

Всероссийская астрометрическая конференция  
«Пулково-2015»

## Кинематическая калибровка шкал расстояний для планетарных туманностей

Кривошеин С. Б., Никифоров И. И.

23 сентября 2015 г.

Санкт-Петербургский Государственный Университет  
Кафедра небесной механики



# Постановка задачи

Целью работы являлась калибровка шкал расстояний для планетарных туманностей (ПТ) кинематическим методом.

- По выборке объектов получаем расстояние до центра вращения  $R_0$ , рассматриваемого как центр Галактики.
- По полученному значению  $R_0$  находим  $k$  — отношение масштаба шкалы к «наилучшему»  $R_0^{\text{best}}$ .

# Используемая модель

Метод применялся к подсистеме ПТ диска Галактики. Для данной подсистемы целесообразно использовать цилиндрическую модель вращения:

$$\Theta(x) = \sum_{i=0}^n \theta_i (\Delta x)^i.$$

Здесь и далее  $x = \frac{R}{R_0}$ ,  $\Delta x = x - 1$ .

## Используемая модель (продолжение)

Таким образом,

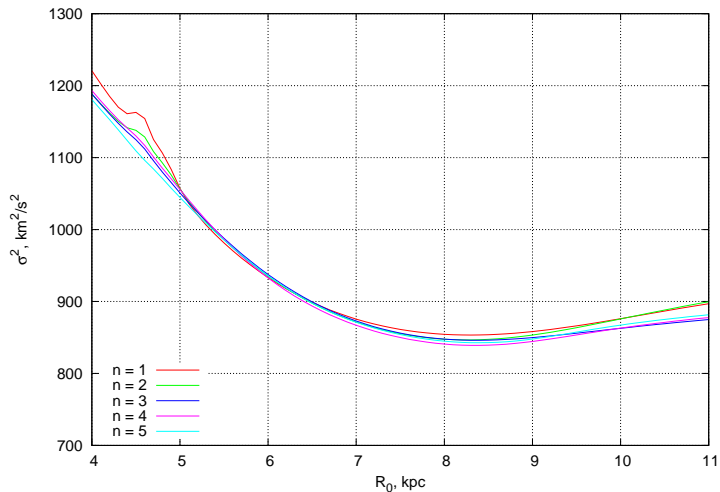
$$V_r^{mod} = \left( -2AR_0\Delta x + \sum_{i=2}^n \theta_i (\Delta x)^i \right) x^{-1} \sin l \cos b - V_r^\odot + K, \quad (1)$$

$$V_r^\odot \equiv u_0 \cos l \cos b + v_0 \sin l \cos b + w_0 \sin b.$$

Здесь  $A$  — первый параметр Оорта;  $(l, b)$  — галактические координаты объекта;  $(u_0, v_0, w_0)$  — компоненты скорости Солнца относительно подсистемы ПТ.

Из-за того, что  $w_0$  плохо определяется, его значение мы зафиксируем, принимая  $w_0 = w_\odot = 7.7 \text{ км/с} = \text{МСП}$ .

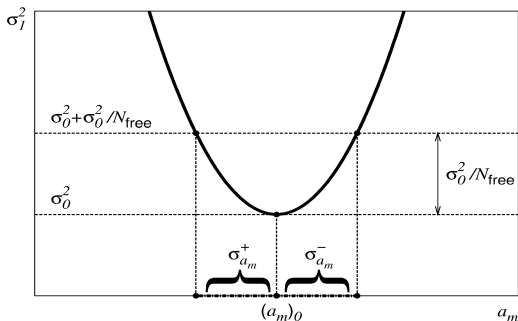
# Профиль целевой функции



# Нахождение формальных ошибок

Границы доверительных интервалов параметров модели находились как корни уравнения

$$\sigma_1^2 = \sigma_0^2 \left( 1 + \frac{1}{N_{\text{free}}} \right).$$



# Составление выборки

Для получения однородной выборки применялись следующие критерии исключения выбросов:

- 1 по большим невязкам,
- 2 по сильному смещению результата (Jackknife),
- 3 по нахождению вблизи априорного положения оси Галактики,
- 4 находящиеся аномально далеко от плоскости диска либо от центра Галактики.

## Составление выборки (продолжение)

- 1 Большие невязки: критическое значение невязки находится динамически по размеру выборки как корень  $\text{erfc}(s) = \frac{\sqrt{2}}{n}$ .
- 2 Jackknife: последовательно исключаются объекты, наиболее сильно смещающие результат. Остановка происходит в глобальном минимуме  $\frac{\sigma_{JK}(R_0)}{\bar{R}_0}$ .
- 3 Нахождение вблизи оси: исключались объекты с  $x < x_{\min}$ , значение параметра  $x_{\min}$  оптимизировалось.
- 4 Вручную исключались только явные выбросы (например, объект с  $Z = 6$  кпк явно принадлежит гало).



# Получение решения и начальное приближение

Разработанный алгоритм итеративным способом решает следующие задачи:

- получение точечных оценок и доверительных интервалов модельных параметров,
- оптимизацию порядка полиномиальной модели вращения дисковой подсистемы ПТ,
- исключение объектов, близких к оси Галактики (с оптимизацией границы исключения),
- исключение объектов с большими невязками,
- исключение объектов, смещающих оценку  $R_0$ .

Итерации являются независимыми и позволяют получить самосогласованное решение данных задач.

## Используемые шкалы

Были рассмотрены пять шкал расстояний до ПТ, для них независимо прямым методом найдены отношения масштабов:

R1 \ R2	Ac78	CKS92	Ph04	St08	Zh95
Ac78	1	$0.81 \pm 0.02$	$0.82 \pm 0.02$	$0.67 \pm 0.02$	$0.64 \pm 0.02$
CKS92	$1.23 \pm 0.03$	1	$0.97 \pm 0.02$	$0.99 \pm 10^{-4}$	$0.73 \pm 0.02$
Ph04	$1.22 \pm 0.03$	$1.03 \pm 0.02$	1	$0.81 \pm 0.01$	$0.78 \pm 0.01$
St08	$1.49 \pm 0.04$	$1.01 \pm 10^{-4}$	$1.22 \pm 0.02$	1	$0.88 \pm 0.03$
Zh95	$1.56 \pm 0.05$	$1.34 \pm 0.03$	$1.28 \pm 0.02$	$1.13 \pm 0.04$	1

Здесь и далее: Ac78 — Acker (1978); CKS92 — Cahn, Kahler, Stanghellini (1992); Ph04 — Phillips (2004); St08 — Stanghellini et al. (2008); Zh95 — Zhang (1995).

Решения были получены для трёх каталогов: Ac78, St08 и Zh95.

# Результаты для разных $x_{\min}$

## Каталог Acker (1978)

$x_{\min}$	0.0 – 0.2	0.3	0.35	0.4	<b>0.45</b>	<b>0.5</b>	<b>0.55</b>	0.6
$N$	184	237	228	225	<b>220</b>	<b>211</b>	<b>209</b>	-
$R_0$ , кпк	$5.89^{+1.09}_{-0.76}$	$5.99^{+0.54}_{-0.48}$	$5.53^{+0.51}_{-0.47}$	$5.70^{+0.50}_{-0.47}$	<b><math>5.70^{+0.50}_{-0.46}</math></b>	<b><math>5.32^{+0.47}_{-0.43}</math></b>	<b><math>5.53^{+0.51}_{-0.46}</math></b>	-

## Каталог Stanghellini (2008)

$x_{\min}$	<b>0.0</b>	0.2	<b>0.25</b>	<b>0.3</b>	0.35	0.4
$N$	250	250	<b>242</b>	<b>242</b>	224	212
$R_0$ , кпк	$8.03^{+0.49}_{-0.46}$	$8.03^{+0.49}_{-0.46}$	<b><math>8.16 \pm 0.45</math></b>	<b><math>8.16 \pm 0.45</math></b>	$8.23^{+0.48}_{-0.45}$	$8.28^{+0.56}_{-0.52}$

## Каталог Zhang (1995)

$x_{\min}$	0.0	0.15	0.2	<b>0.25</b>	<b>0.3</b>	0.35
$N$	277	277	262	<b>260</b>	<b>260</b>	229
$R_0$ , кпк	$6.98^{+0.31}_{-0.27}$	$6.98^{+0.31}_{-0.27}$	$6.62 \pm 0.30$	<b><math>6.58 \pm 0.31</math></b>	<b><math>6.58 \pm 0.31</math></b>	$6.70^{+0.46}_{-0.45}$

# Результаты для окончательных решений

Значения кинематических параметров для окончательных решений

Cat.	n	$R_0$ , кпк	$\sigma^2$ , км <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	$AR_0$ , км/с	$\theta_2$ , км/с	$u_0$ , км/с	$v_0$ , км/с	$K$ , км/с
Ak78	1	5.50 +0.49 -0.46	1373.63 37.06	87.29 ± 7.18 +3.56 -3.21		13.14 ± 3.73 -0.19 +0.27	24.70 ± 3.68 +0.73 -0.96	-1.93 ± 2.56 ± 0.02
St08	2	8.16 ±0.45	1138.65 33.74	83.69 ± 5.47 +2.84 -3.10	57.37 ± 20.30 +8.49 -9.59	15.36 ± 3.08 -0.32 +0.25	31.85 ± 3.24 +0.69 -0.94	-1.91 ± 2.17 +0.09 -0.06
Zh95	2	6.58 ±0.31	1252.06 35.38	74.37 ± 4.38 +2.03 -2.25	26.27 ± 12.25 +3.29 -4.24	10.82 ± 3.08 +0.11 -0.13	25.89 ± 3.31 +0.65 -0.91	-0.43 ± 2.20 ± 0.10

## Значения калибровочных коэффициентов

Для каталога Acker (1978):

$$k_{Ak} = 1.44 \pm 0.12.$$

Для каталога Stanghellini et al. (2008):

$$k_{St} = 0.97 \pm 0.06.$$

Для каталога Zhang (1995):

$$k_{Zh} = 1.20 \pm 0.05.$$

Калибровочный коэффициент  $k$  находится как

$$k = (k_{cat}) \times \left( \frac{R_0}{7.9 \text{ кпк}} \right).$$

Формула для получения калиброванного расстояния:

$$R_{cal} = kR.$$

# Заключение

- Был разработан и алгоритм, позволяющий получить независимую и самосогласованную оценку кинематических параметров и выполнить калибровку шкалы.
- Разработанный алгоритм демонстрирует хорошие свойства сходимости, что говорит о его надежности.
- Алгоритм должен хорошо работать для любых шкал ПТ и может послужить универсальным инструментом для их исследования.

## Заключение

- Была осуществлена калибровка трёх каталогов, предположительно принадлежащих к трём разным группам масштабов: «короткого» Acker (1978), «среднего» Stanghellini (2008) и «длинного» Zhang (1995).
- Полученный результат может служить аргументом в пользу надёжности каталога Stanghellini (2008).
- Решение, полученное для каталога Zhang (1995), противоречит ранее имевшимся представлениям об этом каталоге, и, возможно, говорит о необходимости пересмотра отношения к нему.