

УДК 524.4-333

## ЛОКАЛЬНАЯ СКРЫТАЯ МАССА

О.Ю.МАЛКОВ

Поступила 26 июля 1994

Принята к печати 29 июля 1994

Допуская существование локальной скрытой массы, обсуждается ее количество, природа и пространственное распределение, делается акцент на коричневые карлики и менее массивные объекты. Показано, что при сделанных предположениях проблема локальной скрытой массы является, по существу, проблемой определения нижнего предела масс образующихся звезд. Предлагается, кроме того, еще один возможный источник локальной скрытой массы: фотометрически неразрешенные двойные системы. Показано, что при определенных условиях они могут внести значительный вклад в количество видимой материи в солнечной окрестности.

1. *Введение.* Одной из важнейших проблем современной астрономии является природа скрытой массы во Вселенной. В широком диапазоне масштабов динамика астрономических систем определяется этим скрытым веществом, обнаруживающим свое присутствие через гравитационные эффекты. Эта проблема является чрезвычайно важной, поскольку решение ряда астрофизических вопросов могло бы быть легко получено, будь природа скрытой массы однозначно установлена.

Необходимо ответить на вопросы: каково количество скрытой массы, ее распределение и природа. Принято рассматривать эти вопросы в приложении к различным астрономическим системам. В порядке уменьшения масштаба это скопления и группы галактик, эллиптические галактики, спиральные галактики, карликовые неправильные и сферические галактики, галактическое гало, солнечная окрестность. Далеко не во всех перечисленных фрагментах Вселенной наличие скрытой массы неоспоримо. Не исключено также наличие т.н. фоновой скрытой массы. Плотность скрытой массы известна весьма приближенно, но имеет тенденцию увеличиваться с увеличением масштаба исследуемой системы.

До сих пор остается также открытым один из наиболее фундаментальных вопросов: имеет ли скрытая масса барионную или небарионную природу. Не исключено также, что скрытая масса является смесью этих двух видов материи.

Статья посвящена проблеме скрытой массы в солнечной окрестности. Другие астрономические системы обсуждаются в этом аспекте в относительно недавнем обзоре Эшмана [1].

Второй раздел статьи содержит основные определения и краткий обзор работ, посвященных проблеме объяснения локальной скрытой массы. В третьем разделе исследуется вклад коричневых карликов в динамическую массу солнечной окрестности, как наиболее вероятных кандидатов в резервуар скрытой массы. Здесь же рассматривается несколько приложений, основанных на гипотезе присутствия в солнечной окрестности достаточного количества коричневых карликов. Четвертый раздел посвящен еще одному возможному кандидату в объекты, в которых содержится скрытая масса — фотометрически неразрешенным двойным системам. Наконец, пятый раздел статьи содержит основные выводы.

**2. Количество и распределение скрытой массы.** Как известно, для обозначения плотности массы в окрестностях Солнца, необходимой для объяснения движения звезд перпендикулярно галактической плоскости, применяется термин "предел Оорта". Многие авторы определяли его численное значение. Крисьюнас [2] дает обзор проведенных до того времени исследований с указанием значений предела Оорта и методов его получения. Значения эти весьма различны и группируются около  $0.2m_{\odot} / \text{пк}^3$ . Наблюдаемая локальная плотность массы (звезд, газа, пыли) отличается от предела Оорта и составляет, по различным оценкам,  $0.07-0.09m_{\odot} / \text{пк}^3$ . Расхождение между ней и пределом Оорта называют "скрытой массой". Ее выражают также в  $m_{\odot} / \text{пк}^3$  или процентном отношении к массе видимого вещества.

Йнэвээр и Эйнасто [3] высказывают точку зрения, что проблемы скрытой массы не существует, поскольку ошибки в определении динамической плотности (предела Оорта) могут быть слишком велики. Можно записать следующее выражение:

$$\rho_{dyn} \sim \left( \frac{\sigma_z^*}{\sigma_z} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\rho_{dyn}$  — динамическая плотность,  $\sigma_z^*$  — дисперсия z-скоростей и  $\sigma_z$  — дисперсия z-координат звезд. "Загрязнение" выборки небольшим количеством звезд гало или старого диска может существенно завысить значение  $\rho_{dyn}$ , увеличив числитель и оставив без изменения знаменатель в формуле (1).

Крисьюнас [2] делал попытку вычислить плотность массы ненаблюдаемых карликов, рассматривая дисперсии трех ансамблей: всей популяции звезд, наблюдаемой и ненаблюдаемой части звезд. Полученное им значение оказалось близким к  $0.02m_{\odot} / \text{пк}^3$ ; с учетом этой величины он довел "фотометрическую" плотность до  $0.09m_{\odot} / \text{пк}^3$ , в то время как динамическая плотность принималась им равной  $0.14m_{\odot} / \text{пк}^3$ .

Значение скрытой массы, как показал Бэкол [4], зависит от ее распределения в Галактике. Он нашел, что общая плотность вещества в окрестностях Солнца равна  $0.185m_{\odot} / \text{пк}^3$ , половину которой составляет наблюдаемая масса, а половину — ненаблюдаемая (в предположении, что они распределены одинаково). Из более поздних работ можно упомянуть статью Бэкола и др. [5], в которой авторы, предполагая распределение невидимого вещества пропорциональным видимому, оценили значение скрытой массы в 53%.

Предположив реальность существования разницы между наблюдаемой плотностью звезд (а также газа и пыли) и динамической плотностью вещества в окрестностях Солнца, естественно попытаться определить класс объектов, содержащих в себе (полностью или преимущественно) скрытую массу. Такие попытки предпринимались неоднократно.

Хилс [6] из данных о межзвездной экстинкции и подсчетов метеоров и комет установил, что ни барионный газ, ни элементарные частицы, ни пылинки, ни межзвездные метеориты и кометы — то есть никакие тела с массой  $< 10^{22}$  грамм — не могут содержать скрытую массу (или только крайне незначительную ее долю). То есть минимальная масса объектов, ее образующих,  $m_{\min} > 5 \cdot 10^{-12} m_{\odot}$ . С другой стороны, согласно Бэколу и др. [7], скрытая масса состоит из объектов с  $m < 2m_{\odot}$ , коль скоро в галактическом диске существуют широкие двойные пары.

Д'Антони и Мацителли [8] исследовали эту проблему, учитывая вклад белых и черных карликов. Нужно отметить, что звезды на поздних стадиях эволюции — достаточно многообещающий, на первый взгляд, резервуар скрытой массы, поскольку являются слабосветящимися объектами. Однако пост-массивные звезды — черные дыры и нейтронные звезды — не могут быть признаны удовлетворительными кандидатами в силу своей крайней малочисленности (если не выдвигать специальных предположений о характере звездообразования в диске Галактики). Что же касается объектов, представляющих собой звезды умеренных масс на поздних стадиях эволюции, то по оценкам Д'Антони и Мацителли [8] в сфере радиусом 20пк содержится около 430 таких объектов интегральной массы порядка  $300m_{\odot}$ . Плотность этих объектов, среди которых

белые и черные карлики представлены примерно поровну, составляет всего  $0.009 m_{\odot} / \text{пк}^3$ . Авторами была сделана попытка увеличить это значение: несколько изменив наклон начальной функции масс, а также массу белого карлика как функцию массы исходной звезды, они получили значение  $0.014 m_{\odot} / \text{пк}^3$ , которое, конечно, тоже недостаточно для объяснения феномена скрытой массы. Следует, тем не менее, заметить, что картина может измениться, если скорость звездообразования в прошлом была существенно выше современной.

Считая, что локальная скрытая масса существует и ее величина близка по значению к наблюдаемой (или фотометрической) массе, мы исследовали два возможных класса объектов, в которых она может содержаться.

3. *Нижний предел звездных масс и скрытая масса.* После того, как рядом авторов (см. выше) была показана несостоятельность разного класса объектов в качестве резервуара скрытой массы, достаточно естественным является предположение, что она может содержаться в звездах малых и сверхмалых масс. Таких звезд достаточно много и, одновременно, это весьма слабосветящиеся объекты. Проблема обнаружения коричневых карликов при различных предположениях об их распределении и количестве в солнечной окрестности рассматривается, например, в [9]. Предположения о наличии скрытой массы в этих объектах (красных и, преимущественно, коричневых карликах) делались рядом авторов [8, 10, 11] и не могут рассматриваться в отрыве от вопроса о начальной функции масс таких звезд.

Если все звезды диска формируются при одинаковых физических условиях, то было бы естественно предположить, что распределение коричневых карликов продолжает распределение красных карликов и более массивных звезд главной последовательности. Другими словами, нет оснований предполагать, что минимальная масса, до которой может идти звездная фрагментация, совпадает с минимальной массой, при которой еще может осуществляться горение водорода. Это означает, что какое-то количество коричневых карликов должно существовать в диске. То обстоятельство, что монотонно возрастающая при  $m \rightarrow 0$  начальная функция масс Солпитера [12] хорошо описывает функцию светимости слабых звезд, позволяет естественным образом объяснить локальную скрытую массу наличием проэволюционировавших коричневых карликов. По оценкам Д'Антони и Маццетелли [8] для этого необходимо, чтобы минимальная масса коричневых карликов не превышала  $m_{\min} = 0.003 m_{\odot}$ .

Моделируя функцию светимости слабых звезд с помощью эволюционных треков коричневых карликов [13], мы исследовали попутно и проблему скрытой

массы. Выяснилось, что при сделанных в [13] предположениях скрытая масса составляет более 40% для степенной начальной функции масс и 30% для логнормальной (нормальной в логарифмической шкале) начальной функции масс. Этот результат практически не зависит от предположений о скорости звездообразования: постоянная и падающая скорости звездообразования приводят к значениям, различающимся крайне незначительно. Несколько другая картина получается при использовании вспышечного звездообразования: в этом случае локальная скрытая масса составляет всего 8–10% для степенной начальной функции масс. Далее расчеты показывают, что относительное количество локальной скрытой массы не менялось, по крайней мере, последние 8 млрд. лет.

Отметим, что логнормальная начальная функция масс (в отличие от степенной) не может восполнить недостаток локальной скрытой массы. Значение невидимой массы, предсказываемой степенной начальной функцией масс, примерно в полтора раза превышает локальную скрытую массу, оцененную с помощью логнормальной начальной функции масс.

Приведенные оценки сделаны в предположении о постоянстве нижнего предела звездных масс. В противном случае, как показывают результаты расчетов эволюции функции светимости слабых звезд, значение скрытой массы является функцией времени (оно растет, в частности, с уменьшением минимальной звездной массы со временем).

Можно поставить и обратную задачу: найти нижний предел масс образующихся звезд, задавшись некоторым значением предела Оорта. Сделаем оценки для степенной начальной функции масс Солпитера [12] (ее можно рассматривать, в принципе, как частный случай функции Миллера и Скало [14] с максимумом далеко в малых массах и крутым падением после него). Тогда значение скрытой массы просто зависит от нижнего предела масс образующихся звезд. Наши оценки показывают следующее. Пусть

$$\frac{dN}{dm} = x m^{-2.35} = \frac{dN}{dM_V} \frac{dM_V}{dM_{bol}} \left| \frac{dM_{bol}}{d \lg L} \right| \left| \frac{d \lg L}{dm} \right|, \quad (2)$$

где в левой части стоит начальная функция масс, а правая часть содержит функцию светимости, шкалу болометрических поправок, формулу перехода от светимостей к звездным величинам и соотношение масса – светимость, соответственно. Используя функцию светимости из [15], шкалу болометрических поправок из [16] и различные соотношения масса – светимость, найдем, что значение  $x$  колеблется в пределах от 420 до 560.

Значение предела Оорта по современным оценкам составляет от  $0.075$  до  $0.23 m_{\odot} / \text{пк}^3$ . Он же может быть вычислен как

$$\rho = \frac{1}{V} \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} x m^{-2.35} m dm, \quad (3)$$

где  $V$  — объем пространства с радиусом 20 пк (сфера исчерпанности упомянутой функции светимости), а  $m_{\min}$  и  $m_{\max}$  — минимальная и максимальная масса звезд, соответственно. Величина  $m_{\max}$  считалась равной  $60m_{\odot}$ ; ее изменения в разумных пределах практически не влияют на результат. Неопределенности значения предела Оорта и коэффициента  $x$  приводят к довольно широким рамкам для искомого  $m_{\min}$ :  $0.3 - 0.004m_{\odot}$ .

Первый предельный случай говорит о том, что распределение маломассивных звезд по массам не соответствует степенному закону с фиксированным показателем  $-2.35$ .

Второй предельный случай ( $m_{\min} = 0.004m_{\odot}$ ) соответствует массам порядка или несколько больше массы Юпитера. Таким образом, предположения о существовании изрядного количества скрытой массы в окрестностях Солнца и распределении образующихся тел по степенному закону дают нам основания экстраполировать функцию Солпитера вплоть до планетных масс. Это дает возможность (чисто формально) оценить количество таких объектов в некотором объеме пространства. Искомое количество

$$n = V x \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} m^{-2.35} dm, \quad (4)$$

где в качестве объема пространства  $V$  рассмотрим объем Солнечной системы, точнее пространства, в котором нам известны все планеты с массой порядка Юпитера ( $m_{\min}$  и  $m_{\max}$  — массы Сатурна и Юпитера, соответственно):

$$V = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{r}{206265} \right)^3. \quad (5)$$

Здесь в качестве  $r$  уместно взять значение 100 а.е. — расстояние, до которого нет известных планет-гигантов, во всяком случае, в плоскости эклиптики [17]. Используя в качестве нормировочного коэффициента  $x$  среднее значение  $x = 470$ , получим для количества планет юпитерианской массы в Солнечной системе  $n = 0.6$ , что не так уж далеко от истины ( $n = 1$ ).

Экстраполяция функции звездообразования на скорпланетные или даже планетные массы не являются некорректной, если рассматривать систему Солнце

— планета-гигант как частный случай двойной звезды. Как известно, чем больше угловой момент вращающегося газопылевого облака, тем на более ранней стадии возможно образование двойной системы. Широкие пары образуются раньше других из облаков, обладающих наибольшим моментом. Затем, на следующем этапе, образуются тесные двойные системы и, наконец, планетные системы. Газопылевые облака, из которых образуются последние, обладают меньшим угловым моментом, чем требуется для образования двойных звезд, но большим, чем угловой момент одиночной звезды. Это позволяет предполагать, что планетные и двойные (кратные) системы могут быть поставлены, в каком-то смысле, в один ряд, и между ними должно быть много общего.

Однако эксцентриситеты планетных орбит исчезающе малы, в то время как двойные звезды с периодами  $11 \leq P \leq 1000$  дней образуются, как показали Дюкенуа и Майор [18], со средним эксцентриситетом  $e = 0.34 \pm 0.07$ .

Предполагая, что скрытая масса содержится, в основном, в объектах типа Юпитера ( $10^{-3} m_{\odot}$ ), Хилс [6] нашел, что ближайшее к Солнечной системе такое тело может быть расположено на расстоянии  $\sim 6000$  а.е. и должно быть заметным объектом в каталоге IRAS.

Возвращаясь к оценке минимальной массы образующихся звезд и используя некоторые средние значения для коэффициента  $\chi$  и предела Оорта, получим величину  $m_{\min} \sim 0.06 m_{\odot}$ , что лежит несколько ниже границы, отделяющей коричневые карлики от красных.

В заключение этого раздела необходимо отметить, что недавние наблюдательные подтверждения эффекта микролинзирования [19,20] неоспоримо свидетельствуют о наличии в окрестностях Солнца известного количества сверхмаломассивных объектов.

4. *Скрытая масса в неразрешенных двойных.* Существенный вклад, который коричневые карлики и, вероятно, менее массивные тела вносят в солнечную окрестность, не исключают наличия других источников скрытой массы, одному из которых посвящен настоящий раздел. Фотометрически неразрешенные двойные системы могут, как будет показано ниже, служить резервуаром скрытой массы. Механизм эффекта следующий: пусть система, представляющаяся нам одиночной звездой с величиной  $V$ , состоит из компонентов со звездными величинами  $V_1$  и  $V_2$ . Наблюдая такую систему, мы оцениваем ее массу по интегральному блеску и эта фиктивная масса всегда оказывается меньшей, чем сумма масс компонентов. Так называемый "дефект массы",  $\delta m$ , составит

$$\delta m = \frac{m_1(V_1) + m_2(V_2)}{m(V)} - 1, \quad (6)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы компонентов, а  $m$  — фиктивная масса системы.

Можно показать, что дефект массы тем больше, чем ближе значения масс компонентов и максимален при отношении их масс  $q = 1$ . Точное его значение зависит, кроме того, от блеска системы и применяемого соотношения масса — светимость. Что касается последнего (а также функции светимости), то для численных оценок здесь использовались те же соотношения, что и для исследования эффекта неразрешенных двойных [21]. Рассматривая систему из двух одинаковых компонентов с блеском —  $6^m.25$  каждый (интегральный блеск системы будет равен —  $7^m$ ), получим для значения дефекта массы величину 47% (то есть 0.47 в принятых обозначениях). Далее, при сделанных в [21] предположениях об ансамбле неразрешенных двойных и рассматривая только звезды ярче  $17^m$ , мы оцениваем максимальный дефект массы такого ансамбля в 72%.

Таким образом, во всяком случае часть скрытой массы может содержаться в неразрешенных двойных системах. Более точные количественные оценки могут быть сделаны, когда вид локальной функции светимости слабых звезд будет известен более точно, а также когда удастся сделать реальные оценки доли неразрешенных двойных и их распределения по отношению масс компонентов.

**5. Выводы.** На основе проведенных исследований можно сделать следующие заключения.

Наиболее реальными кандидатами на резервуар скрытой массы в окрестностях Солнца являются коричневые карлики, объекты с массами от 0.001 до  $0.075m_{\odot}$ . Проблема скрытой массы, таким образом, есть проблема определения значения минимальной массы образующихся звезд. Для степенной начальной функции масс это значение может достигать массы Юпитера, для логнормальной — еще меньших масс. Кроме того, формальная экстраполяция функции Солпитера позволяет адекватно оценить количество планет-гигантов в Солнечной системе. Весьма перспективным инструментом обнаружения коричневых карликов и, возможно, менее массивных объектов являются специализированные космические обсерватории. Это, прежде всего, инфракрасный спутник IRAS, а также планируемые ISO (Infrared Space Observatory) и SIRT F (Space Infrared Telescope Facility). Кроме того, полезным источником может стать наземный обзор 2MASS ( $2 - \mu m$  All-Sky Survey).

В статье показано также, что при определенных условиях фотометрически неразрешенные двойные системы могут вносить существенный вклад в количество видимой материи в окрестностях Солнца.

В данной работе были сделаны попытки объяснить только локальную скрытую массу. Однако не исключено, что природа скрытой массы одинакова в самом широком диапазоне астрономических систем.

Автор благодарен А.Г.Масевич за ряд полезных замечаний. Работа была поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ 93-02-2942).

Институт Астрономии РАН

## LOCAL MISSING MASS

O.YU.MALKOV

Assuming that local missing mass exists, we discuss its possible nature, spatial distribution and amount, with accent on brown dwarfs and other low mass objects. It is shown in particular that the problem of local missing mass is connected with the problem of IMF and its low mass limit determination.

We also propose another possible source of local missing mass, and show that correct registration of photometrically unresolved binary systems can, under suitable conditions, significantly increase the amount of visible matter.

## ЛИТЕРАТУРА

1. K.M.Ashman, Publ. Astron. Soc. Pasif, 104, 1109, 1992.
2. K.Krisclunas, Astron. J., 82, 195, 1977.
3. M.Joeveer, J.Einasto, in "Highlights of Astronomy" ed. A.Muller, 4, 1977, p.33.
4. J.N.Bahcall, Astrophys. J., 276, 169, 1984.
5. J.Bahcall, C.Flynn, A.Gould, in "Dynamics of Disk Galaxies", ed. B.Sundellus, Goteborg, Sweden, 1991, p.105.
6. J.G.Hills, Astron. J., 92, 595, 1986.
7. J.N.Bahcall, P.Hut, S.Tremaine, Astrophys. J., 290, 15, 1985.
8. F.D'Antona, I.Mazzitelli, Astron. and Astrophys., 162, 80, 1985.
9. E.J.Kerins, B.J.Karr, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 266, 775, 1994.
0. A.Burrows, W.B.Hubbard, J.I.Lunine, Astrophys. J., 345, 939, 1989.
1. M.S.Bessell, Astron. J., 101, 662, 1991.
2. E.E.Salpeter, Astrophys. J., 121, 161, 1955.
3. О.Ю.Малков, А.Э.Пискунов, Астрофизика, 29, 504, 1988.
4. G.E.Miller, J.M.Scalo, Astrophys. J. Suppl. Ser., 41, 513, 1979.
5. R.Wielen, H.Jahrelss, R.Kruger, in "The Nearby Stars and the Stellar Luminosity Function",

- IAU Coll. 76, eds. A.G.D.Phillip, A.R.Uppgren, L.Davis Press, Schenectady, 1983, p.163.
16. П.Траати, Публ. Тартус. Астрофиз. обсерв., 44, 282, 1976.
17. Н.Н.Горькавый, Частное сообщение, 1993.
18. A.Duquennoy, M.Mauro, *Astron. and Astrophys.*, 248, 485, 1991.
19. C.Alcock et al., *Nature*, 365, 621, 1993.
20. E.Aubourg et al., *Nature*, 365, 623, 1993.
21. A.E.Piskunov, O.Yu.Malkov, *Astron. and Astrophys.*, 247, 87, 1991.