

СПЕКТРОМЕТЪР НА БЪРЗИ НЕУТРОНИ НА БАЗА ПРОТОНЕН ТЕЛЕСКОП С ЕЛЕКТРОННА КОЛИМАЦИЯ НА ОТКАТНИ ПРОТОНИ

ВАСИЛ МИЛКОВ^{1,2}, ЦВЕТАН ПАНТЕЛЕЕВ², АНДРЕЙ БОГДЗЕЛ²,
ВАЛЕРИЙ ШВЕЦОВ², СЕРГЕЙ КУТУЗОВ², ПАВЕЛ СЕДИШЕВ²,
СЕРГЕЙ БОРЗАКОВ²

¹Катедра "Ядрена техника и ядрена енергетика"
Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“
²ЛНФ „И. М. Франк“, ОИЯИ, Дубна, Русия

Васил Милков, Цветан Пантелеев, Андрей Богдзел, Валерий Швецов, Сергей Кутузов, Павел Седишев, Сергей Борзаков. СПЕКТРОМЕТЪР НА БЪРЗИ НЕУТРОНИ НА БАЗА ПРОТОНЕН ТЕЛЕСКОП С ЕЛЕКТРОННА КОЛИМАЦИЯ НА ОТКАТНИ ПРОТОНИ

В Лабораторията по неутрона физика „И. М. Франк“ в ОИЯИ, Дубна, е създаден прототип на неутронен спектрометър на база газов пропорционален брояч с регистрация на откатни протони. Принципът на действие на спектрометъра е основан на измерване на кинетичната енергия на еластично разсеяни на малки ъгли протони от (n,p) реакция в среда, съдържаща водород. Спектрометърът се състои от два цилиндрични пропорционални брояча, изпълняващи ролята на катоди, поставени в общ газов обем с обща централно разположена анодна нишка. Използвайки радиоизотопни източници на неутрони ^{252}Cf и $^{239}\text{Pu-Be}$, както и моноенергетични неутрони от реакция $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$, получени от тънка литиева мишена, поставена на пътя на поток протони от електростатичен ускорител ЕГ-5, бяха проведени изследвания на характеристиките на неутронния спектрометър.

Vasil Milkov, Tsvetan Panteleev, Andrey Bogdzel, Valeriy Shvetsov, Sergey Kutuzov, Pavel Sedishev, Sergey Borzakov. FAST NEUTRON SPECTROMETER BASED ON A PROTON TELESCOPE WITH ELECTRONIC COLLIMATION OF RECOIL PROTONS

A prototype of neutron spectrometer based on a gas proportional counter with recoil protons registration is created in the Frank Laboratory of Neutron Physics at the JINR, Dubna. The spec-

За контакти: Васил Милков, Софийски университет „Св. Климент Охридски“, Физически факултет, Катедра „Ядрена техника и ядрена енергетика“, бул. „Джеймс Баучър“ 5, София 1164, телефон: +359 2 8161 728; e-mail: milkov@phys.uni-sofia.bg

trometer is developed to measure the kinetic energy of scattered elastically at small angles protons that are produced by (n,p) reaction in an environment containing hydrogen. The elaborated prototype consists of two cylindrical proportional counters used as cathodes. They are placed in gas environment with a common central-situated anode wire. Studies on the characteristics of the neutron spectrometer were conducted using ^{252}Cf and ^{239}Pu -Be radioisotope neutron sources, as well as monoenergetic neutrons produced by the $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ reaction when a thin lithium target was bombarded with proton beam from an electrostatic accelerator EG-5.

Keywords: neutron spectrometer, proportional counter, proton recoil telescope

PACS numbers: 29.40.Cs

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Необходимостта от измервания на кинетичната енергия от бързи неутрони се е появила едновременно с тяхното откритие и продължава да е актуално и до днешни дни. Цялата сложност идва от отсъствието на електричен заряд, което води до изисквания за преобразуване на енергията от неутрона в кинетична енергия на някаква заредена частица. Регистрацията на неутрони се разделя на две съществено различни задачи:

1. Задача за регистрация на забавени топлинни неутрони, използвайки ядрени реакции, които имат големи сечения на взаимодействие.

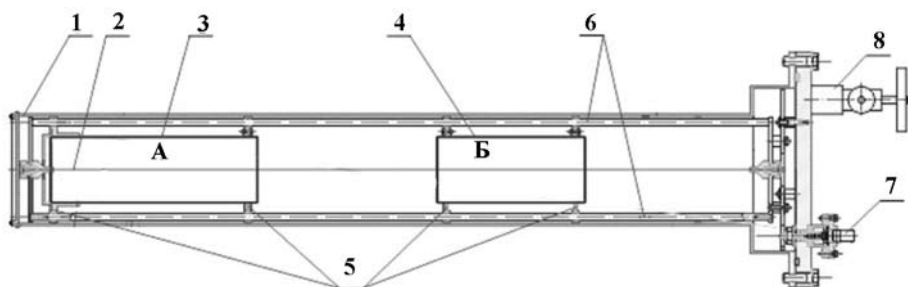
2. Задача, която като правило е свързана с измерването на енергийни разпределения от бързи неутрони – използват се резултати от неутрон-ядрени взаимодействия, за които сечението за взаимодействие е не повече от 10 b (10^{-27} m^2).

В областите на резонансните енергии (от $0,5\text{ eV}$ до около 100 keV) се прилага методът на време на прелитане, изискващ импулсен характер на работа на неутронния източник. Друг метод е измерване на енергиите на откатни протони във водородсъдържащи сцинтилационни материали [1]. Частен случай за използване на тази методика е т. нар. протонен телескоп, в който се измерва енергията на откатни протони в газова среда. Като пример може да се посочат по-ранни разработки на подобни спектрометри, разгледани в работи [2–4]. Именно на този метод за спектрометрия на бързи неутрони е посветена тази работа.

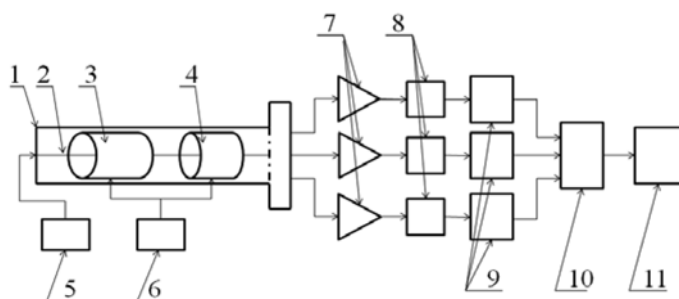
2. ОПИСАНИЕ НА УРЕДА

Създаденият в ЛНФ ОИЯИ прототип на неутронен спектрометър на база газов пропорционален брояч с регистрация на откатни протони с прилагане на метод за тяхната електронна колимация е представен в общ вид на фиг. 1.

Корпусът *1* представлява тънкостенна тръба от неръждаема стомана с вътрешен диаметър 96 mm и дължина 625 mm. По дължината на цялата работна част на детектора е опъната анодна жица ($W + Au$) с диаметър 50 μm 2. В самото начало на работния обем е разположен първият катод (А) 3 във вид на тръба с дължина 175 mm, на разстояние 152,5 mm от нейния край е монтиран втори катод (Б) 4 с дължина 125 mm. Двата електрода са изготвени от тънкостенни тръби от неръждаема стомана с вътрешен диаметър 54 mm, те са закрепени и центрирани с помощта на тefлонови пръстени 5. Пръстените от своя страна са разположени на шест метални пръчки (стойки) 6. На задния фланец са разположени три сигнални изхода 7 и вакуумен кран 8.



Фиг. 1. Общ вид на уреда: 1 – корпус, 2 – анодна жица ($W + Au$), 3 – катод А, 4 – катод Б, 5 – тefлонови пръстени, 6 – метални пръчки, 7 – сигнални изходи, 8 – вакуумен кран



Фиг. 2. Блок-схема на спектрометъра:

1 – корпус, 2 – анод, 3 – катод А, 4 – катод Б, 5 – изравняващи източници на напрежение, 6 – зарядочувствителни предусилватели, 8 – спектрометрични усилватели, 9 – аналого-цифрови преобразователи (АЦП), 10 – контролер КАМАК, 11 – персонален компютър (ПК)

На фиг. 2 е представена блок-схема на спектрометъра. Анодът 2 в корпуса 1 е включен към източник на положително високо напрежение 5, катод А (3) и катод Б (4) са включени към изравняващи източници на

напрежение 6. Сигналите от катодите и анода се подават към входовете на зарядочувствителни предусилватели 7. Изходите от предусилвателите са включени към входовете на съответните спектрометрични усилватели 8, които от своя страна са включени към входовете на аналого-цифрови преобразователи (АЦП) 9, които чрез контролер КАМАК 10 по USB интерфейс са свързани към персонален компютър (ПК) 11. АЦП, контролер КАМАК и ПК образуват електронна система, която осъществява функцията на дискриминация, съвпадението на сигналите от анода и катодите и запис на многомерната амплитудна информация.

Обработката на получената информация се прави с помощта на специално разработена програма в ЛНФ, в резултат на която от многомерните експериментални данни се получава енергиен неутронен спектър в зададената област на газовата мишена и зададения телесен ъгъл на разсеяните откатни протони в детектора.

3. ПРИНЦИП НА РАБОТА

Телескопът е направен на основата на пропорционален брояч с обща анодна жица в херметичен корпус, напълнен с водородсъдържаща газова смес. Използването на двата допълнителни електрода позволява да се решат две функционални задачи:

- създаване на област в първата тръба (катод А), изпълняваща ролята на мишена;

- колимация на откатни протони в пространствения ъгъл, който се определя от дъното на лицевата част на втората тръба (катод Б).

Областта от края на втората тръба до края на детекторния корпус създава обем, в който се установяват откатните протони. В обема на детектора се отделят две области с различни радиуси (катоди А и Б и останалите части от брояча), което води до различие в коефициентите на газово усилване. Изравняването на коефициента на газово усилване се осъществява с помощта на компенсационен потенциал, подаван на двата катода. В телескопа колимацията се осъществява чрез съвпадение на импулсите от откатните протони в двете тръби, които впоследствие (след програмно сортиране на експерименталните данни за избраните интервали на амплитудно разпределени сигнали, записани с катоди А и Б) дават нужната информация за енергийния спектър.

Изменяйки прага на дискриминация на импулсите в първата катодна тръба, може да се избере дебелината на газовия слой, разположен непосредствено в нейното начало, в който могат да се осъществят процесите на еластично разсейване на неутроните върху протоните. Като се определи дебелината

и разположението на газовата мишена, а също така променяйки телесния ъгъл, в пределите на който работи телескопът, може да се оптимизира както ефективността, така и разделителната способност по енергии на уреда.

Прагът на дискриминация на импулсите във втората тръба се поставя в района на максималните амплитуди, което съответства на пълното преминаване на откатните протони през тръбата. Тъй като загубите на енергия с висока точност са пропорционални на дължината на траекторията на откатния протон, прагът на дискриминация определя практически избраната дебелина на газовия слой в мишената.

За изчисляване на пробезите на протоните в детектора се използва програма SRIM [5].

Фактът на съвпадение по време на събирането на импулсите от двете катодни тръби съответства на пълното разполагане на траекторията на протоните в обема на телескопа. В лабораторната координатна система енергията на откатните протони E_p зависи от ъгъла θ на излитане на протона спрямо първоначалното направление на неутрона с енергия E_{n0} по следния начин:

$$E_p = E_{n0} \cdot \cos^2 \theta_p. \quad (1)$$

Регистрирайки протоните в малък телесен ъгъл, може да се получи добра разделителна способност по енергии:

$$dE_p = E_{n0} \sin(2\theta_p) d\theta_p. \quad (2)$$

Като интегрираме от 0 до $\theta_{p\max}$ се получава

$$\Delta E_p = E_{n0} (1 - \cos \theta_{p\max}). \quad (3)$$

Трябва да се отбележи, че величината $\theta_{p\max}$ зависи от точката на раждане на следата от протона. При дължина на газовия слой на мишената 80 mm тази величина се равнява на $\sim 1\%$.

За калибриране по енергии в областта до 1 MeV, а също така и за измерване на собствената разделителна способност на детектора по енергии, в състава на газовата смес се добавя малко количество ^3He .

Различията на представения спектрометър в сравнение с други подобни разработки се състоят в това, че:

- в качеството на протонна мишена се използва газов слой в първата тръба, като дебелината и положението се избират произволно при обработка на информацията в електронната система, което води до значително

намаляване на енергийния праг в спектрите и подобряване на разделителната способност по енергии;

– втората тръба служи като колиматор на откатни протони (при условие на съвпадение на сигналите от двете тръби). Изборът на минимален ъгъл на колимация се осъществява след обработката на информацията в електронната схема.

4. МОДЕЛИРАНЕ С ПОМОЩТА НА ПРОГРАМА „МОНТЕ КАРЛО“ И ПРЕСМЯТАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПРОТОТИПА

За изследване характеристиките на протонния телескоп беше направена симулация с помощта на метода „Монте Карло“.

Бързите неутрони се разсейват във водородсъдържаща газова мишена. Получените откатни протони попадат в цилиндричен брояч с радиус R_c и дължина L . Подавайки компенсационен потенциал на двата катода А и Б, се постига изравняване на електричните силови линии на полето в обема на детектора и съответно на коефициента на газово усилване в целия обем на уреда. Предполага се, че потокът неутрони, падащи върху телескопа, е ламинарен, паралелен на оста на детектора z . Ако допуснем, че откатен протон се е появил в точка с координати z_0 , на разстояние r от оста на цилиндъра и се движи в направление, определено от азимутален ъгъл φ и ъгъл θ спрямо оста на цилиндъра, считано от вертикалното направление (фиг. 3), то тогава протонът пресича границата на цилиндъра на разстояние

$$r_1 = -r \cos \varphi + \sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + R_c^2 - r^2}. \quad (4)$$

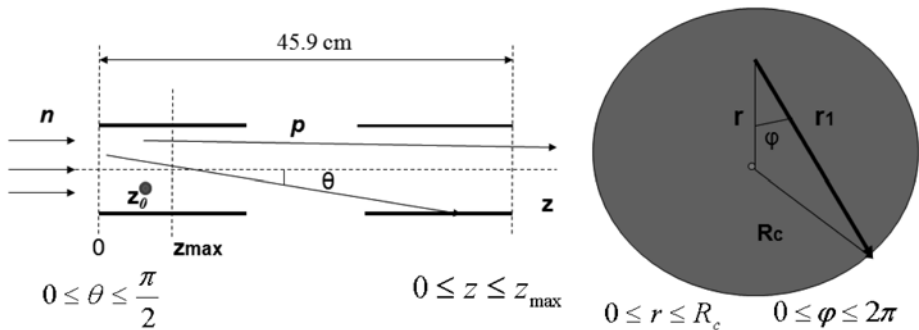
Разстоянието, което преминава един протон в цилиндъра, е равно на

$$l_p = \frac{r_1}{\sin \theta}. \quad (5)$$

Ако протонът се появи в точка с координати z_0 , то той пресича границата на цилиндъра в точка с координати

$$z_1 = z_0 + l_p \cdot \cos \theta. \quad (6)$$

По стойност координатата z_1 не трябва да превишава максималната дължина на брояча.



Фиг. 3. Пресмятане на спектъра на откатни протони в цилиндричен брояч

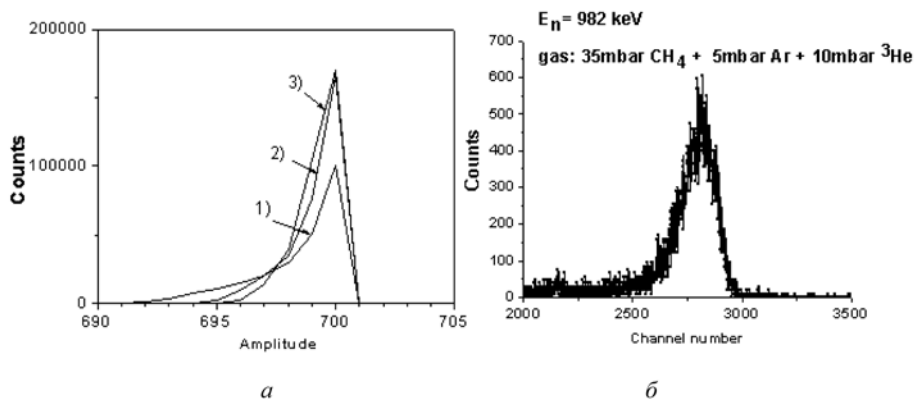
Програмата моделира траекторията на протони в зависимост от ъглите на излитане θ и φ . Разиграва се начало на следата с координати z и разстояние r от оста на симетрия на брояча (катод А). След това се разиграват ъглите θ и φ и се пресмята дължината на следата до точката на пресичане с тръбата (катод Б). Ъглите и първоначалните координати варират в следните граници:

$$(0 \leq r \leq R_c; 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq z_{\max}).$$

За оценка на телесния ъгъл се избират само тези събития, при които протоните са преминали напълно втората тръба. По такъв начин се подбират събития, съответстващи на протонните траектории в малък пространствен ъгъл по оста на симетрия на детектора, което позволява да се определи енергията на налитания неутрон с добра разделителна способност.

Изчисленията са извършени за моноенергетични неутрони с енергия 1 MeV, дължина на следата 70 cm, максимално разстояние от началото на първата тръба до края на втората – $L = 45,9$ cm. Радиусът на тръбата е $R_c = 2,25$ cm. Бяха пресметнати три случая: 1) $0 < z < 2,5$ cm.; 2) $0 < z < 5,0$ cm.; 3) $0 < z < 7,5$ cm. Броят на разиграваните събития за всяко пресмятане е 10^7 .

Резултатите показват, че при увеличаване на размерите на областта на раждане на протоните се увеличава и ширината на пика (вж. фиг. 4a). За сравнение на фиг. 4б е показан измерен спектър. Условиата на измерване са описани по-долу.



Фиг. 4. а) Пресмятания за формата на спектрите на протони при различни области на раждане на следите: 1) $0 < z < 2,5$ cm; 2) $0 < z < 5,0$ cm; 3) $0 < z < 7,5$ cm; б) Експериментални резултати. Моноенергиен поток неутрони $E_n = 982$ keV, получен на електростатичен генератор ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ

Оценката на ефективността е направена по формула

$$\varepsilon = n_H \sigma_{np} \frac{\Delta\Omega}{2\pi}. \quad (7)$$

Формула (7) е вярна за малка газова концентрация и отчита, че протоните летят напред. В нея n_H е броят водородни ядра на 1 cm^2 в детектора, а σ_{np} е сечението на разсейване. Използван е газ CH_4 под налягане 35 mbar.

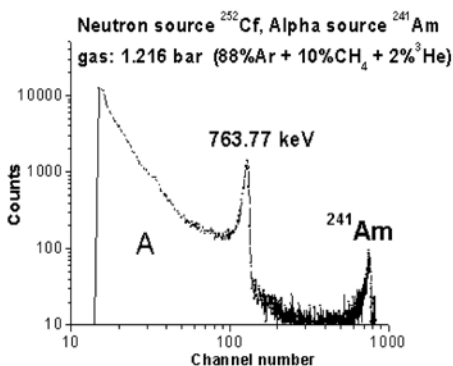
$$n_H = \frac{N_H}{S} = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\Omega}{2\pi} \approx 0,02. \quad (9)$$

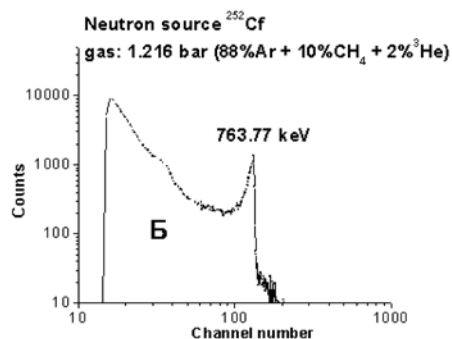
С помощта на резултатите от моделирането се получава, че ефективността на телескопа при налягане 35 mbar е $\varepsilon(1 \text{ Mev}) = 1,6 \cdot 10^{-6}$. Ефективността на телескопа линейно зависи от налягането на работния газ.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

За проверка на работоспособността на детектора бяха проведени следните експерименти. В предната част на първата тръба (катод А) беше прикрепен α -източник ^{241}Am ($E_{\alpha} = 5,4 \text{ MeV}$), налягането на газа ($88\%\text{Ar} + 10\%\text{CH}_4 + 2\%\text{He}$) във вътрешността на детектора бе $1,2 \text{ atm}$, което изключва възможността α -частици от първата тръба (катод А) да попаднат във втората (катод Б). Детекторът бе облъчван с топлинни неутрони след забавяне от ^{252}Cf . На фиг. 5 и 6 са представени резултатите от измерването. След проверката на двата катода източникът ^{241}Am беше отделен.



Фиг. 5. Спектър от катод А



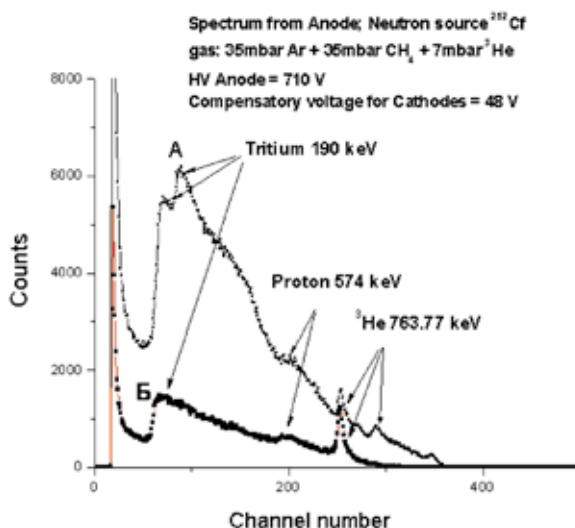
Фиг. 6. Спектър от катод Б

На фиг. 7 са представени резултати от измерени анодни спектри от реакция $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77 \text{ keV}$. Сместването на двата пика, т.е. изравняването на коефициента на газово усилване в целия обем на детектора, се постига с помощта на подаден положителен потенциал на катодните тръби.

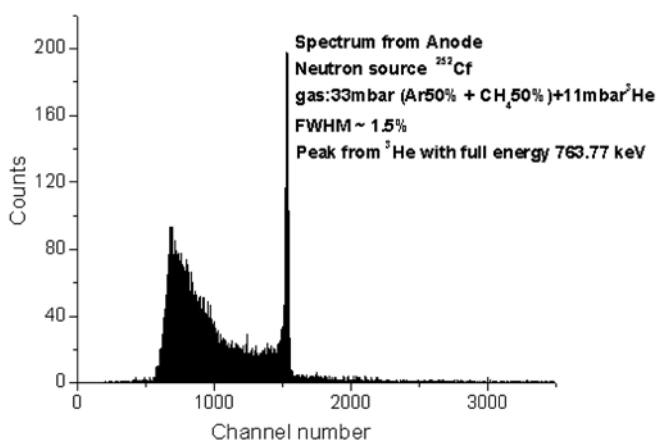
Добавянето на малко количество ^3He в газовата смес позволява експериментално да се измерят два изключително важни параметъра на протонния телескоп.

1. С помощта на стандартен ^{252}Cf -източник на неутрони и полиетиленов блок, изпълняващ ролята на забавител, беше измерена вътрешната разделителна способност по енергии на детектора, която беше оценена на 1,5% (FWHM). Получените резултати са представени на фиг. 8.

2. Пиковите на пълно поглъщане в обема на детектора позволяват да се проведе енергийно калибриране с висока точност. Възможно е също така да се използват и пиковите на излитане на протона (574 keV) и тритона (190 keV) за калибриране на телескопа при ниски енергии на неутронния поток.



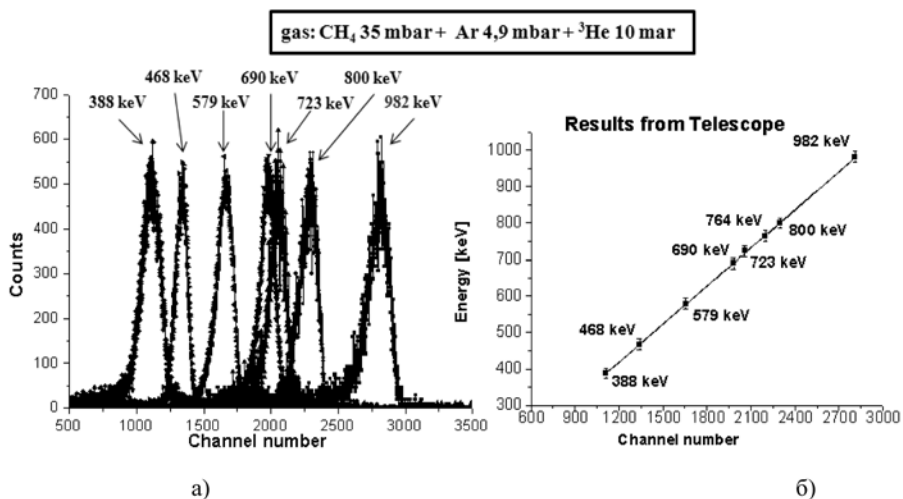
Фиг. 7. Спектър от реакция ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}+763,77\text{ keV}$: спектър А – без компенсационен потенциал; спектър Б – с помощта на компенсационен потенциал на двата катода



Фиг. 8. Спектър от реакция ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}+763,77\text{ keV}$ с помощта на стандартен източник на неутрони ${}^{252}\text{Cf}$ и полиетиленов блок за забавител

На електростатичния генератор ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ бяха проведени серия измервания на моноенергетични потоци неутрони, които бяха получени в резултат на реакцията ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$. На фиг. 9а и б са показани спектри от неутрони с енергии в интервала от 388 keV до 982 keV, получени при калибриране на спектрометъра по енергии, и построената зависимост канал/

енергия, която има линеен вид. Също така от фиг. 9а може да се види, че функцията на отклик за този спектрометър има гаусов вид.



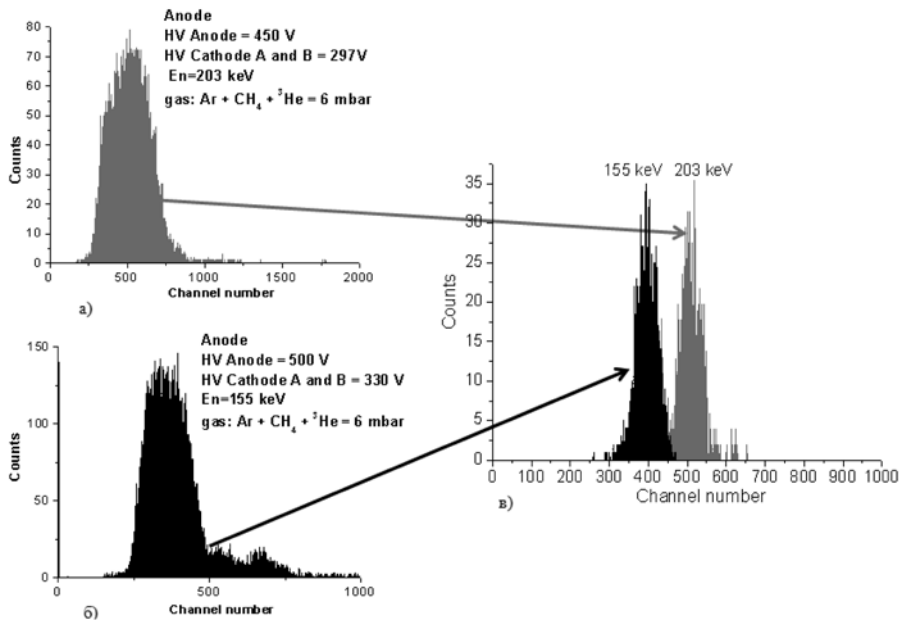
Фиг. 9. Резултат от ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ: а) калибриране по енергии в интервала 388 keV до 982 keV (спектри след програмно сортиране по катоди А и Б); б) графика на зависимостта канал/енергия от получените резултати при калибрирането

На ЕГ-5 също така бяха проведени измервания при ниски налягания на газовата смес в детектора, с помощта на които бе определена долната граница на измерваните енергии за този уред. Резултатите от две измервания при енергии на неутроните 155 keV и 203 keV са показани на фиг. 10а,б. На фиг. 10в са показани спектрите за тези две енергии след програмно сортиране по катоди А и Б.

Разделителната способност по енергии за бързи неутрони от мишена ⁷Li на ЕГ-5 варира в границите от 7% до 15% за всички проведени измервания и от 1% до 3% по ³He. Този широк интервал на разделителната способност по енергии на детектора се определя преди всичко от ефекта страглинг (straggling) на траекторията на откатните протони, т. е. от значителното отклонение на траекторията им от първоначалното направление в края на следата. По тази причина съществена част от енергията се губи след попадане на протоните върху стените на втората катодна тръба. Страглингът в съчетание със силната нелинейност на стойностите на относителните енергийни загуби на откатните протони в процеса на тяхното забавяне по дължината на траекторията им силно затруднява избора на интервала на интегриране на протонния спектър във втората катодна тръба при определяне на точната форма на изследвания неутронен спектър. От друга страна, ефектът на електронната колимация

позволява този избор да бъде проведен така, че разделителната способност да се изравни със собствената разделителна способност на телескопа.

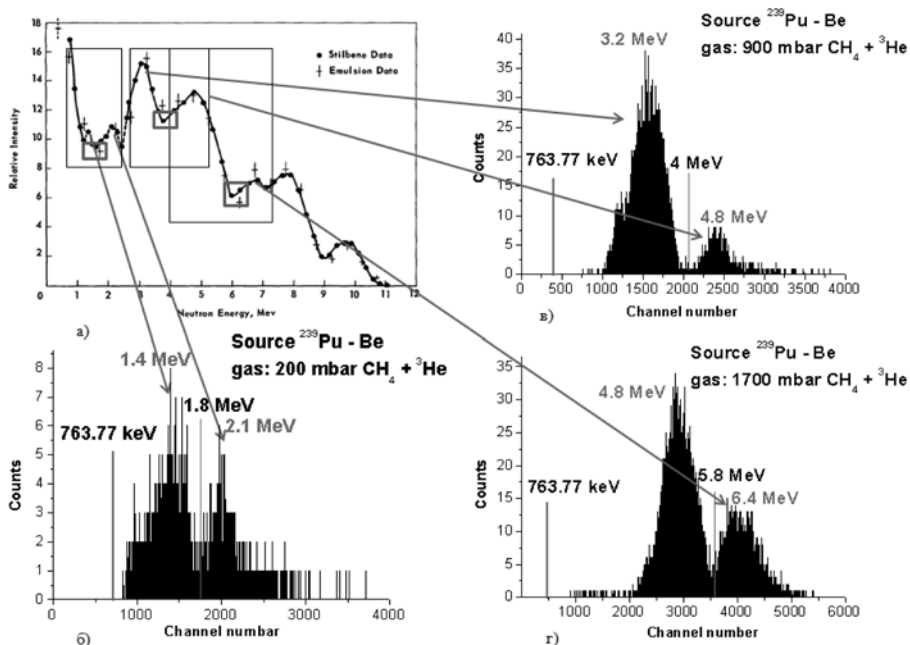
Поради техническа невъзможност да бъде измерен спектър на неутрони с енергия, по-голяма от 1 MeV, на ЕГ-5 беше използван източник $^{239}\text{Pu-Be}$, който има известен енергиен спектър [6]. Поради ограничения енергиен интервал, в който може да работи уредът при дадено налягане на газо-вата смес (за представения уред енергийният интервал е $E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 2$), се налага той да бъде презапълван всеки път за всеки конкретно измерван енергиен интервал. Друга възможност е да се започне измерване от очаквания максимум на енергиите на неутроните и постепенно да бъде намалявано налягането в зависимост от енергийния интервал, който трябва да бъде изследван. Разбира се, всичко това се прави след нужните пресмятания с програма SRIM за съответните пробези и разсейвания на протоните в газовата среда [5].



Фиг. 10. Резултат от ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ: а) спектър от неутрони с енергия 203 keV; б) спектър от неутрони с енергия 155 keV; в) спектри от неутрони с енергия 155 keV и 203 keV, след програмна сортировка с катоди А и Б

На фиг. 11а са показани данни под формата на спектър от източник $^{239}\text{Pu-Be}$, получени със стилбен и емулсии [6]. На фиг. 11б, в и г са показани резултати за три енергийни интервала ($1,4 \text{ MeV} \div 2,1 \text{ MeV}$; $3,2 \text{ MeV} \div 4,8 \text{ MeV}$; $4,8 \text{ MeV} \div 6,4 \text{ MeV}$), измерени с неутронния спектрометър на база протонен

телескоп с електронна колимация на откатни протони. Маркерът в началото на всеки спектър отговаря на пълната енергия от реакцията ${}^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77 \text{ keV}$, по която и именно се извършва калибрането.



Фиг. 11. Резултат от източник ${}^{239}\text{Pu}$ -Be: а) данни от източник ${}^{239}\text{Pu}$ -Be, получени със стилбен и емулсии. Резултати от телескопа: б) енергиен интервал 1,4 MeV÷2,1 MeV; в) енергиен интервал 3,2 MeV÷4,8 MeV; г) енергиен интервал 4,8 MeV÷6,4 MeV

6. КРАТЪК АНАЛИЗ НА ПРЕДСТАВЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

В представената работа е направено описание на конструкцията на спектрометъра на бързи неутрони на база протонен телескоп с електронна колимация на откатни протони и използваната към него електроника. Разгледан е принципът на работа на този уред, в която важно място заема самата методика на електронна колимация.

За изследване на характеристиките на детектора са направени симулации с използване на метода „Монте Карло“, резултатите от които са представени на фиг. 4а и сравнени с експериментално получени резултати фиг. 4б. Беше установено, че при увеличаване на областта на раждане на протоните се увеличава и ширината на пика.

Ефективността на детектора, пресметната за газ CH_4 при налягане

35 mbar и енергия на неутроните 1 MeV, е оценена на 10^{-6} . Разбира се, трябва да се има в предвид, че тази ефективност във всички случаи зависи както от състава и налягането на газовата смес в обема на телескопа, така и от енергията на неутроните, избраната степен на електронна колимация, геометрията на детектора и др., което до някаква степен затруднява точното ѝ определяне. Формула (7) дава приблизителна оценка за ефективността.

За проверка на работоспособността на детектора са регистрирани спектри с катод А, катод Б и анод (вж. фиг. 5–8). Към предната част на катод А бе временно прикрепен алфа-източник ^{241}Am ($E_{\alpha} = 5,4 \text{ MeV}$), с цел да се провери възможността за евентуална негова употреба за енергийно калибриране (вж. фиг. 5), а също така и като доказателство, че протичащите в първата катодна тръба процеси по никакъв начин не влияят на спектралните характеристики на втората катодна тръба. Получените резултати потвърждават нашите очаквания за представения уред.

Извършена бе настройка на протонния телескоп с помощта на компенсационно напрежение, подадено към катода А и Б, поради което бе изравнено полето в обема на телескопа и коефициента на газово усилване (вж. фиг. 7). Благодарение на подходящо подбрано компенсационно напрежение, ние успяхме да измерим собствената разделителна способност по енергии на детектора, която бе оценена на $\sim 1,5\%$ (FWHM) (вж. фиг. 8).

От проведените измервания на ЕГ-5 с моноенергетични неутрони, които бяха получени в резултат на реакция $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$, бе направено калибриране по енергии в интервала 388–982 keV (виж. фиг. 9а). Най-ниската енергия, измерена с този неутронен спектрометър, е 155 keV (вж. фиг. 10а, б, в), която представлява и долна граница по енергии за нашия прототип.

Разделителната способност по енергии FWHM за бързи неутрони в интервала 155 keV–1 MeV варира в границите от 7% до 15%. Използването на източника $^{239}\text{Pu-Be}$ позволи да бъдат измерени три енергийни области и бе достигната горна граница по енергии от 6,4 MeV (вж. фиг. 11б, в, г).

Необходимо е да се отбележи един съществен недостатък на този прототип. Това е малкият енергиен интервал $E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 2$, в който работи неутронният спектрометър. За да се отстрани този недостатък, трябва да се промени разстоянието между двата цилиндрични катода, както и общата дължина на корпуса на детектора. Тук важна роля играе геометричният фактор. Също е важно да се знае, че описаният уред е подходящ основно за работа с квазимоноенергетични неутронни потоци.

Въпреки ниската ефективност на този уред в сравнение с ефективността на сцинтилационните детектори, той има няколко съществени предимства пред тях. Това са много ниската чувствителност към гама-лъчение, което винаги присъства в неутроннофизичните изследвания, и по-добрата разделителна способност по енергии (FWHM), което е важно свойство за всеки уред.

Благодарности. Искрени благодарности на доц. д-р Людмил Цанков, ръководител катедра „Ядрена техника и ядрена енергетика“, за оказаното съдействие при написването на тази статия и на А. В. Стрелков (ЛНФ, ОИЯИ) за техническата помощ и постоянния му интерес към провежданите изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Keisuke Asai; Norihiro Naoi, Tetsuo Iguchi, Kenichi Watanabe, Jun Kawarabayashi and Takeo Nishitani. *Nuclear Science and Technology*, Vol. **43**, No. 4, p. 320–324 (2006).
- [2] H. Borst. *Nucl. Instr. and Meth.*, **169**, 69–75 (1980).
- [3] M. Mizuno. *Nucl. Instr. and Meth.*, **75**, 85–92 (1969).
- [4] M. Mizuho and T. Yamanaka. *Nucl. Instr. and Meth.* **91**, 57–60 (1971).
- [5] <http://www.srim.org/#SRIM>
- [6] M. E. Anderson. Neutron Energy Spectra of ^{239}Pu -Be, ^{238}Pu -F and ^{238}Pu - ^{18}O Source, AEC Research and Development REPORT, Printed in the United States of America, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, National Bureau of Standards, U. S. Department of Commerce, Springfield, Virginia 22151.