

CONTEMPORARY
ASTRONOMY:
NEW DIRECTIONS
AND NEW PROBLEMS

Yu. N. GNEDIN

Modern astronomy uses the whole spectrum of electromagnetic waves. New branches of astronomy have appeared: radio, X-ray, and gamma-ray astronomy, astronomy of ultrahigh energy photons, neutrino and gravitation wave astronomy. Numerous new unusual celestial bodies have been discovered: neutron stars, black holes, and quasars.

Современная астрономия всеволновая, она основывается на регистрации излучения во всех диапазонах спектра. Появились новые направления: радио-, рентгеновская и гамма-астрономия, астрономия фотонов сверхвысокой энергии, нейтринная и гравитационная астрономия. Астрономия открыла новые небесные объекты, свойства которых необычны с точки зрения традиционной лабораторной физики: это компактные звезды, нейтронные звезды, черные дыры, квазары.

СОВРЕМЕННАЯ АСТРОНОМИЯ: НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Ю. Н. ГНЕДИН

Государственный технический университет, Санкт-Петербург

ВВЕДЕНИЕ

Под *астрономией* понимают науку о небесных объектах. Однако часто используют и термин *астрофизика*.

Буквальное значение слова *астрофизика* в переводе с греческого языка означает *физика звезд*. Однако в настоящее время это слово имеет значительно более широкое значение. Астрофизика — это наука о физических явлениях во Вселенной. Она изучает не только звезды, но и межзвездную и межгалактическую среды, а также свойства и взаимодействия мельчайших частиц вещества (элементарных частиц, атомов, молекул), от которых существенно зависят многие свойства космических объектов, а также и Вселенной в целом.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время стирается различие между понятиями *астрофизика* и *астрономия*, и многие разделы современной астрофизики в свое название включают слово “астрономия”. Так, например, ряд разделов современной астрофизики принято называть “Радиоастрономия”, “Оптическая астрономия”, “Рентгеновская астрономия”, “Нейтринная астрономия” и т.д. Такое смещение понятий возникло в результате происшедшей в последние десятилетия революции в астрономии. Суть этой революции состоит не только в том, что человечество освоило ближнее космическое пространство и активно использует его для научных исследований, а главным образом в том, что современная астрофизика (и астрономия) стала всеволновой. Это означает, что в настоящее время ученые осуществляют наблюдения небесных объектов в широком диапазоне электромагнитного излучения, начиная от самых длинных радиоволн и заканчивая самыми энергичными фотонами, энергия которых достигает величины 10^{16} эВ, а также такими элементарными частицами, как нейтрино.

В астрофизике реализуется два концептуальных подхода. Один подход состоит в исследовании индивидуальных небесных объектов, таких, как планеты, звезды, пульсары, квазары, галактики, скопления галактик и др. Другой подход заключается в изучении общих физических принципов для разнообразных астрофизических процессов и в попытке установить общие законы развития материи во Вселенной.

Самый существенный вопрос для астрофизики, каким образом возможно получить информацию о

небесных объектах. В настоящее время известны четыре канала получения информации.

1. *Электромагнитное излучение*: гамма-лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное и радио-излучения.

2. *Космические лучи*, которые достигают окрестности Земли и могут взаимодействовать с ее атмосферой. Первичный состав космических лучей включает высокоэнергичные электроны, протоны и тяжелые ядра, а также нестабильные нейтроны и мезоны. В первичный состав космических лучей входят также антипротоны и позитроны, то есть антиматерия. Но значительная часть из них образуется в результате взаимодействия протонов и ядер с межзвездным и межпланетным веществом, а также с атмосферами звезд и планет.

3. *Нейтрино и антинейтрино*. В настоящее время известны три типа нейтрино, два из которых связаны с электронами и мю-мезонами, а третий тип — с тау-мезонами.

4. *Гравитационные волны*, которые возникают при взрывах массивных звезд и могут дать информацию о движениях массивных небесных тел. Хотя гравитационные волны и не были детектированы напрямую, существует много наблюдательных данных, которые подтверждают их существование.

Вершиной успеха современной астрофизики явилось открытие небесных объектов с совершенно необычными физическими свойствами. Во-первых, это нейтронные звезды, которые представляют собой очень компактные, размером всего около 10 км объекты. Магнитное поле таких звезд достигает исключительно громадной величины $\sim 10^{13}$ гаусс, совершенно недостижимой в земных лабораторных условиях. В таких громадных полях полностью изменяется структура вещества и его свойства. Во-вторых, это черные дыры — объекты, у которых вторая космическая скорость равна скорости света. В третьих, это квазары, которые являются ядрами галактик и представляют собой сверхмассивные черные дыры. Важной частью современной астрофизики является космология, то есть наука о том, как возникла и развивалась Вселенная в целом, а также наука о крупномасштабной структуре Вселенной.

СТРУКТУРА НАБЛЮДАЕМОЙ ОБЛАСТИ ВСЕЛЕННОЙ — МЕТАГАЛАКТИКИ

Метагалактика — это вся наблюдаемая область Вселенной. Основными элементами ее крупномасштабной структуры являются галактики и скопления галактик. Галактики представляют собой стационарные гравитационно-связанные звездные системы. Звездная система, в которую входит наше Солнце, — Галактика — содержит примерно 10^{11} звезд; ее масса приблизительно $2 \cdot 10^{44}$ г, то есть $10^{11} M_{\odot}$, а полная излучаемая звездами энергия (светимость) — около $3 \cdot 10^{43}$ эрг/с.

Галактики, как и звезды, имеют склонность образовывать группы и скопления различной численности. Это свойство у них выражено намного сильнее, чем у звезд. У звезд лишь сравнительно малая доля входит в состав рассеянных скоплений, шаровых скоплений или звездных ассоциаций, а подавляющая масса является просто звездами общего поля Галактики. У галактик картина противоположная. Большинство из них является членами групп или скоплений галактик и только незначительная часть располагается вне групп и скоплений в общем поле Метагалактики.

Группы галактик содержат десятки членов. Например, наша Галактика входит в состав группы ближайших к нам галактик, состоящей примерно из 20 членов. Эта группа образует так называемую Местную систему. В свою очередь Местная система входит в состав скопления, центр которого находится в той части неба, где проектируется созвездие Девы. Скопления, как правило, насчитывают сотни и даже тысячи членов. Одно из самых больших скоплений в созвездии Комы (Волосы Вероники) содержит около десяти тысяч галактик. Оно имеет почти сферическую форму и его радиус составляет примерно 4 Мпк.

Следует обратить внимание на разницу между скоплениями звезд, образующими галактики, и скоплениями галактик. Расстояние между членами звездного скопления огромны по сравнению с размерами звезд. Расстояния между членами скопления галактик всего лишь в несколько раз больше, чем размеры галактик.

В самое последнее время результаты наблюдений на больших инструментах, в том числе на Большом 6-метровом телескопе в России, показали, что скопления и группы скоплений, в свою очередь, распределены далеко не случайным образом. Так, Местная группа, в которую входят наша Галактика и туманность Андромеды, образует вместе с другими близкими группами галактик систему, названную Местным сверхскоплением. В Метагалактике имеются и другие сверхскопления. Их средний размер составляет 20 — 30 Мпк.

Как выяснено в последние годы, многие богатые скопления галактик содержат значительные количества горячего ионизированного газа, являющегося источником мощного рентгеновского излучения. Открытие протяженных источников рентгеновского излучения, отождествленных со скоплениями галактик, явилось выдающимся достижением рентгеновской астрономии последних лет. Самыми мощными из них являются скопления Комы, Персея и Девы. Характерные размеры протяженных источников составляют 0,1 — 1 Мпк, а их светимость лежит в пределах 10^{43} — 10^{45} эрг/с. Детальное исследование их спектров показало, что источником излучения является горячий газ с температурой 10^7 — 10^8 К, захваченный скоплением как гравитационной ямой.

Масса такого газа в ряде скоплений сравнима с суммарной массой галактик.

Скопления галактик обнаруживают одну замечательную особенность: для многих из них масса, определенная по скоростям собственного движения галактик в скоплении, оказывается заметно больше массы, определенной по общей светимости галактик. Первый способ нахождения массы основан на предположении, что скопления представляют собой стационарные гравитационно-связанные системы. Полная механическая энергия каждой такой системы должна быть отрицательной, причем кинетическая энергия должна составлять (в среднем по времени) половину модуля гравитационной потенциальной энергии, то есть

$$E_{\text{кин}} = \frac{1}{2}|E_{\text{грав}}|. \quad (1)$$

Это соотношение представляет собой так называемую вириальную теорему классической механики. Она получается как прямое следствие уравнений движения при общей стационарности системы. Например, для частицы массы m , обращающейся по стационарной круговой орбите вокруг центральной массы $M \gg m$, скорость движения V определяется из условия равенства (по модулю) центробежной и гравитационной сил (см. рис. 1):

$$F_{\text{ц}} = \frac{mV^2}{r}, \quad F_{\text{грав}} = \frac{GMm}{r^2}, \quad (2)$$

где r — радиус орбиты.

$$F_{\text{ц}} = F_{\text{грав}} = \frac{V^2}{r} = \frac{GM}{r^2}, \quad (3)$$

то есть

$$E_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2} = \frac{GMm}{2r}.$$

Легко провести доказательство и для любой системы произвольного числа частиц.

Если размер скопления R и дисперсия скоростей галактик V известны, то из (2) следует оценка массы скопления:

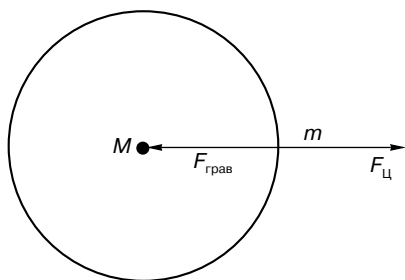


Рис. 1.

$$M_{VT} \approx \frac{V^2 R}{G}. \quad (4)$$

Определенную таким способом массу называют вириальной.

Другой способ определения массы состоит в том, что полную наблюдаемую светимость скопления умножают на принимаемое за стандартное отношение масса/светимость, найденное независимо для отдельных галактик. Это последнее отношение различно для галактик различных типов, но если известно, что в данном скоплении преобладают галактики какого-то определенного типа, то суммарную массу этих галактик M_L можно таким способом действительно оценить. И вот оказывается, что суммарная масса галактик почти всегда меньше вириальной массы скопления:

$$M_{VT} > M_L. \quad (5)$$

Это обстоятельство (его называют вириальным парадоксом) было установлено Цвикки еще в 30-е годы. Результаты новых детальных исследований, выполненных в последние годы, подтверждают этот парадокс.

Вириальный парадокс исчезает, если скопления не являются стационарными системами, так что к ним не применима вириальная теорема. Однако если они все же стационарны, то из него следует наличие в скоплениях значительных масс темного, не светящегося вещества помимо вещества самих галактик, причем эта, как говорят, скрытая, масса должна быть в 3 – 10 раз больше общей массы галактик в скоплениях. Имеется ряд серьезных аргументов в пользу второй возможности.

Иерархия космических структур обрывается на скоплениях и сверхскоплениях. В различных областях Метагалактики, имеющих размер 100 – 300 Мпк и более, содержащих много галактик и скоплений, средняя плотность видимого вещества галактик оказывается одинаковой, где бы эти области не находились. Эта плотность составляет

$$\rho \approx 3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3. \quad (6)$$

С учетом скрытых масс эта величина возрастает примерно втрое.

Одинаковость средней плотности в различных областях пространства означает, что Метагалактика является однородной, если рассматривать ее в большом масштабе, превосходящем размер ячейки неоднородности 100 – 300 Мпк. Это одно из фундаментальных свойств окружающей нас Вселенной.

Другим ее фундаментальным свойством является нестационарность. Наблюдения показывают, что галактики и скопления галактик, разделенные расстояниями, превосходящими размер ячейки неоднородности, удаляются друг от друга. Этот факт был установлен благодаря измерению лучевых скоростей галактик.

Первое успешное определение лучевой скорости галактики по наблюдению доплеровского смещения ее спектральных линий было выполнено в 1912 году Слайфером в обсерватории Ловелла. Он нашел, что одна из галактик в созвездии Андромеды приближается к Земле со скоростью порядка 200 км/с. Это удивительный результат, если вспомнить, что большинство звезд движется со скоростями не более 50 км/с. Изучая спектры других галактик, Слайфер нашел, что для большинства из них характерно красное смещение линий, то есть в отличие от галактики в Андромеде эти галактики удаляются, а не приближаются. Смещение спектральных линий снова давало большие скорости. К 1914 году Слайфер измерил спектры 13 галактик; все они, за исключением двух, удалялись со скоростями около 300 км/с.

Такие скорости намного превосходили самые большие скорости, когда-либо измеренные в астрономии. Однако самое удивительное было впереди. К 1917 году были зарегистрированы скорости в 600 км/с, но даже этот результат был вскоре превзойден.

Значение результатов Слайфера прояснилось в дальнейшем благодаря важному открытию Хаббла, который показал, что скорости удаления галактик отнюдь не случайны. Исходя из измеренных им расстояний до спиральных галактик, Хаббл в 1929 году установил, что вплоть до расстояний в 6 млн. световых лет скорости галактик пропорциональны расстояниям до них:

$$V = HR. \quad (7)$$

Коэффициент пропорциональности, названный фактором Хаббла, измерен, как и все величины, с не очень большой точностью:

$$H = 50 - 100 \text{ (км/с)/Мпк}. \quad (8)$$

В настоящее время наиболее вероятным считается значение

$$H = 75 \text{ (км/с)/Мпк}.$$

Величина, обратная постоянной Хаббла, может рассматриваться как возраст нашей Метагалактики:

$$T = 1/H = 2 \cdot 10^{10} \text{ лет}. \quad (9)$$

Величина H не зависит от направления, а это означает, что Метагалактика не только однородна, но и изотропна.

Данные о распределении и движении галактик были до недавнего времени единственным источником сведений о Метагалактике. В 1965 году было открыто существование электромагнитного излучения, однородно заполняющего Метагалактику и приходящего равномерно со всех сторон. Измерения его интенсивности в диапазоне длин волн от 20 до 0,3 см показали, что это излучение равномерно, то есть имеет планковский спектр с температурой $T = 2,7 \text{ К}$. В этой области длин волн изотропия этого излучения установлена с точностью до десятой до-

ли процента, что значительно превышает точность, с которой установлена изотропия постоянной Хаббла (~20%).

Разлет галактик свидетельствует, что наша Метагалактика расширяется. Возникает вопрос, будет ли наша Метагалактика расширяться неограниченно или ее расширение сменится сжатием? Очевидно, что ответ на этот вопрос зависит от того, каково значение плотности вещества в Метагалактике в настоящее время. При малой плотности Метагалактика будет неограниченно расширяться, а при большой плотности расширение сменится сжатием из-за действия сил гравитации. Существует критическое значение плотности вещества $\rho_{\text{крит}}$, отделяющее один случай от другого. Несложно определить это критическое значение плотности. Действительно, известно, что вторая космическая скорость для шара массы M записывается следующим образом:

$$V = \sqrt{2GM/R}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) выражение для массы

$$M = \frac{4\pi}{3}\rho R^3,$$

а вместо скорости $V = HR$, находим

$$HR = \sqrt{\frac{8\pi G}{3}\rho R^2}$$

или, выражая отсюда плотность $\rho_{\text{крит}}$,

$$\rho_{\text{крит}} = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (11)$$

Итак, критическое значение средней плотности в Метагалактике зависит от постоянной Хаббла H . При значении постоянной $H = 75 \text{ (км/с)/Мпк}$ получаем:

$$\rho_{\text{крит}} \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3. \quad (12)$$

Мы уже видели, что для вещества, входящего в галактики, усредненная плотность составляет около $3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$, то есть много меньше критической. Однако учет скрытой массы увеличивает эту оценку.

ПРИРОДА НЕВИДИМОЙ (СКРЫТОЙ) МАССЫ (МАТЕРИИ)

Галактики в скоплениях вращаются слишком быстро, и при этом скопления не распадаются. Звезды, расположенные на краях спиральных галактик, вращаются вокруг них быстрее, чем предсказывает теория, и при этом не улетают прочь. Запасы невидимого вещества с его дополнительной гравитацией могут держать эти галактики и звезды в равновесии. Поскольку все, от протонов до планет, участвует в гравитационном взаимодействии, темное вещество теоретически может состоять из чего угодно. Многие астрономы поддерживают мысль о том, что темное вещество состоит из более

или менее обычного вещества – множества слабых коричневых карликов, или, возможно, темных планет типа Юпитера.

С другой стороны, большое количество физиков убеждено в том, что невидимое вещество состоит из элементарных частиц (см. таблицу 1). В течение долгих экспериментов ученые пришли к выводу, что их экспериментальные устройства могут быть немного модифицированы, чтобы сделать возможным изучать некоторые из частиц темного вещества. Слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs), частицы темной материи должны пролетать сквозь детектор со скоростью 320 км/с. С каждым мгновением миллионы этих мельчайших пылинок, по некоторым вычислениям, могут пролетать через каждый квадратный сантиметр космоса. Предполагается, что, когда интенсивный поток WIMPs будет пролетать через кристалл (германий и силикон), одна из частиц будет время от времени ударять в ядро кристаллической решетки и решетка начнет вибрировать из-за толчков, поскольку WIMPs, по расчетам, должны иметь массу примерно такую же, как атом. Небольшое количество энергий ударов будет передано электронам в кристалле, заставляя их перемещаться. Каждый кристалл смонтирован со свинцовой батареей и эффект наблюдается посредством помещения в него электрического поля и измерения потока заряда – метод, известный как ионизационное обнаружение. Поскольку почти все WIMPs просто пролетят сквозь кристалл, как если бы его не было, то результаты будут слабыми. Один кристалл весом 900 г может испытать от 1 до 1000 взаимодействий с WIMPs каждый день, независимо от природы WIMPs.

Аксион

Гипотетическая частица, используемая в физике для решения некоторых проблем, появляющихся

Таблица 1. Возможные обладатели “скрытой” массы

Бариионное вещество. Макроскопические объекты	Небариионное вещество. Элементарные частицы
Коричневые карлики (Brown dwarfs)	Нейтрино Аксион (axion)
Нейтронные звезды (Neutron stars)	Фотино
Черные дыры (Black holes)	Бозоны Хиггса
Планеты типа Юпитера	Вимпсы (WIMPs – Weakly Interactive Massive Particles) Странные частицы
MAHO (MACOs – MAcroscopic Compact Halo Objects)	Нейтралино (neutralino)

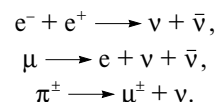
при моделировании сильного взаимодействия – взаимодействия, которое удерживает атомные ядра от распада. Один аксион может быть более чем в триллион раз легче электрона, но в каждом кубическом сантиметре их может быть сто миллиардов. WIMPs могут аннигилировать в темном гало Млечного Пути, испуская гамма-лучи, антипротоны и позитроны. Такую радиацию можно зафиксировать, но пытаться выделить этот сигнал из общей какофонии излучений нашей Галактики едва ли проще, чем обнаружить WIMPs в лаборатории.

Нейтрино – возможный носитель скрытой массы

Нейтринная астрофизика изучает физические процессы в космических объектах, происходящие с участием нейтрино. Проблемы регистрации космических нейтрино ν относятся к нейтринной астрономии.

Нейтрино естественного происхождения во Вселенной имеют три принципиально различающихся по своей природе источника. На ранних стадиях горячей Вселенной, в течение приблизительно 1 секунды после начала ее расширения, нейтрино находились в тепловом равновесии с веществом. От этой эпохи нам остался сильно остывший с тех пор газ космологических нейтрино (реликтовые нейтрино).

В обычных звездах типа Солнца нейтрино рождаются в ядерных реакциях, обеспечивающих наблюдаемую светимость звезд. При взрывах сверхновых звезд и звездных гравитационных коллапсах температура в центре звезды поднимается настолько, что рождаются позитроны и даже π -мезоны (пионы) и мюоны, которые образуют нейтрино в реакциях



Энергии этих звездных нейтрино находятся в основном в диапазоне от долей до нескольких десятков мегаэлектронвольт. Нейтрино рождаются также космическими лучами. Ускоренные до высоких энергий протоны или более тяжелые ядра, сталкиваясь с ядрами атомов или с низкоэнергетическими фотонами, производят π - и K -мезоны, в результате распада которых возникают космические нейтрино высоких энергий. Их энергетический диапазон, доступный регистрации, простирается от нескольких десятков гигаэлектронвольт до, возможно, $10^{15} - 10^{16}$ эВ.

Коричневые карлики – маломассивные холодные звезды

Данные о массах компонентов двойных звезд неопределимы для установления статистической зависимости между абсолютной болометрической величиной звезды и ее массой – зависимости, которая вытекает из современной теории внутреннего строения звезд и источников энергии звезд. Эта за-

висимость служит для определения масс одиночных звезд по их светимостям (иначе, по их абсолютным болометрическим звездным величинам $M_{\text{бол}}$). Масса коричневого карлика оценивается как $0,05M_{\odot}$.

Нейтронные звезды

Нейтронные звезды — это гидростатически равновесные звезды, вещество которых состоит в основном из нейтронов. Существование нейтронных звезд было предсказано в 30-х годах XX века, вскоре после открытия нейтрона. Однако только в 1967 году они были обнаружены в виде импульсных источников радиоизлучения — пульсаров. Затем было установлено, что нейтронные звезды проявляют себя так же, как рентгеновские пульсары (1971 год) и вспышечные источники рентгеновского излучения — барстеры (1975 год). Не исключено, что на одной из стадий существования нейтронные звезды являются источниками гамма-всплесков. К 1984 году было открыто около 400 нейтронных звезд, из них около 20 в виде рентгеновских пульсаров, около 40 в виде барстеров, а остальные в виде обычных радиопулсаров.

Черная дыра

Черная дыра — область пространства, в которой поле тяготения настолько сильно, что вторая космическая скорость (параболическая скорость) для находящихся в этой области тел должна была бы превышать скорость света, то есть из черной дыры ничто не может вылететь — ни излучение, ни частицы, ибо в природе ничто не может двигаться со скоростью, большей скорости света. Границу области, за которую не выходит свет, называют горизонтом черной дыры. Для того чтобы поле тяготения смогло “запереть” излучение, создающая это поле масса должна сжаться до объема с радиусом, меньшим гравитационного радиуса

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

Гравитационный радиус чрезвычайно мал даже для больших масс (например, для Солнца, имеющего массу $2 \cdot 10^{33}$ г, $r_g = 3$ км).

Поле тяготения черной дыры описывается теорией тяготения Эйнштейна. Согласно этой теории, вблизи черной дыры геометрические свойства пространства описываются неевклидовой (римановой) геометрией, а время течет медленнее, чем вдали, вне сильного поля тяготения.

По современным представлениям, массивные звезды (с массой в несколько масс Солнца и больше), заканчивая свою эволюцию, могут в конце концов сжаться (сколлапсировать) и превратиться в черную дыру.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКА “СКРЫТОЙ МАССЫ”

Если “скрытая масса” состоит из компактных звездных объектов (MACHOS, см. табл. 1), то они могут быть обнаружены по эффекту гравитационной фокусировки, то есть будут действовать как гравитационные линзы, отклоняя и усиливая свет далеких звезд или галактик.

Гравитационная линза

Гравитационная фокусировка — свойство гравитирующего объекта отклонять проходящий мимо него поток частиц или излучения, собирая поток (фокусируя) и действуя наподобие оптической или электромагнитной линзы.

Солнце, двигаясь относительно разреженного межзвездного газа, фокусирует своим тяготением поток газа, собирая его вдоль луча, направленного в сторону, противоположную движению Солнца (рис. 1). Уплотнение потока газа вдоль луча фокусировки непосредственно наблюдается по его излучению в линии гелия ($\lambda = 584$ нм) с помощью приборов, установленных на космических аппаратах.

При прохождении света вблизи гравитирующего тела его траектория искривляется, свет притягивается к телу (рис. 2). Для обычных тел угол отклонения α мал ($\alpha \ll 1$) и выражается формулой

$$\alpha(b) = \frac{4Gm}{bc^2},$$

где b — прицельный параметр, m — масса тяготеющего тела. Как видно из рис. 3, лучи, вышедшие из светящейся точки I , огибают тело S и достигают наблюдателя H . Если источник света протяженный, то наблюдатель увидит два сильно астигматичных изображения объекта. Тело S , которое своим тяготением искривляет поток лучей, получило название гравитационной линзы. Если гравитирующая масса линзы S не сосредоточена в центре объекта, а распределена по некоторому объему и лучи света могут свободно проходить через эту массу (такой случай реализуется для большей части объема галактик или скопления галактик), то траектории лучей будут более сложными. Как правило, наблюдатель сможет увидеть три изображения светящегося объекта (тре-

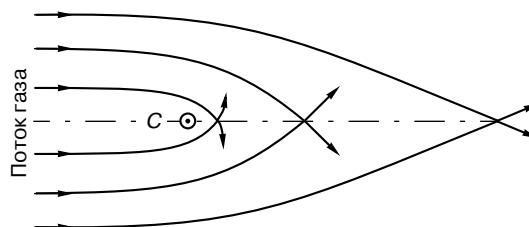


Рис. 2. Фокусировка массивным космическим телом C (Солнцем или звездой) набегающего потока частиц.

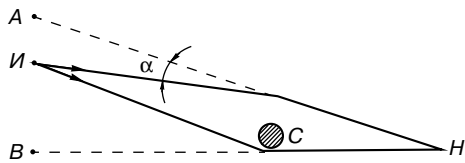


Рис. 3. Схематическое изображение гравитационной линзы. Массивное тело C , расположенное между источником излучения I и наблюдателем H , искривляет лучи, и наблюдатель видит два изображения A и B источника.

тый луч может проходить через центральную часть гравитационной линзы, почти не отклоняясь от своего пути).

Уже обнаружено проявление 3 – 5 гравитационных линз. Например, открыта пара квазаров QSQ 0957+561 A, B, находящихся на угловом расстоянии 5"7 друг от друга, имеющих идентичные спектры с красным смещением $z = 1,41$ и почти одинаковую яркость. Гравитационной линзой в этом случае является галактика (или скопление галактик), находящаяся на пути от квазара к Земле и создающая его двойное изображение.

Гравитационная фокусировка света своеобразно проявляется при его распространении в пространстве, заполненном прозрачной тяготеющей материей.

Тяготение материи, находящейся в конусе лучей, искривляет их, как схематически показано на рис. 4. Чем дальше объект, тем большая масса содержится в конусе лучей, тем сильнее отклонение. Это приводит к тому, что, начиная с некоторого расстояния во Вселенной, более далекий объект имеет уже не меньшие угловые размеры, а большие, чем такой же объект, расположенный ближе.

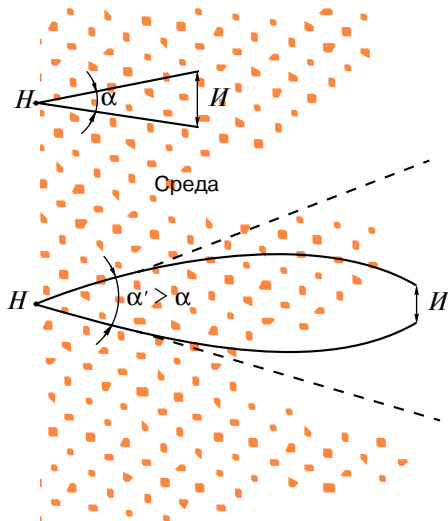


Рис. 4. Эффект увеличения видимых угловых размеров α источника излучения I с ростом космологического расстояния до наблюдателя H .

Программа EROS

Известно, что кривые вращения, наблюдаемые у спиральных галактик, показывают, что у таких галактик должно быть гало из темного вещества. Считается, что масса гало должна быть в десять раз больше, чем масса видимых частей галактик. Природа темного вещества доподлинно не известна. Это могут быть взаимодействующие элементарные частицы или темные астрономические объекты типа коричневых карликов и черных дыр. Идентификация природы гало оказала бы сильное влияние на космологию и на теорию образования галактик.

Пачинский предполагал, что темные астрономические объекты в нашем Гало могут быть обнаружены при наблюдениях блеска отдельных звезд в Большом Магеллановом облаке (БМО). Все дело в гравитационном отклонении света: если массивный объект гало пройдет рядом с лучом зрения, направленным на звезду БМО, количество света, получаемого наблюдателем от этой звезды, увеличится. Увеличение является функцией от параметра удара, то есть минимального расстояния между лучом зрения и массивным дефлектором, при котором отклонение еще не происходит. Выражая увеличение через нормальный параметр удара

$$A\left(u = \frac{r_0}{R_E}\right) = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{1/2}},$$

где R_E – “радиус Эйнштейна” – функция массы дефлектора M , расстояния между наблюдателем и дефлектором D_d и расстояния между наблюдателем и звездой D_s :

$$R_E^2 = \frac{4GM}{c^2} D_d \left(1 - \frac{D_d}{D_s}\right).$$

Увеличение будет больше, чем на 0,3 звездные величины, если параметр удара будет меньше, чем радиус Эйнштейна дефлектора ($u < 1$).

Вероятность такого увеличения для данной звезды в любое заданное время равна вероятности того, что звезда будет находиться в круге площадью πR_E^2 с центром в любом дефлекторе между нами и звездой. Поскольку R_E^2 пропорционален массе дефлектора, а количество дефлекторов в гало обратно пропорционально их массам, то эта вероятность зависит только от массы всего темного вещества, расположенного вдоль луча зрения, и не зависит от масс индивидуальных дефлекторов. Эта вероятность оказывается по порядку величины равной скорости вращения галактики в квадрате, деленной на скорость света, то есть примерно 10^{-6} . Более точные вычисления дают вероятность примерно $0,5 \cdot 10^{-6}$ для увеличения больше, чем на 0,3 звездной величины. Это число было получено в предположении, что сферическое изотермическое гало имеет массу $4 \cdot 10^{11} M_\odot$ и находится ближе к центру Галактики, чем БМО. Эта масса

определяет кривую вращения для наблюдаемой скорости вращения Галактики 220 км/с.

Поскольку наблюдатель, звезда и дефлектор находятся в относительном движении, то длительность увеличения порядка R_E/V_t , где V_t — относительная поперечная скорость дефлектора. При линзировании звезд в БМО объектами нашего гало эта относительная скорость приблизительно равна 200 км/с и наиболее вероятное время линзирования примерно составляет

$$\tau = 70 \sqrt{\frac{M}{M_\odot}} \text{ дней}$$

(когда говорится “время линзирования”, имеется в виду то время, в течение которого увеличение составляет более чем 0,3 звездной величины). Так как τ пропорционально \sqrt{M} , то количество случаев микролинзирования, фиксируемых за время наблюдения, обратно пропорционально \sqrt{M} . И чтобы наблюдать один случай с характерным временем τ , произведение количества наблюдаемых звезд и времени наблюдения должно быть порядка $10^6 \tau$.

Это может быть достигнуто, если гало состоит из невидимых объектов с массой больше или порядка 10^{-7} массы Солнца, что соответствует характерному времени от нескольких месяцев до нескольких часов. Объекты с такой массой включают в себя водородные объекты, которые слишком легки, чтобы в них пошла термоядерная реакция ($M < 0,07 M_\odot$), но слишком тяжелы, чтобы водород улетучился из них в космос ($M > 10^{-7} M_\odot$). Для восприимчивости к увеличению на 0,3 звездной величины погрешность фотометрических измерений должна быть меньше 0,1 звездной величины. Переменные сами по себе звезды могут быть отсеяны, если требовать, чтобы кривые блеска были симметричными, ахроматичными и имели единственный экстремум (увеличение не может повторяться). Две группы начали проводить

работы по получению требуемой чувствительности. Первая группа (это, в сотрудничестве, Ливермор—Беркли—(центр астрофизики частиц)—Маунт Стромло—Сан-Диего—Санта-Барбара) наблюдала БМО в Маунт Стромло, Австралия. Вторая группа называлась EROS (Experience de Recherche d’Objets Sombres) и начинала в 1990 году наблюдения БМО в обсерватории ESO в Ла-Силле, Чили.

EROS состоит из двух программ. Первая предусматривала поиск дефлекторов с массой от $10^{-4} M_\odot$ до $10^{-1} M_\odot$, соответствующей короткому времени линзирования в пределах от 1 до 30 дней. Использовались пластинки Шмидта с изображениями БМО; это позволило изучить приблизительно 10 миллионов звезд за период в несколько лет. (Примерно половина этих звезд являются достаточно яркими, чтобы их можно было наблюдать достаточно точно для того, чтобы заметить изменение на 0,3 звездной величины.) Вторая программа предусматривала поиск дефлекторов с массой от $10^{-7} M_\odot$ до $10^{-3} M_\odot$, соответствующей времени линзирования от 1 до 3 дней. Для этого использовалась большая CCD-мозаика на специально для этого предназначенном телескопе, чтобы просматривать примерно 150 000 звезд каждые 20 минут. Первые положительные результаты данной программы уже достигнуты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынов Д.Я. Общая астрофизика. М.: Наука, 1974.
2. Шкловский И.С. Звезды, их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984.
3. Физика космоса. Маленькая энциклопедия, 1986.

* * *

Юрий Николаевич Гнедин, доктор физико-математических наук, профессор, зам. директора Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Автор более 150 научных работ.