

**ДАВЛЕНИЕ В РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЯХ
КАК МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ АТОМОВ И ПЕРВЫХ ИОНОВ
С НИЗКИМИ ПОТЕНЦИАЛАМИ ИОНИЗАЦИИ**

**Resonance Lines Pressure as Acceleration Mechanism of Atoms
and First Ions with Low Ionization Potential**

Abstract. Calculations of the solar radiation pressure on atoms and first ions are presented. It is shown that for some of them the light pressure exceeds the action of gravity. Comparison of the results with the values of the ionization potentials shows the coincidence of the maxima of the radiation pressure on neutral atoms and first ions with the minima of the first ionization potential (FIP) and second ionization potential (SIP) consequently. Minima of SIP indicate a number of ions, similar BeII, MgII, CaII and their neighboring elements of large numbers. Thus, a possible mechanism accelerating pickup ions and energetic neutral atoms (ENA) of solar wind, originating from inner sources (zodiacal dust and sungrazing comets) can be radiation pressure in resonance lines.

Введение. Влияние светового давления на различные атомы и ионы в атмосфере Солнца пытался оценить еще Милн в начале 20-го столетия. В то время за недостатком данных о силах осцилляторов трудно было делать какие-то выводы о влиянии этого механизма на атомы и ионы.

В данной работе представлены результаты расчётов светового давления солнечного излучения на атомы и первые ионы элементов с известными силами осцилляторов для переходов с основного уровня. Оказалось, что для некоторых из них давление радиации превосходит действие гравитации и эти атомы и ионы могут быть ускорены световым давлением до различных скоростей и проявлять своё присутствие в составе солнечного ветра.

Идея, что источником быстрых ионов (pickup ions) и "энергичных нейтральных атомов" (ENA) может быть внутренний источник, а именно зодиакальная пыль и "солнцескребущие" (sungrazing) кометы, витает уже давно; в частности она высказана в работе (Bzowski M. and Królikowska M., A&A, 2005, **435**, 723).

В настоящей работе предлагается радиационное давление как возможный механизм ускорения pickup ions и ENA, исходящих от внутреннего источника.

Метод расчёта. Сила светового давления F_l в центре резонансной линии определяется из выражения

$$F_l = \alpha_l \frac{\pi}{c} \frac{F_\lambda \chi_l}{(r/r_\odot)^2},$$

где F_λ – интенсивность излучения в среднем по солнечному диску в единичном интервале длин волн в непрерывном спектре между линиями согласно (Makarova E.A.,

Kharitonov A.V., Kazachevskaya T.V., et al., *Baltic Astronomy*, 1998, **7**, 467), χ_l – остаточная интенсивность в центре линии в долях единицы (за единицу принимается непрерывный спектр F_λ), χ_l определялась из атласа (Kurucz L., Furenlid I., Brault J., Testerman L. *Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm*, Nat. Solar Observ. Atlas No. 1, 1984, Harvard University, 239); r/r_\odot – расстояние от центра Солнца в солнечных радиусах, c – скорость света; $\alpha_l = \pi e^2 \lambda^2 f_l / m_e c^2$ – коэффициент поглощения в линии согласно (Аллен К.У. *Астрофизические величины*, 1977, Москва, Мир, 446), где e и m_e – заряд и масса электрона, f_l – сила осциллятора для излучения в данной линии l .

Световое давление F_i на i – атом или ион определяется суммой давлений по всем резонансным линиям l :

$$F_i = \sum_l F_l.$$

Механизм ускорения обеспечивается суммой давлений для всех резонансных линий данного атома. Чем больше сила осциллятора атома и чем мощнее интенсивность солнечного спектра в соответствующей длине волны, тем сильнее радиационное давление.

Дальнейший сценарий поведения атома или иона зависит в основном от времени его жизни в поле излучения и отношения силы светового давления к силе притяжения: $\beta = F_l / F_g$. Если $\beta > 1$, элемент получает ускорение, направленное от Солнца. Поскольку силы, действующие на разные элементы и ионы, различны, то различны и их терминальные скорости. Это обстоятельство и может обусловить пространственное разделение элементов в процессе их удаления из Солнечной системы и образование облаков, обогащённых разными элементами. Обнаружить неоднородности или аномалии химического состава можно в потоке солнечного ветра на орбите Земли или где-нибудь на периферии Солнечной системы.

Результаты. Сопоставление результатов расчётов с известными значениями потенциалов ионизации (рис. 1) показывает совпадение максимумов радиационного давления на нейтральные атомы (сплошная линия) с минимумами потенциалов первой ионизации (FIP).

Легче всего поддаются действию светового давления атомы щелочного ряда, начиная с Li. Они имеют на внешней оболочке один электрон и мощный резонансный дублет вблизи максимума солнечного спектра. Световое давление для атома Li превосходит силу тяготения в 223 раза (Шестакова Л.И., *Известия НАН РК, Серия физ.-мат.*, 2005, № 4, 82). Следующий максимум давления радиации приходится на атом Na (рис. 1). Но здесь ситуация сложнее, поскольку в солнечном спектре остаточная интенсивность в центре глубоких линий дублета NaI порядка 5%. Если атом имеет нулевую радиальную скорость относительно Солнца и соответствующее нулевое доплеровское смещение относительно центра линии, то в этом случае световое давление по нашим расчетам составит $F_{\text{rad}} = 4.3F_{\text{grav}}$. Но, поскольку оно превосходит силу тяготения, то атом начнет ускоряться и наращивать радиальную скорость, направленную прочь от Солнца.

Чем больше будет соответствующее радиальной скорости доплеровское смещение, тем сильнее световое давление, которое достигнет максимума, когда скорость атома будет достаточно велика, чтобы по доплеровскому смещению длина волны поглощаемого атомом света вышла из ядра линии на уровень непрерывного спектра. В этом случае сила радиационного давления F_{rad} для атома Na будет превосходить силу тяготения F_{grav} в 81.3 раза.

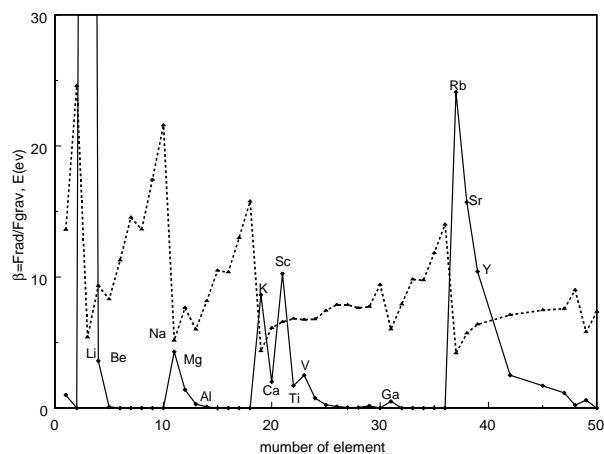


Рис. 1: Отношение светового давления к силе тяготения β (сплошная линия) для ионов с нулевой радиальной скоростью относительно Солнца. Линия с короткими штрихами – β для ионов с большими радиальными скоростями. Верхняя штриховая линия – потенциал первой ионизации.

Однако такой процесс ускорения для атомов щелочного ряда длится недолго, поскольку они имеют низкий потенциал первой ионизации (FIP) и быстро ионизируются солнечным ультрафиолетовым излучением. Время их жизни около Солнца невелико: например, атомы Na на расстоянии шести солнечных радиусов ионизируются через 27 секунд (Шестакова Л.И. Письма в АЖ, 1990, **16**, № 6, 550). Оценка количества атомов Na на луче зрения в области сублимации около Солнца выполнена Делоне А.В. с соавторами по наблюдениям полного солнечного затмения 29.03.2006. Оказалось, что количество атомов на луче зрения не превосходит $2 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ (Delone A.V., Divlekeev M.I., Sukhanov E.A., Gulyaev R.A., Yakunina G.V. and Porfir'eva G.A. Astronomy Reports, 2008, **52**, 152).

Гораздо лучше вписываются в этот процесс атомы II столбца таблицы Менделеева, имеющие на внешней оболочке по два электрона, такие, как Mg, Ca и т.п. Они также имеют глубокие резонансные линии вблизи максимума солнечного спектра и достаточно сильное световое давление при начальной нулевой радиальной скорости относительно Солнца. При этом у них достаточно большое время жизни, чтобы ускориться до больших скоростей. После первой ионизации они становятся ионами, подобными атому Li, и у них появляются ещё более мощные резонансные линии, смещенные в УФ сторону, но всё ещё находящиеся вблизи максимума солнечного излучения. Время жизни у первых ионов Mg, Ca и т.п. на несколько порядков больше, чем у нейтральных атомов. Специальный эксперимент по наблюдению ионов CaII линии $\lambda 3933 \text{ \AA}$ во внешней короне Солнца был проведен Гуляевым и Щегловым (Гуляев Р.А., Щеглов П.В. ДАН России, 1999, **366**, № 2, 199) во время полного солнечного затмения 22.02.1998. Было показано, что ионы CaII могут двигаться со скоростями порядка или даже превосходящими скорость солнечного ветра на расстояниях до 30 солнечных радиусов.

Ещё яснее, чем для нейтральных атомов, совпадение максимумов радиационного давления с минимумами потенциалов второй ионизации (SIP) выглядит для первых

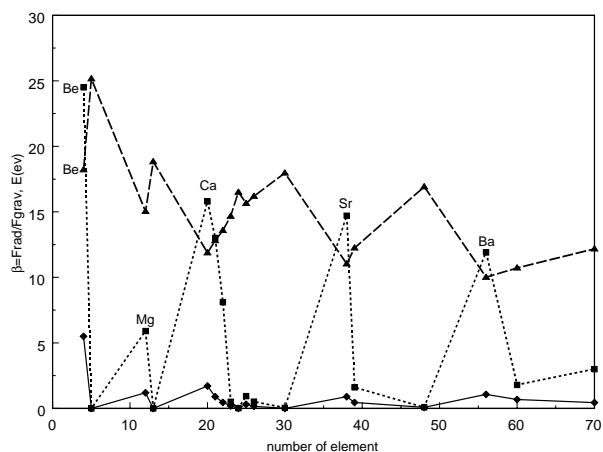


Рис. 2: Отношение светового давления к силе тяготения β (сплошная линия) для ионов с нулевой радиальной скоростью относительно Солнца. Линия с короткими штрихами – β для ионов с большими радиальными скоростями. Верхняя штриховая линия – потенциал второй ионизации.

ионов (рис. 2). Минимумы потенциалов второй ионизации указывают на ряд ионов, подобных BeII, MgII, CaII и на соседние с ними элементы больших номеров.

Можно сделать вывод, что наиболее перспективными в смысле поиска в составе солнечного ветра на уровне земной орбиты могут быть элементы из II столбца таблицы Менделеева, обладающие высоким уровнем светового давления, как в виде атомов, так и в виде ионов, такие как Mg, Ca, Sr, Ba (рис. 2). Вероятнее всего, эти элементы имеют уже ненулевые радиальные скорости в момент ионизации, будучи разогнаны световым давлением в нейтральном состоянии. Интересно отметить, что кроме выделенных "активных" в смысле светового давления столбцов таблицы Менделеева, обнаружилось ещё и "активные" ряды: IV, начинающийся с K, и VI, начинающийся с Rb. Интересен также VIII ряд, начинающийся с Cs и содержащий редкоземельные металлы лантаноиды. Те из них, для которых известны силы осцилляторов, показывают высокие β как для атомов, так и для ионов.

Дважды ионизованные атомы имеют резонансные линии в УФ-области, где давление солнечной радиации не может оказывать заметного влияния на динамику частиц. Поэтому предложенный механизм ускорения можно применить только к нейтральным атомам и первым ионам с низкими потенциалами первой и второй ионизации.

Астрофизический институт
имени В.Г. Фесенкова
Обсерватория 23, Алма-Ата, 050020, Казахстан.
shest1952@mail.ru

Л.И.Шестакова
L.I.Shestakova

Received December 25, 2012.