

**Отзыв научного руководителя
на диссертационную работу Шапошникова Ивана Андреевича
«Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в двойных системах
типа WR+OB как эволюционных предшественников релятивистских объектов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Работа И.А.Шапошникова посвящена спектроскопическим исследованиям звезд Вольфа-Райе (WR) в двойных WR+OB системах с целью уточнения масс звезд WR и определения темпов потери массы в виде ветра у этих звезд.

Звезды WR как гелиевые остатки первоначально массивных звезд, потерявших в процессе эволюции свои водородные оболочки, являются непосредственными эволюционными предшественниками релятивистских объектов. Коллапсы CO-ядер звезд WR приводят к феномену сверхновой типа Ib/c и формированию черных дыр или нейтронных звезд. Сильная радиальная потеря массы в виде ветра звезд WR существенно влияет на их эволюцию. Поэтому наблюдательное определение темпов потери массы звездами WR представляет собой важную задачу. Наиболее надежно темпы потери массы определяются у звезд WR, входящих в двойные системы, по наблюдаемому изменению (возрастанию) орбитальных периодов. Впервые такую динамическую оценку темпа потери массы у звезды WR, входящей в затменную WR+OB систему V444 Cyg, выполнил Х.Ф.Халиуллин в 1974 году. К сожалению, число затменных систем среди нескольких десятков спектрально-двойных WR+OB систем весьма мало. Поэтому в работе эволюционные изменения орбитальных периодов ищутся не только по затменным кривым блеска, но и с использованием кривых лучевых скоростей спектрально-двойных WR+OB систем, полученных по наблюдениям в разные эпохи. Спектральные наблюдения двойных WR+OB систем начались в 1940-х годах и продолжаются разными научными группами вплоть до последнего времени. Большой временной интервал наблюдений этих систем, порядка 80 лет, благоприятствует поиску изменений их орбитальных периодов.

В работе И.А.Шапошникова на 2.5 метровом телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ получен богатый спектральный наблюдательный материал для шести WR+OB систем, выполнена его тщательная обработка и редукция, изучена переменность профилей эмиссионных линий в спектрах звезд WR и построены надежные кривые лучевых скоростей для обеих компонент системы. На основе этих данных уточнены элементы спектроскопических орбит этих систем и даны новые оценки масс компонент. С использованием архивных спектральных наблюдений, охватывающих интервал времени в ~80 лет, проанализированы вековые изменения орбитальных периодов WR+OB систем. Результаты анализа изменений периодов этих систем, полученные по спектральным данным в случае затменных WR+OB систем, оказались в хорошем согласии с соответствующими результатами, полученными из анализа затменных кривых блеска. Это иллюстрирует надежность спектроскопического метода поиска изменения орбитальных периодов в WR+OB системах.

Перед тем, как использовать для дальнейшего анализа найденные значения темпов изменений орбитальных периодов изученных WR+OB систем, автор выполнил два важных исследования. Он обобщил модель Джинсовской моды потери орбитального момента двойной системы на случай, когда радиально истекающая звезда имеет ненулевые размеры. Кроме того, для обоснования модели радиально истекающего звездного ветра из звезды WR он также исследовал возможные эффекты анизотропии звездного ветра WR путем анализа зависимости ширин профилей эмиссионных линий от наклонов орбит в WR+OB системах. Оказалось, что эффекты анизотропии звездного ветра пренебрежимо малы, и Джинсовская мода потери углового момента из WR+OB системы может обоснованно применяться для определения темпа потери массы звездой WR по изменению орбитального периода системы.

По найденным значениям темпов изменения орбитальных периодов для шести WR+OB систем автор дал наиболее надежные динамические оценки темпов радиальной потери массы звездами WR и построил важную эмпирическую зависимость темпа потери массы звездой WR от ее массы. Этот результат является новым, он имеет принципиальное значение для описания эволюции звезд WR и понимания процессов формирования релятивистских объектов.

Используя свои новые определения масс звезд WR совместно с опубликованными данными о массах этих звезд, автор построил надежное распределение масс 30 звезд WR, которое оказалось возможным хорошо аппроксимировать логнормальным распределением. Также автор, используя опубликованные данные, построил распределение по массам для пятидесяти черных дыр, которое также хорошо аппроксимируется логнормальным распределением.

Из сравнения этих распределений, используя найденную зависимость темпа потери массы звезды WR от ее массы, автору удалось найти эмпирическую и модельно независимую связь между массой черной дыры и массой соответствующей звезды WR в конце эволюции. Оказалось, что масса черной дыры, образованной в результате коллапса СО ядра звезды WR практически совпадает с массой ее СО-ядра. Это новый результат, который имеет большое значение для теории звездной эволюции и релятивистской астрофизики.

За время работы над диссертацией И.А.Шапошников показал себя вдумчивым и творческим активным исследователем, способным к самостоятельной научной работе. Результаты работы неоднократно докладывались на многих (10) научных конференциях и опубликованы автором в шести статьях, в большинстве случаев в журналах Top-25: MNRAS и Astron Aph. В большинстве совместных публикаций И.А.Шапошников является первым автором.

Считаю, что квалификационная работа И.А.Шапошникова "Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в двойных системах типа WR+OB как эволюционных предшественников релятивистских объектов" удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и может быть рекомендована для защиты.

Считаю, что диссертация И. А. Шапошникова «Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в двойных системах типа WR+OB как эволюционных предшественников релятивистских объектов» 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,
профессор, академик РАН
06.03.2026

А. М. Черепашук

Подпись А. М. Черепашука заверяю:
начальник отдела канцелярии ГАИШ МГУ Л. Н. Новикова