

02;12

## Газовые образцы со смесью изотопов водорода и гелия-3 для ЯМР-спектроскопии и оценка магнитного момента ядра гелия-3

© Н.Н. Аруев<sup>1</sup>, Ю.И. Неронов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева,  
190005 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,  
197101 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: aruev.mass@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2012 г.)

Описана технология изготовления стеклянных ампул высокого давления для ЯМР-спектроскопии, в которых содержатся изотопы водорода — дейтерий и протий, а также легкий изотоп гелия — гелий-3. Использование ампул позволило измерить частоты спиновой прецессии ядер гелия-3 и ядер молекулярного дейтерия и вычислить одну из фундаментальных физических констант — отношение магнитного момента гелиона к магнитному моменту протона:  $\mu_h/\mu_p = -0.761\ 812\ 215(3)$ .

### Введение

Значения величины магнитного момента дейтрона (ядра атома дейтерия)  $\mu_d$  и отношения магнитного момента дейтрона к магнитному моменту протона, который, по существу является ядром атома легкого изотопа водорода — протия,  $\mu_d/\mu_p$  впервые появились в таблице фундаментальных физических констант (ФФК) в согласовании 1986 г. [1]. Основанием для включения этих данных в качестве входных величин в согласование констант послужили экспериментальные работы [2], а также косвенные расчетные данные на основе измерений  $g$ -факторов атомарного дейтерия и протия с использованием мазера, которые оказались в хорошем согласии с результатом [2].

В последующих согласованиях ФФК в 1998, 2002 и 2006 гг. [3] число включенных экспериментально определенных значений магнитных моментов легчайших ядер увеличивалось, что связано с особой значимостью этих констант для физики и, в частности, для развития представления о строении ядерной материи. В ядре гелия-3 протоны имеют взаимно противоположную ориентацию спинов, и его магнитный момент  $\mu(^3\text{He})$  на  $\sim 90\%$  определяется магнитным моментом нейтрона  $\mu_n$ . Разность магнитных моментов  $\mu(^3\text{He}) - \mu_n$  представляет интерес, поскольку она обусловлена проявлением тензорного характера сил нуклон-нуклонного взаимодействия и соответственно наличием орбитального движения в ядре  $^3\text{He}$  с угловым моментом  $L = 1$ , а также виртуальными распадами. Следует отметить, что первоначально предположение о кварковом строении нуклонов являлось следствием сопоставления магнитных моментов протона, нейтрона и магнитных моментов легчайших ядер.

В настоящее время магнитные моменты тритона (ядра атома трития) —  $\mu_t$  и гелиона (ядра легкого

изотопа гелия  $^3\text{He}$ ) —  $\mu_h$  и их отношения к магнитному моменту протона известны с относительной погрешностью  $10^{-8} - 10^{-9}$ . Эти отношения были определены [2,4–7] с помощью ЯМР-спектроскопии с одновременной регистрацией сигналов частоты спиновой прецессии измеряемого легкого ядра и протона в одном и том же магнитном поле. Например, для дейтрона  $\mu_d(\text{HD})/\mu_p(\text{HD}) \approx 2F_d(\text{HD})/F_p(\text{HD})$  или для тритона  $M_t(\text{TH})/\mu_p(\text{HT}) \approx F_t(\text{TH})/F_p(\text{HD})$  с последующим учетом сдвига частот из-за малой асимметрии молекул HT и HD.

Таким образом, магнитный момент протона, как правило, является своеобразной единицей в подобных измерениях. При этом измерения становятся относительными, так как измеряются только две частоты и их отношение. Измерения частот являются самыми точными из всех известных, что позволяет минимизировать погрешность результата подобных экспериментов. Однако другие возможные источники погрешности требуют тщательного рассмотрения и учета.

Работы по определению ФФК обычно и имеют своей целью повышение точности одной из констант, добавление еще одной–двух значащих цифр в ее величину и соответствующее уменьшение погрешности или обнаружение какого-то неизвестного ранее источника систематической погрешности, ее исследование и оценку ее вклада.

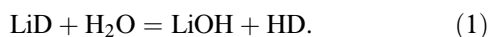
### Изготовление образцов

Важнейшей составляющей подобных экспериментов является приготовление рабочего образца, параметры которого позволяют выполнить прецизионное исследование. В начале настоящей работы авторы планировали использовать ЯМР-спектрометр с электромагнитом

фирмы „Брукер“ с индукцией  $B = 2.142$  Т, т.е. со средней индукцией магнитного поля. Это обстоятельство накладывало некоторые ограничения и устанавливало требования ко всем элементам измерительной установки и к методике проведения измерений. Разрешающая способность ЯМР-спектрометра, а значит, ширина сигнала ЯМР и точность определения частоты спиновой прецессии зависят от многих причин: от величины и однородности магнитного поля, от стабильности магнитного поля и его градиентов во времени, стабильности частоты и уровня радиотехнических шумов, а также величины давления в газовом образце.

Причем из данных [8] следует, что для получения малой ширины спектральных линий от газообразных цилиндрических ампул требуется давление порядка 100 atm. При этом диффузионное перемещение молекул ограничено, и молекулы находятся в зоне регистрации за время оцифровки сигналов свободной прецессии. Однако при давлении 100 atm ампулы из стандартных стеклянных трубок находятся на грани допустимой прочности, и велика вероятность разрыва ампул и повреждения регистрирующей части ЯМР-спектрометра.

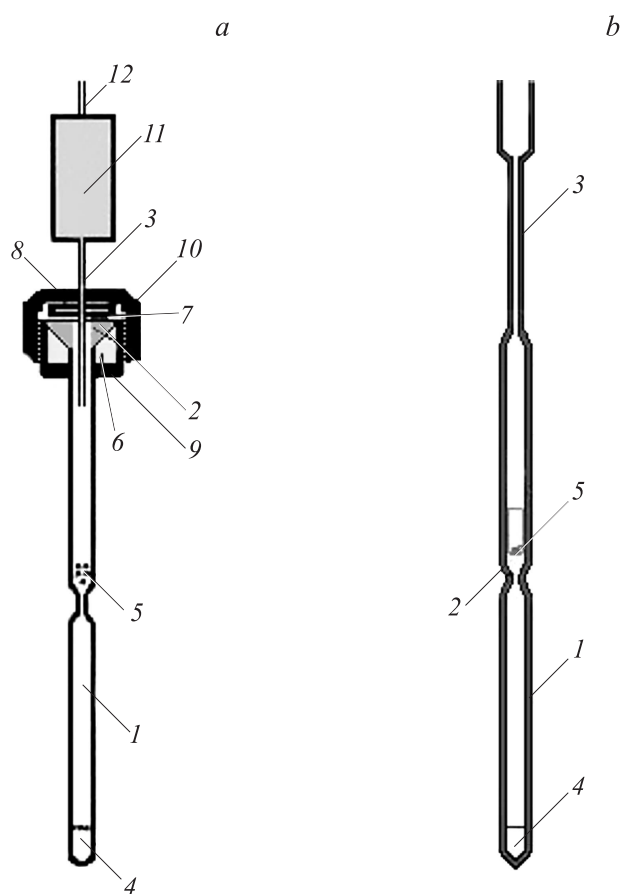
Методика изготовления ампул ЯМР с высоким давлением исследуемых легких газов в предшествующих работах [2,4–8] подробно не рассматривалась, и обусловлено это было тем, что во всех измерениях, кроме [5], использовались газовые смеси, содержащие только изотопы водорода — протий, дейтерий и тритий. Наполнение ампул с необходимыми геометрическими размерами производилось, как правило, без предварительной откачки воздуха на основе химической реакции кристаллического дейтерида лития с водой, определенные количества которых помещались в ампулу перед ее отпайкой (герметизацией):



Количества дейтерида лития и воды, необходимые для наполнения известного объема дейтерированным протием при заданном давлении, могут быть вычислены и, как показывают проведенные эксперименты, измеренные давления HD в специальном реакторе хорошо согласуются с расчетными оценками.

Более сложную процедуру представляет собой наполнение ампулы ЯМР изотопами разных элементов, в частности гелием-3 и протием. При использовании электромагнита с  $B = 2.142$  Т для получения достаточно высокой чувствительности (прежде всего высокого отношения сигнала ЯМР к шуму на ядрах гелия-3) было необходимо наполнять ампулы ЯМР обоими газами до парциальных давлений порядка 10 atm и выше.

Если наполнение ампул изотопами водорода отработано и не вызывает проблем, то наполнение их гелием-3 связано с рядом трудностей. Прежде всего гелий-3 малораспространенное и дорогое вещество. В настоящей работе авторы использовали гелий-3, который был произведен ФГУППО „Маяк“ (высшая категория



**Рис. 1.** *a* — конструкция комбинированной ЯМР-ампулы: 1 — стеклянная ампула, 2 — конусное расширение стекла, 3 — медная трубка, 4 — вода, 5 — кристаллы LiD, 6 — конусное витонное уплотнение, 7 — плоское витонное уплотнение, 8 — медная плоская шайба, 9 — медный цилиндр с наружной резьбой, 10 — накидная гайка с внутренней резьбой, 11 — медный мерный объем, 12 — медная трубка. *b* — стеклянная ЯМР-ампула: 1 — стеклянная ампула, 2 — перетяжка, 3 — капилляр, 4 — вода, 5 — кристаллы LiD.

чистоты 99,996%; основная примесь — изотоп гелий-4 находился на уровне 0,004%, все другие примеси — менее  $10^{-4}\%$ ). Давление гелия-3 в баллоне составляло  $\sim 2.9$  atm, и, следовательно, требовалось повышать парциальное давление гелия в 4–5 раз. Вся процедура наполнения и отпайки ампулы должна проводиться в герметичной системе с вакуумной откачкой, чтобы атмосферный воздух (прежде всего парамагнитный кислород) не попал в рабочую ампулу и в баллон с гелием-3. По этим причинам была изготовлена простейшая вакуумная система, включающая в себя два вентиля: один запорный и второй дозирующий, к которому непосредственно присоединялась наполняемая ампула.

Вначале авторы работали с комбинированными ампулами, которые состояли из стекла и меди. Одна из таких ампул разборной конструкции схематично показана на рис. 1, *a*.

Открытый конец стеклянной ампулы длиной 110–120 мм с внешним и внутренним диаметрами 6,8 мм и 4,5 мм соответственно, изготавливался в виде воронки, в которой с помощью медных деталей и витонных уплотнений герметично закреплялась медная трубка с внешним диаметром  $\sim 4,0$  мм и толщиной стенки  $\sim 1,0$  мм. Второй конец этой трубки подсоединялся к дополнительному мерному объему (в 4–5 раз превышающему объем ампулы), а он, в свою очередь, — к напускному вентилю. Мерный объем представлял собой медную трубку с внешним диаметром 15 мм и толщиной стенки  $\sim 1$  мм, длиной  $\sim 70$  мм, которая была тщательно отожжена.

Методика наполнения ампулы заключалась в следующем. Расчетное количество воды  $\sim 1,0$  см<sup>3</sup> с помощью шприца вводится на дно ампулы, и несколько кристаллов LiD (массой  $\sim 0,4$  г) помещается на перетяжку, которая расположена примерно в 50 мм от дна ампулы. Затем стеклянная и медная части монтируются вместе в соответствии с рис. 1 и подсоединяются к вакуумной системе. Предварительная форвакуумная откачка системы производится при закрытом дозирующем вентиле, который далее медленно открывается, и откачка ведется до тех пор, пока вода в ампуле не замерзнет, что происходит при давлении  $P \geq 10^{-3}$  Торр.

При этом контролируется давление в системе и скорость откачки, что свидетельствует о качестве сборки ампулы и мерного объема и возможного наличия утечек. После этого запорным вентилем перекрывается откачка всей системы, дозирующим вентилем перекрываются ампула с мерным объемом, в систему напускается гелий-3 из баллона и затем медленно открывается дозирующий вентиль. Наполнение ампулы и мерного объема продолжается 15–20 с, после чего дозирующий вентиль и вентиль на баллоне перекрываются. Следующим шагом работы является отсоединение ампулы с мерным объемом от системы откачки. Для этого используется специальное устройство, которое состоит из двух роликовых подшипников диаметром  $\sim 4$  мм и длиной  $\sim 30$  мм, один из которых неподвижен, а другой может двигаться по направляющим так, что длинные стороны подшипников остаются параллельными. Это устройство позволяет „перекусить“ медную отожженную трубку с внешним диаметром 4–5 мм или полностью пережимает трубку, если между роликами поставить ограничитель с толщиной меньше, чем удвоенная толщина стенки трубки.

С помощью такого устройства авторы пережимали трубку выше мерного объема (рис. 1) в трех местах. Причем каждая пережимка была ортогональна предыдущей. Ограничивающим размером был 1,4 мм. В четвертом случае авторы не использовали ограничитель и „отрезали“ ампулу с мерным объемом от дозирующего вентиля. После этого вся сборка проверялась на течь в сосуде с водой. Следующий этап работы заключался в том, что гелий-3 постепенно выдавливался в стеклянную ампулу путем сжатия цилиндрического медного мерного

объема до плоского состояния. В соответствии с газовым законом для изотермического процесса  $PV = \text{const}$  давление в стеклянной ампуле должно увеличиться в  $(V_1 + V_2)/V_1$  раз, где  $V_1$  и  $V_2$  — объемы ампулы и мерного цилиндра. Таким образом, авторы повышали давление гелия-3 в ампуле до 15–18 атм. Испытания сборки на герметичность в воде позволяли выявить большие утечки газа через витонные уплотнения.

Путем закручивания накидной гайки нам удавалось закрыть течь при этих давлениях газа в ампуле. После этого снова повторялась процедура пережимания и „отрезания“ медной трубки, соединяющей стеклянную ампулу с мерным объемом, и проверка на утечку уплотнений и пережимок медной трубки. Последний этап наполнения ампулы заключался в проведении реакции дейтеридов лития с водой. Для этого ампула переворачивается, кристаллы падают с перетяжки вниз, а водяной столбик останавливается на перетяжке, и очень медленно за счет смачивания стекла вода попадает в нижнюю часть ампулы.

Реакция (1) идет с выделением большого количества тепла, давление в ампуле по расчетам повышается до десятков атмосфер. На этом этапе, как правило, образуются течи. В качестве материала уплотнений были испытаны витон, фторопласт и вакуумная резина. Однако в четырех изготовленных таким образом ампулах высокого давления из-за трудно контролируемых медленных утечек газа нам не удалось зарегистрировать сигнал от гелия-3 после их установки в ЯМР-спектрометре.

Были предприняты попытки изготовить необходимые ампулы ЯМР другой конструкции, когда медная трубка укреплялась в стеклянной ампуле с помощью эпоксицидной смолы. Методика и строгая последовательность операций наполнения этих ампул полностью повторяли вышеописанные. Однако использование такого уплотнения также не позволило зарегистрировать ЯМР-сигнал.

Существенным недостатком варианта стеклянных ампул, имеющих уплотнитель и переход на металл, является следующее. Наличие медных деталей в составе рабочей ампулы не позволяло вращать ампулу вокруг продольной оси для усреднения неоднородностей магнитного поля. Движение металла в высоком магнитном поле вызывает возникновение токов Фуко и связанное с ним торможение вращения образца и возможные возмущения основного поля.

Значительная часть трудностей, связанных с изготовлением ампул ЯМР, исчезла, когда была найдена возможность продолжить работу на ЯМР-спектрометре „Брукер“ WM400, который укомплектован сверхпроводящим магнитом с индуктивностью  $B = 9,398$  Т. Как показали исследования, стабильность поля этого магнита составляет  $\Delta B/B \approx 3 \cdot 10^{-9}$ , что соответствует дрейфу частоты не более 1 Гц на уровне 400 МГц в течение эксперимента. Неоднородность магнитного поля в зоне расположения ампулы ЯМР находится на уровне  $\Delta B/B \approx 3 \cdot 10^{-9}$ , что позволяет получить малую ширину линии ЯМР. Высокая чувствительность спектрометра

позволяет существенно снизить давление гелия-3 в ампуле.

На рис. 1, *b* показана ампула ЯМР до заполнения ее газами. Общая длина ее составляет 150 мм, внешний диаметр стеклянной трубки равен 6.8 мм, внутренний — 4.5 мм. На расстоянии  $\sim 50$  мм от дна ампулы делается перетяжка трубки так, чтобы внутренний диаметр уменьшить до 2–2.5 мм. Как было описано выше, на дно ампулы шприцом вводится  $\sim 1$  мл воды, а на перетяжку помещается несколько кристаллов LiD. После этого на расстоянии 110–120 мм от дна ампулы вытягивается капилляр с внутренним диаметром  $\sim 1$  мм и длиной порядка 30 мм.

Верхняя часть ампулы с помощью резинового вакуумного шланга подсоединяется к дозирующему вентилю вакуумной системы, производится медленная откачка ампулы с водой, затем наполнение ее гелием-3 из баллона при давлении  $\sim 2.9$  atm, после чего шланг пережимается, и ампула отсоединяется от системы откачки. Для того чтобы запаять стеклянную ампулу и сохранить в ней гелий, находящийся при указанном выше давлении, авторы замораживали воду в ампуле и охлаждали газ до температуры жидкого азота, а затем быстро производили отпайку ампулы в нижней части капилляра (рис. 1, *b*).

Отпайка каждой ампулы (по этой методике было изготовлено несколько ампул) сопровождалась небольшим хлопком: выходом избыточного давления гелия-3 через расплавленное стекло и образованием маленького стеклянного шарика на конце ампулы. Процедура замораживания ампул с водой до температуры жидкого азота ( $-196^\circ\text{C}$ ) связана с рядом трудностей. Было потеряно несколько ампул, которые были разорваны льдом пока авторы не научились замораживать воду отдельными каплями на стенках ампулы короткими погружениями в жидкий азот, при этом постепенный рост льда не разрывал ампулу. После отпайки ампул, оттаивания льда и достижения комнатной температуры давление гелия-3 в ампуле можно оценить в 1–2 atm (неопределенность связана с тем, что из-за необходимости отпайки ампулу вынимали из жидкого азота).

Последний этап наполнения ампулы дейтерием осуществлялся за счет химической реакции, как это было описано выше. Оставшаяся после реакции щелочь LiOH в виде белых аморфных кристаллов оставалась в ампуле вне зоны регистрации ЯМР-сигналов. По нашим расчетам давление изотопов водорода в ампуле было в пределах 70–80 atm.

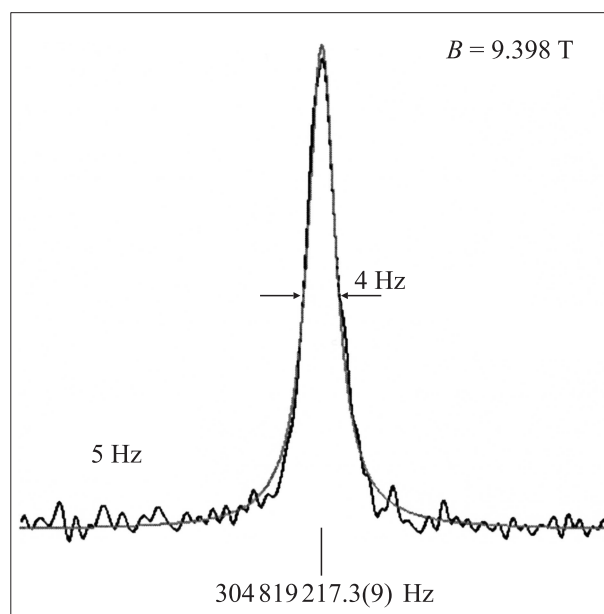
Еще одна задача, возникающая при изготовлении газовых проб высокого давления, была связана с диффузией гелия через стенки стекла разных марок. В технической литературе иногда встречаются сведения о том, что проницаемость гелием стекла может быть очень высокой, правда, при этом не указываются марки стекла, численные данные о коэффициентах диффузии и уж тем более о влиянии изотопных эффектов гелия на эти процессы. Поэтому авторы использовали в наших

работах ампулы из двух марок стекла: C52-1 (молибденовое стекло) и C29 (аналогичное по составу оконному стеклу). Отметим, что изменений амплитуды сигнала ЯМР на ядрах гелия за счет его утечки через стекло не было замечено в течение года для ампул из обеих марок стекла, хотя толщина стекла в верхней части ампулы составляет несколько десятых долей миллиметра.

## Регистрация сигналов

На рис. 2 представлен ЯМР-спектр от ядер гелия-3, который накапливали при 1000-кратном суммировании сигналов свободных прецессий в течение  $\sim 10$  min. Давление в ампуле достаточно для ограничения диффузионного перемещения молекул газовой фазы, и ширина сигналов гелия-3 составляла  $\sim 4$  Hz. При математической обработке для накопленных сигналов свободной прецессии проводили фурье-преобразование, а сигналы спектра совмещали с контурами Лоренца. Параметры контуров Лоренца определялись итерационной процедурой при минимизации квадратичных отклонений с использованием как действительной, так и мнимой компонент ЯМР-сигналов, как это описано в работе [9].

Для стабилизации магнитного поля в ЯМР-спектрометрах традиционно используют ЯМР-сигналы от ядер дейтерия, которые регистрируют одновременно на втором частотном канале. В настоящей работе был использован сигнал от дейтерированного аналога водорода  $\text{D}_2$ , который также образуется в ампулах, согласно реакции  $\text{LiOD} + \text{HD} = \text{LiOH} + \text{D}_2$ , на поверхности щелочных кристаллов.



**Рис. 2.** Спектр ЯМР-сигнала от ядер гелия-3, накопленный на частоте 304 819 217.3 Hz при стабилизации индукции магнитного поля по центру сигнала от молекул  $\text{D}_2$  на частоте 61 423 509.23 Hz.

Сигналы от гелия-3 регистрировали на основном радиочастотном канале спектрометра относительно опорной частоты [ $F_0(^3\text{He}) = 304\,818\,606.38\text{ Hz}$ ]. При обработке серии данных в этом канале была определена частота сдвига сигнала ядер гелия-3:  $dF(^3\text{He}) = 610.9(9)\text{ Hz}$ . Соответственно, частота сигнала от ядер гелия-3 равна:

$$\begin{aligned} F(^3\text{He}) &= 304\,818\,606.38 + 610.9(9) \\ &= 304\,819\,217.3(9)\text{ Hz}. \end{aligned} \quad (2)$$

В скобках указана погрешность в последней значащей цифре.

Фактически авторы определяли отношение частот резонансов ядер гелия-3 и частоты резонанса дейтронов  $D_2$ . Частота последнего определялась синтезатором и была точно известна в единицах частоты опорного кварцевого генератора:

$$F(D_2) = 61\,423\,509.23\text{ Hz}. \quad (3)$$

Таким образом, от образца с газовой смесью с помощью одной общей резонансной индуктивности одновременно регистрировалось отношение частот резонанса двух разноименных ядер:

$$F(^3\text{He})/F(D_2) = 4.962\,582\,261(14). \quad (4)$$

Статистическая погрешность измерения отношения составляет  $3 \cdot 10^{-9}$ , причем источниками ее являются две неопределенности: неопределенность регистрации сигнала от ядер гелия-3 и соизмеримая с ней неопределенность в захвате стабилизации магнитного поля по центру сигналу дейтерия от молекул  $D_2$ .

## Вычисление магнитного момента гелия-3

Для оценки магнитного момента ядра гелия-3 в единицах магнитного момента протона к полученному отношению (4) следует применить ряд преобразований. В работе [10] была исследована разность экранирования ядер дейтерия в молекулах  $D_2$  и  $DH$ . При этом использовалось магнитное поле  $11.747\text{ T}$  и был получен результат:  $\sigma(D_2) - \sigma(DH) = (46.8 \pm 0.8) \cdot 10^{-9}$ . Используя эту разность из [10] и отношение (4), можем вычислить

$$\begin{aligned} F(^3\text{He})/F(DH) &= \frac{F(^3\text{He})}{F(D_2)} \{1 - [\sigma(D_2) - \sigma(DH)]\} \\ &= 4.962\,582\,028(14). \end{aligned} \quad (5)$$

Далее можно перейти к отношению частот резонанса ядер гелия-3 и протона в дейтериевомодороде, если использовать данные работы [11]. В работе [11] было определено отношение частот резонанса двух ядер дейтериевомодорода  $F(HD)/F(DH) = 6.514\,399\,028(8)$ . Этот результат

и отношение (5) позволяют вычислить

$$F(^3\text{He})/F(DH) = \frac{F(^3\text{He})/[F(DH)]}{F(HD)/F(DH)} = 0.761\,786\,622(3). \quad (6)$$

Для определения магнитного момента ядра гелия-3 в единицах магнитного момента протона, связанного в обычном молекулярном водороде  $H_2$ , требуются данные о величине частотного изотопного сдвига  $\Delta F_p(H_2-HD)$ .

В отличие от триплетного сигнала  $HD$  сигнал от  $H_2$  более широкий ( $\sim 35\text{ Hz}$ ) и соответственно его положение на частотной шкале регистрируется с большей погрешностью. Поэтому для определения частотной разности  $\Delta F(H_2-HD)$  был выполнен отдельный эксперимент. В поле  $9.398\text{ T}$  для этого изотопного частотного сдвига был получен следующий результат:  $\Delta F(H_2-HD) = 16.3(2)\text{ Hz}$ . В относительных единицах этому соответствует следующая разность экранирования протонов:

$$\sigma(HD) - \sigma(H_2) = (40.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-9}. \quad (7)$$

Используя (7) для магнитного момента ядра гелия-3 (связанного в атоме гелия-3) в единицах магнитного момента протона (связанного в молекулярном водороде), получим следующую величину:

$$\begin{aligned} F(^3\text{He})/F(H_2) &= \frac{F(^3\text{He})}{F(HD)} \{1 - [\sigma(HD) - \sigma(H_2)]\} \\ &= 0.761\,786\,591(3). \end{aligned} \quad (8)$$

Ранее для этого отношения в работе [4] было получено значение  $F(^3\text{He})/F(H_2) = 0.761\,786\,637(13)$ , которое на 3.3 стандартных отклонения отличается от нового и более точного результата (8). Такое отличие не кажется большим, поскольку в газовые образцы в работе [4] авторы добавляли парамагнитный кислород  $O_2$  для уменьшения времени ядерной магнитной релаксации инертных атомов гелия-3, а об интенсивном взаимодействии молекул водорода и кислорода хорошо известно.

Для перехода к отношению магнитных моментов ядер следует использовать расчетные данные об электронном экранировании ядер в атоме гелия-3 и экранировании протонов в молекулярном водороде. В частности, если использовать расчетные данные  $\sigma(^3\text{He}) = 59924 \cdot 10^{-9}$  из работы [5] и расчетные данные  $\sigma(H_2) = 26288 \cdot 10^{-9}$ , представленные в работе [12], то получим результат

$$\begin{aligned} \frac{\mu(^3\text{He})}{\mu_p} &= \frac{F(^3\text{He})}{F(H_2)} \{1 + [\sigma(^3\text{He}) - \sigma(H_2)]\} \\ &= -0.761\,812\,215(3) \quad (4 \cdot 10^{-9}). \end{aligned} \quad (9)$$

Данное отношение имеет отрицательный знак, поскольку магнитный момент нейтрона (определяющий магнитный момент ядра гелия-3) ориентирован противоположно направлению спина в отличие от протона,

у которого и магнитный момент и спин ориентированы в одном направлении. В качестве погрешности (9) указана лишь погрешность исходного экспериментального значения (8). На наш взгляд, к ней следует добавить погрешность расчета экранирования ядер, но авторы расчетов, как правило, не указывают погрешности вычислений  $\sigma(^3\text{He})$  и  $\sigma(\text{H}_2)$ , так как их трудно оценить. Однако сопоставление расчетных и экспериментальных данных для простейших молекул [13] позволяет считать, что погрешность современных вычислений  $\sigma(\text{H}_2)$  (и тем более  $\sigma(^3\text{He})$ ) вносит в конечный результат неопределенность, которая сопоставима с погрешностью экспериментального результата (8).

Для сравнения отметим, что прецизионному определению магнитного момента ядра гелия-3 была посвящена работа [14], где было получено  $\mu(^3\text{He})/\mu_p = -0.761\,812\,210(15)$ . С этим отношением хорошо согласуется наш более точный результат:  $\mu_h/\mu_p = -0.761\,812\,215(3)$  (4ppb).

Авторы выражают благодарность фонду РФФИ, грант № 08-02-13562-офи-ц, который был предоставлен на начальном этапе этой работы.

## Список литературы

- [1] *Cohen E.R., Taylor B.N.* // Rev. Mod. Phys. 1987. Vol. 59. N 4. P. 1121–1148.
- [2] *Неронов Ю.И., Барзах А.Е., Мухамадиев Х.* // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. Вып. 6. С. 1872–1882.
- [3] *Mohr P.J., Taylor B.N.* // Rev. Mod. Phys. 2008. Vol. 80. N 2. P. 633–730.
- [4] *Неронов Ю.И., Барзах А.Е.* // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. Вып. 5. С. 1659–1669.
- [5] *Неронов Ю.И., Барзах А.Е.* // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. Вып. 5. С. 1521–1540.
- [6] *Александров В.С., Неронов Ю.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93. Вып. 6. С. 337–340.
- [7] *Неронов Ю.И., Александров В.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. Вып. 6. С. 452–455.
- [8] *Karshenboim S.G., Ivanov V.G., Neronov Yu.I., Nikolaev B.P., Tolparov Yu.N.* // Can. J. Phys. 2005. Vol. 83. N 4. P. 405–412.
- [9] *Неронов Ю.И., Серёгин А.Н.* // Измерительная техника. 2010. № 8. С. 65–70.
- [10] *Неронов Ю.И., Каршенбойм С.Г.* // Научное приборостроение. 2006. Т. 16. Вып. 1. С. 53–57.
- [11] *Горшков М.В., Неронов Ю.И., Николаев Е.Н., Тарбеев Ю.В., Тальрозе В.Л.* // ДАН. 1989. Т. 305. № 6. С. 1362–1365.
- [12] *Sundholm D., Gauss J., Schafer A.* // J. Chem. Phys. 1995. Vol. 105. N 24. P. 1151–1159.
- [13] *Helgaker T., Jaszunski M., Ruud K.* // Chem. Rev. 1999. Vol. 99. N 1. P. 293–352.
- [14] *Flowers J.L., Petley B.W., Richards M.G.* // Metrologia. 1993. Vol. 30. N 2. P. 75–86.