

Околокритическое поведение теплоемкости при переходах в антиферромагнитное состояние в гексаборидах RB_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 NdB_6 , GdB_6 и TbB_6 с ян-теллеровской структурной неустойчивостью, изучено критическое поведение $C_p(T)$. Установлено, что фазовое превращение в этих RB_6 относится к классу “слабых” фазовых переходов 1-го рода, близких к фазовым переходам 2-го рода, с малой величиной скачка ΔC_p в 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 NdB_6 и 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 TbB_6 получены γ_{AF} , $\gamma_P \sim -2$, 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 RB_6 при низких температурах. Среди них антиферромагнитный (AF) металл с тяжелыми фермионами CeB_6 , так называемый топологический Кондо-изолятор SmB_6 , ферромагнитный полуметалл EuB_6 и металлы RB_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 B_6 играют роль анионов и (ii) необычный AF порядок с общим для RB_6 волновым вектором $\mathbf{q}_M = (1/4, 1/4, 1/2)$ объясняется наличием квадрупольных взаимодействий [1, 2]. При этом аналогичные AF основные состояния были обнаружены как для магнитной решетки Кондо CeB_6 [1, 2–4], так и для PrB_6 в соизмеримой AF фазе [5–7], а также для GdB_6 [8–13], TbB_6 [13–15], DyB_6 [16, 17] и HoB_6 [18].

Считается, что в этих AF металлах сложные магнитные структуры обусловлены квадрупольными (мультипольными) взаимодействиями, однако это неверно, по крайней мере, в случае GdB_6 , где наполовину заполненная $4f$ -оболочка иона Gd^{3+} имеет лишь спинные степени свободы (конфигурация $4f^7$, $L = 0$).

Аргументы, свидетельствующие о колебаниях тяжелых РЗ ионов большой амплитуды и о развитии структурной неустойчивости, были получены для GdB_6 [19, 20], TbB_6 [21] и DyB_6 [22]. В [19–22] было установлено, что квазилокальные колебания РЗ ионов, слабо связанных с жестким борным каркасом в RB_6 , отвечают энергиям в диапазоне $5 \div 10$ мэВ. В качестве механизма, ответственного за колебания РЗ ионов, на основании результатов прецизионных измерений рентгеновской дифракции GdB_6 [23], LaB_6 [24, 25] и 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 RB_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 АФ 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 АФ 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 (АФ–Р), представлены на рис. 1. В узкой окрестности АФ–Р 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 2а–с и рис. 3а–с более детально представлены температурные зависимости теплоемкости $C_p(T, H_0)$ в узкой окрестности АФ–Р 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

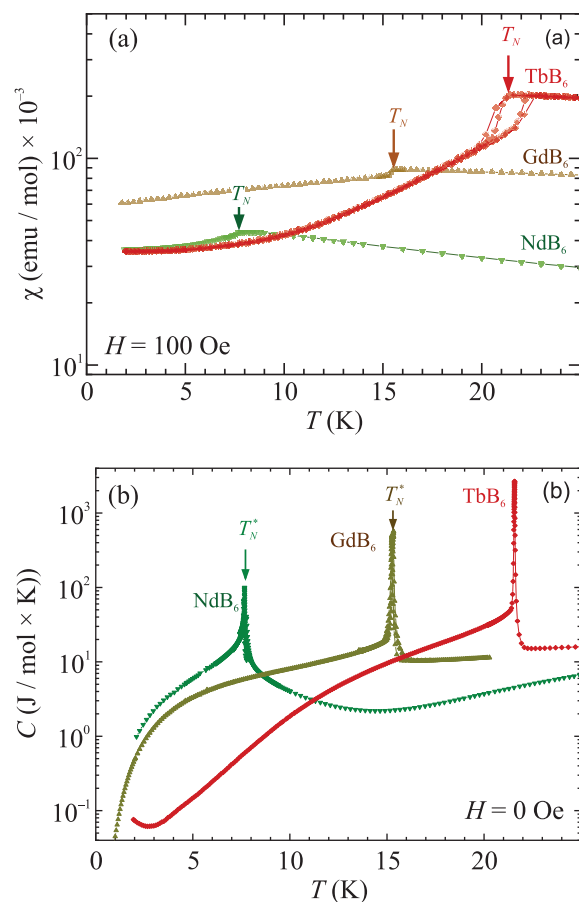


Рис. 1. (Цветной онлайн) Температурные зависимости: (а) – магнитной восприимчивости χ в поле $H = 100 \text{ Э}$ и (б) – теплоемкости C_p гексаборидов NdB_6 , GdB_6 и TbB_6 . T_N и T_N^* – температуры магнитных фазовых переходов (см. текст)

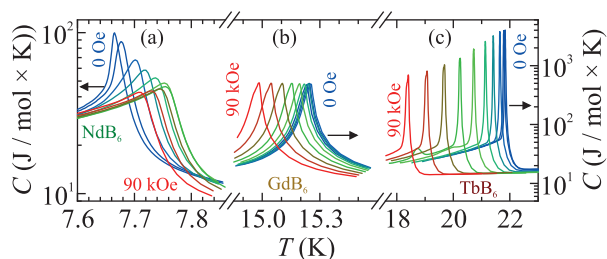


Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимости теплоемкости от температуры при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля для соединений NdB_6 (а), GdB_6 (б) and TbB_6 (с)

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

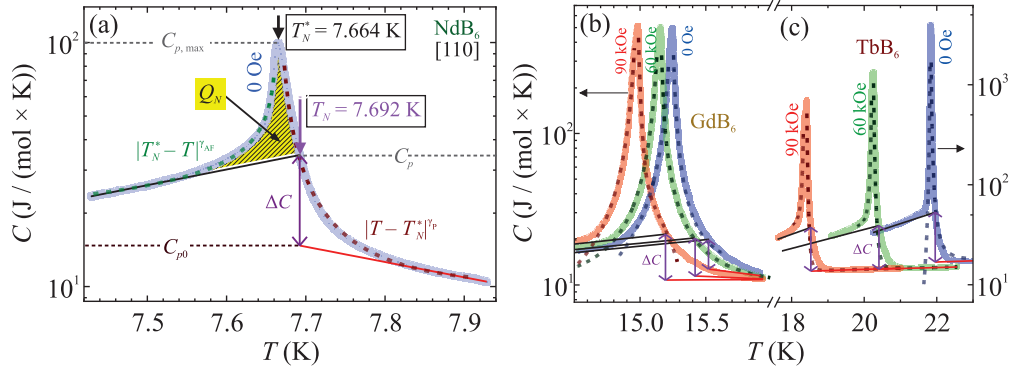


Рис. 3. (Цветной онлайн) Температурные кривые теплоемкости $C_p(T)$ в окрестности AF–P переходов для соединений NdB₆ ($H = 0$) (a), GdB₆ (b) и TbB₆ (c) для $H = 0, 60$ и 90 кЭ. Для примера показаны аппроксимация $C_p \sim (T - T_N^*)^\gamma$ (i – AF, P) в AF и P фазах в непосредственной окрестности T_N , 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. 3а–с) и (ii) особенностей на магнитных кривых (см. рис. 1а). 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 $C_p \sim (T - T_N^*)^\gamma$ (i – AF и P) по обе стороны перехода. Соответствующие значения показателей степени $\gamma_{AF}(H)$ и $\gamma_P(H)$, представлены на рис. 4а. 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 NdB₆, GdB₆ и TbB₆ показано на рис. 4б и с соответственно.

Как отмечалось выше, фазовые превращения AF–P в соединениях NdB₆, GdB₆ and TbB₆ 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. 4а, эффективные критические показатели γ_{AF} и γ_P в NdB₆ и GdB₆, 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

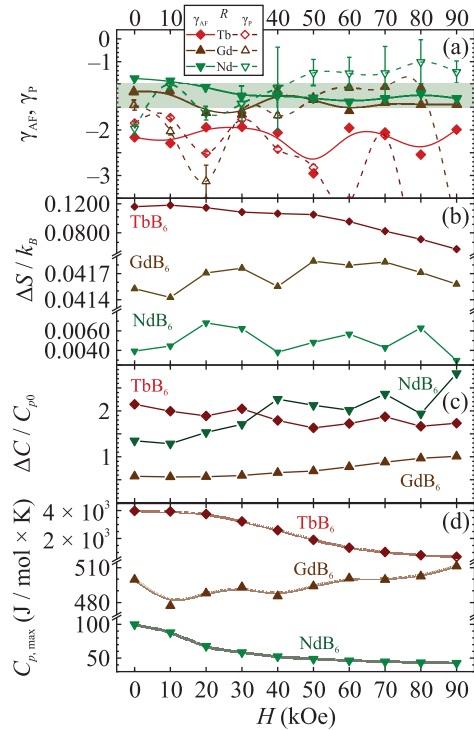


Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимости от магнитного поля: (a) – критических индексов γ_{AF} и γ_P для интервала температур ниже и выше AF–P перехода, соответственно, (b) – величины скачка энтропии на атом $\Delta S/k_B = Q_N/(7T_N^* \cdot R)$, (c) – скачка теплоемкости $\Delta C/C_{p0}$ и (d) – амплитуды λ -аномалии $C_{p,max}$ при AF-переходе для соединений NdB₆, GdB₆ и TbB₆. Зеленой полосой на панели (a) показана область критических индексов, полученных в моделях Изинга, Гейзенберга и $x - y$ модели [30]

γ_P для NdB₆, что, по-видимому, связано с особенностями магнитной фазовой диаграммы и требует проведения дополнительных исследований. Полученные для TbB₆ значения индексов $\gamma_{AF}, \gamma_P \sim -2$, 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 АФ 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 АФ-Р 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 АФ-Р 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. 4с).

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 АФ 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 АФ 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 слу-

чаях 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 АФ 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. Bénéu, “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, "Теликоидальный 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.