

## О ПРИМЕНИМОСТИ ПРИНЦИПА ФЕРМА К ОПТИКЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

*И.М.Франк, А.И.Франк*

Рассмотрен вопрос о применимости принципа Ферма к оптике ультрахолодных нейтронов (УХН), когда наличие гравитации существенно искривляет траектории нейтронов. Показано, что принцип Ферма вполне применим и в случае нейтронных волн

Способность ультрахолодных нейтронов (УХН) отражаться от зеркала при любом угле падения позволяет надеяться, что существует возможность создания нейтронно-оптических приборов и, в перспективе нейтронного микроскопа [1]. Поскольку длина волны УХН сравнима с длиной волны ультрафиолетового света, то при образовании изображения существенны не только законы геометрической оптики, но и особенности, характерные для волновой оптики. Какую роль здесь играют волновые свойства, видно, например, из опытов Шекенхофера и Штайерла по дифракции и интерференции [2]. При этом в работе [2] уже была использована довольно сложная оптическая система, в которой нейтронная волна испытывала большое число отражений от плоских зеркал.

Известно, что очень существенной особенностью УХН является изменение скорости нейтрона при изменении высоты. При этом траектория изгибается в поле гравитационных сил. Этот эффект значителен: максимальная высота, на которую способны подняться УХН, не превышает 1 — 2 м по отношению к уровню их источника. Влияние гравитации приводит, очевидно, к тому, что положение фокуса, в котором собирается пучок нейтронов, зависит от их начальной скорости (хроматическая аберрация), и даже для нейтронов со скоростью, близкой к максимальной, это влияние значительно. В этом заключается своеобразие оптики ультрахолодных нейтронов.

В обычной оптике лучи, собирающиеся в фокусе точечного источника, должны иметь одинаковые фазы. Это следствие принципа Ферма, согласно которому путь луча таков, что его оптическая длина минимальна. В идеальном случае, при фокусировании света в точку, это условие минимума должно выполняться для каждого луча из непрерывной последовательности лучей, приходящих в фокус, а это, очевидно, возможно только, если оптическая длина одинакова. Одинаковость фаз волн в фокусе — существенная характеристика изображения. Поскольку длина пути до фокуса различна для различных траекторий нейтронов, а волновой вектор  $k$  меняется по величине вдоль траектории, возникает вопрос о применимости к оптике УХН принципа Ферма.

Задача о распространении волны в потенциальном поле может быть описана введением показателя преломления. В случае потенциала, оп-

ределенного гравитацией, найдем из закона сохранения энергии

$$k_1^2 = k^2 - \frac{2m}{\hbar^2} U, \quad U = mgz. \quad (1)$$

Здесь  $U$  — изменение потенциала при подъеме на высоту  $z$  по отношению к некоторому уровню, условно принятому за нулевую высоту и  $k^2 = m^2 v^2 / \hbar^2$ , где  $v$  — скорость нейтрона при  $z = 0$ .

Отсюда квадрат показателя преломления

$$n^2(v, z) = \frac{k_1^2}{k^2} = 1 - \frac{2gz}{v^2}. \quad (2)$$

Это уравнение позволяет свести задачу о распространении нейтронных волн к оптической задаче о распространении света в среде с показателем преломления, являющимся функцией  $z$ . Поскольку принцип Ферма не требует допущения оптически однородной среды, то, следовательно, он применим и в случае нейтронных волн.

Объединенный институт  
ядерных исследований

Поступила в редакцию  
21 сентября 1978 г.

### Литература

- [1] И.М. Франк. Природа, №9, 24, 1972.  
[2] H.Schechehofer, A.Steyerl. Phys. Rev. Lett., 39, 1310, 1977.