

Institut d'Astrophysique de Paris

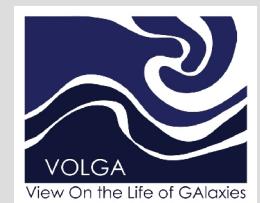
September 19-23 2016

**The Milky Way and its environment  
gaining insights into the drivers of galaxy formation and evolution**

© NAOJ

[http://www.iap.fr/vieScientifique/ateliers/MilkyWay\\_Workshop/2016/](http://www.iap.fr/vieScientifique/ateliers/MilkyWay_Workshop/2016/)

**65 reports, more than 120 participants**



# Institut d'Astrophysique de Paris





**Françoise Combes, Matt Lehnert, Nikos Prantzos, Annie Robin,  
Bruce Elmegreen, Misha Haywood, Ivan Minchev, Lia Athanassoula,  
Preben Grosbol, et al.**

# **Модели формирования Галактики и наблюдательные ограничения.**

**Доклады:**

**Jo Bovy**

**The structure of the Milky way disks**

**Ivan Minchev**

**The evolution of the Milky way disk(s)**

**Melissa Ness**

**Insights from the Galactic Bulge**

**Lia Athanassoula**

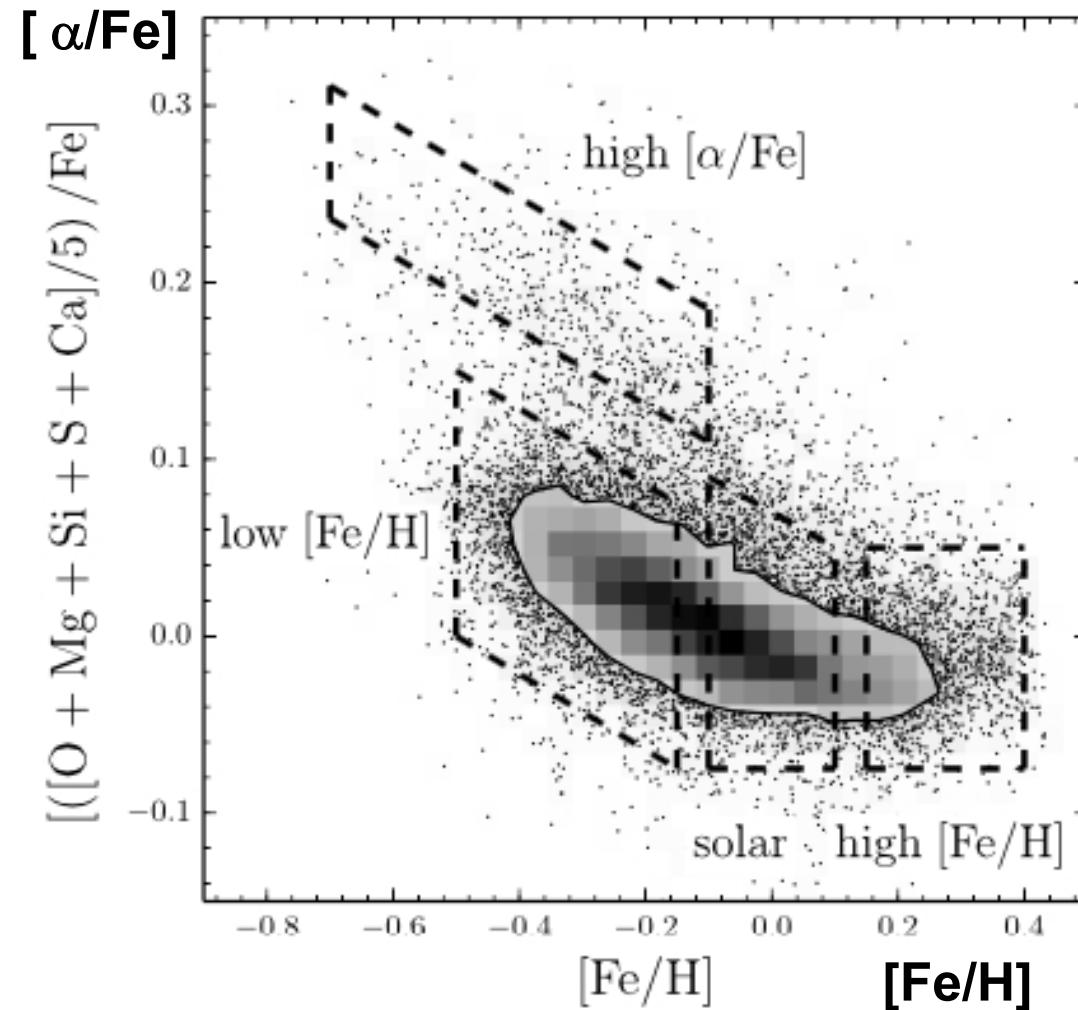
**A disc galaxy model applied to the chemo-dynamics of the bar-bulge region +**

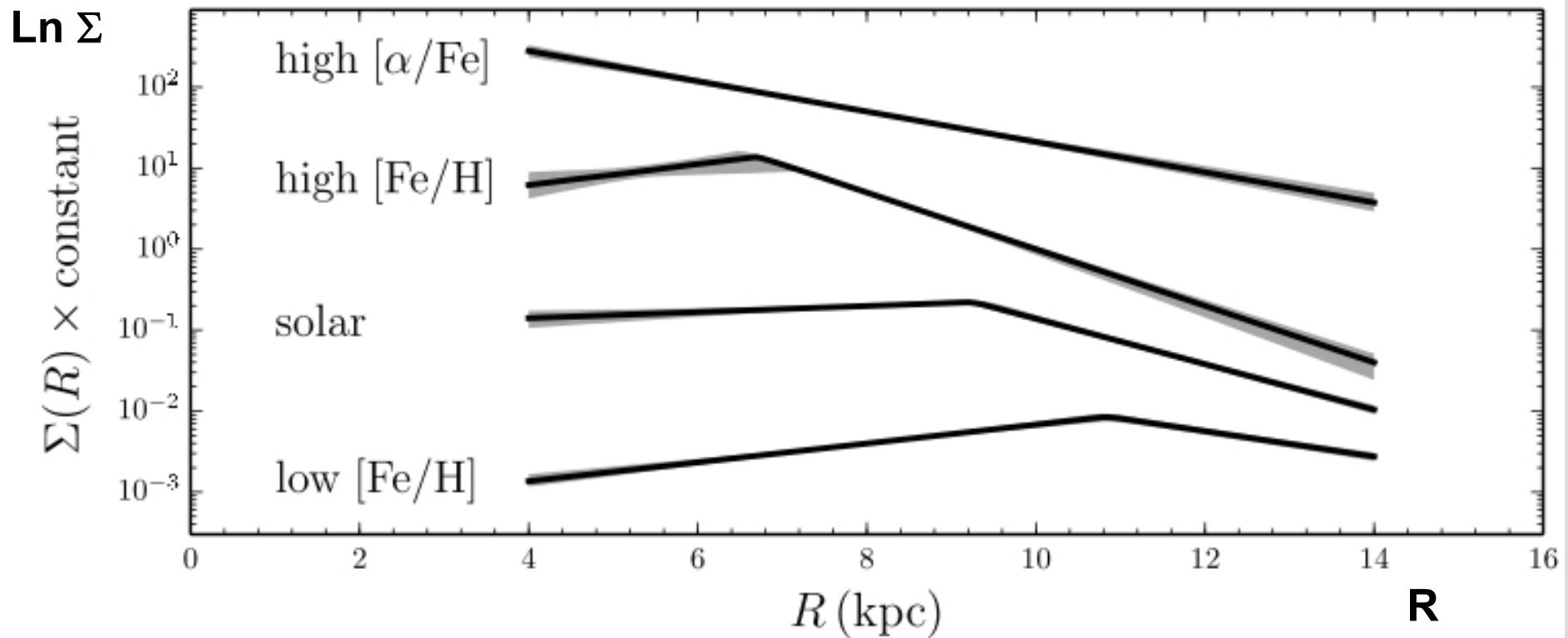
**Bruce Elmegreen**

**Some thoughts on the evolution of thick disks and the Milky Way:  
where to go from here?**



**Jo Bovy, University of Toronto, Canada**  
**The structure of the Milky way disks**





**Профили поверхностной плотности  $\Sigma(R)$  для 4-ех  
моно-металлических выборок. Серым цветом показан 95 %  
доверительный интервал.  $\Sigma(R)$  как комбинация двух экспонент**

$$\ln \Sigma(R) \propto \begin{cases} -h_{R,\text{in}}^{-1}(R - R_0) & R \leq R_{\text{peak}}, \\ -h_{R,\text{out}}^{-1}(R - R_0) & R > R_{\text{peak}}. \end{cases}$$

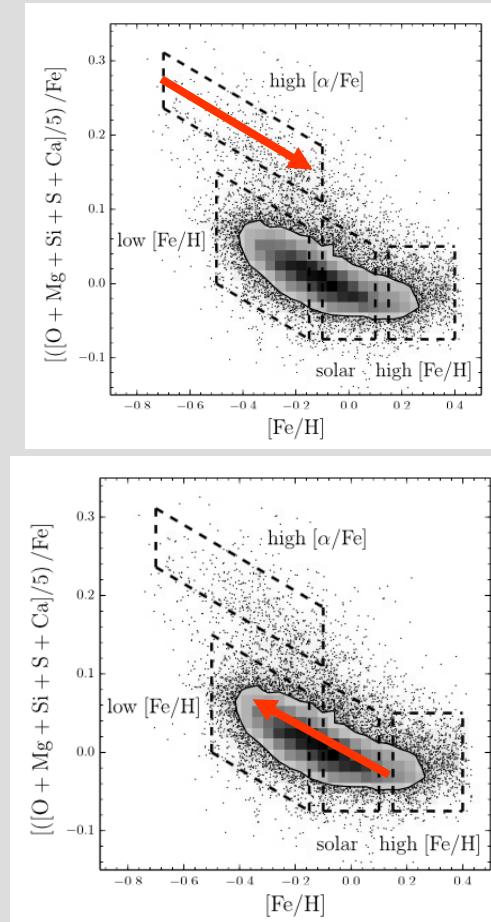
**Jo Bovy et al. 2016.**

**Использовали данные о 14,699 красных гигантов из обзора APOGEE, расположенных  $4 \text{ kpc} < R < 15 \text{ kpc}$ , для изучения свойств населений с одинаковой металличностью (mono-abundance populations MAP), исправленных за эффекты селекции.**

**Выборка звезд с высоким  $[\alpha/\text{Fe}]$  имеет поверхностную плотность  $\Sigma$**   
 $\Sigma(R) \sim \exp(-r/r_d)$ ,  
 $r_d = 2.2 \pm 0.2 \text{ kpc}$ .

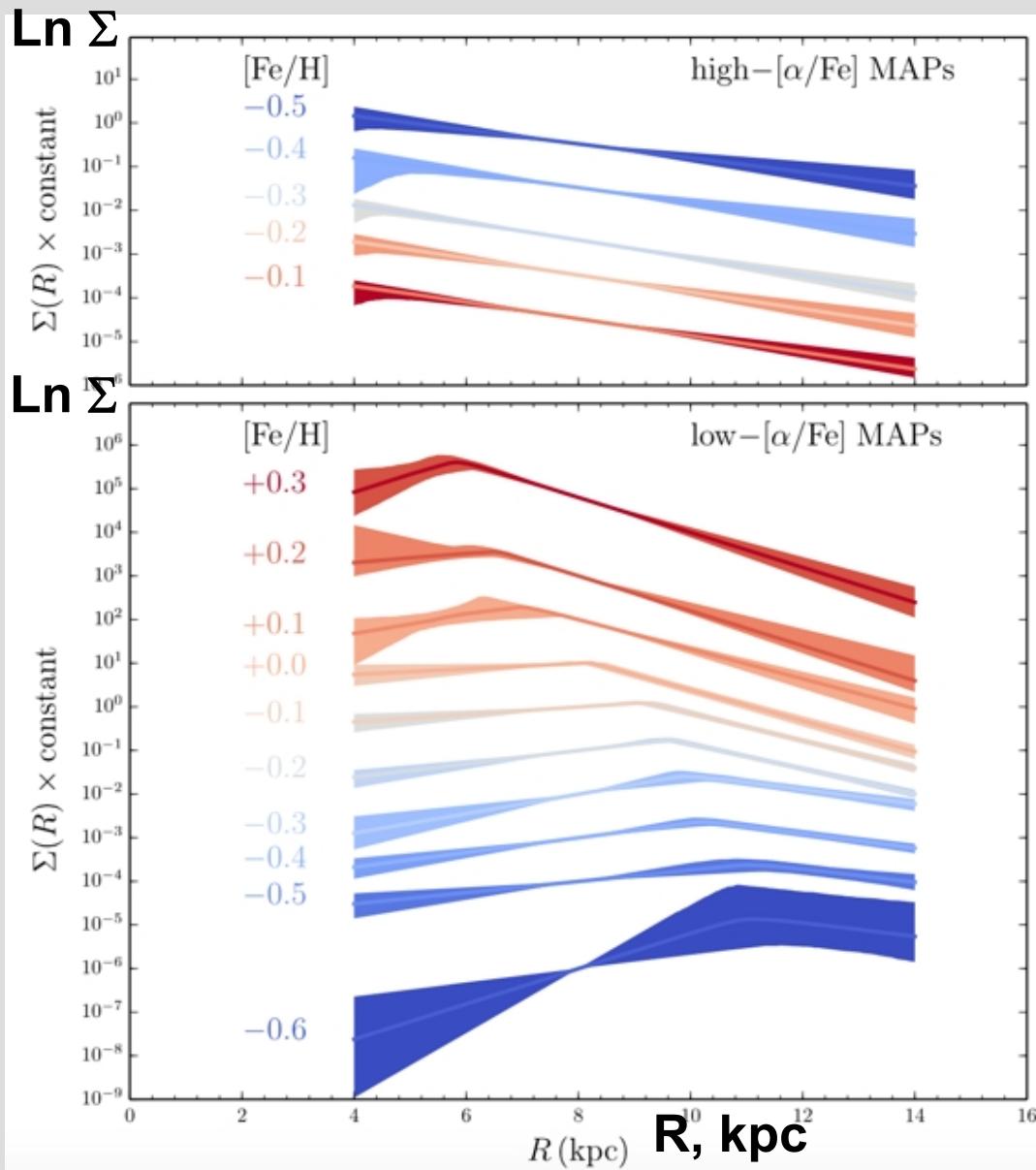
**Вертикальное распределение звезд выборки описывается законом**  
 $\zeta(z) \sim \exp(-z/H_z)$ ,  
 $H_z \sim 1 \text{ kpc}$ .

Bovy et al. 2016



Нет четкой  
границы  
между тонким  
и толстым диском

## Поверхностная плотность $\Sigma(R)$ . Разбиение на более узкие интервалы



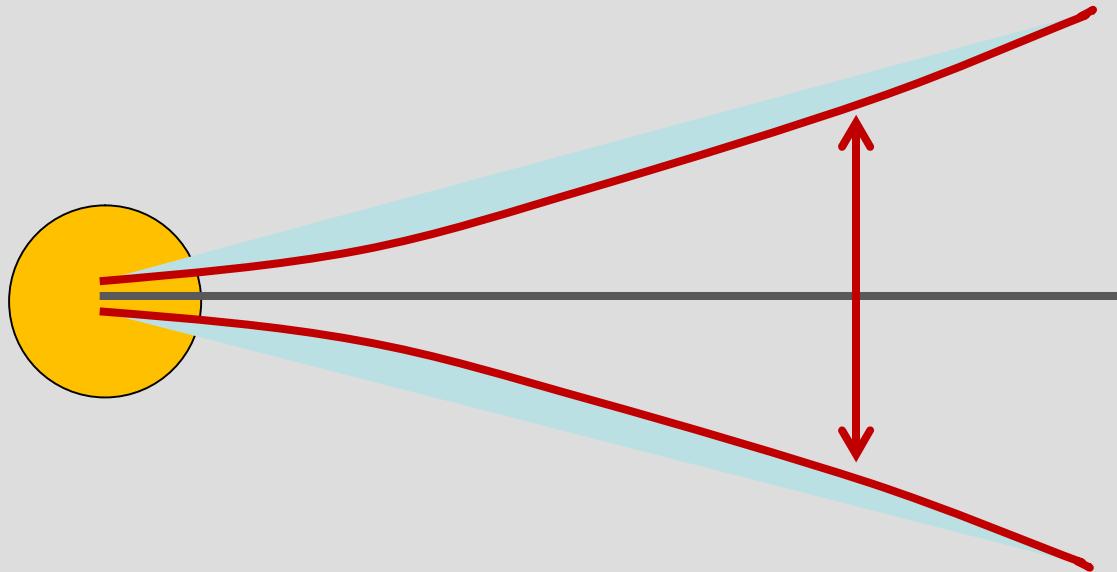
**Выборки звезд с низким содержанием  $[\alpha / \text{Fe}]$  имеют пик плотности на определенном радиусе Rpeak.  
Чем больше  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , тем меньше Rpeak.**

### **Donut-like rings**



**Удивительно то, что более молодые звезды рождаются на меньшем радиусе, чем более старые.**

## FLARING – увеличение Hz с ростом R

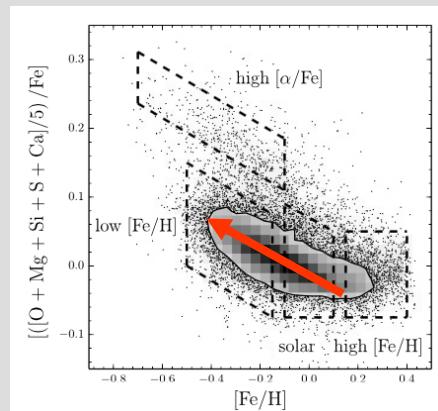
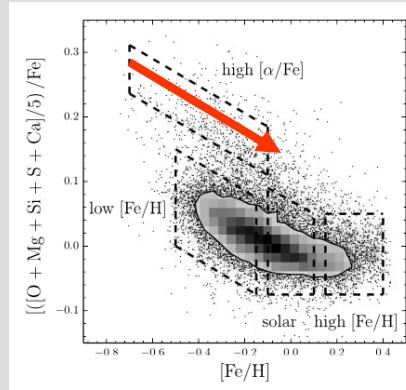


Bovy et al. : выборка звезд с высоким  $[\alpha/\text{Fe}]$  не демонстрирует FLARING.

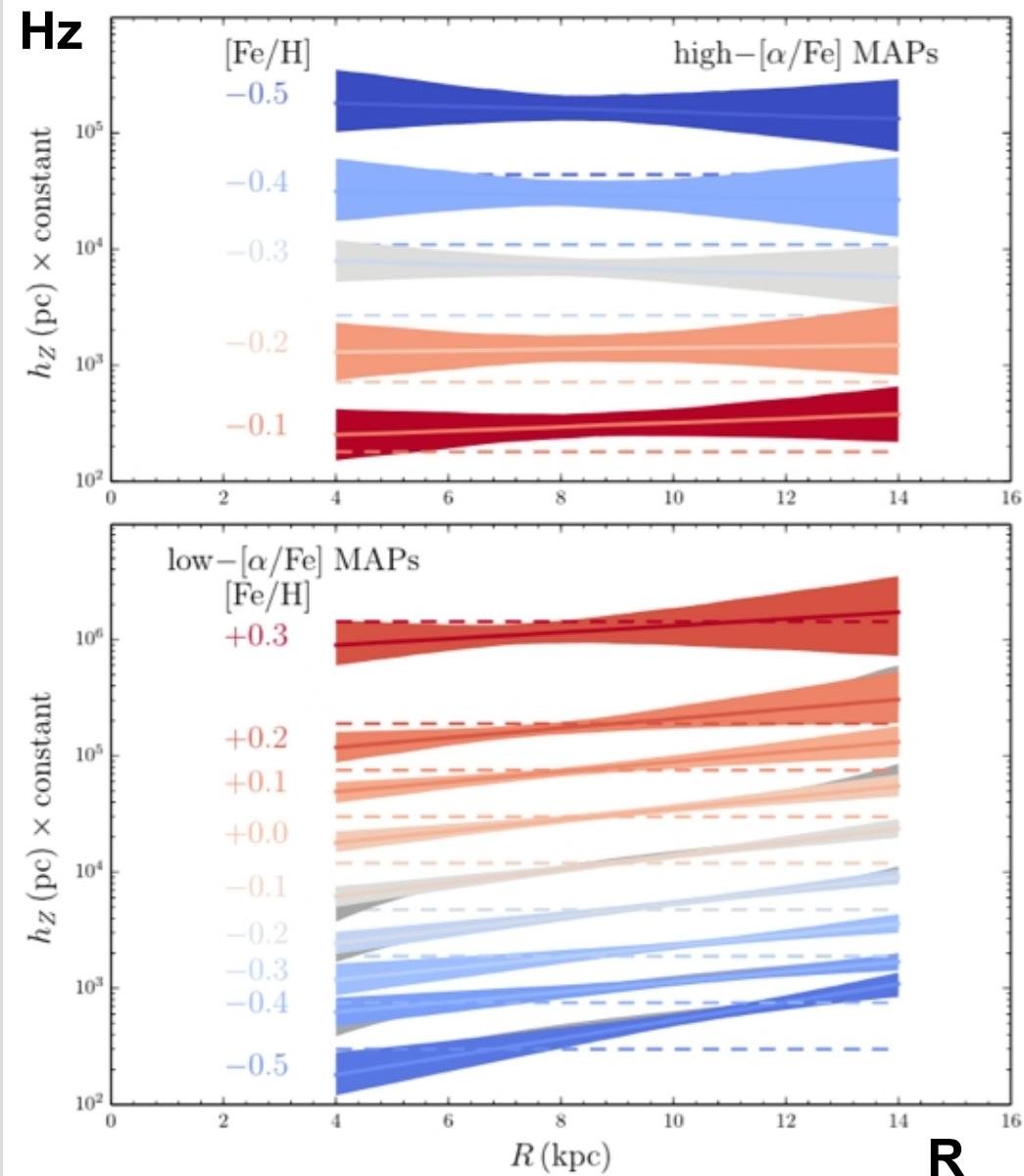
Выборки звезд с низким  $[\alpha/\text{Fe}]$  демонстрируют небольшое FLARING  
 $R_{\text{flare}} = 8.5 \pm 0.7$  кпс.

$$\ln \zeta(Z) \propto h_Z^{-1} \exp(R_{\text{flare}}^{-1} [R - R_0]) |Z|$$

Bovy et al. 2016



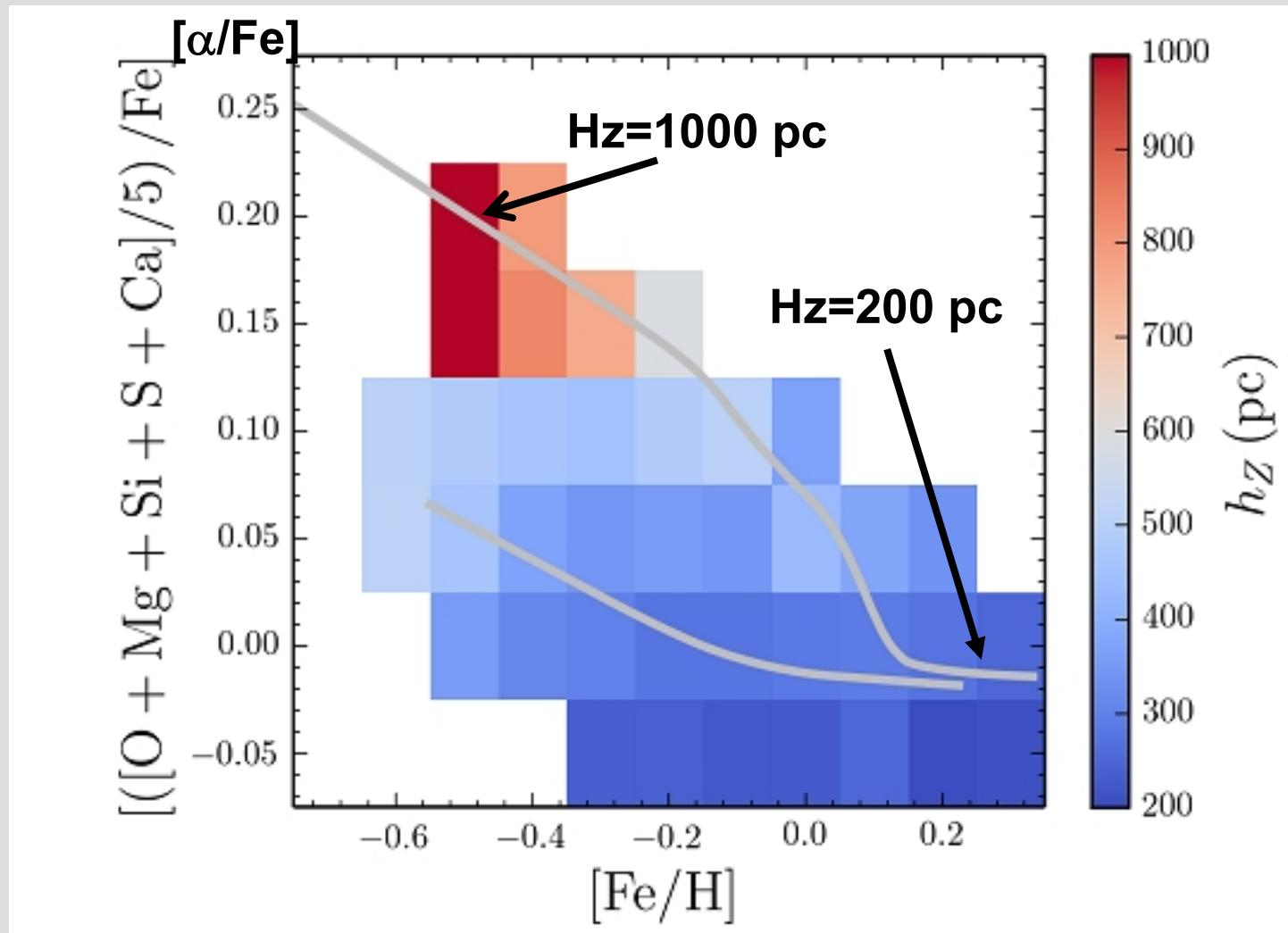
## Изменение вертикального масштабного параметра Hz вдоль радиуса



OLD

YONG-  
ER

## Вертикальный масштаб диска Hz в координатах $(\text{Fe}/\text{H}), [\alpha/\text{Fe}]$



Bovy  
et al.  
2016



Ivan Minchev  
Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)

### The evolution of the Milky way disk(s)

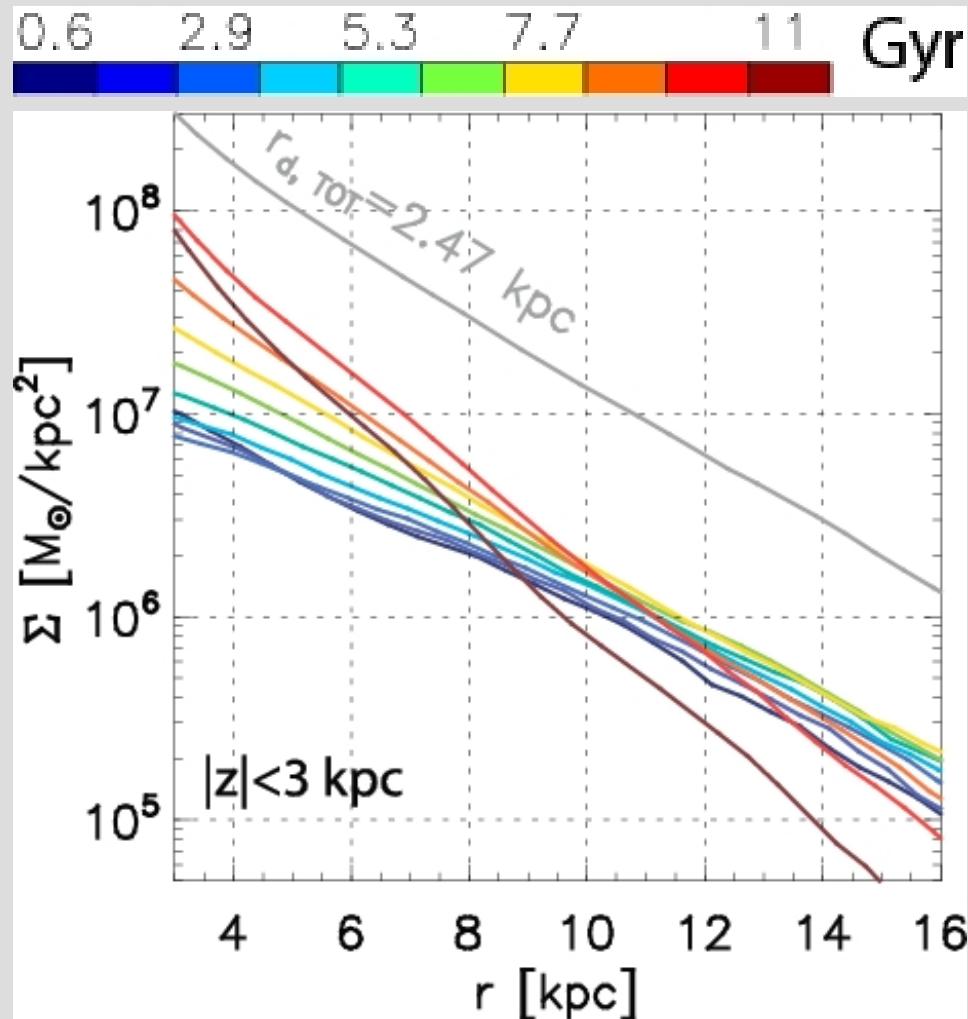
Ivan Minchev частично оспаривает результаты Jo Bovy.

I. Minchev считает, что пики на кривых  $\Sigma$  (  $R$  ), обнаруженные Bovy, возникают из-за эффектов селекции. Каждая подвыборка Bovy mono-metallicity звезд не является mono-age, кроме выборки с high-[ $\alpha$ /Fe].

Выборка red-clump stars APOGEE смещена в сторону молодых звезд. Именно недостаток старых звезд (которые концентрируются к центру) создает пики на кривых  $\Sigma$  (  $R$  ).

Моделирование показывает, что таких пиков быть не должно. Население каждого возраста должно иметь экспоненциальное распределение по диску и диски должны демонстрировать FLARING (рост Hz с увеличением R) (Minchev et al. 2016).

## Модельная зависимость поверхностной плотности $\Sigma$ от радиуса $R$ для выборок разного возраста

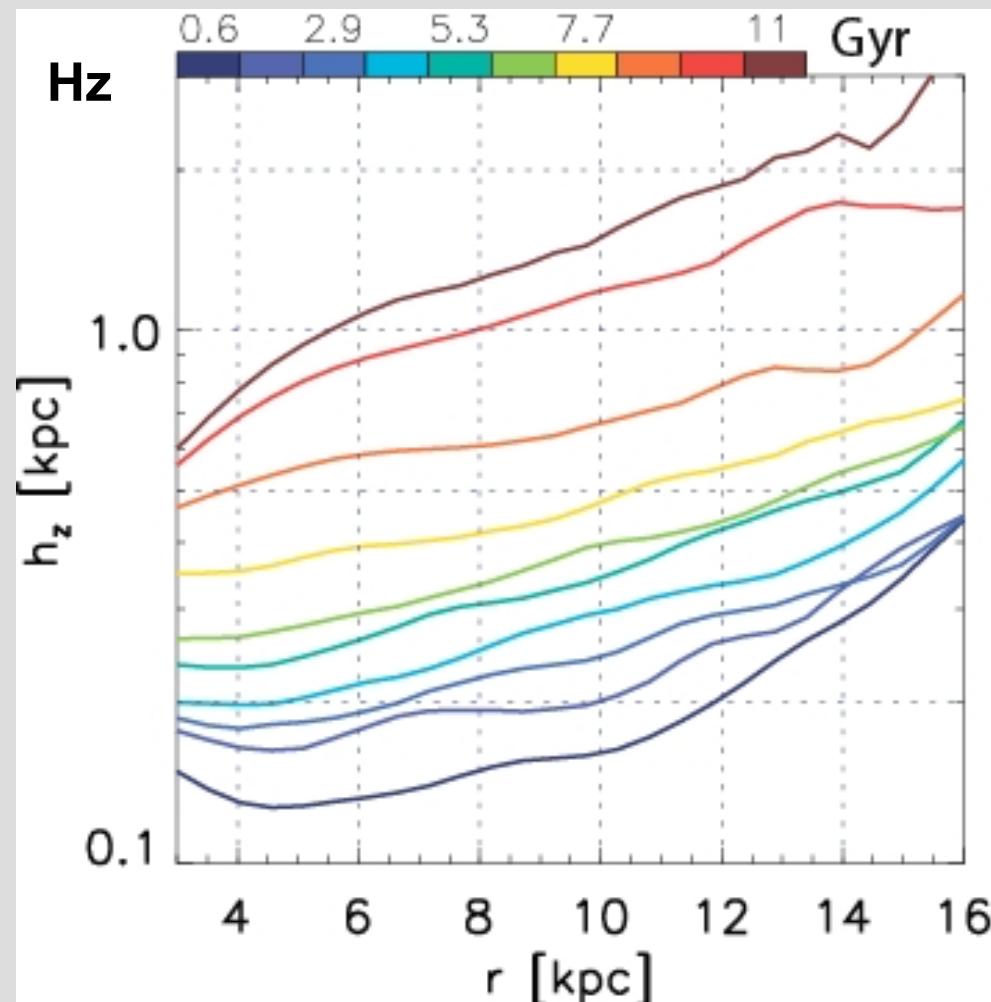


Космологическое  
Моделирование  
МСМ (Minchev, Chiappini,  
Martig, 2013)  
показывает,  
что mono-age население  
должно иметь  
 $\exp(-r/r_d)$   
распределение по диску,  
но с разным  $r_d$ .

Чем меньше возраст,  
тем больше  $r_d$ .

Формирование диска  
“inside-out”

Моделирование Hz популяций разного возраста (Minchev et al. 2013).



**FLARING**  
(увеличение Hz  
с ростом R)  
демонстрирует  
**КАЖДОЕ**  
**mono-age** население.

Суммарный  
**FLARING**  
населений  
разных возрастов  
может быть  
представлен  
как суперпозиция  
тонкого и толстого  
дисков.

Причина **FLARING** – радиальные миграции, вызванные  
резонансным взаимодействием спиралей с баром.

**Радиальные миграции создают FLARING !!! ????**

**Minchev et al. 2012, Elena D'Onghia:**

**FLARING** происходит за счет звезд,  
мигрирующих внутрь (*inward migrants*),  
которые уТОНЧАЮТ диск. Звезды,  
мигрирующие наружу (*outward migrants*)  
практически НЕ меняют толщину диска.

**Minchev & Famaey 2010.**

**A New Mechanism for Radial Migration in Galactic Disks:  
Spiral-Bar Resonance Overlap**

**Транзиентные спиральные рукава не способны  
разогреть диск по Z, а диски с баром и  
медленными модами могут!**

**Или minor mergers ответственны за FLARING  
в большей степени?**

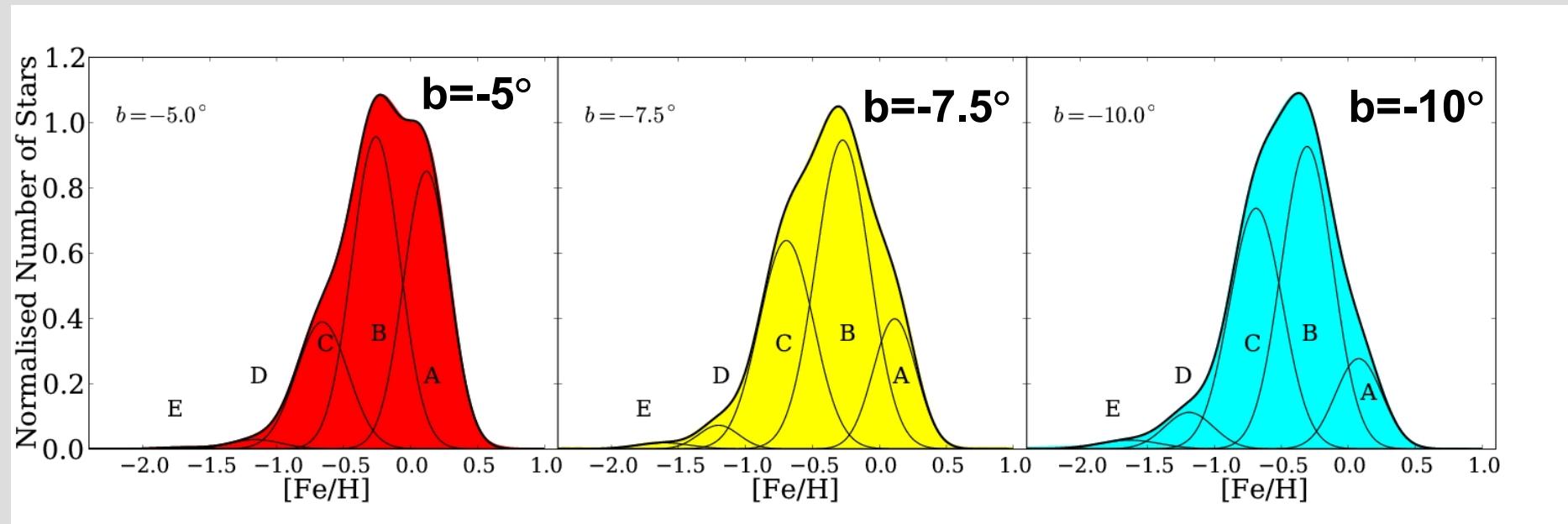


**Melissa Ness**  
**Max-Planck-Institut für Astronomie,**  
**Heidelberg, Germany**

### **Insights from the Galactic Bulge**

Галактический балдж состоит из звезд, имеющих широкий разброс металличности,  $-3.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < 1 \text{ dex}$ . Средняя металличность уменьшается с увеличением  $Z$ .  
Вертикальный градиент металличности составляет  $-0.45 \text{ dex kpc}^{-1}$   
(Ness & Freeman 2016).

## Химического состава балджа

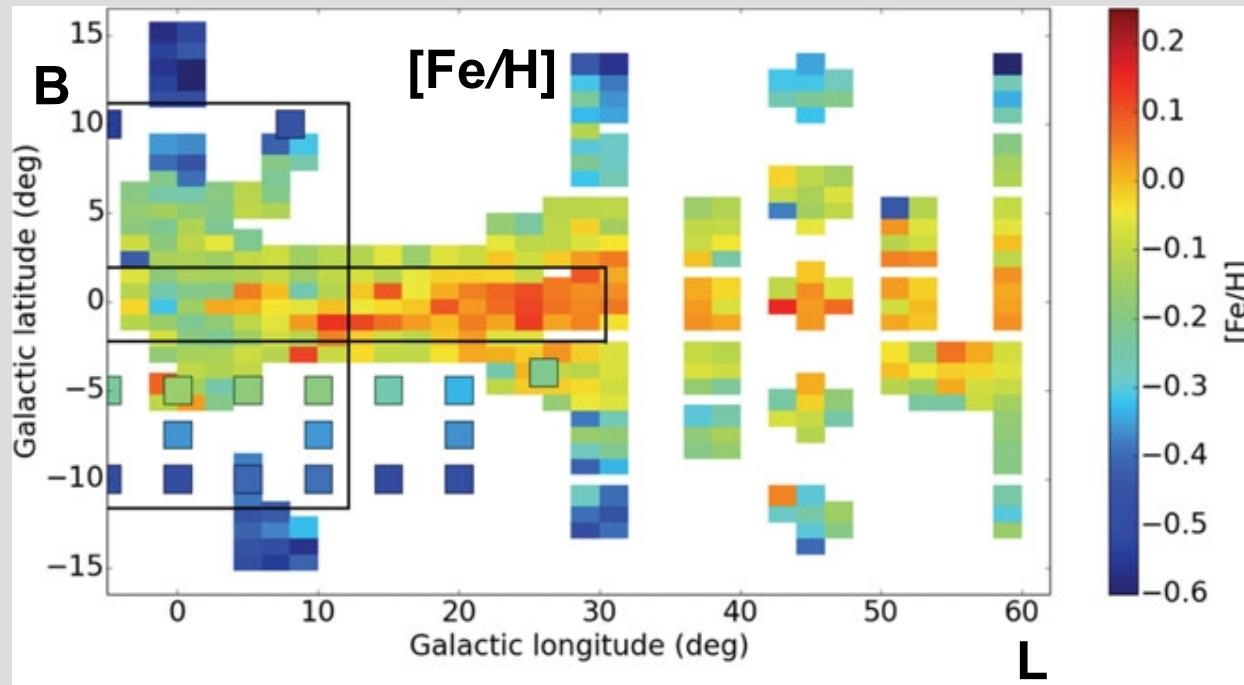


Распределение звезд балджа по металличности представленное, как суперпозиция гауссиан С-В-А для различных галактических широт (Ness et al. 2013).

$$C \rightarrow -0.70 \text{ dex}$$

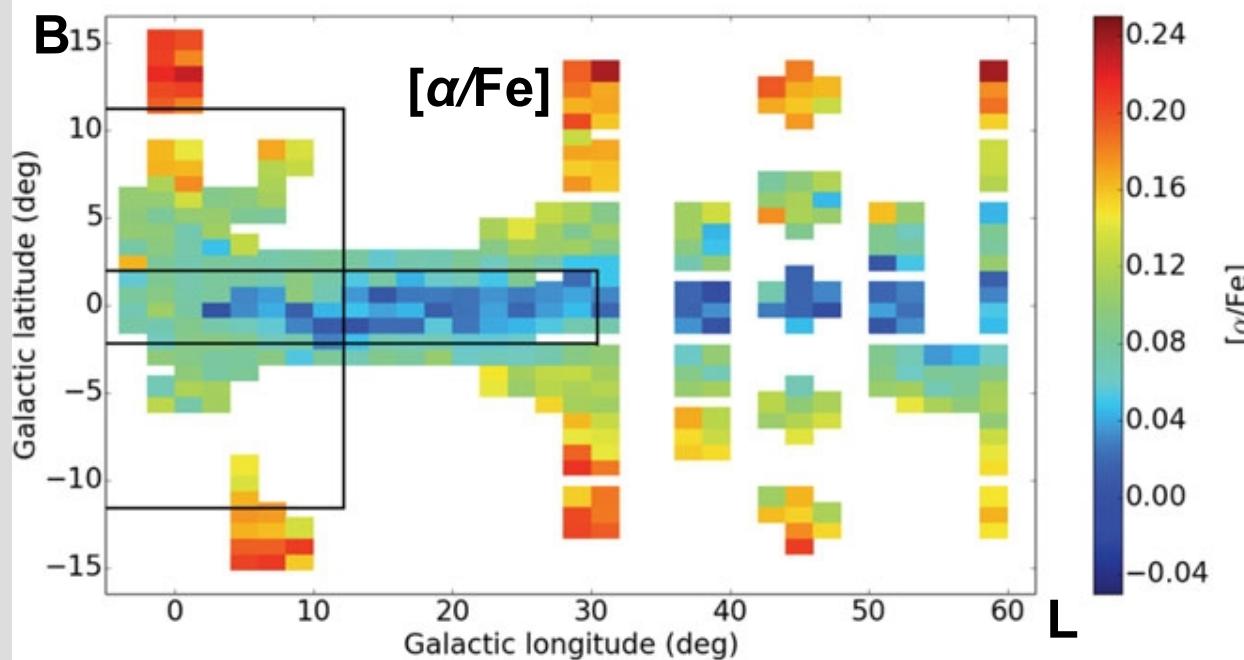
$$B \rightarrow -0.25 \text{ dex}$$

$$A \rightarrow +0.15 \text{ dex}$$



Ness & Freeman  
2016:

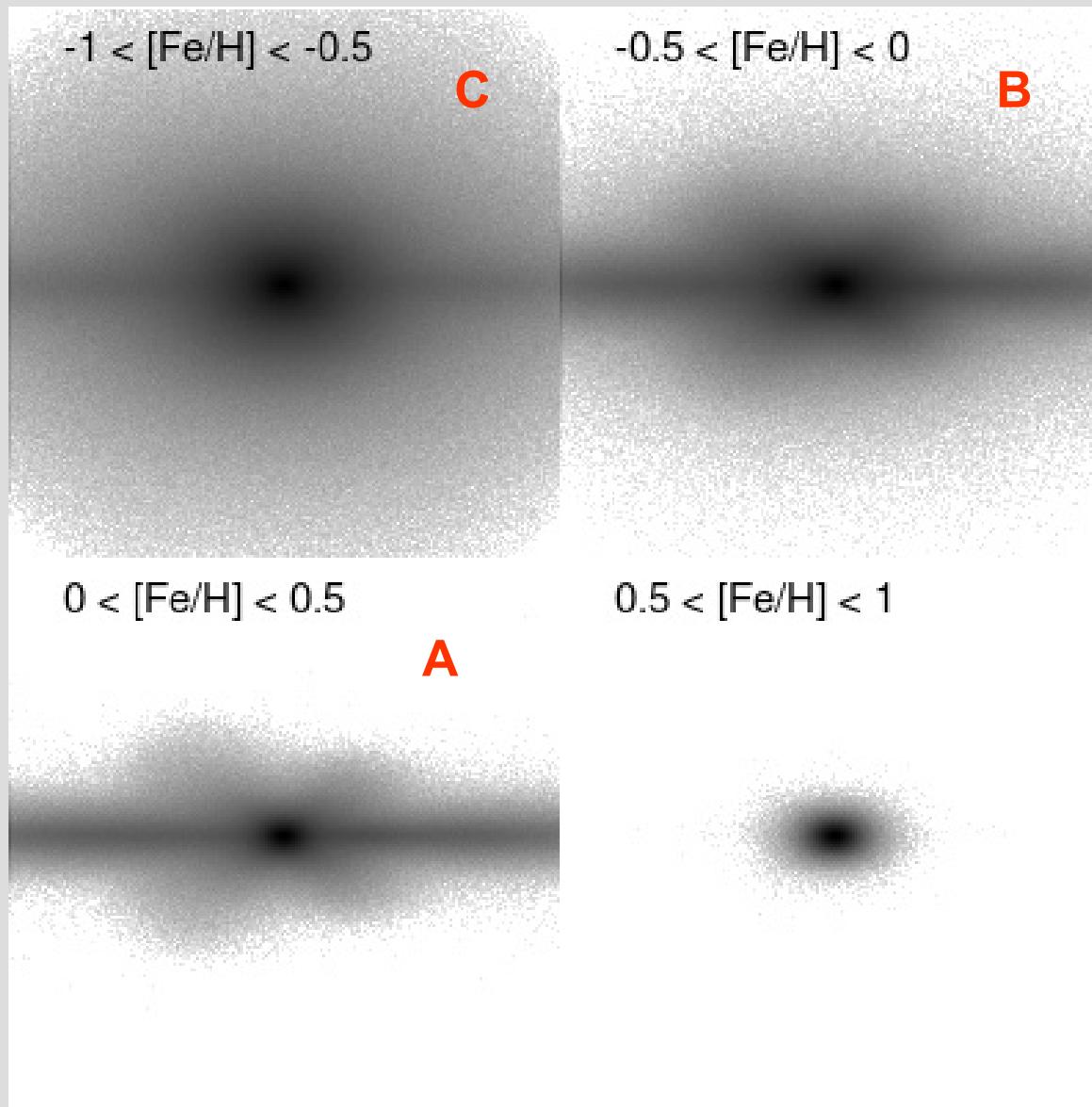
[Fe/H] and [ $\alpha$ /Fe]  
maps  
for the 13 000 bulge  
and disk stars  
from APOGEE and  
8 000 ARGOS  
bulge stars



The small box  
indicates the  $h_z=180$   
pc thin bar identified  
by Wegg, Gerhard,  
Portail (2015).

The larger box shows  
the boxy bulge  
in the COBE image  
(Dwek et al.1995).<sup>19</sup>

**Наиболее металличные звезды балджа являются частью структуры, имеющую форму гантели (X-shape).**



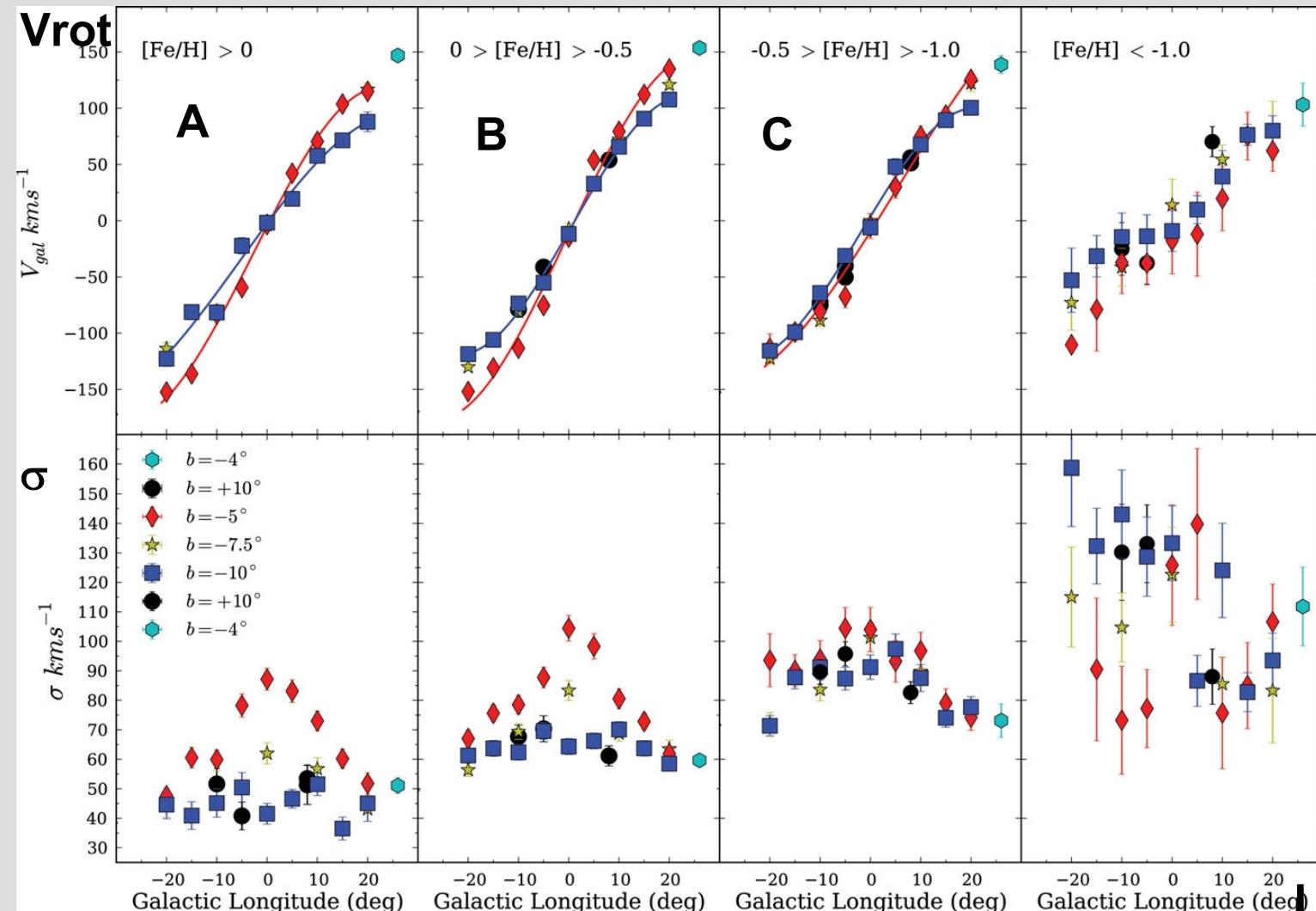
**Ness & Lang 2016**

**WISE +  
новая методика  
обработки  
данных  
Lang (2014)**

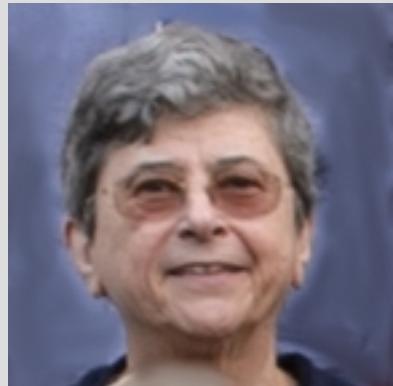
**A, B –  
гантелиобразный  
балжд  
(boxy-peanut bulge)**

**С – толстый диск**

## Вращение различных подсистем балджа

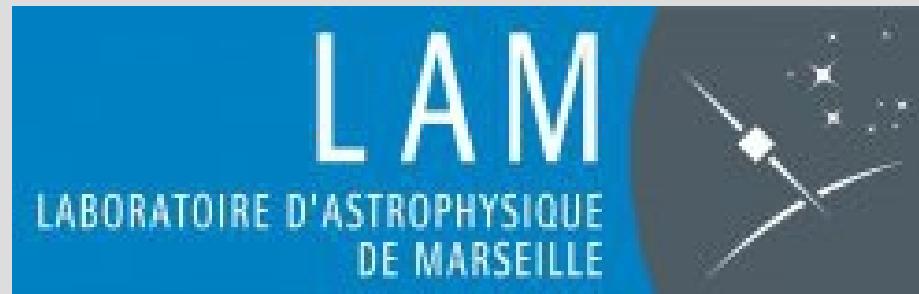


Боху-реанут балдж (А, В) и толстый диск (С)  
вращаются примерно одинаково (Ness et al. 2013)



**E. Athanassoula**  
**Laboratoire d'Astrophysique de Marseille**

**A disc galaxy model applied to the  
chemo-dynamics of the bar-bulge region  
and to the outer regions of the disc**



## **FORMING DISK GALAXIES IN WET MAJOR MERGERS**

**E. ATHANASSOULA, S. A. RODIONOV,  
N. PESCHKEN, J. C. LAMBERT  
2016ApJ...821...90A**

Athanassoula et al. 2016

Используя Nbody+SPH моделирование, Athanassoula et al. 2016 исследовали слияние (merging) двух дисковых протогалактик, имеющих горячее газовое гало (hot gaseous halo).

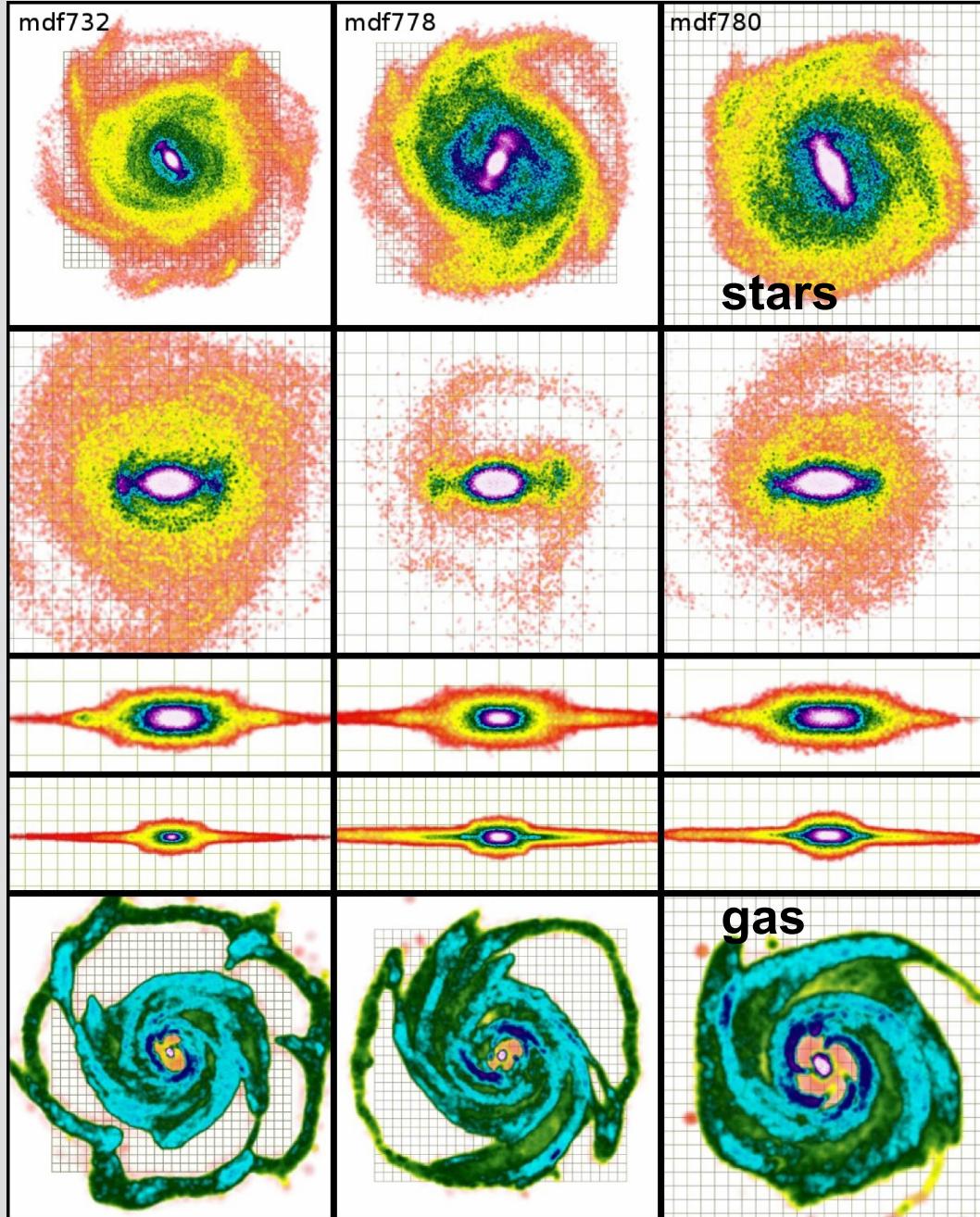
Родительские диски разрушаются во время слияния и их звезды (звезды, рожденные до мергинга) формируют классический балдж.

Звезды, рожденные во время мергинга, формируют толстый диск и боху балдж.

Новый звездный диск формируется постепенно из остатков газа, падающего из гало. Новый диск тонкий протяженный в экваториальной плоскости.

Бар начинает формироваться раньше, чем окончательно сформируется тонкий диск.

Кривая вращения плоская.



**Морфология звездных и газовых дисков t=10 Gyr.**

**Горячий газ в Родительских протогалактиках имеет спин: 60% вращается в одну сторону -- 40% в другую (md732).**

**Родительские галактики до слияния находятся в одной плоскости (complaner mergers)**

**После слияния галактик, газ из гало продолжает падать, формируя диск и спиральные рукава**

**Для формирования дисковой галактики в модели слияния двух галактик важно:**

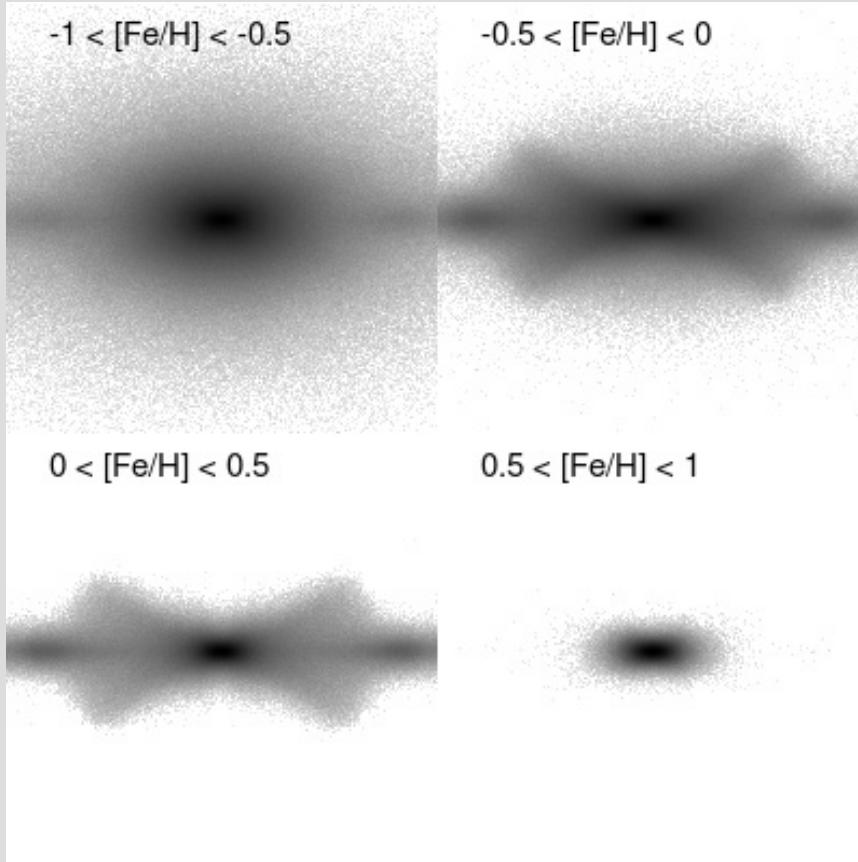
**1) Присутствие горячего газа в гало стекивающихся родительскихproto-галактик. Из этого газа потом медленно формируется диск.**

**2) Наличие механизма “Central AGN-like feedback”,**  
который препятствует излишней концентрации материи  
в центральной области.

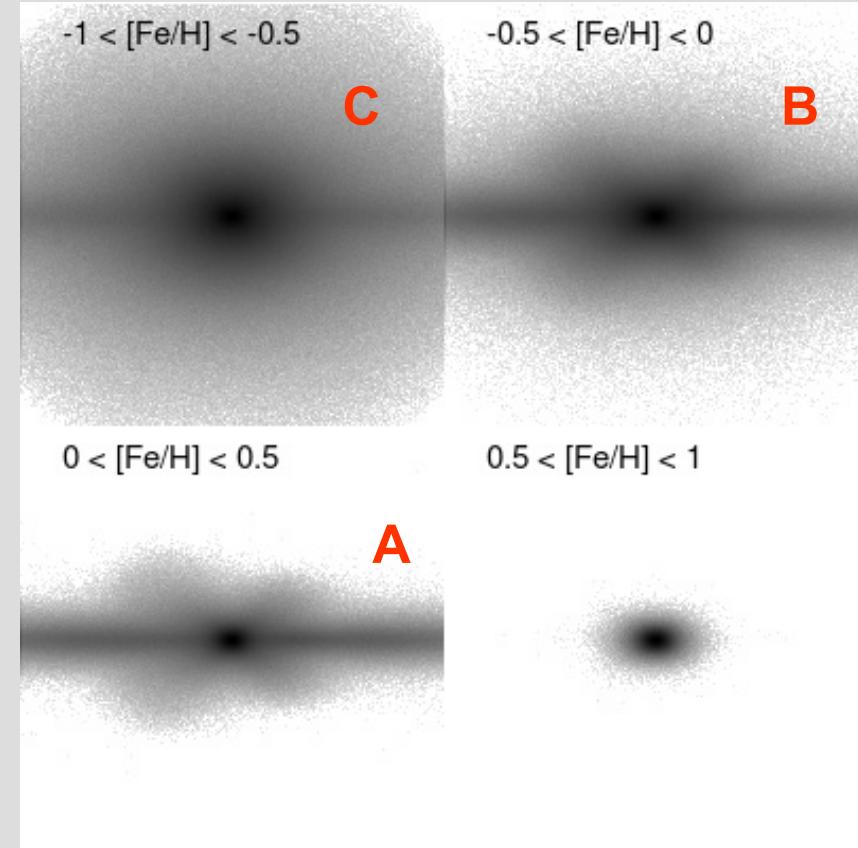
**Большая точечная масса в центре была бы препятствием  
для формирования бара.**

**Эмпирическая модель:** часть газа падает на  
центральную черную дру и излучает энергию,  
которая поглощается газом в центральной области  
и нагревает его, что замедляет скорость звездообразования.  
Если  $\rho > \rho_{AGN}$ , то  $T_{gas}$  увеличивается до  $T_{AGN}$

## Моделирование химического состава балджа

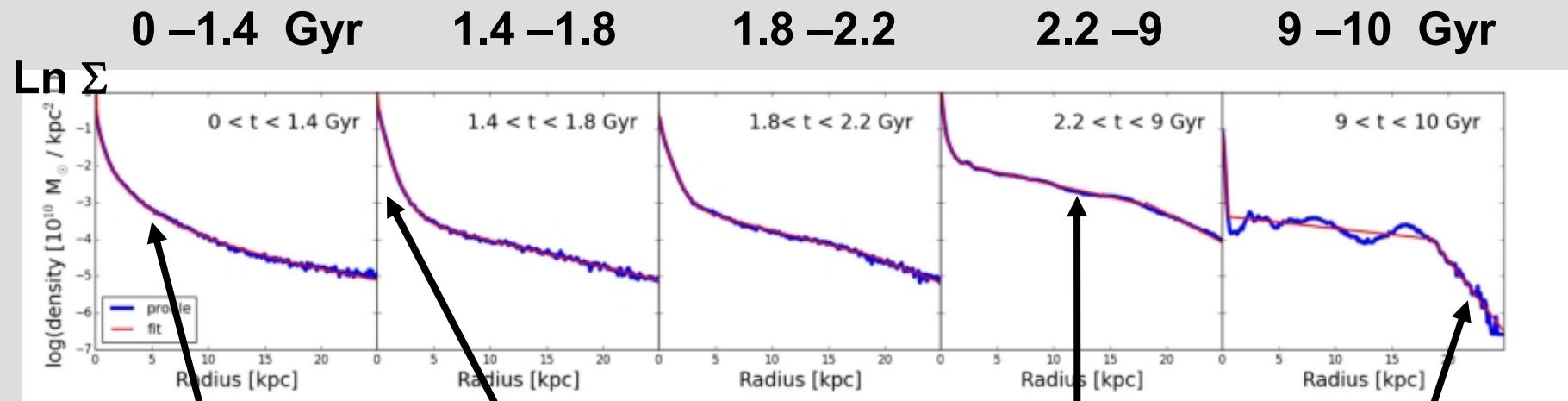


Моделирование  
Athanassoula et al. 2016



Анализ наблюдений  
Ness & Lang 2016

## Профили плотности звезд, рожденных в пять разных эпох (Athanassoula et al. 2016).



Соответствует  
Sersic профиль  
 $I = I_0 - k \cdot R^{1/n}$   
 $n = 4.5 - 6$   
классический  
балдж

Внутренний  
дисковый  
псевдобалдж

Внутренний  
диск

Внешний  
диск

FIT => Три экспоненциальных диска

Спустя 10 Gyr профиль плотности имеет тип II  
(плотность  $\Sigma$  более круто падает на периферии галактики)



**Françoise Combes**  
**Observatoire de Paris**

**Round Table Discussion**  
**Thin vs Thick disks**



**Misha Haywood**



**Ivan Minchev**

**Толстый диск**

$R_d = 2.2 - 2.8 \text{ kpc}$   
 $H_z = 700 - 1400 \text{ pc}$

**Вращаются примерно одинаково.**

**Может это один и тот же диск ?**

**Или они все-таки существенно  
различаются?**

**Тонкий диск**

$R_d = 2.5 - 3.0 \text{ kpc}$   
 $H_z = 220 - 450 \text{ pc}$



**Jo Bovy**



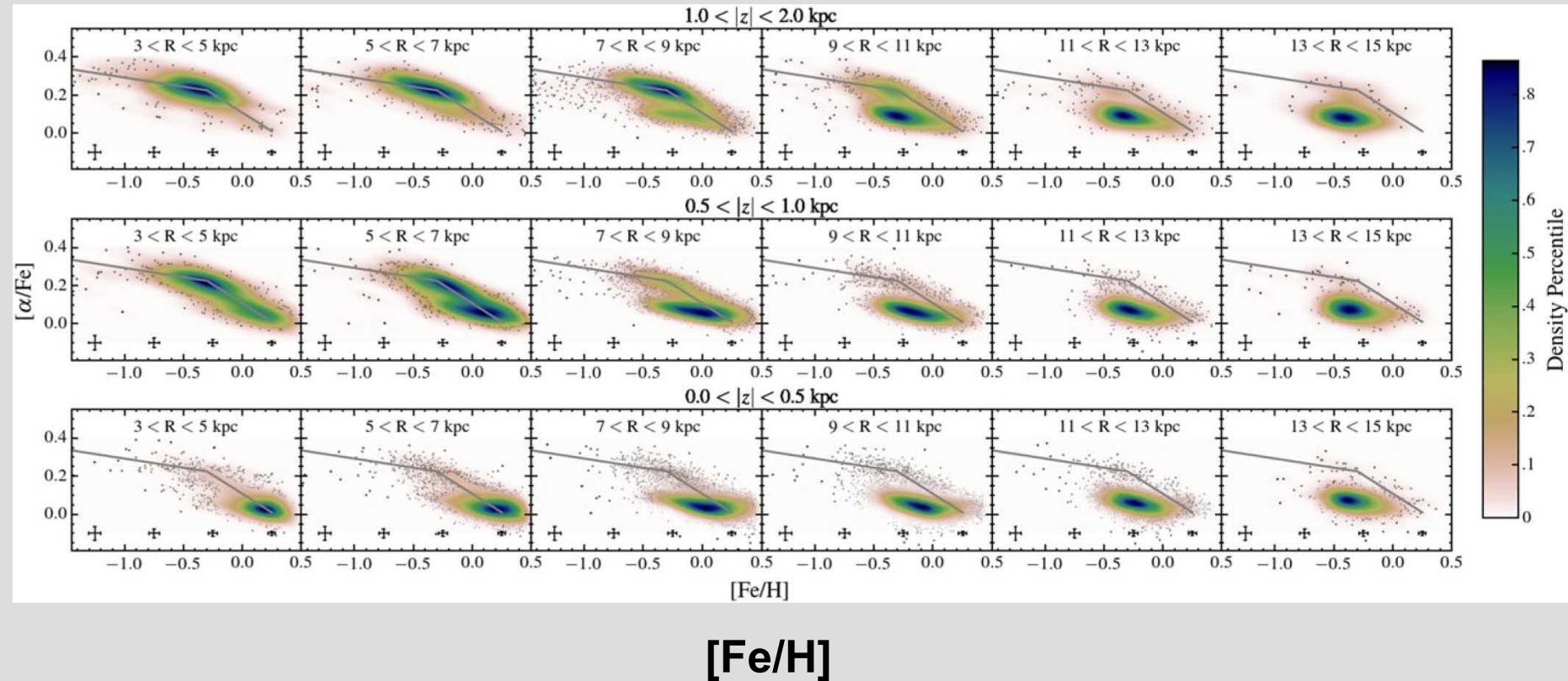
Bruce Elmegreen  
IBM T.J. Watson Research Center  
NY 10598 USA

**Some thoughts on the evolution  
of thick disks and the Milky Way:  
where to go from here?**

В галактиках на высоких красных смещениях доминируют газовые сгустки, возникающие в результате джинсовской неустойчивости ( $10^8 - 10^9$  Ms). Моделирование показывает, что за 1 Gyr движение сгустков к центру галактики и их взаимодействие друг с другом и с диском приводят к формированию классического балжда и экспоненциального диска (Bournaud, Elmegreen, Elmegreen 2007, 2009). Толстый диск имеет постоянную Hz, не меняющуюся с радиусом, потому что Hz определяется турбулентными движениями. Сначала формируется толстый диск, и только после того как вырастет дисперсия скоростей σ в центральной области формируется бар.

**Был ли переход от толстого к тонкому диску постепенным?  
Некоторые наблюдения показывают бимодальное  
распределение**

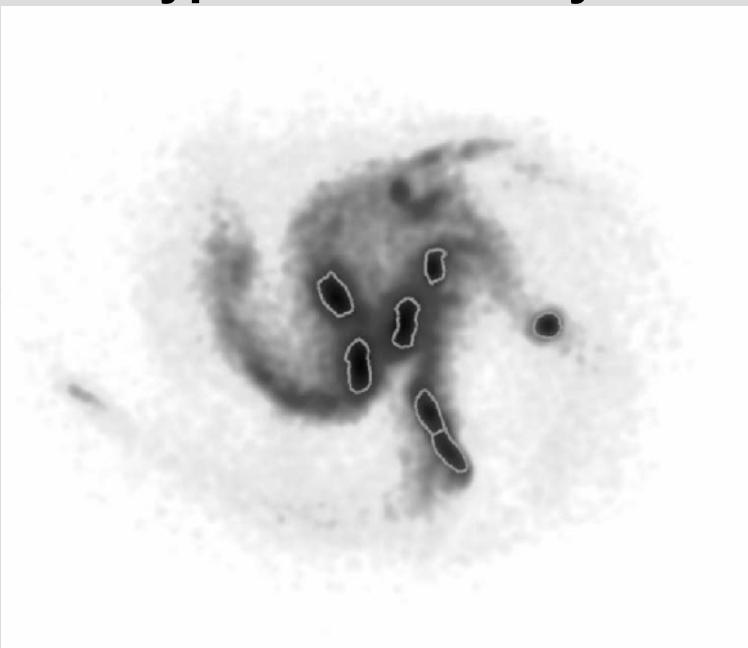
[ $\alpha/\text{Fe}$ ]



**Hayden +15: 70,000 red giants from APOGEE survey:  
thick and thin sequences**

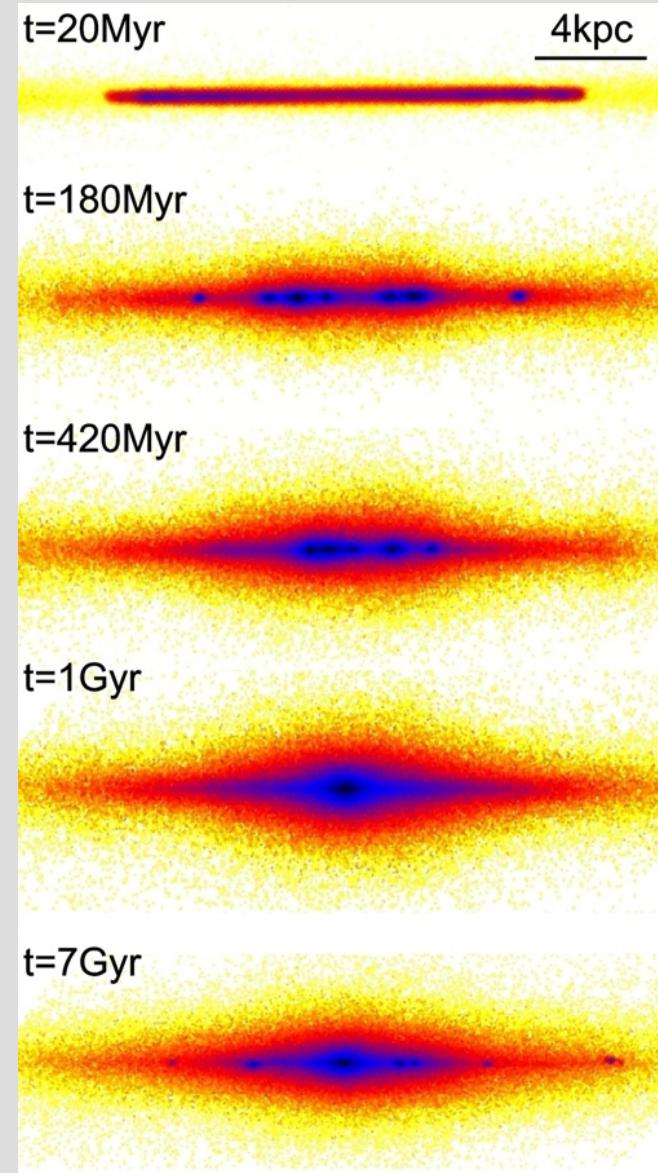
## Clump-cluster evolution

Контуры газовых сгустков



Bournaud, Elmegreen, Elmegreen  
2007, 2009

Вид с ребра на модельные диски →  
Диск быстро утолщается благодаря  
присутствию сгустков.



Bruce Elmegreen:

Какова последовательность событий, которые привели к формированию Milky Way?

Три шага на пути формирования диска похожего на MW.

1. Шаг первый.

На раннем этапе скорости акреции, звездообразования, взаимодействий, minor mergers были высокими, что делало диск крайне турбулентным.

- early time means it has “high  $\alpha/\text{Fe}$ ”,
- high  $\sigma/V_{\text{rot}}$  means it is “thick”,
- $R_{\text{Jeans}}/R_{\text{D}} \sim (\sigma/V_{\text{rot}})^2$  &  $M_{\text{Jeans}}/M_{\text{gal}} \sim (\sigma/V_{\text{rot}})^4$

Газовые сгустки имеют большую массу, что обеспечивает им долгое существование и возможность “torque the disk” и формировать классический балдж.

-рассечение звезд высоко, что сглаживает градиенты металличности и создает “eccentric orbits”.

**Bruce Elmegreen:**

**Перпендикулярно плоскости галактики, гравитация уравновешивается давлением, которое зависит, главным образом, от поверхностной плоскости  $\Sigma$ :**

$$P \sim \frac{\pi}{2} G \Sigma^2$$

**Или , эквивалентно,**

$$H = \frac{\sigma^2}{\pi G \Sigma}$$

Bruce Elmegreen:

Шаг второй.

Постепенно, скорость акреции и бомбардировки облаками замедляется, SFR and  $\sigma/V_{\text{rot}}$  падают.

Нz уменьшается с уменьшением  $\sigma$  и увеличением  $\Sigma$ .

- В то же время, угловой момент акрецирующего вещества возрастает и поэтому  $rd$  увеличивается.
- Эти процессы идут параллельно:  
акреция состоит из спокойных потоков  
остывающего газа гало +  
отдельные газовые облака.
- Переход от толстого диска к тонкому идет постепенно.
- Самые старые части диска выделяются повышенным содержанием  $[\alpha/\text{Fe}]$ , экстр. малометал. зв. (EMP stars)

Bruce Elmegreen:

Шаг третий.

Когда холодная часть диска становится достаточно массивной, он может сформировать бар. А бар может изогнуть (buckle) внутреннюю часть диска.

Скорость акреции продолжает падать, SFR тоже падает.

Под влиянием гравитационной нестабильности, холодный звездный диск формирует коротко-живущие и возобновляющиеся спиральные рукава “*recurrent spirals*”.

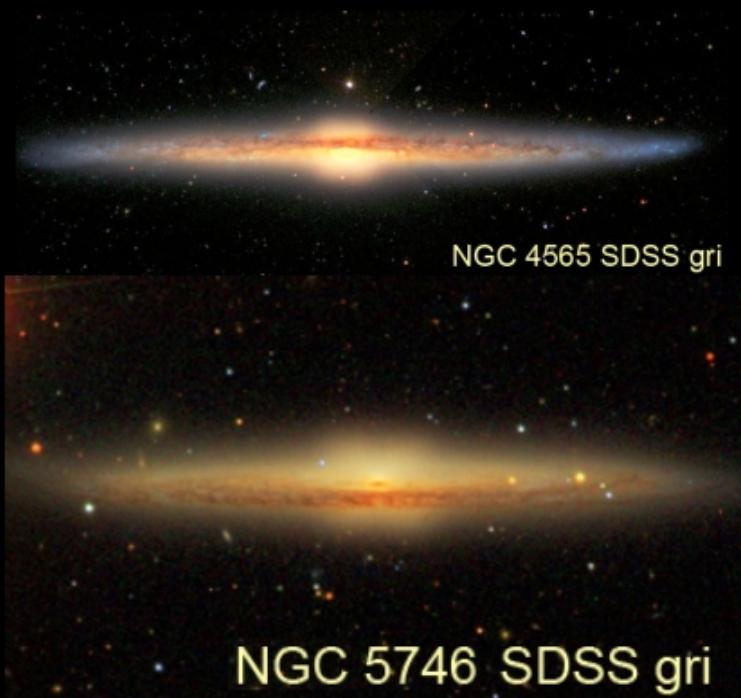
Холодные звезды нагреваются и бар удлиняется.

Горячая часть диска неактивна.

# Secular Evolution of Galaxy Disks: Our Milky Way as a Case Study

John Kormendy

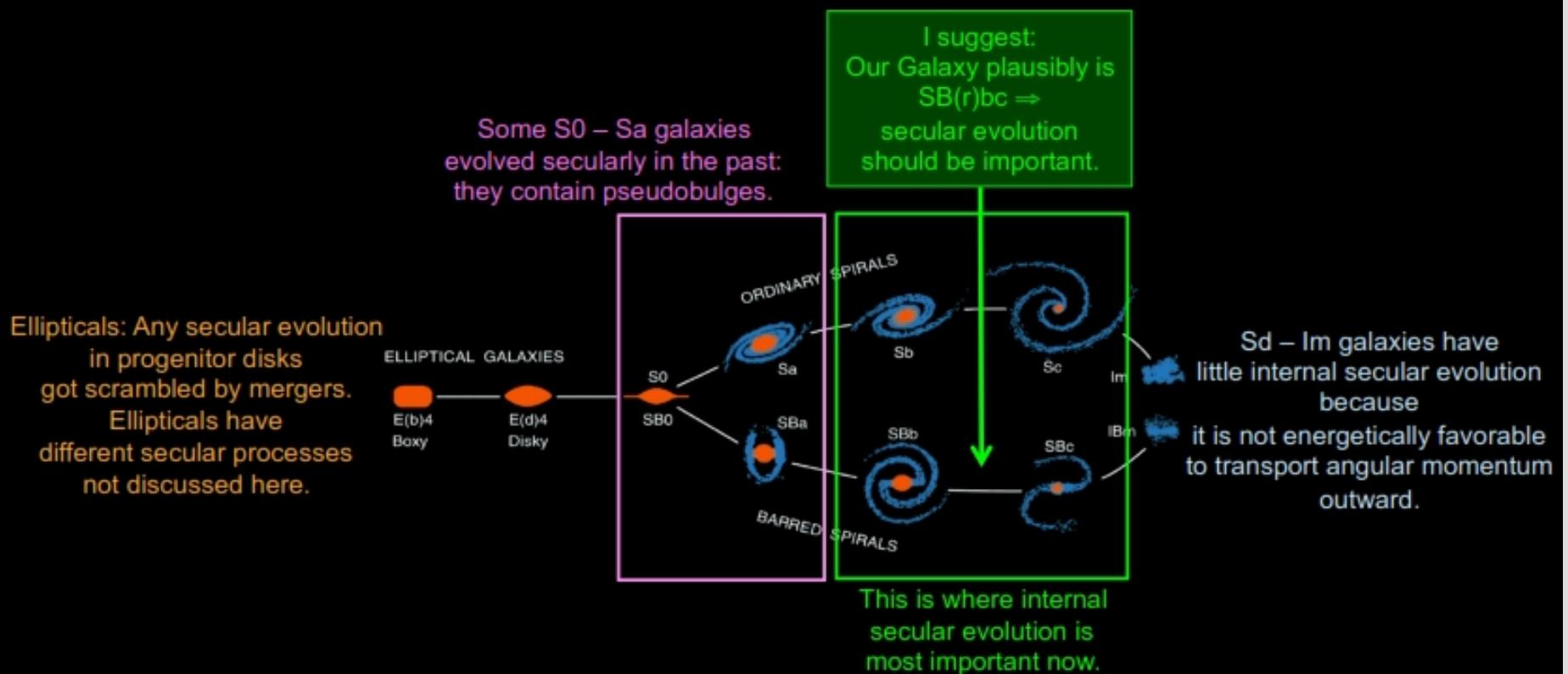
Department of Astronomy, University of Texas at Austin  
Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics  
Munich University Observatory



Milky Way history is dominated by gentle hierarchical clustering of fragments and by disk secular evolution & growth of 2 pseudobulges (boxy & disky).

Close analogs of the Milky Way are SB(r)b NGC 4565 and NGC 5746.

# At what Hubble types does secular evolution happen?



Tremaine (1989), Lynden-Bell & Kalnajs 1972; Lynden-Bell & Pringle 1974:  
 $d(\text{total energy}) / d(\text{angular momentum}) = \Omega(r) = V(r)/r$   
 $\Rightarrow$  Secular evolution by inward transport of gas  $\Rightarrow$  pseudobulge growth should be most rapid at Hubble type  $\sim$  Sbc.