

УДК 539.12.01

РЕАКЦИИ С КВАРКАМИ ДО ИХ КОНФАЙНМЕНТА

В. В. Бурдюжа

Рассмотрен период эволюции Вселенной, когда кварки были в свободном состоянии ($10^{-38} - 10^{-30}$) сек. Кварки с электрическим зарядом $q = \pm 2/3$ и $q = \pm 1/3$ на входе в реакциях рассеяния на бозонах в суперсимметричный период эволюции $10^{16} - 10^{12}$) ГэВ могли создать как барионный, так и антибарионный мир. Дополнительные реакции с той же самой калибровкой ($B-L$) также имели место с $q = \pm 2/3$ и $q = \pm 1/3$. Последующий конфаинмент кварков в первые доли секунды закрепил отношение u и d кварков в протонах и в лёгких ядрах, таких как дейтроны, тритоны и α -частицы. Перемешивание кварков в реакциях рассеяния с образованием лептонов привело к фиксации состава главных барионных компонент Вселенной и также к барионной асимметрии. Рассеивающими бозонами могли быть дейтроны и α -частицы.

Ключевые слова: кварки, запрещённые реакции, суперсимметрия.

Введение. В очень раннюю эпоху эволюции Вселенной в реакциях рассеяния кварков на бозонах в период суперсимметрии возникло резкое отклонение от равновесной концентрации заряженных частиц. Важное следствие этого периода эволюции – возможность несохранения барионного числа и как следствие появление реакций рассеяния, запрещённых Стандартной моделью (СМ) [1]. Высокие температуры в ранней Вселенной снимают подавление сохранения барионного (B) и лептонного (L) чисел, но в режиме суперсимметрии должна сохраняться только разность ($B - L$). В Стандартной модели физики частиц все взаимодействия сохраняют барионное и лептонное число. Известно, что протон состоит из трёх кварков (uud) – два имеют электрический заряд $q = 2/3$, а третий кварк имеет $q = -1/3$. Почему это так? После образования протонов оставшийся бюджет кварков был использован для образования нейтронов (ddu) и стабильных ядер (дейтроны ($uuddu$) и альфа-частицы ($uuduudddu$)). Для

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: burdyuzhavv@lebedev.ru.

ранней Вселенной важны также были радиоактивные тритоны (${}^3\text{H}$) с периодом полураспада около 12 лет. Дейтроны и α -частицы – это бозоны, как это известно. Независимые измерения барионного содержания Вселенной, полученные из различных экспериментов [2–4], подтверждают со 100%-ой вероятностью существование барионной асимметрии:

$$\eta_B = (n_B/n_\gamma) = (6.12 \pm 0.04) \times 10^{-10}. \quad (1)$$

Для того чтобы динамическим путём сгенерировать барионную асимметрию, должны быть выполнены условия Сахарова [5]:

- 1) Нарушение барионного числа B ;
- 2) Нарушение CP и C симметрии;
- 3) Система не должна быть в динамическом равновесии.

До сих пор нет общепринятого мнения о природе барионной асимметрии. Последние обзоры опубликованы в работах [6–8]. Барионная асимметрия реализовалась, несмотря на существование CPT инвариантности в нашей Вселенной. Однако, как отмечено в [9], барионная асимметрия остаётся навсегда, если реализуется ненулевая разница между барионным и лептонным числами ($B - L$). В этой работе наша мотивация основана на несохранении барионного числа в реакциях с кварками в течение их рассеяния на бозонах [10]. Вероятно, в ранней Вселенной, в течение периода суперсимметрии, реакции с калибровкой ($B - L$), запрещённые Стандартной моделью, могли привести формально как к барионной, так и антибарионной Вселенной. Т. е. могли образоваться две цепочки конкурирующих реакций, одна из которых из-за перебора тупиковых реакций заглохла в течение геометрической прогрессии. Прямая реакция, развиваясь в геометрической прогрессии, имела намного меньше тупиковых реакций, продолжив развитие барионного мира после окончания режима суперсимметрии.

Четыре главных реакции с кварками. Кварки и лептоны в течение суперсимметричного периода эволюции Вселенной относились к калибровочной группе $SO(10)$ и в течение расширения её симметрия уменьшалась:

$$SO(10) \rightarrow \dots SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3) \times U(1) \rightarrow U. \quad (2)$$

Рассмотрим несколько возможных реакций рассеяния кварков на бозонах с калибровкой ($B - L$), проиллюстрировав это Фейнмановскими диаграммами. На рис. (1, 2) показаны две конкурирующие реакции, результаты которых противоположны (более подробно – в статье [9]):

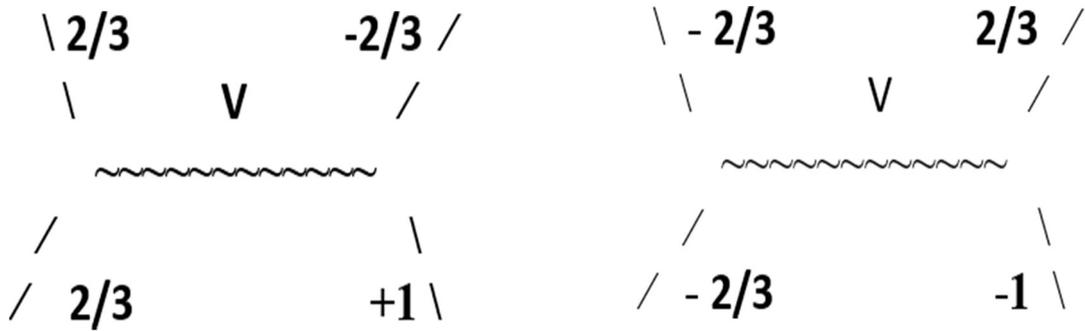


Рис. 1: Фейнмановская диаграмма рассеяния кварков с зарядом $2/3$ на бозонах (антибарионная вселенная).

Рис. 2: То же для кварков с зарядом $-2/3$ (барионная).

Используя кварки Стандартной модели с электрическим зарядом $q = 2/3$ на входе, невозможно получить барионную вселенную, но антибарионную возможно. Разность $(B - L)$ до взаимодействия была $(1/3) + (1/3) = 2/3$, после взаимодействия $-1/3 - (-1) = 2/3$ $(B - L)$ сохраняется. Электрический заряд до взаимодействия был $2/3 + 2/3 = 4/3$, после $-2/3 + 1 = 1/3$ (в этой реакции на выходе был кварк с $q = -2/3$ и позитрон с $L = -1$). В результате этой реакции частица с электрическим зарядом $q = +1$ (протон) исчезла. И во всём объёме мог образоваться антибарионный мир. Но ситуация радикально изменяется, если на входе будут кварки с электрическим зарядом $q = -2/3$ (рис. 2). Тогда $(B - L)$ на входе $-1/3 + (-1/3) = -2/3$ и после взаимодействия $1/3 - (+1) = -2/3$. Здесь $(B - L)$ также сохраняется, а на выходе был кварк стандартной модели с $q = 2/3$ и электрон. Электрический заряд на входе был $-2/3 + (-2/3) = -4/3$, а на выходе $2/3 - 1 = -1/3$. В результате этой реакции частица с зарядом -1 (антипротон) исчезла и во всём объёме мог образоваться барионный мир.

Но конечно были другие, вспомогательные, но экстремально важные реакции с кварками $q = \pm 2/3$ и $q = \pm 1/3$. На рис. 3 мы имеем $(B - L)$ на входе $-1/3 + (-1/3) = -2/3$. На выходе реакции рассеяния $+1/3 - 1 = -2/3$. Электрический заряд на входе реакции $-2/3 - 1/3 = -1$, а на выходе $2/3 - 1 = -1/3$. В этой реакции частица с $q = -2/3$ исчезла, но кварк стандартной модели с $q = 2/3$ появился, как и электрон. На рис. 4 мы имеем на входе $(B - L)$ $1/3 + 1/3 = 2/3$, на выходе $-1/3 - (-1) = 2/3$. Электрический заряд был на входе $2/3 + 1/3 = 1$, а на выходе электрический заряд был $-1/3 + 1 = 2/3$. Здесь частица с $q = 1/3$ исчезла, но возникли частица стандартной модели с $q = -1/3$ и позитрон. Реакции с кварками на входе $q = \pm(1/3)$ эффектов для барионного генезиса

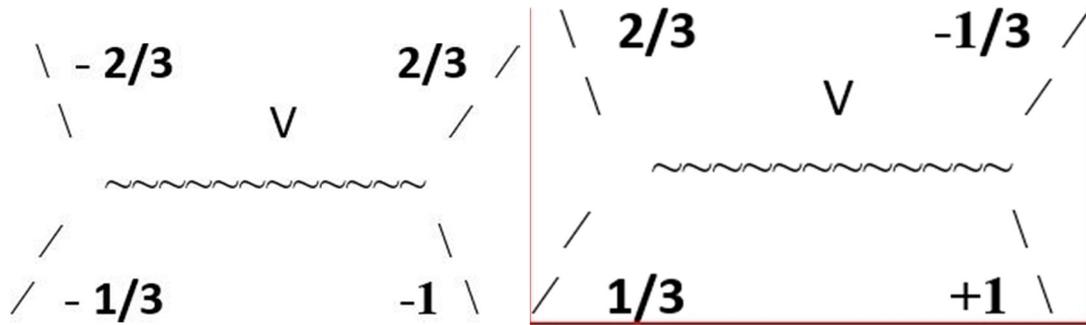


Рис. 3: Фейнмановская диаграмма рассеяния на бозонах кварков с зарядами $-2/3$ и $-1/3$.

Рис. 4: Фейнмановская диаграмма рассеяния на бозонах кварков с зарядами $2/3$ и $1/3$.

не дают.

Цепочки реакций с кварками и их разбаланс уже с первых шагов. Рассеяние кварков бозонами, в нашем случае дейтронами или альфа-частицами, в прямой цепочке реакций, которое могло привести к барионной Вселенной – следствие реакций, иллюстрированных рис. 5, где показаны только первые 4 шага. Здесь тупиковые реакции (рис. 4), как и на рис. 6, отмечены жирными буквами.

Обратная цепочка реакций, которая могла привести к антибарионной вселенной, иллюстрирована рис. 6. Здесь также показаны только первые 4 шага геометрической прогрессии. Шаги на рис. 5 и 6 обозначены римскими буквами. Немедленно в глаза бросается разное количество “тупиковых” реакций – (см. рис. 4), которые могут быть маркером процесса асимметрии. Для расчёта реализовавшейся асимметрии необходимо знать знаменатель геометрической прогрессии. В табл. 1 сведено количество маркерных реакций до конца суперсимметричного периода, т. е. до 17 шага включительно.

Т а б л и ц а 1

Количество тупиковых (маркерных) реакций на различных шагах (st.) в прямой (сверху) и обратной (снизу) цепочках реакций

4 st.	5 st.	6 st.	.....	16 st.	17st.	18 st.
2	6	18	.....	28697814	86093442	0
4	12	36	.....	57395628	172186884	0

Прогрессия хорошо прослеживается только с 4 шага, поэтому первые три шага опущены в табл. 1, но они видны на рис. (5, 6). Знаменатель прогрессии d , как видно из

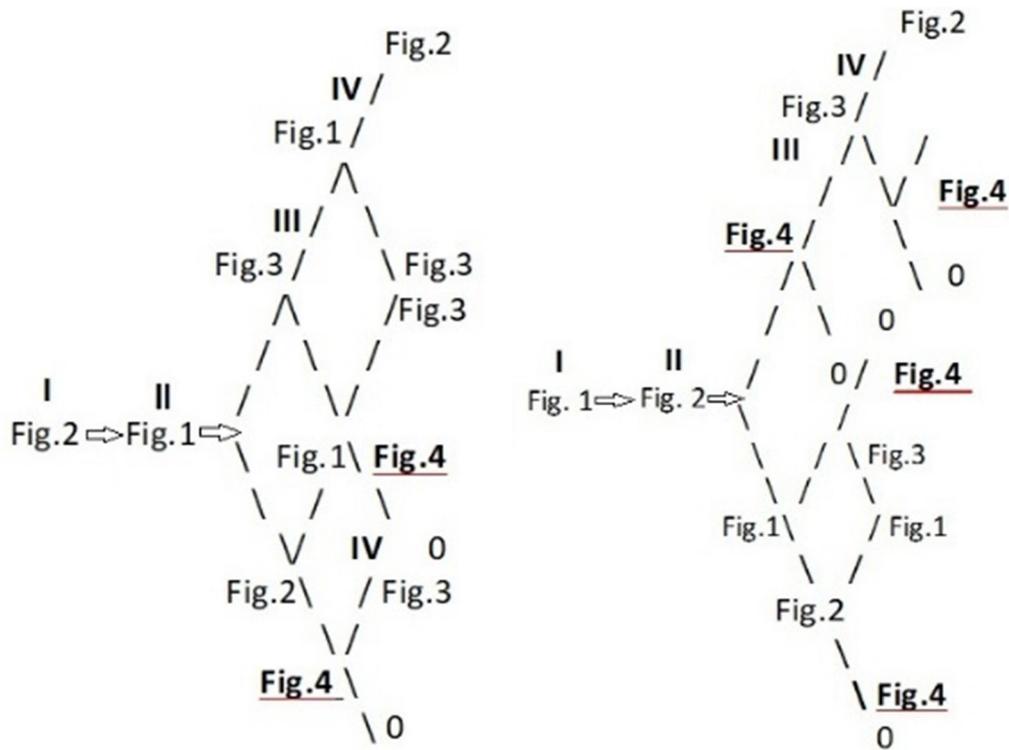


Рис. 5: Первые 4 шага прямой цепочки реакций, дающих барионный мир. Пояснения в тексте.

Рис. 6: Первые 4 шага обратной цепочки реакций, дающих антибарионный мир.

табл. 1, равен 3. Формула n – элемента геометрической прогрессии имеет вид:

$$a_n = a_1 d^{n-1}. \tag{3}$$

Тогда для прямой цепочки $a_1 = 2$ и $a_{17} = 2 \times 3^{16} = 86093442$, для обратной цепочки $a_1 = 4$ и $a_{17} = 4 \times 3^{16} = 172186884$. Таким образом, закалка барионной асимметрии имела место к 17 шагу геометрической прогрессии. Т.е. к концу суперсимметричного периода эволюции Вселенной прямая реакция имела 86093442 маркера, в то время как обратная реакция имела 172186884 маркера. Обратная величина из маркеров в обратной цепи – зафиксированное отношение числа антибарионов к числу барионов: $1/172186884 = 5.807 \times 10^{-10}$, если принять прямую цепь, равной 1. Чтобы получить наблюдаемую величину барионной асимметрии (1) маркерных (тупиковых) реакций, должно быть 163 380 000 [9].

Обсуждение главных реакций. В главных реакциях перемешивания кварков (рис. 2–4) кварков Стандартной модели с электрическим зарядом $q = 2/3$ появлялось в два

раза больше, чем других кварков Стандартной модели с $q = -1/3$ и это отношение зафиксировалось в протонах после конфайнмента кварков в течение 10^{-30} сек. В тот момент температура была около 10^{25} К. Это следует из формулы:

$$T = 10^{10} t^{-1/2} \quad (4)$$

(эта формула хорошо работает только в режиме расширения Вселенной с замедлением, т.е. до $z = 0.6$). После конфайнмента кварков зафиксировался не только состав протонов (uud) и нейтронов (ddu), но также и состав лёгких ядер таких, как дейтрон (uudddu), тритон (uuddduddu) и альфа-частица (uudddudddu). Но, чтобы всё это случилось, необходимо было “окрасить” кварки, соблюдая принцип Паули. Это и произошло посредством введения для кварков трёх цветов (красный, синий, зелёный), т.е. цветовое вырождение было снято группой цветовой симметрией $SU(3)_c$. Другими словами “заготовки” ядерных компонент образовались в суперсимметричный период эволюции Вселенной. В период ядерного синтеза результаты суперсимметричного периода эволюции Вселенной подверглись изменению к их современному состоянию:

$$d + \gamma \langle = \rangle p + n, \quad (5)$$

$$d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma, \quad (6)$$

$$d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p, \quad (7)$$

$$d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n, \quad (8)$$

$${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p, \quad (9)$$

$${}^3\text{H} + p \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma, \quad (10)$$

$${}^3\text{H} + d \rightarrow {}^4\text{He} + n, \quad (11)$$

здесь: d – дейтрон, n – нейтрон, p – протон. Все эти ядерные реакции были реализованы в период ядерного синтеза [10], который был после суперсимметричного периода, т.е. довольно “рано”. Лептоны – не менее важны. Электроны возникли в двух главных реакциях из трёх (рис. 2 и рис. 3), но позитроны только в одной (рис. 4). Позитроны также образовывались и в конкурирующей цепочке [9] и поэтому эпопея с лептонами не менее интересна и важна, хотя процесс аннигиляции (e^+e^-) мы не обсуждаем в этой статье.

Заключение. Кратко рассмотрен суперсимметричный период эволюции Вселенной, который имел место, вероятно, в течение (10^{-38} – 10^{-30}) доли секунды, и который зафиксировал кварковый состав протонов, нейтронов и лёгких ядер. Калибровка (B-L)

способствовала этому в реакциях рассеяния кварков на бозонах (дейтроны и альфа-частицы). В этот же период времени образовалась барионная асимметрия [9]. Выводы:

- 1) суперсимметричный период эволюции Вселенной был;
- 2) конфайнмент кварков в “бесцветную фазу”, вероятно, реализовался около $\sim 10^{-30}$ сек;
- 3) фиксация состава протона, нейтрона, дейтрона, тритона и альфа-частиц была в этот же период времени;
- 4) калибровка (B-L) работала в реакциях рассеяния кварков на бозонах (дейтроны и α -частицы) в суперсимметричный период эволюции Вселенной.

Отметим, что дейтрон стабилен, в отличие от тритона и с большим успехом применяется в современных ускорителях. Об асимметрии лептонов можно найти в статье [11]. Новые расчёты барионной асимметрии есть в статье [9], в которой получено значение этой асимметрии с точностью на два порядка лучше, чем точность космической обсерватории “Planck” [4]. Крайне важно также отметить ещё две реакции, имеющие (B-L) калибровку, иллюстрированные рис. 7, 8.

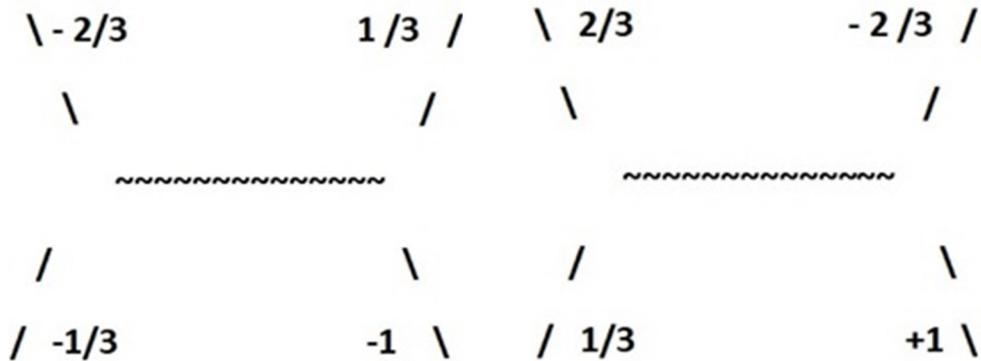


Рис. 7: Фейнмановская диаграмма рассеяния на бозонах кварков зарядами $-2/3$ и $-1/3$.

Рис. 8: Фейнмановская диаграмма рассеяния на бозонах кварков зарядами $2/3$ и $1/3$.

Это пара реакций, в одной из которых (рис. 7) при рассеянии на входе были кварки с электрическим зарядом $q = -2/3$, $q = -1/3$, а на выходе у кварка был электрический заряд $q = 1/3$ и электрон с $q = -1$. Эта реакция – “помощник” в реализации лептонной составляющей Вселенной. В другой реакции из этой пары (рис. 8) с электрическим зарядом $q = 2/3$ и $q = 1/3$ на входе после рассеяния появился кварк с $q = -2/3$ и позитрон с $q = +1$. Эта реакция – “помощник” в реализации барионной асимметрии, выдавая критически важный кварк с $q = -2/3$ и электрон. Задача этой статьи была

выявить причины появления асимметрии (она возникает при рассеянии кварков на бозонах с (B-L) калибровкой) и, конечно, понять состав главных барионных компонент Вселенной. Точный расчёт обсуждаемым реакциям пока сделать невозможно, поэтому данная статья во многом носит феноменологический характер. Но точный расчёт возникновения барионной асимметрии уже сделан и будет опубликован в отдельной работе [9].

Данная статья возникла благодаря выдающимся работам В. А. Рубакова в исследовании ранней Вселенной [1, 12].

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. A. Kuzmin, V. A. Rubakov, *Phys. Lett.* **155**, 36 (1985). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(85\)91028-7](https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)91028-7).
- [2] Yao W. et al., *J. Phys. G. Nuclear and Part. Phys.* **33**, 1 (2006). DOI: 10.1088/0954-3899/33/1/001.
- [3] E. Komatsu, J. Dunkley, M. R. Nolta, et al., *ApJS* **180**, 330 (2009). DOI: 10.1088/0067-0049/180/2/300.
- [4] N. Aghanim, Y. Akrami, F. Arroja, et al., *A&A* **A1**, 641 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201833880.
- [5] A. D. Sakharov, *Phys. Lett.* **5**, 32 (1967). DOI: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002497.
- [6] D. Boderker, W. Buchmuller, *Rev. Mod. Phys.* **93**, 035004 (2021). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.035004>.
- [7] J. Jaeckel, W. Yin, *Phys. Rev. D* **107**, 015001 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.015001>.
- [8] S. J. Huber, K. Mimasu, J. M. No, *Phys. Rev. D* **107**, 075042 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.075042>.
- [9] V. V. Burdzyuzha, Highly Accurate Calculation of Baryon Asymmetry (prepared to publication in 2025).
- [10] C. Pitrou, A. Coc, J-Ph. Uzan, E. Vangioni, *Phys. Rep.* **4**, 5 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.04.005>.
- [11] M. Lattanzi, M. Moretti, *Symmetry* **16**, 1657 (2024). <https://doi.org/10.3390/sym16121657>.
- [12] Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков, *Введение в теорию ранней Вселенной* (М., ЛЕНАНД, 2016). DOI: 10.1142/7874.

Поступила в редакцию 16 февраля 2025 г.

После доработки 23 апреля 2025 г.

Принята к публикации 23 апреля 2025 г.