



НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА

Авторы: А. И. Франк

НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА, раздел [нейтронной физики](#), в котором изучаются волновые свойства нейтрона и явления, возникающие при взаимодействии нейтронных пучков с веществом и полями. К этим явлениям относятся, в частности, преломление и отражение нейтронных пучков на границе раздела двух сред, дифракция и интерференция нейтронных волн.

Н. о. возникла вскоре после открытия [нейтрона](#) (1932). В 1936 амер. физики Д. Митчелл и П. Пауэрс уверенно наблюдали [дифракцию нейтронов](#) на монокристалле. Значит. вклад в развитие Н. о. был сделан Э. [Ферми](#) и его школой. В частности, именно Ферми впервые ввёл понятие показателя преломления n для описания взаимодействия нейтронов с конденсиров. средами.

Нейтрон может проявлять себя как частица с энергией

\mathcal{E} , скоростью

v и импульсом

p или как волна с длиной, определяемой формулой де Бройля:

$\lambda = 2\pi\hbar/p$ (см. [Волны де Бройля](#)), где

\hbar – постоянная Планка. Волновые свойства отчётливо проявляются у нейтронов низких энергий (медленных нейтронов), длина волны которых порядка или больше

межатомных расстояний в веществе (ок. 10^{-10} м). Б. ч. явлений Н. о. имеет аналогию с оптич. явлениями. Электромагнитные волны описываются [Максвелла уравнениями](#), а

нейтронная волна (нейтронная волновая функция) подчиняется [Шрёдингера](#)

[уравнению](#). Рассеяние нейтронов обусловлено гл. обр. сильным взаимодействием

нейтронов с атомными ядрами, рассеяние световых волн – электромагнитным

взаимодействием фотонов с электронными оболочками атомов. В обоих случаях

падающая на вещество волна порождает вторичные волны, когерентное сложение

которых определяет преломлённые и отражённые волны. Длина волны

λ_1 в среде отличается от длины волны

λ в вакууме, а отношение

$\lambda/\lambda_1 = n$ называют показателем преломления. Неупругое рассеяние нейтронов можно сопоставить с комбинационным рассеянием света. Поляризационные явления в Н. о. существенно отличаются от оптических, т. к. связаны с наличием у нейтрона спина (см. Поляризованные нейтроны).

Поскольку нейтрон, в отличие от фотона, обладает массой покоя, из соотношения де Бройля следует, что при попадании нейтрона в среду меняется не только длина волны, но также скорость нейтрона и его кинетич. энергия. Изменение последней равно потенциалу взаимодействия нейтрона с веществом:

$U = (2\pi\hbar^2/m)Nb$. Тогда

$n^2 = 1 - U/\varepsilon = 1 - v_0^2/v^2$, где

$v_0 = 2\hbar\sqrt{\pi Nb}/m$, b – когерентная длина рассеяния нейтронов ядрами среды,

N – число ядер в единице объёма среды,

m – масса нейтрона. Величину

v_0 называют граничной скоростью вещества. Для большинства веществ

$b > 0$, а

v_0 порядка нескольких метров в секунду. Следовательно, при попадании в среду нейтрон совершает работу

($U > 0$).

Нейтроны со скоростью

$v < v_0$ и энергией

$\varepsilon < U$ (ультрахолодные нейтроны) не могут преодолеть силы отталкивания среды и

полностью отражаются от её поверхности (т. е. коэф. отражения равен 1). Полное внутр. отражение возможно также для холодных и тепловых нейтронов в том случае, когда нормальная к отражающей поверхности компонента скорости нейтрона

$v_z \leq v_0$, а угол скольжения меньше критич. угла. В действительности коэф.

отражения нейтронов всегда несколько меньше единицы, т. к. ядра не только рассеивают нейтроны, но и поглощают их. Существуют и др. процессы, ведущие к ослаблению нейтронной волны; роль этих процессов учитывают введением

комплексной длины рассеяния (комплексными величинами оказываются также U и n^2).

Наличие у нейтрона магнитного момента приводит к его взаимодействию с магнитным полем и магнитными моментами атомов, что порождает т. н. магнитное рассеяние нейтронов, не имеющее аналога в оптике. Влияние постоянного магнитного поля учитывается в выражении для показателя преломления следующим образом:

$$n^2 = 1 - v_0^2/v^2 \pm 2\mu B/mv^2, \text{ где}$$

μ – магнитный момент нейтрона,

B – магнитная индукция, знаки «

\pm » относятся к двум возможным ориентациям магнитного момента нейтрона относительно вектора

B . Такая двужначность показателя преломления используется в устройствах, предназначенных для получения пучков поляризованных нейтронов и определения степени их поляризации.

Способность нейтронов отражаться от зеркал используют для транспортировки нейтронов от источников к эксперим. установкам с помощью [нейтронородов](#). Помимо зеркал полного отражения широкое распространение имеют т. н. суперзеркала (многослойные, в т. ч. полярирующие), отражающие нейтроны при углах скольжения, значительно превосходящих критические. Дифракция нейтронов применяется в [нейтронографии](#) для исследования субмикроскопич. свойств вещества. Принципы Н. о. реализуются в ряде физич. устройств: в поляризаторах и анализаторах нейтронов, монохроматорах, преломляющих призмах, устройствах, позволяющих фокусировать нейтронные пучки (в т. ч. в магнитных линзах). Измерение коэф. отражения нейтронов от плоских образцов при

$v_z > v_0$ лежит в основе метода нейтронной рефлектометрии, применяемого для исследования подповерхностной структуры вещества. Особенности пространственно-временной эволюции спина нейтрона и спиновой прецессии положены в основу метода нейтронного [спинового эха](#), широко применяемого в совр. нейтронографии.

Примером квантового нейтронно-оптич. устройства является нейтронный интерферометр (см. [Нейтронная интерферометрия](#)). Методами Н. о. исследуют также

некоторые нестационарные квантовые явления, для описания которых необходимо использовать временное уравнение Шрёдингера.

Литература

Лит.: Юз Д. Д. Нейтронная оптика. М., 1955; Гуревич И. И., Тарасов Л. В. Физика нейтронов низких энергий. М., 1965; Гуревич И. И., Протасов В. П. Нейтронная физика. М., 1997; Игнатович В. К. Нейтронная оптика. М., 2006.

Processing math: 100%