**минобрнауки России**

**Санкт-Петербугский государственный электротехнический университет**

**«ЛЭТИ» Им. В.И. Ульянова (Ленина)**

**Кафедра физики**

**Физика**

**Лабораторная работа № 16 по теме**

**«Исследование электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в слабом магнитном поле»**

**Вариант 13**

Выполнил: студент гр. №3586 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Сидоров Антон Дмитриевич

Проверила: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Посредник Олеся Валерьевна

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вопросы | | Даты коллоквиума | Итог |
| **15** | **7** |
|  |  |  |  |
|  |
|  |
|  |
|  |

Санкт-Петербург

2024

**Содержание**

[1 Общие положения 3](#_Toc184593764)

[1.1 Цель работы 3](#_Toc184593765)

[1.2 Приборы и принадлежности (Экспериментальная установка) 3](#_Toc184593766)

[2 Основные теоретические положения 4](#_Toc184593767)

[2.1 Определения 4](#_Toc184593768)

[2.2 Электронный парамагнитный резонанс 4](#_Toc184593769)

[2.3 Ответы на контрольные вопросы 12](#_Toc184593770)

[2.3.1 Вопрос 1 – Вопрос 15 12](#_Toc184593771)

[2.3.2 Вопрос 2 – Вопрос 7 13](#_Toc184593772)

[2.3.3 Пункт 3 из указаний по подготовки к работе 13](#_Toc184593773)

[3 Указания к работе 14](#_Toc184593774)

[3.1 Указания по подготовке к работе 14](#_Toc184593775)

[3.2 Указания выполнению наблюдений 14](#_Toc184593776)

[3.3 Указания по обработке результатов 15](#_Toc184593777)

[4 Результаты работы 17](#_Toc184593778)

[4.1 Наблюдения и расчёты 17](#_Toc184593779)

[4.2 Графики 17](#_Toc184593780)

[4.3 Расчёты и погрешности 17](#_Toc184593781)

[5 Вопросы на защиту 18](#_Toc184593782)

[5.1 Эффект Зеемана 18](#_Toc184593783)

[5.1.1 Нормальный и аномальный эффект Зеемана 20](#_Toc184593784)

[5.1.2 Опыт Штерна и Герлаха 21](#_Toc184593785)

[5.1.3 Спин электрона 23](#_Toc184593786)

[5.1.4 Магнитный момент электрона 25](#_Toc184593787)

[5.1.5 Эффект Зеемана 25](#_Toc184593788)

[5.1.6 Аномальный эффект Зеемана 30](#_Toc184593789)

[5.1.7 Эффект Зеемана 31](#_Toc184593790)

[5.2 Волны де Бройля 32](#_Toc184593791)

[5.2.1 Корпускулярно-волновая двойственность частиц вещества 32](#_Toc184593792)

[5.2.2 Волны де Бройля 33](#_Toc184593793)

[5.2.3 Свойства волн де Бройля 33](#_Toc184593794)

[5.2.4 Физический и вероятностный смысл волн де Бройля 35](#_Toc184593795)

[5.3 №62 IdzKvantsvet 36](#_Toc184593796)

[6 Вывод 38](#_Toc184593797)

# **Общие положения**

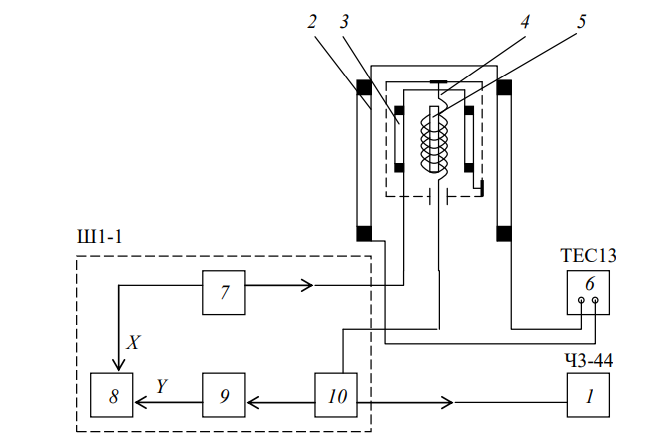
В данном разделе описаны общие положения, связанные с заданием.

## **Цель работы**

Цель данной работы является исследование индуцированных квантовых переходов между зеемановскими уровнями неспаренного электрона в слабом магнитном поле, определение магнитного момента атома (молекулы) и времени жизни атома в возбужденном состоянии.

## **Приборы и принадлежности (Экспериментальная установка)**

Приборами в данной работе являются экспериментальная установка для возбуждения квантовых переходов между зеемановскими уровнями электронов – упрощенный спектрометр электронного парамагнитного резонанса (см. рисунок 1).



1. Лабораторная установка для исследования вынужденных электронных квантовых переходов между зеемановскими уровнями атомов в слабом магнитном поле

# **Основные теоретические положения**

В данном разделе представлены теоретические сведения для выполнения работы.

## **Определения**

К *магнитному резонансу* (МР) относят совокупность явлений, которые могут наблюдаться в системе частиц (ядра, электроны, атомы, молекулы и др.), обладающих моментом импульса и магнитным дипольным моментом. Одним из частных проявлений эффекта МР служит избирательное поглощение системой магнитных диполей энергии внешнего электромагнитного поля определенной (резонансной) частоты.

## **Электронный парамагнитный резонанс**

Электроны обладают собственным (спиновым) моментом импульса

(1)

и собственным магнитным дипольным моментом

(2)

В выражениях (1) и (2) – элементарный заряд, – масса покоящегося электрона; – спиновое квантовое число. При написании выражения (2) учтено, что:

; (3)

– магнетон Бора – элементарный магнитный дипольный момент. Знак минус в формуле (36) указывает на то, что направления магнитного и механического спиновых моментов вследствие отрицательности заряда электрона противоположны.

Проекции механического и магнитного спиновых моментов на заданное направление (например, на ось ) могут принимать в соответствии с общими принципами квантовой механики только *дискретные значения*:

; (4)  
где – *спиновое магнитное квантовое число*. В общем случае  
 . Для электрона , поэтому для числа возможны только два значения . В соответствии с (4) и .

Отношение полного спинового магнитного момента электрона к его полному моменту импульса (или их проекций на ось )

(5)  
называют *спиновым магнитомеханическим отношением* (в литературе это отношение называют иногда *гиромагнитным*).

2. В атоме электрон может обладать также орбитальными механическим и магнитным моментами; полные значения этих моментов характеризуются орбитальным азимутальным квантовым числом :

; (6)

Проекции этих моментов на заданное направление, как и в случае спиновых моментов, могут быть только квантованными:

; (7)  
где – *орбитальное магнитное квантовое число*, – всего значений. Заметим, что числа , всегда целые, в то время как для электрона , .

Орбитальное магнитомеханическое отношение в соответствии с (6) или (7)

(8)  
в 2 раза меньше соответствующего спинового отношения. В силу этого иногда говорят, что спиновое движение обусловливает удвоенный магнетизм по сравнению с орбитальным.

3. В многоэлектронных атомах (молекулах) механические и магнитные моменты (спиновые и орбитальные) складываются так, что атом (молекула) приобретает результирующие момент импульса и магнитный дипольный момент. Правила сложения моментов обсудим только для модели так называемой *рессель-саундерской* связи (спин-орбитальной, -связи). В этой модели орбитальные моменты импульсов электронов складываются в результирующий момент , спиновые моменты электронов – в результирующий момент , а затем уже и обусловливают результирующий момент импульса атома.

Квантовое число результирующего орбитального момента импульса всегда целое или нуль. Результирующее спиновое квантовое число может быть целым или полуцелым в зависимости от того, четное или нечетное число электронов в атоме. Если четное, то число принимает целочисленный ряд значений от до нуля (для например,  
 ). При нечетном число полуцелое от до (для ,например, ).

При определенных числах и квантовое число результирующего момента импульса атома принимает одно из следующих значений:

(9)

Для данного числа из ряда (43) *полный момент импульса* атома составляет , а проекции этого момента на ось может быть только одной из ряда

; (10)  
– всего значений.

Правила сложения магнитных моментов электронов в атоме сложнее, чем механических. Числами и по отдельности можно характеризовать только соответственно суммарные спиновые и орбитальные магнитные моменты электронов в атоме. Поскольку, однако, магнитомеханические спиновые и орбитальные отношения (39) и (42) различаются в 2 раза, результирующий магнитный момент атома μJ будет более сложным образом, чем механический, зависеть от взаимной ориентации моментов и , т. е. от числа . Соответствующий квантово-механический анализ приводит к следующему результату:

; (11)  
где – *множитель (фактор) Ланде*, определяемый по формуле

(12)

Если магнитный момент атома обусловлен только орбитальным движением электрона (), то получается в соответствии с (12.9) и (12.12) и . В этом случае – результат, идентичный (6). Если же магнитный магнетизм атома связан только со спиновым движением электронов, т. е. , то и ; .

Таким образом, по значению фактора Ланде можно судить о вкладах орбитального и спинового движения электронов в результирующий магнитный момент атома или молекулы. Для полностью заполненных оболочек в атомах характерно равенство нулю суммарного орбитального и спинового моментов, поэтому вклад в результирующий момент атома обусловливают только электроны незаполненных оболочек.

4. Атом с магнитным моментом в магнитном поле с индукцией , ориентированном вдоль оси z, обладает потенциальной энергией   
. Поскольку проекция магнитного момента атома на заданное направление (здесь направление поля ) квантована в соответствии с (45), для потенциальной энергии магнитного диполя в магнитном поле имеем

; (13)

Таким образом, каждый энергетический уровень атома, характеризуемый числами , и , расщепляется в магнитном поле   
на подуровней (зеемановских), как показано на рисунке 1 и рисунке 2 для . Таким расщеплением уровней атома в магнитном поле обусловлен в оптической спектроскопии эффект Зеемана.

Между зеемановскими подуровнями возможны самопроизвольные (спонтанные) и вынужденные (индуцированные) квантовые переходы с правилом отбора . Самопроизвольные переходы происходят только в одном направлении – с более высоких уровней на низшие. Вынужденные переходы возможны только под действием внешнего источника энергии, например внешнего электромагнитного поля. Энергия квантов поля должна совпадать с энергетическим зазором между соседними зеемановскими подуровнями:

(14)

Вынужденные переходы в отличие от спонтанных равновероятны в обоих направлениях: .

Вероятность таких переходов пропорциональна плотности энергии электромагнитного поля. При переходе на более высокий уровень атом поглощает из поля квант энергии . Наоборот, при переходе с высокого уровня на низший атом излучает фотон с энергией .

В большом ансамбле атомов число их на нижнем () и верхнем () уровнях неодинаково, обычно . Вследствие этого число переходов с поглощением фотонов больше, нежели с излучением фотонов. Следовательно, при выполнении условия (48) за счет индуцированных переходов между зеемановскими подуровнями из электромагнитного поля поглощается энергия. Этот эффект – *электронный парамагнитный резонанс* (ЭПР) – открыт в 1944 г. в СССР Е. К. Завойским.

Эффекта резонансного поглощения ансамблем атомов энергии электромагнитного поля можно достигнуть двумя способами. Подбирать частоту ν квантов электромагнитного поля для заданного поля такой, чтобы обеспечивалось условие (48); частота резонансного поглощения составит тогда

(15)

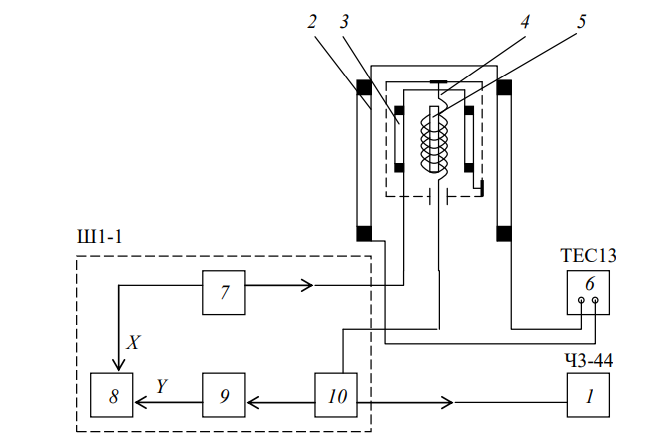
Если частота фиксирована, можно изменением индукции поля менять энергетический зазор между зеемановскими уровнями. Резонансное значение индукции поля составляет

(16)

В радиоспектроскопии для поиска и прохождения линий резонансного поглощения используются оба метода. Пропорциональность между частотой и индукцией поля в соотношениях (15), (16) используется в современной квантовой магнитометрии.

Экспериментально определяя частоту ν0резонансного поглощения и индукцию В0 поля, в котором наблюдается максимум поглощения, на основании соотношений (16.15) и (16.16) можно найти эффективный магнитный момент атома и экспериментальное значение фактора Ланде .

Схема установки, представленная на рисунке 1 продублирована на рисунке 2.



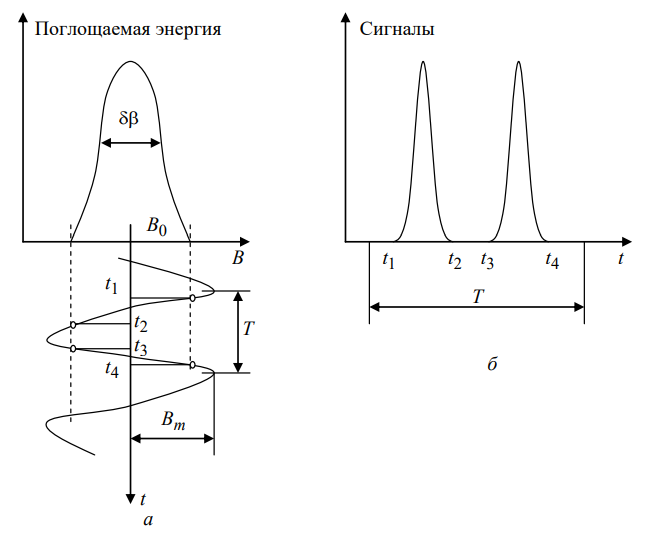
1. Лабораторная установка для исследования вынужденных электронных квантовых переходов между зеемановскими уровнями атомов в слабом магнитном поле

Методика наблюдения вынужденного резонансного поглощения состоит в изучении вынужденных электронных переходов в слабом магнитном поле с индукцией () на лабораторном макете спектрометра ЭПР (рисунок 1).

Магнитное поле создается кольцами Гельмгольца 2 − соосной системой двух круговых катушек с током, среднее расстояние между которыми равно их среднему радиусу. Такая система создает в геометрическом центре магнитное поле с однородностью, достаточной для данного эксперимента. Индукция поля в центре колец Гельмгольца определяется формулой

(17)  
Здесь – число витков на одной катушке, − сила тока, а – средний радиус катушек. Кольца Гельмгольца питаются от стабилизированного регулируемого источника тока 6.

В работе применен динамический (в отличие от статического – снятия по точкам) метод наблюдения линии резонансного поглощения – многократное сканирование с частотой резонансного условия (14), как показано на рисунке 3, а. Для этого на резонансное поле с помощью дополнительных (модуляционных) катушек 3 накладывается модуляционное поле вида , причем амплитуда модуляции , где – ширина резонансной линии.

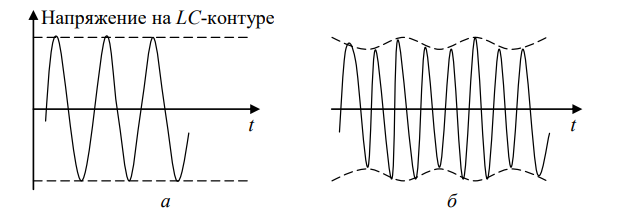


1. Динамический метод регистрации сигналов ЭПР

Из рисунка 3,а видно, что за период модуляции резонансное поглощение возникает дважды между временем и , и , как показано на рисунке 3,б.

Электромагнитное поле частоты создается катушкой индуктивности 4, в которой располагается исследуемый образец 5. Катушка 4 является элементом -контура генератора слабых колебаний 10 (автодина). В обычных условиях (вне резонанса) амплитуда колебаний автодина неизменна (рисунок 4,а). При вхождении в резонанс часть энергии электромагнитного поля катушки поглощается образцом, при этом уменьшается добротность LC-контура, следовательно, уменьшается амплитуда колебаний автодина. При периодическом прохождении резонанса (рисунок 3) напряжение на   
-контуре автодина становится модулированным (рисунок 4,б). Это напряжение детектируется, усиливается усилителем 9 и подается на -вход осциллографа 8; развертка осциллографа синхронизирована с током модуляционного генератора 7. Частота автодина контролируется частотомером 1.

В лабораторном макете автодин, детектор и усилитель, осциллограф и модуляционный генератор являются элементами заводского прибора Ш1-1. Модуляционные катушки 3, катушка 4 с образцом 5 оформлены конструктивно в виде отдельного узла, экранированного от внешних помех латунным посеребренным кожухом, жестко закрепленным на основании колец Гельмгольца.



1. Напряжение на LC-контуре автодина:

а − вне ЭПР; б− при периодическом прохождении ЭПР

Объектом исследования в работе является дифенилпикрилгидразил (сокращенно ДФПГ) объемом – мелкокристаллический порошок фиолетового цвета. Химический состав этого соединения довольно сложен; здесь лишь отметим, что каждая молекула ДФПГ имеет сильно делокализованный неспаренный электрон, для которого .

## **Ответы на контрольные вопросы**

В данном подразделе представлены ответы на контрольные вопросы.

### **Вопрос 1 – Вопрос 15**

В чем различие ядерного магнитного резонанса и электронного парамагнитного резонанса?

*Ядерный магнитный резонанс* (*ЯМР*) – резонансное поглощение или излучение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, на частоте (называемой частотой ЯМР), обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер.

Явления *электронного парамагнитного резонанса* –резонансное поглощение электромагнитного излучения неспаренными электронами. Электрон имеет спин и ассоциированный с ним магнитный момент.

### **Вопрос 2 – Вопрос 7**

В чем заключается эффект Зеемана?

Эффект Зеемана – расщепление линий атомных спектров в магнитном поле. Назван в честь Питера Зеемана, открывшего эффект в 1896 году.

Эффект обусловлен тем, что в присутствии магнитного поля электрон, обладающий магнитным моментом , приобретает дополнительную энергию . Приобретённая энергия приводит к снятию вырождения атомных состояний по полному квантовому числу и расщеплению атомных спектральных линий.

Далее про эффект Зеемана изложено в разделе 5.1.

### **Пункт 3 из указаний по подготовки к работе**

Рассчитать для частоту ЭПР для индукции поля [формула(15)].

Формула (15):

(18)  
где ,

**Решение**

Для :

.

Для :

**Ответ**

,

# **Указания к работе**

В данном разделе представлены указания для подготовки к работе, проведения работы и обработки результатов эксперимента.

## **Указания по подготовке к работе**

Указания по подготовке к работе:

1. Детально изучить закономерности явления магнитного резонанса, соотношения механических и магнитных моментов электронов в атомах и принципы ЭПР. Представить в первой части отчета основные уравнения, относящиеся к изучаемым закономерностям.
2. Изучить блок-схему экспериментальной установки и метод наблюдения сигналов резонансного индуцированного поглощения. По описаниям, имеющимся в лаборатории, ознакомиться с устройством квантового магнитометра Ш1-1, частотомера, источника питания.
3. Рассчитать для частоту ЭПР для индукции поля [формула(15)].

## **Указания выполнению наблюдений**

Указания по выполнению работы:

1. . До начала эксперимента выдержать приборы включенными не менее 5–10 мин.
2. Установить ручкой «Модуляция» на панели прибора Ш1-1 уровень модуляции, соответствующий 50 делениям указателя, при этом амплитуда модуляции , ширина X-развертки осциллографа .
3. . Переключатель «Обратная связь» на приборе Ш1-1 установить в положение IV и ручкой «Частота» установить наибольшую (около ) частоту автодина. Уровень генерации должен соответствовать 1–3 делениям указателя.
4. . Увеличивать ток в катушках Гельмгольца (до ), пока на экране осциллографа в центре развертки не возникнут сигналы резонансного поглощения. Подобрать оптимальный уровень генерации автодина, при котором достигается наилучшее отношение сигнал/шум. Ручкой «Фаза» на приборе Ш1-1 совместить сигналы прямого и обратного хода модуляционного поля (см. рисунок 3,б).
5. Зная ширину развертки осциллографа (), оценить ширину линии резонансного поглощения (на уровне от наибольшей интенсивности сигнала).
6. Снять зависимость резонансной частоты от силы тока в катушках Гельмгольца. Для этого уменьшать ток в катушках через от значения, соответствующего наибольшей частоте автодина, до уровня, при котором сигнал трудноразличим среди шумов и помех. Для каждого нового значения тока изменением частоты автодина устанавливать сигналы резонансного поглощения в центре развертки осциллографа. Получить 5–7 пар значений и .
7. Выключить источник тока, поменять выводы катушек Гельмгольца местами и повторить измерения по п. 6 (с противоположным направлением поля колец Гельмгольца).

## **Указания по обработке результатов**

Указания по обработке эксперимента:

1. Используя формулу (17) и параметры колец Гельмгольца, перевести значения силы тока в пп. 6, 7 в единицы индукции магнитного поля. Данные представить в виде таблицы пар значений , для обоих направлений поля .
2. Для каждой пары значений , рассчитать эффективный момент молекулы ДФПГ: . Найти средневыборочное отклонение значения и доверительный интервал .
3. Используя значение магнетона Бора, рассчитать фактор Ланде:   
   . Сделать выводы о вкладах спинового и орбитального движений электронов в результирующий магнитный момент ДФПГ.
4. Рассчитать энергетическую ширину линии резонансного поглощения. Используя соотношение неопределенностей Гейзенберга−Бора , оценить время жизни молекулы ДФПГ в возбужденном состоянии.
5. Построить на одном графике зависимости резонансной частоты ν0 от индукции поля В0 катушек для прямого и обратного их включения. Обсудить соответствие полученных результатов теоретическому соотношению (14). Экстраполяцией прямых до пересечения с осью абсцисс (индукции) определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля лаборатории , параллельную оси катушек (значение Вл вследствие возмущающего действия железных масс может заметно отличаться от горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли ().
6. Оценить влияние горизонтальной составляющей поля лаборатории на систематическую погрешность определения магнитного момента молекулы ДФПГ. Привести скорректированный результат.

# **Результаты работы**

В данном разделе указаны результаты работы и сведения о них.

Все рассчёты сделаны в Excel.

## **Наблюдения и расчёты**

## **Графики**

## **Расчёты и погрешности**

# **Вопросы на защиту**

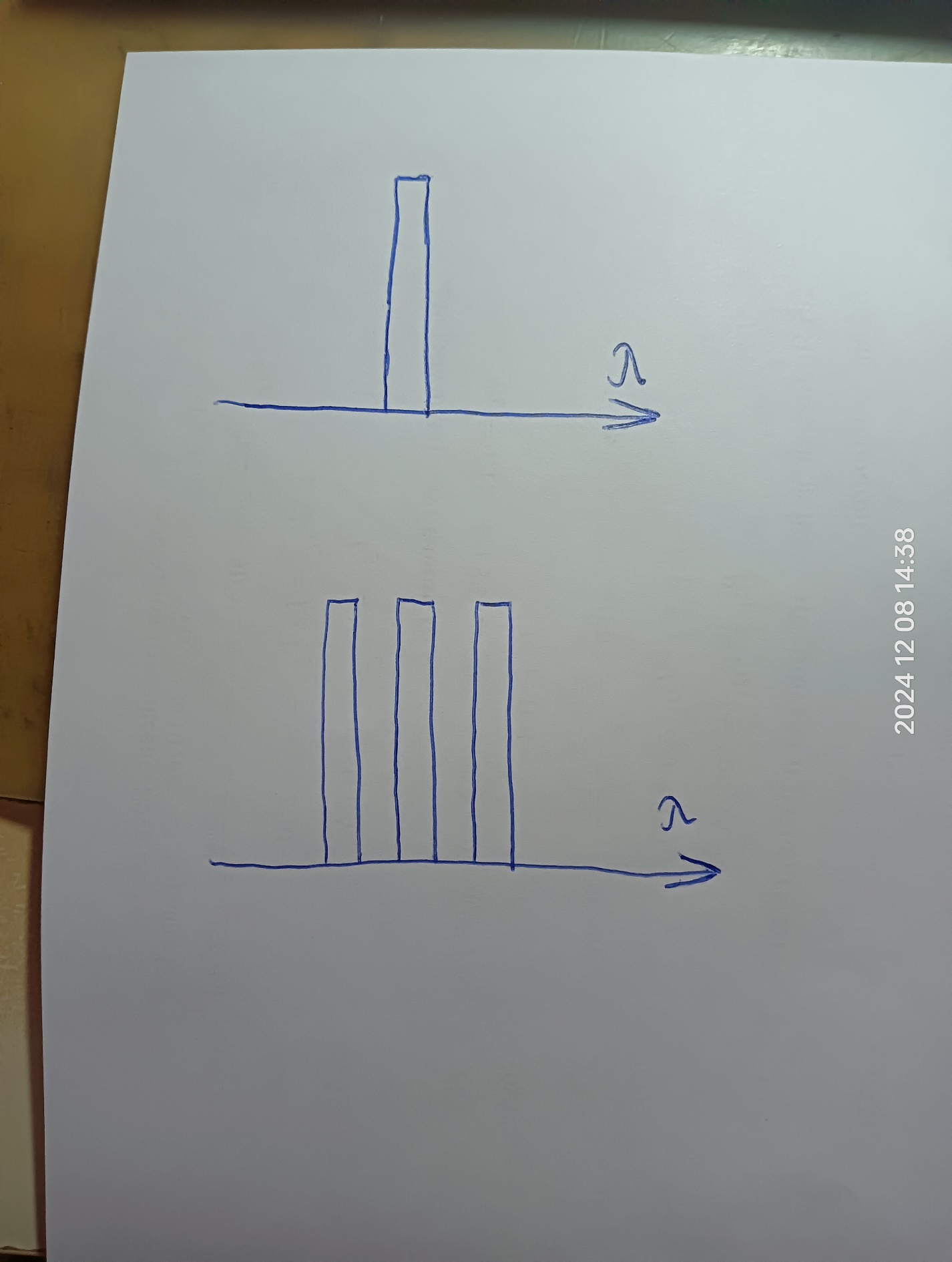
В данном разделе представлены ответы на вопросы, заданные на защиту.

## **Эффект Зеемана**

Расщепление энергетических уровней в магнитном поле было обнаружено в 1896 году голландским физиком Питером Зееманом (25 мая 1865 – 9 октября 1943) и получило название *эффекта Зеемана*.

Расщепление уровней энергии во внешнем электрическом поле тоже доказано экспериментально и называется *эффектом Штарка*.

переход представлен на рисунке



1. переход

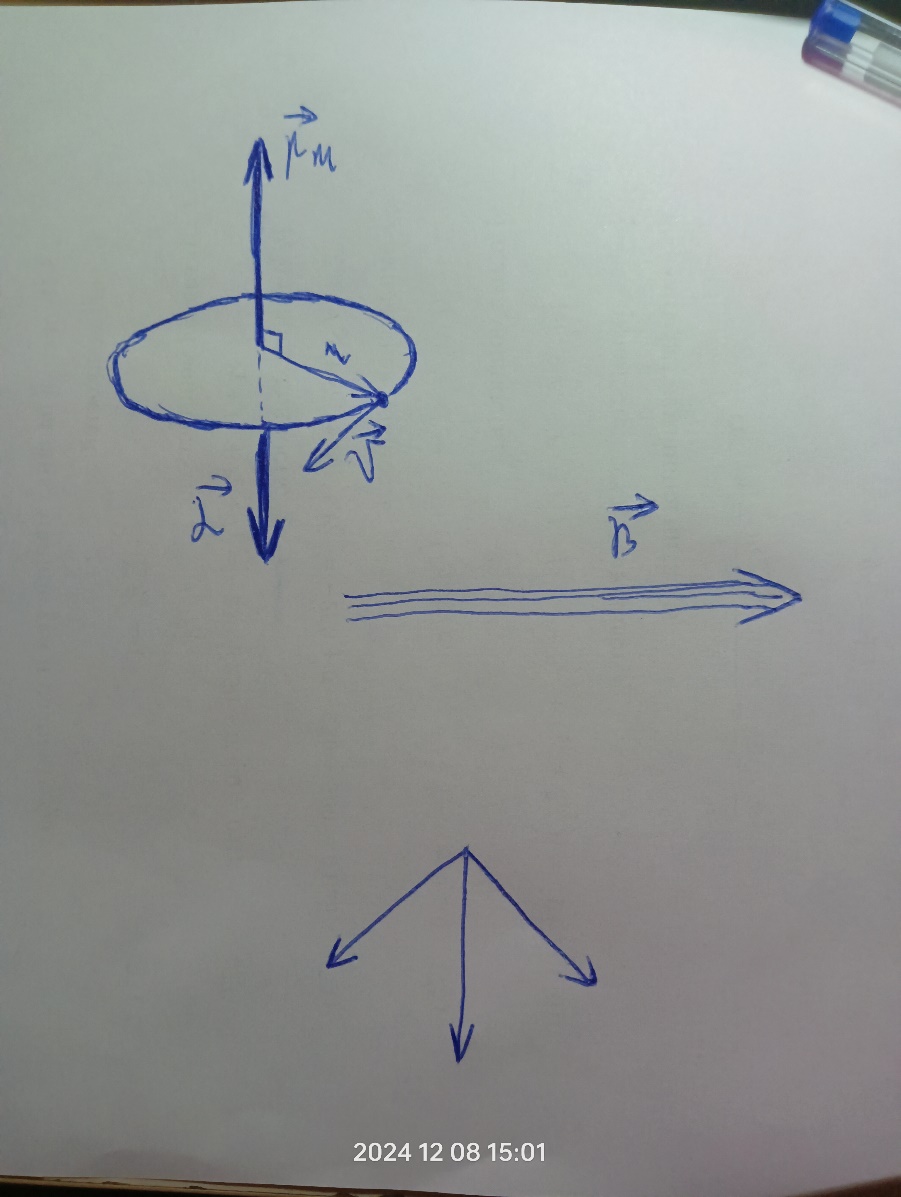
Триплет линий в магнитном поле представлен на рисунке 6.

Изображение выглядит как текст, рукописный текст, Бумажное изделие, бумага

Автоматически созданное описание

1. Триплет линий в магнитном поле

Орбитальный магнитный момент для орбиты с для скорости , радиуса и вектора магнитной индукции электрона представлен на рисунке 7.



1. Триплет линий в магнитном поле

Орбитальный магнитный и механический момент:

(19)

(20)  
где – орбитальное квантовое число; – масса покоя электрона.

Возможные ориентации орбитального магнитного момента представлены на рисунке 8.

Изображение выглядит как текст, рисунок, Детское искусство, зарисовка

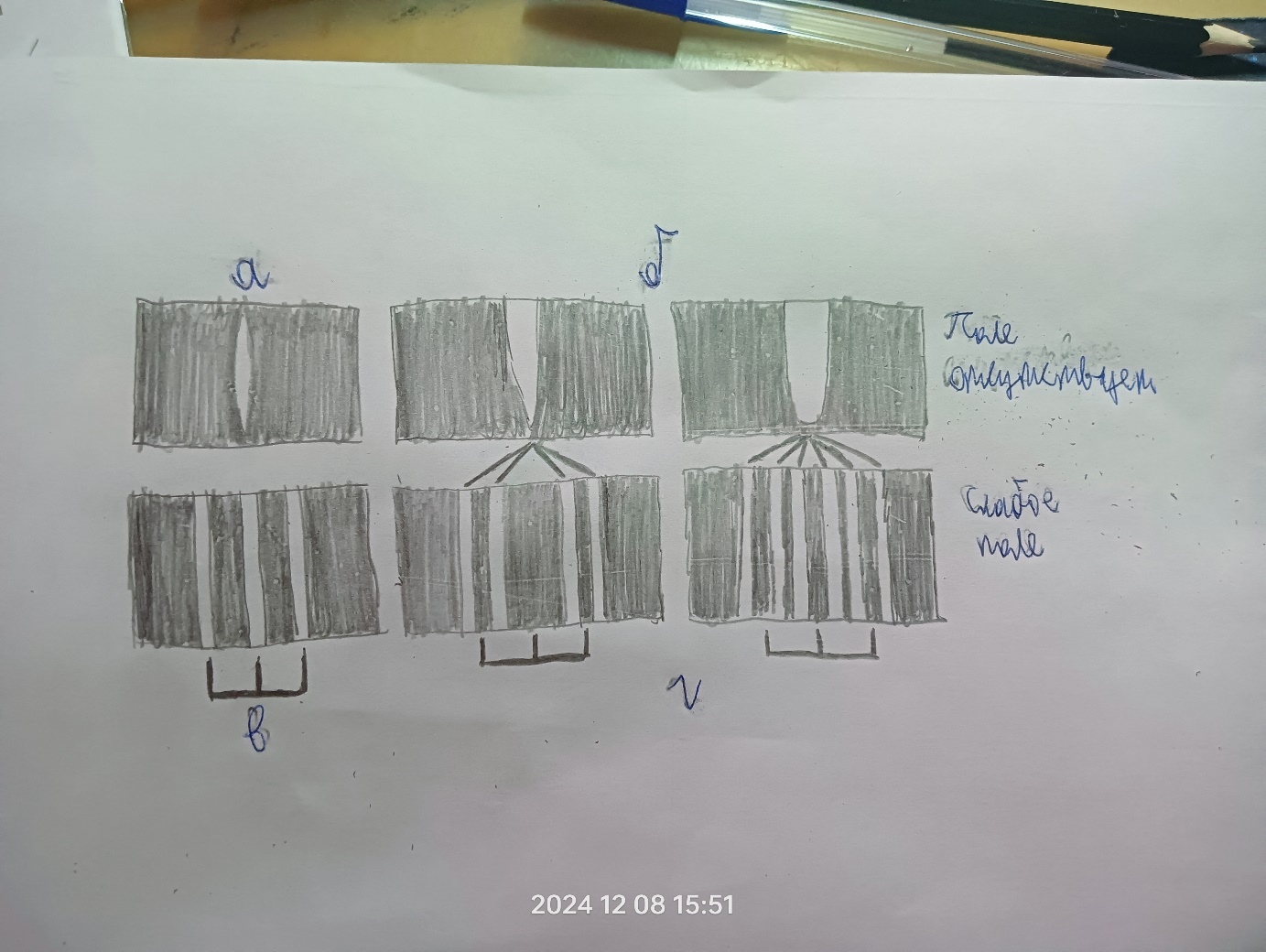
Автоматически созданное описание

1. Возможные ориентации орбитального магнитного момента

### **Нормальный и аномальный эффект Зеемана**

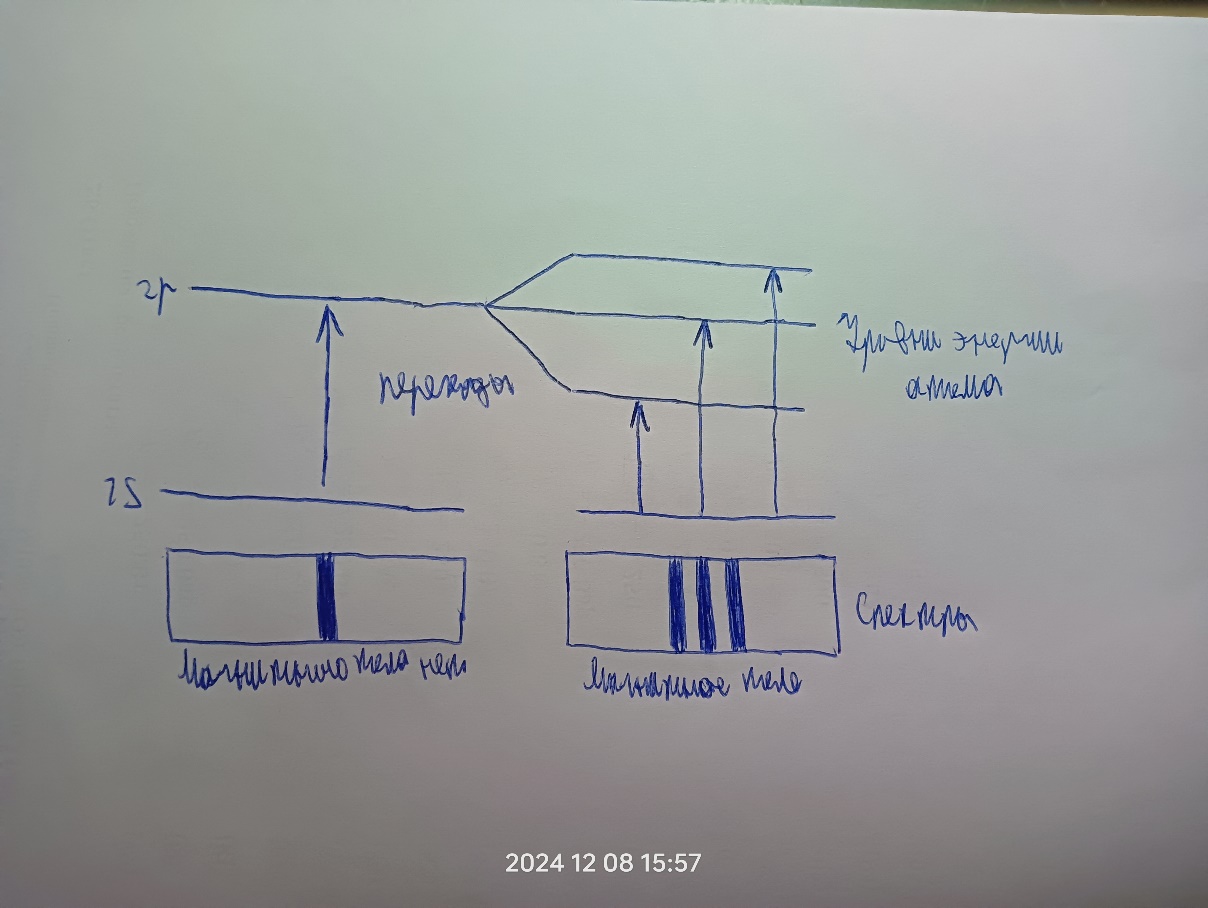
Эффект Зеемана нормальный и аномальный (вид перпендикулярно направлению магнитного моля) представлен на рисунке 9:

* *а* – синглет цинка;
* *б* – главный дуплет натрия;
* *в* – нормальный триплет;
* *г* – аномальное расщепление.



1. Нормальный и аномальный эффект Зеемана

переход представлен на рисунке 10.



1. Нормальный и аномальный эффект Зеемана

### **Опыт Штерна и Герлаха**

В 1922 году Штерн и Герлах

Поставили опыты, целью которых было измерение магнитных моментов атомов различных веществ.

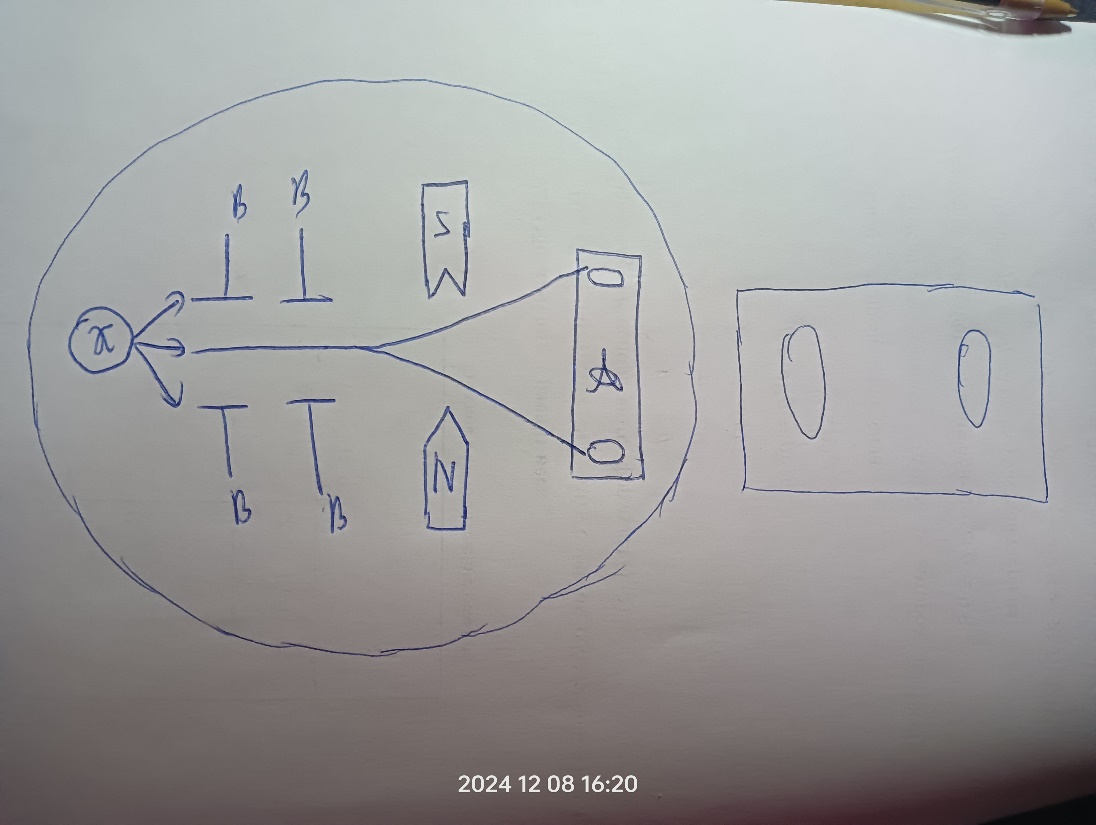
Для химических элементов, образующих первую группу таблицы Менделеева и имеющих один валентный электрон, магнитный момент атома равен магнитному моменту валентного электрона, т.е. одного электрона.

Идея опыта заключалась в измерении силы, действующей на атом в сильно-неоднородном поле.

Неоднородность магнитного поля должна быть такова, чтобы она сказывалась на расстояниях порядка размера атома. Только при этом можно было получить силу, действующую на атом в отдельности.

Опыт представлен на рисунке 11. В колбе вакуум , – *серебряный шарик*, который нагревался до температуры испарения. Атомы серебра летели с тепловой скоростью около . – щелевые диафрагмы. – фотопластинки.

Вышеописанный опыт представлен на рисунке 11.



1. Опыт Штерна и Герлаха

Этим доказывался квантовый характер магнитных моментов электронов.

Количественный анализ показал, что проекция магнитного момента электрона равна магнетону Бора:

(21)

Т.е. для серебра Штерн и Герлах получили, что *проекция магнитного момента* атома (электрона) на направление магнитного поля численно равна *магнетону Бора*.

(22)   
где – орбитальное квантовое число; – масса покоя электрона; – орбитальный магнитный момент электрона; – механический момент электрона.

Единица измерения магнитных моментов электрона и атомов является *магнетрона Бора* ( – единица измерения механического момента импульса)

Кроме того, в этих опытах было обнаружено новое явление. Валентный электрон в основном состоянии атома серебра имеет орбитальное квантовое число (-состояние).

Но при , (проекция момента импульса на направление внешнего поля равна нулю).

Возник вопрос, пространственное квантование *какого момента импульса* обнаружилось в этих опытах и проекция какого магнитного момента равна магнетону Бора?

В 19025 году студенты Геттингенского университета *Гаудсмит* и *Уленбек* предложили существование *собственного механического момента импульса у электрона (спина)* и, соответственно, *собственного магнитного момента электрона* .

Введение понятия спина сразу объяснило ряд затруднений, имеющихся к тому времени в квантовой механике и в первую очередь, результатов опытов Штерна и Герлаха.

### **Спин электрона**

Авторы дали такое толкование *спина*: *электрон – вращающийся волчок*.

Но тогда следует, что «поверхность» волчка (электрона) должна вращаться с линейной скоростью равной , где – скорость света. От такого толкования спина пришлось отказаться.

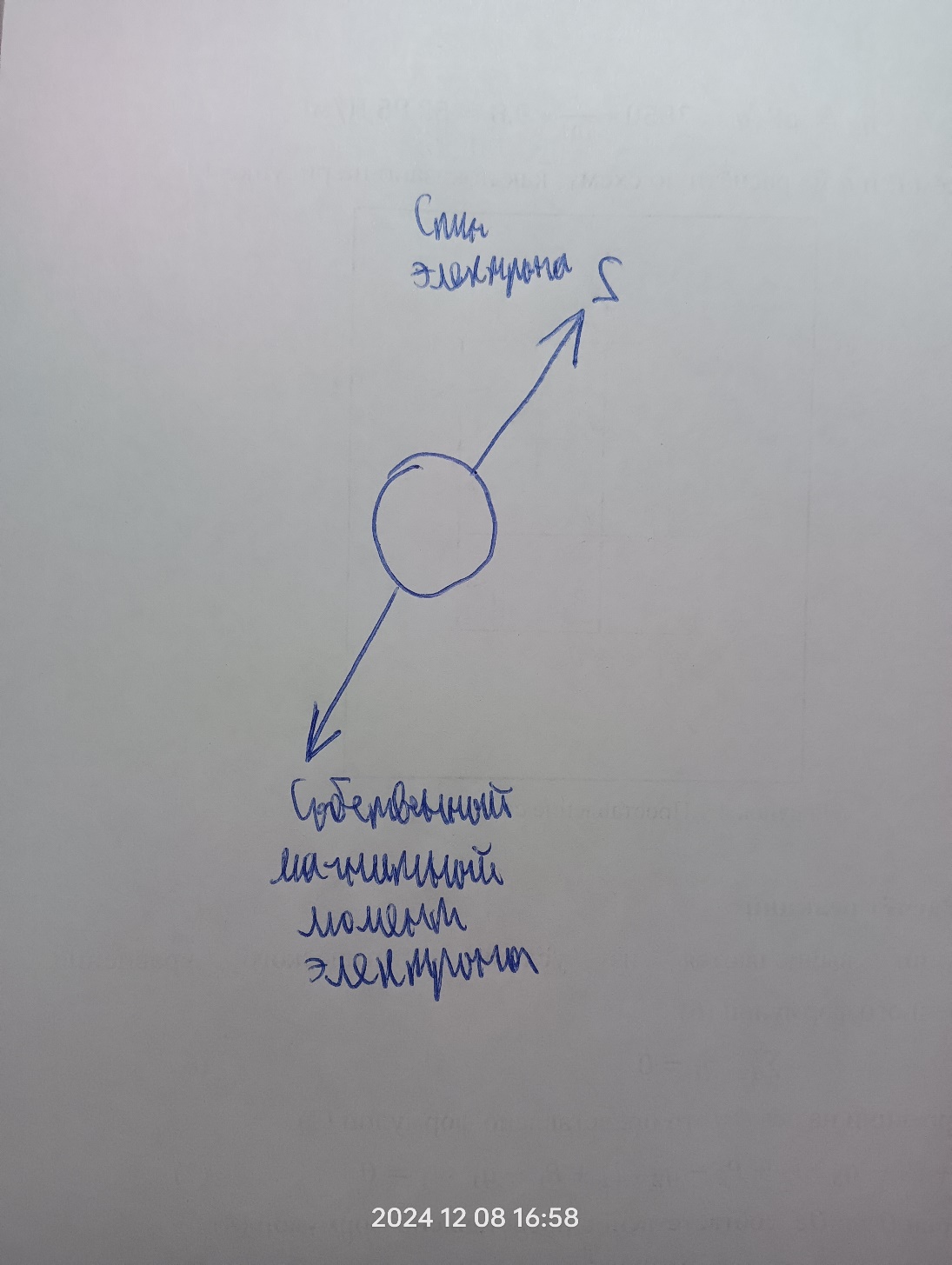
*Спин, как заряд и масса, есть свойство электрона*.

*Поль Дирак* впоследствии показал, что *существование спина вытекает из решения релятивистского волнового уравнения Шредингера*.

Из общих выводов квантовой механики следует, что *спин*:

(23)  
где – спиновое квантовое число.

Иллюстрация спина электрона представлена на рисунке 12.



1. Спин электрона

Аналогично, проекция спина на ось () (ось совпадает с направлением внешнего магнитного поля) должна быть квантована и вектор может иметь различных ориентаций в магнитном поле.

Из опытов Штерна и Герлаха следует, что таких ориентаций *всего две*: , а значит .

Для атомов 1-ой группы, валентный электрон которых находится в -состоянии *момент импульса атома равен спину валентного электрона*.

Поэтому *обнаруженное для таких атомов пространственное квантование момента импульса в магнитном поле является доказательством наличия у спина лишь двух ориентаций во внешнем магнитном поле*.

(Опыты с электронами в -состоянии подтвердили этот вывод, хотя картина получилась более сложной) (жёлтая линия натрия – дуплет из-за наличия спина).

*Численное значение спина электрона*:

(24)

По аналогии с пространственным квантованием орбитального момента () проекция , т.е. тоже *должна быть квантованной величиной* (). *Проекция спина* на направление внешнего магнитного поля, являясь квантовой величиной, определяется выражением:

(25)  
где – *магнитное спиновое квантовое число*. *может принимать только два значения, что и наблюдается в опытах Штерна и Герлаха*.

*Спиновое квантовое число*  имеет только одно значение

(26)

Итак, *проекция спинового механического момента импульса на направление внешнего магнитного поля может принимать два значения*:

(27)

### **Магнитный момент электрона**

*Проекция магнитного момента электрона* на направление внешнего поля:

(28)

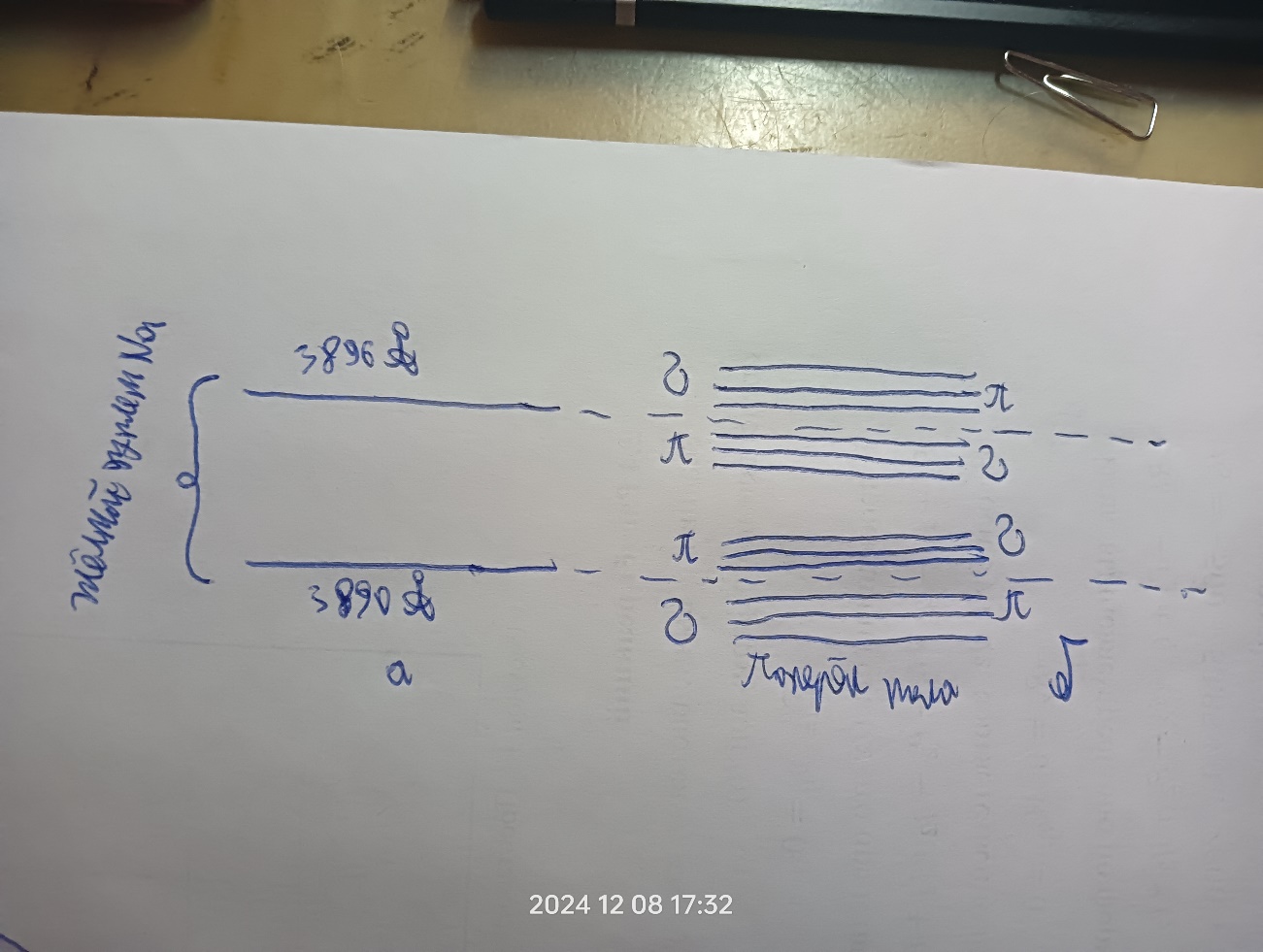
Часто говорят о собственном моменте электрона.

Отношение:  
 (29)  
– *спиновое гиромагнитное отношение*.

### **Эффект Зеемана**

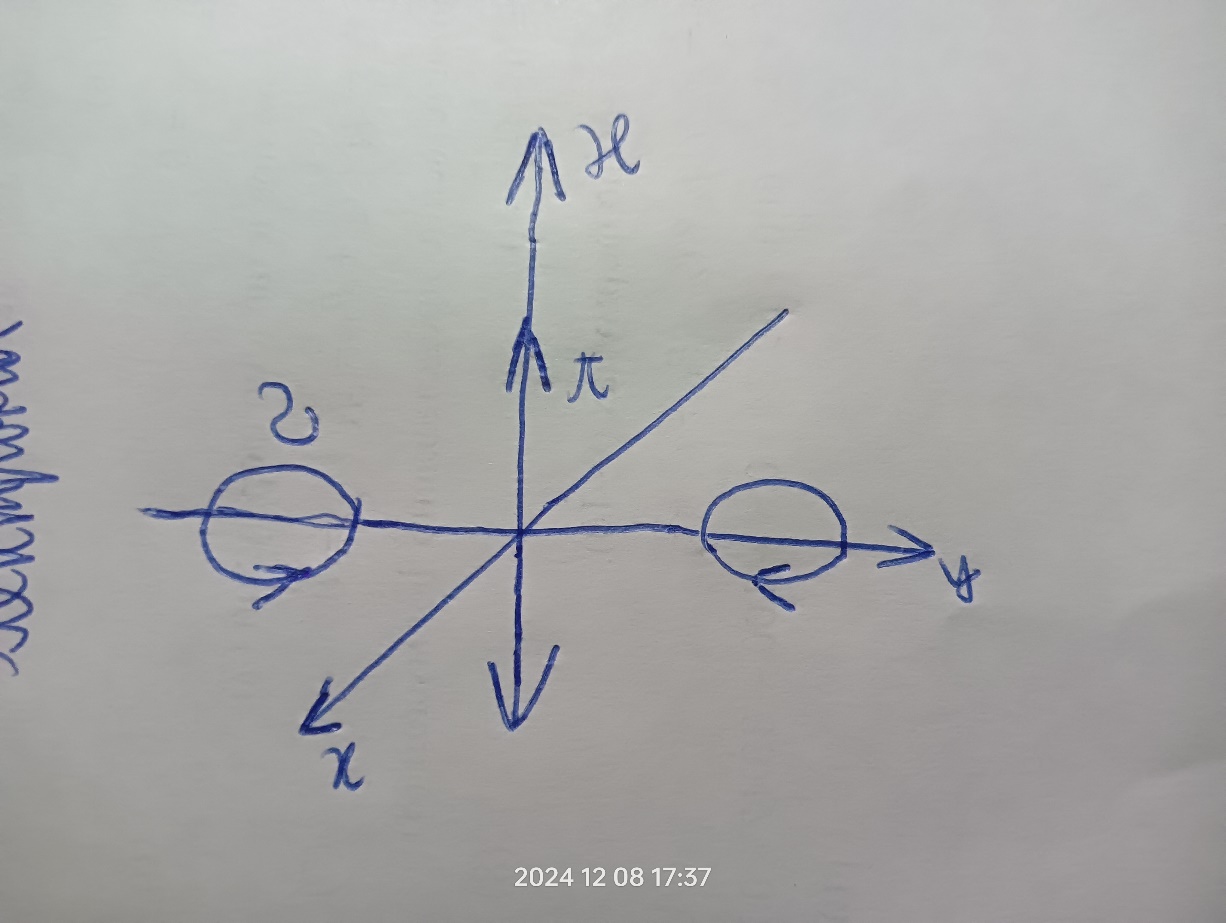
Эффект Зеемана представляет собой явление расщепления спектральных линий в результате воздействия на излучающее вещество внешнего магнитного поля.

Картина расщепления двух близких спектральных линий атома натрия (жёлтого дуплета ) в магнитном поле при наблюдении поперёк и вдоль поля представлена на рисунке 13 (- и -компоненты поляризованы различно.



1. Эффект Зеемана

Поляризация -компонентов (поперечный эффект Зеемана) и -компонентов (продольный эффект) представлена на рисунке 14 ( – направление магнитного поля, плоскость , – плоскость поляризации -компонентов).



1. Эффект Зеемана

Если атом находится в магнитном поле, то произвольное линейно поляризованное колебание электрона может быть разложено на 2 колебания: одно вдоль (), а другое в плоскости (), перпендикулярной . Последнее можно разложить на колебания и , поляризованные по кругу с противоположными направлениями вращения с частотой прецессии Лармора

(30)

Для кругового колебания, совпадающего с направлением прецессии, частота колебаний электрона , а для колебания с противоположным направлением . Вдоль напряжённости магнитного поля колебание электрона не даёт излучения (т.к. линейный осциллятор не излучает вдоль своей оси). Поэтому в продольном ЭЗ наблюдаются два колебания, смещённые от на .

При наблюдении, в перпендикулярном (поперечный ЭЗ) все три компоненты , , дадут линейно поляризованные излучения с частотами: и .

Первым учёным, объясняющим эффект Зеемана был нидерландский физик Х. Лоренц. Сделал это учёный в 1897 году в рамках классической теории, согласно которой движение электрона в атоме определяется в виде гармоники, то есть колебания линейного осциллятора. Согласно данной теории спектральная линия в условиях поперечного эффекта Зеемана, расщепляется на 3 компонента. Такое явление было названо нормальным эффектом Зеемана, расщепление жёлтой линии на большое число компонентов определили как *аномальный эффект Зеемана*.

, (31)  
где , представляют собой заряд и массу электрона соответственно, является магнетоном Бора, а – фактор Ланде. Присутствие знака «минус» обуславливается отрицательностью заряда электрона. Энергия уровня претерпевает изменения по причине взаимодействия магнитного момента с полем .

Величина данного взаимодействия обладает зависимостью от взаимной ориентации и . Вектор в магнитном поле может иметь ориентаций, при которых его проекция , где представляет собой магнитное квантовое число. Она может принимать значения , , , . Такое же количество значений может иметь проекция магнитного момента на направление .

Именно эта причина провоцирует расщепление уровня на компонентов. Изменение энергии на любого из компонентов по отношению к энергии уровня в отсутствии поля с учётом выражений  
 , будет справедливо записать следующим образом:

(32)

Механический момент атома суммируется из орбитального и спинового :

(33)

То же самое относится и к магнитному моменту .

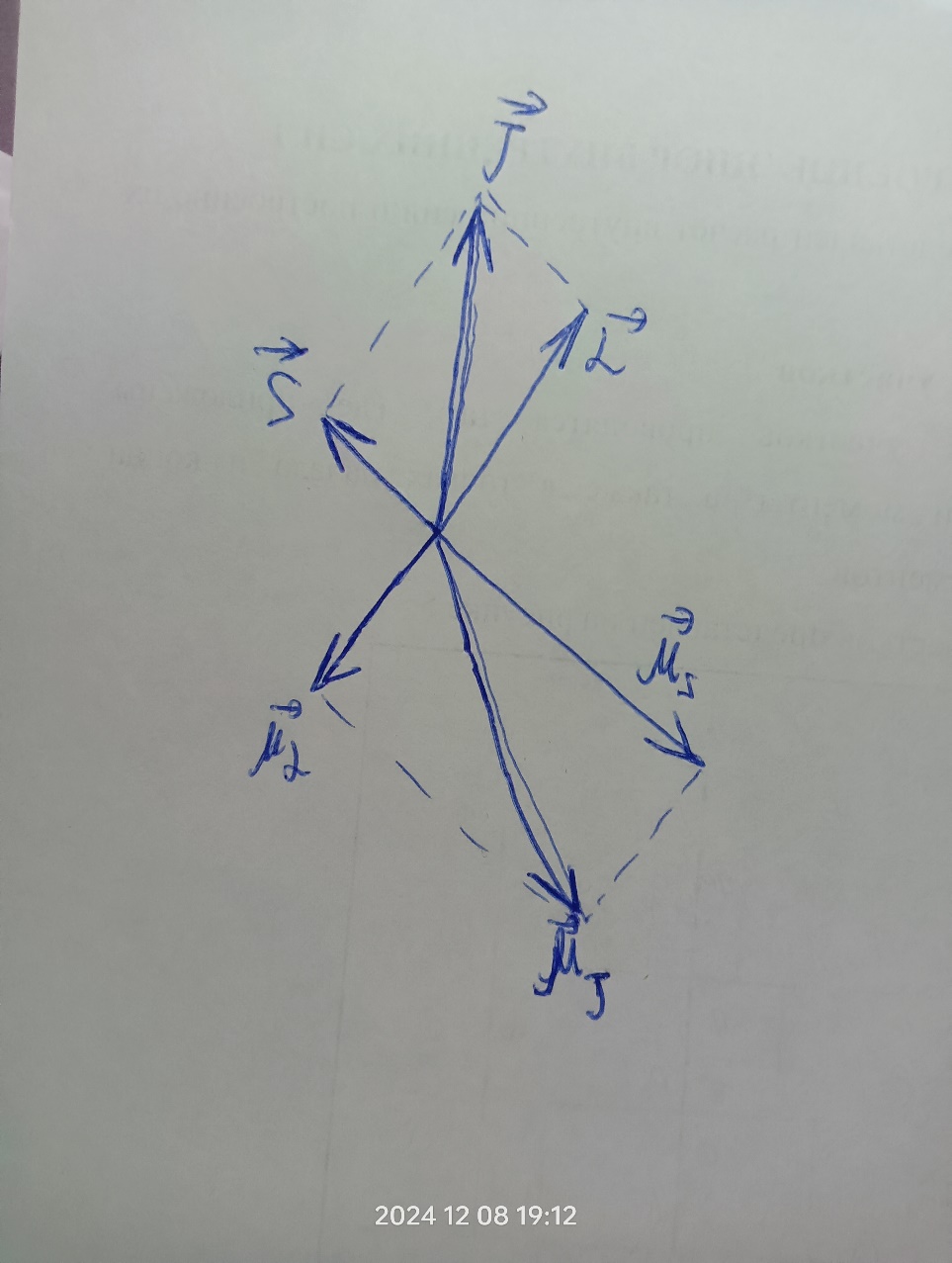
Величина подобна магнитному моменту тока, появляющегося в качестве результата действия орбитального движения электрона в атоме, и эквивалентна . С величиной дело обстоит несколько сложнее по той причине, что спиновый момент зависит от внутренней характеристики электронов, но никак не с их движением. Исходя из эксперимента и из релятивистской квантовой теории Дирака, можно сказать, что , другими словами на единицу спинового момента приходится вдвое превышающий его магнитный момент. Таким образом, полный магнитный момент:

(34)

Эти вектора представлены на рисунке 15.

(35)

(36)

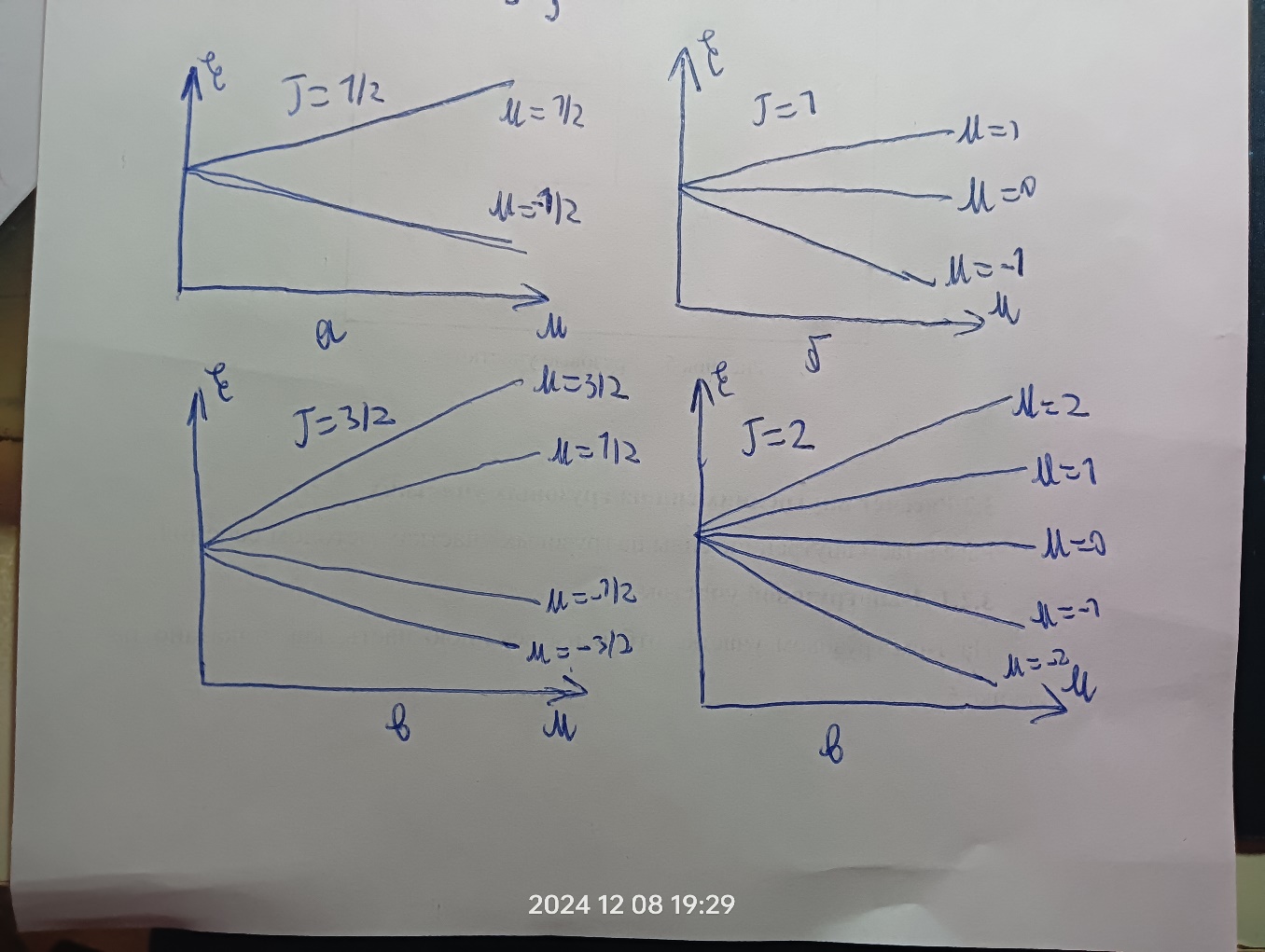


1. Эффект Зеемана

Вектор , прецессирует вокруг вектора , а это говорит о том, что в среднем он направлен вдоль и его величина может быть определена с помощью формулы , . Исходя из результатов расчётов на основе квантовой механики, *фактор Ланде* можно записать следующим образом:

(37)

Зависимость расщепления уровней энергии от напряжённости магнитного поля представлена на рисунке 16.



1. Зависимость расщепления уровней энергии от напряжённости магнитного поля: а – при , б – при , в – при , г – при .

– магнитное квантовое число.

### **Аномальный эффект Зеемана**

Исходя из формулы , можно сказать, что смещение частот компонентов линий эквивалентно:

(38)

Изменение квантового числа определяется с помощью правила отбора:

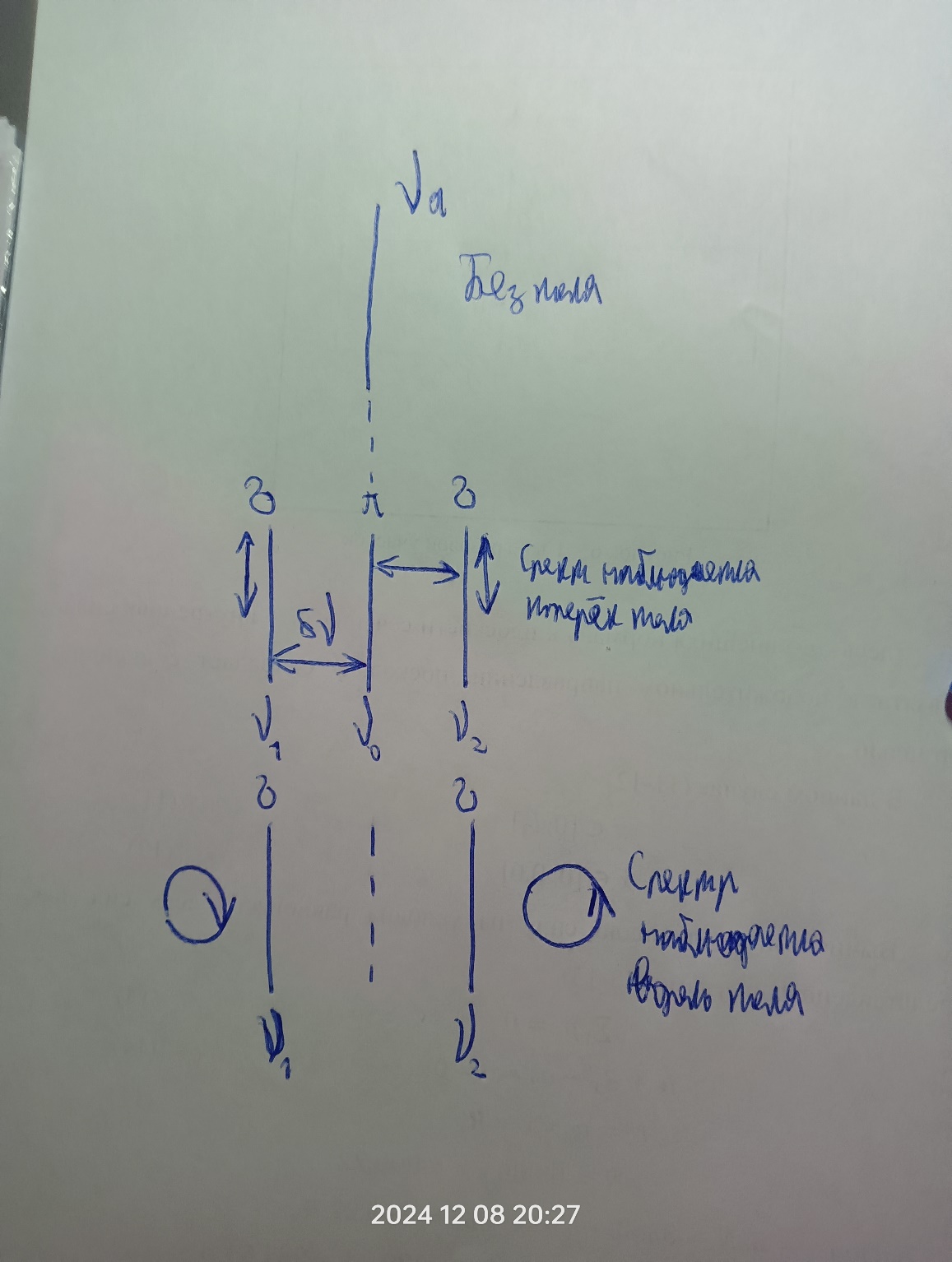
(39)

Различные переходы, которые происходят согласно такому правилу, дают зеемановскую структуру линии. В общем случае значения фактора Ланде для верхнего и нижнего уровней разнятся, переход между которыми формирует спектральную линию. Выходит, что переходы со всевозможными приводят к получению разных даже при условии одинакового . Как результат, получается сложная картина, то есть аномальный эффект Зеемана (наблюдается в слабых магнитных полях).

### **Эффект Зеемана**

В случае, когда у верхнего и нижнего уровней , , ,   
. Переходы между уровнями с приводят к получению центрального -компоненты, а с – смещённого -компоненты. В крайнем сильном поле связь и претерпевает серьёзные нарушения, оба вектора начинают независимо друг от друга прецессировать вокруг направления с проекциями и .

Нормальный эффект Зеемана представлен на рисунке 17 (стрелками обозначена поляризация компонентов, – частота исходной линии,   
 и – частоты -компонентов).



1. Нормальный эффект Зеемана

Переход от аномального к нормальному эффекту Зеемана в сильном поле носит название *эффекта Пашена-Бака*. В процессе перехода происходит нарушение линейной зависимости смещения поля. В различных линиях эффект проявляется при разных величинах магнитного поля.

## **Волны де Бройля**

В данном подразделе представлены сведения о волнах де Бройля (2-ой вопрос к защите)

### **Корпускулярно-волновая двойственность частиц вещества**

(40)

(41)

Формула (41) – формула де Бройля.

Каждой микрочастице соответствует волна, характеризующая частотой колебания и длиной волны – вследствие этого движение микрочастиц является волновым.

Для частицы массой , движущейся со скоростью :

(42)

Если частица имеет кинетическую энергию , то, учитывая, что   
, можно записать:

(43)

Для электрона, ускоренного разностью потенциалов, имеем

, (44)  
следовательно:

(45)

### **Волны де Бройля**

В 1923 году для вещества – Луи де Бройлем был открыт фундаментальный закон природы – *корпускулярно-волновой дуализм волн и частиц*.

Де Бройль утверждал, что *не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами*.

Численные оценки:

1. Длина волны де Бройля теннисного мячика с и   
   , меньше размеров мячика, то есть, для макроскопических предметов волновые свойства не проявляются.
2. Электрон , ускоренный до энергии.   
   Так как , то можно пользоваться нерелятивистскими формулами:  
    – сравнима с длиной волны рентгеновского излучения.

### **Свойства волн де Бройля**

Для свободного электрона соответствует длина волны де Бройля (электронной волны)

(46)

Введём волновой вектор (), тогда формула де Бройля:

(47)

(48)

(49)

Найдём фазовую скорость волн де Бройля:

(50)

(51)

Так как , то фазовая скорость волн де Бройля больше скорости света в вакууме.

(52)

Групповая скорость волн де Бройля:

(53)

Для свободной частицы:

(54)  
Следовательно:

(55)

Свойства волн де Бройля представлены в таблице 1.

1. Свойства волн де Бройля

|  |  |
| --- | --- |
| **Корпускулярные свойства** | **Волновые свойства** |
| Скорость  Импульс  Энергия частицы | Длина волны де Бройля:    Частота волны де Бройля:    Групповая скорость волн де Бройля    Фазовая скорость волн де Бройля: |

Формулы для длины волны де Бройля представлены в таблица 2.

1. Свойства волн де Бройля

| **Длина волны де Бройля** | **Формула** | **Пояснение** |
| --- | --- | --- |
| Общее выражение |  | Длина волны, связываемая с частицей |
| Нерелятивистская частица |  | Учли, что кинетическая энергия частицы |
| Релятивистская частица |  | Релятивистский импульс |
|  | Полная энергия частицы |
|  | Полная энергия частицы |

### **Физический и вероятностный смысл волн де Бройля**

Волны де Бройля имеют специфическую квантовую природу, не имеющую аналогии с волнами в классической физике. Вопрос о природе волн можно сформулировать как вопрос о физическом смысле амплитуды этих волн. Вместо удобнее *выбрать интенсивность волны*, пропорциональную квадрату модуля амплитуды .

Интенсивность волн в данной точке пространства определяет плотность вероятности попадания электронов в эту точку за 1 секунду. *Квадрат модуля амплитуды волн де Бройля в данной точке является мерой вероятности того, что частица обнаруживается в этой точке*.

Для описания распределения вероятности нахождения частицы в данный момент времени в некоторой точке пространства, введём функцию называемую *волновой функцией (или пси-функцией)*: вероятность того, что частица находится в элементе объёма , пропорциональна и элементу объёма :

(56)

Физический смысл имеет не сама функция , а квадрат её модуля

(57)  
где – функция комплексно-сопряжённая с .

Величина имеет смысл плотности вероятности

(58)  
Такая интерпретация волновой функции *даёт возможность называть волны де Бройля «волнами вероятности»*.

Из определения волновой функции следует, что она должна удовлетворять условию нормировки вероятностей:

(59)  
*что означает, что пребывание частицы где-либо в пространстве есть достоверное событие и его вероятность должна быть равна единице*.

Волновая функция является основной характеристикой состояния микрообъектов (элементарных частиц, атомов, молекул). С её помощью в квантовой механике могут быть вычислены средние значения физических величин, которые характеризуют данный объект, находящийся в состоянии, описываемом волновой функцией .

## **№62 IdzKvantsvet**

След пучка электронов на экране электронно-лучевой трубки имеет диаметр . Расстояние от электронной пушки до экрана  
 , ускоряющее напряжение . Оценить с помощью соотношения неопределённостей неопределённость координаты электрона на экране.

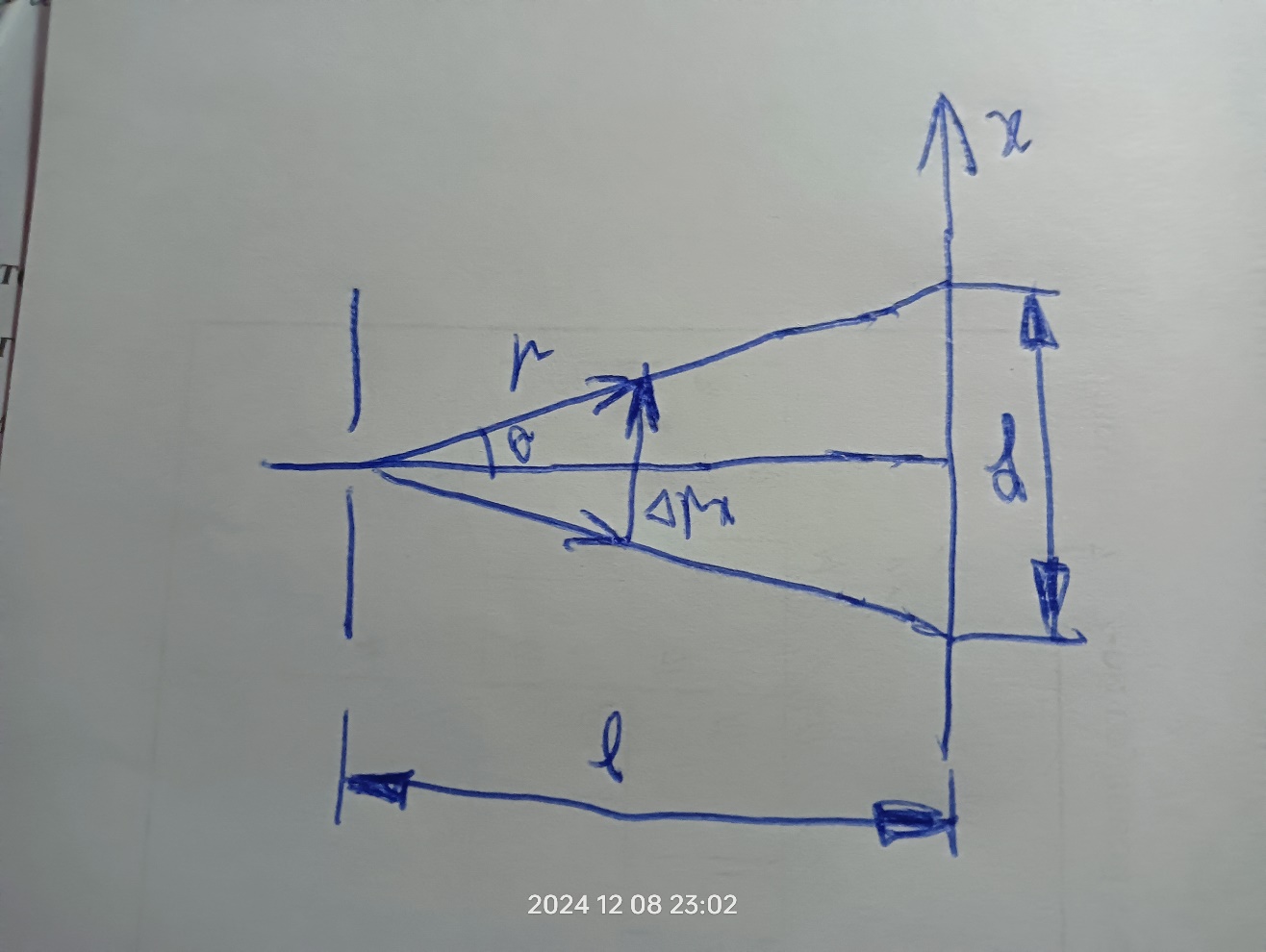
**Дано**

, ,

**Найти**

**Решение**

Иллюстрация данной задачи представлена на рисунке 18.



1. Рисунок к задаче

так как , следовательно , то есть .

Из соотношения неопределённостей Гейзенберга Источник: https://earthz.ru/solves/Zadacha-po-fizike-16059 следует:

. Пусть , следовательно .

.

Следовательно:

, ,

, ,

**Ответ:**

# **Вывод**