

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

Н.Н. Михеев

НИЦ «Курчатовский институт», г. Калуга, Россия
e-mail: kmikran@spark-mail.ru

2024 г.

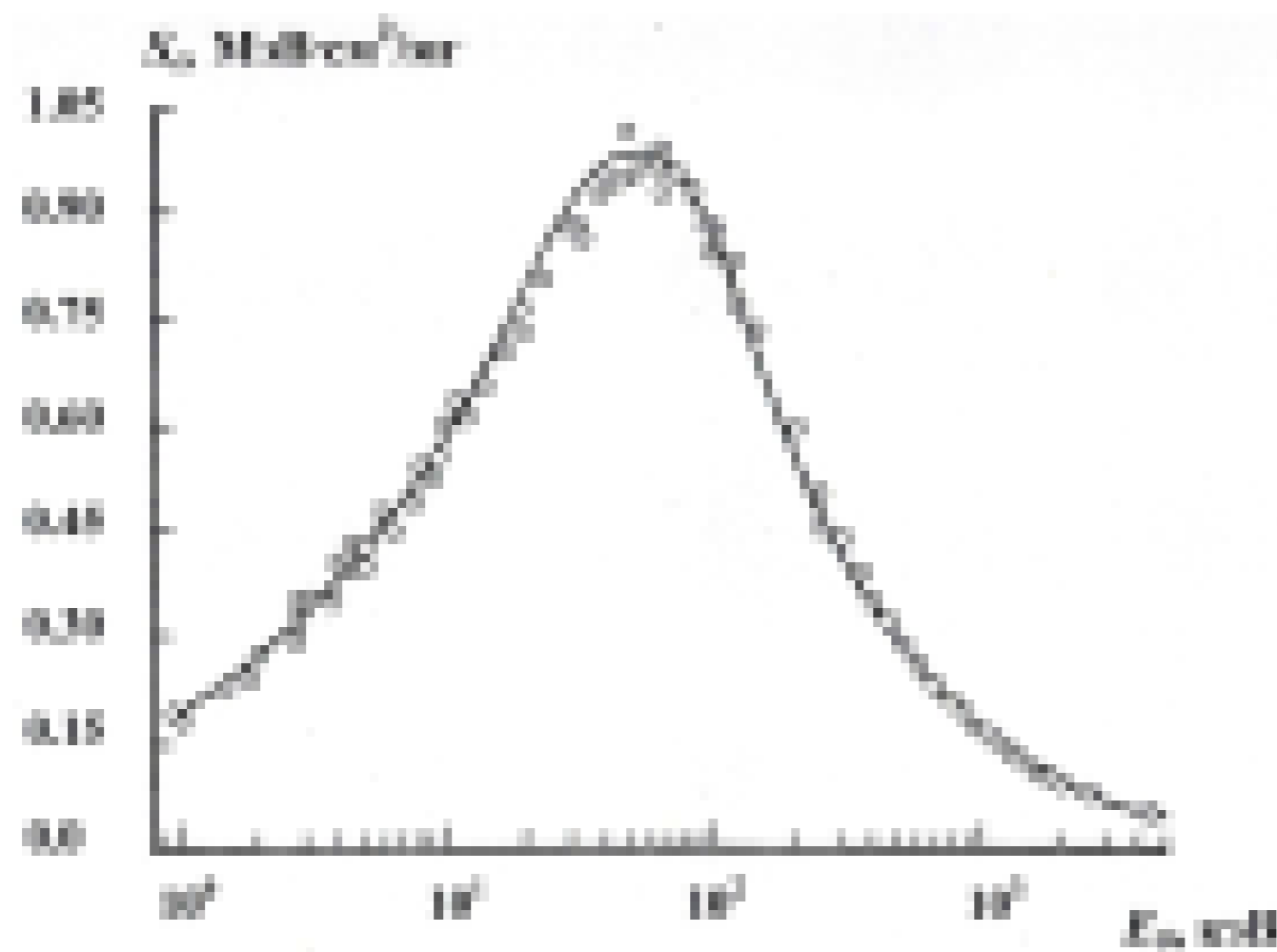


Рис. 1. Тормозная способность (S_e) молекулярного водорода для пучка низкоэнергетических протонов: — — — расчет по формулам работы [4]; \circ — экспериментальные значения S_e различных исследователей из публикации [7].

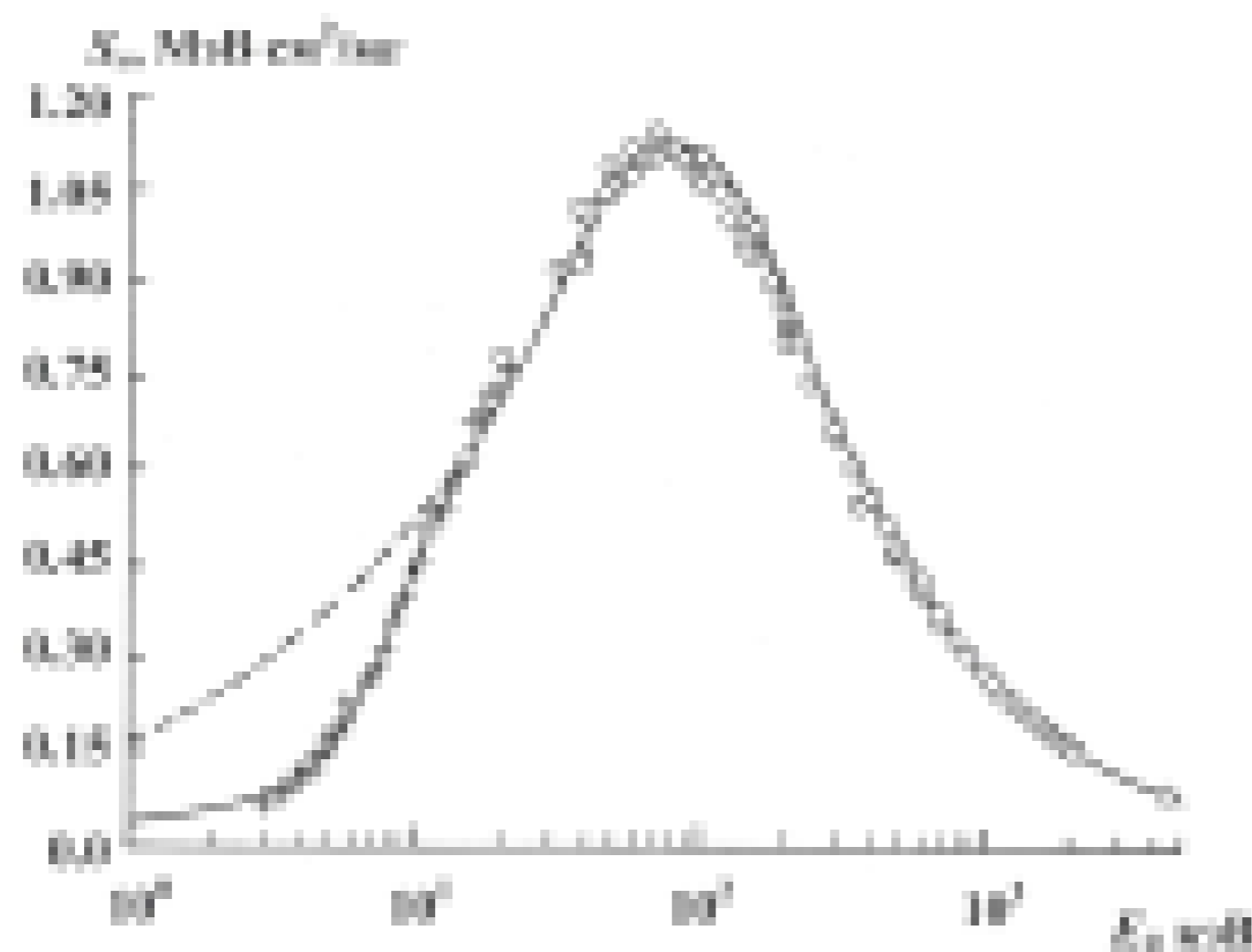


Рис. 2. Тормозная способность S_e гелия для пучка протонов: — — — расчет по формулам данной работы; - - - - расчет по формулам работы [2]; \circ — экспериментальные значения S_e работы [2] и \circ — экспериментальные значения S_e различных исследователей [7].

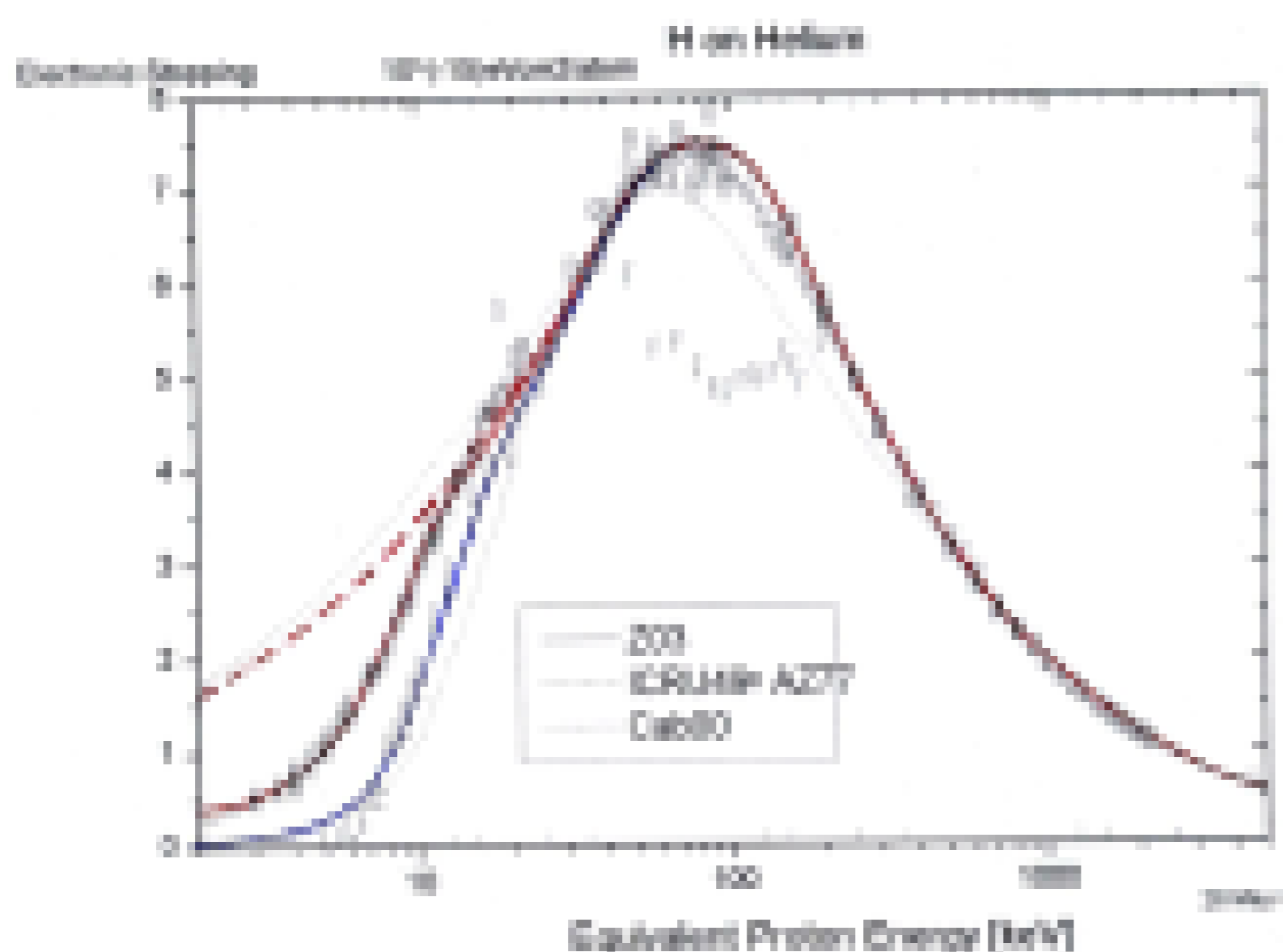


Рис. 4. Тормозная способность S_e гелия для ионов водорода: — — — расчет по формулам данной работы для протонов и дейтронов, соответственно; буллитные символы — экспериментальные значения S_e из публикации В. Пауля.

В работах [1,2] впервые было зарегистрировано явление нелинейной зависимости тормозной способности S_e газообразного гелия от скорости низкоэнергетического пучка ионов водорода. Такая аномалия пока не получила однозначного объяснения и аналитического описания в рамках определенной физической модели. Она может быть связана и с возможным увеличением зарядового состояния низкоэнергетического пучка ионов водорода, и с увеличением силы вероятности ионизации атомов гелия ионами водорода, когда скорость ионов пучка становится меньше скорости электронов ионизации [3], а энергия связи атомных электронов гелия при этом превышает энергию виртуального электрона в водороде.

Также, в работах [4,5] впервые для твердотельных образцов была успешно решена задача описания зависимости тормозной способности вещества от энергии пучка низкоэнергетических протонов и альфа-частиц. Для твердотельных областей характерно то, что энергия связи внешнего атомного электрона ионизации, как правило, не превышает (13.6 – 14.0) эВ. Для газообразных веществ, таких как гелий или неон, эта энергия равна ≈ 24.6 и ≈ 21.6 эВ, соответственно. Причем в некоторых из твердых тел наблюдается явление «ступенчатой» ионизации [6]. Все это несколько усложняет простое использование результатов работ [4,5] к таким областям, требует особого рассмотрения, чему и посвящена настоящая работа.

Применение результатов работы [4] к газообразной ионизации в виде молекулярного водорода дает хорошие соответствия между расчетом и экспериментом, как это представлено на Рис. 1.

Поскольку главный фактор, определяющий нелинейность зависимости S_e гелия от скорости пучка ионов водорода, связан с различием в энергии связи атомных электронах гелиевой ионизации и ионов водорода. Ионы водорода H^+ представляют для электронов гелия виртуальную потенциалную яму со средней энергией $\langle U \rangle \approx 2 \times 13.6$ эВ, тогда как реальная средняя потенциалная энергия $\langle U \rangle$ атомных электронов ионизации, равна $\approx 2 \times 24.6$ эВ, то есть, существенно больше. Чтобы учесть влияние этого различия на вероятность ионизации ψ атомов ионизации пучком низкоэнергетических ионов были использованы результаты работы [6], а именно формула, описывающая зависимость зарядового состояния пучка альфа-частиц от относительной скорости V_p ионизации частиц пучка и максимальной скорости V_m атомных электронов ионизации. Предлагаются для протонов (для пучков) аналогичное выражение ψ :

$$\psi = [1 - \exp(-\beta + V_p/V_m)]^2, \text{ где:}$$

$$\beta = 2.25 + 3.75 \cdot \exp[-(V_p/V_m - 0.7)^2 / 0.0025], \text{ при } (V_p/V_m) \leq 0.7, \text{ и } \beta = 6.0, \text{ при } (V_p/V_m) > 0.7.$$

Итоговый результат расчета S_e с использованной формулой приведен на Рис. 2 (см. далее).

Для пучка дейтронов (для пучков) величина параметра β принимает вид:

$$\beta = 1.0 + 5.0 \cdot \exp[-(V_p/V_m - 0.6)^2 / 0.0417], \text{ при } (V_p/V_m) \leq 0.6, \text{ и } \beta = 6.0 \text{ при } (V_p/V_m) > 0.6.$$

Увеличение числа пучков в ионе водорода увеличивает величину константы в параметре β для дейтронов, и снижает максимум гистограммы при распределении в сторону меньших значений (V_p/V_m) . Это приводит к большей прозрачности гелия для пучка дейтронов, чем для протонов, при одинаковой скорости ионов частиц. Применение той же формулы позволяет проводить расчеты S_e адекватно известным экспериментальным результатам, как это представлено на Рис. 3 для низкоэнергетического пучка дейтронов.

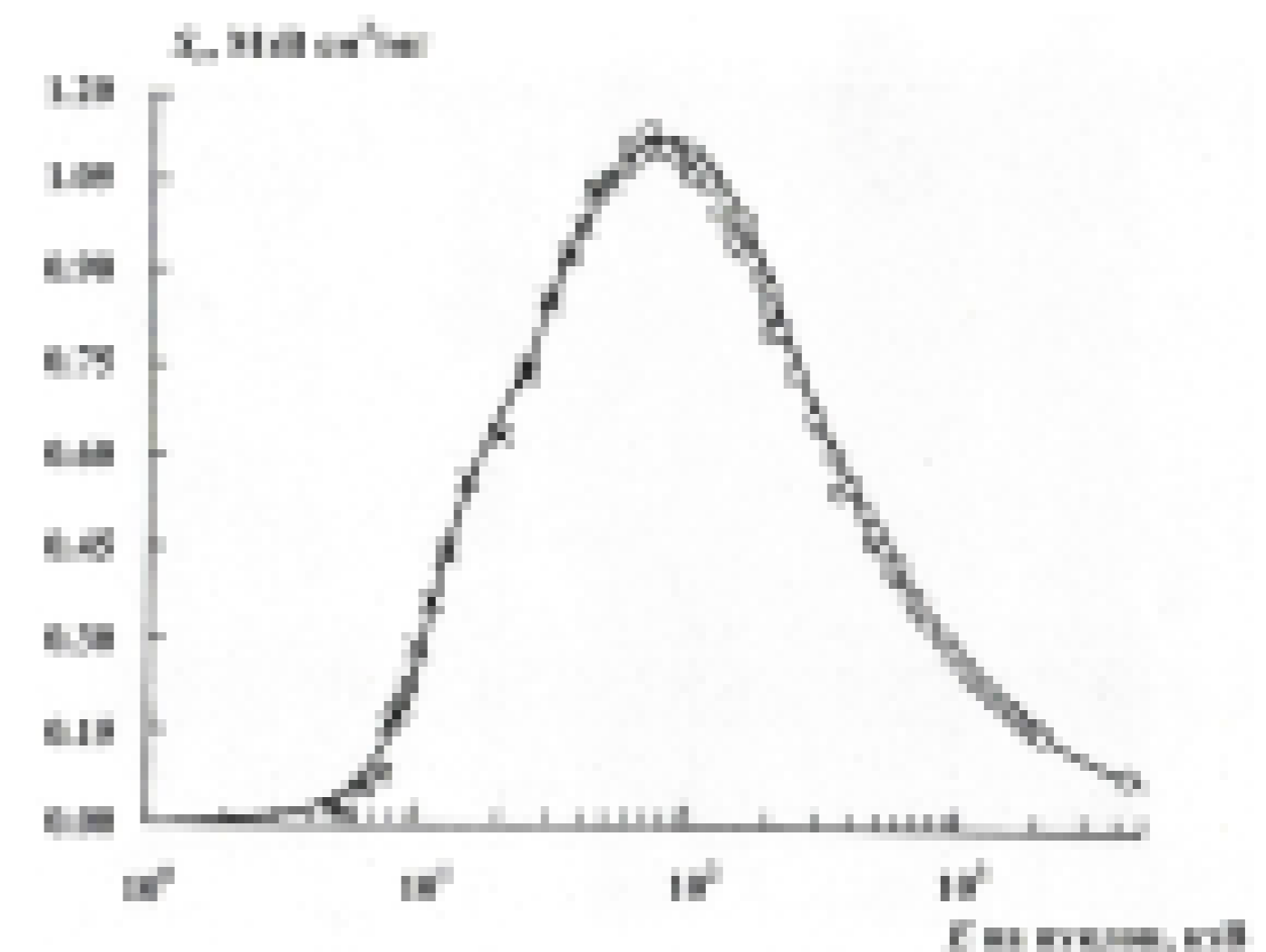


Рис. 3. Тормозная способность S_e гелия для дейтронов: — — — расчет по формулам данной работы; - - - - расчет по формулам работы [2]; \circ — экспериментальные значения S_e работы [2] и \circ — экспериментальные значения S_e различных исследователей [7].

ВЫВОДЫ

Установлено, что наблюдаемая нелинейность зависимости тормозной способности гелия от скорости пучка низкоэнергетических протонов связана с увеличением вероятности ионизации атомов ионизации в условиях, когда энергия связи атомных электронов гелиевой ионизации превышает энергию связи виртуального электрона ионов водорода.

Предложены формулы, позволяющие описывать зависимость вероятности ионизации атомов гелия ионами водорода от относительной скорости пучка протонов и скорости слабейшего электрона гелия, и проведена их апробация.

Список литературы

1. Golber R., Semak D. // Phys. Rev. Lett. 1991, Vol. 66, P. 1831.
2. Rajda F., Gulyásy G., Alföldi M. et al. // Eur. Phys. J., A, 2001, Vol. 10, P. 487.
3. Fetti E., Taylor E. // Phys. Rev., 1947, Vol. 72, P. 399.
4. Михеев Н.Н. // Полярность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022 – № 3. – С. 94–100. (DOI:10.31857/S1028096022000141).
5. Михеев Н.Н., Козлов В.Е. // Полярность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023 – № 1. – С. 20–24. (DOI:10.31857/S1028096023010148).
6. Зингал Ф. «Ионизационные газы», пер. с англ. М.: ГИ Физико-математической литературы, 1959.
7. Paul H. IAEA, ND8. <https://www-nds.iaea.org/stopping/>