

А. Б. СЕВЕРНЫЙ

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО НАЛИЧИЯ ДЕЙТЕРИЯ НА СОЛНЦЕ

(Представлено академиком Г. А. Шайном 17 V 1954)

В настоящей работе изложены метод и результат подробного фотоэлектрического исследования контура водородной линии H_α (λ 6562,8) в спектре Солнца. Установка для фотоэлектрической регистрации спектра отдельных мест солнечной поверхности в ее первоначальном виде была описана ранее (¹). В современном ее состоянии установка выглядит следующим образом (см. рис. 1). Параболическое

зеркало M с диаметром 25 см дает изображение Солнца диаметром 85 мм на входной щели s_1 дифракционного спектрографа (m_1 , m_2 — зеркала коллиматора и камеры, G — решетка с площадью 110 мм, 600 дел/мм). Луч от зеркала камеры m_2 падает на качающееся зеркало t и от него — на щель электрофотометра s_2 с фотоумножителем f_1 . Разработанная электрофотометрическая установка выполнена совместно В. Б. Никоновым и автором. Возникающий при колебании спектра относительно щели s_2 изменяющийся фототок подается через усилитель на вертикальные пластины катодного осциллографа R . Горизонтальная развертка спектра осуществляется также фотоэлектрически —

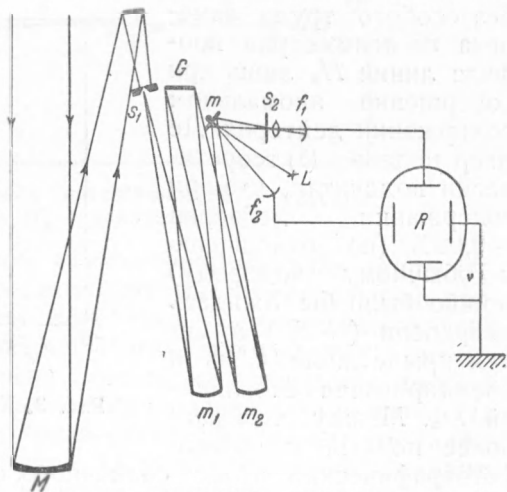


Рис. 1. Схема установки для осциллографирования спектра Солнца.

путем периодических модуляций вспомогательного светового пучка (исходящего из L), отраженного от того же качающегося зеркала t и падающего на второй фотоумножитель f_2 , выход которого подан (через усилитель) на горизонтальные пластины трубки R . Это обеспечивает совершенно безупречную синхронизацию между смещением спектра по щели s_2 и горизонтальной его разверткой. Для видимой части спектра использованы сурьмяно-цезиевые фотоумножители; для длинноволновой — кислородно-цезиевые. Получаемое на экране осциллографа R распределение энергии в спектре Солнца (в участке от 70 до 150 Å) фотографируется или кинематографируется. Пример такой осциллограммы спектра приведен на рис. 2. Постоянная времени на входе в осциллограф и амплитуда колебания t подобраны так, чтобы не было потери разрешающей силы. В нашей установке

это достигается при частоте колебаний спектра около 1 гц*. Нулевая линия на осциллограммах получается при обратном ходе спектра при помощи обтюлятора у щели s_1 , синхронизованного с качающимся зеркалом m .

Обработка большого числа осциллограмм различных линий показывает очень высокую точность метода — не менее чем в 10 раз превышающую точность обычного фотографического метода: средняя квадратичная ошибка отдельного измерения интенсивности по данным свыше 800 осциллограмм оказалась $\pm 0,4\%$. Это позволило надеяться на выявление довольно тонких спектральных эффектов, лежащих в пределах точности обычного метода, и в частности, на выявление поглощения, вызванного тяжелым водородом. Известно, что наиболее интенсивная линия тяжелого водорода D_α (λ 6561,03) расположена настолько близко к самой сильной линии обычного водорода H_α (6562,8), что она могла бы быть без особого труда замечена по асимметрии профиля линии H_α лишь при совершенно аномальном содержании дейтерия. Де Ягер недавно ⁽²⁾ теоретически подсчитал, что при содержании дейтерия $\sim 0,02\%$ (по отношению к обычному водороду) можно было бы ожидать депрессии ($\sim 2\%$) в сильном крыле линии H_α из-за блендирования его линией D_α . Между тем наиболее полный и точный фотографический атлас солнечного спектра Миннаэрта ⁽³⁾ не дает уверенных указаний на такую депрессию. Это кажется естественным, так как точность фотографического метода, примененного Миннаэртом, по его же оценке, едва ли выше 5%.

В основу работы было положено более 100 наилучших (с минимальными флуктуациями амплитуды) осциллограмм линии H_α (λ 6562,82), полученных указанным методом в различное время и для различных мест на диске Солнца. Осциллограммы были разделены на однородные группы, включающие в себя ряд последовательных (отличающихся промежутками не более 5 сек.) записей для данного места на диске Солнца. За исключением нескольких случаев, исключенных из обработки, записи показали практически строгую линейность — постоянство дисперсии вдоль осциллограммы и пропорциональность амплитуды фототоку. Для каждой группы был получен средний контур линии H_α в единицах непрерывного спектра для каждой его точки (пример его для центра диска см. рис. 3). Проведение

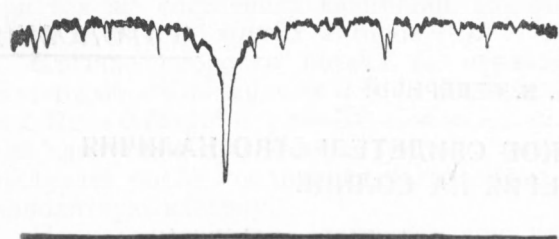


Рис. 2. Осциллограмма линии H_α

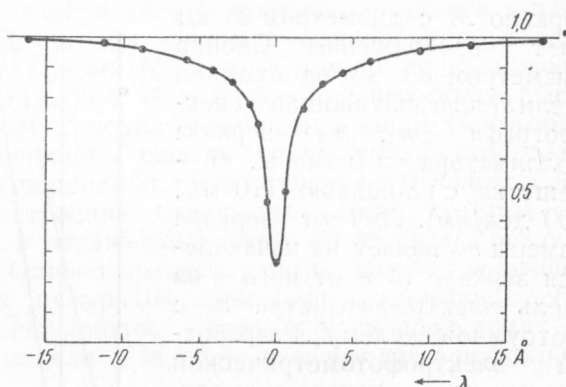


Рис. 3. Контур линии H_α для центра Солнца

* Большие частоты желательны для регистрации быстрых изменений в спектрах активных образований на Солнце.

контура линии H_α , равно как и непрерывного спектра в ее районе делается вполне уверенно ввиду сравнительно незначительного блендирования этой линии и широкого участка записи $\pm 50 \text{ \AA}$. При этом отклонения отдельных записей от среднего отличались не более чем на 1—2% интенсивности непрерывного спектра. Затем измерялись остаточные интенсивности в красном и синем крыле и определялась их разность на одинаковых расстояниях от центра линии. На рис. 4 показана зависимость этой разности от длины волны для отдельных групп, а также средняя зависимость с отметками средних уклонений (чертой) и весов (кружками) для каждой точки. Полученный на рис. 4

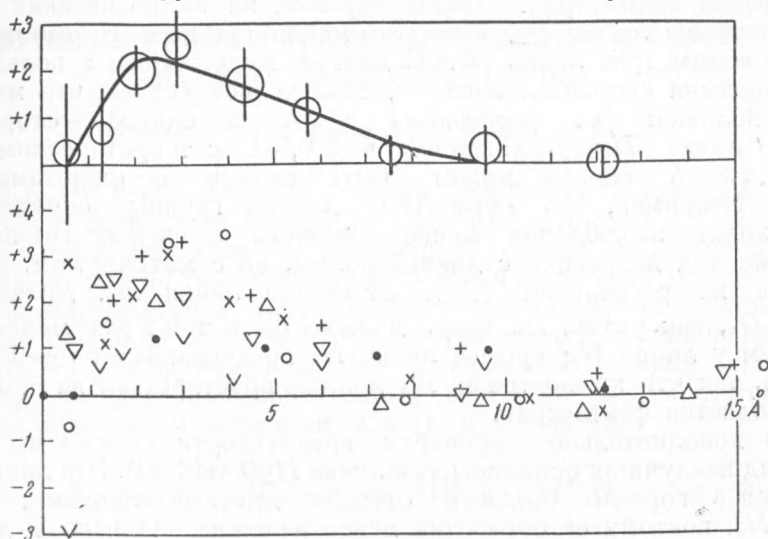


Рис. 4. Ход разности остаточных интенсивностей в красном и синем крыле линии H_α с длиной волны

результат явно свидетельствует об асимметрии профиля линии H_α . Прежде всего эта асимметрия не может быть инструментального происхождения хотя бы потому, что обработка осциллограмм других линий (H и K кальция, D_1 и D_2 натрия и некоторых других), снятых одновременно для тех же мест диска Солнца, не показывает никакой асимметрии, несмотря на большее их блендирование, чем у линии H_α . Кроме того, изменяя направление развертки спектра мы убедились в том, что оно никак не связывается на контурах линий. Говорить же о влиянии инструментального контура (шириной около $0,1 \text{ \AA}$) на появление асимметрии, удаленной на $\sim 2 \text{ \AA}$ от центра линии и простирающейся на участок в $10 \text{ \AA}$, очевидно, также не приходится. Происхождение найденной нами депрессии в синем крыле H_α также весьма неправдоподобно было бы приписать наличию бленды $\lambda\lambda 6561,1$; $6560,6$ (водяные пары атмосферы), $\lambda 6559,6$ (Ti^+) по следующим причинам. Во-первых, эти линии очень слабые (наибольшая имеет интенсивность 0 по Роулонду и Миннаэрту, остальные — минус 3); во-вторых, если бы здесь было влияние бленд, то оно, хотя и в несколько меньшей степени, но также сказалось бы на красном крыле, где также имеются бленды примерно той же интенсивности $\lambda\lambda 6564,1$; $6564,8$; кроме того, мы не видим никакого влияния более сильных бленд на контур H_α , например бленд $\lambda\lambda 6569,2$ или $\lambda\lambda 6552,5$; $6555,5$; в-третьих, влияние бленд, как правило, ограничено узким спектральным интервалом — здесь же депрессия простирается на участок в $10 \text{ \AA}$. Однако наиболее важным является то, что в контурах таких сильных линий как H и K , D_1 и D_2 , где влияние бленд на контур должно быть гораздо больше, не обнаруживается никакой асимметрии.

Далее, обнаруженная депрессия синего крыла не показывает никакой зависимости от положения на диске, поэтому она не может быть связана ни с каким доплеровским эффектом движения водородных масс; кроме того, скорости таких систематических движений были бы абсурдно велики (> 100 км/сек). Эта асимметрия, очевидно, не может быть связана с известным эффектом красного смещения, величина которого в 200 раз меньше, чем расстояние наибольшей депрессии от центра линии H_{α} . Точно так же она не может быть связана с эффектом давления, которое в солнечной атмосфере в 1000 раз меньше, чем те давления, при которых такие эффекты вообще начинают вызывать эффект асимметрии. Таким образом, не видно никаких причин, кроме наличия линии D_{α} , которые могли бы вызвать наблюдаемый эффект асимметрии линии H_{α} . С другой же стороны, в пользу того, что депрессия вызвана линией D_{α} , свидетельствует то, что максимум ее расположен на расстоянии $\sim 2 \text{ \AA}$ в синюю сторону от центра линии H_{α} ; расхождение в $\pm 0,5 \text{ \AA}$ с теоретическим значением $1,8 \text{ \AA}$ вполне может быть связано с ошибками измерений. Например, из обработки другой группы осциллограмм, куда входят наблюдения менее высокого качества, мы получили такой же ход депрессии с длиной волны, но с максимумом, расположенным на расстоянии $1,5 \text{ \AA}$ от центра линии H_{α} . Далее, крыло линии D_{α} , как указал Де Ягер, должно быть в $\sqrt{2}$ раз менее широким, чем у линии H_{α} ; крылья линии H_{α} простираются на $\sim 15 \text{ \AA}$ (см. рис. 2), так что крыло линии D_{α} должно простираться на $\sim 10 \text{ \AA}$, что и наблюдается фактически.

Для дополнительной проверки правильности вывода мы обработали ряд наилучших осциллограмм линии H_{β} ($\lambda 4861,34$). Эта линия блендируется в гораздо большей степени другими линиями, нежели линия H_{α} , поэтому ее обработка менее надежна. Однако и для этой линии обнаруживается депрессия около $1,5\%$ в синем крыле с максимумом, почти точно совпадающим с длиной волны D_{β} ($\lambda 4860,03 \text{ \AA}$). Изложенное позволяет заключить о наличии очень слабых, но вполне обнаруживаемых линий поглощения дейтерия в спектре Солнца. Наличие этих линий подозревалось недавно на основе теоретических соображений Де Ягером ⁽²⁾ и Гоцитом ⁽⁴⁾, и Кресином ⁽⁵⁾ для линии D_{β} и линии пашеновской серии $\lambda 12814,56 \text{ \AA}$.

Эквивалентная ширина депрессии, приписанной нами линии D_{α} , составляет около $100 \text{ м\AA}$, что приблизительно в 10 раз превышает вычисленную с учетом блендирования линий H_{α} и D_{α} Де Ягером, исходя из содержания дейтерия $0,02\%$ от обычного водорода (неблендированная линия D_{α} , согласно его вычислениям, должна иметь как раз такую эквивалентную ширину $\sim 100 \text{ м\AA}$). Это расхождение служит указанием на то, что содержание дейтерия в солнечной атмосфере может быть больше, нежели $0,02\%$, и, возможно, может достигать $0,1\%$. Однако этот вопрос требует более строгого рассмотрения.

Интересно отметить, что наличие дейтерия в атмосфере Солнца, равно как и недавнее отождествление Гринштейном ⁽⁶⁾ бериллия в спектре Солнца, свидетельствуют об отсутствии перемешивания между самыми внутренними слоями Солнца, где температура выше нескольких миллионов градусов, и его атмосферой.

Крымская астрофизическая обсерватория
Академии наук СССР

Поступило
10 V 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Б. Никонов, А. Б. Северный, ДАН, **77**, 217 (1951). ² C. De Jager, *Recht. Astron. de l'Obs. d'Utrecht*, **13**, 1 (1952). ³ M. Minnaert, G. Mulders, J. Hautgart, *Photom. Atlas of the Solar Spectrum*, Utrecht, 1940. ⁴ J. Gauzit, *C. R.*, **234** (1951); (1952). ⁵ D. Crespin, *Acad. Roy. Belg. Cl. Sc.*, **38**, 838 (1952). ⁶ J. Greenstein, E. Tandberg-Hanssen, *Ap. J.*, **119**, 113 (1945).