

Магнитные моменты легких ядер. Ядерный магнитный резонанс.

Григорий Чирков

30 ноября 2016 г.

1 Теория

1.1 Связь магнитного и механического моментов ядра

Согласно квантовой механике, полный момент количества движения ядра \vec{M} принимает целые или полуцелые значения (в единицах \hbar). Для четного числа нуклонов $M = 0, 1, 2, \dots$, а для нечетного $M = 1/2, 3/2, \dots$.

Ядро также обладает магнитным моментом $\vec{\mu}$, связанным с \vec{M} . Отношение γ магнитного момента к механическому называется гиромагнитным отношением:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{M}. \quad (1)$$

Зачастую, вместо γ используют более простую величину, g -фактор. Он также является отношением магнитного момента к механическому, но при этом магнитный момент измеряется в ядерных магнетонах Бора ($\mu_{\text{я}} = e\hbar/2m_p c$), а механический момент – в единицах \hbar :

$$g = \frac{\mu/\mu_{\text{я}}}{M/\hbar} = \frac{\mu}{\mu_{\text{я}}} \frac{\hbar}{M} = \frac{\hbar}{\mu_{\text{я}}} \gamma. \quad (2)$$

Отсюда

$$\vec{\mu} = \frac{\mu_{\text{я}}}{\hbar} g \vec{M}. \quad (3)$$

Квадрат момента импульса \vec{M} определяется формулой

$$\vec{M}^2 = \hbar^2 I(I+1), \quad (4)$$

где I – целое или полуцелое число, называемое спином ядра.

1.2 Магнитный момент ядра

Проекция момента импульса на любую ось также квантуется. Для проекции момента \vec{M} квантовая механика дает формулу

$$M_z = m\hbar, \quad (5)$$

где m – некоторое целое или полуцелое число. Набор всевозможных значений m определяется условием

$$-I \leq m \leq +I, \quad (6)$$

причем последовательные возможные значения m отличаются друг от друга на единицу. Проецируя M и μ на направление вектора B , и применяя формулы (3) и (5), получаем:

$$\vec{\mu}_B = \frac{\mu_{\text{я}}}{\hbar} g \vec{M}_B = \mu_{\text{я}} g m. \quad (7)$$

Наибольшее значение μ_B равно $\mu_{\text{я}} g I$. Его принято называть магнитным моментом ядра.

1.3 Ядро в магнитном поле

В магнитном поле энергетические уровни ядра расщепляются. Расстояние между двумя соседними компонентами расщепившегося уровня находится с помощью (7):

$$\Delta E = B\Delta\mu_B = B\mu_{\text{я}}g\Delta m = B\mu_{\text{я}}g. \quad (8)$$

1.4 ЯМР

Между компонентами расщепившегося уровня могут происходить электромагнитные переходы. Энергия квантов при этом строго определена выражением (8), и поэтому явление носит резонансный характер. Частота излучения определяется обычным способом:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = B\mu_{\text{я}}g/h. \quad (9)$$

Возбуждение переходов между компонентами расщепившегося ядерного уровня носит название ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

1.5 Измерение g -фактора

В данной работе g -фактор определяется с помощью явления ЯМР. Изменяя частоту переменного магнитного поля, мы можем найти положение максимума поглощения, т.е. частоту резонанса. По этому максимуму определяется g -фактор из соотношения (9).

2 Экспериментальная установка

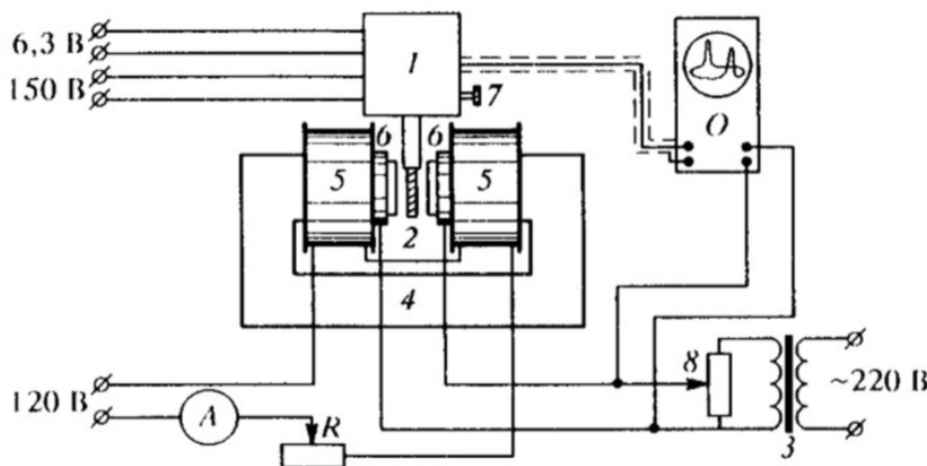


Рис. 1: Схема установки

Исследуемый образец обозначен цифрой 2. Образец помещен внутри катушки, входящей в состав генератора. Генератор представляет собой часть индикаторной установки 1. Магнитное поле в образце создается с помощью электромагнита 4. Основное магнитное поле создается с помощью катушек 5, питаемых постоянным током. Величина тока регулируется реостатом R и измеряется амперметром A . Небольшое дополнительное поле, генерирующее электромагнитные кванты, возбуждается модулирующими катушками 6, присоединенными к сети переменного тока через трансформатор 3. Напряжение на катушках регулируется потенциометром 8.

3 Ход работы

1. Для образца с водой:
 - (а) Найти резонансную частоту поглощения излучения
 - (б) С помощью датчика Холла определить магнитное поле в зазоре электромагнита
2. Повторить пункты выше для других образцов

4 Результаты и их обработка

Все экспериментальные данные и вычисленные значения сведены в таблицу ниже.

Вещество	ν, MHz	B, mT	g -фактор	$\mu, \mu_{\text{я}}$	$\mu_{\text{табл}}, \mu_{\text{я}}$
Вода	9.983	230	5.7 ± 0.3 (4%)	2.9 ± 0.2	2.79
Резина	10.000	230	5.7 ± 0.3 (4%)	2.9 ± 0.2	2.79
Тефлон	9.990	250	5.3 ± 0.2 (4%)	2.7 ± 0.1	2.63
Дейтерий	3.481	530	0.86 ± 0.02 (2%)	0.86 ± 0.02	0.857

Расчет g -фактора сделан по формуле

$$g_{\text{я}} = \frac{h\nu}{\mu_{\text{я}}B}, \quad (10)$$

а магнитного момента – по формуле (7). При подсчете погрешностей учтено, что $\sigma_B = 10mT, \sigma_{\nu} = 1kHz$. Все табличные данные взяты из справочника физических величин (под ред. И.К. Кикоина).

5 Вывод

В проделанном эксперименте было изучено явление ядерно-магнитного резонанса. В ходе работы была получена осциллограмма резонансной кривой, резонансные значения магнитного поля и частоты внешнего излучения. На основе полученных данных были рассчитаны g -факторы и магнитные моменты ядер водорода, дейтерия и фтора. Все полученные значения сходятся с табличными в пределах погрешности.