

ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДОМЕНОВ АНТИБАРИОНОВ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Первичный отчёт

Введение

Существование антивещества было предсказано Полем Дираком в 1927 году на основе его уравнения:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = [c(\hat{a}_x\hat{p}_x + \hat{a}_y\hat{p}_y + \hat{a}_z\hat{p}_z) + mc^2\hat{\beta}]\psi \quad (1)$$

особенность которого заключается в том, что оно содержит равное количество решений, соответствующих как положительной энергии частицы, так и отрицательной [1]. Позже экспериментальным путём было доказано существование электрона с противоположным зарядом - позитрона, а ещё через практически 30 лет - существование антипротона. Более того, в период с 1998 по 2006 год было совершено несколько исследований, подтверждающих идентичность спина, массы протона и антипротона [2, 3].

Вопреки ожиданиям, на сегодняшний день известно, что видимая часть Вселенной в большинстве своём состоит из материи, а не из равного количества материи и антиматерии [4].

Причины барионной асимметрии Ранней Вселенной до сих пор неизвестны и данная проблема весьма актуальна на сегодняшний день.

Математически барионная асимметрия Вселенной (далее - БАВ) может быть определена как разность между количеством барионов и антибарионов, делённая на их сумму в момент, когда антипротоны ещё не исчезли из первичной плазмы. Но учитывая факт того, что продуктами аннигиляции в большинстве своём являются фотоны, а антибарионов в видимой части вселенной нет, уравнение для БАВ может быть определено, как отношение барионов к фотонам:

$$\eta = \frac{N_B}{N_\gamma} \Big|_{T=3K} = \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma} \Big|_{T=3K} \sim \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} \Big|_{T \geq 1 \text{ GeV}} \quad (2)$$

В последнем выражении температура выражена через ГэВ, где $1 \text{ ГэВ} \approx 1.16 \times 10^{13} K$ [2].

Здесь η является фундаментальной константой и равняется 10^9

Для возникновения такой асимметрии должны быть удовлетворены три условия, предложенные А. Д. Сахаровым: I - Отсутствие закона сохранения барионного заряда; II - Отличие частиц от античастиц (СР-инвариантность); III - отсутствие локального термодинамического равновесия [5].

Исходя из соотношения

$$\eta = \left. \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B} \right|_{T=3K} \approx \beta. \quad (3)$$

Величина диспропорции между материей и антиматерией составляет примерно $10^9 + 1$ к 10^9 , что соответствует избытку в 1 частицу на каждый миллиард античастиц. Исходя из этого, можно предположить, что при остывании Вселенной всё антивещество аннигилировало с веществом, производя фотоны, формирующие в дальнейшем реликтовое излучение, оставляя одну миллиардную долю частиц, составляющую сейчас нашу Вселенную.

1 НЕОДНОРОДНЫЙ БАРИОСИНТЕЗ

Утверждение о барионной асимметрии Вселенной главным образом исходит из факта того, что при наличии в ранней Вселенной равных по количеству доменов вещества и антивещества, было бы практически невозможно избежать аннигиляции на их границах. Следовательно, должно быть больше материи.

Однако это не исключает наличие во вселенной сравнительно небольшого количества доменов антиматерии

Сценарий неоднородного бариосинтеза предполагает возможность нахождения доменов антивещества в барион-асимметричной Вселенной, причём для существования таких доменов их размер должен быть не меньше критического $L_c = 8h^2$ кпк, и эффект такой аннигиляции должен быть совместим с наблюдаемым радиационным фоном. Комбинация этих условий даёт небольшой разброс $10^3 M_\odot < M < 10^5 M_\odot$ общей массы макроскопических областей антиматерии в нашей Галактике.

Благодаря численному моделированию могут быть получены оценочные значения количества антивещества в доменах, размерами превышающих критическое значение L_c , и, следовательно, сохранившихся до наших дней, в пределах видимой Вселенной.

В нашей галактике с момента её образования могут находиться приблизительно от 1000 до 100000 антивзвёзд в виде шаровых скоплений. Из-за нахождения этих шаровых скоплений в гало галактики, наблюдать рентгеновское излучение достаточно проблематично, но возможно наблюдать потоки антиметеоритов или антиядер в космических лучах[6].

е-кратность	Количество доменов	Размер домена
59	0	1103 Мпк
55	$5,005 \cdot 10^{-14}$	37,7 Мпк
54	$7,91 \cdot 10^{-10}$	13,9 Мпк
52	$1,291 \cdot 10^{-3}$	1,9 Мпк
51	0,499	630 кпк
50	74,099	255 кпк
49	$8,966 \cdot 10^3$	94 кпк
48	$8,012 \cdot 10^5$	35 кпк
47	$5,672 \cdot 10^7$	12 кпк
46	$3,345 \cdot 10^9$	4,7 кпк
45	$1,705 \cdot 10^{11}$	1,7 кпк

Таблица 1:

Благодаря экспериментам на ускорителях, синтезирующих антивещество, было показано, что свойства антивещества и вещества практически идентичны, за исключением небольшого эффекта от нарушения СР-чётности[7]. Из этого

следует, что домены вещества и антивещества эволюционируют одинаково. Исходя из вышеуказанного утверждения о минимальном размере домена антивещества, можно сделать вывод, что эволюционирующий в домене астрономический объект не может быть меньше шарового скопления. К тому же, изолированная (анти)звезда не может быть сформирована в окружении материи - только в окружении антиматерии[8].

Далее - более подробное описание эволюции внутри доменов антивещества

2 Диффузия на границах вещество-антивещество

Список литературы

- [1] *Paul Adrien Maurice Dirac. A theory of electrons and protons. royalsocietypublishing, 1930.*
- [2] *Alexander Hellems. Putting antimatter on the scales. Science, 1998.*
- [3] *Mitja Fridman Saurya Das, Gaetano Lambiase, and Elias C. Vagenas. Baryon asymmetry from the generalized uncertainty principle. arXiv, 2022.*
- [4] *Mikhail Shaposhnikov Laurent Canetti, Marco Drewes. Matter and antimatter in the universe. arXiv, 2012.*
- [5] *A.D. Sakharov. Baryon asymmetry of the universe. elib, 1967.*
- [6] *Maxim Yu. Khlopov. Nonstandard cosmological scenarios. viavca, 2016.*
- [7] *G. M. Shore M. Charlton, S. Eriksson. Testing fundamental physics in antihydrogen experiments. arXiv, 2020.*
- [8] *K. M. Belotsky, Yu. A. Golubkov, M. Yu. Khlopov, R. V. Konoplich, and A. S. Sakharov. Anti-helium flux as a signature for antimatter globular clusters in our galaxy. arXiv, 2000.*