

Отзыв официального оппонента

на диссертацию **Пширкова Максима Сергеевича**

«Радиоастрономические ограничения на модели фундаментальной физики и астрофизики»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.02 — теоретическая физика, 01.03.02— астрофизика и звездная астрономия.

Диссертационная работа направлена на решение важнейших задач астрофизики высоких энергий, космологии и фундаментальной физики, таких как природа темной материи, пределы применимости общей теории относительности и стандартной модели физики частиц, природа источников гравитационных волн (ГВ), существование во Вселенной первичных черных дыр, свойства галактических и внегалактических магнитных полей. Для решения этих задач диссертантом разработаны оригинальные методы использования данных радиоастрономических наблюдений, с их помощью получен ряд важных результатов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 314 страниц текста с 49 рисунками. Список цитированной литературы содержит 370 наименований.

Первая глава посвящена получению ограничений на альтернативные теории гравитации с помощью высокоточных радионаблюдений пульсаров. Рассмотрена возможность того, что ГВ распространяются быстрее, чем свет. Показано, что если при этом ГВ пройдет под малым углом к направлению на пульсар, то наблюдаемая частота пульсаций изменится под действием гравитационного возмущения значительно сильнее, чем было бы в случае распространения ГВ со скоростью света. Это позволяет получить по уже имеющимся данным ограничения на амплитуду низкочастотного гравитационно-волнового фона (ГВФ) во Вселенной, а в предположении, что этот фон создается парными сверхмассивными черными дырами (СМЧД), и верхний предел на относительное отклонение скорости распространения ГВ от скорости света: 0,4%. Также показано, что массивные гравитоны, которые должны проявлять себя как монохроматические ГВ, не могут вносить существенный вклад в темную материю.

Вторая глава также посвящена получению ограничений на ГВФ с помощью радионаблюдений. Предложено оригинальное развитие метода хронометрирования пульсаров, состоящее в том, чтобы использовать измерения второй производной частоты пульсара для получения ограничений на ГВФ в диапазоне сверхнизких частот (от 10^{-12} до 10^{-8} Гц). С помощью этого метода получен сильный верхний предел ($\sim 10^{-6}$ критической плотности Вселенной) на плотность энергии низкочастотного ГВФ. Подробно рассмотрен случай остаточных уклонений времен прихода импульсов пульсаров в результате слияния двойных СМЧД. Показано, что радиотелескопы следующего поколения вероятно позволят обнаруживать такие слияния. Также рассмотрена возможность получения ограничений на ГВФ в высокочастотном (ГГц) интервале. В случае наличия во Вселенной крупномасштабных магнитных полей с амплитудой порядка нГс, такой ГВФ должен частично преобразовываться в электромагнитное излучение и

вызывать искажения спектра реликтового микроволнового фона. Отсутствие таких искажений в имеющихся данных означает, что плотность энергии высокочастотного ГВФ не превышает ~ 1 в относительных единицах. Это ограничение оказывается на 25 порядков лучше существовавших ранее для этого частотного диапазона. Кроме того, выдвинута интересная идея, что короткие гамма-всплески, возникающие в результате слияния двойных нейтронных звезд, могут сопровождаться всплеском радиоизлучения, который должен приходиться к наблюдателю с задержкой из-за дисперсии в межзвездной и межгалактической среде. Поиск таких радиотранзиентов может быть проведен с помощью радиотелескопов LOFAR и представляет большой интерес с точки зрения поиска ЭМ событий, сопровождающих всплески гравитационных волн.

В третьей главе рассматривается известный эффект искажения времени прихода импульсов пульсара в результате пролета массивного тела вблизи луча зрения. Предложено использовать этот эффект для изучения распределения массы в центральной области Галактики. Показано, что в этом случае остаточные отклонения за период наблюдений 20 лет могут достигать заметной величины в нескольких микросекунд. Далее рассмотрены возможные проявления линзирования пульсаров экзотическими объектами — космическими струнами. Показано, что пересечение струной луча зрения на пульсар должно приводить к скачку наблюдаемой частоты пульсара. Уже имеющиеся данные мониторинга пульсаров позволяют поставить интересный верхний предел на распространенность легких космических струн во Вселенной: $< 10^{-3}$ (в единицах критической плотности). Также показано, что сравнимый предел можно получить и другим способом — с помощью поиска характерных двукратных изменений яркости квазаров. С этой целью диссертант использовал данные оптического обзора SDSS по более чем 25 тысячам квазаров.

Четвертая глава посвящена вопросу о существовании во Вселенной первичных черных дыр (ПЧД). Существуют сильные верхние пределы на пространственную плотность таких объектов практически во всем диапазоне масс, за исключением интервала от 10^{17} до 10^{25} г. Диссертанту удалось практически закрыть и это «окно» и тем самым доказать, что ПЧД не могут вносить существенный вклад в темную материю. Лежащая в основе исследования идея очень красива: ПЧД может быть захвачена нейтронной звездой (напрямую либо через звезду-прародителя) и уничтожить последнюю, а так как нейтронные звезды наблюдаются в заметном количестве, то пространственная плотность ПЧД не может быть большой. Диссертант провел детальные расчеты, уделив особое внимание процессу захвата ПЧД ядром формирующейся массивной звезды. Следует отметить что в рассмотренной физической картине остается ряд значительных неопределенностей, так что полученные ограничения на распространенность ПЧД в указанном диапазоне масс пока все-таки следует считать предварительными.

В пятой главе, на основе каталога мер вращения нескольких десятков тысяч внегалактических радиоисточников из обзора NVSS, построена модель магнитного поля Галактики. Эта модель подтверждает и уточняет основные особенности регулярной структуры галактического магнитного поля, отмеченные в ряде предыдущих работ. Кроме того, получены ограничения на случайную компоненту магнитного поля в Галактике. Показано, что вне плоскости Галактики траектории космических лучей сверхвысоких энергий не могут быть смещены галактическим магнитным полем более чем на несколько градусов. Особенно интересной является вторая часть исследования, в которой данные о мерах вращения для

далеких радиоисточников с известными красными смещениями используются для получения ограничений на внегалактические магнитные поля. Показано, что такие поля не могут превышать 1 нГс на длине когерентности 1 Мпк . Этот результат интересен сам по себе, так как дает уникальную информацию о крупномасштабных магнитных полях во Вселенной, а также означает, что внегалактические поля тоже не могут изменять направления прихода космических лучей сверхвысоких энергий более чем на несколько градусов. Тем не менее, даже такие сдвиги сильно препятствуют поиску источников космических лучей.

Диссертацию в целом можно охарактеризовать как прорывное научное исследование, посвященное разработке и применению новых методов астрофизических исследований. На мой взгляд, особенно важным является то, что сделан целый ряд конкретных предложений по использованию телескопов следующего поколения, таких как «Квадратная километровая решетка» (SKA), для получения новых прорывных результатов. Следует отметить новизну проведенных исследований и полученных результатов. Выносимые на защиту научные заключения хорошо обоснованы, достоверны и весьма значимы для астрофизики высоких энергий и фундаментальной физики. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах, российских и международных конференциях, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

У оппонента есть несколько вопросов и замечаний к диссертации. В параграфе 1.1 рассматривается задача о влиянии ГВФ на остаточные отклонения моментов прихода импульсов пульсаров в случае отличия распространения ГВ от скорости света. При этом показано, что основной вклад в результирующий эффект дают ГВ, распространяющиеся под очень малыми углами к направлению на пульсар. Так как при этом предполагается, что ГВФ в основном создается двойными СМЧД, то не следует ли при оценке величины $R(t)$ принимать во внимание дискретную природу ГВФ, то есть конечное количество пар СМЧД, оказывающих заметное влияние на конкретный пульсар?

В параграфе 3.1.3, при оценке эффекта «микролинзирования» в направлении балджа Галактики, говорится, что сложная структура внутренней части балджа не принималась в расчет. Это допущение вполне разумно, принимая во внимание, что до сих пор не найдены пульсары в центральной области Галактики. Эта ситуация однако может измениться после введения в строй высокочувствительной установки SKA, которая, как ожидается в ряде работ, может обнаружить достаточно много пульсаров в этой области. В этой связи стоит отметить недавнее обнаружение магнитара в трех угловых секундах от СМЧД в ядре Галактики. Так как распределение массы вблизи СМЧД остается довольно плохо изученным (из-за проблемы разрешения звезд в этой густонаселенной области), именно хронометрирование пульсаров могло бы дать уникальную информацию об этом распределении. Поэтому было бы интересно сделать соответствующие оценки. Это не замечание, а пожелание диссертанту на будущее.

В параграфе 4.2 рассматривается задача о захвате ПЧД ядром формирующейся массивной звезды. При этом формирование звезды моделируется в условиях, характерных для галактических гигантских молекулярных облаков. Однако затем говорится, что результаты расчета могут иметь отношение к эпохе формирования карликовых галактик на $z=10-15$. В этой связи стоит отметить, что в столь ранние эпохи процессы звездообразования протекали несколько по-другому, чем в современную эпоху, и в последние годы публикуется много работ на эту тему.

Было бы полезно обсудить, как специфические условия звездообразования в эпоху первых галактик могут сказаться на оценках, сделанных в этом разделе диссертации.

Все эти замечания не являются существенными и никак не влияют на высокое научное значение диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по специальностям 01.04.02 — теоретическая физика, 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, а ее автор **Пширков Максим Сергеевич**, заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Заведующий сектором научной поддержки
обсерватории Спектр-РГ отдела астрофизики
высоких энергий ФГБУН Институт космических
исследований Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

С.Ю. Сазонов

Почтовый адрес: 117997 Москва,
ул. Профсоюзная 84/32,
ФГБУН Институт космических
исследований Российской академии наук

Телефон: 495 9133116
Электронный адрес: sazonov@iki.rssi.ru

Подпись С.Ю. Сазонова заверяю:
Ученый секретарь ИКИ РАН,
доктор физико-математических наук

А.В. Захаров

16 мая 2016 г.

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в
рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

Khabibullin I., **Sazonov S.**

«Is SS 433 a misaligned ultraluminous X-ray source? Constraints from its reflected signal in the Galactic plane»

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 3963 (2016)

Sazonov S., Churazov E., Krivonos R.

«Does the obscured AGN fraction really depend on luminosity?»

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 454, 1202 (2015)

Sazonov S., Sunyaev R.

"Preheating of the Universe by cosmic rays from primordial supernovae at the beginning of cosmic reionization"

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 454, 3464 (2015)

Churazov E., Sunyaev R., Isern J., Knödseder J., Jean P., Lebrun F., Chugai N., Grebenev S., Bravo E., **Sazonov S.**, Renaud M.

"Cobalt-56 γ -ray emission lines from the type Ia supernova 2014J

Nature, 512, 406 (2014)

Khabibullin I., **Sazonov S.**

«Stellar tidal disruption candidates found by cross-correlating the ROSAT Bright Source Catalogue with XMM-Newton observations»

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 444, 1041 (2014)

Medvedev P., Gilfanov M., **Sazonov S.**, Shtykovskiy P.

"Impact of thermal diffusion and other abundance anomalies on cosmological uses of galaxy clusters"

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 440, 2464 (2014)

Сазонов С.Ю., Лутовинов А.А., Кривонос Р.А., Гильфанов М.Р.

"Завал в спектре жесткого рентгеновского излучения ультраярких рентгеновских источников HoIX X-1 и M82 X-1"

Письма в Астрономический журнал, 40, 83 (2014)

Sazonov S., Willner S.P., Goulding A.D., et al.

"Contribution of the Accretion Disk, Hot Corona, and Obscuring Torus to the Luminosity of Seyfert Galaxies: INTEGRAL and Spitzer Observations"

Astrophysical Journal, 757, 181 (2012)

Sazonov S., Sunyaev R., Revnivtsev M.

«Coronal radiation of a cusp of spun-up stars and the X-ray luminosity of Sgr A*»

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 420, 388 (2012)

Churazov E., **Sazonov S.**, Tsygankov S., Sunyaev R., Varshalovich D. "Positron annihilation spectrum from the Galactic Centre region observed by SPI/INTEGRAL revisited: annihilation in a cooling ISM?"

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 411, 1727 (2011)