

В.В. Федотов

Огляд теорії мезоскопічних систем

*Національний технічний університет України, «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: innavegera@gmail.com*

У рамках даної роботи зроблений огляд теорії мезоскопічних систем. Зазначено основні ефекти мезоскопічних систем, визначено, що макроскопічні характеристики системи значно флюктуують, у рамках мезоскопічного рівня. Визначено основні показники когерентності квантової фази та окреслено механізми впливу. Охарактеризовано шість ефектів мезоскопічних систем з детальним обґрунтуванням. Теорія мезоскопічних систем ґрунтується на наступних мезоскопічних ефектах: ефект Ааронова-Бома; ефект інтегрального квантового виходу; дробовий квантовий ефект Холла; універсальні флюктуації кондактанса; квантування провідності квантового точкового контакту; постійні струми у мезоскопічних кільцях.

Перспективи подальших розробок у даному напрямку дослідження ґрунтуються на детальному вивченні мезоскопічних ефектів виходячи зі зростаючої тенденції до виготовлення та дослідження матеріалів, що містять найменші структури та мають низькорозмірні риси, що призводить до мезоскопічного режиму.

Ключові слова: мезоскопічні системи, флюктуація, квантова фаза, когерентність, наноструктурована система, макроскопічні характеристики.

Стаття постуила до редакції 19.08.2017; прийнята до друку 05.09.2017.

Вступ

Постійна тенденція в сучасному матеріалознавстві полягає в тому, щоб запропонувати та досліджувати системи, що містять найменші структури. Отримані системи підходять до мезоскопічного режиму, в якому когерентність квантової фази призводить до зміни у електронних станах квантових пристроїв. У той же час мікроскопічні деталі зразка, такі як точна конфігурація домішок в неупорядкованих системах, визначають деякі кількісні особливості поведінки. Це може призвести до виражених флюктуацій кількості, вимірної в різних зразках, які є макроскопічно еквівалентними.

В кінці ХХ століття у фізичній науці з'являється явна тенденція до наноструктурованих систем. Які включають в себе напівпровідникові структури та магнітні матеріали, а також внутрішньо наноструктуровані системи, такі як біоматеріали та макромолекули. Ці найменші структури підходять до так званого мезоскопічного режиму, в якому квантові ефекти стають актуальними для поведінки матеріалів. У той же час, значні успіхи у контрольованому виготовленні субмікронних

твердотільних структур, а також загальна доступність низькотемпературних установок дозволили систематично досліджувати штучно створені структури, електронні властивості яких модифіковані або навіть переважають вплив квантових інтерференцій. Це дає змогу проводити експерименти у мезоскопічному режимі, які безпосередньо досліджують квантові властивості фазових когерентних систем багатьох тіл.

I. Постановка проблеми дослідження

Мета роботи - зробити огляд теорії мезоскопічних систем. Описати основні показники когерентності квантової фази та окреслити механізми впливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хорошими початковими моментами до вивчення мезоскопічної фізики є недавні книги наукові роботи з даної теми, викладені М.А. Івановим [1], С.М. Шевченко [2] та М.В. Денисенко, А.М. Сатаниним [3].

А.Ф. Клиньських, Ханг Т.Т. Нгуєн, П.А. Мелещенко [4] в додатку до ряду фундаментальних «вторинних» макроскопічних квантових ефектів, а

також квантово-розмірних ефектів в мезоскопічних системах викладені деякі сучасні методи квантової механіки, що не знайшли послідовного висвітлення в навчальній літературі.

Стаття [5] присвячена дослідженню провідності по домішках слабологаного ($N < 1,017 \text{ см}^{-3}$) некомпенсованого ($K < 10^{-3}$) кремнію від електричного (E) і магнітного (H) полів при температурах, відповідних насиченню 03-провідності.

В.Р. Халилов [6] наводить релятивістський квантовий ефект Ааронова-Бома для вільного (за наявності тривекторного кулонівського потенціалу Лоренца) та пов'язаних ферміонних станів. Автором отримано загальну амплітуду розсіювання в комбінації три векторних кулонівських потенціалів Ааронова-Бома та Лоренца як суми двох амплітуд розсіювання.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за темою даної роботи, питання обґрунтування теорії мезоскопічних систем залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

II. Виклад основного матеріалу дослідження

Мезоскопічний режим є проміжним між квантовим світом мікроскопічних систем (атомами або малими молекулами) та класичним світом макроскопічних систем, таких як великі фрагменти конденсованої речовини. Мезоскопічні системи, як правило, складаються з великої кількості атомів, але на їх поведінку суттєво впливають наслідки квантових переходів. Це становить мезоскопічну фізику на межі статистичної фізики та квантової фізики.

Когерентність квантової фази, необхідна для появи інтерференційних ефектів, зберігається лише протягом кінцевого часу τ_φ , що називається періодом розриву фази. Когерентність фази губиться, коли система чи її компоненти, що досліджуються, взаємодіють з її середовищем, наприклад, за допомогою електронно-фононного розсіювання. У електронних провідниках час розриву кінцевої фази відповідає довжині розриву фази L_φ .

Мезоскопічні квантові ефекти з'являються, коли типові шкали часу або довжини системи менше, ніж час розриву фази або довжина. У багатьох випадках це означає, що відповідний розмір системи L повинен бути меншим за довжину когерентності фази [2]

$$L < L_\varphi. \quad (1)$$

Для електрона час/довжина когерентної фази обмежується електрон-електронним та електрон-фононим розсіюванням. Ці процеси важливі при високих температурах, але обидва типи розсіювання пригнічуються при низьких температурах, причина тому, залежність когерентності фаз від температури.

Важливо зауважити, що лише процеси

розсіювання, при яких створюється або руйнується збудження (фонон, електронне збудження тощо) навколишнього середовища, призводять до втрати фазової когерентності. Такі процеси розсіювання залишають слід усередині середовища, який в принципі може спостерігатися, і нагадує вимірювання траєкторії частинки. Ці процеси, як правило, непружні і пов'язані з передачею енергії. Проте процеси, які змінюють середовище без передачі енергії, також можуть призвести до декогеренції.

На відміну від цього, розсіювання електронів від статичних домішок завжди пружне. Незважаючи на те, що фаза електронів могла бути модифікована в процесі розсіювання, це відбувається в чітко визначений спосіб і не руйнує ефекти когерентності фаз.

Тому, мезоскопічний режим характеризується малими масштабами часу та/або довжини та низькими температурами. Коли температура знижується, час/довжина когерентності фази збільшується, а мезоскопічний режим поширюється на більші масштаби часу/довжини. При температурах Кельвіна масштаби часу та довжини в напівпровідникових зразках складають відповідно пікосекунди та мікрометри.

Оскільки у мезоскопічній фізиці часто трапляються малі скінченні системи при низьких температурах, міжривневий інтервал Δ дискретного спектру електронів може стати більше, ніж добуток сталої Больцмана і температури. Тоді електронні та термодинамічні властивості зразка визначаються не лише глобальними величинами, на кшталт середньої щільності станів, але і деталями спектру. Однак точний спектр залежить від конфігурації домішок, що приводить до коливань спостережуваних величин між макроскопічно нерозрізненими зразками. Самі ці коливання є цікавими для вивчення, оскільки якісні ефекти часто універсальні в тому сенсі, що вони не залежать від мікроскопічних деталей.

Теорія мезоскопічних систем ґрунтується на мезоскопічних ефектах:

- ефект Ааронова-Бома;
- ефект інтегрального квантового виходу;
- дробовий квантовий ефект Холла;
- універсальні флуктуації кондактанса;
- квантування провідності квантового точкового контакту;
- постійні струми у мезоскопічних кільцях.

Ефект Ааронова-Бома.

Одним з найбільш вражаючих наслідків фазової когерентності є можливість спостерігати коливання Ааронова-Бома в провідності мезоскопічних структур, що містять невеликі нормальні металеві кільця [6]. При низькій температурі, коли довжина когерентності фази більша, ніж довжина кільця, важлива інтерференція амплітуд електрона, що може проходити як через одну, так і через іншу частину кільця. До внутрішньої різниці фаз φ_0 двох шляхів слід додати ефект магнітного поля, який приводить до фазового зсуву, заданого, як

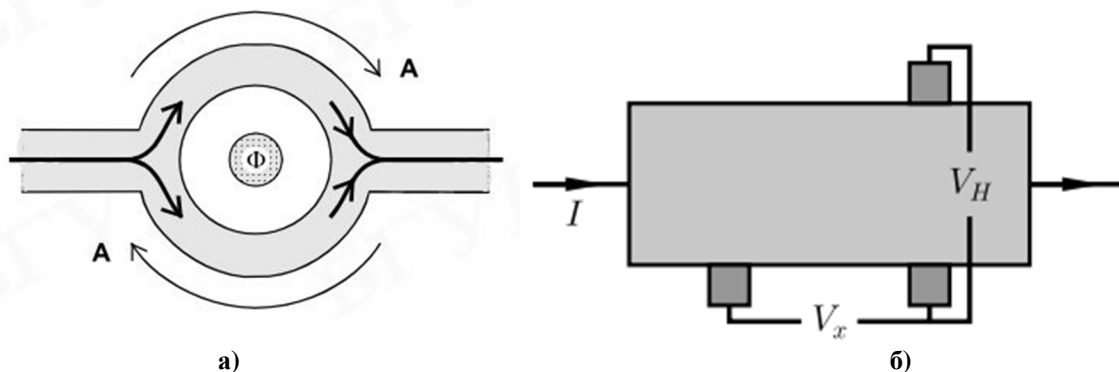


Рис. 1. Ефект Ааронова-Бома: а) розподіл магнітного потоку; б) геометрія ефекту Ааронова-Бома [2, 6].

(2)

(3)

Інтеграл по замкнутому контуру кільця від векторного потенціалу дає фазовий зсув, пропорційний магнітному потоку через кільце, заданому площею кільця, помноженою на (постійну) напруженість магнітного поля перпендикулярно площині кільця. Компонент провідності (співвідношення між струмом через зразок та напругою, що застосовується) пропорційний , що призводить до спостережень - періодичних осциляцій провідності пристрою як функції магнітного потоку, що пронизує кільце, як показано на рис. 1, а.

Поздовжня напруга вимірюється між двома точками уздовж одного краю зразка, тоді як напруга Холла вимірюється між точками на протилежних сторонах зразків.

Ефект інтегрального квантового виходу.

Одним з перших і найбільш вражаючих спостережень макроскопічних наслідків фазової когерентності в електронних властивостях твердотільних пристроїв стало відкриття цілочисленого квантового ефекту Холла [6] Клауса Фон Клітцинга у 1980 році, нагородженого Нобелівською премією у 1985 році.

При вимірюванні ефекту Холла в інверсному шарі кремнієвого МОП транзистора при низьких температурах ($T \sim 1$ К) і в сильних магнітних полях ($B > 1$ Тл) лінійна залежність холлівського опору перетворюється на низку ступенів (плато). Величина опору на цих плато дорівнює комбінації фундаментальних фізичних констант, поділений на ціле число.

Коли на залежності холлівського опору R_H спостерігається плато, поздовжній електричний опір стає дуже малою величиною. При низьких температурах струм в зразку може протікати без дисипації (розсіювання). При проведенні досліджень Фон Клітцинг використовував двовимірний електронний газ.

Ефект Холла передбачає, що, коли провідник поміщається в магнітне поле , то в ньому створюється поперечна напруга між протилежними боковими сторонами зразка, пропорційна поздовжньому струму . Цю залежність можна записати через так званий опір Холла:

Класично, використовуючи формулу Друде, отримуємо опір Холла:

(4)

з двомірною електронною щільністю . Магнітне поле не впливає на поздовжній опір , розрахований від співвідношення падіння напруги між двома точками на тій самій стороні зразка до струму в рамках теорії Друде.

Поздовжній опір знижується до нуля, за винятком деяких значень магнітного поля, де з'являються піки.

Дробовий квантовий ефект Холла.

Перехід до більш сильних магнітних полів і зниження температур в двовимірних електронних газах дозволяє спостерігати додаткові плато опору Холла при дробових факторах наповнення, таких як $\nu = 1/3$. Цей так званий дробовий квантовий ефект Холла був виявлений [4] у 1982 році. Особливості при дробовому наповненні можна простежити до існування корельованих колективних квазічастинкових збуджень [3]. Таким чином, на відміну від цілочисленого квантового ефекту Холла, кулонівська взаємодія між електронами є необхідною для пояснення дробового квантового ефекту Холла. Квазічастинки мають дробовий заряд (наприклад, $e/3$ при $\nu = 1/3$). З вимірювань ударного шуму [1] нещодавно було підтверджено, що носії зарядів при $\nu = 1/3$ в режимі дробового квантового ефекту Холла дійсно мають заряд $e/3$.

Універсальні флуктуації кондактанса.

Застосування неупорядкованих дротів у мезоскопічному режимі має виражені флуктуації як функцію зовнішніх параметрів, таких як магнітне поле або енергія Фермі. Ці флуктуації були виявлені [3] в низькотемпературній (нижче 1 К) провідності інверсійного шару у неупорядкованому кремнієвому транзисторі. Флуктуації відтворюються і відображають відбиток зразка. Походження коливаний полягає у інтерференції різних способів, які електрони можуть приймати під час проходження через зразок, як це зображено на рисунку 2.

У макроскопічно еквівалентному зразку з мікроскопічно різною конфігурацією домішок флуктуації якісно аналогічні, але їх точні

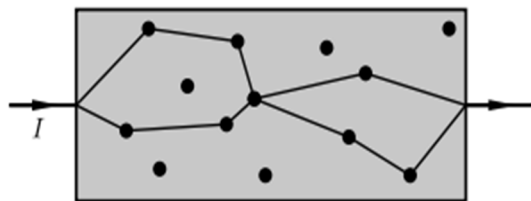


Рис. 2. Можливі шляхи електрона через невпорядкований дріт, з процесами пружного розсіювання на домішках. На шляхи електрона впливає магнітне поле або значення хвильового вектора Фермі, що призводить до коливань провідності у мезоскопічному режимі [6].

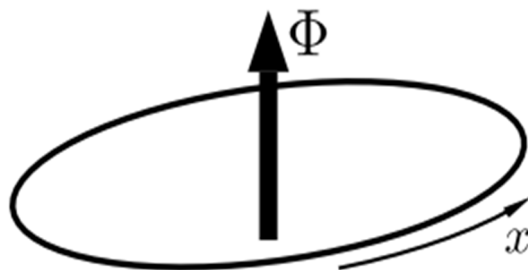


Рис. 3. Ідеальне одновірне кільце, пронизане магнітним потоком Φ , [2, 4].

характеристики можуть бути абсолютно різними. Найбільш вражаючою особливістю коливань провідності є те, що їх типова амплітуда універсальна в дифузійному режимі [2].

Незалежно від середнього значення провідності, коливання завжди складають порядок квантової провідності і залежать лише від базових симетрій (наприклад, симетрії часу інверсії) системи [4]. Це може спричинити відштовхування власних значень матриць випадкових передач.

Квантування провідності квантового точкового контакту.

Точковий контакт є зв'язком між двома провідними матеріалами. Така ланка може бути сформована шляхом накладання обмежувального звуження на дріт або примушення електронів проходити через вузький канал, визначений електростатично, коли вони ведуть від однієї дво- або тривимірної області зразка до іншої. У випадку дуже вузької ширини, більш вузької від середнього вільного шляху та довжини когерентності фаз (l), яка називається балістичним квантовим точковим контактом.

Постійні струми у мезоскопічних кільцях.

Електрони у мезоскопічних кільцях можуть підтримувати струм навколо кільця у термодинамічній рівновазі навіть при нульовій температурі. Цей струм залежить від магнітного потоку і не може розсіюватися дисипативно. Тому він протікає вічно навіть у звичайних провідниках, і саме тому він називається стійким струмом.

На рис. 3 зображено ідеальне одновірне кільце

окружності. Добре відомо, що магнітне поле не може вплинути на поведінку одновірних систем. Це, однак, не відбувається, коли одновірна система замкнена на кільце. У цій топології потік, що з'єднує кільце, призводить до фазового зсуву, накопиченого електронном, що рухається навколо кільця, - квант потоку. Використовуючи калібрувальне перетворення, цей фазовий зсув може бути поданий [2] у граничному стані, усуваючи магнітний векторний потенціал з рівняння Шредінгера для електронів і приводячи до узагальнених періодичних граничних умов

$$\psi(x) = \psi(x + L) e^{i\alpha} \tag{5}$$

для одночастинкових хвильових функцій. Звідси випливає, що всі електронні властивості кільця повинні бути періодичними в магнітному потоці, періодом якого є квант потоку, подібний до ефекту Ааронова-Бома.

Хвильовими функціями не взаємодіючих електронів у чистому кільці є плоскі хвилі

$$\psi_n(x) = e^{i(k_n x - E_n t)} \tag{6}$$

Граничний стан рівняння (5) обмежує можливі хвильові вектори до значень

$$k_n = \frac{2\pi n}{L} \tag{7}$$

де n - ціле число. Флюсова залежність відповідних одночастинкових енергій

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{2\pi^2 \hbar^2 n^2}{2mL^2} \tag{8}$$

що наведено на рисунку 4. Постійний струм при нульовій температурі задається сумою струмів від найнижчих рівнів в кільці. Постійний струм можна записати як:

$$I = \frac{e}{\hbar} \sum_n \hbar k_n \tag{9}$$

З сумарною енергією електронів. Оскільки при заданому значенні знак похідних одночастинкових енергій по відношенню до магнітного потоку коливається з квантовим числом, загальний стійкий струм зменшується шляхом скасування суміжних

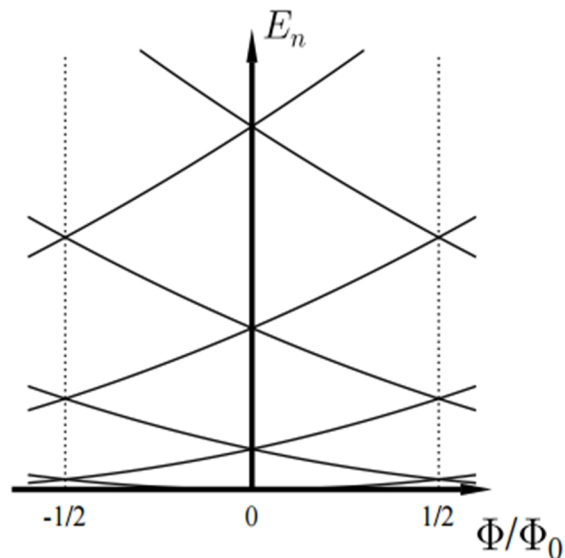


Рис. 4. Залежність потоку від найнижчих енергій однієї частки в кільці, для $-3 \leq n \leq 3$, [2,4].

рівнів. Отриманий струм з великим числом частинок, що переважають останній електрон (на рівні Фермі) та порядку

$$I_p^{ld} \sim ev_F/L, \quad (10)$$

зі швидкістю Фермі v_F .

У неупорядкованих кільцях кінцевої ширини з пружною довжиною вільного шляху $l \ll L$, теоретичне значення навіть для не взаємодіючих електронів набагато складніше отримати. У дифузійному режимі очікується стійкий струм порядку

$$I_p^{diff} \sim ev_F/L \frac{l}{L}, \quad (11)$$

що зменшується в коефіцієнті l/L .

Експериментальне значення постійного струму в дифузійних кільцях [2, 3] набагато більше (принаймні, на порядок), ніж це теоретичне передбачення. Вважається, що розбіжність обумовлена електронною взаємодією, яка була знехтувана при виведенні рівняння (11). Незважаючи на те, що електронна взаємодія, здається, відіграє важливу роль, важливе також і твердження, що взаємодії не можуть впливати на стійкий струм в чистих ротаційно-інваріантних 1d-кільцях [2, 6], а незв'язуючий результат (10) узгоджується з експериментальним для чистого напівпровідникового кільця в балістичному режимі [3].

Це спричинило велику теоретичну активність, пов'язану з комбінованим впливом взаємодій і розладів на підвищення стійких струмів у мезоскопічних кільцях. Незважаючи на те, що різні теоретичні підходи свідчать про збільшення стійкого струму в неупорядкованих зразках внаслідок відштовхування кулонівських взаємодій, кількісне

розуміння експериментів все ще відсутнє.

Висновки і перспективи подальших розробок

У рамках даної роботи було проведено огляд теорії мезоскопічних систем. У мезоскопічному режимі з'являються багато цікавих, іноді несподіваних ефектів за рахунок фазової когерентності електронних хвильових функцій. Деякі з цих ефектів є дуже перспективними для застосування у наноелектронних пристроях або квантових стандартах в метрології.

Найвидатніший приклад, квантовий ефект Холла, вже використовується як стандарт опору. З іншого боку, мезоскопічні системи забезпечують можливість вивчення основних особливостей квантової механіки. Вони також дозволяють вивчати безпосередньо особливості взаємодіючих корельованих квантових систем багатьох тіл. Прикладами є дробовий квантовий ефект Холла та транспортна спектроскопія взаємодіючих електронів у квантових точках.

Перспективи подальших розробок у даному напрямку дослідження ґрунтуються на детальному вивченні мезоскопічних ефектів виходячи зі зростаючої тенденції до виготовлення та дослідження матеріалів, що містять найменші структури та мають низькорозмірні риси, що призводить до мезоскопічного режиму.

Федотов В.В. – старший викладач.

- [1] М.А. Иванов, Динамічні закономірності резонансних квантових систем: автореф. дис. автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук: спец. 01.04.02 (2015).
- [2] С.М. Шевченко, Струмові стани в мезоскопічних нормальних та надпровідних системах: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук: спец. 01.04.02 (2003).
- [3] М.В. Денисенко, А.М. Сатанин, Тезиси докладов Форума молодых ученых ННГУ(Нижний Новгород, 2013). С. 131.
- [4] А.Ф. Клиниких, Ханг Т.Т. Нгуен, П.А. Мелешенко, Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Физика. Математика 2, 241 (2010).
- [5] Ю.А. Гурвич, А.П. Мельников, Л.Н. Шестаков, Вестник Поморского университета, серия «Естественные науки» 1, 92 (2005).
- [6] V.R. Khalilov, Phys. Rev. A 71, 012105(1) (2005).

V.V. Fedotov

Review of Theory of Mesoscopic Systems

*NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", avenue Victory, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
e-mail: innavegera@gmail.com*

In modern conditions, in modern material science the research of systems containing the smallest structures is promising due to demand for them. These systems are based on the mesoscopic regime in which the coherence of the quantum phase leads to a change in the electronic states of quantum devices.

Many modern scholars dealt with the study of mesoscopic physics, they wrote scientific papers on this topic, they include M.A. Ivanov, S.M. Shevchenko and M.V. Denisenko, A.M. Satanin; they approached in detail to the expansion of the concept of the least structures and the mesoscopic regime in general.

The mesoscopic regime is intermediate between the quantum world of microscopic systems (atoms or small molecules) and the classical world of macroscopic systems, such as large fragments of a condensed matter.

As part of this work, the theory of mesoscopic systems was substantiated. The main effects of mesoscopic systems are provided; it is determined that the macroscopic characteristics of the system are significantly fluctuating within the mesoscopic level. The basic indicators of coherence of the quantum phase are determined and the mechanisms of influence are outlined. Six effects of mesoscopic systems with detailed justification are characterized. The theory of mesoscopic systems is based on the following mesoscopic effects: the Aaronov-Bohm effect; integral quantum output effect; fractional quantum Hall effect; Universal fluctuations of conduction; quantization of conductivity of a quantum point contact; direct currents in mesoscopic rings.

Small scales of time and/or length and low temperatures are characteristic for a mesoscopic regime. Under the conditions where the temperature is reduced, the time/length of the coherence of the phase increases, and the mesoscopic regime extends over larger scales of time/length. At Kelvin temperatures, the time and length scales in semiconductor samples are respectively picoseconds and micrometers.

Prospects for further developments in this area of research are based on a detailed study of mesoscopic effects, based on the growing trend for the production and research of materials containing the smallest structures and having low-dimensional features, that leads to the mesoscopic regime.

Keywords: mesoscopic systems, fluctuation, quantum phase, coherence, nanostructured system, macroscopic characteristics.