

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

Лабораторная работа №10.4
по курсу основы современной физики
на тему:
«Магнитные моменты легких ядер»

Работу выполнил:
Валеев Райф

Долгопрудный
2021 год

Цель работы: В работе вычисляются магнитные моменты протона, дейтрона и ядра фтора на основе измерения их g -факторов методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Полученные данные сравниваются с вычислениями магнитных моментов на основе кварковой модели адронов и одночастичной оболочечной модели ядер.

1 Теоретическое введение

1.1 Спин и магнитный момент ядра

Полный момент количества движения ядра I складывается из собственной (спиновой) S и орбитальной L частей.

$$I = L + S$$

Согласно квантовой механике, полный момент количества движения I изолированной системы (ядра) принимает (в единицах \hbar) целые или полуцелые значения.

Отношение магнитного момента ядра $\mu_{\text{я}}$ к механическому моменту I задается гиромагнитным отношение

$$\mu = g_{\text{я}} \mu_{\text{я}} I$$

Где $g_{\text{я}}$ – ядерный g -фактор, $\mu_{\text{я}}$ – ядерный магнетон, I измеряется в величинах \hbar .

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2Mc}$$

M – масса протона.

Таким образом, для вычисления магнитного момента ядра необходимо определить величину его механического момента и g -фактора. В данной работе для определения величины g -фактора используется метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

1.2 Сверхтонкая структура оптических спектров

Сверхтонкая структура спектров вызвана взаимодействием электронов с магнитным моментом ядра. В результате взаимодействия магнитного момента ядра с магнитным полем, создаваемым движением электронов в атомной оболочке, электроны приобретают дополнительную энергию, зависящую от величины магнитного момента ядра и его ориентации относительно направления магнитного поля электрона. Величина I определяется путем простого подсчета числа компонент сверхтонкой структуры в спектре данного изотопа.

1.3 Чередование интенсивностей в полосатых спектрах двухатомных молекул с тождественными ядрами

Этот метод дает возможность определить I . Чередование интенсивностей является следствием того, что волновая функция молекулы с тождественными ядрами должна быть либо симметричной либо антисимметричной относительно перестановки координат и спина. Определение I основано на том факте, что статистические веса симметричных и антисимметричных состояний относятся как $(I+1)/I$.

1.4 Ядерные реакции

Если известен спин начального ядра, а затем происходит некоторый распад, то можно сделать определенные выводы относительно спина конечного ядра, и наоборот. Основано такое определение спина на том, что вероятность перехода (т.е. время жизни возбужденного состояния) зависит от спина и четности исходного и конечного ядра. Разность спинов и четностей этих состояний может быть определена по измерению углового распределения вылетающих γ -квантов.

1.5 Ядерный магнитный резонанс

ЯМР – это резонансное поглощение электромагнитной энергии в веществах, обусловленное ядерным перемагничиванием. ЯМР наблюдается в постоянном магнитном поле B_0 при одновременном воздействии на образец радиочастотного магнитного поля, перпендикулярного B_0 и обнаруживается по поглощению излучения. У нейтральных атомов в сильном магнитном поле связь между I и J разрывается, и оба эти вектора независимо прецессируют с одинаковой угловой частотой $w = g \frac{eH}{Mc}$, где g – гиromагнитное отношение. Если теперь наложить слабое добавочное поле H' , перпендикулярное к основному полю, то оно вызовет изменение ориентации ядренных спинов.

2 Экспериментальная установка

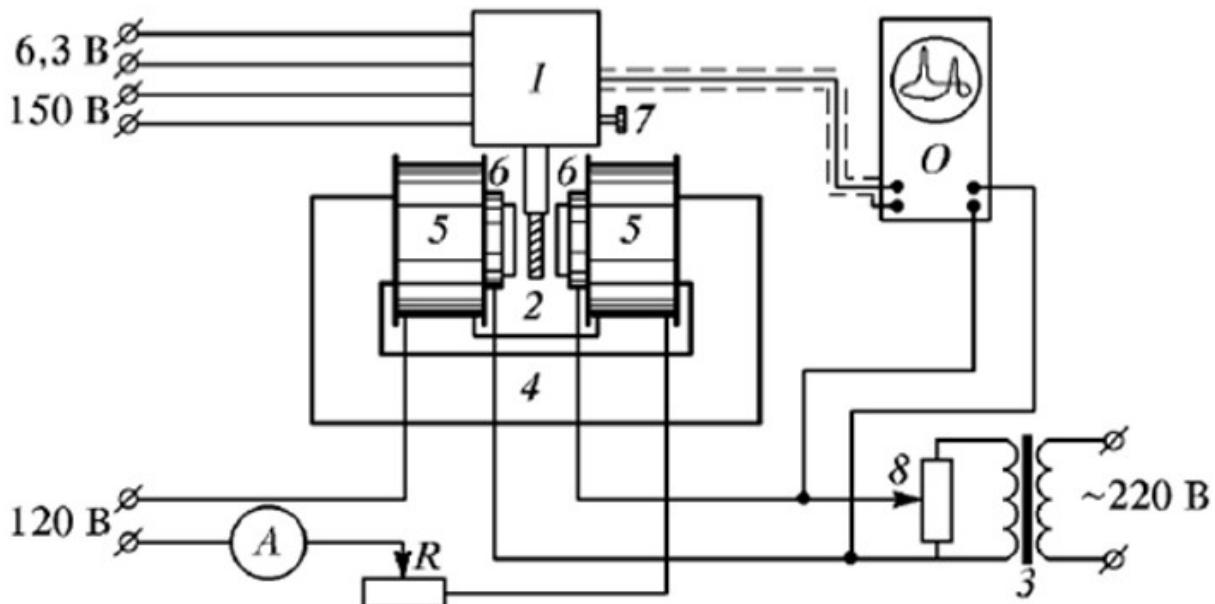


Рис. 1: Схема установки для изучения ядерного магнитного резонанса

В магнитном поле ядерные уровни расщепляются и под действием внешнего высокочастотного поля могут происходить электромагнитные переходы между компонентами расщепившегося уровня, это явление носит резонансный характер и потому называется

ядерным магнитным резонансом. Различие по энергии между этими двумя соседними компонентами определяется формулой

$$\Delta E = g_{\text{я}} \mu_{\text{я}} B_0$$

$$f_0 = \frac{\Delta E}{h} = \frac{g_{\text{я}} \mu_{\text{я}} B_0}{h}$$

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Детектирование сигнала ЯМР осуществляется с помощью промышленного прибора. Модуляция магнитного поля осуществляется с помощью небольшой катушки, частота модуляции ≈ 50 Гц. В зазоре электромагнита устанавливается холловский измеритель магнитного поля, а измерения ЯМР проводятся на резине (измеряется ЯМР на протонах), тефлоне (в состав входит фтор) и тяжелой воде.

3 Измерения. Анализ результатов

	Вода	Резина	Тефлон
f_0 , МГц	9,86	9,90	9,72
σ_{f_0} , МГц	0,01	0,01	0,01
B_0 , мТл	231,62	232,55	229,62
σ_{B_0} , мТл	0,01	0,01	0,01
I , А	0,32	0,35	0,36
V , В	18,6	20,2	20,6
B_0 холла, мТл	231	232	243
σ_{B_0} , мТл	1	1	1
g	5,6	5,6	5,25
σ_g	0,02	0,02	0,02
μ , $\mu_{\text{я}}$	2,80	2,80	2,625
σ_{μ} , Дж/Тл	0,01	0,01	0,01

Таблица 1: Измеренные величины и итоговые g -факторы и угловые моменты для разных веществ

В образцах тефлон и вода исследуется ЯМР на протонах, поскольку формула для ядерного g -фактора уже приведена в теории, как и формула для вычисления величины углового момента, то нам не хватает, для их вычисления, только спинового числа. Поскольку ЯМР на протонах, то спиновое число равно $1/2$, и из этого мы легко считаем все, что нам надо.

Аналогично вычисляется величина g -фактора ядра фтора, а затем его магнитный момент. Величина g -фактора и магнитного момента близка к значению для протона, так как орбитальное движение протона не вносит вклад в магнитный момент этого ядра, и он определяется только спином протона.

В итоге, зная что табличные значения для протона и фтора соответственно равны:

$$\mu_P = 2,7928 \mu_{\text{я}}$$

$$\mu_F = 2,6258 \mu_{\text{я}}$$

То мы видим, что у нас идеально совпадает эксперимент с теорией.



Рис. 2: Тefлон и Вода

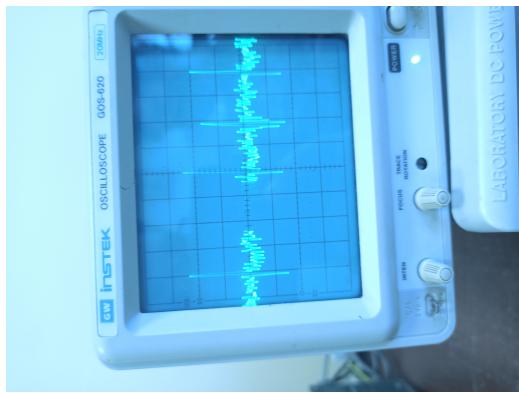


Рис. 3: Резина

4 Вывод

В ходе работы были вычислены магнитные моменты протона, дейтрона и ядра фтора на основе измерения их g -факторов методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Полученные данные сравнивались с вычислениями магнитных моментов на основе квarkовой модели адронов и одночастичной оболочечной модели ядер.

В результате:

1. Магнитный момент и g -фактор протона хорошо согласуются с табличными значениями;
2. Значения магнитного момента и g -фактора ядра фтора оказались близки к соответствующим значениям для протона, как и предсказывает теория.