

ми конфигурация удерживающего магн. поля должна выбираться такой, чтобы траектории дрейфовой движения частиц в магн. поле не слишком сильно отклонялись от магн. поверхностей. Ещё большую опасность для У. п. представляет возможность развития мелкомасштабной турбулентности плазмы, зависящей от распределения плотности n , темп-ры T , плотности продольного тока $j_{||}$, а также от ф-ции распределения частиц по скоростям, приводящей к аномальным переносам, т. е. к сильному ухудшению удержания. Проблема переноса оказалась главной в УТС на основе магн. удержания.

Кроме магн. удержания в разное время выдвигались др. идеи У. п.—электростатического, удержание газовым облаком, комбинациями этих методов с магн. удержанием. Эти методы не получили широкого развития.

Лит.: Шафранов В. Д., Равновесие плазмы в магнитном поле, в сб.: Вопросы теории плазмы, в. 2, под ред. М. А. Леонтовича, М., 1963; Захаров Л. Е., Шафранов В. Д., Равновесие плазмы с током в тороидальных системах, там же, в. 11, под ред. М. А. Леонтовича и Б. Б. Кадомцева, М., 1982; Пустовитов В. Д., Шафранов В. Д., Равновесие и устойчивость плазмы в стеллараторах, там же, в. 15, под ред. Б. Б. Кадомцева, М., 1987.

В. Д. Шафранов.

УДЕРЖАНИЕ ЦВЁТА (англ. colour confinement)—центральная гипотеза совр. теории сильных (ядерных) взаимодействий, основанной на *квантовой хромодинамике* (КХД). Согласно КХД, все адроны, т. е. мезоны и барионы, состоят из кварков и глюонов, характеризующихся квантовым числом *цвет*. Однако ни в природе, ни в экспериментах при высоких энергиях *кварки* и *глюоны* в свободном виде не обнаружены. Гипотеза У. ц. состоит в том, что эти частицы могут существовать только в связанном виде внутри адронов и что ненаблюдаемость свободных кварков и глюонов имеет не временный, а принципиальный характер и должна следовать из КХД. Если эта гипотеза правильна (в чём сходится большинство исследователей), то здесь впервые в истории физики возникает ситуация, когда «составляющие» объекты принципиально, а не в силу техн. трудностей невозможно выделить (ср. с тем, что молекулы можно расщепить на атомы, атомы—на ядра и электроны, ядра—на нуклоны и т. п.). Парадоксальность ситуации усугубляется тем, что кварки, из к-рых состоят обычные адроны (нуклоны, π -мезоны и др.), имеют массу, много меньшую, чем сами адроны, а глюоны и вовсе безмассовы.

Пока не существует полностью убедительного и общепризнанного физ. механизма У. ц. Это связано с тем, что КХД является теорией с «сильной связью», поэтому проверить ту или иную гипотезу У. ц. очень сложно. Более того, даже сам критерий У. ц., т. е. то, что необходимо доказать, непросто сформулировать математически. Рассмотрим наиб. распространённые идеи, привлекаемые для объяснения У. ц. в рамках КХД.

Все предложенные механизмы У. ц. можно разделить на 2 направления: первое условно назовём «экранировкой цвета», второе—«линейным потенциалом». Согласно гипотезе экранировки цвета, глюонное поле, создаваемое отд. кварком, поляризует вакуум настолько сильно, что из вакуума со стопроцентной вероятностью рождается антикварк, полностью экранирующий цветовой заряд пробного кварка. Аналогично, в случае пробного глюона, внесённого в вакуум, рождается другой глюон, экранирующий цветовой заряд первого. Конкретным механизмом экранировки цвета мог бы быть (В. Н. Грибов, 1985) аналог хорошо изученного в *квантовой электродинамике* (КЭД) явления сверхкритич. кулоновского взаимодействия. Известно, что при заряде ядра $Z > 137$ уровень энергии электрона опускается ниже порога дираковского моря электронов с отрицат. энергиями.) При этом становится энергетически выгодным рождение электрон-позитронной пары, причём электрон остаётся вблизи ядра и частично экранирует его кулоновское поле на больших расстояниях, а позитрон уходит на бесконечность.

На малых расстояниях кварк создаёт цветное поле, отвечающее, в силу *асимптотической свободы*, малому заряду. Однако на больших расстояниях эфф. цветовой

заряд растёт и мог бы достичь критич. значения, при к-ром стало бы энергетически выгодным (по аналогии с КЭД) рождение кварк-антикварковой пары. При этом антикварк остался бы вблизи первого кварка, образовав «бесцветное» состояние—мезон, а рождённый кварк ушёл бы на бесконечность.

Сильная сторона гипотезы экранировки цвета—её относит. наглядность, а также согласие с тем фактом, что У. ц. носит «мягкий» характер: совокупность эксперим. данных по адронным процессам при высоких энергиях не даёт оснований считать, что кварки внутри адронов удерживаются к.-л. большими силами. Слабой стороной данной гипотезы является то, что экранировка может произойти лишь при эфф. заряде кварков порядка единицы. При этом уже нельзя полагать, что в задаче существенно лишь цветное поле пробного кварка: при большом заряде становится вероятным рождение виртуальных глюонов и кварк-антикварковых пар. Проблема оказывается существенно теоретико-полевой, и аналогия с КЭД может быть обманчивой.

Кроме того, имеются основания предположить, что У. ц.—свойство не только реального мира, в к-ром есть кварки, но и воображаемого «чисто глюонного» мира, в к-ром кварков не существует, а есть только взаимодействующие между собой в соответствии с теорией Янга—Миллса глюонные поля. Такое упрощение КХД наз. квантовой глюодинамикой. Эксперим. данных о чисто глюонном мире, разумеется, нет, однако нек-рую информацию о квантовой глюодинамике можно получить путём моделирования теории поля с помощью компьютерных методов типа Монте-Карло. Компьютерное моделирование указывает, что У. ц. может осуществляться и без кварков, поэтому механизмом У. ц. вряд ли является экранировка цвета с помощью кварков.

Второй возможный механизм У. ц.—линейный потенциал—состоит в следующем. Если поместить на нек-ром расстоянии друг от друга в качестве пробных цветových зарядов бесконечно тяжёлые кварк и антикварк в таком воображаемом мире, то, согласно гипотезе линейного потенциала, между ними будет действовать не зависящая от расстояния сила притяжения (численно она оказывается равной ок. 14 Т). Эта сила препятствует разлетанию кварка и антикварка, в результате чего они образуют связанное состояние—мезон. Аналогичные силы действуют между 3 кварками, образующими др. связанное состояние—барион.

Осн. предположение этой гипотезы—сила не убывает с увеличением расстояния между кварками. (Если бы она убывала, то, приложив достаточно большую энергию, можно было бы разорвать связанное состояние, т. е. «ионизовать» цвет, что противоречило бы идее У. ц.) Физика ещё не сталкивалась с подобным дальнедействием между микроскопич. объектами. К настоящему времени предложена лишь одна теоретико-полевая модель, в к-рой не убывающая с расстоянием сила притяжения зарядов, по видимому, реализуется: это двумерная модель типа Джорджи—Плэшоу, исследованная А. М. Поляковым [1].

Существует нек-рая физ. аналогия требуемого дальнедействия. Представим себе бесконечный сверхпроводник, в к-рый внесены два идеально узких (и также бесконечных по длине) соленоида с током. Концы этих соленоидов являются источниками магн. поля—как бы *магнитными монополями*. Однако в идеальный сверхпроводник магн. поле не проникает (эффект Мейснера). Поскольку, с др. стороны, магн. линии должны быть замкнуты, в какой-то области сверхпроводимость обязана быть разрушенной, что соответствует проигрышу в энергии. Потеря энергии будет минимальной, если сверхпроводимость разрушится по прямой, соединяющей концы соленоидов (магн. монополи). Подобная ситуация осуществляется в сверхпроводниках II рода. Между монополями образуется «кабрикосовская нить», в к-рой сжаты магн. линии, идущие от одного монополя к другому. Энергетич. затраты на образование «кабрикосовской нити» пропорциональны её длине, т. е. расстоянию между монополями. Т. о., между монополями