

спиральности нейтронов, отнесенный к их сумме, составлял 0,1, то есть в 10^6 раз превышал подобный эффект для нуклон-нуклонных взаимодействий.

В дальнейшем были предприняты специальные измерения для поиска низкоэнергетических p -волновых резонансов. Для некоторых из них были обнаружены эффекты нарушения четности. Особенно интересным был результат, полученный с мишенью ^{113}Cd . У этого изотопа кадмия был обнаружен p -резонанс при энергии 7 эВ и измерен эффект нарушения четности. Сопоставление этих данных с результатом эксперимента Ю.Г.Абова для тепловых нейтронов показало хорошее согласие с теорией.

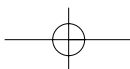
Результат, полученный в ЛНФ, стимулировал начало подобных измерений в США, Японии, а также в российских исследовательских центрах.

Некоторые исследования поискового характера

Созданные в ЛНФ методики для спектроскопических исследований по времени пролета позволили провести ряд экспериментов, имеющих фундаментальный характер. Это проверка равенства гравитационной и инертной масс нейтрона, поиск относительной пространственной анизотропии в распространении нейтронов и гамма-квантов, поиск осциллирующий нейтрон-антинейтрон, поиск сверхплотных ядер. Результаты этих экспериментов имели лишь оценочный характер.

5. Ультрахолодные нейтроны

В связи с открытием в 1964 году видимого нарушения инвариантности по отношению к обращению времени (T -четности) в процессе распада K_0 -мезонов Ф.Л.Шапиро в 1968 году предложил с помощью ультрахолодных нейтронов (УХН) поставить эксперимент с целью выяснить: существует ли электрический дипольный момент (ЭДМ) у нейтрона. Наличие ЭДМ нейтрона, как у элементарной частицы, дало бы еще одно указание на существование нарушения T -четности. Специфическое свойство УХН — способность их храниться в замкнутом сосуде было отмечено Я.Б.Зельдовичем в 1959 году, однако не было подтверждено экспериментально. В 1968 году в ЛНФ на реакторе ИБР под руководством Ф.Л.Шапиро В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотилковский и А.В.Стрелков выполнили эксперимент, в котором впервые наблюдался эффект последовательного многократного отражения нейтрона от стенки сосуда, тем самым нейтрон достаточно долго сохранялся в этом сосуде. В этом первом эксперименте плотность УХН составила всего $\sim 10^{-5}$ УХН/см³, что в значительной мере определялось сравнительно малой мощностью реактора ИБР ~ 6 кВт. Поэтому эксперименты с УХН были перенесены на более мощный реактор ИРТ Института атомной энергии, где в период 1969–1974 годов сотрудниками ЛНФ ОИЯИ совместно с группой Л.В.Грошева исследовались конверторы-замедлители УХН, распространение УХН по нейтроноводам, гравитационная спектроскопия УХН, хранение и детектирование УХН. Возможность хранения УХН в сосудах была продемонстрирована уже в первых экспериментах, однако полученное время хранения оказалось намного меньше ожидаемого. За прошедшие десятилетия с момента открытия УХН выполнены обширные экспериментальные и теоретические исследования, посвященные поиску причин ограничения времени хранения УХН в сосудах.



С 1973 года сотрудники ЛНФ совместно с группой исследователей из НИИАР при содействии Ю.С.Замятнина начали совместные исследования с УХН на самом мощном исследовательском реакторе СМ-2 мощностью 110 МВт в НИИАР (г. Димитровград). В этих исследованиях впервые был наблюден процесс разогрева УХН (в диапазоне энергий тепловых нейтронов), как причины аномального ограничения времени хранения УХН в замкнутых сосудах, и был измерен спектр нагретых нейтронов. На этом же реакторе был выполнен эксперимент с динамически чистым сосудом, стенки которого во время хранения УХН постоянно возобновлялись напылением на них атомов алюминия. Аналогичные измерения были проделаны и с напылением на стенки сосуда меди, цинка, свинца и бериллия. В сосуде с напыленным на стенки бериллием получено время хранения 650 с. В бериллиевых обезгаженных сосудах наблюдалась утечка УХН, очень слабо зависящая от температуры в интервале (20–800)К и практически не зависящая от процессов дейтерирования и покрытия стенок конденсированным CO_2 и D_2O . Проточным способом было измерено парциальное время хранения УХН до нагрева и захвата на поверхности бериллиевого сосуда и измерены спектры нагретых нейтронов в зависимости от степени обезгаживания стенок сосуда.

В 1987 году в ЛНФ была создана оригинальная установка «КОВШ» для изучения длительности хранения УХН разных энергий при температурах вплоть до гелиевых. УХН хранились в шароподобном открытом сверху сосуде, наполнение и опорожнение которого достигалось переворотом сосуда вокруг горизонтальной оси. Эта установка была перевезена в Гатчину на реактор ВВРМ ЛИЯФ, где совместно с группой А.П.Сереброва было измерено время жизни свободного нейтрона ($888,4 \pm 2,9$ с) в сосуде со стенками из конденсированного кислорода. Этот результат по точности значительно превзошел аналогичный результат, полученный ранее методикой регистрации радиоактивности нейтронного пучка.

В конце 70-х годов в ЛНФ выдвигается идея динамического конвертора УХН, работоспособность которого была проверена на изготовленной в ЛНФ установке, в дальнейшем смонтированной на мощном импульсном реакторе БИГР во ВНИИЭФ (Саров). Исследования проводились совместно с группой М.И.Кувшинова из ВНИИЭФ. Конвертор и сосуд для УХН взрывом ускорялись до скоростей ~ 100 м/с, синхронизированным с импульсом реактора. После торможения сосуд с УХН доставлялся в соседнее с залом реактора помещение. При этом плотность УХН в таких сосудах составила ~ 25 УХН/см³.

В последнее время фронт исследований с УХН значительно снизился. В настоящее время во всем мире остался один работающий источник УХН на высокопоточном реакторе ИЛЛ в Гренобле, на который выстроилась большая очередь с предлагаемыми экспериментами. При исследовании причин аномальной утечки УХН из сосудов в совместных исследованиях ЛНФ ОИЯИ–ИЛЛ, Гренобль (В.В.Несвижевский), был обнаружен процесс малых передач энергии УХН, в результате которого энергия УХН в процессе хранения при отражении от стенок увеличивается почти вдвое. Реже наблюдались процессы уменьшения энергии УХН. В принципе малые передачи энергии УХН возможны, однако наблюдаемая вероятность таких процессов оказалась на 5–6 порядков превосходящей теоретические значения этих величин. Также наблюдалось, что вероятность малых передач на 3–5 порядков возрастает при взаимодействии УХН с порошком наночастиц, нанесенным на поверхность сосуда.

В 1976 году В.И.Лушиков предложил эксперимент по наблюдению квантовых состояний в гравитационном поле Земли. В 1999 году в Гренобле на реакторе ИЛЛ интернациональной группой исследователей из Франции, Германии и России (Гатчина, ПИЯФ и Дубна, ЛНФ ОИЯИ) такой эффект был наблюден.

В последнее время на установке КОВШ в Гренобле на реакторе ИЛЛ был получен минимально достигнутый коэффициент поглощения УХН в стенках сосуда, на которые был нанесен слой низкотемпературного безводородного масла. В экспериментах был получен коэффициент поглощения $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ при $T \sim 100$ К.

В ЛНФ проводились и теоретические исследования по тематике УХН, написан ряд обзоров по УХН. В.К.Игнатовичем написана книга «Физика ультрахолодных нейтронов», которая стала широко известной, была переведена на английский язык и издана в Оксфорде.

Нейтронная оптика и другие приложения

Обнаружение УХН и исследования с ними побудили обсуждение возможности создания нейтронного микроскопа (А.И.Франк и другие авторы) и проведение исследований по волновой оптике, которые проводятся в Гренобле группой А.И.Франка. Были исследованы особенности прецессии нейтрона в магнитном поле в условиях его взаимодействия со средой и показана возможность использования ларморовской прецессии для оценки времени взаимодействия нейтрона с квантовыми объектами. Изучен также закон дисперсии УХН на гравитационном спектрометре с использованием интерференционных фильтров. На этом же спектрометре исследована применимость нейтронной оптики к сильно поглощающим средам на примере прохождения УХН через гадолиниевые пленки.

Ю.Н.Покотиловский предложил проверку принципа эквивалентности прямым измерением гравитационного ускорения нейтрона в эксперименте по времени пролета с хорошей монохроматизацией с применением интерференционного фильтра и быстрого прерывателя пучка с помощью электромагнитной заслонки.

6. Физика конденсированных сред

Практически сразу после создания исследовательских ядерных реакторов было обнаружено, что нейтрон является мощнейшим инструментом изучения вещества в конденсированном состоянии. По сравнению с другими видами излучений, используемых для получения информации о структурной организации и динамике атомов и молекул в конденсированных средах (твердых телах и жидкостях), нейтроны имеют ряд преимуществ, поэтому нейтронография, то есть использование различных видов рассеяния нейтронов в конденсированных средах с целью изучения их строения, стала совершенно необходимым инструментом современного естествознания.

Для проведения экспериментов по рассеянию нейтронов конденсированными средами имеется две возможности. На источнике нейтронов с непрерывным потоком выделяют моноэнергетический пучок и измеряют зависимость интенсивности рассеянных в образце нейтронов от изменения их энергии при неупругом процессе или от угла рассеяния при упругом процессе. На импульсном источнике на образец падает