

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.

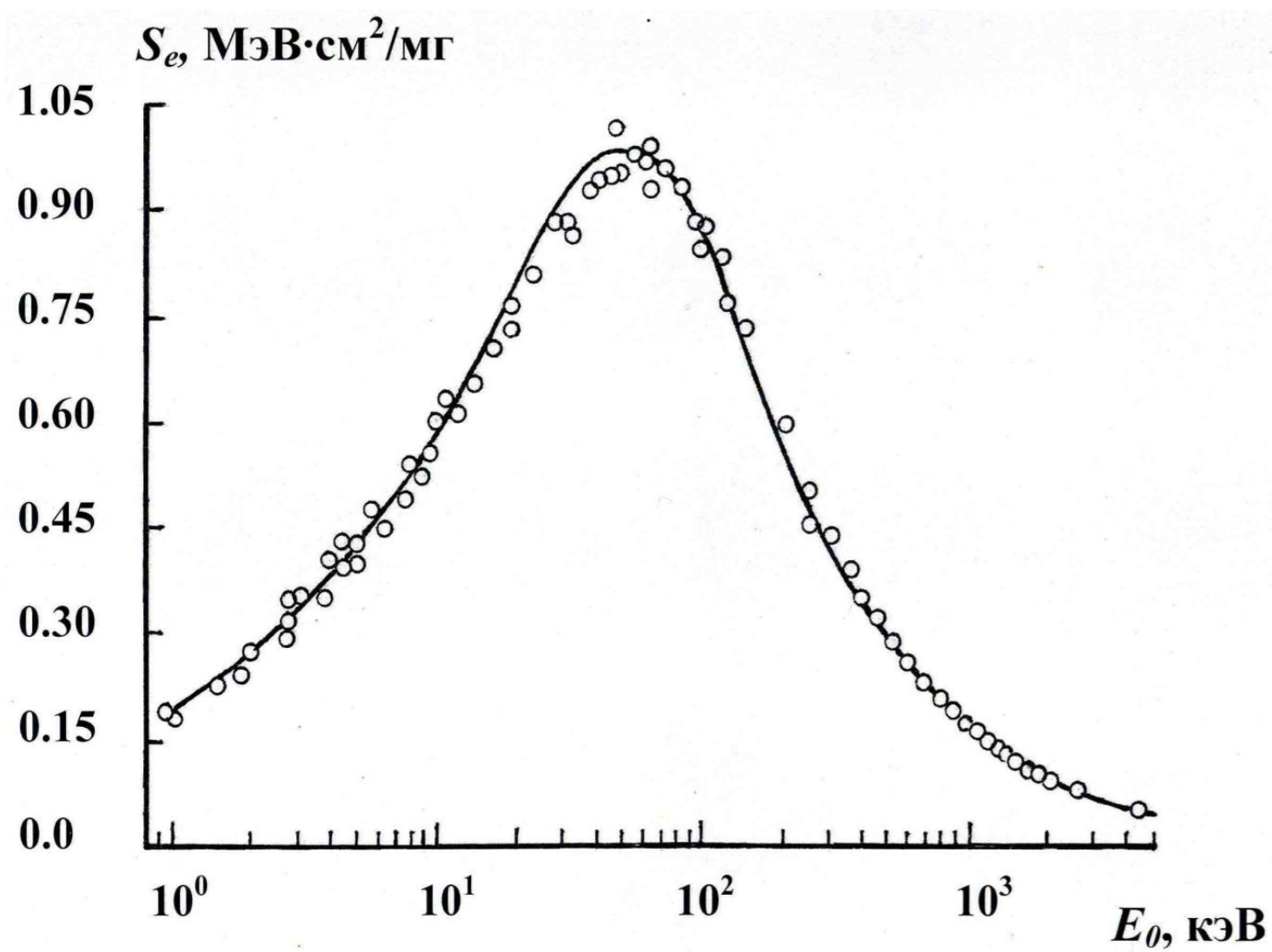


Рис. 1. Тормозная способность (S_e) молекулярного водорода для пучка моноэнергетических протонов: — — расчёт по формулам работы [4]; \circ — измерения значений S_e различных исследователей из компиляции [7].

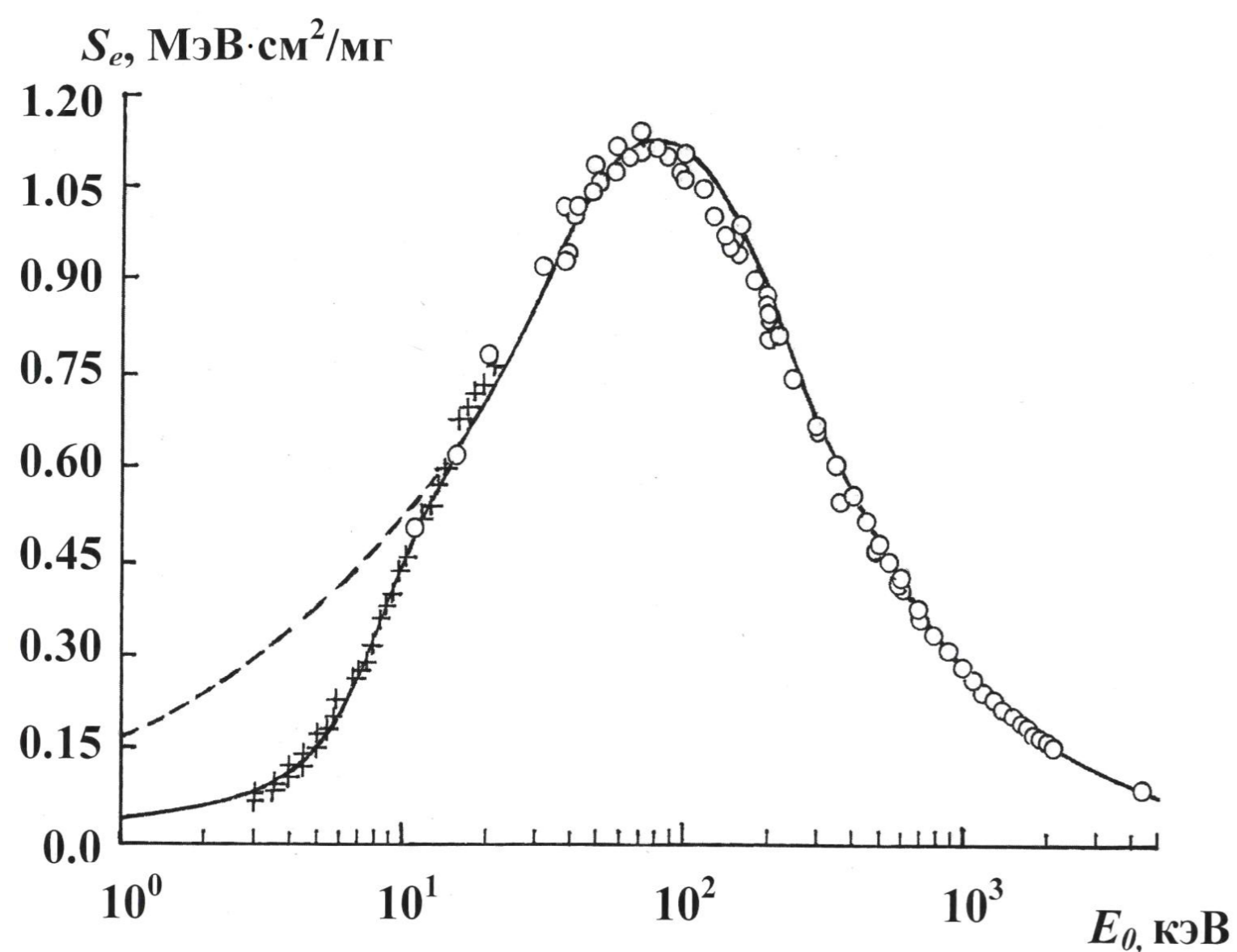


Рис. 2. Тормозная способность S_e гелия для пучка протонов: — — расчёт по формулам данной работы; - - - расчёт по формулам работы [3]; \times — измерения S_e работы [1]; \circ — измерения S_e различных исследователей [7].

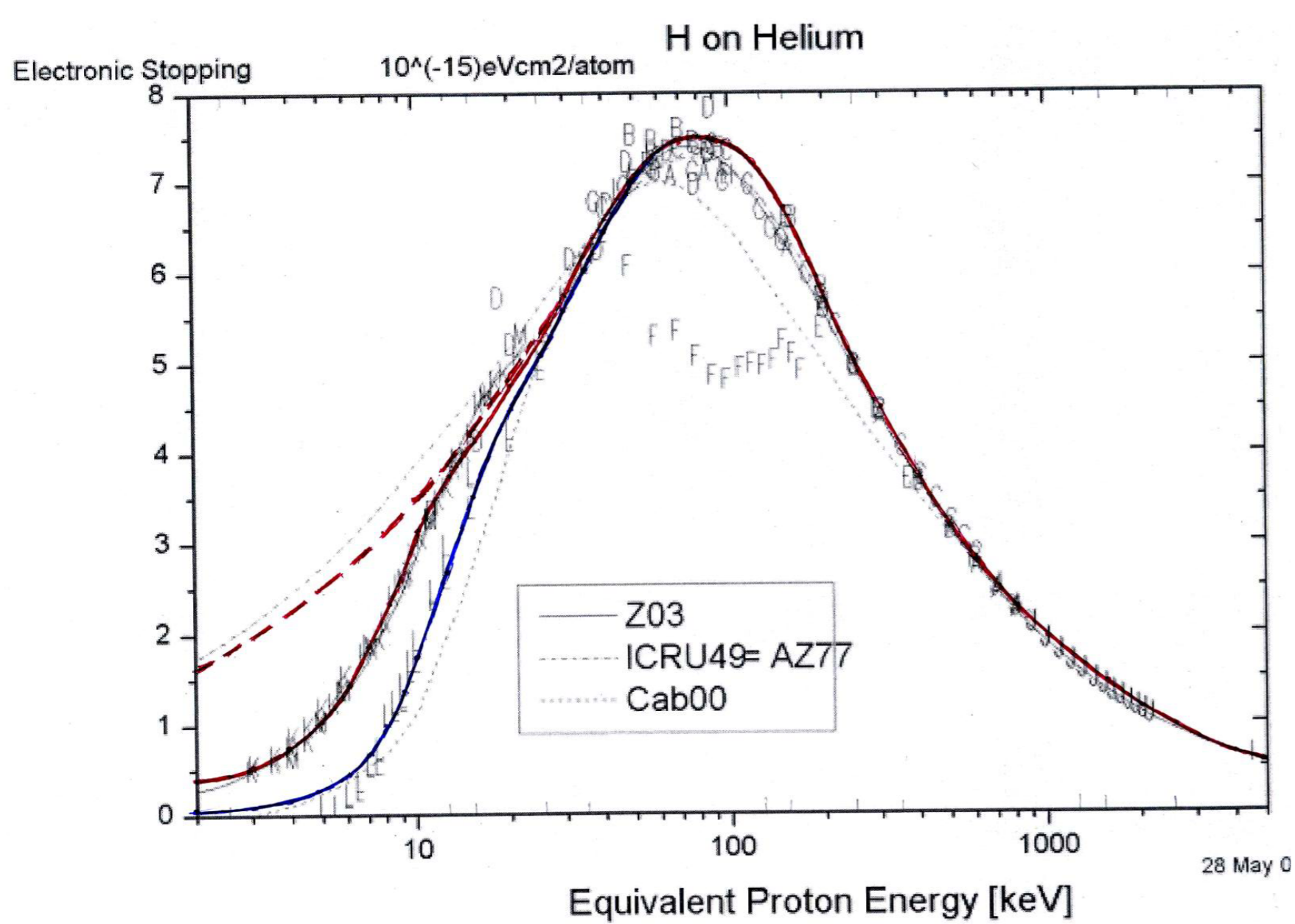


Рис. 4. Тормозная способность S_e гелия для ионов водорода: — — расчёт по формулам данной работы для протонов и дейтронов, соответственно; буквенные символы — измерения S_e из компиляции К. Пауля.

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

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

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

Поэтому главный фактор, определяющий нелинейность зависимости S_e гелия от скорости пучка ионов водорода, очевидно, связан с различием в энергиях связи атомных электронов гелиевой мишени и ионов водорода. Ионы водорода H^+ представляют для электронов гелия виртуальную потенциальную яму со средней энергией $\langle U \rangle \approx 2 \times 13.6$ эВ, тогда как реальная средняя потенциальная энергия $\langle U \rangle$ атомных электронов мишени, равна $\approx 2 \times 24.6$ эВ, то есть существенно больше. Чтобы учесть влияние этого различия на вероятность ионизации ψ атомов мишени пучком моноэнергетических ионов были использованы результаты работы [6], а именно: формула, описывающая зависимость зарядового состояния пучка альфа-частиц от отношения скорости V_0 первичных частиц пучка к минимальной скорости V_{li} атомных электронов мишени. Предлагается для протонов (один нуклон) следующее выражение ψ :

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

$$\beta = 2.25 + 3.75 \times \exp[-(V_0 / V_{li} - 0.7)^2 / 0.0325], \text{ при } (V_0 / V_{li}) \leq 0.7; \text{ и } \beta = 6.0, \text{ при } (V_0 / V_{li}) > 0.7.$$

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

Для пучка дейтронов (два нуклона) величина параметра β несколько иная:

$$\beta = 1.0 + 5.0 \times \exp[-(V_0 / V_{li} - 0.6)^2 / 0.0417], \text{ при } (V_0 / V_{li}) \leq 0.6; \text{ и } \beta = 6.0 \text{ при } (V_0 / V_{li}) > 0.6.$$

Увеличение числа нуклонов в ионе водорода уменьшает вклад константы в параметр β для дейтронов, и сдвигает максимум гауссова вида распределения в сторону меньших значений (V_0 / V_{li}) . Это приводит к большей прозрачности гелия для пучка дейтронов, чем для протонов, при одинаковой скорости потоков частиц. Применение этой формулы позволяет проводить расчеты S_e адекватно имеющимся экспериментальным результатам, как это представлено на Рис. 3 для моноэнергетического пучка дейтронов.

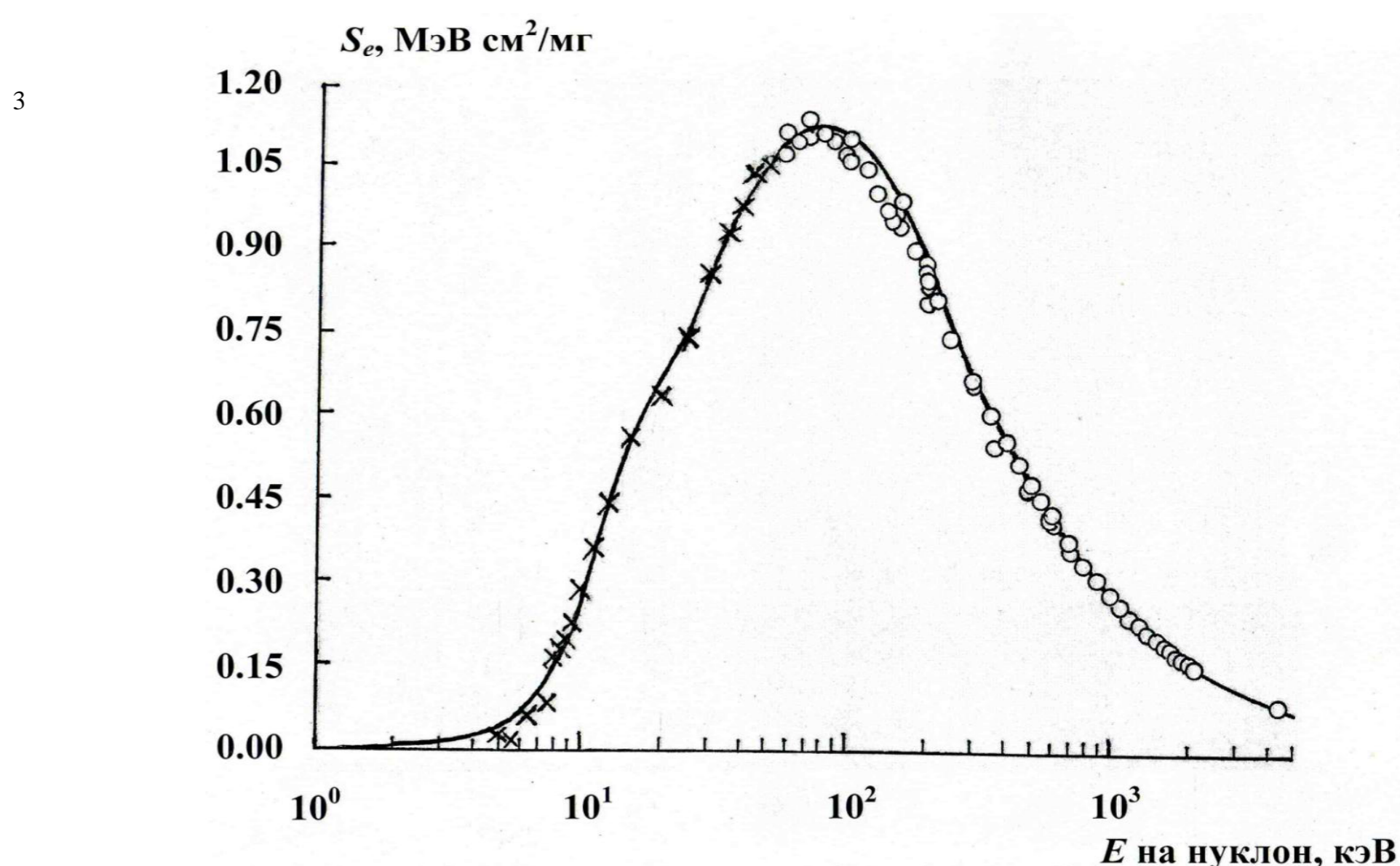


Рис. 3. Тормозная способность S_e гелия для дейтронов: — — расчёт по формулам данной работы; \times — измерения S_e работы [2] и \circ — измерения S_e различных исследователей [7].

ВЫВОДЫ

Установлено, что наблюдаемая нелинейность зависимости тормозной способности гелия от скорости пучка низкоэнергетических протонов связана с уменьшением вероятности ионизации атомов мишени в условиях, когда энергия связи атомных электронов гелиевой мишени превышает энергию связи виртуальных электронов ионов 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

- Golser R., Semrad D. // Phys. Rev. Lett. 1991, Vol. 66, P. 1831.
- Raiola F., Gyirky G., Aliotta M. et al. // Eur. Phys. J., A, 2001, Vol. 10, P. 487.
- Fermi E., Teller E. // Phys. Rev., 1947, Vol. 72, P. 399.
- Михеев Н.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022 – № 3. – С. 94–100. (DOI:10.31857/S1028096022030141).
- Михеев Н.Н., Безбах И.Ж. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023 – № 1. – С. 20–24. (DOI:10.31857/S1028096023010168).
- Энгель Ф. «Ионизованные газы», пер. с англ. М.: ГИ Физико-математической литературы. 1959.
- Paul H. IAEA, NDS. <https://www-nds.iaea.org/stopping/>