

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию К.В. Птицыной «Происхождение космических лучей, нейтрино и гамма-излучения в окрестностях сверхмассивных черных дыр в центрах галактик», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Вопрос о происхождении космических лучей сверхвысоких энергий остаётся нерешённым и интенсивно дебатированным на протяжении многих десятилетий. Увы, революционный прогресс в наблюдательной астрономии и работа крупномасштабных экспериментов, регистрирующих космические лучи, не помогли найти ответов в этой области, а лишь усложнили решение задачи наложением новых строгих ограничений на модели источников. С астрофизической точки зрения, круг возможных объектов, в которых происходит ускорение частиц до сверхвысоких энергий, ограничен физическими условиями в источнике, и даже самый общий учёт ограничений, основанных на геометрических размерах источников и магнитных полях в них, оставляет допустимыми лишь несколько классов объектов. В наиболее строгой форме такие ограничения были получены в 2008 году в студенческой работе К.В. Птицыной (не вошедшей в диссертацию). Уже тогда стало ясно, что малоисследованный класс источников – непосредственные окрестности центральных чёрных дыр всех галактик, а не только активных, - является многообещающим, поскольку при определённых условиях допускает значительное подавление потерь энергии ускоряемой частицы на излучение. С тех пор К.В. Птицына сконцентрировалась на изучении и развитии моделей ускорения частиц в таких источниках. Результаты этого исследования и составили обсуждаемую диссертацию.

Как оказалось, решение изучить данный класс источников и механизм ускорения частиц, обеспечивающий в них минимальные потери, было правильным. В 2011 году коллаборация Pierre Auger Observatory опубликовала ограничения на пространственную концентрацию источников космических лучей с энергиями выше $\sim 10^{19.5}$ эВ, полученные из результата о мелкомасштабной изотропии (отсутствии кластеризации) направлений прихода таких частиц. Оказалось, что источники таких космических лучей должны быть многочисленными, и лишь обсуждаемый механизм, работающий не только в мощных активных, но и в заметно более многочисленных обычных галактиках, способен

обеспечить требуемую концентрацию источников. С использованием упрощённой модели ускорения была построена модель популяции источников космических лучей с энергиями выше 10^{19} эВ, обсуждаемая в первой главе диссертации.

После 2010 года интерес к таким моделям ускорения в мире значительно возрос, подогреваемый не только новыми данными о космических лучах (ускоренные протоны), но и более детальным изучением излучения активных ядер галактик в гамма-диапазоне (предположительно связанного с ускоренными электронами). Уровень детализации наблюдаемых спектров источников при энергиях выше 100 ГэВ стал требовать подробного количественного анализа механизмов излучения, выходящего за пределы стандартных предположений о степенном спектре в источнике. К.В. Птицына построила реалистичную модель ускорения частиц в вакуумном зазоре вблизи чёрной дыры, позволяющую объяснить особенности наблюдаемых спектров активных галактик. Построенная компьютерная модель ускорения явилась серьёзным шагом вперёд по сравнению с ранее использованными приближёнными оценками. Этому посвящена вторая глава диссертации.

В последние годы всё больше внимания привлекают модели высокоэнергичного излучения активных ядер галактик, основанные на ускорении протонов наряду с электронами («протонный блазар»). В частности, результаты наблюдения большой выборки источников наземно-космическим радиоинтерферометром «Радиоастрон» (2014) указывают на высокую вероятность реализации такого механизма в природе. Наряду с гамма-излучением, ускоренные протоны приводят к нейтринному излучению. В третьей главе диссертации используются экспериментальные результаты IceCube (2013-2015). На основе ненаблюдения нейтрино от блазаров ставятся наиболее строгие в мире ограничения на модели «протонного блазара». Оказалось, что одной из немногих разрешённых моделей как раз и является развиваемая К.В. Птицыной модель ускорения протонов до сверхвысоких энергий в вакуумном зазоре вблизи центральной чёрной дыры.

Специфика междисциплинарной области, которой посвящена диссертация, требует широкой образованности и владения методами теории поля, физики частиц, астрофизики частиц, астрофизики высоких энергий, компьютерного моделирования, анализа наблюдательных и экспериментальных данных. По моему мнению, К.В. Птицына освоила все требуемые навыки. Она является сложившимся самостоятельным исследователем, умеющим ставить и решать интересные задачи на переднем крае исследований на стыке физики элементарных частиц и астрофизики, а также способным заинтересовать этими

задачами коллег, как младших (она ведёт активную работу со студентами), так и старших. Её работы хорошо известны в мире и цитируются коллегами, и в России, и за рубежом.

Считаю, что диссертация «Происхождение космических лучей, нейтрино и гамма-излучения в окрестностях сверхмассивных черных дыр в центрах галактик» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, К.В. Птицына, безусловно заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

09.02.2017

Ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН,
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

С.В. Троицкий

Подпись Троицкого С.В. удостоверяю:

Учёный секретарь ИЯИ РАН

А.Д. Селидовкин