ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СДВИГИ ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ СОЛНЦА. II. "ЭФФЕКТ КРАЯ" ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ СОЛНЦА.

Р.Х. САЛМАН-ЗАДЕ

Шемахинская астрофизическая обсерватория АН Азербайджанской Республики

Шемаха, пос. Ю. Мамедалиева, Обсерватория

Приводятся результаты детальных исследований "эффекта края" фраунгоферовых линий в спектре Солнца. Установлено, что причиной "эффекта края" является ошибочность системы длин волн фраунгоферова спектра Солнца.

Со времен открытия, почти 100 лет назад, "эффекта края" фраунгоферовых линий в спектре Солнца, этому вопросу было посвящено много исследований. Однако, удовлетворительное объяснение этому загадочному явлению все еще не найдено.

Наблюдательные материалы получены на солнечных телескопах Астрономической Обсерватории ЛГУ, ГАО Пулково АН СССР и ШАО АН Азербайджанской Республики (1963-1984 г.г.). Были получены и исследованы спектры четырех краев и центра диска Солнца. Измерения негативов производились, в основном, на компараторе ИЗА-2. Лабораторное изучение "синтетических" линий показало, что при измерении на компараторе ошибок наведения из-за асимметрии больше, чем при измерении на регистрограмме. Поэтому измерения сдвигов асимметричных и очень сильных линий производились по фотометрическим регистрограммам.

Обнаружено [1], и в дальнейшем подтверждено [2], что теллурические линии не являются совершенно "идеальными" реперами, а изменяют свое положение в зависимости от зенитного расстояния наблюдения Солнца. Это явление нами учитывалось при дальнейших исследованиях.

Несмотря на обнаруженный недостаток, все же теллурические линии остаются непревзойденными реперами по сравнению с искусственными. Однако, поскольку теллурические линии, которые можно использовать в качестве реперов, сосредоточены только в двух участках спектра (λ 5900 Å и λ 6300 Å), число исследуемых линий обычно ограничивается до 20-25. Между тем, в работе [2] показано, что получение различных, не совпадающих между собой, кривых для "эффекта края" другими авторами связано со случайным подбором и недостаточным количеством исследуемых линий. Используя факт наложения на наблюдаемый спектральный участок спектров из других порядков, изучаемая область была расширена до 3500 Å, а количество исследуемых линий довели до 90, что позволило получить наиболее точную кривую для "эффекта края" (усреднение результатов производилось по всем исследуемым линиям и четырем краям диска Солнца). Заметим, что количество исследуемых линий у других авторов не превышало 28.

Исследования показали, что "эффект края" проявляет отчетливую зависимость от силы линий. Это частично обусловлено разностью уровней, где возникают фраунгоферовы линии. Кривая для "эффекта края", полученная Адам [3], которая всегда считалась одной из точных, в действительности, дает завышенные результаты. Причиной этого является то, что все 3 линии, используемые Адам, возникая в более высоких слоях атмосферы Солнца, показывают большие сдвиги. Из вышесказанного следует, что для более точного определения кривой для "эффекта края" необходимо исследовать большое количество линий разной силы.

Зависимость "эффекта края" от силы линий выявляется даже внутри одного и того же мультиплета. Обнаруживается четкое различие "эффекта края" для нечетно-четных и четно-нечетных переходов между термами. "Красное смещение" фраунгоферовых линий (среднее по всем исследуемым линиям) на краю Солнца приближено к релятивистскому значению, в то время как в центре диска оно вдвое меньше теоретического значения. Кроме того, показано, что явление, приводящее к "эффекту края", распространяется на весь диск Солнца. При наблюдениях, проводимых с применением анализатора (поляроида) излучения, обнаруживается, что сдвиги линий на краю диска зависят от чувствительности их к эффекту Зеемана, давления и сверхтонкой структуры. "Эффект края" значительно различается для восточного и западного краев Солнца. Предполагается, что наблюдаемое различие является следствием крупномасштабных движений на поверхности Солнца, направленных против его осевого вращения.

Для выяснения причин, приводящих к "эффекту края", необходимо было проверить систему длин волн фраунгоферовых линий, на ошибочность которой неоднократно указывалось в литературе. Для исследования в центре диска была выбрана область спектра λ (3895÷6677 Å). Всего было использовано около 100 линий Fe I, оказавшихся наиболее пригодными с точки зрения отсутствия или лишь небольшого блендирования. Были изучены разности $\Delta\lambda=\lambda_{*}-\lambda_{L}-\Delta\lambda_{r}$, где λ_{*} - приближенные значения длин волн фраунгоферовых линий, взятые из [4], λ_{L} - длины волн линий лабораторного спектра Fe I [5], $\Delta\lambda_{r}$ - поправка за счет теоретического красного смещения. Использование λ_{L}, а не λ_{air}, мало изменяет результат и, кроме того, линии солнечного спектра, возникающие особенно глубоко, образуются в условиях не полного вакуума. $\Delta\lambda$ в случае, если они не равны нулю, характеризуют фактическую, систематическую и случайную ошибки системы длин волн фраунгоферова спектра для центра Солнца. Для $\Delta\lambda$ в исследуемой области было получено линейное соотношение в форме (ошибки вероятные):

$$\Delta\lambda\,(\text{мÅ})\ (\text{центр}) = +17.55 - 0.004492\ \lambda\,(\text{Å}) \quad (1)$$
$$\pm 2.51 \pm 0.000152$$

Результаты анализа показали, что систематическая ошибка отсутствует в области λ 4000+4400 Å, а затем нарастает линейно. При этом оказывается, что $\lambda<0$ и, следовательно, длины волн в более длинноволновой области спектра меньше, чем следует. Систематическая ошибка около λ 7000 Å достигает - 15 mÅ. Следовательно, необходимая поправка к системе длин волн фраунгоферова спектра в этой области достигает +15 mÅ. Случайные ошибки также оказываются значительными $\sigma=\pm4$ mÅ. Они обусловлены, в основном, ошибками измерений и частично неизбежным блендированием линий даже тех, которые принято считать достаточно "чистыми". Наблюдается зависимость $\Delta\lambda$ от центральной остаточной интенсивности линии r_o. Линии с $r_o\approx0.1$ или 10% (т.е. достаточно сильные), дают правильную систему длин волн, ибо для них практически $\Delta\lambda\approx0$. Линии же с большей r_o (т.е. более слабые) дают ошибочную систему длин волн, ибо $\Delta\lambda<0$ и при r_o=0.3+0.5 или 30+50 %, для них $|\Delta\lambda|$ =20+10 mÅ т.е. в среднем около 15 mÅ. Подобные сравнительно слабые линии (их ядра) эффективно образуются в более глубоких слоях атмосферы Солнца. Следовательно, систематическая ошибка в системе длин волн линий центра диска Солнца растет с погружением в более глубокие слои его атмосферы. Этот результат подтверждается также при сопоставлении значений $\Delta\lambda$ с эффективными оптическими глубинами зарождения линий.

Мы считаем, что остаточные дифференциальные отрицательные сдвиги линий Fe I при погружении в глубь атмосферы Солнца и при переходе в длинноволновый конец спектра связаны с соответствующим ростом плотности вещества Солнца. Согласно современным моделям атмосферы Солнца, плотность вещества больше в областях эффективного зарождения слабых линий примерно на половину порядка или даже на порядок. Как следствие этого, показатель преломления n_λ в этих областях также больше, особенно в центральных частях линий поглощения. В этом случае в формуле для расчета сдвига линий следует использовать не $\lambda-\lambda_o=\Delta\lambda=\lambda_o v/c$ (v - скорость по лучу зрения), а $\lambda-\lambda_o=\Delta\lambda=\lambda_o(v/c)n_\lambda$, где n_λ - показатель преломления для данной длины волны. Таким образом, следует брать не скорость света в вакууме, а фазовую скорость c/n_λ в данной среде. В этом случае получается, что линии поглощения, возникающие глубже (т.е. более слабые), могут быть немного сдвинуты относительно таковых, возникающих в более высоких слоях (более сильных). При этом имеются ввиду лишь ядра линий, по которым производится измерение сдвигов. Для потоков в верхних слоях (глубина $h\approx0$) $\lambda(0)=\lambda_o[1+n_\lambda(0)v/c]$, а в более глубоких $\lambda(h)=\lambda_o[1+n_\lambda(h)v/c]$, и, следовательно, сдвиги фраунгоферовых линий $\Delta\lambda=\lambda_o\Delta n_\lambda v/c$. Например, при $v\approx1$ км/сек, λ=6000 Å, $\Delta\lambda$=0.01 Å, $\Delta n_\lambda\approx0.5$. Такое значение Δn_λ при переходе от глубоких к верхним слоям фотосферы Солнца в ядрах линий поглощения вполне возможно.

По данным наших исследований и Форбса [6], для остаточных сдвигов на краю (край минус центр) для точки $\cos\theta\approx0.1$, было получено линейное соотношение:

$$\Delta\lambda\,(\text{mÅ})\ (\text{край-центр})\approx-17.5+0.0045\ \lambda\,(\text{Å}) \quad (2)$$

Если сложить соотношения (1) и (2), то сдвиг на краю, т.е. "эффект края", исчезает. Оказывается, что причиной "эффекта края" фраунгоферовых линий (усредненная по многим линиям) является не отдельный физический процесс или же их комплекс, а то, что система длин волн фраунгоферова спектра является ошибочной, особенно в красной и инфракрасной областях спектра. Если ввести в длины волн линий в SRRPT [4] соответствующие поправки, "эффект края", как таковой, исчезает. Таким образом, правильнее было бы называть, впредь, не "эффект края", а "эффект центра" фраунгоферовых линий, поскольку, как показали результаты наших исследований, избыточные длины волн линий на краю являются результатом "дефицита" λ в центре Солнца, обусловленного введением, в свое время, неправильных ("дефицитных") поправок к системе длин волн в [7].

[1] *О.А. Мельников, Р.Х. Салман-заде и др.* Доклады АН СССР, 1972, №5 ,с. 205.

[2] *Р.Х. Салман-заде.* Материалы конфепенции по физике, Решт, Иран, 1997.

[3] *M.G. Adam.* M.N.R.A.S., 1959, v. 119, p. 460.

[4] *Ch.E. Moore, M.G. Minnaert, J. Houtgast.* SRRPT, Washington, N.B.S. Monograph, 1966, p.61.

[5] *B.Edlen.* Trans. IAU,1957,v.9,p.220;1960,v.10, p.211.

[6] *E.G. Forbes.* M.N.R.A.S., 1962, v.125, 1.

[7] *C.E. St. John, Ch.E. Moore, L.M. Ware, E.F. Adams, H.D. Babcock.* RRPT, Publ. Corn. Inst. Washington, 1928, n. 396.

R.X. Salman-zadə

GÜNƏŞ SPEKTRİNİN FRAUNHOFER XƏTLƏRİNİN NİSBİ SÜRÜŞMƏLƏRİ. II. GÜNƏŞ SPEKTRİNİN FRAUNHOFER XƏTLƏRİNİN "KƏNAR EFFEKTİ"

Güneş spektrinin Fraunhofer xətlərinin "kənar effekti"nin tədqiqatının nəticələri verilir. Göstərilir ki, "kənar effekti" Günəşin Fraunhofer spektrinin dalğa uzunluqları sisteminin qeyri-dəqiqliyinin nəticəsidir.

R.Kh. Salman-zadeh

THE DIFFERENTIAL SHIFTS OF FRAUNHOFER LINES IN SOLAR SPECTRA. II. THE SOLAR "LIMB-EFFECT"

The results of the detail investigation of solar "limb-effect" are given. It is shown that the solar "limb-effect" is a result of the incorrect wave-length system of the Fraunhofer spectrum.

Дата поступления: 24.09.97 *Редактор: Ф.М. Гашимзаде*