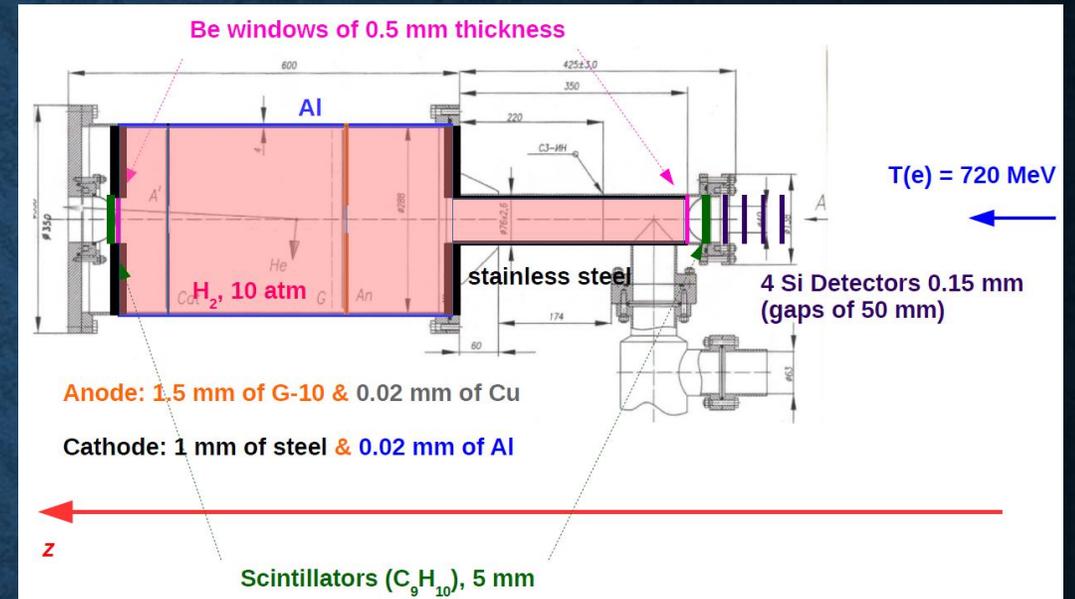


**ТЕСТИРОВАНИЕ
ПРОТОТИПА
ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ
НА ЭЛЕКТРОННОМ
ПУЧКЕ МАМІ**



ТЕСТОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: ЛЕТО 2017 ГОДА

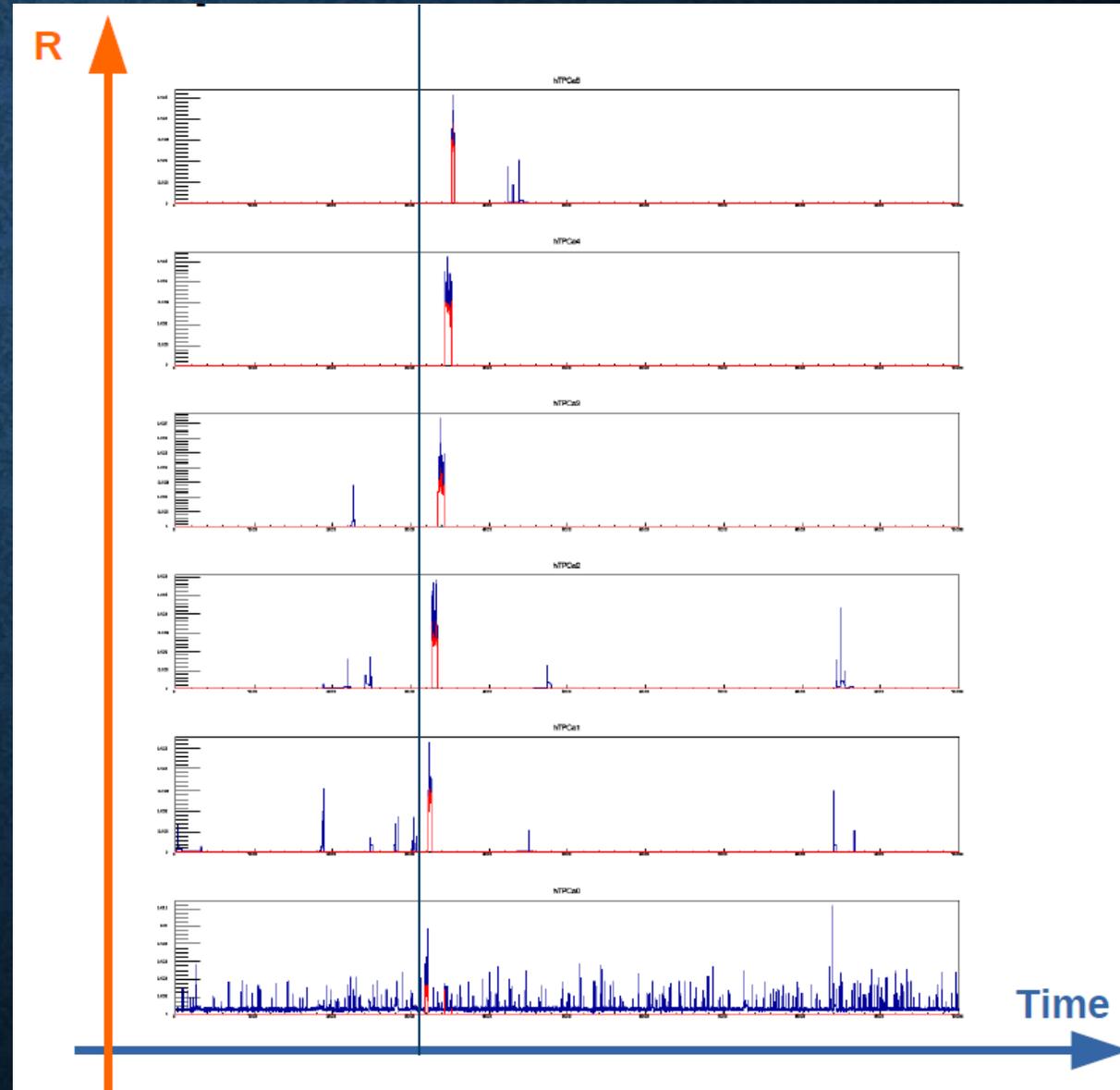
- Детектор строится в ПИЯФ
- Тест уже существующего прототипа детектора (давление 10 атм.) на электронном пучке МАМИ
- Необходимо понять, насколько хорошо мы понимаем фоновые (сопутствующие) процессы
- Компьютерное моделирование установки методом Монте-Карло (программный пакет GEANT4)
- Важно учесть фон от наложений и сопутствующих процессов



ПРИМЕР СПЕКТРА, КОТОРЫЙ МЫ ОЖИДАЕМ ПОЛУЧИТЬ ЭТИМ ЛЕТОМ

- Протон отдачи с энергией 6 МэВ
- Моделируется упругое рассеяние в центре чувствительного объема детектора
- Более корректно описать отклик электроники
- Далее необходимо создать алгоритм распознавания полезных сигналов и подавления фоновых событий
- Проверить расчеты *vs.* Реальность

Надеюсь, у нас всё
получится!



О ЧЁМ Я РАССКАЗАЛ:

- Как, исследуя энергетические уровни атома водорода, можно получить размер его ядра – протона.
- **Что известно о протоне** из экспериментов по рассеянию электронов (нейтрино, протонов...) на нём.
- **Проблемы теоретического описания:** кваркового пленения, массы протона, спина протона.
- **Загадка радиуса протона:** почему протон кажется компактнее, когда его измеряют при помощи мюонов.
- **Наш новый эксперимент** по измерению зарядового радиуса протона в электрон-протонном рассеянии (2017 – 2020 гг.) на ускорителе МАМІ.