

1. Регистрация CNO-нейтрино от Солнца. Источником энергии звёзд являются реакции ядерного синтеза, в которых также рождаются нейтрино. В Солнце 99% энергии выделяется в термоядерном pp-цикле, нейтрино от которого были зарегистрированы ещё в начале 1970-х гг. В эксперименте Vogexino, проводимом в Национальной лаборатории Гран-Сассо (Италия), впервые зарегистрированы нейтрино, рождающиеся в другом термоядерном цикле на Солнце, так называемом CNO (углерод-кислород-азотном), дающем лишь 1% энергии [1]. Ранее эти нейтрино наблюдать не удавалось из-за малого темпа взаимодействий и наличия фонов. В CNO-цикле ядра C, O и N служат катализаторами, что было показано Бете и Вайцекером в 1930-х гг. Детектор Vogexino находится в низкофономом горном тоннеле. Он содержит 280 т сцинтиллятора, просматриваемого 2212-ю фотомножителями. Регистрируются вспышки света от рассеяния нейтрино на электронах. Основным источником фона в области энергий CNO-нейтрино являются распады ядер ^{11}C и ^{210}Bi . Выполненная в 2016 г. термостабилизация детектора позволила уменьшить конвекцию и более точно оценить сигнал от ^{210}Bi . После этого оказалось возможным выделить со статистической значимостью $\approx 5\sigma$ сигнал от нейтрино, родившихся в CNO-цикле. Результаты измерений полностью согласуются со стандартной моделью Солнца и механизмом нейтринных осцилляций Михеева – Смирнова – Вольфенштейна. Таким образом, с регистрацией CNO-нейтрино была полностью завершена нейтринная спектроскопия Солнца. Гелиосейсмология и измерения непрозрачности вещества Солнца дают несколько различающиеся данные о металличности (содержании более тяжёлых, чем гелий, элементов), что известно как "проблема металличности Солнца". Данные по CNO-нейтрино пока совместимы как с моделями Солнца с малой металличностью, так и с большой металличностью, но дальнейшие наблюдения помогут решить эту проблему. Об экспериментах с солнечными нейтрино см. в [2].

2. Диффузия в ультрахолодном ферми-газе. В ультрахолодных ферми-газах длина свободного пробега атомов l определяется расстоянием между ними, а скорости частиц $v \sim \hbar/(ml)$ ограничены принципом неопределённости, поэтому коэффициент диффузии при низких температурах должен выходить на значение $D \sim \hbar/m$. Ранее такое универсальное поведение диффузии уже наблюдалось в ^4He , однако для атомарных ферми-газов экспериментальная ситуация оставалась неоднозначной. В работе P.V. Patel (Массачусетский технологический институт, США) и соавторов выполнено исследование диффузии в газе атомов ^6Li и подтверждена универсальность D при низких температурах [3]. Оптическая ловушка представляла собой полу световую трубку, ограниченную с двух сторон плоскими лучами лазера. В этой ловушке газ обладал высокой степенью однородности. Модулируя по синусоидальному закону интенсивность одного из плоских лучей, можно было вызывать в газе звуковые волны, которые напрямую наблюдались абсорбционным методом. По характеру затухания волн определялся коэффициент диффузии при различной частоте звука. Если при высоких температурах D имел бальмановскую температурную зависимость $\propto T^{3/2}$, то при температурах ниже температуры сверхтекучего перехода достигал универсальный квантовый предел $D \sim \hbar/m$. Данное исследование может прояснить как ряд процессов в сверхпроводниках, так и свойства вещества в сливающихся нейтронных звёздах.

3. Эффект Ефимова вблизи резонанса Фешбаха. В 1970 г. В.Н. Ефимов в своей теоретической работе [4] предсказал наличие бесконечного числа связанных состояний трёх частиц-бозонов. Существование этих "состояний Ефимова" уже было подтверждено в экспериментах. Х. Хие (Колорадский университет, США) и соавторы исследовали неупругое рассеяние атомов ультрахолодного газа ^{39}K вблизи резонанса Фешбаха с промежуточной величиной связи атомов [5]. Экспериментальные условия позволили в значительной степени изолировать эффект Ефимова от эффектов взаимодействия Ван-дер-Ваальса. Характер рассеяния зависит от соотношения эффективного масштаба двухчастичного резонанса и длины рассеяния частиц, а также от температуры газа. При исследовании пространства параметров были обнаружены четыре особенности — максимумы в коэффициенте трёхтельной рекомбинации. Положения трёх из них с точ-

ностью 10% соответствуют универсальным соотношениям, предсказываемым на основе теории Ефимова, а четвёртая особенность не удовлетворяет универсальной зависимости.

4. Прямое наблюдение тёмных экситонов. Экситоны представляют собой связанные состояния электронов и дырок, удерживаемых вместе кулоновскими силами. Если электрон и дырка принадлежат к одному минимуму (valley) зоны проводимости, то экситоны называют яркими, а если к разным, то тёмными. Тёмные экситоны не могут сами поглощать свет, так как электроны и дырки в них имеют разные импульсы. J. Madeo (Окинавский научно-технический институт, Япония) и соавторы исследовали тёмные экситоны в двумерной плёнке полупроводника диселенида вольфрама толщиной в одну молекулу методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением [6]. События вылета электронов из монослоя WSe_2 под действием линейно поляризованного луча экстремального ультрафиолетового излучения разрешались по времени (это было необходимо, так как экситоны короткоживущие), по импульсу и энергии на единой экспериментальной платформе. Наблюдались как сами тёмные экситоны, так и их взаимодействие с яркими экситонами при различных энергиях и импульсах. Было установлено, что по количеству тёмных экситонов преобладают над яркими. На основе тёмных экситонов и формируемой ими "экситонной жидкости", возможно, удастся создать устройства передачи информации и энергии в микромасштабах. Об экситонах в полупроводниках см. в [7–9].

5. Поиск дополнительного нарушения чётности в реликтовом излучении. Представляет большой интерес поиск эффектов за пределами Стандартной модели элементарных частиц в данных космологических наблюдений. Дополнительное нарушение чётности могло бы оказать влияние на характер поляризации реликтового излучения. Наличие поворота поляризации ранее уже было отмечено коллаборацией Планк, но результат имел большую погрешность. Y. Minami (Организация по изучению высокоэнергетических ускорителей KEK, Япония) и E. Komatsu (Институт астрофизики Общества им. М. Планка, Германия и Токийский университет, Япония) применили новую методику обработки данных, предложенную ранее в работах Y. Minami, E. Komatsu и их коллег, которая позволила в два раза уменьшить неопределённость [10]. Суть методики заключается в использовании микроволнового излучения Галактики. Ошибка калибровки телескопа α содержится в данных как по реликтовому излучению, так и по излучению Галактики. А угол дополнительного поворота поляризации β может быть только у реликтового излучения. Разложение по мультиполям и учёт различия в частотных спектрах позволяет разделить два вклада. Было получено, что с хорошей точностью α близок к нулю, а для β найдено значение $0,35 \pm 0,14$ град. Таким образом, на уровне достоверности $2,4\sigma$ обнаружено вращение плоскости поляризации, которое может свидетельствовать о нарушении чётности за пределами Стандартной модели — о новой физике в ранней Вселенной. Причиной вращения может служить, например, аксиоподобное поле, связанное с тёмной материей или тёмной энергией. Однако для подтверждения полученного результата требуются дальнейшие исследования. О перспективах новой физики за пределами Стандартной модели см. в [11, 12].

Список литературы

1. The Borexino Collaboration, Agostini M et al. *Nature* **587** 577 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0>
2. Дербин А В *УФН* **184** 555 (2014); Derbin A V *Phys. Usp.* **57** 512 (2014)
3. Patel P B et al. *Science* **370** 1222 (2020); <https://doi.org/10.1126/science.aaz5756>
4. Efimov V *Phys. Lett. B* **33** 563 (1970)
5. Xie X *Phys. Rev. Lett.* **125** 243401 (2020); <https://arxiv.org/abs/2008.00396>
6. Madeo J *Science* **370** 1199 (2020); <https://doi.org/10.1126/science.aba1029>
7. Глазов М М, Сурис Р А *УФН* **190** 1121 (2020); Glazov M M, Suris R A *Phys. Usp.* **63** (11) (2020)
8. Дурнев М В, Глазов М М *УФН* **188** 913 (2018); Durnev M V, Glazov M M *Phys. Usp.* **61** 825 (2018)
9. Лозовик Ю Е *УФН* **188** 1203 (2018); Lozovik Yu E *Phys. Usp.* **61** 1094 (2018)
10. Minami Y, Komatsu E *Phys. Rev. Lett.* **125** 221301 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.221301>
11. Тронцкий С В *УФН* **182** 77 (2012); Troitsky S V *Phys. Usp.* **55** 72 (2012)
12. Казаков Д И *УФН* **189** 387 (2019); Kazakov D I *Phys. Usp.* **62** 364 (2019)