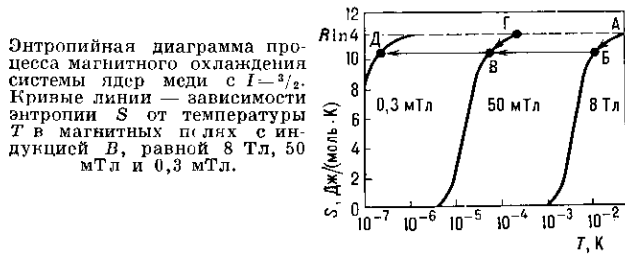


Для примера рассмотрим процесс ядерного размагничивания меди. Существует два стабильных изотопа меди: ^{63}Cu (69,04%) и ^{65}Cu (30,96%). Оба изотопа имеют ядерный спин $I=3/2$, величина *g*-фактора меди с учётом вклада изотопов $g_n=1,5$. При темп-рах $T \leq 10^{-2}$ К энтропия *S* меди определяется ориентац. степенями свободы ядерных магн. моментов, т. к. электронные и фононные степени свободы при столь низких темп-рах практически отсутствуют («вымерзли»). Энтропия моля меди описывается ф-лой

$$S = R \ln(2I+1) - \Lambda (B^2 + b^2)/(2\mu_0 T^2),$$

где $\Lambda = N_A I(I+1) \mu_0 \mu_{\text{яд}}^2 g_n^2 / 3k = 4,0 \cdot 10^{-12}$ К·м³/моль — молярная ядерная константа Кюри, $\mu_{\text{яд}} = 5,05 \times 10^{-27}$ А·м² — ядерный магнетон, μ_0 — магнитная постоянная, *R* — газовая постоянная, N_A — Авогадро постоянная, *B* — внеш. магн. поле, *b* — эффективное поле, наводимое на ядре меди соседними ядрами. Температурные зависимости энтропии меди, помещённой в различные внеш. магн. поля, показаны на рис.

Процесс ядерного размагничивания меди осуществляют поэтапно. Первоначально медь охлаждают в силь-



ном магн. поле (до точки Б на рис.). При этом внеш. холодильник, к-рым обычно является криостат растворения, отводит от меди тепло. Затем проводят процесс адиабатич. размагничивания (Б—В на рис.), к-рый идёт с сохранением энтропии меди. Скорость этого процесса обычно выбирается такой, чтобы тепловые потери за счёт токов Фуко были пренебрежимо малы. Конечная темп-ра T_k подсистемы ядер меди определяется значениями начального и конечного полей размагничивания (B_n и B_k) и без учёта тепловых потерь во время размагничивания равна

$$T_k = T_n \sqrt{(B_k^2 + b^2)/(B_n^2 + b^2)}.$$

Ядерная теплоёмкость *C* меди после размагничивания также зависит от величины конечного поля

$$C = 2\Lambda \cdot (B_k^2 + b^2)/(2\mu_0 T_k^2).$$

После размагничивания подсистема ядер может быть использована в качестве хладагента для охлаждения других систем (процесс ВГ), а затем медь снова намагничивают (процесс ГА). На рис. проиллюстрирован также эксперимент по глубокому охлаждению ядер меди (Б—Д), в к-ром удаётся получить темп-ру ядер ~ 10 нК.

Практич. применение метода М. о. ограничено относительно плохим контактом магн. подсистемы с др. подсистемами вещества. В результате при охлаждении подсистемы ядер меди до $T \sim 10^{-7}$ К электроны проводимости остаются охлаждёнными лишь до $T \sim 10^{-5}$ К, а жидкий гелий удаётся охладить только до $\sim 10^{-4}$ К (из-за *Капицы скачка температуры*). С др. стороны, количество теплоты, к-рое может поглотить система ядерных спинов, тем меньше, чем ниже темп-ра. Поэтому при использовании ядерного размагничивания в качестве метода охлаждения темп-ру подсистемы ядер обычно поддерживают близкой к темп-ре охлаждаемых образцов.

Одной из разновидностей метода М. о. является т. н. метод охлаждения ядер во вращаю-

щейся системе координат. Метод эффективен, когда тепловой контакт подсистемы ядер (спиновой ядерной системы) с др. подсистемами вещества пренебрежимо мал. В этом методе на спиновую систему непрерывно воздействуют радиочастотным полем, к-рое можно рассматривать как стационарное, если для спинов ввести вращающуюся с частотой поля систему координат. При переходе во вращающуюся систему координат к внеш. магн. полю *B* необходимо добавить эффективное поле $\sim \omega/\gamma$ (ω — частота, γ — магнитомеханическое отношение). Поэтому, изменяя частоту радиочастотного поля ω , удаётся изменять эффективное поле и проводить процесс ядерного размагничивания. С использованием этого метода удалось охладить систему ядер фтора до $T \sim 10^{-6}$ К и наблюдать процесс магн. уорядочения этих ядер.

Лит.: Гольдман М., Спиновая температура и ЯМР в твердых телах, пер. с англ., М., 1972; Лоунасмала О. В., Принципы и методы получения температуры ниже 1 К, пер. с англ., М., 1977. Ю. М. Бумько.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ — силовое поле, действующее на движущиеся (в системе, в к-рой рассматривается поле) электрич. заряды (токи) и на тела, обладающие магнитным моментом. Вместе с электр. полем образует единое электромагнитное поле. Термин «М. п.» введён в 1845 М. Фарадеем (М. Faraday).

Согласно Максвелла уравнениям, источниками М. п. являются электр. токи, магн. моменты и переменные электр. поля (о природе источников М. п. в разл. средах см. в ст. *Магнетизм, Магнетизм микрочастиц*). М. п. в среде обычно характеризуется двумя аксиальными векторами: магнитной индукцией *B* и напряжённостью магнитного поля *H*. Эти векторы не независимы, а связаны между собой т. н. материальным ур-нием $B = B(H)$, различным для различных сред. О более общей зависимости $B = B(H, T, p, \dots)$ (*T* — темп-ра, *p* — давление, ...) говорят как о магн. ур-нии состояния вещества. В вакууме $B = H$ (в СГС) или $B = \mu_0 H$ (в СИ), где μ_0 — магнитная постоянная. Различие между векторами *B* и *H* в среде связано с наличием в ней микроскопич. магн. моментов. В СИ

$$B = \mu_0 (H + M), \quad (1)$$

где вектор *M* равен магн. моменту единицы объёма и наз. вектором намагниченности. В большинстве неферромагн. сред намагниченность (по крайней мере в слабых полях) пропорциональна напряжённости М. п.:

$$M = \chi H. \quad (2)$$

Коэф. χ наз. магнитной восприимчивостью. С учётом (2) ур-ние (1) можно записать в виде:

$$B = \mu_0 \mu H, \quad \mu = 1 + \chi,$$

где коэф. μ наз. магнитной проницаемостью. В переменных полях величины μ и χ зависят от частоты и волнового вектора (т. н. временная и пространств. дисперсии, см. *Диспергирующая среда*). Плотность энергии *w* макроскопич. статич. М. п. в среде можно записать в виде:

$$w = \int H dB \quad (\text{СИ}).$$

В общем случае пределы интегрирования являются ф-цией *H* и значение *w* зависит от вида связи между *B* и *H*. Для вакуума, пара- и диамагн. сред, т. е. в случае линейной связи между *B* и *H*, $w = HB/2$. Это справедливо и для переменного М. п. в случае стационарной линейной среды и в отсутствие дисперсии (об энергии переменного М. п. в диспергирующих средах см. в ст. *Энергия электромагнитного поля*).

К осн. физ. проявлениям М. п. относятся магн. часть Лоренца силы

$$f = q[vB] \quad (\text{СИ})$$

(*q*, *v* — заряд и скорость частицы), сила, действующая на магн. момент *m* и соответствующая потенци-