

Моделирование орбитального движения тел вокруг Sgr A* и проблема определения расстояния до центра Галактики

И. И. Никифоров, А. В. Веселова

Санкт-Петербургский государственный университет

«Современная звездная астрономия»

Нижний Архыз, САО РАН, 9 октября 2019 г.

Моделирование орбитального движения вокруг Sgr A* и проблема R_0

Классы измерений расстояния до центра Галактики (R_0) по способам определения опорных расстояний.

- ① Эмпирические:
 - а) относительные (шкалы расстояний с эмпирическими калибровками),
 - б) абсолютные (геометрические расстояния).
- ② Теоретические (шкалы расстояний с теоретическими калибровками, ныне не актуальные).

Моделирование орбитального движения тел вокруг Sgr A* → абсолютное расстояние до центрального объекта, т.е. $\approx R_0$, с высокой (!) внутренней точностью.

$A_V \sim 30 \div 50 \implies$ Наблюдения в ИК-диапазоне: $A_K \approx 3$.

- Спекл-изображения центрального скопления Галактики:
 - с 1991 г. — **германской группой** (MPE–Cologne) на ESO NTT, с 2002 г. — на ESO VLT;
 - с 1995 г. — **(американской) группой Andrea Ghez** (UCLA) на Keck I, Keck II.

\implies Обнаружение больших собственных движений ($\gtrsim 10^3$ км/с) „S-звезд“ вокруг Sgr A*.

[«Sgr A*» $\stackrel{\text{def}}{=}$ компактный темный массивный объект, расположенный в направлении на радиоисточник Sgr A* = «**центральная (сверх)массивная черная дыра**».]

- **Salim & Gould** (1999): моделирование вращения S-звезд вокруг Sgr A* (только метод) \rightarrow возможность **точного нахождения абсолютного расстояния до Sgr A***.

- Начало 2000-х гг.: звезда S2/S0-2 оказалась самой короткопериодической и ярчайшей из близких к Sgr A*.

Звезда S0-2 (S2): B2.5V,

$K = 14.2$, $P = 16.041 \pm 0.002$ года (Boehle+, 2016; Do+, 2019);

$K = 13.95$, $P = 16.052$ года (Gillissen+, 2017; GC, 2018);

прохождения перицентра: апрель 2002 г., 19.05.2018 09:50 UTC (GC19);

$a = 0.12$ сд = 0.005 пк ≈ 1010 а.е., $r_a \approx 1910$ а.е., $r_p \approx 110$ а.е. (Ghez+, 2008; Plewa, Sari, 2018);

$a = 125.066 \pm 0.084$ мсд, $r_p = 17$ св. ч ≈ 14 мсд = 120 а.е., $V_p \approx 7650$ км/с (GC, 2018, 2019).

- Появление спектроскопии на основе техники адаптивной оптики \rightarrow
Ghez et al. (2003, UCLA): первое измерение лучевой скорости звезды S2 \rightarrow
Возможность полного решения задачи: в частности, определение R_0 и массы Sgr A*, $M(\text{BH})$.

Первые полные решения (германской группой).

- Eisenhauer et al. (2003) по 5 V_r и 19 (α, δ) :

$$R_0 = 7.94 \pm 0.42 \text{ кпк}, \mathcal{M}(\text{ВН}) = (3.59 \pm 0.59) \times 10^6 M_\odot.$$

- Eisenhauer et al. (2005) по 7 V_r и 21 (α, δ) :

$$R_0 = 7.62 \pm 0.32 \text{ кпк}, \mathcal{M}(\text{ВН}) = (3.61 \pm 0.32) \times 10^6 M_\odot.$$

Но это в предположении, что лучевая скорость Sgr A* (фокуса орбиты) $V_r(\text{ВН}) = 0$ км/с относительно МСП (!), основанном на «сильных наблюдательных ограничениях сверху» на собственное движение (!) Sgr A* — 20–60 км/с.

N. (2008, 2012): игнорирование ненулевой лучевой скорости фокуса орбиты (Sgr A*) ведет к пропорциональному смещению R_0 (по единственному измерению лучевой скорости звезды V_{LSR}):

$$\delta_{\text{sys}} \equiv \frac{\sigma_{\text{sys}}(V_{\text{LSR}})}{|V_{\text{LSR}}|} = \frac{V_{\text{LSR}}(\text{BH})}{|V_{\text{LSR}}|} = \frac{\sigma_{\text{sys}}(R_0)}{R_0}. \quad (1)$$

$$V_{\text{Sgr A}^*} = 20 \div 60 \text{ км/с} \implies \\ \sigma_{\text{sys}}(R_0) = 1.3 \div 5.6 \% = (0.1 \div 0.45 \text{ кпк}) \cdot (R_0/8 \text{ кпк}).$$

Ghez et al. (2008) по 16 V_r и 27 (l, b) для S0-2 (S2):

$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = -20_{-37}^{+29} \text{ км/с}, \quad R_0 = 7.96_{-0.70}^{+0.57} \text{ кпк}, \\ \mathcal{M}(\text{BH}) = (4.07_{-0.78}^{+0.52}) \cdot 10^6 \mathcal{M}_{\odot};$$
$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = (0 \text{ км/с}) \implies R_0 = 8.36_{-0.44}^{+0.30} \text{ кпк}, \\ \mathcal{M}(\text{BH}) = (4.53_{-0.55}^{+0.34}) \cdot 10^6 \mathcal{M}_{\odot}.$$

Gillessen et al. (2009):

по 6 S-звездам, включая S2

$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = (0 \pm 5 \text{ км/с}) \Rightarrow R_0 = 8.33 \pm 0.17 \text{ кпк},$$
$$M(\text{BH}) = (4.31 \pm 0.22) \cdot 10^6 M_{\odot};$$

только по S2

$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = (0 \pm 5 \text{ км/с}) \Rightarrow R_0 = 8.48 \pm 0.38 \text{ кпк},$$
$$M(\text{BH}) = (4.45 \pm 0.41) \cdot 10^6 M_{\odot};$$

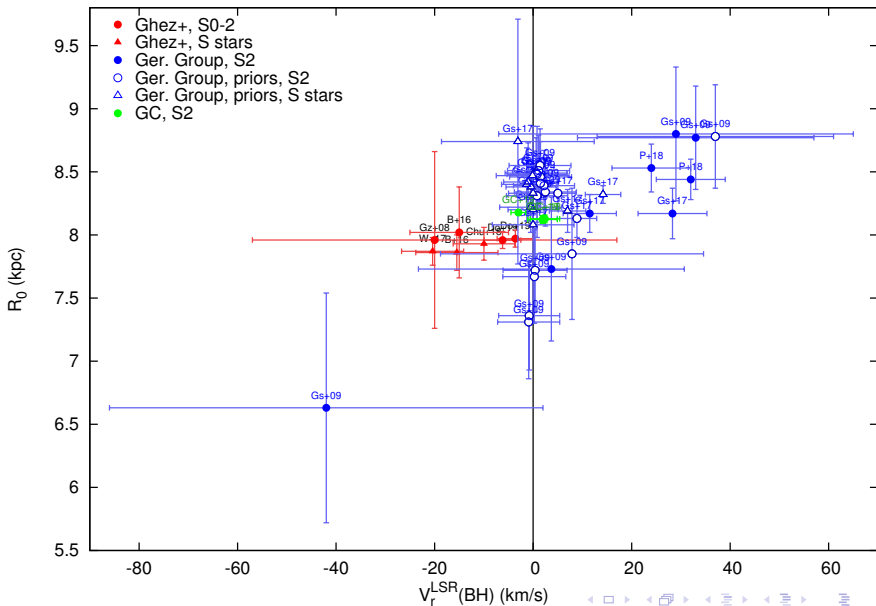
$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = +29 \pm 36 \text{ км/с}, R_0 = 8.80 \pm 0.53 \text{ кпк},$$
$$M(\text{Sgr A}^*) = (4.93 \pm 0.75) \cdot 10^6 M_{\odot};$$

только по S2 (без данных 2002 г.)

$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = (0 \pm 5 \text{ км/с}) \Rightarrow R_0 = 7.31 \pm 0.45 \text{ кпк},$$
$$M(\text{BH}) = (3.51 \pm 0.36) \cdot 10^6 M_{\odot};$$

$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = -42 \pm 44 \text{ км/с}, R_0 = 6.63 \pm 0.91 \text{ кпк},$$
$$M(\text{BH}) = (2.85 \pm 0.74) \cdot 10^6 M_{\odot}.$$

Зависимость R_0 от $V_r^{\text{LSR}}(\text{BH})$



- 2005 г.: **GRAVITY Collaboration** = MPE + LESIA (Paris Observatory+) + IPAG (Université Grenoble Alpes+) + University of Cologne + CENTRA (Universidade de Lisboa, Portugal) + ESO предложила новый инструмент — **GRAVITY** на интерферометре VLTI ESO, состоящем из четырех 8-м основных телескопов (unit telescopes) ESO; концепция аналогична радиоинтерферометрии, по сравнению с которой в оптическом/ИК-диапазоне есть принципиальные ограничения из-за меньшей длины волны; понадобился значительный технический прогресс, чтобы их преодолеть.
- 2016 г. — первый свет; по угловому разрешению инструмент эквивалентен 130-м телескопу, эквивалентная собирающая площадь 200 м^2 (16-м телескоп = $4 \times 8\text{-м}$ телескоп); предельная величина $K \approx 17$ (на 2.2 мкм).

- С 2017 г. — GRAVITY Collaboration выполняет оптическую/ИК-интерферометрию в рамках мониторинга орбит S-звезд. Точность астрометрии 20–150 мксд (увеличение точности с эпохи спекл на два порядка, ежедневно видят изменения положения S2).

GRAVITY Collaboration (2019).

Методы: χ^2 -минимизация, модель шума от нераспознанных звезд. Непосредственный учет релятивистских поправок — гравит. красного смещения и трансверсального доплеровского эффекта. Учет эффекта Рёмера. Поправки первого порядка от Шварцшильд-овской метрики.

Для S0-2 в варианте с моделью шума (noise model fit):

$$R_0 = 8178 \pm 13_{\text{stat.}} \pm 22_{\text{sys.}} \text{ пк } (\pm 26 \text{ пк}),$$

$$M(\text{Sgr A}^*) = (4.152 \pm 0.014) \times 10^6 M_{\odot},$$

$$V_r(\text{Sgr A}^*) = -3.0 \pm 1.5 \text{ км/с.}$$

Решает ли это проблему R_0 ? I

Очевидно, еще нет. . .

Что еще нужно?

- Результаты по S2/S0-2 внутри каждой группы должны перестать «эволюционировать» со временем.
- Результаты по S2/S0-2, полученные двумя группами, должны согласовываться друг с другом. (Желательно появление какой-то третьей независимой группы.)
Но это лишь результаты по одной звезде!
- Должны появиться столь же надежные и согласующиеся результаты (в обеих группах) хотя бы по какой-нибудь еще S-звезде или даже по всей совокупности S-звезд, но без S2/S0-2. И эти результаты должны согласовываться с результатами по S2/S0-2.

Решает ли это проблему R_0 ? II

GRAVITY Collaboration (2019).

Для S0-2 :

$$R_0 = 8178 \pm 13_{\text{stat.}} \pm 22_{\text{sys.}} \text{ пк } (\pm 26 \text{ пк}),$$

$$M(\text{Sgr A}^*) = (4.152 \pm 0.014) \times 10^6 M_{\odot},$$

$$V_r(\text{Sgr A}^*) = -3.0 \pm 1.5 \text{ км/с.}$$

Do+ (2019).

Для S0-2:

$$R_0 = 7.971 \pm 0.059_{\text{stat.}} \pm 0.032_{\text{sys.}} \text{ пк } (\pm 67 \text{ пк}),$$

$$M(\text{Sgr A}^*) = (3.984 \pm 0.058 \pm 0.026) \times 10^6 M_{\odot},$$

$$V_r(\text{Sgr A}^*) = -3.6 \pm 3.7 \text{ км/с}$$

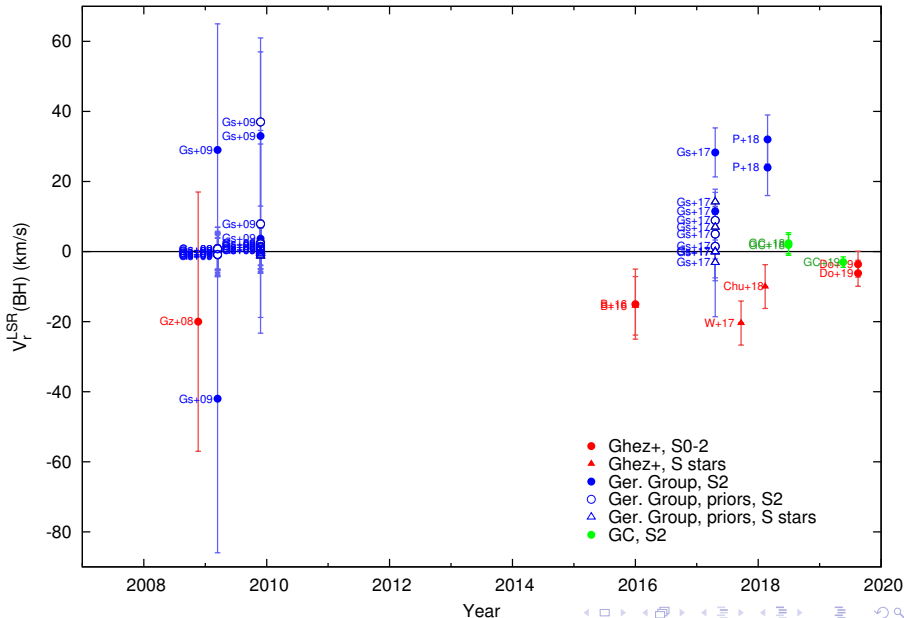
$$\Upsilon = 0.80 \pm 0.16 \pm 0.047 \text{ (параметр красного смещения).}$$

$$R_0 = 7.946 \pm 0.050 \text{ (stat.)} \pm 0.032 \text{ (sys.) кпк,}$$

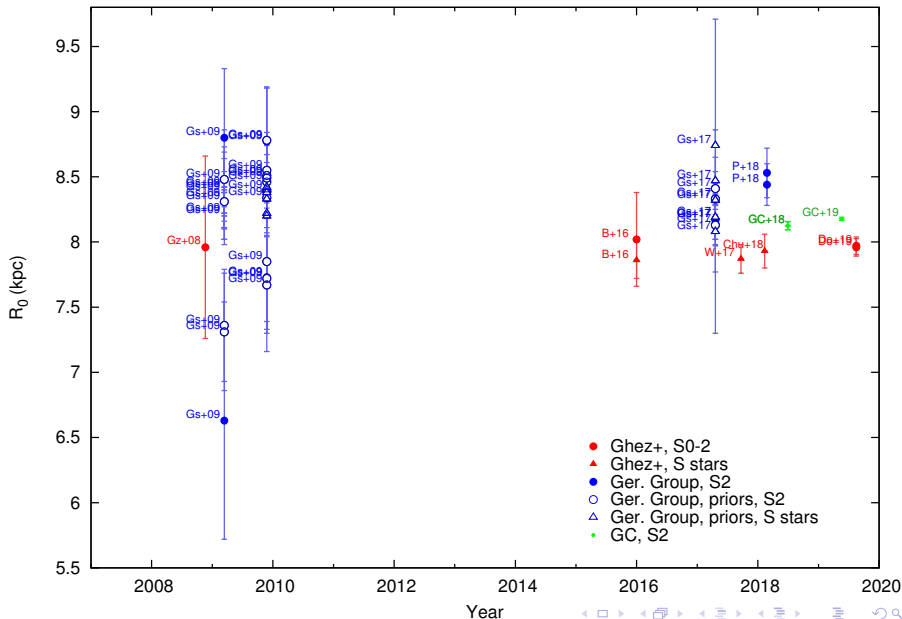
$$\Upsilon = 1.$$

Разница по R_0 значима на уровне 3.6σ !

Эволюция оценок $V_r^{\text{LSR}}(\text{BH})$



Эволюция оценок R_0 по орбитам S-звезд [$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) \neq 0$]



Находится ли Sgr A* (точно) в барицентре Галактики? I

⇒ Можно ли связать с Sgr A* инерциальную систему Галактоцентрических координат?

Есть разные точки зрения.

- Reid (2003), Reid & Brunthaler (2004), Reid (2008), Bland-Hawthorn & Gerhard (2016), GRAVITY Collaboration и др.:

Sgr A* покоится относительно динамического центра Галактики (в пределах неопределенности).

Основной аргумент: незначимо отличное от нуля пекулярное собственное движение Sgr A*,
 $\mu_{\text{pec}}(\text{BH}) = (\mu_l^0(\text{BH}), \mu_b^{\text{LSR}}(\text{BH}))$.

Находится ли Sgr A* (точно) в барицентре Галактики? II

- Точное совпадение Sgr A* с барицентром Галактики не доказано.

Blitz (1994): на статус динамического центра могут претендовать и другие центральные концентрации масс, например, Sgr B2. Нельзя исключить, что они совершают осцилляции относительно точки минимума потенциала диска и сфероида Галактики. Центральность Sgr A*, по крайней мере на указанных масштабах, объективно нельзя считать бесспорной.

Аргументы:

- Нулевая вертикальная скорость $V_b^{\text{LSR}}(\text{BH})$ не обязательно означает отсутствие вертикальных осцилляций Sgr A*.
- Современные измерения не исключают $|V_l^0(\text{BH})|$ порядка нескольких км/с.
- $V_b^{\text{LSR}}(\text{BH}) = V_l^0(\text{BH}) = 0$ км/с не исключают ненулевую лучевую скорость $V_r^0(\text{BH})$.

Находится ли Sgr A* (точно) в барицентре Галактики? III

- Кондратьев, Орлов (2008): за счет сближений с шаровыми скоплениями амплитуда дрейфа центральной черной дыры нашей Галактики может достигать нескольких парсек.
 - Batcheldor+ (2010): черная дыра в M87 смещена на 6.8 ± 0.8 пк от центра.
 - Di Cintio+ (2019) исследовали динамику сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в ядрах галактик при помощи полуаналитической модели, включающей динамическое трение и гравитационное взаимодействие со звездами: СМЧД испытывает движение броуновского вида и достигает (наблюдаемого) смещения ≈ 6 пк за 10^{10} лет.
- Comerford & Greene (2014): активные ядра галактик, испытывающие мерджер, имеют кинематические смещения ядра относительно вмещающей галактики ($50 < |v| < 410$ км/с).

Данные измерений пекулярной скорости Sgr A*. I

Пекулярная скорость Sgr A*:

$$V_{\text{pec}}(\text{BH}) = (V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}), V_l^0(\text{BH}), V_b^{\text{LSR}}(\text{BH})).$$

Пекулярная скорость Солнца относительно Местного стандарта покоя (МСП, LSR)

Работа	u_{\odot}^{LSR} , км/с	v_{\odot}^{LSR} , км/с	w_{\odot}^{LSR} , км/с
Schönrich+ (2010)	$11.10^{+0.69}_{-0.75}$	12.24 ± 0.47	$7.25^{+0.37}_{-0.36}$
Bland-Hawthorn & Gerhard (2016)	10.0 ± 1	11.0 ± 2	7.0 ± 0.5

- Гелиоцентр. скорость $V_r(\text{BH}) = V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) - u_{\odot}^{\text{LSR}} \implies V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = V_r(\text{BH}) + u_{\odot}^{\text{LSR}}$.

GRAVITY Collaboration (2019):

$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = -3.0 \pm 1.5 \text{ км/с при } u_{\odot} = 11.10 \text{ км/с,}$$

$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = -4.1 \pm 1.5 \text{ км/с при } u_{\odot} = 10.0 \text{ км/с.}$$

$$(V_r(\text{BH}) = -14.1 \pm 1.5 \text{ км/с.})$$

Данные измерений пекулярной скорости Sgr A*. II

- $\mu_l(\text{BH}) = \mu_l^0(\text{BH}) - \omega_\odot, \quad \omega_\odot = \omega_0 + v_\odot/R_0,$
 ω_\odot — угловая скорость Солнца,
 ω_0 — угловая скорость нелокального стандарта покоя
центроида звезд,
 v_\odot — остаточная скорость Солнца относительно этого
стандарта \implies

$$\mu_l^0(\text{BH}) = \mu_l(\text{BH}) + \omega_\odot,$$

$$V_l^0(\text{BH}) = \mu_l^0(\text{BH})R_0 = [\mu_l(\text{BH}) + \omega_\odot]R_0.$$

Reid & Brunthaler (2004):

$$\mu_l(\text{BH}) = -6.379 \pm 0.026 \text{ мсд/год} = -30.24 \pm 0.12 \text{ км/с/кпк}$$

(при $k = 4.7406$) \implies При $R_0 = 8$ кпк

Работа	$\omega_\odot,$ км/с/кпк	$V_0(\text{BH}),$ км/с
Reid+ (2014)	30.57 ± 0.43	$+2.6 \pm 3.6$
Расторгуев+ (2017)	$30.72 \pm \leq 0.47$	$+3.8 \pm \leq 3.9$
...
	$31.16 \pm \leq 0.54$	$+7.4 \pm \leq 4.4$

- $\mu_b(\text{BH}) = \mu_b^{\text{LSR}}(\text{BH}) - w_{\odot}^{\text{LSR}}/R_0 \implies$
 $V_b^{\text{LSR}}(\text{BH}) = V_b(\text{BH}) + w_{\odot}^{\text{LSR}} = \mu_b(\text{BH})R_0 + w_{\odot}^{\text{LSR}}.$

Reid & Brunthaler (2004):

$$\mu_b(\text{BH}) = -0.202 \pm 0.019 \text{ мсд/год} = -0.958 \pm 0.090 \text{ км/с/кпк}$$

\implies

$w_{\odot}^{\text{LSR}},$ км/с	$V_b^{\text{LSR}}(\text{BH}), \text{ км/с}$		
	$R_0 = 7.8 \text{ кпк}$	$R_0 = 8 \text{ кпк}$	$R_0 = 8.2 \text{ кпк}$
7.25	-0.22 ± 0.70	-0.41 ± 0.72	-0.61 ± 0.74
7.0	-0.47 ± 0.70	-0.66 ± 0.72	-0.86 ± 0.74

Возможное орбитальное движение Sgr A* в сглаженном потенциале Галактики

Задача: оценить размах возможных осцилляций центральной черной дыры в регулярном поле Галактики при современных оценках пекулярной скорости Sgr A*.

Пробное тело помещалось в центр Галактики:

$$(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$$

Численное интегрирование уравнений движения.

Начальные скорости пробного тела (в км/с)

Варианты	$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH})$	$V_l^0(\text{BH})$	$V_b^{\text{LSR}}(\text{BH})$
«Малый номинал»	-3.0	+3	
«Большой номинал»	-4.1	+7	-0.9
« 2σ »	-7.1	+16	-2.3

Диск + сферическое гало + эллипсоидальный бар + сфероидальный балдж (Casetti-Dinescu+, 2013, кроме балджа).

Диск: потенциал Миямото–Нагаи

$$\Phi(R, z) = - \frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left(a + \sqrt{z^2 + b^2}\right)^2}}, \quad (2)$$

$a = 6.5$ кпк, $b = 0.26$ кпк, $M_d = 1.1 \cdot 10^{11} M_\odot$;

R — галактоосевое расстояние, $R_0 = 8$ кпк.

Гало: логарифмическая модель

$$\Phi(r) = v_h^2 \ln(r^2 + d^2), \quad (3)$$

r — галактоцентрическое расстояние;

$d = 12$ кпк, $v_h = 121.9$ км/с.

Бар: трехосный эллипсоид с неоднородным распределением плотности — потенциал Феррера

$$\rho(m^2) = \begin{cases} \rho_0 (1 - m^2/a_1^2)^n, & m \leq a_1, \\ 0, & m \geq a_1; \end{cases} \quad n = 2; \quad (4)$$

$$m^2 \equiv a_1^2 \sum_{i=1}^3 \frac{x_i^2}{a_i^2}, \quad (5)$$

x_1, x_2, x_3 — координаты в системе отсчета бара

(x_1 — вдоль большой полуоси, x_2 — вдоль малой полуоси, x_3 — вдоль оси z);

$a_1 = 3.14$ кпк, $a_2 = 1.178$ кпк, $a_3 = 0.81$ кпк — полуоси бара вдоль x_1, x_2, x_3 соответственно.

$\varphi_0 = 25^\circ$ — угол наклона бара к линии центр–антицентр (галактоцентрическая долгота ближнего к Солнцу края бара).

$\omega_{\text{bar}} = 20, 40, 60$ км/с/кпк — угловая скорость вращения бара.

Балдж

Модель Хернквиста, использованная Casetti-Dinescu+ (2013),

$$\Phi(r) = -\frac{GM_b}{r+c}, \quad (6)$$

оказалась непригодной для целей настоящего исследования \implies
Рассмотрено три других варианта задания потенциала балджа.

- Модель балджа Миямото–Нагаи

$$\Phi(R, z) = -\frac{GM_b}{\sqrt{R^2 + \left(a_1 + \sqrt{z^2 + b_1^2}\right)^2}}. \quad (7)$$

где $a_1 = 0.04$ кпк, $b_1 = 0.2$ кпк для $R_0 = 8.5$ кпк (Нинкович, 1992) были умножены на поправочный коэффициент $8/8.5$.

- Сфера Пламмера

$$\Phi(r) = -\frac{GM_b}{\sqrt{r^2 + c_1^2}}, \quad (8)$$

$c_1 = 0.3$ кпк (Кондратьев, Орлов, 2008).

- Изохронный потенциал (Binney, Tremaine, 2008)

$$\Phi(r) = -\frac{GM_b}{b_1 + \sqrt{b_1^2 + r^2}}, \quad (9)$$

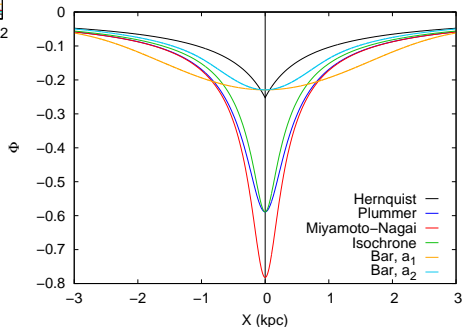
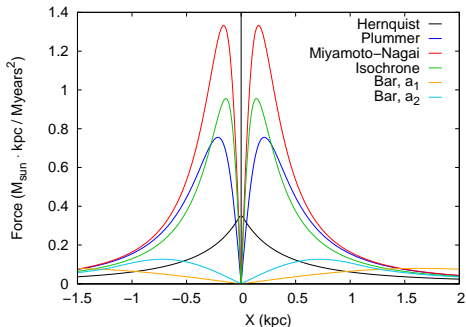
где величина $b_1 = 0.15$ кпк выбрана такой, чтобы значение потенциала в минимуме было близко к значению потенциала Пламмера, а сила принимала промежуточное значение между значениями в модели Пламмера и Миямото–Нагаи.

Bland-Hawthorn & Gerhard (2016): для массы классического балджа можно указать только верхний предел.

Варианты:

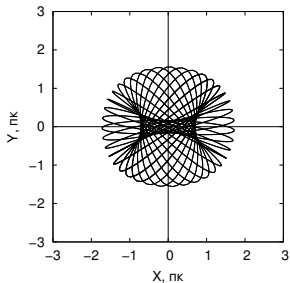
- Примем максимальный вклад балджа в массу центральной компоненты \implies массу бара будем считать равной 80% приведенного в работе Касетти-Динеску значения — $3.12 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ — и массу балджа равной $0.78 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.
- Компоненты балджа нет, только бар (наиболее вероятная модель). Тогда его масса $3.9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

Сила и потенциал для моделей балджа и бара.

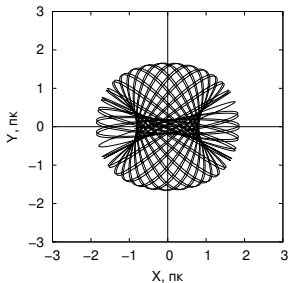


$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = -3 \text{ км/с}, V_l^0(\text{BH}) = 0 \text{ км/с}$$

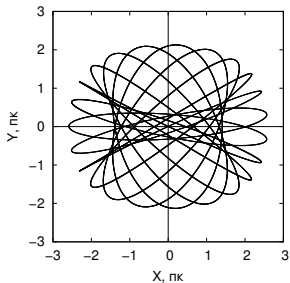
Потенциал Миямото–Нагаи, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



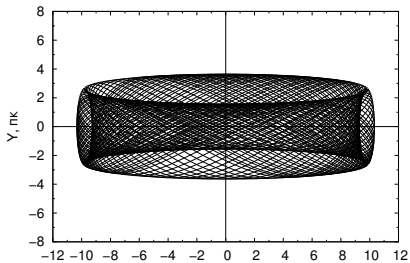
Изохронный потенциал, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Потенциал Пламмера, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



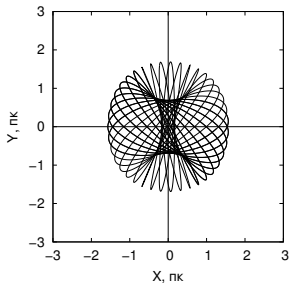
Потенциал только бара, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



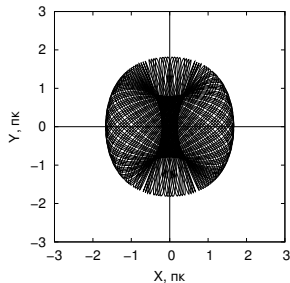
Navigation icons: back, forward, search, and other controls.

$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = 0 \text{ км/с}, V_l^0(\text{BH}) = +3 \text{ км/с}$$

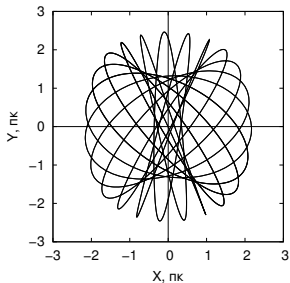
Потенциал Миямото–Нагаи, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



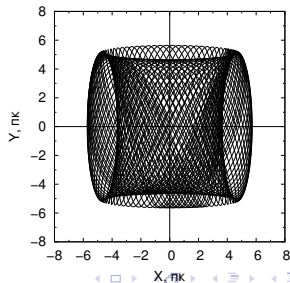
Изохронный потенциал, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Потенциал Пламмера, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$

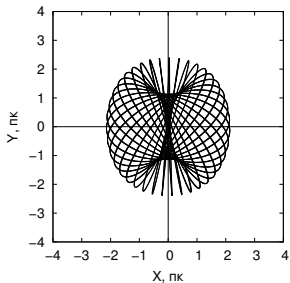


Потенциал только бара, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$

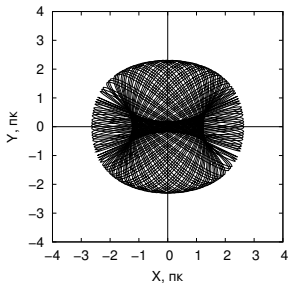


$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = -3 \text{ км/с}, V_l^0(\text{BH}) = +3 \text{ км/с}$$

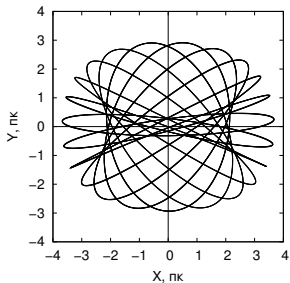
Потенциал Миямото–Нагаи, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



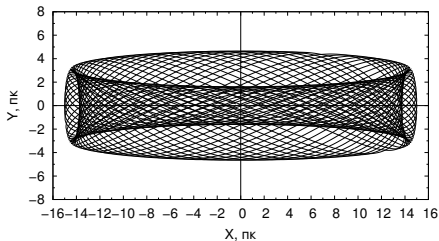
Изохронный потенциал, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Потенциал Пламмера, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$

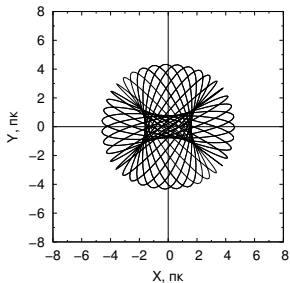


Потенциал только бара, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$

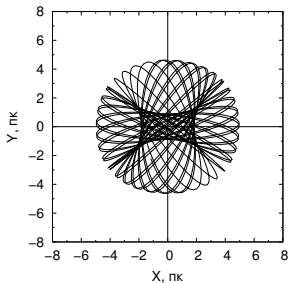


$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = -4.1 \text{ км/с}, V_l^0(\text{BH}) = +7 \text{ км/с}$$

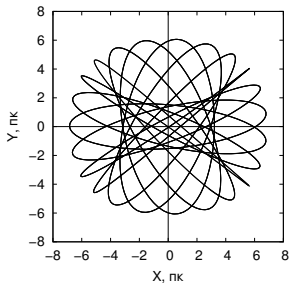
Потенциал Миямото–Нагаи, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



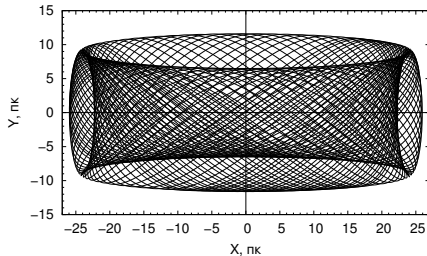
Изохронный потенциал, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Потенциал Пламмера, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$

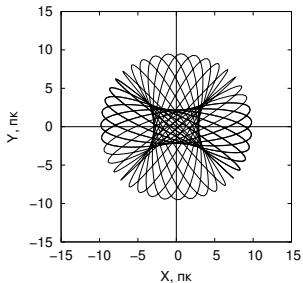


Потенциал только бара, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$

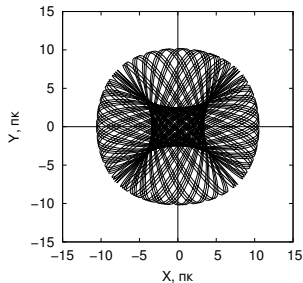


$$V_r^{\text{LSR}}(\text{BH}) = -7 \text{ км/с}, V_l^0(\text{BH}) = +16 \text{ км/с} (2\sigma)$$

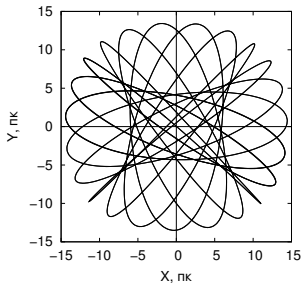
Потенциал Миямото–Нагаи, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



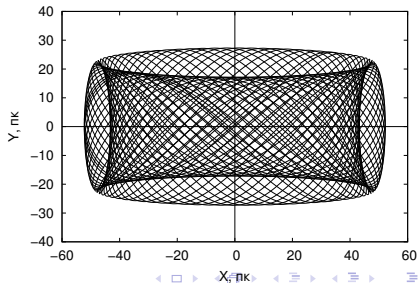
Изохронный потенциал, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Потенциал Пламмера, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Бар без балджа, $\omega = 40 \text{ км/с/кпк}$



Положение Sgr A* относительно средней плоскости диска Галактики

Sgr A*: $(l, b) = (-0^{\circ}056, -0^{\circ}046)$ (Reid & Brunthaler, 2004)

$\implies Z(\text{BH}) = (-6.4 \text{ пк}) \cdot (R_0/8 \text{ кпк}).$

$Z_0 = 25 \pm 5 \text{ пк}$ (Jurić+, 2008) \implies

Тогда расстояние от Sgr A* до плоскости диска

$z(\text{BH}) = Z_0 + Z(\text{BH}) = 18.6 \pm 5 \text{ пк}.$

Варианты:

$z(\text{BH}) = 18.6 \text{ пк}$ («номинал»),

$z(\text{BH}) = 9 \text{ пк}$ (« σ »).

Параметры вертикальных колебаний Sgr A*

Начальная скорость — нулевая.

Начальные координаты: $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, z_0)$.

T_0 — период вертикальных колебаний,

$W_{\max} = \max |W|$ — амплитуда изменения вертикальной скорости W ,

ΔT_W — продолжительность фазы $|W| \leq 2.7$ км/с.

Модель балджа	T_0 , млн. лет	W_{\max} , км/с	ΔT_W , млн. лет	ΔT_W , % от T_0
$z_0 = 18.6$ пк (номинал)				
Модель Пламмера	4.85	23.5	0.31	6.4
Модель Миямото–Нагаи	3.13	36.4	0.13	4.1
Изохронный потенциал	3.65	32.0	0.18	4.8
Балджа нет (только бар)	9.27	12.6	1.11	12.0
$z_0 = 9.0$ пк (2σ)				
Модель Пламмера	4.84	11.1	0.64	13.4
Модель Миямото–Нагаи	3.12	17.3	0.27	8.5
Изохронный потенциал	3.64	14.8	0.36	9.9
Балджа нет (только бар)	9.27	5.8	2.39	25.9

- Несмотря на прорывные успехи проекта GRAVITY и американской группы проблему расстояния до центра Галактики (R_0) пока нельзя считать решенной, даже в понимании под центром именно Sgr A*.
- При современных оценках пекулярной скорости центральной черной дыры ее осцилляции в регулярном поле в плоскости Галактики могут приводить к смещениям этого объекта относительно барицентра до десятков парсек.

- Масштаб осцилляций сильно зависит от наличия/отсутствия компоненты классического балджа в дополнение к бару: при номинальных значениях компонент пекулярной скорости Sgr A* размах колебаний не превышает 6 пк в случае наличия балджа и доходит до 25 пк, если балджа нет; при компонентах скорости в пределах уровня значимости 2σ колебания могут составлять 15 и 50 пк соответственно.
- Несмотря на малые значения измеренной линейной вертикальной скорости центральной черной дыры, сейчас нельзя исключить вертикальные ее осцилляции, т.е. ее расположение вне плоскости диска Галактики.

В настоящий момент нельзя сделать окончательные выводы, но прогрессе в этом направлении может быть очень быстрым. . .