

логия, 1985. № 1. С. 77. [14] Перегрин Д. Нелинейные волновые процессы. М., 1987. С. 37. [15] Вольцингер А. Е., Клеванный К. А., Пелиновский Е. Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л., 1989. [16] Миллер М. А., Островский Л. А. // Физическая энциклопедия. М., 1988. Т. 1. С. 325. [17] Korteweg D. J., de Vries G. // Phil. Mag. and J. of Science. 1895. 39, series 5. P. 422. [18] Пелиновский Е. Н. // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1971. № 2. С. 68. [19] Johnson R. S. // Phys. Fluids. 1972. 15. P. 1693. [20] Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М., 1977. [21] Ursell F. // Proc. Camb. Phil. Soc. 1953. 49. P. 685. [22] Захаров В. Е., Манаков С. В., Новиков С. П., Питаевский Л. П. Теория солитонов. М., 1980. [23] Арсеньев С. А. // Тр. Совещ. по прогнозу цунами. Обнинск, 1988. С. 19. [24] Арсеньев С. А., Шелковников Н. К. Динамика вод шельфов. М., 1989. [25] Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. Л., 1982.

Поступила в редакцию
21.03.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 3

АСТРОНОМИЯ

УДК 524.47

ШАРОВОЕ СКОПЛЕНИЕ M15: ЭФФЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННОЙ ФОКУСИРОВКИ

М. Ю. Маслаков

(ГАИШ)

Проведено исследование центральной части шарового звездного скопления M15 для поиска эффектов гравитационной фокусировки. Путем сравнения величины дисперсии яркости звезд центральной части скопления, где вероятность данного процесса больше, с дисперсией в удаленной от центра области установлена возможность существования этого эффекта. Методом максимального правдоподобия произведена оценка величины дисперсий.

Введение

Целью настоящей работы является изучение эффектов гравитационной фокусировки (ГФ) электромагнитного излучения в шаровом звездном скоплении. Из теоретического анализа данного явления, выполненного М. В. Сажиным [1], следует, что шаровые скопления являются областями, наиболее благоприятными для реализации условий, приводящих к возникновению эффекта гравитационной фокусировки. В анализируемой схеме гравитационными линзами (ГЛ) могут быть невидимые непосредственно звезды, принадлежащие к нижней части главной последовательности диаграммы Герцшпрунга—Рессела, предположительно существующие в скоплении белые карлики и нейтронные звезды. Проходя достаточно близко в картинной плоскости возле звезды, линза своим гравитационным полем фокусирует излучение последней. Под фокусировкой в данном случае подразумевается возмущение, вносимое гравитационным полем линзы. Оно не является полным аналогом обычной оптической фокусировки, но из-за ряда сходных черт получило такое определение. Эта фокусировка в свою очередь приводит к увеличению яркости звезды.

Явление гравитационной линзы было впервые открыто во внегалактической астрономии, хотя исторически сначала рассматривалось для звезд Галактики [2]. Оценка вероятности наблюдения этого эффекта среди звезд нашей Галактики показала, что она очень мала. Не оспари-

вая правильность такого результата, укажем, что оценка проводилась для обычного звездного населения Галактики. Однако в нашей Галактике есть области повышенной звездной плотности — шаровые звездные скопления. Там вероятность наблюдения эффекта усиления светового потока посредством гравитационного поля должна быть значительно выше, чем в областях, принадлежащих диску Галактики.

1. Оценка величины и вероятности ожидаемого эффекта

Оценка величины искомого эффекта являлась основой для организации наблюдательной программы. Можно показать, что луч света, проходящий на минимальном расстоянии b от центра объекта с массой M , будет отклоняться от прямолинейной траектории на угол [3]

$$\varphi = \frac{4GM}{bc^2}, \quad (1)$$

где G — гравитационная постоянная, c — скорость света.

Анализ конкретного расположения звезды-источника, ГЛ и наблюдателя, выполненный в работе [1], дает нам соотношение, определяющее величину усиления светового потока в процессе ГФ:

$$A = (1 - 4r_g^2 D^2 / b^4)^{-1}, \quad (2)$$

где D — расстояние между линзой и источником, r_g — гравитационный радиус линзы.

Условие измеримого усиления выберем в виде $\Delta m = 0,1$, т. е. изменение видимой звездной величины примем равным 0,1. Это соответствует значению $A = 1,1$. Из условия большего значения ($A \geq 1,1$) получим неравенство для параметра: $b \leq \sqrt{6} r_g D$. Цилиндр с радиусом b и длиной D охватывает объем, попав в который, ГЛ изменит яркость звезды-источника не менее чем на $0,1^m$.

Итак, мы оценили размер «рабочей» области, приходящейся на отдельную звезду. Располагая этой характеристикой, определим полный «рабочий» объем, приходящийся на те звезды, за яркостью которых мы можем следить в данном скоплении. После этого определим вероятность единичного события, заключающегося в том, что отдельная ГЛ, движущаяся в скоплении, будет находиться в одном из «рабочих» объемов всех наблюдаемых звезд и вследствие этого вызывать эффект ГФ. Эта вероятность грубо равна отношению суммарной «рабочей» площади оснований тех «рабочих» цилиндров, которые окружают наблюдаемые звезды, к полной площади рассматриваемой части скопления S :

$$P = \sum_i \pi b^2 / S. \quad (3)$$

Теперь будем мысленно увеличивать количество линз и определим функцию распределения вероятности количества событий. Данная модель является упрощенным вариантом, в котором отдельное событие является испытанием Бернулли и описывается биномиальным законом:

$$P(k) = C_N^k P^k (1 - P)^{N-k}, \quad (4)$$

где N — количество ГЛ, которые располагаются в исследуемом объеме скопления, k — количество ожидаемых эффектов, P — вероятность единичного события, определенная нами ранее.

2. Проведение и обработка наблюдений

Снимки скопления M15, которые служили исходным материалом как для построения функции видимой звездной плотности, необходимой для оценки вероятности реализации эффекта ГФ, так и для поиска самого эффекта, были получены в Высокогорной Среднеазиатской экспедиции ГАИШ МГУ. Наблюдения проводились на телескопе Цейсс-600, у которого при помощи дополнительной оптики фокусное расстояние было увеличено до 22,5 м. Это увеличение фокусного расстояния необходимо для того, чтобы изображение звезды (аппаратная функция системы «телескоп плюс атмосфера») не искажалось недостаточным разрешением светоприемника. Экспозиция составляла 30 мин. Каждую ночь вблизи меридиана получалась серия снимков. После проявления из полученной серии выбирался снимок с наилучшим качеством изображения.

По полученным изображениям M15 по стандартной методике [4] была вначале построена функция видимой звездной плотности, по которой оценивалось то количество звезд, за яркостью которых мы можем следить с помощью нашей аппаратуры. Количество же зарегистрированных звезд в свою очередь определяет вероятность наблюдения эффекта ГФ. Оценка вероятности, полученная таким образом, является заниженной по сравнению с теоретическими оценками, в которых, как правило, учитываются все звезды скопления.

По количеству звезд была проведена оценка вероятности наблюдения события ГФ. Определение вероятности эффекта как отношения суммарной «рабочей» площади, приходящейся на наблюдаемые звезды, к полной площади рассматриваемой части скопления предполагает, что ГЛ с одинаковой вероятностью находится в любой точке этой области.

Итак, вероятность того, что отдельная ГЛ, находящаяся в выбранной области скопления, приведет к эффекту ГФ, равна $P \simeq 10^{-5}$.

Для данной оценки единичного благоприятного исхода видно, что для того, чтобы вероятность обнаружить хотя бы один эффект была близка к единице, необходимо, чтобы в этой области скопления помимо звезд, за которыми мы наблюдаем, находилось еще около миллиона объектов, которые могут являться ГЛ. Эта величина не является невероятной для такого объекта, как M15, в котором общее количество звезд порядка 10^7 .

Оценка вероятности существования интересующего нас эффекта, имеющего амплитуду $\Delta m = 0,1^m$, интересна прежде всего тем, что показывает статистическую представимость эффекта, а это позволяет для выделения интересующего нас сигнала воспользоваться дисперсионным анализом. В основе способа выделения сигнала лежит представление об аддитивности дисперсии величины, являющейся откликом нашей системы на поступающий сигнал. Предполагается, что добавочное возмущение, возникающее за счет ГФ, приведет к возрастанию дисперсии в значении этого отклика для группы звезд, расположенных в области более вероятного возникновения эффекта ГФ.

Для поиска этого процесса была предложена следующая схема измерения. На ирис-фотометре по всем полученным фотографиям были измерены яркости для двух групп звезд. Одна группа выбиралась из области, окружающей ядро, где вследствие большей плотности звезд можно ожидать большей частоты появления эффекта, чем на периферии скопления, где была выбрана вторая группа звезд. В процессе обработки серии фотографий, разнесенных во времени, измерялись от-

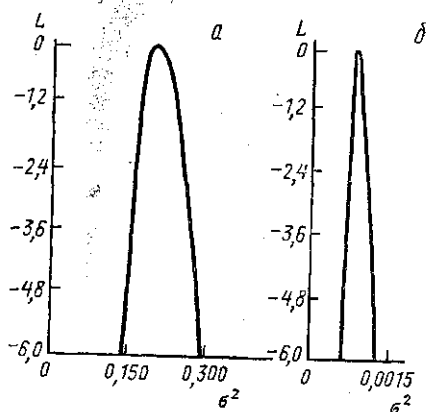
клонения фактических разностей блеска выбранных пар звезд от средних величин их разностей $\overline{\Delta m_i}$, полученных в результате усреднения разностей для данных пар по всей серии снимков. Эти отклонения образовали единый массив, который использовался для оценки величины дисперсии в двух сравниваемых между собой группах звезд, находящихся на периферии и в центре. Причем дисперсия для центральной области в случае наличия эффекта должна быть больше.

Оценка дисперсии проводилась методом максимального правдоподобия [5] в предположении, что отклонения разностей блеска для всех пар звезд от их средних величин $\overline{\Delta m_i}$ распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием. Для каждой пары усредненная разность приравнивалась нулю, а отклонения образовывали сумму ω , которая является параметром логарифмической функции правдоподобия

$$L(\sigma^2|\omega) = -\frac{n}{2} \ln \sigma^2 - \frac{\omega}{2\sigma^2} + \frac{n}{2} \ln \frac{\omega e}{n}, \quad (5)$$

где $\omega = \sum_{i=1}^n \{\overline{\Delta m_i} - (m'_i - m''_i)\}$, n — количество выбранных пар звезд, i — номер выбранной пары, m'_i и m''_i — звездные величины i -й пары. Максимум функции правдоподобия совпадает с искомым значением дисперсии, а интервал по уровню —2 определяет 95%-й доверительный интервал.

Построенные логарифмические функции правдоподобия (рисунок) показывают значимое увеличение дисперсии для внутренней части скопления, что подтверждает возможность существования механизма ГФ. На физическую реальность указывает тот факт, что величины флуктуаций не коррелированы в пределах одной фотопластинки, как это было бы в случае, если бы флуктуации вызывались изменением в качестве изображения, т. е. воздействием, охватывающим всю группу наблюдаемых звезд. Обнаруженное возрастание дисперсии разностей блеска выбранных пар звезд в центральной части скопления можно интерпретировать как эффект ГФ, хотя необходимо рассмотреть возможность существования и других процессов изменения яркости, чувствительных к возрастанию пространственной плотности звезд в скоплении.



Функция правдоподобия внутренней (а) и внешней (б) частей скопления

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сажин М. В. // Астрон. циркуляр. 1987. № 1500. [2] Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М., 1965. Т. 2. С. 436. [3] Вейнберг С. Гравитация и космология. М., 1975. С. 204. [4] Холопов П. Н. Звездные скопления. М., 1981. С. 480. [5] Худсон Д. Статистика для физиков. М., 1970. С. 124.

Поступила в редакцию
12.04.89