Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 4

АСТРОНОМИЯ

Л. Э. ГУРЕВИЧ и А. И. ЛЕБЕДИНСКИЙ

О ПРИЧИНАХ ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 24 III 1955)

Явления, происходящие при вспышке Новой, показывают, что при этом на поверхность звезды выходит ударная волна. Это естественно представлять себе как результат взрыва, происшедшего в недрах звезды. Гипотеза о тепловом взрыве ядерных реакций как причине вспышек Новых, а может быть, и новоподобных звезд высказана в [1].

Одна из возможных причин звездных вспышек заключается в следующем. После выгорания водорода в центральной части звезды в ней образуется постепенно растущая изотермическая область, окруженная слоем ядерных источников энергии. При достижении изотермической областью достаточно больших размеров звезда переходит с режима ядерных реакций, как источника энергии, на режим гравитационного сжатия. На этой стадии эволюция звезды заключается в ее сжатии, сопровождающемся постепенным разогревом всей ее массы, включая и наружную область, в которой еще сохранился водород. Превращение водорода в гелий в этой области будет постепенно ускоряться и может привести к тепловому взрыву. Взрыв произойдет вследствие того, что тепловыделение при ядерных реакциях растет с температурой гораздо быстрее, чем теплоотдача из области периферических источников энергии наружу, и при постепенном разогреве может быть достигнута такая критическая температура T_k, выше которой тепловыделение происходит быстрее, чем теплоотдача, и потому уже не может компенсироваться теплоотдачей наружу. С этого момента квазистационарное состояние становится невозможным и начинается сравнительно быстрый рост температуры в области периферических источников энергии (в слое A, как мы его назовем). Через некоторое время t_i, называемое временем индукции, начнется детонация, и ударная волна вынесет выделенную энергию на поверхность звезды.

В процессе перехода звезды с режима ядерных источников на режим гравитационного сжатия, на той стадии, когда масса изотермической области становится достаточно велика, звезда проходит через неустойчивое состояние, в котором могут возникнуть вспышки. Чтобы понять это, рассмотрим наиболее простой в математическом отношении случай, когда наружная содержащая водород область стала уже тонкой и ее нижняя граница находится на глубине z_A, малой по сравнению с радиусом звезды R. В этом приближении температура на глубине z_A

$$T_A \sim z_A \sim \left(\frac{M_e}{R^2}\right)^{4/17} (gF)^{2/17}, \qquad (1)$$

где M_e — масса наружной области, g и F — ускорение силы тяжести и плотность потока радиации на поверхности звезды.

При случайном увеличении энерговыделения возрастет F, а вместе с ним, согласно (1), и T_A. Рост T_A увеличит энерговыделение ядер-

ных реакций, что в свою очередь приведет к дальнейшему росту z_A и T_A. При случайном уменьшении F глубина z_A, а вместе с тем и температура T_A уменьшается, что поведет к дальнейшему уменьшению F, пока ядерные реакции не прекратятся. Значит, такое состояние неустойчиво. На более ранней стадии эволюции звезды, пока глубина z_A еще велика, соотношения (1) не верны, и случайное изменение потока энергии вызывает изменение температуры в противоположную сторону, возвращающее тепловыделение к его нормальному значению*.

Усиление периферических ядерных реакций непосредственно приводит к вспышке. В обратном случае — их угасания — звезда постепенно переходит на новый режим — режим гравитационного сжатия как источника ее энергии. Переходный процесс не поддается простому рассмотрению, но когда процесс сжатия, начавшись на периферии звезды, распространится на всю ее массу до самого центра и сжатие будет происходить гомологически, оно будет сопровождаться разогревом всей звезды и, в частности, слоя A. Поэтому рано или поздно температура T_A слоя A достигнет критического значения T_k, и в нем произойдет вспышка, если она не произошла раньше во время переходного процесса. Таким образом, угасание периферических ядерных реакций на переходной стадии эволюции звезды лишь отсрочивает вспышку, но не устраняет ее наступление**.

Рассмотрение кинетики процесса вспышки приводит к следующим выводам. В течение периода индукции температура слоя A возрастает от критического значения T_k до значения T_i, в несколько раз превосходящего критическое (расчет дает для вспышек Новых $T_k \approx 2 \cdot 10^7$, $T_i \approx 8 \cdot 10^7$). Период индукции длится в случае плотной звезды-карлика несколько тысяч лет, но лишь непосредственно перед вспышкой примерно за неделю — начинается заметный и быстро ускоряющийся рост температуры, а потому и быстро возрастающее тепловыделение. Дополнительное тепло все в меньшей мере успевает отводиться наружу, и на наружной границе слоя A образуется сверхадиабатический градиент температуры. Однако он не может вызвать перемешивание вещества, так как для развития конвекции необходимо, как показывает оценка, значительно большее время.

При температуре T_i тепловыделение в слое A происходит уже столь быстро, что тепло не может отводиться из него наружу, и в нем образуется конечный перепад давления, т. е. ударная волна, вы-

---

* Можно думать, что именно эта неустойчивость была формально, без выяснения ее физического смысла, обнаружена в [2], где установлено, что при достижении определенных критических размеров изотермической области уравнения равновесия звезды становятся несовместными.

** Итак, наша гипотеза связывает вспышки звезд с периферическими взрывами в них. Тепловой взрыв в центральной части звезды при обычных условиях невозможен, так как звезда обладает свойством «саморегулирования», препятствующим центральному взрыву. Дело в том, что при медленном повышении тепловыделения в центральной части звезды избыточное тепло распределяется равновесным образом по всей звезде и это приводит вследствие расширения звезды, в соответствии с теоремой о вириале, не к нагреванию, а к охлаждению центральной области звезды.

Наоборот, в случае периферического взрыва медленное расширение области, лежащей над слоем A, происходящее в процессе предвзрывного разогрева за время индукции, не мешает взрыву, как при разогреве центральной области звезды, а даже отчасти помогает ему, так как повышает температуру слоя A. Это следует из формулы (1), в которой теперь под F следует подразумевать сумму потоков энергии: F_c — основных источников энергии звезды и F_A — периферических источников, находящихся в слое A, т. е. $F = F_c + F_A$. При увеличении F_A растет глубина z_A и температура T_A, так что расширение не приводит к охлаждению слоя A. В отличие от случая, рассмотренного в тексте, угасание ядерных реакций в слое A теперь невозможно, так как центральные источники энергии поддерживают некоторую минимальную температуру слоя A.

носящая наружу часть энергии и производящая сильный нагрев всего газа, лежащего над слоем A. Начавшийся таким образом взрыв быстро приостанавливается или, как мы будем говорить, вырождается задолго до исчерпания водорода в наружной области, так что лишь малая его доля успевает превратиться в гелий.

Причина вырождения взрыва заключается в специфике ядерных реакций. Из двух известных реакций превращения водорода в гелий одна, а именно, протон — протонная вообще не может вести к взрыву вследствие своей медленности. Как показано в [1], при критической температуре тепловыделение в слое A должно быть сравнимо со светимостью звезды, а в момент начала взрыва — еще на много порядков больше; протон — протонная реакция даже при несущественности кулоновского барьера для столкновений протонов не может дать такого тепловыделения. Что же касается реакции Бете, то она содержит два β-распада, происходящих за время порядка сотен секунд: $N^{13} \to C^{13} + e^+$ со временем полураспада $9{,}93 \pm 0{,}03$ мин. и $O^{15} \to N^{15} + e^+$ со временем полураспада 115 ± 1 сек.*. При высоких температурах скорость всего цикла Бете лимитируется этими двумя процессами, и потому быстрое ускорение процесса превращения водорода слоя A в гелий прекращается очень скоро после начала взрыва, когда все ядра C^{12}, захватив протон, превратятся в ядра C^{13}. После этого каждое ядро C^{12} может захватывать в среднем один протон за 10 мин., так что в течение этого срока доля x_C / x_H всего водорода слоя A сможет превратиться в гелий, где x_H и x_C — атомные концентрации водорода и углерода. При $x_H \approx 1$ и обычном значении $x_C \approx 10^{-3}$ эта доля равна 10^{-3}, а весь водород слоя A может быть исчерпан лишь за неделю. Но газ наружной области, нагретый до 10^8 градусов, не может оставаться в покое в течение такого срока. Он неизбежно придет за время порядка десятков секунд в состояние быстрого расширения, сопровождающегося, вообще говоря, беспорядочными движениями, и испытывает значительное охлаждение, прекращающее взрыв. Поэтому доля водорода, который успеет превратиться при вспышке в гелий, не превышает доли атомов углерода, т. е. 10^{-3}. Поскольку при взрыве выгорает лишь малая часть водорода после взрыва восстанавливаются те же условия, что и до взрыва и потому через некоторое время взрыв должен повториться.

Совокупность наблюдательных факторов делает весьма вероятным, что вспышки каждой новой звезды действительно многократно повторяются. Промежутки времени между вспышками должны быть порядка времени индукции. Если произошла сильная вспышка, то она породит интенсивную турбулентность и вещество охладится до критической температуры, которая обусловливается структурой всей звезды в целом. В этом случае промежуток времени между вспышками сравним с периодом индукции при критической температуре. Наоборот, слабая вспышка порождает менее интенсивное перемешивание, а потому и меньшее охлаждение вещества. Вследствие этого промежутки времени между слабыми вспышками — порядка времени индукции при температуре, превышающей критическую, т. е. значительно меньше, чем в случае сильных вспышек.

Таким образом, намечается возможность объяснения корреляции между частотой вспышек и их амплитудой.

Энергетический масштаб вспышки определяется массой наружной, содержащей водород части звезды и потому убывает на протяжении ее эволюции. Вспышка, охватывающая существенную часть звезды,

---

* Возможный вариант реакции $N^{13} + H \to O^{14} \to N^{14} + e^+$ также содержит β-распад со временем полураспада $76{,}5 \pm 0{,}5$ сек.

имеет энергетический масштаб вспышек Сверхновых *. Промежутки времени между такими вспышками должны быть порядка миллионов лет. Число вспышек масштаба Сверхновых, испытаемых звездой, а потому и частота этих вспышек в Галактике, зависит от динамики вспышки, выброса массы и темпов гравитационного сжатия, и его определение требует особого исследования. По мере уменьшения наружной области звезды масштабы вспышек и промежутки между ними уменьшаются. Однако лишь у достаточно плотных карликов малой массы с радиусом порядка или меньше 0,1 $R_\odot$ возможны вспышки с энергетическим масштабом вспышек Новых. В этом случае промежутки времени между вспышками должны быть порядка тысяч лет. Именно таким карликом, судя по последним данным, является Новая Геркулеса 1934 г. **.

Как мы уже видели, при очень высокой температуре, достигаемой слоем A за время взрыва, все процессы цикла Бете происходят с большой скоростью, за исключением процессов β-распада, приводящих к образованию C^{13} и N^{15}. Нарастание тепловыделения прекращается, и взрыв вырождается тогда, когда значительная часть устойчивых ядер C^{12}, C^{13}, N^{14} и N^{15} превратилась в радиоактивные ядра N^{13} и O^{15}, которые в дальнейшем после β-распада переходят в C^{13} и N^{15}. Поэтому в результате вспышек C^{12} и N^{14} должны перерабатываться в C^{13} и N^{15} и, следовательно, отношения $C^{13}:C^{12}$ и $N^{15}:N^{14}$ должны быть аномально велики в атмосферах звезд, испытавших вспышки.

В некоторых холодных звездах обнаружено ([4]) аномально большое содержание изотопа C^{13}. Наблюдаемая величина отношения $C^{13}:C^{13}$ достигает единицы. С нашей точки зрения это может быть следствием того, что эти звезды испытывали в прошлом вспышки.

Поступило
17 II 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Л. Э. Гуревич, А. И. Лебединский, ЖЭТФ, 17, 792 (1947). [2] S. Chandrasekhar, L. R. Henrich, Aph. J., 94, 525 (1941). [3] M. F. Walker, PASP, 66, 230 (1954). [4] Astrophysics, Editor J. A. Hynek, N. Y., 1951, p. 154.

* Другая возможность вспышек масштаба Сверхновых заключается в том, что в звездах с большим содержанием углерода мощная ударная волна, распространяющаяся из слоя A внутрь, может привести к возникновению в нижележащих слоях реакции превращения гелия в углерод, не содержащей медленно протекающих процессов. Взрыв в этом случае не будет вырожденным, и существенная часть ядерной энергии звезды превратится в тепло.

** Валькер установил ([3]), что Новая Геркулеса 1934 г. — затменная двойная звезда с радиусом орбиты, лишь немного превышающим сумму радиусов звезд (длительность затмения около часа при периоде $4^h\,39^m$). Вторичный минимум почти не заметен, и следовательно, эффективная температура одной звезды много выше, чем другой. Повидимому, суммарная масса обоих компонентов порядка $M_\odot$, радиус большего — холодного компонента порядка $R_\odot$, а радиус меньшего и более яркого компонента, вероятно вспыхивающего как Новая, существенно меньше, чем $R_\odot$.