

Некоторые проблемы изучения строения и кинематики Галактики

А.С. Расторгуев¹, М.В. Заболотских

*Гос. астрономический институт им. П.К. Штернберга,
Московский государственный университет, 119992
Москва, Университетский просп. 13, Российская
Федерация*

Обсуждаются основные проблемы, связанные с исследованиями строения и эволюции Галактики на основе массовых наблюдательных данных по фотометрии, спектроскопии, лучевым скоростям звезд. Сделан обзор некоторых крупных космических проектов звездно-астрономического направления.

1. Звездная астрономия на рубеже веков: 1997-2006 г.

Рубеж 20-го и 21-го столетий стал знаменательной вехой для исследований нашей Галактики. Главным образом, это было связано с успешным завершением крупнейшего космического проекта HIPPARCOS и публикацией в 1997 году каталога, содержащего беспрецедентно точные фотометрические и астрометрические данные о 118218 звездах (ESA 1997a). Направленный, в первую очередь, на измерение высокоточных тригонометрических параллаксов и положений звезд, проект сыграл громадную роль в развитии не только звездной астрономии, но и астрофизики. Его первые результаты суммированы в сборнике материалов Венецианской конференции 1997 г. (ESA 1997b).

Во-первых, проект более чем на порядок расширил сферу, в пределах которой расстояния звезд известны с относительной точностью выше 10%, значительно обогатив наши знания о строении и населении околосолнечной окрестности. 19000 высокоточных тригонометрических параллаксов близких звезд разных спектральных классов и классов светимости послужили прекрасной осно-

¹rastor@sai.msu.ru

вой для уточнения астрофизических калибровок светимости и, как следствие, астрономической шкалы расстояний. Во-вторых, проект впервые реализовал систему координат в оптическом диапазоне, наиболее близкую к Международной небесной системе отсчета ICRS (International Celestial Reference System), до той поры задававшейся радиоинтерферометрическими измерениями положений квазаров. Следовательно, положения и абсолютные собственные движения оптических объектов теперь могут быть определены в лучшей на данный момент фундаментальной внегалактической системе координат. Впоследствии система отсчета HCRS (HIPPARCOS Celestial Reference System) была распространена на 1 и затем на 2.5 млн. более слабых звезд, вошедших в каталоги TYCHO и TYCHO-2 (Хог и др. 2000а,б). Следовательно, в среднем на квадратный градус небесной сферы в настоящее время приходится приблизительно 60 звезд с весьма надежно определенными координатами в системе ICRS, что сильно облегчает задачу редукции координат более слабых звезд, исследованных в рамках последующих многочисленных массовых звездных проектов.

Так, в самом конце XX - начале XXI века появился целый ряд новых "всемирных" каталогов, фактически опирающихся на систему ICRS. Кратко перечислим важнейшие из них.

1) Каталоги Морской астрономической обсерватории США USNO A2.0 и USNO B1.0, содержащие соответственно более 526 млн. и более 1.24 млрд. объектов, экстрагированных из фотографических обзоров. Последний содержит также и собственные движения звезд, а астрометрическая точность составляет примерно 200 mas и он полон до $21^m(V)$.

2) Астрографические каталоги Морской астрономической обсерватории США UCAC и UCAC2, основанные на ПЗС-наблюдениях, выполненных в СТЮ (Чили). Последний содержит около 70 млн. звезд до предельной величины $16^m(R)$; астрометрическая точность, составляющая для более ярких звезд 20 mas , падает на пределе до 70 mas . По сравнению координат с более старыми эпохами выведены абсолютные собственные движения с точностью от 1 – 3 до 4 – 6 $\text{mas}/\text{год}$ соответственно. При высоких астрометрических качествах каталога фотометрическая точность, невысока, она составляет 0.1 – 0.3^m в нестандартной цветовой полосе *R*.

3) Инфракрасный обзор неба 2MASS (2 Micron All Sky Survey), кооперативный проект Массачусетского университета, JPL и Калифорнийского технологического института США, выполненный на двух автоматизированных 130-см телескопах, установленных в Аризоне (США) и СТЮ (Чили). Каталог включает более 470 млн. точечных объектов, с фотометрией в полосах ближней ин-

фракрасной области спектра JHK_S и координатами, измеренными с точностью не хуже 150 mas . Фотометрические пределы (на уровне отношения сигнал/шум порядка 10) составляют около $15.8^m, 15.1^m, 14.3^m$ соответственно в полосах JHK_S . Малое поглощение света в этом диапазоне ($A_K/E_{B-V} \approx 0.3$ по сравнению с 3.06 для поглощения A_V) делает каталог 2MASS исключительно привлекательным для исследования строения галактического диска и его подсистем.

4) Крупный амбициозный международный проект - Слоановский обзор неба SDSS, выполняемый на 2.5-м телескопе системы Ричи-Кретьена, установленном в штате Нью-Мексико (США), предусматривающий пятицветные (в полосах u, g, r, i, z) фотометрические измерения блеска (в диапазоне $3.5 - 9.2\text{ m}\mu$) и спектральные (со средним спектральным разрешением $R \sim 3000$) исследования звезд и галактик вне полосы избегания. В конечном счете (2008 г.) планируется обзор четверти небесной сферы. К июню 2006 г. в V версию каталога включены данные на 8000 кв. град. небесной сферы. Она содержит фотометрические данные более чем о 215 млн. объектов с предельной величиной от 20.5^m до 22.2^m в разных каталожных полосах, а также более 1 млн. спектров, позволяющих определить лучевые скорости объектов (в основном галактик), с точностью порядка 30 км/с .

5) Проект консорциума ESO DENIS (DEep Near Infrared Survey) на южном небе, выполняемый на 1-м телескопе обсерватории La Silla (Чили). Предполагается фотометрическое исследование в полосах $i_G(0.8\text{ m}\mu), J(1.25\text{ m}\mu), K_S(2.15\text{ m}\mu)$ с предельными величинами соответственно $18.5^m, 16.5^m, 14.0^m$. При невысокой позиционной точности (1 as) фотометрическая точность составляет приблизительно 0.1^m . К настоящему времени получены данные о 355 млн. звезд. Как и каталог 2MASS, этот каталог является весьма перспективным средством изучения галактических населений. В частности, по его данным обнаружено и исследовано большое число карликов поздних спектральных классов, а также "коричневых" карликов.

Использование звездных каталогов, положения в которых относятся к разным эпохам, разделенных десятилетиями, позволяет, после редукции на систему ICRS, вычислять собственные движения звезд со вполне удовлетворительной точностью, достигающей для скоплений и групп звезд $1 - 2\text{ mas/год}$.

Помимо "всенебесных" каталогов, содержащих данные о десятках и сотнях миллионов объектов, огромную ценность для современной звездной астрономии представляют специализированные каталоги и базы данных, а также проекты, предусматривающие

массовое измерение лучевых скоростей звезд. Отметим наиболее важные из них.

Каталог заподозренных членов рассеянных звездных скоплений ASCC-2.5 (All Sky Compiled Catalog), созданный Н.Харченко и А.Пискуновым (Харченко 2001, Харченко и др. 2004), содержащий около 2.5 млн. звезд. Он обеспечивает полноту рассеянных звездных скоплений вплоть до гелиоцентрического расстояния 850 пк от Солнца. С помощью этой базы данных открыто более 150 новых скоплений.

Компилятивный каталог данных о 1537 рассеянных звездных скоплениях Диаса и др. (Диас и др. 2002). За время, прошедшее с момента создания каталога Линга (1987) и базы данных WEBDA Ж.-К.Мермийо (1995), численность известных рассеянных скоплений практически не выросла. Однако в самое ближайшее время их число может вырасти в несколько раз благодаря работам С.Копосова и др. (2006), применивших методы вейвлет-анализа к каталогу 2MASS. Завершение проекта приведет к созданию самого массового каталога рассеянных скоплений с характеристиками (расстояниями, возрастами и поглощениями), определенными в единой системе.

Общий каталог переменных звезд (ОКПЗ 1985-1990), поддерживаемый уже в течение почти 60 лет российскими астрономами, содержащий, совместно с Каталогом заподозренных переменных, данные приблизительно о 50000 переменных звездах разных типов. В последние годы число открываемых переменных звезд резко возросло. Один из главных источников данных о новых переменных звездах - это проект ASAS (All Sky Automated Survey), целью которого является инициированный Б.Пачиньским фотометрический мониторинг примерно 15 млн. звезд южного неба ярче 14^m (в полосах V, I) на короткофокусных инструментах широкого поля, ориентированный на поиск переменных звезд и явлений гравитационного микролинзирования в среднем по 150 снимкам каждого поля. К настоящему времени в рамках версии ASAS3 уже открыто и предварительно изучено более 50 тыс. новых переменных звезд. Хотя существующие методики классификации переменных звезд смогли оперативно "переварить" более 2500 новых переменных, открытых в ходе миссии HIPPARCOS, характерный для данного этапа (и тем более ожидаемый в связи с космическим проектом GAIA) резкий рост информации и одновременно необходимость поддерживать высокий уровень качества классификации переменных звезд ставит перед исследователями непростые проблемы. Не удивительно, что этим вопросам было уделено самое пристальное внимание на XXVI Генеральной ассамблее МАС в Праге (2006).

Отдельно хочется сказать о лучевых скоростях звезд. Они, из-за ограниченности использования абсолютных собственных движений, остаются основой исследования кинематики галактических населений.

По-прежнему одним из важнейших является библиографический каталог лучевых скоростей звезд, начатый М.Барбье-Бросса и др. В настоящее время работу продолжил С.Маларода, и последняя версия каталога содержит данные более чем о 76000 звездах (Маларода и др. 2006).

Бобылевым, Гончаровым и Байковой (2006) создан компилятивный каталог OSACA лучевых скоростей (приведенных в единую систему) 35000 близких звезд, предназначенный для исследования кинематики и населения Местной Системы и спирального рукава Ориона. Исключительно высокими качествами обладает Женевско-Копенгагенский обзор (Нордстрем и др. 2004), содержащий около 14000 высокоточных лучевых скоростей и собственных движений, а также металличностей и оценок возраста F и G карликов близких солнечных окрестностей.

Большой группой участников проекта OGLE-II (гравитационного микролинзирования звезд балджа) измерены собственные движения более 5 млн. звезд – карликов, гигантов и "красного сгущения" (см. ниже) – $(11 - 18)^m$ в полосе I на интервале 4-х сезонов 1997-2000 г. с точностью $(0.8 - 3.5) mas/год$ (Суми и др., 2004). Этот каталог предполагается использовать для детального изучения кинематики бара и балджа Галактики.

И, наконец, следует упомянуть об амбициозном международном проекте RAVE (Radial Velocity Experiment), предусматривающем измерение лучевых скоростей (а также параметров атмосферы - металличностей, температур и силы тяжести) приблизительно миллиона южных звезд со средним спектральным разрешением $R \sim 7500$ на 1.2-м телескопе системы Шмидта ААО (Anglo-Australian Observatory). Измерения проводятся в спектральной полосе $0.84 - 0.88 m\mu$ (триплет линий кальция), выбранной для измерения лучевых скоростей в проекте GAIA. К настоящему времени измерены лучевые скорости около 25000 звезд ярче $I \sim 12^m$ и южнее склонения $+20^\circ$ со средней ошибкой 2 - 3 км/с (Стейнмец и др. 2006). Проект предполагается завершить в 2010 г., непосредственно перед запуском космического аппарата GAIA.

Большое количество прецизионных измерений лучевых скоростей различных звезд содержится в открытом для доступа архиве эшелюного спектрографа ELODIE (Баранн и др. 1996, Мултака и др. 2004; архив по адресу <http://atlas.obs-hp.fr/elodie>) Итак, можно констатировать, что к настоящему времени создана хорошая база

для широкого спектра статистических и звездно-астрономических исследований, содержащая разнообразные массовые звездные данные (положения, собственные движения, лучевые скорости, многоцветную фотометрию).

2. Современные проблемы звездной астрономии

2.1. Строение Галактики и функция светимости звезд

Целый ряд классических задач изучения Галактики и ее подсистем (пространственное распределение звезд, поглощение света, модели распределения масс в Галактике) непосредственно связан с функцией светимости звезд. Для решения этих задач часто в явном или неявном виде используется интегральное уравнение, связывающее дифференциальную функцию блеска со звездной плотностью, функцией светимости и поглощением:

$$A(m) = \omega \int_0^r r^2 D(r) \Phi(m - 5 \lg r + 5 - E(r)) dr,$$

где ω - телесный угол поля зрения, $\Phi(M)$ - функция светимости, $E(r)$ - поглощение света на луче зрения от наблюдателя до расстояния r (выраженного в пк). Следовательно, для корректного использования этой методики крайне желательно опираться на трехмерную картину межзвездного поглощения, которая еще очень далека от своего завершения. Таким образом, все эти важнейшие характеристики оказываются взаимосвязанными. Уточнение одной из них требует знания других, однако методики совместного решения задачи о распределении звезд и изменении поглощения с расстоянием пока не разработаны. Начиная с классических работ Дж.Бакалла и Р.Сонейры (1984, а также ссылки в этой работе) и вплоть до настоящего времени звездные подсчеты (до глубоких предельных величин) используются для сравнения фотометрических и динамических моделей Галактики с наблюдениями. Упомянутые авторы впервые привлекли для сравнения моделей с наблюдениями не только звездные подсчеты, но и распределение звезд по цветам в исследованных площадках. Наиболее последовательное развитие эти идеи получили в большом цикле работ так наз. Безансонской школы (Робин и др. 2003 и ссылки в ней), особенностью которых является согласование многокомпонентных моделей, построенных по данным о распределении звезд, с динамическими и кинематическими характеристиками Галактики, которое до этих работ, как правило, не проводилось.

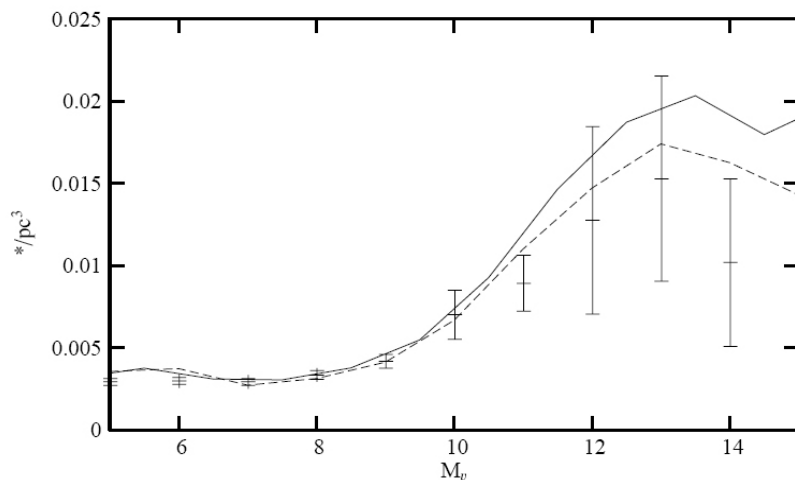


Рис. 1. Наблюдаемая и теоретические функции светимости для звезд Галактики.

При переходе к звездным подсчетам самых слабых звезд (что, в частности, означает глубокое проникновение по лучу зрения), важно знать как ход функции светимости для абсолютно слабых звезд, так и различия между функциями светимости для звезд диска и гало. Представляется, что обе эти особенности поведения функции светимости до сих пор надежно не установлены. В упомянутых работах Бакалла и Сонейры использовались почти одинаковые функции светимости для звезд диска и гало, различающиеся лишь отсутствием у последней звезд ярче $M_V \sim -3^m$ и наличием характерной для населения шаровых скоплений особенности вблизи $M_V \sim +2^m - +4^m$. Локальная плотность гало составляла в их работах $1/500$ плотности диска. На рис. 1 показаны функции светимости звезд в визуальной полосе V , взятые из цитированной работы Робин и др. (2003) и построенные по выборке близких звезд (Ярейсс, Вилен 1997) (точки с указанными ошибками) и для начальной функции масс с разными значениями наклона (линии). Легко видеть, что ход функции светимости для $V > 12^m$ (и тем более $V > 15^m$) все еще совершенно не ясен.

Недавно Шульцгейс и др. (2006) показали, что численность маломассивных звезд, определявшаяся в более ранних исследованиях, может быть заметно недооценена. Так, по данным глубоких звезд-

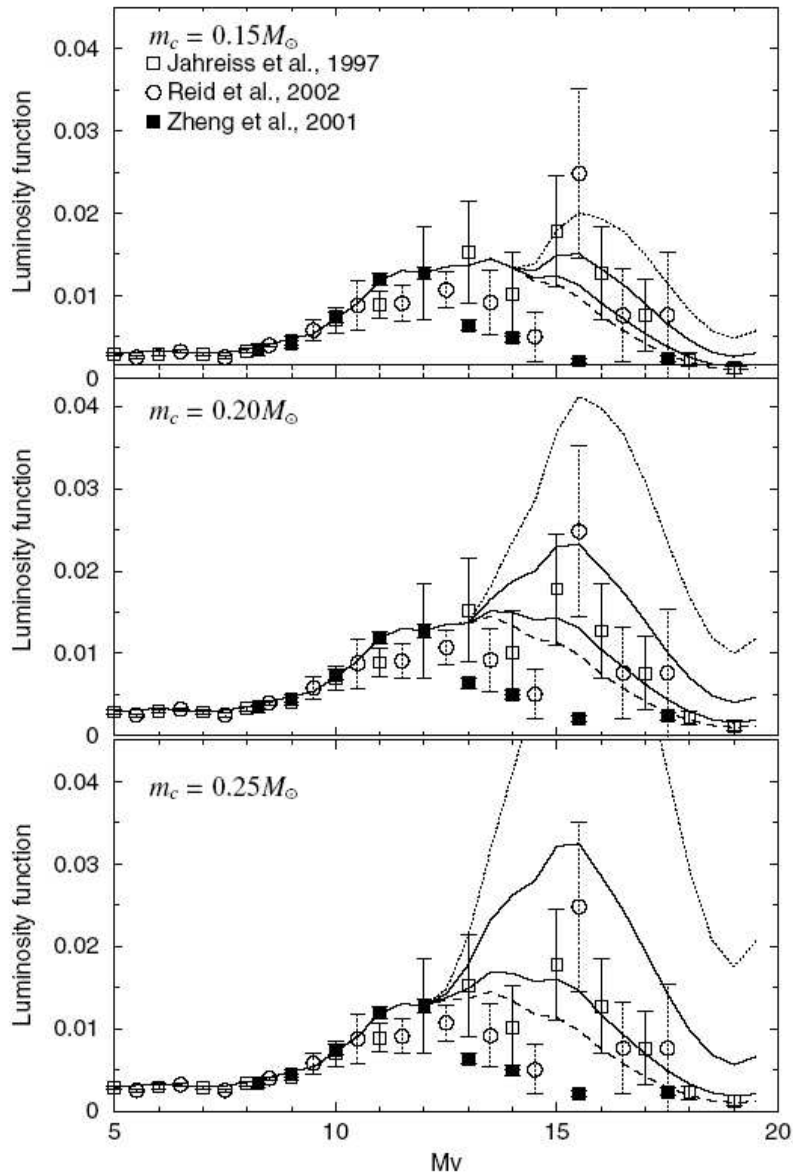


Рис. 2. Сравнение степенных спектров масс мало-массивных звезд (показанных штриховой ("стандартный" показатель $k = 1.5$), тонкой ($k = 2.0$), толстой ($k = 3.0$) и пунктирной ($k = 4.0$) линиями с наблюдениями для различных значений массы на изломе функции масс $m_c = 0.15, 0.20, 0.25 M_\odot$.

ных подсчетов, выполненных на CFHT, наклон степенного спектра масс $dn/dm \sim m^{-k}$ для маломассивных звезд, скорее всего, заметно превышает "стандартный" (с показателем степени $k = 1.5$). А именно, $k = 2.5 \pm 1.0$ для $m < 0.25M_{\odot}$ или $k = 3.0 \pm 1.0$ для $m < 0.20M_{\odot}$. Этот результат неплохо согласуется и с другими определениями функции светимости.

На рис. 2 показано сравнение функций светимости Ярейсса и Вилена (1997), Женья и др. (2001), построенной по подсчетам М-карликов с HST, и Рейда и др. (2002), также построенной по данным о близких звездах, с этими степенными законами, соответствующими разным показателям степени и различным значениями массы звезд в точке излома, в том числе с $k = 4.0 \pm 1.0$ для $m < 0.15M_{\odot}$. Это означает, что суммарный вклад слабых звезд в полную массу Галактики может заметно превышать привычные оценки и, что не исключено, частично "снять" остроту проблемы скрытой массы в Галактике.

Важность знания уверенного хода функции светимости (и массы) для абсолютно слабых звезд еще возрастает в свете будущих космических экспериментов, обещающих достичь пока не реализуемых (по крайней мере, в массовых звездных подсчетах) пределов. На рис. 3 показаны предсказываемые Безансонской моделью Галактики звездные подсчеты в полосе V в направлении ($l = 90^{\circ}, b = +45^{\circ}$). Как видно, при $V > 23 - 24^m$ в них доминируют звезды-карлики с небольшой примесью белых карликов.

В последние годы появились возможности сравнения моделей строения Галактики с наблюдениями в инфракрасном диапазоне, с привлечением данных инфракрасных обзоров (рис. 4). Таким образом, метод моделирования стал в полной мере многоцветным.

Наиболее чувствительная к выбору модели область, как в оптике, так и в инфракрасном диапазоне, приходится на слабейшие звезды, поэтому большие ожидания связываются с будущими космическими проектами, которые обеспечат возможность проведения массовых звездных подсчетов до $25 - 30^m$ в оптике и $18 - 22^m$ в ближнем инфракрасном диапазоне.

2.2. Трехмерные модели поглощения

Определению хода поглощения в разных галактических направлениях посвящено множество работ. Для этой цели, в конечном счете, обычно использовались звездные избытки цвета, преимущественно в оптическом диапазоне, результаты подсчетов далеких галактик и данные об "оптической" толще атомарного водорода. Вообще исследование поглощения естественным образом делится на три логические части. Во-первых, исследование закона поглощения, т.е.

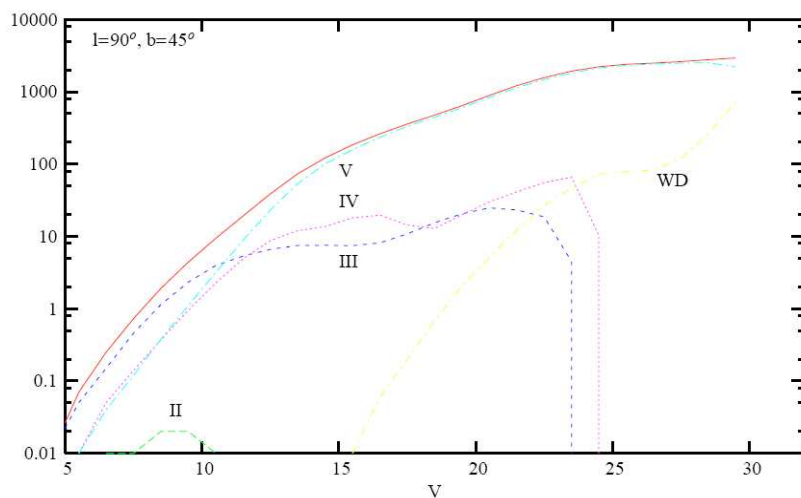


Рис. 3. Звездные подсчеты: предсказания Безансонской модели Галактики (Робин и др. 2003).

зависимости удельного поглощения от длины волны. Не касаясь особенностей поглощения в ультрафиолетовой области спектра, мы можем констатировать, что обширные исследования многоцветных избытков цвета разных выборок звезд, рассматривавшиеся различными авторами (Мартин и др. 1990; Хи и др. 1995), однозначно свидетельствуют в пользу степенного закона для удельного поглощения вида $a_\lambda \sim \lambda^{-k}$ с показателем степени $k \sim 1.73 - 1.85$ в широком диапазоне длин волн, $0.35 - 5 \mu\text{m}$. Во-вторых, это анализ неоднородности поглощения на небесной сфере, которые могут быть в итоге визуализированы в виде карт поглощения разной степени детализации (см., например, известную работу Бурштейна и Хейлеса (1982)). В-третьих, определение хода поглощения с расстоянием в пределах площадки, т.е. в данном направлении. Неплохой моделью, используемой при составлении карт, считается представление о плоских поглощающих слоях, с различающимися от места к месту характеристиками (удельное поглощение в плоскости Галактики, характерная толщина). По сути дела, эти модели обобщают простейший "закон косеканса". Легко понять, что карты поглощения позволяют, в лучшем случае, оценить величину поглощения света до далеких объектов, лежащих вне основного поглощающего газо-

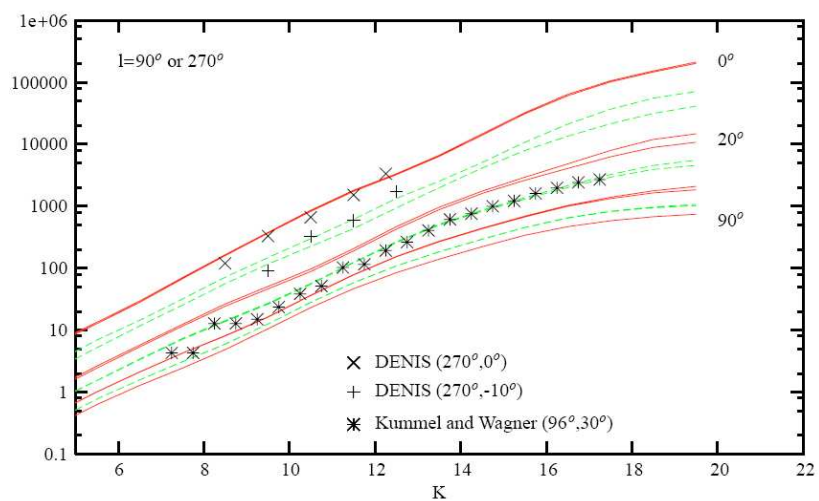


Рис. 4. Инфракрасные звездные подсчеты для разных галактических широт в инфракрасной полосе K : предсказания Безансонской модели Галактики (Робин и др. 2003) и наблюдения (проект DENIS; глубокие оптические и инфракрасные наблюдения в окрестности полюса эклиптики (Кюммель, Вагнер 2001).

пылевого слоя. Как правило, они показывают неплохие результаты при применении к высокоширотным площадкам. Сильная клочковатость поглощающей материи в "полосе избегания" не позволяет относиться к простым модельным оценкам поглощения на низких галактических широтах с большим доверием. Имеется несколько попыток использования для оценки поглощения специальной вычислительной программы, фактически обобщающей данные о распределении пыли в виде карты (см., например, Хаккила и др. 1997).

Бурное развитие инфракрасных исследований снимает, в какой-то степени, остроту проблемы, однако при изучении крупномасштабных структурных особенностей и населения тонкого диска Галактики (например, ее спиральной структуры) отсутствие надежных моделей поглощения может внести очень большие ошибки. Для целого ряда звездно-астрономических работ очень удобными могут оказаться модели сглаженного распределения поглощающего вещества, допускающие простую формализацию.

Среди работ последних лет следует отметить исследования Дриммела и др. (2001, 2003-2004) и Маршалла и др. (2006).

В работах Дриммела и др. используется модель крупномасштабного распределения пыли в Галактике, опирающаяся на наблюдения в дальнем инфракрасном диапазоне ($240 \mu\text{m}$), полученные в ходе эксперимента СОВЕ с добавлением данных о геометрии спиральных ветвей, с экспоненциальным распределением поверхностной плотности (рис. 5).

Авторы, сравнив построенную модель распределения пыли с распределением звезд в каталоге 2MASS, пришли к выводу, что модель, хотя и может применяться для оценки поглощения вплоть до расстояний порядка 8 кпк, не вполне адекватно описывает поглощение до небольших гелиоцентрических расстояний и допускает значительные отклонения от истинной величины поглощения, достигающие нескольких десятых звездной величины в полосе K . Следует также добавить, что выбор положения спиральных рукавов в подобных моделях распределения поглощающей материи тоже может внести большую неопределенность ввиду значительных ошибок позиционирования рукавов, свойственных кинематическим методам определения расстояния по кривой вращения.

Несколько другое направление представлено в работах Безансонской школы (Маршалл и др., 2006), где делается попытка увязать распределение звезд, наблюдающихся в близкой инфракрасной области спектра (по данным каталога 2MASS) с поглощением в рамках детализированной многокомпонентной модели Галактики. Различие наблюдаемой и модельной дифференциальной функции блеска относилось на счет поглощения. Были проанализированы

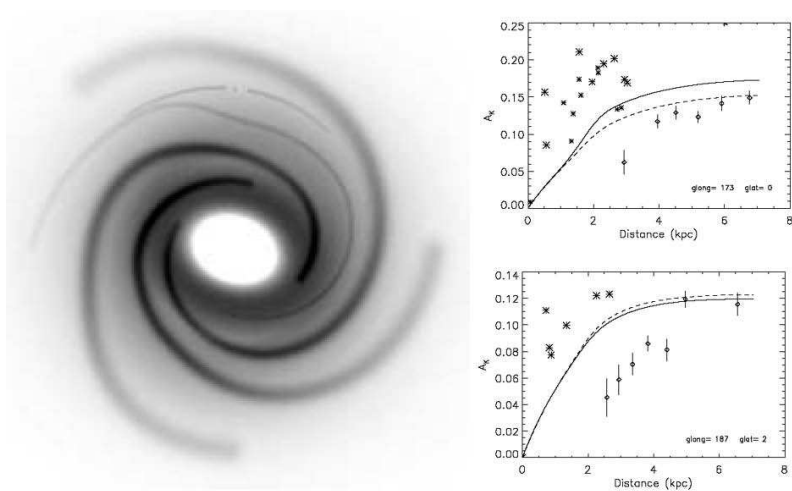


Рис. 5. Сглаженное распределение пыли в диске Галактики по данным Дриммела и др. (2004) (слева; Солнце показано точкой в верхней части рисунка). Сравнение модельной и наблюдаемой величины поглощения в полосе K для двух полей (Дриммел и др. (2003), справа).

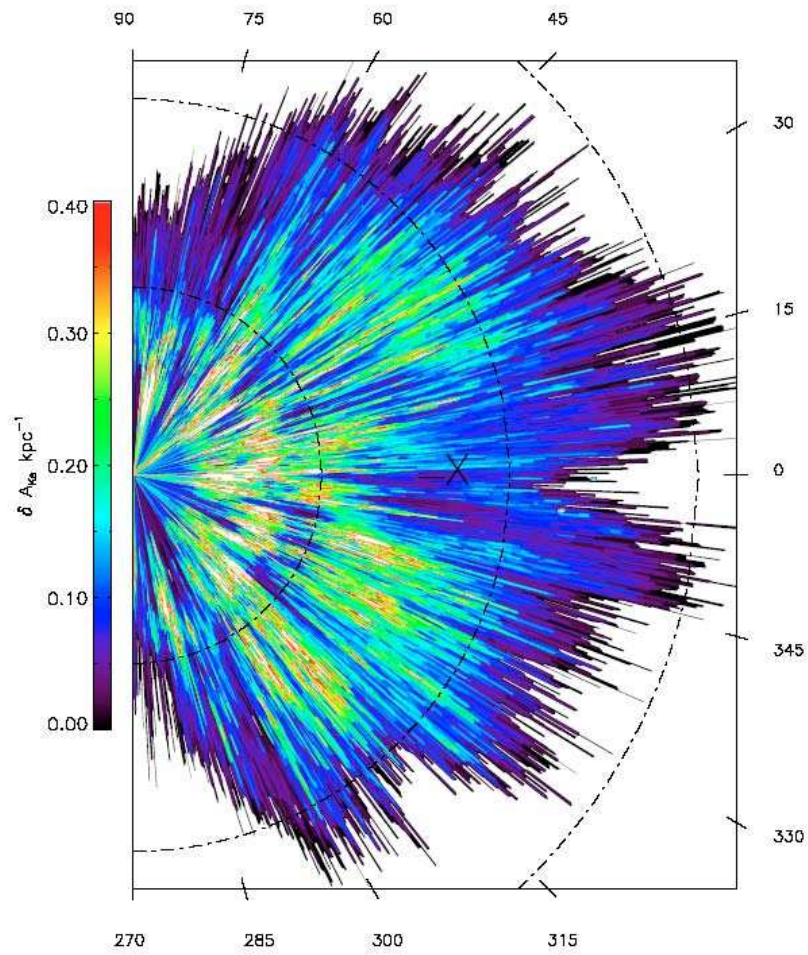


Рис. 6. Двумерная карта удельного поглощения δA_K , выраженного в зв. вел/кпк, в фильтре K для I и IV квадрантов, полученная Маршаллом и др. (2006).

64000 направлений луча зрения в I и IV квадрантах Галактики. Определена шкала высот пылевого слоя (около 125 пк) и обнаружен его значительный изгиб, почти повторяющий изгиб атомарному и молекулярного газового слоя. Карта удельного поглощения в полосе $|b| < 0.25^\circ$ для фильтра K , спроектированная на плоскость Галактики, показана на рис. 6.

2.3. Звезды красного "сгущения" как индикаторы расстояния

Для изучения строения Галактики используются объекты с надежно установленной шкалой расстояний. В последнее время в качестве "стандартных свечей" для определения расстояний приобрели популярность так называемые красные гиганты "red clump" (RC, красное "сгущение") - звезды, представляющие собой более массивный и более металличный аналог звезд горизонтальной ветви в шаровых скоплениях. На диаграммах ГР рассеянных звездных скоплений умеренного и старого возраста (1-10 млрд. лет) и на диаграмме цвет-величина для близких звезд HIPPARCOS RC выглядит как довольно заметная компактная область. По численности гигантов RC в солнечной окрестности можно сделать вывод об их многочисленности во Вселенной, что в совокупности с их высокой светимостью, близостью абсолютных звездных величин и цветов делает звезды эти звезды удобными индикаторами расстояний. Чем обусловлена близость абсолютных звездных величин этих звезд? Когда после истощения запасов водорода масса вырожденного ядра маломассивной звезды ($M_{star} \leq 2M_\odot$) достигает критического значения около $0.45M_\odot$, происходит гелиевая вспышка, "снимающая" вырождение, и начинается процесс горения гелия. Поэтому все маломассивные звезды на стадии горения гелия в ядре имеют близкие массы ядер и, следовательно, близкие светимости.

С появлением каталога HIPPARCOS стало возможным провести точную калибровку светимости гигантов RC. Впервые это было сделано Пачинским и Станеком (1998), которые осуществили привязку светимости в полосе I около 600 близких звезд RC с наиболее точными тригонометрическими параллаксами. По полученному ими результату $\langle M_{I_0} \rangle = -0.279^m \pm 0.088^m$ Станек и др. (1998) определили модуль расстояния БМО, но вскоре Коул (1998) отметил, что светимость может зависеть от металличности и возраста, и для разных звездных населений разница может составлять до 0.6^m .

По 238 гигантам RC с наиболее точными расстояниями и фотометрическими данными в полосе K Альвес (2000) получил калибровку светимости $\langle M_{K_0} \rangle = -1.61^m \pm 0.03^m$ и $V - K \sim 2.2 - 2.5^m$.

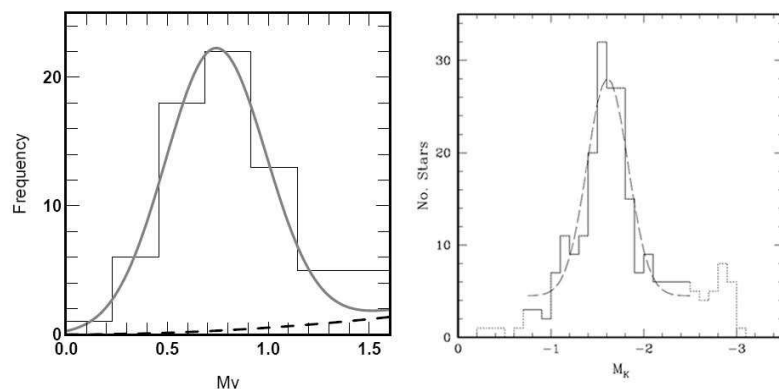


Рис. 7. Наблюдаемые функции светимости гигантов "красного сгущения" в полосах V (слева, по данным Зибберта и др., 2003б) и K (справа, по данным Альвеса, 2000)

Функции светимости гигантов красного "сгущения" в оптическом и инфракрасном диапазонах показаны на рис. 7.

Казалось бы, ситуация могла разрешиться при переходе в более длинноволновый диапазон, где меньше влияние как межзвездного покраснения, так и металличности. Тем не менее, существует две точки зрения. Петржинский и др. (2003) сравнили расстояния до БМО, ММО и dSph Car и For, полученные по гигантам RC, с расстояниями, полученными по другим индикаторам расстояний и пришли к выводу, что светимость гигантов RC в полосах I и J зависит от металличности (хотя в полосе K слабее), но не отмечают ее связи с возрастом.

В противоположность этому Саларис и Жирарди (2002), Персиваль и Саларис (2003) полагают, что из-за разницы в возрасте и металличности светимость звезд красного "сгущения" в полосе K может различаться на $\sim 0.3^m$. Анализ проведен методом популяционного синтеза на основе изохрон Падуанской группы (Жирарди и др. 2000) с учетом скорости звездообразования и соотношения возраст-металличность и вычислена популяционная поправка ΔM_{λ}^{RC} к средней абсолютной звездной величине (рис. 8). Теоретические выводы подтверждены данными по близким галактикам и рассеянным скоплениям.

Жирарди (1999) отмечает существование вторичного "сгущения" для населения с возрастом около 1 млрд. лет и металлич-

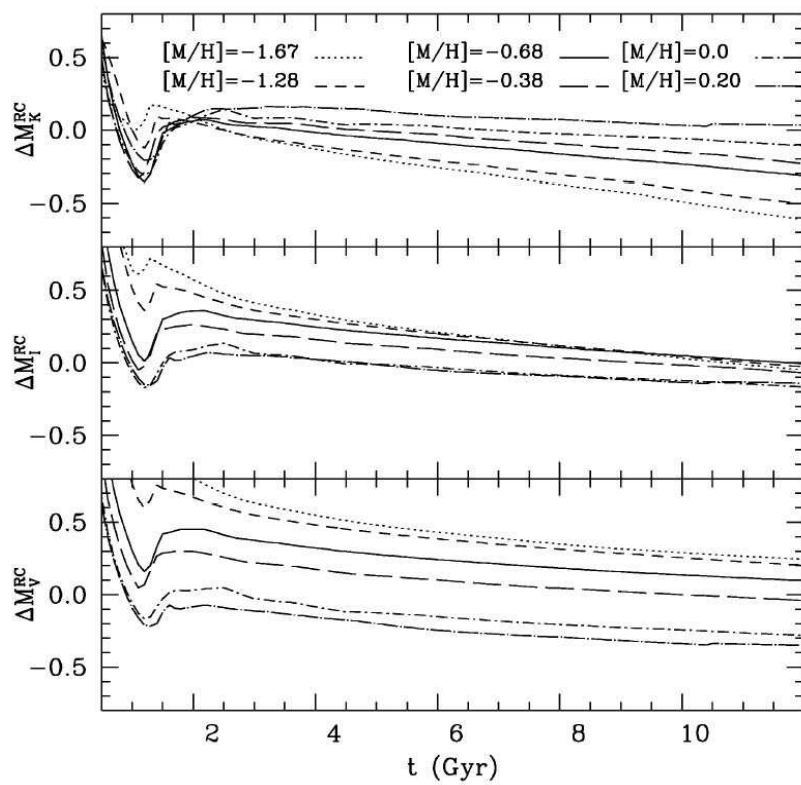


Рис. 8. Зависимость популяционных поправок в полосах $V I K$ от возраста и металличности

ностью выше $z = 0.004$. В звездах, немного массивнее $2 M_{\odot}$ горение гелия может начаться в слабыврожденном ядре с массой $\sim 0.33 M_{\odot}$, что уменьшает светимость звезды. Гиганты вторичного RC слабее на 0.4^m и голубее. Если ошибки фотометрии или оценки поглощения превышают 0.2^m , то гиганты вторичного RC легко спутать с гигантами основного "сгущения".

Грохольский и Сараедина (2002) подтвердили зависимость светимости гигантов RC от металличности и возраста по данным фотометрии из каталога 2MASS для рассеянных и шаровых скоплений с различием $[Fe/H]$ от -1.15 до $+0.15$. Было отмечено, что в скоплениях моложе 2 млрд. лет светимость гигантов в полосе K мало чувствительна к металличности, но зависит от возраста, а в скоплениях старше 2 млрд. лет – наоборот. Сделан вывод, что для населения с возрастом от 2 до 6 млрд. лет и металличностью $-0.5 \leq [Fe/H] \leq 0.0$ среднюю абсолютную звездную величину можно считать постоянной и равной $\langle M_{K_0} \rangle = -1.62^m \pm 0.21^m$.

Несмотря на эти детали, звезды RC широко используются для определения расстояний до близких галактик, рассеянных звездных скоплений, расстояния до центра Галактики, а также для исследования структуры балджа, бара, старого и толстого диска Галактики. Гиганты "сгущения" часто используются для оценки поглощения в нашей Галактике по диаграмме цвет-величина в узких полях (рис. 9). Звезды RC, находящиеся на разных расстояниях, образуют вытянутую полосу правее главной последовательности. Поглощение приводит к наклону полосы. Заметим, что использование этого метода требует учета засоренности выборки звезд RC звездами-карликами, а также звездами красной и асимптотической ветвей гигантов.

2.4. Локальная плотность и скрытая масса

Важное значение для понимания динамики Галактики имеет проблема локальной плотности массы, вертикального распределения плотности и локальной кинематики. В частности, эти характеристики позволяют легко оценить вклад локальной скрытой массы в полную плотность диска. Данному направлению исследований посвящено большое число работ.

Более надежные динамические оценки плотности, опирающиеся на вертикальное распределение и дисперсию скоростей звезд, стали возможными после публикации каталога HIPPARCOS. Крезе и др. (1998) по пространственному распределению и вертикальным скоростям А-звезд определили плотность как $\rho_0 \approx 0.076 \pm 0.015 M_{\odot}/\text{пк}^{-3}$, что практически не оставляет места для скрытой массы.

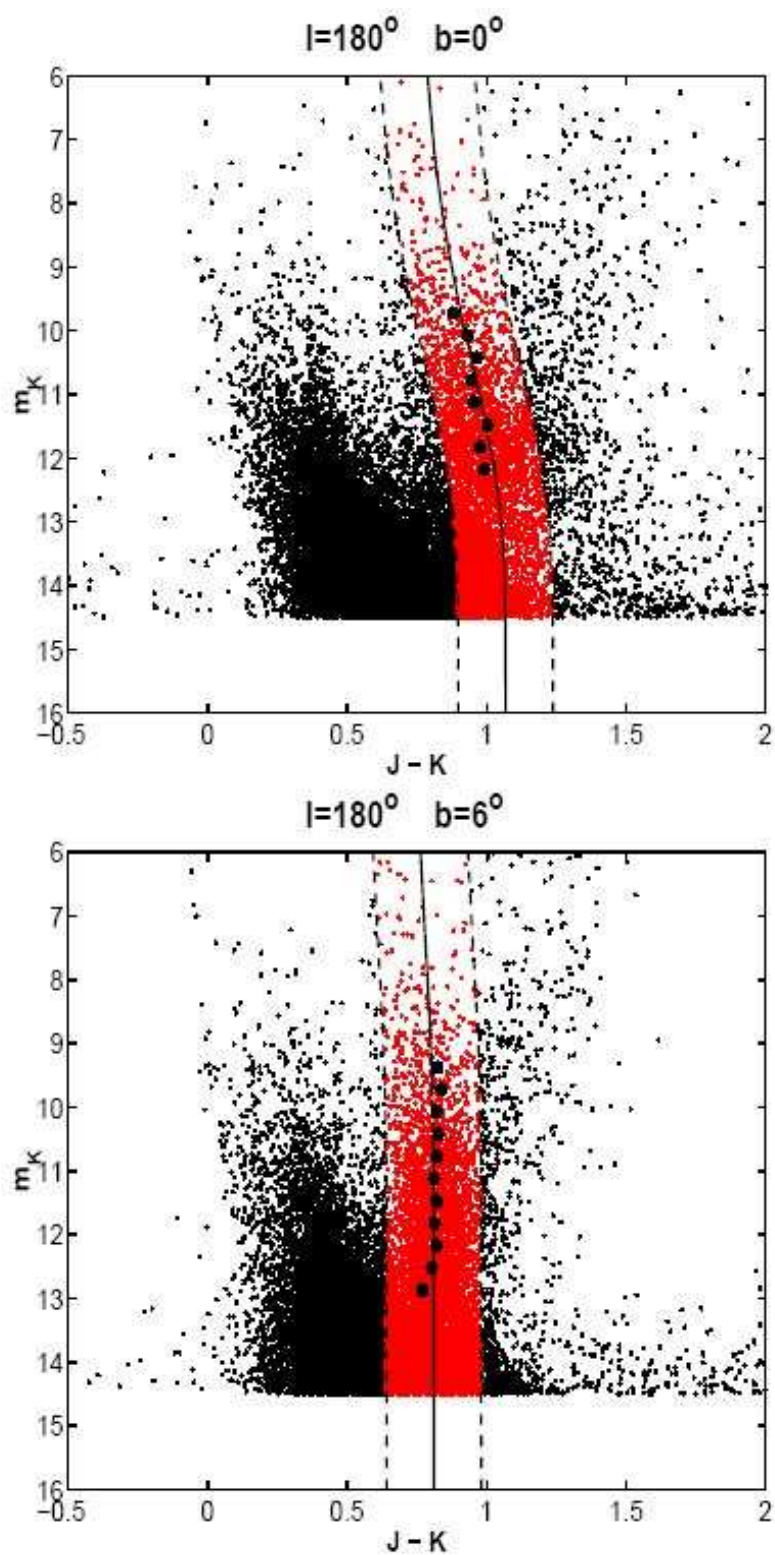


Рис. 9. Диаграмма цвет-величина для двух галактических полей по данным каталога 2MASS (Лопес-Корредойра и др., 2002).

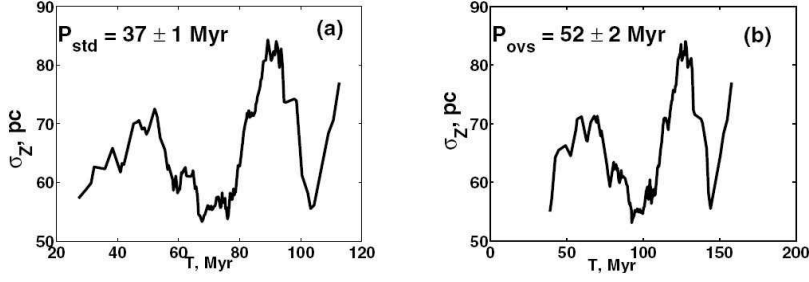


Рис. 10. Толщина вертикального слоя цефеид как функция их возраста (Дамбис 2004), оцененного по эволюционным трекам без проникающей конвекции (слева), и с конвекцией (справа). Указано значение полупериода.

Интересную попытку определения плотности массы сделал Дамбис (2003, 2004), рассмотревший распределение молодых рассеянных скоплений и цефеид по z -координате. Интерпретируя наблюдаемую квазипериодичность толщины слоя объектов с возрастом (см. рис. 10) как следствие вертикальных колебаний подсистемы, он оценил период колебаний и необходимую локальную плотность массы (из $\omega_z^2 \approx 4\pi \rho_0$). Периоды оказались равными $P_z \sim 72 \pm 2 \text{ Myr}$, $92 - 104(\pm 2) \text{ Myr}$ соответственно для эволюции звезд без проникающей конвекции и с конвекцией. Этим значениям периода соответствуют оценки плотности $\rho_0 \approx 0.118 \pm 0.006 M_\odot/\text{пк}^{-3}$, $\rho_0 \approx 0.075 - 0.060(\pm 0.004) M_\odot/\text{пк}^{-3}$. Несоответствие последней оценки другим данным свидетельствует, в частности, о малой эволюционной роли проникающей конвекции ("overshooting"). Первая из оценок оставляет для вклада локальной скрытой массы в полную плотность долю порядка 20 – 25%. Однако, в предположении ее сферически-симметричного распределения, подобного распределению массы в галактическом гало, ее полная масса может быть весьма значительной.

Итак, наиболее надежные современные оценки локальной плотности, или "предела Оорта заключены в пределах $0.076 - 0.12 M_\odot/\text{пк}^{-3}$.

2.5. Вертикальное распределение звезд и толстый диск

Вопрос о вертикальной структуре галактического диска, точнее, о распределении звезд по z -координате, имеет давнюю историю.

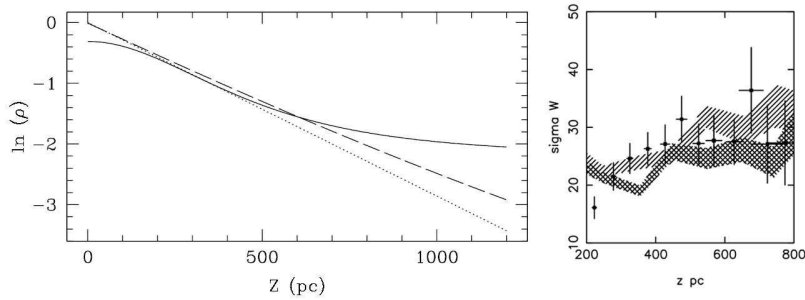


Рис. 11. Изменение пространственной плотности массы в модели, состоящей из толстого и старого диска с разными шкалами высот, соответственно 750 и 350 пк (в логарифмическом масштабе слева, по данным Зиберта и др., 2003). Справа - то же, для вертикальной дисперсии скоростей (Субирани и др., 2003). Точки - звезды выборки; заштрихованы модельные изменения.

Вертикальное распределение звезд, помимо всего прочего, позволяет оценить поверхностную плотность диска, часто используемую в динамическом анализе. Очевидно, что изучение пространственного распределения опирается на индивидуальные звездные расстояния, что требует применения надежных калибровок светимости.

В цикле работ Субирани, Зиберта и Бьенэме (2003а,б, 2005) изучается кинематика и вертикальное распределение звезд, в том числе толстого диска Галактики. Они, как и многие другие исследователи, используют для этой цели гиганты "красного сгущения". Основа выборки – звезды каталога ГУСНО-2 в широком поле вокруг северного галактического полюса, наблюдавшиеся дополнительно с эшелльным спектрографом ELODIE. Их высотное распределение наряду с пространственными скоростями позволяет комбинированным методом определить важнейшие структурные и кинематические характеристики толстого диска.

"Разложение" выборки на звезды толстого и старого диска, выполненное по диаграммам металличность - звездная величина, позволило оценить одновременно шкалы высот старого диска (350 пк) и толстого диска (750 пк), и с привлечением лучевых скоростей и собственных движений - их кинематические характеристики (дисперсии скоростей и скорость отставания от LSR). Важно, что удалось выявить систематические изменения вертикальной дисперсии скоростей с z -координатой. Вклад толстого диска в плотность со-

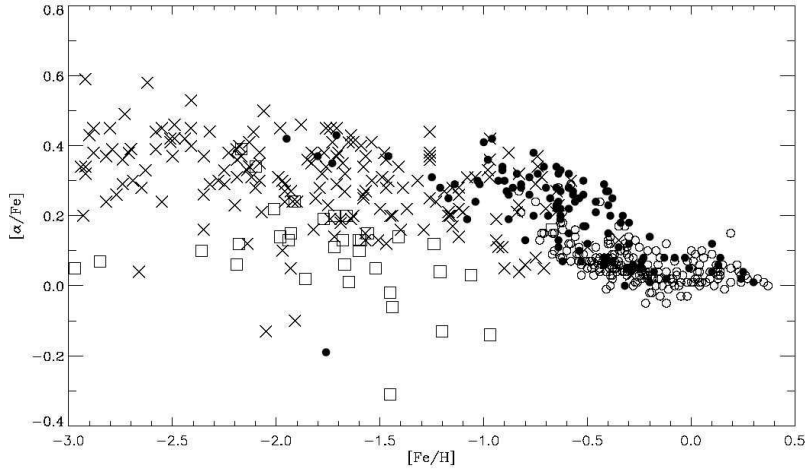


Рис. 12. Относительное содержание α -элементов для разных населений Галактики. Кружки - тонкий диск, жирные точки - толстый диск, косые крестики - гало.

ставляет около $15 (\pm 7)\%$. Результаты приведены на рис. 11. В пределах слоя $|z| < 800$ пк динамически оцененная локальная поверхностная плотность галактического диска (за вычетом вклада темного гало) составляет приблизительно $\Sigma_{0.8 \text{ kpc}} \sim 57 - 66 M_{\odot}/\text{пк}^2$, в неплохом согласии с другими работами. Одновременно получена оценка периода колебаний по z -координате, составляющая $84 \pm 4 \text{ Myr}$, в целом согласующаяся со средним значением Дамбиса (2003, 2004).

Дамбис, Расторгуев (2001), Расторгуев и др. (2005) определяли параметры толстого диска по кинематическим характеристикам выборки RR-Лирид двумя способами: разделив выборку по металличности с границей $[Fe/H]_{lim} \approx -0.8$, а также в предположении бимодального населения выборки (гало и толстого диска), по пространственным скоростям и/или собственным движениям. По пространственным скоростям ~ 360 RR-Лирид они получили скорость выборки $(U_0, V_0, W_0) = (-14 \pm 5, -52 \pm 5, -16 \pm 4)$ км/с и компонента тензора дисперсии $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (56 \pm 5, 44 \pm 4, 35 \pm 4)$ км/с, и весьма близкий к этому результат по собственным движениям ~ 1200 звезд. Вычисленная скорость отставания от LSR хорошо согласуется с другими определениями. Полученные оценки

доли звезд толстого диска среди RR-Лирид составили 0.31 - 0.42. Кроме того, методом статистических параллаксов, разбив всю выборку на группы по металличности, они впервые доказали наличие связи светимости RR-Лирид с металличностью.

Следует отметить, что в связи с ростом наблюдательных возможностей (спектроскопия высокого разрешения на крупных телескопах), большие перспективы по выделению различных населений Галактики имеет использование химических индексов, характеризующих относительное содержание α -элементов (Mg, O, N, S и других) (см., например, рис. 12 из работы Ниссена (2005)).

2.6. Спиральный узор Галактики

В изучения спиральной структуры Галактики остается еще много неясного. Среди многочисленных современных попыток воссоздания картины глобального спирального узора можно отметить работу Русселя (2003), построившего по распределению комплексов звездообразования четырехрукавную модель (рис. 13). Следует отметить, что расстояния до комплексов (и другим индикаторам спиральных рукавов) определяются в основном кинематическими методами, опирающимися на кривые вращения Галактики. Их ошибки связаны с двумя основными факторами – отсутствием "окончательного" варианта кривой вращения Галактики (Хоперсков и Тюрина, 2003) и чувствительностью кинематического метода к отклонениям от чисто круговых движений. Такие отклонения могут быть связаны как с влиянием самих спиральных волн плотности с амплитудой около 10 км/с (Расторгуев и др. 2001), так и с возмущениями со стороны бара и другими факторами. В итоге ошибки расстояния могут составлять 1 и более кпк, что может совершенно "замыть" структурированность картины. По нашему мнению, строгий подход должен опираться на многокомпонентную самосогласованную динамическую модель Галактики, учитывающую если не все, то большинство факторов. К сожалению, до реализации подобного подхода все еще далеко.

Уточнение кривой вращения продолжает оставаться по-прежнему актуальной задачей, играющей большую роль и в решении проблемы скрытой массы. Ее ход за "Солнечным кругом" по данным из разных работ, весьма противоречив и, вдобавок, сильно зависит от шкалы расстояний используемых для ее построения объектов. По этим причинам полного согласия в вопросе о форме кривой вращения до расстояния $2R_0$ пока нет, а наиболее ценные сведения о скрытой массе на периферии Галактики дает кинематика шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников.

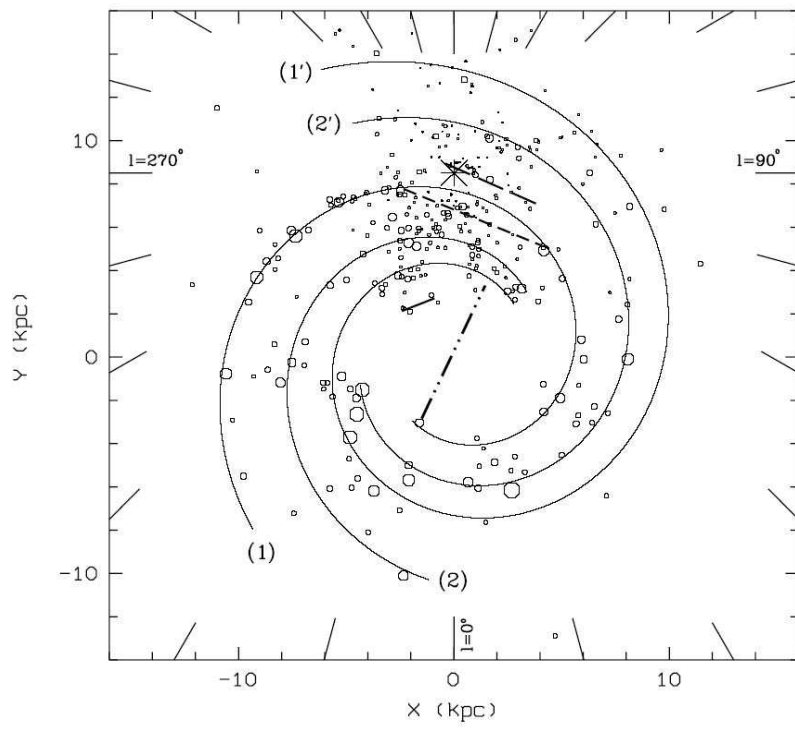


Рис. 13. Четырехрукавная модель галактики (Руссель 2003).

2.7. Кинематика галактических населений

Среди множества задач отметим лишь некоторые направления, получившие в последние годы большое развитие. **Во-первых**, кинематика далеких объектов, шаровых скоплений и карликовых галактик. Отметим работу Сакамото и др. (2003) по оценке полной массы Галактики по лучевым скоростям 11 карликовых галактик, лучевым и пространственным скоростям 137 шаровых скоплений и 413 одиночных звезд горизонтальной ветви. Считая эти объекты гравитационно-связанными с Галактикой, они оценили необходимую для этого массу в $(1.8 - 2.5) \cdot 10^{12} M_{\odot}$, в зависимости от модели. Оценка массы в пределах расстояния до БМО (~ 50 кпк) практически не зависит от модели и составляет $(5.4 \pm 0.4) \cdot 10^{11} M_{\odot}$. та же группа (Бирс и др. 2004) по выборке почти 1000 звезд горизонтальной ветви со спектральными и фотометрическими данными из обзора SDSS по лучевым скоростям оценили полную массу Галактики в пределах расстояния 75 кпк в $(1.5 - 4.0) \cdot 10^{12} M_{\odot}$. Итак, современные данные однозначно свидетельствуют в пользу наличия на периферии Галактики значительной скрытой массы.

В настоящее время известно около десятка так наз. ультрабыстрых (hypervelocity) далеких звезд ранних спектральных классов со скоростями относительно FSR, заметно (на уровне $3-4\sigma$ превышающими скорости звезд балджа и достигающими 700 и более км/с. Их происхождение связывают с распадами тесных двойных в поле тяготения сверхмассивных черных дыр, и их не используют для оценки полной массы Галактики.

Во-вторых, пристальное внимание исследователей привлекает кинематика галактического бара. Он рассматривается в качестве одного из важнейших механизмов возбуждения галактических волн плотности, и поэтому определение его кинематических характеристик представляется крайне важным. Дебаттиста и др. (2002) определил угловую скорость бара по радионаблюдениям 250 OH/IR звезд (звезды с оболочками на краткой стадии асимптотической ветви гигантов с сильной потерей массы) методом диаграмм $V_R - l$ как $59 \pm 5 \pm 10$ км/с, с учетом случайной и систематической ошибки. Суми и др. (2003) предприняли попытку определения скорости вращения бара, изучая потоковые движения звезд "красного сгущения" по данным эксперимента гравитационного микролинзирования OGLE-II. Для этого были определены собственные движения почти 47000 звезд ближнего и дальнего конца бара, и линейная скорость вращения составила ~ 100 км/с, что находится в общем согласии с данными Дебаттисты и др. Козловский и др. (2006) выполнили большую работу по определению высокоточных собствен-

ных движений примерно 16000 звезд в 35 площадках в области окна Бааде $(l, b) = (1^\circ, -4^\circ)$ на HST в полосе I по наблюдениям 1996-2000 г. По этим данным проведено детальное исследование особенностей кинематики небольшой области бара и балджа. В частности, обнаружены значимые градиенты долготной и широтной дисперсий скоростей и найдена их анизотропия, а также выявлен значительный наклон (около 24°) эллипсоида скоростей в балдже к плоскости Галактики.

2.8. Поиск приливных "шлейфов" в Галактике

Примером масштабного и плодотворного использования "всенебесных" каталогов 2MASS и SDSS является поиск и исследование морфологии и звездного состава приливных "шлейфов" или следов разрушения карликовых галактик и шаровых скоплений в приливном поле Галактики, а также Магелланова Потока. Отметим, что с подобными явлениями обычно связывают происхождение толстого диска. В работах Путмен и др. (2003), Момени и др. (2006), а также в обширном цикле работ Белокурова и др. (2006), обнаружен ряд структур (в виде избытков плотности), образованных слабыми звездами и ассоциируемых как с известными карликовыми галактиками в Scl, CMa, CVn, Sgr, так и не связываемых с таковыми. В частности, обнаруженный ранее "пояс" Единорога (на расстоянии порядка 20-25 кпк от центра Галактики), возможно, генетически связан с карликовой галактикой CMa. Найден протяженный высокоширотный "шлейф" вытянутый вдоль большого галактоцентрического круга и, по-видимому, находящийся на расстоянии около 25 кпк от центра Галактики. Есть подозрения, что он связан с высокоскоростными водородными облаками. Новые карликовые галактики открыты в созвездии Волопаса (Voo) и Гончих Псов (CVn), на расстояниях 60 и 220 кпк соответственно. Первая из них, с абсолютной интегральной величиной ($M_V \sim -5.8^m$), значительно слабее "среднего" шарового скопления. По конфигурации двух ветвей "шлейфа" или потока Стрельца (Sgr) сделан вывод о сферической симметрии распределения массы в галактическом гало. Это направление исследований в настоящее время стремительно развивается.

3. Заключение

В данном обзоре, разумеется, упомянуты далеко не все направления развития современной звездной, или галактической, астрономии, и отражены лишь некоторые, наиболее яркие достижения,

опирающиеся на массовые наблюдательные данные, в первую очередь – на "всенебесные" каталоги. Эти результаты и новые открытия фактически закладывают хорошую базу научных проектов, которые предстоит решать в рамках будущих космических экспериментов GAIA и SNAP (SuperNova Acceleration Probe, Шолл и др., 2004), запланированных на 2011-2014 г.

Авторы выражают признательность за частичную финансовую поддержку грант РФФИ 05-02-16526 и грант Президента поддержки ведущих научных школ НШ-5290.2006.2.

Литература

- Альвес 2000 – Alves D., *Astrophys. Journ.* V.539, P.732, 2000
- Бакалл, Сонеира 1984 – Bahcall J., Soneira R., *Astrophys. Journ. Suppl. Ser.* V.55, P.67, 1984
- Баранн и др. 1996 – Barann et al., *Astron. Astrophys.* V.119, P.373, 1996
- Белокуров и др. 2006а-е – Belokurov V. et al., *Astrophys. Journ.* V.642, L137, 2006; *Astrophys. Journ.* V.643, L103, 2006; *Astrophys. Journ.* V.647, L11, 2006; *Astrophys. Journ.* V.650, L41, 2006; *Astrophys. Journ.* V.651, P.167, 2006; astro-ph/0605 v1
- Бирс и др. 2004 – Beers T.C. et al., *IAU Sympos. No.220 Proc.*, P.195, 2004
- Бобылев, Гончаров и Байкова 2006 – Bobylev V., Goncharov G., Bajkova A. *Astronomy Reports*, V.50, P.733, 2006.
- Бурштейн, Хейлес 1982 – Burstein D., Heiles C., *Astron. Journ.* V.87, P.1165, 1982
- Бьенэме и др. 1998 – Bienayme O. et al., *ASP Conf. Ser.* V.136, P.227, 1998
- Бьенэме и др. 2005 – Bienayme O. et al., astro-ph/0510431, 2005
- Грохольский и Сараедини 2002 – Grocholski A.J., Sarajedini A., *Astron. Journ.* V.123, P.1603, 2002
- Дамбис 2003 – *Proc. of the JENAM-2002*, EAS Publ. Ser. V.10, 147, 2003
- Дамбис 2004 – *ASP Conference Proc.* V.310, 158, 2004
- Дамбис, Расторгуев 2001 – Дамбис А.К., Расторгуев А.С., *Письма в астрон. журн.* T.27, C.132, 2001
- Дебаттиста и др. 2002 – Debattista V.P. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.334, P.355, 2002

- Диас и др. 2002 – Dias W. и др. (*Astron. Astrophys.* V.389, 871, 2002)
- Дриммел и др. 2001 – Drimmel R. et al., *Astrophys. Journ.* V.556, P.181, 2001
- Дриммел и др. 2003 – Drimmel R. et al., *Astron. Astrophys.* V.409, P.205, 2003)
- Дриммел и др. 2004 – Drimmel R., *ASP Conf. Ser.* V.317, P.140, 2004;
- Жень и др. 2001 – Zheng Z. et al., *Astrophys. Journ.* V.555, P.393, 2001
- Жирарди 1999 – Girardi L., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.308, P.818, 1999
- Жирарди и др. 2000 – Girardi L. et al., *Astron. Astrophys. Suppl.* V.141, P.371, 2000
- Зиберт и др. 2003 – Siebert A. et al., *Astron. Astrophys.* V.399, P.531, 2003
- Козловский и др. 2006 – Kozlowski S. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.370, P.435, 2006
- Копосов и др. 2006 – Koposov, S., Glushkova, E., Zolotukhin, I. Search for and investigation of new stellar clusters using the data from huge stellar catalogues. *astro-ph/0601647*, 2006
- Коул 1998 – Cole A., *Astrophys. Journ. Lett.* V.500, P.L137, 1998
- Крезе и др. 1998 – Creze M. et al., *Astron. Astrophys.* V.329, P.920, 1998
- Кюммель, Вагнер 2001 – Kummel, Wagner, *Astron. Astrophys.* V.370, P.384, 2001
- Линга 1987 – Linga G., *Catalog of open cluster data*, 5th edition, Lund observatory
- Лопес-Корредойра и др. 2002 – Lopez-Corredoira M. et al., *Astron. Astrophys.* V.394, P.883, 2002
- Маларода и др. 2006 – Malaroda S. et al., *Bibliographic catalog of stellar radial velocities*, Complejo Astronomico el Leoncito, Argentina, 2005
- Мартин и др. 1990 – Martin, Whittet, *Astrophys. Journ.*, V.357, P.113, 1990
- Маршалл и др. 2006 – Marshall D. et al., *Astron. Astrophys.* V.453, P.635, 2006
- Мермийо 1995 – Mermilliod J.-K. WEBDA database, <http://www.univie.ac.at/webda/>
- Момени и др. 2006 – Momany Y. et al., *Astron. Astrophys.* V.451, P.515, 2006

- Мултака и др. 2004 – Moultaqa J. et al., *PASP* V.116, P.693, 2004
- Ниссен 2005 – Nissen P., *Proc. of the GAIA sympos.*, ESA SP-576, P.121, 2005.
- Нордстрем и др. 1994 – Nordstrom B., Mayor M. et al., *Astron. Astrophys.* V.419, P.989, 2004
- ОКПЗ 1985-1990 - Ред. Холопов П.Н., Самусь Н.Н. *Общий каталог переменных звезд*, М.: "Наука Т.I-V, 1985-1990.
- Пачинский и Станек 1998 – Paczynski B., Stanek K. Z., *Astrophys. Journ. Lett.* V.494, P.L219, 1998
- Персиваль и Саларис 2003 – Percival S., Salaris M., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.343, P.539, 2003
- Петржинский и др. 2003 – Pietrzynski G. et al., *Astron. Journ.* V.125, P.2494, 2003
- Путмен и др. 2003 – Putman M. et al., *Astrophys. Journ.* V.586, P.170, 2003
- Расторгуев и др. 2001 – Rastorguev A.S. et al., *Astron. and Astrophys. Transactons.* V.20, P.103, 2001
- Расторгуев в и др. 2005 – Rastorguev A.S. et al., *ESA Publ.*, SP-576, P.707, 2005
- Рейд и др. 2002 – Reid I. et al., *Astron. Journ.* V.124, P.2721, 2002
- Робин и др. 2003 – Robin A. et al., *Astron. Astrophys.* V.409, P.523, 2003
- Руссель 2003 – Russeil D., *Astron. Astrophys.*, V.397, P.133, 2003
- Сакамото и др. 2003 – Sakamoto T. et al., *Astron Astrophys.* V.397, P.899, 2003
- Саларис и Жирарди 2002 – Salaris M., Girardi L., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.337, P.332, 2002
- Станек и др. 1998 – Stanek K.Z., Zaritsky D., Harris J., *Astrophys. Journ. Lett.* V.500, P.L141, 1998
- Стейнмец и др. 2006 – Steinmetz et al., *Astron. J.* V.132, P.1645, 2006
- Субиран и др. 2003а – Soubiran C. et al., *Astron. Astrophys.* V.398, P.141, 2003
- Суми и др. 2003 – Sumi T. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.340, P.1346, 2003
- Суми и др. 2004 – Sumi T. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V.348, P.1439, 2004
- Хаккила и др. 1997 – Hakkila J. et al., *Astron. Journ.* V.114, P.2043, 1997

- Харченко 2000 – Кинематика и физика небесных тел, Т.17, С.409, 2001
- Харченко и др. 2004 – Kharchenko N. et al., *Astron. Nachr.*, V.325, P.409, 2004
- Хи и др. 1995 – He et al., *Astrophys. Journ. Suppl. Ser.* V.101, P.335, 1995
- Хог и др. 2000а – Hog E. et al., *Astron. Astrophys.*, V.355, L27, 2000
- Хог и др. 2000б – Hog E. et al., *Astron. Astrophys.*, V.357, P.367, 2000
- Хоперсков и Тюрина 2003 – *Астрон. журн.* Т.80, С.24, 2003
- Шолл и др. 2004 – Sholl M. et al., in: "Optical, infrared and millimeter space telescopes"(ed. Mather J.C.), *Proc. SPIE*, 5487, 1473, 2004
- Шультгейс и др. 2006 – Schultheis M., Robin A. et al., *Astron. Astrophys.* V.447, P.185, 2006
- Ярейсс, Вилен 1997 – Jahreiss H., Wielen R., *ESA SP-402: Hipparcos-Venice 97*, 675, 1997
- ESA 1997а – ESA, 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200.
- ESA 1997б – *Proceedings of the ESA Symposium "Hipparcos - Venice 97 13-16 May, Venice, Italy, ESA SP-402)*