

Статья "НАРУШЕНИЕ СР ИНВАРИАНТНОСТИ, ЗАРЯДОВАЯ АСИММЕТРИЯ И БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ" (А.Д. Сахаров, 1967)

Статья [1] обращается к фундаментальному вопросу отсутствия симметрии между материей и антиматерией в наблюдаемой Вселенной. Уравнение Дирака предсказывает существование, наряду с частицами, соответствующих античастиц. Было подтверждено экспериментально, что для каждого известного типа частиц существуют свои античастицы. Теорема СРТ гарантирует, что частица и её античастицы имеют одинаковые массы, одинаковые времена жизни и противоположные заряды. При наличии СРТ симметрии загадочным кажется очевидное неравенство количества материи и антиматерии во Вселенной. В самом деле, нет никаких экспериментальных указаний на существование во Вселенной областей с заметной концентрацией антиматерии.

Две основные интерпретации этой асимметрии таковы: либо Вселенная зародилась с небольшим дисбалансом в пользу материи (полный барионный заряд Вселенной отличен от нуля), либо Вселенная, идеально симметричная в момент зарождения, со временем потеряла симметрию под действием некоторых динамических факторов. Последняя точка зрения предпочтительна, хотя ясные экспериментальные доказательства справедливости той или другой точки зрения отсутствуют.

В своей статье 1967 года, Андрей Сахаров сформулировал три необходимых условия, которым должны удовлетворять взаимодействия генерирующие барионы, чтобы материя и антиматерия во Вселенной производилась с разной скоростью. Побудительным мотивом формулировки стало открытие космического фонового излучения и нарушение СР четности в системе нейтральных К-мезонов. Три необходимых "условия Сахарова" таковы:

- 1) Несохранение барионного числа В,
- 2) Нарушение зарядовой симметрии С и СР-симметрии,
- 3) Взаимодействия вне теплового равновесия.

Нарушение барионного числа является, очевидно, необходимым условием возникновения избытка барионов над антибарионами. Однако, нарушение С-симметрии также необходимо для того, чтобы взаимодействие, которое производит больше барионов, чем антибарионов не было сбалансировано взаимодействием, производящим больше антибарионов, чем барионов. Подобным образом необходимо и нарушение СР-симметрии, поскольку в противном случае, во Вселенной производилось бы равное количество левых барионов и правых антибарионов, также как и равное количество правых барионов и левых анти-

барионов. И наконец, взаимодействия должны быть вне теплового равновесия, так как, в противном случае, СРТ-симметрия обеспечит компенсацию процессов уменьшения и увеличения барионного числа.

В настоящее время нет экспериментальных доказательств существования взаимодействий частиц, в которых сохранение барионного числа нарушается на уровне теории возмущений: это означало бы, что все наблюдаемые реакции характеризуются одинаковым барионным числом в начальном и конечном состоянии. Математически, коммутатор оператора барионного числа с пертурбативным гамильтонианом Стандартной Модели равен нулю: $[\hat{B}, \hat{H}] = \hat{B}\hat{H} - \hat{H}\hat{B} = 0$. Известно однако, что в Стандартной Модели сохранение барионного числа нарушается вне рамок теории возмущений. Это, так называемая, глобальная U(1)-аномалия. К нарушению барионного числа могут приводить и физические явления за пределами Стандартной Модели (см. суперсимметрия и Теории Великого Объединения).

Второе условие - нарушение СР-четности было открыто в 1964 году при изучении осцилляций нейтральных К-мезонов (прямое СР-нарушение, которое есть нарушение СР-четности в процессе распада, было открыто в 1999 году). Благодаря СРТ-симметрии, нарушение СР требует и нарушения Т-чётности, симметрии по отношению к обращению времени.

В неравновесном сценарии, последнее условие означает, что скорость реакции генерирующей барионную асимметрию меньше скорости расширения Вселенной. В такой ситуации, частицы и соответствующие античастицы не приходят в тепловое равновесие, поскольку быстрое расширение уменьшает вероятность аннигиляции барион-антибарионных пар.

Работа Сахарова оставалась незамеченной в течение нескольких лет, а ключевая гипотеза несохранения барионного числа, которая необходима для генерации барионной асимметрии отвергалась, пока в 1974 году не появились модели Великого Объединения. Позже было понято, что несохранение барионного числа может быть вполне естественным и общим явлением, отношение к возможности динамической генерации барионной асимметрии Вселенной изменилось радикально. Признание идей Сахарова стимулировало поток публикаций, который не ослабевает до настоящего времени.

[1] A.D. Sakharov, JETP Lett. -USSR **5**, 24 (1967)