

Статистическая корректировка расстояний до планетарных туманностей на основе пространственно-кинематического моделирования

С.Б. Кривошеин, И.И. Никифоров

Санкт-Петербургский государственный университет

"Современная звездная астрономия 2017"
14-16 июня 2017 г.

Решаемые задачи

Пространственно-кинематическое моделирование Галактики (моделирование вращения Галактики по данным о расстояниях и лучевых скоростях объектов) позволяет решать следующие задачи.

- Нахождение параметров вращения Галактики, построение кривой вращения.
- Оценка расстояния до центра Галактики или масштаба шкалы:
 - по надежным шкалам — определение расстояния до центра Галактики R_0 ,
 - ИЛИ по надежным оценкам R_0 — определение масштаба шкал расстояний до объектов независимым методом.

Почему планетарные туманности (ПТ)?

- Яркие объекты, видны на больших расстояниях.
- Слабо подвержены локальным кинематическим отклонениям.

В то же время, нет согласия в данных о расстояниях до ПТ:

- высокая случайная неопределенность индивидуальных оценок расстояний до ПТ,
- систематическая неопределенность шкал расстояний.

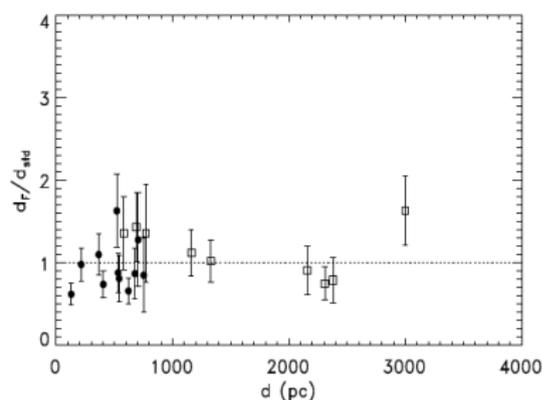
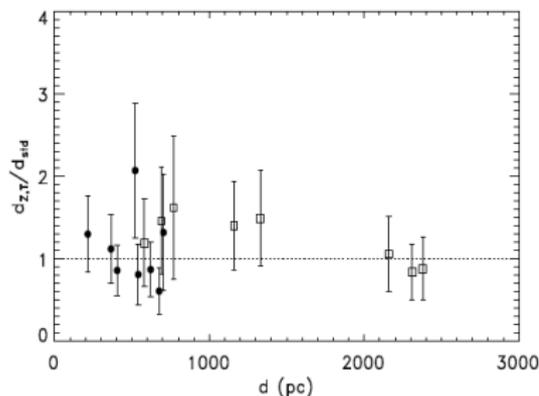
Это делает актуальной задачу определения масштабов шкал расстояний и их корректировки.

Каталоги ПТ (Parker et al., 2012)

These have been very hard to measure accurately with various statistical distance scales in use (e.g. Stanghellini, Shaw & Villaver 2008) but they suffer significant (factor of two or more) errors, both internal and systematic.

- **Stanghellini, Shaw, Villaver (2008, SSV; r).**
- **Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic PNe & 1st suppl.** (Acker et al., 1992, 1996; r, Vr).
- **MASH I (Parker et al., 2001, 2006b; r, Vr),**
MASH-II (Miszalski et al., 2008; r, Vr).

Каталоги ПТ (Smith, 2015)



- Cahn, Kahler, Stanghellini (1992, CKS; r) — "короткая" шкала.
- Zhang (1995, Z95; r) — "длинная" шкала;
Однако расстояния, полученные через зависимость $T_b(R)$ — хорошие!
- Frew, Parker, Wojcic (2016, F16; r).

Каталоги ПТ (Frew et al., 2016) I

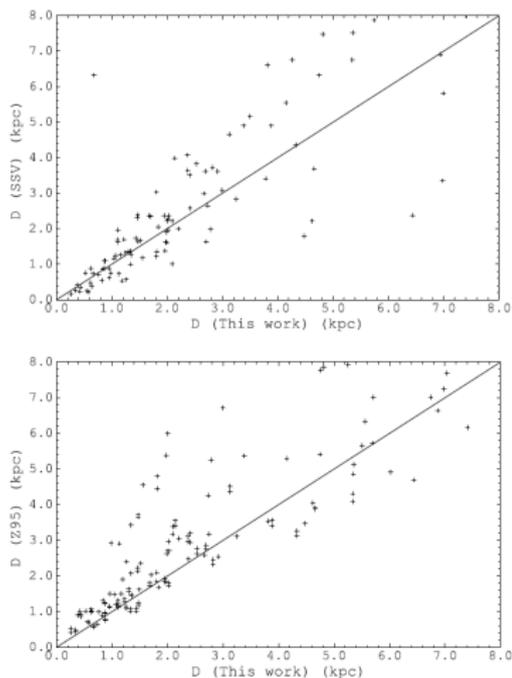


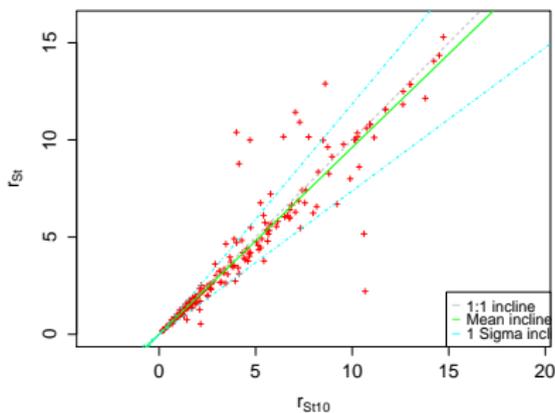
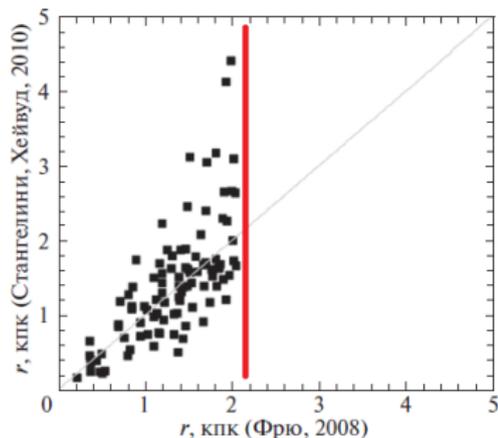
Table 15. A selection of statistical distance scales from the literature, normalised to the present work.

Distance Scale	Method	κ_d
O'Dell (1962)	Shklovsky method	0.84
Cahn & Kaler (1971)	Shklovsky method	0.72
Cudworth (1974)	Shklovsky method	0.95
Milne & Aller (1975)	Shklovsky method	0.72
Acker (1976, 1978)	synthetic	0.67
Maciel & Pottasch (1980)	$M_{\text{ion}}-r$ relation	0.83
Daub (1982)	modified Shklovsky	0.56
Meatheringham et al. (1988)	nebular model	1.03
Cahn et al. (1992; CKS)	modified Shklovsky	0.80
Kingsburgh & Barlow (1992)	nebular model	1.25
Zhang (1995)	T_b-r relation	1.02
Van de Steene & Zijlstra (1995)	T_b-r relation	0.93
Schneider & Buckley (1996)	T_b-r relation	0.91
Mal'kov (1997, 1998)	nebular model	1.05
Bensby & Lundström (2001)	$M_{\text{ion}}-r$ relation	0.97
Phillips (2002)	T_b-r relation	0.37
Phillips (2004b)	T_b-L_5 relation	0.94
Phillips (2005a)	standard candle	0.77
Stanghellini et al. (2008; SSV)	modified Shklovsky	0.88
Frew (2008; F08)	$S_{H\alpha}-r$ relation	0.97
This work	$S_{H\alpha}-r$ relation	1.00

Каталоги ПТ (Frew et al., 2016) II

- Шкала SSV — "короткая"?
- Zhang (1995).
- Phillips (2004b, P04b; r).
- Лучевые скорости – Durand et al. (1998; Vr).

Каталоги ПТ (Бобылев, Байкова, 2017)



Stanghellini, Haywood (2010, SH10) – масштаб завышен на 20%?

- Совпадение масштабов SSV и SH10.
- Согласованность масштаба SH10 и F08

Исходные данные

Были взяты следующие каталоги расстояний до ПТ:

- Frew, Parker, Bojicic (2016);
- Phillips (2004b);
- Stanghellini, Shaw, Villaver (2008);
- Zhang (1995).

В качестве каталога лучевых скоростей был взят каталог Durand et al. (1998).

Непосредственное сравнение шкал

В таблице указаны полученные взаимные отношения масштабов шкал $\left\langle \frac{r_1}{r_2} \right\rangle$:

$r_2 \backslash r_1$	P04b	Z95	SSV	F16
P04b	-	1.118	1.167	1.195
Z95	0.894	-	1.027	1.034
SSV	0.857	0.974	-	0.999
F16	0.837	0.967	1.001	-

$\sigma \left\langle \frac{r_1}{r_2} \right\rangle \in [0.015, 0.016]$, кроме P04b – Z95 (для них 0.006).

Близость найденных отношений масштабов к 1 говорит о качестве выбранных данных.

Составление выборки

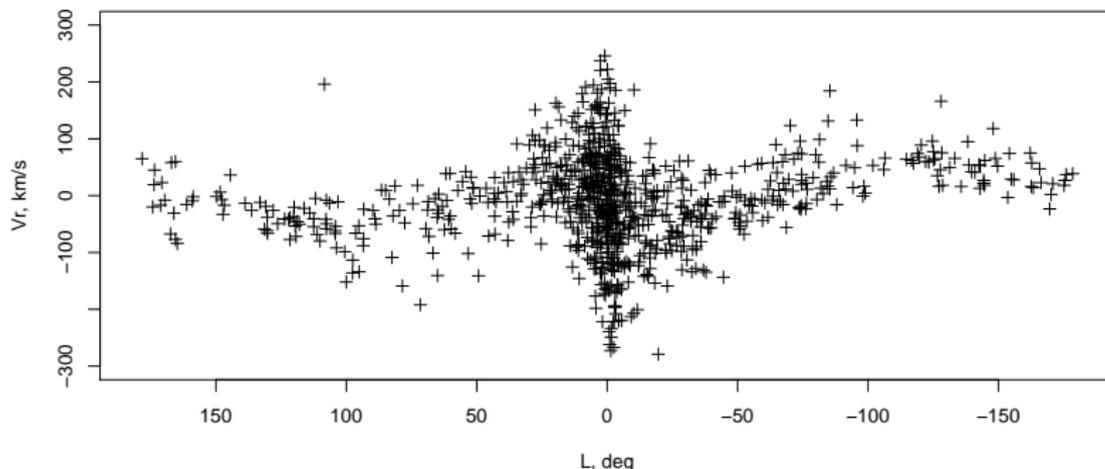
Для получения точного решения выборку необходимо очистить от выбросов: объектов с неправильно определенными параметрами, не принадлежащих к дисковой подсистеме Галактики и др.

Для этого были применены следующие критерии исключения:

- по близости к центру Галактики,
- по большим невязкам,
- по слишком сильному влиянию на результат (jackknife),
- по необычному пространственному расположению.

Исключение объектов балджа

Зависимость лучевых скоростей ПТ от Галактической долготы



Объекты балджа имеют существенно иную кинематику, чем объекты диска. Поэтому из рассмотрения исключалась зона вблизи центра Галактики, задаваемая уравнением $x < x_{\min}$. В алгоритме принимались значения x_{\min} от 0 до 0.55.

Отсев выбросов методом jackknife

Метод складного ножа (англ. jackknife) позволяет оценить поправку параметра модели за конечность используемой выборки.

$$\text{Var}(a) = \frac{N-1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{a}^i - \tilde{a}^{\text{JK}})^2$$

a – рассматриваемый параметр модели,
 \tilde{a}^i – его оценка по выборке без i -го объекта,
 \tilde{a}^{JK} – среднее таких оценок.

Этот метод можно использовать и для оценки влияния отдельных объектов на смещение результата. Исключая объекты с наибольшим влиянием, мы повышаем устойчивость решения и приближаем его к несмещенному значению.

Используемая модель

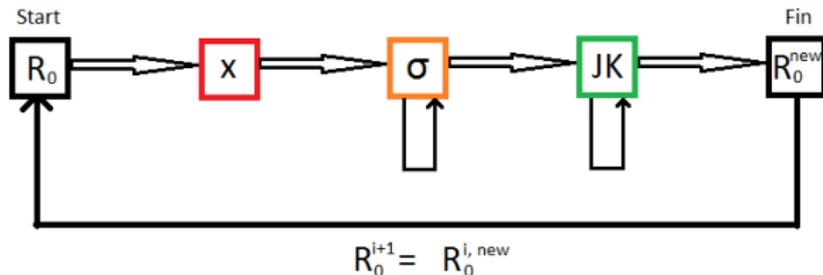
Модель для лучевых скоростей описывается следующей формулой:

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

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

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

Описание алгоритма



Алгоритм мультиитеративный, для поиска решения выполняются итерации:

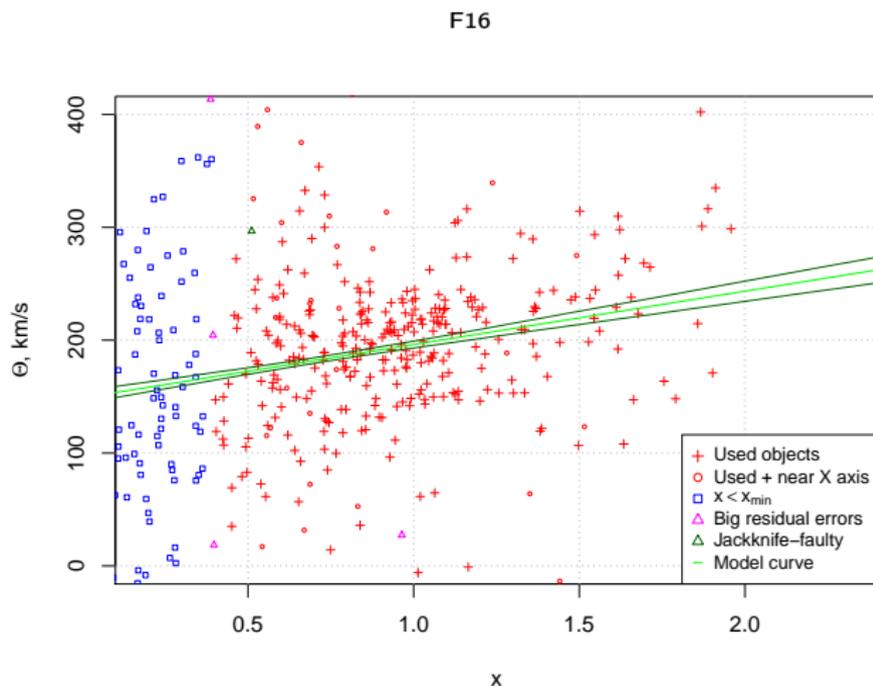
- по m – порядку полиномиальной модели кривой вращения,
- по x_{\min} – размеру зоны исключения объектов балджа,
- по R_0^{prior} – предполагаемому значению параметра R_0 .

Результаты

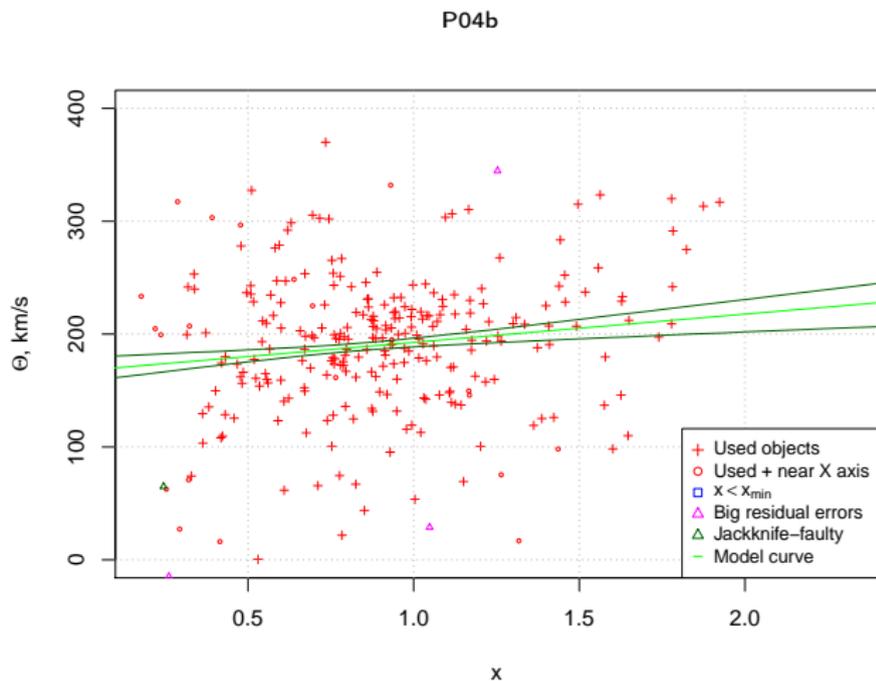
Значения параметров кинематической модели:

Cat.	n	R_0 , kpc	σ^2 , km ² /s ²	AR_0 , km/s	θ_2 , km/s	u_0 , km/s	v_0 , km/s	K , km/s
P04b	1	7.39 ±0.27	1721.65 41.49	83.86 ± 4.81 ^{+1.71} / _{-1.63}		12.43 ± 3.42 ^{+0.10} / _{-0.13}	31.22 ± 3.73 ^{+0.37} / _{-0.42}	-2.36 ± 2.48 ± 0.10
Zh95	2	7.67 ±0.17	1573.92 39.67	78.85 ± 4.48 ^{+0.76} / _{-0.63}	34.57 ± 14.96 ^{-0.08} / _{+1.03}	15.61 ± 3.04 ^{+0.15} / _{-0.20}	32.17 ± 3.46 ^{+0.12} / _{-0.03}	-2.09 ± 2.2 ± 0.08
SSV	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}
F16	1	7.67 ±0.48	1459.84 38.21	74.56 ± 4.80 ± 3.31		15.34 ± 2.72 ± 0.01	27.75 ± 3.03 ^{+0.75} / _{-0.82}	-2.24 ± 1.99 ^{+0.07} / _{-0.06}

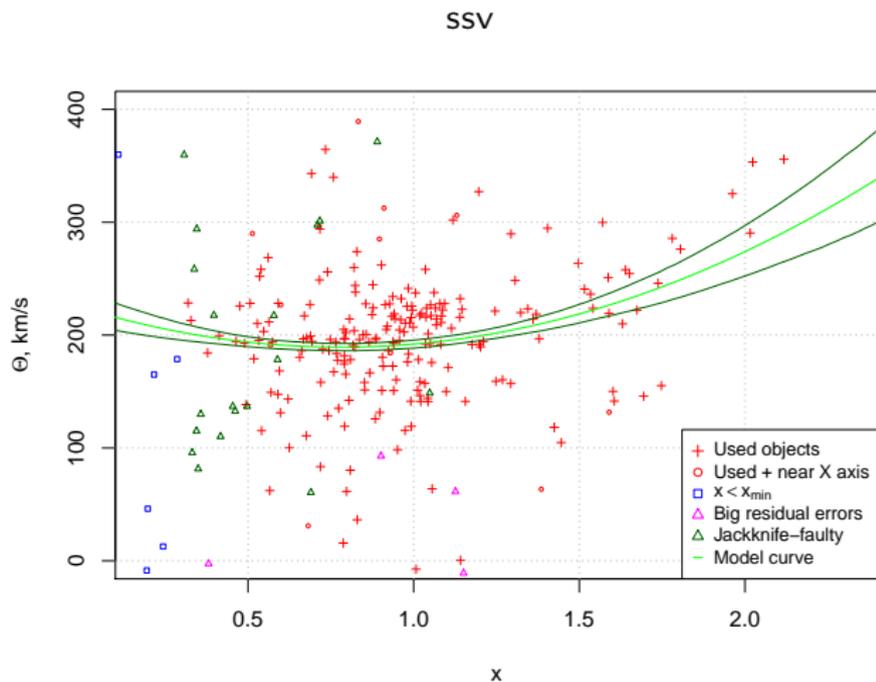
Кривые вращения I



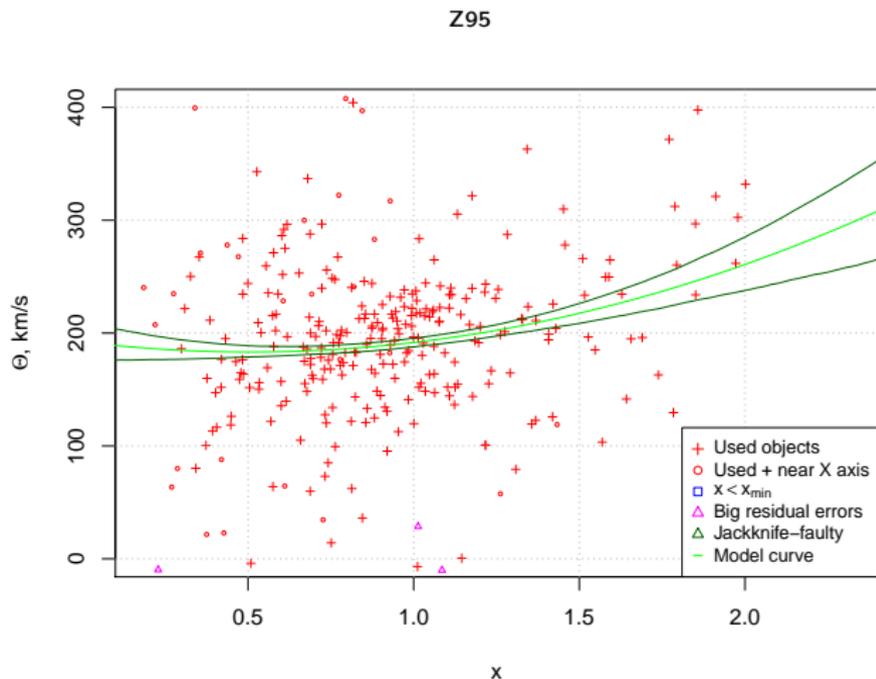
Кривые вращения II



Кривые вращения III



Кривые вращения IV



Выводы

- Для четырёх каталогов получены адекватные значения модельных параметров — переход от калибровки к оценке параметров.
- Сопоставлено около 1500 объектов — возможность построения синтетического каталога.
- По видимому, достигнут определенный консенсус в проблеме расстояний до ПТ.