

Получение поляризованных молекул изотопов водорода

Д. К. Топорков^{*+1)}, А. В. Грамолин^{*}, С. А. Зеваков^{*}, Д. М. Николенко^{*}, И. А. Рачек^{*}, Р. Ш. Садыков^{*},
Ю. В. Шестаков^{*+}

^{*}Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

⁺Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 12 декабря 2016 г.

После переработки 30 декабря 2016 г.

Демонстрируется возможность получения поляризованных молекул изотопов водорода путем их спиновой сепарации в неоднородном поле сверхпроводящих магнитов. Этот способ был предложен нами ранее, здесь он был реализован на базе источника поляризованных атомов, разработанного в Институте ядерной физики. Измеренный поток поляризованных молекул сравнивается с результатом моделирования. Обсуждается возможность создания более интенсивного источника поляризованных молекул.

DOI: 10.7868/S0370274X17050034

1. В научной литературе все чаще появляются статьи, в которых обсуждается возможность применения поляризованного топлива в термоядерных реакциях синтеза для производства энергии [1]. Ожидается, что применение поляризованного топлива существенно повысит выход энергии. Эффект от наличия поляризации частиц, участвующих в реакции, был подтвержден экспериментально [2]. Протекание D-D-реакции в случае обеих поляризованных частиц в настоящее время экспериментально изучается [3].

2. Имеющиеся источники поляризованных атомов ³He с лазерной накачкой поляризации позволяют производить около 10¹⁹ атомов/с. Поляризованные атомы гелия можно сохранять длительное время (часы) при относительно высоком давлении (10 и более атмосфер). Таким образом, технологическое состояние производства ³He уже в настоящее время, в принципе, удовлетворяет требованиям реакторов с поляризованным топливом.

Современные источники поляризованных атомов водорода и дейтерия позволяют получать пучки интенсивностью около 10¹⁷ атомов/с. Подробный обзор существующих источников поляризованных атомов водорода приведен в работах [4, 5]. Интенсивность рассмотренных источников принципиально ограничена рассеянием атомов друг на друге в плотном пучке, поэтому ожидать прогресса в развитии таких источников не приходится. Другой недостаток подобных источников состоит в том, что накапливать и хранить поляризованный дейтерий/водород в атомарном состоянии не представляется возможным —

неизбежно приходится осуществлять рекомбинацию атомов в молекулы. При этом, помимо дополнительных потерь, возникает вопрос о сохранении поляризации полученных таким путем молекул. Исследования в данном направлении ведутся [6].

Ранее нами была предложена схема установки, в которой преодолены оба указанных выше недостатка [7]. Согласно моделированию, можно получить достаточно большой поток поляризованных по ядерному спину молекул водорода, используя лишь их фокусировку в неоднородных магнитных полях. В данной работе мы демонстрируем принципиальную возможность реализации этой идеи, используя имеющийся у нас источник поляризованных атомов дейтерия [8].

3. Как у водорода, так и у дейтерия существуют два спиновых изомера (орто-состояние), когда спины ядер в молекуле имеют параллельную (одного знака) ориентацию, и пара-состояние, когда направления спинов ядер молекулы противоположны. При обычных условиях нормальный водород представляет собой смесь 3/4 орто- и 1/4 пара-модификаций, а нормальный дейтерий — 2/3 орто- и 1/3 пара-модификаций. При низких температурах термодинамически стабильны орто-модификация дейтерия и пара-модификация водорода. Самопроизвольное орто-пара-превращение при низких температурах происходит очень медленно. Молекулы водорода, имеющие различные проекции магнитного момента, могут быть пространственно разделены в неоднородном магнитном поле, что впервые было продемонстрировано в работе [9]. Поскольку магнитный момент молекул составляет порядок ядерного магне-

¹⁾e-mail: D.K.Toporkov@inp.nsk.su

тона, градиент магнитного поля должен быть большим.

4. Для получения молекул с определенной проекцией спинового момента использовали секstupольные сверхпроводящие магниты источника поляризованных атомов [8]. На рис. 1 приведена сверхтонкая

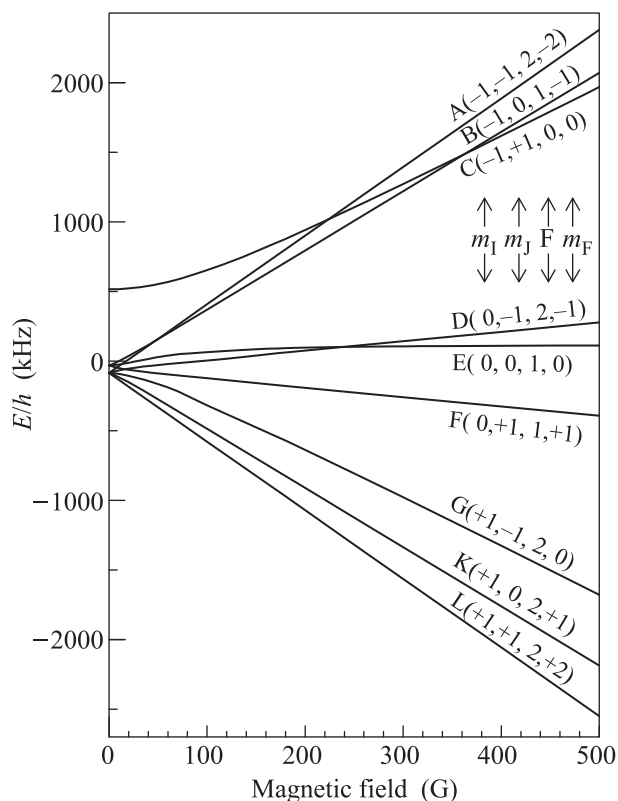


Рис. 1. Сверхтонкая энергетическая структура молекулы водорода в магнитном поле [10]. m_I , m_J , m_F – проекции спинового I, орбитального J и полного F моментов соответственно

энергетическая структура молекулы водорода в магнитном поле [10]. Молекулы в состояниях А, В и С имеют проекцию спинового момента $m_I = -1$ и в неоднородном магнитном поле на них действует сила в направлении, противоположном градиенту поля. Схема, иллюстрирующая принцип работы установки, представлена на рис. 2. Два магнита длиной 7.0 и 12.5 см, установленные в одном баке, включенные в электрическую цепь последовательно и разделенные промежутком в 31 см, были применены для фокусировки молекул. Внутренний диаметр трубки вакуумной камеры определяет доступную апертуру магнитов, она равна 42 мм. Магнитное поле на расстоянии 21 мм от оси магнита при токе в обмотке 350 А составляет 34 кГс, а градиент поля – 32 кГс/см. При работе с водородом для улучшения откачки га-

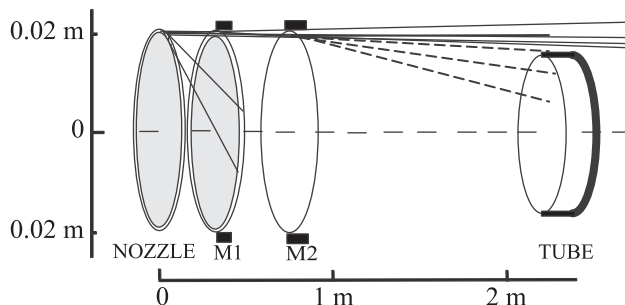


Рис. 2. Схема установки для получения поляризованных молекул водорода. Траектории молекул при выключенных магнитах показаны сплошными линиями. При включении магнитов M1 и M2 молекулы в состояниях А, В и С фокусируются в приемную трубку – пунктирные траектории

за температура жидкого гелия понижалась до 2.5 К путем снижения давления паров над жидкостью.

На другом баке, имеющем температуру жидкого гелия, был установлен источник молекул – медный блок с кольцевым соплом, наружный и внутренний диаметры которого равны 41.9 и 41.7 мм (ширина сопла – 0.1 мм). Источник установлен соосно с секstupольными магнитами. С помощью нагревателя температуру сопла можно изменять в широких пределах, начиная от температуры жидкого гелия. Расстояние от сопла до входа в фокусирующие магниты – 33 см. На входе в магниты установлен диск диаметром 40 мм, образующий кольцевую диафрагму с внешним диаметром 42 мм и шириной 1 мм. При такой геометрии молекулы, влетающие в магнит, движутся вблизи полюсов, где градиент поля и, следовательно, отклоняющая их сила, максимальны. На расстоянии 135 см от конца магнитов по оси установки размещена приемная трубка для молекул диаметром 30 мм и длиной 20 см. Приемная трубка оканчивается объемом, в котором установлена высоковакуумная лампа, служащая для определения потока газа в трубку. Приемная трубка может перемещаться в поперечном направлении на расстояние ± 6 см. Если считать, что молекулы, испущенные из источника, при соударении с внутренней поверхностью апертуры магнита откачиваются с вероятностью, равной единице, то в приемную трубку, выставленную по оси пучка, не должны попадать молекулы при выключенном магнитном поле. При включении магнитного поля молекулы в подсостояниях с отрицательным магнитным моментом (А, В, С и, в меньшей степени, D) отклоняются к оси и, попадая в трубку, повышают в ней давление.

5. Нами было проведено Монте-Карло моделирование фокусировки молекул водорода для данной

геометрии. Предполагалось, что на поверхности источника газ подчиняется распределению Максвелла, что приводит к пространственному распределению интенсивности вылетающих частиц по закону косинуса от угла вылета. Считалось, что если молекула касалась криогенной поверхности, то она к ней прилипала с вероятностью, равной единице. Учитывая, что только одна четвертая часть молекул имеет отрицательную проекцию ядерного момента, был рассчитан поток сфокусированных в трубку молекул $Q_{\text{foc}} = 2.1 \cdot 10^{-6} Q_0$, где Q_0 – полный поток молекул из источника. Магнитный момент считался одинаковым для всех трех подсостояний А, В и С.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные по изменению давления в приемной трубке для во-

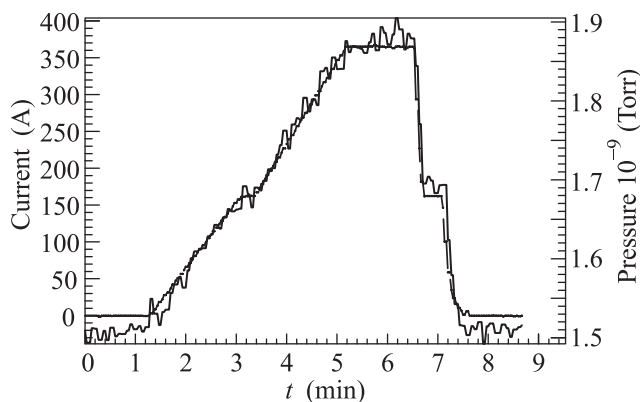


Рис. 3. Динамика давления водорода в приемной трубке (сплошная линия) и тока через обмотку отклоняющих магнитов (пунктирная кривая)

дородного молекулярного пучка при введении и выведении тока в магнитах. Температура источника молекул в этом случае составляла около 8 К. Для дейтерия температура сопла была поднята до 11 К. Расход газа через сопло составлял $8.6 \cdot 10^{17}$ мол/с для водорода и $6.0 \cdot 10^{17}$ мол/с для дейтерия соответственно. Зная проводимость приемной трубки и чувствительность лампы к данному газу, можно определить поток сфокусированных (поляризованных) молекул в трубку, вызвавших повышение давления.

Измеренный поток поляризованных молекул водорода, сфокусированных магнитами в приемную трубку, равен $1.5 \cdot 10^{12}$ мол/с. При этом отношение сфокусированных молекул к полному потоку из источника составило $1.7 \cdot 10^{-6}$. Для дейтерия поток сфокусированных молекул меньше, поскольку их магнитные моменты существенно меньше таковых для молекул водорода. Кроме того, для молекул дейтерия, имеющих одинаковую проекцию ядерного спина, магнитные моменты сильно отличаются. Из-

меренный поток поляризованных молекул водорода близок к рассчитанному. Высокий уровень подложки неполяризованных молекул, который не предсказывается Монте-Карло-моделированием, возможно, объясняется отражением молекул от стенок вакуумной камеры магнитов. Когда угол падения, отсчитанный от нормали к поверхности, близок к 90° , может происходить зеркальное отражение, что приводит к увеличению интенсивности пучка.

6. Как показывают экспериментальные результаты уже с имеющимися магнитами (не оптимальными для данной задачи), можно получать значимые потоки поляризованных по ядерному спину молекул. Данные результаты можно использовать при разработке прототипа источника поляризованных молекул, обладающего существенно большей интенсивностью.

Понимание физических свойств изомеров водорода и кинетики их конверсии, изучение динамики сохранения поляризации в молекулах при их столкновениях со стенками или конденсации в твердую фазу, открывает широкий фронт исследований. Поскольку основным состоянием дейтерия при низких температурах является орто-дейтерий, то, по-видимому, можно получать твердый поляризованный дейтерий и использовать его в качестве топлива в инерциальных термоядерных реакциях и других исследованиях.

В дальнейшем, совместно с немецкими коллегами, предполагается измерение степени поляризации протонов и дейтронов в сфокусированном молекулярном пучке с помощью Lamb-shift поляриметра, аналогичного примененному в работе [6]. Положительные результаты по исследованию кинетики потери поляризации молекулами, возможно, позволят создавать внутренние поляризованные газовые мишени высокой плотности. Такие мишени востребованы для проведения ядерно-физических экспериментов в накопителях заряженных частиц [11].

Авторы благодарны Ральфу Энгельсу (Ralf Engels) и Маркусу Бюшеру (Markus Büscher) за плодотворные обсуждения дальнейшей работы по измерению ядерной поляризации в молекулярном пучке. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-42-01009, совместного с грантом DFG BU 2227/1-1.

1. G. Ciullo, R. Engels, M. Büscher, and A. Vasilyev, Springer Proc. Phys. **187**, 1 (2016).
2. Ch. Leemann, H. Bürgisser, P. Huber, U. Rohrer, H. Paetz gen. Schieck, and F. Seiler, Helv. Phys. Acta **44**, 141 (1971).

3. A. Vasilyev, L. Kochenda, P. Kravtsov, V. Trofimov, M. Vznudaev, G. Ciullo, P. Lenisa, R. Engels, and H. Paetz gen. Schieck, Springer Proc. in Phys. **187**, 35 (2016).
4. D. Toporkov, in *XVth Intern. Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*, Charlottesville, Virginia, USA (2013), p.064.
5. E. Steffens and W. Haeberli, Rep. Prog. Phys. **66**, 1887 (2003)
6. R. Engels, R. Gorski, K. Grigoryev, M. Mikirtychyants, F. Rathmann, H. Seyfarth, H. Ströher, P. Weiss, L. Kochenda, P. Kravtsov, V. Trofimov, N. Tschernov, A. Vasilyev, M. Vznuzdaev, and H. Paetz gen. Schieck, Rev. Sci. Instrum. **85**, 103505 (2014).
7. Yu.V. Shestakov, D.M. Nikolenko, I.A. Rachek, D.K. Toporkov, and V.F. Dmitriev, in *Proc. of 13th Intern. Symp. on High Energy Spin Phys.*, Protvino, Russia (1998), p.415.
8. L.G. Isaeva, B.A. Lazarenko, S.I. Mishnev, D.M. Nikolenko, S.G. Popov, I.A. Rachek, Yu.V. Shestakov, D.K. Toporkov, D.K. Vesnovsky, and S.A. Zevakov, Nucl. Instrum. and Methods A **411**, 201 (1998).
9. R. Frisch and O. Stern, Z. Phys. **85**, 4 (1933)
10. N.F. Ramsey, Phys. Rev. **85**, 60 (1952).
11. Д.М. Николенко, Х. Аренховель, Дж. Аррингтон и др. (Collaboration), ЯФ **73**, 1365 (2010) [Phys. Atom. Nucl. **73**, 1322 (2010)].