

И. М. ГОРДОН

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПЕРЕМЕННОСТИ ЗВЕЗД И ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 12 IV 1954)

1. Нами было показано, что в случае вспышек Сверхновых увеличение светимости не может иметь непосредственной причиной увеличение излучающей поверхности ⁽¹⁾. Такая общепринятая точка зрения противоречит наблюдаемой скорости расширения. Единственным механизмом, который может обеспечить колоссальное и весьма быстрое возрастание светимости, повидимому, является тормозное излучение релятивистских электронов. Таким образом, при вспышке Сверхновых имеет место выброс огромного числа космических частиц, и сама вспышка является световым сигналом об этом грандиозном взрыве. Установление того факта, что вспышка Сверхновых обусловлена излучением «свещающихся» электронов, обязана исключительно масштабу явления, который делает очевидным несостоятельность обычного механизма теплового излучения.

Вместе с тем есть веские основания полагать, что образование космических частиц сопутствует и другим, менее значительным проявлениям переменности звезд. Если бы Солнце находилось на расстоянии ближайшей звезды, оно не обнаруживало бы никаких признаков переменности. Однако его исключительная близость позволяет обнаружить своеобразную форму переменности, выраженную 11-летним циклом активности, одним из ярких проявлений которой являются извержения. Во время хромосферных извержений происходит ряд замечательных процессов, которые, как нами было показано ранее ⁽²⁾, вытекают из основного факта — образования в них некоторого количества космических частиц. Этот вывод находит подтверждение в том что при некоторых извержениях непосредственно наблюдается увеличение интенсивности первичной компоненты космических лучей.

Мы приходим к выводу, что существенной чертой и самых мощных проявлений переменности (Сверхновые), и самых слабых проявлений (Солнце) является образование космических частиц. Естественно ожидать, что и в промежуточных случаях переменности этот процесс должен играть существенную роль. Ключом для решения этого вопроса являются свойства спектров извержений. Как известно, извержения наблюдаются в виде эмиссионной области в хромосфере, причем в эмиссии наблюдается ряд линий водорода, кальция и других элементов; они сопровождаются образованием темных волокон, которые обнаруживают значительные переменные смещения как к фиолетовому, так и к красному концу спектра. Волокна свидетельствуют об образовании активных протуберанцев со скоростями порядка сотен километров в секунду ⁽³⁾. Быстрые изменения лучевых скоростей свидетельствуют о действии сил, которые существенно превосходят гравитационные силы. Иногда эти волокна значительно искажают вид извержения, а также наблюдаются в эмиссии ⁽⁴⁾. Недавно установлено явление «выброса» атомов из извержений со скоростями порядка тысячи километров в секунду; эти выбросы

ответственны за геомагнитные возмущения, следующие за мощными извержениями ⁽⁵⁾.

Особый интерес представляют случаи, когда в извержениях настолько увеличивалась интенсивность непрерывного спектра, что они наблюдались в интегральном свете ⁽⁶⁾. Обычное объяснение повышенной интенсивности увеличенной электронной плотностью в данном случае несостоятельно, так как противоречит второму началу термодинамики. Мы объяснили эти случаи излучением «светящихся» электронов ⁽²⁾. Для дальнейшего существенно отметить, что эмиссионные линии извержения неизменно смещены относительно линий поглощения, образованных волокнами, причем это смещение быстро изменяется со временем.

2. Хорошо известен класс звезд, спектр которых напоминает спектр хромосферных извержений. Это звезды dMe, у которых линии H и K CaII — наиболее интенсивные линии извержений — наблюдаются в эмиссии. Недавно было обнаружено, что многие из них претерпевают неожиданные, крайне непродолжительные и нерегулярные вспышки ⁽⁷⁾. О распространенности таких «эруптивных» звезд свидетельствует тот любопытный факт, что к их числу относится ближайшая к нам звезда — Проксима Центавра. При наиболее значительной вспышке звезды UV Кита ⁽⁹⁾ ее блеск лишь за 20 сек. увеличился в 100 раз. Объяснение такого подъема блеска увеличением температуры части хромосферы ⁽⁹⁾ несостоятельно как в силу того, что время релаксации существенно превосходит 20 сек., так и потому, что рост температуры влечет уменьшение оптической толщины.

Даже если предположить, что освобождение энергии в недрах звезды происходит мгновенно, то, чтобы переработать эту энергию в тепловое излучение, понадобится значительное время, и вспышка растянется. На ошибочность этого предположения указывают также и прямые данные наблюдений. Так, во время вспышки BD 20° 2465 наблюдения велись с зеленым светофильтром, так что возможность возрастания блеска за счет увеличения интенсивности в фиолетовой и голубой частях спектра исключалась ⁽¹⁰⁾. При помощи такой схемы никак не могут быть объяснены те еще более быстрые и нерегулярные колебания блеска, которые характерны для вспышек.

Впервые гипотеза о том, что появление эмиссионных линий в спектре переменных звезд связано с эруптивной деятельностью типа солнечной, была высказана Г. А. Шайном ⁽¹²⁾. Позднее для объяснения эмиссионного спектра звезд dMe предполагалась мощная эруптивная деятельность того же типа, что и на Солнце, но настолько интенсивная, что эмиссионные линии наблюдаются в интегральном спектре звезды ⁽¹¹⁾. Мы предполагаем, что вспышки этих звезд аналогичны тем редким случаям солнечных извержений, когда они наблюдались в интегральном свете. Естественно предположить, что вспышки звезд dMe также обуславливаются излучением «светящихся» электронов. Подтверждение этой гипотезы могли бы дать наблюдения поляризации света в момент вспышек. Близость этих звезд полностью исключает поляризацию света за счет межзвездной среды. Исключительный интерес представляет изучение их спектра в момент вспышек — в нем можно ожидать появления смещенных абсорбционных и эмиссионных линий сложной структуры — аналог спектра мощных солнечных извержений.

Исходя из данных о светимости в момент вспышки и глубокой оценки магнитного поля, можно оценить число релятивистских электронов. Для обеспечения требуемой светимости необходимо $\approx 10^{33}$ электронов с энергией $\approx 10^9$ эв. Интересно отметить, что полная энергия их имеет тот же порядок, что и энергия, излученная при вспышке. Оценка радиоизлучения показывает, что в максимуме оно составит 10^{-25} эрг/см² гц·сек, т. е. за пределами современной точности наблюдений.

Предложенная картина устраняет трудности, связанные как с необы-

чайной скоростью возрастания блеска, так и с его неправильными колебаниями. Причиной быстрого падения блеска может явиться изменение энергии излучающих электронов, а также напряженности магнитного поля. Особенности спектров переменных типа Т Тельца (эмиссионные линии H, Ca II, Fe II), а также наличие с фиолетовой стороны ярких линий, линий поглощения — заставляют также ожидать там наличия эруптивной деятельности и связывать переменность этих звезд с последней. Таким образом, при вспышках звезд типа dMe, повидимому, происходит образование космических частиц.

3. Существует еще один класс переменных звезд, обладающих замечательными свойствами, — долгопериодические переменные. При весьма низкой эффективной температуре спектры этих холодных сверхгигантов неизменно обнаруживают эмиссионные линии H, Ca II и ряда металлов. Благодаря исследованиям П. Меррилла и Г. А. Шайна⁽¹²⁾ стало известно, что аномалии интенсивности бальмеровской серии объясняются тем, что эмиссионные линии возникают в более глубоких слоях, чем линии поглощения. Загадкой представляется ряд обстоятельств — аномальная протяженность их атмосферы, циклический характер изменений их спектров и блеска, наличие эмиссионных линий. Г. А. Шайн показал, что эмиссионные линии связаны с истечением вещества, а также заподозрил большую роль процессов, подобных «извержениям» на Солнце⁽¹³⁾.

К числу прочих трудностей присоединяется и их аномально большая яркость в максимуме блеска. Звезда α Кита имеет в максимуме блеска яркость, в 15 раз превосходящую ту, которая соответствует ее температуре⁽¹⁴⁾. Учет изменения поверхности лишь ухудшает положение, так как радиус в максимуме в среднем на 18% меньше, чем в минимуме. Предположение Меррилла о том, что в минимуме в атмосфере звезды происходит конденсация углерода в пылинки и капельки, едва ли верно — плотность в оболочке настолько мала, что конденсация там невозможна.

Ключ для решения вопроса о природе переменности долгопериодических звезд и звезд типа RV Тельца дают также свойства их спектров. Сложная структура спектральных линий, смещение эмиссионных линий относительно абсорбционных и сам факт появления эмиссионных линий, а также ряд других особенностей спектра могут найти естественное объяснение в мощной эруптивной деятельности в атмосферах этих звезд. В частности, указанная П. Мерриллом и Г. А. Шайном большая глубина зарождения эмиссионных линий, чем линий поглощения, аналогична такому же соотношению в извержениях. Естественное объяснение получает также аномальная протяженность атмосферы этих звезд^(15, 13). В пользу такого предположения говорит циклический характер изменения спектров и блеска, а также то, что непосредственные наблюдения обнаружили в атмосферах холодных сверхгигантов образование мощных протуберанцев⁽¹⁶⁾. Избыток излучения в максимуме блеска может найти объяснение в значительной доле излучения «светящихся» электронов.

4. Ряд замечательных свойств обнаруживают и другие переменные звезды, в частности Новые и звезды с оболочкой. У звезд с оболочкой наблюдаются циклические изменения смещений линий, сложная структура линий, эмиссионный спектр. У Новых появление эмиссионных линий до максимума, наличие нескольких систем линий поглощения одновременно, быстрые изменения смещения линий⁽¹⁷⁾ приводят к ряду трудностей при теоретическом истолковании. Э. Р. Мустель⁽¹⁸⁾ показал, что для истолкования таких смещений действием гравитационных сил требуются массы Новых, превышающие тысячу масс Солнца, что противоречит другим данным. Особенности спектров Новых и звезд с оболочкой плохо согласуются с представлением о выбросе звездой оболочки и скорее могут быть объяснены образованием протуберанцев.

Именно в эруптивных протуберанцах мы наблюдаем картину, аналогичную той, которую обнаруживают спектры Новых, причем смещение

линий заведомо объясняется действием негравитационных сил. Эти и другие особенности спектров Новых и звезд с оболочкой могут быть объяснены появлением мощных извержений и связанных с ними протуберанцев. Иногда при вспышке Новых в действительности наблюдается расширяющаяся оболочка. Этот процесс, очевидно, соответствует упомянутым выше «выбросам» атомов, которые наблюдаются во время извержений и ответственны за геомагнитные возмущения. Сгустки, наблюдавшиеся в оболочках Новых (которые иногда принимали за компоненты звезды), никак не могли образоваться за счет выброса сгустков звездой. Такая точка зрения была оставлена уже для протуберанцев из-за полной несостоятельности. Скорее, это конденсации которые образуются в протяженной оболочке звезды, подобно тому, как образуются протуберанцы в короне.

Таким образом, мы приходим к следующим выводам:

1) В двух крайних случаях переменности звезд — вспышка Сверхновых и солнечной активности — установлено образование космических частиц, ответственных за существенные черты этого процесса.

2) Вспышки «эруптивных» звезд класса dMe обуславливаются усилением эруптивной деятельности типа солнечной и связанным с этим выбросом космических частиц. Повышение блеска, в основном, связано с тормозным излучением релятивистских электронов в магнитном поле.

3) Особенности спектра долгопериодических и полуправильных звезд заставляют предполагать мощную эруптивную деятельность в их атмосферах. Повышение светимости, в основном, также обуславливается излучением «светящихся» электронов и является следствием выброса космических частиц.

4) Особенности спектра Новых и звезд с оболочкой также находят естественное объяснение в предположении о том, что в их оболочках происходят мощные извержения и образуются протуберанцы. При этом, очевидно, образуется значительное количество космических частиц.

5) Можно предполагать, что всякое проявление переменности звезд существенно связано с эруптивной деятельностью и образованием космических частиц. Все переменные в большей или меньшей мере являются первичным источником космических лучей в Галактике.

6) В связи с широкой распространенностью эруптивной деятельности в переменных исключительный интерес представляет изучение физической природы хромосферных извержений.

Прямой проверкой высказанных положений могут явиться наблюдения поляризации света переменных звезд в максимуме блеска, а также спектра «эруптивных» звезд в момент вспышки. В их спектрах можно ожидать появления эмиссионных и абсорбционных линий сложной структуры, обнаруживающих взаимное смещение компонентов.

Поступило
26 II 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. М. Гордон, ДАН, 94, № 3 (1954). ² И. М. Гордон, ДАН, 94, № 5 (1954). ³ H. W. Dodson, Ap. J., 115, 320 (1952). ⁴ H. W. Dodson, E. R. Hedeman, Observatory, 72, No. 866 (1952). ⁵ H. W. Dodson, E. R. Hedeman, J. Chamberlain, Ap. J., 117, 66 (1953). ⁶ М. Вальдмаер, Результаты и проблемы исследования Солнца, М., 1950, стр. 176. ⁷ S. L. Lippincott, Ap. J., 115, 582 (1952). ⁸ Oskanian, Intern. Astr. Un., Circ. No. 1376; Sky and Telescope, 12, 75 (1953). ⁹ P. E. Roques, Publ. Astr. Soc. Pac., 65, 19 (1953). ¹⁰ K. G. Kron, G. E. Kron, ibid., 61, 210 (1949). ¹¹ D. Greenstein, ibid., 62, 156 (1950). ¹² P. Merrill, Ap. J., 65, 23 (1927); Г. А. Шайн, Zs. f. Ap., 10, 73 (1936). ¹³ Г. А. Шайн, Изв. АН СССР, сер. физ., 9, № 3 (1945). ¹⁴ Л. Гольдберг, Л. Аллер, Атомы, звезды и туманности, М.—Л., 1948, стр. 141. ¹⁵ P. W. Merrill, J. Roy. Astr. Soc. of Canada, 46, 181 (1952). ¹⁶ McKellar, C. Odgers et al., Nature, 169, 990 (1951). ¹⁷ Проблемы космической аэродинамики, 1953, стр. 132—146. ¹⁸ Э. Р. Мустель, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 6, 144 (1951). ¹⁹ R. C. Jennison, M. K. Das Gupta, Nature, 172, 996 (1953).