

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
**ПЕРЕСМОТР ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ГРАВ.
МИКРОЛИНЗИРОВАНИЮ НА ПЛОТНОСТЬ ПЧД С УЧЕТОМ
ИХ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ**

Научный руководитель _____ Е. С. Шлепкина

Студент Б20-102 _____ Б. Ю. Мучкинова

Консультант _____ К. М. Белоцкий

Москва 2024

Содержание

1	Введение	3
2	Задача	3
2.1	Постановка задачи	3
2.2	Параметры кластера	3
3	Результаты	4
4	Заключение	5

1 Введение

Открытие LIGO/Virgo гравитационных волн от слияний десятков черных дыр солнечной массы привело к повышенному интересу к первичным черным дырам (ПЧД) как кандидатам в скрытую массу.

ПЧД — это черные дыры, которые образуются в ранней Вселенной. Наиболее часто изучаемым механизмом образования является коллапс больших возмущений плотности, вызванных инфляцией. ПЧД могут формировать скопления. Это может происходить за счет случайного (пуассоновского) пространственного распределения одиночных ПЧД или за счет специфики самого механизма их рождения (например, коллапс доменных стенок, образованных в результате фазовых переходов на стадии инфляции) ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]).

Одним из наблюдательных проявлений ЧД может являться эффект гравитационного микролинзирования удаленных светил (звезд, квазаров и др.).

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

При исследовании гравитационных линз часто оказывается достаточным рассмотрение эффекта в приближение тонкой линзы. Это сильно упрощает вычисления, и оправдано тем, что характерные масштабы (расстояние от наблюдателя до источника и линзы) много больше, чем характерный размер линзы (т. е. области, где преимущественно происходит отклонение лучей света).

2 Задача

2.1 Постановка задачи

Конечной целью исследования является пересмотр результатов 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. ПЧД массы m могут быть собраны в кластеры массы M_{cl} . Они могут подпадать под ограничения на одиночные ПЧД как с массами m , так и M_{cl} в зависимости от параметров (компактности) кластера и вида наблюдений (ограничений). Но также могут их и избегать! Наша общая работа нацелена на поиск таких параметров, чтобы избежать максимально и те (на m), и те (на M_{cl}) ограничения. Данная работа изучает возможность ослабления ограничения на $m \approx M_{\odot}$ по микролинзированию. Работа по пересмотру ограничения на ПЧД массы $M \approx 10^4 M_{\odot}$ ведется отдельно)

2.2 Параметры кластера

Параметры кластера брались, следуя работе [10]

$R \leq 1$ пк – радиус кластера

$M_{cl} = 10^4 M_{\odot}$ – масса кластера

$r_0 \leq 0.1R$ – радиус ядра кластера ("кора")

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r + r_0)^3}, \quad 0 < r < R$$

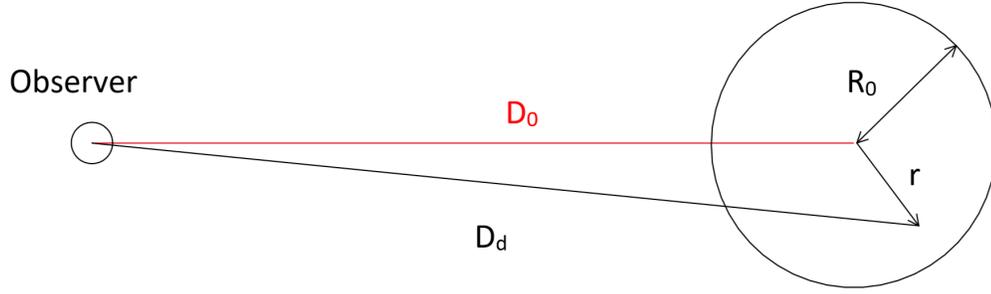


Рисунок 1 — Пояснительный рисунок

3 Результаты

Были получены следующие результаты:

- Классифицированы возможные проявления кластерной структуры ПЧД в эффекте микролинзирования:
 1. по форме сигнала, то есть искажению временного профиля сигнала. Однако поскольку предсказать конкретную форму сигнала сложно, поэтому точного ответа нет;
 2. по временному интервалу между событиями микролинзирования на одной звезде;
 3. по угловому и временному интервалам между событиями микролинзирования. Получить данное распределение является приоритетной задачей для дальнейшего исследования.
- Оценено в 1-м приближении распределение по временному интервалу T между событиями микролинзирования (см. рис. 2).
- Получены распределения по расстояниям до ближайшей ПЧД для двух случаев:
 1. равномерное распределение ПЧД в кластере (см. рис. 3а). Для данного случая аналитически была найдена функция распределения. Для того чтобы ближайшая ПЧД находилась на расстоянии, заключенном между l и $l + dl$, необходимо:
 - чтобы расстояние до ближайшей ПЧД было не меньше l – вероятность этого события равна $1 - F(l)$;
 - чтобы внутри сферического слоя $2\pi r dl$ была ПЧД - вероятность этого события равна $a2\pi l dr$, где a – вероятность нахождения ПЧД внутри бесконечно малой площади dS
 Так как эти два события взаимно независимы, то вероятность, что произойдет и то, и другое, равна произведению их вероятностей. Следовательно, $f(l)dl = (1 - F(l))a2\pi l dl$. Дифференцируя по l и имея в виду $f(l) = F'(l)$, получаем дифференциальное уравнение

$$-f(l) = \frac{1}{2\pi a r^2 l^2} (f'(l)l - f(l)) \quad (1)$$
 Решая 1, получим

$$f(l) = 2\pi a l e^{-\pi a l^2} \quad (2)$$
 2. реальное распределение ПЧД в кластере (см. рис. 3б)

- Получены численные оценки ослабления ограничения на основе эффекта простого экранирования (на основе работы К.Тощенко и [11]) (см. рис. 4 и рис. 5). Под незаэкранированными ПЧД подразумеваем часть ПЧД в кластере, которая лежит в области $\tau < 0.1$, поскольку эффект искажения профиля события проявляется при $\tau \ll 1$, работа К. Тощенко "Влияние кластеризации первичных черных дыр на наблюдательные ограничения доли компактных объектов Гало"

4 Заключение

Для дальнейшей работы разрабатывается критерий анализа событий по другим проявлениям (временнo-пространственной их корреляции) для сравнения нулевой гипотезы (одиночных ПЧД) и кластерной, который включает в себя поиск функции распределения по угловым расстояниям и временным интервалам между событиями микролинзирования.

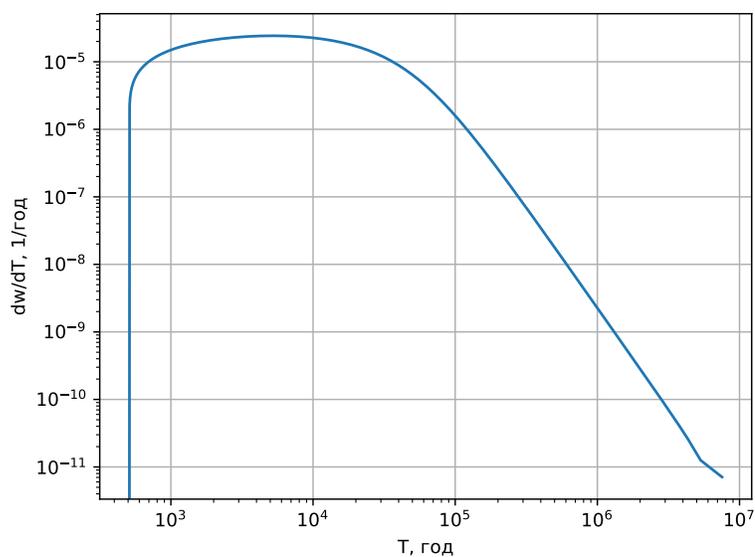
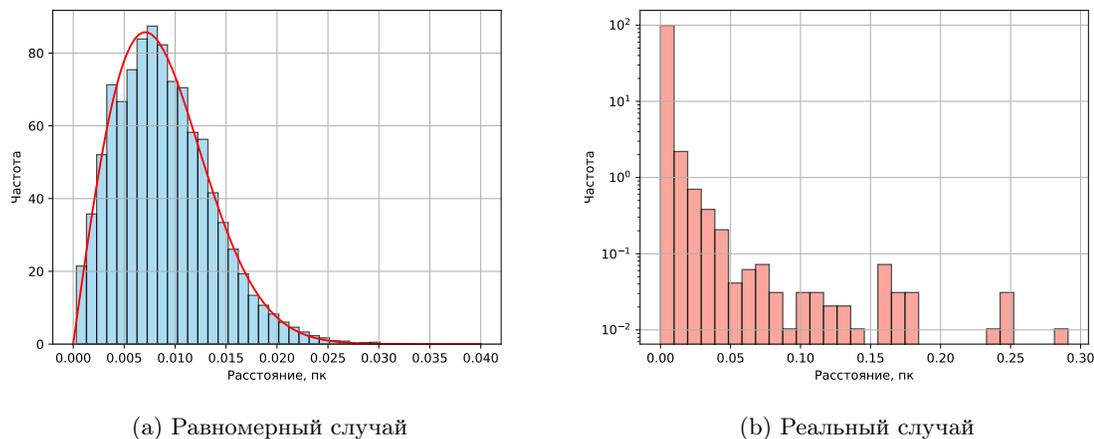


Рисунок 2 — Распределение по временному интервалу T между событиями



(a) Равномерный случай

(b) Реальный случай

Рисунок 3

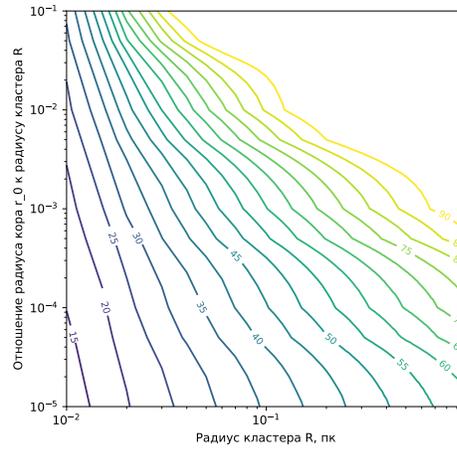


Рисунок 4 — Доля незаэкранированных ПЧД

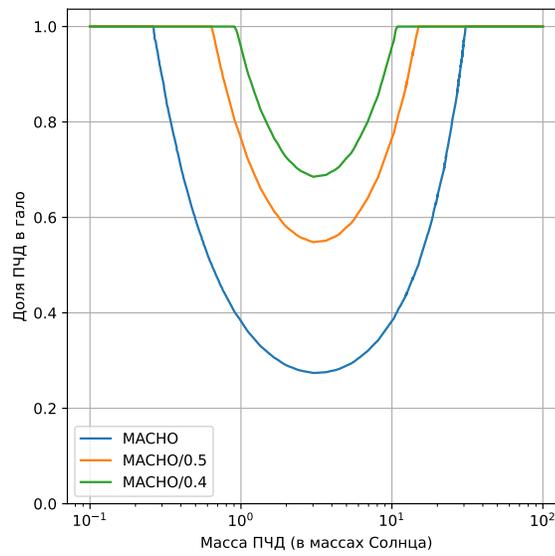


Рисунок 5 — Ослабленные ограничения МАСНО

Список литературы

- [1] N. Afshordi, P. McDonald and D.N. Spergel, *Primordial black holes as dark matter: The Power spectrum and evaporation of early structures*, *Astrophys. J. Lett.* **594** (2003) L71 [[astro-ph/0302035](#)].
- [2] M.Y. Khlopov, R.V. Konoplich, S.G. Rubin and A.S. Sakharov, *First-order phase transitions as a source of black holes in the early universe*, *Grav. Cosmol.* **6** (2000) 153.
- [3] S.G. Rubin, M.Y. Khlopov and A.S. Sakharov, *Primordial black holes from nonequilibrium second order phase transition*, *Grav. Cosmol.* **6** (2000) 51 [[hep-ph/0005271](#)].
- [4] S.G. Rubin, A.S. Sakharov and M.Y. Khlopov, *The Formation of primary galactic nuclei during phase transitions in the early universe*, *J. Exp. Theor. Phys.* **91** (2001) 921 [[hep-ph/0106187](#)].
- [5] M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka and S. Yokoyama, *Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914*, *Phys. Rev. Lett.* **117** (2016) 061101 [[1603.08338](#)].
- [6] T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka and K.S. Thorne, *Gravitational waves from coalescing black hole MACHO binaries*, *Astrophys. J. Lett.* **487** (1997) L139 [[astro-ph/9708060](#)].
- [7] K. Ioka, T. Chiba, T. Tanaka and T. Nakamura, *Black hole binary formation in the expanding universe: Three body problem approximation*, *Phys. Rev. D* **58** (1998) 063003 [[astro-ph/9807018](#)].
- [8] N. Kaiser, *On the Spatial correlations of Abell clusters*, *Astrophys. J. Lett.* **284** (1984) L9.
- [9] C. Animalì and V. Vennin, *Clustering of primordial black holes from quantum diffusion during inflation*, [2402.08642](#).
- [10] K.M. Belotsky, V.I. Dokuchaev, Y.N. Eroshenko, E.A. Esipova, M.Y. Khlopov, L.A. Khromykh et al., *Clusters of primordial black holes*, *Eur. Phys. J. C* **79** (2019) 246 [[1807.06590](#)].
- [11] MACHO collaboration, *MACHO project limits on black hole dark matter in the 1-30 solar mass range*, *Astrophys. J. Lett.* **550** (2001) L169 [[astro-ph/0011506](#)].