

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
Зональная научная библиотека имени В. А. Артисевич
Отдел научной информации*

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ XXI ВЕКА

Виртуальная
выставка

Саратов
2021

ВСТУПЛЕНИЕ

...Даже для лучших выпускников физических факультетов наших вузов характерны отсутствие широты, незнание того, что же сейчас делается в физике вообще, а не только в какой-то её более или менее узкой области...

...Трудно охватить мысленным взором картину современной физики как целого. Между тем такая картина существует... у физики имеется стержень. Таким стержнем являются **фундаментальные понятия и законы, сформулированные в теоретической физике**...

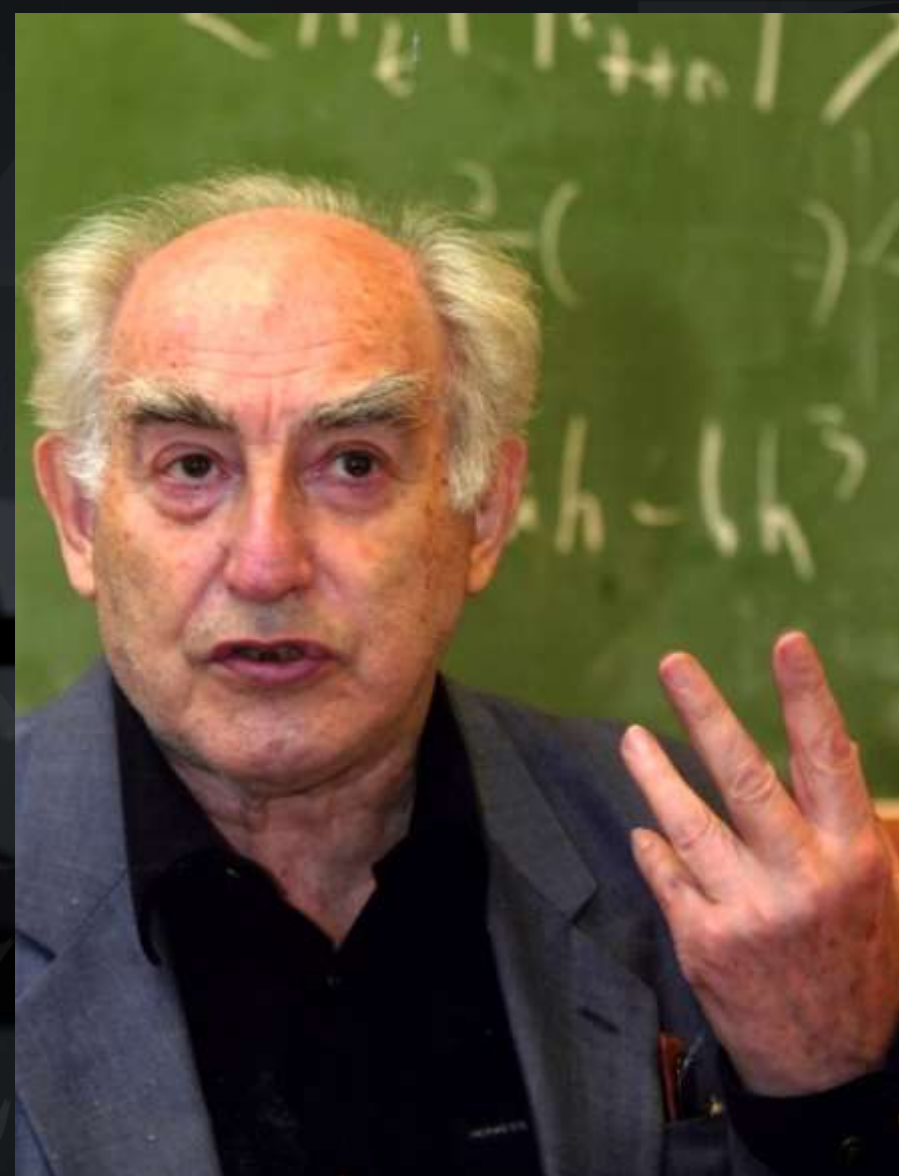
Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века

...

15. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия. W^\pm - и Z^0 - бозоны. Лептоны.

...

17. Фундаментальная длина. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях. Коллайдеры.



Виталий Лазаревич Гинзбург
Академик АН СССР и РАН,
лауреат Нобелевской премии
по физике 2003 года

«Физический минимум» — какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века?»¹

В.Л. Гинзбург

В последние годы я уделяю, если говорить о физике, все больше внимания некоторой образовательной программе, условно называемой «физическим минимумом». Поскольку на Нобелевских лекциях, насколько осведомлен, присутствует много молодежи, а решил остановиться здесь на этом «физическом минимуме».

В России любят приводить высказывания некоего вымышленного персонажа Козьмы Прутков, который, в частности, изрек: «Нельзя объять необъятное». Итак, необходимо что-то выбрать. Вот я и пошел по этому пути: составил «список» особенно важных и интересных проблем. Очевидно, что любой такой «список» не может не иметь субъективной окраски. Ясно и то, что «список» с течением времени должен изменяться. Ясно, наконец, что все вопросы, не включенные в «список», никак не могут считаться неважными или неинтересными. Просто многие из них кажутся мне (или авторам других аналогичных списков) менее актуальными в данный момент времени. Опять же «нельзя объять необъятное». Те же, кто знают важное и интересное, находящееся за пределами «списка», не имеют никаких оснований обижаться и должны лишь дополнить или изменить «список». Знакомство со всеми вопросами, включенными в «список», а и называю «физическим минимумом». Рационально, этот «минимум» и его название является отсылкой к «теоретическому минимуму», предложенному Л.Д. Ландау в тридцатые годы XX века. Для ознакомления с «физическим минимумом» начинающему лучше помочь. Этой цели и служило и, надеюсь, служит как составление самого «списка», так и комментарий к нему.

В целом же, если предложение использовать и развивать и «физический минимум» встретит поддержку, то должны появиться новые книги на данную тему. К сожалению, это уже не моя задача.

В рамках же настоящей лекции мне остается только вспомнить известную поговорку: «Чтобы узнать, каков пудинг, нужно его попробовать» (The proof of the pudding is in the eating) и привести «список» на начало XXI века, который упоминался:

1. Управляемый ядерный синтез.
2. Высокотемпературная и комнатотемпературная сверхпроводимость (HTSC и KTCSC).
3. Металлический водород. Другие экзотические вещества.
4. Двумерная электронная жидкость (аномальный эффект Холла и некоторые другие эффекты).
5. Некоторые вопросы физики твердого тела (гетероструктуры и полупроводники, квантовые ямы и точки, переходы металл-диэлектрик, волны зарядовой связности, мезоскопия).
6. Фазовые переходы второго рода и родственные им. Некоторые критерии таких переходов. Охлаждение (в частности, лазерное) до сверхнизких температур. Bose-эйнштейновская конденсация в газах.
7. Физика нанообъектов. Кластеры.
8. Жидкие кристаллы. Сегнетоэлектрики. Ферроэлектрики.
9. Фуллерены. Нанотрубки.
10. Новые данные о сверхвысоких магнитных полях.
11. Неполная физика. Турбулентность. Солитоны. Хаос. Странные аттракторы.

12. Резьба, графен, сверхтонкие лазеры.
13. Сверхтяжелые элементы. Экзотические ядра.
14. Спектр масс. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика. Кварк-глюонная плазма.
15. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий, W^{\pm} и Z^0 -бозоны. Литовия.
16. Стандартная модель. Великое объединение. Суперобъединение. Распад протона. Магнетогидродинамика. Магнитные монополи.
17. Фундаментальные частицы. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях. Коллайдеры.
18. Исправление CP-асимметрии.
19. Неполная физика в вакууме и в сверхвысоких электромагнитных полях. Фазовые переходы к вакууму.
20. Струны, M-теория.
21. Экспериментальная проверка общей теории относительности.
22. Гравитационные волны, их детектирование.
23. Космологическая проблема. Инфляция. Д-член в «модельном» уравнении. Связь между космологией и физикой высоких энергий.
24. Нейтринные осцилляции и нейтринные массы. Сверхновые нейтрино.
25. Черные дыры. Космические струны (?).
26. Квазары и ядра галактик. Образование галактик.
27. Проблема темной материи (серой массы) и ее детектирование.
28. Происхождение космических лучей со сверхвысокой энергией.
29. Гамма-всплески. Гиперионы.
30. Нейтринная физика и астрономия. Нейтринные осцилляции.

Выделение именно 30 проблем (точнее, пунктов в списке), конечно, крайне условно. Да и некоторые из них можно было бы разделить. В первом моем «списке», опубликованном в 1971 г., было 17 проблем. В дальнейшем их число возрастало. Вероятно, и сейчас к «списку» следовало бы кое-что добавить, например, вопрос о квантовых компьютерах и успехах в оптике. Но я этого о достаточным поощрением уже не могу сделать.

В общем, несомненно, что любой «список» не диктуется, что-то можно выбрасывать, что-то дополнить в зависимости от интересов лекторов и авторов соответствующих статей.

Должен добавить, что в «физический минимум» следует включить также три «великих» проблемы современной физики. Включить в том смысле, что их нужно в какой-то мере выделить, специально обсуждать, сделать за предметом в соответствующих направлениях.

Сами «великие проблемы» — это: во-первых, вопрос о возрастании энтропии, необратимости и «стреле времени».

Во-вторых, — это проблема интерпретации вероятностной квантовой механики и возможности узнать что-либо новое даже в области ее применимости (лично я в такой возможности сомневаюсь, но считаю, что глаза нужно оставлять открытыми).

В-третьих, — это вопрос о редукции живого к неживому, т.е. вопрос о возможности объяснить происхождение жизни и мышления на основе одной физики.

В заключение еще одно замечание. В принципе можно было и даже в наши дни можно встретиться с мнением, что в физике уже почти все сделано. Имеются якобы только неясные «облачка» в небе или теории, которые скоро доделают, и возникнет «теория всего» (theory of everything). Я считаю подобные мнения просто какой-то слепотой. Вся история физики, в том числе и состояние физики и, в частности, астрофизики (включая космологию) на сегодняшний день убеждают в обратном. Перед нами еще, по моему мнению, безбрежное море нерешенных проблем.

Мне остается только позавидовать более молодым из присутствующих, которые увидят очень много нового, важного и интересного.

¹ Приводится фрагмент (с некоторыми сокращениями) из Нобелевской лекции В.Л. Гинзбурга. Полный текст см. УФН 174 (11) 1240 (2004) или <http://www.ufn.ru/ufn2004/ufn2004/abstracts/abst12413.html>; некоторые новые комментарии к «списку» см. <http://data.ufn.ru/tbtime/tb124107.pdf>.

Гинзбург, В. Л. «Физический минимум» — какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века? / В. Л. Гинзбург. — DOI: 10.3367/UFNr.0177.200704b.0346. — Текст : непосредственный // Успехи физических наук. — 2007. — Т. 177, № 4. — С. 346. — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2007/4/b> (дата обращения: 20.01.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0042-1294.

Приводится фрагмент из Нобелевской лекции В. Л. Гинзбурга.

LEFT-
HANDED
PARTICLES

RIGHT-
HANDED
PARTICLES

Weak neutral
interactions

Electromagnetic
interactions

Green
quarks

Red
quarks

Higgs
Boson

Strong
interactions

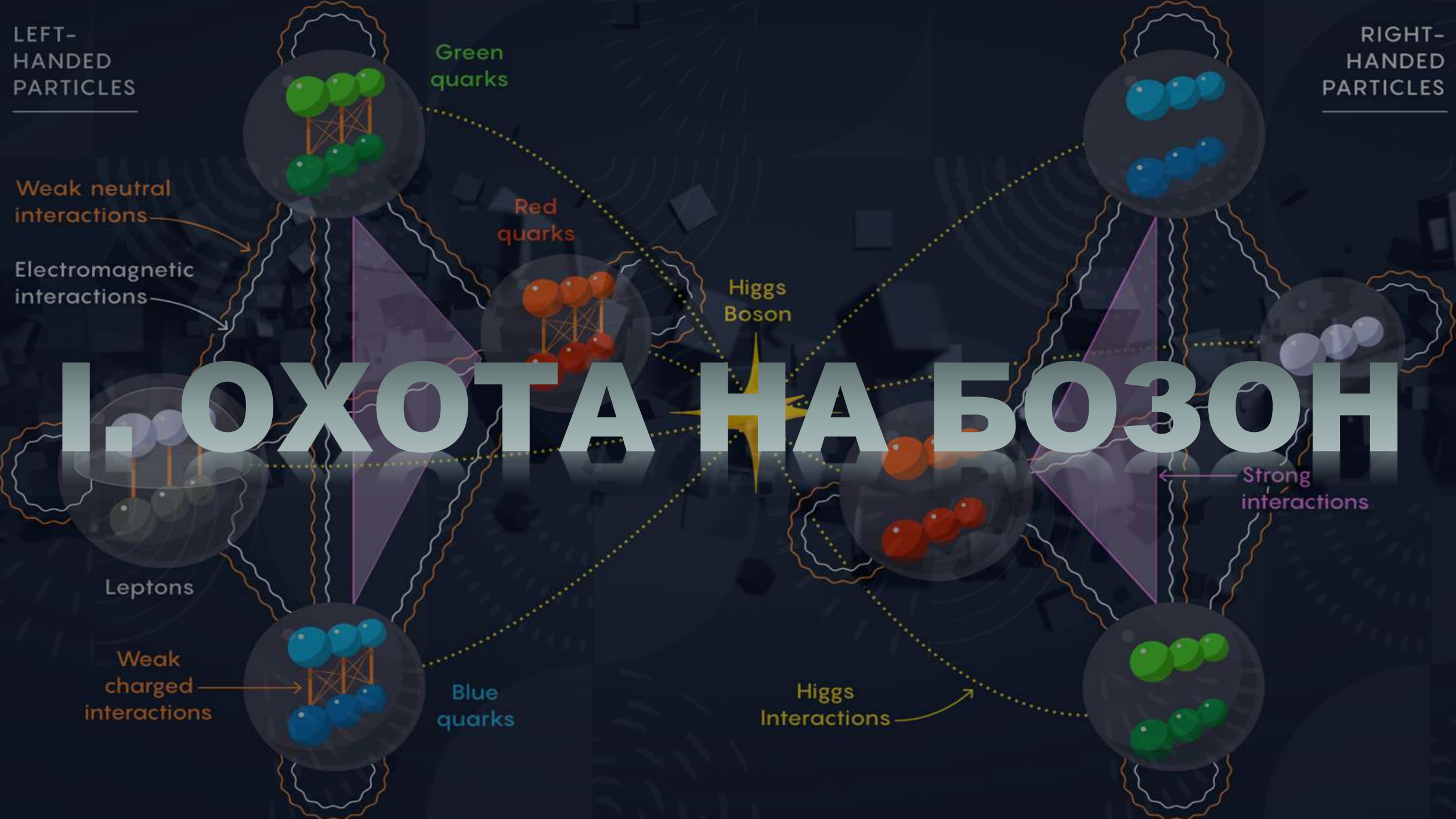
I. ОХОТА НА БОЗОН

Leptons

Weak
charged
interactions

Blue
quarks

Higgs
Interactions



The background is a dark, monochromatic composition of various geometric elements. It features a grid of squares, some of which are filled with concentric circles or radial lines. Scattered throughout are numerous small, three-dimensional cubes and rectangular prisms, some appearing to float or be in motion. The overall effect is a complex, layered, and futuristic aesthetic.

КУЛЬМИНАЦИЯ

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2013

Наконец-то, открытие!*

PACS numbers: 01.10.Cc, 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFN.0185.201510e.1049

8 октября 2013 г. по решению Шведской Королевской академии наук лауреатами Нобелевской премии по физике за 2013 г. стали Франсуа Энглера (François Englert) (Свободный университет Брюсселя, Брюссель, Бельгия) и Питер У. Хиггс (Peter W. Higgs) (Эдинбургский университет, Великобритания) за теоретическое открытие механизма, позволяющего полям элементарных частиц субатомных масштабов приобретать массу посредством спонтанного нарушения симметрии. Открытие было подтверждено экспериментально в экспериментах ATLAS и CMS, проводившихся на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.



Франсуа Энглер



Питер У. Хиггс

Франсуа Энглера и Питера У. Хиггса было совместно присуждена Нобелевская премия по физике 2013 г. за теорию возникновения массы элементарных частиц. Они предсказали эту теорию в 1964 г. независимо друг от друга Энглер вместе с ныне покойным коллегой Робертом Браутом (Robert Brout). В 2012 г. открытие так называемого бозона Хиггса в лаборатории ЦЕРН в пригороде Женева (Швейцария) подтвердило их теорию.

Отмеченная награда теории является неотъемлемой частью Стандартной модели физики элементарных частиц, которая описывает устройство нашего мира. Согласно Стандартной модели всё — от дышек и людей до звезд и планет — состоит всего из нескольких материяльных частиц. Эти частицы управляют системами, определяя все главные характеристики, вследствие чего всё работает как положено.

Вся Стандартная модель построена на существовании особой частицы — бозона Хиггса. Эта частица появилась из невидимого поля, которое пронизывает всё пространство. Даже там, где Вселенная кажется пустой, это поле существует. При контакте с полем частица приобретает массу, в противном случае не существовало бы. Теория, разработанная Энглера и Хиггом, описывает этот процесс.

4 июля 2012 г. в лаборатории физики элементарных частиц в ЦЕРНе эта теория была подтверждена открытием бозона Хиггса. Большой адронный коллайдер (БАК) в ЦЕРНе является, по-видимому, самой сложной и самой большой установкой из когда-либо созданных человечеством. Две группы учёных, примерно по 3000 человек в каждой — ATLAS и CMS — смогли выделить бозон Хиггса из миллиардов столкновений частиц на БАК.

Открытие бозона Хиггса — недостающего элемента Стандартной модели — величайшее достижение, оживило Стандартную модель — не исследованную часть космической головоломки Вселенной. Одна из причин этого в том, что в Стандартной модели некоторые частицы — нейтрино — имеют нулевую массу, а в то время как последние исследования показывают, что у нейтрино масса всё-таки есть. Другая причина заключается в том, что эта модель описывает только видимое вещество, которое составляет одну пятую часть космического вещества. Найти загадочные частицы тёмной материи — одна из целей учёных, работающих на новых объектах в ЦЕРНе.

Франсуа Энглер, гражданин Бельгии. Родился в 1932 г. в г. Эггербеке (Бельгия). Получил степень доктора физики в 1959 г. в Свободном университете Брюсселя (Брюссель, Бельгия). Заслуженный профессор Свободного университета Брюсселя (Брюссель, Бельгия). www.uib.ac.be/sciences/physique/Francois.Englert.html

Питер У. Хиггс, гражданин Великобритании. Родился в 1929 г. в г. Ньюкасл-апон-Тайн (Великобритания). Получил степень доктора физики в 1954 г. в Королевском колледже (Университет Лондона, Великобритания). Заслуженный профессор Эдинбургского университета (Великобритания). www.ph.ed.ac.uk/higgs

Информация Нобелевского комитета
(Перевод с английского)

Для более полной информации см. на официальном веб-сайте Нобелевского комитета:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013

* В английском оригинале: "Here, at last!"

Наконец-то, открытие! — DOI: 10.3367/UFN.0185.201510e.1049. — Текст : непосредственный // Успехи физических наук. — 2015. — Т. 185, № 10. — С. 1049. — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2015/10/e> (дата обращения: 20.01.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0042-1294.

8 октября 2013 г. по решению Шведской Королевской академии наук лауреатами Нобелевской премии по физике за 2013 г. стали Франсуа Энглера (Свободный университет Брюсселя) и Питер У. Хиггс (Эдинбургский университет, Великобритания) за теоретическое открытие механизма, позволяющего понять возникновение массы субатомных частиц, который недавно был подтверждён открытием предсказанной фундаментальной частицы в экспериментах ATLAS и CMS, проводившихся на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

(ПРЕД)ИСТОРИЯ

The background is a dark, monochromatic composition of various geometric and organic shapes. It features a grid of squares, some of which are filled with concentric circles or radial lines. Scattered throughout are numerous small, three-dimensional cubes and rectangular blocks, some appearing to be in motion or stacked. The overall effect is a complex, layered, and somewhat chaotic visual texture.

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Предыстория хиггсовского бозона*

П. Хиггс

PACS numbers: 01A85, +g. 11.15. – q. 12.15. – y

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510h.1061

Содержание

1. Истоки в физике конденсированных сред (1961).
 2. Спонтанное нарушение симметрии в физике частиц (1961).
 3. Хиггсовские бозоны в релятивистских теориях (1962).
 4. Начало поисков (1962).
- Список литературы (1962).

1. Истоки в физике конденсированных сред

В квантовой теории поля существование хиггсовского бозона предсказывалось в классе квантовых теорий поля, где симметрия была относительно преобразований группы Ли спонтанно нарушается асимметричным вакуумным состоянием. Это квант определенных флуктуаций параметра порядка.

Такое спонтанное нарушение симметрии было впервые предложено в 1960 г. как характерная особенность теорий элементарных частиц, однако говорилась об этом говорилось в контексте теории конденсированных сред. Пример с ферромагнетизмом, описанный Гейзенбергом [1] в 1928 г., — наиболее ранний из всех случаев соседних электронов взаимодействующих друг с другом, в основном состоянии системы становится конфигурацией, в которой все спины ориентированы параллельно в одном направлении (энергетически выгоднее по сравнению с антипараллельной ориентацией), тем самым нарушая пространственную симметрию динамики.

Другие примеры, более близкие к нарушению симметрии, интересной для физики элементарных частиц, является сверхтекучесть. В 1947 г. Боголюбов [2] рассмотрел бозе-конденсацию бесконечной системы нейтральных босонных частиц, которые взаимодействуют друг с другом через короткодействующие силы взаимного отталкивания. Такой конденкат характеризует комплексной "микроскопической волновой функцией" (параметром порядка). Квадрат модуля этой функции является мерой наблюдаемой плотности конденсата, а ее аргумент (наблюдаемый) является произвольной величиной, нарушая тем самым симметрию движения при поворотах волновых функций бозона на диаграмме Аргана. Близкодействием представляли по второму квантованному гамильтониану элементом, прямо пропорциональным квадрату плотности частиц, т.е. четвертой степенно компонент скалярного квантового поля.

Третий пример, ставший моделью для теоретиков в области элементарных частиц, — это сверхпроводимость. В 1950 г. Гинзбург и Ландау [3] показали, что это явление можно объяснить бозе-конденсацией электрически заряженных скалярных бозонов. В то время казалось, что кандидатами в такие бозоны

нет среди известных компонентов металлов или сплавов. Только позднее, после того как Купер показал, каким образом можно связать два электрона в пару, представляющую собой бесспиновую бозе-частицу, теория сверхпроводимости, сформулированная Барdeenом, Купером и Шриффером в 1957 г. [4], стала жизнеспособной. Таким образом, теория Гинзбурга – Ландау приобрела статус эффективной теории, которая оказалась верной в условиях, когда составная структура куперовских пар была несущественной.

По аналогии со сверхтекучестью макроскопическая волновая функция конденсата, обусловленного сверхпроводимостью, нарушает симметрию динамики системы при вращениях амплитуды на диаграмме Аргана. Однако в случае сверхпроводимости бозоны электрически заряжены, и эту симметрию можно обойти на калибровочно инвариантность в электродинамике.

Энергетическая щель в ферромагнетизме в теории БКШ пропорциональна модулю волновой функции конденсата. Возможность существования флуктуаций, для которых эта величина перестает быть постоянной и становится волнообразной в пространстве-времени, была впервые выведена из теории БКШ Литтлвудом и Варма [5] в 1981 г. и предложена в качестве объяснения загадочного свойства рамановского спектра в сверхпроводящем NbSe₂, измеренного за год до этого Соорьякумаром и Кляймом [6].

2. Спонтанное нарушение симметрии в физике частиц

В 1960 г. Намбу [7], вдохновленный теорией БКШ, впервые предложил релятивистские модели генерации массы в физике элементарных частиц. Его идея состояла в том, что энергетическая щель между однофермионным состоянием и противоположными дираковскими состояниями с отрицательной энергией должна возникать благодаря наличию векторного скалярного конденсата, как в теории БКШ, в которой заполненные энергетические полосы являются аналогом "моря Дирака". Существование такого конденсата нарушало бы симметрию модели при преобразованиях группы Ли, которая в физике частиц была бы неабелевой группой, включающей группу U(1) в качестве подгруппы, ответственной за сохранение электрического заряда.

Хотя Намбу был вдохновлен теорией БКШ, но предложенные им ядерные модели, в отличие от этой теории, не обладали локальной калибровочной инвариантностью. Вскоре стало ясно, что как в этих моделях (содержавших элементарные скалярные поля), так и в моделях, изученных Голдстоуном [8] (1961), всегда существуют флуктуации, соответствующие босонным частицам с нулевой массой (голдстоуновские бозоны). Связь между спонтанным нарушением симметрии и голдстоуновскими бозонами в релятивистских теориях была формально доказана Голдстоуном, Салломом и Вайнбергом [9] в 1962 г. Экспериментальные свидетельства против существования таких частиц в реальном мире подвергли бы сомнению правильность идей Намбу.

Между 1962 и 1964 гг. в литературе возникли дебаты, можно ли обойти теорему Голдстоуна. В 1963 г. Андерсон [10] указал, что в сверхпроводниках из-за электродинамического взаимодействия

Хиггс, П. У. Предыстория хиггсовского бозона / П. У. Хиггс ; перевод с английского К. А. Постнова. – DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510h.1061. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1061-1062. – Библиогр.: с. 1062 (20 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2015/10/h> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Спонтанное нарушение симметрии в физике частиц. Эксперименты по проверке электрослабой теории и поиск бозона Хиггса – частицы, приобретающей массу при контакте с полем.

* Статья впервые была опубликована в журнале *Science Today Physics* том 8, вып. 9, с. 970–972, ноябрь 2007 года [Higgs P "Prehistory of the Higgs boson" *C.R. Physique* 8:970–972 (2007)].

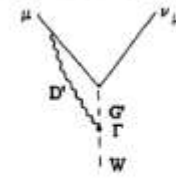


Fig. 1.

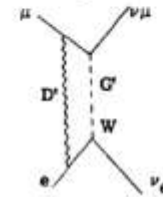


Fig. 2.

well into account the radiation correction to the β -decay constant found by Berman ³⁾ and Kinoshita and Sirlin ⁴⁾ we obtain for the muon life time

$$\frac{\tau_{\mu}}{\tau_{\mu}^0} = 1 - \frac{3e^2}{4\pi} \ln \frac{\Lambda^2}{\mu^2} + \frac{3e^2}{2\pi} \ln \frac{\Lambda_{\beta}}{2E} - \frac{3}{5} \frac{M_{\mu}^2}{\mu^2}, \quad (1)$$

where τ_{μ}^0 is the muon life time calculated by means of universal theory of four fermion interaction with a constant taken from β -decay without any corrections, Λ_{β} is the cut off momentum due

to the strong interactions, $\Lambda_{\beta} \sim M$, E is the energy of β -transition. According to experimental data $\tau_{\mu}/\tau_{\mu}^0 = 0.988 \pm 0.004$.

Substituting the numbers into (1) we obtain $\tau_{\mu}/\tau_{\mu}^0 = 1.003$ and the disagreement between the theory and experiment will be in our case $1.5 \pm 0.4\%$. When discussing this result one should take into consideration that in (1) only the terms $\sim e^2 \ln e^2$ were correctly taken into account but the terms $\sim e^2$ were discarded.

It seems to us that the conclusion that in the theory of weak interaction with intermediate W-meson β - and μ -constants must be with good accuracy the same (taking into account the corrections due to the electromagnetic and weak interactions), is in favour of the weak interaction theory with W-meson unlike the four-fermion theory.

More detailed paper will be published elsewhere.

The author is indebted to B. V. Geshkenbein, I. Yu. Kobsarev, L. B. Okun, A. M. Perelomov, I. Ya. Pomeranchuk, V. S. Popov, A. P. Rudik and M. V. Terentyev for valuable discussions.

References

- 1) B. L. Ioffe, M. V. Terentyev (in print).
- 2) T. D. Lee, Phys. Rev. 128 (1962) 890.
- 3) S. M. Berman, Phys. Rev. 112 (1958) 267.
- 4) T. Kinoshita, A. Sirlin, Phys. Rev. 113 (1959) 1652.

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

Recently a number of people have discussed the Goldstone theorem ^{1,2)}: that any solution of a Lorentz-invariant theory which violates an internal symmetry operation of that theory must contain a massless scalar particle. Klein and Lee ³⁾ showed that this theorem does not necessarily apply in non-relativistic theories and implied that their considerations would apply equally well to Lorentz-invariant field theories. Gilbert ⁴⁾, how-

ever, gave a proof that the failure of the Goldstone theorem in the nonrelativistic case is of a type which cannot exist when Lorentz invariance is imposed on a theory. The purpose of this note is to show that Gilbert's argument falls for an important class of field theories, that in which the conserved currents are coupled to gauge fields.

Following the procedure used by Gilbert ⁴⁾, let us consider a theory of two hermitian scalar fields

Higgs, P. W. Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields / P. W. Higgs. – DOI: 10.1016/0031-9163(64)91136-9. – Текст : непосредственный // Physics Letters. – 1964. – Vol. 12, iss. 2, September. – P. 132-133. – Библиогр.: p. 133 (5 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0031916364911369> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: по подписке. – ISSN 0375-9601.

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson³ has drawn attention: that the scalar zero-mass excitations of a superconducting neutral Fermi gas become longitudinal plasmon modes of finite mass when the gas is charged.

The simplest theory which exhibits this behavior is a gauge-invariant version of a model used by Goldstone⁴ himself: Two real⁵ scalar fields φ_1, φ_2 and a real vector field A_μ interact through the Lagrangian density

$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{2}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}, \quad (1)$$

where

$$\nabla_\mu \varphi_1 = \partial_\mu \varphi_1 - eA_\mu \varphi_2,$$

$$\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + eA_\mu \varphi_1,$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu,$$

e is a dimensionless coupling constant, and the metric is taken as $-+++$. L is invariant under simultaneous gauge transformations of the first kind on $\varphi_1 \pm i\varphi_2$ and of the second kind on A_μ . Let us suppose that $V'(\varphi_0^2) = 0$, $V''(\varphi_0^2) > 0$; then spontaneous breakdown of U(1) symmetry occurs. Consider the equations [derived from (1) by treating $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, and A_μ as small quantities] governing the propagation of small oscillations

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}, \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1), \\ G_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \quad (3)$$

into the form

$$\partial_\mu B^\mu = 0, \quad \partial_\nu G^{\mu\nu} + e^2 \varphi_0^2 B^\mu = 0. \quad (4)$$

Equation (4) describes vector waves whose quanta have (bare) mass $e\varphi_0$. In the absence of the gauge field coupling ($e = 0$) the situation is quite different: Equations (2a) and (2c) describe zero-mass scalar and vector bosons, respectively. In passing, we note that the right-hand side of (2c) is just the linear approximation to the conserved current: It is linear in the vector potential, gauge invariance being maintained by the presence of the gradient term.⁶

When one considers theoretical models in which spontaneous breakdown of symmetry under a semisimple group occurs, one encounters a variety of possible situations corresponding to the various distinct irreducible representations to which the scalar fields may belong; the gauge field always belongs to the adjoint representation.⁴ The model of the most immediate interest is that in which the scalar fields form an octet under SU(3): Here one finds the possibility of two nonvanishing vacuum expectation values, which may be chosen to be the two $Y = 0$, $I_3 = 0$ members of the octet.⁷ There are two massive scalar bosons with just these quantum numbers; the remaining six components of the scalar octet combine with the corresponding components of the gauge-field octet to describe

Higgs, P. W. Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons / P. W. Higgs. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.508. – Текст : непосредственный // Physical Review Letters. – 1964. – Vol. 13, iss. 16, October. – P. 508-509. – Библиогр.: p. 509 (9 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.13.508> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0031-9007.

*Work supported in part by the U. S. Atomic Energy Commission and in part by the Graduate School from funds supplied by the Wisconsin Alumni Research Foundation.

¹R. Feynman and M. Gell-Mann, *Phys. Rev.* **109**, 13 (1958).

²T. D. Lee and C. N. Yang, *Phys. Rev.* **119**, 1410 (1960); S. B. Treiman, *Nuovo Cimento* **15**, 916 (1960).

³S. Okubo and R. E. Marshak, *Nuovo Cimento* **28**, 56 (1963); Y. Ne'eman, *Nuovo Cimento* **27**, 922 (1963).

⁴Estimates of the rate for $K^+ \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-$ due to induced neutral currents have been calculated by several authors. For a list of previous references see Mirza A. Baqi Bég, *Phys. Rev.* **132**, 426 (1963).

⁵M. Baker and S. Glashow, *Nuovo Cimento* **25**, 857

(1962). They predict a branching ratio for decay mode (1) of $\sim 10^{-4}$.

⁶N. P. Samios, *Phys. Rev.* **121**, 275 (1961).

⁷The best previously reported estimate comes from the limit on $K_L^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$. The 90% confidence level is $|g_{\mu\mu}^2| < 10^{-3} |g_{\mu\pi}^2|$; M. Barton, K. Lande, L. M. Lederman, and William Chinowsky, *Ann. Phys. (N.Y.)* **5**, 156 (1958). The absence of the decay mode $\mu^+ \rightarrow e^+ + e^- + e^-$ is not a good test for the existence of neutral currents since this decay mode may be absolutely forbidden by conservation of muon number; G. Feinberg and L. M. Lederman, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **13**, 465 (1963).

⁸S. N. Biswas and S. K. Bose, *Phys. Rev. Letters* **12**, 176 (1964).

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.⁴⁻⁶ A characteristic feature of such theories is the possible existence of zero-mass bosons which tend to restore the symmetry.^{7,8} We shall show that it is precisely these singularities which maintain the gauge invariance of the theory, despite the fact that the vector meson acquires mass.

We shall first treat the case where the original fields are a set of bosons ψ_A which transform as a basis for a representation of a compact Lie group. This example should be considered as a rather general phenomenological model. As such, we shall not study the particular mechanism by which the symmetry is broken but simply assume that such a mechanism exists. A calculation performed in lowest order perturbation theory indicates that

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_5 invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reasonable.

(1) Lest the simplicity of the argument be shrouded in a cloud of indices, we first consider a one-parameter Abelian group, representing, for example, the phase transformation of a charged boson; we then present the generalization to an arbitrary compact Lie group.

The interaction between the ψ and the A_μ fields is

$$H_{\text{int}} = ieA_\mu \psi^* \vec{\sigma}_\mu \psi - e^2 \psi^* \psi A_\mu A_\mu, \quad (1)$$

where $\psi = (\psi_1 + i\psi_2)/\sqrt{2}$. We shall break the symmetry by fixing $\langle \psi \rangle \neq 0$ in the vacuum, with the phase chosen for convenience such that $\langle \psi \rangle = \langle \psi^* \rangle = \langle \psi_1 \rangle/\sqrt{2}$.

We shall assume that the application of the

Englert, F. Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons / F. Englert and R. Brout. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.321. — Текст : непосредственный // Physical Review Letters. — 1964. — Vol. 13, iss. 9, August. — P. 321-323. — Библиогр.: p. 323 (12 назв.). — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.13.321> (дата обращения: 20.01.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0031-9007.

ИНСТРУМЕНТЫ

The background is a dark, monochromatic composition of various geometric elements. It features a grid of squares, some of which are filled with concentric circles or radial lines. Scattered throughout are numerous small, three-dimensional cubes and rectangular prisms, some appearing to be in motion or floating. The overall effect is a complex, layered, and futuristic aesthetic.



*Фото туннеля Большого Адронного коллайдера, сектор 3-4.
Источник:*

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Views_of_the_LHC_tunnel_sector_3-4_tirage_1.jpg?uselang=ru

A893889

Н. В. Красников, В. А. Матвеев

ОТКРЫТИЕ БОЗОНА ХИГГСА

И ПОИСК

НОВОЙ ФИЗИКИ

НА БОЛЬШОМ
АДРОННОМ
КОЛЛАЙДЕРЕ
при энергиях
7 и 8 ТэВ

Н. В. Красников
В. А. Матвеев

ОТКРЫТИЕ
БОЗОНА
И ПОИСК
НОВОЙ
ФИЗИКИ

НА БОЛЬШОМ
АДРОННОМ
КОЛЛАЙДЕРЕ



A893889

Красников, Н. В. Открытие бозона Хиггса и поиск новой физики на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8ТэВ / Н. В. Красников, В. А. Матвеев ; Ин-т ядер. исслед. РАН. – Москва : КРАСАНД, 2015. – 288 с. : ил., цв. ил. – Библиогр.: с. 257-274 (292 назв.). – ISBN 978-5-396-00645-4. – Текст : непосредственный.

Н. В. Красников, В. А. Матвеев

НОВАЯ ФИЗИКА

A992300

НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Н. В. Красников
В. А. Матвеев

НОВАЯ ФИЗИКА НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ



URSS



URSS

A992300

Красников, Н. В. Новая физика на Большом адронном коллайдере / Н. В. Красников ; Ин-т ядер. исслед. РАН. – Москва: КРАСАНД, 2011. – 208 с. : ил. – Библиогр.: с. 185-191 (176 назв.). – ISBN 978-5-396-00313-2. – Текст : непосредственный.

A 996544

С. И. Битюков, Н. В. Красников

ПРИМЕНЕНИЕ
СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ПОИСКА

НОВОЙ ФИЗИКИ
НА БОЛЬШОМ
АДРОННОМ
КОЛЛАЙДЕРЕ



ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОИСКА
НОВОЙ ФИЗИКИ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

С. И. Битюков, Н. В. Красников

A996544

Битюков, С. И. Применение статистических методов для поиска новой физики на большом адронном коллайдере / С. И. Битюков, Н. В. Красников. – Москва : КРАСАНД, 2013. – 268, [4] с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 257-269 (172 назв.). – ISBN 978-5-396-00540-2. – Текст : непосредственный.

The background is a dark, monochromatic composition of various geometric and organic shapes. It features a grid of squares, some of which are filled with concentric circles or radial lines. Scattered throughout are numerous small, three-dimensional cubes and rectangular blocks, some appearing to be in motion or falling. The overall effect is a complex, layered, and futuristic aesthetic.

ЧТО ДАЛЬШЕ?

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Физика на Большом адронном коллайдере. Бозон Хиггса

Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 26 февраля 2014 г.

PACS number: 01.10.Fy

DOI: 10.3367/UFN.0184.201409h.0985

26 февраля 2014 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН "Физика на Большом адронном коллайдере. Бозон Хиггса".

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Боос Э.Э.** (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельяна Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва). *Стандартная модель и предсказания для бозона Хиггса.*

2. **Зайцев А.М.** (Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва). *Эксперимент ATLAS: бозон Хиггса и Стандартная модель.*

3. **Лавин А.В.** (Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). *Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поисковая физика.*

4. **Казанов Д.И.** (Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). *Хиггсовский бозон открывает: что дальше?*

Статьи, написанные на основе докладов 1, 3 и 4, публикуются ниже. Расширенный обзор по теме доклада 2 будет опубликован в одном из последующих номеров УФН.

PACS numbers: 12.15.-y, 12.60.-L, 14.80.Bn
DOI: 10.3367/UFN.0184.201409h.0985

Стандартная модель и предсказания для бозона Хиггса

Э.Э. Боос

1. Введение

Со школы нам хорошо известно о существовании четырёх видов взаимодействия в природе: гравитационного, слабого, электромагнитного и сильного. Сильные взаимодействия отвечают за притяжение протонов и нейтронов в ядрах и обеспечивают стабильность самих

ядер. Эти взаимодействия — короткодействующие, с характерным радиусом действия порядка размера ядра, 10^{-12} – 10^{-13} см. Менее интенсивными являются знакомые нам электромагнитные взаимодействия, которые обеспечивают стабильность атомов и молекул за счёт взаимодействия положительно заряженных атомных ядер и отрицательно заряженных электронов. Радиус этих сил может быть очень большим. Непосредственно мы этого не чувствуем, поскольку атомы и молекулы в целом электрически нейтральны. Ещё менее интенсивные слабые взаимодействия отвечают за распад нейтрона в свободном состоянии, нестабильность многих атомных ядер. Эти взаимодействия обеспечивают, в частности, те ядерные циклы, благодаря которым происходит выделение энергии на Солнце. Самые малоинтенсивные взаимодействия, гравитационные, обеспечивают притяжение между массивными телами и, следовательно, существование планет, Солнечной системы, галактик и т.д.

Все эти представления, полученные нами в школе, абсолютно правильны. Но проблема состоит в том, что взаимодействия проявляются по-разному на разных расстояниях, различными могут быть и объекты, между которыми эти взаимодействия осуществляются. Стандартная модель — это квантовая теория, описывающая то, как устроена природа на расстояниях, на три-четыре порядка меньших, чем размеры ядер и протонов. "Микроскопами", которые позволяют получить информацию о явлениях на столь предельно малых расстояниях, являются коллайдеры — как завершившие уже свою работу установки LEP I, LEP II (LEP — Large Electron-Positron collider), SLAC (Stanford Linear Collider), HERA (Hadron-Electron Ring Accelerator), Tevatron и др., так и ныне действующий крупнейший в истории Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider — LHC) и ожидаемый в будущем международный линейный коллайдер ILC (International Linear Collider).

Для того чтобы понять, какие расстояния можно изучать на том или ином коллайдере, удобно воспользоваться принятой в физике высоких энергий релятивистской системой единиц. В этой системе единицами измерения являются постоянная Планка $\hbar = 6,582 \times 10^{-22}$ МэВ·с и скорость света $c = 2,998 \times 10^{10}$ см·с⁻¹. Один электронвольт — это энергия, которую приобретает электрон с зарядом $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл при прохождении разности потенциалов в 1 В ($1 \text{ эВ} = q_e \cdot 1 \text{ В}$). В релятивистской системе единиц полагают $\hbar = c = 1$, что позволяет получить простое, но очень важное

Боос, Э. Э. Стандартная модель и предсказания для бозона Хиггса / Э. Э. Боос. — DOI: 10.3367/UFNr.0184.201409h.0985. — Текст : непосредственный // Успехи физических наук. — 2014. — Т. 184, № 9. — С. 985-996 : 10 рис. — Библиогр.: с. 996 (27 назв.). — Материалы научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук. — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2014/9/h> (дата обращения: 20.01.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0042-1294.

Стандартная модель — это квантовая теория, описывающая то, как устроена природа на расстояниях, на три-четыре порядка меньших, чем размеры ядер и протонов. «Микроскопами», которые позволяют получить информацию о явлениях на столь предельно малых расстояниях, являются коллайдеры.

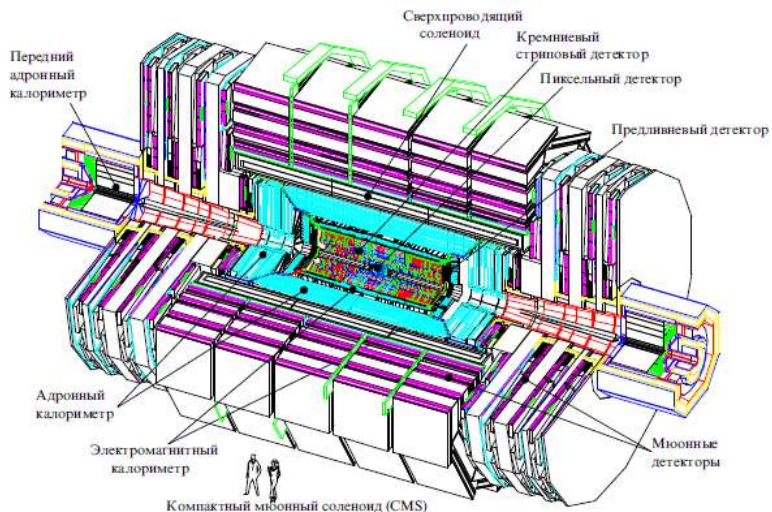


Рис. 1. Составные части детектора CMS.

Ланев, А. В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики / А. В. Ланев. – DOI: 10.3367/UFN.0184.201409i.0996. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 996-1004 : 6 рис., 1 табл. – Библиогр.: с. 1003-1004 (73 назв.). – Материалы научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2014/9/i> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Важная составляющая часть Стандартной модели – механизм Браута-Энглера-Хиггса, в котором... возникают ненулевые массы элементарных частиц, а из-за квантовых возмущений поля Хиггса появляется новая элементарная частица – бозон Хиггса.

т.е. слабо, что гарантируется симметриями теории, киральной для фермионов и калибровочной для бозонов. Такой симметрии, которая запрещала бы столь сильную зависимость массы от масштаба, в случае скалярного бозона Хиггса нет. Если потребовать, чтобы поправки к массе бозона Хиггса не превышали самой массы, $\delta M_H < M_H$, то ограничение на Λ составит величину, меньшую 1 ТэВ, что находится уже на грани противоречия с данными, поскольку никакой "новой физики" на таком масштабе пока не обнаружено. Эта трудность, возможно техническая, носит название "проблема малых иерархий". Для её решения, по-видимому, необходимо что-то в дополнение к СМ.

В данной короткой статье мы рассмотрели, в основном, электрослабую часть СМ с механизмом ВЕН, появление свойства бозона Хиггса и ограничения на него. Сильную часть СМ, квантовую хромодинамику, физику матрицы СКМ, физику нейтринного сектора, как и многие другие вопросы, мы не затрагивали. Поиск и обнаружение бозона Хиггса на LHC в экспериментах CMS (Compact Muon Solenoid) и ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), следствии этого открытия, трудности СМ, теоретические идеи выхода за рамки СМ и поиски эффектов "новой физики" обсуждаются в других докладах, представленных на научной сессии Отделения физических наук РАН "Физика на Большом адронном коллайдере. Бозон Хиггса" 26 февраля 2014 г.

Автор выражает благодарность В.А. Рубакову за предложение подготовить данный доклад. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 12-02-93108-НЦННЛ-а) и Программой поддержки ведущих научных школ (грант НШ-3042.2014.2).

Список литературы

1. Glashow S.L. *Nucl. Phys.* **22** 579 (1961)
2. Weinberg S. *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967)
3. Salam A. *Conf. Proc. CERN* **EP 367** (1968)
4. Buchmüller W, Laidjine C, in *European School of High-Energy Physics, Kitzbühel, Austria, 2005* (CERN-2006-014, Ed. R. Fleischer) (Geneva: CERN, 2006) p. 1; hep-ph/0609134
5. Pich A, in *European School of High-Energy Physics, Averborg, Sweden, 2006* (CERN-2007-003, Ed. R. Fleischer) (Geneva: CERN, 2007) p. 1; arXiv:0705.4264
6. Высоцкий М И и др., в сб. *Труды летней школы физики "Датонск"*, 2006 (М.: Арт-Инжин-Центр, 2006) с. 299
7. Altarelli G, in *The Landolt-Börnstein Database, Group 1, 21A, 3* (Springer Materials, Ed. H. Schopper) (Berlin: Springer-Verlag, 2006); <http://www.springermaterials.com/index/bookdetail.html>
8. Rubakov V, in *European School of High-Energy Physics, Hervegnote-sur-Semois, Belgium, 2008* (CERN-2009-002, Eds N. Ellis, R. Fleischer) (Geneva: CERN, 2009) p. 1
9. Hofle W, in *European School of High-Energy Physics, Buzzeo, Germany, 2008* (CERN-2010-002, Eds C. Geppert, M. Spiropulu) (Geneva: CERN, 2010) p. 1; arXiv:1012.3883
10. Леонидов А В, в сб. *Физика элементарных частиц и предтеория Большого адронного коллайдера. Летняя школа Физики Датонск "Датонск"* (М.: ЛЕНАНД, 2011) с. 7
11. Босе Э С, в сб. *Физика элементарных частиц и предтеория Большого адронного коллайдера. Летняя школа Физики Датонск "Датонск"* (М.: ЛЕНАНД, 2011) с. 156
12. Рубаков В А *УФН* **182** 1017 (2012); *Rubakov V A Phys. Usp.* **55** 949 (2012); Рубаков В А *УФН* **181** 653 (2011); *Rubakov V A Phys. Usp.* **54** 633 (2011)
13. Окунь Л Б *УФН* **182** 1026 (2012); *Okun L B Phys. Usp.* **55** 958 (2012)
14. Окунь Л Б *УФН* **182** 1031 (2012); *Okun L B Phys. Usp.* **55** 963 (2012)
15. Altarelli G "Collider physics within the Standard Model: a primer", CERN-PH-TH.2013-019, arXiv:1305.3842
16. Bilenchuk E "Field theory and the electro-weak Standard Model", in *The 2013 European School of High-Energy Physics, Hungary, 3 - 18 June 2013*

17. The ALEPH Collab., The DELPHI Collab., The L3 Collab., The OPAL Collab., The LEP Electroweak Working Group *Phys. Rep.* **532** 119 (2013); CERN-PH-EP/2013-022; arXiv:1302.3415
18. Гинзбург В Л, Ландау Л Д *ЖЭТФ* **20** 1064 (1950); *Ginzburg V L. On Superconductivity and Superfluidity* (Berlin: Springer, 2009) p. 113
19. Englert F, Brout R *Phys. Rev. Lett.* **13** 321 (1964)
20. Higgs P W *Phys. Lett.* **12** 132 (1964)
21. Higgs P W *Phys. Rev. Lett.* **13** 508 (1964)
22. Фаддеев Л Д, Славнов А А *Введение в квантовую теорию калибровочных полей 2-е изд.* (М.: Наука, 1988); *Faddeev L D, Slavnov A A Gauge Fields. Introduction to Quantum Theory 2nd ed.* (Reading, Mass.: Addison-Wesley Publ., 1991)
23. Djouadi A *Phys. Rep.* **457** 1 (2008)
24. Dittmaier S et al. (LHC Higgs Cross Section Working Group) *Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables* (Geneva: CERN, 2011) DOI:10.3170/CERN-2011-002; arXiv:1101.0993
25. Campbell J M et al. "Higgs boson production in association with bottom quarks", in *Physics at TeV Colliders. Proc. of the Workshop, Les Houches, France, May 26 - June 3, 2003*, hep-ph/0405302
26. Binoth S, Gabrielli E, Mele B *JHEP* **2013**(01)088 (2013)
27. Baak M et al. *Eur. Phys. J. C* **72** 2005 (2012)

PACS numbers: H30.-j, 12.15.-y, 12.60.-L, 14.70.-y, 14.80.Bn, 95.35.+d
DOI: 10.3367/UFN.0184.201409.0996

Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики

А. В. Ланев¹

1. Введение

Предсказания Стандартной модели (СМ) хорошо описывают наблюдаемую физику элементарных частиц. Важная составная часть СМ — механизм Браута-Энглера-Хиггса, в котором вводится скалярное поле Хиггса с ненулевым вакуумным ожиданием в результате спонтанного нарушения симметрии; за счёт взаимодействия с этим полем возникают ненулевые массы элементарных частиц, а из-за квантовых возмущений поля Хиггса появляется новая элементарная частица — бозон Хиггса. Однако до недавнего времени не было экспериментального подтверждения существования бозона Хиггса. Одной из главных целей сооружения Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider, LHC) и Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария) было выяснение того, существует ли бозон Хиггса, какова его масса, соответствуют ли его характеристики СМ. При этом на полной проектной энергии в системе центра масс сталкиваются протоны $\sqrt{s} = 14$ ТэВ и первоначально планируемой интегральной светимости $\mathcal{L}_{int} = 300 \text{ fb}^{-1}$ должны были произойти какие-то открытия: или бозона Хиггса, или других новых сильных эффектов, поскольку иначе при энергии более 1 ТэВ произошло бы perturbativное нарушение унитарности в рассеянии промежуточных векторных бозонов [1]. Другими главными физическими целями сооружения LHC является поиск физики вне

¹ От имени коллаборации CMS.

А. В. Ланев, Общественный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., РФ
E-mail: Alexander.Lanov@cern.ch

36. CMS Collab. "CMS contribution to the Socrates 2013 report", arXiv:1307.7135

37. De Bruyn K et al. *Phys. Rev. Lett.* **109** 041801 (2012); arXiv:1204.1737

38. Aaij R et al. (LHCb Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **110** 021801 (2013); arXiv:1211.2674

39. CMS and LHCb Collab., CMS-PAS-BPH-13-007, LHCb-CDFN-2013-012; <http://cds.cern.ch/record/1564324>

40. CMS Collab., CMS-PAS-FTR-13-022; <http://cds.cern.ch/record/1605250>

41. The ATLAS, CDF, CMS, D0 Collab., LHC/TeVatron NOTE, ATLAS-CONF-2014-008, CDF Note 11073, CMS PAS TOP-13-014, D0 Note 8416; arXiv:1403.4427

42. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *JHEP* **2014** (02) 024 (2014); arXiv:1312.7582

43. Khachatryan V et al. (CMS Collab.) *JHEP* **2014** (06) 090 (2014); arXiv:1403.7566

44. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **112** 231802 (2014); arXiv:1406.2942

45. CMS Collab., CMS-PAS-TOP-13-009; <http://cds.cern.ch/record/1631990>

46. Khachatryan V et al. (CMS Collab.) *JHEP* **2010** (09) 091 (2010); arXiv:1009.4122

47. Li W *Mod. Phys. Lett.* **A27** 1230018 (2012); arXiv:1206.0148

48. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *Phys. Lett. B* **718** 795 (2013); arXiv:1209.5482

49. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *JHEP* **2011** (07) 076 (2011); arXiv:1105.2438

50. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *JHEP* **2013** (12) 030 (2013); arXiv:1310.7291

51. CMS Collab., CMS-PAS-SMP-14-002; <http://cds.cern.ch/record/1720220>

52. Leike A *Phys. Rep.* **317** 143 (1999); hep-ph/9805494

53. Rizzo T G. SLAC-PUB-12129; hep-ph/9610104

54. Randall L, Sundrum R. *Phys. Rev. Lett.* **83** 4690 (1999); hep-th/9906064

55. CMS Collab., CMS-PAS-EXO-12-001; <http://cds.cern.ch/record/1519132>

56. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *Phys. Lett. B* **720** 63 (2013); arXiv:1212.6175

57. Dimopoulos S, Landsberg G. *Phys. Rev. Lett.* **87** 161602 (2001); hep-ph/0106293

58. Giddings S B, Thomas S D. *Phys. Rev. D* **65** 055010 (2002); hep-ph/0106219

59. Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G. *Phys. Lett. B* **429** 263 (1998); hep-ph/9810315

60. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *JHEP* **2013** (07) 178 (2013); arXiv:1301.5338

61. Rubakov V A. *Sov. J. Nucl. Phys.* **171** 913 (2001); Rubakov V A. *Phys. Usp.* **44** 171 (2001)

62. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 111801 (2012); arXiv:1112.0658

63. CMS Collab., CMS-PAS-EXO-12-027; <http://cds.cern.ch/record/1523261>

64. CMS Collab., CMS-PAS-EXO-12-031; <http://cds.cern.ch/record/1523260>

65. CMS Collab., CMS-PAS-EXO-12-048; <http://cds.cern.ch/record/1525585>

66. CMS Collab., CMS-PAS-EXO-13-004; <http://cds.cern.ch/record/1563245>

67. CMS Collab., CMS-PAS-B2G-13-004; <http://cds.cern.ch/record/1697173>

68. Сахаров А. Д. *Известия АН СССР* **5** 32 (1967); Sakharov A D. *JETP Lett.* **5** 24 (1967)

69. Сахаров А. Д. *УФН* **144** (5) 61 (1991); Sakharov A D. *Sov. Phys. Usp.* **34** 392 (1991)

70. Копелович Т. *УФН* **183** 783 (2013); Kopelovich T. *Phys. Usp.* **56** 347 (2013)

71. Chatrchyan S et al. (CMS Collab.) *Phys. Lett. B* **731** 173 (2014); arXiv:1310.1638

72. Высокый М. И., Неноров Р. Б. *УФН* **171** 939 (2001); Vysockiy M I, Nenorov R B. *Phys. Usp.* **44** 919 (2001)

73. CMS Physics Results, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResults>

PACS numbers: **12.15.-y, 12.60.-i, 14.80.-j**
 DOI: 10.3367/UFNr.0184.201409j.1004

Хиггсовский бозон открыт: что дальше?

Д. И. Казаков

1. Введение

Открытие хиггсовского бозона [1, 2] в 2012 г. и присуждение Нобелевской премии в 2013 г. ознаменовали важный этап в физике элементарных частиц. Был экспериментально подтверждён теоретически предсказанный около 50 лет назад механизм генерации масс фундаментальных частиц — механизм спонтанного нарушения симметрии Браута-Энглера-Хиггса [3, 4]. Тем самым Стандартная модель (СМ) фундаментальных взаимодействий получила логическое завершение и приобрела статус стандартной теории. Под СМ (Standard Model — SM) понимается описание сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий между кварками и лептонами, основанное на калибровочной теории с группой симметрии $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$. При этом кварки являются триплетами, а лептоны — синглетами группы $SU(3)_C$, левые компоненты кварков и лептонов представляют собой дублеты группы $SU(2)_L$, а правые компоненты — синглеты, и все они имеют гиперзаряд согласно группе $U(1)_Y$. Состав полей материи и переносчиков четырёх фундаментальных взаимодействий СМ представлен на рис. 1. К уже известным частицам, все из которых были открыты в XX в., добавился хиггсовский бозон, открытый уже в XXI в.

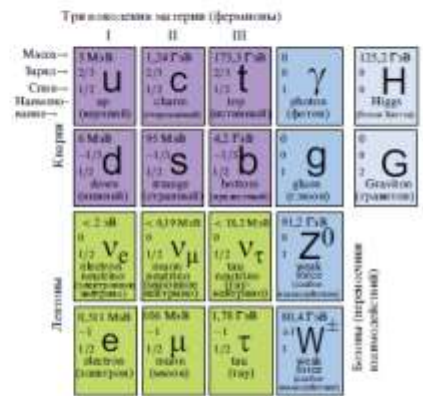


Рис. 1. Стандартная модель фундаментальных взаимодействий (ссылка [5]).

Д.И. Казаков. Лаборатория теоретической физики им. Н.И. Басина Общественного института ядерных исследований, Дубна, Московская обл., РФ
 Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алкашова, Москва, РФ
 Долгоруцкий, Московская обл., РФ

Казаков, Д. И. Хиггсовский бозон открыт: что дальше? / Д. И. Казаков. – DOI: 10.3367/UFNr.0184.201409j.1004. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 1004-1016 : 20 рис.. – Библиогр.: с. 1015-1016 (79 назв.). – Материалы научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук. . – ISSN 0042-1294. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2014/9/j> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный.

Открытие хиггсовского бозона в 2012 г. и присуждение Нобелевской премии в 2013 г. ознаменовали важный этап в физике элементарных частиц. Был экспериментально подтверждён теоретически предсказанный около 50 лет назад механизм генерации масс фундаментальных частиц — механизм спонтанного нарушения симметрии Браута-Энглера-Хиггса. Тем самым Стандартная модель (СМ) фундаментальных взаимодействий получила логическое завершение и приобрела статус стандартной теории. Возникает вопрос: это конец истории или её новый этап? Ответ, который даёт научное сообщество, не вызывает сомнений: это начало большой программы исследований длиной в несколько десятилетий.

Дремин, И. М. Некоторые новые открытия на коллайдерах / И. М. Дремин. – DOI: 10.3367/UFNr.2018.01.038284. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 4. – С. 437-445 : 7 рис. – Библиогр.: с. 444-445 (29 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2018/4/d> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Охарактеризованы последние экспериментальные открытия, сделанные в исследованиях взаимодействий протонов при очень высоких энергиях и отобранные для демонстрации предсказательной силы теории и её попыток выяснить природу некоторых менее понятных явлений. Описаны следующие явления: открытие бозона Хиггса, возрастание сечений взаимодействия протонов по мере увеличения энергии, возрастание доли процессов упругого рассеяния в том же интервале энергий, экспоненциальное убывание упругого дифференциального сечения при довольно больших переданных импульсах (на малых расстояниях), а также испускание струй и образование хребта в неупругих процессах с очень большой множественностью.

Некоторые новые открытия на коллайдерах

И.М. Дремин

Пять самых последних экспериментальных открытий, сделанных в исследованиях взаимодействий протонов при очень высоких энергиях, отобранные для демонстрации предсказательной силы теории и её попытки объяснить природу некоторых менее понятных явлений. К ним относятся: открытие бозона Хиггса, возрастание сечений взаимодействия протонов по мере увеличения энергии, возрастание доли процессов упругого рассеяния в том же интервале энергий, экспоненциальное убывание упругого дифференциального сечения при довольно больших переданных импульсах (на малых расстояниях), а также испускание струй и образование хребта в неупругих процессах с очень большой множественностью.

Ключевые слова: протон, упругое рассеяние, условие унитарности

PACS number: 13.75.Cs, 13.85.Dx

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.01.038284>

Содержание

1. Введение (437).
 2. Зависимость сечений взаимодействия от энергии (438).
 3. Зависимость от энергии отношения упругого сечения к полному сечению (439).
 4. Дифференциальное сечение упругого рассеяния (440).
 5. Струи и хребты в неупругих процессах (442).
 6. Обсуждение и заключение (442).
- Список литературы (444).

Последние достижения в физике относятся к предсказанию. Предсказание — не предпримчивое и не дано!
Л.Д. Ландау

1. Введение

Непрерывный прогресс физики опирается на цепь последовательных открытий. Физика частиц высоких энергий берёт своё начало в исследованиях космических лучей, в которых были обнаружены многие новые неожиданные свойства взаимодействий частиц. Изобретение ускорителей частиц, а позднее коллайдеров привело к заметному повышению точности экспериментальных сведений о свойствах взаимодействий частиц. Сейчас наиболее впечатляющие результаты приходят из исследований на

Большом адронном коллайдере (БАК) (Large Hadron Collider — LHC). Пучки протонов сталкиваются там с энергиями вплоть до 13 ТэВ ($\sqrt{s} \approx 13$ ТэВ) в их системе центра масс (с.ц.м.). Эти энергии превышают собственную массу покоя протона более чем на четыре порядка по величине. Основная цель исследований на коллайдере состоит в изучении сил, управляющих взаимодействиями частиц, и выяснения внутреннего строения фундаментальных структурных блоков окружающего нас вещества².

Теория таких сил известна сейчас под названием Стандартной модели (СМ), объединяющей сильные и электрослабые взаимодействия. Хотя в настоящее время не найдено указаний на критические отклонения от предсказаний СМ, по их экспериментальные поиски и рассмотрение разных теоретических возможностей выхода за рамки СМ ведутся весьма активно. Основанием для приложения усилий в этом направлении служит как новые экспериментальные и наблюдательные факты, требующие своего описания и объяснения, так и оригинальные теоретические гипотезы. Стоит, в частности, упомянуть о проблемах тёмной материи и тёмной энергии, о поисках суперсимметричных партнёров наблюдаемых частиц и т.д. Вместе с тем не всем экспериментальным фактам пока удалось найти объяснение, может быть, всего лишь вследствие недостаточной развитости методов расчёта в рамках Стандартной модели. Эта проблема особенно наглядно проявляется в случае сильных взаимодействий с большой константой связи (в так называемых мягких адронных процессах). О некоторых из них, в частности, и пойдёт речь в настоящей статье.

Сначала мы кратко расскажем об открытии бозона Хиггса на БАК, а затем опишем некоторые новые характеристики взаимодействий протонов, которые требуют своей интерпретации и дальнейшего более глубо-

¹ Из опубликованной в [1] рецензии Л.Д. Ландау в 1960 г., основанной на его магнетронной записке.

И.М. Дремин, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 33, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: itremin@ph.fg
Национальный исследовательский ядерный университет «МИЯФ», Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация

Статья поступила в 13 января 2018 г.,
после доработки 21 января 2018 г.

² Напомним, что протон является ядром атома водорода и состоит из трёх кварков: двух верхних и одного нижнего.

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Программа изучения бозона Хиггса и открытые вопросы в физике частиц и космологии

Б. Хайнеман, Й. Нир

Программа изучения бозона Хиггса непосредственно связана со златыми первоначальными фундаментальными вопросами в физике частиц и космологии. Поэтому при обсуждении проектов будущих коллайдерных экспериментов одним из способов их сравнения является оценка их потенциала для достижения прогресса в нахождении ответов на эти вопросы. В данной статье обсуждаются перспективы различных экспериментальных поисков симметричных скалярных частиц, которые могут быть связаны с несколькими открытыми вопросами, так и в измерении распада бозона Хиггса на пары фермионов, что имеет непосредственное отношение к загадкам в флейворной физике. Приводится также перечень наиболее важных и/или открытых в хиггсовском секторе, которые связаны с другими открытыми вопросами.

Ключевые слова: бозон Хиггса, e^+e^- -коллайдер, pp-коллайдер, флейворная физика, Стандартная модель, барьонная асимметрия Вселенной

PACS numbers: 12.10.-g, 12.60.-i, 14.80.-j

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.05.038568>

Содержание

1. Введение (985)
 2. Эксперименты (986)
 3. Скалярные скаляры (986)
 - 3.1. $M_s < M_h/2$ 3.2. $M_s > M_h/2$
 4. В чём состоит решение флейворной загадки (загадки)? (990)
 - 4.1. Динамическая массовка (992)
 - 5.1. Является ли h единственной? 5.2. Является ли h элементарной? 5.3. Что отвечает за переход $m_b^2 \ll m_c^2$? 5.4. Был ли элементарный переход фазовым переходом (случай) первого рода?
 - 5.5. Действительно ли барьонная асимметрия возникла за счёт CP-нарушения взаимодействия?
 6. Заключение (995)
- Список литературы (996)

1. Введение

Настоящим бриллиантом в короне достижений экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК, LHC) по сей день является открытие бозона Хиггса [1, 2] в июле 2012 г. Однако открытие бозона Хиггса — это не конец, но лишь часть пути поиска, который начался с теоретических предсказаний Брута, Энглера [3] и Хиггса [4]. В то время как существование бозона Хиггса отвечает на вопрос, как элементарные частицы приобретают массу, оно, в действительности, не объясняет сами значения

масс, и, кроме того, поднимает новые вопросы. "Программа изучения бозона Хиггса" — масштабный исследовательский проект на LHC и на всех предлагаемых будущих коллайдерных экспериментах. С экспериментальной точки зрения программа изучения бозона Хиггса состоит в проведении большого набора измерений, нацеленных на выяснение детальных свойств этой уникальной частицы. Эта программа является также весьма захватывающей с теоретической точки зрения, поскольку она имеет отношение к нескольким открытым вопросам и загадкам в физике частиц и космологии.

В настоящей статье мы исследуем связь свойств бозона Хиггса с фундаментальными вопросами в физике частиц и космологии. Данная работа была инициирована обсуждением будущих ускорителей в Комитете по научной стратегии в ЦЕРНе. Измерения физических величин, относящихся к бозону Хиггса, рассматриваются как основная часть научной программы экспериментов на будущих ускорителях. В данной статье сжато представлены выводы по имеющейся литературе о связи между прецизионными измерениями в физике бозона Хиггса и нерешёнными фундаментальными вопросами о нашей Вселенной. Мы также приводим оценки точностей различных измерений на будущих коллайдерах и сопоставляем их с точностями, которые требуются для получения ответа на тот или иной вопрос. Следует отметить, что для многих из этих вопросов существуют также другие важные наблюдаемые (как в коллайдерных, так и в других экспериментах), не связанные с измерениями в хиггсовском секторе, однако их обсуждение выходит за рамки данной работы.

Ниже представлен список из семи важнейших открытых вопросов в физике частиц и космологии, на которые программа по изучению бозона Хиггса может дать ответы.

1. Является ли h единственной скалярной степенью свободы?
2. Является ли h элементарной частицей?

Хайнеман, Б. Программа изучения бозона Хиггса и открытые вопросы в физике частиц и космологии / Б. Хайнеман, Й. Нир ; перевод с английского С. В. Демидова. — DOI: 10.3367/UFNr.2019.05.038568. — Текст : непосредственный // Успехи физических наук. — 2019. — Т. 189, № 9. — С. 985-996 : 11 табл. — Библиогр.: с. 996 (75 назв.). — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2019/9/e> (дата обращения: 20.01.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0042-1294.

Программа изучения бозона Хиггса непосредственно связана со многими нерешёнными фундаментальными вопросами в физике частиц и космологии; при обсуждении проектов будущих коллайдерных экспериментов одним из методов сравнения является оценка их потенциала для достижения прогресса в нахождении ответов на эти вопросы. Приведён перечень наиболее важных наблюдаемых в хиггсовском секторе, которые связаны с другими открытыми вопросами.

**ЧТО ПОЧИТАТЬ
ЕЩЁ?**

1. Evans, L. LHC Machine / L. Evans and P. Bryant. – DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08001. – Текст : непосредственный // Journal of Instrumentation. – 2008. – Vol. 3, August. – S08001. – Библиогр.: pp. 154-158 (65 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08001> (дата обращения: 22.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 1748-0221.

2. Абрамов, В. С. Сверхбезызлучательные состояния, нейтрино и бозон Хиггса во фрактальных квантовых системах / В. С. Абрамов. – DOI: 10.31857/S0367676520030035. – Текст : непосредственный // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 3. – С. 371-376 : 9 рис. – Библиогр.: с. 375-376 (15 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42446508> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0367-6765.

3. Аномально взаимодействующие бозоны Z: пример вклада ОИЯИ в физику на Большом адронном коллайдере / В. А. Бедняков [и др.]. – DOI: 10.3367/UFNr.0186.201604d.0425. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186, № 4. – С. 425-433 : 8 рис., 4 табл. – Библиогр.: с. 433 (20 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2016/4/d> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

4. Барвинский, А. О. Туннелирующее космологическое состояние и происхождение хиггсовской инфляции в Стандартной модели / А. О. Барвинский. – DOI: 10.4213/tmf6746. – Текст : непосредственный // Теоретическая и математическая физика. – 2012. – Т. 170, № 1. – С. 62-86 : 9 рис. – Библиогр.: с. 85-86 (38 назв.). – Материалы XVI Международного семинара по физике высоких энергий "Quarks-2010". – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/tmf/v170/i1/p62> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0564-6162.

5. Басалаев, А. Е. Поиски частиц темной материи на Большом адронном коллайдере = Dark matter searches at the LargeHadron Collider / А. Е. Басалаев, Ю. Г. Нарышкин. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер.: Физико-математические науки. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 122-137. – Библиогр.: с. 133-135 (50 назв.). – Список литературы представлен на рус. и англ. яз. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://phymath.spbstu.ru/article/2018.39.12> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 2304-9782.

6. Высоцкий, М. И. К открытию бозона Хиггса / М. И. Высоцкий. – Текст : непосредственный // Природа. – 2013. – № 1. – С. 4-10 : 5 рис. – Библиогр.: с. 10 (12 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18830404> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0032-874X.

7. Гинзбург, В. Л. О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о "физическом минимуме" на начало XXI века / В. Л. Гинзбург. – DOI: 10.3367/UFNr.0174.200411g.1240. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 11. – С. 1240-1255. – Библиогр.: с. 1254-1255 (77 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2004/11/g> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

8. Долгополов, М. В. Бифуркационные наборы расширенного потенциала Хиггса / М. В. Долгополов, С. П. Заводов, Е. Ю. Петрова. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки. – 2013. – № 4 (33). – С. 173-183. – Библиогр.: с. 172-173 (15 назв.). Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21159195> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 1991-8615.

9. Дремин, И. М. Изменение структуры протонов с ростом их энергии / И. М. Дремин. – Текст : непосредственный // Ядерная физика. – 2014. – Т. 77, № 10. – С. 1286-1292. – Библиогр.: с. 1292 (22 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22020234> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0044-0027.

10. Дремин, И. М. Неожиданные свойства взаимодействия протонов при высоких энергиях / И. М. Дремин. – DOI: 10.3367/UFNr.2016.11.037977. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 4. – С. 353-366 : 4 рис. – Библиогр.: с. 366 (48 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2017/4/a> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

11. Дубинин, М. Н. Упрощённые параметрические сценарии МССМ после открытия бозона Хиггса / М. Н. Дубинин, Е. Ю. Петрова. – Текст : непосредственный // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79, № 4. – С. 302-314. – Библиогр.: с. 313 (48 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26496044> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0044-0027.

12. Казаков, Д. И. Перспективы физики элементарных частиц / Д. И. Казаков. – DOI: 10.3367/UFNr.2018.04.038353. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189, № 4. – С. 387-401 : 21 рис. – Библиогр.: с. 400-401 (64 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2019/4/e> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

13. Красников, Н. В. Поиск правого WR-бозона и тяжёлого нейтрино на Большом адронном коллайдере / Н. В. Красников, В. А. Матвеев. – DOI: 10.4213/tmf8727. – Текст : непосредственный // Теоретическая и математическая физика. – 2014. – Т. 181, № 3. – С. 487-494 : 4 рис. – Библиогр.: с. 494 (11 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/tmf/v181/i3/p487> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0564-6162.

14. Ланев, А. В. Последние результаты коллаборации CMS по поискам физики вне стандартной модели / А. В. Ланев. – Текст : непосредственный // Ядерная физика. – 2015. – Т. 78, № 6. – С. 558-562. Библиогр.: с. 561 (31 назв.). – Доклад на международной сессии-конференции "Физика фундаментальных взаимодействий". – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23387951> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0044-0027.

15. Первушин, В. Н. Данные по Сверхновым и реликтовому излучению и масса частицы Хиггса в масштабно-инвариантной теории гравитации / В. Н. Первушин. – Текст : непосредственный // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: Физика. – 2010. – Вып. 1. – С. 18-23. – Библиогр.: с. 23 (28 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15263230> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 1814-733X.

16. Поиск и идентификация эффектов больших пространственных измерений в процессах рождения лептонных и фотонных пар на Большом адронном коллайдере / А. А. Панков [и др.]. – Текст : непосредственный // Ядерная физика. – 2015. – Т. 78, № 6. – С. 499-513. – Библиогр.: с. 512 (52 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23387945> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0044-0027.

17. Результаты поиска бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8 ТэВ / А. А. Артамонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Ядерная физика. – 2016. – Т. 79, № 3. – С. 253-264. – Библиогр.: с. 263 (27 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26068340> (дата обращения: 23.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0044-0027.

18. Рубаков, В. А. К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса / В. А. Рубаков. – DOI: 10.3367/UFNr.0182.201210a.1017. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 10. – С. 1017-1025 : 3 рис. – Библиогр.: с. 1025 (33 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2012/10/a> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

19. Рубаков, В. А. Космология и Большой адронный коллайдер / В. А. Рубаков. – DOI: 10.3367/UFNr.0181.201106f.0655. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, № 6. – С. 655-664 : 1 рис. – Библиогр.: с. 664 (44 назв.). – Материалы научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2011/6/f> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

20. Рыскин, М. Г. Распределения партонов при малых x / М. Г. Рыскин, А. Г. Шуваев. – DOI: 10.7868/S0370274X14090124. – Текст : непосредственный // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2014. – Т. 99, вып. 9. – С. 636-644. – Библиогр.: с. 643-644 (22 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21695949> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0370-274X.

21. Рэндалл, Л. Достучаться до небес: Научный взгляд на устройство Вселенной : учебное пособие / Л. Рэндалл. – 1. – Москва : ООО "Альпина нон-фикшн", 2016. – 518 с. – ISBN 9785916712643. – URL: <http://znanium.com/go.php?id=912697> (дата обращения: 19.01.2021). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей. – Текст : электронный.

22. Савина, М. В. Поиск калуца-клейновских возбуждений гравитона и микроскопических черных дыр с помощью детектора CMS на ускорителе LHC / М. В. Савина. – Текст : непосредственный // Ядерная физика. – 2015. – Т. 78, № 6. – С. 571-575. Библиогр.: с. 575 (23 назв.). – Доклад на международной сессии-конференции "Физика фундаментальных взаимодействий". – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23387954> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0044-0027.

23. Скобелев, В. В. Бозоны Хиггса в ранней Вселенной. Размерность нашего пространства. Ч. I. Стационарное состояние "хиггсовской" Вселенной с максимумом энтропии / В. В. Скобелев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 16-25. – Библиогр.: с. 25 (11 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19114468> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: по подписке. – ISSN 0021-3411.

24. Скобелев, В. В. Бозоны Хиггса в ранней Вселенной. Размерность нашего пространства. Ч. II. Квазистационарные состояния "хиггсовской" Вселенной / В. В. Скобелев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6. – С. 91-96. – Библиогр.: с. 96 (11 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19431120> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: по подписке. – ISSN 0021-3411.

25. Шапошников, М. Е. Асимптотическая безопасность гравитации и масса бозона Хиггса / М. Е. Шапошников. – DOI: 10.4213/tmf6766. – Текст : непосредственный // Теоретическая и математическая физика. – 2012. – Т. 170, № 2. – С. 280-291 : 2 рис. – Библиогр.: с. 290-291 (55 назв.). – Материалы XVI Международного семинара по физике высоких энергий "Quarks-2010". – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/tmf/v170/i2/p280> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0564-6162.

26. Шильцев, В. Д. Коллайдеры частиц высоких энергий: прошедшие 20 лет, предстоящие 20 лет и отдаленное будущее / В. Д. Шильцев. – DOI: 10.3367/UFNr.0182.201210d.1033. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 10. – С. 1033-1046 : 7 рис., 4 табл. – Библиогр.: с. 1046 (59 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2012/10/d> (дата обращения: 24.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

27. Энглер, Ф. Механизм БЭХ и его скалярный бозон / Ф. Энглер ; перевод с английского К. А. Постнова. – DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510f.1050. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1050-1058 : 18 рис. – Библиогр.: с. 1058 (20 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2015/10/f> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

ПРОДОЛЖЕНИЕ СЛЕДУЕТ

© Стольниц, М. М., виртуальная выставка, 2021