

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/vie_scientifique/ateliers/MilkyWay_Workshop/2016/

65 reports, more than 120 participants



Institut d'Astrophysique de Paris





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

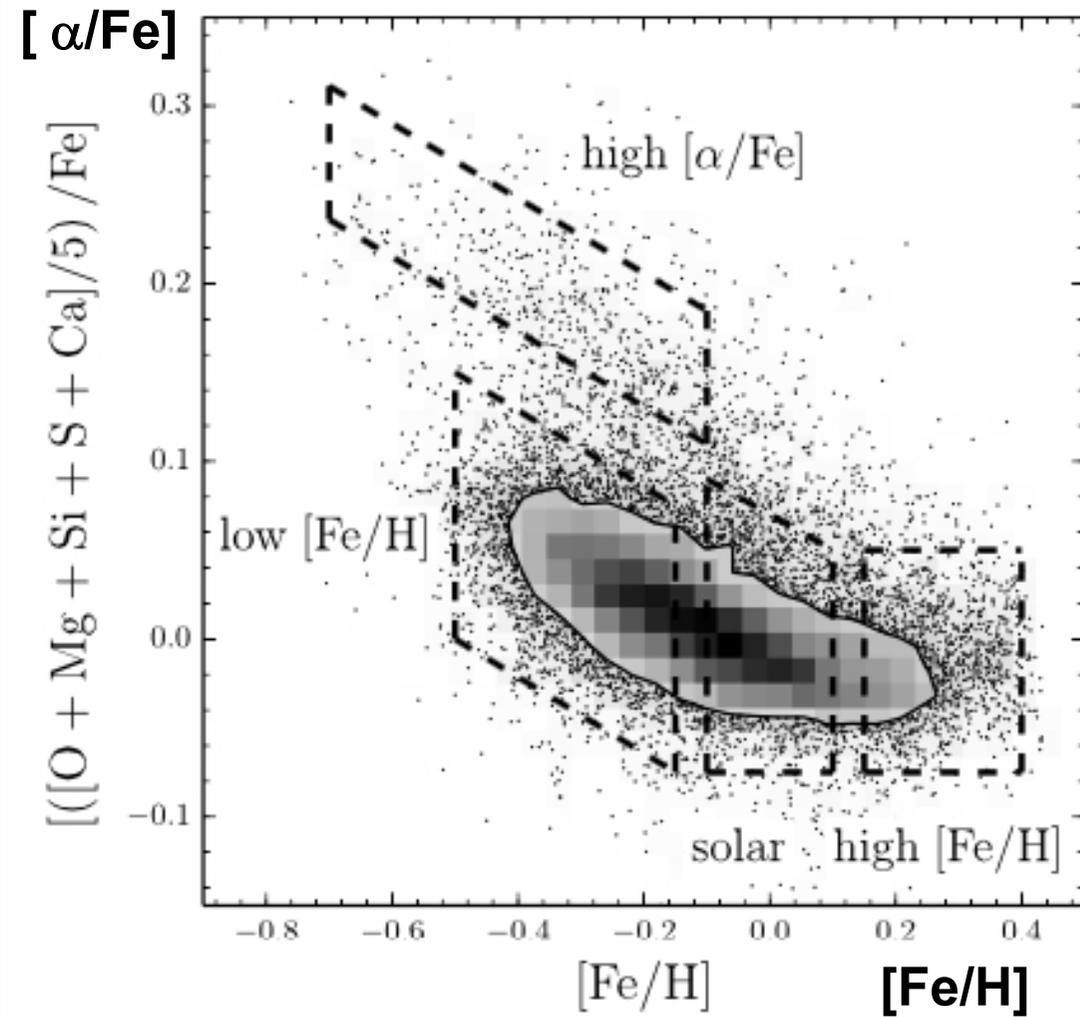
Модели формирования Галактики и наблюдательные ограничения.

Доклады:

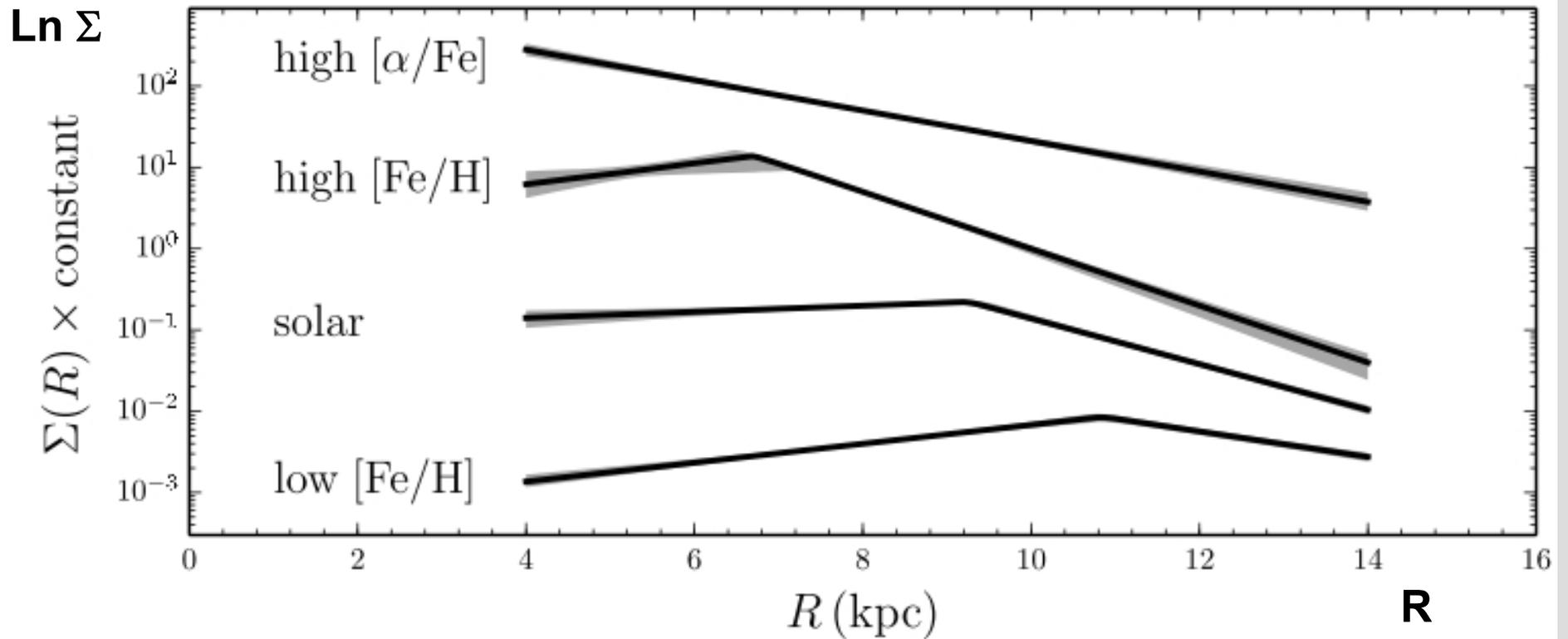
- | | |
|-------------------------|--|
| Jo Bovy | The structure of the Milky way disks |
| Ivan Minchev | The evolution of the Milky way disk(s) |
| Melissa Ness | Insights from the Galactic Bulge |
| Lia Athanassoula | A disc galaxy model applied to the chemo-dynamics of the bar-bulge region + |
| 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



Bovy et al. 2016



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

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

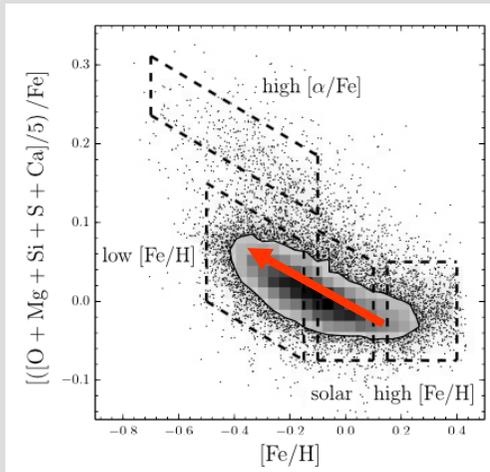
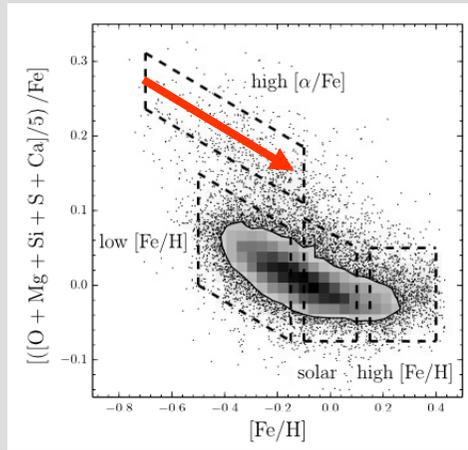
Jo Bovy et al. 2016.

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 Σ
 $\Sigma(R) \sim \exp(-r/r_d)$,
 $r_d = 2.2 \pm 0.2 \text{ kpc}$.**

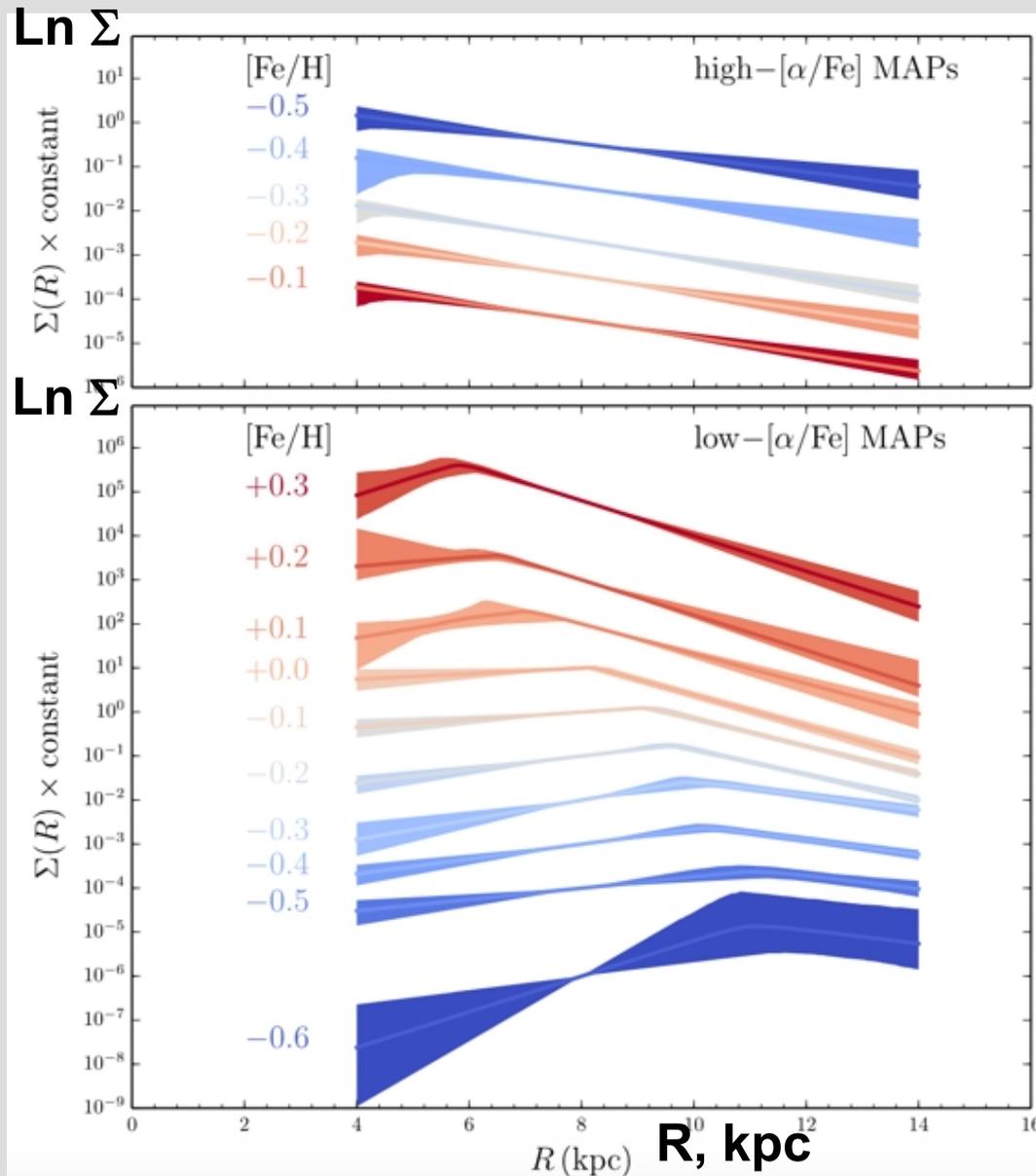
**Вертикальное распределение звезд выборки описывается законом
 $\zeta(z) \sim \exp(-z/H_z)$,
 $H_z \sim 1 \text{ kpc}$.**

Vovy et al. 2016



Нет четкой границы между тонким и толстым диском

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



OLD

YONG-ER

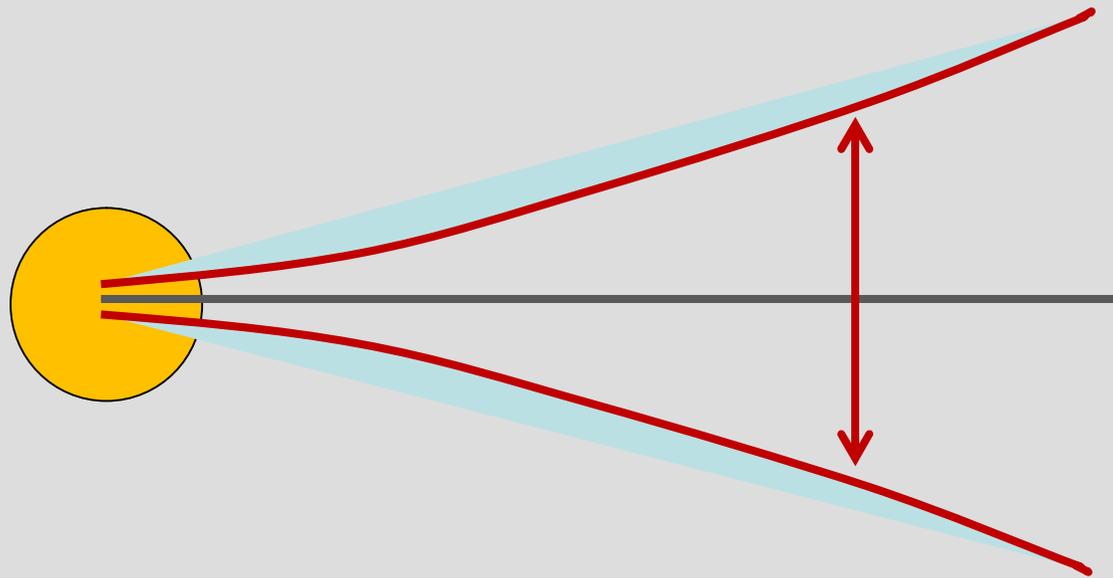
Выборки звезд с низким содержанием $[\alpha / \text{Fe}]$ имеют пик плотности на определенном радиусе R_{peak} . Чем больше $[\text{Fe}/\text{H}]$, тем меньше R_{peak} .

Donut-like rings



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

FLARING – увеличение H_z с ростом R

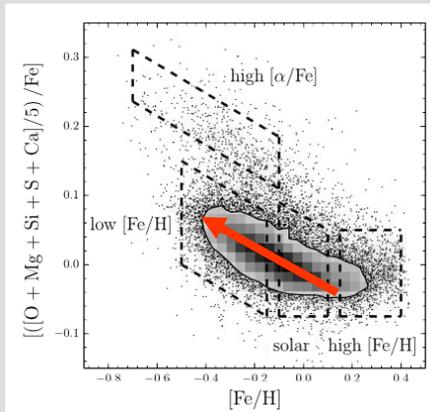
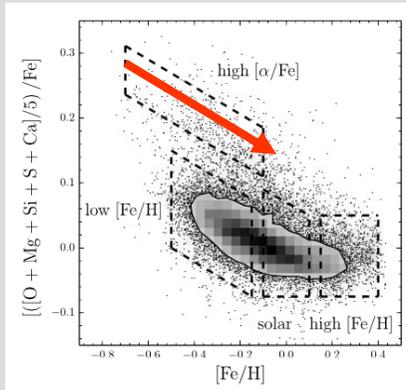


Vouy et al. : выборка звезд с высоким $[\alpha/\text{Fe}]$ не демонстрирует FLARING.

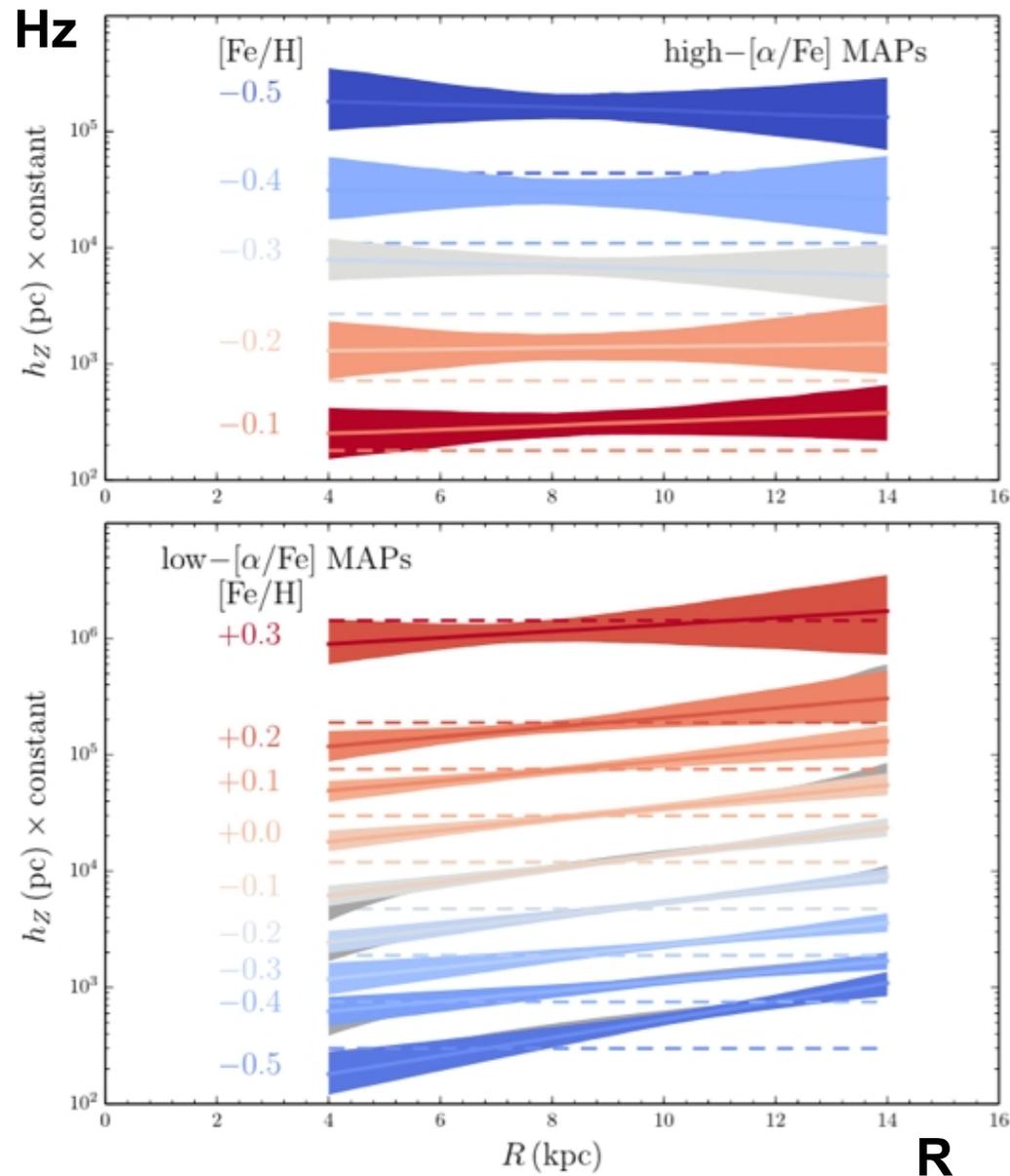
**Выборки звезд с низким $[\alpha/\text{Fe}]$ демонстрируют небольшое FLARING
 $R_{\text{flare}} = 8.5 \pm 0.7$ кpc.**

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

Vovy et al. 2016



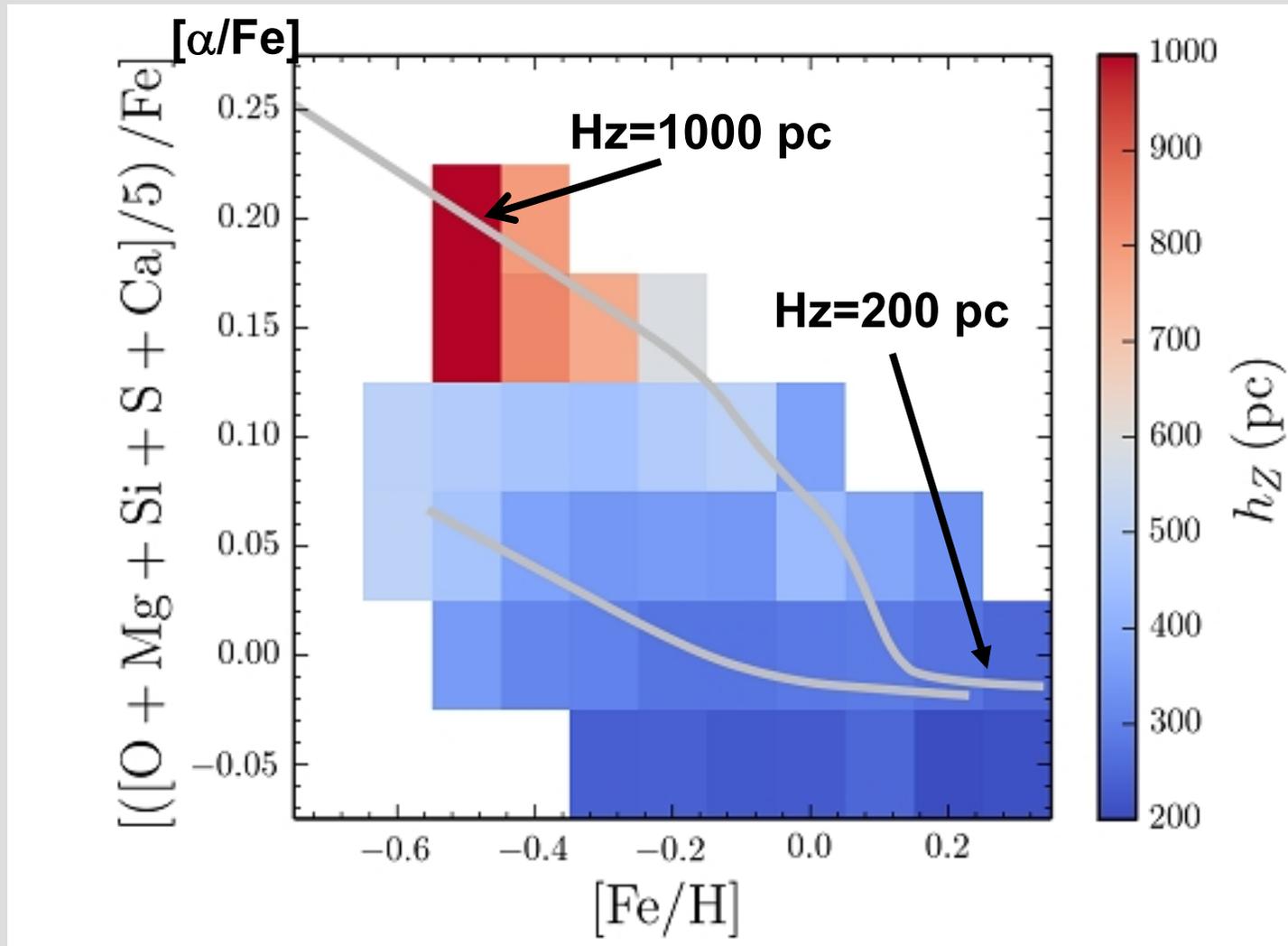
Изменение вертикального масштабного параметра h_z вдоль радиуса



OLD

**YONG-
ER**

Вертикальный масштаб диска h_z в координатах $(Fe/H), [\alpha/Fe]$



**Bovy
et al.
2016**



Ivan Minchev
Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)

The evolution of the Milky way disk(s)

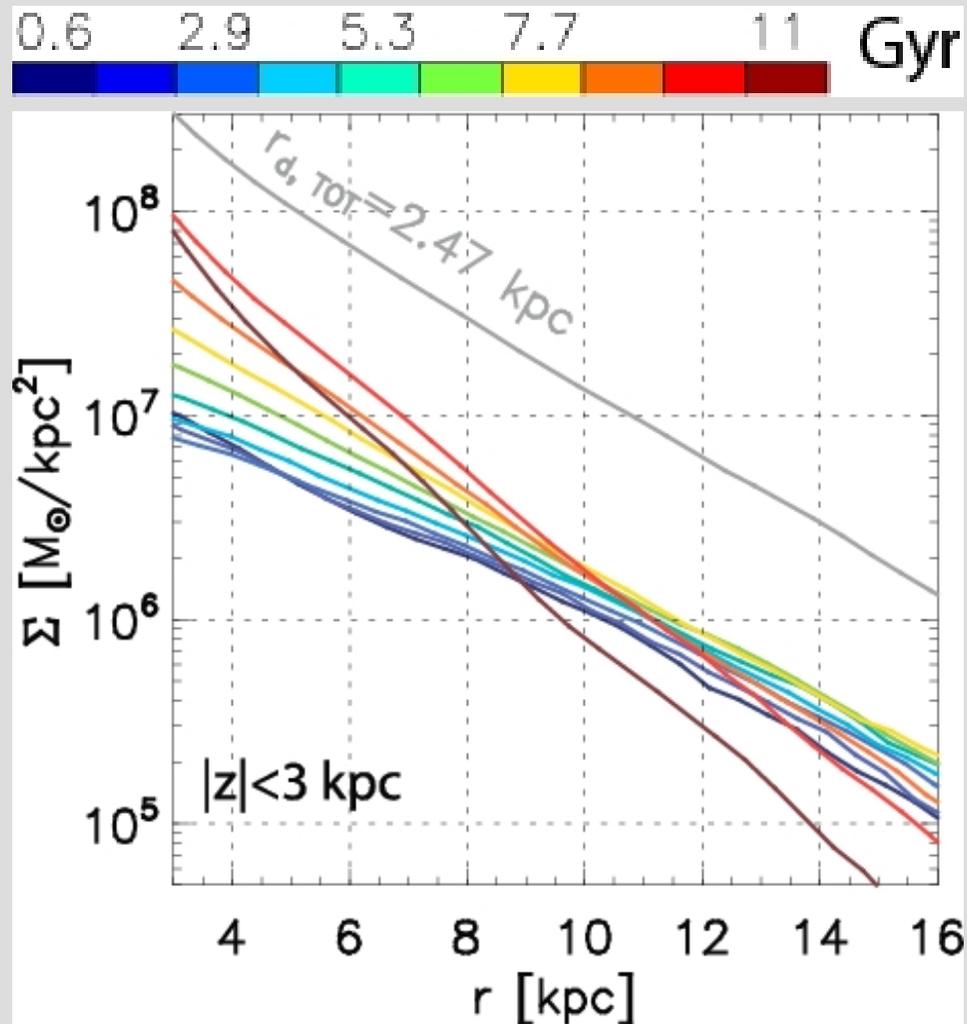
Ivan Minchev частично оспаривает результаты Jo Bovy.

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 H_z с увеличением R) (Minchev et al. 2016).

Модельная зависимость поверхностной плотности Σ от радиуса R для выборок разного возраста

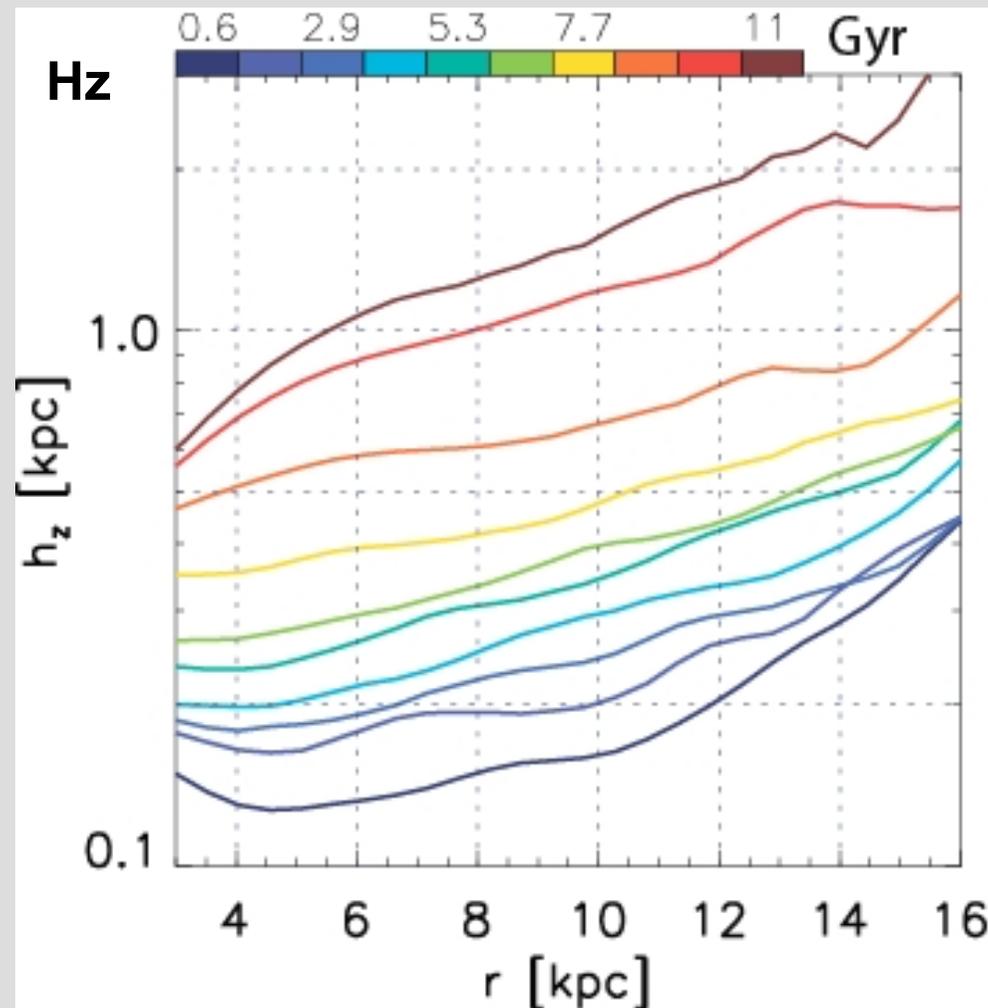


Космологическое Моделирование MCM (Minchev, Chiappini, Martig, 2013) показывает, что mono-age население должно иметь $\exp(-r/r_d)$ распределение по диску, но с разным r_d .

Чем меньше возраст, тем больше r_d .

Формирование диска “inside-out”

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



FLARING

(увеличение H_z 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 migrators), которые уТОНЧАЮТ диск. Звезды, мигрирующие наружу (outward migrators) 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?

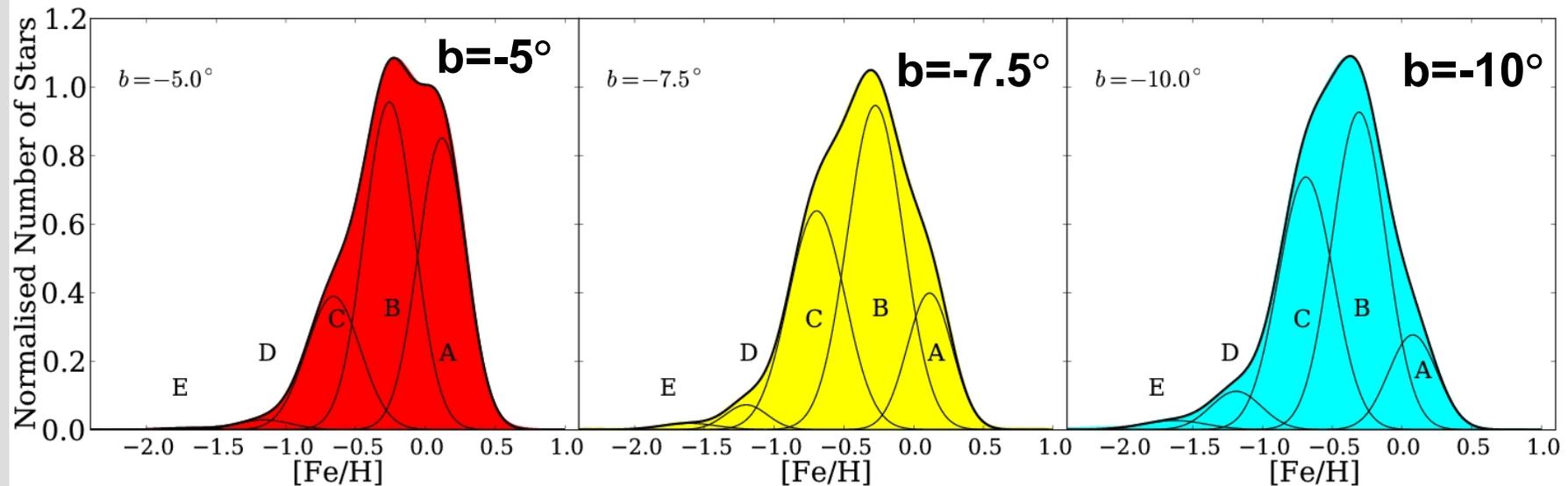


Melissa Ness
Max-Planck-Institut für Astronomie,
Heidelberg, Germany

Insights from the Galactic Bulge

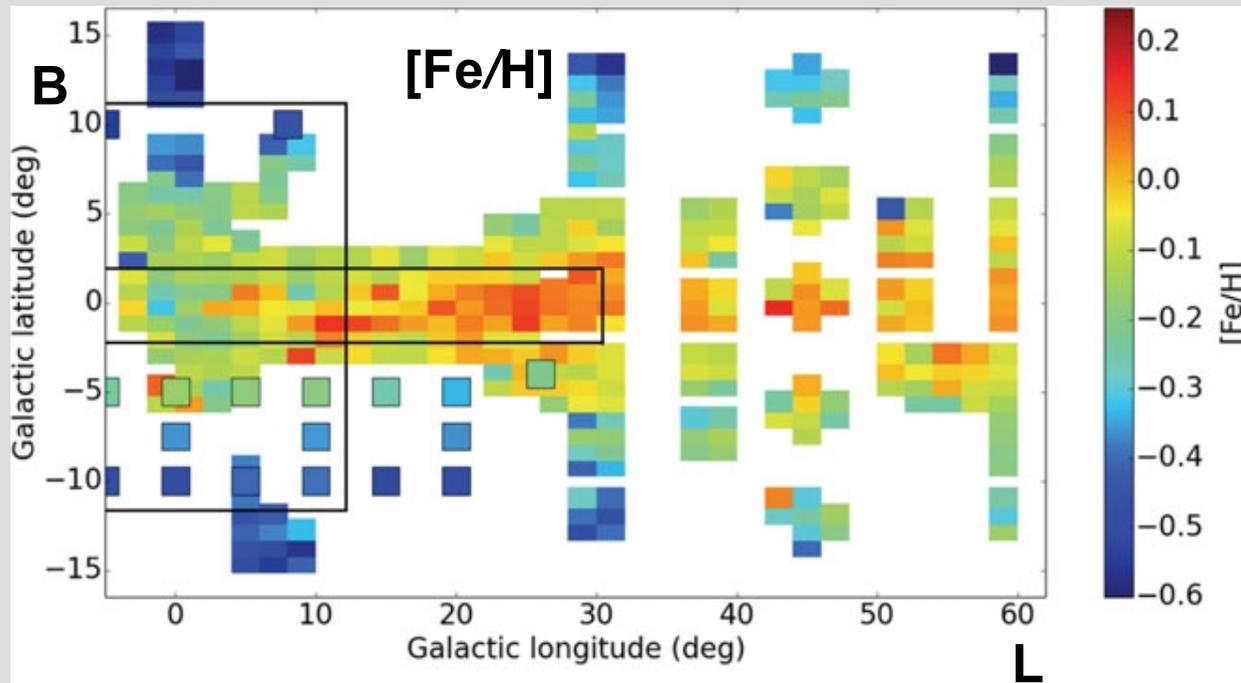
Галактический балдж состоит из звезд, имеющих широкий разброс металличности, $-3.0 < [Fe/H] < 1$ dex. Средняя металличность уменьшается с увеличением Z . Вертикальный градиент металличности составляет -0.45 dex kpc^{-1} (Ness & Freeman 2016).

Химического состава балджа



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

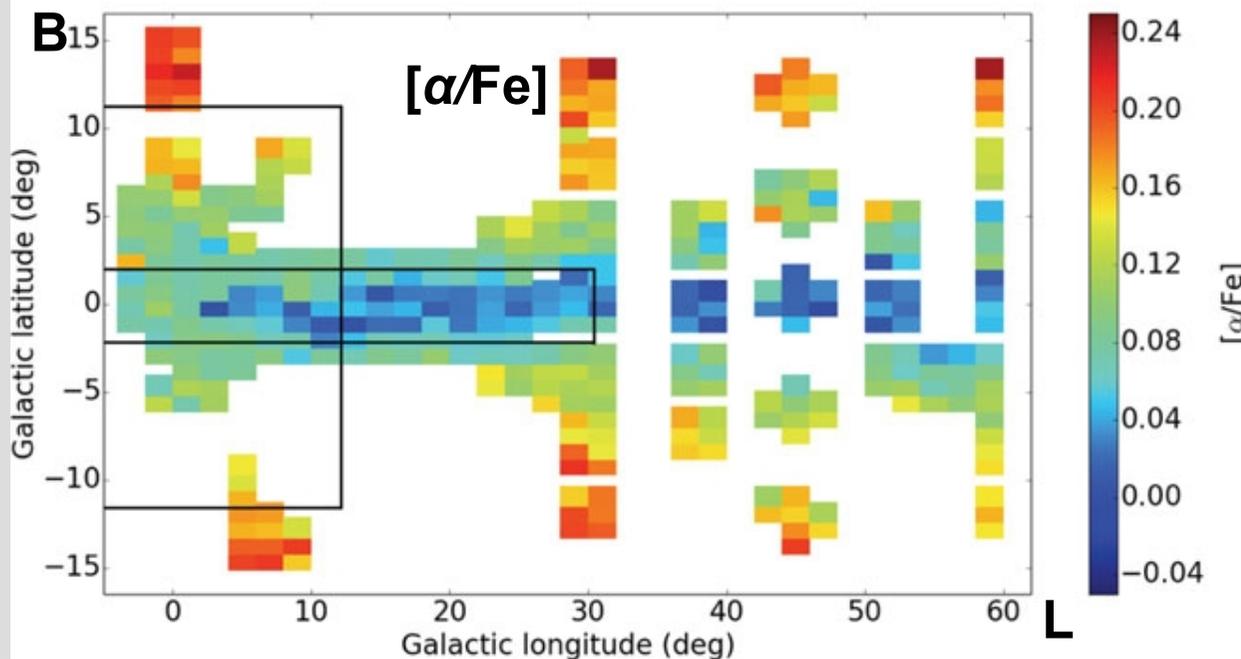
C \rightarrow -0.70 dex
B \rightarrow -0.25 dex
A \rightarrow +0.15 dex



**Ness & Freeman
2016:**

**$[\text{Fe}/\text{H}]$ and $[\alpha/\text{Fe}]$
maps**

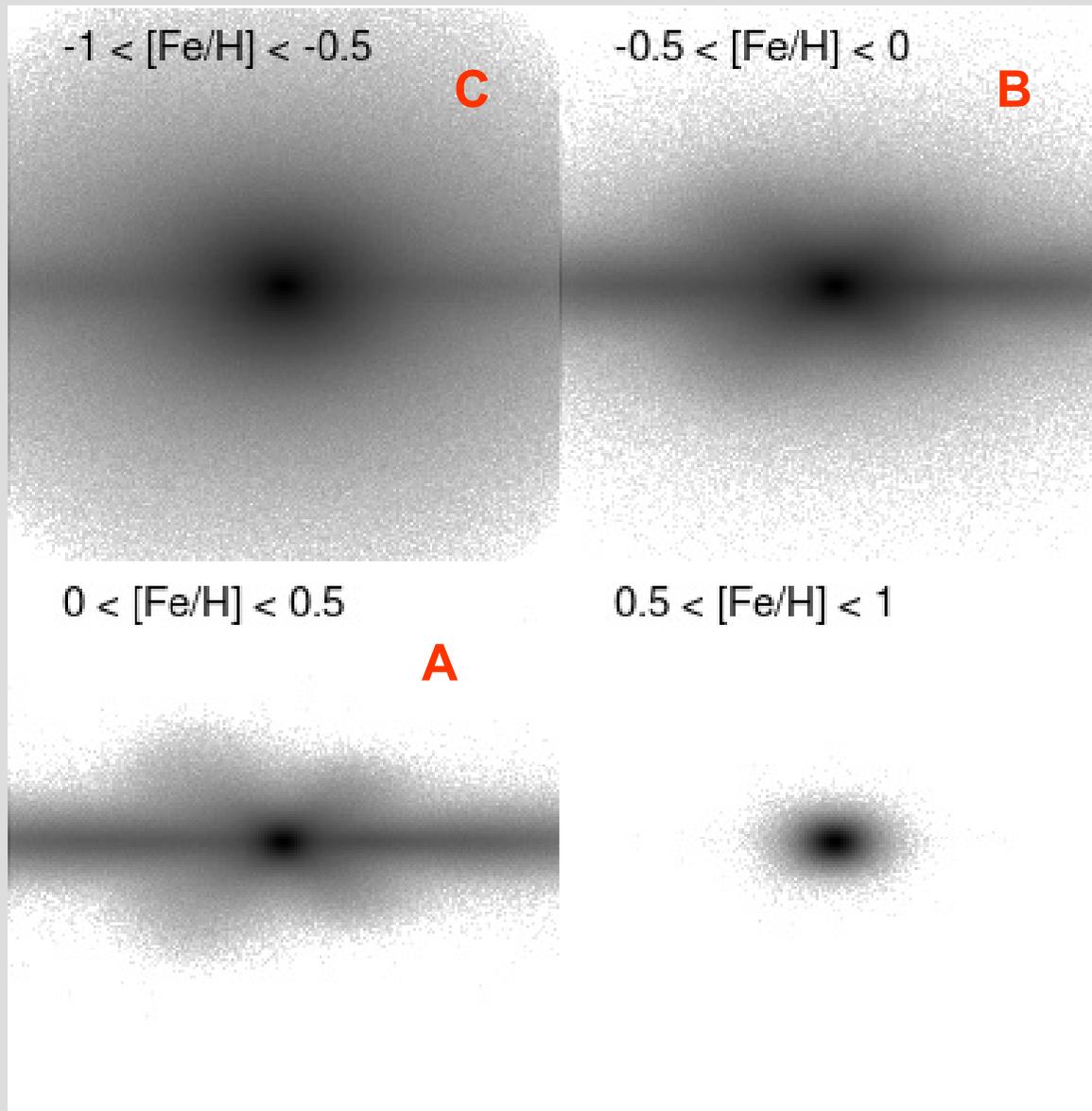
**for the 13 000 bulge
and disk stars
from APOGEE and
8 000 ARGOS
bulge stars**



**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).**

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



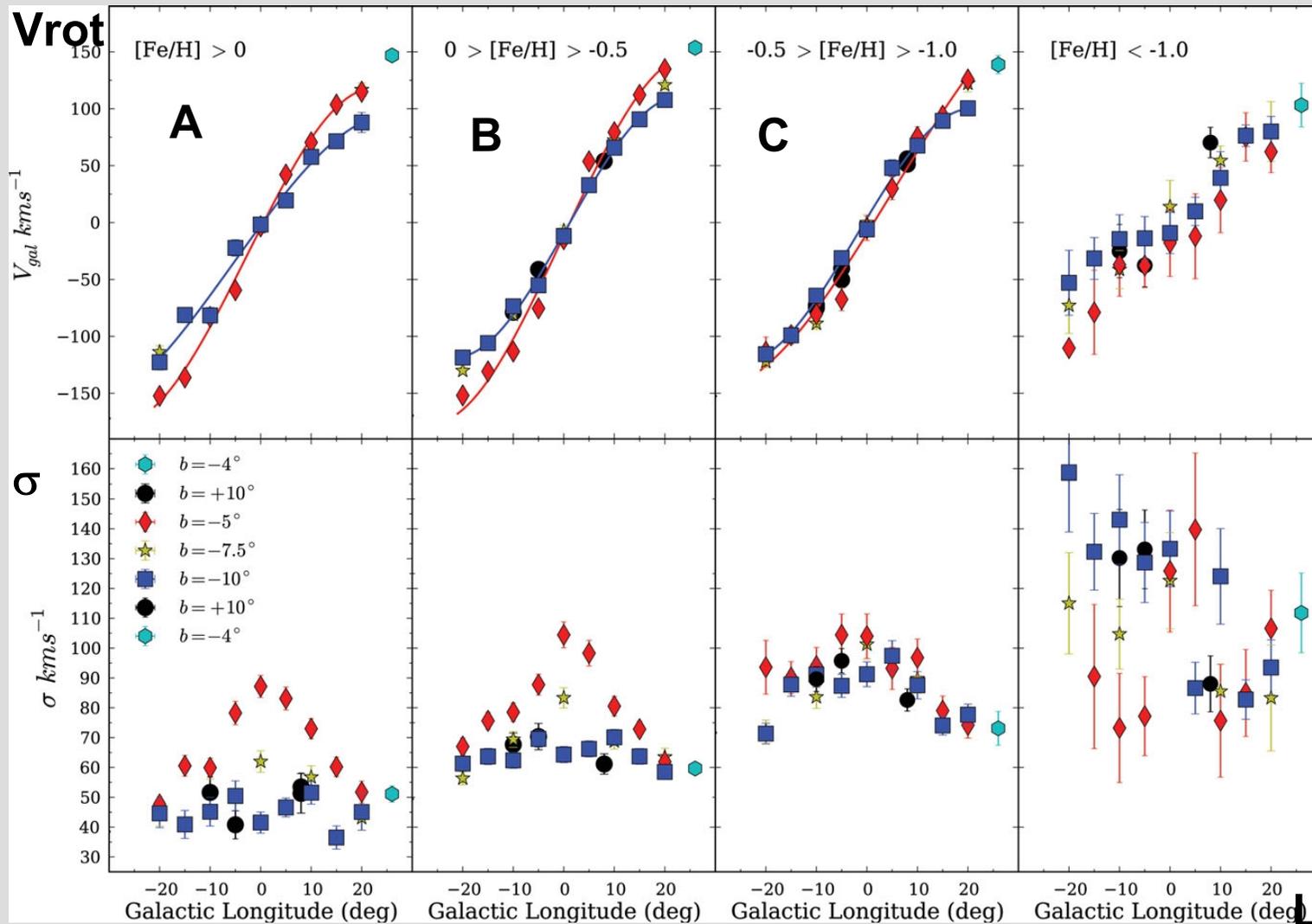
Ness & Lang 2016

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

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

C – толстый диск

Вращение различных подсистем балджа

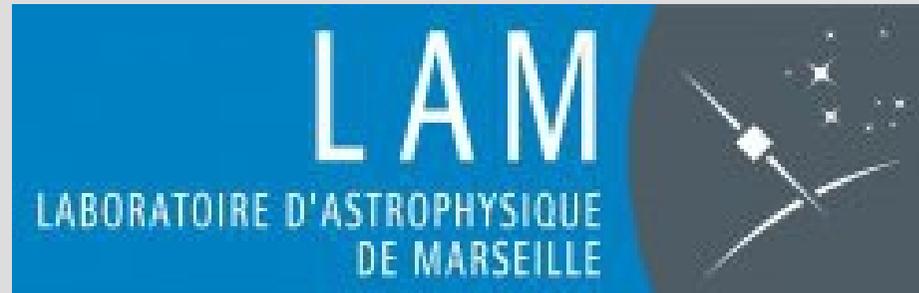


Воху-реанут балдж (A, B) и толстый диск (C) вращаются примерно одинаково (Ness et al. 2013)



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).

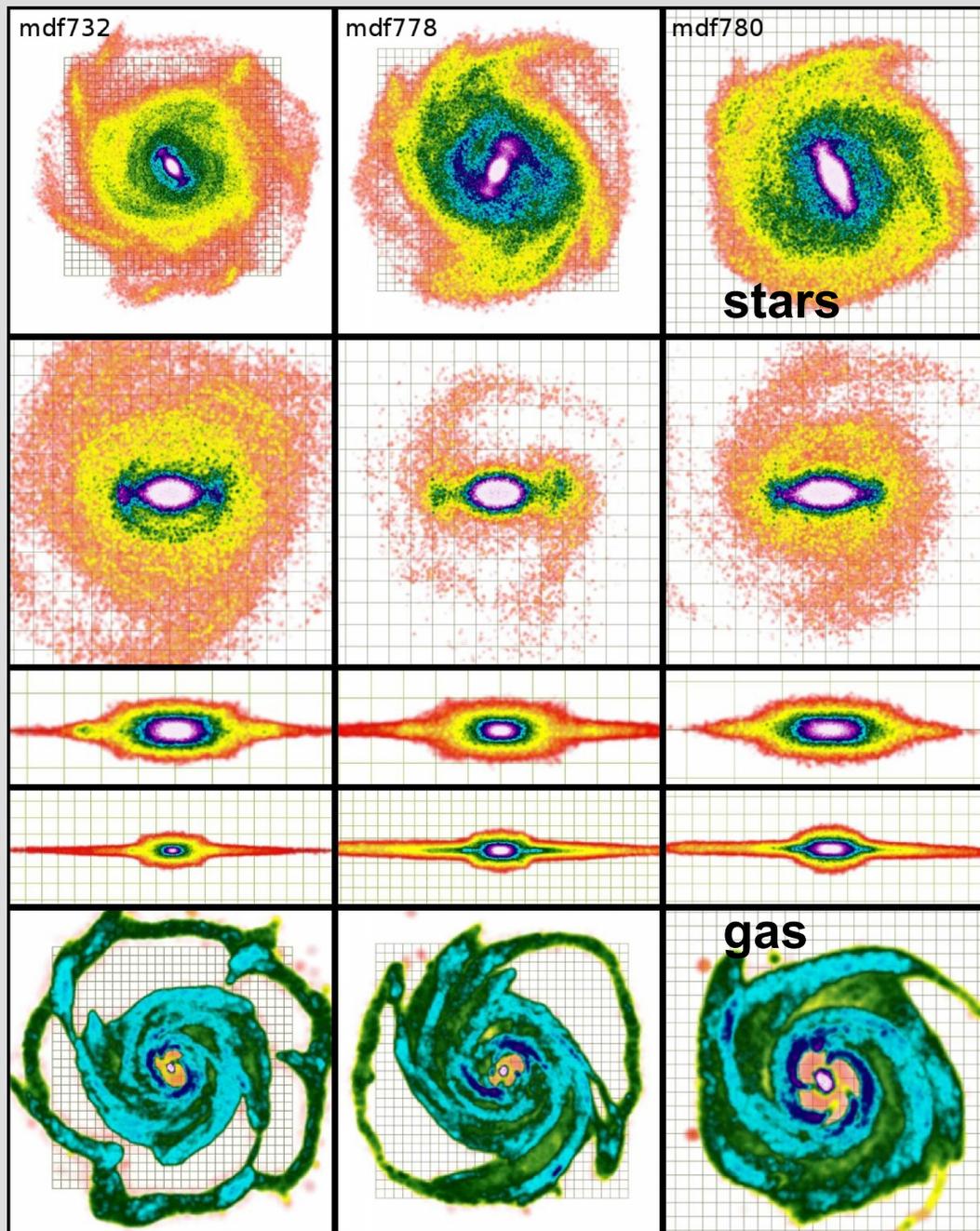
Родительские диски разрушаются во время слияния и их звезды (звезды, рожденные до мерджинга) формируют классический балдж.

Звезды, рожденные во время мерджинга, формируют толстый диск и boxy 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:

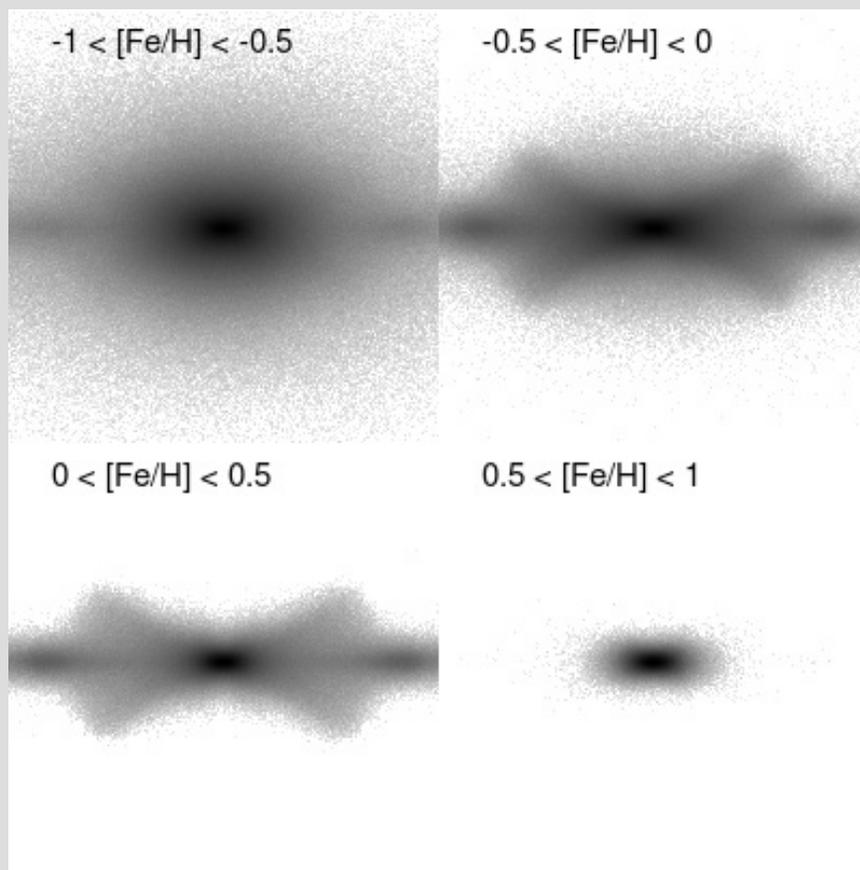
1) Присутствие горячего газа в гало сталкивающихся родительских прото-галактик. Из этого газа потом медленно формируется диск.

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

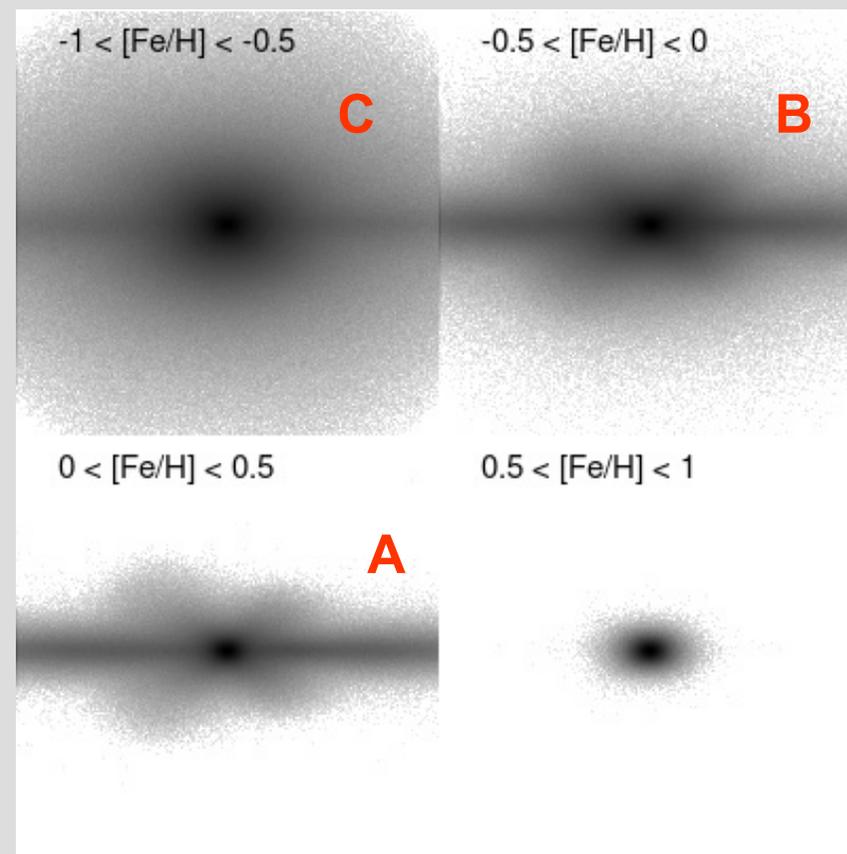
Большая точечная масса в центре была бы препятствием для формирования бара.

Эмпирическая модель: часть газа падает на центральную черную дыру 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

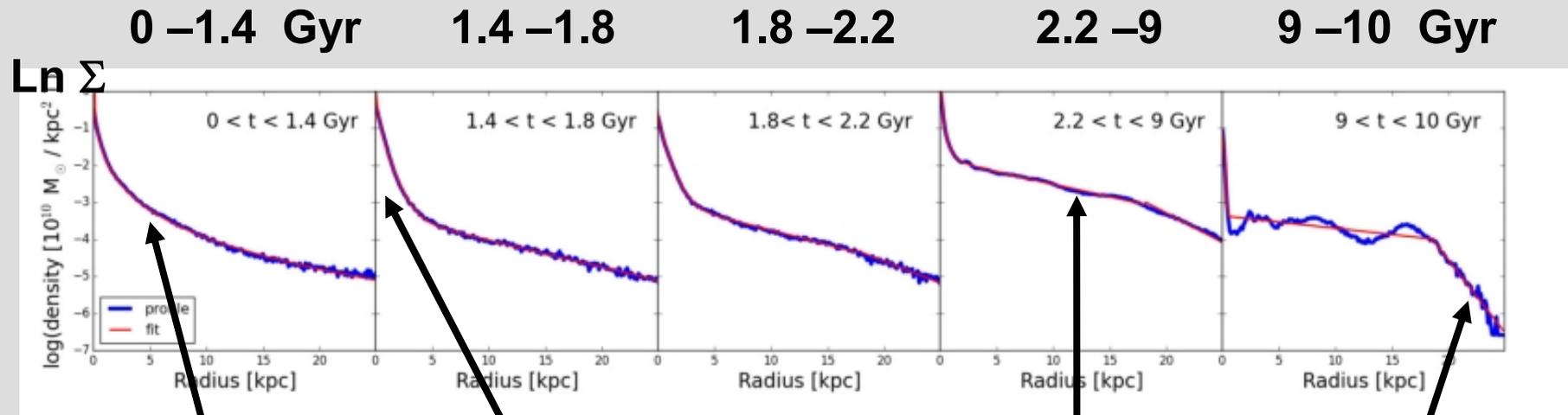


Моделирование
Athanassoula et al. 2016



Анализ наблюдений
Ness & Lang 2016

Профили плотности звезд, рожденных в пять разных эпох (Athanasoula 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 Σ более круто падает на периферии галактики)



Françoise Combes
Observatoire de Paris

Round Table Discussion
Thin vs Thick disks

Толстый диск

Тонкий диск

Rd=2.2 -2.8 кpc
Hz=700 - 1400 μ c

Rd=2.5 - 3.0 кpc
Hz=220 - 450 μ c

Вращаются примерно одинаково.

Может это один и тот же диск ?

Или они все-таки существенно различаются?



Misha Haywood



Jo Bovy



Ivan Minchev



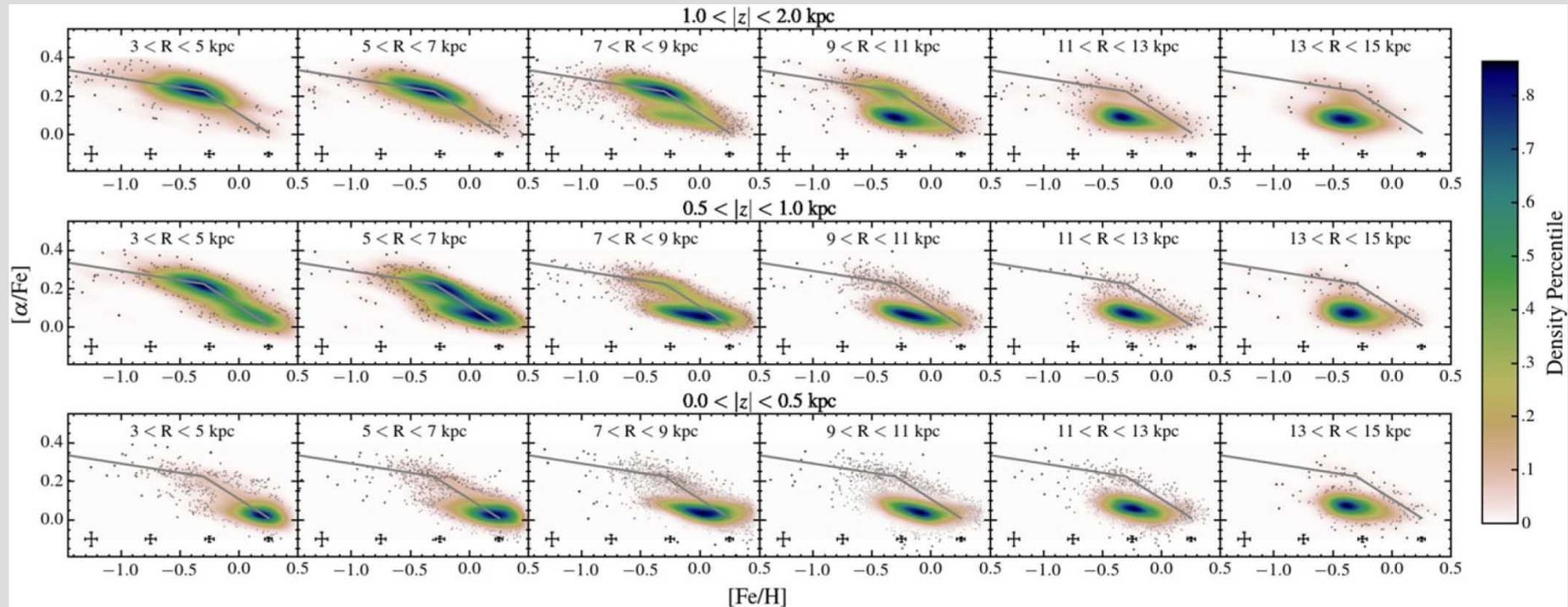
**Bruce Elmegreen
IBM T.J. Watson Research Center
NY 10598 USA**

**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 балджа и экспоненциального диска (Bournaud, Elmegreen, Elmegreen 2007, 2009). Толстый диск имеет постоянную Nz , не меняющуюся с радиусом, потому что Nz 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

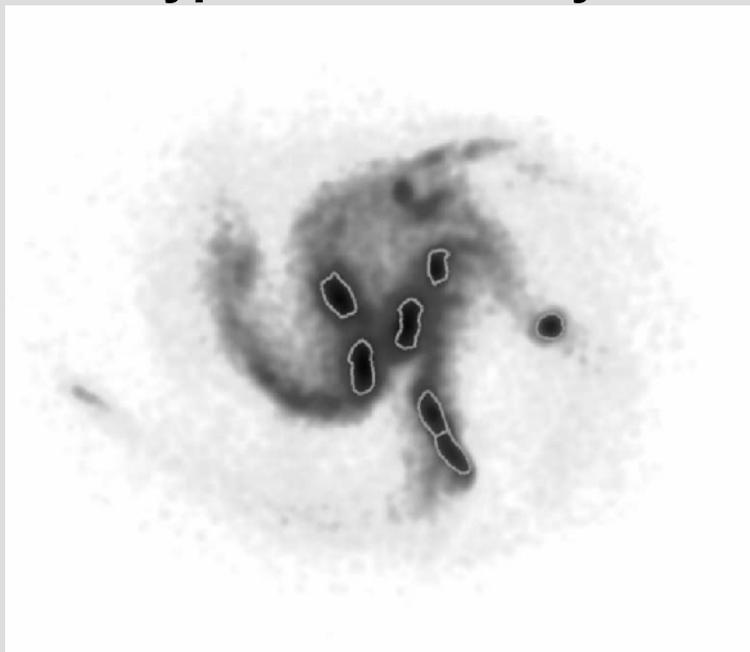
$[\alpha/\text{Fe}]$



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

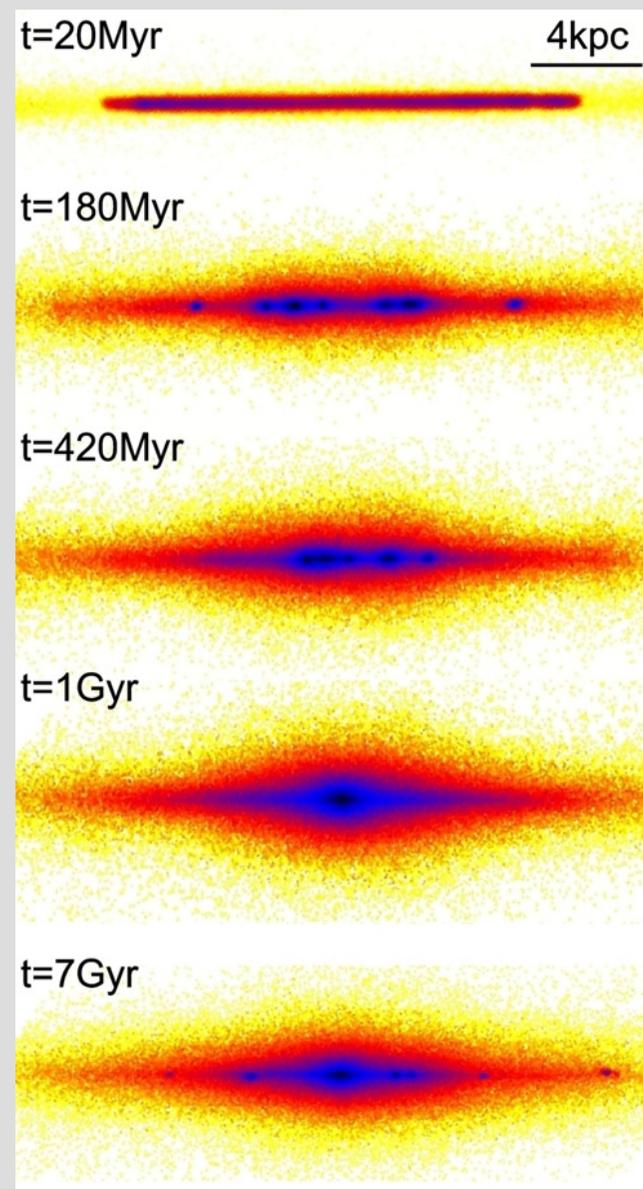
**Hayden +15: 70,000 red giants from APOGEE survey:
thick and thin sequences**

Clump-cluster evolution Контурные 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 аккреции, звездообразования, взаимодействий, minor mergers были высокими, что делало диск крайне турбулентным.

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

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

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

Bruce Elmegreen:

Перпендикулярно плоскости галактики, гравитация уравнивается давлением, которое зависит, главным образом, от поверхностной плотности Σ :

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

Или, эквивалентно,

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

Bruce Elmegreen:

Шаг второй.

Постепенно, скорость аккреции и бомбардировки облаками замедляется, SFR and σ/V_{rot} падают.

N_z уменьшается с уменьшением σ и увеличением Σ .

- **В то же время, угловой момент аккрецирующего вещества возрастает и поэтому rd увеличивается.**
- **Эти процессы идут параллельно:
аккреция 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 $[\alpha/Fe]$, 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 аккреции продолжает падать, SFR тоже падает.

Под влиянием гравитационной неустойчивости, 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



NGC 4565 SDSS gri



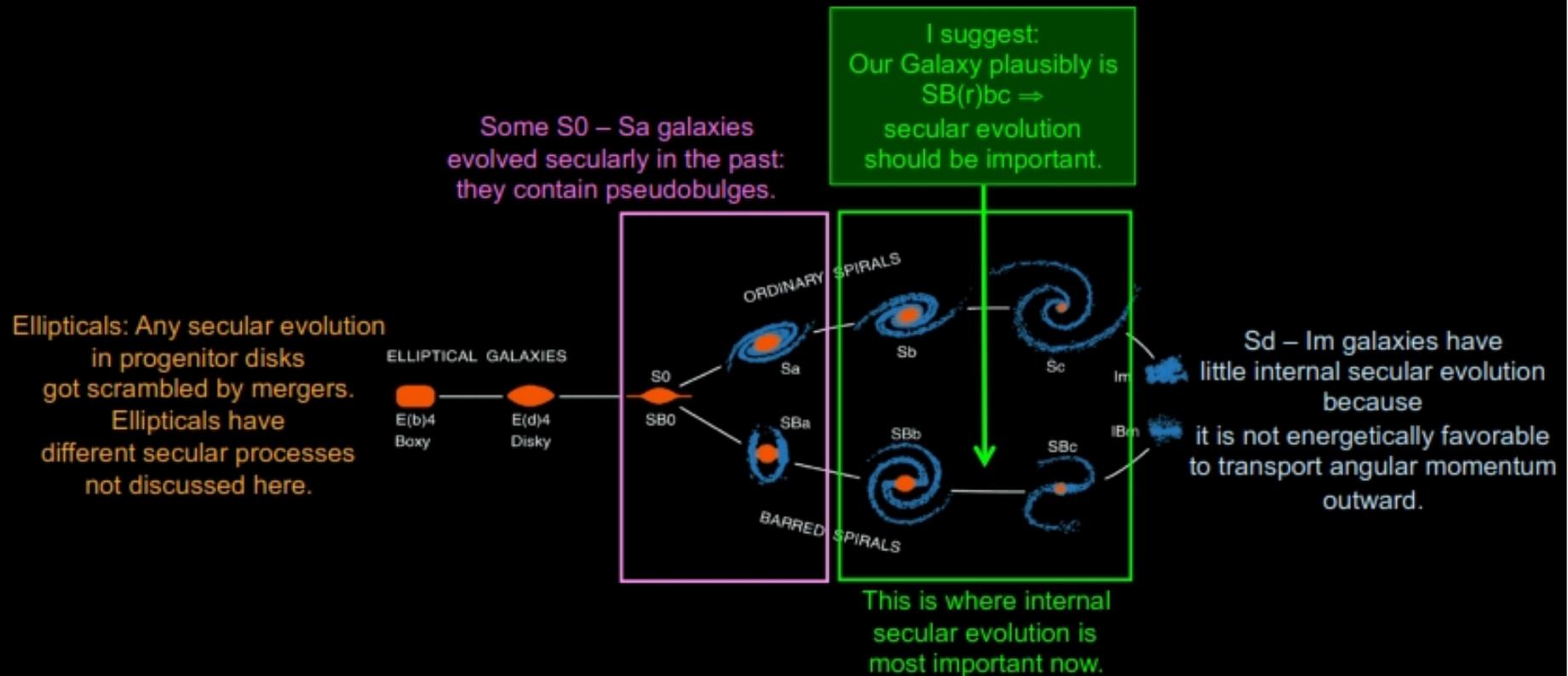
NGC 5746 SDSS gri



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

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:

$$\frac{d(\text{total energy})}{d(\text{angular momentum})} = \Omega(r) = V(r)/r$$
 \Rightarrow Secular evolution by inward transport of gas \Rightarrow pseudobulge growth should be most rapid at Hubble type \sim Sbc.