

**ВИКОРИСТАННЯ ЕМПІРИЧНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ  $dE/dx \sim E^n/a$  ДЛЯ КАЛІБРОВКИ  $\Delta E - E$ -СПЕКТРОМЕТРІВ**

**О. К. Горпинич, О. М. Поворозник, О. О. Ячменьов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

На основі відомої емпіричної залежності  $dE/dx \sim E^n/a$  питомих енергетичних втрат заряджених частинок у речовині від енергії розроблено методику енергетичної калібровки  $\Delta E - E$ -спектрометрів.

Основною передумовою успішного проведення будь-якого експериментального дослідження ядерних процесів є достовірна ідентифікація продуктів реакції та визначення їх енергії.

Однією з найбільш уживаних експериментальних методик, що дає змогу достовірно визначати масу, заряд та енергію заряджених частинок, є так звана  $\Delta E - E$ -методика, в якій використовуються дводетекторні  $\Delta E - E$ -спектрометри, де перший тонкий  $\Delta E$ -детектор служить для вимірювання питомих втрат енергії  $\Delta E$ , а другий  $E$ -детектор - повної енергії частинки  $E$ . Питомі енергетичні втрати описуються спрощеним виразом Бете - Блоха [1]

$$-dE/dx = (aZ^2c^2/v^2) \ln[bv^2/(c^2 - v^2)], \quad (1)$$

де  $v$  - швидкість частинки;  $c$  - швидкість світла;  $a$  і  $b$  константи, що залежать тільки від матеріалу детектора. Логарифмічний член майже не залежить від енергії і його впливом можна знехтувати, а оскільки в експериментах переважно реєструються нерелятивістські частинки, для яких  $v^2 = 2E/M$ , то формулу (1) можна спростити як

$$dE/dx \propto MZ^2/E. \quad (2)$$

Визначення величини енергії  $E$  частинки шляхом сумування сигналів з двох детекторів та одночасне вимірювання відповідних величин питомих іонізаційних втрат  $dE/dx$  у тонкому детекторі дає значення  $MZ^2$ , тобто забезпечує ідентифікацію частинок.

Протягом останніх десятиріч в експериментальному дослідженні ядерних реакцій використовувались різноманітні версії втілення  $\Delta E - E$ -методу. Показано [2], що залежність  $dE/dx$  для всіх частинок з  $Z \leq 10$  можна апроксимувати степеневою залежністю

$$-dE/dx \propto E^n/a, \quad (3)$$

де величина  $n$  визначається типом частинок, а параметр  $a$  пропорційний  $1/MZ^2$ . Пробіг  $R$  зарядженої частинки з енергією  $E$  в поглиначі можна обчислити, сумуючи приріст елементів пробігу, що відповідає приросту енергетичних втрат. Таким чином,

$$R = \int_{E_1}^E (dx/dE)dE + R_1, \quad (4)$$

де  $E_1$  - величина енергії, менше якої просте співвідношення (3) перестає бути коректним;  $R_1$  - відповідний пробіг для частинок з енергією  $E_1$ . Як показали розрахунки за допомогою програми TRIM [3], величини енергії  $E_1$  для детекторів NaI(Tl) та Si суттєво не відрізняються.

Показано [4], що в області енергій 5 - 50 MeV залежність (3) описує питоми іонізаційні втрати для частинок з  $Z < 2$  з похибкою, що не перевищує декілька відсотків. Для більш важких іонів необхідно вводити додаткові енергетично залежні параметри [5], що

обмежує застосування цього методу ідентифікації. Для високоенергетичних частинок  $R_1 \ll R$ , а  $E_1 \ll E$ , отже, у цьому випадку

$$R \propto aE^{1-n}. \quad (5)$$

Як правило, використовують показник степеня  $b = 1-n$ , який залежить від типу іона. Якщо позначити товщину тонкого детектора, в якому частинка втрачає енергію  $\Delta E$ , як  $\Delta x$ , то для частинки з повною енергією  $E + \Delta E$  на основі формули (5) отримуємо

$$\Delta x / a \propto [(E + \Delta E)^b - E^b], \quad (6)$$

де  $a \sim 1/MZ^2$ ,  $b = 1-n$ ,  $\Delta x$  - товщина  $\Delta E$  - детектора.

У роботі викладено результати використання залежності (6) для енергетичної калібровки обох детекторів  $\Delta E - E$ -спектрометра. На циклотроні У-240 було проведено кореляційний експеримент, в якому  $\alpha$ -частинки з енергією 67,2 МеВ бомбардували титан-третійову мішень товщиною 2,7 мг/см<sup>2</sup>. Продукти реакції реєструвалися телескопами детекторів, які склалися з кремнієвих поверхнево-бар'єрних  $\Delta E$ -детекторів товщиною 300 мкм та  $E$ -детекторів із кристалів NaI(Tl) розмірами  $\varnothing 20 \times 20$  мм.

Обробка спектрометричної інформації проводилася поетапно. На першому етапі здійснювалася побудова двовимірних  $\Delta E - E$ -спектрів та проведення їх енергетичної калібровки. На рис. 1 наведено зразок одного зі спектрів.

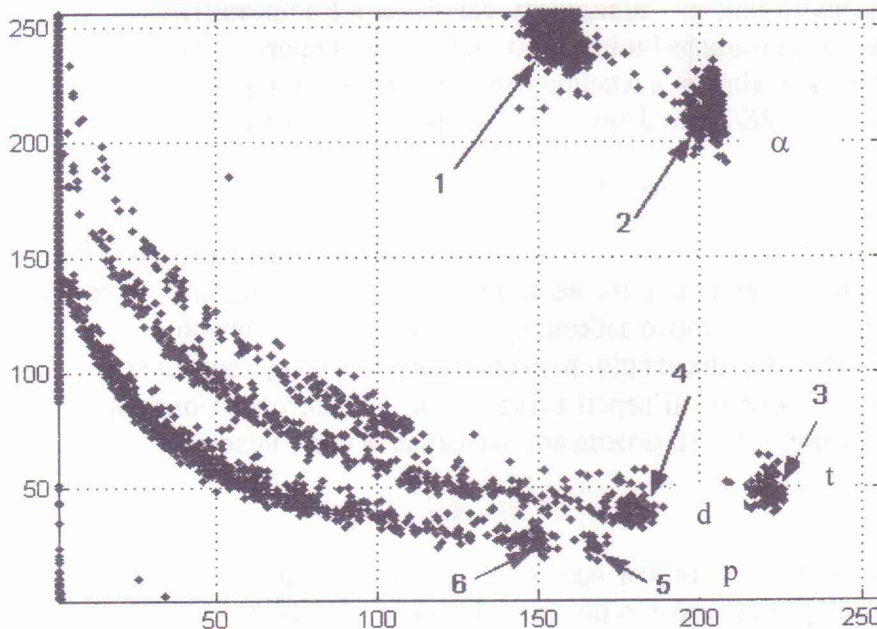


Рис. 1.  $\Delta E - E$ -спектр продуктів Т(Тi) +  $\alpha$ -реакцій при  $E_\alpha = 67,2$ . Кут реєстрації  $21^\circ$ .

Для енергетичної калібровки використовувалися енергії, отримані з кінематичних розрахунків для реперних точок, позначено на рис. 1 цифрами. Так, дві точки (1, 2) на  $\alpha$ -локусі відповідають пружному розсіянню  $\alpha$ -частинок на титані та тритії, одна точка (3) на тритонному локусі - тритонам віддачі з  $\alpha + t$ -розсіяння, одна точка (4) на дейтронному локусі та дві точки (5, 6) на протонному локусі належать реакціям  ${}^3\text{H}(\alpha, d){}^5\text{He}$ ,  ${}^3\text{H}(\alpha, p){}^6\text{He}_{o.c.}$  та  ${}^3\text{H}(\alpha, p){}^6\text{He}^*(1,8 \text{ MeV})$  відповідно.

Враховуючи лінійність спектрометричних трактів, вважаємо, що втрати енергії  $E$  та  $\Delta E$  пропорційні номерам каналів  $N_E$  та  $N_{\Delta E}$  спектрів  $E$  та  $\Delta E$ -детекторів, тоді

$$E = C_1 N_E + C_2, \quad (7)$$

$$\Delta E = C_3 N_{\Delta E} + C_4, \quad (8)$$

де  $C_1, C_2$  – калібровочні коефіцієнти  $E$ -детектора;  $N_E$  – значення номера каналу  $E$ -детектора;  $C_3, C_4$  – калібровочні коефіцієнти  $\Delta E$ -детектора;  $N_{\Delta E}$  – значення номера каналу  $\Delta E$ -детектора.

Калібрівка сцинтиляційного  $E$ -детектора ускладнюється тим, що різні типи частинок необхідно калібрувати окремо, а деякі локуси в  $\Delta E - E$ -спектрі не містять достатньої кількості реперних точок. Окрім того, не завжди можна користуватися залежністю (8), оскільки, наприклад, функцію відгуку сцинтиляторів не можна вважати лінійною в усьому енергетичному діапазоні [6, 7].

Для енергетичної калібрівки кожного окремого локусу частинок, ідентифікованих на двовимірній  $\Delta E - E$ -матриці, застосовуємо вираз (6). Підставляючи значення виразів (7) і (8) у рівняння (6), отримуємо

$$k = (C_1 N_E + C_2 + C_3 N_{\Delta E} + C_4)^b - (C_1 N_E + C_2)^b, \quad (9)$$

де константа, пропорційна  $MZ^2 \Delta x$ .

Показники степеня  $b$  для напівпровідникового та сцинтиляційного детекторів обрано однаковими. Для визначення можливості використання формули (6) для комбінованих детекторів питомі іонізаційні втрати для  $p, d, t$  при гальмуванні в  $\text{NaJ(Tl)}$  та  $\text{Si}$  обчислювались за допомогою програми TRIM[3], і розрахунки показали, що значення показників степеня для  $\text{NaJ(Tl)}$  та  $\text{Si}$  відрізняються не більш ніж на 10 %.

Після логарифмування формули (9) знаходимо співвідношення між  $N_{\Delta E}$  і  $N_E$ , яке містить калібровочні коефіцієнти  $C_1 - C_4$ , і використовуємо його для апроксимації експериментальних даних з  $\Delta E - E$ -спектра. Для цього необхідно (рис. 2):

а) визначити показник степеня у виразі (9) шляхом підгонки до питомих іонізаційних втрат для кожного типу частинок, використовуючи формулу (3);

б) прокалібрувати  $\Delta E$ -детектор;

в) отримати двовимірні  $\Delta E - E$ -спектри обраного телескопу детекторів;

г) вибрати і позначити локус, який відповідає певному сорту частинок;

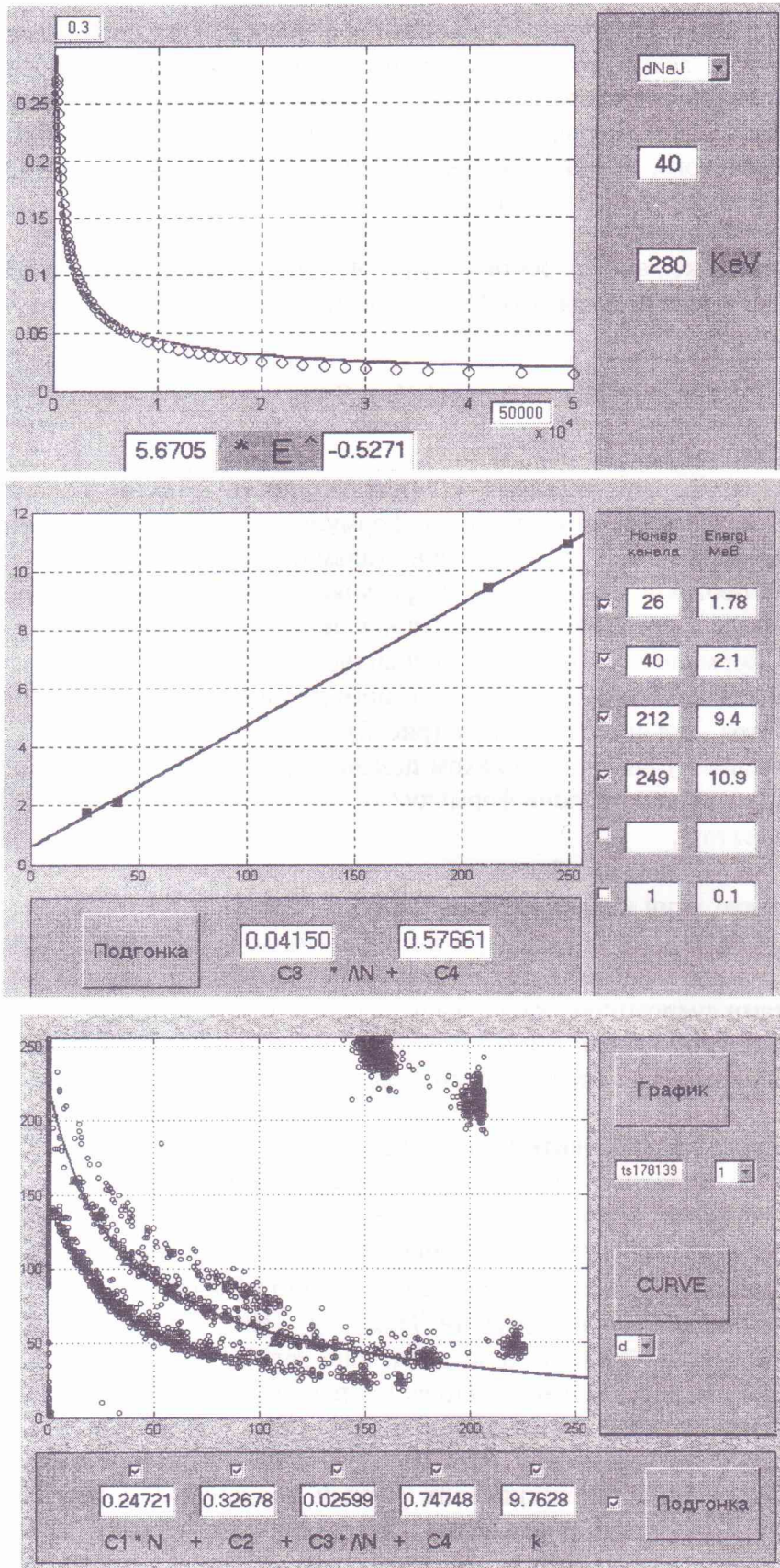
д) апроксимувати залежність  $N_{\Delta E} - N_E$ , отриману з формули (9), до експериментальних точок виділеного локусу методом найменших квадратів і визначити коефіцієнти апроксимації, які і є коефіцієнтами енергетичної калібрівки, та візуалізувати результати.

За допомогою пакета чисельних розрахунків MATLAB було написано ряд програм, які давали змогу з використанням зручного графічного інтерфейсу (див. рис. 2) виконати це завдання.

У загальному випадку програма знаходить всі коефіцієнти  $C_1 - C_4$  і константу  $k$  без додаткової інформації. Наявність достатньої кількості реперних точок (більше трьох) дає змогу отримати достовірні значення коефіцієнтів енергетичної калібрівки. Спочатку визначаються коефіцієнти  $C_3, C_4$  для  $\Delta E$ -детектора. Процедура калібрівки, яка до того ж дає змогу визначити реальну товщину  $\Delta E$ -детектора, докладно описано в роботі [8].

При дослідженні тричастинкових ядерних реакцій  ${}^3\text{H}(\alpha, dd)t$ ,  ${}^3\text{H}(\alpha, tt)n$  та  ${}^3\text{H}(\alpha, tt)p$ , спричинених  $\alpha + t$ -взаємодією при  $E_\alpha = 67,2$  MeV, було визначено калібровочні коефіцієнти за описаною вище процедурою. Після сортування вибраних пар локусів з урахуванням енергетичної калібрівки спектрометрів було отримано матриці  $dd$ -,  $t^3\text{He}$ - та  $tt$ - збігів.

На рис. 3 наведено деякі з цих отриманих матриць. Суцільними лініями нанесено кінематичні розрахунки для відповідних тричастинкових реакцій в припущенні точкових розмірів мішені та детекторів. Коректність проведення енергетичної калібрівки можна оцінити по узгодженні розташування кінематично розрахованого локусу з експериментальною матрицею збігів. Як видно з рис. 3, використання степеневі залежності питомих іонізаційних втрат енергії заряджених частинок від їх енергії дає змогу отримати достовірні коефіцієнти енергетичної калібрівки для комбінованих  $\Delta E - E$ -спектрометрів.



1. Графічний інтерфейс апроксимації  $dE/dx$  степеневим законом.

2. Графічний інтерфейс знаходження коефіцієнтів енергетичної калібровки  $\Delta E$ -детектора

3. Графічний інтерфейс, що дозволяє відобразити двовимірний  $\Delta E - E$ -спектр вибраного спектрометра, виділити та позначити локус, властивий певному роду частинок (дейтронів) та провести апроксимацію  $\Delta N - N$ -спектра, визначивши коефіцієнти калібровки.

Рис. 2. Набір створених за допомогою пакета чисельних розрахунків MATLAB графічних дисплеїв 1 – 3.

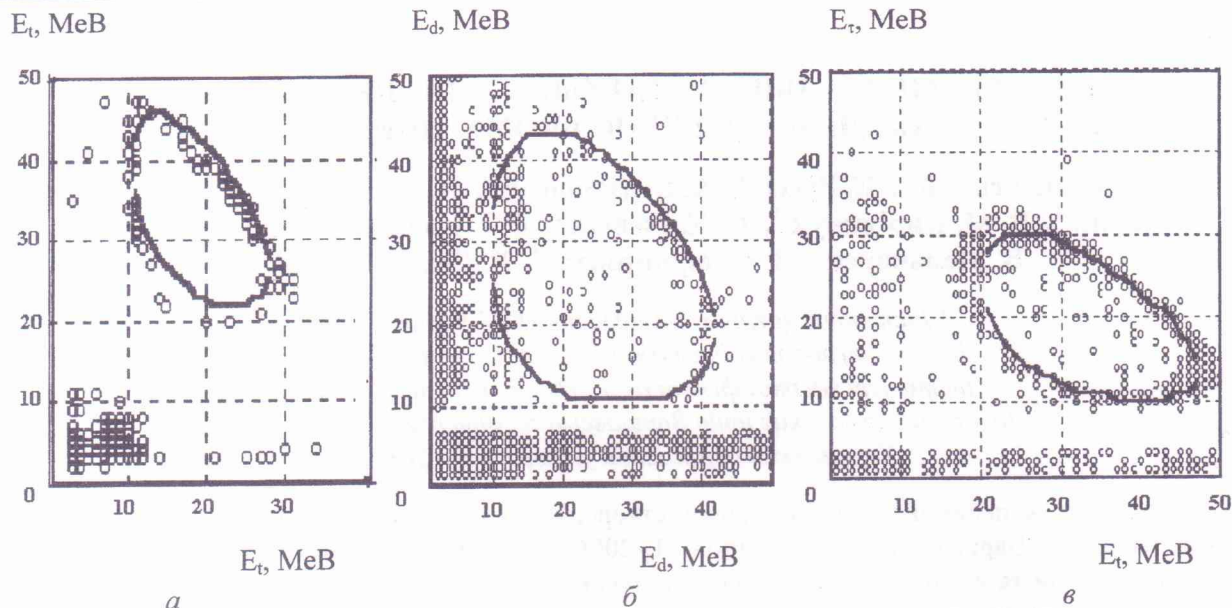


Рис. 3. Матриці tt-, dd- та t<sup>3</sup>He-збігів з α + t-взаємодії при E<sub>α</sub> = 67,2 MeV. Суцільні лінії - кінематичні розрахунки для тричастинкових реакцій: а - <sup>3</sup>H(α, tt)p; б - <sup>3</sup>H(α, dd)t; в - <sup>3</sup>H(α, tt)n.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Livingston M.S., Bete H.A. // Rev. Mod. Phys. – 1937. – Vol. 9. – P. 261.
2. Goulding F.S. and Harvey B.G. // Annual Review of Nuclear Science. – 1975. – Vol. 25. – P. 167.
3. Ziegler F. // Program of Transport of Ions in Matter (TRIM). - 1989.
4. Skyrme D.J. // Nucl. Ins & Meth. – 1967. – Vol. 57. – P. 61.
5. Butler G.W., Poskanzer A.M., Landis D.A. // Nucl. Ins & Meth. – 1970. – Vol. 89. – P. 189.
6. Биркс Дж. Сцинтиляционные счетчики. - М.: Иностран. лит., 1955.
7. Медведев М.Н. Сцинтиляционные детекторы. - М., 1977.
8. Горпинич О.К., Пірнак Віт.М., Поворозник О.М. та ін. // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. - 2001. - № 2(4). - С. 40.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ dE/dx ~ E<sup>n</sup>/a ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ΔE – E-СПЕКТРОМЕТРОВ

О. К. Горпинич, О. М. Поворозник, А. А. Ячменёв

На основании известного эмпирического выражения dE/dx ~ E<sup>n</sup>/a зависимости удельных энергетических потерь заряженных частиц в веществе от энергии разработана методика энергетической калибровки комбинированного ΔE – E-спектрометра.

UTILIZATION OF dE/dx ~ E<sup>n</sup>/a DEPENDENCE FOR ΔE – E-SPECTROMETER CALIBRATION

O. K. Gorpinich, O. M. Povoroznyk, O. O. Jachmenjov

The method of calibration of ΔE – E-spectrometers by the use of known empiric form dE/dx ~ E<sup>n</sup>/a which describes the specific energy loss of charge particles in the matter for energy calibration of ΔE – E-spectrometer was designed/

Надійшла до редакції 22.02.02,  
після доопрацювання – 11.09.02.