



А.С. Расторгуев

***ГАИШ МГУ, отдел изучения Галактики и
переменных звезд***

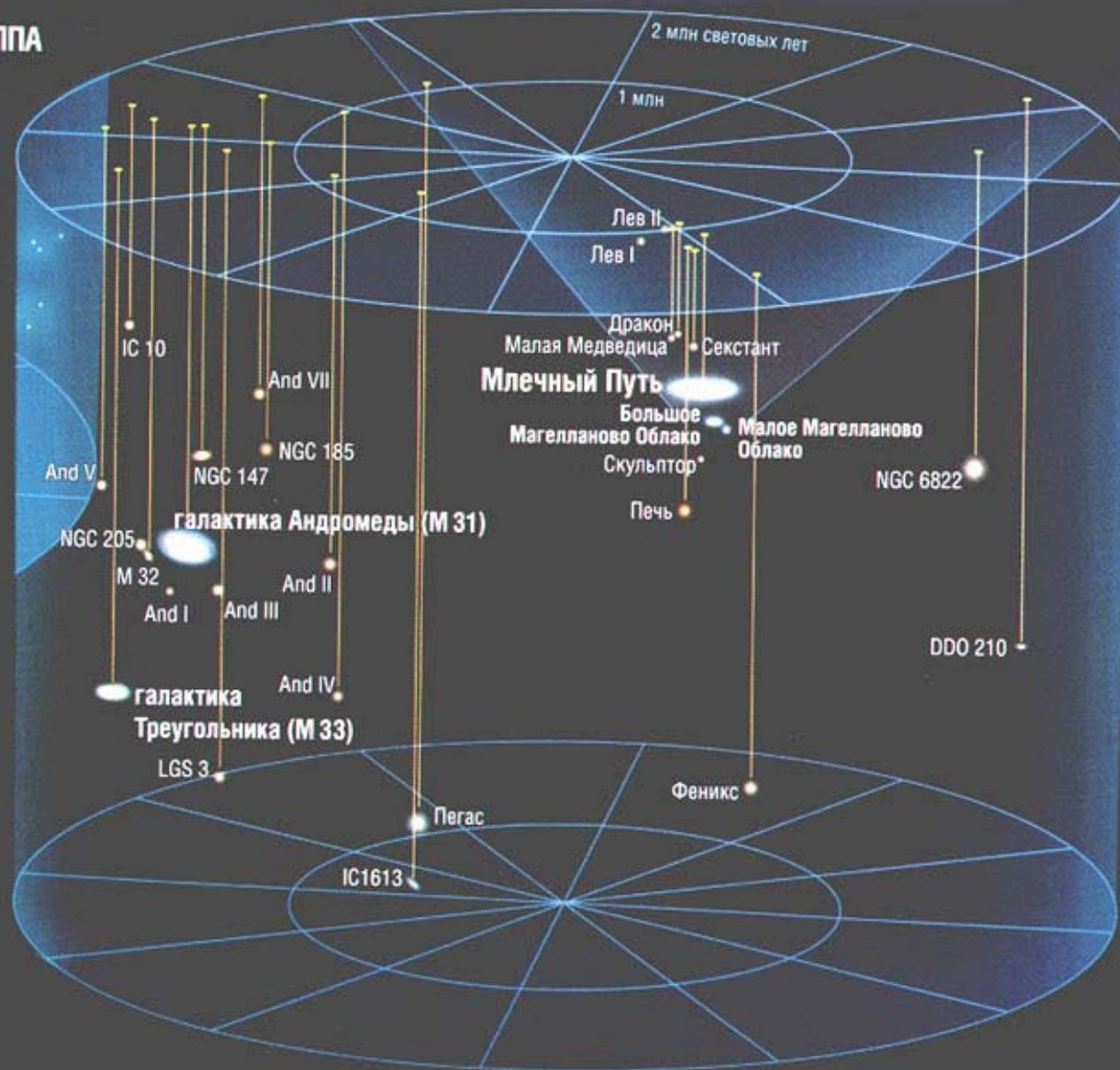
***Физфак МГУ, кафедра экспериментальной
астрономии***

**Кинематические ограничения на
скрытую массу в Местной Группе
галактик**

(Москва, ГАИШ МГУ, 4-5 февраля 2008 г.)

Ближайшие соседи Млечного Пути

МЕСТНАЯ ГРУППА



- Местная Группа включает почти 50 галактик, большинство которых – карлики: эллиптические и неправильные
- Самые крупные из **спутников М31**: М33 («Треугольник»), М32 и NGC205; из **спутников Галактики** - Большое и Малое Магеллановы Облака.

Ключевые вопросы:

- Велика ли «локальная» скрытая масса?
- Велика ли скрытая масса на больших расстояниях – в Галактике и Местной Группе галактик?
- Какова природа скрытой массы?
 - Барионная
 - Небарионная
 - ???
- Обнаружение скрытой массы

Наблюдаемая оценка локальной массовой плотности

- Наблюдаемая локальная звездная плотность: $\sim 0.12 \text{ пк}^{-3} \rightarrow (0.05-0.08) M_0 \text{ пк}^{-3}$
- Вклад газа (атомарного и молекулярного газа) не более $\sim 50\%$ от вклада звезд



$$\rho_{\text{vis}} \sim 0.075-0.12 M_0 \text{ пк}^{-3}$$

(оценки разных авторов)

Динамические оценки локальной плотности в диске Галактики



• **Vienayme et al.**
(ASP Conf. Ser.
V.182, 1999) - по
данным о
близких А-
звездах из
HIPPARCOS: 3D-
поле скоростей
и пространств.
распределение

Oort's limit: $0.076\text{-}0.10 M_{\odot}/\text{пк}^3$

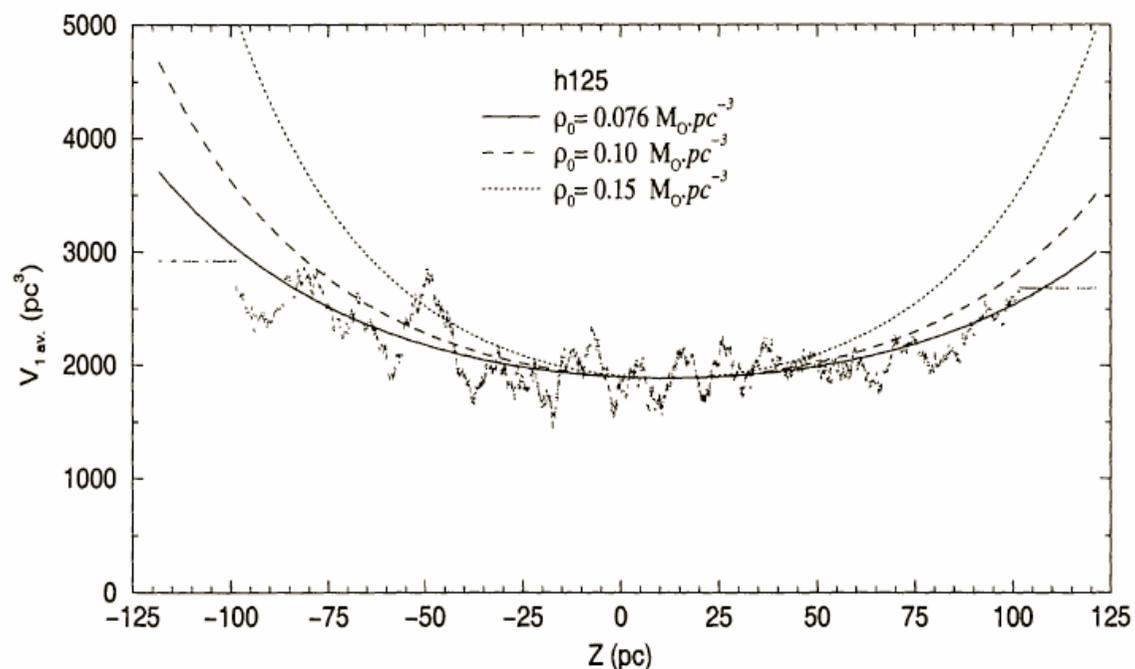


Figure 1. Calculated inverse density profiles under three different assumed values of the local mass density $0.076 M_{\odot}\text{pc}^{-3}$ (best estimate), $0.10 M_{\odot}\text{pc}^{-3}$ and $0.15 M_{\odot}\text{pc}^{-3}$ (from bottom to top).

Дамбис (2003, 2004) – по зависимости толщины вертикального распределения цефеид и молодых рассеянных скоплений от возраста: Полупериод вертик. колебаний:

$$P_Z = 37 \dots 52 \text{ Myr}$$

$$\omega^2_Z \approx 4\pi GM_0 \nu_0$$

$$\rho_{dyn} \sim 0.06 \dots 0.12 M_0 \text{ n}\kappa^{-3}$$

$$\text{LDM: } \rho < 0.023 M_0 \text{ n}\kappa^{-3}$$

$$(< 25 \dots 35\%)$$

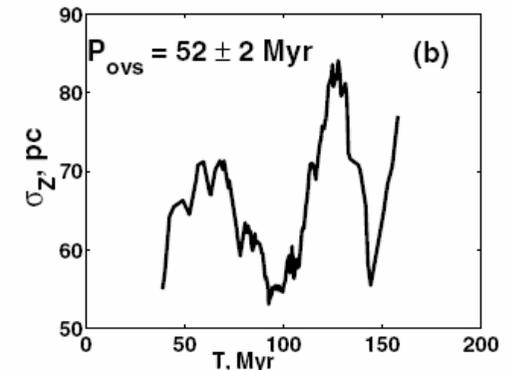
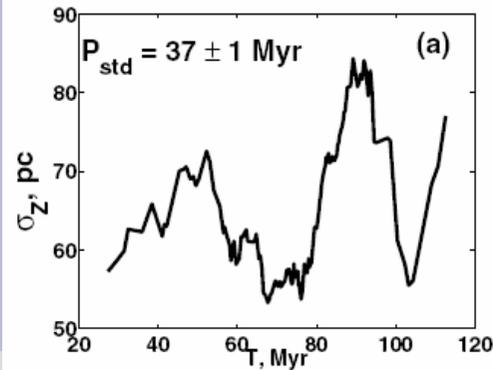
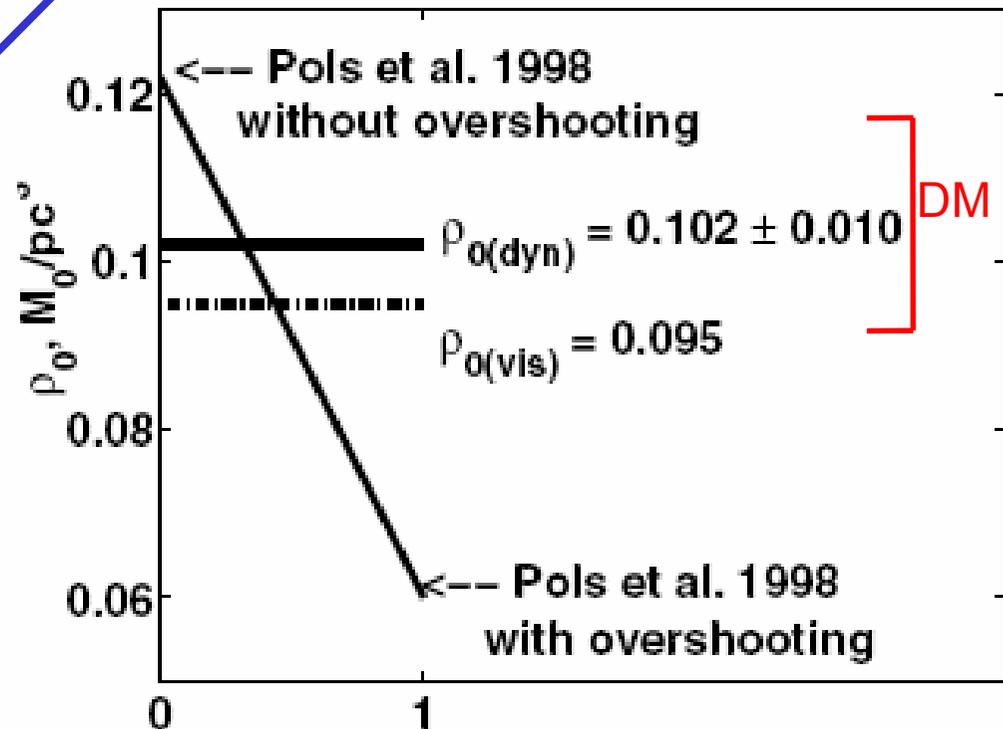


Figure 1. Vertical dispersion of the Cepheid layer as a function of age: standard models (a) and models with overshooting (b).

Уравнение Пуассона



Вывод:

- Локальная скрытая масса, скорее всего, мала – вклад не более $1/3$

Пример: Безансонская модель распределения плотности в Галактике (*A. Robin et al., 2002-2006*)

	density law	
Disc с центральной депрессией	$\rho_0/d_0 \times \{\exp(-(a/h_{R_+})^2) - \exp(-(a/h_{R_-})^2)\}$ with $h_{R_+} = 5000$ pc, $h_{R_-} = 3000$ pc (Шкалы диска)	if age ≤ 0.15 Gyr
	$\rho_0/d_0 \times \{\exp(-(0.5^2 + a^2/h_{R_+}^2)^{1/2}) - \exp(-(0.5^2 + a^2/h_{R_-}^2)^{1/2})\}$ with $h_{R_+} = 2530$ pc, $h_{R_-} = 1320$ pc (Шкалы диска)	if age > 0.15 Gyr
Thick disc	$\rho_0/d_0 \times \exp(-\frac{R-R_\odot}{h_R}) \times (1 - \frac{1/h_z}{x_l \times (2. + x_l/h_z)} \times z^2)$	if $ z \leq x_l$, $x_l = 400$ pc
	$\rho_0/d_0 \times \exp(-\frac{R-R_\odot}{h_R}) \times \frac{\exp(x_l/h_z)}{1+x_l/2h_z} \exp(-\frac{ z }{h_z})$ with $h_R = 2500$ pc, $h_z = 800$ pc (Шкала диска и шкала высот)	if $ z > x_l$
Spheroid	$\rho_0/d_0 \times (\frac{a_c}{R_\odot})^{-2.44}$	if $a \leq a_c$, $a_c = 500$ pc
	$\rho_0/d_0 \times (\frac{a}{R_\odot})^{-2.44}$ Степенной закон; сжатие ~ 0.76	if $a > a_c$
Bulge	$N \times \exp(-0.5 \times r_s^2)$	$\sqrt{x^2 + y^2} < R_c$
	$N \times \exp(-0.5 \times r_s^2) \times \exp(-0.5 \times (\frac{\sqrt{x^2+y^2}-R_c}{0.5})^2)$ with $r_s^2 = \sqrt{[(\frac{x}{x_0})^2 + (\frac{y}{y_0})^2]^2 + (\frac{z}{z_0})^4}$ Трехосный эллипсоид или сфероид	$\sqrt{x^2 + y^2} > R_c$
ISM	$\rho_0 \times \exp(-\frac{R-R_\odot}{h_R}) \times \exp(-\frac{ z }{h_z})$ with $h_R = 4500$ pc, $h_z = 140$ pc (Шкала диска и шкала высот)	
Dark halo	$\frac{\rho_c}{(1+(a/R_c)^2)}$ with $R_c = 2697$ pc and $\rho_c = 0.1079$ Почти изотермический	

Нормировка модели на параметры, наблюдаемые вблизи Солнца (по данным HIPPARCOS)

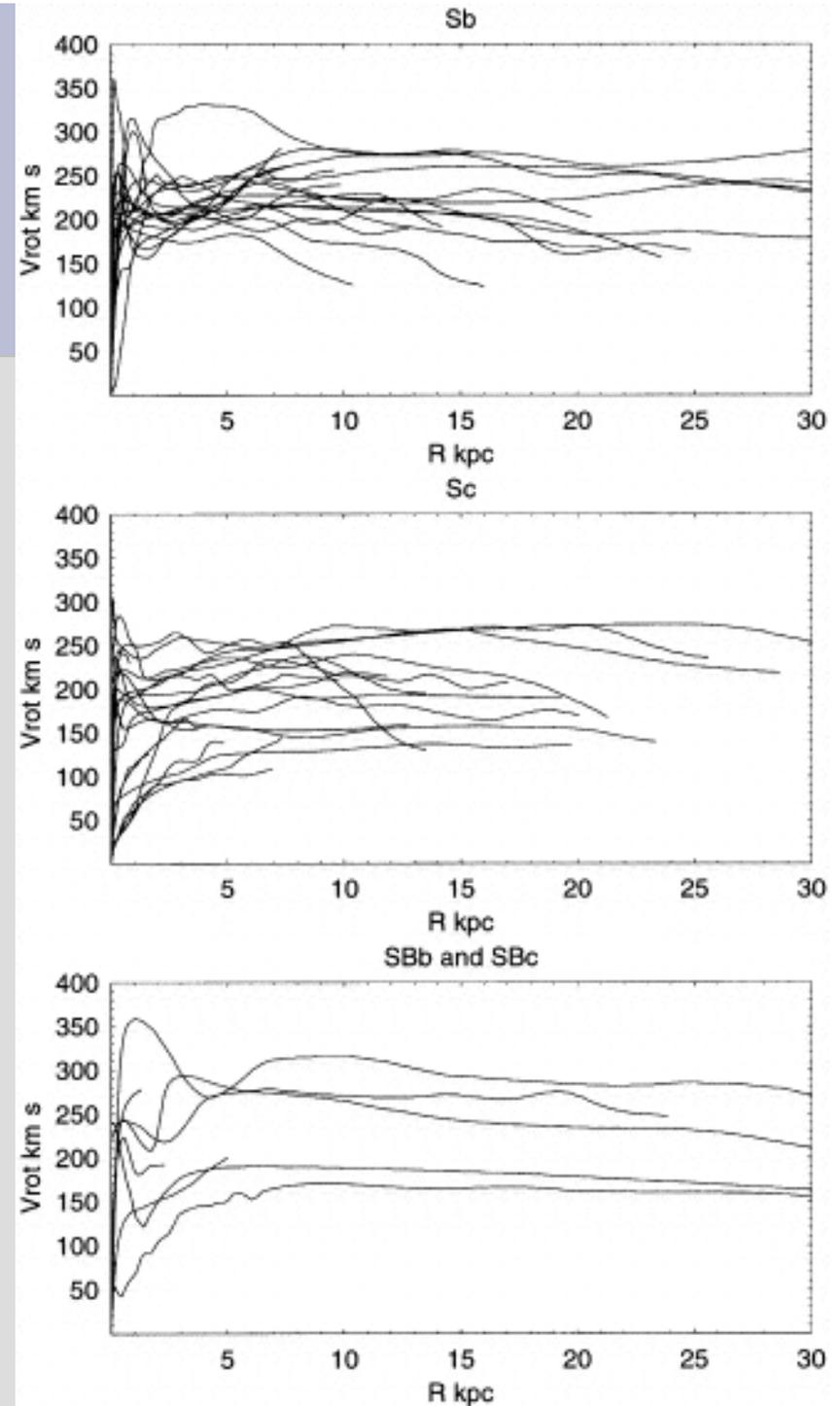
Полная локальная
плотность:

$$\rho_{\text{Sun}} \sim 0.076 M_{\odot} / \text{пк}^3$$

Table 2. Local mass density ρ_0 of the stellar components, the dark matter halo and the interstellar medium (ISM). W -velocity dispersion σ_W used for the dynamical self-consistency, and disc axis ratios ϵ resulting from this process. The white dwarf mass density is computed assuming a white dwarf mass of $0.6 M_{\odot}$.

	Age (Gyr)	ρ_0 ($M_{\odot} \text{pc}^{-3}$)	σ_W (km s^{-1})	ϵ
Disc	0–0.15	4.0×10^{-3}	6	0.0140
	0.15–1	7.9×10^{-3}	8	0.0268
	1–2	6.2×10^{-3}	10	0.0375
	2–3	4.0×10^{-3}	13.2	0.0551
	3–5	5.8×10^{-3}	15.8	0.0696
	5–7	4.9×10^{-3}	17.4	0.0785
	7–10	6.6×10^{-3}	17.5	0.0791
	WD	3.96×10^{-3}		
		$\Sigma = 0.0430$		
Thick disc	11	1.34×10^{-3}		
	WD	3.04×10^{-4}		
			$\Sigma = 0.0016$	
Stellar halo	14	9.32×10^{-6}		0.76
Dark matter halo		0.0099		1.
ISM		0.0210		

- Многие спиральные галактики обладают «плоскими» кривыми вращения, простирающимися до расстояний порядка 30-50 кпк.
- Это свидетельство в пользу значительной «скрытой» массы на периферии
- **Как с этим обстоит дело в нашей Галактике?**

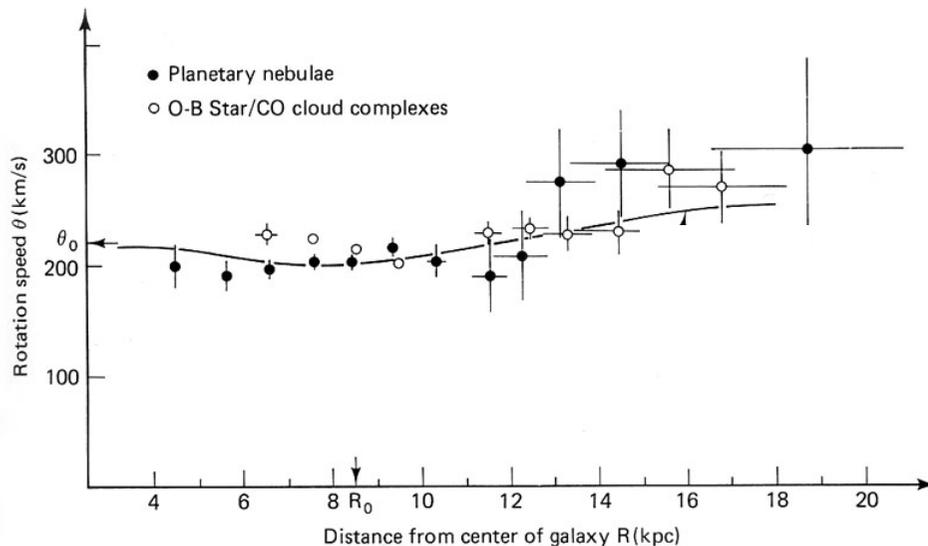
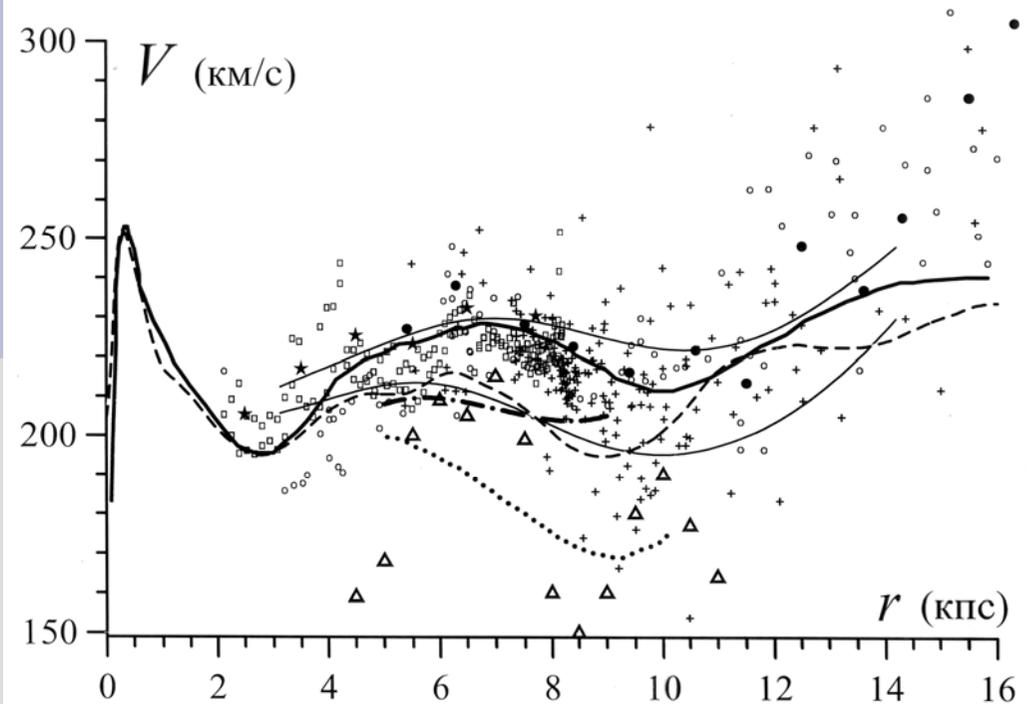


Простая оценка массы Галактики:

- Скорость вращения диска – 220 км/с →
масса в пределах $10 \text{ кпк} \sim 1.2 \cdot 10^{11}$ млрд.
солнечных
- Вклад в эту массу:
 - диска $\sim 80-90\%$
 - гало $\sim 10-20\%$
- Какова масса в пределах $50-100 \text{ кпк}$? –
Нужна надежная кривая вращения или
данные о максимальных скоростях звезд.
Если кривая вращения плоская → полная
масса может достичь 10^{12} солнечных.

- Кривая вращения Галактики пока не очень надежна (показаны варианты разных авторов) →

- При этом в окрестностях Солнца значительной скрытой массы, безусловно, нет



Кривая вращения Галактики в области $R > 4$ кпк по данным о молодых звездных комплексах и планетарных туманностях

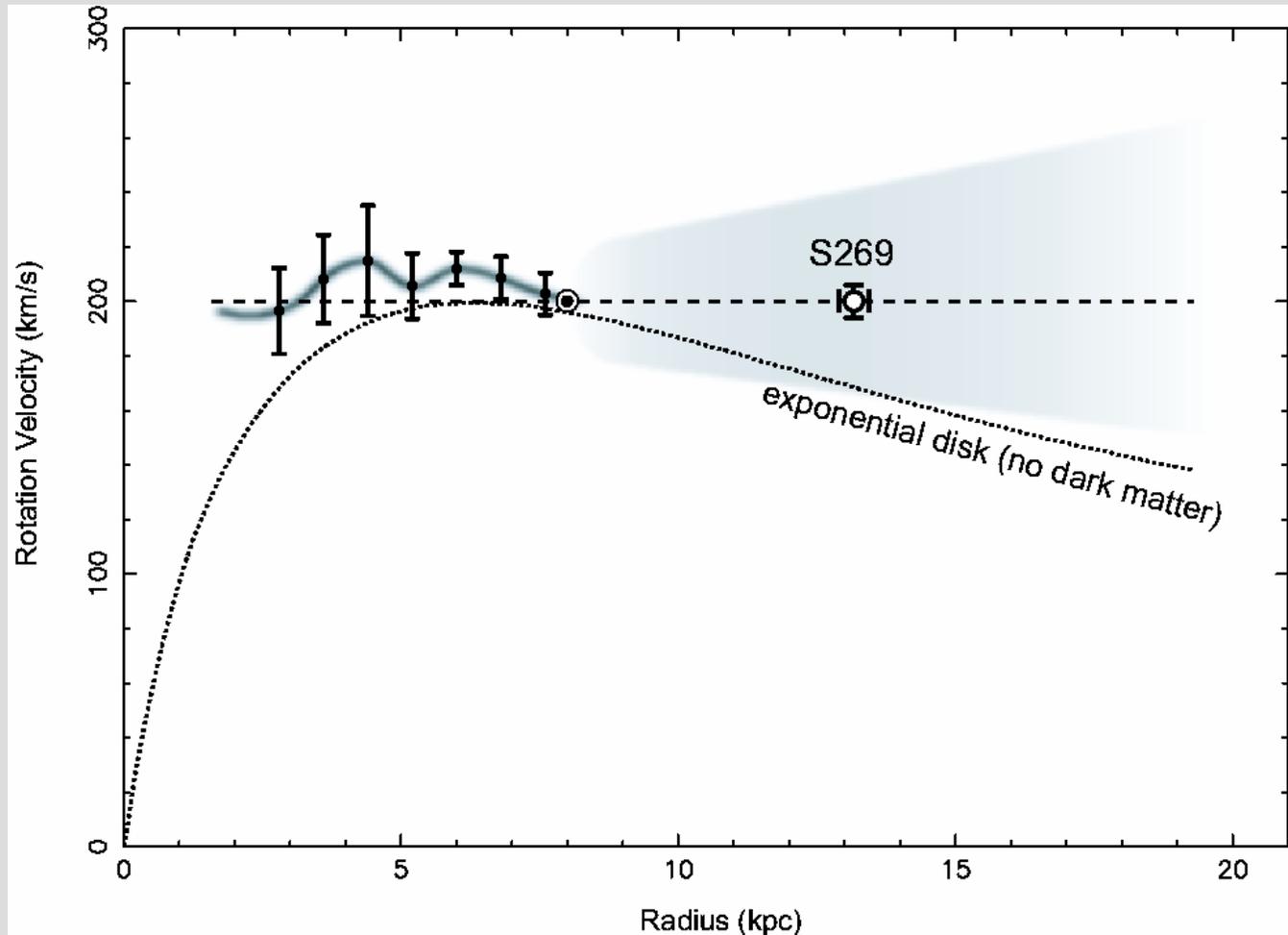
← Есть намеки на плоскую кривую вращения

(Следует иметь в виду, что ход кривой вращения зависит и от шкалы расстояния: чем она короче, тем медленнее рост скорости вращения)

- **Honma et al. (ArXiv:0709.0820v1)** – VERA наблюдения H_2O мазеров в области звездообразования Sharpless 269

$\pi=189\pm 8$ μas , $D=5.28\pm 0.23$ кпк

**Скорость
вращения
Галактики
не растёт?**



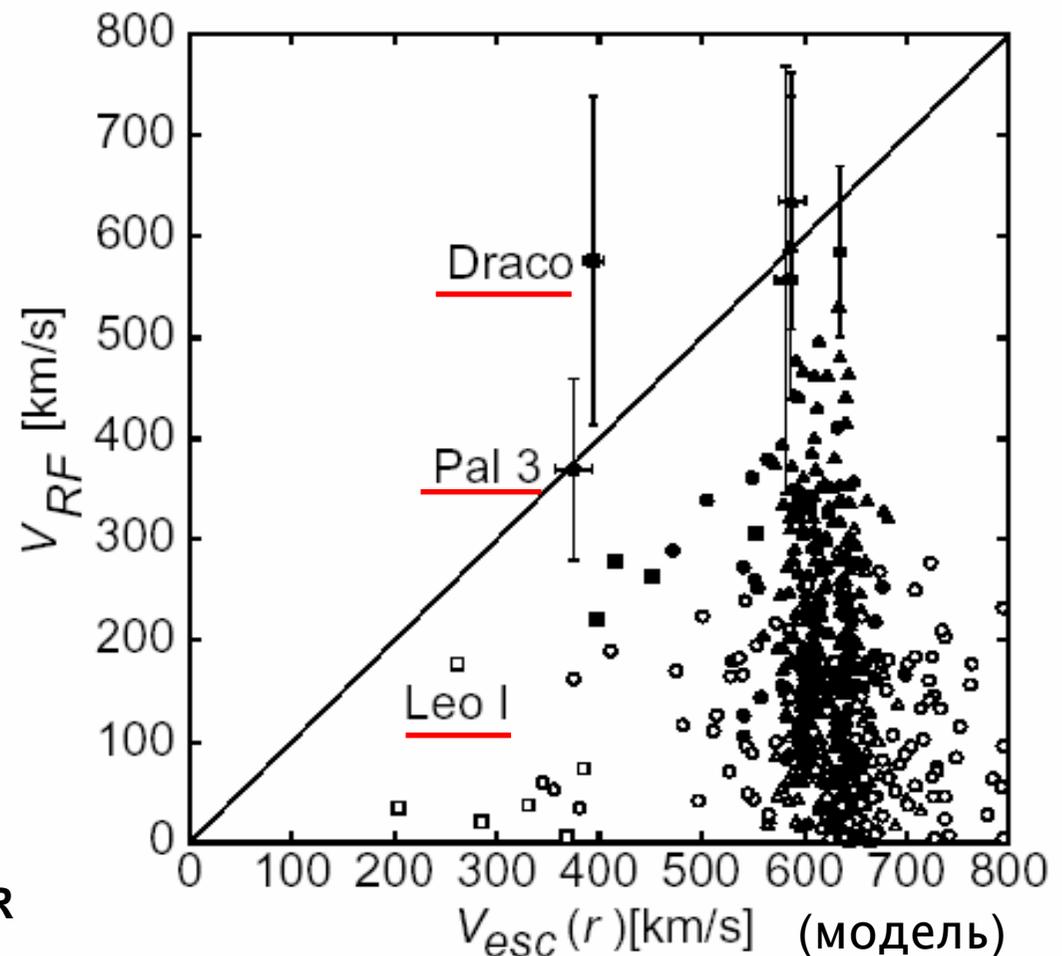
Кинематические ограничения на распределение массы в гало Галактики (из условий гравитационной связи)

Анализируются *лучевые скорости* далеких объектов гало

**Sakamoto, Chiba
& Beers (2002-2003):**

**11 карликовых
галактик,
137 ШЗС,
413 НВ-звезд поля**

Требование $V_{\text{esc}} < V_{\text{GSR}}$



Основной вклад в ограничения на полную массу системы дают Draco, Leo I, Pal 3

Нижние оценки массы:

$\sim 5.5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ в пределах расстояния до БМО (~ 50 кпк), практически не зависит от модели

$\sim (1.8-2.5) \cdot 10^{12} M_{\odot}$ в пределах расстояния до Leo I (270 кпк)

«Гипергалактика» по Я. Эйнасто ?

Ультрабыстрые звезды (HyperVelocity Stars)

- Известно пока 7(?) HVS (проэволюционировавшие В-звезды) Общее число оценивается в $\sim 10^3$
- Происхождение: распад двойной в поле центральной SMBH
- Если так, то **их нельзя использовать для тестирования галактического потенциала**
- **Межгалактическое население ?**

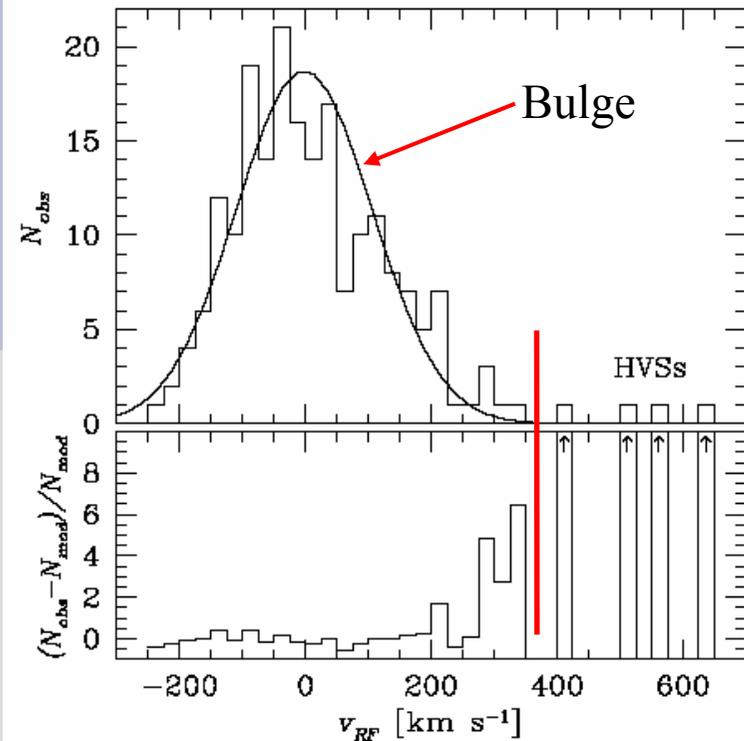


FIG. 4.— Galactic rest-frame velocity histogram of the late B-type stars (*upper panel*). The best-fit Gaussian (*thin line*) has dispersion $108 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$. Our survey has identified a total of four HVSs that are 4-6 σ outliers from this distribution. The lower panel plots the residuals of the observations from the best-fit Gaussian, normalized by the value of the Gaussian. In addition to the HVSs, there is an interesting tail of high positive velocity objects $200 < v_{rf} < 400 \text{ km s}^{-1}$.

TABLE 1
HYPERVELOCITY STARS

ID	l deg	b deg	g' mag	v_{RF} km s^{-1}	d kpc	t_{GC} Myr	Catalog
HVS1	227.3	31.3	19.8	+709	110	160	SDSS J090745.0+024507 ¹
HVS2	176.0	47.1	18.8	+717	19	32	US 708 ²
HVS3	263.0	-40.9	16.2	+548	61	100	HE 0437-5439 ³
HVS4	194.8	42.6	18.4	+563	75	130	SDSS J091301.0+305120 ⁴
HVS5	146.3	38.7	17.9	+643	55	90	SDSS J091759.5+672238 ⁴
HVS6	243.1	59.6	19.1	+508	75	160	SDSS J110557.45+093439.5
HVS7*	263.8	57.9	17.7	+418	55	120	SDSS J113312.12+010824.9

REFERENCES. — (1) Brown et al. (2005a); (2) Hirsch et al. (2005); (3) Edelmann et al. (2005); (4) Brown et al. (2006)

NOTE. — HVS4 - HVS7 are from this targeted HVS survey.

*Probable HVS.

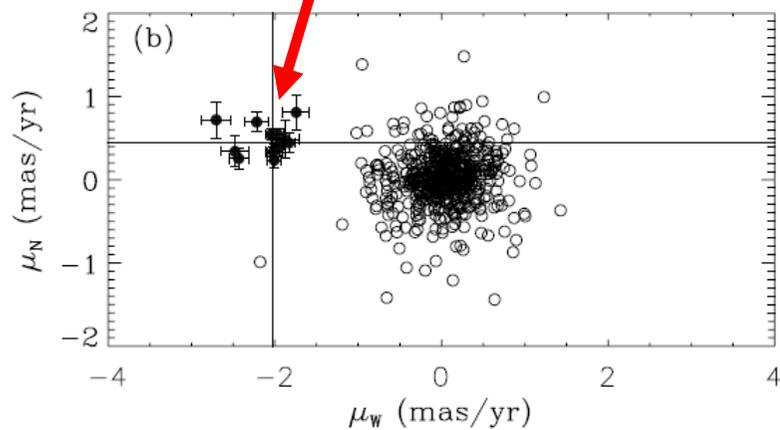
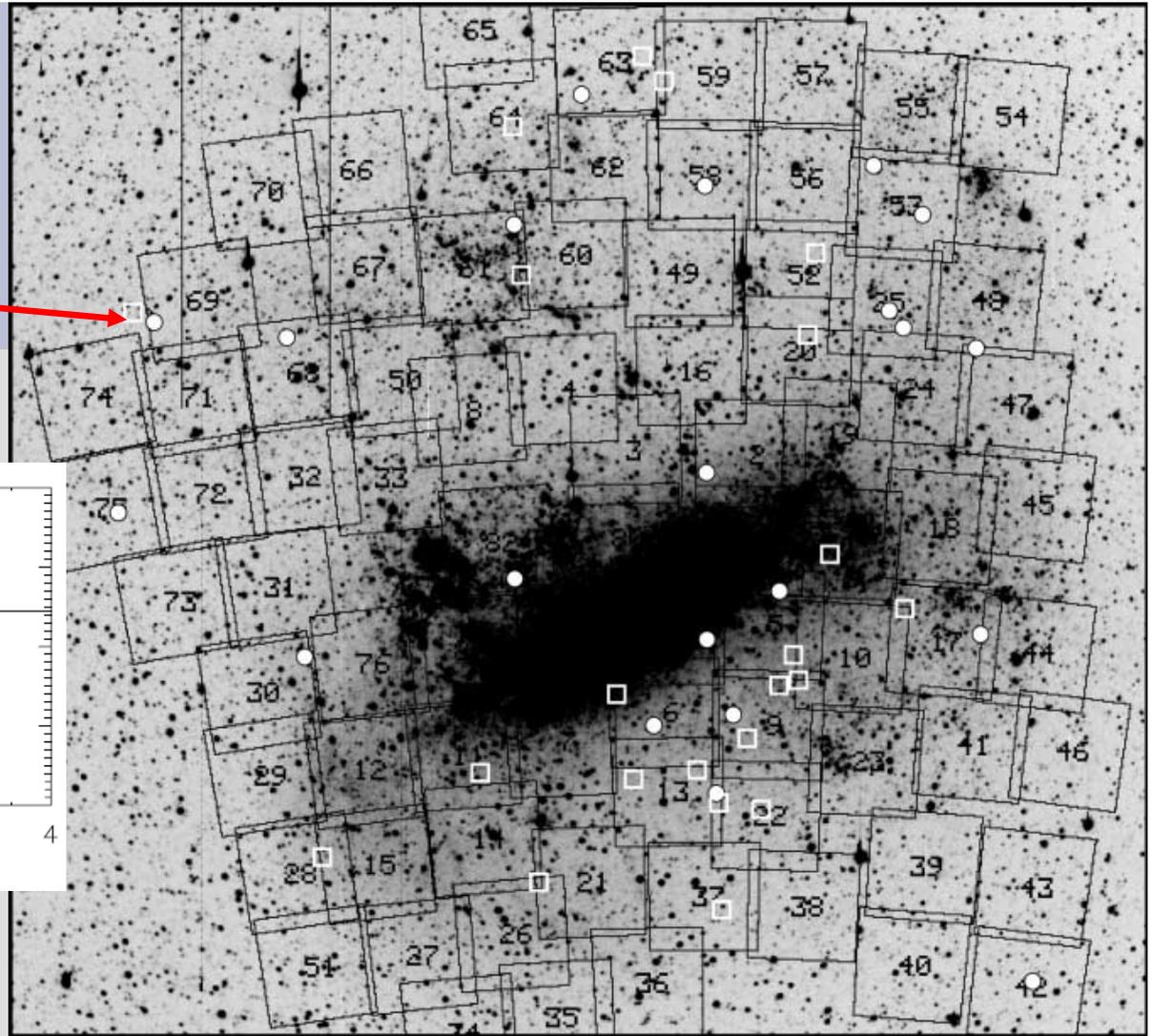
- **Реальность XXI века:**
- **Измерение собственных движений и пространственных скоростей близких галактик в Местной Группе**

Kallivayalil et al. (2006-2007), Besla et al. (2007)

- **Динамика LMC, SMC и Магелланова потока по собственным движениям и лучевым скоростям**
- Наблюдения: HST **A**dvanced **C**amera for **S**urveys
- Привязка: к квазарам в полях галактик (21 – в LMC, 6 – в SMC)
- Разность эпох: **2 года (!)**

LMC

Квезары

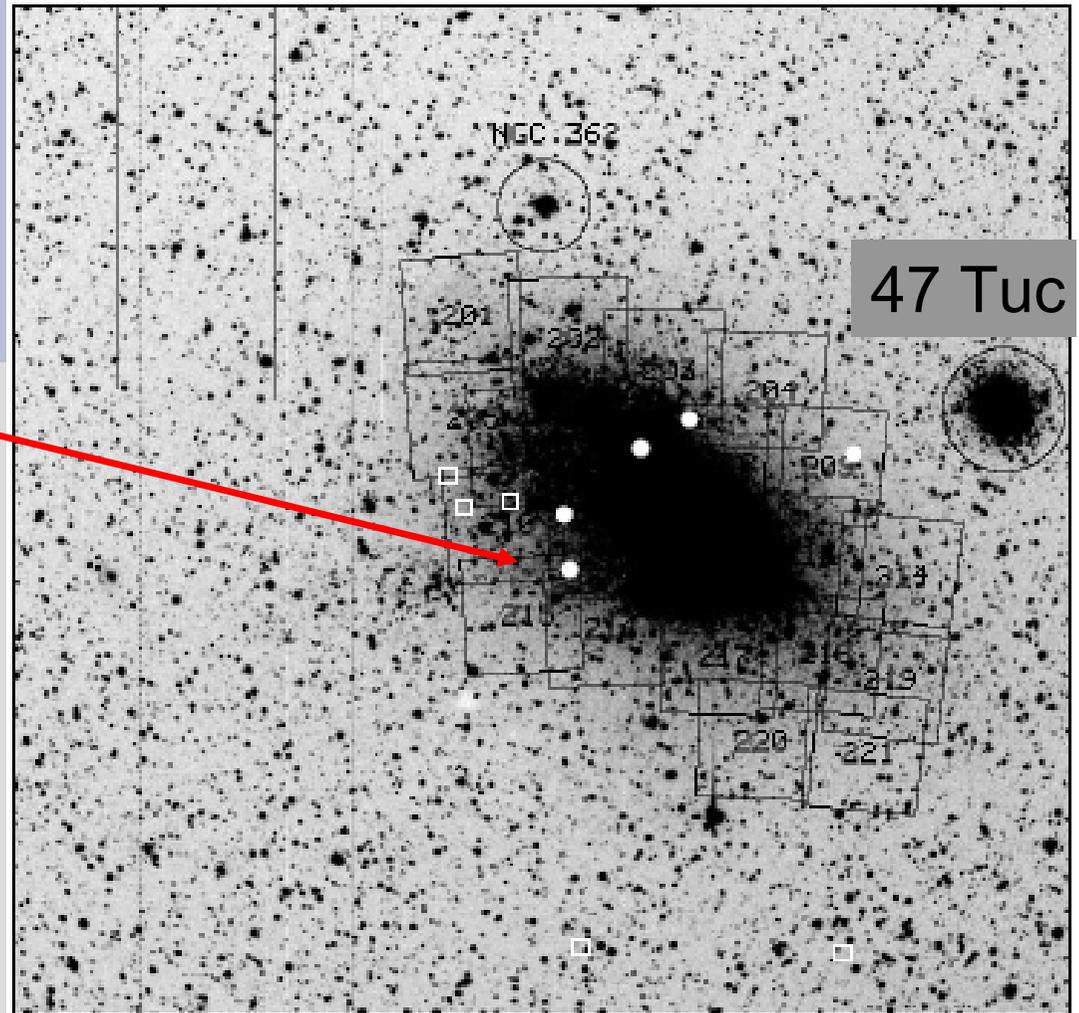
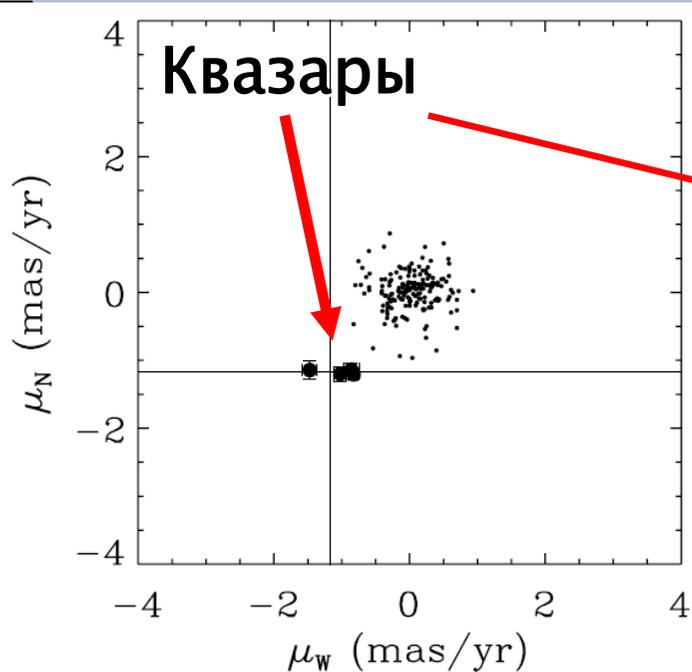


$$\mu_W = -1.94 \pm 0.09 \text{ mas yr}^{-1},$$
$$\mu_N = 0.43 \pm 0.06 \text{ mas yr}^{-1}.$$



$$v_{\text{LMC}} = 378 \pm 18 \text{ km s}^{-1},$$
$$v_{\text{LMC, rad}} = 89 \pm 4 \text{ km s}^{-1},$$
$$v_{\text{LMC, tan}} = 367 \pm 18 \text{ km s}^{-1}$$

SMC



$$\mu_W = -1.16 \pm 0.18 \text{ mas yr}^{-1},$$

$$\mu_N = -1.17 \pm 0.18 \text{ mas yr}^{-1}$$

$$v_{\text{SMC}} = 302 \pm 52 \text{ km s}^{-1},$$

$$v_{\text{SMC, rad}} = 23 \pm 7 \text{ km s}^{-1},$$

$$v_{\text{SMC, tan}} = 301 \pm 52 \text{ km s}^{-1}$$

$$v_{\text{LMC}} = 378 \pm 18 \text{ km s}^{-1},$$

$$v_{\text{LMC, rad}} = 89 \pm 4 \text{ km s}^{-1},$$

$$v_{\text{LMC, tan}} = 367 \pm 18 \text{ km s}^{-1}$$

- $V_{\text{TAN}} > 220 \text{ км/с}$, $V_{\text{RAD}} > 0 \rightarrow$ LMC и SMC недавно прошли через перицентры галактических орбит
- V_{TAN} близка ко II космической скорости MW (?)
- Относительная скорость $105 \pm 42 \text{ км/с}$ близка ко II космической скорости LMC

$$v_{\text{SMC}} = 302 \pm 52 \text{ km s}^{-1},$$

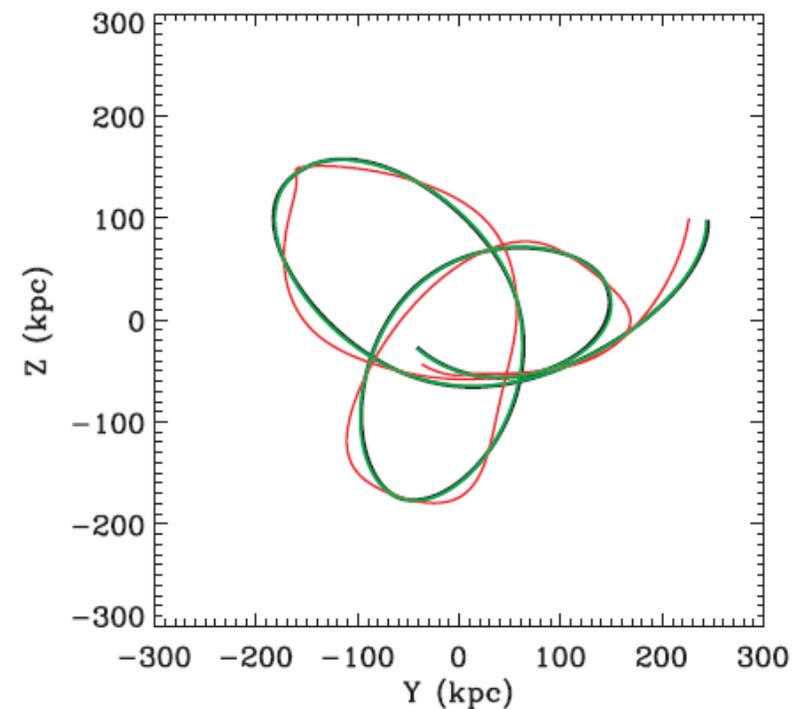
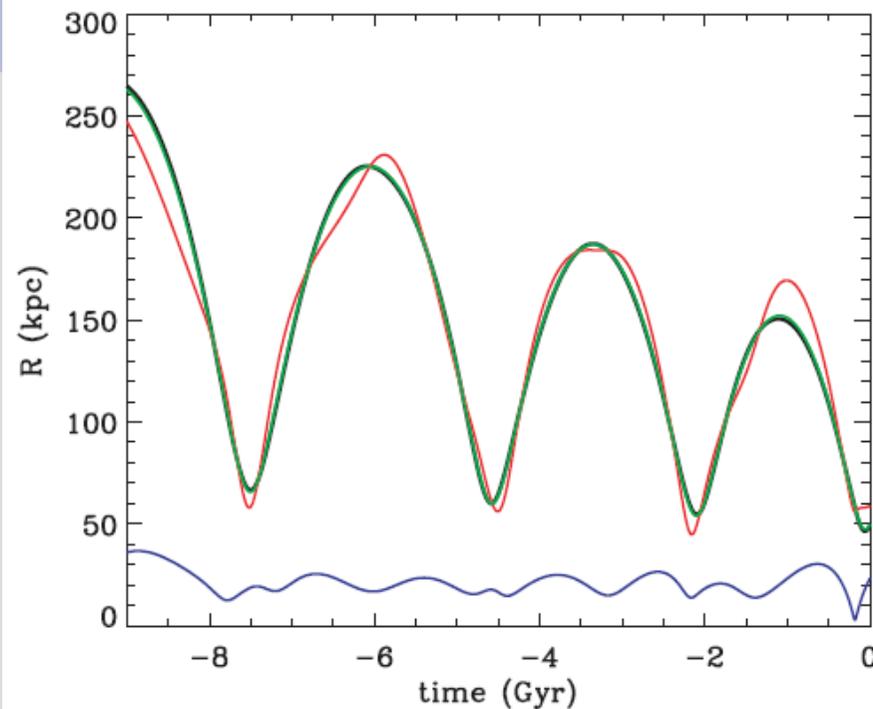
$$v_{\text{SMC, rad}} = 23 \pm 7 \text{ km s}^{-1},$$

$$v_{\text{SMC, tan}} = 301 \pm 52 \text{ km s}^{-1}$$

- Следствие: полная масса Галактики (до расстояний порядка 100-200 кпк) должна быть сравнима с

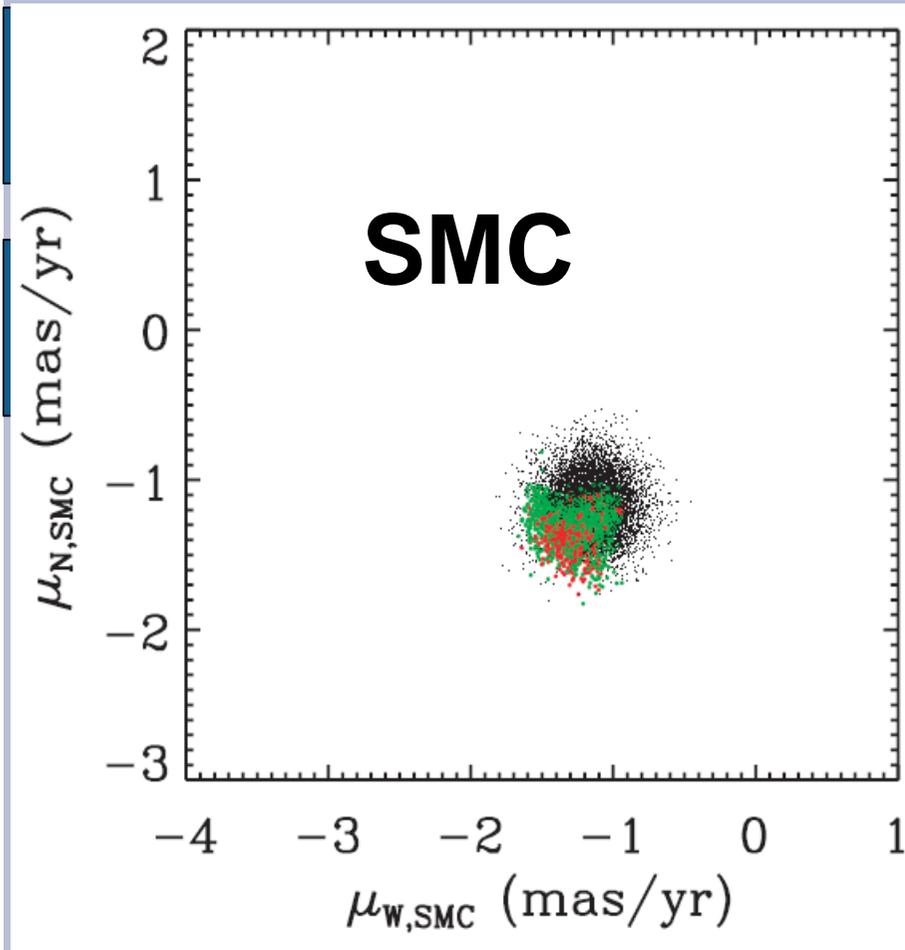
$$(1-2) \cdot 10^{12} M_0$$

Образуют ли Магеллановы Облака гравитационно-связанную систему?



- Одна из связанных орбит Облаков в изотермическом потенциале Галактики с учетом динамического трения (9 Gyr)
- Но: в пределах ошибок μ намного больше несвязанных решений

Начальные условия и устойчивость:



Диаграммы

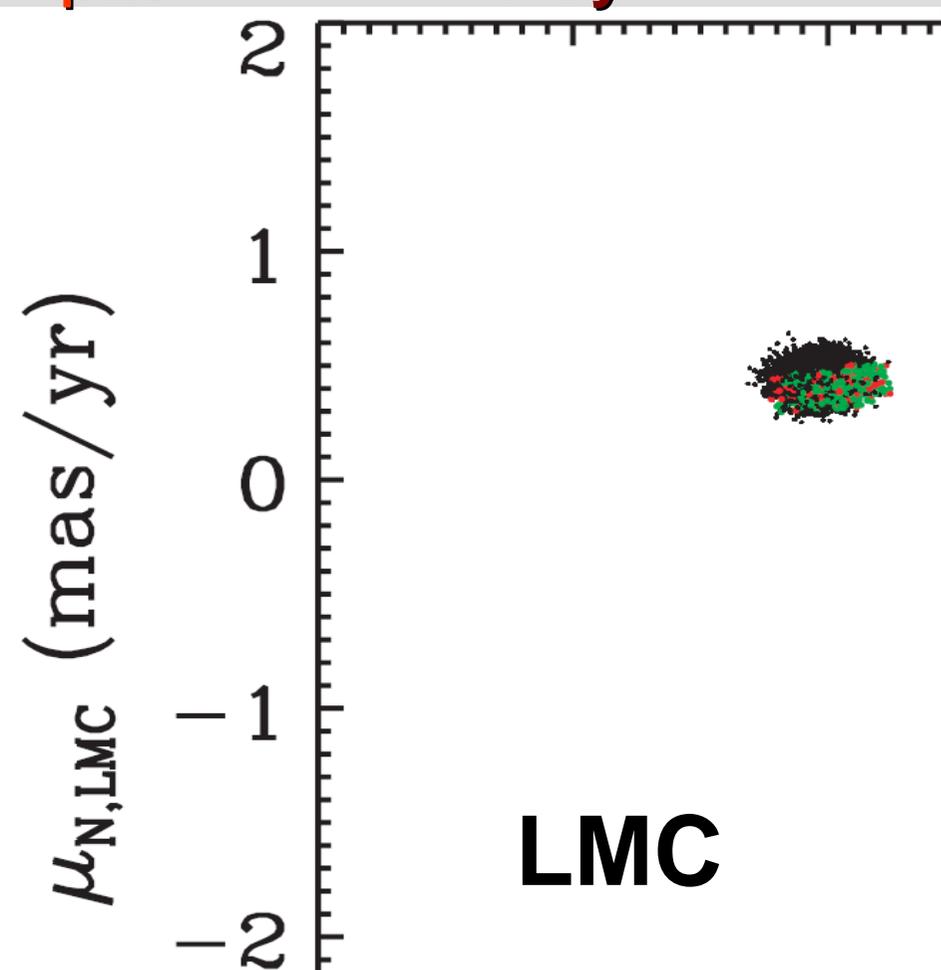
$$\mu_N - \mu_W$$

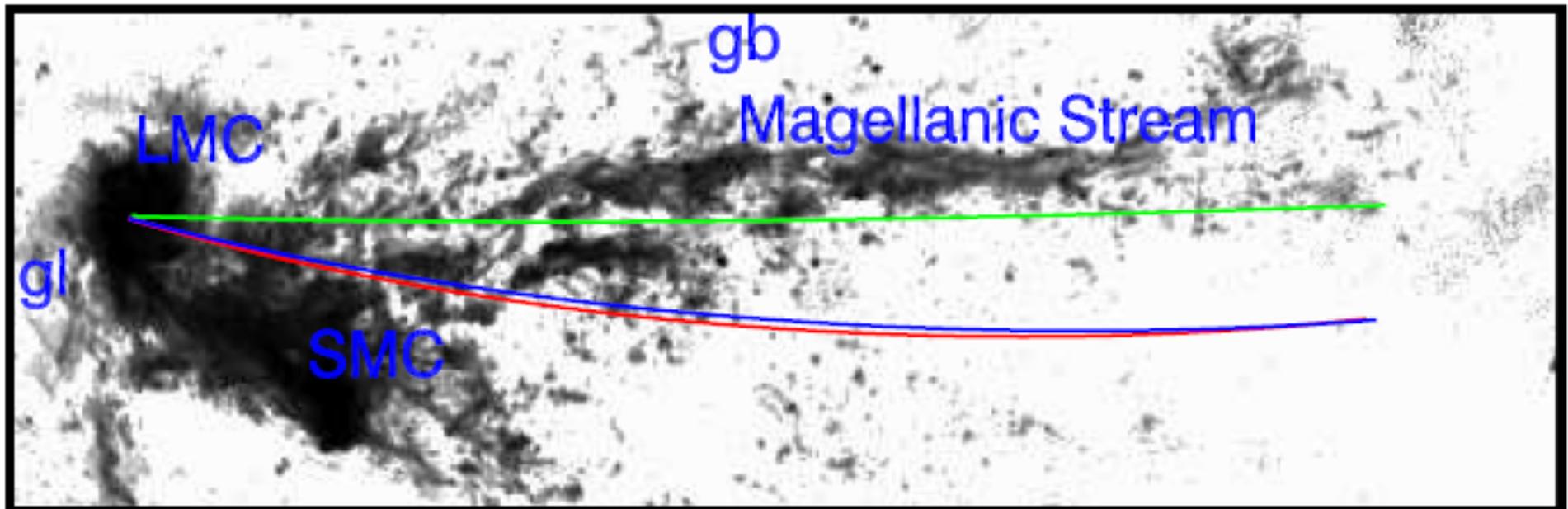
Гравитационная
связанность на
интервалах времени

Черный: $\Delta T < 1$ Gyr

Зеленый: $\Delta T \sim 1 - 5$ Gyr

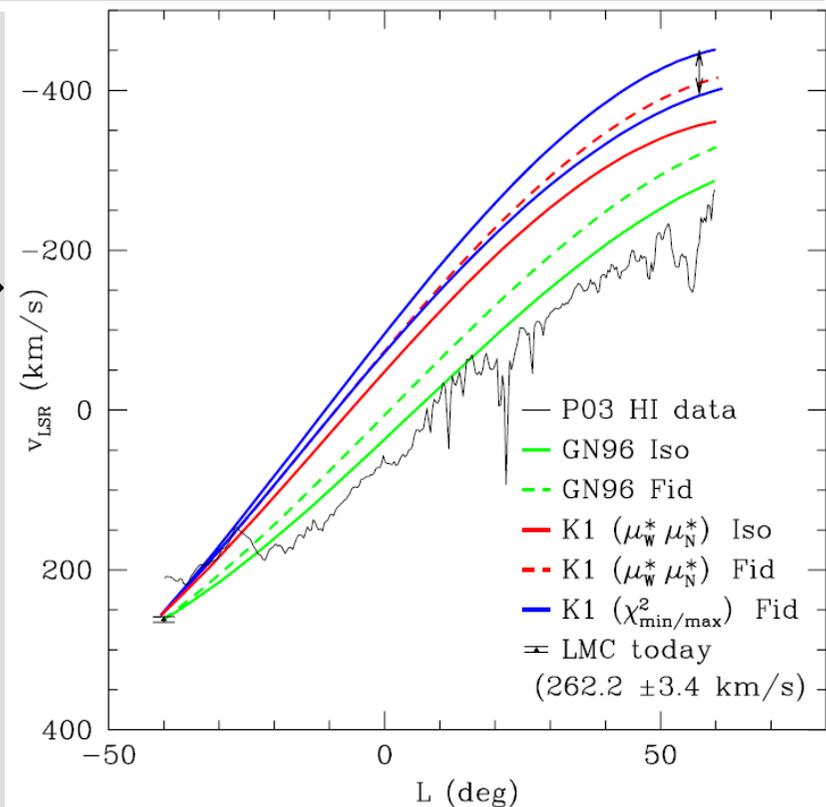
Красный: $\Delta T > 5$ Gyr





Скорости L/SMC и Магелланова Потока

L/SMC не связаны с
Магеллановым (газовым)
ПОТОКОМ



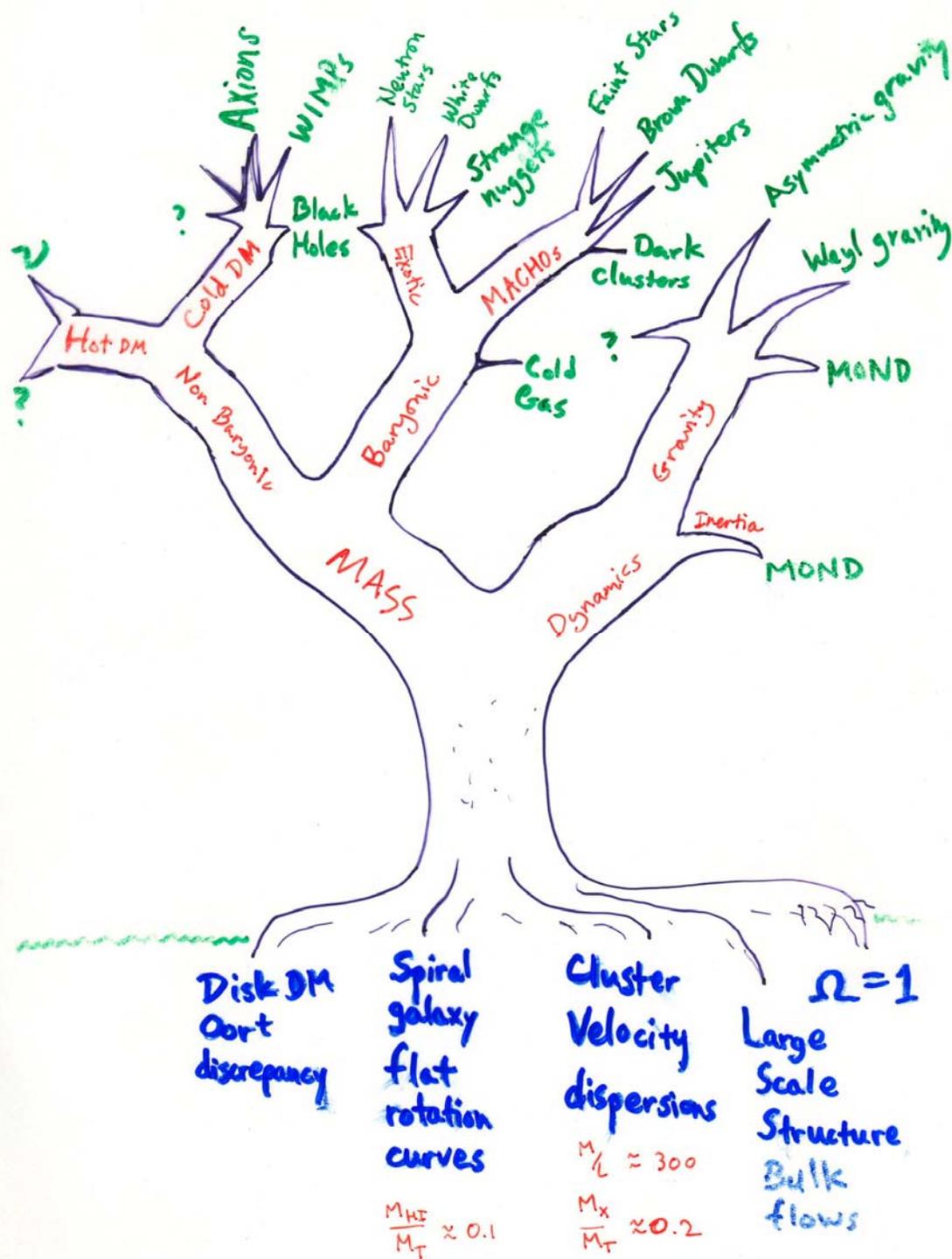
Proper Motions in the Andromeda Subgroup

Andreas Brunthaler¹, Mark J. Reid², Heino Falcke^{3,4}, Christian Henkel¹ and Karl M. Menten¹

ArXiv: 0708.1704v1

- VLBI наблюдения H₂O мазеров в М 33 и IC 10
- Точность РМ: ~ **3-6 $\mu\text{as/year}$**
- **$M_{\text{M31}} > 6.6 \cdot 10^{11} M_{\odot} - 1.2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$**

требуется для гравитационной
связанности (зависимости от модели)



Dark Matter «Family Tree»

Что ищут астрономы?

- Не вдаваясь в современные концепции небарионной (Λ CDM – Cold Dark Matter, WIMP – Weakly Interacting Massive Particles) и барионной (MACRO – Massive Compact Halo Objects) темной материи, покажем классические пути поиска «темных» объектов в современных астрономических наблюдениях

Вклад разных классов светимости в звездные подсчеты: при подсчетах для $V > 25^m$ критична модель $\Phi(M)$ для ГП

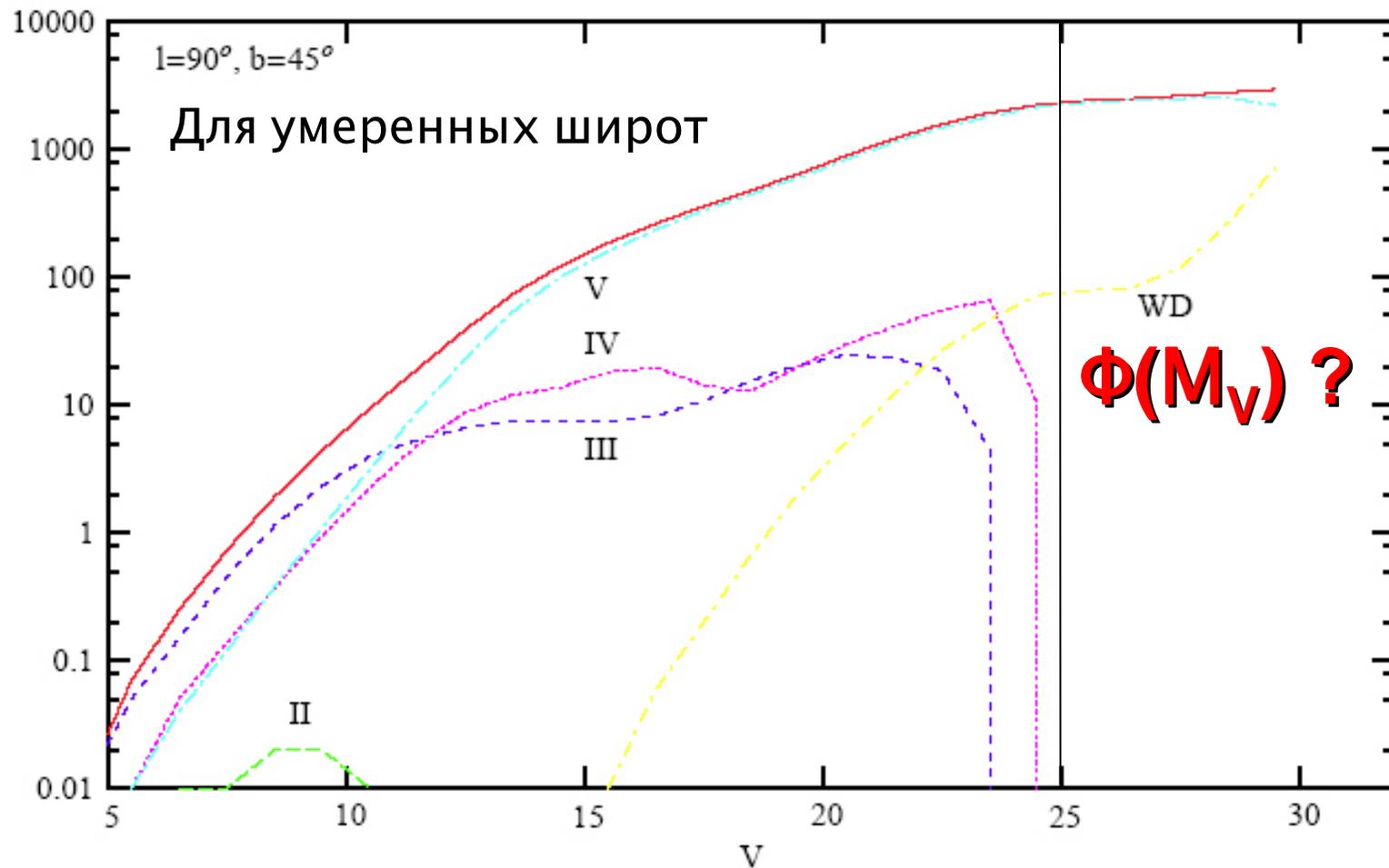
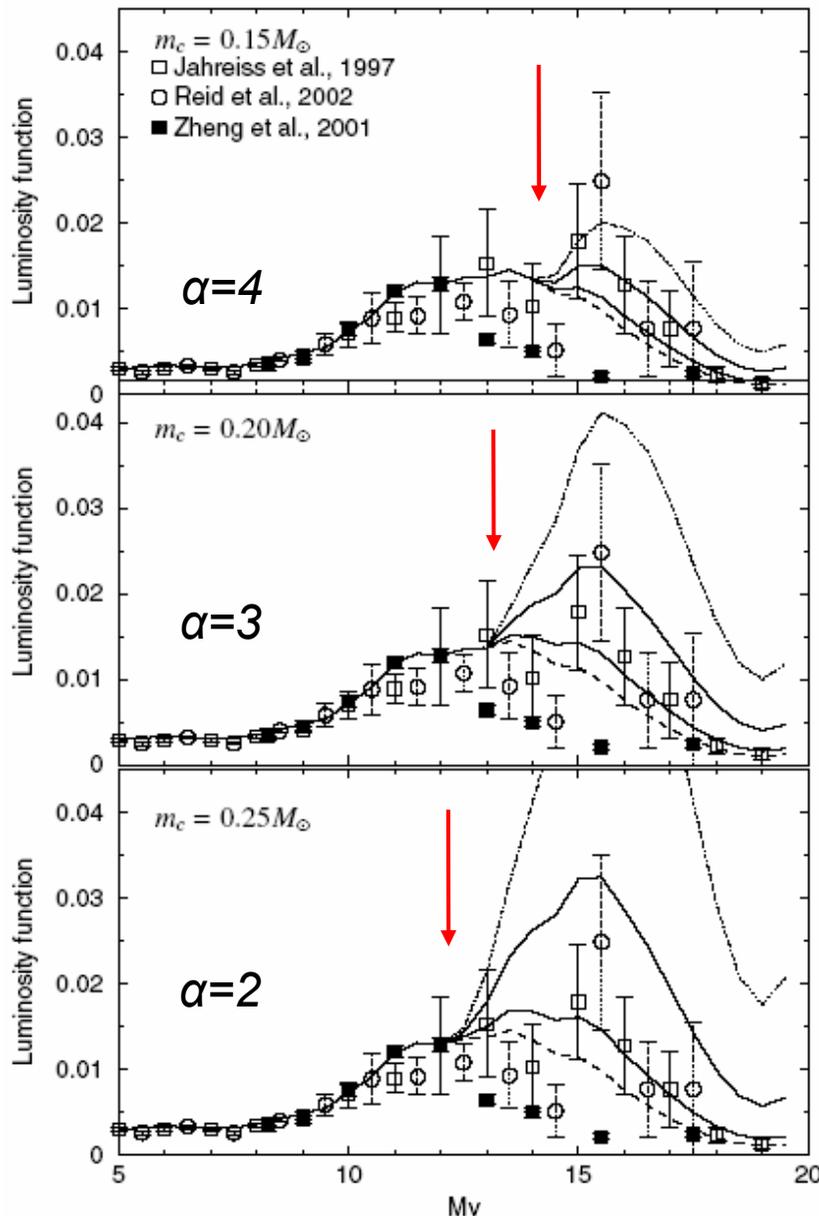


Fig. 11. Star count predictions (stars per magnitude and per square degree) in the V band at $l = 90^\circ$ and $b = 45^\circ$ and contributions of the different luminosity classes. All: solid line, class II: long dashed, class III: short dashed, class IV: dotted, class V: dashed-dotted upper curve, white dwarfs: dashed-dotted lower curve. The giants dominate at $V < 11$, main sequence stars at $V > 14$ in this direction. The rise of the white dwarf curve at $V > 27$ is due to the dark halo white dwarf population normalized here to 2% of the dark halo.

Слабый конец функции светимости:

Свежие результаты проекта CFHT Legacy Survey (M.Schultheis, A.Robin et al., 2006)



Luminosity function in the V band in number of stars per pc^3 per magnitude for different break points in mass. The top panel indicates $m_c = 0.15 M_\odot$, the middle panel $m_c = 0.20 M_\odot$ and the lower panel $m_c = 0.25 M_\odot$. Open squares are from Jahreiss et al.'s (1997) determination from the revised Catalogue of Nearby Stars, open circles are from Reid et al. (2002) determination using the PMSU survey combined with Hipparcos data, filled squares are from Zheng et al.'s (2001) determination from the HST. The lines show model luminosity functions assuming different slopes for the IMF: $\alpha = 1.5$ is the standard Galaxy model (dashed line), $\alpha = 2$ (thin line), $\alpha = 3$ (thick line), and $\alpha = 4$ dotted line) (see text).

m_c – mass break (излом, красная черта)

Для IMF вида $dn/dm \sim m^{-\alpha}$:

$\alpha = 1.5$ для $m < 0.5 m_0$ (стандартная модель):

$\alpha = 4$ для $m < m_c = 0.15 m_0$!

$\alpha = 3$ для $m < m_c = 0.20 m_0$!

$\alpha = 2$ для $m < m_c = 0.25 m_0$

Избыток звезд малой массы!

Вклад в решение проблемы DM?

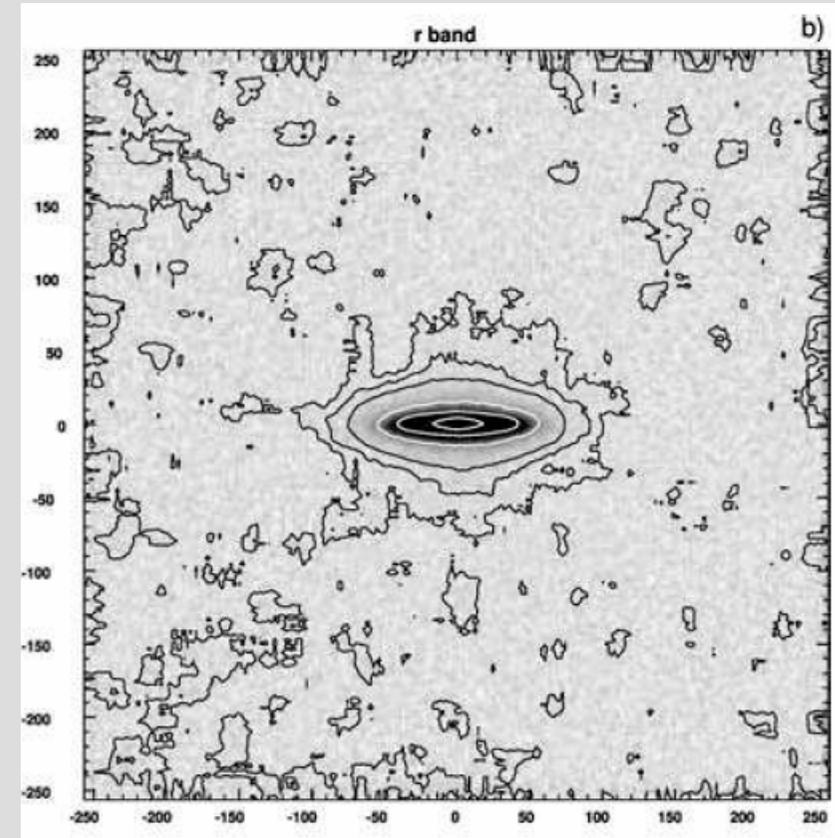
Haloes around edge-on disc galaxies in the Sloan Digital Sky Survey

Stefano Zibetti,^{1★} Simon D. M. White¹ and Jon Brinkmann²

¹Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, D-85748 Garching bei München, Germany

²Apache Point Observatory, PO Box 59, Sunspot, NM 88349, USA

- ~1100 ДИСКОВЫХ галактик, ВИДИМЫХ С ребра (SDSS – g,r,i,z)
- Красное население!
- Радиальный профиль $\sim r^{-3}$



Red halos of galaxies – Reservoirs of baryonic dark matter?

E. Zackrisson^{1,2,3}, N. Bergvall³, C. Flynn¹,
G. Östlin², G. Micheva² and B. Caldwell³

2. A bottom-heavy stellar initial mass function?

¹, Finland

², Sweden

³, Sweden

Zackrisson, Bergvall, Östlin *et al.* (2006) analyzed the colours of these new detections and found that the halos of both BCGs and edge-on disks could be explained by a stellar population with a very bottom-heavy IMF ($dN/dM \propto M^{-\alpha}$ with $\alpha \approx 4.50$, where $\alpha = 2.35$ represents the Salpeter slope). For an IMF slope as extreme as this, only stars with masses $0.1 \leq M (M_{\odot}) \leq 3$ contribute substantially to the integrated optical/near-IR light. The mass-to-light ratios of such populations are very high ($M/L_{\lambda} \gtrsim 40$), which

make them
redshift Uni
comes from
been derived

Попытка объяснить красные гало населением с большим наклоном функции масс (> 4) в области маломассивных звезд. Потенциально большой вклад в полную массу, уменьшающий роль действительно «скрытой» массы. $M/L > 40$

Микролинзирование: MACHO, OGLE

CONTRIBUTION OF BROWN DWARFS AND WHITE DWARFS TO RECENT MICROLENSING OBSERVATIONS AND TO THE HALO MASS BUDGET

G. CHABRIER, L. SEGRETAİN, AND D. MÉRA

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (UMR CNRS 5574), Ecole Normale Supérieure, 69364 Lyon Cedex 07, France

Received 1996 April 22; accepted 1996 June 17

ABSTRACT

We examine the recent results of the MACHO collaboration toward the Large Magellanic Cloud in terms of a halo brown dwarf or white dwarf population. The possibility that most of the microlensing events are due to brown dwarfs is totally excluded by large-scale kinematic properties. The white dwarf scenario is examined in detail in the context of the most recent white dwarf cooling theory which explicitly takes into account the extra energy source that derives from the carbon-oxygen differentiation at crystallization and the subsequent Debye cooling. We show that the observational constraints arising from the luminosity function of high-velocity white dwarfs in the solar neighborhood and from the recent *Hubble Space Telescope* deep field counts are consistent with a white dwarf contribution to the halo missing mass as large as 50%, provided there is (1) an initial mass function strongly peaked around $\sim 1.7 M_{\odot}$, and (2) a halo age older than ~ 18 Gyr.

- HST-Deep Field Survey: вклад старых белых карликов $\sim 50\%$ от требуемого моделями барионной скрытой массы!
- Еще резерв: коричневые карлики с $M < 0.08 M_{\odot}$, BH, NS, планеты, ...

Danforth & Shull, ApJ V.624, P.555-560, 2005
“The Low-z Intergalactic Medium. O VI barion census”

- Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE). Наблюдения активных ядер галактик.
- Вклад WHIM (**W**arm-**H**ot **I**ntergalactic **M**edium) в полную барионную плотность $\sim 10\%$

Проекты 2010-2020:

- Глубокие звездные обзоры (до 21-28^m):
- **GAIA**
- **SNAP** (**S**uper**N**ovae as **A**cceleration **P**robe)
- Поиск слабых звездных кандидатов в «скрытые» объекты как побочный результат проекта

- **MOND** = **MO**dified **N**ewtonian **D**ynamics
- Beer, Wilhelm; von Madler, Johann Heinrich (1837) – первыми использовали термин ‘MOND’
- Альтернатива концепции небарионной темной материи (Λ CDM)
- Первые идеи о (малых) отклонениях от закона R^{-2} были предложены для объяснения аномального смещения перигелия Меркурия, т.е. как альтернатива ОТО.

$$a = GM \frac{1}{r^{2+\delta}}$$

Закон Холла (1894)
Ньюком: $\delta \approx 1.612 \cdot 10^{-7}$
(1895)

$$a = GM \left(\frac{1}{r^2} + f(r) \right)$$

Закон Клеро (1745)
 $f(r) \sim r^{-4}$

Другие авторы:

Challis J. (1859)

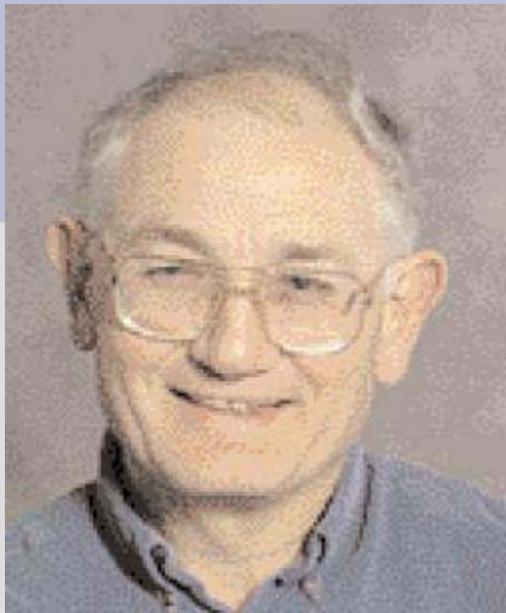
Guthrie F. (1870)

Hicks W. (1880)

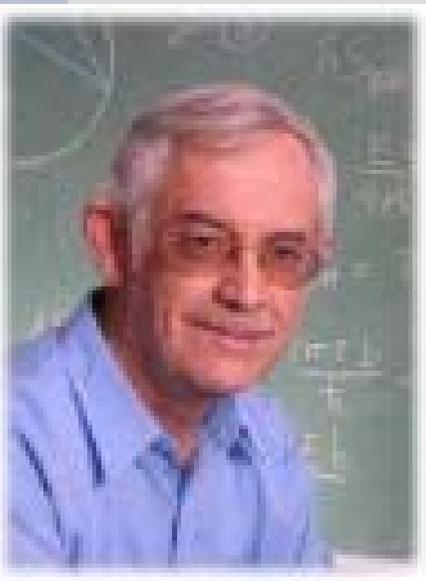
...

MOND: большие отклонения от закона Ньютона

Фриц Цвикки (динамика скоплений галактик)



Moti Milgrom – автор
парадигмы MOND (1983)
>2400, 23 x 23



Jacob Bekenstein –
разработка физических
основ MOND
>4100, 30 x 30

Robert Sanders –
теория
~2900, 32 x 32



Stacy McGaugh –
PR, PR, PR...
>3600, 33 x 33

- Автор современной парадигмы MOND:
Mordehai Milgrom (Weizmann Inst., Israel) –
ApJ V.270, P.365, 1983

- Основная идея: закон Ньютона для силы $\sim R^{-2}$ действует при ускорениях, превышающих

- $$a \gg a_0 \approx 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ см/с}^2$$

- Пример: ускорение Плутона от Меркурия больше $a_0 \rightarrow$ проверка отклонений от ЗН в Солнечной системе невозможна

- (Ускорение Солнца в Галактике $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ см/с²)[†]

- Постулируется, что ускорение от пробной частицы массой M на расстоянии r равно

$$a^2 / a_0 \approx MGr^{-2}$$

при $a_N \ll a_0$

- или $a^2 = a_N \cdot a_0$ (a_N – закон Ньютона), и $a \sim R^{-1}$ – изотермический потенциал
- Апологеты MOND строят новые физические теории

Такие разные теории тяготения:

- AQUAL – нелинейный Лагранжиан

$$L = - \int \left[\frac{a_0^2}{8\pi G} F \left(\frac{|\nabla\Phi|^2}{a_0^2} \right) + \rho\Phi \right] d^3x.$$

- RAQUAL – релятивистское обобщение AQUAL

- PCG – Phase Coupled Gravity $\tilde{g}_{\alpha\beta} = e^{2\psi/c^2} g_{\alpha\beta}$
- **TeVS – Tensor-Vector Scalar Theory**
- BSTV – Bi-Scalar Tensor-Vector Theory
- STVG – Scalar-Tensor-Vector Gravity (Moffat, 2006)
- MOG – Modified Gravity et al. ...

- **Принципы:** теория выводится из *действия*
- Релятивистская инвариантность
- Принцип эквивалентности
- Причинность
- Неотрицательность плотности энергии
- Отклонения от Ньютоновской теории тяготения

-
- **Астрофеноменология:**
 - Внегалактические масштабы
 - Гравлинзирование
 - Солнечная система
 - Двойные пульсары
 - Космология

MOND Page of Stacy McGaugh:

• <http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/>

- “...A compelling physical basis for MOND is still lacking”
- “...As yet, no one has succeeded in writing down a theory which encompasses both MOND and General Relativity”