

Гравитационное микролинзирование на кластере ПЧД

Куракин А.А. М18-115

Белоцкий К.М.

Цели работы

Часть 1:

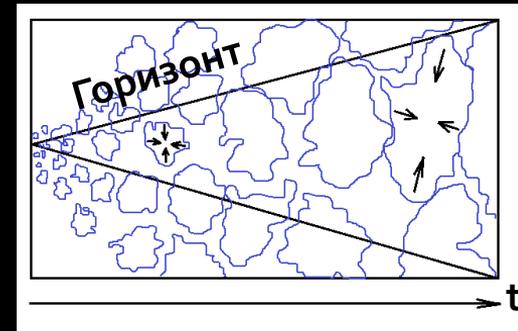
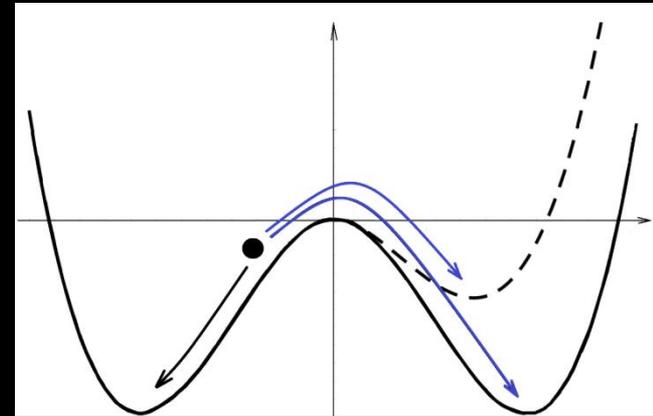
- Построение модели взаимодействия доменной стенки с фермионами
- Расчет скорости передачи энергии от доменной стенки горячей плазме (фермионам)

Часть 2:

- Оценка ожидаемого числа событий микролизирований на кластере ПЧД

Образование ПЧД

- В результате ФП во время и после инфляционной стадии происходит образование доменных стенок, отделяющих друг от друга различные вакуумы
- Оказавшись под горизонтом, стенка начинает эволюционировать: при взаимодействии с горячей плазмой происходит диссипация кинетической энергии колебаний стенки
- В результате коллапса стенок образуются ПЧД



Возможные наблюдательные эффекты

Эффект разогрева:

- Может быть заметен по СМВ (искажение спектра)
- Наблюдаться в современной Вселенной (наблюдение нагретых областей)

Описание доменной стенки

- Лагранжиан, описывающий стенку:

$$\mathcal{L}_{wall} = \partial_\mu \phi^\dagger \partial^\mu \phi - \frac{1}{4}(\phi^\dagger \phi - f^2/2)^2 - \Lambda^4(1 - \cos \theta). \quad (1)$$

ϕ - комплексное скалярное поле; θ - фаза поля; Λ, f - параметры лагранжиана

- Подстановка: $\phi = \frac{f}{\sqrt{2}} \exp(i\theta) = \frac{f}{\sqrt{2}} \exp(i\chi/f)$ (2)

- В результате приходим к лагранжиану синус Гордона:

$$\mathcal{L}_{wall} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \chi)^2 - \Lambda^4(1 - \cos(\chi/f)) \quad (3) \rightarrow \text{решение: } \chi(z) = 4f \operatorname{arctg} \left(\exp \left[\frac{\Lambda^2}{f} z \right] \right) \quad (4)$$

Лагранжиан для фермионов

- Взаимодействие со стенкой будем описывать Юкавским членом: $\mathcal{L}_f = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi + g_0(\phi\bar{\psi}\psi + h.c.) - m\bar{\psi}\psi = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi + \sqrt{2}g_0f\bar{\psi}\psi\cos(\chi/f) - m\bar{\psi}\psi$ (5)

- Перепишем член взаимодействия в виде:

$$\mathcal{L}_{int} = m_0\cos(\chi/f)\bar{\psi}\psi = m_0\left(1 - \frac{2}{\text{ch}^2(2z/d)}\right)\bar{\psi}\psi \quad (6)$$

- В итоге фермионная часть лагранжиана примет вид:

$$\mathcal{L}_f = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m_0\frac{2}{\text{ch}^2(2z/d)}\bar{\psi}\psi - m_f\bar{\psi}\psi \quad (7) \quad , \quad \text{где } m_f = m - m_0 \text{ - масса фермиона}$$

Обобщенное уравнение Дирака

- Уравнение движения фермионного поля: $0 = (\gamma^\mu \partial_\mu - g(x)) \psi$ (8) ,

где $g(x) = \frac{2m_0}{\text{ch}^2(2x/d)} + m_f$ (9)

- Решение ищем в виде: $\psi(x) = \begin{pmatrix} u_1(x) & u_2(x) & u_3(x) & u_4(x) \end{pmatrix}^T e^{-iEt + ip_t x_t}$ (10)

- Замена: $\phi_+(x) = u_1(x) + iu_3(x)$ (11)

$$\phi_-(x) = u_1(x) - iu_3(x).$$

- Задача свелась к решению скалярного уравнения:

$$0 = \left(\frac{d^2}{dx^2} \mp g'(x) + E^2 - g^2(x) \right) \phi_\pm(x) \quad (12)$$

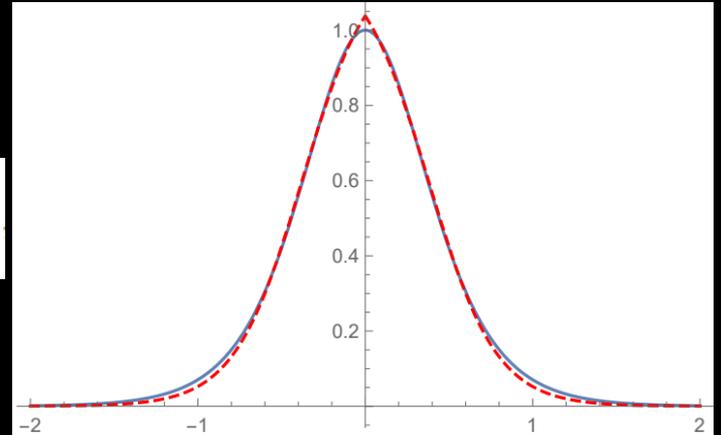
Аппроксимация

- Аппроксимируем функцию $g(x)$ потенциалом вида:

$$(13) \quad g(x) = \frac{A\theta(x)}{1 + \exp(a(x - x_0))} + \frac{A\theta(-x)}{1 + \exp(-a(x + x_0))} + m_f$$

A , a , x_0 - параметры аппроксимации.

- Тогда уравнение приводится к гипергеометрическому виду.
 - Решаем задачу в областях $x < 0$, $x > 0$ и проводим сшивку решений в точке $x = 0$



Решение обобщенного уравнения Дирака

- Решение гипергеометрического уравнения для области $x < 0$:

$$\phi_+^L(\xi) = C_1 \xi^{-\alpha} (1 - \xi)^{-\beta} {}_2F_1(-\alpha - \nu - \beta, -\alpha + \nu - \beta, 1 - 2\alpha; \xi) + C_2 \xi^\alpha (1 - \xi)^{-\beta} {}_2F_1(\alpha - \nu - \beta, \alpha + \nu - \beta, 1 + 2\alpha; \xi). \quad (14)$$

где $\xi = -\exp(-a(x + x_0))$, параметры

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{a} \sqrt{(m_f + A)^2 - E^2} = \frac{ip}{a} \\ \beta &= -\frac{A}{a} \\ \nu &= \frac{1}{a} \sqrt{m_f^2 - E^2} = \frac{i}{a} \sqrt{E^2 - m_f^2} = \frac{ik}{a} \end{aligned} \quad (15)$$

- Данное решение в асимптотике дает две волны: падающую и отраженную: $\phi_+^L \xrightarrow{x \rightarrow -\infty} D_1 e^{ik(x+x_0)} + D_2 e^{-ik(x+x_0)}$ ($D_1, D_2 = \text{const}$ – доп. слайд)

$$\phi_-^L(x) \xrightarrow{x \rightarrow -\infty} -\frac{k + im}{E} D_1 e^{ik(x+x_0)} + \frac{k - im}{E} D_2 e^{-ik(x+x_0)} \quad (16)$$

Решение обобщенного уравнения Дирака

- Для области $x > 0$ в асимптотике имеем:

$$\phi_+^R(x) = d_1 e^{ik(x-x_0)} \quad (17)$$

$$\phi_-^R(x) \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} -\frac{k + im}{E} d_1 e^{ik(x-x_0)}$$

есть только прошедшая волна, коэффициент при волне, бегущей против оси x , положили $d_2 = 0$.

- Сшивка в точке $x = 0$:

$$\begin{aligned} \phi_+^R|_{x=0} &= \phi_+^L|_{x=0} \\ (\phi_+^R)'|_{x=0} &= (\phi_+^L)'|_{x=0} \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициент отражения

- Плотность тока вероятности :

$$j = \bar{\psi}(x)\gamma^3\psi(x) = -|u_1(x)|^2 + |u_2(x)|^2 + |u_3(x)|^2 - |u_4(x)|^2 = -\phi_+^*\phi_- - \phi_-^*\phi_+. \quad (19)$$

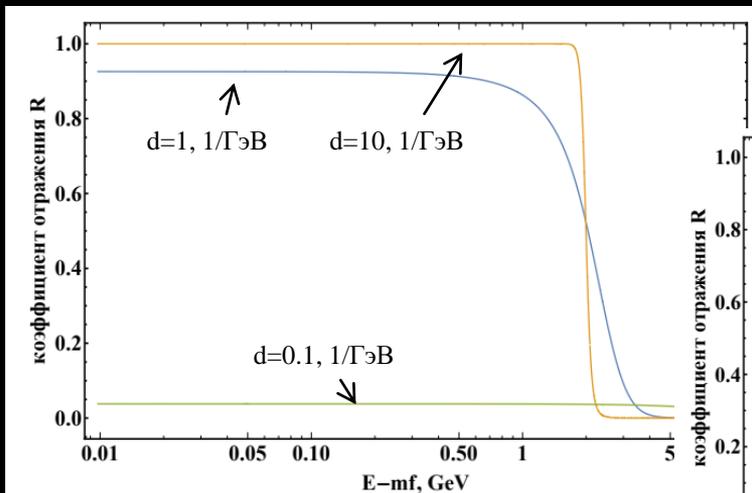
- Ток в области $x < 0$

$$j = \frac{k}{E}(|D_1|^2 - |D_2|^2) = j_{inc} - j_{ref}. \quad (20)$$

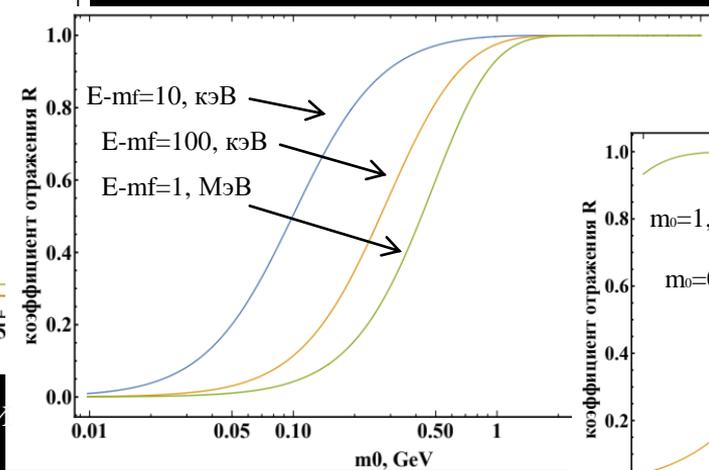
- Коэффициент отражения:

$$R = \frac{j_{ref}}{j_{inc}} = \frac{|D_2|^2}{|D_1|^2}. \quad (21)$$

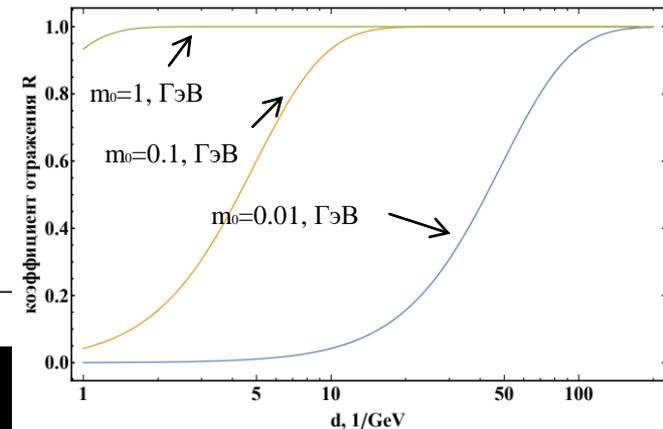
Коэффициент отражения



коэффициент отражения от энергии частицы, $m_0 = 1 \text{ ГэВ}$

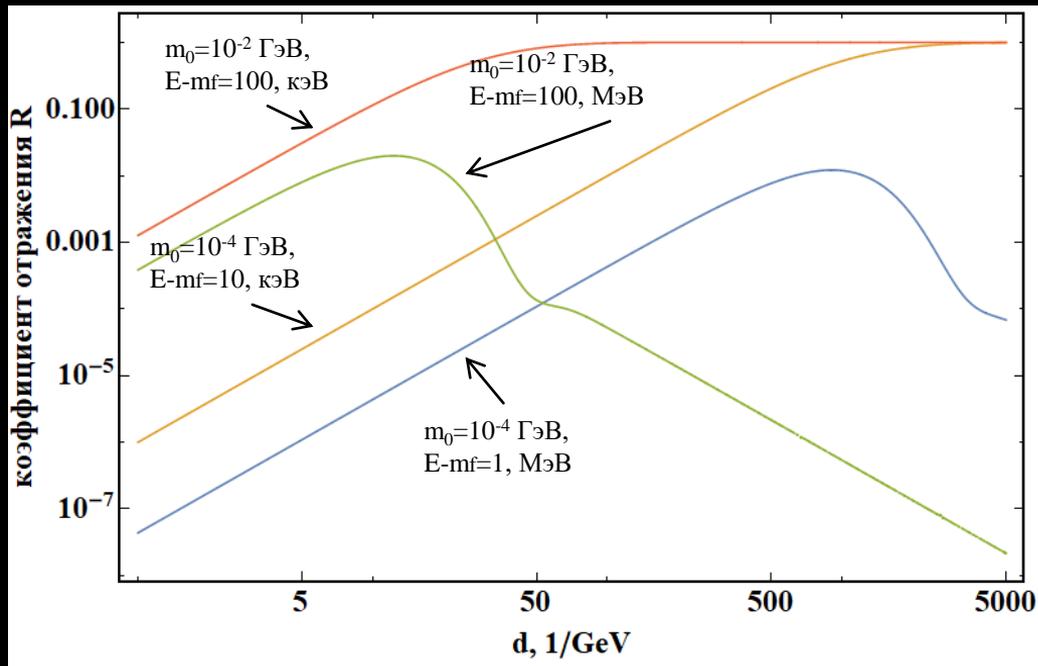


коэффициент отражения от константы взаимодействия, $d = 1 \text{ ГэВ}$



коэффициент отражения от толщины стенки, $E-mf = 1 \text{ МэВ}$

Коэффициент отражения



Скорость передачи энергии

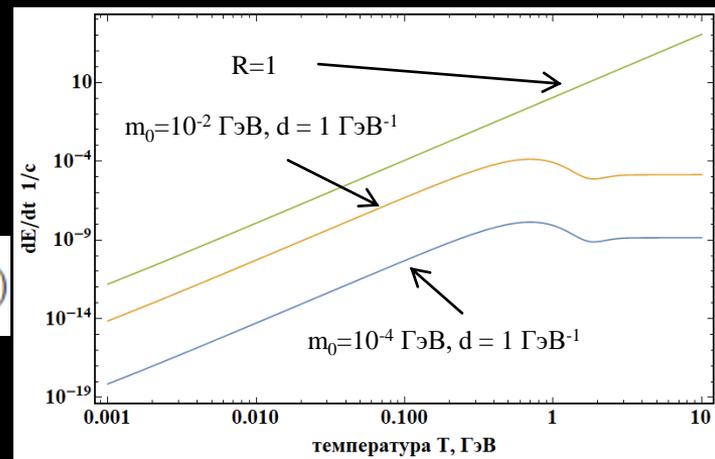
- Скорость передачи энергии будем вычислять по формуле (оценочной):

$$(22) \quad d\tilde{E}/dt \approx [\tilde{E}'(T) - \tilde{E}(T)] \cdot R(\tilde{E}(T)) \cdot \tilde{n}_{tot} \cdot v_{rel}$$

$$(23) \quad d\tilde{E}/dt \approx \frac{2u^2\tilde{E} + 2uk_z}{1 - u^2} \cdot 5T^3 \cdot R(T) \cdot \frac{\tilde{v}(T) + u}{1 + u\tilde{v}(T)} + (u \rightarrow -u)$$

- Кинетическая энергия единицы площади

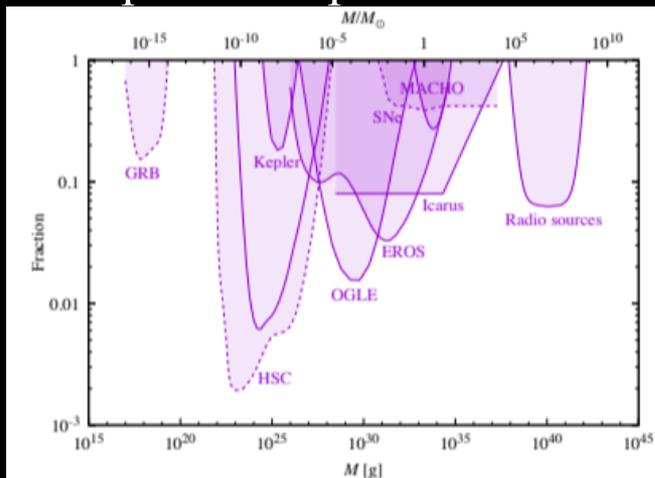
$$(24) \quad \sigma = (\gamma - 1)M_{sol} = 8(\gamma - 1)\Lambda^2 f = 4(\gamma - 1)\Lambda^4 d$$



Скорость передачи энергии о единицы площади стенки в зависимости от температуры плазмы

Гравитационное микролинзирование

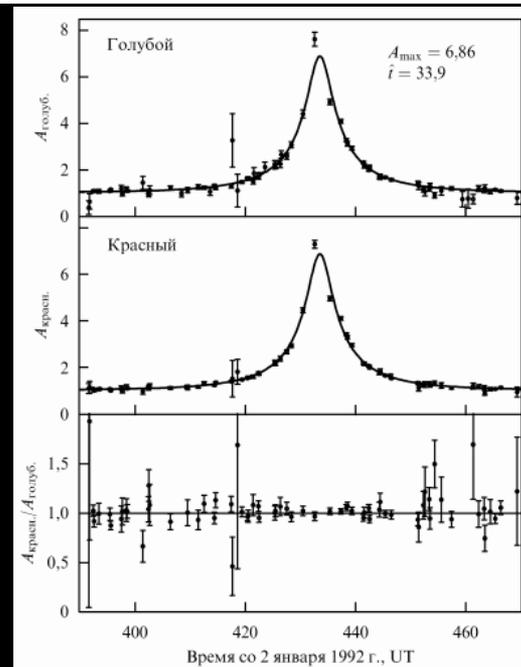
- Микролинзирование наблюдаем по всплеску яркости фоновой звезды источника, изображения различить не можем



Ограничения на РВН в долю в
DM

$$(25) \quad R_E^2 = r_\odot \frac{D_d D_{ds}}{D_s} \frac{m}{M_\odot}$$

Радиус Эйнштейна,
усиление > 1.34



событие MACHO

Гравитационное микролинзирование на кластере ПЧД

16

- В оценках будем пользоваться NFW профилем массы:
$$\rho_{NFW}(R) = \frac{\rho_c}{\frac{R}{R_c} \left(1 + \frac{R}{R_s}\right)^2} \quad (26)$$

- Число кластеров (скоплений) в направлении LMC:
$$N = \Delta\Omega \int_0^{d_{LMC}} dx \frac{\rho(x)}{M_{cl}} x^2 = 1560, \quad (27)$$

- Площадь LMC, покрываемая кластерами:
$$P = \Delta\Omega \int_0^{d_{LMC}} dx \frac{\pi R^2 M_{cl} \rho_{NFW}(x)}{\Delta\Omega \pi x^2 M_{cl}} x^2 = 1.1 \cdot 10^{-2} \quad (28)$$

- Вириальная скорость РВН внутри кластера:
$$v = \sqrt{\frac{GM_{tot}}{R}} \approx 6.6 \text{ км/с} \ll v_c \quad (29)$$

→ скорость РВН относительно кластера можем пренебречь

Ожидаемое число событий

- Дифференциальный темп микролинзирования:

$$(30) \quad \frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Omega_{PBH}}{\Omega_{DM}} N_{star} \int dm dx d\theta f(m) \frac{\rho_{DM}(x)}{m v_c^2} \left(\frac{R_E \cos \theta}{t} \right)^4 \exp \left[-\frac{2R_E}{v_c t} \right]$$

- Функция эффективности эксперимента МАСНО (вероятность регистрации события длительности t)

$$(31) \quad \varepsilon = \begin{cases} 0.4 \exp(-(\ln t/35)^2/0.72), & t < 35 \\ 0.4 \exp(-(\ln t/35)^2/0.18), & t \geq 35 \end{cases}$$

- Ожидаемое число событий N ($N_{star} = 10^6$, $T = 1$ год):

$$(32) \quad N = N_{star} T \int \varepsilon(t) \frac{d\Gamma}{dt} dt$$

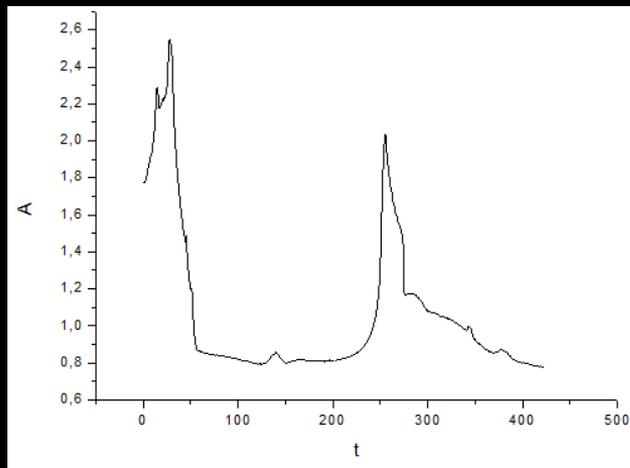
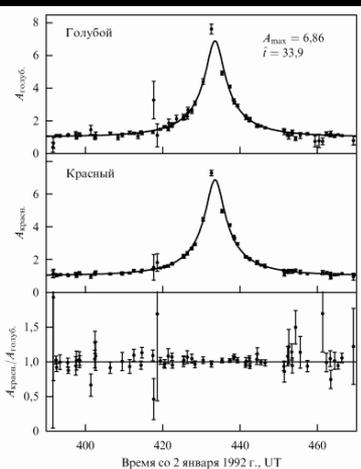
Ожидаемое число микролинзирования без учета функции эффективности:

- $N \sim 3700$, $m_{min} = 10^{-8} M_{\odot}$
- $N \sim 2.2$, $m_{min} = 10^{-3} M_{\odot}$.

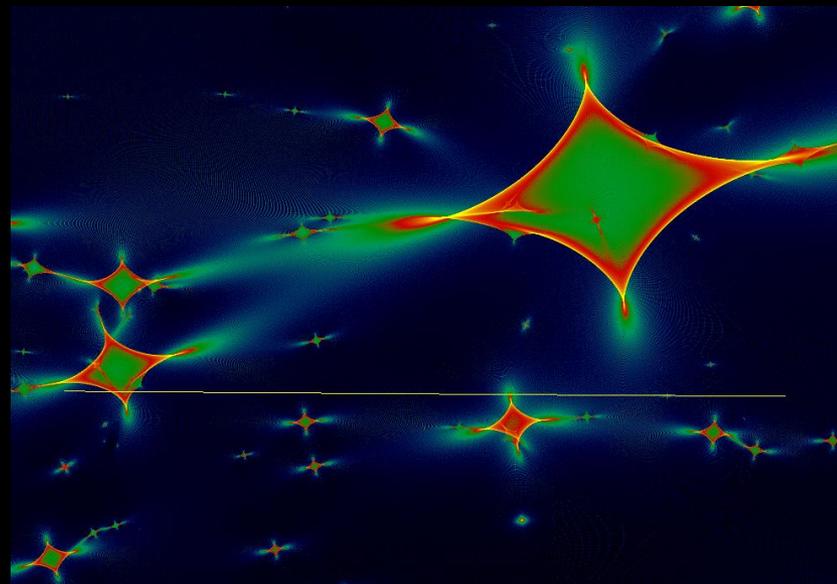
с учетом:

- $N \sim 0.5$, $m_{min} = 10^{-8} M_{\odot}$
- $N \sim 0.4$, $m_{min} = 10^{-3} M_{\odot}$

Кривая блеска



- Кривая блеска (t – время наблюдения, дни)



Карта усиления (magnification pattern).
Получена с помощью кода MICROLENS

Заключение

- Построена модель взаимодействия фермионов с доменной стенкой; определена скорость передачи энергии от доменной стенки плазме.
- Данная модель в дальнейшем будет использоваться для определения возможного нагрева отцепившихся от хаббловского потока областей.
- Проведена оценка ожидаемого числа событий гравитационного микролинзирования на кластере РВН