

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

УДК 539.1

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ НА
КЛАСТЕРЕ ПЧД**

Научный руководитель _____ Е. С. Шлепкина

Студент Б20-102 _____ Б. Ю. Мучкинова

Москва 2022

Содержание

1	Введение	3
2	Задача	3
2.1	Задача-1	3
2.1.1	Гладкое гало	3
2.1.2	Кластеризованное гало	4
2.2	Задача-2	5
3	Заключение	6

1 Введение

Открытие LIGOVirgo гравитационных волн от слияний десятков черных дыр солнечной массы привело к повышенному интересу к первичным черным дырам (ПЧД) как кандидатам в темную материю.

ПЧД — это черные дыры, которые могут образоваться в ранней Вселенной. Наиболее часто изучаемым механизмом образования является коллапс больших возмущений плотности, вызванных инфляцией. Скопления ПЧД формируются вскоре после равенства излучения и материи.

Звездное микролинзирование — это временное усиление, которое возникает, когда компактный объект проходит близко к лучу зрения звезды. Различные обзоры микролинзирования наложили жесткие ограничения на количество компактных объектов в гало Млечного Пути.

2 Задача

Пересмотреть результаты экспериментов MACHO, OGLE и др. в рамках представления о кластерной структуре первичных черных дыр. Мы используем термин "кластер" по отношению ПЧД во избежание путаницы с термином "скопление преимущественно использующееся для звезд.

Стоит отметить, что массовое и пространственное распределение являются модельными параметрами. В рамках данной научной-исследовательской работы рассматривалось две модели:

- Пространственное распределение – Пуассоновское, массы ПЧД в кластере одинаковые и равные $M_{\text{РВН}}$;
- Значения масс чёрных дыр скопления лежат в диапазоне $10^{-4} - 10^2 M_{\odot}$

2.1 Задача-1

Рассмотрим первую задачу. В ее основе лежит статья Anne Green [1].

Скопления, содержащие небольшое количество объектов, испаряются, а скопления ПЧД с $N_{\text{cl}} \lesssim 10^3$ к настоящему времени испарится. Таким образом, для ПЧД, которые формируются из-за больших инфляционных возмущений плотности, ожидается, что наиболее распространенный размер скопления сегодня будет $N_{\text{cl}} \sim 10^3$, не зависящим от массы ПЧД.

2.1.1 Гладкое гало

Дифференциальная частота событий микролинзирования $d\Gamma/d\hat{t}$ в направлении Большого Магелланова Облака (БМО) для гладкого гало, полностью состоящего из компактных объектов с массой $M_{\text{РВН}}$ и максвелловским распределением скоростей, определяется выражением

$$\frac{d\Gamma}{d\hat{t}} = \frac{32L}{M_{\text{РВН}}\hat{t}^4 v_c^2} \int_0^1 \rho(x) R_E^4(x) e^{-Q(x)} dx$$

где \hat{t} — время пересечения диаметра Эйнштейна, $R_E(x)$ — радиус Эйнштейна

$$R_E(x) = 2 \left[\frac{GM_{\text{РВН}}x(1-x)L}{c^2} \right]^{1/2} \approx 10^{-4} \text{пк} \left[\frac{M_{\text{РВН}}}{M_{\odot}} \frac{L}{50 \text{кпк}} x(1-x) \right]^{1/2}$$

где G — Гравитационная постоянная, $L \approx 50$ кпк — расстояние до БМО, x — расстояние линзы от наблюдателя в единицах L и $Q(x) = 4R_E^2(x)/(\hat{t}^2 v_c^2)$, где $v_c = 220$ км/с — линейная скорость.

Стандартная модель гало, обычно принимаемая в исследованиях микролинзирования («Модель S»), представляет собой изотермическую сферу с сердцевинной и профилем плотности

$$\rho(R) = \rho_0 \frac{R_c^2 + R_0^2}{R_c^2 + R^2}$$

где локальная плотность темной материи $\rho_0 = 0,0079 M_{\odot} \text{пк}^{-3}$, радиус ядра $R_c = 5$ кпк и радиус Солнца $R_0 = 8,5$ кпк. Дифференциальная частота событий, уравнение (3.1), тогда дается выражением

$$\frac{d\Gamma}{d\hat{t}} = \frac{512\rho_0(R_c^2 + R_0^2)LG^2M_{\text{РВН}}}{\hat{t}^4 v_c^2 c^4} \int_0^1 \frac{x^2(1-x)^2}{A+Bx+x^2}$$

где $A = (R_c^2 + R_0^2)/L^2$, $B = -2(R_0/L) \cos b \cos l$ и $b = -32.8^\circ$, $l = 281^\circ$ – галактическая широта и долгота БМО.

Ожидаемое количество событий N_{exp} определяется выражением

$$N_{\text{exp}} = E \int_0^\infty \frac{d\Gamma}{d\hat{t}} \epsilon(\hat{t}) d\hat{t}$$

где E – экспозиция в звездных годах, а $\epsilon(\hat{t})$ – эффективность обнаружения, т. е. вероятность того, что событие микролинзирования, которое происходит с продолжительностью \hat{t} , будет обнаружено.

2.1.2 Кластеризованное гало

Типичное расстояние между ПЧД в скоплении много больше, чем радиус Эйнштейна (для $M_{\text{РВН}} = 1M_\odot$, $n_{\text{cl}}^{-1/3} \sim 10^{-2} N_{\text{cl}}^{1/2}$ пк, а $R_E \sim 10^{-4}$ пк). Поэтому линзами выступают отдельные ПЧД, а не скопление в целом.

Мы предполагаем, что площадь поверхности БМО круглая, так что события микролинзирования могут быть вызваны компактными объектами внутри конуса с вершиной на Земле и основанием в БМО, а также что часть f ТМ находится в виде ПЧД, а все ПЧД находятся в кластерах, содержащих N_{cl} ПЧД с массой $M_{\text{РВН}}$. Мы видели в гл. 2, который кластеризуется с $N_{\text{cl}} \lesssim 10^3$ к сегодняшнему дню испарятся, и поэтому некоторая (вероятно, довольно большая) часть ПЧД сегодня не сгруппируется. Поэтому предположение, что все РВН находятся в кластерах с $N_{\text{cl}} \gtrsim 10^3$, обеспечивает верхний предел фактического влияния кластеризации на ограничения микролинзирования.

Чтобы учесть кластеры, которые только частично лежат в пределах конуса микролинзирования, рассматриваются кластеры в пределах большей области, которая центрируется на конусе микролинзирования и имеет радиус на каждом расстоянии прямой видимости x , равный радиусу конуса микролинзирования, плюс радиус скопления: $r_{\text{tcone}}(x) = xL \tan \theta + R_{\text{cl}}$, т.е. усеченный конус с узким концом у Земли. Для каждой комбинации $M_{\text{РВН}}$ и N_{cl} сначала вычисляется среднее число кластеров внутри усеченного конуса, N_{tcone} ,

$$N_{\text{tcone}} = \frac{f M_{\text{tcone}}}{M_{\text{РВН}} N_{\text{cl}}}$$

где M_{tcone} – масса внутри усеченного конуса.

В рамках данной модели можно получить временное распределение дифференциальной частоты событий микролинзирования, рис. 1

Мы пересмотрели ограничения на ТМ ПЧД от звездного микролинзирования по направлению к БМО, принимая во внимание скопление ПЧД, ожидаемое, когда ПЧД формируются в результате коллапса больших гауссовских возмущений, порожденных инфляцией. В этом случае скопления ПЧД достаточно рассеяны, чтобы ПЧД действовали как индивидуальные линзы, и ожидается, что скопления, содержащие $N_{\text{cl}} \sim 10^3$, будут наиболее распространены, а более мелкие скопления испарились. Для простоты предположим, что все ПЧД имеют одинаковую массу, $M_{\text{РВН}}$, и находятся в скоплениях, содержащих фиксированное число ПЧД, N_{cl} . На самом деле некоторая часть ПЧД, в том числе и те, что ранее находились в скоплениях с $N_{\text{cl}} \lesssim 10^3$, сегодня будет несгруппированным

Данная модель является простейшей, на сегодняшний день существует уже несколько статей, рассматривающих эту модель [2], [3]

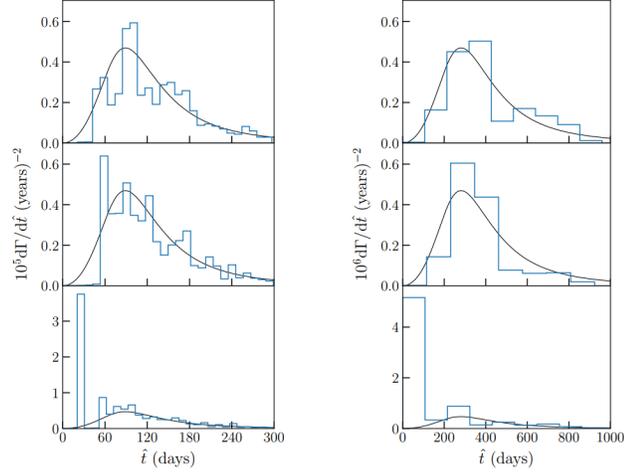


Рисунок 1 — Пример реализации дифференциальной частоты событий, $d\Gamma = d\hat{t}$, для сгруппированной ТМ (синие линии) по сравнению со стандартным гладким ореолом ТМ (черный). Во всех шести случаях вся ТМ находится в кластерах, содержащих $N_{cl} = 10^6$ ПЧД, а ПЧД имеют массу $M_{PЧД} = 110M_{\odot}$ в левом и правом столбцах соответственно. Верхние две строки показывают «типичные» реализации, где отсутствие каких-либо скоплений вблизи наблюдателя приводит к дефициту кратковременных событий. В нижнем ряду показаны примеры редких реализаций, когда рядом с наблюдателем находится кластер, производящий кратковременные события с высокой частотой (обратите внимание на другой диапазон оси y в этом случае).

2.2 Задача-2

Рассмотрим вторую задачу. На рис. 2 слева изображены каустики каждой черной дыры в кластере, справа – кривые блеска фоновой звезды. На рис. 2 видно, что кривые блеска для 0.004, 0.007 пк имеют сложный профиль сильно отличающийся от кривой блеска для одиночных линз. Здесь имеется сильное влияние линз друг на друга и скопления в целом. Напротив на рис. 2 0.028 пк профиль становится практически таким, как для одиночных линз. Для расстояний больших 0.028 пк это влияние практически отсутствует и кривые блеска не отличимы от кривых для одиночных линз

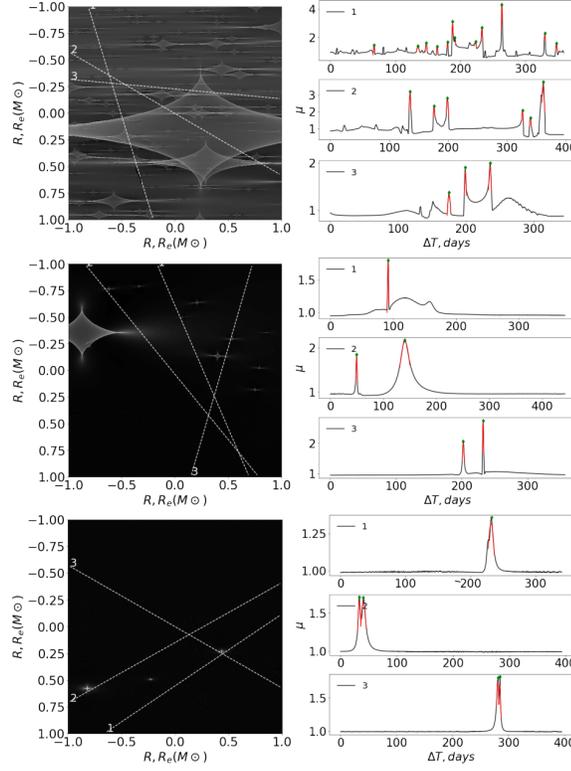


Рисунок 2 — Пример карт усиления и соответствующих им кривых блеска для фоновой звезды размером до $R_{\text{source}} \approx 27 \cdot R_{\odot}$ для скопления ПЧД на расстояниях: (сверху вниз) 0.014, 0.020, 0.033 пк от центра скопления. Зеленым цветом обозначены найденные пики. Красным цветом показан результат фитирования пиков кривых блеска.

3 Заключение

В данной работе "Изучение эффекта микролинзирования на кластере ПЧД"

- была освоена постановка задачи включающая изучение эффекта микролинзирования на кластере ПЧД;
- изучалась литература, посвященная эффекту микролинзирования, имеющаяся на данный момент.

Изучив имеющуюся литературу, мы пришли к выводу, что требуется создавать собственные алгоритмы отбора сигналов, чтобы отличать их от микролинзирования на одиночной ЧД и фоновых событиях (переменные звезды и др.). Открытие LIGOVirgo гравитационных волн от слияний десятков черных дыр солнечной массы привело к повышенному интересу к первичным черным дырам (ПЧД) как кандидатам в темную материю.

Список литературы

- [1] M. Gorton and A.M. Green, *Effect of clustering on primordial black hole microlensing constraints*, *JCAP* **08** (2022) 035 [2203.04209].
- [2] V. De Luca, G. Franciolini, A. Riotto and H. Veermäe, *Ruling Out Initially Clustered Primordial Black Holes as Dark Matter*, *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022) 191302 [2208.01683].
- [3] G. Franciolini, K. Kritos, E. Berti and J. Silk, *Primordial black hole mergers from three-body interactions*, *Phys. Rev. D* **106** (2022) 083529 [2205.15340].