

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

УДК 539.165.2

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ, СВЯЗАННЫХ С
ЗАХВАТОМ ТЁМНЫХ АТОМОВ, В
ПРЕДПОЛОЖЕНИИ О СИЛЬНОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СКРЫТОЙ МАССЫ С
БАРИОННЫМ ВЕЩЕСТВОМ

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор кафедры №40

_____ М. Ю. Хлопов

Студент

_____ А. М. Халилова

Москва 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	2
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
1.1 Модель сильного взаимодействия скрытой массы с барионной материей .	4
1.2 Динамическое трение от рассеяния на гало скрытой массы	4
1.3 Накопление массы за счёт захваченных тёмных атомов	5
1.4 Аномальные ядра и аномальная компонента космических лучей	5
2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	6
2.1 Сила трения и её влияние на орбиту Земли	6
2.2 Прирост массы Земли	7
2.2.1 Оценка для Солнца	7
2.3 Оценка доли аномальной компоненты в космических лучах	7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	9

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее фундаментальных проблем современной космологии и физики элементарных частиц является проблема тёмной материи (ТМ). Согласно современным представлениям, тёмная материя составляет приблизительно 27% всей материи во Вселенной и около 68% её полной плотности энергии [3]. Предположение о существовании скрытой массы было впервые выдвинуто на основе астрономических наблюдений, свидетельствующих о несоответствии между наблюдаемым движением видимых объектов (звёзд, галактик) и предсказаниями ньютоновской и релятивистской гравитации для имеющейся видимой массы.

В отличие от барионного вещества, скрытая масса не участвует в электромагнитном взаимодействии — она не поглощает, не отражает и не излучает свет, что делает её прямое обнаружение исключительно сложной задачей. Основные доказательства её существования носят гравитационный характер: это кривые вращения галактик, гравитационное линзирование, наблюдения за скоплениями галактик и анализ анизотропии реликтового излучения.

Несмотря на десятилетия интенсивных исследований, фундаментальная природа скрытой массы остаётся неизвестной. Наиболее разработанной и популярной гипотезой является модель холодной тёмной материи (Cold Dark Matter, CDM), согласно которой скрытая масса состоит из массивных, слабо взаимодействующих частиц (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs). Эти гипотетические частицы, такие как нейтрино в теориях суперсимметрии, могли бы рождаться в ранней Вселенной и сохраниться до наших дней, объясняя наблюдаемую плотность [1]. Однако прямые попытки детектирования WIMPs в подземных экспериментах, а также поиск их рождений на ускорителях (например, на Большом адронном коллайдере) пока не увенчались успехом.

Это подталкивает научное сообщество к исследованию альтернативных сценариев и непрямых методов обнаружения. Например, к гипотезе о сильном взаимодействии скрытой массы с барионным веществом. Один из методов подтверждения или опровержения этой гипотезы связан с изучением гипотетического захвата частиц скрытой массы массивными астрофизическими объектами, такими как звёзды и планететы. Если частицы скрытой массы действительно сильно взаимодействуют с обычным веществом, то они могут рассеиваться на ядрах атомов и захватываться гравитационным полем небесного тела. Последующая аннигиляция или накопление захваченных частиц может приводить к наблюдаемым эффектам: изменению тепловой и химической эволюции

звёзд, модуляции нейтринного потока от Солнца или даже к изменению орбитальной динамики планет.

Таким образом, теоретическое моделирование процессов захвата скрытой массы представляет собой важный инструмент для проверки различных моделей её частиц и установления ограничений на их свойства (массу, сечение взаимодействия).

Целью работы является теоретическое исследование процесса гравитационного захвата частиц скрытой массы некоторыми астрофизическими объектами (Землёй, Солнцем, красными гигантами и сверхгигантами) в предположении о сильном взаимодействии скрытой массы с барионной материей.

Основные задачи работы:

- Провести численную оценку прироста массы Земли за время существования Солнечной системы за счёт аккреции скрытой массы.
- Оценить возможное влияние силы трения от захвата скрытой массы на орбитальное движение Земли.
- Оценить долю ядер, содержащих захваченные частицы скрытой массы, в ядрах звёзд и возможность появления соответствующей «аномальной» компоненты в космических лучах после взрыва сверхновой.
- Сравнить полученные результаты с данными наблюдений.

Глава 1

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Модель сильного взаимодействия скрытой массы с барионной материей

Если скрытая масса участвует в сильном взаимодействии, её сечение рассеяния на нуклоне сравнимо с сечением взаимодействия нейтрона с ядром, в связи с чем длина свободного пробега тёмных атомов в барионном веществе мала (в особенности по сравнению с длиной свободного пробега для вимпов). То есть любая частица скрытой массы, пролетающая через крупный астрономический объект (звезду или планету), гарантированно испытает множественные столкновения уже в самом поверхностном слое. Каждое столкновение с ядром будет резко замедлять частицу (как нейтрон в замедлителе), пока её кинетическая энергия не станет сравнима с тепловой энергией среды. Поскольку кинетическая энергия становится недостаточной для преодоления гравитационного потенциала объекта, частица захватывается.

1.2 Динамическое трение от рассеяния на гало скрытой массы

Помимо гравитационного притяжения, протяжённое гало скрытой массы может оказывать на движущиеся в нём компактные объекты (звёзды, планеты) диссипативное воздействие. В классической работе Чандрасекара [7] эта сила была выведена для гравитационного взаимодействия тел с фоновыми частицами. Однако аналогичный эффект возникает и за счёт прямого рассеяния частиц скрытой массы на нуклонах внутри объекта.

В предположении о сильном взаимодействии возникающая сила трения может оказаться достаточно велика и повлиять на орбитальную энергию небесного тела, что может привести к изменению его орбиты.

1.3 Накопление массы за счёт захваченных тёмных атомов

Накопление скрытой массы приводит к:

1. Медленному увеличению гравитационной массы объекта, что также может влиять на её орбитальные элементы (большую полуось, период) в рамках закона Кеплера.
2. Изменению момента инерции планеты и, как следствие, параметров её вращения (длины суток, прецессии).
3. Возможной модификации теплового баланса недр, если частицы скрытой массы способны к неупругому взаимодействию с выделением энергии.

Хотя эти эффекты чрезвычайно малы, их принципиальная наблюдаемость в многолетних прецизионных измерениях (например, лазерной локации Луны, спутниковых лазерных дальномеров) может сделать захват ТМ уникальным лабораторным экспериментом длительного накопления сигнала [15].

1.4 Аномальные ядра и аномальная компонента космических лучей

Если частицы скрытой массы сильно взаимодействуют с нуклонами и активно захватываются звездой, то они начинают скапливаться в её ядре. Под действием огромной плотности и температуры (в красных гигантах и сверхгигантах) может происходить следующий процесс: частица при столкновении с обычным ядром железа (которое составляет существенную часть ядра красного гиганта) передаёт ему огромную энергию или обменивается с ним составными частями. Это неупругий процесс, в результате которого обычное ядро железа может вступить в ядерную реакцию слияния с частицей скрытой массы с образованием аномального ядра с большой массой. Если звезда с таким ядром взрывается как сверхновая, то выброшенное вещество будет нести химическую аномалию. Её можно искать в спектрах молодых остатков сверхновых или в составе космических лучей. Однако пока такие аномалии в космическом излучении обнаружены не были.

Глава 2

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В рамках практической части работы были получены количественные оценки эффектов, связанных с захватом скрытой массы астрофизическими объектами. Основные результаты представлены ниже.

2.1 Сила трения и её влияние на орбиту Земли

В предположении полного захвата сила трения оценивается как:

$$F_{\text{тр}} = m_{\text{DM}} \cdot n_{\text{DM}} \cdot \pi R^2 \cdot v_0^2, \quad (2.1)$$

где:

- $m_{\text{DM}} = 2 \text{ TeV} \approx 3.58 \times 10^{-39} \text{ кг}$,
- $n_{\text{DM}} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ см}^{-3} = 1.5 \times 10^2 \text{ м}^{-3}$,
- $v_0 = 220 \text{ км/с} = 2.2 \times 10^5 \text{ м/с}$,
- $R_{\oplus} = 7 \times 10^6 \text{ м}$.

Подстановка даёт:

$$F_{\text{тр}}^{\oplus} \approx 3.98 \times 10^9 \text{ Н}. \quad (2.2)$$

Для сравнения, сила гравитационного притяжения между Землёй и Солнцем:

$$F_{\text{грав}} \approx 3.52 \times 10^{22} \text{ Н}, \quad (2.3)$$

откуда отношение:

$$\frac{F_{\text{тр}}^{\oplus}}{F_{\text{грав}}} \approx 1.13 \times 10^{-13} \ll 1. \quad (2.4)$$

Влияние этой силы на изменение большой полуоси орбиты Земли a :

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2aF_{\text{тр}}^{\oplus}}{M_{\oplus}v_{\text{orb}}}, \quad (2.5)$$

где $v_{\text{orb}} = 30 \text{ км/с} = 3 \times 10^4 \text{ м/с}$.

Численно:

$$\frac{da}{dt} \approx -6.67 \times 10^{-15} \text{ м/с}. \quad (2.6)$$

За год ($\approx 3.15 \times 10^7 \text{ с}$):

$$\Delta a \approx 2.1 \times 10^{-7} \text{ м} = 2.1 \times 10^{-5} \text{ см}. \quad (2.7)$$

Время обнаружения эффекта: при точности измерений $\sim 1 \text{ см}$ потребуется около 50 000 лет.

2.2 Прирост массы Земли

В нулевом приближении прирост массы Земли за время существования Солнечной системы:

$$\Delta M_{\oplus} = m_{\text{DM}} \cdot n_{\text{DM}} \cdot \pi R_{\oplus}^2 \cdot v_0 \cdot t, \quad (2.8)$$

где $t = 5 \times 10^9 \text{ лет} \approx 1.577 \times 10^{17} \text{ с}$.

$$\Delta M_{\oplus} \approx 3 \times 10^{14} \text{ кг} \quad (\sim 5 \times 10^{-11} M_{\oplus}). \quad (2.9)$$

2.2.1 Оценка для Солнца

Аналогично для Солнца ($R_{\odot} = 7 \times 10^8 \text{ м}$):

$$F_{\text{тр}}^{\odot} \approx 3.98 \times 10^{13} \text{ Н}. \quad (2.10)$$

2.3 Оценка доли аномальной компоненты в космических лучах

Для оценки возможного вклада захваченных частиц скрытой массы в космические лучи после взрыва сверхновой использованы следующие допущения:

- Захваченные частицы равномерно распределяются по ядру звезды.
- Каждая захваченная частица образует одно "аномальное" ядро.

Число ядер железа в ядре звезды:

$$N_{\text{Fe}} = \frac{M_{\text{Fe}}}{m_{\text{Fe}}} \approx 2.4 \times 10^{55}, \quad (2.11)$$

где $M_{\text{Fe}} = 2 \times 10^{30}$ кг, $m_{\text{Fe}} \approx 50m_p$.

Число захваченных частиц скрытой массы:

$$N_{\text{DM}} = n_{\text{DM}} \cdot \pi R^2 \cdot v_0 \cdot t, \quad (2.12)$$

где $t = 4 \times 10^6$ лет $\approx 1.26 \times 10^{14}$ с.

Результаты для различных типов звёзд представлены в таблице:

Тип объекта	Радиус, м	N_{DM}	Доля аномальных ядер
Красные гиганты	10^{11}	1.3×10^{46}	5.4×10^{-10}
Красные сверхгиганты	10^{13}	1.3×10^{50}	5.4×10^{-6}

Таблица 2.1: Оценка доли аномальных ядер для различных звёзд

Возможная доля аномальной компоненту космических лучей для красных сверхгигантов $\sim 10^{-6}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена теоретическому исследованию процесса гравитационного захвата частиц скрытой массы астрофизическими объектами и оценке влияния этого процесса на их массу и динамику в предположении о сильном (ядерном) взаимодействии скрытой массы с барионной материей.

На основе уравнений динамики были получены основные формулы, описывающие силу динамического трения, возникающую за счёт рассеяния частиц скрытой массы на ядрах объекта, а также прирост массы небесного тела за счёт накопления захваченных частиц.

Были проведены численные оценки для различных астрофизических объектов: Земли, Солнца, красных гигантов и сверхгигантов, получены следующие количественные результаты:

1. Сила трения от захвата скрытой массы, действующая на Землю, составляет $F_{\text{тр}}^{\oplus} \sim 4 \times 10^9$ Н, что на 13 порядков меньше силы гравитационного притяжения к Солнцу.
2. Скорость изменения большой полуоси орбиты Земли:

$$\frac{da}{dt} \sim 7 \times 10^{-15} \text{ м/с},$$

что соответствует смещению на $\Delta a \sim 2 \times 10^{-5}$ см в год.

3. Время, необходимое для накопления наблюдаемого эффекта при современной точности измерений (~ 1 см), оценивается в 50 000 лет.
4. Прирост массы Земли за время существования Солнечной системы:

$$\Delta M_{\oplus} \sim 3 \times 10^{14} \text{ кг},$$

что составляет $\sim 5 \times 10^{-11}$ от её общей массы.

5. Доля аномальной компоненты космического излучения от взрыва сверхновой для красного сверхгиганта:

$$\frac{N_{\text{DM}}}{N_{\text{Fe}}} \sim 5 \times 10^{-6},$$

то есть прямая регистрация аномальной компоненты современными экспериментами была бы невозможной.

Полученные результаты показывают, что эффекты захвата скрытой массы астрофизическими объектами солнечного типа (планеты, звёзды главной последовательности) являются пренебрежимо малыми в масштабах времени их существования, то есть предположение о ядерном взаимодействии скрытой массы с барионной материей не дало расхождений с наблюдаемыми данными.

Литература

- [1] Bertone, G., Hooper, D., Silk, J. Particle dark matter: evidence, candidates and constraints // *Physics Reports*. — 2005. — Vol. 405, Issues 5–6. — P. 279–390.
- [2] White, S. D. M., Frenk, C. S. Galaxy formation through hierarchical clustering // *The Astrophysical Journal*. — 1991. — Vol. 379. — P. 52–79.
- [3] Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 641. — A6.
- [4] Jungman, G., Kamionkowski, M., Griest, K. Supersymmetric dark matter // *Physics Reports*. — 1996. — Vol. 267, Issues 5–6. — P. 195–373.
- [5] Sikivie, P. Experimental tests of the "invisible" axion // *Physical Review Letters*. — 1983. — Vol. 51, No. 16. — P. 1415–1417.
- [6] Bode, P., Ostriker, J. P., Turok, N. Halo formation in warm dark matter models // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 556, No. 1. — P. 93–107.
- [7] Chandrasekhar, S. Dynamical Friction. I. General Considerations: the Coefficient of Dynamical Friction. // *The Astrophysical Journal*. — 1943. — Vol. 97. — P. 255.
- [8] Gustafson, R. A., Shoemaker, I. M., Takhistov, V. Probing Dark Matter Interactions with Stellar Motion near Sagittarius A* // *arXiv preprint*. — 2025. — arXiv:2510.07387.
- [9] Gould, A. Resonant enhancements in weakly interacting massive particle capture by the earth // *The Astrophysical Journal*. — 1987. — Vol. 321. — P. 571–585.
- [10] Silk, J., Olive, K. A., Srednicki, M. The photino, the sun, and high-energy neutrinos // *Physical Review Letters*. — 1985. — Vol. 55, No. 2. — P. 257–259.
- [11] Gaisser, T. K., Steigman, G., Tilav, S. Limits on cold dark matter candidates from deep underground detectors // *Physical Review D*. — 1986. — Vol. 34, No. 8. — P. 2206–2216.
- [12] Iocco, F. et al. Dark matter annihilation effects on the first stars // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 675, No. 1. — P. 937–946.
- [13] Kouvaris, C., Tinyakov, P. Constraining asymmetric dark matter through observations of compact stars // *Physical Review D*. — 2011. — Vol. 83, No. 8. — 083512.

- [14] Mack, G. D., Beacom, J. F., Bertone, G. Towards closing the window on strongly interacting dark matter: Far-reaching constraints from Earth's heat flow // *Physical Review D*. — 2007. — Vol. 76, No. 4. — 043523.
- [15] Adler, S. L. Can the flyby anomaly be attributed to earth-bound dark matter? // *Physical Review D*. — 2008. — Vol. 79, No. 2. — 023505.