

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET
(по материалам электронных препринтов)

Ю.Н. Ерошенко

PACS numbers: 01.10. – m, 01.30. – y, 01.90. + g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.09.039234>

1. Проверка принципа эквивалентности. Общая теория относительности (ОТО) со времени её создания выдержала ряд успешных проверок, включая недавнюю регистрацию гравитационных волн и наблюдение тени чёрной дыры. Но, возможно, ОТО не является окончательной, а представляет собой приближение к более полной теории, учитывающей квантовые эффекты и дополнительные взаимодействия. Не исключено, что эти новые взаимодействия, переносимые, например, дилатонподобными частицами, могут на некотором малом уровне нарушать слабый принцип эквивалентности (независимость ускорения свободного падения тел от их массы и состава). В работе [1] представлены итоговые результаты эксперимента MICROSCOPE, проводимого на орбите вокруг Земли в условиях слабых помех с целью проверки принципа эквивалентности. Установка содержит два парящих в невесомости концентрических цилиндра разного состава (соединения титана и платины), взаимные ускорения которых измеряются сверхточными электростатическими акселерометрами. Также имеется референсный прибор с цилиндрами одного состава для контроля систематических ошибок. За всё время наблюдения для параметра Этвеша получено $\eta = [-1.5 \pm 2.3(\text{стат.}) \pm 1.5(\text{сист.})] \times 10^{-15}$, что в 4,6 раз лучше прежнего значения. Данный результат на достигнутом уровне точности подтверждает справедливость принципа эквивалентности, и из него следуют ограничения на величину новых взаимодействий.

2. Поиск безнейтринного двойного бета-распада. В ряде экспериментов ведётся поиск гипотетического безнейтринного двойного бета-распада, запрещённого в рамках Стандартной модели элементарных частиц [2]. Его обнаружение означало бы, что нейтрино является майорановской частицей (своей собственной античастицей). Распад такого типа пока не обнаружен, но получены ограничения снизу на время жизни различных ядер относительно безнейтринного двойного бета-распада. Эксперимент CUPID-0, проводимый в Национальной лаборатории Гран Сассо (Италия), по своей концепции является развитием эксперимента CUORE, в котором недавно были получены наилучшие ограничения на распад ядер ^{130}Te . В спектре распада ядер ^{82}Se ищется дополнительный пик, соответствующий безнейтринному каналу. Основным новшеством CUPID-0 по сравнению с CUORE является использование сцинтилляционных болометров. Для распада ^{82}Se в основное состояние ядра ^{82}Kr получено ограничение для времени полураспада $T_{1/2} > 4,6 \times 10^{24}$ лет (в 20 раз лучше предшествующих ограничений) [3]. Отсюда следует ограничение на эффективную массу майорановского нейтрино $m_{\beta\beta} < (263 - 545)$ МэВ. Также были получены наиболее строгие ограничения на распад ^{82}Se в возбуждённые состояния ^{82}Kr , сигнатурой которых является излучение дополнительных гамма-фотонов при дезситации.

3. Внутренний с-кварк в протоне. Протон состоит из двух u-кварков, одного d-кварка и глюонов. Также внутри протона должно рождаться и исчезать большое количество кварк-антикварковых пар всех других типов (кварковое море). Те кварки,

массы которых превышают массу самого протона, называются внутренними (intrinsic) кварками. Особый интерес представляют внутренние с-кварки, поскольку их масса (1,25 ГэВ) чуть больше массы протона и, согласно оценкам, они могут переносить $\sim 0,5 - 2\%$ импульса протона. Однако ряд предыдущих попыток зарегистрировать внутренний с-кварк давали неоднозначные и взаимоисключающие результаты, и этот фундаментальный вопрос остаётся открытым уже около 40 лет. Коллаборацией NNPDF выполнено новое исследование данных по pp-столкновениям на Большом адронном коллайдере и данных ряда других экспериментов и на уровне 3σ подтверждено наличие внутреннего с-кварка в протонах [4]. При обработке данных, в частности, применялись технологии "машинного обучения".

4. Электрон-фотонные пары. А. Feist (Институт междисциплинарных наук Общества им. М. Планка и Гёттингенский университет, Германия) и соавторы разработали новый метод получения квантово запутанных пар электронов и фотонов [5]. Для этого использовался кольцевой оптический микрорезонатор на основе высококачественного фотонного чипа, создающий вблизи себя эванесцентное электромагнитное поле. Когда электроны от электронного микроскопа пролетали вблизи резонатора, они взаимодействовали с эванесцентным полем, что приводило к генерации фотонов, которые покидали микрорезонатор через оптоволокно. Возникшие при этом пары электрон-фотон описывались единой волновой функцией (были квантово запутанными). Полученные таким путём пары обладают высокой квантовой чистотой (fidelity). Квантово запутанные электрон-фотонные пары применяются в квантовой оптике для квантово-усиленной визуализации, а также в различных областях квантовой коммуникации.

5. Интерференция единичных неидентичных частиц. Чаще всего квантовая интерференция происходит между частицами одного типа, однако она возможна и между различными системами [6]. Ранее уже наблюдалась интерференция между квазичастицей-магноном (квантом спинового возбуждения) и коллективным фотонным состоянием, а также между фотоном и когерентным NOON-состоянием. К. Су (Южно-Китайский педагогический университет) и соавторы впервые продемонстрировали квантовую интерференцию между различными единичными частицами (фотоном и магноном) в интерферометре Хонга-У-Мандела и исследовали их квантовую статистику [7]. В интерферометре применялся гибридный сплиттер, в котором могла происходить конверсия между указанными частицами посредством тёмного поляритонного состояния в ансамбле атомов, причём сплиттер мог переводиться из эрмитова в неэрмитов режим работы. Это позволило реализовать кроссовер между бозонной и фермионной квантовыми статистиками, хотя оба входящих состояния были бозонными. Более того, удалось выполнить имитацию трёх фермионных состояний посредством трёх единичных фотонов на входе в интерферометр.

6. Диодный эффект в сверхпроводимости. В некоторых нетрадиционных сверхпроводниках внешнее магнитное поле может сосуществовать со сверхпроводимостью. На этом основан открытый недавно эффект "сверхпроводящего диода",

когда критический ток сверхпроводника зависит от направления. Однако это явление наблюдалось только в присутствии внешнего магнитного поля. J.-X. Lin (Брауновский университет, США) и соавторы впервые продемонстрировали сверхпроводящий диод без внешнего магнитного поля в трёхслойном графене с кручением [8]. Направление диодного эффекта можно изменять с помощью внеплоскостного магнитного поля (метод "воспитания материала"), а также изменяя плотность носителей или угол закручивания слоёв. Вероятным объяснением сверхпроводящего диодного эффекта в графене является дисбаланс в заполнении проводящих зон, что, возможно, приводит к куперовскому спариванию с конечным импульсом. Это исследование даёт прямое доказательство сосуществования сверхпроводимости и нарушения симметрии относительно обращения времени на атомном уровне.

7. "Антилазер". Когерентное поглощение излучения ("антилазер") уже было ранее реализовано в эксперименте путём создания резонансных структур [9], но только для одной или нескольких мод, отличающихся углом падения. Y. Slobodkin (Еврейский университет в Иерусалиме, Израиль) и соавторы предложили теоретически и продемонстрировали в эксперименте метод создания когерентного поглощения, при котором для каждой возможной моды поглотитель самонастраивается таким образом, что происходит её полное поглощение [10]. То есть происходит идеальное поглощение сигнала с любым волновым фронтом. Метод основан на формальном соответствии такого когерентного поглощения обращённому по времени излучению лазера с вырожденным резонатором. Для обращения лазерного эффекта было предложено поместить в резонатор две линзы и тонкий слой поглощающей среды. Благодаря вырождению мод и интерференции свет остаётся в резонаторе и много раз проходит через поглощающую среду. Это обеспечит идеальное когерентное поглощение любой комбинации мод, независимо от их относительных фаз и направлений. Выполненный по описанной методике эксперимент подтвердил успешность данной концепции — эффективность поглощения сложного сигнала, состоящего из более чем 1000 мод, составила 94 %.

8. Локальное нарушение закона Ома в графене. Закон Ома ($j = \sigma E$) имеет место в масштабах, превышающих среднюю длину свободного пробега электронов в веществе, когда перенос электричества является диффузионным процессом. Однако предсказывалось, что в ферми-жидкостях перенос может определяться электрон-электронными столкновениями. Это приводит к вязкостному переносу, при котором течение тока напоминает течение жидкости. A. Jenkins (Калифорнийский университет в Санта-Барбаре, США) и соавторы наблюдали переход от одного режима переноса к другому и локальное нарушение закона Ома в монослое графена вблизи вытравленного узкого сужения [11]. С помощью сканирующего магнитометра на основе азотной вакансии (NV-центра) регистрировалось магнитное поле и находился профиль создающего поле электрического тока. В омическом режиме ток концентрируется вблизи границ сужения, а при температуре < 200 К — ближе к центру. Это согласуется с переходом от диффузионного к вязкостному потоку электронов. Показано также, что в случае жидкостного поведения тока преодолевается предел проводимости Ландауэра–Шарвина, соответствующий баллистическому режиму электронов.

9. Моделирование астрофизических дисков в лаборатории. В газовых дисках вокруг чёрных дыр большой темп аккреции должен сопровождаться переносом углового момента из центральной области диска вовне. Точные механизмы, отвечающие за перенос углового момента, пока не ясны. Это может быть магниторотационная неустойчивость или чисто гидродинамический перенос без магнитного поля. Наряду с аналитическими и численными расчётами, одним из методов исследования является моделирование астрофизических дисков в лабораторных экспериментах. Группой исследователей из Парижского

университета (Сорбонна) M. Vernet, S. Fauve и C. Gissinger создана новая экспериментальная установка [12], в которой исследуется перенос углового момента турбулентным потоком электропроводящей жидкости, заключённой в тонкий диск. В эксперименте определены два вклада в локальный перенос углового момента: один от полоидальной рециркуляции, вызванной наличием границ, а другой от турбулентных флуктуаций в объёме. Последнее обеспечивает эффективный перенос углового момента независимо от молекулярной вязкости жидкости и приводит к предсказанию Крайчана для числа Нуссельта. Таким образом, в данном так называемом предельном режиме эксперимент обеспечивает конфигурацию, аналогичную астрофизическим аккреционным дискам. Это, во-первых, свидетельствует о верном теоретическом описании переноса и, во-вторых, позволяет предсказывать скорости аккреции. Теория астрофизических дисков в 1973 г. получила существенное развитие в работе Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева. О дисковой аккреции см. также [13–15].

10. Источники внегалактических нейтрино. Нейтринный телескоп IceCube, находящийся в Антарктиде, регистрирует космические нейтрино с энергиями 100 ТэВ–10 ПэВ неизвестного пока происхождения [16]. В ряде исследований были получены указания, что источники этих нейтрино коррелируют с положением некоторых блазаров — активных ядер галактик, у которых джеты направлены в сторону Земли. Недавнее важное свидетельство такого рода получено в работе Ю.Ю. Ковалева и его коллег [17], рассмотревших корреляцию с радиоизлучением блазаров. S. Buson (Бюрцбургский университет, Германия) и её соавторы выполнили поиск корреляций блазаров и нейтрино в IceCube за 7 лет наблюдений по новой методике — без дополнительных предположений и с достаточно однородными выборками событий [18]. В таком подходе получено, что 10 из 19 областей с наибольшим числом нейтринных событий (горячие пятна) совпадают с положением блазаров. Это подтвердило выводы о связи происхождения нейтрино с блазарами, причём вероятность случайной ассоциации оценивается на уровне 6×10^{-7} .

Список литературы

1. Touboul P et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 121102 (2022)
2. Шимкович Ф *УФН* **191** 1307 (2021); Šimkovic F *Phys. Usp.* **64** 1238 (2021)
3. Azzolini O et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 111801 (2022)
4. Ball R D et al. (The NNPDF Collab.) *Nature* **608** 483 (2022)
5. Feist A et al. *Science* **377** 777 (2022)
6. Любошиц В Л, Подгорецкий М И "Интерференция неидентичных частиц" *ЖЭТФ* **55** 904 (1968); Lyuboshits V L, Podgoretskii M I "Interference of nonidentical particles" *Sov. Phys. JETP* **28** 469 (1969)
7. Su K et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 093604 (2022)
8. Lin J-X et al. "Zero-field superconducting diode effect in small-twist-angle trilayer graphene" *Nat. Phys.* (2022) <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01700-1>
9. Розанов Н Н *УФН* **187** 879 (2017); Rosanov N N *Phys. Usp.* **60** 818 (2017)
10. Slobodkin Ye et al. *Science* **377** 995 (2022)
11. Jenkins A et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 087701 (2022)
12. Vernet M, Fauve S, Gissinger C *Phys. Rev. Lett.* **129** 074501 (2022)
13. Бескин В С *УФН* **173** 1247 (2003); Beskin V S *Phys. Usp.* **46** 1209 (2003)
14. Курбатов Е П, Бисикало Д В, Кайгородов П В *УФН* **184** 851 (2014); Kurbatov E P, Bisikalo D V, Kaygorodov P V *Phys. Usp.* **57** 787 (2014)
15. Шакура Н И и др. *УФН* **189** 1202 (2019); Shakura N I et al. *Phys. Usp.* **62** 1126 (2019)
16. Троицкий С В *УФН* **191** 1333 (2021); Troitsky S V *Phys. Usp.* **64** 1261 (2021)
17. Plavin A, Kovalev Yu Y, Kovalev Yu A, Troitsky S *Astrophys. J.* **894** 101 (2020)
18. Buson S et al. *Astrophys. J. Lett.* **933** L43 (2022); arXiv:2207.06314