

ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Можаровский С.Г.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

MEASUREMENT OF LONGITUDINAL MAGNETIC FIELDS BY SPECTROPOLARIMETRIC DATA

Mozharovsky S.G.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, Saint Petersburg, Russia

The applicability of the center-of-gravity (COG) method and the inversion method from the Milne-Eddington (ME) model for constructing longitudinal magnetic field $B_{||}$ maps is investigated. Based on the Hinode spectropolarimeter (SP) data, it is shown that the ME inversion is unsuitable for regions of the quiet photosphere, since it irregularly distorts the $B_{||}$ values by several times. With regions of the umbra and penumbra, where there are no irregular three-lobed Stokes V profiles, the ME inversion works well. The COG method underestimates the values by 10–20% in all cases, but this underestimation is stable, it does not show random changes from point to point. This becomes clear after analyzing the data obtained by the COG method for Fe I λ 6301 and 6302 Å lines independently of each other. These data show very good similarity. The COG method works well in the quiet photosphere and penumbra. In the umbra, there are no spectral bands free of blends. This prevents us from determining the continuum level, the knowledge of which is necessary for the success of the COG method.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-225-228>

Введение

Карты продольного магнитного поля – это важнейшее средство для анализа состояния солнечной активности. Наиболее просто их получить двумя способами – из инверсии по модели атмосферы Милна-Эддингтона (МЕ-инверсии) и методом центров тяжести (Center Of Gravity – COG).

МЕ-инверсия (см., например, [1]) основана на аналитическом решении уравнений переноса излучения в параметрах Стокса. Задавая несколько параметров модели получают профили Стокса магнитоактивных спектральных линий. Затем варьируя параметры, среди которых есть напряжённость магнитного поля $|B|$ и угол его вектора с лучом зрения γ , добиваются минимума суммы квадратов отклонений точек в модельном и наблюдаемом профилях. Команда миссии Hinode применяет МЕ-инверсию ко всем сеансам наблюдения своего спектрополяриметра и делает доступными рассчитанные карты через интернет. На картах есть значения $|B|$ и γ , из которых можно получить продольное поле $B_{||}$.

Метод COG [2] основан на том, что разность положений центров тяжести I+V и I-V профилей Стокса равна величине магнитного расщепления спектральной линии согласно формуле (значения λ даны в см):

$$(\lambda_{I+V} - \lambda_{I-V}) / 2 = 4.6686 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 \cdot g_{\text{eff}} \cdot B_{\parallel}, \quad (1)$$

длины волн центров тяжести $\lambda_{\pm}$, где $I_{\pm} = I_C - (I \pm V)$, вычисляются как суммы:

$$\lambda_{\pm} = \Sigma(I_{\pm} \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda) / \Sigma(I_{\pm} \cdot \Delta\lambda). \quad (2)$$

Мы можем рассчитать [3] профили Стокса любой магнитоактивной спектральной линии, в которой мало самопоглощение, для любой одномерной модели фотосферы. Значения $B_{\parallel} = B_{\text{COG}}$ полученные из рассчитанных профилей фактически совпадают со значениями, первоначально заданными в модели $B_{\parallel, \text{Model}}$. Таким образом, значения B_{COG} будут неизменны для любой модели фотосферы и для любой магнитоактивной линии (с точностью до фактора Ланде g_{eff}).

Однако если взять реальную линию, например Fe I λ 6302 Å, расчётные значения B_{COG} будут составлять $k = 0.8-0.9$ от значений $B_{\parallel, \text{Model}}$, меняясь при изменении величины и направления поля в модели. Из-за самопоглощения степень круговой поляризации в линии становится меньше, в той же степени уменьшается и рассчитанное поле B_{COG} .

Проблема несовпадения значений продольного поля, полученных разными методами

Имея значения продольного поля, полученные разными методами, мы можем их сравнить. Если оценки разных методов идеальны, диаграмма рассеяния точек должна точно лечь на прямую с коэффициентом наклона $k = 1$. Из рисунка 1 *слева* мы можем понять, что методы в целом работают хорошо. Как и предсказывает модельный расчёт, отношение $B_{\text{COG}}/B_{\text{ME}, \parallel}$ лежит где-то вблизи прямой $k = 0,8$, что мы и ожидали. Однако рисунок 1 *слева* построен для точек, принадлежащих полутени солнечных пятен. А рисунок 1 *справа* – для точек спокойной фотосферы. Очевидно, что в области спокойной фотосферы один из методов, а возможно и оба, не пригодны для измерения магнитного поля. В настоящей работе проведена проверка тремя разными способами; в результате каждой проверки получалось, что непригодным является метод МЕ-инверсии. Из-за малого отношения сигнал шум в профилях Стокса Q и U в спокойной фотосфере результаты инверсии начинают удовлетворять нескольким разным комбинациям входных параметров.

Метод центров тяжести можно использовать для независимого определения продольного поля по линиям Fe I λ 6302 и 6301 Å. На рисунке 2 *слева*, где сравниваются значения для двух линий, мы видим ожидаемую картину. У линии 6301 больше эквивалентная ширина, чем у 6302. Соответственно в ней больше самопоглощение и точки диаграммы рассеяния должны лежать ниже прямой $k = 1$. Диаграмму на рисунке 2 *справа* объяснить не просто. Если в методе COG не скрыта методическая ошибка, то в линии 6301 значения $B_{\parallel}$ получаются больше, чем в 6302. Считается общепринятым, см., например [4] что линия большей силы 6301 образуется вы-

ше, чем 6302. Отсюда следует, что поле растёт с высотой. А это противоречит устоявшимся представлениям о конфигурации поля в фотосфере.

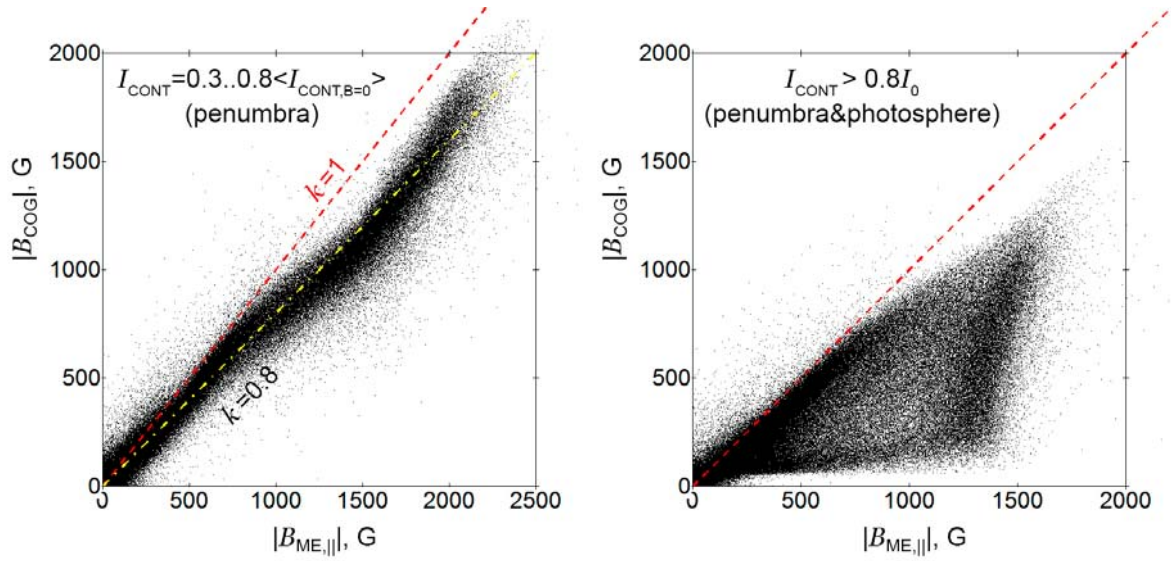


Рис. 1. Диаграммы рассеяния точек $B_{\text{COG}}/B_{\text{ME},||}$ для сеанса наблюдений SP/Hinode 20141024_0031 для двух подмножеств точек. Слева – точки полутени, отфильтрованы по значениям яркости I_{CONT} 0.3–0.8 средней яркости спокойной фотосферы $I_0 = \langle I_{\text{CONT},B=0} \rangle$. Справа – точки спокойной фотосферы, отфильтрованы по $I_{\text{CONT}} > 0.8 \cdot I_0$.

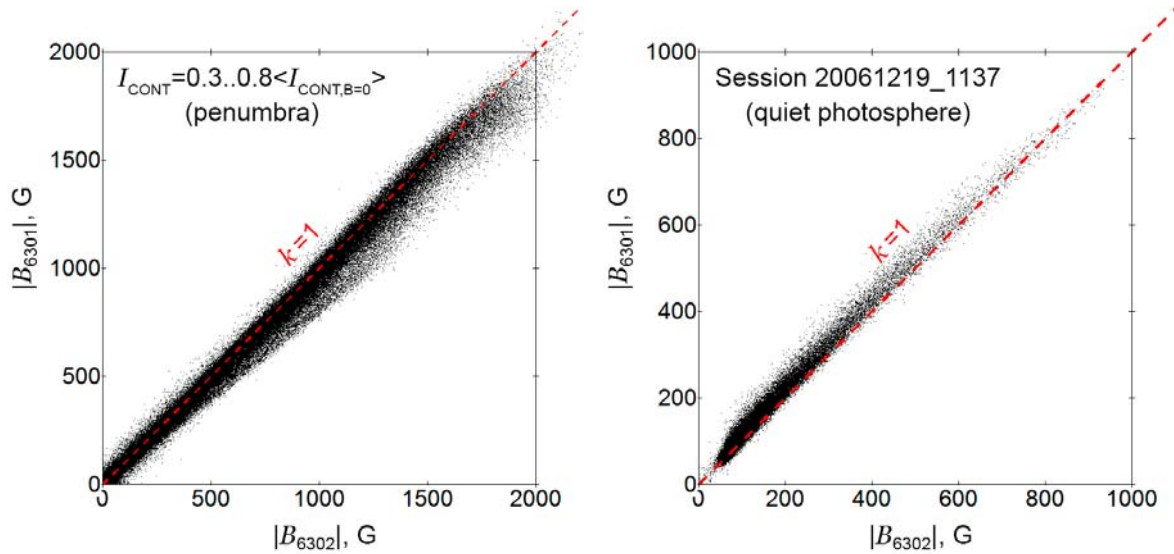


Рис. 2. Диаграммы рассеяния точек $B_{\text{COG},6301}/B_{\text{COG},6302}$. Слева – сеанс 20141024_0031, полутень. Справа – сеанс 20061219_1137, спокойная фотосфера

Поэтому был сделан модельный расчёт методом пробного слоя [5] эффективных высот отклика сигнала B_{COG} на изменения магнитного поля. Из расчёта оказалось, что отклик в линии 6301 приходит с большей глубины, чем 6302, т.е. обратно тому, как принято считать, см. рисунок 3 слева. Разница высот очень мала, поэтому для измеренного отношения $k_{12} = B_{6301}/B_{6302}$ градиент поля должен быть большим. Как следует из обзора [6] из раздела о поле вне сетки (InterNetwork – IN), силовые трубки маг-

нитного поля выходят из-под поверхности Солнца вертикально и на некоторой высоте испытывают резкое скачкообразное расширение в горизонтальное одеяло. В соответствии с этой моделью был проведён расчёт профилей Стокса для нашей пары линий. Как оказалось, такая модель отлично описывает наблюдения и не требует каких-то вычурных объяснений для $k_{12} > 1$ как это сделано в работе [4].

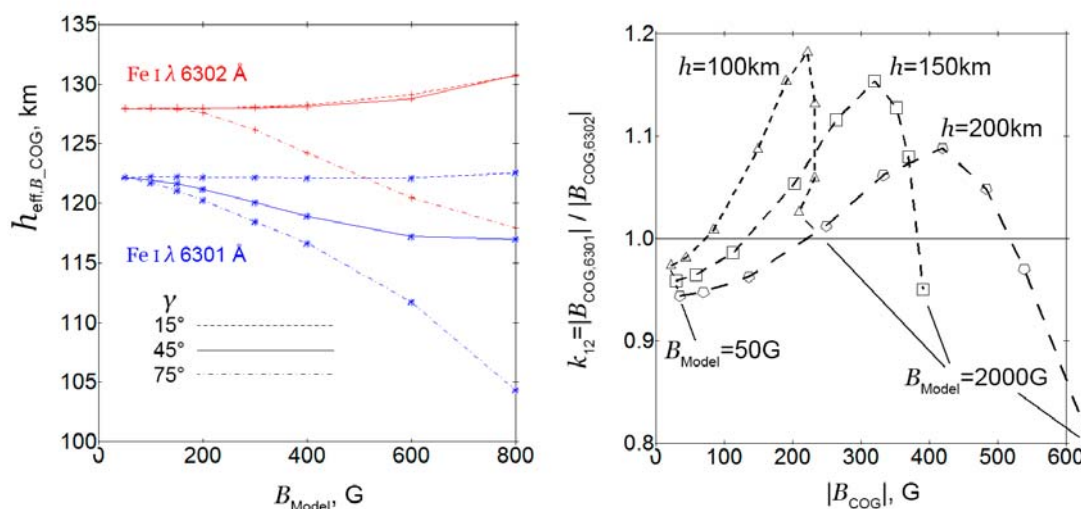


Рис. 3. Слева Эффективные высоты отклика сигнала B_{COG} для двух спектральных линий для модели фотосферы HOLMU [7] для ряда значений напряжённости поля B и угла γ . Справа Отношение значений B_{6301}/B_{6302} для той же модели в случае особенной конфигурации магнитного поля. В нижних слоях модели поле вертикально, в верхних – горизонтально, и на отрезке длиной 150 км, центрированном на высоте $h = 100, 150$ и 200 км угол γ линейно меняется от 0 до 90°.

Выводы

На основе данных спектрополяриметра Hinode показано, что для областей спокойной фотосферы использование МЕ-инверсии непригодно. С областями тени и, по большей части, с полутенью, МЕ-инверсия справляется хорошо. Метод COG при использовании линий 6302/6301 стабильно занижает значения на 10–20%. Он хорошо работает в спокойной фотосфере и полутени, а в случае тени надо отдельно исследовать уровень континуума.

Превышение потока продольного поля в линии 6301 над потоком в линии 6302 объясняется обратным соотношением высот отклика этих линий на сигнал B_{COG} , чем было принято считать ранее.

Литература

1. Orozco Suárez, D., et al. // Publ. of the Astronomical Society of Japan, 2007, **59**: p. 837.
2. Semel, M. // Annales d'Astrophysique, 1967, **30**: 513-513.
3. Можаровский, С.Г. // Ежегодник УАФО ДВО РАН, 2013, **15**: с. 76-110.
4. Faurobert, M. and G. Ricort // Astronomy and Astrophysics, 2021, **651**: p. A21.
5. Можаровский, С.Г. // "Солнечная и солнечно-земная физика – 2013", Труды конференции ГАО, СПб, 2013, с. 153-156.
6. Hinode Review Team // Publ. of the Astronomical Society of Japan, 2019, **71**: p. R1.
7. Holweger, H. and E.A. Müller // Solar Physics, 1974, **39**: p. 19-30.