

## GRAVITATIONAL MICROLENSING EFFECT AND DARK MASS PROBLEM

A. M. CHEREPASHCHUK

*More than 90% of the mass of the Universe exists in dark, non-observable form. It is possible to detect the bearers of this dark matter using the gravitational microlensing effect when the brightness of star increases due to deflection of light ray of remote star in gravitational field of dark body. At present the number of such observed microlensing phenomena reaches more than 50.*

*Свыше 90% массы Вселенной находится в скрытой, ненаблюдаемой форме. Обнаружить носителей этой скрытой массы можно по гравитационному микролинзированию, когда в результате искривления лучей света далекой звезды в гравитационном поле темного тела блеск звезды сильно возрастает. Число таких событий микролинзирования, которые удалось наблюдать, превышает 50.*

© Черепашук А.М., 1998

## ГРАВИТАЦИОННОЕ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ И ПРОБЛЕМА СКРЫТОЙ МАССЫ

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт  
им. П.К. Штернберга, Москва

### ВВЕДЕНИЕ

До последнего времени было очевидно, что о 9/10 материи во Вселенной мы ничего не знаем, поскольку она, кроме гравитационного взаимодействия, никак не проявляет себя. Всевозрастающее число наблюдательных данных свидетельствовало о том, что какая-то загадочная темная материя, от которой мы не регистрируем никаких излучений, заполняет Вселенную и определяет движение тел. В науке были случаи, когда астрономические наблюдения опережали лабораторные исследования. Например, известный химический элемент гелий впервые был обнаружен в спектре Солнца по характерным линиям поглощения и лишь затем в земных лабораториях. Но гелий составляет лишь около 25% по массе от наблюдаемого вещества во Вселенной. Сейчас же астрономия утверждает, что ненаблюдаемая форма материи (называемая скрытой массой) составляет свыше 90% всей массы во Вселенной, а та материя, которую мы наблюдаем, — это всего лишь малая добавка (менее 10%).

Ученым очень неуютно сознавать такую огромную меру незнания, поэтому сейчас мы являемся свидетелями яростной атаки на проблему скрытой массы. И теоретики и наблюдатели изобретают остроумные гипотезы и хитроумные эксперименты, чтобы прояснить, что же это такое скрытая масса. И кажется, за последние 2–3 года в этой животрепещущей проблеме наметился ощутимый прогресс. О результатах новейших наблюдательных исследований природы скрытой массы мы и хотим рассказать в нашей статье.

### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА СКРЫТОЙ МАССЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Первые упоминания о возможном наличии скрытой массы относятся еще к началу 40-х годов нашего столетия. Связаны они с изучением вращения нашей и других галактик, а также с исследованием скоростей галактик в скоплениях. Наблюдая распределение звезд, газа и пыли в галактиках, можно судить о распределении массы видимой материи в них, используя, например, хорошо известную зависимость масса—светимость для звезд. Этому распределению

массы можно поставить в соответствие вполне определенный закон вращения звезд и газа в галактике. В частности, если звезды вращаются вокруг центра галактики по круговым орбитам (что является разумным предположением), а основная часть звезд сосредоточена в объеме радиусом  $r_0$ , то звезды за пределами этого объема должны вращаться вокруг центра галактики по кеплеровскому закону, определяемому равенством силы гравитационного притяжения и центростремительной силы:

$$\frac{GM(r_0)m}{r^2} = \frac{mV^2}{r}, \quad (1)$$

где  $M(r_0)$  — масса центральной части галактики,  $G$  — гравитационная постоянная,  $m$  и  $V$  — соответственная масса и скорость звезды.

Из уравнения (1) следует, что при отсутствии скрытой массы на достаточно больших расстояниях от центра галактики скорость вращения звезд и газа должна подчиняться закону

$$V(r) \sim r^{-1/2}, \quad (2)$$

то есть убывать с расстоянием от центра обратно пропорционально квадратному корню из расстояния. В подавляющем большинстве случаев, в том числе и для нашей Галактики, закон вращения (2) не соблюдается, причем всегда скорость вращения наблюдаемых звезд и газа в галактиках убывает гораздо медленнее с расстоянием, чем по закону  $1/\sqrt{r}$ , а во многих случаях  $V(r) = \text{const}$  для расстояний во многие десятки килопарсек от центра галактики. Вывод из такого наблюдательного факта может быть только один (если, конечно, не отказываться от фундаментальных законов физики): наблюдаемые звезды и газ в галактиках погружены в протяженную массивную среду с размерами много больше, чем характерные размеры видимой области галактики. Иными словами, уравнение (1) для всей видимой части галактики неприменимо, поскольку величина радиуса  $r_0$  больше размеров видимой галактики. Анализ отклонений законов распределения скоростей вращения в галактиках от закона  $1/\sqrt{r}$  приводит к выводу о том, что в скрытой, ненаблюдаемой форме находится свыше 90% всей массы (!).

Второе свидетельство существования скрытой массы следует из изучения скоростей движения галактик как целого в галактических скоплениях. В физике хорошо известна теорема вириала, утверждающая, что для стационарной гравитирующей системы сумма полной потенциальной энергии  $U$  и удвоенной полной кинетической энергии  $E_k$  должна равняться нулю:

$$U + 2E_k = 0. \quad (3)$$

Поскольку в случае квазисферического скопления гравитационная потенциальная энергия скопления галактик  $U$  по порядку величины составляет  $-GM^2/R$  ( $M$  — полная масса скопления,  $R$  — его радиус), а полная средняя кинетическая энергия по-

ступательного движения галактик в скоплении  $E_k = M\bar{v}^2/2$  ( $\bar{v}^2$  — среднее значение квадрата скорости галактик в системе покоя скопления), то из формулы (3) следует

$$M \approx \frac{\bar{v}^2 R}{G}. \quad (4)$$

Если из наблюдений известны  $\bar{v}^2$  и  $R$  (а для многих скоплений их можно определить), то по формуле (4) можно оценить массу скопления галактик, которую принято называть динамической или вириальной массой скопления. Оказалось, что для большинства скоплений галактик динамическая масса, оцененная по формуле (4), в десятки раз (!) превосходит видимую массу скопления, определенную прямым подсчетом наблюдаемых галактик скопления. Таким образом, вывод о том, что свыше 90% материи находится в скрытой, ненаблюдаемой форме, подтверждается независимыми исследованиями движений галактик в скоплениях: галактики здесь движутся слишком быстро ( $V \geq 1000$  км/с), быстрее, чем это следует из оценки массы видимого вещества скопления, которая получается суммированием масс галактик, оцененных по зависимости масса—светимость. О наличии скрытой массы свидетельствуют также обнаружение горячего ( $T = (3-10) \cdot 10^7$  К,  $n_e > 10^{-3}$  см $^{-3}$ ) газа в скоплениях галактик, эффекты гравитационного линзирования далеких галактик и квазаров более близкими скоплениями галактик и другие наблюдательные данные. Некоторые теоретические проблемы (например, проблема формирования крупномасштабной структуры Вселенной, космологические проблемы, связанные с объяснением открытых недавно пространственных флуктуаций реликтового микроволнового фона, и т.п.) также требуют для своего решения привлечения скрытой массы.

Таким образом, вопрос о природе скрытой массы во Вселенной назрел очень остро. Существуют гипотезы о носителях скрытой массы. Прежде всего ясно, что скрытая масса — это не газ. Оценки массы горячего ионизованного газа в скоплениях галактик по его рентгеновскому излучению показывают, что эта масса составляет всего лишь около 10% динамической массы скоплений, то есть масса горячего газа того же порядка, что и наблюдаемая масса, заключенная в галактиках. Оценки массы нейтрального водорода в галактиках, выполненные радиоастрономическими методами по наблюдениям в линии 21 см, также отвергают газ как носитель скрытой массы. В настоящее время в качестве носителей скрытой массы рассматриваются два класса объектов. Первый класс предсказывается теорией эволюции звезд и представляет собой небесные тела, состоящие в основном из барионной формы материи (сильно взаимодействующих элементарных частиц с полувещным спином — нейтронов, протонов и т.п.), и называется МАСНО (Massive Astrophysical Compact

Halo Objects). Этот класс объектов включает в себя маломассивные ( $M < 0,1 M_{\odot}$ ) и потому слабо светящиеся звезды, так называемые коричневые карлики (звезды с массой менее  $0,08 M_{\odot}$ , в недрах которых никогда не зажигаются термоядерные реакции), белые карлики, планеты с массами от  $10^{-5}$  до  $10^{-3} M_{\odot}$ , нейтронные звезды в неактивной стадии (без феномена пульсара), черные дыры.

Второй класс объектов предсказывается теорией образования Вселенной (инфляционная стадия и горячая стадия – Большой взрыв), которая предсказывает рождение на ранних стадиях образования Вселенной очень слабо взаимодействующих элементарных частиц с неравной нулю массой покоя, так называемых WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). К этому классу могут принадлежать нейтрино, нейтралино, фотино, гравитино, аксионы, космические струны и т.п. Важно отметить, что, как следует из теории нуклеосинтеза на ранних стадиях образования Вселенной, доля средней плотности барионной компоненты вещества во Вселенной по отношению к средней плотности небарионной (WIMPs) составляет всего  $\sim 0,04$ . В то же время доля средней плотности видимого вещества по отношению к полной средней плотности Вселенной должна составлять лишь  $\sim 0,002$ .

Среди этого списка претендентов на носителей скрытой массы есть более или менее предпочтительные объекты, однако окончательный ответ на вопрос о том, из чего состоит скрытая масса, должны дать наблюдения. Но как наблюдать невидимую, скрытую материю? Оказывается, щедрая природа, поставляя нам трудные задачи, в то же время дает и шансы для их решения.

### КАК НАБЛЮДАТЬ СКРЫТУЮ МАССУ?

Для наблюдений скрытой массы используется тот факт, что она обладает гравитационным полем, в котором, как известно из общей теории относительности (ОТО), путь лучей света искривляется. Эффект искривления пути лучей света далекой звезды в гравитационном поле Солнца давно известен и на краю Солнца составляет  $\sim 1,75''$ . Искривление лучей света в гравитационном поле аналогично действию линзы на световые лучи. Поэтому возникло понятие гравитационной линзы – гравитирующего объекта, создающего путем искривления лучей света изображения (“духи”) далекого объекта (квзара, галактики). Важно отметить, что при этом блеск “духов” может быть много больше блеска самой линзируемой галактики. Известны десятки “духов” далеких галактик и квазаров, которые образовались в результате гравитационного линзирования их света более близкими галактиками или скоплениями галактик. Например, хорошо известный двойной квазар QSO 0957+561, открытый в 1979 году американскими учеными Д. Вэлшем, Р.Ф. Касвеллом и Р.Дж. Вейманном. Особенно впечатляю-

щи полученные недавно на космическом телескопе им. Хаббла изображения скоплений далеких галактик, имеющих вид концентрических дуг и сформированных в результате гравитационного линзирования их света более близкими скоплениями галактик. Решая обратную задачу можно, исследуя “духи” скоплений галактик, восстановить их истинные изображения и даже оценить распределение массы в гравитационной линзе – скоплении галактик. Именно при таких исследованиях получается дополнительный вывод о необходимости существования скрытой массы в скоплениях галактик. Таким образом, явления гравитационных линз уже хорошо известны в мире галактик и квазаров (рис. 1). Необходимо отметить, что о большом значении для науки эффекта гравитационной линзы писал еще в 1936 году А. Эйнштейн и в 60-х годах российские ученые П.В. Блюх и А.А. Минаков, А.В. Бялко, а также американец С. Либс, норвежец С. Рефсдал и др.

Польский ученый Б. Пачинский, работающий в США, в 1986 году высказал замечательную идею использовать для выявления носителей скрытой массы эффект гравитационного микролинзирования звезд ближайших галактик темными телами нашей Галактики. Микролинзирование звезд отличается от линзирования далеких галактик тем, что невозможно отдельно наблюдать “духи”, так как их угловое разделение очень мало (порядка  $0,001''$ ). Однако при микролинзировании можно наблюдать изменение блеска линзируемой звезды, вызванное

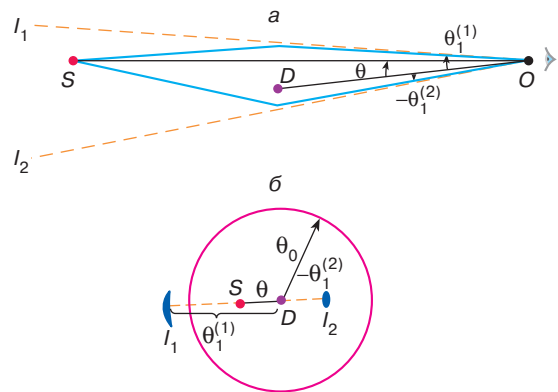


**Рис. 1.** Изображение Креста Эйнштейна – четырех “духов” далекой галактики, образованных в результате ее гравитационного линзирования более близкой галактикой с несферически-симметричным распределением массы. Изображение получено сотрудниками ГАИШ МГУ с помощью ПЗС-приемника излучения, установленного в фокусе 1,5-м телескопа АЗТ-22 Высокогорной Майданакской обсерватории в Узбекистане. Угловой размер каждой из компонент Креста Эйнштейна менее  $0,5''$

относительным перемещением звезды, линзы и наблюдателя. Б. Пачинский, проанализировав кривую вращения  $V(r)$  нашей Галактики, высказал гипотезу, что Галактика обладает сферической подсистемой (гало), которая может быть заполнена несветящимися телами МАСНО с массами от  $10^{-8}$  до  $10^2 M_{\odot}$ : нейтронными звездами, черными дырами, коричневыми карликами и космическими телами вплоть до тел с массой Юпитера и меньше. Число этих темных тел в гало Галактики, согласно оценке Б. Пачинского, должно быть весьма велико, так что вероятность того, что звезда ближайшей галактики (например, Большого Магелланова облака – БМО) почти точно спроектируется на темное тело, составляет порядка  $10^{-6}$ . Хотя эта вероятность весьма мала, но если наблюдать одновременно миллионы звезд БМО с помощью панорамных приемников излучения (фотопленка, ПЗС-матрица), то можно надеяться достаточно часто регистрировать вспышки звезд, обусловленные эффектом микролинзирования. По длительности и частоте таких событий можно судить о вкладе темных тел гало Галактики в полную массу невидимого вещества. Эта наблюдательная задача была поставлена Б. Пачинским, и ее решение несколькими группами ученых привело в последние годы к определению параметров конкретных темных тел гало Галактики.

### МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ

Рассмотрим основные принципы создания изображений в гравитационной линзе – теле со сферически-симметричным распределением массы. На рис. 2, а буквой  $D$  обозначена гравитационная линза (или, как ее еще называют, дефлектор),  $S$  – звезда фона, буквой  $O$  отмечено положение наблюдателя. Угол между направлением на дефлектор и истинное положение звезды  $S$  обозначим через  $\theta$ , угол между направлением на дефлектор и “дух”  $I_1$  или  $I_2$  – через  $\theta_1^{(1)}$  или  $\theta_2^{(2)}$  соответственно. В проекции на картинную плоскость изображение картины линзирования представлено на рис. 2, б. Здесь  $D$  – дефлектор,  $S$  – звезда,  $I_1^{(1)}$  и  $I_2^{(2)}$  – “духи” – изображения звезды  $S$ , образованные вследствие искривления лучей света от звезды  $S$  в поле тяжести дефлектора  $D$ . Два луча, прошедшие по разные стороны от тяготеющего тела  $D$ , будут отклонены от первоначальных направлений. Если звезда  $S$  находится достаточно далеко от дефлектора  $D$ , то лучи начнут сходиться и пересекутся в некоторой удаленной точке  $O$ , куда помещен наблюдатель. Угол отклонения луча света звезды  $S$  в гравитационном поле дефлектора (в радианах) равен  $2r_g/r$  – удвоенному отношению величины гравитационного радиуса дефлектора  $r_g = 2GM/c^2$  к прицельному расстоянию  $r$  звезды  $S$  по отношению к центру дефлектора. Из геометрических соотношений можно написать уравнение, связывающее основные углы:



**Рис. 2.** а – искривление лучей света далекой звезды  $S$  в гравитационном поле точечной массы  $D$ . Указаны характерные углы (см. текст); б – расположение дефлектора  $D$ , звезды  $S$  и “духов”  $I_1$  и  $I_2$  на картинной плоскости. Здесь  $\theta_0$  – угловой радиус конуса Эйнштейна

$$\theta_1^2 - \theta\theta_1 - \theta_0^2 = 0. \quad (5)$$

Здесь  $\theta_0$  – угловой радиус так называемого конуса Эйнштейна:

$$\theta_0^2 = \frac{4GM}{c^2} \frac{L_{SD}}{(L_{SD} + L_{OD})L_{OD}}, \quad (6)$$

где  $M$  – масса дефлектора,  $c$  – скорость света,  $G$  – гравитационная постоянная,  $L_{SD}$  – расстояние от звезды до дефлектора,  $L_{OD}$  – расстояние от наблюдателя до дефлектора.

Квадратное уравнение (5) имеет два действительных корня  $\theta_1^{(1)}$  и  $\theta_2^{(2)}$ , соответствующих двум изображениям источника  $S$ . При этом площадь первого изображения (в стерadiansах) определяется как

$$\Omega_1 = \pi\phi_s^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{u}{4} + \frac{1}{4u} \right),$$

а площадь второго изображения

$$\Omega_2 = \pi\phi_s^2 \left( -\frac{1}{2} + \frac{u}{4} + \frac{1}{4u} \right),$$

где  $\phi_s$  – угловой радиус звезды,

$$u = \sqrt{1 + \frac{4\theta_0^2}{\theta^2}}.$$

Размеры и яркость двух “духов” будут разными, но их суммарный блеск больше блеска нелинзированного источника  $S$ :

$$\Omega_1 + \Omega_2 = \pi\phi_s^2 \cdot \frac{1}{2} \left( u + \frac{1}{u} \right) > \pi\phi_s^2.$$

Соответствующий коэффициент усиления блеска звезды

$$A = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{\pi\varphi_s^2} = \frac{1}{2}\left(u + \frac{1}{u}\right). \quad (7)$$

При больших значениях  $A$  можно приближенно записать:

$$A \approx \frac{\theta_0}{\theta}, \quad (8)$$

то есть коэффициент усиления в этом случае просто равен отношению углового радиуса конуса Эйнштейна к угловому расстоянию между дефлектором и истинным положением звезды  $S$ . При строго соосном расположении звезды фона и дефлектора вместо двух изображений  $I_1$  и  $I_2$  звезды  $S$  в картинной плоскости образуется яркое кольцо радиусом  $\theta_0$ , именуемое кольцом или конусом Эйнштейна. Коэффициент усиления  $A$  в этом случае записывается как

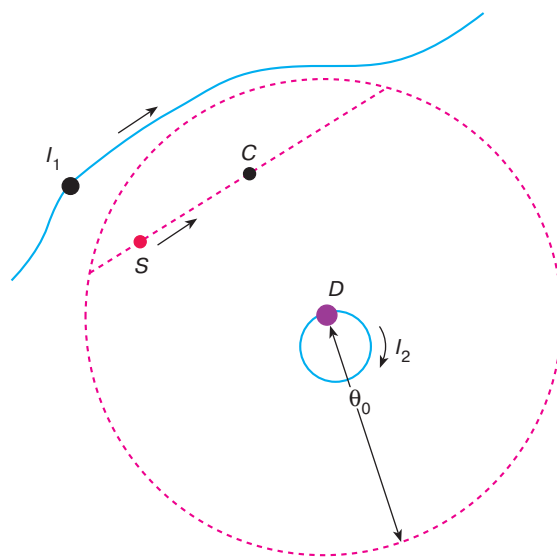
$$A \approx \frac{2\pi\theta_0\varphi_s}{\pi\varphi_s^2} = \frac{2\theta_0}{\varphi_s}.$$

Радиус конуса Эйнштейна  $\theta_0$  приблизительно пропорционален квадратному корню из отношения массы дефлектора  $M$  к расстоянию до него. Поэтому для массы галактики на типичном межгалактическом расстоянии угловое расстояние между “духами”  $I_1$  и  $I_2$  составляет несколько угловых секунд, а для массы дефлектора порядка массы Солнца и расстояния до него  $\sim 10$  кпк (характерного для гало Галактики) расстояние между “духами”  $I_1$  и  $I_2$  составляет величину порядка угловой миллисекунды.

Наблюдать два изображения галактик или квазаров, разделенных угловым расстоянием в несколько секунд дуги, вполне возможно даже наземными средствами. Наблюдать же два изображения, разделенные расстоянием  $0,001$ , с Земли невозможно. Поэтому эффект микролинзирования наблюдают по изменению блеска звезды  $S$ .

Наблюдатель  $O$ , дефлектор  $D$  и звезда поля  $S$  обладают некоторыми скоростями, и в результате звезда поля  $S$  движется относительно  $D$  с некоторой результирующей угловой скоростью. При этом прицельный параметр  $\theta$  и как следствие коэффициент усиления являются переменными величинами. Движение звезды  $S$  в картинной плоскости через конус Эйнштейна показано на рис. 3. Здесь направление истинного движения помечено штриховой линией, а видимое движение двух “духов”  $I_1, I_2$  — сплошными линиями. Направление движения звезды  $S$  помечено стрелкой и в пределах конуса Эйнштейна может рассматриваться как прямолинейное. Направление движения изображения  $I_1$  совпадает с направлением истинного движения звезды  $S$ , а направление изображения  $I_2$  обратное.

Радиус конуса Эйнштейна для дефлектора с массой  $\sim 1M_\odot$ , удаленного от Земли на расстояние



**Рис. 3.** Истинное движение источника  $S$  (пунктир) и видимые движения “духов”  $I_1$  и  $I_2$  через конус Эйнштейна радиусом  $\theta_0$

$\sim 10$  кпк, составляет порядка одной тысячной секунды дуги.

Если пространственная скорость дефлектора  $\sim 300$  км/с (типичные скорости в гало нашей Галактики), время пересечения конуса Эйнштейна составляет около одного месяца. Таким же является характерное время изменения блеска при микролинзировании. Можно провести перпендикуляр  $DC$  из дефлектора  $D$  к истинной траектории  $S$ . Слева и справа от этого перпендикуляра картины идентичны. Поэтому кривая блеска при микролинзировании одиночной звезды  $S$  является симметричной относительно момента времени, когда  $S$  проходит через точку  $C$  (максимум коэффициента усиления  $A$  и соответственно максимум блеска). Кроме того, ввиду независимости угла отклонения фотона в гравитационном поле от его энергии (или частоты) кривая блеска при микролинзировании точечного источника не должна зависеть от длины волны  $\lambda$ .

Итак, существуют два важных признака, позволяющие отличить кривую блеска звезды при микролинзировании от кривой блеска обычной переменной звезды: при микролинзировании кривая блеска должна быть строго симметричной относительно своего максимума (если пренебречь параллактическим смещением звезды и дефлектора, обусловленным движением Земли по орбите вокруг Солнца) и не должна зависеть от длины волны.

### ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЭФФЕКТОВ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ

По рекомендации Б. Пачинского с 1991 года поиск эффектов микролинзирования звезд БМО темными телами гало нашей Галактики начался двумя

группами ученых. Группа американских и австралийских ученых назвала свой эксперимент MACHO. Наблюдения проводились на обсерватории Mount Stromlo в Австралии, вблизи Канберры. Использовался телескоп с зеркалом диаметром  $\sim 1,27$  м, в фокусе которого установлен панорамный фотоэлектрический приемник – ПЗС-матрица, позволяющая одновременно регистрировать и анализировать с помощью компьютера блеск около миллиона звезд. Группа французских и чилийских ученых назвала свой эксперимент EROS. Наблюдения проводились в Чили на широкоугольном 50-см телескопе системы Шмидта вначале с помощью фотографической методики, а затем с помощью фотоэлектрического ПЗС-приемника излучения. Обе группы наблюдали несколько миллионов звезд на протяжении двух лет и практически одновременно в одном томе международного журнала “Nature” опубликовали первые результаты наблюдений явлений микролинзирования звезд БМО темными телами гало нашей Галактики. Оказалось, что блеск нескольких звезд БМО испытал резкий (примерно от трех до шести раз) подъем и падение. Кривые блеска не зависели от длины волны, были строго симметричны и имели характерную продолжительность изменений блеска порядка одного месяца (рис. 4, 5). По продолжительности изменения блеска  $\Delta t$  оцениваются размеры конуса Эйнштейна  $\theta_0$  дефлектора (см. формулу (6)). Соответствующая масса темного тела составляет  $\sim 0,1 M_{\odot}$ .

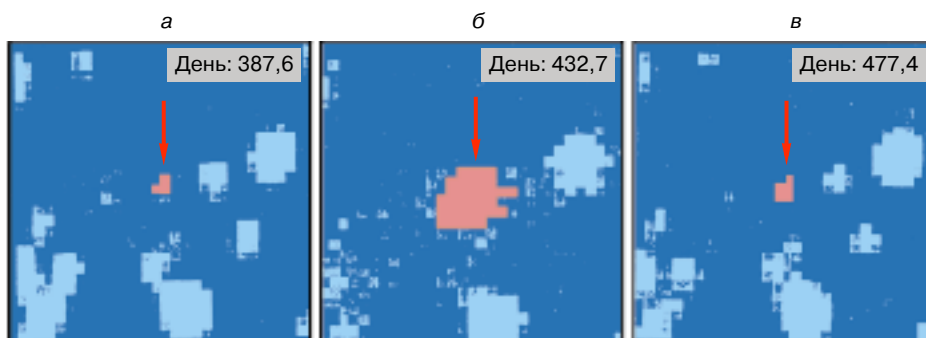
Таким образом, первые же результаты наблюдений явлений микролинзирования позволили заключить, что по крайней мере одной из компонент скрытой массы являются маломассивные ( $M \leq 0,1 M_{\odot}$ ) звезды, возможно коричневые карлики. Количество таких маломассивных звезд в нашей Галактике оказывается много большим, чем это предсказывает современная теория происхождения и эволюции звезд, что ставит перед учеными серьезную проблему, требующую скорейшего решения.

Для корректной оценки доли скрытой массы, сосредоточенной в таких маломассивных звездах, необходимо наращивать число наблюдений явлений микролинзирования, причем желательно это делать не только в направлении на БМО, но и в других направлениях, чтобы лучше оценить пространственное распределение темных тел в Галактике. С этой целью группа астрономов ГАИШ МГУ под руководством М.В. Сажина еще в 1989 году начала поиск эффектов микролинзирования звезд галактики в созвездии Андромеда (которая расположена на Северном небе и доступна для наблюдений с обсерваторий России и стран СНГ). Группа американских и польских ученых с 1992 года наблюдает эффекты микролинзирования звезд балджа нашей Галактики темными телами гало (балдж – это большое скопление звезд в окрестности галактического центра). Этот эксперимент получил название OGLE. В эксперименте OGLE были открыты десятки случаев микролинзирования.

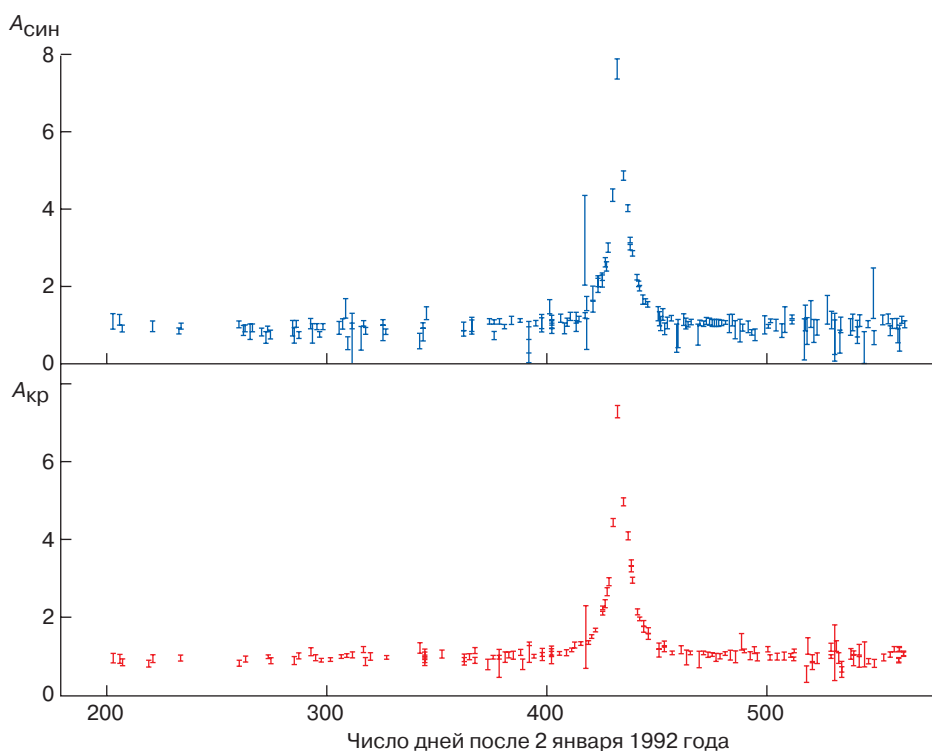
К настоящему времени число обнаруженных явлений микролинзирования превышает 50. Анализ результатов наблюдений БМО позволяет заключить, что по крайней мере половина скрытой массы гало Галактики в виде барионов обязана своим происхождением вкладу маломассивных ( $M < (0,1-0,5) M_{\odot}$ ) звезд и коричневых карликов. Из чего состоит вторая половина барионной компоненты скрытой массы и какова природа небарионной компоненты скрытой массы, пока остается загадкой. Впрочем, можно существенно уменьшить остроту проблемы, если учесть явления микролинзирования не только одиночных, но также двойных и кратных звезд.

#### МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ

Доля двойных и кратных среди звезд Галактики составляет около 50%, поэтому вполне вероятно наблюдать явления микролинзирования, обусловленные двойственностью звезд. Забегая вперед,



**Рис. 4.** Изображения звездного поля в Большом Магеллановом облаке (БМО), полученные группой MACHO до появления эффекта микролинзирования (а), в момент микролинзирования звезды БМО темным телом гало нашей Галактики (б) и после микролинзирования (в). Видно сильное увеличение яркости одной из звезд БМО, обусловленное искривлением лучей света этой звезды в гравитационном поле более близкого к нам темного тела Галактики (из журнала: Nature. 1993. Vol. 365. P. 621)



**Рис. 5.** Кривые блеска звезды БМО в синих и красных лучах, обусловленные эффектом микролинзирования (из статьи С. Алкока и др.: *Nature*. 1993. Vol. 365. P. 621). Кривые симметричны и не зависят от длины волны. Это доказывает, что они обусловлены не физической переменностью звезды, а связаны с искривлением лучей света звезды БМО в гравитационном поле более близкого к нам темного тела гало нашей Галактики

отметим, что в этих случаях кривая блеска при микролинзировании может быть несимметричной и зависящей от длины волны. Не исключено, что первые наблюдатели явлений микролинзирования отбрасывали такие события, считая их связанными не с микролинзированием, а с тривиальной причиной — физической переменностью звезды (доля таких переменных звезд достигает 10%). Если принять во внимание такие отброшенные события, доля маломассивных звезд, белых карликов и коричневых карликов в барионной компоненте скрытой массы может быть больше 50%. Поэтому анализ явлений микролинзирования, связанных с двойственностью звезд, представляется актуальной задачей.

Впервые проблему микролинзирования одиночной звезды фона двойной гравитационной линзой рассмотрели Б. Пачинский и С. Мао в 1991 году. Проблема микролинзирования двойной звезды фона одиночной гравитационной линзой была рассмотрена К. Гристом и В. Ху в 1992 году. М.В. Сажин и автор данной статьи в 1994–1995 годах рассчитали кривые изменения блеска и цвета при микролинзировании двойных звезд различных спектральных классов одиночной гравитационной линзой. Изменения цвета при микролинзировании двойной звезды одиночной гравитационной линзой происходят не потому, что лучи света разных длин волн откло-

няются в гравитационном поле дефлектора на разные углы, а потому, что звезды разных спектральных классов (и, следовательно, разных температур) проходят на разных угловых расстояниях от дефлектора.

М.Б. Богданов и автор данной статьи рассчитали “хроматический” эффект при микролинзировании и показали, что даже при стандартной ситуации микролинзирования одиночной звезды могут происходить небольшие изменения цвета (амплитудой порядка одного процента). Это связано с тем, что реальная звезда не является идеальным точечным объектом, а имеет хотя и очень малые, но отличные от нуля угловые размеры и различное в разных длинах волн распределение яркости по диску. Поскольку диск звезды имеет потемнение к краю и температура излучения на краю диска ниже, чем в его центре, зависимость коэффициента усиления при микролинзировании  $A(\theta)$  от углового расстояния  $\theta$  до дефлектора приводит к тому, что блеск реальной звезды в максимуме в большинстве случаев испытывает покраснение. Это характерное покраснение в максимуме блеска может быть использовано как дополнительный признак эффекта гравитационного микролинзирования.

Особенно характерным признаком эффекта микролинзирования является специфическое изменение

степени и угла линейной поляризации излучения линзируемой звезды. На это обратили внимание английские ученые Дж. Симмонс, Дж. Виллис и А. Ньюсем, а также М.Б. Богданов, М.В. Сажин и автор настоящей статьи. Хотя излучение на краю диска звезды поляризовано (степень поляризации здесь достигает 10%), полное излучение от одиночной сферической звезды не поляризовано. Для появления заметной линейной поляризации излучения звезды нужны отклонения от сферической симметрии. Когда свет звезды испытывает гравитационное микролинзирование, излучение края диска звезды усиливается сильнее излучения его центра, что приводит к нарушению сферической симметрии и появлению заметной линейной поляризации амплитудой до 0,5%. Точность современных фотоэлектрических поляризационных наблюдений достигает 0,01%, поэтому изменение поляризации света звезды при микролинзировании вполне наблюдаемо и тоже может использоваться как дополнительный признак эффекта микролинзирования реальной звезды.

Наблюдалось несколько явлений микролинзирования, показывающих несимметричные кривые блеска, которые интерпретировались в рамках модели двойной гравитационной линзы. Отдельные несимметричные кривые блеска могут быть связаны также с микролинзированием двойной звезды одиночной гравитационной линзой. Изучение таких аномальных кривых микролинзирования перспективно для уточнения доли маломассивных звезд и коричневых карликов в скрытой массе.

Все описанные эффекты, сопутствующие явлению микролинзирования, свидетельствуют о том, что микролинзирование позволяет не только выявить природу скрытой массы, но и дает возможность изучать далекие звезды с очень высоким угловым разрешением ( $\sim 0,001$ ). О том, что явление микролинзирования можно использовать как телескоп, обладающий сверхвысоким угловым разрешением, писали в 1993 году М.В. Сажин и американский ученый Д. Блэйер. Наблюдения микролинзирования звезд с высокой фотометрической точностью дают принципиальную возможность обнаружения не только звездных, но даже планетных спутников у звезд.

Российские ученые А.В. Гуревич, К.П. Зыбин и В.А. Сирота в 1996 году опубликовали очень важную работу, где показали, что актуальным является также поиск некомпактных объектов гало Галактики, состоящих из элементарных частиц небарионной природы (WIMPs). В этом случае также должны наблюдаться кривые блеска, обусловленные микролинзированием света далеких звезд, но уже не компактными, а протяженными телами гало Галактики. Таким образом, появляется возможность изучения не только барионной, но и небарионной компоненты скрытой массы. При этом, чтобы надежно отличить точечный дефлектор от протяженного,

особенно важно наблюдать и исследовать микролинзирование двойных звезд фона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы описали современный наблюдательный статус проблемы скрытой массы во Вселенной. Использование современных фотоэлектрических панорамных приемников и мощных компьютеров позволило осуществить настоящий прорыв в этой важнейшей проблеме науки и выявить по крайней мере одну компоненту скрытой массы — это маломассивные ( $M < (0,1-0,5) M_{\odot}$ ) звезды, белые карлики и возможные коричневые карлики, которых оказалось очень много в гало нашей Галактики, много больше, чем предсказывалось теорией эволюции звезд. Это открытие ставит новые проблемы перед теоретиками. Можно не сомневаться, что в ближайшие годы мы узнаем много принципиально нового о природе и эволюции звезд.

Подчеркнем одно важное обстоятельство. Открытие эффектов микролинзирования были сделаны на небольших наземных телескопах простыми и дешевыми средствами. Наряду с обнаружением эффектов микролинзирования были получены высокоточные кривые блеска многих десятков тысяч переменных звезд разных типов, что является важным вкладом не только в проблему скрытой массы, но и в проблему изучения переменных звезд. Все это показывает, насколько плодотворной может оказаться остроумная научная идея.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Блюх П.В., Минаков А.А.* Гравитационные линзы. М.: Знание, 1990. С. 3–62.
2. *Шульга В.* Космические линзы и поиск темного вещества во Вселенной // Наука и жизнь. 1994. № 2. С. 6–11.
3. *Сажин М.В., Черепашук А.М.* Микролинзирование двойных и кратных звезд // Письма в "Астрон. журн.". 1994. Т. 20, № 9. С. 613–619.
4. *Богданов М.Б., Черепашук А.М.* "Хроматический" эффект при гравитационном микролинзировании звезд // Там же. 1995. Т. 21, № 8. С. 570–573.
5. *Гинзбург В.Л.* О физике и астрофизике. М.: Бюро "Квантум", 1995.
6. *Захаров А.Ф.* Гравитационные линзы и микролинзы. М.: Янус-К, 1997.

\* \* \*

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, член-корреспондент РАН. Научные интересы: физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики. Автор свыше 200 научных работ и десяти монографий.