

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕСМОТРА ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР В СКРЫТОЙ МАССЕ ДЛЯ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК

Научный руководитель: К. М. Белоцкий

Студент: К. М. Кузнецова, Б21-102

Введение

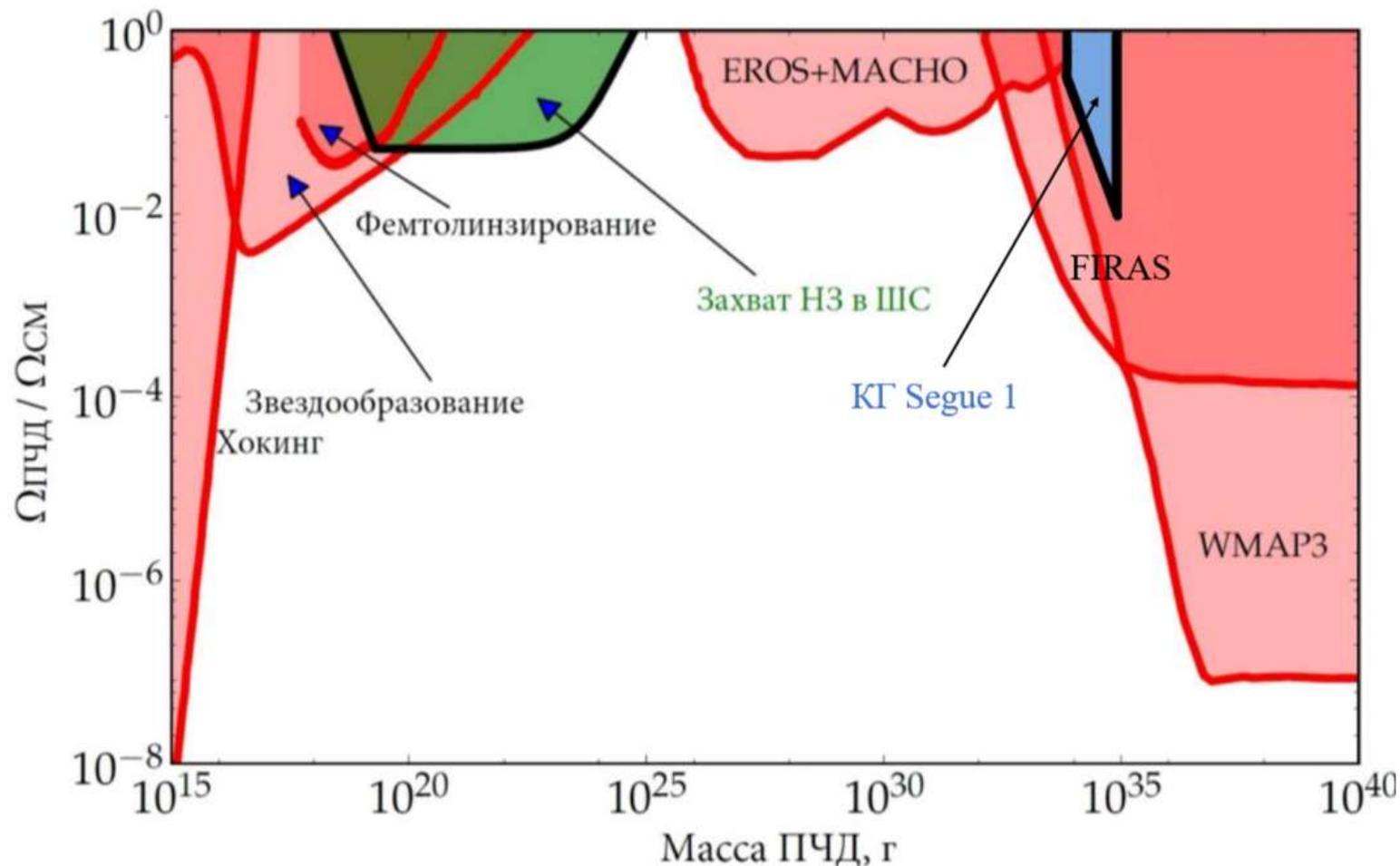
По состоянию на сегодняшний день существование скрытой массы (СМ) было установлено только благодаря её гравитационному взаимодействию, и потому природа скрытой массы остается одной из крупнейших нерешенных задач космологии. В научной литературе рассматриваются различные кандидаты на роль СМ, одним из которых выступают первичные черные дыры (ПЧД).

Carr B., Clesse S., Garcia-Bellido J., Hawkins M., Kuhnel F. *Observational Evidence for Primordial Black Holes: A Positivist Perspective*. — 2023. — arXiv:2306.03903 [astro-ph.CO]

Carr B., Kuhnel F. *Primordial Black Holes as Dark Matter Candidates // SciPost Physics Lecture Notes*. — 2022. — arXiv:2110.02821 [astro-ph.CO]

Hawkins M. R. S. *The case for primordial black holes as dark matter // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — T. 415, № 3. — С. 2744—2757.

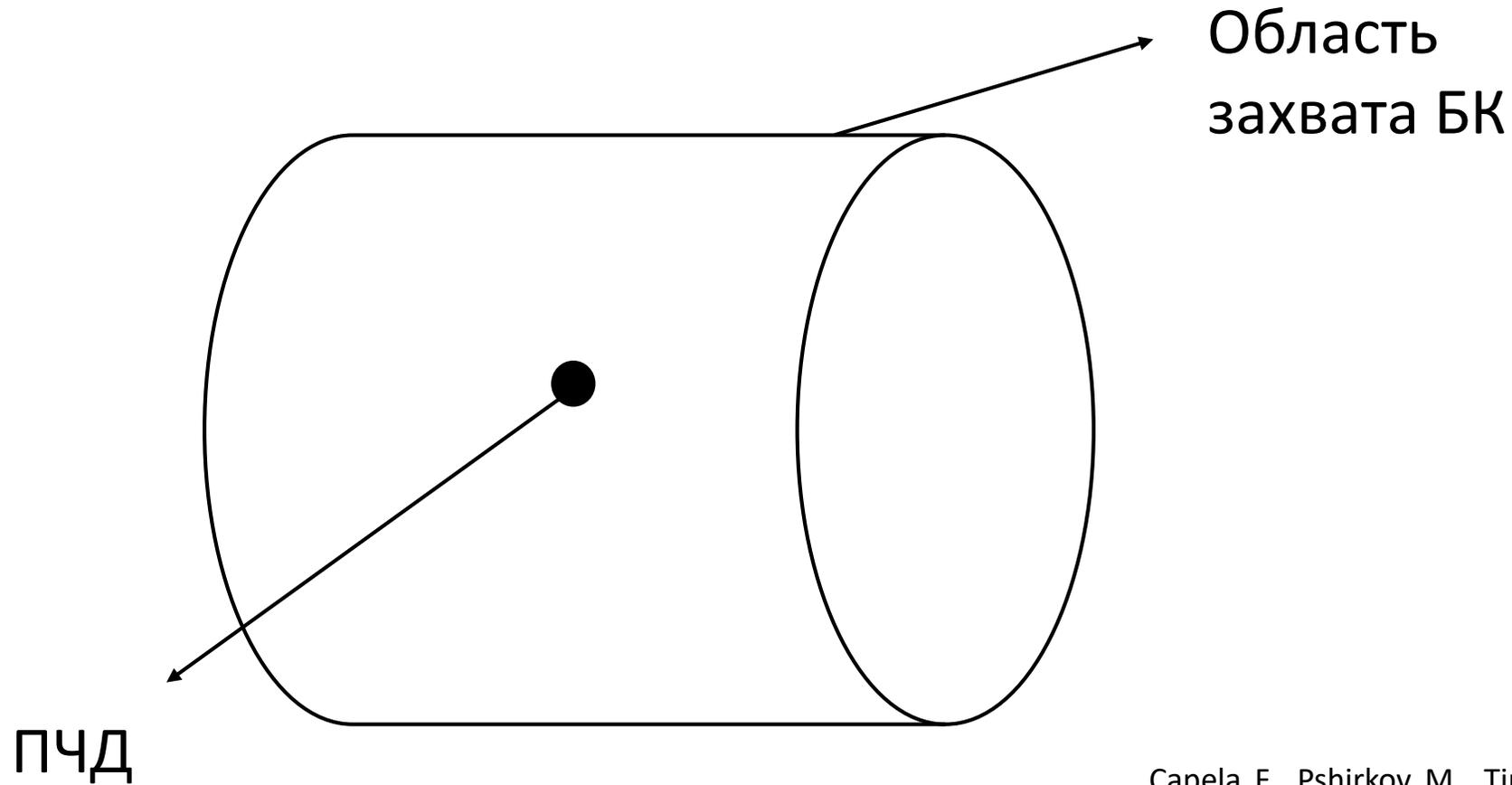
Ограничения на долю ПЧД в СМ



Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. *Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from capture by neutron stars* // Physical Review D. — 2013. — Т. 87, № 12.

Koushiappas S.M., Loeb A. *Dynamics of Dwarf Galaxies Disfavor Stellar-Mass Black Holes as Dark Matter* // Physical Review Letters. — 2017. — July. — Vol. 119, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.041102>.

Взаимодействие белых карликов с ПЧД



Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. *Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from star formation* // Physical Review D. — 2013. — Т. 87, № 2.

Исследование возможности пересмотра ограничения доли ПЧД в СМ для КГ

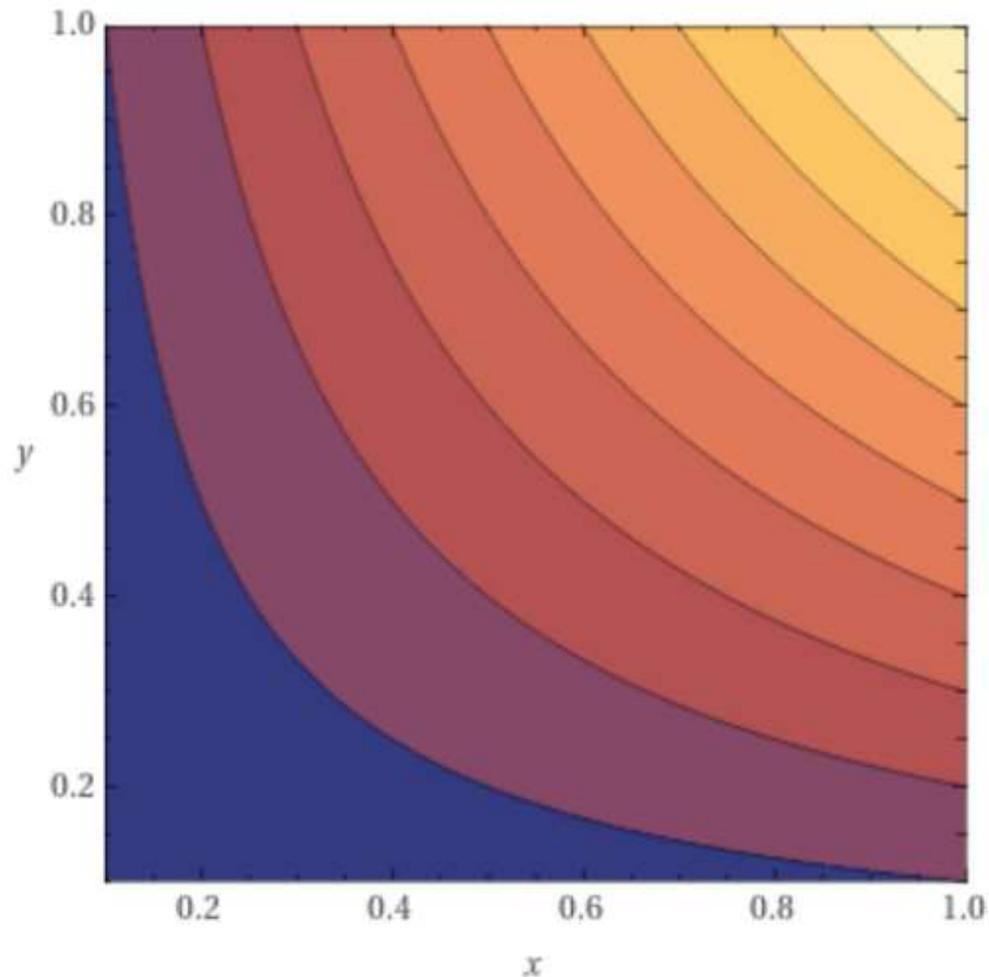


График величины $\beta = \frac{КГ}{ШС} = x \cdot y$.

По осям отложены значения $y = \frac{n_{3В}^{КГ}}{n_{3В}^{ШС}}$, $x = \frac{\rho_{СМ}^{КГ}}{\rho_{СМ}^{ШС}}$.

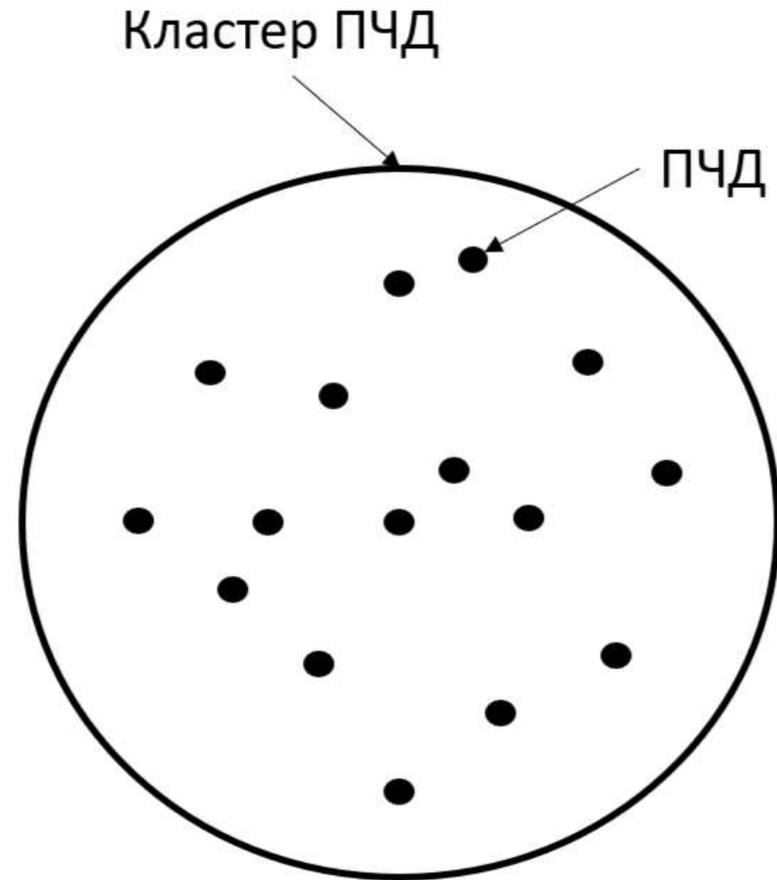
ШС



КГ



Влияние эффекта кластеризации на ограничения доли ПЧД в СМ



Большинство ограничений на долю ПЧД в СМ строятся из предположения об их равномерном пространственном распределении. В случае, если ПЧД образуют кластеры, они могут либо частично, либо полностью обходить существующие ограничения на плотность равномерно распределенных ПЧД, что позволяет ПЧД стать жизнеспособными кандидатами в СМ.

Belotsky K.M., Dokuchaev V.I., Eroshenko Y.N., [et al.]. Clusters of Primordial Black Holes // The European Physical Journal C. — 2019. — Mar. — Vol. 79, no. 3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6741-4>.

Ожидаемое ослабление ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации для КГ

$$N_{ВЗ}^{КЛ} = [N_{КЛ}] \cdot [P_{КЛ}]$$

$N_{КЛ}$ – число взаимодействий БК с ПЧД при попадании БК в кластер;

$P_{КЛ}$ – вероятность попадания БК в кластер;

$$N_{КЛ} = n_{ПЧД}^{КЛ} \cdot \sigma_{БК} \cdot d_{КЛ}$$

$n_{ПЧД}^{КЛ}$ – концентрация ПЧД внутри кластера;

$\sigma_{БК}$ – гравитационное сечение захвата БК;

$d_{КЛ}$ – диаметр кластера;

$$P_{КЛ} = n_{КЛ} \cdot V_{КЛ} \cdot \alpha \cdot N$$

$n_{КЛ}$ – концентрация кластеров ПЧД внутри КГ;

$\sigma_{КЛ}$ – гравитационное сечение захвата кластера;

v_{∞} – скорость между БК и ПЧД на большом расстоянии;

$t = 10^{10}$ лет – характерное время задачи;

α – свободный параметр – доля БК в общем количестве звёзд;

$$V_{КЛ} = \sigma_{КЛ} \cdot v_{\infty} \cdot t$$

N – общее количество звезд;

Ожидаемое ослабление ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации для КГ

Равномерное распределение ПЧД внутри кластера

$$n_{\text{ПЧД}}^{\text{КЛ}} = \frac{M_{\text{КЛ}}}{m_{\text{ПЧД}} \cdot V_{\text{КЛ}}}$$

$$N_{\text{КЛ}} = n_{\text{ПЧД}}^{\text{КЛ}} \cdot \sigma_{\text{БК}} \cdot d_{\text{КЛ}}$$

Распределение ПЧД внутри кластера обратно пропорциональное радиуса кластера

$$n_{\text{ПЧД}}^{\text{КЛ}} \sim \frac{1}{R_{\text{КЛ}}^3}$$

$$N_{\text{КЛ}} = \frac{M_{\text{КЛ}}}{m_{\text{ПЧД}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{БК}}}{R_{\text{КЛ}}^2} \left(3 \cdot \frac{R_{\text{КЛ}}^2}{R_0^2} - 1 \right)$$

Ожидаемое ослабление ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации для КГ

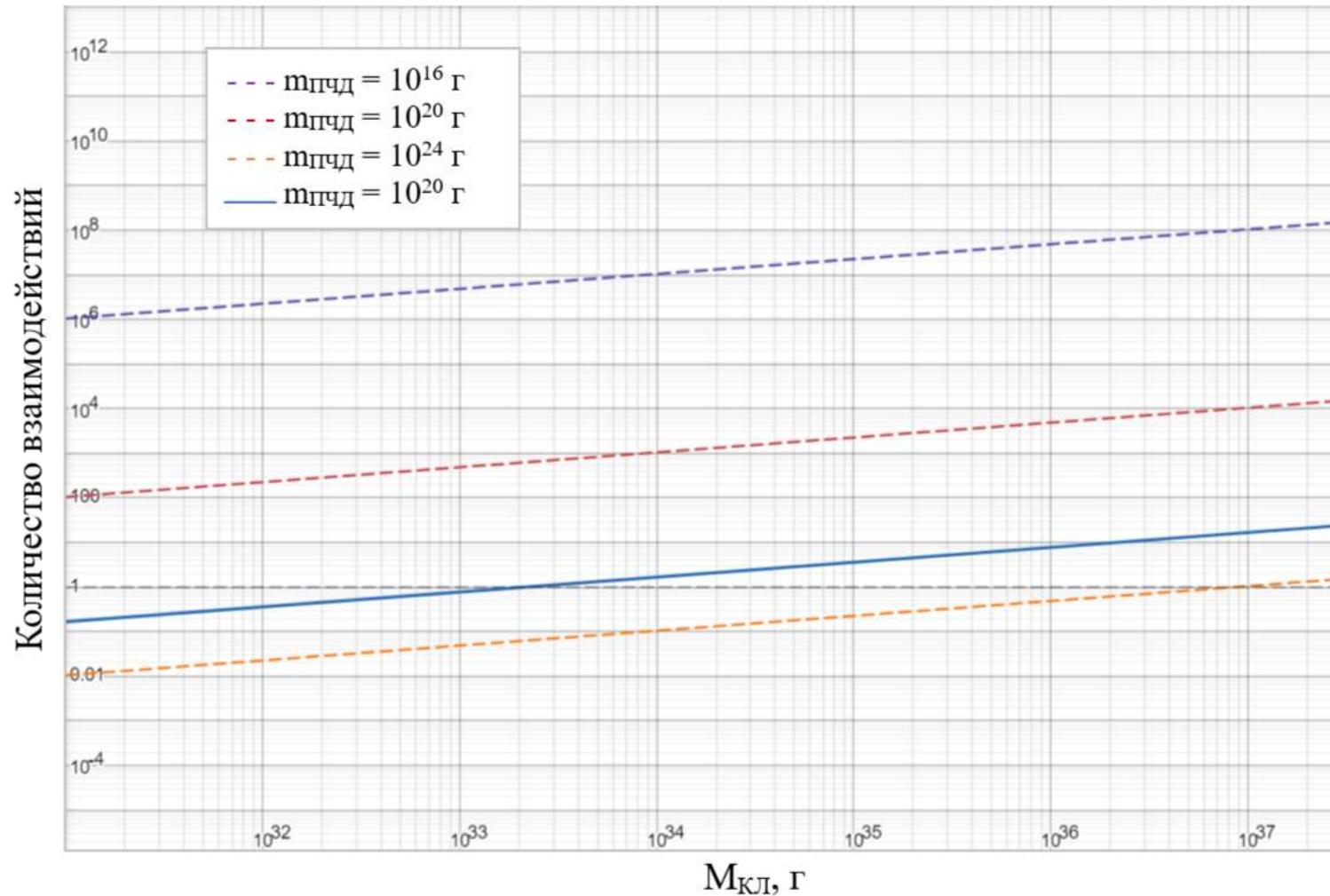
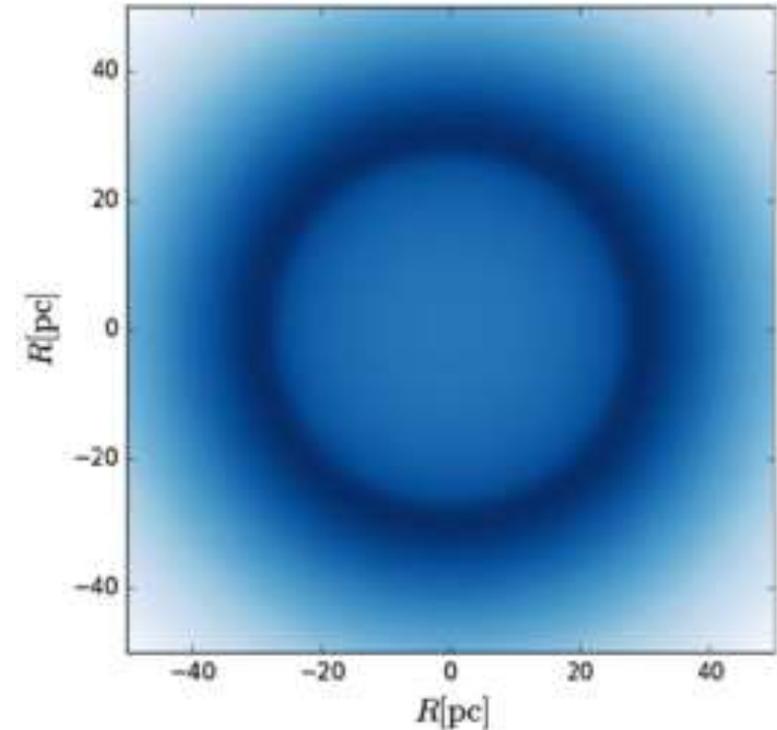
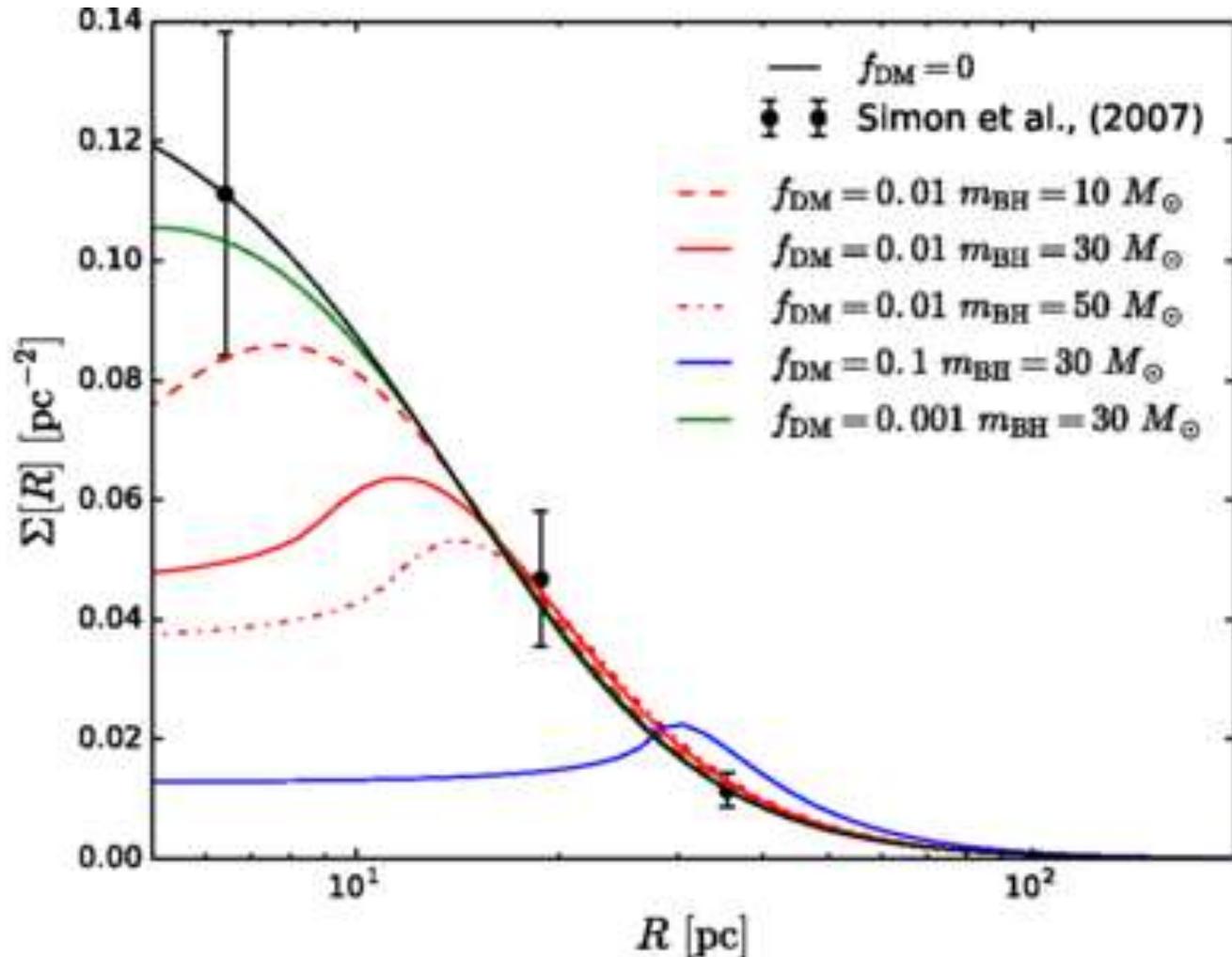


График зависимости количества взаимодействий ПЧД с БК от массы кластера ПЧД при разных массах ПЧД, если бы БК не разрушался.

Взаимодействие ПЧД и кластеров ПЧД со звездами в КГ



Koushiappas S.M., Loeb A. Dynamics of Dwarf Galaxies Disfavor Stellar-Mass Black Holes as Dark Matter // Physical Review Letters. — 2017. — July. — Vol. 119, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.041102>.

Взаимодействие ПЧД и кластеров ПЧД со звездами в КГ

Рассмотренные динамические эффекты в работе [1]:

- приливные силы, когда звезда рассеивается на кластере ПЧД;
- рассеяние звезды на кластере ПЧД как на целом;
- динамическое трение, когда кластер ПЧД проходит через скопление звезд;
- динамическое трение, когда звезда проходит через кластер ПЧД.

[1] Belotsky K., Krasnov M., Pugachev S. Investigation of the dynamics of interaction of a cluster of primordial black holes with stellar cluster. — 2024. — принято в печати в журнале UMD.

Заключение

В данной работе рассматривалось взаимодействие первичных черных дыр (ПЧД) с белыми карликами (БК) в шаровых скоплениях (ШС) и карликовых галактиках (КГ) и взаимодействие кластеров ПЧД с БК в КГ. В частности, исследовалась возможность пересмотра ограничения на долю ПЧД в СМ (f) в случае их кластеризации для КГ. В качестве источника ограничения рассматривался эффект разрушения звезды при попадании в неё ПЧД. Также были проанализированы работы, в которых рассматривалось взаимодействие ПЧД и кластеров ПЧД со звездами в КГ.

Были получены следующие результаты:

- **было показано и подтверждено, что при соответствующем подборе параметров кластера ПЧД ограничение на f , такое как по эффекту разрушения звезды при попадании в нее ПЧД, для КГ можно ослабить;**
- **был проведен анализ работ и выяснено, что предварительно динамическое ограничение для кластеров ПЧД отличается мало от данного ограничения в некластеризованном случае.**

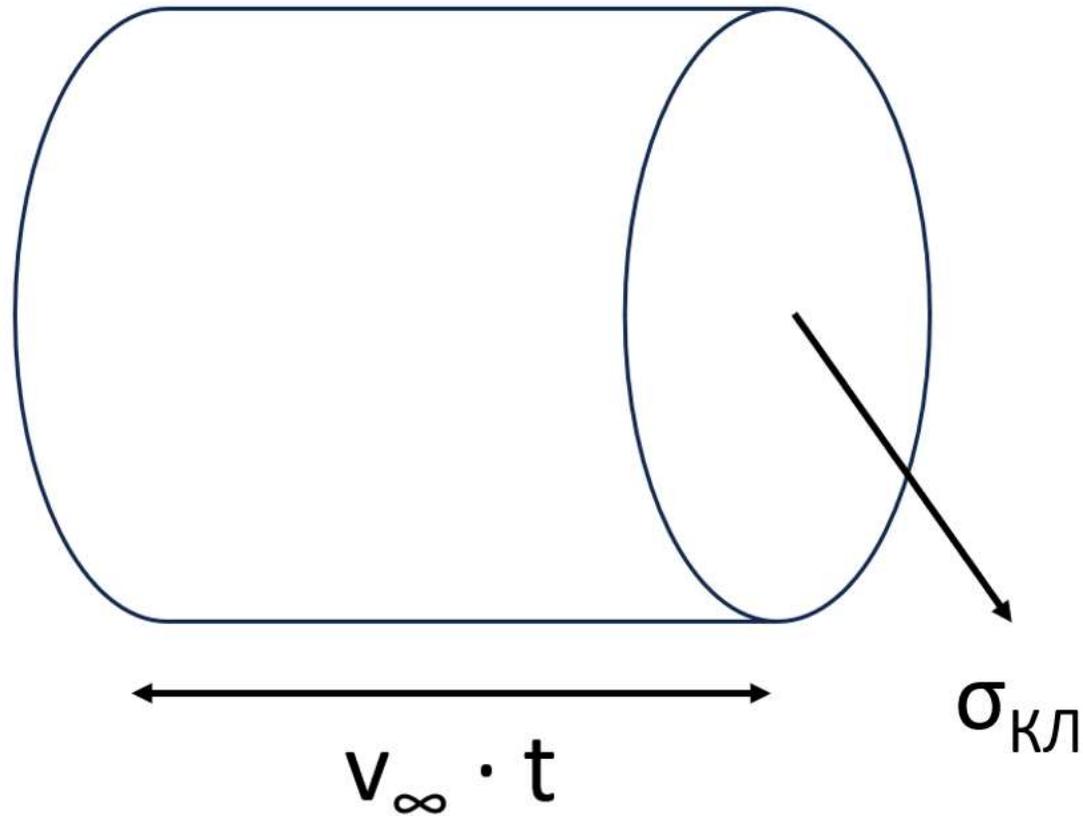
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hawkins M. R. S. The case for primordial black holes as dark matter // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2011. — Т. 415, № 3. — С. 2744—2757.
2. Carr B., Kuhnel F. Primordial Black Holes as Dark Matter Candidates // SciPost Physics Lecture Notes. — 2022. — arXiv:2110.02821 [astro-ph.CO]
3. Carr B., Clesse S., Garcia-Bellido J., Hawkins M., Kuhnel F. Observational Evidence for Primordial Black Holes: A Positivist Perspective. — 2023. — arXiv:2306.03903 [astro-ph.CO]
4. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from capture by neutron stars // Physical Review D. — 2013. — Т. 87, № 12.
5. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from star formation // Physical Review D. — 2013. — Т. 87, № 2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

6. Carr B., Clesse S., Garcia-Bellido J., Hawkins M., Kuhnel F. Observational Evidence for Primordial Black Holes: A Positivist Perspective. — 2023. — arXiv:2306.03903 [astro-ph.CO]
7. Koushiappas S.M., Loeb A. Dynamics of Dwarf Galaxies Disfavor Stellar- Mass Black Holes as Dark Matter // Physical Review Letters. — 2017. — July. — Vol. 119, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.041102>
8. Belotsky K., Krasnov M., Pugachev S. Investigation of the dynamics of interaction of a cluster of primordial black holes with stellar cluster. — 2024.

Ожидаемое ослабление ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации для КГ



$$P_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} \cdot V_{\text{кл}} \cdot \alpha \cdot N$$

$$V_{\text{кл}} = \sigma_{\text{кл}} \cdot v_{\infty} \cdot t$$

$n_{\text{кл}}$ – концентрация кластеров ПЧД внутри КГ;
 $\sigma_{\text{кл}}$ – гравитационное сечение захвата кластера;
 v_{∞} – скорость между БК и ПЧД на большом расстоянии;
 $t = 10^{10}$ лет – характерное время задачи;
 α – свободный параметр – доля БК в общем количестве звёзд;
 N – общее количество звезд;

Ожидаемое ослабление ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации для КГ

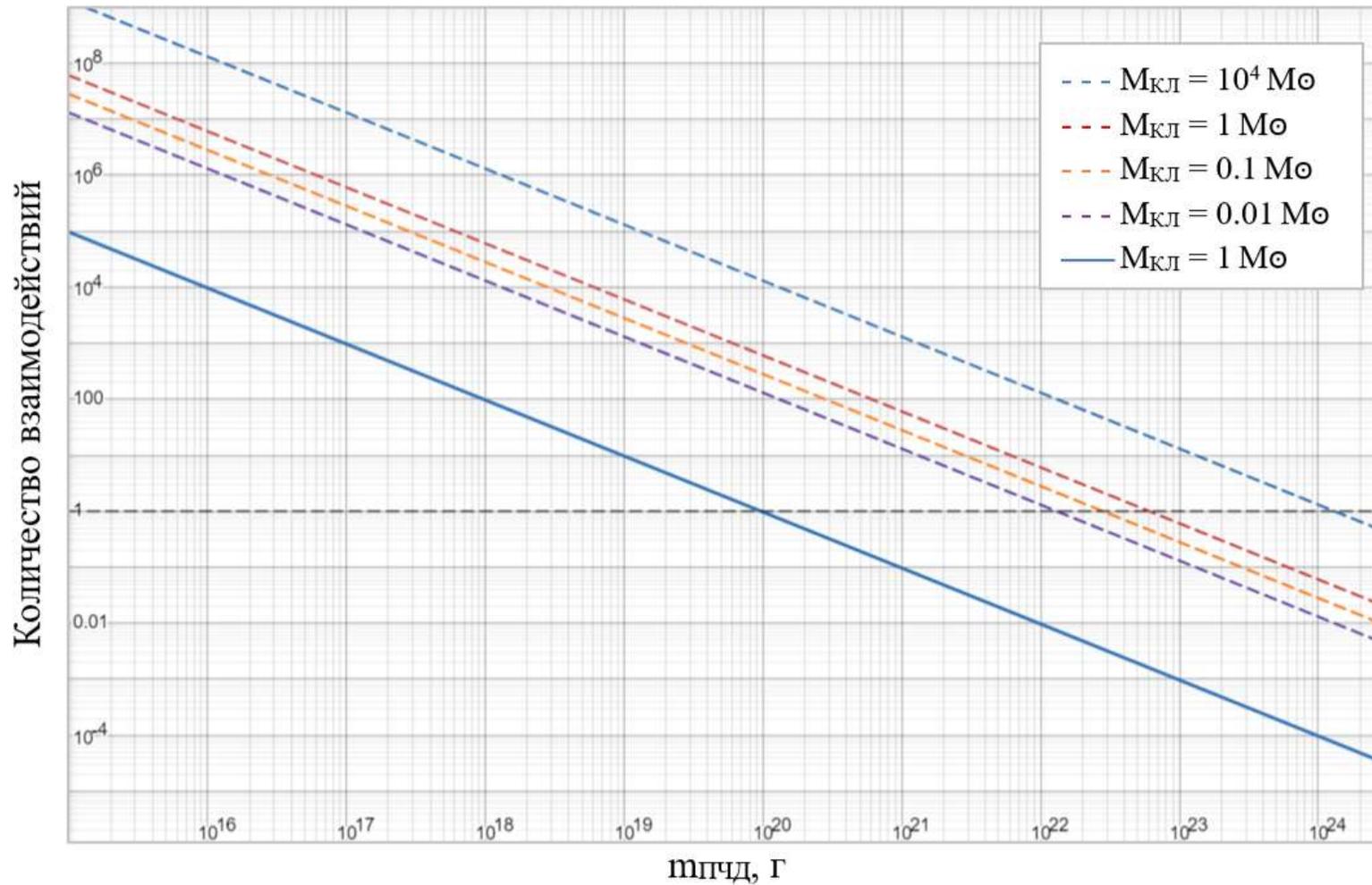
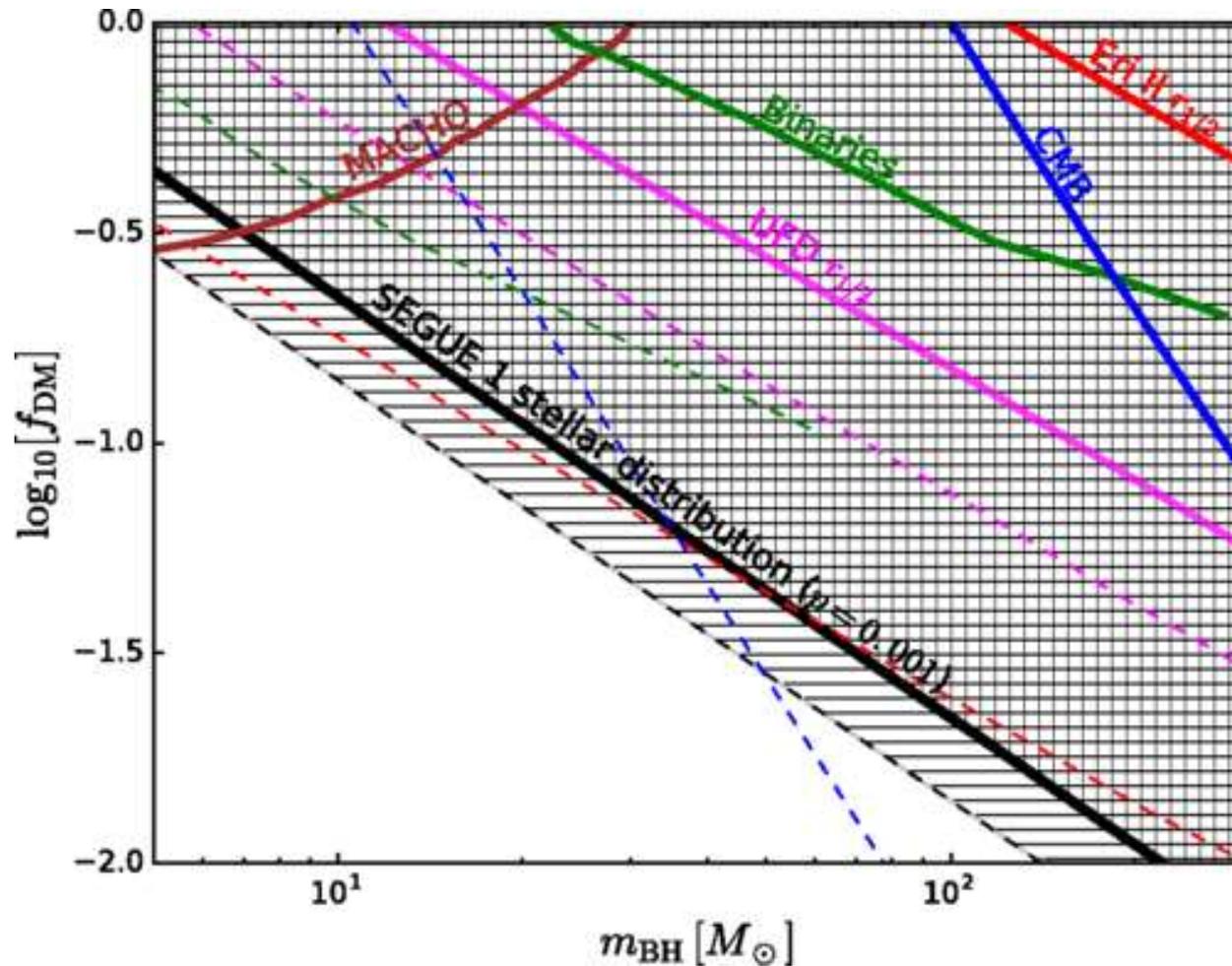


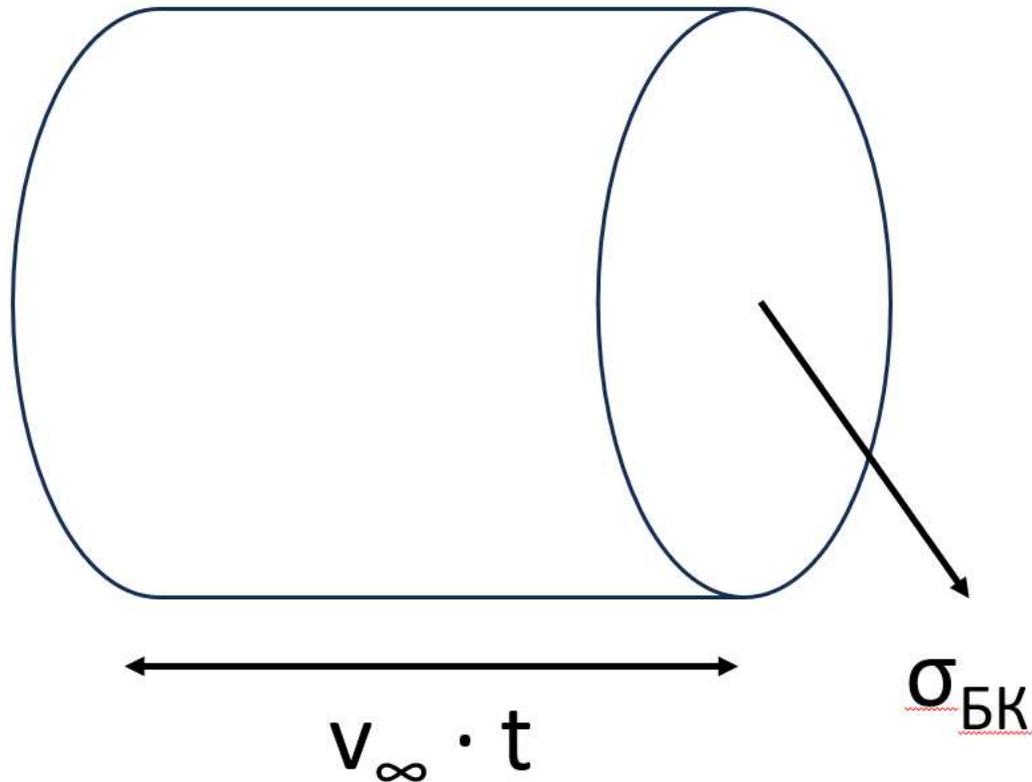
График зависимости количества взаимодействий ПЧД с БК от массы ПЧД при разных массах кластера, если бы БК не разрушался.

Взаимодействие ПЧД и кластеров ПЧД со звездами в КГ



Koushiappas S.M., Loeb A. Dynamics of Dwarf Galaxies Disfavor Stellar-Mass Black Holes as Dark Matter // Physical Review Letters. — 2017. — July. — Vol. 119, no. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.041102>.

Исследование возможности пересмотра ограничения доли ПЧД в СМ для КГ



$$N_{B3} = n_{\text{ПЧД}} \cdot V_{BK} \cdot \alpha \cdot N$$

$$V_{BK} = \sigma_{BK} \cdot v_{\infty} \cdot t$$

$n_{\text{ПЧД}} = \frac{M_{\text{СМ}} / m_{\text{ПЧД}}}{V}$ – концентрация ПЧД внутри ШС/КГ;

σ_{BK} – гравитационное сечение захвата БК;

v_{∞} – скорость между БК и ПЧД на большом расстоянии;

$t = 10^{10}$ лет – характерное время задачи;

α – свободный параметр – доля БК в общем количестве звёзд;

N – общее количество звезд;

Исследование возможности пересмотра ограничения доли ПЧД в СМ для КГ

$$\beta = \frac{(N_{ВЗ}^{КГ})^*}{(N_{ВЗ}^{БК})^*} = \frac{КГ}{ШС} \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{n_{ЗВ}^{КГ}}{n_{ЗВ}^{ШС}} \cdot \frac{\rho_{СМ}^{КГ}}{\rho_{СМ}^{ШС}} = \frac{КГ}{ШС}$$

$$\rho_{СМ}^{ШС} = \gamma \cdot \rho^{ШС}$$

γ	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
β	(10 - 1000)	(1 - 100)	(0,1 - 10)	(10^{-2} - 1)