

1. Сверхпроводимость при комнатной температуре. Открытие сверхпроводимости [1] с критической температурой, достигавшей $T_c = 203$ К в интервале давлений 100–250 ГПа (в алмазных наковальнях), в системе H_3S вызвало поток работ по экспериментальному изучению высокотемпературной сверхпроводимости гидридов в области мегабарных давлений (см. обзоры [2, 3]). Теоретический анализ немедленно подтвердил, что эти рекордные значения T_c обеспечиваются традиционным электрон-фононным взаимодействием и хорошее описание экспериментальной ситуации обеспечивается теорией Элиашберга–МакМиллана в пределе достаточно сильной электрон-фононной связи [4, 5]. Более того, подробные расчёты для целого ряда гидридов переходных металлов под давлением [4] привели к предсказанию достаточно большого числа таких систем с рекордными значениями T_c . В ряде случаев эти предсказания получили блестящее подтверждение, в частности, были экспериментально достигнуты рекордные значения $T_c = 250–260$ К в системе LaH_{10} [6, 7]. Принципиальное значение этих работ состоит, прежде всего, в том, что они ярко продемонстрировали отсутствие существенных ограничений для T_c в рамках электрон-фононного механизма куперовского спаривания, где традиционно считалось, что T_c не может превышать 30–40 К. После появления работ [6, 7] стало ясно, что не за горами открытие сверхпроводимости при комнатной температуре, которая многие годы казалась лишь мечтой немногих теоретиков [8, 9]. И вот теперь этот рубеж перейдён — в только что появившейся работе [10] была получена сверхпроводимость с $T_c = 287,7 \pm 1,2$ К (т.е. около $+15^\circ\text{C}$) в системе $C-H-S$ при давлении 267 ± 10 ГПа. Авторы воспользовались тем, что сероводород H_2S и метан CH_4 хорошо перемешиваются. Такая смесь (с дополнительной инжекцией H_2) была подвергнута фотохимическому синтезу при высоком давлении (с использованием лазерного излучения) и исследована в интервале давлений от 100 до 300 ГПа. Были получены очень убедительные данные по достаточно узкому сверхпроводящему переходу (из резистивных измерений) с T_c в интервале от 175 до 287 К при изменении давления от 175 до 267 ГПа, которые были подтверждены измерениями диамагнитного отклика (эффекта Мейсснера) при давлениях от 175 до 200 ГПа, а также прямыми (резистивными) измерениями верхнего критического магнитного поля (уменьшения T_c под воздействием внешнего магнитного поля до 9 Тл) вблизи T_c . Эти измерения показали, что изучаемая система представляет собой типичный сверхпроводник II рода, а значение H_{c2} при $T = 0$ могут достигать 62 или 85 Тл (в зависимости от используемой экстраполяции к $T = 0$). К сожалению, авторам пока ещё не удалось точно определить структуру исследованной сверхпроводящей фазы $C-H-S$, что связано с трудностями рентгеновских измерений в системах с лёгкими атомами (малостью сечения рассеяния рентгеновских

лучей). Представляется, что эта задача будет решена в ближайшее время в комбинации прямых экспериментов и современных методов теоретического моделирования устойчивых структур в области высоких давлений [4]. Практически не остаётся сомнений, что и предел $T_c = +15^\circ\text{C}$ может быть превзойдён в ходе будущих экспериментов с гидридами под высоким давлением, а может быть, и в случае экспериментального получения металлического водорода.

2. Гравитационное красное смещение. Эффект гравитационного красного смещения (ГКС) — уменьшение частоты излучения, приходящего от массивного объекта — является одним из классических тестов Общей теории относительности (ОТО). ГКС было измерено на Земле в эксперименте Паунда и Ребки и наблюдалось для Солнца и звёзд — белых карликов. Поправки от ГКС учитываются также в системах спутниковой навигации. Измерение ГКС для Солнца осложнено конвективными движениями плазмы (грануляцией), вызывающими доплеровские сдвиги. Однако в последнее время техника спектральных наблюдений получила новое развитие, что позволило J.I. Gonzalez Hernandez (Канарский институт астрофизики и Университет Ла-Лагуна, Испания) и соавторам выполнить новые наиболее точные измерения эффекта ГКС на Солнце [11]. Наблюдался свет Солнца, отражённый от Луны, в котором суммирован вклад всего солнечного диска. Использовался высокостабильный спектрограф на 3,6-метровом телескопе обсерватории Ла-Силья в Чили. Для его калибровки применялся метод лазерной частотной гребёнки. Измерялась центральная частота и эквивалентная ширина 326 линий поглощения железа. Для интерпретации наблюдений использовалась 3D-модель фотосферы, позволяющая предсказывать профили линий. Наблюдение 15 сильных линий даёт для ГКС величину 639 ± 14 м с⁻¹ с минимумом модельных предположений. А глобальное фитирование 97 линий 3D-моделью даёт 638 ± 6 м с⁻¹. Полученные величины хорошо согласуются с рассчитанным значением $633,1$ м с⁻¹ и тем самым ещё раз подтверждают предсказание ОТО.

3. Квантовая тепловая машина. У микроскопических квантовых систем, рассматриваемых как тепловые машины, имеется возможность квантовой суперпозиции их различных, в том числе противоположных, термодинамических циклов, что невозможно в классическом случае. В экспериментах уже были реализованы квантовые тепловые машины на основе различных систем. К. Оно (Институт физико-химических исследований RIKEN, Япония) и соавторы впервые создали квантовую тепловую машину на основе спинового состояния электрона примеси в туннельном полевым транзисторе [12]. Высокочастотное изменение потенциала затвора вызывало переходы между двумя энергетическими уровнями и создавало их определённую населённость. Также к затвору был приложен модулирующий сигнал, изменяющий расстояние между уровнями. Направление цикла Отто зависело от того, в какой момент происходил переход между уровнями: при минимальном или максимальном расстоянии между ними. Если период модулирующего сигнала был больше времени когерентности системы, то система могла работать либо в режиме тепловой машины с прямым циклом, либо холодильника. Однако если период был меньше времени когерентности, то система могла находиться в суперпозиции этих состояний.

Ю.Н. Ерошенко. Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация
E-mail: erosh@ufn.ru

М.В. Садовский. Институт электрофизики УрО РАН, ул. Амурдсена 106, 620016 Екатеринбург, Российская Федерация
E-mail: sadovskii@ierp.uran.ru

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской 18, 620290 Екатеринбург, Российская Федерация

4. Оптический резонатор на основе левитирующих микрокапель. Сферический оптический резонатор мог бы иметь очень большую добротность за счёт наличия множества вариантов путей обхода и сложения фаз световых волн на сфере. Однако для этого требуется высокое качество сферической поверхности. У твёрдых микросфер, лежащих на плоскости, даже наличие точки опоры приводит к деформации, ухудшающей их оптические свойства. J. Kher-Alden (Израильский технологический институт — Технион) и соавторы в качестве резонатора применяли жидкие капли силиконового масла радиусом 10 мкм, удерживаемые в состоянии левитации оптическим пинцетом [13]. В этом случае капли имеют высокую степень сферичности и качество поверхности. Вблизи капель проходило изогнутое оптоволокно. Через эванесцентное поле осуществлялась связь оптических мод в волокне и в капле без заметного влияния на форму капель. Оптическая точность (optical finesse) данного резонатора превышала $11,6 \times 10^6$ (добротность $1,2 \times 10^9$), т.е. свет мог совершать более 10 млн оборотов внутри капли. В первых левитирующих сферических резонаторах А. Ашкина, созданных в 1970-х годах, эта величина составляла всего ~ 300 . В эксперименте также выполнены измерения вырожденности и плотности состояний оптических мод. Данный резонатор может найти применения в прецизионных физических измерениях и в оптических сенсорах.

5. Квантовые флуктуации вблизи предела Ландауэра. Как было показано в работах Р. Ландауэра, логические операции сопровождаются производством энтропии и диссипацией тепла. Например, при стирании одного бита информации окружению передаётся количество тепла $q \geq k_B T \ln(2)$ (предел Ландауэра), где k_B — постоянная Больцмана, а T — температура. J. Goold (Тринити-колледж, Дублин, Ирландия) и соавторы в своей теоретической работе [14] исследовали рост диссипации вблизи предела Ландауэра за счёт квантовых флуктуаций при необратимом стирании информации. Наличие у системы квантовой когерентности приводит к росту диссипации сверх предела Ландауэра и делает распределение энергетических потерь негауссовым, в отличие от случая тепловых флуктуаций. Ещё одной особенностью квантовых эффектов является диссипация энергии конечными порциями — испускание квантов. Далее авторы применили полученные ими общие принципы к модельной двухуровневой системе. Было получено, что за счёт квантовых флуктуаций диссипация энергии может в 30 раз превосходить предел Ландауэра, тогда как классические эффекты диссипации создают превышение только в 4 раза. Эффект повышенной диссипации может оказаться важным для микроскопических логических ячеек, работающих вблизи предела Ландауэра, так как он может приводить к их повреждению.

6. Нелинейный магнитоэлектрический эффект. У многих кристаллов магнитоэлектрический эффект (появление электрической поляризации под влиянием внешнего магнитного поля) пропорционален первой или второй степени напряжённости магнитного поля. L. Weymann (Венский технический университет, Австрия) и соавторы обнаружили [15], что в лангаситах, допированных атомами гольмия, $\text{Ho}_x\text{La}_{3-x}\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ с $x = 0,043 \pm 0,005$ эффект может иметь четвёртый и шестой порядок. Исследовались монокристаллы при температуре 2 К в магнитном поле 6–14 Тл. Для измерения поляризации применялись серебряные электроды на гранях кристаллов. Измерения показали, что поляризация испытывает четыре периода осцилляций при вращении магнитного поля на угол 2π в кристаллической *ac*-плоскости и шесть периодов при вращении в *ab*-плоскости. Это свидетельствует о зависимости от компонент магнитного поля в четвёртой и шестой степени соответственно. При этом зависимость амплитуды поляризации от величины магнитного поля остаётся линейной. Ранее в кристаллах шестая степень зависимости не наблюдалась. Авторы разработали теоретическую модель, которая в целом хорошо воспроизводит обнаруженные свойства, учитывая взаимовлияние локальной и глобальной симметрий. Обнаруженный эффект открывает новые возможности для управления электрическими свойствами веществ с помощью магнитного поля. В работе прини-

мали участие российские исследователи из МГУ, ИОФАН, МФТИ и Национального исследовательского университета "МИЭТ". О магнитоэлектрических материалах см. в [16, 17].

7. Аномальный магнитар Swift J1818.0-1607. Магнитары представляют собой молодые одиночные нейтронные звёзды с очень сильными магнитными полями и медленным вращением. Их рентгеновское излучение подпитывается диссипацией магнитного поля. Существует ещё один класс нейтронных звёзд с сильными магнитными полями, которые, напротив, излучают в основном за счёт энергии вращения. Предполагалось, что эти нейтронные звёзды с ротационной подпиткой и магнитары относятся к единой популяции объектов, однако промежуточных видов нейтронных звёзд ранее обнаружить не удавалось. Наблюдения рентгеновского источника Swift J1818.0-1607 с помощью телескопа Swift BAT и телескопа NICER, установленного на МКС, показали, что он может быть искомым промежуточным видом [18]. Swift BAT регистрировал жёсткую часть спектра рентгеновской вспышки, типичной для магнитаров, а NICER наблюдал последующую (в течение первых ~ 100 дней) эволюцию спектра в мягкой области. Swift J1818.0-1607 является наиболее быстро вращающимся магнитаром из известных, имея период 1,36 с. Характер замедления и сильные глитчи и антиглитчи (изменения частоты вращения) говорят об относительно молодом возрасте нейтронной звезды. При этом излучение может частично подпитываться вращением, а магнитное поле $2,7 \times 10^{14}$ Гс и светимость $7,9 \times 10^{35}$ эрг с^{-1} имеют промежуточные величины. Наблюдаемое радиоизлучение Swift J1818.0-1607 также относит его к промежуточному типу нейтронных звёзд, так как лишь у немногих магнитаров зарегистрировано радиоизлучение. О магнитосферах пульсаров см. в [19–22]. Весьма вероятно, что магнитары являются источниками быстрых радиовсплесков [23].

Список литературы

1. Drozdov A P, Eremets M I, Troyan I A, Ksenofontov V, Shylin S I *Nature* **525** 73 (2015)
2. Еремец М И, Дроздов А П *УФН* **186** 1257 (2016)
3. Pickard C J, Errea I, Eremets M I *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **11** 57 (2020)
4. Liu H, Naumov I I, Hoffman R, Ashcroft N W, Hemley R J *PNAS* **114** 6990 (2018)
5. Gor'kov L P, Kresin V Z *Rev. Mod. Phys.* **90** 01001 (2018)
6. Drozdov A P et al. *Nature* **569** 528 (2019)
7. Somayazulu M et al. *Phys. Rev. Lett.* **122** 027001 (2019)
8. Гинзбург В Л *УФН* **174** 1240 (2004)
9. Максимов Е Г *УФН* **178** 176 (2008)
10. Snider E et al. *Nature* **586** 373 (2020)
11. Gonzalez Hernandez J I et al. *Astron. Astrophys.*, принята к публикации в 2020 г.; <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038937>
12. Ono K et al. *Phys. Rev. Lett.* **125** 166802 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.166802>
13. Kher-Alden J et al. *Phys. Rev. X* **10** 031049 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.10.031049>
14. Miller H J D et al. *Phys. Rev. Lett.* **125** 160602 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.160602>
15. Weymann L et al. *npj Quantum Materials* **5** 61 (2020); <https://doi.org/10.1038/s41535-020-00263-9>
16. Пятаков А П, Звездин А К *УФН* **182** 593 (2012); Pyatakov A P, Zvezdin A K *Phys. Usp.* **55** 557 (2012)
17. Бухараев А А и др. *УФН* **188** 1288 (2018); Bukharaev A A et al. *Phys. Usp.* **61** 1175 (2018)
18. Hu C-P et al. *Astrophys. J.* **902** 1 (2020); <https://arxiv.org/abs/2009.00231>
19. Бескин В С, Гуревич А В, Истомин Я Н *УФН* **150** 257 (1986); Beskin V S, Gurevich A V, Istomin Ya N *Sov. Phys. Usp.* **29** 946 (1986)
20. Бескин В С, Истомин Я Н, Филиппов А А *УФН* **183** 179 (2013); Beskin V S, Istomin Ya N, Philippov A A *Phys. Usp.* **56** 164 (2013)
21. Бескин В С *УФН* **188** 377 (2018); Beskin V S *Phys. Usp.* **61** 353 (2018)
22. Потехин А Ю *УФН* **180** 1279 (2010); Potekhina A Yu *Phys. Usp.* **53** 1235 (2010)
23. Попов С Б, Постнов К А, Пширков М С *УФН* **188** 1063 (2018); Popov S B, Postnov K A, Pshirkov M S *Phys. Usp.* **61** 965 (2018)