

О лучевой скорости сверхмассивной черной дыры в центре Галактики

И. И. Никифоров, А. В. Веселова

Санкт-Петербургский государственный университет

Конференция «Современная звездная астрономия»,
посвященная 70-летию со дня рождения
Леонида Петровича Осипкова

Кавказская Горная Обсерватория ГАИШ МГУ, 9 июня 2016 г.

$V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ как фундаментальный параметр Галактики

$V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ — лучевая скорость сверхмассивной черной дыры в центре Галактики (Sgr A^*) относительно МСП.
Новый фундаментальный параметр Галактики?

- Фундаментальное значение $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$.

Находится ли Sgr A^* **точно** в барицентре Галактики? \implies

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

Если да, с какой точностью и на каких масштабах?

- Прикладное значение $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$:

это явный или неявный параметр в ряде модельных задач, включающих, в частности, определение расстояния от Солнца до центра Галактики (R_0) и массы центральной черной дыры.

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

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).

Есть разные точки зрения.

- Reid (2003), Reid & Brunthaler (2004), Reid (2008),
Bland-Hawthorn & Gerhard (2016) и др.:
Sgr A* **покоится относительно динамического центра**
Галактики (в пределах неопределенностей).

Аргументы:

- $V_b^0(\text{BH}) \equiv V_b(\text{BH}) - (-w_\odot) = (-0.4 \pm 0.9 \text{ км/c}) \cdot (R_0/8 \text{ кпк})$
(Reid & Brunthaler, 2004)
при $w_\odot = 7.17 \pm 0.38 \text{ км/c}$ (Dehnen & Binney 1998).

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

- $\mu_l^0(\text{BH}) = \mu_l(\text{BH}) - (-\omega_\odot)$.

Reid, Brunthaler (2004): $\mu_l(\text{BH}) = -30.24 \pm 0.12 \text{ км/с/кпк}$.

Reid+ (2014) по 80 мазерам: $\omega_\odot = 30.57 \pm 0.43 \text{ км/с/кпк}$

$$\Rightarrow \mu_l^0(\text{BH}) = +0.33 \pm 0.45 \text{ км/с/кпк},$$

$$V_l^0(\text{BH}) = (+2.6 \pm 3.6 \text{ км/с}) \cdot (R_0/8 \text{ кпк}).$$

Rastorguev+ (2016) по 123 мазерам:

$$\omega_\odot = 30.98 \pm 0.55 \text{ км/с/кпк}$$

$$\Rightarrow \mu_l^0(\text{BH}) = +0.74 \pm 0.56 \text{ км/с/кпк},$$

$$V_l^0(\text{BH}) = (+5.9 \pm 4.5 \text{ км/с}) \cdot (R_0/8 \text{ кпк}).$$

- Merritt+ (2007): броуновское движение объекта Sgr A* вследствие возмущений от близких к нему звезд $\sim 0.2 \text{ км/с}$.
- Sgr A* — **центральная черная дыра** \Rightarrow из-за динамического трения должна была быстро потерять орбитальный момент и по спирали попасть в барицентр Галактики (как и в других галактиках).

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

- 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 сфера Галактики. Центральность Sgr A*, по крайней мере на указанных масштабах, объективно нельзя считать бесспорной.

Аргументы:

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

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

- 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.

Comerford & Greene (2014): активные ядра галактик, испытывающие мерджер, имеют кинематические смещения ядра относительно вмещающей галактики ($50 < |v| < 410$ км/с).

Параметр $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ в задаче моделирования орбитального движения S-звезд вокруг Sgr A*. |

UCLA group (Ghez+ 2003, 2005), MPE–Cologne group
(оценивание R_0 ; Eisenhauer+, 2003, 2005; Trippe+ 2006):
в предположении $V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = 0 \text{ км/с}$.

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}):

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

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

Параметр $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ в задаче моделирования орбитального движения S-звезд вокруг Sgr A*. //

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

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

Параметр $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ в задаче моделирования орбитального движения S-звезд вокруг Sgr A*. |||

Gillessen et al. (2009, *MPE–Cologne group*):

по 6 S-звездам, включая S2

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

только по S2

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

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

только по S2 (без данных 2002 г.)

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

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

Параметр $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ в задаче моделирования орбитального движения S-звезд вокруг Sgr A*. IV

Выводы по результатам моделирования орбитального движения S-звезд:

- Оценки $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ значимо от нуля не отличаются.
- Современная точность измерения $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ допускает значения порядка нескольких десятков км/с.
- Эмпирическое соотношение между $V_{\text{LSR}}(\text{BH})$ и систематическим смещением оценки R_0 этим методом:

$$\Delta R_0 \approx +[0.01 \div 0.02 \text{ кпк}/(\text{км}/\text{с})] \cdot V_{\text{LSR}}(\text{BH}). \quad (2)$$

- Для достижения точности $\sigma[V_{\text{LSR}}(\text{BH})] = 1 \text{ км}/\text{с}$ нужно увеличение числа измерений лучевых скоростей S-звезд в $\sim 10^3$ раз (при прочих равных условиях)...

Feldmeier+ (2014). I



A. Feldmeier, N. Neumayer, A. Seth, R. Schödel,
N. Lützgendorf, P. T. de Zeeuw, M. Kissler-Patig,
S. Nishiyama, C. J. Walcher. "Large scale kinematics and
dynamical modelling of the Milky Way nuclear star cluster."
A&A, 570, A2 (2014).

Наблюдения звездного скопления в ядре Галактики
[эффективный радиус $r_{\text{eff}} \sim 110 \div 127'' = 4.2 \div 5$ пк, масса
 $(2 \div 3) \cdot 10^7 M_\odot$] на спектрографе ISAAC (VLT) с длинной
щелью в ИК-диапазоне \Rightarrow Спектроскопическая карта
интегрального излучения для поля центральной площадки
 $\sim 9.5 \times 8$ пк и для 6 меньших полей до 19 пк вдоль
Галактической плоскости. Кинематический анализ выполнялся
для диапазона $\sim 2.2902 \div 2.365$ мкм, содержащего 4 линии
поглощения CO, наиболее заметные в спектрах холодных звезд
поздних типов с возрастом несколько миллиардов лет.

Feldmeier+ (2014). II

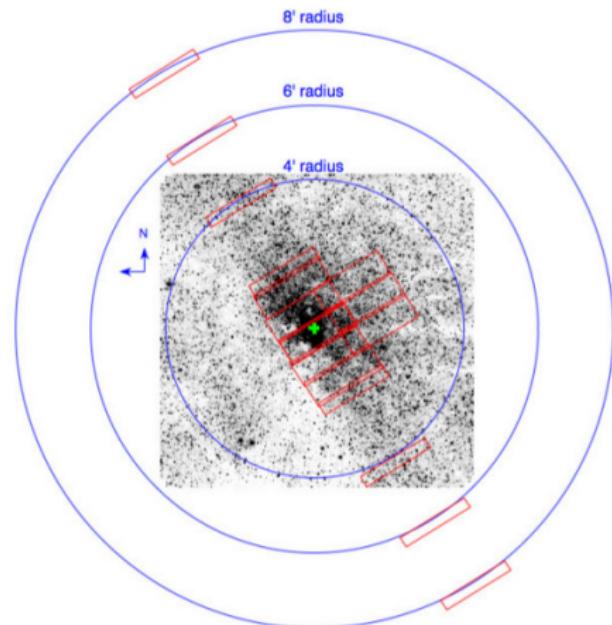


Fig. 1. Positions of the regions scanned with ISAAC (red rectangles). The underlying image is from IRSF/SIRIUS in K_s band (Nishiyama et al. 2006). The circles denote a distance of 4', 6', and 8' from the position of Sgr A*, respectively, and the green cross is the position of Sgr A*. The outer fields are not exactly symmetric due to the drift towards the south-west during the acquisition.

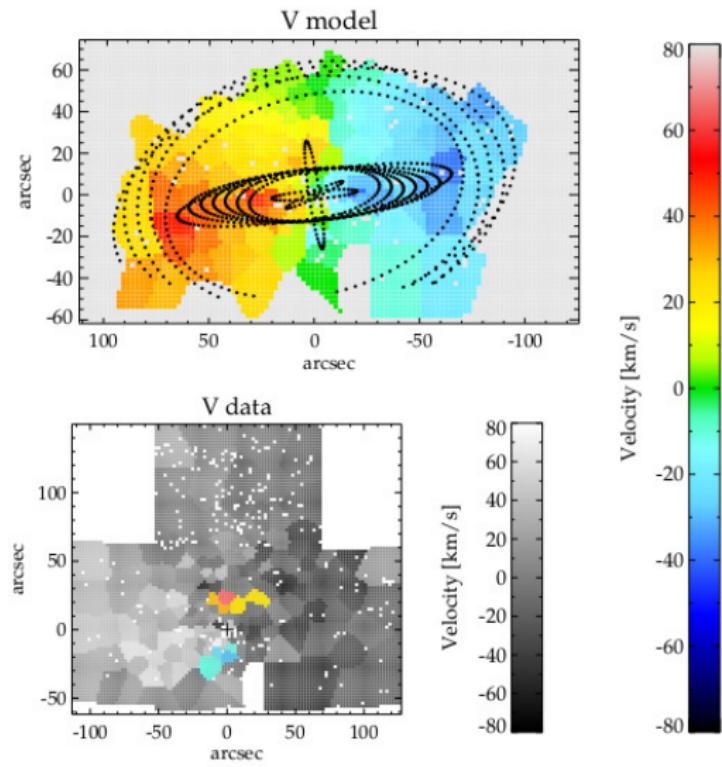
Feldmeier+ (2014). III

Кинематика скопления оказалась сложной: подструктуры.

I. „Холодная“ с ортогональным вращением на $r \leq 20'' \sim 0.8$ пк.

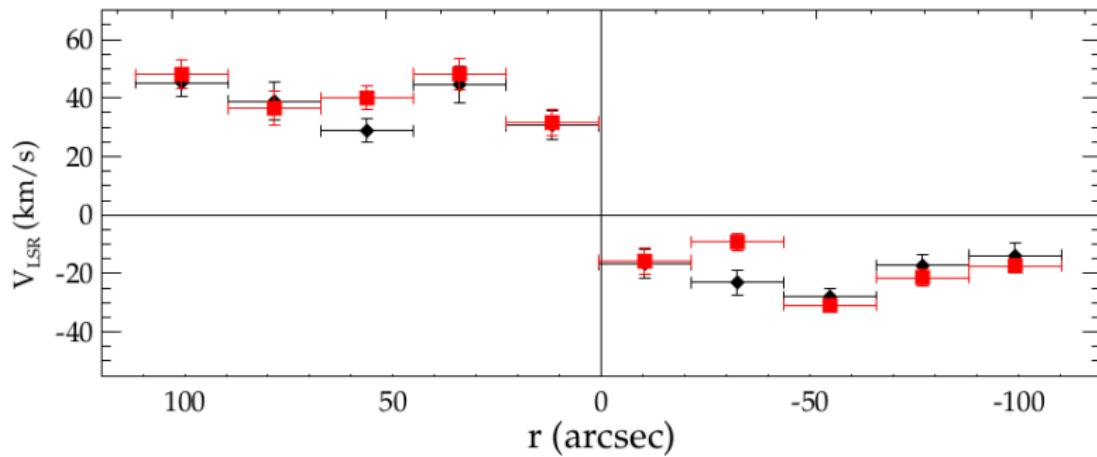
II. С вращением $\sim 9^\circ \pm 3^\circ$ к плоскости Галактики, $q_{\text{kin}} = 0.17\text{--}0.37$, $r \sim 30\text{--}70''$.

III. С вращением под тем наклоном, $q_{\text{kin}} = 0.57\text{--}0.74$, $r \sim 70\text{--}100''$.



Feldmeier+ (2014). IV

Радиальные профили скорости



Абсолютные скорости на восточной стороне на >10 км/с выше, чем на западной.

Задачи работы

- Параметрическое моделирование радиальных профилей скорости звездного скопления в ядре.
- Возможные интерпретации асимметрии скорости восток–запад.

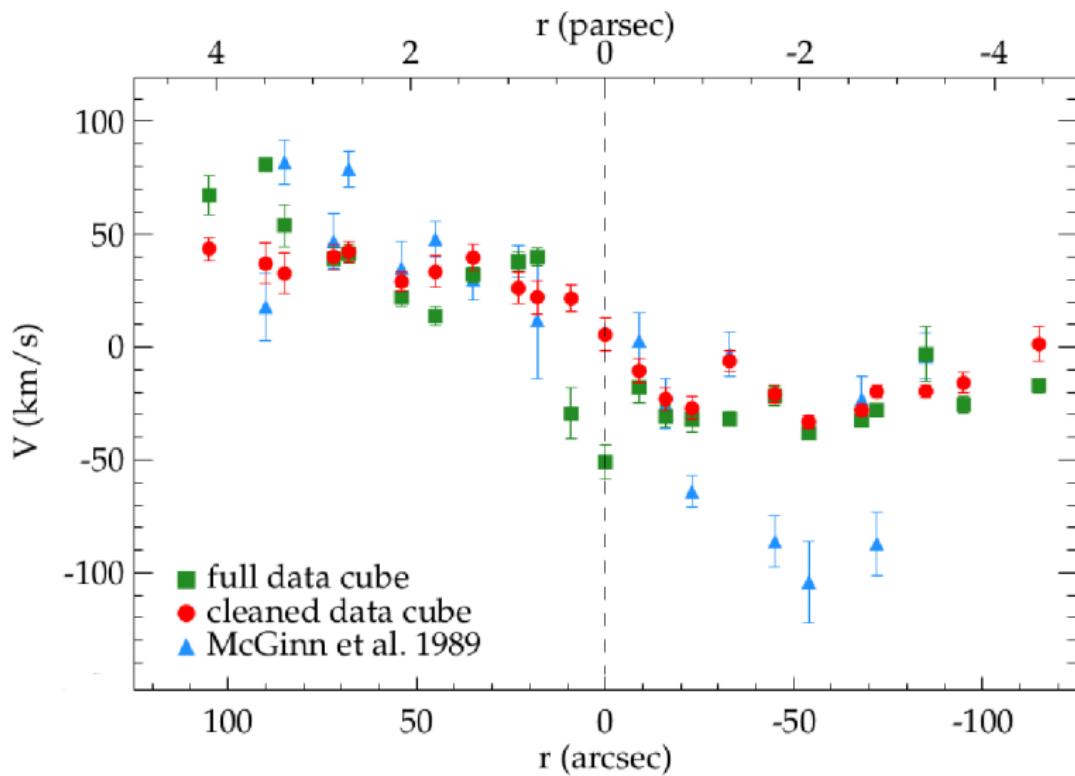
Ненулевая скорость Sgr A* относительно Местного стандарта покоя?

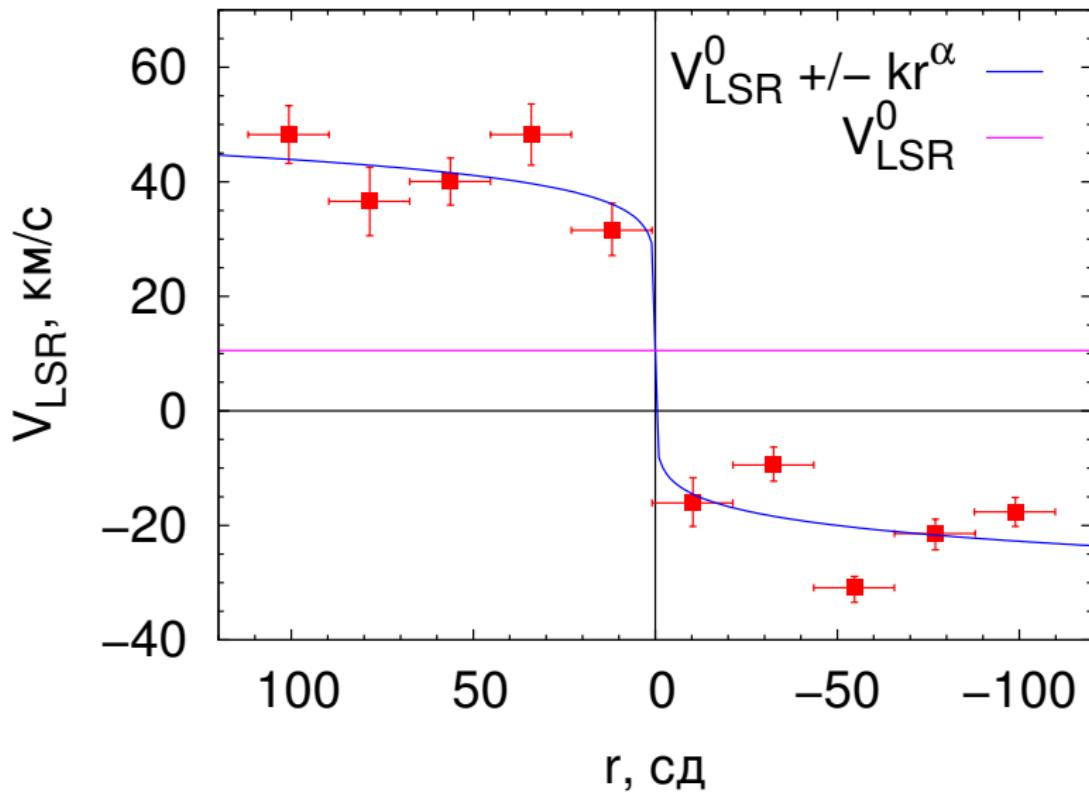
$$V_{\text{LSR}}(r) = \begin{cases} V_{\text{LSR}}^0 + k(r - r_0)^\alpha, & r \geq r_0; \\ V_{\text{LSR}}^0 - k(r - r_0)^\alpha, & r \leq r_0; \end{cases} \quad \alpha < 1; \quad (3)$$
$$\mathbf{p} = (V_{\text{LSR}}^0, r_0, \alpha).$$

Параметр r_0 обусловлен плохо \implies Принято $r_0 = 0''$
(направление на Sgr A*).

Вариант	V_{LSR}^0 , км/с	k км/с/(сд $^\alpha$)	α
Скан 22" для наклона 9° , $\sigma_r = 0$	$+10.6 \pm 2.9$	18.9 ± 1.8	$0.12^{+0.35}_{-0.20}$
Скан 22" для наклона 9° , $\sigma_r \neq 0$	$+10.6 \pm 1.9$	18.7 ± 1.1	$0.13^{+0.19}_{-0.12}$
Скан 22" для наклона 0° , $\sigma_r = 0$	$+7.0 \pm 2.4$	23.0	$0.06^{+0.12}_{-0.11}$
Скан 22" для наклона 0° , $\sigma_r \neq 0$	$+7.0 \pm 1.5$	23.0 ± 1.2	$0.059^{+0.161}_{-0.068}$
Скан 20" для наклона 0° , $\sigma_r = 0$	$+5.8 \pm 1.9$	$13.8^{+4.8}_{-5.8}$	$0.180^{+0.100}_{-0.087}$

Скорость движения центра вращения (Sgr A*) относительно МСП значимо отличается от нуля и для разных вариантов профилей скорости составляет
 $V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = (+6 \div +11) \pm 2$ км/с.



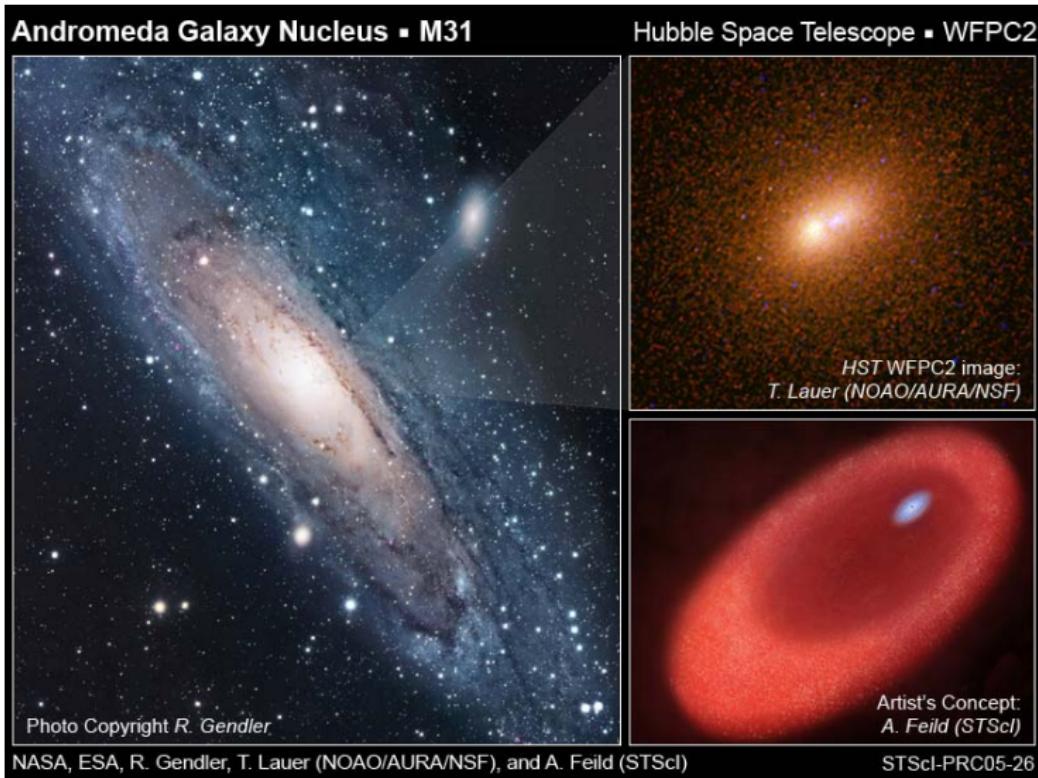


Возможные интерпретации. I

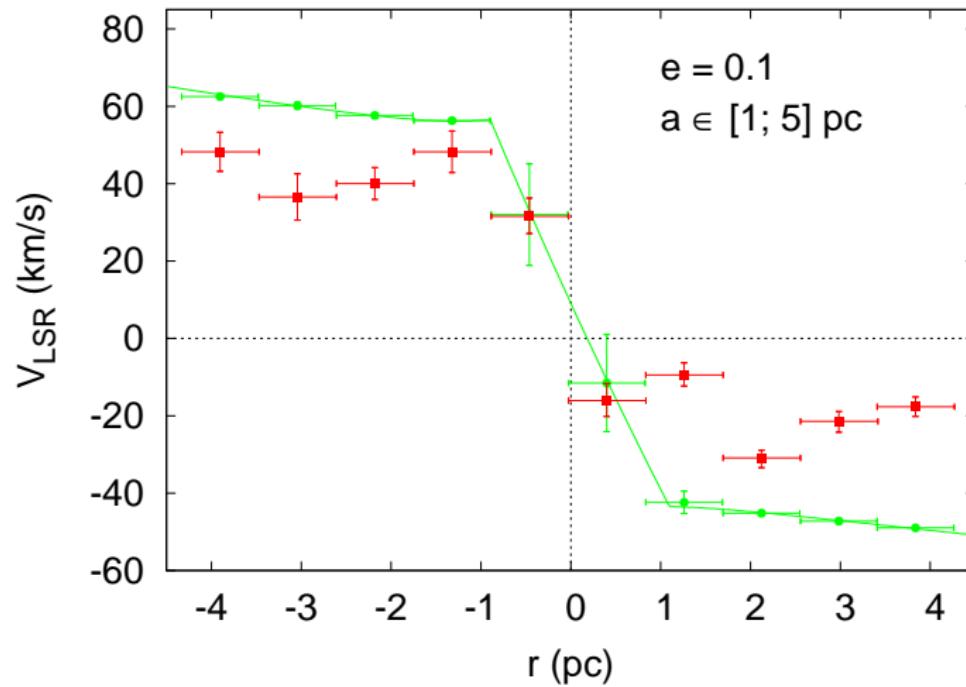
- Эксцентричность центрального скопления.

M31 имеет эксцентричный диск в ядре: P1, P2, P3 (черная дыра); P2 и P3 близки к фотометрическому центру балджа. Расстояние от P1 до P2+P3 в проекции 0.5 сд, что для расстояния до M31 770 кпк дает 1.9 пк.

Возможные интерпретации. II



Возможные интерпретации. III



Возможные интерпретации. IV

Аргументы против.

- Разнородные по кинематике участки профиля приводят к сходной величине V_{LSR}^0 .

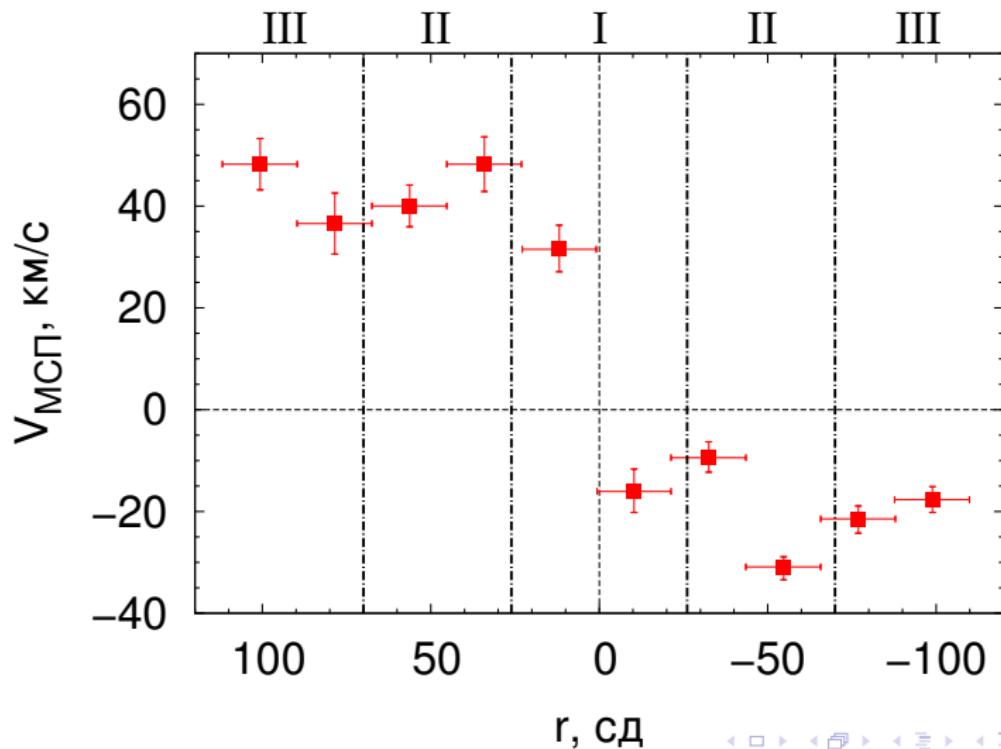
I: $V_{\text{LSR}}^0 = +7.7 \pm 3.2 \text{ км/с.}$

II: $V_{\text{LSR}}^0 = +12.0 \pm 1.7 \pm 3.8 \text{ км/с.}$

III: $V_{\text{LSR}}^0 = +11.4 \pm 1.7 \pm 1.8 \text{ км/с.}$

Среднее (I + II + III): $V_{\text{LSR}}^0 = +10.14 \pm 1.1 \pm 1.7 \text{ км/с.}$

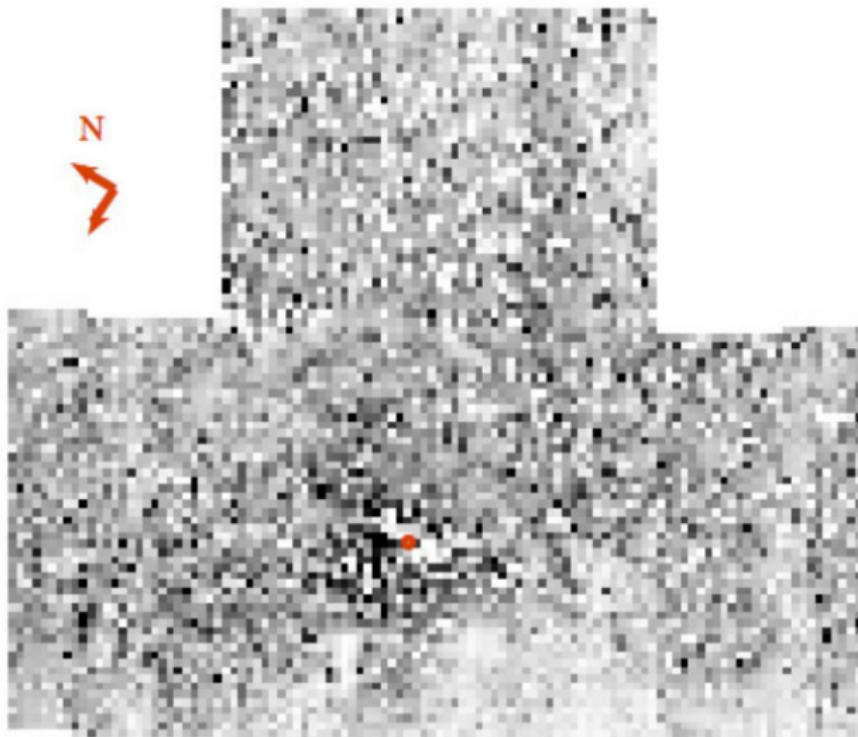
Возможные интерпретации. V



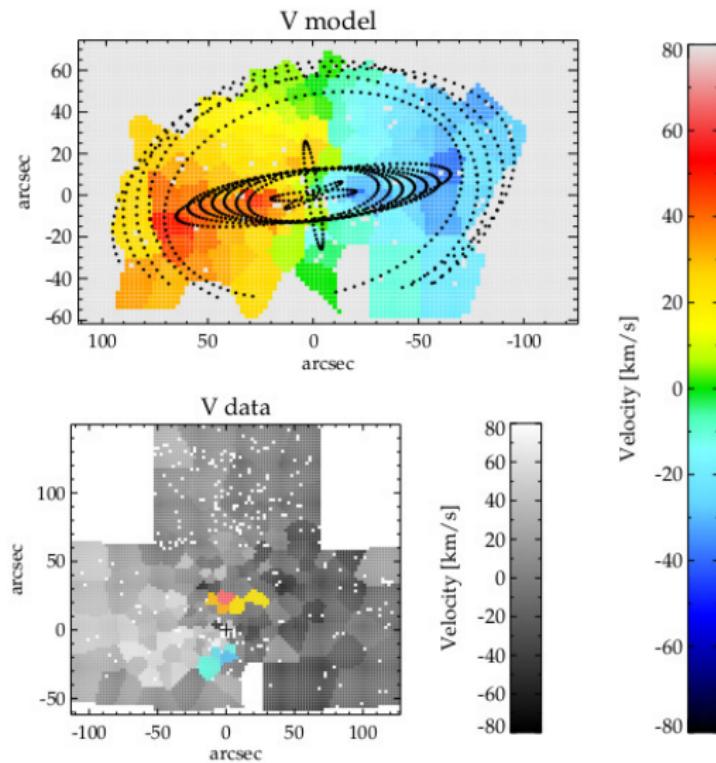
Возможные интерпретации. VI

- Ортогональная структура также имеет асимметричную кинематику: скорость северной части ~ 35 км/с, скорость южной части ~ -25 км/с $\Rightarrow V_{\text{LSR}}^0 = +5$ км/с.
- Должна быть асимметрия в фотометрии: западная («апоцентрическая») часть должна быть ярче и быть смещенной вправо относительно Sgr A*. Чего не наблюдается.

Возможные интерпретации. VI



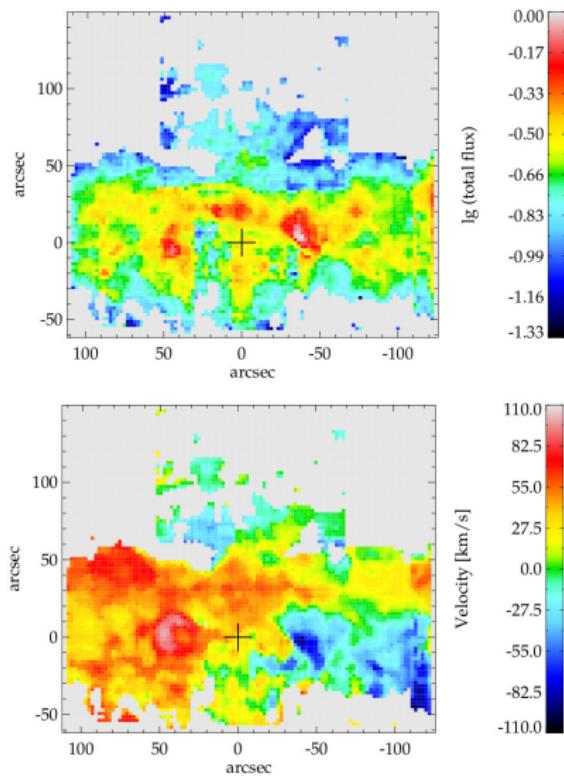
Возможные интерпретации. VII



Возможные интерпретации. VIII

- Положительная центральная скорость наблюдается и по эмиссии H_2 (Feldmeier+, 2014) при отсутствии асимметрии по отношению к Sgr A*.

Возможные интерпретации. IX



Возможные интерпретации. X

- Положительная скорость $V_{\text{LSR}}^0 \sim 10 \text{ км/с}$ — скорость МСП относительно барицентра в сторону антицентра Галактики $u_{\text{LSR}}^0 \sim -10 \text{ км/с}$.

Но тогда глобально определенная компонента пекулярного движения Солнца (u_\odot) должна быть меньше локальной ($u_\odot = 10 \pm 1 \text{ км/с}$). Чего не наблюдается (Reid+ 2014; Rastorguev+ 2016; Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016).

- Тогда скорость $V_{\text{LSR}}^0 \sim 10 \text{ км/с}$ — скорость движения Sgr A* относительно барицентра Галактики:

$$V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = (+6 \div +11) \pm 2 \text{ км/с}.$$

Наилучшая оценка: $V_{\text{LSR}}(\text{BH}) = +10.6 \pm 1.9 \text{ км/с}$.

$$V_{\text{hel}}(\text{BH}) = +10.6 + 10.3 = +20.9 \pm 1.9 \text{ км/с}.$$

Коррекции оценок R_0

$$\Delta R_0 \approx +[0.01 \div 0.02 \text{ кпк}/(\text{км}/\text{с})] \cdot V_{\text{LSR}}(\text{BH}).$$

Тогда ожидаемые поправки:

- для результата Ghez+ (2008)

$$R_0 = 8.36 + (0.11 \div 0.21) = (8.47 \div 8.57)^{+0.30}_{-0.44} \text{ кпк};$$

- для результата Gillessen+ (2009):

$$R_0 = 8.33 + (0.11 \div 0.21) = (8.44 \div 8.54) \pm 0.17 \text{ кпк}.$$

Выводы

- Наиболее вероятной причиной асимметрии восток-запад профилей средней лучевой скорости, приведенной к МСП, для звездного скопления в ядре Галактики представляется положительная лучевая скорость движения центральной черной дыры ($Sgr A^*$) Галактики относительно МСП.
- Наилучшая оценка этой скорости по профилям центрального скопления: $V_{LSR}(\text{BH}) = +10.6 \pm 1.9 \text{ км/с.}$
- Ожидаемые поправки оценок R_0 , полученных ранее в результате моделирования орбит S-звезд, $+ \sim 0.1 \div 0.2 \text{ кпк}$, что приводит к значениям $R_0 \approx 8.4 \div 8.6 \text{ кпк.}$
- Полученные результаты могут означать, что центральная черная дыра нашей Галактики не находится точно в барицентре последней.