



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

До Ив Себ

P-871

ЗАМЕЧАНИЯ О СООТНОШЕНИИ
ПРОБЕГ-ЭНЕРГИЯ

неэф, 1962, т43, в1, с120-125.

Дубна 1962 год

До Ин Себ

P-871

ЗАМЕЧАНИЯ О СООТНОШЕНИИ
ПРОБЕГ-ЭНЕРГИЯ

13.5.82/4 чс.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Как известно, потери энергии заряженных тяжелых частиц при прохождении через вещество выражаются формулой:

$$\frac{dE}{dR} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} \frac{N_0 Z}{A} B, \quad (1)$$

где R - пробег в г/см², N_0 - число Авагадро, A и Z - атомный вес и атомный номер атомов вещества, v - скорость частицы.

Коэффициент B будем называть тормозной способностью вещества.

Линхард и Шарфф^{/1/} на основании закона Блоха $I = KZ$ (I - средняя энергия ионизации атома^{/2/}) показали, что в приближении модели Томаса-Ферми тормозная способность B зависит только от x :

$$x = \frac{v^2}{Z \frac{v_0^2}{0}}, \quad v_0 = \frac{e^2}{\hbar} \quad (2)$$

Используя это обстоятельство, легко показать, что пробег частицы в веществе будет иметь вид $R = \frac{AZ}{z^2} F(x)$, т.е. будет выражаться через универсальную функцию от x . Однако, как показывает эксперимент, закон Блоха неточен. На рис. 1 приведена зависимость от Z величины $K = I/Z$, полученная по результатам ряда работ. Черными кружками отмечены данные для протонов с энергией выше 340 Мэв^{/3/, /4/, /5/}. При обработке этих данных в формуле для потери энергии учитывались поправки только на релятивистский эффект. Средняя энергия ионизации алюминия полагалась равной 163 эв. Белыми кружками отмечены результаты работ, выполненных с протонами малых энергий^{/6,7/}. Кривая, нанесенная на рисунке, выражает зависимость вида $I = KZ^n$ ($K=17$, $n = 0,86$).

Экспериментальные точки хорошо ложатся возле этой кривой, в то время как по закону Блоха они должны были расположиться возле прямой, параллельной оси Z .

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что закон Блоха $I = KZ$, по-видимому, не имеет места. В таком случае тормозная способность не может быть функцией только от x . Тем не менее пробег может

быть выражен через универсальную функцию, если вместо x использовать другой параметр^{x)}:

$$y = \frac{E}{I a_0}, \quad (3)$$

где E и a_0 - кинетическая энергия и массовое число частицы. Данный вид параметра y , по-нашему мнению, будет хорошо соответствовать поставленной задаче для релятивистской области энергий. В выражение для y входит средняя энергия ионизации I . Для последующих выводов знание точного значения I не существенно.

Предположим, что не только в приближении модели Томаса-Ферми, но и в общем случае тормозная способность зависит только от y .

Тогда пробег R выразится через функцию F , зависящую только от y :

$$R = \frac{a_0 A I^2}{z^2 Z} F(y). \quad (4)$$

В приближении Бете^{/9/} $F(y)$ может быть получена теоретически. В общем случае вычислить $F(y)$ трудно, так как, несмотря на многочисленные работы^{/10-17}, точный вид выражения для тормозной способности неизвестен. Мы построим функцию $F(y)$ из экспериментальных данных. Так как форма $F(y)$ не зависит от состава вещества, т.е. $F(y)$ является универсальной функцией, мы используем для построения $F(y)$ наиболее точные и полные данные, полученные в ядерной фотоэмульсии.

11.

На рис.2 представлены экспериментальные данные работы^{/18/}, в которой измерения проводились в широком интервале энергий от ~ 1 Мэв до 700 Мэв. Результаты приведены для протона в стандартной эмульсии.

x) Как обычно, предполагается, что I не зависит от энергии. Параметр y ранее был использован М.З.Максимовым при расчете универсального соотношения пробег-энергия^{/8/}.

Как видно из рисунка, в интервале энергий 7-200 Мэв экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую линию. Если энергию выражать в Мэв, а пробег в μ , то в этом интервале соотношение пробег-энергия может быть представлено в виде:

$$E = aR^m, \quad (5)$$

где значения констант ^{x)} равны

$$\begin{aligned} a &= 0,265 \pm 0,002 \\ m &= 0,574 \pm 0,001 \end{aligned} \quad (6)$$

В интервале 200-1000 Мэв соотношение пробег-энергия также может быть представлено в виде (5). Если энергию выражать в Мэв, а пробег в см, то значения констант будут равны

$$\begin{aligned} a &= 41,41 \pm 0,40 \\ m &= 0,656 \pm 0,003 \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 3 приведены отклонения экспериментальных значений пробега R_e от значений R_T , вычисленных по формуле (5), в которой использовались полученные константы. Относительные отклонения даны в функции скорости частицы. Как видно из рисунка, в интервале энергий 7-1000 Мэв формула (5) справедлива с большой точностью.

III.

Построим функцию $F(y)$ для протона ($a_0=1, z=1$). Используя (5) и (4), получим

$$F(y) = k y^{1/m} \quad (8)$$

$$k = Z l_m^{-2} / a^{1/m} A \quad (9)$$

^{x)} В некоторых работах были получены другие значения констант $a = 0,262, m = 0,575/26/$ $a = 0,251, m = 0,581/27/$ $a = 0,286, m = 0,568/28/$. Различие в величине константы m можно объяснить неточностью измерений, а также тем, что измерения проводились в различных интервалах энергии.

Рассматривая зависимость функции F от Y в логарифмическом масштабе, можно видеть, что константы k и m определяют форму этой функции. Поскольку функция $F(Y)$ универсальна, то универсальными будут константа k и константа m , входящие в соотношение пробег-энергия (5). Средняя энергия ионизации стандартной ядерной эмульсии равна $I = 0,331 \text{ Кэв}^{1/3,19/}$. Отсюда следует, что интервалу энергий 7-100 Мэв соответствует интервал $Y=20-600$. В этом интервале Y соотношение пробег-энергия для всех веществ выражается согласно (5) и (8) равенством

$$E = aR^{0,874} \quad (10)$$

Здесь от состава вещества и параметров частицы зависит только величина a . Равным образом в интервале $600 \leq Y \leq 27000$ соотношение пробег-энергия выражается, согласно (5) и (7), равенством:

$$E = aR^{0,856} \quad (11)$$

1У.

Выведенные соотношения применялись нами в работе с водно-эмульсионной камерой /20-21/. Для определения константы a в соотношении (10) нами был измерен средний пробег μ -мезонов из π - μ - e распада, который оказался равным $R_{\mu} = 1010 \pm 16 \mu$. Принимая величину энергии μ -мезонов равной 4,12 Мэв /22/, мы получим значение $a = 0,197$. Соотношение пробег-энергия для водно-эмульсионной камеры, таким образом, будет иметь вид:

$$E = 0,197 R^{0,874} \quad (12)$$

Используя величину $a = 0,197$ и соотношение (9), мы получили среднюю энергию ионизации в водно-эмульсионной камере:

$$I_{в.э.} = 208 \text{ эв.} \quad (13)$$

У.

Можно привести ряд экспериментальных фактов, подтверждающих универсальность константы m , a , следовательно, и предположение о зависимости тормозной способности только от Y .

А. В интервале $20 \leq y \leq 600$.

1. В работе с водно-эмульсионной камерой ^{/21/}, с составом сильно отличающимся от состава обычной эмульсии, измерялись пробеги 69 протонов с известной энергией. Результаты были обработаны методом наименьших квадратов. Полученное соотношение $E = (0,201 \pm 0,008) R^{0,573 \pm 0,005}$ хорошо совпадает с (12).

2. На рис. 4 показаны отклонения экспериментальных значений пробега R_e от значения R_T , вычисленных по формуле (10) для Al, Cu, Pb и эмульсии. Относительные отклонения даны в функции y . Как видно из рисунка, отклонения меньше 1% /18,29-31/.

Б. В интервале $600 \leq y \leq 27000$.

1. Дифференцируя (5) и учитывая (9), получим выражение для потерь энергии в виде:

$$\frac{dE}{dR} = m \left(\frac{Z}{Ak} \right) l^{\frac{1}{m}-2} E^{1-\frac{1}{m}} \quad (14)$$

Используя это выражение и универсальность констант k и m , получим отношение тормозных способностей

$$\frac{B}{B_0} = \left(\frac{A_0}{A} \frac{Z}{Z_0} \right) \left(\frac{l}{l_0} \right)^{\frac{1}{m}-2} \quad (15)$$

Как видно, в выражение для отношения $\frac{B}{B_0}$ величина энергии не входит.

В таблице приведены отношения тормозных способностей, измеренные в различных веществах ^{/3,4,23-25/}. Как видно из таблицы, отношение тормозных способностей с хорошей точностью не зависит от энергии.

Т а б л и ц а

E	эм/Сu	Be/Al	C/Al	Al/Сu	Fe/Al	Pb/Сu
750-600	1,0101	-	-	0,8804	-	1,3162
600-450	1,0067	-	-	0,8794	-	1,3205
450-300	1,0026	1,024	1,124	0,8789	0,906	-
270	-	-	1,137	-	-	-
180	-	1,02	1,12	-	0,889	-

2. Из работ Мазера^{3,4} и Сегре (протоны с энергией 340 Мэв) и Зрелова-Столетова (660 Мэв), выполненных с медью $^{23}_{11}\text{Cu}$, мы получили $\mu = -0,65 \pm 0,02$, что в пределах экспериментальных ошибок согласуется с (12).

У1.

Универсальность констант k и μ может найти применение в опытах по измерению средней энергии ионизации I атома. В этих опытах обычно измеряется величина среднего пробега или тормозная способность вещества. Затем по формуле (1) вычисляется I . При этом вводятся различные поправки $^{10-16/}$, основанные на более или менее произвольных предположениях. Точность измерений I в этих опытах составляет ~ 10%. С другой стороны, используя соотношение (9), можно по величине среднего пробега рассчитать I с точностью ~ 7%.

Автор выражает благодарность М.И. Подгорецкому и К.Д. Толстому за ценные обсуждения, Б.П. Баннику и М.Г. Шафрановой за помощь в работе, Ким Зе Пхену и Ом Сан Ха за проведение вычислений на машине М-20.

Л и т е р а т у р а

1. I. Lindhard and M. Scharff. Dan. Mat. Fys. Medd. 27, 15 (1953).
2. F. Bloch. Ann. Physik 16, 285 (1933).
3. W.H. Barkas, von Friesen, S. Nuovo Cimento Supp. 19, 41 (1961).
4. C.J. Bakker, E. Segre. Phys. Rev. 81, 489 (1951).
5. В.П. Зрелов, Г.А. Столетов. ЖЭТФ, 38, 658 (1959).
6. D.C. Sach, J.R. Richardson, Phys. Rev. 83, 834 (1951).
7. G. Mano. Comptes rendus 197, 319 (1933).
8. Н.З. Максимов. ЖЭТФ, 37, 127 (1959).
9. H.A. Bethe. Am. Physik 5, 325 (1930).
10. M.S. Livingston and H.A. Bethe. Revs. Modern Phys. 9, 263 (1937).
11. H.A. Bethe, Zs. f. Phys. 76, 293 (1936).
12. C. Moller, Ann. d. Phys. 14, 531 (1932).

13. L.M.Brown. Phys. Rev. 79, 297 (1950).
14. M.C.Walske. Phys. Rev. 88, 1283 (1952).
15. M.C.Walske. Phys. Rev. 101, 940 (1956).
16. R.M.Sternheimer. Phys. Rev. 88, 851 (1952).
17. W.H.Barkas. Nuovo Cim. 8, 201 (1958).
18. W.H.Barkas, P.H.Barrett, P.Cuer, P.Heckman, F.M.Smith, H.K.Ticho. Nuov. Cim. 8, 185 (1958).
19. Vigneron, I. Journ. de Phys. et rad., 14, 145 (1953).
20. До Ин Себ, Л.Г. Кривенцова, С.И. Любомилов, М.Г. Шафранова. Материалы III Международной конференции по ядерной фотографии, Москва, 1960 (в печати).
21. До Ин Себ, Л.Ф. Кириллова, З.Корбел, М.Г.Шафранова, ПТЭ (1961) (в печати).
22. W.J.Barkas, W.Birnbaum, F.M.Smith. Phys. Rev. 101, 778 (1956).
23. R.L.Mather and E.Segre. Phys. Rev. 84, 191 (1951).
24. T.Thompson UCRL-1910 (Berkley 1952).
25. C.Tobias. AECD- 2099- A.
26. C.M.Lattes, P.M.Fowler, P.Cuer. Proc.Phys.Soc. 59, 883 (1947).
27. H.Bradner, F.M.Smith, W.H.Barkas and Bishop. Phys. Rev. 77, 462 (1950).
28. H.Fay, K.Gottstein, K.Hain. Supp. Nuo. Cim. 11, 234 (1954).
29. N.Bloembergen and von Heerden P.J. Phys. Rev. 83, 561 (1951).
30. H.Bichsel, R.F.Mozley and W.A.Aron. Phys. Rev. 105, 1788 (1957).
31. F.C.Gilbert, H.H.Heckman and F.M.Smith. Rev. Scient. Instrum. 29, 404 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел
27 декабря 1961 года.

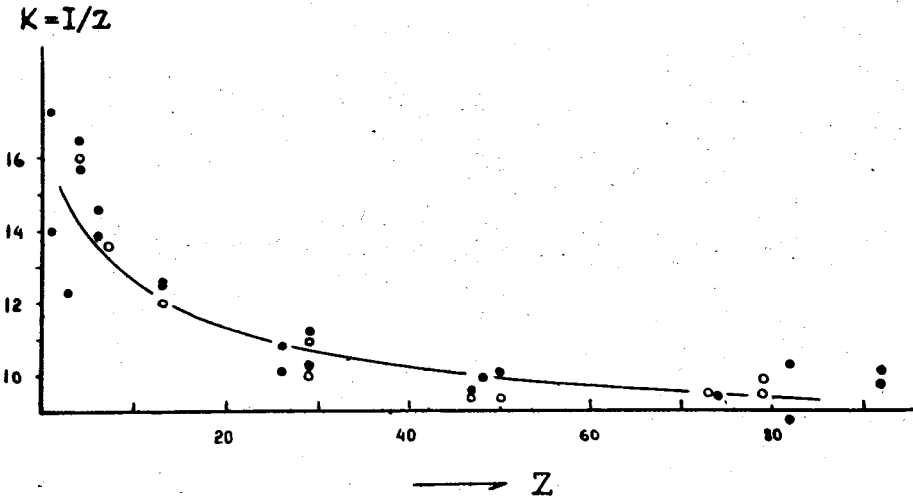


Рис. 1.

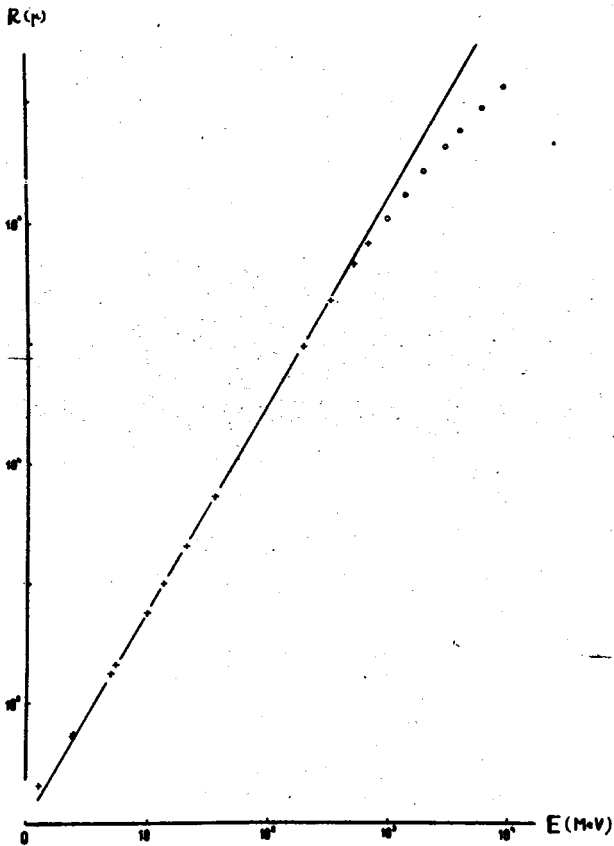


Рис. 2. Соотношение пробег-энергия для протонов в стандартной эмульсии.

+ - результаты работы /3/ ,

o - результаты, вычисленные по Баркасу /17/ .

$$\frac{R_e - R_r}{R_e} \times 100$$

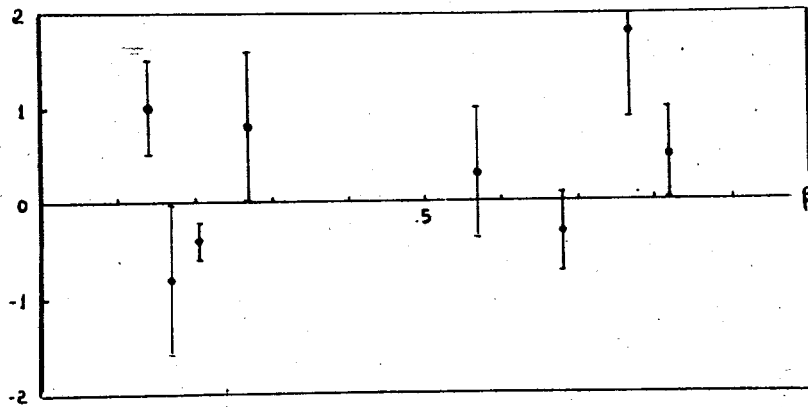


Рис. 3.

$$\frac{R_e - R_r}{R_e} \times 100$$

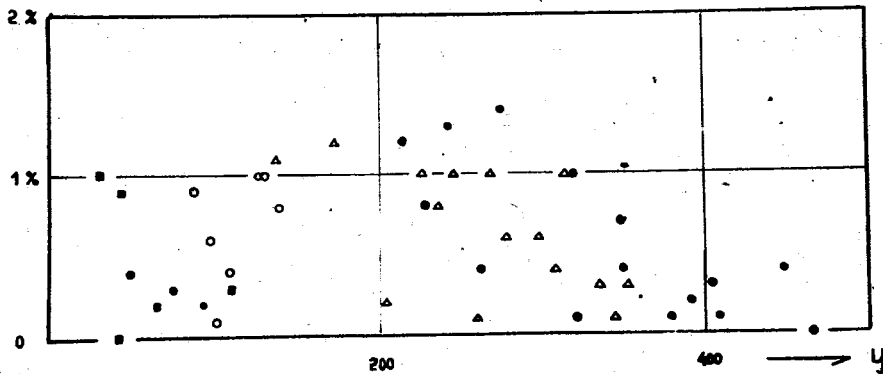


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и вычисленных значений пробегов.

■ - измерения в ядерной эмульсии; ● - на Al ;
○ - на Pb; Δ - на Si .