

## МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ВЫСОКИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ШИРОТАХ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

© 2022 г. О. Ю. Малков<sup>1, \*</sup>, А. С. Авдеева<sup>1, 2</sup>, Д. А. Ковалева<sup>1</sup>, А. Д. Некрасов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> НИУ ВШЭ, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

\*E-mail: malkov@inasan.ru

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 17.03.2022 г.

Принята к публикации 31.03.2022 г.

По данным спектроскопического обзора RAVE DR6 и астрометрического обзора Gaia DR2/EDR3 были получены зависимости межзвездного поглощения от расстояния ( $A_V(d)$ ) для ряда высокоширотных площадок южного неба. Эти зависимости были аппроксимированы классической барометрической функцией (законом косеканса). Параметры функции были затем аппроксимированы сферическими функциями. Результирующая аналитическая трехмерная модель межзвездного поглощения может использоваться для оценки значений  $A_V$  для звезд Галактики с известными параллаксами, а также значений полного (галактического) поглощения  $A_{Gal}$  в данном направлении.

*Ключевые слова:* межзвездное поглощение.

DOI: 10.31857/S0004629922070040

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Решение многих проблем в астрофизике и звездной астрономии связано с изучением межзвездного поглощения. В частности, представляет большой интерес распределение межзвездного вещества в окрестностях Солнца. Паренаго [1] предложил формулу, связывающую визуальное поглощение  $A_V$  с расстоянием  $d$  и галактической широтой  $b$ , основанную на барометрической (экспоненциальной) функции. Классическая модель однородного, полубесконечного поглощающего слоя с плотностью, экспоненциально распределенной по высоте, дает так называемый закон косеканса:

$$A_V(b, d) = \frac{a_0 \beta}{\sin |b|} \left( 1 - \exp \left( -\frac{d \sin |b|}{\beta} \right) \right). \quad (1)$$

Здесь параметр  $\beta$  — шкала высот, а  $a_0$  — величина поглощения на единицу расстояния в галактической плоскости.

Прямым методом определения межзвездного поглощения являются измерение показателей цвета и определение избытков цвета (т.е. величины покраснения света). Распределение избытков цвета и межзвездного вещества в окрестностях Солнца изучалось многими авторами. Согласно

некоторым моделям, параметры  $a_0$  и  $\beta$  имеют фиксированные значения, в то время как другие авторы предлагают более сложные схемы, в которых  $a_0$  и  $\beta$  зависят от направления на небе. Кроме того, был проведен ряд исследований, в которых авторы, вместо закона косеканса, использовали для описания зависимости поглощения от расстояния кусочно-линейные или квадратичные функции, различные для разных направлений на небе. В частности, различные значения параметров  $a_0$  и  $\beta$  были предложены в исследованиях [2–6]. Эти модели экстинкции были построены для всего неба и использовали закон косеканса. Значение  $0.15^m$  было предложено для  $a_0$  в [2], в то время как Sandage [3] предложил  $a_0 = 0.165^m (1.192 - (b))$  для  $|b| < 50^\circ$  и нулевое поглощение для более высоких широт. Для параметра  $\beta$  в [4] было предложено значение 100 пс. Pandey and Mahra [7] в своем комплексном исследовании рассеянных скоплений получили для  $V$ -диапазона средние значения  $a_0 = 1.35 \pm 0.12^m/\text{кпк}$  и  $\beta = 0.16 \pm 0.02$  кпк. Последнее значение можно сравнить со значением шкалы высот межзвездного вещества  $125_{-7}^{+17}$  пк, найденным в [8]. В [5] и, позднее, в [6] были пред-

приняты попытки для определения параметров  $a_0$  и  $\beta$  для различных регионов, а не для всего неба в целом. Шаров [6] предложил карту межзвездной экстинкции, в которой значения обоих коэффициентов были приведены для каждой из 118 областей. Аналогичные исследования проводились и позже [7, 9, 10]. Отличие их от предыдущих работ заключалось в том, что здесь авторы отказались от закона косеканса и предложили зависимость от расстояния в виде кусочно-линейных функций. Кроме того, эти карты охватывают только низкоширотные области. Модель, построенная Арену и др. [11], использует квадратичную функцию расстояния. Модель экстинкции [12] учитывает пояс Гулда – дополнительный слой поглощения. Автор предполагает, что изменение поглощения по долготе (отдельно вдоль экваториальной галактической плоскости и в поясе Гулда) имеет синусоидальную форму. При удалении от Земли экстинкция меняется в соответствии с законом косеканса. Модель показала хорошее соответствие с несколькими существующими картами межзвездного поглощения.

Недавно [13, 14] была представлена модель межзвездного поглощения на основе параллакс Gaia DR2 и фотометрии Gaia и WISE для более чем ста тысяч гигантов и предложили трехмерное распределение пыли для этой модели. Модель представляет улучшенную версию моделей [12, 15] с эллиптическим и смещенным от центра пылевым слоем в поясе Гулда.

Сравнительный анализ многих исследований был проведен в [16, 17]. Другие опубликованные модели, использующие спектральные и фотометрические данные, были основаны на массиве из  $10^4$ – $10^5$  звезд, или были построены для очень ограниченной области неба (см., напр., [18–24]). Среди последних карт межзвездного поглощения нужно отметить работу [25], в которой авторы на основе данных Gaia DR2, Pan-STARRS 1 и 2MASS построили трехмерную карту распределения пыли до расстояний в несколько килопарсек, охватывающую небо к северу от склонения  $\delta = -30^\circ$ ; работу [26], в которой представлена новая трехмерная карта покраснения межзвездной пыли в галактической плоскости, основанная на данных Gaia DR2, 2MASS и WISE, а также работу [27], посвященную поглощению в локальной околосолнечной области.

Важным шагом в создании шкалы внегалактических расстояний является оценка галактического поглощения света внегалактических объектов, сделанная для того, чтобы надлежащим образом учесть уменьшение блеска индикаторов расстояния в других галактиках за счет межзвездной пыли в нашей Галактике. Полное галактическое визуальное поглощение (далее – галактиче-

ское поглощение,  $A_{Gal}$ ) оценивается по покраснению света на луче зрения (вызванное галактической пылью) в предположении стандартного закона экстинкции. Оценки покраснения были опубликованы в [28], где использовались данные по колонковой плотности нейтрального водорода, в [29], где были объединены результаты IRAS и COBE/DIRBE; в [30] были даны новые оценки экстинкции, сделанные на основе анализа данных обзора SDSS. Очевидно, что галактическая экстинкция может быть получена из формулы Паренаго (1) в предположении, что  $d \rightarrow \infty$ :

$$A_{Gal}(b) = \frac{a_0 \beta}{\sin|b|}. \quad (2)$$

За последние несколько лет появились новые наблюдательные данные, так что общее число звезд, для которых могут быть получены значения экстинкции и расстояния, увеличилось до пяти миллионов и выше. Это позволяет нам достичь значительного прогресса в анализе межзвездной экстинкции и построить простую аппроксимационную формулу для быстрой оценки межзвездной экстинкции для галактических и внегалактических исследований. Основной задачей настоящего исследования является создание программ для аппроксимации  $A_V(d)$ -отношений для различных областей неба, и их применение к набору выбранных площадок на небе. Мы предполагаем, что формула Паренаго (1) удовлетворительно воспроизводит наблюдаемую межзвездную экстинкцию  $A_V$  в  $V$ -диапазоне для высоких галактических широт. После того, как параметры  $a_0$  и  $\beta$  определены для каждой области, мы конструируем аналитические выражения для их оценки для всего неба.

Нужно отметить, что наши результаты применимы к оптической экстинкции. Для более коротких длин волн экстинкция более неопределенна и может быть описана так называемым законом межзвездной экстинкции [31–36].

В данной работе мы представляем результаты для высоких галактических широт,  $|b| > 20^\circ$ . Наша модель дает общую картину распределения межзвездной экстинкции и не учитывает локальные неоднородности поглощающего материала, который концентрируется к галактической плоскости. Здесь исследуется южное небо; аналогичная работа для северного неба была проведена нами в [37]. Данные для более низких широт будут опубликованы в последующих работах.

В разделе 2 описывается выбор областей, используемых нами для исследования, а также процедура определения межзвездной экстинкции, которую мы применяли. В разделе 3 приведены результаты построения соотношений  $A_V(d)$  для

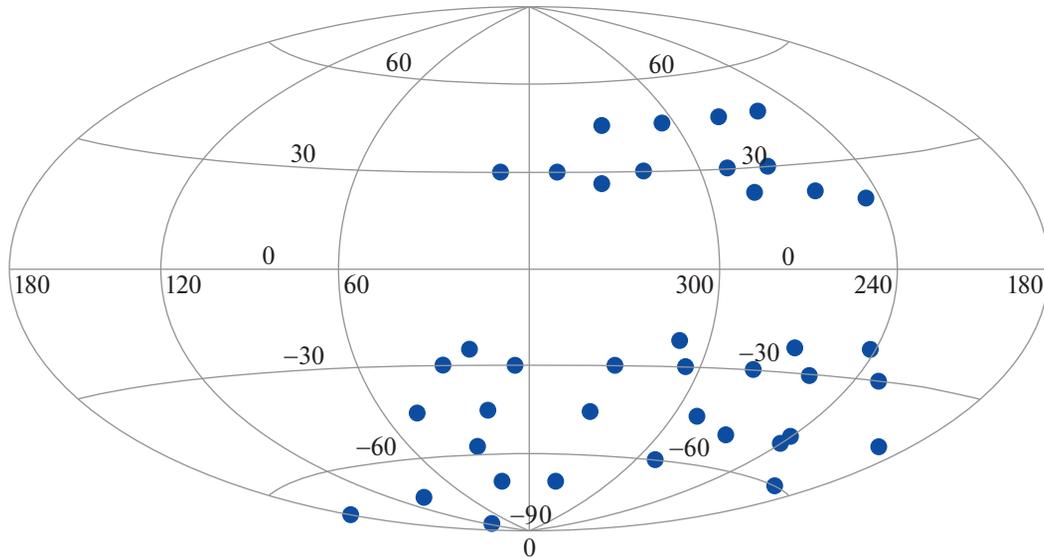


Рис. 1. Выбранные области. Галактические координаты, проекция Айтофа.

выбранных областей. Раздел 4 содержит результаты 2D-аппроксимации параметров экстинкции по всему небу (за исключением низкоширотных областей) и обсуждение их возможных физических следствий. В разделе 5 сделаны выводы по результатам исследования и обсуждаются наши дальнейшие планы.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящем исследовании использовались звезды, содержащиеся в RAVE DR6 (BDASP) (~460000 объектов) [38, 39] и в обзорах Gaia [40] и EDR3 [41]. Для определения межзвездной экстинкции для конкретных объектов мы провели кросс-отождествление объектов RAVE и Gaia в сорока выбранных областях с  $|b| > 20^\circ$ , равномерно распределенных по небу. Ограничение на  $|b|$  было выбрано исходя из справедливости утверждения, что закон косеканса удовлетворительно воспроизводит зависимость  $A_V(d)$  в высоких широтах, далеких от галактической плоскости. Каждая область представляет собой конус радиусом  $80''$ . Выбранные области изображены на рис. 1.

Визуальное поглощение  $A_V$  для каждой звезды вычислялось следующим образом:

$$A_V = c_1/c_2 \times [(BP - RP)_0 - (BP - RP)]. \quad (3)$$

Здесь  $c_2 \equiv A_G/A_V$ , где  $A_G$  — межзвездная экстинкция в  $G$ -диапазоне Gaia. Бонно и др. [42] предлагают значение 0.840 для  $c_2$ . Для параметра  $c_1 \equiv A_G/E_{BP-RP}$  мы используем среднее значение, равное 2.02. Это значение вычислено для

звезды G2 V с помощью кривой экстинкции по [31] с  $R_V \equiv A_V/E_{B-V} = 3.1$  (отметим также работу [43], суммирующую связи между экстинкцией в разных фотометрических полосах). Характеристики полос пропускания были взяты из [44], расстояния до звезд  $d$  — из работы [45].

Широкая полоса пропускания Gaia  $G$  охватывает диапазон от 330 до 1050 нм, и она оптимизирована для того, чтобы собрать максимум света для астрометрических измерений. Фотометрия в полосах Gaia  $BP$  и  $RP$  получена в результате интеграции спектров низкого разрешения синего и красного фотометров ( $BP$  и  $RP$ ), охватывающих диапазоны (330–680) и (630–1050) нм [46]. Фактически коэффициент  $c_2 \equiv A_G/A_V$  является не константой, а функцией монохроматического поглощения  $A_0$  и температуры  $T_{\text{eff}}$  из-за большой ширины полосы  $G$  Gaia (см., напр., [44, 47–49]). Здесь мы, однако, пренебрегаем этим эффектом, который можно оценить следующим образом. Используя параметры из [48, табл. 1], чтобы вывести коэффициенты экстинкции Gaia как функцию цвета и поглощения, мы получаем для полной использованной выборки данных среднее значение  $\langle k_G \rangle = A_G/A_0 \approx 0.82 \pm 0.04$ . В уравнении (3) выражение для  $A_G$ , однако, упрощается, и в знаменателе остается только  $E_{BP-RP}$ . Избыток цвета  $E_{BP-RP}$  должен показывать определенную зависимость от спектрального класса и поглощения. Коэффициент  $c_1 \approx 2$  в уравнении (3) становится неверным при большом поглощении или для звезд спектральных типов позднее K6 (см. [44, рис. 17], также [50] и калиб-

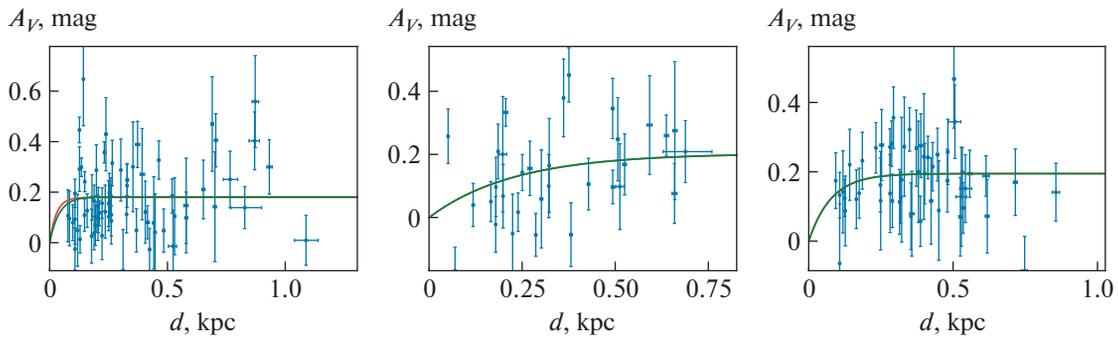
**Таблица 1.** Межзвездное поглощение в избранных площадках

Area	$l, ^\circ$	$b, ^\circ$	$a_0, m/\text{кпк}$	$\beta, \text{пк}$	$A_{\text{Gal}}, \text{mag}$	$N$
1	5.0	-30.0	$6 \pm 16$	$14 \pm 32$	$0.18 \pm 0.66$	70
2	30.0	-30.0	$0.8 \pm 0.4$	$55 \pm 32$	$0.09 \pm 0.03$	58
3	230.0	-30.0	$7 \pm 9e5$	$3 \pm 4e5$	$0.05 \pm 900$	31
5	280.0	-30.0	$5 \pm 13$	$15 \pm 37$	$0.16 \pm 0.56$	20
6	305.0	-30.0	$15 \pm 54$	$11 \pm 41$	$0.35 \pm 1.75$	20
7	330.0	-30.0	$0.7 \pm 0.2$	$216 \pm 110$	$0.31 \pm 0.18$	63
8	17.0	-45.0	$3.4 \pm 31.4$	$19 \pm 172$	$0.09 \pm 1.17$	31
9	46.0	-45.0	$0.5 \pm 0.2$	$330 \pm 397$	$0.23 \pm 0.29$	31
10	195.0	-45.0	$3.5 \pm 8.5$	$32 \pm 79$	$0.16 \pm 0.55$	43
12	270.0	-50.0	$0.22 \pm 0.24$	$210 \pm 440$	$0.06 \pm 0.14$	48
13	290.0	-45.0	$0.9 \pm 2.4$	$40 \pm 115$	$0.05 \pm 0.19$	42
15	335.0	-45.0	$0.2 \pm 0.9$	$70 \pm 360$	$0.02 \pm 0.14$	40
16	26.0	-56.9	$0.05 \pm 2.2$	$50 \pm 2000$	$0.003 \pm 0.18$	41
17	96.7	-72.9	$1.6 \pm 2.9$	$60 \pm 120$	$0.1 \pm 0.3$	51
18	200.0	-60.0	$2 \pm 15$	$30 \pm 220$	$0.08 \pm 0.7$	20
19	290.0	-60.0	$5 \pm 520$	$12 \pm 1300$	$0.1 \pm 10$	25
20	20.0	-70.0	$6 \pm 7e4$	$7 \pm 8e4$	$0.05 \pm 800$	24
22	340.0	-70.0	$0.21 \pm 0.04$	$190 \pm 700$	$0.04 \pm 0.17$	29
23	275.0	30.0	$3.2 \pm 8.5$	$15 \pm 43$	$0.1 \pm 0.4$	39
24	290.0	30.0	$0.9 \pm 0.5$	$115 \pm 114$	$0.2 \pm 0.2$	32
25	320.0	30.0	$6 \pm 390$	$9 \pm 590$	$0.1 \pm 9.5$	20
26	350.0	30.0	$9.2 \pm 8.1$	$15 \pm 13$	$0.28 \pm 0.35$	116
27	10.0	30.0	$10.5 \pm 2.2$	$29.3 \pm 6.6$	$0.61 \pm 0.19$	105
28	113.0	-85.0	$0.1 \pm 0.5$	$140 \pm 1000$	$0.014 \pm 0.119$	50
29	260.3	46.3	$0.5 \pm 0.9$	$100 \pm 200$	$0.07 \pm 0.19$	22
30	279.5	45.8	$0.42 \pm 0.45$	$110 \pm 170$	$0.07 \pm 0.12$	61
31	305.0	45.0	$6 \pm 30$	$20 \pm 100$	$0.17 \pm 1.25$	62
32	330.0	45.0	$2.50 \pm 1.15$	$55 \pm 28$	$0.19 \pm 0.13$	50
33	242.0	-22.0	$2.3 \pm 25.0$	$10 \pm 110$	$0.06 \pm 0.92$	18
34	269.0	-23.0	$6.4 \pm 21.0$	$13 \pm 45$	$0.2 \pm 1.0$	23
35	310.0	-22.0	$4.8 \pm 1.6$	$41 \pm 19$	$0.5 \pm 0.3$	48
36	19.9	-24.8	$6.9 \pm 3.5$	$28 \pm 16$	$0.5 \pm 0.4$	31
37	262.3	22.3	$19 \pm 7e6$	$1.5 \pm 5e5$	$0.07 \pm 4e5$	23
38	335.0	-26.5	$7.5 \pm 2.6$	$22 \pm 8$	$0.37 \pm 0.19$	39
39	283.9	-22.4	$1.91 \pm 1.98$	$31 \pm 39$	$0.16 \pm 0.25$	19
40	245.4	-20.3	$4.3 \pm 7.6$	$20 \pm 38$	$0.26 \pm 0.68$	20

ровочные таблицы Матажек<sup>1</sup>), поэтому фактические значения  $c_1$  оказываются ниже. Неучет этого эффекта может привести к переоценке  $A_V$ .

<sup>1</sup> [http://www.pas.rochester.edu/~ematajek/EEM\\_dwarf\\_UBVI-JHK\\_colors\\_Teff.txt](http://www.pas.rochester.edu/~ematajek/EEM_dwarf_UBVI-JHK_colors_Teff.txt)

В некоторых областях общий тренд поглощения с расстоянием оказался отрицательным, вероятно, из-за низких значений поглощения до удаленных объектов. Мы связываем это с неточно измеренным значением температуры для некоторых объектов в данных RAVE. Чтобы исключить



**Рис. 2.** Примеры наилучших решений методом минимизации  $\chi^2$  для трех областей, координаты их центров, слева направо, ( $l = 5^\circ, b = -30^\circ$ ), ( $l = 290^\circ, b = 30^\circ$ ), ( $l = 330^\circ, b = 45^\circ$ ). Синие точки с указанием ошибок – звезды из данных RAVE/Gaia, зеленая линия – наилучшая аппроксимация формулой (1). См. обсуждение в тексте.

звезды с запредельно низкими поглощениями на дальних расстояниях, мы установили следующие ограничения на используемые для работы данные:  $1.6 > BP - RP > 0.8$  и  $\lg g > 3.5$ .

Собственный показатель цвета  $(BP - RP)_0$  для звезд ГП оценивался из значений  $T_{\text{eff}}$  (RAVE) с помощью соотношений Матажек (см. адрес сайта в сноске 1, а также [50]).

### 3. АППРОКСИМАЦИЯ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ВЫБРАННЫХ ОБЛАСТЯХ

Мы предполагаем, что формула Паренга (1) удовлетворительно описывает наблюдаемую межзвездную экстинкцию для относительно высоких галактических широт. Для оценки параметров  $a_0, \beta$  в формуле (1) для каждой области мы разработали две независимые процедуры, описанные ниже.

Отметим, что для нескольких объектов значения межзвездной экстинкции, вычисленные согласно выражению (3), оказались отрицательными. Тем не менее они учитывались при вычислении значений параметров.

#### 3.1. Минимизация $\chi^2$

Для наших наборов данных  $A_V(d)$  в выбранных площадках с небесными координатами  $(l, b)$  мы для расчета наилучших параметров  $a_0, \beta$  в формуле (1) используем пакет LMFIT [51] для языка программирования Python. Мы минимизируем функционал  $\chi^2$ , который определяется следующим образом:

$$\chi^2(a_0, \beta) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{A_V(d_n) - A_{V,n}}{\varepsilon_n(A_V, d)} \right)^2, \quad (4)$$

где  $N$  – количество точек в выбранных площадках,  $d_n, A_{V,n}$  – значения расстояния и экстинкции для точки номер  $n$  в площадке,  $A_V(d)$  – значение экстинкции из формулы Паренга (1). Значения  $\varepsilon_n(A_V, d)$  – это стандартная ошибка значений экстинкции и расстояния для исходных данных. Примеры решений  $A_V(d)$  с наилучшими параметрами  $a_0, \beta$  для ряда областей показаны на рис. 2.

Неопределенности значения экстинкции определяются процедурой ее определения и учитывают наблюдательную ошибку эффективной температуры и наклон калибровочного соотношения  $T_{\text{eff}}$  от собственного показателя цвета  $(BP - RP)_0$ . Наблюдательные ошибки используемых значений эффективной температуры определяются процедурами RAVE и в основном связаны с качеством и характеристиками спектров RAVE для данного источника. Наклон соотношения “ $T_{\text{eff}} - (BP - RP)_0$ ” уменьшается к более высоким температурам, и в пределах рассматриваемого набора данных увеличение  $T_{\text{eff}}$  на 1000 К приводит, при фиксированной ошибке в  $T_{\text{eff}}$ , к уменьшению ошибки в  $A_V$  примерно на 30%. Влияние ошибки в  $T_{\text{eff}}$  является гораздо более значительным: при фиксированной  $T_{\text{eff}}$  ошибка в  $A_V$  увеличивается прямо пропорционально увеличению ошибки в  $T_{\text{eff}}$ .

#### 3.2. Сканирование значения $\chi^2$ -scan

Независимо от процедуры минимизации, описанной в разделе 3.1, нами вычислялись также значения  $\chi^2$ , полученные по формуле (4) на сетке  $(a_0, \beta)$ , и определялось минимальное значение  $\chi^2$  на этой сетке. Значения  $a_0, \beta$  сетки, соответствующие минимальному значению  $\chi^2$ , считались наилучшими значениями аппроксимации. Мы также

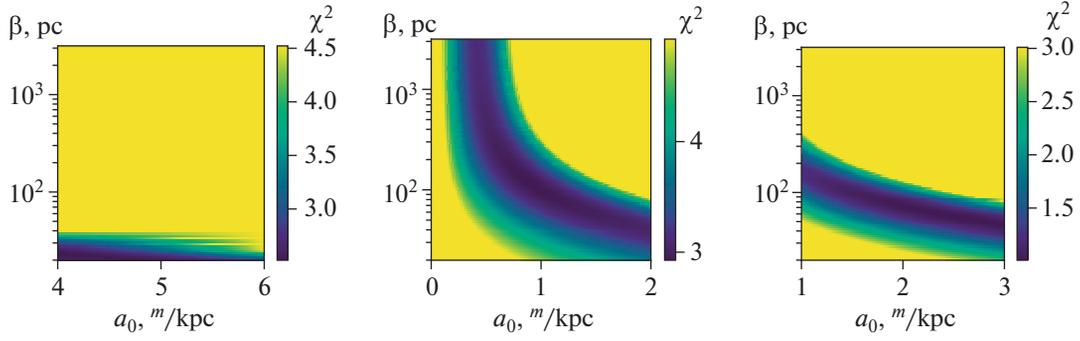


Рис. 3. Примеры решений методом сканирования  $\chi^2$  для тех же областей, что и на рис. 2.

оценивали значения стандартной ошибки определения параметров  $a_0, \beta$  по  $1\sigma$ -контуре на  $\chi^2$  карте. Примеры решений  $\chi^2(a_0, \beta)$  для некоторых областей показаны на рис. 3. Нужно обратить внимание на то, что форма синей области вокруг минимального значения дает представление о степени вырождения аппроксимируемых параметров для данной области.

### 3.3. Сравнение и анализ результатов

Оба подхода, описанные в разделах 3.1 и 3.2, были применены ко всем 40 областям. Аппроксимация была успешно проведена для 36 из 40 областей. В трех других областях решение аппроксимации не было найдено. Это может быть связано как с количеством отрицательных значений поглощения, так и с неадекватным общим трендом поглощения, немонотонным или убывающим. Еще одна область, которую мы исключили, показывает сомнительно низкое значение  $a_0$ . Тем не менее мы сохранили некоторые решения с большими значениями неопределенностей, такие как области 3, 20 и 37, поскольку они имеют разумные значения  $a_0$  и  $\beta$  и, таким образом, могут внести разумный вклад в аппроксимацию поглощений для всего неба. Значения  $\chi^2$  были оценены для обоих методов. Для составления окончательного списка параметров  $a_0, \beta$  для исследованных областей были взяты значения, полученные с помощью одного из двух подходов (см. разделы 3.1 и 3.2), а именно того, который демонстрирует меньшее значение  $\chi^2$ . Эти данные, включая галактическую экстинкцию  $A_{\text{Gal}}$ , рассчитанную с помощью уравнения (2), представлены в табл. 1.

Мы сравнили рассчитанную галактическую экстинкцию со значениями, предсказанными в работах [29, 30] (см. рис. 4, значения  $A_{\text{Gal}}$  из [29], [30] были получены с помощью калькулятора га-

лактической экстинкции<sup>2</sup>). Результаты сравнения, в пределах ошибок, вполне удовлетворительны.

## 4. АПРОКСИМАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ $a_0, \beta$ ПО ВСЕМУ НЕБУ

Наш последний шаг – аппроксимация значений параметров  $a_0, \beta$  по всему небу с помощью сферических гармоник. Тридцать шесть из числа выбранных областей были использованы для аппроксимации, они перечислены в табл. 1 ( $N$  – число звезд в области). Результаты представлены в табл. 2, уравнениях (5)–(7) и на рис. 5.

$$a_0 = +15.439Y_0^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 1.778Y_1^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 3.69Y_1^1 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 8.05Y_2^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 4.465Y_2^1 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 0.565Y_2^2 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right), \quad (5)$$

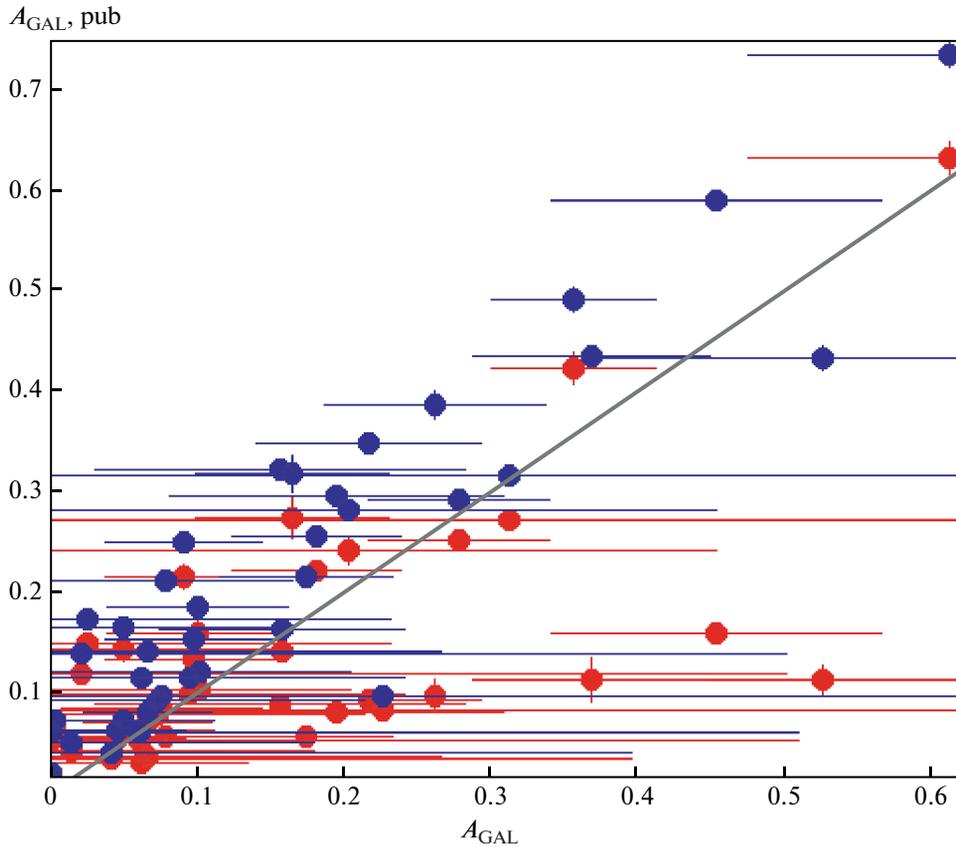
$$\beta = +154.124Y_0^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) + 7.755Y_1^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 66.388Y_1^1 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) + 108.668Y_2^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) + 64.935Y_2^1 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 45.774Y_2^2 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right), \quad (6)$$

$$A_{\text{Gal}} = 0.535Y_0^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 0.08Y_1^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 0.399Y_1^1 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 0.324Y_2^0 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) - 0.187Y_2^1 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right) + 0.106Y_2^2 \left( l, \frac{\pi}{2} - b \right). \quad (7)$$

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектроскопические обзоры служат важными источниками сведений не только о параметрах

<sup>2</sup> <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>



**Рис. 4.** Галактическая экстинкция  $A_{\text{Gal}}$ , сравнение с [30] (красные точки) и [29] (синие точки). Отношение  $y = x$  показано сплошной линией, для сравнения.

звезд, но и о природе межзвездной пыли и ее распределения в Млечном Пути. Атмосферные параметры звезд, при использовании их с тригонометрическими параллаксами, дают нам исключительную возможность независимо оценить как расстояние  $d$ , так и межзвездную экстинкцию  $A_V$ .

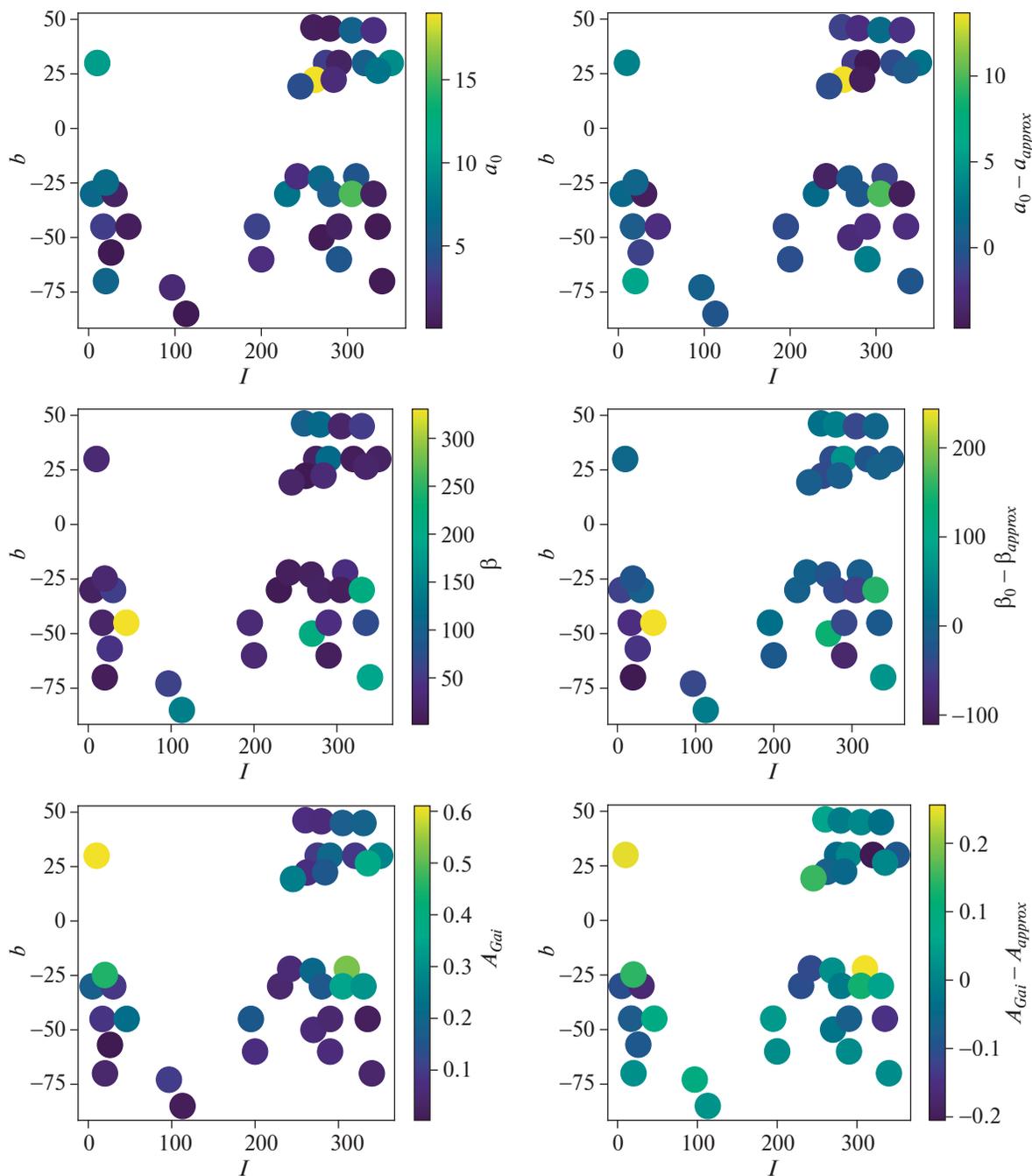
В данном пилотном исследовании изучается возможность получения уравнения для быстрой оценки величины межзвездной экстинкции. Мы провели перекрестную идентификацию объектов в спектроскопических обзорах LAMOST и RAVE и обзорах Gaia DR2/EDR3. Для 40 тестовых площадок, расположенных на высоких галактических широтах ( $|b| > 20^\circ$ ) мы построили зависимости  $A_V(d)$  и аппроксимировали их законом косеканса (1). Затем мы определили значения  $a_0$  и  $\beta$  для каждой области и провели двумерную аппроксимацию сферическими функциями для всего неба. Мы также оценили галактическую экстинкцию  $A_{\text{Gal}}$  для тестовых областей (уравнения (5)–(7)). Сравнение наших результатов с данными из [30] демонстрирует некоторое рассогласование и требует дальнейшего обсуждения.

Уравнения (5), (6) могут быть использованы для расчета параметров  $a_0$  и  $\beta$  и, следовательно, для оценки межзвездной экстинкции по формуле (1). Эти результаты справедливы для высоких галактических широт ( $|b| > 20^\circ$ ) и расстояний до 6–8 кпк от Солнца. Уравнение (7) позволяет оценить галактическую экстинкцию для высоких галактических широт.

В нашей дальнейшей работе мы планируем включить звезды, не относящиеся к ГП, из обзоров LAMOST и RAVE, а также Gaia, и распростра-

**Таблица 2.** Коэффициенты аппроксимации сферическими функциями

	$a_0$	$\beta$	$A_{\text{Gal}}$
$A_{00}$	$15.439 \pm 4.499$	$154.124 \pm 495.928$	$0.535 \pm 0.122$
$A_{10}$	$-1.778 \pm 3.857$	$7.75 \pm 69.08$	$-0.08 \pm 0.105$
$A_{11}$	$-3.69 \pm 7.684$	$-66.388 \pm 137.646$	$-0.399 \pm 0.209$
$A_{20}$	$-8.05 \pm 3.43$	$108.668 \pm 61.455$	$-0.324 \pm 0.093$
$A_{21}$	$-4.465 \pm 4.657$	$64.935 \pm 83.426$	$-0.187 \pm 0.127$
$A_{22}$	$-0.565 \pm 5.739$	$-45.774 \pm 102.799$	$0.106 \pm 0.156$



**Рис. 5.** Результаты аппроксимации. Значения (слева) и отклонения (residuals, справа) для  $a_0$ ,  $\beta$ ,  $A_{Gal}$  (сверху вниз) соответственно. Отклонения представляют собой разности между значениями из табл. 1 и значениями, полученными из уравнений (5)–(7).

нить наши результаты на более низкие галактические широты. Кроме того, мы планируем распространить нашу процедуру на другие спектроскопические обзоры. На северном небе могут быть использованы, помимо LAMOST, APOGEE (~450 000 объектов) [52], SEGUE (~350 000 объектов) [53], и предстоящий WEAVE (2021+) [54], WHT Enhanced Area Velocity Explorer, многообъ-

ектный обзорный спектрограф для 4.2-м телескопа Уильяма Гершеля (WHT) в Обсерватория Рокке-де-лос-Мучачос (Ла-Пальма, Канарские острова). На южном небе, помимо RAVE, могут быть использованы предстоящие обзоры 4MOST и MOONS. 4MOST (2022+) [55], 4-metre Multi-Object Spectrograph Telescope, созданный для 4.1-м телескопа ESO VISTA в Паранальской обсервато-

рии (Чили). MOONS (2020+) [56], Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph, предназначенный для ESO VLT (8.2 м).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту статьи за сделанные замечания, которые помогли ее существенно улучшить. Авторы благодарят Кирилла Гришина за помощь в работе, а Эрика Мамажека — за калибровочные таблицы. В работе использовались библиографическая система ADS и пакет Torcat [57].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *P. P. Parenago*, *Astronomicheskii Zhurnal* **13**, 3 (1940).
2. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, and J. R. Corwin*, *Second reference catalogue of bright galaxies* (Austin: University of Texas Press, 1976).
3. *A. Sandage*, *Astrophys J.* **178**, 1 (1972).
4. *L. Spitzer*, *Physical processes in the interstellar medium* (New York: A Wiley-Interscience Publ., 1978).
5. *P. P. Parenago*, *Popular Astronomy* **53**, 441 (1945).
6. *A. S. Sharov*, *Soviet Astron.* **40**, 900 (1963).
7. *K. Pandey and H. S. Mahra*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **226**, 635 (1987).
8. *D. J. Marshall, A. C. Robin, C. Reylé, M. Schultheis, and S. Picaud*, *Astron. and Astrophys.* **453**, 635 (2006).
9. *M. P. Fitzgerald*, *Astron. J.* **73**, 983 (1968).
10. *T. Neckel and G. Klare*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **42**, 251 (1980).
11. *F. Arenou, M. Grenon, and A. Gomez*, *Astron. and Astrophys.* **258**, 104 (1992).
12. *G. A. Gontcharov*, *Astron. Letters* **35**, 780 (2009).
13. *G. A. Gontcharov and A. V. Mosenkov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **500**, 2590 (2021).
14. *G. A. Gontcharov and A. V. Mosenkov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **500**, 2607 (2021).
15. *G. A. Gontcharov*, *Astron. Letters* **38**, 12 (2012).
16. *O. Malkov and E. Kilpio*, *Astrophys. Space Sci.* **280**, 115 (2002).
17. *E. Y. Kil'Pio and O. Y. Malkov*, *Astron. Rep.* **41**, 10 (1997).
18. *P. B. Lucke*, *Astron. and Astrophys.* **64**, 367 (1978).
19. *R. Drimmel, A. Cabrera-Lavers, and M. López-Corredoira*, *Astron. and Astrophys.* **409**, 205 (2003).
20. *A. Abergel, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A11 (2014).
21. *S. E. Sale, J. E. Drew, G. Barentsen, H. J. Farnhill, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **443**, 2907 (2014).
22. *G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, H.-W. Rix, et al.*, *Astrophys J.* **810**, id. 25 (2015).
23. *R. Lallement, L. Capitanio, L. Ruiz-Dern, C. Danielski, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A132 (2018).
24. *R. Lallement, C. Babusiaux, J. L. Vergely, D. Katz, F. Arenou, B. Valette, C. Hottier, and L. Capitanio*, *Astron. and Astrophys.* **625**, id. A135 (2019).
25. *G. M. Green, E. Schlafly, C. Zucker, J. S. Speagle, and D. Finkbeiner*, *Astrophys J.* **887**, id. 93 (2019).
26. *B. Q. Chen, Y. Huang, H. B. Yuan, C. Wang, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **483**, 4277 (2019).
27. *R. H. Leike, M. Glatzle, and T. A. Enßlin*, *Astron. and Astrophys.* **639**, id. A138 (2020).
28. *D. Burstein and C. Heiles*, *Astron. J.* **87**, 1165 (1982).
29. *D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis*, *Astrophys J.* **500**, 525 (1998).
30. *E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner*, *Astrophys J.* **737**, id. 103 (2011).
31. *J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis*, *Astrophys J.* **345**, 245 (1989).
32. *J. E. O'Donnell*, *Astrophys J.* **437**, 262 (1994).
33. *M. A. Fluks, B. Plez, P. S. The, D. de Winter, B. E. Westerglund, and H. C. Steenman*, *Astrophys. J. Suppl.* **105**, 311 (1994).
34. *K. A. Larson and D. C. B. Whittet*, *Astrophys J.* **623**, 897 (2005).
35. *E. L. Fitzpatrick and D. Massa*, *Astrophys J.* **663**, 320 (2007).
36. *K. D. Gordon, S. Cartledge, and G. C. Clayton*, *Astrophys J.* **705**, 1320 (2009).
37. *A. Nekrasov, K. Grishin, D. Kovaleva, and O. Malkov*, *European Phys. J. Special Topics* **230**, 2193 (2021).
38. *M. Steinmetz, G. Guiglion, P. J. McMillan, G. Matijević, et al.*, *Astron. J.* **160**, 83 (2020).
39. *A. Kunder, G. Kordopatis, M. Steinmetz, T. Zwitter, et al.*, *Astron. J.* **153**, 75 (2017).
40. *T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016).
41. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **650**, id. C3 (2021), arXiv:2012.01533 [astro-ph.GA]
42. *G. Bono, G. Iannicola, V. F. Braga, I. Ferraro, et al.*, *Astrophys J.* **870**, id. 115 (2019).
43. *S. Wang and X. Chen*, *Astrophys J.* **877**, id. 116 (2019).
44. *C. Jordi, M. Gebran, J. M. Carrasco, J. de Bruijne, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **523**, id. A48 (2010).
45. *C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Maniet, and R. Andrae*, *Astron. J.* **156**, id. 58 (2018).
46. *D. W. Evans, M. Riello, F. De Angeli, J. M. Carrasco, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A4 (2018).
47. *C. Danielski, C. Babusiaux, L. Ruiz-Dern, P. Sartoretti, and F. Arenou*, *Astron. and Astrophys.* **614**, id. A19 (2018).
48. *C. Babusiaux, F. van Leeuwen, M. A. Barstow, C. Jordi, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A10 (2018).
49. *C. A. L. Bailer-Jones*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **411**, 435 (2011).
50. *M. J. Pecaut and E. E. Mamajek*, *Astrophys. J. Suppl.* **208**, id. 9 (2013).
51. *M. Newville, T. Stensitzki, D. B. Allen, and A. Ingargiola*, *LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python* (2014). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11813>
52. *I. Reis, D. Poznanski, D. Baron, G. Zasowski, and S. Shahaf*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **476**, 2117 (2018).

53. *B. Yanny, C. Rockosi, H. J. Newberg, G. R. Knapp, et al.*, *Astron. J.* **137**, 4377 (2009).
54. *D. J. B. Smith, P. N. Best, K. J. Duncan, N. A. Hatch, et al.*, in *SF2A-2016*, Proc. of the Ann. meeting of the French Society of Astron. and Astrophys., held 14–17 June, 2016 at the Centre de Recherche Astrophysique de Lyon, edited by C. Reylé, J. Richard, L. Cambrésy, M. Deleuil, E. Péontal, L. Tresse, and I. Vauglin, p. 271 (2016).  
<http://hdl.handle.net/20.500.12386/24322>.
55. *R. S. de Jong, O. Agertz, A. A. Berbel, J. Aird, et al.*, *Messenger* **175**, 3 (2019).
56. *M. Cirasuolo and MOONS Consortium*, in *Multi-Object Spectroscopy in the Next Decade: Big Questions, Large Surveys, and Wide Fields*, Proc. of a conference held at Teatro Circo de Marte, Santa Cruz de La Palma, Canary Islands, Spain on 2–6 March 2015, edited by I. Skillen, M. Balcells, and S. Trager (San Francisco: Astron. Soc. Pacific), ASP Conf. Ser. **507**, 109 (2016).
57. *M. B. Taylor*, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV ASP Conference Series*, Proc. of the Conference held 24–27 October, 2004 in Pasadena, California, USA, edited by P. Shopbell, M. Britton, and R. Ebert (San Francisco: Astron. Soc. Pacific), ASP Conf. Ser. **347**, 29 (2005).