

## Метод малоуглового рассеяния нейтронов для исследования наноуглеродных структур и материалов

Кульвелис Ю.В.<sup>1</sup>

kulvelis\_yv@npi.nrcki.ru

<sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН), как правило, позволяет определить особенности тонкой структуры объекта на масштабе 1-100 нм (надмолекулярные структуры). Нейтронная волна, длина волны которой (2–20 Å) сравнима с межатомными расстояниями в конденсированном веществе или превышает это расстояние, вступает во взаимодействие сразу с коллективом атомов, что позволяет рассматривать рассеяние медленных нейтронов, используя общие оптические понятия когерентного и некогерентного рассеяния, применяемые к рассеянию волн любой природы. Атомы ансамбля рассеивают нейтроны двояким образом: либо как единый коллектив, либо как набор отдельных независимых рассеивающих центров. Этот факт выражается в разбиении сечения рассеяния  $s$  на два слагаемых – когерентное ( $s_c$ ) и некогерентное ( $s_i$ ):  $s = s_c + s_i$ .

Эксперимент по МУРН сводится к измерению кривой рассеяния нейтронов на образце, которая представляет собой зависимость интенсивности  $I$  или сечения когерентного рассеяния нейтронов  $d\Sigma/d\Omega$  в единичный телесный угол  $\Omega$  от длины вектора рассеяния  $q = \frac{4\pi \sin(\theta/2)}{\lambda}$ , который пропорционален переданному импульсу ( $p = \hbar q$ ), где  $q$  – угол рассеяния, а  $\lambda$  – длина волны нейтронов. Анализ кривой рассеяния  $I(q)$ , являющейся Фурье-образом корреляционной функции, имеющей смысл распределения рассеивающих объектов по размерам, позволяет установить характерные размеры и форму рассеивающих частиц в образце, их пространственное распределение и взаимную организацию [1].

Важной особенностью МУРН является природа рассеяния – нейтроны, взаимодействуя с атомами, рассеиваются в основном только на их ядрах. Это приводит к тому, что амплитуды  $b_c$  когерентного рассеяния нейтронов на ядрах разных изотопов одного химического элемента могут сильно различаться. Особенно важным при исследовании углеродных и других структур является различие  $b_c$  для водорода и дейтерия, что дает возможность изотопного контрастирования в МУРН-эксперименте. Для углеродных структур (наноалмазы, графен, фуллерены) МУРН позволяет определить организацию кластеров, образующихся из первичных частиц в водных суспензиях, а контрастированием можно определить наличие неалмазной компоненты на поверхности алмазных наночастиц. Метод МУРН хорошо зарекомендовал себя при исследовании тонкой структуры протонопроводящих мембран, изготовленных на основе фторсодержащих полимеров типа Nafion®, где наблюдаются тонкие гидрофильные каналы в гидрофобной полимерной матрице со строго упорядоченной структурой, которые собираются в пучки и имеют несколько уровней структурной организации.

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-23-00129).*

### Ссылки

1. Д.И. Свергун, Л.А. Фейгин Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. (Наука, М., 1986).