

метрии «стандартной модели» в этом случае можно было бы трактовать как продукты редукции большой группы при нарушении связанной с ней симметрии. На этом пути, в принципе, могла бы возникнуть возможность Великого объединения взаимодействий. Формальной основой такого объединения может служить свойство изменения с энергией эфф. констант взаимодействия калибровочных полей  $g_i^2/4\pi = \alpha_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), возникающее при учёте высших порядков теории (т.н. бегущие константы). При этом константа  $\alpha_1$  связана с группой  $U(1)$ ;  $\alpha_2$  — с группой  $SU(2)$ ;  $\alpha_3$  — с группой  $SU(3)$ . Упомянутые очень медленные (логарифмические) изменения описываются выражением

$$\alpha_i^{-1}(M) = \alpha_i^{-1}(\mu) - b_i(2\pi)^{-1} \ln M/\mu,$$

связывающим значения эфф. констант  $\alpha_i(M)$  и  $\alpha_i(\mu)$  при двух различающихся значениях энергии:  $M$  и  $\mu$  ( $M > \mu$ ). Характер этих изменений разный для разл. групп симметрии (и, следовательно, разл. взаимодействий) и даётся коэффициентами  $b_i$ , вбирающими в себя информацию как о структуре групп симметрии, так и об участвующих во взаимодействии частицах. Поскольку  $b_1, b_2$  и  $b_3$  различны, допустима возможность того, что, несмотря на заметные расхождения величин  $\alpha_i^{-1}(\mu)$  при исследованных энергиях  $\mu$ , при очень больших энергиях  $M$  все три значения  $\alpha_i^{-1}(M)$  совпадут, т.е. будет реализовано Великое объединение взаимодействий. Тщательный анализ, однако, показал, что в рамках стандартной модели, используя известные значения  $\alpha_i^{-1}(\mu)$ , получить совпадение всех трёх значений  $\alpha_i^{-1}(M)$  при каком-то большом  $M$  невозможно, т.е. вариант теории с Великим объединением в этой модели не реализуем. В то же время было выяснено, что в схемах, отличных от стандартной модели, с изменённым составом осн. (фундам.) полей или частиц, Великое объединение может иметь место. Изменения в составе осн. частиц ведут к изменениям в значениях коэффициентов « $b_i$ » и тем самым обеспечивают возможность совпадения  $\alpha_i(M)$  при больших  $M$ .

Руководящей идеей при выборе изменённого состава осн. частиц теории явилась идея возможного существования в мире Э.ч. суперсимметрии, к-рая устанавливает определ. взаимосвязи между частицами целого и полуполого спина, фигурирующими в теории. Для соблюдения требований суперсимметрии, напр. в случае стандартной модели, каждой частице должна быть поставлена в соответствие частица со спином, смещённым на  $1/2$ . Причём в случае точной суперсимметрии все эти частицы должны иметь одинаковые массы. Так, кваркам и лептонам спина  $1/2$  должны быть поставлены в соответствие их суперсимметричные партнёры (суперпартнёры) со спином ноль, всем калибровочным бозонам со спином 1 — их суперпартнёры со спином  $1/2$ , а бозону Хиггса спина ноль — суперпартнёр со спином  $1/2$ . Поскольку в исследованной области энергии суперпартнёры кварков, лептонов и калибровочных бозонов заведомо не наблюдаются, суперсимметрия, если она существует, должна быть заметно нарушенной, а массы суперпартнёров должны иметь значения, значительно превышающие значения масс известных фермионов и бозонов.

Последовательное выражение требования суперсимметрии находят в минимальной суперсимметричной модели (МССМ), в к-рой в дополнение к уже перечисленным изменениям в составе частиц стандартной модели число бозонов Хиггса увеличивается до пяти (из них два являются заряженными и три — нейтральными частицами). Соответственно в модели возникают пять суперпартнёров бозонов Хиггса со спином  $1/2$ . МССМ — простейшее обобщение стандартной модели на случай суперсимметрии. Значение  $M$ , при к-ром происходит совпадение  $\alpha_i(M)$  (Великое объединение), в МССМ примерно равно  $10^{16}$  ГэВ.

С гипотезой о существовании суперсимметрии связана одна из перспективных возможностей развития теории калибровочных полей, разрешающая к тому же ряд её внутр. проблем, связанных с устойчивостью фигурирующих в ней параметров. Суперсимметрия, как было от-

мечено, позволяет сохранить в теории Э.ч. привлекательную возможность Великого объединения взаимодействий. Решающим подтверждением факта существования суперсимметрии явилось бы обнаружение суперпартнёров известных частиц. По оценкам, их массы лежат в диапазоне от сотен ГэВ до 1 ТэВ. Частицы таких масс будут доступны для изучения на протонных коллайдерах следующего поколения.

Проверка гипотезы о существовании суперсимметрии и поиски суперсимметричных частиц, безусловно, одна из важнейших задач физики Э.ч., к-рой в ближайшем будущем, несомненно, будет уделяться первоочередное внимание.

### Некоторые общие проблемы теории элементарных частиц

Новейшее развитие физики частиц явно выделило из всех микросоставляющих материи группу частиц, играющих особую роль и имеющих наибольшие основания (на нач. 90-х гг.) именоваться истинно Э.ч. К ней относятся фундам. фермионы спина  $1/2$ : лептоны и кварки, составляющие три поколения, и калибровочные бозоны спина 1 (глюоны, фотоны и промежуточные бозоны), являющиеся переносчиками сильного и эл.-слабого взаимодействий. К этой группе, скорее всего, следует присоединить частицу со спином 2, *гравитон*, как переносчика гравитац. взаимодействия, связывающего все частицы. Особую группу составляют частицы спина 0, бозоны Хиггса, пока, впрочем, не обнаруженные.

Многие вопросы тем не менее остаются без ответа. Так, остаётся неясным, существует ли физ. критерий, фиксирующий число поколений элементарных фермионов. Не понятно, насколько принципиальным является отличие в свойствах кварков и лептонов, связанное с присутствием у первых цвета, или это отличие специфично только для изученной области энергии. К этому вопросу примыкает вопрос о физ. природе Великого объединения, поскольку в его формализме кварки и лептоны рассматриваются как объекты с близкими свойствами.

Важно понять, не указывает ли существование различных «внутр.» квантовых чисел кварков и лептонов ( $B, L, I, S, C, b$  и т.д.) на более сложную геометрию микромира, отвечающую большему числу измерений, чем привычная нам четырёхмерная геометрия макроскопич. пространства-времени. С этим вопросом тесно связан вопрос о том, какова макс. группа симметрии  $G$ , к-рой удовлетворяют взаимодействия Э.ч. и в к-рую вложены группы симметрии, проявляющие себя в изученной области энергий. Ответ на этот вопрос помог бы определить предельное число переносчиков взаимодействия Э.ч. и выяснить их свойства. Не исключено, что макс. группа  $G$  фактически отражает свойства симметрии нек-рого многомерного пространства. Этот круг идей нашёл известное отражение в теории *суперструн*, к-рые являются аналогами обычных струн в пространствах с числом измерений, большим четырёх (обычно в пространстве 10 измерений). Теория суперструн трактует Э.ч. как проявления специфических возбуждений суперструн, отвечающие разл. спинам. Считается, что лишние (сверх четырёх) измерения не обнаруживают себя в наблюдениях в силу т.н. компактификации, т.е. образования замкнутых подпространств с характерными размерами  $\sim 10^{-33}$  см. Внеш. проявлением существования этих подпространств являются наблюдаемые «внутр.» квантовые числа Э.ч. Каких-либо данных, подтверждающих правильность подхода к трактовке свойств Э.ч., связанного с предположением о суперструнах, пока не существует.

Как видно из сказанного, в идеале завершённая теория Э.ч. должна не только правильно описывать взаимодействия заданной совокупности частиц, отобранных в качестве фундаментальных, но и содержать в себе объяснение того, какими факторами определяется число этих частиц, их квантовые числа, константы взаимодействия, значения их масс и т.п. Должны быть также поняты причины выделенности наиб. широкой группы симметрии  $G$  и одновременно