

# Вопрос о барионной асимметрии Вселенной после Сахарова

Ю.В. Штанов

*Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова*



# План доклада

## Частицы и античастицы

- Симметрия между миром и антимиром
- Законы сохранения в микромире

## Зарядовая (барионная) асимметрия Вселенной

- Работы Сахарова

## Современные сценарии

- В стандартной модели
- В моделях Великого объединения
- В моделях со “стерильными” нейтрино

## Частицы и античастицы

Симметрия между миром и антимиром

Законы сохранения в микромире

## Зарядовая (барионная) асимметрия Вселенной

Работы Сахарова

## Современные сценарии

В стандартной модели

В моделях Великого объединения

В моделях со “стерильными” нейтрино

# Частицы и античастицы

В 1928 году Дирак получил релятивистское уравнение, описывающее электрон, из которого следовало существование *позитрона* – частицы с той же массой, но противоположным зарядом

В 1932 году позитрон был открыт Андерсоном в космическом излучении

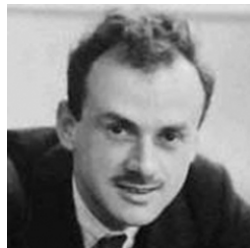
Впоследствии было установлено, что (почти) все частицы имеют свои античастицы:

1936 мюон и антимюон  
(в космическом излучении)

1947  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезоны  
(в космическом излучении)

1955-6 антипротон, антинейтрон

1966-... открыты ряд анти-ядер и т.д.



Частицы, тождественные своим античастицам, получили название “истинно нейтральных”: фотон, Z-бозон, бозон Хиггса, глюоны ...

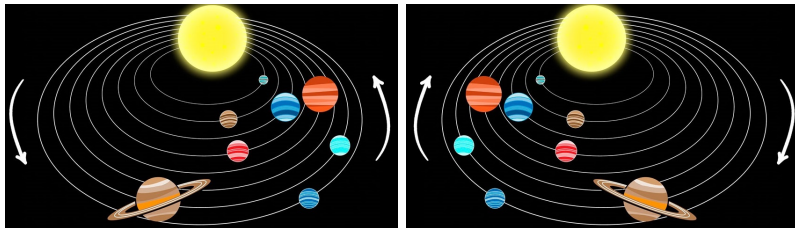
Нейтрино – ?  
(открыто в 1956 году)

# Симметрия между миром и антимиром (CPT-теорема)

Все процессы будут протекать симметрично, если одновременно:

- ▶ Заменить все частицы на античастицы (C операция)
- ▶ Совершить зеркальное отражение пространства (P операция)
- ▶ Следить за эволюцией в обратном времени (T операция)

Законы максвелловской электродинамики и ньютоновой механики симметричны относительно C, P и T операций по отдельности:



*Как с этим обстоит дело в микромире?*

# Время фундаментальных открытий

- ▶ Нарушение зеркальной (P)-симметрии (Lee, Young; эксперимент Wu, 1956).

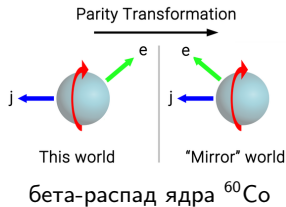
Надежда на комбинированную CP-симметрию (Ландау; Lee, Young, 1957)

$$K_1 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \rightarrow 2\pi, \quad K_2 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \rightarrow 3\pi$$

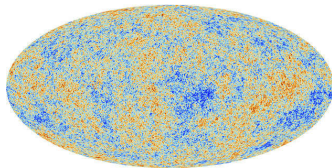
- ▶ Нарушение (CP)-симметрии (Christenson, Cronin, Fitch, Turlay, 1964)

- ▶ Открытие реликтового излучения Вселенной (Penzias, Wilson, 1965) с  $T \simeq 3 \text{ K}$

Карта температуры, полученная космической обсерваторией Planck:



Обнаружен CP-несимметричный распад  $K_2 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

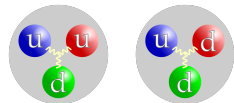


# Стандартная модель элементарных частиц

## ► Гипотеза кварков (Gell-Mann; Zweig, 1964)

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
спин→	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b>u</b> верхний	<b>c</b> очарованный	<b>t</b> истинный	<b>g</b> глюон	<b>H</b> бозон Хиггса
<b>КВАРКИ</b>	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>d</b> нижний	<b>s</b> странный	<b>b</b> прелестный	<b><math>\gamma</math></b> фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>e</b> электрон	<b><math>\mu</math></b> мюон	<b><math>\tau</math></b> тау	<b>Z</b> Z бозон	
<b>ЛЕПТОНЫ</b>	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> электронное нейтрино	<b><math>\nu_\mu</math></b> мюонное нейтрино	<b><math>\nu_\tau</math></b> тау нейтрино	<b>W</b> W бозон	
					<b>КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ</b>

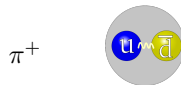
Из кварков состоят барионы:



протон

нейтрон

и мезоны:



$\pi^+$

Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра:



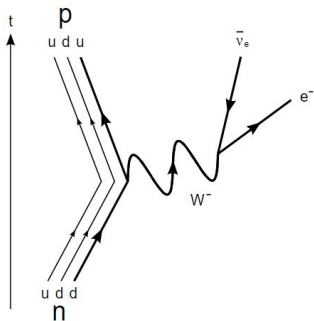
# Законы сохранения в микромире

- ▶ Электрический заряд
- ▶ Барионное число\*
- ▶ Лептонное число\*

Барионные числа имеют кварки (+1/3) и антикварки (−1/3)

Лептонные числа имеют лептоны (+1) и антилептоны (−1)

Пример: распад нейтрона



Ограничение на время жизни протона  
 $\tau_p > 3.6 \times 10^{29}$  лет ( $\tau_p > 10^{31} - 10^{33}$  лет для конкретных каналов распада)

\* Барионное и лептонное числа не сохраняются при высоких температурах среды (об этом ниже)

\* Лептонное число не сохраняется, если нейтрино истинно нейтрально (майорановского типа)



## Частицы и античастицы

Симметрия между миром и антимиром

Законы сохранения в микромире

## Зарядовая (барионная) асимметрия Вселенной

Работы Сахарова

## Современные сценарии

В стандартной модели

В моделях Великого объединения

В моделях со “стерильными” нейтрино

# Зарядовая асимметрия Вселенной

Во Вселенной осталось только вещество и практически нет антивещества

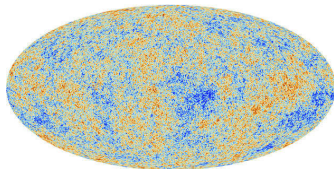
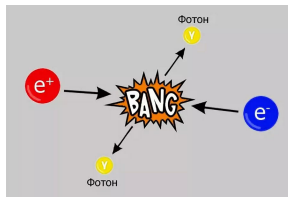
*Откуда это известно?*

Соприкасающиеся области вещества и антивещества во Вселенной производили бы **аннигиляционное  $\gamma$ -излучение**, которое не наблюдается

*Возможно, области вещества и антивещества разделены большими пустотами?*

Исключительная однородность температуры реликтового излучения исключает образование столь больших пустот

Поскольку вещество Вселенной по массе в основном состоит из барионов, обычно говорят о **барионной асимметрии Вселенной**



$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

# Работы А.Д. Сахарова



- ▶ Письма в ЖЭТФ 5, 32–35; 36–39 (1967)
- ▶ Сб. Проблемы теоретической физики, с. 35–44 (1969)
- ▶ ЖЭТФ 76 (4), 1172–1181 (1979)

## НАРУШЕНИЕ $CP$ -ИНВАРИАНТНОСТИ, $C$ -АСИММЕТРИЯ И БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

*А.Д.Сахаров*

Теория расширяющейся Вселенной, предполагающая сверхплотное начальное состояние вещества, по-видимому, исключает возможность макроскопического разделения вещества и антивещества; поэтому следует принять, что в природе отсутствуют тела из антивещества, т.е. Вселенная асимметрична в отношении числа частиц и античастиц ( $C$ -асимметрия). В частности, отсутствие антибарионов и предполагаемое отсутствие неизвестных барионных нейтрино означает отличие от нуля барионного заряда (барионная асимметрия). Мы хотим указать на возможное объяснение  $C$ -асимметрии в горячей модели расширяющейся Вселенной (см. [1]) с привлечением эффектов нарушения  $CP$ -инвариантности (см. [2]). Для объяснения барионной асимметрии дополнительно предполагаем приближенный характер закона сохранения барионов.

Принимаем, что законы сохранения барионов и мюонов не являются абсолютными и должны быть объединены в закон сохранения "комбинированного" барион-мюонного заряда  $n_K = 3n_B - n_\mu$ . Положено:

# Проблема барионной асимметрии Вселенной

## Идея А.Д. Сахарова

Вселенная из зарядово ( $C$ ) зеркально ( $P$ ) симметричной превращается в зарядово-несимметричную в процессе эволюции

То есть, возникает избыток частиц над античастицами. Частицы и античастицы впоследствии аннигилируют, а избыток частиц остается

Три знаменитые **условия Сахарова**, которые должны выполняться во всех сценариях такого типа:

1. Несохранение барионного числа (*новая гипотеза!*)
2. Нарушение  $C$  и  $CP$ -симметрии
3. Нарушение термодинамического равновесия (*обеспечивается расширением Вселенной*)

# Недавний обзор по барионной асимметрии

## Dietrich Bödeker, Wilfried Buchmüller (2021)

### II. THEORETICAL FOUNDATIONS

#### A. Sakharov's conditions for baryogenesis

A. Sakharov (Sakharov, 1967) wrote his famous paper on baryogenesis two years after the discovery of CP violation in  $K^0$ -decays (Christenson *et al.*, 1964) and one year after the discovery of the cosmic microwave background (Penzias and Wilson, 1965) that had been predicted as remnant of a hot phase in the early universe 20 years earlier (Gamow, 1946).

Sakharov's paper contains three necessary conditions for the generation of a matter-antimatter asymmetry from microscopic processes:

- (1) Baryon-number violation. As we know today, after an inflationary phase one cannot have  $B \neq 0$  as an initial condition of the hot early universe, and if baryon number were conserved a state with  $B = 0$  could not evolve into a state with  $B \neq 0$ .

- (2) C and CP violation. If the fundamental interactions were invariant under charge conjugation (C) and the product of parity and charge conjugation (CP) the reaction rate for two processes, related by the exchange of particles and antiparticles, would be the same. Hence, no baryon asymmetry could be generated.

- (3) Departure from thermal equilibrium. Sakharov considered an initial state of the universe at high temperature. Thermal equilibrium would then mean that the system is stationary, so an initially vanishing baryon number would always be zero. A departure from thermal equilibrium defines an arrow of time. In a non-thermal system this can be provided by the time evolution of scalar fields, as in Affleck-Dine baryogenesis.

# Гипотезы Сахарова и их последующие воплощения

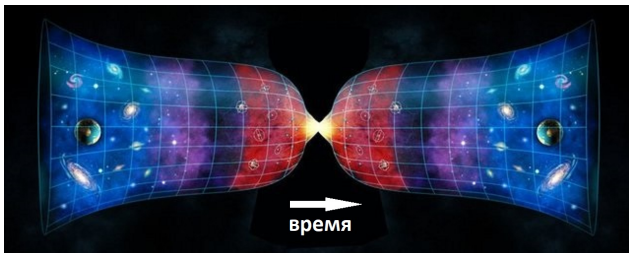


Image credit: Andrea Danti/Shutterstock

- Сахаров предполагал **CPT**-симметричную модель Вселенной, которая сжимается до планковских плотностей, и затем расширяется, зеркально повторяя свою историю  $\Rightarrow$  все заряды равны нулю в момент минимального сжатия
- Согласно более поздним моделям, Вселенная **CP**-симметрична непосредственно после инфляционной стадии
- Сахаров предполагал нарушение барионного числа вследствие превращения кварков в лептоны за счет взаимодействия с тяжелыми векторными бозонами
- Соответствует ситуации в позднейших теориях великого объединения:

$$q \rightarrow \ell + X$$

# Гипотезы Сахарова и их современные воплощения

- Нарушение  $CP$ -симметрии в модели Сахарова осуществлялось через гипотетические частицы – “максимоны” (Марков, 1966), которые распадаются с избытком вещества над антивеществом
- Сходные идеи реализуются в современных сценариях генерации барионной асимметрии за счет распадов тяжелых бозонов или тяжелых нейтрино

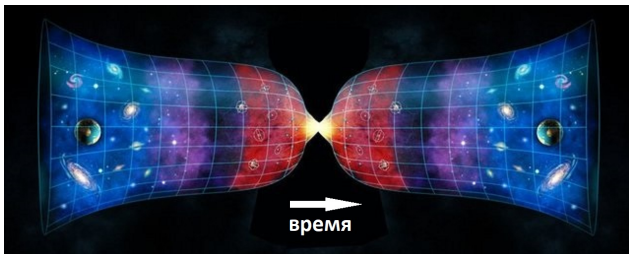


Image credit: Andrea Danti/Shutterstock

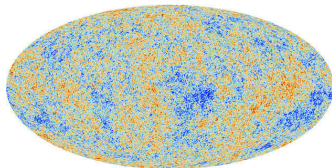
# Что нужно объяснить количественно?

( $E = mc^2$ , поэтому массу и энергию можно измерять в одних единицах)

- ▶ Барионная асимметрия  $B_S$  – величина, сохраняющаяся во времени при температурах ниже точки электрослабого перехода  
 $T \simeq 100 \text{ ГэВ} \sim 10^{15} \text{ К}$
- ▶ Эта величина довольно точно определяется по анизотропии температуры реликтового излучения
- ▶ В ранней Вселенной при  $T \gtrsim \text{МэВ} \sim 10^{10} \text{ К}$  имеем

$$\frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_b + n_{\bar{b}}} \sim 10^{-10}$$

$$B_S = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \approx 6 \times 10^{-10}$$



$$m_u = 1.5\text{--}4 \text{ МэВ}$$

$$m_d = 4\text{--}8 \text{ МэВ}$$



## Частицы и античастицы

Симметрия между миром и антимиром

Законы сохранения в микромире

## Зарядовая (барионная) асимметрия Вселенной

Работы Сахарова

## Современные сценарии

В стандартной модели

В моделях Великого объединения

В моделях со “стерильными” нейтрино

## В стандартной модели

- ▶ Барионное число строго говоря не сохраняется из-за квантовой аномалии и инстантонов ('t Hooft, 1976)

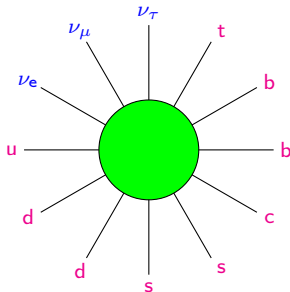
$$\Gamma \sim e^{-4\pi/\alpha_w} \sim 10^{-165}$$

- ▶ Скорость таких процессов увеличивается при температурах  $T \gtrsim 10^{15}$  К (Кузьмин, Рубаков, Шапошников, 1985)

$$\Gamma(T) \sim (\alpha_w T)^4 e^{-2\pi m_W(T)/\alpha_w T}$$

- ▶ При этом сохраняется разность  $B - L$ , где  $B = n_b - n_{\bar{b}}$  — барионное число, и  $L = n_\ell - n_{\bar{\ell}}$  — лептонное число
- ▶ Вследствие термодинамического равновесия в ранней Вселенной  $B + aL = 0$ , где  $a = 28/51$  в стандартной модели

Следствие: если в равновесии  $B - L = 0$ , то  $B = L = 0$



# Тепловая история Вселенной



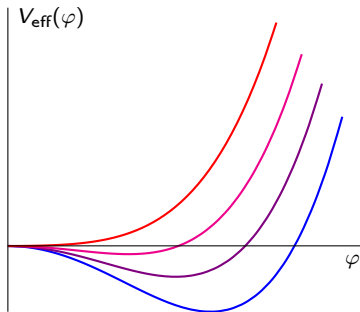
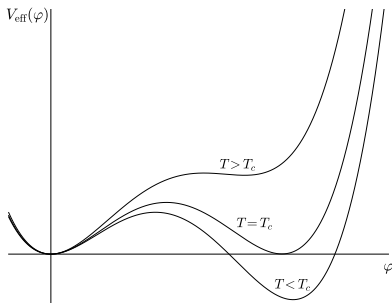
Барионная асимметрия должна быть сгенерирована во время или до электрослабого перехода, поскольку после него барионное число **B** сохраняется

# Электрослабый фазовый переход

процесс с нарушением термодинамического равновесия

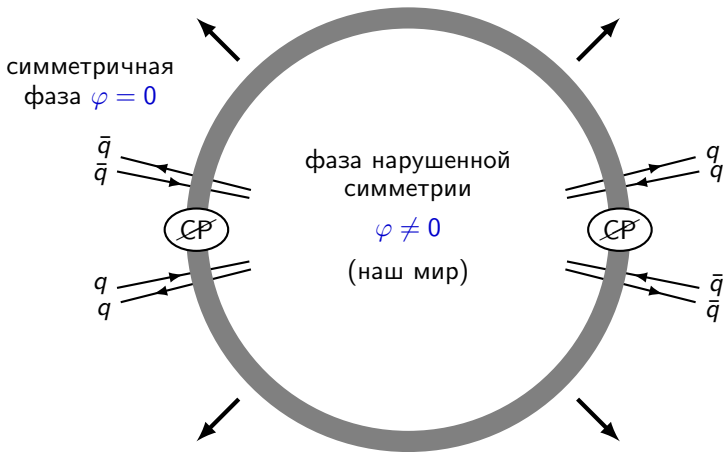
Требуется фазовый переход 1-го рода: так было бы при массе бозона Хиггса  $m_H < 70 \text{ ГэВ}$

В стандартной модели  $m_H = 125 \text{ ГэВ}$ , и фазовый переход непрерывен



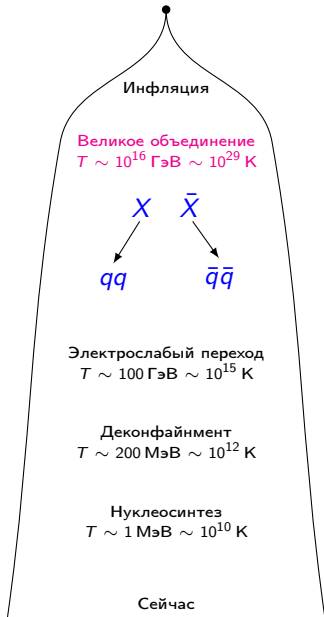
Требуется расширять стандартную модель (например, добавлять новые поля Хиггса) для реализации фазового перехода 1-го рода

# Генерация барионного числа в электрослабом переходе



Стенки областей новой фазы расширяются со скоростью, близкой к скорости света. На стенках генерируется барионная асимметрия

# В моделях Великого объединения



Имеются новые бозоны  $X$  и их античастицы  $\bar{X}$  с различающимися скоростями распадов на кварки и антикварки:

$$\Gamma(X \rightarrow qq) \neq \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q})$$

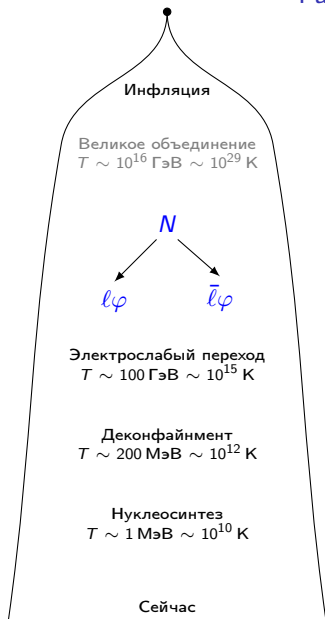
Величина барионной асимметрии

$$B_S \sim \frac{\Gamma(X \rightarrow qq) - \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q})}{\Gamma(X \rightarrow qq) + \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q})}$$

Эти процессы должны нарушать  $B - L$  (иначе тепловое равновесие обнулит  $B$  и  $L$ )

# В моделях со “стерильными” нейтрино

Fukugida, Yanagida, 1986



Предполагается существование трех новых (“правых”) нейтрино  $N$

Это позволяет объяснить малые массы обычных нейтрино  $\nu$  (механизм “качелей”):  $m_{\nu_e} < 0.12 \text{ эВ}$

Вначале образуется лептонная асимметрия  $L = L_0 \neq 0$  благодаря неравновесным CP-нарушающим распадам

$$\Gamma(N \rightarrow l\varphi) \neq \Gamma(N \rightarrow \bar{l}\varphi)$$

После этого система приходит в равновесие за счет процессов, нарушающих  $B$  ( $a = 28/51$ ):

$$\left. \begin{aligned} B - L &= -L_0 \\ B + aL &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow B = -\frac{a}{a+1} L_0$$

# Пример: модель $\nu$ MSM

Asaka, Blanchet, Shaposhnikov, 2005

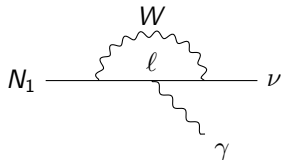
Основная посылка: стандартная модель (с добавлением стерильных нейтрино  $N_i$ ) справедлива вплоть до планковских энергий ( $10^{19}$  ГэВ)

Нейтрино  $N_2$  и  $N_3$  имеют почти одинаковые массы порядка 100 ГэВ, а нейтрино  $N_1$  массу порядка 10 кэВ

Модель позволяет объяснить одновременно:

- ▶ Массы и осцилляции обычных нейтрино
- ▶ Барионную асимметрию Вселенной (за счет  $N_2$  и  $N_3$ )
- ▶ Темную материю (за счет долгоживущего  $N_1$ )

Слабая линия излучения, зарегистрированная в 2014 году в астрофизических объектах (Bulbul *et al.*; Boyarsky *et. al.*) может быть результатом двухчастичного распада  $N_1$  с массой  $\approx 7$  кэВ





# Выводы

- ▶ Сахаров был первым, кто попытался объяснить зарядовую (барионную) асимметрию Вселенной
- ▶ Сформулированные им три принципа являются универсально необходимыми для всех сценариев такого типа
- ▶ Предложенные механизмы бариогенезиса многообразны, они работают при очень высоких плотностях энергии, и получить прямое экспериментальное подтверждение для многих из них будет трудно, если не невозможно
- ▶ Особого внимания заслуживают “минимальные” модели, такие как  $\nu$ MSM, которые могут быть проверены в эксперименте и которые одновременно предлагают решение нескольких проблем (массы нейтрино, нейтринные осцилляции, темная материя)