

ЗВЕЗДЫ ВОЛЬФА–РАЙЕ: ОТ ЧЕРНЫХ ДЫР ДО ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

WOLF–RAYET STARS: FROM BLACK HOLES TO GAMMA-RAY BURSTS

A. M. CHEREPASHCHUK

Wolf–Rayet stars are bare helium cores of massive stars. They are at a late evolutionary stage, which will be followed by the core collapse and formation of a relativistic entity. Recently, close relationship has been established between the evolution of Wolf–Rayet stars and the formation of black holes and neutron stars, as well as the generation of gamma-ray bursts.

Звезды Вольфа–Райе являются обнаженными гелиевыми ядрами массивных звезд. Они находятся на поздней стадии эволюции, за которой следует коллапс с образованием релятивистского объекта. В последнее время выявилась тесная связь эволюции звезд Вольфа–Райе с образованием черных дыр и нейтронных звезд, а также с генерацией космических гамма-всплесков.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

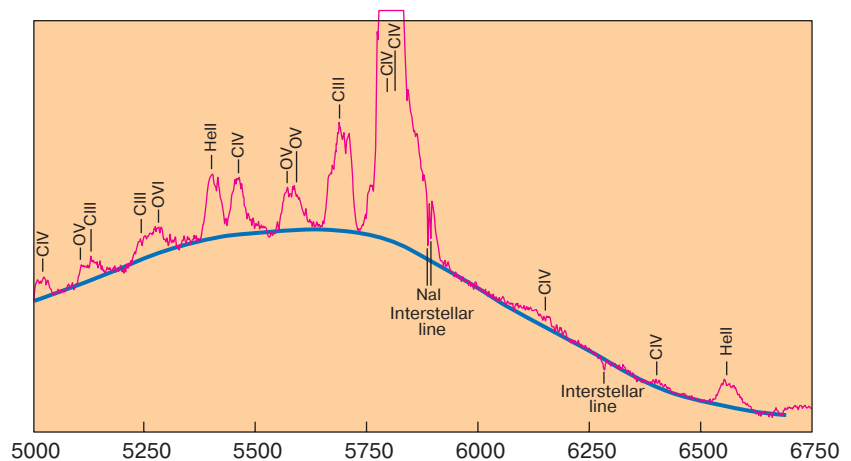
Проблема звезд Вольфа–Райе (WR) лежит на стыке между классической и релятивистской астрофизикой. Звезды WR, отождествляемые по сильным и широким линиям излучения в спектре (рис. 1), были открыты в 1867 году французскими учеными М. Вольфом и Дж. Райе. Здесь мы рассмотрим лишь массивные звезды WR I типа населения Галактики, которые в среднем концентрируются к галактической плоскости. Признаками звезд WR обладают также маломассивные горячие звезды — ядра планетарных туманностей, которые мы в статье рассматривать не будем.

Всего известно около 200 звезд WR в нашей Галактике и примерно 300 в других ближайших к нам галактиках. Полное число звезд WR в Галактике должно составлять одну-две тысячи, что очень мало по сравнению с 10^{11} — общим числом звезд в Галактике. Тем не менее изучение звезд WR очень важно для понимания эволюции массивных звезд и их связи с образованием черных дыр.

Звезды WR радикально отличаются от обычных звезд типа Солнца тем, что у них мощность, излучаемая в эмиссионных линиях гелия, азота, углерода и кислорода, сравнима с мощностью, излучаемой в непрерывном спектре. Кроме того, звезды WR резко отличаются от звезд типа Солнца по химическому составу: они в основном состоят из гелия и содержат очень мало водорода, доля которого в обычных звездах достигает 75% по массе.

В последнее время выявляется тесная связь между эволюцией звезд WR и образованием релятивистских объектов (нейтронных звезд и черных дыр), а также генерацией космических гамма-всплесков, которые вот уже свыше 30 лет составляют интригующую загадку в астрофизике.

Рис. 1. Спектр звезды Вольфа–Райе углеродной последовательности. По оси абсцисс отложена длина волны в ангстремах (10^{-8} см), по оси ординат – интенсивность в условных единицах. Указаны линии, соответствующие ионам HeII, CIII–CIV, OV–OVI в спектре звезды WR, а также узкие линии поглощения, сформированные при прохождении света звезды WR через межзвездную среду



СВОЙСТВА ЗВЕЗД WR

По современным представлениям, звезды WR являются обнаженными гелиевыми ядрами первоначально очень массивных ($M > 30\text{--}40M_{\odot}$) звезд, потерявших свои мощные водородные оболочки (до 60–70% массы всей звезды) либо за счет истечения вещества в виде звездного ветра, либо в результате обмена веществом в тесных двойных системах (см. [1, 2]). Мощный эмиссионный линейчатый спектр звезд WR формируется в протяженной разреженной атмосфере, радиально расширяющейся со скоростями в 1–3 тыс. км/с и темпом потери массы $\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$. Эта протяженная расширяющаяся атмосфера является основанием звездного ветра звезды WR. Главной причиной ускорения вещества в звездном ветре является, по-видимому, сила давления излучения горячего гидростатического ядра звезды WR, содержащего основную часть массы (масса вещества ветра звезд WR составляет лишь $\sim 10^{-9}$ от массы ее ядра).

Подтверждение того, что звезды WR являются гелиевыми ядрами массивных звезд, следует из анализа затмений звезд WR в двойных WR+O-системах и из определения химического состава звезд WR по их спектрам. Анализ затмений приводит к выводу, что радиус ядра звезды WR при массе $10M_{\odot}$ составляет всего около $2\text{--}3R_{\odot}$, а его температура превышает 50 000 К. Эти характеристики типичны для массивных гелиевых звезд (радиус водородной звезды солнечного типа при массе $10M_{\odot}$ должен составлять не менее $8R_{\odot}$). Оценки относительного содержания гелия, полученные из анализа спектров звезд WR с использованием современных весьма совершенных компьютерных моделей протяженных звездных атмосфер, неизменно приводят к выводу о том, что число атомов гелия в атмосферах звезд WR много больше, чем атомов водорода.

Звезды WR делятся на две последовательности: азотную (WN) и углеродную (WC). В спектрах звезд

WN в основном содержатся линии азота, а в спектрах звезд WC преобладают линии углерода и кислорода. Кроме того, среди звезд WR выявляется немногочисленная группа звезд с усиленными линиями кислорода в спектре (WO-звезды). И в спектрах звезд WN и звезд WC присутствуют линии гелия и водорода, однако линии водорода весьма слабы ввиду преимущественно гелиевого химического состава звезд WR. Последовательность звезд WN–WC–WO интерпретируется как эволюционная. Сразу после обнажения ядра массивной звезды оно обогащено продуктами CNO-цикла – углеродно-азотного цикла термоядерных реакций, которые происходили в ядре массивной звезды. Поэтому вначале поверхность звезды WR обогащена азотом и звезда WR принадлежит к типу WN. По мере потери массы в виде звездного ветра у звезды WR обнажаются слои, обогащенные углеродом в результате термоядерных превращений гелия в углерод (так называемая реакция тройного столкновения α -частиц). Поэтому звезда WN в дальнейшем превращается в звезду WC. Последующая потеря вещества в виде звездного ветра обнажает слои звезды WR, обогащенные кислородом в результате захвата α -частиц ядрами атомов углерода. Звезда WC постепенно превращается в звезду WO. Таким образом, звезды WN самые молодые, а звезды WC и особенно WO наиболее старые, компактные, практически лишенные водородных оболочек.

Из 201 известной звезды WR в Галактике 112 имеют тип WN, 79 – тип WC, три – тип WO. Обнаружена сильная концентрация звезд WR к плоскости Галактики, они часто связаны с молодыми рассеянными скоплениями и OB-ассоциациями и, следовательно, в абсолютном смысле являются молодыми объектами с возрастом порядка миллиона лет. В то же время, будучи обнаженными гелиевыми ядрами массивных звезд, звезды WR находятся на конечном этапе своей эволюции, на стадии после стадии Главной последовательности

диаграммы Герцшпрунга–Рассела. Поэтому уместно сказать, что звезды WR — сильно постаревшие объекты из-за своей слишком бурной молодости.

Эволюция звезды WR как гелиевой звезды зависит от массы образующегося у нее углеродно-кислородного ядра. Время эволюции звезды WR более чем на порядок короче времени эволюции обычной водородной звезды той же массы и для массы $M_{WR} = 20M_{\odot}$ составляет $\sim 3 \cdot 10^5$ лет. После истощения гелия в ядре звезды WR последовательно и во все ускоряющемся темпе протекают термоядерные реакции превращения углерода, кислорода, неона и кремния с последующим образованием железного ядра, коллапс (быстрое сжатие) которого приводит к образованию релятивистского объекта, сопровождаемого, по всей вероятности, взрывом сверхновой. Поскольку масса взрывающейся звезды велика, а звезда WR лишена мощной водородной оболочки, это должна быть пекулярная сверхновая типа Ib/c. В частности, аномально слабая сверхновая, сопровождавшая образование остатка сверхновой Кассиопея А, могла быть вызвана взрывом звезды WR.

Замечательно то, что недавно один из космических гамма-всплесков, по-видимому, отождествлен со вспышкой аномальной сверхновой типа Ic, соответствующей взрыву звезды WC.

Свыше 50% звезд WR входит в состав двойных систем, содержащих в качестве спутников горячие массивные звезды спектральных классов O. Орбитальные периоды двойных WR+O-систем лежат в пределах от суток до нескольких лет. Анализ спектральных, фотометрических и поляриметрических наблюдений двойных WR+O-систем позволяет определить массы WR- и O-звезд. К настоящему времени таким способом измерены массы 24 звезд WR (рис. 2), которые лежат в весьма широких пределах — от $5M_{\odot}$ до $55M_{\odot}$. Средняя масса звезд WR составляет $\sim 18M_{\odot}$. Среди звезд WR должны также существовать двойные WR+(A-M)-системы, содержащие в качестве спутников маломассивные холодные звезды спектральных классов A–M. Такие WR+(A-M) двойные являются предшественниками маломассивных рентгеновских двойных систем с нейтронными звездами и черными дырами. Существуют также WR+C двойные системы, у которых спутник C является релятивистским объектом. Пример WR+C-системы — система CygX-3, пекулярная рентгеновская двойная система с очень коротким орбитальным периодом 4,8 часа. Недавние наблюдения линейной поляризации излучения в эмиссионных линиях и непрерывном спектре позволили установить, что около 15% звезд WR имеют ядра с быстрым осевым вращением.

Таким образом, к настоящему времени имеется ясность в понимании эволюционного статуса звезд WR и накоплен богатый наблюдательный материал по этим

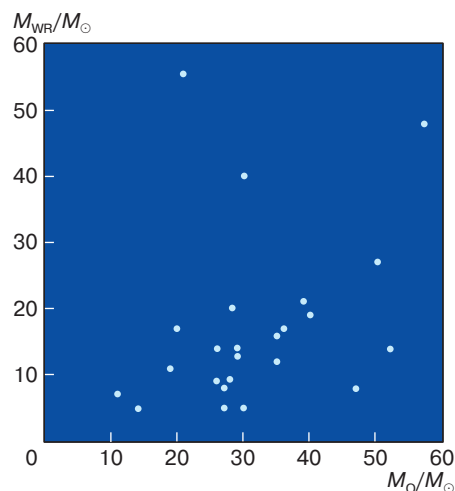


Рис. 2. Зависимость масс звезд WR (в солнечных единицах) от масс O-звезд в двойных WR+O-системах. Массы звезд WR занимают широкий диапазон от 5 до $55M_{\odot}$.

резко пекулярным объектам. Кроме того, сейчас мы имеем надежные определения масс 30 релятивистских объектов в двойных системах [3]. На рис. 3 приведены сведения о массах релятивистских объектов в двойных

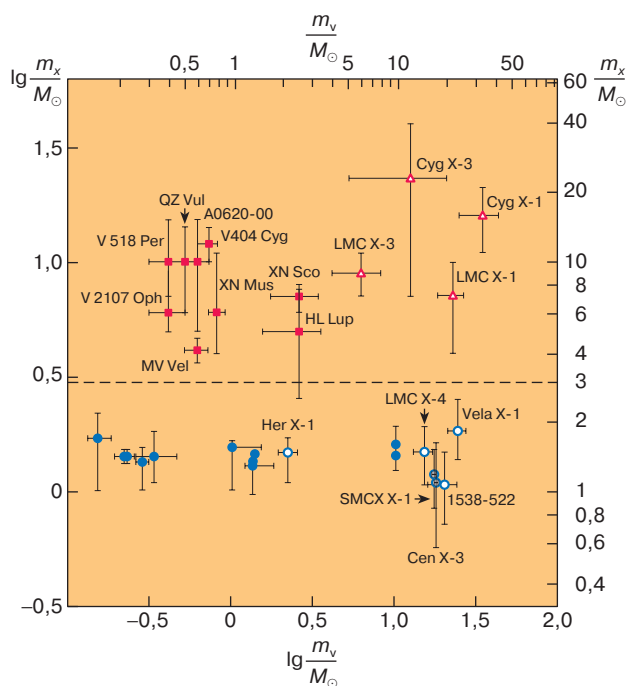


Рис. 3. Зависимость масс m_x нейтронных звезд (кружки) и черных дыр (треугольники и квадраты) от масс звезд-спутников m_v в двойных системах. Закрашенные кружки соответствуют радиопульсарам, квадратики — черным дырам в рентгеновских новых

системах. Недавнее выяснение космологической природы гамма-всплесков [4] позволило определить светимости и энергии около двух десятков гамма-всплесков. Поэтому мы имеем возможность сравнить параметры звезд WR с характеристиками нейтронных звезд и черных дыр, а также с наблюдательными данными по космическим гамма-всплескам.

ЗВЕЗДЫ WR И РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Звезды WR в конце своей эволюции порождают нейтронные звезды и черные дыры. Интересно сравнить массы звезд WR и их СО-ядер с массами релятивистских объектов. Релятивистские объекты могут порождаться не только звездами WR, но и другими массивными звездами, например красными и голубыми сверхгигантами, содержащими мощные водородные оболочки. Однако в тесных двойных системах из-за перетекания вещества массивные звезды всегда теряют свои водородные оболочки и превращаются в звезды WR. Поэтому сравнение масс релятивистских объектов и звезд WR в двойных системах является корректным. Правда, остается одна существенная трудность: звезды WR интенсивно теряют вещество в виде звездного ветра с темпом $\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ и неясно, какая часть массы звезды WR доживет до стадии предсверхновой. Еще сложнее обстоят дела со сравнением масс обычных массивных звезд и релятивистских объектов: мощная водородная оболочка звезды может быть потеряна различными способами за время ядерной эволюции звезды, что делает сравнение масс релятивистских объектов с массами предшествующих им обычных звезд весьма неопределенным. Преимущества звезд WR перед обычными звездами состоят в том, что они, во-первых, уже лишены мощных водородных оболочек и, во-вторых, известен механизм потери вещества для них – радиальное истечение в виде звездного ветра. Нужно только аккуратно измерить величины темпа потери массы \dot{M}_{WR} звездами WR и установить зависимость \dot{M}_{WR} от массы M_{WR} звезды WR.

Основной источник информации о величинах \dot{M}_{WR} – наблюдения звезд WR в радио- и инфракрасном диапазонах спектра.

В последнее время выяснилось, что величины \dot{M}_{WR} для звезд WR, измеренные по наблюдениям их радио- и инфракрасных потоков, завышены в несколько раз (на это впервые обратил внимание автор настоящей статьи в 1991 году). Это связано с тем, что интенсивность теплового радио- и инфракрасного излучения звездных ветров звезд WR пропорциональна квадрату электронной плотности вещества ветра, а ветер звезд WR, как выяснилось, имеет сильно неоднородную, клочковатую структуру. Поэтому интерпретация на-

блюдаемых радио- и инфракрасных потоков в модели непрерывного ветра звезды WR, не учитывающей его клочковатость, приводит к завышению величины \dot{M}_{WR} . Учет клочковатости ветра звезд WR позволяет существенно уменьшить величины \dot{M}_{WR} , поэтому влияние потери массы звездами WR на их массы в конце эволюции оказывается не столь значительным, как это считалось ранее. В предыдущих исследованиях эволюции звезд WR ученые неизменно получали так называемый эффект сходимости массы звезды к одному небольшому значению: практически независимо от начальной массы звезды WR из-за значительной потери массы масса ее углеродно-кислородного ядра в конце эволюции M_{CO}^f составляет всегда $M_{CO}^f \approx (2-4)M_{\odot}$. Но тогда как объяснить существование черных дыр с массами в $(10-15)M_{\odot}$ в двойных системах Cyg X-1, GS2023+338 и GRS1121-68? Ведь это надежный наблюдательный факт!

Недавно автор статьи рассчитал конечные массы M_{CO}^f СО-ядер звезд WR с учетом зависимости M_{CO}^f от \dot{M}_{WR} с эффектом клочковатости ветра звезды WR. Оказалось, что в этом случае удастся избежать эффекта сходимости: массы СО-ядер звезд WR в конце эволюции распределены равномерно и в широком диапазоне от 2 до $40M_{\odot}$, который включает в себя наблюдаемый диапазон масс нейтронных звезд и черных дыр. Рисунок 4 поясняет сказанное. Массы звезд WR и их СО-ядер в конце эволюции распределены равномерно. В то же время массы релятивистских объектов распределены бимодально: средняя масса нейтронной звезды (17 определений) составляет $M_{n.z} = (1,35 \pm 0,15)M_{\odot}$, средняя масса черной дыры (13 определений) $M_{ч.д} = (8-10)M_{\odot}$. В интервале масс между $2M_{\odot}$ и $4M_{\odot}$ не обнаружено ни нейтронных звезд, ни черных дыр. Средняя масса СО-ядер звезд WR в конце эволюции, непосредственно предшествующих коллапсу ядра и образованию релятивистского объекта, составляет $(7-10)M_{\odot}$, что близко к средней массе черных дыр.

Обнаруженное нами различие в распределении масс релятивистских объектов и их прародителей – СО-ядер звезд WR в конце эволюции позволяет предположить, что масса прародителя не является единственным параметром, определяющим природу релятивистского объекта (нейтронная звезда, черная дыра).

По-видимому, на образование нейтронной звезды или черной дыры при коллапсе железного ядра предсверхновой влияют также другие характеристики ядра, например: его вращение, магнитное поле, различные типы неустойчивостей, возникающих при коллапсе. Как уже отмечалось, около 15% звезд WR имеют быстро вращающиеся ядра.

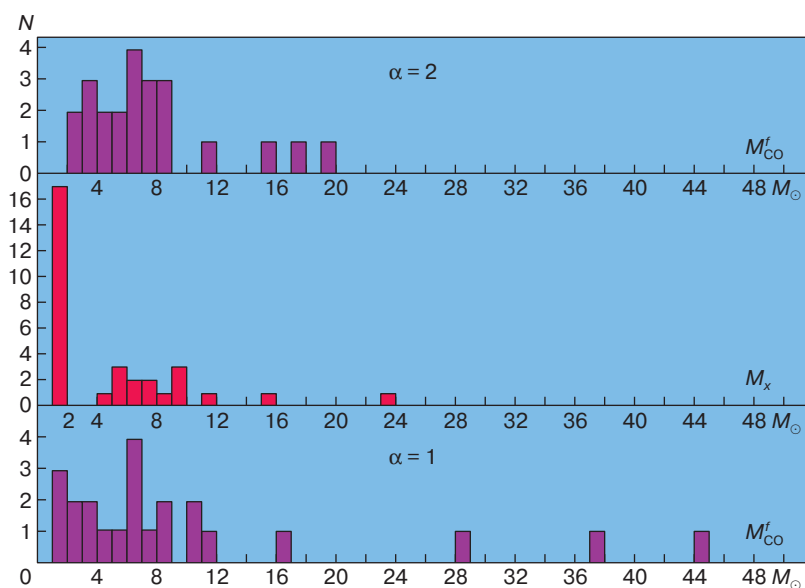


Рис. 4. Распределения масс углеродно-кислородных ядер звезд WR в конце их эволюции M_{CO}^f , вычисленные с учетом наблюдаемого темпа потери массы в виде звездного ветра $\dot{M}_{WR} \sim M_{WR}^{\alpha}$, для $\alpha = 1$ и $\alpha = 2$. В середине рисунка приведено также распределение масс M_x нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах. Видно, что распределение величин M_x бимодально (имеются два максимума с $M_x = (1-2)M_{\odot}$ и $M_x = (4-16)M_{\odot}$), а распределения M_{CO}^f непрерывны

Таким образом, накопление данных о массах звезд WR, нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах позволяет делать важные выводы о поздних стадиях эволюции массивных звезд.

ЗВЕЗДЫ WR И КОСМИЧЕСКИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ

Космические гамма-всплески [4] были открыты в конце 1960-х годов с борта американских спутников серии «Вела», предназначенных для контроля за ядерными взрывами в земной атмосфере. Это короткие (длительностью 1–100 секунд) всплески гамма-излучения, наблюдаемые с бортов космических аппаратов почти ежедневно и распределенные равномерно по небу.

Исследования последних лет позволили выполнить рентгеновские и оптические отождествления нескольких десятков гамма-всплесков. По оптическим спектрам удалось измерить красные смещения линий ($z = 0,4-4,5$) и доказать, что гамма-всплески генерируются в галактиках, удаленных от нас на громадные расстояния в миллиарды световых лет. Но тогда, зная расстояние и наблюдаемую освещенность, создаваемую гамма-всплесками у поверхности Земли, можно в рамках принятой модели Вселенной (например, используя плоскую космологическую модель с космологической постоянной) определить полную энергию ΔE , выделяемую во время гамма-всплеска. Она оказывается чудовищно велика: $\sim 10^{53}$ эрг, что соответствует полной аннигиляции массы, равной 5% от массы Солнца.

На рис. 5 приведено распределение гамма-всплесков по энергиям, рассчитанное в предположении об изотропном характере гамма-излучения при вспышке. Видно, что энерговыделение в гамма-всплесках зани-

мает широкий диапазон от $2 \cdot 10^{54}$ до $3 \cdot 10^{51}$ и даже до $\sim 10^{48}$ эрг (этот сравнительно низкоэнергичный гамма-всплеск, как уже отмечалось, отождествлен со вспышкой сверхновой типа Ic SN1998bw в близкой галактике ESO184-G82 с красным смещением $z = 0,0085$). Кроме того, намечается возможная бимодальность в распределении величин ΔE : основная группа гамма-всплесков имеет энергию $\Delta E \approx 3 \cdot 10^{51} - 2 \cdot 10^{54}$ эрг и намечается второй максимум в распределении величин ΔE в районе

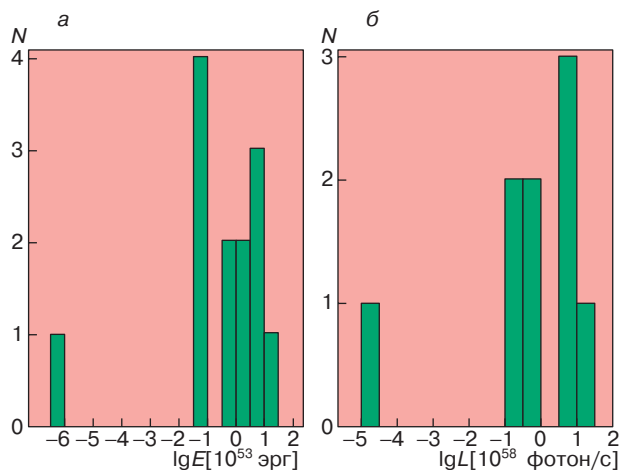


Рис. 5. Распределения гамма-всплесков по общему энерговыделению (а, в единицах 10^{53} эрг) и по интенсивности излучения в максимуме всплеска (б, в единицах 10^{58} фотонов в секунду). Видны широкий разброс гамма-всплесков по энергиям (несколько порядков величины) и возможная бимодальность распределения гамма-всплесков, характеризующаяся двумя максимумами: при 10^{53} и 10^{48} эрг

$\sim 10^{48}$ эрг. То, что в этом диапазоне ΔE пока обнаружен лишь один гамма-всплеск, может быть связано с эффектами наблюдательной селекции: просто такие низкоэнергичные гамма-всплески трудно обнаружить. Недавно был запущен новый международный специализированный спутник «Хете», предназначенный для исследования гамма-всплесков. Возможно, этот спутник поможет открыть и исследовать новые слабые гамма-всплески.

Широкий диапазон энергий гамма-всплесков коррелирует со значительным разбросом по массам звезд WR и их CO-ядер в конце эволюции. Кроме того, возможный бимодальный характер распределения гамма-всплесков по энергиям коррелирует с бимодальным распределением по массам релятивистских объектов — продуктов коллапса CO-ядер звезд WR. Замечательно также и то, что один гамма-всплеск отождествлен со вспышкой сверхновой типа Ic, соответствующей взрыву звезды WC углеродной последовательности, практически лишенной водородной оболочки. Все эти факты привлекают внимание к звездам WR как возможным прародителям гамма-всплесков.

До последнего времени наиболее популярной моделью гамма-всплесков была модель слияния нейтронных звезд в двойной системе, предложенная С.И. Блининовым с соавторами в 1984 году. Потеря двойной системой энергии за счет излучения гравитационных волн приводит к тому, что две нейтронные звезды постепенно сближаются и в конце концов сливаются. При слиянии нейтронных звезд за короткое (порядка секунд) время в результате аннигиляции пар нейтрино–антинейтрино образуется огненный шар, состоящий из электрон-позитронных пар и гамма-квантов, который расширяется под действием давления излучения до скоростей, близких к скорости света. После того как огненный шар становится прозрачным, он высвечивает гамма-кванты в виде короткой вспышки. Важно то, что процессы, сопровождающие слияние нейтронных звезд, ничем не экранируются и непосредственно видны внешнему наблюдателю. Это и позволяет наблюдать всплеск гамма-излучения от слияния двух нейтронных звезд.

Энергия, требуемая для объяснения гамма-всплесков ($\sim 10^{53}$ эрг), выделяется также и при коллапсе железного ядра массивной звезды, сопровождаемого вспышкой сверхновой. Но при этом практически вся энергия уносится в виде нейтрино. Кроме того, мощная водородная оболочка обычной звезды экранирует возникающее жесткое излучение и демпфирует своим весом появление различных неустойчивостей, возникающих при коллапсе ядра звезды. В связи с этим представляется перспективным рассмотреть звезды WR как возможные прародители гамма-всплесков: ведь они лишены

мощных водородных оболочек и в данном случае почти ничего не мешает жесткому излучению, формирующемуся при коллапсе ядра звезды WR, выходить на поверхность и быть наблюдаемым. Вспомним, что средняя масса CO-ядра звезды WR в конце эволюции $M_{CO}^f = (7-10)M_{\odot}$ близка к средней массе черной дыры $M_{ч.д} = (8-10)M_{\odot}$, формирующейся при коллапсе ядра звезды WR. Это дает основания предполагать, что при взрыве звезды WR как сверхновой масса сброшенной оболочки весьма мала, и вполне возможно, что формирующееся при коллапсе железного ядра гамма-излучение может быть наблюдаемо.

В последнее время коллапсы ядер массивных звезд серьезно рассматриваются как механизм формирования гамма-всплесков. Согласно модели Гиперновой Б. Пачинского (США), энергия при коллапсе выделяется при образовании быстро вращающейся черной дыры с массой около $10M_{\odot}$ в окружении плазмы со сверхсильным магнитным полем $\sim 10^{15}$ Гс. В моделях, разрабатываемых группой С. Вусли (США), релятивистский огненный шар формируется нейтринным излучением из аккреционного диска, образующегося из коллапсирующего ядра вокруг черной дыры. Формирующийся узконаправленный релятивистский выброс (джет) прожигает оболочку звезды и производит гамма-всплеск.

Недавно С.С. Герштейн предложил модель гамма-всплесков при коллапсе массивной невращающейся звезды WR. В этой модели внутренние ударные волны в огненном шаре формируются электрон-позитронной плазмой в ходе нестационарного пульсационного термоядерного горения вещества вблизи горячей прото-нейтронной звезды.

Следует подчеркнуть, что по мере накопления наблюдательных данных все больше и больше фактов указывает на связь гамма-всплесков с эволюцией массивных звезд. Перечислим важнейшие из них.

1. Повышенный темп звездообразования в отождествленных с гамма-всплесками галактиках (хозяйских галактиках). Именно в таких галактиках должно быть много горячих массивных звезд.

2. Большое поглощение на луче зрения к источникам гамма-всплесков, выведенное из наблюдений рентгеновских и оптических послесвечений. Высокая концентрация газа и пыли характерна для областей образования массивных звезд.

3. Распределение положений гамма-всплесков относительно центров хозяйских галактик в картинной плоскости статистически совпадает с распределением массивных звезд.

4. Наблюдения интенсивных линий железа в рентгеновских послесвечениях нескольких гамма-всплесков указывают на наличие плотного, обогащенного

тяжелыми элементами газа, окружающего область формирования гамма-всплесков.

Эти факты приводят к заключению, что по крайней мере часть гамма-всплесков связана с эволюцией массивных звезд. При этом, поскольку наиболее массивные звезды в конце эволюции превращаются в звезды WR, лишенные мощных водородных оболочек, весьма перспективно рассматривать звезды WR как прародители гамма-всплесков. Однако для успешного объяснения феномена гамма-всплесков в рамках модели звезды WR необходимо показать, что наблюдаемая частота гамма-всплесков согласуется с частотой коллапсов ядер звезд WR.

Частота гамма-всплесков составляет 10^{-7} – 10^{-6} год⁻¹ на среднюю галактику с массой $10^{11} M_{\odot}$. Частота вспышек сверхновых в Галактике (масса которой $10^{11} M_{\odot}$) составляет одну сверхновую на 30–100 лет, то есть на четыре-пять порядков выше. Поэтому исследователи при рассмотрении взрыва сверхновой как модели гамма-всплеска вынуждены привлекать не изотропное, направленное испускание гамма-квантов, например в виде джета. Отметим, что проблема частоты событий стоит и в случае модели слияний нейтронных звезд, частота которых в Галактике, согласно новейшим оценкам, выполненным В.М. Липуновым с сотрудниками, составляет $\sim 10^{-4}$, что на два-три порядка выше частоты гамма-всплесков. Здесь также необходимо использовать не изотропную модель формирования гамма-всплеска. Поскольку звезды WR соответствуют наиболее массивным звездам Галактики, их частота рождения (и соответственно взрывов как сверхновых) составляет $\sim 10^{-3}$ год⁻¹, что на три-четыре порядка выше наблюдаемой частоты гамма-всплесков.

Есть два выхода из создавшегося положения: а) постулировать наличие узких (в несколько градусов) джетов и б) допустить сферически-симметричное энерговыделение, но считать, что из-за наличия скрытых параметров коллапса (вращение, магнитное поле и т.п.) или стохастического исхода коллапса, обусловленного проявлением различных неустойчивостей, лишь одна из 10^3 – 10^4 звезд WR коллапсируя приводит к формированию гамма-всплеска. В этой связи существенно обратить внимание на звезды WR кислородной последовательности (WO-звезды), которые наиболее продвинуты в эволюционном отношении и являются наиболее компактными, лишенными внешних оболочек. Число звезд WO в галактике, по-видимому, не превышает 10, частота их взрывов как сверхновых близка к 10^{-5} , что всего на один-два порядка выше, чем наблюдаемая частота гамма-всплесков.

Недавно К.А. Постнов и автор данной статьи рассмотрели звезды WR как прародители гамма-всплесков и показали, что наиболее вероятными кандидатами

на предшественников гамма-всплесков являются именно WO-звезды. Наиболее вероятными хозяйскими галактиками для гамма-всплесков, по-видимому, являются так называемые WR-галактики, в суммарных спектрах которых наблюдаются широкие линии излучения HeII, характерные для звезд WR. Это говорит о том, что относительное число звезд WR в таких галактиках много больше, чем в нашей Галактике. Класс WR-галактик был выделен П. Конти (США) в 1991 году, и можно предполагать, что именно в этих галактиках наиболее вероятно ожидать появление гамма-всплесков. Кроме того, имеет смысл поискать признаки WR-галактик (широких линий излучения HeII) у хозяйских галактик, в которых уже были открыты гамма-всплески.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования звезд WR показывают, как тесно классическая область астрофизики может переплетаться с самыми актуальными и горячими проблемами современной науки. Есть основания полагать, что звезды WR являются ключевыми объектами для понимания происхождения черных дыр, нейтронных звезд и генерации космических гамма-всплесков. Это еще раз подчеркивает, насколько плодотворными могут быть исследования, выполненные на стыке разных научных направлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепашук А.М. Тесные двойные звезды на поздних стадиях эволюции // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 8. С. 84–92.
2. Черепашук А.М. Обратные задачи в астрофизике // Там же. 1997. № 12. С. 84–91.
3. Черепашук А.М. Черные дыры в двойных звездных системах // Там же. № 3. С. 87–93.
4. Липунов В.М. «Военная тайна» астрофизики // Там же. 1998. № 5. С. 83–89.
5. Черепашук А.М. Звезды Вольфа–Райе и рентгеновские двойные // Земля и Вселенная. 1994. № 2. С. 3–11.

Рецензент статьи В.М. Липунов

* * *

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, зав. кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ, член-корреспондент РАН. Область научных интересов – физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики. Автор свыше 250 научных работ и десяти монографий.