

DISTANCE SCALE
IN THE UNIVERSE

A. S. RASTORGUEV

The intimate connection of fundamentals of astronomy – the methods and results of distance measurements in our Galaxy and beyond – with most critical problems of contemporary astrophysics – theory of stellar evolution and cosmology is discussed. The attention is paid to the contradiction between small age of the Universe estimated through the Hubble constant and large age of globular clusters predicted by the theory of stellar evolution.

Рассмотрена глубинная связь основ астрономии – методов и результатов определения расстояний в Галактике и за ее пределами – с ключевыми проблемами современной астрофизики: теорией звездной эволюции и космологией. Внимание читателей обращено на противоречие между малым возрастом Вселенной, оцениваемым через постоянную Хаббла, и большим возрастом шаровых скоплений, предсказываемым теорией звездной эволюции.

© Расторгуев А.С., 1999

ШКАЛА РАССТОЯНИЙ
ВО ВСЕЛЕННОЙ

А. С. РАСТОРГУЕВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ЧТО ТАКОЕ “ШКАЛА РАССТОЯНИЙ”

Положение Солнечной системы в Галактике, размеры галактик, расстояния до них – это те важные вопросы, на которые астрономы пытаются получить ответ на протяжении многих десятилетий. Комплекс этих задач обычно объединяют термином “проблема шкалы расстояний”. Уметь определять надежные расстояния в мире космических объектов необходимо уже в силу того, что их знание позволяет построить модель строения Галактики, скоплений галактик и даже структуры обозримой части Вселенной. Очевидно, что от принятой шкалы расстояний зависят также оценки массы звездных систем, поскольку масса и линейный размер однозначно определяют скорость вращения Галактики или величину скоростей звезд, населяющих звездное скопление (определенная формулой $V^2 \propto k \frac{G \times M}{R}$), где G – гравитационная постоянная, M – масса звездной системы, а k – постоянный коэффициент порядка 1, зависящий от геометрии распределения масс в системе). Не все, однако, догадываются, что проблема шкалы расстояний является гораздо более общей и непосредственно затрагивает самые фундаментальные космологические параметры, такие, как величина постоянной Хаббла H (которая характеризует скорость расширения Вселенной и является коэффициентом пропорциональности между скоростью удаления далеких галактик и расстоянием, $V \approx H \times R$, где R – расстояние), возраст Вселенной и возраст представителей старого населения галактик, в первую очередь шаровых звездных скоплений. Может показаться удивительным, что, несмотря на прогресс астрономических исследований, мы до сих пор не знаем с достаточной точностью шкалу расстояний во Вселенной.

Разумеется, представления о достаточной точности во все времена были свои. Они определялись масштабом решаемых задач. Так, более 400 лет назад Николай Коперник пришел к выводу, что звезды расположены по крайней мере в 1000 раз дальше от нас, чем Солнце. Теперь-то мы знаем, что он ошибся в своих оценках по крайней мере в 200 раз. Это была одна из первых смелых попыток соотнести межзвездные расстояния с привычными земными масштабами. Гораздо позднее, в первой трети XX века, астрономам достаточно было научиться определять внегалактические расстояния с точностью до

порядка величины, чтобы доказать, что так называемые спиральные туманности представляют собой такие же галактики, как наша. Что же до межзвездных расстояний, то в ближайших окрестностях Солнца (вплоть до расстояний порядка 10–20 пк¹ они уже и в то время были хорошо известны. Нетрудно понять, что адекватное понимание как строения нашей Галактики, так и обозримой части Вселенной возможно лишь в том случае, если мы сумеем правильно продолжить шкалу межзвездных расстояний на межгалактические масштабы, то есть найдем ту линейку, с помощью которой можно равным образом надежно измерять расстояния до звезд и других галактик.

Проблема кажется тривиальной только на первый взгляд. Однако одно лишь то, что ей посвящено множество публикаций в специальной астрономической литературе, что она затрагивается практически на каждом коллоквиуме или симпозиуме Международного астрономического союза, посвященных вопросам галактической или внегалактической астрономии, доказывает ее актуальность на протяжении последних десятилетий. В начале 1980-х годов в связи с подготовкой космического проекта HIPPARCOS², одной из главных целей которого было измерение высокоточных расстояний до звезд, многие астрономы надеялись, что результаты, полученные в ходе выполнения проекта, позволят окончательно решить проблему шкалы расстояний. В июне 1997 года результаты этого впечатляющего космического эксперимента, и в первую очередь каталог расстояний до 118 000 звезд, стали достоянием широких астрономических кругов. Сразу же стало ясно, что проект все же не смог окончательно решить проблему шкалы расстояний. Давайте внимательно рассмотрим, что лежит в основе современной астрономической шкалы расстояний и в чем состоит сама проблема.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ЗВЕЗД И РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Методы определения расстояний до звезд делятся на две группы: геометрические и фотометрические [1]. К числу геометрических методов относится непосредственное измерение так называемого тригонометрического (или годичного) параллакса, то есть параллактического смещения звезды на небес-

¹ Парсек (или сокращенно пк) – единица измерения расстояний в астрономии. 1 пк соответствует расстоянию, с которого радиус земной орбиты виден под углом в 1 секунду дуги. Нетрудно вычислить, что 1 пк = 206 265 а.е. = = $3,08 \cdot 10^{13}$ км (1 а.е. равна расстоянию от Земли до Солнца).

² Название HIPPARCOS (High Precision PARallax Collecting Satellite) вольно переводится как спутник, предназначенный для измерения высокоточных параллаксов. В течение 30 месяцев работы на орбите в 1991–1993 годах с его помощью измерялись параллаксы и собственные движения большого числа звезд.

ной сфере, обусловленного орбитальным движением Земли вокруг Солнца (рис. 1). Классическими фотографическими методами параллакс (обозначаемый греческой буквой π и измеряемый в угловых секундах) определяется со средней точностью порядка $0'02$ – $0'05$. Это означает, что лишь для ближайших звезд (в пределах 20–30 пк) расстояния известны с точностью не хуже 50%. Космический аппарат HIPPARCOS расширил эту сферу примерно до 300–500 пк. Для практических целей (исследования строения Галактики, например) требуется значительно более высокая точность – не хуже 5–10%, поэтому прямое измерение межзвездных расстояний возможно лишь в небольшой по галактическим меркам окрестности Солнца. Для того чтобы изучать строение Галактики и тем более мир галактик, мы должны уметь переносить локальную шкалу расстояний на галактические масштабы.

Для этой цели используется информация о светимости звезд. Зная светимость (или, что одно и то же, абсолютную звездную величину³), видимый блеск и величину поглощения света (для этого достаточно определить видимый блеск звезды с помощью фотометрии в трех цветовых полосах), можно рассчитать расстояние до звезды по простой формуле

$$m - M = 5 \lg R - 5 + A,$$

где A – поглощение света, а расстояние R измеряется в парсеках. Разность видимой и абсолютной величин ($m - M$) принято называть модулем расстояния.

³ Под абсолютной звездной величиной (часто обозначаемой буквой M в отличие от видимой величины m) понимают звездную величину, которую имела бы звезда, расположаясь от нас на расстоянии 10 пк. Абсолютная звездная величина позволяет вычислить энерговыделение звезды, то есть светимость по сравнению с Солнцем.

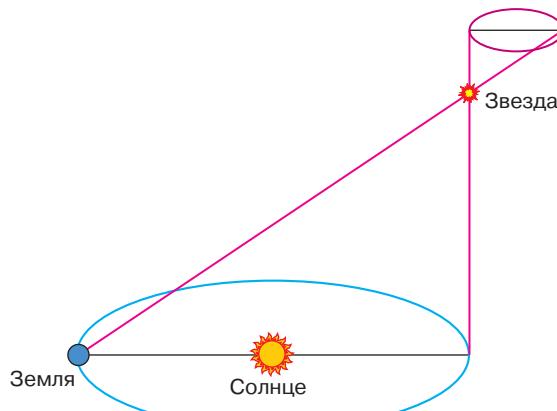


Рис. 1. Определение годичного, или тригонометрического, параллакса. Параллакс равен большой оси эллипса видимого перемещения звезды на небесной сфере вследствие орбитального движения Земли

Абсолютную величину для многих типов звезд определяют по известным параллаксам подобных звезд, населяющих солнечную окрестность. Очевидно, это один из возможных способов установления шкалы расстояний. Найденные по этой формуле расстояния (или параллаксы) часто называют фотометрическими, чтобы подчеркнуть метод их измерения.

Однако среди звезд солнечной окрестности с параллаксами, измеряемыми тригонометрическим методом, подавляющее большинство составляют звезды-карлики, то есть звезды, находящиеся на той же стадии эволюции, что и Солнце. Они принадлежат к числу сравнительно слабых звезд Галактики. Звезды – красных гигантов, которые в 100 раз ярче Солнца, в ближайшей окрестности довольно мало. Еще более ярких звезд уж совсем единицы. Речь идет о самых молодых и горячих звездах и сверхгигантах, превосходящих Солнце по светимости в тысячи и десятки тысяч раз. Причиной их малого числа является общая тенденция резкого падения числа ярких звезд с ростом светимости.

Для определения светимостей абсолютно ярких звезд используют рассеянные звездные скопления¹ [2]. На рис. 2 изображена диаграмма цвет – видимая звездная величина для типичного рассеянного скопления Плеяды, близкого и видного даже невооруженным глазом на осеннем и зимнем небе. На этой диаграмме выделяется главная последовательность звезд, источником энерговыделения которых служат реакции ядерного горения водорода. Поскольку размеры большинства скоплений сравнительно невелики по сравнению с расстоянием до них, модуль расстояния для всех членов скопления практически одинаков. Его можно определить сравнением видимой величины звезд скопления с абсолютной величиной подобных звезд другого скопления, расстояние до которого уже определено независимым методом. Из-за большого числа звезд в скоплении расстояние оценивается с высокой точностью.

Стандартной линейкой для измерения расстояний между скоплениями служит хорошо известное скопление Гиады (расположенное вблизи Альдебарана – ярчайшей звезды созвездия Тельца). Оно об-

¹ Рассеянные звездные скопления – гравитационно устойчивые группы звезд диаметром до 30 пк, населяющие диск Галактики. Звезды одного скопления имеют одинаковый возраст и химический состав, их объединяет общность происхождения из одного газового облака. Возрасты рассеянных скоплений заключены в широком интервале от 1 млн до 5–10 млрд лет. Чем моложе скопление, тем более яркие и горячие звезды в нем присутствуют. В Галактике открыто более 1500 рассеянных скоплений, а общее их число оценивается в 20–30 тысяч.

² Цвет звезды эквивалентен спектральному классу и определяется как разность звездных величин, измеренных в двух полосах (например, желтой и синей) видимого спектра.

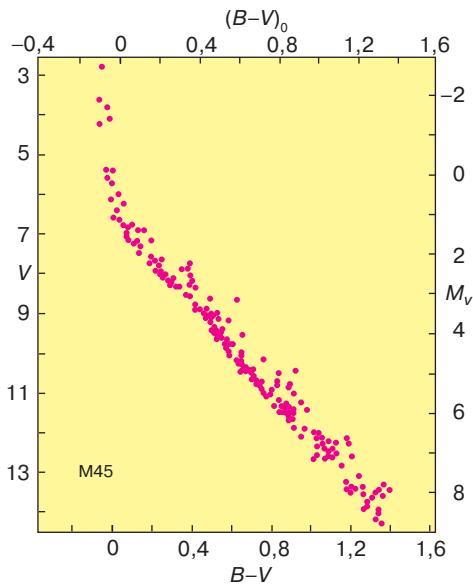


Рис. 2. Диаграмма Герцшпрunga-Рессела (цвет – звездная величина) для рассеянного звездного скопления Плеяды. По горизонтальной оси отложен наблюдаемый показатель цвета $B-V$, по вертикальной: слева – видимая величина в желтой полосе V , справа – абсолютная величина M_V . Звезды концентрируются к главной последовательности (звезды-карликов). $(B-V)_0$ – истинный показатель цвета

ладает одним совершенно уникальным свойством, благодаря которому мы можем определить расстояние до него независимым способом с использованием другого геометрического метода – метода группового или статистического параллакса [1]. Суть метода в следующем. Гиады – близкое скопление, имеющее заметную скорость движения относительно Солнца. По закону перспективы все входящие в него звезды будут смещаться по большим кругам небесной сферы, пересекающимся в одной точке, называемой радиантом скопления (рис. 3). Положение радианта легко определяется по собственным движениям звезд³, а скорость скопления – по лучевым скоростям (измеряемым на основании эффекта Доплера). Принцип измерения группового параллакса понятен из рис. 4. На нем изображена одна из звезд скопления, находящаяся от нас на расстоянии r (пусть оно выражено в парсеках). Пусть λ – угол между направлением на звезду и

³ Собственным движением звезды называют ее видимое угловое перемещение по небесной сфере среди далеких звезд. Оно обозначается греческой буквой μ и измеряется в угловых секундах в год. Наиболее быстрая звезда – звезда Барнarda (собственное движение более $10''$ в год). Для большинства звезд значения μ очень малы и имеют порядок $0.^001$ – $0.^01$ в год. Их измерение является одной из最难нейших задач позиционной астрономии, или астрометрии.

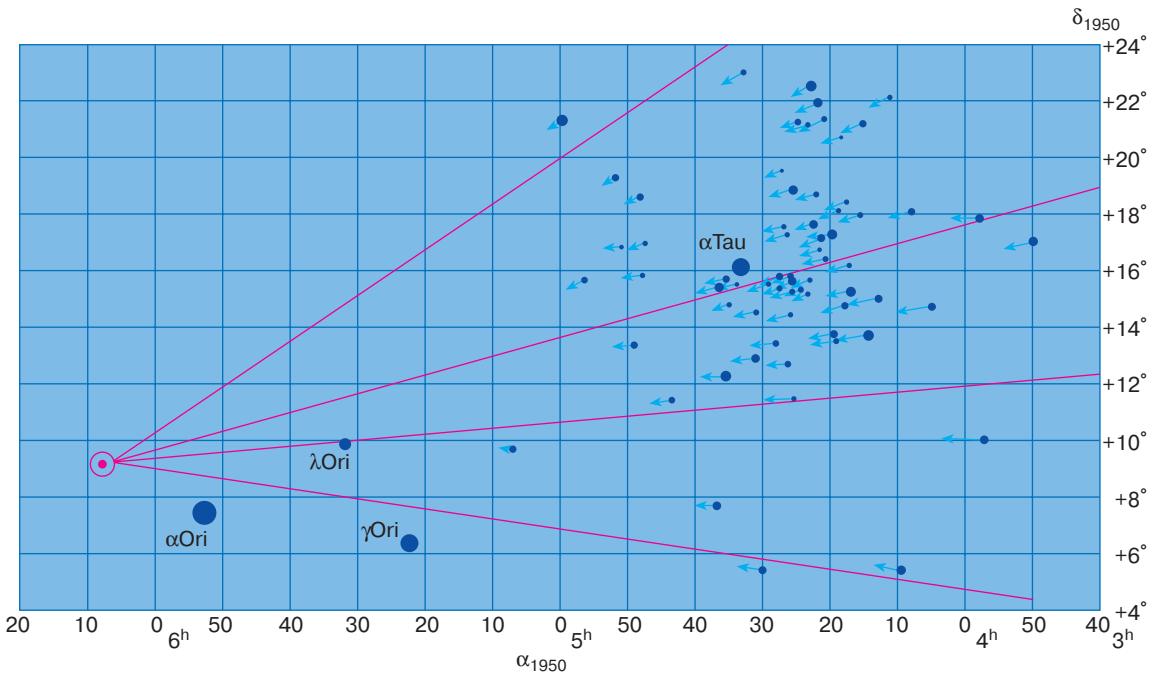


Рис. 3. Радиант близкого рассеянного скопления Гиады. Векторы изображают направления движения отдельных звезд

“антирадиант” скопления, \vec{V} – вектор относительной скорости скопления, V_r и V_t – соответственно лучевая и тангенциальная скорости (в км/с), а μ – собственное движение звезды (выраженное в угловых секундах в год). Нетрудно понять, что все эти величины связаны между собой формулой $4,738\mu r =$

$= V_r \operatorname{tg} \lambda$. По этой формуле можно рассчитать расстояние до каждой звезды движущегося скопления и, следовательно, среднее для всего скопления. Найденное таким методом расстояние до Гиад оказалось равным 45 ± 1 пк, что недавно было подтверждено результатами, полученными со спутника HIPPARCOS.

Таким образом, вплоть до последнего времени шкала расстояний рассеянных скоплений фактически опиралась на единственное скопление – Гиады. Сейчас HIPPARCOS измерил расстояние еще до одного из ближайших скоплений – Плеяд, оно равно 120 пк. Опираясь на расстояния рассеянных скоплений, можно сделать еще один важный шаг на пути создания астрономической шкалы расстояний.

Так, в нескольких молодых рассеянных скоплениях встречаются цефеиды. Эти пульсирующие переменные звезды-сверхгиганты спектральных классов F–G, обладающие громадной светимостью и практически стабильными радиальными пульсациями оболочки [3], играют огромную роль в изучении галактик. В нашей Галактике открыто более 1000 звезд этого типа, имеющих периоды изменения блеска от 2 до 68 суток с амплитудой, достигающей $1,5^m$; из-за их высокой светимости цефеиды видны даже в далеких спиральных галактиках (на расстояниях выше 10 Мпк). Что же делает цефеиды столь интересными объектами? Дело в том, что у цефеид имеется четкая зависимость между периодом пульсаций и средней абсолютной величиной

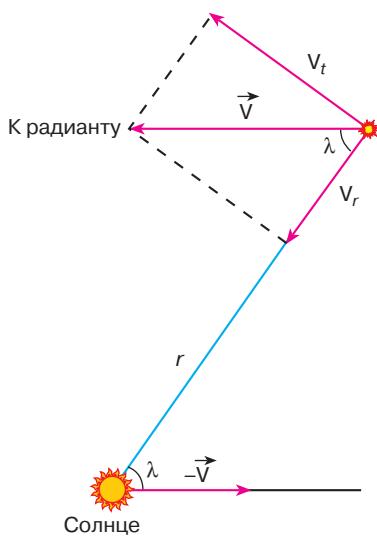


Рис. 4. Принцип измерения группового параллакса. Показаны направление относительной скорости группы звезд и ее лучевая и тангенциальная компоненты. r – расстояние до звезды

(или средней по периоду пульсаций светимостью), имеющая вид (для желтого участка спектра) $M_{cp} \approx -1,0^m - 2,9^m \lg P$, где P – выраженный в сутках период изменения блеска. Параметры зависимости период–светимость определяются всего лишь по девяти цефеидам – членам молодых рассеянных скоплений. Поскольку цефеиды и другие молодые объекты тесно связаны с областями текущего звездообразования, анализ их распределения в Галактике позволяет распознать строение ее спирального узора, наиболее четко намечаемого именно самыми молодыми объектами высокой светимости. И разумеется, с помощью этой зависимости уже можно оценивать фотометрические расстояния до других галактик, содержащих цефеиды! Это и есть шкала расстояний, которую мы хотели построить. Итак, резюмируя рассказанное, изобразим логическую цепочку связей, на которую в конечном счете опирается принимаемая астрономами шкала расстояний:

Расстояние до Гиад и Плеяд (метод группового параллакса) →

- фотометрические расстояния до молодых рассеянных скоплений, содержащих девять цефеид (вычисленные через модуль расстояний) →
- параметры зависимости период–светимость для цефеид →
- фотометрические расстояния до галактик, содержащих цефеиды.

Очевидно, вследствие сложной структуры этой цепочки на шкалу расстояний оказывают влияние все возможные источники ошибок, как случайных, так и систематических.

ШКАЛА РАССТОЯНИЙ СТАРЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЛАКТИКИ

Все объекты, о которых мы упомянули в связи с созданием шкалы расстояний, населяют диск Галактики и являются очень молодыми (так, возраст цефеид не более 50–80 млн лет). А как определяются расстояния до старых объектов Галактики, например шаровых звездных скоплений¹ [2] и одиночных звезд галактического гало?² Раз звезды диска и гало имеют разный возраст, происхождение, химический состав и находятся на разных стадиях звездной эволюции, подходить к ним с единой меркой не

¹ Шаровые звездные скопления – гравитационно устойчивые скопления, содержащие десятки и сотни тысяч старых звезд галактического гало (см. ниже). Имеют почти сферическую форму. Их возраст не намного меньше возраста Галактики и составляет по крайней мере 10–12 млрд лет.

² Гало Галактики – совокупность старых объектов. В отличие от объектов диска население гало очень слабо концентрируется к плоскости симметрии Галактики и гораздо сильнее – к центру Галактики. Распределение старого населения имеет сфероидальную форму. Гало практически не вращается.

так просто. Для того чтобы установить шкалу расстояний, пригодную для старых объектов, необходимо найти независимый способ определения расстояний хотя бы до некоторых из них. Такими объектами стали пульсирующие переменные (и снова выручают нас переменные звезды!) звезды типа RR Лиры, названные так в соответствии с принятым в “Общем каталоге переменных звезд” обозначением наиболее хорошо изученного представителя этого класса – звезды RR в созвездии Лиры [3].

Эти звезды меняют свой блеск с периодами от 0,4 до 1 суток, но в отличие от цефеид диска все имеют приблизительно одну и ту же среднюю светимость. Звезды этого класса (гораздо более слабые, чем цефеиды) в большом количестве населяют горизонтальную ветвь шаровых скоплений на диаграмме цвет–звездная величина (рис. 5) и являются основой определения расстояний до этих скоплений. Для этого нужно только независимым способом определить их абсолютную величину и, измерив видимую величину, вычислить фотометрическое расстояние. До недавнего времени для определения абсолютных величин звезд типа RR Лиры использовался единственный доступный и надежный способ – метод статистических параллаксов. Он является сложным обобщением уже рассмотренного метода группового параллакса, учитывающим тот факт, что звезды типа RR Лиры не только обладают общим движением относительно Солнца, но и в отличие от членов рассеянного скопления с большими (порядка 150 км/с, что свойственно звездам галактического гало) скоростями движутся одна относительно другой.

Как и в методе группового параллакса, для вычисления абсолютных величин (и, следовательно,

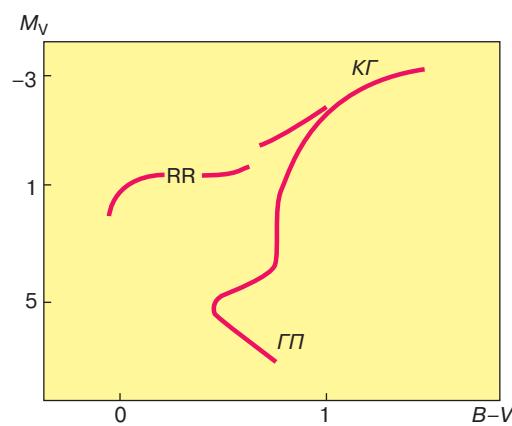


Рис. 5. Диаграмма Герцшпрунга–Рессела (цвет–абсолютная звездная величина) для типичного шарового звездного скопления. Показано положение пульсирующих переменных звезд типа RR Лиры на горизонтальной ветви. КГ – ветвь красных гигантов, ГП – часть главной последовательности, населенная звездами малой массы

расстояний) используются лучевые скорости и собственные движения звезд, а также их видимые звездные величины. Суть метода сводится к тому, что общее движение группы звезд относительно Солнца неизбежно присутствует в их собственных движениях в виде компонента собственного движения μ_{cp} , направленного на радиант и связанного с расстоянием до звезды и скоростью движения группы выражением $4,738\mu_{\text{cp}}r \approx V \sin \lambda$ (как легко видеть из рис. 4). Поскольку эти звезды движутся относительно Солнца со средней скоростью более 200 км/с, эффект общего движения хорошо заметен даже на больших межзвездных расстояниях. Задача состоит в оптимальном подборе такого значения абсолютной величины звезд типа RR Лиры M_{RR} , при котором наилучшим образом выполняется приведенное выше соотношение.

В течение десятилетий использовалось выведенное таким методом еще в 1960-е годы значение $M_{\text{RR}} = +0,6^m$, использованное для расчета расстояний до шаровых скоплений и даже до центра Галактики. В настоящее время в связи с появлением нового массового и более точного наблюдательного материала это значение пересмотрено. По новым данным, для звезд типа RR Лиры с пониженным содержанием тяжелых химических элементов (то есть с типичным для населения гало химическим составом) $M_{\text{RR}} \approx +0,78^m$. Результаты прямого измерения расстояний в рамках проекта HIPPARCOS дают по меньшему числу звезд близкое к этому значение светимости. Следовательно, ранее принимаемая шкала расстояний старых объектов нуждается в сокращении всех расстояний примерно на 9%.

СОГЛАСОВАНИЕ ШКАЛ РАССТОЯНИЙ

Итак, мы рассмотрели те наблюдательные данные, на которые опираются шкалы расстояний молодых (диск) и старых (гало) объектов. Ясно, однако, что в идеальном случае эти две шкалы должны совпадать, то есть 1 кпк в гало должен быть равным 1 кпк в диске Галактики. Проверить согласованность шкал расстояний можно несколькими способами. Во-первых, определив расстояние до центра Галактики R_0 . Может показаться странным, что по поводу значения этого фундаментального параметра на протяжении десятков лет в астрономической литературе идет ожесточенная дискуссия. Встречающиеся в литературе оценки R_0 заключены в пределах от 6,5 до 10 кпк.

Этот неправдоподобно большой разброс оценок связан именно с применением двух упомянутых шкал расстояний. Так, с одной стороны, расстояние до центра Галактики можно считать равным расстоянию до области, к которой концентрируются шаровые скопления и звезды типа RR Лиры. С другой – существует кинематический метод определения расстояния, заключающийся в том, что центр Галактики является также центром вращения объектов галакти-

ческого диска [4]. Есть и многочисленные другие методы [5], большинство которых опирается либо на одну, либо на другую из рассмотренных шкал.

Второй способ проверки согласованности шкал состоит в определении модуля расстояния галактики, в которой хорошо изучены как рассеянные скопления и цефеиды, так и шаровые скопления и переменные типа RR Лиры. Речь идет о Большом Магеллановом облаке (БМО). Эта неправильная галактика, видная невооруженным глазом на южном небе, является одним из ближайших спутников нашей Галактики. Использование упомянутых ранее оценок светимости звезд типа RR Лиры и зависимости период–светимость для цефеид приводит к хорошему согласию значений модуля расстояния БМО, близкому к $18,25-18,30^m$. Это значение также хорошо согласуется с оценкой расстояния БМО, полученной сравнением линейной и угловой скоростей расширения остатка Сверхновой, вспыхнувшей в БМО в 1987 году.

Что касается расстояния до центра Галактики, то в последнее время разными методами получаются оценки порядка $R_0 \approx 7,2-7,8$ кпк, неплохо согласующиеся с обеими шкалами расстояний. Впервые стало возможным говорить о согласованной шкале расстояний в Галактике. По сравнению с использованными ранее шкалами она стала на 10–15% короче.

ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШКАЛЫ РАССТОЯНИЙ

В 1995 году с помощью 2,5-метрового космического телескопа им. Хаббла были изучены цефеиды в галактике M 96 – спиральной галактике, входящей в состав группы галактик в созвездии Льва. Несмотря на то что они очень слабы ($\approx 25-26^m$), для восьми цефеид удалось проследить изменения их блеска со временем и определить среднюю видимую величину. После учета поглощения с помощью зависимости период–светимость, ранее используемой для цефеид Галактики (более “длинной”), был оценен их абсолютный блеск и найдено расстояние до него $11,6 \pm 0,8$ Мпк [6]. Важны космологические и космогонические последствия этого результата.

Зная расстояние и лучевую скорость скопления (приблизительно 7200 км/с), мы можем оценить постоянную Хаббла $H \approx 69 \pm 8$ км/с/Мпк. Это существенно больше значения 50 км/с/Мпк, принимавшегося на протяжении многих лет. Постоянная Хаббла в рамках космологической модели Эйнштейна–де Ситтера однозначно связана с возрастом Вселенной: $T \propto H^{-1}$. Новое, более высокое значение постоянной Хаббла приводит к слишком малому возрасту Вселенной – менее 10 млрд лет. Парадокс заключается в том, что теория звездной эволюции предсказывает существенно больший возраст шаровых скоплений. Впрочем, по современным оценкам [7], возраст галактического диска, оцененный по белым карликам, также превышает

9,5 млрд лет. Если же учесть, что новая, уточненная шкала расстояний несколько короче, то значение постоянной Хаббла увеличится и противоречие между малым возрастом Вселенной и возрастом шаровых скоплений и диска только усилится, конечно, если не предполагать, что большинство шаровых скоплений имеет докалактическое происхождение, что крайне маловероятно.

Кроме того, как уже было сказано, последние результаты изучения переменных звезд типа RR Лиры говорят о необходимости уменьшить их светимость приблизительно на 0,2^m. Эволюционные расчеты показывают, что светимость звезд на этой стадии должна уменьшаться с возрастом скопления [2]. Уменьшая светимость и тем самым сокращая шкалу расстояний, мы даже увеличиваем эволюционный возраст скоплений. Итак, уменьшение шкалы расстояний приводит, с одной стороны, к уменьшению возраста Вселенной, а с другой — к увеличению возраста шаровых скоплений и отмеченное противоречие только усиливается.

Как же устранить парадокс, связанный со шкалой расстояний? Объяснение, удовлетворяющее всех исследователей, пока не найдено. Ождалось, что окончательный и однозначный ответ даст прямое измерение высокоточных параллаксов звезд гало и цефеид с помощью спутника HIPPARCHOS. Однако, судя по имеющемуся наблюдательному материалу, этого не произошло. Число цефеид с высокоточными параллаксами (то есть сравнительно близких) слишком мало для точных выводов. Следовательно, оснований заметным образом удлинить шкалу расстояний пока нет.

Альтернативное объяснение парадокса может быть связано как с неверной интерпретацией выводов теории эволюции или даже неточностью самой теории эволюции маломассивных звезд (к которым относится большинство звезд шаровых скоплений), так и с необходимостью уточнить космологическую

модель. Эту точку зрения разделяет широкий круг исследователей.

Итак, ключевые вопросы современной астрофизики — теория звездной эволюции и космологические представления — оказались весьма чувствительными к результатам определения расстояний в нашей Галактике и за ее пределами. Противоречие выводов теории звездной эволюции и космологии, по-видимому, станет стимулятором дальнейшего развития наших представлений о Галактике и Вселенной и ареной борьбы новых идей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаковский П.Г. Звездная астрономия. М.: Наука, 1985.
2. Холопов П.Н. Звездные скопления. М.: Наука, 1981.
3. Гоффмейстер К., Рихтер Г., Венцель В. Переменные звезды. М.: Наука, 1991.
4. Дамбис А.К., Мельник А.М., Растворгув А.С. Кривая вращения системы классических цефеид и расстояние Солнца от центра Галактики // Письма в "Астрон. журн.". 1995. Т. 21. С. 331.
5. Feast M.W. The Galaxy / Ed. G. Gilmore, B. Carswell. Dordrecht: Reidel, 1987. P. 25.
6. Tanvir N.R., Shanks T., Ferguson H.C., Robinson D.R.T. Determination of the Hubble Constant from Observations of Cepheid Variables in the Galaxy M 96 // Nature. 1995. Vol. 377. P. 27.
7. Oswalt T.D., Smith J.A., Wood M.A., Hintzen P. A Lower Limit of 9.5 Gyr on the Age of the Galactic Disk from the Oldest White Dwarf Stars // Nature. 1996. Vol. 382. P. 692.

* * *

Алексей Сергеевич Растворгув, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. Специалист в области звездной и наблюдательной астрономии, строения и динамики Галактики и звездных скоплений. Автор более 70 научных статей.