

СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ



SOFIA UNIVERSITY
FACULTY OF PHYSICS

Васил Михайлов Милков

**ГАЗОВИ ПРОПОРЦИОНАЛНИ ДЕТЕКТОРИ ЗА
СПЕКТРОМЕТРИЯ НА НЕУТРОНИ**

Автореферат

на дисертация за получаване на образователната и научна
степен "доктор"

Научна специалност: 01.03.04 Ядрена физика

Научен ръководител:

доц. д-р. Людмил Цанков

Научен консултант:

кфн. Цветан Пантелеев

София, 2012 г.

Резюме

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

- първа - за регистрация на забавени (топлинни) неутрони, използвайки ядрени реакции с големи сечения на взаимодействие, достигащи няколко хиляди барн;

- втора - като правило свързана с измерването на енергийните разпределения на потоците от бързи неутрони – използвайки резултати от неутрон - ядрени взаимодействия, за които сечението за взаимодействие е добре известно и е не повече от няколко десетки барн.

В областите на топлинните и резонансните енергии (от 0.005 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 се явява създаденият в Лабораторията по неутронна физика им. И.М.Франка в Обединения Институт за Ядрени Изследвания, Дубна прототип на неутронен спектрометър на база газов пропорционален брояч с регистрация на откатни протони [5,6,20].

В настоящата дисертация се разглеждат три вида газови пропорционални броячи в изработката и изпитанията на които авторът на представения труд има основен принос. Това са:

- Двумерен позиционно чувствителен детектор на топлинни неутрони (2D ПЧД);
- 2л Секционен детектор на топлинни неутрони;
- Нов тип спектрометър на бързи неутрони с помощта на специално разработен прибор - т.нар. неутронен спектрометър на бързи неутрони на база протонен телескоп с електронна колимация на откатни протони, в който се измерва енергията на откатни протони в газова среда [5, 6].

Структура и съдържание на дисертацията

Самата дисертация е структурирана, както следва:

Глава 1

Описани са основните режими на работа на газонапълнените детектори, по-конкретно на пропорционалните броячи и развиващите се в тях процеси. Разгледани са някои конструкционни особености, работни условия на детекторите и основните им енергетични и времеви характеристики, специфичната електроника за събиране на данните от позиционно чувствителни детектори, както и някои често използвани методи за регистрация на неутрони.

Глава 2

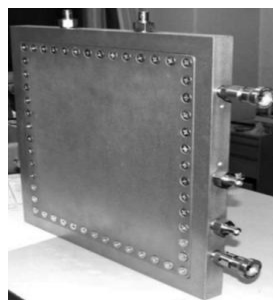
Тук са представени са два типа пропорционални детектори, в изготвянето на които авторът на дисертационният труд има активно участие. Това са:

2.1 Двумерен позиционно чувствителен детектор на топлинни неутрони (2D ПЧД) [7-9,21]

Този детектор е предназначен за измерване профила на неутронни потоци в реално време както на стационарни, така и на импулсни източници на неутрони. Разработеният прибор намира широко приложение на реактор ИБР-2М, ОИЯИ и може да се използва не само за неутронни източници с много високи неутронни потоци, използвани по цял свят, но и за източници следващо поколение, създавани в САЩ (SNS) [22] и Япония (JPARC) [23].

Описание и конструкция на детектора

Външният вид на детектора е показан на фигура 2.1. Той представлява пропорционална многожична камера под ниско налягане. Корпусът е изготвен от алуминиева сплав Д16Т, с размери 320 x 320 x 23 mm, дебелината на входния прозорец за неутронния поток е 1 mm, размерът на чувствителната област за неутрони е 100x100 mm.



Фигура 2.1* Външен вид на Двумерен позиционно чувствителен детектор на топлинни неутрони.

* Номерацията на фигурите следва тази в дисертацията

В обема на камерата са разположени две катодни и една анодна рамки от стъклотекстолит с дебелина 3,5 mm. Разстоянието между катодните рамки е 12 mm, анодът е разположен по средата между тях. Катодите и анодите представляват тънки жици от позлатен волфрам и позлатен молибден, намотани върху стъклотекстолитови рамки. Дебелината на анодните жици е 10 μm , а на катодните – 50 μm . Стъпката между анодните жици е 2 mm, като всичките излизат на обща шина, катодните жици са със стъпка 1 mm, обединени по две и изведени на линия на закъснение. Електродните жици на горната катодна рамка са разположени перпендикулярно на електродните жици от долната катодна плоскост. Линията на закъснение се състои от дискретни елементи, с постоянни $L = 145 \text{ nH}$ и $C = 56 \text{ pF}$, едно звено задържа сигнала с 2.9 ns. На фигура 2.2 са показани катодна рамка с линия на закъснение и вид на детектора с рамките в разглобен вид.

На анода се подава високо напрежение с положителна полярност чрез MHV контакт. За изходни сигнали се използват 5 BNC контакта. На корпуса има 2 газова контакта тип «Swagelock» за газово напълване на детектора, които също позволяват при необходимост работа в проточен режим. За регистрация на неутрони обемът на детектора е запълнен с газова смес, състояща се от газ с високо сечение за залавяне на неутрони - ^3He (преобразуващ газ) и гасящ газ CF_4 . Възможно е използването и на газова смес $\text{N}_2 + \text{CF}_4$.

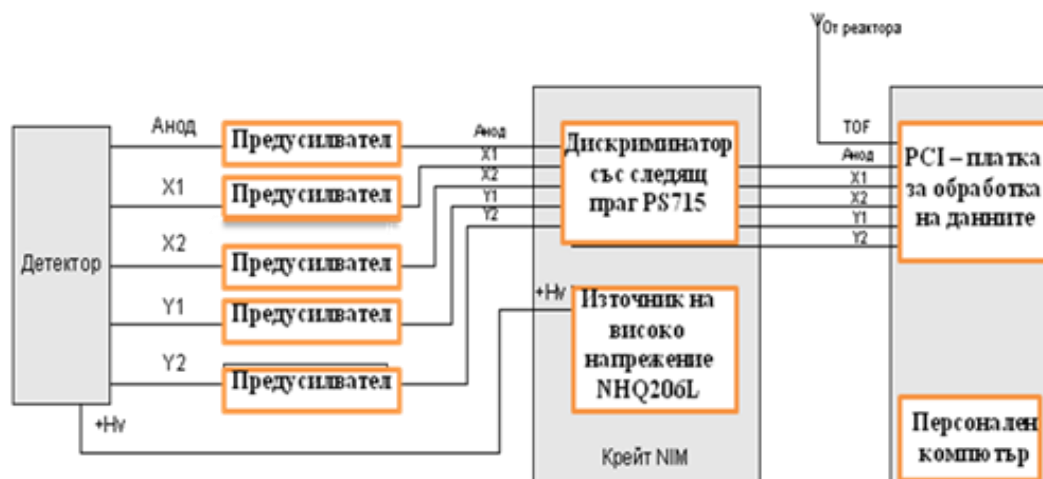


Фигура 2.2 Линията на закъснение върху катодна рамка и вид на детектора с рамките в разглобен вид.

Електроника

На фигура 2.3 е показана принципна схема на системата за събиране на данни.

Електрониката се състои от следните компоненти: крейт NIM с блок дискриминатор със следящ праг PS715 (фирма Philips Scientific) и източник на високо напрежение NHQ206L (фирма Iseg Spezialelektronik GmbH), персонален компютър с платка за обработка на данните и 5 бързодействащи предусилватели, закрепени на страничните стени на корпуса на детектора.



Фигура 2.3 Принципна схема на електрониката в позиционно-чувствителен детектор.

Основните параметри на предусилвателя са:

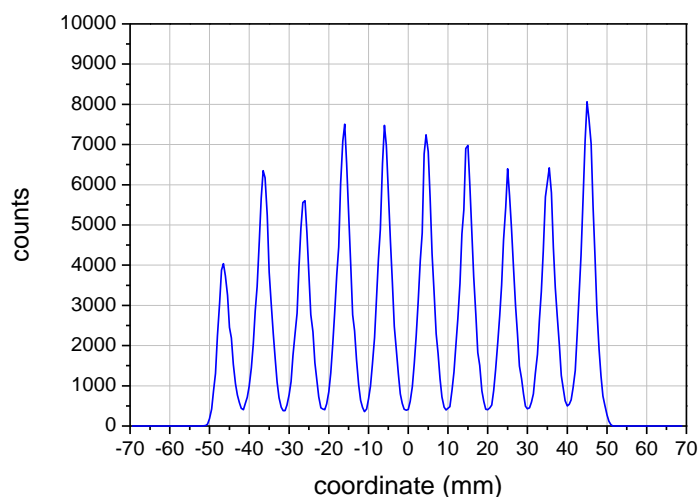
- коефициент на усилване (товарно съпротивление 50Ω) ~ 1250 ;
- време за нарастване на изходния импулс ~ 20 ns;
- средноквадратичен шум, приведен към входа $\sim 1.8 \div 2.5 \mu\text{V}$;
- динамичен диапазон на изходния сигнал (товарно съпротивление 50Ω) $\sim +1.5\text{V} \div -2.0\text{V}$;
- захранващо напрежение 12 V.

Сигналите от катодите (X1,X2,Y1,Y2) и от анода (след разделителния капацитет) постъпват на съответния предусилвател, след това на петканалния дискриминатор със следящ праг PS715. От дискриминатора сигналите отиват в персоналния компютър, на платката за обработка на данни с PCI-интерфейс. На платката PCI DAQ (DeLiDAQ [10,11]) постъпва също така сигнал за старт от импулсния неутронен източник, по който се определя енергията на регистрираните неутрони при работа в режим на време на прелитане.

Изследване параметрите на детектора

Определянето на характеристиките на детектора е направено на реактор ИБР-2 [19] ОИЯИ, Дубна. Измерени са координатната разделителна способност и хомогенността на детекторната ефективност по цялата му чувствителна област.

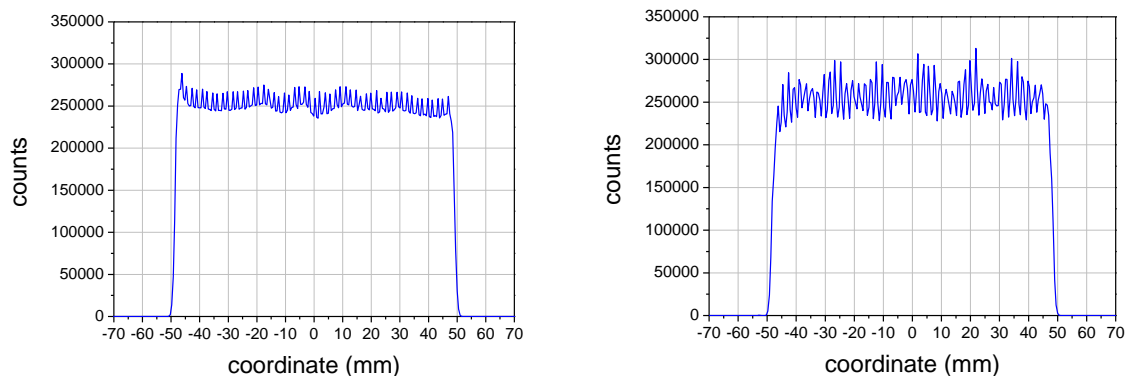
Координатната разделителна способност е измерена по следния начин. На входния прозорец на детектора е закрепена кадмиева маска, след което той е поставен на директен неутронен поток от реактора. Маската представлява кадмиева пластина с дебелина 1 mm и прорязани в нея канали с ширина 0.5 mm. Разстоянието между каналите е 10 mm. Получените спектри се сумират по ос Y за получаване на интегрален спектър по ос X. Резултатът е представен на фигура 2.5.



Фигура 2.5. Интегрален спектър по ос X, взет от маска с вертикални канали. Газова смес 50 mbar ^3He + 950 mbar CF_4 . Време на измерване 1 h, 16 min.. Напрежение + 2800 V.

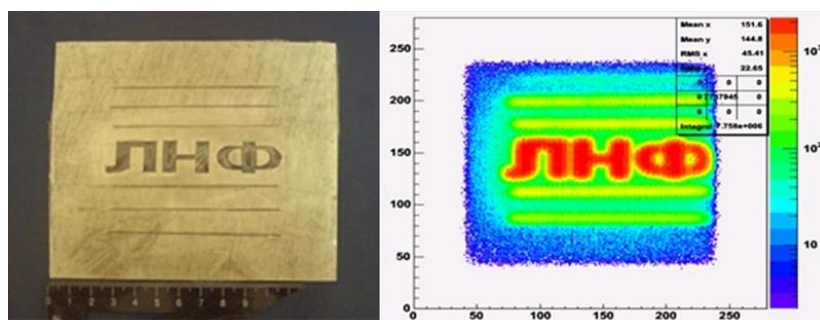
Разликата в площите на пиковете на отделни канали е причинена от нееднаквостите в ширината на каналите на маската (0.5 ± 0.2 mm). Наблюдаваните пикове имат Гаусово разпределение. При напрежение 2900 V максималното средноквадратично отклонение на разпределението е 2.9 канала. Разстоянието между пиковете е 10 mm, което съответства на около 19.3 канала. Така получената разделителна способност в центъра на детектора е оценена на около 3.7 mm. По аналогичен начин е определена и координатната разделителна способност по ос Y, която в центъра на детектора също е оценена на 3.7 mm.

Също така е оценена и диференциалната нехомогенност на детекторната ефективност при различни работни напрежения. В този случай мониторът е бил изведен от директния неутронен поток и е измерван спектърът на разсеяните неутрони от парафинов блок, поставен на пътя на потока неутрони. На фигура 2.6 са показани интегрални спектри, измерени по двете координатни оси при равномерна неутронна засветка на входния прозорец. Вижда се значителна модулация в ефективността, особено по оста Y, причините за които са описани в литературата [21]. Тази модулация се явява главна причина за пространствената нехомогенност на ефективността на монитора.



Фигура 2.6. Равномерна засветка на детектора в разсеян неутронен поток. Интегрален спектър по ос X – в ляво, интегрален спектър по ос Y – в дясно. Напрежение + 2850 V. Време на измерване 1 h. и 35 min..

За визуална оценка на работата на детектора, на фигура 2.10 е показана кадмиева маска с абривиатура на Лабораторията по неутронна физика в ОИЯИ и нейният образ, получен с помощта на детектора.



Фигура 2.10 Измерване на засветка с помощта на кадмиева маска «ЛНФ» Газова смес 50 mbar ^3He + 950 mbar CF_4 . Време на измерването 15 min.. Напрежение на анода + 3300 V. Градуировка на канал ~ 0.5 mm.

Съвременните източници на неутрони имат изисквания към контрола на неутронните потоци с интензитети до 10^8 n/(cm²·s). Поставеният на директния поток детектор е подложен на високи интензитети, които предизвикват претоварване на детектора с конвертиращ газ хелий. В такива случаи в качество на конвертор може да се използва N_2 , със сечение на взаимодействие около 1.9 barn.

Обобщение

Разработеният позиционно-чувствителен детектор, както беше споменато по-горе, е предназначен за измерване профила на неутронни потоци както на стационарни, така и на импулсни източници на неутрони. Основните характеристики на представения детектор са дадени в таблица 1.

Тип на детектора	Двумерен позиционно чувствителен детектор на топлинни неутрони (2D ПЧД) с ниска ефективност
Област на чувствителност	100x100 mm ²
Ефективност	10 ⁻² -10 ⁻⁶ (за неутрони с дължина на вълната 1 Å, в зависимост от газовите смеси).
Разделителна способност по координати	4x4 mm ²
Натоварване	до 100 kHz
Хомогенност на каналите	Не по-лоша от 20% (без сумиране) и 5% (със сумиране)
Отслабване на падащия поток	По-малко от 5%
Материал на корпуса	алуминий Д16Т
Входен прозорец	алуминий 1 mm
Работен газ	³ He или N ₂ + CF ₄ ,
Работно налягане	1 atm
Предусилватели: захранване полярност на вх. сигнал полярност на изх. сигнал Контакт	12V, 90 mA положителна или отрицателна, Z _{in} =50 Ω отрицателна, Z _{out} =50 Ω BNC
Високо напрежение	До + 3.5 kV
Контакти	MHV, BNC
Анод	Позлатена волфрамова жица d=10 μm, стъпка 2 mm
Катод	Позлатена молибденова жица d=50 μm, стъпка 1 mm

Таблица 1. Параметри на 2D ПЧД монитора на топлинни неутрони.

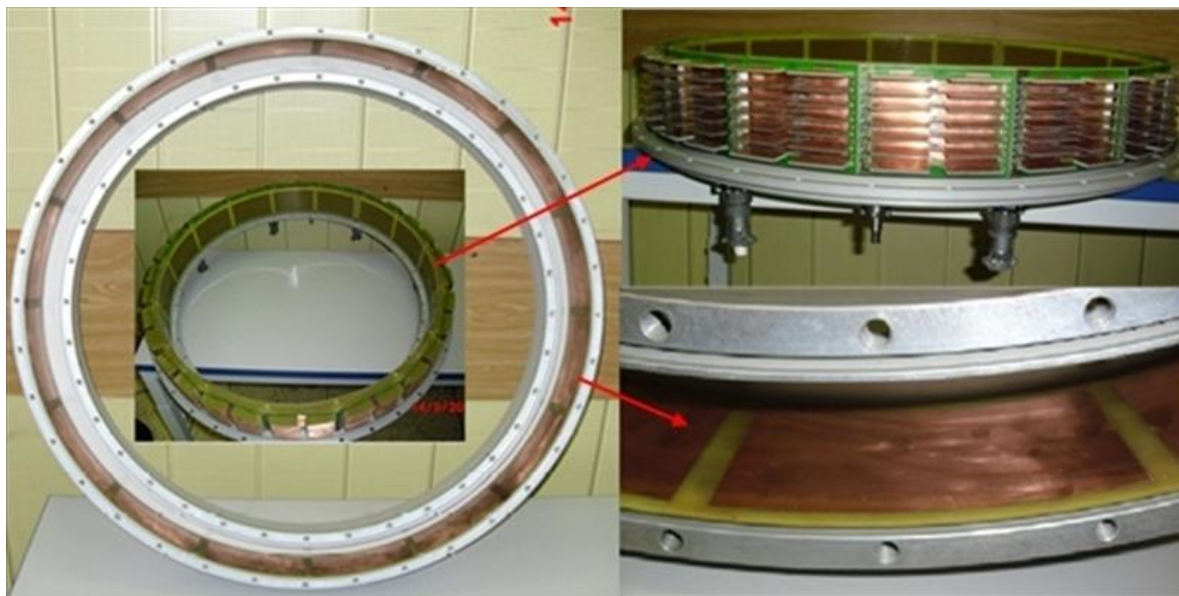
2.2 2π Секционен детектор на топлинни неутрони

Той е предназначен за изследване на взаимодействията на топлинни неутрони с твърдотелни обекти в аксиална геометрия. Комбинацията от многодетекторна система с ниско-фонові експериментални условия за регистрация на разсеяни неутрони позволява успешно да се провеждат експерименти с образци с малък обем ($V \sim 0,05 \div 3 \text{ mm}^3$). Детекторът е предназначен за детекторната система ДН-6 на канал № 6b на реактора ИБР-2М [19,24].

Описание и конструкция на детектора

Детекторът има пръстеновидна форма с вътрешен радиус 340 mm, външен радиус 380 mm и височина на цилиндъра 83 mm. Той е разделен на 16 еднакви сектора, всеки от

които по образуващата на цилиндричния обем е разделен на шест отделни броячи, разположени в общ газов обем (работна газова смес: 80% ^3He + 15% Ar + 5% CO_2 ; работно газово налягане в интервала от 2 atm. до 7 atm.). Формата на броячите с доста добро приближение може да се счита за паралелепипед с дължина 123 mm, височина 40 mm и ширина 12 mm (фигура 2.12).

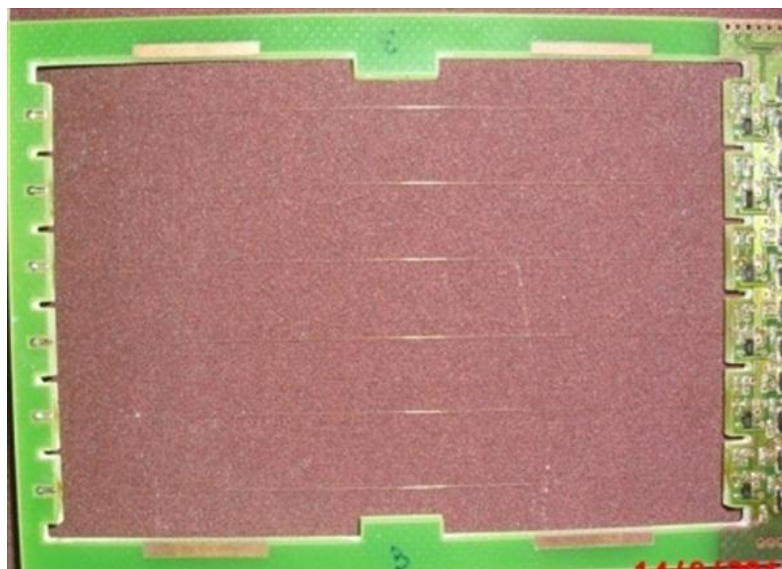


Фигура 2.12 2п Секционен детектор: Вътрешен вид (16 сектора (рамки) с по 6 анодни жици на всяка рамка, разположени между две независими катодни повърхности).

Във всеки сектор се намира рамка с 6 анодни електрода (жици от позлатен волфрам с диаметър 30 μm), показани на фигура 2.13. Корпусът и капакът на детектора са направени от дуралуминий марка АМГ, осигуряващ херметичност и механична здравина. Секциите и секторът са ограничени механично от стъклотекстолитови пластини (пръстени) с дебелина 5 x 1 mm (междинни) и 2 x 3 mm (крайни), играещи роля на катоди.

Сигналите от отделните секции (общо на брой 96 (16 x 6)) се свалят от анодните електроди, които са разположени централно във всяка отделна секция. Стъпката между анодните жици е 12 mm. Всеки анод е свързан със зарядочувствителен предусилвател (фигура 2.13). Предусилвателите са разположени вътре в газовия обем, в близост до анодните жици, което осигурява максимално разделяне по канали и намалява шума.

Сигналите от предусилвателите от всеки две секции постъпват на изходните многоконтактни херметични конектори, към които са включени 12 канални (общо осем на брой) линейни усилватели, оформени в отделни дуралуминиеви кутии, които се прикрепват непосредствено към конекторите (фигура 2.14).



Фигура 2.13. Рамка с 6 анодни електрода, всеки включен към предусилвател.



фигура 2.14. 2л Секционен детектор (16 x 6) на топлинни неутрони с монтирани 8 дванадесет канални усилватели-формирователи (1) (по един на всеки две рамки).

Сигналите от осемте групи усилватели се подават на 3 x 32 канални блок дискриминатори и впоследствие на събиращата електроника. Индивидуалното сваляне на информация от всяка секция осигурява гъвкавост при настройка на детектора.

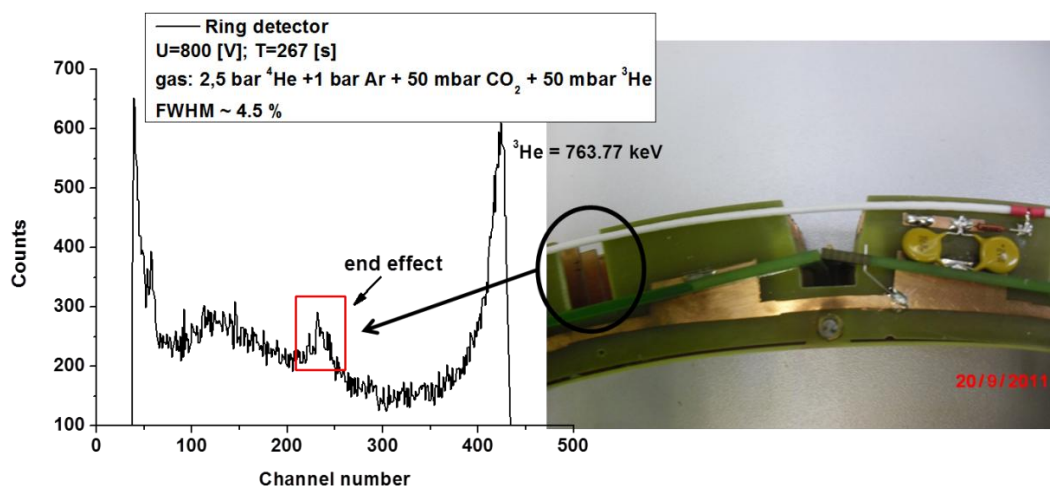
Основните характеристики на представения детектор са приведени в таблица 2.

№	Параметър	Значение
1.	Ширина на входния прозорец, mm	~70
2.	Количество анодни жици в секция	6
3.	Ъгъл на припокриване, градуси	360°
4.	Брой на секциите	16
5.	Брой на измерителните канали	96
6.	Ефективност, % ($\lambda=4\text{Å}$)	< 80%
7.	Вътрешен радиус, mm	340
8.	Външен радиус, mm	400
9.	Дебелина на входния прозорец, mm	~7
10.	Материал на корпуса	~ Al ₂ O ₃
11.	Дебелина на чувствителния обем, mm	~40

Таблица 2. Основни характеристики на 2π секционния детектор на топлинни неутрони.

Изпитания

За проверка на работоспособността на детектора и настройка на работните параметри, са проведени изпитания с помощта на неутронен източник ²⁵²Cf. Записани са амплитудни спектри поотделно от всеки един от 96-те анода. На фигура 2.16 е представен амплитуден спектър, записан с един от 96-те анода от 2π детектора.



Фигура 2.16. Амплитуден спектър, записан с един от всичките 96 анода от 2π детектора и краев ефект от централно разположения прорез на всички дискове от стъклотекстолит.

За пика на пълно поглъщане на ³He с енергия 763,77 keV е получена разделителна способност по енергии около 5%. На спектъра се наблюдава краев ефект, дължащ се на

централно разположения прорез (15 mm x 24 mm) на всичките дискове от стъклотекстолит (фигура 2.16).

Предназначенията на тези прорези са две:

1. Евентуална замяна на 16-те сектора с 32 с по-малки размери;
2. За фиксиране на анодните рамки.

Важно е да се отбележи, че тези предназначения в дадения случай се явяват конструкторска грешка, която, разбира се е поправима (чрез запояване на стъклотекстолитови двойно метализирани пластинки с размер на прорезите, което ще доведе до изравняване на полето).

На канал №12 на реактор ИБР-2М бяха проведени тестови измервания с два от 16-те сектори (сектори №11 и №12) и бяха получени 12 спектри по метода на време на прелитане от цилиндричен образец Al_2O_3 (диаметър 10 mm и височина 10 mm).

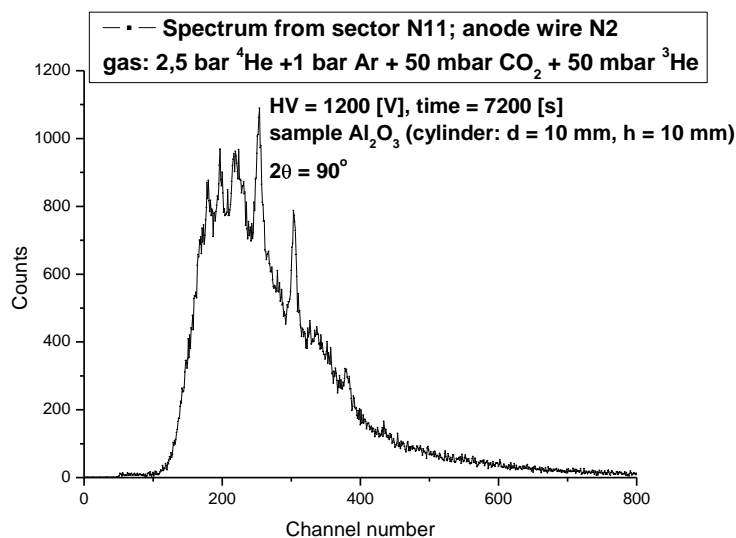
Измерванията бяха проведени при следните характеристики на измервателния тракт: ширина на временния канал 64 μs , брой на каналите 1024 и време на закъснение по отношение старта на реактора – 0.625 μs . Разстоянието между импулсите на реактора е фиксирано и е точно 200 μs . На фигура 2.18 е показана експерименталната установка на канал №12 на реактор ИБР-2М с прилежащата към него система за събиране на данни от детектора.



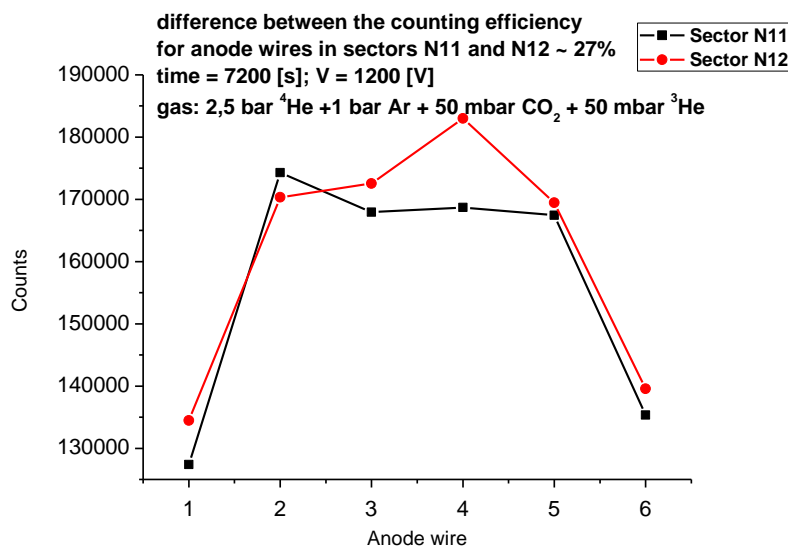
Фигура 2.18. Експериментална установка на канал №12 на реактор ИБР-2М. Монтиран детектор с прилежащата към него част от системата (един 32 канален блок дискриминатор) за събиране на данни.

На фигура 2.19 е показан спектър, получен със сектор №11, детектор №2 (анодна жица №2). Както беше споменато по-горе, изследваният образец е Al_2O_3 . Важно е да се отбележи, че не е ползвана защита на детектора, което съответно води до висока подложка (фон), също така количеството на 3He е 50 mbar, което е 60-пъти по-малко от реалното

работно запълване (поради високата му цена и ограниченото му количество) и съответно броячната ефективност е 60-пъти по-малка от реално необходимата. Що се отнася до броячната ефективност, на фигура 2.20 са показани резултатите от сектори №11 и №12. Вижда се, че крайните детектори в двата сектора броят значително по-малко, като разликата в броячната ефективност достига до 27%. Най-простото решение на този проблем е въвеждането на нормировъчни коефициенти за всеки брояч. Предполагаема причина за тези различия е и причината, довела и до краевия ефект, споменат по-отгоре. Тъй като на катодите се подава отрицателен потенциал, а корпусът е на земя, възможно е при събирането на заряда част от него да отива на корпуса през прорезите, които се намират на стъклотекстолитовите рамки (фигура 2.16).



Фигура 2.19. Спектър от сектор № 11 от образец Al_2O_3 (диаметър 10 mm и височина 10 mm).



Фигура 2.20. Броячна ефективност за сектори №11 и №12.

Обобщение

В представената под-глава е направено описание на конструкцията 2-π секционен детектор на топлинни неутрони за ДН-6 спектрометъра на реактор ИБР-2М. Принципът на действие на спектрометъра е основан на регистрацията на разсеяни топлинни неутрони от микрообразци. Представени са резултати, получени с помощта на източник ^{252}Cf . Също така са показани тестови резултати, получени на канал №12 на реактор ИБР-2М. Благодарение на тези резултати са открити някои недостатъци в конструкцията на детектора, които са лесно преодолими и не представляват съществен проблем. Важно да се отбележи, че получените резултати изцяло удовлетворяват нашите очаквания. В бъдеще предстои тестов пуск на детектора с всичките 16 секции на канал №12 на реактор ИБР-2М и следващ монтаж на канал № 6b.

Детекторът е направен в рамките на Протокол за сътрудничество №3912-4-09/11 от 27.02.2009 и научна тема (№ 04-4-1075-2009/2011 «Перспективни разработки и създаване на оборудване за ИБР-2М спектрометри») между Института по Ядрена Физика (г. Ржеж, Чехия) и Лабораторията по Неутронна Физика ОИЯИ, г.Дубна [18].

Глава 3

В тази глава е представен направеният от автора и неговите колеги прототип на Спектрометър на бързи неутрони на база протонен телескоп с електронна колимация на откатни протони, на който основно е посветен този дисертационен труд [5,6].

Детекторът представлява пропорционален брояч с нетривиална геометрия, чийто принцип на действие се основава на регистрацията и спектрометрията на бързи неутрони и може да бъде използван както в реакторната физика, така и в експерименталната неутронна физика. По-конкретно, принципът му на действие е основан на измерване на кинетичната енергия на еластично разсеяни на малки ъгли протони от (n,p) реакция в среда, съдържаща водород. Сравнително простата конструкция и използваната методика за обработка на получените резултати с помощта на специално разработен софтуер дават възможност за директно получаване на спектралните характеристики на неутронния поток. В таблица 3 са представени изискванията спрямо условията на извършените експерименти с неутронния спектрометър.

От гледна точка на конструкцията, първите детектори за регистрацията на неутрони с помощта на ядрени реакции и използване на „телескопичен принцип“ са създадени в началото на 70-те години [3,4]. От създаването си до днешни дни те са запазили геометрически основната си конструкция, която се състои от няколко части: анодна жица, цилиндрични катоди и колиматор. Представеният в тази работа прибор до известна степен

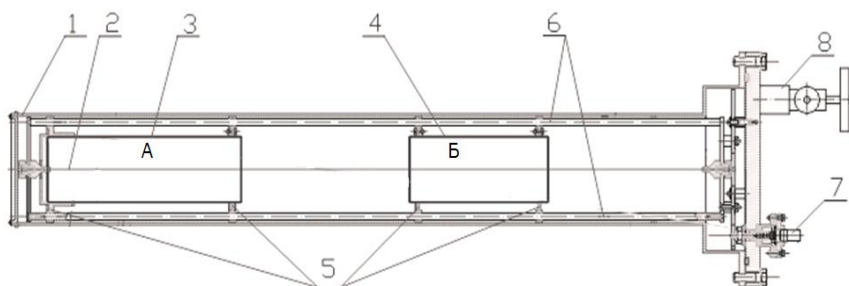
прилича на по-рано разработените пропорционални броячи с малки разлики в конструкцията и принципа на работа. Различията ще бъдат коментирани по-долу.

Характеристики	Технически изисквания
Диапазон на чувствителност по енергии на неутроните	150 keV ÷ 14 MeV
Ефективност в условие на тройни съвпадения (в зависимост от налягането и газовата смес в обема на детектора)	$10^{-4} \div 10^{-6}$
Разделителна способност по енергии (FWHM) по ^3He , (n,p) реакция	1,5 % ÷ 3%
Разделителна способност по енергии (FWHM) за бързи неутрони от мишена ^7Li , (p,n) реакция	7% ÷ 15%
Разделителна способност по енергии (FWHM) за бързи неутрони от газова мишена Деутерий (D,D) реакция	7% ÷ 15%

Таблица 3. Изисквания спрямо условията на извършените експерименти с неутронния спектрометър на основа протонен телескоп с електронна колимация на откатни протони.

Описание на прибора

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 фигура 3.1.



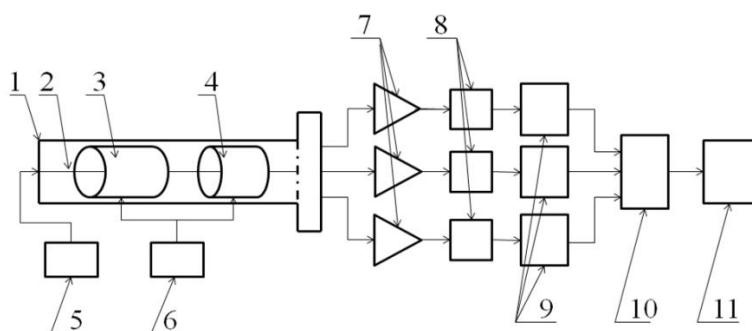
Фигура. 3.1. Общ вид на прибора: корпус (1), анодна жица (W+Au) (2), Катод А (3), Катод Б (4), тефлонови пръстени (5), метални пръчки (стойки) (6), сигнални изходи (7), вакуумен кран (8).

Корпусът (1) е изготвен от тънкостенна тръба от неръждаема стомана с вътрешен диаметър 96 mm и дължина 625 mm. По дължина 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 (Катод А) (3) във вид на тръба с дължина 175 mm, на разстояние 152.5 mm от нейния край е монтиран втори катод (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 тефлонови

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).

На фигура 3.2 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 аналогово-цифрови преобразователи (АЦП) (9), които чрез контролер КАМАК (10) по USB интерфейс са свързани към персонален компютър (ПК) (11).



Фигура 3.2. Блок-схема на спектрометъра: корпус (1), анод (2), катод А (3), катод Б (4), изравняващи източници на напрежение (6), зарядочувствителни предусилватели (7), спектрометрични усилватели (8), аналогово-цифрови преобразователи (АЦП) (9), контролер КАМАК (10), персонален компютър (ПК) (11).

АЦП, контролерът 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 (програма “Lada”).

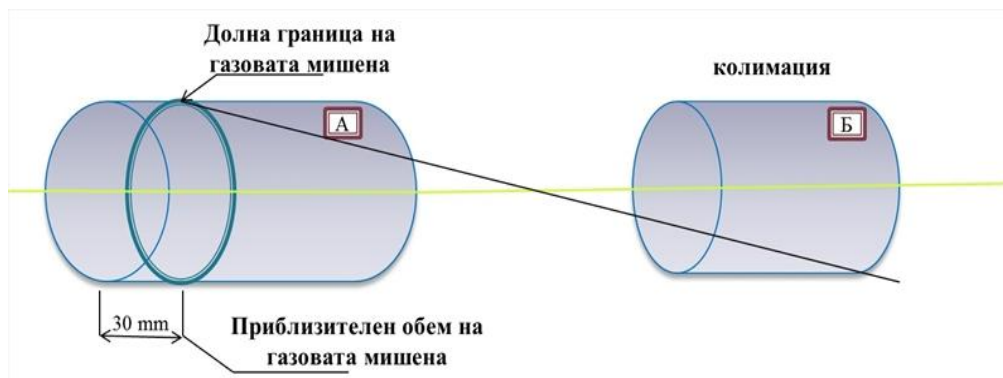
Принцип на работа

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 (катоди) 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).

На фигура 3.3 е представен визуално работният принцип на двата катода.



Фигура 3.3 Катоди А и Б - работен принцип.

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 едновременно 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. Определяйки дебелината и разположението на газовата мишена, а също така променяйки телесния ъгъл, в пределите на който работи телескопът, може да се оптимизират както ефективността, така и разделителната способност по енергии на прибора.

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 [12].

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.

За калибровка по енергии, а също така и за измерване на собствената разделителна способност на детектора по енергии, в състава на газовата смес се добавя малко количество ^3He (около 1% от общата смес).

Отличията на представения спектрометър спрямо други подобни разработки [2-4] се състоят в това, че:

- в качество 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 в качество на колиматор на откатни протони (при условие на съвпадение на сигналите с двете тръби). Изборът на минимален ъгъл на колимация се осъществява след обработка на информацията в електронната схема.

Програмно осигуряване

В настоящата дисертация се използват два програмни продукта, с помощта на които се правят пресмятания, анализ и симулации. Това са програма **“SRIM”** (*The Stopping and Range of Ions in Matter*) [12], с която определяме йонизационните загуби в газови смеси с помощта на пакета **“Спиране на йони и обсег в мишени”**, както и програма “Lada”, разработена за нашите нужди и използвана за спектрометрия и анализ на получените спектри. Тези програми ще бъдат разгледани накратко.

Програма “SRIM”

SRIM е съвкупност от софтуерни пакети, които изчисляват много от характеристиките при транспорта на йони във веществото. Типичните приложения на програмата са за:

* **Спиране на йони и обсег в мишени**: В SRIM се пресмятат повечето аспекти на загубата на енергия на йоните във веществото. Също така програмата включва бързи изчисления, които показват таблици на спиращата способност, обхвата и разпределението на разсейването за йони с всякаква енергия във всякакви елементарни мишени. По-сложните изчисления съдържат мишени със сложни конфигурации и много слоеве (нашите нужди от тази програма се ограничават до използването на този пакет).

Други възможни приложения са:

* **Внасяне на йони**

* **Разпрашване**

* **Йонно предаване**

* **Терапия с йонен сноп**

Програма "Lada"

Програмата "Lada" е написана за оперативен контрол на набор от физични данни, с възможност за запис на носител по време на експерименти. Тя позволява да се визуализират четири едномерни енергийни и времеви спектри и тяхната подробна информация. Също така се използва и за настройка на апаратурата. Когато се работи в "off-line" режим, има възможност за построяване на интегрални спектри по много-параметрични критерии за запазване на първоначалните (първични) данни.

В "on-line" режим данните непрекъснато се подават в паметта на персоналния компютър в "list mode" и се приемат от програмата по един от USB каналите.

В "off-line" режим може да се подготвят интегрални спектри от двоични файлове към първоначалните данни или да се видят стари записи. При работа с двоични файлове има възможност за сортиране на събития, свързани помежду си с определени критерии.

Моделиране с помощта на метода Монте-Карло и пресмятане ефективността на прототипа

За изследване на характеристиките на протонния телескоп е направена симулация с помощта на метода Монте-Карло.

Бързите неутрони се разсейват във водородсъдържаща газова мишена (подобен анализ е представен в работа [13]) и 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 електрическите силови линии на полето в обема на детектора и, съответно, на коефициента на газово усилване в целия обем на прибора). Предполага се, че потокът неутрони, падащи върху телескопа е ламинарен, паралелен на оста на детектора z . Ако допуснем, че се е появил откатен протон в точка с координати z_0 и 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. 3.6.), то тогава протонът пресича границата на цилиндъра на разстояние:

$$r_1 = -r \cos \varphi + \sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + R_c^2 - r^2} \quad (3.1)$$

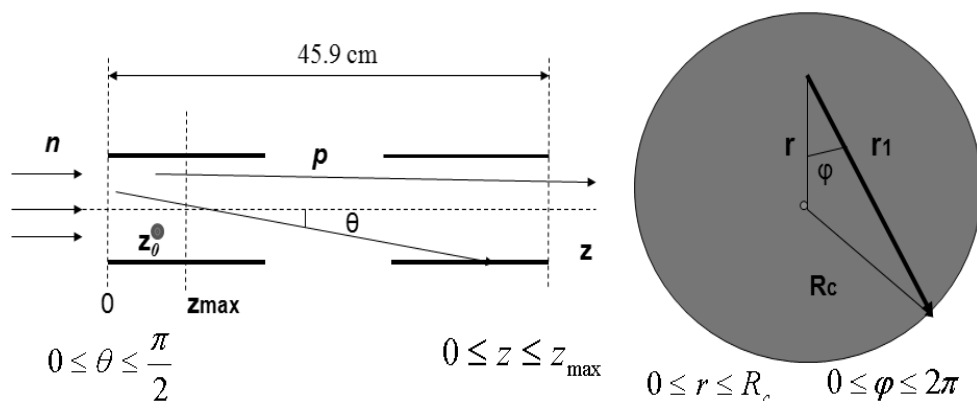
Разстоянието, което преминава един протон в цилиндъра е равно на:

$$l_p = \frac{r_1}{\sin \theta} \quad (3.2)$$

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

$$z_1 = z_0 + l_p \cdot \cos \theta \quad (3.3)$$

Координатата z_1 не трябва да превишава максималната дължина на брояча.



Фигура 3.6 Пресмятане на спектъра на откатни протони в цилиндричен брояч.

Програмата моделира траекторията на протони в зависимост от ъгъла на излитане θ и φ по следния начин: Разиграва се чрез случайни числа началото на следата с координати z и разстояние r от оста на симетрия на брояча. След това се разиграват ъглите θ и φ и се пресмята дължината на следата до точката на пресичане с тръбата. Ъглите и първоначалните координати варират в следните граници: $(0 \leq r \leq R_c; 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq z_{\max})$.

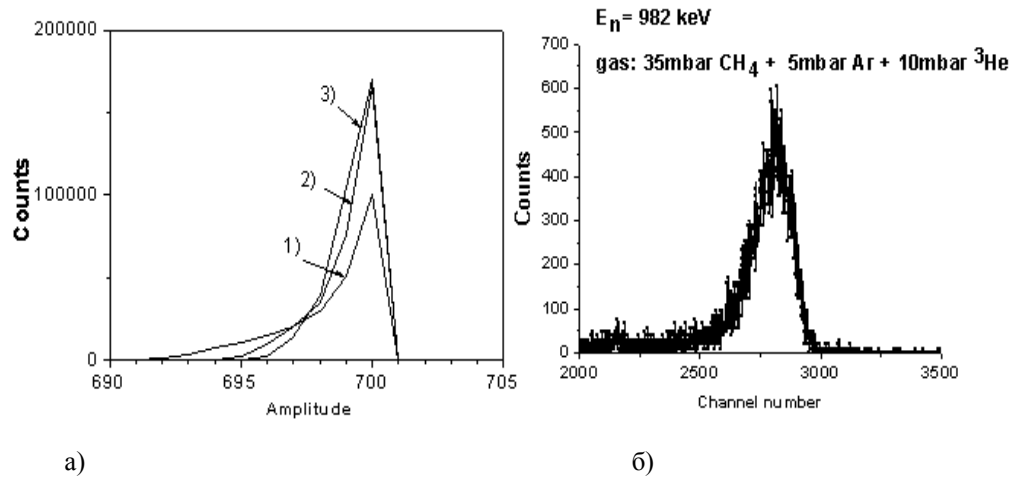
За оценка на телесния ъгъл се избират само тези събития, при които протоните са преминали напълно втората тръба. По такъв начин се отбират събития, съответстващи на протонните траектории в малък пространствен ъгъл по оста на симетрия на детектора, което позволява да се определи енергията на налитания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

Изчисленията са извършени за моноенергийни неутрони с енергия 1 MeV, дължина на следата 70 cm, максимално разстояние от началото на 1-вата тръба до края на 2-рата $L = 45.9$ 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 (виж фиг. 3.7 а)). За сравнение на фиг. 3.7 б) е показан измерен спектър. Условиата на измерване са описани по-долу.



Фигура 3.7 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 (3.4):

$$\varepsilon = n_H \sigma_{np} \frac{\Delta\Omega}{2\pi} \quad (3.4)$$

Формула (3.7) е вярна за малка газова концентрация и отчита, че протоните летят напред.

n_H - брой водородни ядра на cm^2 в детектора, σ_{np} - сечение за разсейване.

Използван е газ CH_4 под налягане 35 mbar.

$$n_H = \frac{N_H}{S} = 2.1 \cdot 10^{19} cm^{-2} \quad (3.5)$$

$$\frac{\Delta\Omega}{2\pi} \approx 0.02 \quad (3.6)$$

С помощта на резултатите от моделирането се получава, че ефективността на телескопа при налягане 35 mbar е $\varepsilon(1MeV) \approx 4 \cdot 10^{-6}$. Ефективността на телескопа линейно зависи от налягането на работния газ.

Експериментални резултати

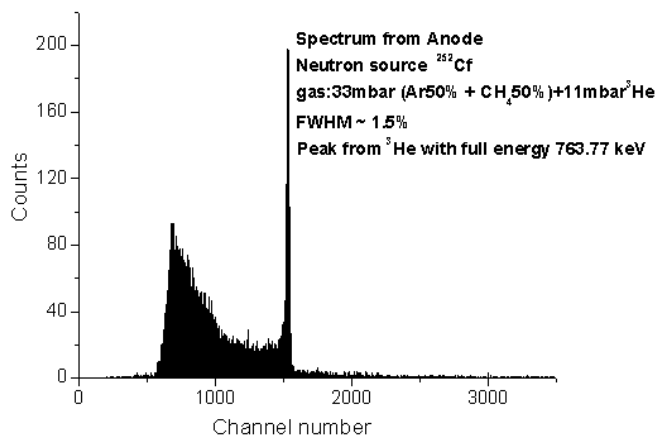
За проверка на работоспособността на детектора с помощта на източник ^{252}Cf бяха записани спектри с катод А, катод Б и анод. Временно беше прикрепен α -източник ^{241}Am ($E_\alpha = 5.4 \text{ MeV}$), като евентуален вариант за калибровка по този източник. След като бяха проведени измервания, които удовлетвориха нашите очаквания, той беше свален.

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, е измерена вътрешната разделителна способност по енергии на детектора, която е оценена на 1.5% (FWHM). Получените резултати са представени на фигура 3.10.

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

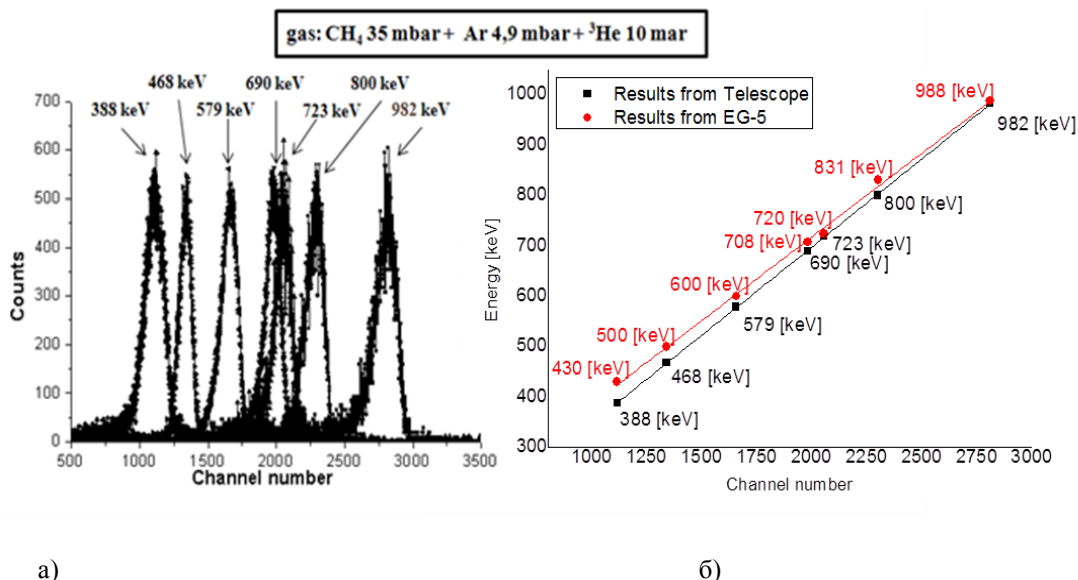


Фигура 3.10. Спектър от реакция $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763.77 \text{ keV}$ с помощта на стандартен източник на неутрони ^{252}Cf и полиетиленов блок за забавител.

На електростатичния генератор ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ бяха проведени серия измервания на моноенергийни потоци неутрони, които са получени в резултат на реакции $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ и $\text{D}(d,n)^3\text{He}$.

За всеки измерваем енергиен интервал са направени предварителни пресмятания с програма SRIM за пробезите на протоните в обема на детектора, с помощта на които впоследствие е определено работното налягане на газовата смес в самия детектор.

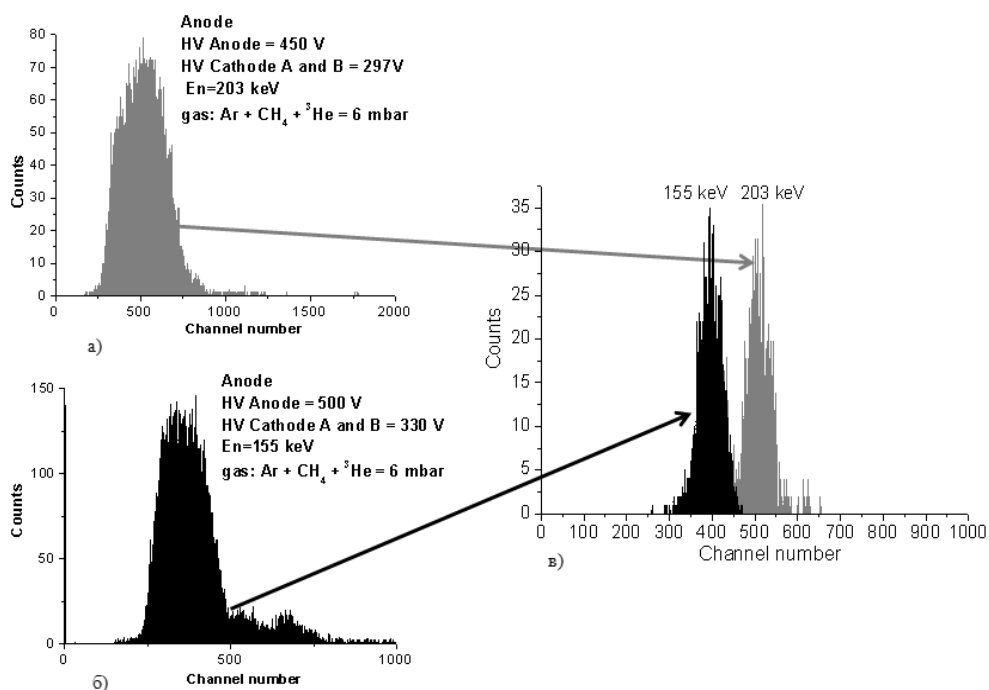
На фигура 3.13 а) са показани спектри от моноенергийни неутрони с енергии в интервала от 388 keV до 982 keV, получени от тънка литиева мишена с неизвестна дебелина, поставена на пътя на поток протони (реакция ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$). От проведените измервания с тази мишена беше направена приблизителна оценка за нейната дебелина, която съответства на около 30 keV.



Фигура 3.13. Резултат от ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ. а) Калибровка по енергии в интервала 388 keV до 982 keV (спектри след програмна сортировка по катоди А и Б (Lada)); б) графика на зависимостта канал/енергия от получените резултати при калибровката с детектора и представената информация за енергиите от ЕГ-5.

Тези енергетични спектри се явяват своеобразна калибровка на спектрометъра по енергии, а построената зависимост канал/енергия има линеен вид (виж фигура 3.13 б)). Използваната газова смес за този енергиен интервал е CH₄ 35 mbar + Ar 4,9 mbar + ³He 10 mbar. На фигура 3.13 б) също е направено сравнение между представената информация за енергиите от ЕГ-5 и получените резултати при калибровката с детектора. Различията при ниските енергии се дължат на нестабилност при работата на ЕГ-5 (невъзможност за поддържане на постоянни честоти) и загуби в обема на мишената.

С мишената от литий са проведени измервания при ниски налягания на газова смес в детектора (6 mbar CH₄ + Ar + ³He), с помощта на които е определена долната граница на измерваните енергии за този прибор. Резултатите от две измервания при енергии на неутроните 155 keV и 203 keV са показани на фигура 3.15 а), б). На фигура 3.15 в) са показани спектрите за тези две енергии след програмна сортировка по катоди А и Б (програма Lada).

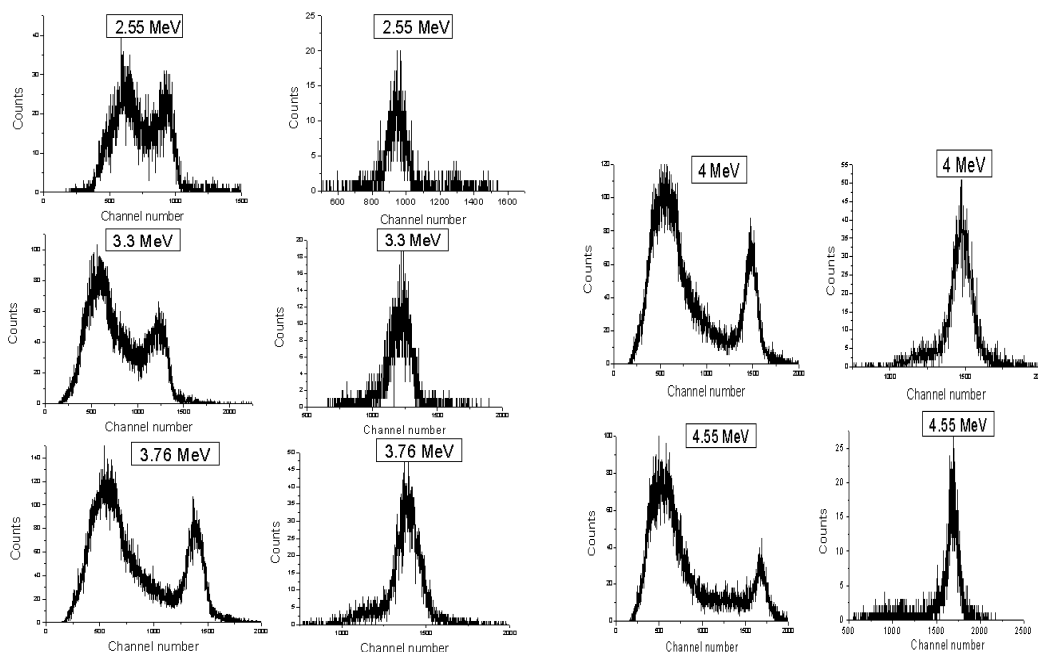


Фигура 3.15. Резултат от ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ: а) Спектър от неутрони с енергия 203 keV; б) Спектър от неутрони с енергия 155 keV; в) Спектри от неутрони с енергия 155 keV и 203 keV, след програмна сортировка с катоди А и Б.

Разделителната способност по енергии за бързи неутрони от мишена ${}^7\text{Li}$ на ЕГ-5 варира в границите от 7% до 12% за всички проведени измервания и от 1% до 3% по ${}^3\text{He}$. 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 закъснение 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 по този начин така, че разделителната способност да се изравни със собствената разделителна способност на телескопа.

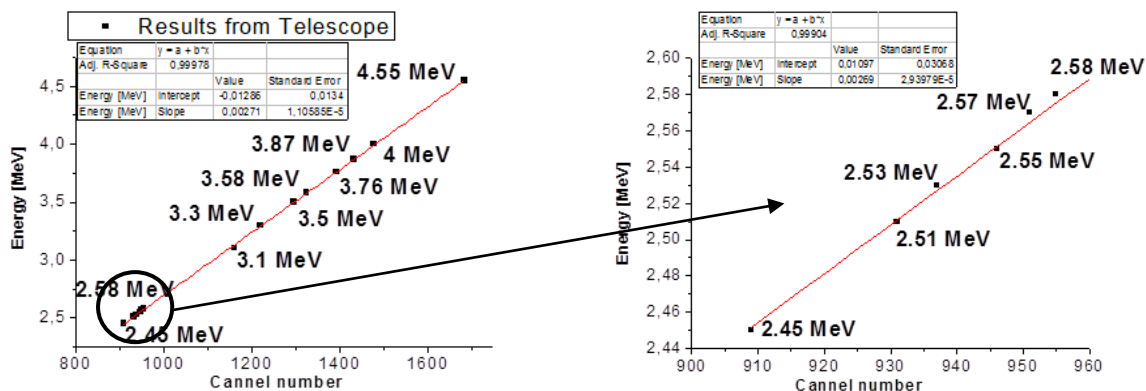
Поради техническа невъзможност да бъде измерен спектър на неутрони с енергия по-голяма от 1 MeV с помощта на тънка литиева мишена, бяха направени експерименти с помощта на газова деутериева мишена (реакция $\text{D}(\text{d},\text{n}){}^3\text{He}$), с която бяха измерени моноенергийни неутрони с енергии в интервала от 2.45 MeV до 4.55 MeV (14 енергийни точки). Работната газова смес, с която е запълнен детекторът е CH_4 900 mbar + ${}^3\text{He}$ 5 mbar.

На фигура 3.16 са представени част от измерените неутронни спектри преди и след сортировка по катода А и Б с помощта на програма Lada. Разделителната способност по енергии варира в границите от 8% до 12%.



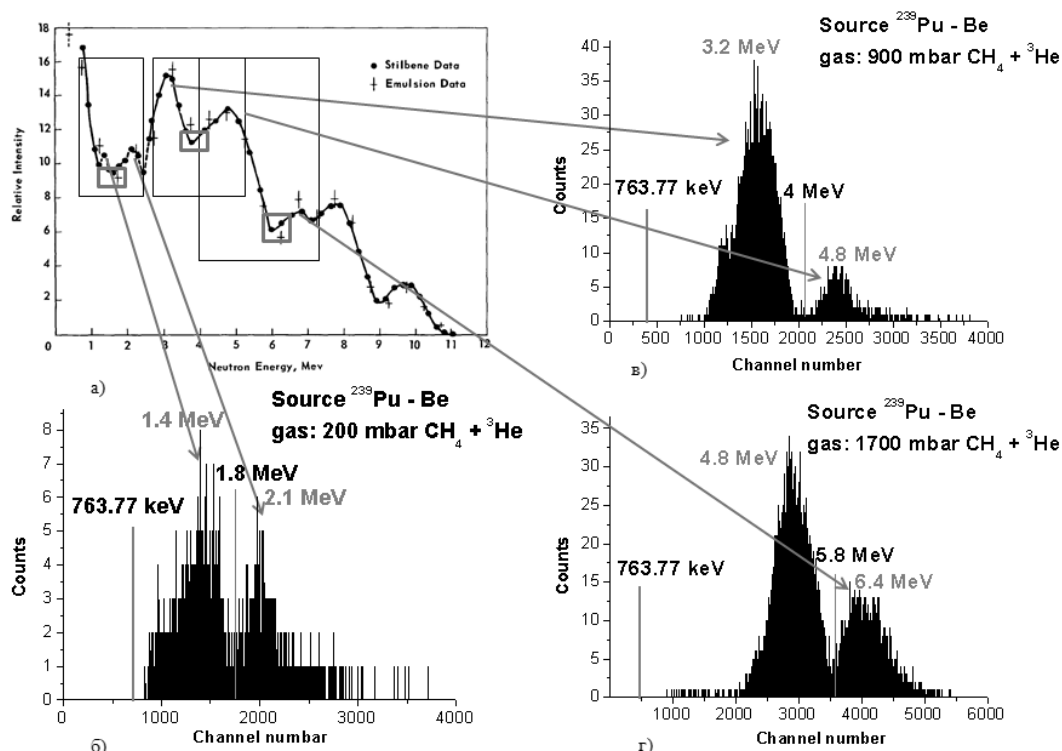
Фигура 3.16. Резултат от ЕГ-5 ЛНФ ОИЯИ. Спектри на бързи неутрони от деутериева газова мишена (реакция $D(d,n)^3He$) в интервала от 2.55 MeV до 4.55 MeV (спектри преди и след програмна сортировка по катода А и Б)). Работната газова смес е CH_4 900 mbar + 3He 5 mbar.

На фигура 3.17 е показана зависимостта канал/енергия от получените резултати при калибровката по енергии за измерените четиринадесет точки, която има линеен вид. Стандартното отклонение на коефициентите на калибровката за измерванията не превишава 3%.



Фиг.3.17. Зависимост канал/енергия от получените резултати при калибровката по енергия с газова деутериева мишена за неутрони с енергия в интервала от 2.45 MeV до 4.55 MeV.

Бяха проведени измервания с източник $^{239}\text{Pu-Be}$, който има известен енергиен спектър [14]. От измерванията с този източник е възстановена част от неговия енергиен спектър (фигура 3.21).



Фигура 3.21. Резултат от източник $^{239}\text{Pu-Be}$: а) Данни от източник $^{239}\text{Pu-Be}$ получени със стилбен и емулсии [14]; 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.

На фигура 3.21 а) са показани данни под формата на спектър от източник $^{239}\text{Pu-Be}$, получени със стилбен и емулсии [14]. На фигура 3.21 б), в) и г) са показани резултати за три енергийни интервала (1.4 MeV ÷ 2.1 MeV; 3.2 MeV ÷ 4.8 MeV; 4.8 MeV ÷ 6.4 MeV) измерени с протонния телескоп. Маркерът в началото на всеки спектър отговаря на пълната енергия от реакция $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763.77\text{ keV}$, по която се извършва калибровката. Проведените измервания с източник $^{239}\text{Pu-Be}$ показват един съществен недостатък на този прибор. Това е малкият енергиен интервал $E_{\text{max}} / E_{\text{min}} = 2$, в който работи този неутронен спектрометър при дадено газово напълване.

Кратко обобщение на представените резултати

В тази глава 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 действие на този прибор, 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. Беше установено, че при увеличаване на размерите 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 1.6×10^{-6} . Разбира се, трябва да се има 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 електронната колимация, геометрията на детектора и др., което до някаква степен затруднява точното ѝ определяне. Представената формула (3.4) дава приблизителна оценка за ефективността.

За проверка на работоспособността на детектора са регистрирани спектри с катод А, катод Б и анод. 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 енергийна калибровка. Извършена е настройка на протонния телескоп с помощта на компенсационно напрежение, подадено към катоди А и Б, с което беше изравнено полето в обема на телескопа и коефициентът на газово усилване.

Беше измерена собствената разделителна способност по енергии на детектора, която е оценена на $\sim 1.5\%$ (FWHM).

От проведените измервания на ЕГ-5 с моноенергийни неутрони, които бяха получени в резултат на реакция $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$, е направена калибровка по енергии в интервала 388 keV - 982 keV. Различията при сравнението на резултатите от ЕГ-5 и резултатите получени с телескопа се дължат на нестабилност при работата на ЕГ-5 и загуби в обема на мишената. Най-ниската енергия, измерена с този неутронен спектрометър е 155 keV, която се явява и долна граница за детектора. Разделителната способност по енергии FWHM за бързи неутрони в интервала 155 keV ÷ 1 MeV варира в границите от 7% до 15%.

От проведените измервания на ЕГ-5 с моноенергийни неутрони, които бяха получени в резултат на реакция $\text{D}(d,n)^3\text{He}$, е направена калибровка по енергии в интервала 2.45 MeV до 4.55 MeV. Разделителната способност по енергии FWHM за бързи неутрони за този интервал варира в границите от 8% до 12%.

С помощта на източника $^{239}\text{Pu-Be}$ бяха измерени спектрите в три енергийни области и е достигната горна граница по енергии от 6.4 MeV.

Съществен недостатък на този прототип е ограничения енергиен интервал, в който може да работи приборът при дадено налягане на газовата смес (за представения прибор енергийният интервал $E_{\text{max}} / E_{\text{min}} = 2$), поради което се налага той да бъде презапълван всеки път, за всеки конкретно измерван енергиен интервал. Разбира се, всичко това се прави след нужните пресмятания с програма SRIM [12].

Възможно решение на проблема с малкия енергиен диапазон е промяна на дължината, диаметъра и разстоянието между двата цилиндрични катода, както и на общата дължина на корпуса на детектора. Важно е да се отбележи, че описаният прибор е подходящ основно за работа с квазимоноенергийни неутрони потоци.

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

Трябва да се спомене, че на основа на проведените експерименти и получените резултати е проявен интерес от Националния Институт за Изследване на Плазмата (National Fusion Research Institute (NFRI)) Южна Корея [15-17].

Заключение

Основните научни приноси в настоящия дисертационен труд се свеждат до следното:

1. Създадени са два типа пропорционални детектори, в изготвянето и характеризирането на които авторът на дисертацията има активно участие. Това са:

1.1 Двумерен позиционно чувствителен детектор на топлинни неутрони (2D ПЧД). [31,33,47], предназначен за измерване профила на неутронни потоци в реално време както на стационарни, така и на импулсни източници на неутрони.

Разработеният прибор е компактен, което позволява лесно обслужване и маневреност при работа. Той намира широко приложение на реактора ИБР-2М в ОИЯИ и може да се използва за измервания с неутронни източници с много високи неутронни потоци, включително и за източници следващо поколение.

1.2. 2π секционен детектор на топлинни неутрони, предназначен за детекторната система ДН-6 на канал № 6b на реактора ИБР-2М [24].

Разработеният детектор има следните важни преимущества пред други подобни детекторни системи:

- Възможност да измерва образци с малък обем ($V \sim 0,05 \div 3 \text{ mm}^3$) поради своята висока ефективност;
- Практически всички 96 единични детектори имат еднакви работни характеристики, тъй като те се намират в общ газов обем, което подобрява работните условия и получените резултати;
- Ефектът на вторично разсеяните неутрони в детектора е по-слабо изразен поради компактността на детекторната конструкция.

2. Създаден е прототип на Спектрометър на бързи неутрони на база протонен телескоп с електронна колимация на откатни протони [5,6] и нова методика за обработка на сигналите, която позволява директно получаване на спектралните характеристики на неутронния поток по време на самото измерване. Методиката е проверена чрез измерването както на моноенергетични, така и на сложни спектри на различни неутронни източници ($^{239}\text{Pu-Be}$, ^{252}Cf). Благодарение на ниската чувствителност към гама лъчение и добрата разделителна способност по енергии, детекторът може да работи на места, където други детектори не биха могли да се справят. Това са места с висок гама фон, такива като инсталациите за термоядрен синтез.

Приложение

Основните части на дисертацията са публикувани в патент на изобретение, различни журнали, както и под формата на доклади на конференции.

• Патент за изобретение

На 26.10.2011 г., е получен положителен отговор на подадените документи за патент на "Нейтронен спектрометър на база протонен телескоп" от Федералната служба по интелектуална собственост, патенти и търговски марки "РОСПАТЕНТ", Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности» [45].

Номер на решение за даване на патент за изобретение № 2010135091/28(049869) - НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ ПРОТОННОГО ТЕЛЕСКОПА - Ц. Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, В.М. Милков

• Публикации

[1]. Ц.Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, В.М.Милков, В.Н. Швецов, С.А. Кутузов, С.Б.Борзаков, П.В. Седышев, „Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа с электронной коллимацией протонов отдачи”, Препринт P13-2010-124, ОИЯИ, 2010.

[2]. ВАСИЛ МИЛКОВ^{1,2}, ЦВЕТАН ПАНТЕЛЕЕВ², АНДРЕЙ БОГДЗЕЛ², ВАЛЕРИЙ ШВЕЦОВ², СЕРГЕЙ КУТУЗОВ², ПАВЕЛ СЕДЫШЕВ², СЕРГЕЙ БОРЗАКОВ², „СПЕКТРОМЕТЪР НА БЪРЗИ НЕУТРОНИ НА БАЗА ПРОТОНЕН ТЕЛЕСКОП С ЕЛЕКТРОННА КОЛИМАЦИЯ НА ОТКАТНИ ПРОТОНИ”, Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Physique, v. 104, 20-34, 2011

[3]. В. М. Милков^{1,2}, Ц.Ц. Пантелеев¹, А.А. Богдзель¹, В.Н. Швецов¹, С.А. Кутузов¹, С.Б. Борзаков¹, П.В. Седышев¹, "Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа с электронной коллимацией протонов отдачи", Письма в ЭЧАЯ, вып. 5, 2012 (приета за печат).

[4]. ВАСИЛ МИЛКОВ^{1,2}, ЦВЕТАН ПАНТЕЛЕЕВ², АНДРЕЙ БОГДЗЕЛ², АЛЕКСАНДР БЕЛУШКИН², СЕРГЕЙ КУЛИКОВ², ВАЛЕРИЙ ЖУРАВЛЕВ², ВАЛЕНТИН ПРИХОДЬКО², "МНОГОСЕКЦИОНЕН 2- π ДЕТЕКТОР НА ТОПЛИННИ НЕУТРОНИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИФРАКЦИЯТА НА МИКРООБРАЗЦИ В АКСИАЛНА ГЕОМЕТРИЯ", Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Physique,.

• Публикувани резюмета на конференции

[1] Bogdzel A.A., Milkov V.M., Panteleev Ts.Ts. "Measurements of the fast neutron spectra by telescope of recoil protons.", 19th INTERNATIONAL SEMINAR on Interaction of Neutrons with Nuclei:

"Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics" Dubna, Russia, May Dubna, Russia, May 25-28, 2011

• Представени резултати на международни конференции лично от дисертанта

[1].В.М.Милков, Ц.Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, "Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа с электронной коллимацией протонов отдачи.", „XIV научная конференция «ОМУС 2010»". 1 по 6 февраля 2010 г., Дубна, ОИЯИ.

[2]. V.M. Milkov, Ts.Ts. Pantelev, A.A. Bogdzel, S.A.Kutuzov, S.B.Borzakov, P.V. Sedyshev, "A neutron spectrometer on the basis of a proton telescope with electronic collimation of recoil protons.", 18th INTERNATIONAL SEMINAR on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics" Dubna, Russia, May 26-29, 2010

[3]. В.М.Милков, Ц.Ц.Пантелеев, А.А.Богдзель, В.Н.Швецов, С.А. Кутузов, С.Б.Борзаков, П.В. Седышев, "Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа с электронной коллимацией протонов отдачи.", РНИКС-2010, XXI СОВЕЩАНИЕ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ИССЛЕДОВАНИЯХ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, 16 – 19 ноября 2010 г., Москва, Российский научный центр «Курчатовский институт».

[4]. В. М. Милков, Ц. Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, В.Н. Швецов, С.А. Кутузов, С.Б.Борзаков, П.В. Седышев, "Спектрометр быстрых нейтронов на базе протонов отдачи", „XV научная конференция «ОМУС 2011»”. 14 по 19 февраля 2011г. Дубна, ОИЯИ

[5]. Bogdzel A.A., Milkov V.M., Pantelev Ts.Ts. "Measurements of the fast neutron spectra by telescope of recoil protons.", 19th INTERNATIONAL SEMINAR on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics" Dubna, Russia, May Dubna, Russia, May 25-28, 2011

[6]. V.M. Milkov, Ts. Ts. Pantelev, A. A. Bogdzel, A.V. Belushkin, S.A. Kulikov, V.V.Zhuravlev, V.I.Prikhodko, "Multisection ring detector of thermal neutrons for diffraction studies on microsamples in axial geometry", "35th meeting of the PAC for Condensed Matter Physics", Dubna, Russia, January 16-17, 2012

[7]. Васил Милков, Цветан Пантелеев, Андрей Богдзел, Александр Белушкин, Сергей Куликов, Валерий Журавлев, Валентин Приходько, "Многосекционный кольцевой детектор тепловых нейтронов для исследований дифракции на микрообразцах в аксиальной геометрии" „XVI научная конференция «ОМУС 2012»”. 06 по 10 февраля 2012г. Дубна, ОИЯИ.

- **Участия на конкурсах за млади специалисти**

[1]. В.М.Милков, Ц.Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, "Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа с электронной коллимацией протонов отдачи." , „XIV научная конференция «ОМУС 2010»”. 1 по 6 февраля 2010 г., Дубна, ОИЯИ (допускане до втори кръг от конкурса).

[2] В. М. Милков, Ц. Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, В.Н. Швецов, С.А. Кутузов, С.Б.Борзаков, П.В. Седышев, "Спектрометр быстрых нейтронов на базе протонов отдачи", „XV научная конференция «ОМУС 2011»”. 14 по 19 февраля 2011г. Дубна, ОИЯИ (второ място).

- **Отзиви от представените резултати на конкурса млади специалисти**

✓ „XV научная конференция «ОМУС 2011»”. 14 по 19 февраля 2011г. Дубна, ОИЯИ (второ място).

✓ “НАУКА СОДРУЖЕСТВО ПРОГРЕСС” ЕЖЕНЕДЕЛЬНИК ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 9(4049) стр. 4-6, Пятница, 4 марта 2011 года

Литература:

- [1]. Keisuke ASAI^{1,*}; Norihiro NAOI¹, Tetsuo IGUCHI¹, Kenichi WATANABE¹, Jun KAWARABAYASHI¹ and Takeo NISHITANI², Neutron Spectrometer for DD/DT Burning Ratio Measurement in Fusion Experimental Reactor, Nuclear Science and Technology, Vol. 43, No. 4, p. 320–324 (2006).
- [2]. H Borst, Proportional counter telescopes for fast neutron spectrometry, Nucl. Instr. and Meth. 169 (1980) 69-75.
- [3]. M. Mizuho, A gas recoil fast neutron spectrometer, Nucl. Instr. and Meth. 75 (1969) 85-92.
- [4]. M. Mizuho and T. Yamanaka, A fast neutron spectrometer with fast coincidence technique in proportional counters, Nucl. Instr. and Meth. 91 (1971) 57-60.
- [5]. Ц.Ц. Пантелеев, А.А. Богдзель, В.М.Милков, В.Н. Швецов, С.А. Кутузов, С.Б.Борзаков, П.В. Седышев, „Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа с электронной коллимацией протонов отдачи”, P13-2010-124, ОИЯИ, 2010.
- [6]. ВАСИЛ МИЛКОВ^{1,2}, ЦВЕТАН ПАНТЕЛЕЕВ², АНДРЕЙ БОГДЗЕЛЬ², ВАЛЕРИЙ ШВЕЦОВ², СЕРГЕЙ КУТУЗОВ², ПАВЕЛ СЕДЫШЕВ², СЕРГЕЙ БОРЗАКОВ², „СПЕКТРОМЕТЪР НА БЪРЗИ НЕУТРОНИ НА БАЗА ПРОТОНЕН ТЕЛЕСКОП С ЕЛЕКТРОННА КОЛИМАЦИЯ НА ОТКАТНИ ПРОТОНИ”, Annuaire de l'Universite de Sofia “St. Kliment Ohridski”, Faculte de Physique, v. 104, 20-34, 2011.
- [7]. А.В. Белушкин, А.А. Богдзель, В.В. Журавлев, Ц.Ц. Пантелеев, Ли Ен Че, А.Н. Черников, А.В. Чураков, В.Н. Швецов, Двухкоординатный ъниторный позиционн-чувствительный детектор тепловых нейтронов, Журнал технической физики, 2008, том 78, вып. 1
- [8]. A.V.Belushkin, et al., One-dimensional Position-sensitive Detector of Thermal Neutrons, PTE 2007,7,pp.23-29.
- [9]. A.V. Belushkin, et al., Two-dimensional Monitor Position-sensitive Detector of Thermal Neutrons. Preprint JINR P-13-2006-124, Dubna, 2006, Submitted to "Journal of Technical Physics" (in Russian).
- [10]. F. Levchanovskiy et al., A PCI DAQ Board for MWPC Detectors with Delay Line Position Readout. Nucl. Instr. and Meth. A529(2004), pp. 413-416.
- [11]. F.V. Levchanovskiy et al., Software Modules of DAQ PCI board (DeLiDAQ) for Positive-Sensitive MWPC Detectors with Delay Line Readout, NIM A569 (2006), pp 900-904.
- [12]. <http://www.srim.org/#SRIM>
- [13]. С.К. Андрухович, В.П. Божко, А.Н. Водин, С.Н. Олейник, С.А. Солдатов, Э.А. Рудак, О.И. Ячник, “МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ И ВЫХОДОВ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ ИЗ ВОЛОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОК ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ”, „Вісник Харківського університету”, №832,2008.
- [14]. М.Е. Anderson, NEUTRON ENERGY SPECTRA OF ²³⁹Pu-Be, ²³⁸Pu-F AND ²³⁸Pu-¹⁸O 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.
- [15]. <http://www.nfri.re.kr/english/>
- [16]. http://en.wikinews.org/wiki/KSTAR_tokamak_test_reactor_sees_first_plasma
- [17]. <http://vodpod.com/watch/3627371-kstar-korean-superconducting-tokamak-advanced-research>
- [18]. <http://wwwinfo.jinr.ru/plan/ptp-2011/r141075.htm>
- [19]. http://flnp.jinr.ru/img/107/90_DN-6.pdf
- [20]. http://www.rupto.ru/podved_org/podved_org.htm
- [21]. M.Marmotti, et al., “Two-dimensional position-sensitive detectors for high resolution diffraction with neutrons and high energy synchrotron radiation.” NIM Section A 477 (2002) 347-352
- [22]. <http://www.sns.gov/>
- [23]. <http://j-parc.jp/index-e.html>
- [24]. ВАСИЛ МИЛКОВ^{1,2}, ЦВЕТАН ПАНТЕЛЕЕВ², АНДРЕЙ БОГДЗЕЛ², АЛЕКСАНДР БЕЛУШКИН², СЕРГЕЙ КУЛИКОВ², ВАЛЕРИЙ ЖУРАВЛЕВ², ВАЛЕНТИН ПРИХОДЬКО², “МНОГОСЕКЦИОНЕН 2-п ДЕТЕКТОР НА ТОПЛИНИИ НЕУТРОНИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИФРАКЦИЯТА НА МИКРООБРАЗЦИ В АКСИАЛНА ГЕОМЕТРИЯ”, Annuaire de l'Universite de Sofia “St. Kliment Ohridski”, Faculte de Physique, v. 105 (приета за печат).