в ферромагн. состояние. В Tb, Dy и Ho эти темп-ры соответственно равны $T_N = 229$, 179, 130 К и $T_C = 220$, 85, 19 К.

Эрбий (Er) при $T < T_C = 20$ К имеет структуру типа ферромагн. спирали, в диапазоне темп-р 20—50 К осциллируют как поперечные, так и продольные проекции магн. моментов на гексагональную ось (сложная спираль). В интервале темп-р 52—84 К в Er реализуется статич. продольная *спиновая волна* с осцилляцией продольной проекции магн. момента, при этом средние (по времени) значения поперечных составляющих равны нулю. При $T > T_N = 84$ К Er — парамагнетик. Тулий (Tm) при темп-рах $T < T_C = 32$ К имеет ферримагн. структуру, а при $T > 32$ К в нём реализуется антиферромагн. структура типа статич. продольной спиновой волны, к-рая разрушается с переходом в парамагн. состояние при темп-ре $T_N = 56$ К. Кристаллич. решётка Yb состоит из диамагн. двухвалентных ионов Yb^{2+}, при $T > 270$ К становится существенным вклад в магнетизм парамагн. трёхвалентных ионов Yb^{3+}. В Lu проявляется только *Паули парамагнетизм*, т. к. трёхвалентные ионы Lu^{3+} имеют целиком заполненную 4*f*-оболочку и не имеют парамагн. момента ($J = 0$). Данные о празеодиме (Pr) и прометии (Pm) недостаточно надёжны. В РЗЛ металлах, ионы к-рых имеют орбитальный момент $L \neq 0$, наблюдаются громадные значения магн. анизотропии ($\sim 10^8$ эрг/см^3) и гигантская *магнитострикция* (относит. удлинение $\Delta l/l \sim 10^{-3}$) при низких темп-рах.

В сплавах тяжёлых РЗЛ металлов (а также Y и Sc) наблюдаются сложные магн. фазовые переходы и периодич. структуры, характерные для РЗЛ металлов. Паулиевские парамагнетики Y и Lu, имеющие постоянные решётки, отличающиеся лишь на неск. % от параметров решётки большинства тяжёлых РЗЛ элементов, образуют с ними обширные области твёрдых растворов, являясь хорошими магн. разбавителями.

Магнетизм РЗЛ соединений. Синтезировано огромное число РЗЛ соединений, обладающих ферримагн. и антиферромагн. свойствами.

К интерметаллическим соединениям относятся соединения РЗЛ металлов с благородными металлами, Al, Ga, In, Sn, Si и Ge, соединения РЗЛ металлов с 3 *d*-переходными металлами и др. Наиб. практич. интерес имеют соединения РЗЛ металлов с Fe и Co. Соединения Sm_2Co_{17}, $NdCo_5$, Nd — Fe — B и др. используются для изготовления мощных *магнитов постоянных* с макс. магн. энергией, превышающей 32—28 МГс·Э. Соединения RFe_2 (R — РЗЛ элемент) обладают гигантской магнитострикцией не только при низких (как РЗЛ металлы), но и при комнатных темп-рах. На их основе изготовлены наиболее эфф. *магнитострикционные материалы* для УЗ-преобразователей, адаптивной оптики и др. Гигантские значения одноионных констант магн. анизотропии (в RCo_5 и RFe_2) и магнитострикции (в RFe_2), реализующиеся вплоть до комнатных темп-р, обусловлены в осн. подмагничивающим действием больших эфф. обменных полей, действующих на РЗЛ ионы со стороны подрешёток Fe и Co, благодаря обменной поляризации 3 *d*-ионами коллективизированных и гибридизированных *s*-, 3 *d*- и 5 *d*-электронов.

Наиб. изученными оксидными РЗЛ соединениями являются ферриты-гранаты $R_3Fe_5O_{12}$, ортоферриты $RFeO_3$ и ортохромиты $RCrO_3$.

Характер магн. упорядочения в них определяется косвенными обменными взаимодействиями РЗЛ ионов и ионов Fe и Cr через ионы O, взаимодействием ионов с кристаллич. полями и антисимметричным обменным *Дзялошинского взаимодействием*.

В ферритах-гранатах наблюдаются неколлинеарные ферримагн. структуры, в к-рых результирующие магн. моменты подрешёток РЗЛ ионов и Fe антипараллельны, при этом магн. моменты РЗЛ ионов располагаются по поверхности конуса с определённым углом раствора вокруг оси лёгкого намагничивания. Ортоферриты и ортохромиты проявляют *слабый ферромагнетизм*, т. к. магн. моменты подрешёток железа располагаются не строго антипараллельно. В ортоферритах при понижении темп-ры до точки Нееля наблюдаются магн. *ориентационные фазовые переходы*. Ортоферриты и ферриты-гранаты получили широкое применение как материалы магнитооптики. Кроме того, ферриты-гранаты используются в СВЧ-технике.

К *магнитным полупроводникам* относятся соединения РЗЛ элементов с элементами V и VI групп периодич. системы Менделеева (халькогениды и пниктиды, напр. SmS, EuO, EuS, HoN), ферриты-гранаты с избытком двухвалентных ионов Fe^{2+} и ряд др. соединений. В этих магнетиках наблюдается сильное влияние магн. упорядочения на подвижность и концентрацию носителей заряда, а также на ширину запрещённой зоны. Для них характерно т. н. гигантское красное смещение края оптич. поглощения при изменении темп-ры вблизи точки Кюри, чувствительное к внеш. магн. полю. Магн. упорядочение этих соединений обусловлено косвенным обменным взаимодействием через анионы, прямым обменом за счёт перекрытия орбиталей соседних РЗЛ ионов и РККИ-взаимодействием через электроны проводимости.

Аморфные редкоземельные магнетики. Наиб. изучены аморфные сплавы РЗЛ металлов с переходными 3*d*-металлами. Аморфная структура характеризуется хим. и структурным беспорядком. Это приводит к большей локализации 3*d*-электронов, изменению обменных взаимодействий и темп-р магн. упорядочения по сравнению с кристаллич. аналогами. Кроме ферро- и ферримагнетизма в аморфных Р. м. наблюдаются также более сложные магн. состояния: *сперомагнетизм*, *асперомагнетизм*, *сперимагнетизм*, *миктомагнетизм*, *спиновое стекло*. Аморфные РЗЛ сплавы используются в малогабаритных пост. магнитах с высокой магн. энергией, магнитострикционных материалах, в устройствах термомагн. записи на аморфных плёнках, обладающих перпендикулярной магн. анизотропией и точкой компенсации (либо точкой Кюри) вблизи комнатной темп-ры.

Лит.: Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики, М., 1965; Редкоземельные полупроводники, Л., 1977; Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М., 1979; Белов К. П., Редкоземельные магнетики и их применение, М., 1980; Физика и химия редкоземельных элементов. Справочник, пер. с англ., М., 1982; Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах, М., 1985; Никитин С. А., Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов, М., 1989.

С. А. Никитин.

РЕДКОЗЕМЕ́ЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕ́НТЫ — элементы III группы периодич. системы элементов Менделеева: лантан (ат. номер 57) и следующие за ним 14 лантаноидов (ат. номера 58—71), а также иттрий и скандий.

Все Р. э.— металлы. Их атомы обладают сходным строением внеш. оболочек (число электронов на внеш. оболочке постоянно, а заполняется *d*- или *f*-оболочка) и соответственно сходными хим. свойствами. Т. к. заполняющиеся оболочки, определяющие оптич. и магн. свойства атомов, у Р. э. экранированы (особенно сильно у лантаноидов) внеш. электронами, мн. Р. э. обладают необычными оптич. и магн. свойствами, что обеспечило им широкое применение (см. *Редкоземельные магнетики*, *Люминофоры*).

С. С. Бердоносов.

РЕДУКЦИО́ННЫЕ ФО́РМУЛЫ — правила вычисления элементов *матрицы рассеяния* (S) в *аксиоматической квантовой теории поля* (АКТП). Конкретный вид Р. ф. зависит от выбора исходных объектов в конкретном варианте теории. Наиб. прост этот вид для АКТП в формулировке Боголюбова, где исходным объектом является сама S-матрица, понимаемая как оператор в *Фока представлении*:

$$S = \sum_{m,n\geqslant 0} (m!\,n!)^{-1} \int S_{mn}(p_1,\ldots,p_m;k_1,\ldots,k_n) \times \\ \times a^+(p_1)\ldots a^+(p_m) a^-(k_1)\ldots a^-(k_n) d^3p_1\ldots d^3k_n. \quad (1)$$