

## Учет межзвездного поглощения при анализе фотометрических данных

Малков О.Ю.<sup>1</sup>, Длужневская О.Б.<sup>1</sup>, Жуков А.О.<sup>1,2</sup>, Захаров А.И.<sup>2</sup>, Ковалева Д.А.<sup>1</sup>, Миронов А.В.<sup>2</sup>, Сичевский С.Г.<sup>1</sup>, Скворцов Н.А.<sup>3</sup>, Ступников С.А.<sup>3</sup>, Сытов А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. Штернберга, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем информатики, Москва, Россия

Учет межзвездного поглощения – необходимый этап в процессе параметризации звезд по многоцветной фотометрии. Мы анализируем опубликованные законы межзвездного поглощения и обсуждаем возможность оценки величины межзвездного поглощения для фотометрических полос современных больших обзоров.

*Ключевые слова:* межзвездное поглощение, фотометрические обзоры

### Photometric data analysis: the estimation of interstellar extinction

Malkov O.Yu.<sup>1</sup>, Dluzhnevskaya O.B.<sup>1</sup>, Zhukov A.O.<sup>1,2</sup>, Zakharov A.I.<sup>2</sup>, Kovaleva D.A.<sup>1</sup>, Mironov A.V.<sup>2</sup>, Sichevsky S.G.<sup>1</sup>, Skvortsov N.A.<sup>3</sup>, Stupnikov S.A.<sup>3</sup>, Sytov A.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Informatics Problems RAS, Moscow, Russia

Taking into account interstellar extinction is the necessary procedure in the process of parameterization of stars from multicolor photometry. We analyze published interstellar extinction laws and discuss the possibility of assessing the interstellar extinction in photometric bands of modern large surveys.

*Keywords:* interstellar extinction, photometric surveys

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.001

### 1. Введение

Как было показано в [1], [2], [3], данные, содержащиеся в больших современных многополосных обзорах [4] позволяют успешно проводить параметризацию звезд и межзвездной среды. Методика кросс-идентификации объектов в больших обзорах, определения параметров звезд и расстояний до них описана в [5], [6], [7]. Для параметризации необходимо иметь представление о том, насколько поглощение в фотометрической полосе  $X$  ( $A_X$ ) отличается от поглощения в полосе  $V$  ( $A_V$ ). Однако, значения  $A_X/A_V$  посчитаны и опубликованы только для небольшого числа современных обзоров, а именно:

- Rieke and Lebofsky 1985 [8]: UBVR<sub>I</sub>JHKLMN, 8.0, 8.5, ..., 13.0  $\mu\text{m}$
- Cardelli et al. 1989 [9]: UBVR<sub>I</sub>JHKL
- Draine 2003 [10]: Johnson, Cousins, SDSS
- Indebetouw et al. 2005 [11]: 2MASS, Spitzer
- Schlafly and Finkbeiner 2011 [12]: Landolt, UKIRT(JHKL), Gunn, Stromgren, SDSS
- Yuan et al. 2013 [13]: 2MASS, SDSS, GALEX, ALLWISE
- Hanson and Bailer-Jones 2014 [14]: u, g, i, z, Y, J, H, K
- Bono et al. 2019 [15]: Gaia

Для вычисления отсутствующих значений  $A_X/A_V$  необходимо, в частности, знать форму кривой межзвездной экстинкции (или закона межзвездного поглощения, ЗМП). Ниже кратко описаны и проанализированы опубликованные ЗМП и даны рекомендации для их применения при вычислении значения поглощения для фотометрических полос современных больших обзоров.

Таблица 1: Закон межзвездного поглощения

Ссылка	$x, (\mu m)^{-1}$	$\lambda, \text{A}$	ЗМП, вид
Cardelli et al. 1989 [9]	0.3 - 1.1 (IR) 1.1 - 3.3 (Opt/NIR) 3.3 - 8 (UV) 8 - 10 (Far-UV)	9100 - 33,000 3000 - 9100 1250 - 3000 1000 - 1250	$A_\lambda/A_V$
O'Donnell 1994 [17]	1.1 - 3.3 (Opt/NIR)	3000 - 9100	$A_\lambda/A_V$
Fluks et al. 1994 [18]	0 - 10 (IR/Opt/UV)	1000 - 2,500,000	$A_\lambda/E_{B-V}$
Larson and Whittet 2005 [16]	0 - 0.8 (IR)	>12,500	$A_\lambda/A_V$
Fitzpatrick and Massa 2007 [19]	0 - 1 (IR) 3.7 - 8.7 (UV)	>10,000 1150 - 2700	$E_{\lambda-V}/E_{B-V}$
Gordon et al. 2009 [20]	3.3 - 11 (UV/Far-UV)	900 - 3000	$A_\lambda/A_V$

## 2. Сравнение опубликованных ЗМП и выбор ЗМП для расчетов

Ниже приводится краткий анализ ряда опубликованных ЗМП (см. таб. 1 и рис. 1). В качестве аргумента в опубликованных ЗМП обычно используется величина  $x \equiv (\lambda, \mu m)^{-1}$ , где длина волны  $\lambda$  дана в микронах. Авторы, как правило, вычисляют значение функции  $A_\lambda/A_V$ . Отметим, что все представленные здесь ЗМП (кроме [16]) зависят от  $R_V$ .

Cardelli et al. (1989) [9] представляют ЗМП в виде

$$A_\lambda/A_V = a(x) + b(x)/R_V, \quad (1)$$

где  $a(x), b(x)$  – полиномы. В работе Fluks et al. (1994) [18] данные представлены в табулированном виде. Larson and Whittet (2005) [16] представляют ЗМП для ИК-диапазона в виде степенного закона  $A_\lambda/A_V = (0.46 \pm 0.13) \times \lambda^{-2.3 \pm 0.5}$ . В Fitzpatrick and Massa (2007) [19] также предлагается степенной закон для ЗМП в ИК-диапазоне:  $E_{\lambda-V}/E_{B-V} = 1.057 \times (\lambda, nm)^{-1.84} - 3.001$ , и более сложный вид для УФ-диапазона. Формула для оптического диапазона в [19] не представлена. В работах Gordon et al. (2009) [20] и O'Donnell (1994) [17] используется ЗМП в виде (1), предложенном в [9], но предлагаются другие коэффициенты для УФ и ИК/оптического диапазонов, соответственно.

Существует, таким образом, возможность модифицировать ЗМП [9] в ИК/оптике (согласно [17]) и в УФ (согласно [20]). Сшивки при  $x = 1.1$  между функциями из [9] и [17] происходит гладко. При  $x = 3.3$  значения функций из [17] и [20] не совпадают (и разница этих значений зависит от  $R_V$ ), однако это место шкалы длин волн ( $\lambda = 3000 \text{ A}$ ,  $\log \lambda = 3.48$ ) не покрывается фотометрическими полосами используемыми нами обзоров (см. рис. 2). Необходимо отметить, что при работе с большими значениями  $R_V$  и/или в далеком УФ-диапазоне проблема сшивки ЗМП [9] и [20] становится более сложной (см. рис. 3).

При определении границ диапазона длин волн, в котором предстоит вычислять значения межзвездного поглощения в фотометрических полосах современных больших обзоров, необходимо учитывать, что экстремальными обзорами в нашем наборе являются GALEX и AllWISE (см. рис. 2). Голубая граница полосы FUV обзора GALEX лежит в районе  $\lambda = 1340 \text{ A}$  ( $x=7.46$ ). Красная граница полосы W4 обзора AllWISE лежит в районе  $\lambda = 280,500 \text{ A}$  ( $x=0.03$ ), а если использовать только полосы W1, W2 обзора AllWISE, то красная граница смещается на  $\lambda = 55,600 \text{ A}$  ( $x=0.18$ ). Полосы W3, W4 имеют низкую чувствительность, а полоса W4 – еще и плохое угловое разрешение.

На рис. 4 представлены кривые реакции всех *всенебесных* обзоров, используемых в нашей работе, и законы межзвездного поглощения [9] и [18]. Можно видеть, что для наших целей нет необходимости продлевать ЗМП в ультрафиолетовую область за  $\lambda=1260 \text{ A}$  ( $\log \lambda = 3.1$ ), т.е., ЗМП Cardelli et al. (1989) [9] может использоваться без расширения Gordon et al. (2009) [20].

Отметим, что в ЗМП Fluks et al. (1994) [18] учитываются особенности спектра межзвездной среды в ИК диапазоне: полосы льда (3.1 мкм), силикатов (9.7 мкм) и др. Однако, принимая во внимание ограниченную пригодность данных полос W3, W4 обзора AllWISE, можно игнорировать немонотонное поведение ЗМП [18] на участке  $\lambda > 63,000 \text{ A}$  ( $\log \lambda > 4.8$ ).

Таким образом, нам необходим ЗМП в диапазоне  $x$  от 0.18 до 7.46. Из рассмотренных выше, этот диапазон полностью покрывают ЗМП [9] и [18]. Мы предполагаем проводить дальнейшие вычисления с этими

двумя ЗМП (они достаточно однородны и покрывают широкий диапазон длин волн), это даст возможность сравнить полученные для различных ЗМП результаты.

### 3. Заключение

Для вычисления значений межзвездного поглощения в фотометрических полосах современных больших обзоров нам необходимо использовать закон межзвездного поглощения (ЗМП), т.е., зависимость поглощения от длины волны. В данной работе дана сводка опубликованных значений межзвездного поглощения в различных фотометрических полосах, а также приводятся и анализируются различные представления ЗМП в диапазоне 900 – 2,500,000 Å. Показано, что для решения большинства поставленных задач достаточно использовать ЗМП, предложенный в работах Cardelli et al. (1989) [9] или Fluks et al. (1994) [18].

Работа поддержана грантом РФФИ 20-52-53009.

### Список литературы

1. S. G. Sichevskij, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astrophysical Bulletin*, **69**, 160, 2014.
2. O. Malkov, S. Karpov, E. Kilpio, S. Sichevsky, et al., *Open Astronomy*, **27**, 62, 2018.
3. O. Y. Malkov, S. V. Karpov, D. A. Kovaleva, J. Murthy, et al., *Springer International Publishing, Communications in Computer and Information Science*, **1223**, 108, 2020.
4. O. Y. Malkov, *Astronomy Reports*, **62**, 993, 2018.
5. S. V. Karpov, O. Y. Malkov, and A. V. Mironov, *Astrophysical Bulletin*, **67**, 82, 2012.
6. O. Malkov, O. Dluzhnevskaya, S. Karpov, E. Kilpio, A. Kniazev, A. Mironov, and S. Sichevskij, *Baltic Astronomy*, **21**, 319, 2012.
7. S. G. Sichevskij, *Astrophysical Bulletin*, **73**, 98, 2018.
8. G. H. Rieke and M. J. Lebofsky, *ApJ*, **288**, 618, 1985.
9. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *ApJ*, **345**, 245, 1989.
10. B. T. Draine, *ARA&A*, **41**, 241, 2003.
11. R. Indebetouw, J. S. Mathis, B. L. Babler, M. R. Meade, et al., *ApJ*, **619**, 931, 2005.
12. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *ApJ*, **737**, 103, 2011.
13. H. B. Yuan, X. W. Liu, and M. S. Xiang, *MNRAS*, **430**, 2188, 2013.
14. R. J. Hanson and C. A. L. Bailer-Jones, *MNRAS*, **438**, 2938, 2014.
15. G. Bono, G. Iannicola, V. F. Braga, I. Ferraro, et al., *ApJ*, **870**, 115, 2019.
16. K. A. Larson and D. C. B. Whittet, *ApJ*, **623**, 897, 2005.
17. J. E. O'Donnell, *ApJ*, **437**, 262, 1994.
18. M. A. Fluks, B. Plez, P. S. The, D. de Winter, B. E. Westerlund, and H. C. Steenman, *A&A Sup.*, **105**, 311, 1994.
19. E. L. Fitzpatrick and D. Massa, *ApJ*, **663**, 320, 2007.
20. K. D. Gordon, S. Cartledge, and G. C. Clayton, *ApJ*, **705**, 1320, 2009.

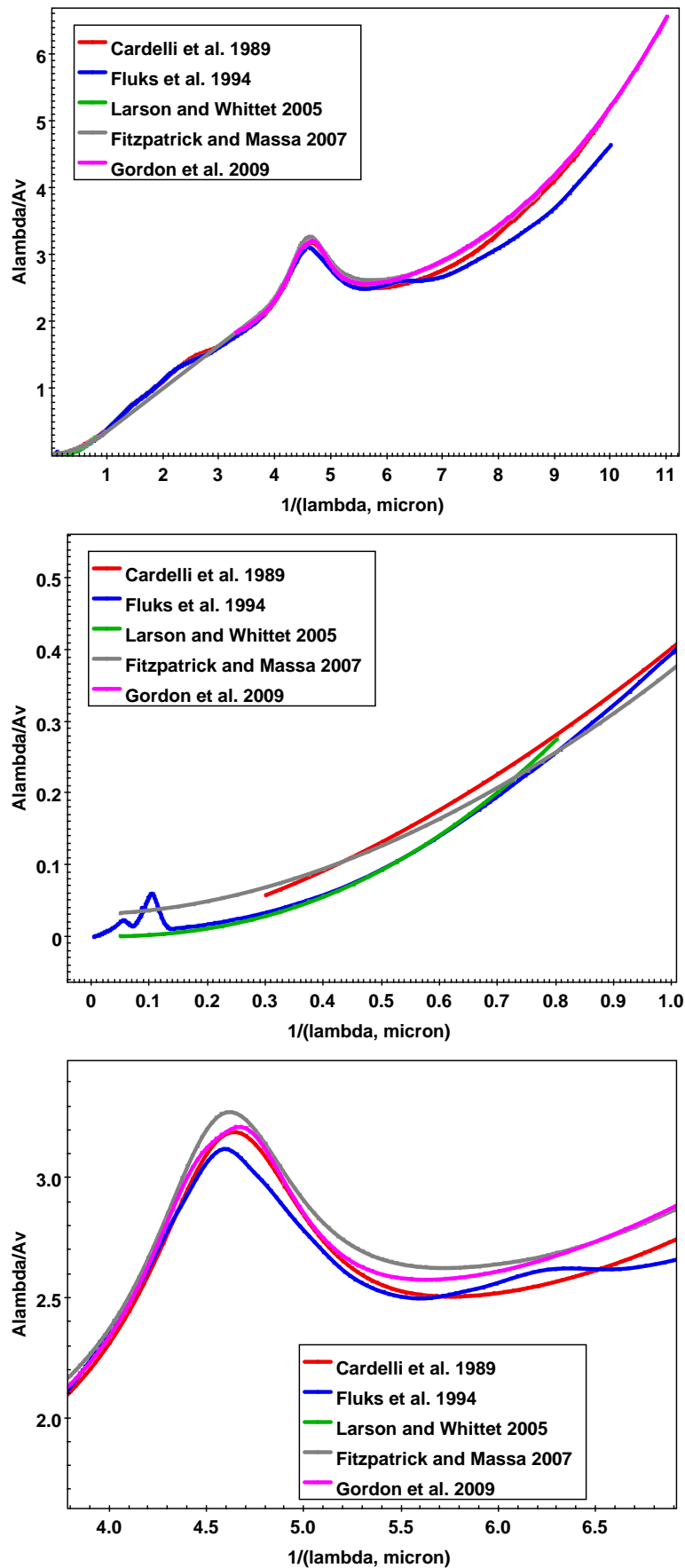


Рис. 1: Закон межзвездного поглощения. Верхний, средний и нижний график: общий вид, ИК-область, УФ-пик, соответственно. Красная кривая: [9] для  $R_V=3.1$ . Синяя кривая: [18] для  $R_V=3.1$ . Зеленая кривая: [16]. Серая кривая: [19] для  $R_V=3.1$ . Фиолетовая кривая: [20] для  $R_V=3.1$ .

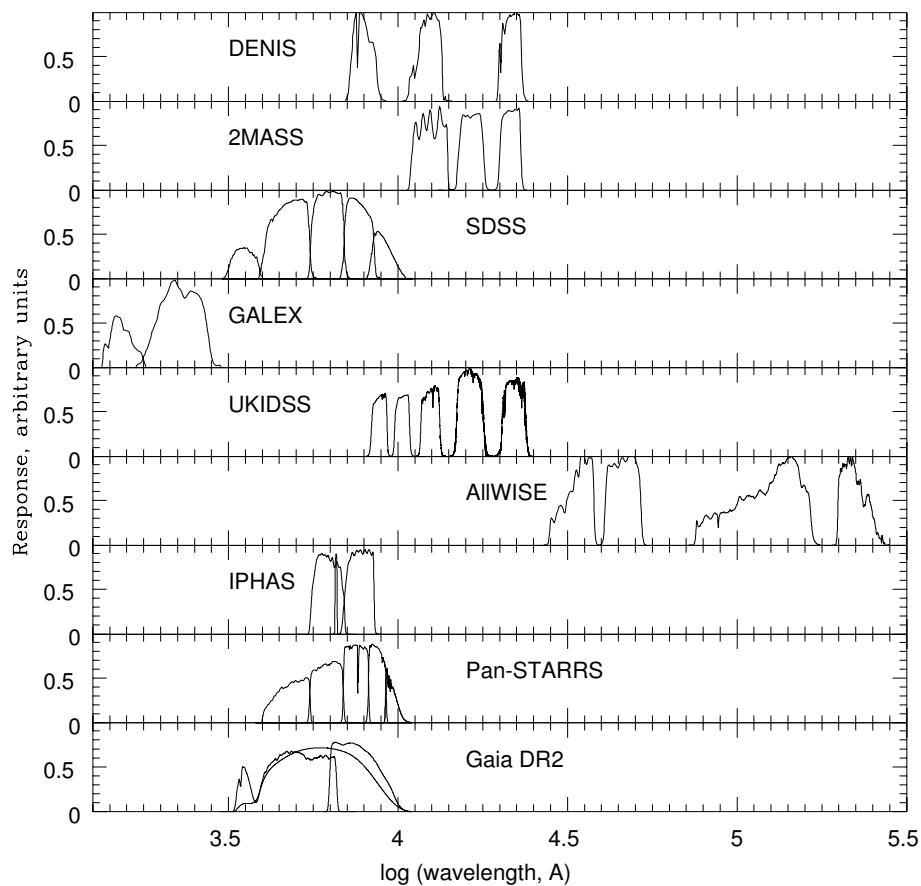
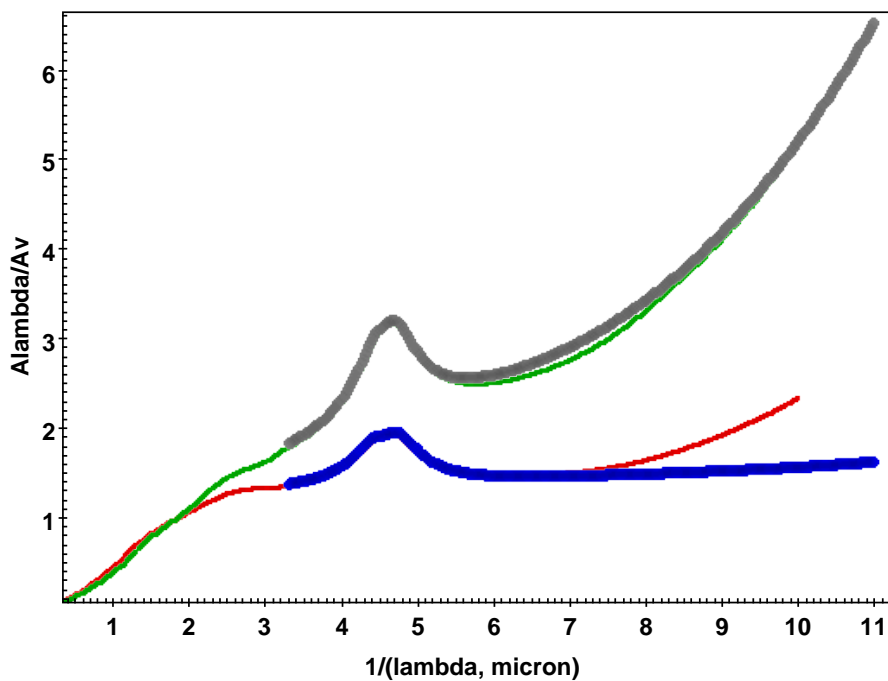


Рис. 2: Кривые реакции фотометрических обзоров.

Рис. 3: Закон межзвездного поглощения для различных значений  $R_V$ :  $R_V = 3.1$  (верхняя пара кривых),  $R_V = 5.0$  (нижняя пара кривых). Тонкие кривые – [9], толстые кривые – [20].

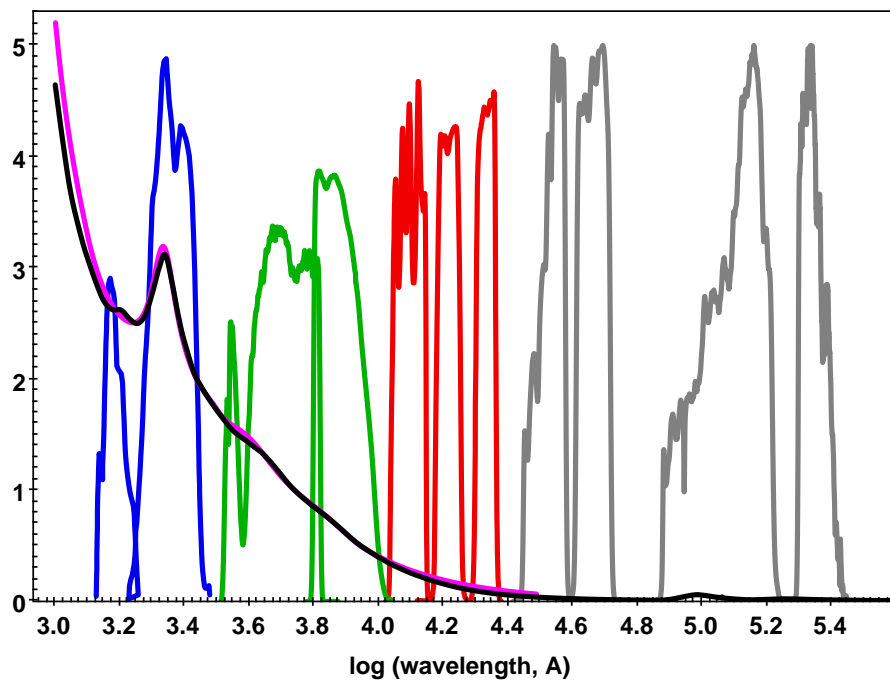


Рис. 4: Кривые реакции всенебесных обзоров и закон межзвездного поглощения. Кривые реакции (слева направо): GALEX (FUV, NUV), Gaia (BP, RP), 2MASS (J, H, K<sub>S</sub>), AllWISE (W1, W2, W3, W4); по оси ординат – пропускная способность в условных единицах. Закон межзвездного поглощения для  $R_V = 3.1$ : [9] (фиолетовая кривая), [18] (черная кривая); по оси ординат –  $A_\lambda/A_V$ .