

## ОГРАНИЧЕНИЯ НА ЛЕГКИЕ СКАЛЯРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

*В.А.Кузьмин, И.И.Ткачëв, М.Е.Шапошников*

Из анализа экспериментов по прямому измерению ван-дер-ваальсовых сил найдено ограничение на массу и константу связи легких скалярных частиц с фермионами. Применительно к скалярным частицам суперсимметричных теорий (скалярный аксион) это дает ограничение на масштаб нарушения суперсимметрии  $M^2 > 10^6 \text{ ГэВ}^2$ .

При построении единых теорий сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий в последнее время все чаще привлекаются принципы суперсимметрии (симметрии Ферми — Бо-

зе)<sup>1</sup>, которые в значительной степени уменьшают произвол в выборе констант связи, комплектов и спектра масс элементарных частиц. Одной из важнейших характерных черт суперсимметричных теорий являются гораздо более слабые квантовые расходимости, что, в частности, дает возможность решить<sup>2</sup> естественным образом проблему калибровочных иерархий. Объединение<sup>3</sup> суперсимметрии с  $U(1)_{PQ}$ -симметрией, введенной Печчей и Квинн<sup>4</sup> для решения  $CP$ -проблемы в сильных взаимодействиях, ведет к предсказанию, помимо аксиона, также и его суперпартнеров — легкого скалярного бозона (скалярного аксиона) и фермиона (аксино). Важнейшей задачей становится экспериментальное обнаружение этих предсказываемых частиц.

В настоящей работе мы покажем, что экспериментальное обнаружение скалярных аксионов оказывается в пределах возможностей современного эксперимента — уже теперь вплотную подошли к обнаружению скалярного аксиона в экспериментах по измерению сил Ван-дер-Ваальса (эффекта Казимира) между макроскопическими телами.

В силу суперсимметрии связь скалярного аксиона с нуклонами прямо соотносится с юкавской константой взаимодействия аксиона и равна

$$f \sim \frac{m_N}{M_{PQ}} \sim 10^{-9} - 10^{-18}, \quad (1)$$

где  $m_N$  — характерная нуклонная масса,  $M_{PQ}$  — масштаб нарушения  $U(1)_{PQ}$ -симметрии  $M_{PQ} \sim 10^9 - 10^{18}$  ГэВ. При этом масса скалярного аксиона составляет<sup>5</sup>

$$m \sim M^2/M_{PQ}, \quad (2)$$

где  $M$  — масштаб нарушения суперсимметрии. Для решения проблемы калибровочных иерархий необходимо иметь<sup>2</sup>  $M \sim 10^2 - 10^3$  ГэВ, таким образом  $m \sim 10^{-5} - 10^6$  эВ. Наиболее естественным значением для  $M_{PQ}$  в моделях большого объединения является масштаб объединения  $M_X$ , равный<sup>6</sup>  $M_X \sim 10^{16} - 10^{18}$  ГэВ в суперсимметричных теориях. Таким образом, наиболее вероятными параметрами скалярного аксиона оказываются следующие (см. рисунок)  $f \sim 10^{-16} - 10^{-18}$ ,  $m \sim 10^{-5} - 10^{-1}$  эВ. Каковы же существующие экспериментальные ограничения на параметры легких скалярных частиц?

Частицы с  $m < 1$  кэВ, константа связи которых с электронами  $f_e > 10^{-11}$ , уносили бы заметную долю звездной энергии<sup>7</sup>. Отсюда вытекает ограничение<sup>8</sup>  $M_{PQ} > 10^9$  ГэВ, т. е.  $f < 10^{-9}$  (см. рисунок). Гравитационные взаимодействия до расстояний меньших  $m^{-1}$  эквивалентны юкавскому взаимодействию с нуклонами с константой  $f = 10^{-19}$ . Гравитационные силы промерены до расстояний  $\sim 10$  см с точностью  $\sim 1\%$ . Таким образом, исключены частицы с  $f > 10^{-20}$  и  $m < 10^{-6}$  эВ.

Тем не менее, скалярная частица, параметры которой удовлетворяют вышеприведенным ограничениям, проявила бы себя во многих других интересных макроскопических экспериментах. Действительно, любое макроскопическое тело, содержащее  $N_0$  частиц (источник), создает вокруг себя классическое скалярное поле  $\phi \sim fN_0 e^{-mr}/r$ . При поднесении пробного тела к источнику масса любой частицы (и, пропорционально, тела) изменяется на величину  $\Delta M \sim f\phi$ . Это приводит, в частности, к сдвигу атомарных и ядерных уровней и сдвигу частот излучаемых при этом квантов. Так, например, при  $f \sim 10^{-13}$  и  $m \sim 10^{-4}$  эВ ( $\lambda \sim 10^{-1}$  см) энергия сверхтонкого расщепления уровней водорода изменяется на  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-14}$ , а ядерные спектральные линии в эффекте Мессбауэра — на  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-17}$ .

Ниже мы покажем, что наибольший интерес с точки зрения поиска легких скалярных частиц с параметрами (1) — (2), предсказываемых суперсимметричными теориями, является измерение сил Ван-дер-Ваальса между макроскопическими телами. Обычно измеряется<sup>9</sup> Ван-дер-Ваальсова сила между плоскостью и сферической линзой с большим радиусом кривизны

$$F = \frac{2\pi R}{3} \frac{B}{d^3}, \quad (3)$$

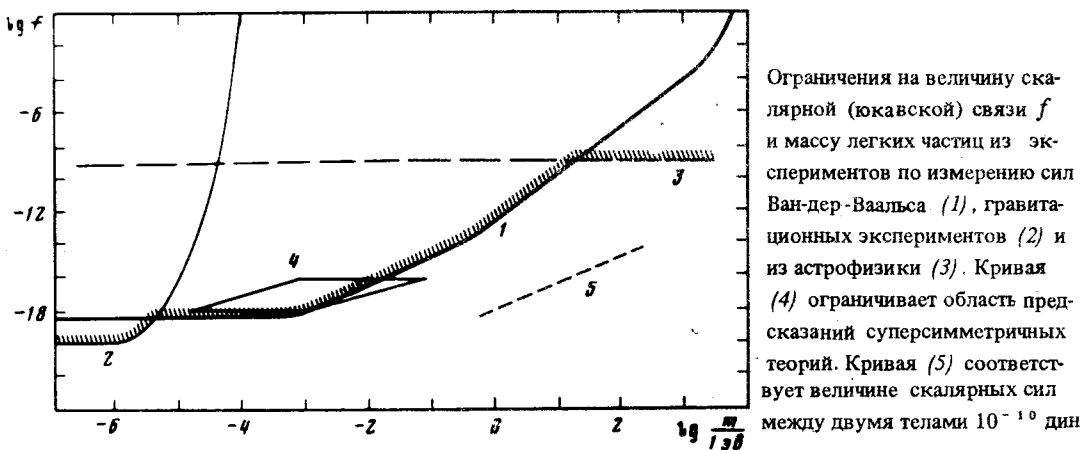
где  $d$  — расстояние между поверхностями тел,  $R$  — радиус кривизны. В работах<sup>9</sup> пройден интервал расстояний  $5 \cdot 10^{-7} \text{ см} < d < 10^{-4} \text{ см}$  и экспериментально найденное значение для  $B$  и изменение силы с расстоянием хорошо согласуются с теорией. В результате обмена скалярными частицами между этими телами возникла бы дополнительная сила

$$F_{\text{скаляр}} = \frac{(2\pi)^2 f^2 n^2 e^{-m d}}{m^3} R, \quad (4)$$

где  $n$  — объемная плотность числа частиц, имеющих заряд  $f$  (при выводе этой формулы мы считали  $m^{-1} \ll R \sim 7 \text{ м}$ ). Исходя из 10%-ной точности эксперимента, получим область исключенных значений параметров  $f$  и  $m$ , которая изображена на рисунке<sup>1)</sup>. В промеренном интервале расстояний  $d$ , соответствующих  $1 \text{ эВ} \leq m \leq 10^3 \text{ эВ}$ , эта область задается соотношением

$$f^2 / m^6 < \frac{e^3}{27} \frac{B}{60\pi n^2},$$

что при  $n = 2 \cdot 10^{24}$ ,  $B = 0,6 \cdot 10^{-19} \text{ эрг} \cdot \text{см}$ , дает  $f/m^3 < 10^{-13} (\text{эВ})^{-3}$ . Из рисунка и формул (1), (2) можно получить ограничение на масштаб нарушения суперсимметрии. В частности, при  $M_{PQ} \sim M_X \sim 10^{17} \text{ ГэВ}$  имеем  $M^2 > 10^6 \text{ ГэВ}^2$ . Отметим, что астрофизическое ограничение на  $M^2$ , полученное в работе<sup>10</sup>, из рассмотрения влияния легких частиц на эволюцию звезд на поздних стадиях, являвшееся наиболее сильным до сих пор, составляет  $M^2 > 2,6 \cdot 10^3 \text{ ГэВ}^2$



Как видно из рисунка, опыты по измерению сил Ван-дер-Ваальса (эффекта Казимира) являются весьма эффективным средством поиска скалярных взаимодействий и проверки суперсимметричных теорий в широком интервале значений скалярной юкавской константы связи  $10^{-18} < f < 10^{-9}$  и масс скалярных частиц  $10^{-6} \text{ эВ} < m < 10 \text{ эВ}$ . При меньших значениях масс  $m < 10^{-6} \text{ эВ}$  наиболее эффективным средством поиска новых частиц являются гравитационные эксперименты, а при  $10 \text{ эВ} < m < 1 \text{ кэВ}$  наиболее сильные ограничения следуют из астрофизики.

Отметим, что скалярные частицы с параметрами (1), (2) возникают при нарушении любой глобальной симметрии в суперсимметричной теории. В этом случае  $M_{PQ}$  следует заменить на масштаб нарушения соответствующей симметрии.

Результаты измерения эффекта Казимира, как видно из рисунка, уже теперь существенно ограничивают область допустимых значений  $f$  и  $m$ . Не исключено, что при повышении точности такого рода экспериментов (скажем, при постановке опытов с компенсацией сил Ван-дер-

1) Разумеется, приведенное ограничение справедливо также и для связи скалярных частиц с электронами.

Ваальса) частицы, предсказываемые суперсимметричными теориями, будут обнаружены. Кривая 5 на рисунке относится к случаю, когда сила скалярного взаимодействия между двумя телами составляет  $10^{-10}$  дин; столь малые по абсолютной величине силы уже измерялись на опыте <sup>11</sup>.

В заключение мы хотели бы выразить глубокую благодарность Г.М.Гуревичу, Г.В.Домогацкому, Г.Т.Зацепину, А.Ю.Игнатьеву, М.В.Казарновскому, В.М.Лобашеву, В.А.Матвееву, В.Г.Недорезову, В.А.Рубакову, Ю.Я.Стависскому, А.Н.Тавхелидзе и А.Е.Чудакову за интерес к работе и полезные обсуждения.

#### Литература

1. В качестве обзора по суперсимметрии и супергравитации см., например, *Fayet P., Ferrara S.* Phys. Rep., 1977, **32**, 249; *Van Neieuwenhuizen P.* Phys. Rep., 1981, **68**, 189.
2. *Witten E.* Nucl. Phys., 1981, **B185**, 513.
3. *Raby S., Nilles H.P.* SLAC-2743, 1981,
4. *Peccei R.D., Quinn H.R.* Phys. Rev. Lett., 1977, **38**, 1440.
5. *Tamvakis K., Wyler D.* CERN TH-3240, 1982.
6. *Dimopoulos S., Raby S., Wilczek F.* Phys. Rev., 1981, **D24**, 1981, *Фрадкин Е.С., Фрадкина Т.Е.* Письма в ЖЭТФ, 1981, **34**, 412.
7. *Домогацкий Г.В.* ЯФ, 1968, **8**, 759.
8. *Dicus D.A., Kolb E.W., Teplitz V.L., Wagoner R.V.* Phys. Rev., 1978, **D18**, 1829.
9. *Derjagin V.P., Abrikosova E.N., Lifshitz E.M.* Quarterly Reviews. 1956, **10**, 295; *Van Silfhout A.* Dispersion forces between macroscopic objects, Amsterdam, 1966; *D. Tabor, R.H.S. Winterton.* Nature, 1968, **219**, 1120.
10. *Fukugita M., Sakai N.* KEK TH-42, 1982.
11. *Панов А.П.* ЖЭТФ, 1979, **77**, 1701.