

Рентгеновское излучение звезд и механизмы его формирования

Введение

Рентгеновская астрономия исследует космические объекты по их рентгеновскому излучению с энергией фотонов от 0.1 до 100 кэВ, что соответствует диапазону длин волн от 100 до 0.1 ангстрема. Рентгеновский диапазон делится на 3 части: жесткий, классический и мягкий (см. презентацию).

Необходимо иметь в виду, что из-за особенностей регистрации рентгеновского излучения его поток измеряется в единицах "число фотонов на квадратный сантиметр в секунду на единичном интервале энергий", в оптике, как известно, поток измеряется в "количестве энергии на квадратный сантиметр в секунду в единичном интервале частот". Поток в фотонных единицах связан с привычным нам потоком соотношением:

$$F_x = \frac{AF_\nu}{h^2\nu},$$

где $A = 1.602 \cdot 10^{-19}$ эрг/кэВ.

Атмосфера Земли препятствует проникновению рентгеновского излучения до земной поверхности, поглощая рентгеновские кванты на высотах ~ 100 -30 км.

История открытия рентгеновской астрономии

Первые эксперименты такого рода были осуществлены в конце 1940-х годов в США под эгидой Пентагона. Как раз тогда сотрудник вашингтонской Военно-морской исследовательской лаборатории Герберт Фридман сконструировал модифицированный счетчик Гейгера, детектирующий кванты высоких энергий и потому способный засечь атмосферный ядерный взрыв (это и была основная цель). Именно с помощью этих приборов американские ученые и получили информацию об испытаниях первой советской атомной бомбы 29 августа 1949 года. В том же 1949 году Фридман и его коллеги начали отправлять новые счетчики в космос в носовых конусах трофейных немецких ракет Фау-2. Фридман пытался также обнаружить рентгеновское излучение звезд, но чувствительности тогдашних детекторов явно не хватало, и из этой затеи ничего не вышло. Однако со временем судьба вознаградила Фридмана за упорство - в 1964 году он и его сотрудники первыми обнаружили рентгеновское излучение знаменитой Крабовидной туманности. Фридман устанавливал свою аппаратуру на геофизических ракетах, но для систематического поиска космических рентгеновских источников необходимо длительное непрерывное наблюдение. Поэтому в начале 1960-х годов несколько американских астрофизиков пришли к убеждению, что детекторы рентгена следует размещать на спутниковых платформах. Среди них был выпускник Миланского университета Риккардо Джиаккони. В 1962 году его группа обнаружила Скорпион X-1 - первый рентгеновский источник за пределами Солнечной системы. К 1966 году эксперименты на ракетах и воздушных шарах позволили астрофизикам из США и Англии выявить более тридцати таких источников. Это убедило руководителей NASA в целесообразности запуска рентгеновского спутника. В проекте он назывался X-Ray Explorer, но после выхода на орбиту был переименован в Uhuru, что на языке суахили означает ксвобода (он ушел в космос с установленной вблизи берегов Кении платформы 12 декабря 1970 года - в День независимости этой страны). Uhuru проработал около двух с половиной лет, и отправленная с него информация стала источником многих открытий. Этот аппарат зарегистрировал 339 рентгеновских источников, в том числе и объект в созвездии Лебедя, который стал первым в истории астрономии претендентом на роль черной дыры.

Uhuru был рентгеновским спутником, но никак не телескопом, т.е. не собирал и не фокусировал излучение. Джиаккони это прекрасно понимал. Еще в 1960 году в соавторстве с крупнейшим американским специалистом по космическим лучам Бруно Росси он опубликовал статью, содержащую первую в мире принципиальную схему настоящего рентгеновского телескопа с фокусирующей зеркальной системой. Рентгеновские кванты имеют особенность - из-за своей большой энергии они практически не преломляются в веществе (а значит, невозможно создать рентгеновские линзы) и не отражаются, а поглощаются при любых углах падения, кроме самых маленьких (около 90 градусов). Поэтому для создания эффективного рентгеновского зеркала входящие лучи должны идти почти параллельно отражающей поверхности. Вычисления показали, что зеркало для рентгеновского телескопа должно выглядеть как сужающаяся полая трубка с параболической или гиперболической поверхностью. Еще в 1952 году немецкий физик-оптик Ганс Волкер отметил, что для надлежащей фокусировки нужны две последовательно установленные отражающие поверхности. В свою очередь Джиаккони и Росси поняли, что для увеличения чувствительности телескопа каждый фокусирующий блок должен состоять из нескольких вложенных друг в друга трубковидных зеркал с единой центральной осью. По этой схеме и строят рентгеновские телескопы.

13 ноября 1978 г. произошел запуск первой обсерватории "Эйнштейн". Разрешающая способность обсерватории была порядка 5 угл.сек, регистрировались кванты в диапазоне 200эВ - 20 кэВ. Зарегистрировали рентгеновское излучение остатков сверхновых, слабых внегалактических источников.

В 1980-90-е годы европейские страны, СССР и Япония отправили в космос немало рентгеновских спутников и телескопов (самым мощным из них был немецкий ROSAT с зеркалами 80-сантиметрового диаметра, действовавший в 1990-99 гг.). Однако ни один из них не смог существенно улучшить качество наблюдений, сделанных "Эйнштейном". Астрономии XXI века был необходим инструмент, обладающий куда более широкими возможностями. Именно поэтому в 1976 году Джиаккони и его коллега Харви Тананбаум направили в NASA новые предложения на этот счет. Будущую обсерваторию назвали AXAF (Advanced X-Ray Astrophysics Facility). Задумка была грандиозной - телескоп с шестью парами зеркал с максимальным диаметром 120 см, способный регистрировать в сто раз менее яркие рентгеновские источники, нежели "Эйнштейн". Однако руководство NASA имело иные приоритеты, да и с финансами, как всегда, была напряженка. Поэтому ученым пришлось согласиться, что телескоп получит 8 зеркал, а не 12 и будет оснащен меньшим числом приборов. 23 июля 1998 г. - запуск спутника Chandra. Его камера высокого разрешения дает возможность получать качественные изображения с точностью до 0,5 угловой секунды. В фокальной плоскости телескопа размещены два прибора ЧК камера высокого разрешения и спектрометр. Детектирующее устройство камеры представляет собой две пластины величиной с открытку, на которых находится по 69 миллионов тончайших трубочек из свинцового стекла. Удары рентгеновских квантов выбивают из них электроны, которые ускоряются электрическим полем и порождают электронные ливни. Регистрация этих сигналов позволяет определить, сколько квантов падает на каждую трубочку, и на этой основе компьютер формирует изображение объекта.

Механизмы рентгеновского излучения

Рассмотрим основные элементарные процессы, приводящие к появлению рентгеновских квантов. Их можно разделить на две группы - тепловые и нетепловые. Первые связаны с излучением нагретой до высокой температуры плазмы, при этом в энергию квантов переходит энергия теплового движения электронов. Согласно закону смещения Вина $T\lambda \sim 0.29 \cdot 10^8$, в рентгеновской области спектра может излучать плазма, нагретая до $10^6 - 10^7$ К. При таких температурах

практически все наиболее распространенные химические элементы полностью ионизованы, за исключением элементов группы железа. Поэтому наибольшее значение имеет тормозное излучение. Нетепловое излучение возникает, когда заряженные частицы приобретают энергию не за счет высокой температуры плазмы, а ускоряются каким-либо механизмом (например, при перезамыкании силовых линий магнитного поля в солнечных вспышках) до релятивистских энергий. В этом случае распределение электронов по энергиям является не максвелловским, а степенным.

1. Тормозное излучение.

При торможении свободных электронов в результате их близкого пролета от заряженных ядер генерируется широкий спектр электро-магнитного излучения. Т.к. вероятность кулоновского взаимодействия высока, то этот механизм является одним из главных источников генерации жестких фотонов в УФ и рентгеновской областях.

Излучательная способность определяется след.образом:

$$\epsilon = 5.44 \cdot 10^{-39} \frac{g_{cc} Z^2 n_e n_i}{T^{1/2}} \cdot e^{-h\nu/kT},$$

где g_{cc} - фактор Гаунта, Z и n_i - заряд и концентрация ионов, n_e - концентрация электронов. Экспоненциальный множитель определяет характер для тормозного излучения, так называемый завал по частоте на больших частотах(энергиях).

2. Рентгеновское излучение в линиях (излучение при свободно-связанных переходах).

Наиболее заметными здесь являются:

1). Рентгеновская линия нейтрального железа на энергии 6.4 кэВ, образующаяся при переходе электрона с L на K оболочку. Предварительно электрон должен быть выбит с этой оболочки рентгеновским квантом. Таким образом, эта линия является флуоресцентной, и образуется при прохождении рентгеновского излучения через оптически тонкое облако нейтрального вещества, или при отражении рентгеновского излучения от оптически толстой нейтральной среды.

2). Рентгеновская линия водородоподобного Fe XXVI железа на энергии 6.97 кэВ и гелиеподобного железа Fe XXV на энергии 6.7 кэВ. Излучаются горячей плазмой. Соответствующие переходы след.: $1s-2p(^1P_{1/2})$ и $1s-2p(^1P_{3/2})$ - для водородоподобного иона железа, $1s^2 - 1s2p(^1P_1)$ - для гелиеподобного иона железа.

3. *Магнито-тормозное циклотронное и синхротронное излучение.* Как известно, заряженные частицы (в частности, электроны) в магнитном поле двигаются по спирали, и излучают при этом энергию. Если средняя кинетическая энергия электронов меньше энергии покоя электрона ($kT_e < m_e c^2$), то излучение является циклотронным и происходит на частоте

$$\nu_H = \frac{eH}{2\pi m_e} \sim 3 \cdot 10^6$$

и ее гармониках. Видно, что при напряженности магнитного поля $H \sim 10^{12} - 10^{14}$ Гс, характерного для нейтронных звезд в рентгеновских пульсарах, циклотронное излучение попадает в рентгеновскую область спектра, а при напряженности магнитного поля $\sim 10^7 - 10^8$ Гс, характерного для белых карликов в полярах и промежуточных полярах, - в оптическую и инфракрасную.

В случае, когда энергия электронов сравнима или превосходит их энергию покоя $E = \gamma m_e c^2, \gamma \leq 1$, излучение называется синхротронным. Максимум его излучения приходится на частоту

$$\nu_H = \frac{eH\gamma^2}{2\pi m_e} \sim 1.4 \cdot 10^6 H \gamma^2.$$

4. Комптоновское рассеяние фотонов на электронах.

В процессе рассеяния фотон и электрон обмениваются энергией, и результирующие значения энергии электрона и частоты фотона определяются из законов сохранения импульса и энергии. В случае, если энергия электрона до рассеяния много меньше энергии рентгеновского фотона, фотон передает часть своей энергии электрону, этот процесс называется эффектом отдачи (прямой эффект Комптона), и результирующее изменение частоты фотона определяется (в нерелятивистском пределе)

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{hc}{mc^2}(1 - \cos \alpha),$$

$\cos \alpha$ - косинус угла рассеяния фотона (см. презентацию). В случае, когда энергия электронов больше энергии фотонов, электрон отдает часть своей энергии фотону, вследствие эффекта Доплера (обратный эффект Комптона), и результирующее среднее увеличение частоты определяется выражением:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{4}{3}(\gamma^2 - 1),$$

где γ - безразмерная энергия электрона.

5. Излучающая плазма.

В зависимости от вида распределения электронов по энергиям (по скоростям) излучение плазмы подразделяется на тепловое (когда распределение максвелловское) и на нетепловое (как правило, степенное распределение электронов по энергиям. В случае теплового излучения плазма может быть оптически толстой или оптически тонкой.

Оптически тонкая плазма излучает характерный плоский спектр с экспоненциальным завалом, по форме совпадающий с коэффициентом излучения, так как решение уравнения переноса излучения в однородном плоском слое без учета рассеяния с функцией источника, равной функции Планка, имеет вид:

$$I_\nu = (1 - \exp(-\tau))B_\nu \sim \tau B_\nu.$$

Горячая оптически тонкая плазма имеется в коронах звезд и Солнца, в остатках вспышек Сверхновых звезд, в скоплениях галактик и коронах эллиптических галактик.

Оптически толстая плазма излучает в первом приближении как абсолютно черное тело $I_\nu = B_\nu$, если можно пренебречь рассеянием на электронах. В том случае, когда непрозрачность определяется рассеянием на электронах, спектр может искажаться. Более того, при определенных условиях, благодаря многократному комптоновскому рассеянию с набором энергии, может сформироваться степенной спектр излучения. Этот процесс называется комптонизацией. Рентгеновское излучение такого типа образуется в процессе аккреции вещества на компактный объект - нейтронную звезду или черную дыру в двойной системе.

Рассмотрим более подробно механизм рентгеновского излучения в случае аккреции вещества в двойной системе. При аккреции вещества массой ΔM на компактный объект массой M потенциальная гравитационная энергия переходит в кинетическую (вещество разгоняется в гравитационном поле), которая затем переходит в тепловую при остановке вблизи поверхности, и излучается. Количество излучаемой энергии равно:

$$\Delta E = \frac{\Delta M V^2}{2} = \frac{G \Delta M M}{2R},$$

где R - радиус нейтронной звезды. Таким образом, при постоянном темпе аккреции dM/dT светимость как количество излучаемой в единицу времени энергии определяется выражением:

$$L = \frac{GM\dot{M}}{2R}.$$

Легко получить, что при темпе аккреции $dM/dT \sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ на нейтронную звезду массой равной одной массе Солнца обеспечивается светимость $\sim 8 \cdot 10^{37}$ эрг/с. И мы можем определить ее эффективную температуру:

$$\sigma T^4 = \frac{L}{4\pi R^2}$$

которая в нашем примере оказывается $T \sim 3 \cdot 10^7 \text{К}$. Как мы уже выяснили ранее, тело, нагретое до такой температуры, излучает в рентгеновском диапазоне спектра.

Рассмотрим нетепловое излучение. Известно, что заряженные частицы могут приобретать большие энергии, не только благодаря высокой температуре, но и вследствие ускорения в электромагнитных полях и во время различных взрывных процессов типа вспышек сверхновых звезд. Наша уверенность в этом основана на двух наблюдательных фактах - наличии Галактических космических лучей и солнечных космических лучей. Последние уверенно связываются с солнечными вспышками, а Галактические космические лучи скорее всего обязаны своим происхождением вспышкам сверхновых звезд. В космических лучах частицы имеют степенное распределение по энергиям, поэтому мы вправе предполагать, что и в астрофизических объектах, в которых могут быть нетепловые ускоренные частицы, их распределение по энергиям является степенным. Однако тепловая плазма, благодаря эффекту Комптона, также способна генерировать степенной спектр. Сделать выбор между тепловым и нетепловым механизмом генерации степенного рентгеновского спектра можно, измерив его поляризацию. Поляризация синхротронного излучения должна быть велика и достигать 20-30% , что и наблюдается в синхротронных радиоспектрах. Поляризация при рассеянии на электронах не может превышать 12%. К сожалению, в настоящее время поляризация излучения астрофизических объектов в рентгеновской области спектра не может быть измерена.

Характеристики рентгеновского излучения звезд

1. *Солнце*. Излучают в рентгене корона и хромосферные вспышки. Механизм возбуждения рентгеновского излучения в основном тепловой (формирование линий) и тормозной. Светимость короны в рентгеновском диапазоне $\sim 10^{-6} - 10^{-7} L_{\odot}$ ($L_{\odot} = 3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с).

2. *Остатки сверхновых и нейтронные звезды в остатках сверхновых (радиопульсары)*. Более десятка галактических рентгеновских источников отождествлены с остатками так называемых сверхновых звезд. В большинстве случаев источником рентгеновского излучения является горячая плазма за фронтом ударной волны, которая служит границей раздела между межзвездной средой и расширяющейся газовой оболочкой, возникшей после вспышки сверхновой. Пожалуй, важным исключением является знаменитая Крабовидная туманность. Ее излучение (от радио- до рентгеновского) интерпретируется как синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитном поле туманности. В центре этой туманности находится радиопульсар. Это единственный радиопульсар, излучающий во всех диапазонах, включая и гамма-излучение сверхвысокой энергии.

3. *Рентгеновские тесные двойные системы*. В настоящее время значительное количество рентгеновских источников отождествлено с тесными двойными системами. Почти все они являются рентгеновскими пульсарами, то есть быстро вращающимися замагниченными нейтронными звездами, входящими в состав двойных систем. Источником энергии рентгеновского пульсара является, однако, не энергия вращения нейтронной звезды, а гравитационная энергия газа, перетекающего на нейтронную звезду из оптического компонента двойной системы, выделяющаяся при падении на ее поверхность. Для появления рентгеновского пульсара необходимо, чтобы на поверхности нейтронной звезды было сильное магнитное поле $\sim 10^{11} - 10^{13}$ Гс. Как

только в процессе эволюции нормальной звезды в тесной двойной системе ее поверхность достигает границы полости Роша, начинается сильное истечение газа. Ионизированный газ свободно падает на замагниченную нейтронную звезду вплоть до так называемой альвеновской поверхности, радиус которой r_A определяется из условия равенства магнитного и газового давлений. На расстоянии r_A от нейтронной звезды магнитное поле останавливает поток плазмы и направляет его вдоль магнитных силовых линий на магнитные полюсы звезды.

4. *Затменно-двойные звезды.* В некоторых двойных звездах одна из компонент имеет звездный ветер. Вещество ветра формирует ударный фронт при столкновении со второй звездой. Температура за фронтом ударной волны $\sim 10^6$ К, и вещество при таких температурах излучает в рентгеновском диапазоне спектра. Пример: Алголь $L_X \sim 10^{30} - 10^{31}$ эрг/с.

5. *Транзиентные рентгеновские источники или рентгеновские новые.* Транзиент, или рентгеновская новая, - это рентгеновская звезда, которая внезапно вспыхивает в каком-либо участке неба, где она раньше не наблюдалась. Интенсивность излучения такой звезды возрастает с характерным временем порядка недели, а затем блеск звезды постепенно, за несколько месяцев, падает до уровня фона. Кривая блеска рентгеновского транзиента удивительно напоминает кривую оптического блеска новой. Вот почему транзиенты имеют второе название - рентгеновские новые. Рентгеновские новые - это также двойные системы, но в отличие от предыдущего случая нейтронная звезда движется по сильно вытянутой орбите с большим эксцентриситетом. Пока нейтронная звезда находится далеко от оптического компонента, скорость истечения вещества из нормальной звезды невелика и соответственно мал поток возникающего в результате аккреции рентгеновского излучения. Как только нейтронная звезда входит в периастр (то есть подходит близко к нормальной звезде), из-за уменьшения расстояния между звездами и соответствующего возрастания гравитационного воздействия нейтронной звезды на оптический компонент мощность истечения резко возрастает, увеличивается темп аккреции и соответственно резко растет рентгеновский поток.

6. *Барстеры.* Барстеры характеризуются внезапным возрастанием рентгеновской светимости за время порядка нескольких секунд. При аккреции на нейтронную звезду со слабым магнитным полем рентгеновский пульсар не появляется. Обычно светит почти постоянно аккреционный диск, однако вещество, накапливаемое на поверхности нейтронной звезды, достигая критической массы, испытывает термоядерный взрыв, в процессе которого богатое водородом вещество превращается в гелий и другие тяжелые элементы. Это ведет к вспышкам рентгеновского излучения, повторяющимся через 4-12 часов. Кроме этих вспышек у некоторых барстеров наблюдаются вспышки второго типа, более частые (отсюда - быстрые барстеры) с интервалом от 20 до 400 секунд, связанные, по-видимому, с неустойчивостью аккреционного диска. Светимость барстера во время вспышки $\sim 10^{38}$ эрг/с, в спокойном состоянии $\sim 10^{36} - 10^{37}$ эрг/с.

7. *Сверхмягкие рентгеновские источники.* Эти рентгеновские источники были исследованы в начале 90-х годов спутником "ROSAT". Они имеют очень мягкие спектры (90% фотонов имеют энергии меньше 0.5 кэВ) и высокие светимости $L_X \sim 10^{38}$ эрг/с. Эти источники были интерпретированы как тесные двойные системы с белым карликом и вторичной звездой спектрального класса F, переполняющей свою полость Роша.

8. *Черные дыры в двойных системах.* Выдающимся достижением рентгеновской астрономии явилось открытие кандидатов в черные дыры в двойных системах. Характер аккреции плазмы из оптического компонента на черную дыру отличается от случая нейтронной звезды, так как у черной дыры не может быть сильного магнитного поля. Поэтому рентгеновское излучение аккрецирующей черной дыры никогда не будет пульсировать. Однако решающим аргументом, конечно, является определение массы рентгеновского компонента, например по кривой лучевых скоростей оптического компонента.

До последнего времени наилучшим кандидатом в черные дыры считался рентгеновский источник Лебедь X-1 (Cyg X-1). Его оптическим компонентом является голубой сверхгигант - звезда HDE 226868. Ее спектральные линии меняются вследствие эффекта Доплера с периодом $P = 5,6$ суток, что соответствует орбитальному периоду двойной системы. По кривой лучевых скоростей можно найти функцию масс, которая позволяет установить нижний предел и массу невидимого объекта как ~ 10 масс Солнца. Это и есть главный наблюдательный аргумент в пользу существования черной дыры в этой двойной системе.

В последнее время найдены и другие кандидаты в черные дыры - это рентгеновский источник в Большом Магеллановом Облаке LMC X-3 и рентгеновская новая V404 Cyg. Определенные массы компактных звезд - источников рентгеновского излучения оказались намного выше трех масс Солнца - предельного значения массы нейтронной звезды. Поэтому они с большой степенью достоверности являются черными дырами.

Дальнейшие исследования рентгеновского излучения

В 2011 году планируется запуск обсерватории Спектр-Рентген-Гамма, который будет изучать самые энергичные процессы во Вселенной со времени Большого Взрыва. С помощью этой миссии будет впервые проведен обзор всего неба в жестком рентгеновском диапазоне энергий от 2 до 30 кэВ.

Основные научные задачи проекта: 1. Обнаружение около 100 тысяч скоплений галактик (т.е. регистрация всех существующих во Вселенной скоплений!); 2. Обнаружение около 3 млн AGN и детальное исследование всей популяции сверхмассивных черных дыр; 3. Детектирование филаментов теплого газа между скоплениями для исследования процессов формирования крупномасштабной структуры Вселенной ; 4. Детальное изучение физики популяции галактических рентгист-в: рент.двойных, ост.вспышек сверх-х,протозвезды и др.(см. презентацию)