

предположить существование только центральных сил между протонами, то экспериментальные данные не позволяют установить детали зависимости потенциальной энергии от расстояния, а определяют только два параметра: радиус эффективного взаимодействия $r_0 = 2,6 \cdot 10^{-13}$ см и длину рассеяния $a = -7,7 \cdot 10^{-13}$ см. Отрицательное значение длины рассеяния указывает на невозможность устойчивого состояния 1S двух протонов.

Можно было ожидать, что при больших энергиях в рассеянии будут присутствовать фазовые смещения P - и D -волн, величина которых могла дать указание о зависимости потенциала взаимодействия от расстояния. В работе [13] показано, что экспериментальные данные, полученные в [14], при исследовании рассеяния протонов 32 Мэв указывают на отсутствие фазовых смещений P - и D -волн, вызванных ядерными силами. В более поздней работе [15] измерялось с большой точностью (ошибка $< 1\%$) рассеяние $18,2$ Мэв протонов на протонах. Было показано, что фазы рассеяния

$$\delta_0 = 54,1^\circ, \quad \delta_1 = 1,0^\circ, \quad \delta_2 = 0,4^\circ.$$

В пределах радиуса действия ядерных сил кулоновское взаимодействие мало. Рассматривая его как возмущение, можно получить связь между длиной рассеяния a протонов на протонах и «эквивалентной» длиной рассеяния a_s , когда кулоновского поля нет [12].

$$\frac{1}{a_s} \approx \frac{1}{a} + \frac{1}{D} \left(\ln \frac{r_0}{D} + 2\gamma - 0,824 \right).$$

Полагая $a = -7,7 \cdot 10^{-13}$ см, $r_0 = 2,6 \cdot 10^{-13}$ см, $D = 2,88 \cdot 10^{-12}$ см, получим $a_s = -2,3 \cdot 10^{-12}$ см, что хорошо совпадает с наблюдаемой длиной рассеяния нейтронов на протонах в синглетном спиновом состоянии $a_s = -2,37 \cdot 10^{-12}$ см (см. § 46) и подтверждает гипотезу зарядовой независимости ядерных сил.

§ 48. Когерентное рассеяние и определение знака длин рассеяния нейтронов на протонах

Измерение эффективных сечений рассеяния нейтронов на протонах при малых энергиях позволяет определить только абсолютное значение длин рассеяния, а не их знаки. Знание же знаков длин рассеяния необходимо для установления возможности связанных состояний в системе. Положительное значение длин рассеяния указывает на то, что в системе возможны связанные состояния.

Для определения знака длин рассеяния можно исследовать интерференционные явления, возникающие при рассеянии нейтронов на нескольких протонах. Интерференционные явления можно наблюдать в том случае, когда расстояние между рассеивающими протонами меньше соответствующей длины волны де Бройля. Поскольку расстояние между атомами в молекулах и твердых телах порядка 10^{-8} см,

то интерференционные явления можно наблюдать только с нейтронами, обладающими энергиями $< 0,01$ эв.

Теллер и Швингер предложили изучать рассеяние нейтронов на молекулах орто- и параводорода с целью определения знака длины рассеяния. При комнатных температурах водород содержит как молекулы параводорода, так и молекулы ортоводорода. При температуре порядка 20°K можно получить водород, содержащий только молекулы параводорода, т. е. молекулы с антипараллельной ориентацией спинов протонов.

При рассеянии нейтрона (с длиной волны, значительно превышающей размеры молекулы) на молекуле водорода сечение рассеяния будет определяться только длиной рассеяния $\sigma = 4\pi a^2$, где длина рассеяния a будет равна сумме длин рассеяния на первом и втором протоне молекулы. Поскольку длина рассеяния, совпадающая при очень малых энергиях по абсолютной величине с амплитудой рассеяния, пропорциональна приведенной массе (см. (43,8а)), то, рассматривая при упругом рассеянии нейтронов малой энергии молекулу водорода как жесткую, можно выразить длину рассеяния нейтрона на связанном в молекуле протоне через длину рассеяния на свободном протоне:

$$a' = a_{\text{связ}} = \frac{\mu_{\text{мол}}}{\mu_{\text{своб}}} a_{\text{своб}} = \frac{4}{3} a_{\text{своб}}, \quad (48,1)$$

где $\mu_{\text{мол}} = \frac{2}{3} M$ — приведенная масса молекулы и нейтрона;
 $\mu_{\text{своб}} = \frac{M}{2}$ — приведенная масса протона и нейтрона.

В зависимости от взаимной ориентации спинов нейтрона и протонов соответствующая длина рассеяния будет совпадать либо с длиной синглетного рассеяния, либо с длиной триплетного рассеяния. Поэтому удобно ввести эффективную длину рассеяния:

$$a_{\text{эфф}} = a'_t \pi_t + a'_s \pi_s, \quad (48,2)$$

где

$$\pi_s = \frac{1}{4} (1 - \sigma_n \sigma_p) \quad \text{и} \quad \pi_t = \frac{1}{4} (3 + \sigma_n \sigma_p) \quad (48,3)$$

— проекционные операторы соответственно синглетного и триплетного спинового состояний. Оператор π_t равен нулю в синглетном состоянии, а π_s — в триплетном.

Длину рассеяния нейтронов на обоих протонах молекулы водорода можно представить*) так:

$$a = a_{\text{эфф}}(1) + a_{\text{эфф}}(2).$$

*) Это простое соотношение справедливо лишь при столь большой длине волны, при которой оба протона молекулы можно считать расположенными в одной точке, т. е. когда можно пренебречь разностью фаз, обусловленной расстоянием между протонами. Энергия таких нейтронов недостаточна для возбуждения ротационных уровней молекулы; поэтому рассеяние будет только упругим.

Принимая во внимание (48,2) и (48,3), получим:

$$a = \frac{1}{2} (3a'_t + a'_s) + \frac{1}{2} (a'_t - a'_s) \sigma_n S,$$

где $S = \frac{1}{2} [\sigma_p(1) + \sigma_p(2)]$ — суммарный спин молекулы водорода. Для молекулы пароводорода $S = 0$, следовательно,

$$a_{\text{пара}} = \frac{1}{2} (3a'_t + a'_s).$$

Пользуясь (48,1), можно выразить длину рассеяния нейтронов на молекуле параводорода через длины рассеяния на свободных протонах

$$a_{\text{пара}} = \frac{2}{3} (3a_t + a_s). \quad (48,4)$$

Сечение рассеяния

$$\sigma_{\text{пара}} = 4\pi |a_{\text{пара}}|^2 = \frac{16}{9} \pi |3a_t + a_s|^2. \quad (48,5)$$

Подставляя значения (см. § 46) $a_t = 5,39 \cdot 10^{-13}$ см, $a_s = -2,37 \cdot 10^{-12}$ см, получим $(3a_t + a_s) = -0,753 \cdot 10^{-12}$ см; $\sigma_{\text{пара}} = 3,17 \cdot 10^{-24}$ см². Если бы длина синглетного рассеяния была положительной, то $\sigma_{\text{пара}}^{(+)} = 88,8 \cdot 10^{-24}$ см². Экспериментальное значение [16] $(3a_t + a_s)_{\text{эксп}} = 0,647 \cdot 10^{-24}$ см². Следовательно, сечение рассеяния нейтронов на параводороде

$$(\sigma_{\text{пара}})_{\text{эксп}} = 3,6 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2.$$

Это значение, несомненно, подтверждает, что длины синглетного и триплетного рассеяния нейтронов на протонах имеют противоположные знаки.

Измерения $\sigma_{\text{пара}}$ на параводороде могут содержать систематическую ошибку из-за присутствия малых количеств ортоводорода и явления радиационного захвата нейтрона протоном с образованием дейтрона.

Получение мощных потоков нейтронов с помощью ядерных реакторов позволило изучать рассеяние на кристаллах, содержащих водород. Упругое рассеяние нейтронов системой, состоящей из большого числа протонов, может быть представлено в виде суммы когерентного и некогерентного или диффузионного рассеяния. Рассеяние называется когерентным, если рассеянные волны интерферируют между собой и падающей волной. При некогерентном рассеянии такой интерференции нет. Некогерентное рассеяние возникает из-за флуктуаций плотности, вызванной тепловым движением (тепловое диффузионное рассеяние), из-за присутствия беспорядочно распределенных других ядер и из-за беспорядочной ориентации спинов (если рассеяние зависит от спинов). Более подробно эти вопросы разобраны в главе XII.

При некогерентном рассеянии сечение рассеяния определяется суммой сечений на каждом центре рассеяния. При когерентном рассеянии надо складывать амплитуды рассеяния, а затем уже вычислять сечение.

Вследствие интерференции когерентно рассеянных в направлении вперед волн суммарная волна, распространяющаяся в кристалле, будет иметь волновое число K , отличающееся от волнового числа k в свободном пространстве (см. § 90):

$$K^2 = k^2 + 4\pi N A_{aa}, \quad (48,6)$$

где $k = \sqrt{\frac{2\pi\epsilon}{h}}$; N — число рассеивающих центров в $см^3$; A_{aa} — амплитуда рассеяния вперед, отнесенная к одному ядру. Используя (48,6), можно ввести понятие показателя преломления вещества для нейтронных волн

$$n = \frac{K}{k} = \sqrt{1 + \frac{4\pi N A_{aa}}{k^2}} \approx 1 + \frac{2\pi N}{k^2} A_{aa}. \quad (48,7)$$

Существенно, что показатель преломления линейно зависит от амплитуды рассеяния. Измеряя показатель преломления, следовательно, можно определить знак амплитуды рассеяния. Показатель преломления (48,7) обычно очень мало отличается от единицы; так, например, при $A_{aa} = 5 \cdot 10^{-13}$ $см$ (что соответствует полному сечению $\sigma = 3,14$ $барн$) $N \sim 10^{22}$; для тепловых нейтронов ($\lambda \sim 2 \cdot 10^{-8}$ $см$) показатель преломления будет отличаться от единицы только в шестом знаке.

Если коэффициент преломления вещества для нейтронов меньше единицы, то при некотором угле падения возникнет полное внутреннее отражение. Критический угол полного внутреннего отражения зависит только от показателя преломления. Различные некогерентные эффекты (поглощение и т. д.) ведут к уменьшению интенсивности отраженного пучка и не влияют на критический угол полного внутреннего отражения. В связи с этим определение критического угла полного внутреннего отражения является лучшим методом измерения показателя преломления. Одним из первых этот метод применили Ферми и Маршалл [17], которые воспользовались береговским отражением от монокристалла для получения монохроматического падающего пучка нейтронов.

Поскольку длина рассеяния a связана с амплитудой рассеяния A простым соотношением $a = -A$, то формулу (48,7) можно написать в виде

$$n = 1 - \frac{2\pi N a}{k^2}. \quad (48,8)$$

Критический угол полного внутреннего отражения определяется соотношением

$$\theta_0 = \sqrt{2(1-n)} = \frac{2}{k} \sqrt{\pi N a}. \quad (48,9)$$

Обычно $(1-n) \sim 10^{-6}$, поэтому θ_0 соответствует десяткам минут.

Для определения знака и величины длины когерентного рассеяния ($a_{\text{ког}}$) на ядрах водорода использовалось полное внутреннее отражение нейтронов от поверхности жидкого триэтилбензола ($C_{12}H_8$) (метод «жидкого» зеркала).

Под длиной когерентного рассеяния понимается (см. главу XII) отнесенная к одному протону, усредненная по ориентациям спина длина рассеяния

$$a_{\text{ког}} = \frac{3}{4} a'_t + \frac{1}{4} a'_s.$$

Поскольку протоны связаны с тяжелой молекулой, то $a' = 2a_{\text{своб}} \equiv 2a$, поэтому

$$a_{\text{ког}} = \frac{1}{2} (3a_t + a_s). \quad (48,10)$$

Подставляя в (48,10) значение $a_t = 5,39 \cdot 10^{-13}$ см, $a_s = 2,37 \cdot 10^{-13}$ см, получим теоретическое значение $(a_{\text{ког}})_{\text{теор}} = 3,75 \cdot 10^{-13}$ см.

В эксперименте «зеркало» содержало смесь атомов водорода и углерода в отношении 1,5:1, поэтому в формулу (48,9) надо подставить $a = (a_C + 1,5a_H)_{\text{ког}}$. Значение a_C известно с точностью до 0,5%, и равно $6,63 \cdot 10^{-13}$ см, поэтому из экспериментально определенной величины a можно вычислить длину рассеяния a_H ; оказалось, что $(a_H)_{\text{ког}} = -(3,75 \pm 0,3) \cdot 10^{-13}$ см, что находится в хорошем согласии с приведенным выше теоретическим значением.