

И. С. ШКЛОВСКИЙ

О ПРИРОДЕ СВЕЧЕНИЯ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 13 IV 1953)

Знаменитая туманность М1 (Крабовидная туманность) уже неоднократно привлекала к себе внимание исследователей. Этот единственный в своем роде объект, как сейчас твердо установлено, является остатком вспышки Сверхновой 1054 г. Существующие представления о природе Крабовидной туманности основываются на важных работах Бааде (1) и Минковского (2), получивших при помощи первоклассных инструментальных средств ее фотографии и спектр. Согласно (1), туманность состоит из двух взаимно-проникающих частей: ажурной волокнистой сетки, излучающей линейчатый спектр, расположенной на периферии туманности и расширяющейся со скоростью 1000—1300 км/сек, и аморфной сплошной массы, имеющей тенденцию концентрироваться к центру туманности и излучающей непрерывный спектр. Согласно (2), свечение в линиях излучения составляет только несколько процентов от свечения Крабовидной туманности в непрерывном спектре. Из приведенных в (2) значений цветовой температуры туманности следует, что интенсивность излучения в непрерывном спектре медленно уменьшается с уменьшением длины волны.

Все существующие представления о физических условиях в Крабовидной туманности основаны на истолковании ее непрерывного спектра. Бааде (1) и Минковский (2) не допускают возможности какого-либо механизма излучения, отличного от свободно-свободных и свободно-связанных переходов в сильно ионизованном газе — веществе туманности. Это излучение должно возбуждаться исключительно горячей звездой — ядром туманности — бывшей Сверхновой. Такой механизм излучения вполне естественен, так как совершенно очевидно, что никакими процессами рассеяния или отражения свечение Крабовидной туманности объяснить нельзя. Другие механизмы свечения в непрерывном спектре туманностей никогда не рассматривались*.

Однако при таком предположении о механизме излучения туманности в непрерывном спектре возникают трудности и противоречия, которые нам представляются непреодолимыми. Многие из этих трудностей были известны раньше, но не делалось попыток критически анализировать их, так как никто не сомневался в правильности предложенного в (1) и (2) механизма излучения непрерывного спектра. Мы сейчас, по необходимости кратко, перечислим эти трудности.

* Исключение составляет механизм «дробления» I_{α} -квантов, которым недавно Киппер объяснил непрерывный спектр планетарных туманностей (10). Если бы этот механизм был ответственен за излучение Крабовидной туманности в непрерывном спектре, то последняя излучала бы интенсивные линии водорода, чего не наблюдается. Кроме того, распределение энергии в непрерывном спектре было бы отличным от наблюдаемого. Модификация механизма Киппера — «дробление» квантов резонансной линии гелия — по тем же причинам не может объяснить непрерывный спектр М1.

Неизбежным следствием принятого механизма излучения являются выводы о том, что в Крабовидной туманности: а) кинетическая температура исключительно высока — порядка сотен тысяч градусов (особенно, если учесть, что наблюдения не дают указаний на скачок интенсивности у границы серий Бальмера ⁽³⁾ и у границ серий ионизованного гелия); б) концентрация электронов в туманности $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$; в) масса туманности около $15 M_{\odot}$; г) температура ядра чудовищно высока ($500\,000^{\circ}$); д) радиус ядра исключительно мал ($0,02 R_{\odot}$).

Представляются совершенно непонятными морфологические особенности Крабовидной туманности. Нельзя понять, как волокнистая сетка туманности движется вот уже 900 лет в аморфной, довольно плотной среде, излучающей непрерывный спектр. Заметим, что плотность волокон очень низка, ибо самые интенсивные линии излучения суть: [OII] λ 3727 и [NII] $\lambda\lambda$ 6548 и 6584. Но вероятности переходов у этих линий исключительно малы, поэтому они усиливаются только у туманностей с низкой плотностью.

Поэтому вряд ли концентрация электронов в волокнах M1 превышает $300\text{—}400 \text{ см}^{-3}$. Тем более непонятно длительное движение столь разреженного, сравнительно холодного (что следует из характера спектра волокон) газа в довольно плотной, очень горячей среде. Важно подчеркнуть, что аморфная часть туманности не является расширяющейся тонкой оболочкой (подобно волокнистой сетке), а сплошь заполняет объем туманности ⁽⁴⁾.

Совершенно непонятно, почему у волокон сравнительно низкое состояние возбуждения. Ведь быстрые электроны будут из «диффузной» части туманности попадать в ее «волоконистую» часть, возбуждая и ионизируя там атомы. Точно так же нельзя пренебрегать ионизацией атомов в волокнах мощным ультрафиолетовым излучением ядра. В ⁽²⁾ делается попытка устранить эту трудность, однако эту попытку никоим образом нельзя признать удовлетворительной.

Непонятно, почему в спектре «диффузной» части туманности отсутствуют линии излучения водорода и ионизованного гелия, с неизбежностью возникающие при рекомбинациях. Попытка объяснить отсутствие водородных линий предположением, что Крабовидная туманность бедна водородом и гелием, неудовлетворительна. В волокнах линии гелия относительно весьма интенсивны, линии водорода также имеются.

Ядру Крабовидной туманности приходится приписывать совершенно фантастические характеристики специально для того, чтобы объяснить необычные условия в туманности. Это является одним из наиболее слабых пунктов интерпретации непрерывного спектра M1.

Непонятно, почему туманности — остатки галактических Сверхновых 369 г. ⁽⁵⁾, 1572 и 1604 гг. — так слабы по сравнению с Крабовидной туманностью ⁽⁶⁾. Существенной трудностью является также аномально большая масса Крабовидной туманности.

Подчеркиваем, что все эти трудности вытекают из истолкования непрерывного спектра M1. Ввиду того что эти трудности, как нам представляется, являются непреодолимыми, указанное истолкование следует признать ошибочным. Существующая интерпретация непрерывного спектра Крабовидной туманности возникла тогда, когда нельзя было предложить никакого другого механизма излучения. В настоящее время, однако, положение коренным образом изменилось.

В 1949 г. было обнаружено, что Крабовидная туманность является довольно мощным источником радиоизлучения ⁽⁷⁾. В 1952 г. было доказано, что угловые размеры источника излучения совпадают с угловыми размерами Крабовидной туманности ⁽⁸⁾. Таким образом, с достоверностью установлено, что источником излучения является не ядро, а сама туманность.

Исследования показали, что радиоспектр Крабовидной туманности резко отличается от радиоспектров других дискретных источников. А именно, на протяжении огромного интервала от $\lambda = 750$ см до $\lambda = 25$ см, охватывающего около 5 октав, поток излучения, рассчитанный на единичный интервал частот, остается практически постоянным⁽⁹⁾. Известно, что такой особенностью обладает излучение оптически тонкого слоя ионизованного газа⁽⁵⁾. Поэтому мы попытались в⁽⁵⁾ объяснить радиоизлучение Крабовидной туманности свободно-свободными переходами, т. е. тем же механизмом, который, согласно^(1, 2), определяет свечение этой туманности в оптической части спектра. При этом, однако, интенсивность, рассчитанная на единичный интервал частот в оптической части спектра, должна быть в 3 раза меньше, чем в области радиочастот; между тем из наблюдений следует, что она в 1000 раз меньше. Никаким приемлемым межзвездным поглощением света такую разницу объяснить нельзя⁽⁵⁾. Это означает, что радиоизлучение Крабовидной туманности нельзя объяснить тепловым излучением находящихся в ней газов.

Учитывая неприемлемость принятого в настоящее время механизма излучения Крабовидной туманности в непрерывном спектре и особенность ее радиоспектра, нам представляется достаточно обоснованным считать, что те же факторы, которые являются причиной радиоизлучения Крабовидной туманности, являются причиной ее оптического излучения с непрерывным спектром. Если на протяжении 5 октав интенсивность радиоизлучения, рассчитанная на единичный интервал частот, почти не убывает (как это следует из наблюдений), то на протяжении последующих 18 октав (до оптической области) она убывает в 1000 раз, что представляется вполне естественным.

Согласно⁽⁵⁾, механизмом радиоизлучения в туманностях — остатках Сверхновых — является тормозное излучение релятивистских электронов в слабых магнитных полях. Частота, на которой излучается наибольшее количество энергии, дается соотношением $\nu_m = \frac{eH}{4\pi mc} \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$, где

E — энергия релятивистских электронов. Отсюда следует, что если $H = 10^{-4}$, то при $\nu_m = 1200$ Мгц ($\lambda = 25$ см) $E = 1,1 \cdot 10^9$ эв, а при $\nu_m = 5 \cdot 10^{14}$ Мгц ($\lambda = 6000$ Å) $E = 7 \cdot 10^{11}$ эв.

Если в туманности по каким-либо причинам имеются релятивистские электроны с энергией порядка 10^9 эв, то должны быть в некотором количестве и электроны с энергией порядка 10^{11} — 10^{12} эв. Учитывая, что интенсивность туманности в оптической части спектра в 1000 раз меньше, чем в области радиочастот, при помощи известных формул для тормозного излучения релятивистских электронов в магнитных полях найдем, что концентрация электронов с энергией в $7 \cdot 10^{11}$ эв будет примерно в 1000 раз меньше, чем концентрация электронов с энергией в 10^9 эв, и будет порядка 10^{-9} см⁻³. Электроны с энергией $7 \cdot 10^{11}$ эв, излучая в магнитном поле, будут тормозиться. Однако, как можно показать, существенные потери энергии наступят только через несколько тысяч лет.

Таким образом, у М1 «реальной туманностью» является только расширяющаяся система волокон — «сетка». Она имеет чисто эмиссионный спектр. Видимая звездная величина светящихся газов — остатков взрыва Сверхновой 1054 г. — редуцируется с 9^m до 12 — 13^m , что уже довольно близко к видимой величине остатков Сверхновых 369 и 1604 гг. (15^m). Планетарные туманности, удаленные от нас на такое же расстояние, как и М1, обычно имеют звездную величину около 10^m ⁽⁶⁾. Учитывая низкую плотность волокон, масса Крабовидной туманности (состоящей, по нашим представлениям, из одних только волокон) вряд ли превышает несколько сотых массы Солнца, хотя, по видимому, в сотни раз превышает массы оболочек обычных Новых звезд. Что касается массы «диффузной» туманности, состоящей из релятивистских частиц, то она совершенно ничтожна, не больше $10^{-7} M_{\odot}$. То обстоятельство, что у других туманностей — остат-

ков Сверхновых 369 и 1572 гг.— нет интенсивного непрерывного спектра (что определяет их малую яркость), объясняется отсутствием в этих туманностях достаточного количества релятивистских электронов с высокими энергиями.

Таким образом, вся проблема физики туманностей — остатков Сверхновых, а равно и самих Сверхновых должна быть полностью пересмотрена.

В частности, коль скоро массы оболочек, выброшенных Сверхновыми, существенно меньше массы самой звезды, вспышка Сверхновой вряд ли влечет за собой коренное изменение структуры звезды. Это означает, что не существует качественного различия между вспышками Сверхновых и обычных Новых звезд. Разница только в масштабе явления, т. е. в количестве освободившейся энергии, массе выброшенной оболочки и т. д.

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
6 IV 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. Baade, *Ap. J.*, **96**, 188 (1942). ² R. Minkowski, *Ap. J.*, **96**, 199 (1942).
³ D. Barbier, *Ann. Aph.*, **8**, 35 (1945). ⁴ И. Оорт, *Космическая аэродинамика*, М., 1952. ⁵ И. С. Шкловский, *Астр. журн.*, **30**, 15 (1953). ⁶ Б. А. Воронцов-Вельяминов, *Газовые туманности и новые звезды*, изд. АН СССР, 1948. ⁷ J. Stanley, O. Slee, *Austr. J. Sci. Res.*, **2** (1949). ⁸ B. Mills, *Nature*, **170**, 1063 (1952).
⁹ J. H. Piddington, H. C. Minnett, *Austr. J. Sci. Res.*, **4**, 458 (1951).
¹⁰ А. Я. Киппер, *Сборн. О развитии советской науки в Эстонской ССР с 1940 по 1950 г.*, 1950.