Где можно искать одиночные черные дыры?

М.Е.Прохоров и С.Б.Попов

Что такое черные дыры? Что мы о них знаем? Насколько известно, впервые черные дыры, как тела настолько массивные и компактные, что даже свет не мог их покинуть появились независимо в трудах Майкела (1784) и Лапласа (1795). Но в то время скорость света еще считалась не наибольшей из возможных для материальных тел, а просто очень высокой скоростью, и все эти построения выглядели простой игрой ума. Черная дыра в "строгом" смысле этого слова, как решение уравнений Общей Теории Относительности Эйнштейна, была предсказана Шварцшильдом (1916). С тех пор теория классических (не квантовых) черных дыр получила очень сильное развитие. Интересующихся этим вопросом я отсылаю к книгам "Математическая теория черных дыр" Чандрасекара и "Физика черных дыр" Новикова и Фролова (лучше ко второму изданию). А для тех, кто хочет избежать огромного количества формул, предназначена замечательная популярная книга "Космические рубежи теории относительности" Кауфмана. [Из нее вы сможете узнать как движутся лучи света вблизи и внутри черных дыр; как выглядит Вселенная для наблюдателя сидящего рядом с черной дырой и как для падающего в нее; что вблизи вращающихся черных дыр есть область, где тела еще могут не падать внутрь, но обязаны вращаться вместе с ними, а через кольцевую сингулярность в центре такой черной дыры можно проскользнуть в другую Вселенную; что с помощью конформных диаграмм Пенроуза всю Вселенную можно изобразить в маленьком квадрате; и многое другое.] С начала 80-х годов прошлого века начала развиваться и квантовая теория черных дыр. Она не закончена из-за того, что до сих пор нет теории фундаментальных взаимодействий, которая корректно объединяла бы гравитацию и другие силы (слабое, сильное и электромагнитное взаимодействия). Но некоторые следствия этой теории уже известны и, более того, успели стать научной "классикой". Наиболее известен из них эффект Хокинга — эффект испарения черных дыр.

С астрофизической точки зрения черная дыра выглядит гораздо проще — это почти материальная точка, массивное компактное тело без твердой поверхности. Последнее свойство отличает черные дыры от нейтронных звезд и белых карликов. Область, где проявляются замечательные сложные свойства, присущие черным дырам, не превышает нескольких гравитационных радиусов

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где G — ньютоновская гравитационная постоянная, c — скорость света, а M — масса черной дыры. Столь близкие к черной дыре окрестности редко бывают доступны наблюдениям (если темп аккреции на черную дыру достаточно высок и она является ярким рентгеновским источником, то оптическая толща падающего вещества на расстоянии в несколько r_g существенно превышает единицу, а в случае низких темпов аккреции саму черную дыру можно наблюдать только если она расположена недалеко от Солнца или по эффектам не связанным с аккрецией, например, если она входит в двойную систему с радиопульсаром).

До сих пор неизвестно ни одного объекта про который мы могли бы с полной уверенностью сказать, что это черная дыра. Есть две группы объектов, которые носят название **кандидатов в черные дыры**: это 16 двойных рентгеновских систем в которы масса компактного компаньона превышает $3\mathrm{M}_\odot$ — теоретический максимум массы нейтронной звезды при любом уравнении ее состояния. В наиболее удачных кандидатах этой группы масса “черной дыры” превышает этот предел в несколько раз. Неуверенность в этих системах вызывается возможными систематическими ошибками наблюдений и в принципе возможным дифференциальным вращением компактного объекта. Средняя масса этих черных дыр порядка $10\mathrm{M}_\odot$.

Ко второй группе относятся сверхмассивные черные дыры в центрах галактик. Их сегодня известно более 20. Их массы лежат в интервале от 10^6 до 10^9 $\mathrm{M}_\odot$. По-видимому, подобная черная дыра с массой $3 \cdot 10^6$ $\mathrm{M}_\odot$ есть и в центре нашей Галактики. Присутствие и массы этих кандидатов в черные дыры определяются по распределению и движениям звезд вблизи центров галактик. Неопределенность положения объектов из данной группы вызвана тем, что отличить сверхмассивную черную дыру от очень плотного звездного скопления очень трудно. [Однако мнение астрономической общественности относительно этих объектов изменилось и сейчас стремительно набирает популярность утверждение, что любая галактика с балджем имеет в его центре черную дыру с массой в несколько процентов (до 10%) от его массы.]

Возможно черные дыры будут открыты по другому — например в парах с радиопульсарами (теория предсказывает существование 1 черной дыры в паре с радиопульсаром на примерно 1000 одиночных пульсаров, сейчас пульсаров известно уже более 1300, но для обнаружения черной дыры в такой паре по наблюдению времен прихода импульсов требуется, чтобы наклон орбиты был почти равен 90°) или по гравитационному сигналу от слияния двойных черных дыр и/или нейтронных звезд (в 2001 году в пробную эксплуатацию были запущены уже 3(!) наземные гравитационно-волновые антенны).

Отметим, что кроме сверхмассивных черных дыр, все остальные варианты обнаруживают черные дыры только в составе двойных систем того или иного типа. Единственная крупномасштабная программа поиска одиночных черных дыр звездной массы проводилась в 70-80-х годах в САО под руководством В.Ф.Шварцмана, а затем Г.М.Бескина. В этой программе пытались обнаружить одиночные черные дыры, аккрецирующие вещество из межзвездной среды, по микро- и наносекундной переменности их излучения. В ходе выполнения этой программы не было найдено ни одной черной дыры, этот результат хорошо согласуется с сегодняшними представлениями о числе и светимостях таких объектов.

Здесь кончается введение и можно задать вопрос вынесенный в заглавие: “Где и как нужно искать одиночные черные дыры?”

На расстоянии 750 пк от Солнца известно 56 убегающих звезд. Эти звезды почти не отличаются от остальных звезд дисковой составляющей Галактики по всем своим параметрам, кроме высокой пространственной скорости. Сейчас предполагается, что такие звезды образуются либо при динамической эволюции скоплений и ассоциаций в которых они родились (наиболее вероятная причина — тесное тройное сближение), либо в результате распада двойной системы при взрыве сверхновой. Четыре звезды из этой группы обладают массой выше 25 $M_\odot$ (следует отметить, что для этих звезд масса определяется по виду спектра с не очень высокой точностью). Вот эти системы:

Название	Масса, $M_\odot$	Скорость, км/с
ξ Per	33	65
HD 64760	25–35	31
ζ Pup	67	62
λ Cep	40-65	74

В замечательной работе Hoogerwerf et al (2001) исследовали все 56 близкие убегающие звезд. Эти звезды “близки” в том смысле, что эти звезды были промерены Hipparcos’ом и мы знаем их положения на небе, собственные движения и параллаксы с милиарксекундной точностью. Авторы проследили движение этих звезд в Галактике и для большинства из них (в том числе для всех 4 массивных) нашли когда и их какой ассоциации эти звезды вылетели, а также какой из двух возможных механизмов выброса действовал для каждой конкретной звезды (большинство звезд было выброшено при распаде двойных). Скорее всего все четыре массивные убегающие звезды приобрели свою высокую пространственную скорость в результате взрывов Сверхновых в двойных системах. Можно привести сразу несколько аргументов в пользу такого вывода:

- Эти звезды очень массивные. Для того, чтобы быть выкинутыми из скопления (ассоциации) им надо было пролететь вблизи не намного менее массивных звезд. Иначе, по закону сохранения импульса, выброшенными из системы оказались бы именно менее массивные звезды. А столь массивных звезд очень мало, это прямое следствие закона Солпитера (1955). Близкий пролет нескольких массивных звезд оказывается чрезвычайно редким событием, по сравнению с достаточно редкими тесными тройными сближениями звезд малых масс.

- Массивные звезд живут всего насколько миллионов лет. Этот факт накладывает на описанное в предыдущем пункте редкое событие дополнительное ограничение — сближение должно успеть произойти пока массивные звезды не взорвались как Сверхновые.

- И, наконец, все эти звезды летят со скоростями в несколько раз выше дисперсии скоростей тех ассоциаций, в которых они родились. Сам по себе этот факт ничему не противоречит, после удачного тесного сближения звезды могут приобретать достаточно высокие скорости. Однако это происходит только в редких случаях, средняя величина приобретаемой в таких процессах скорости существенно ниже.

За более детальными аргументами для каждой из четырех звезд этой группы я отсылаю читателя к уже упоминавшейся работе Hoogerwerf et al (2001), а общий вывод таков — с очень большой вероятностью каждая из этих четырех звезд входила в состав достаточно тесной массивной двойной системы и приобрела свою пространственную скорость после ее распада из-за взрыва Сверхновой.

Итак, каждая из этих четырех звезд входила в двойную систему в которой как Сверхновая некоторое время назад взорвалась ее соседка. Взорвавшаяся звезда прошла весь свой эволюционный путь быстрее, то есть была еще более массивной, чем наблюдаемая нами убегающая звезда. Как считается сейчас именно такие очень массивные звезды ($M > 30$–$40\mathrm{M}_\odot$) при своем коллапсе образуют не нейтронные звезды, а черные дыры. Более того, у звезд со слегка бо́льшими массами ($M \gtrsim> 40$–$50\mathrm{M}_\odot$) скорее всего происходит прямой коллапс ядра в черную дыру без промежуточной стадии горячей нейтронной звезд (см., например, Бисноватый–Коган, 1968).

Если Сверхновая взрывается симметрично, а двойная система, в которой этот взрыв произошел, обращалась по круговой орбите, то для *распада двойной* необходимо сбросить *по крайней мере половину массы системы*. [Пример: если масса убегающей звезды равна $M_\mathrm{o} = 30\mathrm{M}_\odot$ и не изменилась существенно с момента распада системы, а масса черной дыры равна $M_{\mathrm{BH}} = 10\mathrm{M}_{\odot}$, то масса сброшенной оболочки должна быть не меньше $\Delta M \geqslant M_{\mathrm{o}} + M_{\mathrm{BH}} = 40\mathrm{M}_{\odot}$, а масса взорвавшейся предсверхновой $M_{\mathrm{SN}} = M_{\mathrm{BH}} + \Delta M \geqslant 50\mathrm{M}_{\odot}$. А так как столь массивные звезды очень сильно теряют вещество за время своей жизни (как минимум 30% начальной массы), то каждая из рассматриваемых нами звезд (особенно ζ Pup) входили в *чрезвычайно массивные* двойные системы.]

Следует сразу заметить, что эти системы не могли проходить стадию обмена массой. При большом отношении масс в системе перетекание вещества, после заполнения первичным компонентом полости Роша, будет неустойчивым, что приведет к стадии с общей оболочкой и, как следствие, к очень сильному сближению и, скорее всего, к слиянию компонентов системы. При умеренном отношении масс перетекание будет устойчивым и квазиконсервативным. Такой обмен масс заканчивается в момент или после выравнивания масс компонентов системы. После этого симметричный взрыв Сверхновой уже не может разорвать систему, так как ее масса слишком мала. (Другое условие — круговая орбита — после стадии обмена массой гарантированно выполняется.)

Так как наши системы были достаточно тесными (скорости с которыми летят сейчас убегающие звезды порядка их орбитальных скоростей в двойных системах), то предположение о круговых орбитах выглядит достаточно естественным. А очень высокая масса предсверхновой делает вероятным прямой коллапс ядра Сверхновой в черную дыру. Как принято считать сегодня, такой коллапс идет симметрично и не сопровождается отдачей (т.е. скорость черной дыры такая же, как скорость предсверхновой перед взрывом), в отличие от процесса образования нейтронных звезд, которые рождаются с пространственными скоростями в несколько сот километров в секунду. (Следует, правда, сказать, что никаких серьезных аргументов в пользу такого вывода о ходе образования массивных черных дыр нет, это просто *мнение астрономического сообщества.*)

Так как два приведенных выше условия скорее всего выполняются, то распад происходит самым простым образом (см. Рис.1). Оболочка сбрасывается симметрично относительно центра предсверхновой и уносится по прямой в направлении и со скоростью ее орбитального движения в момент взрыва. Движение относится к центру оболочки, а ее симметричное расширение на него не влияет. Центр масс двух звезд (черной дыры и второго компонента двойной системы, ставшего убегающей звездой) движется в противоположном направлении, но с большей скоростью, так как масса сброшенной оболочки превышает сумму масс оставшихся звезд (см. условие распада двойной системы несколькими абзацами выше).

В системе центра масс двух звезд (куда не включается сброшенная оболочка) скорости звезд сразу после взрыва направлены перпендикулярно соединяющей их линии, относительная скорость звезды и черной дыры равна относительно орбитальной скорости звезд перед взрывом

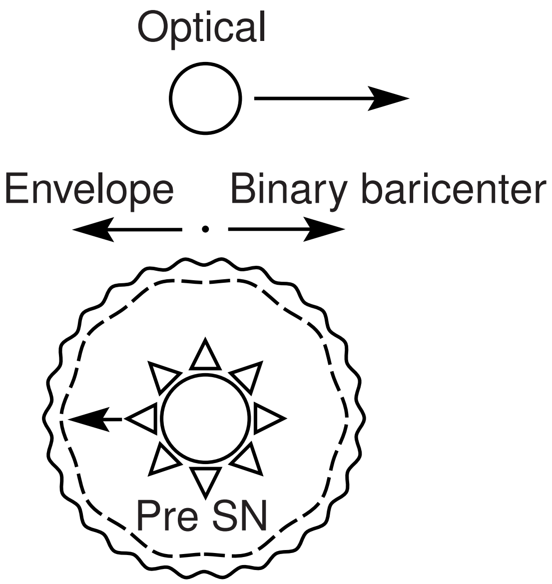

Рис. 1: Схема распада двойной системы после взрыва Сверхновой.

(см. Рис.2). И убегающая звезды, и черная дыра движутся по подобным гиперболам с эксцентриситетом $e = \Delta M/(M_{\rm o} + M_{\rm BH}) \geqslant 1$. При удалении звезд друг от друга векторы их скоростей повернутся на угол $\varphi : \cos\varphi = 1/e$. В предельном случае, когда сброшенная масса равна точно половине массы системы, звезды движутся по параболам $(e = 1)$ и за время разлета направление их скоростей изменяется на 90°. На Рис.2 параболические траектории показаны пунктиром.

В системе центра масс предсверхновой (см. Рис.3) к гиперболическому (параболическому) разлету звезд добавляется равномерное движение их центра тяжести. Я не буду приводить здесь формул для этих скоростей, так как они хотя они и достаточно длинны, но просты по сути, а главное, не очень интересны нам сами по себе. Скажу только, что в итоге обе звезды в сторону примерно противоположную той, куда удаляется оболочка.

Зная положение каждой из звезд на небе, расстояние до нее и компоненты ее скорости, мы можете проинтегрировать назад по времени их движение в гравитационном потенциале Галактики (момент вылета звезды из ассоциации где она образовалась мы брали из работы Hoogerwerf et al (2001)) и найти с какой скоростью $v_{\rm o}$ относительно ассоциации вылетела каждая из убегающих звезд и как эта скорость была направлена. По величине $v_{\rm o}$ нам надо определить скорость черной была $v_{\rm BH}$. Эта задача имеет однозначное решение, если заданы ΔM и $M_{\rm BH}$ и мы можем найти скорость $v_{\rm BH}$ угол ψ который она образует с $v_{\rm o}$: $\psi(v_{\rm BH}, v_{\rm o}) = \widehat{\vec{v}_{\rm BH}\vec{v}_{\rm o}}$. Определить конкретное положение $v_{\rm BH}$ на поверхности мы не можем,

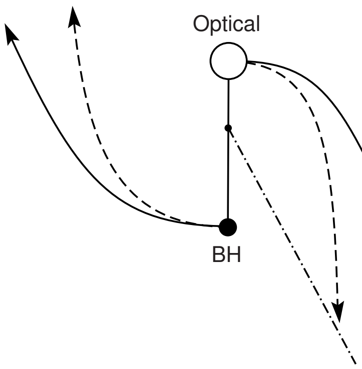

Рис. 2: Разлет звезд после взрыва Сверхновой в системе их центра масс.

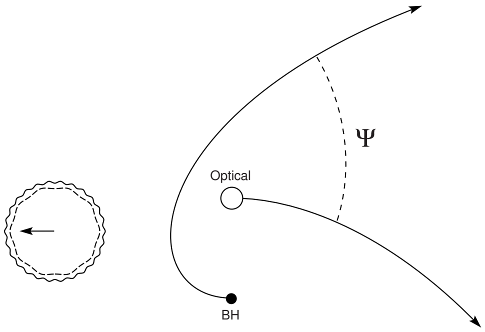

Рис. 3: Разлет звезд после взрыва Сверхновой в системе предсверхновой.

так как оно зависит от неизвестной нам ориентации плоскости орбиты предсверхновой.

В это пункте мы сделали три упрощающие предположения, которые перечислим здесь и явно, а обсудим ниже:

- Симметричный взрыв сверхновой, в ходе которого пространственная скорость остатка (серной дыры) на изменяется.
- Мы предполагали, что ассоциация движется по круговой орбите в диске Галактики.
- Скорость движения двойной системы внутри ассоциации не учитывалась.

Эти предположения позволяют использовать описанное выше соотношение между скоростями убегающей звезды и черной дыры в точке распада двойной системы. Для каждого набора параметров ϕ, ΔM и $M_{\rm BH}$ (угол ϕ — определяет положение ориентацию плоскости орбиты двойной системы) мы получаем вектор $\vec{v}_{\rm BH}(\phi, \Delta M, M_{\rm BH})$, а проинтегрировав движение черной дыры от момента взрыва сверхновой до настоящего времени — находим ее положение на небе. При переборе допустимых значений параметров эти точки будут заметать на небе область, где надо искать черную дыру. Траектория оптической звезды и несколько возможных траекторий черной дыры для системы породившей ζ Pup приведены на Рис.4, а возможная область локализации черной дыры для той же системы — на Рис.5 (оба рисунка даны в галактических координатах).

Из сделанных нами предположений о скоростях наиболее неопределенным и существенным кажется первое (об отдаче при образовании черной дыры). Если проводить здесь аналогию с нейтронными звездами, то черная дыра могла бы приобрести при рождении дополнительную скорость до нескольких десятков километров в секунду, что полностью испортило бы полученную область локализации. Как я уже говорил в пользу этого предположения нет как никаких серьезных аргументов, так и никаких возражений. Предположение о круговом движении молодых звездных ассоциаций в диске Галактики выглядит достаточно хорошим, кроме того это движение в принципе можно измерить. Движение двойной внутри ассоциации можно учесть при расчетах (прибавив случайно ориентированную скорость величиной порядка дисперсии скоростей внутри ассоциации к вектору движения ее центра). Эти скорости невелики и их учет приведет к небольшому увеличению областей локализации (по сделанным оценкам на 10–15%).

Аналогичные области получены и для остальных трех убегающих звезд. Области достаточно большие, искать в них какие-либо пекулярные источники в оптическом- и радиодиапазонах бесполезно (в свое время, до запуска спутника BeppoSAX, подобные исследования проводились для боксов ошибок гамма всплесков; успеха они не имели). Вероятно наиболее перспективно посмотреть нет ли в этих областях неотождествленных источников жесткого излучения в первую очередь по каталогам EGRET. Активность черной дыры в жестком диапазоне может быть связана с аккрецией турбулизованного межзвездного вещества (Шварцман, 1970a-c). Такое вещество обладает угловым моментом и не может сразу упасть на черную дыру, а образует вблизи нее аккреционное кольцо, которое под действием вязкости превращается в диск. Если вещество из такого кольца не полностью выпадает на черную дыру за время пересечения ею ячейки межзвездной турбулентности, то вблизи черной дыры начнет формироваться новое кольцо вещества с другой ориентацией. Эти кольца “аннигилируют” друг друга, что приведет к усилению темпа аккреции. Темп аккреции будет очень сильно меняться на характерных временах пересечения турбулентных ячеек (от суток до лет в зависимости от скорости черной дыры относительно межзвездной среды).

Мы благодарим проф. А. Расторгуева и проф. К. Куимова за консультации. Данная работа была поддержана грантом РФФИ 00-02-17164.

Список литературы

[1] Hoogerwerf R., de Bruijnr J.H.J., de Zeeuw P.T., 2001, Astron. Astrophys. 365, 49

[2] Laplace P.S., 1795, "Le Systeme du Monde", vol.II, Paris; перевод Лаплас П.С., 1982, "Изложение системы мира", М., Наука

[3] Michell J., 1784, Philos. Trans. R.S. Lond. v.LXXIV, p.35

[4] Salpeter E.E., 1955, ApJ 121, 161

[5] Schwarzschild K., 1916, Sitzungsber. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math. Phys. Tech., p.189

[6] Бисноватый–Коган Г.С., 1968, Астрофизика 4, 221

[7] Кауфман У., "Космические рубежи теории относительности", М., Мир, 1981

[8] Новиков И.Д., Фролов В.П., "Физика черных дыр", М., Наука, 1986

[9] Шварцман В.Ф., 1970a, Радиофизика 13, 1852

[10] Шварцман В.Ф., 1970b, АЖ 47, 660

[11] Шварцман В.Ф., 1970c, АЖ 47, 824

[12] Чандрасекар С., "Мастематическая теория черных дыр", М., Мир, 1986

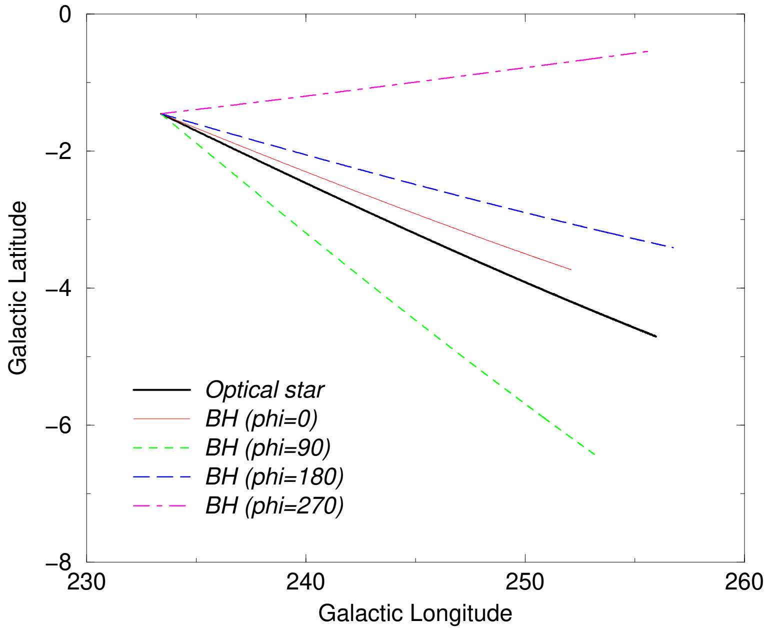

Рис. 4: Траектории движения по небу убегающей звезды ζ Pup (сплошная линия) и четыре возможных траектории движения черной дыры (штриховые линии). Масса черной дыры полагалась равной $M_{\mathrm{BH}} = 10\mathrm{M}_\odot$, а сброшенная масса $\Delta M = 50\mathrm{M}_\odot$.

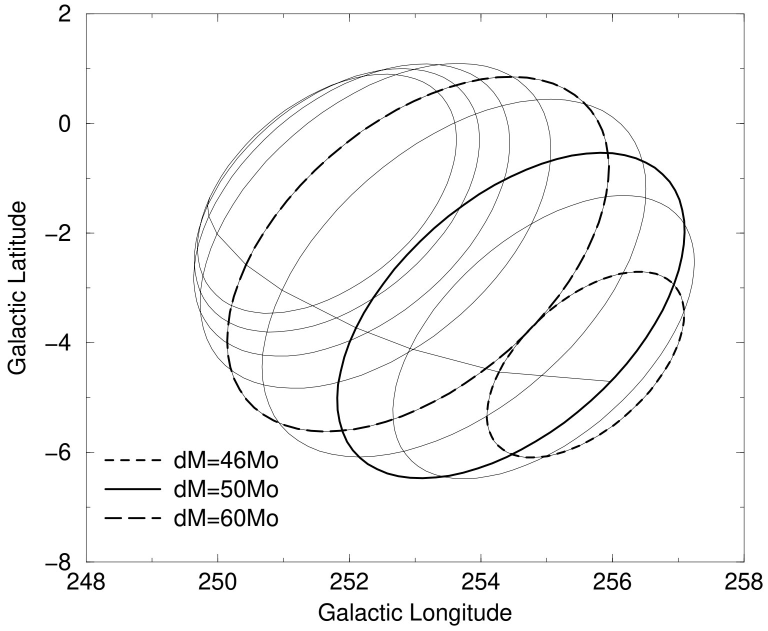

Рис. 5: Область возможной локализации черной дыры — происходящей из той же распавшейся двойной системы, что и убегающая звезда ζ Pup. Кольца соответствуют различным значениям сброшенной масс ΔM и ориентации орбиты предсверхновой ϕ. Масса черной дыры полагалась равной $M_{\mathrm{BH}} = 10\mathrm{M}_\odot$.