

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДВУХСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ

В.И. Шульга

НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

vish008@yandex.ru

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Как известно, из энергетических спектров водорода и его изотопов, отраженных от поверхности твердого тела, можно получать данные о сечении неупругого торможения частиц S_e в области энергий $E < 10$ кэВ . Для серебра значения S_e , найденные этим методом, оказались значительно ниже тех, что получены из энергетических спектров частиц, прошедших через тонкие пленки. Цель работы состояла в том, чтобы методом компьютерного моделирования рассчитать спектры отражения и протестировать зависимости $S_e(E)$, предложенные разными авторами. Для сравнения часть расчетов проведена с учетом зависимости $T(\rho)$ (T – неупругие потери энергии в элементарном столкновении и ρ – прицельный параметр столкновения), а также для случая прохождения водорода через тонкую пленку серебра.

МЕТОД РАСЧЕТА

Расчеты выполнены с использованием программы OKSANA в том ее варианте, который описан в работе [1]. Моделировалось отражение ионов H и D с начальной энергией $E_0 = 0.5-9$ кэВ от двухслойной мишени Ag(211Å)/Si при нормальном падении ($\alpha = 0$). Мишень считалась неупорядоченной (аморфной). Регистрировались ионы, рассеянные на угол 129° , что соответствует условиям эксперимента [2].

Упругое взаимодействие бомбардирующих частиц с атомами мишени описывалось потенциалом Томаса-Ферми-Мольера с длиной экранирования Линдхарда. Электронное торможение задавалось двумя способами: 1) введением тормозной силы, определяемой функцией $S_e(E)$, и 2) с учетом неупругих потерь энергии в каждом столкновении. В качестве $T(\rho)$ взята зависимость, предложенная Оэном и Робинсоном для легких ионов [3].

Зависимости $S_e(E)$, использованные в данной работе для описания торможения изотопов водорода в Ag и Si, показаны на рис.1 и 2. По определению, $S_e = -(dE/dx)_e/N$, где N – атомная плотность мишени.

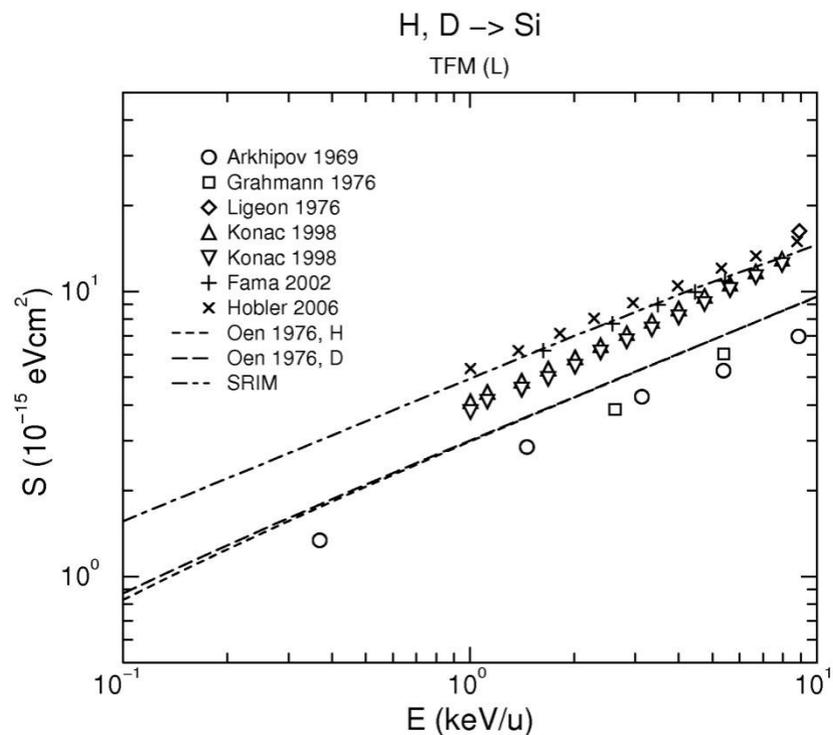
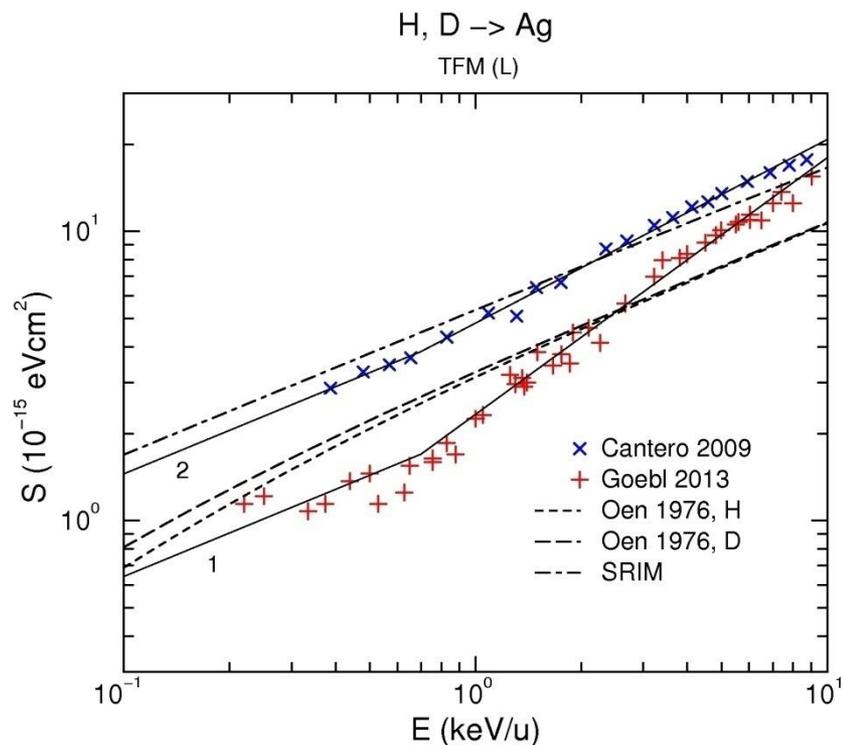


Рис. 1. Сечение неупругого торможения изотопов водорода в Ag. Значки + и × – сечения, измеренные методом отражения [2] и прохождения частиц через тонкие мишени [4], соответственно.

Рис. 2. То же для Si. Экспериментальные данные взяты из рис.10 работы [5]. Кривые SRIM построены по данным сайта <http://www.srim.org>

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

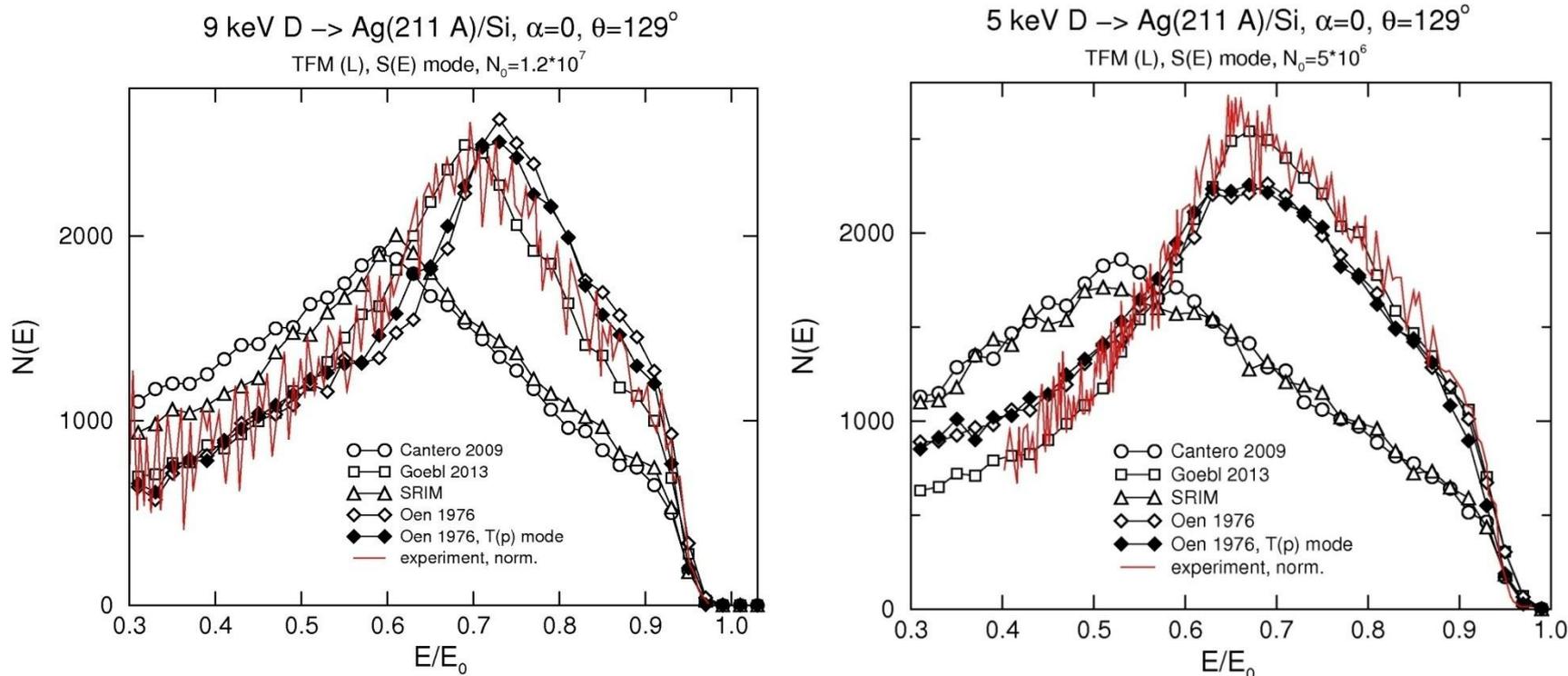


Рис. 3. Энергетические спектры дейтерия с начальной энергией $E_0 = 9$ и 5 кэВ при рассеянии двухслойной мишенью Ag/Si на угол 129° для случая падения по нормали ($\alpha = 0$). Символы – моделирование с использованием различных зависимостей $S_e(E)$, цветные линии – эксперимент [2].

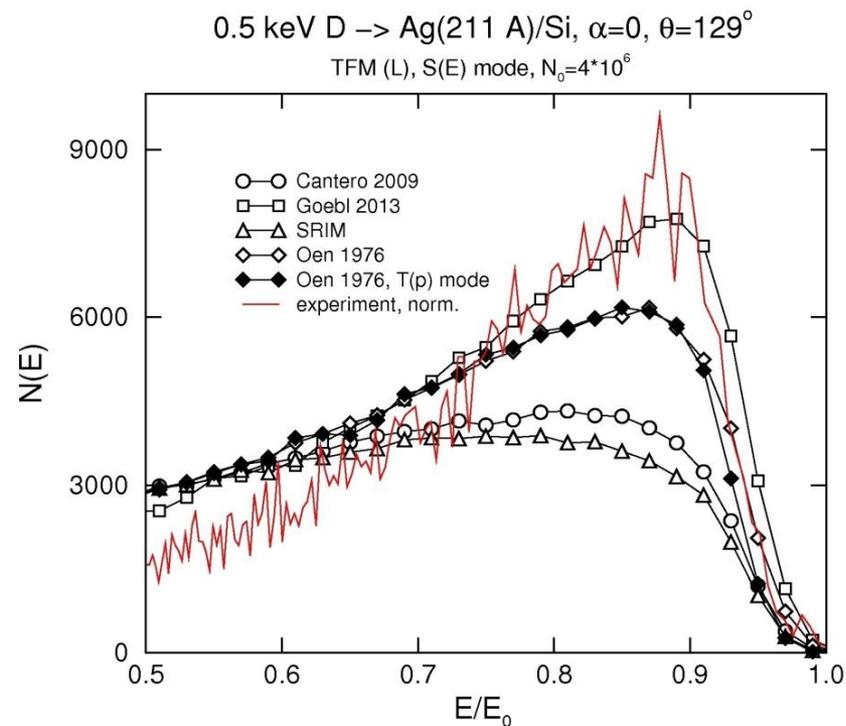
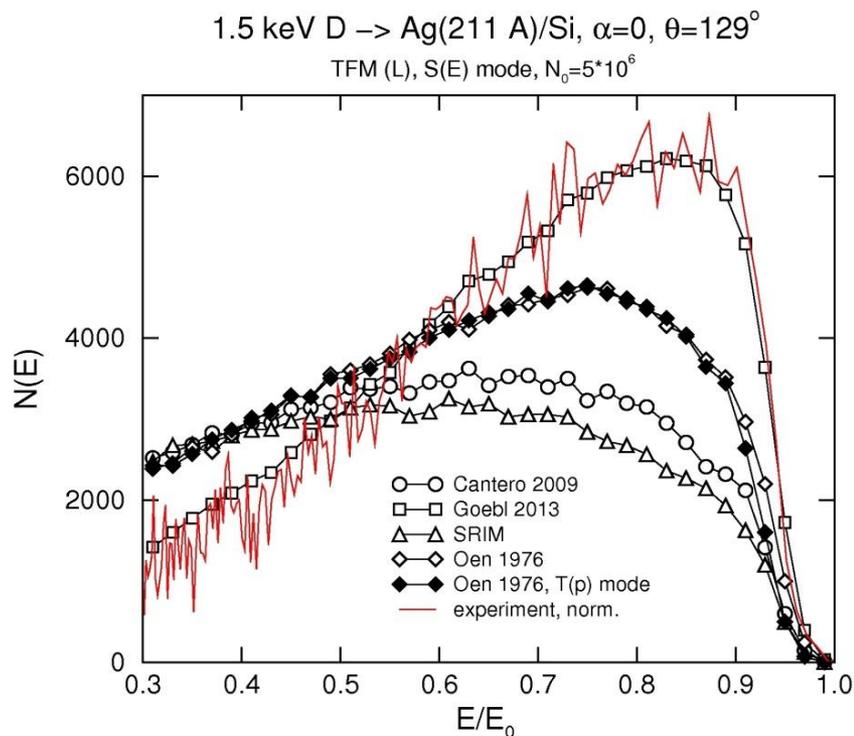


Рис. 4. То же, но для $E_0 = 1.5$ и 0.5 кэВ. Из рис. 3 и 4 следует, что с экспериментом лучше всего согласуется зависимость $S_e(E)$, найденная в [2] с помощью программы компьютерного моделирования TRBS. Худшие результаты дает SRIM. Учет $T(p)$ заметно влияет лишь при энергиях E близких к E_0 , т.е. когда число столкновений сравнительно невелико и роль сильных столкновений особенно важна (см. также [1]).

Чтобы выяснить возможную причину высоких сечений торможения, полученных в [4] методом рассеяния в тонких пленках, было проведено моделирование прохождения водорода с энергией до 10 кэВ через слой Ag толщиной 250 Å, что отвечает условиям эксперимента [4]. Регистрировались ионы, рассеянные в прямом направлении ($\theta = 0$). Угол захвата детектора мог варьироваться. Как и в [4], рассматривалось полное сечение торможения, т. е. $S_e + S_n$. Оно определялось двумя способами:

$$S_1 = (E_0 - \langle E \rangle) / (zN) \quad (1)$$

и

$$S_2 = S_1 z / \langle L \rangle, \quad (2)$$

где z – толщина мишени, $\langle E \rangle$ – средняя энергия частиц, попавших в детектор, и $\langle L \rangle$ – средняя длина их траекторий. Величины S_1 и S_2 привязывались к средней энергии частиц при движении в мишени $\langle E_t \rangle$, которая также рассчитывалась при моделировании траекторий.

Результаты расчета показаны на рис. 5.

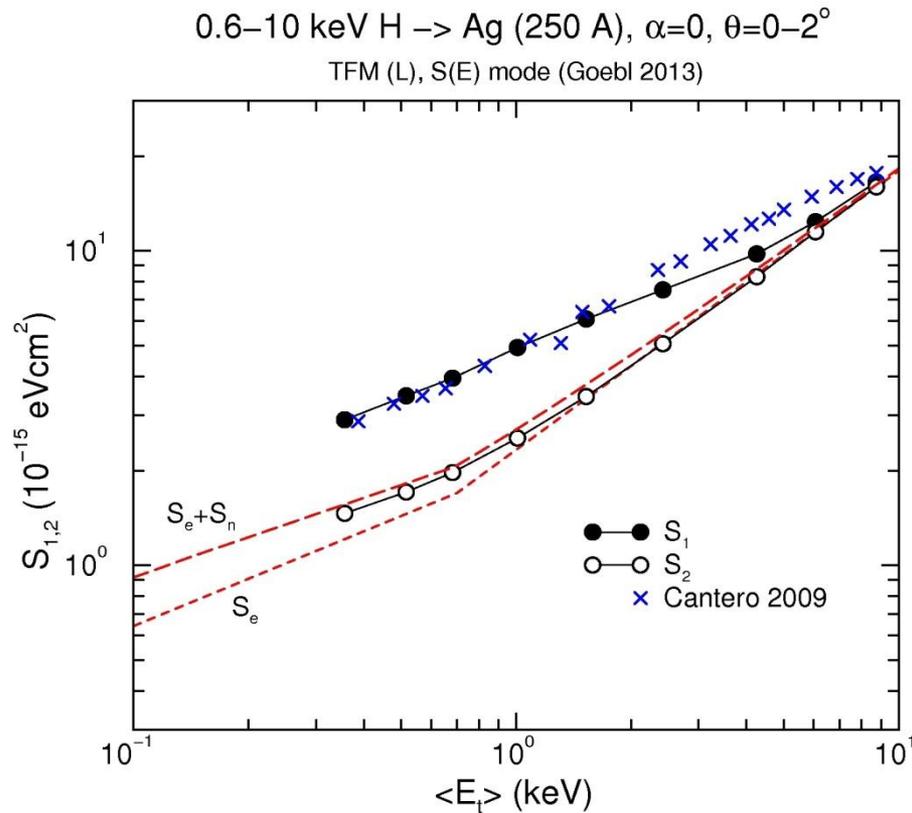


Рис. 5. Энергетические зависимости величин S_1 и S_2 для случая рассеяния водорода слоем серебра толщиной 250 Å в интервал углов $\theta = 0-2^\circ$. S_e – сечение электронного торможения, использованное в расчетах (линия 1 на рис.1); $S_e + S_n$ – полное сечение; \times – эксперимент [4]. В эксперименте угол захвата детектора составлял 1.6° .

ВЫВОДЫ

Расчет продемонстрировал высокую чувствительность спектров отраженных ионов H и D к процессам электронного торможения. Наилучшее согласие с экспериментом получено для зависимости $S_e(E)$, найденной в работе [2] с использованием компьютерной программы TRBS. Тем самым подтверждено, что методика восстановления зависимости $S_e(E)$ из данных по отражению, использованная в [2], является корректной. Одной из причин завышенных сечений торможения в работе [4] является, вероятно, использование недостаточно тонкой мишени, что приводило к удлинению траекторий частиц в мишени за счет многократного рассеяния.

Литература

1. Shulga V.I., Schinner A., Sigmund P. // NIM B. 2020. V. 467. P. 91.
2. Goebel D., et al. // Phys. Rev. A. 2013. V. 87. P. 062903.
3. Oen O.S., Robinson M.T. // NIM. 1976. V. 132. P. 647.
4. Cantero E.D. et al. // Phys. Rev. A. 2009. V. 80. P. 032904.
5. Sigmund P., Schinner A. // NIM B. 2017. V. 410. P. 78.