

ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЧАСТИНОК ВИВЕДЕНОГО ПУЧКА ТАНДЕМА ЕГП-10К ЗА ДОПОМОГОЮ γ -СПЕКТРОМЕТРІЇ

О. Ю. Горюнов, І. П. Дряпаченко, Е. М. Можжухін,
В. І. Ніколасв, М. В. Стрільчук

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Зроблено прив'язку абсолютного значення енергії протонів тандема ЕГП-10К до частоти ядерного магнітного резонансу (ЯМР) датчика поля поворотного магніту-аналізатора СП-88. Для визначення енергії пучка використовувалась реакція $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$, енергетичний поріг якої 3656,6 кеВ. Для ідентифікації відкриття цього каналу реакції реєструвалися γ -кванти з розрядки збудженого стану 587 кеВ кінцевого ядра ^{89}Zr . Було визначено частоту ЯМР $f = 16253,5^{+4,8}_{-8,3}$ кГц, що відповідає абсолютному значенню енергії прискорених протонів 4272 кеВ.

Вступ

Енергія частинок на виході прискорювача традиційно є визначальною його характеристикою. Супутнім показником якості пучка є розкид енергії прискорених частинок. За цими характеристиками електростатичні прискорювачі не дарма вважаються прецизійними, оскільки вони забезпечують пучки заряджених частинок з можливістю плавного регулювання енергії та її розкидом у частки відсотків. У свою чергу це з необхідністю викликає потребу прецизійного визначення цих параметрів пучка для отримання якісних експериментальних даних.

Перезарядний електростатичний прискорювач ІЯД НАН України (тандем ЕГП-10К) зараз забезпечує пучки протонів і дейтронів з енергією від 3 до 7 МеВ. У перших експериментах на виведеному пучку протонів було виміряно функцію збудження пружного розсіяння $^{12}\text{C}(p, p)^{12}\text{C}$ з метою абсолютизації енергії пучка [1]. Значення енергії бомбардуєчих протонів 4808 кеВ відповідає резонансу $5/2^+$ компаунд-ядра $^{13}\text{N}^*$ з енергією збудження $E^* = 6364$ кеВ. Прив'язка абсолютного значення енергії частинок пучка проводилась до частоти ядерного магнітного резонансу (ЯМР) датчика поля поворотного магніту-аналізатора СП-88, який переводить виведений з тандема пучок у горизонтальну площину. Тоді ж передбачалося проведення вимірювань на реакціях (p, γ) , (p, n) та на більш точно відомих резонансних рівнях. Саме це було виконано зараз через п'ять років, протягом яких система стабілізації напруги високовольтного електрода, а також тракт прискорення та транспортування пучків вдосконалювались, що не могло не позначитись на енергетичних параметрах прискорених іонів на фізичній мішені.

Із відомого співвідношення для оцінки стабільності енергії електростатичних прискорювачів $\Delta E/E = 2\Delta R/R = 2\Delta X/L$, де R - радіус повороту магніту-аналізатора, ΔR - його зміна, L - відстань від магніту-аналізатора до фізичної мішені та ΔX - відхилення (розміри) пучка на мішені, видно, що залежність енергетичного розкиду від ΔR передбачає незмінність положення місця входу прискореного пучка в камеру магніту-аналізатора. При відхиленні (зміні) кута входження система стабілізації утримує пучок на виході магніту в одному положенні, змінюючи при цьому його енергію. Іншими словами, просторові коливання пучка в прискорювачі перетворюються у коливання напруги на високовольтному електроді. Так, при $E_p = 4500$ кеВ, $L = 900$ см, $\Delta X = 1$ см енергія змінюється на 10 кеВ, а при $R = 75$ см і $\Delta R = 0,1$ см енергія змінюється на 12 кеВ.

У цій роботі презентовано результати перевірки та коректування абсолютизації енергії частинок виведеного пучка тандема ЕГП-10К.

Експериментальна частина

У даній роботі енергетичні характеристики пучка прискорених іонів визначались за наявністю продуктів ядерної взаємодії при подоланні порогу обраної заздалегідь відповідної ядерної реакції. Нами використовувалась методика вимірювання γ -спектрів розпаду продуктів (p, γ) - та (p, n) -реакцій на різних мішенях. На рис. 1 зображено схему іонно-оптичного тракту проходження пучка протонів до досліджуваної мішені.

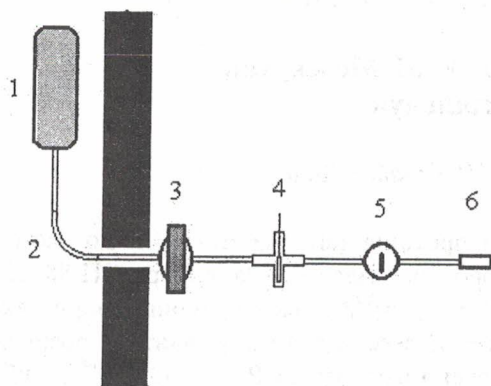


Рис. 1. Схема іонно-оптичного тракту проведення експерименту.

Пучок протонів з вертикально розташованого тандем-генератора 1 проходить по іонопроводу 2 через поворотний магніт-аналізатор 3 крізь діафрагму з отвором діаметром 6 мм на мішень, розташовану у невеличкій вакуумній камері КП 4, яку виготовлено з органічного скла. Це зроблено для уникнення (зменшення) фону комптонівських електронів з конструкційних матеріалів в районі мішені, які попадають на детектор. З іншого боку, це забезпечує електричну ізоляваність штока з

мішенними рамками і дає змогу виміряти (проінтегрувати) заряд, принесений частинками пучка, які зупинились у мішені. Пучок, що пройшов крізь мішень та реакційну камеру 5, гальмується в циліндрі Фарадея 6 на відстані 3 м. Геометрію та вузли експериментальної установки показано на рис. 2. За мішенною камерою можна побачити торцеву частину корпусу детектора у свинцевому захисті.

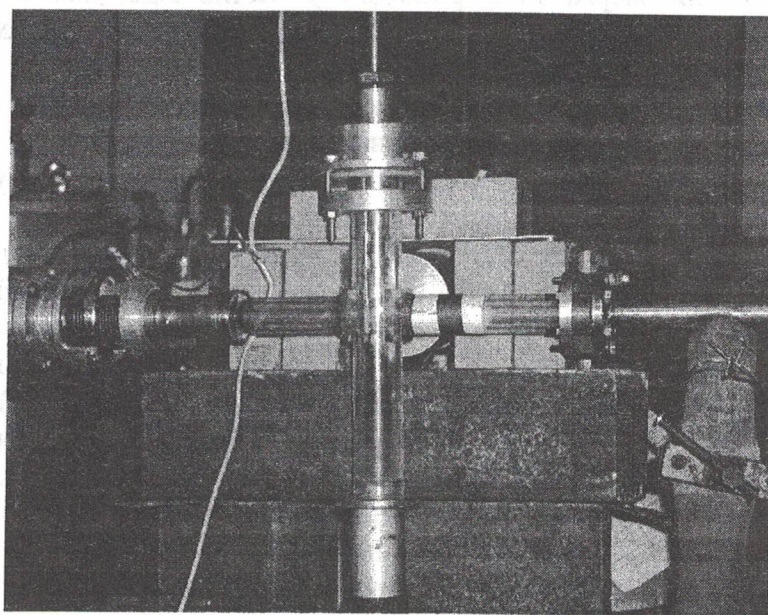


Рис. 2. Вигляд експериментальної установки КП.

Енергія пучка прискорених іонів визначається індукцією магнітного поля в зазорі магніту-аналізатора, яка вимірюється методом ЯМР відповідно до співвідношення між частотою ЯМР (f) та індукцією $B = 0,0234864 \cdot f$. У роботі [1] було отримано співвідношення

$$k = f / \sqrt{E} = 7,799,$$

яке пов'язує енергію частинок пучка з частотою ЯМР магніту-аналізатора.

За цією формулою обраховано й протабульовано значення частоти ЯМР і відповідні їм значення енергії протонів з кроком 10 кеВ. Установка та зміна енергії прискорених частинок виконується вибором та введенням відповідного значення частоти ЯМР у відповідні електронні й регулюючі пристрої стабілізатора струму магніту-аналізатора.

Стабільність частоти ВЧ-генератора вимірювача індукції методом ЯМР та струму в обмотках магніту-аналізатора має бути дуже високою. Зміна частоти генератора ЯМР на 2,5 кГц на рівні 17 МГц рівнозначна зміні струму в обмотках на 10 мА на рівні 35 А, що становить $3 \cdot 10^{-4}$. Реально схеми стабілізації забезпечують довгострокову стабільність $\leq 10^{-4}$.

Для визначення отриманої енергії пучка ми використали реакцію $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$. Енергетичний поріг цієї реакції 3656,6 кеВ. Для ідентифікації відкриття цього каналу реакції було вирішено реєструвати γ -кванти з розрядки збудженого стану 587 кеВ кінцевого ядра ^{89}Zr . Для реєстрації γ -квантів збудження ядер-продуктів використовувався детектор з надчистого германію об'ємом 180 см³. Детектор і спектрометрична лінійка виробництва фірми ORTEC складаються із стандартних NIM-блоків. Високовольтний блок живлення й попередній підсилювач розташовані безпосередньо в боксі з виведеним пучком, а спектрометричний підсилювач та буферна пам'ять - у вимірювальній кімнаті. Накопичена в буфері статистична інформація через інтерфейс скидається у персональний комп'ютер у зручному для подальшої обробки форматі. На початку циклу вимірювань проводились прецизійне настроювання та калібрування спектрометричного тракту (виставлення "0" енергетичної шкали, перехід до енергетичної ціни каналу спектра з 8192 каналів) з використанням γ -джерела ^{60}Co .

Результати вимірювань

На рис. 3 представлено спектр γ -квантів, накопичений при опроміненні мішені ^{89}Y пучком протонів з енергією 4 МеВ. Із струмом пучка на мішені 5 - 10 нА подібні спектри накопичувались за 30 - 50 хв. Для роботи використовувалась ділянка цього спектра від 550 до 600 кеВ (рис. 4). Саме тут майже поруч розташовані γ -лінія 561 кеВ ^{90}Zr , як кінцевого продукту реакції $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$, і очікувані γ -кванти з енергією 587 кеВ з реакції $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$. Як обумовлювалося вище, ці γ -кванти повинні з'явитися у спектрі тоді, коли енергія пучка досягне значення суми порогової енергії (p, n)-реакції на цьому ядрі й енергії збудження відповідного стану кінцевого ядра. Саме це відображено на рис. 4, де наведено спектри

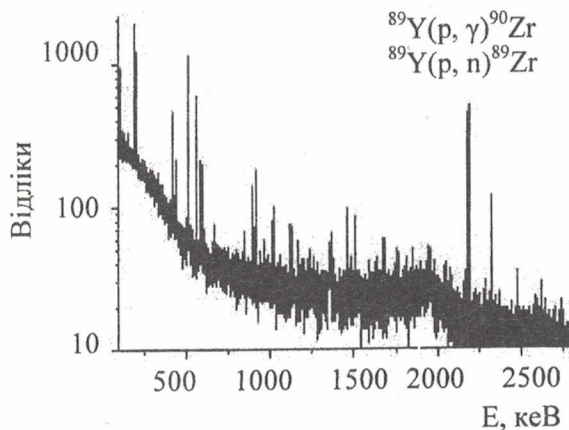


Рис. 3. Спектр γ -квантів з реакцій $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$ та $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$.

γ -квантів, накопичених у послідовних експозиціях з кроковою зміною енергії бомбардуєчого пучка у 10 кеВ і виміряних після паузи до 20 хв. На рис. 4 наведено також для кожної енергії відповідні значення частоти ЯМР. Очевидна однозначна ідентифікація відкриття каналу реакції $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$ у цьому невеличкому діапазоні зміни енергії пучка. На рис. 5 представлено оброблені дані цих вимірювань у вигляді залежності співвідношення інтенсивності виходу γ -квантів з (p, n)- та (p, γ)-реакцій на ^{89}Y від частоти ЯМР (енергії бомбардуєчого пучка протонів). Канал $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$ використовувався для нормування даних щодо вихідного каналу з реакції $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$.

Статистичні похибки ідентифікації каналу реакції $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$ збільшуються з наближенням бомбардуєчої енергії до порогових значень. Ці похибки задають відповідні межі полоси похибок (за горизонтальною віссю - F, кГц) визначення "порогової" частоти (енергії пучка). З інтерпольованого перетинання цієї осі наведеною кривою та лініями межі полоси похибок було визначено частоту ЯМР, яка відповідає абсолютному значенню енергії прискорених протонів 4272 кеВ, а саме $f = 16253,5^{+4,8}_{-8,3}$ кГц. Вказані похибки відповідають статистичним похибкам визначення виходу γ -квантів з реакції $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$ і вкладаються у "геометричні" межі наведених міток експериментальних даних. Порівняння отриманих даних із згаданими вище результатами роботи [1] вказують на необхідність їх корекції. Без врахування ефектів

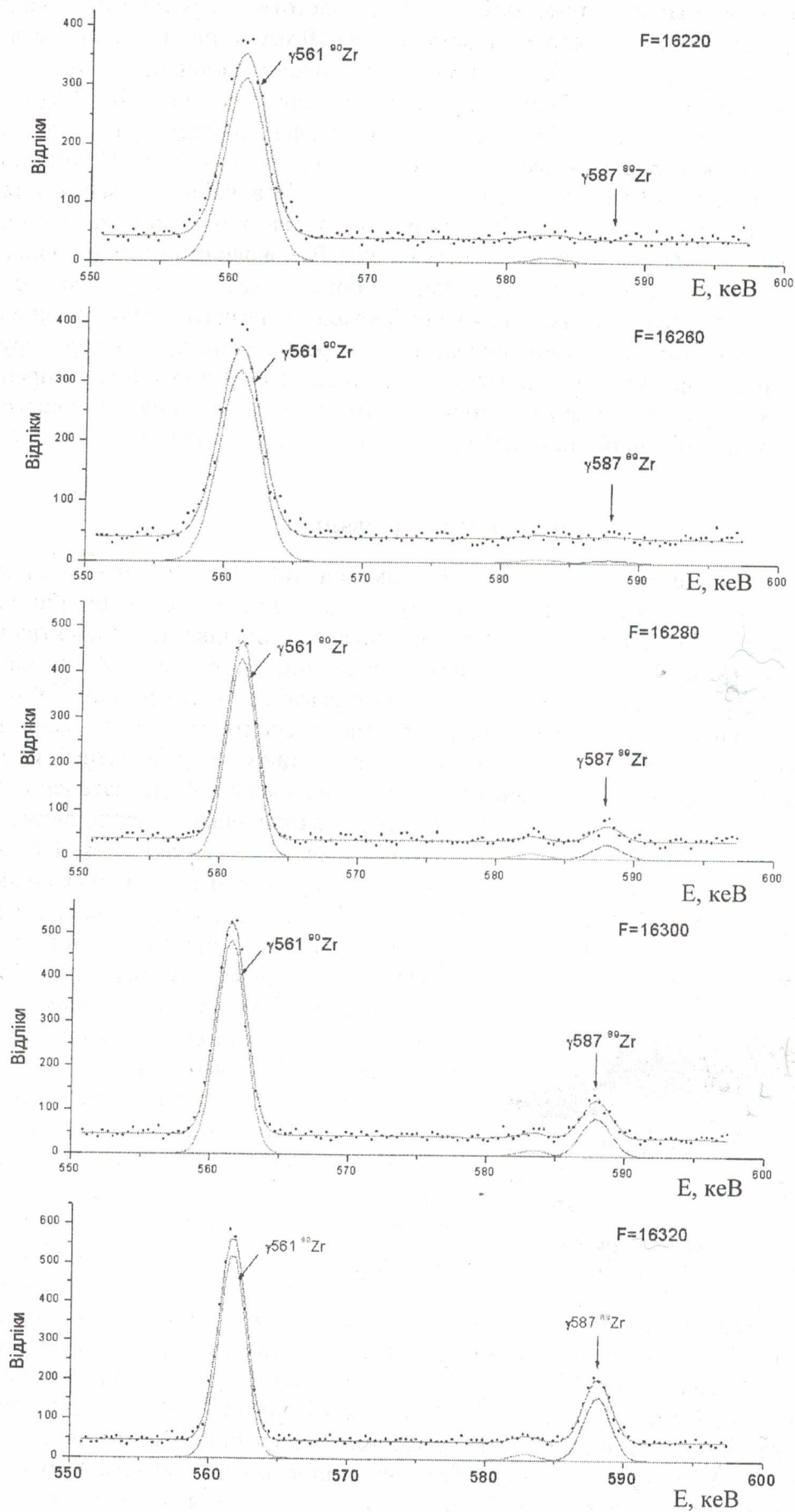


Рис. 4. Послідовні експозиції з кроковою зміною енергії пучка у 10 кеВ.

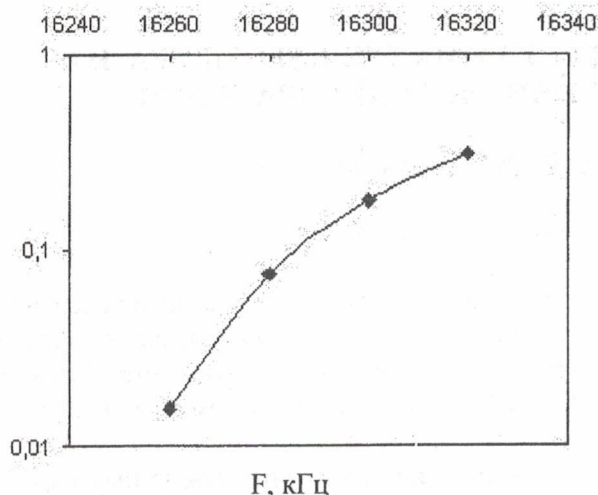


Рис. 5. Залежність від енергії (частоти ЯМР) виходу γ -квантів рівня з енергією 587 кеВ з реакції $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$.

товщини мішені та повторюваності геометрії іонної оптики виведення пучка на мішень мова йде про розбіжність отриманих раніше й зараз даних у 50 кеВ. Така розбіжність цілком пояснюється зміною положення вхідного та вихідного отвору магніту-аналізатора та корекцією тракту транспортування, які були зроблені при оптимізації величини струму, виведеного з прискорювача.

Автори висловлюють щире подяку персоналу тандема ЕГП-10К за забезпечення пошукових змінних режимів роботи прискорювача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бобьрь В. В., Вишневикий И. Н., Горюнов О. Ю. и др. Абсолютизация по энергии пучка протонов тандем-генератора ЭГП-10 // Материали щорічної наукової конференції НЦ "ІЯД". - Київ, 1997. - С. 154 - 155.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЧАСТИЦ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА ТАНДЕМА ЭГП-10К ПРИ ПОМОЩИ γ -СПЕКТРОМЕТРИИ

О. Ю. Горюнов, И. П. Дряпаченко, Э. М. Можжухин,
В. И. Николаев, М. В. Стрільчук

Проведена привязка абсолютного значения энергии протонов тандема ЭГП-10К к частоте ядерного магнитного резонанса (ЯМР) датчика поля поворотного магнита-анализатора СП-88. Для определения энергии пучка использовалась реакция $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$, энергетический порог которой 3656,6 кеВ. Для идентификации открытия этого канала реакции регистрировались γ -кванты из распада возбужденного состояния 587 кеВ конечного ядра ^{89}Zr . Была определена частота ЯМР $f = 16253,5^{+4,8}_{-8,3}$ кГц, которая отвечает абсолютному значению энергии ускоренных протонов 4272 кеВ.

DEFINITION OF THE ABSOLUTE ENERGY OF BEAM PARTICLES FROM TANDEM EGP-10K BY MEANS OF γ -SPECTROMETRY

O. Yu. Goryunov, I. P. Dryapachenko, E. N. Mozzhukhin,
V. I. Nikolaev, N. V. Strilchuk

The attachment of absolute energy of proton beam from tandem EGP-10K to the nuclear magnetic resonance (NMR) frequency of field device put in rotated magnet-analyzer SP-88 has been made. The determination of beam energy was made with the aid of $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$ reaction, where the threshold-is 3656 keV. 587 keV level from decay of ^{89}Zr was used for identification of the reaction. It was determined that NMR frequency $f = 16253,5^{+4,8}_{-8,3}$ Kc/s corresponds to 4272 KeV proton energy.

Надійшла до редакції 21.11.02,
після доопрацювання – 27.02.03.