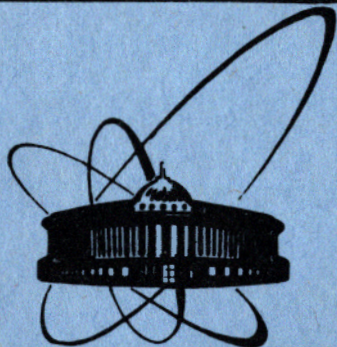


84-598



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

6-84-598

Ю.Хеннигер, Хо Ги Хон, В.Вагнер

СРАВНЕНИЕ РАССЧИТАННЫХ
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ **STOPW/82**
ЗНАЧЕНИЙ ТОРМОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ
И СЕЧЕНИЙ ЗАМЕДЛЕНИЯ ИОНОВ
С ЭНЕРГИЯМИ ДО 1,5 МэВ/а.е.м.
С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Направлено в журнал "Kernenergie"

1984

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для расчета тормозной способности и пробега тяжелых ионов с энергиями $\leq 1,5$ МэВ/а.е.м. широко применяется метод экстраполяции сечений замедления легких частиц $/p, d, \alpha /$ по квадрату эффективного заряда иона $/\text{скейлинг}/^{1-8/}$. Этот способ требует отдельного учета всех элементов тормозящей среды^{5-7/}.

Попытки вывести обобщенную функцию Линдхарда для всех элементов мишени^{10-12/} не находили физического обоснования из-за сильного влияния Z_p -осцилляций на сечение замедления.

Программа STORFOW/82 для расчета тормозной способности ионов использует для каждого элемента мишени специальный набор исходных констант^{8/}. Метод расчета основывается на работах Зиглера^{7/} и Андерсона^{13/}, в которых выводятся аналитические выражения для тормозной способности протонов и ионов гелия. В названные работы входили все имеющиеся до 1977 года экспериментальные данные тормозной способности. Авторы этих работ считают, что достигнутая точность расчета тормозной способности для протонов и ионов гелия в таких широко используемых материалах, как Al, Si, Ni, Ag и Au, достаточна по отношению к погрешностям измерений.

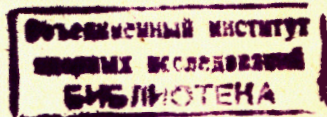
С другой стороны, экспериментальных данных для газов было относительно мало. Поэтому целями настоящей работы являются сравнение рассчитанных с помощью программы STORFOW/82 тормозных способностей легких ионов с более новыми экспериментальными данными и критический анализ входящих в расчет констант.

Необходимой оказалась ревизия наборов исходных расчетных констант для газов. Все случаи широкого применения газовых детекторов и камер в современных экспериментах с тяжелыми ионами и использование ионизационных камер для дозиметрии нейтронов, могут служить примером, подтверждающим потребность в более точных расчетах энергетических потерь, особенно для легких ионов.

2. РАСЧЕТЫ

Расчеты проводились с несколько измененным вариантом программы STORFOW/82^{8/}. Эта программа позволяет вычислять тормозную способность S и пробег R ионов всех элементов, вплоть до трансурановых. Кроме того, существует возможность расчета модифицированных величин, как, например, первичных потерь энергии REL, отношения $Z_{\text{off}}^2 / \beta^2$, где Z_{off} означает эффективный заряд иона, $\beta = v/c$ и т.д.

В программе учитываются все до сих пор известные поправки энергетических потерь, как нерелятивистские, так и релятивистские.



Параметры твердых тормозящих сред взяты из работ Зиглера^{5,7,13/}. Соответствующие данные для газовых мишеней, с другой стороны, вели к большим отклонениям рассчитанных величин от экспериментально измеренных^{15-21/}, особенно в энергетической области <1,5 МэВ/а.е.м. Поэтому для газовых мишеней использовались данные Баумгарта^{18,21/}.

В настоящей работе рассчитывались массовые тормозные способности S/ρ и сечения замедления $s=S/\rho_A$ или $s=S/\rho_M$, где ρ обозначает плотность мишени, а ρ_A , ρ_M - число атомов /молекулы/ в кубическом сантиметре.

Результаты расчетов собраны в табл.1-9 и изображены на рис.1-9.

В экспериментальных данных сознательно опускались погрешности, потому что в соответствующих публикациях часто указывают лишь статистические компоненты ошибок или вообще не обсуждается точность измеренных величин.

3. ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанные значения массовой тормозной способности различных твердых мишеней для нескольких ионов сравниваются с экспериментальными данными в табл.1-4 /рис.1-4/. В высокой энергетической области наблюдается хорошее соответствие для всех тормозящих сред. Только вблизи пика кривой Брэгга у нескольких элементов /например, Ве / появляются расхождения. Так как экспериментальная база данных часто оказывается ошибочной или неполной, то в настоящее время еще не представляется целесообразным подгонять соответствующие расчеты путем изменения входящих констант.

Результаты позволяют заключить, что настоящий вариант программы STOROW/82 генерирует достаточно точные значения массовой тормозной способности для твердых мишеней, особенно для металлов. Отклонения можно ожидать только для материалов, для которых пока не существует экспериментальных данных, и где расчетные константы получаются путем экстраполяции от иногда довольно далеких соседних элементов.

Измерения, проведенные на ионных кристаллах, подтверждают расчет на уровне экспериментальных погрешностей^{22/}.

В табл.5-9 /рис.5-9/ собраны результаты расчетов для газобразных мишеней. С одной стороны, ожидается хорошее соответствие с экспериментами Баумгарта^{18-21/}, так как расчетные константы взяты именно из этих работ. С другой - наблюдается и хорошее соответствие расчетных данных со значениями из работ Фукуды^{19,20/}, которые были получены независимо от других.

Из рис.6 и 7 можно заключить, что программа STOROW/82 генерирует достаточно точные значения массовой тормозной способности и для газов.

Таблица 1. Массовая тормозная способность Au, Cu и Ag для протонов. Экспериментальные данные из^{14/}, /см.рис.1/

| E МэВ | S/ρ в МэВ/(г·см ⁻²) | | | | | |
|----------|--------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|
| | Au | | Cu | | Ag | |
| | эсп. | расч. | эсп. | расч. | эсп. | расч. |
| 0.025 | 89 | 70 | | | 152 | 146 |
| 0.030 | 94 | 74 | | | 163 | 156 |
| 0.040 | 102 | 86 | 193 | 193 | 181 | 173 |
| 0.050 | 107 | 94 | 207 | 207 | 193 | 184 |
| 0.060 | 111 | 100 | 218 | 216 | 202 | 192 |
| 0.080 | 117 | 110 | 230 | 228 | 210 | 200 |
| 0.100 | 120 | 116 | 235 | 231 | 211 | 201 |
| 0.150 | 123 | 123 | 236 | 227 | 198 | 192 |
| 0.200 | 121 | 121 | 220 | 217 | 183 | 187 |
| 0.250 | 117 | 115 | 209 | 208 | 172 | 170 |

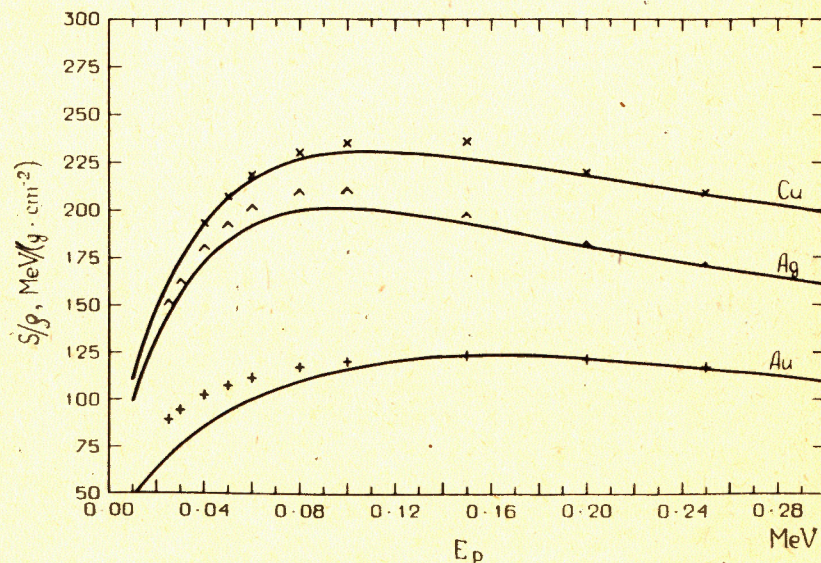


Рис.1

Таблица 2. Массовая тормозная способность С, Al, Ni и Ag для дейтронов. Экспериментальные данные из [15], /см.рис.2/

| E МэВ | S/ρ в МэВ/(г·см ⁻²) | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | C | | Al | | Ni | | Ag | |
| | эксп. | рас. | эксп. | рас. | эксп. | рас. | эксп. | рас. |
| 0.2 | 745 | 729 | 458 | 446 | 265 | 260 | 208 | 201 |
| 0.4 | 594 | 572 | 374 | 370 | 247 | 245 | 187 | 181 |
| 0.6 | 480 | 467 | 317 | 321 | 223 | 216 | 166 | 160 |
| 0.8 | 399 | 399 | 279 | 285 | 199 | 193 | 146 | 145 |
| 1.0 | 345 | 351 | 252 | 257 | 178 | 176 | 129 | 133 |
| 1.1 | 325 | 333 | 241 | 245 | 169 | 169 | 123 | 128 |
| 1.2 | 310 | 316 | 232 | 234 | 162 | 163 | 117 | 123 |
| 1.3 | 298 | 301 | 222 | 224 | 156 | 157 | 112 | 119 |
| 1.4 | 289 | 288 | 214 | 215 | 151 | 152 | 109 | 114 |
| 1.5 | 281 | 276 | 206 | 207 | 147 | 147 | 106 | 110 |
| 1.6 | 273 | 265 | 199 | 199 | 143 | 143 | 103 | 108 |
| 1.7 | 264 | 255 | 193 | 193 | 139 | 139 | 101 | 104 |
| 1.8 | 255 | 246 | 186 | 187 | 135 | 135 | 99 | 101 |
| 1.9 | 250 | 238 | 181 | 181 | 133 | 132 | 97 | 99 |
| 2.0 | 240 | 230 | 173 | 172 | 131 | 128 | 94 | 96 |

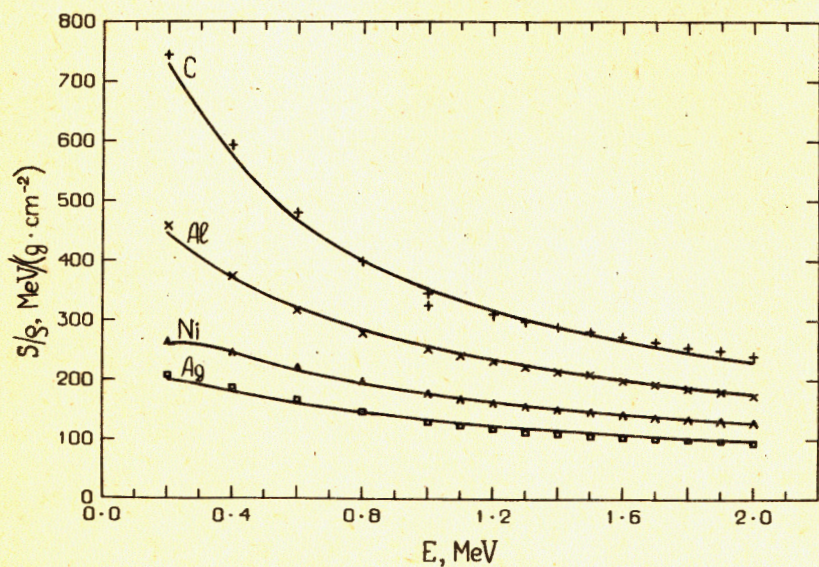


Рис. 2

Таблица 3. Массовая тормозная способность Be, C и Al для ионов гелия. Экспериментальные данные из [16], /см.рис.3/

| E МэВ | S/ρ в МэВ/(г·см ⁻²) | | | | | |
|----------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Be | | C | | Al | |
| | эксп. | расч. | эксп. | расч. | эксп. | расч. |
| 0.2 | 1600 | 1680 | 1550 | 1570 | 1070 | 1140 |
| 0.3 | 1760 | 1770 | 1790 | 1750 | 1300 | 1240 |
| 0.4 | 1850 | 1800 | 1950 | 1860 | 1370 | 1280 |
| 0.6 | 1860 | 1770 | 2080 | 1920 | 1340 | 1300 |
| 0.8 | 1750 | 1700 | 2040 | 1890 | 1300 | 1270 |
| 1.0 | 1610 | 1610 | 1930 | 1810 | 1240 | 1230 |
| 1.2 | 1480 | 1350 | 1780 | 1710 | 1190 | 1180 |
| 1.4 | 1390 | 1450 | 1650 | 1610 | 1150 | 1120 |
| 1.6 | 1330 | 1380 | 1550 | 1520 | 1100 | 1070 |
| 1.8 | 1270 | 1310 | 1470 | 1440 | 1050 | 1030 |
| 2.0 | 1210 | 1250 | 1410 | 1360 | 1000 | 990 |

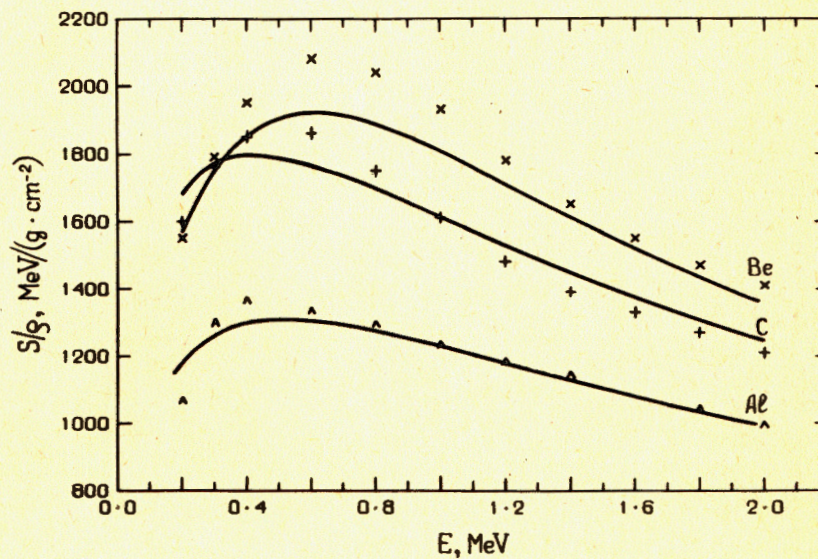


Рис. 3

Таблица 4. Массовая тормозная способность Ni и Ag для ионов гелия. Экспериментальные данные из /17/, см. рис. 4/

| E | S/ρ в МэВ/(г.см ⁻²) | | | |
|-----|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | Ni | | Ag | |
| | эксп. | расч. | эксп. | расч. |
| 0.2 | 525 | 524 | 403 | 408 |
| 0.3 | 616 | 614 | 481 | 483 |
| 0.4 | 684 | 678 | 538 | 536 |
| 0.6 | 765 | 757 | 603 | 599 |
| 0.8 | 794 | 791 | 623 | 622 |
| 1.0 | 792 | 796 | 617 | 622 |
| 1.2 | 775 | 788 | 599 | 609 |
| 1.4 | 754 | 770 | 579 | 591 |
| 1.6 | 734 | 747 | 560 | 570 |
| 1.8 | 716 | 723 | 542 | 549 |
| 2.0 | 697 | 698 | 518 | 528 |

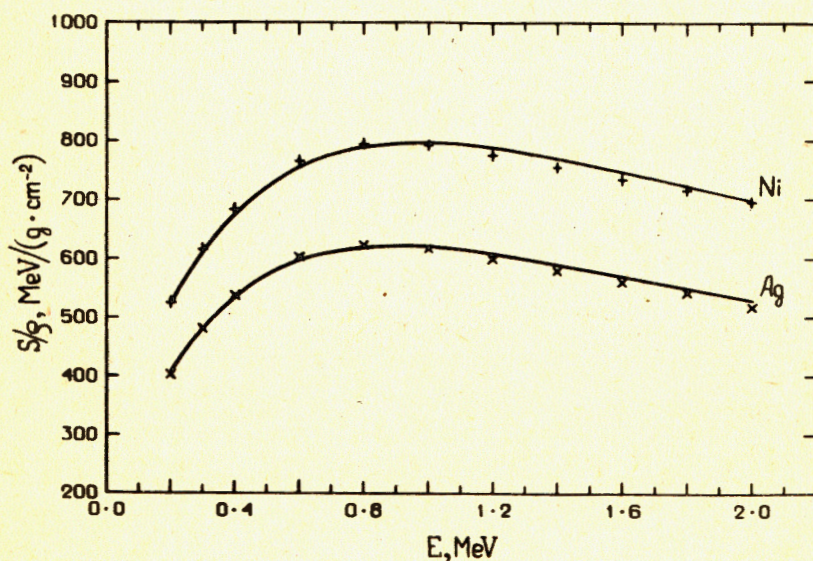


Рис. 4

Таблица 5. Сечение замедления газов H₂, He, N₂ и Ar для протонов. Экспериментальные данные из /18/, см. рис. 5/

| E | S/ρ в МэВ/(г.см ⁻²) | | | | | | | | |
|-------|---------------------------------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | МэВ | H ₂ | | He | | N ₂ | | Ar | |
| | | эксп. | расч. | эксп. | расч. | эксп. | расч. | эксп. | расч. |
| 0.066 | 3649 | 4057 | 1057 | 1083 | 757 | 757 | 504 | 499 | |
| 0.085 | 3499 | 3647 | 1062 | 1093 | 761 | 767 | 499 | 497 | |
| 0.096 | 3406 | 3537 | 1063 | 1085 | 756 | 758 | | | |
| 0.102 | | | | | | | 484 | 485 | |
| 0.154 | 2689 | 2878 | 937 | 970 | 678 | 688 | | | |
| 0.164 | | | | | | | 407 | 425 | |
| 0.200 | 2291 | 2389 | 837 | 849 | 612 | 607 | 365 | 371 | |
| 0.300 | 1696 | 1763 | 655 | 662 | 489 | 483 | 291 | 297 | |
| 0.400 | 1363 | 1402 | 544 | 541 | 410 | 405 | 248 | 253 | |
| 0.500 | 1150 | 1173 | 463 | 462 | 352 | 352 | 218 | 225 | |
| 0.600 | 1004 | 1016 | 405 | 405 | 314 | 313 | | | |
| 0.700 | 881 | 900 | 363 | 362 | 283 | 284 | 178 | 186 | |
| 0.800 | 808 | 810 | 332 | 329 | 261 | 260 | | | |

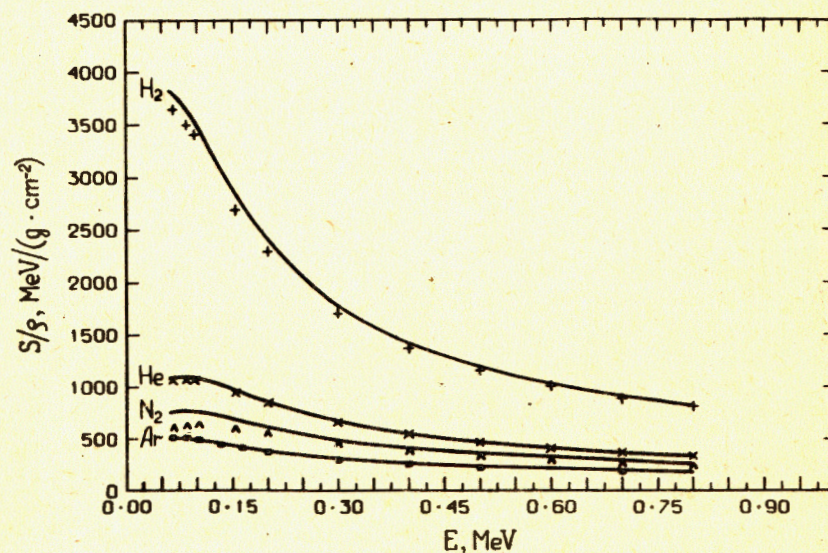


Рис. 5

Таблица 6. Сечение замедления газов He и Ar для ионов гелия. Экспериментальные данные из /19/, /см.рис.6/.

| Газ | Эксперимент | | Расчет | |
|-----|-------------|-------|--------|-------|
| | Е/кэВ/ | s | Е/кэВ/ | s |
| He | 41.19 | 5.53 | 40 | 5.09 |
| | 64.35 | 6.83 | 60 | 6.45 |
| | 84.56 | 7.87 | 80 | 7.60 |
| | 103.81 | 8.70 | 100 | 8.62 |
| | 126.20 | 9.48 | 120 | 9.53 |
| | 143.80 | 10.13 | 140 | 10.35 |
| | 163.60 | 10.72 | 160 | 11.10 |
| | 183.60 | 11.37 | 180 | 11.79 |
| | 201.50 | 11.95 | 200 | 12.42 |
| Ar | 42.51 | 27.19 | 40 | 23.22 |
| | 62.87 | 33.19 | 60 | 29.86 |
| | 77.63 | 37.11 | 80 | 35.64 |
| | 100.23 | 41.79 | 100 | 40.80 |
| | 121.38 | 48.73 | 120 | 40.80 |
| | 139.49 | 51.77 | 140 | 49.80 |
| | 159.87 | 55.02 | 160 | 53.70 |
| | 177.80 | 58.12 | 180 | 61.46 |
| | 201.05 | 61.59 | 200 | 60.70 |

Примечание: $s = S/\rho_A$ или $s = S/\rho_M$, s в 10^{-15} эВ·см²/атом; ρ_A , ρ_M - атомная или молекулярная плотность.

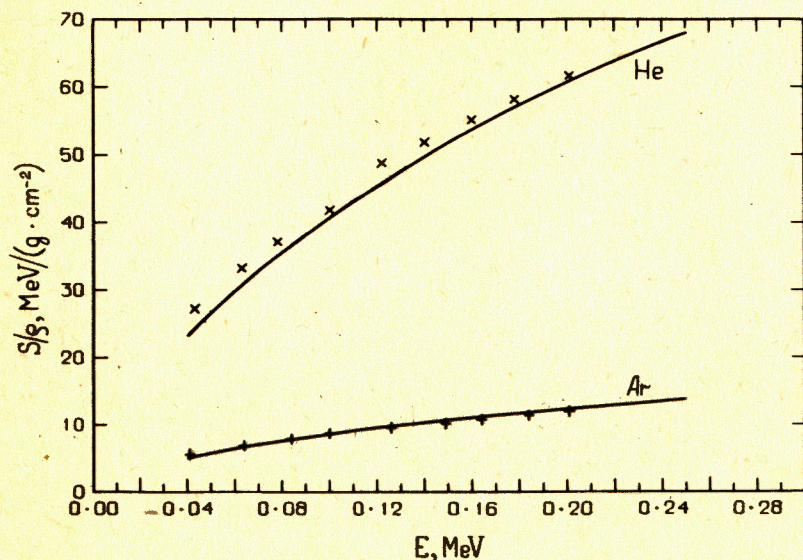


Рис.6

Таблица 7. Сечение замедления газов CO₂ и CH₄ для протонов в 10^{-15} эВ·см² на молекулу. Экспериментальные данные из /20/, /см.рис.7/.

| CO ₂ | | | | CH ₄ | | | |
|-----------------|-------|--------|------|-----------------|-------|--------|------|
| эксперимент | | расчет | | эксперимент | | расчет | |
| Е/кэВ/ | s | Е/кэВ/ | s | Е/кэВ/ | s | Е/кэВ/ | s |
| 40.4 | 41.0 | 40.0 | 43.0 | 38.1 | 34.2 | 40 | 38.7 |
| 62.3 | 46.6 | 60.0 | 47.4 | 59.7 | 36.4 | 60 | 40.5 |
| 81.7 | 48.7 | 80.0 | 48.9 | 85.0 | 39.3 | 80 | 39.7 |
| 98.9 | 49.3 | 100.0 | 48.7 | 104.8 | 38.0 | 90 | 38.8 |
| 119.9 | 48.7 | 120.0 | 46.9 | 127.1 | 36.4 | 100 | 37.8 |
| 138.9 | 46.8 | 150.0 | 45.1 | 142.0 | 33.2 | 150 | 32.2 |
| 162.1 | 45.5 | 200.0 | 40.5 | 162.3 | 31.1 | 200 | 27.4 |
| 181.7 | 42.8 | | | 179.4 | 28.8 | 240 | 23.8 |
| 197.2 | 41.4 | | | 202.0 | 27.2 | | |
| 221.0 | 39.34 | | | 220.9 | 25.79 | | |

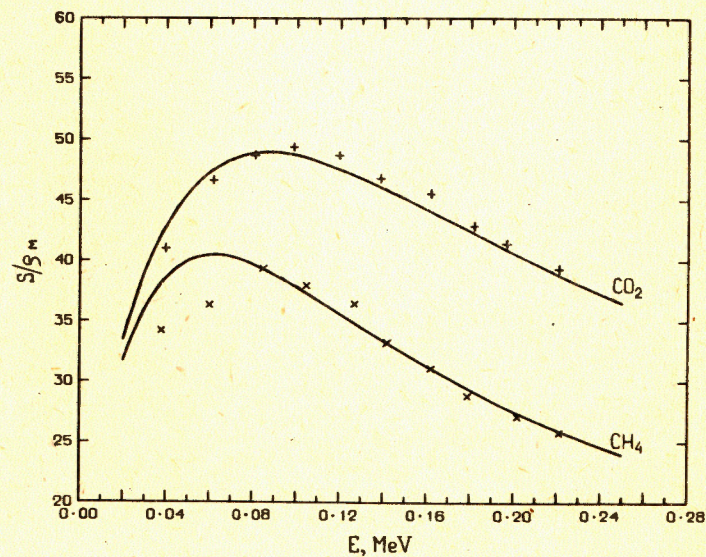


Рис.7

Таблица 8. Сечение замедления газов CH_4 , He и Ar для ионов гелия в 10^{-15} эВ·см² на молекулу /при He и Ar на атом/. Экспериментальные данные из /21/ см.рис.8 и 9/

| CH_4 | | | | He | | | | Ar | | | |
|---------------|------|--------|------|-------------|------|--------|------|-------------|------|--------|------|
| экспер. | | расчет | | экспер. | | расчет | | экспер. | | расчет | |
| E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) |
| 96 | 43.6 | 80 | 48.7 | 95 | 7.6 | 80 | 7.6 | 94 | 40.1 | 80 | 35.6 |
| 103 | 46.0 | 100 | 54.5 | 106 | 8.1 | 100 | 8.6 | 102 | 42.2 | 100 | 40.8 |
| 200 | 65.4 | 200 | 75.5 | 198 | 11.7 | 120 | 9.5 | 199 | 59.6 | 200 | 60.7 |
| 299 | 78.5 | 300 | 87.9 | 202 | 11.8 | 200 | 12.4 | 298 | 71.7 | 300 | 73.8 |
| 400 | 88.9 | 400 | 94.7 | 300 | 14.3 | 300 | 14.9 | 395 | 82.9 | 400 | 81.4 |
| 500 | 94.6 | 600 | 97.9 | 396 | 16.2 | 380 | 16.1 | 499 | 88.4 | 600 | 87.6 |
| 597 | 96.0 | 800 | 94.1 | 499 | 16.9 | 400 | 16.4 | 595 | 91.3 | 800 | 85.7 |
| 696 | 96.3 | 1000 | 87.8 | 599 | 17.6 | 600 | 17.6 | 693 | 90.3 | 1000 | 80.7 |
| 890 | 91.5 | | | 702 | 17.5 | 800 | 17.4 | 889 | 85.1 | | |
| 1026 | 88.1 | | | 899 | 17.2 | 1000 | 16.7 | 1035 | 82.1 | | |
| 1035 | 88.9 | | | 1042 | 16.5 | | | | | | |

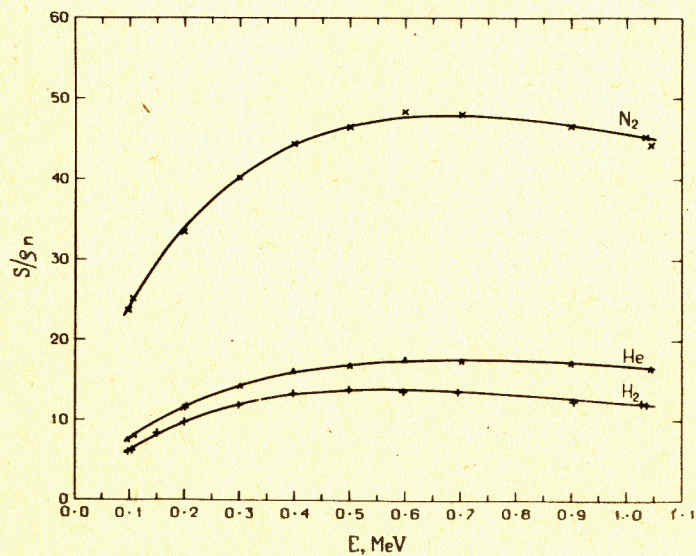


Рис.8

Таблица 9. Сечение замедления газов CO_2 и H_2 для ионов гелия в 10^{-15} эВ·см² на молекулу. Экспериментальные данные из /21/, /см.рис.8 и 9/

| H_2 | | | | CO_2 | | | |
|--------------|------|--------|------|---------------|-------|--------|-------|
| экспер. | | расчет | | экспер. | | расчет | |
| E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) | E/кэВ/ | s(E) |
| 96 | 6.2 | 80 | 6.1 | 93 | 65.4 | 80 | 69.7 |
| 103 | 6.3 | 100 | 6.9 | 103 | 66.2 | 100 | 77.0 |
| 149 | 8.5 | 140 | 8.4 | 203 | 91.6 | 200 | 103.4 |
| 199 | 9.8 | 200 | 10.1 | 296 | 108.0 | 300 | 119.6 |
| 298 | 11.9 | 300 | 12.0 | 397 | 122.3 | 400 | 129.7 |
| 396 | 13.3 | 400 | 13.1 | 500 | 128.3 | 600 | 138.2 |
| 498 | 13.9 | 600 | 13.5 | 596 | 134.0 | 800 | 137.7 |
| 596 | 13.6 | 800 | 12.8 | 704 | 132.0 | 1000 | 132.7 |
| 694 | 13.6 | 1000 | 11.8 | 902 | 132.1 | 1200 | 125.7 |
| 903 | 12.4 | | | 1034 | 130.9 | | |
| 1026 | 12.2 | | | 1045 | 128.5 | | |
| 1034 | 12.0 | | | | | | |

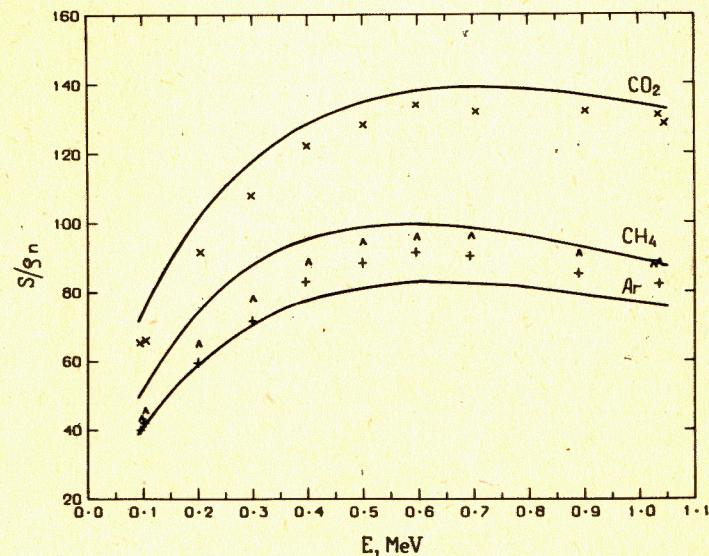


Рис.9

1. Lindhard J. Kgl.Danske Vindenskab.Selskab.Mat.-Fys.Medd., 1954, 28, No.8.
2. Lindhard J., Scharff M. Kgl.Danske Vindenskab. Selskab, Mat.-Fys.Medd., 1952, 27, No.15.
3. Lindhard J., Scharff M., Schiøtt H.E. Kgl. Danske Vindenskab. Selskab, Mat.-Fys.Medd., 1963, 33, No.14.
4. Lindhard J., Winter Aa. Kgl. Danske Vindenskab. Selskab, Mat.-Fys.Medd., 1964, 34, No.4.
5. Ziegler J.F. Helium Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matter, vol.4 of the Stopping and Ranges of Ions in Matter. Pergamon Press, New York, 1977.
6. Besenbacher F. et al. Kgl.Danske Vindenskab. Selskab, Mat.-Fys.Medd., 1979, 40, No.3.
7. Ziegler J.F. Handbook of Stopping Cross-Sections for Energetic Ions in All Elements, vol.5 of the Stopping and Ranges of Ions in Matter. Pergamon Press, New York, 1980.
8. Henniger J., Horlbeck B. JINR, 10-83-366, Dubna, 1983.
9. Armstrong T.W., Chandler K.C. Oak Ridge National Lab., Report No. ORNL-4869, Oak Ridge, 1973 and Nucl.Instr. and Meth., 1973, 113, p.313.
10. Northcliffe L.C., Schilling R.F. Nucl.Data, 1970, 7, p.233.
11. Pretzsch G. TU-Inf. 05-17-17, TU, Dresden, 1977.
12. Pretzsch G. Exp.Techn.der Phys., 1979, 27, p.31.
13. Anderson H.H., Ziegler J.F. Hydrogen Stopping Power and Ranges of Ions in Matter. Pergamon Press, New York, 1977.
14. Valenzuela A. et al. Phys.Rev., 1972, B6, p.95.
15. Santry D.C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1981, 188, p.211-216.
16. Santry D.C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1980, 178, p.523-530.
17. Santry D.C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1980, 178, p.531-537.
18. Baumgart H. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1983, 204, p.597-604.
19. Fukuda A. J.Phys.B: At.Mol.Phys., 1981, 14, p.4533-4544.
20. Fukuda A. Phys.Med.Biol., 1980, 25, p.877.
21. Baumgart H., Berg H., Huttel E. Nucl.Instr. and Meth., 1983, 215, p.319.
22. Fellingner J. et al. JINR, E16-83-513, Dubna, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 августа 1984 года.

Хеннигер Ю., Хо Ги Хон, Вагнер В. 6-84-598
Сравнение рассчитанных с помощью программы STOPOW/82 значений тормозной способности и сечений замедления ионов с энергиями до 1,5 МэВ/а.е.м. с экспериментальными данными

Проводились расчеты массовой тормозной способности различных твердых и газообразных тормозящих сред и сечений замедления ионов водорода и гелия. Сравнение рассчитанных величин с экспериментально измеренными указывает на достигнутую точность расчетов, которая лежит на уровне экспериментальных погрешностей. Модификацией программы STOPOW/82 удалось генерировать достаточно точные данные и для газов. Результаты представлены в виде таблиц и графиков.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод авторов

Henniger J., Ho Gi Hon, Wagner W. 6-84-598
Comparison of Calculated and Measured Stopping Powers and Stopping Cross Sections for Ions with Energy up to 1.5 MeV/a.e.m. Calculated with the Help of STOPOW/82 Program

Calculations of the mass stopping power and stopping cross sections of different solid and gaseous stopping environments H and He ions were done. Comparison of the calculated values with experimental measurements shows the received accuracy of the calculations, which lies upon the level of the experimental errors. By modification of the STOPOW/82 program we were a success to generate exact enough the data for the gases too. The results are presented by means of tables and grafically.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984