

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СКОПЛЕНИЯ АНТИЗВЕЗД КАК ИСТОЧНИК АНТИГЕЛИЯ
В ПОТОКЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Студент _____ А. О. Кириченко

Научный руководитель,
проф., д.ф.-м.н. _____ М. Ю. Хлопов

Научный консультант,
к.ф.-м.н., доцент _____ А. Г. Майоров

Москва 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Введение	2
1.1 Первичное антивещество	3
1.2 Шаровые скопления в гало Галактики	4
1.3 Постановка задачи	6
2 Результаты	8
2.1 Расчет плотности энергии античастиц в космических лучах .	8
2.2 Движение частицы в магнитном поле Галактики	10
2.3 Заключение	14
Список литературы	15

1. ВВЕДЕНИЕ

В конце 20х годов прошлого века Поль Дирак предсказал существование античастиц – новых частиц, противоположных уже известным по знаку электрического, барионного, лептонного зарядам и другим характеристикам [1].

Антиматерия стали подробно изучать, и, согласно современным представлениям, оно имеет три возможных природы происхождения:

1. Первичное антиматерия, сохранившееся с момента зарождения Вселенной [2, 3], и сейчас, по предположению, может существовать в виде шаровых скоплений антизвезд [4].
2. Вторичное антиматерия, как результат столкновения ядерной компоненты космических лучей с межзвездным газом или с остатком оболочки сверхновой [5].
3. Антиматерия от экзотических источников (испарение первичных черных дыр или распад/аннигиляция гипотетических частиц скрытой массы) [6].

Предсказание [4] основано на предположении о симметрии свойств шаровых скоплений вещества и антиматерия [3]. В данной работе рассматривается возможность существования шарового скопления антиматерия, который будет является источником первичного антигелия. Первичный антигелий является вторым по распространенности после антипротона. Шаровое скопление также является источником более тяжелых антиядер. Но двигаясь по Галактике, тяжелые ядра будут подвергаться фрагментации. Именно поэтому антигелий является той характеристикой шарового скопления, которая, с одной стороны, практически не рождается как вторичная, а с другой стороны, будет более распространена как первичная [4]. Подход в данной работе направлен на то, чтобы уточнить предсказания этой гипотезы с учетом описания образования и распространения антигелия в Галактике.

1.1. ПЕРВИЧНОЕ АНТИВЕЩЕСТВО

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

А.Д.Сахаров(1967)[7] и В.А.Кузьмин(1970)[8] сформулировали необходимые условия для бариосинтеза – механизма генерации барионной асимметрии во Вселенной:

1.Асимметрия между частицами и античастицами как нарушение зарядовой С- и комбинированной CP-симметрии.

2.Нарушение закона сохранения барионного заряда.

3.Нарушение локального термодинамического равновесия.

С другой стороны в работах [9] - [12] показано, что почти все существующие механизмы бариосинтеза допускают существование доменов с избытком антивещества, в случае сильной неоднородности бариосинтеза. Размер доменов не фиксирован, он зависит от деталей рассматриваемых механизмов и может быть как малым, так и достигающим размера метагалактики.

Макроскопическая область антивещества с избытком антибарионов при той же температуре и плотности эволюционирует так же как и обычное вещество макроскопических размеров. Эксперименты на ускорителях, где синтезируют антивещество, показывают, что свойства частиц и античастиц совпадают, если пренебречь малым эффектом нарушения CP-четности[13].

В окружении вещества в ходе космологической эволюции не может сформироваться астрономический объект меньше, чем шаровое скопление, это показано в работе [14]. При меньших размерах антивещество еще до формирования Галактики проаннигилировало бы с окружающим его барионным веществом. Верхний предел размера домена задается наблюдаемыми потоками гамма-излучения.

Шаровые скопления антизвезд могли образоваться во время формирования Галактики и сохраниться в ее гало к настоящему времени. Потоки космических антиядер - это основополагающий признак существования таких скоплений.

1.2. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ В ГАЛО ГАЛАКТИКИ

Шаровое звёздное скопление – совокупность звезд, которая образует кластер сферической формы вращающийся вокруг ядра Галактики. Шаровые скопления очень тесно связаны под действием гравитации, 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, во Млечном Пути в настоящее время известно около 150 шаровых скоплений [15].

Наблюдения за шаровыми скоплениями показывают, что эти звездные образования возникают главным образом в областях эффективного звездообразования, где межзвездная среда имеет более высокую плотность, по сравнению с нормальными звездообразующих областями. В настоящее время 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 [16].

Траектории движения шаровых скоплений эксцентричны и сильно наклонены к плоскости галактики. Находясь на орбите «окраины» галактики, шаровым скоплениям требуется несколько сотен миллионов лет, чтобы пройти одну орбиту. В центре шарового скопления звезды могут достигать плотности от 100 до 1000 звезд на кубический парсек. Это отлично 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 [17]-[18].

1.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуя известное наблюдаемое шаровое скопление М4, рассматриваем его как прототип шарового скопления антизвезд и, как следствие, источник антигелия. (таблица 1.1).

Таблица 1.1 — Параметры скопления М4 [19]

Возраст, Млдр. лет	Расстояние от Солнца, кпк	Число звезд
12	1.72	$8 \cdot 10^4$

Тогда рассмотрим три возможных механизма инъекции антигелия в космические лучи от шарового скопления М4:

1. Стационарное истечение вещества с поверхности антизвезд

Если область распространения антивещества шарового скопления будет пересекать галактический диск, то звездный ветер может попасть в диск, а затем и в Солнечную систему. Звезды постоянно теряют часть своей массы, создавая высокую концентрацию частиц от шарового скопления. В этом случае ожидаются энергии \sim МэВ, но тогда потребуется процесс дополнительного ускорения частиц для преодоления магнитного поля Солнца, но, как известно, этот эффект подавляется.

2. Вспышки на антизвездах

На Солнце постоянно происходят взрывные процессы, которые сопровождаются ускорением частиц и, как следствие, появлением солнечных космических лучей. Мы предполагаем существование подобных процессов в шаровом скоплении антизвезд. Частицы от таких вспышек на антизвездах получают энергию выше (\sim ГэВ) и сформируют антиядерную составляющую космических лучей. Известно, что внутри диска могут генерироваться частицы с энергией \sim ГэВ, но вопрос о распространении таких частиц из гало в диск в настоящее время остается открытым. В этой статье этот механизм проникновения будет протестирован путем моделирования движения частиц в магнитных полях гало, диска и солнечной модуляции.

3. Взрывы антисверхновых в шаровом скоплении антизвезд

Взрывы сверхновых – это результат эволюции звезд, который сопровождается выбросом энергии $\sim 10^{51}$ эрг. Оболочка взорвавшейся антивезды распространяется с высокой скоростью, и частицы могут получать энергию до ($\sim 10^{15}$ эВ) в результате различных механизмов ускорения и входить в состав космических лучей. По аналогии со звездами, которые являются источником частиц в космических лучах, антивезды могут быть основным источником античастиц в галактических космических лучах, поэтому антисверхновые могут быть наиболее вероятным генератором антиядер в галактических космических лучах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ начинается с наиболее вероятного механизма – взрывов антисверхновых, потому как магнитные поля Галактики препятствуют проникновению античастиц низких энергий в Галактический диск.

Но так же немаловажно отметить, что частота взрыва таких сверхновых мала на фоне вспышек антизвезд и на фоне постоянного истечения стационарного вещества антизвезд.

2.1. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ АНТИЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

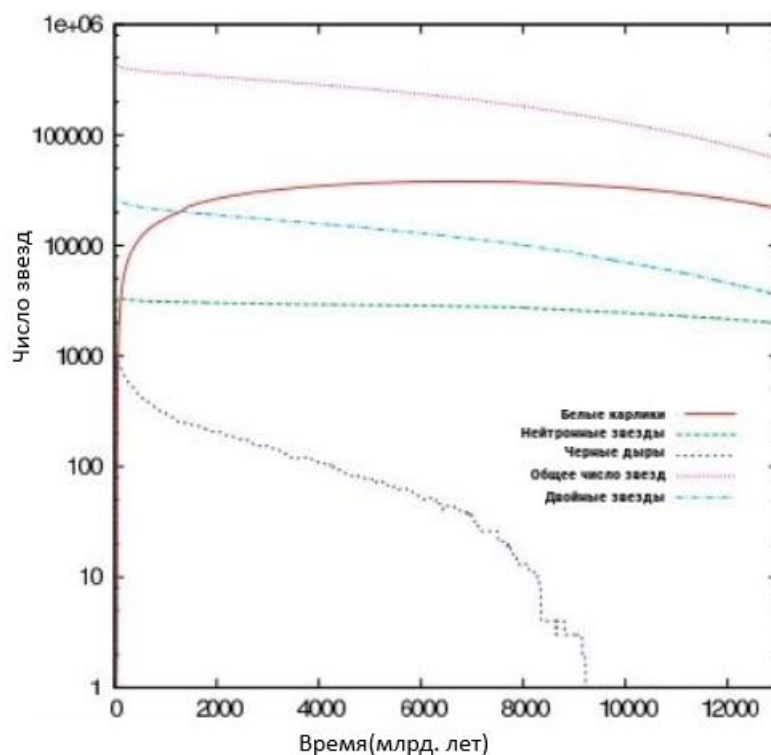


Рисунок 2.1 — Изменение населения М4 во времени

На рисунке (2.1) представлен график эволюции населения скопления М4[20]. 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 антисверхновых. Этот факт можно использовать для расчета плотности энергии античастиц в космических лучах.

Используя формулу для плотности энергии космических лучей обычного вещества

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn} \dot{N}_{sn} t_{ret}}{V} \quad (2.1)$$

где N_{sn} – число нейтронных звезд в М4, t – возраст скопления, \dot{N}_{sn} – средняя частота взрыва сверхновых, E_{sn} – энергия от одной сверхновой, t_{ret} – время удержания космических лучей, V – объем области распространения космических лучей (для расчета объема взята модель цилиндра с высотой и радиусом 30кпк и 10 кпк соответственно, чтобы рассмотреть не только область диска, но и гало Галактики).

Представим все численные значения этих величин в виде таблицы(2.1):

Таблица 2.1 — Таблица численных характеристик величин для расчета плотности энергии античастиц

N_{sn}	t , млрд.лет	\dot{N}_{sn}	E_{sn} , Эрг	t_{ret} , млн. лет	V, kpc^3
12	1.72	$8 \cdot 10^4$	10^{51}	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^3$

Рассчитаем плотность используя формулу (1) и значения таблицы:

$$\rho_{CR} = 10^{-4} \text{ЭВ}/\text{см}^3 \quad (2.2)$$

Для сравнения приведем значение плотности энергии космических лучей обычного вещества:

$$\rho = 1 \text{ЭВ}/\text{см}^3 \quad (2.3)$$

Так же приведем плотность энергии для вторичных антипротонов

$$\rho_{\bar{p}} = 10^{-5} \text{эВ/см}^3 \quad (2.4)$$

Полученное значение качественно совпадает с экспериментальным данным для плотности энергии антипротонов. Но, если учесть, что частицы космических лучей, движущиеся по Галактике, теряют часть своей энергии при различных взаимодействиях и, впоследствии, не могут проникнуть в диск из-за подавления проникновения частиц с низкой энергией, тогда можно будет уточнить результат. Для этого необходимо более подробно рассмотреть механизм движения галактических космических лучей, представленный в следующей части.

2.2. ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ

Моделирование движения частиц в магнитных полях Галактики необходимо для оценки реальной доли частиц из начального потока, которые будут распространяться в диск Галактики.

Моделирование магнитного поля галактики. Была составлена функциональная программа на основе уравнений из [21], входными параметрами функции являются координаты в Галактике, а выходными параметрами - компоненты векторов магнитного поля в декартовой системе координат. Компоненты магнитного поля в цилиндрической системе координат с началом отсчета в Галактическом центре [21]:

$$B_{\phi} = -\frac{B_1}{2R/R_0} \frac{z}{(z+z_0)} \left(\sqrt{(R/R_0)^2 + (z/z_0)^2} - z/z_0 \right)$$

$$B_R = \frac{1}{2} B_1 \frac{z_0^2}{(z+z)^2} \tanh(R/R_0)$$

$$B_z = \frac{0.1B_1 z_0}{R_0} + \frac{1}{2} B_1 \frac{z_0^2}{(z+z)^2} \left(\frac{\tanh(R/R_0)}{R} + \frac{\text{sech}^2(R/R_0)}{R_0} \right)$$

Где принимается $R_0=5$ кпк и $z_0=0.5$ пк в качестве масштабных длин, а параметр B_1 является свободным в [21] и определяется калибровкой, например, магнитным полем вблизи Солнечной системы по данным работы [22].

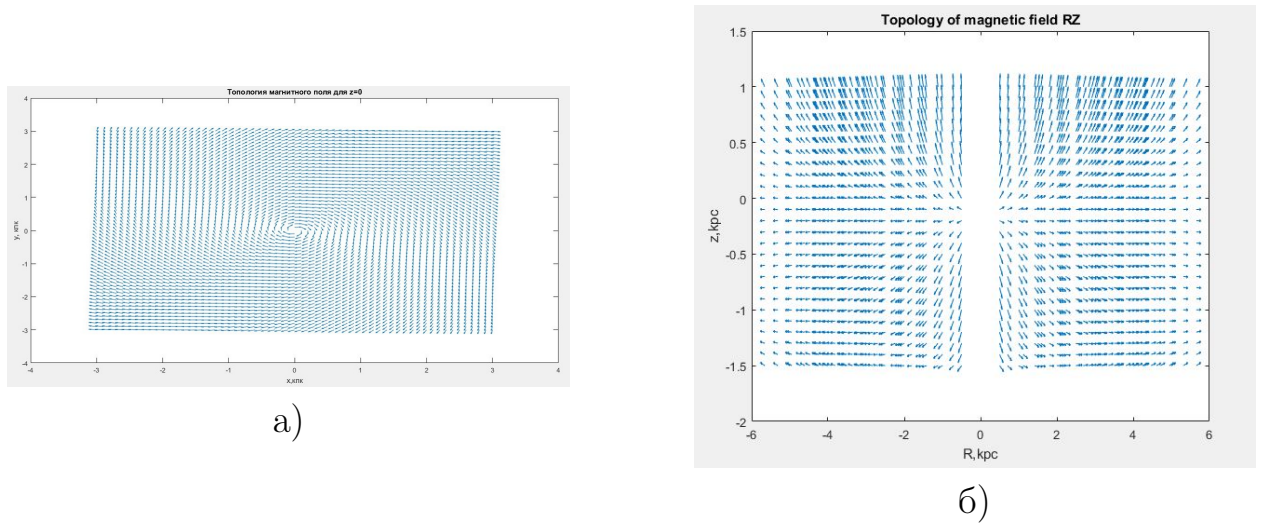


Рисунок 2.2 — Топологии магнитного поля Галактики $Z = 0$ и RZ

Была построена топология галактического магнитного поля в плоскостях RZ и $Z = 0$. На рисунке (2а) показаны силовые линии магнитного поля, идущие из центра Галактики по спирали. Это согласуется с представлением о глобальных магнитных полях Галактики в плоскости галактического диска. На рисунке (2б) показана вертикальная проекция магнитного поля Галактики на RZ , заметно, что силовые линии расходятся в разные стороны по закону уравнений из [21]. Мы воспроизвели магнитное поле, представленное в [21]. На основе полученных топологий можно сказать, что составленная программа работает верно, т.к. изображения магнитных полей совпадают с данными [21], т.о. программу можно использовать для моделирования крупномасштабного регулярного магнитного поля Галактики.

Поэтому следующим шагом было объединение программы, задающей топологию магнитного поля с программой построения траектории частиц по заданой топологии. Первый и самый важный шаг - определить порог энергии частицы, проникающей в галактический диск. Для этого на входе программы задавались энергетические монолинии и на каждом определялся процент частиц от общего потока, запускаемых от шарового скопления М4. Монолинии выбирались исходя из запуска визуализации траекторий отдельных частиц(Рис. 2.3).

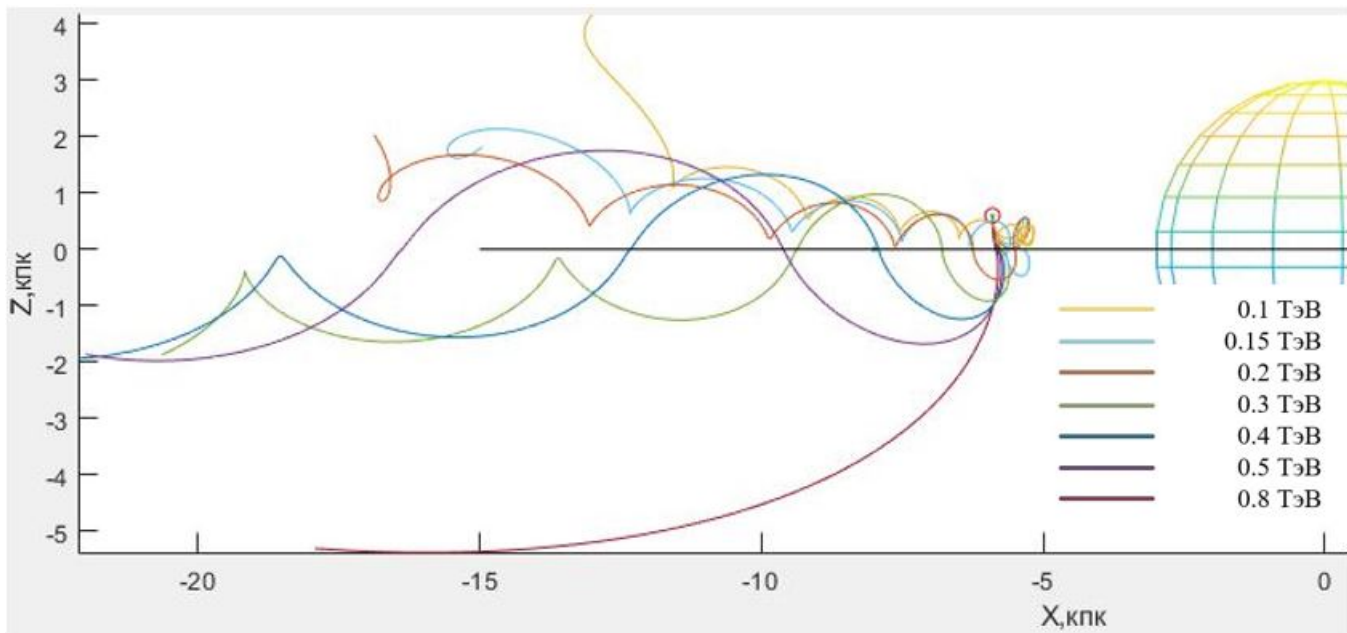


Рисунок 2.3 — Визуализация движения моноэнергетических частиц

Благодаря визуализации диапазон поиска пороговой энергии сузился до промежутка от 50 ГэВ до 50 ТэВ. В таблице представлены данные процента частиц в зависимости от энергии, задаваемой в цикле моделирования траектории.

Таблица 2.2 — Таблица энергетических моноэнергетических потоков антигелия и процент проникших в диск частиц

50 ГэВ	100 ГэВ	150 ГэВ	200 ГэВ	240 ГэВ	250 ГэВ	300 ГэВ	350 ГэВ
0	0	0	0	0	100	100	100

Таким образом можно отметить, что частицы с низкой энергией (порядка десятка ГэВ) не проникают в галактический диск. Активно антигелий начинает проникать в диск, начиная с энергий порядка 100 ГэВ. То есть в первом приближении можно сделать вывод, что проникновение частиц порядка нескольких ГэВ в диск маловероятно, то есть второй механизм инжекции становится менее вероятным.

Но так же важно отметить, что на данный момент моделируется крупномасштабная компонента магнитного поля. Поле на малых масштабах нерегулярно и приводит к уменьшению длины диффузии и увеличе-

нию вероятность рассеяния. Это непременно приведет к дополнительным параметрам для потока частиц и как следствие к изменению значения пороговой энергии.

2.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было рассмотрено типичное шаровое скопление М4 как прототип шарового скопления антивезд. Основываясь на симметрии свойств вещества и антивещества, обсудили эволюцию этого ШС и механизмы инъекции антивещества в КЛ. Расчитана плотность энергии высокоэнергетических античастиц, выброшенных ШС антивещества в космических лучах. Полученное значение с учетом неопределенностей диффузии антипротонов качественно соответствует данным наблюдений.

Так же в части моделирования траектории потока частиц оценена пороговая энергия проникновения частиц в диск, на крупномасштабном магнитном поле. Таким образом, дальнейшая работа направлена на моделирование движения частиц в магнитном поле Галактики в малых масштабах, которые внесут дополнительные модификации в поток частиц. Реализация нашей программы поможет получить прогнозы ожидаемого потока антиядер от доменов антивещества в нашей Галактике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. A. M. Dirac: The quantum theory of the electron, Proc. Roy. Soc. (London) **A117**, 610—624 (1928).
- [2] M. Y. Khlopov: *Fundamentals of Cosmoparticle Physics* CISP-Springer, Cambridge, UK, 2012.
- [3] A. D. Dolgov: Matter and antimatter in the universe, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **113** 40 (2002).
- [4] M.Yu. Khlopov: An antimatter globular cluster in our Galaxy - a probe for the origin of the matter, Gravitation and Cosmology , **4**, 69-72 (1998).
- [5] Nicola Tomassetti, Alberto Oliva: Secondary antinuclei from supernova remnants and background for dark matter searches, 35th International Cosmic Ray Conference – ICRC2017, (2017).
- [6] Stecker F.W., Tylka A.J., The cosmic-ray antiproton spectrum from dark matter annihilation and its astrophysical implications: a new look, *The Astrophysical Journal*, **1989**, 336, 51-54.
- [7] V.A. Kuzmin: CP violation and baryon asymmetry of the universe, JETP Lett, **12**, 228 (1970).
- [8] A.D. Sakharov: Violation of CP-invariance, C-asymmetry and baryon asymmetry of the Universe, JETP Lett, **5**, 32 (1967).
- [9] V.M. Chechetkin, M.G. Sapozhnikov, M.Yu. Khlopov and Ya.B.Zeldovich: Astrophysical aspects of antiproton interaction with He (Antimatter in the Universe), Phys. Lett. **118B**, 359-362 (1982).
- [10] V.M. Chechetkin, M.Yu. Khlopov and M.G. Sapozhnikov: Antiproton interactions with light elements as a test of GUT cosmologies., Rivista Nuovo Cimento, **5**, 1-80 (1982).

- [11] A.D. Dolgov, A.F. Illarionov, N.S. Kardashev, I.D. Novikov, Cosmological model of a baryon island, JETP, **67**, 1517-1524 (1988).
- [12] M.Yu. Khlopov, S.G. Rubin, A.S. Sakharov: Possible Origin of Antimatter Regions in the Baryon Dominated Universe., Phys.Rev.D **62**, 083505 (2000).
- [13] M. Charlton, S. Eriksson, G. M. Shore: Fundamental Physics in Antihydrogen Experiments, 97-98 (2020).
- [14] M.Yu. Khlopov, R.V. Konoplich, R. Mignani, et al.: Evolution and observational signature of diffused antiworld., Astroparticle Phys.,**12**, 367-372 (2000).
- [15] <http://gclusters.altervista.org/>
- [16] M. Paul: *Star Clusters. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, 2014.
- [17] <https://www.astro.keele.ac.uk/workx/globulars/globulars.html>
- [18] J. S. Kalirai, H. B.Richer: Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution, Royal society publishing, (2009).
- [19] D. C. Heggie and M. Giersz: Modelling individual globular clusters, Cambridge University Press Access S246,**3**, 121-130 (2007).
- [20] D. C. Heggie, M. Giersz: Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4,Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1, **388**, 429–443 (2008).
- [21] C. J. Nixon, T. O. Hands: The origin of the structure of large-scale magnetic fields in disc galaxies Notices of the Royal Astronomical Society 3, **477**, 3539–3551 (2018).
- [22] M. Opher, F. Alouani Bibi: A strong, highly-tilted interstellar magnetic field near the Solar System, Nature, **462**, 1036–1038 (2009).