

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе **Пширкова Максима Сергеевича** «Радиоастрономические ограничения на модели фундаментальной физики и астрофизики», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.02 – теоретическая физика, 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения, содержит 49 рисунков, 2 Приложения, в списке литературы 370 ссылок, всего 314 страниц текста. Опубликовано 24 работы, из них 17 в реферируемых журналах, в частности, в Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. D, MNRAS, и других журналах, 5 статей в сборниках трудов конференций и двух тезисов докладов. Работы докладывались на международных и всероссийских конференциях (24).

Во **Введении**, помимо общего обзора основных проблем, затронутых в диссертации, сформулированы актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту. Дан список опубликованных работ, перечислены конференции и семинары, на которых они докладывались.

В **Главе 1** обсуждаются ограничения на альтернативные теории гравитации из пульсарных наблюдений. Прежде всего, это модели (автор называет их теориями) массивной гравитации, в частности, работа Дубовского, Гинякова, Ткачева [44], где гравитоны с массой отличной от нуля ( $m_g \sim 2 \cdot 10^{-25}$  эВ) рассматриваются как кандидаты в темную материю (ТМ). **М.С. Пширков** с соавторами в PRL статье [45] показывает, что метод пульсарного хронометрирования в полосе низких частот гравитационного волнового фона, соответствующего массивному гравитону, совместно с астрометрическими ограничениями позволяют ограничить плотность таких массивных гравитонов значительно ниже локальной плотности темной материи, т.е. массивные гравитоны могут составлять лишь небольшую долю во всей темной материи Галактики.

В **Главе 2** в разделе 2.1. с помощью данных измерения вращательных параметров пульсара (второй производной частоты вращения) автором получено ограничение на плотность энергии в гравитационно-волновом фоне в низко-частотном диапазоне  $10^{-12}$ - $10^{-8}$  Гц,  $\Omega_{GW} < 2 \cdot 10^{-6}$ .

В разделе 2.2 автор рассматривает ограничения на гравитационно-волновой фон в области высоких частот ( $\sim$ ГГц) из-за его взаимодействия с крупномасштабным магнитным полем. Автор цитирует работы своих предшественников, рассматривая гравитон-фотонную конверсию во внешнем поле с вероятностью (2.26), впервые подсчитанной Герценштейном (ЖЭТФ 1962, ссылка диссертации [100] неточна). Однако эта формула верна для случая, когда длина когерентности магнитного поля много меньше длины осцилляции между электромагнитными и гравитационными волнами,  $L \ll l_{osc}$  [110]. Имеется в виду обобщение формулы Герценштейна (2.26) Раффельтом и Стодольским (Phys.Rev. D 37 (1988) 1237) как  $P=4\pi GB^2 L^2 \rightarrow P=(4/\pi)GB^2(l_{osc})^2 \sin^2(\pi L/l_{osc}) \sin^2\theta$ . Здесь длина осцилляций  $l_{osc} = 4\pi c\omega/\omega_{pl}^2$ , где  $\omega$  – угловая частота электромагнитной волны,  $\omega_{pl}^2 = 4\pi n_e/m_e$  – квадрат плазменной частоты,  $\omega_{pl} = 5.65 \cdot 10^4 \sqrt{n_e/cm^{-3}} = 1.5 \cdot 10^2$  Гц для плотности электронов  $n_e = 10^{15} cm^{-3}$  в скоплениях галактик. Нетрудно подсчитать, что для частоты  $f = 10^{10}$  Гц, используемой в разделе 2.2,  $\omega = 6.3 \cdot 10^{10}$  Гц, длина осцилляций  $l_{osc} = 10^{18}$  см, тогда как длина когерентности магнитного поля (2.27) на этой частоте равна  $L = 3 \cdot 10^{19}$  см  $> l_{osc} = 10^{18}$  см, т.е. формула Герценштейна неточна в вычислениях **М.С. Пширкова.**

В разделе 2.3 автор изучает особенности гравитационно-волновых всплесков с памятью от слияний сверхмассивных черных дыр (СМЧД с массами  $M_{BH} \sim 3 \cdot 10^8 M_{Sun}$ ) в том же методе пульсарного хронометрирования. Этот метод в применении на радиотелескопе следующего поколения (SKA) будет полезным дополнением к наблюдениям в эксперименте eLISA, а для СМЧД с массами  $M > 10^8 M_{Sun}$  будет даже предпочтительнее по чувствительности космических интерферометров.

Интересным является возможное обнаружение нетепловых радиовсплесков, связанных с короткими гамма-всплесками, ожидаемое на радиотелескопе LOFAR (последний раздел 2.4 второй главы). Такие радиовсплески ожидаются от слияния двойных нейтронных звезд с образованием дифференциально вращающегося массивного объекта с сверхсильным магнитным полем, что, в свою очередь, и может служить источником гамма-всплеска.

**В третьей главе** получены ограничения на распространенность легких космических струн в Галактике по пульсарным наблюдениям микролинзирования за счет искажения метрики массивным телом, например, при пересечении такими струнами луча зрения на пульсар. Соответствующие остаточные отклонения моментов прихода пульсарных радиоимпульсов на антенну, при наблюдении ансамбля пульсаров из центральных областей Галактики, где ожидается скопление струн, позволили получить ограничение на распространенность легких космических струн (плотности их энергии по отношению к критической) на уровне  $\Omega_{\text{string}} \sim 10^{-3}$  для струн с натяжением  $\mu = dE/dz$ , или безразмерной энергией на единицу длины,  $G\mu/c^2 = 10^{-14}$ .

**В четвертой главе** изучены ограничения на распространенность первичных черных дыр (ПЧД) в качестве кандидатов в темную материю. Рассмотрены два сценария: а) захваты ПЧД нейтронными звездами (НЗ) или унаследование ПЧД от их прародителей путем захвата из мини-гало темной материи самой звездой до ее превращения в компактный остаток-нейтронную звезду. Получаемые ограничения в обоих случаях позволяют исключить первичные черные дыры как основной компонент темной материи в ранее неисследованном диапазоне масс ПЧД  $10^{17} \text{ — } 3 \cdot 10^{24} \text{ г}$ , закрывая последнее разрешенное «окно» (статьи **Пширкова** с Тиняковым и Capela в Phys.Rev.D, 2013-2015 г.г.). Идея получения ограничений в этом диапазоне масс ПЧД проста: ПЧД имеют малый радиус (порядка атомных размеров для массы

$\sim 10^{20}$  г), они не взаимодействуют с разреженным веществом, но легко захватываются нейтронной звездой с экстремально большой плотностью, и, оказавшись в центре звезды, в дальнейшем поглощают ее саму за время меньше миллиона лет. Само существование и наблюдение НЗ большого возраста позволяет ограничить вероятность (частоту) таких захватов, и, следовательно, распространенность ПЧД такой массы. Как известно, ПЧД малой массы исключены излучением Хокинга: их время жизни меньше возраста Вселенной, а ПЧД больших масс, чем рассмотренные **Пширковым** в данной главе, исключены наблюдениями микролинзирования, в частности, из наблюдений телескопа Kepler до масс ПЧД  $3 \cdot 10^{33}$  г, а для еще больших масс из анализа реликтового излучения.

**В пятой главе** соискатель исследует галактические (ГМП) и внегалактические магнитные поля (ВМП), используя каталог NRAO VLA Sky Survey для мер фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоизлучения от далеких источников. Исключением внегалактических радиоисточников на низких широтах **Пширковым** строится модель регулярного магнитного поля Галактики по почти 40 тысячам RM (мерам вращения) от внегалактических источников. Эта модель чрезвычайно важна для интерпретации наблюдений космических лучей, в том числе сверхвысоких энергий порядка и выше GZK обрезания их спектра. Для определения **внегалактических магнитных полей** (ВМП) используются разностные меры вращения  $RRM = RM - RM_{gal}$ , где как раз данные наблюдений  $RM_{gal}$  для ГМП позволяют отделить их вклад в разностную меру вращения. Особое беспокойство при анализе распространения космических лучей вызывает случайная составляющая ГМП. Автор связывает отклонения космических лучей в случайном поле с известным разбросом мер вращения от внегалактических источников, что позволяет ему по данным упомянутого каталога внести угловое ограничение для поисков источников (т.е. уже

астрономии) протонов энергии  $E \geq 4 \cdot 10^{19}$  эВ, когда отклонение не превосходит  $5^\circ$  или даже меньше при удалении от галактической плоскости. Особый интерес вызывают исследования ВМП в разделе 5.4. по данным того же каталога мер вращения. Для мощных источников величина RRM гораздо точнее определяет искомое ВМП, превышая вклад ошибок измерения и, разумеется, слабее подвержена влиянию случайного галактического магнитного поля. Предполагается рост мер вращения с увеличением известных расстояний до источников для фиксированной светимости радиоизлучения. Однако не наблюдение подобной зависимости от красного смещения позволяет автору ограничить внегалактические магнитные поля на уровне достоверности  $2\sigma$  величиной 1.2 нГс для длины когерентности (масштаба поля) 1 Мпк. Это лучше ограничения эксперимента Планк и, кроме того, имеет отношение как к полям космологического происхождения (тогда как Планк только для космологических расстояний  $z \sim 1000$ ), так и для ВМП астрофизического происхождения. Для однородных ВМП (масштаб горизонта Вселенной) ограничение **Пширкова** с соавторами еще сильнее (0.5 нГс).

**В заключении** кратко перечислены результаты всех глав. Подчеркивается высокая чувствительность наблюдений в радиодиапазоне, которая позволяет уточнять модели вне рамок Стандартной модели физики частиц. Сюда относятся альтернативные к ОТО модели теории гравитации, ограничения на распространенности массивных гравитонов и первичных черных дыр как кандидатов в ТМ, плотности струн в Галактике, и, наконец, моделирование магнитных галактических и внегалактических полей из анализа наблюдаемых фарадеевских мер вращения.

Имеются опечатки. После формулы (5.28) автор переставил обозначения «релевантных» космологических параметров,  $\Omega_m=0.73$  и  $\Omega_\Lambda=0.27$ , должно быть наоборот:  $\Omega_m=0.27$  и  $\Omega_\Lambda=0.73$ . Пропущена буква «о» в слове «нормировкой» после формулы (5.7) в разделе 5.2.2.

В целом, несмотря на отмеченные выше недостатки, диссертация производит очень хорошее впечатление. Прделанный автором труд отражен в публикациях в высокорейтинговых журналах, также высок уровень цитируемости опубликованных работ **М.С. Пширкова**.

**Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.**

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Пширков Максим Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.02 – теоретическая физика и 01.03.02. – астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук

Семикоз Виктор Борисович

142190 г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН,  
Тел. 8 (495) 851 -01-20, e-mail: [semikoz@yandex.ru](mailto:semikoz@yandex.ru),

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения  
радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН),  
заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН.

Подпись д.ф.-м.н. Семикоза В.Б. заверяю:

Ученый секретарь ИЗМИРАН к.ф м.н.

А.И. Рез

Семикоз Виктор Борисович

1. V.B. Semikoz, J.W.F. Valle, “Chern-Imons anomaly as polarization effect”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)* 11 (2011) 048.
2. V.B. Semikoz, D.D. Sokoloff and J.W.F. Valle, “Lepton asymmetry and primordial hypermagnetic helicity evolution”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)* 06 (2012) 008.
3. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Leptogenesis via hypermagnetic fields and baryon asymmetry”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)* 02 (2012) 040; Erratum: *JCAP* 08 (2012) E01.
4. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Lepton asymmetry growth in symmetric phase of an electroweak plasma with hypermagnetic fields versus its washing out by sphalerons”, *Physical Review D* 87(2013) 025023.
5. V.B. Semikoz, A.Yu. Smirnov and D.D. Sokoloff, “Hypermagnetic helicity evolution in early universe: leptogenesis and hypermagnetic diffusion”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)* 10 (2013) 014.
6. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Instability of magnetic fields in electroweak plasma driven by neutrino asymmetries”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)* 05 (2014) 002.
7. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Magnetic field instability in a neutron star driven by the electroweak electron-nucleon interaction versus the chiral magnetic effect”, *Physical Review D* 91(2015) 061301 (R).
8. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Generation of the magnetic helicity in a neutron star driven by the electroweak electron-nucleon interaction”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP)* 05 (2015) 032.
9. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Energy source for the magnetic field growth in magnetars driven by the electron-nucleon interaction”, *Phys. Rev. D* 92 (2015) 8, 083007.