



Новое
в жизни
науке,
технике

Подписная
научно –
популярная
серия

П. В. Блюх
А. А. Минаков

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ

1'90

КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**

1/1990

Издается ежемесячно с 1971 г.

П. В. Блюх,
А. А. Минаков

**ГРАВИТАЦИОННЫЕ
ЛИНЗЫ**

**В приложении этого номера:
новости астрономии**



Издательство «Знание» Москва 1990

ББК 22.6
Б69

Редактор: ВНРКО И. Г.

Блиох П. В., Минаков А. А.

Б 69 Гравитационные линзы. — М.: Знание, 1990. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 1).

ISBN 5-07-001197-9

15 к.

В брошюре рассказывается об истории открытия нового астрономического явления — гравитационных линз, о том, какие линзы обнаружены к настоящему времени и как это явление используется в современной астрофизике для изучения свойств далеких космических объектов (квazarов, галактик).

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся актуальными проблемами познания Вселенной.

1605000000

ББК 22.6

ISBN 5-07-001197-9 © Блиох П. В., Минаков А. А., 1990 г.

ВВЕДЕНИЕ

В 1989 г. мировое астрономическое сообщество отметило своеобразный юбилей — 10 лет со дня открытия первой гравитационной линзы. Вторая половина XX в. оказалась весьма удачной для астрономов. В 1960 г. были открыты квазары — самые далекие и мощные космические источники. Спустя всего семь лет (в 1967 г.) обнаружили пульсирующие источники-пульсары с удивительно постоянными периодами следования импульсов (вначале даже показалось, что наконец-то приняты сигналы от внеземных цивилизаций). Еще один небольшой перерыв, как будто бы нарочно спланированный для того, чтобы астрономы могли прийти в себя, и в 1979 г. новая сенсация — обнаружена гравитационная линза!

Внешне этот объект выглядит более чем скромно. Он предстал перед наблюдателями в виде двух слабых голубоватых звездочек в созвездии Большой Медведицы. Интересно, что фотографии этих звездочек были получены еще в 1950 г. (невооруженным глазом они не видны), но их удивительные свойства обнаружили только в 1979 г., когда удалось провести спектральный анализ их излучения. Спектры двух источников оказались настолько неправдоподобно совпадающими друг с другом, что было высказано предположение о том, что на самом деле здесь наблюдается двойное изображение одного и того же источника, своего рода «космический мираж». О земных миражах, с которыми встречается путешественник в морях и пустынях, знает каждый. Известно, что они возникают довольно часто. «Космические миражи» — явление очень редкое и до 1979 г. никогда не отмечалось. Открытие первой гравитационной линзы стимулировало целенаправленные поиски других линз, которые и были вскоре обнаружены. К моменту написания этой книги уже известны 17 объектов с проявлениями линзового эффекта сил тяготения.

Но почему астрономическое сообщество столь живо отреагировало на открытие гравитационной линзы? Ведь в том, что они должны существовать, никто не сомневался, потому что искривление лучей света в поле тяжести, предсказанное А. Эйнштейном, было экспериментально подтверждено еще в 1919 г. А. Эддингтоном, а это явление и составляет физическую основу действия гравитационной линзы. Дело в том, что обнаружить проявления линзового эффекта не так-то просто. Открытие 1979 г. было подготовлено непрерывным совершенствованием техники наблюдений, благодаря чему границы видимой части Вселенной все время расширялись. Но чем дальше расположен наблюдаемый источник, тем вероятнее, что на пути к Земле его излучение подвергнется действию сил тяготения близких небесных тел. Более того, на самом деле астрономы «смотрят» в глубины Вселенной только сквозь пронизывающие все пространство гравитационные поля звезд, галактик, скоплений галактик и, возможно, еще не открытых космических объектов. По мере совершенствования астрономических инструментов и расширения диапазона длин волн, на которых ведутся наблюдения, учет гравитационной фокусировки (или дефокусировки) становится все более необходимым.

Но это еще не все. История развития науки и техники показывает, что вновь открытое явление по мере его изучения само постепенно превращается в «инструмент», с помощью которого делаются новые открытия. В данном случае можно сказать, что мы имеем дело с гигантскими «телескопами», созданными самой природой, и будет очень досадно, если мы не сумеем ими воспользоваться. Не меньший интерес представляет изучение и самих «линз», потому что значительная (а скорее всего, даже большая) часть материи во Вселенной находится в ненаблюдаемой форме, поскольку она не излучает электромагнитные волны. Однако гравитационные поля, создаваемые «скрытой массой», могут быть обнаружены и исследованы по тем изменениям, которые претерпевает излучение далеких источников, проходя сквозь «линзу». Обо всем этом рассказывается в данной брошюре.

СВЕТ И РАДИОВОЛНЫ ТОЖЕ ПОДЧИНЯЮТСЯ ЗАКОНУ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

За 300 лет, прошедших со времен И. Ньютона, закон всемирного тяготения стал настолько привычным, что утверждение «Все тела притягиваются друг к другу» иногда приводят как пример тривиальной истины. Не столь известно, что в число «тел», на которые действует сила тяжести, входят и «частицы света» — фотоны. Поэтому световой луч, проходя вблизи небесного тела, немного искривляется. Поток первоначально параллельных лучей, обтекающих центр притяжения со всех сторон, после преломления в гравитационном поле превращается в поток сходящихся лучей. На некотором расстоянии от притягивающего тела лучи пересекаются, подобно тому, как это происходит в обычной собирающей линзе. Так возникает эффект гравитационной линзы (ГЛ).

Фокусировку света и радиоволн в полях тяготения удалось наблюдать совсем недавно (в 1979 г.), но история ГЛ началась значительно раньше. О том, как возникла идея о возможности существования ГЛ и какие драматические события связаны с фундаментальным утверждением о преломлении световых лучей в поле тяжести, следует рассказать более подробно. Мы начнем с 1938 г., когда в шестом номере журнала «Природа» появилась статья известного советского астронома Г. А. Тихова под названием «Следствия возможного отклонения световых лучей в поле тяготения звезд». В ней полностью описана ГЛ, хотя сам термин автором не использовался. Касаясь истории вопроса, Г. А. Тихов писал: «Летом 1935 г. мне пришла мысль исследовать вопрос об отклонении лучей в поле тяготения звезд... К концу 1935 г. я уже сделал значительную часть работы и в январе 1936 г. прочитал об этом доклад в Ленинграде и Пулкове. Впоследствии оказалось, что начиная с того же 1935 г. этим вопросом занимались еще несколько ученых, в числе которых находился и сам Эйнштейн». Действительно, примерно в то же время в 1936 г. в американском журнале «Сайенс» появилась заметка А. Эйнштейна «Линзоподобное действие звезды при отклонении света в гравитационном поле». Нередко на эту статью ссылаются как на первую работу по гравитационной фокусировке, хотя на самом деле извест-

ны и более ранние публикации. Об одной из них, принадлежащей русскому физику О. Д. Хвольсону (1924 г.), упоминается в той же статье Г. А. Тихова. Но и эта работа не была самой первой. О некоторых оптических эффектах, которые должны наблюдаться при прохождении света в поле тяготения звезды, говорилось еще раньше в статьях английских астрономов О. Лоджа (1919 г.) и А. Эддингтона (1920 г.). Правда, Лодж возражал против самого термина «линза», а Эддингтон, хотя и указал на возможность появления двух изображений одной звезды, сделал неправильные выводы об уменьшении их яркости (на самом деле за счет фокусировки яркость изображений может и возрасть). Тем не менее имена этих ученых, конечно, должны быть включены в список первопредсказателей гравитационных линз.

Нельзя забывать и еще об одном человеке. Мы имеем в виду чешского инженера-электрика Р. Мандла. Он сам не писал статей о ГЛ, но свои мысли о них высказал Эйнштейну, который и произвел необходимые расчеты. Об этом прямо говорится в самом начале работы Эйнштейна: «Некоторое время тому назад меня посетил Р. Мандл и попросил опубликовать результаты небольшого расчета, который я провел по его просьбе. Уступая его желанию, я решил опубликовать эту заметку».

Среди упомянутых публикаций выделяются работы А. Эйнштейна и Г. А. Тихова, выполненные независимо друг от друга и практически одновременно. В них имеются необходимые расчеты (у Г. А. Тихова более подробные), тогда как во всех предыдущих статьях содержались лишь качественные описания некоторых проявлений линзового эффекта. В последующие годы в различных странах появилось большое число работ на эту тему. Особенно возрос поток публикаций после обнаружения первой ГЛ. Сегодня число статей, посвященных эффекту ГЛ, измеряется уже сотнями. Об основных идеях, которые в них содержатся, мы расскажем в дальнейшем, а пока что вернемся почти на 200 лет назад. Дело в том, что немецкий астроном И. Зольднер рассчитал угол преломления световых лучей в гравитационном поле Солнца еще в 1801 г. Его расчет основывался на теории Ньютона и результат выражался следующей простой формулой:

$$\Theta^{(n)}_g = r_g/\rho.$$

Здесь введены следующие обозначения (рис. 1): $\Theta^{(0)}_g$ — угол гравитационного преломления светового луча, рассчитанный по теории Ньютона (на это указывает верхний индекс «н»),

$$r_g = 2GM/c^2$$

так называемый гравитационный радиус притягивающего тела; он пропорционален массе тела M .

Кроме массы тела в выражение для r_g входят фундаментальные физические постоянные: $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²·кг⁻² (гравитационная постоянная) и $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света). Буквой ρ обозначен прицельный параметр луча — то наименьшее расстояние до центра притяжения, на котором прошел бы луч мимо притягивающего тела, если бы преломление отсутствовало, т. е. луч шел бы по прямой линии.

Если подставить в формулу для r_g массу Солнца $M_S = 2 \cdot 10^{30}$ кг, то получится следующее значение его гравитационного радиуса: $r_g = 2,96$ км. Что же касается величины ρ , то наименьшее расстояние от невозмущенного луча до центра Солнца равно радиусу светила $R_S = 7 \cdot 10^5$ км. Отсюда получается, что максимальный угол отклонения луча в поле тяжести Солнца должен быть равен $\Theta^{(0)}_{gS} = 4,22 \cdot 10^{-6}$ рад = $0''{,}87$.

Мы уже упоминали, что расчет И. Зольднера основывался на ньютоновской теории. Поэтому, естественно, возникает вопрос: не мог ли сам Ньютон получить приведенное выше значение $\Theta^{(0)}_{gS}$? Что касается основной формулы $\Theta^{(0)}_g = r_g/\rho$, то положительный ответ не вызывает сомнения. Действительно, уже в первом издании «Начал» (1687 г.) показано, что в центральном поле тяготения траектории всех тел представляют собой одно из конических сечений. В частности, частица, путь которой начинается с конечной скоростью из бесконечности, движется по гиперболе с фокусом в центре притяжения. При малых углах отклонения угол между асимптотами гиперболы (а это и есть угол преломления) равен как раз r_g/ρ . Далее необходимо выяснить, мог ли Ньютон применить законы движения материальных тел к световым частицам, допускал ли он их притяжение к массивным телам? Известно, что ньютоновская модель света очень сложна. Чего стоит, например, такое определение («Оптика», 1704 г.): «Под лучами света я разумею его мельчайшие части как при их по-

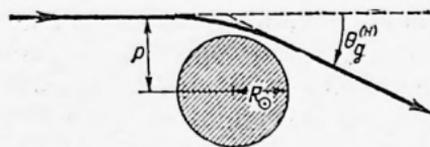


Рис. 1. Преломление светового луча в поле тяготения Солнца

следовательном чередовании вдоль тех же линий, так и одновременно существующие по различным линиям». Здесь можно усмотреть корпускулярный характер теории, суть которой заключается в том, что свет состоит из мельчайших частиц, вылетающих из источника по всем направлениям. Далее Ньютон подчеркивает, что корпускулы летят прямолинейно, но в то же время задает вопрос: «Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не избегают ли этим действием его лучей, и не будет ли (при прочих равных условиях) это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?» Как будто бы формулировка вопроса не оставляет сомнения в том, что Ньютон размышлял о преломлении света в поле тяготения. Но мы воздержимся от столь категоричного утверждения, так как приведенное выше высказывание относится к опытам по дифракции света вблизи резкого края непрозрачных экранов. Вполне возможно, что гравитационное воздействие здесь совсем и не подразумевалось. Однако, с другой стороны, заключительный раздел первой книги «Начал» посвящен движению весьма малых частиц под действием сил притяжения к большим телам. Там же говорится об аналогии между траекториями этих частиц и световыми лучами.

Все необходимые данные о величинах, входящих в формулу для определения $\Theta_{гс}^{(M)}$ (скорость света, масса Солнца и его радиус), могли оказаться в распоряжении Ньютона к моменту написания «Начал» или в крайнем случае к моменту опубликования «Оптики», но такое уточнение ничего, разумеется, не меняет, поскольку в литературном наследии Ньютона расчета $\Theta_{гс}^{(M)}$ для Солнца нет.

Немногим более чем через 10 лет после опубликования работы И. Зольднера французский физик О. Френель убедительно показал, что свет представляет собой волновой процесс. Возможно, поэтому работа Зольднера, в которой свет рассматривался как поток частиц, была надолго забыта, а преломление света в гравитационном поле вновь привлекло к себе внимание уже как

эффект, предсказанный общей теорией относительности (ОТО), создателем которой является Эйнштейн. Более того, оказалось, что искривление светового луча вблизи края диска Солнца играет чрезвычайно важную роль. Этот эффект входит в экспериментальную основу ОТО наряду с красным смещением (изменение частоты колебаний в поле тяготения) и смещением перигелия Меркурия. Среди упомянутых трех эффектов преломление световых лучей является наиболее наглядным, и только после того как он был обнаружен, теория относительности привлекла к себе всеобщее внимание.

События развивались следующим образом. Принцип относительности для систем отсчета, движущихся относительно друг друга с произвольной, но постоянной скоростью, был сформулирован Эйнштейном в 1905 г. Спустя два года этот принцип был обобщен на системы отсчета, движущиеся относительно друг друга с ускорением, что позволило установить влияние гравитационного поля на разнообразные физические явления, в том числе и на распространение света. Проведенные в 1911 г. расчеты угла отклонения в поле тяготения Солнца привели Эйнштейна к старым (ньютоновским) результатам: $\Theta_g = r_g/p$. Нет сомнения, что Эйнштейн не знал о работе И. Зольднера 1801 г., так как, получив ту же формулу для угла отклонения, он ничего не говорит о своем предшественнике. Но вопрос о приоритете в определении Θ_g мог иметь определенную остроту лишь в течение четырех лет, потому что в 1915 г. появилась новая работа Эйнштейна, в которой была окончательно сформулирована ОТО и установлено, что найденное ранее значение угла преломления является заниженным ровно в 2 раза. Причина расхождения заключается в том, что, согласно ОТО, поле тяготения массивного тела, вблизи которого проходит луч света, вызывает искривление пространства-времени, что и приводит к дополнительному отклонению луча по сравнению с ньютоновским значением. Итак, из теории Эйнштейна следовало, что

$$\Theta^{(e)}_g = 2r_g/p,$$

и для луча света, проходящего у края диска Солнца, получался результат $\Theta^{(e)}_g = 8,44 \cdot 10^{-6}$ рад = $1''{,}75$.

Таким образом к 1915 г. имелось два значения угла отклонения Θ_g : одно из них ($0''{,}87$), полученное ранее, соответствовало теории Ньютона, а второе ($1''{,}75$) вы-

текало из ОТО. Понятно, как важно было измерить эту величину, ведь от того, есть двойка или нет в формуле для Θ_g , зависел ответ на фундаментальный вопрос о реальности искривления пространства-времени в поле тяжести.

КАК УДАЛОСЬ ИЗМЕРИТЬ УГЛЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА И РАДИОВОЛН В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ СОЛНЦА

Прежде чем рассказать о результатах наблюдений, остановимся немного на методике измерений угла отклонения света в поле тяготения Солнца, чтобы стали понятны те трудности, которые встали на пути исследователей. Из формулы для $\Theta_g(p)$ видно, что заметное отклонение лучей света происходит лишь в непосредственной близости от диска Солнца, где $p \sim R_c$. Поэтому желательно было бы наблюдать источники (звезды) вблизи самой границы светящегося диска, а это возможно лишь при полном солнечном затмении. Но в этих условиях из-за яркой внутренней короны в лучшем случае удастся сфотографировать звезду на угловом расстоянии от края Солнца, примерно равном одному радиусу диска, что дает расчетное отклонение $\sim 0''{,}9$. На фотопластинке при фокусном расстоянии объектива телескопа $F=6$ м это соответствует расстоянию около 25 мкм. Данные положений звезд, взятые из каталога, недостаточно точны, чтобы можно было, сверяясь с ними, заметить такое малое смещение. Поэтому приходится фотографировать те же звезды, когда Солнце уходит далеко от них, а это лучше всего сделать с интервалом в $1/2$ года до или после затмения. Снимок сравнения обычно делают, помещая фотопластинку стеклянной стороной к объективу, чтобы потом можно было сложить сравниваемые пластинки слой к слою. Однако за несколько месяцев состояние инструмента может измениться (в частности, из-за изменения температуры окружающей среды), что приведет к различным масштабам снимков и еще больше затруднит сравнение изображений.

Первая попытка проверить предсказанное в 1911 г. Эйнштейном преломление луча вблизи края диска Солнца (тогда фигурировало еще старое значение $\Theta_{gc} = 0''{,}87$) была предпринята немецким астрономом

Э. Финлей-Фрейндлихом. Он изучил все имевшиеся в его распоряжении фотоснимки полных солнечных затмений и постарался обнаружить смещения звезд. Успеха он не добился. Очередное затмение должно было произойти в 1914 г., причем с хорошими условиями видимости на территории России. Однако началась первая мировая война, и наблюдения не состоялись. В 1915 г., когда Эйнштейн получил новый результат $1'',75$, значение будущих экспериментов еще более возросло. По существу, на их основании предстояло сделать выбор между классической теорией Ньютона и новой теорией Эйнштейна.

Затмение 29 мая 1919 г. должно было быть особенно благоприятным для измерений, поскольку Солнце в это время оказывалось вблизи звездного скопления Гиад, где имеется много ярких звезд. Английские астрономы А. Эддингтон и Ф. Дайсон организовали две экспедиции. Одна из них отправилась в Собриль на север Бразилии, а вторая — на остров Принсипи в Гвинейском заливе у берегов Африки. Наблюдениям на острове Принсипе немного помешала облачность, но изображения звезд на фотоснимке удалось все же получить. Большой успех выпал на долю экспедиции в Бразилии. Здесь были сделаны фотографии с помощью телескопа с фокусным расстоянием 5,8 м. Снимок сравнения был сделан спустя два месяца после затмения. Результаты сравнения снимков дали величину $1'',98 \pm 0,18$. Таким образом было доказано существование эффекта искривления световых лучей и его согласие с результатами ОТО.

В дальнейшем подобного рода наблюдения неоднократно повторялись, и к концу 60-х годов накопилось уже около 380 изображений звезд во время полных солнечных затмений. Отличия от расчетного значения $\Theta_{гс} = 1'',75$ составляют в среднем около 20%, что и является, по-видимому, предельной точностью затменных наземных оптических измерений.

Заметный скачок в повышении точности измерений угла произошел в связи с развитием радиоастрономии. Первые успешные измерения гравитационного отклонения радиоволн сантиметрового диапазона были выполнены в 1969 г. и с тех пор неоднократно повторялись. Для этой цели нередко используют квазар 3С 279*, ко-

* Обозначение 3С 279 расшифровывается так: источник № 279 в 3-Кембриджском каталоге.

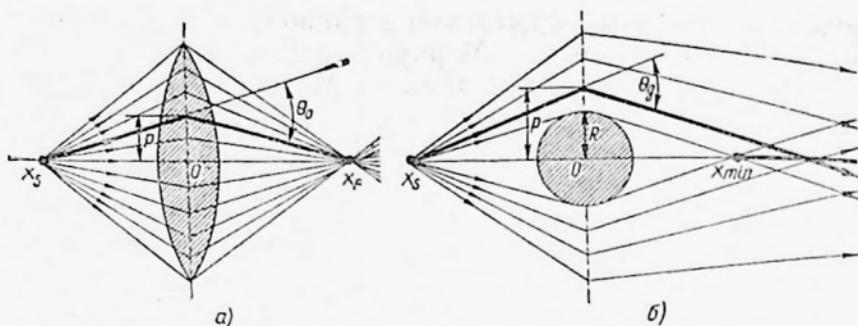


Рис. 2. Ход лучей в обычной (а) и гравитационной (б) линзах; жирная линия, начинающаяся в точке x_{\min} , фокальная полуось

торый 8 октября каждого года проходит вблизи солнечного диска. Этот источник удобен еще и тем, что в 10° от него расположен квазар 3С 273, используемый в качестве реперного. Измерение угла между указанными источниками во время приближения 3С 279 к Солнцу дает возможность измерить гравитационное искривление радиолуча. Преимущество радионаблюдений по сравнению с оптическими заключается не только в том, что их можно выполнять регулярно, не дожидаясь солнечного затмения, но и в значительно большей точности угловых измерений. Последнее обстоятельство связано с развитием сети радиоинтерферометров, базы которых в настоящее время достигли уже межконтинентальных расстояний, а точности измерения углов в сантиметровом диапазоне приближаются к $0'',0001$. К началу 80-х годов данные ОТО в радиодиапазоне были подтверждены с точностью примерно 0,5% от измеряемой величины $1'',75$.

Кроме преломления лучей света и радиоволн, существует еще один эффект, который имеет ту же физическую природу (искривление пространства-времени в гравитационном поле), но проявляется не в пространственных (угол преломления), а во временных (запаздывание сигнала) характеристиках волновых процессов. Из формул ОТО следует, что скорость распространения волны в поле тяжести несколько изменяется, а именно уменьшается по сравнению со скоростью света в вакууме. Это замедление можно измерить непосредственно с помощью радиолокатора, если радиолуч проходит вблизи Солнца. Такие эксперименты стали возможными начиная с 60-х

годов, когда была осуществлена радиолокация ближайших к Солнцу планет — Меркурия и Венеры.

Радиопульс идет от Земли к Меркурию и обратно примерно 1000 с, а расчетное время гравитационного запаздывания составляет около 200 мкс, т. е. требуется относительная точность измерений порядка 10^{-7} . Для современных радиотехнических устройств такая точность вполне достижима. Главная трудность заключается в том, что в эксперименте по радиолокации необходимо точно знать положение Меркурия (точнее, точки отражения радиосигнала от поверхности планеты) с погрешностью, не превышающей 60 км.

ЧТО ВИДНО СКВОЗЬ ГРАВИТАЦИОННУЮ ЛИНЗУ И КАК ОНА УСИЛИВАЕТ СВЕТИМОСТЬ ИСТОЧНИКА (ОПТИКА ЗВЕЗДЫ-ЛИНЗЫ С НЕПРОЗРАЧНЫМ ЯДРОМ)

Попробуем сравнить ГЛ с обычной собирающей линзой (ОЛ). Две линзы обладают тем общим свойством, что концентрируют проходящие сквозь них лучи. Однако между ними имеется существенное различие, связанное с зависимостью угла преломления от прицельного параметра луча. Напомним, что в ГЛ угол преломления обратно пропорционален прицельному параметру ($\Theta_g = 2r_g/p$), а в ОЛ зависимость совершенно иная: угол преломления тем больше, чем дальше от оси линзы проходит луч. Математическим выражением этого факта является следующий закон преломления лучей в ОЛ:

$$\Theta_o = p/F_o,$$

где F_o — фокусное расстояние линзы. К чему приводит переход параметра p из числителя в знаменатель в формулах для Θ_o и Θ_g , показано на рис. 2. Здесь изображен ход лучей в двух линзах. В точке x_s расположен точечный источник света, от которого отходят лучи по разным направлениям. Рассмотрим один из лучей, выделенный жирной линией. После преломления в линзах он пересекает ось в точке x . Но на этом общность свойств ОЛ и ГЛ, по существу, и заканчивается. Связь между x_s и x дается в ОЛ так называемым уравнением линзы: $1/x_s + 1/x = 1/F_o$. Аналогично можно записать и уравнение ГЛ, только заменив F_o на F_g : $1/x_s + 1/x = 1/F_g$. Величина F_o связана с Θ_o следующим соотношением: $F_o =$

$= p/\Theta_0$. Точно так же находится и $F_g = p/\Theta_g = p^2/2r_g$. Поэтому основное уравнение, определяющее оптику ГЛ, выглядит так:

$$1/x_s + 1/x = 2r_g/p^2.$$

Видно, что фокусное расстояние ГЛ зависит от p , поэтому лучи, проходящие на разных расстояниях от центра притяжения, пересекают ось x в разных точках, образуя фокальную полуось. В ОЛ дело обстоит совсем не так. Поскольку F_0 не зависит от p , все лучи пересекаются в одной точке (фокусе линзы), удаленной на расстояние $x_F = F_0 x_s / (x_s - F_0)$.

Далее учтем, что звезда-линза имеет непрозрачное ядро (мы пока рассматриваем только такие ГЛ), поэтому прицельный параметр луча не может быть меньше радиуса звезды R . Итак, $p_{\min} = R$ и соответственно $F_{g \min} = R^2/2r_g$. Максимальные же значения p и F_g ничем не ограничены, поэтому вместо определенного фокуса x_F ГЛ имеет фокальную полуось, начинающуюся в точке $x_{\min} = R^2 x_s / (2r_g x_s - R^2)$ и простирающуюся от линзы до бесконечности. В замене фокуса на фокальную полуось и заключается основное отличие между ОЛ и ГЛ.

Будем рассматривать для определенности очень далекие источники, считая, что $x_s \rightarrow \infty$. При этом на линзу падает поток параллельных лучей, а точка пересечения оси каждым лучом находится на расстоянии $x = p^2/2r_g$ от ГЛ. При $p = R$ легко определяется минимальное расстояние $x_{\min} = R^2/2r_g$, которое соответствует началу фокальной полуоси. Если взять для ориентировочных оценок данные, относящиеся к Солнцу ($R_C = 7 \cdot 10^5$ км, $r_g \simeq \simeq 3$ км), получим $x_{\min} \simeq 8,3 \cdot 10^{10}$ км. Вспомним, что расстояние от Земли до Солнца равно $1,5 \cdot 10^8$ км, т. е. в несколько сот раз меньше x_{\min} . Это означает, что наблюдать с Земли линзовый эффект поля тяготения Солнца нельзя. С другой стороны, ближайшая к нам звезда (Проксима в созвездии Центавра) удалена на расстояние 4,3 световых года (1 световой год = $9,4 \cdot 10^{12}$ км), что в сотни раз превышает x_{\min} . Поэтому в принципе любая из звезд может служить в качестве ГЛ, необходимо только, чтобы звезда-источник и звезда-линза располагались примерно на одном луче зрения.

Попробуем представить себе, как выглядит точечный источник, если наземный наблюдатель смотрит на

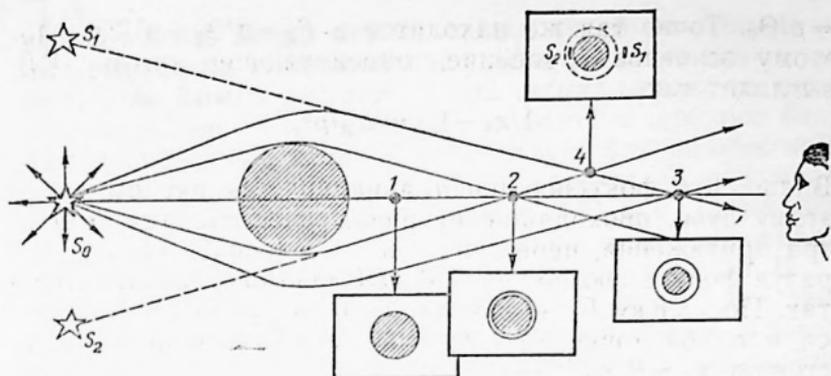


Рис. 3. Таким представится «точечный» источник, наблюдаемый сквозь гравитационную линзу

него сквозь ГЛ (рис. 3). Допустим сначала, что наблюдатель находится на оси x , т. е. источник и линза расположены на одном луче зрения. Если расстояние до ГЛ меньше x_{\min} (точка 1), источник не виден совсем — он закрыт непрозрачным диском ГЛ. Изображение появится только тогда, когда наблюдатель, удаляясь от ГЛ, достигает x_{\min} (точка 2). Но изображение появится сразу со всех сторон от ядра ГЛ, т. е. будет иметь вид светящегося кольца, вплотную примыкающего к ядру. При увеличении расстояния x (точка 3) кольцо отрывается от ядра, между ними появляется зазор, который постепенно возрастает по мере удаления наблюдателя от ГЛ. Кольцеобразное изображение источника иногда называют кольцом Эйнштейна. Его радиус $l = \sqrt{2r_g \bar{x}}$, где $\bar{x} = xx_s / (x + x_s)$. Угловые размеры ядра звезды-линзы и кольца Эйнштейна очень малы, еще меньше угловой зазор между ними, поэтому увидеть их в отдельности не представляется возможным даже в лучшие из наземных телескопов. Тем не менее кольцо Эйнштейна все же обнаружено, но в ГЛ другого типа. Как это произошло, будет рассказано несколько позже.

Теперь представим себе, что достаточно удаленный наблюдатель ($x > x_{\min}$) сместится на некоторое расстояние ρ от оси x (точка 4). Картина становится совсем иной. Симметрия лучей нарушается, светящееся кольцо разрывается на две дуги, которые по мере удаления наблюдателя от оси стягиваются в маленькие кружки. До тех пор пока наблюдатель не выйдет из области фо-

кусировки, он будет видеть вместо одной звезды S два источника света S_1 и S_2 , расположенных по разные стороны от звезды-линзы. Это и есть тот самый «космический мираж», о котором мы упоминали во Введении. При выходе наблюдателя из области фокусировки изображение S_2 исчезает (оно экранируется диском звезды-линзы), а S_1 будет примерно совпадать с истинным положением источника.

В области пересечения лучей должен наблюдаться еще один эффект, связанный с гравитационной фокусировкой, — возрастание блеска звезды-источника. При небольших смещениях наблюдателя от оси x коэффициент усиления блеска равен $q = \sqrt{2r_g/\bar{x}} \cdot x/\rho$. В случае, когда источник очень удален от ГЛ ($x_s \gg x$), из приведенной формулы получается выражение, впервые полученное в работах Эйнштейна и Тихова:

$$q = \sqrt{2r_g x} / \rho.$$

Видно, что с увеличением расстояния x усиление линзы не убывает, а, наоборот, растет пропорционально \sqrt{x} . Кроме того, на самой оси ($\rho=0$) коэффициент усиления неограниченно возрастает, что физически неосуществимо. Этот результат — следствие упрощенного рассмотрения, основанного на геометрической оптике (представление о луче как о бесконечно тонкой линии). На самом деле в природе всегда существуют факторы, вызывающие размыв лучей в пределах небольшого угла $\Delta\theta$. Поэтому лучи пересекаются на оси линзы не в одной точке, а на некоторой площадке, что приводит к вполне определенному (не бесконечному!) коэффициенту усиления.

Действительно, с учетом размыва лучей фокальное пятно на оси имеет размеры $x \cdot \Delta\theta$. Теснее, чем на этой площадке, лучи сойтись не могут. Следовательно, оценку максимально возможного усиления можно получить, заменив ρ в формуле для q на $\rho_{\min} \approx x \cdot \Delta\theta$, после чего получим $q_{\max} \approx \sqrt{2r_g/\bar{x}} / \Delta\theta$. Величина угла размыва лучей $\Delta\theta$ определяется различными факторами. Если, например, учесть, что наблюдаемая звезда S имеет конечные угловые размеры $\Delta\theta_s$, то надо положить $\Delta\theta = \Delta\theta_s$. Размыв лучей возникает и в процессе распространения электромагнитной волны из-за рассеяния на неоднородностях межзвездной среды. Угол рассеяния

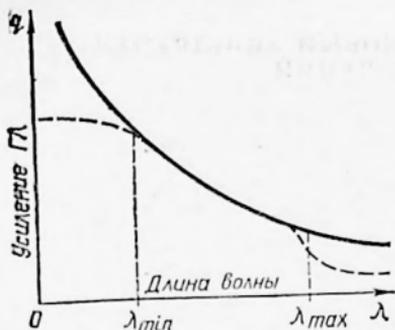


Рис. 4. Зависимость максимального возможного коэффициента усиления ГЛ (для звезды-линзы типа Солнца) от длины волны. Сплошная линия — идеальная ГЛ, пунктирная — реальная ГЛ

$\Delta \Theta_p$ зависит от свойств неоднородностей, расстояния до источника и длины волны λ наблюдаемого излучения. Обычно $\Delta \Theta_p$ возрастает с ростом λ , поэтому в диапазоне достаточно длинных радиоволн эффект гравитационной фокусировки будет ослаблен. Подобным же образом действуют и гравитационные поля окружающих линзу звезд. Они тоже приводят к рассеянию лучей на некоторый угол $\Delta \Theta_g$. Однако этот угол не зависит от длины волны λ . Ко всему этому необходимо еще прибавить дифракционный размыв лучей. Он связан с волновой природой света и характеризуется углом дифракции $\Delta \Theta_d \approx \lambda/l$. Дифракция волн существует всегда, даже если остальные механизмы рассеяния и не проявляют себя. В таких идеальных условиях коэффициент усиления принимает максимально возможное значение. Расчеты показывают, что $q_{\max} \approx r_g/\lambda$ и не зависит от расстояний x и x_s . При определении величины q_{\max} необходимо учитывать все перечисленные выше факторы, но, как правило, главную роль играет наибольшая из составляющих угла размыва лучей.

Очень важно, что углы $\Delta \Theta_p$, $\Delta \Theta_d$ и $\Delta \Theta_g$ по-разному зависят от длины волны λ . Это накладывает некоторые ограничения на тот диапазон, в котором можно наблюдать эффект ГЛ в чистом виде. Типовая зависимость максимального усиления ГЛ от длины волны представлена на рис. 4. За счет дифракции волн с ростом λ величина q_{\max} убывает ($\sim \lambda^{-1}$). Усиление прекращается ($q \approx 1$) при $\lambda = r_g$. Это абсолютная длинноволновая граница гравитационной фокусировки. С учетом рассеяния излучения на плазменных неоднородностях межзвездной среды длинноволновая граница λ_{\max} может сместиться в сторону более коротких волн и значительно сузить рабочий диапазон. Ограничение со стороны коротких

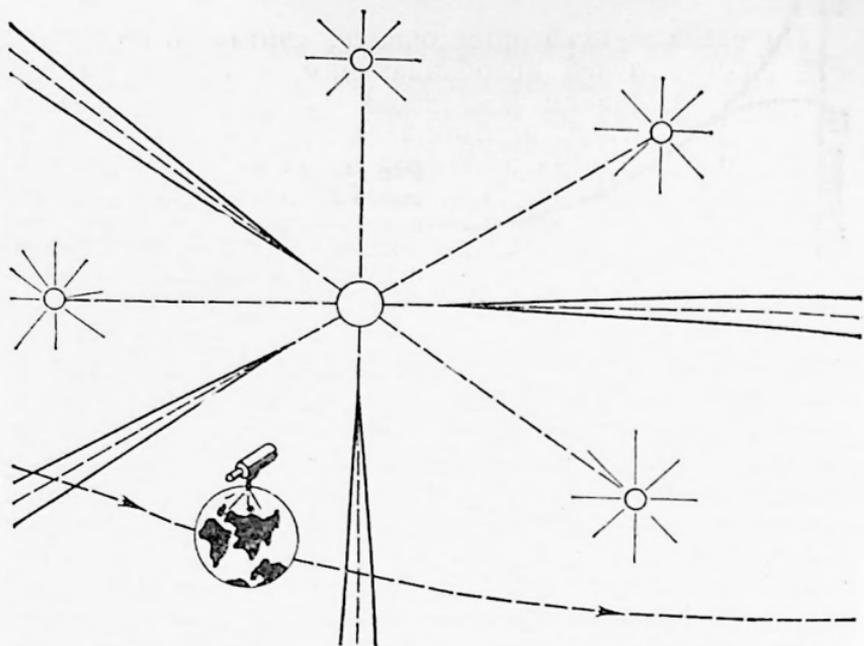


Рис. 5. Когда Земля, двигаясь вместе с Солнцем, пересекает область фокусировки какой-нибудь ГЛ, наблюдатель зафиксирует возрастные блеска источника

волн имеет иной характер. Начиная с некоторого значения $\lambda = \lambda_{\min}$, угол дифракции становится меньше углового размера источника $\Delta \Theta_s$ или угла гравитационного рассеяния, и дальнейший рост q_{\max} с уменьшением длины волны прекращается, так как $\Delta \Theta$ перестает зависеть от λ . При этом коэффициент усиления может оставаться достаточно большим, т. е. абсолютных ограничений со стороны коротких волн не существует (разумеется, в пределах применимости ОТО).

Величины λ_{\max} и λ_{\min} зависят от конкретных условий наблюдения. Заметим, что никакая другая линза не обладает таким свойством. Дело в том, что с уменьшением длины волны показатели преломления всех веществ стремятся к единице и обычные линзы перестают работать на очень коротких волнах — например, в области рентгеновских лучей. Отсутствие коротковолновой границы — характерное свойство ГЛ, которая, таким образом, способна фокусировать не только свет, но также рентгеновские и γ -лучи и даже поток нейтрино.

Произведем некоторые оценки, считая дифракционный размыв лучей преобладающим, что соответствует идеальным условиям фокусировки. Любую звезду окружает большое число источников излучения, и каждый из них создает с противоположной от линзы стороны свою область фокусировки. Поэтому ГЛ можно представить в виде «ежа», у которого во все стороны торчат «иглы» — фокальные полуоси (рис. 5). Если Земля при своем движении пересечет одну из таких «игл», наблюдателю покажется, что излучение, идущее со стороны звезды-линзы, внезапно усилилось. Возрастание светимости источника определяется коэффициентом усиления ГЛ и может достигать очень больших значений. Так, для звезд, подобных Солнцу ($r_g \sim 10$ км), в оптическом диапазоне ($\lambda \sim 5 \cdot 10^{-5}$ см) $q_{\max} \sim 10^{10}$.

Возможность усиления светимости в десятки миллиардов раз, естественно, не могла не привлечь внимание астрономов. Неоднократно делались попытки связать значительное возрастание яркости некоторых источников с фокусирующим действием ГЛ. Подобным образом пытались объяснить, в частности, огромные потоки излучения от далеких квазаров, о чем будет подробнее рассказано в последующем разделе. Пока же обратим внимание на трудности наблюдения самого эффекта ГЛ. Как уже отмечалось выше, разделить изображения источника и звезды-линзы не удастся даже с помощью лучших из наземных телескопов. В таких условиях особое значение приобретает увеличение блеска источника. Однако вероятность пересечения «иглы» наземным наблюдателем очень мала. Действительно, размеры области максимального усиления равны $x \cdot \Delta \Theta_d$. Полагая $x \sim 10^{14}$ км (расстояние до ближайших звезд) и $\Delta \Theta_d \sim 10^{-15}$ рад (угол дифракции вблизи края звезды, подобной Солнцу), получим $x \cdot \Delta \Theta_d \sim 100$ м. Это и есть характерный масштаб, который определяет толщину «иглы». Если наблюдатель сместится от фокальной полуоси, например, на 100 км, то коэффициент усиления уменьшится в тысячу раз по сравнению с максимальным. Правда, он все равно остается очень большим, но надо помнить, что линзовый эффект удастся обнаружить лишь в том случае, если сфокусированное излучение от далекой звезды-источника значительно превзойдет излучение более близкой звезды-линзы. Для каких-либо оценок допустимого спада усиления и соответствующего смещения от

оси необходимо знать конкретные условия наблюдения, но уже приведенные выше цифры показывают, что речь идет о совсем небольших по космическим масштабам расстояниях. Следовательно, и вероятность попасть на фокальную полуось очень мала.

Кроме того, нельзя забывать, что мы рассматривали идеальную ситуацию, когда размыв лучей происходит исключительно из-за дифракции, а поле тяготения звезды-линзы предполагается сферически-симметричным. Строго говоря, гравитационное поле можно считать сферически-симметричным только на больших расстояниях от центра тяготения, вблизи же него начинают сказываться всевозможные отклонения от шарообразной формы звезды, неоднородное распределение массы внутри нее, а также вращение звезды вокруг своей оси. В этом случае симметрия лучей нарушается (даже для наблюдателя, расположенного на оси источник — линза), вся картина сильно усложняется, максимальный коэффициент усиления падает и вероятность обнаружения эффекта ГЛ еще более понижается.

Однако еще в 1937 г. Ф. Цвикки обратил внимание на то, что роль линзы могут играть не только отдельные звезды, но и целые галактики. В этом случае все масштабы резко возрастают, и вместо очень острых «игл» возникают довольно протяженные области фокусировки, в которых Земля может находиться длительное время. Важно, что угловые расстояния между изображениями источника и линзой настолько увеличиваются, что оказываются в пределах разрешающей способности современных оптических и радиотелескопов.

Возникает вопрос: отличается ли структура изображений, наблюдаемых через галактическую линзу, от изображений, формируемых звездой-линзой? Если звезду можно рассматривать как компактное образование с небольшими отклонениями от сферической симметрии, то галактика представляет собой протяженный объект сложной формы с заранее неизвестным распределением массы. Кроме того, галактики-линзы могут быть достаточно прозрачными для электромагнитных волн, т. е. лучи света и радиоволны могут проходить и через внутренние области галактики. Заметим, что понятие «прозрачности» или «непрозрачности» является на самом деле условным. Для гравитационных волн и потоков

нейтринно Солнце и звезды следует рассматривать как прозрачные тела, хотя необходимо учитывать и некоторое затухание внутри ядра ГЛ.

ПРОЗРАЧНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ (ЛИНЗЫ-ГАЛАКТИКИ)

Закон преломления лучей, проходящих сквозь тело ГЛ, зависит от распределения массы внутри линзы. Если вспомнить, что в галактике, подобной нашей, сосредоточены сотни миллиардов звезд, станет понятным, что точный закон распределения вещества невозможно даже сформулировать, а тем более рассчитать угол преломления лучей. Казалось бы, положение безвыходное, но есть одно обстоятельство, которое помогает преодолеть эту трудность. Несмотря на огромное число звезд, расстояния между ними очень велики по сравнению с их размерами. Поэтому гравитационные поля отдельных звезд заметно преломляют лучи лишь в малых своих окрестностях. В остальном же объеме галактики и в особенности вне ее действует некоторое усредненное гравитационное поле, создаваемое массой большого числа звезд и газообразного вещества в межзвездной среде. Однако и отдельная звезда, несмотря на ничтожную долю ее массы в общей массе галактики, может сыграть важную роль в свойствах всей галактики-линзы. Это произойдет тогда, когда луч, идущий к наблюдателю от далекого источника, пройдет в непосредственной близости от данной звезды. В описании прозрачных линз-галактик используют два термина: говорят о макролинзе, когда имеют в виду влияние усредненного гравитационного поля, и о микролинзах, когда рассматривают отдельные звезды.

Начнем с описания макролинз, считая, что масса вещества в объеме галактики распределена непрерывно (массы отдельных звезд как бы «размазаны» по межзвездным объемам). Астрономические наблюдения показывают, что существуют различные типы галактик и соответственно рассматриваются разные модели распределения массы. Основные особенности прозрачных ГЛ лучше всего рассмотреть на примере сферически-симметричных распределений масс. Они используются для описания слабонесферичных эллиптических галактик,

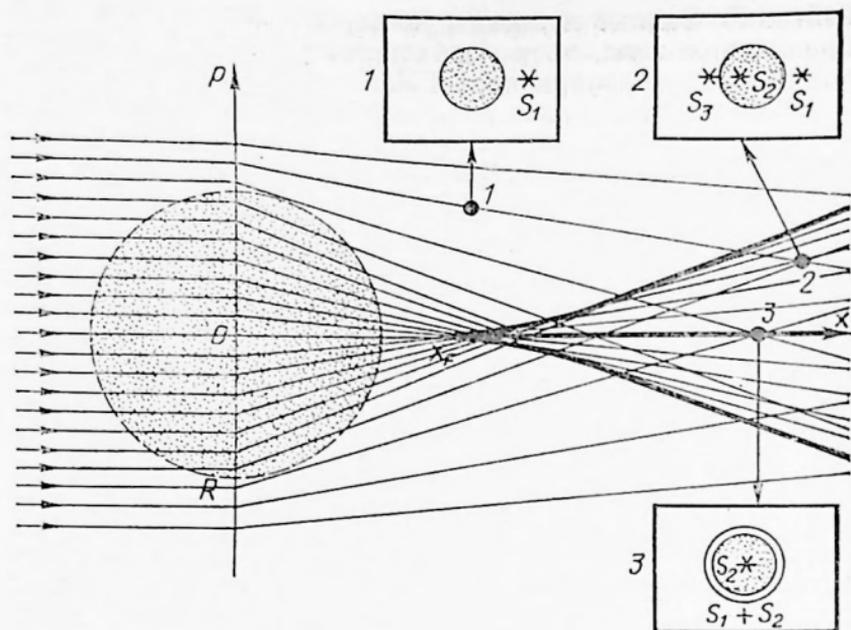


Рис. 6. Ход лучей в прозрачной ГЛ и вид источника, наблюдаемого сквозь линзу

шаровых звездных и галактических скоплений, короны и гало спиральных галактик.

В литературе по ГЛ используются следующие модели: а) однородная сфера, имеющая постоянную плотность массы в пределах всего объема, ограниченного радиусом галактики R_G ; б) изотермическая сфера, в которой плотность массы от ядра к периферии убывает обратно пропорционально квадрату расстояния; в) модель Кинга, в которой учитываются разные зависимости убывания плотности в ядре галактики и ее внешней области, называемой гало. Законы преломления лучей в этих моделях, конечно, отличаются в деталях, но для нас это не очень существенно. На рис. 6 показан ход лучей в прозрачной линзе и вид точечного источника, наблюдаемого сквозь ГЛ. Для сферически-симметричного распределения массы гравитационное поле вне галактики совпадает с полем сосредоточенной массы (звезды). Поэтому закон преломления внешних лучей (у них прицельный параметр p больше радиуса галактики R_G) не отли-

чается от уже знакомого нам закона обратной пропорциональности $\Theta_g = 2r_g/p$, но гравитационный радиус r_g соответствует теперь массе всей галактики M_g ($r_g = 2GM_g/c^2$). Эти внешние лучи, пересекаясь на оси x , образуют фокальную полуось, начиная с некоторого расстояния от ГЛ. Совсем иначе преломляются внутренние лучи, у которых $p \leq R_g$. Для них линза-галактика напоминает ОЛ: центральный луч совсем не преломляется, а лучи, проходящие на расстоянии p от центра, преломляются тем сильнее, чем больше это расстояние. В идеальной собирающей линзе действует закон прямой пропорциональности $\Theta_0 = p/F_0$, и поэтому возникает фокус — точка, где концентрируются все проходящие сквозь линзу лучи. В прозрачных ГЛ Θ_g также растет с ростом p , но не обязательно пропорционально p . Прямая пропорциональность наблюдается лишь для лучей, проходящих в непосредственной близости от центра линзы. Поэтому в фокусе прозрачной ГЛ собираются только эти лучи, а остальные по-прежнему пересекаются на фокальной полуоси, которая начинается прямо из точки фокуса. Кроме того, внутренние лучи могут пересекаться, а точнее, соприкасаться на некоторой конической поверхности, называемой каустикой. Вершина каустического конуса также совпадает с точкой фокуса. На рис. 6 показаны фокус (точка x_F), жирными линиями — фокальная полуось (область оси x справа от x_F) и каустика, имеющая вид криволинейного конуса.

Если рассматривать лучи как бесконечно тонкие линии (приближение геометрической оптики), то в местах их наибольшей концентрации (фокус, фокальная полуось, каустика) интенсивность прошедшего сквозь ГЛ излучения становится бесконечно большой. На самом деле, конечно, бесконечной интенсивности не возникает, так как всегда существуют факторы, приводящие к размытию лучей и распределению излучения по некоторой площади. Все сказанное по этому поводу в предыдущем разделе, где рассматривалась непрозрачная ГЛ, полностью сохраняет свое значение и в данном случае.

Теперь попробуем представить себе, что увидит наблюдатель, смотрящий сквозь прозрачную ГЛ на «точечный» источник. Соответствующая картина представлена на том же рис. 6. Структура видимых изображений станет понятной, если подсчитать число лучей, проходящих через точку наблюдения: сколько проходит лу-

чей, столько и видно изображений. Вне каустического конуса (точка 1) имеется одно изображение источника S_1 и, разумеется, видна еще сама галактика-линза. Внутри конуса (точка 2) наблюдаются три изображения S_1 , S_2 , S_3 , одно из которых обязательно проектируется внутрь контура галактики. На самой каустике S_2 и S_3 сливаются (остаются два изображения). Слияние изображений наблюдается и при попадании наблюдателя на фокальную полуось. В этом случае изображения S_1 и S_2 образуют сплошное кольцо. Внутри него, точно по центру, расположено S_2 . Если наблюдатель, оставаясь на оси x , будет приближаться к линзе, радиус кольца станет уменьшаться. В точке x_F кольцо смыкается с центральным изображением, которое сохраняется вплоть до самой линзы.

Обрисованная картина существенно связана со сферической симметрией (шарообразной формой) галактики-линзы. Конечно, это очень жесткое требование, и большинство ГЛ такой симметрией не обладают. Тем не менее на больших расстояниях от сосредоточения масс гравитационное поле все равно оказывается близким к сферически-симметричному. Поэтому достаточно далекие внешние лучи по-прежнему образуют фокальную полуось, начинающуюся где-то вдали от ГЛ. Что же касается лучей, проходящих на близком расстоянии от галактики и тем более сквозь нее, то здесь нарушения симметрии будут сказываться очень сильно. В статьях по ГЛ нередко встречается модель распределения массы в виде сплющенного сфероида (эллипсоида вращения). Такая чечевицеобразная форма достаточно хорошо передает характер распределения вещества во многих галактиках и в то же время позволяет рассчитать структуру изображений, наблюдаемых сквозь линзу.

Так же, как и ранее, будем рассматривать очень далекий «точечный» источник, наблюдатель же пусть находится на оси линзы. Возникающая при этом картина зависит от ориентации сплющенной линзы относительно луча, идущего от источника к наблюдателю. Рассмотрим две ситуации: а) плоскость «чечевицы» перпендикулярна лучу зрения и б) совпадает с лучом зрения (рис. 7). В случае (а) симметрия лучей для осевого наблюдателя полностью сохраняется и так же, как и в сферически-симметричной ГЛ, видно светящееся кольцо и точечное изображение в центре. Заметим, что картина

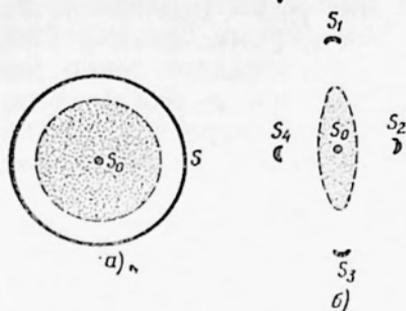


Рис. 7. Структура изображений, наблюдаемых сквозь чечевицеобразную ГЛ. Плоскость «чечевицы» перпендикулярна лучу зрения (a) и совпадает с ним (b)

не зависит от того, насколько сплюснен сферонд. Даже в предельном случае, когда сферонд превращается в плоский диск (такие модели также рассматриваются), структура изображений остается неизменной.

Совсем иначе обстоит дело в случае (b). Глядя на очертания галактики (они изображены на рис. 7, a и 7, b пунктиром), становится ясным, что осевая симметрия полностью нарушается и соответственно светящееся кольцо уже не возникает. Оно разрывается на четыре «точечных» изображения (если учесть угловые размеры источника, то вместо четырех точек появятся небольшие дугообразные отрезки). Центральное изображение по-прежнему сохраняется. При смещении наблюдателя от оси линзы изображения источника перемещаются по сложным траекториям вне и внутри контура «чечевицы». При этом некоторые пары изображений могут сближаться, сливаться в одно и исчезать. Области наибольшей концентрации лучей, имеющие для сферически-симметричной ГЛ вид фокальной полуоси и конической круговой каустики, для случая (b) трансформируются в более сложные каустические поверхности. Так, фокальная полуось «расщепляется» в узкую приосевую каустическую, имеющую в сечении вид криволинейного ромба. Коническая же каустика превращается из круговой в эллиптическую.

Учитывая все, что было сказано о структуре изображений в сферондальных ГЛ, можно сделать следующее заключение. Наблюдатель, перемещающийся поперек оси источник — линза, увидит не более четырех изображений «точечного» источника, если ГЛ имеет непрозрачное ядро, и не более пяти изображений, если ГЛ прозрачна для того вида излучения, которое регистрируется. В последнем случае при различных положениях на-

блюдателя число изображений может быть равно 5, 3, 1, т. е. является нечетным числом (кроме чрезвычайно редких случаев, когда наблюдатель попадает точно на каустику и два изображения сливаются в одно). Как мы увидим ниже, число изображений играет важную роль при астрономических наблюдениях, связанных с поиском и исследованием ГЛ.

Отказ от требования сферической симметрии сближает используемые в теоретическом анализе идеализированные модели с реальными ГЛ. Сделаем еще один шаг в этом направлении. Мы обращаем внимание читателя на то обстоятельство, что массивные космические объекты всегда вращаются. Звезды вращаются вокруг своей оси, и в то же время каждая звезда участвует во вращении всей галактики. Возникает вопрос: не сказывается ли вращение ГЛ на ее оптических свойствах? Согласно теории Ньютона вращение центрального притягивающего тела никак не влияет на движущееся вокруг него или пролетающее мимо малое тело. Если бы эта теория была всегда справедлива, то вращающаяся и неподвижная ГЛ не отличались бы друг от друга. Совсем иначе обстоит дело в ОТО, согласно которой вращающееся тело вовлекает во вращение все окружающее его пространство. Подчеркиваем: речь идет именно о пространстве. Если тело находится в вакууме, то эффект увлечения все равно действует в полной мере. При этом вращение пространства оказывается весьма своеобразным, совсем не похожим на вращение твердого тела. Чем дальше от вращающейся массы расположена область пространства, тем меньше угловая скорость ее увлечения*. Коль скоро пространство вокруг вращающейся ГЛ вовлечено во вращение, траектории световых лучей испытывают дополнительное преломление. Симметрия лучей при этом нарушается, даже если ГЛ имела бы идеальную шарообразную форму (имеется один-единственный случай, когда дополнительное преломление не нарушает осевую симметрию лучей — когда ось вращения шарообразной ГЛ точно совпадает с осью источника — линза). В результате наблюдатель будет фиксировать структурные изменения изображений, ана-

* Увлечение пространства во вращение носит название эффекта Лензе—Тирринга по имени немецких физиков, предсказавших его в начале 20-х годов нашего века.

логичные тем, какие имели место для сфероидальной ГЛ. В частности, наблюдатель, расположенный на оси источник — линза, увидит четыре внешних и одно внутреннее изображения (если ГЛ имеет непрозрачное ядро, внутреннее изображение, разумеется, отсутствует). Но это еще не все. Вся совокупность лучей смещается в сторону вращения. В результате узкая приосевая и коническая эллиптическая каустики сдвигаются от оси источник — линза по направлению вращения ГЛ.

Эффект увлечения в обнаруженных ГЛ еще никогда не наблюдался. Да это и не удивительно, учитывая, что для таких объектов, как звезды, он очень слаб. Расчеты показывают, что смещение приосевой каустики для ГЛ, подобной нашему Солнцу, составляет всего лишь несколько сантиметров. Значительно больше это смещение у вращающейся линзы-галактики, но все равно обнаружить его чрезвычайно трудно.

Эффект Лензе—Тирринга должен проявить себя в полной мере у ГЛ, образуемой вращающейся черной дырой. Однако пока что черные дыры надежно не обнаружены, не говоря уже о создаваемых ими эффектах фокусировки. В то же время имеется большое число теоретических работ, в которых рассматривалось распространение света вблизи черных дыр, включая и эффекты ГЛ. Здесь мы не будем на них останавливаться. Заметим только, что лучи, проходящие достаточно далеко от черной дыры, фокусируются точно так же, как и в гравитационном поле обычных объектов. Но лучи, которые проходят на близких расстояниях (порядка гравитационного радиуса) от центра притяжения, преломляются весьма причудливым образом. Например, возможны лучевые траектории, несколько раз огибающие черную дыру, а затем уходящие в любом направлении, включая и обратные направления на источник (отражение), либо имеющие вид спирали, навивающейся на некоторую предельную окружность вблизи черной дыры, и наконец, существуют захватываемые лучи: они подходят к черной дыре так близко, что «падают» в нее и обратно уже не возвращаются.

Мы убедились, что линзы, не обладающие сферической симметрией, создают достаточно сложные множественные изображения далекого источника. Легко представить себе, насколько усложнится вся картина, если учесть тонкую структуру гравитационного поля внутри

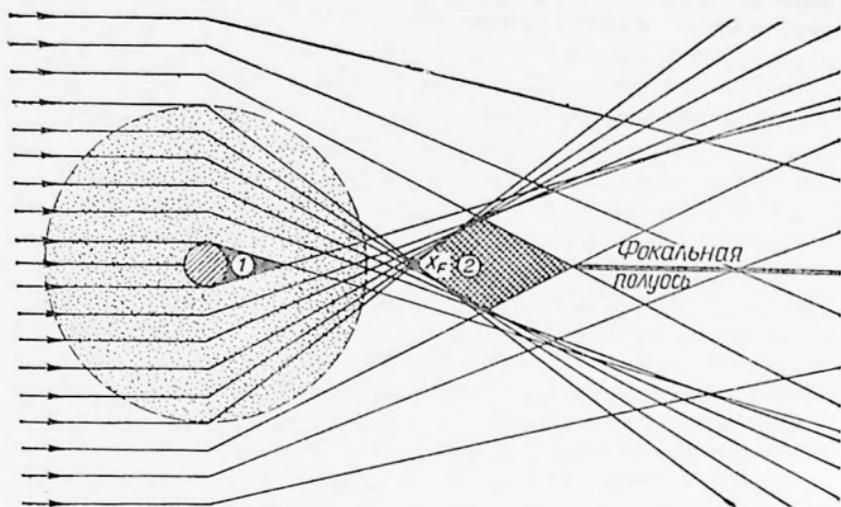


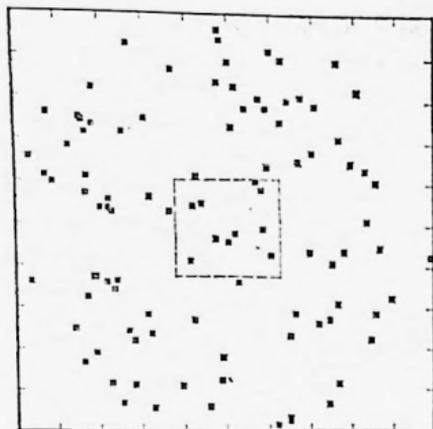
Рис. 8. Ход лучей в прозрачной линзе-галактике с микролинзой (отдельная звезда в центре сферы): 1 — тень от непрозрачного ядра микролинзы; 2 — каустическая тень, возникающая за счет дополнительного преломления лучей

галактики. Имеются в виду поля тяготения вблизи отдельных звезд, образующих микролинзы, к рассмотрению которых мы переходим. Начнем с самого простого случая, когда внутри сферической «макролинзы» имеется только одна «микролинза», причем она проектируется прямо в самый центр диска «макролинзы». Мы уже знаем, какими свойствами в отдельности обладают линзы-звезды и линзы-галактики. Не представит труда исследовать и их комбинированное действие в случае указанного выше симметричного расположения.

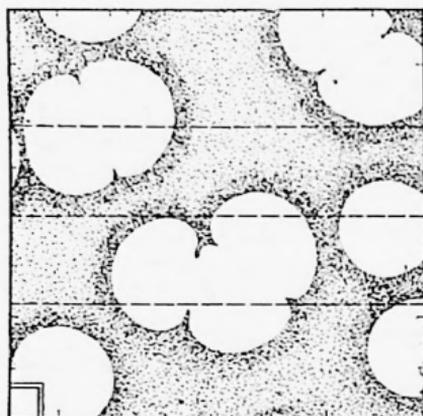
Напомним, что центральная часть прозрачной линзы-галактики действует подобно обычной собирательной линзе: чем больше прицельный параметр луча, тем сильнее он преломляется. Включение звезды-линзы в центр прозрачной микролинзы вызовет дополнительное преломление лучей в том же направлении, но с другой зависимостью от прицельного параметра: чем дальше от оси проходит луч, тем слабее действует на него микролинза. И наконец, совсем далекие лучи, проходящие на периферии галактики и вне ее, практически не испытывают дополнительного преломления от отдельной звезды. Они

образуют многократно упоминавшуюся фокальную полуюсь. Что же касается лучей из центральной области, то их конфигурация становится весьма непохожей на рассмотренные ранее. Геометрия лучей в комбинированной линзе показана на рис. 8. Предлагаем сравнить его с рис. 6, где показаны лучи в той же линзе-галактике, но без дополнительной микролинзы. Самая примечательная особенность рис. 8 — появление «пустой» области в окрестности оси ГЛ за точкой фокуса x_f . В пустую область не попадает ни один луч — источник там не виден совсем. Кроме этой затененной области, боковые границы которой напоминают каустический конус на рис. 6, имеется еще одна тень от непрозрачного ядра микролинзы. Однако ее размеры в масштабах галактики ничтожно малы, и до наземного наблюдателя она никогда не доходит. Каустическая же тень может сыграть важную роль.

Если теперь обратиться к реальной ГЛ, то следует помнить, что внутри галактики находится не одна, а огромное множество звезд, и все они могут сыграть роль микролинз. Нет никакой возможности точно учесть влияние на лучевые траектории всех звезд даже с помощью современных ЭВМ. Но в этом, к счастью, и нет необходимости, поскольку главную роль играют только ближайšie к лучу зрения звезды. Но даже совокупность двух звезд приводит к весьма сложным вычислениям, и единственная реальная возможность учесть действие множества микролинз — это математическое моделирование с помощью ЭВМ. Результат одного такого численного эксперимента представлен на рис. 9. На нем (рис. 9,а) показано 100 случайно расположенных звезд, входящих в состав гипотетической галактики. С помощью ЭВМ были рассчитаны траектории лучей с учетом влияния полей тяготения каждой звезды и галактики в целом. На рис. 9,б отмечены те точки, куда попадают лучи в плоскости наблюдения, ортогональной оси макролинзы. Если бы линзового эффекта поля тяготения не было вовсе, то расстояния между лучами на любом участке плоскости наблюдения были бы одинаковыми и теми же, что привело бы к равномерной освещенности по всей плоскости. Такая невозмущенная картина представлена на маленьком квадрате слева внизу. Суммарное же действие полей тяготения звезд и галактики приводит к перераспределению лучей: в некоторых местах



а)



б)

Рис. 9. Результаты численного моделирования траекторий лучей в ГЛ, состоящей из линзы-галактики (б), и 100 микролинз (а)

они сгущаются (здесь освещенность возрастает), а в некоторых совсем отсутствуют (это области тени, где источник совсем не виден). Рис. 9,б соответствует не всему участку неба на рис. 9,а, а только его центральной части, которая выделена пунктиром. Присмотримся к этим рисункам внимательнее. Легко заметить, что «пустые» места имеют вид круговых областей, каждой из которых можно сопоставить одну звезду. Таким образом, то влияние микролинз, о котором мы рассказывали выше на очень упрощенном примере, проявляется и здесь.

Если иметь в виду реальные ГЛ и наблюдателя, находящегося на Земле, то картина, представленная на рис. 9,б, окажется не вполне отвечающей действительности. То, что она достаточно схематично описывает лишь одно из возможных распределений звезд, не требует пояснения. Но есть еще одно важное отличие. Нарисованная картина статична, а на самом деле она непрерывно меняется. Источник излучения, линза и Земля находятся в непрерывном движении относительно друг друга. Поэтому наблюдатель, движущийся вместе с Землей и Солнцем, попадает то в области сильной фокусировки, возникающие на границах «пустых» мест, то в области тени, где сигнал ослабевает. Таким образом, хотя сами микролинзы не видны из-за колоссального рас-

стояния даже до самой близкой к нам галактики, но их влияние сказывается в сравнительно быстрых изменениях светимости источника, наблюдаемого сквозь ГЛ. Расчеты показывают, что заметные изменения светимости «точечного» источника вследствие описанного эффекта могут происходить за месяцы и даже за несколько дней. Это обстоятельство надо учитывать при наблюдениях быстропеременных источников. Если они видны через линзу-галактику, то надо постараться установить, происходят ли изменения светимости в самом источнике или они возникают за счет влияния микролинз.

КАК БЫЛА ОТКРЫТА ПЕРВАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ ЛИНЗА

Все началось с совместных исследований двух английских (Д. Уолш, Р. Карсвелл) и одного американского (Р. Вейман) астрономов. Они вели поиск звездopodobных объектов, расположенных на небосводе в тех местах, где ранее были обнаружены «точечные» радиоисточники. Такие наблюдения проводятся регулярно и имеют вполне определенную цель. Подобным образом находят квазары — объекты, расположенные на очень больших расстояниях. Участвуя в расширении Вселенной, квазары удаляются от нас с огромными скоростями, благодаря чему линии излучения в их спектре сильно смещены в красную сторону. Этот сдвиг называется красным смещением и обозначается буквой z , по нему определяют скорость движения источника и его расстояние до Земли: чем больше z , тем быстрее удаляется и дальше от нас находится наблюдаемый источник. Квазары имеют самые большие красные смещения из всех известных пока объектов. Рекордное на сегодняшний день (1988 г.) значение z равно 4,43; ему соответствует скорость удаления источника, равная примерно 93% от скорости света.

Уолш, Карсвелл и Вейман исследовали радиоисточник 0957+561 *A, B* (цифры обозначают экваториальные координаты, а буквы указывают на наличие двух компонентов — *A* и *B*). В том же месте на небосводе расположены две слабые звезды 17-й величины. 29 марта 1979 г. удалось получить оптические спектры этих звезд, и предположение о том, что на самом деле это не звезды, а квазары, подтвердилось. Измерения показали, что оба компонента (в дальнейшем их стали называть близ-

нецами) имеют одинаковые красные смещения, равные 1,4, которым соответствует скорость удаления свыше 200 000 км/с.

Как будто ничего особенного не произошло: искали квазар, а нашли сразу два. Но оказалось, что компоненты обнаруженной пары, как и положено настоящим близнецам, имеют удивительно схожие свойства. Прежде всего они расположены совсем рядом — угловое расстояние между ними составляет 6". Другой столь близкой пары ранее известно не было, хотя к моменту ее обнаружения в каталогах имелось уже около 2000 квазаров. Самое же необычное заключалось в спектрах компонентов *A* и *B*: они были похожи друг на друга даже в мелких деталях (это относится к спектрам как излучения, так и поглощения). Такое совпадение спектров, естественно, наводило на мысль о том, что компоненты *A* и *B* не являются независимыми источниками, а как-то связаны друг с другом. Мнения астрономов разделились. Одни считали «близнецов» парой близких друг к другу и гравитационно связанных квазаров, другие выдвинули смелое предположение, что в данном случае наблюдается эффект гравитационной линзы.

Какие же аргументы «за» и «против» были у сторонников разных гипотез? Примерное равенство красных смещений в линиях излучения и поглощения света свидетельствовало о том, что облака, в которых происходит поглощение света, расположены где-то вблизи источника и их скорости удаления от Земли также близки к 200 000 км/с. Отличие же в скоростях поглощающих облаков для компонентов *A* и *B* оказалось очень малым — всего лишь несколько десятков километров за секунду. Поэтому можно было предположить, что световые лучи, идущие от «близнецов», проходят через одно и то же облако. Но для этого требуется, чтобы облако было очень большим — больше расстояния между двумя источниками. Не вдаваясь в подробности, заметим, что такое объяснение наталкивается на значительные трудности из-за огромных размеров облака. Поэтому астрономы склонялись к мнению, что два источника — это кажущийся эффект, на самом же деле существует только один, а раздвоение его изображения произошло под действием гравитационной линзы. Если это предположение соответствует истине, то идентичность спектров *A* и *B* не требует дополнительного объяснения.

Однако гипотеза гравитационной линзы также нуждается в проверке. Прежде всего следовало убедиться, что «близнецы» остаются «близнецами» не только в оптике, но и в других диапазонах электромагнитного излучения. Кроме того, необходимо было обнаружить саму линзу. С помощью телескопов, использовавшихся первоначально, такую проверку выполнить было нельзя, но как раз к этому моменту вступили в строй новые, более совершенные инструменты, работающие в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах. Вначале были уточнены оптические спектры; с этой целью на новом многозеркальном телескопе Смитсоновской лаборатории (США) установили спектрограф. Этот телескоп имеет не одно, а 6 зеркал диаметром 1,8 м каждое и по своей разрешающей способности занимает третье место в мире. Уточненные спектры показали, что разность скоростей, соответствующая линиям поглощения двух компонентов, составляет всего 15 км/с. Почти полное совпадение скоростей подкрепило гипотезу гравитационной линзы, но дальнейшие оптические измерения пришлось временно отложить, так как летом условия наблюдения «близнецов» ухудшаются (в связи с сокращением углового расстояния между Солнцем и Большой Медведицей, в созвездии которой находится двойной квазар).

Радиоастрономы, однако, могли продолжить работу, и им удалось получить очень интересные данные с помощью радиотелескопа VLA (Very Large Array — очень большая антенна), который также представляет собой многозеркальный инструмент. В нем используются 27 параболических диаметром 25 м, расположенных в виде латинской буквы Y. Наибольший размер Y равен 21 км, что обеспечивает разрешающую способность, конкурирующую с лучшими оптическими телескопами. Была получена радиокарта источника 0957+561 A, B, снятая на волне $\lambda=6$ см (рис. 10). Оказалось, что в радиодиапазоне компоненты A и B имеют не столь схожие структуры, как в оптике, поскольку в окрестности A обнаружены какие-то дополнительные детали. Возможно, они никак не связаны с квазарами и лишь случайно видны в той же части неба, но такое предположение несколько искусственное. Трудности же объяснения наблюдаемой радиоструктуры на основе эффекта ГЛ заключались прежде всего в полном отсутствии данных о фокусирующем объекте. Вот почему остро встал вопрос

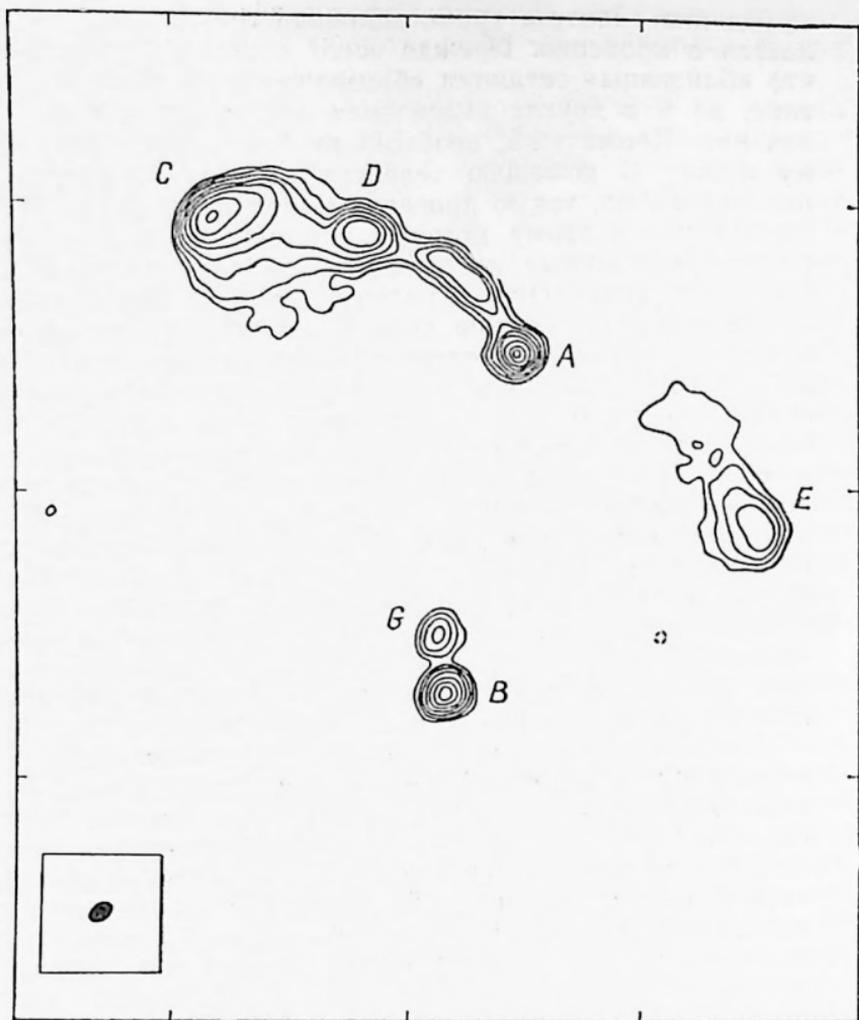


Рис. 10. Радиокарта неба в области двойного квазара QSO 0957+561 A, B. Наряду с «близнецами» (детали A и B) видны дополнительные источники (детали C, D, E) и галактика-линза G

об обнаружении самой линзы.

Ее открыли осенью 1979 г., как только условия оптических наблюдений снова стали благоприятными. Оказалось, что раздвоение изображений производит эллиптическая галактика, которая видна как объект 19-й звездной величины, т. е. в несколько раз слабее, чем

«близнецы». Эту галактику сфотографировали почти одновременно в двух обсерваториях: одна находится в США, а вторая, недавно вступившая в строй, расположена на Гавайских островах, на вершине вулкана Мауна-Кеа (высота 4200 м), где высокая прозрачность и однородность атмосферы позволяют вести наблюдения не только в оптике, но и в инфракрасных лучах.

Красное смещение галактики-линзы оказалось сравнительно невелико ($z=0,39$). Следовательно, ГЛ расположена намного ближе к Земле, чем квазар. Изображение линзы почти сливается с компонентом B и на радиокarte образует небольшой выступ, который обозначен буквой G . Положение линзы резко асимметрично по отношению к двум изображениям, что создало некоторые трудности при объяснении данных наблюдений на основе гипотезы о гравитационной фокусировке. Для компактной линзы потоки излучения, идущие от компонентов A и B , должны были бы сильно отличаться друг от друга, но, согласно измерениям, они оказались почти одинаковыми. Для объяснения примерного равенства потоков пришлось привлекать к рассмотрению сложные модели распределения масс внутри линзы. Кроме того дальнейшие наблюдения американских астрономов показали, что галактика G является членом большого скопления, состоящего из 146 галактик. Центр яркости этого скопления смещен на $23''$ к западу от компонента B . В расчетах учитывались поля тяготения всех этих галактик.

Убедительным аргументом в пользу гипотезы ГЛ явилось обнаружение временной задержки в изменениях яркости компонента B по сравнению с A , возникающей из-за различия времен прохождения излучения по двум путям. Измерения этой задержки потребовали регулярных наблюдений в течение нескольких лет. Оказалось, что она составляет примерно 1,6 года.

Интересно обсудить еще вопрос о внутреннем изображении квазара, просвечивающего сквозь галактику-линзу. Так как оно должно было находиться где-то вблизи компонента B , для его обнаружения необходим инструмент с разрешающей способностью в десятые или даже сотые доли угловой секунды. Осенью 1979 г. радиоструктура «близнецов» исследовалась с помощью межконтинентального радиоинтерферометра. Измерения проводились на волне $\lambda=6$ см синхронно на двух радио-

телескопах: один из них диаметром 43 м находится в обсерватории Грин-Бэнк (США), а второй со 100-метровым зеркалом — в Эффельсберге (ФРГ). Огромная длина базы (от Америки до Европы) обеспечивает очень высокую разрешающую способность. Тем не менее «внутреннее» изображение не было обнаружено, хотя угловые размеры компонентов A и B определялись с точностью $0'',001$. Таким образом, вопрос остается пока открытым. В дальнейшем предполагается продолжить исследования с помощью телескопа, выведенного на орбиту вокруг Земли, где вредное влияние атмосферы будет исключено и можно получить детальное оптическое изображение с очень высоким разрешением.

КАК ИЩУТ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Сообщение об обнаружении первой гравитационной линзы послужило толчком к интенсивным исследованиям эффекта ГЛ. Наряду с теоретическими работами (число их уже измеряется сотнями) начались целенаправленные поиски подходящих астрономических объектов. При этом наметилось два направления. Во-первых, начали отбирать возможные кандидаты среди уже известных квазаров, причем особое внимание уделялось наиболее отдаленным из них, что и понятно: чем дальше расположен источник, тем вероятнее появление гравитирующего объекта на одном с ним луче зрения. Вторая группа исследователей приступила к поиску таких ранее не известных квазаров, излучение которых может оказаться гравитационно сфокусированным более близкими галактиками.

Основная трудность этих поисков заключается в том, что благоприятные ситуации (источник и линза на одном луче зрения) возникают чрезвычайно редко. Кроме того, квазары довольно трудно отбирать среди множества звезд нашей Галактики, на которые они очень похожи на фотографиях. Отличить их можно только после получения спектров. Весьма плодотворными оказываются поиски квазаров в радиодиапазоне. Дело в том, что обычные звезды, как правило, слабо излучают радиоволны, поэтому большая часть компактных радионисточников представляет собой внегалактические объекты, в число которых входят и квазары. Кроме того, разрешающая

способность современных радиотелескопов и радиоинтерферометров уже превосходит ту, которая достигается в оптике. К сожалению, только небольшое число квазаров излучает радиоволны, следовательно, наблюдения радиисточников позволяют обнаружить лишь малую долю гравитационных линз из их общего числа.

Первые радионаблюдения, направленные с самого начала исключительно на поиск ГЛ, были проведены учеными из Массачусетского технологического института (США) на 100-метровом телескопе в обсерватории Грин-Бэнк. Обследовав большие участки неба в поисках источников на длине волны $\lambda=6$ см, определив их положение и яркость, радиоастрономы составили каталог из нескольких тысяч объектов. Далее, из них были отобраны те, для которых имелись радиокарты, полученные на радиотелескопе VLA. Анализ радиокарт позволяет выявить квазары, возможно, наблюдаемые сквозь ГЛ. Поскольку линзы порождают, как правило, множественные изображения, подходящими кандидатами считаются сдвоенные и более многократные квазары с сравнительно небольшими угловыми расстояниями между компонентами. Условной границей углового расщепления, при котором кратные источники становятся «подозрительными», является угол не более $10''$. Большее разделение считается маловероятным, потому что требует слишком большой массы ГЛ. Особо привлекают к себе внимание источники, образующие дуги или кольца, так как такие изображения могут возникать в результате действия ГЛ.

В дальнейшем поиск перемещается в оптический диапазон. Напомним, что в отличие от любых других линз гравитационные линзы совершенно одинаково фокусируют и радиоволны, и световые лучи. Поэтому тем радиокартам, на которых видны кратные изображения, должны соответствовать в оптике (если это действительно эффект гравитационной фокусировки) аналогичные структуры. Наиболее чувствительным способом регистрации изображений в настоящее время являются не фотопластинки, а так называемые ПЗС-детекторы (приборы с зарядовой связью). Работая с такими регистраторами на 4-метровом телескопе, можно в течение 30-минутной экспозиции зафиксировать объекты в 16 млн. раз менее яркие, чем самая слабая звезда, наблюдаемая невооруженным глазом. Если множественные изо-

бражения квазаров на радиокартах и в оптике повторяют друг друга, считается, что «кандидат» выдержал эту проверку и можно переходить к главному испытанию. У каждого компонента определяют оптические спектры с высоким разрешением. Их структура (распределение интенсивности излучения по разным длинам волн) зависит от множества физических факторов — расстояния до источника, его движения, химического состава, температуры и т. д. Если окажется, что красные смещения и формы спектров разных компонентов совпадают, то вероятнее всего наблюдается один источник, а многокомпонентность — это результат действия ГЛ. К сожалению, выполнить спектральный тест не так-то просто, потому что очень трудно получить хороший спектр слабых объектов, разделенных всего лишь несколькими угловыми секундами. Но даже если идентичность спектров можно считать установленной, это еще не все. Необходимо смоделировать всю наблюдаемую картину, т. е. найти близлежащие объекты (галактики или скопления галактик), играющие роль линзы, и рассчитать положение и яркость создаваемых ими изображений. Совпадение расчетной и видимой картин — еще одно свидетельство в пользу гипотезы ГЛ. На такой анализ для одного хорошего кандидата может потребоваться во много раз больше времени, чем на осуществление полного обзора, из которого был взят этот кандидат. Мы не говорим уже об измерении времени запаздывания в изменениях яркости разных компонентов. Оно обычно требует многих лет, хотя, строго говоря, и эти наблюдения также должны рассматриваться как необходимая проверка реальности гравитационного расщепления изображений.

СКОЛЬКО ГРАВИТАЦИОННЫХ ЛИНЗ УДАЛОСЬ ОТКРЫТЬ ЗА 10 ЛЕТ (1979—1989 гг.)?

Может показаться странным, но трудно дать определенный ответ на этот простой вопрос. К настоящему времени (1989 г.) в литературе можно найти упоминание о 17 гравитационных линзах (точнее, о 17 кандидатах на роль ГЛ). Из них надежно установленными можно считать только пять. Три относятся к очень слабым объектам, и вероятность того, что здесь действительно на-

блюдается гравитационная фокусировка, не достигает 50%. Оставшиеся девять объектов также вызывают пока большие сомнения.

Мы не будем перечислять здесь все 17 предполагаемых ГЛ, а остановимся лишь на нескольких из них, чтобы дать представление о разнообразных проявлениях линзового эффекта. О первой гравитационной линзе (квазар 0957+561) мы уже рассказали достаточно подробно, поэтому перейдем сразу к другим источникам.

Квазар и спиральная галактика на одном луче зрения. Квазар QSO 2237+0305* был обнаружен в 1984 г. в созвездии Пегаса в процессе регулярного обзора на телескопе Уинилской обсерватории (США). Первоначально он был зарегистрирован как спиральная галактика, имеющая ядро, вокруг которого видна кольцевая структура (рис. 11). Сама по себе такая картина не представляет собой ничего необычного, но как только был проведен спектральный анализ отдельных элементов изображения, все предстало в ином свете. Оказалось, что красное смещение кольца очень мало ($z=0,04$) по сравнению с красным смещением ядра ($z=1,7$). Следовательно, ядро и кольцо находятся на разных расстояниях, хотя и на одном луче зрения, т. е. здесь наблюдается ситуация, типичная для линзового эффекта: далекий квазар спроецировался на более близкую галактику. Совпадение центров изображений оказалось столь точным, что уже сам по себе этот факт заставил астрономов сомневаться в том, что здесь действительно наблюдается ГЛ, а не какой-то необычный квазар, окруженный туманностью (в последнем случае, конечно, пришлось бы как-то объяснить разные красные смещения ядра и оболочки). Дальнейшие исследования представили дополнительные свидетельства в пользу гравитационной фокусировки. В 1987 г. на 3,6-метровом телескопе обсерватории Мауна-Кеа с использованием ПЗС-детекторов удалось разрешить центральное ядро, имеющее угловые размеры $1'',7$, на пять компонентов. Один из них — это собственно ядро галактики, а четыре других, расположенных крестообразно, — изображения квазара. Аналогичные данные были получены и на других инструментах (на 5-метровом телескопе Паломарской

* QSO — Quasy Stellar Object — квазизвездный объект. Так обозначают в каталогах квазары,

обсерватории и 4-метровом обсерватории Китт-Пик (США). Были сняты также спектрограммы отдельных компонентов, и оказалось, что все четыре изображения квазара имеют одинаковые красные смещения при одинаковых формах спектров. Остается только удивляться еще точному совпадению центров изображений квазара и галактики (вероятность такого совпадения оценивается примерно как 1 : 10 000).

В середине 1988 г. появилось сообщение еще об одном крестообразном квазаре H 1413+117. У него четыре компонента лежат в пределах $1''$ и в более ранних наблюдениях регистрировались как один объект суммарной яркости (рис. 12). Изображение удалось разрешить на 2,2-метровом телескопе обсерватории Ля Силла (Чили) с помощью ПЗС-детекторов. Кажущаяся звездная величина квазара $m=17$, а красное смещение $z=2,55$. Галактика-линза пока не обнаружена.

Галактики фокусируют друг друга. Почти во всех гравитационных линзах, открытых до настоящего времени, фокусируемыми источниками являются квазары. Однако в 1986 г. было высказано предположение, что гравитационная фокусировка должна наблюдаться и на радиогалактиках. Заметим, что выделение особого класса радиогалактик в известной мере является условным, так как практически все галактики излучают в радиодиапазоне, хотя и с сильно отличающимися интенсивностями.

При линзовом эффекте для галактик возможно не будет обнаруживаться столь четкое расщепление изображений, как это бывает у «точечных» квазаров, но за счет фокусировки возникает избыток светимости (по оценкам до 5 звездных величин).

Было отобрано 13 «подозрительных» объектов, среди которых 4 радиогалактики 3С 13, 3С 324, 3С 266 и 3С 238 являются наиболее интересными, так как для всех них удастся указать также и возможные линзы (близлежащие галактики или скопления галактик). Согласно расчетам первые два источника должны не только приобрести «сверхсветимость», но и образовать множественные изображения. Дальнейшие наблюдения подтвердили этот эффект для радиогалактики 3С 324. Ее характерная особенность, которая и послужила поводом для заключения о гравитационной фокусировке, — наличие двух серий спектральных линий в оптике. Одна

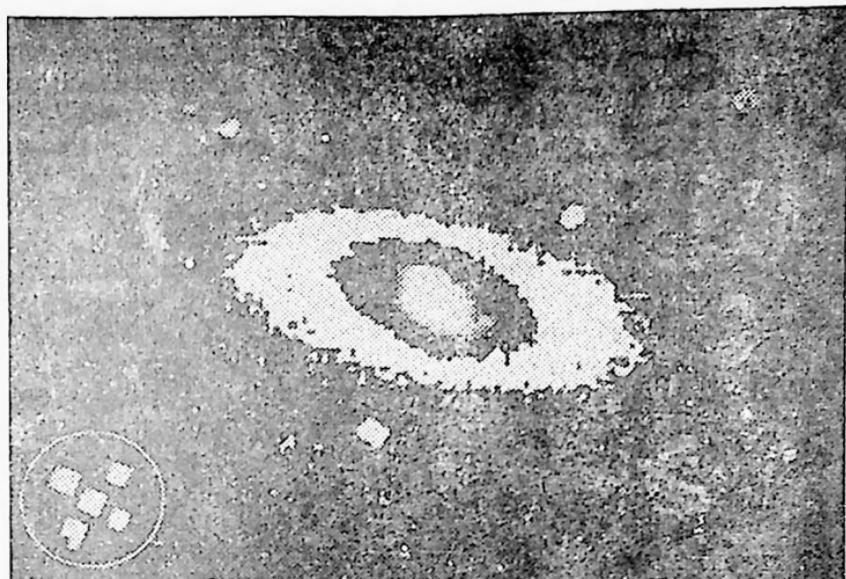


Рис. 11. Квазар QSO 2237+0305, спроектировавшийся в центр более близкой спиральной галактики. Центральная часть (ядро галактики + 4 изображения квазара) показана с более высоким разрешением слева внизу

из них соответствует $z=1,206$, а вторая — $z=0,845$. Четкого пространственного разделения изображений источника, как это наблюдалось во всех предыдущих случаях с квазарами, здесь не происходит. Тем не менее фотографии, полученные на 3,6-метровом телескопе обсерватории Мауна-Кеа в условиях очень хорошей видимости, свидетельствуют о сложной структуре, состоящей из нескольких компонентов. Три, а возможно и четыре, компонента, частично перекрывающих друг друга, расположены в пределах нескольких угловых секунд.

Картина поразительно меняется на photographиях, сделанных с помощью интерференционных фильтров в узких спектральных окнах (рис. 13). На длине волны $\lambda=5139 \text{ \AA}$ (линия ионизированного углерода с учетом красного смещения $z=1,206$) компонент a виден слабее, чем b и c . Если же перейти к длине волны $\lambda=6840 \text{ \AA}$ (линия ионизированного кислорода с учетом красного смещения $z=0,845$), то будет виден только компонент a , компоненты b и c исчезают. Такая особенность ЗС 324

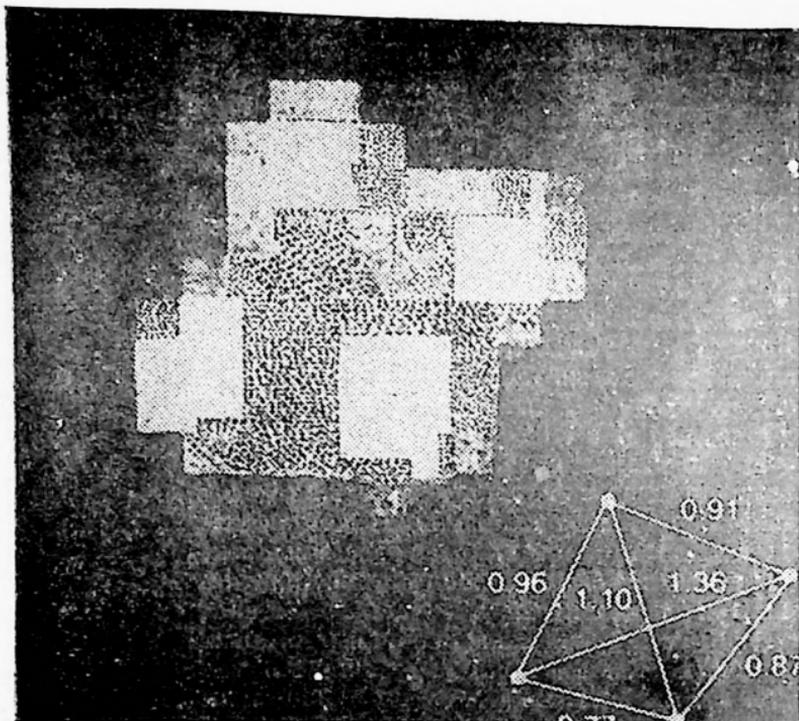


Рис. 12. Квазар H 1413+117 («лист клевера»). Внизу справа показано расположение центров четырех изображений (размеры даны в угловых секундах)

свидетельствует о том, что в узком лучевом конусе совмещаются два источника, находящихся на разных удалениях, и следовательно, наблюдается линзовый эффект. Более близкий источник (компонент *a*) представляет собой галактику, которая играет роль ГЛ. Дальний источник (тоже галактика) предстает благодаря линзовому эффекту в виде расщепленных, частично перекрывающихся изображений *b*, *c* и более слабого *d*. Фотографии на рис. 13 наглядно иллюстрируют возможность дистанционной селекции источников за счет разных красных смещений путем наблюдений в узких спектральных интервалах.

Гигантские дуги в скоплениях галактик. Эффект гравитационной фокусировки может привести к возникновению дугообразных структур, очень напоминающих дета-

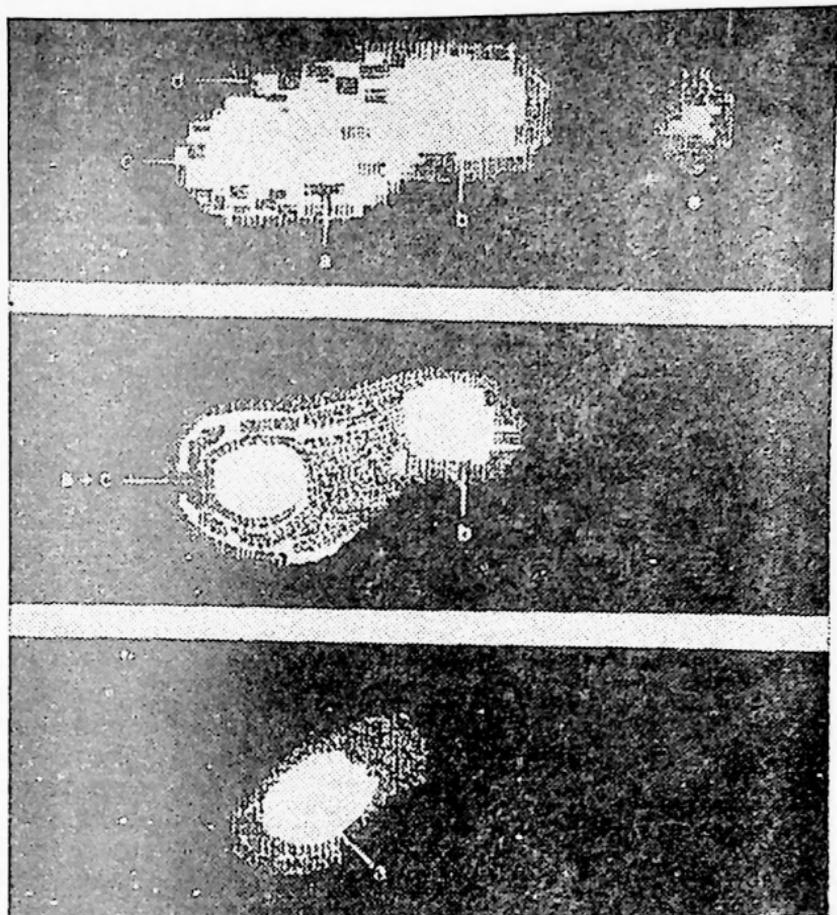


Рис. 13. ПЗС-изображение 3С 324. Сверху — снимок в красном свете, посередине — снимок в линии ионизированного углерода с $z=1,206$ ($\lambda=5139 \text{ \AA}$), (снизу — снимок в линии ионизированного кислорода с $z=0,845$ ($\lambda=5840 \text{ \AA}$)): *a* — галактика-линза; *b*, *c*, *d* — множественные изображения фокусируемой галактики; *e* — возможно, галактика, соседняя с 3С 324

ли тех кольцевых изображений, которые рассматривались ранее. Впервые подобные образования были обнаружены еще в 1976 г. в скоплении галактик А-2218. В дальнейшем к ним добавились дуги в скоплениях А-370, А-963 и CL 2244-02. Однако до последнего времени природа этих образований оставалась неясной. Новые интересные данные появились только в сентябре 1985 г.

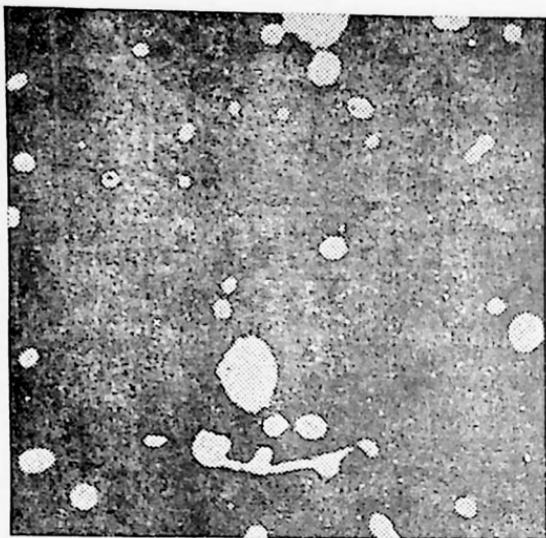


Рис. 14. Гигантская дуга в скоплении А-370

На уже не раз упоминавшемся 3,6-метровом телескопе на Гавайских островах в условиях очень хорошей видимости с использованием ПЗС-детекторов удалось получить детальное изображение гигантской светящейся дуги в скоплении А-370. Если предположить, что эта дуга также входит в состав скопления, то придется допустить, что ее линейные размеры превышают 100 Кпк (напомним, что диаметр всей нашей Галактики равен примерно 30 Кпк) при сравнительно небольшой (менее 10 Кпк) ширине дуги (рис. 14). Был предложен ряд объяснений природы этого необычного объекта. Наиболее правдоподобной представляется гипотеза гравитационной линзы. Она подкрепляется как спектральными данными, так и результатами численного моделирования. Дуга (если ее считать дугой окружности), охватывающая примерно 60° , имеет неоднородную структуру с небольшим разрывом и расширением на восточном конце. Спектры восточной детали и остальной части дуги совпадают. Их красное смещение $z=0,59$, в то время как основные элементы А-370 имеют $z=0,374$. Следовательно, дуга не принадлежит скоплению, а находится за ним, т. е. сквозь гравитационные поля скопления и межгалактическую среду виден какой-то более удаленный источник.

Численная реконструкция изображения в модели ГЛ, соответствующей основным членам скопления А-370, совпадает с наблюдаемой картиной и является сильным аргументом в пользу гравитационного линзирования. При построении изображения предполагалось, что фокусируемый источник представляет собой спиральную галактику (это предположение подтверждается особенностями спектра). Что же касается самой ГЛ, то в расчете была принята довольно сложная модель распределения масс, создающих фокусирующее гравитационное поле. Основная масса $(2 \div 3) \cdot 10^{14} M_{\odot}$ распределена равномерно в центральной области А-370 в пределах круга радиусом $25''$. Кроме того, учитывалось еще 9 элементов скопления.

Космические петли, или кольца Эйнштейна. Радиоисточник MG 1131+0456 из созвездия Льва был занесен в каталог еще в 1950 г., но его необычная кольцеобразная форма установлена только в 1987 г. при поиске ГЛ на радиотелескопе VLA. Открывшаяся после получения радиоизображения картина еще больше напоминает светящееся кольцо, характерное для ГЛ, чем описанная выше дуга в А-370. Если это действительно результат гравитационной фокусировки (иного объяснения пока не предлагается), то центры источника и линзы совместились здесь с очень высокой точностью. Наблюдаемый объект — типичный радиоисточник, порожденный выбросом из ядра галактики. Две яркие точки, видимые на радиокarte (рис. 15), являются, вероятно, двойным изображением ядра галактики. Сама же кольцеобразная структура представляет собой сильно искаженное изображение выброса, вытекающего позади галактического центра. Радиокarta MG 1131+0456 была получена на волне $\lambda = 6$ см, оптические же наблюдения пока что не привели к каким-либо положительным результатам. В том месте, где находится радиоисточник, в оптике обнаруживается светящееся пятно, блеск которого соответствует 22-й звездной величине.

О еще одном источнике MG 1654+1346, имеющем кольцевое изображение, было сделано сообщение на январской (1989 г.) сессии Американского астрономического общества. Представленная на рис. 16 радиоккартина данного источника интерпретируется следующим образом. Имеется квазар с двумя выбросами, которые являются источниками радиоизлучения. Почти точно на од-

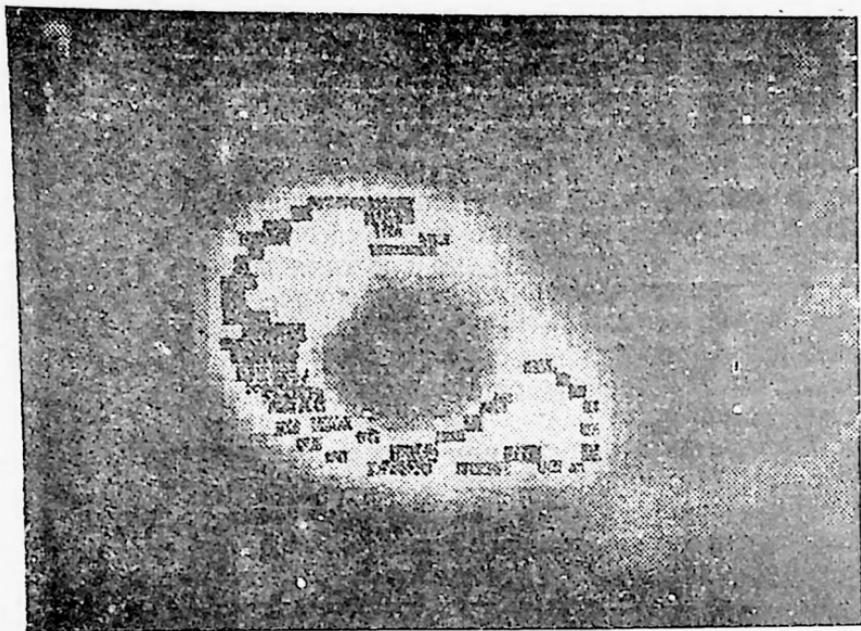


Рис. 15. Загадочная космическая петля, получившая название кольца Эйнштейна (источник MG 1131+0456)

ном луче зрения с одним из выбросов, но ближе к Земле находится галактика, играющая роль ГЛ. Она усиливает светимость далекого источника, создает его кольцевое изображение. Второй выброс (слева вверху) находится вдали от направления на ГЛ, и поэтому линза практически на него не влияет.

На радиокarte сам квазар и ГЛ не видны, но они обнаруживаются в оптике в виде источников соответственно 21-й и 19-й звездных величин. Радиокarta MC 1654+1346 получена с помощью радиотелескопа VLA, а оптические наблюдения велись на 1,3-метровом телескопе обсерватории Китт-Пик (США). Объект MC 1654+1346 очень интересен тем, что здесь впервые обнаружено кольцевое изображение, в котором надежно установлены расстояния до источника ($z=1,74$) и до галактики-линзы ($z=0,254$). Зная расстояния и размеры кольца, легко рассчитать массу ГЛ. Она оказалась равной почти 300 миллиардам солнечных масс.

Традиционный способ определения масс галактик ос-

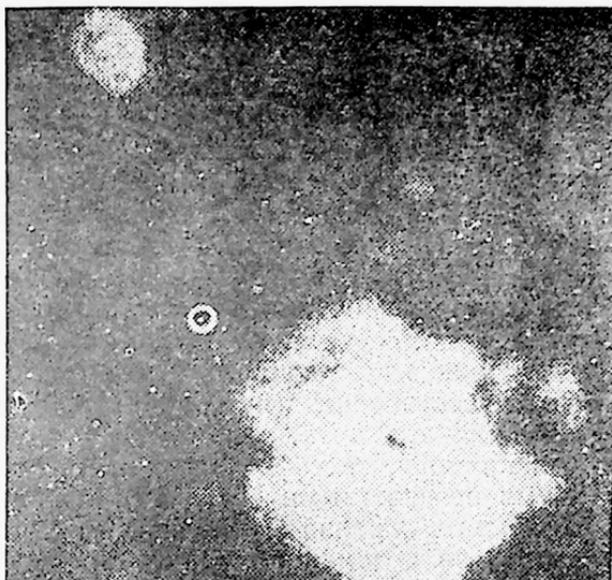


Рис. 16. Радионизображение источника MG 1654-1346. Положение квазара (он виден в оптике) отмечено светлым кольцом. Одна из радионизлучающих областей видна вверху слева, вторая (внизу справа) приобрела вид кольца благодаря действию ГЛ

нован на измерении скоростей звезд (по доплеровскому смещению их спектров) на разных расстояниях от ядра. По известному распределению скоростей можно на основе закона Кеплера рассчитать массу галактики. Этот способ и тот, который удалось реализовать, наблюдая кольцевое изображение в ГЛ, совершенно независимы, что существенно повышает надежность результатов. По мнению астрономов, размеры кольцевого изображения свидетельствуют о наличии в галактике-линзе заметного количества невидимого вещества (скрытая масса).

Заканчивая описание некоторых ГЛ, упомянем еще об одном двойном квазаре QSO 1146+111 B, C. Он интересен тем, что его компоненты отдалены друг от друга на очень большое угловое расстояние — $157''$. Эта, казалось бы, чисто количественная особенность на самом деле ведет к весьма радикальным астрофизическим гипотезам. Мы еще вернемся к этому вопросу, когда будем рассматривать астрофизические приложения линзового эффекта.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ — НОВЫЙ «ИНСТРУМЕНТ» ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

То, что гравитационная линза может сыграть роль гигантского телескопа, позволяющего увидеть такие далекие источники, которые не доступны обычным инструментам, ясно хотя бы из описания упомянутой выше «дуги Эйнштейна». Напомним: там, где наблюдалось бы лишь бесформенное пятнышко, сквозь ГЛ «видны» (правда, пока только в радиодиапазоне) ядро и выброс далекой галактики. К сожалению, их изображения сильно искажены ГЛ, но, поскольку закон преломления электромагнитных волн в гравитационных полях хорошо известен, можно восстановить (путем расчетов) истинную структуру источника.

Собственно говоря, здесь мы сталкиваемся одновременно с двумя неизвестными объектами, так как в наблюдаемой с Земли картине отражаются не только свойства источника, но и самой линзы. Однако в этом есть и свои преимущества, потому что для астрофизики представляют интерес как далекие источники, так и более близкие небесные тела, гравитационные поля которых проявляют себя в данном случае. Более того, материя, входящая в состав гравитационных линз, может быть вообще недоступна для других способов исследования. Ведь гравитационные поля создаются всеми видами вещества и энергии. Линза может быть и светящейся и темной. Она может состоять даже из какого-нибудь неизвестного пока нам вещества, сконцентрированного в звезды или разреженного, такого, как газ элементарных частиц (например, нейтрино). Здесь нам хотелось бы привести слова академика Я. Б. Зельдовича, сказанные в 1987 г.: «За последние 10 лет стало ясно, что более половины массы любого достаточно большого объема во Вселенной находится в некоторой ненаблюдаемой форме, так как она не излучает электромагнитные волны и не взаимодействует с ними. Эта масса ощущается только благодаря производимому ею гравитационному притяжению. Однако пока не существует никаких детекторов (типа применяемых в ядерной физике), которые могли бы зарегистрировать эту «скрытую массу», или «темную массу». Вполне возможно, что гравитационные линзы окажутся наиболее подходящими инструментами для изучения «скрытой массы».

Вопрос о «скрытой массе» имеет чрезвычайно важное значение для космологии. Дело в том, что если средняя плотность вещества во Вселенной в нашу эпоху меньше или равна некоторому критическому значению $\rho_{кр} \approx 10^{-29} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, то Вселенная должна расширяться неограниченно (открытая Вселенная). Если же $\rho > \rho_{кр}$, то фаза расширения сменится сжатием вплоть до нулевых размеров (закрытая Вселенная). Из астрономических наблюдений следует, что средняя плотность светящегося вещества $\rho \approx 3 \cdot 10^{-31} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, т. е. примерно в 30 раз меньше критической. Казалось бы, опыт говорит в пользу открытой модели. Но что если невидимая «скрытая масса» доводит среднюю плотность до $\rho_{кр}$ или даже превышает ее? Эффект гравитационной фокусировки, возможно, поможет получить ответ на этот фундаментальный вопрос космологии.

Вторая весьма заманчивая перспектива астрофизических приложений ГЛ — это получение информации о космологических расстояниях до объектов во Вселенной. Речь идет об определении так называемой постоянной Хаббла, которая характеризует зависимость скорости удаления далеких источников от расстояния до них. Американский астроном Э. Хаббл в течение многих лет исследовал спектры звезд в разных галактиках. Он обнаружил, что эти спектры отличаются от спектров звезд нашего Млечного Пути: почти все они оказались сдвинутыми в сторону более длинных волн (в красную сторону). Природа красного смещения в настоящее время надежно установлена. Она связана с расширением Вселенной, вследствие которого все объекты удаляются друг от друга и, разумеется, от наземного наблюдателя также. Но при удалении источника любых колебаний их частота уменьшается (эффект Доплера), а длина волны соответственно возрастает. Относительное изменение длины волны $(\lambda_{набл} - \lambda_{ист}) / \lambda_{ист}$ (это и есть красное смещение z) для скорости удаления источника v , намного меньшей скорости света c , равно v/c . Установленное Хабблом пропорциональное возрастание z с расстоянием до галактик означает одновременно и возрастание скорости удаления. Поэтому можно написать, что $v = Hr$. Это и есть знаменитый закон Хаббла, открытый им в 1929 г. В приведенной формуле буквой r обозначено расстояние до источника, а H — некоторая константа, которая носит название постоянной Хаббла. Первоначально

но ее величина считалась равной $500 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot (\text{Мпк})^{-1}$, а затем она много раз пересматривалась. В настоящее время наиболее вероятное значение H лежит в пределах $50 \div 100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot (\text{Мпк})^{-1}$. Спрашивается, почему возникает такая большая неопределенность? Казалось бы, определить постоянную Хаббла очень просто. Достаточно измерить красное смещение (а оно определяется по спектрам очень точно) и, зная расстояние r , легко рассчитать H . Действительно, из $z = v/c$ и закона Хаббла следует $z = Hr/c$, откуда $H = zc/r$.

Формула в самом деле получилась совсем простой, но вся беда в том, что чрезвычайно трудно точно определить расстояние r до источника. Из-за этого и возникает такой огромный разброс в значениях H . В астрономии нет единого универсального способа определения расстояний. До ближайших галактик они находятся, в частности, по звездным величинам ярчайших звезд в этих системах (чем дальше звезда, тем меньше ее блеск, наблюдаемый с Земли). Существуют и иные способы определения r , но все они являются косвенными, т. е. расстояния рассчитываются на основе тех или иных предположений, связывающих наблюдаемые величины (блеск светила, угловые размеры газовых туманностей, интегральная звездная величина галактики и др.) с расстоянием. Расстояние же до самых удаленных объектов само оценивается только по красному смещению в их спектрах, т. е. величина H считается известной. Ясно, что чрезвычайно важно определить H каким-нибудь независимым способом.

Гравитационные линзы, по-видимому, дают такую возможность. Представим себе, что интенсивность источника, наблюдаемого сквозь ГЛ, резко изменилась — например, возросла на короткое время (произошла вспышка). Если, наблюдая квазар сквозь линзу, мы видим два его изображения, то изменения их интенсивностей будут происходить, вообще говоря, неодновременно. Сначала увеличится блеск того изображения, к которому ведет более короткий путь, а потом, спустя некоторое время Δt , изменение блеска повторится во втором изображении. Ясно, что величина Δt связана с расстоянием до источника и линзы и их взаимным расположением. Путем расчетов наблюдаемое запаздывание Δt удастся связать со всеми геометрическими характеристиками системы источник — линза и их красными

смещениями. В формулу войдет и постоянная Хаббла. Поэтому, измерив Δt , можно определить величину H :

$$H = F(z_s, z_L) / \Delta t,$$

где $F(z_s, z_L)$ — некоторая известная функция красных смещений источника (z_s) и линзы (z_L). Основная погрешность в расчете Δt и, следовательно, в определении значения H связана с неточным знанием конфигурации линзы и распределением материи вдоль трассы (гравитационные поля на трассах также влияют на величину Δt). Для первой гравитационной линзы (квazar 0957+561) возникающая погрешность считается равной примерно 20%, а само значение H оценивается сверху таким образом: $H \lesssim 200 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot (\text{Мпк})^{-1} / \Delta t [\text{год}]$. Результаты наблюдений дают $\Delta t \simeq 1,6$ года и, следовательно, $H \lesssim 75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot (\text{Мпк})^{-1}$. В литературе описан еще один близкий по сути, но несколько иной по форме расчет. Вместо того чтобы вычислять H по измеренным значениям Δt , рассчитывается красное смещение источника z_s при каком-то выбранном ранее значении H и измеренном красном смещении линзы z_L . Сравнивая вычисленное таким образом z_s с тем, которое получается из оптических спектров, можно сделать выводы о космологической (за счет расширения Вселенной) или иной природе красного смещения. Исходными наблюдательными данными являются время запаздывания Δt , угол между изображениями и отношение их светимостей. Кроме того, необходимо знать красное смещение линзы z_L и ее массу. Считая, что в случае 0957+561 масса линзы составляет примерно $10^{12} M_\odot$, получается удовлетворительное согласие в рассчитанном и измеренном значениях z_s .

Важнейшие данные о космологической эволюции источников содержатся в так называемой функции светимости, характеризующей связь числа источников с их светимостью. Для галактик и квазаров функции светимости отличаются друг от друга тем, что число квазаров с ростом светимости уменьшается более плавно. Вскоре после открытия гравитационных линз было высказано предположение, что расширение функции светимости квазаров — кажущийся эффект, связанный с фокусировкой излучения квазаров в гравитационных полях более близких галактик. Собственно говоря, эта идея была высказана известными астрофизиками супругами Барнот-

ти (США) еще до обнаружения ГЛ, тогда, когда были впервые открыты самые мощные по излучению объекты Вселенной квазары (1960 г.). Барнотти предположили, что квазары — это обычные галактики, но их огромная светимость есть результат гравитационной фокусировки более близкими галактиками, играющими роль усиливающих линз. Гипотеза гравитационной фокусировки долгое время воспринималась иронически астрономическим сообществом (напомним, что первая гравитационная линза была обнаружена через 19 лет после открытия квазаров). Тем не менее Барнотти продолжали активно пропагандировать свою идею: в период между 1965 и 1981 гг. ими было опубликовано на эту тему около 40 работ!

Однако расчеты показывают, что вероятность такого точного совмещения источников и линз на лучах зрения, при которых возникает заметное усиление, очень мала. Например, вероятность возрастания блеска на 10 звездных величин составляет примерно 10^{-10} . Не столь заметное усиление блеска, например, на 2,5 звездной величины (в 10 раз) является более вероятным: здесь вероятность достигает $\sim 10^{-4}$, что, вообще говоря, не так уж мало. Однако против отождествления галактик и квазаров говорит быстрая переменность интенсивности излучения последних. Характерные времена изменений могут быть несколько месяцев или даже недель, что указывает на малые размеры источника (~ 1 пк). Механизм генерации колоссальной мощности в малом объеме пока достоверно не известен, хотя эта проблема занимает астрофизиков уже три десятка лет.

Если сформулировать гипотезу Барнотти более осторожно, а именно: гравитационные поля близлежащих галактик влияют на кажущийся блеск некоторых квазаров, и это необходимо учитывать при анализе функции светимости, то с таким утверждением вполне можно согласиться. Отсюда вытекают некоторые заключения, допускающие экспериментальную проверку. Изображения многих квазаров при достаточном угловом разрешении телескопов ($< 0'',2$) должны расщепиться на ряд компонентов. Яркие квазары должны иметь слабую туманную корону (фокусирующий объект). В частности, если квазар 3C 273 связан с ГЛ, то угловые размеры светящейся туманности оцениваются в $10''$, а ее светимость

примерно на 9 звездных величин меньше, чем светимость центрального источника.

Гравитационная фокусировка не только влияет на функцию светимости, но и должна приводить к кажущемуся увеличению плотности квазаров около близлежащих галактик и скоплений галактик. Однако наблюдаемое некоторое увеличение числа квазаров вблизи галактик может оказаться и случайным совпадением. Расчеты показывают, что для получения достоверных результатов надо исследовать очень большое число (10^4 — 10^5) ассоциаций квазар — галактика.

Исследование структуры изображений показывает, что в тех случаях, когда источник пересекает критическую область (каустику), картина, наблюдаемая сквозь ГЛ, резко меняется. Эти изменения будут восприниматься наблюдателем как очень быстрое движение. Никаких релятивистских ограничений на скорость кажущихся перемещений, естественно, не существует и, в частности, могут наблюдаться сверхсветовые скорости. Сверхсветовые скорости расширения структур радиогалактик были обнаружены в 1969—1971 гг., а их традиционное объяснение является чисто «геометрическим». Можно показать, что кажущаяся скорость перемещения выброса по небосводу определяется следующей формулой: $v_{\text{каж}} = v \sin \varphi / (1 - \cos \varphi \cdot v/c)$. Здесь v — истинная скорость выброса (она всегда меньше c), а φ — угол между лучом зрения и направлением выброса. Для релятивистских струй v близко к c , и при малых углах φ кажущаяся скорость может во много раз превосходить c . Возможная связь сверхсветовых скоростей с ГЛ была отмечена в середине 70-х годов. Конкретные оценки для одного из самых ярких квазаров 3C 273 показывают, что наблюдающаяся здесь скорость $v \simeq 10 c$ допускает объяснение действием ГЛ, находящейся где-то на полпути до квазара. Однако объект, играющий роль линзы, пока не обнаружен.

В обширном потоке литературы, посвященной астрофизическим приложениям гравитационной фокусировки, просматривается иногда стремление, встретившись с необычным явлением, привлечь для его объяснения эффект ГЛ. Так, в частности, высказываются предположения, что такие экзотические объекты, как черные дыры и космические струны, возможно, обнаружат себя именно в качестве гравитационных линз. Толчком к этому пред-

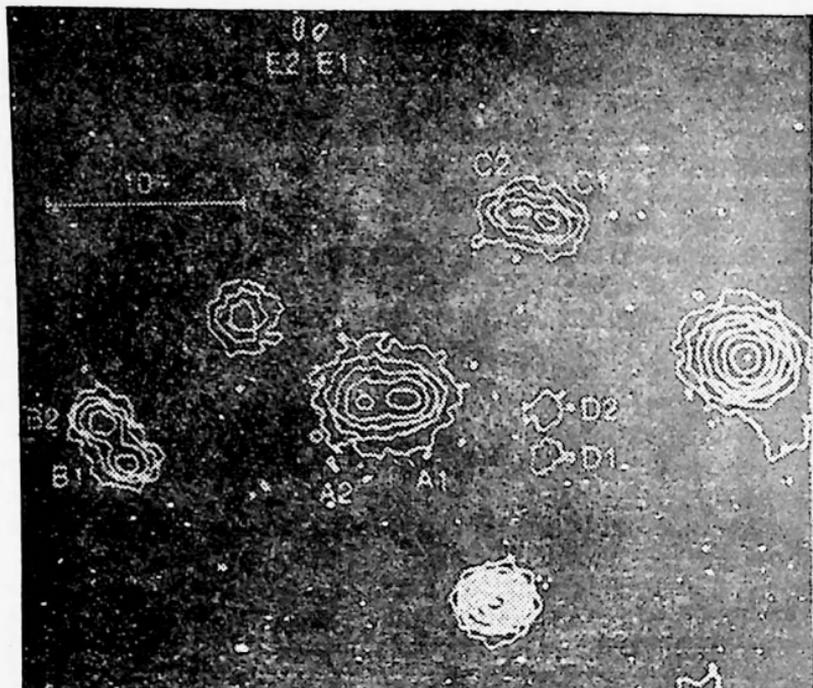


Рис. 17. Поле двойных галактик — возможное свидетельство линзового эффекта космической струны

положению послужило открытие двойного квазара QSO 1146+111 B, C с расщеплением в $157''$, о котором мы уже упоминали ранее. Необычно большой угол между изображениями свидетельствует об огромной массе линзы (если это действительно раздвоенное изображение, а не два разных источника с одинаковыми свойствами). В качестве линзы может действовать сверхмассивная черная дыра с $M \sim 10^{15} M_{\odot}$ либо космическая струна — нитевидный объект с колоссальной плотностью массы, превосходящей $10^{19} \text{ г}\cdot\text{см}^{-1}$. Если это черная дыра, то она должна была бы создать темное пятно в реликтовом фоне микроволнового излучения с расчетным диаметром не более $0'',1$, что пока не обнаружено. Что же касается линзового эффекта на космических струнах, то его отличительной особенностью является очень большой угол раздвоения изображений ($\geq 1'$) при их равной светимости. Двойной квазар 1146+111 B, C как будто бы об-

ладает этими признаками (большой угол расщепления, отношение светимостей компонентов равно 1,02). Однако тщательное исследование спектров на 3,6-метровом телескопе показало, что в своей длинноволновой части они существенно отличаются друг от друга, и это, конечно, свидетельствует против линзовой гипотезы. Тем не менее окончательного заключения еще не сделано, так как из-за временной задержки сигналов на разных трассах спектры компонентов могут отличаться вследствие эволюции самого источника.

Интересный пример раздвоения изображений в широком поле зрения представлен на рис. 17. На фотографии небольшого участка неба видно несколько «сдвоенных» галактик. Здесь также высказывается предположение, что эти структуры являются кажущимися, так как они могут быть проявлением линзового эффекта космической струны, расположенной между нами и наблюдаемыми галактиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трудно предвидеть влияние новых открытий на развитие науки и техники даже в ближайшие годы, не говоря уже об отдаленной перспективе. Но все же, чего можно ожидать от ГЛ? Конечно, их значение заключается не в экспериментальной проверке ОТО. В слабых полях она уже проверена с несравненно большей точностью, чем это возможно (пока) с помощью ГЛ. Главное — это получение с их помощью ценной астрономической информации. Весьма определенно высказывается на этот счет известный физик-теоретик Т. Редже, словами которого мы и заканчиваем рассказ о гравитационных линзах: «Мы находимся в преддверии новой эпохи в астрофизике, когда сведения о далеких галактиках будут получены путем исследования влияния их гравитации на свет, идущий от еще более далеких объектов».

Действительно ли окажутся ГЛ столь мощным «инструментом», покажет будущее, но нет сомнения, что по мере совершенствования техники наблюдений будут обнаруживаться все более тонкие проявления гравитационной фокусировки и соответственно повышаться роль ГЛ в астрономических наблюдениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюх П. В., Минаков А. А. Гравитационные линзы. — Киев: Наукова думка, 1989. — 237 с.
2. Брагинский В. Б., Полнарев А. Г. Удивительная гравитация. — М.: Наука, 1985. — 160 с.
3. Владимиров Ю. С., Мицкевич Н. В., Хорски Я. Пространство, время, гравитация. — М.: Наука, 1984. — 205 с.

НОВОСТИ АСТРОНОМИИ

Где находится источник?

Самый яркий источник гамма-лучей в нашей Галактике — это известный объект Лебедь-1. Лишь немногим уступает ему объект, также испускающий гамма-лучи и находящийся в центре Млечного Пути. Недавние наблюдения, проводившиеся американскими учеными с помощью шара-зонда, поднимавшегося до высоты 36 км, показали, что гамма-источник в Млечном Пути находится не в центре галактики, а на расстоянии от него по крайней мере на 300 с лишним световых лет. В этом месте расположен рентгеновский источник не совсем обычного вида. Скорее всего, это двойная система, состоящая из нейтронной звезды и красного гиганта.

Именно нейтронной звезде (если это действительно так) гамма-излучение из этой области галактики обязано своей энергией — 511 кэВ. Как известно, эта энергия выделяется при аннигиляции позитронов и электронов. Откуда же берутся эти пары? Ученые предполагают, что они появляются в результате следующего механизма: нейтронная звезда «стягивает» на себя вещество соседа по системе. При падении его на нейтронную звезду рождаются гамма-кванты самой различной энергии. В поле наиболее энергичных из них и рождаются пары электрон—позитрон, которые, аннигилируя, и дают снова гамма-излучение, но уже с вполне определенной энергией.

Железо на Земле кончится не скоро

По той причине, что его в недрах нашей планеты может оказаться больше, чем принято считать согласно стандартной модели Земли.

По этой модели и Солнце и планеты образовались в одно и то же время из первоначальной солнечной туманности (небулы) и, естественно, в самом начале свое-

го существования имели аналогичный состав. Представителями этого этапа ученые считают углеродистые хондриты — метеориты, время от времени выпадающие на поверхность планеты. Именно состав этих небесных посланцев из далекого прошлого пришел в противоречие с недавними спектрометрическими измерениями, которые показали, что соотношение содержания, скажем, железа и кремния на Солнце значительно (на 30—40%) выше, чем в хондритах. Тем самым эти метеориты, скорее всего, не могут претендовать на роль образцов солнечной небулы, а мантия Земли (впрочем, как и недра Луны, Марса, Венеры) может содержать больше окиси железа (на 15% по весу), чем считалось раньше.

Темное вещество пока остается темным

Проблема так называемого темного вещества («скрытой» массы), т. е. вещества, не испускающего электромагнитного излучения, которое можно фиксировать, обсуждается давно и имеет несколько аспектов.

Сегодня многие ученые считают, что темное вещество составляет от 50 до 90% полной массы Вселенной. Нынешняя плотность видимой массы в ней меньше критической, поэтому главный вопрос о будущем Вселенной — является она открытой или замкнутой — остается в связи с этим нерешенным. Если же темное вещество будет обнаружено и можно будет оценить его количество, то проблема будущего Вселенной получит решение.

То, что «скрытая» масса должна иметь место, было показано на примере вращения галактик и их скоплений. Скорости вращения отдельных галактик вокруг своей оси или вокруг центра скопления таковы, что видимое вещество не должно было бы удержаться в галактиках, а галактики — в скоплениях. Раз при таких больших скоростях вращения галактики не «разваливаются», это означает, что «что-то» дополнительно удерживает их.

Что же может представлять собой темное вещество?

Вряд ли это барионы — трудно подобрать механизм, который бы помешал барионному веществу «высветить»

ся» в каком-либо из диапазонов электромагнитных волн. Кандидатов же на более экзотическое темное вещество несколько. Один из них — тяжелые нейтрино. Но если они преобладают во Вселенной, непонятно, как могут (могли) образовываться структуры, подобные галактикам, скоплениям галактик и т. д. Поэтому теоретики считают, что Вселенная заполнена холодным темным веществом, способным взаимодействовать с обычным только гравитационно. Спектр кандидатов в частицы такого вещества достаточно широк — от тяжелых слабовзаимодействующих частиц до очень легких аксионов. Массивными слабовзаимодействующими частицами могут быть тяжелые лептоны и целая куча суперсимметричных партнеров обычных бозонов, предсказываемых теорией супергравитации.

Легкие (от 0,01 до 5—10 эВ) аксионы должны быть очень холодными и сосредоточиваться в области галактических гало.

Предположения теоретиков не остаются только на бумаге. Предложены и проведены отдельные эксперименты по регистрации слабовзаимодействующих массивных частиц. Поиски аксионов ведутся с 1987 г. Однако пока «сигналы» от темного вещества не зарегистрированы.

Углерод и комета Галлея

В августе этого года в Северном полушарии будет видна комета Брорзена—Меткалфа. Ученые надеются измерить соотношение изотопов углерода в ее веществе с тем, чтобы сравнить его с отношением углерода-12 и углерода-13, полученным с помощью спектральных измерений вещества кометы Галлея. Это отношение оказалось необычным, оно составляет $(40-65) : 1$, что сильно отличается от отношения изотопов углерода в других объектах Солнечной системы (от Земли и Луны до метеоритов и атмосфер планет).

Есть несколько теорий, объясняющих это различие. Подождем встречи с новой небесной гостьей.

«Звенит» пульсар

Среди 500 известных в настоящее время пульсаров (быстровращающихся нейтронных звезд) существует особый их класс — так называемые миллисекундные

пульсары. Их открыто пока всего только 12 — с периодами вращения от 2 до десятков миллисекунд. Рекордсменом оказался оптический пульсар, «засевший» в месте взрыва Сверхновой 1987А. Он «вспыхивает» каждые 0,5 мс. Если это действительно нейтронная звезда, находящаяся в остатке Сверхновой, то устоявшиеся представления об образовании нейтронных звезд становятся сомнительными.

Вообще говоря, высокие скорости вращения пульсаров объясняются тем, что они «наматывают» на себя момент вращения звезд-спутников, вещество с которых «сносится» на нейтронную звезду. Но период в 0,5 мс таким способом объяснить нельзя. Чтобы вещество нейтронной звезды при такой скорости вращения удерживалось вместе, уравнение состояния ее должно иметь другой, нежели принятый сегодня, вид.

Правда, выдвинута гипотеза, которая может спасти ситуацию. Ученые Иллинойского университета предположили, что столь малый период обязан не вращению пульсара, а вибрации нейтронной звезды. Ударная волна, возникшая при взрыве Сверхновой, заставляет «звенеть» как колокол образовавшуюся нейтронную звезду. С течением времени вибрация должна затухать.

Разница в миллиарды лет

В нашей Галактике, в основном в ее гало, насчитывается свыше сотни шаровых скоплений звезд. Согласно общепринятой на сегодня теории образования Млечного Пути он возник 12—13 млрд. лет назад в результате гравитационного сжатия сферического газового облака. Этот процесс продолжался примерно 200 млн. лет. Но тогда и возраст шаровых скоплений не должен различаться в пределах этой цифры, поскольку они являются как бы остатками первичной галактической туманности.

Однако канадские ученые, исследовавшие с помощью оптических телескопов ряд шаровых скоплений, объявили, что относительный возраст отдельных скоплений может весьма значительно различаться. Так, они считают, что шаровое скопление NGC-288 на 2 млрд. лет старше других скоплений, а скопления NGC-362 и Паломар-12 — на 2 млрд. и 5 млрд. лет соответственно моложе. Столь большой разброс относительных возрастов скоплений

(если эти результаты будут подтверждены) требует пересмотра многих концепций в теории образования нашей Галактики.

Новый спутник Нептуна

К Тритону и Нерееде прибавился еще один спутник, названный — хотя и суховато, но с надеждой на продолжение нумерации — «1989 № 1» и обнаруженный «Вояджером-2» на том месте, где, по расчетам астрономов и баллистиков, его в принципе быть не должно. По размерам он в несколько раз меньше Луны.

Атмосфера Марса

В настоящее время давление в атмосфере красной планеты составляет около $1/50$ давления в атмосфере нашей планеты. Американские ученые выдвинули предположение, что первоначально марсианская атмосфера имела давление, сравнимое с земным. Кто же виновник исчезновения $^{49}/_{50}$? Кометы и астероиды, считают астрономы Аризонского университета. Падая на планету, эти объекты взрываются, и скорость расширяющихся горячих газов оказывается столь большой, что превышает скорость отрыва от планеты (особенно если она обладает слабой гравитацией). Для Марса, чтобы «вытянуть» часть газа за его пределы, размеры падающих объектов не превышают 3 км.

Когда она взорвется?

Когда звезда заканчивает свой термоядерный цикл превращением кремния в железо (последнее уже не «горит»), то при определенной массе звезды ей предстоит участь сверхновой. Энергия, выделяемая при ядерном синтезе, уже не может сдержать гравитационное падение внешних слоев звезды на ядро, и звезда коллапсирует с выделением громадного количества энергии.

В нашей Галактике последней сверхновой стала известная Сверхновая 1987А, взорвавшаяся в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии 170 000 световых лет от нас. И хотя в среднем во Вселенной появляется одна сверхновая за 300 лет, астрономы ожидают, что гораздо раньше мы станем свидетелями взрыва еще од-

ной звезды, также находящейся в нашей Галактике, причем гораздо ближе, чем Сверхновая 1987А.

Это — звезда η Киля массой в 100 солнечных. Находится она на расстоянии 8000 световых лет, поэтому ее взрыв не останется незамеченным — она будет в течение некоторого времени самым ярким объектом после Солнца и полной Луны.

Будущая Сверхновая уже взрывалась в 1843 г., но это был «обычный» взрыв, в результате которого оказались сброшенными внешние слои, образовавшие наблюдаемую сейчас на этом месте туманность.

Коричневый карлик обнаружен — кажется!

Ученые США, Израеля и Швейцарии считают, что ими обнаружены непосредственные доказательства существования коричневого карлика — звезды, масса которой столь мала, что ядерные реакции на ней не могут включиться, и тем самым она для нас остается невидимой.

Астрономы наблюдали за звездой HD 114 762 и показали, что она имеет невидимого спутника, вращающегося вокруг нее. Появляясь то справа, то слева от материнской звезды, невидимый спутник создает циклические изменения в измеряемой доплеровской скорости HD 114 762. Величина этих изменений соответствует массе спутника в $1/100$ массы Солнца, т. е. это — коричневый карлик.

По материалам зарубежных журналов и ТАСС

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Свет и радиоволны тоже подчиняются закону всемирного тяготения	5
Как удалось измерить углы преломления света и радиоволн в поле тяготения Солнца	10
Что видно сквозь гравитационную линзу и как она усиливает светимость источника (оптика звезды-линзы с непрозрачным ядром)	13
Прозрачные гравитационные линзы (линзы-галактики)	21
Как была открыта первая гравитационная линза	31
Как ищут гравитационные линзы в настоящее время	36
Сколько гравитационных линз удалось открыть за 10 лет (1979—1989 гг.)?	38
Гравитационные линзы — новый «инструмент» для астрономических наблюдений	48
Заключение	55
Литература	56
Новости астрономии	57

Научно-популярное издание

Блюх Павел Викторович
Минаков Анатолий Алексеевич

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*
Редактор *И. Г. Вирко*
Мл. редактор *С. С. Патрикеева*
Обложка художника *К. С. Гереева*
Худож. редактор *К. А. Вечерин*
Технический редактор *О. А. Найденова*
Корректор *В. В. Каночкина*

ИБ № 10832

Слано в набор 24.10.89. Подписано к печати 19.12.89. Т-18659.
Формат бумаги 84×108^{1/2}. Бумага тип. № 2. Гарнитура ли-
тературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отг. 3,57.
Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 27 795 экз. Заказ 1896. Цена 15 коп.
Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд
Серова, д. 4. Индекс заказа 901201.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр,
Новая пл., д. 3/4.

Дорогой читатель!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.

Подписка на брошюры издательства «Знание», ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в «Каталоге советских газет и журналов» в разделе «Центральные журналы», рубрика «Брошюры издательства «Знание»»

Цена подписки на год 1 руб. 80 коп.



Наш адрес:
СССР,
Москва,
Центр,
проезд Серова, 4