Перелік питань курсу ***Магнітні та спінзалежні явища в твердих тілах***

(Викладач: *Сергій Михайлович Рябченко*)

1. Релятивістська природа магнетизму. Магнітний монополь Дірака. Виток з током як магнітний диполь.
2. Магнітні властивості вільного атому (без врахування ефектів багатоелектронності) у найпростішому розгляді. Орбітальний момент. Електронний спіновий момент, спіновий момент ядра, повний (електрон + ядро) спіновий момент, надтонка взаємодія. Повний електронний момент обертання. Спін-орбітальна взаємодія у одноелектронному атомі на прикладі магнітного поля, що створює заряджене ядро на електроні, котрий рухається (в к-натах з нерух ел-ном). Правило інтервалів Ланде, g-фактор Ланде.
3. Зв'язок статистики і спіну (теорема Паулі, 1940 р.). Симетричність і антисиметричність до перестановок. Ферміони і Бозони. Розподіли Фермі і Бозе. Принцип Паулі як.
4. Гамільтоніан зарядженої частинки, що знаходиться у центрально-симетричному потенціалі, і водночас у магнітному полі. Імпульс у магнітному полі. Векторний потенціал. Калібровка векторного потенціалу. Чому можливі різні калібровки? Діамагнітний момент і діамагнітна сприйнятливість атому, Ван-Флеківський парамагнетизм. Принципова відмінність поляризаційного і орієнтаційного магнетизмів.
5. Електронний спіновий *g*-фактор, його аномалія (2-ка) і виявлене відхилення від двійки, Лембівський зсув та його причина разом з причиною відміни *g*-фактору від 2-ки. Історія відкриття цих явищ. Пояснення Бете. Початок радіоспектроскопії – початок квантової електродинаміки.
6. Заряджена частинка без центральносиметричного потенціалу у магнітному полі. Електрони металу у магнітному полі. Відсутність діамагнетизму у класичному випадку. Паулівська парамагнітна сприйнятливість; ідея виведення виразу для неї (на прикладі сферичної поверхні Фермі).
7. Квантування Ландау (у різних калібровках). Калібровка Ландау. Кількість станів на орбіті Ландау. Квант потоку для електронів (відміна від кванту потоку у надпровідниках). Квантування Ландау в *r*-просторі та в *k*-просторі. Постійність площі (в *k*-просторі) між орбітами Ландау і її залежність від магнітного поля. Що кантується у кванті потоку?
8. Радіус орбіти у реальному просторі. Магнітна довжина. Діамагнітна сприйнятливість Ландау, її відношення до Паулівської сприйнятливості. Ефект осциляцій магнітної сприйнятливості де Гааза—ван Альфена. Ефект Шубникова—де Гааза. Використання осциляційних ефектів для вивчення топології поверхні Фермі.
9. Циклотронний резонанс в металах, діамагнітний резонанс в напівпровідниках. Їх спільність і відмінність. Використання їх для вивчення поверхні Фермі. Поняття про екстремальні орбіти. Співвідношення частот спінових переходів і циклотронних в металах, напівпровідниках (якісно).
10. Ефект Ааронова-Бома. Ідея, наслідки.
11. Магнітоопір у безспіновому випадку. Магнітоопір у феромагнітних структурах. Багатошарові структури з гігантським магнітоопором. Природа явища.. Відмінність природи магнітоопору в звичайному металі від гігантського магнітоопору в багатошарових наноструктурах феромагнітний метал/звичайний метал. Тунельний магнітоопір. Речовини з «колосальним» магнітоопором. Перехід метал—діелектрик. Колосальний магнітоопір. Страйп-структури. Зарядове та магнітне впорядкування
12. Ефект Холла, основні співвідношення. Що і як можна досліджувати із звичайного ефекту Холла. Ефект Холла при двох типах носів. Аномальний ефект Холла в феромагнітних провідних середовищах. Спіновий ефект Холла. Спіновий і аномальний ефекти Холла як споріднені явища.
13. Спін орбітальна взаємодія як релятивістський ефект. Можливий вплив СО взаємодії на закон дисперсії носіїв. Інверсія часу і інверсія просторова. Об'ємна і структурна асиметрія. СО Дрессельхауза і Рашби. Їх наслідки для напівпровідників. Для спінтроніки. Спіновий ефект Холла. Спіновий і аномальний ефекти Холла як споріднені явища. Анізотропний магнітоопір.

14. Квантовий ефект Холла. Зразки для його вивчення. Гетерограниця, інверсійний шар; квантова яма; спейсери; модуляційне легування і т. ін.. Густина станів електронів у двовимірних системах. Типова схема проведення експерименту і типові результати вимірів (залежності). Якісний зміст квантового ефекту Холла.

15. Квант опору $\frac{h}{e_2}$; поведінка ρ_{xy} і ρ_{xx}. Пояснення значень ρ_{xy} при цілочисельних заповненнях орбіт Ландау. Чому сходинки? Ідея локалізації. Критерій локалізації Іоффе—Регеля. Мінімальна металева провідність.

16. Досягнення в технології виготовлення зразків і умовах проведення експериментів. Дробовий (нецілочисельний) ефект Холла. Умови його виникнення, прояву. Типова картинка. Ідея інтерпретації. Поняття про функцію Лафліна. Її якісний зміст Масштаб щілини для ДКЕХ. Трансформація квантового Холл-ефекту в міру зростання температури з якісним поясненням і при різних (низькій, високій – які критерії високої чи низької температури) рухливостях носіїв струму у зразках. Поняття про "складені ферміони", еніони. Хвилі спінової густини і хвилі густини розподілу електронів.

17. Інші типи зв'язаних станів у електронній, або електронно-дірковій системах. Екситон Ваньє – Мотта в магнітному полі. Поняття про екситон Ваньє - Мотта взагалі. Співвідношення енергії зв'язку і відстаней між рівнями Ландау; "діамагнітний" екситон. ~~Проблема Бозе конденсації екситонів Ваньє - Мотта.~~

~~(- Магнітні властивості надпровідників, Ефект Мейснера. Рівняння Лондонів, його ідея. Надпровідники I-го і II-го роду (фаза Шубникова). Проміжний стан надпровідника I-го роду в магнітному полі. Роль фактору розмагнічування (диск, "веретено", сфера).~~

~~Вихоровий стан для надпровідників II-го роду. Основні співвідношення; параметр Гінзбурга. Вихор Абрикосова. Вихорові гратки. Критична густина струму як струм, що зриває вихори з центрів піннінгу. Резистивний стан надпровідника.~~ цього я не розповідатиму, бо це читають вам у курсі про надпровідність, але можу питати -)

18. Багатоелектронний атом. Електрон-електронне відштовхування та шляхи його врахування Ідея самоузгодженого поля Хартрі. Варіаційний метод виводу співвідношення для нього. Ідея Фока. Принцип Паулі. Представлення хвильової функції як мультиплікації орбітальної і спінової частин. Обмінна взаємодія, її природа та її вираз через спінові оператори. Наближення Хартрі—Фока. Зняття виродження по величині орбітального квантового числа при заданому n. Поняття конфігурації. Таблиця Мєндєлєєва.

Роль спін-орбітальної взаємодії. Критерії відбору для різних випадків, що розглядаються. j—j - зв'язок, L—S - зв'язок. Слеттерівські детермінанти. Правила складання моментів (коефіцієнти Вігнера). Правила Хунда, його зміст "на пальцях".

19. Результат застосування правила Хунда для іонів групи заліза D-, S-, F-стани. Спін-орбітальна взаємодія в багатоелектронному атомі. Спін-орбітальні мультиплети.

Намагнічуваність ансамблю іонів. Функція Бриллюена, її виведення. Ф-я Ланжевена. Ефективне число магнетонів Бора на атом. Данні про намагнічуваність ансамблю іонів у твердих тілах. Рідкісноземельні сполуки та сполуки групи заліза. Прояв заморожування орбітальних моментів у кристалічному полі для групи заліза.

20. Загальна ідея кристалічного поля як розвиток багатоелектронного підходу. Сильне, середнє та слабке кристалічні поля. Критерії сили поля, ідеї підходу в кожному із випадків. Теорема Кремерса і інверсія часу. Її наслідок для розщеплення станів магнітних моментів іонів у кристалах.

21. Ідея реалізації підходів теорії кристалічного поля (на прикладі випадку середнього поля). Представлення хвильової функції через сферичні гармоніки. Сума по взаємодії з зарядами у вузлах. Розкладання кристалічного поля по сферичних гармоніках. Якісні підходи для зменшення числа матричних елементів, що їх треба обчислити. Правила відбору при складанні моментів. Врахування симетрії. Центр інверсії. Правило трикутника. Ідея розрахунку (мікроскопічного)

кристалічного поля (розкладання в ряд по сферичних гармоніках). Розкладання кристалічного поля на складові різної симетрії. Метод інваріантів і незвідні оператори.

22. Теорема Вігнера—Еккарта. Метод еквівалентних операторів Стівенса. Необхідність симетризації при виведенні виразу для еквівалентного оператора. Схематично – як це робити на прикладі випадку кубічного кристалічного поля. V_0^4, V_4^4.

23. Розщеплення *D*-стану в кубічному кристалічному полі. Матричні елементи операторів $L_\pm$ і L_Z. Матриця для еквівалентного оператора кубічного поля. t_{rg}- і e_g- стани як власні стани кубічного кристалічного поля. Вигляд цих функцій у координатному просторі. Розщеплення *F*-стану в кубічному кристалічному полі. Розташування розщеплених рівнів для випадку тетраедричного і октаедричного випадків реалізації кубічного поля.

24. Подальше зняття виродження спін-орбітальною взаємодією та низькосиметричними полями. Ефективний момент 1 триплетного виродженого стану та перенормування спін-орбітальної константи для нього, як черговий приклад використання теореми Вігнера—Еккарта. Незвідність виродженого e_g- стану до ефективного моменту ½.

25. Теорема Яна—Теллера, її зміст "на пальцях". Статичний та динамічний ефекти Яна—Теллера. Багатоямність, тунелювання та термоактивовані переходи. Кооперативний ефект Яна—Теллера. Експериментальні прояви. Псєвдоянтелерівський ефєкт. Нецентральні домішки. Сегнетоеластіки.

26. Ідея методу спін-гамільтоніану. Схема знайдення спін-гамільтоніану за теорією збуджень на прикладі D стану в тетрагонально-спотвореному кубічному полі. Анізотропний g – фактор; Члени кристалічного поля. Метод інваріантів для виведення спін гамільтоніану. Інваріанти кристалічного поля і інваріанти в описі взаємодії з магнітним полем.

Надтонка взаємодія; ізотропна, анізотропна; надтонка взаємодія з ядрами сусідніх іонів; ядерна квадрупольна взаємодія, її зміст "на пальцях". Ядерна зеєманівська взаємодія. Повний спін-гамільтоніан поодинокого магнітного іона у кристалі.

27. Можливі магніто-дипольні переходи різних типів у іонів в кристалах: ЯКР. ЯМР, ЕПР. Опис на основі переходів між рівнями спін-гамільтоніана. Кутові залежності. Квантово-механічний опис магнітодипольних переходів. Високочастотна магнітна сприйнятливість, дійсна та уявна її частини. Спектральна густина – введення часу T_2. Потужність, що поглинається. Врахування кінетики розподілу населеностей. Фактор насичення Спінова температура.

28. Опис магніторезонансних переходів на основі рівнянь руху магнітного моменту, його обмеженість. Елементарний магнітний резонанс. Рух намагніченості зразка у магнітному полі. Рівняння Блоха. Зміст T_2 у рівняннях Блоха. T_2 і T_2^* . Обернені і необернені випадковості. Поняття детермінованого хаосу. Зміст T_1 у рівняннях Блоха. Якісний зміст вирішень рівнянь Блоха. Роль насичення. Що таке "насичення"?

29. Методи реєстрації парамагнітних резонансів. Електронного, ядерного. Типові чутливості. Рекордні чутливості. Метод Q-метра для неперервної реєстрації спектрів магнітних резонансів. Ідея методу спінової луни. Метод Хана. "Обернення" у часі розпаду поперечної намагнічуваності і відновлення випадковостей, пов'язаних з детермінованим хаосом. ЯМР високої роздільної здатності. Основні ідеї методу. Галузь застосувань. ЯМР-томографія, принцип методу, історія розвитку, застосування. Розтлумачення "на пальцях", чому вдається спостерігати вузькі лінії резонансних переходів на частотах в десятки і сотні разів менших ніж кТ / h при температурі вимірів.

30. Природа спін-фононної взаємодії. Спін-фононний гамільтоніан як наслідок залежностей параметрів звичайного спін-гамільтоніану від міжіонних відстаней. Статичний аспект спін-фононної взаємодії. Залежності параметрів спектрів від тиску, від температури. Акустичний парамагнітний резонанс. Спін-граткова релаксація як вимушені переходи під дією фононів . Поняття "процесів" і "механізмів". Прямий, комбінаційний та орбахівський процеси. Фононне вузьке горло. Механізми спін-граткової релаксації. Механізми Валера, Кроніга – ван Флека тощо. Реальні ситуації з спін-гратковою релаксацією для різних іонів.

31. Спін-спінова взаємодія. Диполь-дипольна та обмінна. Квантово-механічні розрахунки ширини лінії магнітного резонансу. Метод моментів (основні поняття). Другий та четвертий моменти, обумовлені диполь-дипольною та обмінною взаємодіями. Секулярний та несекулярний внески дипольної взаємодії в ширину лінії. "Обмінне звуження" резонансної лінії. Поняття часу кореляції. Звуження рухом. Випадок домінуючої обмінної взаємодії. Ускладнення опису процесів релаксації.

32 Анізотропна обмінна взаємодія як наслідок врахування спін-орбітальної взаємодії і опису основного стану іона за допомогою ефективного спіну. Обмінна взаємодія Дзялошинського – Моріа. Спонтанне магнітне впорядкування. Опис на основі молекулярного поля. Високотемпературне розкладання. Закон Кюрі-Вейсса для сприйнятливості. Феромагнетизм. Фазова діаграма стану магнетика по температурі, по полю. Переходи І-го і ІІ-го роду. Критичні індекси. Домени. Доменні стінки Блоха і Нееля.

33. Магнітодипольна (магністатична) взаємодія як причина виникнення доменної структури; неаналітичність внеску в енергію від дип.-дип. взаємодії. Поля розмагнічування і основний метод їх врахування. Спінові хвилі в феромагнетику. Прояв неаналітичності магнітостатичної взаємодії. Магнітостатичні хвилі. Феромагнітний резонанс.

34. Антиферомагнетизм, історія розвитку уявлень. Фазова діаграма температура—поле . Слабкий феромагнетизм в АФМ. Спінові хвилі. Роль анізотропії для утворення "щілини". Антиферомагнетики типу "легка площина" і типу "легка вісь".

35. Магнітострикція в феро- і антиферомагнетиках. Спонтанна магнітострикція. Зняття просторового виродження в легкоплощинних системах за рахунок спонтанної магнітострикції (якісно). Квантово-механічна проблема з АФМ, з ізотропним ФМ. Квазісередні Боголюбова. Ферімагнетіки (основні поняття, приклади).

36. Опис феромагнітного і антифнромагнітного станів і резонансів в них на основі рівняння Ландау і Ліфшиця. Ефективні поля, ідея їх введення її продуктивність і можливі обмеження. Форми релаксаційного члена в рівняннях Ландау—Ліфшиця. Природа релаксації у магнітовпорядкованих середовищах.

37. Типи фазових переходів. Ідея масштабної інваріантності. Скейлінг. Критичні індекси та їх зв'язок з розмірністю системи. Спінове скло. Дворівневі системи - ДУСи. Фрустрації, їх приклади, "неспіввимірні" фази. Типи магнітного впорядкування. Загальна ідея природи існування парамагнітних діелектриків, ідея моделі Хаббарда.

Носій-іонна обмінна взаємодія та її природа. Діагональна та недіагональна за квазіімпульсом частини. Роль діагональної частини. Гігантське спінове розщеплення електронних зон у магнітозмішаних (напівмагнітних) напівпровідниках. "Надтонке" поле в оптично-орієнтованих напівпровідниках. Наближення середнього поля (модель Вонсовського –Зінера). Феромагнетизм перехідних металів. Типова зонна схема. Експериментальні прояви. Поле Найта на ядрі феромагнітного металу. Релаксація Корінги в металах. Її прояв і застосування при вивчення переходів металу у надпровідний стан.

Роль недіагональної частини носій-обмінного обміну. Спінова поляризація носіїв $S_e(\vec{q}), S_e(\vec{r})$. RKKY-взаємодія. Упорядкування через RKKY. Еквівілентність та можливі відмінності RKKY підходу і моделі Вонсовського –Зінера. Поняття про «подвійний обмін».

Напівмагнітні напівпровідники. Гігантське спінове розщеплення зон в них. Магнітні полярони. Напівпровідникові квантові ями на основі напівмагнітних напівпровідників. Можливість феромагнітного впорядкувіння у напівмагнітних (розчинених магнітних) напівпровідниках. Реальні досягнення.

Ефект Кондо. Резонанс Сула—Абрикосова. Температура Кондо. Кондо-сплави, їх застосування.

Багатошарові структури з гігантським магнітоопором. Природа явища. Перехід метал—діелектрик . Колосальний магнітоопір. Страйп-структури. Зарядове та магнітне впорядкування. Спінзалежні явища в рекомбінації фотозбуджень в напівпровідниках. Спінзалежні хімічні реакції. Перспективи спінтроніки. Реальні успіхи і проблеми.