

Э. Р. МУСТЕЛЬ

О ВЫБРАСЫВАНИИ ВОДОРОДНЫХ АТОМОВ ИЗ СОЛНЦА

(Представлено академиком Г. А. Шайном 26 IX 1951)

Вопрос о солнечных корпускулярных потоках является чрезвычайно актуальным как с космогонической*, так и с геофизической (полярные сияния и т. д.) точек зрения. Реальность выброса корпускул из Солнца подтверждена в последнее время непосредственно путем изучения спектра полярных сияний^(2, 3). Оказалось, что линия H_{α} водорода в спектре полярных сияний, снимаемом в направлении на магнитный зенит, смещена в фиолетовую сторону. Таким образом, в составе корпускулярных потоков присутствуют атомы водорода.

Проблема выбрасывания атомов из Солнца уже обсуждалась автором⁽⁴⁾; в этой работе был представлен ряд аргументов в пользу того, что наиболее правдоподобным фактором, могущим обусловить выброс атомов из Солнца, является световое давление. Введение же сил электромагнитной природы связано с серьезными трудностями. Так, всевозможные «электромагнитные» механизмы дают, в противоположность наблюдениям⁽⁵⁾, весьма широкий пучок корпускул. Кроме того, при возможном действии указанных электромагнитных сил мы должны были бы ожидать истечения из Солнца (с большими скоростями) и корональной материи. Действительно, последняя образована высокоионизованными атомами и в этом отношении ничем не отличается от той (конечно, тоже ионизованной) материи, которая образует потоки вылетающих из Солнца корпускул. В то же время ширина, а также положение корональных линий и ряд дополнительных факторов свидетельствуют о том, что такого истечения корональной материи нет.

В той же работе автора⁽⁴⁾ было указано, что выброс из Солнца под действием светового давления возможен только для атомов Ca II, причем это выбрасывание должно происходить из области факелов. Здесь световое давление на атомы Ca II осуществляется в линиях H и K . Во всех точках контура H - и K -линий (в области факелов) световое давление на атомы Ca II превышает силу тяготения на них со стороны Солнца. Это должно вести к истечению атомов Ca II из самых внешних частей хромосферы над факелами, т. е. из флоккулов.

Там же было указано, что световое давление на атомы водорода в активных местах Солнца** является недостаточным для непосредственного выброса этих атомов из Солнца. Однако, так как присутствие водорода в солнечных корпускулярных потоках является теперь

* См. особенно работу В. Г. Фесенкова⁽¹⁾.

** Повидимому, за исключением хромосферных вспышек, см. далее.

установленным фактом, данный вопрос следует еще раз критически пересмотреть.

Рассмотрим сначала световое давление на атомы H, обусловленное только лаймановским континуумом (за $\lambda = 912 \text{ \AA}$). Элементарные подсчеты показывают, что даже равенство между этим световым давлением и тяготением осуществляется при температуре излучения T_E (в рассматриваемой спектральной области) порядка $11\,000^\circ$. Столь высокое значение для T_E в факельных площадках полностью противоречит геофизическим данным, особенно если мы рассматриваем годы максимума солнечной деятельности, когда площадь, занимаемая факелами на солнечном диске, относительно весьма высока.

Другая не менее серьезная трудность состоит в том, что при $T_E = 11\,000^\circ$ доля нейтральных водородных атомов должна быть при максимально больших возможных значениях электронной концентрации n_e в потоке совершенно ничтожной. Все это заставляет нас перейти к рассмотрению линий лаймановской серии и притом, конечно, первой линии L_α .

При оценке силы p'_L селективного светового давления на атомы H, обусловленного линией L_α , следует, естественно, вводить такие предположения и исходить из таких данных, которые бы указывали максимальное возможное значение для величины p'_L . В связи с этим при подсчете интенсивности в крыле L_α линии, излучаемой хромосферой над факелом*, мы можем пренебречь самопоглощением.

Так как нас интересуют части крыла линии L_α , достаточно удаленные от центра последней, мы должны исходить из того, что здесь распределение излучаемых квант в линии будет соответствовать затуханию вследствие излучения. В этом случае, как легко подсчитать, равновесие между тяготением и световым давлением на расстоянии 6 \AA от центра линии, что соответствует 1500 км/сек , осуществляется при $N_2 \cong 8 \cdot 10^{14}$, где N_2 — число атомов водорода во втором состоянии над 1 см^2 основания хромосферы в области факела. Для выброса же атомов из Солнца требуется, очевидно, еще большее значение N_2 . Оно должно быть также повышено из-за неучета возможного самопоглощения в линии L_α . Во всяком случае, требуемое для выброса атомов H число N_2 должно быть порядка $10^{15} - 5 \cdot 10^{15}$.

Спрашивается, может ли величина N_2 во флоккулах достигать указанного значения. Ряд соображений указывает, что нет. Во-первых, следует заметить, что число N_2 в невозмущенных частях Солнца близко к $2 \cdot 10^{12}$ (6). В то же время увеличение числа N_2 во флоккулах фактически в 1000 раз по сравнению с таковым же в невозмущенной хромосфере совершенно невероятно. Такое увеличение N_2 характеризует хромосферные вспышки (7), для которых N_2 , судя по увеличению излучения в водородных линиях, по меньшей мере на 2 порядка больше, чем N_2 даже во флоккулах.

Имеется и ряд других возражений против столь высокого значения N_2 во флоккулах. Так например, взяв минимальное возможное (теоретическое) значение для отношения $N_3:N_2$ и отправляясь от указанного числа $N_2 \cong 10^{15}$, можно показать, что найденное таким образом минимальное число N_3 на 2—3 порядка превышает то значение N_3 , которое может быть оценено по наблюдаемому излучению в H_α во флоккулах.

Помимо указанных соображений, имеется и другое очень серьезное возражение, что при непосредственном выбросе атомов H под

* Ясно, что нас интересуют факелы (с расположенными над ними флоккулами), ибо в этих местах солнечного диска световое давление должно быть больше, чем в остальных частях диска.

действием светового давления радиальность в выбросе корпускул отсутствовала бы.

Таким образом, выброс атомов H из активных частей Солнца под непосредственным действием светового давления в высшей степени маловероятен. Единственное исключение из этого составляют интенсивные хромосферные вспышки (⁷), которые, однако, являются редким явлением*.

Как же тогда атомы H попадают в состав корпускулярных потоков? Здесь, повидимому, решающим оказывается увлечение атомов H ионами кальция**. О том, что атомы кальция в своем движении способны увлечь за собой большое количество атомов водорода и при этом вылетать из Солнца (совместно с атомами водорода) с достаточно большими скоростями, говорят элементарные соображения и подсчеты. Следует иметь в виду, что масса атома H в 40 раз меньше массы атома Ca и, следовательно, с точки зрения преодоления силы тяготения со стороны Солнца вылет 40 атомов водорода и 1 атома кальция эквивалентен мыслимому удвоению массы атома кальция. В то же время соответствующие подсчеты показывают, что, например, атом ионизованного кальция, приобретший скорость порядка 150 км/сек (в силу чего при этой скорости световое давление на него в $2\frac{1}{2}$ —3 раза больше давления, соответствующего равновесию), может покинуть Солнце со скоростью порядка 750 км/сек, если его масса внезапно сделается равной $2,5 m_{Ca}$. Это эквивалентно увлечению 60 водородных атомов (сила увлечения резко возрастает при скорости атомов Ca, превышающей тепловую скорость окружающих протонов, равную в короне 120—140 км/сек).

Наличие водородных атомов в корпускулярном пучке*** резко повышает возможную концентрацию подлетающих к земле корпускул. Проведем элементарные подсчеты. Во внешних слоях солнечной хромосферы концентрация атомов водорода не меньше, чем средняя концентрация корональной материи в основании короны, т. е. $5 \cdot 10^8$. Учитывая относительное содержание кальция, мы получим для концентрации атомов последнего числа $5 \cdot 10^8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-5}$. Далее, пусть 1 атом кальция увлекает 40 атомов водорода. Тогда, принимая во внимание расходимость в сечении радиального пучка корпускул при следовании их до земли, получим вблизи земли $5 \cdot 10^8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot 40 \cdot \frac{1}{46000} \cong \cong 2,2 \text{ см}^{-3}$, что по ряду новейших данных представляется достаточно правдоподобным.

Сразу же встает вопрос о том, почему в спектре полярных сияний до сих пор не обнаружено излучение кальция. Здесь необходимо заметить следующее. Прежде всего, как это следует из работ И. Шкловского (⁸), отсутствие излучения в линиях Ca отнюдь нельзя считать установленным фактом****. Кроме того, излучение в линиях Ca не может быть, повидимому, большим. Действительно, уже при вылете из Солнца атомов Ca в корпускулярном потоке должно быть в несколько десятков раз меньше, чем атомов водорода. Далее, наблюдаемое излучение в H_{α} и возможное излучение в линиях Ca создается корпускулами, входящими в состав уже сфокусированных земным магнитным полем пучков (зоны полярных сияний). В то же время для Ca II отношение e/m в 40 раз меньше, чем для протонов. Поэто-

* Здесь как раз указанная радиальность отсутствует!

** О выбросе последних см. (⁴).

*** Который, в соответствии с (⁴), должен быть относительно весьма узким.

**** Излучение это должно присутствовать в линиях Ca I, а не Ca II; см. ту же работу (⁸).

му доля атомов Са, влетающих в атмосферу земли, будет из-за этого фактора еще значительно уменьшена.

Обратимся к последнему вопросу — вопросу о скоростях влетающих в земную атмосферу корпускул. Указанная выше скорость порядка 700 км/сек является некоторой средней скоростью. В действительности, из-за флуктуаций в плотности атомов Са и Н, степень увлечения первыми вторых будет различной. В тех местах флоккулов, где увлекаемых атомов Н будет относительно меньше, результирующая скорость будет значительно больше; во всяком случае, возможны скорости до 1500 км/сек.

Таким образом, мы должны наблюдать спектр скоростей, что и подтверждается многодневной длительностью геомагнитных бурь. Кроме того, для обычных магнитных бурь максимальные скорости в пучке, находимые из наблюдений (по запаздыванию), действительно составляют около 1500 км/сек. Это же число подтверждается и шириной линии H_{α} в спектре полярных сияний во время умеренных магнитных бурь⁽³⁾. Что же касается очень большой бури от 19 VIII 1950 г., давшей, согласно⁽²⁾, максимальную скорость $v \simeq 3200$ км/сек, то по целому ряду признаков она была, повидимому, вызвана хромосферной вспышкой, где подобные скорости вполне возможны как с точки зрения теории⁽⁷⁾, так и наблюдений⁽⁹⁾. О том, что здесь, по всей вероятности, мы имели дело с хромосферной вспышкой, говорит весьма характерный вид соответствующих геомагнитных возмущений. Кроме того, при сопоставлении этой бури с деталями на Солнце найдено, что наименьшее возможное время запаздывания (яркий флоккул с $L = 80^{\circ}$ и $\varphi = +15^{\circ}$) составляло около 2 дней, т. е. около 1000 км/сек. Однако возможно, что мы имеем некоторый дополнительный ускоряющий механизм вблизи земли, проявляющийся наиболее резко во время очень сильных магнитных бурь.

Крымская астрофизическая обсерватория
Академии наук СССР

Поступило
19 IX 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Фесенков, Астр. журн., 26, 67 (1949). ² А. Meinel, Ap. J., 113, 50 (1951). ³ С. Gartlein, Phys. Rev., 81, 463 (1951). ⁴ Э. Мустель, Изв. Крымск. астрофиз. обсерватории, 3, 3 (1948). ⁵ М. Гневывшев и А. Оль, Астр. журн., 22, 151 (1945). ⁶ G. Cillie and D. Menzel, Н. С., 410. ⁷ Э. Мустель и А. Северный, ДАН, 80, № 6 (1951). ⁸ И. Шкловский, ДАН, 81, № 3 (1951). ⁹ Н. Newton, MN, 103, 244 (1943).