

## Отзыв научного руководителя

на диссертационную работу Малютина Виктора Александровича «Оптическое излучение солнечной хромосферы во время вспышек», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация посвящена восстановлению физических параметров источников оптического излучения в солнечных вспышках по наблюдаемым потокам в спектральных линиях. Это позволяет судить о плотности газа, его температуре и возможной пространственной неоднородности.

Отличие диссертации от большинства работ на эту тему заключается в количестве спектральных линий: до шести линий трёх химических элементов – водорода, гелия и первого иона кальция. Сопоставление теоретических потоков в линиях разных химических элементов предъявляет требования к методике определения состояния ионизации каждого элемента. В условиях хромосферы определяющий вклад в скорость ионизации может давать ударная ионизация из возбуждённых состояний, причём скорость ионизации быстро растёт с увеличением главного квантового числа. Поэтому в расчётах необходимо учитывать достаточно много дискретных уровней для достижения термализации при балансе ударной ионизации и тройной рекомбинации. Это требование выполнено в диссертации. С учетом этого требования соискателем был реализован собственный алгоритм для вычисления теоретических потоков в линиях трех упомянутых химических элементов.

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы и степень ее разработанности. Описаны цели и задачи исследования, научная новизны работы, теоретическая и практической значимость. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В главе 1 более подробно описана степень разработанности темы: содержатся общие сведения о солнечной атмосфере, описание формирования излучения в разных слоях атмосферы (фотосфера, корона), отмечается особенность его формирования в хромосферном газе; полуэмпирические модели атмосферы, а также используемые в них модели атомов водорода, гелия, иона кальция CaII. Отдельное внимание уделено уже разработанным программным продуктам, которые позволяют вычислять теоретические потоки и строить теоретические профили спектральных линий с учетом переноса излучения. Приводятся сведения о солнечных вспышках, о механизмах нагрева и свечения газа

во вспышках, а также о формировании излучения в волокнах и протуберанцах.

В главе 2 описывается разработанный алгоритм для вычисления интегральных потоков в спектральных линиях атомов водорода, гелия и иона CaII: перечисляются учитываемые элементарные процессы заселения и опустошения дискретных уровней, описан учет рассеяния излучения в частотах линий с помощью приближения вероятности выхода кванта. Особое внимание уделено моделям атомных систем и числу учитываемых дискретных уровней. Отмечается, что хотя число учитываемых уровней меньше предсказываемого числа по Критерию Инглиса-Теллера, для высоковозбужденных уровней достигается условие термализации. Это условие позволяет говорить о надежном определении состояния ионизации газа. Также учитываются эффекты давления при радиационных переходах в атомных системах в условиях хромосферы. Так, профили поглощения у водородных переходов и у переходов между высоковозбужденными уровнями CaII принимаются сверткой контуров Доплера и Хольцмарка, а при переходах между уровнями атома гелия и низкими уровнями иона CaII — контуром Фойгта. Поиск атомных данных, отладка алгоритма во многом проводилась соискателем самостоятельно.

В главе 3 осуществляется восстановление параметров излучающего газа на базе разработанной в предыдущей главе методики применительно к пяти солнечным вспышкам. Наблюдения солнечных вспышек в оптических линиях были любезно предоставлены Юрием Алексеевичем Купряковым, сотрудником лаборатории новых фотометрических методов ГАИШ МГУ им. М.В.Ломоносова. Показано, что фрагмент протуберанца, наблюдавшийся в ходе вспышки 07 июня 2011 г. в линиях  $H\alpha$ ,  $H\beta$  водорода и  $H$  CaII, можно объяснить в однослойном приближении. Восстановление газовых параметров во вспышке 21 апреля 2017 г. по линиям  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\epsilon$  бальмеровской серии водорода требует предположения о неоднородном на луче зрения газе. Достаточно яркая линия  $H\epsilon$  по отношению к  $H\beta$  говорит о плотном газе, однако достаточно слабая линия  $H\beta$  по отношению к  $H\alpha$  требует для объяснения разреженный газ, который оптически тонок в линии  $H\alpha$ . Таким образом, в ходе вспышки присутствует плотный (концентрация  $N > 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) холодный (температура  $T \approx 4000 \text{ K}$ ) слой и разреженный ( $N < 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ), но более нагретый ( $T > 5700 \text{ K}$ ), причем разреженный слой расположен ближе к наблюдателю. Во вспышке 01 октября 2015 г. восстановлены параметры газа для двух источников (ядер) оптического излучения, расположенных поблизости, оба из которых были зарегистрированы в линиях  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\epsilon$  водорода, линиях  $H$  и IR (8542 Å) иона CaII, а также в линии D3 атома гелия. Излучающий газ является существенно неоднородным по лучу зрения, имея от двух до четырех слоев. В каждом эпизоде вспышки есть слои от

высокой (12000÷18000К) до низкой (4500÷5500К) температуры и с концентрацией от  $10^{11}$  см<sup>-3</sup> до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Соискатель пробовал сначала считать потоки в модели двухслойного газа. Если они не удовлетворяли наблюдаемым потокам, то добавлял третий и четвертый слой. Вспышки 27 апреля и 11 мая 2012 г., также наблюдавшиеся в шести линиях, показывают неоднородность как по лучу зрения, так и в картинной плоскости. Соискатель добился равенства наблюдаемых и теоретических относительных потоков, при этом теоретические абсолютные потоки оказались занижены по сравнению с наблюдаемыми. Поэтому была предложена модель неоднородных излучающих облаков, не накладывающихся по лучу зрения. Данные облака имеют по крайней мере две области — холодную с температурой в диапазоне 7800К ÷ 9000К и горячую, 13800К ÷ 19500К.

В заключении приведены основные результаты работы и возможные направления развития темы исследования.

Считаю, что диссертация В. А. Малютина «Оптическое излучение солнечной хромосферы во время вспышек» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым МГУ к кандидатским диссертациям, и может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (физико-математические науки).

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

12 мая 2025 года

К. В. Бычков

Подпись К. В. Бычкова заверяю:

начальник отдела канцелярии ГАИШ МГУ

Л. Н. Новикова