РАДИОРАДИУС СОЛНЦА В ММ ДИАПАЗОНЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ХРОМОСФЕРЫ

Топчило Н.А.¹, Лукичева М.А.^{1,2}, Нагнибеда В.Г.¹, Рыжов Н.А.³

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский филиал САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

³*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

SOLAR RADIORADIUS IN MM RANGE AND MODERN CHROMOSPHERE MODELS

Topchilo N.A.¹, Loukitcheva M.A.^{1,2}, Nagnibeda V.G.¹, Ryzhov V.S.³

¹*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg Branch of Special Astrophys. Obs. RAS, St. Petersburg, Russia*

³*Baumann Moscow Technical State University, Moscow, Russia*

The radioradius of the Sun is an important and suitable observational feature that connected with structure of the atmosphere. Its value in millimeter and submillimeter range defines the chromospheres height (limb extension). Numerous measurements of the solar radioradius provide ample opportunities for testing models of a solar atmosphere comparing observational and model values. Special interest causes a millimeter-submillimeter range of wavelengths, radiation in which is completely defined by chromosphere. In the presented work model calculation of radioradius for spatially-non-uniform 3D models of chromosphere by means of program Bifrost for a cube $24 \times 24 \times 17$ Mm with spatial resolution of 48 km across and 19–100 km on a vertical is executed. Values of radioradius were calculated for set of wavelengths from operating range of ALMA radiointerferometer. Comparison of observational and modelling values shows that the measured values of radioradius significantly surpass calculated on the used numerical model. In the considered range the measured radioradius changes from 7" up to 24" while model calculation gives the values which are not exceeding 3". Such strong discrepancy requires additional research.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-403-406

В настоящее время уже общепринятой является точка зрения, что тепловое миллиметровое и субмиллиметровое излучение Солнца оказывается наиболее удобным средством диагностики хромосферной плазмы [1, 2]. Важной характеристикой, которую можно получить из наблюдений, является распределение радиояркости по диску Солнца, в котором, как было давно предсказано на основе простой модели солнечной атмосферы с инверсией температуры в верхней хромосфере, должно существовать уярчение к краю диска и яркое узкое кольцо вокруг солнечного лимба, обусловленное вкладом более горячей верхней хромосферы. Однако такие наблюдения требуют достаточно высокого углового разрешения, и много лет выполнялись во время солнечных затмений или на крупных радиотелескопах и интерферометрах. К сожалению, получаемые результаты сильно зависят

от реального углового разрешения, метода обработки наблюдений, так что сводка полученных результатов демонстрирует значительный разброс данных (см. обзор [3]).

В таких условиях большой интерес представляет величина радиорadiusа Солнца, который характеризует, главным образом, высотную протяженность хромосферы и получение которого гораздо слабее зависит от углового разрешения. Он измеряется вполне определенным способом: на радиальных сканах – по положению точки, соответствующей половинной яркости центральной области диска, либо по максимуму производной в лимбовой части скана, а по затменным наблюдениям – по разности моментов оптических и радио контактов. Естественно, во всех случаях необходимо учитывать особенности инструмента и метода наблюдений [4].

Подобные измерения проводились нами и во время затмений [5], и на РТ-7.5 МГТУ на волне 3.2 мм, давая значения радиорadiusа в пределах (7.5–12) угл. сек., что хорошо соответствует результатам других наблюдений [6–9]. Совокупность наблюдательных данных показывает, что радиорadius даже на субмм волнах превышает оптический радиус на (3–4) угл. сек. (см. рис. 3) и значительно возрастает с длиной волны во всем миллиметровом диапазоне.

Расчетные значения радиорadiusа в большинстве случаев получают на основе «классических» моделей хромосферы и переходной области VAL и FAL [10]. В этих одномерных (параметры хромосферы зависят только от высоты) и стационарных моделях быстрый рост температуры (переходная область) происходит на высоте около 2200 км. Поэтому модельный расчет величины радиорadiusа на мм волнах не дает значений больше 3 угл.сек.. Разными авторами неоднократно предпринимались попытки устранить противоречия путем введения в модель различных структурных «холодных» элементов (спикулы и др.). Все такие построения, несмотря на кажущийся успех, объединяет то, что все они чисто эмпирические, и ни теоретически, ни физически не обоснованы.

В настоящее время появился уникальный инструмент мм и субмм диапазона – ALMA, способный обеспечить недоступное ранее угловое разрешение для солнечных радионаблюдений, а также, разработана теоретическая реалистичная 3D-модель солнечной хромосферы, которая может быть использована при интерпретации солнечных наблюдений на ALMA [11, 12]. Эта численная модель, разработанная с использованием полного набора уравнений радиационной гидродинамики, описывает максимально приближенную к реальности сильно неоднородную структуру хромосферы (рис. 1). Цель данной работы – протестировать новую 3D-модель, сравнивая модельные расчеты величины радиорadiusа для субмм и мм диапазона с наблюдаемыми значениями, в том числе, и с последними наблюдениями с использованием ALMA [13, 14].

Рис. 1. Модель биполярной области «спокойной» солнечной атмосферы с усиленной магнитной сеткой.

Модель en024048_hion [15] представляет собою куб размером $24 \times 24 \times 17$ Мм с разрешением 48 км по горизонтали и 19–100 км по вертикали, параметры которой рассчитаны программой Bifrost.

Карты (срезы) магнитного поля (левый столбец) и электронной температуры (правый столбец), верхний ряд карт соответствует уровню фотосферы, средний – высоте 800 км, нижний – 2000 км.

Тестирование проводилось для модельной области атмосферы спокойного Солнца с усиленной магнитной сеткой en024048_hion [15], описанной на рис. 1. Для расчета распределения яркостной температуры по диску (вдоль радиуса диска) Солнца необходимо задавать параметры атмосферы вдоль поверхности Солнца от центра диска до лимба. Для этого имеющийся куб расчетных параметров был многократно повторен вдоль поверхности Солнца с соответствующим изменением ориентации. Поскольку масштаб мелкомасштабной структуры внутри заданного куба много меньше размеров куба, то получаемое при таком построении распределение параметров атмосферы спокойного Солнца, практически, не нарушает общности расчетов. При расчете теплового тормозного миллиметрового излучения применялся алгоритм, использованный в [16].

При расчете яркостной температуры как функции расстояния от центра диска вдоль радиуса диска определялись траектории луча внутри заданной моделью области атмосферы, и вдоль этих траекторий задавались значения параметров плазмы. Расчеты проводились для волн диапазона ALMA (рис. 2).

Рис. 2. Пример расчетного распределения радиояркостности на волне 3.24 мм.

Программы, реализующие описанный алгоритм расчета выходящего радиоизлучения, написаны на языке Питон и универсальны по отношению к выбору модели и могут быть использованы для расчетов как одномерных моделей атмосферы (VAL и т.п.), так и моделей, полученных путем численного 2D и 3D моделирования солнечной атмосферы (Bifrost и др.).

Рис. 3. Значения радиорадиуса Солнца в миллиметровом диапазоне длин волн, полученные из наблюдений в последние годы [14], дополненные нашими расчетами (кривые минимальных (R_{min}) и максимальных (R_{max}) значений по всем вариантам).

В целом, общий вывод заключается в следующем (рис. 3):

- зависимость модельного значения радиорадиуса от длины волны похожа на аналогичную зависимость наблюдаемых значений;
- превышение радиорадиуса над оптическим значительно меньше (примерно, в три раза) наблюдаемых значений.

Причины такого расхождения требуют отдельного исследования. Одна из возможных причин состоит в недооценке корональной составляющей в расчете 3D модели, что слабо проявляется при вычислении параметров излучения в центральной зоне диска Солнца, но сильно влияет на характеристики прилиम्бовой зоны.

Литература

1. Loukitcheva M.A., Nagnibeda V.G. // ESASP, 2000, 463, 363-366.
2. Loukitcheva M., Solanki S., Carlsson M., Stein R. // A&A, 2004, v. 419, 747.
3. Нагнибеда В.Г., Пуотрович В.В. // Труды Астр. общ. ЛГУ, 1987, т. 41, 5-80.
4. Топчило Н.А. // Труды Астр. общ. ЛГУ, 1987, т. 41, 143-155.
5. Nagnibeda V.G., Rozanov B.A. // ASPS Conf. Series, 1998, v. 155, 416.
6. White S.N., Kundu M. // IAU Symp.154, Infrared Solar Physics, 1994, p. 167.
7. Belkora L., HUDFORD G., Gary D., Woody D. // ApJ, 1992, v. 400, 692.
8. Bastian T.S., Ewell M.W.Jr., Zirin H. // ApJ, 1993, v. 415, 364.
9. Ewell M.W., Zirin H., Jensen J.B., Bastian T.S. // ApJ, 1993, v. 403, 426.
10. Fontenla I.M., Avrett E.H., Loeser R. // ApJ, 1993, v. 406, 319.
11. Wedemeyer S., Bastian T., Brajsa R. et al. // SSR, 2016, v. 200, Issue 1-4, 1-73.
12. Loukitcheva M., Solanki S., Carlsson M., White S. // A&A, 2015, v. 575, id.A15.
13. Nindos A., Alissandrakis C., Bastian T. et al. // A&A, 2018, v. 619, id.L6, 5.
14. Selhorst C., Simões P., Brajsa R. et al. // ApJ, 2019, v. 871, id.45.
15. <http://sdc.uio.no/search/simulations>
16. Loukitcheva M., White S., Solanki S. // A&A, 2017, v. 601, id.A43.