

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 – 2019 г.

Содержание

Введение	3
Экспериментальные результаты об открытии античастиц	5
Шаровые скопления в гало галактики	8
Постановка задачи	10
Результаты	11
Заключение	14
Список литературы	15

Введение

В конце 1920х годов Поль Дирак предсказал существование античастиц. То есть частиц, противоположных уже открытым протону и электрону по электрическому заряду и другим характеристикам. Позитрон открыли чуть позже, в 1932 году. А в 1955 году на ускорителе Беватрон был открыт антипротон, это событие было отмечено Нобелевской премией. Почти одновременно с антипротоном был открыт антинейтрон. Сейчас обнаружены сотни античастиц. Любая заряженная частица имеет свою античастицу. За открытие античастиц больше не вручают Нобелевские премии. Антиматерию стали подробно изучать и согласно современным представлениям она разделяется на три категории по происхождению:

1. Первичная антиматерия сохранилась с момента зарождения вселенной и сейчас существует в виде шаровых скоплений антизвезд или в виде антигалактик.
2. Вторичная антиматерия образуется в результате 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 [20] 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 [1] 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, в частности за счёт того, что в первичной плазме при такой температуре могли рождаться Х-бозоны. Именно тогда из-за отличия в свойствах частиц и античастиц и мог возникнуть небольшой избыток барионов. Что в итоге привело к барионной асимметрии Вселенной.

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 вероятности 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 выживание частиц вещества в нашем мире.[20] В работах [2-5] 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 эволюционирует так же как и обычная материя макроскопических размеров.[3] Эксперименты на ускорителях, где синтезируют антивещество, показывают, что свойства частиц и античастиц с поразительной точностью совпадают, если пренебречь малым масштабом нарушения СР-четности.

В изолированном пространстве не может сформироваться астрономический объект меньше, чем шаровое скопление, это показано в работе [6]. 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.[6] При меньших размерах антивещество проаннигилирует с веществом. Эффектом присутствия доменов антивещества может быть регистрация ядер антигелия[7,8], к примеру, в экспериментах на околоземных установках PAMELA и AMS-02.

Экспериментальные результаты об открытии античастиц

Так как цель данной работы теоретически оценить поток антивещества, то важным моментом проверки теории- это сопоставление расчетов с экспериментальными данными. Мы будем рассматривать эксперименты в которых проводится поиск антивещества от потоков галактических космических лучей: PAMELA, AMS-02, BESS. Рассмотрим каждый из них подробнее.

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 кремниевое-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 анти-нейтроны, 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.

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. Регистрируется как вещество так и антивещество в широком диапазоне масс и энергий.

Устройство AMS-02

Магнит. С помощью магнитного поля AMS отделяет вещество от антивещества, по радиусу кривизны оценивает импульс частицы. В приборе используется постоянный магнит. Он не имеет жестких ограничений по сроку службы в сравнении с сверхпроводящим магнитом.

Детектор переходного излучения (Transition Radiation Detector (TRD)). Регистрирует ультрарелятивистские частицы. TRD состоит из слоев радиатора, между слоями расположены трубочки газоразрядных детекторов. Эти детекторы заполнены смесью $\text{Xe}:\text{CO}_2$ и работают в лавинном режиме.

Система времени пролета (Time-of-Flight System (ToF)). Служит для прецизионного определения времени и скорости частиц. Это позволяет отличать e^- от e^+ и p от \bar{p} до энергий 1-2 ГэВ. Совместно с трекером ToF определяет абсолютный заряд частицы. Так же ToF служит для AMS триггером. Система состоит из 4х плоскостей (2 верхних 2 нижних) сцинтилляционных детекторов, расстояние между ними 1.2м. Каждая плоскость-набор полосок сцинтилляторов в подсоединенных к ним ФЭУ.

Кремниевый трекер (Silicon Tracker). Определяет заряд, импульс и направление полета частицы. Трекер состоит из 8 тонких (300 мкм) двусторонних микростриповых сенсоров. Стрипы верхних и нижних поверхностей ортогональны. Расстояние между стрипами 50 мкм. Две сенсорные панели находятся в начале и в конце спектрометра, остальные – в поле магнита.

Черенковский детектор. Определяет скорость ультрарелятивистских частиц (прецизионно). В сочетании с жесткостью и зарядом, измеренными трекером и системой времени пролета и скорости, измеренной с помощью черенковского детектора и системы времени пролета определяется масса частицы. ЧД состоит из радиатора в центре которого NaF, окруженный слоем аэроге-

ля. Миниатюрные фотонные детекторы (ФД) регистрируют черенковское излучение. Частицы без помех пролетают в электромагнитные калориметры благодаря наличию отверстий в центре фотонных детекторов. ФД регистрируют черенковский конус. Раствор конуса большой за счет показателя преломления $\text{NaF}(1.335)$. Часть фотонов попадает в чувствительную область, несмотря на наличие отверстия по центру. Вокруг ЧД находится коническое зеркало. Фотоны, отражающиеся от зеркала также регистрируются. С помощью специального алгоритма распознавания образов по проекциям черенковских конусов восстанавливаются скорость и углы вылета частиц. По ширине линии оценивается заряд.

Электромагнитный калориметр (Electromagnetic Calorimeter (ECAL)). Измеряет энергию e^- , e^+ , γ , если она меньше 1 Тэв. Калориметр также производит сепарацию $\frac{p}{e^+}$ и $\frac{\bar{p}}{e^-}$, восстанавливает направление движения первичной частицы с точностью до нескольких градусов, реконструирует 3хмерный профиль ливня на 18 различных глубинах. ECAL—это "блинчатый пирог" из 9ти суперслоев. Каждый такой слой состоит из 11 свинцовых фольг толщиной 1мм. В слоях находятся желобки, чередующиеся со сцинтилляционными волокнами, диаметр которых 1мм. Эти волокна располагают перпендикулярно друг другу.

Система совпадений (Anti-Coincidence Counter (ACC)). Отбирает для физического анализа только те частицы, которые попадают в AMS под небольшими углами. В секунду прибор регистрирует 10^4 событий. ACC отбирает из них только 20%. Система антисовпадений очень полезна при поиске \overline{He} . Ядра высоких энергий, попавшие в магнит, могут взаимодействовать с веществом. Система состоит из двух тонких слоев пластиковых сцинтилляторов, окружающих трекер.

Шаровые скопления в гало галактики

ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ, группы звёзд, связанных между собой силами взаимного гравитационного притяжения и имеющих совместное происхождение, близкие возраст и химический состав. В звездных скоплениях количество звезд колеблется от 20-30 до нескольких миллионов. ЗС обычно имеют плотный центр(ядро), которое окружено менее плотной короной. Диаметры скоплений имеют разброс от нескольких пк до 280 пк. Звездные скопления делаются на шаровые и рассеянные, главное отличие которых масса и возраст. Рассеянные более молодые и содержат меньше звезд - от десятка до тысячи. Тогда как шаровые ЗС имеют в составе от тысячи до нескольких миллионов звезд. ШЗС выглядят более структурировано, шарообразно(М3 в созвездии Гончих псов и М13 в созвездии Геркулеса). Рассеянные же не имеют конкретной структуры и выглядят клочковато(скопление Плеяды и Гиады).

Шаровые скопления распределяются в сфероидальном объеме Галактики неравномерно, сильно концентрируясь к центру. ШЗС находящиеся возле центра имеют большие скорости относительно Солнца, в среднем 170км/с. К настоящему моменту обнаружены ок. 160 шаровых скоплений, но лишь малая часть скрывается за пылевыми облаками диска, т.к. ШС распределены по всему объему галактики, а не только в диске. По теоретическим расчетам в Галактике не более 200 ШС.

Анализ диаграмм Гершпрунга-Рассела дает важные сведения об эволюции ЗС. Для рассеянных и шаровых звездных скоплений эти диаграммы различны. У ШС на стадии главной последовательности находятся менее массивные звезды(0.7-0.8 масс Солнца). Это объясняет возраст таких скоплений(12-14 млрд. лет), т.к. наименее массивные звезды теряют свою оболочку не так интенсивно. Светимости в ШС так же меньше в сравнении с РС. Самые яркие звезды в ШЗС -красные гиганты на последних стадиях эволюции. Формирование звездных скоплений происходит в недрах гигантского облака межзвездного вещества, т.к. облако гравитационно неустойчиво. Происходит это в наиболее холодной и плотной части облака—в ядре. В образующихся ЗС появляются массивные звезды, которые разогревают окружающее их облако и оно

разрушается. Звезды, образующие долгоживущее скопление, гравитационно связаны друг с другом. Сближаясь, звезды обмениваются энергией и приобретают избыток энергии. Вместе с газом покидают скопление и звезды, имеющие высокие скорости. Такие звезды образуют звездную ассоциацию. Также на разрушение звездного скопления сильное влияние оказывают пролетающие мимо массивные облака межзвездного газа (массы некоторых могут достигать 10^6 масс Солнца), совершающие гравитационные толчки. Рассеянные звездные скопления разрушаются быстрее, так как они малонаселены. Шаровые скопления более стойкие из-за большого количества гравитационно связанных звезд. [13]

Постановка задачи

Пусть шаровое скопление- источник антигелия. Мы берем для рассмотрения именно антигелий т.к. его вторичность маловероятна. Для этого должны в одном месте и практически одновременно образоваться два антипротона и два антинейтрона. Причем их относительные скорости должны быть малы. Солнечная система находится в диске галактики Млечный путь на расстоянии 8 кпк. Есть три возможных инъекции антигелия в КЛ:

:

1. Низкие энергии В предположении того, что 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.

Звезды постоянно теряют часть своей массы, поэтому плотность частиц от всего шарового скопления будет достаточно высокой. Но это очень низкие энергии, необходим процесс доускорения частиц. Поэтому этот вариант рассматривать как единственный не стоит.

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

3. Взрывы сверхновых - это результат эволюции звезд, сопровождающийся выбросом огромной энергии. Вещество от взорвавшейся звезды распространяется с большой скоростью и с высокой вероятностью достигнет наблюдателя. Именно поэтому они являются наиболее вероятным источником космических лучей.

Результаты

В семестре проводилось ознакомление с шаровыми звездными скоплениями и их основными свойствами. Так же изучались космические лучи, механизмы их образования и типы.

Были изучены характеристики звезд и этапы их эволюции: классификация звезд в зависимости от возраста, массы и температуры; рассмотрены параметры звездного ветра. На первом этапе было изучено население скопления М4 и его эволюция по данным из статьи [11]:

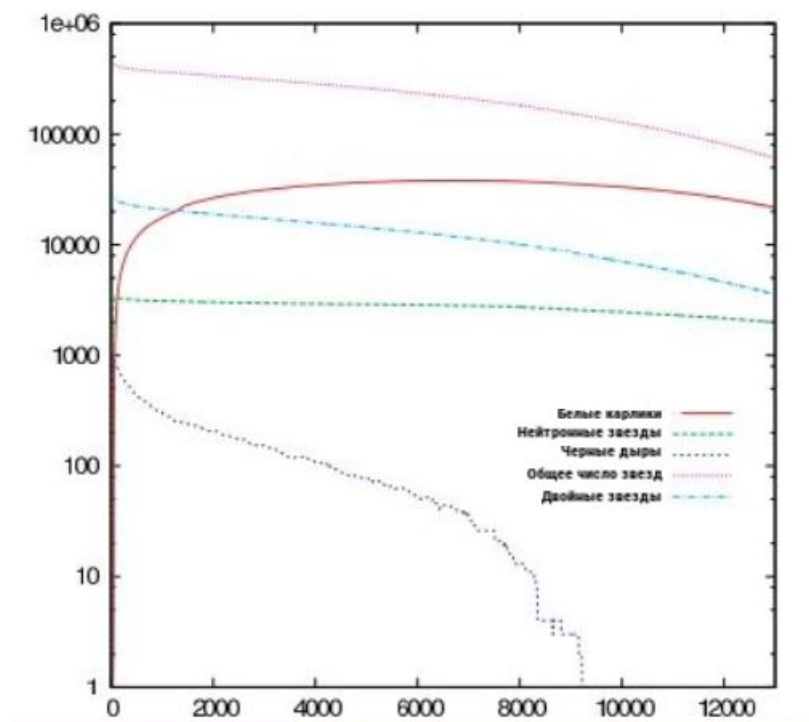


Рис.2 Изменение населения М4 во времени

Проанализируем график. Полное число звезд в М4 уменьшилось к настоящему моменту. Скопление теряет часть своего населения. Звезды со скоростями, превышающими скорость отрыва, покидают скопление. Уходящие звезды уносят часть кинетической энергии, после чего происходит перераспределение оставшейся энергии - появляются "быстрые" звезды. Таким образом, звезды на периферии покидают скопление. Это один из двух основных механизмов разрушения шарового скопления, он называется "испарение". Обратите внимание так же на число нейтронных звезд. Оно почти не изменилось за 12 млрд. лет. Это говорит о том, что примерно 12 млрд лет назад они образовались, возможно как результат взрыва сверхновых. В таком случае поток

ГКЛ от сверхновых этого кластера может быть зарегистрирован на колоземной орбите в настоящем времени.

По данным статьи [12]

и таблице из книги [15]

построены гистограммы масс по выборке температур из 100 звезд.

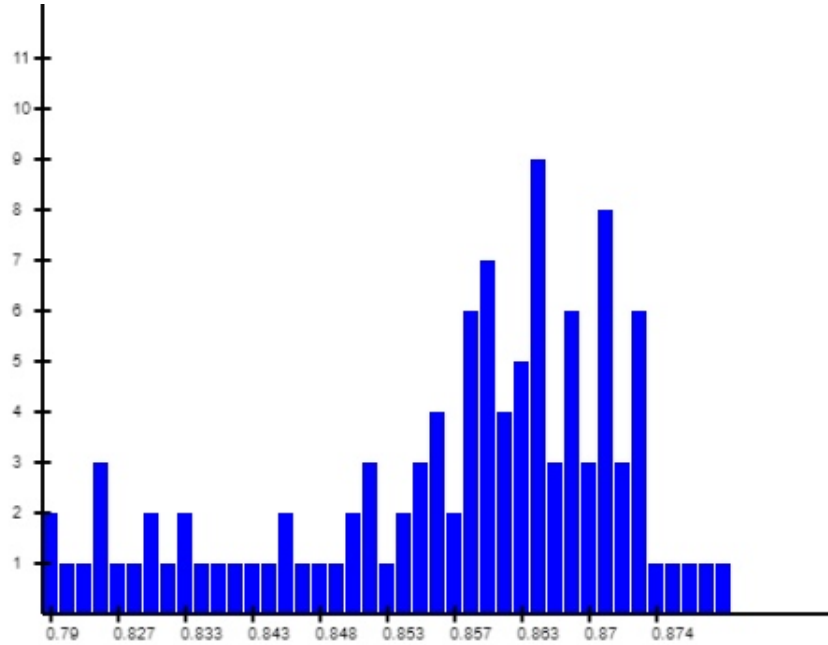


Рис.5 Распределение по массам из 100 звезд в звездном скоплении М4

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 обмениваются ли звезды веществом между собой было рассчитано среднее расстояние между звездами по формуле объема шара при известных значениях радиуса кластера(R) и количества звезд в нем(N):

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

Используя данные для B_r из статьи [16] и формулу из книги [15], находим средний размер астросферы для оранжевых карликов в М4:

$$\delta = \sqrt{\frac{n_p m_p v_{wind}^2}{\frac{B_r^2}{8\pi}}} = 1.1 * 10^3 a.e. \text{ или } 0.005 \text{ парсек} \quad (2)$$

сравнивая его с полученным средним расстоянием между звездами можно сказать, что звезды в скоплении не обмениваются веществом.

Расчет скорости покидания вещества из скопления М4, вторая космическая

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (3)$$

R- радиус скопления

M- масса скопления

Подставляем все данные

R= 3.4 св. лет [17]

получаем значение

$$v_2 = 1.5 * 10^4 m/c \quad (4)$$

Далее считаем температуру ветра по формуле из статьи [18]

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

9 Предварительно вычислив радиус звезды по формуле[19]

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{L_{sun}}}}{\left(\frac{T}{T_{sun}}\right)^2} \quad (6)$$

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

Находим по графику из статьи [18] для 1 а.е. Значение скорости ветра слабо меняется с расстоянием, поэтому для оценки берем это значение

$$v_{wind} = 700 km/c \quad (7)$$

Скорость ветра звезды больше второй космической. Вещество активно покидает пределы скопления.

Заключение

Список литературы

- [1] Сахаров А.Д. Нарушение CP-инвариантности, C-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной. // Письма в ЖЭТФ, Т. 5, 1967. - С. 32.
- [2] Dolgov A.D. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. A, V. 113, 2002. - P. 40
- [3] Долгов А.Д., Илларионов А.Ф., Кардашев Н.С., Новиков И.Д. // ЖЭТФ, Т. 1, 1987. – С. 94.
- [4] Khlopov M.Yu., Rubin S.G., Sakharov A.S. Possible Origin of Antimatter Regions in the Baryon Dominated Universe.//arXiv:hep-ph/0003285.
- [5] Khlopov M.Yu., Rubin S.G., Sakharov A.S. Antimatter regions in the baryon-dominated Universe. // arXiv:hep-ph/0210012.
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] 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
- [9] <http://www.astronet.ru/>
- [10] Douglas C. Heggie, / Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4/ Douglas C. Heggie, Mirek Giersz// -2008.
- [11] 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
- [12] <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2006-5/tables/1>

- [13] Лит.: Холопов П. Н. Звездные скопления. М., 1981; Спитцер Л. Динамическая эволюция шаровых скоплений. М., 1990.
- [14] <https://asd.gsfc.nasa.gov/bess/BESS.html>
- [15] Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей)
- [16] Magnetic Fields in the Milky Way Marijke Haverkorn
- [17] <https://www.messier-objects.com/messier-4/>
- [18] Stellar winds on the main-sequence C. P. Johnstone, M. Güdel
- [19] Агекян Т.А. Звёзды, Галактика, Метагалактика
- [20] Долгов А. Д., Зельдович Я. Б., Вещество и антивещество во Вселенной, "Природа 1982