



## Задача

Чтобы ответить на вопросы о физической природе и происхождении спиральных рукавов в галактиках, необходимо измерить их динамические свойства, такие как угловая скорость узора  $\Omega_p$  или радиус коротации (CR). Наблюдения показывают, что галактики могут содержать несколько независимых спиральных узоров одновременно. Было показано, что так называемая нелинейная резонансная связь, при которой совпадают резонансы последовательных узоров (coupling), играет важную роль в таких системах (Masset & Tagger, 1997; Rautiainen & Salo, 1999; Minchev et al., 2012). Задача в том, чтобы надежно идентифицировать случаи независимых спиральных узоров для галактик с плоской кривой вращения (RC) и исследовать, какие относительные скорости узоров,  $\Omega_p^{\text{out}}/\Omega_p^{\text{in}}$ , они могут иметь для связи между основными резонансами (CR, ILR, OLR, 4:1).

## Наблюдения

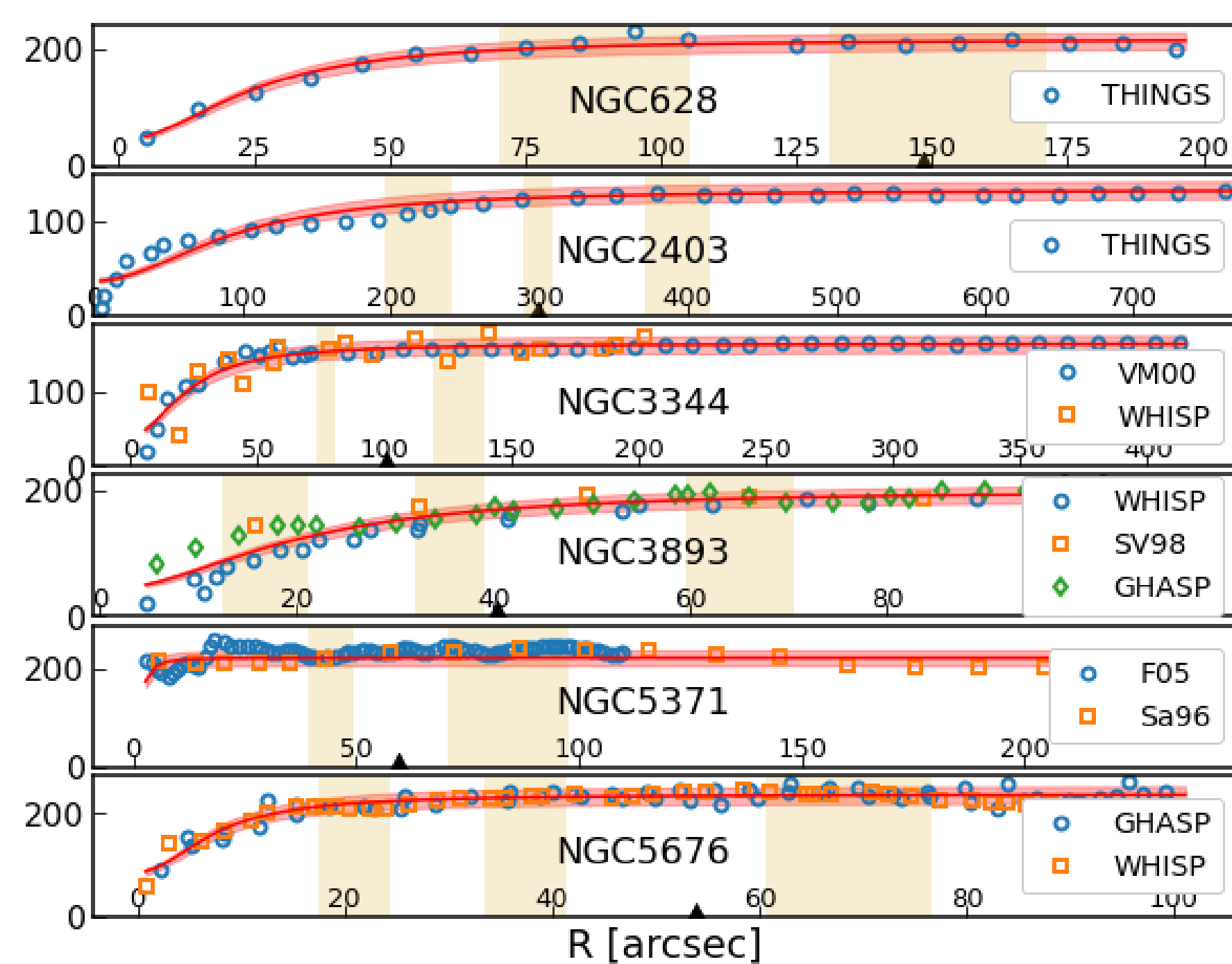
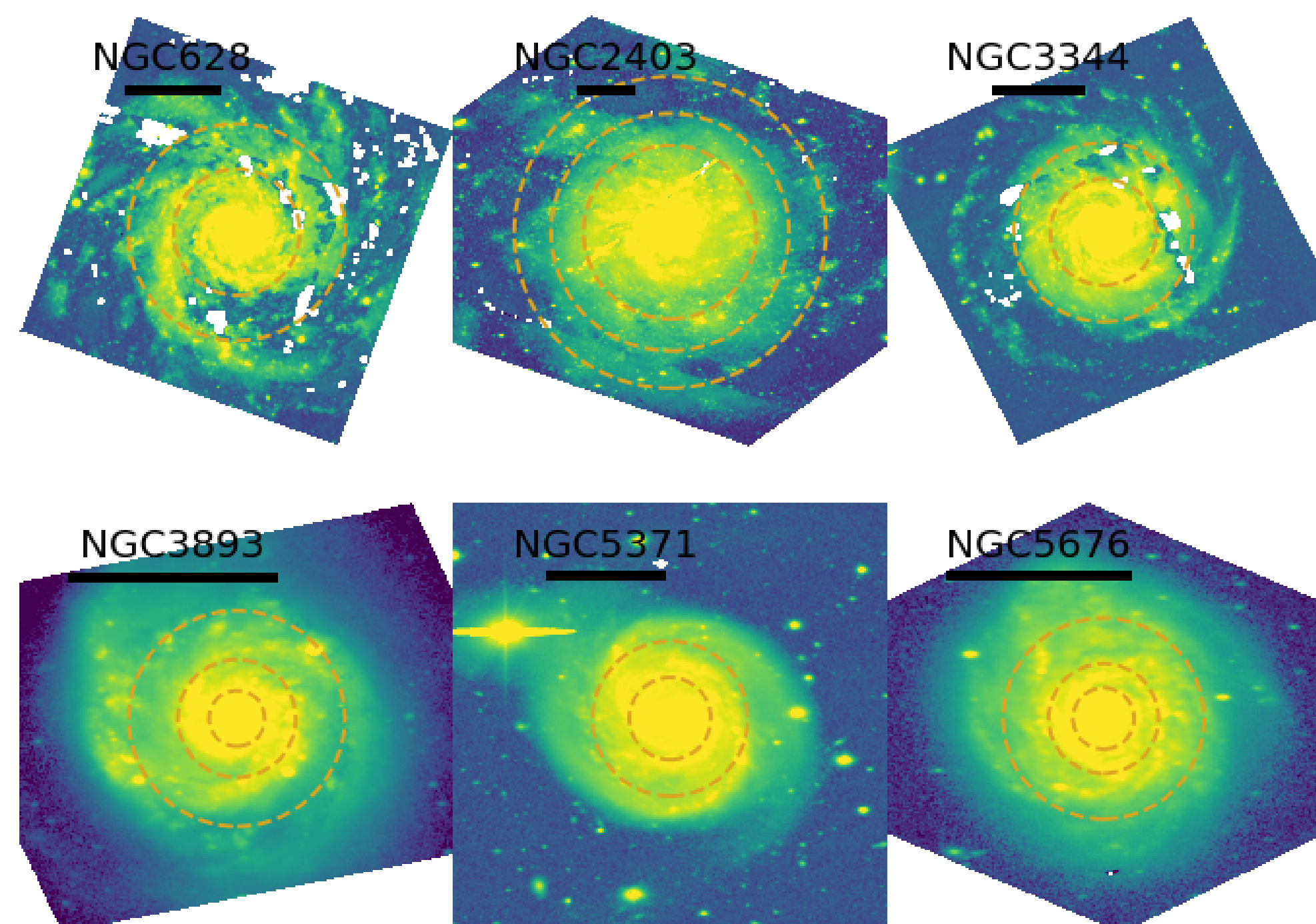


Рисунок 1: (вверху) Миниатюрные изображения галактик из DESI Legacy Imaging Surveys в полосе  $g$ . Изображения приведены в логарифмической шкале в условных единицах, окружности показывают средние положения CR (см. Рис. 2), длина масштабной линейки равна 2 угловым минутам. (внизу) Кривые вращения и их подгонка с погрешностью 7%. Треугольником показана величина  $r_{25}/2$ . Данные из: F05: Fridman et al. (2005); THINGS: de Blok et al. (2008); GHASP: Garrido et al. (2005); SV98: Sanders & Verheijen (1998); VM00: Verdes-Montenegro et al. (2000); WHISP: van der Hulst et al. (2001); and Sa96: Sanders (1996).

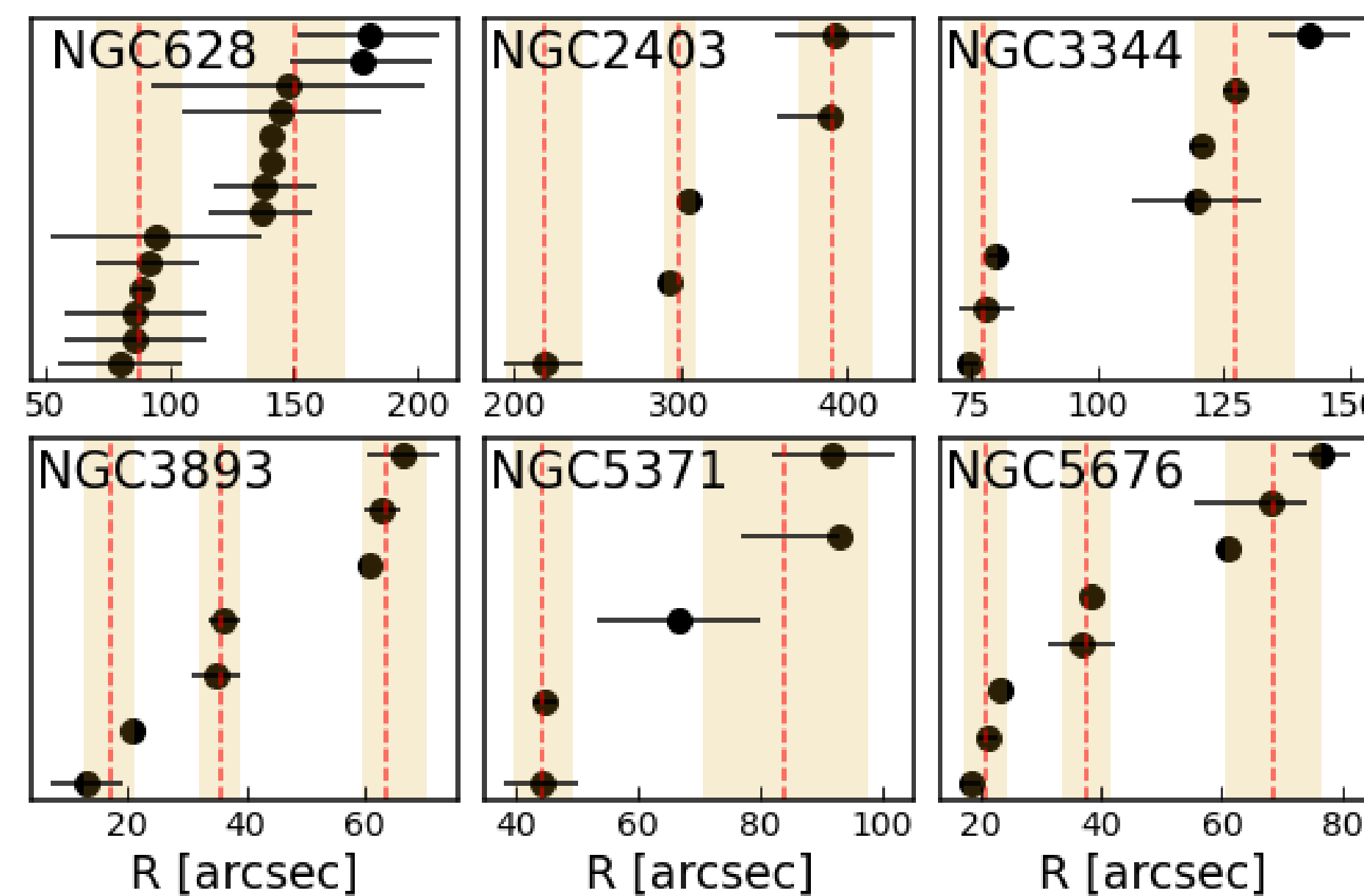


Рисунок 2: Положения CR для отдельных частей спирального узора (точки), собранные из 17 работ. Цветные вертикальные области показывают границы предполагаемых CR для каждого шаблона, пунктирная красная линия показывает среднее значение для точек внутри каждого CR. Границы выбраны условно, но близки к дисперсии точек. Вертикальная ось показана только для иллюстративных целей, чтобы разнести точки.

## Решение и результаты

Мы используем стандартные обозначения  $\Omega = v/r$  для угловой скорости и  $\Omega_p$  для угловой скорости спирального узора. Для каждого узора резонанс порядка  $m$  описывается кривой  $\Omega + \kappa/m$ , где  $\kappa$  - эпциклическая частота,  $m = \pm 2$  для OLR и ILR и  $m = \pm 4$  для ультрагармонического резонанса 4:1 (обозначения OUHR и IUHR). Для RC вида  $v(r) \propto r^\alpha$  и используя выражение для эпциклической частоты

$$\kappa^2 = \frac{2\Omega}{r} \frac{d}{dr} (r^2 \Omega)$$

можно тривиальным образом найти, что

$$\frac{R_m}{CR} = \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{m} \sqrt{1 + \alpha} \right)^{(1-\alpha)^{-1}}$$

где  $R_m$  - положение резонанса. Тогда, положив отношение внешнего CR к внутреннему как  $\omega = CR_{\text{out}}/CR_{\text{in}}$  и используя плоскую RC ( $\alpha = 0$ ), можно точно решить простую систему уравнений равенства положений двух резонансов и найти отношение  $\omega$  для всех 10 возможных случаев нелинейной резонансной связи. Например, связь  $OLR_{\text{in}} = ILR_{\text{out}}$ , показанная в случае NGC4736 (Moellenhoff et al. 1995), дает  $\omega = (1 + \sqrt{2}/2)/(1 - \sqrt{2}/2) \approx 5.83$ , а другие случаи вычисляются аналогичным образом.

Таблица 1: Все возможные комбинации (ес-но  $\omega > 1$ ) и соотношения  $\omega$  для основных резонансов.

	in			
out	IUHR	CR	OUHR	OLR
ILR	2.21	3.41	4.62	5.83
IUHR	-	1.55	2.09	2.64
CR	-	-	1.35	1.71
OUHR	-	-	-	1.26

Важно, что для случая плоской RC  $\omega^{-1}$  равно отношению скоростей узора  $\Omega_p^{\text{out}}/\Omega_p^{\text{in}}$ . Также можно напрямую выразить время «закрутки», за которое один узор обгонит второй на один оборот:

$$\tau_{\text{wind}} = 2\pi \left( \frac{v_0}{CR_{\text{in}}} - \frac{v_0}{CR_{\text{out}}} \right)^{-1} = \frac{2\pi}{\Omega_{\text{in}}} \times \left( 1 - \frac{CR_{\text{in}}}{CR_{\text{out}}} \right)^{-1} = \frac{\tau_{GY}}{1 - \omega^{-1}},$$

где  $\tau_{GY}$  - время оборота внутреннего узора. Для значений из Табл. 1,  $\tau_{\text{wind}}$  составляет  $1.2 - 4.8 \times \tau_{GY}$ , т.е. глобальный узор является короткоживущим.

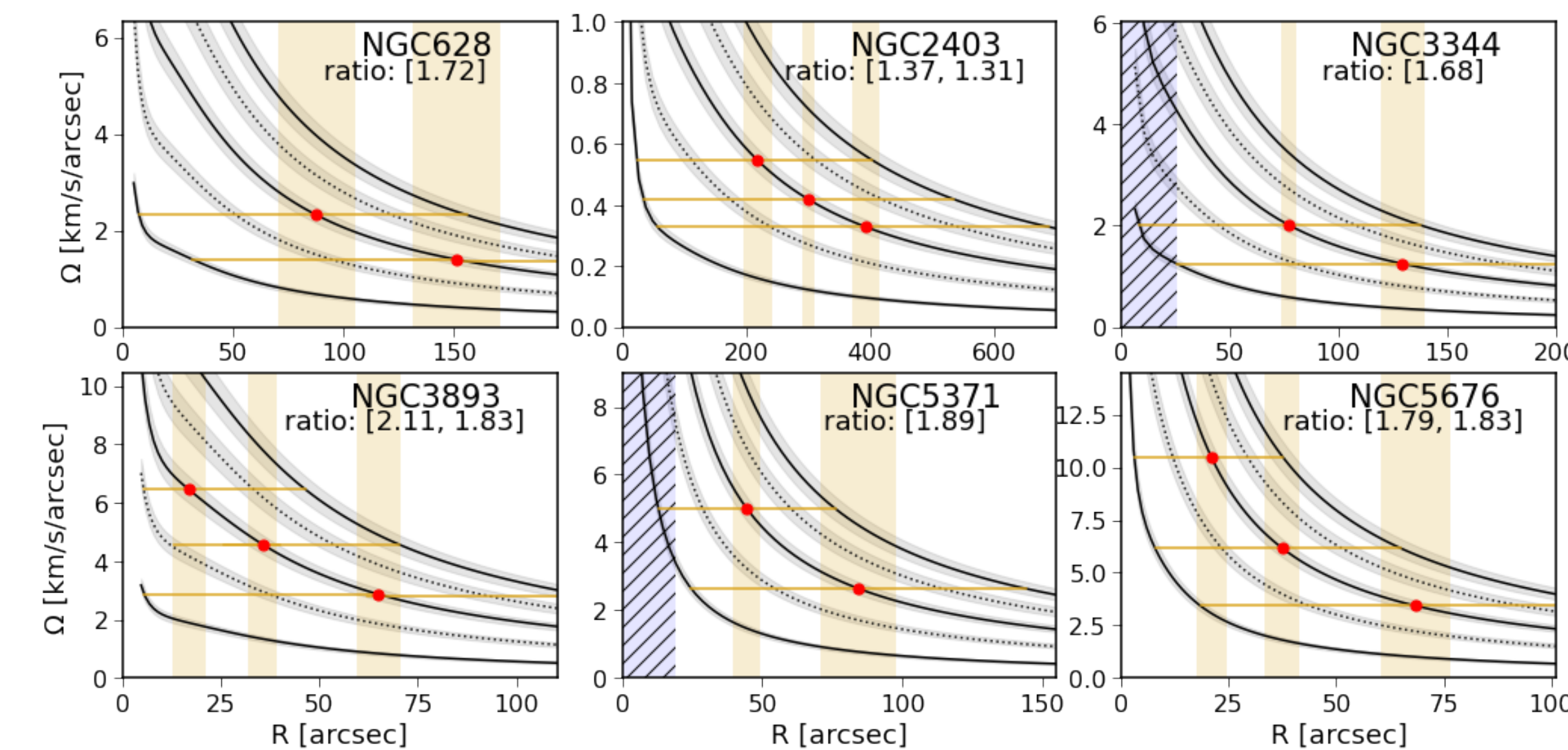


Рисунок 3: Угловая скорость и кривые резонансов: сплошные линии показывают  $\Omega$ , ILR и OLR; пунктирные линии показывают IUHR и OUHR. Области, заполненные серым цветом, представляют ошибку, связанную с RC. Красные точки показывают среднее положение каждого CR. Горизонтальные линии протяженности каждого спирального узора от его внутреннего резонанса (ILR или IUHR) до внешнего (OLR). Числа показывают  $\omega$  для последовательных узоров. Синие заштрихованные области отмечают размеры бара (при его наличии).

## Выводы

- Предполагая плоскую кривую вращения и спирально-спиральную резонансную связь, найдены все возможные отношения  $\omega = CR_{\text{out}}/CR_{\text{in}}$  радиусов коротации двух последовательных узоров для основных резонансов (Таблица 1). В трех случаях значения  $\omega > 3$ , т.е. примеры таких галактик, как ожидается, будут редкими, если они вообще существуют.
- Одновременное совпадение  $OLR_{\text{in}} = CR_{\text{out}}$  &  $CR_{\text{in}} = IUHR_{\text{out}}$ , наблюдаемое во многих галактиках (Font et al. 2014), в исследуемой задаче естественно следует из-за очень близкого отношения  $\omega$  в обоих случаях. Для двух других близких пар также должно наблюдаться одновременное совпадение резонансов.
- Показано, что резонансная связь неизбежно означает, что спирали будут «закручиваться» за несколько оборотов диска. Получена оценка времени закручивания  $\tau_{\text{wind}}$  для каждого случая в терминах оборотов.
- Для шести галактик с плоской RC надежно найдены несколько CR, используя измерения из других работ (Рис. 2). Для каждой галактики использовано по крайней мере три различных независимых метода измерения CR.
- Для этих галактик показано, что наблюдаемые резонансы визуально связаны (Рис. 3) и согласуются с ожидаемым  $\omega$ . Это не первый случай, когда подобная связь продемонстрирована в реальных галактиках, но теперь она хорошо мотивирована, и найдены веские наблюдательные доказательства существования нескольких отдельных спиральных узоров одновременно в одной галактике.
- Найден новый вариант резонансной связи в NGC2403 (дважды) и в NGC3893, а именно  $OLR_{\text{in}} = OUHR_{\text{out}}$  &  $OUHR_{\text{in}} = CR_{\text{out}}$ . Насколько известно, как отдельно, так и совместно (см. (ii)) эти случаи ранее не наблюдались.

## Ссылки

- Marchuk A. A., 2024, A&A, 686, L14. doi:10.1051/0004-6361/202450602
- Minchev I., Famaey B., Quillen A. C., Di Matteo P., Combes F., Vlahić M., Erwin P., et al., 2012, A&A, 548, A126. doi:10.1051/0004-6361/201219198
- Rautiainen P., Salo H., 1999, A&A, 348, 737
- Masset F., Tagger M., 1997, A&A, 322, 442. doi:10.48550/arXiv.astro-ph/9902125
- Font J., Beckman J. E., Querejeta M., Epinat B., James P. A., Blasco-herrera J., Erroz-Ferrer S., et al., 2014, ApJS, 210, 2. doi:10.1088/0067-0049/210/1/2
- Marchuk A. A., Mosenkov A. V., Chugunov I. V., Kostjuk V. S., Skryabina M. N., Reshetnikov V. P., 2024, MNRAS, 527, L66. doi:10.1093/mnrasl/slad141