

УДК 537.533.35:53.072

ПРОСТАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТОРМОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ ГЕЛИЯ ОТ СКОРОСТИ ИОНОВ ВОДОРОДА НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2025 г. Н. Н. Михеев*

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии
и фотоники НИЦ “Курчатовский институт”, Калуга, 248033 Россия*

**e-mail: kmikran@spark-mail.ru*

Поступила в редакцию 26.07.2024 г.

После доработки 29.08.2024 г.

Принята к публикации 29.08.2024 г.

Впервые учтена зависимость вероятности ионизации атомов гелия от скорости пучка ионов водорода низких энергий, когда первый потенциал ионизации атомов мишени превышает потенциал ионизации атомов пучка заряженных частиц. Получены формулы, описывающие зависимости тормозной способности гелия от энергии пучка моноэнергетических протонов и дейтронов. Показано, что их применение позволяет проводить расчеты тормозной способности гелия адекватно имеющимся экспериментальным результатам.

Ключевые слова: направленный пучок моноэнергетических ионов водорода, многократное неупругое рассеяние, тормозная способность вещества.

DOI: 10.31857/S1028096025030012, **EDN:** EKQJFT

ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2] была зарегистрирована нелинейная зависимость тормозной способности S_e газообразного гелия от скорости низкоэнергетических ионов водорода. Она проявляется в более значительном уменьшении энергетических потерь ионного пучка, чем это предсказывает стандартная теория неупругого рассеяния [3–5]. О возможности ее реализации в случае медленных заряженных частиц в материалах, характеризующихся большой энергией связи электронов внешней оболочки атомов, есть упоминание в [6]. Впервые же возрастание прозрачности гелиевой тонкой мишени для протонного пучка низких энергий наблюдалось еще в 50-е гг., и сведения о нем приведены в [7]. Такая аномалия пока не получила однозначного объяснения и аналитического описания в рамках определенной физической модели. Ранее для твердотельных образцов в [8–10] впервые была успешно решена прямая задача описания зависимости тормозной способности вещества от энергии пучка моноэнергетических протонов и α -частиц в широком диапазоне их энергии E_0

от 1.0 кэВ до 100 МэВ. Для твердотельных объектов характерно то, что энергия связи внешнего электрона мишени, как правило, не превышает 13.6–14.0 эВ [11]. Для газообразных мишеней, таких как гелий или неон, эта энергия равна ≈ 24.6 и ≈ 21.6 эВ соответственно. В некоторых из инертных газов наблюдается явление “ступенчатой” ионизации [12, 13]. Все это несколько усложняет простое применение результатов [8, 9] к таким объектам и требует особого рассмотрения, чему и посвящена настоящая работа.

ВЫБОР ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЯВЛЕНИЯ

Нелинейная зависимость тормозной способности S_e атомов газообразного гелия от скорости низкоэнергетических ионов водорода может быть следствием как возможного уменьшения зарядового состояния низкоэнергетического пучка ионов водорода, так и уменьшения вероятности ионизации атомов гелия ионами водорода. Последнее будет происходить в условиях, когда

энергия связи электронов гелия превышает энергию связи электрона в водороде, а скорость ионов пучка становится меньше скорости электронов мишени.

Применение результатов [8] к газообразной мишени в виде молекулярного водорода, энергия возбуждения метастабильных состояний которого ≈ 9.46 эВ, дает хорошее соответствие между расчетом и экспериментальными данными [14–21] (рис. 1). И это указывает на то, что зарядовое состояние протонного пучка $z = 1$ и не меняется при низких энергиях частиц. Поэтому главный фактор, определяющий нелинейность зависимости S_e гелия от скорости пучка ионов водорода, очевидно, связан с различием значений энергии связи электронов гелиевой мишени и ионов водорода. Ионы водорода H^+ представляют для электронов гелия потенциальную яму со средней потенциальной энергией $\langle U \rangle \approx 27.2$ эВ, тогда как реальная средняя потенциальная энергия $\langle U \rangle$ электронов мишени ≈ 49.2 эВ, т.е. существенно больше.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ

Чтобы учесть влияние этого различия на вероятность ионизации ψ атомов мишени пучком моноэнергетических ионов, были использованы результаты [9], а именно формула, описывающая зависимость вероятности неупругого рассеяния пучка α -частиц от отношения скорости V_0 первичных частиц пучка к минимальной скорости V_{li} электронов мишени. Запишем для протонов (единичный нуклон) следующее выражение ψ :

$$\psi = [1 - \exp(-\beta V_0/V_{li})]^2, \text{ где} \quad (1)$$

$$\beta = 2.25 + 3.75 \exp[-(V_0/V_{li} - 0.7)^2/0.0325],$$

$$\text{при } (V_0/V_{li}) \leq 0.7, \quad (2)$$

$$\beta = 6.0, \text{ при } (V_0/V_{li}) > 0.7.$$

Итоговый результат расчета S_e с использованием формул (1) и (2) приведен на рис. 2. Для дейтрона, ядро которого состоит из двух нуклонов, величина параметра β несколько иная:

$$\beta = 1.0 + 5.0 \exp[-(V_0/V_{li} - 0.6)^2/0.0417],$$

$$\text{при } (V_0/V_{li}) \leq 0.6, \quad (3)$$

$$\text{и } \beta = 6.0 \text{ при } (V_0/V_{li}) > 0.6.$$

Возрастание числа нуклонов в ионе водорода сопровождается увеличением радиуса ядра изотопа, что уменьшает примерно в два раза константу в параметре β для дейтронов и сдвигает максимум распределения гауссова вида в сторону меньших значений отношения (V_0/V_{li}) . Это приводит к большей прозрачности гелия для пучка дейтронов, чем для протонов, при одинаковой скорости потоков одинаково заряженных частиц. Подробная качественная интерпретация наблюдаемой зависимости вероятности ионизации гелия от количества нуклонов в ядре изотопов водорода планируется в последующей публикации. Применение формул (1) и (3) позволяет проводить расчеты S_e адекватно имеющимся экспериментальным результатам для моноэнергетического пучка дейтронов (рис. 3).

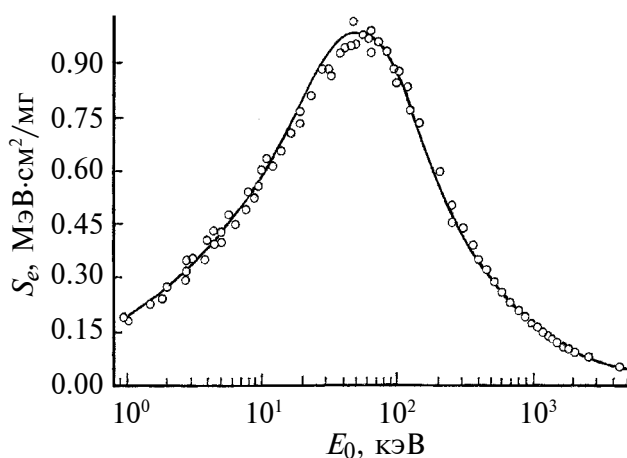


Рис. 1. Тормозная способность S_e молекулярного водорода для пучка моноэнергетических протонов: сплошная кривая — расчет по формулам [9]; точки — измерения S_e [14–20].

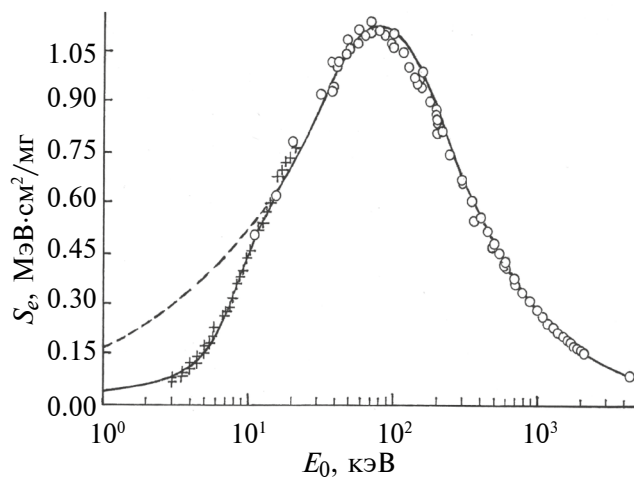


Рис. 2. Тормозная способность S_e гелия для пучка протонов: сплошная кривая — расчет по формулам (1) и (2); штриховая кривая — расчет по формулам [9]; крестики — данные [1]; кружки — данные [21].

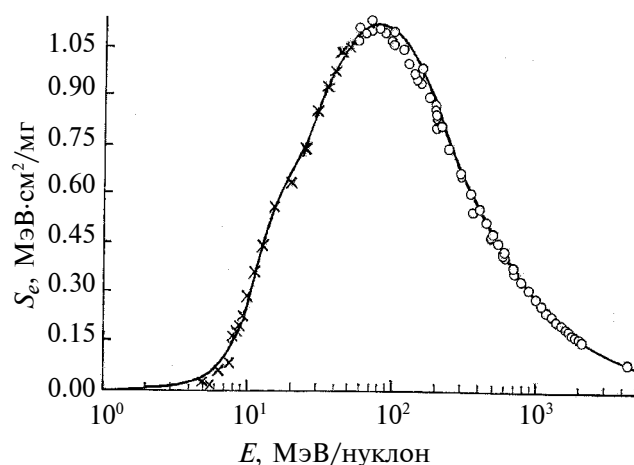


Рис. 3. Тормозная способность S_e гелия для пучка дейтронов: сплошная кривая – расчет по формулам (1) и (2); крестики – данные [2]; кружки – данные [21].

ВЫВОДЫ

Установлено, что наблюдаемая нелинейность зависимости тормозной способности гелия от скорости пучка низкоэнергетических ионов водорода связана с уменьшением вероятности ионизации атомов мишени в условиях, когда энергия связи электронов гелиевой мишени превышает энергию связи электрона атома водорода. Предложены формулы, позволяющие описывать зависимость вероятности ионизации атомов гелия ионами водорода от отношения скорости пучка протонов к скорости слабосвязанного электрона гелия, и проведена их апробация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Golser R., Semrad D. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 1831. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.66.1831>
2. Raiola F., Gyirky G., Aliotta M. et al. // Eur. Phys. J. A. 2001. V. 10. P. 487. <https://doi.org/10.1007/s100500170107>
3. Фурсов О.Б. // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. Вып. 11. С. 1517. http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_009_05_1076.pdf
4. Lindhard J., Winther A. // Kgl. danske vid. selskab. Mat.-fys. Medd. 1964. B. 34. № 4. S. 23.
5. ICRU Report 49. Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. International Commission on Radiation Units and Measurements. 1993.
6. Fermi E., Teller E. // Phys. Rev. 1947. V. 72. P. 399. <https://doi.org/10.1103/physrev.72.399>
7. Stier P.M., Barnett C.F. // Phys. rev. 1956. v. 103. Iss. 4. p. 896. <https://doi.org/10.1103/physrev.103.896>
8. Мухеев Н.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 3. С. 94. <https://doi.org/10.31857/s1028096022030141>
9. Мухеев Н.Н., Безбах И.Ж. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 1. С. 20. <https://doi.org/10.31857/s1028096023010168>
10. Мухеев Н.Н., Безбах И.Ж. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2024. № 3. С. 72. <https://doi.org/10.26201/SURF.2024.3.72>
11. Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
12. Энгель А. Ионизованные газы. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. 326 с.
13. Френсис Г. Ионизационные явления в газах. М.: Атомиздат, 1964. 302 с.
14. Golser R., Semrad D. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1992. V. 69, P. 18. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(92\)95732-7](https://doi.org/10.1016/0168-583X(92)95732-7)
15. Boergesen P., Soerensen H. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1982. V. 200. P. 571.
16. Phillips J.A. // Phys. Rev. 1953. V. 90. P. 532. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.90.532>
17. Reiter G., Kniest N., Pfaff E., Clausnitzer G. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1990. V. 44. P. 399. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(90\)90001-B](https://doi.org/10.1016/0168-583X(90)90001-B)
18. Boergesen P., Nicolet M.A. // Nucl. Instrum. Methods. 1977. V. 140. P. 541.
19. Huberman M.N. // Phys. Rev. 1962. V. 127. P. 799. doi: 10.1103/PhysRev.127.799
20. Bonderup E., Hvelplund P. // Phys. Rev. A. 1971. V. 4. P. 562. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.4.562>
21. Paul H. IAEA. NDS. <https://www-nds.iaca.org/stopping/>

A Simple Physical Model of Nonlinear Dependence of Helium Stopping Power on the Velocity of Low-Energy Hydrogen Ions

N. N. Mikheev*

Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, National Research Centre “Kurchatov Institute”, Kaluga, 248033 Russia

**e-mail: kmikran@spark-mail.ru*

For the first time, the dependence of the probability of ionization of helium atoms on the velocity of a low-energy hydrogen ion beam is taken into account when the first ionization potential of target atoms exceeds the ionization potential of the charged particle beam atoms. Formulae describing the dependences of the helium stopping power on the beam energy of monoenergetic protons and deuterons are obtained. It is shown that their application makes it possible to calculate the helium stopping power adequately to the available experimental results.

Keywords: directed beam of monoenergetic hydrogen ions, multiple inelastic scattering, stopping power of matter.