

# Quantifying the stellar ages of dynamically-separated bulges and disks of CALIFA spiral galaxies

Yunpeng Jin<sup>1\*</sup>, Ling Zhu<sup>1\*\*</sup>, Stefano Zibetti<sup>2</sup>, Luca Costantin<sup>3,4</sup>, Glenn van de Ven<sup>5</sup>, and Shude Mao<sup>6,7</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China

<sup>2</sup> INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo Enrico Fermi 5, I-50125 Firenze, Italy

<sup>3</sup> Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), Ctra de Ajalvir km 4, Torrejón de Ardoz, 28850, Madrid, Spain

<sup>4</sup> INAF-Osservatorio Astronomico di Brera, Via Brera 28, 20121, Milano, Italy

<sup>5</sup> Department of Astrophysics, University of Vienna, Türkenschanzstraße 17, 1180 Wien, Austria

<sup>6</sup> Department of Astronomy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>7</sup> National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 20A Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100101, China

Received; accepted

## ABSTRACT

We employ a recently-developed population-orbit superposition technique to simultaneously fit the stellar kinematic and age maps of 82 CALIFA spiral galaxies, and obtain the ages of stars in different dynamical structures. We first evaluate the capabilities of this method on CALIFA-like mock data created from the Auriga simulations. The recovered mean ages of dynamically cold, warm and hot components match the true values well, with up to 20% observational error in the mock age maps. For CALIFA spiral galaxies, we find that the stellar ages of the cold, warm and hot components all increase with galaxies' stellar mass, from  $\overline{t_{\text{cold}}} \sim 2.2$  Gyr,  $\overline{t_{\text{warm}}} \sim 2.3$  Gyr and  $\overline{t_{\text{hot}}} \sim 2.6$  Gyr for galaxies with stellar mass  $M_* < 10^{10} M_\odot$ , to  $\overline{t_{\text{cold}}} \sim 4.0$  Gyr,  $\overline{t_{\text{warm}}} \sim 5.1$  Gyr and  $\overline{t_{\text{hot}}} \sim 5.9$  Gyr for galaxies with  $M_* > 10^{11} M_\odot$ . About 80% of the galaxies in our sample have  $t_{\text{hot}} > t_{\text{cold}}$ , and the mean values of  $t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}$  also increase with stellar mass, from  $0.7^{+0.6}_{-0.2}$  Gyr in low-mass galaxies ( $10^{8.9} M_\odot < M_* \leq 10^{10.5} M_\odot$ ) to  $1.7^{+0.7}_{-0.2}$  Gyr in high-mass galaxies ( $10^{10.5} M_\odot < M_* < 10^{11.3} M_\odot$ ). The average younger stellar age in disks than in bulges suggests that either disks formed later and/or experienced a more prolonged and extensive period of star formation. The lower mass spiral galaxies have younger bulges and younger disks, while higher mass spiral galaxies generally have older bulges and their disks span a wide range of ages. This is consistent with the scenario that the bulges in more massive spirals formed earlier than those in less massive spirals.

**Key words.** galaxies: spiral – galaxies: structure – galaxies: kinematics and dynamics – galaxies: evolution – galaxies: fundamental parameters

# Основные результаты:

- Данные CALIFA 82 спиральные галактики
- Используют динамическое моделирование параллельно с оценкой возрастов звёзд
- Получены средние оценки возрастов динамически горячих, тёплых и холодных компонент для двух категорий масс - массивных ( $> 10^{11} M_{\text{Sun}}$ ) и маломассивных ( $< 10^{10} M_{\text{Sun}}$ )
- $\langle t_{\text{hot}} \rangle - \langle t_{\text{cold}} \rangle = \langle \Delta t_{\text{hc}} \rangle > 0$  для 80% галактик, более того для более массивных галактик эта разность больше, чем для менее массивных  $\Delta t_{\text{hc}}^g > \Delta t_{\text{hc}}^d$
- Следовательно, авторы делают вывод, что раз  $\Delta t_{\text{hc}}^g (= 1.7 \text{ Gyr}) > \Delta t_{\text{hc}}^d (= 0.7 \text{ Gyr})$ , то сценарий\* работает

\*Сценарий = Балджи массивных галактик формируются раньше, то есть быстрее, чем балджи маломассивных галактик

# Введение (на что ссылаются авторы)

- Фотометрическая декомпозиция балдж-диск - плохо, а динамическая - хорошо
- Балджи в спиральных галактиках формируются раньше дисков, дольше эволюционируют, чем диски, которые формируются позднее и почти не влияют на эволюцию балджей
- Балджи спиральных галактик не только старше, но и металличеснее, и разница между возрастами увеличивается с массой, то есть было 2 эпохи формирования балджей
- Динамически-горячие орбиты в глубине, центре балджа, холодные - на периферии, т. е. холодные орбиты хорошо коррелируют с фотометрически-разложенной частью диска
- Доля горячих орбит уменьшается с ростом звёздной массы галактики вплоть до  $10^{10} M_{\text{Sun}}$ , и увеличивается для более массивных галактик. Ровно наоборот для холодных орбит

# А что вообще делали то?

- Идея проверки population-orbit superposition method на CALIFA-модельных данных
- Потом применение метода к 82 галактикам из реального CALIFA
- Используя Шварцшильдское динамическое моделирование и распределениями звёздных орбит, полученными этими авторами ранее, они получают возраст различных динамических компонентов

То есть по сути 3 блока работы. Применяется 2 этапа для создания модели суперпозиции населений-кинематик:

1. Создание стандартной Шварцшильдской модели орбитальной суперпозиции, путём фита распределения светимости и кинематики звёзд галактики
2. Поиск best-фита, путём подбора оптимальных свободных параметров модели

# Метод суперпозиции населений-орбит. Создание модели орбитальной суперпозиции

Подход, аналогичный ван ден Бошу (2008) - трёхосная шварцшильдовская модель: распределение масс звёзд, масса чёрной дыры, внутренние структуры.

Три шага для создания модели:

1. Построение гравитационного потенциала
2. Сэмплинг и интегрирование орбит
3. Нахождение орбитальных весов из фита данных наблюдений (2d поверхностная яркость, 3d плотность светимости, 2d кинематика)

1. MGE 2d разложение

2. 3d плотность светимости проецируется из 2d MGE с учётом углов наблюдения ( $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ )

# Метод суперпозиции населений-орбит. Создание модели орбитальной суперпозиции

3. умножая на  $M/L$  плотность светимости и решая уравнение Пуассона получаем гравитационный потенциал
4. учитывается потенциал (NFW) тёмного гало: тут вылезают первые 2 свободных параметра -  $M_{200}$  (масса в пределах вириального радиуса) и  $s$  - плотность скрытой массы
5. углы наблюдения ( $\theta, \phi, \psi$ ) переводятся в параметры трёхосности галактики: вводятся отношения осей  $p = b/a, q = c/a$  и фактор сжатия  $u$
6. Для предотвращения вырождения устанавливается  $u = 0.9999$ , а также используются известные из других работ соотношения  $M_{200} - s$
7. В итоге имеем 4 свободных параметра -  $(M/L)_*, p, q, M_{200}$

# Метод суперпозиции населений-орбит. Создание модели орбитальной суперпозиции

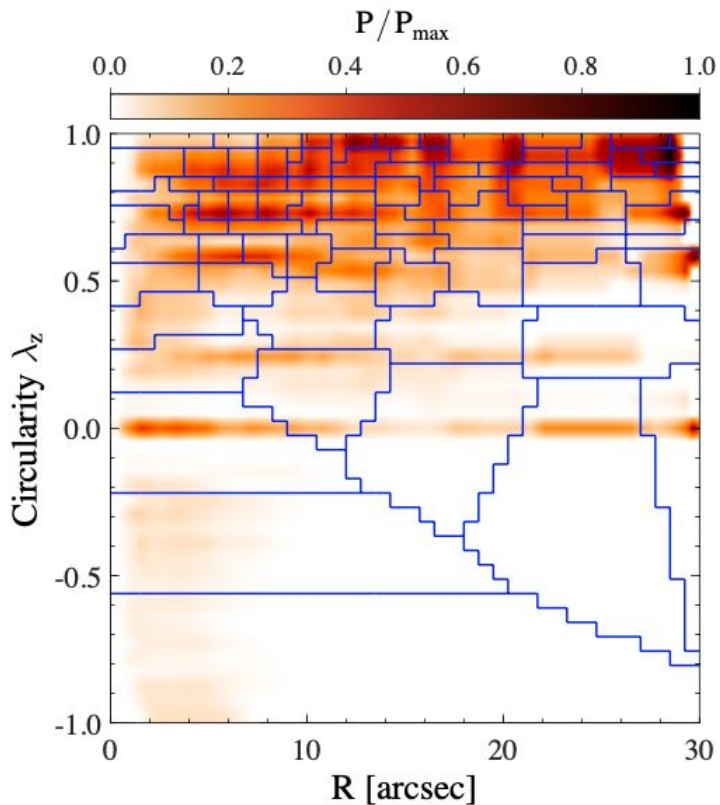
8. Орбиты - из трёх интегралов движения ( $E, I_2, I_3$ ). В CALIFA  $21 \times 10 \times 7$  для НУ.

9. Имеется  $3 \times 21 \times 10 \times 7 = 4410$  узлов орбит. Веса подбираются NNLS, причём кинематика звёзд и плотность светимости берутся за ограничения NNLS.

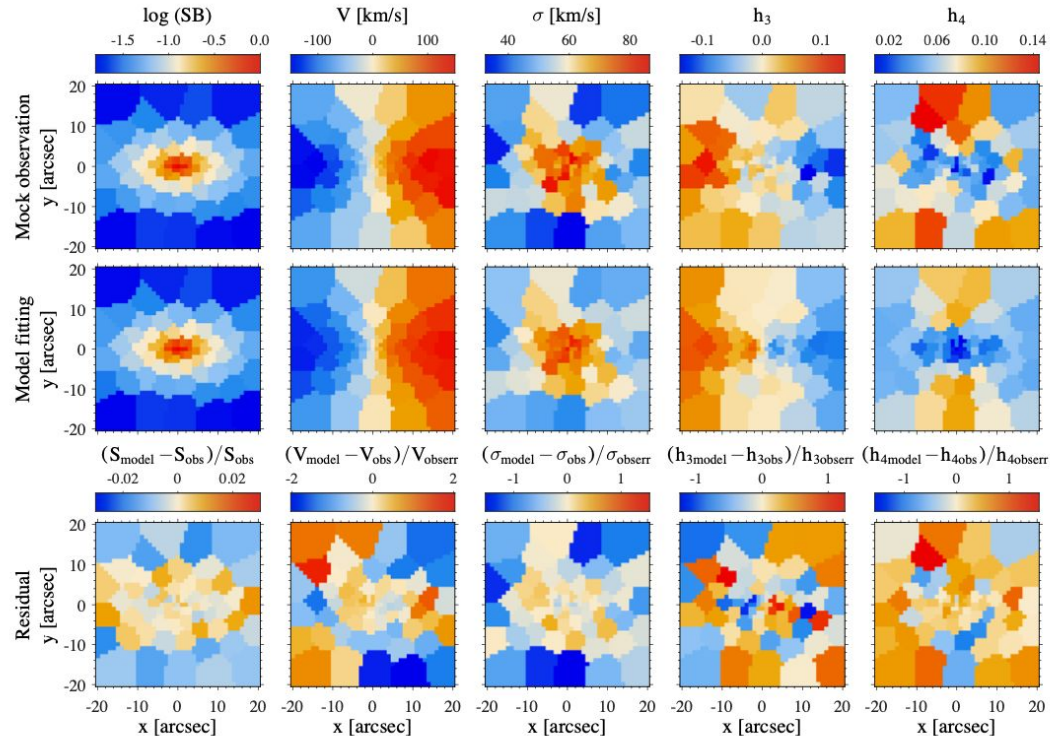
10. На последнем шаге орбитального моделирования - итеративный процесс подбора свободных параметров.

11. Далее происходит возрастная маркировка каждой орбиты. Звёзды на одинаковой орбите обладают одинаковым возрастом.

Каждая орбита характеризуется средним радиусом и т. н. параметром "кругообразности"  $\lambda_z$ , являющимся угловым моментом относительно малой оси нормированным на момент круговой орбиты с той же полной энергией.



**Fig. 1.** The probability density distributions of stellar orbits  $P(\lambda_z, r)$  in the phase space of time-averaged radius  $r$  versus circularity  $\lambda_z$  for the best-fitting model of a typical simulated spiral galaxy. The normalized probability  $P/P_{\max}$  is indicated by the colour bar. We adopt the Voronoi-binning scheme in the  $\lambda_z$ - $r$  plane to make roughly equal-weight orbit bundles, with their boundaries being represented by the blue lines.



**Fig. 2.** The mock surface brightness, stellar kinematic data and the best-fitting model for Au-6 with inclination angle  $\theta = 60^\circ$ . From left to right: the logarithmic normalised surface brightness, mean velocity  $V$ , velocity dispersion  $\sigma$ , skewness  $h_3$ , and kurtosis  $h_4$ . From top to bottom: the mock observations, the model fittings, and the residuals. The residuals represent the relative deviations of surface brightness and the standardised residuals of kinematics.



# Валидация метода с помощью Auriga

Проект Auriga (Au) - набор космологических магнитогидродинамических моделей, состоящих из 30 изолированных гало массой Млечного Пути.

Моделирование включает в себя комплексные физические процессы формирования галактик, такие как:

- охлаждение газа через линии металлов (диэлектронная рекомбинация + реакции перезарядки ионов);
- гибридное многофазное звёздообразование
- звёздный и AGN feedback
- UV реликтовый фон
- магнитные поля

Начальные массы барионных частиц и частиц тёмной материи  $5 \times 10^4 M_{\text{Sun}}$  и  $3 \times 10^5 M_{\text{Sun}}$  соответственно (Grand et al. 2017).

# Результаты валидации симуляций

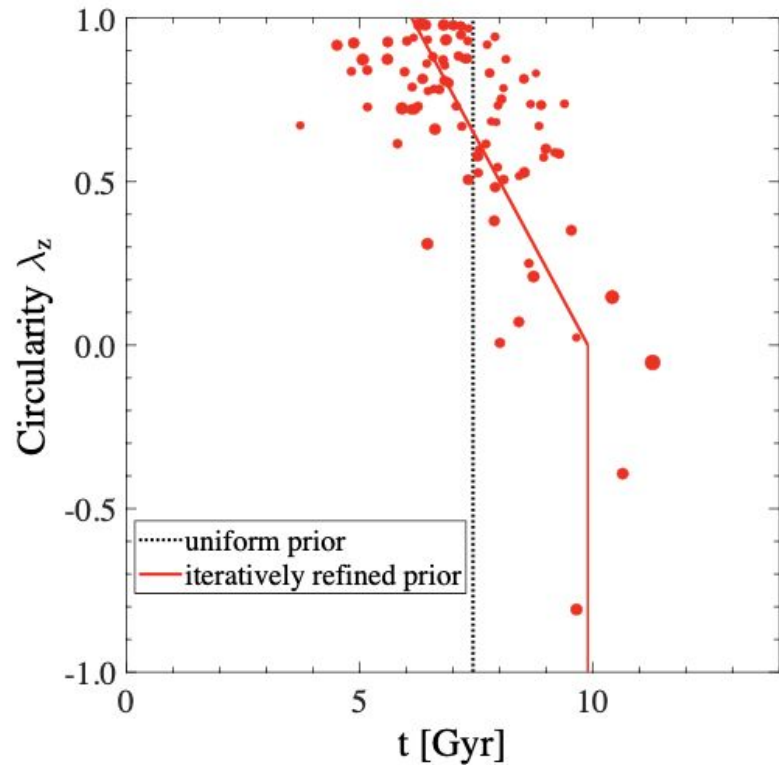
Распределение орбит для каждой симуляции → байесовский анализ с ложной картой возраста из зависимости "кинематика - возраст" получают априорный возраст орбиты.

Модель А - возраст один (итеративная модель). Модель В - мультivoзрастная модель (по сути усреднение нескольких моделей, связь возраста с  $\lambda_z$ ).

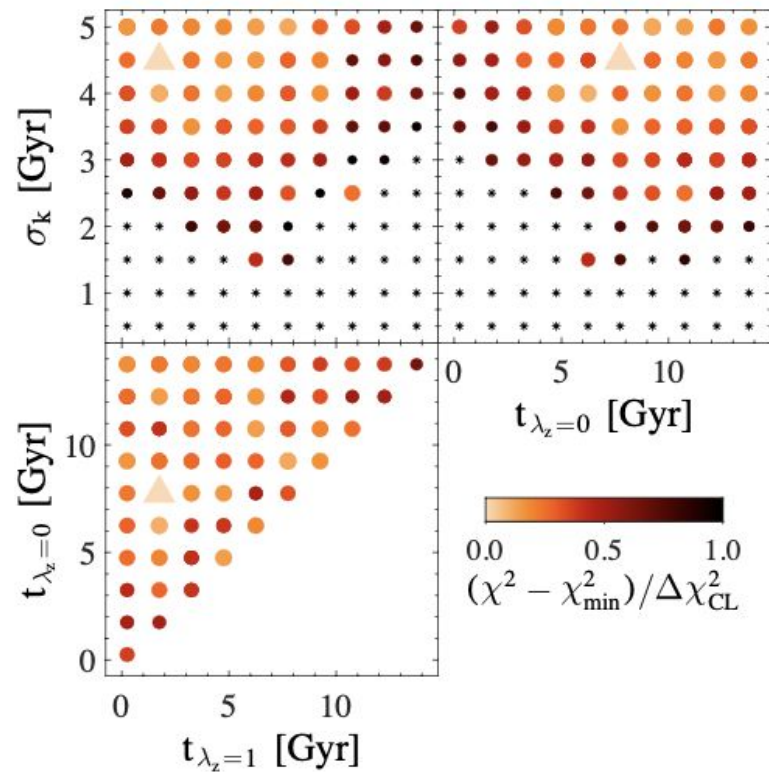
Детальное распределение звёзд полностью не восстановлено (звёзды с возрастом менее 3 Gyr плохо отражаются моделями)

Разделение на холодные ( $\lambda_z > 0.8$ ), тёплые ( $0.25 < \lambda_z < 0.8$ ) и горячие ( $\lambda_z < 0.25$ ) орбиты. Горячие орбиты включают противовращение.

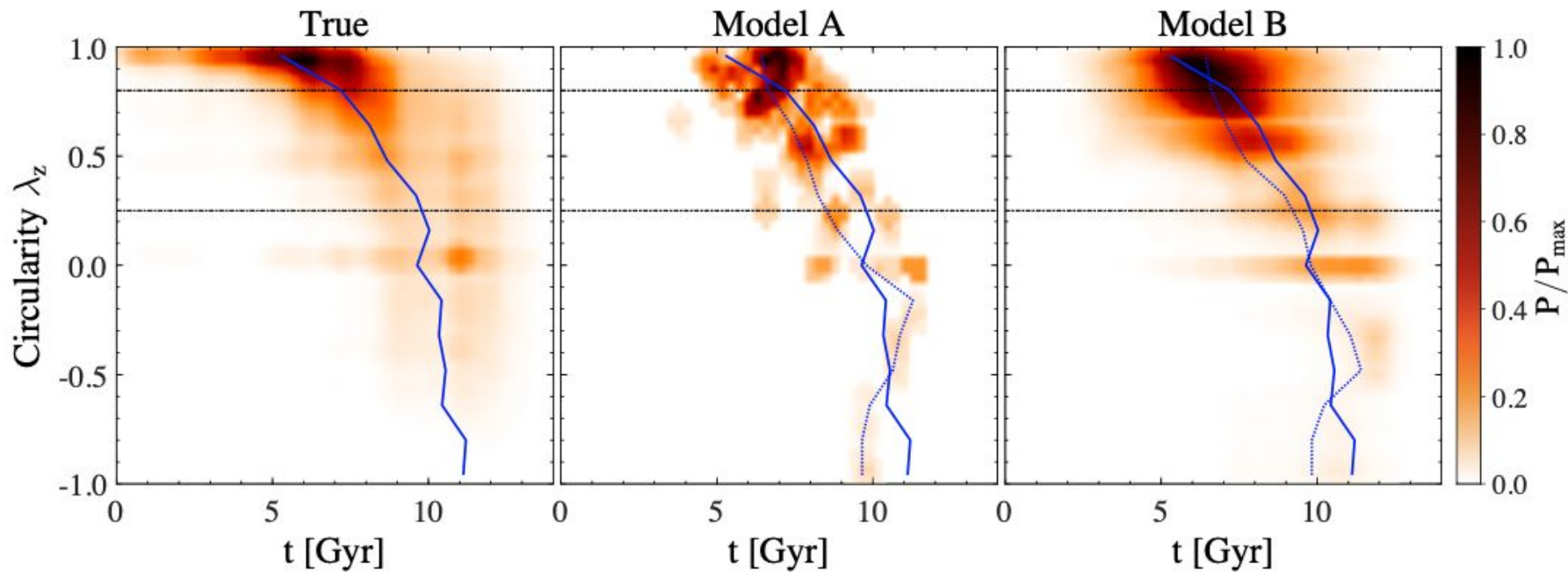
Затем вычисляется истинный и средний модельный возрасты для всех "макетных" данных Auriga.



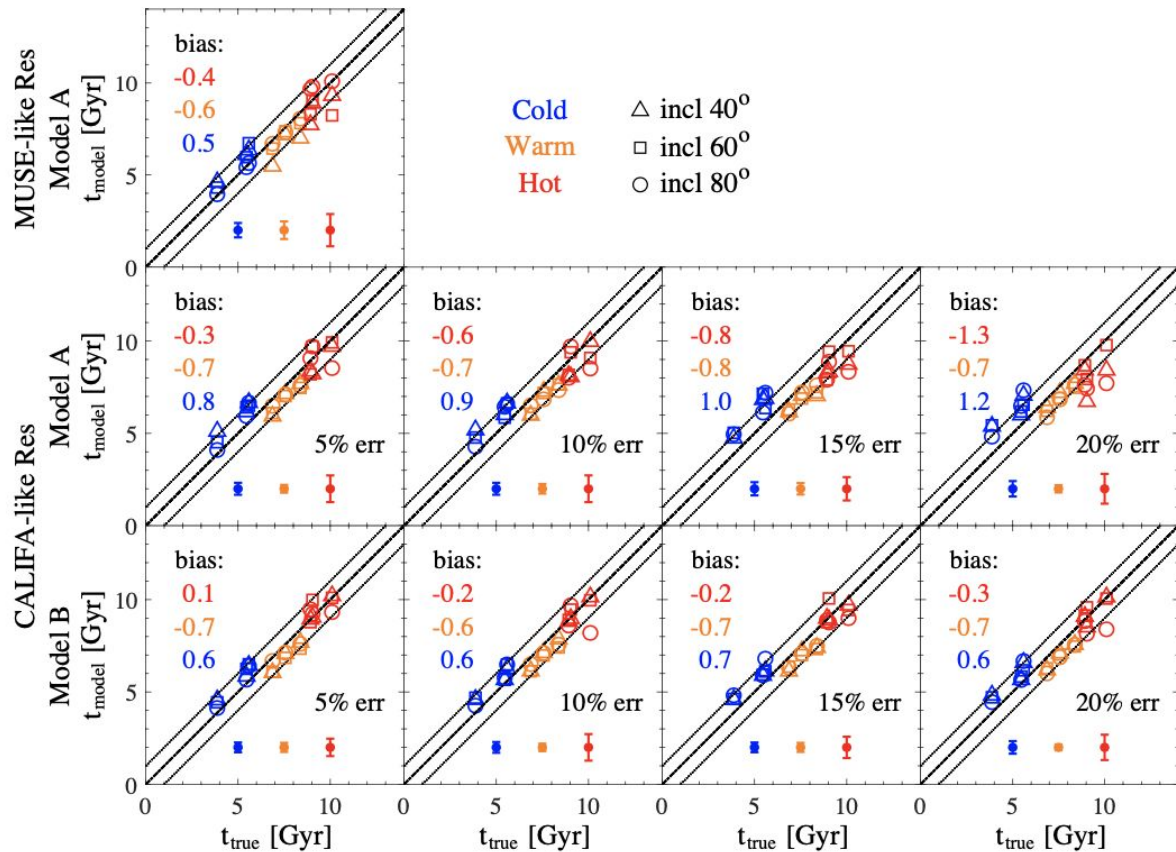
**Fig. 3.** The correlation between stellar age  $t$  and circularity  $\lambda_z$  demonstrated with Au-6-60-5. The black dotted line represents  $\mu_k$  of the uniform prior we started with, while the red solid line represents  $\mu_k$  of the iteratively refined prior based on the results from the previous model run. The red dots represent the final  $t_k$  obtained in the last model iteration, with larger dot sizes indicating larger orbit weights of the orbit bundles.



**Fig. 4.** The parameter space of the age-circularity priors for Au-6-60-5. We use three parameters to determine the  $\lambda_z$ - $t$  prior, including the age when  $\lambda_z = 0$ , the age when  $\lambda_z = 1$ , and the dispersion  $\sigma_k$ . The largest orange triangles denote the model with minimum  $\chi^2$  and the other coloured dots represent the models within  $1\sigma$  confidence level, as indicated by the colour bar. The small black asterisks represent the models outside  $1\sigma$  confidence level.



**Fig. 6.** The probability density distributions of stellar orbits  $P(\lambda_z, t)$  in the phase space of circularity  $\lambda_z$  versus age  $t$  for Au-6-60-5. Left panel: the true distribution directly derived from the simulation. Middle panel: the model recovered distribution from Model A. Right panel: the model recovered distribution from Model B, which is the average of all acceptable models within  $1\sigma$  confidence level. The normalised probability  $P/P_{\max}$  is indicated by the colour bar. The horizontal dashed lines divide the cold ( $\lambda_z \geq 0.8$ ), warm ( $0.25 < \lambda_z < 0.8$ ) and hot ( $\lambda_z \leq 0.25$ , including the counter-rotating orbits) components. The solid blue line in each panel represents the mean stellar age as a function of circularity from the simulations, while the blue dashed lines denote the model recovered ones from Model A and Model B.



**Fig. 7. One-to-one comparison of the true and model recovered age of the cold, warm and hot orbit components for all mock data sets.** Top left panel: results using Model A and mock data with MUSE-like spatial resolution from [Zhu et al. \(2020\)](#). Middle panels: results using Model A and mock data with CALIFA-like spatial resolution. Bottom panels: results using Model B and mock data with CALIFA-like spatial resolution. In the middle and bottom panels, the relative observational errors equal to 5%, 10%, 15% and 20% from left to right. The triangles, squares and circles represent the mock data sets with inclination angles  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $80^\circ$ . Blue, orange and red markers denote the cold ( $\lambda_c \geq 0.8$ ), warm ( $0.25 < \lambda_c < 0.8$ ) and hot ( $\lambda_c \leq 0.25$ ) components, with their corresponding mean bias and statistical uncertainty shown by the coloured texts and error bars in each panel. The dashed lines represent the equality of  $t_{\text{model}}$  and  $t_{\text{true}}$ , while the dotted lines are  $\pm 1$  Gyr away from the dashed lines.

# Данные CALIFA

У 300 галактик CALIFA со звёздными массами  $10^{8.7} < M_* < 10^{11.9}$ , имеющие звёздную кинематику и SDSS DR8 изображения в r-фильтре были промоделированы (трёхосным/триаксиальным) методом Шварцшильда.

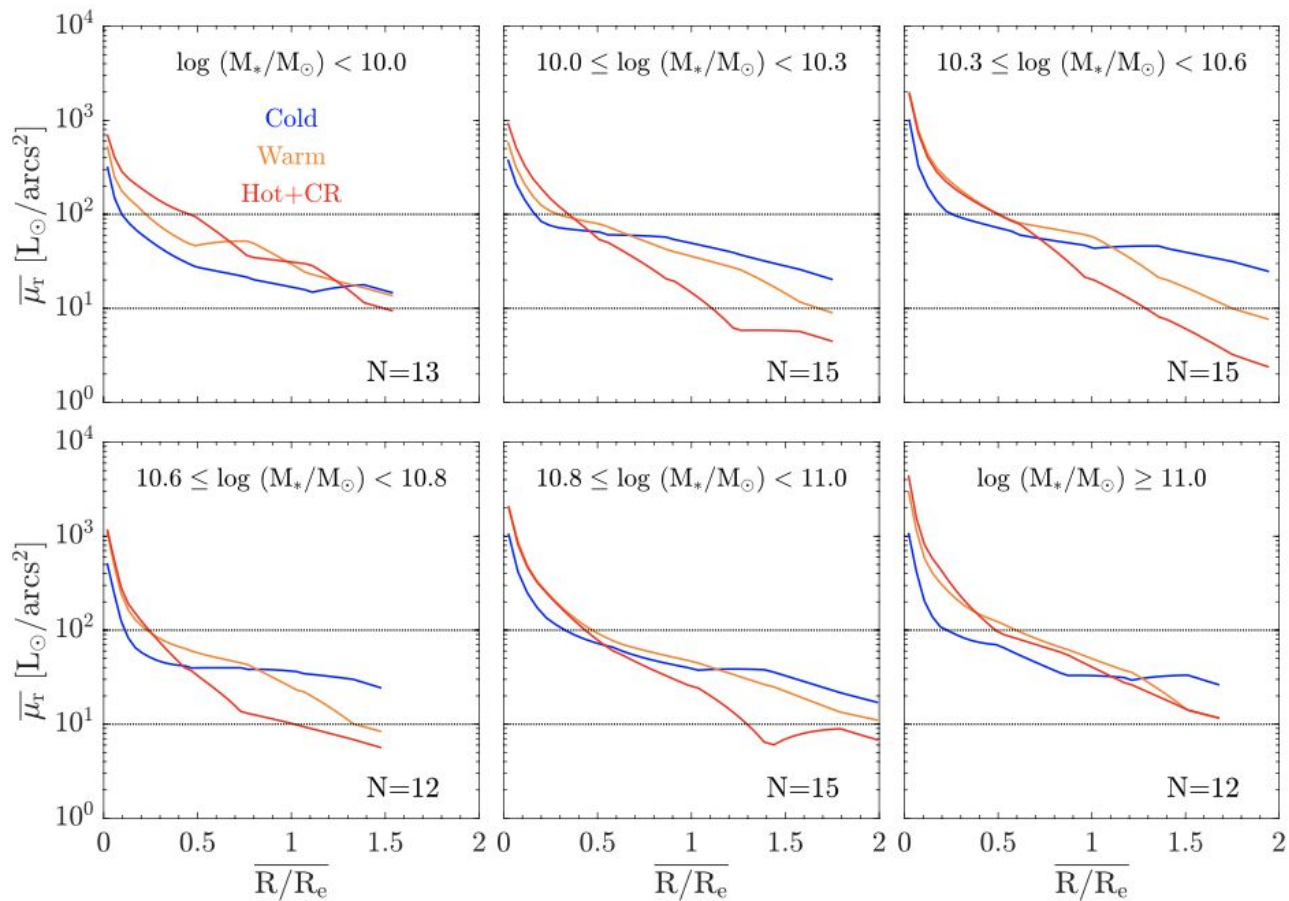
Из 300 галактик 227 (160 спиральных и 60 раннего типа) имели полный набор моделей суперпозиции орбит из предыдущей работы данных авторов 5-летней давности. Из 160 лишь 113 галактик имеют надлежащее качество моделей и гарантированное качество данных. Далее отброшены (глазами) галактики имеющие явную асимметрию в картах возраста, поскольку используемые авторами модели точно-симметричны) - и так осталось 82 S-галактики. Их звёздные массы лежат в пределах  $10^{8.9} - 10^{11.3}$ .

У 300 галактик CALIFA со звёздными массами  $10^{8.7} < M_* < 10^{11.9}$ , имеющие звёздную кинематику и SDSS DR8 изображения в r-фильтре были промоделированы (трёхосным/триаксиальным) методом Шварцшильда.

# Данные CALIFA

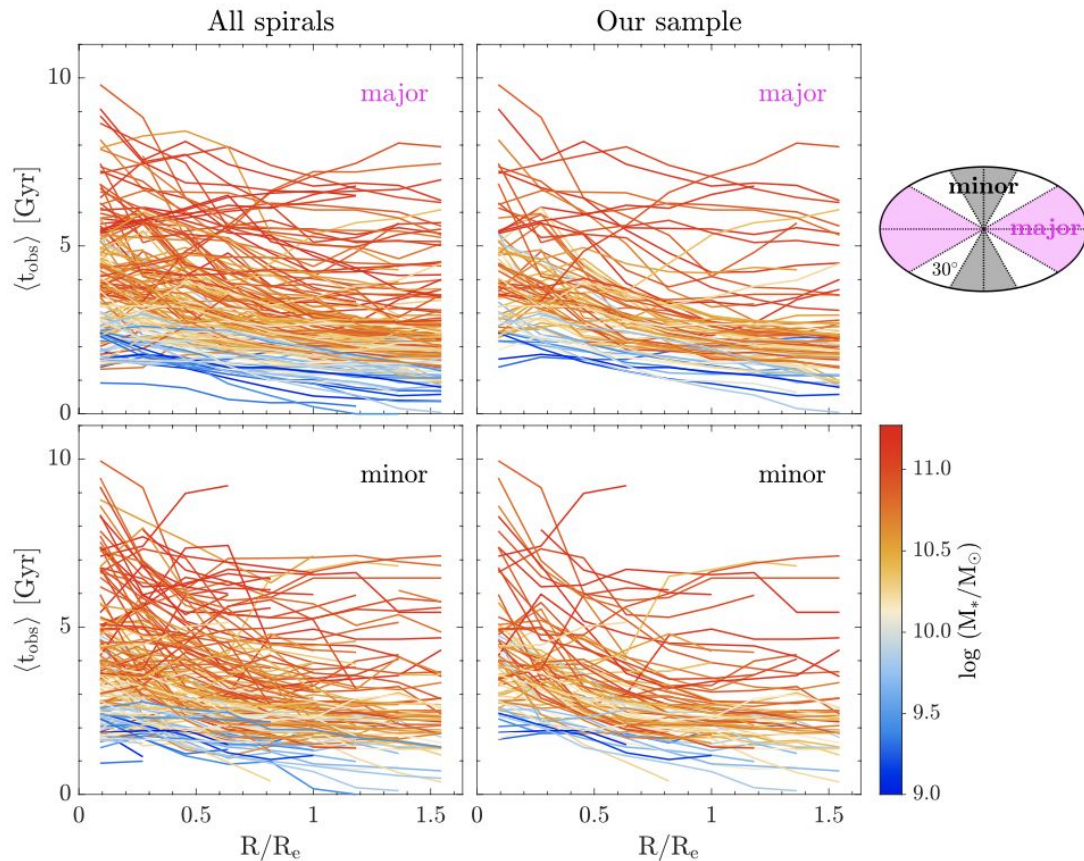
Из 300 галактик 227 (160 спиральных и 60 раннего типа) имели полный набор моделей суперпозиции орбит из предыдущей работы данных авторов 5-летней давности. Из 160 лишь 113 галактик имеют надлежащее качество моделей и гарантированное качество данных. Далее отброшены (глазами) галактики имеющие явную асимметрию в картах возраста, поскольку используемые авторами модели точно-симметричны) - и так осталось 82 S-галактики. Их звёздные массы лежат в пределах  $10^{8.9}$  -  $10^{11.3}$ .

- ★ 80% галактик имеют отрицательный градиент возраста
- ★ 94% галактик старше во внутренней области, равной половине эффективного радиуса
- ★ 67 галактик ранних типов не участвовали в статистике, поскольку возраст их балджей просто-напросто брался как средний возраст всей галактики (причина - нет очевидных градиентов возрастов)



**Fig. A.1.** The binned r-band surface brightness profiles  $\bar{\mu}_r$  versus radius  $\bar{R}/R_e$ . Our sample is divided into six mass bins with intervals defined by  $\log(M_*/M_\odot) = 8.9, 10.0, 10.3, 10.6, 10.8, 11.0$  and  $11.3$ . In each panel, we bin the profiles of galaxies within a certain mass bin for cold ( $\lambda_z \geq 0.8$ , blue lines), warm ( $0.25 < \lambda_z < 0.8$ , orange lines), and hot ( $\lambda_z \leq 0.25$ , red lines) components separately. The number of galaxies  $N$  in each bin is shown by the text. The horizontal dotted lines in each panel represent the values of  $10^1$  and  $10^2$ .





**Fig. A.2.** The luminosity-weighted age profiles  $\langle t_{\text{obs}} \rangle$  along major and minor axes versus radius  $R/R_e$ . The left panels show the profiles of all 160 spiral galaxies by matching the catalogues from Zhu et al. (2018b) and Zibetti et al. (2017), while the right panels show the profiles of 82 spirals in our final sample. The ellipse on the right of the figure illustrates how we calculate the age profile: for each galaxy, we find its major axis from the image and divide the image into different regions (separated by the dotted lines) by a step of  $30^\circ$  starting from the major axis. Then we calculate the luminosity-weighted age profile within  $\pm 30^\circ$  regions away from the major axis (magenta shadow, corresponding to the top panels) and the minor axis (grey shadow, corresponding to the bottom panels). Each fold line in the panels indicates a galaxy, with its stellar mass  $\log(M_*/M_\odot)$  being indicated by the colour bar.

# Данные CALIFA

Для каждой из 82 галактик, авторы берут все орбиты в пределах  $R_{\text{eff}}$  и делят их на 15 бинов по  $\lambda_z$ . Далее вычисляется плотность вероятности  $P(\lambda_z)$  и распределение возрастов  $t(\lambda_z)$ .

Авторы биннируют галактики по массам на 6 бинов и вычисляют средние возрасты и доли светимости трёх динамически-выделенных компонентов. Более молодые звёзды в динамически-холодных компонентах, звёзды в холодных дисках - самые молодые, причём все три компонента стареют с увеличением звёздной массы галактики:  $t_{\text{cold}} < t_{\text{warm}} < t_{\text{hot}}$ . Авторы заявляют о справедливости сценария более раннего образования и балджей у более массивных галактик

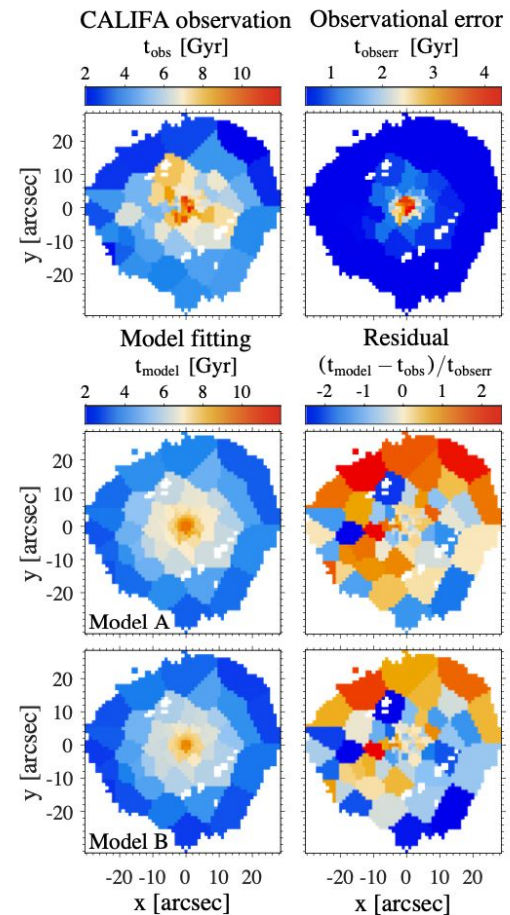
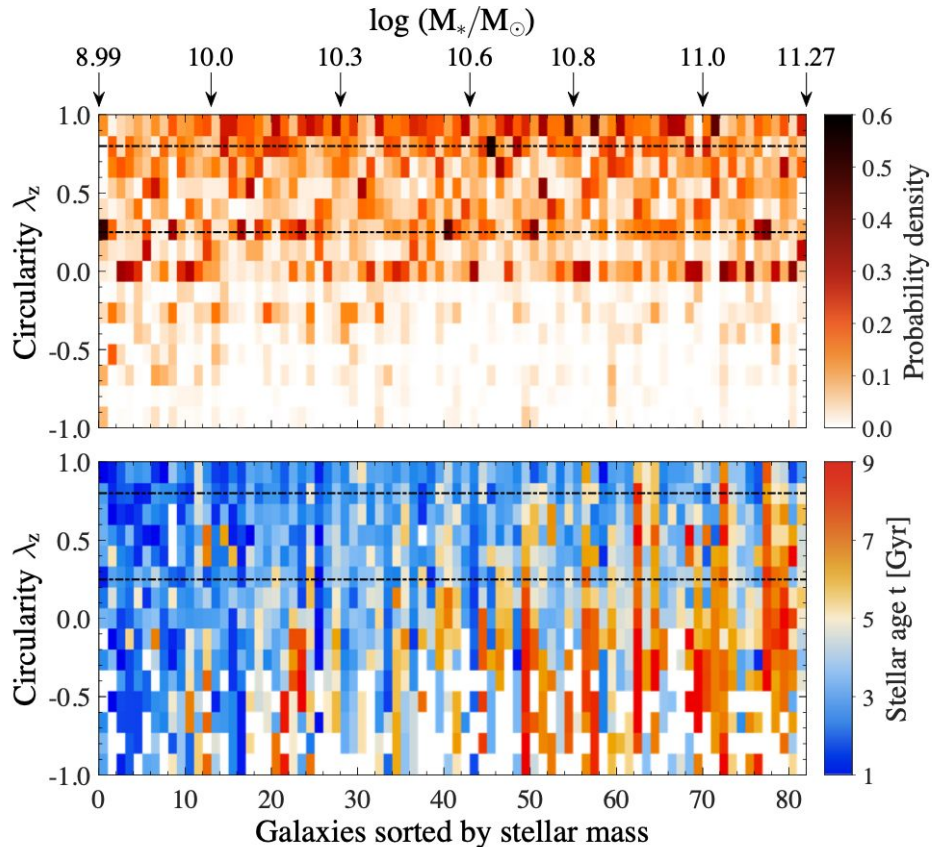
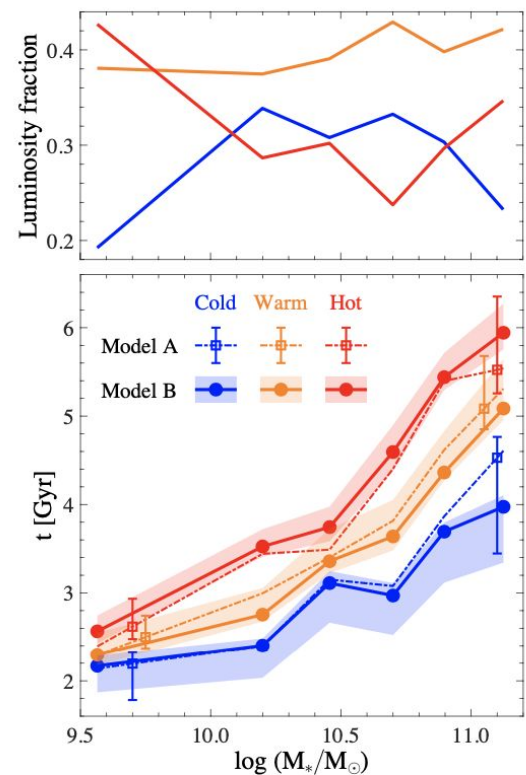


Fig. 8. The binned age map and the best-fitting models for NGC 0171. Top panels: the binned age map  $t_{\text{obs}}$  and the binned error map  $t_{\text{obserr}}$ ; middle panels: the best-fitting age map  $t_{\text{model}}$  and the standardised residuals between mock observations and model fittings  $t_{\text{stdres}} = (t_{\text{model}} - t_{\text{obs}})/t_{\text{obserr}}$  derived from Model A; Bottom: similar to middle panels but derived from Model B.



**Fig. 9.** The probability density distributions of stellar orbits and the distributions of stellar ages within  $R_c$  versus circularity  $\lambda_z$  for each of 82 CALIFA spirals. Each column in the top panel shows the orbit probability  $P(\lambda_z)$  of a certain circularity bin (y-axis) for a galaxy (x-axis), as indicated by the colour bar. The sequence of galaxies along the x-axis is sorted by increasing stellar mass from left to right, with the positions of some typical stellar mass  $\log(M_*/M_\odot)$  shown at the top of the figure. For each galaxy, the average circularity of all stellar orbits is calculated, with the black solid line denoting its variation with stellar mass. The results in the top panel originally come from Figure 2 of Zhu et al. (2018b), which plots a similar orbit distribution for each of 300 CALIFA galaxies. The bottom panel correspondingly presents the age  $t$  of each circularity bin for each galaxy, with bluer pixels indicating younger stellar populations and redder pixels denoting older populations. The horizontal dashed lines in the top and middle panels divide the cold ( $\lambda_z \geq 0.8$ ), warm ( $0.25 < \lambda_z < 0.8$ ) and hot ( $\lambda_z \leq 0.25$ , including the counter-rotating orbits) components.



**Fig. 10.** The luminosity-weighted orbit fractions and mean stellar ages of the cold, warm and hot components within  $R_c$  as a function of galaxy's stellar mass. In the top panel, the blue, orange and red lines represent the luminosity-weighted fractions of the cold, warm and hot components in different mass bins. In the bottom panel, the coloured solid lines with dots denote the mean ages of the cold, warm and hot components within different mass bins derived from Model B. The coloured shadows represent the overall uncertainties of Model B. For comparison, the mean ages of the cold, warm and hot components derived from Model A are shown by the coloured dashed lines, with the coloured error bars representing the typical overall uncertainties of Model A at the low-mass and high-mass ends.

# Данные CALIFA

Причём возраст горячей компоненты с массой галактики увеличивается быстрее возраста холодной. При  $M_* < 10^{10} M_{\text{Sun}}$ :

$$\langle t_{\text{cold}} \rangle = 2.2 \text{ Gyr} \quad \langle t_{\text{warm}} \rangle = 2.3 \text{ Gyr} \quad \langle t_{\text{hot}} \rangle = 2.6 \text{ Gyr}$$

А при  $M_* > 10^{11} M_{\text{Sun}}$ :

$$\langle t_{\text{cold}} \rangle = 4.0 \text{ Gyr} \quad \langle t_{\text{warm}} \rangle = 5.1 \text{ Gyr} \quad \langle t_{\text{hot}} \rangle = 5.9 \text{ Gyr}$$

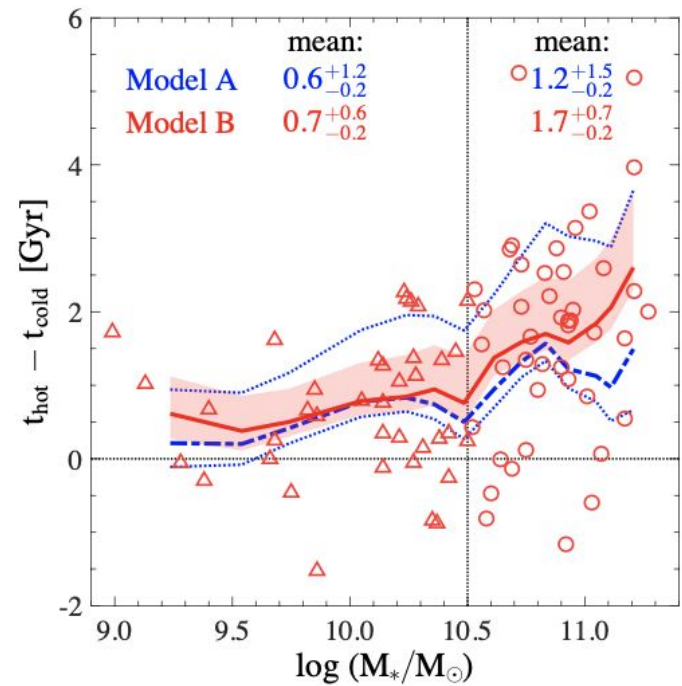
У упомянутой ранее модели A неопределённости возрастов больше.

В модели B разность возрастов претерпевает излом при  $M = 10^{10.5} M_{\text{Sun}}$ , что послужило причиной условного разделения на массивные и маломассивные галактики. Для маломассивных при  $\langle \Delta t_{\text{hc}} \rangle = 0.7 \text{ Gyr}$  разность  $\langle \Delta t_{\text{hc}} \rangle < 2 \text{ Gyr}$ , в то время как для массивных  $\langle \Delta t_{\text{hc}} \rangle = 1.7 \text{ Gyr}$ , причём  $\sigma(\Delta t_{\text{hc}}^g) = 0.9 \text{ Gyr} < \sigma(\Delta t_{\text{hc}}^g) = 1.4 \text{ Gyr}$ .

# Данные CALIFA

В модели A ситуация практически аналогична, хоть и в модели B априори полагалось предположение о связи возраста с  $\Lambda_z$ .

Итак, основной вывод из последних трёх графиков - у 80% S-галактик CALIFA балдж старше диска: и у массивных и у маломассивных S-галактик ситуация одинаковая, что согласуется с космологической моделью TNG50, согласно которой спирали с массами  $< 10^{10} M_{\text{Sun}}$  на больших и средних  $z$  образуют свои балджи и диски одновременно с непрерывным SF в них, причём SF в дисках затухает медленнее, а следовательно и средний возраст дисков чуть моложе возраста балджей.



**Fig. 11. The age difference between the hot and cold orbit components  $t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}$  within  $R_e$  versus stellar mass.** The red markers indicate  $t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}$  derived from Model B for each galaxy in our sample, with the triangles representing low-mass spirals ( $M_* \leq 10^{10.5} M_{\odot}$ ) and the circles representing high-mass spirals ( $M_* > 10^{10.5} M_{\odot}$ ). The corresponding red curve represents the moving average of  $t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}$ . The red shadow denotes the overall uncertainties of Model B. For comparison, the moving average of  $t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}$  and the overall uncertainties derived from Model A are shown by the blue dashed line and the blue dotted lines. The horizontal dotted line means  $t_{\text{hot}} = t_{\text{cold}}$ , while the vertical dotted line denotes  $M_* = 10^{10.5} M_{\odot}$ . The mean values of  $t_{\text{hot}} - t_{\text{cold}}$  for low-mass spirals and high-mass spirals are shown by the texts.

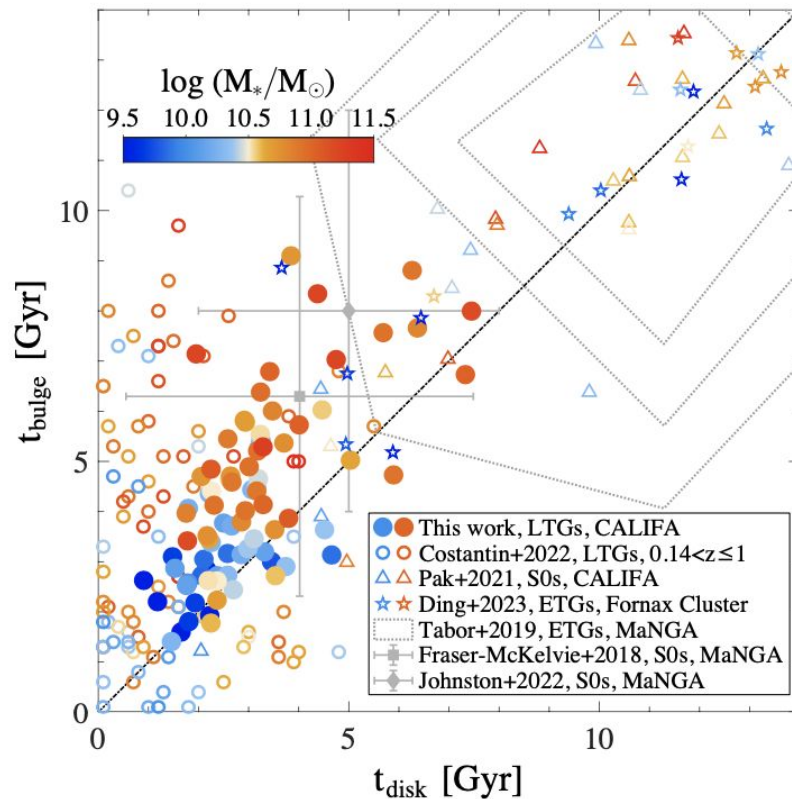
# Данные CALIFA

Массивные спирали имеют очень старые балджи, но имеют широкий диапазон возрастов звёзд, то есть балджи у таких галактик образуются в результате вспышки звездообразования на больших  $z$ . А диски формируются уже позже образования балджа и вообще могут разрушаться при мёржинге, но впоследствии могут быть восстановлены. Ширина диапазона возрастов диска, по мнению авторов, вызвана разной историей мёржинга.

Тем не менее есть галактики с балджами моложе дисков. Авторы полагают что такое может произойти из-за:

- удушья окружающей средой
- звёздных ветров

Далее авторы сравнивают свои результатами с результатами других работ.



**Fig. 12. One-to-one comparison of bulge ages  $t_{\text{bulge}}$  and disk ages  $t_{\text{disk}}$  from different works.** The dots represent 82 CALIFA spirals in our sample, with the bulge and disk ages corresponding to the ages of the hot and cold components within  $R_e$  derived from Model B ( $t_{\text{bulge}}=t_{\text{hot}}$ ,  $t_{\text{disk}}=t_{\text{cold}}$ ). The circles indicate 91 spiral galaxies at redshift  $0.14 < z \leq 1$  from Costantin et al. (2022). The triangles denote 29 CALIFA S0 galaxies (shifted 2 Gyr younger for both bulges and disks) from Pak et al. (2021). The pentacles denote 18 early-type galaxies in the Fornax Cluster from Ding et al. (2023). The stellar mass of galaxies are indicated by the colour bar. The region covered by the grey dashed lines (shifted 4 Gyr younger for both bulges and disks) roughly shows the density distributions of 272 MaNGA early-type galaxies from Tabor et al. (2019). The grey squares and diamonds represent the mean bulge ages and disk ages in the samples of 279 MaNGA S0 galaxies (Fraser-McKelvie et al. 2018) and 78 MaNGA S0 galaxies (Johnston et al. 2022), respectively, with the corresponding error bars representing the standard deviations of bulge ages and disk ages.

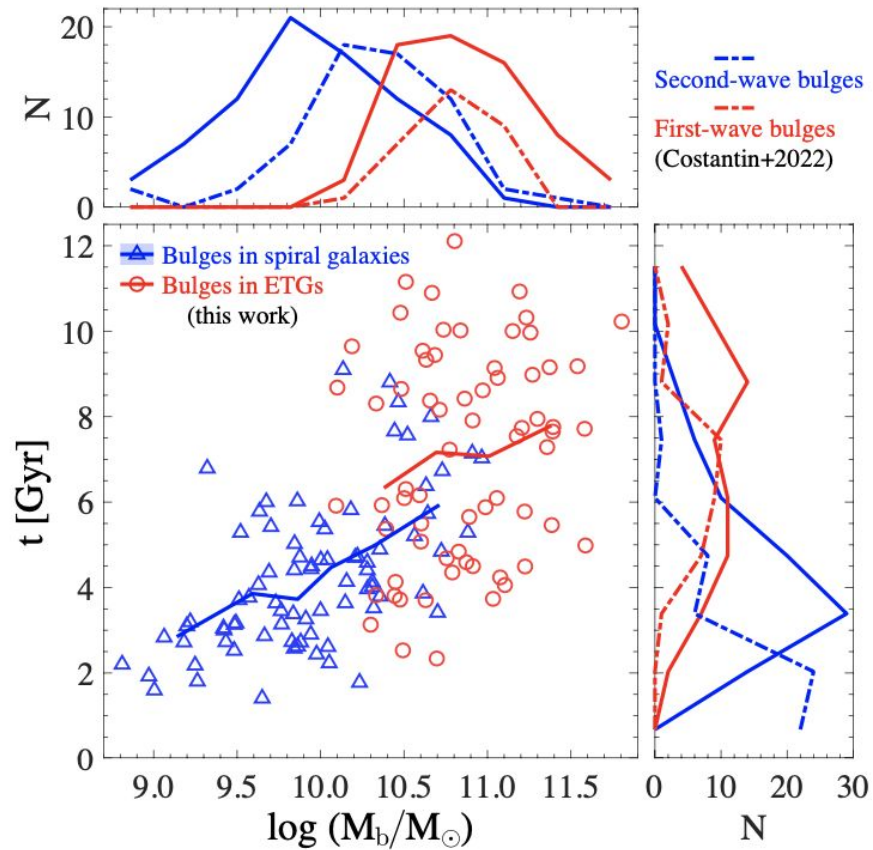
# Обсуждение и выводы I. Возраст балджа и диска

- ★ Авторы полагают, что сравнение с Tabor et al. (2019) (где балджи имеют те же возраста что и диски) некорректно, поскольку в той работе по MaNGA методы определения возраста диска и балджа не одинаковы.
- ★ А вот Ding et al. (2023) применяют те же методы, но для галактик ранних типов скопления Fornax. В той работе было найдено, что разница возрастов балджей и дисков связана с временем падения галактики внутрь скопления.
- ★ Те галактики, что уже давно упали на центр имеют одинаковые возраста балджей и дисков, а те, что только начинают или продолжают падение имеют возраста балджей в среднем на 2 Gyr старше дисков, подобно спиральям в CALIFA.
- ★ На больших  $z$  (до 1) 85% S-галактик также имеют балджи, которые много старше дисков, как показано в работе Costantin et al. (2022). Причём в той работе, аналогично этой, показано, что разница в возрастах увеличивается со звёздной массой.



# Обсуждение и выводы II. Возраст - масса балджа

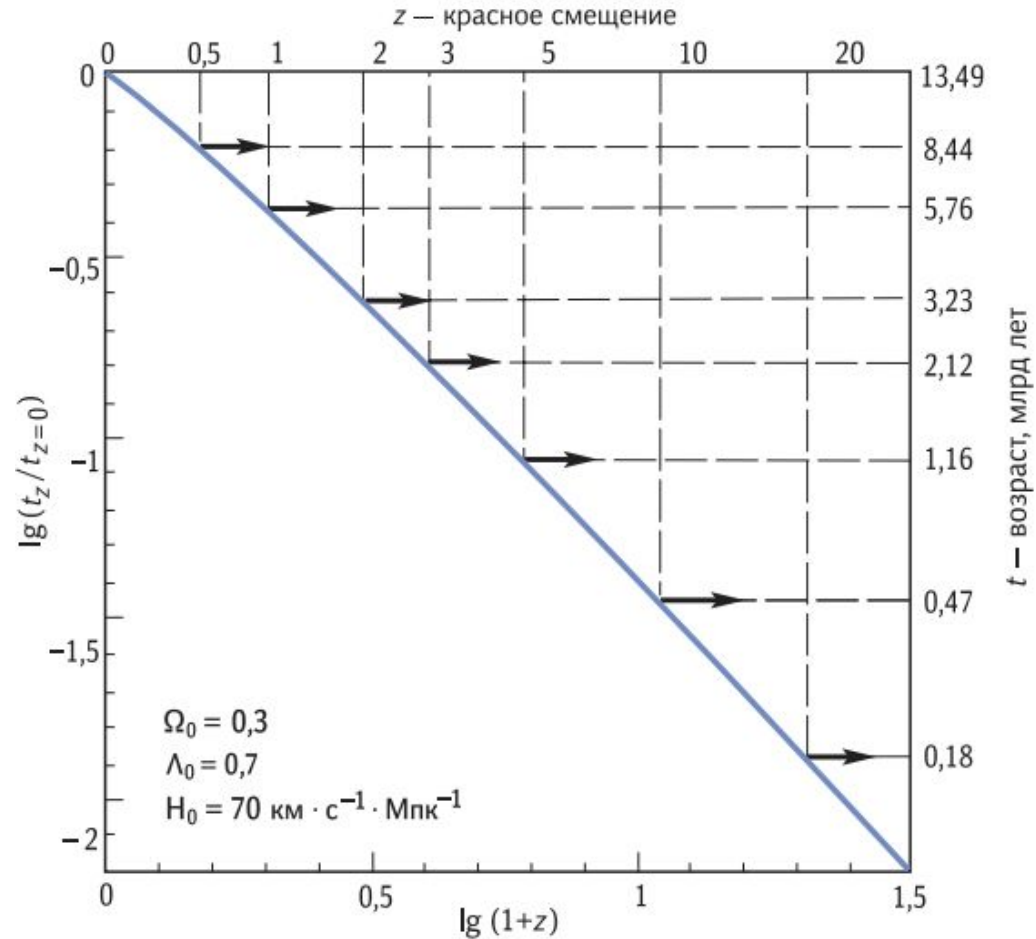
- ★ Также полагается, что на  $z$  больших, чем у галактики в данной работе возраст населения диска и балджа в среднем моложе, что логично, а также что в работе *Costantin et al. (2022)* использовалась оценка возрастов дисков на больших радиусах, где звёзды полагаются более молодыми\*\*
- ★ Авторы исследовали зависимость возраста балджа от его массы для галактик ранних типов, где возраст балджа, в силу отсутствия градиента возраста звёзд вдоль радиуса, принимался равным средневзвешенному по светимости возрасту звёзд галактики целиком
- ★ Как и у S-галактик, балджи галактик ранних типов тем массивнее, чем старше. Хотя судя по графику на следующем слайде, для галактик ранних типов я не вижу таковой зависимости...
- ★ Авторы делают вывод: при объединении спиралей и галактик ранних типов, то население балджей в CALIFA бимодально: балджи первого типа и второго типа (или первой и второй волны).



**Fig. 13. The bulge ages versus bulge mass for spiral galaxies and early-type galaxies.** In the main panel, the blue triangles represent 82 bulges in spiral galaxies in our sample, and their ages correspond to the ages of the hot component within  $R_e$  derived from Model B. The red circles denote 67 bulges in early-type galaxies in our contrast sample, and their ages correspond to the luminosity-weighted mean ages calculated from the age maps. The blue solid line with shadow represents the mean bulge ages and uncertainties of spiral galaxies within different mass bins, while the red solid line denotes the mean bulge ages of early-type galaxies within different mass bins. In the top and right panels, the corresponding coloured solid lines represent the marginalised distributions of bulge mass and bulge ages in our work. The dashed lines denote the distributions from Costantin et al. (2022), with the blue lines representing the "second-wave bulges" and the red lines representing the "first-wave bulges".

# Балджи 1 и 2 типа

- ★ Балджи первого типа растут быстро в ранней Вселенной, благодаря диссипативным процессам, возможно проэволюционировав до  $z \sim 2$  (до 10.5 Gyr) "red nuggets"
- ★ Балджи второго типа формируются позже:  $z \sim 1-2$  (7.9 - 10.5 Gyr), но как и балджи первого типа, эти балджи имеют тенденцию приобретать диски к  $z \sim 0.5$  (5.2 Gyr)
- ★ Балджи спиралей CALIFA - балджи 2 типа, но есть нюанс



# Балджи 1 и 2 типа. И итог работы

- ★ Балджи спиралей CALIFA - балджи 2 типа, но есть нюанс: в выборке авторов больше балджей с малой массой (они предполагают, что это эффект селекции), а балджи S-галактик на самомо деле старше балджей 2 типа
- ★ По мнению авторов, это вызвано \*\*

## Основные выводы работы:

- Систематика в разности возрастов балджей и дисков от маломассивных к массивным дисковым галактикам указывает на РАЗНУЮ историю их формирования, что должно радовать космологов
- Различные истории сухого/мокрого мёржинга могут являться причиной большого разброса возрастов дисков в массивных спиральных галактиках

**Спасибо за внимание!**