

181

С 343 g
K-551

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P15 - 3756



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

А.П. Кобзев, В.И. Салацкий, С.А. Тележников

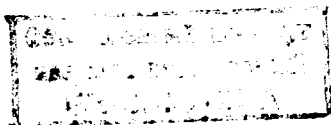
УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ТРИТОНОВ НА КИСЛОРОДЕ
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 0,9 - 1,7 МЭВ

1968

P15 - 3756

А.П. Кобзев, В.И. Салацкий, С.А. Тележников

УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ТРИТОНОВ НА КИСЛОРОДЕ
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 0,9 - 1,7 МЭВ



7249 / 1 ч.

В в е д е н и е

Настоящая работа является продолжением выполненных ранее исследований ядерных реакций трития с кислородом.

В прежних сообщениях^{1,2/} обнаружено несколько новых уровней составного ядра ${}^6\text{F}$ в области энергий возбуждения от 11,7 до 13,2 Мэв. Для определения характеристик найденных уровней необходимо исследовать возможно большее число выходных каналов реакции взаимодействия трития с кислородом. Исследованию одного из этих каналов, а именно - упругого рассеяния тритонов на кислороде и посвящена настоящая работа.

Эксперимент

Исследование рассеяния тритонов на кислороде выполнено на электростатическом генераторе ОИЯИ на 1,8 Мэв. Энергия ионов трития определялась с помощью магнитного анализатора, прокалиброванного по резонансу при 1117 кэв из реакции ${}^{12}\text{C}(t, p_0) {}^{14}\text{C}$ /3/.

В пучке с массой 3, кроме ионов T^+ , присутствуют молекулярные ионы HNN^+ и HD^+ , а также ионы гелия-3, непрерывно образующегося при естественном распаде трития. Примесь ионов HNN^+ составляла 0,4 - 0,5%, ионов HD^+ - от 0,1 до 0,3% и ионов ${}^3\text{He}^+$ - 0,3%. Эти примеси не только искажают измерения числа тритонов, падающих на мишень, но также затрудняют выделение на спектре пика от тритонов, рассеянных на кислороде.

На различных этапах работы использовались твердые мишени из окиси бериллия, окиси никеля, алуида (Al_2O_3), а также газовые мишени, напыляемые кислородом и смесями кислорода с аргоном или ксеноном.

Мишени из окиси бериллия готовились испарением бериллия в вакууме. Полученные пленки оказывались в значительной степени окисленными. Такие мишени, как видно из рис. 1, позволяли хорошо отделять пик тритонов, рассеянных на кислороде, от тритонов, рассеянных на бериллии, но отделять этот пик от частиц из различных реакций на бериллии оказалось невозможным.

Мишени из окиси никеля получались при нагревании пластинки никеля в воздухе. Пленка окиси никеля отделялась от пластинки раствором йода в этиловом спирте, подобно тому, как это делалось в работе^{/4/}. Как видно из рис. 2, частицы, рассеянные на никеле, образуют большую подложку, затрудняющую выделение тритонов, рассеянных на кислороде. Кроме того, содержание кислорода в мишени изменялось под действием пучка, что приводило к существенному искажению результатов.

Мишени из алунда готовились электролизным методом, описанным в работе^{/5/}. Такие мишени оказались устойчивыми под пучком. Однако было замечено, что в различных экземплярах мишеней на один атом алюминия приходится различное количество атомов кислорода. Это, вероятно, объясняется тем, что при изготовлении мишени металлический алюминий не полностью стравливается с окисной пленки.

Для абсолютных измерений применялись газовые мишени со слюдяными окнами, в которых число атомов определяется достаточно точно. Кислород, используемый для наполнения мишеней, имел примеси аргона и азота. Примесь аргона определялась по рассеянию тритонов и составляла $(0,34 \pm 0,03)\%$. Оценка примеси азота была сделана по выходу α -частиц из реакции $^{14}\text{N}(t, \alpha)^{18}\text{O}$ и составила $(0,6 \pm 0,2)\%$. Аргон и ксенон, используемые в смесях с кислородом, имели ничтожное количество примесей. Потери энергии тритонов в слюде взяты из работы^{/8/}.

Рассеянные частицы регистрировались кремниевым поверхностно-барьерным детектором с напряжением смещения 15 вольт. При таком напряжении шумы детектора были малы, а разрешение вместе с регистрирующей аппаратурой составляло около 40 кэв для протонов и тритонов в области энергий от 400 до 1500 кэв. Один из полученных спектров приведен на рис. 3.

В части измерений, где требовалось учитывать просчёты амплитудного анализатора, имеющего мертвое время около 150 микросекунд, использовалась следующая схема. Импульсы от детектора после усиления поступали на линейный вход схемы пропускания и дифференциальный дискриминатор, который управлял схемой пропускания так, что на выходе ее анализатор регистрировал участок спектра, вырезаемый дискриминатором. Импульсы, поступающие на управляющий вход схемы пропускания, регистрировались также пересчётным устройством, которое вместе с дискриминатором имело разрешающее время во много раз меньше, чем анализатор. Коэффициент просчётов определялся как отношение счёта пересчётного устройства к сумме импульсов, зарегистрированных анализатором.

Исследование $^{16}\text{O}(p, p)^{16}\text{O}$.

Для проверки методики измерения упругого рассеяния на газовых мишенях был проделан эксперимент по рассеянию протонов на кислороде. Протонный пучок - наиболее чистый пучок ускорителя, а из работы^{17/} известно, что для энергий до 2 Мэв сечение рассеяния протонов на кислороде изменяется плавно, поэтому даже резкое изменение режима ионного источника и фокусировки пучка, необходимое для проверки схемы измерения просчётов анализатора, не могло приводить к искажению результатов (из-за изменения примесей в пучке и ухудшения стабилизации энергии протонов при уменьшении тока протонов). Оказалось, что просчёты определяются с точностью не хуже одного процента.

Дифференциальные сечения рассеяния протонов на кислороде под углом 150° л.с. приведены на рис. 4. Относительные ошибки измерений составляют примерно половину от полных ошибок сечений, показанных на рисунке, имеющих величины около 4%. Пунктирная кривая на рисунке - рассеяние, вычисленное по формуле Резерфорда, которую для лабораторной системы удобно представить в следующем виде:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = (\gamma + 1) \frac{Z^2 z^2 \cdot 0,8141 \cdot 10^{-26}}{2\pi E^2} \cdot \frac{1}{\gamma \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} - 1 + \cos^2 \theta}} \times$$

$$\times \frac{1}{\left(\frac{1 + \frac{1}{\gamma}}{\cos \theta - \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} - 1 + \cos^2 \theta}} - \cos \theta \right)^2}$$

где

$$\gamma = \frac{E}{m}$$

E - энергия падающей частицы (Мэв),

m - масса падающей частицы,

M - масса ядра-мишени,

z - заряд падающей частицы,

Z - заряд ядра-мишени,

θ - угол рассеяния.

Видно, что измеренные сечения значительно больше вычисленных по формуле Резерфорда.

На рис. 4 также приведены относительные измерения рассеяния под углом $(164 \pm 5)^\circ$, взятые из работы^{/7/}, нормированные при энергии протонов 2,0 Мэв к результату работы^{/8/}, равному 94 ± 2 мбарн/стер. Экспериментальные ошибки работы^{/7/} при энергиях выше 1,1 Мэв были равны 4%, а ниже, из-за фона, - 15%. Сечения рассеяния, измеренные под углом 164° , также значительно больше вычисленных по формуле Резерфорда.

Рассеяние тритонов на кислороде

На рис. 5 приведены результаты измерений на алундовых мишенях под углом 150° л.с. Рассеяние на алюминии пропорционально резерфордовскому, так как выход его, умноженный на квадрат энергий, аппроксимируется в пределах экспериментальных ошибок горизонтальной прямой.

Рассеяние на кислороде представлено как отношение выхода на кислороде к выходу на алюминии. Вычисленные таким образом данные пропорциональны отношению рассеяния на кислороде к резерфордовскому. Использование рассеяния на алюминии в качестве монитора удобно тем, что исключает ошибки, связанные с определением числа тритонов, бомбардирующих мишень, и с просчётами анализатора.

На рис. 6 приведены результаты измерений под углом 150° на газовых мишенях. Меньший разброс точек на мишенях со смесями обусловлен преимуществами измерения рассеяния на кислороде относительно газа - монитора, рассеяние на котором принимается равным резерфордовскому. Это предположение было проверено, и, как видно на том же рисунке, оно выполняется в пределах экспериментальных ошибок.

Относительные измерения на алунде, кислороде с аргоном и кислороде с ксеноном под углом 150° имеют точность около 2%, а абсолютные измерения на газовых мишенях получаются с точностью не хуже 5%. Поэтому для других углов проводились измерения сечений рассеяния только с использованием газов - мониторов: аргона и ксенона. Энергетические зависимости рассеяния тритонов на кислороде под углами 144, 133, 115,5 и $79,5^\circ$ приведены на рис. 7 и 8.

Обсуждение результатов

Сечение рассеяния частиц со спином $1/2$ (тритонов) на ядре со спином 0 (кислород-16) можно представить в виде:

$$\sigma = |A_{1/2, 1/2}|^2 + |A_{1/2, -1/2}|^2$$

где

$$A_{1/2, 1/2} = \frac{\sigma^{1/2}}{K\alpha} [-C_\alpha(\theta) + \frac{i}{\sqrt{4\pi}} \sum_l \{ (\ell+1) T_{\ell, \ell}^{\ell+1/2} + \ell T_{\ell, \ell}^{\ell-1/2} \} P_\ell(\cos\theta)]$$

$$A_{1/2, -1/2} = \frac{\pi^{1/2}}{K a} \frac{i}{\sqrt{4\pi}} \sum_{\ell} (T_{\ell, \ell}^{\ell-1/2} - T_{\ell, \ell}^{\ell+1/2}) P_{\ell}'(\cos \theta),$$

$K a$ - волновое число,

$C a$ - амплитуда Резерфордовского рассеяния,

$P_{\ell}(\cos \theta)$ - полином Лежандра,

$P_{\ell}'(\cos \theta)$ - присоединенный полином Лежандра,

$T_{\ell, \ell}^{\ell+1/2}, T_{\ell, \ell}^{\ell-1/2}$ - элементы матрицы рассеяния,

$A_{1/2, -1/2}$ - амплитуда рассеяния с переворотом спина, которая равна 0 при отсутствии спин-орбитального взаимодействия.

Для изолированного уровня с фиксированным J^{π} в сумме по ℓ в $A_{1/2, 1/2}$ остается одно слагаемое с ℓ , соответствующим условиям $J = \ell \pm 1/2$, $\pi = (-1)^{\ell}$, и под углом, где $P_{\ell}(\cos \theta) = 0$ $A_{1/2, 1/2}$,

значительно упрощается. Чтобы использовать при анализе это упрощение, функции возбуждения измерялись под углами, соответствующими нулям полиномов: при угле $79,5^{\circ}$ л.с., равном углу 90° ц.м. (все нечётные полиномы нули), при $115,5^{\circ}$ л.с. или 125° ц.м. (P_2 равен нулю), при 133° л.с. или 141° ц.м. (P_3 равен нулю), при 144° л.с. или 150° ц.м. (P_4 равен нулю) и при 150° л.с. или 155° ц.м. (P_5 равен нулю).

Как видно из рис. 9, форма кривых рассеяния тритонов на кислороде мало меняется в зависимости от угла. На всех кривых в диапазоне энергий 0,90 - 1,66 Мэв чётко видно по одному максимуму и по два минимума. Наибольшее отклонение измеренного рассеяния (до 35%) от вычисленного по формуле Резерфорда получено при наибольшем угле наблюдения в районе 1,6 Мэв. С уменьшением угла наблюдения отклонение от Резерфордовского рассеяния уменьшается, и при угле $79,5^{\circ}$ становится не больше 5,5%. На кривой рассеяния, измеренной под углом 150° в большем диапазоне энергий, виден еще один максимум при энергии 1,70 Мэв. На всех кривых нет других максимумов и минимумов, превышающих относительную ошибку измерений, равную 2%. При энергиях ниже 1,0 Мэв измеренное рассеяние на всех углах, кроме $79,5^{\circ}$, превышает Резерфор-

довское рассеяние. При углах $115,5$ и 150° это превышение при наиболее низких измеренных энергиях доходит до 10%, что в два раза больше полных экспериментальных ошибок сечений рассеяния. Оценка влияния многократного рассеяния тритонов, вылетающих из газовой мишени через пленку из слюды, показывает, что такое рассеяние может только приводить к занижению измеренных сечений (особенно при малых энергиях тритонов) и поэтому не объясняет превышения измеренных сечений рассеяния над резерфордовскими.

Из предварительного анализа упругого рассеяния можно заключить, что парциальные тритонные ширины дают малый вклад (не более 8%) в полную ширину для всех аномалий. А так как характер кривых сечения сохраняется на всех углах, то, по-видимому, поведение упругого рассеяния нельзя объяснить для любого интервала энергий, используя только один изолированный уровень. В функциях возбуждения реакций $^{16}\text{O}(t, \alpha)^{16}\text{N}$ и $^{16}\text{O}(t, p)^{16}\text{O}$, полученных в работе [1], в районе энергий от 1,3 до 1,7 Мэв имеется несколько резонансов с перекрывающимися ширинами. Некоторые из них можно связать с аномалиями в упругом рассеянии.

Для извлечения информации о спинах уровней составного ядра ^{16}F требуются детальные расчёты с учётом данных по угловым распределениям в других каналах реакции.

В заключение авторы выражают благодарность В.И.Фурману за участие в постановке задачи и обсуждении полученных результатов, П.П.Костромину за изготовление слюдяных пленок, а также Е.С.Смирнову и Н.Н.Счётчикову, обеспечившим работу электростатического генератора.

Л и т е р а т у р а

1. А.П.Кобзев, А.В.Громов, К.Кашлик, К.Недведюк, В.И.Салацкий, С.А.Тележников. Ядерная физика, 5 510, (1967).
2. А.П.Кобзев, К.Недведюк, В.И.Салацкий, И.В.Сизов, С.А.Тележников. Препринт ОИЯИ Р6-3314, Дубна 1967.
3. Б.Кюн, В.И.Салацкий, И.В.Сизов. ЖЭТФ, 43, 1860 (1962).
4. О.Кубашевский, Б.Голкинс. Окисление металлов и сплавов. М., Изд-во иностр. лит., 1955.

5. U.Hauser, W.Kesler, Rev. Scient. Instrum., 29, 380 (1958).
6. А.М.Говоров, Ли Га Ен, Г.М.Осетинский, В.И.Салацкий, И.В.Сизов.
Препринт ОИЯИ Р-725, Дубна 1961.
7. R.A.Laubenstein, M.J.W.Laubenstein, L.J.Koester, R.C.Mobly,
Phys. Rev., 84, 12 (1951).
8. F.J.Eppling, J.R.Cameron, R.H.Davis, A.S.Divatia, A.I.Galonsky,
E.Goldberg, R.W.Hill, Phys. Rev., 91, 438 (A) (1953).

Рукопись поступила в издательский отдел

7 марта 1968 года.

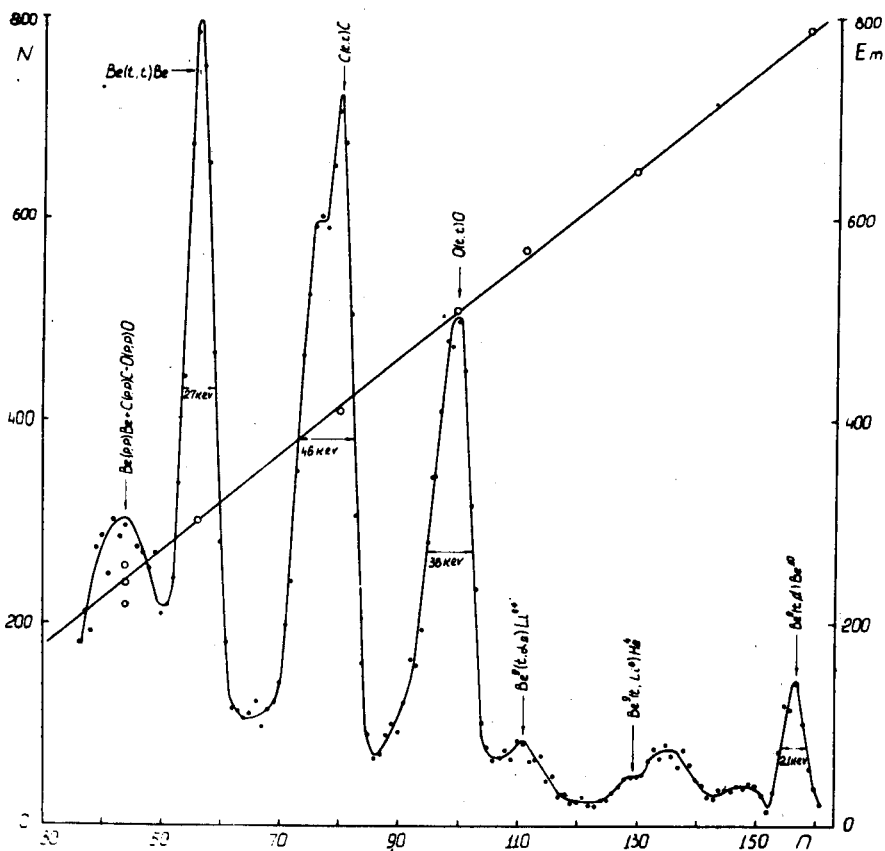


Рис. 1. Спектр частиц из бериллиевой мишени. $E_T = 946$ кэВ,
 $\theta = 130^\circ$, $U_{смещения} = 90$ вольт. На осях:
 N - число отсчетов на канал, E_m - энергия частиц
 в килоэлектронвольтах, α - номера каналов анализатора.

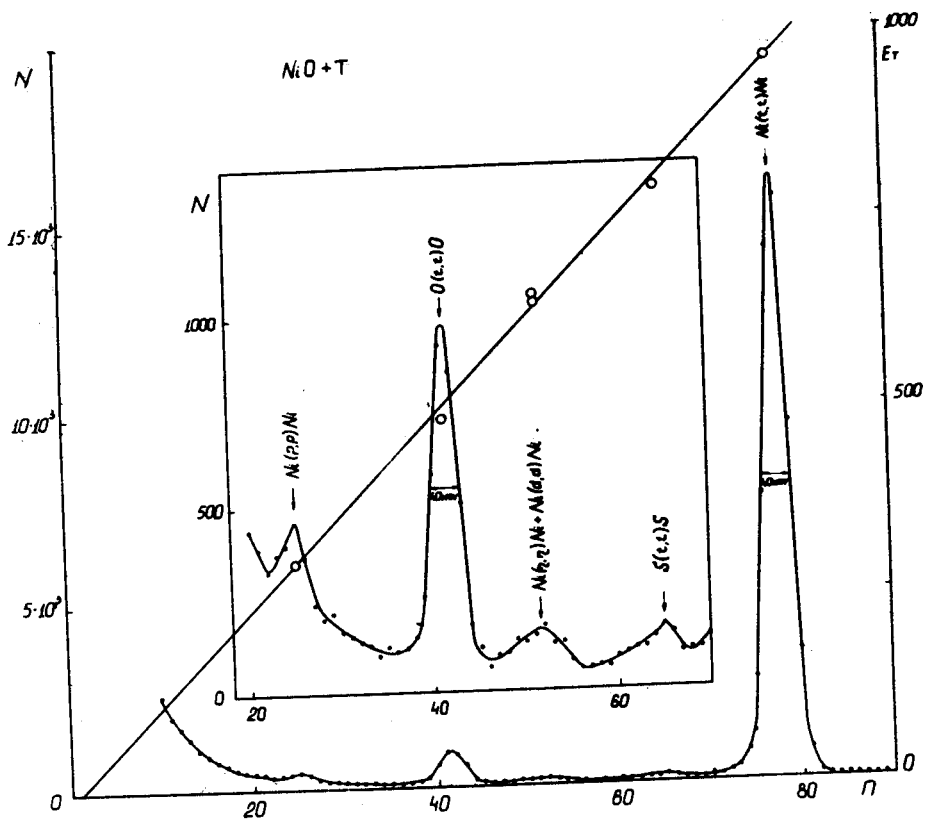


Рис. 2. Спектр частиц, рассеянных на мишени из NiO .
 $E_T = 1277$ кэв, $\Theta = 150^\circ$. U смещения = 15 вольт.
 Перед детектором пленка из слюды толщиной $0,28 \text{ мг/см}^2$.
 На осях: N - число отсчетов на канал, E_m - энергия частиц в килоэлектронвольтах, n - номера каналов анализатора.

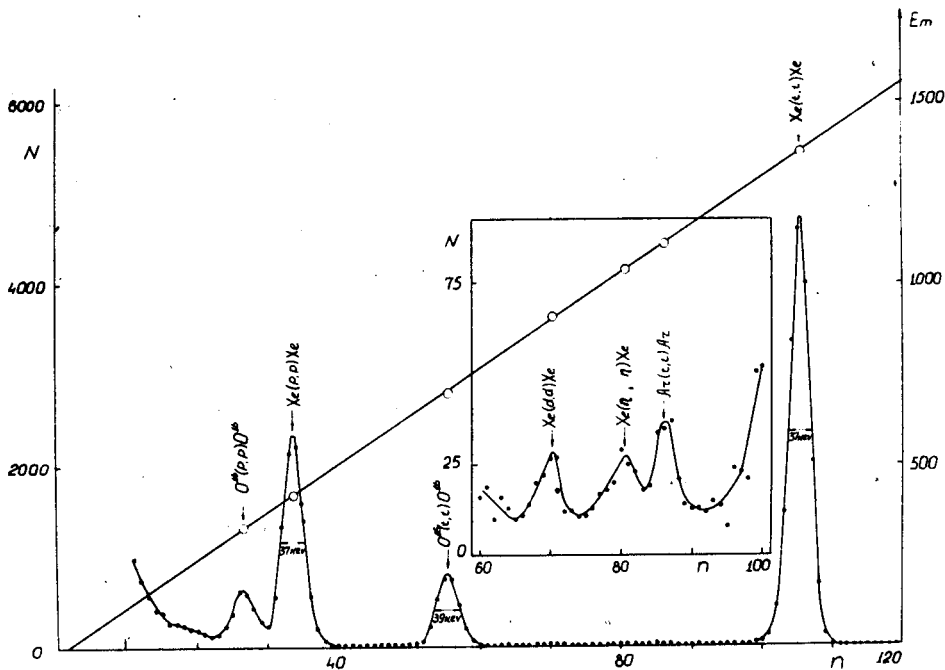


Рис. 3. Спектр частиц, рассеянных на газовой мишени,
 $E_T = 1572$ кэв, $\theta = 144^\circ$. Мишень - $^{40}\text{O} + \text{Xe}$
 На осях: N - число отсчетов на канал, E_m - энергия
 частиц в килоэлектронвольтах, n - номера каналов
 анализатора.

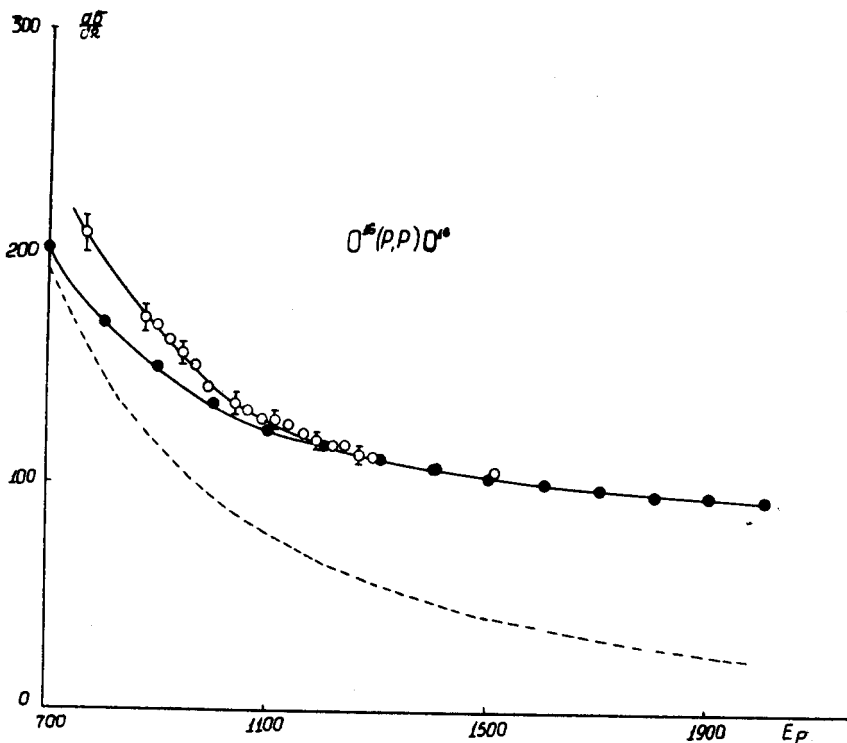


Рис. 4. Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на кислороде. $\Theta = 150^\circ$. Пунктирная кривая - резерфордовское рассеяние. \circ - данные настоящей работы, \bullet - данные работы [7] при угле примерно 164° .
 На осях: $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ - сечение в миллибарнах на стерадиан,
 E_p - энергия протонов в килоэлектронвольтах.

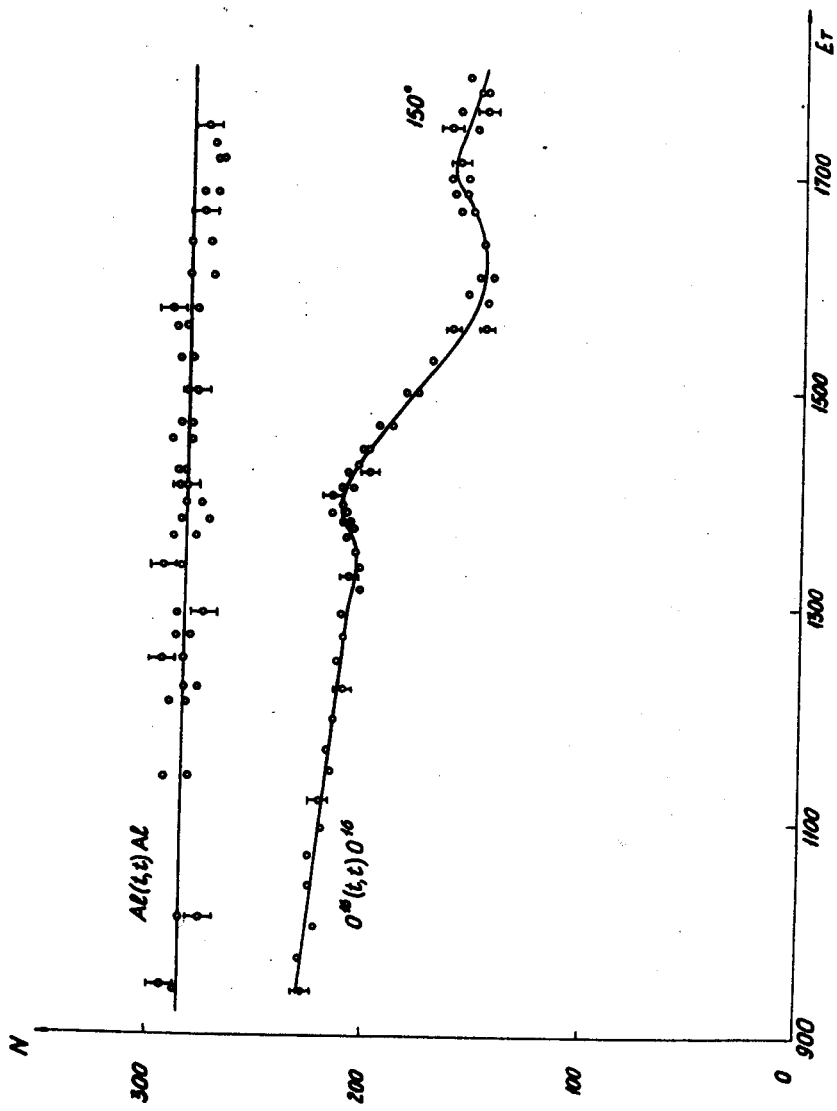


Рис. 5. Упругое рассеяние тритонов на алюминии и кислороде.
 Мишень - Al_2O_3 . $\Theta = 150^\circ$. На осях: E_t - энергия тритонов в килоэлектронвольтах.

$$N = E^2 \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad - \text{ относительные единицы.}$$

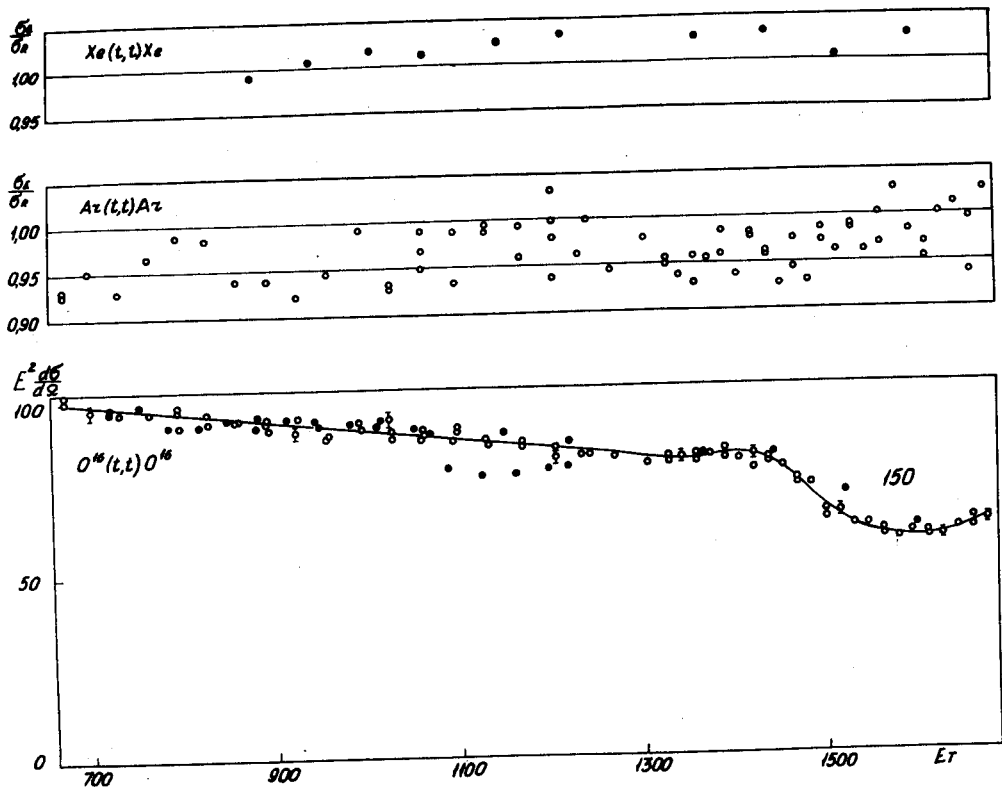


Рис. 6. Упругое рассеяние тритонов на ксеноне, аргоне и кислороде. Мишени - $^{16}O + Xe$ и $^{16}O + Ar$. $\Theta = 150^\circ$.

На осях: E_T - энергия тритонов в килоэлектронвольтах.

$\frac{\sigma_E}{\sigma_R}$ - отношение экспериментальных сечений к Резерфордским.

$E^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$ - произведение дифференциального сечения рассеяния на квадрат энергии тритонов. \bullet - данные на мишени, наполненной кислородом, \circ - данные на мишени $-O_2 + Ar$, \ominus - данные на мишени $-O_2 + Xe$.

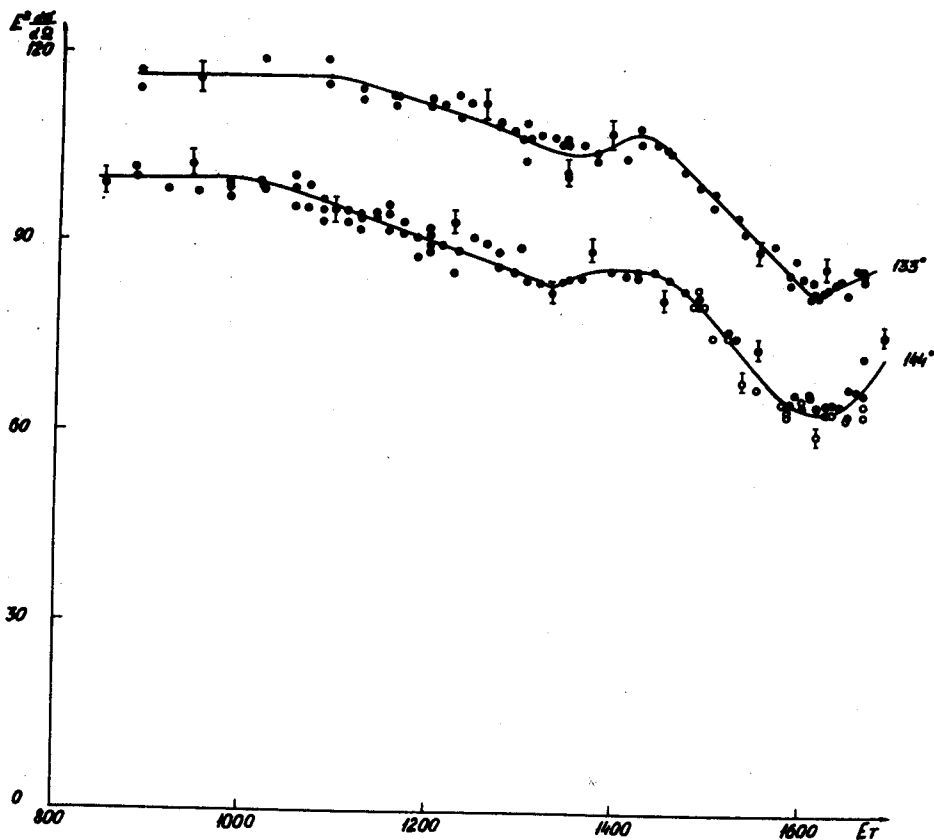


Рис. 7. Упругое рассеяние тритонов на кислороде. $\Theta = 144^\circ$ и 133° . На осях: E_T - энергия тритонов в килоэлектрон-вольтах, $E^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$ - произведение дифференциального сечения рассеяния на квадрат энергии тритонов. \circ - данные на мишени $-O_2 + Ar$, \bullet - данные на мишени $-O_2 + Xe$.

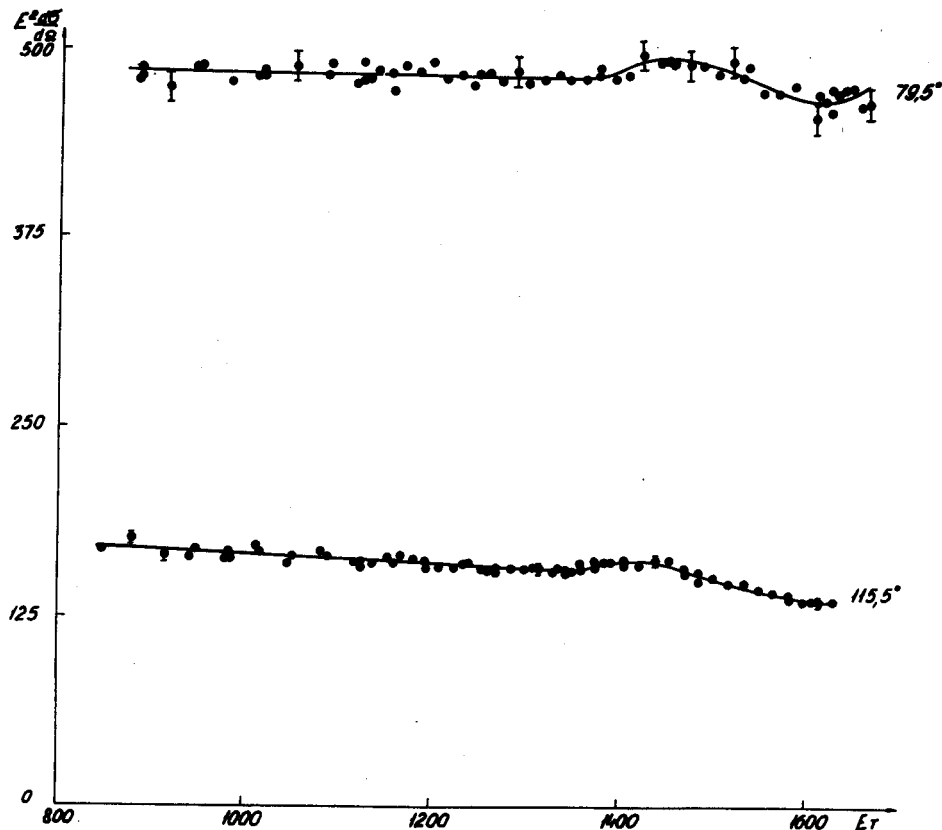


Рис. 8. Упругое рассеяние тритонов на кислороде. $\Theta = 115,5^\circ$ и $79,5^\circ$. На осях: E - энергия тритонов в килоэлектрон-вольтах,
 $E^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$ - произведение дифференциального сечения рассеяния на квадрат энергии тритонов.

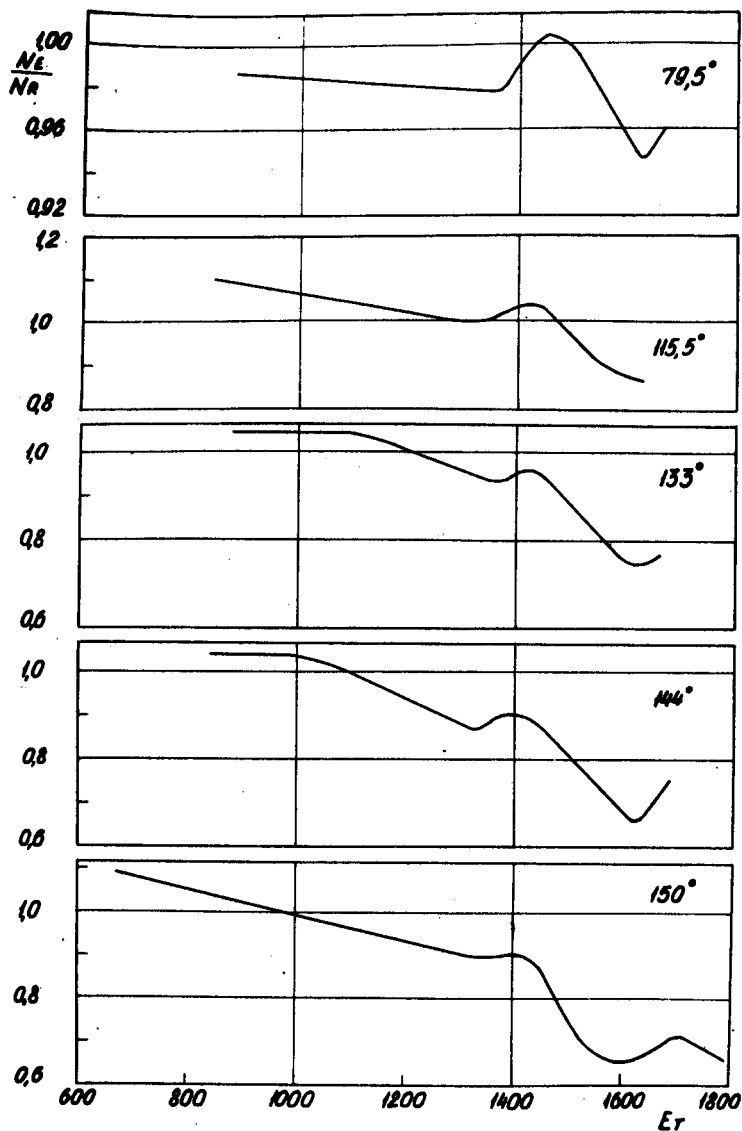


Рис. 9. Сравнение упругого рассеяния тритонов на кислороде при различных углах, полученного экспериментально, с резерфордским. На осях: E_T - энергия тритонов в килоэлектронвольтах,

$\frac{N_E}{N_R}$ - отношение экспериментальных сечений к резерфордским.