

## Лабораторная работа №343

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ПРОТОНА

**Приборы и принадлежности:** электромагнит ЭМ-1, источник питания постоянного тока Б5-49, измеритель магнитной индукции Ш1-9, частотомер ЧЗ-44, амперметр постоянного тока.

**Введение.** Магнитное поле в веществе создается не только электрическим током, протекающим по проводам, но и движением заряженных частиц внутри атомов и молекул, а также собственными магнитными моментами электронов и ядер. По современным представлениям собственный магнетизм вещества обусловлен тремя причинами: 1) орбитальным движением электронов вокруг ядер, 2) собственным магнитным моментом электронов, 3) собственным магнитным моментом ядер. Изучению последнего явления и посвящена данная работа.

Обозначим магнитный момент ядра  $\vec{\mu}$ . Величина его не зависит от внешнего магнитного поля, в котором находится вещество, содержащее такие ядра. Направление вектора магнитного момента совпадает с направлением момента импульса  $\vec{M}$ . Коэффициент пропорциональности  $\gamma$  называется *гиромагнитным отношением*

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

В соответствии с квантовой теорией величина магнитного момента ядра определяется следующей формулой:

$$\mu = \mu_N g \sqrt{I(I+1)}, \quad (2)$$

где  $g$  –  $g$ -фактор (читается как *жэ-фактор*), который определяется экспериментально,

$I$  – целое или полуцелое число, которое принято называть спиновым квантовым числом ядра (или просто – спином ядра). Спин зависит от массового и зарядового чисел ядра.

$\mu_N$  – ядерный магнетон Бора.

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}. \quad (3)$$

Здесь  $m_p$  – масса протона,

$e$  – заряд протона (он равен элементарному заряду),

$\hbar$  – постоянная Планка, разделенная на  $2\pi$ .

Благодаря воздействию внешнего магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$  ядерный магнитный момент ориентируется в нем определенным образом. Как следует из квантовой теории, возможны такие ориентации, при которых

проекция магнитного момента на направление внешнего магнитного поля  $\vec{B}$  определяется следующим соотношением:

$$\mu_B = \mu_N g m, \quad (4)$$

где  $m$  – целое число (при  $I$  целом) или полуцелое (при  $I$  полуцелом). Набор возможных значений  $m$  задается условием

$$-I; -(I-1); -(I-2) \dots (I-2); (I-1); I. \quad (5)$$

На рис. 1,а показаны возможные ориентации во внешнем магнитном поле  $\vec{B}$  магнитного момента ядра, обладающего полуцелым спином  $I=3/2$ , а также проекции его на направление поля. В данном примере  $m = -3/2; -1/2; +1/2; +3/2$  (разность между соседними значениями всегда равна единице).

Взаимодействие магнитного момента ядра с внешним полем приводит к появлению у ядра дополнительной энергии

$$\varepsilon = -\vec{\mu} \vec{B} = -\mu B \cos(\angle \vec{\mu}, \vec{B}), \quad (6)$$

или

$$\varepsilon = -\mu_B B, \quad (7)$$

где  $\mu_B$  – проекция магнитного момента на направление поля.

Так как проекция магнитного момента, в соответствии с формулой (4), может принимать ряд дискретных значений, то энергетический уровень ядра расщепляется в магнитном поле на такое же количество подуровней (рис. 1,б).

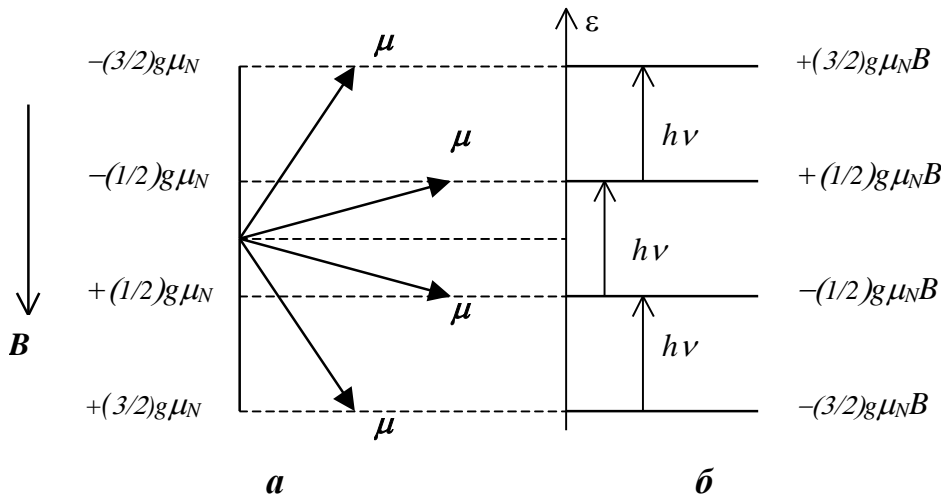


Рис.1

Разность значений энергии между двумя соседними подуровнями составляет

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = B\mu_{B2} - B\mu_{B1} = g\mu_N B, \quad (8)$$

так как  $\Delta m = \pm 1$ .

Перевод ядра с нижних энергетических уровней на более высокие требует затраты электромагнитной энергии и происходит под воздействием внешнего радиочастотного поля подходящей частоты  $\nu$ , удовлетворяющей условию

$$h\nu = \Delta\varepsilon; \quad h\nu = g\mu_N B. \quad (9)$$

$$\nu = \frac{g\mu_N}{h} B. \quad (10)$$

Явление поглощения энергии электромагнитного поля, приводящее к возбуждению переходов между энергетическими уровнями магнитного момента ядра в постоянном магнитном поле, носит название *ядерного магнитного резонанса (ЯМР)*.

Как видно из формулы (10), частота резонансного поглощения энергии высокочастотного излучения пропорциональна индукции постоянного магнитного поля  $\vec{B}$ . Этот факт используется для самого точного в настоящее время измерения магнитной индукции. Высокая точность достигается благодаря тому, что техника измерения частоты электромагнитных колебаний достигла большого совершенства, а процесс измерения осуществляется довольно просто и надежно.

**Целью** данной лабораторной работы является: 1) наблюдение сигнала ЯМР на протонах воды, 2) определение магнитного момента протона, 3) измерение индукции магнитного поля электромагнита.

**Описание установки.** Схема лабораторной установки приведена на рис.2.

1. Электромагнит предназначен для создания постоянного магнитного поля. Его питание производится от источника тока (ИП), имеющего высокую стабильность, чтобы сигнал ЯМР на экране индикатора имел устойчивое положение.

2. Прибор Ш1-9 состоит из двух блоков: генератора и индикатора. Он предназначен для измерения индукции магнитного поля с высокой точностью. В силу особенностей используемого для его работы физического явления магнитное поле в месте расположения *датчика* должно иметь однородность не хуже  $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ .

В генераторный блок входит высокочастотный генератор, вырабатывающий электромагнитные колебания амплитудой до 1 В и частотой от 1 до 30 МГц. Высокочастотная (ВЧ) катушка колебательного контура вынесена за пределы генераторного блока на отрезке радиочастотного кабеля и оформлена в виде датчика. Внутри катушки (ее выводы отмечены цифрами 1, 2 на рис.2) помещается диамагнитное вещество, ядра которого обладают магнитным моментом  $\vec{\mu}$ .

Путем изменения частоты генератора можно добиться равенства частоты радиочастотного поля с частотой прецессии магнитных моментов ядер и создать условия для резонансного поглощения энергии радиочастотного поля,

если удовлетворить равенство (10). Поглощение энергии (понижение добротности контура) обнаруживается и регистрируется блоком индикатора.

Чтобы иметь возможность наблюдать сигнал ЯМР визуально на экране осциллографической трубки, применяют низкочастотную (НЧ) модуляцию постоянного магнитного поля переменным с частотой 50 Гц и амплитудой до 5 мТл (рис.3,а). Выводы катушек модуляции отмечены цифрами 3, 4 (рис.2).

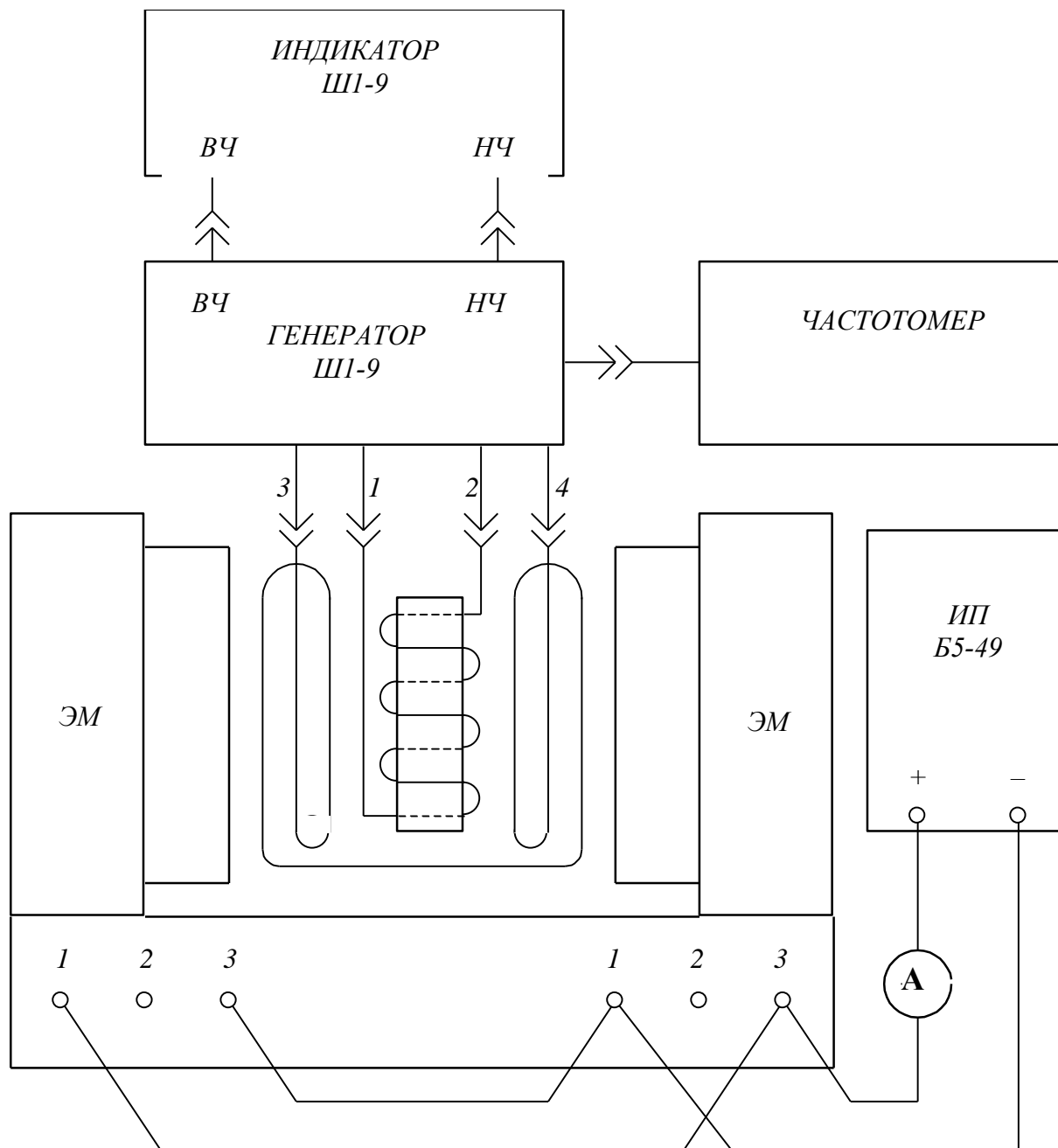
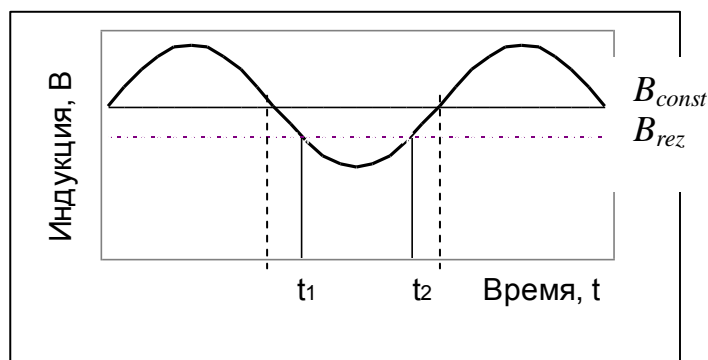


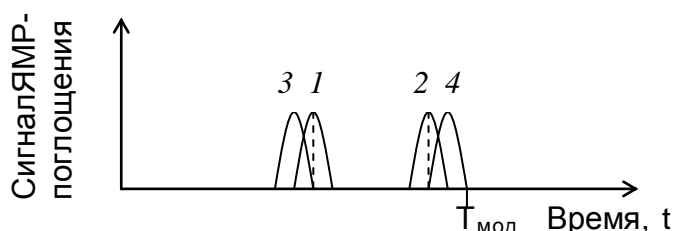
Рис.2

Модуляция осуществляется двумя небольшими катушками, расположенными около высокочастотной катушки колебательного контура с диамагнитным образцом. Тогда дважды за период модуляции создаются

резонансные условия и два раза появляется сигнал поглощения на экране осциллографического индикатора («пички» 1 и 2), так как горизонтальная развертка его производится с той же частотой модуляции (рис.3,б). Подстройкой частоты ВЧ-генератора сигналы ЯМР выводятся в центр экрана



а



б

Рис.3

(«пички» 3 и 4). В этом положении поле модуляции проходит через нуль и резонанс происходит в постоянном магнитном поле  $B_{const}$ , величину которого требуется измерить.

**Измерения.** С целью облегчения поиска сигнала ЯМР желательно знать *примерное* значение индукции магнитного поля, которое можно получить другими, более простыми, но менее точными, методами измерений (например, с помощью

милливеберметра, как это делается в работе №337).

В противном случае поиск сигнала может оказаться слишком длительным и трудоемким, так как его появление связано с одновременным выполнением ряда условий. Для преодоления этих затруднений в данной работе предлагается градуировочный график электромагнита, из которого индукция определяется приблизительно по величине протекающего тока.

1.Проверьте, все ли измерительные приборы соединены так, как требуется (см. схему на рис.2).

2.До включения источника питания Б5-49 в сеть поставьте на его кодовых переключателях 9,0 В и 100 мА (нулевые установки выставлять нельзя – это связано с риском вывести прибор из строя).

3.Включите источник питания в сеть.

4.Установите на кодовом переключателе источника напряжение 59 В. Признаком того, что источник работает нормально, служит свечение индикатора «Режим стабилизации. Ток». При этом условии источник дает стабилизированный ток 100 мА.

5.Вставьте датчик ЯМР №3 в зазор электромагнита, в гнездо алюминиевого вкладыша. Назначение вкладыша таково. Во-первых, он способствует улучшению однородности поля магнита, так как обеспечивает параллельность его полюсных наконечников, во-вторых, фиксирует положение датчика в зазоре.

Согласно инструкции по эксплуатации прибора Ш1-9 [7] датчиком №3 в третьем поддиапазоне частот можно измерять поля от 125 до 320 мТл. В качестве поглощающего вещества этот датчик содержит воду. Сигнал ЯМР наблюдается на ядрах водорода – *протонах*. Спин ядра  $H^1$  равен  $\frac{1}{2}$ . Ядра другого атома воды, кислорода, не дают сигнала ЯМР ни в этом, ни в другом диапазоне частот, поскольку магнитный момент ядра  $O^{16}$  равен нулю. По этой же причине присутствие кислорода не мешает наблюдению резонанса на протонах.

6. Включите в сеть оба блока измерителя магнитной индукции. На блоке «Генератор» установите:

- переключатель «Поддиапазон» – в положение 3,
- переключатель «Род работы» – в положение «Ручной»,
- клавишу «АПЧ» – в отжатое положение,
- ручкой «Модуляция» установите ток модуляции 10 мкА,
- ручки «ВЧ» и «НЧ» – на максимум.
- Положение остальных ручек произвольное.

7. Нажмите кнопку «Контроль» на блоке «Индикатор». На цифровом табло должно высветиться число 234,874. Наличие такого показания свидетельствует о нормальной работе прибора Ш1-9.

8. По градуировочному графику электромагнита определите, какое магнитное поле соответствует току, протекающему через него в данный момент. С помощью клавиш «Настройка» и ручки грубой регулировки частоты генератора  $\blacktriangledown$  выставьте на табло значение индукции, близкое к найденной по графику величине. Но сигнал ЯМР при этом может и не появиться на экране.

9. Вращая ручку настройки частоты ВЧ-генератора  $\blacktriangle$  и манипулируя клавишами «1 – 64», найдите сигнал ЯМР, который на экране имеет приблизительно такой вид, как показано на рис.4. Он перемещается по экрану при вращении ручек грубой и тонкой  $\blacktriangledown$   $\blacktriangledown$  регулировок частоты, в отличие от шумов и помех, которые при этом остаются на месте. По этому признаку можно идентифицировать даже слабый сигнал ЯМР.

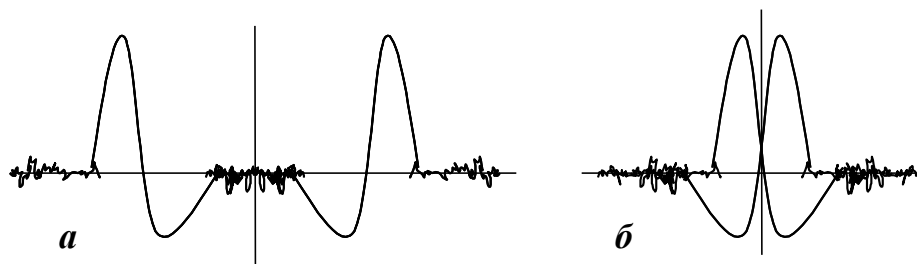


Рис.4

10. Ручкой «Фаза» сведите сигналы до наложения их друг на друга.

11. Ручками настройки частоты ВЧ-генератора совместите центр сигналов ЯМР с вертикальной осью экрана осциллографа (рис. 4,б).

12. Пронаблюдайте, как действуют на сигнал ЯМР ручки управления «Модуляция», «НЧ» (усилитель низкой частоты), «ВЧ» (амплитуда выходного напряжения высокочастотного генератора). При этом обратите внимание на показания стрелочного индикатора. Подберите такое положение указанных ручек управления, при котором наблюдаемый сигнал имеет наилучший вид. Соответствующие оптимальной настройке показания запишите в таблицу.

Датчик № Поддиапазон		Ток модуляции Ток ВЧ-генератора	
$i, \text{мА}$	$B, \text{мТл}$	$\nu, \text{МГц}$	$\nu/B, \text{Гц/Тл}$

13. Включите частотомер. Переключатель «Время счета» установите на  $10^{-2}$  с. Частотомер показывает частоту генератора ВЧ-колебаний  $\nu$ .

При нажатии кнопки «Контроль» на частотомере, он должен показывать  $1000,0 \cdot 10^4$  Гц, что является признаком его нормальной работы.

14. Запишите в таблицу индукцию магнитного поля и резонансную частоту, когда сигнал ЯМР находится точно в центре экрана (рис. 4, б).

15. Повторите измерения  $B$  и  $\nu$  при токе электромагнита  $i$  110; ... 190 мА через каждые 10 мА.

16. Перед тем как выключить приборы после окончания всех измерений, установите кодовые переключатели источника питания Б5-49 в исходное положение: 100 мА и 9,0 В. Только после этого выключите тумблер.

**Обработка результатов измерений.** 1. Вычислите отношение  $\nu/B$  и найдите его среднее значение  $\langle \nu/B \rangle$ .

2. По формуле (3) вычислите ядерный магнетон Бора, используя для входящих в нее величин табличные данные из справочника.

3. Из формулы (10) определите  $g$ -фактор протонов в воде.

4. Вычислите магнитный момент протона по формуле (2) и его проекцию на направление внешнего магнитного поля  $\mu_B$  по формуле (4). Наибольшее возможное значение  $\mu_B$  равно  $\mu_N g I$ . Именно это значение принято называть магнитным моментом ядра, которое приводится в справочных данных [4, 2, 3].

5. Нарисуйте схему расщепления энергетических уровней протона во внешнем магнитном поле, подобную показанной на рис. 1.

6. Установите единицы измерения всех рассчитанных Вами величин.

7. Постройте по Вашим измерениям график зависимости индукции поля от тока электромагнита. Сравните его с градуировочным графиком, предложенным Вам в лаборатории. Есть ли между ними разница и в чем она состоит?

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление ядерного магнитного резонанса?
2. Почему для наблюдения ЯМР требуется магнитное поле с высокой однородностью и стабильностью?
3. Зачем нужно модулировать постоянное магнитное поле переменным?
4. Почему при синусоидальной модуляции сигнал ЯМР появляется на экране индикатора дважды в течение периода модуляции? Что будет наблюдаться, если применить пилообразную модуляцию поля?

Список рекомендуемой литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Атомная и ядерная физика. М.: Наука, 1986. Ч.1. §42.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. С.593-603.
3. Попл Дж., Шнейдер В., Бернштейн Г. Спектры ядерного магнитного резонанса высокого разрешения. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С.14-17, 569.
4. Лабораторные занятия по физике /Под ред. Л.Л.Гольдина. М.: Наука, 1983. С.604-612.
5. Козлов В.И. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм. М.: Изд. МГУ, 1987. С.97.
6. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.
7. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1984.
8. Измеритель магнитной индукции Ш1-9: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1990.