

## **Отзыв официального оппонента на диссертационную работу**

Криворученко Михаила Ивановича

### **Модификация свойств адронов в ядерной материи**

представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01-04-02 - теоретическая физика

#### **Актуальность темы**

В экспериментах по столкновению тяжелых ядер исследуется в частности модификация свойств адронов в среде с плотностью порядка и выше плотности насыщения. В настоящее время такие эксперименты ведутся на коллайдерах RHIC (BNL), LHC (CERN), на SIS (GSI, Darmstadt) и планируются в будущем на установках FAIR (Darmstadt) и НИКА (Дубна). Недавний прогресс в наблюдательной астрофизике существенно обогатил наши знания о строении нейтронных звезд, которое определяется уравнением состояния и составом ядерной материи. Открытие пульсаров с массой, заметно превышающей предел Чандрасекара (Demorest et al. 2010, Lynch et al. 2013), исключает широкое семейство «мягких» уравнений состояния и некоторые экзотические формы ядерной материи. В плотной среде, как известно, частицы изменяют свои свойства. Впервые данный эффект исследовался теоретически и экспериментально в атомной физике, где наблюдается зависимость положения атомных уровней и их ширины от температуры и плотности газа. Изучение модификации свойств адронов в плотной материи по сравнению с их свойствами в вакууме стало возможным благодаря развитию ускорительной техники. Элементарные частицы, используемые в качестве зонда, помогают извлечь из экспериментальных данных уникальную

информацию о свойствах материи при плотности, превышающей плотность насыщения. Диссертация посвящена изучению этих проблем. Ее актуальность продиктована современным развитием науки и не вызывает у меня сомнений.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Статьи, вошедшие в диссертацию, удовлетворяют требованиям обоснованности и достоверности, принятым в современной теоретической физике. Материал в Главах 2.4 и 5 изложен достаточно строго, в том числе математически. Обоснованность феноменологических схем и доказательств в работах, вошедших в Главу 4, в частности в 4.2.1, даже превышает обычные стандарты принятые в физике тяжелых ионов. Большинство предсказаний дилептонных ширины распадов нестранных мезонов, сделанные в Главе 4.1, впоследствии были подтверждены экспериментально. В Главе 6 представлен детальный анализ модификации свойств каонов в пионной материи, который впервые позволил выделить векторную и скалярную составляющие по группе Лоренца в операторе собственной энергии каонов.

Для описания физических эффектов квантово-полевые и феноменологические схемы применяются вполне корректно. Это подкрепляется подтверждением предсказаний экспериментальными данными, включая более поздние эксперименты (дилептонные парциальные ширины легких нестранных мезонов), а также результатами альтернативных теоретических схем, таких как расчеты на решетках, PNIL и PQMD. Установлено, что важную роль в описании дилептонных спектров играет уширение нуклонных резонансов (Глава 4), что согласуется с теоретическим описанием реакций фотопоглощения на ядрах (Глава 3).

Работы соискателя, вошедшие в диссертацию, докладывались на международных конференциях и семинарах, прошли апробацию, востребованы, в том числе среди экспериментаторов, и хорошо цитируются. Работы, вошедшие в

диссертацию, опубликованы в международных физических журналах, в которых рецензентами являются ведущие эксперты мирового уровня.

### **Оценка новизны и достоверности**

Диссертантом выдвинуты следующие новые положения, представляющие научный интерес:

- 1) В работах диссертанта впервые предсказано (1991 г.) существование спаривания кварков, щели в спектре возбуждений, сверхпроводимости холодной кварковой материи для цветовой группы  $SU(2)$ . Данное предсказание подтверждено вычислениями на решетках (S. Hands et al. 2006), в моделях PNIL (T. Brauner et al. 2009) и PQMD (N. Strodthoff and L. von Smekal 2014).
- 2) Получена одномерная рекурсивная формула для нормировки волновой функции в проекционной теории БКШ.
- 3) Изучен эффект бозе-конденсации дибарионов в ядерной материи. Предложено и детально исследовано обобщение модели Валечки, включающее дибарионный сектор. На основе анализа лабораторных данных о свойствах ядерной материи при плотности насыщения и астрофизических данных наблюдений над нейтронными звездами найдены ограничения на массы и константы связи дибарионов с векторными и скалярными мезонами.
- 4) Столкновительное уширение нуклонных резонансов играет существенную роль в эффекте «плавления» нуклонных резонансов в реакциях фотопоглощения на тяжелых ядрах. Этот эффект также важен для описания дилептонных спектров в столкновениях тяжелых ионов при промежуточных энергиях.
- 5) Найдена и детально обоснована двухкомпонентная формула Брейта-Вигнера, описывающая когерентное рождение резонансов на ядрах с учетом интерференции амплитуд распада внутри и вне ядра. Определены кинематические режимы

некоторых реакций, в которых двухкомпонентная структура оказывается наиболее выраженной.

6) Детально изучены распады легких нестранных мезонов и нуклонных резонансов с массой меньше 2 ГэВ на дилептонные пары. Проведено моделирование спектра дилептонов в элементарных реакциях  $pp$  и в столкновениях тяжелых ионов для энергий DLS (Bevalac) и HADES (Darmstadt). Динамика столкновений описывается в рамках транспортной модели релятивистской квантовой молекулярной динамики (QMD/RQMD) Тюбингена/ИТЭФ. Из анализа экспериментальных данных получен вывод о том, что векторные мезоны в ядерной материи испытывают значительное уширение, однако, их масса существенно не изменяется.

7) Доказана возможность сведения квантово-механической задачи эволюции к задаче построения ансамбля квантовых характеристик (траекторий Мoyal) в любом порядке квазиклассического разложения по постоянной Планка. Задача сводится к решению конечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

8) В термализованной пионной материи, которая образуется в столкновениях тяжелых ионов при энергиях RHIC, вычислен оператор собственной энергии каонов. Увеличение парциальной ширины распада  $\phi$ -мезона на электрон-позитронные пары, обнаруженное коллаборациями NA50, NA49 и PHENIX, интерпретируется как результат перераспределения и модификации свойств вторичных каонов.

9) Изучена модификация свойств нейтрино в ядерной среде, обусловленная экзотическим скалярным взаимодействием между майорановским нейтрино и нуклонами. Взаимодействие изменяет майорановскую массу нейтрино, что отражается на вероятности безнейтринного двойного бета-распада. Получено

ограничение на масштаб экзотического скалярного взаимодействия порядка  $1 \text{ ТэВ}$ .

В целом, результаты, полученные автором, приводят к существенному прогрессу в нашем понимании процессов, которые относятся к области на стыке физики адронов, ядерной физики и астрофизики.

На мой взгляд, однако, при выводе двухкомпонентной формулы Брейта-Вигнера имело бы смысл обсудить роль отраженной от поверхности ядра волны. При высоких энергиях ее вклад невелик, но с уменьшением энергии структура двухкомпонентной формулы приобретает, по-видимому, более сложный вид.

Основные результаты диссертации изложены в 22-х статьях, опубликованных в ведущих международных рецензируемых физических журналах, они неоднократно обсуждались на конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

### **Общие замечания по диссертационной работе**

1. В последние годы в решеточных моделях получены указания на уменьшение температуры перехода из фазы конфайнмента в фазу деконфайнмента с ростом химического потенциала (T. Voz et al., 2013). Соответственно, при высоком химическом потенциале кварковая материя может находиться в фазе деконфайнмента, чему соответствуют цветные элементарные возбуждения над фермифермой. Данная картина имеет место в модели NII, рассмотренной диссертантом.
2. В дополнение к эффектам, рассмотренным в диссертации, заслуживают внимания также формирование  $b$ -кварковых дибарионов в ядрах может приводить к наблюдаемым эффектам в процессах подпорогового рождения частиц, запре-

щенных кинематикой в  $pp$  столкновениях. Данные приводят к существенным ограничениям на свойства таких возбужденных состояний в ядрах (см. в Phys.Rev. C33(1986)2070).

3. Заслуживают также внимания эффекты, связанные с примесью дибарионов в простейших ядрах как дейтрон. Они могут приводить к рождению

адронов в кинематически запрещенных областях, так называемому кумулятивному рождению (Phys.Lett. B117(1982)101), и в отклонениях от стандартной Глауберовской модели для протон-дейтронного рассеяния (Яд.Физ. 42(1985)1073)

4. Некоторые разделы диссертации носят сугубо технический характер и без особого ущерба могут быть сокращены.

Отмеченные отдельные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные теоретические результаты диссертации.

### **Заключение**

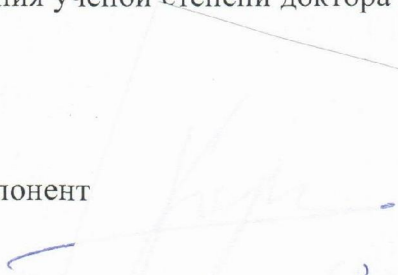
Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, совокупность которых позволяет их квалифицировать как научное достижение. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Работа базируется на продвинутых теоретических схемах, тесно связана с феноменологией и экспериментом, сопровождается детальными расчетами. Она написана понятно, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе в целом сделаны ясные выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Криворученко Михаил Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора наук по специальности теоретическая физика.

Официальный оппонент



Б. З. КОПЕЛИОВИЧ

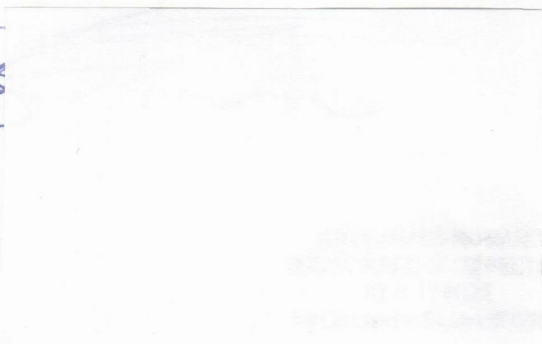
доктор физ.-мат. наук Б.З. Копелиович

Подпись официального оппонента заверяю

Печать

Дата

Sworn to and subscribed  
before me this  
6<sup>th</sup> day of Nov., 2015



Борис Зиновьевич Копелиович  
Научный сотрудник Физического факультета  
Технического университета Федерико Санта Мария  
Universidad Técnica Federico Santa María  
Avenida España 1680, Valparaíso, Región V, Chile  
Тел.: +56-995111029. E-mail: Boris Kopeliovich <[bzk@mpi-hd.mpg.de](mailto:bzk@mpi-hd.mpg.de)>