

1. Проверка неравенств Белла для системы джозефсоновских кубитов

Исследователи из Калифорнийского университета в Санта Барбаре подтвердили экспериментально, что неравенства Белла нарушаются в макроскопической системе, состоящей из двух джозефсоновских кубитов (квантовых битов), реализованных на сверхпроводящих джозефсоновских контактах. Ранее нарушение неравенств Белла уже было проверено в различных квантовых процессах, что исключило участие в них "скрытых параметров". В новом эксперименте два джозефсоновских кубита посредством электромагнитного резонатора переводились в запутанное квантовое состояние (см. *УФН* 176 1092 (2006)), а затем были измерены квантовые корреляции между состояниями кубитов. Для данного эксперимента неравенство Белла можно записать в виде $S < 2$, где величина S зависит от состояний кубитов. Измерения показали, что $S = 2,0732 \pm 0,0003$, т.е. неравенство Белла нарушено на уровне 244 стандартных отклонений и, следовательно, состояние кубитов в данном эксперименте не может быть описано классически.

Источник: *Nature* 461 504 (2009)

<http://dx.doi.org/10.1038/nature08363>

2. Незатухающий ток в кольце

J. Harris (Йельский университет, США) и его коллеги впервые измерили величину незатухающего электрического тока в металлическом (несверхпроводящем) кольце. Незатухающий кольцевой ток, существование которого предсказали теоретически M. Buttiker, Y. Imry и R.B. Landauer в 1983 г., является элементом равновесного квантового состояния электронов в кольце. Предсказывалось, что в кольцах микронного размера при температурах $T < 1$ К незатухающий ток достигает величины ~ 1 нА. Внешнее магнитное поле нарушает симметрию относительно обращения времени, что ведёт к выбору одного из направлений тока, а ввиду эффекта Ааронова–Бома ток является периодической функцией $I(\Phi)$ магнитного потока Φ через кольцо. Ранее предпринимались попытки использовать сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы) для регистрации магнитного поля, производимого незатухающим током, однако чувствительности данного метода оказалось недостаточно, в частности, из-за обратного влияния, которое оказывают осцилляции сверхпроводящего тока в СКВИДах на ток в кольце. J. Harris и его коллеги измерили влияние магнитного поля тока на микромеханический зонд-кантилевер, изготовленный из кремния. Алюминиевые кольца были прикреплены к концу зонда, и измерялось смещение резонансной частоты механических колебаний кантилевера за счёт взаимодействия магнитных моментов кольцевых токов с внешним магнитным полем. Колебания кантилевера вызывались пьезомеханическим элементом и наблюдались с помощью лазерного интерферометра. Эта методика обладает примерно на порядок лучшей чувствительностью (~ 20 пА Гц $^{-1/2}$), чем подход с использованием СКВИДов. Результаты измерений как с единичными алюминиевыми кольцами, так и с большим массивом колец, хорошо соответствуют теоретическим предсказаниям. Было выяснено, что осцилляции тока $I(\Phi)$ в различных кольцах массива были некоррелированы по фазам и в первой и во второй гармониках. Регистрация незатухающих токов в микроскопических кольцах может помочь в изучении квантовых фазовых переходов и квантовой когерентности при низких температурах.

Источник: *Science* 326 272 (2009)

<http://dx.doi.org/10.1126/science.1178139>

3. Расщепление куперовских пар

Двумя независимыми группами исследователей созданы эффективные источники электронов в запутанных по спину состояниях (ЭПР-пары), принцип действия которых основан на расщеплении куперовских пар электронов, туннелирующих из сверхпроводника. Ранее задача генерации ЭПР-пар электронов затруднялась тем, что в металлах электроны находятся под поверхностью Ферми, и высвобождение электронов сопровождается разрушением запутанности. В сверхпроводниках основным состоянием является конденсат куперовских пар в спин-синглетном состоянии, и эти пары могут быть выделены из сверхпроводника путём туннелирования. Оставшуюся задачу разделения куперовских пар на отдельные электроны L. Hofstetter и его коллеги из Швейцарии, Венгрии и Дании решили путём использования кулоновского отталкивания электронов, испытывавших туннелирование в две квантовые точки. Квантовые точки возникали в области пересечения нанопроволокой, изгото-

вленной из арсенида индия, центрального сверхпроводника и двух металлических контактов, находящихся в нормальном (несверхпроводящем) состоянии. С помощью управляющих электродов можно регулировать глубину потенциальной ямы квантовых точек так, чтобы через каждую квантовую точку одновременно проходил лишь один электрон. Электроны куперовской пары естественным образом квантово-коррелированы (запутаны) по направлению спина, и эта запутанность электронов сохранялась после расщепления пары. Эксперимент L.G. Herrmann из Франции, Испании и Германии в общих чертах напоминает описанный выше, однако вместо нанопроволоки использовались углеродные нанотрубки. Новые источники ЭПР-пар электронов могут найти важные применения в фундаментальных исследованиях, например, для изучения парадокса Эйнштейна – Подольского – Розена.

Источники: *Nature* 461 960 (2009)

<http://dx.doi.org/10.1038/nature08432>,

<http://arxiv.org/abs/0909.3243v1>

4. Бозе-эйнштейновский конденсат атомов кальция

S. Kraft (Федеральный физико-технический институт, Германия) и его коллеги впервые получили бозе-эйнштейновский конденсат атомов щёлочноземельного металла ^{40}Ca . На начальном этапе эксперимента производилось лазерное охлаждение атомов в магнитооптической ловушке с использованием переходов $^1S_0 - ^1P_1$, $^1S_0 - ^3P_1$ и др. Основной процесс, который ограничивал эффективность охлаждения, — это потери при трёхчастичных взаимодействиях атомов. На заключительном этапе облачко атомов загружалось в оптическую дипольную ловушку и охлаждалось испарительным методом. Переход примерно 2×10^4 атомов в состояние бозе-эйнштейновского конденсата при температуре 170 нК был зарегистрирован по характерному гауссовому профилю плотности. Появление конденсата также подтверждалось большой величиной химического потенциала газа, который был рассчитан на основе измеренных скоростей анизотропного расширения облачка. В атомах ^{40}Ca возможны интеркомбинационные квантовые переходы с очень узкими (шириной всего 370 Гц) спектральными линиями $^1S_0 - ^3P_1$. Поэтому использование бозе-эйнштейновского конденсата атомов ^{40}Ca представляет большие перспективы для сверхточных экспериментов, например для прецизионных измерений гравитационного поля. Кроме того, в основном невырожденном энергетическом состоянии атомы ^{40}Ca не имеют магнитных моментов, и это дополнительно повышает точность измерений за счёт отсутствия взаимодействий с внешними магнитными полями.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* 103 130401 (2009)

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.130401>

5. Магнетизм углерода

Исследователи из Чехии и Нидерландов J. Cervenka, M.I. Katsnelson и C.F.J. Flipse прояснили механизм возникновения ферромагнитных свойств при комнатной температуре у поликристаллического образца графита. Магнетизм различных форм углерода был обнаружен в ряде экспериментов (см., например, *УФН* 174 106 (2004)), однако его происхождение оставалось неизвестным. Высказывались гипотезы, что наблюдавшийся магнетизм углерода обусловлен примесями металлов, либо дефектами в кристаллической структуре. В новом эксперименте для измерений использовались магнитный силовой микроскоп, СКВИД-магнитометр и атомный силовой микроскоп, что позволило одновременно исследовать магнитные и электронные свойства образца с хорошим пространственным разрешением. Полученные микроизображения дают прямые свидетельства того, что магнетизм графита возникает благодаря дефектам в структуре его атомных слоёв, а примеси заметной роли не играют. Вдоль углеродных плоскостей графита сформирована двумерная сеть дефектов, имеющих толщину около 2 нм, которые ограничивают однородные области — зёрна поликристалла. Ферромагнетизм создают неспаренные электроны, локализованные в дефектах на границах зёрен. Магнитный углерод может найти применение в спинтронных устройствах, а также в медицине для создания биологических сенсоров.

Источники: *Nature Physics* 5 840 (2009)

<http://dx.doi.org/10.1038/nphys1399>,

<http://arxiv.org/abs/0910.2130>