СУБ-МИЛЛИМЕТРЫ НА ALMA И МИКРОВОЛНЫ НА РАТАН-600. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДЛЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

Богод В.М., Кальтман Т.И., Лукичева М.А.

Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

SUB-MILLIMETER WAVES ON ALMA AND MICROWAVES AT THE RATAN-600. COMPARISON FOR ACTIVE REGIONS ON THE SUN

Bogod V.M., Kaltman T.I., Loukitcheva M.A.

Special Astrophysical Observatory of RAS, Saint-Petersburg, Russia

Knowledge of temperature and density distributions in the atmosphere of a sunspot is extremely important for understanding the process of energy transfer from the photosphere up to the corona in the presence of strong magnetic fields. Novel data at millimeter and submillimeter wavelengths obtained with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) radiotelescope and regular observations in microwave range with the RATAN-600 provide unique opportunity to conduct the first mapping and to obtain new information. As a part of the ALMA test solar campaign, observations of the active region AR12470 were carried out in December 2015 at wavelengths 1.3 mm and 3 mm. A comparison of these observations with the data from regular microwave observations with the RATAN-600 was carried out. We present here the results obtained from the two instruments and compare them with the models of the sunspot atmosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-63-66

Введение

Пятна представляют собой самые выразительные образования на, в целом, однородных оптических изображениях Солнца. Магнитные поля пятен препятствуют конвективному переносу энергии из-под фотосферы, что делает пятна темными, с температурой до 2000 К ниже, чем в окружающей спокойной фотосфере. Центральная часть пятна (тень пятна), в которой магнитное поле почти строго вертикально, является наиболее темной (холодной). Окружающие тень тонкоструктурные образования с почти горизонтальными магнитными полями (полутень пятна) могут иметь разную яркость: от пониженной яркости тени до яркости спокойного Солнца.

В более высоких атмосферных слоях пятно может выглядеть совершенно иначе: оно может быть неразличимо со спокойным фоном или быть ярче него. Предполагается, что в атмосфере пятна происходит нагрев, связанный с сильным магнитным полем, но механизм этого нагрева и его величина крайне мало изучены. Наблюдения на миллиметровых волнах (ALMA) и сантиметровых (РАТАН), несущие информацию о хромосферных высотах и переходной области к короне, позволяют исследовать эту, мало изученную область атмосферы пятна.

В недавних работах Loukitcheva et al., 2014 [1] и Loukitcheva et al., 2017 [2] были протестированы различные модели атмосферы солнечного пятна, при этом сравнивались мм и субмм яркостные температуры, рассчитанные по моделям, с результатами наблюдений современных интерферометров, таких как Berkeley-Illinois-Maryland Array (BIMA) и Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA). Возможность наблюдений Солнца на интерферометре ALMA, представляющем собой уникальный современный инструмент с пространственным разрешением до долей угловых секунд, появилась только лишь в 2017 г. Для предварительного исследования тепловой структуры хромосферы солнечного пятна и сравнения с модельными предсказаниями мы использовали более ранние наблюдения, полученные в рамках тестовой компании солнечных наблюдений в 2015 г на волнах 1 мм и 3 мм.

Совместный анализ наблюдений АО 12740, полученных на ALMA и РАТАН-600

Наблюдения активной области АО 12740 были выполнены 16 и 18 декабря 2016 года с использованием двадцати двух 12-метровых антенн и девяти 7-метровых в наиболее компактной конфигурации интерферометра ALMA с максимальной длиной базы 450 м, на двух длинах волн – 3 (Band 3) и 1.3 (Band 6) мм. Впервые высокое разрешение мм наблюдений (4.9×2.2 угл. сек на 3 мм и 2.4×0.9 угл. сек на 1.3 мм, соответственно) позволило

Рис. 1. Слева: карты AR12470, полученные на ALMA на волнах 3 и 1.3 мм, 16.12.2015 и 18.12.2015, соответственно. Справа: наблюдаемые профили радиояркостности (синий) и продольной компоненты фотосферного магнитного поля по данным SDO/HMI (красный) для горизонтального (а), (с) и вертикального (б), (д) профилей солнечного пятна на 3 и 1.3 мм, соответственно. Сплошными и штриховыми линиями обозначены границы тени и полутени пятна.

разрешить пространственную структуру пятен на высотах нижней и средней хромосферы, где генерируется излучения на волнах 1.3 и 3 мм, и обна-

ружить уярчение в тени пятна на волне 3 мм, не наблюдавшееся ранее, и потемнение в центре тени пятна на волне 1 мм. Таким образом, было обнаружено, что структура тени пятна кардинально отличается на волнах 1 и 3 мм, в то время как полутень имеет подобное строение на этих двух волнах (рис. 1).

На рис. 2 слева представлены многоволновые наблюдения на РАТАН-600 на многих волнах в диапазоне 1.82 см-2.22 см в e-mode (сплошные линии) и в o-mode (пунктиром) над и под пунктиром спокойного Солнца соответственно. Справа, представлен более широкий спектр (8-17 ГГц) NOAA 12470. Интерполяция спектров на ось абсцисс дает значения корональных полей на этих модах. На высоких частотах температура излучения o-mode дает информацию о потоке излучения и температуре хромосферы.

Рис. 2. Слева: одномерные сканы, полученные для АО12470 на РАТАН-600 в необыкновенной (e-mode, корональные высоты) и обыкновенной (o-mode, уровни верхней хромосферы) модах. Справа: соответствующие им микроволновые спектры.

В недавно опубликованной работе Stupishin et al., 2018 [3] спектрально-поляризационные наблюдения трех солнечных пятен на РАТАН-600 в диапазоне частот 3-18 ГГц, дополненные экстраполяциями фотосферного магнитного поля в корону и расчетами радиоизлучения, были использованы для восстановления хода температуры в переходной области пятна и дальнейшего сравнения с модельными распределениями. Было надежно определено, что верхняя переходная область находится на высотах 2-2.3 Мм с температурой в нижней короне порядка 1.5-2.5 МК. При этом радиоизлучение коротковолновой части РАТАН-600 [4] несет информацию о верхней хромосфере и нижней переходной области. Привлечение данных оптического и УФ диапазонов будет способствовать интеграции результатов, полученных в радио диапазоне, в полную картину строения атмосферы солнечного пятна от самых нижних фотосферных слоев до корональных высот. Изучение влияния магнитных полей на перенос энергии явля-

ется задачей не только физики Солнца, но и всей физики звезд, в частности, проблема актуальна для активных карликов с крупномасштабными магнитными полями, сопоставимыми с полями солнечных пятен.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания: №АААА-А17-117011810013-4, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 16-02-00749 и 18-02-00045.

Литература

1. *Loukitcheva M., Solanki S.K., White S.* The chromosphere above sunspots at millimeter wavelengths // 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 561, 133-141.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321321>
2. *Loukitcheva, M.; Iwai, K.; Solanki, S.K.; White, S.M.; Shimojo, M.* Solar ALMA observations: constraining the chromosphere above sunspots // *Astrophysical Journal*, 2017, 850, 35.
3. *Stupishin A.G. et al.* // *Solar Physics*, 2018, V. 293, I. 1, article id. 13, 15.
не используются, но возможны:
4. *Bogod V.M.* // *Astrophysical Bulletin*, 2011, V. 66, I. 2, 190-204.