

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

**ГРАВИТАЦИОННОЕ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ
МАССИВНЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ КОМПАКТНЫХ
ОБЪЕКТОВ. ГИПОТЕЗА О НЕМЕЗИДЕ**

(научно-исследовательская работа)

Выполнила:

Пазухина Анастасия,
10 класс СОФМШ

Научный руководитель:

Филиппов Юрий Петрович,
к.ф.-м.н., старший препода-
ватель кафедры общей и
теоретической физики
Самарского государствен-
ного университета

Самара, 2011 г.

Оглавление

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| 1 Гравитационное микролинзирование. Гипотеза о Немезиде | 8 |
| 1.1 Проблема темной материи | 8 |
| 1.2 Гравитационное линзирование и современный статус исследований | 11 |
| 1.3 Гипотеза о Немезиде | 18 |
| 2 Расчет и анализ искомых величин | 26 |
| 2.1 Угол отклонения фотона в гравитационном поле линзы | 26 |
| 2.2 Дифференциальное и полное сечение рассеяния фотонов в гравитационном поле линзы | 30 |
| 2.3 Задача о построении изображений точечной гравитационной линзой | 35 |
| 2.4 Расчет кривой блеска микролинзированного источника | 39 |
| 2.5 Определение времени микролинзирования и массы микролинзы | 45 |
| 2.6 Оценка вероятности детектирования Немезиды с использованием метода микролинзирования | 49 |
| Заключение | 52 |
| Литература | 55 |

Введение

Актуальность работы. В рамках современного научного пространства существует ряд фундаментальных проблем, требующих неотложного решения [1, 2, 3, 4]. Среди прочих в первой декаде XXI века особым вниманием отмечена **фундаментальная проблема скрытой массы Вселенной** (проблема темной материи) [5, 6, 7, 8].

Суть данной проблемы заключается в том, что свыше 90% (по массе) вещества в видимой части Вселенной находится в скрытой, ненаблюдаемой форме [9]. Этому факту есть ряд косвенных неопровержимых подтверждений:

- при изучении вращения нашей и других галактик было обнаружено несоответствие законов движения звезд и газа в галактиках распределениям массы видимой материи в телах последних. Вывод из такого наблюдательного факта может быть только один (если, конечно, не отказываться от фундаментальных законов физики): наблюдаемые звезды и газ в галактиках погружены в протяженную массивную среду с размерами много больше, чем характерные размеры видимой области галактики.
- Другое косвенное подтверждение существования скрытой массы следует из изучения скоростей движения галактик как целого в галактических скоплениях. Галактики в таких скоплениях движутся относительно их центра масс с огромными скоростями. Чтобы такие скопления были устойчивыми гравитирующими системами (а скопления являются таковыми), необходимо присутствие дополнительного вещества, масса которого в десятки раз больше массы видимого вещества галактик.
- О наличии скрытой массы свидетельствует также обнаружение горячего ($T = (3 \div 10) \cdot 10^7$ К, $n > 10^{-3}$ см⁻³) газа в скоплениях галактик.
- На это указывают данные наблюдений гравитационного линзирования далеких галактик и квазаров более близкими скоплениями галактик и другие наблюдательные данные.
- Некоторые теоретические проблемы (например, проблема формирования крупномасштабной структуры Вселенной, космологические проблемы, связанные с объяснением открытых недавно пространственных флук-

туаций реликтового микроволнового фона, и т.п.) также требуют для своего решения привлечения скрытой массы.

Более того, в 2004 г. с помощью рентгеновской обсерватории Chandra группа американских астрономов (Doug Clowe, University of Arizona) получила первое прямое доказательство существования темной материи [10] на основе данных наблюдений двух галактических скоплений.

Таким образом, существование темной материи есть уже неопровержимый факт. Естественным образом возникает другой вопрос: *какова природа темной материи и что является ее носителем?*

Прежде всего, ясно, что скрытая масса – это не газ. Оценки массы горячего ионизованного газа в скоплениях галактик по его рентгеновскому излучению показывают, что эта масса составляет всего лишь около 10% динамической массы скоплений, то есть масса горячего газа того же порядка, что и наблюдаемая масса, заключенная в галактиках. Оценки массы нейтрального водорода в галактиках, выполненные радиоастрономическими методами по наблюдениям в линии 21 см, также отвергают газ как носитель скрытой массы.

В настоящее время в качестве носителей скрытой массы рассматриваются два класса объектов. Первый класс предсказывается теорией эволюции звезд и представляет собой небесные тела, состоящие в основном из барионной формы материи (сильно взаимодействующих элементарных частиц с полужестким спином – нейтронов, протонов и т.п.), и называется МАСНО (Massive Astrophysical Compact Halo Objects). Этот класс объектов включает в себя маломассивные ($M < 0.1M_{\odot}$, $M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30}$ кг – масса Солнца) и потому слабо светящиеся звезды, так называемые коричневые карлики (звезды с массой $M < 0.08M_{\odot}$, в недрах которых никогда не зажигаются термоядерные реакции), белые карлики, планеты с массами $10^{-5} \div 10^{-3} \times M_{\odot}$, нейтронные звезды в неактивной стадии (без феномена пульсара), черные дыры.

Второй класс объектов предсказывается теорией образования Вселенной. Согласно этой теории на ранних стадиях образования Вселенной возможно рождение очень слабо взаимодействующих элементарных частиц с неравной нулю массой покоя, так называемых WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). К этому классу могут принадлежать нейтрино, нейтралино, фотино, гравитино, аксионы, космические струны и т.п. Среди этого списка претендентов на носителей скрытой массы есть более или менее предпочтительные объекты, однако окончательный ответ на вопрос о том, из чего состоит скрытая масса, должны дать наблюдения.

Следующий вопрос, продиктованный логикой, есть *как наблюдать темную материю?*

Согласно выше сказанному темная материя крайне слабо взаимодействует

с электромагнитным излучением звезд и сама фактически не излучает. Поэтому такая материя может быть обнаружена лишь посредством гравитационного взаимодействия с обычной барионной материей (материей, из которой состоят наблюдаемые звезды, газопылевые туманности) и электромагнитным излучением.



Рис. 1. Богдан Пачинский.

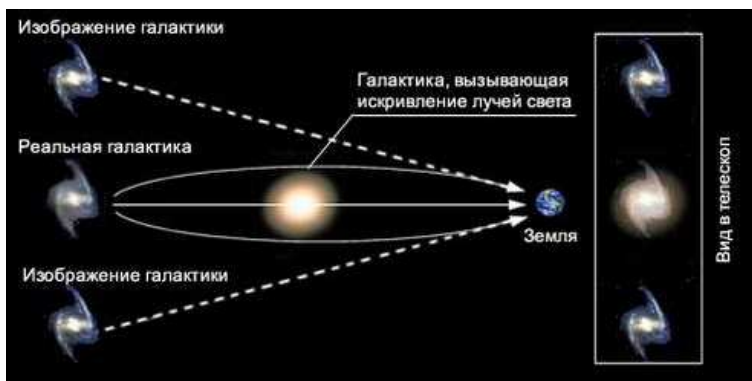


Рис. 2. К определению феномена гравитационного линзирования.

В 1986 году Богдан Пачинский (см. рис. 1) – американский астрофизик опубликовал статью, ставшую пионеркой и задавшей новое направление в астрономии, как наблюдательной, так и теоретической. Здесь он предложил искать темное вещество в нашей Галактике – *Млечный путь* и ее окрестностях с помощью **гравитационного микролинзирования** (см. рис. 2) – метода, основанного на эффекте *гравитационной микролинзы*, заключающемся в искривлении лучей света (гравитационном фокусировании света) далекой звезды в гравитационном поле темного точечного тела (точнее говоря, его угловые размеры ничтожно малы), в результате чего блеск звезды сильно возрастает.

Для реализации проекта Пачинскому и его коллегам из Варшавского университета удалось построить сравнительно небольшой 1.3-метровый телескоп в Чили, снабдив его высокочувствительными ПЗС-матрицами и специально разработанным программным обеспечением.

Проект OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) оказался чрезвычайно эффективным не только для обнаружения эффекта гравитационного микролинзирования, но и для открытия множества новых переменных звезд, а также для поиска внесолнечных планет методом гравитационного микролинзирования. Несколько планет были обнаружены и непосредственно во время событий микролинзирования как характерные возмущения кривой блеска. Положительных результатов микролинзирования добились в экспериментах MACHO и EROS (об этом смотри ниже). Число событий микролинзирования, которые удалось наблюдать специалистам в разных экспериментах, превышает 50.

В XX-м веке несколько групп астрономов, изучали природу звезд главной последовательности и обнаружили, что среди них преобладают двойные звезды. Поскольку Солнце является рядовой звездой этой последовательности, то ученые высказали предположение о возможности существования у Солнца звезды-компаньона, связанной с ним гравитационными силами и образующей вместе двойную систему. Однако напарница Солнца до сих пор визуально не наблюдается.

Четко обозначенную гипотезу о существовании подобного тела выдвинул профессор университета Беркли Ричард Мюллер (Richard Muller) 19 апреля 1984 года, назвавший гипотетическую звезду "Немезидой", по имени древнегреческой богини мщения. Гипотеза о Немезиде и ее "фатальное" имя потребовалась изначально для того, чтобы объяснить периодичность явлений массовой гибели практически всего живого на нашей планете. Дело в том, что в 1984 году палеонтологи Дэвид Роп (David Raup) и Джек Сепкоский (Jack Sepkoski) опубликовали результаты анализа геологических пластов, отвечающих разным эпохам, охватывающим последние 250 миллионов лет. Они обнаружили, что отчетливо наблюдаются двенадцать событий, отвечающих резкому увеличению смертности живого на Земле. Промежуток времени между этими двумя ближайшими событиями составляет 26 миллионов лет [11]. Роп и Сепкоский заключили, что такие события (включая предполагаемое исчезновение динозавров 65 миллионов лет назад) случались регулярно и могли иметь взрывную причину, в частности, гравитационное возмущение, наводимое в облаке комет Оорта Немезидой, порождало ливень комет во внутренней части Солнечной системы и бомбардировку Земли. Последнее приводило к глобальной катастрофе и массовой гибели живого мира.

Согласно современным представлениям *Немезида* является темным космическим телом: протозвездой (коричневым карликом) в недрах которой не начались термоядерные реакции, и к настоящему времени уже остывшей или маломассивной звездой, быстро израсходовавшей свой запас термоядерного горючего и к настоящему времени также остывшей.

Сегодня ученые располагают рядом косвенных подтверждений существования звезды-компаньона Солнца (см. параграф 1.3). В частности, в работах [12, 13] были выполнены оценки массы данной звезды и элементов ее орбиты.

В связи со сказанным возникают следующие вопросы:

- *Возможно ли применение метода гравитационного микролинзирования для поиска Немезиды?*
- *Какие результаты для наблюдаемых при этом можно ожидать, опираясь на имеющиеся оценки параметров Немезиды?*

Проведенный обзор литературы по данной тематике указал на отсутствие конкретных ответов на поставленные вопросы.

В связи со сказанным, главной целью настоящей работы является расчет и анализ аналитических результатов для основных наблюдаемых, определяемых методом гравитационного микролинзирования. Численный анализ наблюдаемых указанного метода для возможных значений параметров, характеризующих Немезиду.

Согласно сформулированной цели, основными задачами настоящей работы являются следующие положения:

1. Расчет угла отклонения и дифференциального сечения рассеяния для фотонов определенной длины волны, гравитационно взаимодействующих со сферическим телом-линзой.

2. Решение задачи о построении изображений гравитационной линзой.

3. Расчет профиля кривой блеска для случая одиночного сферического тела-линзы. Определение зависимости времени затмения от геометрических и динамических параметров задачи.

4. Численный анализ полученных результатов для возможных значений параметров, характеризующих Немезиду.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Метод геометрической оптики.

2. Методы классической механики и статистической физики.

Данная работа имеет следующую структуру.

Первая глава посвящена современному статусу проблемы темной материи, гравитационному линзированию.

Во **второй главе** подробно представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.

Глава 1

Гравитационное микролинзирование. Гипотеза о Немезиде

В настоящей главе будет представлен краткий обзор современного статуса проблемы темной материи и перспектив поиска ее решения. Отдельное внимание будет уделено методу гравитационного линзирования и гипотезе о Немезиде.

1.1 Проблема темной материи

В XXI веке под пристальным вниманием физиков и астрономов находятся следующие две фундаментальные проблемы [5, 8]:

1. *Природа темной энергии и ускоренное расширение Вселенной.*

Согласно последним данным наблюдений сверхновых звезд типа Ia наша Вселенная расширяется с положительным ускорением. Если бы в природе существовало только обычное гравитационное притяжение, то оно замедляло бы разбегание галактик. Следовательно, в природе существует феномен антигравитации, обусловленный неизвестным человеку источником энергии («темной энергией»). Что является источником антигравитации?

Один из возможных источников антигравитации – вакуум. Однако, простейший количественный анализ указывает на неправдоподобность гипотезы (подобное свойство вакуума сопровождалось бы выделением энергии, много большей чем необходимо для сегодняшнего ускоренного расширения Вселенной). Другой, более правдоподобный источник – новое сверхслабое поле (возможно, Хиггс), пронизывающее всю Вселенную – основа темной энергии. Как известно, поле Хиггса является ответственным за генерацию масс фундаментальных полей Стандартной модели (СМ) и ее модификаций, например, Минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ) [14].