

значение реального потенциала нейтрон-ядерного взаимодействия (рис. 1). В физике медленных нейтронов в качестве

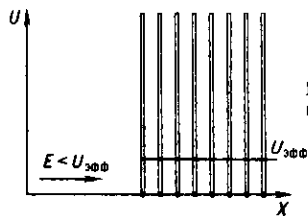


Рис. 1. Эффективный потенциал взаимодействия ультрахолодных нейтронов со средой.

потенциала нейтрон-ядерного взаимодействия используется точечный квазипотенциал Ферми:

$$V(r) = (h^2/2\pi m) b \delta(r - r_0),$$

где  $m$  — масса нейтрона,  $\delta(r - r_0)$  — дельта-функция;  $r_0$  — радиус-вектор ядра, а множитель  $b$ , называемый когерентной длиной рассеяния на связанном ядре, определяется экспериментально из сечения рассеяния  $\sigma_p$  медленных нейтронов на данных ядрах согласно соотношению

$$\sigma_p = 4\pi b^2.$$

Для среды с плотностью ядер  $N$  усреднение квазипотенциала Ферми по объёму даёт простое выражение для эфф. потенциала:

$$U_{эфф} = (h^2/2\pi m) b N.$$

Основанием для введения такого усреднённого потенциала можно считать тот факт, что нейтроны с длиной волны де Бройля  $\lambda$ , превышающей межатоомные расстояния, взаимодействуют сразу с большим кол-вом ядер и не ощущают дискретности среды.

Для большинства ядер  $b > 0$  и соответственно положителен их эфф. потенциал  $U_{эфф}$ . Чтобы проникнуть из вакуума внутрь среды, нейтроны должны преодолеть отталкивающее действие этого потенциала. Если энергия нейтронов  $\mathcal{E} = mv^2/2 < \mathcal{E}_{гр} = mv_{гр}^2/2 = U_{эфф}$ , то они не могут пройти из вакуума в среду и полностью отражаются при любых углах падения ( $\mathcal{E}_{гр}$  и  $v_{гр}$  — т. н. граничные энергия и скорость У. н. для данного материала). Эфф. потенциал  $U_{эфф}$  обусловлен чисто ядерными силами и связан с *сильным взаимодействием*, обычно характеризующимся энергиями в десятки МэВ. Однако из-за короткодействия ядерных сил и малого объёма, занимаемого ядрами в обычном веществе, величина  $U_{эфф}$ , играющая роль *работы выхода* при переходе нейтрона из вакуума внутрь среды, оказывается крайне малой ( $\sim 10^{-7}$  эВ). В табл. приведены значения эфф. потенциалов для ряда материалов. Небольшое кол-во веществ имеет отрицат. эфф. потенциал. При падении из вакуума У. н. частично отражаются от притягивающего потенциала этих веществ и частично проникают внутрь материала, где движутся с большей скоростью:

$$v_{ср} = v(1 - U_{эфф}/\mathcal{E})^{1/2}$$

( $v$  и  $v_{ср}$  — скорости нейтрона в вакууме и среде).

Эфф. потенциал связан с показателем преломления  $n$  нейтронной волны в веществе соотношением

$$n^2 = v_{ср}^2/v^2 = (\mathcal{E} - U_{эфф})/\mathcal{E} = 1 - \lambda^2 b N/\pi.$$

Оба способа описания взаимодействия нейтронов со средой — через эфф. потенциал или с помощью показателя преломления нейтронной волны — эквивалентны. Так, полное отражение У. н. при  $\mathcal{E} < U_{эфф}$  аналогично отражению света от металлич. зеркала (показатель преломления мнимый). Практически, однако, поведение У. н. удобнее рассматривать, решая *Шрёдингера уравнение* с потенциалом  $U_{эфф}(r)$ , учитывая также часто существенные для столь медленных нейтронов потенциалы гравитационного  $U_g = mgz$  ( $z$  — высота) и магнитного  $U_{маг} = \mu B(r)$  ( $\mu$  — магн. момент нейтрона,  $B$  — магн. индукция) полей. В частности, У. н. в гравитац. поле не могут преодолеть перепад высот  $> 2$  м.

Конечная величина  $U_{эфф}$  приводит к тому, что отражение У. н. сопровождается их частичным проникновением в среду на глубину

$$\kappa = h/(2mU_{эфф})^{1/2} \approx 100 \text{ \AA}.$$

Находясь внутри материала, У. н. могут либо быть захвачены ядрами, либо приобрести дополнительную энергию порядка  $kT \gg U_{эфф}$  за счёт процессов *неупругого рассеяния нейтронов* на фонах. Возникающие при этих процессах потери нейтронов описываются добавлением к эфф. потенциалу малой мнимой части, к-рую принято выражать безразмерным параметром (см. табл.)

$$\eta = -\text{Im} U_{эфф}/\text{Re} U_{эфф} = -\text{Im} b/\text{Re} b.$$

Эффективные потенциалы, граничные скорости и де-бройлевские длины волн  $[\lambda_d = h/(mv_{гр})]$  для некоторых материалов

Материал	$U_{эфф}$ , нэВ	$v_{гр}$ , м/с	$\lambda_d$ , \AA	$\eta = \frac{-\text{Im} U_{эфф}}{\text{Re} U_{эфф}}$
<sup>58</sup> Ni	380	8,52	464	0,9
	306	7,65	517	1,1
Ni	282	7,35	539	1,3
	208	6,31	627	1,8
Fe	341	8,07	490	0,5
	80	3,91	1011	2,2
Be	249	6,91	573	0,05
	196	6,12	646	0,06
Графит	168	5,66	699	1,44
	166	5,63	703	—
D <sub>2</sub> O	147	5,31	746	0,06
Аl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	125	4,89	809	—
Тefлон	101	4,39	901	—
CO <sub>2</sub>	95	4,26	928	16,0
Стекло борное	90	4,15	953	0,05
Стекло безборное	91	4,17	948	0,06
Pb	58,4	3,34	1184	0,11
Mg	54,1	3,21	1232	0,22
Al	54	3,21	1231	0,18
Si	-8,7	1,29	3063	—
Полиэтилен	-8,8	1,30	3047	1,70
Wa	-14,8	1,68	2353	—
H <sub>2</sub> O	-48,7	3,05	1296	5,8
Ti				

В силу *оптической теоремы* мнимая часть длины рассеяния

$$\text{Im} b = (-m/2h) \sigma_{полн} v,$$

где  $\sigma_{полн}$  — полное сечение взаимодействия нейтронов с материалом. При малых скоростях нейтронов доминирующими процессами являются захват и неупругое рассеяние нейтронов, сечения к-рых следуют т. н. закону  $1/v$ . Поэтому параметр  $\eta$  не зависит от скорости У. н. и для большинства материалов равен  $10^{-4} - 10^{-5}$ . Вероятность поглощения или нагрева У. н. при однократном отражении от поверхности материала  $\approx \eta v/v_{гр}$ , т. е. до своего исчезновения У. н. могут испытать более  $10^5$  столкновений со стенкой (границей).

**Получение У. н.** осуществляют путём выделения медленной компоненты максвелловского спектра тепловых нейтронов, выходящих из замедлителя *ядерного реактора*. В таком спектре поток У. н. с энергией  $0 < \mathcal{E} < \mathcal{E}_{гр}$  составляет

$$\Phi_{ун} = \frac{\Phi}{4(kT)^2} \int_0^{\mathcal{E}_{гр}} \exp(-\mathcal{E}/kT) \mathcal{E} d\mathcal{E} = \frac{\Phi}{8} (\mathcal{E}_{гр}/kT)^2.$$

Здесь  $\Phi$  — полный поток нейтронов из замедлителя,  $T$  — установившаяся в замедлителе темп-ра нейтронного газа. При  $T = 300$  К и  $\mathcal{E}_{гр} = 1,7 \cdot 10^{-7}$  эВ (для меди)  $\Phi_{ун} = 0,6 \cdot 10^{-11}$  Ф, т. е. У. н. составляют крайне малую часть полного потока нейтронов из реактора. Первые У. н. были выделены Ф. Л. Шапиро в 1968 т. н. методом времени пролёта на *импульсном реакторе*.