

УДК 539.171.017

ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ ДЕЙТЕРИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА POLFUSION

С.Н. Терехин, А.А. Васильев, М.С. Микиртыгьянц, П.А. Кравцов, М.Е. Взнуздаев

Лабораторией криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики совместно с Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики создается источник поляризованных атомов водорода и дейтерия для международного эксперимента по исследованию ядерной реакции синтеза поляризованных дейтронов (Polarized dd-fusion experiment). Этот эксперимент проводится в России. Для этого в Петербургском институте ядерной физики создается специализированный экспериментальный комплекс. Описаны базовые принципы конструкции одного из модулей установки – источника поляризованных атомов дейтерия. Подробно рассмотрена конструкция радиочастотного диссоциатора и вопросы контроля параметров пучка.

Ключевые слова: поляризация, сечение реакции, ядерный синтез, диссоциация.

Введение

Целью эксперимента по изучению поляризованного дейтериевого синтеза (международное название проекта – PolFusion, Polarized dd-fusion experiment) является систематическое исследование ядерных реакций $d+d$ и $d+{}^3\text{He}$ с поляризованными исходными частицами в диапазоне энергий 10–100 кэВ. Эксперимент осуществляется международной коллаборацией в составе нескольких научно-исследовательских и образовательных институтов, в числе которых ведущие позиции занимают Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ) (базовая организация) и Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. В качестве основного иностранного участника выступает Институт ядерной физики Исследовательского центра г. Юлих, Германия (FZ-Jülich, IKP) [1].

Одной из задач эксперимента является измерение асимметрии в дифференциальном сечении для различных каналов указанных реакций, а также исследование изменения полного сечения реакции dd-синтеза при поляризации исходных частиц по сравнению с неполяризованным сечением. Планируется экспериментальное определение спин-корреляционных коэффициентов C_{zz} и C_{zzzz} , в частности, для определения фактора подавления квинтетного состояния для обоих каналов реакции dd-синтеза. Данная величина имеет противоречивые теоретические предсказания и играет важную роль для создания термоядерного реактора с малым выходом нейтронов. В качестве дополнительной задачи эксперимента рассматривается измерение астрофизического S -фактора для поляризованного дейтерия.

Для осуществления эксперимента необходима установка, объединяющая различные по назначению элементы, каждый из которых заслуживает отдельного рассмотрения. Предметом настоящей работы являются вопросы конструирования одной из двух наиболее важных частей установки PolFusion – источника поляризованных атомов дейтерия ABS (Atomic Beam Source).

Требования к интенсивности источника поляризованных атомов дейтерия

Использование источников поляризованных атомов в настоящее время является основным методом получения поляризованных атомов дейтерия. Такие источники используются в ускорительной технике в составе инжекторов, а также для создания внутренних мишеней для накопительных колец ускорителей. Создание источников поляризованных атомов возможно только в рамках масштабных ускорительных экспериментов ввиду высокой стоимости необходимого оборудования. Интенсивность лучших мировых образцов таких источников не превышает $5 \cdot 10^{16}$ атом/с [2, 3].

Для эксперимента PolFusion предполагается применение источника, построенного на базе установки Кельнского университета, использованной в проекте SAPIS [4]. В исходном варианте источник производил пучок нейтральных атомов дейтерия с тензорной и векторной поляризацией, энергией атомов порядка 0,1 эВ и интенсивностью около 10^{15} атом/с. Для эксперимента PolFusion приведенной интенсивности недостаточно; необходима модернизация установки с увеличением интенсивности до мирового уровня.

Конструкция источника поляризованных атомов

Источник поляризованных атомов – устройство (рис. 1), состоящее из ряда подсистем. Первая из них – радиочастотный диссоциатор 1, в котором исходный молекулярный дейтерий подвергается диссоциации на атомы. На выходе из сопла диссоциатора формируется газовая струя, состоящая преимущественно (до 90%) из нейтральных атомов. Далее параметры струи корректируются механическими диафрагмами – скиммером и коллиматором 2. Проходя через систему блоков сверхтонких переходов и спин-сепарирующих магнитов 3–6, пучок приобретает заданную условиями эксперимента поляризацию, сохраняя при этом фокусировку. В результате на выходе из источника получается практически цилиндрический пучок атомов дейтерия 7 со скоростью около 1000 м/с (тепловая энергия) и упорядоченным спиновым со-

стоянием, который может быть использован в качестве струйной мишени в эксперименте PolFusion.

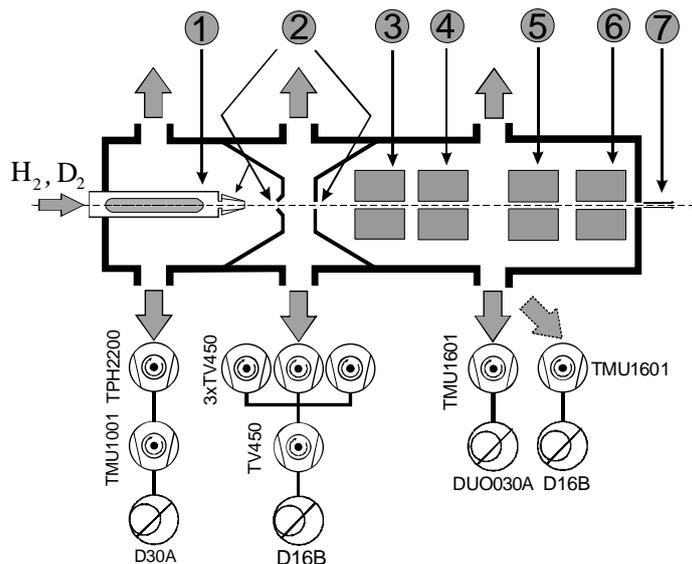


Рис. 1. Структура источника и системы откачки

Одной из технических особенностей источника поляризованных атомов является система дифференциальной вакуумной откачки. В эксперименте PolFusion источник состоит из трех частично изолированных друг от друга камер, в каждой из которых поддерживаются индивидуальные вакуумные условия. Для обеспечения такой схемы была создана вакуумная система, состоящая из четырех форвакуумных и восьми турбомолекулярных насосов суммарной производительностью около 6000 л/с.

Радиочастотный диссоциатор

Диссоциатор с соплом (рис. 2) создает исходную атомарную струю и является ключевым элементом источника. Ниже приводится его принцип действия и конструктивная реализация для эксперимента PolFusion.

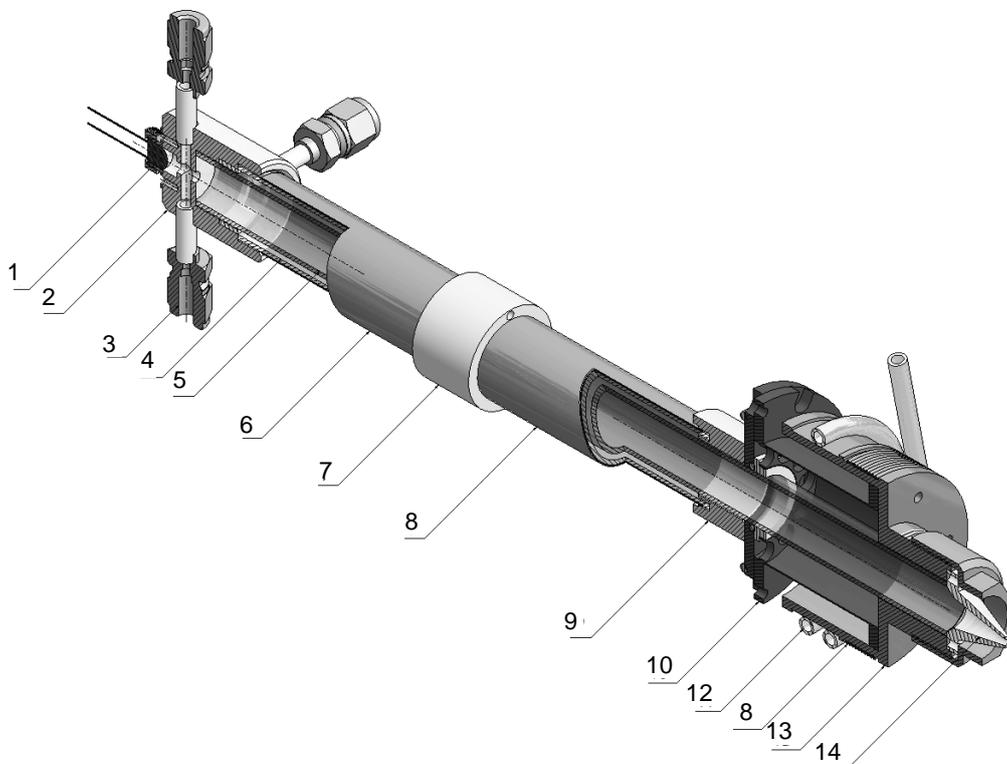


Рис. 2. Схема диссоциатора: 1 – фотодиод; 2 – коллектор; 3 – штуцер; 4 – внешняя трубка; 5 – внутренняя (разрядная) трубка; 6 – заземленная обкладка; 7 – центрирующая муфта; 8 – обкладка под потенциалом; 9 – запорная муфта; 10 – составной фланец; 11 – трубки охладителя; 12 – нагреватель; 13 – муфта

стабилизатора температуры сопла; 14 – сопло

Основа устройства – коаксиально расположенные стеклянные трубки 4 и 5, скрепленные с одной стороны коллектором из нержавеющей стали 2, а с другой – пластиковой запорной муфтой 9. Перечисленные элементы соединены между собой герметичным клеевым швом таким образом, что между трубками образуется пространство для циркуляции охлаждающей жидкости.

Коллектор имеет четыре однотипных штуцера 3 с условным проходом 4 мм. Два их них предназначены для обеспечения циркуляции охлаждающей жидкости, третий и четвертый – для подвода дейтерия и измерения его давления. Внешний торец коллектора имеет стеклянное окно, на котором размещен фотодиод 1. Назначение фотодиода – контроль за параметрами разряда внутри диссоциатора по интенсивности свечения плазмы.

Пластиковая центрирующая муфта 7, являющаяся изолирующим разделителем между заземленной обкладкой 6 и обкладкой под потенциалом 8, и составной фланец 10 предназначены для размещения и фиксации диссоциатора относительно элементов источника.

Алюминиевое сопло 14 закреплено на массивной медной муфте 13, температура которой стабилизируется. Трубки охладителя 11 и нихромовая нить нагревателя 12 смонтированы на муфте 13, образуя с ней общий узел стабилизатора температуры сопла.

Принцип автоматической стабилизации температуры, заложенный в работе устройства, заключается в установлении баланса между холодильной мощностью, мощностью электрического нагревателя и теплоподводом от нескольких источников: внешний теплоподвод через тепловые мосты, нагрев самого диссоциатора в процессе его работы, теплопередача через поток газа из диссоциатора. Холодильная мощность определяется расходом испаряющегося в трубках хладагента – жидкого азота; в стационарном режиме работы она практически постоянна. Величина паразитного теплоподвода зависит от многих факторов, она может меняться относительно быстро в процессе работы системы. Мощность электрического нагревателя регулируется с помощью регулируемого источника тока, ее величина заложена в алгоритм автоматической стабилизации температуры сопла с обратной связью по его температуре. Температура сопла непрерывно контролируется установленным на нем резистивным датчиком РТ-100.

Охлаждение сопла необходимо для уменьшения скорости атомов в пучке и обеспечения условий для намерзания тонкого слоя льда на поверхности сопла, который существенно уменьшает рекомбинацию атомов (превращение атомарного дейтерия в молекулярный) на поверхности.

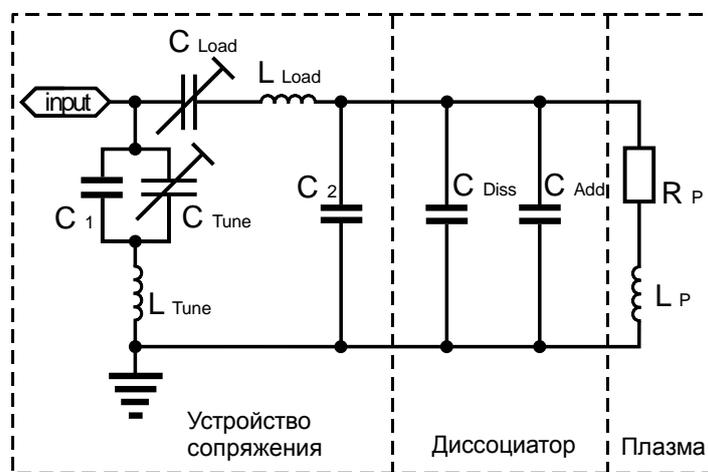


Рис. 3. Радиочастотная система диссоциатора (включая эквивалентную схему плазмы)

Исходный газ инжектируется во внутреннее пространство диссоциатора под давлением порядка 100–200 Па. Такое давление является оптимальным для существования газового разряда. Для получения и поддержания плазменного разряда (рис. 3) используют колебательный контур, питаемый радиочастотным генератором (input). Мощность электромагнитного поля передается на плазму посредством емкостной связи. Автоматическая подстройка параметров контура с минимизацией отраженной мощности осуществляется специальным устройством сопряжения, с помощью переменных конденсаторов C_{Load} и C_{Tune} . Остальные элементы служат для настройки динамического диапазона.

Газовый разряд порождает большое количество свободных электронов. В приложенном электромагнитном поле эти электроны приобретают некоторую энергию и при столкновении с молекулами газа вызывают их ионизацию либо диссоциацию. При средней энергии свободных электронов ~5 эВ интенсивность процесса диссоциации существенно выше интенсивности ионизационных процессов. По этой

причине при выборе режима газового разряда руководствуются этим значением.

Степень диссоциации зависит не только от режима газового разряда, но и от скорости протекания обратного процесса рекомбинации. Преобладающим процессом является поверхностная рекомбинация [1]. Она зависит, прежде всего, от материала разрядной трубки и от температуры на ее поверхности. Эффективность использования электрической мощности для диссоциации молекул не превышает 5%. В этом случае ключевым элементом системы является водяное охлаждение, которое отводит от диссоциатора неиспользованную электрическую мощность (около 300 Вт).

Контроль параметров пучка

Для достижения оптимальных условий работы источника необходимо измерение параметров выходящей из него струи, таких как распределение плотности газовой струи и распределение степени диссоциации пучка в поперечном сечении. Для измерения этих характеристик предложено устройство двухкоординатного сканирования. Устройство позволяет перемещать в плоскости, перпендикулярной оси пучка, один из двух чувствительных элементов – головку квадрупольного масс-спектрометра или компрессионную трубку.

Принцип работы квадрупольного масс-спектрометра подробно описан в [2]. Прибор действует по принципу разделения ионов по отношению их заряда к массе в высокочастотном электростатическом поле, формируемом между четырьмя симметрично расположенными электродами с переменной полярностью. Это позволяет с высокой эффективностью измерять относительную интенсивность молекулярной и атомарной формы дейтерия, получая в результате степень диссоциации вещества, попавшего в чувствительный объем (головку) квадрупольного масс-спектрометра. Перемещая головку в плоскости, перпендикулярной оси пучка, можно построить распределение степени диссоциации дейтерия в поперечном сечении.

Для построения распределения плотности пучка в поперечном сечении используется компрессионная трубка. Схема работы этого устройства приведена на рис. 4. При рассмотрении схемы надо принять во внимание, что объемная концентрация атомов в пучке невелика и соответственно течение газа находится в свободно-молекулярном режиме.

Частицы, образующие атомарный пучок дейтерия, попадают в компрессионную трубку и проходят внутрь измерительного объема. При этом атомы не встречают существенного сопротивления, так как их траектории практически параллельны стенкам компрессионной трубки. Напротив, частицы, покидающие измерительный объем через компрессионную трубку, имеют хаотично направленные траектории и встречают уже значительное сопротивление. Разница сопротивлений прямому и обратному потоку газа в компрессионной трубке служит причиной роста давления внутри измерительного объема, которое измеряется с помощью высокочувствительного датчика (вакуумной ионизационной лампы с горячим катодом). Изменение давления тем существенней, чем интенсивнее пучок и чем больше степень перекрытия его поперечного сечения входным отверстием компрессионной трубки.

Если диаметр компрессионной трубки относительно невелик по сравнению с поперечным сечением атомарной струи, то, перемещая ось компрессионной трубки относительно оси пучка в двух координатах, можно получить диаграмму распределения интенсивности пучка в поперечном сечении.

Измерения с помощью компрессионной трубки допускают абсолютную калибровку. Если из независимого источника через вентиль тонкой регулировки подавать известный поток дейтерия, то можно построить зависимость давления в компрессионном объеме от величины потока. После сравнения давления можно назвать абсолютное количество атомов пучка, попадающих в секунду на вход компрессионной трубки. Компрессионный объем должен гарантировать полную рекомбинацию атомов в молекулы при измерении потока атомарного пучка, так как калибровка осуществляется с использованием молекулярного дейтерия.

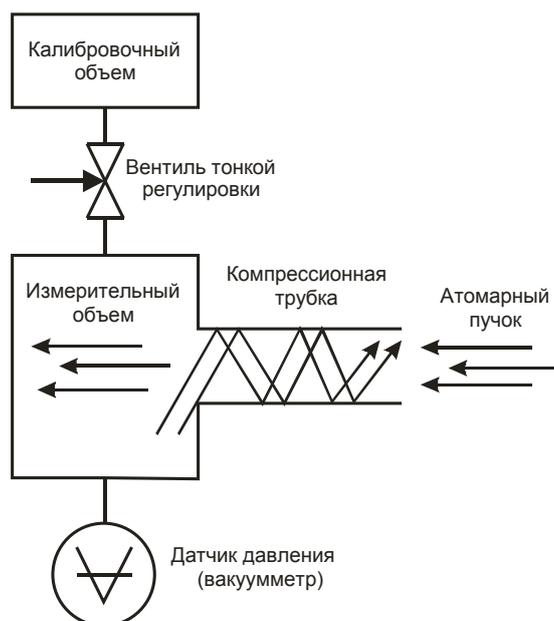


Рис. 4. Схема работы компрессионной трубки

Заключение

В масштабной экспериментальной установке для измерения дифференциального сечения ядерной реакции синтеза поляризованных дейтронов присутствует большое количество разнородных подсистем – вакуумных, газовых, криогенных, электронных и др. Только при оптимизации всего комплекса устройств можно добиться высокой интенсивности пучка дейтронов. Эта интенсивность определяет время набора статистики для получения данных. Наибольшее влияние поляризационных параметров на сечение реакции предполагается при низких энергиях, где кулоновский барьер делает реакции синтеза очень редкими (одна реакция в несколько минут). И именно эта область энергий (около 10 кэВ) чрезвычайно интересна для теоретической физики и астрофизики.

Подробно описанное в работе устройство – диссоциатор, оригинальная разработка коллектива авторов. В диссоциаторе приходится совмещать противоречивые требования. Например, плазменный разряд можно осуществить при невысоком давлении (100–200 Па). Но низкое давление не позволяет сформировать хорошую газовую струю. Следовательно, экспериментально приходится определять как условия для осуществления плазменного разряда, так и газодинамические характеристики формирования струи. Таким образом, кроме самого диссоциатора, появляется комплекс измерительных средств (квадрупольный масс-спектрометр и компрессионная трубка с системой перемещения) для осуществления оптимизации параметров всей установки.

Разработка и тестирование источника поляризованных атомов, а также испытания отдельных элементов производятся в настоящее время в лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики.

Литература

1. Терехин С.Н. и др., Приборная база эксперимента по исследованию сечения реакции dd-ядерного синтеза с поляризованными компонентами в проекте PolFusion // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – № 7. – С. 62–67.
2. Микиртычянц М.С. Разработка и исследование источника атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией для экспериментов на внутренних пучках ускорителей: Дис. ... к. ф.-м. н.: 01.04.01. – Гатчина: ПИЯФ, 2002. – 118 с.
3. Emmerich R. and H. Paetz gen. Double-Polarized Fusion Experiment // Schieck, NIM. – A586. – 2008. – P. 387.
4. Kravtsov P. et al. Double-Polarized Fusion // Conf. proceedings (XIVth International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry). – St. Petersburg, 2011. – P. 116–119.

- Терехин Сергей Николаевич** – Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», научный сотрудник, lab19@yandex.ru, serzh@gtn.ru
- Васильев Александр Анатольевич** – Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией, vassilie@pnpi.spb.ru
- Микиртычянц Максим Сергеевич** – Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», научный сотрудник, maxmik@gmail.com
- Кравцов Петр Андреевич** – Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, pkravt@gmail.com
- Взнуздаев Марат Евгеньевич** – Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики», кандидат химических наук, ст. научный сотрудник, marat@pnpi.spb.ru