Письма в ЖЭТФ, том 124, вып. 6, с. 460 – 465 © 2026 г. 25 сентября

Околокритическое поведение теплоемкости при переходах в антиферромагнитное состояние в гексаборидах $R\mathrm{B}_6$ (R – Nd, Gd и Tb)

Н. Е. Случанко[+1)], *А. Н. Азаревич*[+], *А. В. Богач*[+], *А. В. Шестаков*[+], *С. Ю. Гаврилкин*[*+], *А. Ю. Цветков*[*], *В. В. Воронов*[+], *С. Габани*[×], *К. Флахбарт*[×2)], *В. Н. Рыжов*[°], *В. В. Бражкин*[°]

[+] *Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

[*] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[×] *Institute of Experimental Physics of the Slovak Academy of Sciences, SK-04001 Košice, Slovakia*

[°] *Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, 142190 Троицк, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 24 июля 2026 г.
После переработки 5 августа 2026 г.
Принята к публикации 11 августа 2026 г.

Выполнены прецизионные измерения теплоемкости C_p в магнитном поле до 90 кЭ в окрестности температуры Нееля T_N в гексаборидах $\mathrm{NdB_6}$, $\mathrm{GdB_6}$ и $\mathrm{TbB_6}$ с ян-теллеровской структурной неустойчивостью, изучено критическое поведение $C_p(T)$. Установлено, что фазовое превращение в этих $R\mathrm{B}_6$ относится к классу "слабых" фазовых переходов 1-го рода, близких к фазовым переходам 2-го рода, с малой величиной скачка ΔC_p в $\mathrm{GdB_6}$, причем поведение $C_p(T)$ в широкой окрестности T_N хорошо описывается критическими индексами γ_i ($i =$ AF и P), характерными для λ-аномалии. Для $\mathrm{NdB_6}$ и $\mathrm{GdB_6}$ γ_{AF} и γ_{P} принимают значения $-(1 \div 1.4)$, найденные в различных моделях для "чистых" фазовых переходов 2-го рода. В сильных полях до 90 кЭ критические показатели заметно отклоняются от модельных значений. Для $\mathrm{TbB_6}$ получены γ_{AF}, $\gamma_{\mathrm{P}} \sim -2$, указывающие на более ярко выраженную "первородность" перехода.

DOI: 10.7868/S3034576626090180

1. Интерес к редкоземельным (РЗ) гексаборидам обусловлен большим разнообразием экзотических основных состояний, реализующихся в $R\mathrm{B}_6$ при низких температурах. Среди них антиферромагнитный (AF) металл с тяжелыми фермионами $\mathrm{CeB_6}$, так называемый топологический Кондо-изолятор $\mathrm{SmB_6}$, ферромагнитный полуметалл $\mathrm{EuB_6}$ и металлы $R\mathrm{B}_6$ (R – Pr, Nd, Gd, Tb, Dy и Ho) с необычным AF основным состоянием (см., например, [1]). Принято считать, что в семействе РЗ гексаборидов с простой кубической кристаллической структурой (i) стабильные октаэдры B6 играют роль анионов и (ii) необычный AF порядок с общим для $R\mathrm{B}_6$ волновым вектором $\mathbf{q}_{\mathrm{M}} = (1/4, 1/4, 1/2)$ объясняется наличием квадрупольных взаимодействий [1, 2]. При этом аналогичные AF основные состояния были обнаружены как для магнитной решетки Кондо $\mathrm{CeB_6}$ [1, 2–4], так и для $\mathrm{PrB_6}$ в соизмеримой AF фазе [5–7], а также для $\mathrm{GdB_6}$ [8–13], $\mathrm{TbB_6}$ [13–15], $\mathrm{DyB_6}$ [16, 17] и $\mathrm{HoB_6}$ [18]. Считается, что в этих AF металлах сложные магнитные структуры обусловлены квадрупольными (мультипольными) взаимодействиями, однако это неверно, по крайней мере, в случае $\mathrm{GdB_6}$, где наполовину заполненная $4f$-оболочка иона $\mathrm{Gd^{3+}}$ имеет лишь спиновые степени свободы (конфигурация $4f^7$, $L = 0$).

Аргументы, свидетельствующие о колебаниях тяжелых РЗ ионов большой амплитуды и о развитии структурной неустойчивости, были получены для $\mathrm{GdB_6}$ [19, 20], $\mathrm{TbB_6}$ [21] и $\mathrm{DyB_6}$ [22]. В [19–22] было установлено, что квазилокальные колебания РЗ ионов, слабо связанных с жестким борным каркасом в $R\mathrm{B}_6$, отвечают энергиям в диапазоне $5 \div 10$ мэВ. В качестве механизма, ответственного за колебания РЗ ионов, на основании результатов прецизионных измерений рентгеновской дифракции $\mathrm{GdB_6}$ [23], $\mathrm{LaB_6}$ [24, 25] и $\mathrm{CeB_6}$ [25–27] было предложено развитие кооперативной ян-теллеровской (ЯТ) неустойчивости борной подрешетки. В экспериментах [23–27] были обнаружены статические ЯТ-искажения и динамические зарядовые страйпы вдоль нескольких направлений [100] и [110] в кубической решетке $R\mathrm{B}_6$,

[1)] e-mail: nes@lt.gpi.ru
[2)] K. Flachbart.

сопровождающиеся образованием колебательно связанных пар РЗ ионов в направлении страйпов.

Очевидно, ЯТ структурная неустойчивость в RB_6 оказывает влияние на характер магнитных фазовых переходов и особенности критического поведения в этих AF металлах. Известно, что все эти превращения являются "слабыми" переходами 1-го рода с малой величиной гистерезиса, слабыми структурными искажениями и малыми тепловыми эффектами [9–18]. В то же время, для этих превращений наблюдается гигантский рост теплоемкости вблизи точки перехода [8, 23], характерный для лямбда-аномалий при фазовых переходах 2-го рода. Поскольку детальных исследований поведения теплоемкости в окрестности данных превращений ранее не проводилось, целью настоящей работы является изучение специфики фазовых переходов в AF состояние в металлах RB_6 (R – Nd, Gd и Tb) с помощью прецизионных измерений теплоемкости $C_p(T, H_0)$ в магнитном поле до 90 кЭ с выяснением особенностей критического поведения в неелевской и парамагнитной фазах исследуемых гексаборидов.

2. Монокристаллические образцы RB_6 (R – Nd, Gd и Tb) были выращены методом бестигельной индукционной зонной плавки в атмосфере аргона [28]. Измерения теплоемкости $C_p(T, H_0)$ и намагниченности $M(T, H_0 = 100\,\text{Э})$ выполнены на установках PPMS и MPMS (Quantum Design) в ЦКП ФИАН и Центре совершенства Словацкой академии наук. Полученные данные, характеризующие исследуемые кристаллы RB_6 в широкой окрестности перехода антиферромагнетик–парамагнетик (AF–P), представлены на рис. 1. В узкой окрестности AF–P переходов измерения теплоемкости RB_6 проводились рекомендованным компанией Quantum Design single-slope релаксационным методом, при этом кривая релаксации нагрева–охлаждения записывается непрерывно в ходе одного теплового импульса без фиксации температуры образца в конкретных экспериментальных точках, тогда как точность измерения температуры определяется выбором параметров импульса и характеристиками регистрирующего устройства [29].

3. На рисунке 2a–c и рис. 3a–c более детально представлены температурные зависимости теплоемкости $C_p(T, H_0)$ в узкой окрестности AF–P переходов, измеренные в магнитном поле до 90 кЭ single-slope релаксационным методом в режимах нагрева и охлаждения для соединений NdB_6, GdB_6 и TbB_6, соответственно.

Как видно из рис. 2, 3, в ряду NdB_6–GdB_6–TbB_6 амплитуда λ-аномалий при $T_N^* C_{p,\max}$ значительно

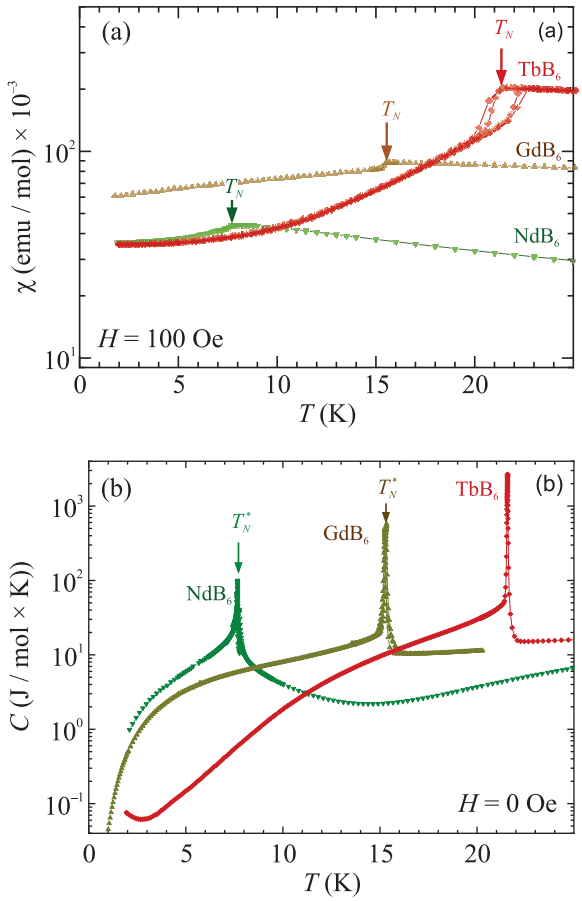

Рис. 1. (Цветной онлайн) Температурные зависимости: (a) – магнитной восприимчивости χ в поле $H = 100\,\text{Э}$ и (b) – теплоемкости C_p гексаборидов NdB_6, GdB_6 и TbB_6. T_N и T_N^* – температуры магнитных фазовых переходов (см. текст)

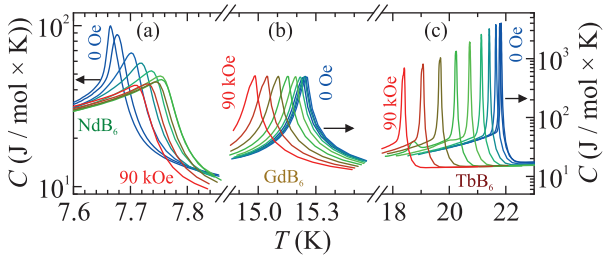

Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимости теплоемкости от температуры при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля для соединений NdB_6 (a), GdB_6 (b) and TbB_6 (c)

возрастает, тогда как величина скачка теплоемкости между симметричной (P) и несимметричной (AF) фазами $\Delta C = C_p - C_{p0}$ (см. обозначения на рис. 3a–c) немонотонно изменяется в ряду NdB_6–GdB_6–TbB_6 (рис. 4c). Для исследованных в работе гексаборидов RB_6 температура T_N^*, отвечающая положению пика

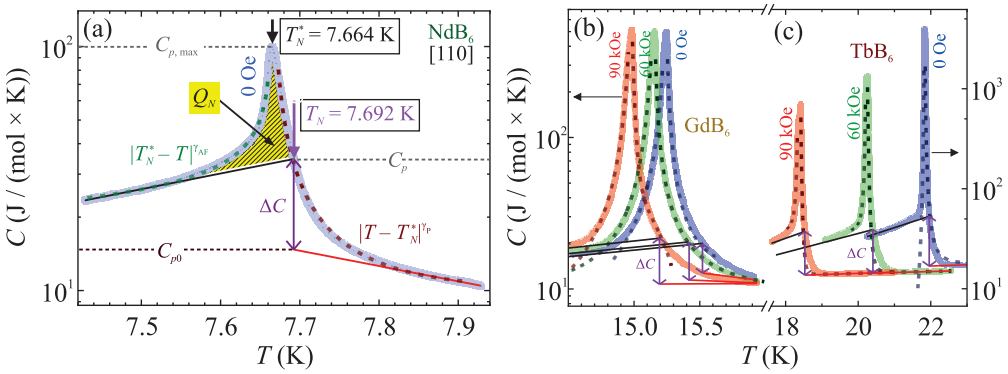

Рис. 3. (Цветной онлайн) Температурные кривые теплоемкости $C_p(T)$ в окрестности AF–P переходов для соединений NdB_6 ($H = 0$) (a), GdB_6 (b) и TbB_6 (c) для $H = 0$, 60 и 90 кЭ. Для примера показаны аппроксимация $C_P \sim (T - T_N^*)_i^\gamma$ (i – AF, P) в AF и P фазах в непосредственной окрестности T_N, определение параметров C_{p0} и $C_{p,\max}$, величины скачка ΔC и теплоты перехода Q_N

лямбда-аномалии, отличается от реальной температуры Нееля T_N, найденной (i) по положению скачка теплоемкости (рис. 3a–c) и (ii) особенностей на магнитных кривых (см. рис. 1a). Амплитуда скачка ΔC является важной характеристикой фазового перехода 2-го рода и может быть использована для оценки параметров в разложении термодинамического потенциала [30]. Одним из самых важных результатов работы является тот факт, что температурная зависимость теплоемкости прекрасно описывается в рамках критического поведения $C_p \sim (T - T_N^*)_i^\gamma$ (i – AF и P) по обе стороны перехода. Соответствующие значения показателей степени $\gamma_{AF}(H)$ и $\gamma_P(H)$, представлены на рис. 4a. Изменение скачка энтропии на атом $\Delta S/k_B = Q_N/(7T_N^* R)$, где k_B – постоянная Больцмана, Q_N – теплота перехода, R – газовая постоянная) и приведенной величины скачка теплоемкости $\Delta C/C_{p0}$ в магнитном поле до 90 кЭ для NdB_6, GdB_6 и TbB_6 показано на рис. 4b и c соответственно.

Как отмечалось выше, фазовые превращения AF–P в соединениях NdB_6, GdB_6 and TbB_6 относятся к классу “слабых” фазовых переходов 1-го рода, близких по поведению теплоемкости к фазовым переходам 2-го рода. Критическое поведение в окрестности T_N для теплоемкости при постоянном давлении при “настоящем” фазовом переходе 2-го рода должно характеризоваться тем же индексом γ, что и для изотермической сжимаемости и коэффициента теплового расширения [30]. Как видно из рис. 4a, эффективные критические показатели γ_{AF} и γ_P в NdB_6 и GdB_6, найденные в интервалах температур ниже и выше AF–P перехода, оказываются близкими к значениям $-(1.2 \div 1.4)$, типичным для фазовых переходов 2-го рода, полученным в моделях Изинга, $x - y$ и Гейзенберга [30]. С ростом магнитного поля наблюдается заметное уменьшение параметра

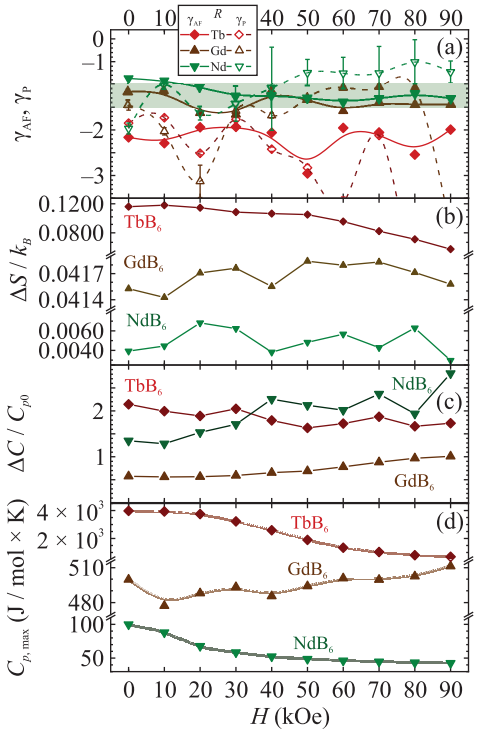

Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимости от магнитного поля: (a) – критических индексов γ_{AF} и γ_P для интервала температур ниже и выше AF–P перехода, соответственно, (b) – величины скачка энтропии на атом $\Delta S/k_B = Q_N/(7T_N \cdot R)$, (c) – скачка теплоемкости $\Delta C/C_{p0}$ и (d) – амплитуды λ-аномалии $C_{p,\max}$ при AF-переходе для соединений NdB_6, GdB_6 и TbB_6. Зеленой полосой на панели (a) показана область критических индексов, полученных в моделях Изинга, Гейзенберга и $x - y$ модели [30]

γ_P для NdB_6, что, по-видимому, связано с особенностями магнитной фазовой диаграммы и требует проведения дополнительных исследований. Полученные для TbB_6 значения индексов γ_{AF}, $\gamma_P \sim -2$, на наш

взгляд, свидетельствуют о существенных тепловых эффектах при переходе 1-го рода в этом соединении. Также не исключено, что критический показатель в этом случае связан с возможной квазидвумерностью электронной и спиновой плотности. Обнаруженный в работе резкий рост теплопоглощения Q_N при AF переходе в ряду NdB_6, GdB_6 и TbB_6 (см. рис. 4b), и наблюдаемое для TbB_6 резкое уменьшение магнитной восприимчивости в окрестности T_N подтверждают усиление эффектов "первородности" на AF-P переходе. Действительно, в отличие от фазового перехода 2-го рода, переход 1-го рода сопровождается тепловыделением/теплопоглощением, и, следовательно, рост амплитуды скачка энтропии на атом $\Delta S/k_B$ при движении вдоль ряда NdB_6–GdB_6–TbB_6 подтверждает усиление эффектов "первородности" на AF–P переходе. Отметим также, что величина скачка теплоемкости $\Delta C/C_{p0}$ для соединений NdB_6 и TbB_6 с ростом напряженности внешнего магнитного поля варьируется в пределах $1.4 \div 2.7$, тогда как для GdB_6 $\Delta C/C_{p0}$ принимает значения меньше единицы (рис. 4c).

Заметим, что тепловые эффекты и связанные с ними скачки энтропии в исследованных нами RB_6 очень малы, тогда как для "обычных" фазовых переходов 1-го рода в кристаллах характерные величины $\Delta S/k_B$ находятся в интервале $0.5 \div 2$. Для слабых переходов 1-го рода $\Delta S/k_B$ обычно принимает значения $0.1 \div 0.2$. В результате лишь скачок энтропии для TbB_6 имеет заметную величину ~ 0.12, для GdB_6 $\Delta S/k_B \sim 0.03$, тогда как оценки $\Delta S/k_B < 0.007$ для NdB_6 дают значения, близкие к ошибке измерений.

4. Суммируя вышеизложенное, в исследованных гексаборидах NdB_6, GdB_6 and TbB_6 наблюдается сложное околокритическое поведение теплоемкости в окрестности AF переходов. На первый взгляд, представляется удивительным, что эффективные критические показатели, описывающие рост теплоемкости вблизи T_N, почти постоянны в широкой области температур по обе стороны перехода. Этот факт, так же, как и "правильный" знак скачка теплоемкости и его величина, "роднят" изученные AF превращения с фазовыми переходами 2-го рода. Более того, для NdB_6 и GdB_6 эффективные критические индексы близки к модельным теоретическим значениям. Заметим, что "чистые" фазовые переходы 2-го рода в магнетиках могут иметь место только в модельных системах магнитных моментов. В реальных кристаллах всегда есть связь магнитных и решеточных степеней свободы, и, строго говоря, "чистые" фазовые переходы 2-го рода в кристаллах не реализуются, например, вследствие эффекта магнитострикции. Однако во многих случаях связь магнитной и атомной подсистем с точки зрения эксперимента оказывается пренебрежимо малой. Исследованные нами бориды относятся к промежуточному классу веществ: магнитная и решеточная подсистемы в них довольно сильно связаны вследствие ЯТ структурной неустойчивости борной подрешетки. В результате AF превращение, которое в обеих фазах вдали от T_N начинается как классический переход 2-го рода с гигантской лямбда-аномалией теплоемкости, в ближайшей окрестности точки перехода (сотые доли градуса) сменяется на фазовый переход 1-го рода с небольшим скачком энтропии. Отметим в заключении, что согласно теории Ларкина–Пикина [31], взаимодействие критических флуктуаций с упругими деформациями кристаллической решетки способно изменить характер фазового перехода, превращая непрерывный переход 2-го рода в слабый переход 1-го рода при сохранении выраженной λ-подобной аномалии теплоемкости. Такое поведение согласуется с наблюдаемой в настоящей работе формой кривой теплоемкости вблизи T_N. Аналогичные результаты были получены ранее при исследованиях магнитного превращения в MnSi [32], которое изначально рассматривалось, как фазовый переход 2-го рода, однако выполненные в [32] прецизионные измерения обнаружили наличие чрезвычайно малого скачка объема $\sim 5 \times 10^{-4}\,\%$. Таким образом, изученные в работе магнетики представляют примеры превращений, в которых одновременно может наблюдаться критическое поведение, характерное для переходов 2-го рода, и экспериментально измеряемые скачки энтропии и объема, присущие переходам 1-го рода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект # 26-12-00258) с использованием оборудования Центра коллективного пользования Физического института им. Лебедева Российской академии наук и Центра Совершенства Словацкой академии наук. Авторы признательны А. К. Муртазаеву за многочисленные полезные дискуссии.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект # 26-12-00258) с использованием оборудования Центра коллективного пользования Физического института им. Лебедева Российской академии наук и Центра Совершенства Словацкой академии наук. С. Габани и К. Флахбарт благодарны Словацкому агентству исследований и разработок за поддержку в рамках контрактов # APVV-23-0226 и # VEGA 2/0034/24.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. P. Thalmeier, A. Akbari, and R. Shiina, *Multipolar Order and Excitations in Rare-Earth Boride Kondo Systems*, in *Rare-Earth Borides*, ed. by D. S. Inosov (Jenny Stanford Publishing, Singapore, 2021), ch. 8, p. 615; DOI: 10.1201/9781003146483-8.
2. A. S. Cameron, G. Friemel, and D. S. Inosov, "Multipolar phases and magnetically hidden order: review of the heavy–fermion compound $Ce_{1-x}La_xB_6$", Rep. Prog. Phys. **79**, 66502 (2016); DOI: 10.1088/0034-4885/79/6/066502.
3. J. Effantin, J. Rossat-Mignod, P. Burlet, H. Bartholin, S. Kunii, and T. Kasuya, "Magnetic phase diagram of CeB_6", J. Magn. Magn. Mater. **47–48**, 145 (1985); DOI: 10.1016/0304-8853(85)90382-8.
4. O. Zaharko, P. Fischer, A. Schenck, S. Kunii, P.-J. Brown, F. Tasset, and T. Hansen, "Zero-field magnetic structure in CeB_6 reinvestigated by neutron diffraction and muon spin relaxation", Phys. Rev. B **68**, 214401 (2003); DOI: 10.1103/PhysRevB.68.214401.
5. C. M. McCarthy, C. W. Tompson, R. J. Graves, H. W. White, Z. Fisk, and H. R. Ott, "Low temperature phase transitions and magnetic structure of PrB_6", Solid State Commun. **36**, 861 (1980); DOI: 10.1016/0038-1098(80)90129-5.
6. P. Burlet, J. M. Effantin, J. Rossat-Mignod, S. Kunii, and T. Kasuya, "Neutron scattering investigations of magnetic structures and multipole interactions in rare-earth hexaborides like $Ce_xNd_{1-x}B_6$", J. Phys. (Paris) Colloq. **49**, C8-459 (1988); DOI: 10.1051/jphyscol:19888211.
7. H. C. Walker, K. A. McEwen, D. F. McMorrow, M. Bleckmann, J.-G. Park, S. Lee, F. Iga, and D. Mannix, "X-ray resonant scattering study of the structural and magnetic transitions in PrB_6", Phys. Rev. B **79**, 054402 (2009); DOI: 10.1103/PhysRevB.79.054402.
8. S. Kunii, K. Takahashi, and K. Iwashita, "Phonons and Specific Heat Analysis in Rare-Earth Hexaborides", J. Solid St. Chem. **154**, 275 (2000); DOI: 10.1006/jssc.2000.8849.
9. K. Kuwahara, S. Sugiyama, K. Iwasa, M. Kohgi, M. Nakamura, Y. Inamura, M. Arai, and S. Kunii, "EXCED – Epithermal neutron diffractometer at KENS", Appl. Phys. A **74**, S302 (2002); DOI: 10.1007/s003390201399.
10. D. F. McMorrow, K. A. McEwen, J.-G. Park, S. Lee, D. Mannix, F. Iga, and T. Takabatake, "Coupling of lattice and spin degrees of freedom in GdB_6", Physica B **345**, 66 (2004); DOI: 10.1016/j.physb.2003.11.022.
11. K. Kuwahara, R. Yamamoto, M. Kohgi, H. Nakao, K. Ishii, K. Iwasa, Y. Murakami, S. Kunii, H. Sagayama, Y. Wakabayashi, and H. Sawa, "Anisotropy of the charge transport in GdB_6?", Physica B **359–361**, 965 (2005); DOI: 10.1016/j.physb.2005.01.278.
12. M. Amara, S. E. Luca, R.-M. Galera, F. Givord, C. Detlefs, and S. Kunii, "Exchange-displacement waves in GdB_6", Phys. Rev. B **72**, 064447 (2005); DOI: 10.1103/PhysRevB.72.064447.
13. S. E. Luca, M. Amara, R. M. Gallera, F. Givord, S. Granovsky, O. Isnard, and B. Beneu, "Neutron diffraction studies on GdB_6 and TbB_6 powders", Physica B **350**, e39 (2004); DOI: 10.1016/j.physb.2004.03.009.
14. M. Amara, R.-M. Galéra, I. Aviani, and F. Givord, "Macroscopic and microscopic investigation of the antiferromagnetic phase of TbB_6", Phys. Rev. B **82**, 224411 (2010); DOI: 10.1103/PhysRevB.82.224411.
15. K. Iwasa, F. Iga, T. Moyoshi, A. Nakao, and T. Ohhara, "Magnetic-Ordering Propagation Vectors of Terbium Hexaboride Revisited", J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 064705 (2018); DOI: 10.7566/JPSJ.87.064705.
16. K. Takahashi, H. Nojiri, K. Ohoyama, M. Ohashi, Y. Yamaguchi, M. Motokawa, and S. Kunii, "Neutron-scattering study of DyB_6", J. Magn. Magn. Mater. **177–181**, 1097 (1998); DOI: 10.1016/S0304-8853(97)00968-2.
17. K. Iwasa, M. Amano, H. Nakao, and Y. Murakami, "Structural Modulation of the Cage Lattice System DyB_6", JPS Conf. Proc. **3**, 016026 (2014); DOI: 10.7566/JPSCP.3.016026.
18. T. Yamaguchi, M. Akatsu, Y. Nakano, T. Washizawa, Y. Nemoto, T. Goto, A. Dönni, S. Nakamura, and S. Kunii, "Thermal expansion and ultrasonic measurements of ferroquadrupole ordering in HoB_6", Physica B: Condensed Matter **329–333** (Part 2), 622 (2003); DOI: 10.1016/S0921-4526(02)02524-3.
19. K. Iwasa, R. Igarashi, K. Saito, C. Laulhe, T. Orihara, S. Kunii, K. Kuwahara, H. Nakao, Y. Murakami, F. Iga, M. Sera, S. Tsutsui, H. Uchiyama, and A. Q. R. Baron, "Motion of the guest ion as precursor to the first-order phase transition in the cage system GdB_6", Phys. Rev. B **84**, 214308 (2011); DOI: 10.1103/PhysRevB.84.214308.
20. K. Iwasa, R. Igarashi, K. Saito, C. Laulhe, T. Orihara, S. Kunii, K. Kuwahara, H. Nakao, Y. Murakami, F. Iga, M. Sera, S. Tsutsui, H. Uchiyama, and A. Q. R. Baron, "Softening of the Longitudinal Phonon Mode along the [100] Direction in GdB_6", Chin. J. Phys. (Taiwan) **49**, 231 (2011); https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/05779073-201102-201104150033-201104150033-231-238.
21. K. Iwasa, F. Iga, A. Yonemoto, Y. Otomo, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, "Universality of anharmonic motion of heavy rare-earth atoms in hexaborides", J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 094604 (2014); DOI: 10.7566/JPSJ.83.094604.
22. K. Iwasa, K. Kuwahara, Y. Utsumi, K. Saito, H. Kobayashi, T. Sato, M. Amano, T. Hasegawa,

N. Ogita, M. Udagawa, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, "Renormalized Motion of Dysprosium Atoms Filling Boron Cages of DyB_6", J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 113601 (2012); DOI: 10.1143/JPSJ.81.113601.

23. A. P. Dudka, O. N. Khrykina, N. B. Bolotina, N. Yu. Shitsevalova, V. B. Filipov, M. A. Anisimov, S. Gabani, K. Flachbart, and N. E. Sluchanko, "Quantum diffusion regime of charge transport in GdB_6 caused by electron and lattice instability", Phys. Rev. B **100**, 205103 (2019); DOI: 10.1103/PhysRevB.100.205103.
24. А. Н. Азаревич, А. В. Богач, О. Н. Хрыкина, Н. Б. Болотина, В. М. Гридчина, Н. Ю. Шицевалова, С. Ю. Гаврилкин, А. Ю. Цветков, С. Габани, К. Флахбарт, А. В. Кузнецов, Н. Е. Случанко, "Локализованная сверхпроводимость в гексабориде LaB_6 с динамическими зарядовыми страйпами", Письма в ЖЭТФ **119**(12), 909 (2024) [A. N. Azarevich, A. V. Bogach, O. N. Khrykina, N. B. Bolotina, V. M. Gridchina, N. Yu. Shitsevalova, S. Yu. Gavrilkin, A. Yu. Tsvetkov, S. Gabani, K. Flachbart, A. V. Kuznetsov, and N. E. Sluchanko, "Localized Superconductivity in LaB_6 Hexaboride with Dynamic Charge Stripes", JETP Lett. **119**, 934 (2024)]; DOI: 10.1134/S0021364024601696.
25. O. N. Khrykina, N. B. Bolotina, V. G. Gridchina, A. N. Azarevich, A. V. Bogach, K. M. Krasikov, N. Yu. Shitsevalova, V. B. Filipov, and N. E. Sluchanko, "Evidence for nanosized magnetic clusters of Ce-ions in the archetypal heavy fermion metal CeB_6", J. Alloys Compd. **970**, 172527 (2024); DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.172527.
26. О. Н. Хрыкина, Н. Б. Болотина, В. М. Гридчина, А. Н. Азаревич, К. М. Красиков, Н. Ю. Шицевалова, В. Б. Филипов, С. Ю. Гаврилкин, А. Ю. Цветков, Н. Е. Случанко, "Электронный фазовый переход в соединении с тяжелыми фермионами CeB_6", Письма в ЖЭТФ **119**(2), 150 (2024) [O. N. Khrykina, N. B. Bolotina, V. M. Gridchina, A. N. Azarevich, K. M. Krasikov, N. Yu. Shitsevalova, V. B. Filipov, S. Yu. Gavrilkin, A. Yu. Tsvetkov, and N. E. Sluchanko, "Electronic Phase Transitions in Heavy-Fermion CeB_6 Compound", JETP Lett. **119**, 144 (2024)]; DOI: 10.1134/S0021364023603913.
27. A. N. Azarevich, O. N. Khrykina, N. B. Bolotina, V. M. Gridchina, A. V. Bogach, S. V. Demishev, V. N. Krasnorussky, S. Yu. Gavrilkin, A. Yu. Tsvetkov, V. V. Voronov, K. I. Kugel, A. L. Rakhmanov, S. Gabani, K. Flachbart, and N. E. Sluchanko, "Evidence for spin droplets (ferrons) formation in the heavy fermion metal CeB_6 with dynamic charge stripes", Solid State Sciences **167**, 107990 (2025); DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2025.107990.
28. N. Shitsevalova, *Crystal chemistry and crystal growth of rare-earth borides in rare-earth borides*, in *Rare-Earth Borides*, ed. by D. S. Inosov (Jenny Stanford Publishing, Singapore, 2021), ch. 1, p. 1.
29. https://qdusa.com/siteDocs/productBrochures/1084-500.pdf.
30. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Статистическая физика* (Наука, Физматлит, М., 1995), т. 5, ч. 1 [D. Landau and E. M. Lifshitz, *Course of Theoretical Physics, V. 5 Statistical Physics, Part 1*, 3rd ed. (Pergamon Press, Butterworth-Heinemann, 1980)].
31. А. И. Ларкин, С. А. Пикин, "Фазовые переходы первого рода, близкие ко вторым", ЖЭТФ **56**(5), 1664 (1969) [A. I. Larkin and S. A. Pikin, "Phase Transitions of the First Order but Nearly of the Second", Sov. Phys. JETP **29**, 891 (1969)].
32. С. М. Стишов, А. Е. Петрова, "Геликоидальный зонный магнетик MnSi: магнитный фазовый переход", УФН **187**, 1365 (2017) [S. M. Stishov and A. E. Petrova, "Helical itinerant magnet MnSi: magnetic phase transition", Phys.-Uspekhi **60**, 1268 (2017)]; DOI: 10.3367/UFNr.2017.03.038110.