

Оригинальная статья

УДК 538.915; 538.955; 538.945

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14

МАГНИТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВОДНИКОВ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

© 2025 г. И. П. Попов

Курганский государственный университет (Россия, 640020, Курган, ул. Советская, 63/4)

Аннотация. Проведена проверка правомерности приписывания кванта момента импульса \hbar любой многочастичной квантовой системе, в том числе куперовской паре электронов. Последние образуются в проводниках с малой длиной свободного пробега электронов и не образуются в проводниках с большой длиной свободного пробега электронов. Куперовскую пару электронов получают в результате парной корреляции, обусловленной электрон-фононным притяжением между электронами, превышающим кулоновское отталкивание (фононы возникают при колебаниях кристаллической решетки). Наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar произошло исключительно при определении кванта магнитного потока. Если электронов будет не один, а два (коррелированных куперовских или некоррелированных), учитывая, что магнитный поток величина аддитивная, то суммарный поток будет в четыре раза больше, чем принято считать. Микроскопическая теория сверхпроводимости БКШ (теория Бардина – Купера – Шриффера) удовлетворяет только парными корреляциями электронов, однако, нет никаких противопоказаний для возникновения многочастичных корреляций. При этом квант магнитного потока будет неограниченно уменьшаться. Момент импульса – величина аддитивная. Это значит, что квант момента импульса \hbar , приписанный многочастичной квантовой системе, должен делиться между частицами системы. Поэтому каждая частица будет обладать меньшим моментом импульса, чем квант, что неприемлемо. Наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar является неправомерным. Квант момента импульса \hbar может приписываться только одной квантовой частице, и не может учитываться для квантовой совокупности частиц. Квантом магнитного потока является исключительно квант Ф. Лондона.

Ключевые слова: квант момента импульса, куперовская пара, корреляция, фонон, квант магнитного потока

Для цитирования: Попов И.П. Магнитные особенности проводников с различной проводимостью. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2025;1(51):9–14.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-9-14](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14)

Original article

MAGNETIC FEATURES OF CONDUCTORS WITH DIFFERENT CONDUCTIVITY

© 2025 I. P. Popov

Kurgan State University (63/4 Sovetskaja Str., Kurgan, 640020, Russian Federation)

Abstract. The validity of attributing a quantum of angular momentum to any multiparticle quantum system, including a Cooper pair of electrons, has been verified. The latter are formed in conductors with a short free path of electrons and are not formed in conductors with a long free path of electrons (to clarify the wording – avoid repetitions). A Cooper pair of electrons is obtained as a result of pair correlation due to electron-phonon attraction between electrons exceeding Coulomb repulsion (phonons arise when the crystal lattice vibrates). The assignment of the Cooper pair of electrons to the quantum of angular momentum \hbar occurred exclusively when determining the quantum of the magnetic flux. If there are not one, but two electrons (correlated Cooper or uncorrelated), and given that the magnetic flux is additive, the total flux will be four times greater than is commonly assumed.

Microscopic Theory of BCS Superconductivity (Bardeen theory – Cooper–Schrieffer) satisfies only paired correlations of electrons, however, there are no contraindications for the occurrence of multiparticle correlations. In this case, the quantum of the magnetic flux will decrease indefinitely. The angular momentum is an additive quantity. This means that the angular momentum quantum l , attributed to a multiparticle quantum system, must be shared between the particles of the system. Therefore, each particle will have a moment of momentum less than a quantum, which is unacceptable. Endowing a Cooper pair of electrons with a quantum of angular momentum l is illegal. The angular momentum quantum l can be attributed to only one quantum particle, and cannot be attributed to a quantum set of particles. The quantum of the magnetic flux is exclusively the quantum of F. London.

Keywords: angular momentum quantum, Cooper pair, correlation, phonon, magnetic flux quantum

For citation: Popov I.P. Magnetic features of conductors with different conductivity. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):9–14. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-9-14](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14)

Введение

Куперовская пара электронов [1 – 4] образуется в результате парной корреляции, обусловленной электрон-фононным притяжением между электронами [5 – 7], превышающим кулоновское отталкивание (фононы возникают при колебаниях кристаллической решетки [8]).

Наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar произошло исключительно при определении кванта магнитного потока [9]. В результате квант магнитного потока, образованный двумя электронами, вдвое меньше кванта, созданного одним электроном (квантом Φ . Лондона). Это противоречит аддитивности магнитного потока [10].

Целью настоящей работы является проверка правомерности приписывания кванта момента импульса \hbar любой многочастичной квантовой системе, в том числе куперовской паре электронов.

Используется теоретический метод исследования, основанный на квантово-механическом и полуклассическом рассмотрении [11; 12].

Приоритет куперовских пар над некоррелированными электронами

Куперовские пары электронов образуются в проводниках с малой длиной свободного пробега электронов и не образуются в проводниках с большой длиной свободного пробега электронов [13 – 15]. Экспериментально зафиксирован минимальный магнитный поток, созданный одной парой электронов (куперовской) в проводнике с малой длиной свободного пробега электронов. Это означает, что нет принципиальных препятствий для регистрации минимального магнитного потока, созданного единственным электроном в проводнике с большой длиной свободного пробега (особенно с учетом того, что поток вдвое больше) [16 – 18]. Приоритета куперовских пар над некоррелированными (единичными) электронами не существует. Поток от одного электрона зарегистриро-

вать не сложнее, чем поток от двух (в соответствии с существующей парадигмой он в два раза больше).

Квант магнитного потока с большой длиной свободного пробега электронов

Энергия единичного некоррелированного электрона в проводнике с большой длиной свободного пробега

$$E = \frac{I\Phi}{2}, \quad (1)$$

где I – ток, созданный движением этого электрона; Φ – магнитный поток, образованный током I .

Ток от единственного электрона определяется по следующей формуле:

$$I = \frac{e}{T}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; $T = \frac{2\pi R}{v}$ – период обра-

щения электрона в кольцевом проводнике; R – радиус кольца; v – скорость электрона.

С другой стороны, энергию электрона можно определить по следующему уравнению:

$$E = \frac{m_e v^2}{2}, \quad (3)$$

где m_e – масса электрона.

Учитывая формулы (1) – (3), получаем

$$\Phi = \frac{2\pi R m_e v}{e} = \frac{2\pi R p}{e}, \quad (4)$$

где p – импульс электрона.

Поскольку электрон один (неспаренный), то не возникает никаких разночтений при наделении его квантом момента импульса \hbar :

$$m_e v R = p R = \hbar, \quad (5)$$

отсюда получаем выражение для определения кванта магнитного потока Φ . Лондона:

$$\Phi_L = \frac{2\pi\hbar}{e} = \frac{h}{e}. \quad (6)$$

где h – постоянная Планка.

Магнитный поток двух электронов

Если электронов будет не один, а два (коррелированных куперовских или некоррелированных), учитывая, что магнитный поток является аддитивной величиной, то в соответствии с уравнением (6) суммарный поток равен

$$\Phi_2 = 2\Phi_L = \frac{2h}{e}. \quad (7)$$

Это в четыре раза больше, чем принято считать.

Для того, чтобы он стал равен величине, которую принято считать квантом магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \quad (8)$$

следует складывать обратные величины:

$$\frac{1}{\Phi} = \frac{1}{\Phi_L} + \frac{1}{\Phi_L} = \frac{2}{\Phi_L} = \frac{2e}{h}. \quad (9)$$

Многочастичные корреляции

Микроскопическая теория сверхпроводимости БКШ (теория Бардина – Купера – Шриффера) реализуется только парными корреляциями электронов [19; 20]. В то же время нет никаких противопоказаний для возникновения многочастичных корреляций.

При этом квант магнитного потока будет неограниченно уменьшаться:

$$\Phi_0 = \frac{h}{ne}, \quad (10)$$

где n – кратность корреляции.

Квант магнитного потока с малой длиной свободного пробега электронов

Пусть имеет место квант магнитного потока (8).

В силу аддитивности магнитного потока при двухчастичной корреляции электронов в проводнике с малой длиной свободного пробега электронов магнитный поток, созданный одним электроном, равен

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \frac{h}{2e} = \frac{h}{4e}. \quad (11)$$

При многочастичной корреляции

$$\Phi_0 = \frac{1}{n} \frac{h}{ne} = \frac{h}{n^2 e}. \quad (12)$$

Электрон (магнитный поток) так же неисчерпаем, как атом.

Эталонная верификация наделения куперовской пары квантом момента импульса \hbar

Мотив приписывания куперовской паре электронов кванта момента импульса \hbar состоит в том, что пары электронов образуют квантовую систему (пара электронов атома гелия (эталон), вместо фононов «посредником» является кулоновское притяжение ядра).

Поэтому также, как и куперовской паре, спаренным электронам гелия следует применять квант момента импульса

$$2m_e v r_{\text{He}} = \hbar. \quad (13)$$

Баланс сил, действующих на любой электрон гелия

$$\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_{\text{He}})^2} = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}; \quad (14)$$

$$1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}, \quad (15)$$

где ϵ_0 – постоянная электрическая.

Из уравнения (13) следует, что

$$4m_e^2 v^2 r_{\text{He}}^2 = \hbar^2, \\ r_{\text{He}}^3 = \frac{\hbar^2}{4m_e^2 v^2},$$

подставив в формулу (15), получим

$$1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{4m_e^2 v^2}{\hbar^2} = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}; \\ r_{\text{He}} = \frac{m_e v^2 4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{1,75 e^2 4m_e^2 v^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{1,75 e^2 4m_e} = \frac{a_0}{7}.$$

В численном значении

$$r_{\text{He}} = \frac{a_0}{7} = \frac{5,2917721092 \cdot 10^{-11}}{7} \approx 7,56 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Это почти в четыре раза меньше установленного радиуса гелия.

Легко убедиться, что при использовании вместо уравнения (13) формулу (5) получим практически табличное значение. Использование выражения (6) для определения величины \hbar многочастичной квантовой системы является неправомерным. Во избежание противоречий его нельзя приписывать и другим многочастичным квантовым системам (в том числе куперовской паре).

Выводы

Квант момента импульса \hbar , применяемый для многочастичной квантовой системы, должен делиться между частицами системы. Поэтому каждая частица будет обладать моментом импульса меньше кванта, что неприемлемо. Таким образом, наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar является неправомерным.

Квант момента импульса \hbar можно применять только для одной квантовой частицы, и не может приписываться квантовой совокупности частиц. Подтверждением этого является атом гелия. Квантом магнитного потока является исключительно квант Φ Лондона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Seeger R.L., Forestier G., Gladii O., Leiviskä M., Auffret S., Joumard I., Rubio-Roy M., Baltz V., Gomez C., Buzdin A.I., Houzet M. Penetration depth of cooper pairs in the irnm antiferromagnet. *Physical Review B*. 2021;104:054413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.054413>
- Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research*. 2024;6:L022009. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.6.1022009>
- Chan A.K., Cubukcu M., Montiel X., Komori S., Vanstone A., Thompson J.E., Perkins G.K., Kinane C.J., Caruana A.J., Boldrin D., Blamire M., Robinson J., Eschrig M., Kurebayashi H., Cohen L.F. Controlling spin pumping into superconducting nb by proximity-induced spin-triplet cooper pairs. *Communications Physics*. 2023;6:287. <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01384-w>
- Furukawa T., Miyagawa K., Matsumoto M., Sasaki T., Kanoda K. Microscopic evidence for preformed cooper pairs in pressure-tuned organic superconductors near the MOTT transition. *Physical Review Research*. 2023;5:023165. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.023165>
- Ishida K., Matsueda H. Two-step dynamics of photoinduced phonon entanglement generation between remote electron-phonon systems. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2021;90:104714. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.104714>
- Liu Y., Han Ya., Yu Ju., Zhang H., Yin Q., Lei H., Hu J., Zhang D. Visualizing electron-phonon and anharmonic phonon-phonon coupling in the kagome ferrimagnet GDMN6SN6. *Applied Physics Letters*. 2023;122. <https://doi.org/10.1063/5.0152116>
- Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon-phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ -phase TAN. *Chinese Physics B*. 2023;32:046502. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/acb201>
- Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Исследование параметров кристаллической решетки, фазового состава и структуры сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;1:63–68.
- Жерновой А.И. Квантование магнитного потока, создаваемого наночастицей магнетита. *Научное приборостроение*. 2018;2:45–48.
- Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge. *Tech. Phys.* 2024;69:2397–2405. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700415>
- Попов И.П. Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам. *Вестник Удмуртского университета. Физика и химия*. 2014;3:51–54.
- Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Tech. Phys.* 2024;69:2406–2408. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700427>
- Сивухин Д.В. *Атомная и ядерная физика*. Москва: Физматлит. 2002:784.
- Шляров В.В., Загуляев Д.В., Аксенова К.В. Изменение механических характеристик технического чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;2:10–16.
- Лосев Г.Л., Ельищев В.А. Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов. *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020;4:63–68. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-63-68>
- Azar M.El., Bouhlal A., Jellal A. Boosting energy levels in graphene magnetic quantum dots through magnetic flux and inhomogeneous gap. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;685:416005. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416005>

17. Azar M.El., Bouhlal A., Alhaidari A.D., Jellal A. Effect of magnetic flux on scattering in a graphene magnetic quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;675:415610. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415610>
 18. Bryon Ja., Weiss D.K., You X., Sussman S., Croot X., Huang Z., Koch J., Houck A.A. Time-dependent magnetic flux in devices for circuit quantum electrodynamics. *Physical Review Applied*. 2023;19:034031. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.19.034031>
 19. Павлов В.Д. Расчетный минимальный радиус позитрония. *Инженерная физика*. 2024;2:24–29. <https://doi.org/10.25791/in-fizik.2.2024.1385>
 20. Павлов В.Д. О корректности размера позитрония. *Вестник Томского государственного университета. Химия*. 2024; 33:24–32. <https://doi.org/10.17223/24135542/33/2>
- REFERENCES**
1. Seeger R.L., Forestier G., Gladii O., Leiviskä M., Auffret S., Joumard I., Rubio-Roy M., Baltz V., Gomez C., Buzdin A.I., Houzet M. Penetration depth of cooper pairs in the irnm antiferromagnet. *Physical Review B*. 2021;104:054413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.054413>
 2. Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research*. 2024;6:L022009. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.6.l022009>
 3. Chan A.K., Cubukcu M., Montiel X., Komori S., Vanstone A., Thompson J.E., Perkins G.K., Kinane C.J., Caruana A.J., Boldrin D., Blamire M., Robinson J., Eschrig M., Kurebayashi H., Cohen L.F. Controlling spin pumping into superconducting nb by proximity-induced spin-triplet cooper pairs. *Communications Physics*. 2023;6:287. <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01384-w>
 4. Furukawa T., Miyagawa K., Matsumoto M., Sasaki T., Kanoda K. Microscopic evidence for preformed cooper pairs in pressure-tuned organic superconductors near the MOTT transition. *Physical Review Research*. 2023;5:023165. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.023165>
 5. Ishida K., Matsueda H. Two-step dynamics of photoinduced phonon entanglement generation between remote electron-phonon systems. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2021;90:104714. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.104714>
 6. Liu Y., Han Ya., Yu Ju., Zhang H., Yin Q., Lei H., Hu J., Zhang D. Visualizing electron-phonon and anharmonic phonon-phonon coupling in the kagome ferrimagnet GDMN6SN6. *Applied Physics Letters*. 2023;122. <https://doi.org/10.1063/5.0152116>
 7. Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon–phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ -phase TAN. *Chinese Physics B*. 2023;32:046502. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/acb201>
 8. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Study of the crystal lattice parameters, phase composition and structure of the AK5M2 alloy after surface modification with titanium and subsequent irradiation with an electron beam. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;1:63–68. (In Russ.).
 9. Zhernovoi A.I. Quantization of magnetic flux created by a magnetite nanoparticle. *Scientific instrumentation*. 2018;2:45–48. (In Russ.).
 10. Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge. *Tech. Phys*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700415>
 11. Popov I.P. Reduction of Planck's constant to classical fundamental constants. *Bulletin of Udmurt University. Physics and chemistry*. 2014; 3: 51–54. (In Russ.).
 12. Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Tech. Phys*. 2024;69:2406–2408. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700427>
 13. Sivukhin D.V. *Atomic and nuclear physics*. Moscow: Fizmatlit. 2002:784. (In Russ.).
 14. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Aksenova K.V. Changes in the mechanical characteristics of commercially pure aluminum under exposure to a magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;2:10–16. (In Russ.).
 15. Losev G.L., Eltishchev V.A. Electromagnetic measurements of level and conductivity of non-ferrous metals. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2020;4:63–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-63-68>
 16. Azar M.El., Bouhlal A., Jellal A. Boosting energy levels in graphene magnetic quantum dots through magnetic flux and inhomogeneous gap. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;685:416005. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416005>
 17. Azar M.El., Bouhlal A., Alhaidari A.D., Jellal A. Effect of magnetic flux on scattering in a graphene magnetic quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;675:415610. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415610>
 18. Bryon Ja., Weiss D.K., You X., Sussman S., Croot X., Huang Z., Koch J., Houck A.A. Time-dependent magnetic flux in devices for circuit quantum electrodynamics. *Physical Review Applied*. 2023;19:034031.

<https://doi.org/10.1103/physrevapplied.19.034031>

19. Pavlov V.D. Estimated minimum radius of positronium. *Engineering physics*. 2024;2: 24–29. (In Russ.).

https://doi.org/10.25791/infi_zik.2.2024.1385

20. Pavlov V.D. On the correct size of positronium. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*. 2024;33:24–32. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17223/24135542/33/2>

Сведения об авторе:

Игорь Павлович Попов, к.т.н., доцент кафедры теоретической, экспериментальной физики и компьютерных методов физики, Курганский государственный университет

E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

ORCID: 0000-0001-8683-0387

SPIN-код: 9668-2780

Information about the author:

Igor' P. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical, Experimental Physics and Computer Methods of Physics, Kurgan State University

E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

ORCID: 0000-0001-8683-0387

SPIN-код: 9668-2780

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 25.06.2024

После доработки 06.11.2024

Принята к публикации 07.11.2024

Received 25.06.2024

Revised 06.11.2024

Accepted 07.11.2024