

«Российская наука на заре нового века»
М.: «Научный мир», 2001. С.105-117.

Шкала расстояний во Вселенной

А.С.Расторгуев, А.К.Дамбис

Алексей Сергеевич Расторгуев - доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной астрономии физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, заведующий отделом изучения Галактики и переменных звезд Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга при МГУ;

Андрей Карлович Дамбис - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга при МГУ 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 масс звездных систем, поскольку масса и линейный размер R однозначно связаны со скоростью вращения Галактики или скоростями звезд, населяющих звездное скопление (определяемых формулой

$$V \propto k \sqrt{\frac{GM}{R}},$$

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 представляет коэффициент пропорциональности между скоростью удаления далеких галактик и расстоянием, $V \sim HR$, где R — расстояние), возраст Вселенной и возраст представителей старого населения галактик, в первую

очередь шаровых звездных скоплений. Может показаться удивительным, что, несмотря на большой 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 в., 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 собственная. Что же до межзвездных расстояний, то в ближайших окрестностях Солнца, вплоть до расстояний порядка 10—20 парсек*, 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, т.е. 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 статей и обзоров в специальной астрономической литературе, что она затрагивается практически на каждом коллоквиуме или симпозиуме Международного астрономического союза, посвященном вопросам галактической или внегалактической астрономии, доказывает ее непреходящую актуальность на протяжении последних десятилетий. В начале 80-х годов в связи с подготовкой космического проекта «HIPPARCOS»**, 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 г. 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 «закрыть» 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 основные группы: геометрические и фотометрические. К числу геометрических относится непосредственное измерение так называемого тригонометрического (или годичного) параллакса, т.е. параллактического смещения звезды на небесной сфере, обусловленного орбитальным движением Земли вокруг Солнца

* 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 (1"). Нетрудно вычислить, что 1 пк = 206265 а.е.(астрономических единиц, равных расстоянию от Земли до Солнца) = $3.08 \cdot 10^{13}$ км.

** 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 гг. с его помощью измерялись параллаксы и собственные движения большого числа звезд.

(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.

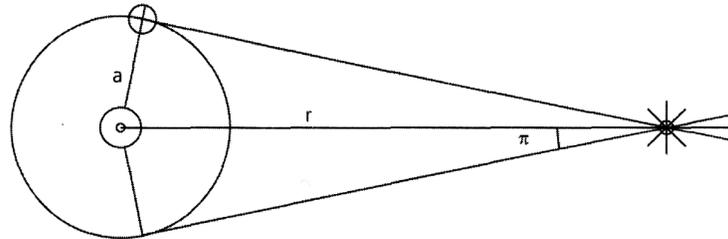


Рис.1. Годичный параллакс звезды — угол π , под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты a . В результате обращения Земли по орбите вокруг Солнца положение звезды, на небесной сфере за полгода смещается на угол 2π .

Для этой цели используется информация о светимостях звезд. Зная светимость (или, что одно и то же, абсолютную звездную величину*), видимый блеск и величину поглощения света (для этого обычно 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*. Абсолютную величину для многих типов звезд определяют по известным параллаксам подобных звезд, населяющим 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, т.е. звезды, находящиеся на той же стадии эволюции, что и Солнце. Они принадлежат к числу сравнительно слабых звезд Галактики, и это обстоятельство сильно затрудняет или даже делает невозможным наблюдение подобных им объектов в далеких галактиках и их использование в качестве индикаторов расстояния. Звезд — красных гигантов, которые

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

в 100 раз ярче Солнца, в ближайшей окрестности довольно мало. И уж совсем единицы — еще более ярких звезд. Речь идет о самых молодых и горячих звездах и о сверхгигантах, превосходящих Солнце по светимости в тысячи и десятки тысяч раз. Причина их малого числа — общая тенденция резкого падения количества ярких звезд с ростом светимости.

Для определения светимостей абсолютно ярких звезд используют рассеянные звездные скопления. 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 тыс. На рис.2 изображена диаграмма Цвет*—видимая звездная величина для типичного рассеянного скопления Плеяды, близкого и видимого 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, расстояние (а следовательно, и модуль расстояния) для всех членов скопления практически одинаков. Его можно определить путем сравнения видимой величины звезд 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 до скоплений служит хорошо известное скопление Гиады (расположенное вблизи ярчайшей звезды созвездия Тельца Альдебарана). Оно обладает одним совершенно уникальным свойством, благодаря которому мы можем определить расстояние до него независимым способом с использованием другого геометрического метода — *группового, или статистического, параллакса*. 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 звезд**, 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 (выражено в пк). Пусть λ — угол между направлением на звезду и на «антирадиант» скопления, V — вектор относительной скорости скопления, V_r и V_t — соответственно лучевая и тангенциальная скорости (в км/с), μ — собственное движение звезды (выраженное в "/год). Нетрудно понять, что все эти величины связаны между собой формулой $4.738\mu r = V_r \operatorname{tg} \lambda$.

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

** Собственным движением звезды называют ее видимое угловое перемещение по небесной сфере среди далеких звезд. Оно обозначается греческой буквой μ и измеряется в "/год. Наиболее «быстрая» звезда — Барнарда (собственное движение более 10"/год). Для большинства звезд значения μ очень малы и имеют порядок 0.001—0.01 "/год. Их измерение — одна из труднейших задач позиционной астрономии (или астрометрии).

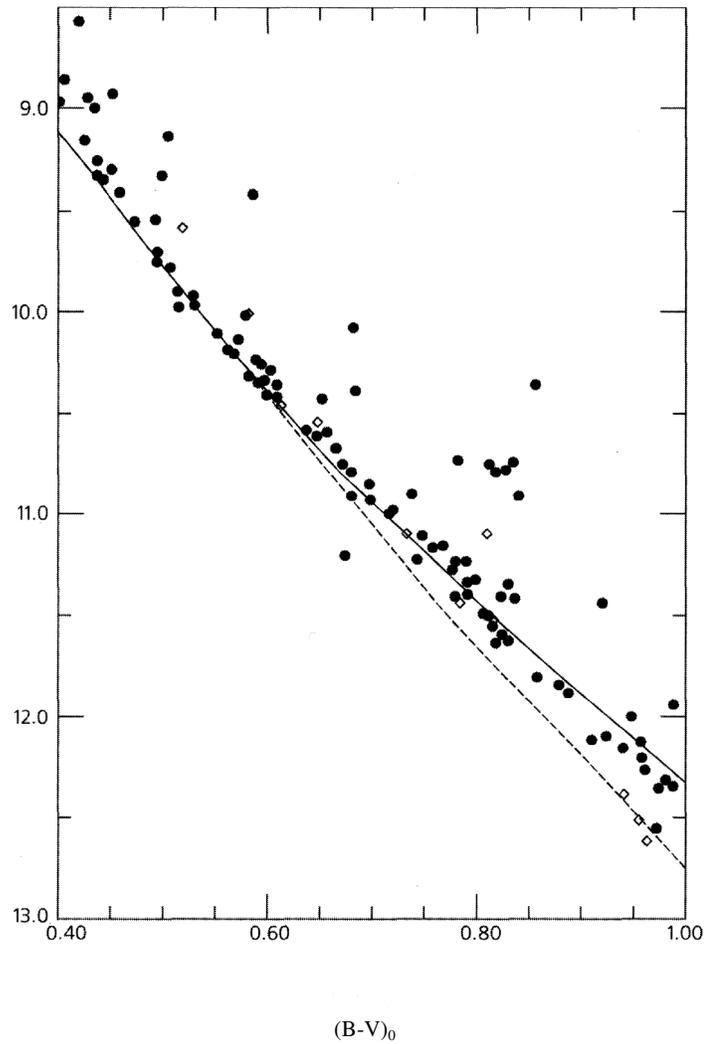


Рис.2. Диаграмма цвет—видимая звездная величина для близкого скопления Плеяды. По вертикальной оси отложены видимые звездные величины в желто-зеленой области спектра (цветовая полоса V), по горизонтальной — разности измеренных звездных величин в синей и желто-зеленой цветовых полосах.

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 прямых измерений тригонометрических параллаксов, полученными со спутника «HIPPARCOS».

Таким образом, долгое время шкала расстояний рассеянных скоплений фактически опиралась на единственное скопление — Гиады. Однако еще

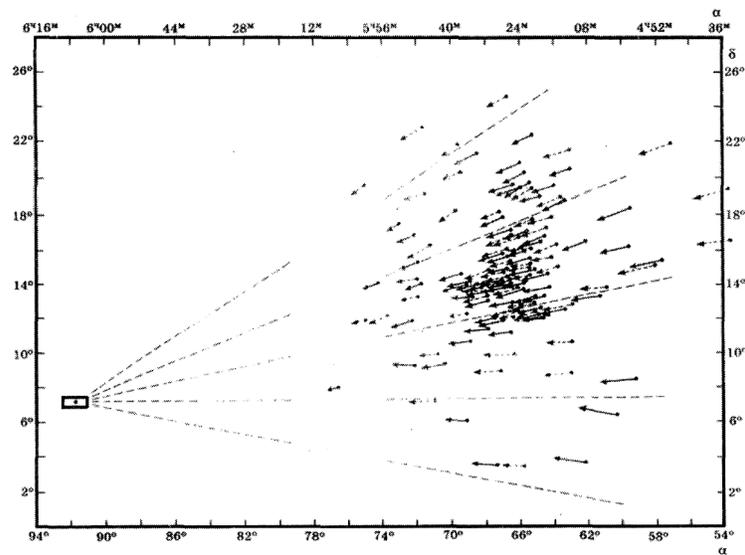


Рис.3- Близкое скопление Гиады на звездной карте (по горизонтальной оси — прямое восхождение, по вертикальной — склонение). Стрелками показаны собственные движения звезд. Они сходятся практически в одной точке неба — радианте.

в 1964 г. И.М.Копылов обратил внимание на явно завышенные светимости наиболее горячих голубых в принятых тогда вариантах главной последовательности и предложил свой вариант главной последовательности, не опирающийся на Гиады и приводящий к более короткой шкале расстояний по сравнению с общепринятой. В 1975 г. Д.Л.Кроуфорд по измеренным тригонометрическим параллаксам ближайших звезд спектрального класса F (они немного горячее и ярче Солнца) независимым от Гиад образом определил положение главной последовательности на диаграмме цвет—величина (при этом цвет определялся в тогда еще новой фотометрической системе, предложенной Стремгренем). Эта диаграмма была впоследствии применена для определения расстояния до другого близкого скопления — Плеяд: около 128 пк. При этом оказалось, что расстояния до большинства рассеянных скоплений также примерно на 15% короче тех, в основе которых лежало расстояние до Гиад. Близость Плеяд была недавно подтверждена результатами наблюдений «HIPPARCOS»: согласно высокоточным измерениям тригонометрических параллакссов членов этого скопления, расстояние до Плеяд оказалось даже еще короче — около 120 пк. На нежелательность использования Гиадной в качестве эталона расстояний до рассеянных скоплений еще в 1971 г. указали Ю.Н.Ефремов и И.М.Копылов, которые обратили внимание на нетипичность этого скопления, звезды которого в 1.5 — 2 раза богаче тяжелыми элементами (к ним астрономы относят всю таблицу Менделеева за исключением двух самых легких и распространенных элементов — водорода и гелия), чем звезды в большинстве скоплений в окрестности Солнца. Де-

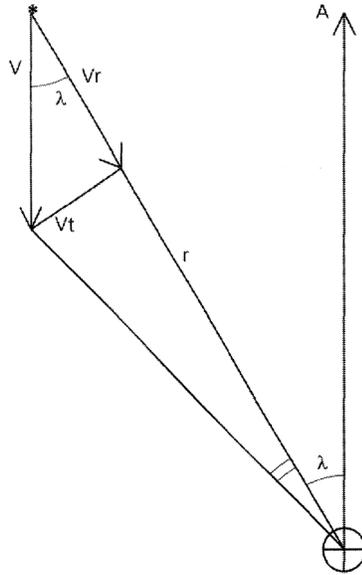


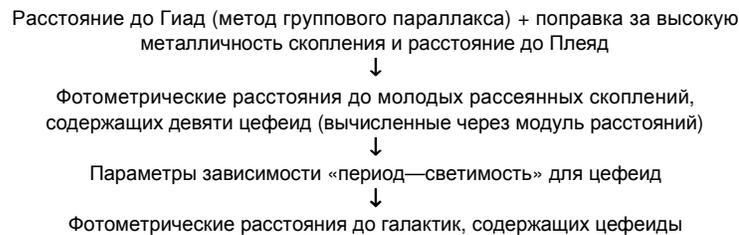
Рис.4. Принцип измерения группового параллакса скопления, движущегося на расстоянии r . Здесь λ — угол между направлением на звезду и на «антирадиант» скопления A , V — вектор относительной скорости скопления, V_r и V_t — лучевая и тангенциальная скорости.

ло в том, что большое число линий тяжелых элементов (астрономы часто называют их металлами) в спектре звезды — а они концентрируются в голубой части спектра — делают цвет звезды более красным, чем он был бы в отсутствие металлов. При этом видимая светимость звезды остается почти неизменной (поскольку в видимой области спектра линий металлов мало), и в результате более красным звездам приписывается светимость их более голубых, а следовательно, более горячих и ярких сородичей. Учет этого эффекта позволяет устранить упомянутое выше противоречие в пользу более короткой «плеядной» шкалы расстояний (содержание металлов в Плеядах примерно такое же, как и у большинства скоплений вблизи Солнца).

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, играют огромную роль в изучении галактик. В нашей Галактике открыто более 1000 звезд этого типа, имеющих периоды изменения блеска от 2 до 68 сут., с амплитудой, достигающей 1.5^m ; из-за их высокой светимости цефеиды видны даже в далеких спиральных галактиках (на расстояниях свыше 10 Мпк = 10 млн. пк), а очень регулярные и сильные изменения блеска позволяют легко отличить эти звезды от других. Что же делает цефеиды столь интересными объектами? Дело в том, что у цефеид имеется четкая зависимость периода пульсаций от сред-

ней абсолютной величины (или средней по периоду пульсаций светимости), представляющая (для желтого участка спектра) $M_V \sim -1.0^m - 2.9^m \lg P$, где P — выраженный в сутках период изменения блеска. Параметры зависимости период—светимость определяются всего лишь по девяти цефеидам — членам молодых рассеянных скоплений и, по имеющимся данным, мало чувствительным к содержанию металлов. 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, причем Космический телескоп им.Хаббла — а исследование цефеид в далеких галактиках является одним из ключевых элементов его научной программы - позволяет делать это на расстояниях до 10 млн. пк и более! 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.



Вследствие сложной структуры этой цепочки на шкалу расстояний, очевидно, влияют все возможные источники ошибок, как случайных, так и систематических.

Ожидалось, что высокоточные измерения тригонометрических параллаксов на спутнике «HIPPARCOS» позволят окончательно установить все детали упомянутой выше цепочки, получив тем самым стройную и внутренне согласованную шкалу расстояний молодых объектов и опирающуюся на нее внегалактическую шкалу расстояний. Однако уже самые первые результаты оказались весьма противоречивыми. Так, в 1997 г. М.Фист и Р.Кэчпол, проанализировав эти тригонометрические параллаксы измеренных на спутнике «HIPPARCOS» классических цефеид, пришли к выводу о необходимости существенного увеличения их шкалы расстояний. В то же время ряд авторов на основании изучения тригонометрических параллаксов ряда близких рассеянных скоплений и менее компактных группировок — звездных ассоциаций — сделали однозначный вывод в пользу короткой шкалы, которая никак не согласуется с предложенной Фистом и Кэчпол шкалой расстояний цефеид. В самое последнее время, похоже, выход из этого противоречия найден — опять-таки в пользу короткой шкалы расстояний.

Дело в том, что, согласно результатам применения метода статистических параллаксов (а также при более тщательном анализе тригонометрических параллаксов!) к цефеидам, короткая шкала расстояний остается, безус-

ловно, верна для цефеид больших периодов (свыше 9—10 дней), на которые, в частности, опирается вся внегалактическая шкала расстояний, а увеличить же следует лишь расстояния цефеид коротких периодов (которые в большинстве других галактик наблюдать не удастся). Последнее же обстоятельство связано скорее всего с неверным определением «тона», в котором пульсируют многие короткопериодические цефеиды. Дело в том, что цефеида может пульсировать несколькими различными способами (иногда даже одновременно), подобно тому как гитарная струна может издавать звуки разной высоты в зависимости от того, как ее ущипнуть. Большинство цефеид (и практически все цефеиды больших периодов) пульсируют в так называемом основном тоне, период которого связан со светимостью звезды через упоминавшуюся выше зависимость. Однако часть цефеид (и таких особенно много среди цефеид коротких периодов) пульсируют в так называемом первом оберitone, период которого составляет около 70% от периода основного тона для каждой конкретной звезды. И в случае если по каким-либо причинам звезду, пульсирующую в первом оберitone, по ошибке принимают за цефеиду, пульсирующую в основном тоне, то ей фактически приписывается заниженный период и, следовательно, заниженная светимость.

Так что результат Фиста и Кэчпол всего лишь косвенное подтверждение ошибочной классификации большого числа цефеид коротких периодов. Применение метода статистических параллаксов с учетом возможных ошибок классификации цефеид по модам пульсации опять-таки приводит к короткой шкале расстояний в прекрасном согласии с результатами для близких скоплений — этот результат был независимым образом получен в 1998 г. авторами этой статьи совместно с Е.В.Глушковой и М.В.Заболоцких, а также группой французских и испанских исследователей (К.Лури, А.Е.Гомес, Ф.Фигерас и М.О.Менессье). Отметим, наконец, что, согласно результатам, полученным авторами этой статьи совместно с А.М.Мельник, короткая шкала расстояний подтверждается также анализом тригонометрических параллаксов голубых звезд, а также результатами применения к ОВ-ассоциациям (тесным группировкам молодых, объединенным общим происхождением) метода статистических параллаксов.

Шкала расстояний старых объектов Галактики

Все объекты, которые 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 звезд ОВ-ассоциаций - всего около 10 млн. лет). А как же определяются расстояния до старых объектов Галактики, например шаровых звездных скоплений* и одиночных звезд галактического гало**? Поскольку звезды диска и гало имеют разный возраст, происхождение, химический состав и находятся на разных стадиях звездной эволюции, подходить к ним с единой «меркой» не 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 соответст-

* 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.

** 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 сферическую форму. Гало практически не вращается.

вии с принятым в Общем каталоге переменных звезд обозначением наиболее хорошо изученного представителя этого класса — звезды RR в созвездии Лиры).

Эти звезды меняют свой блеск с периодами от 0.4 до 1 сут, 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 так называемую 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 скоростями (порядка 150 км/с, что свойственно звездам галактического гало) движутся относительно друг друга.

Как и в методе группового параллакса, для вычисления абсолютных величин (и следовательно, 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 виде компонента собственного движения $\mu_{\text{ср}}$, направленного на радиант и связанного с расстоянием до звезды и скоростью движения группы выражением $4.738 \mu_{\text{ср}} \approx V \sin \lambda$. 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_V , при котором наилучшим образом выполняется приведенное выше соотношение.

В течение десятилетий использовалось выведенное таким методом еще в 60-е годы значение $M_V = +0.6^{\text{m}}$, применявшееся 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 (т.е. с типичным для населения гало химическим составом) $M_{\text{RR}} = +0.78^{\text{m}}$. Результаты прямого измерения расстояний в рамках проекта «HIPPARCOS» дают по меньшему числу звезд близкое к этому значению 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, т.е. 1 кпк в гало должен быть равным 1 кпк в диске Галактики. Проверить согласованность шкал расстояний можно несколькими способами. В первую очередь определив расстояние до центра Галактики RO. Может показаться странным, что по поводу значения этого фундаментального параметра на протяжении десят-

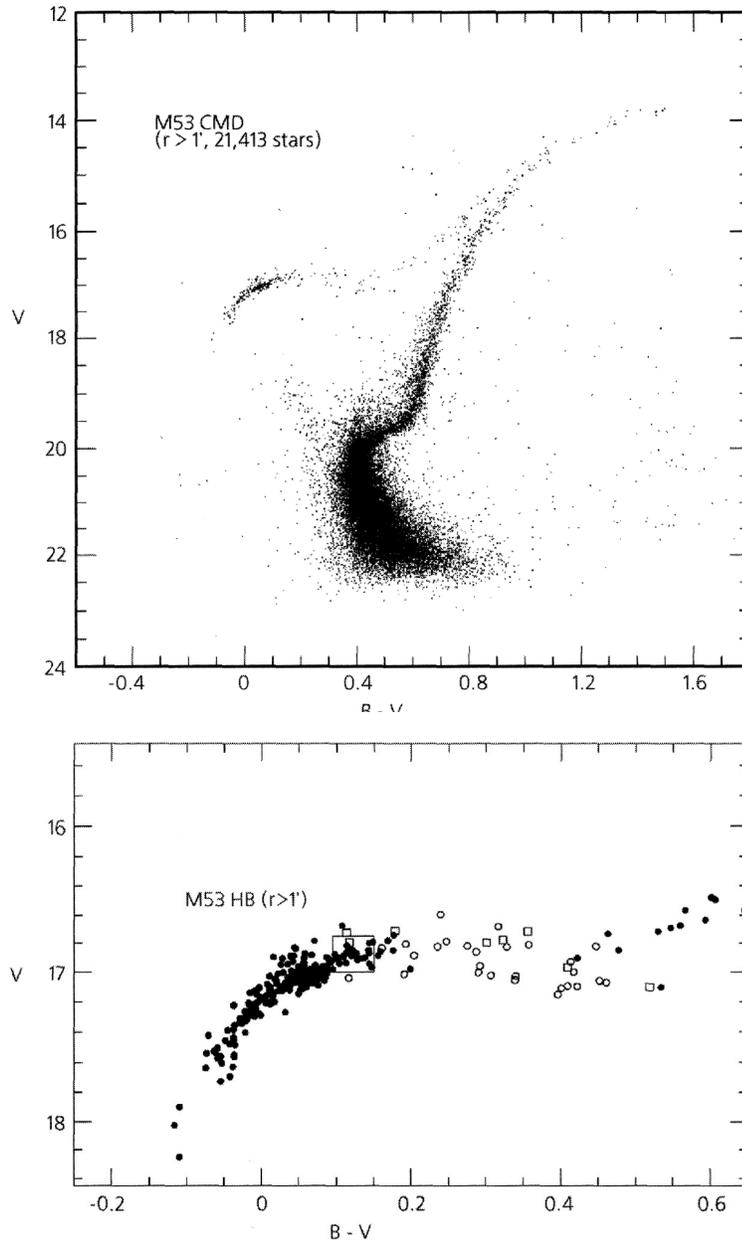


Рис.5. Диаграммы цвет—звездная величина шарового скопления M53 (вверху — для всего скопления, внизу — для горизонтальной ветви). Звезды RR Lyr (светлые кружки) имеют одинаковую светимость. По вертикальной оси отложены измеренные звездные величины членов скопления в цветовой полосе V, по горизонтальной — разности звездных величин в полосах B (синяя) и V (желто-зеленая).

ков лет в астрономической литературе идет ожесточенная дискуссия. Встречающиеся оценки R_0 заключаются в пределах от 6.5 до 10 кпк.

Этот неправдоподобно большой разброс 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 галактического диска. Есть и многочисленные другие методы, 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, видимая невооруженным глазом на южной части неба, — один 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, сделанной путем сравнения линейной и угловой скоростей расширения остатка Сверхновой, вспыхнувшей в БМО в 1987 г.

Что касается расстояния до центра Галактики, то в последнее время разными методами получают оценки порядка $R_0 = 7.2—7.8$ кпк, неплохо согласующиеся с обеими шкалами расстояний. Впервые стало возможным говорить о согласованной шкале расстояний в Галактике. По сравнению с использовавшимися ранее шкалами она стала на 10—15% короче.

Проблемы, связанные с использованием шкалы расстояний

В 1995 г. с помощью 2.5-метрового Космического телескопа им. Хаббла были изучены цефеиды в спиральной галактике M96, входящей в состав группы галактик созвездия Льва. Несмотря на то, что они очень слабы ($25—26^m$), для восьми цефеид удалось проследить изменения 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 ± 0.8 Мпк. Важны космологические и космогонические последствия этого результата.

Зная расстояние и лучевую скорость скопления галактик (приблизительно 7200 км/с), мы можем оценить постоянную Хаббла $H = 69 \pm 8$ 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, 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 меж-

ду малым возрастом Вселенной и возрастом шаровых скоплений и диска только усилится. Конечно, если не предположить, что большинство шаровых скоплений имеет догалактическое происхождение, что крайне маловероятно.

Более 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. 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 — увеличению возраста шаровых скоплений, и отмеченное противоречие только усиливается.

Как же устранить парадокс, связанный со шкалой расстояний? Объяснение, удовлетворяющее всех исследователей, пока не найдено. Ожидалось, что окончательный и однозначный ответ даст прямое измерение высокоточных параллаксов звезд гало и цефеид с помощью спутника «HIPPARCOS». Однако, судя по имеющемуся наблюдательному материалу, этого не произошло. Число цефеид с высокоточными параллаксами (т.е. 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.