

РАЗМЕР АТОМА ГЕЛИЯ В КОНТЕКСТЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Отмечено, что электроны атома гелия образуют квантовую систему подобно куперовской паре электронов в сверхпроводниках. Квантовые системы характеризуются тем, что квантом момента импульса \hbar наделялся не каждая их частица, а вся квантовая система целиком. При этом показано, что существующее расчетное значение радиуса атома гелия связано с тем, что каждый из его двух электронов наделялся квантом момента импульса \hbar . Необходимость исключения указанных двойных стандартов при определении момента импульса квантовых систем приводит к тому, что квантом момента импульса \hbar следует наделять не каждый электрон атома гелия, а их квантовую совокупность. Следствием этого является корректировка значения радиуса атома гелия, который оказался практически в четыре раза меньше табличного значения.

Ключевые слова: гелий, квантовая система, квант момента импульса, радиус атома, диффузия.

THE SIZE OF THE HELIUM ATOM IN THE CONTEXT OF QUANTUM SYSTEMS

Abstract. It is noted that the electrons of the helium atom form a quantum system similar to the Cooper pair of electrons in superconductors. Quantum systems are characterized by the fact that the quantum of angular momentum \hbar was not assigned to each of their particles, but to the entire quantum system as a whole. It is shown that the existing calculated value of the radius of the helium atom is due to the fact that each of its two electrons was assigned a quantum of angular momentum \hbar . The need to exclude the specified double standards when determining the angular momentum of quantum systems leads to the fact that the quantum of angular momentum \hbar should be assigned not to each electron of the helium atom, but to their quantum set. The consequence of this is the correction of the value of the radius of the helium atom, which turned out to be almost four times smaller than the tabulated value, which is essential for its permeability through membranes.

Keywords: helium, quantum system, quantum of angular momentum, atomic radius, diffusion.

Введение

Размер атома гелия имеет существенное значение [1, 2], в частности, для мембранных технологий.

Электроны атома гелия образуют квантовую систему подобно куперовской паре электронов в сверхпроводниках [3-6] или паре электрон-позитрон в атоме позитрония [7, 8]. Вместо фононов, связывающих электроны куперовской пары [9, 10], «посредником» у электронов атома гелия является кулоновское притяжение ядра. Другими словами, квантовая система электронов атома гелия ничем не «хуже» куперовской пары.

Квантовые системы, в частности, куперовская пара электронов и пара электрон-позитрон характеризуются тем, что квантом момента импульса \hbar (без учета спина [11]) наделялся не каждая ее частица, а вся квантовая система целиком (строго говоря, \hbar – не сам момент импульса, а его проекция на направление магнитного поля; далее имеется в виду именно это), т.е.

$$2m_e v r = \hbar. \quad (1)$$

Здесь m_e – масса электрона (и позитрона), v – его скорость, r – радиус движения.

Далее будет показано, что существующее расчетное значение радиуса атома гелия связано с тем, что *каждый* из его двух электронов наделялся квантом момента импульса \hbar (без учета спина). Соответственно, момент импульса пары электронов гелия равен

$$2m_e v r = 2\hbar. \quad (2)$$

Налицо двойные стандарты при наделении квантовых систем моментом импульса [12].

А поскольку двойные стандарты неприемлемы [13], на электроны атома гелия следует обобщить условие (1).

Это, конечно, приведет к корректировке значения радиуса атома, что и является целью настоящей работы.

Далее используется полуклассическое рассмотрение, которое для цели работы является вполне достаточным.

Вычисление радиуса атома гелия с учетом двух квантов момента импульса

Кулоновская сила притяжения любого электрона к ядру равна

$$F_{+-} = \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2}.$$

Здесь e – заряд электрона [14, 15], ϵ_0 – постоянная электрическая, r_{He} – радиус атома гелия.

За счет кулоновского отталкивания электронов наиболее *вероятно* (с оглядкой на квантовую механику), что они диаметрально противоположны друг другу относительно ядра. При этом сила отталкивания электронов друг от друга равна

$$F_{--} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_{\text{He}})^2}.$$

Коэффициент «2» в знаменателе обусловлен тем, что расстояние между электронами вдвое больше радиуса атома.

Центробежная сила равна

$$F_v = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}.$$

Баланс сил, действующих на любой электрон,

$$\begin{aligned} F_{+-} - F_{--} &= F_v, \\ \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_{\text{He}})^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}, \\ 1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из (2) следует

$$r_{\text{He}}^2 = \frac{\hbar^2}{m_e^2 v^2}.$$

Подстановка в (3)

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

Здесь

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} \quad (4)$$

– боровский радиус атома водорода.

В численном значении

$$r_{\text{He}} = \frac{4}{7} a_0 = \frac{4}{7} 5,2917721092 \cdot 10^{-11} \approx$$

$$\approx 30,24 \cdot 10^{-12}(\text{м}) .$$

Почти совпадает с табличным значением $31 \cdot 10^{-12}(\text{м})$.

Таким образом, как и было анонсировано выше, радиус атома гелия рассчитывается с учетом того, что *каждый* из его двух электронов наделяется квантом момента импульса \hbar . Другими словами, игнорируется то обстоятельство, что электроны атома гелия образуют квантовую систему.

Вычисление радиуса атома гелия с учетом образования его электронами двухчастичной квантовой системы

Помимо сил кулоновского взаимодействия между электронами действует сила магнитного отталкивания

$$F_{\mu} = \frac{\mu_0 e^2 v^2}{4\pi(2r_{\text{He}})^2} .$$

Здесь μ_0 – постоянная магнитная.

Баланс сил, действующих на любой электрон

$$\begin{aligned} F_{+-} - F_{--} - F_{\mu} &= F_v , \\ \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_{\text{He}})^2} - \frac{\mu_0 e^2 v^2}{4\pi(2r_{\text{He}})^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}} , \\ 1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{\mu_0 e^2 v^2}{4\pi(2r_{\text{He}})^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}} , \\ \frac{7e^2}{16\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{\mu_0 e^2 v^2}{16\pi r_{\text{He}}^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}} , \\ \frac{7e^2/\epsilon_0 - \mu_0 e^2 v^2}{16\pi r_{\text{He}}^2} &= \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}} , \\ r_{\text{He}} &= \frac{7e^2/\epsilon_0 - \mu_0 e^2 v^2}{16\pi m_e v^2} . \end{aligned} \quad (5)$$

Из (1) следует

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

Подстановка в (5)

$$\begin{aligned} r_{\text{He}} &= \frac{7e^2/\epsilon_0 - \mu_0 e^2 \hbar^2 / (4m_e^2 r_{\text{He}}^2)}{16\pi m_e \hbar^2 / (4m_e^2 r_{\text{He}}^2)} , \\ 16\pi m_e \hbar^2 r_{\text{He}} &= \frac{7e^2}{\epsilon_0} 4m_e^2 r_{\text{He}}^2 - \mu_0 e^2 \hbar^2 , \\ r_{\text{He}}^2 - 16\pi m_e \hbar^2 \frac{\epsilon_0}{28e^2 m_e^2} r_{\text{He}} - \mu_0 e^2 \hbar^2 \frac{\epsilon_0}{28e^2 m_e^2} &= 0 , \\ r_{\text{He}}^2 - \frac{16\pi \hbar^2 \epsilon_0}{28e^2 m_e} r_{\text{He}} - \frac{\epsilon_0 \mu_0 \hbar^2}{28m_e^2} &= 0 . \end{aligned}$$

С учетом (4)

$$\begin{aligned} r_{\text{He}}^2 - \frac{1}{7} a_0 r_{\text{He}} - \frac{\hbar^2}{28m_e^2 c^2} &= 0 , \\ r_{1,2} &= \frac{1}{14} a_0 \pm \sqrt{\frac{1}{196} a_0^2 + \frac{\hbar^2}{28m_e^2 c^2}} . \end{aligned} \quad (6)$$

Постоянная тонкой структуры равна

$$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}.$$

Масса электрона равна

$$m_e = \frac{e^2 \mu_0}{4\pi a_0 \alpha^2} = \frac{e^2 \mu_0}{4\pi a_0 \alpha} \frac{2h}{\mu_0 c e^2} = \frac{\hbar}{c a_0 \alpha}.$$

Возвращаясь к (6),

$$\begin{aligned} r_{1,2} &= \frac{1}{14} a_0 \pm \sqrt{\frac{1}{196} a_0^2 + \frac{\hbar^2}{28c^2} \frac{c^2 a_0^2 \alpha^2}{\hbar^2}} = \\ &= \frac{1}{14} a_0 \pm a_0 \sqrt{\frac{1}{196} + \frac{\alpha^2}{28}}. \end{aligned}$$

Минимальное значение очевидным образом не подходит. Поэтому

$$r_{1,2} = \frac{1 + \sqrt{1 + 7\alpha^2}}{14} a_0.$$

В численном значении

$$\begin{aligned} r_{1,2} &= \frac{1 + \sqrt{1 + 7 \cdot 7,297\,352\,5643^2 \cdot 10^{-6}}}{14} \times \\ &\quad \times 5,2917721092 \cdot 10^{-11} = \\ &= 7,5603788612 \cdot 10^{-12} (\text{м}). \end{aligned}$$

Это практически в четыре раза меньше табличного значения.

Заключение

Необходимость исключения двойных стандартов при определении момента импульса квантовых систем приводит к тому, что квантом момента импульса \hbar наделяется не каждый электрон атома гелия, а их квантовая совокупность. Следствием этого является корректировка значения радиуса атома гелия, который оказался практически в четыре раза меньше табличного значения.

Это обстоятельство имеет существенное значение для мембранных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашковский В.В., Семенов Р.М., Лопатин М.Н. Применение системного подхода для разработки методов прогноза землетрясений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 95-102.
2. Лопатин М.Н., Семенов Р.М. Подземные воды южного прибайкалья – источник информации для прогноза землетрясений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 187-192.
3. Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs // Physical Review Research. 2024. No. 6. pp. L022009. DOI: 10.1103/physrevresearch.6.l022009
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. Vol. 5. pp. 023165. DOI: 10.1103/physrevresearch.5.023165
5. Павлов В.Д. О моменте импульса куперовской пары электронов и кванте магнитного потока // Прикладная физика и математика. 2024. № 4. С. 12-16. DOI: 10.25791/pfi m.04.2024.1301
6. Pavlov V. D. On the electronic quantum structures of conductors // Physics of Complex Systems. 2025. Vol. 6, No. 1. pp. 49–53. DOI: 10.33910/2687-153X-2025-6-1-49-53

7. Попов И.П. Вычисление размера позитрония // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2024. № 3. С. 75–85. DOI: 10.21685/2072-3040-2024-3-7
8. Попов И.П. Об одной гипотезе Д.И. Менделеева // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2023. № 32. С. 75–86. DOI: 10.17223/24135542/32/6
9. 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. No. 90. pp. 104714. DOI: 10.7566/JPSJ.90.104714
10. Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon–phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ -phase TAN // Chinese Physics B. 2023. No. 32. pp. 046502. DOI: 10.1088/1674-1056/acb201
11. Павлов В.Д. Квант магнитного потока, созданный спином электрона // Прикладная физика и математика. 2025. № 3. С. 17–19. DOI: 10.25791/pfim.03.2025.1333
12. Попов И.П. Двойные стандарты при описании атомов гелия и позитрония // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2024. № 35. С. 143–151. DOI: 10.17223/24135542/35/11
13. Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics // Technical Physics. 2024. Vol. 69. No. 8. pp. 2406–2408. DOI: 10.1134/S1063784224700427
14. Павельчук А.В. Конечно-элементное моделирование электронно-индуцированной зарядки сегнетоэлектриков с использованием инструментария COMSOL MULTIPHYSICS // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 132–137.
15. Штайгер М.Г., Иванчик Н.Н., Лисицын А.И., Карлина А.И. Использование методов сканирующей электронной микроскопии для металлографии рельсовых сталей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 189–196. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).189-196.

REFERENCES

1. Kashkovskiy V.V., Semenov R.M., Lopatin M.N. Primeneniye sistemnogo podkhoda dlya razrabotki metodov prognoza zemletryaseny [Application of a systems approach to the development of earthquake prediction methods]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, No. 2 (54), pp. 95–102.
2. Lopatin M.N., Semenov R.M. Podzemnyye vody yuzhnogo pribaykal'ya – istochnik informatsii dlya prognoza zemletryaseny [Groundwater of the southern Baikal region – a source of information for earthquake forecasting]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2013, No. 3 (39), pp. 187–192.
3. Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research*, 2024, No. 6, pp. L022009. DOI: 10.1103/physrevresearch.6.L022009
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, Vol. 5, pp. 023165. DOI: 10.1103/physrevresearch.5.023165
5. Pavlov V.D. O momente impul'sa kuperovskoy pary elektronov i kvante magnitnogo potoka [On the angular momentum of a Cooper pair of electrons and the quantum of magnetic flux]. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics], 2024, No. 4, pp. 12–16. DOI: 10.25791/pfim.04.2024.1301
6. Pavlov V. D. On the electronic quantum structures of conductors. *Physics of Complex Systems*, 2025, Vol. 6, No. 1, pp. 49–53. DOI: 10.33910/2687-153X-2025-6-1-49-53
7. Popov I. P. Vychisleniye razmera pozitroniya [Calculation of the size of positronium]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskiye nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences], 2024, No. 3, pp. 75–85. DOI: 10.21685/2072-3040-2024-3-7

8. Popov I.P. Ob odnoy gipoteze D.I. Mendeleyeva [On one hypothesis of D.I. Mendeleev]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya* [Bulletin of Tomsk State University. Chemistry], 2023, No. 32, pp. 75-86. DOI: 10.17223/24135542/32/6
9. 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, No. 90, pp. 104714. DOI: 10.7566/JPSJ.90.104714
10. Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon–phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ -phase TAN. *Chinese Physics B*, 2023, No. 32, pp. 046502. DOI: 10.1088/1674-1056/acb201
11. Pavlov V.D Kvant magnitnogo potoka, sozdanny spinom elektrona [Quantum of magnetic flux created by electron spin]. *Prikladnaya fizika i matematika* [Applied Physics and Mathematics], 2025, No. 3, pp. 17-19. DOI: 10.25791/pfim.03.2025.1333
12. Popov I.P. Dvoynnye standarty pri opisani atomov geliya i pozitroniya [Double standards in the description of helium and positronium atoms]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya* [Bulletin of Tomsk State University. Chemistry], 2024, No. 35, pp. 143-151. DOI: 10.17223/24135542/35/11
13. Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Technical Physics*, 2024, Vol. 69, No. 8, pp. 2406–2408. DOI: 10.1134/S1063784224700427
14. Pavel'chuk A.V. Konechno-elementnoye modelirovaniye elektronno-indutsirovannoy zaryadki segnetoelektrikov s ispol'zovaniyem instrumentariya COMSOL MULTIPHYSICS [Finite element modeling of electron-induced charging of ferroelectrics using COMSOL MULTIPHYSICS tools]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2016, No. 4 (52), pp. 132-137.
15. Shtayger M.G., Ivanchik N.N., Lisitsyn A.I., Karlina A.I. Ispol'zovaniye metodov skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii dlya metallografii rel'sovykh staley [Using scanning electron microscopy methods for metallography of rail steels]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, No. 4 (56), pp. 189-196. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).189-196.

Информация об авторах

Попов Игорь Павлович - к. т. н., ассистент кафедры теоретической, экспериментальной физики и компьютерных методов физики, Курганский государственный университет, г. Курган, e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Information about the author

Popov Igor Pavlovich, PhD, Assistant, Department of Theoretical, Experimental Physics and Computer Methods of Physics, Kurgan State University, Kurgan, e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru