

# Глубокая фотометрия спиральных галактик

А.В. Мосенков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН

<sup>2</sup>Университет Бригама Янга

\* *e-mail*: [mosenkovAV@gmail.com](mailto:mosenkovAV@gmail.com)

## Аннотация

В данной работе рассматривается потенциал использования глубокой фотометрии для изучения структуры спиральных галактик. В качестве источника глубокой фотометрии выбран современный цифровой обзор DESI Legacy Imaging Surveys с большим покрытием северного неба. Приводится ряд примеров спиральных галактик с различными структурными особенностями низкой поверхностной яркости, которые не видны на изображениях с обычной глубиной. В частности, рассматриваются слабые спирали за пределами оптического радиуса, приливные структуры (изгибы диска, звездные потоки и петли), а также слабые полярные структуры, расположенные перпендикулярно плоскости диска. Таким образом, использование глубокой фотометрии открывает новые возможности изучения структурных особенностей галактик и позволяет сделать более надежные выводы об их эволюции.

## Введение

На сегодняшний день глубокая поверхностная фотометрия является одним из основных методов изучения структурных характеристик галактик и позволяет получить более полное представление об эволюции основных структурных единиц крупномасштабной структуры Вселенной (Martínez-Delgado et al., 2010; Abraham, van Dokkum, 2014; Trujillo, Fliri, 2016; Rich et al., 2019). Так, аккреция вещества, большой и малый мерджинг, и порождаемые ими различные приливные эффекты приводят к формированию структур, которые часто не выделяются на изображениях с обычной глубиной (в этом плане обзор SDSS, York et al. 2000, с глубиной  $26.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$  стал стандартом в изучении поверхностной фотометрии галактик). Многие из таких структур возникают в тесном пространственном окружении, например в компактных группах и скоплениях галактик, а часто наблюдаемый диффузный свет в таких объектах (“вырванные” из галактик звезды) свидетельствует о влиянии потенциала темного галактического скопления на структурные особенности галактик и их морфологию (Poliakov et al., 2021).

Недавно Rich et al. (2019) использовали глубокую фотометрию, полученную с помощью небольшого 0.8м телескопа, для изучения структуры звездного галактического скопления у близких галактик. У некоторых галактик были обнаружены структуры, не упомянутые ранее в литературе.

В Mosenkov et al. (2020a) на основе данных из Rich et al. (2019) для подвыборки видимых с ребра галактик была изучена внешняя форма галактик (толстого диска и звездного гала). По форме внешних изофот, авторы разделили видимые с ребра дисковые галактики на три типа — с дисковыми (в форме сплюснутого алмаза с заостренными кончиками), эллиптическими и ящикоподобными изофотами. Кроме того, по наличию приливных структур галактик и поверхностной плотности галактик окружения удалось проследить связь между формой внешних изофот и взаимодействием галактик с соседями — галактики с дисковыми изофотами, по-видимому, не испытывали сильного взаимодействия за последние несколько миллиардов лет (характерный возраст существования приливных структур, Mancillas et al. 2019), тогда как галактики с ящикоподобными и эллиптическими изофотами либо участвуют во взаимодействии, либо участвовали в малом или большом мерджинге в недавнем прошлом.

Кроме того, глубокая поверхностная фотометрия позволяет изучать изгибы звездного диска и спиральные рукава. В работе Mosenkov et al. (2020b) на основе глубокой фотометрии из различных источников показано, что галактики проявляют заметный изгиб (или наклонение) внешнего диска по отношению к плоскости галактики. В работе Mancillas et al. (2019) данные глубокой фотометрии для нескольких спиральных галактик (M 51, M 74, M 101, NGC 4214 и особенно NGC 6946) свидетельствуют о существовании слабого спирального узора далеко за пределами оптического радиуса.

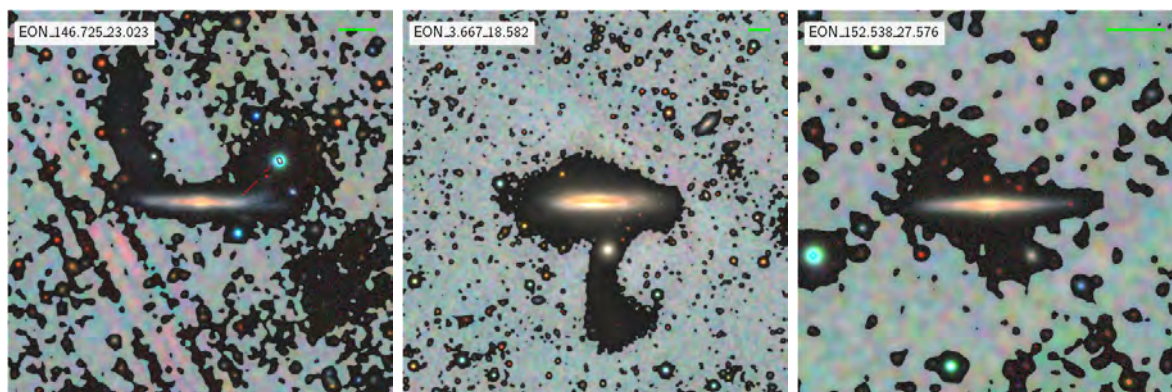
В данной работе я демонстрирую возможности одного из самых глубоких на сегодняшний день оптических обзоров неба, DESI Legacy Imaging Surveys (Dey et al., 2019), для изучения структурных особенностей спиральных галактик. На нескольких примерах показывается, что глубокая фотометрия может существенно помочь в уточнении эволюционной модели галактик.

## 1 Обзор DESI Legacy Imaging Surveys

DESI Legacy Imaging Surveys представляет собой коллаборацию трех проектов, а именно Dark Energy Camera Legacy Survey (Flaugher et al., 2015), Beijing-Arizona Sky Survey (Zou et al., 2017), и Mayall z-band Legacy Survey (DESI Collaboration et al., 2016), с общей областью покрытия Северного полушария в 14 тыс. кв. градусов в трех оптических полосах  $g$ ,  $r$  и  $z$ . Область покрытия неба находится в пределах  $-18^\circ < \delta < +84^\circ$ . Глубина суммарных экспозиций в базе данных проекта оценивается в  $28-29 \text{ mag arcsec}^{-2}$  со средним значением PSF FWHM 1-1.6" в зависимости от фильтра.

## 2 Глубокая фотометрия спиральных галактик

Для изучения структурных особенностей спиральных галактик используются каталог видимых с ребра галактик EGIS (Bizyaev et al., 2014) (в общей сложности 5747 галактик) и выборка, состоящая из 1123 спиральных галактик, автоматически отобранная из базы данных HyperLeda (Makarov et al., 2014) по следующим критериям:  $b > 30^\circ$  (чтобы минимизировать влияние пыли в плоскости Галактики), оптический диаметр  $1' < D_{25} < 10'$  (не рассматриваются галактики со слишком маленьким или большим угловым размером), угол наклона галактики  $i < 51^\circ$  и числовой морфологический тип Хаббла  $T > 0$  (рассматриваются только спиральные галактики). Для указанных выше галактик из базы данных DESI



**Рис. 1:** Примеры галактик с приливными структурами. Зеленый отрезок в правом верхнем углу показывает масштаб в  $30''$ .

Legacy Imaging Surveys мной были получены изображения в трех полосах  $g, r$  и  $z$ , после чего из этих полей были получены цветные изображения галактик с контрастированием пикселей с поверхностной яркостью ярче  $27.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Поскольку суммарные поля в базе данных уже были очищены от фона неба, эта процедура повторно не проводилась (см. описание подготовки данных в Dey et al. 2019).

Ниже кратко описываются примеры отобранных мной спиральных галактик с различными структурными особенностями низкой поверхностной яркости (слабее  $25 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ).

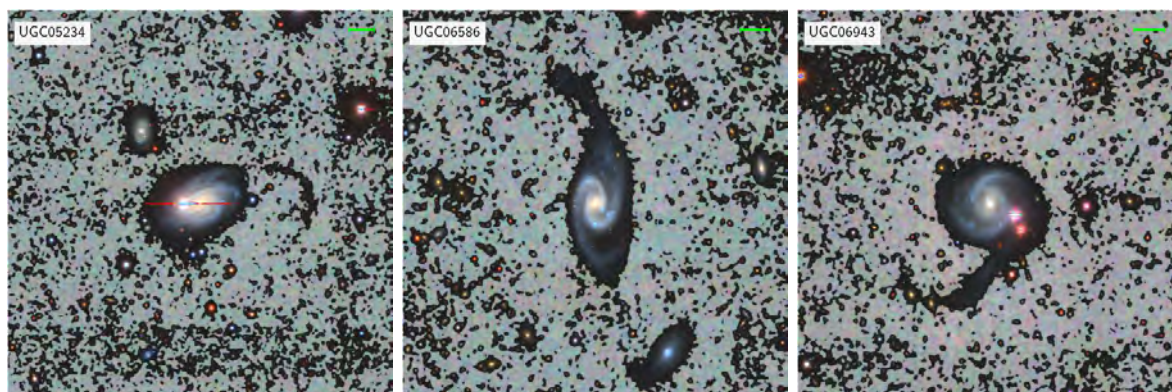
## 2.1 Приливные структуры

Я рассмотрел большую выборку галактик и ниже привожу характерные примеры различных структурных особенностей.

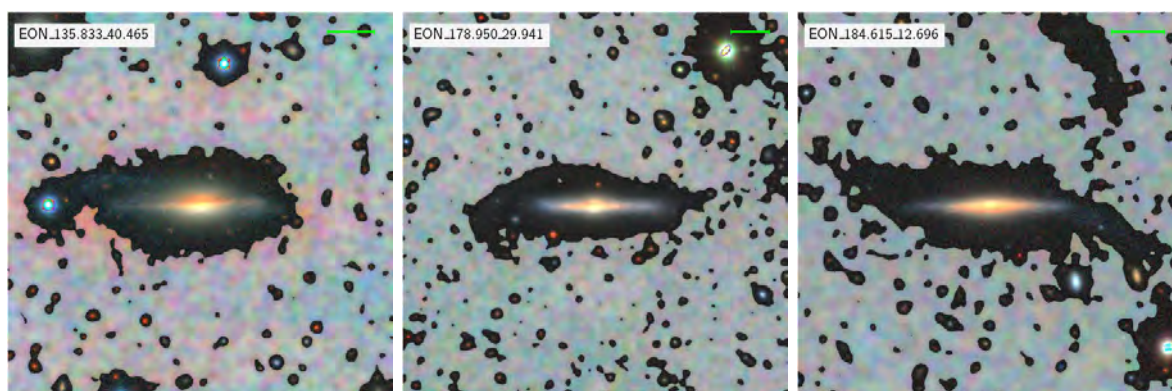
На Рис.1 приведены характерные примеры галактик с приливными структурами. К таким структурам относят приливные хвосты, звездные потоки, арки, петли, мосты и пр. На левом изображении в верхней левой части над плоскостью галактики хорошо виден звездный поток, по-видимому порожденный карликовой галактикой (не видна на изображении). На среднем изображении также виден звездный поток от карликовой галактики (под плоскостью большой галактики), порожденный приливным взаимодействием между галактиками. На правом изображении хорошо видна петля, наклоненная к плоскости галактики примерно под углом  $45^\circ$ . Интересно, что вид средней галактики отличается от крайних - ее внешние изофоты выглядят ящикоподобными и диск явно демонстрирует увеличение вертикальной шкалы к периферии (флэринг), в то время как две другие галактики являются достаточно тонкими, с еще “не разогретыми” звездными дисками.

## 2.2 Спиральная структура

На Рис.2 представлены примеры спиральных галактик со слабыми спиральными рукавами на периферии, которые явно являются продолжением внутренних рукавов. Стоит отметить, что кривизна (угол закрутки) у внешних спиральных рукавов меняется довольно сильно, что не соответствует общему поведению внутренних спиралей, если мысленно аппроксимировать их логарифмической спиралью (Savchenko et al., 2020). По-видимому, наблюдаемые внешние спирали были искажены приливным взаимодействием с соседними галактиками, что характерно для гранд-дизайн галактик типа M 51 (Dobbs et al., 2010).



**Рис. 2:** Примеры галактик с внешними слабыми спиралями. Зеленый отрезок в правом верхнем углу показывает масштаб в 30".



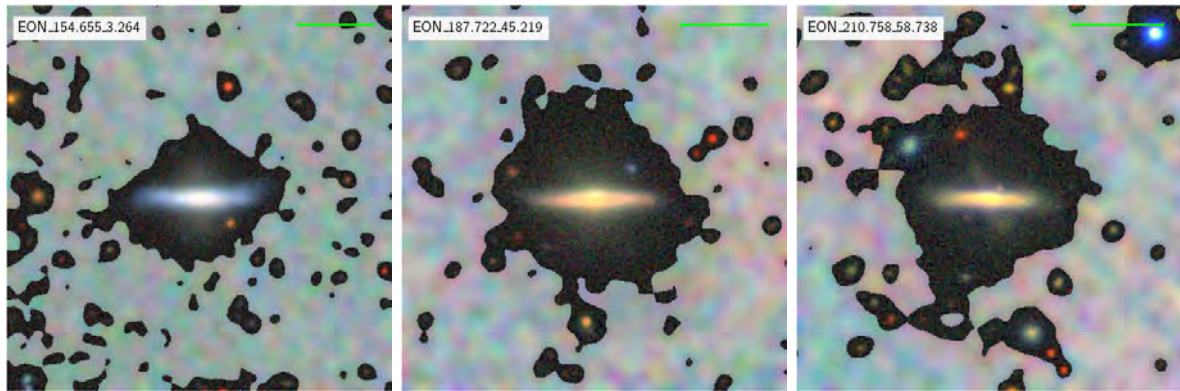
**Рис. 3:** Примеры галактик с сильными изгибами диска. Зеленый отрезок в правом верхнем углу показывает масштаб в 30".

### 2.3 Изгибы диска

На Рис. 3 приводятся видимые с ребра галактики с сильными изгибами звездного диска. В случаях левого и среднего изображений хорошо видно, что изгиб наблюдается именно у внешнего спирального рукава (имеет характерный голубоватый цвет и загибается над плоскостью диска). На правом изображении представлен сильный интегралоподобный изгиб самого диска, причем этот изгиб становится заметным лишь за пределами оптического радиуса и имеет низкую поверхностную яркость. Существует несколько механизмов, которые объясняют формирование изгибов звездного диска, одним из которых является приливное возмущение (см. Senczuk et al. 2020 и ссылки внутри). Характерно, что приведенные на Рис.3 галактики имеют близкие спутники.

### 2.4 Полярные структуры

У представленных на Рис.4 галактик хорошо выделяются ортогональные (или сильно наклоненные) к плоскости галактики структуры. Интересно, что в основном полярные кольца наблюдаются у галактик ранних типов, тогда как наличие пыли и/или цвет у приведенных галактик указывает на то, что представленные галактики являются скорее всего галактиками позднего типа. При этом нужно заметить, что помимо фотометрического, требуется еще и кинематическое подтверждение полярности этих структур. В недавней работе Mosenkov et al. (2022) рассмотрели глубокие изображения 13 кандидатов в галактики с полярными



**Рис. 4:** Примеры полярных структур, выявленных на глубоких изображениях. Зеленый отрезок в правом верхнем углу показывает масштаб в  $30''$ .

ми кольцами и выявили различного рода приливные структуры в половине из них. Хотя у приведенных здесь галактик явных приливных структур не наблюдается, столкновение двух дисковых галактик, расположенных под прямым углом к друг другу, все еще остается одним из основных механизмов формирования полярных структур.

### 3 Выводы

В статье рассмотрены примеры использования глубокой поверхностной фотометрии обзора DESI Legacy Imaging Surveys для изучения спиральных галактик. В качестве основных выводов отметим следующее:

- Глубокая фотометрия открывает возможности изучения слабых приливных структур вокруг галактик, порожденных малым или большим мерджингом. Рассмотренные нами примеры демонстрируют разнообразные низкоконтрастные структуры, которые не видны на обычных изображениях. Это позволяет сделать более надежные выводы о факторах, влияющих на эволюцию конкретных галактик благодаря изучению фотометрии низкой поверхностной яркости. Кроме того, наличие толстых изгибов дисков у рассмотренных галактик с ребра (которые также не заметны на обычных изображениях), по-видимому также указывает на приливное взаимодействие с соседними галактиками. Исследование большой выборки объектов позволит изучить статистику слабых приливных структур у спиральных галактик и установить связь морфологического типа и структурных параметров галактик с присутствием слабых приливных структур вокруг них.
- Спиральный узор является отличительной чертой большинства дисковых галактик в Ближней вселенной. Формирование спиральной структуры в галактиках до сих пор полностью не изучено и существуют различные механизмы его генерации (см. недавний обзор Sellwood, Masters 2022), которые, по-видимому доминируют в различных типах спиралей. Рассмотренные нами примеры указывает на важность глубокой фотометрии для изучения свойств спирального узора — как меняются его характеристики к периферии за пределами оптического радиуса и, наконец, где спиральный узор заканчивается по отношению к подложке из звездного диска. Будущие результаты

выполняемого сейчас систематического исследования спиральной структуры у представительной выборки спиральных галактик с различным типом узора (Mosenkov et al. in prep.) позволят не только уточнить модели генерации узора в зависимости от характеристик галактики (в том числе ее пространственного окружения, Savchenko et al. 2020), но и определить наблюдательный предел звездообразования в спиральных.

- Наконец, предварительные исследования на основе глубокой фотометрии галактик (см. Shakespear, Mosenkov 2022 и примеры, приводящиеся в данной статье) указывают на то, что доля галактик с полярными структурами может быть в несколько раз больше, чем указано в литературе (Whitmore et al., 1990; Moiseev et al., 2011). Это, в свою очередь, позволит найти ограничения на форму темного гала в галактиках (Zasov et al., 2017).

Ввод в строй новых телескопов, прежде всего обсерватории им В. Рубин (Ivezic et al., 2019), позволит существенно увеличить вклад глубокой фотометрии в изучение свойств и эволюции галактик.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 22–22–00483).

## Список литературы

- Abraham Roberto G., van Dokkum Pieter G.* Ultra-Low Surface Brightness Imaging with the Dragonfly Telephoto Array // *PASP.* I 2014. 126, 935. 55.
- Bizyaev D. V., Kautsch S. J., Mosenkov A. V., Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Ya., Yablokova N. V., Hillyer R. W.* The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks // *ApJ.* V 2014. 787, 1. 24.
- DESI Collaboration , Aghamousa Amir, Aguilar Jessica, Ahlen Steve, Alam Shadab, Allen Lori E., Allende Prieto Carlos, Annis James, Bailey Stephen, Balland Christophe, Ballester Otger, Baltay Charles, Beaufore Lucas, Bebek Chris, Beers Timothy C., Bell Eric F., Bernal José Luis, Besuner Robert, Beutler Florian, Blake Chris, Bleuler Hannes, Blomqvist Michael, Blum Robert, Bolton Adam S., Briceno Cesar, Brooks David, Brownstein Joel R., Buckley-Geer Elizabeth, Burden Angela, Burtin Etienne, Busca Nicolas G., Cahn Robert N., Cai Yan-Chuan, Cardiel-Sas Laia, Carlberg Raymond G., Carton Pierre-Henri, Casas Ricard, Castander Francisco J., Cervantes-Cota Jorge L., Claybaugh Todd M., Close Madeline, Coker Carl T., Cole Shaun, Comparat Johan, Cooper Andrew P., Cousinou M. C., Crocce Martin, Cuby Jean-Gabriel, Cunningham Daniel P., Davis Tamara M., Dawson Kyle S., de la Macorra Axel, De Vicente Juan, Delubac Timothée, Derwent Mark, Dey Arjun, Dhungana Govinda, Ding Zhejie, Doel Peter, Duan Yutong T., Ealet Anne, Edelstein Jerry, Eftekharzadeh Sarah, Eisenstein Daniel J., Elliott Ann, Escoffier Stéphanie, Evatt Matthew, Fagrelius Parker, Fan Xiaohui, Fanning Kevin, Farahi Arya, Farihi Jay, Favole Ginevra, Feng Yu, Fernandez Enrique, Findlay Joseph R., Finkbeiner Douglas P., Fitzpatrick Michael J., Flaughner Brenna, Flender Samuel, Font-Ribera Andreu, Forero-Romero Jaime E., Fosalba*

*Pablo, Frenk Carlos S., Fumagalli Michele, Gaensicke Boris T., Gallo Giuseppe, Garcia-Bellido Juan, Gaztanaga Enrique, Pietro Gentile Fusillo Nicola, Gerard Terry, Gershkovich Irena, Giannantonio Tommaso, Gillet Denis, Gonzalez-de-Rivera Guillermo, Gonzalez-Perez Violeta, Gott Shelby, Graur Or, Gutierrez Gaston, Guy Julien, Habib Salman, Heetderks Henry, Heetderks Ian, Heitmann Katrin, Hellwing Wojciech A., Herrera David A., Ho Shirley, Holland Stephen, Honscheid Klaus, Huff Eric, Hutchinson Timothy A., Huterer Dragan, Hwang Ho Seong, Illa Laguna Joseph Maria, Ishikawa Yuzo, Jacobs Dianna, Jeffrey Niall, Jelinsky Patrick, Jennings Elise, Jiang Linhua, Jimenez Jorge, Johnson Jennifer, Joyce Richard, Jullo Eric, Juneau Stéphanie, Kama Sami, Karcher Armin, Karkar Sonia, Kehoe Robert, Kennamer Noble, Kent Stephen, Kilbinger Martin, Kim Alex G., Kirkby David, Kisner Theodore, Kitaniadis Ellie, Kneib Jean-Paul, Kuposov Sergey, Kovacs Eve, Koyama Kazuya, Kremin Anthony, Kron Richard, Kronig Luzius, Kueter-Young Andrea, Lacey Cedric G., Lafever Robin, Lahav Ofer, Lambert Andrew, Lampton Michael, Landriau Martin, Lang Dustin, Lauer Tod R., Le Goff Jean-Marc, Le Guillou Laurent, Le Van Suu Auguste, Lee Jae Hyeon, Lee Su-Jeong, Leitner Daniela, Lesser Michael, Levi Michael E., L'Huillier Benjamin, Li Baojiu, Liang Ming, Lin Huan, Linder Eric, Loebman Sarah R., Lukić Zarija, Ma Jun, MacCrann Niall, Magneville Christophe, Makarem Laleh, Manera Marc, Manser Christopher J., Marshall Robert, Martini Paul, Massey Richard, Matheson Thomas, McCauley Jeremy, McDonald Patrick, McGreer Ian D., Meisner Aaron, Metcalfe Nigel, Miller Timothy N., Miquel Ramon, Moustakas John, Myers Adam, Naik Milind, Newman Jeffrey A., Nichol Robert C., Nicola Andrina, Nicolati da Costa Luiz, Nie Jundan, Niz Gustavo, Norberg Peder, Nord Brian, Norman Dara, Nugent Peter, O'Brien Thomas, Oh Minji, Olsen Knut A. G., Padilla Cristobal, Padmanabhan Hamsa, Padmanabhan Nikhil, Palanque-Delabrouille Nathalie, Palmese Antonella, Pappalardo Daniel, Pâris Isabelle, Park Changbom, Patej Anna, Peacock John A., Peiris Hiranya V., Peng Xiyan, Percival Will J., Perruchot Sandrine, Pieri Matthew M., Pogge Richard, Pollack Jennifer E., Poppett Claire, Prada Francisco, Prakash Abhishek, Probst Ronald G., Rabinowitz David, Raichoor Anand, Ree Chang Hee, Refregier Alexandre, Regal Xavier, Reid Beth, Reil Kevin, Rezaie Mehdi, Rockosi Constance M., Roe Natalie, Ronayette Samuel, Roodman Aaron, Ross Ashley J., Ross Nicholas P., Rossi Graziano, Rozo Eduardo, Ruhlmann-Kleider Vanina, Rykoff Eli S., Sabiu Cristiano, Samushia Lado, Sanchez Eusebio, Sanchez Javier, Schlegel David J., Schneider Michael, Schubnell Michael, Secroun Aurélie, Seljak Uros, Seo Hee-Jong, Serrano Santiago, Shafieloo Arman, Shan Huanyuan, Sharples Ray, Sholl Michael J., Shourt William V., Silber Joseph H., Silva David R., Sirk Martin M., Slosar Anze, Smith Alex, Smoot George F., Som Debopam, Song Yong-Seon, Sprayberry David, Staten Ryan, Stefanik Andy, Tarle Gregory, Sien Tie Suk, Tinker Jeremy L., Tojeiro Rita, Valdes Francisco, Valenzuela Octavio, Valluri Monica, Vargas-Magana Mariana, Verde Licia, Walker Alistair R., Wang Jiali, Wang Yuting, Weaver Benjamin A., Weaverdyck Curtis, Wechsler Risa H., Weinberg David H., White Martin, Yang Qian, Yèche Christophe, Zhang Tianmeng, Zhao Gong-Bo, Zheng Yi, Zhou Xu, Zhou Zhimin, Zhu Yaling, Zou Hu, Zu Ying. The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design // arXiv e-prints. X 2016. arXiv:1611.00036.*

*Dey Arjun, Schlegel David J., Lang Dustin, Blum Robert, Burleigh Kaylan, Fan Xiaohui, Findlay Joseph R., Finkbeiner Doug, Herrera David, Juneau Stéphanie, Landriau Martin, Levi Michael, McGreer Ian, Meisner Aaron, Myers Adam D., Moustakas John, Nugent Peter,*

*Patej Anna, Schlafly Edward F., Walker Alistair R., Valdes Francisco, Weaver Benjamin A., Yèche Christophe, Zou Hu, Zhou Xu, Abareshi Behzad, Abbott T. M. C., Abolfathi Bela, Aguilera C., Alam Shadab, Allen Lori, Alvarez A., Annis James, Ansarinejad Behzad, Aubert Marie, Beechert Jacqueline, Bell Eric F., BenZvi Segev Y., Beutler Florian, Bielby Richard M., Bolton Adam S., Briceño César, Buckley-Geer Elizabeth J., Butler Karen, Calamida Annalisa, Carlberg Raymond G., Carter Paul, Casas Ricard, Castander Francisco J., Choi Yumi, Comparat Johan, Cukanovaite Elena, Delubac Timothée, DeVries Kaitlin, Dey Sharmila, Dhungana Govinda, Dickinson Mark, Ding Zhejie, Donaldson John B., Duan Yutong, Duckworth Christopher J., Eftekharzadeh Sarah, Eisenstein Daniel J., Etourneau Thomas, Fagrellius Parker A., Farihi Jay, Fitzpatrick Mike, Font-Ribera Andreu, Fulmer Leah, Gänsicke Boris T., Gaztanaga Enrique, George Koshy, Gerdes David W., Gontcho Satya Gontcho A., Gorgoni Claudio, Green Gregory, Guy Julien, Harmer Diane, Hernandez M., Honscheid Klaus, Huang Lijuan Wendy, James David J., Jannuzi Buell T., Jiang Linhua, Joyce Richard, Karcher Armin, Karkar Sonia, Kehoe Robert, Kneib Jean-Paul, Kueter-Young Andrea, Lan Ting-Wen, Lauer Tod R., Le Guillou Laurent, Le Van Suu Auguste, Lee Jae Hyeon, Lesser Michael, Perreault Levasseur Laurence, Li Ting S., Mann Justin L., Marshall Robert, Martínez-Vázquez C. E., Martini Paul, du Mas des Bourboux Hélión, McManus Sean, Meier Tobias Gabriel, Ménard Brice, Metcalfe Nigel, Muñoz-Gutiérrez Andrea, Najita Joan, Napier Kevin, Narayan Gautham, Newman Jeffrey A., Nie Jundan, Nord Brian, Norman Dara J., Olsen Knut A. G., Paat Anthony, Palanque-Delabrouille Nathalie, Peng Xiyan, Poppett Claire L., Poremba Megan R., Prakash Abhishek, Rabinowitz David, Raichoor Anand, Rezaie Mehdi, Robertson A. N., Roe Natalie A., Ross Ashley J., Ross Nicholas P., Rudnick Gregory, Safonova Sasha, Saha Abhijit, Sánchez F. Javier, Savary Elodie, Schweiker Heidi, Scott Adam, Seo Hee-Jong, Shan Huanyuan, Silva David R., Slepian Zachary, Soto Christian, Sprayberry David, Staten Ryan, Stillman Coley M., Stupak Robert J., Summers David L., Sien Tie Suk, Tirado H., Vargas-Magaña Mariana, Vivas A. Katherina, Wechsler Risa H., Williams Doug, Yang Jinyi, Yang Qian, Yapici Tolga, Zaritsky Dennis, Zenteno A., Zhang Kai, Zhang Tianmeng, Zhou Rongpu, Zhou Zhimin.* Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys // *AJ*. V 2019. 157, 5. 168.

*Dobbs C. L., Theis C., Pringle J. E., Bate M. R.* Simulations of the grand design galaxy M51: a case study for analysing tidally induced spiral structure // *MNRAS*. IV 2010. 403, 2. 625–645.

*Flaugher B., Diehl H. T., Honscheid K., Abbott T. M. C., Alvarez O., Angstadt R., Annis J. T., Antonik M., Ballester O., Beaufore L., Bernstein G. M., Bernstein R. A., Bigelow B., Bonati M., Boprie D., Brooks D., Buckley-Geer E. J., Campa J., Cardiel-Sas L., Castander F. J., Castilla J., Cease H., Cela-Ruiz J. M., Chappa S., Chi E., Cooper C., da Costa L. N., Dede E., Derylo G., DePoy D. L., de Vicente J., Doel P., Drlica-Wagner A., Eiting J., Elliott A. E., Emes J., Estrada J., Fausti Neto A., Finley D. A., Flores R., Frieman J., Gerdes D., Gladders M. D., Gregory B., Gutierrez G. R., Hao J., Holland S. E., Holm S., Huffman D., Jackson C., James D. J., Jonas M., Karcher A., Karliner I., Kent S., Kessler R., Kozlovsky M., Kron R. G., Kubik D., Kuehn K., Kuhlmann S., Kuk K., Lahav O., Lathrop A., Lee J., Levi M. E., Lewis P., Li T. S., Mandrichenko I., Marshall J. L., Martinez G., Merritt K. W., Miquel R., Muñoz F., Neilsen E. H., Nichol R. C., Nord B., Ogando R., Olsen J., Palao N., Patton K., Peoples J., Plazas A. A., Rauch J., Reil K., Rheault J. P., Roe N. A., Rogers H., Roodman A., Sanchez E., Scarpine V., Schindler R. H., Schmidt R., Schmitt R., Schubnell*



*M., Schultz K., Schurter P., Scott L., Serrano S., Shaw T. M., Smith R. C., Soares-Santos M., Stefanik A., Stuermer W., Suchyta E., Sypniewski A., Tarle G., Thaler J., Tighe R., Tran C., Tucker D., Walker A. R., Wang G., Watson M., Weaverdyck C., Wester W., Woods R., Yanny B., DES Collaboration . The Dark Energy Camera // AJ. XI 2015. 150, 5. 150.*

*Ivezić Željko, Kahn Steven M., Tyson J. Anthony, Abel Bob, Acosta Emily, Allsman Robyn, Alonso David, AlSayyad Yusra, Anderson Scott F., Andrew John, Angel James Roger P., Angeli George Z., Ansari Reza, Antilogus Pierre, Araujo Constanza, Armstrong Robert, Arndt Kirk T., Astier Pierre, Aubourg Éric, Auza Nicole, Axelrod Tim S., Bard Deborah J., Barr Jeff D., Barrau Aurelian, Bartlett James G., Bauer Amanda E., Bauman Brian J., Baumont Sylvain, Bechtol Ellen, Bechtol Keith, Becker Andrew C., Becla Jacek, Beldica Cristina, Bellavia Steve, Bianco Federica B., Biswas Rahul, Blanc Guillaume, Blazek Jonathan, Blandford Roger D., Bloom Josh S., Bogart Joanne, Bond Tim W., Booth Michael T., Borgland Anders W., Borne Kirk, Bosch James F., Boutigny Dominique, Brackett Craig A., Bradshaw Andrew, Brandt William Nielsen, Brown Michael E., Bullock James S., Burchat Patricia, Burke David L., Cagnoli Gianpietro, Calabrese Daniel, Callahan Shawn, Callen Alice L., Carlin Jeffrey L., Carlson Erin L., Chandrasekharan Srinivasan, Charles-Emerson Glenaver, Chesley Steve, Cheu Elliott C., Chiang Hsin-Fang, Chiang James, Chirino Carol, Chow Derek, Ciardi David R., Claver Charles F., Cohen-Tanugi Johann, Cockrum Joseph J., Coles Rebecca, Connolly Andrew J., Cook Kem H., Cooray Asantha, Covey Kevin R., Cribbs Chris, Cui Wei, Cutri Roc, Daly Philip N., Daniel Scott F., Daruich Felipe, Daubard Guillaume, Daues Greg, Dawson William, Delgado Francisco, Dellapenna Alfred, de Peyster Robert, de Val-Borro Miguel, Digel Seth W., Doherty Peter, Dubois Richard, Dubois-Felsmann Gregory P., Durech Josef, Economou Frossie, Eifler Tim, Eracleous Michael, Emmons Benjamin L., Fausti Neto Angelo, Ferguson Henry, Figueroa Enrique, Fisher-Levine Merlin, Focke Warren, Foss Michael D., Frank James, Freemon Michael D., Gangler Emmanuel, Gawiser Eric, Geary John C., Gee Perry, Geha Marla, Gessner Charles J. B., Gibson Robert R., Gilmore D. Kirk, Glanzman Thomas, Glick William, Goldina Tatiana, Goldstein Daniel A., Goodenow Iain, Graham Melissa L., Gressler William J., Gris Philippe, Guy Leanne P., Guyonnet Augustin, Haller Gunther, Harris Ron, Hascall Patrick A., Haupt Justine, Hernandez Fabio, Herrmann Sven, Hileman Edward, Hoblitt Joshua, Hodgson John A., Hogan Craig, Howard James D., Huang Dajun, Huffer Michael E., Ingraham Patrick, Innes Walter R., Jacoby Suzanne H., Jain Bhuvnesh, Jammes Fabrice, Jee M. James, Jenness Tim, Jernigan Garrett, Jevremović Darko, Johns Kenneth, Johnson Anthony S., Johnson Margaret W. G., Jones R. Lynne, Juramy-Gilles Claire, Jurić Mario, Kalirai Jason S., Kallivayalil Nitya J., Kalmbach Bryce, Kantor Jeffrey P., Karst Pierre, Kasliwal Mansi M., Kelly Heather, Kessler Richard, Kinnison Veronica, Kirkby David, Knox Lloyd, Kotov Ivan V., Krabbendam Victor L., Krughoff K. Simon, Kubánek Petr, Kuczewski John, Kulkarni Shri, Ku John, Kurita Nadine R., Lage Craig S., Lambert Ron, Lange Travis, Langton J. Brian, Le Guillou Laurent, Levine Deborah, Liang Ming, Lim Kian-Tat, Lintott Chris J., Long Kevin E., Lopez Margaux, Lotz Paul J., Lupton Robert H., Lust Nate B., MacArthur Lauren A., Mahabal Ashish, Mandelbaum Rachel, Markiewicz Thomas W., Marsh Darren S., Marshall Philip J., Marshall Stuart, May Morgan, McKercher Robert, McQueen Michelle, Meyers Joshua, Migliore Myriam, Miller Michelle, Mills David J., Miraval Connor, Moeyens Joachim, Moolekamp Fred E., Monet David G., Moniez Marc, Monkewitz Serge,*

- Montgomery Christopher, Morrison Christopher B., Mueller Fritz, Muller Gary P., Muñoz Arancibia Freddy, Neill Douglas R., Newbry Scott P., Nief Jean-Yves, Nomerotski Andrei, Nordby Martin, O'Connor Paul, Oliver John, Olivier Scot S., Olsen Knut, O'Mullane William, Ortiz Sandra, Osier Shawn, Owen Russell E., Pain Reynald, Palecek Paul E., Parejko John K., Parsons James B., Pease Nathan M., Peterson J. Matt, Peterson John R., Petravick Donald L., Libby Petrick M. E., Petry Cathy E., Pierfederici Francesco, Pietrowicz Stephen, Pike Rob, Pinto Philip A., Plante Raymond, Plate Stephen, Plutchak Joel P., Price Paul A., Prouza Michael, Radeka Veljko, Rajagopal Jayadev, Rasmussen Andrew P., Regnault Nicolas, Reil Kevin A., Reiss David J., Reuter Michael A., Ridgway Stephen T., Riot Vincent J., Ritz Steve, Robinson Sean, Roby William, Roodman Aaron, Rosing Wayne, Roucelle Cecille, Rumore Matthew R., Russo Stefano, Saha Abhijit, Sassolas Benoit, Schalk Terry L., Schellart Pim, Schindler Rafe H., Schmidt Samuel, Schneider Donald P., Schneider Michael D., Schoening William, Schumacher German, Schwamb Megan E., Sebag Jacques, Selvy Brian, Sembroski Glenn H., Seppala Lynn G., Serio Andrew, Serrano Eduardo, Shaw Richard A., Shipsey Ian, Sick Jonathan, Silvestri Nicole, Slater Colin T., Smith J. Allyn, Smith R. Chris, Sobhani Shahram, Soldahl Christine, Storrie-Lombardi Lisa, Stover Edward, Strauss Michael A., Street Rachel A., Stubbs Christopher W., Sullivan Ian S., Sweeney Donald, Swinbank John D., Szalay Alexander, Takacs Peter, Tether Stephen A., Thaler Jon J., Thayer John Gregg, Thomas Sandrine, Thornton Adam J., Thukral Vaikunth, Tice Jeffrey, Trilling David E., Turri Max, Van Berg Richard, Vanden Berk Daniel, Vetter Kurt, Virieux Françoise, Vucina Tomislav, Wahl William, Walkowicz Lucianne, Walsh Brian, Walter Christopher W., Wang Daniel L., Wang Shin-Yawn, Warner Michael, Wiecha Oliver, Willman Beth, Winters Scott E., Wittman David, Wolff Sidney C., Wood-Vasey W. Michael, Wu Xiuqin, Xin Bo, Yoachim Peter, Zhan Hu. LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products // *ApJ*. III 2019. 873, 2. 111.
- Makarov Dmitry, Prugniel Philippe, Terekhova Nataliya, Courtois Hélène, Vauglin Isabelle. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances // *A&A*. X 2014. 570. A13.
- Mancillas Brisa, Duc Pierre-Alain, Combes Françoise, Bournaud Frédéric, Emsellem Eric, Martig Marie, Michel-Dansac Leo. Probing the merger history of red early-type galaxies with their faint stellar substructures // *A&A*. XII 2019. 632. A122.
- Martínez-Delgado David, Gabany R. Jay, Crawford Ken, Zibetti Stefano, Majewski Steven R., Rix Hans-Walter, Fliri Jürgen, Carballo-Bello Julio A., Bardalez-Gagliuffi Daniella C., Peñarrubia Jorge, Chonis Taylor S., Madore Barry, Trujillo Ignacio, Schirmer Mischa, McDavid David A. Stellar Tidal Streams in Spiral Galaxies of the Local Volume: A Pilot Survey with Modest Aperture Telescopes // *AJ*. X 2010. 140, 4. 962–967.
- Moiseev Alexei V., Smirnova Ksenia I., Smirnova Aleksandrina A., Reshetnikov Vladimir P. A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // *MNRAS*. XI 2011. 418, 1. 244–257.
- Mosenkov Aleksandr, Rich R. Michael, Koch Andreas, Brosch Noah, Thilker David, Román Javier, Müller Oliver, Smirnov Anton, Usachev Pavel. The haloes and environments of nearby galaxies (HERON) - II. The outer structure of edge-on galaxies // *MNRAS*. V 2020a. 494, 2. 1751–1770.

- Mosenkov Aleksandr V., Reshetnikov Vladimir P., Skryabina Maria N., Shakespear Zacory.* Unveiling the Nature of Polar-ring Galaxies from Deep Imaging // *Research in Astronomy and Astrophysics*. XI 2022. 22, 11. 115003.
- Mosenkov Aleksandr V., Smirnov Anton A., Sil'chenko Olga K., Rich R. Michael, Reshetnikov Vladimir P., Kormendy John.* Tilted outer and inner structures in edge-on galaxies? // *MNRAS*. IX 2020b. 497, 2. 2039–2056.
- Poliakov Denis, Mosenkov Aleksandr V., Brosch Noah, Koriski Shuki, Rich R. Michael.* Quantified diffuse light in compact groups of galaxies // *MNRAS*. VI 2021. 503, 4. 6059–6077.
- Rich R. Michael, Mosenkov Aleksandr, Lee-Saunders Henry, Koch Andreas, Kormendy John, Kenefick Julia, Brosch Noah, Sales Laura, Bullock James, Burkert Andreas, Collins Michelle, Cooper Michael, Fusco Michael, Reitzel David, Thilker David, Milewski Dave G., Elias Lydia, Saade M. L., De Groot Laura.* The haloes and environments of nearby galaxies (HERON) - I. Imaging, sample characteristics, and envelope diameters // *MNRAS*. XII 2019. 490, 2. 1539–1569.
- Savchenko Sergey, Marchuk Alexander, Mosenkov Aleksandr, Grishunin Konstantin.* A multiwavelength study of spiral structure in galaxies. I. General characteristics in the optical // *MNRAS*. III 2020. 493, 1. 390–409.
- Sellwood J. A., Masters Karen L.* Spirals in Galaxies // *ARA&A*. VIII 2022. 60.
- Semczuk Marcin, Lokas Ewa L., D'Onghia Elena, Athanassoula E., Debattista Victor P., Hernquist Lars.* Tidally induced warps of spiral galaxies in IllustrisTNG // *MNRAS*. XI 2020. 498, 3. 3535–3548.
- Shakespear Zacory, Mosenkov Aleksandr.* Galaxies with polar structures in the SDSS Stripe 82 // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 54. VI 2022. 148.03. (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
- Trujillo Ignacio, Fliri Jüergen.* Beyond 31 mag arcsec<sup>-2</sup>: The Frontier of Low Surface Brightness Imaging with the Largest Optical Telescopes // *ApJ*. VI 2016. 823, 2. 123.
- Whitmore Bradley C., Lucas Ray A., McElroy Douglas B., Steiman-Cameron Thomas Y., Sackett Penny D., Olling Rob P.* New Observations and a Photographic Atlas of Polar-Ring Galaxies // *AJ*. XI 1990. 100. 1489.
- York Donald G., Adelman J., Anderson Jr. John E., Anderson Scott F., Annis James, Bahcall Neta A., Bakken J. A., Barkhouser Robert, Bastian Steven, Berman Eileen, Boroski William N., Bracker Steve, Briegel Charlie, Briggs John W., Brinkmann J., Brunner Robert, Burles Scott, Carey Larry, Carr Michael A., Castander Francisco J., Chen Bing, Colestock Patrick L., Connolly A. J., Crocker J. H., Csabai István, Czarapata Paul C., Davis John Eric, Doi Mamoru, Dombeck Tom, Eisenstein Daniel, Ellman Nancy, Elms Brian R., Evans Michael L., Fan Xiaohui, Federwitz Glenn R., Fiscelli Larry, Friedman Scott, Frieman Joshua A., Fukugita Masataka, Gillespie Bruce, Gunn James E., Gurbani Vijay K., de Haas Ernst, Haldeman Merle, Harris Frederick H., Hayes J., Heckman Timothy M., Hennessy G. S.,*

*Hindsley Robert B., Holm Scott, Holmgren Donald J., Huang Chi-hao, Hull Charles, Husby Don, Ichikawa Shin-Ichi, Ichikawa Takashi, Ivezić Željko, Kent Stephen, Kim Rita S. J., Kinney E., Klaene Mark, Kleinman A. N., Kleinman S., Knapp G. R., Korienek John, Kron Richard G., Kunszt Peter Z., Lamb D. Q., Lee B., Leger R. French, Limmongkol Siriluk, Lindenmeyer Carl, Long Daniel C., Loomis Craig, Loveday Jon, Lucinio Rich, Lupton Robert H., MacKinnon Bryan, Mannery Edward J., Mantsch P. M., Margon Bruce, McGehee Peregrine, McKay Timothy A., Meiksin Avery, Merelli Aronne, Monet David G., Munn Jeffrey A., Narayanan Vijay K., Nash Thomas, Neilsen Eric, Neswold Rich, Newberg Heidi Jo, Nichol R. C., Nicinski Tom, Nonino Mario, Okada Norio, Okamura Sadanori, Ostriker Jeremiah P., Owen Russell, Pauls A. George, Peoples John, Peterson R. L., Petravick Donald, Pier Jeffrey R., Pope Adrian, Pordes Ruth, Prosapio Angela, Rechenmacher Ron, Quinn Thomas R., Richards Gordon T., Richmond Michael W., Rivetta Claudio H., Rockosi Constance M., Ruthmansdorfer Kurt, Sandford Dale, Schlegel David J., Schneider Donald P., Sekiguchi Maki, Sergey Gary, Shimasaku Kazuhiro, Siegmund Walter A., Smee Stephen, Smith J. Allyn, Snedden S., Stone R., Stoughton Chris, Strauss Michael A., Stubbs Christopher, SubbaRao Mark, Szalay Alexander S., Szapudi Istvan, Szokoly Gyula P., Thakar Anirudda R., Tremonti Christy, Tucker Douglas L., Uomoto Alan, Vanden Berk Dan, Vogeley Michael S., Waddell Patrick, Wang Shu-i., Watanabe Masaru, Weinberg David H., Yanny Brian, Yasuda Naoki, SDSS Collaboration . The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary // AJ. IX 2000. 120, 3. 1579–1587.*

*Zasov A. V., Saburova A. S., Khoperskov A. V., Khoperskov S. A. Dark matter in galaxies // Physics Uspekhi. IV 2017. 60, 1. 3.*

*Zou Hu, Zhou Xu, Fan Xiaohui, Zhang Tianmeng, Zhou Zhimin, Nie Jundan, Peng Xiyan, McGreer Ian, Jiang Linhua, Dey Arjun, Fan Dongwei, He Boliang, Jiang Zhaoji, Lang Dustin, Lesser Michael, Ma Jun, Mao Shude, Schlegel David, Wang Jiali. Project Overview of the Beijing-Arizona Sky Survey // PASP. VI 2017. 129, 976. 064101.*

# Deep photometry of spiral galaxies

A.V. Mosenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS

<sup>2</sup>Brigham Young University

\**e-mail:* [mosenkovAV@gmail.com](mailto:mosenkovAV@gmail.com)

## Abstract

In this study, we consider the potential of using deep photometry for exploring the structure of spiral galaxies. As a source of deep photometry, the modern DESI Legacy Imaging Surveys is chosen, with a wide coverage of the Northern hemisphere. Several examples of spiral galaxies with various structural features of low surface brightnesses are presented which are not seen in images with an ordinary depth. In particular, we consider faint spirals beyond the optical radius, tidal structures (disk warps, stellar streams, and loops), as well as faint polar structures, which are arranged perpendicularly to the disk plane. Therefore, the use of deep photometry reveals new opportunities for studying the structural properties of galaxies and allows one to make more reliable conclusions about their evolution.