

Ограничения на природу центрального сверхмассивного объекта нашей Галактики

Лобков Дмитрий Сергеевич, 204 группа

МГУ им.М.В.Ломоносова, Физический факультет, кафедра физики частиц и
космологии

13 мая 2021 г.

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН
Троицкий Сергей Вадимович

Введение

- Стрелец A* - компактный радиоисточник, находящийся в центре Млечного Пути, на расстоянии 26000 световых лет от Солнечной системы.
- Точно не ясна природа SgrA*, существуют аргументы «за» и «против» того, что это может быть СМЧД.

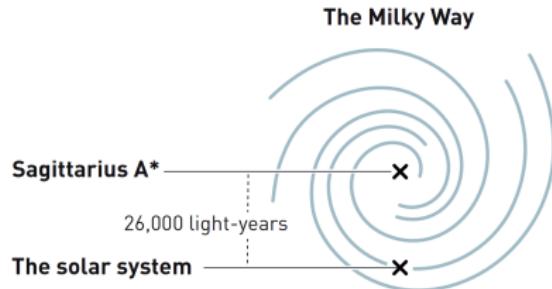


Рис.: Млечный путь, вид сверху. Источник: nobelprize.org

- По наблюдению (в течении 18 лет) положения SgrA* относительно двух фоновых источников (J1745–2820, J1748–2907) были оценены: «внеплоскостная» компонента скорости, ускорение, отклонение от центра масс системы радиоисточника.
- Особый** интерес представляет оценка массы центрального объекта по параметрам орбит ближайших звёзд, а также оценка на массу радиоисточника с учётом ограничений на его движение.

Оценка массы центрального объекта

По движению звёзд и параметрам их орбит, было заключено, что масса центрального объекта примерно равна:

$$M \approx 4 \times 10^6 M_{\odot}$$

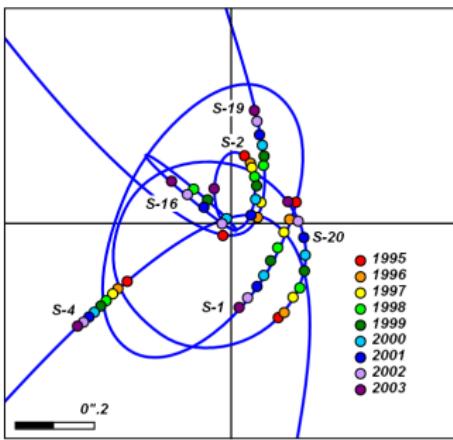


Рис.: Траектории звезд, ближайших к центру Галактики. Источник: wikipedia

Какая доля приходится на радиоисточник..?

- Reid, Brunthaler (2004) приводят вывод формулы для оценки среднего квадрата скорости движения радиоисточника и получают первую оценку на его массу:

$$M_* > 0.4 \times 10^6 M_\odot$$

- 2020: моделирование движения $10^6 - 10^7$ звезд вокруг центрального объекта даёт новую оценку:

$$M_* > 1 \times 10^6 M_\odot$$

Принципиальное отличие модели: «unseen mass» "размазана" в пространстве, не имеет четких границ. Её большая часть сосредоточена в центре.

Построение новой модели

Принципы новой модели

Цель: ограничить массу радиоисточника в новой модели
центр.объекта

- ① Шар из темной материи (поэтому возможно движение радиоисточника внутри шара).
- ② Шар имеет четкие границы, постоянную плотность.
- ③ Радиоисточник движется все время внутри шара.
- ④ В начальный момент времени $t_0 = 0$ радиоисточник находится в начале координат - центре тяжелого шара.

Движение внутри шара

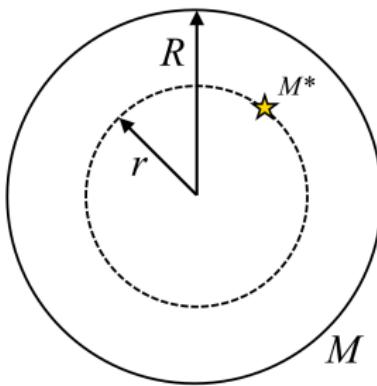


Рис.: Движение точечной массы внутри шара

По т.Гаусса:

$$\oint_S \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi GM \Rightarrow g(r) = \frac{GM}{R^3} r$$

Движение внутри шара

Найдем силу и потенциальную энергию:

$$F(r) = M_\star g(r) = \frac{GMM_\star}{R^3} r = -\frac{\partial U}{\partial r},$$

откуда можем найти:

$$U(r) = -\frac{GMM_\star r^2}{2R^3} = -\frac{kr^2}{2}.$$

Функция Лагранжа:

$$\mathcal{L} = \frac{m}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - \frac{1}{2} k (x^2 + y^2 + z^2).$$

Уравнение колебания по оси x :

$$x(t) = a \cos(\omega t + \alpha) = a \cos \varphi$$

Уравнение колебания по оси y :

$$y(t) = b \cos(\omega t + \beta) = b \cos(\varphi + \delta)$$

Движение внутри шара

Получаем уравнение:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \delta = \sin^2 \delta,$$

это эллипс с центром в начале координат.

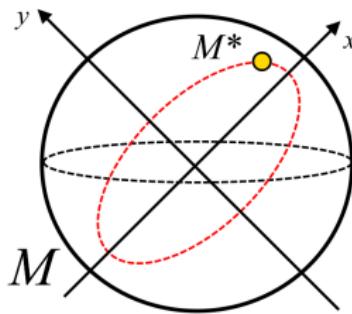


Рис.: Движение по эллиптической траектории

$U \sim r^2$, ожидаем отлеты на меньшие расстояния, как следствие
— ослабление ограничений на массу радиоисточника

Движение радиоисточника с учетом ближайших звезд

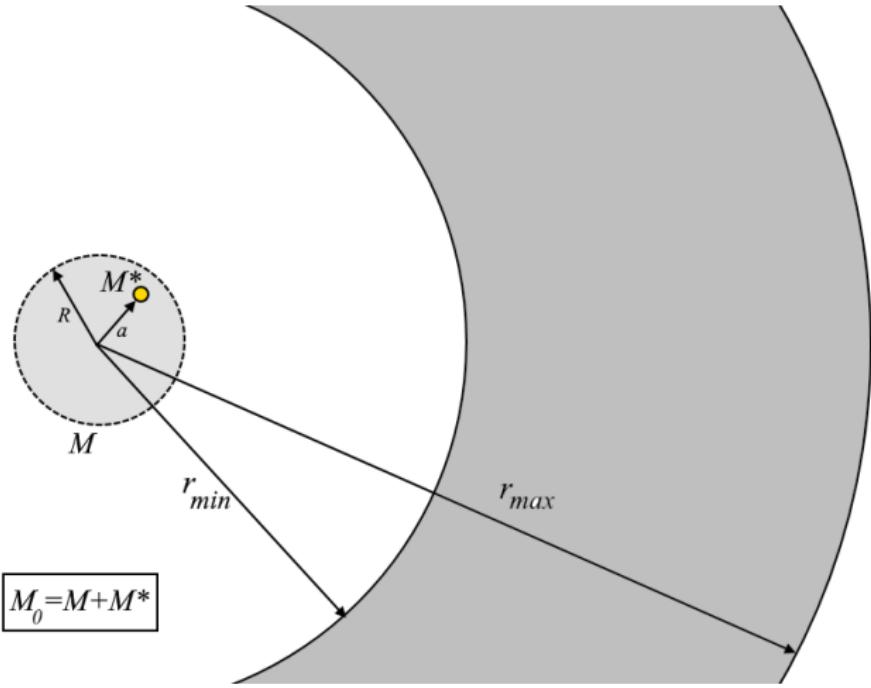


Рис.: Движение точечной массы внутри шара с добавлением равномерного распределения звездной массы

В силу консервативности системы:

$$M_* \vec{V} + \sum_i m_i \vec{v}_i = 0, \quad (1)$$

возведем в квадрат и возьмем среднее:

$$M_*^2 \langle V^2 \rangle = \sum_i \langle m_i^2 v_i^2 \rangle. \quad (2)$$

Для простоты возьмем единственную характеристическую звездную массу m и заменим суммирование в уравнении (4) интегралом:

$$\sum_i \langle m_i^2 v_i^2 \rangle = m^2 \int r^2(r) \left(\frac{dN}{dr} \right) dr, \quad (3)$$

Движение радиоисточника с учетом ближайших звезд

Учитывая, что предполагается: $\rho(r) = \rho_0(r/r_0)^{-\alpha}$, находим:

$$v^2(r) = \frac{GM(r)}{r} = \frac{G}{r} \cdot \left(M_0 + \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr \right), \quad (4)$$

а также:

$$\left(\frac{dN}{dr} \right) dr = \frac{\rho}{m} 4\pi r^2 dr = N_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2-\alpha} d \left(\frac{r}{r_0} \right). \quad (5)$$

Подставим (4),(5) в интеграл, а также отыскав среднее квадрата скорости (анализ колебательных уравнений), получаем итоговую формулу:

$$\boxed{\frac{MM_*^2 a^2}{2R^3} = m^2 N_0 \left[(M + M_*) \cdot \frac{r^{2-\alpha}}{2-\alpha} + \frac{4\pi\rho_0 r_0^\alpha}{3-\alpha} \cdot \frac{r^{5-\alpha}}{5-\alpha} \right]_{r_{min}}^{r_{max}}}, \quad (6)$$

Цель: ограничить массу радиоисточника в зависимости от параметра R

Принимая амплитуду $a = 4$ а.е и посчитав $R_s(M)$, заключаем, что $50R_s \leq R \leq 1500R_s$ (см.[1,2]) и взяв распределение $\rho(r)$ (см.[3]) получаем:

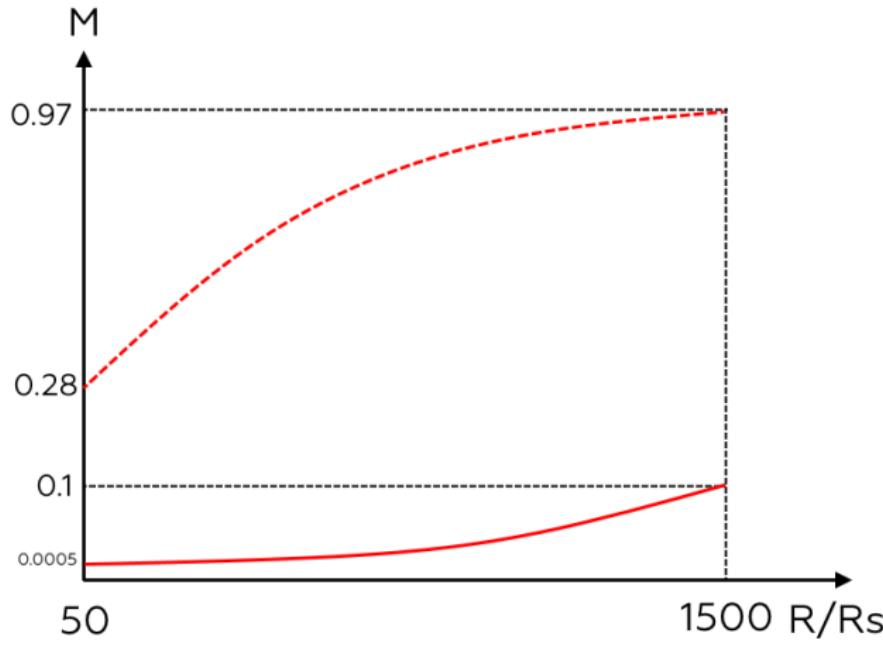
$R = 50R_s$	$M \geq 2500M_{\odot}$
$R = 1500R_s$	$M \geq 400000M_{\odot}$

Как и предполагалось ранее, ограничения на массу источника ослабли!!!

Результаты расчетов

Ограничиваая скорость:

$$V < V_{max} = a\omega \Rightarrow M_* \leqslant M_0 - \frac{1}{n} \frac{c^2 a}{\sqrt{8G}}.$$



Список литературы

-  M. J. Reid, A. Brunthaler. *The Proper Motion of Sgr A*: II. The Mass of Sgr A**, 2004 //arXiv:astro-ph/0408107v1
-  S.V.Troitsky. *Supermassive dark-matter Q-balls in galactic centers?*, 2016 //arXiv:1510.07132v2
-  M. J. Reid, A. Brunthaler. *The Proper Motion of Sagittarius A*: III. The Case for a Supermassive Black Hole*, 2020 //arXiv:2001.04386