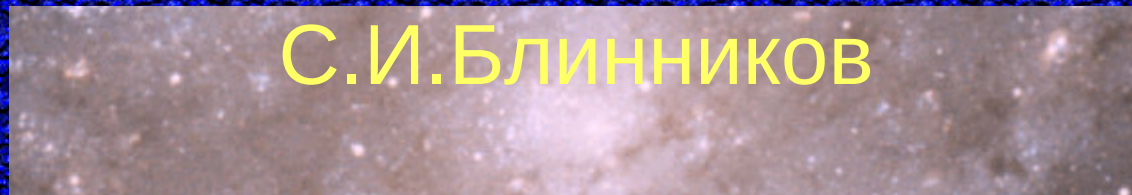


Тёмная Материя в галактиках



С.И.Блинников



ИСТОЧНИКИ

- Презентации о Тёмной Материи (ТМ, Dark Matter, DM): А.В.Засов (ГАИШ, МГУ), Д.Ю.Акимов (ИТЭФ), Г.Раффелт (G.Raffelt, MPI für Physik, München), Е.Васильев (МФТИ)
- NASA (ADS, Chandra, etc.)
- Лекции автора на Зимней Школе ИТЭФ
- ArXiv.org

План

- Основные аргументы в пользу существования тёмной материи
- «Невидимые» барионы
- Темное гало или темный диск?
- Проблема каспа
- Темная материя и процессы в диске

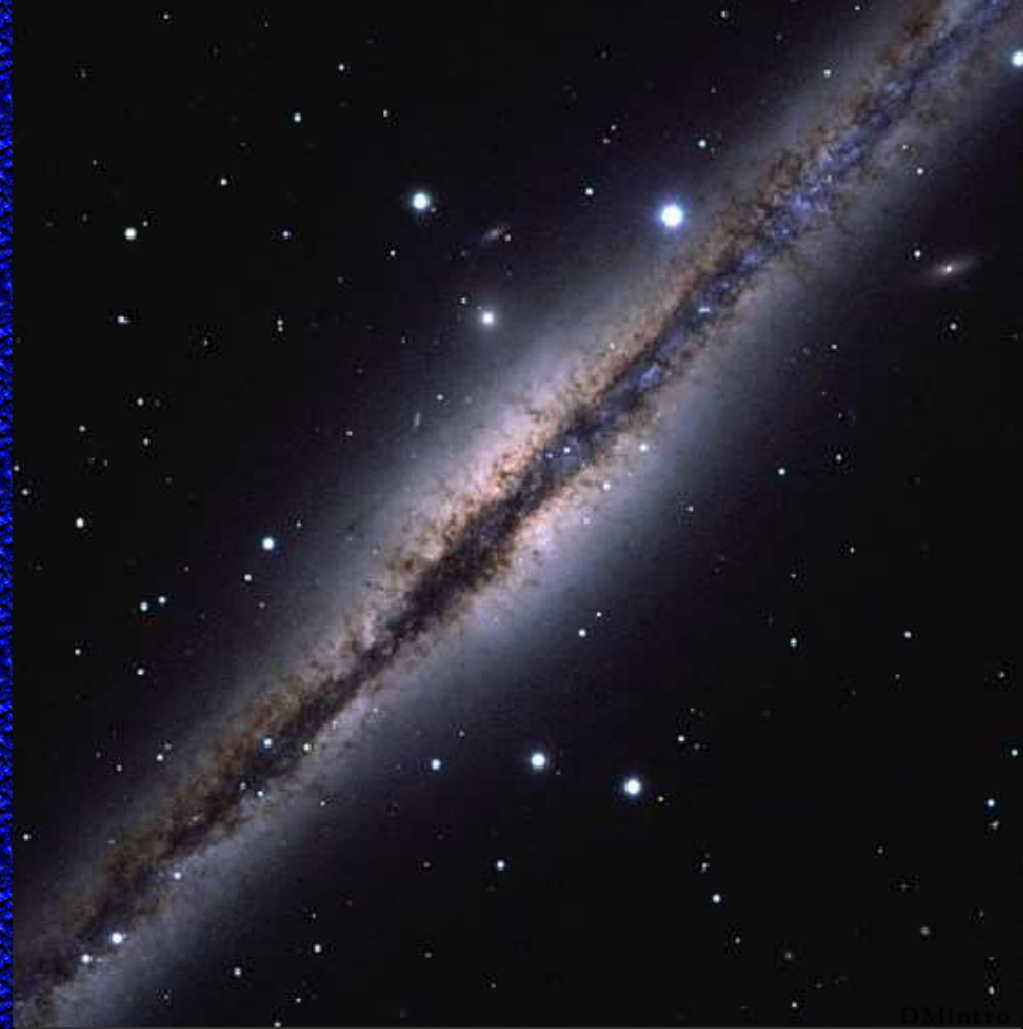
Факты о Тёмной Материи

- Динамика галактик
- Динамика скоплений галактик
- Горячий газ в скоплениях
- Гравитационное линзирование
- Образование структур из малых возмущений в горячей Вселенной

Спиральные галактики



NGC 2997 плашмя

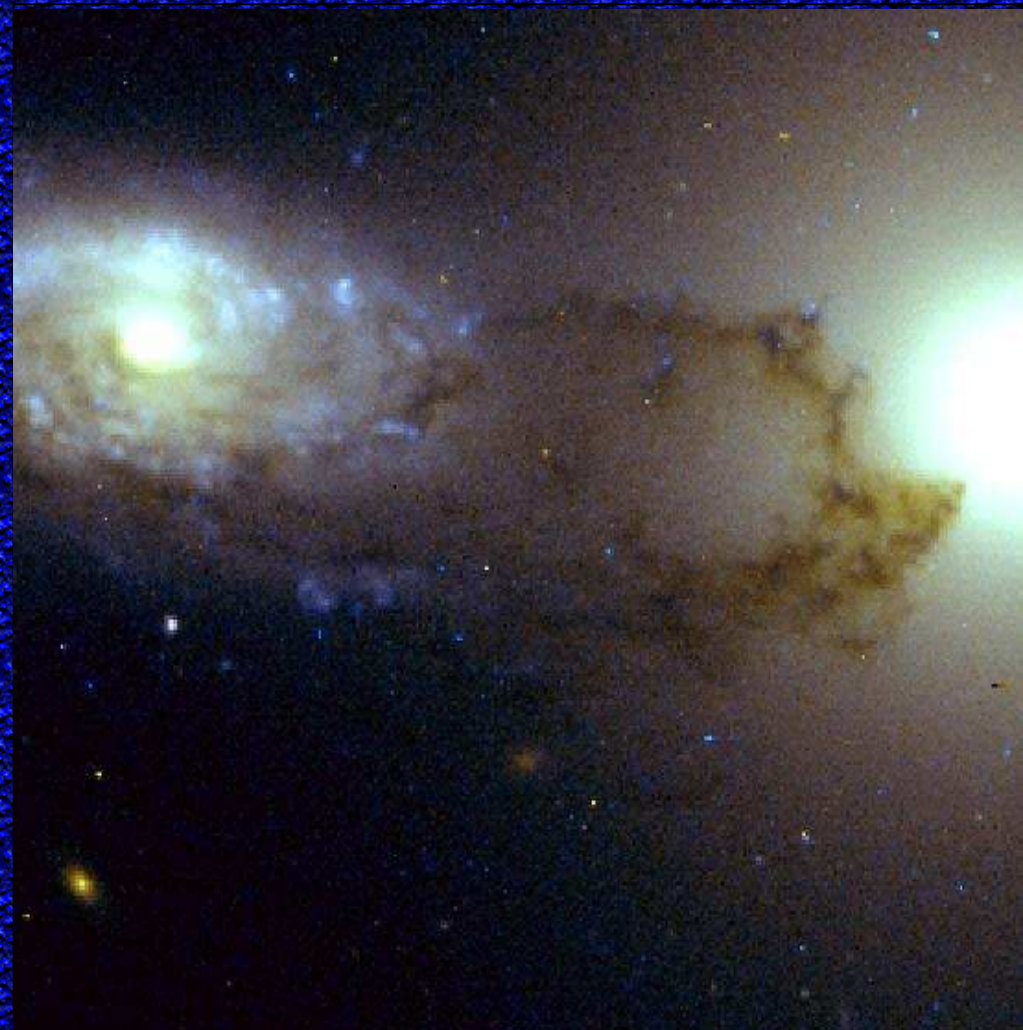


NGC 891 с ребра

Спиральные и эллиптические



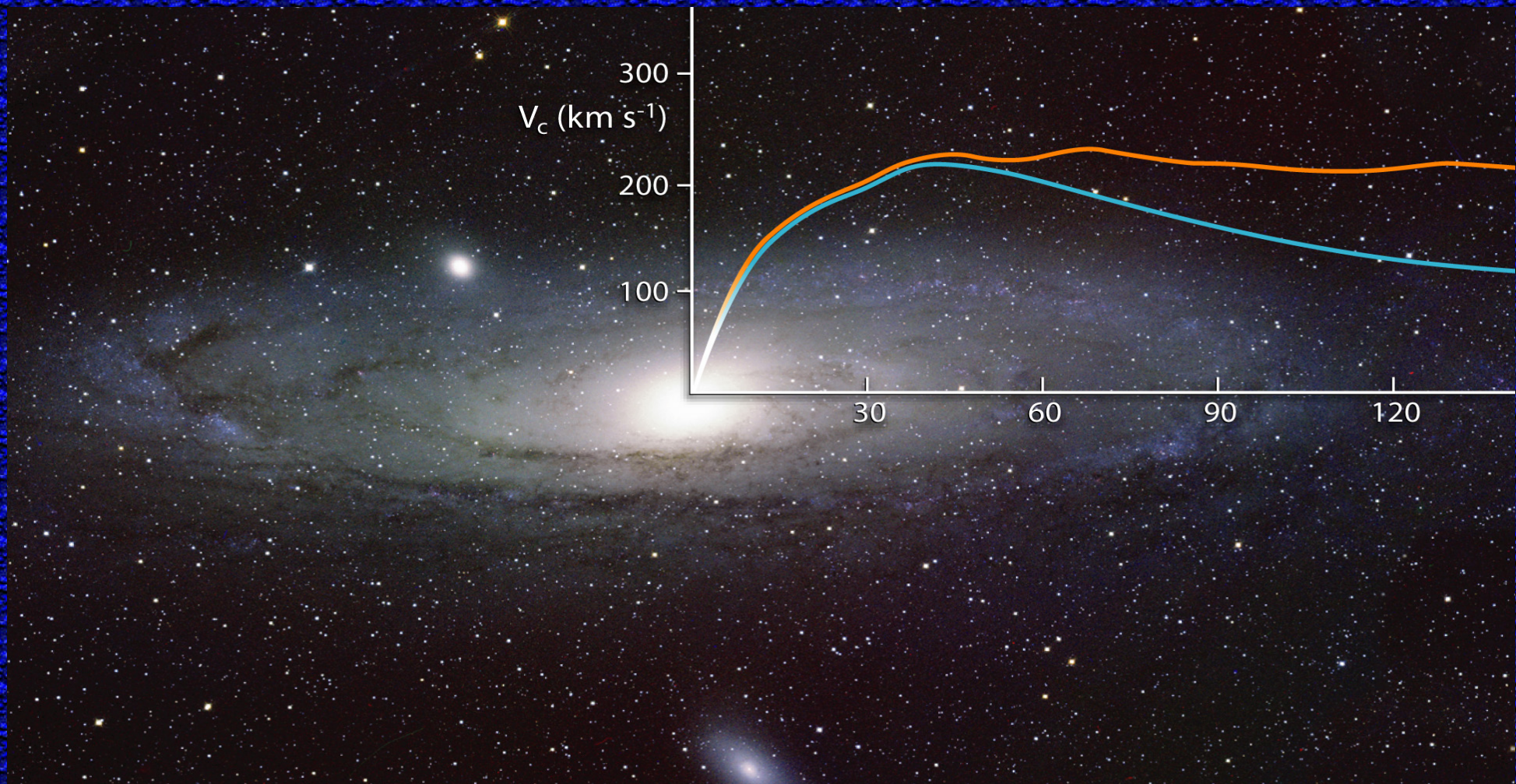
М51 со спутником



Периферия рукавов на фоне далёкой эллиптической галактики

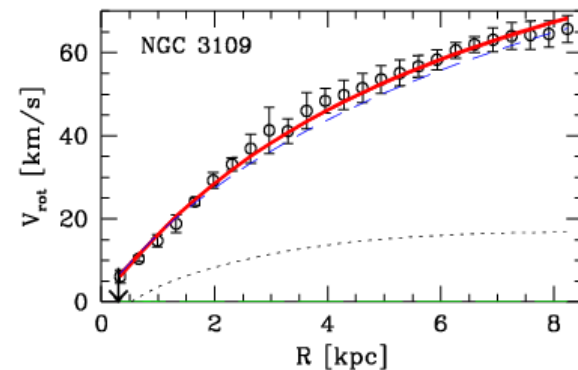
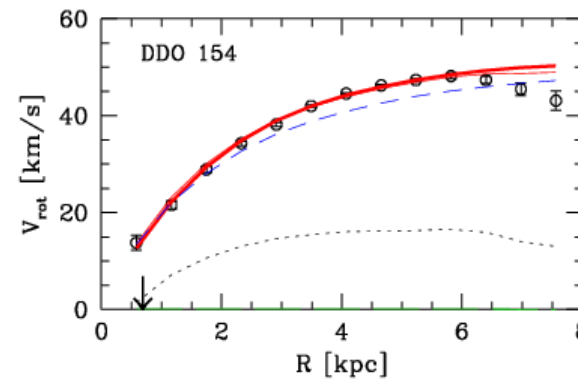
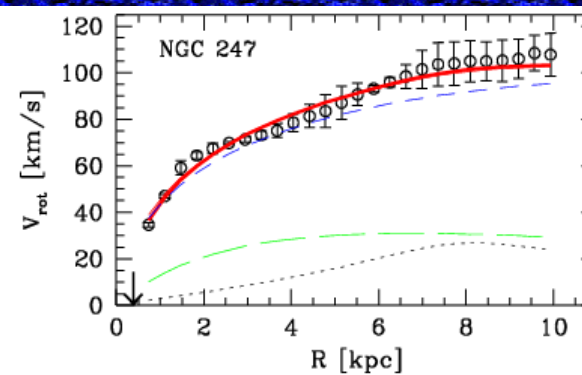
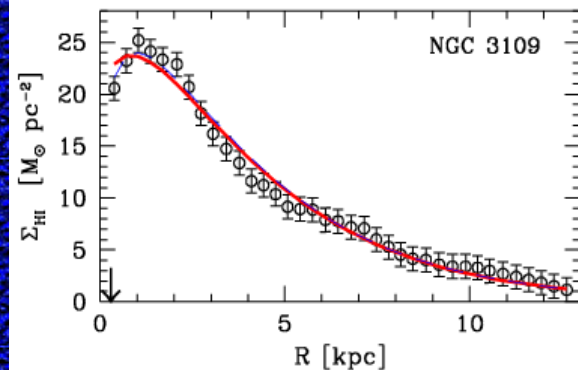
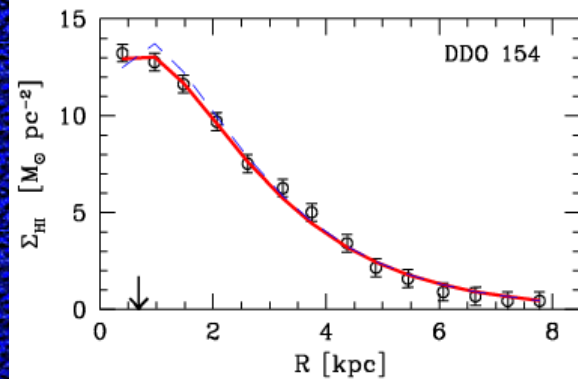
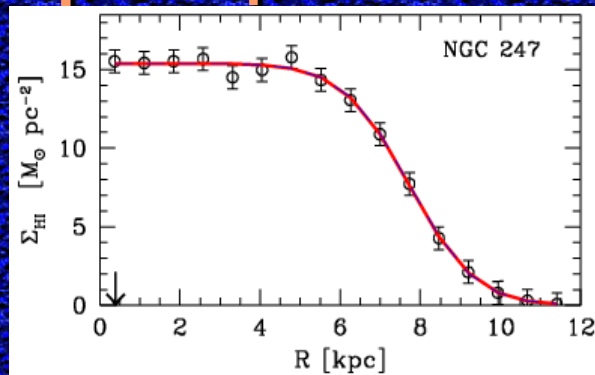
Вращение галактик на периферии (где мало горячих звёзд) можно наблюдать в радиодиапазоне (нейтральный водород, мазеры CO...)

Кривая вращения M31 (Andromeda)
не спадает, как нужно ожидать по
светящейся материи



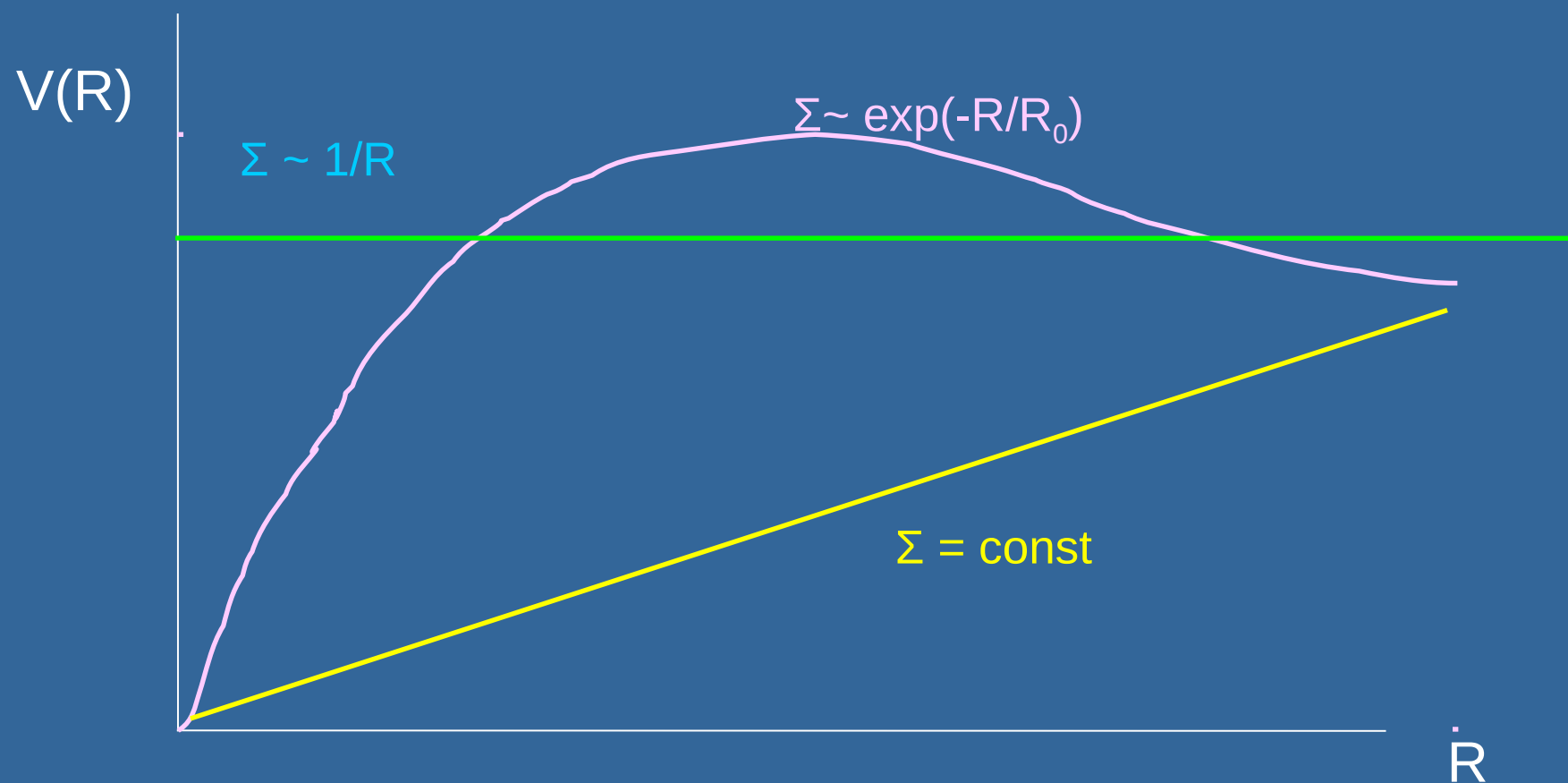
Длинные плоские кривые вращения — не главное!

яркость



скорость

Кривая вращения для тонкого диска:



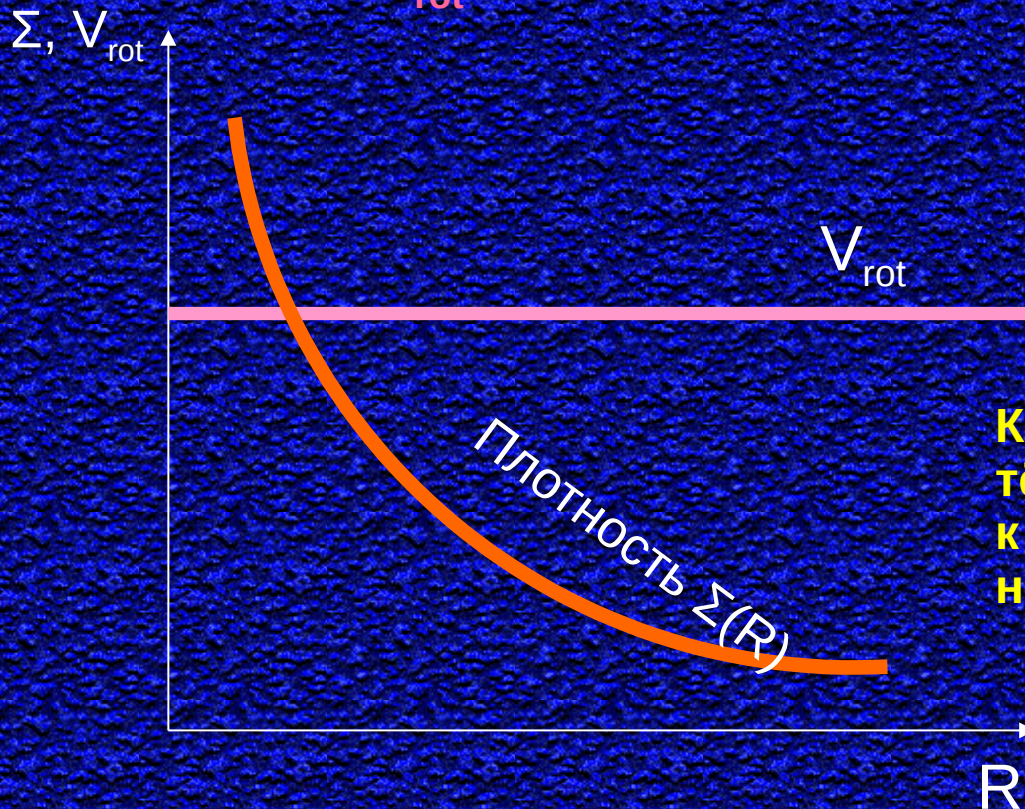
Например, Диск Местеля

$$V_{\text{rot}}^2 = R \cdot d\psi/dR$$

Диск Местеля имеет такое распределение поверхностной плотности:

$$\Sigma(R) \sim \Sigma_0 R_0 / R$$

$$V_{\text{rot}}^2 = 2\pi G \Sigma_0 R_0$$



Кривая вращения плоская без всякой тёмной материи, но отношение массы к светимости M/L оказывается не похожим на известные объекты

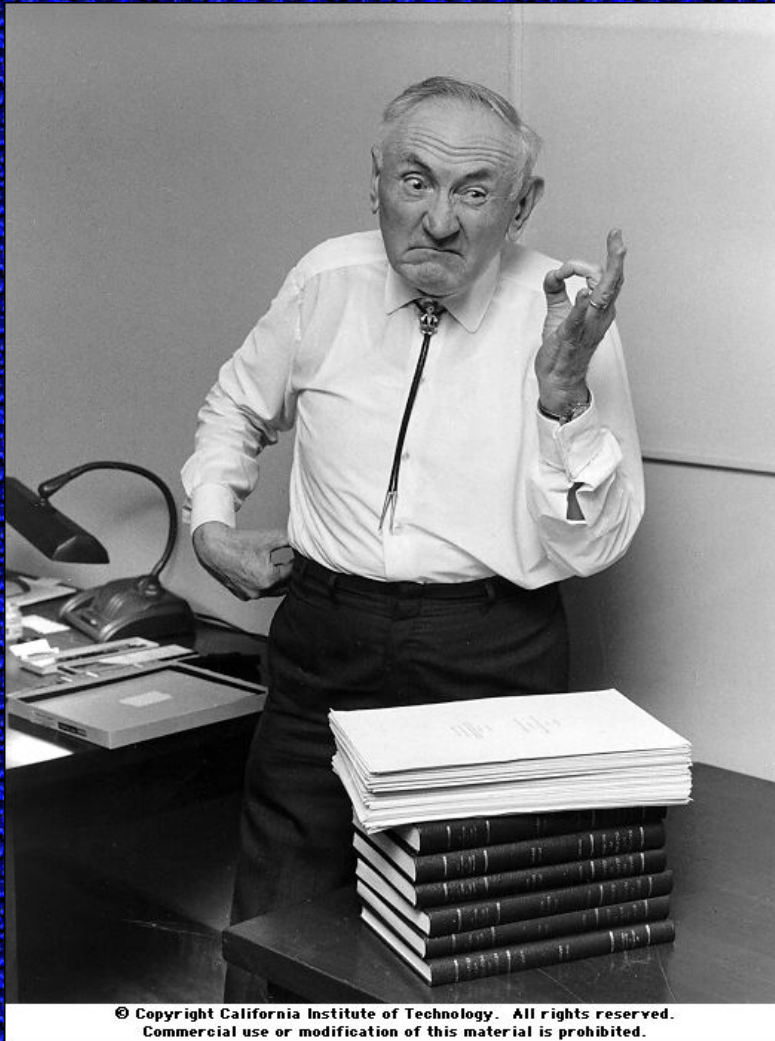
**ПРОБЛЕМА СКРЫТОЙ ИЛИ ТЁМНОЙ
МАССЫ ВОЗНИКЛА ИЗ-ЗА СИЛЬНОГО
РАССОГЛАСОВАНИЯ ПРЯМЫХ
(кинематических) И КОСВЕННЫХ
(фотометрических) ОЦЕНОК МАССЫ
ГАЛАКТИК (и их систем)**

Строение спиральной галактики



Гало Тёмной Материи

Первое указание на DM пришло из скоплений галактик



Fritz Zwicky (1933): Тёмная материя должна сдерживать скопление галактик СОМА от расширения — эта статья была забыта до 1970х годов

Тёмная материя в скоплениях галактик

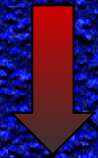
Стационарная система "частиц", связанных гравитацией, подчиняется теореме вириала

$$2\langle E_{\text{kin}} \rangle = -\langle E_{\text{grav}} \rangle$$

$$2\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{G_N M_r m}{r} \right\rangle$$

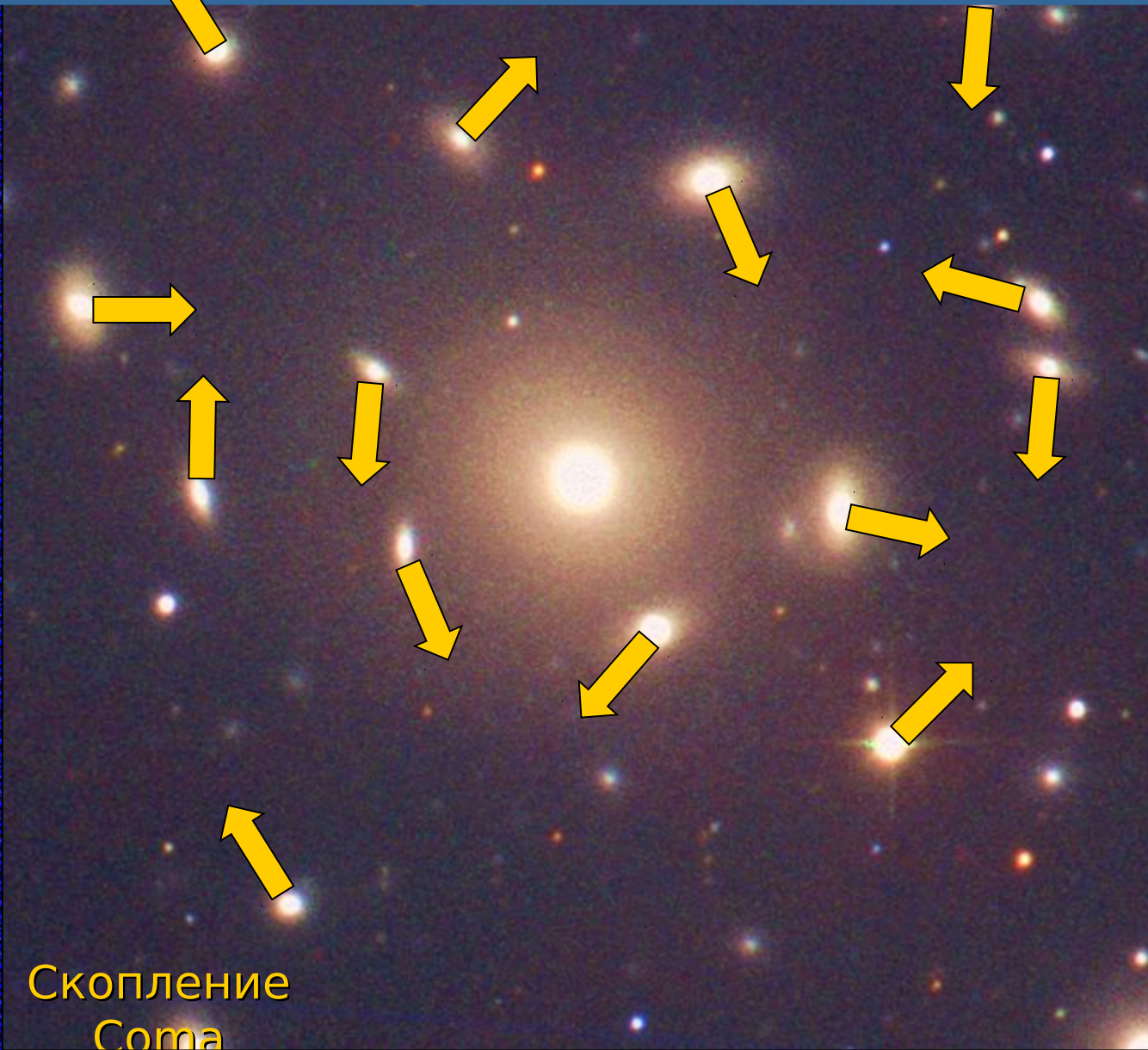
$$\langle v^2 \rangle \approx G_N M_r \langle r^{-1} \rangle$$

Скорость измеряется по доплер-эффекту в спектральных линиях



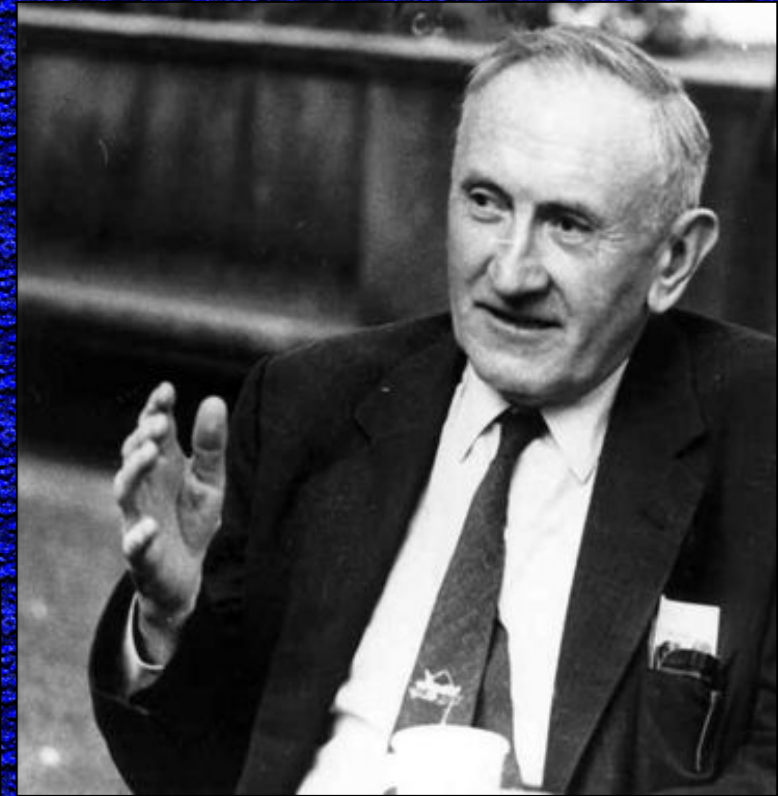
Оценка массы

Скопление
Coma



Dunkle Materie in Galaxienhaufen

В 2013 г 80-летие открытия
Цвикки Dunkle Materie – Тёмной
Материи



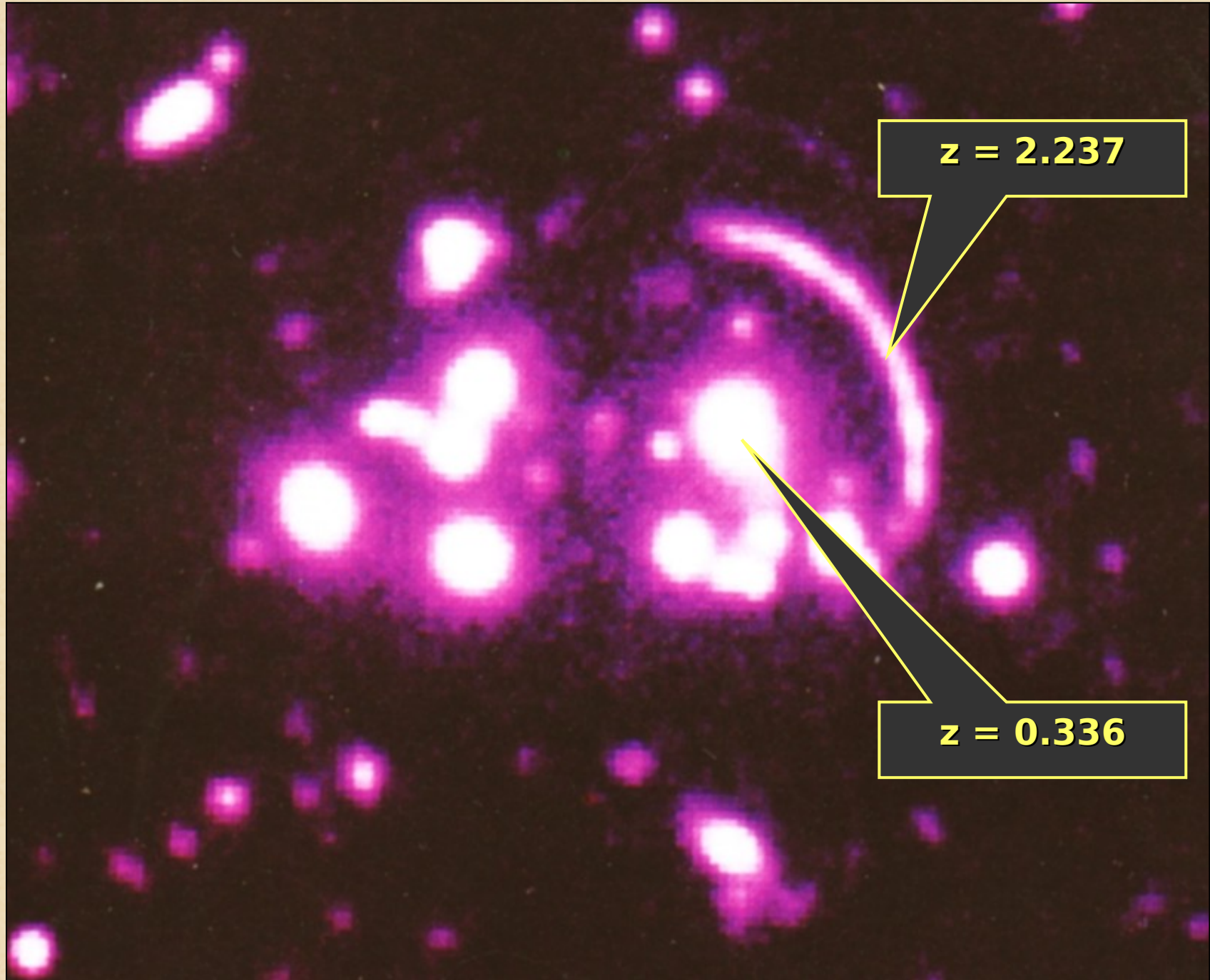
Fritz Zwicky:

Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln
(**The redshift of extragalactic nebulae**)

Helv. Phys. Acta 6 (1933) 110

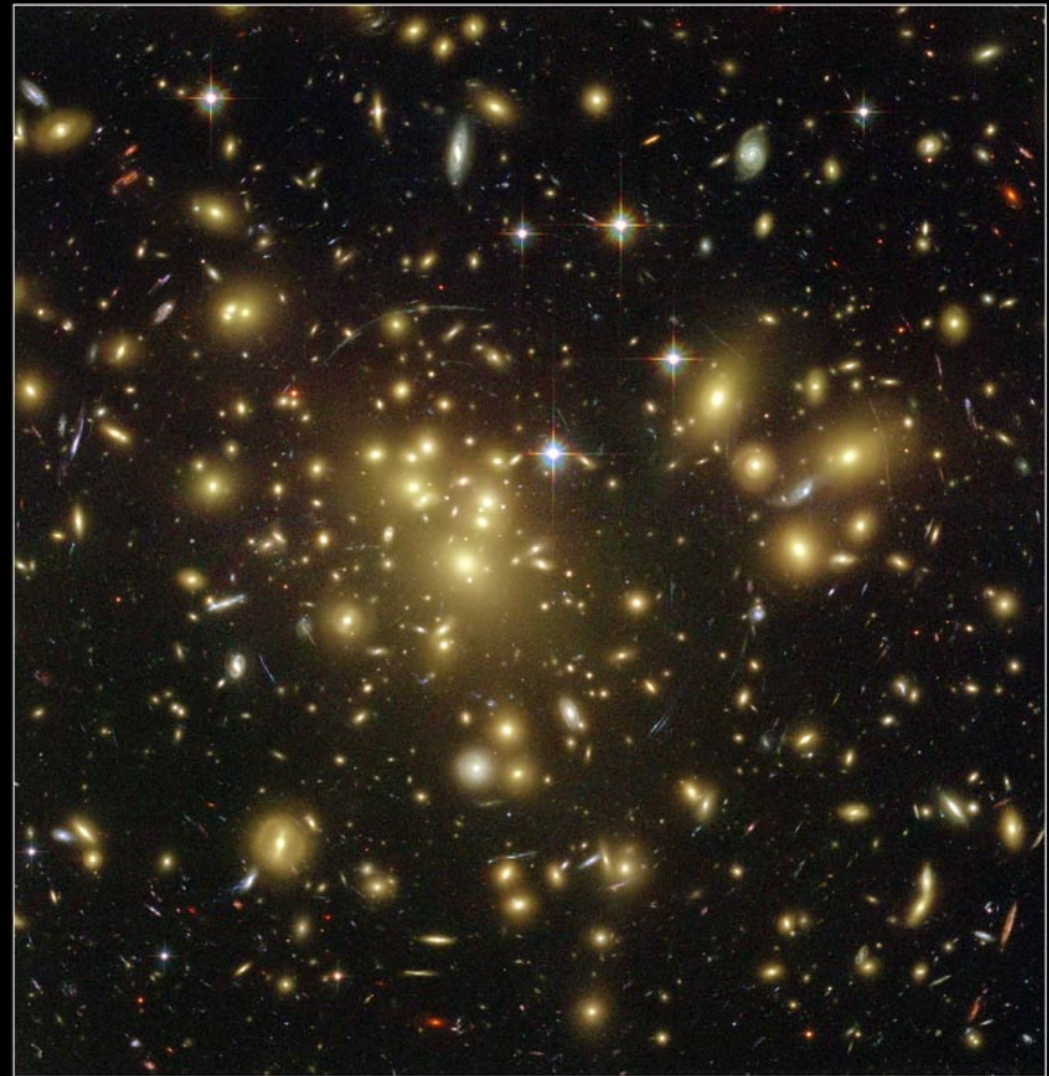
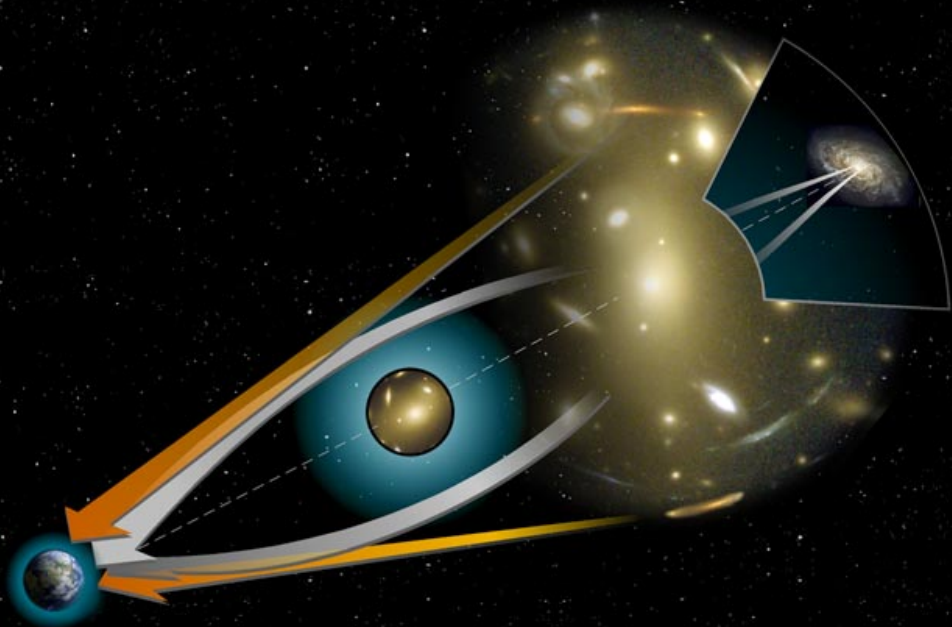
Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete¹). Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass dunkle Materie in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

Гигантская дуга в скоплении Cl 2244-02



Тёмная материя: гравитационное линзирование

Наблюдения далёких галактик
сквозь линзирующие их скопления
галактик позволяют оценить
массу скопления-линзы



Galaxy Cluster Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

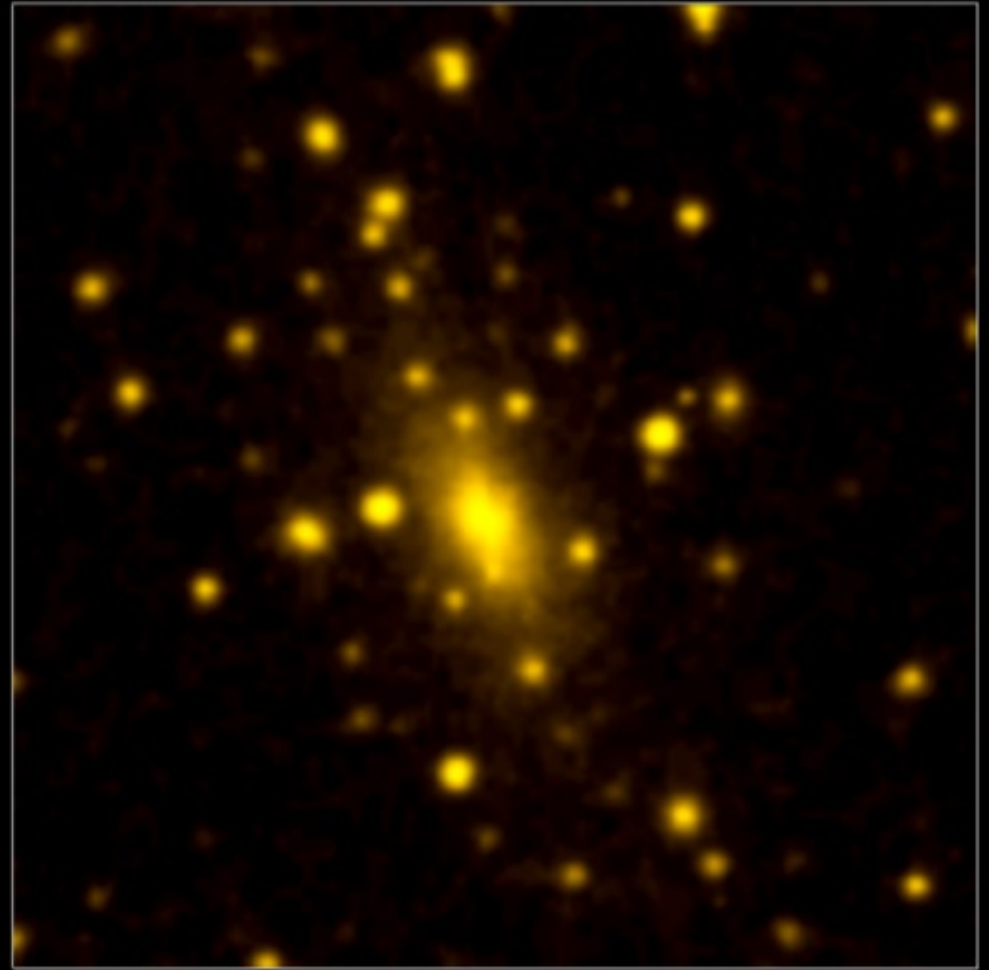
NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA
STScI-PRC03-01a

Hot X-Ray Gas in Clusters of Galaxies



Abell 2029

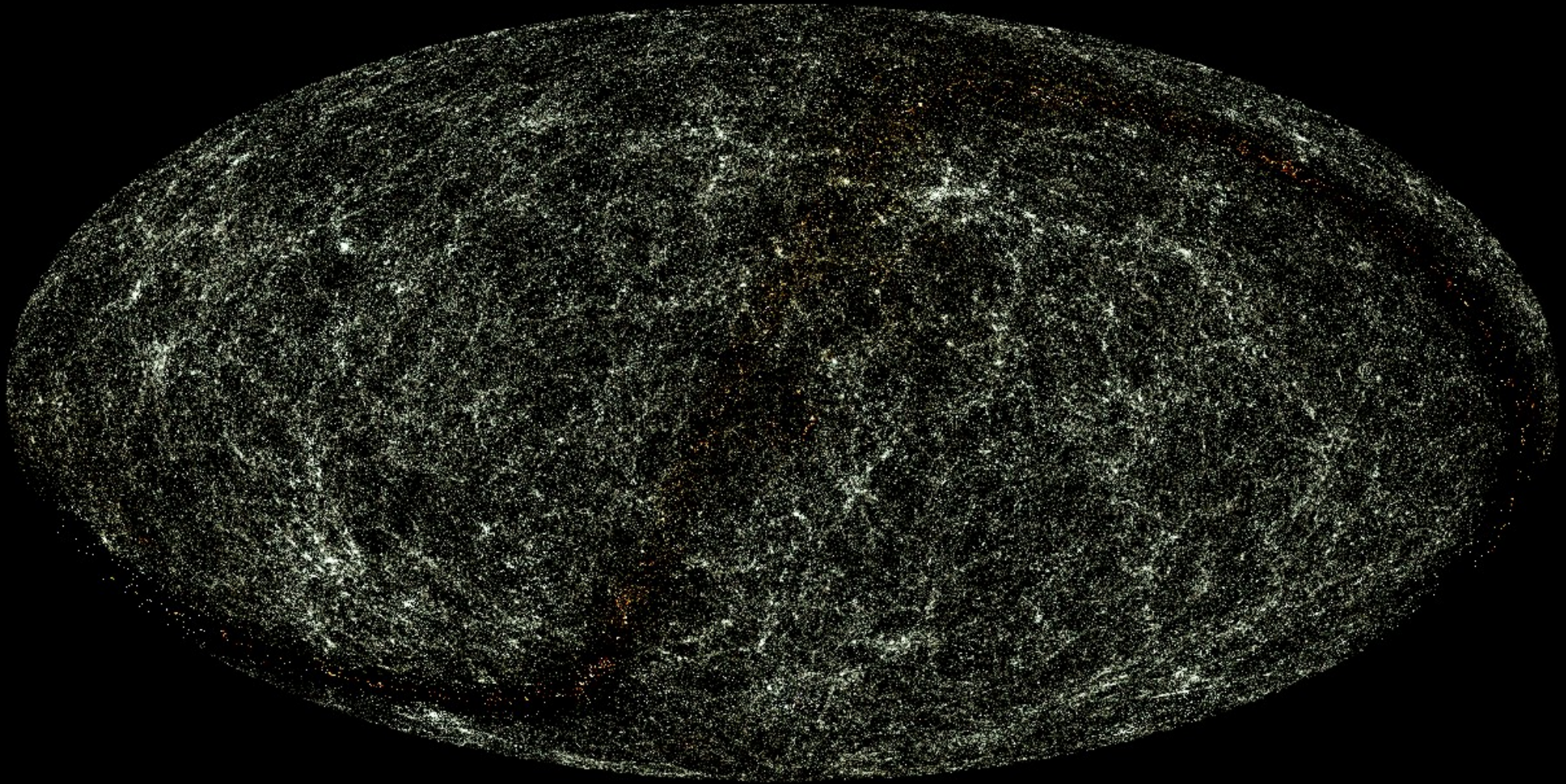
CHANDRA X-RAY



DSS OPTICAL

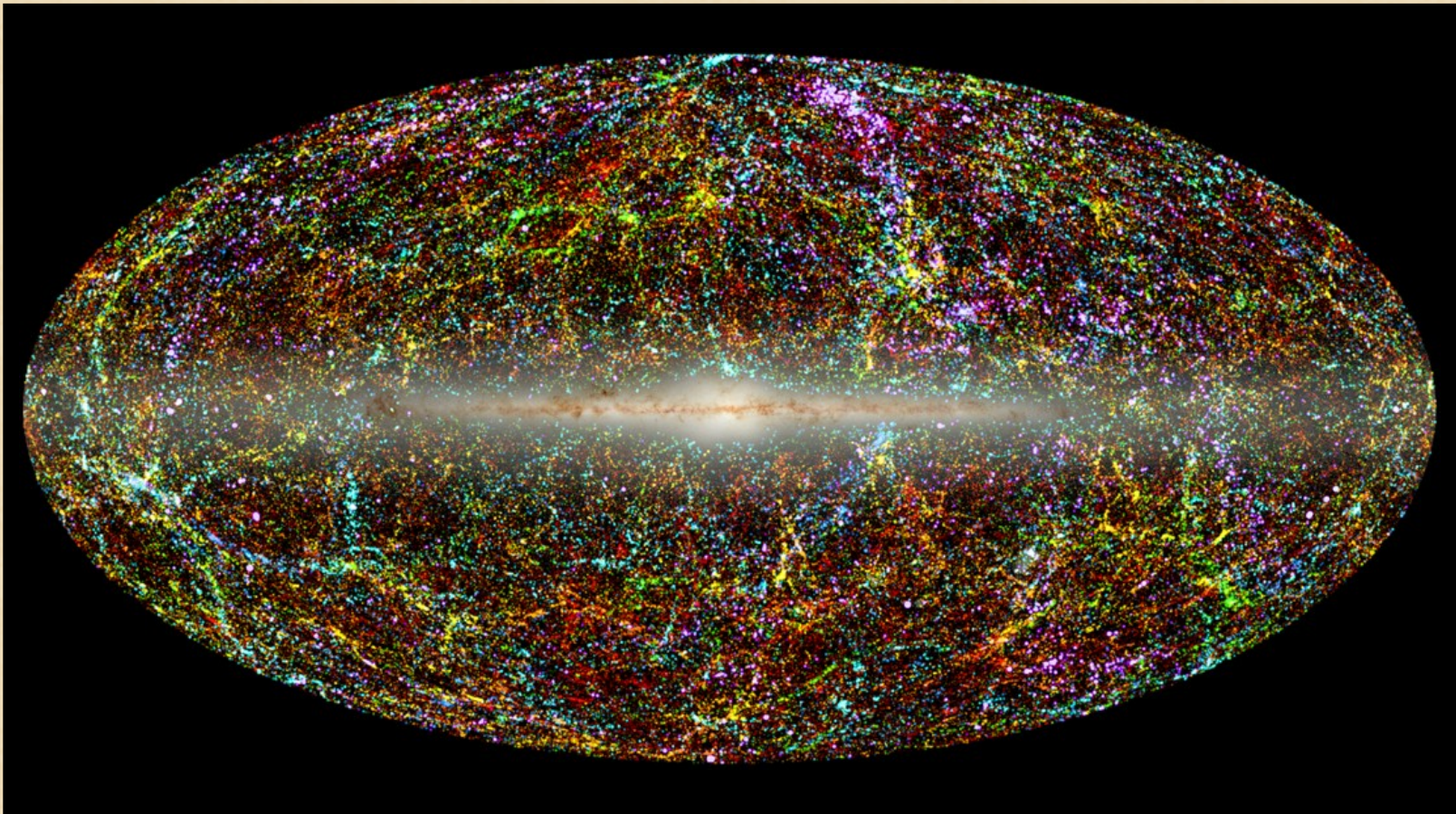
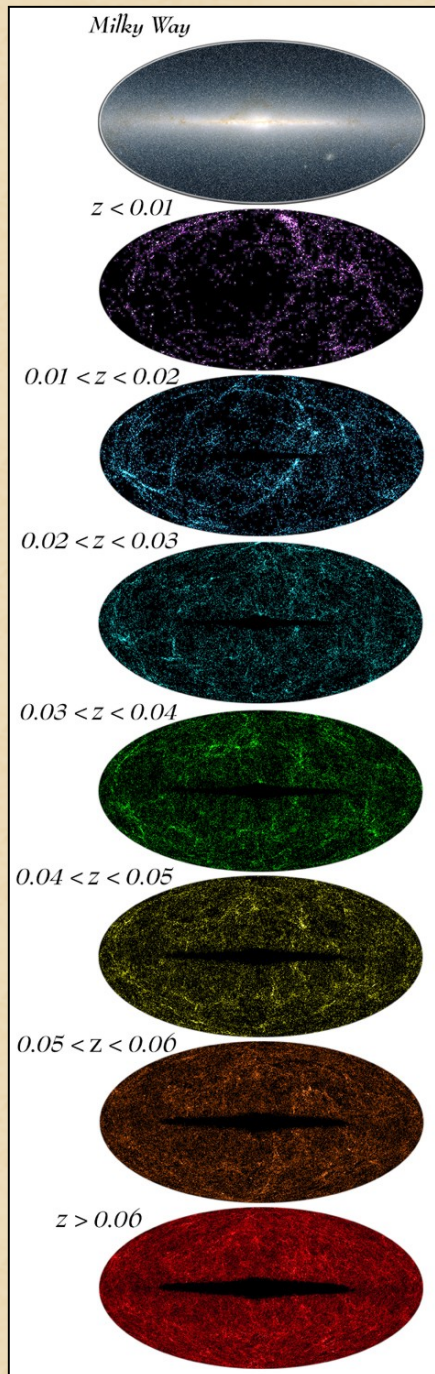
Most of the baryonic mass in a typical galaxy cluster resides in hot, x-ray emitting intergalactic gas – этот горячий газ не может быть удержан своим гравитационным полем – нужна DM

Sky Distribution of Galaxies (XMASS XSC)



http://spider.ipac.caltech.edu/staff/jarrett/2mass/XSC/jarrett_allsky.html

Galaxy Distribution in the Sky



Sky distribution (equal area Aitoff projection) of the 2MASS

Extended Source Catalog (> 1.5 mio galaxies).
Color coding according to redshift.

T.H.Jarrett, PASA 21 (2004) 396

<http://web.ipac.caltech.edu/staff/jarrett/2mass/LSS/>

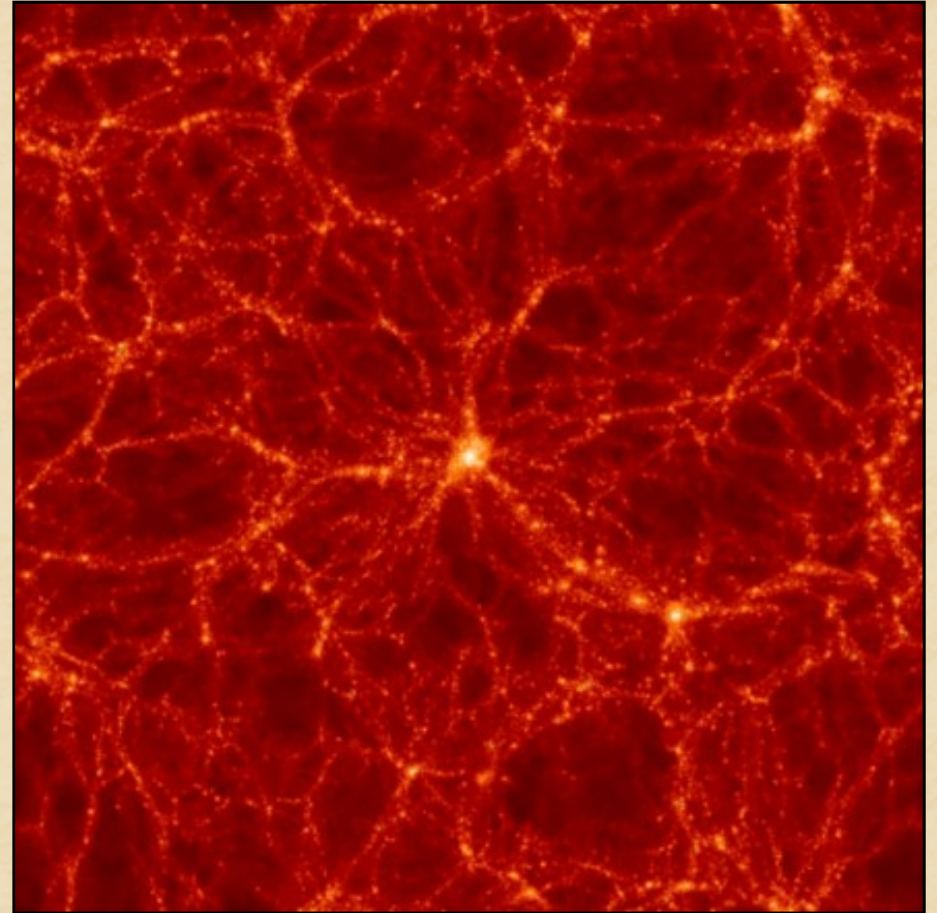
Образование структур во Вселенной

Smooth



Structured

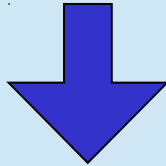
**Structure forms by
gravitational instability
of primordial
density fluctuations**



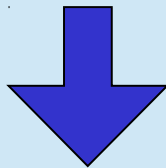
Рост флуктуаций в расширяющейся Вселенной

Возмущения барионной компоненты

На момент рекомбинации $\frac{\delta\rho_b}{\rho_b} \simeq 3\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-4}$;
на линейной стадии возмущения могут вырасти в $a_0/a_{rec} = 1 + z_{rec} \simeq 10^3$ раз,
что явно недостаточно для образования галактик.

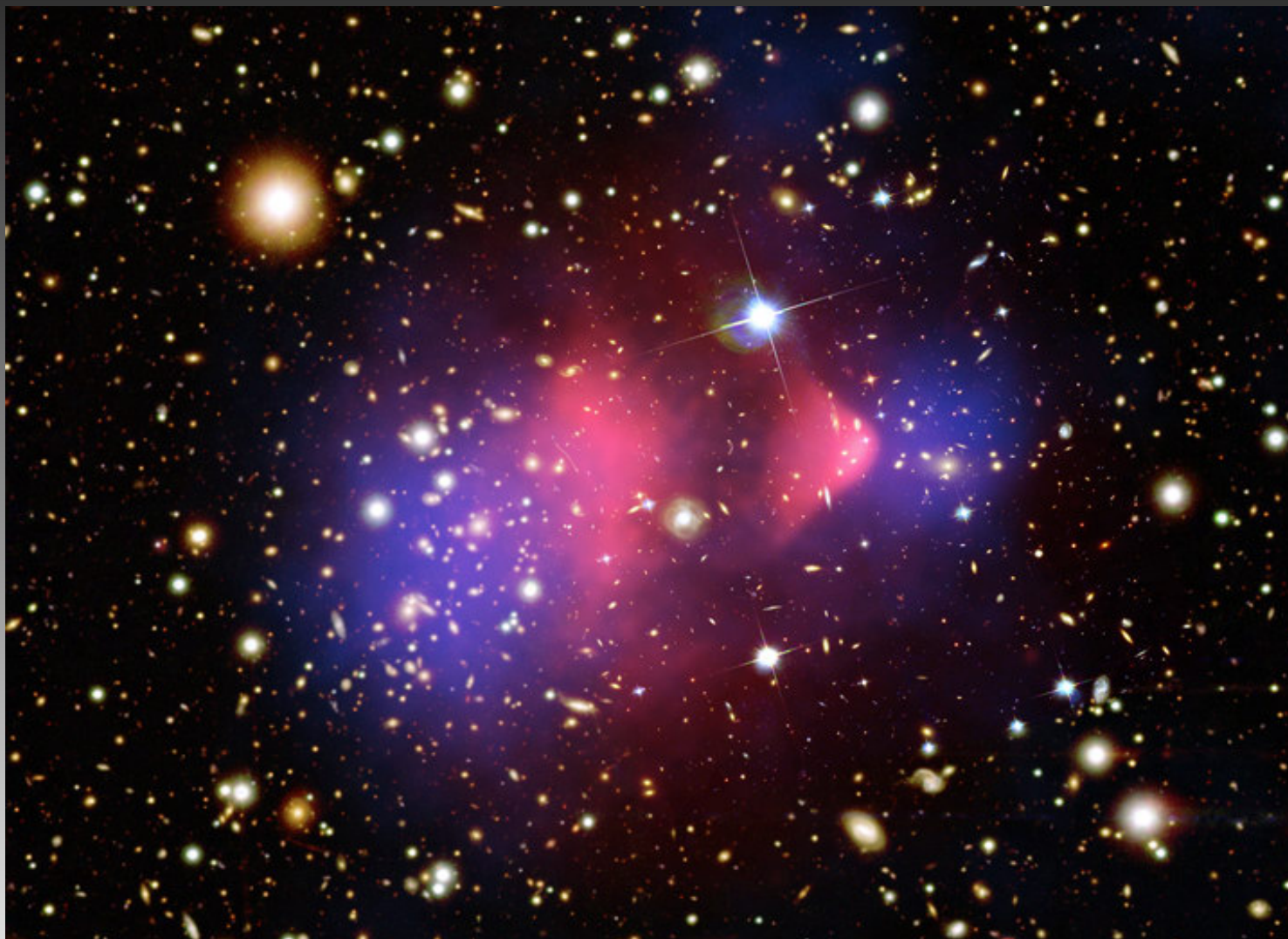


Необходимо, чтобы возмущения плотности и грав. потенциала обеспечивались другим (небарионным) веществом, не связанным с излучением к моменту рекомбинации



Аргумент в пользу существования небарионной тёмной материи

Bullet Cluster: «прямое свидетельство» в пользу бесстолкновительной тёмной материи



Красным – наблюдения рентгеновского излучения горячего межгалактического газа;
синим – рассчитанное распределение тёмной материи, сопутствующей галактикам.

Тёмная материя: наблюдательные свидетельства

- Образование крупномасштабной структуры Вселенной
- Избыток массы во внешних частях галактик (кривые вращения галактик)
- Избыток массы в скоплениях галактик (по дисперсии скоростей галактик, по горячему газу и по массе гравитационных линз)
- Реликтовый фон: $\Omega_m \sim 0.27$, но $\Omega_{bar} \sim 0.05$

ПРОБЛЕМА

изучения распределения массы по измерениям скоростей звёзд/газа

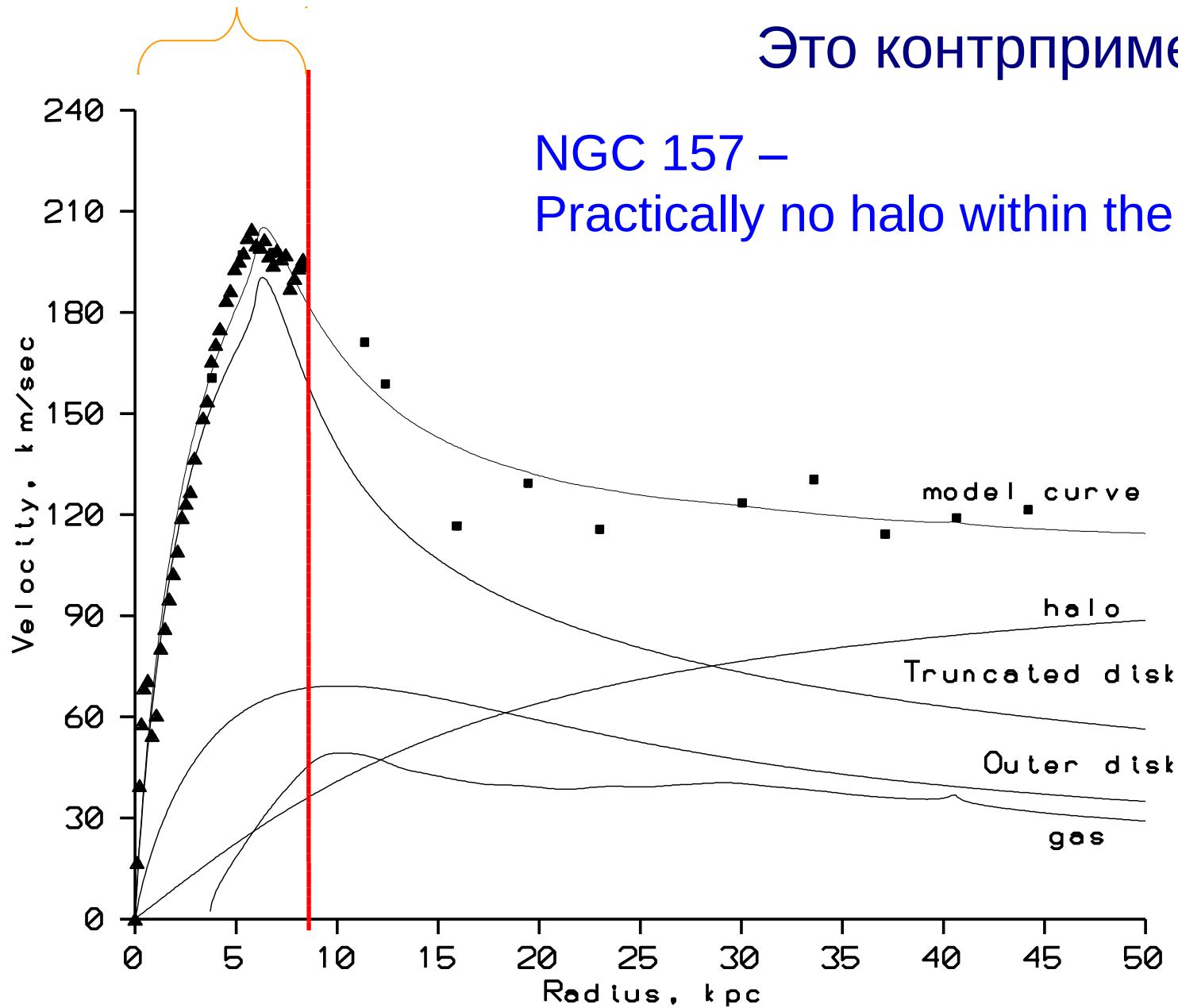
- Неопределенность самого понятия «масса галактики»
- Некруговые движения газа и звёзд в диске
- Необходимость учета дисперсии скоростей (для звёзд)
- Необходимость оценки параметров ориентации диска (для учета эффектов проекции)
- Зависимости результата от принятой модели распределения плотности в галактике

Optical disk

Это контрпример для MOND

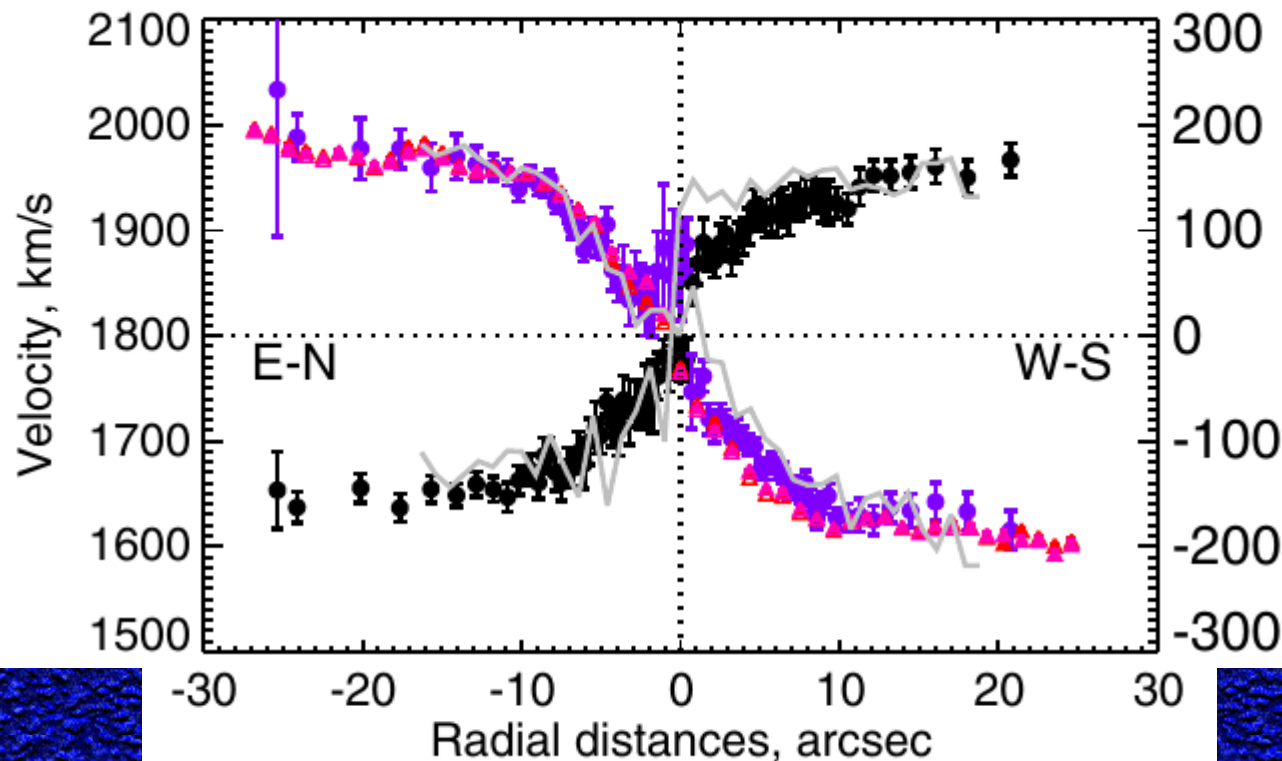
NGC 157 –

Practically no halo within the optical borders



IC 719, a rare case: Two counterrotating disks

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 769:105 (10pp), 2013 June 1



Катков, Сильченко, Афанасьев

Высокие M/L_B в пределах оптического диска

Рекордсмены

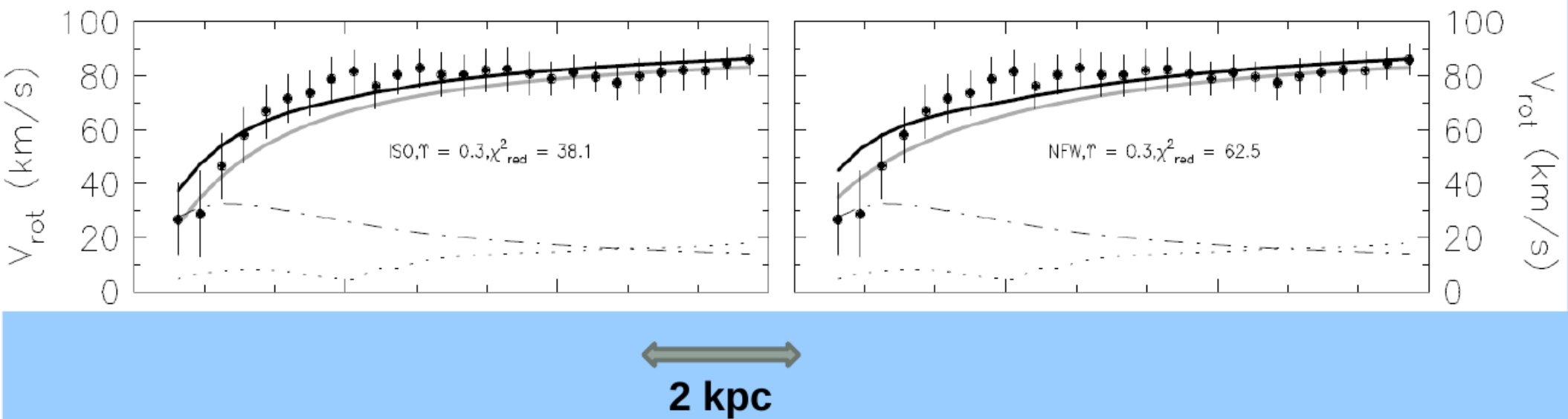
UGC 3303, dIrr, $M/L_B = 31$, Караченцев и др. 2004

UGC 128, Irr, $M/L_B = 34$, Zavala et al. 2003

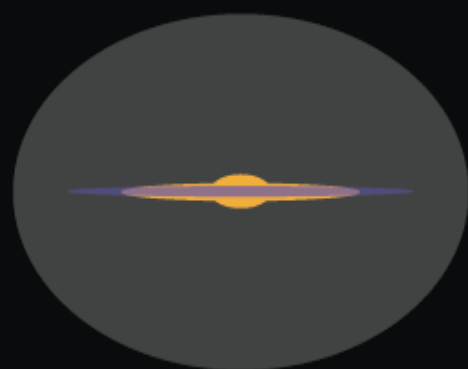
UGC 7170, Scd (?), $M/L_B = 43$, Cox et al, 1996

NGC2915

- Elson et al., 2010



At the last measured point on the rotation curve, this galaxy has a total-mass-to-light ratio of $M/L \sim 140 (M/L)_{\text{solar}}$, making it one of the most dark-matter-dominated galaxies known.



=



+



+



M_{tot}

=

M_{gas}

+

M_{disk}

+

M_{halo}



V_{tot}^2

=



V_{gas}^2

+



V_{disk}^2

+

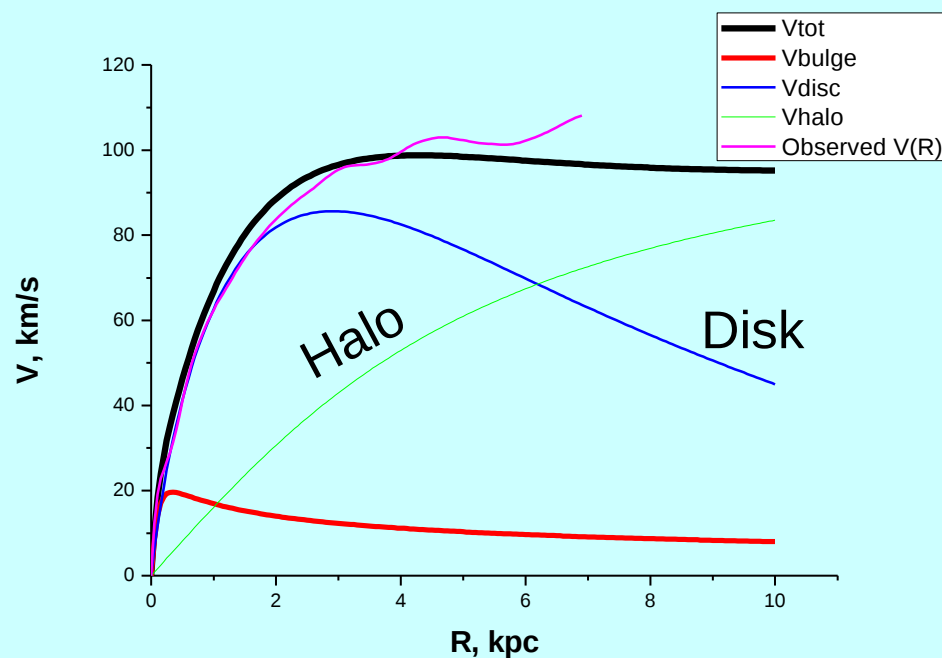


V_{halo}^2

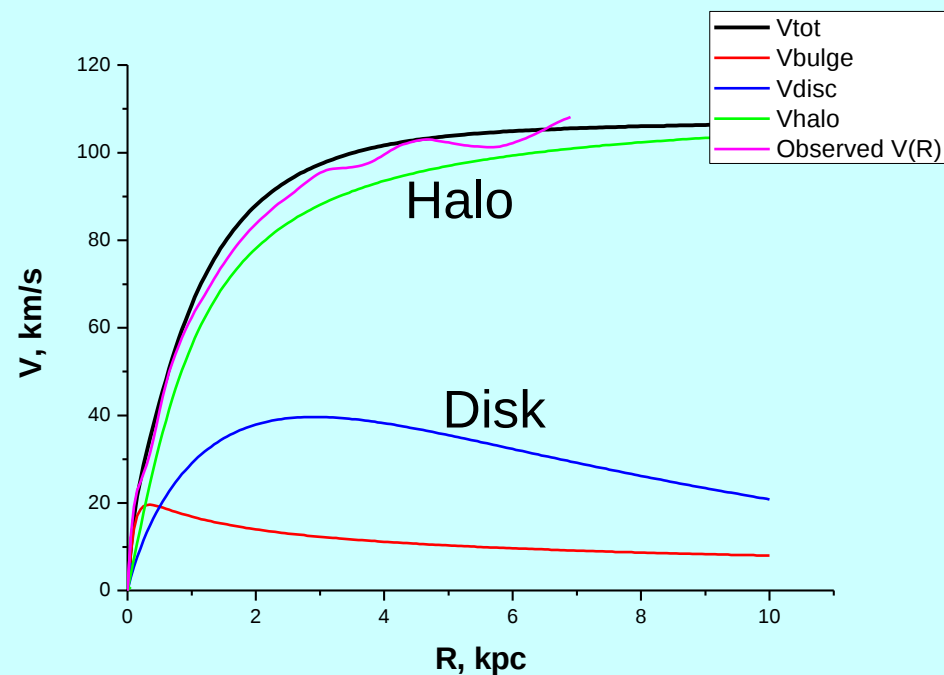


Проблема неоднозначности оценки масс компонент

**M33,
Maximum disk**

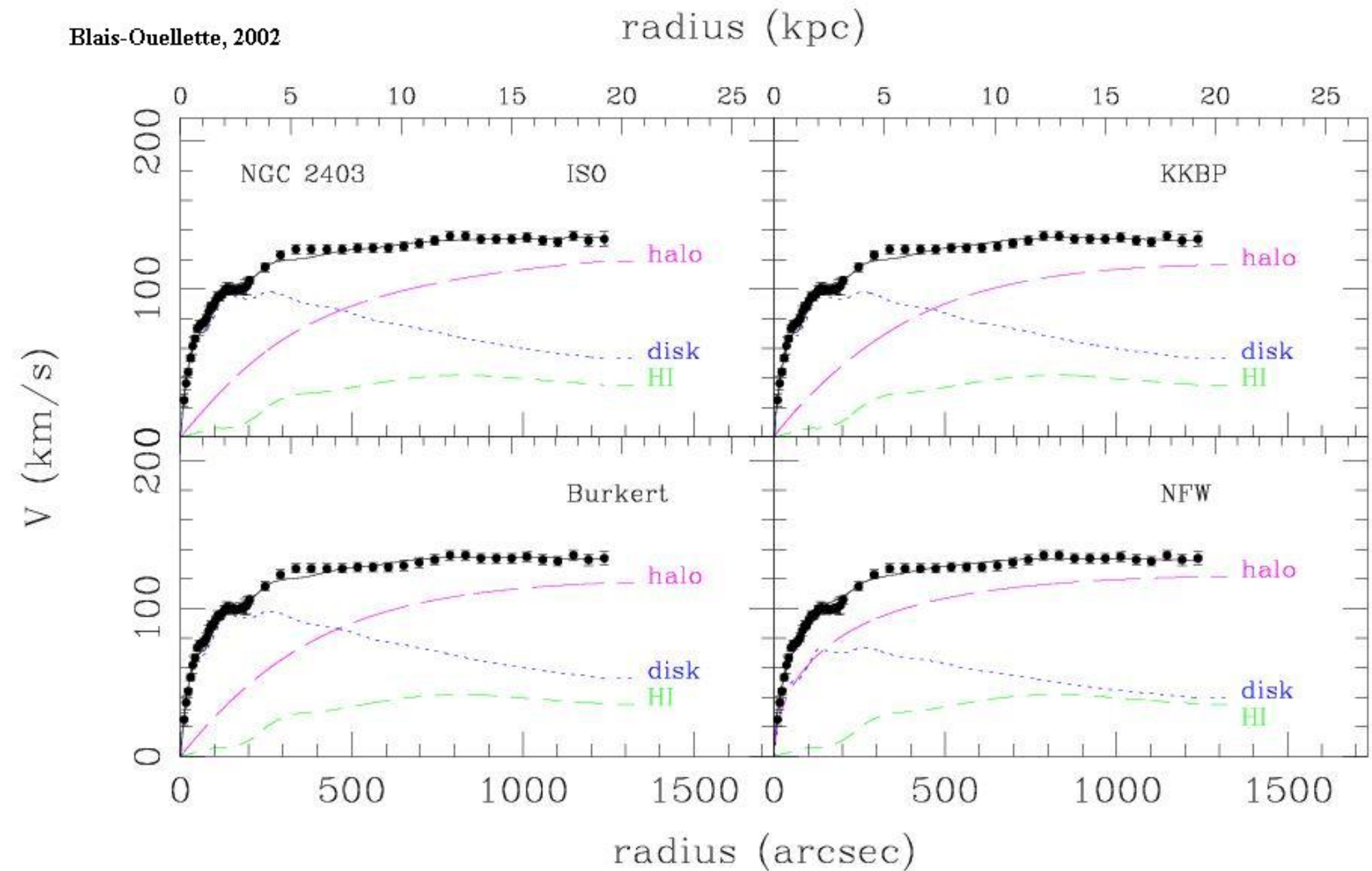


**M33,
Minimum disk**

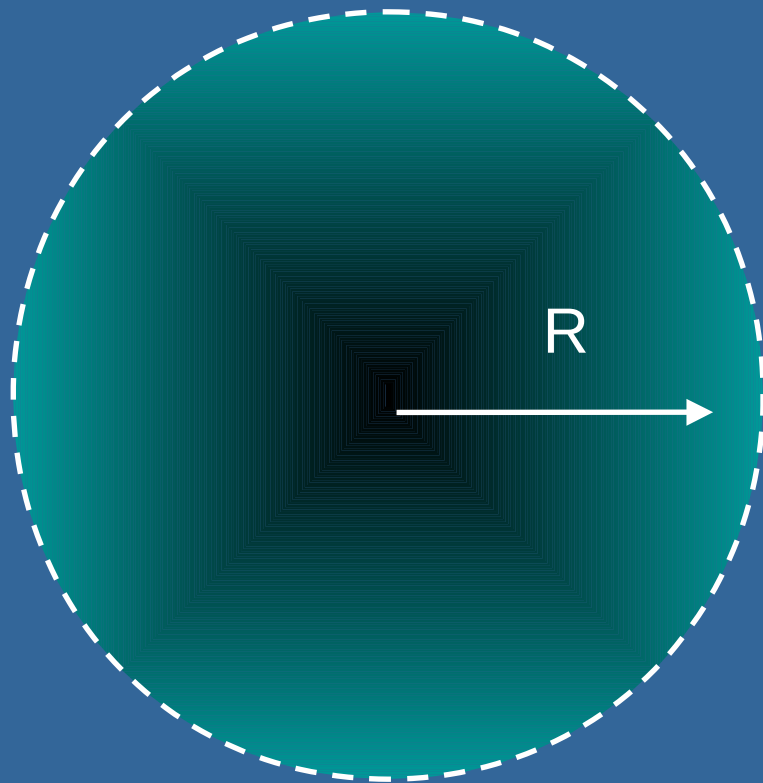


MAXIMUM DISK

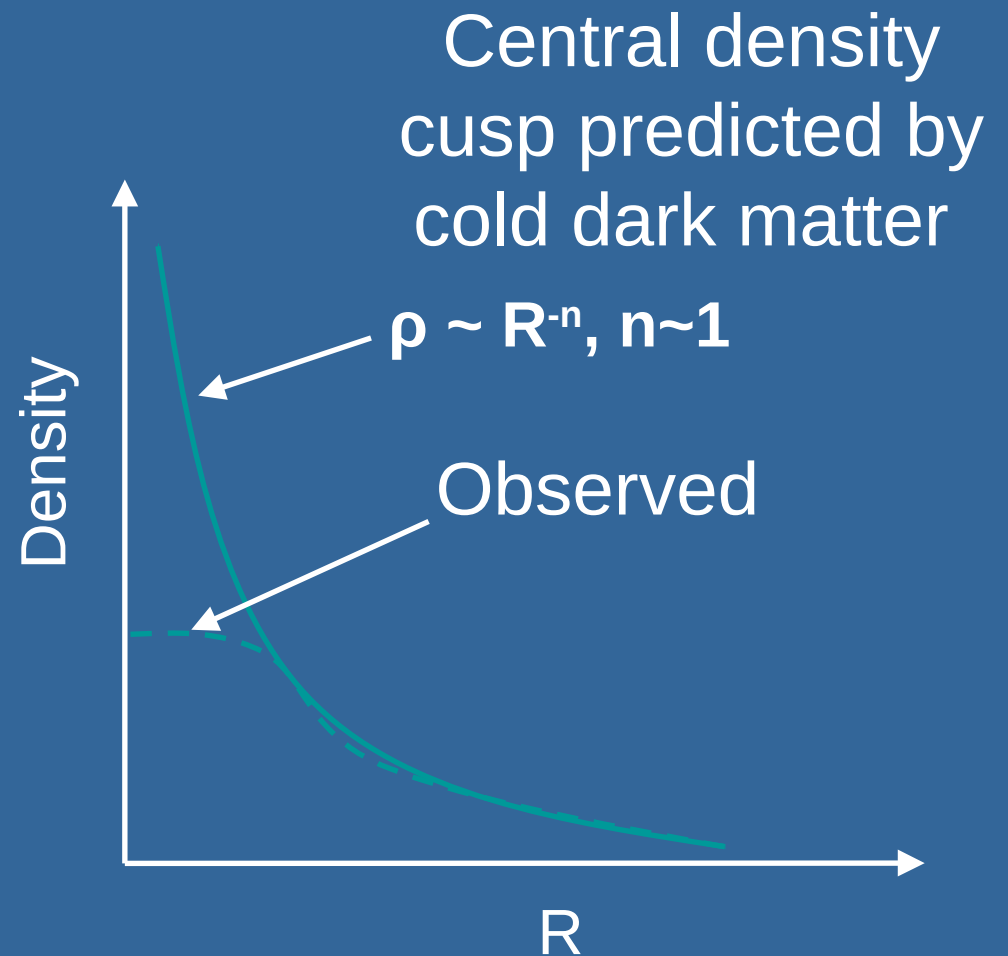
Blais-Ouellette, 2002



ПРОБЛЕМА КАСПА



Dark matter halo



Плотность в ТМ-гало в разных моделях

Для профиля Наварро и др. (1996), NFW:

$$\rho_{\text{NFW}}(R) = \frac{\rho_s}{(R/r_s)(1 + R/r_s)^2}.$$

Для профиля Буркерта

$$\rho_{\text{B}}(R) = \frac{\rho_0 r_{\text{core}}^3}{(R + r_{\text{core}})(R^2 + r_{\text{core}}^2)}.$$

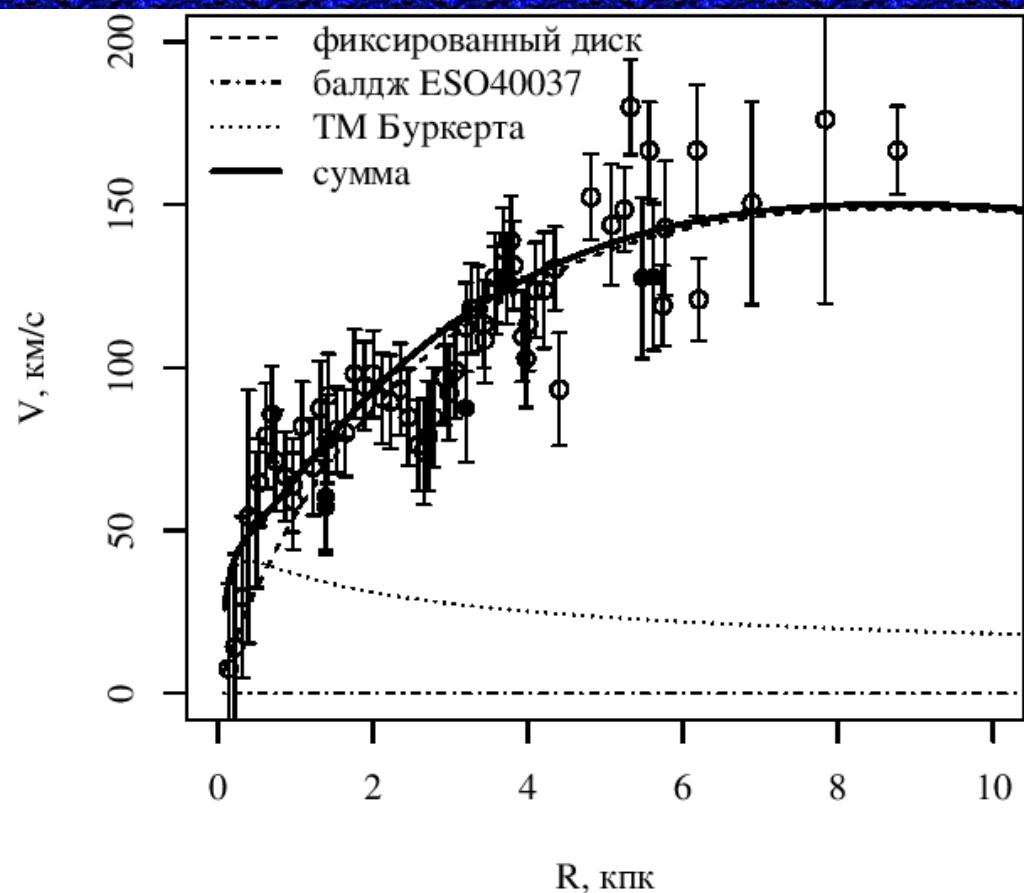
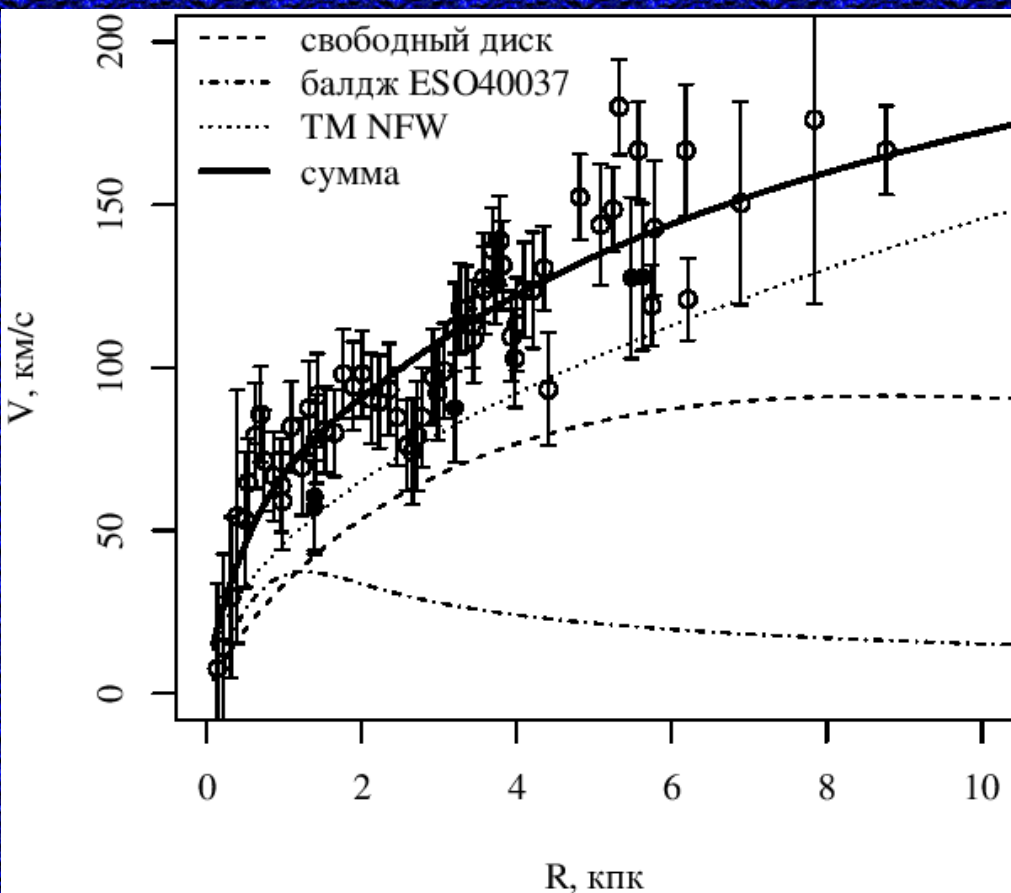
Для профиля Мура:

$$\rho_{\text{M}}(R) = \frac{\rho_s}{(R/r_s)^{1.5}(1 + (R/r_s)^{1.5})}.$$

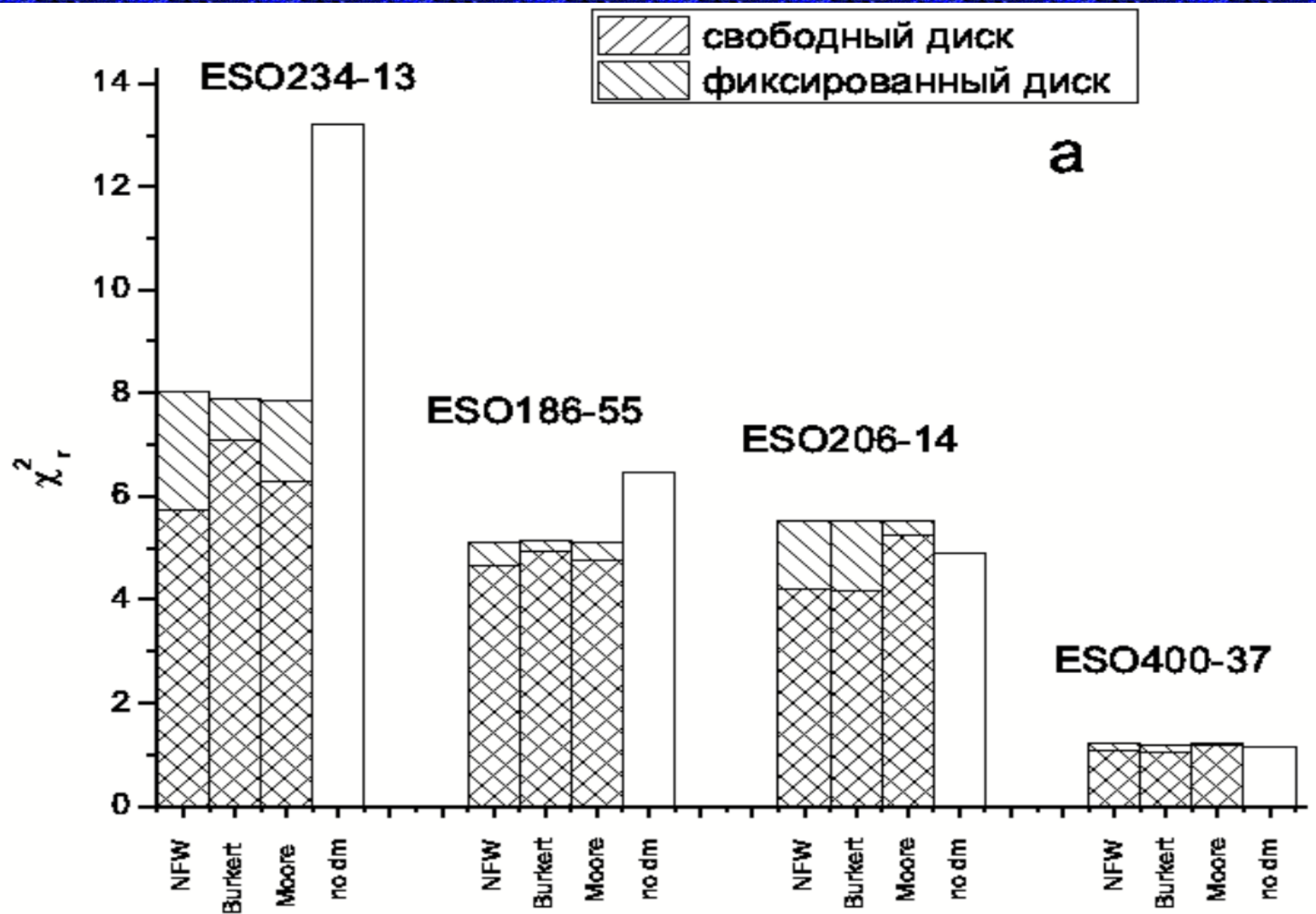
Аналитически Гуревич и Зыбин (УФН, 1995) получили $n=1.7\sim 1.9$

ТМ в LSB-галактиках (низкой поверхностной яркости)

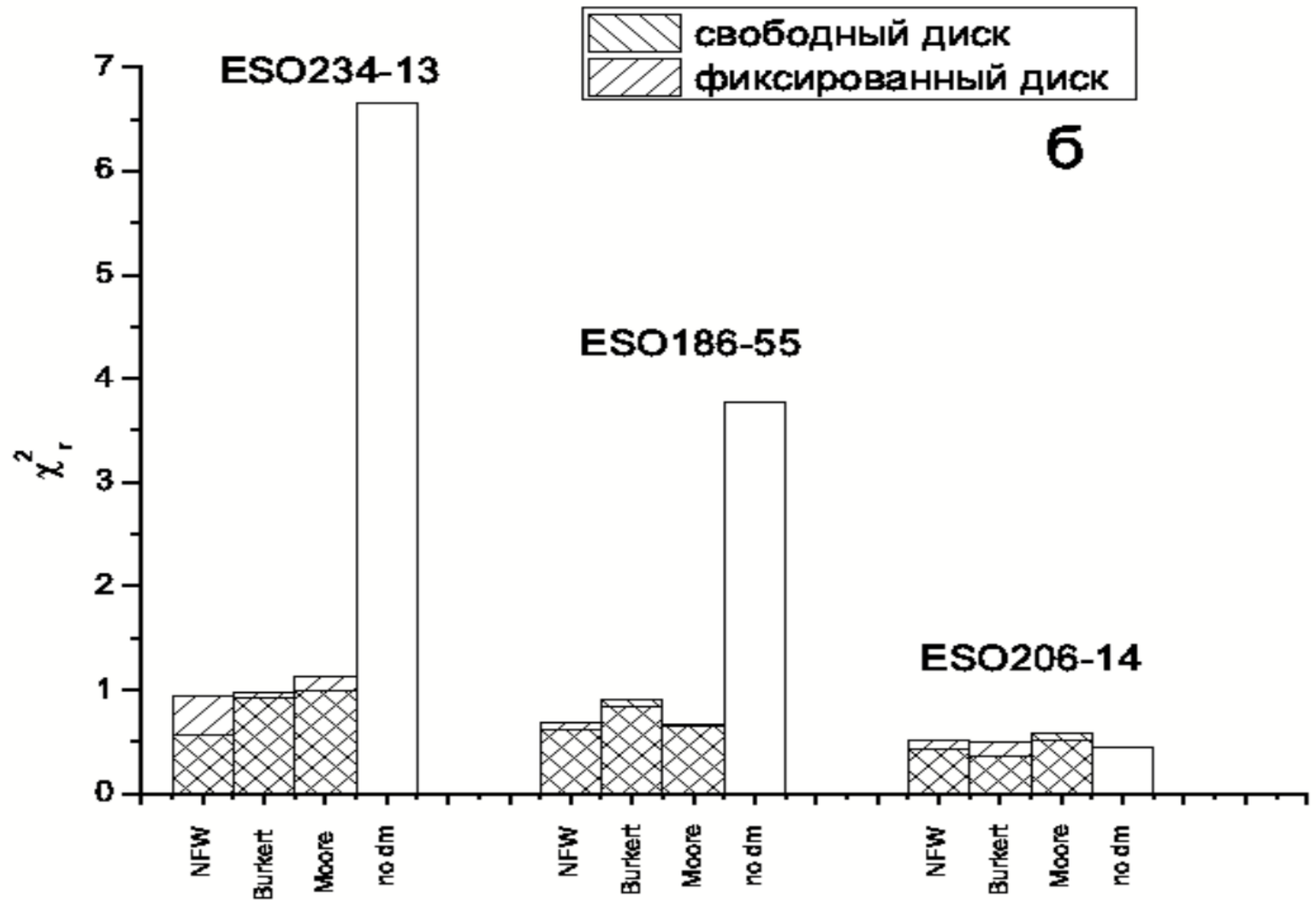
- Щелканова, Блинников, Сабурова, Долгов, ПАЖ (2013)



V_{rot} — газ и звёзды



Vrot ТОЛЬКО ПО звёздам



6

Theoretical schemes “cusp $\longrightarrow$ core”

2010

**On the isolated dwarf galaxies:
from cuspy to flat dark matter density profiles
and metallicity gradients**

S. Pasetto^{1,2}, E.K. Grebel¹, P. Berczik^{1,3,4}, R. Spurzem^{3,5,1}, W. Dehnen⁶

**Star formation; hydrodynamic
numerical modelling**

2012

**A solution to the problems of cusps and
rotation curves in dark matter halos in the
cosmological standard model**

A. G. Doroshkevich*, V. N. Lukash, E. V. Mikheeva

**Cosmological random motions
of matter ‘heat up’ the DM particles
in collapsing halos, suppressing
cusp-like density profiles.
Analytical approach**

**The interaction of dark matter cusp
with the baryon component in disk galaxies**

2012 Khoperskov,^{1,*} B. M. Shustov,¹ and A. V. Khoperskov²

¹*Institute of astronomy Russian academy of sciences, Moscow, 119017, Russia*

²*Volgograd state university, Volgograd, 119017, Russia*

**Star formation, Supernova
feedback. Numerical modelling.**

Влияние взрывного звездообразования на размывание каспа развивает следующая, часто цитируемая статья (почти 100 ссылок за год):

Cuspy no more: how outflows affect the central dark matter and baryon distribution in Λ cold dark matter galaxies

F. Governato,^{1★} A. Zolotov,² A. Pontzen,^{3†} C. Christensen,^{4‡} S. H. Oh,^{5,6}
A. M. Brooks,^{7§} T. Quinn,¹ S. Shen⁸ and J. Wadsley⁹

Но наблюдатели утверждают, что такое бурное образование звёзд не проходит:

CSIRO PUBLISHING

Publications of the Astronomical Society of Australia, 2012, **29**, 395–433

<http://dx.doi.org/10.1071/AS12005>

Review

The Dark Matter Crisis: Falsification of the Current Standard Model of Cosmology

P. Kroupa

Argelander Institute for Astronomy, University of Bonn, Auf dem Hügel 71,
53121 Bonn, Germany

Email: pavel@astro.uni-bonn.de

Отношения $M_{\text{dm}}/M_{\text{lum}}$

В пределах оптического радиуса:

Среднее значение для галактик S-S0

Williams+ arXiv 0909.0680,

Zasov et al, arXiv

$$M_{\text{dm}}/M_{\text{lum}} \sim 1$$

M31 в пределах 38 кпс ($\sim 2 R_{\text{opt}}$)

Chemin+, arXiv 0909.3846

$$M_{\text{dm}}/M_{\text{lum}} \sim 4$$

Пары галактик

со средним расстоянием ~ 120 кпс

Karachentsev, Makarov, 2008

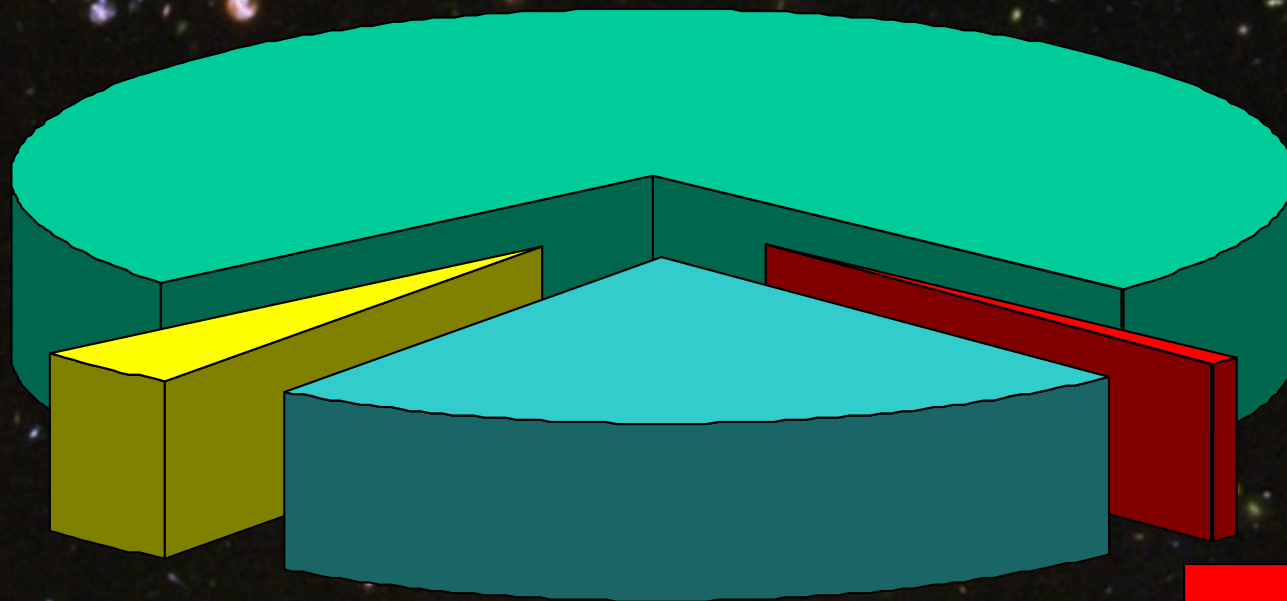
$$M_{\text{dm}}/M_{\text{lum}} \sim 10$$

Карлик предельно низкой массы Segue-1

Meng+ arXiv 0909.3496

$$M_{\text{dm}}/M_{\text{lum}} > 200$$

Dark Energy 73%
(Cosmological Constant)



Ordinary Matter 4%
(of this only about 10% luminous)

Dark Matter
23%

Neutrinos
0.1–2%

Missing baryons (McGaugh+2010) and arXiv:1301.0623

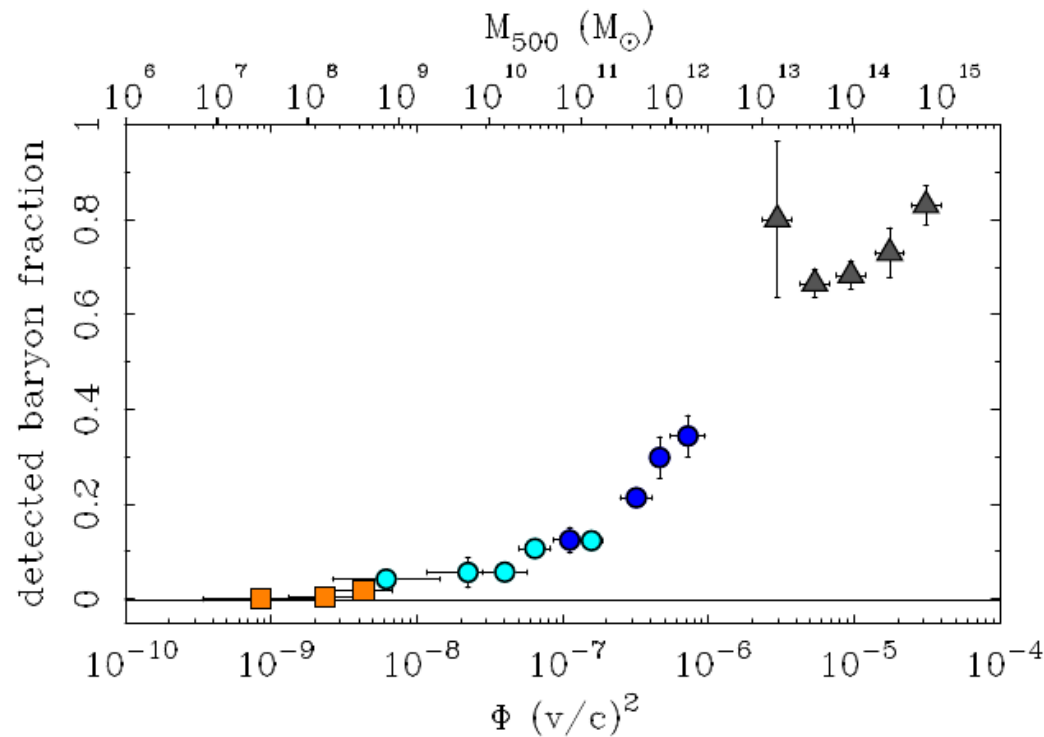


Figure 2. The fraction of detected over expected baryons $f_d = (M_b/M_{500})/f_b$ as a function of potential well and mass. Each point represents many objects. Orange squares are Local Group dwarf satellites, light blue circles gas-dominated disk galaxies, dark blue circles star-dominated spiral galaxies, grey triangles galaxy clusters.

$$f_b = 0.17 \pm 0.01 \text{ (Komatsu et al. 2009)}$$

– доля барионов в NR веществе

Есть ли DM в диске Галактики?

Method	Local DM density and velocity dispersion	REF
Kinematic data+ analysis of the input of all visible components	0.5-0.8 GeV/cm ³ ~(1-1.5)· 10 ⁻²⁴ g/cm ³ Vel.disp= 480-515 km/s.	B. Burch and R. Cowsik, 2013
2000 K-dwarfs data; a new method of solution of Jeans-Poisson equations	0.95±0.05 GeV/cm ³ ~2·10 ⁻²⁴ g/cm ³	S. Garbari et al., 2012
Spatial and velocity distribution for a sample of 9000 K-dwarfs	0.28±0.08 GeV/cm ³ ~6·10 ⁻²⁵ g/cm ³	L. Zhang et al., 2012
Decomposition of rotation curve: the original method	0.43±0.10 GeV/cm ³ ~0.8·10 ⁻²⁴ g/cm ³	Nesti & Salucci, 2012
PROBABILITY INTERVAL: 0.3-0.8 GeV/cm ³		

ПОИСКИ НОСИТЕЛЕЙ DM

- Маломассивные звезды или вырожденные холодные тела
- Газ при $T \sim 3 - 5$ K.
- Бесстолкновительная среда из WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)

Трудности Λ CDM модели

- The Cusp/Core (1991)
- Missing Satellites (1999) – легче в WDM
- The Disk of Satellites (2005) вокруг MW и M31
- Isolated Massive Galaxies (2010) – 3 в местной группе – вдали от филамента
- The Local Void (2010) – слишком пустой
- The Thin Old Disk (2011). The MW has a thin disk which has stars as old as 10 Gyr. Such old thin disks have still not been produced in the SMOG (House et al. 2011).

Some Dark Matter Candidates

Supersymmetric particles

- **Neutralinos**
- Axinos
- Gravitinos

Little Higgs models

Axions

Kaluza-Klein excitations

Mirror matter

Sterile neutrinos

Wimpzillas (superheavy particles)

MeV-mass dark matter

Q-balls

Primordial black holes

Gauge hierarchy problem

CP Problem of strong interactions

Large extra dimensions

Exact parity symmetry

Right-handed states should exist

Super GZK cosmic rays

Explain cosmic-ray positrons

Why not ?

Some Dark Matter Candidates

Supersymmetric particles

- **Neutralinos**
- Axinos
- Gravitinos

Little Higgs models

Axions

Kaluza-Klein excitations

Mirror matter

Sterile neutrinos

Wimpzillas (superheavy particles)

MeV-mass dark matter

Q-balls

Primordial black holes

Gauge hierarchy problem

CP Problem of strong interactions

Large extra dimensions

Exact parity symmetry

Right-handed states should exist

Super GZK cosmic rays

Explain cosmic-ray positrons

Why not ?

Свидетельства существования Тёмной Материи:

динамика галактик и их скоплений,
горячий газ в скоплениях,
гравитационное линзирование,
образование структур из малых
возмущений в горячей Вселенной,

- всё это требует гравитации, более сильной, чем может дать видимое вещество. Единым образом всё можно объяснить тяготением невидимой Тёмной Материи. Но в Λ CDM модели много трудностей. Другой путь — модификация гравитации, MOND и т.п. — противоречит ряду наблюдений. Требуются модели ТМ, с более богатыми взаимодействиями, чем WIMPs.