

На завершающей стадии получившуюся наноструктуру наращивали сверху слоем кремния, в результате чего все атомы Р оставались фиксированными в заданных положениях с точностью  $\pm 1$  узел решетки ( $\pm 3.8 \text{ \AA}$ ) и защищенными от воздействия окружения. При управляющем напряжении чуть меньше пороговой величины такой транзистор ведет себя как квантовая точка, демонстрируя эффекты кулоновской блокады. Развитую в [1] методику можно также использовать для изготовления квантовых информационных устройств, в которых базисные состояния кубитов формируются спиновыми или зарядовыми состояниями изолированных доноров фосфора. Что же касается транзисторов, то мы подошли к естественному физическому пределу, за которым перестает выполняться закон Мура об экспоненциальном росте плотности элементов на микросхеме.

*1. M.Fuechsle et al., Nature Nanotechn. 7, 242 (2012).*

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Ротонная коллективная мода в двумерной ферми-жидкости

Жидкий  $^3\text{He}$  представляет собой простейшую модельную систему для исследования динамики сильнокоррелированных фермионов. При малых импульсах в этой системе имеются два типа низкоэнергетических элементарных возбуждений: так называемый “нулевой звук” (коллективные колебания плотности) и возбуждения типа частица-дырка. И те, и другие хорошо описываются теорией ферми-жидкости Ландау. В работе [1] (Франция, Финляндия, США, Австрия) при изучении неупругого рассеяния нейтронов на монослое жидкого  $^3\text{He}$  обнаружена еще одна коллективная мода, но уже при больших импульсах, более чем в два раза превышающих импульс Ферми. Эта мода аналогична ротонной моде в бозе-жидкости  $^4\text{He}$ . Для объяснения полученных результатов авторы [1] используют обобщенную для ферми-системы динамическую теорию многих тел, в которой учитывается зависимость межчастичного взаимодействия от энергии. Они обращают внимание на возможную причастность такого рода когерентных возбуждений с большими импульсами к спариванию носителей заряда в высокотемпературных сверхпроводниках.

*1. H.Godfrin et al., Nature 483, 576 (2012).*

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### Новое магнитное состояние в парамагнитной фазе $\text{HoCo}_2$

Редкоземельные интерметаллиды  $\text{ReCo}_2$  известны как класс модельных соединений, в которых обменное взаимодействие между спинами редкой земли и кобальта всегда отрицательно и приводит к их антипараллельной ориентации. В 2007г. в соединении  $\text{ErCo}_2$  в парамагнитной фазе было обнаруже-

но новое магнитное состояние [1], названное авторами этой работы “паримагнетизмом”. Это состояние, в котором моменты ионов Co не имеют дальнего порядка, но их суммарный момент во внешнем поле антипараллелен полю и суммарному моменту ионов Er. Существует это состояние в диапазоне температур выше точки Кюри  $T_C$  и ниже характерной температуры спин-флип перехода  $T_f$ . С целью проверки существования подобного аномального состояния в других соединениях класса  $\text{ReCo}_2$  группа исследователей из Испании, Франции, Германии и США [2] измерила спектры магнитного кругового дихроизма (XMCD) и малоуглового нейтронного рассеяния (SANS) на поликристаллических образцах  $\text{HoCo}_2$ . XMCD измерения выполнены на канале UE46-PGM1 синхротрона BESSY. Исследовались спектры рентгеновского поглощения (XAS) и XMCD на  $L_{2,3}$  краю Co и  $M_5$  краю Ho при температурах  $5\text{K} < T < 350\text{K}$  и магнитном поле  $H = 1\text{T}$  (рис. 1). Температура Кюри  $T_C$  для этого кристалла равна  $76\text{K}$ . Видны изменения знака сигнала XMCD  $\text{Co}L_{2,3}$  и  $\text{Ho}M_5$  выше  $83\text{K}$ , подтверждающие ферримагнитную связь спинов Co и Ho выше точки Кюри.

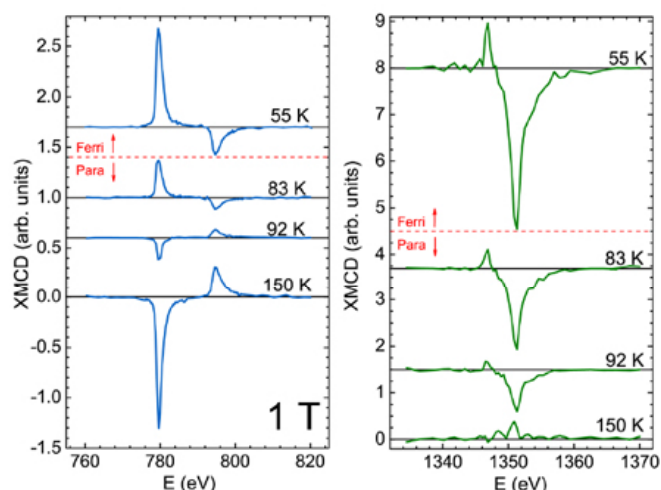


Рис. 1. Спектры XMCD Co  $L_{2,3}$  (слева) и Ho  $M_5$  (справа) при разных температурах в поле 1Т. Пунктирная линия разделяет спектры выше и ниже точки Кюри.

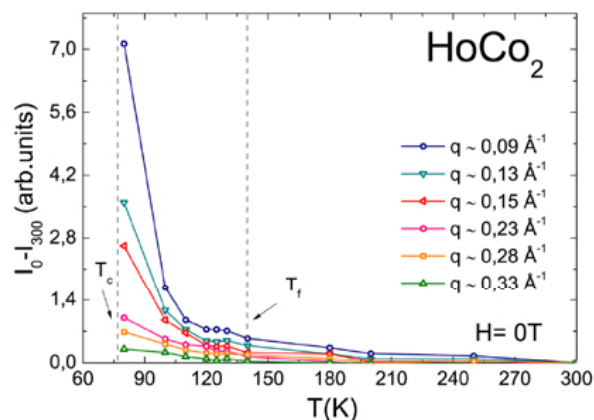


Рис. 2. Температурная зависимость разности интенсивностей нейтронного рассеяния для заданного волнового вектора в нулевом магнитном поле.

Подтверждение близкому магнитному порядку было найдено на основе данных малоуглового рассеяния нейтронов (SANS), полученных на дифрактометре D16 в ILL, Гренобль. На рис. 2 показаны разности магнитной интенсивности рассеяния  $I_0$  при данной температуре  $T$  и  $I_{300}$  при  $T=300\text{K}$  для различных волновых векторов в нулевом магнитном поле. Видна расходимость при установлении дальнего магнитного порядка в точке Кюри  $T_C$  и появление плато ниже температуры спин-флип перехода  $T_f=140\text{K}$ .

Сам по себе факт наличия близкого магнитного порядка выше точки Кюри не удивителен. В данном случае удивителен широкий диапазон температур, в котором имеет место развитый ближний порядок. Например, широкая область ближнего антиферромагнитного порядка в высокотемпературных сверхпроводящих купратах имеет понятную причину в виде квазидвумерности спиновой системы. В рассмотренных выше редкоземельных кобальтатах причина появления "парамагнетизма" неясна, попытки объяснения авторов [2] не выглядят убедительно. Тем не менее, температурная эволюция спектров ХМCD крайне интересна, и в целом обнаруженное явление заслуживает дальнейшего изучения.

С.Овчинников

1. J.Herrero-Albillos et al., Phys. Rev. B 76, 094409 (2007).
2. С.М.Бонилла et al., J. Appl. Phys. 111, 07E315 (2012).

## МАГНИТЫ

### Магнитный изотоп-эффект и влияние магнитного поля на биологические процессы

Синтез молекулярных энергоносителей в живых организмах осуществляется ферментами - молекулярными машинами. Все они работают только в присутствии ионов магния. Но если в ферментах заменить природный магний его чистой изотопной формой  $^{25}\text{Mg}$ , то производство энергоносителей возрастает в 2-3 раза. Это открытие авторов [1-3] послужило основой создания новых медицинских средств против гипоксии и сердечной недостаточности.

Все живые организмы производят молекулярные энергоносители - нуклеозидтрифосфаты. Прекращение этого процесса означает гибель организма. Главный из нуклеозидтрифосфатов - аденозинтрифосфат (АТФ) (рис. 1).

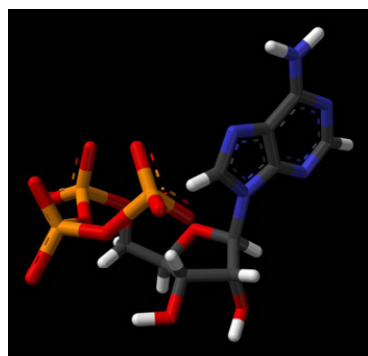


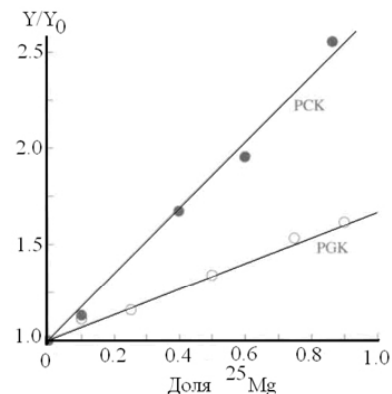
Рис.1. Аденозинтрифосфат (АТФ)

АТФ нужен для мышечного сокращения, переваривания и усвоения пищи, химического превращения (метаболизм) веществ в организме,

синтеза нуклеиновых кислот и белков, проводимости нервных импульсов, синтеза нейромедиаторов, ответственных за память, мышление и эмоции, деления и роста клеток, функционирования иммунной системы, зрения, свёртывания крови и заживления ран, а также для множества других процессов.

Что же происходит при замене изотопов магния? Большинство химических элементов имеют стабильные изотопы, отличающиеся и массой, и магнитными характеристиками атомных ядер. Некоторые изотопы, например,  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{31}\text{P}$ , характеризуются наличием ядерных магнитных моментов, или ядерных спинов, и называются магнитными. Все остальные изотопы немагнитны. Различия атомных масс и магнитных свойств изотопов являются причиной масс-зависимых и магнитно-изотопных эффектов, соответственно. Известно множество масс-зависимых изотопных эффектов, проявляющихся в виде изменения скорости протекания химических реакций. Магнитно-изотопные же эффекты в химии характерны только для радикальных реакций. Они обусловлены, главным образом, влиянием ядерного магнитного момента на спиновую эволюцию радикальных пар (РП), судьба которых (внутриклеточная рекомбинация или внеклеточные реакции) определяется действием спиновых запретов и правил отбора.

Рис. 2. Зависимость относительного выхода АТФ от доли изотопа  $^{25}\text{Mg}$  для креатинкиназы (РСК) и фосфоглицераккиназы (РГК).



Наблюдаемый авторами [1-3] ядерно-магнитный изотопный эффект - прямое доказательство того, что механизм реакции включает образование и превращение парамагнитных частиц - радикалов или ион-радикалов, каждый из которых несёт одиночный (неспаренный) электрон, носитель парамагнетизма. Магнитный изотоп-эффект с участием магния означает, что синтез АТФ является ион-радикальной реакцией, первая стадия которой - перенос электрона от аниона фосфатной группы АДФ к иону  $\text{Mg}^{2+}$ ; при этом рождается пара радикалов - парамагнитный катион  $\text{Mg}^+$  и фосфатный радикал. В такой паре есть два состояния - синглетное, когда угловые моменты неспаренных электронов вычитаются (компенсируются), и триплетное, когда угловые моменты складываются. Эти два состояния создают два канала фосфорилирования - синглетный и триплетный. Фундаментальная роль иона  $^{25}\text{Mg}^+$  состоит в том, что магнитный момент ядра  $^{25}\text{Mg}$  изменяет электронный угловой момент и стимулирует триплетный канал фосфорили-