

Дейтрон Дээр Явагдах Фото Урвалуудын Огтлолын Туршлагын Дүнг Шалгах Асуудалд

Б.Отгоолой, Г.Дамдинсүрэн, Д.Баатархүү

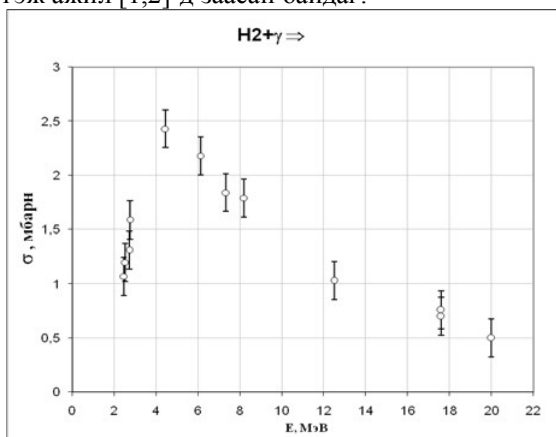
Монгол улсын их сургууль, Цөмийн судалгааны төв

Товч утга. Цэвэр ус H_2O болон хүнд ус D_2O -ыг тормозын гамма цацрагийн ижилхэн урсгалд шарсан. Фото протоноор явагдах $O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалаар үүссэн N^{13} ($T_{1/2}=9,97$ минут) цацраг идэвхт изотопын бета идэвхжилийн хугацаанаас хамаарлыг ус ба хүнд усны хувьд хэмжсэн. Эдгээр дээжний идэвхжилийн харьцаагаар дейтрон дээр явагдах фото урвалуудын огтлолд үнэлгээ өгсөн.

(Энэ ажлыг “Хэрэглээний цөмийн физикийн судалгаа” сэдвийн дагуу гүйцэтгэв)

I. СУДЛАГДСАН БАЙДАЛ:

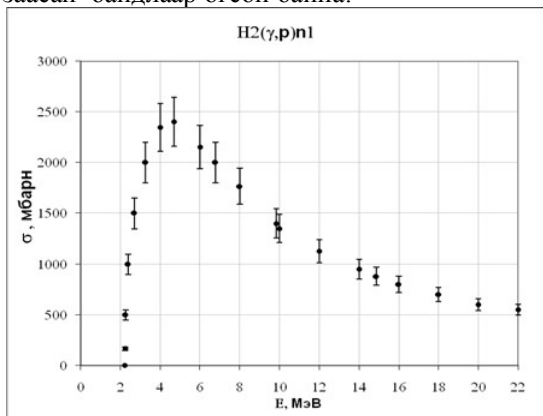
Дейтрон дээр явагддаг $H^2(\gamma,n)H^1$; $^2H(\gamma,n)p$; $H^2(\gamma,p)n^{*1}$ ($n^{*1} \Rightarrow T_{1/2}=10,6$ мин, β^-) фото урвалуудын бүтэн огтлолын энергийн хамаарал 1-р зурагт заасан хэлбэртэй байна гэж ажил [1,2]-д заасан байдаг.



Зураг.1. Дейтрон дээр явагдах фотоурвал бүтэн огтлол энергис хамаарал

Мөн ажил [3]-д дээрх хамаарлыг дейтроны фото хуваагдлын огтлолын энергис хамаарал гэж нэрлэсэн байдаг. Өөрөөр хэлбэл бүтэн огтлолын энергийн хамаарал гэдгийг батлан харуулсан байна.

Гэтэл ажил [4]-д $H^2(\gamma,p)n^{*1}$ урвалын огтлолын энергийн хамаарлыг 2-р зурагт заасан байдлаар өгсөн байна.



Зураг.2. Дейтрон дээр явагдах (γ,p) урвалын огтлол энергийн хамаарал,

Өөрөөр хэлбэл $H^2(\gamma,p)n^{*1}$ урвалын огтлол зураг,1-д заасан бүтэн огтлолоос $\sim 10^3$ дахин их байна. Энэ зөрчил нь ишлэл татагдсан [4] ажлын хэвлэлийн алдаа байв уу? гэдгийг тодруулах шаардлагатай болсон юм. Устөрөгч дээр фото урвал явагдаггүй. Иймд цэвэр ус H_2O болон хүнд ус H^2_2O (цаашид D_2O гэх)-ыг тормозын гамма цацрагаар шарахад үүсэх протоноор явагддаг $O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалын тусламжтайгаар дээрх зөрчлийг шалгах асуудлыг энэ ажилд хөндөв.

II. ТУРШИЛТ

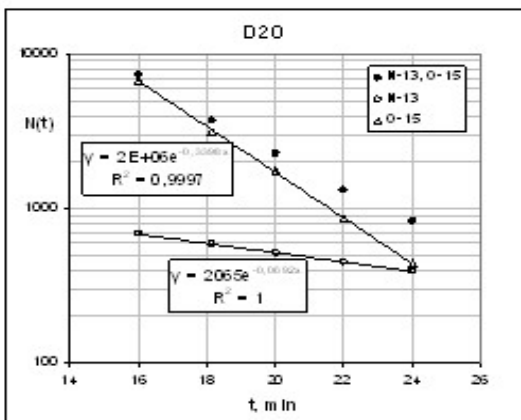
Ижилхэн эзэлхүүн бүхий хүнд ус D_2O (99.8%) болон нэрмэл H_2O усудыг микроотрон дээр тормозын гамма цацрагаар тус бүр 20 минут шарсан.

Хүснэгт,1. Хүчилтөрөгчийн изотопууд дээр явагддаг цөмийн зарим урвалууд

^{16}O	(γ,n)	(γ,p)	(n,γ)	(n,p)	(p,n)	(p,a)
99.8	$O^{16}(\gamma,n)O^{15}$ $T_{1/2}=2.04$ м	$O^{16}(\gamma,p)N^{15}$ тогтвортой	$O^{16}(n,\gamma)O^{17}$ тогтвортой	$O^{16}(n,p)N^{16}$ $T_{1/2}=7,2$ с	$O^{16}(p,n)F^{16}$	$O^{16}(p,a)N^{13}$ $T_{1/2}=9,97$ м $\sigma=1$
0.04	$O^{17}(\gamma,n)O^{16}$ тогтвортой	$O^{17}(\gamma,p)N^{16}$ $T_{1/2}=7,2$ с	$O^{17}(n,\gamma)O^{18}$ тогтвортой	$O^{17}(n,p)N^{17}$ $T_{1/2}=4,2$ с	$O^{17}(p,n)F^{17}$ $T_{1/2}=64,49$ с	$O^{17}(p,a)N^{14}$ тогтвортой
0.16	$O^{18}(\gamma,n)O^{17}$ тогтвортой	$O^{18}(\gamma,p)N^{17}$ $T_{1/2}=4,2$ с	$O^{18}(n,\gamma)O^{19}$ $T_{1/2}=26,91$ с	$O^{18}(n,p)N^{18}$ $T_{1/2}=624$ мс	$O^{18}(p,n)F^{18}$ $T_{1/2}=1,83$ ц $\sigma=10^3$	$O^{18}(p,a)N^{15}$ тогтвортой

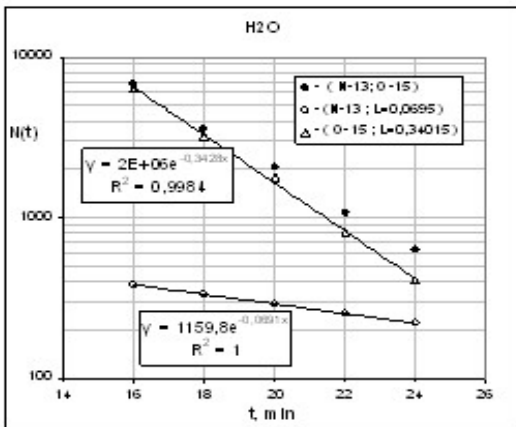
$O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалаар үүссэн цацраг идэвхит N^{13} изотоп нь 511 кэВ энергитэй аннигиляцын гамматай, харин 1.2 МэВ максимум энергитэй β^+ задралтай.

Хүснэгт,1-ээс харахад: N^{13} изотопын бета задралыг хэмжихэд O^{15} , F^{18} изотопуудаас өгөгдөх бета цацрагууд давхар хэмжигдэх магадлалтай. Гэвч F^{18} изотоп үүсэх огтлол N^{13} изотоп үүсэхээс 10^3 дахин бага [4]. Нөгөө талаас O^{18} изотопын тархалт 0.16% гэдгийг тооцвол



Зураг,3. Хүнд усны нийлбэр бета задралын муруй

F^{18} изотопын өгөх эффект N^{13} изотопынхоос даруй 10^5 дахин бага болох учир $O^{18}(p,n)F^{18}$ урвалын нөлөөг тооцохгүй байж болно. Ижил эзэлхүүнтэй D_2O ба H_2O дээжүүдийн нийлбэр бета идэвхжилийн хугацааны хамаарлуудыг шаралт дууссанаас хойш 16 минутын дараа эхлэн хэмжсэн дүнг 3, 4-р зургуудаар үзүүлэв.

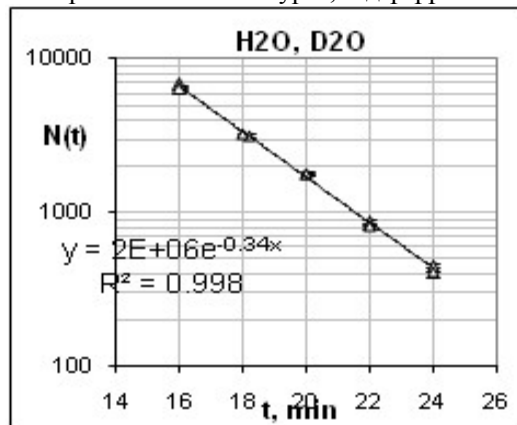


Зураг,4. Усны нийлбэр бета задралын муруй

Дээж тус бүрийн бета идэвхжилийг бета тоолуураар тав удаа 1.5 минутаар хэмжсэн. Зургууд дээр: N^{13} , O^{15} изотопуудын нийлбэр бета идэвхжилийн хугацааны хамаарлыг дугуй хар цэгээр тэмдэглэв. Энэхүү муруйнууд нь дээрх хоёр изотопд харгалзах задралын муруй болохыг дугуй цагаан (N^{13}), цагаан гурвалжин (O^{15}) цэгүүдээр тус тус тэмдэглэв. N^{13} изотопын задралын тогтмол $L = \ln 2 / T_{1/2} = 0.0695 \text{ мин}^{-1}$; O^{15} изотопын хувьд $L = 0.340 \text{ мин}^{-1}$ байдаг.

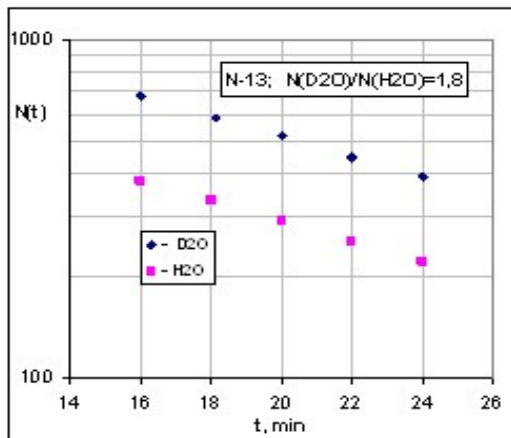
Хүнд ус (D_2O)-ны хэмжилтийг боловсруулахад N^{13} , O^{15} изотопуудын задралын тогтмолууд харгалзан 0.0692 мин^{-1} , 0.3398 мин^{-1} , харин ус (H_2O)-ны хувьд хийгдсэн хэмжилтийг боловсруулахад харгалзан 0.0691 мин^{-1} ; 0.3428 мин^{-1} гэж тодорхойлогдсоныг зургуудаас харж болно.

Өөрөөр хэлбэл шаралтаас хойш 16 минутын дараа дээж бүрт дээрх хоёр изотопын идэвхжил үлдсэн байна. Дээж тус бүрийг электроны урсгалын гүйдэл тогтмол 10 мкА байхад шарсан (энэхүү гүйдэл нь тормозын цацрагийн урсгалын нягттай шууд хамааралтай байдаг) учраас гамма цацрагийн урсгалын нягт Φ_γ тогтмол байсан гэж үзэж болно. Дээжнүүдийн шаралт, хэмжилтийн геометр болон хугацаа бүгд ижилхэн. Нөгөө талаас ижилхэн эзэлхүүн бүхий хүнд ус D_2O (99.8%) болон нэрмэл H_2O уснууд дахь O^{16} изотопын тоон харьцаа 1:1.01 байх учир анхдагч тормозын гамма цацрагаар явагдсан $O^{16}(\gamma,n)O^{15}$ урвалаас үүссэн O^{15} изотопын задралын муруй хоёр дээжийн хувьд ойролцоогоор давхцах ёстой. Энэхүү хамаарлыг шалгасныг зураг,5-д үзүүлэв.



Зураг,5. Ус, хүнд усны O^{15} изотопын задралын муруй

Зургаас харахад хоёр дээжийн O^{15} изотопоос өгөгдсөн эффектүүд байдаг давхцаж байгаа бөгөөд задралын тогтмол 0.340 мин^{-1} гэж тодорхойлогджээ. Түүнчлэн хоёр хэмжилтийн дүнгүүд нэг муруй дээр орших нийлэлтийн коэффициент $R^2 = 0.998$ байна. Эдгээр үзүүлэлтүүд нь туршилт маш нарийн хийгдсэний баталгаа юм.



Зураг.6. Ус, хүнд усан дахь N^{13} изотопын бета задралын муруй

$O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалыг өдөөгч протоны үүсгүүр нь дейтрон болон хүчилтөрөгч дээр тормозын гамма цацрагийн шингэлтээр фотопротон үүсгэх цөмийн урвалууд юм. Өмнө тэмдэглэсэн ёсоор ижилхэн эзэлхүүн бүхий ус, хүнд ус хоёроос $O^{16}(\gamma,p)N^{15}$ урвалаар үүсэх протоны тоо ойролцоогоор тэнцүү байна. Харин хүнд усны хувьд дейтроноос үүсэх протон нэмэгдэх тул $O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалын эффект усныхаас их байх ёстой. Ус болон хүнд усны хувьд N^{13} изотопоос хэмжигдсэн эффектүүдийг 6-р зурагт дахин нэгтгэж үзүүлэв. Зурагт хүнд уснаас хэмжигдсэн N^{13} изотопын эффект усныхаас ~ 1.8 дахин их болохыг харуулав. Өөрөөр хэлбэл 5 хэмжилтийн дундаж:

$$\frac{N(D2O)}{N(HO)} \approx \frac{N_o + N_D}{N_o} = 1 + \frac{N_D}{N_o} \approx 1.8$$

$$\frac{N_D}{N_o} = 0.77 \pm 0.01 \quad (1)$$

$N_D, N_o - N^{13}$ изотопийн идэвхжилд H^2 ба O^{16} изотопуудаас өгсөн эффектүүд.

III. N_D/N_o харьцааг үнэлсэн тооцоо

Микротрон МТ-22 дээр гарч байгаа $F(E)$ квант/(см²с.МэВ) спектр бүхий тормозын гамма цацрагийн (0÷22) МэВ энергийн мужид харгалзах Φ_γ урсгалын нягтыг бичвэл:

$$\Phi_\gamma = \int_0^{22 \text{ МэВ}} F(E) dE \text{ квант/(см}^2 \text{сек.)}$$

Тормозын цацрагийн “урагш” чиглэсэн нормчилогдсон Шиффагийн $f(E)$ спектр нь дараах хэлбэртэй тодорхойлогдоно [5]:

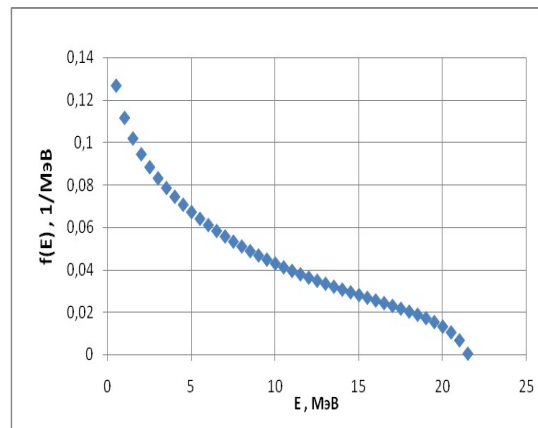
$$f(E) = \frac{F(E)}{\Phi_\gamma} \text{ МэВ}^{-1}$$

$$\text{Үүнд: } \int_0^{22 \text{ МэВ}} f(E) dE = 1$$

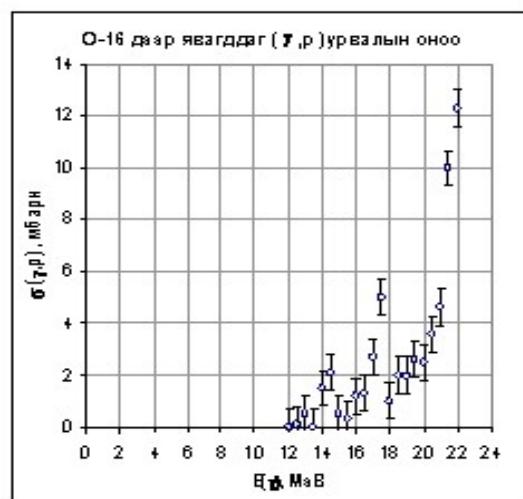
Практикт аливаа урвалын огтлолын утгууд дандаа энергийн дискрет утгууд дээр хэмжигдсэн, эсвэл тооцоологдсон байдаг. Энэ тохиолдолд нормчилогдсон спектрийг дараах байдлаар илэрхийлэх нь илүү тохиромжтой.

$$\sum_{i=1}^n f_i(E) \Delta E = 1$$

Энд: n – тормозын цацрагийн (0÷22) МэВ энергийн мужийг ΔE алхмаар хуваахад гарсан интервалын тоо.



Зураг.7. Тормозын гамма цацрагийн (0÷22) МэВ энергийн мужийг $\Delta E=0.5$ МэВ алхмаар хуваасан Шиффагийн нормчилогдсон спектр



Зураг.8. $O^{16}(\gamma,p)N^{15}$ урвалын огтлол [3]

Нейтроны үйлчлэлээр үүссэн протонууд (хүснэгт,1) нь анхдагч (γ,p) урвалынхтай харьцангуй хоёрдугаар үеийнх бөгөөд эдгээр протоноор явагдах (p,a) урвал 3-р үеийнх болох тул (n,p) урвалаар үүссэн протоны нөлөөг бидний хэрэглэж буй арга мэдрэхгүй.

Нөгөө талаас тормозын цацрагаар шарагдаж байгаа шингэнүүдийн молекулын нэгдэлд орж байгаа дейтрон болон хүчилтөрөгч бүр протоны “үүсгүүр” болно. Эдгээр “үүсгүүр”-ээс үүссэн протонууд 4п өнцгөөр зэргэлдээ орших H^2, O^{16} изотопуудтай шууд харилцан үйлчлэлд орно.

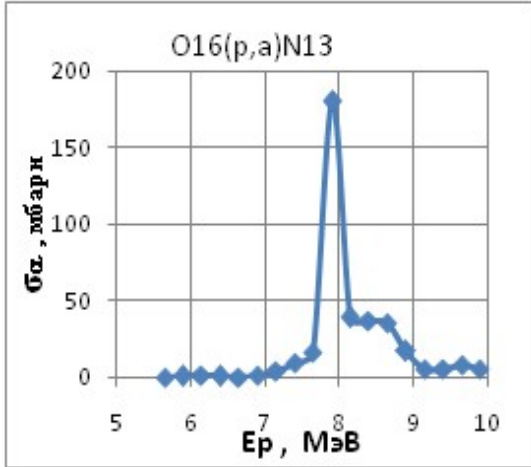
Иймд $O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалыг өдөөгч протоны үндсэн спектр нь H^2, O^{16} изотопууд дээр явагддаг (γ,p) урвалаар тодорхойлогдох бөгөөд $\sigma(E)f(E)$ үржвэртэй шууд хамааралтай.

Дейтроны фото хуваагдлын үед үүссэн бөөмс болон цөмүүдийн масс

ойролцоогоор тэнцүү учраас тусч буй гамма цацрагийн E энергиэс тухайн урвалын босго Q=2,23 МэВ энергийг хасахад үлдсэн энергийг ойролцоогоор тэнцүү хувааж авах бөгөөд тэдгээр нь $E_p=(E-Q)/2$ гэсэн кинетик энергитэй болно.

Харин $O^{16}(\gamma,p)N^{15}$ шууд урвалаар үүссэн протоны кинетик энерги $E_p=(E-Q)$ байх бөгөөд энэ тохиолдолд урвалын босго энерги Q=12 МэВ [4] болно.

$O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалын босго 5,54 МэВ[4]. Энэ урвалын σ_a огтлолын протоны энергиэс хамаарлыг 9-р зурагт үзүүлэв [6].



Зураг.9. $O^{16}(p,a)N^{13}$ урвалын огтлол ба энергийн хамаарал

Дээр тэмдэглэснээр дейтроноос үүссэн протоны хамгийн их энерги $E_p=(22-Q)/2=9.885$ МэВ, хүчилтөрөгчийн хувьд $E_p=(22-Q)=10$ МэВ байна. Өөрөөр хэлбэл энергийн мужийн зөрүү (9-р зургаас харахад) тооцоонд нөлөөлөхгүй.

Хүнд усан дахь дейтроны болон усны хүчилтөрөгчийн атомуудын тоог харгалзан A_D, A_O гэж тэмдэглэвэл N_D/N_O харьцаа дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$\frac{N_D}{N_O} = \frac{A_D \sum_{i=1} f_i(E) \sigma_i^D(E) \sigma_{ia}((E-Q)/2) \Delta E}{A_O \sum_{i=1} f_i(E) \sigma_i^O(E) \sigma_{ia}(E-Q) \Delta E} \quad (2)$$

Энд шаралт, хэмжилтийн геометр, хугацааны функцууд болон гамма цацрагийн интеграл урсгал бүгд ижилхэн учраас дээрх харьцаанд тусгагдаагүй.

1,2,7,8,9-р зургууд дахь хамаарлуудыг ашиглан дейтроноос протон үүсэх $\sigma_i^D(E)$ огтлолын утгыг янз бүрийн хувилбараар сонгон авч N_D/N_O харьцааг томъёо (2)-оор үнэлснийг 2-р хүснэгтэд туршлагын үр дүнтэй харьцуулан үзүүлэв.

Хүснэг. 2. $\sigma_i^D(E)$ огтлолыг гурван хувилбараар орлуулж N_D/N_O харьцааг үнэлсэн дүн

$\sigma_i^D(E)$	$\sigma_{\gamma,p} + \sigma_{\gamma,n} + \sigma_p$ ажил [1,2,3]	σ_p ажил [4]	$\sigma_{\gamma,p} + \sigma_p$	Энэ ажлаар хийгдсэн туршилтын дүн
N_D/N_O	1.4	1380	? (0.77 - 1.4)	0.77±0.01

Гамма цацрагийн (0÷22) МэВ энергийн мужид дейтрон дээр явагдах (γ,n) урвалын $\sigma_{\gamma,n}$ огтлолын хамаарал тодорхойгүй учраас (γ,np), (γ,p) урвалуудын нийлбэр $\sigma_{\gamma,np} + \sigma_{\gamma,p}$ огтлолоор дээрх харьцааг үнэлэх боломжгүй болсон билээ.

Гэвч хүснэгтээс харахад ажил [4] үнэн гэвэл турлагын дүн бүтэн гурван эрэмбийн алдаа гаргажээ гэсэн дүгнэлтэд хүрнэ. Энэ нь туршилтын явц маш өндөр нарийвчлалтай сайн хийгдсэний баталгаа болох 5-р зурагт хийгдсэн дүгнэлттэй шууд зөрчилдөж байна. Харин ажил [1,2,3]-аар хийгдсэн тооцоо туршлагын дүнтэй ойролцоо нэг эрэмбийн гарсан нь ажил [4]-г залруулахад хүргэж байна.

Дүгнэлт

Дейтрон дээр явагдах (γ,np), (γ,p) урвалуудын нийлбэр $\sigma_{\gamma,np} + \sigma_{\gamma,p}$ огтлолуудаарх N_D/N_O харьцааны үнэлгээ (0.77 - 1.4) мужид харгалзах нь тооцоо ба туршлагын дүнгүүдээс харагдаж байна. Иймд ажил [4]-г дахин шалгах шаардлагатай. Нөгөө талаас энэхүү туршлагын ажил нь микротроны тормозын гамма цацрагийн суваг дээр шингэн дээжинд фотопротонноор шинжилгээ хийх бүрэн боломжтойг харуулав.

К вопросу Проверки Сечений Фото Ядерных Реакций, Идущих На Дейтроне

Б.Отгоолой, Г.Дамдинсүрэн, Д.Баатархүү

Облучены образцы из воды H_2O и тяжелой воды D_2O в поле тормозного гамма-излучения. Измерено изменение активности изотопа N^{13} от времени, возникающего в результате ядерной реакции $O^{16}(p,a)N^{13}$, для этих образцов. По отношению бета-активности этих образцов проверены сечения фото ядерных реакций, идущих на дейтроне.

Ном зүй

1. Technical reports series №156. Vienna. 1974
2. С. Де Бенедетти, Ядерные взаимодействия, Атомиздат, Москва, 1968.
3. Ядерные реакции, Том 2, Атомиздат Москва, 1964, Под редакцией П.М.Эндта.

4. Technical reports series №273, Vienna, 1987.
5. Christion Segebade and Hans-Peter Weise, Photon Activation Analysis. Berlin a New York, 1988.
6. S.Takacs, F.Tarkanyi, A.Hermanne, R.Paviotti de Corcuera, Validation and upgrade of the recommended cross section data of charged particle reactions used for production PET radioisotopes (J,NIM/B,211,169,2003) Main Reference, Update of (R,IAEA-TECDOC-1211, 153, 2001)