

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

523.84

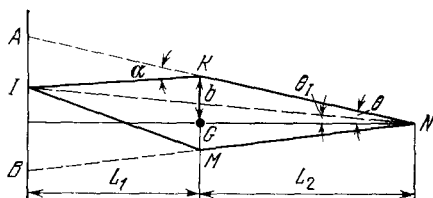
**ДВОЙНОЙ КВАЗАР QSO 0957 + 561 А, В —
ГРАВИТАЦИОННАЯ ЛИНЗА?****В. Ф. Муханов****1. ВВЕДЕНИЕ**

Прошло уже более года с момента появления первого сообщения Вольша и др.¹ об открытии уникальной пары квазаров QSO 0957 + 561 А, В. С тех пор наблюдения этого объекта проводились во многих обсерваториях мира. Квазары исследовались в различных диапазонах длин волн — от радио до ультрафиолетового, — и к настоящему времени накоплен большой наблюдательный материал, по-видимому, достаточный, чтобы уже можно было сделать довольно определенные выводы о природе этого феномена. Вольш и др.¹ обнаружили, что два квазара QSO 0957 + 561 А, В, приблизительно одинаковой яркости ($I_B/I_A \sim 0,8$), угловое расстояние между которыми составляет $5,7''$, имеют одинаковое красное смещение $Z = 1,41$ и почти идентичные спектры. Естественным образом возникло предположение, что на самом деле мы видим не два различных квазара, а один, изображение которого расщеплено на два гравитационной линзой. Что же представляет собой гравитационная линза?

2. ГРАВИТАЦИОННАЯ ЛИНЗА

Одним из замечательных следствий общей теории относительности, блестяще подтвердившимися наблюдениями, явилось предсказание искривления траектории световых лучей в гравитационном поле массивных объектов. Эффект гравитационной линзы целиком связан с этим явлением. На возможность существования такого рода эффекта впервые указал А. Эйнштейн².

Чтобы уяснить принцип действия гравитационной линзы, рассмотрим следующую простую модель (см. рисунок). Пусть свет от точечного источника I распространяется к наблюдателю N . Предположим, что вблизи прямой IN ($\theta_1 \ll 1$) находится массивный гравитирующий объект G . Вследствие отклонения траектории световых лучей на угол α гравитационным полем G вместо одного пучка лучей (IN), приходящего от источника I к наблюдателю N , может быть несколько. В случае сферически-симметрич-



Схематическое изображение гравитационной линзы.

В присутствии гравитирующего объекта G свет от источника I до наблюдателя N доходит по двум траекториям, IKN и IMN , и соответственно наблюдаются два изображения (A и B) одного источника I .

ного объекта G угол отклонения света α при прохождении на расстоянии b от его центра равен

$$\alpha(b) = 4\gamma M(b) b^{-1} c^{-1}, \quad \alpha \ll 1, \quad (1)$$

где $M(b)$ — проектируемая на нас масса внутри b , γ — гравитационная постоянная, c — скорость света. Кроме того, из рисунка нетрудно видеть, что при $\alpha, \theta, \theta_I \ll 1$ имеет место простое геометрическое соотношение

$$(L_1 + L_2) \theta_I + \alpha(b) L_1 = \theta (L_1 + L_2). \quad (2)$$

Так как $b = L_2 \theta$, то из (1) и (2) получаем следующее уравнение для θ :

$$\theta^2 - \theta_I \theta - \frac{4\gamma}{L_2(L_1 + L_2)c} M(L_2 \theta) = 0. \quad (3)$$

В случае точечной массы G $M(L_2 \theta) = M_0 = \text{const}$, уравнение (3) является квадратным и имеет два решения. Следовательно, свет от I доходит до наблюдателя по двум траекториям (IMN , IKN), и наблюдатель будет видеть два изображения одного источника I (A и B на рисунке). Если бы гравитирующий объект находился точно на прямой, соединяющей источник с наблюдателем, то изображение квазара, как нетрудно видеть, представляло бы собой кольцо. При смещении G с прямой, вследствие асимметрии, кольцо превращается в два сильно астигматичных изображения, лежащих в плоскости, проходящей через I , N и G .

В случае протяженного объекта G ситуация существенно усложняется. Уравнение (3), вообще говоря, является трансцендентным, так как зависимость $M(L_2 \theta)$ может быть произвольной. Расчеты показывают³, что в случае галактики, для наиболее правдоподобной модели распределения плотности в ней, число решений уравнения (3), а следовательно, и число изображений, будет нечетным (1, 3 и т. д. изображений, скорее чем два).

Отметим также, что, в отличие от ситуации с точечной массой, где для получения сравнимых яркостей изображений A и B требуется, чтобы G находился почти точно посередине между изображениями источника (для QSO 0957 + 561 смещение должно быть $\leq 0,1''$), для протяженных объектов требование на геометрию линзы ослабляются^{7, 8}. Это повышает вероятность образования линз, подобных QSO 0957 + 561 A, B, на три порядка.

Перейдем теперь к описанию наблюдений двойного квазара, выполненных в последнее время. Прежде всего отметим, что замечательная идентичность их спектров была подтверждена в работах Вейманна и др.⁴ и Уиллза и Уиллза⁵.

3. РАДИОНАБЛЮДЕНИЯ

Прямой проверкой гипотезы гравитационной линзы являются радионаблюдения QSO 0957 + 561 A, B, выполненные Пули и др.⁶, Робертсом и др.,⁷ Поркасом и др.⁸ Радиисточники имеют сложную структуру, простирающуюся до $12''$ вокруг квазаров. Более яркий квазар пары (A) находится почти в центре линейной радиоструктуры, состоящей из четырех ярко выраженных компонент. Квазар B является компактным радиисточником, возможно, слабо вытянутым ($\sim 1,5''$) вдоль линии, соединяющей A и B по направлению к A, в то время как A представляет собой точечный радиисточник (радиопротяженность $A \leq 1''$).

Отсутствие около B какой-либо радиоструктуры, соответствующей найденной вблизи A, трудно совместить с простой моделью для гравитационной линзы. Однако если объект G (см. рисунок) является протяженным (например, галактика), интерпретация радионаблюдений не является

проблемой. Соответствующая радиопротяженность В может быть обусловлена «линзовой» галактикой G , а асимметрия галактики, и, возможно, наличие скопления на пути между нами и квазаром, вполне могут объяснить асимметрию наблюдаемой радиоструктуры ³.

4. ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Другим очевидным тестом для рассматриваемой гипотезы является нахождение и исследование гравитирующего объекта G (предположительно галактики). Наблюдения подобного рода чрезвычайно трудны. Если галактика находится приблизительно на полпути между нами и квазаром, то изображение ее должно быть очень слабым. Наблюдения, проведенные группой американских астрофизиков, увенчались успехом. Янг и др. ³ нашли, что на расстоянии $0,8''$ от В расположена слабосветящаяся галактика 18—19 звездной величины, с красным смещением $Z \sim 0,4$ ^{3,5*}). Существование других объектов между А и В исключается на уровне 25 звездной величины. Зная красное смещение, можно найти светимость галактики. Для $Z \sim 0,4$ полная светимость ее должна быть $\sim 2 \cdot 10^{11} L_{\odot}$, что соответствует светимости типичных гигантских эллиптических галактик.

Янг и др. ³ нашли вблизи квазаров ассоциацию галактик, образующую, как они предполагают, скопление, членом которого является «линзовая» галактика. Расчеты линзы, учитывающие наличие скопления галактик, очень сложны и неоднозначны. Однако при разумном выборе параметров может быть получена картина, близкая к наблюдаемой. Выше отмечалось, что в случае галактики, по-видимому, должны наблюдаться три изображения квазара, скорее чем два. В рамках модели, рассчитанной Янгом и др., квазар пары должен состоять из двух тесных ($\leq 0,2''$) неразрешенных компонент.

5. НАБЛЮДЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ

Инфракрасные (IR) наблюдения QSO 0957 + 561 А, В проводились Сойфером и др. ⁹ и Лебофским и др. ¹⁰. Было найдено, что вблизи В существует сильный IR источник, который авторы интерпретируют как галактику. Типичные характеристики ее, такие как IR спектр, светимость ($L \sim 2 \cdot 10^{11} L_{\odot}$) и другие, согласуются с параметрами гигантской эллиптической галактики, находящейся при $Z \sim 0,4$. Кроме того, подобие и необычность IR спектров самих квазаров является косвенным аргументом в пользу гравитационной линзы.

Модель гравитационной линзы предсказывает постоянство отношения потоков наблюдаемых компонент А и В во всех диапазонах длин волн, при условии, что нет существенной разницы в поглощении для пучков лучей, отвечающих различным изображениям квазара. Исследования в ультрафиолетовом (UV) диапазоне показали, что поглощение, по-видимому, несущественно ¹¹. Отношение потоком компонент В и А удивительно одинаково и составляет $\sim 0,8$ в радио, инфракрасном, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах, что является сильным подтверждением гипотезы гравитационной линзы ³⁻¹¹.

*) Определение красного смещения галактики довольно ненадежно. Янг и др. ³ и Уиллз и Уиллз ⁵ исходят из предположения, что разница наблюдаемых спектров квазаров А и В в красной области обусловлена галактикой. Интерпретируя излом в спектре В как линию С II, они находят Z . Однако Б. В. Комберг обратил внимание на то, что разница в спектрах квазаров может быть обусловлена линией поглощения пыли вблизи В. Все это заставляет относиться к определению красного смещения галактики с осторожностью.

6. ДАЛЬНЕЙШИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Хотя получены многочисленные свидетельства в пользу того, что пара квазаров QSO 0957 + 561 A, B представляют собой гравитационную линзу, для окончательного разрешения поставленных вопросов необходимы дальнейшие наблюдения. Эти наблюдения включают в себя несколько аспектов.

Наличие корреляции переменности квазаров A и B может дать прямое подтверждение рассматриваемой гипотезы. В настоящее время такие наблюдения проводятся на 6-метровом телескопе в ст. Зеленчукская (СССР)*). Важнейшим тестом является также исследование радиоструктуры компоненты B на предмет выявления ее двойственности.

Наблюдения другого рода связаны с исследованием «линзовой» галактики и скопления, членом которого, как предполагают, она является. В частности, необходимо более надежное определение красного смещения галактик**). Также весьма важно найти дисперсию скоростей «линзовой» галактики и галактик скопления, геометрию скопления и т. д. для определения неизвестных параметров линзы.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время мы довольно уверенно можем сказать, что первая во Вселенной гравитационная линза обнаружена. Будет удивительно, если наши представления о природе QSO 0957 + 561 A, B, радикально изменятся.

Открытие гравитационных линз является подтверждением общей теории относительности, качественно таким же, как и отклонение света Солнцем. Оно прямо свидетельствует о космологическом расстоянии до квазаров. Кроме того, гравитационные линзы, если они будут найдены в достаточно большом количестве***), явятся новым мощным инструментом для определения космологических параметров (постоянная Хаббла и др.).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Walsh D., Carswell R. F., Weymann R. J.—Nature, 1979, v. 279, p. 381.
2. Эйштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966.— Т. 2, с. 436.
3. Young P., Gunn J. et al. Preprint.— Hale Observatories, 1980.
4. Weymann R. J., Chaffee F. H., Walsh D., Carswell R. F.—Astrophys. J. Lett., 1979, v. 233, p. 143.
5. Wills B. J., Wills D.—Astrophys. J., 1980, v. 238, p. 1.
6. Pooley G. G., Browne I. W. A. et al.—Nature, 1979, v. 280, p. 461.
7. Roberts D. H., Greenfield P. E., Burke B. F.—Science, 1979, v. 205, p. 894.
8. Porcas R. W., Booth R. S. et al.—Nature, 1979, v. 282, p. 385.
9. Soyrfer B. T., Neugebauer G. et al.—Nature, 1980, v. 285, p. 91.
10. Lebofsky M. J., Rieke G. H. et al.—Ibid., p. 385.
11. Gondhalekar P. M., Wilson R.—Ibid., p. 461.

*) Наблюдения, проведенные Бескиным Г. М., Неизвестным С. И. и Шварцманом В. Ф., показывают, что компоненты двойного квазара «поменялись ролями» в результате его медленной переменности и временной задержки между изображениями. В октябре 1980 г. яркость компоненты B была больше яркости компоненты A, в то время как в течение 1979 г. и первой половины 1980 г. объект A был ярче B.

**) Можно надеяться, что в ближайшее время красное смещение «линзовой» галактики будет определено более надежно по линии поглощения Mg II, которая, к сожалению, является довольно слабой.

***) Недавно появилось сообщение Вейманиа и др. об открытии системы трех квазаров QSO PG 1115 + 08. Угловое расстояние между компонентами системы ~2—3'', красное смещение 1,71 и, кроме того, спектры квазаров очень похожи. Авторы предполагают, что эта система представляет собой гравитационную линзу.