

ОБЗОРЫ

МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

Г.А. ГОНЧАРОВ

Поступила 13 мая 2016

Принята к печати 24 августа 2016

Обзор описывает современные представления о межзвездном поглощении. Они существенно отличаются от представлений XX в. Благодаря инфракрасным обзорам сотен миллионов звезд по всему небу, таких, как 2MASS, SPITZER-IRAC, WISE, мы заглянули в самые плотные и самые разреженные области межзвездной среды на расстоянии несколько кпк от Солнца. Кроме того, наблюдения в инфракрасном и микроволновом диапазонах, где, видимо, поглощает и излучает основная масса пыли, приблизили нас к пониманию распределения пылинок по свойствам в масштабе Галактики и Вселенной. Мы переживаем разгар научной революции в представлениях о межзвездной среде и пыли. Итоги и даже ключевые результаты этой революции пока трудно предсказать. Тем не менее, уже а) построена физически обоснованная модель пространственного распределения поглощающей материи в ближайшем килопарсеке, учитывающая пояс Гулда, как контейнер пыли, и дающая точную оценку поглощения для любого объекта только по его галактическим координатам. Ясно также, что б) в галактических окрестностях Солнечной системы межзвездная среда содержит примерно половину всей массы материи (другая половина включает звезды, их остатки и темную материю); в) межзвездная среда, и, в частности, пыль, существенно различается в разных районах космоса, и нельзя судить о далеком космосе, исследуя только близкий.

Ключевые слова: *межзвездное поглощение; покраснение; межзвездные пылевые частицы; характеристики и свойства Галактики Млечный путь*

1. Изменение представлений о межзвездном поглощении.

Представления, что в пространстве между звездами есть некая среда, поглощающая звездный свет, развивались со времен Вильяма Гершеля. Исторический обзор этих представлений дан Ли (2005). Однако до конца XX в. межзвездная среда и поглощение рассматривались лишь как помеха в изучении звезд. Впрочем, помеха столь незначительная, что даже для разрешения фотометрического парадокса Ольберса ("если число звезд во Вселенной бесконечно, то все небо должно сиять как Солнце") поглощение привлекалось, разве что, самим Ольберсом. Оно считалось существенным только около галактической плоскости, где плотность межзвездной среды

достаточна для формирования из нее звезд. Оценка межзвездного поглощения в слое около галактической плоскости почти не изменилась за последние 170 лет: от 1^m на кпк у Струве (1847) до $1^m.2$ на кпк у Гончарова (2012б). Впрочем, долгое время считалось, что даже около галактической плоскости основная часть вещества заключена в звездах. Например, Куликовский (1985, с.146) отмечал, что межзвездная материя составляет не более 10% массы материи в спиральных ветвях Галактики.

Изменение этих представлений в XXI в. является одной из основ текущей астрономической революции. В наиболее популярной до сих пор, но устаревшей (Гончаров 2012г) Безансонской модели Галактики (Робин и др., 2003) межзвездной среде в галактических окрестностях Солнца отведено уже 28%, остальной барионной материи (звездам, коричневым карликам, белым карликам, нейтронным звездам и планетам) 59% и темной материи - 13%. В новой версии той же модели Жеках и др. (2014) вслед за Бинни и Тремэн (2008) приняли для окрестностей Солнца пространственную массовую плотность межзвездной среды 0.05 (47%), остальной барионной материи 0.043-0.049 (около 44%) и темной материи $0.01 M_{\odot}/\text{пк}^3$ (9%). МакКи и др. (2015) детально проанализировали пространственную плотность материи в окрестностях Солнца и получили плотность межзвездной среды 0.041 (42.3%), остальной барионной материи 0.043 (44.3%) и темной материи $0.013 M_{\odot}/\text{пк}^3$ (13.4%). Но они отметили, что вдали от галактической плоскости обнаружен водород, который из-за сферического пространственного распределения относительно центра Галактики объединяется в моделях с темной материей. С учетом этого видим, что по современным оценкам межзвездная среда содержит примерно половину массы материи в околосолнечной части Галактики. Это разумно, если принять, что звезды образуются из среды в диске Галактики в наше время. С учетом общепринятого соотношения массы газа к массе пыли пространственную массовую плотность пыли можно оценить как $5 \cdot 10^{-4} M_{\odot}/\text{пк}^3$, или в г/см^3 :

$$3.5 \cdot 10^{-26}. \quad (1)$$

В XX в. астрономам был наиболее доступен диапазон длин волн 0.4-1 мкм, где поглощение примерно обратно пропорционально длине волны:

$$A_{\lambda} \sim 1/\lambda. \quad (2)$$

Кроме того, исследования были ограничены преимущественно областью пространства рядом с Солнцем, где коэффициент пропорциональности R_V между покраснением звезды $E_{(B-V)}$ и поглощением A_V является постоянной, единой, универсальной характеристикой пылевой среды для всего пространства и для всего диапазона длин волн (Куликовский 1985, с.151):

$$A_V = R_V \cdot E_{(B-V)}. \quad (3)$$

Но в XXI в. наблюдения в других диапазонах и на больших расстояниях

от Солнца обнаружили огромное разнообразие характеристик космических пылинок (обзор, Дрэйн (2003)). Во многих диапазонах излучения и районах Галактики соотношение (2) не выполняется, а отношение полного поглощения к селективному R_v является лишь одной из характеристик пылевой среды и меняется как в пространстве, так и в зависимости от длины волны (Вошинников, 2012). Это заставляет ученых разрабатывать новый раздел науки, физику космической пыли. В ее рамках, как показано в обзоре Вошинникова (2012), наблюдаемое поглощение, покраснение, коэффициент R_v , весьма разнообразные для разных направлений, расстояний, диапазонов и источников излучения, в последние годы довольно успешно описываются теоретическими моделями с различным распределением пылинок по размеру, химическому составу, форме и другим свойствам.

2. *Карта SFD98.* Поглощенное излучение переизлучается пылинкой как излучение с большей длиной волны. И по этому излучению можно судить и о поглощении, и о свойствах пыли.

В 1998г. Шлегель и др. (1998) (далее - SFD98) опубликовали карту для всего неба, позволяющую судить о покраснении и поглощении, хотя и косвенно. Это карта ИК излучения пыли на $\lambda = 100$ мкм в зависимости от галактической долготы l и широты b . С учетом температуры пыли и принятых калибровок, после исключения зодиакального света и ярких точечных источников излучение пыли должно соответствовать покраснению излучения звезд при прохождении света сквозь толщу всего галактического вещества на заданном луче зрения. Исходным материалом для составления карты послужили результаты космических проектов COBE/DIRBE и IRAS/ISSA. SFD98 сочетает точность COBE/DIRBE (16%) и угловое разрешение IRAS/ISSA (около бугл. мин.). Благодаря этому, карта SFD98 использована в более, чем 9000 исследований. А при оценке покраснения и поглощения внегалактических объектов она является эталоном. Но все-таки это карта излучения, а не покраснения или поглощения, как ее часто ошибочно именуют (обычно ее данные используются с $R_v = 3.1$). И эта карта имеет систематические ошибки, особенно важные для внегалактической астрономии и космологии.

1. Арче и Гудман (1999) показали, что разрешение карты температуры пыли, сопутствующей карте SFD98, составляет всего $1''.4$ (разрешение COBE/DIRBE), а не $6''$, как основной карты, и это должно приводить к ошибкам SFD98 при большом градиенте температуры. Эти ошибки обнаружены, например, Гончаровым (2012б) при сравнении SFD98 с картой Гончарова (2010) в густых облаках пояса Гудда. Аналогичные ошибки SFD98 найдены Шлафли и др. (2014а) в окрестностях тонких волокнистых структур среды при использовании многоцветной фотометрии Pan-STARRS1 для более 500 миллионов звезд.

2. Бэрри и др. (2012) по данным каталога SDSS (Абазаджан и др. 2009) для миллионов звезд нашли ошибки SFD98, которые могут быть вызваны неполным учетом зодиакального света и точечных источников ИК излучения.

3. Арче и Гудман (1999) отметили, что излучение с $\lambda = 100$ мкм авторы SFD98 пересчитали в привычное для пользователей покраснение $E_{(B-V)}$, используя многоцветную фотометрию и спектроскопию нескольких сотен эллиптических галактик с малым покраснением ($E_{(B-V)} < 0^m.3$), так как в областях неба с большим покраснением, т.е. около галактического экватора галактики не видны. В результате эта калибровка SFD98 при больших покраснениях ошибочна: покраснение SFD98 завышено. Это подтверждено многими авторами (ссылки даны Камбрези и др. 2005). Шлафли и др. (2014a) подтвердили это, используя фотометрию Pan-STARRS1 для более 500 миллионов звезд и рассмотрев общие проблемы пересчета карт эмиссии в карты покраснения и поглощения.

4. Яхата и др. (2007) сравнили подсчеты числа галактик из SDSS в 69 площадках вокруг северного полюса Галактики с картой SFD98. Для большого покраснения найдена естественная убыль числа галактик с ростом покраснения, но для малых покраснений найден неожиданный рост числа галактик с покраснением. Кроме того, при малом покраснении, чем оно меньше, тем галактика в среднем краснее. Но этот эффект ослабляется с ростом красного смещения. Моделируя ошибки SFD98, Яхата и др. (2007) показали, что систематические ошибки калибровки SFD98 при минимальном покраснении на уровне всего $0^m.02$, превращаются в итоговую ошибку минимального поглощения $\sigma(A_V) = 0^m.1$. Кроме того, авторы предположили, что в SFD98 недооценка малого покраснения вызвана наблюдаемой, но неучтенной эмиссией скоплений галактик в далеком ИК диапазоне (видимо, из-за межгалактической пыли). Вольф (2014) сравнил с SFD98 полное (включая "серое") поглощение в высоких галактических широтах по наблюдениям примерно 50000 квазаров. Он подтвердил, что SFD98 завышает большое и занижает малое покраснение и не учитывает около-и межгалактическую эмиссию в далеком ИК диапазоне.

В качестве иллюстрации на рис. 1 сопоставлены покраснения $E_{(B-V)G}$ по карте Гончарова (2010) для звезд на расстоянии 1.0-1.6 кпк и $E_{(B-V)SFD98}$ (SFD98, сквозь всю Галактику) для площадок неба $10^\circ \times 10^\circ$ по данным Гончарова (2012б). Черные точки и аппроксимирующая сплошная кривая - данные для $|b| > 15^\circ$ вне облаков пояса Гулда. Большие заполненные ромбы и штрих-пунктир - данные для 9 областей с $|b| > 15^\circ$, содержащих облака пояса Гулда. Квадраты и пунктир - данные для $|b| < 15^\circ$ вдали от направления на центр Галактики. Большие пустые ромбы - данные для области вокруг центра Галактики ($-30^\circ < l < +30^\circ$, $|b| < 15^\circ$). Для всех данных показана

точность. Видно, что около галактического экватора, как и ожидалось, покраснение сквозь всю Галактику заметно превосходит локальное покраснение. Но всюду при $|b| > 15^\circ$ разности карт соответствуют их заявленным высоким точностям. Кроме того, видно, что штрих-пунктир примерно вдвое выше сплошной кривой и даже выше пунктира. То есть покраснение в поясе Гулда примерно вдвое больше, чем вне его на тех же широтах, и чем покраснение около галактической плоскости вне направления на центр Галактики.

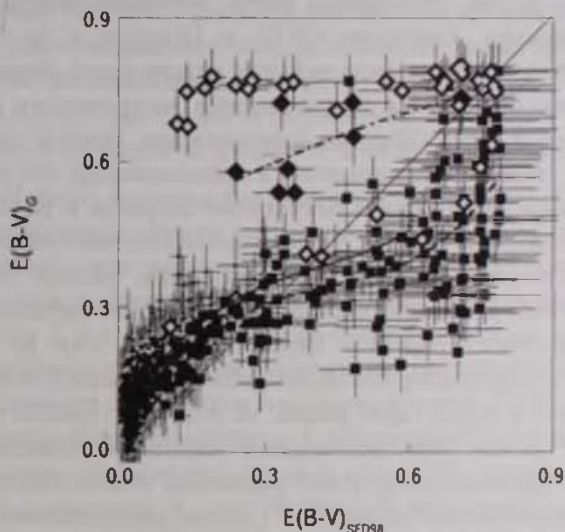


Рис.1. Корреляция между $E_{(B-V)_G}$ Гончарова (2010) и $E_{(B-V)_SFD98}$ для площадок неба $10^\circ \times 10^\circ$ по данным Гончарова (20126). Черные точки - данные для $|b| > 15^\circ$ вне облаков пояса Гулда, аппроксимированные сплошной кривой. Большие заполненные ромбы - данные для 9 областей с $|b| > 15^\circ$, содержащих облака пояса Гулда, аппроксимированные штрих-пунктиром. Квадраты - данные для $|b| < 15^\circ$ вдали от направления на центр Галактики, аппроксимированные пунктиром. Большие пустые ромбы - данные для области вокруг центра Галактики ($-30^\circ < l < +30^\circ$, $|b| < 15^\circ$), показывающие насыщение обеих карт при $E_{(B-V)} > 0^m.8$. Для всех данных показана точность.

Аналогичные результаты показывает сравнение SFD98 и карты Джонса и др. (2011) для высоких широт в радиусе 2кпк от Солнца с использованием спектров более 9000 карликов класса М из SDSS (Гончаров, 20126). В частности, в высоких широтах - среднее покраснение и поглощение $\overline{E_{(B-V)}} \approx 0^m.06$ и $\overline{A_V} \approx 0^m.2$ в отличие от SFD98, дающей $\overline{E_{(B-V)}} \approx 0^m.03$ и $\overline{A_V} \approx 0^m.1$.

Недооценка малого и переоценка большого покраснения картой SFD98 подтверждено Гончаровым (20126) при сравнении SFD98 с картами Гончарова (2010) и Джонса и др. (2011) с точностью, позволяющей выразить систематическую ошибку SFD98 в аналитической форме. Показанный на рис.1 сплошной кривой проведенный методом наименьших квадратов полином

$$y = 3x^3 - 3.7x^2 + 1.8x + 0.06, \quad (4)$$

где $y = E_{(B-V)}$ - истинное покраснение, $x = E_{(B-V)}$ - покраснение по SFD98, стоит добавить как поправку во все вычисления с использованием SFD98.

Использование SFD98 для оценки покраснения/поглощения в пределах Галактики затруднено тем, что не известны расстояния до структур, отраженных на карте, т.е. эта карта двумерная.

В отличие от SFD98, трехмерные карты излучения/покраснения/поглощения, например, Гончарова (2010) и Шлафли и др. (20146) показывают пространственное расположение межзвездных облаков. Их расстояния в целом согласуются с расстояниями, полученными Дэйм и др. (1987) и Дутра и Бика (2002) из сопоставления лучевой скорости облака с моделью галактического вращения в предположении, что скорость определяется только вращением, а пекулярные скорости и радиальные движения отсутствуют. Но заметим, что это предположение сомнительно, соответствующие результаты имеют низкую точность, видимо, не выше ± 500 пк (Гомез, 2006), расстояние определяется только до переднего края облака, а протяженность облака и другие облака за ним не видны. Трехмерные карты определяют положения облаков гораздо точнее, и не только до переднего и заднего края облака, но и до всех скрытых облаков на том же луче зрения. Они подтвердили найденное Бочкаревым и Ситник (1985) и Страйжисом и др. (1999) радиальное относительно центра пояса Гудда (расположенного недалеко от Солнца) распределение поглощающей материи ближайшего килопарсека. В частности, подтверждено, что облачный комплекс Cygnus gift протянулся на расстояние от 500 до 2000 пк, имеет вытянутую форму с соотношением размеров 1:5 и радиален относительно центра пояса Гудда. Следовательно, стоит обратить внимание на высказанное в этих же работах предположение, что радиальная относительно Солнца ориентация пылевых частиц и целых гигантских облаков может быть вызвана особым положением Солнца недалеко от эпицентра процессов, недавно образовавших Местный пузырь и пояс Гудда. А рентгеновское излучение, возникшее в этих процессах, могло повлиять на химический состав и поглощающие свойства пылевых частиц, а также на галактическое магнитное поле, ориентирующее частицы.

Несмотря на недостатки, карта SFD98 показывает основные особенности распределения поглощающей материи в Галактике. При этом в высоких и средних широтах SFD98 отражает покраснение/поглощение вблизи Солнца, так как почти вся поглощающая материя при $|b| > 15^\circ$ (более 70% неба) находится на расстоянии меньше 600 пк от Солнца, а для широт $10^\circ < |b| < 15^\circ$ (еще 10% неба) - ближе 1300 пк (Гончаров, 20126). Отметим, что это придает большое значение исследованиям покраснения и поглощения именно в ближайшем килопарсеке. Особенно, если учесть, что именно на

средних и высоких широтах наблюдается большинство внегалактических объектов. Вольф (2014) показал, что неопределенность поглощения внутри Галактики является одним из основных источников неопределенности космологических параметров, полученных по сверхновым типа Ia.

На карте SFD98 видно, что минимум излучения/покраснения/поглощения не приходится на галактические полюса. В каждом галактическом полушарии минимум покраснения двойной: одна пара минимумов ($b \approx +55^\circ$, $l \approx 160^\circ$ и $b \approx -55^\circ$, $l \approx 340^\circ$) вызвана ориентацией пояса Гулда (содержащего пыль, как показано далее), другая - глобальным наклоном поглощающего слоя ($b \approx +50^\circ$, $l \approx 90^\circ$ и $b \approx -50^\circ$, $l \approx 250^\circ$). Второй наклон дает большее покраснение в первом и втором квадранте в южном полушарии и третьем и четвертом - в северном.

3. *Модель поглощения Арену и др. (1992).* С середины XX в. предпринимались попытки представить поглощение в виде более или менее простой двух- или трехмерной модели или функции (единой для неба или меняющейся от области к области), например, в зависимости от галактических координат l , b и (желательно) расстояния r . Отличие модели от карты в том, что вторая дает средние наблюдаемые поглощения в ячейках, а модель аппроксимирует эти значения некой зависимостью. В 1992-2009 гг. наилучшей аналитической трехмерной моделью межзвездного поглощения в ближайшем килопарсеке была модель Арену и др. (1992), которая аппроксимирует среднее поглощение A_V для 199 областей неба параболой в зависимости от расстояния: $A_V = k_1 r + k_2 r^2$, где k_1 и k_2 - набор коэффициентов для области неба. Эта модель адекватно воспроизводит наблюдения в ближайшем килопарсеке. Ее недостатком является отсутствие какого-либо физического обоснования закономерностей в наблюдаемых вариациях A_V . В качестве примера на рис.2а показана вычисленная по модели Арену и др. (1992) зависимость A_V от l для $r=500$ пк и полос $+15^\circ < b < +30^\circ$, $+5^\circ < b < +15^\circ$, $-5^\circ < b < +5^\circ$, $-15^\circ < b < -5^\circ$, $-30^\circ < b < -15^\circ$. Вертикальные линии показывают декларированную авторами точность модели. Общая, примерно синусоидальная зависимость A_V от l показана на рис.2а для $-5^\circ < b < +5^\circ$ пунктиром как $0.8 + 0.5 \sin(l + 20^\circ)$. Модель Арену и др. (1992) отражает, но не объясняет эту зависимость, а также - особенности поглощения вдали от галактической плоскости: на рис.2а видно, что при $+5^\circ < b < +30^\circ$ поглощение больше на долготах центра Галактики, а при $-30^\circ < b < -5^\circ$ - антицентра.

Точность любой модели ограничена колебаниями поглощения от звезды к звезде в одной и той же области пространства: например, для двух соседних звезд, находящихся от нас на расстоянии 500 пк, вполне возможен разброс поглощения $\sigma(A_V) \approx 0^m.3$ при типичной величине поглощения $A_V = 0^m.6$. Эти оценки получены Грином и др. (2014) при вычислении

расстояний, абсолютных величин и поглощений для примерно миллиарда звезд по высокоточной многоцветной фотометрии из каталога RAp-STARRS1. Аналитическая модель поглощения в ближайшем килопарсеке более точная, чем модель Арену и др. (1992), но возможны модели, более обоснованные физически.

Как показывает карта SFD98 и другие, для ближайших к Солнцу килопарсеков основной особенностью распределения поглощающего вещества

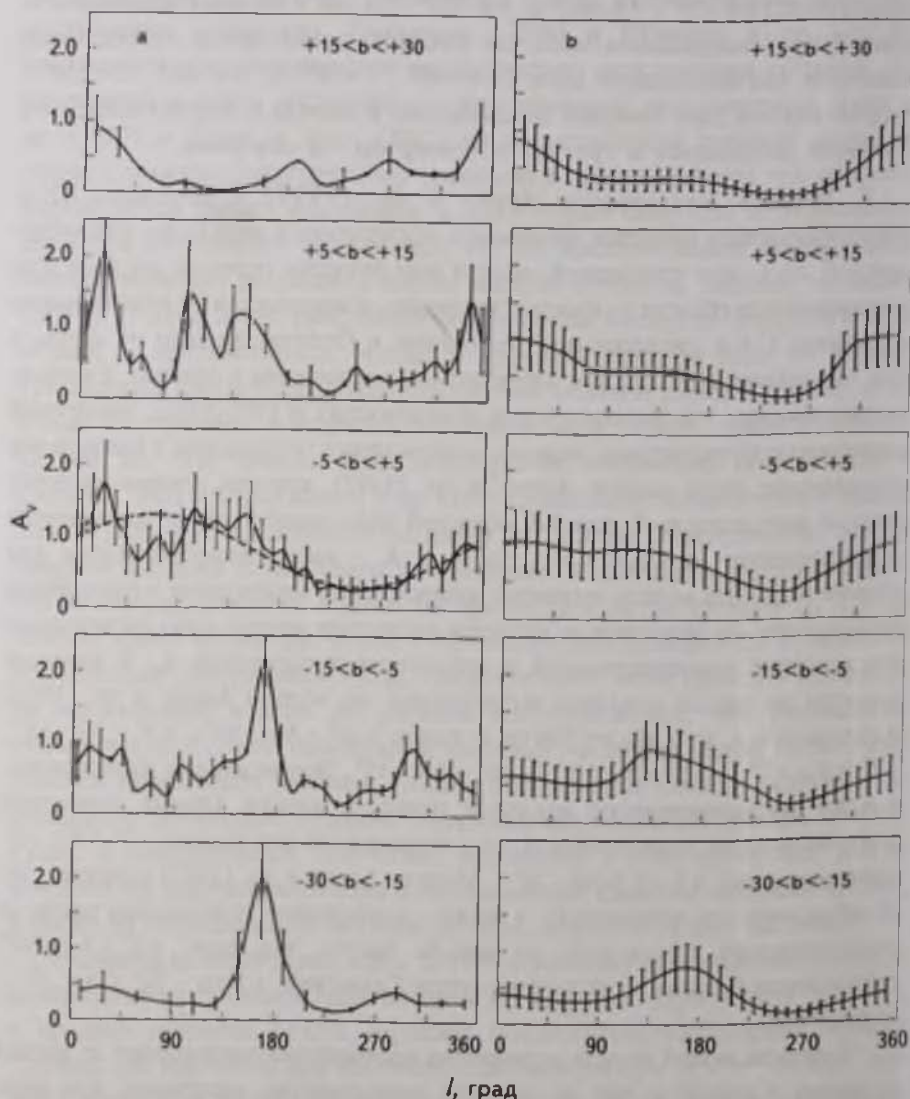


Рис.2. Зависимость A_V от l для $r = 500$ пк для разных широт: (а) согласно модели Арену и др. (1992), (б) согласно модели Гончарова (2009). Пунктиром для $-5^\circ < b < +5^\circ$ показана зависимость $0.8 + 0.5 \sin(l + 20^\circ)$. Вертикальные линии показывают точность моделей.

является его концентрация к плоскости Галактики. Второй важной особенностью является наличие областей со сравнительно большим поглощением вдали от галактической плоскости, преимущественно в поясе Гулда. Его описание дано Гончаровым (2009), Перриманом (2009, с.324-328), Гончаровым (2012б) и Бобылевым (2014). Пояс Гулда содержит молодые звезды и их ассоциации. Звезды образуются здесь и в наше время. Сопутствующие межзвездные облака могут служить причиной поглощения. Тэйлор и др. (1996) впервые отметили пояс Гулда как источник пыли, вторгающейся в Солнечную систему, а Вергели и др. (1998) впервые отметили межзвездное поглощение в поясе Гулда.

4. Новая модель поглощения с учетом пыли в поясе Гулда.

На рис.3 представлено предполагаемое в окрестностях Солнечной системы взаиморасположение двух слоев поглощающей материи - слоя с полутолщиной Z_A около экваториальной плоскости Галактики (далее - экваториального слоя) и слоя в поясе Гулда с полутолщиной ζ_A и радиусом $r' = 600$ пк вокруг Солнца. Наклон пояса Гулда к галактической плоскости обозначим γ . Рабочая система координат определяется наблюдаемыми галактическими координатами звезд: r, l, b . Солнце находится в центре рабочей системы координат. Смещение главной плоскости экваториального слоя относительно Солнца - Z_0 и аналогичное смещение

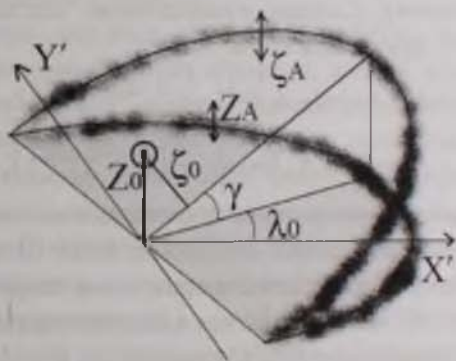


Рис.3. Взаиморасположение двух слоев пыли в модели Гончарова (2009).

для поглощающего слоя пояса Гулда - ζ_0 . Для сопоставления со стандартной галактической системой координат на рис.3 показаны X' и Y' - оси прямоугольной системы координат, лежащие в экваториальном слое. Ось X' параллельна направлению на центр Галактики, Y' - направлению галактического вращения. Как λ_0 обозначим разворот наивысшей точки пояса Гулда относительно оси X' , он же - угол между осью Y' и линией пересечения слоев.

Долгота λ и широта β звезды относительно главной плоскости пояса

Гулда вычисляются по галактическим координатам звезды:

$$\sin(\beta) = \cos(\gamma)\sin(b) - \sin(\gamma)\cos(b)\cos(l), \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}(\lambda - \lambda_0) = \cos(b)\sin(l)/(\sin(\gamma)\sin(b) + \cos(\gamma)\cos(b)\cos(l)). \quad (6)$$

Наблюдаемое поглощение A_V аппроксимируется суммой двух функций:

$$A_V = A_V(r, l, b) + A_V(r, \lambda, \beta), \quad (7)$$

каждая из которых представляется барометрическим законом (Паренаго, 1954, с.265). Поглощение в экваториальном слое:

$$A_V(r, l, b) = (A_0 + A_1 \sin(l + A_2))Z_A \left(1 - e^{-r|\sin(b)|/Z_A}\right) / |\sin(b)|, \quad (8)$$

где A_0 , A_1 , A_2 - свободный член, амплитуда и фаза поглощения в синусоидальной зависимости от l , и поглощение в поясе Гулда:

$$A_V(r, \lambda, \beta) = (\Lambda_0 + \Lambda_1 \sin(2\lambda + \Lambda_2))\zeta_A \left(1 - e^{-r|\sin(\beta)|/\zeta_A}\right) / |\sin(\beta)|, \quad (9)$$

где Λ_0 , Λ_1 , Λ_2 - свободный член, амплитуда и фаза поглощения в синусоидальной зависимости от 2λ . Предположение о том, что поглощение в поясе Гулда имеет два максимума в зависимости от долготы λ , подтвердилось. Максимумы поглощения в поясе Гулда наблюдаются около направлений, где удаление пояса от галактической плоскости максимально, т.е., примерно на долготах центра и антицентра Галактики.

С учетом смещения Солнца относительно поглощающих слоев уравнения (8) и (9) преобразуются в

$$A_V(r, l, Z) = (A_0 + A_1 \sin(l + A_2))r \left(1 - e^{-|Z-Z_0|/Z_A}\right) Z_A / |Z - Z_0|, \quad (10)$$

$$A_V(r, \lambda, \zeta) = (\Lambda_0 + \Lambda_1 \sin(2\lambda + \Lambda_2))\min(r', r) \left(1 - e^{-|\zeta-\zeta_0|/\zeta_A}\right) \zeta_A / |\zeta - \zeta_0|, \quad (11)$$

где $r' = 600$ пк - ограничение радиуса поглощающего слоя в поясе Гулда (поглощение за пределами пояса не должно быть больше, чем на его краю), ζ - аналог расстояния Z (вдоль координаты в направлении северного полюса Галактики), т.е. смещение звезды в системе координат пояса Гулда перпендикулярно главной плоскости пояса.

В результате имеем систему уравнений (7), по уравнению на каждую звезду или ячейку пространства. В левых частях стоит наблюдаемое поглощение A_V , в правых - функция трех наблюдаемых величин r , l и b . Решение дает значения 12 неизвестных: γ , λ_0 , Z_A , ζ_A , Z_0 , ζ_0 , A_0 , A_1 , A_2 , Λ_0 , Λ_1 , Λ_2 , которые подбираются так, чтобы минимизировать сумму квадратов невязок левых и правых частей уравнений (7).

Решения получены с использованием различных данных о поглощении и представлены Гончаровым (2009) и Гончаровым (20126). Наиболее точное решение для поглощения в экваториальном слое и в поясе Гулда соответственно:

$$(1.2 + 0.3 \sin(l + 55^\circ)) r (1 - e^{-|Z+0.01|/0.07}) 0.07/|Z+0.01|, \quad (12)$$

$$(1.2 + 1.1 \sin(2\lambda + 130^\circ)) \min(0.6, r) (1 - e^{-|z|/0.05}) 0.05/|z|, \quad (13)$$

где угловые величины выражены в градусах, а расстояния - в кпк.

Физическая обоснованность новой модели видна в реалистичности полученных оценок: наклон пояса Гудда к плоскости Галактики - около 19° ; полутолщина слоев пыли - 70 и 50 пк для экваториального и пояса Гудда, соответственно; смещение Солнца перпендикулярно слоям - 10 и 0 пк, соответственно и т.д.

Другие преимущества новой модели перед моделью Арену и др. (1992) - простота и непрерывность: вместо 199 площадок неба с индивидуальными формулами имеем одну формулу, а поглощение в зависимости от координат меняется плавно, а не скачками от площадки к площадке.

Эта модель - на сегодня лучший способ вычислить поглощение A_V для светила, если известны только его галактические координаты. Около галактического экватора ($|b| < 15^\circ$) эта модель работоспособна, по крайней мере, до соседних спиральных рукавов, т.е. до 2 кпк. В средних и высоких широтах ($|b| > 15^\circ$) - работоспособна до расстояний в мегаларсеки, учитывая, что, как указано ранее, почти вся поглощающая материя на этих широтах находится в пределах $r < 600$ пк.

Следовательно, для всех объектов с $r > 600$ пк и $|b| > 15^\circ$, включая и большинство внегалактических объектов, данная модель поглощения не только является лучшей оценкой поглощения, если известны только координаты объекта, но, более того, дает приемлемый результат, если расстояние до объекта неизвестно (тогда в формуле (13) $r = 600$ пк). Например, для галактики Андромеды данная модель дает $A_V = 0^m.458$ при $r = 600$ пк и $A_V = 0^m.459$ при $r = 750000$ пк. В любом случае значение по новой модели значительно превосходит значения A_V , обычно принимаемые для галактики Андромеды: $E_{(B-V)} = 0^m.058$ из SFD98 и $A_V = 0^m.18$ с учетом $R_V = 3.1$. Но, исправив значение из SFD98 в соответствии с уравнением (4), получим $E_{(B-V)} = 0^m.153$ и $A_V = 0.473$, что хорошо согласуется с указанной оценкой по новой модели поглощения. Причина довольно большого поглощения для галактики Андромеды в том, что на нее проецируется область неба около экваториальной плоскости пояса Гудда. Он дает половину суммарного поглощения ($A_V = 0^m.23$). Очевидно, до сих пор этот вклад недооценивался. В связи с открытием роли пояса Гудда, как контейнера поглощающего вещества, необходима переоценка поглощений до внегалактических объектов, особенно тех, на которые проецируется пояс.

Важно, что данная модель поглощения оценивает только поглощение в полосе V . Поглощение в иных полосах она не даст из-за пространственных

вариаций закона поглощения.

5. *Трехмерные карты поглощения.* Работа Страйжиса (1977) является и сводкой представлений о покраснении/поглощении к 1977г., и указателем к текущей научной революции, где впервые строго сформулированы требования и подходы, позволяющие при использовании многоцветной фотометрии формировать выборки звезд со схожим распределением энергии в спектре. На основе этих выборок можно исследовать пространственные вариации покраснения, поглощения и закона поглощения. Расцвет таких исследований наступил в XXI в. с появлением каталогов с точной (на уровне $0^m.01$) фотометрией миллионов звезд по всему небу в разных диапазонах излучения. В 2000г. вышел каталог Tycho-2 (Хег и др., 2000), в 2006 - 2MASS (Скрутские и др., 2006), в 2013 - последняя версия каталога WISE (Райт и др., 2010) и т.д.

Сменилась эпоха, на протяжении десятилетий поглощение вычислялось по покраснению (уравнение (3)) в предположении $R_V = 3.1$, а покраснение, в свою очередь, вычислялось как избыток цвета между наблюдаемым показателем цвета звезды и нормальным цветом непокарасневшей звезды того же спектрального класса и класса светимости:

$$E_{(B-V)} = (B-V) - (B-V)_0. \quad (14)$$

Но спектральный класс и класс светимости не являются однозначным набором характеристик распределения энергии в спектре звезды. А именно это распределение нас и интересует. Однозначный набор: масса, металличность и возраст. С небольшой потерей точности они переводятся, например, в базе теоретических эволюционных треков и изохрон PARSEC (Брессан и др., 2012) в температуру и светимость или абсолютную величину и показатель цвета. Но вычисление по ним спектрального класса и класса светимости не является однозначной задачей. Цитируя Страйжиса (1977, с. 104): "Спектральный класс и класс светимости являются лишь грубой дискретной мерой температуры и абсолютной величины. В действительности наблюдается плавный переход от одного спектрального класса к другому и от одной светимости к другой. Поэтому для более точного определения нормальных индексов данной звезды необходимо знать ее температуру и абсолютную величину или ускорение силы тяжести g ". Даже формально сортировка звезд по показателю цвета плодотворнее, чем по спектральному классу. Подклассы от O5 до M9 при разных классах светимости - это не более 200 градаций. И это все, что спектральная классификация может сказать о звезде. В то же время, типичная звезда $V = 10^m$ имеет точную (точность порядка $0^m.02$) фотометрию из каталогов Tycho-2, 2MASS, WISE и других. Обычно в сумме это не менее 10 фотометрических полос, т.е. 45 независимых показателей цвета. И по каждому из них звезды имеют

сотни градаций. Например, по показателю цвета ($u - W2$) с использованием полосы u из каталога SDSS и $W2$ из каталога WISE звезды занимают диапазон $1^m.5 < (u - W2) < 12^m.0$ с точностью $0^m.02$, т.е. имеют 525 градаций. Таким образом, многоцветная фотометрия дает на порядок больший объем информации о звезде, чем спектральная классификация.

Создание трехмерной карты покраснения/поглощения на основе многоцветной фотометрии предполагает определение для каждой звезды ее расстояния и приближенного распределения энергии в спектре, а значит - и ключевых астрофизических характеристик. Все эти величины должны вычисляться согласованно, обычно при решении системы (Гончаров, 2012в):

$$\begin{cases} r = 10^{(m-A-M+5)/5} \\ M = f1((m1-m2)_0) \\ (m1-m2)_0 = (m1-m2) - E_{(m1-m2)} \\ E_{(m1-m2)} = A/R \\ A = f2(r, l, b) \\ R = f3(r, l, b), \end{cases} \quad (15)$$

где $f1$, $f2$ и $f3$ - некие функции, $m1$ и $m2$ - величины одной звезды в двух полосах, M - абсолютная величина, r - расстояние, A - поглощение, R - коэффициент поглощения, E - покраснение.

Распространены и модификации метода. Для близких к Солнцу звезд каждого класса можно принять $E_{(m1-m2)} = 0$ и $(m1-m2) = (m1-m2)_0$. Тогда в каждой далекой ячейке пространства $E_{(m1-m2)} = (m1-m2) - (m1-m2)_0$. Кроме того, если из анализа спектров звезд определены эффективная температура, металличность и ускорение силы тяжести (как например, в проекте SDSS), то перед решением системы (15) по ним вычисляются $(m1-m2)_0$ и M .

Примеры такого подхода. Дутра и др. (2003) на основе фотометрии 2MASS отобрали гиганты ветви и построили трехмерную карту в направлении центра Галактики. Джонс и др. (2011) построили трехмерную карту для высоких широт в радиусе 2 кпк от Солнца с использованием спектров более 9000 карликов класса M из SDSS. При этом поглощение определено для каждой звезды из аппроксимации ее спектра в диапазоне $0.57 < \lambda < 0.92$ мкм кривой поглощения, зависящей от λ (найжены и вариации R_p , но с точностью лишь 0.4). Бэрри и др. (2012) построили карту на основе фотометрии SDSS и 2MASS для миллионов звезд. Чен и др. (2014) - с использованием 2MASS и WISE для 13 миллионов звезд в направлении на антицентр Галактики. Грин и др. (2014) - с использованием PanSTARRS1 для примерно миллиарда звезд. Произведение трехмерной карты покраснения

Гончарова (2010) и трехмерной карты вариаций закона поглощения (коэффициента R_v) Гончарова (2012a), составленных этим методом, позволило Гончарову (2012b) построить трехмерную карту поглощения A_v в ближайшем килопарсеке с разрешением 50 пк и точностью $\sigma(A_v) \approx 0^m.2$.

Неодиночные и пекулярные звезды, попадая в выборку, искажают результаты. Обычно это происходит, если двойственность или пекулярность звезды изменяет ее распределение энергии в спектре только в некоторых полосах, а выборка формируется по одному набору показателей цвета, в то время, как поглощение и другие характеристики выборки вычисляются по другому набору. Примеры: околозвездная пылевая оболочка поглощает коротковолновое излучение звезды и переизлучает его как длинноволновое; на поверхности звезды есть области, создающие коротковолновое излучение. Обычное решение этой проблемы - анализировать распределение энергии в спектре по как можно большему набору фотометрических полос, исключая звезды с иным распределением энергии хотя бы в одной полосе. При этом в каждой рассматриваемой ячейке пространства стоит контролировать все средние показатели цвета, исправленные за покраснение, и их стандартные отклонения. Они должны соответствовать теоретическим величинам, например, из базы данных PARSEC. Здесь возможны итерации: по "грязной" выборке вычисляются покраснения, по ним вычисляются нормальные цвета, отбрасываются посторонние звезды, и покраснения вычисляются по более "чистой" выборке. Такой подход применен, например, Гончаровым (2012a). Стоит также осреднять характеристики большого числа звезд в каждой ячейке пространства. Например, Гончаровым (2012a) ячейки пространства подбирались так, чтобы в каждой было не менее 25 звезд ОВ. Спектральная классификация для исключения пекулярных звезд обычно не эффективна, так как содержит много ошибок.

При составлении карт часто для упрощения принимается $R_v = 3.1$. Но сравнение таких карт, полученных по фотометрии на существенно разных длинах волн, показывает их большие разногласия. Их величина, видимо, коррелирует с температурой пыли (Дутра и др., 2003; Пик и Грэйвс, 2010). Применение закона поглощения с $R_v = 3.1$ в областях, где он не выполняется, приводит к большим ошибкам при вычислении поглощений, расстояний, абсолютных величин и других характеристик звезд. При этом систематические вариации R_v вызывают систематические же ошибки расстояний и других величин. Согласно Райс и Корради (2008), при вариациях $R_v \pm 1.5$ от среднего значения вычисляемые фотометрические расстояния ошибочны на 10%. Это не позволяет далее игнорировать пространственные вариации свойств пыли и, следовательно, закона поглощения. Определение закона поглощения (или множества коэффициентов, аналогичных R_v в разных диапазонах излучения) является одной из главных задач современной

астрономии при изучении пылевой межзвездной среды, покраснения и поглощения. Коэффициент R_v и другие характеристики закона поглощения достигают экстремальных значений, показывают большие вариации и определяются с худшей точностью вдали от галактической плоскости и вне видимого диапазона излучения.

В результате построения трехмерных карт стало ясно, что малое поглощение и покраснение в высоких широтах ни в коей мере не противоречит большим значениям R_v там же. Кроме того, теперь находят объяснение многочисленные имеющиеся в литературе противоречивые данные о корреляции или антикорреляции покраснения и коэффициента R_v и, соответственно, покраснения и поглощения. Они коррелируют в тонком слое ($|Z| < 100$ пк) около галактического экватора, так как здесь в направлении центра Галактики растет и покраснение, и R_v и поглощение. Вне этого слоя они антикоррелируют: в высоких и средних широтах меньшему покраснению соответствуют большие значения R_v . В обширном исследовании закона поглощения около галактической плоскости Шлафли и др. (2016) нашли сильную корреляцию между R_v и эмиссией в далеком ИК. Это объясняется, если закон поглощения зависит, прежде всего, от размера пылинок. Тогда упомянутая антикорреляция показывает, что там, где пылинок много, преобладает мелкая пыль, а там, где их мало - крупная. Таким образом, видимо, в некоторой степени сохраняется средняя пространственная плотность пыли в больших объемах пространства, несмотря на вариации размера пылинок.

6. Вариации закона поглощения. В качестве стандартного закона поглощения, согласующегося с наблюдениями в некоторой части Галактики (но не везде), можно принять закон Вайнгартнера и Дрэйна (2001), далее WD2001. При $0.4 < \lambda < 1.2$ мкм и $R_v = 3.1$ он согласуется с законом Дрэйна (2003), Индебетова и др. (2005), законом, принятым в базе PARSEC на основе Карделли и др. (1989) и другими. Закон WD2001 показан на рис.8 при $R_v = 3.1$ и $R_v = 5.5$, соответственно, нижним и верхним серыми пунктирами.

Многоцветная фотометрия может использоваться для определения закона поглощения. Действительно, соотношение двух или нескольких показателей цвета звезды является характеристикой распределения энергии в ее спектре. Для группы звезд с примерно одинаковым исходным распределением энергии в спектре большое изменение распределения энергии из-за поглощения при малом покраснении соответствует большим значениям R_v и наоборот. Соответствующий метод определения закона поглощения Страйжис (1977, с.39-40) назвал методом экстраполяции закона экстинкции (поглощения), Бердников и др. (1996) - методом цветовых разностей, Засовски и др. (2009) - методом соотношения показателей цвета, Маевский и др. (2011) - методом избытка цвета Рэлея-Джинса. При этом многие исследователи

слегка модифицируют этот метод. Видимо, впервые его применили Джонсон и Боргман (1963). Они обнаружили не только большие отклонения R_V от значения 3.1 для некоторых звезд, но и меньшую по амплитуде плавную зависимость R_V от долготы с минимумом около $l \approx 110^\circ$ (большие отклонения R_V от значения 3.1 обнаружены и в классической работе Джонсона (1965)).

Как показал Вегнер (2003), в настоящее время это единственный прямой метод определения пространственных вариаций закона поглощения с использованием фотометрии отдельных звезд, а не, скажем, скоплений. Предпринимаются попытки найти альтернативу - корреляции коэффициента R_V с другими величинами, например, с длиной волны максимальной поляризации излучения звезд или с характеристиками локального максимума поглощения около длины волны 0.2175 мкм. Но, как показал Вошинников (2012), это дает сомнительные результаты.

Как показал Гончаров (2012a), для использования метода экстраполяции закона поглощения нужна полная выборка звезд высокой светимости с примерно одинаковым распределением энергии в спектре, однородно распределенных в большой области пространства. При этом их покраснение должно быть существенным в каждой рассматриваемой ячейке пространства. Точнее, среднее покраснение в ячейке должно быть больше естественного разброса показателей цвета непокрашенных звезд и, кроме того, больше ошибки показателя цвета из-за ошибок исходной фотометрии. Фактически метод плодотворен при точности фотометрии на уровне не хуже $0^m.01$.

Гончаровым (2012a) составлена трехмерная карта вариаций закона поглощения (коэффициента R_V) в радиусе 700 пк от Солнца с точностью $\sigma(R_V) = 0.2$ и разрешением 100 пк. В качестве примера на рис.4 показаны контурные карты R_V в зависимости от координат (а) X и Z для слоя

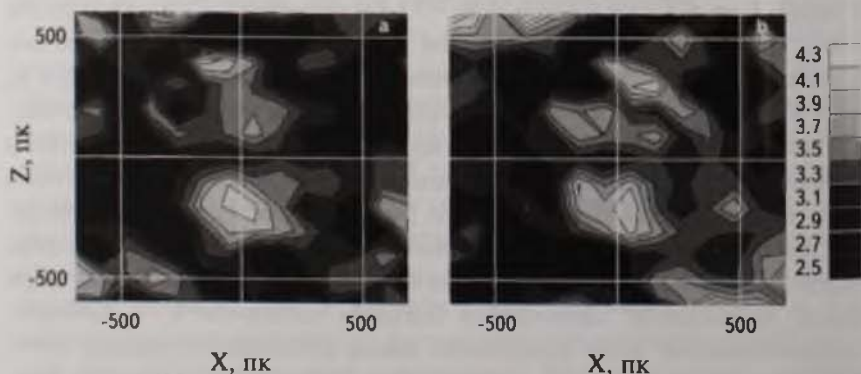


Рис.4. Контурные карты R_V в зависимости от (а) X и Z для слоя $-150 < Y < +150$ пк, (б) Y и Z для слоя $-150 < X < +150$ пк по данным Гончарова (2012a). Справа дана цветовая шкала значений R_V . Белые линии координатной сетки нанесены с шагом 500 пк. Солнце - в центрах графиков.

$-150 < Y < +150$ пк, (6) Y и Z для слоя $-150 < X < +150$ пк. Справа дана цветовая шкала значений R_V . Белые линии координатной сетки нанесены с шагом 500 пк. Солнце – в центрах графиков. Видны две области экстремально высоких значений R_V севернее и южнее Солнца. Северная имеет "изъяз" во втором квадранте – область более низких значений R_V , ранее отмеченная Фишпатрик и Масса (2007). Также видно, что пространственные вариации R_V в значительной степени радиальны по отношению к центру пояса Гулда. Например, уменьшение R_V при $|X| \approx 500$ пк примерно соответствует положению краев пояса Гулда. Кроме того, в плоскости XZ центральный слой наклонен к галактическому экватору примерно на 19° , т.е. так же, как пояс Гулда. Наклон этого слоя говорит в пользу того, что обнаруженная во всем рассмотренном пространстве в целом сферическая структура вариаций R_V не является гелиоцентрическим артефактом.

Для составления этой карты использованы две выборки: 11990 звезд OB и 30671 гигантов ветви класса KIII. Во всех рассмотренных пространственных ячейках значения R_V согласуются для двух рассматриваемых выборок в пределах $\Delta R_V < 0.2$. Поэтому окончательная трехмерная карта получена осреднением результатов по выборкам. Обнаруженная согласованность вариаций R_V для красных гигантов и звезд OB подтверждает найденное Бердниковым и др. (1996) сходство R_V для голубых и красных звезд. Видимо, зависимости R_V от покраснения, поглощения, спектрального класса и других характеристик, найденные разными исследователями (см. Страйжис, 1977), в некоторой степени могут быть артефактами, возникшими из-за неучтенных корреляций между характеристиками звезд и вариациями R_V . Видимо, решающую роль при этом играет селекция звезд по расстоянию в каталогах, ограниченных по звездной величине: звезды разного цвета наблюдаются на разных средних расстояниях и поэтому демонстрируют разные средние R_V .

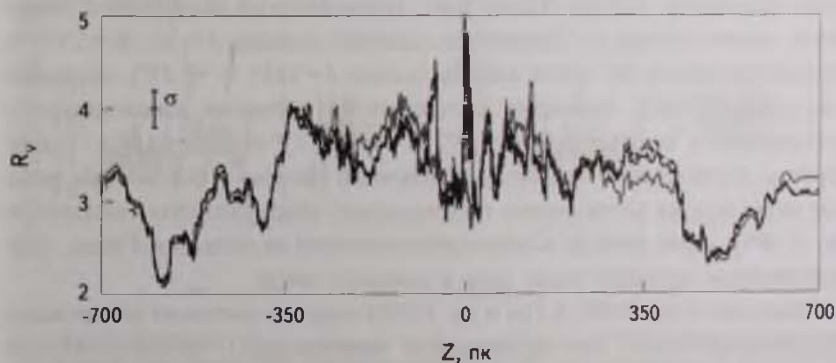


Рис.5. Вариации величин $1.12 E_{(V_r, K_s)} / E_{(B_r, V_r)}$ (серая кривая), $1.07 E_{(V_r, W3)} / E_{(B_r, V_r)}$ (черный пунктир) и $1.02 E_{(V_r, W3)} / E_{(B_r, V_r)}$ (черная сплошная кривая) в зависимости от $|Z|$ по данным Гончарова (2016). Отрезком показана точность.

На рис.5 серой кривой, черным пунктиром и черной сплошной кривой показаны вариации аппроксимаций коэффициента R_V , величин, соответственно, $R_V = 1.12 E_{(V_T - K_S)} / E_{(B_T - V_T)}$, $R_V = 1.07 E_{(V_T - W3)} / E_{(B_T - V_T)}$ и $R_V = 1.02 E_{(V_T - W4)} / E_{(B_T - V_T)}$. Они получены Гончаровым (2016) на основе фотометрии 1355 гигантов ветви класса KIII из Tycho-2, 2MASS и WISE в пространственном цилиндре вдоль оси Z радиусом 150 пк вокруг Солнца. В рассматриваемых величинах коэффициент 1.12 получен из теории, а коэффициенты 1.07 и 1.02 подобраны так, чтобы три рассматриваемых величины давали одно и то же среднее значение ($R_V = 3.38$) в рассматриваемом диапазоне $|Z| < 700$ пк. Коэффициенты 1.07 и 1.02 согласуются с аналогичными, следующими из закона поглощения WD2001: 1.09 и 1.02. Соответствующее поглощение $A_{W3} = 0.074 A_V$ и $A_{W4} = 0.027 A_V$ (при $\lambda = 11$ и 22 мкм) вызвано силикатами (Ли, 2005; Бочкарев, 2009).

Кривые на рис.5 заметно расходятся только при $-200 < Z < -50$, $-2 < Z < 14$, $100 < Z < 125$ и $280 < Z < 400$ пк. Видимо, в этих областях пространственная массовая плотность крупных пылинок отличается от средней. Взлет черных кривых при $-2 < Z < 14$ пк, видимо, отражает повышенное содержание крупных пылинок в ближайших галактических окрестностях Солнечной системы, преимущественно к северу от галактической плоскости. Этот результат согласуется с результатами Крюгера и др. (2015) и Штруба и др. (2015), которые по данным детектора пыли на борту космического аппарата Ulysses обнаружили повышенную концентрацию крупных пылинок в потоке межзвездной пыли, вторгающемся в Солнечную систему именно из северного галактического полушария вместе с потоком нейтрального водорода и гелия (в том же направлении и примерно с той же скоростью относительно Солнца, около 20 км/с движется и множество самых молодых звезд ОВ, принадлежащих поясу Гулда (Гончаров, 2012в)). Более того, галактические координаты точки входа этого потока в Солнечную систему (около $l = 3^\circ$, $b = 21^\circ$) и противоположной ей точки выхода (около $l = 183^\circ$, $b = -21^\circ$), согласно Гончарову (2012б), примерно соответствуют областям максимального поглощения в поясе Гулда ($l = 15^\circ$, $b = 19^\circ$ и $l = 195^\circ$, $b = -19^\circ$). Таким образом, исследование пылинок в Солнечной системе и фотометрия звезд в ее окрестностях согласованно подтверждают обнаруженную Тейлором и др. (1996) связь между Солнечной системой и поясом Гулда, как контейнером крупной пыли, газа и молодых звезд.

Засовски и др. (2009) и Гао и др. (2009) впервые уверенно обнаружили крупномасштабные (на протяжении многих кпк) систематические пространственные вариации закона поглощения в диффузной среде Галактики. В этих исследованиях, кроме прочего, применена полностью сформулированная чуть позже очень перспективная модификация Маевским

и др. (2011) метода экстраполяции закона поглощения с использованием фотометрии только в ближнем и среднем ИК диапазоне. Во внутренней, относительно Солнца, части диска Засовски и др. (2009) и Гао и др. (2009) нашли, что с удалением от центра Галактики отношение поглощения в ИК к поглощению в видимом диапазоне падает (т.е. менее плотной среде соответствует меньшее ИК поглощение и более крутая кривая поглощения в зависимости от длины волны). Если закон поглощения в основном определяется размером пылинок, то меньшему поглощению в ИК диапазоне соответствует более мелкая пыль. Но теми же авторами найден более плоский (т.е. велико отношение поглощения в ИК к поглощению в видимом диапазоне) закон поглощения в межрукавном пространстве, чем в рукавах. Это значит, что для самой разреженной среды ИК поглощение растет с уменьшением плотности среды. Берлинд и др. (1997) нашли ту же зависимость, определив закон поглощения в видимом и ближнем ИК диапазоне (0.3 - 2 мкм) по фотометрии галактики IC2163, частично затмеваемой галактикой NGC2207. Они обнаружили менее плоский закон в спиральных рукавах при $A_V \approx 1^m$ и более плоский - в межрукавном пространстве при $A_V \approx 0^m.5$.

Гончаров (2013а) и Шультхайс и др. (2015), используя иные фотометрические данные, подтвердили результаты Засовски и др. (2009) и Гао и др. (2009) для внутренней, относительно Солнца, части диска Галактики, но нашли противоположную закономерность в его внешней части. Здесь

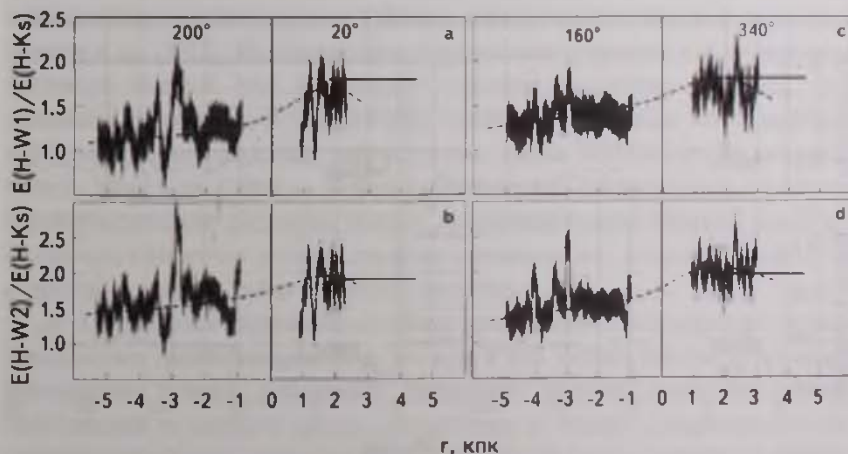


Рис.6. Величины $E_{(V,W1)}/E_{(H-Ks)}$ и $E_{(V,W2)}/E_{(H-Ks)}$ в зависимости от расстояния до Солнца для долгот 200° (отрицательные r) и 20° (положительные r) ((a)-(b)), 160° (отрицательные r) и 340° (положительные r) ((c)-(d)): результаты Гончарова (2013а) - черные кривые с серыми полосами ошибок. Горизонтальными прямыми показаны аналогичные результаты Засовски и др. (2009). Штриховыми линиями показан примерный систематический ход характеристик.

с удалением от центра Галактики на протяжении многих кпк отношение поглощения в ИК к поглощению в видимом диапазоне растет. Итак, обнаруженные на сегодня пространственные вариации закона поглощения в диске Галактики это, прежде всего, немонотонные вариации в зависимости от галактоцентрического расстояния. Следовательно, на некотором галактоцентрическом расстоянии, чуть ближе к центру Галактики, чем располагается Солнце, поглощение в ИК минимально, кривая поглощения в зависимости от длины волны наиболее крутая, размер пылинок минимален. Это видно на рис.6, где показаны вариации характеристик закона поглощения $E_{(H-W1)}/E_{(H-Ks)}$ и $E_{(H-W2)}/E_{(H-Ks)}$ в зависимости от расстояния до Солнца для галактических долгот 200° , 20° , 160° и 340° , т.е. около направлений на центр и антицентр Галактики: кривые показывают результат Гончарова (2013а), а горизонтальные прямые - результат Засовски и др. (2009), осредненный авторами для соответствующей долготы.

Те же закономерности Хаттон и др. (2015) нашли для галактики М82 (R_v с удалением от центра галактики сначала падает, затем растет на протяжении многих кпк).

Гончаров (2012а; 2013б; 2016) проанализировал закон поглощения в пространственных конусах, высотой 25 кпк, направленных от Солнца к галактическим полусосам. Для этого использована фотометрия 9769 гигантов сгущения (в радиусе 8° вокруг полусосов) и 1221 гигантов ветви (в радиусе 20° вокруг полусосов) из Tycho-2, 2MASS и WISE. Оказалось, что вне галактической плоскости, на расстояниях $100 < |Z| < 25000$ пк от нее (Z - координата в направлении северного полюса Галактики) всюду, кроме тонких

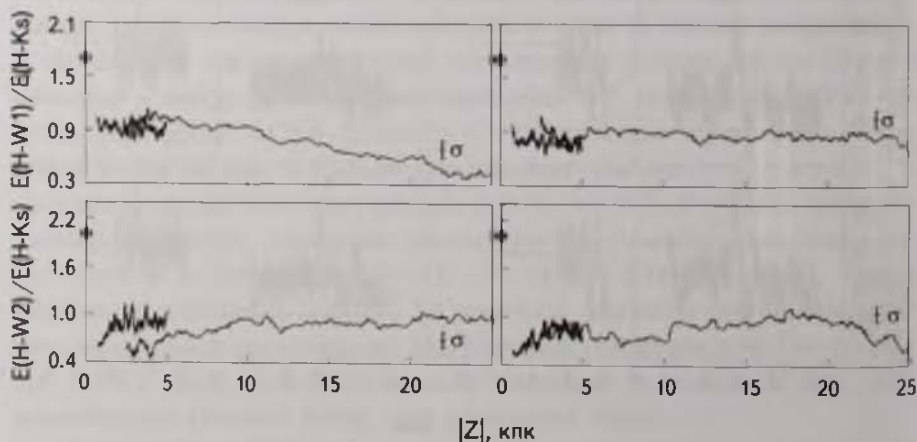


Рис.7. Вариации $E_{(H-W1)}/E_{(H-Ks)}$ и $E_{(H-W2)}/E_{(H-Ks)}$ в направлении северного (слева) и южного (справа) галактических полюсов по данным Гончарова (2013б; 2016) для гигантов ветви (серые кривые) и гигантов сгущения (черные кривые). Кружки показывают характеристики, полученные Засовски и др. (2009) и Гончаровым (2013а) около галактической плоскости, осредненные по всем долготам вдали от направлений на центр и антицентр Галактики. Их разброс ± 0.4 показан вертикальными линиями.

слоев на $Z \approx -600$ пк и $Z \approx -500$ пк, закон поглощения более плоский, чем около плоскости Галактики. На рис.7 показаны вариации величин $E_{(H-W1)}/E_{(H-K_s)}$ и $E_{(H-W2)}/E_{(H-K_s)}$ в зависимости от $|Z|$ в направлении северного (слева) и южного (справа) галактических полюсов по данным для гигантов ветви (серые кривые) и гигантов сгущения (черные кривые). Видно хорошее согласие соответствующих черных и серых кривых в общем диапазоне расстояний. В среднем для двух полюсов $E_{(H-W1)}/E_{(H-K_s)} \approx 0.8$, $E_{(H-W2)}/E_{(H-K_s)} \approx 0.85$ при пространственных вариациях этих величин ± 0.2 . Для сравнения те же характеристики, полученные Засовски и др. (2009) и Гончаровым (2013а) около галактической плоскости, осредненные по всем долготам вдали от направлений на центр и антицентр Галактики - $E_{(H-W1)}/E_{(H-K_s)} \approx 1.7$, $E_{(H-W2)}/E_{(H-K_s)} \approx 2.0$ при пространственных вариациях ± 0.4 . Эти величины показаны на рис.7 кружками, а диапазон вариаций - вертикальными линиями. Модель WD2001 при $R_V = 3.1$ дает для этих характеристик значения $E_{(H-W1)}/E_{(H-K_s)} = 1.92$, $E_{(H-W2)}/E_{(H-K_s)} = 2.37$, которые в пределах вариаций согласуются с наблюдаемыми около плоскости Галактики, но не вдали от нее. Другими словами, около плоскости Галактики почти всюду $E_{(H-W1)}/E_{(H-K_s)} > 1.1$ и $E_{(H-W2)}/E_{(H-K_s)} > 1.1$ (т.е. пыль сравнительно мелкая), а вдали от нее - почти всюду $E_{(H-W1)}/E_{(H-K_s)} < 1.1$ и $E_{(H-W2)}/E_{(H-K_s)} < 1.1$ (пыль более крупная). Таким образом, нигде вдали от галактической плоскости вплоть до гало Галактики закон поглощения в ИК диапазоне не похож на закон около плоскости.

Закон поглощения в ИК диапазоне исследован многими авторами. Обзор наблюдений дан Вангом и др. (2014), а обзор соответствующих моделей - Вангом и др. (2015). Их сопоставление предполагает наличие в среде крупных пылинкок. Видимо они же создают эмиссию на длинах волн до 2 мм, найденную телескопами COBE/DIRBE, COBE/FIRAS и Planck. Среди моделей, наиболее соответствующих наблюдениям, кроме WD2001 стоит отметить модель Зубко и др. (2004) со сложными пылинками, включающими аморфные и кристаллические силикаты, графит, аморфный углерод (сажу) и оболочку из органики (включая полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)) и водяного льда, а также полости (пустоты).

В ИК диапазоне крупномасштабные пространственные вариации закона поглощения наиболее заметны, так как в ИК можно заглянуть в самые запыленные уголки Галактики. Например, большие вариации закона поглощения и свойств среды обнаружены в балдже Галактики, т.е. в центральной области радиусом 2 кпк. Необычный закон поглощения найден в балдже еще Поповски (2000) и Суми (2004). Но только в результате многих исследований, например, Натафа и др. (2013), формируется полная картина. С удалением от центра Галактики в пределах балджа средний размер пылинки сначала растет, затем уменьшается, и на периферии

балджа переходит в упомянутые ранее вариации, найденные для диска Галактики Засовски и др. (2009).

До сих пор почти все наблюдения закона поглощения в ИК диапазоне относятся к плотным облакам около галактической плоскости или к центру Галактики. Здесь совпадающие в пределах ошибок результаты получили Луц (1999), Индебетов и др. (2005), Джанг и др. (2006), Флаэрти и др. (2007), Нишияма и др. (2009), Фриц и др. (2011), Чен и др. (2013), Гао и др. (2009). Средний по ним закон поглощения в зависимости от $1/\lambda$ для полос $W4$, $W3$, Spitzer/IRAC 8 мкм, Spitzer/IRAC 5.8 мкм, $W2$ (или Spitzer/IRAC 4.5 мкм), $W1$ (или Spitzer/IRAC 3.6 мкм), Ks , H показан кружками на рис.8. Для сравнения законы WD2001 при $R_V = 3.1$ и $R_V = 5.5$ показаны, соответственно, нижней и верхней пунктирными кривыми. Видно, что наблюдения хорошо ложатся на закон WD2001 при $R_V = 5.5$. Тот же закон поглощения в ИК, но с пиком на 4.5 мкм, получили Ванг и др. (2013) в облаке Угольный мешок и Гао и др. (2013) в плотной среде Большого Магелланова облака. Эти пики поглощения на 4.5 мкм ($W2$) показаны на рис.8, соответственно, серым и черным треугольниками. Ли и др. (2016) в обзоре свойств пыли и поглощения в Местной группе галактик отметили, что все наблюдения в диапазоне 2-6 мкм дают плоский закон поглощения и для плотной, и для диффузной среды.

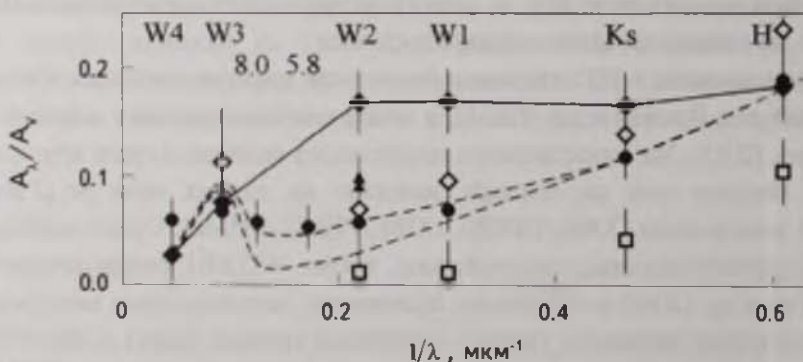


Рис.8. Зависимость отношения A_λ / A_V от величины $1/\lambda$. Закон поглощения WD2001 при $R_V = 3.1$ и $R_V = 5.5$ показан серыми пунктирами, соответственно, нижним и верхним. Осредненные результаты указанных в тексте исследований показаны кружками. Серым и черным треугольниками отмечены пики поглощения на 4.5 мкм, найденные Вангом и др. (2013) и Гао и др. (2013). Результаты Давенпорта и др. (2014) для $b > 50^\circ$ показаны открытыми ромбами, а для $b < 25^\circ$ — открытыми квадратами. Закон поглощения, найденный Гончаровым (2013б; 2016) для гало Галактики ($5 < |Z| < 25$ кпк), показан ромбами и черными кривыми. Вверху подписаны спектральные полосы.

Все рассматриваемые законы поглощения являются относительными. Причем нуль-пункт, т.е. поглощение в некой полосе, принятое за истину, в каждом исследовании свой. Для сопоставления результатов, учитывая, что большинство из них в ИК диапазоне согласуются с законом поглощения

WD2001 при $R_V = 5.5$, здесь он принят в качестве нуль-пункта. В настоящее время неопределенность нуль-пункта закона поглощения является главной проблемой во всех исследованиях. Она может быть решена в будущем только при использовании однородной и высокоточной спектрофотометрии в очень широком диапазоне от ультрафиолета, до далекого ИК.

При том же нуль-пункте результаты Гончарова (2013б; 2016) вдали от галактической плоскости соответствуют $A_H = 0.18 A_V$, $A_{K_S} = 0.17 A_V$, $A_{W1} = 0.16 A_V$, $A_{W2} = 0.16 A_V$, $A_{W3} = 0.074 A_V$, $A_{W4} = 0.027 A_V$. Точность этих оценок - $0.03 A_V$. Эти величины показаны на рис.8 заполненными ромбами и сплошными ломаными линиями. Таким образом, видим совершенно плоский закон поглощения в полосах с H по $W2$, т.е. в диапазоне от 1.4 до 5.4 мкм.

Как видно из рис.8, в полосах $W1$ и $W2$ найденное Гончаровым (2013б; 2016) поглощение в гало Галактики превосходит остальные упомянутые результаты более, чем на величину декларируемых ошибок. Однако результаты Гончарова (2013б; 2016) получены на гораздо большем удалении от галактической плоскости, где почти нет других исследований для сравнения.

Обзор наблюдений "серого" поглощения в разных районах Галактики и вне ее дан Горбиковым и Брошем (2010). К пространству вдали от галактической плоскости относится лишь один результат: в направлении трех высокоширотных облаков на расстоянии 0.5 - 1 кпк от галактической плоскости, используя SDSS, они нашли "серое" поглощение величиной $0^m.2 - 0^m.4$, согласующееся с результатом Гончарова (2013б; 2016).

С тех пор лишь Давенпорт и др. (2014) проанализировали закон поглощения в ИК диапазоне в диффузной среде вдали от галактической плоскости (на Z порядка 1 кпк) и сравнили его с законом около плоскости. При этом использована 10-полосная фотометрия более миллиона звезд из SDSS, 2MASS и WISE. Их результат для $b > 50^\circ$ показан на рис.8 открытыми ромбами, а для $b < 25^\circ$ - открытыми квадратами. Близость на рис.8 кружков и открытых ромбов предполагает сходство межзвездной среды в плотных облаках около галактической плоскости и в разреженной среде вдали от нее.

Отмечу, что на широтах $25^\circ < b < 50^\circ$ Давенпорт и др. (2014) нашли особенно сильный прирост поглощения (относительно A_V) в полосах H и K_S . На широтах $50^\circ < b < 90^\circ$ относительное поглощение в H и K_S уменьшается, зато сильно растет поглощение в $W1$ и $W2$. То же показал и Гончаров (2013б; 2016). Это выглядит как постепенное увеличение среднего размера пылинки с удалением от галактической плоскости. Данные Давенпорта и др. (2014) - материал для дальнейшего более подробного анализа.

Шлафли и др. (2016) отметили, что во многих исследованиях, якобы,

рассматривающих крупномасштабные вариации закона поглощения в высоких широтах, на самом деле используется один узкий диапазон длин волн и/или небольшое число звезд ОВ, естественно, располагающихся в узком слое около галактической плоскости и, следовательно, анализируются лишь некоторые свойства конкретных звезд и среды в ничтожно малой части Галактики. Примером служит активно цитируемая (более 70 ссылок) работа Фицпатрика и Массы (2009), анализирующая всего 14 ОВ звезд в пределах $|Z| < 100$ пк. Как источник путаницы стоит привести исследование Ларсона и Виттета (2005), которые исследуют закон поглощения в высоких галактических широтах, но в пределах 100 пк от Солнца. Очевидно, их результаты относятся к экваториальному слою пыли с обычным законом поглощения.

Рассмотренные здесь вариации закона поглощения, особенно в ИК диапазоне, интерпретируются Вангом и др. (2013) как наличие в Галактике трех видов среды: плотные облака диска и балджа с крупной пылью и большим поглощением в ИК, диффузная среда спиральных рукавов с мелкой пылью и малым поглощением в ИК и наиболее разреженная (translucent) среда между рукавами и вдали от галактической плоскости с законом поглощения как у плотных облаков. Ванг и др. (2013) подчеркивают сходство первой и третьей среды: температура очень низкая, газ молекулярный, заряженных частиц мало. Видимо, в плотных облаках объединение пылинок преобладает над дроблением, в спиральных рукавах из-за высокой температуры дробление преобладает над объединением, а в самой разреженной среде нет процессов, дробящих пылинки. В подтверждение этого Мивиль-Дэшенэ и др. (2002) показали, что в типичном довольно разреженном высокоширотном облаке относительные скорости пылинок радиусом порядка 0.1 мкм близки к критической скорости около 1 км/с (при более низкой скорости пылинки, встречаясь, объединяются, при более высокой – дробятся). Эта гипотеза о трех типах среды в Галактике нуждается в дальнейшей проверке.

7. Крупная пыль вне диска Галактики. Итак, видимо, на периферии нашей и других галактик и, возможно, в межгалактической среде доля крупной пыли больше, чем в дисках галактик. Видимо, именно эта крупная пыль создает давно известный избыток излучения некоторых внегалактических объектов в далеком ИК диапазоне при $\lambda \approx 500$ мкм. Эта эмиссия обнаружена и по наблюдениям космических телескопов Herschel и Planck (Галлиано и др., 2011; Планк, 2011б). Этот избыток сразу после открытия в 1990-х годах пытались интерпретировать как повышенную пространственную массовую плотность холодной (с температурой 4–7 К) пыли (Рич и др., 1995). Но столь большая пространственная плотность, да еще и крупных пылинок, вдали от галактической плоскости считалась невозможной. Современная многоцветная ИК фотометрия показывает, что это возможно, видимо, прежде всего, за счет укрупнения пылинок. При

постоянной пространственной массовой плотности увеличение радиуса частицы на порядок (например, с 0.1 до 1 мкм) ведет к уменьшению числа частиц в единице объема на 3 порядка и к такому же увеличению среднего расстояния между пылинками. Это резко повышает прозрачность среды и снижает взаимодействие вещества с излучением. Укрупнение пылинок ведет и к росту излучения ими в далеком ИК диапазоне. На сегодня это является единственным объяснением антикорреляции между ИК излучением и плотностью среды в Большом Магеллановом облаке, которая обнаружена Галлиано и др. (2011) в результатах телескопа *Herschel*.

Отметим, что упомянутая ранее эмиссия в среднем ИК диапазоне, найденная Яхата и др. (2007) и Вольфом (2014) при сравнении фотометрии галактик и квазаров с картой SFD98, возможно, является проявлением неучтенных до сих пор пылинок среднего размера. А неожиданно обнаруженное ракетным экспериментом *Cosmic Infrared Background ExpeRiment (CIBER)* мощное излучение в ближнем ИК диапазоне с периферий галактик и из межгалактического пространства (Земцов и др., 2014), видимо, является проявлением неучтенной мелкой пыли. Таким образом, возможно, до сих пор недооценивалась пространственная массовая плотность не только крупной, но и всей пыли.

Большую долю именно крупной пыли в среде подтверждают наблюдения вызванных этой пылью гало вокруг рентгеновских источников. Витт и др. (2001) обнаружили созданное крупными (радиусом не менее 2 мкм) межзвездными пылинками гало вокруг рентгеновского источника Новой *Cygni* 1992. Корралес и Пэрельс (2012) обнаружили рентгеновское гало вокруг источника *Cygnus X-3*, вероятно, созданное крупными пылинками в межзвездной среде ассоциации *Cyg OB2* на фоне источника.

Согласно результатам проекта *Планк* (2011b), до 90.7% всей массы пыли на периферии Галактики содержится в крупных пылинках. Увеличению размера и массы твердых частиц здесь способствует не только постоянная низкая температура (порядка 10 К согласно *Планк* (2011a)) и близость кинетических энергий объектов, но и рост роли сил Ван-дер-Ваальса по сравнению с гравитацией, накопление на поверхности пылинок ледяных оболочек, а также - высокая способность таких частиц впитывать газ (Сандфорд и Алламандола, 1993), превращая атомарный водород в молекулярный (Дизли и др., 1994; Перец и др., 2005). Скорость этого превращения на поверхности частиц растет с уменьшением температуры и увеличением размера частиц (Липштат и Бихам, 2005 и ссылки в этой работе). Накопление на тугоплавких пылинках ледяных оболочек и возникновение слоеных пылинок также способствуют повышенному поглощению в ближнем ИК диапазоне (Фрид и др., 2011; Вошинников 2012).

Впервые еще Гринберг (1974) отметил, что межзвездная среда хорошо

описывается только моделями, содержащими крупную (более 0.1 мкм) пыль. В XXI в. это подтверждается. Обзор предложенных разными авторами распределений пылинок по размерам дан Вошинниковым (2012). Например, модель WD2001, как мы видели, лучше всего соответствует наблюдениям в диапазоне 2–8 мкм, если в ней принять $R_p = 5.5$. Но тогда она включает значительную долю углеродных пылинок радиусом порядка 0.5 мкм, а в некоторых вариантах и до 7.3 мкм. Впрочем, модель WD2001 по признанию авторов ни при каких параметрах не может объяснить очень большую долю крупных (радиусом порядка 0.5 мкм) межзвездных пылинок, зарегистрированных аппаратами *Ulysses* и *Galileo* в Солнечной системе по данным WD2001. Фриш и др. (1999) отметили необходимость дальнейших наблюдений проявлений крупной пыли внутри и вне Солнечной системы. Такие наблюдения выполнены и обсуждаются в следующем разделе.

По современным представлениям пыль формируется в оболочках красных гигантов, сверхгигантов, новых и сверхновых звезд, и из них выносятся в межзвездную среду (Бочкарев, 2009). Но долгое время результаты наблюдений производимой массы пыли на несколько порядков расходились с теоретическими оценками (Вессон и др., 2015). В последние годы, благодаря наблюдениям этих звезд в микроволновом диапазоне, оценки существенно пересмотрены.

Впервые большая масса пыли (порядка $0.5 M_{\odot}$) была обнаружена в выбросе сверхновой SN1987A Мацурой и др. (2011) по наблюдениям в далеком ИК диапазоне космической обсерваторией *Herschel*. Вессон и др. (2015) по наблюдениям *Herschel* обнаружили вокруг сверхновой SN1987A через 25 лет после взрыва пыль общей массой 0.6–0.8 $M_{\odot}$. При этом для соответствия наблюдаемому распределению энергии в спектре нужна заметная доля пылинок радиусом больше 2 мкм. Авторы делают вывод об интенсивном росте пылинок в определенный период. Вслед за ними также по наблюдениям *Herschel* Мацура и др. (2015) объясняют наблюдаемое распределение энергии в спектре сверхновой SN1987A наличием образованной после взрыва пыли массой, 0.5 и 0.3 $M_{\odot}$, соответственно, для силикатных и аморфных углеродных пылинок (всего пыли – около 0.8 $M_{\odot}$). Индебетов и др. (2014) проанализировали холодную пылевую оболочку (остаток ядра взорвавшейся звезды), наблюдаемую вокруг сверхновой SN1987A телескопом ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) с лучшим разрешением, нежели у *Herschel*, и нашли очень эффективную конденсацию в пыль всего углерода, произведенного звездой. Они заключили, что за первые 25 лет эта сверхновая произвела пыль общей массой порядка 0.2 $M_{\odot}$, и, видимо, основная часть этой пыли (преимущественно крупные пылинки) должна перейти в межзвездную среду. Опираясь на результаты Двек и др. (2007), авторы делают вывод,

что в таком случае сверхновые с коллапсирующим ядром являются доминирующими поставщиками пыли в среду галактик при любом красном смещении. Галл и др. (2014) проанализировали свойства плотной среды вокруг сверхновой SN 2010j через несколько сотен дней после взрыва. Они заключили, что в этой среде возникли пылинки радиусом от 0.001 до 4.2 мкм, но в основном крупнее 1 мкм (80% массы пыли содержится в пылинках радиусом больше 0.1 мкм). Распределение этих пылинок по размерам – степенное с показателем 3.6. Оно показано на рис.9 и обсуждается далее. По данным Галл и др. (2014) примерно те же характеристики пыли показали сверхновые SN 1995N, SN 1998S, SN 2005ip и SN2006jd. Крупную пыль нашли также Шиклуна и др. (2015) с помощью инструмента SPHERE на телескопе VLT при анализе газопылевой оболочки, теряемую сверхгигантом VY Canis Majoris. Масса потерь – $0.0001 M_{\odot}$ в год. Средний радиус пылинки – 0.5 мкм. Большое давление света должно изгонять такие крупные пылинки в межзвездную среду без потерь и разрушения.



Рис.9. Распределение пространственной плотности пыли в зависимости от радиуса пылинки в оболочке сверхновой – штрих-пунктир, в межзвездной среде с углеродной и силикатной пылью – черная сплошная кривая, в межзвездной среде с ледяной пылью (иная нормировка) – черный пунктир, внутри Солнечной системы по данным аппарата Ulysses – серая сплошная кривая, по данным аппарата New Horizons – квадрат с указателем неопределенности, по данным аппаратов Pioneer – ромбы с указателем неопределенности.

Ли и др. (2011) оценили для Галактики среднюю частоту сверхновых с коллапсирующим ядром: 2.3 в век. Если в среднем сверхновая производит пыль массой $0.5 M_{\odot}$, то среда обогащается пылью со скоростью $0.011 M_{\odot}$ в год (аналогичные расчеты для Большого Магелланова облака даны Мадурой и др. (2011)). С другой стороны, при темпе звездообразования в Галактике порядка $1.6 M_{\odot}$ в год (Ликуя и Ньюман, 2015) и соотношении массы газа к массе пыли 100, видим, что звездообразование забирает из среды порядка $0.016 M_{\odot}$ в год. Таким образом, производство пыли (и

крупной, в том числе) сверхновыми (даже без учета гигантов и сверхгигантов) теперь представляется достаточным для поддержания постоянной средней пространственной плотности межзвездной среды, несмотря на постоянный расход среды на образование звезд и планет.

8. *Пыль внутри и вне Солнечной системы.* В последние годы появились результаты, позволяющие сопоставить распределение пылинок по размеру и общую массу пыли 1) в местах производства пыли, 2) в межзвездной среде, 3) на краю и 4) внутри Солнечной системы.

Поглощение/излучение позволяет оценить размер пылинок, а удары по космическим аппаратам позволяют оценить массу пылинок. Для сопоставления этих результатов надо знать среднюю физическую плотность пылинки. На сегодня единственные, непосредственно наблюдаемые за орбитой Юпитера, сформировавшиеся там небольшие твердые тела (т.е. наиболее близкие к межзвездным пылинкам по условиям существования), для которых достоверно известна плотность - это регулярные спутники Сатурна (Томас, 2010) и Урана (Якобсон и др., 1992) с плотностью около 1 г/см^3 . Есть и другие основания (Двек и др., 2007; Бочкарев, 2009, с.296) для того, чтобы здесь и далее принять такую среднюю физическую плотность для межзвездных пылинок.

Используем величину (1) для нормировки распределения производимых сверхновой SN 2010j1 пылинок по размеру по данным Галл и др. (2014). Это можно считать распределением пылинок по размеру в местах их производства - штрих-пунктир на рис.9.

Пространственная массовая плотность пыли в зависимости от радиуса пылинки по модели WD2001 при $R_p = 5.5$ показана на рис.9 сплошной черной кривой. Как показали Касусо и Бекман (2010), это модельное распределение по порядку величины согласуется с наблюдаемыми распределениями для Галактики и Магеллановых облаков. Его можно считать распределением пылинок по размеру в межзвездной среде. В сверхновых и в Солнечной системе найдена большая доля крупной пыли, поэтому для сравнения выбран вариант модели WD2001 с максимальной долей крупной пыли, т.е. с максимальным R_p .

Регистрация ударов межзвездных пылинок детекторами аппаратов Ulysses и Galileo по данным Фриш и др. (1999) и Крюгера и др. (2001) показала, что пылинки массой от 10^{-12} до $2 \cdot 10^{-12}$ г, т.е. радиусом порядка 0.7 мкм дают основной вклад в массу пыли. Крюгером и др. (2015) получена оценка пространственной плотности ($2.1 \cdot 10^{-27} \text{ г/см}^3$) и распределения по размеру межзвездных пылинок, проникших в Солнечную систему (характеристики этого потока обсуждались ранее). Эта оценка получена по 16-летним данным детектора пыли космического аппарата Ulysses вдали от эклиптики на гелиоцентрическом расстоянии около 5 а.е., и она примерно

на порядок меньше величины (1) для межзвездного пространства. Это распределение показано на рис.9 сплошной серой кривой и является оценкой пыли внутри Солнечной системы. Отметим, что аппарат *Ulysses* определял только массу пылинки. Здесь ее радиус вычислен, исходя из физической плотности 1 г/см^3 . Крюгером и др. (2015) отмечено, что данные аппарата *Ulysses* согласуются с данными аппаратов *Galileo* (регистрировавшим пыль в основном на гелиоцентрических расстояниях около 5 а.е.), *Cassini* (1-9.5 а.е.) и *Helios* (0.3-1 а.е.).

Отметим, что Солнечная система насыщена потоками межпланетной пыли местного происхождения, в том числе, и крупной (в результате разрушения астероидов и комет, выброса вещества кривовулканами и т.п.). Например, Бауэр и др. (2008) показали, что 90% массы пыли, потерянной кентавром Эхеклом, содержится в пылинках размером порядка 30 мкм. И эта потеря пыли не является результатом удара извне (хотя механизм потери не ясен), иначе доля крупной пыли была бы еще больше. Но в данных упомянутых аппаратов межзвездные пылинки уверенно отделяются от межпланетных. В настоящем обзоре курсивом отмечено, какая пыль имеется в виду.

По данным Попп и др. (2010) датчик пыли на борту аппарата *New Horizons* на гелиоцентрических расстояниях от 2.6 а.е. до 15.5 а.е. показал пространственную плотность крупной межзвездной пыли того же порядка, что и аппараты *Ulysses*, *Galileo*, *Pioneer 10*, *Pioneer 11*, *Voyager 1* и *Voyager 2* на сопоставимых гелиоцентрических расстояниях. На гелиоцентрических расстояниях 6.8 - 15.5 а.е. для пылинок массой $2 \cdot 10^{-12} - 10^{-9} \text{ г}$ (т.е. радиусом 0.8 - 6.2 мкм) пространственная плотность по данным аппарата *New Horizons* в среднем составила $2.6 \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3$. Это значение отмечено на рис.9 квадратом для радиуса 0.8 мкм и отходящей от него горизонтальной линией, указывающей неопределенность радиуса. Это можно считать оценкой пыли на краю Солнечной системы. Вертикальный сдвиг на рис.9 между черным квадратом и серой кривой - отмеченный Попп и др. (2010) в данных аппарата *New Horizons*, указывает на нарастание потока межзвездной пыли за орбитой Юпитера с удалением от Солнца. Для сравнения Попп и др. (2010) приводят пространственную плотность всей (межпланетной и межзвездной) пыли за орбитой Юпитера по данным аппаратов *Pioneer*: $8.6 \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3$ для пылинок массивнее $8.3 \cdot 10^{-10} \text{ г}$, т.е. радиусом больше 6 мкм и $2.5 \cdot 10^{-25} \text{ г/см}^3$ для пылинок массивнее $6 \cdot 10^{-9} \text{ г}$, т.е. радиусом больше 11.2 мкм. Эти значения отмечены двумя ромбами на рис.9 (отходящая вправо от левого ромба горизонтальная линия указывает на неопределенность радиуса). При этом аппарат *New Horizons* столь крупной пыли вообще не зафиксировал. Причина, как показали лабораторные тесты Попп и др. (2010) - в технических ограничениях

детектора пыли аппарата New Horizons. Крюгером и др. (2015) отмечены технические ограничения детектора пыли аппарата Ulysses, которые не позволили ему зафиксировать столкновения с пылинками массой больше $3 \cdot 10^{-11}$ г, т.е. радиусом больше 2 мкм. Видимо, в Солнечной системе основная масса пыли содержится в пылинках радиусом больше 0.5 мкм. Насколько это неожиданный результат, видно по тому, что создатели почти всех детекторов пыли космических аппаратов не рассчитывали зарегистрировать столь крупную пыль.

Черная и серая сплошные кривые на рис.9 очень похожи на аналогичные кривые на рис.24 из статьи WD2001, где модель WD2001 сравнивается с прежними результатами космических аппаратов для Солнечной системы Фриша и др. (1999). Таким образом, на первый взгляд, обоснован вывод WD2001 о том, что распределения пылинок по массе в межзвездной среде и в Солнечной системе различаются радикально (как черная и серая сплошные кривые на рис.9). Однако WD2001 оперируют массой пылинок, в то время, как измеряемой величиной является длина волны излучения/поглощения. При калибровке WD2001 исходят из средней плотности пылинок около 3 г/см^3 в предположении, что мелкие состоят из силикатов (3.5 г/см^3), а крупные - из графита (2.24 г/см^3). При $R_v = 5.5$ максимум распределения WD2001 $3 \cdot 10^{-27} \text{ г/см}^3$ приходится на пылинки массой $2 \cdot 10^{-13}$ г, т.е. радиусом 0.25 мкм. Углеродные пылинки такого размера вызывают максимальное поглощение на длине волны 1.5 мкм (Борен и Хафмен, 1986; Бочкарев, 2009). Но если пылинки состоят преимущественно из водяного льда и имеют среднюю плотность 1 г/см^3 , то при той же длине волны максимального поглощения распределение пылинок по размеру иное. Его расчет приведен далее.

Ослабление излучения космических светил, которое мы по традиции называем поглощением, на самом деле включает рассеяние и собственно поглощение (хотя их разделение не всегда важно). Они описываются, соответственно, действительной n' и мнимой n'' частью комплексного показателя преломления $n = n' - i \cdot n''$. Величины n' и n'' могут быть сложными функциями λ , зависящими от химического состава и других характеристик пылинок (Бочкарев, 2009). Как показано ранее, основная масса межзвездной пыли, видимо, заключена в пылинках, вызывающих поглощение в диапазоне от 0.6 до 5 мкм (для модели WD2001 при $R_v = 5.5$ - на 1.5 мкм). В этом диапазоне $n' \approx 1$ (Бочкарев, 2009). А n'' варьируется в широких пределах, например, от $n'' \ll 1$ для водяного льда до $n'' \approx 1$ для углерода (Борен и Хафмен, 1986). Это вызывает неопределенность при вычислении размера пылинок, если известна длина волны, на которой поглощение максимально. Но для приближенной оценки можно считать, что отношение этой длины волны к радиусу пылинки варьируется

от примерно 1 для ледяных пылинок до примерно 6 для углеродных (Борен и Хафмен, 1986; Бочкарев, 2009). Тогда максимальное поглощение на длине волны 1.5 мкм вместо углеродных пылинок радиусом 0.25 мкм может вызываться ледяными пылинками радиусом 1.5 мкм. При плотности 1 г/см^3 масса такой пылинки $1.4 \cdot 10^{-11} \text{ г}$. Аналогично сместится все распределение: оно показано на рис.9 черным пунктиром. При этом пространственную массовую плотность пыли оценим на основе нормировки (1). Это незначительно смещает пунктир по ординате относительно сплошной черной кривой.

Из рис.9 видно, что новое распределение (пунктир) гораздо легче сопоставить с остальными результатами, чем исходное (черная сплошная кривая).

1. Сопоставив пыль в окрестности сверхновой (штрих-пунктир) и в межзвездной среде (пунктир), видим, что изначально в среднем довольно крупная пыль, видимо, со временем дробится.

2. Сопоставив пыль в среде (пунктир) и на краю Солнечной системы (квадрат и ромбы), не находим расхождения: максимумы распределений согласуются по порядку величины. Следовательно, видимо, межзвездная пыль почти беспрепятственно проникает во внешние районы Солнечной системы.

3. Сопоставив пыль в межзвездной среде (пунктир) и внутри Солнечной системы (серая кривая), видим, что внутрь проникает малая часть пыли (препятствующие механизмы рассмотрены Крюгером и др. (2015)), хотя распределение пылинок по размеру в некоторой степени сохраняется.

4. Если типичные межзвездные пылинки покрыты ледяными оболочками, которые составляют основную часть их массы, и если в сверхновых и в Солнечной системе до сих пор наблюдалась типичная пыль, то не исключено, что и производятся, и господствуют в среде (возможно, за исключением тонкого экваториального слоя в спиральных рукавах), и вторгаются в Солнечную систему преимущественно (по массе) пылинки радиусом более 0.5 мкм.

9. Заключение. По современным представлениям в околосолнечной части Галактики межзвездная среда содержит примерно половину массы материи. Поэтому исследования среды очень важны.

Представления о распределении пыли в слое около галактической плоскости ($|Z| < 100 \text{ пк}$) и соответствующие оценки поглощения в этом слое почти не изменились за последние 170 лет: от 1^m на кпк согласно Струве (1847) до $1^m.2$ на кпк согласно Гончарову (20126) по уравнению (12). Поэтому основные открытия, относящиеся к поглощению и пылевой среде, в XXI в. делаются при изучении областей с $|Z| > 100 \text{ пк}$. В частности, удалось численно охарактеризовать поглощение не только в экваториальном

слое пыли, но и в слое в поясе Гулда. Как видно из сравнения уравнений (12) и (13), на некоторых долготах и широтах поглощение в поясе Гулда даже больше, чем в экваториальном слое. Его учет, например, по модели Гончарова (2009), сумме формул (12) и (13), особенно важен для внегалактических объектов. При этом достаточно знать координаты объекта, а для объектов в средних и высоких широтах и заведомо далее 600 пк не надо знать расстояние.

Наиболее популярный до сих пор источник учета поглощения, карта SFD98 имеет систематические ошибки, главная из которых может быть исправлена по формуле (4).

Одной из главных задач современной астрономии при изучении пылевой среды и поглощения является уточнение закона поглощения, особенно вдали от галактической плоскости и в инфракрасном диапазоне (где среда прозрачнее, а поглощение вызывается пылинками, видимо, содержащими основную массу пыли). Все чаще закон поглощения определяется при решении системы (15) или ее аналогов одновременно с определением ключевых характеристик каждой звезды на основе многоцветной фотометрии или спектрофотометрии миллионов звезд. Такой подход дает на порядок больший объем информации о звезде, чем спектральная классификация.

На сегодня исследования пыли и вызванного ею поглощения/излучения охватывают почти всю Галактику и показывают значительные вариации характеристик пылевой среды и, прежде всего, распределения пылинок по размеру. Многие исследования указывают на неожиданно большую долю крупной пыли при ее производстве сверхновыми и сверхгигантами, в некоторых районах балджа, в межзвездном пространстве, на периферии диска, в гало Галактики, в радиусе 14 пк от Солнца и внутри Солнечной системы. Это нуждается в дальнейшей проверке, особенно, в связи с возникающей неопределенностью космологических параметров.

Благодарю В.П.Гринина и Н.Г.Бочкарева за ценные замечания. Для настоящего обзора интенсивно использованы результаты проектов Hipparcos-Tycho, Two Micron All Sky Survey (2MASS) и Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), а также - ресурсы Страсбургского центра астрономических данных (Centre de Données astronomiques de Strasbourg). Исследование выполнено при финансовой поддержке по программе Президиума РАН П-7, подпрограмме "Переходные и взрывные процессы в астрофизике".

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Ст.-Петербург, Россия, e-mail: georgegontcharov@yahoo.com

REVIEWS

THE INTERSTELLAR EXTINCTION

G.A.GONTCHAROV

The review describes the current understanding of interstellar extinction. It differs significantly from those of the XX century. Thanks to the infrared surveys of hundreds of millions of stars all over the sky, such as 2MASS, SPITZER-IRAC, WISE, we looked at the most dense and most translucent regions of the interstellar medium at the distances of several kpc from the Sun. Furthermore, the observations in the infrared and microwave range, where, apparently, the bulk of the dust absorbs and radiates, brought us closer to an understanding of the distribution of dust particles on the properties on the scale of the Galaxy and the Universe. We are going through the midst of a scientific revolution in the perception of the interstellar medium and dust. The results and even the key ones of this revolution are difficult to predict yet. However it has been already constructed 1) the physically based model of the spatial distribution of the extinction matter in the nearest kiloparsec taking into the account the Gould belt as a dust container and providing the accurate estimation of the extinctions for any object based on only its galactic coordinates. It is also clear that 2) in the vicinity of the Solar system the galactic interstellar medium contains about half mass of all matter (the other half includes the stars, their remnants and dark matter); 3) interstellar medium and, in particular, the dust varies widely from regions of space, and it is impossible to estimate the deep space, exploring only nearby one.

Key words: *interstellar extinction: reddening: interstellar dust particles: characteristics and properties of the Galaxy Milky Way*

ЛИТЕРАТУРА

- Бердников Л.Н., Возякова О.В., Дамбис А.К., Письма в Астрон. ж., 22, 372 (1996).
- Бобылев В.В., Астрофизика, 57, 625 (2014), (Astrophysics, 57, 583 (2014)).
- Борен К., Хафмен Д., Поглощение и рассеяние света матыми частицами, М., Мир, 26 (1986).
- Бочкарев Н.Г., Основы физики межзвездной среды, М., Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2009, с.291-337.
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., 35, 862 (2009), (Astron. Lett., 35, 780 (2009)).

- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **36**, 615 (2010), (Astron. Lett., **36**, 584 (2010)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **38**, 15 (2012a), (Astron. Lett., **38**, 12 (2012a)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **38**, 108 (2012b), (Astron. Lett., **38**, 87 (2012b)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **38**, 776 (2012в), (Astron. Lett., **38**, 694 (2012с)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **38**, 860 (2012г), (Astron. Lett., **38**, 771 (2012d)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **39**, 102 (2013a), (Astron. Lett., **39**, 83 (2013a)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **39**, 620 (2013b), (Astron. Lett., **39**, 550 (2013b)).
- Гончаров Г.А., Письма в Астрон. ж., **42**, 494 (2016), (Astron. Lett., **42**, 445 (2016)).
- Куликовский П.Г., Звездная астрономия, М., Наука, 1985.
- Паренаго П.П., Курс звездной астрономии, М., ГИТТЛ, 1954.
- Страйжис В., Многоцветная фотометрия звезд, Издательство "Мокслас", Вильнюс, 1977.
- Abazajian K.N., Adelman-McCarthy J.K., Agueros M.A. et al., Astrophys. J. Supp. Ser., **182**, 543 (2009).
- Arce H.G., Goodman A.A., Astrophys. J., **512**, L135, (1999).
- Arenou F., Grenon M., Gomez A., Astron. Astrophys., **258**, 104, (1992).
- Bauer J.M., Choi Y.-J., Weissman P.R. et al., Publ. Astron. Soc. Pacif, **120**, 393 (2008).
- Berlind A.A., Quillen A.C., Pogge R.W. et al., Astron. J., **114**, 107 (1997).
- Berry M., Ivezić Z., Sesar B. et al., Astrophys. J., **757**, 166 (2012).
- Binney J., Tremaine S., Galactic Dynamics (Princeton University Press, 2008).
- Bochkarev N.G., Sitnik T.G., Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **108**, 237 (1985).
- Bressan A., Marigo P., Girardi L. et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **427**, 127 (2012), <http://stev.oapd.inaf.it/cmd>
- Cambresy L., Jarrett T.H., Beichman C.A., Astron. Astrophys., **435**, 131, (2005).
- Cardelli J.A., Clayton G.C., Mathis J.S., Astrophys. J., **345**, 245 (1989).
- Casuso E., Beckman J.E., Astron. J., **139**, 1406 (2010).
- Chen B.-Q., Schultheis M., Jiang B.W. et al., Astron. Astrophys., **550**, A42 (2013).
- Chen B.-Q., Liu X.-W., Yuan H.-B. et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **443**, 1192 (2014).
- Corrales L., Paerels F., Astrophys. J., **751**, 93 (2012).
- Czekaj M.A., Robin A.C., Figueras F. et al., Astron. Astrophys., **564**, A102 (2014).
- Dame T.M., Ungerechts H., Cohen R.S. et al., Astrophys. J., **322**, 706 (1987).
- Davenport J.R.A., Ivezić Z., Becker A.C. et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **440**, 3430 (2014).
- Dissly R.W., Allen M., Anicich V.G., Astrophys. J., **435**, 685 (1994).
- Draine B.T., Ann. Rev. Astron. Astrophys., **41**, 241 (2003).
- Dutra C.M., Bica E., Astron. Astrophys., **383**, 631 (2002).
- Dutra C.M., Santiago B.X., Bica E.L.D. et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **338**, 253, (2003).

- Dwek E., Galliano F., Jones A.P., *Astrophys. J.*, **662**, 927 (2007).
- Fitzpatrick E.L., Massa D., *Astrophys. J.*, **663**, 320, (2007).
- Fitzpatrick E.L., Massa D., *Astrophys. J.*, **699**, 1209 (2009).
- Flaherty K.M., Pipher J.L., Megeath S.T. et al., *Astrophys. J.*, **663**, 1069 (2007).
- Frisch P.C., Dorschner J.M., Geiss J. et al., *Astrophys. J.*, **525**, 492 (1999).
- Fritz T.K., Gillessen S., Dodds-Eden K. et al., *Astrophys. J.*, **737**, 73 (2011).
- Gall C., Hjorth J., Watson D. et al., *Nature*, **511**, 326 (2014).
- Galliano F., Hony S., Bernard J.-P. et al., *Astron. Astrophys.*, **536**, A88 (2011).
- Gao J., Jiang B.W., Li A., *Astrophys. J.*, **707**, 89 (2009).
- Gao J., Jiang B.W., Li A. et al., *Astrophys. J.*, **776**, 7 (2013).
- Gomez G.C., *Astron. J.*, **132**, 2376 (2006).
- Gorbikov E., Brosch N., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **401**, 231 (2010).
- Green G.M., Schlafly E.F., Finkbeiner D.P. et al., *Astrophys. J.*, **783**, 114 (2014).
- Greenberg J.M., *Astrophys. J.*, **189**, L81 (1974).
- Høg E., Fabricius C., Makarov V.V. et al., *Astron. Astrophys.*, **355**, L27 (2000).
- Hutton S., Ferreras I., Yershov V., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **452**, 1412 (2015).
- Indebetouw R., Mathis J.S., Babler B.L. et al., *Astrophys. J.*, **619**, 931 (2005).
- Indebetouw R., Matsuura M., Dwek E. et al., *Astrophys. J.*, **782**, L2 (2014).
- Jacobson R.A., Campbell J.K., Taylor A.H. et al., *Astron. J.*, **103**, 2068 (1992).
- Jiang B.W., Gao J., Omont A. et al., *Astron. Astrophys.*, **446**, 551 (2006).
- Johnson H.L., *Astrophys. J.*, **141**, 923 (1965).
- Jonhson H.L., Borgman J., *Bulletin of Astronomical Institute of Netherlands*, **17**, 115 (1963).
- Jones D.O., West A.A., Foster J.B., *Astron. J.*, **142**, 44 (2011).
- Krüger H., Grün E., Landgraf M. et al., *Planetary and Space Sci.*, **49**, 1303 (2001).
- Krüger H., Strub P., Grün E. et al., *Astrophys. J.*, **812**, 139 (2015).
- Larson K.A., Whittet D.C.B., *Astrophys. J.*, **623**, 897 (2005).
- Li A., *J. Phys. Conf. Ser.*, **6**, 229 (2005).
- Li W., Chornock R., Leaman J. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **412**, 1473 (2011).
- Li A., Wang S., Gao J. et al., *Lessons from the local group*, Eds. K.C.Freeman, et al., Springer, New York, 85 (2016).
- Licquia T.C., Newman J.A., *Astrophys. J.*, **806**, 96 (2015).
- Lipshat A., Biham O., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **362**, 666 (2005).
- Lutz D., *The Universe as Seen by ISO*, Eds. P.Cox, M.F.Kessler, 623 (1999).
- Majewski S.R., Zasowski G., Nidever D.L., *Astrophys. J.*, **739**, 25 (2011).
- Matsuura M., Dwek E., Meixner M. et al., *Science*, **333**, 1258 (2011).
- Matsuura M., Dwek E., Barlow M.J. et al., *Astrophys. J.*, **800**, 50 (2015).
- McKee C.F., Parravano A., Hollenbach D.J., *Astrophys. J.*, **814**, 13 (2015).
- Miville-Deschenes M.-A., Boulanger F., Joncas G. et al., *Astron. Astrophys.*, **381**, 209 (2002).
- Nataf D.M., Gould A., Fouque P. et al., *Astrophys. J.*, **769**, 88 (2013).
- Nishiyama S., Tamura M., Hatano H. et al., *Astrophys. J.*, **696**, 1407 (2009).
- Peek J.E.G., Graves G.J., *Astrophys. J.*, **719**, 415, (2010).
- Perets H.B., Biham O., Manico G. et al., *Astrophys. J.*, **627**, 850 (2005).
- Perryman M., *Astronomical Application of Astrometry* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2009).

- Planck Collaboration, Ade P.A.R., Aghanim et al.*, *Astron. Astrophys.*, **536**, A16 (2011a).
- Planck Collaboration, Ade P.A.R., Aghanim N. et al.*, *Astron. Astrophys.*, **536**, A17 (2011b).
- Planck Collaboration, Ade P.A.R., Aghanim N. et al.*, *Astron. Astrophys.*, **536**, A24 (2011c).
- Popowski P.*, *Astrophys. J.*, **528**, L9, (2000).
- Poppe A., James D., Jacobsmeyer B. et al.*, *Geophysical Research Letters*, **37**, L11101 (2010).
- Reach W.T., Dwek E., Fixsen D.J. et al.*, *Astrophys. J.*, **451**, 188 (1995).
- Reis W., Corradi W.J.B.*, *Astron. Astrophys.*, **486**, 471 (2008).
- Robin A.C., Reyle C., Derriere S. et al.*, *Astron. Astrophys.*, **409**, 523 (2003).
- Sandford S.A., Allamandola L.J.*, *Astrophys. J.*, **409**, L65 (1993).
- Schlafly E.F., Green G., Finkbeiner D.P. et al.*, *Astrophys. J.*, **789**, 15 (2014a).
- Schlafly E.F., Green G., Finkbeiner D.P. et al.*, *Astrophys. J.*, **786**, 29 (2014b).
- Schlafly E.F., Meisner A.M., Stutz A.M. et al.*, *Astrophys. J.*, **821**, 78 (2016).
- Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M.*, *Astrophys. J.*, **500**, 525 (1998).
- Schultheis M., Kordopatis G., Recio-Blanco A. et al.*, *Astron. Astrophys.*, **577**, 77 (2015).
- Scicluna P., Siebenmorgen R., Wesson R. et al.*, *Astron. Astrophys.*, **584**, L10 (2015).
- Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R. et al.*, *Astron. J.*, **131**, 1163 (2006).
<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/index.html>
- Straizys V., Corbally C.J., Laugalys V.*, *Baltic astronomy*, **8**, 355 (1999).
- Strub P., Krüger H., Sterken V.J.*, *Astrophys. J.*, **812**, 140 (2015).
- Struve F.G.W.*, *Etudes d'Astronomie Stellaire*, (Pulkovo observatory, 1847).
- Sumi T.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **349**, 193, (2004).
- Taylor A.D., Baggaley W.J., Steel D.I. et al.*, *Nature*, **380**, 323 (1996).
- Thomas P.C.*, *Icarus*, **208**, 395 (2010).
- Vergely J.-L., Freire Ferrero R., Egret D., et al.*, *Astron. Astrophys.*, **340**, 543 (1998).
- Voshchinnikov N.V.*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **113**, 2334 (2012).
- Wang S., Gao J., Jiang B.W., et al.*, *Astrophys. J.*, **773**, 30 (2013).
- Wang S., Li A., Jiang B.W.*, *Planetary and Space Science*, **100**, 32 (2014).
- Wang S., Li A., Jiang B.W.*, *Astrophys. J.*, **811**, 38 (2015).
- Wegner W.*, *Astron. Nachr.*, **324**, 219, (2003).
- Weingartner J.C., Draine B.T.*, *Astrophys. J.*, **548**, 296 (2001).
- Wesson R., Barlow M.J., Matsuura M. et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **446**, 2089 (2015).
- Witt A.N., Smith R.K., Dwek E.*, *Astrophys. J.*, **550**, L201 (2001).
- Wolf C.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, 4252 (2014).
- Wright E.L., Eisenhardt P.R.M., Mainzer A.K. et al.*, *Astron. J.*, **140**, 1868 (2010).
<http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/wise.html>
- Yahata K., Yonehara A., Suto Y. et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **59**, 205 (2007).
- Zasowski G., Majewski S.R., Indebetouw R. et al.*, *Astrophys. J.*, **707**, 510 (2009).
- Zemcov M., Smidt J., Arai T. et al.*, *Science*, **346**, 732 (2014).
- Zubko V., Dwek E., Arendt R.G.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **152**, 211 (2004).