

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
РАБОТЕ**

**"РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ
АННИГИЛЯЦИИ ВЕЩЕСТВА И
АНТИВЕЩЕСТВА"**

Научный руководитель
д.ф.-м.н, проф.

Хлопов М. Ю.

Студентка

Борисенко А.С.

Москва 2026

Содержание

1	Введение	2
2	Теоретическая часть	3
2.1	Количественное определение барионной асимметрии	3
2.2	Аннигиляция на границах доменов	3
2.2.1	Энерговыведение при протон-антипротонной аннигиляции	3
2.2.2	Продукты аннигиляции и их энергия	3
2.2.3	Условия существования домена	4
2.2.4	Температура и давление в зоне аннигиляции	4
2.2.5	Сравнение давления аннигиляции с гравитационным	5
2.2.6	Расширение вместо сжатия	5
2.2.7	Сравнение времени разлёта и времени свободного падения	6
2.3	Гравитационная неустойчивость в условиях аннигиляции	6
2.3.1	Масса Джинса: базовое определение	6
2.3.2	Физический смысл массы Джинса	7
2.3.3	Гравитационное взаимодействие вещества и антивещества	7
2.3.4	Аннигиляционный нагрев и увеличение массы Джинса	8
3	Расчётное задание	8
3.1	Постановка задачи	8
3.2	Нахождение оптимальной массы Джинса	8
3.3	Оценка отношения давлений	9
3.3.1	Исходные параметры	9
3.3.2	Плотность барионов	9
3.3.3	Отношение давлений	9
3.3.4	Противоречие между давлением аннигиляции и массой Джинса	10
4	Заключение	11

1 Введение

В данной работе проводится исследование эволюции доменов антивещества в барионно-асимметричной Вселенной. Эти исследования требуют привлечения разработки различных механизмов, связанных с образованием объектов антивещества в условиях аннигиляции на их границе.

Образование барионной асимметрии в ранней Вселенной связано с механизмами бариосинтеза. Если бариосинтез неоднороден, то в крайней форме эта неоднородность проявляется в образовании избытка барионов над антибарионами. Поэтому вопрос о теоретической основе образования избытка барионов предполагает возможность проверки этих моделей по образованию доменов антивещества в барионно-асимметричной Вселенной.

Актуальность данной работы связана с необходимостью анализа условий, при которых домены антивещества могли бы существовать и эволюционировать. Наличие аннигиляции на границах вещества и антивещества приводит к выделению огромной энергии, созданию высокого давления и нагреву среды, что может существенно влиять на гравитационную неустойчивость. Понимание этих процессов важно для теоретической оценки возможности формирования объектов антивещества в таких доменах.

Целью работы является изучение объектов антивещества, которые могут сформироваться в доменах. В рамках данной работы исследуется конкретная задача — развитие гравитационной неустойчивости в условиях аннигиляции вещества и антивещества.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. проведён анализ энерговыделения при протон-антипротонной аннигиляции и определены основные продукты реакций;
2. выполнено сравнение давления продуктов аннигиляции с гравитационным давлением для различных сценариев;
3. рассмотрена модификация массы Джинса в условиях аннигиляционного нагрева;
4. показано, что аннигиляция на границах доменов приводит к расширению вещества вместо гравитационного сжатия.

2 Теоретическая часть

2.1 Количественное определение барионной асимметрии

Барионная асимметрия может быть определена как разница между числом барионов N_B и антибарионов $N_{\bar{B}}$, отнесённая к их сумме или к энтропии. Наиболее удобной наблюдательной величиной является отношение барион-фотон:

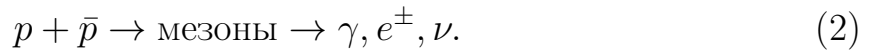
$$\eta = \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma} \Big|_{T=3\text{К}} \approx 6 \times 10^{-10}. \quad (1)$$

Это значение извлекается из данных первичного нуклеосинтеза (BBN) и анизотропии реликтового излучения (СМВ). Физический смысл η заключается в том, что на каждый миллиард фотонов приходится примерно один «лишний» барион.

2.2 Аннигиляция на границах доменов

2.2.1 Энерговыведение при протон-антипротонной аннигиляции

Основной реакцией, определяющей эволюцию границы между барионным и антибарионным доменами, является аннигиляция протона и антипротона:



Полная энергия, выделяющаяся в одном акте аннигиляции, равна удвоенной массе покоя протона:

$$E_{\text{ann}} = 2m_p c^2 = 2 \times 938,27 \text{ МэВ} = 1,877 \text{ ГэВ}. \quad (3)$$

Это колоссальная энергия в расчёте на одну частицу. Для сравнения, энергия связи в атоме водорода составляет всего 13,6 эВ, что в $1,4 \times 10^8$ раз меньше, а энергия, выделяемая при термоядерном синтезе в звёздах, составляет около 26 МэВ на акт синтеза гелия — всё равно на два порядка меньше.

2.2.2 Продукты аннигиляции и их энергия

При аннигиляции $p\bar{p}$ выделяется энергия $E_{\text{ann}} = 1,877 \text{ ГэВ}$, которая распределяется между продуктами реакции. Основные каналы:

- **Нейтральные пионы** π^0 (распад $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$): каждый фотон имеет энергию $\sim 67,5 \text{ МэВ}$.

- **Заряженные пионы** π^\pm : $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$, затем $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$.
- **Электрон-позитронные пары** — рождаются как непосредственно, так и в каскадных процессах.
- **Нейтрино** — уносят часть энергии, не взаимодействуя с веществом.

Все продукты, кроме нейтрино, движутся со скоростями, близкими к скорости света, то есть являются ультрарелятивистскими. Для такой частицы:

$$v \approx c \left(1 - \frac{1}{2\gamma^2} \right), \quad \gamma = \frac{E}{mc^2} \gg 1. \quad (4)$$

2.2.3 Условия существования домена

Для того чтобы домен антивещества мог существовать достаточно долго (и тем более — чтобы в нём могли формироваться структуры), его масса должна удовлетворять определённым ограничениям:

$$10^3 M_\odot \leq M \leq 10^5 M_\odot, \quad (5)$$

где M_\odot — масса Солнца.

Нижний предел ($10^3 M_\odot$) обеспечивает выживание домена: если масса слишком мала, домен полностью аннигилирует за время, меньшее возраста Вселенной. Верхний предел ($10^5 M_\odot$) обусловлен наблюдательными ограничениями, в частности — данными эксперимента AMS-02 по поиску антигелия в космических лучах [1].

2.2.4 Температура и давление в зоне аннигиляции

Если в единице объёма аннигилирует n_a пар, то плотность выделившейся энергии составляет:

$$u = n_a \cdot 2m_p c^2. \quad (6)$$

Продукты аннигиляции (фотоны, пионы, электрон-позитронные пары) при энергиях $\gg mc^2$ ведут себя как ультрарелятивистский газ. Для такого газа давление связано с плотностью энергии простым соотношением:

$$p = \frac{1}{3}u. \quad (7)$$

В термодинамическом равновесии плотность энергии связана с температурой законом Стефана–Больцмана:

$$u = aT^4 + (\text{вклад других частиц}), \quad (8)$$

где $a = \pi^2 k_B^4 / (15 \hbar^3 c^3) \approx 7,56 \times 10^{-15}$ эрг·см⁻³·К⁻⁴ — радиационная постоянная.

Если вся выделившаяся энергия остаётся в объёме V , можно оценить температуру:

$$T \approx \left(\frac{n_a \cdot 2m_p c^2}{a} \right)^{1/4}. \quad (9)$$

Для типичной плотности барионов в ранней Вселенной $n_a \sim 10^{44}$ м⁻³ получаем:

$$T \sim 10^{12} \text{ К}. \quad (10)$$

Это температура, на много порядков превышающая температуру рекомбинации ($T_{\text{rec}} \sim 3000$ К). При такой температуре среда полностью ионизована, в следствии чего нейтральные атомы, которые необходимы для эффективного охлаждения и последующего гравитационного коллапса, не формируются.

2.2.5 Сравнение давления аннигиляции с гравитационным

Условие гидростатического равновесия для сферического облака массы M и радиуса R даёт порядковую оценку гравитационного давления в центре:

$$p_{\text{grav}} \sim \frac{GM^2}{R^4}. \quad (11)$$

Давление ультрарелятивистской плазмы:

$$p_{\text{rad}} = \frac{1}{3} a T^4 \sim \frac{1}{3} n_a E_{\text{ann}}. \quad (12)$$

Подставляя $M \sim n_b m_p R^3$ (где n_b — плотность барионов) и полагая $n_a = n_b$, получаем отношение:

$$\frac{p_{\text{rad}}}{p_{\text{grav}}} \sim \frac{n_b E_{\text{ann}} / 3}{G n_b^2 m_p^2 R^2} = \frac{E_{\text{ann}}}{3 G n_b m_p^2 R^2}. \quad (13)$$

2.2.6 Расширение вместо сжатия

Уравнение движения для оболочки сгустка под действием давления аннигиляции и гравитации:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM}{R^2} + \frac{4\pi R^2 p_{\text{rad}}}{M}. \quad (14)$$

Второй член (давление) доминирует, поэтому ускорение положительное — оболочка расширяется. Таким образом, вместо гравитационного коллапса происходит взрывное расширение.

2.2.7 Сравнение времени разлёта и времени свободного падения

Время разлёта продуктов аннигиляции:

$$\tau_{\text{exp}} \sim \frac{R}{c}. \quad (15)$$

Гравитационное время свободного падения:

$$\tau_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \sqrt{\frac{R^3}{GM}}. \quad (16)$$

Их отношение:

$$\frac{\tau_{\text{ff}}}{\tau_{\text{exp}}} \sim \frac{R/c}{\sqrt{R^3/(GM)}} \sim \sqrt{\frac{GM}{Rc^2}}. \quad (17)$$

Для сгустка с массой $M \sim M_{\odot}$ и радиусом $R \sim R_{\odot}$ (типичная звезда):

$$\sqrt{\frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}c^2}} \sim \sqrt{\frac{2 \times 10^{30} \text{ кг} \times 6,67 \times 10^{-11}}{7 \times 10^8 \text{ м} \times 9 \times 10^{16}}} \sim 10^{-5}. \quad (18)$$

То есть $\tau_{\text{ff}} \ll \tau_{\text{exp}}$ — гравитация успевает сжать звезду за время, меньшее времени разлёта.

2.3 Гравитационная неустойчивость в условиях аннигиляции

2.3.1 Масса Джинса: базовое определение

В стандартной теории Джинса [2, 3] рассматриваются малые возмущения в самогравитирующей среде. Дисперсионное соотношение для звуковых волн с учётом гравитации имеет вид:

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 - 4\pi G\rho, \quad (19)$$

где:

- ω — частота возмущения;
- $c_s = \sqrt{\partial p / \partial \rho}$ — адиабатическая скорость звука;
- $k = 2\pi / \lambda$ — волновое число;

- ρ — плотность среды.

Неустойчивость ($\omega^2 < 0$) развивается для длин волн, превышающих критическую:

$$\lambda_J = c_s \sqrt{\frac{\pi}{G\rho}}. \quad (20)$$

Соответствующая масса Джинса — минимальная масса флуктуации, способной к коллапсу:

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \rho \left(\frac{\lambda_J}{2} \right)^3 = \frac{\pi^{5/2} c_s^3}{6G^{3/2} \rho^{1/2}}. \quad (21)$$

2.3.2 Физический смысл массы Джинса

Масса Джинса — это масштаб, на котором гравитационная энергия сравнивается с тепловой:

$$\frac{GM_J^2}{R_J} \sim \frac{M_J}{\mu m_p} k_B T, \quad (22)$$

где μ — средняя молекулярная масса. При $M > M_J$ гравитация доминирует; при $M < M_J$ давление удерживает флуктуацию от коллапса.

В стандартной космологии [4] масса Джинса эволюционирует следующим образом:

- В радиационно-доминированную эпоху ($T > 10^4$ К): $c_s \approx c/\sqrt{3}$, $M_J \sim 10^{15} M_\odot$ (масштаб скоплений галактик).
- После рекомбинации ($T \sim 3000$ К): $c_s \sim 10$ км/с, $M_J \sim 10^5 M_\odot$ (масштаб шаровых скоплений).
- В современную эпоху: $M_J \sim 10^2 M_\odot$ (масштаб звёзд).

Таким образом, в стандартной Вселенной коллапс происходит последовательно от крупных масштабов к мелким.

2.3.3 Гравитационное взаимодействие вещества и антивещества

Общее гравитационное поле создаётся суммой плотностей:

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G(\rho_+ + \rho_-). \quad (23)$$

В этом случае джинсовская неустойчивость может развиваться, однако здесь вступает в силу аннигиляция: любая флуктуация, содержащая как вещество, так и антивещество, будет терять массу за счёт аннигиляции на границах. Время аннигиляции:

$$\tau_{\text{ann}} \sim \frac{1}{n\langle\sigma v\rangle} \quad (24)$$

намного меньше времени свободного падения:

$$\tau_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}}. \quad (25)$$

Для типичных плотностей $\tau_{\text{ann}} \ll \tau_{\text{ff}}$, поэтому флуктуация аннигилирует прежде, чем успеет сколлапсировать.

2.3.4 Аннигиляционный нагрев и увеличение массы Джинса

Даже если каким-то образом образовалась флуктуация с избытком вещества (или антивещества), аннигиляция на её границе выделит энергию, которая нагреет среду. Скорость звука c_s возрастет, а масса Джинса, как следует из (21), растёт как c_s^3 :

$$M_J \propto c_s^3 \propto T^{3/2}. \quad (26)$$

3 Расчётное задание

3.1 Постановка задачи

Найти соотношение между неустойчивостью Джинса и эффектом продуктов аннигиляции давления.

3.2 Нахождение оптимальной массы Джинса

Температура в зоне аннигиляции достигает $T \sim 10^7\text{--}10^8$ К.

Скорость звука в нагретой среде:

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B T}{m_p}} \sim 300 \text{ км/с}. \quad (27)$$

Масса Джинса — минимальная масса флуктуации, способной к гравитационному коллапсу:

$$M_J = \frac{\pi^{5/2} c_s^3}{6G^{3/2} \rho^{1/2}}. \quad (28)$$

Подставляя численные значения ($\rho = n_b m_p$, $n_b \sim 10^{40} \text{ м}^{-3}$, $c_s \sim 3 \times 10^5 \text{ м/с}$), получаем:

$$M_J \sim 2000 M_\odot. \quad (29)$$

Следовательно, сколлапсировать могут только сгустки с массой более $2000M_{\odot}$. Это значение удовлетворяет условию (5).

Для развития гравитационной неустойчивости требуются дополнительные механизмы, связанные с образованием молекулярных облаков антивещества и остыванием, которое может приводить к образованиям объектов такой массы.

3.3 Оценка отношения давлений

3.3.1 Исходные параметры

В предыдущем пункте мы нашли минимальную массу для образования сгустков (29):

$$M_{\min} = 2 \times 10^3 M_{\odot}, \quad (30)$$

где $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ кг — масса Солнца. Тогда:

$$M = 2 \times 10^3 \times 2 \times 10^{30} = 4 \times 10^{33} \text{ кг}. \quad (31)$$

Характерный радиус домена примем равным радиусу типичного шарового скопления или компактной карликовой галактики:

$$R \sim 1 \text{ пк} = 3 \times 10^{16} \text{ м}. \quad (32)$$

3.3.2 Плотность барионов

Из соотношения $M \sim n_b m_p R^3$ (с точностью до численного коэффициента порядка единицы) получаем:

$$n_b \sim \frac{M}{R^3 m_p}. \quad (33)$$

Подставляя численные значения:

$$n_b = \frac{4 \times 10^{33}}{(3 \times 10^{16})^3 \times 1,67 \times 10^{-27}} \sim 8,7 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}. \quad (34)$$

3.3.3 Отношение давлений

Формула для отношения давления аннигиляции к гравитационному давлению получена в (13):

$$\frac{p_{\text{rad}}}{p_{\text{grav}}} \sim \frac{E_{\text{ann}}}{3Gn_b m_p^2 R^2}. \quad (35)$$

Здесь:

$$\begin{aligned}E_{\text{ann}} &= 2m_p c^2 = 3,01 \times 10^{-10} \text{ Дж}, \\G &= 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}, \\m_p &= 1,67 \times 10^{-27} \text{ кг}.\end{aligned}$$

Тогда:

$$\frac{p_{\text{rad}}}{p_{\text{grav}}} \sim \frac{3,01 \times 10^{-10}}{3 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 8,7 \times 10^{10} \times (1,67 \times 10^{-27})^2 \times (3 \times 10^{16})^2} \sim 6,89 \times 10^9 \quad (36)$$

Таким образом, давление аннигиляции всегда доминирует над гравитационным, и облако расширяется, а не сжимается.

3.3.4 Противоречие между давлением аннигиляции и массой Джинса

Можно заметить, что давление аннигиляции мешает образованию макрообъектов в домене, в то время как полученная масса Джинса наоборот допускает существование таких объектов.

Для того, чтобы обеспечить образование объектов в домене требуются дополнительные механизмы, например, механизмы, связанные с образованием молекулярных облаков и также первичной неоднородностью распределения антивещества в домене, связанной с аннигиляцией более мелких доменов вещества.

4 Заключение

В данной работе исследовалось влияние аннигиляции вещества и антивещества на развитие гравитационной неустойчивости в доменах антивещества.

Проведён анализ энерговыделения при протон-антипротонной аннигиляции. Показано, что в одном акте аннигиляции выделяется энергия $E_{\text{ann}} = 1,877$ ГэВ, а продукты аннигиляции являются ультрарелятивистскими.

Выполнено сравнение давления продуктов аннигиляции с гравитационным давлением. Полученное отношение $p_{\text{rad}}/p_{\text{grav}} \sim 6,89 \times 10^9 \gg 1$ показывает, что давление аннигиляции доминирует над гравитационным. Именно это давление является главным препятствием для гравитационного сжатия.

Рассмотрена модификация массы Джинса в условиях аннигиляционного нагрева. Аннигиляционный нагрев среды до $T \sim 10^7\text{--}10^8$ К увеличивает скорость звука до $c_s \sim 300$ км/с, что даёт оценку массы Джинса $M_J \sim 2000M_{\odot}$. Это значение удовлетворяет условию существования домена $10^3M_{\odot} \leq M \leq 10^5M_{\odot}$.

Таким образом, основная проблема для развития гравитационной неустойчивости в доменах антивещества — давление продуктов аннигиляции, превышающее гравитационное. Для её преодоления требуются дополнительные механизмы, например, наличие внутренних субдоменов вещества внутри антивещественного домена (структура типа «швейцарского сыра»), которые могут локально изменять баланс давлений и создавать условия для гравитационного сжатия.

Список литературы

- [1] Aguilar, M. et al. (AMS Collaboration). (2023). Preliminary evidence for antihelium candidates in cosmic rays. *ICRC 2023 proceedings*.
- [2] Jeans, J. H. (1902). The stability of a spherical nebula. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 199, 1-53.
- [3] Binney, J., & Tremaine, S. (2008). *Galactic Dynamics* (2nd ed.). Princeton University Press.
- [4] Dodelson, S. (2003). *Modern Cosmology*. Academic Press.
- [5] Anderson, E. K., et al. (ALPHA Collaboration). (2023). Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter. *Nature*, 621, 716-722.
- [6] Schiff, L. I. (1958). Sign of the Gravitational Mass of a Positron. *Physical Review Letters*, 1, 254.
- [7] Trigger, S. A., & Gribov, I. A. (2022). Jeans instability and antiscreening in the system of matter-antimatter with antigravitation. *Physics Letters B*, 826, 136913.
- [8] Khlopov, M. Yu., Rubin, S. G., & Sakharov, A. S. (2000). Evolution and observational signature of diffused antiworld. *Astroparticle Physics*, 12, 367-372.