

Феноменологічні моделі фізики високих енергій або Вступ до фізики високих енергій

Д.ф.м.н. Евгений Сергеевич Мартынов

Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины

Отдел физики высоких плотностей энергии

Лаборатория грид-вычислений в физике (зав.)

Содержание курса

- I. Введение: предмет и методы ФВЭ, история теоретических взглядов и экспериментов, ЦЕРН, ЛНС, информационно-вычислительная поддержка современных экспериментов ФВЭ, грид-технологии.
- II. Основные свойства частиц и их взаимодействий
- III. Теоретические постулаты современных теорий (моделей) ФВЭ. Калибровочные теории: теория электрослабых взаимодействий, квантовая хромодинамика, стандартная теория. Проблемы и новые идеи.
- IV. Основы теории аналитической S -матрицы, постулаты. Амплитуды, их свойства и связь с наблюдаемыми величинами. Метод комплексных угловых моментов и модель полюсов Редже.
- V. Динамика взаимодействия адронов при высоких и сверхвысоких энергиях. Померон, оддерон в S -матрице и КХД.
- VI. Типы процессов, упругое и неупругое взаимодействие, множественное рождение, инклюзивные процессы. Глубоко-неупругое лептон-адронное рассеяние, партоны, функции распределения партонов.
- VII. Столкновение и взаимодействие релятивистских адронов и ядер. Кварк-глюонная плазма, методы описания и модели.

Теми для самостійної роботи:

Змістовний модуль 1

- Сучасні діючі прискорювачі.
- Прискорювач RHIC.
- Прискорювач LHC.
- Експериментальні детектори ЦЕРНа, ATLAS, CMS, ALICE, LHCб, TOTEM.
- Програми комп'ютерної обробки експериментальних даних (MINUIT, ROOT).
- Спектроскопія адронів.
- Ієрархія законів збереження для різних типів взаємодії.
- $SU-2$ і $SU-3$ симетрія. Фундаментальні представлення.
- Історія моделі кварків

Змістовний модуль 2

- Оператор кутового моменту у квантовій механіці.
- Полюси Редже в квантовій механіці, загальні властивості.
- Полюси Редже в потенційному розсіянні в полі з кулонівським потенціалом.
- Теореми Фруассара і Померанчука для повних перерізів.
- Методи дослідження пружних процесів при високих енергіях.
- Електромагнітна взаємодія точкових частинок зі складеними, формфактори
- Зв'язок фізики високих енергій і космології.

Контрольні запитання:

Змістовний модуль 1

- Типи елементарних частинок, їх квантові числа.
- Типи взаємодії елементарних частинок, їх основні властивості.
- Основні експерименти на прискорювачі LHC.
- Принцип обмінної взаємодії, модель Юкави.
- Ізотопічний спіні, ізотопічні мультиплети.
- Кваркова модель. Квантові числа кварків.
- Кварк-глюонна картина сильної взаємодії.
- Калібрувальна симетрія, калібровочні бозони.
- Асимптотична свобода і конфайнмент.
- Об'єднані моделі взаємодій.
- Класифікація елементарних частинок в стандартній моделі.

Змістовний модуль 2

- Постулати S-матриці, унітарність S-матриці.
- Кінематика пружного розсіяння.
- Повний та диференціальний перерізи. Оптична теорема.
- Парціальні амплітуди і полюси Редже.
- Зв'язок полюсів Редже з резонансами, діаграма Чью-Лоу.
- Перетворення та представлення амплітуди розсіяння
- Інклюзивні процеси, узагальнена оптична теорема.
- Одночастинковий розподіл, скейлінг Фейнмана.
- Електромагнітні формфактори, структурні функції.
- Глибоко непружне розсіяння електронів на протонах.
- Партона модель.
- Кварк-глюонна плазма, методи опису.

Перелік запитань для заліку

1. Експерименти на LHC в ЦЕРНі, детектори і фізичні задачі.
2. Методи обробки і аналізу експериментальних даних, грид.
3. Класифікація елементарних частинок і їх взаємодій.
4. Квантові числа елементарних частинок.
5. Симетрії та закони збереження.
6. Кваркова модель. Квантові числа кварків. Кварк-глюонна картина сильної взаємодії.
7. Калібрувальна симетрія, калібровочні бозони.
8. Теоретико-польові моделі, квантова електродинаміка.
9. Теоретико-польові моделі, теорія електрослабкої взаємодії.
10. Теоретико-польові моделі, квантова хромодинаміка.
11. Стандартна модель і бозон Хігса.

12. S-матриця, основні постулати і властивості.
13. Рівняння унітарності S-матриці.
14. Пружне розсіяння адронів, амплітуда та її властивості.
15. Повний і диференціальний перерізи.

Перелік запитань для заліку

16. Оптична теорема.
17. Парціальна амплітуда, властивості, рівняння унітарності.
18. Границя Фруассара для повних перерізів.
19. Комплексні кутові моменти. Перетворення Зомерфельда-Ватсона.
20. Поліус Редже, основні властивості, діаграма Чью-Лоу.
21. Представлення прицільного параметру. Умова унітарності для прицільної амплітуди.
22. Моделі пружного розсіяння адронів при високих енергіях.
23. Померон і оддерон, моделі і експериментальні дані.
24. Інклюзивні процеси, кінематичні змінні, перерізи.
25. Основні процеси множинного народження адронів.
26. Електромагнітні формфактори.
27. Глибоко непружне розсіяння лептонів і адронів, зв'язок з кварками.
28. Поліуси Редже в теорії глибоко непружного розсіяння.
29. Структурні функції, розподілення кварків в адроні.
30. Зіткнення релятивістських ядер, кварк-глюонна плазма.

Рекомендована література

Основна:

D. Perkins, Introduction to high energy physics. IV edition, 2000.

Д. Перкинс, Введение в физику высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Л.Б. Окунь, **Физика элементарных частиц**, М.: Наука, 1988.

О.І Ахієзер, М.П. Рекало, **Фізика елементарних частинок**, Наукова думка, 1978.

К. Нишиджима, **Фундаментальные частицы**. М.: Мир, 1965.

Додаткова:

F. Halzen, A. Martin, QUARKS AND LEPTONS: An Introductory Course in Modern Particle Physics, JOHN WILEY & SONS, 1984

V. Barone, E. Predazzi, High Energy Particle Diffraction, Springer, 2001.

S.Donnachie et al., Pomeron & QCD. Cambridge University Press, 2002.

Физика микромира (маленькая энциклопедия),

под ред. Д.В. Ширкова, М.: Советская энциклопедия, 1980.

Інтернет-джерела:

Википедия, <http://ru.wikipedia.org/wiki/Портал:Физика>, разделы: Квантовая механика, Квантовая теория поля, Ядерная физика, Физика элементарных частиц,

Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_physics.

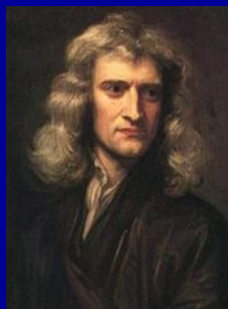
Лекція 1

Історія теорії і експериментів в фізиці елементарних частинок



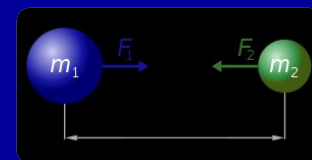
Демокрит:

«Все, что вокруг нас, состоит из атомов» (IV в. д.н.э.)



И. Ньютон: закон всемирного тяготения (1666)

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$$



Ш. Кулон: закон взаимодействия зарядов (1780-е)

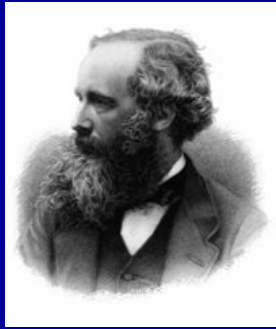
$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

СГСЭ $k = 1$
 СИ $k = \frac{1}{\epsilon_0} = 8,9875517873681764 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$



М. Фарадей : электрическое поле, магнитное поле (1830-е)

$$\vec{E}, \vec{H}$$



Дж. К. Максвелл: уравнения электрического и магнитного полей (1864)

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} \equiv \text{rot} \mathbf{A} (= \varepsilon_{ikl} \frac{\partial}{\partial x_k} A^l), \quad \nabla \cdot \mathbf{B} \equiv \text{div} \mathbf{B} = \frac{\partial}{\partial x_i} B^i$$

Уравнения Максвелла в ковариантной форме (в вакууме)

$$\partial_\alpha F^{\alpha\beta} = \frac{4\pi}{c} j^\beta$$

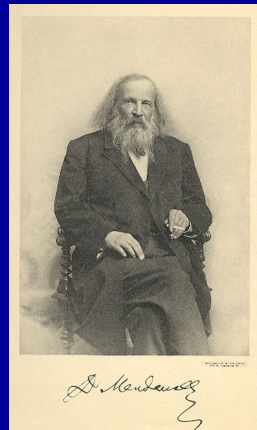
$$j^\alpha = (c\rho, \mathbf{j})$$

$$F^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z \\ E_x & 0 & -B_z & B_y \\ E_y & B_z & 0 & B_x \\ E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}$$

$$\partial_\alpha \equiv \frac{\partial}{\partial x_\alpha} = \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right)$$

$$\partial_\alpha F_{\beta\gamma} + \partial_\beta F_{\gamma\alpha} + \partial_\gamma F_{\alpha\beta} = 0$$

Д.И. Менделеев: периодическая система элементов (1869)



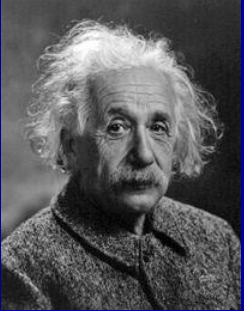


Ж. Перрен: элементарный заряд (1895),
Дж. Дж. Томсон: катодные лучи, электрон (1897),
Нобелевская премия - 1906

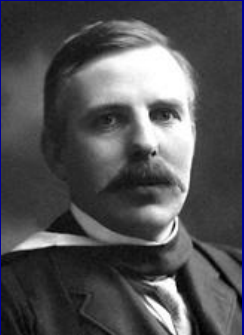


М. Планк: квантовая природа излучения (1900)
Нобелевская премия - 1918

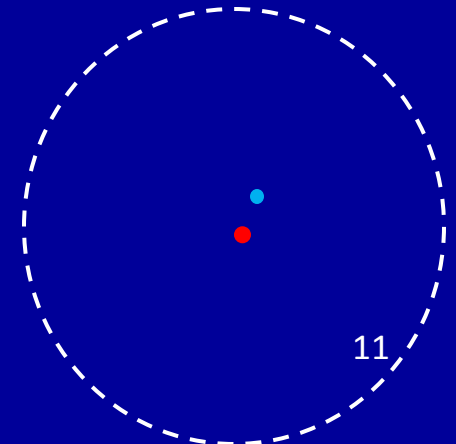
$$E = h\nu$$



А. Эйнштейн: фотоэффект, γ -квант, фотон,
специальная теория относительности (1905)
Нобелевская премия - 1921



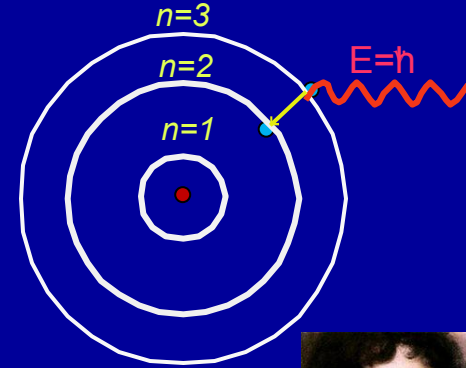
Э. Резерфорд: атом, протон (1911)
Нобелевская премия по химии - 1908





Н. Бор: квантовая модель атома водорода (1913)
Нобелевская премия - 1922

$$E_n = -\frac{ke^2m_e}{2h^2n^2} = \frac{-13.6\text{eV}}{n^2}$$

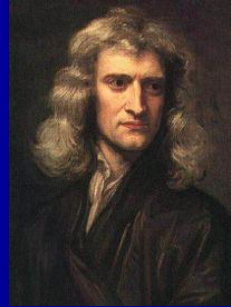


Л. де Бройль: частица \approx волна (1924)
Нобелевская премия - 1929

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0v}$$

Х. Гюйгенс: волновая теория света (1678)

И. Ньютон: корпускулярная теория света (1704)



В. Гейзенберг, Е. Шредингер

Нобелевские премии – 1932, 1933:

квантовая механика

Уравнение Шредингера (1925),

принцип неопределенности (1927)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi$$

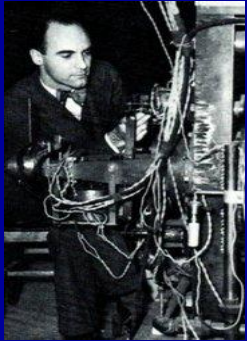
$$\Delta p\Delta x \geq \hbar / 2$$



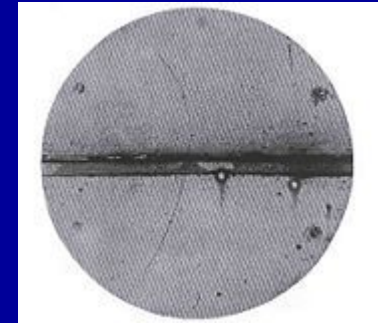


П. Дирак: уравнение Дирака, частицы и античастицы (1928, Нобелевская премия -1933)

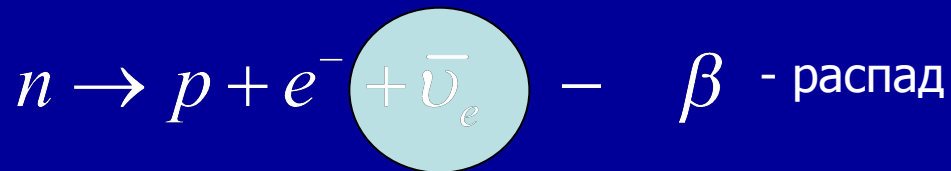
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0, \quad \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu} \quad (\hbar = c = 1)$$



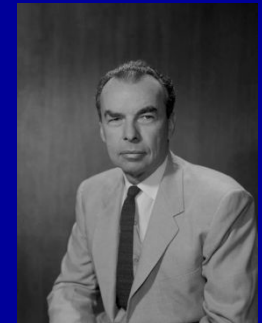
К. Андерсен: экспериментальное открытие позитрона (1932) Нобелевская премия - 1936



Д. Чедвик: открытие нейтрона (1932) Нобелевская премия - 1935



Время жизни нейтрона - 885.7 ± 0.8 с.



Брюс Корк (1956)
антинейтрон



В. Паули
Н.п. -1945

На Сольвеевском Конгрессе в 1933 г. В Брюсселе **В. Паули** выступил с рефератом о механизме β -распада с участием лёгкой нейтральной частицы со спином $1/2$, в котором, со ссылкой на предложение **Э. Ферми**, назвал гипотетическую частицу «нейтрино», («нейтрончик»). Это выступление было фактически первой официальной «публикацией», посвящённой нейтрино.



Э. Ферми
Н.п. - 1938

Экспериментально нейтрино было открыто только в 1957 г. (Ф.Райнесс)
Нобелевская премия - 1995

$$\Sigma m_\nu < 0.28 \text{eV}$$



Х. Юкава: предсказание новой частицы (1935).
Нобелевская премия - 1949

$$V = -g^2 \frac{e^{-r/r_0}}{r}, r_0 \propto 1/m,$$

В 1936 г. К. Андерсен открыл частицу с массой $207m_e$ (мю-мезон)
– это не мезон Юкавы



С. Пауэл (1947)
Н.п. - 1950

m – масса π - мезона (139 МэВ)

Д. Рочестер, К. Батлер (1947) – открытие каонов или К-мезонов со странными свойствами - они рождались только в паре с другими странными частицам.

Новое квантовое число – **странность** (Гелл-Манн, Нишиджима, 1953)

Открытие странных гиперонов $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ (тяжелее протона) - 50-60-е

Позднее, в 50-х годах, а особенно в 60-х, было открыто множество новых частиц с самыми разнообразными свойствами.

Большинство из них – сильновзаимодействующие (адроны), нестабильные, с временем распада $\sim 10^{-23}$ сек. Они получили название **резонансов**.

Все они считались элементарными частицами. Всего известно стабильных и нестабильных частиц более 350!!!

Физики стали искать более фундаментальные частицы, из которых составлены эти «элементарные» частицы.

Модель Сакаты – все адроны составлены из p, n, λ

**Симметрии → законы сохранения → теория групп
→ мультиплеты, систематика адронов (спектроскопия)**



М. Гелл-Манн: все адроны состоят из кварков и антикварков (1964). Нобелевская премия - 1969

Кварки имеют дробный заряд, они различаются особыми квантовыми числами (свойствами), которые получили названия **запах** и **цвет**.

Запах: верхний (up, **u**-quark),
нижний (down, **d**-quark),
странный (strange, **s**-quark)

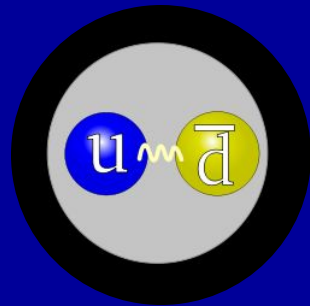
Цвет: **красный**, **зеленый**, **синий**

Из теории следовало существование еще нескольких типов кварков, еще нескольких запахов,

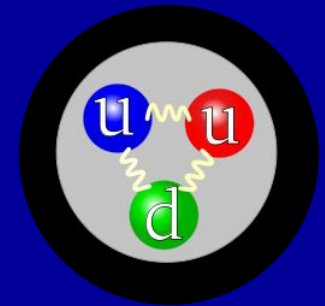
очарованный (charm, **c**-quark),
красивый (beauty, **b**-quark),
истинный (truth (top), **t**-quark)

Все кварки имеют дробный заряд

Бозоны
(с целым спином)
состоят из
кварка и антикварка



Фермионы
(с полуцелым спином)
состоят из трех кварков





В результате серии экспериментов группа физиков под руководством **Р. Хофштадтера** (Стентфорд) установила, что протон в некоторых процессах ведет себя так, как будто он составлен из множества мелких частичек, которые получили название **партоны** (от part – часть) (Нобелевская премия - 1961).



В 1974 г. в двух экспериментах (**С. Тинг** и **Б. Рихтер**) были открыты мезоны, состоящие из пары кварк-антикварк, c и \bar{c} . В одном эксперименте их назвали J -частицами, в другом - ψ -частицами. Сейчас – J/ψ . Нобелевская премия -1976



b -quark был открыт в 1977 г. в американской лаборатории FermiLab (эксперимент E288, **Л. Ледерман** и др. Нобелевская премия - 1988).

t -quark был открыт в 1995 г. в экспериментах на коллайдере Теватрон ($p + \bar{p}$) в американской лаборатории FermiLab коллаборациями CDF и DØ.
CDF – коллаборация, около 600 человек.



Элементарные частицы проявляют себя, взаимодействуя друг с другом.

Как взаимодействуют частицы?

Электроны (заряженные частицы) взаимодействуют, обмениваясь фотонами



Р. Фейнман



С. Томонага



Ю. Швингер

Теория электромагнитного взаимодействия:
квантовая электродинамика (Нобелевская премия -1965)

Общий принцип:

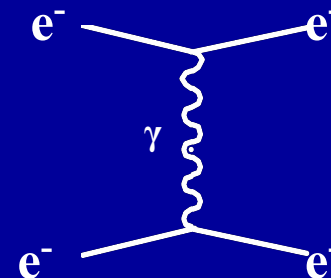
всякое взаимодействие носит обменный характер.

Для каждого типа взаимодействия есть

частицы - объекты взаимодействия

и есть

частицы - переносчики взаимодействия



Четыре типа фундаментальных взаимодействий



Гравитационное

(все частицы)

Электромагнитное

(все заряженные частицы)

Слабое

(лептоны, мезоны, барионы)

Сильное

(барионы, мезоны)

Барионы (полуцелый спин) + мезоны (целый спин) = адроны
участвуют в сильных взаимодействиях

$$\text{Электромагнитные силы} : \frac{1}{r} \quad \text{Сильные силы} : \frac{1}{r} e^{-r/r_0} \quad r_0 \approx 10^{-13} \text{ cm}$$

известно несколько сотен адронов

Элементарные (?) частицы

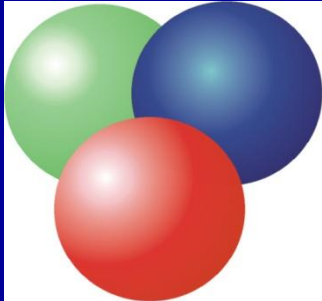
Фундаментальные частицы – кварки и лептоны

лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях



**Все сильновзаимодействующие частицы
(протон, нейтрон, пи-мезоны, К-мезоны, ...)
состоят из кварков**

**Барионы состоят из
трех кварков**



**Кварки взаимодействуют,
обмениваясь глюонами**

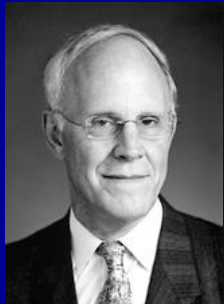
**Мезоны состоят из пары
кварк-антикварк**



**Теория взаимодействия кварков и глюонов –
квантовая хромодинамика**

Электрический заряд кварков кратен $1/3$ заряда электрона

Асимптотическая свобода (чем меньше расстояние, тем слабее взаимодействие)



Д. Гросс



Д. Политцер



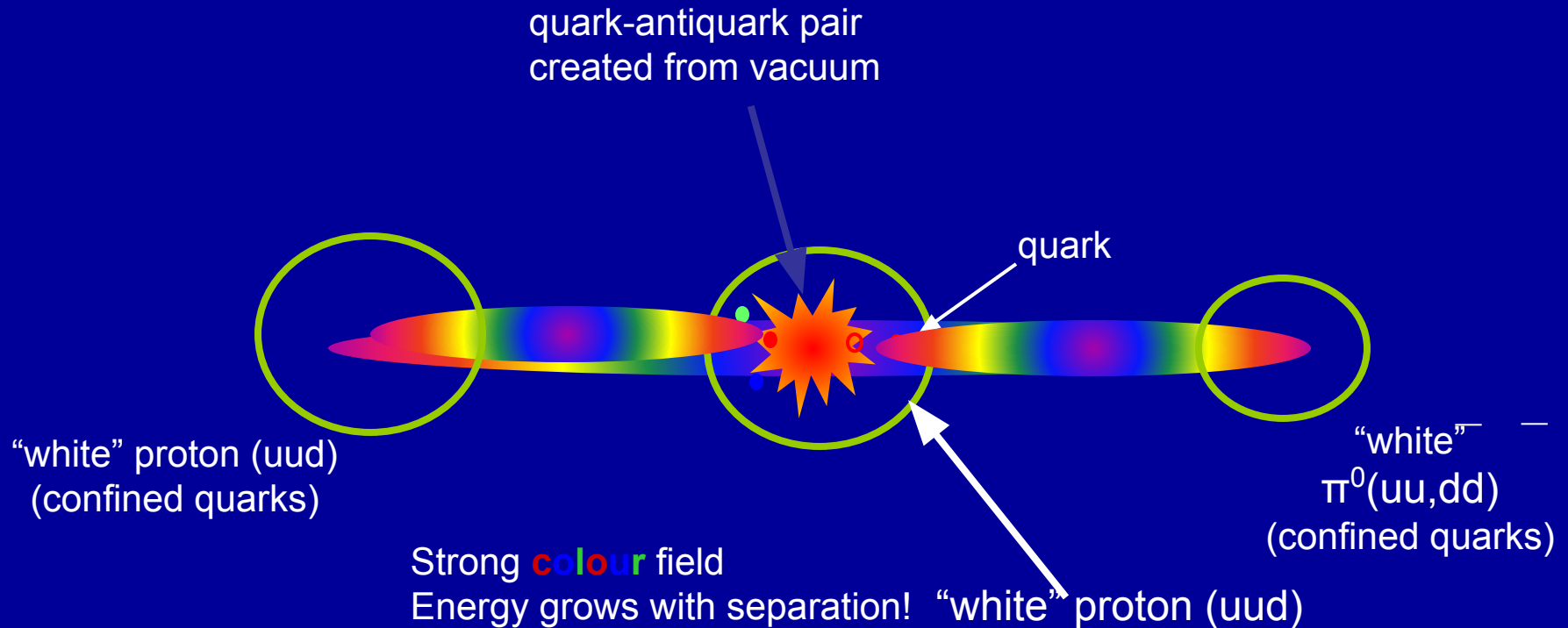
Ф. Вильчек

**Нобелевская премия за открытие
асимптотической свободы в КХД
(2004)**

Конфайнмент («запирание» кварков и глюонов внутри адронов) – это есть экспериментальный факт, строгая теория пока не существует, хотя есть КХД

Кварков и глюонов нет в свободном состоянии!

Обычные адроны называют бесцветными или белыми



Quarks



up



down



charm



strange



top 2016



beauty

Leptons



electron



neutrino e



muon



neutrino μ



tau



neutrino τ

Bosons



photon



gluon



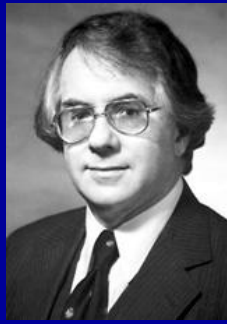
$Z^0 W^\pm$



Higgs ²³

Слабые взаимодействия:

распады частиц, нарушение симметрий, переходы между разными кварками – роль фотонов и глюонов в слабых взаимодействиях играют **W-** и **Z** – бозоны – они в 80 раз тяжелее протона



Единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий – **нобелевская премия в 1979 г**

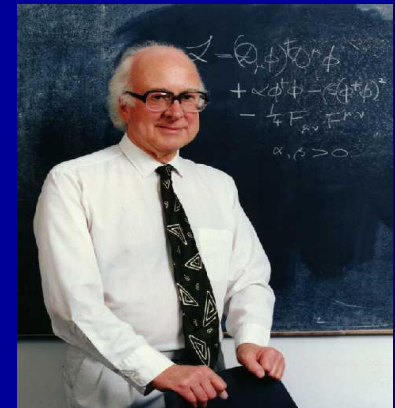
С. Вайнберг

А. Салам

Ш. Глэшоу

Единая теория электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий – **Стандартная теория (модель)**

Предсказывает существование новой частицы, которая еще “не наблюдалась” (до 2012-2013 г.) – **бозон Хиггса** с массой около 120 масс протона



П.В. Хиггс



Директор ЦЕРНа **Rolf Heuer** (на фото в центре), руководители экспериментов CMS **Joe Incandela**, (справа на фото) и ATLAS **Fabiola Gianotti** (слева на фото) и на семинаре, и на пресс-конференции **неоднократно подчеркнули, что**

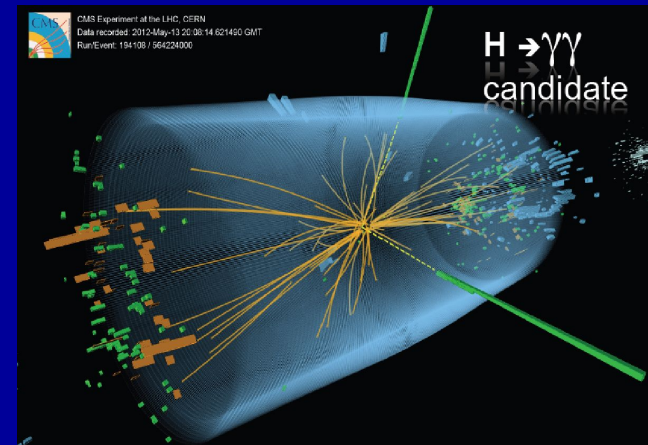
это открытие было бы невозможно без использования грида для обработки экспериментальных данных.

С 1-го января 2016 года генеральным директором ЦЕРНа

16.02.2016

стала **Fabiola Gianotti**

4 июля 2012 р. в ЦЕРНе состоялся семинар, на котором после докладов руководителей экспериментов CMS и ATLAS было заявлено об открытии новой частицы. С большой вероятностью эта новая частица является бозоном Хиггса. Предсказан 50 лет назад, поиски ведутся уже **много лет.**



Реконструкция одного из событий: распад новой частицы на два гамма кванта

25

CMS

In summary

We have observed a new

- boson with a mass of
- **$125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}$**

at

4.9σ significance !

2012 год

ATLAS:

We observe an excess of events at

$m_H \sim 126.5 \text{ GeV}$

with local significance **5.0σ**

2013 год – новые эксперименты, большая статистика
Исследование квантовых чисел новой частицы, ширин
распада по разным каналам.

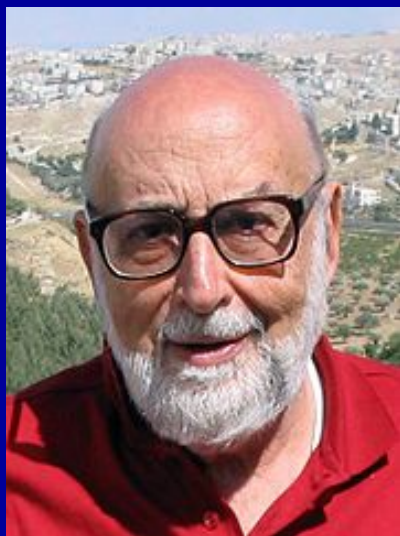
Спин – 0, P-четность – положительная, значения ширин
практически совпадают с предсказаниями Стандартной
Модели для бозона Хиггса.

Вывод: новая частица – бозон Хиггса

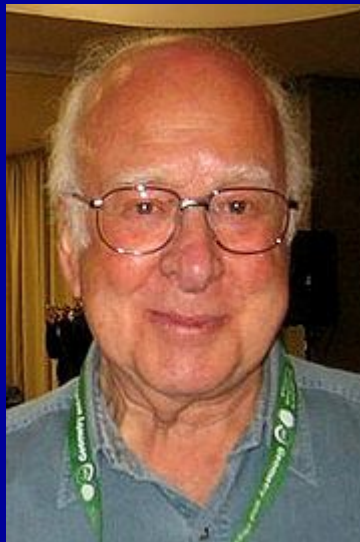
В 2014 Нобелевская премия по физике присуждена **Франсуа Энглеру и Питеру Хиггсу**



«за теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН»



**Бельгия
Франсуа
Энглер**



**Великобритания
Питер Хиггс**



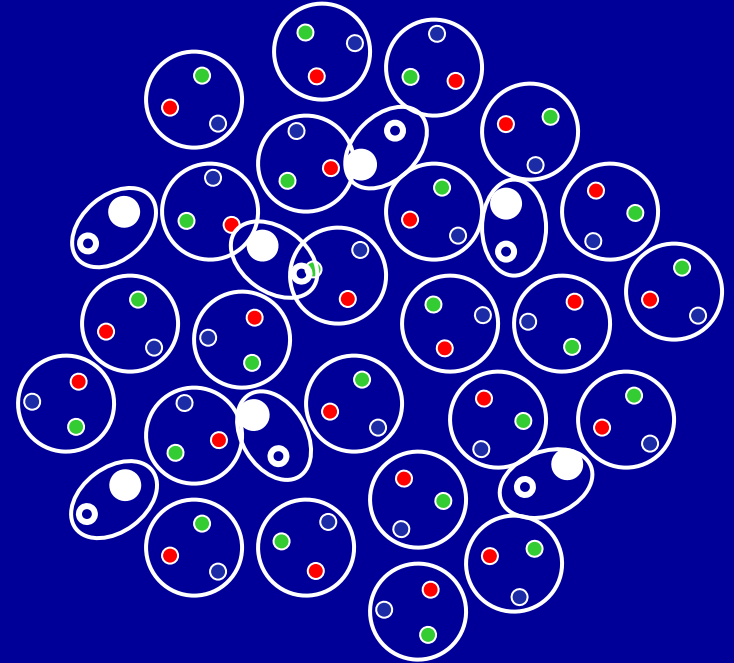
**Р. Браут
2011**

Еще одно, исключительно важное, предсказание
квантовой хромодинамики:

кварк-глюонная плазма

При достижении очень высокой
плотности ядерного вещества
исчезают «границы» между
нуклонами
(протонами и нейтронами),

образуется новое состояние
материи, в котором нет адронов
(или их очень мало),
а есть только кварки и глюоны



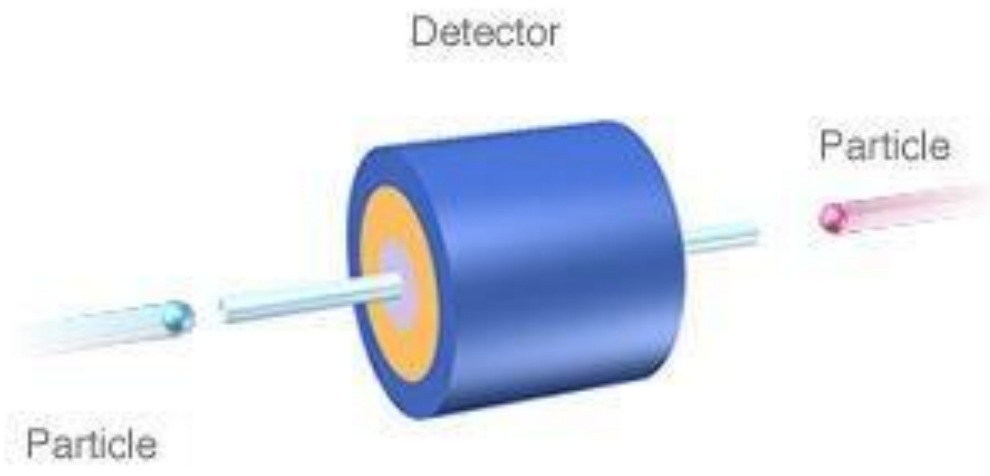
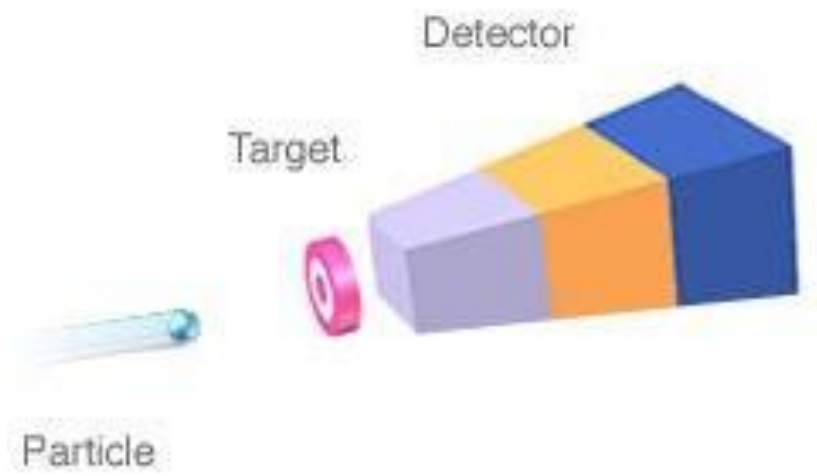
Экспериментальная проверка и изучение свойств частиц и их взаимодействий

Чтобы «проникнуть» на малые расстояния, т.е. иметь малую неопределенность в координате, нужно иметь частицы с большими импульсами

Соотношение неопределенностей $\Delta p \Delta x \geq h / 2$

Ускоритель с фиксированной мишенью

Ускоритель со встречными пучками (коллайдер)



Лабораторная система $\vec{p}_2 = 0$

Система центра масс $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0$

$$\begin{aligned}
 s &= (p_1 + p_2)^2 \\
 &= (E_1 + m_2)^2 - \vec{p}_1^2 \\
 &= E_1^2 - \vec{p}_1^2 + 2E_1 m_2 + m_2^2 \\
 &= 2E_1 m_2 + m_1^2 + m_2^2 \approx 2E_1 m_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s &= (p_1 + p_2)^2 \\
 &= (E_1 + E_2)^2 \approx 4E^2; \\
 E_1 &\approx E_2 = E
 \end{aligned}$$