

НАБЛЮДЕНИЕ НИСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ ПОЛУТЕНИ

Можаровский С.Г.

*Институт прикладной астрономии Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*

OBSERVATION OF THE PENUMBRA DOWNFLOWS

Mozharovsky S.G.

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Areas of the penumbra, in which the radiation of the upflow and downflow plasma streams is mixed at one point in the aperture of the Hinode spectropolarimeter were found. The difference in the speeds of these streams can be on the order of 10 km s^{-1} , that is, more than the sound speed. Supersonic downward penumbra flows have been described in the literature before. However, in these articles authors noted the insufficient resolution of the Hinode SOT/SP and drew a geometric picture as crossed streams adjacent in the aperture plane. In our study, it turns out that the streams are separated by depth on the line of sight, as in a layer cake, which is inclined both towards the surface of the photosphere and towards the observer. This leads to the fact that the Stokes V-profiles have complex multi-lobe shapes. Analysis of these shapes gives some understanding of the structure of the penumbra flows. This can be useful, since the penumbra is characterized by entanglement, complexity, and high intensity of plasma flows, due to which the results of different authors are sometimes contradictory.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-205-208

Обнаружение нисходящих потоков

В нашем исследовании потоки плазмы в полутени, которые движутся вниз с большими скоростями, были обнаружены как побочный результат. Поэтому наше представление об этих потоках – это независимый от других авторов взгляд.

Всё началось с задачи сегментирования профилей интенсивности с целью выбрать участки линии, которые отдельно дают вклад в параметры глубины профиля линии и его ширины (доплеровского уширения). Наилучшей тактикой оказалось найти самые протяжённые участки монотонного изменения интенсивности и принять их за левое и правое крыло линии. Для крыльев были найдены середины их интенсивностей, и для этих середин определены длины волн и в частности длина волны середины красного крыла $\lambda_{RedWing}$, см. рис. 1. Из значений $\lambda_{RedWing}$ можно построить карту. На карте в виде наиболее светлых участков выделяются места в полутени с максимальным доплеровским красным смещением и наиболее сильным магнитным полем. Оказалось, что для таких участков характерна сложная форма профиля круговой поляризации (V-профиля Стокса), см. рис. 3. b), c). Сложный профиль V-параметра Стокса можно интерпретиро-

вать как попадание в апертуру поляриметра участков, в которых плазма разделена как минимум на два потока. Эти потоки плазмы имеют различие лучевой скорости в несколько км/с, а также различие напряженностей магнитного поля – график b), либо даже полярности продольного поля – график с).

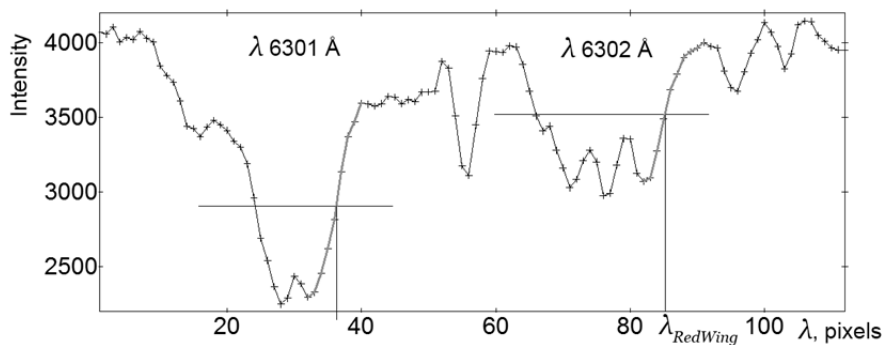


Рис. 1. Определение длины волны середины красного крыла каждой из линий.

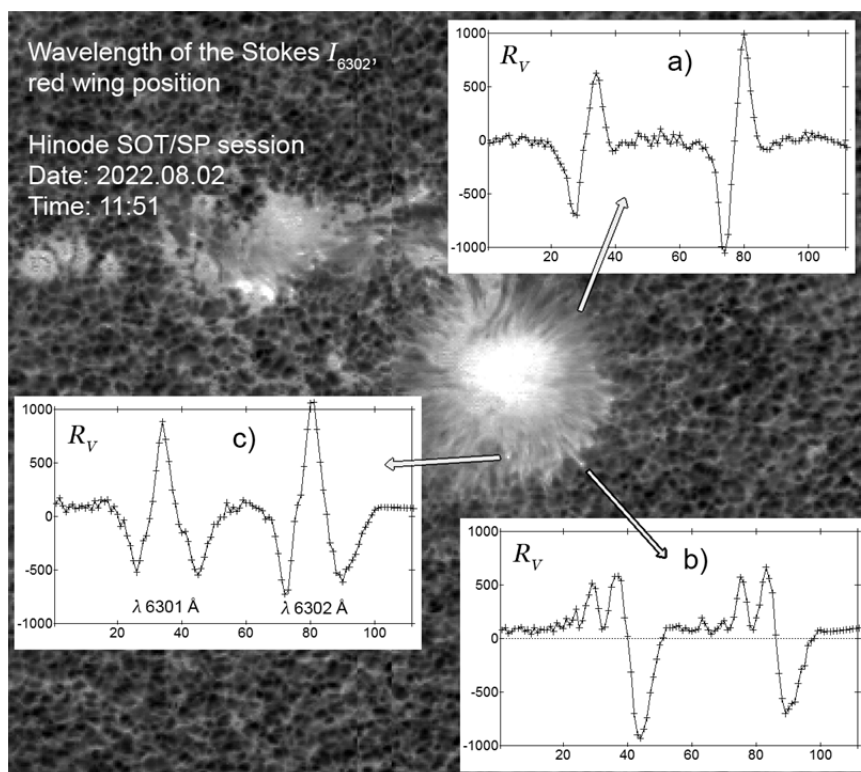


Рис. 2. Карта сеанса наблюдений спектрополяриметра спутника Hinode построена по данным о длине волны середины правого крыла линии Fe I λ 6302 Å, а также профили Стокса V для отмеченных на карте участков a), b) и c).

Авторы [1, 2] отмечали, что у спектрополяриметра Hinode недостаточное разрешение, поэтому рисовали геометрическую картину, где нисходящие сверхзвуковые потоки смешаны с восходящими в плоскости апертуры. Из наших данных следует, что потоки расположены один над другим.

Обоснование возможности видеть в профиле круговой поляризации слои, которые находятся на разной высоте по лучу зрения и имеют разные скорости

Как было указано в работе [3], эффективные высоты отклика профилей линий на изменения лучевой скорости и напряженности магнитного поля ведут себя так, как будто они «притягиваются» к тем высотам, где скорость и поле приобретают экстремальные значения. Это можно пояснить следующим образом. Профиль поглощения линии можно представить как облако непрозрачности, которое расположено над слоем, формирующим уровень континуума. Экстремальная лучевая скорость в некотором низко расположенном слое смещает это облако по длине волны. Слои, лежащие выше, остаются прозрачными, поэтому эффективная высота отклика профиля оказывается равной высоте этого низко лежащего слоя. Если теперь выше по лучу зрения окажется слой, где скорость экстремально смещает профиль в противоположную сторону, то с этим слоем будет связана эффективная высота отклика другого крыла линии. Если говорить о многолепестковом профиле круговой поляризации, то крайние лепестки будут достаточно хорошо описывать два слоя с экстремальными противоположно направленными скоростями. А внутренние лепестки будут некоторой смесью, и к ним надо относиться критически.

Свойства нисходящих потоков

Нисходящие потоки чаще проявляются на стороне полутени, ближайшей к краю диска Солнца, в центре диска они проявляются равномерно со всех сторон, что подтверждается рисунком 3. Однако иногда возникает феномен особенно сильных потоков, направленных вниз, которые занимают большую площадь. Так на карте сеанса 20061110_1601, когда пятно

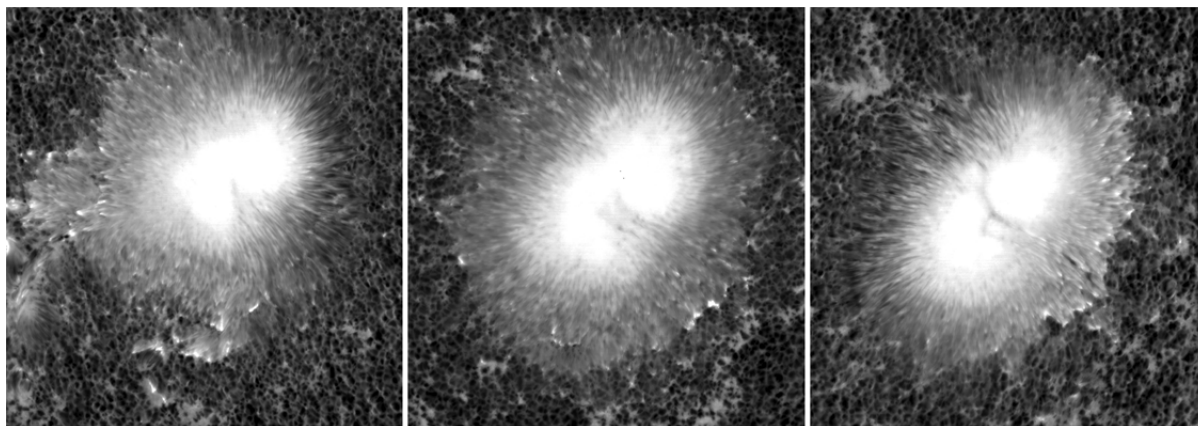


Рис. 3. Карты значений $\lambda_{RedWing,6302}$ для сеансов наблюдений Hinode 20061112_0500, 20061114_0715 и 20061116_1420 соответственно с восточной стороны диска Солнца, по центру и с западной стороны. Светлые участки полутени – места, где наблюдаются сильные нисходящие потоки.

находилось близко к краю Солнца, со стороны, ближайшей к центру диска, наблюдалось два особо ярких участка с нисходящими потоками. Нисходя-

щие потоки могут иметь продольное поле, совпадающее по знаку с полем тени, а иногда этот знак противоположный, см. рис. 2 b) и с).

Полезно рассмотреть V-профили соседних пикселей. В некоторых случаях можно наблюдать три соседних пикселя, из которых в правом и левом пикселях круговые поляризации разного знака, в центральном - трёхлепестковый V-профиль, указывающий на смешивание поляриностей в апертуре пикселя (например, пиксель (1847,331) в сеансе 20170905_0606). Однако обычно симметричные трёхлепестковые пиксели занимают значительную область. Это говорит о том, что слои с разными скоростями располагаются друг над другом, см. рис. 4.

В некоторых случаях профиль круговой поляризации распадается на два профиля, у которых видны точки смены полярности. По таким профилям можно измерить скорости потоков. По ним получается, что в окрестностях наиболее ярких точек карт $\lambda_{RedWing}$ скорости синего, направленного вверх потока, составляют 0–3 км/с, а скорости красного, направленного вниз, 6–12 км/с.

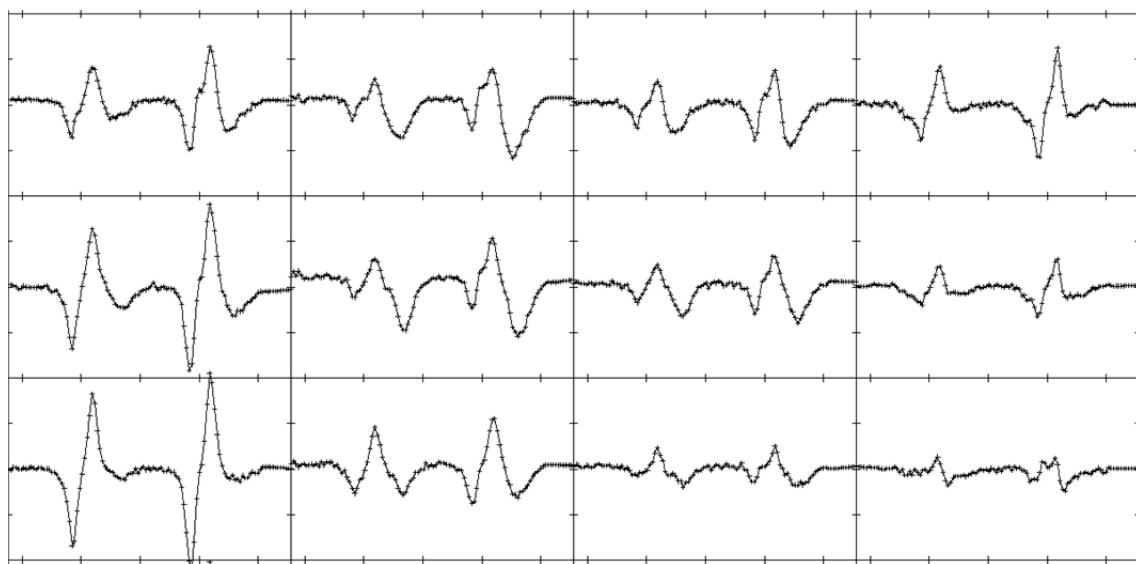


Рис. 4. V-профили Стокса смежных пикселей. Очевидно, что профиль каждого пикселя не является комбинацией соседних профилей, а образован в результате смешивания излучения потоков, которые располагаются на разной глубине.

Литература

1. *Ichimoto, K., et al.*, Fine-Scale Structures of the Evershed Effect Observed by the Solar Optical Telescope aboard Hinode // Publications of the Astronomical Society of Japan. Vol. 59. 2007. S593.
2. *Pozuelo, S.E., L.R. Bellot Rubio, and J. de la Cruz Rodríguez.* Properties of Supersonic Evershed Downflows // The Astrophysical Journal, 2016. **832**: p. 170.
3. *Можаровский, С.Г.* О влиянии градиентов магнитного поля и лучевой скорости на эффективные глубины отклика крыльев спектральных линий, in Всероссийская ежегодная конференция "Солнечная и солнечно-земная физика", 2014, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН: ГАО, Санкт-Петербург. p. 299-302.