

И. М. ГОРДОН

**К ВОПРОСУ О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ХРОМОСФЕРНЫХ
ИЗВЕРЖЕНИЙ ***

(Представлено академиком Г. А. Шайнэм 7 IX 1953)

Накопление наблюдательных данных обнаружило, что хромосферным извержениям часто сопутствует ряд замечательных явлений:

1. Вспышка радиоизлучения или «радиоизвержения» (1).
2. Затухание радиосвязи на коротких волнах, которое, повидимому, вызывается действием рентгеновской радиации на ионосферу Земли (2, 3).
3. Увеличение интенсивности первичной компоненты космических лучей, которое наблюдается во время значительных извержений (13).
4. Увеличение интенсивности непрерывного спектра в оптической области (7).

Уже то обстоятельство, что радиоволны в метровом диапазоне не могут выйти из хромосферы (4), показывает, что извержение нельзя рассматривать как процесс, локализованный только в хромосфере.

Замечательной особенностью извержений является излучаемый ими непрерывный спектр. В большинстве случаев он бывает слабым, однако в некоторых исключительных случаях интенсивность его была такова, что извержения наблюдались на фоне фотосферы в интегральном свете. Обычно это излучение приписывалось рассеянию света на свободных электронах (7). Такое объяснение в применении к извержениям исключительной интенсивности совершенно несостоятельно, так как требует слишком больших концентраций электронного газа. Кроме того, оно противоречит второму началу термодинамики.

Таким образом, непрерывный спектр извержений в оптической области, по существу говоря, не объясняется современными теориями хромосферных извержений.

Излучение рентгеновских квантов и особенно увеличение интенсивности первичной компоненты космических лучей заставляют ожидать, что в извержении имеются частицы, обладающие очень значительной энергией. Этому, однако, противоречит низкий уровень возбуждения и ионизации в эмиссионной области в хромосфере.

Наконец, последние данные наблюдений (10-12) непосредственно указывают на то, что извержение есть сложный электромагнитный процесс, охватывающий значительную толщу атмосферы Солнца. Все эти многочисленные данные при построении теории хромосферных извержений обычно игнорировались, хотя, по нашему мнению, именно они значительно глубже вскрывают природу процесса извержения, чем оптические свойства того нестационарного флоккула, который и является собственно извержением.

* Доложено 20 VI 1952 г. на ученом совете Харьковской астрономической обсерватории и 17 XII 1952 г. на пленуме комиссии по исследованиям Солнца АН СССР в Ленинграде.

Исключение составляет гипотеза, высказанная И. С. Шкловским (2), однако она не дает количественных оценок и не способна объяснить большинство хромосферных извержений, о которых известно, что они происходят в нижних слоях хромосферы (5).

Для объяснения физической природы хромосферных извержений мы будем считать, что в некоторой области короны действием индукционных электрических и магнитных полей электроны и протоны ускоряются до релятивистских энергий, иногда достигающих значения $5 \cdot 10^9$ эв. О реальности такого предположения свидетельствуют данные наблюдений космических лучей (13).

Релятивистские электроны, движущиеся в магнитном поле, становятся источником целого спектра электромагнитного излучения, который подробно исследовался рядом советских ученых, в том числе В. В. Владимирским (6). В. Л. Гинзбург показал, что излучение релятивистских электронов в магнитном поле является вероятным источником радиоизлучения Галактики (8).

При некоторых значениях энергии частиц и напряженности магнитного поля максимум излучения приходится на радиочастоты. При других значениях этих величин он смещается в рентгеновскую часть спектра. Рентгеновские кванты, излучаемые при этом и попадающие в атмосферу Земли, производят ионизацию D-слоя ионосферы и затухание радиосвязи на коротких волнах. При некоторых условиях релятивистские электроны в этой области могут становиться источником интенсивного излучения в видимом свете. Таким образом, излучение извержениями непрерывного спектра, повидимому, имеет своим источником излучение «светящихся электронов». Это открывает возможность объяснения тех редких случаев, в которых извержения наблюдались на фоне фотосферы в интегральном свете (7). Воздействие потоков частиц и квантов из этой области короны на нижележащие слои атмосферы Солнца — хромосферу вызывает в ней избыточную ионизацию, а следовательно, и избыточное количество рекомбинаций. Вследствие этого и возникает эмиссионная область в хромосфере. С этой точки зрения те геофизические последствия извержений, которые рассматривались до сих пор как побочные, являются наиболее существенными для характеристики процесса извержения.

Нам кажется, таким образом, что все существенные стороны процесса извержений вытекают из основного факта — наличия в извержениях электронов с релятивистскими энергиями.

Для количественной проверки этих предположений мы воспользуемся формулами В. В. Владимирского (6). При этом мы рассмотрим тот случай, когда проекция импульса на плоскость, перпендикулярную направлению магнитного поля, порядка самого импульса. Так как детальная структура поля в этой области и направление потока частиц нам неизвестны и целью является лишь оценка порядка требуемой плотности релятивистских частиц, мы пользуемся этим предположением.

Выражение для энергии, излучаемой релятивистской частицей в единичном интервале частот:

$$P(\nu) = 16 \frac{e^3 H}{mc^2} P\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right), \quad (1)$$

где e и m — заряд и масса частицы; $\omega = 2\pi\nu$ — угловая частота излучения; $\omega_1 = \frac{eH}{mc} \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$, где E — энергия и H — компонента напряженности магнитного поля, перпендикулярная скорости частицы. Для функции $p(\omega/\omega_1)$ даются следующие асимптотические выражения:

$$p\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) = 0,256 \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^{1/3} \quad \text{при} \quad \frac{\omega}{\omega_1} \ll 1; \quad (2)$$

$$p\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) = \frac{1}{16} \left(\pi \frac{\omega}{\omega_1}\right)^{1/2} e^{-2\omega/3\omega_1} \quad \text{при} \quad \frac{\omega}{\omega_1} \gg 1.$$

В интервале $0,18 < \omega / \omega_1 < 16$ асимптотические формулы непригодны; значения функций протабулированы в (6). Максимум достигается при $\omega / \omega_1 = 0,5$, причем $p(0,5) = 0,10$.

Пользуясь этими формулами, можно оценить требуемую плотность релятивистских частиц в области, при которой интенсивность выходящего радиоизлучения соответствует наблюдаемой во время «радиоизвержений».

Оценку интенсивности радиоизлучения при «радиоизвержениях» мы произвели, исходя из данных (14). Для $\lambda = 1,5$ м наиболее мощное радиоизвержение давало интенсивность $676 \cdot 10^{-15}$ вт/м²·Мгц. Полагая $H = 10$ эрст., радиус области $r = 10^{10}$ см и энергию электронов $E = 10^8$ эв, мы получим, что для интенсивности в $7 \cdot 10^{-13}$ вт/м²·Мгц требуется плотность релятивистских электронов $n_e = 1,5 \cdot 10^3$ см⁻³. Самопоглощением можно пренебречь, так как область является оптически тонкой — излучение с этой длиной волны на порядок меньше теплового излучения абсолютного черного тела с температурой в 10^{120} (что соответствует энергии частиц $E = 10^8$ эв).

Некоторые свойства излучения радиоизвержений (поляризация, направленность) свидетельствуют о малой оптической толщине излучающей области.

Известно, что извержения часто являются источником всеобщего затухания радиосвязи на коротких волнах. Недавно получены данные в пользу того, что причиной этого эффекта является избыточная ионизация D-слоя ионосферы рентгеновским излучением, причем интенсивность излучения с $\lambda = 10$ Å составляет 10^{-4} эрг/см²·сек, и что это излучение, повидимому, имеет характер вспышек. Расчет с помощью тех же формул при $H = 50$ эрст., $E = 5 \cdot 10^9$ эв и радиусе области $r = 5 \cdot 10^9$ см показывает, что требуемая плотность электронов составляет $n_e = 250$ см⁻³. Учет направленности излучения может существенно снизить эту величину.

Аналогичный подсчет можно сделать также и для интенсивности излучаемого извержениями оптического непрерывного спектра.

Мы рассмотрим два случая. Случай обычной интенсивности, при котором $I_v = 2 \cdot 10^{-7}$ эрг/см²·сек·гц (7); полагая $E = 9 \cdot 10^8$ эв, $H = 100$ эрст. и $r = 5 \cdot 10^9$ см, получим, что $n_e = 10^2$ см⁻³. Направленность излучения здесь уже учтена. Для объяснения тех исключительных случаев, когда непрерывный спектр достигает яркости фотосферы, требуется еще бо́льшая напряженность поля $H = 500$ эрст. Полагая $E = 4 \cdot 10^8$ эв, мы находим, что требуемая яркость получается при $n_e = 10^4$ см⁻³ (с учетом направленности).

В пользу возможности наличия в этих областях короны больших магнитных полей свидетельствует то, что там эффективно действует индукционный механизм ускорения частиц до релятивистских энергий.

Позднее И. С. Шкловский применил аналогичные представления о физической природе хромосферных извержений для выяснения вопроса об источнике излучения в Крабовидной туманности (17). Подобно тому как мы это сделали для хромосферных извержений, он предположил, что и непрерывный оптический спектр, испускаемый туманностью, и ее радиоизлучение имеют своим источником тормозное излучение релятивистских электронов в магнитном поле. Прямым критерием для проверки такого предположения могут послужить наблюдения извержений и Крабовидной туманности в поляризованном свете. Эти наблюдения могут дать однозначное доказательство наличия светящихся электронов и в извержениях и в оболочке Сверхновой.

В заключение следует отметить, что настоящая работа делает желательным пересмотр методики исследований извержений, а также создания новой их классификации, в которой должно отражение найдет не

только оптическая фаза процесса, но также и те существенные геофизические проявления, которые сопутствуют этому процессу.

В последнее время устанавливается все более и более тесная связь между проблемой космических лучей и астрономией. Ряд важных работ В. Л. Гинзбурга⁽⁸⁾, Г. Г. Гетманцева⁽¹⁵⁾, И. С. Шкловского⁽¹⁸⁾ сблизили между собой исследования космических лучей с радиоастрономическими исследованиями Галактики. С. Б. Пикельнер⁽¹⁶⁾, используя данные наблюдений космических лучей, пришел к фундаментальному выводу о наличии шаровой системы весьма разреженного газового субстрата, окружающего Галактику.

Настоящая работа, которая объясняет непрерывный оптический спектр хромосферных извержений как излучение светящихся электронов, дает непосредственный оптический метод наблюдения тех мест, в которых рождаются космические лучи.

Пользуюсь случаем выразить благодарность действительному члену АН УССР Н. П. Барабашеву за обсуждение результатов.

Поступило
20 VII 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Л. Гинзбург, УФН, **32**, 26 (1947); **34**, 13 (1948). ² И. С. Шкловский, ДАН, **64**, 37 (1949). ³ С. Л. Манделъштам, УФН, **46**, 145 (1952). ⁴ В. Л. Гинзбург, Астр. журн., **26**, 84 (1949). ⁵ Э. Р. Мустель, А. Б. Северный, Изв. Крымск. астр. обс., **5**, 3 (1950). ⁶ В. В. Владимирский, ЖЭТФ, **18**, 392 (1948). ⁷ М. Вальдмайер, Результаты и проблемы исследования Солнца, 1950. ⁸ В. Л. Гинзбург, ДАН, **76**, 377 (1951). ⁹ И. С. Шкловский, Солнечная корона, 1951, стр. 339. ¹⁰ Н. Dodson, R. McMath, Ap. J., **115**, 78 (1952). ¹¹ A. Bruzek, Observatory, **72**, 54 (1952). ¹² Н. Dodson, Ap. J., **115**, 320 (1952). ¹³ C. Neher, Rev. Mod. Phys., **20**, 350 (1948). ¹⁴ Quart. Bull. on Solar Activity, Nos. 77—90 (1948—1950). ¹⁵ Г. Г. Гетманцев, ДАН, **83**, 557 (1952). ¹⁶ С. Б. Пикельнер, ДАН, **88**, 229 (1953). ¹⁷ И. С. Шкловский, ДАН, **90**, 983 (1953). ¹⁸ И. С. Шкловский, Астр. журн., **30**, 15 (1953).