

Г. А. ЛЕЙКИН

О ПРИЧИНЕ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ И ВЛИЯНИИ МЕЖЗВЕЗДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЗВЕЗДЫ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 4 XI 1952)

Исследование физических условий во внутренней короне показывает, что она теряет энергию в количестве около 10^{28} эрг/сек. Основные потери энергии обусловлены передачей теплоты из короны в хромосферу вследствие большого градиента температуры и высокой теплопроводности коронального вещества. Таким образом, любая гипотеза, претендующая на объяснение высокой температуры короны, должна обеспечить выход энергии не ниже 10^{28} эрг/сек.

С другой стороны, как указал С. Б. Пикельнер (1), температура короны не может сильно превысить 10^6 °, так как с ростом температуры резко возрастает диссипация корональных частиц, являющаяся мощным фактором охлаждения.

Согласно наблюдениям, корональные образования представляют собой образования квази-статические, сохраняющиеся практически неизменными в течение значительных промежутков времени, обычно превышающих несколько дней. В то же время малая плотность и высокая температура коронального вещества должны были бы привести к чрезвычайно быстрому распаду таких образований (время распада порядка 1 часа).

Повидимому, единственным фактором, способным воспрепятствовать распаду, является магнитное поле, на что впервые было указано И. С. Шкловским (2). Расчет показывает, что магнитное поле напряженностью в 1 эрст. способно обеспечить время жизни корональных образований значительно больше наблюдаемого. Существенно, что коэффициенты температуропроводности и диффузии в плазме перпендикулярно силовым линиям магнитного поля пропорциональны $T^{-1/2}$ (T — кинетическая температура частиц, ответственных за процесс переноса) и, следовательно, убывают с ростом температуры.

Проведенное исследование причин высокой температуры солнечной короны показало, что высокая корональная температура может быть объяснена лишь действием электромагнитного поля.

Подсчет количества выпадающего на Солнце вещества показывает, что приход энергии вместе с ним не превышает 10^{24} эрг/сек. Попытка приписать нагрев короны приходу частиц высокой энергии из недр Солнца противоречит данным наблюдений. Также несущественен перенос энергии ударными волнами: ударная волна может перенести энергию в корону только в том случае, если амплитуда ее скорости в хромосфере превышает тепловую скорость корональных частиц. Наблюдаемые в хромосфере скорости движения вещества значительно ниже тепловой скорости в короне.

Впервые мысль о том, что корона обязана высокой температурой электромагнитному полю, была высказана И. С. Шкловским (3).

Среди явлений, связанных с недрами Солнца, повидимому, только магнито-гидродинамические волны, вызываемые движением гранул в общем магнитном поле, способны дать достаточный энергетический выход (4). Однако для переноса этой энергии в корону необходимо существование в хромосфере постоянного магнитного поля напряженностью $H \geq 10$ эрст., что, насколько можно судить в настоящее время, плохо согласуется с наблюдениями. Кроме того, отсутствие наблюдательных данных о характере движения гранул не позволяет оценить действительный поток энергии, излучаемой в виде магнито-гидродинамических волн.

Анализ возможной роли внешних по отношению к Солнцу магнитных полей, не участвующих в его движении, приводит к выводу, что энергетические потери короны могут быть возмещены, если вращение Солнца происходит в постоянном магнитном поле напряженностью 10^5 — 10^6 эрст. По современным данным, поле такой (или даже более высокой) напряженности следует ожидать в окрестностях Солнца (5). При вращении в постоянном магнитном поле в короне должно возникнуть электрическое поле, напряженность которого

$$E = \frac{1}{c} |VH|$$

(где V — скорость движения вещества относительно магнитного поля). Как показывают наблюдения, корона участвует во вращении Солнца. Таким образом, электрический ток будет индуцироваться в короне при условии $\text{rot } E \neq 0$, т. е. при H не параллельном оси вращения Солнца. Поскольку межзвездное магнитное поле в большей части пространства перпендикулярно плоскости Галактики, следует ожидать выполнения этого условия.

Принимая эффективный радиус короны $R_{\text{эф}} \approx 1,5 \cdot 10^{11}$ см, циклическую частоту вращения Солнца $\omega \approx 3 \cdot 10^{-6}$, составляющую напряженности магнитного поля, перпендикулярную оси вращения Солнца, $H_{\perp} \approx 5 \cdot 10^6$ эрст., получим среднюю напряженность электрического поля в короне $E_{\text{ср}} \approx 10^{-8}$ в/см.

В то же время энергетические потери столба коронального вещества сечением в 1 см^2 составляют по порядку величины 10^5 эрг/сек. Так как проводимость коронального вещества $\sigma \approx 10^{15}$ э. с. е. и радиус короны порядка 3 радиусов Солнца, то для восполнения энергетических потерь короны необходимо электрическое поле средней напряженностью в $0,7 \cdot 10^{-8}$ в/см. Поскольку вращение и внешнее поле стационарны, явления самоиндукции при этом несущественны.

Следовательно, присутствия в окрестностях Солнца постоянного магнитного поля напряженностью $H \approx 5 \cdot 10^6$ эрст. достаточно, чтобы объяснить высокую температуру солнечной короны. Выдвигаемая гипотеза подтверждается также распределением температуры в короне: экваториальные области, где скорость движения вещества больше, обычно характеризуются более высокой температурой.

При таком механизме нагрева, существенно зависящем от плотности вещества в короне, представляется естественным считать, что существование в короне областей различной температуры объясняется различной плотностью вещества в этих областях.

Электрический ток, сопровождающийся выделением джоулевого тепла, должен течь вдоль силовых линий магнитных полей, связанных с Солнцем. Напряженность этих магнитных полей можно попытаться оценить по скорости движения шлемов и оболочек протуберанцев. Рассматривая их движение как распространение магнито-гидродинамических волн, найдем напряженность магнитного поля в короне равной 10^3 — 10^4 эрст., что представляется вполне достаточным для резкого уменьшения движения корональных частиц поперек магнитных силовых линий.

Энергия, поддерживающая высокую температуру короны, освобождается за счет торможения вращения Солнца во внешнем магнитном поле. Принимая момент количества движения Солнца равным $8 \cdot 10^{48}$ г · см²/сек, получим энергию вращения Солнца равной по порядку величины $5 \cdot 10^{42}$ эрг. Полагая корону неизменной, приходим к выводу, что кинетической энергии вращения Солнца в настоящий момент достаточно для поддержания высокой температуры короны в течение интервала времени порядка 10^8 лет. Иными словами, межзвездное магнитное поле должно оказывать чрезвычайно сильное влияние на вращение звезд.

Согласно выдвигаемой гипотезе, короной должно обладать большинство вращающихся звезд, расположенных вблизи галактической плоскости, поскольку здесь можно ожидать значительных межзвездных магнитных полей. С. Б. Пикельнер⁽⁶⁾ нашел ряд косвенных свидетельств существования короны у некоторых звезд. Оставляя в стороне влияние межзвездного магнитного поля на более глубокие слои звезды, покажем, что в настоящее время прямое спектроскопическое обнаружение короны у горячих быстро вращающихся звезд представляется невозможным.

Для обнаружения при помощи применяющихся в настоящее время приборов эмиссионной линии в спектре звезды необходимо, чтобы интенсивность в линии по крайней мере на 5% превосходила интенсивность в соседнем участке непрерывного спектра.

Радиус звездной короны можно определить как расстояние от центра звезды, на котором кинетическая энергия частицы близка к ее потенциальной энергии в поле тяготения звезды, т. е.

$$\frac{\gamma m M_{\text{зз}}}{R} \beta \approx \frac{mV^2}{2} + \frac{3}{2} kT,$$

где γ — гравитационная постоянная; m — масса протона; $\beta \approx 1/2$ — множитель, введенный для учета электростатического поля звезды; R — радиус короны; V — гидродинамическая скорость (в нашем случае — линейная скорость вращения); k — постоянная Больцмана; T — кинетическая температура короны; $M_{\text{зз}}$ — масса звезды. Подставляя значения постоянных и измеряя массу и радиус звезды в единицах солнечных массы и радиуса, получим: $R' < 2 \cdot 10^{15} \frac{M'}{V^2 + 2 \cdot 10^8 T}$.

Следовательно, радиус короны звезды спектрального типа В, имеющей массу порядка 10 масс Солнца, экваториальную скорость вращения порядка 250 км/сек и кинетическую температуру короны около 10^6 °, не может превышать 25 радиусов Солнца.

Эквивалентная ширина солнечных корональных линий по определению Лио⁽⁷⁾ порядка 10^{-4} Å соседнего участка спектра центра Солнца. Ширина линий порядка 1 Å. Таким образом, у Солнца интенсивность в эмиссионной линии короны превосходит интенсивность соседнего участка непрерывного спектра на 0,01%.

Поскольку светимость звезд В более чем в 100 раз превышает светимость Солнца, делая мажорирующее предположение, что корона излучает как оптически тонкий слой, получим при радиусе короны, равном 25 радиусам Солнца, превышение интенсивности порядка 1% (радиус солнечной короны принят равным 3). Ширина корональных линий звезды типа В должна вследствие быстрого вращения значительно превосходить ширину линий солнечной короны (для линий железа, например, в 100 раз). Поэтому в действительности превышение интенсивности окажется порядка 0,01%. Если температура короны звезды больше 10^6 °, радиус ее соответственно уменьшится.

Таким образом, прямое экспериментальное обнаружение короны у горячих звезд в настоящее время представляется невозможным, если

только вероятности переходов для ее линий не превосходят более чем на 2 порядка вероятности переходов для линий солнечной короны.

Заметим, что внешний слой короны быстро вращающихся звезд должен интенсивно терять частицы, причем, ввиду большой длины свободного пробега, покидающие корону частицы могут получать энергии, достигающие $Z \cdot 10^7$ эв (Z — заряд частицы).

Представляется также вероятным, что эмиссионные линии в спектрах звезд в ряде случаев обязаны своим происхождением вращению звезды в межзвездном магнитном поле.

В заключение приношу искреннюю благодарность И. С. Шкловскому и С. Б. Пикельнеру за многочисленные советы и обсуждения.

Поступило
17 IX 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Б. Пикельнер, Изв. Крымск. астрофиз. обс., **5**, 34 (1950). ² И. С. Шкловский, Солнечная корона, 1951. ³ И. С. Шкловский, УФН, **30**, 63 (1946). ⁴ Н. Alfven, M. N., **107**, 211 (1947). ⁵ Я. П. Терлецкий, ЖЭТФ, **22**, 507 (1952). ⁶ С. Б. Пикельнер, ДАН, **72**, 255 (1950). ⁷ М. Lyot, M. N., **99**, 580 (1939).