

# 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. Полюс 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. Полюси 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](http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_physics).

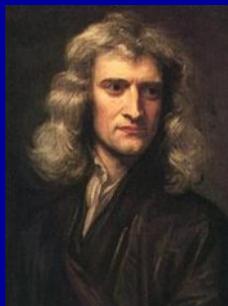
## *Лекція 1*

# **Історія теорії і експериментів в фізиці елементарних частинок**



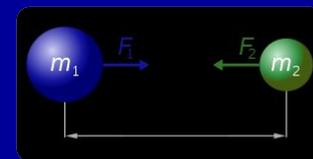
### Демокрит:

«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)

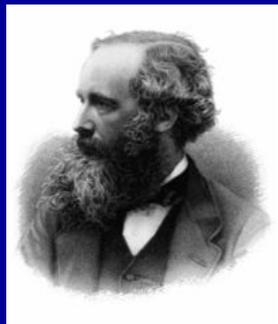
$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

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)

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

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

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

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

Уравнения Максвелла в ковариантной форме (в вакууме)

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

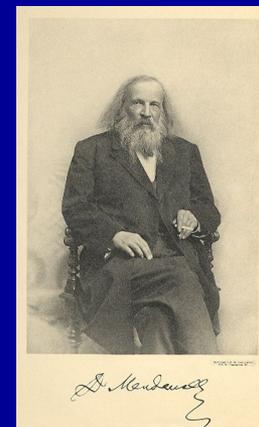
$$j^\alpha = (c\rho, \mathbf{j})$$

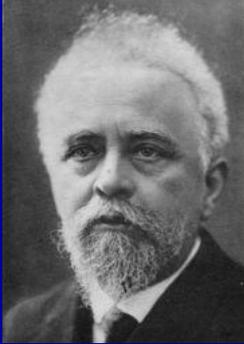
$$F^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z \\ E_x & 0 & -B_z & B_y \\ E_y & B_z & 0 & B_x \\ E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}$$

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

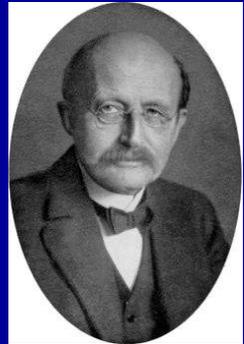
$$\partial_\alpha F_{\beta\gamma} + \partial_\beta F_{\gamma\alpha} + \partial_\gamma F_{\alpha\beta} = 0$$

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



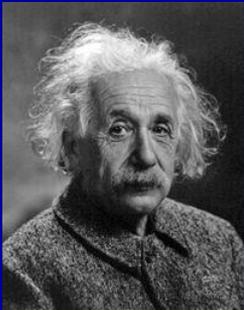


**Ж. Перрен:** элементарный заряд (1895),  
**Дж. Дж. Томсон:** катодные лучи, электрон (1897),  
Нобелевская премия - 1906

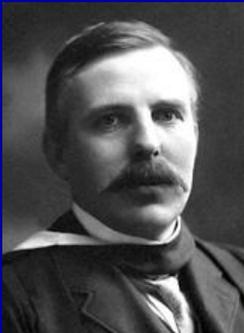


**М. Планк:** квантовая природа излучения (1900)  
Нобелевская премия - 1918

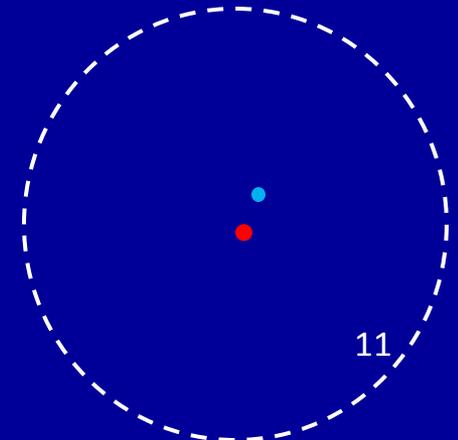
$$E = h\nu$$



**А. Эйнштейн:** фотоэффект,  $\gamma$ -квант, фотон,  
специальная теория относительности (1905)  
Нобелевская премия - 1921



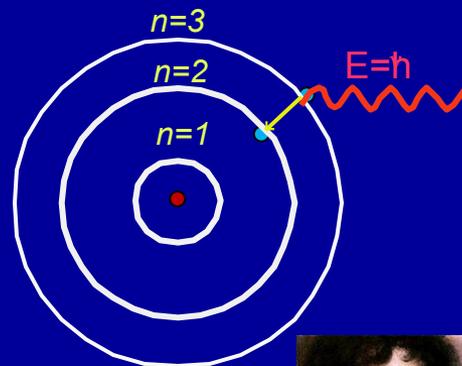
**Э. Резерфорд:** атом, протон (1911)  
Нобелевская премия по химии - 1908





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

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

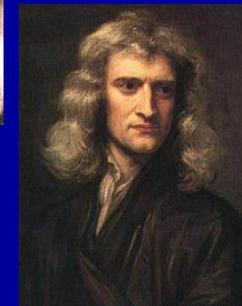


**Л. де Бройль:** частица  $\approx$  волна (1924)  
Нобелевская премия - 1929

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

**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)

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

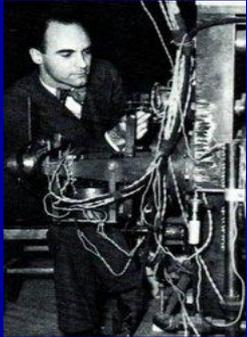
$$\Delta p\Delta x \geq \hbar / 2$$



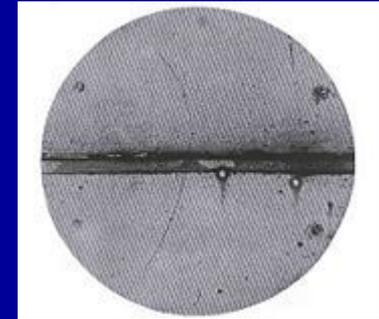


**П. Дирак:** уравнение Дирака, частицы и античастицы (1928, Нобелевская премия -1933)

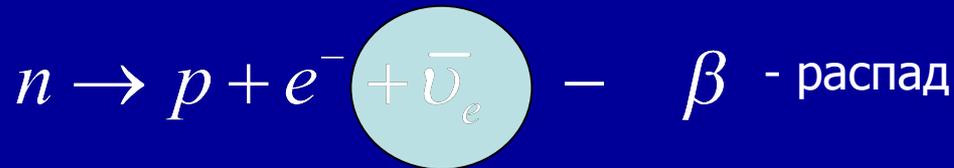
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0, \quad \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu} \quad (\hbar = c = 1)$$



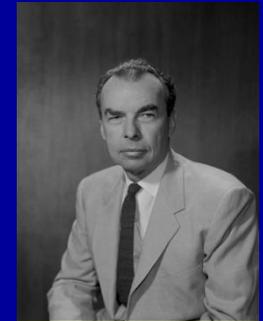
**К. Андерсен:** экспериментальное открытие позитрона (1932) Нобелевская премия - 1936



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



Время жизни нейтрона -  $885.7 \pm 0.8$  с.



**Брюс Корк (1956)**  
антинейтрон



**В. Паули**  
Н.п. -1945

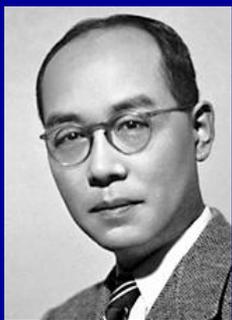
На Сольвеевском Конгрессе в 1933 г. В Брюсселе **В. Паули** выступил с рефератом о механизме  $\beta$ -распада с участием лёгкой нейтральной частицы со спином  $1/2$ , в котором, со ссылкой на предложение **Э. Ферми**, назвал гипотетическую частицу «нейтрино», («нейтрончик»). Это выступление было фактически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

**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)

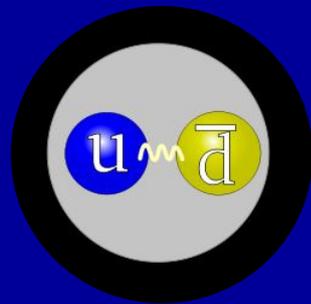
**Цвет:** **красный**, **зеленый**, **синий**

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

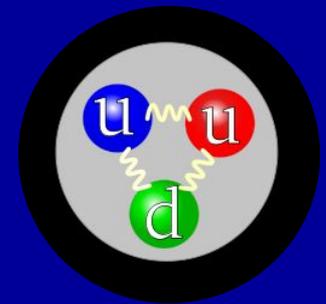
очарованный (charm, **c**-quark),  
красивый (beauty, **b**-quark),  
истинный (truth (top), **t**-quark)

**Все кварки имеют дробный заряд**

Бозоны  
(с целым спином)  
состоят из  
кварка и антикварка



Фермионы  
(с полуцелым спином)  
состоят из трех кварков

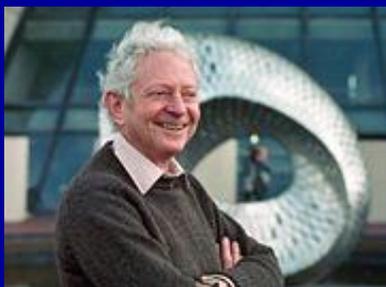




В результате серии экспериментов группа физиков под руководством **Р. Хофштадтера** (Стентфорд) установила, что протон в некоторых процессах ведет себя так, как будто он составлен из множества мелких частичек, которые получили название **партоны** (от part – часть) (Нобелевская премия - 1961).



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 -  $\psi$ -частицами. Сейчас –  $J/\psi$ . 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.



CDF



DØ

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:

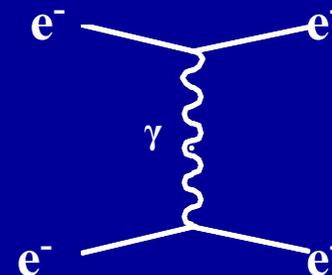
всякое взаимодействие носит обменный характер.

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**

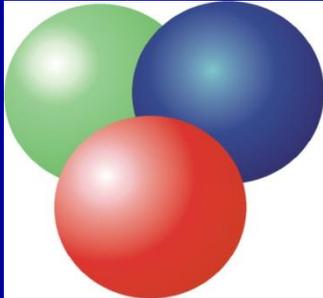
**Фундаментальные частицы – кварки и лептоны**

*лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях*



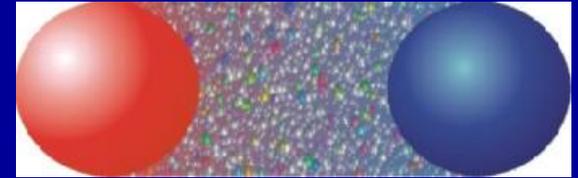
**Все сильновзаимодействующие частицы  
(протон, нейтрон, пи-мезоны, К-мезоны, ...)  
состоят из кварков**

**Барионы состоят из  
трех кварков**



**Кварки взаимодействуют,  
обмениваясь глюонами**

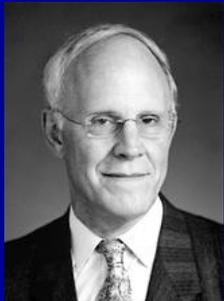
**Мезоны состоят из пары  
кварк-антикварк**



**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**



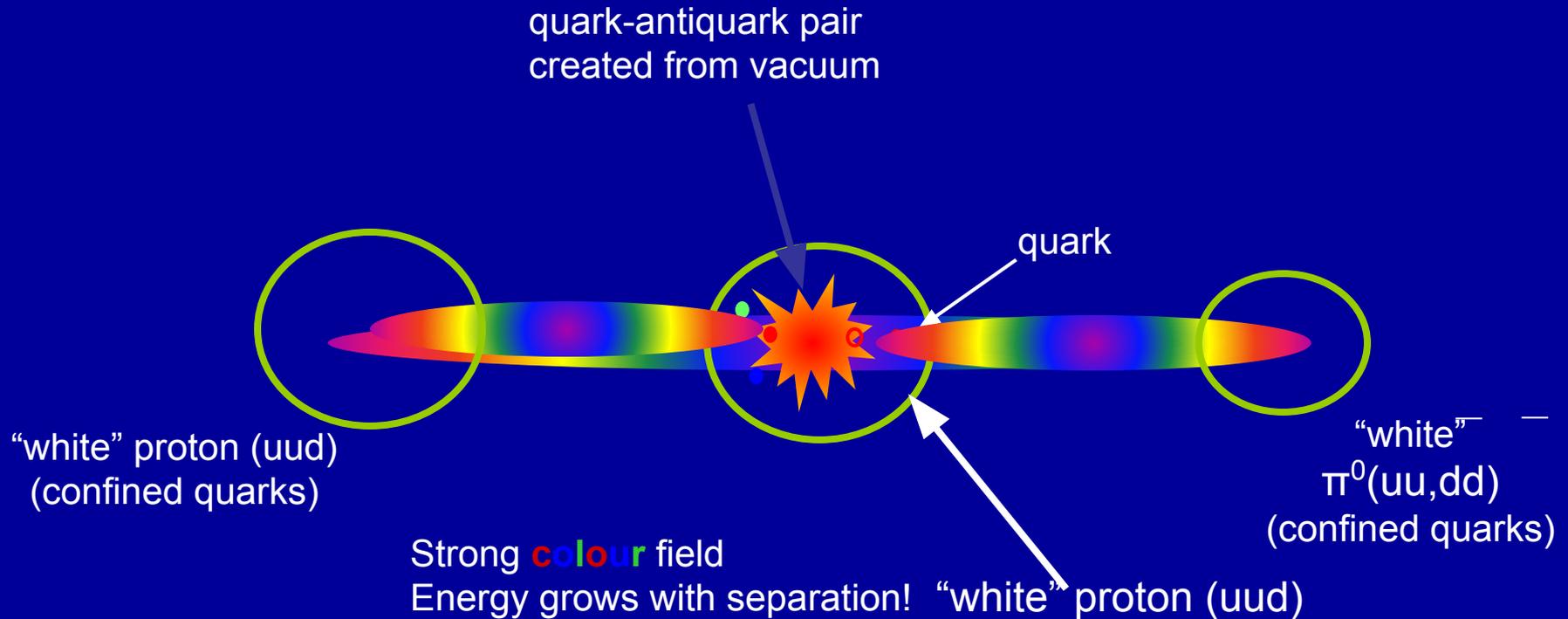
**Ф. Вильчек**

**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



beauty

# Leptons



electron



neutrino  $e$



muon



neutrino  $\mu$



tau



neutrino  $\tau$

# Bosons



photon



gluon



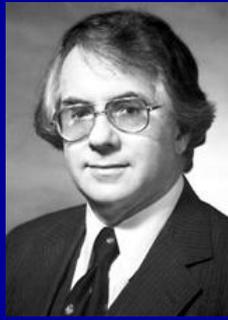
$Z^0 W^\pm$



Higgs <sup>23</sup>

## 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**

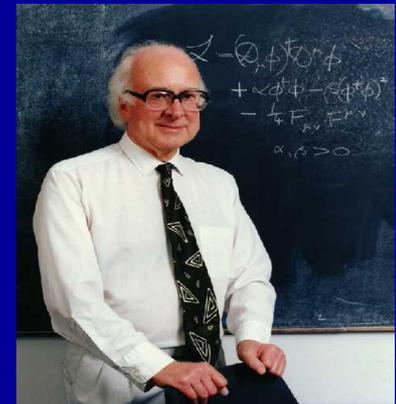
**С. Вайнберг**

**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**

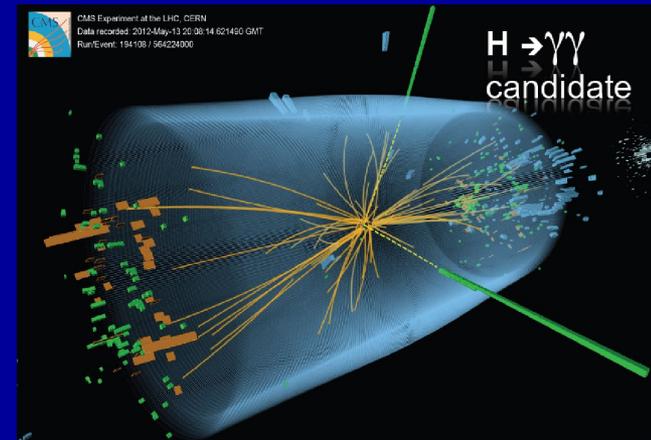
**это открытие было бы невозможно без использования грида для обработки экспериментальных данных.**

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

**$4.9 \sigma$**  significance !

2012 год

ATLAS:

We observe an excess of events at

**$m_H \sim 126.5 \text{ GeV}$**

with local significance  **$5.0 \sigma$**

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

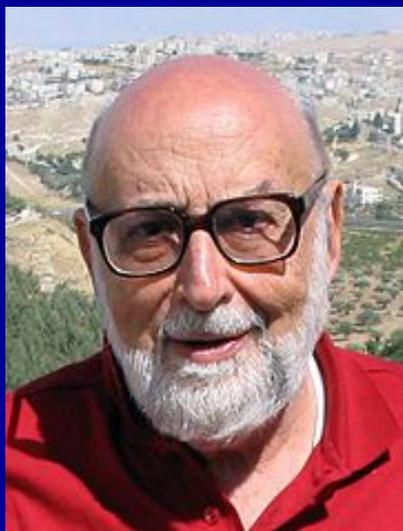
Спин – 0, P-четность – положительная, значения ширин  
практически совпадают с предсказаниями Стандартной  
Модели для бозона Хиггса.

**Вывод: новая частица – бозон Хиггса**

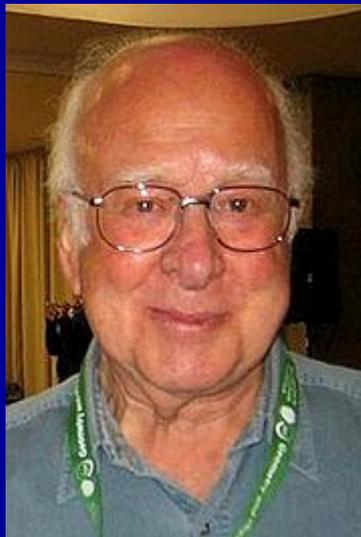
# В 2014 Нобелевская премия по физике присуждена **Франсуа Энглеру и Питеру Хиггсу**



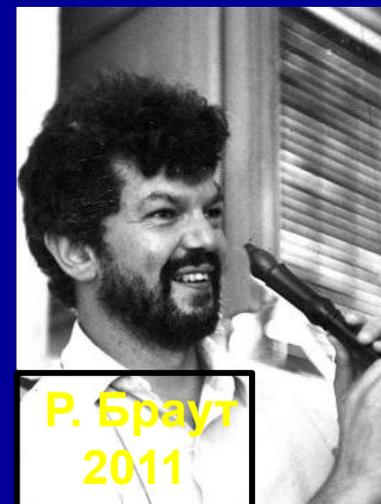
«за теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН»



**Бельгия  
Франсуа  
Энглер**



**Великобритания  
Питер Хиггс**



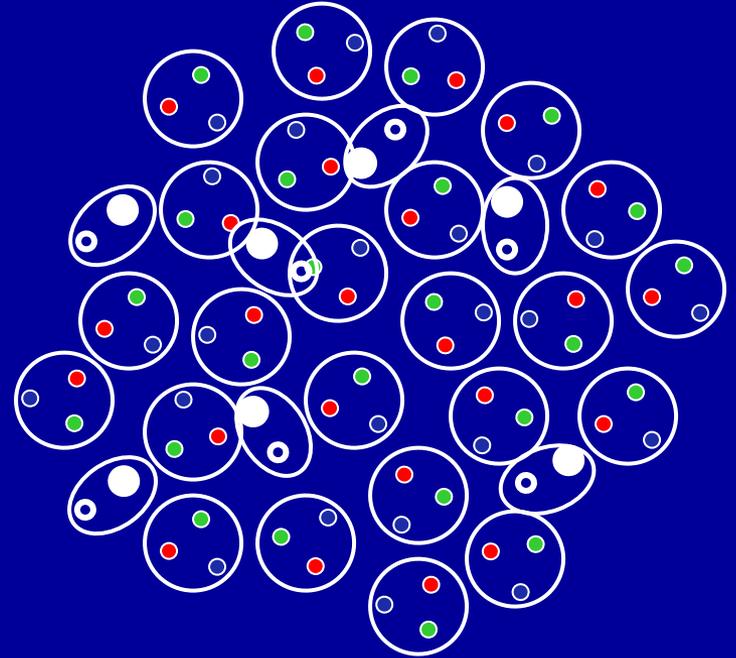
**Р. Браут  
2011**

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



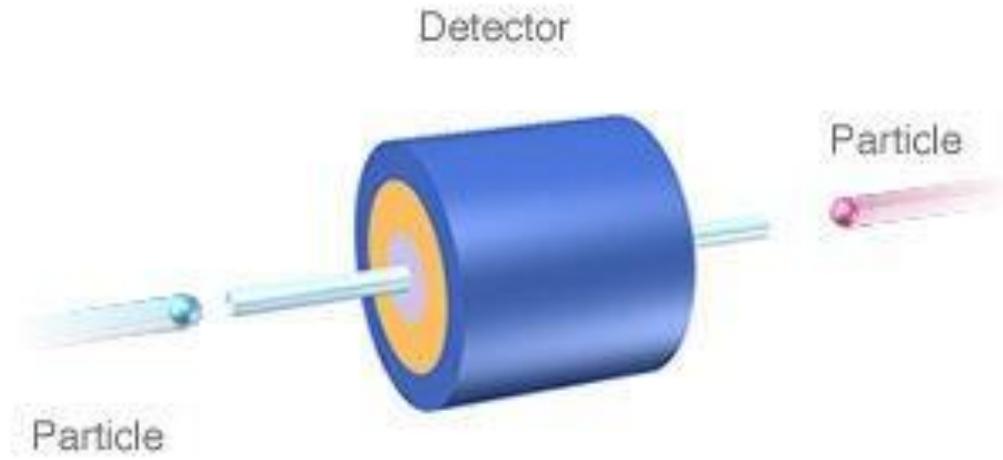
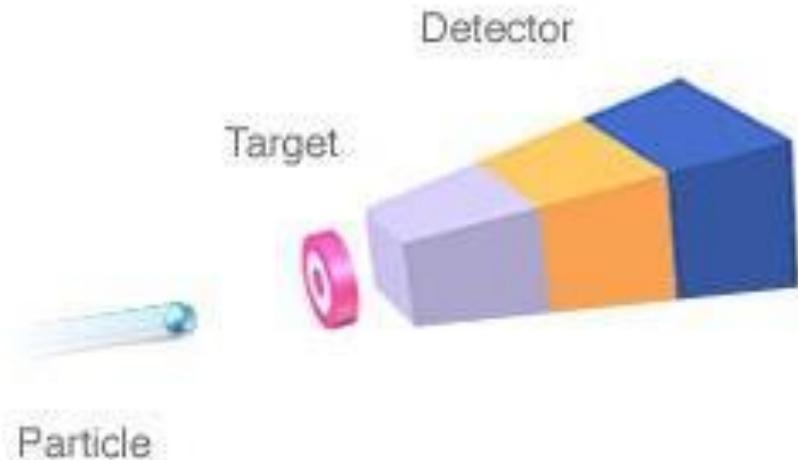
# Экспериментальная проверка и изучение свойств частиц и их взаимодействий

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

$$\vec{p}_2 = 0$$

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

Система центра масс

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0$$

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