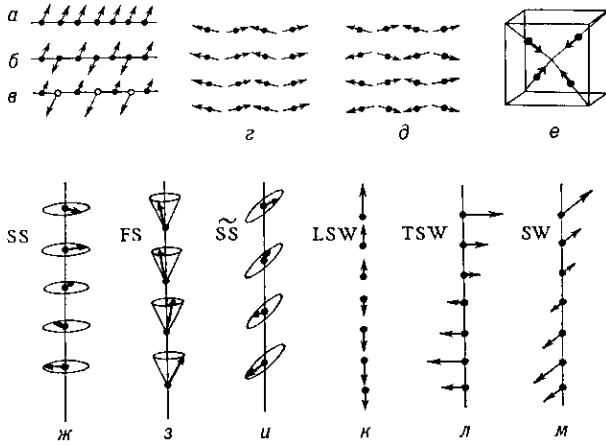


лись слабонеколлинеарные типы: *г* — слабый ферромагнетизм (пример —  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) и *д* — слабонеколлинеарный многоподрешёточный антиферромагнетизм ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и др.). В кристаллах с неск. сортами магн. атомов могут существовать М. а. с. с коллинеарным расположением спинов для одного сорта атомов и с неколлинеарным — для другого ( $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и др.).



Наиболее распространённые типы магнитных атомных структур.

Случай *е* иллюстрирует пример сильнонеколлинеарной М. а. с. с четырьмя подрешётками магнитными (пример —  $\text{UO}_2$ ).

Важнейшей характеристикой М. а. с. является магн. пространств. периодичность и её соотношение с периодом кристаллич. решётки. Как показывает эксперимент, в кристаллах чаще всего устанавливаются М. а. с., в *k*-рых существует довольно простая закономерность изменения спинов атомов при переходе от одной примитивной ячейки исходного (парамагнитного) кристалла к другой. Если спин  $S_{ni}$  любого атома с номером *i* в *n*-й ячейке выражается через соответственный спин  $S_{0i}$  атома *i* нулевой (исходной) ячейки посредством соотношения

$$S_{ni} = S_{0i} e^{ik \cdot t_n} \quad (1)$$

( $t_n$  — вектор трансляции из нулевой ячейки в *n*-ю), то говорят, что М. а. с. имеет волновой вектор (ВВ)  $k$ . В более общем случае М. а. с. характеризуется не одним, а неск. ВВ, но обычно принадлежащими одной и той же звезде ВВ  $\{k\}$ . [Звездой ВВ  $k$  наз. совокупность неэквивалентных лучей, получаемых из данного ВВ (луча)  $k$  действием всех элементов симметрии *h* точечной группы кристалла.] Тогда:

$$S_{ni} = \sum_L S_{0i}^L e^{ik_L \cdot t_n}, \quad (2)$$

где  $k_L = h_L k$ ,  $h_L$  — элементы симметрии, порождающие неэквивалентные лучи  $k_L$ .

Особое место среди типов М. а. с. занимают структуры со сравнительно простыми ВВ, соответствующими симметричным точкам Бриллюэна зоны кристалла, напр.  $k=0$ ,  $k=1/2 b_3$ ,  $k=1/2 (b_1 + b_2)$ ,  $k=1/2 (b_1 + b_2 + b_3)$ , где  $b_1, b_2, b_3$  — основные векторы обратной решётки. В этих случаях магн. атомы с параллельными спинами оказываются расположенными либо на расстояниях, равных периоду кристаллической решётки (тогда магн. периодичность совпадает с кристаллической и  $k=0$ ), либо на расстояниях, кратных такому периоду (тогда магн. ячейка увеличена по сравнению с кристаллической вдвое, вчетверо и т. д.). Представленные на рис. типы М. а. с. *a—e* обладают небольшой магн. ячейкой. Их М. а. с. можно представить в виде совокупности небольшого числа магн. подрешёток.

В последующем были экспериментально открыты (в редкоземельных металлах и ряде др. кристаллов)

и теоретически исследованы более сложные типы М. а. с., напр. типы *ж—и* (рис.). Их наз. винтовыми или модулированными (употребляются также термины: спиральные, геликоидальные, длиннопериодические, несоизмеримые): SS (простая спираль, примеры — Er,  $\text{VF}_2$ ), FS (ферромагнитная спираль,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) и SS (сложная спираль,  $\text{TbMn}_2$ ).

В случае винтовых М. а. с. при продвижении по кристаллу вдоль некого направления, задаваемого ВВ  $k$  (вектором распространения), изменение спина каждого последующего магн. атома по сравнению с предыдущим определяется операцией поворота  $U_{m\phi}$ , где  $m$  — единичный вектор вдоль оси вращения,  $\phi$  — угол поворота. Вектор  $m$  часто наз. вектором спирали. При этом спин атома, взятый за исходный, может быть направлен по-разному:  $S \parallel m$ ,  $S \perp m$ , а также косо по отношению к  $m$ . Различаться может и взаимная ориентация векторов  $k$  и  $m$ . Угол  $\phi$  характеризует длину волны спирали  $\lambda$ , а она, в свою очередь, связана с модулем ВВ  $|k| = 2\pi/\lambda$ . Чаще всего у винтовых М. а. с. длина ВВ  $k$  много меньше длины векторов обратной решётки, а  $\lambda$ , соответственно, велика по сравнению с периодами кристалла. Поэтому их наз. также длиннопериодическими. Такие М. а. с. можно рассматривать как модулированную структуру с  $k=0$ ; отсюда ещё одно их название — модулированные М. а. с. В общем случае следует говорить о модуляции М. а. с. с нек-рым ненулевым ВВ  $k_0$ , тогда  $k = k_0 + \delta k$ .

Для длиннопериодич. М. а. с. угол  $\phi$ , а значит и длина волны  $\lambda$  (период структуры), зависит от темп-ры и др. внеш. факторов и может в связи с этим иметь определ. диапазон значений, в т. ч. значения, несоизмеримые с периодами кристалла. Такие М. а. с. наз. несоизмеримыми.

Особую группу М. а. с. составляют т. н. полупорядоченные типы (рис., *к—м*): LSW (продольная спиновая волна, Er), TSW (поперечная спиновая волна,  $\text{TbZn}_2$ ) и SW (промежуточный случай, Nd). Длина спинов в рассматриваемом случае модулирована вдоль ВВ  $k$  по простому закону, напр. по синусоидальному. Поскольку значение атомного спина  $S_i$  предполагается неизменным для каждого идентичного магн. атома (оно обусловлено гораздо более сильными внутриаомными взаимодействиями), то возможной причиной существования таких М. а. с. считают неупорядоченность нек-рых проекций атомных спинов. Напр., структуру LSW можно получить из SS, если в ней считать неупорядоченными перпендикулярные к направлению  $k$  проекции атомных спинов. Вещества, у *k*-рых М. а. с. характеризуются не одним, а несколькими ВВ  $k$  [см. (2)], наз. магнетиками с мульти-*k*-структурой (примеры —  $\text{CeAl}_2$ ,  $\text{UO}_2$ , Nd).

Подавляющее большинство сведений о М. а. с. кристаллов получены с помощью магнитной нейтронографии. Задача расфировки магн. нейтронограмм является фактически вариат. задачей с многими переменными; задаётся стартовая пробная модель М. а. с., по ней рассчитываются профили магн. рефлексов (бравговских пиков интенсивности) в дифракц. картине, а затем эта теоретич. картина сравнивается с экспериментальной. При их несовпадении пробную модель варьируют до наиболее хорошего совпадения. Близость интенсивностей  $I_{\text{расч}}$  и  $I_{\text{эксп}}$  характеризуют одним т. н. *R*-фактором — нормированной суммой квадратов отклонений  $\Delta I = I_{\text{расч}} - I_{\text{эксп}}$  по всем пикам. Численные значения *R*-факторов для многих М. а. с. довольно велики. Существует немало примеров, когда неск. разных моделей М. а. с. с несильно отличающимися *R*-факторами удовлетворяют одной и той же эксперим. нейтронограмме, так что идентификация М. а. с. часто затруднена. Трудности существуют также и при определении векторов  $k$  структуры, поскольку различие мульти-*k*- и 1-*k*-структур часто