

УДК 523.982

Наблюдения 8-килогауссового магнитного поля в солнечном пятне

В.Г. Лозицкий, Н.И. Лозицкая

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

Представлены результаты спектрально-поляризационных измерений магнитного поля в двух крупных солнечных пятнах, наблюдавшихся на ГСТ АО КНУ 18 мая 2002 г. и 29 октября 2003 г. При детальном изучении зеемановского расщепления линий FeI 6301.5 и 6302.5 во втором пятне найдены такие эффекты: а) непараллельность бисекторов профилей $I+V$ и $I-V$ на расстояниях примерно ± 250 мÅ от центра линии FeI 6301.5 и б) узкие и слабые вторичные пики V -параметра Стокса на расстояниях ± 387 мÅ от центра в линии FeI 6302.5. Аргументируется вывод, что эти особенности указывают на существование в пятне субтелескопического магнитного поля с напряженностью ≈ 8100 Гс, которое имело ту же полярность (N), что и фоновое поле пятна напряженностью 3200 Гс.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ 8-КИЛОГАУССОВОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ У СОНЯЧНІЙ ПЛЯМІ, Лозицький В.Г., Лозицька Н.І. — Представлено результати спектрально-поляризаційних вимірювань магнітного поля у двох великих сонячних плямах, які спостерігались на ГСТ АО КНУ 18 травня 2002 р. і 29 жовтня 2003 р. При детальному вивченні зееманівського розщеплення ліній FeI 6301.5 і 6302.5 у другій плямі знайдені такі ефекти: а) непаралельність бісекторів профілів $I+V$ і $I-V$ на відстанях приблизно ± 250 мÅ від центру лінії FeI 6301.5 і б) вузькі й слабкі вторинні піки V -параметра Стокса на відстанях ± 387 мÅ від центру лінії FeI 6302.5. Аргументується висновок, що ці особливості вказують на існування в плямі субтелескопічного магнітного поля з напруженістю ≈ 8100 Гс, яке мало ту ж полярність (N), що і фонове поле плями з напруженістю 3200 Гс.

OBSERVATIONS OF 8-KILOGAUSS MAGNETIC FIELD IN A SUNSPOT, by Lozitsky V.G., Lozitska N.I. — The results of spectral-polarized measurements of magnetic fields in two great sunspots are presented observed on 18 May 2002 and 29 October 2003 on horizontal solar telescope of Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University. On a base of detailed study of the Zeeman splitting in FeI 6301.5 and 6302.5 lines, the following spectral effects were found in second spot: a) non-parallelism of bisectors in $I+V$ and $I-V$ profiles on distances about ± 250 mÅ from line center of FeI 6301.5 and b) narrow and weak secondary peaks of Stokes V parameter on distances ± 387 mÅ from center of FeI 6302.5 line. The conclusion is argued that these peculiarities indicate the presence in sunspot of subtelescopic magnetic field with strength about ≈ 8100 G which had the same polarity (N) as 3200 G background magnetic field of this sunspot.

Ключевые слова: солнечные пятна; магнитные поля.

Key words: sunspots; magnetic fields.

1. ВВЕДЕНИЕ

Напряженность магнитного поля в солнечных пятнах зависит в основном от их размера и фазы солнечного цикла [3]. В солнечных пятнах с диаметром полутени 30–60" величина магнитного поля в среднем от 2100 до 2700 Гс, хотя иногда отмечаются и магнитные поля (в крупных пятнах) до 4–5 тысяч гаусс. В частности, Стешенко [6] измерил магнитное поле с напряженностью 5350 Гс в небольшом ($\leq 2''$) фрагменте большого солнечного пятна. Максимальное (на сегодняшний день) магнитное поле в солнечном пятне измерено Ливингстоном с соавторами [7]; оно достигало 6100 Гс.

Вопрос об условиях возникновения и частоте появления таких особо сильных полей в настоящее время неясен. Согласно наблюдениям, для появления таких полей не обязательно наличие пятен особо большого размера. Как отмечено выше, Стешенко [6] наблюдал экстремально сильное поле в небольшой области более крупного пятна, тогда как вне этой области магнитное поле было гораздо слабее. Северный [4] более столетия назад предположил, что «...магнитное поле внутри пятен имеет тонкую структуру, осреднение которой при наблюдениях приводит к полям $\sim 10^3$ гаусс, в то время как фактическое поле отдельных элементов пятна (возможно, различной полярности и наклона) составляет десятки тысяч гаусс».

Исходя из этого, можно взять за основу следующую рабочую гипотезу. Возможно, особо сильные магнитные поля в пятнах имеют столь небольшие размеры и занимают столь небольшую интегральную площадь (фактор заполнения), что при прямых наблюдениях с умеренным пространственным разрешением они «не разрешаются». Это означает, что наблюденная картина расщепления спектральной магниточувствительной линии является результатом суммирования спектральных вкладов как минимум двух компонент с различным магнитным полем: с более сильным и с меньшим фактором заполнения и с

менее сильным, но с большим фактором заполнения. Тогда признаки присутствия сильной компоненты можно найти на основе сопоставления наблюдаемых картин расщепления с теми, которые получаются теоретически для однородного магнитного поля. Именно такое сопоставление и являлось целью настоящего исследования.

2. МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Материал наблюдений получен на эшелъном спектрографе Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко [2]. Наблюдались два крупных пятна с сильным магнитным полем: 18.05.2002 г. (АО NOAA 9948) и 29.10.2003 г. (АО NOAA 10488). Первое пятно имело диаметр около $50''$ и магнитное поле 3600 Гс по визуальным измерениям в линии FeI 5250.2, выполненным в АО КНУ в линии FeI 5250.2; гелиоцентрический угол этого пятна соответствовал $\mu = 0.85$. Второе пятно имело $\mu = 0.97$, диаметр около $60''$ и магнитное поле 3400 Гс. В процессе наблюдений фотографировались $I+V$ и $I-V$ спектры этих пятен на фотопластинки ORWO WP3. Экспозиции при фотографировании составляли 30 сек и начинались в 13:34:00 и 12:53:50 UT, соответственно.

3. НАБЛЮДЕННЫЕ ПРОФИЛИ ЛИНИЙ

Магнитные поля в пятнах измерялись по магниточувствительным линиям FeI 6301.5 и 6302.5 Å, которые имеют близкие глубины формирований в атмосфере Солнца и факторы Ланде $g = 1.669$ и 2.487 , соответственно [1]. В первом приближении, эти две линии можно рассматривать как одну и ту же магниточувствительную линию, имеющую дискретно изменяющиеся (в 1.5 раза) факторы Ланде. Это весьма ценно в методе «отношения линий» (см. напр. [8, 9]), позволяющем обнаруживать и диагностировать сильные субтелескопические магнитные поля.

Наблюдаемые профили $I+V$ и $I-V$ этих линий (рис. 1 и 2) фотометрировались отдельно и взаимно «привязывались» по длинам волн по теллурическим линиям O_2 . Оказалось, что эти профили имеют следующие особенности:

- а) у линии с большим фактором Ланде ($g = 2.487$) наблюдается частичное разделение π - и σ -компонент, тогда у линии с меньшим фактором Ланде ($g = 1.669$) — неразделенные π - и σ -компоненты;
- б) магнитное поле, измеренное по расщеплению σ -компонент линии с большим фактором Ланде, равно 2700 Гс для первого пятна и 3200 Гс — для второго. Попутно заметим, что меньшие значения напряженностей по сравнению с визуальными измерениями имеют здесь двоякую причину: во-первых, фотографические измерения при длительных экспозициях занижают пиковые (максимальные) значения напряженностей, улавливаемые визуально при кратковременных улучшениях качества изображения и, во-вторых, при фотографировании первого пятна было выставлено на входной щели не самое сильное поле;
- в) расщепление бисекторов профилей $I \pm V$ линии FeI 6301.5 в обоих пятнах изменяется в общем не монотонно с расстоянием от центра линии, как должно быть при однородном и чисто продольном поле

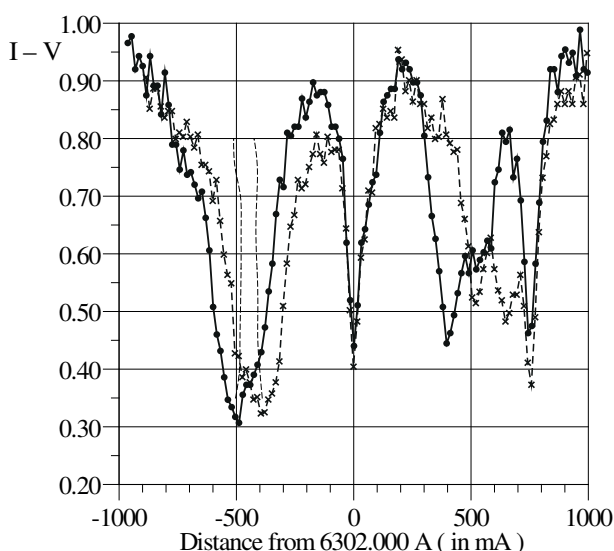


Рис. 1. Профили $I \pm V$ линий FeI 6301.5 и 6302.5 Å в пятне 18.05.2002 г. Указанным линиям соответствуют отсчеты по оси абсцисс около -500 и $+500$ мÅ, тогда как теллурическим линиям — отсчеты 0 и 750 мÅ. Для линии FeI 6301.5 тонкими штриховыми линиями показаны бисекторы профилей $I+V$ и $I-V$.

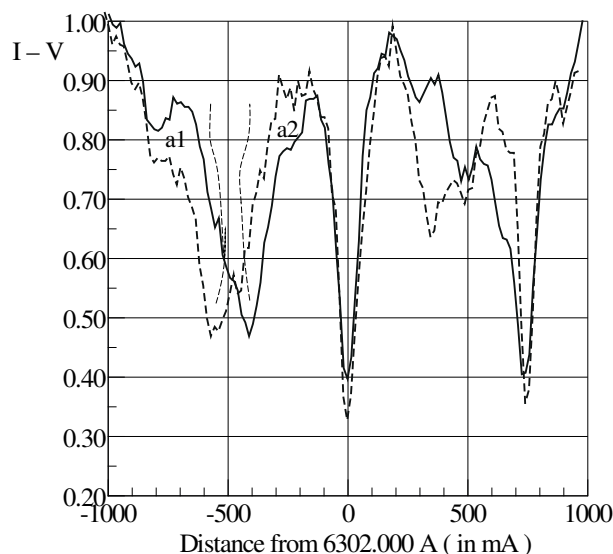


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для пятна 29.10.2003 г.

(см. ниже). А именно, бисекторы этих профилей наиболее расщеплены в ядре линии, далее в средних крыльях это расщепление несколько меньше и затем опять возрастает в далеких крыльях. Особенно отчетливо это видно в пятне 29 октября 2003 г;

г) в этом же пятне, в профиле линии 6301.5 имеются симметрично расположенные относительно центра линии (на расстояниях от центра 250 мÅ) особенности a1 и a2, создающие эффект локального «вздутия» бисекторов в далеких крыльях линии;

д) положение π -компоненты в линии 6302.5 хорошо совпадает в обеих поляризациях в пятне 29 октября 2003 г., где она видна более отчетливо, чем в другом пятне.

4. ТЕОРИЯ

Для сравнения наблюдений с теорией были рассчитаны профили однородного поля по теории Унно [10] для модели атмосферы Милна–Эддингтона. Предполагалась доплеровская форма профилей коэффициентов поглощения. По рассчитанным профилям Стокса I и V находились их комбинации $I+V$ и $I-V$, а в них — их бисекторы. Для иллюстрации на рис. 3 показаны результаты расчета для относительного коэффициента поглощения $\eta_0 = 4.0$ и различных углов γ между силовой линией магнитного поля и лучом зрения: $\gamma = 0^\circ$ (продольное поле), 45° (поле промежуточной ориентации между продольным и поперечным) и 75° (почти поперечное поле). По оси абсцисс отложено относительное расстояние от центра линии ν , выраженное у доплеровских ширинах $\Delta\lambda_D$, т.е. $\nu = \Delta\lambda/\Delta\lambda_D$, где $\Delta\lambda$ — линейное расстояние от центра линии. Представленный на рис. 3 случай соответствует $\nu_H = \Delta\lambda_H/\Delta\lambda_D = 1$. Это случай тесного блендирования π - и σ -компонент. Для линии FeI 5250.2 он соответствует полю В 1500 Гс, а для линии FeI 6302.1 — $B \approx 3200$ Гс, т.е. близкому по величине к тому полю, которое было измерено в пятнах визуальным методом.

Из рисунка видно, что при чисто продольном поле, когда в спектре видны лишь σ -компоненты, а π -компонента отсутствует, бисекторы профилей $I+V$ и $I-V$ взаимно параллельны, а их расщепление соответствует $\nu = 1$. Это тот случай, когда из измерений с анализатором круговой поляризации получается модуль магнитного поля.

При $\gamma = 45^\circ$ в спектре зеемановского триплета появляется центральная π -компонента, которая пока что менее интенсивна, чем σ -компоненты, но, имея линейную поляризацию (а в реальности — еще и будучи частично деполяризованной рассеянным светом), проникает в спектры как $I+V$, так $I-V$. В каждом из спектров $I+V$ и $I-V$ она объединяется с видимой σ -компонентой, и это дает асимметричный профиль, с непараллельными бисекторами профилей $I+V$ и $I-V$. Здесь существенно то, что при однородном поле расщепление бисекторов должно быть максимально в ядре линии и монотонно уменьшаться при переходе в ее все более далекие крылья. Но даже в ядре линии расщепление бисекторов будет меньше, чем в случае продольного поля. В итоге, из таких измерений (при $\gamma = 45^\circ$) получается не модуль магнитного поля, а величина, меньшая за него и более близкая к продольной компоненте $B_{\parallel} = B \cos \gamma$.

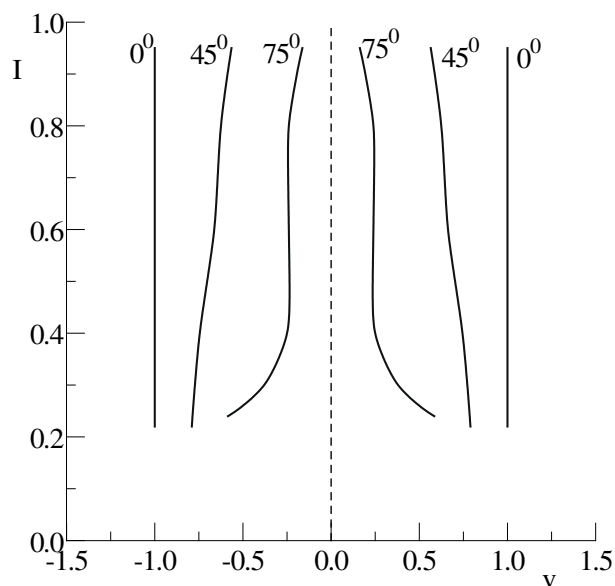


Рис. 3. Теоретические бисекторы профилей $I \pm V$ в теории Унно [10] при $\eta_0 = 4.0$, $\nu_H = 1$ и различных углах γ между силовой линией магнитного поля и лучом зрения (их значения указаны на рисунке).

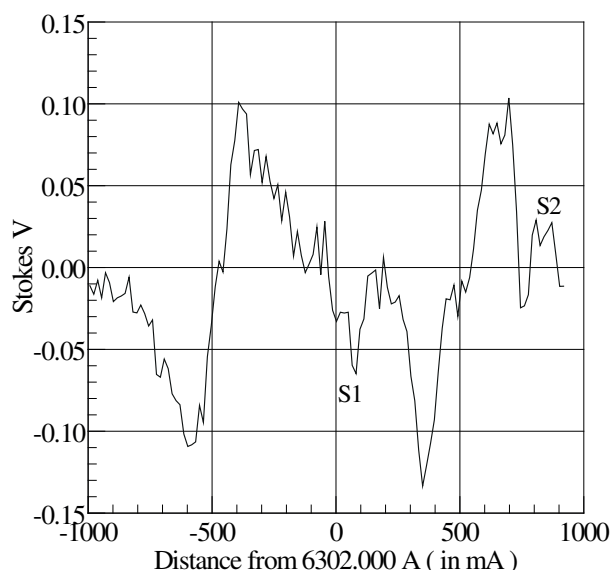


Рис. 4. Наблюдаемые профили V линий FeI 6301.5 и 6302.5 в пятне 29.10.2003 г. (см. текст).

При $\gamma = 75^\circ$ картина качественно не меняется: расщепление бисекторов также уменьшается при переходе от ядра линии к ее крыльям, притом в более значительном диапазоне изменений, чем при $\gamma = 45^\circ$. Это связано с тем, что при $\gamma = 75^\circ$ значительно усиливается центральная π -компонента и она вносит наибольшие отличия от продольного поля в центре линии, тогда как в далеких крыльях она существенно ослабевает и там картину расщепления диктуют в основном σ -компоненты.

Сравнивая рис. 1 и 2 с рис. 3, можно видеть, что наблюдаемое расщепление бисекторов не соответствует однородному полю. Основное «искажение» наблюдаемых профилей — локальный максимум расщепления бисекторов в линии FeI 6301.5 на расстояниях от центра $\pm 250 \text{ mÅ}$. Теоретически при однородном здесь никакого максимума (типа локального «вздутия» бисекторов) не должно быть. А поскольку он возникает, то это, наиболее вероятно, связано с наложением на картину расщепления от однородного поля еще одной картины расщепления, которая соответствует той же магнитной полярности, но гораздо более высоким напряженностям. Это означает, что действительная структура магнитного поля пятна была как минимум двухкомпонентной, с различными напряженностями и факторами заполнения этих компонент.

Для линии FeI 6301.5, с учетом ее фактора Ланде, величину магнитного поля B в сильной компоненте можно найти по формуле

$$B = 3.23 \cdot 10^4 \Delta\lambda_H, \quad (1)$$

где B выражено в Гс, а $\Delta\lambda_H$ — в Å. Подставляя в (1) $\Delta\lambda_H = 250 \text{ mÅ}$, имеем $B = 8075 \text{ Гс}$.

Поскольку линии FeI 6301.5 и 6302.5 имеют близкие глубины формирования, но разные факторы Ланде (у второй линии он в 1.5 раза больше, чем у первой), мы должны наблюдать соответствующие особенности также и в профилях FeI 6302.5. Но ввиду того, что эта линия (а именно, ее «красное» крыло) блендирована теллурической линией и к тому же имеет больший фактор Ланде, удобнее рассматривать для этой цели не бисекторы, а стоксовы профили V .

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОФИЛЕЙ V

Теоретически при однородном магнитном поле профиль параметра V должен иметь вид знакопеременной одиночной «волны». При небольших расщеплениях ($\nu_H \ll 1$) амплитуда этой «волны» должна быть тем больше, чем сильнее магнитное поле, а положение ее пиков должно совпадать с максимальной крутизной профилей Стокса I , т.е. с максимальным градиентом интенсивности $dI/d\lambda$. Но при сильных полях ($\nu_H > 1$) амплитуда «волны» параметра V перестает расти, а расстояние ее пиков от центра линии становится соответствующим зеемановскому расщеплению $\Delta\lambda_H$. Именно в этом случае может быть измерен модуль магнитного поля B вне зависимости от угла γ .

При двухкомпонентном магнитном поле, имеющем существенно различные напряженности в его двух компонентах, должна наблюдаться не одиночная, а двойная «волна» параметра V . Если для обеих компонент выполняется условие $\nu_H \gg 1$, то по положению каждого пика относительно центра линии можно прямым путем измерить напряженности в обоих компонентах поля.

Если с этой точки зрения рассмотреть наблюдаемые профили V линий в пятне 29.10.2003 г. (рис. 4), то имеем следующее. В линии FeI 6301.5 не заметно очевидной двойственности ее «волны» параметра V , что и неудивительно, поскольку эта линия имеет относительно невысокую магнитную чувствительность. Однако у линии FeI 6302.5, наряду с основной «волной» параметра V , заметны также небольшие вторичные пикки $s1$ и $s2$, расположенные на удалении $740-810 \text{ mÅ}$ друг от друга, что может означать, что зеемановское расщепление во второй (сильной) компоненте находится в пределах $\Delta\lambda_H = 370-405 \text{ mÅ}$.

Если эти значения подставить в калибровочную формулу для FeI 6302.5

$$B = 2.15 \cdot 10^4 \Delta\lambda_H, \quad (2)$$

где обозначения те же, что и в (1), то имеем $B = 7955-8707.5 \text{ Гс}$. Как видим, полученные значения хорошо согласуются с теми, которые получают по другой линии (8075 Гс). Реальные ошибки измерений здесь около $\pm 100 \text{ Гс}$, так что имеет смысл говорить о величине примерно 8100 Гс по обеим линиям.

По амплитуде пикков $s1$ и $s2$ можно приближенно оценить фактор заполнения сильной компоненты. Если сделать упрощающее предположение, что условия формирования линий в обеих компонентах поля одинаковы, а соответствующая абсорбция является оптически тонкой, то соотношение амплитуд основных и вторичных пиков параметра V должно быть таким же, как отношение факторов заполнения. С этих позиций, непосредственно из рис. 4 можно заключить, что факторы заполнения более слабой и более сильной компонент должны относиться примерно как 3:1. Это означает, что фактор заполнения более сильной компоненты около 25% интегральной площади пятна, а более слабой — 75%.

Это позволяет оценить верхний предел диаметра соответствующих мелкомасштабных силовых трубок с особо сильным полем ($\approx 8100 \text{ Гс}$). Если считать, что пространственное разрешение прямых наблюдений на ГСТ АО КНУ около 2 Мм, а на входную щель попадала только одна такая трубка, то ее диаметр тогда $\approx 1 \text{ Мм}$. Но если в действительности таких трубок там было, скажем, 10, и все они имели одинаковый диаметр, то тогда диаметр отдельной трубки должен быть примерно в 3 раза меньше, т.е. около 300 км.

6. ВЫВОДЫ

Из представленных выше данных следует, что максимальная величина магнитного поля в пятнах может достигать ≈ 8100 Гс, будучи сосредоточенной в относительно небольших элементах (≤ 1 Мм) той же полярности, что и более слабое «фоновое» поле пятна. Возможной причиной дополнительного усиления поля является скрученность магнитных силовых линий в тонких магнитных жгутах, приводящая к значительной концентрации магнитного поля в центральной части жгута, при том, что средняя по его сечению плотность магнитной энергии, входящая в уравнение поперечного баланса, остается в пределах, соответствующих давлению поля в 2–3 кГс [5].

Авторы глубоко благодарны проф. Соловьеву А.А. за полезное обсуждение и ряд ценных замечаний.

1. Земанек Е.Н., Стефанов А.П. Расщепление некоторых спектральных линий FeI в магнитном поле // Вестник Киевского ун-та, сер. астрономии. — 1976. — Вып. 18. — С. 20–36.
2. Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г., Лозицкая Н.И., Остапенко В.О., Полупан П.Н., Романчук П.Р., Россада В.М. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестник Киевского университета, Астрономия. — 1980. — Вып. 22. — С. 48–56.
3. Лозицкая Н.И. Вековые вариации магнитных полей солнечных пятен: сопоставление различных индексов // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 4. — С. 30–36.
4. Северный А.Б. Некоторые результаты исследований нестационарных процессов на Солнце // Астрон. ж-л. — 1957. — **34**, № 5. — С. 684–693.
5. Соловьев А.А. Диссипативный коллапс магнитных жгутов с бессильным магнитным полем // Астрономический ж-л. — 2011. — **88**, № 11. — С. 1111–1123.
6. Стещенко Н.В. Магнитные поля мелких солнечных пятен и пор // Известия Крым. астрофиз. обсерватории. — 1967. — **37**. — С. 21–28.
7. Livingston W., Harvey J.W., Malanushenko O.V. Sunspots with the strongest magnetic fields // Solar Phys. — 2006. — **239**. — P. 41–68.
8. Lozitska N., Lozitskij V. Small-scale magnetic fluxtube diagnostics in a solar flare // Solar Physics. — 1994. — **151**, № 2. — С. 319–331.
9. Stenflo J.O. Small-scale magnetic structures on the Sun // Astron. Astrophys. Rev. — 1989. — **1**. — С. 3–48.
10. Unno W. Line formation of a normal Zeeman triplet // Publ. Astron. Soc. Japan. — 1956. — **8**. — С. 108–125.

Поступила в редакцию 12.10.2012