

УДК 539.172

Т.В. Полторжицька¹, Г.Ф. Пітченко²

¹Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

²Інститут електронної фізики НАН України, 88000, Ужгород, вул. Університетська, 21

e-mail:nuclear@email.uz.ua

ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ІЗОМЕРНИХ ВІДНОШЕНЬ ВИХОДІВ В РЕАКЦІЇ $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ В ОБЛАСТІ 10 – 20 МеВ

Досліджено залежність ізомерних відношень виходів від максимальної енергії гамма-квантів у реакції $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ в інтервалі енергій 10 – 20 МеВ. Розраховані перерізи збудження метастабільного стану з $J^\pi = 11/2^-$ ядра ^{123}Te . Одержані експериментальні ізомерні відношення виходів порівнюються з теоретичними розрахунками, проведеними в рамках програмного пакету TALYS-1.2.

Ключові слова: фотоядерні реакції, ізомерні відношення, переріз, $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$.

Вступ

Ядерні реакції з випромінюванням різних частинок у вихідному каналі є важливим джерелом інформації про механізм реакції, структуру високозбуджених станів материнського ядра, властивості і характеристики новоствореного ядра.

Дослідження властивостей збуджених станів у ядерних реакціях включає характеристики і імовірність збудження рівнів, їх енергію, спіновий розподіл, дозволяють одержати важливу інформацію про механізм реакції. Однак дані в цій області не повні. Деякі з зазначених властивостей можуть бути отримані із відношення виходів продуктів реакцій у різних спінових станах. Одним із таких напрямків досліджень є вимірювання ізомерних відношень, які визначаються як відношення перерізів (виходів) заселення ізомерних і основних станів дочірніх ядер. Це відношення залежить від спіну ядер мішені і моменту, що вноситься в ядро

гамма-квантом, а від механізму каналу реакції, властивостей кінцевих ядер при високих енергіях збудження, а також в області низькорозташованих дискретних рівнів, через які формується ізомерний і основний стан [1, 2].

Проведення таких досліджень на фотонних пучках має ряд суттєвих переваг. Одна з них та, що гамма-кванти привносять в ядро відносно малі збудження. В інтервалі енергій гігантського дипольного резонансу (10 – 25 МеВ) гамма-кванти вносять в ядро кутовий момент $l=1\hbar$, а дисперсія моментів після вильоту частинок є в інтервалі $(1\div 2)\hbar$.

Метою даної роботи є дослідження залежності ізомерних відношень виходів від енергії гамма-квантів у реакції $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ в області гігантського дипольного резонансу (ГР). До теперішнього часу процеси збудження ізомерних станів у реакціях (γ, n) для ^{124}Te залишаються практично не вивченими. Фактично виконана лише одна робота з дослідження для ізомерного відношення в

одній точці при $E_{\gamma\max} = 25$ MeV [1]. Систематичні дослідження ізомерних відношень виходів реакції $(\gamma, n)^m$ дозволяють одержати не лише інтегральні характеристики перерізів, а і розрахувати диференціальні перерізи збудження ізомерних станів, оцінити їх параметри: енергію максимуму E_{\max} , ширину Γ , ефективні пороги і т.д., що дозволяє провести більш детальне порівняння з теоретичними розрахунками, більш однозначну інтерпретацію результатів.

У досліджуваній реакції $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123m,g}\text{Te}$ в ізотопа ^{123}Te ізомерний стан характеризується спін-парністю $J^\pi = 11/2^-$ і формується ядерною підбололкою $1h_{11/2}$, основний стан підбололкою $3s_{1/2}$.

Експеримент

Мішені для експерименту були виготовлені у виді дисків склоподібного окису телуру TeO_2 діаметром 25 мм, товщиною 2 мм і чистотою 99,99 % природного ізотопного складу. Опромінювання досліджуваних взірців виконувались на гальмівному гамма-пучку мікротрона М-30 ІЕФ НАН України [3] в області енергій 10 – 18 MeV з кроком $\Delta E = 0.5$ MeV. При енергіях 19, 20 і 22 MeV опромінення проводилося на бетатроні Б-25/30 УжНУ. Зміна енергій прискорених електронів на мікротроні відбувалося двома методами: в широких межах - заміною хвильоводних вставок, тобто зміною числа орбіт і в межах однієї орбіти – зміною магнітного поля. Напруженість магнітного поля контролювалася методом ядерного магнітного резонансу. Середній струм прискорених електронів підтримувався на рівні 5 мкА. Як гальмівна мішень використовувалася пластина танталу товщиною 0.5 мм. Для дослідження використовувалася активційна методика. Час опромінення на

мікротроні склав 2 години при енергіях біля порогу реакції $(\gamma, n)^m$ і 20 хвилин в діапазоні 15 – 18 MeV. На бетатроні час опромінення – 2 години, час охолодження – 5 - 7 діб, а час вимірювання 1 – 2 доби. Гамма-спектри наведеної активності опромінених мішеней вимірювались гамма-спектрометром з високою роздільною здатністю на базі HPGe-детектора об'ємом 175 cm^3 і 8192 канальним аналізатором CANBERRA, зв'язаного з комп'ютером для накопичення і обробки даних. Роздільна здатність детектора складала 1.9 keV для лінії 1332 keV кобальту-60. Фрагмент схеми розпаду збуджених станів ядра ^{123}Te наведено на рис. 1.

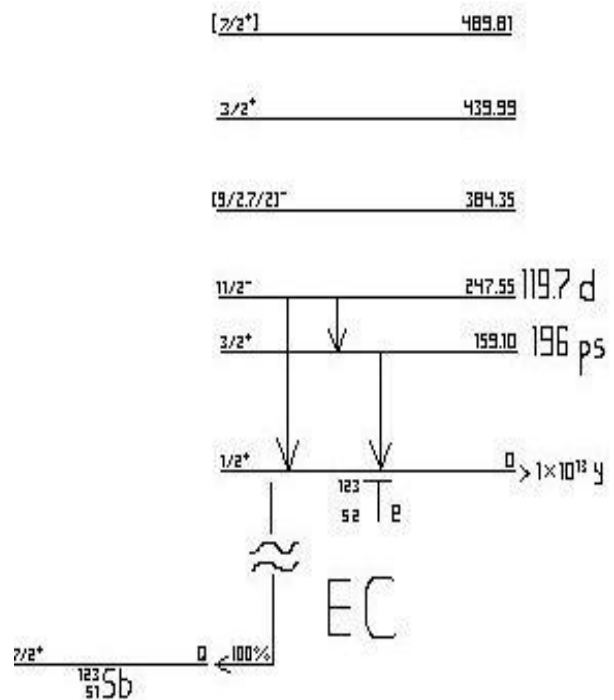


Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду ядра ^{123}Te .

Спектроскопічні характеристики досліджуваних ядер взяті з робіт [4,5]. Так, спін-парність основного і ізомерного станів J^π становить відповідно $1/2^+$, $11/2^-$, період напіврозпаду ізомерного стану – $T_{1/2} = 119.2$ дня, енергія ізомерного рівня $E_{\text{iso}} = 159$ keV, енергія аналітичної гамма-лінії $E_\gamma = 247$ keV, інтенсивність гамма-переходу $\alpha = 84$ %, поріг (γ, n) реакції для

материнського ядра ^{124}Te $V_n=9.4$ МеВ. Експериментальний апаратурний спектр взірця TeO_2 , опроміненого при енергії $E_{\gamma\text{max}} = 15$ МеВ, наведено на рис. 2, тут n – номер каналу аналізатора, N – кількість імпульсів у каналі.

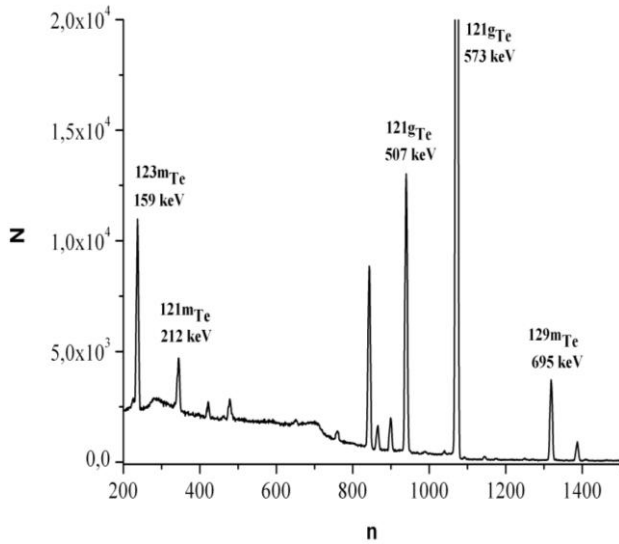


Рис. 2. Ділянка експериментального гамма-спектра від опромінення мішені телуру.

Результати та їх аналіз

При роботі на гальмівних гамма-пучках безпосередньо в експерименті вимірюються виходи $Y(E_m)$ фотоядерних реакцій, які зв'язані з перерізами $\sigma(E)$ інтегральним рівнянням:

$$Y(E_m) = k \int_{E_g}^{E_m} \sigma(E) \Phi(E, E_m) dE, \quad (1)$$

де $\Phi(E, E_m)$ – спектр гальмівних гамма-квантів, E_n – енергія порогу реакції, E_m – максимальна енергія гамма-спектра, k – нормуючий коефіцієнт.

Ізомерні відношення виходів d визначаються як відношення виходу заселення ізомерного стану Y_m до виходу основного стану Y_g $d=Y_m/Y_g$, або відношення виходу Y_m до повного виходу (γ, n) реакції Y_n :

$$\eta = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{Y_m}{Y_m + Y_g} = \frac{1}{1 + \frac{1}{d}}$$

В загальному випадку ізомерне відношення виходів визначається наступним чином [6]:

$$d = \frac{Y_m}{Y_g} = \left[\frac{\lambda_g}{\lambda_m} \frac{f_m(t)}{f_g(t)} \left(C \frac{N_g \phi_m}{N_m \phi_g} - p \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} \right) + p \frac{\lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m} \right]^{-1} \quad (2)$$

тут $\phi_{m,g} = \xi_{m,g} \cdot k_{m,g} \alpha_{m,g}$, де $\xi_{m,g}$ – фотоефективність реєстрації гамма-ліній, що відповідають за розпад ізомерного і основного станів, $k_{m,g}$ – поправка на самопоглинання відповідних гамма-ліній, $\alpha_{m,g}$ – інтенсивність аналітичних ліній, N_m , N_g – число імпульсів у фотопіках

відповідальних за розпад ізомерного і основного станів, C – коефіцієнт, що враховує можливі прорахунки і накладання імпульсів, p – коефіцієнт розгалуження, $f_{m,g}$ – часова функція, що має вигляд:

$$f_{m,g} = \left[1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_{irr}) \exp(-\lambda_{m,g} t_{cool}) \right] \left[1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_{meas}) \right]$$

Тут $\lambda_{m,g}$ – стала розпаду, t_{irr} , t_{cool} , t_{meas} – часи опромінення, охолодження та вимірювання відповідно. Аналіз даних з повних перерізів (γ, n) реакцій для ізоотопів телуру

показує, що їх параметри від ізоотопу до ізоотопу змінюються слабо, в межах кількох процентів [7]. Тому, оскільки основний стан ^{123}Te стабільний і вихід його

заселення не вимірювався, то для визначення брався вихід $Y_n=Y_m+Y_g$, визначений для ^{122}Te , який вимірювався одночасно.

Хоча переріз реакції (γ,γ^m) на два порядки менший перерізу реакції $(\gamma,n)^m$, а в природній суміші ізотопів телуру вміст ізотопу ^{123}Te становить 0.87%, вносила поправка на вклад реакції $^{123}\text{Te}(\gamma,\gamma^m)^{123m}\text{Te}$ у вихід Y_m реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$.

Одержані таким чином експериментальні відношення виходів для реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$ наведені точками на рис. 3. Видно, що ізомерне відношення $\eta(E_{\gamma\text{max}})$ зростає і в області 18 MeV досягає значення 0.19 ± 0.01 . В області 20 – 22 MeV ізомерне відношення не виходить на плато, а продовжує зростати, що може бути пов'язано з вкладом реакції $^{125}\text{Te}(\gamma,2n)^{123m}\text{Te}$, ефективний поріг якої знаходиться в області ~ 17 MeV.

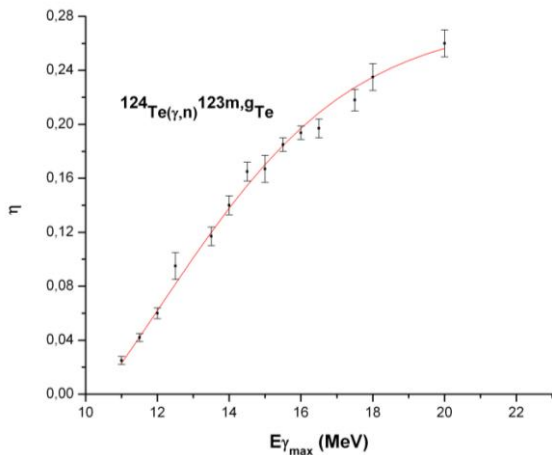


Рис. 3. Експериментальне ізомерне відношення для реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$.

Суцільною кривою на рис. 3 наведені результати апроксимації експериментальних ізомерних відношень $d=f(E_m)$ для реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$ кривою Больцмана:

$$d = \frac{A + (B - A)}{1 + \exp\left(\frac{E - E_0}{\Delta E}\right)}, \quad (3)$$

де A , B , E_0 и ΔE – параметри. У області 11 – 18 MeV апроксимація даних здійснювалася методом найменших квадратів. В

результаті одержані наступні значення параметрів:

$$A=0.215\pm 0.021, \quad B=-0.395\pm 0.007, \\ E_0=8.581\pm 0.065, \quad \Delta E=3.140\pm 0.350.$$

Наявність експериментальної залежності ізомерних відношень виходів від максимальної енергії гамма-квантів $\eta(E_m)$ від порогу реакції $(\gamma,n)^m$ і вище ГР дозволяє, використовуючи повні перерізи (γ,n) реакції [7], розрахувати перерізи заселення ізомерних станів σ_m . Розрахунок проводився методом оберненої матриці [8]. Одержаний переріз збудження метастабільних станів у реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$ наведено на рис. 4. Переріз має одnogорбу форму з максимумом при енергії 15.5 MeV. Суцільною кривою на рис. 4 наведено результат підгонки перерізу σ_m кривою Лоренца:

$$\sigma(E) = \sigma_0 \cdot \frac{\Gamma^2 E^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + \Gamma_0^2 E^2}, \quad (4)$$

тут σ_0 , E_0 , Γ_0 – параметри. В результаті апроксимації одержані наступні значення: $\sigma_0=68.58\pm 2.64$ (мбн), $E_0=15.55\pm 0.06$ (MeV), $\Gamma_0=4.23\pm 0.19$ (MeV).

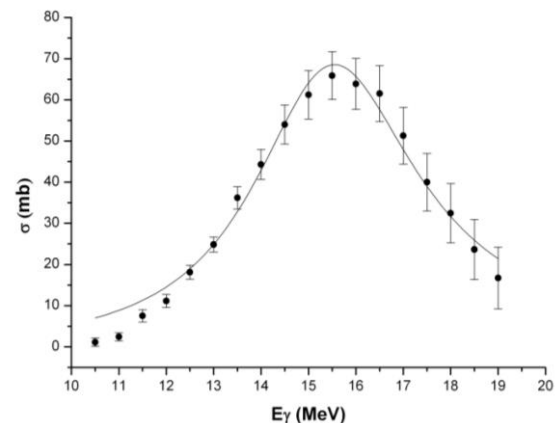


Рис. 4. Переріз збудження ізомерного стану в реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$.

З метою порівняння результатів з теоретичними оцінками нами проведено розрахунки ізомерних відношень виходів у реакції $^{124}\text{Te}(\gamma,n)^{123m}\text{Te}$ за допомогою програмного пакета TALYS-1.2 [9]. Ця програма являє собою зібраний в одному

кодів пакет більшості сучасних моделей, що описують протікання ядерних реакцій.

Під час розрахунку використовується наступна схема реакції: ядро-мішень з параметрами (Z_i, N_i) і спіно-парністю (J_i, π_i) взаємодіє з гамма-квантом, що має енергію E_γ , при цьому формується ядро з енергією E_c ($E_c = E_\gamma$) та спектром можливих значень спіну та парності (J_c, π_c) . Розраховується повний переріз фотопоглинання σ_{tot} . Розпад збудженого ядра відбувається за рахунок двох процесів: внаслідок напівпрямих процесів (частка яких складає 0.73% при $E_\gamma = 12$ MeV, 4.42% при $E_\gamma = 9.68$ MeV і 7.4% при $E_\gamma = 18$ MeV) та у відповідності з статистичним механізмом Хаузера-Фешбаха [10].

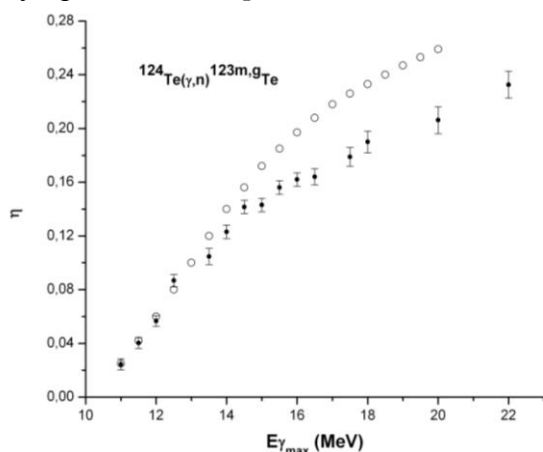


Рис. 5. Порівняння результатів розрахункових ізомерних відношень з експериментом.

Після емісії нейтронів розраховується перехід на конкретні рівні (зони) дочірнього ядра, при цьому використовується коефіцієнт проникності T_i , розрахований за оптичною моделлю [11].

До енергії збудження дочірнього ядра $E = 3$ MeV бралися конкретні дискретні рівні з бази даних RIPL – 2.0 [12]. При вищих енергіях спектр збуджених станів дочірнього ядра розглядався як неперервний, з густиною рівнів $\rho(E, J, \pi)$ і розбивався на 50 енергетичних підзон. Якщо ядро розпадається в підзону неперервного спектра, то використовувався ефективний коефіцієнт проникності T_i^{ef} . Для опису густини рівнів ρ тут використана модель Фермі-газу із зміщенням [13].

На рис. 5 наведені результати розрахунку, світлі точки – розрахункові ізомерні відношення виходів для реакції $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123m.g}\text{Te}$, темні – їх експериментальні ізомерні відношення. Порівняння двох кривих показує, що теорія добре описує характер енергетичної залежності $\eta = f(E_{\gamma, \text{max}})$ у всьому діапазоні досліджуваних енергій. Те, що розрахунок дає на $\sim 10\%$ завищені значення η , можна вважати задовільним результатом. Таке узгодження скоріш за все вказує на домінування статистичного механізму реакції (γ, n) і адекватності використання в розрахунках методу Хаузера-Фешбаха.

Висновки

Досліджено залежність ізомерних відношень виходів у реакції $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123m.g}\text{Te}$ в інтервалі енергій 10 – 20 MeV. Розраховані перерізи збудження метастабільного стану ядра ^{123}Te . Одержані експериментальні ізомерні відношення виходів порівнюються з теоретичними розрахунками, проведеними в рамках програмного пакету TALYS-1.2.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белов А.Г., Гангрский Р.П., Тончев А.П. и др. – ЯФ. – 1996. – т.59. – с. 585.
2. Мазур В. М.// ФЭЧАЯ. – 2000. – т. 31. – № 2. – с. 385 – 430.
3. Капица С. П., Мелехин. Микротрон, М.; Наука. – 1969.
4. Browne E., Firestone R.B., Table of Radioactive Isotopes, Wiley, New York. – 1986.

5. Ohya S. Nucl. Data Sheets . – 102, 547. – 2004.
6. Vanska R., and Rieppo R. Nucl. Instr. Meth. – v. 179. – p. 525. – 1981.
7. Varlamov A. V., Varlamov V. V., Rudenko P. S., et al. Atlas of Giant Dipole Resonance. IAEA, INDC (NDS) – 394. – Vienna, . – 1999.
8. Богданкевич О.В., Николаев Ф.А. Работа с пучком тормозного излучения.– М. Атомиздат. – 1964.
9. Koning A. J., Hilaire S., Duijvesyijn M. C., TALYS – 1.0. Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology –ND 2007. – May. 22 – 27, 2007. – Nice, France.
10. Hauser W., Feshbach H. Phys. Rev. – v. 87. – p. 336. – 1952.
11. Эммерих У.С. В сб. Физика быстрых нейтронов. – М. Атомиздат. – т.2. – с. 55. – 1966.
12. Capote R. RIPL - Reference Input Parameter Library for calculation of nuclear reactions and nuclear data evaluation./ R. Capote, M. Herman, P. Oblozinsky et al. // Nuclear Data Sheets. –2009. –Vol. 110. –P. 3107-3217.
13. Малышев А.В. Плотность уровней и структура атомных ядер. – М. Атомиздат. – 1969.

Стаття надійшла до Редакції 30.05.2011

T.V. Poltorzhyska¹, G.F. Pitchenko²

¹Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshina, 54

²Institute of Electron Physics of NAS of Ukraine, 88000, Uzhhorod, Universytetska Str, 21

ENERGY DEPENDENCE OF ISOMERIC YIELDS RATIOS FOR THE $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ REACTION IN THE 10 – 20 MeV REGION

Investigation of isomeric yields ratios energy dependence in the $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ reaction have been carried out for the 10-20 MeV energy region. Cross - section of ^{123}Te nucleus metastable state excitation has been obtained. Experimental results are compared with theoretical calculations performed with TALYS-1.2 code.

Key words: photonuclear reactions, isomeric ratios, cross-section, $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$.

Т.В. Полторжицкая¹, Г.Ф. Питченко²

¹Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

²Институт электронной физики НАН Украины, 88000, Ужгород, вул. Университетская, 21

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ВЫХОДОВ В РЕАКЦИИ $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ В ОБЛАСТИ 10 – 20 МэВ

Исследованы зависимости изомерных отношений выходов от максимальной энергии гамма-квантов в реакции $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$ в интервале энергий 10 - 20 МэВ. Рассчитаны сечения возбуждения метастабильного состояния с $J^\pi = 11/2^-$ ядра ^{123}Te . Полученные экспериментальные изомерные отношения выходов сравниваются с теоретическими расчетами, проведенными с помощью программного пакета TALYS-1.2.

Ключевые слова: фотоядерные реакции, изомерное отношение, сечение, $^{124}\text{Te}(\gamma, n)^{123\text{m,g}}\text{Te}$.