МАССЫ ГАЛАКТИК

Интервал масс: 10^7– 10^{12} Мс

Методы оценки масс

Прямой:

- *анализ кинематики газа (кривая вращения, дисперсия скоростей)*
- *ширина линии HI + фотометрический размер галактики*
- *анализ кинематики звезд*
- *анализ условий возникновения структур в диске (балдж, спиральные ветви)*

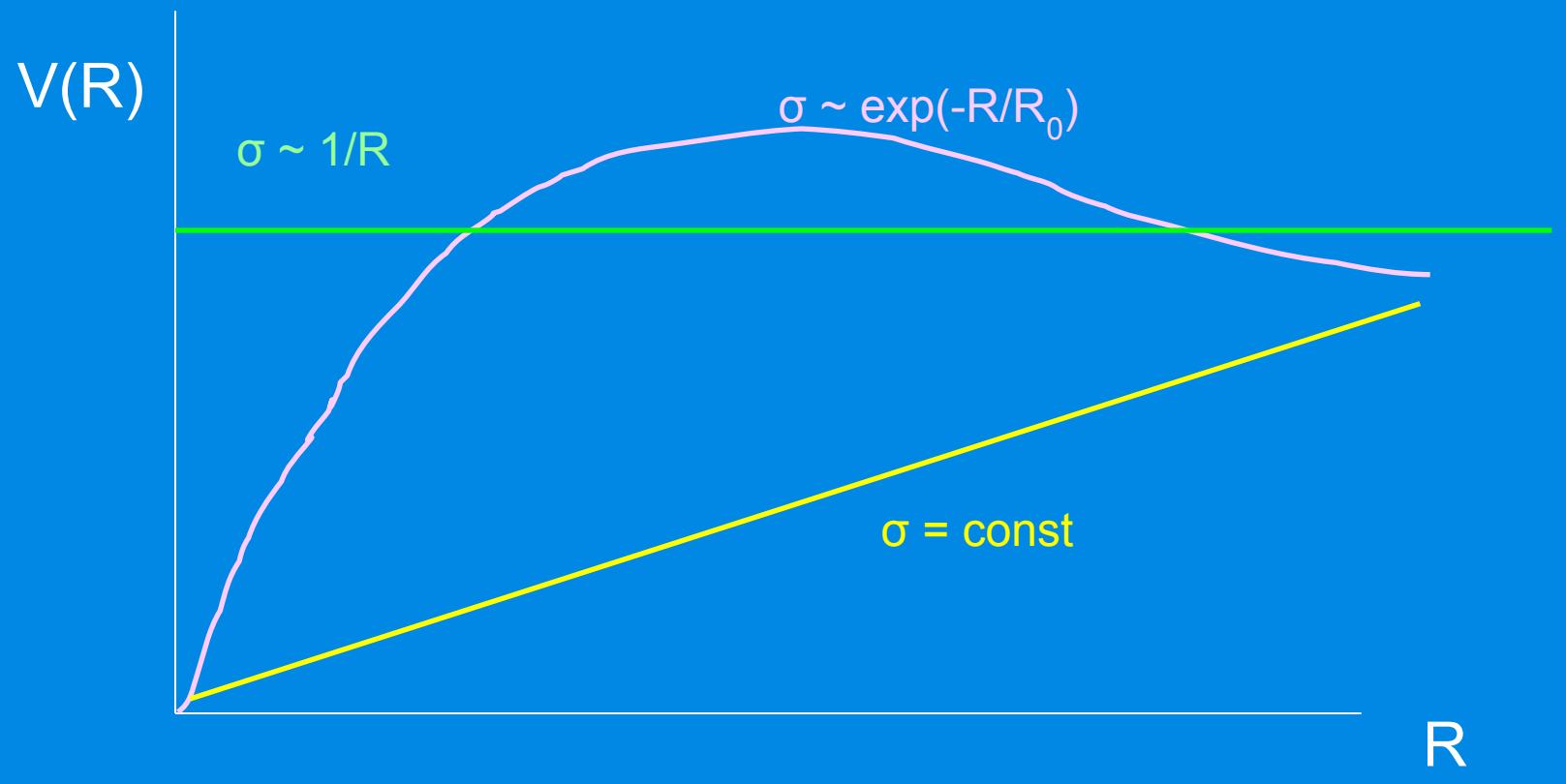
Косвенный

(только для барионной массы):

- *по излучению звезд (светимость+цвет или спектр) и газа (линии HI, CO)*

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

Кривая вращения для тонкого диска:



Два (исторически) главных аргумента в пользу существования **DM** в дисковых галактиках:

- Форма кривой вращения сильно отличается от ожидаемой в предположении постоянства отношения M/L вдоль радиуса диска

- Отношение массы к светимости M/L оказывается существенно выше, чем можно ожидать для нормального звездного населения, если M оценивать по динамике галактического диска

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

Из моделей звездного населения с различным содержанием молодых и старых звезд ожидаемые оценки составляют:

M/L~ 1 – преобладает свет молодых звезд

M/L ~ 10 – только старые звезды

Насколько надежна фотометрическая оценка массы звездного населения?

ПРОБЛЕМА
оценки массы звездного населения по данным фотометрии (яркость + цвет)

1. Оценка чувствительна к функции масс звезд и, прежде всего, к нижнему пределу масс, ни в одном случае хорошо не известном.

Ограничение по точности: в лучшем случае фактор 2

$$M_{STAR} = \int_{M_{LOW}} \psi(M)\,dM$$

2. Оценка массы модельно зависима: различные принятые эволюционные треки звезд, металличность звезд, различная история звездообразования приводят к различным отношениям **M/L.**

ПРОБЛЕМА
оценки массы по измерениям скоростей вращения диска

- Неопределенность самого понятия «масса галактики»
- Не-круговые движения
- Необходимость оценки параметров ориентации диска (для учета эффектов проекции)
- Зависимости результата от характера распределения плотности в галактике

- МАССА ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА = ДИНАМИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛЕННАЯ МАССА – МАССА ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ – МАССА ГАЗА.

Чтобы понять, где находится темная масса – в диске или гало – требуется оценка массы отдельных компонент галактики.

ПРЕИМУЩЕСТВА, КОТОРЫЕ ДАЕТ ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ СТАРОГО ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ ДИСКА

- Сводятся к минимуму влияние некруговых скоростей, связанных, например, с локальными областями звездообразования, спиральными ветвями, поглощением карликовых спутников, внешним воздействием на галактику.
- В совокупности с оценкой дисперсии скоростей позволяет для оценки массы диска ввести условие его гравитационной устойчивости

Гипотеза об устойчивости:

Звездный (звездно-газовый) диск должен быть устойчив к гравитационным возмущениям в плоскости диска и к изгибным возмущениям в перпендикулярном направлении.

Ограничение на дисперсию скоростей

Первое требует определенного порогового значения радиальной дисперсии скоростей звезд, второе – дисперсии по z – координате.

- $C_r \geq Q \cdot C_T$
- $C_T = 3.36G\sigma/\kappa$
- $C_z/C_r \geq 0.4$

ИНФОРМАЦИФЯ О ДИСПЕРСИИ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД – КЛЮЧ К ОЦЕНКЕ МАССЫ ДИСКА

Основные механизмы увеличения дисперсии скоростей звезд в дисках галактик:	
Механизм	***Примечание***
Взаимодействие звезд с GMC	**Почти изотропное рассеяние. Эффективность велика при большом количестве GMC.**
Взаимодействие звезд со спиральными волнами плотности	**Рост дисперсии преимущественно в плоскости диска. Эффективность не известна**
Взаимодействие звезд с массивными объектами гало и аккреция мелких спутников	**Рост дисперсии в основном в направлении, перпендикулярном плоскости диска. Эффективность не известна.**
Взаимодействие с соседними галактиками, слияние	**Эффективность сильно зависит от окружения.**
Гравитационная и изгибная неустойчивости	**Пропорциональный рост дисперсии в плоскости диска и перпендикулярно к ней. Прекращается через несколько периодов вращения диска.**

Дисперсия скоростей звезд диска + кривая вращения (исправленная за асимметричный дрейф) дает возможность оценить :

-- локальную плотность диска :

$\sigma(r) = 1/Q \cdot C_r \cdot \kappa/3.36G$, где

C_r – дисперсия скоростей,

к-эпициклическая частота

-- полную массу экспоненциального диска

$M_d = 2\pi\sigma(R)\cdot\exp(R/L)\cdot L^2$,

L – радиальная шкала диска

ЧИСЛЕННЫЕ 3D-МОДЕЛИ

- Диск: $N = 20 \cdot 10^3 - 100 \cdot 10^3$, газ не учтен
- Гало и балдж (не эволюционирующие)
- Радиальные шкалы и относительная масса диска и балджа – свободные параметры
- Начальная дисперсия скоростей – на субкритическом уровне ($Q = 0.8 – 1.1$)
- Шварцшильдовское распределение по скоростям

НАБЛЮДЕНИЯ:

BTA, 6m reflector of Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences

Device:

SCORPIO, long slit regime, CCD 2048x2048.

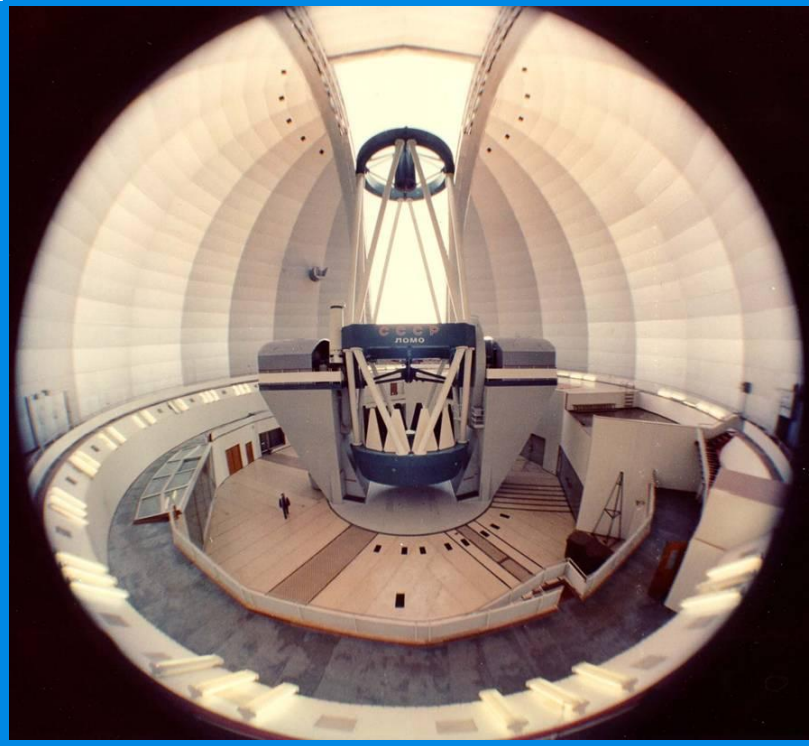
Template: G8-K4 stellar spectra, 4800-5540AA.

T_{exp} - 2 -2.5 hours

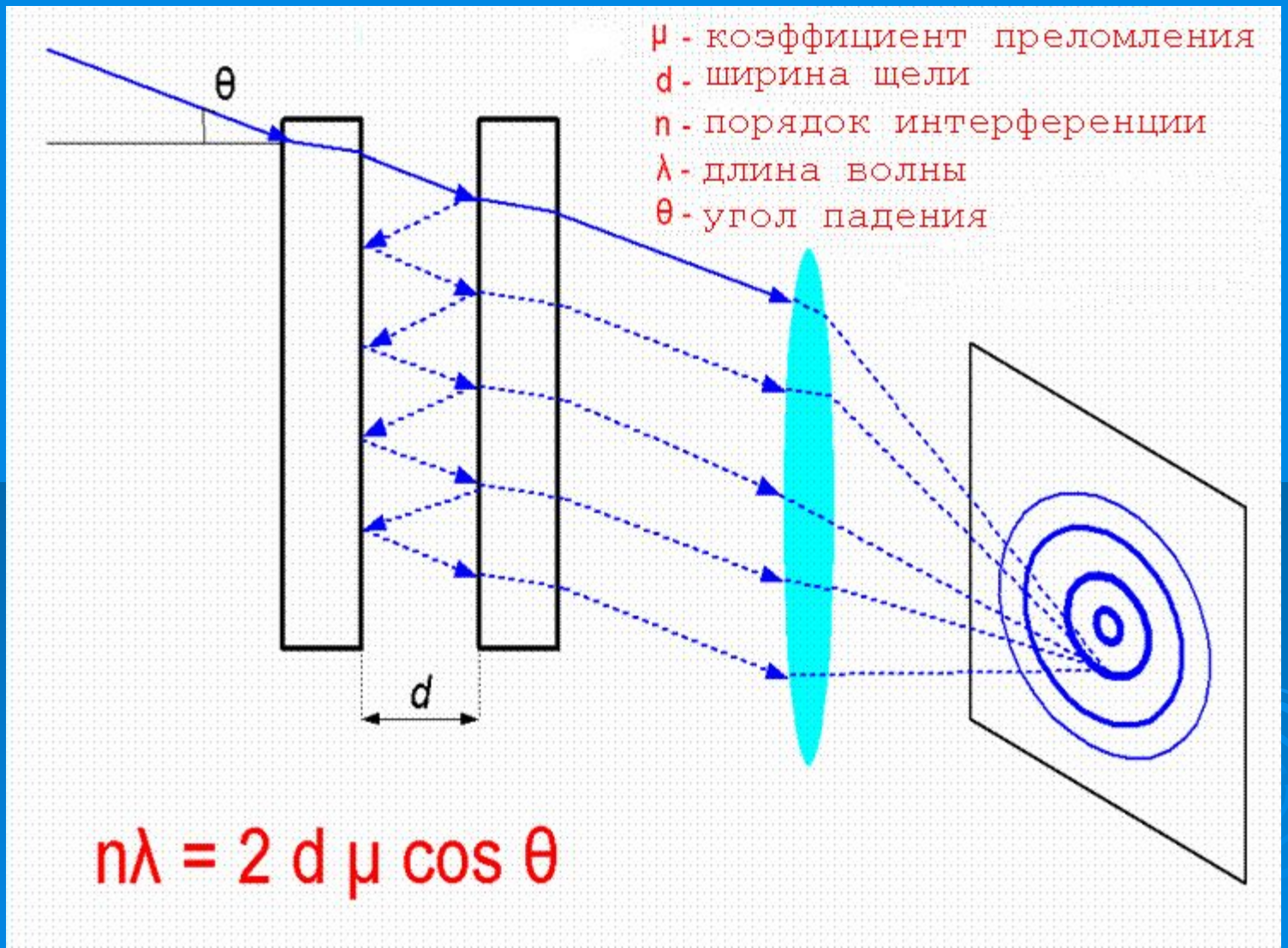
Data processing:

Cross-correlation method,

adaptive (variable) binning.



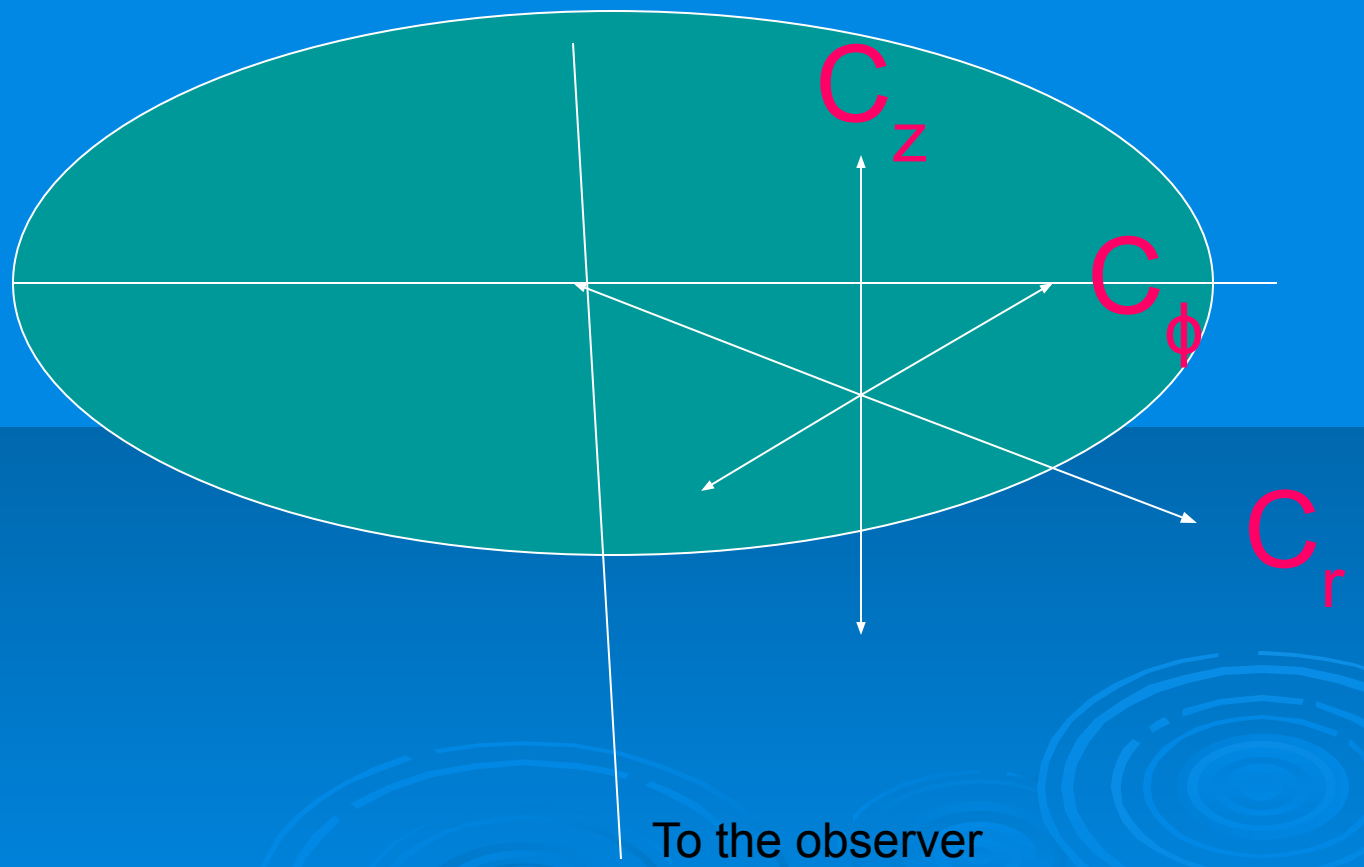
3D- СПЕКТРОСКОПИЯ



Три компонента дисперсии скоростей: C_r, $C\phi$, C_z.

$$C_{obs} = (C_z^2\cos^2 i + C_\phi^2 \sin^2 i \cos^2\alpha + C_r^2 \sin^2 i \sin^2\alpha)^{1/2}$$

$$C_r / C_\phi = 2\Omega / \kappa \text{ (epicyclic approximation)}$$



Galaxy	Mdisc ($10^9 M_o$)	Method	Reference	Md/M_t for R=4L (extrapolation)	Mdisc from BTF relationship (Pizagno+04)
Milky Way	44	N-body model Local marginal stability at R=Rsun	Khoperskov+03	0.33	66
M31	72	Dynamic model	Widrow+ 03, Geehan 05	0.25	85
M33	11 7	Marginal stability Rotation curve	Based on Hermann+ 05 estimates of PN Corbelli 07	0.7 0.5	6.1
LMC	4	N-body model Marginal stability	Khoperskov, Zasov	0.5	2.1
SMC	1.6-2.4	Dynamic model	Bekki, Stanimirovich 08	0.16-0.24	1.3

ПРОБЛЕМА С ДИСКАМИ ГАЛАКТИК НИЗКОЙ ЯРКОСТИ (LSB- галактик)

- Принято считать: темная масса доминирует почти от самого центра
- Для гигантских LSB это создает проблему объяснения часто встречающейся спиральной структуры, а иногда и баров.

MAXIMUM DISK AGAINST SUBMAXIMUM DISK: WHO WINS?

Let L **be disc radial scalelength.**

Maximum disk :

The disk is as massive as it is allowed by the rotation curve;

the main mass within $R_{max} = 2.2L$ is contributed by the stellar disk

Submaximum disk:

Dark halo gives significant input into the gravitational potential even at $R = 2.2L$.

To connect the velocity dispersion with the local density of a disc, one may

either

- a) to assume that stability parameter Q_T is known (Zasov1985, Bottema1993),

or

- b) to assume that a vertical scalelength of a disc is known (Bottema, 1993, 1997)

or

- c) to apply N-body models to galaxies where either disc flattness or velocity dispersion are known (Zasov, 1985, Zasov et al., 2002)

NUMERICAL 3D-MODELS of marginally stable discs

- TREEcode method
- Disc: $N = 2 \cdot 10^5 - 10^6$, no gas
- A wide range of radial scalelengths and relative masses of three components (disc, bulge, quasi-isothermal halo
- Iterational step-by-step approximation to the threshold of stability

Assumptions:

- A disc is presented by a single component
- A quasistable state is reached for the time significantly shorter than the age of a disc.

NUMERICAL 3D-MODELS

- **Disc: N = $2 \cdot 10^5$ - 10^6 , no gas**
- **A wide range of radial scalelengths and relative masses of components**
- **Iterational step-by-step approximation to the threshold of stability**

Assumptions:

- **The disc reaches the state of a quasistable equilibrium for the time significantly shorter than its age.**
- **Optical brightness of a disc follows the mass distribution**

Чтобы связать дисперсию скоростей звезд с плотностью диска, необходимо

либо

a) считать известным параметр устойчивости Q (Zasov1985, Bottema1993),

либо

b) считать известной толщину диска (Bottema, 1993, 1997)

либо

c) использовать численные (N-body) модели галактик, диски которых находятся вблизи порога устойчивости (Zasov, 1985, Zasov et al., 2002, Zasov et al 2005)

Analytical local criteria of threshold values of radial velocity dispersion C_r:

- Toomre' criterion

$Q_T = 1, \qquad Q_T = Cr/(3.36\pi G\sigma/\kappa)$

- Modified Toomre' criterion

$Q_T = 2\Omega/\kappa$

- Morozov' criterion

$Q_T = (2\Omega/\kappa)(1+F_M\,(Cr, \Omega, \kappa, d\sigma/dr, dC_r/dr, d\Omega/dr))$

- Polyachenko-Polyacheko-Strel'nikov criterion

$Q_T = F_P(d\ln\Omega/d\ln r)$

АНАЛИТИЧЕСКИЕ локальные критерии устойчивости (пороговые значения радиальной дисперсии скоростей звезд C_r):

Let $Q = C_r/(C_r)_{TOOMRE}$
where $(C_r)_{TOOMRE} = 3.36\pi G\sigma/\kappa$ *is the marginal radial dispersion for rigid rotating thin disk*.

- “Classical” Toomre criterium

$Q_T = 1$,

- Modified Toomre’ criterion

$Q_T = 2\Omega/\kappa$

- Morozov’ criterion

$Q_T = (2\Omega/\kappa)(1+F_M\,(Cr, \Omega, \kappa, d\sigma/dr, dC_r/dr, d\Omega/dr)$

- Polyachenko-Polyacheko-Strel’nikov criterion

$Q_T = F_P(d\ln\Omega/d\ln r)$

Let

- C_{obs} – *observed velocity dispersion (LOSVD)*
- C_{min} - *line-of sight velocity dispersion, expected for marginally stable disc.*

In general case, three alternatives are possible.

1. **Cobs > Cmin**

A disk is overheated by some processes such as merging or interactions

2. **Cobs < Cmin**

Either disc is unstable or its mass, and hence, Cmin, is overestimated.

3. **Cobs ≈ Cmin**

Quiet evolution, without major merging or strong gravitational perturbations

The example:

- NGC 4150 – So/a galaxy with a very small disc and practically no bulge

Disc scalelength ~ 0.7 kpc

Total mass of the disc is $5.3^{+2}_{-1.5} * 10^{9}\ M_{sun}$

MODEL PARAMETERS

Galaxy	Mdisc 10^{10}Mo	$M_{halo}/M_{disc+bulge}$ within R=2L	Z_0 kpc	Z_0 / R_{25}
NGC 1167	39	0.51	2.8	0.12
NGC 2273	8.7	0.65	0.80	0.07
NGC 4150	0.53	0.56	0.78	0.17
NGC 6340	4.54	0.66	1.30	0.15