

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 134

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ
ЯМР

Работу поставил доц. Неделько В.И.

Москва 2012 г.

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЯМР

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СООТНОШЕНИЯ

В основе работы магнитометров, использующих явление ЯМР, лежит то обстоятельство, что парамагнитные атомы являются магнитными диполями и ведут себя подобно магнитным волчкам. Когда на свободный парамагнитный атом действует постоянное внешнее магнитное поле H_0 , то ось, по которой направлен магнитный дипольный момент M , прецессирует в этом поле по часовой стрелке с частотой ω_0 , пропорциональной величине поля

$$\omega_0 = \gamma H_0, \quad (1)$$

где γ - отношение магнитного момента атома к его механическому моменту

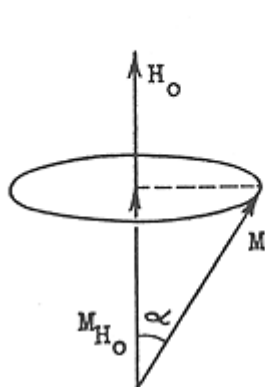


Рис.1 Магнитный момент прецессирует в постоянном магнитном поле H ; M - проекция магнитного момента на направление поля; α - угол прецессии.

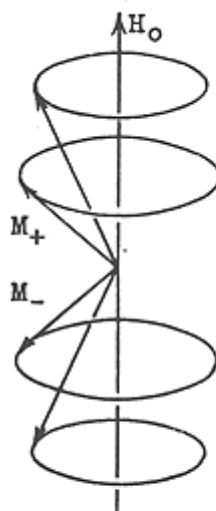


Рис.2 Без учета тепловых движений. Суммарная проекция $M_{H_0} = 0$.

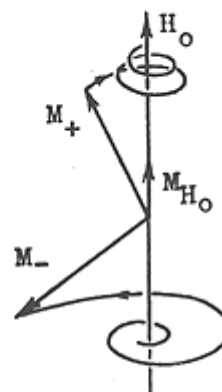


Рис.3 С учетом тепловых движений. Суммарная проекция $M = M_+ - M_- \neq 0$

(гиромангнитное отношение) (рис. 1). Для каждого вида атомов γ имеет свое значение. Так как γ измерено с большой точностью, то значение H_0 легко определяется измерением ω_0 . Угол раствора α , а следовательно, и величина M_{H_0} проекции магнитного момента M каждого диполя на направление поля H_0 не изменяются, если на диполь не действуют внешние силы. При этом суммарная проекция для совокупности неориентированных диполей $\sum M_{H_0} = 0$ (рис.2).

Однако в действительности такие силы всегда существуют. В результате хаотических тепловых движений совокупность магнитных диполей атомов, составляющих вещество, постепенно ориентируется в направлении H_0 (рис.3). Суммарная проекция M_{H_0} становится отличной от нуля - $M_{H_0} = M_+ - M_- \neq 0$.

Величина этой проекции зависит от величины поля H_0 , от свойств вещества и температуры. Суммарная проекция M_{H_0} , определяет суммарную намагниченность вещества M_H , содержащего магнитные диполи. Величину M_H можно изменить. Для этого, как ранее указывалось, следует изменить угол раствора α (рис.1).

Предположим, что под прямым углом к H_0 в плоскости, содержащей M и H_0 , приложено дополнительно малое магнитное поле H_1 . На диполь будет действовать момент силы f , величина и направление которого определяется равенством

$$\vec{N} = [\vec{M}\vec{H}_1]. \quad (2)$$

Увеличение угла α между M и H_0 возможно, если малое поле H_1 вращается вокруг H_0 синхронно с прецессией диполя (с частотой ω_0). Если же H_1 вращается с угловой частотой, отличной от частоты ω_0 или с частотой, имеющей противоположный знак, то будут наблюдаться лишь небольшие возмущения прецессионного движения без существенного изменения M_H . Таким образом, намагниченность вещества изменяется, когда угловая частота $\omega = 2\pi\nu$ вращающегося поля становится равной ω_0 .

$$2\pi\nu = \omega_0 = \gamma H_0, \quad (3)$$

где ν представляет собой линейную частоту вращающегося поля.

Несмотря на то, что создание высокочастотного вращающегося магнитного поля практически вполне осуществимо, обычно пользуются линейно осциллирующим полем. Действительно, как показано на рис.4, если линейно осциллирующее поле имеет амплитуду $2H_1$, то его можно разложить на два поля с круговой поляризацией, каждая из которых имеет амплитуду H_1 , но вращается в противоположную сторону в плоскости, перпендикулярной к H_0 .

Два равных вектора H_1 , вращающиеся в противоположных направлениях, при сложении дают результирующий вектор, совершающий колебания с амплитудой $2H_1$. Постоянное поле H направлено перпендикулярно плоскости чертежа.

Эффект изменения намагниченности будет наблюдаться у компоненты, которая имеет соответствующий знак вращения; другая компонента дает исчезающе малый эффект. Эффект изменения намагниченности вещества при выполнении условия $\omega_0 = \gamma H_0$ носит название магнитного резонанса. Магнитный резонанс может наблюдаться в системах, состоящих из парамагнитных частиц, в качестве которых могут выступать и атомные ядра, в частности, ядра атомов водорода - протоны, обладающие магнитным дипольным моментом $\sim 5 \cdot 10^{-24}$ эрг/гс. Эффект изменения ядерной намагниченности при выполнении условия $\omega_0 = \gamma H_0$ носит название ядерного магнитного резонанса.

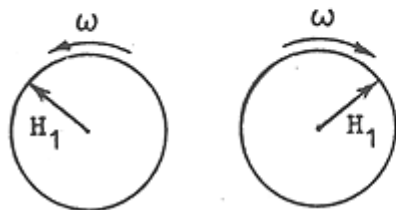


Рис.4 Два равных вектора H_1 . а) и б) вращаются в противоположных направлениях; при сложении они дают результирующий вектор (H), совершающий колебания с амплитудой $2H_1$. Постоянное поле H направлено перпендикулярно плоскости чертежа.

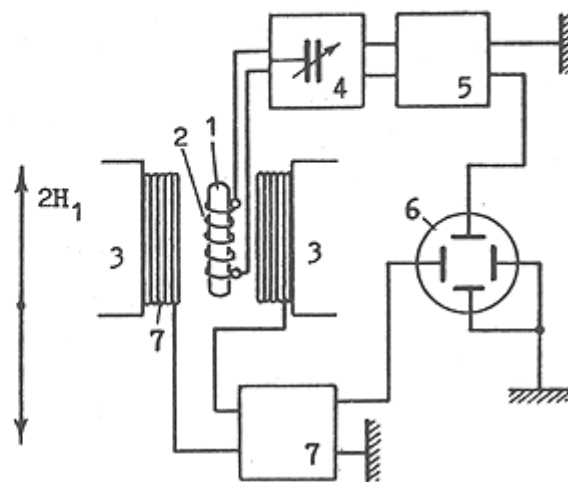


Рис.5 Блок-схема протонного магнитометра. 1. Кювета с водой. 2. Катушка радиочастотного генератора. 3. Полюса магнита. 4. Генератор в/ч. 5. Детектор и усилитель н/ч. 6. Осциллограф. 7. Обмотка для модуляции магнитного поля и генератор звуковой частоты.

На рис.5 показана блок-схема протонного магнитометра.

Рабочим веществом здесь обычно является вода. Ампулу с водой помещают

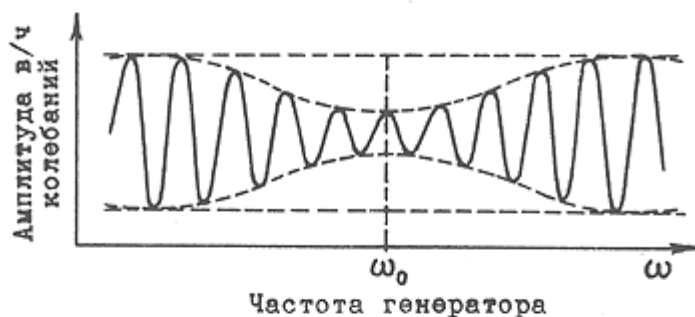
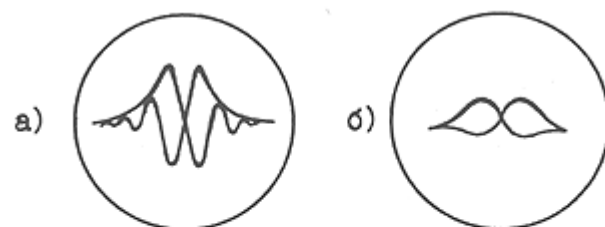


Рис.6 Изменение намагниченности воды в момент совпадения частот генератора и прецессии приводит к изменению амплитуды в/ч колебаний.

Рис.6,а При большой модуляции и большой амплитуде в/ч сигнала, а также при уменьшении однородности магнитного поля сигнал уширяется, уменьшается его амплитуда (см.рис. 6,б), вообще может исчезнуть.

в катушку индуктивности колебательного контура генератора высокой частоты (в/ч), которая расположена между полюсными наконечниками магнита. Как уже говорилось, в магнитном поле большая часть магнитных моментов протонов ориентируется так, что вода в целом становится намагниченной. Затем включают генератор высокой частоты, в результате чего в катушке индуктивности образуется переменное магнитное поле $H = 2H_1 \sin \omega t$, перпендикулярное к направлению постоянного магнитного поля, создаваемого магнитом. Далее, изменяя емкость переменного конденсатора, также входящего в колебательный контур генератора, начинают плавно изменять частоту в/ч колебаний. Как уже говорилось, при совпадении частот переменного магнитного поля, создаваемого генератором, с частотой прецессии магнитных моментов протонов происходит изменение намагниченности воды. Индуктивность катушки, в которой находится ампула с водой, зависит от намагниченности воды, поэтому в момент изменения намагниченности воды изменяется величина индуктивности катушки, что приводит к изменению амплитуды колебаний высокой частоты (рис.6).

Однако для наблюдений необходимо выделить огибающую в/ч колебаний. Для этого сигнал с в/ч генератора выпрямляют и усредняют.

Для наблюдения сигналов постоянное магнитное поле H_0 модулируется. Для этого с генератора звуковой частоты ($\sim 100 \text{ Гц}$) подают сигнал в катушки, которые расположены так, что их ось расположена перпендикулярно оси катушки индуктивности, в которой находится ампула с водой. Тот же сигнал звуковой частоты подается на вход осциллографа для запуска развертки луча. В этом случае за период модуляции на экран осциллографа два раза подается напряжение, повторяющее форму огибающей в/ч колебаний. Следует отметить, что форма огибающей, наблюдаемой на экране осциллографа, зависит от многих факторов. Среди них: амплитуда напряжения в/ч колебаний, амплитуда напряжения модуляции, свойства материала, из которого изготовлен магнит, форма полюсов магнита и т.д.

В связи с этим каждый раз при работе с прибором следует находить оптимальные условия наблюдения сигналов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью данной задачи является построение зависимости величины индукции магнитного поля (B), создаваемого катушками Гельмгольца от величины силы тока i , протекающего по ним. Измерение индукции магнитного поля проводится с использованием прибора *Ш1-1*, который является протонным квантовым магнитометром. Схема измерений представлена на рис.7.

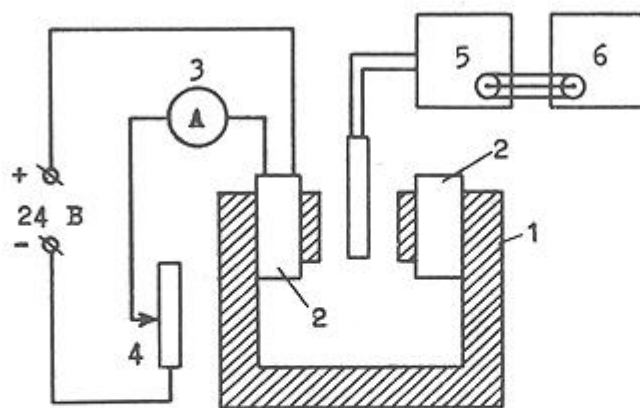


Рис.7 1 – постоянный магнит; 2 – катушка Гельмгольца; 3 – амперметр; 4 – реостат; 5 – измеритель магнитной индукции ШИ-1; 6 – частотомер ЧЗ-9.

1. Проведение измерений прибором ШИ-1

а) Подготовка к измерениям

- 1 Подключить к разъемам *ВЧ* и *МОДУЛЯЦИЯ* на задней стенке прибора соединительный кабель с датчиком.
2. К гнезду *ЧАСТОТОМЕР* подключить электронно-счетный частотомер ЧЗ-9.
3. Установить переключатель *ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ* в положение II.
4. Установить переключатель *КОНТРОЛЬ УРОВНЯ* в положение *ГЕНЕРАЦИЯ*.
5. Установить переключатель *АПЧ* в положение *ВЫКЛ.*
6. Ручки *УСИЛЕНИЕ*, *ФАЗА*, *МОДУЛЯЦИЯ* установить в среднее положение.
7. Включить тумблер *СЕТЬ* и дать прогреться прибору 15 мин.
8. С помощью потенциометра *ЯРКОСТЬ* добиться появления луча на экране осциллографа.
9. Нажав кнопку, ручкой *ЦЕНТРОВКА ЛУЧА* установить луч на отметку в середине экрана.

б) Проведение измерений

1. Установить ручкой *ЧАСТОТА* шкалу на отметку 55 делений.
2. По стрелочному индикатору. установить напряжение колебаний в пределах 2-5 делений на шкале. Ручку *УСИЛЕНИЕ* установить таким образом, чтобы на экране осциллографической трубки наблюдались шумы измеряемого сигнала.
3. Установить переключатель *КОНТРОЛЬ УРОВНЯ* в положение *МОДУЛЯЦИЯ*. Ручкой *МОДУЛЯЦИЯ* установить ток модуляции,

соответствующий 2-3 делениям шкалы стрелочного индикатора.

4. Медленно вращая ручку *ЧАСТОТА* добиться появления сигнала *ЯМР* (рис.6,а или 6,б).

5. Ручкой *ФАЗА* добиться пересечения резонансных кривых.

6. Ручкой *ЧАСТОТА* совместить точку пересечения резонансных кривых с отметкой в центре экрана и с помощью частотомера измерить частоту генератора прибора.

7. Вычислить индукцию магнитного поля

$$B = k\nu = 0.0234874\nu,$$

где $k = 0,0234874 = 28 / \gamma$ и ν - измеренная частота.

2. Проведение измерений прибором ЧЗ-9

а. Подготовка к измерениям

1. Включить кабель питания прибора в сеть. При этом должна зажечься сигнальная лампочка *ВКЛ (ТЕРМОСТАТ)*.

2. Включить тумблер питания прибора. При этом должны зажечься лампочка *СЕТЬ*, неоновые лампы отсчетных декад и начать работать вентилятор.

3. Прогреть прибор в течение 5 мин.

4. Произвести контроль работоспособности прибора. Для этого необходимо установить:

а) Переключатель *РОД РАБОТЫ* в положение *САМОКОНТР. 10 МГц*.

б) Переключатель *МЕТКИ ВРЕМЕНИ В СЕК.* в положение 1.

в) Тумблер 1 МГц на задней стенке прибора в положение *ВНУТР.*

г) Регулятор *ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ* в среднее положение.

д) Произвести ряд отсчетов с цифрового табло счетчика.

Результаты измерений могут отличаться от частоты 10 МГц не более чем на 1 Гц.

Порядок проведения работы

Упражнение 1

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

1. Включить и подготовить к работе приборы *ШШ-1* и *ЧЗ-9* (согласно инструкции).

2. Найти на экране осциллографической трубки *ШШ-1* сигнал *ЯМР*, произвести измерения частоты прибором *ЧЗ-9* и используя расчетную формулу, определить индукцию магнитного поля постоянного магнита.

Упражнение 2

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА

1. Подключить концы проводов к источнику постоянного тока (24 В на электропитке).
2. **ВНИМАНИЕ!** *Эта операция производится преподавателем или лаборантом).*
2. С помощью реостата установить в цепи ток $0,1\text{ А}$.
3. Найти на экране осциллографической трубки *Ш1-1* сигнал *ЯМР*, измерить его частоту и определить индукцию магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом и катушками Гельмгольца.
4. Провести аналогичные измерения для значений тока $0,2\text{ А}$; $0,3\text{ А}$; $0,4\text{ А}$; $0,5\text{ А}$.
5. Из полученных значений индукции магнитного поля вычесть значение индукции магнитного поля постоянного магнита и построить график зависимости индукции магнитного поля катушек Гельмгольца от величины силы тока.

ЛИТЕРАТУРА

- Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм - 4-е изд., перераб.- М.: Наука. Физматлит. 1998. - 336 с.
Глава 7. Магнитное поле в веществе.
§ 7.6. Магнитомеханические явления.