

# МАССЫ ГАЛАКТИК

Интервал масс:  $10^7 - 10^{12}$  Мс

## Методы оценки масс

### Прямой:

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

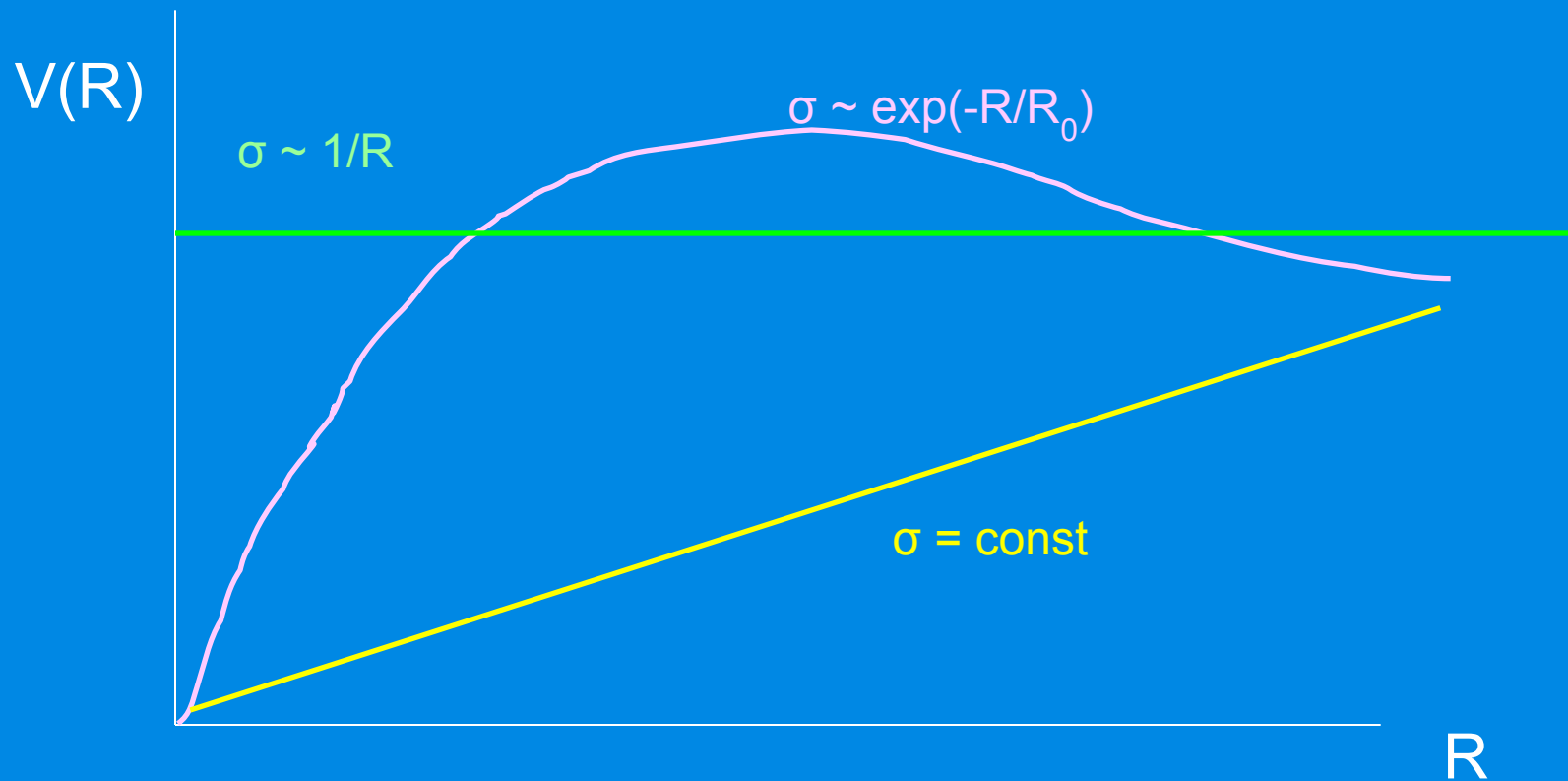
### Косвенный

(только для барионной массы):

- по излучению звезд (светимость+цвет или спектр) и газа (линии H $\alpha$ , 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 $M/L_V$ в пределах оптического диска

## Рекордсмены

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

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

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

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

$M/L \sim 1$  – преобладает свет молодых звезд

$M/L \sim 10$  – 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  $C_r \geq 0.5 C_z$  радиальной дисперсии скоростей звезд, второе  $C_r = 2.36 \Omega/k$  – дисперсии по  $z$  – координате.
- $C_r \geq 0.5 C_z$
  - $C_r = 2.36 \Omega/k$
  - $C_z / C_r \geq 0.4$

# ИНФОРМАЦИЯ О ДИСПЕРСИИ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД – КЛЮЧ К ОЦЕНКЕ МАССЫ ДИСКА

Основные механизмы увеличения дисперсии скоростей звезд в дисках галактик:

<i>Механизм</i>	<i>Примечание</i>
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 :

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

$C_r$  – дисперсия скоростей,  
 $\kappa$  – эпитциклическая 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:**

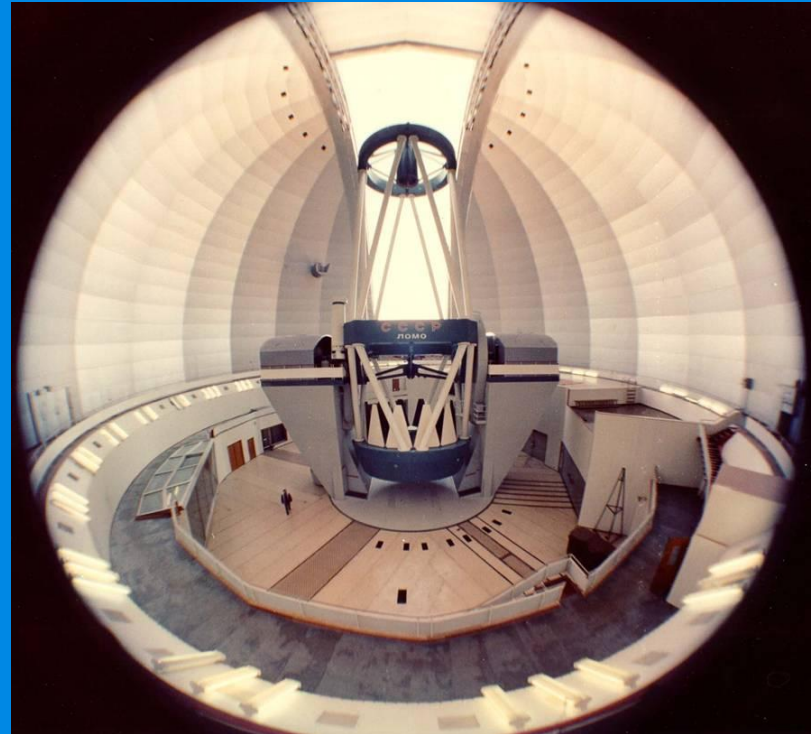
SCORPIO, long slit regime, CCD 2048x2048.

**Template:** G8-K4 stellar spectra, 4800-5540Å.

$T_{\text{exp}}$  - 2 -2.5 hours

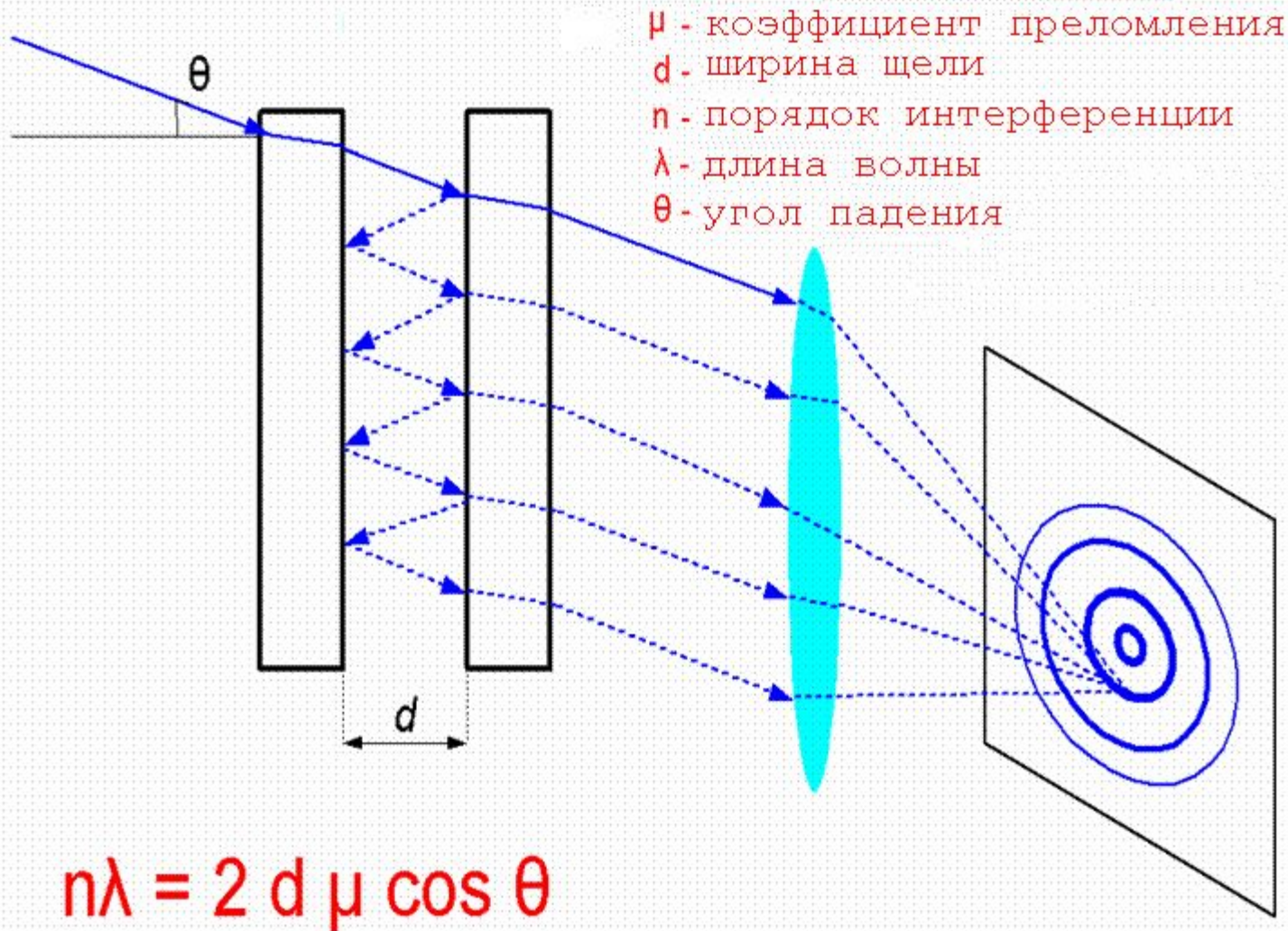
**Data processing:**

Cross-correlation method,  
adaptive (variable) binning.





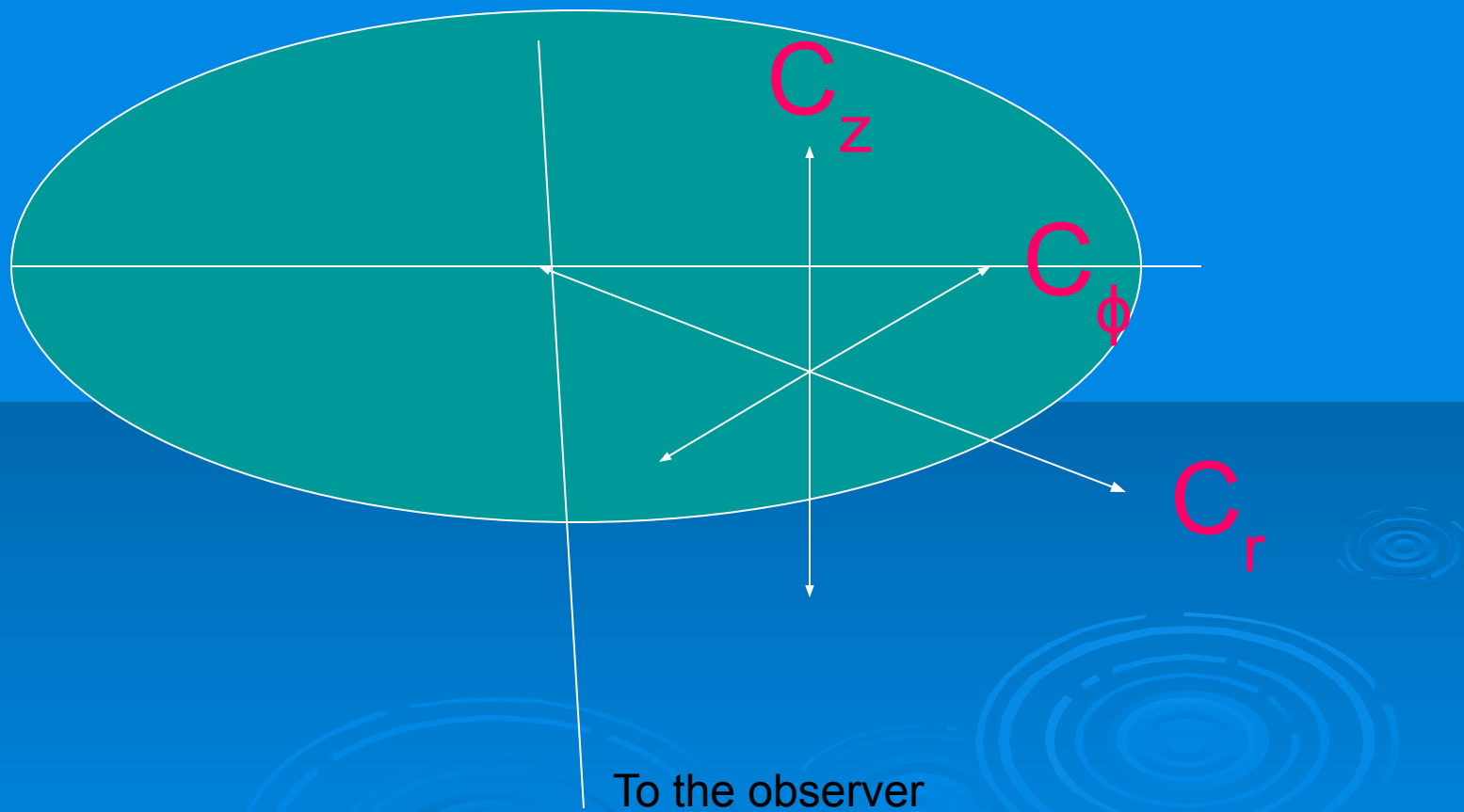
# 3D- СПЕКТРОСКОПИЯ





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

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



Galaxy	M <sub>disc</sub> (10 <sup>9</sup> M <sub>⊙</sub> )	Method	Reference	M <sub>d</sub> /M <sub>t</sub> for R=4L (extrapo- lation)	M <sub>disc</sub> from BTF relationship (Pizagno+04)
Milky Way	44	N-body model Local marginal stability at R=R <sub>sun</sub>	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	0.16-0.2 4	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,

*either* one may

- a) to assume that stability parameter  $Q_T$  is known (Zasov 1985, Bottema 1993),

*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 flatness 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  $Q$  (Zasov 1985, Bottema 1993),

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

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

□ 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-Polyacheiko-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  $Q = C_r / (C_r)_{\text{TOOMRE}}$   
where  $(C_r)_{\text{TOOMRE}} = 3.36\pi G\sigma/\kappa$  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

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

□ Polyachenko-Polyacheko-Strel’nikov criterion

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

Let

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

In general case, three alternatives are possible.

**1.  $C_{\text{obs}} > C_{\text{min}}$**

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

**2.  $C_{\text{obs}} < C_{\text{min}}$**

Either disc is unstable or its mass, and hence,  $C_{\text{min}}$ , is overestimated.

**3.  $C_{\text{obs}} \approx C_{\text{min}}$**

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  $\sim 0.7$  kpc

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

# MODEL PARAMETERS

Galaxy	M <sub>disc</sub> 10 <sup>10</sup> Mo	M <sub>halo</sub> /M <sub>disc+bulge</sub> within R=2L	Z <sub>0</sub> kpc	Z <sub>0</sub> / R <sub>25</sub>
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