

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА**

Ю.А. Белкова, Я.А. Теплова

**ПРОБЕГИ ИОНОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ И
ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ**

Препринт НИИЯФ МГУ №2015-1/888

Москва, 2015 г.

УДК 539.186

Ю.А. Белкова, Я.А.Теплова
e-mail:teplova@anna19.sinp.msu.ru

**ПРОБЕГИ ИОНОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ И
ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ**

Препринт НИИЯФ МГУ №2015-1/888

Аннотация

Собраны, систематизированы и проанализированы полученные в ЛАС НИИЯФ МГУ экспериментальные данные о пробегах ионов He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, P, Ar, K, Br, Kr в различных газах (водород, гелий, аргон, воздух), углеводородных соединениях (метан, пары бензола) и в ядерной фотоэмульсии. Рассмотрены общие закономерности изменения пробегов в зависимости от энергии и заряда ядра ионов, а также от атомного номера среды.

Yu.A.Belkova, Ya.A.Teplova

ION RANGES IN GASES AND NUCLEAR PHOTO EMULSION

Preprint MSU SINP №2015-1/888

Abstract

This work presents a compilation, systematic and analysis of experimental data on ranges of He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, P, Ar, K, Br, Kr ions in gases (hydrogen, helium, argon, air), hydrocarbons (methane, benzene vapor) and nuclear photo emulsion, obtained in Laboratory of Atomic Collisions of Scobeltsyn Nuclear Physics Research Institute. The general features of range variation, depending on the energy and nuclear charge of ions and atomic number of media, are analyzed.

©Ю.А. Белкова, Я.А. Теплова

©НИИЯФ МГУ, 2015, <http://www.sinp.msu.ru>

Введение

Работы по изучению взаимодействия тяжелых ионов с веществом являются естественным продолжением исследований торможения протонов и электронов, активно проводившихся в 40-70 годы XX века.

Тяжелые заряженные частицы встречаются в природе (в космических лучах, при распаде радиоактивных элементов), а также образуются в ионных источниках и ускоряются в современных ускорительных устройствах.

Быстрые тяжелые ионы необходимы для медицинской диагностики и лечения онкологических заболеваний. Пучки тяжелых ионов предпочтительны по сравнению с гамма-лучами, поскольку ионы при столкновении с частицами вещества передают большую порцию энергии, имея небольшой пробег, что позволяет локально воздействовать на вредное новообразование, не разрушая окружающие ткани. В неорганических веществах тяжелые ионы могут, останавливаясь на определенной глубине, создавать некоторый слой с отличающимися от основного вещества свойствами, что находит применение при ионной имплантации и в разных отраслях промышленности.

Область применения результатов исследования взаимодействия ионов с веществом обширна и во многих случаях требует оценки параметров с большой точностью. Процесс торможения быстрых частиц в среде обычно описывается с помощью нескольких параметров, одним из очевидных является величина пути, по которому пройдет частица в среде до полной остановки. Длина этого пути, как известно, называется пробегом и часто обозначается буквой R . Большую роль в формировании пробега играет химический состав и агрегатное состояние среды, что сказывается на длине пробега.

Наибольшее количество измерений пробегов относится к газообразной среде, что важно для прикладных работ и удобно для теоретического моделирования. Однако более интересными и нужными является измерение пробегов в твердом веществе, в котором труднее непосредственно фиксировать длину пробега. Кроме того, физический процесс взаимодействия быстрой частицы с атомами в твердой среде сложнее, чем в газе. Как известно, расстояние в плотной среде между атомами существенно меньше, чем в газе, поэтому возбуждение иона, вызванное взаимодействием с атомами (или молекулами) среды, может сохраняться до следующего соударения, что изменит величину теряемой ионом энергии и его пробег. Возникает вопрос - как, используя измерения в газе, оценить пробег в твердом веществе. Одним из путей решения этого вопроса является измерение пробегов ионов в «промежуточном» веществе, которое по плотности приближается к твердой среде, например, в жидкости или газе высокого давления. Подобной средой

являются и ядерные фотоэмульсии, в которых пробег ионов может быть измерен непосредственно, что важно для последующего анализа.

В настоящей работе собраны экспериментальные результаты измерения пробегов ионов, полученные в лаборатории атомных столкновений (ЛАС) отдела физики атомного ядра (ОФАЯ) НИИЯФ МГУ, в газах с различными зарядами ядер атомов мишени, Z_i (водород, гелий, аргон, воздух), углеводородных соединениях (метан, пары бензола) для ионов с зарядами ядер от $Z=2(\text{He})$ до $Z=36(\text{Kr})$, а также пробеги ионов с $Z=2-6$ в фотоэмульсии НИКФИ-Я2.

Результаты частично опубликованы в работах [1-6].

1. Экспериментальное определение пробегов ионов

Различные методы измерения пробегов имеют свои достоинства и недостатки, приводя к разнице в конечных результатах. Известно, что процесс прохождения частиц через вещество представляет собой цепочку столкновений частицы с атомами или молекулами среды, то есть является сугубо статистическим, при этом в конце пробега наблюдается естественный разброс величин.

Различные методы измерения величин пробегов, связанные с аппаратными особенностями также приводят к отличию в конечных результатах. Непосредственные измерения длины пробега, например, в толстослойных «ядерных» фотопластинках, представляются наиболее наглядными, однако их абсолютная величина зависит от размера зерна, плотности и влажности эмульсии.

При прохождении частицы через вещество движущаяся частица постепенно теряет энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды, что фиксируется по величине электрического импульса, поэтому особенности регистрации импульса и качество регистрирующей аппаратуры сказываются на точности измерения конца пробега, так называемого «хвоста». Методика измерения пробегов ионов, приводимых в данной работе, подробно описана в [2,3].

На рис. 1 в качестве примера приведены типичные экспериментальные кривые. По таким кривым определялись величины среднего, экстраполированного и «максимального» пробегов. Как видно из рисунка, экстраполированный пробег, R' , больше, чем средний пробег, R , но меньше, чем пробег максимальный, R'' .

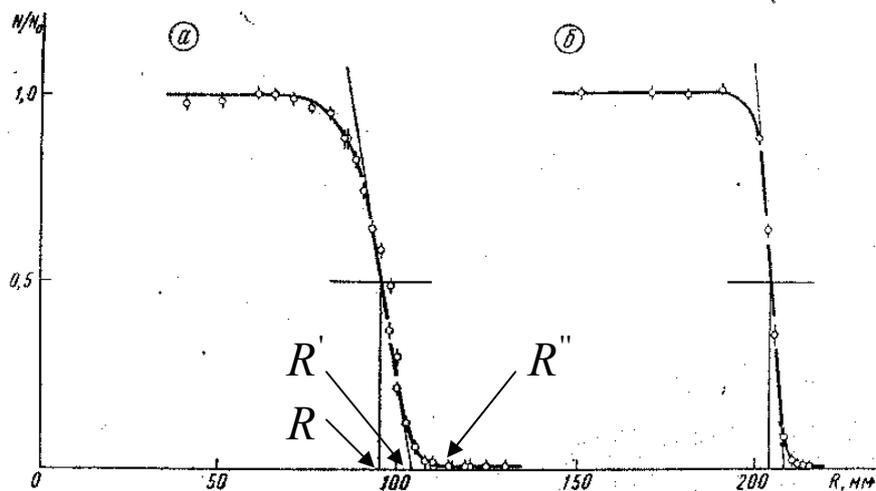


Рис.1. Относительное количество частиц N/N_0 в зависимости от расстояния от входного «окна» в камеру торможения: а- для ионов ^{31}P (давление воздуха в камере торможения $p=3.6$ кПа, $t=19^0$), б- для ионов He ($p=40.3$ кПа, $t=19^0$) [4].

Тяжелые заряженные частицы проходят слой поглотителя почти без рассеяния и поэтому в идеальном случае имеют прямолинейную траекторию в веществе. При этом частицы теряют энергию в основном на ионизацию и возбуждение атомов среды. Если энергия ионов E и средние потери энергии dE/dx одинаковы, то все частицы с одинаковым зарядом Z должны проходить похожие расстояния в веществе. На практике наблюдается разброс величин пробегов, связанный со статистическим характером процесса ионизационных потерь. Частицы теряют свою энергию в очень большом, но конечном числе отдельных актов столкновения. Флуктуациям подвержено как число актов столкновения на единицу длины, так и потери энергии в каждом отдельном акте. В идеальном случае (без учета разброса за счет аппаратных особенностей) пробеги отдельных частиц распределены около среднего значения пробега R по закону Гаусса, в результате чего кривая на рис. 1 имеет не резкий, а плавный спад. В соответствии со свойствами гауссова распределения интенсивность пучка уменьшается в два раза, когда пробег равен среднему пробегу ионов. Построив касательную к кривой в этой точке и продолжив ее до пересечения с осью абсцисс, можно найти экстраполированный пробег R' . Обычно разность $S=R'-R$ называется разбросом пробегов, а относительный разброс пробегов S/R - стрэгглинг. Погрешности результатов измерений пробегов в рассмотренном интервале скоростей составляли 2-3%. Величина стрэгглинга для различных ионов колебалась от 3 до 10%. По пересечению кривой удельной ионизации с осью абсцисс определялся максимальный пробег ионов, который оказался на 3-5% больше экстраполированного.

2. Анализ полученных результатов

Результаты экспериментов представлены в таблицах и графиках (с.13-54) совместно с расчетными величинами, полученными по программе SRIM-2013. Проанализирована зависимость пробегов от Z , Z_t и E , $R=R(Z, Z_t, E)$.

На рис. 2 представлены пробеги ионов Li в различных газовых средах. Наибольший пробег ионов Li наблюдается в гелии, пробеги в водороде примерно в 1,5 раза, а в аргоне и воздухе - в 8 раза меньше при той же энергии. Пробеги в воздухе и аргоне совпадают между собой в пределах экспериментальной погрешности.

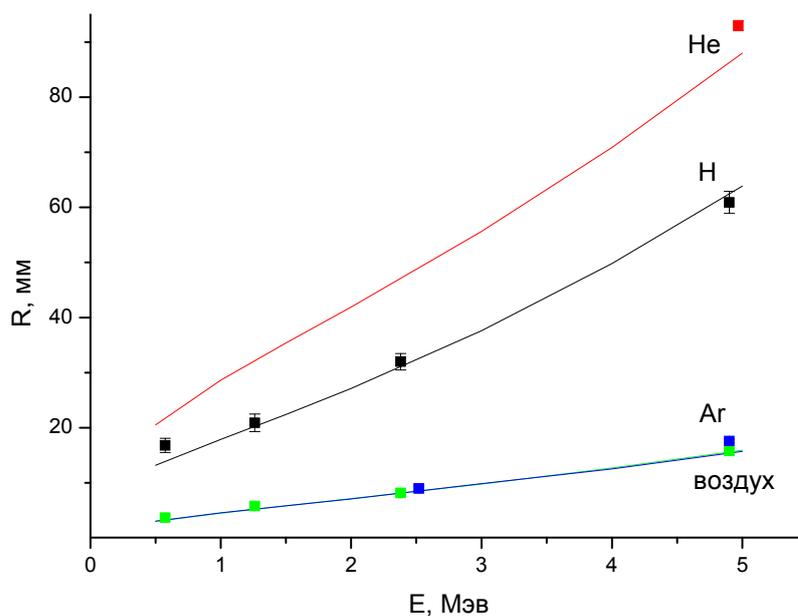


Рис. 2. Пробеги ионов Li в различных газовых средах (гелий, водород, аргон, воздух) в зависимости от энергии ионов; ■ – экспериментальные результаты, представленные в таблицах данной работы. Сплошные линии- расчеты по программе SRIM-2013.

На рис. 3 представлены кривые зависимости $R(Z)$ для нескольких значений скоростей ионов в воздухе. Приведенные экспериментальные данные [5] показывают, что зависимость пробегов ионов от Z при одной скорости не является монотонной. В интервале зарядов $Z=2-18$ максимумы и минимумы величин пробегов отчетливо наблюдаются для скоростей ионов $V=(2-6) \cdot 10^8$ см/с, с увеличением скорости осцилляции становятся менее выраженными.

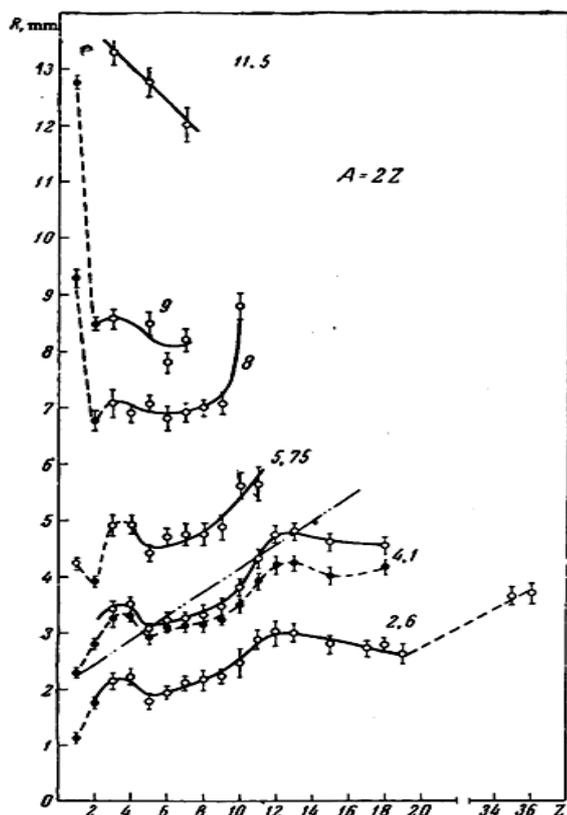


Рис. 3. Зависимость пробегов многозарядных ионов от Z в воздухе при давлении 100 кПа, 19°C : R'' – светлые точки, соединенные сплошными линиями. R – черные точки, соединенные пунктиром. Рядом с кривыми указана скорость ионов, V , в единицах 10^8см/с . Штрих-пунктирная прямая рассчитана по формуле (9) при $V = 4,1 \cdot 10^8\text{см/с}$.

3. Теоретическое описание пробегов ионов

Известно [7-19], что частица с энергией E , пройдя в веществе некоторое расстояние R до остановки, теряет всю свою энергию за счет множества случайных столкновений с атомами тормозящего вещества. Пробег данной частицы в конкретном тормозящем веществе пропорционален ее энергии E . Зная зависимость $R(E)$, можно, измеряя пробеги частиц, определить их начальную энергию.

Пробег частицы можно вычислить, зная удельные потери энергии $(-\frac{dE}{dx})$ и начальную энергию E :

$$R(E) = \int_0^E \frac{dE}{(-\frac{dE}{dx})} . \quad (1)$$

Выражение (1) определяет средний пробег ионов, если при вычислениях использовались средние потери энергии.

Изменение пробега иона при уменьшении его начальной энергии с E_1 до E_2 может быть получено из (1):

$$R(E_1) - R(E_2) = \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)} \quad (2)$$

Основные закономерности в описании пробегов определяются особенностями потерь энергии ионов, которые существенно различаются в зависимости от начальной скорости (энергии) иона.

В области малой скорости ионов V , $V \leq V_0 Z^{2/3}$, где $V_0 = e^2/\hbar$, потери энергии пропорциональны скорости иона [20,21]. Так, в полуклассическом приближении, основанном на выражении, полученном О.Б.Фирсовым [21] для энергии, передаваемой при столкновении иона с атомом вещества, потери энергии пропорциональны скорости, где k_1 - коэффициент пропорциональности [22]:

$$-\frac{dE}{dx} = k_1 (Z + Z_t) V. \quad (3)$$

Если учесть, что в нерелятивистском случае $dE = MVdV$, пробеги ионов будут пропорциональны начальной скорости ионов:

$$R = k_1' \int \frac{MVdV}{(Z + Z_t)V} = k_1' \frac{M}{Z + Z_t} V \quad (4)$$

В области больших скоростей, $V > V_0 Z^{2/3}$, потери энергии рассматриваются в предположении, что энергия тратится исключительно на ионизацию и возбуждение атомов тормозящего вещества. В приближении Бете-Блоха [23,24], если считать, что логарифмическая функция медленно меняется с изменением V , а релятивистская поправка и поправка на поляризацию среды в рассматриваемой области скоростей являются пренебрежимо малыми, потери энергии имеют можно описать следующим выражением:

$$-\frac{dE}{dx} = k_2 \frac{Z^2}{V^2} Z_t, \quad (5)$$

а пробеги ионов можно представить как

$$R = k_2' \int \frac{MVdV}{Z^2 Z_t / V^2} = k_2' \frac{M}{Z^2 Z_t} V^4. \quad (6)$$

Соотношение между пробегами частиц с различными зарядами ядер Z и массами M в одной и той же среде, исходя из (6), можно записать в виде

$$R_2(V) = \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \cdot \frac{M_2}{M_1} \cdot R_1(V), \quad (7)$$

откуда следует, что функция

$$f(V) = R(V) \cdot \frac{Z^2}{M}, \quad (8)$$

является одинаковой и характеризует пробеги ионов с данной скоростью V в конкретной среде.

Экспериментальные данные показывают, однако, что величина функции $f(V)$ зависит от заряда ядра ионов. На рисунке 4 приведены величины Z^2R/A , рассчитанные на основе экспериментально измеренных пробегов различных ионов в водороде.

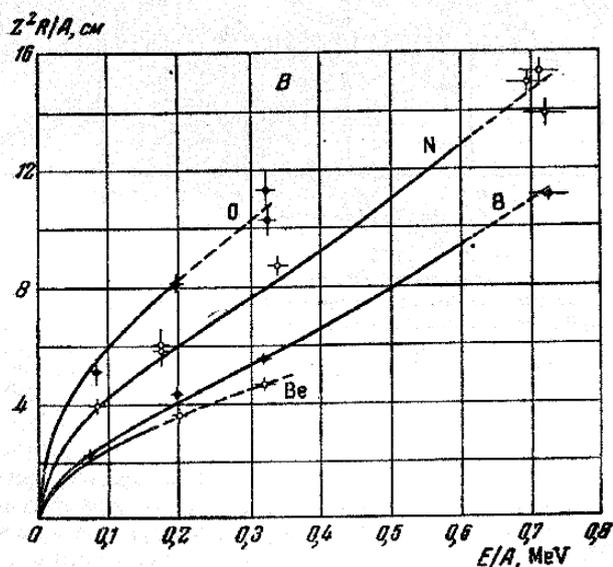


Рис.4. Зависимость пробегов ионов от энергии в водороде при давлении 100 кПа [2].

Как видно из рис. 4, функция (8) не универсальна, ее величина монотонно увеличивается с возрастанием Z при одной и той же скорости ионов. Аналогичные результаты получаются и при рассмотрении пробегов ионов в других средах [2,4]. Это вызвано ограниченностью применимости формул (5)-(8). Для того, чтобы использовать данное приближение при расчетах пробегов ионов на основе известных данных о пробегах протонов в веществе, в (7) вводятся дополнительные члены, например, в [6] для пробегов ионов используется выражение

$$R_z = MR_p / Z^2 + MZ^{2/3} C_z (V / V_0 Z) \quad (9)$$

где C_z – универсальная функция, зависящая от отношения скорости иона к скорости его К-электрона.

Для частиц меньшей энергии ($E \sim 100$ кэВ/нуклон) необходимо учитывать процессы перезарядки иона. В результате захвата и потери электронов средний заряд ионов становится меньше заряда их ядер Z , вследствие чего уменьшаются средние потери энергии. С другой стороны, те же процессы сами по себе являются дополнительными источниками потерь энергии, которые для легких ионов становятся сравнимыми по величине с ионизационными потерями. При дальнейшем замедлении иона ($E \sim 10$ кэВ/нуклон) возрастает роль упругих потерь энергии.

В области средних скоростей (от V_0 до $6V_0$), заряд иона меняется по мере прохождения через вещество за счет процессов потери и захвата электрона, поэтому в выражении (5) необходимо заменить Z на средний заряд иона $\bar{i} = \sum i \cdot F_i$, где F_i - зарядовые фракции ионов. Существует большое количество полуэмпирических выражений для среднего заряда ионов. Дмитриевым и Николаевым [24], для области значений $\frac{\bar{i}}{Z} < 0,6$, было получено выражение $\frac{\bar{i}}{Z} = \frac{k}{Z^{1/2}} \cdot \frac{V}{V_0}$, где коэффициент k изменяется от 0.4 для ионов в аргоне до 0.35 - в гелии. Учет изменения потерь энергии за счет отличия \bar{i} от Z , приводит к соответствующему изменению в выражении для пробега ионов:

$$R = k_2' \int \frac{MVdV}{(Z^{1/2} \frac{V}{V_0})^2 Z_t / V^2} = k_2' \frac{M}{ZZ_t} V^2 \quad (10)$$

Таким образом, пробеги ионов с данной скоростью V в конкретной среде характеризуются общей функцией

$$f(V) = R(V) \cdot \frac{Z}{M}, \quad (11)$$

а в области больших скоростей ионов, $V \gg V_0 Z^{2/3}$, когда ион теряет все электроны при прохождении через вещество, справедливы соотношения (7) и (8).

На рис. 5 представлены экспериментальные данные о пробегах ионов Li, Be, B и C в воздухе.

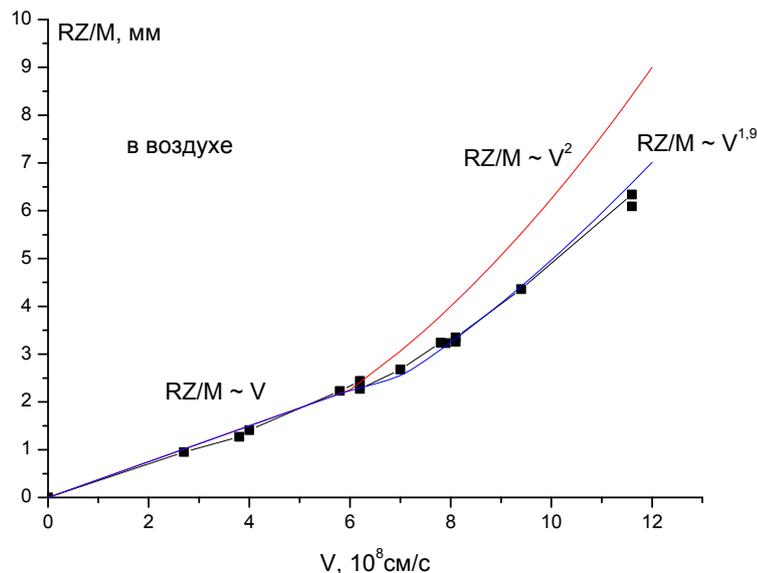


Рис.5. Зависимость пробегов ионов Li, Be, B и C в воздухе от скорости ионов. ■ – экспериментальные результаты, представленные в таблицах данной работы. Сплошные линии- расчеты по формулам $RZ/M = k_1 V$ и $RZ/M = k_2 V^{1.9}$.

Из рис.5 видно, что функция $f(V)$ (11) действительно является универсальной для рассмотренных ионов. На основе экспериментальных данных в области малых скоростей ($V < 7 \cdot 10^8$ см/с) функцию $f(V)$ можно представить в виде $f(V) = k_1 V$, $k_1 = 0.375$, что соответствует выражению (4). При дальнейшем увеличении скорости зависимость пробегов от скорости изменяется, $f(V) = k_2 V^\delta$, где $\delta = 1.9$, $k_2 = 0.063$. Полученное значение δ несколько меньше теоретической величины, следующей из формулы (10).

4. Выводы

1. На основе представленных экспериментальных данных проведен анализ зависимости пробегов ионов от Li до Kг от V в интервале скоростей $V = (2-12) \cdot 10^8$ см/с в различных газовых средах и фотоэмульсии.
2. В области средних скоростей ионов $((7-12) \cdot 10^8$ см/с) необходимо учитывать существенное отличие среднего заряда иона от заряда ядра, что приводит к изменению величин потерь энергии и пробегов ионов.
3. Использование среднего заряда ионов при расчетах пробегов позволяет получить универсальную функцию $f(V) = R(V) \cdot \frac{Z}{M}$, справедливую во всей рассмотренной области скоростей для пробегов различных ионов в среде.
4. В области малых скоростей пробег ионов пропорционален скорости ионов, $R = k_1 \frac{M}{Z} V$, а при увеличении скорости ионов соответствующая зависимость приобретает вид $R = k_2 \frac{M}{Z} V^\delta$, где $1 < \delta < 2$.

Список литературы

1. Я.А.Теплова, И.С.Дмитриев, В.С.Николаев, Л.Н.Фатеева. О взаимодействии ионов лития с веществом // ЖЭТФ. 1957. Т.32, Вып. 5, С.974-978.
2. Я.А.Теплова, В.С.Николаев, И.С.Дмитриев, Л.Н.Фатеева. Пробег и удельная ионизация многозарядных ионов в газах // ЖЭТФ. 1958. Т.34, Вып. 3, С.559-568.
3. Ю.А. Воробьев. Пробег ионов азота и бериллия в воздухе. // ЖЭТФ. 1958. Т.34, С.1306-1307.
4. Я.А.Теплова, В.С.Николаев, И.С.Дмитриев, Л.Н.Фатеева. Пробег и удельная ионизация многозарядных ионов // Известия АН СССР. Серия физическая. 1959. Т.23, №7, С.894-897.

5. Я.А.Теплова, В.С.Николаев, И.С.Дмитриев, Л.Н.Фатеева. Торможение многозарядных ионов в твердых и газообразных средах // ЖЭТФ. 1962. Т.42, Вып. 1, С.44-60.
6. И.С.Дмитриев, Я.А.Теплова. Пробеги легких ионов в фотоэмульсии НИКФИ-Я2 // приборы и техника эксперимента. 1967. №4, С.62-65.
7. N. Bohr // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1948. V.24 P.191.
- Н. Бор. Прохождение атомных частиц через вещество.- М. ИЛ. 1950.
8. S.K.Allison and S.D.Warshaw // Rev. Mod. Phys., 1953. V.25. P.779.
9. H.A.Bethe and J.Ashkin. Experimental Nuclear Physics, ed. E.Segre, New York, 1953, V.1, chapter 2. Экспериментальная ядерная физика. под ред. Э.Сегре. М.:ИЛ, 1955.
10. J.Lindhard and M.Sharff // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1953. V.27. P.15.
11. N. Bohr and J.Lindhard // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1954. V.28. P.7.
12. S.K.Allison, J.Cuevas and M.Garsia-Munoz // Phys. Rev. 1960. V.120. P.1266.
13. J.Lindhard, M.Sharff and H.E.Schiott // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1963. V.33. P.14.
14. H.E.Schiott // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1966. V.35. №9.
15. Д.Бейтс. Теория атомных столкновений. В кн. Атомные и молекулярные процессы. Под ред. Д.Бейтса. М. Мир. 1964. С.478-539.
16. А.Далгарно. Пробеги и потери энергии. В кн. Атомные и молекулярные процессы. Под ред. Д.Бейтса. М. Мир. 1964. С.540-573.
17. L.G.Northcliffe // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1963, V.13. P.67.
18. L.G.Northcliffe and R.F.Schilling // Nuclear Data Tables. 1970. V.A7, P.233.
19. W.Whaling. Handbuch der Physik. Berlin, Springer. 1958. P.202.
20. О.Б.Фирсов // ЖЭТФ. 1959. Т.36. С.1517.
21. J. Lindhard, M. Scharff // Phys. Rev. 1961. V.124. P.128.
22. H.A. Bethe // Ann. D. Phys. 1930. V.5. P.325.
23. Я.А.Теплова, Ю.А.Белкова. Потери энергии ионов в газовых средах. Препринт НИИЯФ МГУ №2010-1/858, 2010, 41 стр.
24. F.Bloch // Zs. f. Phys. 1933. V.81. P.363.
25. И.С.Дмитриев, В.С.Николаев // ЖЭТФ. 1964. Т.47. С.615.

Экспериментальные данные

Таблицы экспериментальных данных содержат

- пробеги ионов от Li до Kг в различных газовых средах;
- пробеги ионов Li, Be, B, C в ядерной фотоэмульсии.

Рисунки содержат экспериментальные данные, приведенные в таблицах, и расчеты по программе SRIM-2013.

В таблицах представлены: энергия ионов в МэВ/нуклон, скорость ионов в 10^8 см/с, средние пробеги ионов R , экстраполированные пробеги ионов R' , максимальные пробеги ионов R'' , разброс пробегов ионов, характеризующий отличие экстраполированного пробега от среднего, $S = R' - R$, стрэгглинг пробегов S/R , а также величина, характеризующая относительное отличие максимального пробега от среднего, $(R'' - R)/R$.

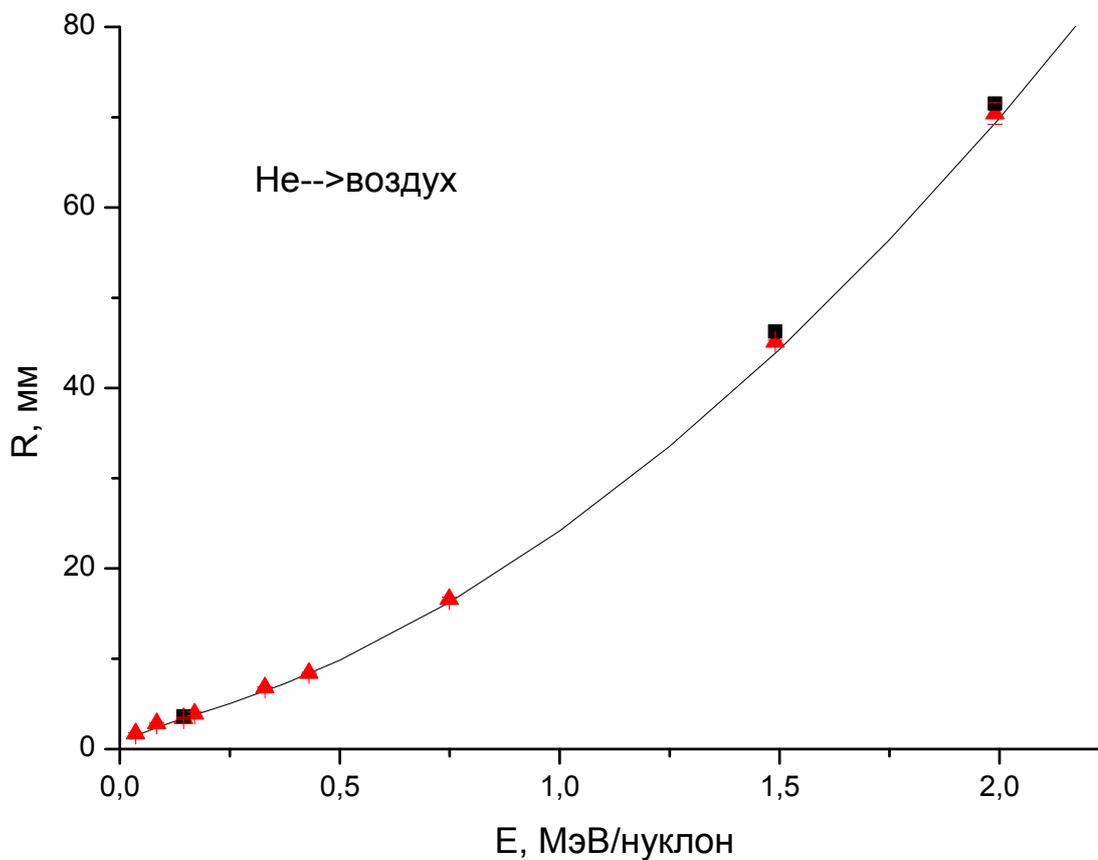
Средний и экстраполированный пробеги определялись с точностью 2-3% .

Максимальный пробег определялся с точностью 3-7% .

Пробеги ионов гелия

Ионы He в воздухе

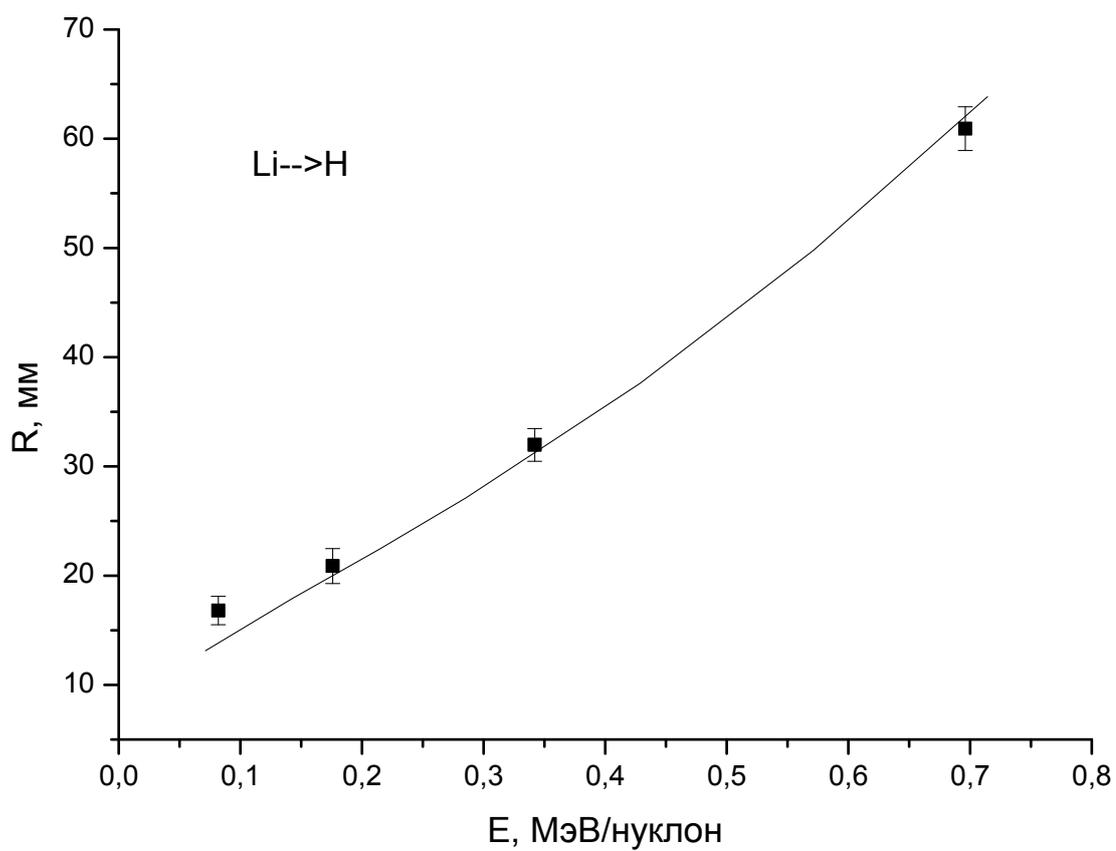
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R, \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R, \%$	$S/R, \%$
2,6	0,036		$1,7 \pm 0,1$			
4,1	0,084		$2,8 \pm 0,1$			
5,3	0,14	$3,6 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$	5,9	2,9
5,7	0,17		$3,9 \pm 0,1$			
8,0	0,33		$6,8 \pm 0,2$			
9,0	0,43		$8,4 \pm 0,1$			
12,0	0,75		$16,6 \pm 0,2$			
16,9	1,49	$46,3 \pm 0,2$	$45,1 \pm 0,2$	$46,0 \pm 0,2$	2,8	2,0
19,4	1,99	$72,4 \pm 1,2$	$70,4 \pm 1,2$	$71,5 \pm 1,2$	2,8	1,5



Пробеги ионов лития

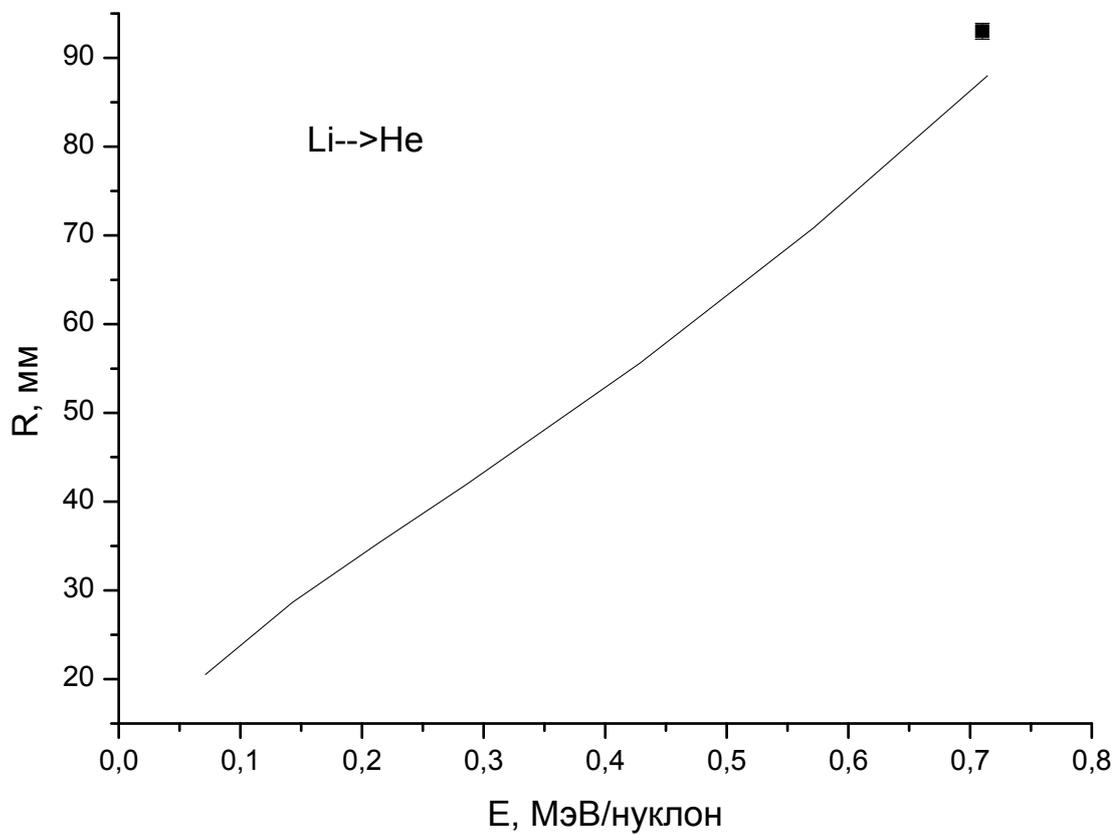
Ионы Li в водороде

V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R , мм макс.
4,0	0,082	$16,8 \pm 1,3$
5,8	0,18	$20,9 \pm 1,6$
8,1	0,34	$32,0 \pm 1,5$
11,5	0,70	$60,9 \pm 2,0$



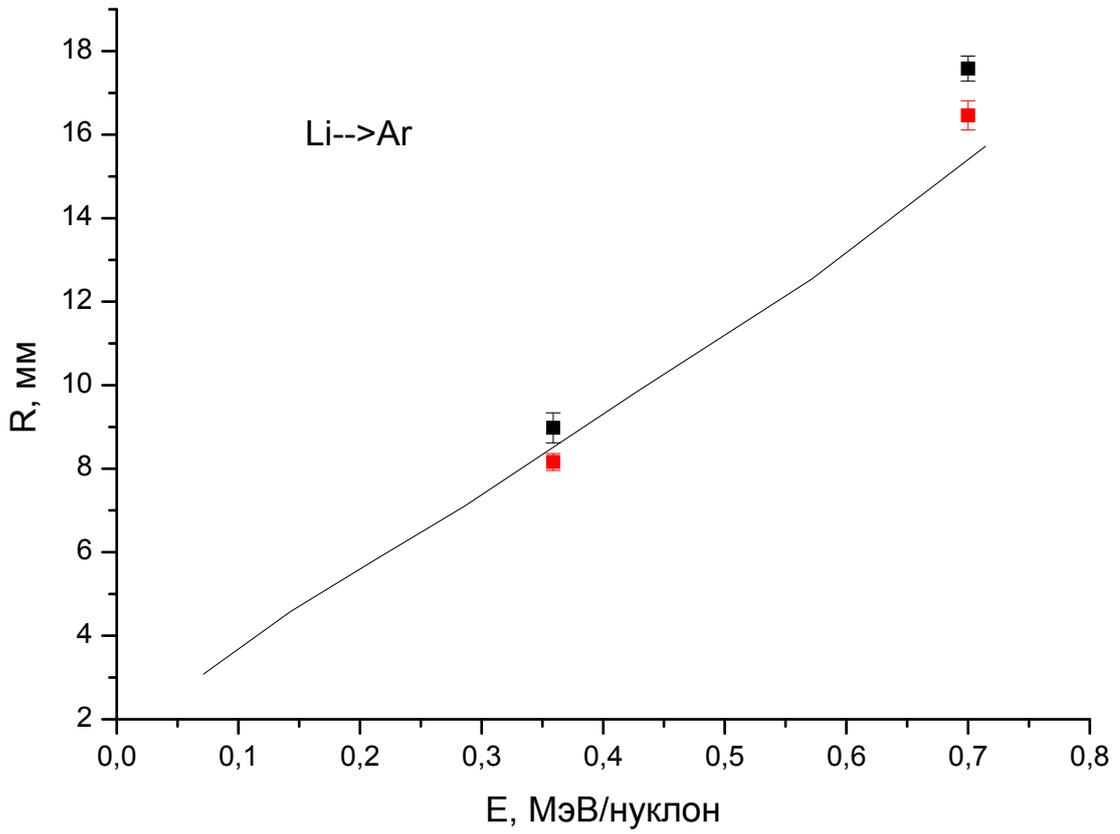
Ионы Li в гелии

V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R , мм макс.
11,7	0,71	$93,0 \pm 0,9$



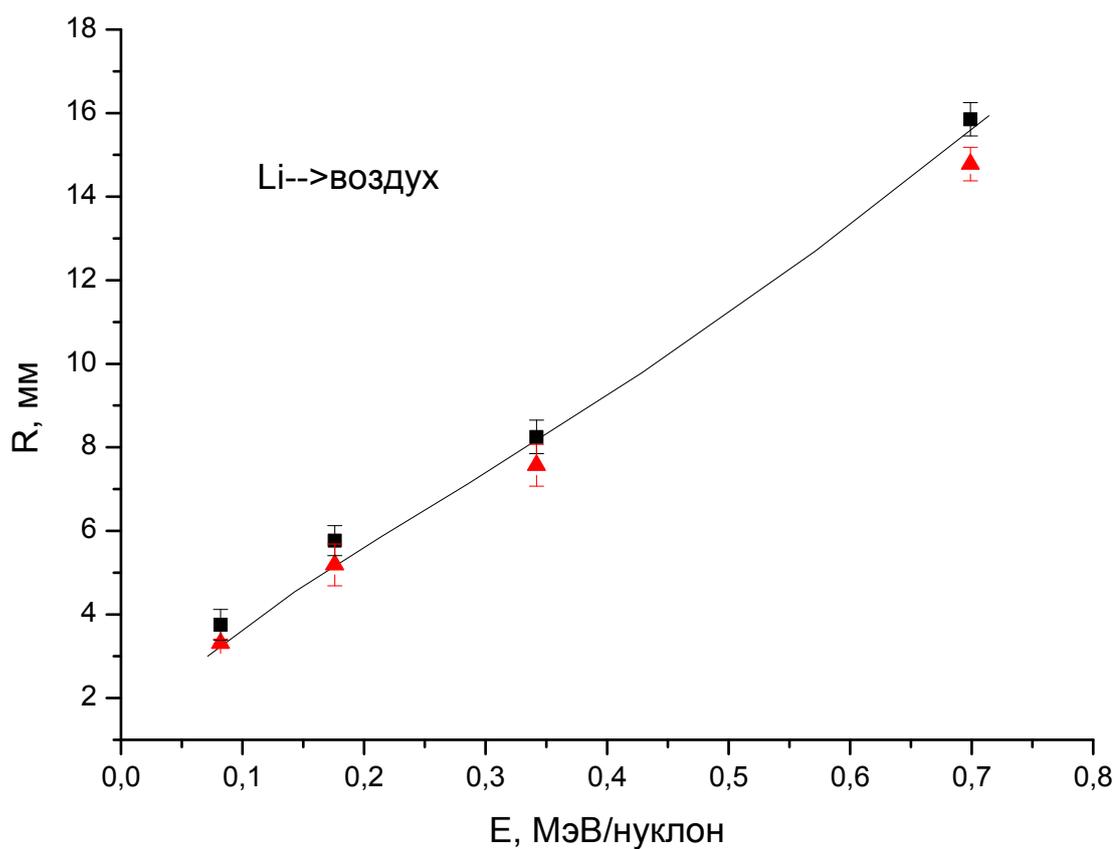
Ионы Li в аргоне

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R \text{ \%}$	$S/R, \text{ \%}$
8,3	0,36	$9,0 \pm 0,4$	$8,2 \pm 0,2$	$8,5 \pm 0,2$	9,8	3,7
11,6	0,70	$17,6 \pm 0,3$	$16,5 \pm 0,4$	$17,0 \pm 0,2$	6,7	3,0



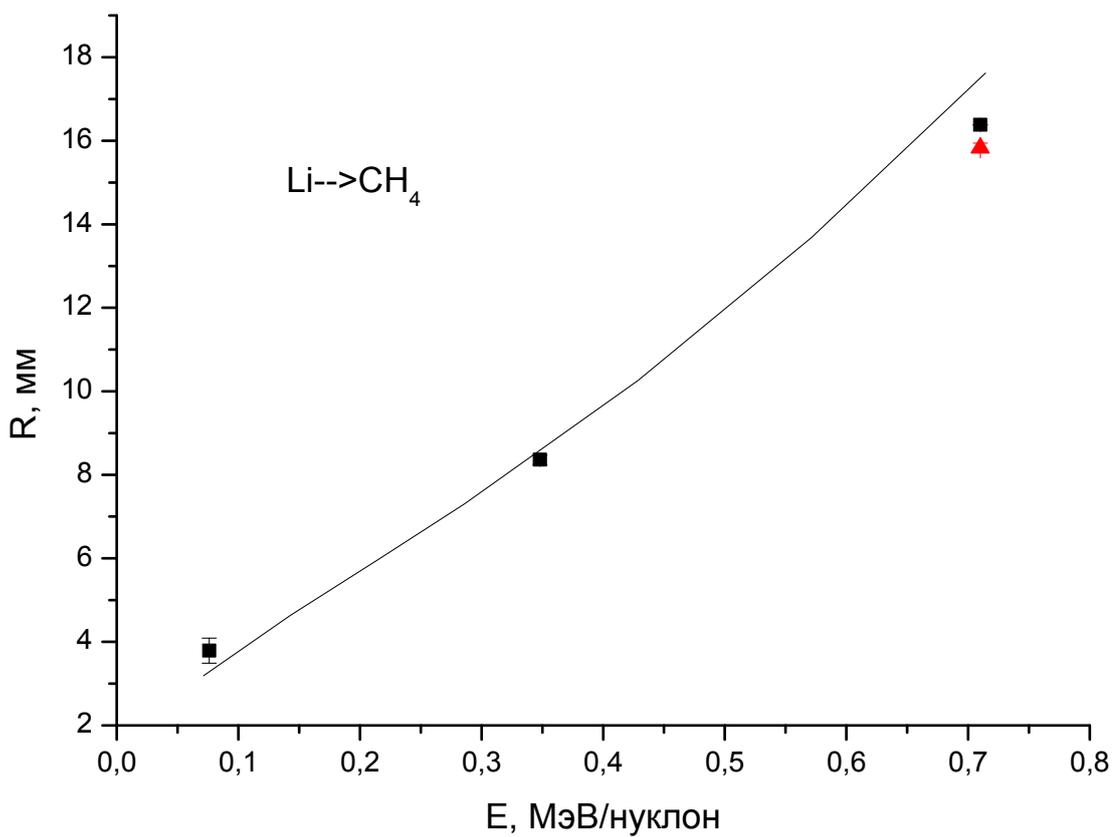
Ионы Li в воздухе

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R, \%$	$S/R, \%$
4,0	0,082	$3,7 \pm 0,4$	$3,3 \pm 0,1$		12,1	
5,8	0,18	$5,8 \pm 0,4$	$5,2 \pm 0,5$		11,5	
8,1	0,34	$8,2 \pm 0,4$	$7,6 \pm 0,5$	$7,9 \pm 0,2$	7,9	3,9
11,6	0,70	$15,8 \pm 0,4$	$14,8 \pm 0,4$		6,8	



Ионы Li в метане

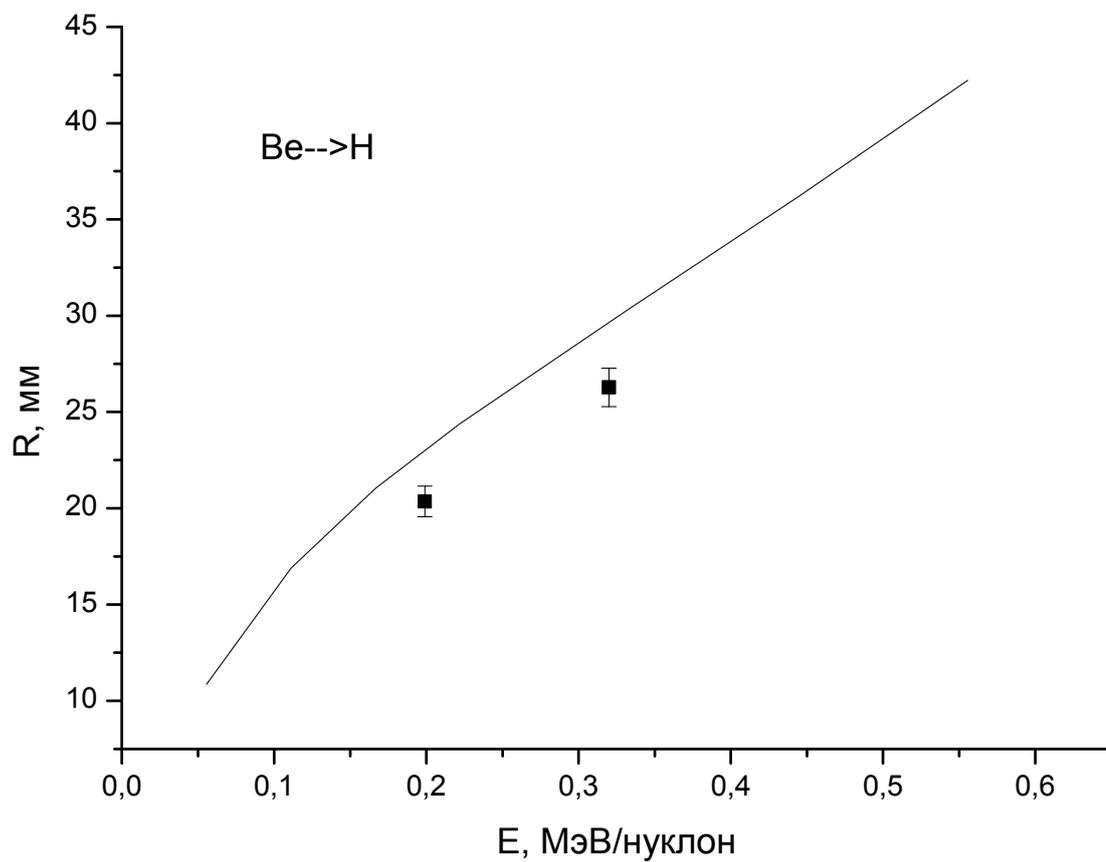
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R \text{ \%}$	$S/R, \text{ \%}$
3,8	0,076	$3,8 \pm 0,3$				
8,2	0,35	$8,4 \pm 0,1$				
11,7	0,71	$16,4 \pm 0,1$	$15,8 \pm 0,1$	$16,0 \pm 0,1$	3,8	1,3



Пробеги ионов бериллия

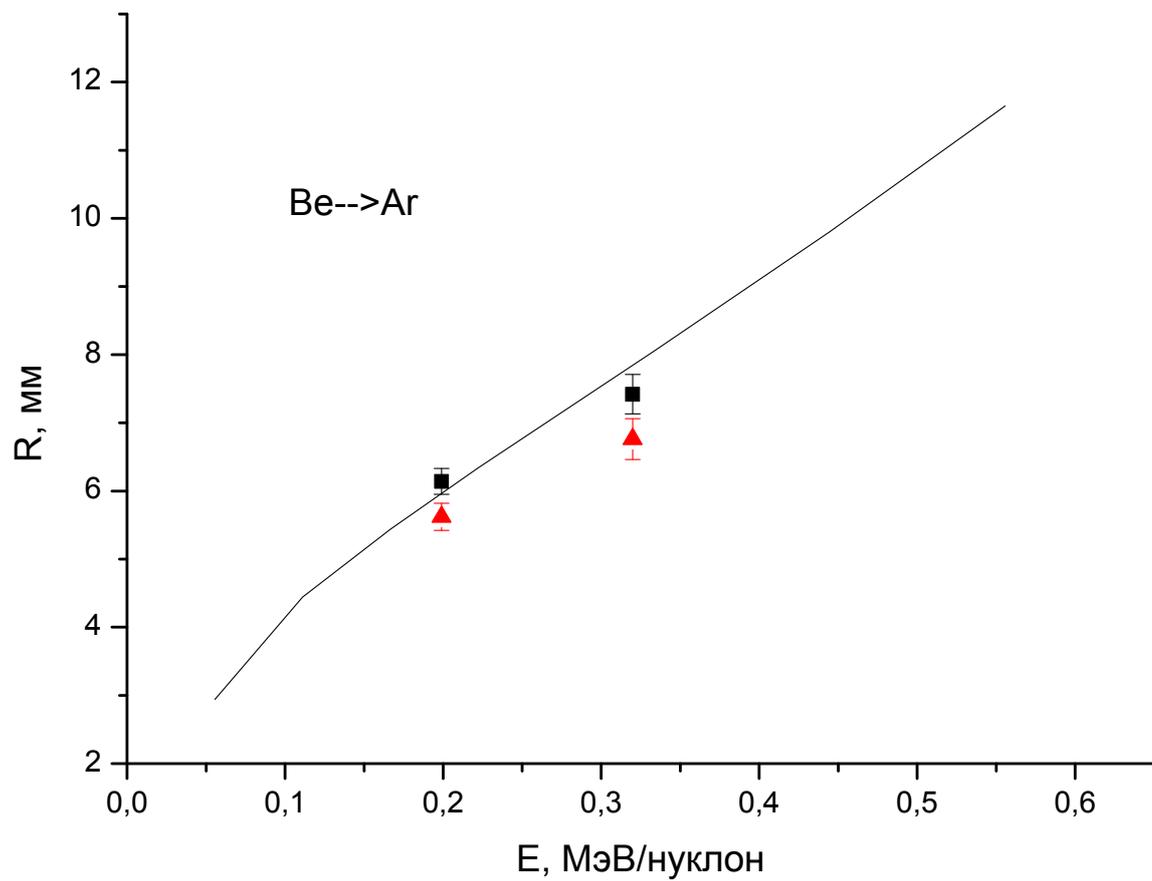
Ионы Be в водороде

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мм макс}$
6,2	0,20	$20,3 \pm 0,8$
7,8	0,32	$26,3 \pm 1,0$



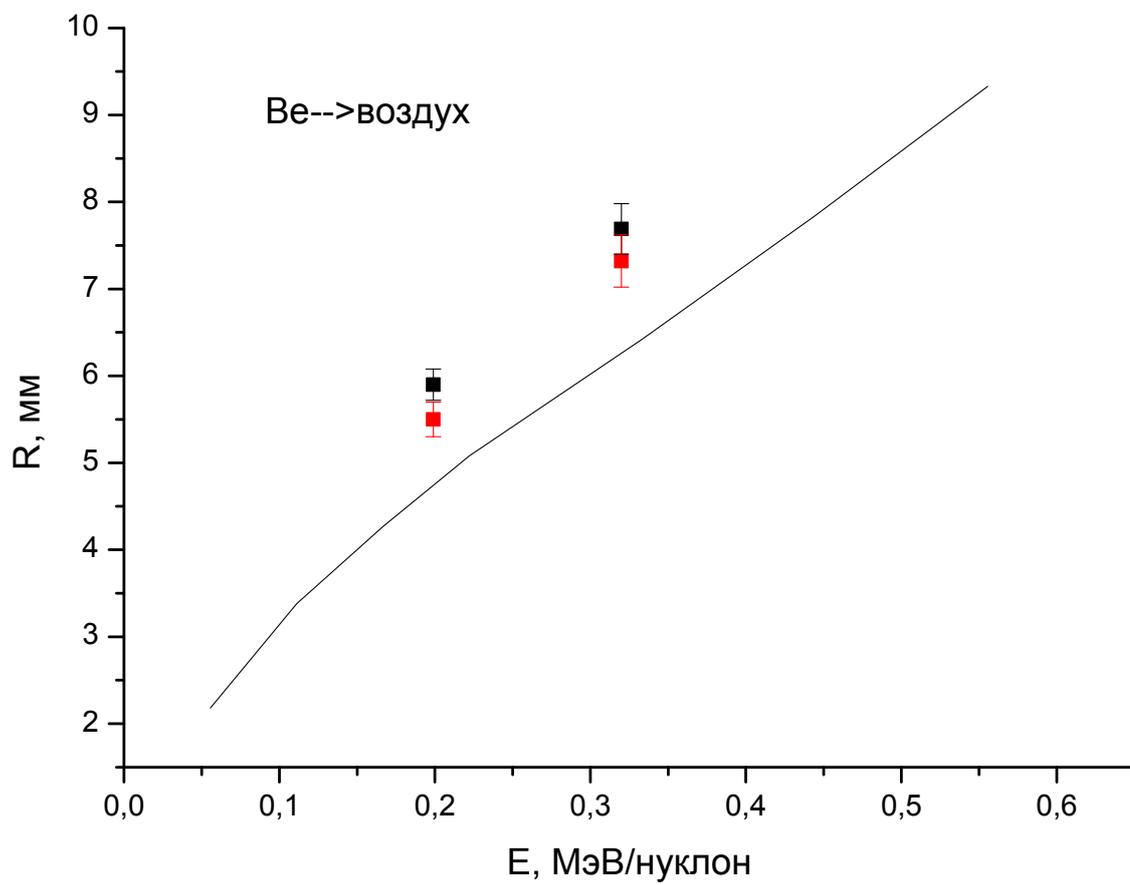
Ионы Be в аргоне

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R) / R \%$
6,2	0,20	$6,1 \pm 0,2$	$5,6 \pm 0,2$	8,9
7,8	0,32	$7,4 \pm 0,3$	$6,8 \pm 0,2$	8,8



Ионы Be в воздухе

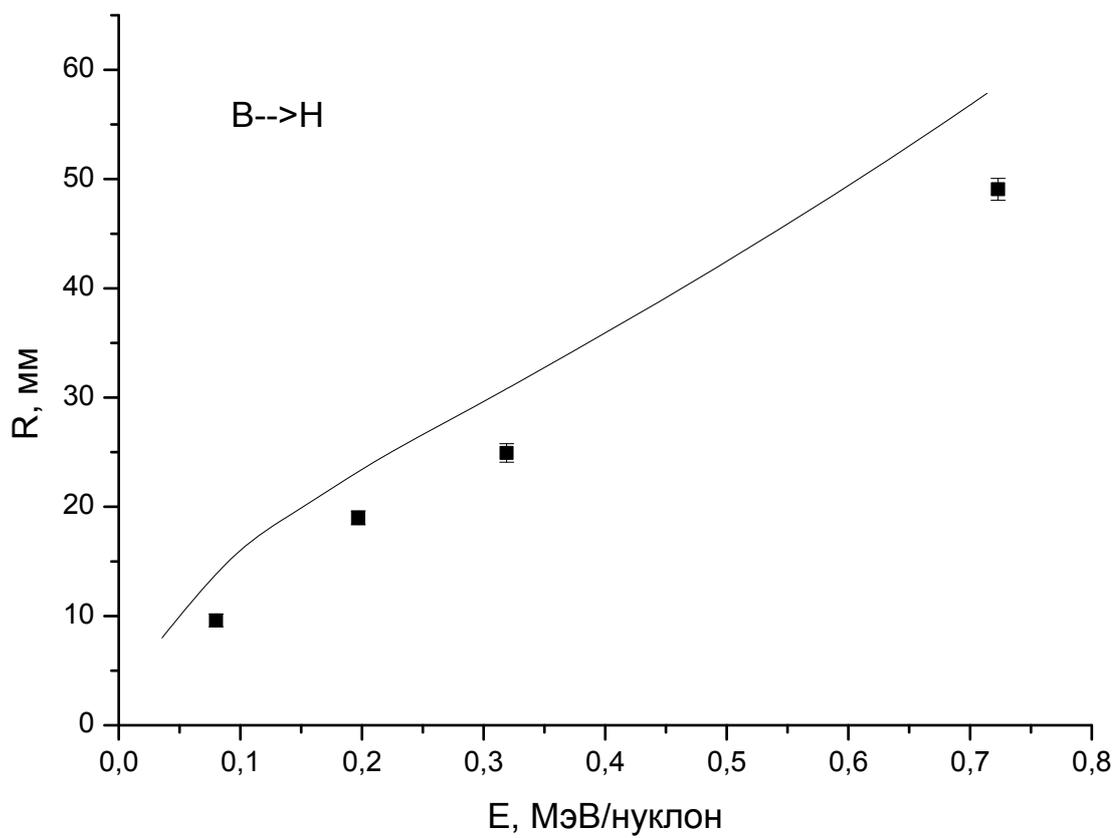
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс}$	$R, \text{ мм средн}$	$(R'' - R) / R \%$
6,2	0,20	$5,9 \pm 0,2$	$5,5 \pm 0,2$	7,3
7,8	0,32	$7,7 \pm 0,3$	$7,3 \pm 0,3$	5,6



Пробег ионов бора

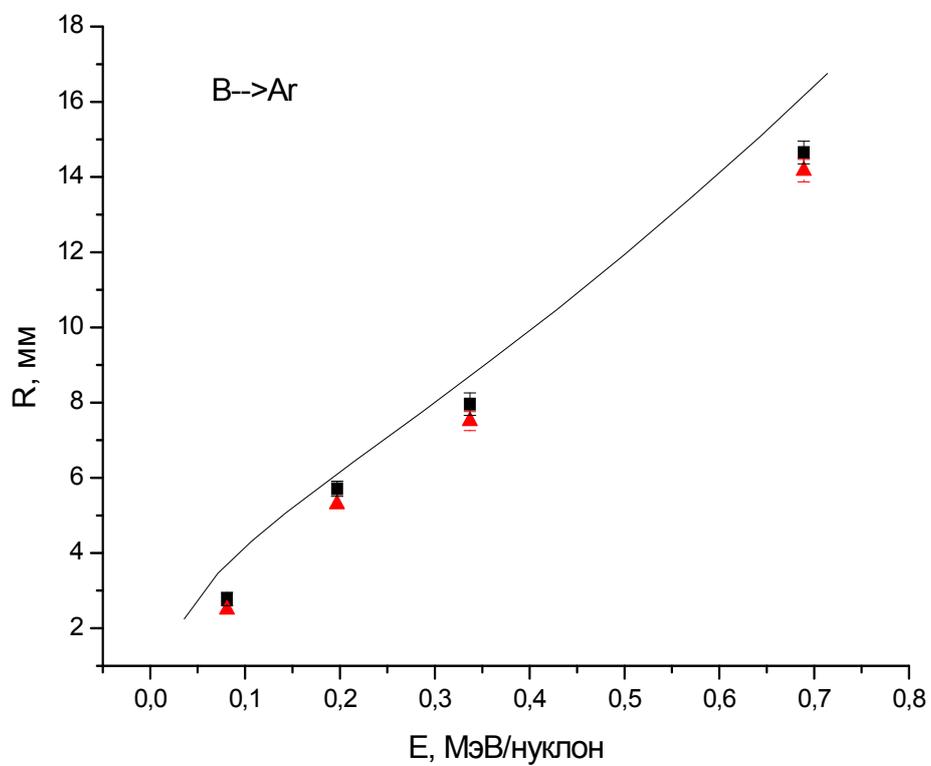
Ионы В в водороде

V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R , мм макс.
3,9	0,08	$9,6 \pm 0,6$
6,2	0,20	$19,0 \pm 0,6$
7,8	0,32	$24,9 \pm 0,9$
11,8	0,72	$49,1 \pm 1,0$



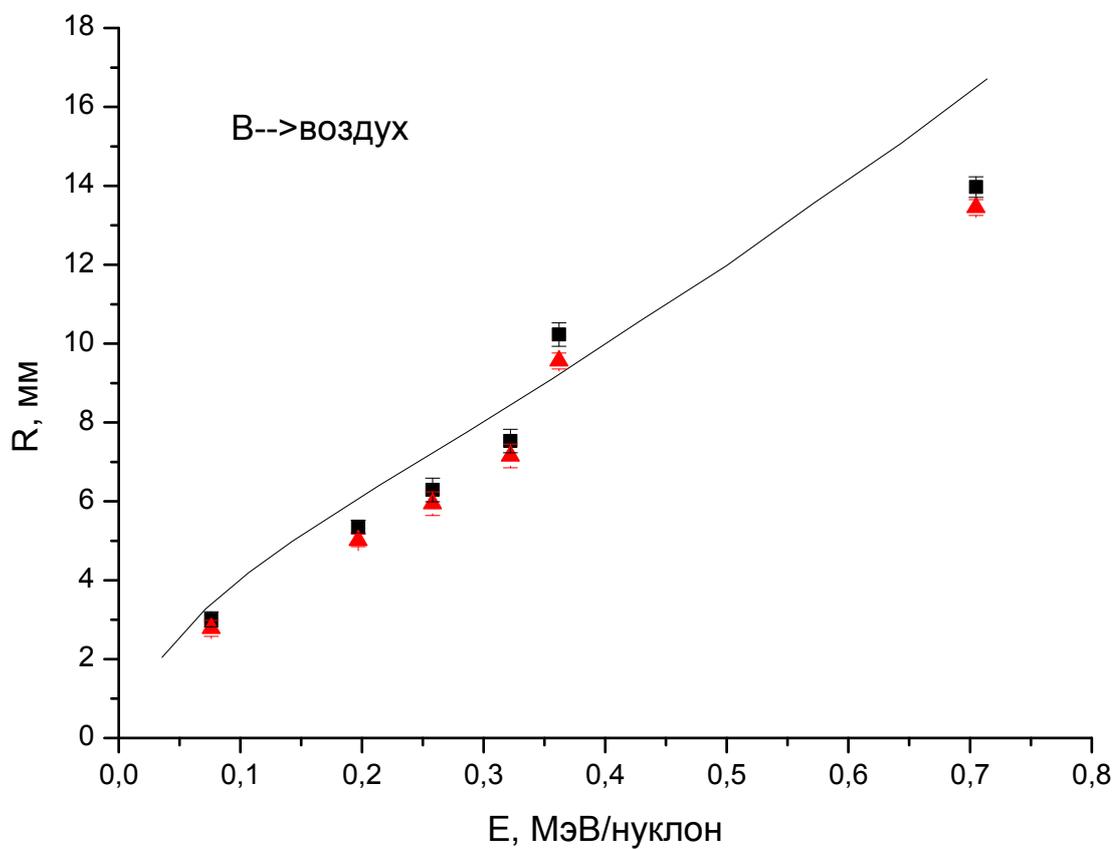
Ионы В в аргоне

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R, \%$	$S/R, \%$
3,9	0,08	$2,8 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,2$		12,0	
6,2	0,20	$5,7 \pm 0,2$	$5,3 \pm 0,2$		7,5	
8,1	0,34	$8,0 \pm 0,3$	$7,5 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,3$	6,7	4,0
11,5	0,69	$14,6 \pm 0,3$	$14,2 \pm 0,3$	$14,5 \pm 0,3$	2,8	2,1



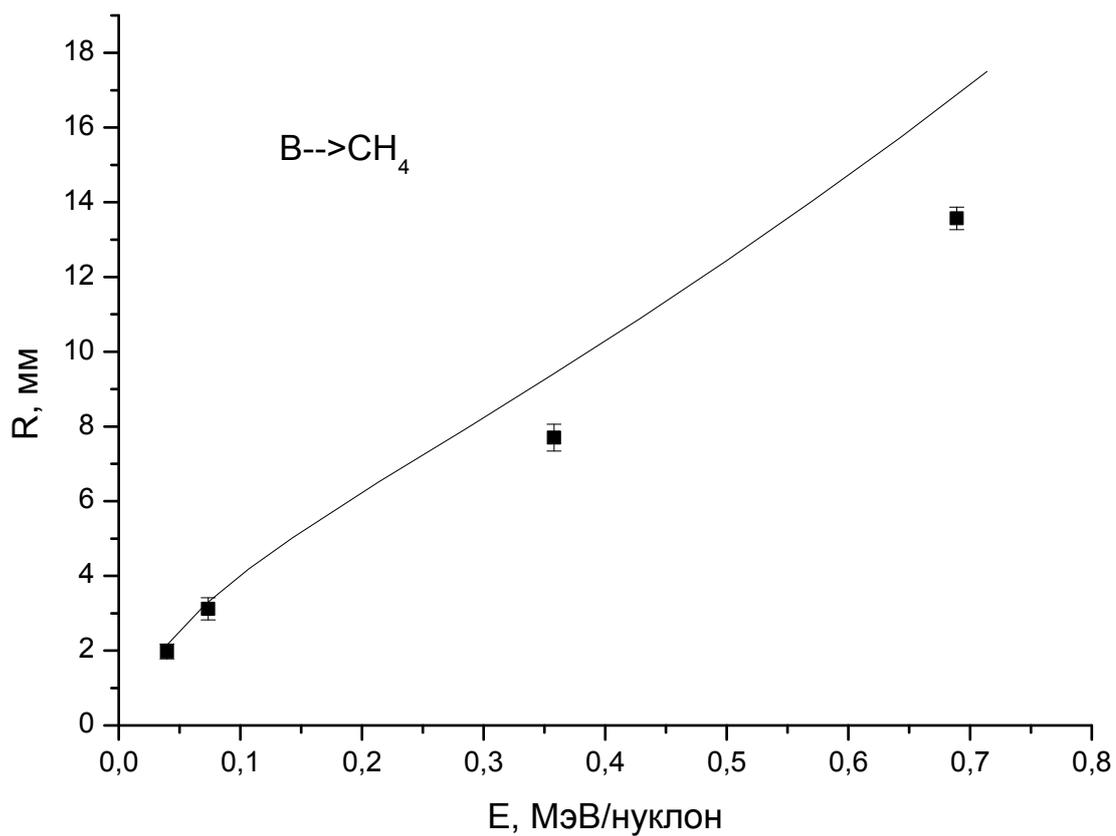
Ионы В в воздухе

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R) / R \%$
3,8	0,076	$3,1 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,2$	7,1
6,2	0,20	$5,4 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,2$	8,0
7,0	0,26	$6,3 \pm 0,3$	$5,9 \pm 0,3$	6,8
7,9	0,32	$7,5 \pm 0,3$	$7,1 \pm 0,3$	5,6
9,4	0,36	$10,2 \pm 0,3$	$9,6 \pm 0,20$	6,2
11,6	0,70	$14,0 \pm 0,3$	$13,4 \pm 0,20$	4,5



Ионы В в метане

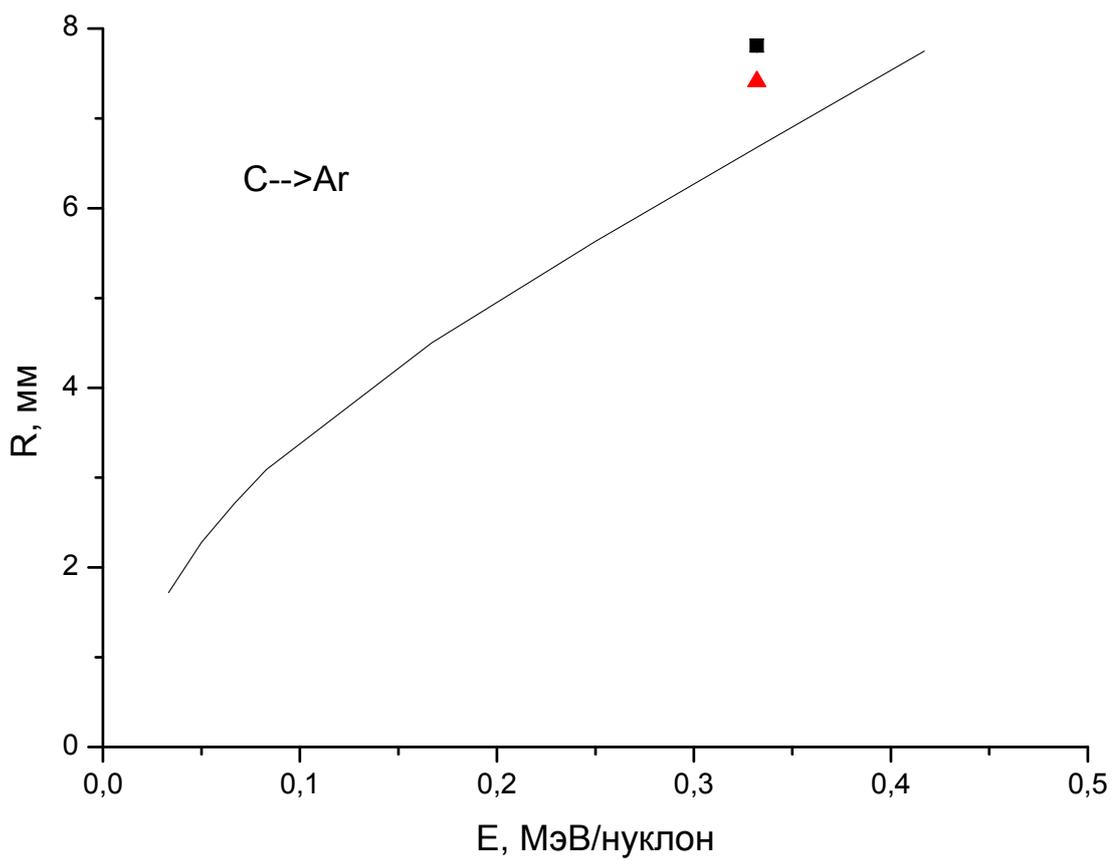
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R^{\text{max}}, \text{ мм}$
2,8	0,040	$2,0 \pm 0,2$
3,8	0,074	$3,1 \pm 0,2$
8,3	0,36	$7,7 \pm 0,4$
11,5	0,69	$13,6 \pm 0,3$



Пробег ионов углерода

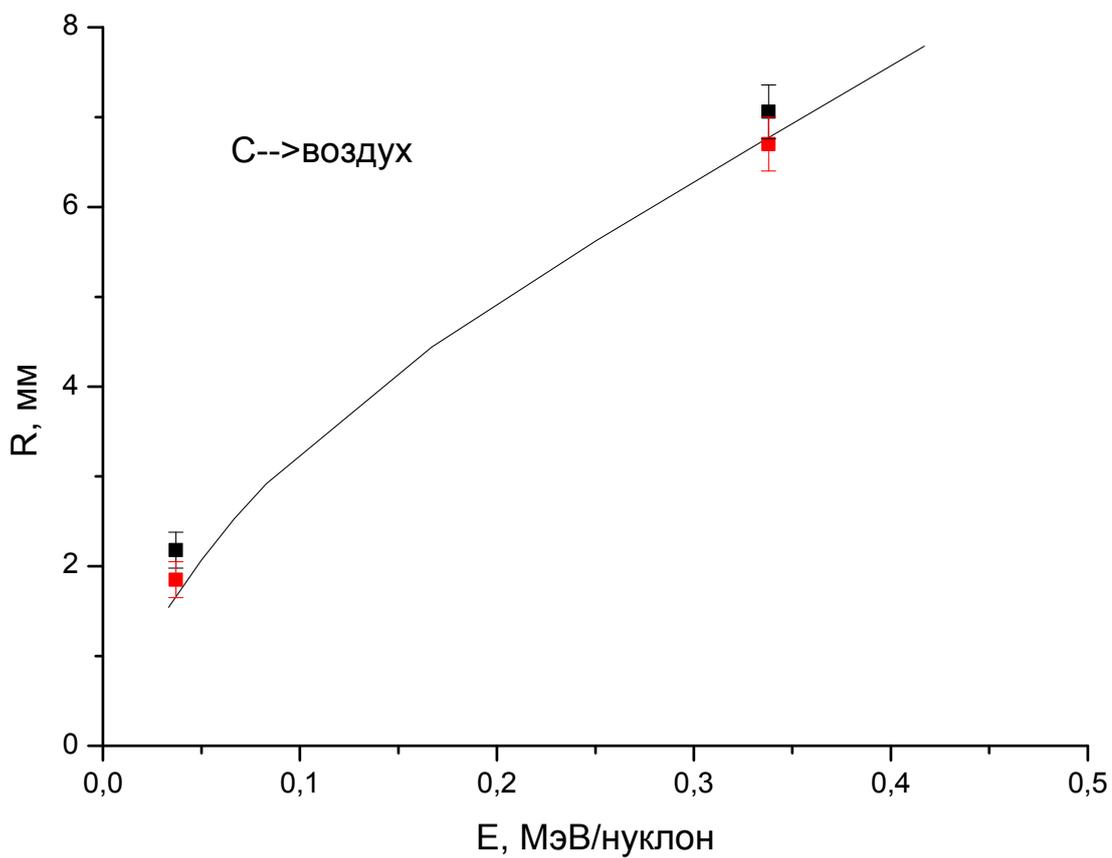
Ионы С в аргоне

V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R'' , мм макс	R , мм средн	$(R'' - R)/R$ %
8,0	0,33	$7,8 \pm 0,1$	$7,41 \pm 0,1$	9,9



Ионы С в воздухе

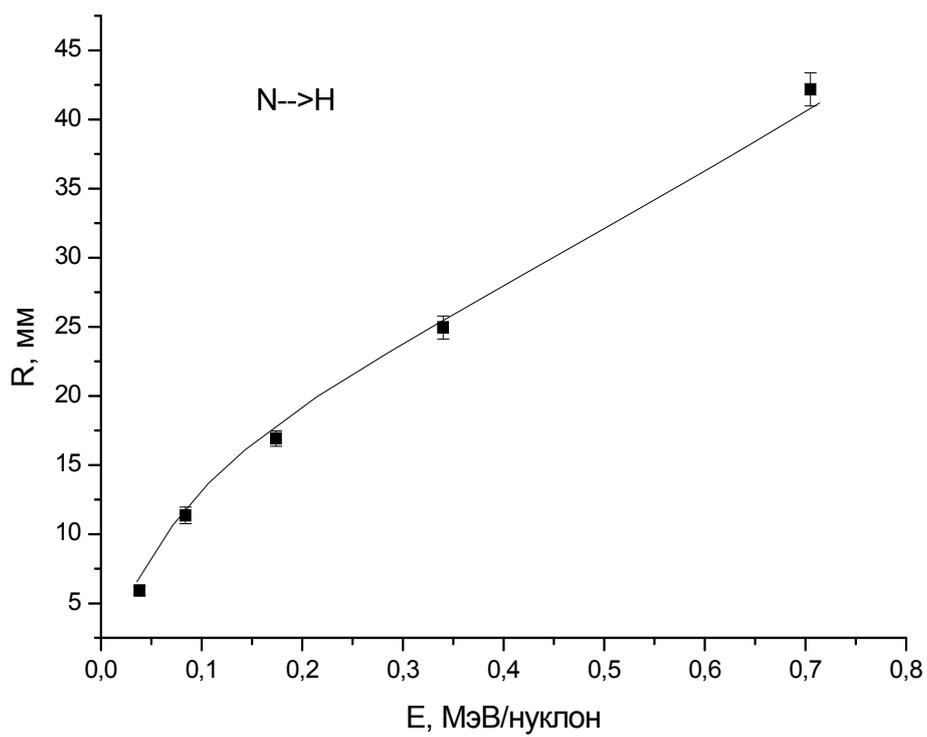
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R)/R \%$
2,7	0,037	$2,2 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$	15,8
8,1	0,34	$7,1 \pm 0,3$	$6,7 \pm 0,3$	6,0



Пробеги ионов азота

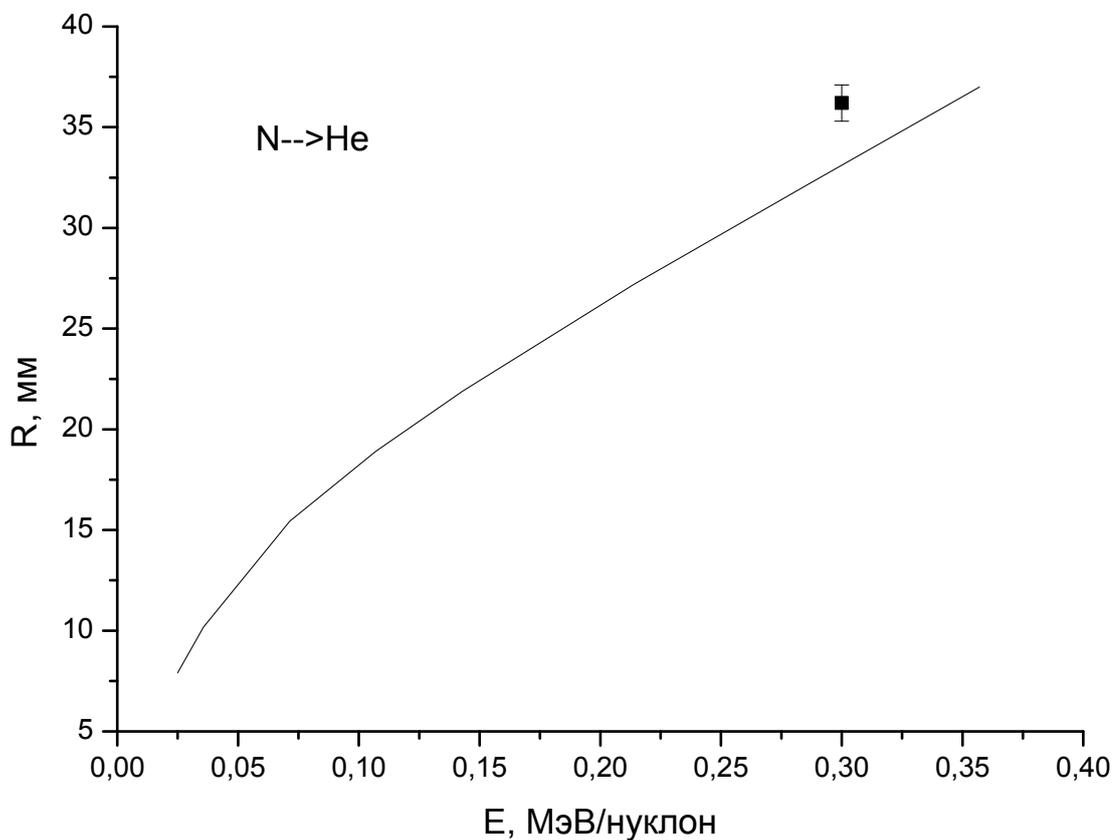
Ионы N в водороде

V, 10^8 см/с	E, МэВ/н	R ^{max} , мм макс.
2,7	0,038	5,9±0,3
4,1	0,084	11,4±0,6
5,8	0,17	16,9±0,6
8,1	0,34	24,9±0,8
11,7	0,70	42,2±1,2



Ионы N в гелии

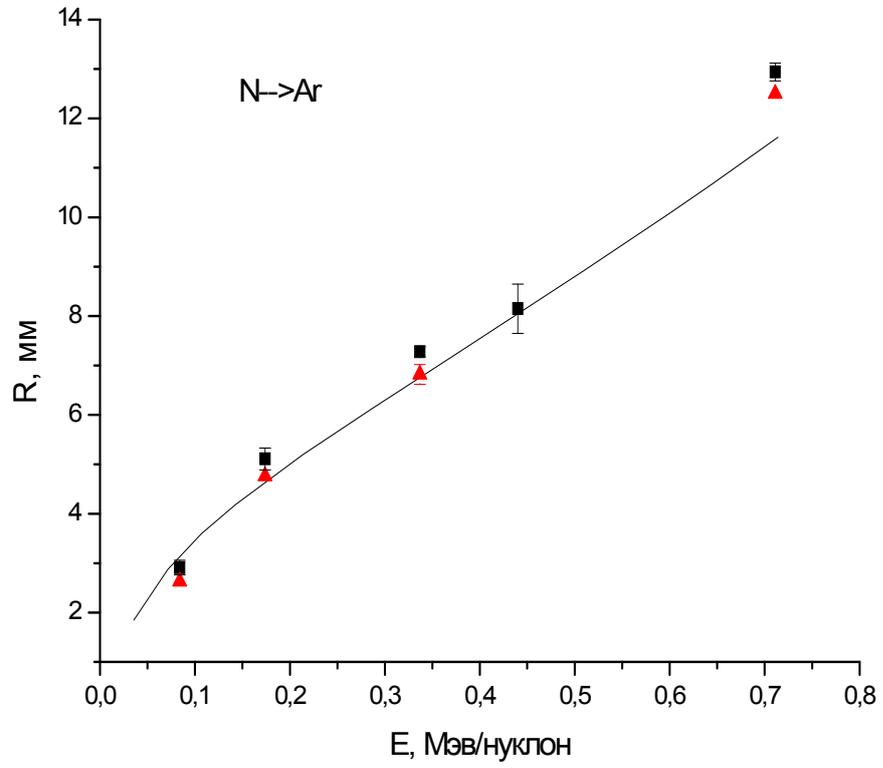
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс}$
7,6	0,30	$36,2 \pm 0,9$



Ионы N в аргоне

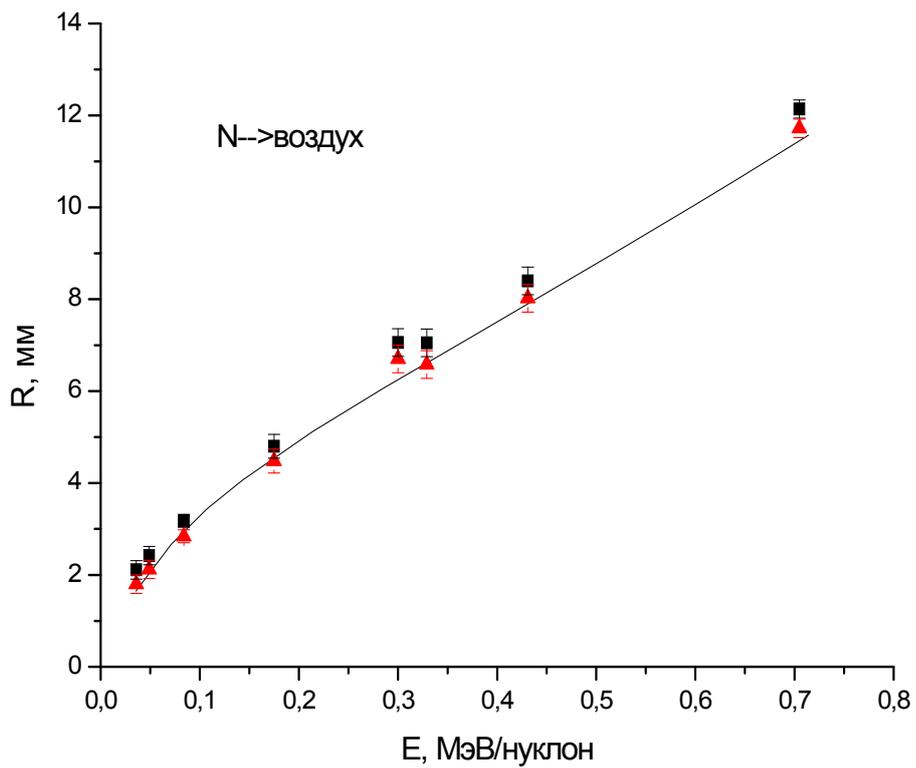
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R, \%$	$S/R, \%$
4,1	0,084	$2,9 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$		11,5	
5,8	0,17	$5,2 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,2$		8,3	
8,1	0,34	$7,3 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,2$	$7,1 \pm 0,2$	7,4	4,4
9,2	0,44	$8,1 \pm 0,5$				

11,7	0,71	12,9±0,2	12,5±0,2		5,2	
------	------	----------	----------	--	-----	--



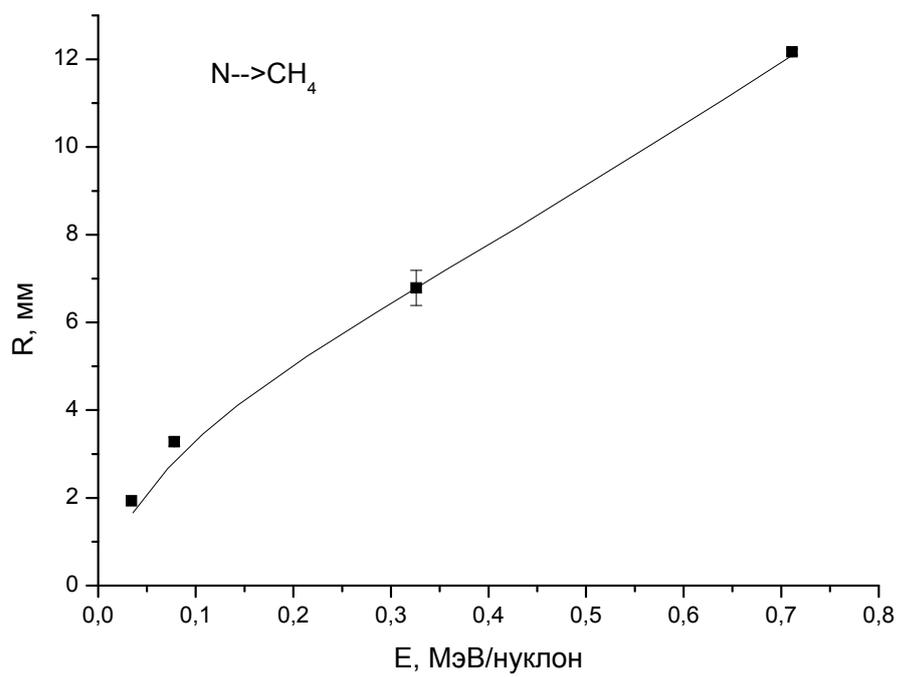
Ионы N в воздухе

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R, \text{ мм экстр.}$	$(R - R)/R \%$	$S/R, \%$
2,6	0,036	$2,1 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$		16,7	
3,1	0,049	$2,4 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$		14,3	
4,1	0,084	$3,2 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,2$		14,2	
5,8	0,17	$4,8 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,3$		6,7	
7,6	0,30	$7,1 \pm 0,3$	$6,7 \pm 0,3$		6,0	
8,0	0,33	$7,0 \pm 0,3$	$6,6 \pm 0,3$	$6,8 \pm 0,2$	6,0	3,0
9,1	0,43	$8,4 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,3$	$8,2 \pm 0,2$	5,0	2,5
11,67	0,70	$12,1 \pm 0,2$	$11,7 \pm 0,2$		3,4	



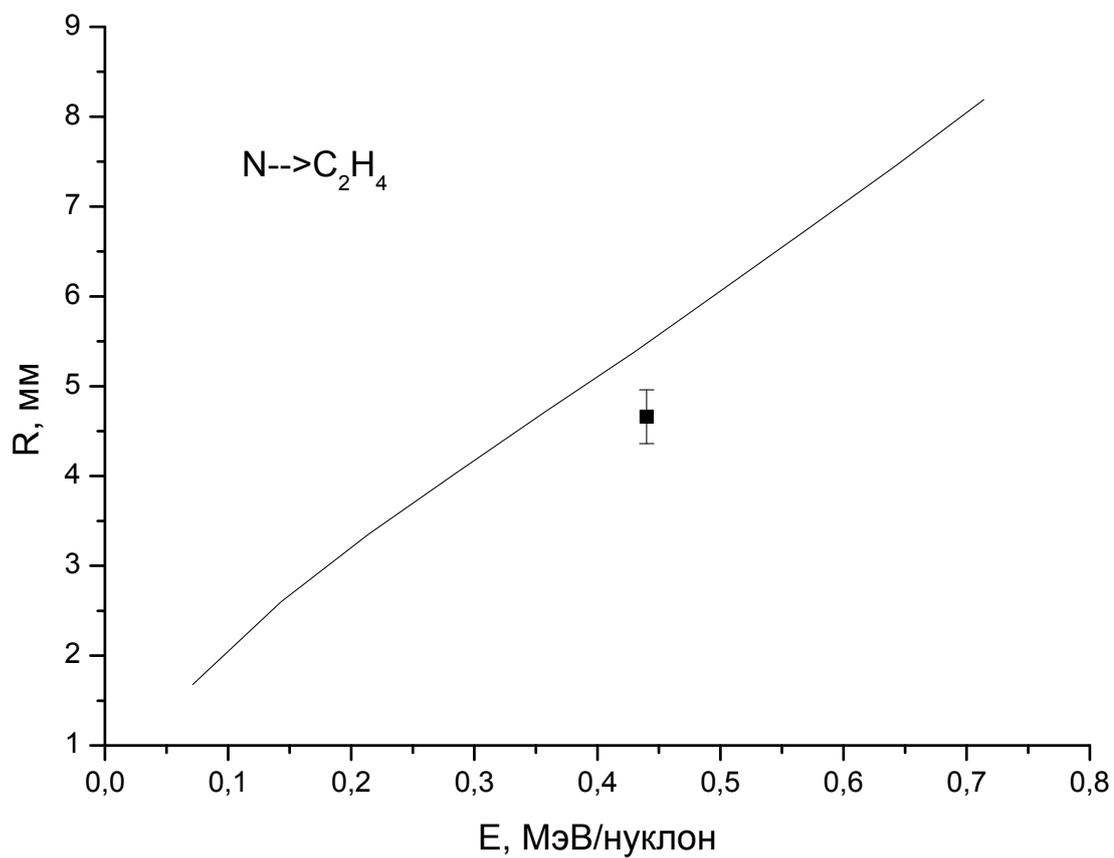
Ионы N в метане

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мм макс.}$
2,6	0,034	$1,9 \pm 0,1$
3,9	0,078	$3,3 \pm 0,1$
7,9	0,33	$6,8 \pm 0,4$
11,7	0,71	$12,2 \pm 0,1$



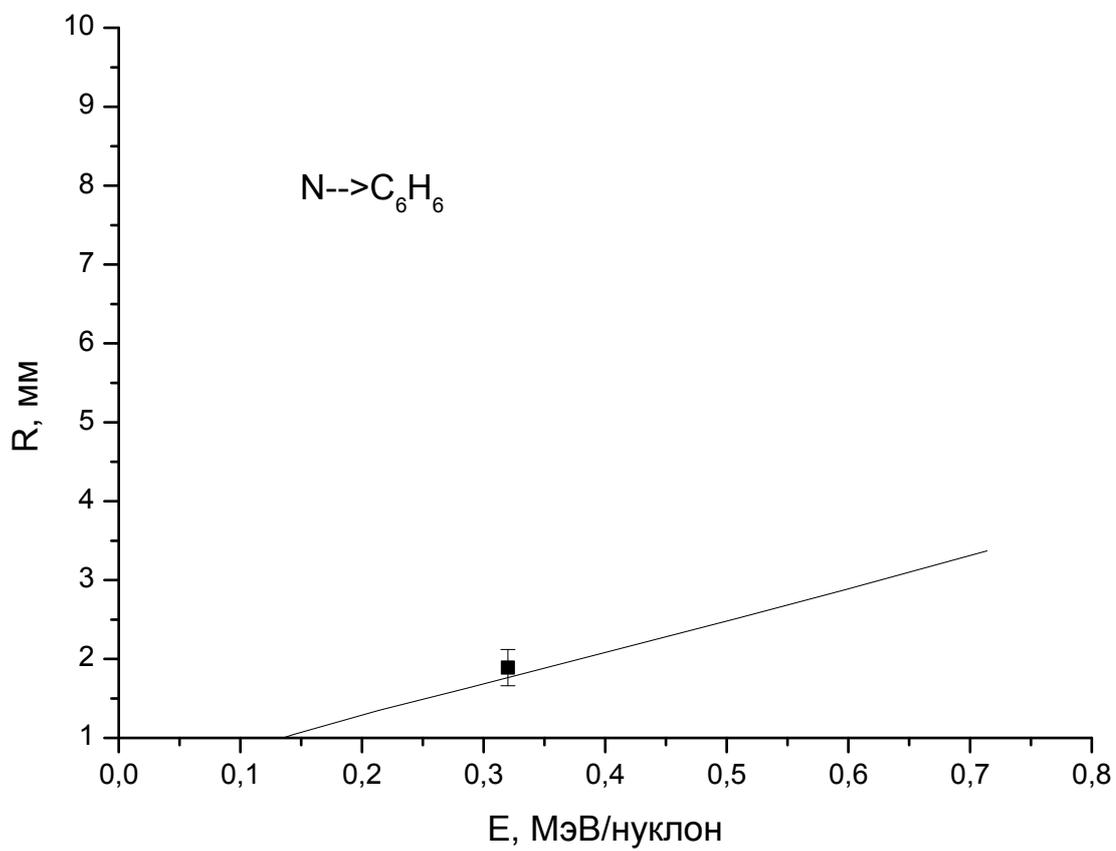
Ионы N в этилене

V, 10 ⁸ см/с	E, МэВ/н	R ^{max} , мм
9,2	0,44	4,67±0,3



Ионы N в бензоле(пары)

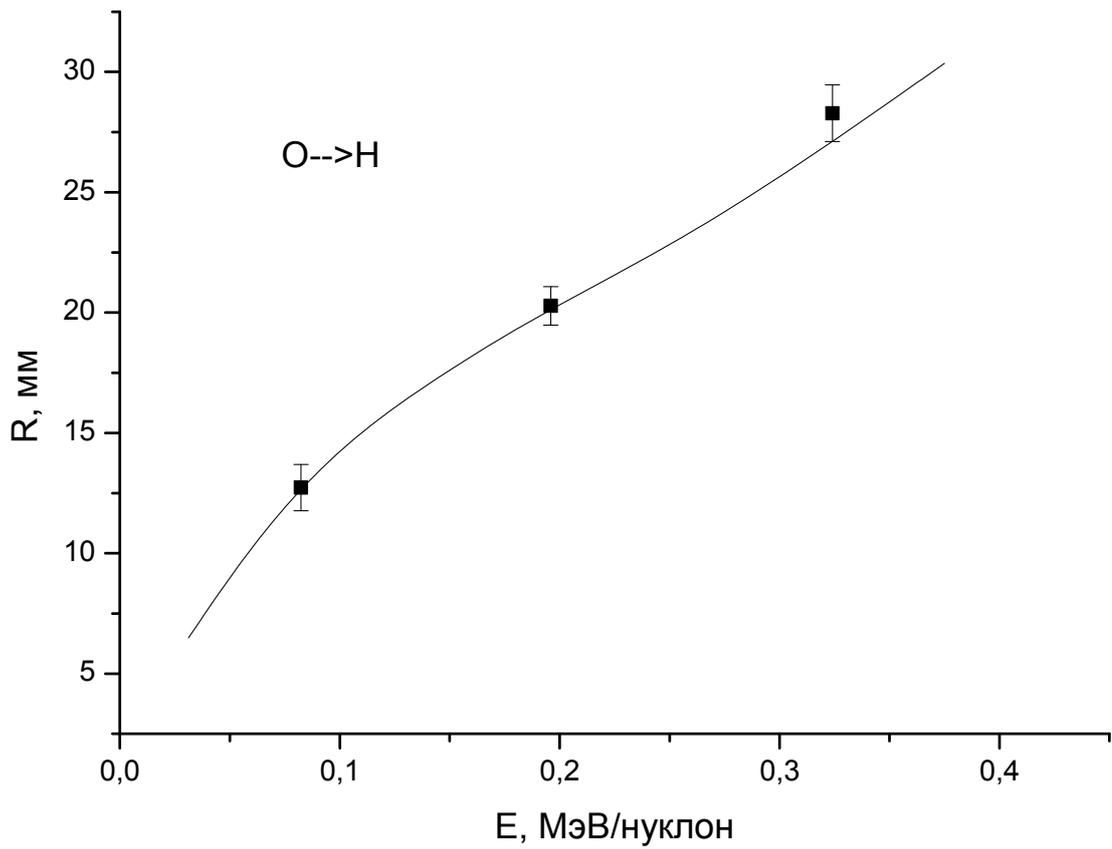
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мм макс.}$
7,9	0,32	$1,9 \pm 0,3$



Пробеги ионов кислорода

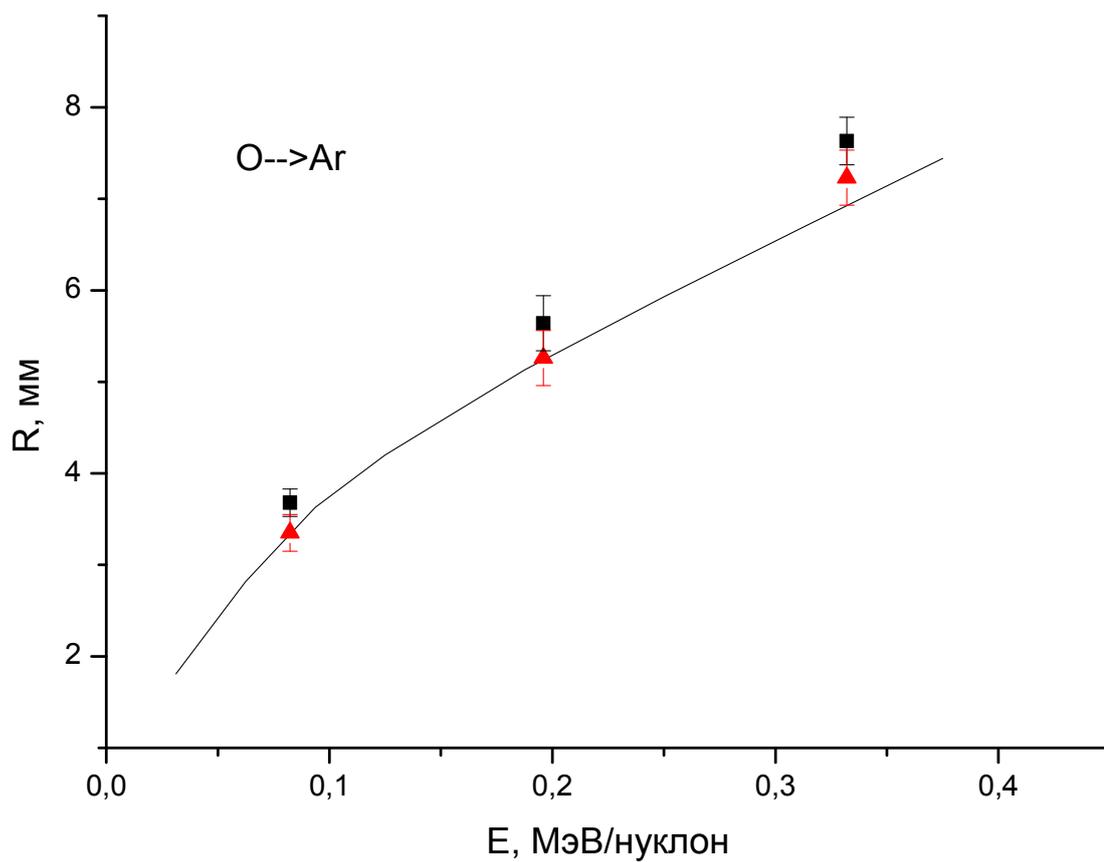
Ионы O в водороде

V, 10 ⁸ см/с	E, МэВ/н	R ^{max} , мм макс.
4,0	0,082	12,7±1,0
6,1	0,20	20,3±0,8
7,9	0,32	28,3±1,2



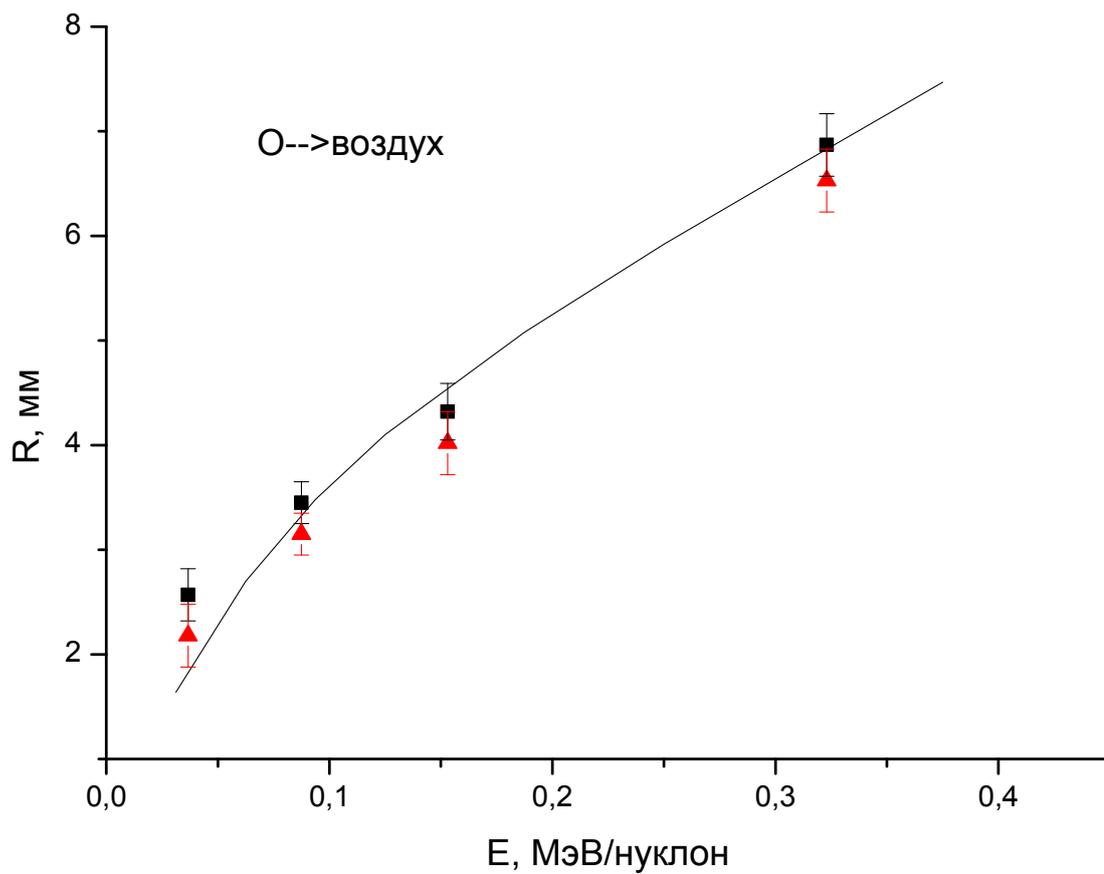
Ионы O в аргоне

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс}$	$R, \text{ мм средн}$	$(R'' - R) / R \%$
4,0	0,082	$3,7 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,2$	8,8
6,1	0,20	$5,6 \pm 0,3$	$5,3 \pm 0,3$	5,7
8,0	0,33	$7,6 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,3$	5,6



Ионы O в воздухе

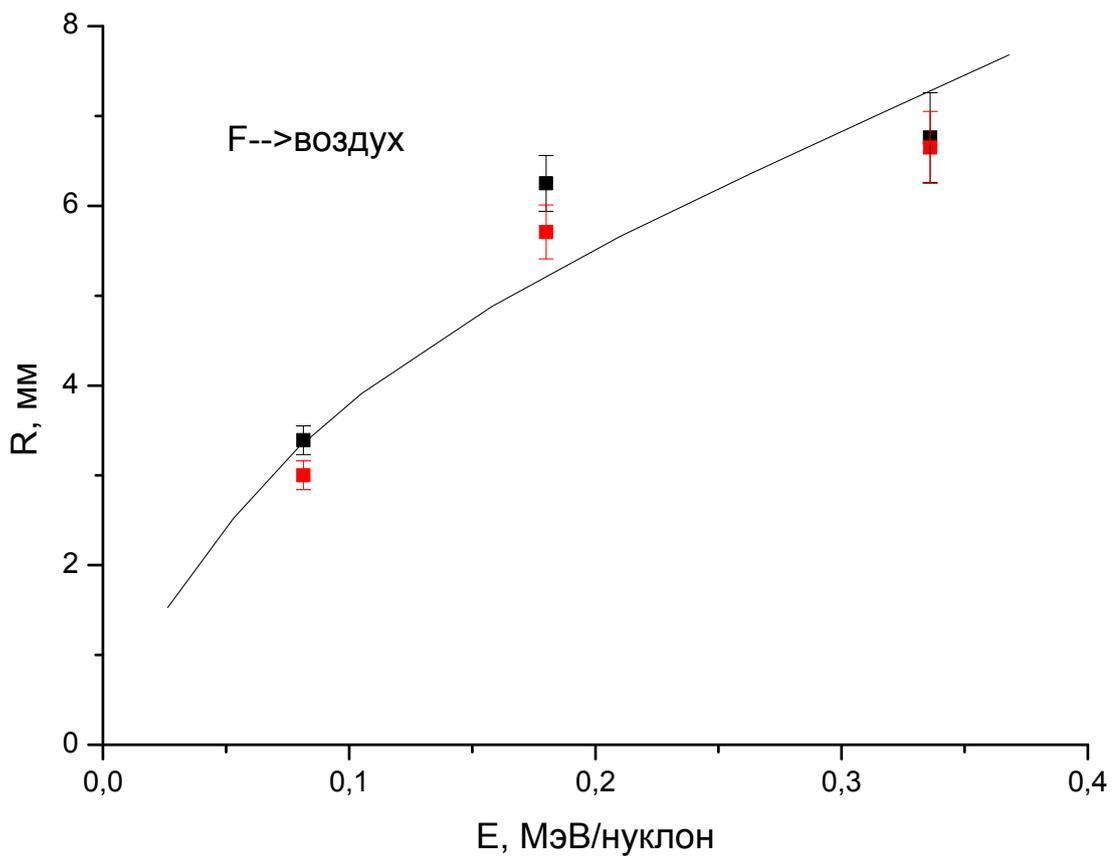
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R) / R \%$
2,7	0,037	$2,6 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$	18,2
4,1	0,087	$3,5 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,2$	9,4
5,4	0,15	$4,3 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,3$	7,5
7,9	0,32	$6,9 \pm 0,3$	$6,5 \pm 0,2$	6,2



Пробег ионов фтора

Ионы F в воздухе

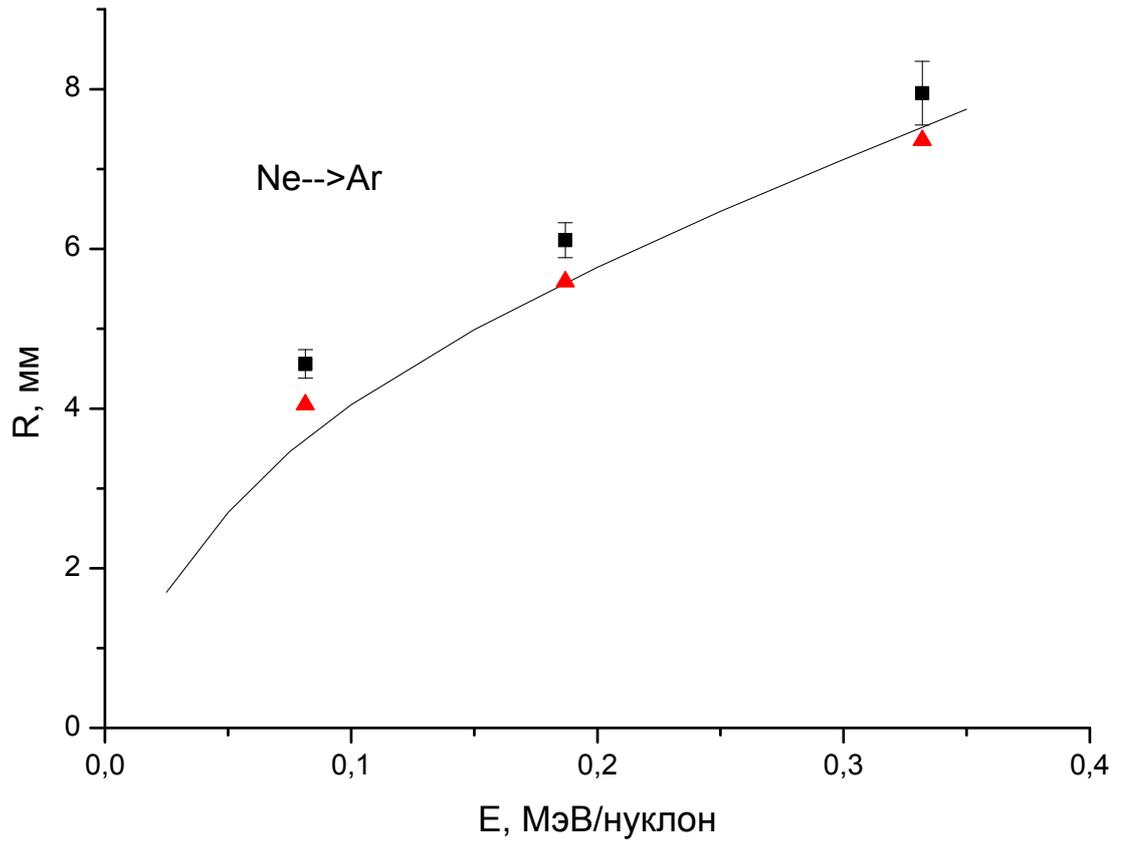
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс}$	$R, \text{ мм средн}$	$(R'' - R) / R \%$
4,0	0,081	$3,4 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	13,3
6,2	0,18	$6,2 \pm 0,3$	$5,7 \pm 0,3$	8,8
8,0	0,34	$6,8 \pm 0,5$	$6,6 \pm 0,4$	3,0



Пробеги ионов неона

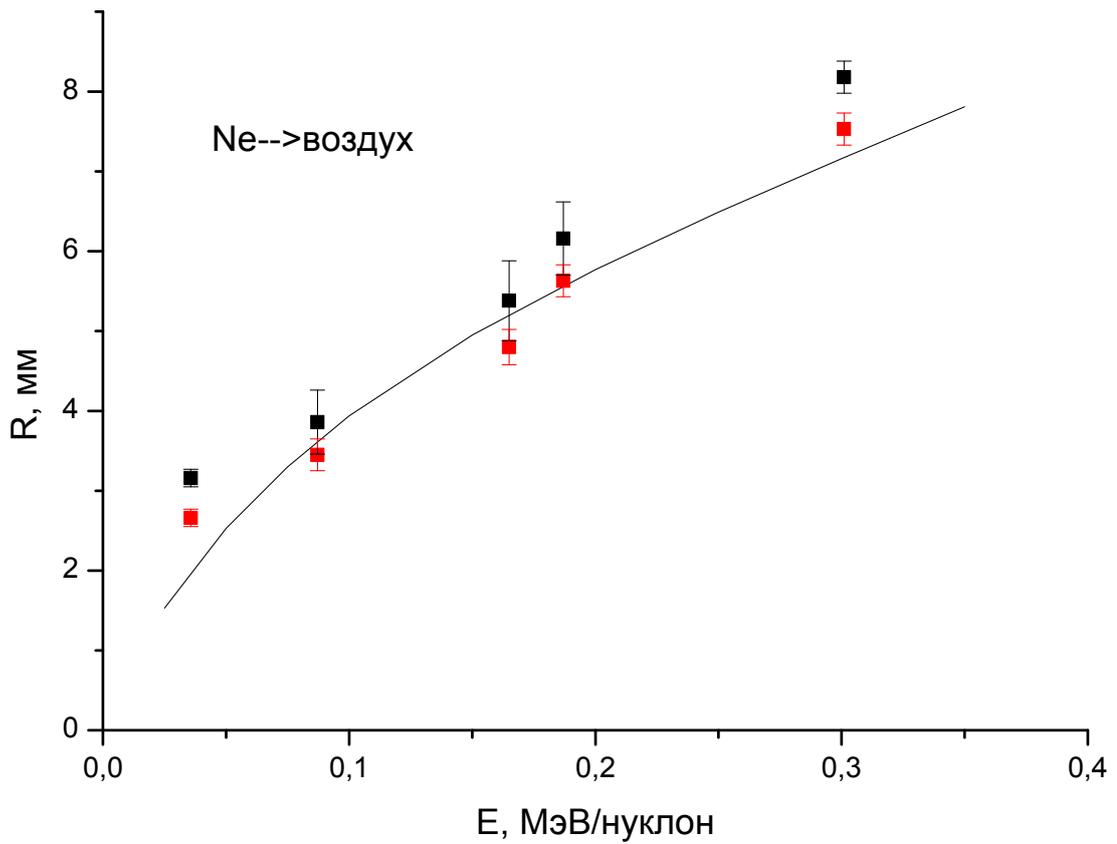
Ионы Ne в аргоне

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R)/R \%$
4,0	0,081	$4,6 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$	12,2
6,0	0,19	$6,1 \pm 0,2$	$5,6 \pm 0,2$	8,9
8,0	0,33	$7,9 \pm 0,4$	$7,4 \pm 0,4$	6,8



Ионы Ne в воздухе

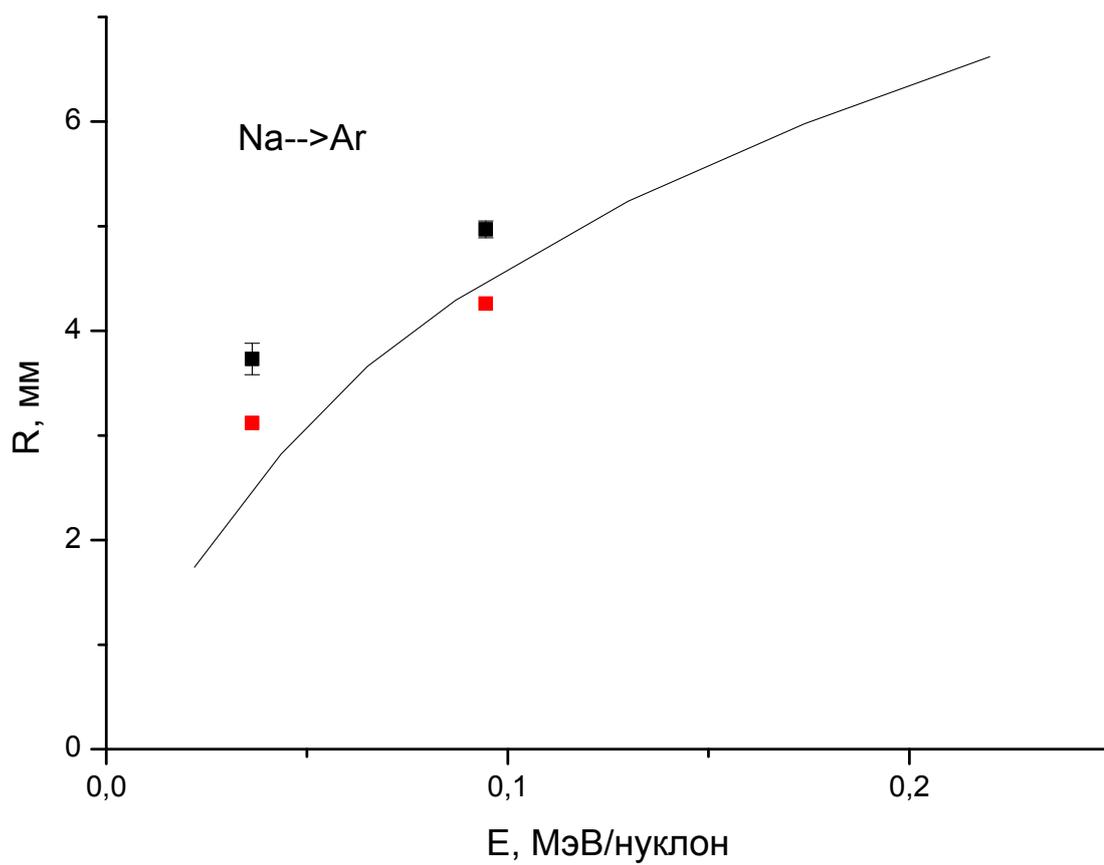
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R, \%$	$S/R, \%$
2,7	0,036	$3,2 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$		18,5	
4,1	0,087	$3,9 \pm 0,4$	$3,4 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,2$	14,7	2,9
5,6	0,16	$5,4 \pm 0,5$	$4,8 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,2$	12,5	6,3
6,0	0,19	$6,2 \pm 0,5$	$5,6 \pm 0,2$		10,7	
7,6	0,30	$8,2 \pm 0,2$	$7,5 \pm 0,2$		9,3	



Пробеги ионов натрия

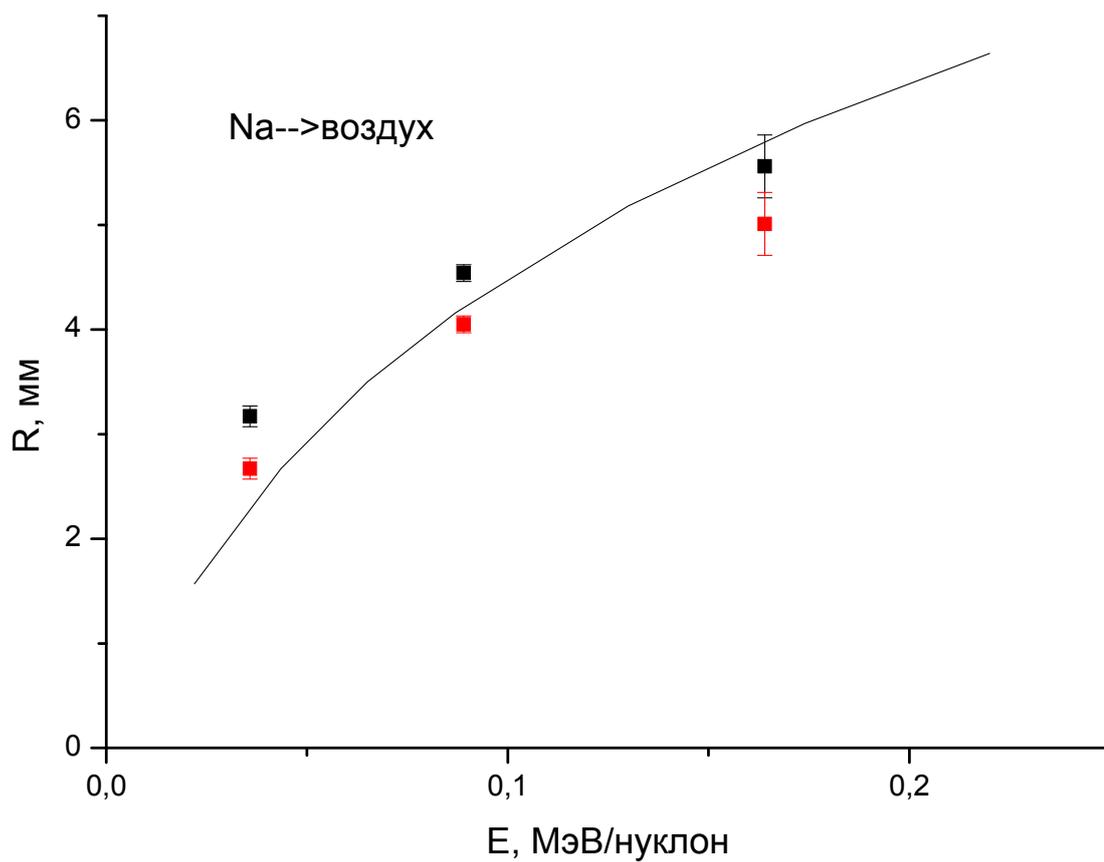
Ионы Na в аргоне

V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R'' , мм макс	R , мм средн	$(R'' - R) / R$ %
2,6	0,036	$3,7 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	19,3
4,3	0,094	$5,0 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,2$	16,3



Ионы Na в воздухе

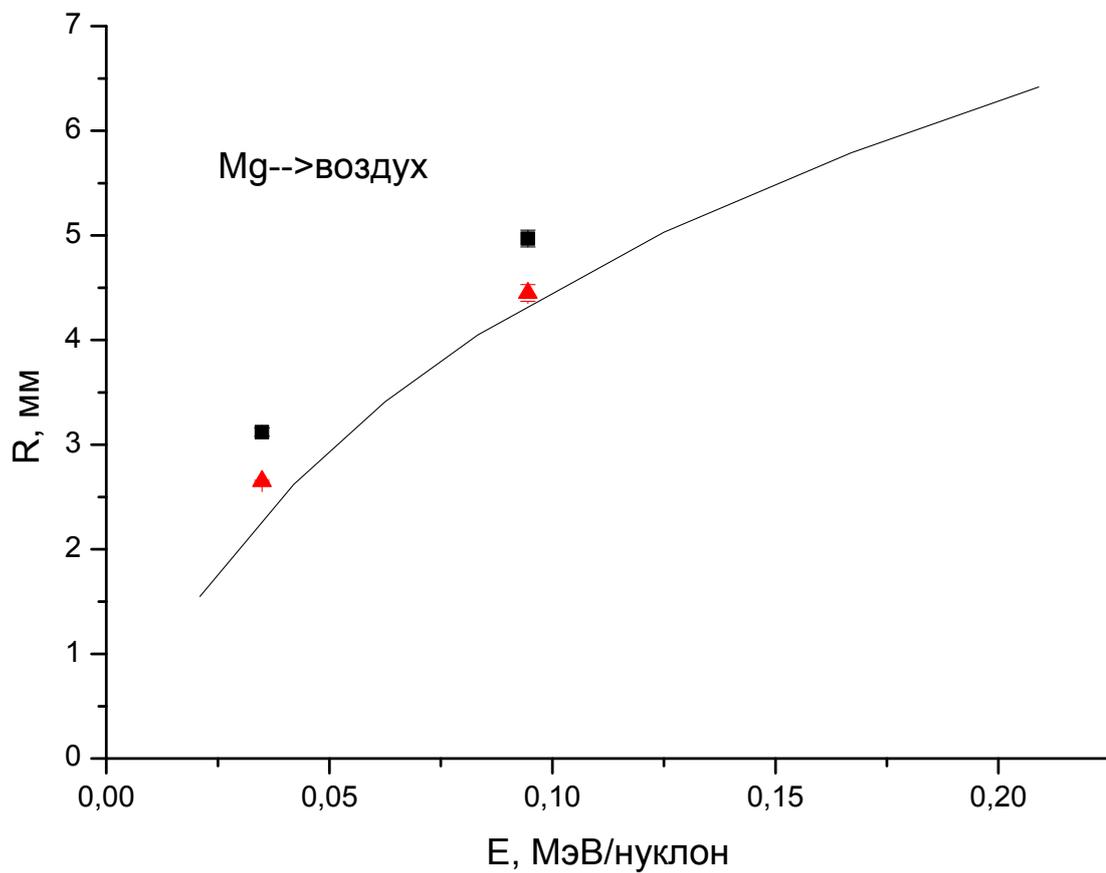
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R) / R \%$
2,6	0,036	$3,2 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,1$	18,5
4,1	0,089	$4,6 \pm 0,1$	$4,1 \pm 0,1$	10,2
5,6	0,16	$5,6 \pm 0,3$	$5,1 \pm 0,3$	9,8



Пробеги ионов магния

Ионы Mg в воздухе

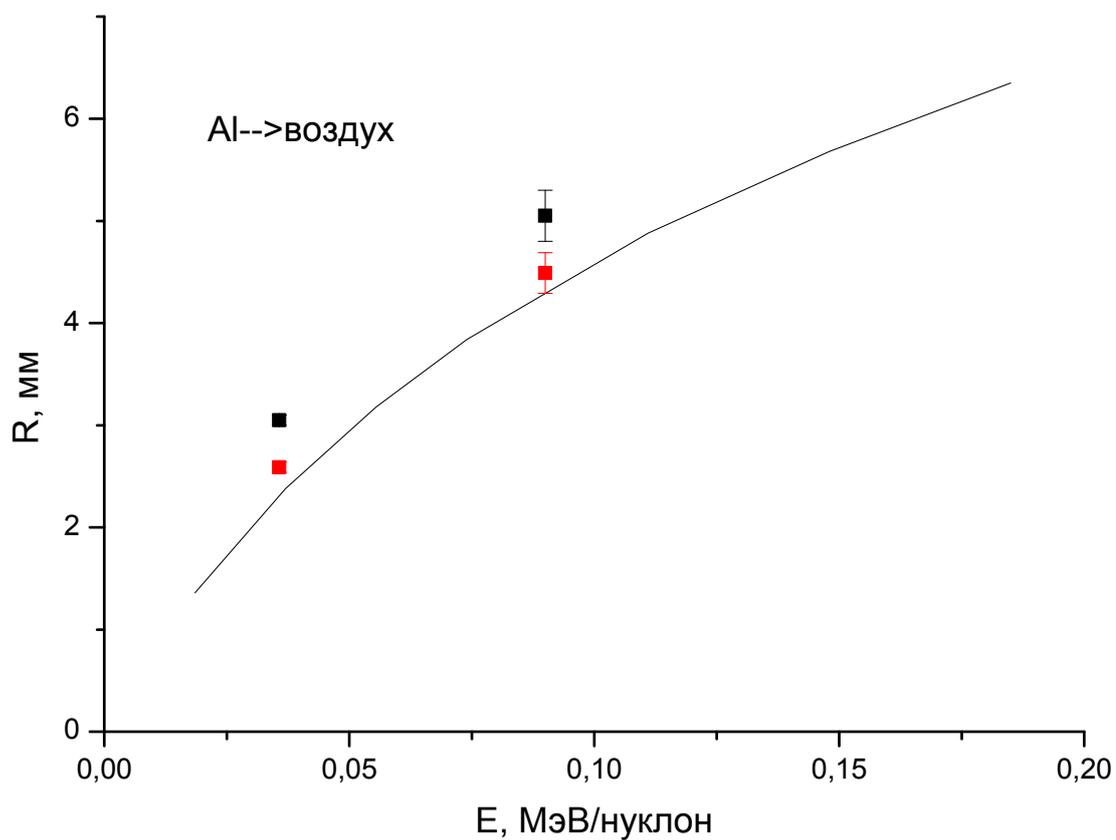
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R) / R \%$
2,7	0,035	$3,12 \pm 0,04$	$2,65 \pm 0,04$	17,7
4,3	0,094	$4,97 \pm 0,08$	$4,45 \pm 0,08$	11,7



Пробеги ионов алюминия

Ионы Al в воздухе

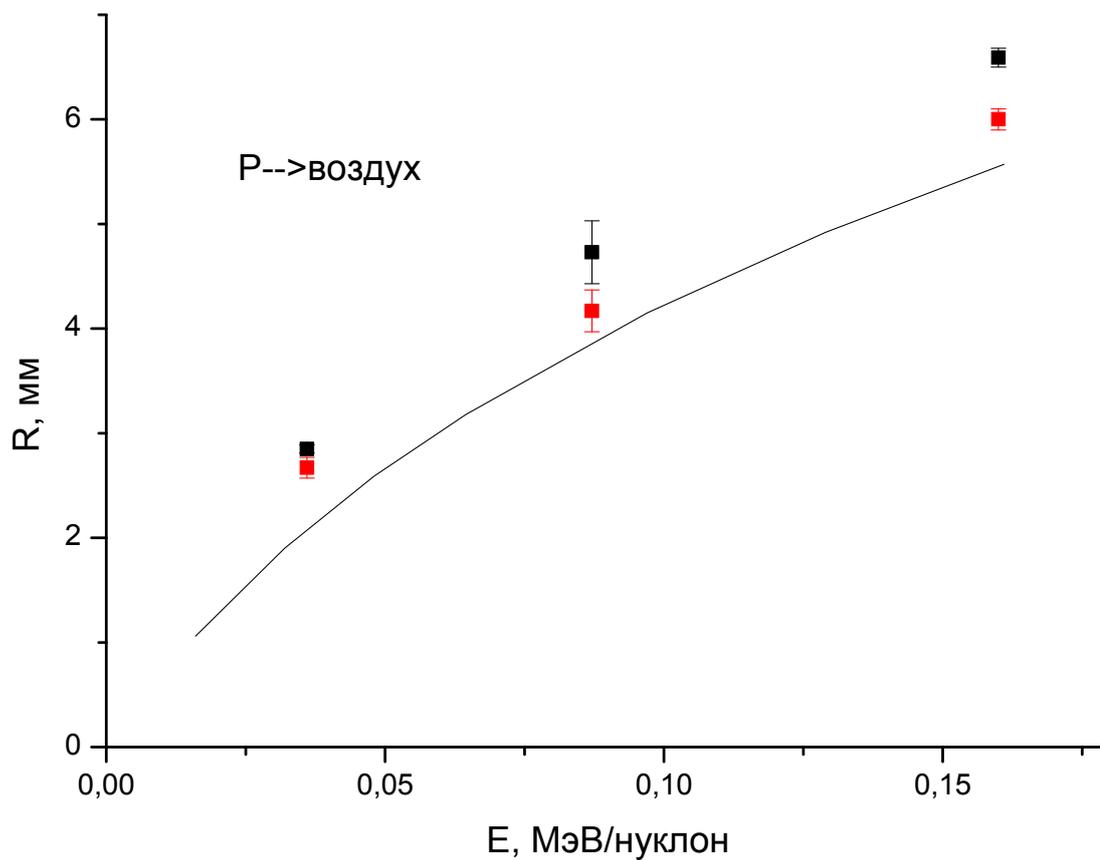
V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R'' , мм макс.	R , мм средн.	R' , мм экстр.	$(R'' - R) / R$ %	S , %
2,6	0,036	$3,05 \pm 0,05$	$2,59 \pm 0,05$		17,7	
4,2	0,091	$5,0 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,2$	11,1	6.7



Пробеги ионов фосфора

Ионы P в воздухе

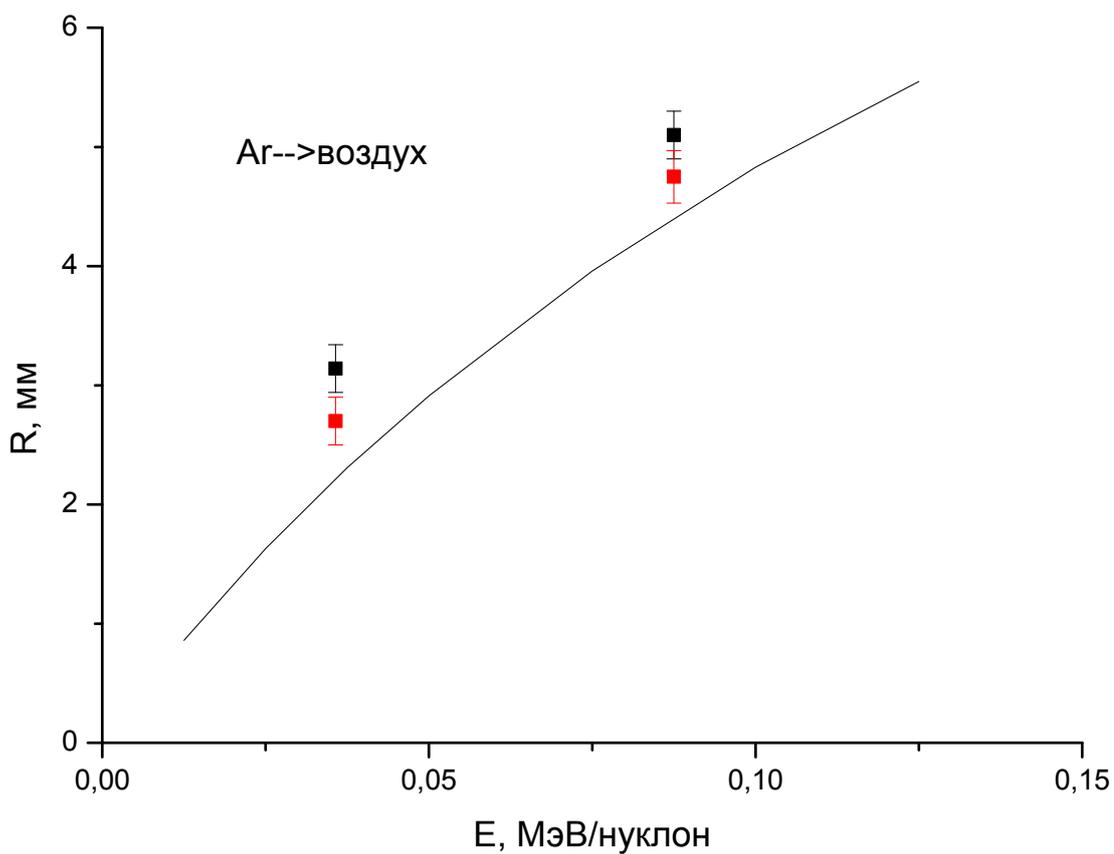
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R \%$	$S, \%$
2,6	0,036	$2,85 \pm 0,04$	$2,6 \pm 0,1$		9,6	
4,1	0,087	$4,7 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,2$	11,9	7.1
5,5	0,16	$6,6 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,1$		10,0	



Пробег ионов аргона

Ионы Ar в воздухе

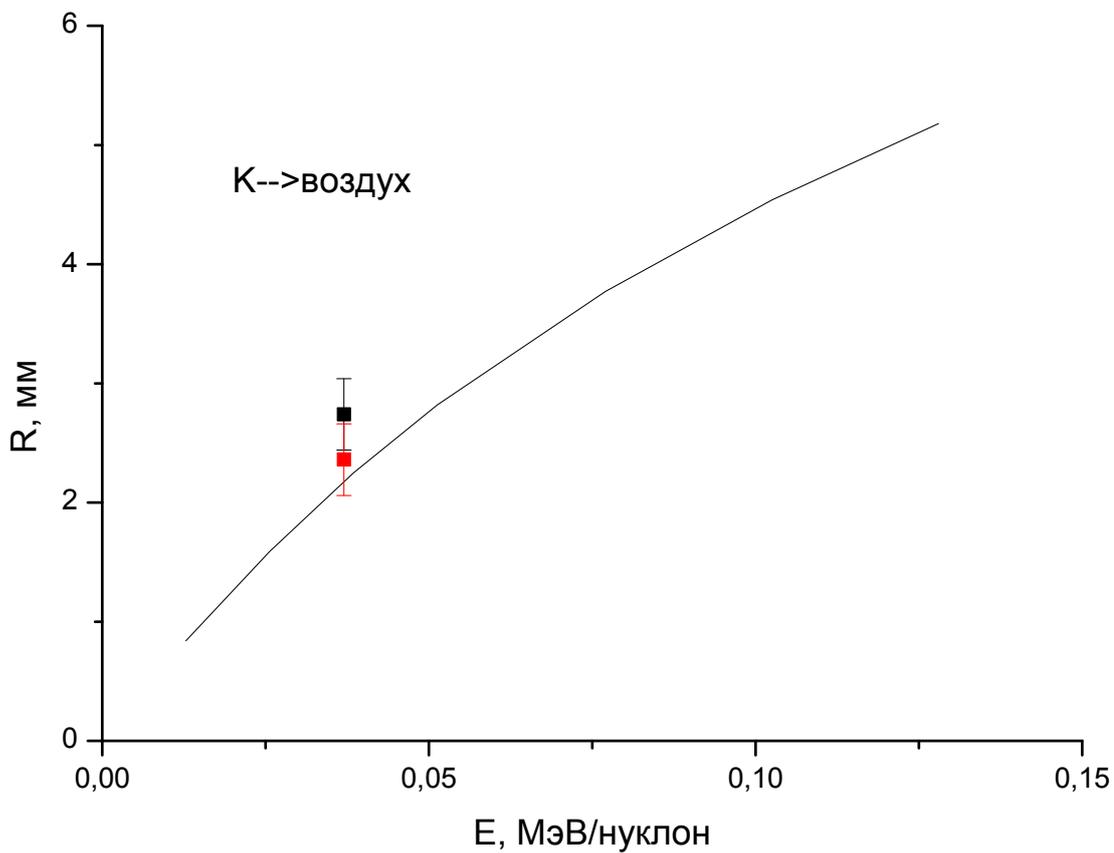
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$R', \text{ мм экстр.}$	$(R'' - R) / R \%$	$S, \%$
2,6	0,036	$3,1 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,2$		14,8	
4,1	0,087	$5,1 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,2$	8,5	6,4



Пробеги ионов калия

Ионы К в воздухе

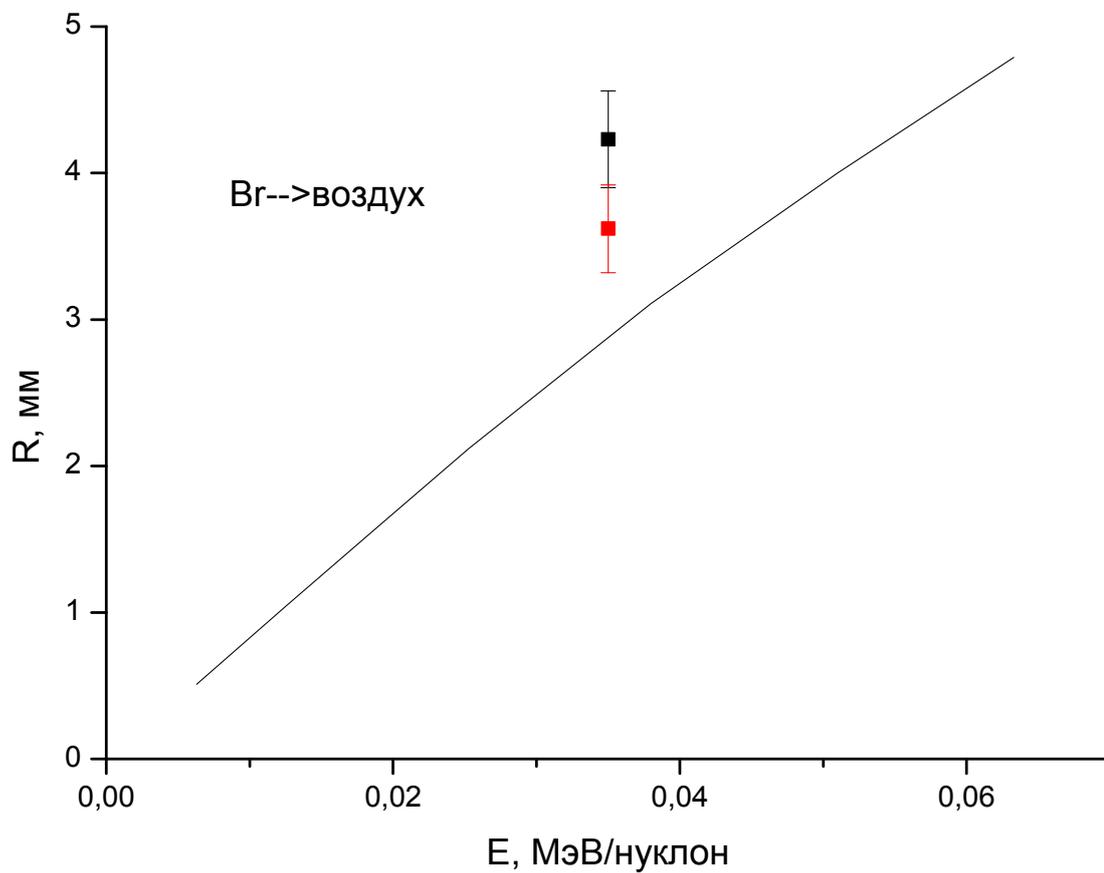
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс}$	$R, \text{ мм средн}$	$(R'' - R) / R \%$
2,7	0,037	$2,7 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,3$	12,5



Пробег ионов брома

Ионы Br в воздухе

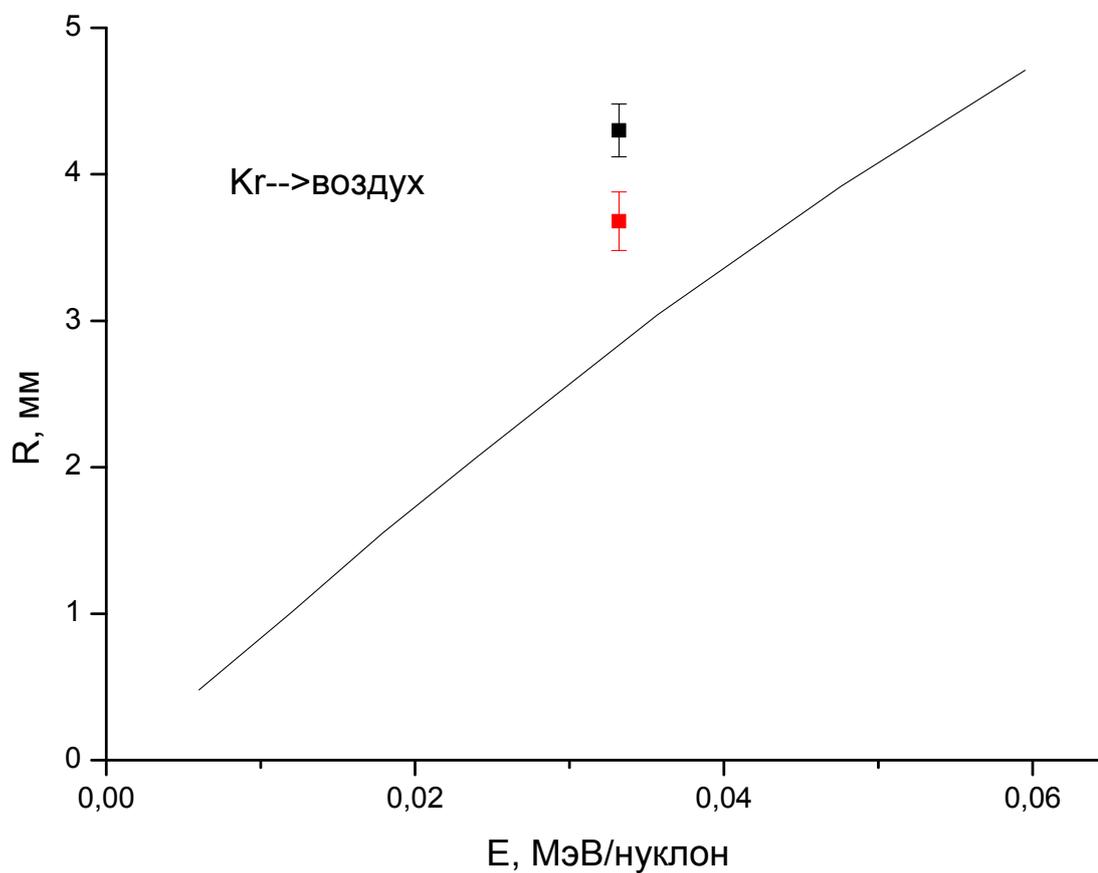
$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R'', \text{ мм макс.}$	$R, \text{ мм средн.}$	$(R'' - R) / R \%$
2,6	0,035	$4,2 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,3$	16,7



Пробеги ионов криптона

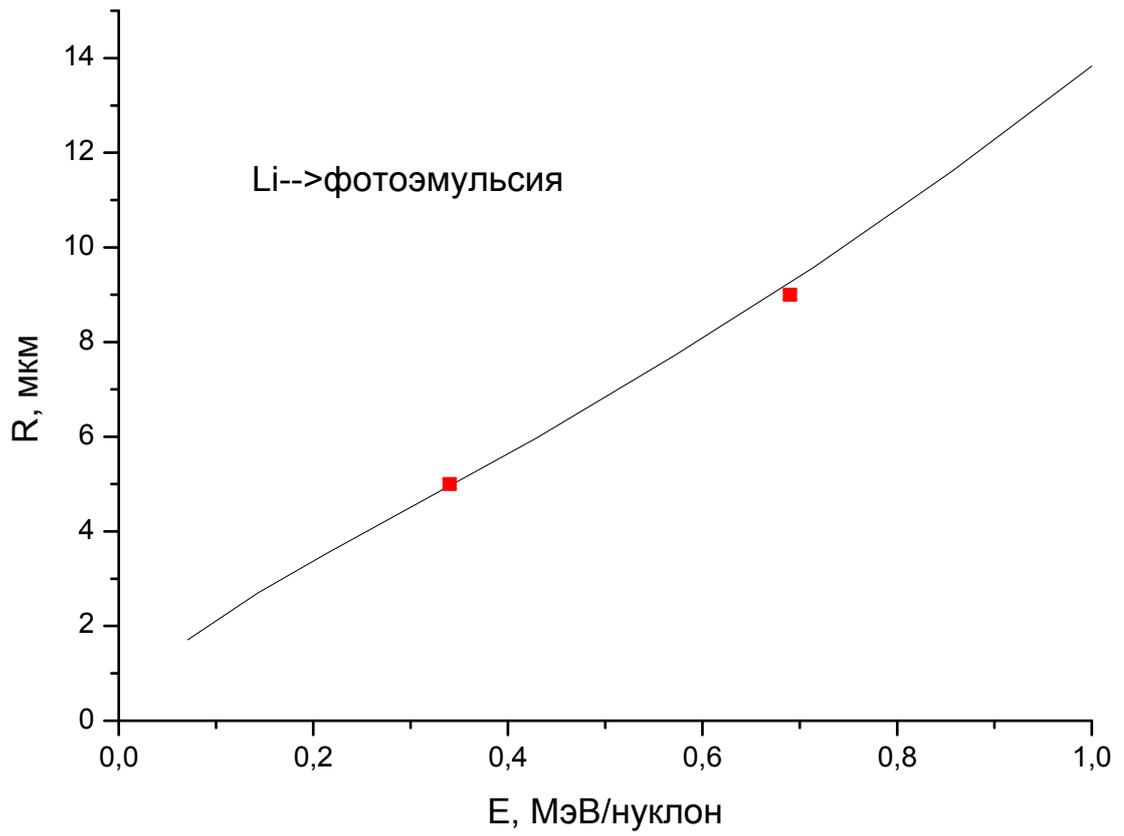
Ионы Kr в воздухе

V , 10^8 см/с	E , МэВ/н	R'' , мм макс.	R , мм средн.	$(R'' - R)/R$ %
2,5	0,033	$4,3 \pm 0,2$	$3,7 \pm 0,2$	16,2



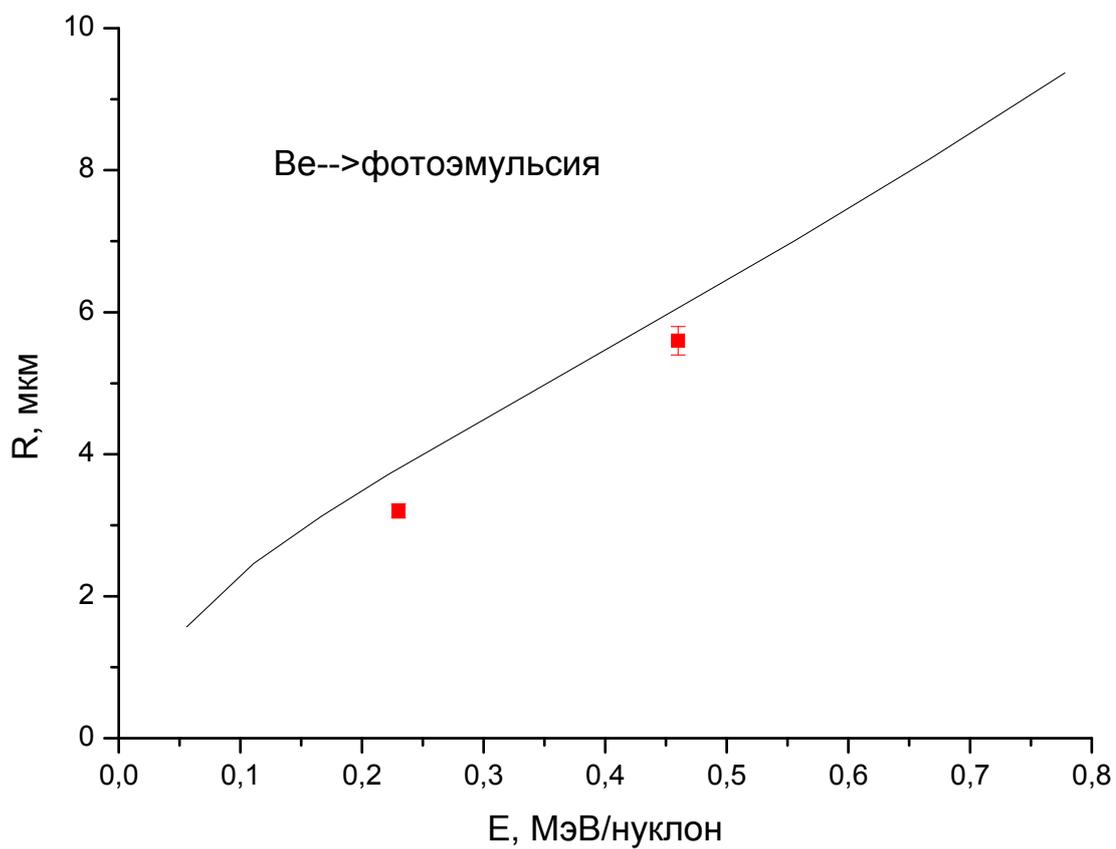
Ионы Li в фотоэмульсии НИКФИ-Я2

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мкм средн}$
8,1	0,34	$5,0 \pm 0,1$
11,5	0,69	$9,0 \pm 0,1$



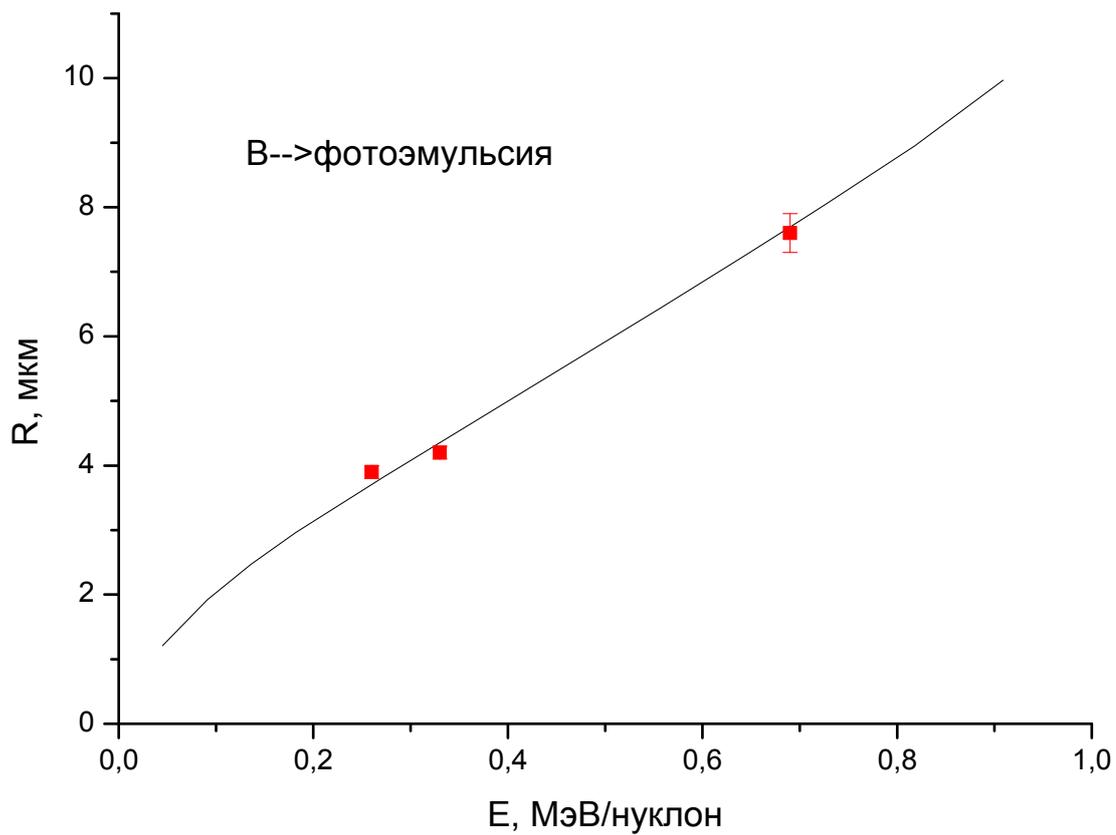
Ионы Ве в фотоэмульсии НИКФИ-Я2

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мкм средн}$
6,7	0,23	$3,2 \pm 0,1$
9,4	0,46	$5,6 \pm 0,2$



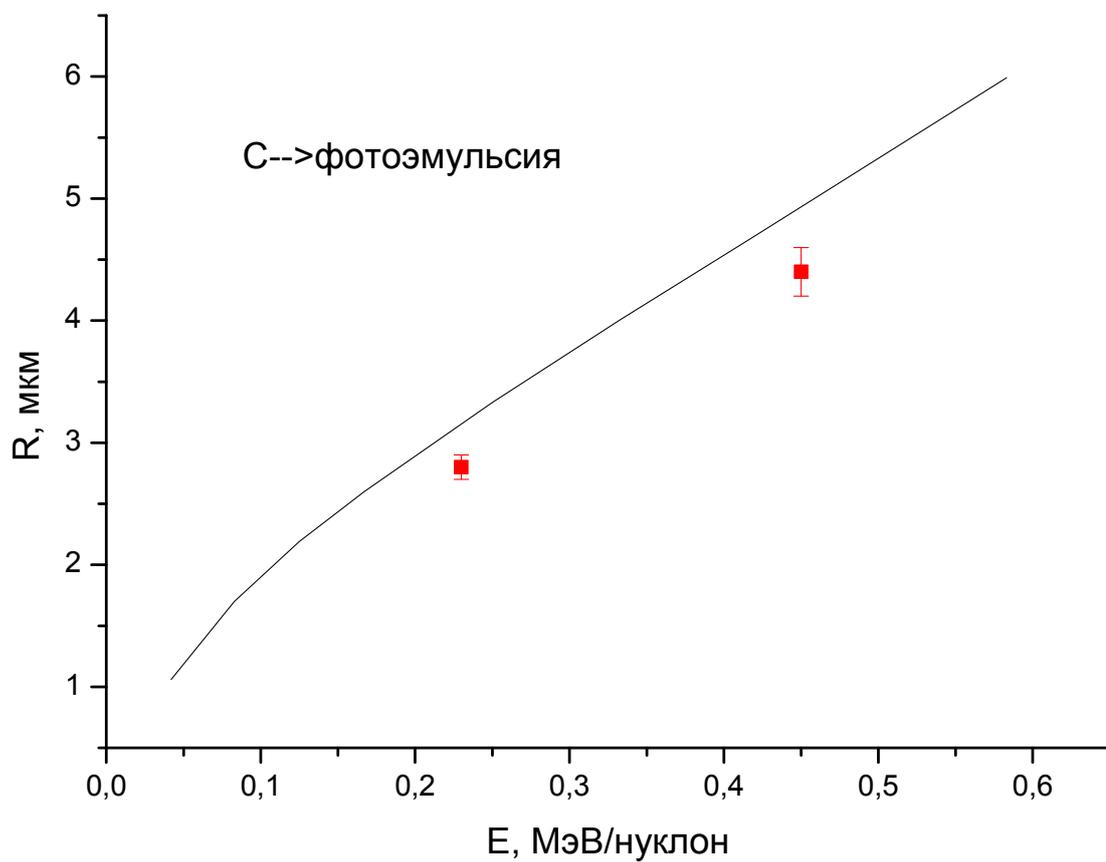
Ионы В в фотоэмульсии НИКФИ-Я2

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мкм средн}$
7,0	0,26	$3,9 \pm 0,1$
7,9	0,33	$4,2 \pm 0,1$
11,5	0,69	$7,6 \pm 0,3$



Ионы С в фотоэмульсии НИКФИ-Я2

$V, 10^8 \text{ см/с}$	$E, \text{ МэВ/н}$	$R, \text{ мкм средн}$
6,7	0,23	$2,8 \pm 0,1$
9,3	0,45	$4,4 \pm 0,2$



Юлия Александровна Белкова

Яна Анатольевна Теплова

**ПРОБЕГИ ИОНОВ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ И
ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ**

Препринт НИИЯФ МГУ №2015-1/888

Работа поступила в ОНТИ 29 июня 2015 г.