

## Van der Waals magnets for spintronics and nanoelectronics

Two-dimensional (2D) van der Waals (vdW) layered magnetic materials demonstrate novel challenging physical phenomena and are considered as promising building blocks for creating advanced spintronics and nanoelectronics devices. These materials possess a graphene-like magnetic lattice symmetry and demonstrate the existence of magnetic ordering down to the monolayer limit at sufficiently high temperatures. The occurrence of new topological spin excitations, insulator-metal transition, spin crossover, and superconductivity has recently been discovered in vdW magnets.

Structural, magnetic and vibrational properties of a model representative of 2D vdW materials – ferromagnet  $\text{CrBr}_3$ , were studied by X-ray, neutron diffraction and Raman spectroscopy in a wide temperature range of 5–300 K, Fig. 1 [1]. The magnetic moments of Cr ions forming a graphene-like magnetic lattice in Br–Cr–Br layers were found to order ferromagnetically below the Curie temperature  $T_C = 36$  K. An anomalous behavior of the structural parameters in the temperature range of ferromagnetic ordering, and a negative thermal expansion of the unit cell volume and quasi two-di-

Fig. 1

a) Neutron diffraction patterns of  $\text{CrBr}_3$  measured at different temperatures and calculated profiles obtained using the Rietveld method. b) The schematic view of rhombohedral crystal structure of  $\text{CrBr}_3$  with symmetry  $R\bar{3}$ . On the right van der Waals atomic layers are shown, top and side view.

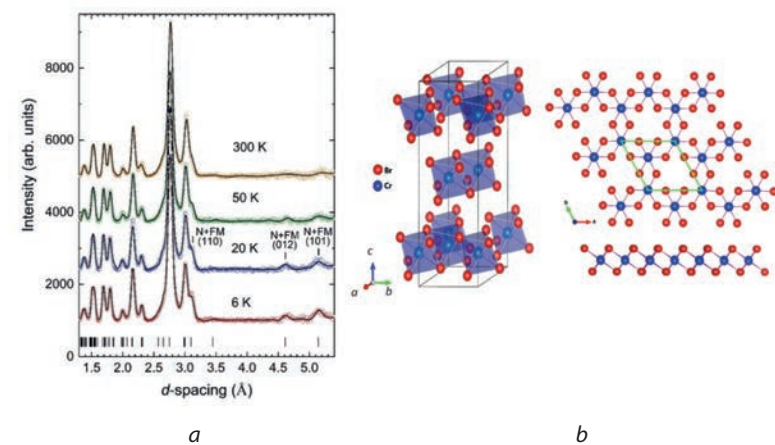


Рис. 1

a) Нейтронные дифракционные спектры  $\text{CrBr}_3$ , измеренные при различных температурах и профили, рассчитанные по методу Ритвельда. b) Ромбоэдрическая кристаллическая структура  $\text{CrBr}_3$  симметрии  $R\bar{3}$ . Справа показаны ван-дер-ваальсовы атомные слои, вид сверху и сбоку.

## Ван-дер-ваальсовы магнетики для спинтроники и нанoeлектроники

Квазидвумерные (2D) ван-дер-ваальсовы слоистые магнитные материалы демонстрируют ряд новых физических явлений и рассматриваются в качестве перспективных систем для создания передовых устройств спинтроники и нанoeлектроники. Магнитная решетка данных материалов подобна графену и в них наблюдается магнитное упорядочение вплоть до предела молекулярного монослоя при достаточно высоких температурах. Недавно в ван-дер-ваальсовых материалах были обнаружены новые типы спиновых возбуждений, переход диэлектрик-металл, спиновый кроссовер, сверхпроводимость.

Структурные, магнитные и колебательные свойства модельного представителя семейства ван-дер-ваальсовых магнетиков  $\text{CrX}_3$  –  $\text{CrBr}_3$ , исследованы с помощью методов рентгеновской, нейтронной дифракции и рамановской спектроскопии в диапазоне температур 5–300 K, рис. 1 [1]. Магнитные моменты ионов Cr, формирующие графеноподобную магнитную решетку в слоях Br–Cr–Br, упорядочиваются ферромагнитно при температуре Кюри  $T_C = 36$  K. В области  $T_C$  обнаружено anomalous поведение структурных параметров (рис. 2). Ниже этой температуры характер теплового расширения объема элементар-

mensional van der Waals layers in the temperature range  $T < T_C$  were revealed (Fig. 2). In addition, an anomalous thermal variation of interatomic distances and angles was also observed. In the Raman spectra, these structural effects provoke an additional increase in the frequencies of most of the observed vibrational modes caused by pronounced spin-phonon coupling.

It should be noted that negative thermal expansion is a relatively rare physical effect found only in a few classes of materials. The coefficient of linear

thermal expansion of atomic layers in  $\text{CrBr}_3$  in the region  $T < T_C$ ,  $\alpha_l = -1.6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , is close to the corresponding value for graphene at low temperatures.

The obtained results demonstrated good compatibility of materials such as  $\text{CrX}_3$  (X – halide) and graphene for the possible fabrication of heterostructures based on them. Its practical use can become an important step towards the development of an advanced generation of spintronics, nanoelectronics, information recording and storage devices.

Fig. 2. a) Temperature dependences of the lattice parameters and unit cell volume of  $\text{CrBr}_3$ , normalized to the corresponding values at room temperature. b) Temperature dependences of distances between Cr magnetic ions inside van der Waals layers (intra-layer) and between layers (inter-layer).

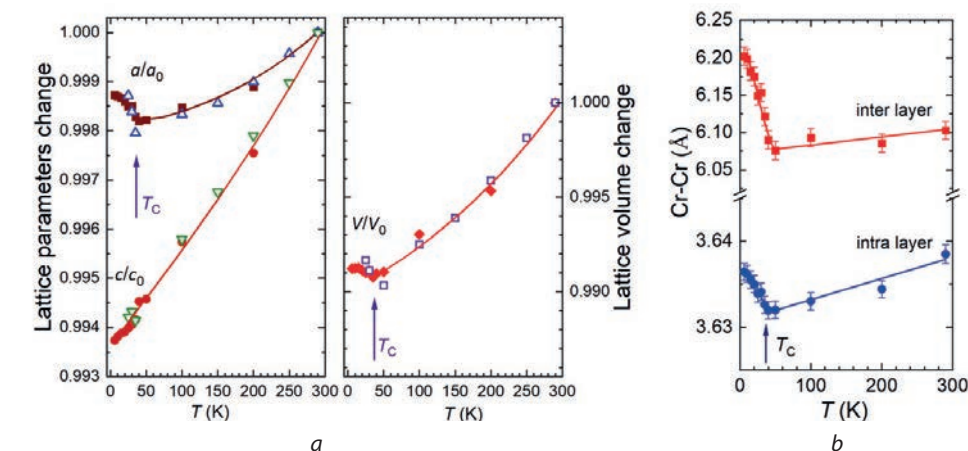


Рис. 2. а) Температурные зависимости параметров и объема элементарной ячейки кристаллической решетки  $\text{CrBr}_3$ , отнормированные на соответствующие значения при комнатной температуре. б) Температурные зависимости расстояний между магнитными ионами Cr внутри ван-дер-ваальсовых слоев (intra-layer) и между слоями (inter-layer).

ной решетки и ван-дер-ваальсовых слоев изменялся с положительного на отрицательный. В области температуры магнитного упорядочения также наблюдались значительные эффекты спин-фононного взаимодействия, проявляющиеся в аномальном увеличении большинства частот колебательных мод.

Следует отметить, что отрицательное тепловое расширение является сравнительно редким физическим эффектом, обнаруженным лишь в нескольких классах материалов. Коэффициент теплового расширения атомных слоев  $\text{CrBr}_3$  в области  $T < T_C$ ,  $\alpha_l = -1.6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , близок к соответ-

ствующей величине для графена в области низких температур.

Полученные результаты свидетельствуют о хорошей совместимости материалов типа  $\text{CrX}_3$  (X — галоген) и графена с точки зрения перспектив создания гетероструктур на их основе, практическое использование которых может стать важным шагом на пути к разработке передового поколения устройств спинтроники, нанoeлектроники, записи и хранения информации.