

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа №6.10.4
(Основы современной физики)

Магнитный момент лёгких ядер

Работу выполнил:
Дорогинин Демид, группа Б02-825

г. Долгопрудный
2021 год

Аннотация

В работе исследуется ядерный магнитный резонанс, наблюдается сигнал ЯМР от ядер водорода, опрееляется g -фактор для ядер фтора, наблюдается насыщение ядерного магнитного резонанса.

Теория

Рассмотрим ядро с магнитным моментом $\boldsymbol{\mu}$ во внешнем поле с индукцией \mathbf{B} . Взаимодействие магнитного диполя с внешним полем приводит к появлению дополнительной энергии

$$E = -(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{B}).$$

Вектор $\boldsymbol{\mu}$ ориентирован по направлению полного момента количества движения \mathbf{M} :

$$\boldsymbol{\mu} = \gamma \mathbf{M},$$

где γ – гиромагнитное соотношение. Вводя ядерный g -фактор, значение которого постоянно на одном уровне,

$$g = \frac{\hbar}{\mu_{\text{я}}} \gamma,$$

перепишем в виде

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\mu_{\text{я}}}{\hbar} g \mathbf{M}.$$

Квадрат вектора \mathbf{M} и его проекция определяются формулами

$$\mathbf{M}^2 = \hbar^2 I(I + 1), \quad M_z = m\hbar,$$

гдн I , целое или полуцелое число, – спин ядра, а m – целое число, по модулю не превосходящее I . Тогда, проектируя \mathbf{M} и $\boldsymbol{\mu}$ на направление вектора B , получим

$$\mu_B = \frac{\mu_{\text{я}}}{\hbar} g M_B = \mu_{\text{я}} g m.$$

Таким образом, разница между расщепившимися уровнями энергии будет

$$\Delta E = B \Delta \mu_B = B \mu_{\text{я}} g.$$

Между компонентами расщепившегося уровня могут происходить электромагнитные переходы. Переходы с нижних компонент на верхние требуют затрат энергии и происходят лишь под действием внешнего высокочастотного поля. Энергия квантов, вызывающих электромагнитные переходы, точно определена, стало быть явление носит резонансный характер. Соответствующая частота

$$\omega = \frac{\Delta E}{\hbar} = \frac{\mu_{\text{я}}}{\hbar} B g. \quad (1)$$

Возбуждение переходов между компонентами расщепившегося ядерного уровня носит название *ядерного магнитного резонанса*.

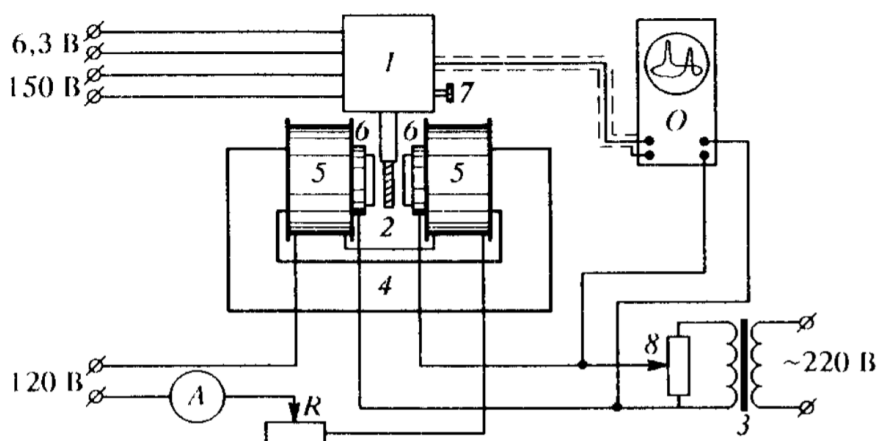


Рис. 1: Схема установки.

Установка

На Рис. 1 изображена схема установки. Образец 2 помещён внутрь катушки, входящей в состав генератора. Генератор представляет собой часть индикаторной установки 1, магнитное поле в образце создаётся с помощью электромагнита 4. Основное магнитное поле создаётся с помощью катушек 5, питаемых постоянным током. Величина тока регулируется реостатом R и измеряется амперметром A . Небольшое дополнительное поле возбуждается модулирующими катушками 6, присоединёнными к сети переменного тока через трансформатор 3. Напряжение на катушках регулируется потенциометром 8.

Основной частью установки является генератор слабых колебаний. Он представляет собой усилитель с положительной обратной связью, благодаря которой поддерживается непрерывная генерация. Катушка с образцом и находящийся в ящике 1 конденсатор переменной ёмкости образуют сеточный контур генератора. Ёмкость конденсатора можно менять, поворачивая лимб 7. При наступлении ЯМР поглощение энергии в образце увеличивается, добротность сеточного контура падает и амплитуда генерации уменьшается. Высокочастотный сигнал с генератора усиливается и детектируется.

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.

Сигнал ядерного магнитного резонанса наблюдается на экране осциллографа. На рис. 2 вверху изображен временной ход магнитного поля электромагнита. Как уже отмечалось, постоянная часть поля создается основными, а переменная – модулирующими катушками. При правильной настройке установки магнитное поле колеблется около резонансного значения, пересекая его два раза за каждый период изменения тока в модулирующих катушках. Как видно из Рис. 2, время, проходящее между следующими друг за другом пересечениями, одинаково при точном равенстве постоянного магнитного поля резонансному значению B_0 (Рис. 2а) и различается при неточном их соответствии (Рис. 2б) основной составляющей магнитного поля.

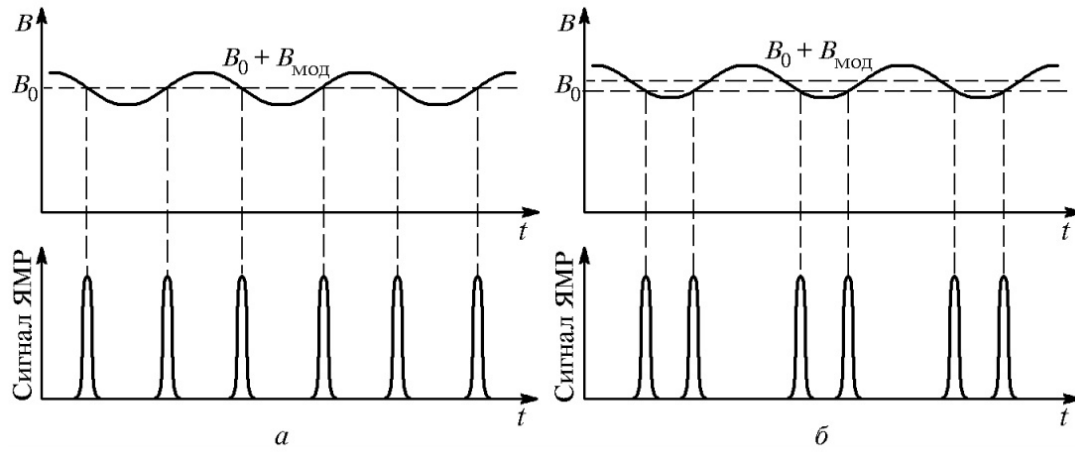


Рис. 2: Временная зависимость магнитного поля и сигнала ядерного магнитного резонанса.

1 Выполнение и обработка данных

Найдём резонансную частоту $f_{\text{рез}}$ для четырёх различных образцов, после чего с помощью детектора Холла определим магнитное поле в щели прибора. Результаты в Таблице 1.

№	Образец	$f_{\text{рез}}$, МГц	$B_{\text{холл}}$, мТл	B_0 , мТл
1	Резина	9.88	229	232.0
2	Тефлон	9.87	243	231.9
3	Вода	9.37	227	228.5
4	Тяжелая вода	3.42	521	522.3

Таблица 1: Результаты измерения постоянного магнитного поля и резонансной частоты.

Для каждого образца вычислим g -фактор и магнитный момент ядра, далее используем ядерный магнетон

$$\mu_{\text{я}} \approx 5.05 \cdot 10^{-27} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}.$$

1.1 Образцы №1 и №3 – резина и вода (ЯМР на протонах)

Величина ядерного g -фактора для протона определяется по формуле

$$g_p = \frac{hf_0}{\mu_{\text{я}} B_0}$$

Так как угловой момент протона определяется только его спином, то по величине g -фактора легко рассчитать и магнитный момент

$$\mu_p = g_p \mu_{\text{я}} I = \frac{g_p}{2} \mu_{\text{я}}.$$

В результате вычисленные значения совпали с табличными.

$$\mu_{p_{\text{табл}}} = 2.7928 \mu_{\text{я}}.$$

1.2 Образец №2 – тефлон (ЯМР на ядрах фтора)

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.

$$\mu_{\text{F табл}} = 2.6285\mu_{\text{я}}.$$

1.3 Образец №4 – тяжелая вода (ЯМР на дейтронах)

Здесь измеряется ЯМР на дейтронах. Величина g -фактора определяется по аналогичной формуле.

Спин дейтрона равен 1, поэтому его магнитный момент

$$\mu_p = g_p \mu_{\text{я}} I = g_p \mu_{\text{я}}$$

При этом табличное значение:

$$\mu_{\text{D табл}} = 0.857\mu_{\text{я}}$$

Предположим, что основное состояние дейтрона является не чистым S-состоянием, а смесью состояний 3S_1 и 3D_1 (с $L = 2$). Если P_S и P_D – статистические веса этих состояний, то

$$\mu_d = \mu_n + \mu_p - \frac{3}{2} \left(\mu_n + \mu_p - \frac{1}{2} \right) P_D$$

Отсюда, зная табличные значения магнитных моментов протона и нейтрона и используя найденное значение магнитного момента дейтрона, найдем P_D :

$$\mu_p = 2.792763\mu_{\text{я}}, \quad \mu_n = -1.91315\mu_{\text{я}}$$

$$P_D = \frac{2}{3} \frac{\mu_n + \mu_p - \mu_d}{\mu_n + \mu_p - \frac{1}{2}} = (5.0 \pm 1.6)\%$$

Итоговые результаты представим в Таблице 2.

№	Образец	$g_{\text{я}}$	$\sigma_{g_{\text{я}}}$	$\mu, \mu_{\text{я}}$
1	Резина	5.59	0.05	2.79
2	Тефлон	5.35	0.05	2.67
3	Вода	5.38	0.05	2.69
4	Тяжелая вода	0.85	0.01	0.85

Таблица 2: Результаты вычисления g -факторов и магнитных моментов ядер.

2 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 кварковой модели адронов и одночастичной оболочечной модели ядер.

В результате магнитный момент и g -фактор протона хорошо согласуются с табличными значениями, значения магнитного момента и g -фактора ядра фтора оказались близки к соответствующим значениям для протона, как и предсказывает теория, для дейтрона проведен расчёт статистического веса состояния 3D_1 .

Список литературы

- [1] Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М. *Лабораторный практикум по общей физики: Учеб. пособие для вузов. Т3. Квантовая физика.* М.: Физматкнига - 2005.