

Научная статья

УДК 530.145

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-4-37-42

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ЗЕНОНА С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

Камалов Т. Ф.*, Евдокимов Н. В., Камалов Ю. Т.

*Государственный университет просвещения, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, стр. 2,
Российская Федерация*

**Корреспондирующий автор, e-mail: timkamalov@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.08.2024

Принята к публикации 02.09.2024

Аннотация

Цель: описать эксперимент по прямому экспериментальному наблюдению квантового эффекта Зенона.

Процедура и методы. Для исследования необходима модель сканирующего зондового микроскопа (СЗМ).

Результаты. Описанные теоретические оценки исследования дают обнадеживающие результаты получения устойчивых возбуждённых состояний атомов методом прямого измерения их возбуждённых состояний.

Теоретическая и практическая значимость заключается в перспективе получать устойчивые возбуждённые состояния атомов различных элементов.

Ключевые слова. квантовый эффект Зенона, сканирующий зондовый микроскоп

Благодарности: Авторы благодарны профессору В. В. Беляеву за общее руководство и ценные советы, которые повлияли на написание этой работы.

Для цитирования.

Камалов Т. Ф., Евдокимов Н. В., Камалов Ю. Т. Оценка возможности экспериментальной проверки квантового эффекта Зенона с помощью сканирующего зондового микроскопа // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2024. № 4. С. 37-42. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-4-37-42>

Original research article

EXPERIMENTAL TEST OF THE QUANTUM ZENO EFFECT USING AN SCANNING PROBE MICROSCOPE

T. Kamalov, N. Evdokimov, Yu. Kamalov*

*Federal State University of Education, ulitsa Radio 10A build. 2, Moscow 105005,
Russian Federation*

**Corresponding author, e-mail: e-mail: timkamalov@gmail.com*

Received by the editorial office 19.08.2024

Accepted for publication 02.09.2024

Abstract

Aim. To describe an experiment on direct experimental observation of the quantum Zeno effect.

Methodology. The study requires a model of a scanning probe microscope-SPM.

Results. The described theoretical estimates of the study give encouraging results of obtaining stable excited states of atoms by direct measurement of their excited states.

Research implication lies in the prospect of obtaining stable excited states of atoms of various elements.

Keywords. quantum Zeno effect, scanning probe microscope-SPM

Acknowledgments. The authors are grateful to Professor V. V. Belyaev for general guidance and valuable advice that influenced the writing of this work.

For citation.

Kamalov, T. F., Evdokimov, N. V. & Kamalov, Yu. T. (2024). Experimental test of the quantum Zeno effect using an scanning probe microscope. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 4, pp.37-42. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-4-37-42>

Введение

Квантовый эффект Зенона предсказан квантовой механикой и теоретически описан в работах [1–4]. Эффект был экспериментально подтверждён в [5; 6].

В эффекте Зенона вероятность нахождения электрона в атоме в начальном возбуждённом состоянии $|\psi_0\rangle$ уменьшается квадратично со временем в маленьком промежутке времени,

$$S = 1 - \frac{t}{t_z} + o(t^2), \quad (1)$$

где время Зенона t_z определяется разбросом энергий начального состояния ($\hbar = 1$),

$$t_z = [\langle \psi_0 | H | \psi_0 \rangle^2 - \langle \psi_0 | H^2 | \psi_0 \rangle],^{-1/2} \quad (2)$$

где H – оператор Гамильтона.

Из этого следует, что для системы, подвергаемой частым проверкам (или эквивалентным «прерываниям» [6]) каждые τ секунд, вероятность $W(t)$ оставаться в $|\psi_0\rangle$, как ожидается, будет демонстрироваться экспоненциальный распад

$$\lim W(t) \approx \exp(-\gamma t), \gamma(\tau) = \tau^2 / t_z^2 \quad (3)$$

который останавливается при $\tau \rightarrow 0$.

Наблюдение квантового эффекта Зенона не с помощью косвенных измерений, а прямыми измерениями может позволить подтвердить возможность получать устойчивые возбуждённые состояния атомов.

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) известен двух типов. Это сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ). СТМ измеряет эквипотенциальные поверхности взаимодействия между острием зонда и поверхностью образца, что позволяет получить информацию о рельефе поверхности. СТМ может по протекающему туннельному току наблюдать размеры атома с точностью порядка нескольких ангстрем.

Также в некоторых модификациях атомно-силового микроскопа (АСМ) можно измерять силы взаимодействия между зондом и поверхностью в зависимости от расстояния (спектроскопия силового взаимодействия). Это может дать информацию о локальных электронных свойствах, которые могут быть связаны с возбуждёнными состояниями.

Размер возбуждённого атома As

Размер атома (или его радиус) зависит от его энергетического состояния. В возбуждённом состоянии электроны занимают более высокие энергетические уровни, что приводит к увеличению размера атома. Давайте рассмотрим, как оценить размер возбуждённого атома мышьяка (As).

1. Основные понятия

Атомный радиус: Это расстояние от ядра до внешнего электронного облака. В возбуждённом состоянии электроны находятся дальше от ядра, поэтому радиус увеличивается.

Энергетические уровни: В возбуждённом состоянии электроны переходят на орбитали с более высокими главными квантовыми числами (n), что увеличивает атомный радиус.

2. Основное состояние атома As

В основном состоянии электронная конфигурация атома мышьяка:

As: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$.

Внешние электроны находятся на $4s$ и $4p$ орбиталях. Атомный радиус мышьяка в основном состоянии составляет около 120 пм (пикометров).

Возбуждённое состояние атома As

В возбуждённом состоянии один из электронов переходит на более высокий энергетический уровень. Например:

Электрон с $4p$ переходит на $5s$:

As*: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2 5s^1$.

Электрон с $4s$ переходит на $4d$:

As*: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1 4p^3 4d^1$.

В этих состояниях внешние электроны находятся на орбиталях с более высокими главными квантовыми числами ($n=5$ или $n=4d$), что увеличивает размер атома.

Оценка размера возбуждённого атома

Размер атома в возбуждённом состоянии можно оценить с помощью квантовой механики. Радиус орбиты электрона пропорционален квадрату главного квантового числа (n^2):

$$r_n \propto n^2,$$

где r_n — радиус орбиты для уровня n .

Пример:

В основном состоянии внешние электроны находятся на уровне $n=4$.

В возбуждённом состоянии электрон может перейти на уровень $n=5$.

Отношение радиусов:

$$\frac{r_5}{r_4} = \frac{5^2}{4^2} = \frac{25}{16} \approx 1.56$$

Таким образом, радиус атома в возбуждённом состоянии увеличивается примерно в 1,56 раза по сравнению с основным состоянием.

Численная оценка

Если радиус атома As в основном состоянии составляет 120 пм, то в возбуждённом состоянии:

$$r \text{ возбуждённый} \approx 120 \text{ пм} \times 1.56 \approx 187 \text{ пм}.$$

Факторы, влияющие на размер

Экранирование ядра: в многоэлектронных атомах внутренние электроны экранируют заряд ядра, что влияет на радиус внешних электронов.

Релятивистские эффекты

Для тяжёлых элементов (таких как As) релятивистские эффекты могут влиять на размер атома.

Заключение

Размер возбуждённого атома мышьяка увеличивается по сравнению с основным состоянием, так как электроны переходят на более высокие энергетические уровни. Оценка показывает, что радиус может увеличиться примерно в 1,6 раза. Согласно квантовому эффекту Зенона нахождение электрона на возбуждённом состоянии атома должно оставаться стабильным в течении всего времени измерения его состояния с помощью сканирующего туннельного микроскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sokolovski D., Pons M., Kamalov T. Anomalous Zeno effect for sharply localized atomic states // Physical Review A. 2012. Vol. 86. Iss. 2. Article No. 022110. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.022110.
2. Misra B., Sudarshan E. C. G. The Zeno's paradox in quantum theory // Journal of Mathematical Physics. 1977. Vol. 18. Iss. 4. P. 756–763. DOI: 10.1063/1.523304.

3. Home D., Whitaker M. A. B. A Conceptual Analysis of Quantum Zeno; Paradox, Measurement, and Experiment // *Annals of Physics*. 1997. Vol. 258. Iss. 2. P. 237–285. DOI: 10.1006/aphy.1997.5699.
4. Facchi P., Nakazato H., Pascazio S. From the Quantum Zeno to the Inverse Quantum Zeno Effect // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 86. Iss. 13. P. 2699–2703. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.2699.
5. Quantum Zeno effect / W. M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger, D. J. Wineland // *Physical Review A*. 1990. Vol. 41. Iss. 5. P. 2295–2300. DOI: 10.1103/PhysRevA.41.2295.
6. Fischer M. C., Gutierrez-Medina B., Raizen M. G. Observation of the Quantum Zeno and Anti-Zeno Effects in an Unstable System // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 87. Iss. 4. Article No. 040402. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.040402.

REFERENCES

1. Sokolovski, D., Pons, M. & Kamalov, T. (2012). Anomalous Zeno effect for sharply localized atomic states. In: *Physical Review A*, 86 (2), 022110. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.022110.
2. Misra, B. & Sudarshan, E. C. G. (1977). The Zeno's paradox in quantum theory. In: *Journal of Mathematical Physics*, 18 (4), 756–763. DOI: 10.1063/1.523304.
3. Home, D. & Whitaker, M. A. B. (1997). A Conceptual Analysis of Quantum Zeno; Paradox, Measurement, and Experiment. In: *Annals of Physics*, 258 (2), 237–285. DOI: 10.1006/aphy.1997.5699.
4. Facchi, P., Nakazato, H. & Pascazio, S. (2001). From the Quantum Zeno to the Inverse Quantum Zeno Effect. In: *Physical Review Letters*, 86 (13), 2699–2703. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.2699.
5. Itano, W. M., Heinzen, D. J., Bollinger, J. J. & Wineland, D. J. (1990). Quantum Zeno effect. In: *Physical Review A*, 41 (5), 2295–2300. DOI: 10.1103/PhysRevA.41.2295.
6. Fischer, M. C., Gutierrez-Medina, B. & Raizen, M. G. (2001). Observation of the Quantum Zeno and Anti-Zeno Effects in an Unstable System. In: *Physical Review Letters*, 87 (4), 040402. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.040402.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Камалов Тимур Фянович (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной физики и нанотехнологий Государственного университета просвещения;

ORCID: 0000-0002-4349-4747; e-mail: timkamalov@gmail.com;

Евдокимов Николай Валерьевич (г. Москва) – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологий Государственного университета просвещения;

ORCID: 0000-0002-5129-2619; e-mail: nv.evdokimov@gmail.com;

Камалов Юрий Тимурович (г. Москва) – аспирант кафедры фундаментальной физики и нанотехнологий Государственного университета просвещения;

ORCID: 0000-0003-0475-7556; e-mail: kamalov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timur F. Kamalov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;
ORCID: 0000-0002-4349-4747; e-mail: timkamalov@gmail.com;

Nikolay V. Evdokimov (Moscow) – Postgraduate Student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;
ORCID: 0000-0002-5129-2619; e-mail: nv.evdokimov@gmail.com;

Yuriy T. Kamalov (Moscow) – Postgraduate Student, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal University of Education;
ORCID: 0000-0003-0475-7556; e-mail: kamalov@gmail.com.