

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



10238

РЗ - 10238

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

Ю.Ю.Косвинцев, Е.Н.Кулагин, Ю.А.Кушнир,
В.И.Морозов, А.В.Стрелков

ИЗВЛЕЧЕНИЕ УХН
ИЗ ВЫСОКОПОТОЧНОГО РЕАКТОРА СМ-2

1976

РЗ - 10238

Ю.Ю.Косвинцев,* Е.Н.Кулагин, Ю.А.Кушнир,*
В.И.Морозов,* А.В.Стрелков

ИЗВЛЕЧЕНИЕ УХН
ИЗ ВЫСОКОПОТОЧНОГО РЕАКТОРА СМ-2

Направлено в *"Nuclear Instruments and Methods"*

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

*Научно-исследовательский институт атомных реакторов, г. Димитровград.

Косвинцев Ю.Ю. и др.

P3 - 10238

Извлечение УХН из высокопоточного реактора СМ-2

Описана установка для получения ультрахолодных нейтронов на высокопоточном реакторе СМ-2. Максимальный выведенный поток УХН составляет 1200 с^{-1} . Измерены интегральные и дифференциальные энергетические спектры этого потока. Определены пропускания УХН прямыми трубами и угловыми поворотами, наблюдалась анизотропия потока ультрахолодных нейтронов, показано существование эффектов выстроенности пучка и предельного углового распределения потока УХН.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1976

Kosvintsev Yu. Yu. et al.

P3 - 10238

Extraction of UCN from High Flux Reactor
SM-2

The present paper describes the installation for ultracold neutrons (UCN) at the SM-2 reactor of the Reactor Research Institute in Dimitrovgrad. Maximum UCN flux extracted was about 1200 sec^{-1} . Both integral and differential energetic spectra of the obtained beam were measured. The UCN transmission was determined for straight and bent guide tubes as well as the angular distribution of UCN at the exit of these guide tubes. It is shown that there exists an effect of beam alignment and a lower limiting angle in the neutron angular distribution at the guide tube exit. Results of a storage experiment in a vessel of about 340 litres are reported.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research

Dubna 1976

Введение

Под ультрахолодными нейтронами /УХН/ понимают нейтроны с энергией E , меньшей средней энергии взаимодействия нейтрона с веществом,

$$E_{\text{УХН}} < \frac{2\pi\hbar^2}{m} N b,$$

где m - масса нейтрона, N - число ядер в 1 см^3 , b - длина рассеяния нейтронов на ядрах вещества. Для большинства веществ $E_{\text{УХН}} \sim 10^{-7} - 10^{-8} \text{ эВ}$. Такие нейтроны отражаются от поверхности вещества при любых углах падения и, будучи заключенными в сосуд, напоминают по своему поведению идеальный газ. После вылета из источника, они, как идеальный газ, диффундируют по трубам и нейтроноводам, имеющим совершенно произвольную конфигурацию. Исключительно малая энергия УХН и возможности их удержания позволяют надеяться на использование УХН в ряде фундаментальных физических экспериментов и прикладных задачах /1/.

Усилиями ряда групп было достигнуто увеличение выхода УХН от $\sim 0,005 \text{ с}^{-1}$ /в первых экспериментах/ до 10^2 с^{-1} , главным образом за счет использования более интенсивных потоков тепловых нейтронов и увеличения степени зеркальности отражающих стенок нейтроновода. Измерения /2/ показали, что при транспортировке по горизонтальным нейтроноводам длиной 5-6 м и диаметром 10 см поток УХН ослабляется в 2-2,5 раза. Используя слабо изогнутый нейтроновод и еще дальше увеличивая степень его зеркальности, в принципе можно еще почти вдвое поднять поток УХН на выходе нейтро-

новода. Однако это приведет к существенному увеличению фона от нейтронов с энергиями, несколько превышающими энергию УХН^{/3/}. В качестве материала для конвертора-замедлителя ультрахолодных нейтронов практически удобно применять гидрид циркония^{/4/}. Использование жидкого водорода, дающего, по расчетам, более существенный выигрыш в выходе УХН, осложнено техническими трудностями работы с жидким водородом у активной зоны реактора. Таким образом, возможным путем дальнейшего увеличения выхода УХН является увеличение потока тепловых нейтронов на конверторе, т.е. использование реактора с потоком $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Извлечение УХН из высокотоочных реакторов связано с трудностями, обусловленными большим радиационным тепловыделением и разложением материала конвертора, более интенсивной радиационной коррозией и тем самым ухудшением степени полировки внутренних стенок нейтроновода.

Нейтронород

Основной частью установки /рис. 1/ является вакуумированный нейтроновод, изготовленный из отрезков труб с электрополированными внутренними стенками. Применение 4 резких изгибов нейтроновода под углом 45° позволило отфильтровать поток УХН от превосходящего его в 10^{12} раз общего потока нейтронов реактора. Участок нейтроновода, проходящий внутри биологической защиты реактора, изготовлен из труб нержавеющей стали диаметрами 70 и 90 см, толщиной в 1 мм, а участок, расположенный вне защиты реактора, - из медных труб диаметром 100 мм.

Используемая конструкция шибера прямого пучка позволила обвести нейтроновод мимо подвижного барабана, закрывающего прямой пучок. Тем самым отпала необходимость в громоздкой защите от прямого пучка вне биологической защиты реактора и сохранилась возможность для проведения и других исследований на прямом пучке. Конвертор УХН выполнен в виде диска из гидрида цирко-

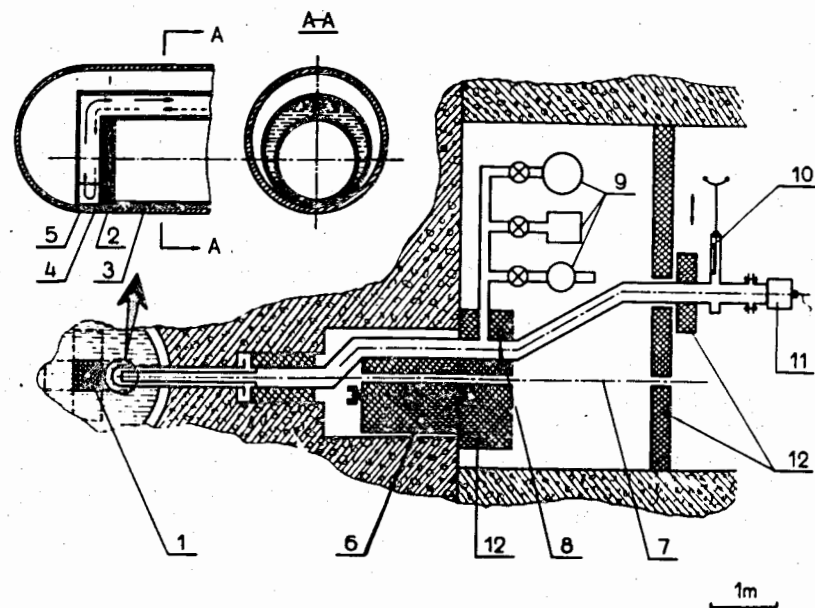


Рис. 1. Схема расположения нейтроновода: 1 - активная зона реактора, 2 - конвертор /гидрид циркония/, 3 - нейтроновод УХН, 4 - водяная рубашка охлаждения конвертора, 5 - циркониевая оболочка канала, 6 - шибер прямого пучка, 7 - прямой пучок, 8 - алюминиевая фольга, 9 - вакуумные насосы, 10 - вакуумный шибер, 11 - детектор УХН, 12 - дополнительная защита.

ния $\phi 70$ мм и толщиной 1,5 мм, припаянного оловом к внутреннему торцу начального участка нейтроновода, который охлаждается водой, циркулирующей в системе охлаждения каналов реактора. Внутренняя полость участка нейтроновода, размещенного в защите реактора, герметично отделена от остальной части нейтроновода алюминиевой фольгой толщиной 100 мкм, что предотвращает случайное попадание воздуха в начальный участок при монтажных работах на выходе нейтроновода. Измерения показали, что постановка такой фольги ослабляет поток УХН на $25 \div 30\%$. Откачка начального участка нейтро-

новода осуществлялась непрерывно магнитно-электро-разрядным насосом до вакуума $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ Тор, а остальная часть нейтроновода с подсоединяемыми к нему устройствами откачивалась диффузионным насосом. Вакуумный шибер, установленный на выходе нейтроновода, позволяет разгрузить алюминиевую фольгу от перепада давлений при частых разгерметизациях на конце нейтроновода.

Весь нейтроновод может перемещаться на ~ 25 см в зоне оси пучка. При этом конвертор выводится из зоны интенсивного облучения в то время, когда эксперименты с УХН не проводятся.

Для регистрации УХН использован двухкамерный пропорциональный счетчик на основе ^3He с суммарной площадью входного окна камер $60 \text{ см}^2 / 5$.

Для определения фона от более быстрых, чем УХН, нейтронов обе камеры счетчика могли поочередно перекрываться медной / ~ 10 мкм / шторкой.

Эксперименты с УХН

При максимальном потоке тепловых нейтронов на конверторе $/2 \div 4/ 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ / мощность реактора - 100 МВт / счет УХН составил 640 с^{-1} при фоне от холодных нейтронов $\sim 45 \text{ с}^{-1}$ и тепловых - $0,01 \text{ с}^{-1}$ / при постановке дополнительной защиты на детектор/. Фон от холодных нейтронов эффективно подавлялся применением дополнительных угловых поворотов нейтроновода. Таким образом, в случае эффективности детектора $\sim 0,5^{1/4}$ установка позволяет получать практически "чистый" поток УХН $1200 \div 1300 \text{ с}^{-1}$.

Интегральный энергетический спектр - интенсивность регистрации УХН в зависимости от h /высоты * энергетического барьера в поле тяжести Земли/ измерялся с помощью поворотного колена нейтроновода

* Численно высота подъема УХН в сантиметрах почти точно совпадает с энергией нейтрона, выраженной в нанозлектрон-вольтах.

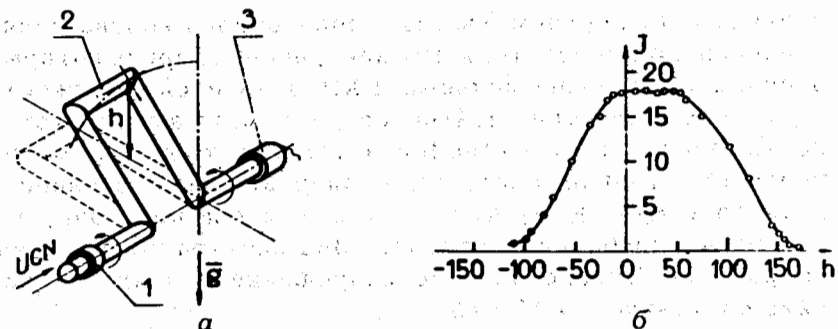


Рис. 2. а/ Схема измерения интегрального спектра УХН: 1 - вращающееся сочленение нейтроновода, 2 - поворотное колено, 3 - детектор УХН. б/ Интегральный спектр УХН на выходе нейтроновода. J - интенсивность регистрации УХН $/\text{с}^{-1}/$. h - высота установки верхнего участка колена над уровнем нейтроновода $/\text{см}/$.

из нержавеющей стали /рис. 2а/. Счет детектора в зависимости от высоты подъема колена показан на рис. 2в. Сплошной линией обозначен спектр, рассчитанный в предположении максвелловского распределения потока УХН.

Измерен также дифференциальный спектр потока УХН на устройстве /рис. 3а/, отличающемся от предыдущего

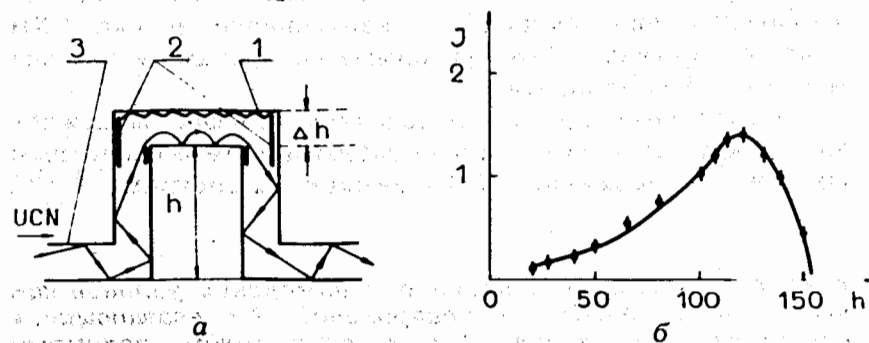


Рис. 3. а/ Схема измерения дифференциального спектра УХН: 1 - поглотитель УХН, 2 - алюминиевые экраны, 3 - поворотное колено. б/ Дифференциальный спектр на выходе нейтроновода. J - интенсивность регистрации УХН $/\text{с}^{-1}/$, h - высота установки нижнего края энергетической щели Δh над уровнем нейтроновода $/\text{см}/$.

наличием на верхнем участке поворотного колена полиэтиленового поглотителя для нейтронов, энергия которых превышает энергию подъема УХН в поле силы тяжести от уровня положения нейтропровода ($h=0$) до высоты установки поглотителя ($h+\Delta h$). Через такое устройство могут проходить только нейтроны с энергией, заключенной в диапазоне $mg h < E < mg(h+\Delta h)$, где m - масса нейтрона, g - ускорение свободного падения. Вид спектра представлен на рис. 3в. Энергетическое разрешение в этих измерениях составило $\sim 10^{-8}$ эВ.

Измерения углового распределения потока УХН производились детектором УХН, устанавливаемым под различными углами к оси нейтропровода с помощью устройства, схематически изображенного на рис. 4а.

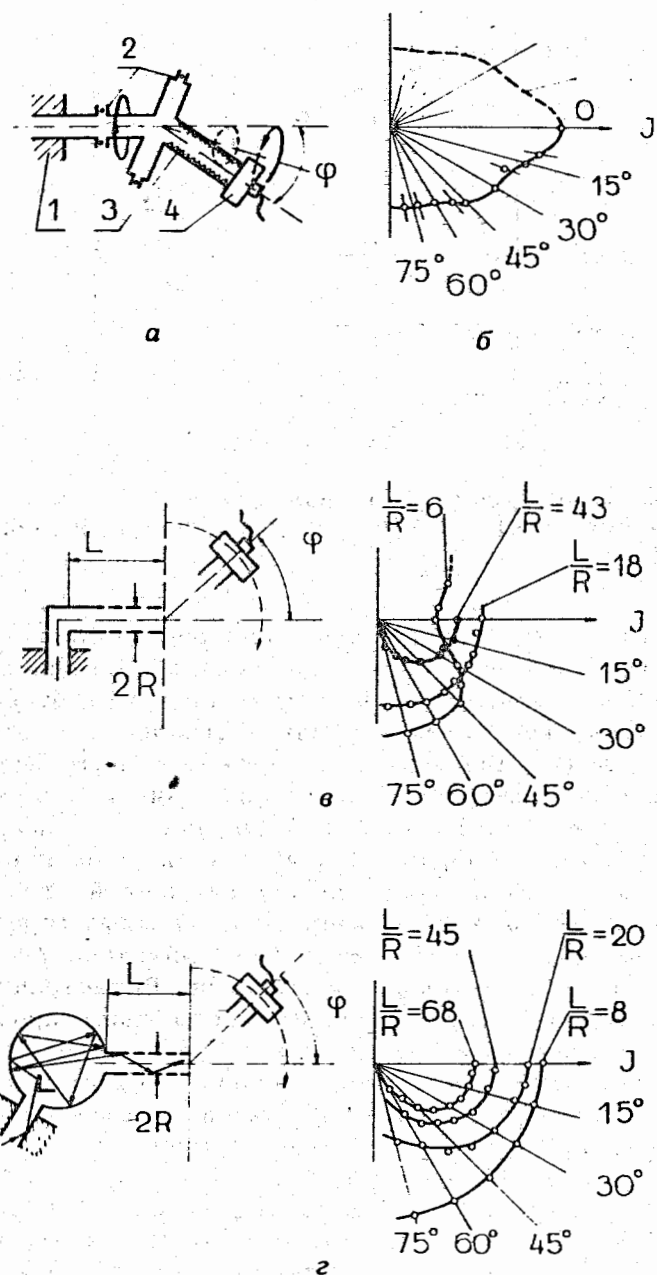
Наблюдаемая направленность потока УХН на выходе нейтропровода /рис. 4б/ претерпевала изменения после прохождения УХН углового поворота /рис. 4в/ или полностью разрушалась после прохождения медной сферической полости $\phi 30$ см /рис. 4г/.

Однако в обоих случаях при последующем распространении УХН по нейтропроводу на расстояниях $L/R \approx 40$ угловое распределение снова принимало вытянутую устойчивую форму, которая уже сохранялась при дальнейшем движении УХН по нейтропроводу.

На рис. 5 представлены результаты измерений коэффициента пропускания изотропного потока УХН /рис. 4г, случай $L/R=8$ / угловыми поворотами в зависимости от угла поворота.

В настоящее время наблюдается большое расхождение между экспериментально наблюдаемым и расчетным временами удержания УХН в замкнутых сосудах /2,3, 5,6/.

Рис. 4. а/ Схема установки для измерения угловой направленности УХН: 1 - нейтропровод, 2 - вращающиеся вакуумные сочленения, 3 - участок трубы, покрытый внутри поглотителем УХН /гофрированный полиэтилен/, 4 - детектор УХН. б/ Угловое распределение УХН на выходе нейтропровода. в/ Угловое распределение УХН, измеренное на различных расстояниях от прямоугольного поворота нейтропровода. г/ То же самое для сферической полости.



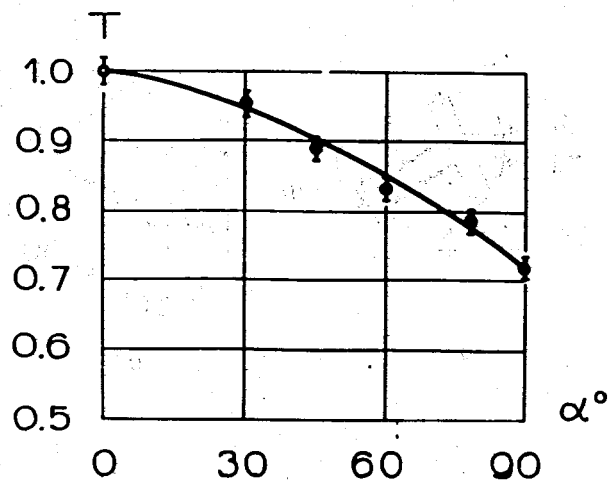
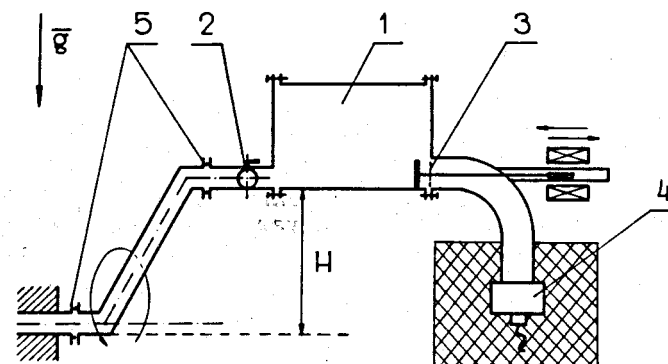


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропускания T для изотропного потока УХН от угла поворота нейтронвода α° .

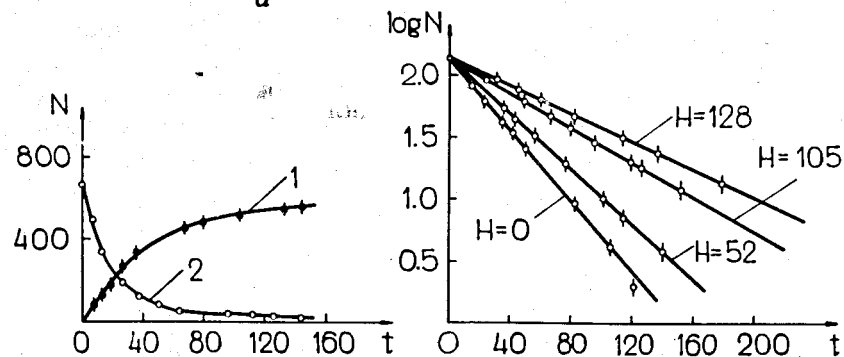
В связи с этим представляет интерес изучение трансформации спектра УХН в процессе их удержания в накопительном объеме. Такие измерения существенно упрощаются при использовании для удержания сосудов большого объема. Для изучения удержания УХН был изготовлен из нержавеющей стали цилиндрический сосуд диаметром ~ 64 см и длиной ~ 105 см /рис. 6а/. Внутренние стенки сосуда обрабатывались электрополированием. Геометрическая площадь возможных щелей утечки УХН не превышала $3-4$ см². На противоположных торцах располагались впускное / $\phi 8$ см/ и выпускное / $\phi 20$ см/ отверстия, закрываемые заслонками. Регистрация "вытекающих" УХН из сосуда осуществлялась пропорциональным счетчиком на основе ³He /³He - 1%, Co₂ - 2%, остальное - Ag, до 1 атм/ с входным окном из алюминиевой фольги толщиной ~ 100 мкм и площадью ~ 300 см².

Алюминиевое окно счетчика отражает УХН с нормальной компонентой скорости менее $\sim 3,2$ м·с⁻¹. Поэтому детектор УХН располагался на ~ 50 см ниже выпускного отверстия. Ультрахолодные нейтроны при падении с такой высоты приобретают дополнительную

скорость ~ 3 м·с⁻¹/, что приводит к увеличению прозрачности алюминиевого окна для УХН, а, следовательно, и к увеличению эффективности их регистрации / \sim в 2 раза/. Весь объем для удержания УХН с помощью вращающихся сочленений нейтронвода может подниматься или опускаться относительно оси нейтронвода, что приводит к изменению спектра ультрахолодных нейтронов, наполняющих сосуд.



а



б

в

Рис. 6. а/ Схема измерения времени удержания УХН в замкнутом сосуде: 1 - сосуд для удержания, 2 - впускная и 3 - выпускная заслонки УХН, 4 - детектор УХН, 5 - вращающиеся вакуумные сочленения нейтронвода. б/ Кривые наполнения /1/ и опорожнения /2/ сосуда УХН. в/ Кривые времен удержания УХН для различных высот подъема сосуда H /см/.

Определение времени удержания УХН производилось методом измерения количества оставшихся в сосуде УХН спустя некоторое время после его наполнения для различных времен выдержки /рис. 6а/. Время удержания УХН в сосуде, расположенном на уровне нейтронотода ($N=0$), составило 47 ± 3 с, время наполнения 33 ± 2 с, а время вытекания 15 ± 2 с /рис. 6б/. Количество накопленных УХН за один цикл $\sim 5 \cdot 10^3$. Измерения происходили при вакууме в сосуде от $3 \cdot 10^{-1}$ до $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ Тор. Давление остаточного газа в сосуде менее 10^{-3} Тор не влияет на время удержания. Увеличение геометрической площади щелей от 4 до 40 см^2 уменьшило время удержания до 43 с, т.е. утечкой через существующие щели и давлением остаточного газа невозможно объяснить сравнительно малую величину полученного времени удержания УХН. При подъеме сосуда на высоты 53, 105 и 128 см время жизни УХН соответственно составило 55, 85 и 104 с. Такое увеличение времени удержания связано с тем, что при подъеме на высоту H спектр УХН, заполняющих сосуд, сдвигается в низкоэнергетическую область на величину mgH .

В дальнейшем с помощью вышеописанных спектрометров планируется измерять спектры вытекающих из сосуда нейтронов, тем самым можно будет проследить за трансформацией спектра удерживаемых в сосуде УХН, что, в свою очередь, может дать информацию о механизме аномально большого коэффициента поглощения УХН при отражении их от стенок сосуда.

Заключение

Извлекаемый поток УХН на данной установке близок к ожидаемому и составляет $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$. При такой интенсивности потока УХН возможным становится детальное изучение спектров УХН, их поведения в замкнутых объемах, измерение сечений взаимодействия УХН с веществом, определение амплитуд когерентного рассеяния и т.д.

Особенный интерес представляют опыты по прямому измерению периода полураспада нейтрона и определению

его электрического дипольного момента, постановка которых на достигнутом потоке УХН уже вполне возможна.

Авторы благодарны Ю.С.Замятнину, В.Н.Нефедову, М.Хетцельту, В.И.Лушикову и И.М.Франку за полезные обсуждения и интерес к этой работе.

Литература

1. Ф.Л.Шапиро. ОИЯИ, РЗ-7135, Дубна, 1973; Conference on Nuclear Structure Study with Neutrons, Budapest, 1972.
2. Л.В.Грошев, В.Н.Дворецкий, А.М.Демидов, В.И.Лушиков, Ю.Н.Панин, Ю.Н.Покопиловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро. ОИЯИ, РЗ-5392, Дубна, 1970; Phys.Lett., 34B, 4, 293 (1971).
3. В.М.Лобашев, Г.Д.Порсев, А.П.Серебров, Е.И.Егоров, В.А.Назаренко. ЯФ, 19, 300 /1974/.
4. В.В.Голиков, В.И.Лушиков, Ф.Л.Шапиро. ЖЭТФ, 64, 1, 73 /1972/.
5. Л.В.Грошев, В.Н.Дворецкий, А.М.Демидов, С.А.Николаев, Ю.Н.Панин, Ю.Н.Покопиловский, А.В.Стрелков, Ф.Л.Шапиро. ОИЯИ, РЗ-7282, Дубна, 1973.
6. A.Steyerl, W.-D.Trüstedt. Z.Physik, 267, 379 (1974).

Рукопись поступила в издательский отдел
22 ноября 1976 года.