

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

---

Кафедра физики элементарных частиц (№40)

Отчет по НИРС на тему:

Скопления антизвезд как источник антигелия в потоке галактических  
космических лучей

Студент Б16-102	Кириченко А.О.	_____
Руководитель работы	Хлопов М.Ю.	_____
Консультант	Майоров А.Г.	_____
Оценка руководителя	_____	_____

Москва – 2020 г.

## Содержание

Введение . . . . .	3
Экспериментальные результаты об открытии античастиц . . . . .	5
Шаровые скопления в гало галактики . . . . .	7
Постановка задачи . . . . .	9
Результаты . . . . .	10
Заключение . . . . .	13
Список литературы . . . . .	14

## Введение

В конце 1920х годов Поль Дирак предсказал существование античастиц— частиц, противоположных протону и электрону по электрическому заряду и другим характеристикам. В 1932, 1955 годах были открыты позитрон и антипротон, соответственно. Сейчас обнаружены сотни античастиц, и каждая заряженная частица имеет свою античастицу.

Антиматерию стали подробно изучать, и, согласно современным теоретическим представлениям, она разделяется на три категории по происхождению:

1. Первичная антиматерия сохранилась с момента зарождения вселенной и сейчас, по предположению, может существовать в виде шаровых скоплений антизвезд или в виде антигалактик.

2. Вторичная антиматерия—как результат столкновения ядерной компоненты галактических космических лучей с межзвездным газом или оболочкой сверхновой

3. Антиматерия от экзотических источников ( от испарения первичных черных дыр или распад/аннигиляция частиц скрытой массы.)

Особый интерес для данной работы представляет первичная антиматерия, так как именно она по предположению в работе [1] сохранилась в нашей галактике в виде шарового скопления антизвезд.

### Первичная антиматерия

Барионная асимметрия Вселенной - наблюдаемое преобладание в видимой части Вселенной вещества над антивеществом. Объяснение происхождения барионной асимметрии Вселенной является одной из ключевых проблем современной физики. В частности в космологии и в физике элементарных частиц.

В статье 1967 года [2] А. Д. Сахаров сформулировал необходимые условия для наличия барионной асимметрии:

1. Асимметрия между миром и антимиром как нарушение зарядовой C- и комбинированной CP-симметрии.

2. Нарушение закона сохранения барионного заряда.

3. Нарушение на ранних этапах формирования Вселенной термодинамического равновесия.

На ранних стадиях развития Вселенной несохранение барионного заряда должно было быть велико, из-за отличия в свойствах частиц и античастиц и мог возникнуть небольшой избыток барионов.

Экспериментальные данные показывают, что С-, Р- и Т-симметрии в отдельности нарушены. В частности, если частица нестабильна и может распадаться в разные конечные состояния, то частичные вероятности скорости распадов в данное конкретное состояние для частицы и в аналогичное (зарядово-сопряжённое) для античастицы оказываются несколько различными. Это явление называется нарушением С- и СР- симметрии. Различие в вероятностях очень мало, но именно оно обеспечивает преимущественное существование частиц вещества в нашем мире.[1]

В работах [3-6] показано, что практически все существующие механизмы бариосинтеза могут приводить к формированию доменов с избытком антиматерии, и это требует незначительных модификаций условий Сахарова. Размер доменов зависит от деталей соответствующих механизмов и может быть как малым, так и достигающим современного горизонта.

Макроскопическая область антиматерии при той же температуре и плотности эволюционирует так же как и обычная материя макроскопических размеров.[4] Эксперименты на ускорителях, где синтезируют антивещество, показывают, что свойства частиц и античастиц с поразительной точностью совпадают, если пренебречь малым эффектом нарушения СР-четности.

В изолированном пространстве не может сформироваться астрономический объект меньше, чем шаровое скопление, это показано в работе [7]. Антизвезда может сформироваться только в окружении антивещества, т.к. иначе вещество и антивещество проаннигилируют. Таким образом, например, шаровые скопления антизвезд могли бы образоваться в период формирования Галактики и сохраниться в ее гало к настоящему времени[7]. При меньших размерах антивещество еще до формирования Галактики проаннигилировало бы с веществом. Эффектом присутствия доменов антивещества может быть регистрация ядер антигелия[8,9], к примеру, в экспериментах на околоземных установках PAMELA и AMS-02.

## Экспериментальные результаты об открытии античастиц

Важным моментом проверки теории является сопоставление расчетов с экспериментальными данными. В этом разделе рассматриваются эксперименты PAMELA и AMS-02, в которых проводится поиск антивещества от потоков галактических космических лучей.

### PAMELA

PAMELA был запущен 15 июня 2006 года и стал первым спутниковым экспериментом, посвященным обнаружению космических лучей, с особым акцентом на поиск антивещества. Эксперимент был прекращен в 2016 году. Прибор построен на спектрометре с постоянными магнитами и кремниевым микрополосковым трекером, который обеспечивает информацию о жесткости частиц. Внизу находится кремниево-вольфрамовый калориметр, нейтронный детектор и сцинтиллятор с ливневым хвостом для распознавания отношения  $\frac{\text{лептон}}{\text{адрон}}$ . Слои пластиковых сцинтилляторов используются для измерения скорости и заряда частицы. PAMELA имеет высокую чувствительность отношения  $\frac{antiHe}{He} = 10^{-7}$

Энергия антипротонов измерялась в диапазоне 60–750 МэВ. Космические лучи сталкиваются с атомами в верхних слоях атмосферы, создавая антинейтроны, которые, в свою очередь, распадаются с образованием антипротонов. Они были обнаружены в части пояса Ван Аллена, ближайшей к Земле. Полученные Данные PAMELA показывают, что аннигиляционные события происходили в тысячу раз чаще, чем можно было бы ожидать в отсутствие антивещества. Данные, содержащие доказательства наличия антивещества, были собраны в период с июля 2006 года по декабрь 2008 года. [10,11]

## AMS-02

AMS является первым большим спектрометром проводящим эксперименты на околоземной орбите. В AMS-02 используются устойчивые к радиации сверхбыстрые микросхемы специально для регистрации частиц высоких энергий. Эксперимент начался в 2011 году и продолжается в настоящее время. Регистрируется как вещество так и антивещество в широком диапазоне масс и энергий. Детекторный модуль состоит из серии детекторов, которые используются для определения различных характеристик излучения и частиц при их прохождении. Характеристики определяются только для частиц, проходящих сверху вниз. Частицы, которые входят в детектор под любыми другими углами, отклоняются.

Детектор переходного излучения измеряет скорости частиц с наибольшей энергией. Верхнее время счетчика полета, наряду с меньшим временем счетчика полета, измеряет скорости частиц с более низкой энергией. Звездный трекер определяет ориентацию модуля в пространстве. Кремниевый трекер измеряет координаты заряженных частиц в магнитном поле. Имеет 4 резервных насоса охлаждающей жидкости. Постоянный магнит изменяет путь заряженных частиц, чтобы их можно было идентифицировать. Счетчик анτισовпадений отбрасывает случайные частицы, попадающие через боковые стенки; Кольцевая визуализация черенковского детектора измеряет скорость быстрых частиц с предельной точностью; Электромагнитный калориметр измеряет полную энергию частиц.

AMS представила в апреле 2015 года данные о 300 миллионах протонных событий и потоке гелия. В декабре 2016 года он обнаружил несколько сигналов, соответствующих ядрам антигелия среди нескольких миллиардов ядер гелия. [12,13]

## Шаровые скопления в гало галактики

Шаровое скопление - это сферическая совокупность звезд, которая вращается вокруг ядра галактики. Шаровые скопления очень тесно связаны под действием силы тяжести, что придает им сферическую форму и относительно высокую плотность звезд по направлению к их центрам. Название этой категории звездных скоплений происходит от латинского *globulus* - небольшой сферы.

Шаровые скопления находятся в гало галактики и содержат значительно больше звезд и намного старше, чем менее плотные открытые скопления, которые находятся в диске галактики. Шаровые скопления довольно распространены, в Млечном Пути в настоящее время известно от 150 до 158 шаровых скоплений, а еще от 10 до 20 еще не обнаружено.

Наблюдения за шаровыми скоплениями показывают, что эти звездные образования возникают главным образом в областях эффективного звездообразования и где межзвездная среда имеет более высокую плотность, чем в нормальных звездообразующих областях. Ни одно из известных шаровых скоплений не показывает активного звездообразования, они свободны от газа и пыли, и предполагается, что весь газ и пыль давно были либо превращены в звезды, либо выдулись из скопления во время первоначального взрыва звездообразования. Это согласуется с мнением о том, что шаровые скопления являются самыми старыми объектами в Галактике и были одними из первых скоплений звезд, которые сформировались.

Шаровые скопления вращаются по галактикам на орбитах, которые сильно эксцентричны и сильно наклонены к плоскости галактики. Находясь на орбите "окраины" галактики, им требуется, возможно, несколько сотен миллионов лет, чтобы пройти одну орбиту. В телескопе шаровое скопление выглядит как нечеткий шар, а отдельные звезды на периферии сливаются в сплошной шар света по направлению к центру. Тем не менее, это просто потому, что звезды находятся так близко друг к другу, что они не могут быть индивидуально телескопически разрешены. В центре шарового скопления звезды могут достигать плотности от 100 до 1000 звезд на кубический парсек. Это в отличие от плотности звезд около нашего Солнца, которая оценивается примерно в

0,14 звезды на кубический парсек.

Шаровые скопления обычно состоят из звезд, которые имеют низкую долю элементов, отличных от водорода и гелия, по сравнению с такими звездами, как Солнце. Называют эти более тяжелые элементы металлами, а пропорции этих элементов - металличностью. Эти элементы производятся в результате звездного нуклеосинтеза, а затем возвращаются в межзвездную среду, где они попадают в звезды следующего поколения. Следовательно, доля металлов может указывать на возраст звезды, причем более старые звезды обычно имеют более низкую металличность. [14-16]



## Постановка задачи

Предположим, что шаровое скопление М4- источник антигелия-4 в галактических космических лучах. Берется для рассмотрения именно антигелий т.к. вероятность его вторичного образования крайне мала. Для этого должны в одном месте и практически одновременно образоваться два антипротона и два антинейтрона. Причем их относительные скорости должны быть малы. Скопление М4 находится в Гало Галактики Млечный путь. Для начала антигелию-4 нужно проникнуть в диск. А потом в солнечную систему, которая находится на расстоянии 8 кпк от галактического центра. Есть три возможных инъекции антигелия в КЛ:

:

1. Низкие энергии.

Если область распространения антивещества шарового скопления будет пересекать галактический диск, звездный ветер попадет в диск, а затем и в Солнечную систему. Для этого рассматривается стационарное истечение вещества звезды в скоплении.

Звезды постоянно теряют часть своей массы, поэтому концентрация частиц от всего шарового скопления будет достаточно высокой. Но это очень низкие энергии, необходим процесс доускорения частиц.

2. В результате вспышек на звездах в шаровом скоплении частицы могут приобретать большую энергию, образуя антиядерную компоненту ГКЛ.

3. Взрывы сверхновых - это результат эволюции звезд, сопровождающийся выбросом огромной энергии (порядка  $10^{51}$  эрг). Вещество от взорвавшейся звезды распространяется с большой скоростью и с высокой вероятностью достигнет Солнечной системы и впоследствии Земли. Сверхновые могут являться наиболее вероятным источником антиядер в космических лучах.

## Результаты

В работе проводилось изучение шаровых звездных скоплений нашей Галактики и их основных свойств. По данным [тот сайт] было построено распределение изученных скоплений.

### Стационарный случай

На первом этапе был рассмотрен механизм стационарного истечения вещества из скопления. По данным [15], [21] построены гистограммы масс по выборке температур из 100 звезд, для понимания того, какие звезды населяют шаровое скопление М4.

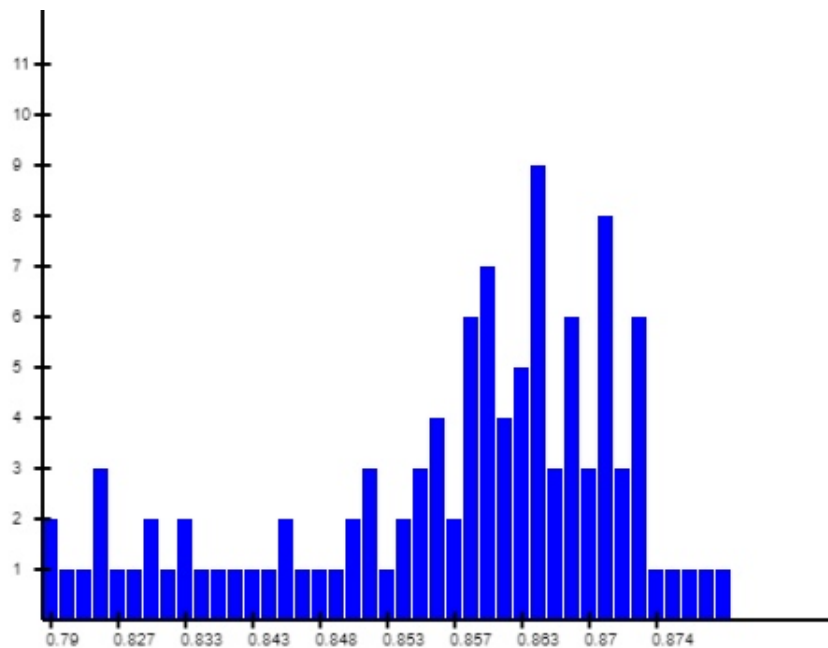


Рис.5 Распределение по массам из 100 звезд в звездном скоплении М4

Эти звезды из центра скопления, но мы можем обобщить на все звёзды скопления, поскольку они эволюционируют в одних и тех же условиях гало. Исходя из распределения масс и значения температур, можно сделать вывод, что наша выборка -это группа оранжевых карликов с массами от 0.78 до 0.9 масс Солнца.

Для того, чтобы понять, могло ли обычное вещество из гало Галактики интенсивно проникать в шаровое скопление, было рассчитано среднее рас-

стояние между звездами по формуле объема шара при известных значениях радиуса кластера( $R$ ) и количества звезд в нем( $N$ ):

$$\langle R \rangle = \sqrt{\frac{4\pi R}{3N}} = 0.03 \text{ пк} \quad (1)$$

Используя данные [21] и [22], находим средний размер астросферы для оранжевых карликов в М4:

$$\delta = \sqrt{\frac{n_p m_p v_{wind}^2}{\frac{B_r^2}{8\pi}}} = 0.005 \text{ пк} \quad (2)$$

сравнивая его с полученным средним расстоянием между звездами можно сказать, что обычное вещество проникает в межзвездное пространство в шаровом скоплении. Это говорит о том, что на поверхности звезд происходит процесс аннигиляции. Для того, чтобы понять, покидает ли вещество звездного ветра шаровое скопление, была рассчитана скорость звездного ветра и полученное значение сравнивалось со второй космической скоростью:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 1.5 * 10^4 \text{ м/с} \quad (3)$$

где  $R=3.4$  св. лет [23],  $M$  радиус и масса скопления соответственно.

Для вычисления звездного ветра нужно вычислить температуру ветра по формуле из [24]

$$T_{wind} = \frac{2G\mu m_p}{\gamma k_b} \left( \frac{C_s}{V_{esc}} \right)^2 \left( \frac{M}{R} \right) = 3.5 * 10^5 \text{ K} \quad (4)$$

и радиус звезды по формуле [25]

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{L_{sun}}}}{\left( \frac{T}{T_{sun}} \right)^2} \quad (5)$$

$$R = 1.28 * R_{sun}$$

Находим по графику из [24] для 1 а.е. Значение скорости ветра слабо меняется с расстоянием, поэтому для оценки берем это значение

$$v_{wind} = 700 \text{ км/с} \quad (6)$$

Скорость ветра звезды больше второй космической. Значит вещество стационарного истечения звезд активно покидает пределы скопления.

## Высокие энергии - вспышки сверхновых

На рисунке 1 представлен график эволюции населения скопления М4[17]. График дает понять какие процессы происходили на ранних этапах жизни скопления и сравнить результаты этих процессов с настоящим временем. Обратим внимание на число нейтронных звезд на графике. Их число не изменилось за 12 млрд. лет. Это значит, что примерно 12 млрд. лет назад они могли образоваться как результат взрыва сверхновых II типа.

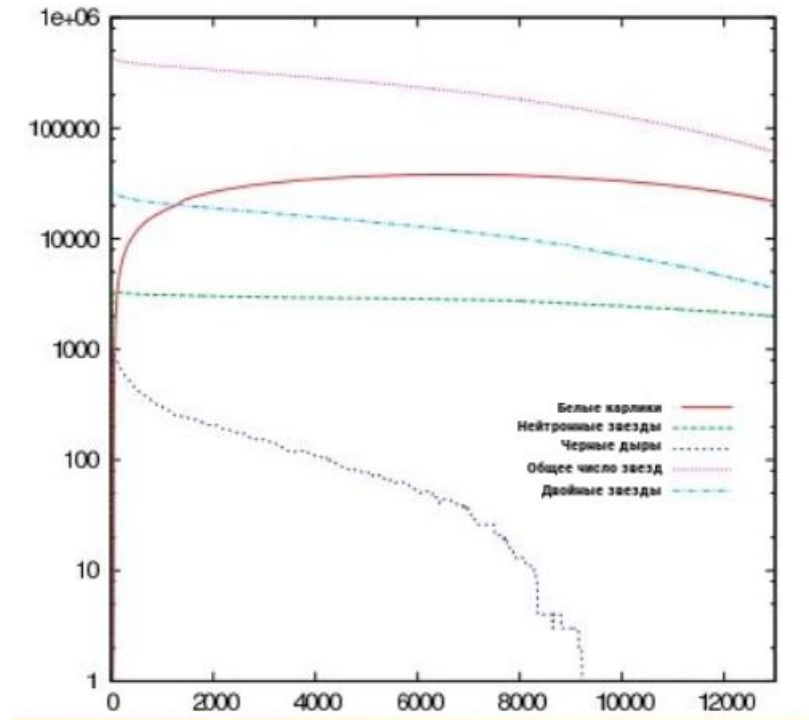


Рис.2 Изменение населения М4 во времени

Используя данные статьи [22] рассчитаем поток антигелия от шарового скопления:

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn} \dot{N}_{sn} t_{ret}}{V} = 10^{-4} \text{эВ/см}^3 \quad (7)$$

где  $N_{sn} = 2 * 10^4$  число нейтронных звезд в М4, берем их для расчетов, так как они по современным представлениям являются результатом взрыва сверхновых,  $t = 13 * 10^9$  лет  $\approx 10^{10}$  лет =  $3 * 10^{16}$  секунд - возраст кластера,  $\dot{N}_{sn} \sim 2 * 10^{-5}$  средняя частота взрыва сверхновых II класса,  $E_{sn} \sim 10^{51}$  эрг - энергия от одной сверхновой,  $t_{ret} \sim 10^7$  - время удержания КЛ,  $V$  - объем диска Галактики с высотой и радиусом 300кпк и 10 кпк соответственно.

## Заключение

В данной работе в рамках шарового скопления антизвезд в Галактике была изучена возможная роль процессов образования доменов антивещества на основе модели, заключающейся в том, что шаровое скопление антизвезд эволюционирует похожим образом как обычное шаровое звездное скопление, исходя из симметрии свойств вещества и антивещества. Основная идея возможности обнаружения домена антивещества состоит в детектировании антиядерной компоненты космических лучей от источника. В работе производится теоретическая оценка данного потока. В связи с тем, анализ разделяется на несколько этапов. построение функции источника, основываясь на тех способах покидания вещества скопления и на формирование модели движения частиц в условиях гало и диска Галактики. Из трех способов покидания вещества рассмотрено два: В стационарном случае проведена оценка скорости покидания вещества и заключено, что антивещество активно покидает источник и в при дальнейших расчетах может дать вклад в общий энергетический поток. Вторым был рассмотрен высокоскоростной случай, базирующийся на получении высокоэнергичных частиц от взрыва сверхновых в этом скоплении. Здесь была рассчитана энергетическая плотность космических лучей от данного скопления.

Дальнейшая работа будет направлена на формирование энергетического спектра от источника и на построение модели движения потоков античастиц в магнитных полях гало и диска Галактики как для стационарного случая, так и для случая частиц с высокими скоростями.

## Список литературы

- [1] Долгов А. Д., Зельдович Я. Б., Вещество и антивещество во Вселенной, "Природа 1982
- [2] Сахаров А.Д. Нарушение СР-инвариантности, С-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной. // Письма в ЖЭТФ, Т. 5, 1967. - С. 32.
- [3] Dolgov A.D. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. A, V. 113, 2002. - P. 40
- [4] Долгов А.Д., Илларионов А.Ф., Кардашев Н.С., Новиков И.Д. // ЖЭТФ, Т. 1, 1987. – С. 94.
- [5] Khlopov M.Yu., Rubin S.G., Sakharov A.S. Possible Origin of Antimatter Regions in the Baryon Dominated Universe.//arXiv:hep-ph/0003285.
- [6] Khlopov M.Yu., Rubin S.G., Sakharov A.S. Antimatter regions in the baryon-dominated Universe. // arXiv:hep-ph/0210012.
- [7] Khlopov M.Yu., Konoplich R.V., Mignani R., et al. Evolution and observational signature of diffused antiworld. // Astroparticle Phys. V. 12, Is. 4, 2000. - P. 367-372.
- [8] Belotsky K.M., Golubkov Yu.A., Khlopov M.Yu. et al. Antihelium flux signature for antimatter globular cluster in Galaxy. // arXiv:astro-ph/9807027v1.2
- [9] Аниканова Е.В., Белоцкий К.М., Гальпер А.М., Майоров А.Г. и др. Шаровое скопление антизвезд как источник антигелия в Галактике. // Труды 8-ой Курчатовской молодежной школы, 2010. – Стр. 363-367
- [10] <http://www.astronet.ru/>
- [11] Launch of the Space experiment PAMELA.M. Casolino, P. Picozza.
- [12] Ten Years of PAMELA in Space Ten Years of PAMELA in Space
- [13] Perrotto, Trent J.; Byerly, Josh (2 April 2013). "NASA TV Briefing Discusses Alpha Magnetic Spectrometer Results". NASA. Retrieved 3 April 2013.

- [14] "The First Five years of AMS on the International Space Station"(PDF). AMS collaboration. December 2016. Retrieved 12 December 2016.
- [15] Kenneth Janes (November 2000). "Star Clusters"(PDF). Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. p. 2. Retrieved 26 March 2014.
- [16] Talpur, Jon (1997). "A Guide to Globular Clusters". Keele University. Retrieved 25 April 2007.
- [17] Kalirai(2010). Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 368, 1913
- [18] Douglas C. Heggie, / Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4/ Douglas C. Heggie, Mirek Giersz// -2008.
- [19] A. F. Marino /Spectroscopic and Photometric evidence of two stellar populations in the Galactic Globular Cluster NGC 6121 (M4)/A.F.Marino, S. Villanova// 2018.-p. 18-21
- [20] <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2006-5/tables/1>
- [21] Лит.: Холопов П. Н. Звездные скопления. М., 1981; Спитцер Л. Динамическая эволюция шаровых скоплений. М., 1990.
- [22] <https://asd.gsfc.nasa.gov/bess/BESS.html>
- [23] Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей
- [24] Magnetic Fields in the Milky Way Marijke Haverkorn
- [25] <https://www.messier-objects.com/messier-4/>
- [26] Stellar winds on the main-sequence C. P. Johnstone, M. Güdel
- [27] Агемян Т.А. Звёзды, Галактика, Метагалактика
- [28] Долгов А. Д., Зельдович Я. Б., Вещество и антивещество во Вселенной, "Природа 1982
- [29] High Energy Cosmic Rays From Supernovae Giovanni Morlino 2016

- [30] Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4 Douglas  
C. Heggie and Mirek Giersz