

Природа массы и эксперименты на будущих ускорителях частиц высоких энергий

Б.Л. Иоффе

Наблюдаемый мир — это мир, состоящий из нуклонов и электронов. Наличие массы у нуклона связано с нарушением киральной симметрии в квантовой хромодинамике (КХД). Поэтому опыты на ускорителях высоких энергий не могут пролить свет на природу массы материи в наблюдаемом мире. Происхождение массы материи будет выяснено, когда будет установлено нарушение симметрии в КХД.

PACS numbers: 12.15.Ff, 12.38.Aw, 14.80.Bn

Сейчас в ЦЕРН'е (Швейцария) сооружается большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider — LHC) со встречными пучками протонов 7×7 ТэВ. Пуск ускорителя намечен на 2007 г., начало экспериментов предполагается в 2008 г. Обсуждается возможность сооружения других ускорителей частиц высоких энергий: линейного ускорителя электронов и позитронов со встречными e^+e^- -пучками с энергиями 0,5–1 ТэВ, мюонного и фотонного коллайдеров. Цель экспериментов на будущих ускорителях частиц высоких энергий — исследование физики за пределами Стандартной модели (beyond the Standard Model), т.е. изучение процессов при энергиях, недоступных на современных ускорителях, поиски неизвестных, но предполагаемых новых тяжелых частиц — хиггсовского бозона, суперсимметричных частиц и т.д. Стандартной моделью называется $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ калибровочная теория, где $SU(3)$ соответствует квантовой хромодинамике — теории сильного взаимодействия, $SU(2) \times U(1)$ — электрослабой теории, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия. Эксперименты на действующих (или действовавших) ускорителях высоких энергий согласуются со Стандартной моделью и не дают каких-либо указаний на наличие новой физики вне нее. Найденные на опыте осцилляции нейтрино, первые данные о существовании майорановского нейтрино, а также астрофизические данные (существование темной материи) свидетельствуют, что такая физика есть. Поэтому с экспериментами на LHC и других будущих ускорителях частиц высоких энергий связаны большие ожидания.

Одна из важнейших проблем, нерешенных при проверке Стандартной модели, которую, как предполагается, должны решить опыты на LHC (и будущих ускорителях), является проблема возникновения масс

частиц. В докладе Де Рёка, Дж. Эллиса и Ф. Джиганотти [1], посвященном опытам на будущих ускорителях, говорится: "Наиболее важные области, где Стандартная модель оставила нерешенные проблемы, включают происхождение масс частиц ...". В совместном предположении экспериментов на LHC, сделанном коллаборациями ATLAS и CMS [2], сказано: " $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ калибровочные взаимодействия Стандартной модели ... не дают объяснения происхождения масс частиц". Утверждается также [3], что основной проблемой исследований на линейном e^+e^- -коллайдере является "механизм нарушения электрослабой симметрии, иными словами, каково происхождение массы в физике частиц". Аналогичным образом эта проблема формулируется и в других статьях, посвященных экспериментам на будущих ускорителях (см., например, [4, 5]).

Приведенные выше высказывания базируются на изначальной идее Стандартной модели. В Стандартной модели нарушение калибровочной $SU(2)$ -симметрии, которое необходимо для того, чтобы W^\pm и Z промежуточные бозоны стали массивными, реализуется за счет введения скалярного поля ϕ , дублета по $SU(2)$ -симметрии. Поле ϕ взаимодействует с полями W^\pm и Z , кварками, лептонами и само с собой. Предполагается, что потенциал самодействия таков, что его минимум возникает при отличном от нуля постоянном в пространстве и времени значении $\phi = \phi_0$. Таким образом, поле ϕ представляется в виде разложения вблизи минимума потенциала $\phi = \phi_0 + \chi$, где χ — квантовое поле, квантами которого являются хиггсовские бозоны. За счет постоянного скалярного поля ϕ_0 , т.е. членов $g^2 \phi_0^2 W^2$, $g^2 \phi_0^2 Z^2$, $h_{li} \phi_0 \bar{l}_i l_i$, $h_{qi} \phi_0 \bar{q}_i q_i$ в лагранжиане взаимодействия, возникают массы промежуточных бозонов, кварков и лептонов. (Здесь l_i, q_i — поля лептонов и кварков, h_{li}, h_{qi} — константы взаимодействия.) Поэтому наблюдение хиггсовского бозона и его взаимодействий с кварками и лептонами объяснит возникновение масс у лептонов и кварков. Именно эта возможность имеется в виду в приведенных выше высказываниях.

Цель настоящей заметки — обратить внимание на то, что выяснение вопроса о существовании хиггсовского бозона и о структуре его взаимодействий с кварками (и,

Б.Л. Иоффе. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова", 119218 Москва, Б. Черемушкинская 25, Российская Федерация
Тел. (495) 123-31-93. Факс (495) 883-96-01. E-mail: ioffe@itep.ru

Статья поступила 11 января 2006 г.

даже более широко, вообще изучение взаимодействий при сверхвысоких энергиях) не имеет отношения (точнее, имеет малое отношение) к происхождению масс частиц наблюдаемого мира. Наблюдаемый мир — звезды, планеты, галактики, окружающие нас предметы состоят из протонов, ядер и электронов. Электроны вносят в массу окружающего нас мира незначительный вклад — меньше 0,1 %. Поэтому, чтобы выяснить происхождение массы наблюдаемого мира, нужно выяснить происхождение массы нуклона. (Я оставляю пока в стороне вопрос о массе темной материи.) Нуклон состоит из u - и d -кварков. Но массы u - и d -кварков малы: $m_u + m_d \approx 10$ МэВ, т.е. их масса составляет малую долю $\sim 1-2\%$ от массы нуклона. Можно показать, что в формальном пределе $m_u, m_d \rightarrow 0$ масса нуклона практически не меняется. Масса нуклона возникает за счет спонтанного нарушения киральной симметрии в квантовой хромодинамике (КХД) и может быть выражена через нарушающие киральную симметрию вакуумные конденсаты [6]. Имеет место приближенная формула, выражающая массу нуклона через кварковый конденсат [6–8] (обзор современного состояния киральной симметрии в КХД и ее нарушения дан в [9, 10]),

$$m = [-2(2\pi)^2 \langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle]^{1/3}. \quad (1)$$

Здесь m — масса нуклона, $\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle$ — кварковый конденсат, q — поле u - или d -кварков. Из киральной симметрии в КХД (сохранения аксиального тока, нарушаемого массами кварков) вытекает выражение для кваркового конденсата (формула Гелл-Мана–Оакса–Реннера [11])

$$\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle = -\frac{1}{2} \frac{m_\pi^2 f_\pi^2}{m_u + m_d}, \quad (2)$$

где m_π и f_π — масса и константа распада π -мезона. При массах кварков, стремящихся к нулю ($m_u, m_d \rightarrow 0$), m_π^2 тоже стремится к нулю, так что $\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle$ стремится к постоянному пределу. Определенная недавно величина кваркового конденсата из данных по τ -распаду [10]

$$\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle = -(254 \text{ МэВ})^3 \pm 10\%.$$

Подстановка этого значения в (1) дает $m = 1,09$ ГэВ, экспериментальное значение массы нуклона $m = 0,94$ ГэВ. Таким образом, для выяснения причины возникновения массы нуклона нужно понять механизм нарушения киральной симметрии в КХД. Нарушение киральной симметрии происходит на больших расстояниях ~ 1 ферми = 10^{-13} см и, тем самым, не имеет отношения к опытам при высоких энергиях, исследующих малые расстояния $\sim 10^{-17}$ см. (На малых расстояниях

киральная симметрия сохраняется.) Выяснение механизма нарушения киральной симметрии в КХД — это теоретическая проблема. Возможно, здесь могут помочь расчеты на решетках, а также эксперименты по столкновениям тяжелых ионов при высоких энергиях, в которых можно надеяться получить информацию о фазовых переходах в КХД. Впрочем, в таких экспериментах плотность барионов велика, т.е. велик химический потенциал μ , тогда как в вакууме $\mu = 0$. Фазовые переходы при конечном μ и $\mu = 0$ могут быть совершенно различными [12, 13].

Масса электрона возникает за счет взаимодействия с хиггсовским полем. Поэтому происхождение масс протона и электрона совершенно разное, и сильное их отличие не столь удивительно.

Краткое замечание относительно темной материи. Природа ее сейчас неизвестна. По-видимому, частицы темной материи весьма тяжелые и слабо взаимодействуют с обычной материей. В этом случае маловероятно, что их масса возникает за счет взаимодействия с полем Хиггса.

Благодарю А.В. Самсонова за подбор материалов по планируемым экспериментам на будущих ускорителях. Работа была поддержана грантом CRDF, RUP2-2621-MO-04 и фондом ЕС по проекту "Изучение сильно взаимодействующей материи", контракт 2004 No. R113-ST-2004-506078.

Список литературы

1. De Roeck A, Ellis J, Gianotti F "Physics motivations for future CERN accelerators", Report CERN-TH/2001-23; hep-ex/0112004
2. Branson J G et al. (ATLAS Collab., CMS Collab.) *EPJdirect C 4* (N1) 1 (2002); hep-ph/0110021
3. Richard F *Int. J. Mod. Phys. A* **19** 1240 (2004); hep-ph/0312020
4. Simmons E H, in *Flavor Physics for the Millennium, TASI 2000: Proc. of the Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics, Boulder, CO, USA, 2000* (Ed. J L Rosner) (Singapore: World Scientific, 2001); hep-ph/0011244
5. Froggatt C D "The origin of mass", in *Proc. of the 6th Intern. Moscow School of Physics (XXXI ITEP Winter School of Physics), ITEP, February 18–26, 2003*; <http://www.itep.ru/ws/2003/?proc>; *Surv. High Energy Phys.* **18** 77 (2003); hep-ph/0307138
6. Ioffe B L *Nucl. Phys. B* **188** 317 (1981); **191** 591 (1981)
7. Беляев В М, Иоффе Б Л *ЖЭТФ* **83** 876 (1982)
8. Ioffe B L *Acta Phys. Polon. B* **16** 543 (1985)
9. Иоффе Б Л *УФН* **171** 1273 (2001)
10. Ioffe B L *Prog. Part. Nucl. Phys.* **56** 232 (2006)
11. Gell-Mann M, Oakes R J, Renner B *Phys. Rev.* **175** 2195 (1968)
12. Rajagopal K, Wilczek F, in *At the Frontier of Particle Physics: Handbook of QCD: Boris Ioffe Festschrift* (Ed. M Shifman) Vol. 3 (Singapore: World Scientific, 2001) p. 2061
13. Chernodub M N, Ioffe B L *Письма в ЖЭТФ* **79** 742 (2004)

The origin of mass and experiments on high-energy particle accelerators

B.L. Ioffe

Russian Federation State Scientific Center "A.I. Alikhanov Institute of Theoretical and Experimental Physics",

ul. B. Chermushkinskaya 25, 119218 Moscow, Russian Federation

Tel. (7-495) 123-3193. Fax (7-495) 883-9601. E-mail: ioffe@itep.ru

The visible world is one consisting of nucleons and electrons. The mass of the nucleon arises from chiral symmetry breaking in quantum chromodynamics (QCD), so high energy accelerator experiments cannot give a clue to the nature of the mass of matter in the visible world. The origin of the mass of the matter will be clarified when the mechanism of chiral symmetry breaking in QCD is established.

PACS numbers: 12.15.Ff, 12.38.Aw, 14.80.Bn

Bibliography — 13 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **176** (10) 1103–1104 (2006)

Received 11 January 2006
Physics – Uspekhi **49** (10) (2006)