

Макроскопічне квантове-механічне тунелювання та квантування енергії в електричному ланцюзі

Національний технічний університет

Анотація. Робота присвячена вивченню унікального явища — можливості квантових ефектів у звичайних електричних системах. Дослідження показує, як явища тунелювання та квантування енергії, характерні для мікроскопічного світу, можуть проявлятися в макроскопічних електричних ланцюгах. У роботі розглядаються експерименти з надпровідними матеріалами, проведені за наднизьких температур. За допомогою високочутливого обладнання вдалося зафіксувати переходи між різними енергетичними станами системи, що підтверджує існування макроскопічних квантових ефектів. Отримані результати мають важливе значення для розвитку майбутніх технологій, зокрема — створення квантових комп'ютерів та нових типів електронних пристроїв. Дослідження допомагає краще зрозуміти, де проходить межа між квантовим і класичним світами, та яким чином квантові явища можуть виявляти себе у макроскопічних масштабах.

Ключові слова. Макроскопічне квантове тунелювання; квантування енергії; джозефсонівський перехід; надпровідність; квантова механіка; дискретні енергетичні рівні; SQUID (надпровідний квантовий інформетр); макроскопічні квантові стани; когерентність; декогеренція; квантові переходи; ефект Джозефсона; надпровідні кубіти; квантова електроніка; резонансне тунелювання.

Abstract. The work is devoted to the study of a unique phenomenon - the possibility of quantum effects in conventional electrical systems. The study shows how the phenomena of tunneling and energy quantization, characteristic of the microscopic world, can manifest themselves in macroscopic electrical circuits. The paper examines experiments with superconducting materials conducted at ultralow temperatures. Using highly sensitive equipment, it was possible to record transitions between different energy states of the system, confirming the existence of macroscopic quantum effects. The results obtained are important for the development of future technologies, in particular, the creation of quantum computers and new types of electronic devices. The research helps to better understand where the boundary between the quantum and classical worlds lies, and how quantum phenomena can manifest themselves on macroscopic scales.

Keywords. Macroscopic quantum tunneling, energy quantization, Josephson junction, superconductivity, quantum mechanics, discrete energy levels, SQUID (superconducting quantum information detector), macroscopic quantum states, coherence, decoherence, quantum transitions, Josephson effect, superconducting qubits, quantum electronics, resonant tunneling.

Вступ. / Introductions.

Експерименти другої половини XX століття, за які Джон Кларк, Мішель Деворе та Джон Мартініс були удостоєні Нобелівської премії з фізики 2025 року за відкриття ефектів макроскопічного квантово-механічного тунелювання та квантування енергії в електричному ланцюзі. Дослідники проводили експерименти з електричним контуром, демонструючи значні ефекти квантово-механічного тунелювання та достатньо великі квантовані рівні енергії. Квантова фізика дає змогу частинкам проходити через бар'єри у процесі, званому тунелюванням, тоді як класична фізика передбачає, що такі бар'єри непереборні для частинок. Дослідники створили електричне коло з надпровідників розміром близько 1 сантиметра, в якому вперше спостерігали суто квантові ефекти — тунелювання та квантування енергії — у макроскопічному об'єкті, який можна тримати в руці. Математичний опис макроскопічного квантового стану: $\Psi = \Psi_0 \cdot e(i\varphi)$ де Ψ_0 - амплітуда хвильової функції, φ - квантова фаза, що визначає поведінку системи. Квантування магнітного потоку: $\Phi = n \cdot \left(\frac{h}{2e}\right) = n \cdot \Phi_0$ де n - ціле число, h - стала Планка, e - заряд електрона, $\Phi_0 \approx 2.07 \times 10^{-15}$ Вб - квант магнітного потоку. Раніше подібні явища вважалися можливими лише в мікросвіті окремих частинок. Введіть тут рівняння. Коли у процесі бере участь велика кількість частинок, квантово-механічні ефекти переважно стають незначними. Однак нобелівські лавреати з фізики експериментально показали, що квантово-механічні властивості не втрачаються у макроскопічному масштабі.

Мета роботи. / Aim.

Ця робота показує, як квантові дива виходять за межі атомного світу. Йдеться про те, щоб побачити квантові ефекти у звичайних на вигляд об'єктах - електричних ланцюгах, які можна розглядати неозброєним оком. Коли мільярди частинок починають поводитися як єдине ціле, відкриваються неймовірні можливості. Квантові закони - це не лише про атоми. Вони можуть проявлятися в макроскопічних системах, створюючи основу для майбутніх технологій. Саме цим пояснюється інтерес до явищ тунелювання та квантування енергії в електричних ланцюгах. Дослідження таких явищ - це шлях до створення принципово нових пристроїв. Квантові комп'ютери, надчутливі датчики, системи безпечної зв'язки - все це стає можливим завдяки розумінню макроскопічних квантових ефектів.

Матеріали та методи./Materials and methods.

Експериментальна робота базувалася на використанні надпровідних матеріалів - ніобію та алюмінію, з яких виготовлялися джозефсонівські переходи — спеціальна структура з двох надпровідників, розділених тонким шаром ізолятора, де енергія описується потенціалом $U(\varphi) = -EJ \cdot (\cos\varphi + (\frac{I}{I_c}) \cdot \varphi)$ де $EJ = (\frac{h}{2e}) \cdot Ic$ - енергія джозефсонівського переходу, I_c - критичний струм, I - струм зсуву та SQUID-структури — це надзвичайно чутливий пристрій для вимірювання магнітних полів, що працює на основі надпровідності та квантових ефектів. Для досягнення необхідних умов проводилося охолодження системи в розведеному гелієвому криостаті до температур нижче 50 мК, що забезпечувало придушення теплових флуктуацій та виокремлення квантових ефектів. Вимірювання тунелювання проводилося з використанням прецизійної системи стабілізації струму з відносною похибкою 10^{-8} , що дозволяло подавати контрольований зсувний струм на джозефсонівські переходи. Співвідношення між струмом і напругою в джозефсонівському переході: $I = Ic \cdot \sin\varphi$; $V = (\frac{h}{2e}) \cdot (\frac{d\varphi}{dt})$. Для реєстрації тунельних подій застосовувався низькошумний підсилювач на основі SQUID з чутливістю порядку 10^{-5} $\Phi_0/\sqrt{\text{Гц}}$, що давало змогу фіксувати навіть найслабші квантові переходи. Дослідження квантування енергії вимагало застосування мікрохвильового зондування в діапазоні 5-40 ГГц через надпровідні мікросмужкові резонатори з добротністю $Q > 10^4$. Сигнал поглинання мікрохвильового випромінювання реєструвався при різних значеннях зсувного струму та зовнішнього магнітного поля, що дозволило побудувати детальну спектроскопічну карту енергетичних рівнів системи. Критично важливим аспектом методики було екранування досліджуваної системи від зовнішніх впливів. Використовувався багатошаровий екран із надпровідного матеріалу та м'якого металу для усунення впливу зовнішніх магнітних полів. Також застосовувалися ретельне екранування від електромагнітних перешкод та цифрові фільтри нижніх частот для мінімізації шумів. Калібрування системи включало вимірювання критичного струму джозефсонівських переходів з точністю 0,1% та верифікацію відсутності паразитних контурів за допомогою імпедансної спектроскопії. Кожен експеримент повторювався не менше 100 разів для забезпечення статистичної значущості результатів та підтвердження їх відтворюваності, що було особливо важливим для реєстрації рідкісних тунельних подій.

Результати та обговорення./Results and discussion.

Експериментальні дослідження продемонстрували однозначні свідчення макроскопічного квантового тунелювання через реєстрацію характерних стрибків напруги в джозефсонівських переходах при температурах нижче 50 мК. Спостереження періодичних переходів між двома станами системи з частотою $\Gamma = A \cdot \exp(-B)$, де Γ - ймовірність тунелювання за одиницю часу, A - преекспоненційний фактор, $B = (\frac{2}{h}) \int \sqrt{2m \cdot (U - E)} \cdot dx$ - евклідова дія що експоненційно залежала від прикладеної напруги, підтвердило квантову природу явища. Вимірювання залежності ймовірності тунелювання від температури виявило чіткий перехід від теплово-активованої поведінки до температурно-незалежного квантового режиму. Спектроскопічні дослідження виявили дискретні енергетичні рівні в макроскопічній системі через резонансне поглинання мікрохвильового випромінювання на специфічних частотах. Вимірювання інтерференційної картини в SQUID-інтерферометрах підтвердило квантування магнітного потоку через надпровідне кільце з точністю до кванта потоку $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$. Експериментально було встановлено відповідність між виміряними енергетичними спектрами та теоретичними прогнозами для квантового гармонічного осцилятора з

ангармонічними поправками. Серія контрольних експериментів довела, що спостережувані ефекти не можуть бути пояснені класичними явищами або тепловими флуктуаціями. Високий ступінь відтворюваності результатів при багаторазових вимірах та різних геометріях джозефсонівських переходів підтвердив надійність експериментальних даних. Отримані результати стали прямим доказом можливості існування макроскопічних квантових станів та відкрили нові перспективи для розвитку квантових технологій.

Висновки./Conclusions.

Проведене дослідження макроскопічного квантового тунелювання та квантування енергії в електричному ланцюзі дозволило експериментально підтвердити фундаментальний принцип універсальності квантової механіки. Отримані результати довели, що квантові явища не обмежуються атомними масштабами, а можуть проявлятися в макроскопічних системах за умови досягнення наднизьких температур та використання надпровідних матеріалів. Експериментальне виявлення дискретних енергетичних рівнів у джозефсонівських переходах та спостереження резонансного тунелювання відкривають нові перспективи для розвитку квантових технологій. Практичне значення дослідження полягає у створенні наукових основ для розробки надпровідних кубітів, квантових сенсорів та нових поколінь електронних пристроїв. Продемонстрована можливість контролю та управління макроскопічними квантовими станами створює передумови для подальшого дослідження квантової когерентності в складних системах. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на збільшення часу життя квантових станів, розробку нових матеріалів та архітектур для квантових обчислень, а також дослідження явищ багаточастинкової квантової кореляції в макроскопічних масштабах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Київський національний університет імені Тараса Шевченка [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [\[https://knu.ua/news/13770\]](https://knu.ua/news/13770). (дата звернення: 08.10.2025).
2. Нобелівська премія 2025: відкриття, що змінили світ [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [\[https://itc.ua/ua/articles/nobelivska-premiya-2025-vidkryttya-shho-zminyly-svit/\]](https://itc.ua/ua/articles/nobelivska-premiya-2025-vidkryttya-shho-zminyly-svit/). (дата звернення: 15.10.2025).
3. Вакарчук І.О. Квантова Механіка. – Львів: Національний університет імені Івана Франка, 2012 – 872с.

Каплун Ілля Сергійович

студент БМ-25мс ФБЦЕІ

<mailto:illyujvfn@gmail.com>

Науковий керівник

Мартинюк Володимир Валерійович

кандидат технічних наук

доцент

доцент кафедри машинобудування та транспорту

національний технічний університет

Вінниця, Україна

Kaplun Ilya Sergeevich

FBCEI

Martyniuk Volodymyr Valeriyovych

candidate of technical sciences

associate professor

associate professor of the department of mechanical engineering and transport

national technical university

Vinnitsia, Ukraine