

полностью отражаются обратно внутрь N . (см. *Нейтронная оптика*). Начиная с $r = d(\mathcal{E}/U)^{1/2}$ (d — поперечные размеры), полное отражение от стенок должны испытывать все нейтроны с энергией $\mathcal{E} < \mathcal{E}_0$, и плотность потока таких нейтронов в N будет оставаться почти постоянной. Некоторые потери нейтронов возникают за счёт диффузного отражения от шероховатостей стенок и слабого поглощения в тонком поверхностном слое (толщиной $\sim 200 \text{ \AA}$), соответствующем глубине проникновения нейтрона в стенки при полном отражении. Для тепловых нейтронов с $\mathcal{E} = 0,025 \text{ эВ}$ и стенок из Ni ($U = 2 \cdot 10^{-7} \text{ эВ}$) макс. угол скольжения $\alpha = 10'$. Обычно зеркальные N изготавливают из полиров. стеклянных пластин с напылённым на поверхность тонким (1—2 мкм) слоем Ni . Пластинки склеиваются в N , коробчатого сечения.

Если зеркальный N плавно изогнуть с радиусом изгиба $R = 2d'\mathcal{E}_0/U$ (d' — размер N в плоскости изгиба), то он может служить фильтром, пропускающим нейтроны с $\mathcal{E} < \mathcal{E}_0$. Кроме того, пучок на выходе изогнутого зеркального N свободен от γ -излучения, неизбежно испускаемого нейтронными источниками. Зеркальные N используются также и как поляризаторы медленных нейтронов. С этой целью отражающий слой изготавливается из ферромагнетика, для которого отталкивающий нейтроны потенциал стенок равен $U' = U \pm \mu B$, где μ — магн. момент нейтрона, B — индукция магн. поля в ферромагн. слое, знаки \pm соответствуют двум ориентациям спина нейтрона. В некоторых материалах (напр., сплав 50% $Fe + 50\% Co$) $U = |\mu B|$ и полное отражение имеет место только для одной из возможных проекций спина нейтрона (см. *Поляризованные нейтроны*). *Ультразвук нейтроны* ($\mathcal{E} < U$) испытывают полное отражение от стенок N при любых углах падения и распространяются по N произвольной формы как сильно разреженный газ.

Лит. см. при ст. *Нейтронная оптика*. В. И. Луциков.

НЕЙТРОНОГРАФИЯ — совокупность методов исследования структуры и свойств вещества с помощью рассеяния нейтронов низких энергий ($\mathcal{E} \leq 1 \text{ эВ}$). Длина волны де Бройля медленных нейтронов соизмерима с межатомными расстояниями в конденсир. средах, что позволяет изучать взаимное расположение атомов (см. *Нейтронная структурная*). Масса и кинетич. энергия нейтрона соизмеримы с массой атома и энергией межатомных взаимодействий в веществе, что позволяет с помощью *неупругого рассеяния нейтронов* исследовать динамич. свойства отд. атомов и молекул в среде. Магн. момент нейтрона взаимодействует с магн. моментами атомов, что позволяет по интенсивности и поляризации магн. рассеяния определять величины магн. моментов атомов, их взаимное расположение и ориентацию, динамич. свойства (см. *Магнитная нейтронная графия*). N применяется для исследования структурных, динамич. и магн. свойств практически всех известных форм конденсир. состояния вещества, от простых жидкостей и кристаллов до биологических макромолекул.

Рассеяние нейтронов веществом принято классифицировать по след. признакам: по изменению энергии нейтрона при рассеянии (упругое, неупругое); по характеру взаимодействия, ответственного за рассеяние (ядерное, магнитное); по степени когерентности нейтронных волн, рассеянных от множества центров, образующих изучаемое вещество. В общем случае интенсивность нейтронной волны, рассеянной малым объёмом вещества, можно представить в виде двух слагаемых, первое из которых пропорц. числу рассеивающих центров N (некогерентная составляющая), второе — N^2 (когерентная составляющая). Когерентная составляющая проявляется в виде пиков на нейтронной графии, некогерентная определяет фон. Некогерентная составляющая нечувствительна к структуре вещества, отражает взаимодействие нейтрона с отд. рассеивающими центрами (дефектами, примесями) и даёт информацию

только о динамич. свойствах отд. рассеивателей (атомных ядер, магн. моментов, молекул). Когерентная составляющая является структурно-чувствительной и позволяет получать информацию о структуре вещества, коллективных динамич. свойствах.

Отличия N от методов, использующих рассеяние др. частиц (*электронная графия*, *рентгеновского структурного анализа*, *рассеяния света*), связаны со свойствами нейтрона: отсутствием электрич. заряда, наличием массы покоя и взаимодействием с веществом только посредством ядерных и магн. сил, а также с высокой проникающей способностью нейтрона, возможностью обмениваться со средой значит. частью кинетич. энергии, изотропией амплитуды ядерного рассеяния и её нерегулярной зависимостью от массового числа A и заряда Z ядра. N является единственным методом, пригодным для исследования некр-ых свойств конденсированных сред, и часто применяется в физике твёрдого тела, жидкостей, физической химии, молекулярной биологии и др.

Нейтронная графия исследования проводятся в научных центрах, располагающих мощными нейтронными источниками — исследовательскими ядерными реакторами или ускорителями частиц с мишенью, производящей нейтроны. В СССР такими центрами являются ИАЭ, ОИЯИ (Дубна), ЛИЯФ (Гатчина) и др. Осн. зарубежные центры — Ин-т Лауэ — Ланжевена (Гренобль, Франция), Брукхейвенская нац. лаборатория (Нью-Йорк, США), лаборатория Резерфорда — Аплтон (Великобритания) и др.

Лит. см. при ст. *Нейтронная графия, структурная*.

А. М. Балагуров, Ю. М. Останевич.

НЕЙТРОНОГРАФИЯ СТРУКТУРНАЯ

— исследование атомной структуры конденсир. сред методом дифракции нейтронов низких энергий на атомных ядрах (упругого когерентного рассеяния). В N с. используются нейтроны с длиной волны де Бройля $\lambda \geq 0,3 \text{ \AA}$.

Рассеяние нейтронной волны на одиночном ядре описывается с помощью т. н. амплитуды рассеяния b , имеющей смысл амплитуды сферич. волны, испускаемой ядром, если на него падает плоская возбуждающая волна единичной амплитуды. Амплитуда рассеяния зависит от массового числа ядра A , его заряда Z , а также от ориентации ориентации спинов нейтрона и ядра. Поэтому сумма сферич. волн, рассеянных ансамблем нетождеств. ядер, состоит из слагаемых с разл. амплитудами. В N с. важна усреднённая амплитуда $\langle b \rangle$, наз. когерентной амплитудой рассеяния. Усреднение амплитуд проводится по спиновым состояниям, изотопному и химическому составу ансамбля ядер, эквивалентных в структурном отношении. Среднеквадратичная флуктуация $\langle b^2 \rangle - \langle b \rangle^2$ определяет интенсивность некогерентного рассеяния. Интенсивность когерентного рассеяния — *дифракции нейтронов* зависит от атомной структуры вещества, тогда как интенсивность некогерентного рассеяния к структуре нечувствительна.

Для наблюдения дифракции нейтронов на исследуемый объект (образец) объёмом V направляют коллимированный пучок нейтронов с волновым вектором k_0 и регистрируют интенсивность I рассеянных нейтронов, имеющих волновой вектор k той же длины, но др. ориентации ($k = k_0 = 2\pi/\lambda$). Интенсивность является ф-цией т. н. вектора рассеяния $\kappa = k - k_0$, $\kappa = 4\pi \sin\theta/\lambda$, где 2θ — угол рассеяния:

$$I(\kappa) = |A|^2 = \left| \int_V \rho(r) \exp(ikr) dV \right|^2. \quad (1)$$

Здесь A — амплитуда рассеянной нейтронной волны, r — пространств. координата точки. Соотношение (1) показывает, что рассеянная нейтронная волна — сумма волн, рассеянных элементарными объёмами dV , каждая из которых имеет амплитуду $\rho(r)dV$ и фазовый множитель $\exp(ikr)$; $\rho(r)$ наз. плотностью когерентной амплитуды рассеяния нейтронов. Задачей N с. явля-