

АСТРОНОМИЯ

Член-корреспондент АН СССР В. Л. ГИНЗБУРГ

**О КРАСНОМ СМЕЩЕНИИ В СПЕКТРЕ СОЛНЦА И ЗВЕЗД**

В последней работе <sup>(1)</sup>, посвященной красному смещению в спектре Солнца и звезд, утверждается, во-первых, что гравитационное красное смещение (если оно вообще имеет место) равно  $\sim 1/5$  значения, предсказанного общей теорией относительности,

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\varphi}{c^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi$  — соответствующая разность гравитационных потенциалов (при наблюдении солнечных линий с достаточной точностью можно считать, что  $\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\kappa M_{\odot}}{r_{\odot} c^2} = -2,12 \cdot 10^{-6}$ ).

Во-вторых, согласно <sup>(1)</sup> существует другой эффект красного смещения, связанный с взаимодействием света со светом <sup>(1,2)</sup>, или света с электронами <sup>(3)</sup> (при этом  $\Delta\nu/\nu \approx -AT^4l$ ,  $A \sim 2 \cdot 10^{-29}$  град<sup>-4</sup> см<sup>-1</sup>,  $T$  — температура звездной атмосферы и  $l$  — ее эффективная толщина).

Радикальный характер этих утверждений, затрагивающих самые основы существующей теории и привлекающих поэтому большое внимание, делает уместным обсуждение вопросов, поднятых в <sup>(1-3)</sup>.

Как известно, существование гравитационного красного смещения <sup>(1)</sup> без всяких дополнительных предположений следует из основных положений общей теории относительности. С квантовой точки зрения красное смещение связано просто с «работой» фотона с массой  $\hbar\nu/c^2$  при прохождении разности потенциалов  $\Delta\varphi$ . Таким образом, совершенно очевидно, что для отказа от формулы (1) нужны глубокие основания. Между тем, рассмотрение имеющихся данных не только не дает таких оснований, но напротив, позволяет говорить о подтверждении предсказаний общей теории относительности на опыте.

Обнаруженное красное смещение в случае белого карлика Сириус В, даже согласно <sup>(1)</sup>, объясняется лишь гравитационным эффектом; количественное же сравнение с (1) невозможно, так как масса и радиус звезды плохо известны. Данные о других звездах также не дают указаний против существования гравитационного смещения <sup>(1)</sup>. Что же касается спектра Солнца, когда только и возможна количественная проверка теории, то лучшие данные <sup>(4)</sup> свидетельствуют о том, что вблизи солнечного края красное смещение в пределах весьма высокой точности эксперимента совпадает с теоретическим значением <sup>(1)</sup>. При удалении от края смещение резко уменьшается и на большей части диска составляет около  $1/3$  теоретического значения. Этот факт уже давно рассматривался <sup>(5)</sup> как указание на существование некоторого фиолетового смещения, частично компенсирующего красное смещение в центральной части диска и связанного, по всей вероятности, с наличием направленных от центра Солнца радиальных потоков в обрабатываемом слое. Как показано в <sup>(4)</sup>, предположение о существовании

таких потоков со скоростью  $v_0 \approx 0,6$  км/сек позволяет полностью объяснить наблюдаемое распределение смещения линий по диску. Но наличие восходящих потоков должно, в условиях стационарной в среднем картины, сопровождаться нисходящими потоками. Отсутствие указаний на наличие таких потоков и неблагоприятный характер оценок роли грануляции привели к выводу <sup>(4)</sup> о несправедливости гипотезы радиальных потоков; именно этот вывод и приводится в <sup>(1)</sup>. В свете новых данных <sup>(6)</sup> легко видеть, однако, что конвективные движения в обрабатываемом слое (грануляция) вполне могут объяснить упомянутое фиолетовое смещение линий.

Схематизируя задачу, примем, что поверхностная яркость областей с более горячими восходящими потоками (скорость  $v_\phi$ , площадь  $\sigma_\phi$ ) равна  $I_\phi$ . Те же величины в областях с нисходящими потоками (т. е. в межгранульных областях) обозначим через  $v_\kappa$ ,  $\sigma_\kappa$  и  $I_\kappa$ . Так как  $I_\phi > I_\kappa$ , линия поглощения будет смещена в фиолетовую сторону по сравнению с линией при  $I_\phi = I_\kappa$ . Эффективная скорость, характеризующая смещение линии в фиолетовую сторону, может быть определена соотношением

$$v_0 = \frac{I_\phi \sigma_\phi v_\phi - I_\kappa \sigma_\kappa v_\kappa}{I_\phi \sigma_\phi + I_\kappa \sigma_\kappa} = \frac{(I_\phi/I_\kappa - 1) v_\phi}{(I_\phi/I_\kappa + \sigma_\kappa/\sigma_\phi)}, \quad (2)$$

где для простоты пренебрежено изменением плотности, в силу чего  $\sigma_\phi v_\phi = \sigma_\kappa v_\kappa$ .

Согласно <sup>(6)</sup> для движений, вносящих наибольший вклад при определении контуров линий  $v_\phi \approx 2,8$  км/сек и  $\sigma_\kappa \approx \sigma_\phi$ , так как, повидимому,  $v_\kappa \approx v_\phi$ ; далее, отношение яркостей

$$\frac{I_\phi}{I_\kappa} \approx \left( \frac{T + \Delta T}{T - \Delta T} \right)^4 \approx 1,7,$$

поскольку  $\Delta T \leq 400^\circ$  (см. <sup>(6)</sup>) и  $T \approx 6000^\circ$ . В результате  $v_0 \approx 0,7$  км/сек, что находится в хорошем согласии со значениями, полученными в <sup>(4)</sup> из анализа красного смещения. Противоречие же, к которому привело применение выражения типа (2) в <sup>(4)</sup>, связано с использованием значения  $I_\phi/I_\kappa \approx 1,1$ , что в данном случае неверно (см. <sup>(6)</sup>, а также <sup>(7)</sup>). Итак, формула (1), а также фиолетовое смещение доплеровского типа, связанное с грануляцией, находят полное подтверждение \*. И уже во всяком случае нет никаких оснований отрицать справедливость формулы (1) на основании имеющихся данных.

Переходя к вопросу о смещении линий в спектре звезд, заметим, что в случае сверхгигантов типа М некоторые линии смещены в фио-

\* С рассмотренной точки зрения при приближении к краю красное смещение, достигнув значения (1), должно перестать расти. Это заключение находится в согласии с измерениями <sup>(4)</sup>, но попытки еще большего приближения к краю весьма целесообразны. Кроме того, при принятом механизме контуры линий должны быть несимметричными, причем с приближением к краю асимметрия должна исчезать, а ширина линий возрастать. Последнее обстоятельство и наблюдается на опыте <sup>(12, 6)</sup>.

К сожалению, вся картина явления может существенно усложниться при учете эффекта давления и особенно если линии в результате соударений сдвигаются не в красную <sup>(4)</sup>, а в фиолетовую сторону <sup>(13)</sup>. Экспериментальное выяснение роли эффекта давления с точки зрения интерпретации результатов работы <sup>(4)</sup> и ей аналогичных, казалось бы, может быть без труда достигнуто путем сравнения сдвигов линий с различными потенциалами возбуждения. Сейчас же, не останавливаясь на деталях, заметим, что сопоставление всех имеющихся данных <sup>(4, 6, 12, 13)</sup> привело автора к заключению о доплеровском характере сдвига; фиолетовое же смещение, зависящее от давления, если оно вообще имеет место, играет, вероятно, второстепенную роль. Заметим также, что косвенным доводом в пользу справедливости формулы (1) является согласие <sup>(14)</sup> между общей теорией относительности и опытом в вопросе об отклонении светового луча при его прохождении вблизи Солнца.

летовую сторону по сравнению с линиями, исходящими из более низких слоев звездной атмосферы <sup>(8)</sup>, и интерпретация такого смещения как красного смещения этих последних линий <sup>(1)</sup> достаточно произвольна. Поэтому на существование нового эффекта красного смещения указывают только данные о звездах типа В, а также типа О и Вольф-Райе (данные об одной звезде). К сожалению, автор лишен возможности судить (в частности, в силу отсутствия в <sup>(1)</sup> ряда подробностей) о том, в какой мере обсуждаемый эффект реален, а не связан все же с удалением звезд и вообще их движением относительно окружающей среды (например, туманности Ориона). Если же эффект действительно существует, то его раньше всего нужно пытаться объяснить конвективными движениями в звездных атмосферах (такие движения в принципе могут приводить и к красному смещению) и известным красным смещением (сдвигом) линий вследствие соударений (эффект давления <sup>(4, 9)</sup>). Между тем, в <sup>(1-3)</sup> без всякого осуждения подобных возможностей предполагается, что красное смещение связано с взаимодействием света со светом или света с электронами. Против такой интерпретации говорят уже данные о смещении в спектре Солнца, так как, согласно <sup>(1)</sup>, около  $\frac{4}{5}$  смещения вблизи края обусловлены новым эффектом, в то время как для такого вывода нет никаких оснований (см. выше) \*. Главное же, объяснение красного смещения рассеянием света на свете или на электронах решительно противоречит надежно установленным выводам теории. Так согласно <sup>(3)</sup>, для объяснения эффекта <sup>(1)</sup> сечение для рассеяния света на электронах должно равняться  $\sigma_{pe} \sim 10^{-17} \div 10^{-16} \text{ см}^2$ , в то время как известное томпсоновское сечение  $\sigma_{pe} = \frac{8\pi}{3} r_0^2 = 6,57 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ . Кроме того, возникают не меньшие трудности, связанные с угловым распределением рассеянного излучения. Учет двойного рассеяния, при котором дополнительно появляется мягкий фотон, как можно показать, также не спасает положения. Сечение для рассеяния света на свете, согласно <sup>(3)</sup>, должно равняться  $\sigma_{pp} \sim 10^{-18} \text{ см}^2$ , в то время как теория дает <sup>(3, 10)</sup> значение  $\sigma_{pp} \sim 10^{-70} \text{ см}^2$  (мы видим возможность уменьшить расхождение на несколько порядков, но это, конечно, совершенно не существенно). В случае рассеяния фотонов имеются также (с точки зрения объяснения эффекта <sup>(1)</sup>) трудности, связанные с угловым распределением. Не останавливаясь на этих вопросах подробнее, укажем лишь, что нам не удалось найти какой-либо возможности объяснить красное смещение взаимодействием света со светом или с электронами без того, чтобы не вступить в конфликт не только с существующей теорией, но и с наблюдаемыми эффектами (например, лембовским смещением уровней). Как ясно из сказанного ранее, для попыток объяснять красное смещение на таком пути <sup>(1-3)</sup> нет пока и убедительных оснований экспериментального характера.

В заключение заметим, что для исследования гравитационного смещения, а также некоторых других эффектов смещения спектральных линий могут оказаться особенно пригодными радиометоды, поскольку в радиодиапазоне можно в принципе измерить смещения  $(\Delta\nu/\nu) \sim 10^{-11} \div 10^{-12}$ , в то время как в оптике  $(\Delta\nu/\nu)_{\min} \sim 10^{-7}$ . В то же время гравитационное смещение, например линии водорода ( $\lambda = 21 \text{ см}$ ), в общем поле Галактики может достигнуть значения  $|\Delta\nu|/\nu \sim 10^{-7}$ ; гравитационное фиолетовое смещение линий, излучаемых с искусственного спутника Земли  $\Delta\nu/\nu \leq \kappa M_{\odot} / r_{\odot} c^2 = 7 \cdot 10^{-10}$ . Далее, если бы

\* В связи с этим заметим, что если бы эффект, обсуждаемый в <sup>(1-3)</sup>, имел место, то все линии в спектре звезд, расположенных во время солнечного затмения вблизи солнечного края, были бы смещены в красную сторону (при этом, согласно <sup>(1)</sup>,  $\Delta\lambda/\lambda \leq 3 \cdot 10^{-6}$ ).

удалось наблюдать лежащие в сантиметровом и дециметровом диапазоне линии (<sup>11</sup>) CH, CH<sup>+</sup> и OH в спектре комет, то при достижении кометой земной орбиты гравитационное смещение этих линий в поле Солнца изменялось бы при движении кометы до величины  $|\Delta\nu|/\nu \sim 10^{-8}$ . Наконец, смещение линий (например линий, инверсионного спектра NH<sub>3</sub>;  $\lambda \approx 1,25$  см) в спектре Юпитера равно  $\Delta\nu/\nu = -2 \cdot 10^{-8}$ . К сожалению, наблюдение разноспектров комет и планет пока еще неосуществимо.

Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Академии наук СССР

Поступило  
27 IV 1954

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> E. Finlay-Freundlich, *Phil. Mag.*, **45**, 303 (1954); *Proc. Phys. Soc.*, **67 A**, 192 (1954). <sup>2</sup> M. Born, *ibid.*, **67 A**, 193 (1954). <sup>3</sup> D. ter Haar, *Phil. Mag.*, **45**, 320 (1954). <sup>4</sup> M. G. Adam, *Month. Not.*, **108**, 446 (1948). <sup>5</sup> C. E. St. John, *Ap. J.*, **57**, 195 (1928). <sup>6</sup> R. S. Richardson, M. Schwarzschild, *ibid.*, **111**, 351 (1950). <sup>7</sup> M. Waldmeier, *Helv. Phys. Acta*, **13**, 13 (1940). <sup>8</sup> W. S. Adams, E. Mac. Cormack, **81**, *Ap. J.*, **81**, 119 (1935). <sup>9</sup> А. Уисольд, Ст. в сборн. *Современные проблемы астрофизики и физики Солнца*, 1951. <sup>10</sup> А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий, *Квантовая электродинамика*, гл. VIII, 1953. <sup>11</sup> И. С. Шкловский, *ДАН*, **92**, 25 (1953). <sup>12</sup> C. W. Allen, *Month. Not.*, **109**, 343 (1949). <sup>13</sup> L. Spitzer, *ibid.*, **110**, 216 (1950). <sup>14</sup> G. van Biesbroeck, *Astron. J.*, **58**, 87 (1953).