

О Т З Ы В

научного руководителя на диссертацию А. С. Винокурова
"Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и
сверхкритической дисковой аккреции"
на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук

Диссертация А. С. Винокурова посвящена исследованию нового класса астрофизических объектов — ультраярких рентгеновских источников (ULX). Эти объекты были выделены в галактиках 2000 г. в результате наблюдений рентгеновской обсерватории CHANDRA благодаря рекордному пространственному разрешению ее телескопа (около одной угловой секунды). До наблюдений CHANDRA подобные рентгеновские источники считались активными ядрами галактик. Исследованию этих недавно выделенных источников посвящено уже около тысячи публикаций. Их рентгеновские светимости в сотни и тысячи раз выше, чем светимости ярчайших черных дыр Галактики. В литературе обсуждаются две модели ULX, первая предполагает, что это черные дыры "звездных масс" (т. е. образовавшиеся в процессе эволюции звезд) в двойных системах, находящиеся в процессе сверхкритической аккреции. Эти объекты подобны известному супер-аккретору SS 433, но их ориентация такова, что мы непосредственно видим внутреннюю часть канала в сверхкритическом аккреционном диске и наблюдаем аккрецирующую черную дыру. В таком случае происходит геометрическая коллимация излучения в направлении наблюдателя, и наблюдаемый рентгеновский поток увеличивается во много раз. Вторая модель предполагает, что ULX есть так называемые черные дыры "промежуточных масс". В современных моделях Вселенной при возрасте сотни млн. лет возможно массовое формирование черных дыр промежуточных масс (сотни – тысячи масс Солнца) из так называемых звезд населения III, первых звезд. Возможно формирование черных промежуточных масс в молодых звездных скоплениях. Однако, такие объекты до сих пор остаются гипотетическими. В любом случае ULX должны быть в тесных двойных системах с массивным донором, чтобы проявить себя как ULX. Независимо от собственных представлений все астрофизики сходятся во мнении, ULX есть самые лучшие кандидаты в черные дыры. Тема диссертации А. С. Винокурова несомненно актуальна.

За 15 первых лет исследования объектов ULX в рентгеновском диапазоне с привлечением всех космических обсерваторий мира дали очень неожиданных результатов. В рентгеновском диапазоне объекты ULX достаточно яркие. Однако, несмотря на огромную активность исследователей всего мира и большое количество новых данных, природа ULX не прояснилась. Наиболее информативным является оптический диапазон, тем более если исполь-

зуется оптическая спектроскопия. В оптическом диапазоне двойники ULX оказались очень слабыми объектами, самый яркий 21-й величины, около 10 объектов 22-23 величины, остальные еще более тусклые. Такие звезды можно наблюдать на телескопах класса 8 метров и более, причем при хороших изображениях.

А. С. Винокурову была предложена тема диссертации исследование объектов ULX в оптическом диапазоне. В основном это спектроскопия ULX на телескопе Subaru (Гавайи), он также обработал все архивные данные с телескопа VLT (ESO). Ему удалось получить спектр двойника ULX 23й величины NGC4395 X-1 на телескопе БТА при очень хороших изображениях. Он обработал практически все архивные фотометрические данные ULX с телескопа им. Хаббла (HST), таких объектов оказалось менее двух десятков. По данным HST была построена гистограмма абсолютных звездных величин ULX, которая оказалась весьма необычной, а также было проведено моделирование распределений энергии нескольких ULX от рентгеновского до оптического диапазонов.

Диссертация А. С. Винокурова состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении дан краткий обзор исследований ULX и общее описание работы, описана актуальность темы, новизна результатов и приведены положения выносимые на защиту. В первой главе детально описываются методы обработки спектральных изображений, а также изображений, полученных по данным космического телескопа им. Хаббла. Во второй главе описаны спектральные исследования оптических двойников ULX, полученных на телескопах БТА и Subaru. Показано, что все спектры ULX, а их всего 8 с учетом архивных данных с телескопов VLT и Keck, обладают одним и тем же, уникальным типом спектра, подобным объекту SS433 и звездам LBV в горячем состоянии. Из этого следует, что это они принадлежат одному типу объектов. Формально, если 8 объектов обладают одним и тем же спектром, вероятность того, что эти объекты могут быть разными, менее одного процента. Также показано, что оптические спектры не могут принадлежать звезде-донору или прогретому аккреционному диску в случае черных дыр промежуточных масс. Оптические спектры формируются в плотных и горячих ветрах с примерно единой фотосферой, соответственно, это сверхкритические аккреционные диски.

В третьей главе были обнаружены три новых оптических двойника ULX и были измерены их распределения энергии в оптике по данным HST. Был также обнаружен четвертый, NGC4395 X-1, спектр которого впервые был получен на БТА. Однако, оптическое отождествление этого ULX (с неточными координатами) было опубликовано ранее другими астрофизиками, поэтому не получилось опубликовать отождествление этого объекта первым. Тем не менее, А. С. Винокурову удалось более чем на треть увеличить количество

известных оптических двойников ULX.

В этой же главе была построена гистограмма абсолютных звездных величин в полосе V всех известных ULX. Показано, что при уменьшении темпа аккреции на внешний край диска (но, тем не менее, сверхкритического), оптическая светимость ветра заметно уменьшается, а температура ветра возрастает, максимум сдвигается в далекий УФ диапазон. Если абсолютная величина объекта слабее чем -5.3, то в большинстве случаев его спектр оказывается более красным (тип F-G сверхгиганта), то есть в системе сверхкритический диск + донор начинает доминировать донор. Если абсолютная величина объекта ярче чем -5.3, то это всегда очень голубой объект (ближний УФ диапазон), его спектр формируется в сверхкритическом диске ветрового канала. Также было обнаружено, что если у любого объекта отношение рентгеновской к оптической светимости более 100-200, то это однозначно ULX.

В четвертой главе было проведено моделирование распределений энергии спектров нескольких ULX от рентгеновского до ближнего ИК диапазонов на основе приближения сверхкритического диска Шакуры-Сюняева (1973). Было найдено, что в моделировании сверхкритических дисков черные дыры оказались звездных масс. При этом, если предположить, что мы моделируем черные дыры промежуточных масс около 1000 солнечных, то параметры этих объектов оказываются неестественными, например, размер комптонизирующей короны становится равным радиусу последней устойчивой орбиты. В случае сверхкритических дисков все параметры модели вполне соответствуют наблюдениям. Мне бы хотелось, чтобы А. С. Винокуров продолжил это моделирование, тем более что мы имеем гарантированное время на новой индийской обсерватории ASTROSAT, где мы сможем получать одновременные спектры ULX рентген-УФ-оптика.

В заключении сформулированы основные положения и выводы диссертации.

В целом, отзыв о диссертационной работе А. С. Винокурова весьма положительный. Невозможно за четыре года работы внести решающий вклад в понимание объектов достаточно "модных", которыми сейчас активно занимаются десятки ведущих астрофизиков мира, и на которые выделяется огромное количество времени на самых престижных телескопах мира. Тем не менее, ряд выводов диссертации несомненно вносят заметный вклад в понимание природы этих черных дыр как сверхкритических дисков.

Важно отметить, что А. С. Винокуров очень хорошо освоил современные методы обработки данных, например, он свободно владеет обработкой фотометрии с HST, даже в деталях. Совместно с Кириллом Атапиным они промоделировали рентгеновские спектры ULX моделью сверхкритических дисков SCADc с учетом комптонизации и инсталлировали эту модель в среду XSPEC. А. С. Винокуров принимает активное участие в наблюдениях на

телескопе БТА, он является ответственным за наблюдения. Александр Винокуров имеет хорошую математическую и физическую подготовку (физфак МГУ), он берется за решение как наблюдательных, так и теоретических задач. Я должен также отметить активность и самостоятельность работы А. С. Винокурова, с ним оказалось очень приятно работать.

В работах, описанных в диссертации, получены новые и интересные результаты. Считаю, что диссертация А. С. Винокурова соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, а диссертант заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

8 августа 2016 г.

Зав. лаборатории Физики Звезд САО РАН
докт. физ.-мат. наук, профессор



С.Н. Фабрика

Почтовый адрес: Россия 369167, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз, САО РАН
тел. +79280286188
e-mail: fabrika@sao.ru.

Подпись С.Н. Фабрики заверяю,
Ученый Секретарь САО РАН
канд. физ.-мат. наук



Е.И. Кайсина