

Ф-20

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.14:621.039.8

18-85-890

Фам Нгок Чьонг

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЛЕГКИХ НУКЛИДОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСТОЧНИКОВ α -ИЗЛУЧЕНИЯ ^{210}Po
И ПУЧКА ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ < 2 МэВ**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Т.М. Тер-Акопян

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник В.П. Варварца

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Э.И. Шаратов

Ведущее предприятие: Ленинградский государственный университет
им. А.А. Еданова.

Защита диссертации состоится " " 1986 г.
в " " часов на заседании специализированного Совета
Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований
(г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан " " 1986 года.

Ученый секретарь
специализированного Совета Ю.В. Таран

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ядерно-физические методы анализа элементного состава вещества имеют большое значение для многих направлений современной науки и техники. Постоянное развитие и совершенствование этих методов, базирующихся на использовании всего арсенала научно-технических достижений современной ядерной физики, привело к получению исключительно высоких результатов анализа по их чувствительности, точности и производительности.

Вместе с тем в ряде практических задач ощущается необходимость дальнейшего совершенствования методов анализа. В частности, это относится к многим задачам, связанным с определением содержания легких элементов, для которых существующие методы не дают вполне удовлетворительных результатов. Так, например, недостаточной для контроля загрязнений окружающей среды является чувствительность методов определения бериллия. Методы анализа содержания азота, основанные на реакциях $^{14}\text{N}(n, \alpha n)$ и $^{14}\text{N}(\gamma, n)$, недостаточно эффективны для анализа пищевых продуктов, содержащих фосфор и фтор, их широкое внедрение сдерживается ввиду необходимости создания специализированных лабораторий, оборудованных ускорителями частиц. Еще более сложным является оборудование современных ультрачувствительных масс-спектрометрических установок, применяемых при анализе редких природных радионуклидов (^{10}Be , ^{14}C и др.).

В связи с этим актуальными являются задачи совершенствования методов анализа, основанных на регистрации ядерных реакций, протекающих при воздействии на исследуемые пробы α -излучения радионуклидов (^{210}Po , ^{238}Pu и др.). Благодаря применению новых избирательных способов наблюдения ядерных реакций представляется возможным достижение уровня чувствительности, точности и производительности, отвечающего требованиям практических задач. Относительная простота и компактность технических средств допускает широкое применение этих методов при контроле загрязнений окружающей среды бериллием, при определении азота в пищевых продуктах, при анализе некоторых легких элементов (Be, Al, F) в геологии и горнодобывающей промышленности.

Изучение резонансов ядерных реакций на пучке протонов с энергией < 2 МэВ наряду с применением новых способов регистрации этих реакций представляет большой интерес для развития относительно простого и доступного метода ультрачувствительного анализа некоторых редких природных радионуклидов (^{10}Be , ^{14}C и др.).

Основная цель работы заключалась в разработке нового метода анализа бериллия, основанного на регистрации совпадений нейтронов и γ -квантов, испускаемых в ядерной реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)$, протекающей

под действием α -частиц ^{210}Po . Определялись выходы характеристических γ -квантов в реакциях α -частиц с ядрами легких элементов (N, Al, F) с целью разработки метода анализа азота, основанного на регистрации γ -квантов с энергией 871 кэВ, испускаемых в реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$, и оценки чувствительности методов определения Al и F по γ -квантам и нейтронам, испускаемым в реакциях (α, p) и (α, n) . Изучалась зависимость величины поперечного сечения реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$ от энергии бомбардирующих протонов с целью определения возможности разработки нового высокочувствительного метода определения ^{10}Be , основанного на регистрации совпадений γ -квантов и нейтронов, испускаемых при этой реакции.

Научная новизна работ

Предложен и разработан новый метод определения бериллия, основанный на регистрации совпадений γ -лучей с энергией 4,439 МэВ и нейтронов, испускаемых в реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)$. При интенсивности α -источника ^{210}Po $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ в телесном угле 2π стерад достигнута чувствительность определения, соответствующая содержанию 0,1 мкг бериллия в пробе. По сравнению с методом регистрации одиночных γ -квантов чувствительность анализа увеличена в 50 раз при уменьшении активности α -источника в 10 раз. Таким образом впервые экспериментально показано преимущество метода γ -n совпадений для идентификации искомого канала ядерной реакции при анализе легких элементов по реакциям (α, n) или (p, n) .

Предложен и испытан новый метод анализа пищевых продуктов на содержание азота белка, основанный на регистрации γ -квантов с энергией 871 кэВ, испускаемых в реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$, протекающей под действием α -частиц ^{210}Po . Измерены выходы γ -квантов с энергией 871 кэВ при облучении α -частицами ^{210}Po образцов, близких по составу к пищевым продуктам, содержащих азот в различной концентрации в диапазоне 0–11%.

Впервые определены вероятности испускания γ -квантов в реакциях (α, n) на алюминии и фторе и даны оценки чувствительности метода γ -n совпадений для анализа этих элементов.

Даны оценки чувствительности методов определения Al и F, основанных на регистрации γ -квантов, испускаемых в реакциях $^{27}\text{Al}(\alpha, p)$, $^{19}\text{F}(\alpha, p)$ и при кулоновском возбуждении фтора α -частицами ^{210}Po .

Впервые измерено поперечное сечение реакции $^{10}\text{Be}(p, n)$ в диапазоне энергии протонов 893–1929 кэВ и дана оценка предела чувствительности определения ^{10}Be по методу γ -n совпадений, которая составляет 10^7 атомов или 10^{-11} атомов ^{10}Be на атом ^9Be .

Практическая ценность работ

Разработанная методика определения бериллия удовлетворяет практическим требованиям задачи контроля чистоты окружающей среды. При проведении такого анализа представляется относительно несложным приготовление образцов в виде тонких препаратов, удобных для облучения α -частицами. Достигнутая чувствительность анализа позволяет проводить определение опасных доз бериллия на пробах сравнительно малого объема (например, 100 л воздуха), что способствует экспрессности измерений. При определении Be в геологических и технологических пробах концентрационная чувствительность метода, разработанного в диссертации, составляет $10^{-2}\%$. Этот метод может успешно конкурировать с методом определения Be по реакции (γ, n) ввиду своей экспрессности и отсутствия источника γ -излучения с высоким уровнем активности.

Созданная аппаратура регистрации γ -n совпадений может быть применена для практических целей при анализе бериллия. Выполненная автоматизация измерений на нейтронном детекторе способствовала осуществлению контроля работы всех узлов установки и позволила вести поиск электрических микропробоев ^3He -счетчиков, что привело к уменьшению фона одиночных нейтронных импульсов от 100 час^{-1} до 70 час^{-1} .

Предложенная и испытанная методика анализа пищевых продуктов на содержание азота белка обеспечивает приемлемую для практики точность и производительность измерений и имеет преимущества по сравнению с другими ядерно-физическими методами ввиду относительной доступности и компактности оборудования, а также благодаря высокой избирательности реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$, которая может быть идентифицирована по характеристической γ -линии 871 кэВ на фоне реакций, протекающих на ядрах других элементов, входящих в состав пищевых продуктов.

Полученные данные о величине поперечного сечения реакции $^{10}\text{Be}(p, n)$ при энергии протонов в диапазоне 893–1929 кэВ используются для разработки высокочувствительного метода анализа ^{10}Be в осадочных породах и метеоритах.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Автоматизация измерений на нейтронном детекторе с 56 ^3He -счетчиками, обеспечившая сбор и анализ полного набора данных; которая привела к уменьшению фона одиночных нейтронных импульсов от 100 час^{-1} до 70 час^{-1} и фона множественных событий от $2,5 \text{ сут}^{-1}$ до 1 сут^{-1} .
2. Новая методика определения бериллия по регистрации γ -n совпадений, давшая предел чувствительности 0,1 мкг ^9Be при интенсивности источника α -частиц $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ в телесном угле 2π стерад.
3. Новая методика определения азота в пищевых продуктах, основанная на регистрации γ -линии 871 кэВ в реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$, проте-

каждой на α -частицах ^{210}Po , способная дать точность результатов в измерениях продолжительностью 5 мин. при величине концентрации азота 2% и интенсивности источника α -частиц 10^9 с^{-1} в телесном угле 2π стерад.

4. Результаты измерения поперечного сечения реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$, показывающие максимум $\sigma = 260 \text{ мб}$ при энергии протонов $E_{\text{лаб.}} = 1050 \text{ кэВ}$, близкой к порогу этой реакции с образованием ^{10}Be в состоянии Γ^+ с энергией возбуждения 718 кэВ , среднее значение поперечного сечения $\bar{\sigma} \approx 180 \text{ мб}$ в диапазоне $E_{\text{лаб.}} = 1030-1400 \text{ кэВ}$, и дающие оценку предела чувствительности определения ^{10}Be по реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$, которая составляет 10^7 атомов или 10^{-11} атомов ^{10}Be на атом ^9Be .

Апробация работы

Основные результаты работы доложены автором на заседаниях семинара Отдела исследования тяжелых ядер Лаборатории ядерных реакций и на 3-й Международной конференции по низкофононым измерениям, Братислава, октябрь 1985 года.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 97 страниц машинописного текста, 16 таблиц, 23 рисунка и список литературы из 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана аннотация работы. В нем показана актуальность задачи развития методов анализа легких нуклидов, изложено краткое содержание диссертации и приведены основные результаты, полученные автором.

В первой главе содержится обзор основных ядерно-физических методов анализа элементного состава вещества. Рассмотрены принципы и свойства нейтронно-активационного, γ -активационного методов, активационного анализа на пучках заряженных частиц, анализа элементного состава с помощью ядерных реакций, рентгенофлуоресцентного и масс-спектрометрического методов анализа. Указанные методы анализа способны решать разнообразные задачи, возникающие в научных исследованиях и на производстве. Вместе с тем, остро ощущается необходимость совершенствования методов анализа ряда легких элементов - бериллия, азота, алюминия, фтора и др., для которых оказываются неприменимыми или дающими не вполне удовлетворительные результаты основные ядерно-физические методы: нейтронно-активационный, γ -активационный и рентгенофлуоресцентный. Масс-спектрометрия, в особенности ультрачувствительные установки, включающие ускорители частиц, способна решать большинство задач анализа легких элементов, в том числе задачи определения редких ра-

дионуклидов (^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl и др.). Однако ввиду большой сложности и трудоемкости этого метода широкое его использование затруднено.

С учетом запросов практики и смежных областей научных исследований представляется актуальным развитие методов анализа, основанных на применении относительно несложных технических средств.

Во второй главе описан метод γ - n совпадений и аппаратура для его применения.

Испускание нейтрона и одного или нескольких характеристических γ -квантов нередко имеет место в выходных каналах реакций. В случае $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ при энергии α -частиц $E \leq 5,3 \text{ МэВ}$ γ -кванты с энергией $4,439 \text{ МэВ}$ испускаются с вероятностью $0,7-0,8$. Из-за действия правил отбора по спину и четности реакция (p, n) на легких ядрах нередко может приводить лишь к образованию конечных ядер, находящихся в возбужденном состоянии. Поэтому наряду с нейтронами в таких реакциях (например, $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$ и др.) испускаются γ -кванты, отвечающие переходам в основное состояние ядер-продуктов. В методе γ - n совпадений высокая разрешающая способность γ -спектрометрического тракта позволяет выделить искомую реакцию (α, n) или (p, n) на фоне таких же реакций, протекающих на ядрах других элементов. Одновременная регистрация нейтрона устраняет фон γ -спектрометра, обусловленный комптоновским рассеянием γ -квантов, испущенных в других ядерных реакциях: (α, γ) , (p, γ) , $(\alpha, \alpha' \gamma)$, $(p, p' \gamma)$ и др.

До настоящего времени метод регистрации γ - n совпадений не применялся в целях анализа элементного состава вещества.

Схема экспериментальной установки для регистрации γ - n совпадений при анализе бериллия по реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ показана на рис.1 Она включала камеру для облучения образцов α -излучением препарата ^{210}Po , два сцинтилляционных γ -спектрометра с монокристаллами германата висмута (диаметр - 8 см, высота - 5 см) и нейтронный детектор с 56 ^3He -счетчиками, расположенными в блоке замедлителя (оргстекло) в 4 рядах, представлявших концентрические окружности, в центре которых находился чувствительный объем детектора. Вероятность регистрации одиночного нейтрона, испущенного из чувствительного объема, равнялась $0,48$. Система пластических сцинтилляционных счетчиков, окружавших нейтронный детектор, обеспечивала защиту от космических лучей. Электронная схема нейтронного детектора обеспечивала регистрацию совпадений γ -квантов и нейтронов с разрешающим временем $\leq 128 \text{ мкс}$, регистрацию множественных нейтронных событий (событий, в которых два или более нейтронов регистрировались в течение промежутка времени $\leq 128 \text{ мкс}$), запись энергетического спектра γ -квантов, зарегистрированных в совпадении с нейтроном.

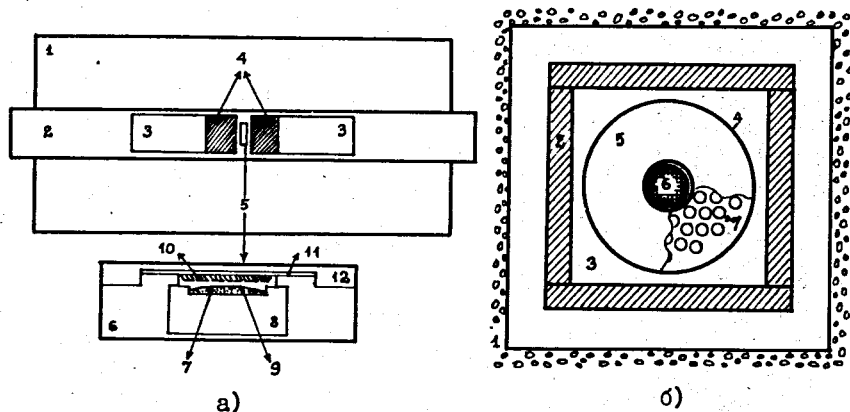


Рис.1 а - Схема установки для измерения спектров γ -квантов в совпадении с нейтронами реакции (α, n) . 1 - нейтронный детектор, 2 - чувствительный объем, 3 - ФЭУ, 4 - сцинтилляторы, 5 - камера с α -источником ^{210}Po и образцом, 6 - корпус камеры, 7 - препарат ^{210}Po , 8 - подложка, 9 - пленка Al_2O_3 , 10 - образец, 11 - подложка образца, 12 - крышка.
б - Схема нейтронного детектора. 1 - бетон, 2 - пластиковые сцинтилляторы, 3 - гранулированный полиэтилен, 4 - кадмий, 5 - оргстекло, 6 - образец, 7 - ^3He -счетчики.

Автоматизация измерений была выполнена на базе ЭВМ MERA 60-30 с системой периферийного оборудования (гибкий диск, кассетный магнитофон, перфоратор, фотосчитыватель, телетайп, дисплей). Промежуточный блок служил для связи ЭВМ с электронной схемой установки. Созданные программы были записаны на языке ассемблер и хранились на гибком диске.

Программа сбора данных накапливала в буферной памяти ЭВМ данные об одиночных и множественных событиях и затем переписывала эти данные на гибкий диск файл за файлом. На экране дисплея программа представляла число импульсов, поступивших с каждого из ^3He -счетчиков за время измерения. Это позволяло контролировать работу счетчиков и системы защиты от космических лучей, так как, когда по тем или иным причинам сигналы от одного из пластиковых сцинтилляторов не поступали на схему выработки сигнала защиты (метки), возрастала скорость поступления импульсов от ^3He -счетчиков, расположенных вблизи этого сцинтиллятора.

Программа обработки данных находила множественные нейтронные со-

бытия и γ - n совпадения, анализировала амплитуды и время поступления импульсов, сравнивала число одиночных импульсов, поступивших от каждого ^3He -счетчика, с наиболее вероятным числом, взятым из таблицы. В результате формировались амплитудные спектры импульсов, производился отбор счетчиков, имеющих микропробой. Отбирая нейтронные события, которые сопровождались сериями импульсов с одного из ^3He -счетчиков, поступивших в интервале времени ≤ 5 мин, мы добились уменьшения фона, обусловленного микропробойми, более, чем в 3 раза.

Автоматизация измерений способствовала сбору и анализу полного набора данных. Фон одиночных нейтронных импульсов был уменьшен от 100 час^{-1} до 70 час^{-1} , фон множественных событий - от $2,5 \text{ сут}^{-1}$ до 1 сут^{-1} .

В третьей главе описаны эксперименты, проведенные с целью разработки новых методов анализа легких элементов (Be , N , Al , F), основанных на регистрации ядерных реакций α -частиц ^{210}Po .

Разработанная методика определения бериллия была основана на регистрации γ - n совпадений в реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$. Результаты измерений приведены в табл.1. В первой колонке указаны образцы, которые облучались α -частицами источника ^{210}Po интенсивностью $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ на 2π стерад. Кроме толстого металлического бериллия и слоя металлического Be толщиной 20 мкг.см^{-2} на подложке из меди с целью определения фона облучались толстые образцы, содержавшие различные элементы. В колонке 6 табл.1 указаны скорости счета нейтронов, измеренные без совпадений с γ -квантами. В колонках 2-5 указаны скорости счета совпадений γ -квантов с нейтронами при четырех значениях порога регистрации γ -квантов: 2800, 3200, 3600 и 4000 кэВ. Зависимости скорости счета γ - n совпадений от порога регистрации γ -квантов для различных толстых образцов приведены на рис.2.

Из сравнения данных табл.1 о скорости счета γ - n совпадений для тонкой мишени из Be и для толстых мишеней: Cu , C , PbO , Pt , нерж. сталь, - видно, что при изучении тонких препаратов, нанесенных на подходящие подложки (фильтр), чувствительность Be составляет $\sim 0,1 \text{ мкг.}$ Подобная схема измерения представляется естественной при решении задачи контроля чистоты окружающей среды. При изучении геологических проб, минеральных фракций и т.д. концентрационная чувствительность определения Be оценивается величиной $\sim 10^{-2}\%$.

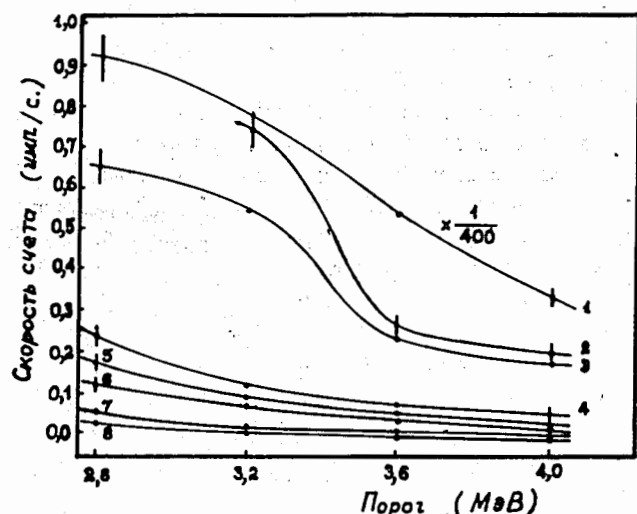
В табл.2 приведены данные о линиях γ -излучения, зарегистрированных при облучении α -частицами ^{210}Po толстых мишеней из нержавеющей стали, PbF_2 и Al .

Результат опыта с образцами нержавеющей стали дает, в основном, представление о γ -квантах, испускаемых при взаимодействии с яд-

Таблица I.

Результаты измерений скорости счета γ - n совпадений при различных порогах регистрации γ -квантов. Цифры - скорость счета за 1 секунду. Активность α -источника ^{210}Po - $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ на 2П стеррад.

Порог	2800 кэВ	3200 кэВ	3600 кэВ	4000 кэВ	Общий счет нейтронов
^9Be 20 мкг	368,8 \pm 24,0	313,7 \pm 20,4	221,6 \pm 14,4	142,6 \pm 2,6	2195,7 \pm 7,5
^9Be на Al подл.	5,117 \pm 0,200	4,306 \pm 0,153	3,033 \pm 0,130	1,967 \pm 0,100	119,37 \pm 1,23
PbF_2	0,539 \pm 0,054	0,482 \pm 0,052	0,262 \pm 0,033	0,203 \pm 0,026	144,05 \pm 1,56
BNAI		0,762 \pm 0,058	0,292 \pm 0,035	0,242 \pm 0,030	230,77 \pm 1,90
Si	0,238 \pm 0,024	0,130 \pm 0,014	0,088 \pm 0,012	0,067 \pm 0,010	79,86 \pm 1,16
Al	0,171 \pm 0,017	0,098 \pm 0,013	0,060 \pm 0,009	0,055 \pm 0,007	87,92 \pm 1,21
Mg	0,123 \pm 0,014	0,078 \pm 0,012	0,046 \pm 0,009	0,023 \pm 0,006	101,76 \pm 1,30
Cu	0,052 \pm 0,009	0,016 \pm 0,005	0,008 \pm 0,003	0,007 \pm 0,003	78,85 \pm 1,14
C	0,048 \pm 0,009	0,022 \pm 0,006	0,020 \pm 0,006	0,015 \pm 0,005	84,17 \pm 1,20
PbO	0,032 \pm 0,007	0,020 \pm 0,006	0,010 \pm 0,004	0,013 \pm 0,005	82,03 \pm 1,09
Pt	0,027 \pm 0,007	0,018 \pm 0,005	0,015 \pm 0,005	0,002 \pm 0,002	79,83 \pm 1,32
Фильтр на Pt	0,037 \pm 0,008	0,025 \pm 0,007	0,015 \pm 0,005	0,013 \pm 0,005	80,71 \pm 1,32
Нерж. сталь	0,027 \pm 0,007	0,013 \pm 0,005	0,010 \pm 0,003	0,002 \pm 0,001	76,71 \pm 1,13



1. ^9Be 3. PbF_2 5. Al 7. C, Cu
2. BNAI 4. Si 6. Mg 8. Pt, PbO

Рис. 2. Зависимость скорости счета γ - n совпадений от энергетического порога регистрации γ -квантов, полученная с α -источником ^{210}Po интенсивностью $5,8 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ /2П ср./-I для толстых мишеней.

рами Al в защитной пленке Al_2O_3 (270 мкг/см^2), покрывавшей препарат ^{210}Po . Источник ^{210}Po испускал нейтроны, полный поток которых составлял $\sim 160 \text{ с}^{-1}$ (см. табл. I). Из данных табл. 2 об интенсивности γ -квантов 709 и 1454 кэВ, испускаемых в реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$, можно заключить, что этот поток нейтронов объясняется реакцией $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$, причем уровни ядра ^{30}P 709 и 1454 кэВ заселяются с примерно одинаковой вероятностью ($\sim 15\%$) и кроме того, с вероятностью 70% в результате эмиссии нейтрона ядро ^{30}P образуется в основном состоянии. Линии γ -квантов 1263, 2236, 3498 кэВ (см. табл. 2) испускаются в реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$. Из данных табл. 2 можно оценить чувствительность ($\geq 10 \text{ мкг}$ по массе или $\geq 5\%$ по концентрации) анализа на Al в тонких поверхностных слоях образцов ($\sim 300 \text{ мкг/см}^2$), основанного на регистрации γ -квантов с энергией 2236 кэВ или совпадений с нейтронами γ -квантов с энергией 709 и 1454 кэВ.

В случае образца PbF_2 (см. табл. 2) линия 891 кэВ обусловлена реакцией $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Na}$. Из данных табл. I и 2 можно найти, что вероятность испускания в этой реакции γ -квантов 891 кэВ, усредненная в диапазоне $E_\alpha = 3,5-5,0 \text{ МэВ}$, равна $\sim 11\%$. Реакцией $^{19}\text{F}(\alpha, p)^{22}\text{Ne}$ объясняется появление линии 1275 кэВ. Две линии 109,85 и 197,05 кэВ соответствует γ -квантам, испускаемым из состояний $^{19}\text{F}^*$, заселяемых в результате кулоновского возбуждения α -частицами ^{210}Po . Оценка минимальной массы и концентрации F, которая может быть обнаружена при регистрации γ -квантов 1275 кэВ или при наблюдении совпадений с нейтронами γ -квантов 891 кэВ, составляет соответственно 10-15 мкг и 0,2-1,0% (для образцов толщиной $\sim 1 \text{ мг/см}^2$).

Линия γ -излучения с энергией 871 кэВ, указанная в табл. 2, появилась в результате реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$, которая протекала на ядрах азота, содержавшегося в слое воздуха между образцом и препаратом ^{210}Po . Цель дальнейших экспериментов заключалась в определении чувствительности и точности метода анализа пищевых продуктов на содержание азота балка, основанного на регистрации γ -квантов с энергией 871 кэВ. Изучались образцы, близкие по структуре и химическому составу к зерну. Данные измерений представлены на рис. 3а. Содержание азота в муке и смесях муки с нитратом целлюлозы определялось по методу наименьших квадратов с использованием результатов, полученных для стандартного образца картофеля (1,37% азота) и чистого нитрата целлюлозы (11,1% азота). На рис. 3а показан результат определения концентрации азота в рисе. Статистические ошибки, указанные на рис. 3а, могут быть уменьшены при замене воздуха, находящегося между образцом и ^{210}Po , на другой газ, не содержащий азота. Для проверки степени полноты такой замены были проведены измерения интенсивности γ -линии

Таблица 2.

Данные об основных линиях γ -спектров, зарегистрированных при облучении α -частицами полониевого источника толщиной из нержавеющей стали, алюминия и PbF_2 . Интенсивность источника $3 \cdot 10^8 \alpha$ -частиц на 2П стерад, энергия $E_\alpha \leq 5$ МэВ. Ge(Li) детектор объемом 43 см³.

Энергия γ -линии (кэВ)	Нержавеющая сталь		Алюминий		PbF_2	
	Число импульсов на 4П стерад. мин.	Выход γ -кв. на $\frac{\gamma}{\alpha}$ -кв. част.	Число импульсов на 4П стерад. мин.	Выход γ -кв. на $\frac{\gamma}{\alpha}$ -кв. част.	Число импульсов на 4П стерад. мин.	Выход γ -кв. на $\frac{\gamma}{\alpha}$ -кв. част.
109,89					3273 \pm 943)	0,110 \pm 0,003
197,15					2853 \pm 773)	0,410 \pm 0,011
511,0	5056 \pm 228	0,70 \pm 0,04	6363 \pm 306	0,89 \pm 0,04	6842 \pm 385	0,63 \pm 0,04
709,0	307 \pm 77	0,07 \pm 0,02			671 \pm 152	0,10 \pm 0,02
803,1	17643 \pm 439	44,6 \pm 0,1	176122 \pm 442	44,5 \pm 0,1	261495 \pm 536	44,0 \pm 0,1
870,8	553 \pm 40	0,14 \pm 0,01	505 \pm 39	0,09 \pm 0,01	681 \pm 62	0,13 \pm 0,01
890,9					389 \pm 39	0,050 \pm 0,005
1262,7	550 \pm 44	0,25 \pm 0,02	633 \pm 44	0,29 \pm 0,02	407 \pm 43	0,13 \pm 0,01
1274,6					2378 \pm 60	0,79 \pm 0,02
1454,0	125 \pm 32	0,06 \pm 0,02	138 \pm 26	0,07 \pm 0,01	143 \pm 25	0,05 \pm 0,01
2235,5	1332 \pm 42	1,16 \pm 0,03	1668 \pm 50	1,45 \pm 0,04	2141 \pm 64	1,23 \pm 0,04
3498,2	129 \pm 14	0,18 \pm 0,02	124 \pm 24	0,17 \pm 0,03	136 \pm 20	0,13 \pm 0,02

1) Кроме длины, указанных в таблице, наблюдались также КХ-линии свинца, используемые при α -распаде ^{210}Po .

2) Указаны только статистические ошибки, выход γ -квантов рассчитан без учета поправки на поглощение γ -квантов в конструкционных материалах.

3) Данные, полученные при измерениях с детектором из сверхчистого германия.

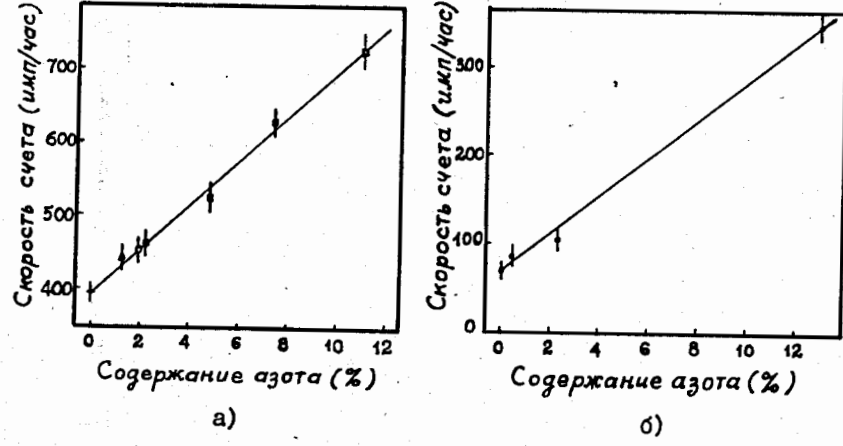


Рис. 3

а - Экспериментальная зависимость скорости счета γ -линии 871 кэВ от концентрации азота в разных образцах. \blacktriangle - стандартный образец картофеля, \square - нитрат целлюлозы, $+$ - фон, вызываемый слоем воздуха, заключенным между источником ^{210}Po и образцом, \blacksquare - смесь муки и нитрата целлюлозы, \circ - мука высшего сорта, \bullet - рис. Указаны только статистические ошибки.

б - Зависимость скорости счета γ -линии 871 кэВ от концентрации азота в смеси воздуха и метана.

871 кэВ при заполнении камеры с источником ^{210}Po различными смесями воздуха и метана. Давление газа равнялось 5-6 атм, α -частицы полностью тормозились в газе. Результаты этих измерений показаны на рис. 3б.

Из данных рис. 3а и 3б следует, что при изучении образцов зерна (концентрация азота $\sim 2\%$) с применением препарата ^{210}Po с интенсивностью 10^9 с⁻¹ в телесном угле 2П стерад 10% точность определения азота будет достигаться в измерениях продолжительностью ~ 5 мин. По сравнению с другими известными ядерно-физическими методами определения азота данный метод отличается относительной доступностью и простотой. Его преимуществом является высокая избирательность наблюдения реакции $^{14}N(\alpha, p)^{17}O$ по γ -линии 871 кэВ, что позволяет определять азот на фоне фосфора и фтора, нередко входящих в состав пищевых продуктов.

Четвертая глава содержит результаты изучения реакции $^{10}\text{Be}(p, n)$ при энергии протонов < 2 МэВ, проведенного с целью определения возможности разработки нового способа определения ^{10}Be . Долгоживущий космогенный радионуклид ^{10}Be ($T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^6$ лет) интересен в геофизике и астрофизике в связи с задачами определения возраста пород, изучения процессов циркуляции в воздушных и водных бассейнах, миграции химических элементов, вариаций космических лучей и т.д. Концентрация ^{10}Be изменяется в пределах от $(2-3) \cdot 10^4$ ат/г в антарктических льдах до $(2-3) \cdot 10^{10}$ ат/г в поверхностных слоях глубоководных железо-марганцевых конкреций.

Реакция $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$ имеет низкий порог по энергии протонов $E_{\text{порог}} = 249$ кэВ. Из-за запрета по спину она может протекать лишь при условии перехода на первый возбужденный уровень Γ^+ ^{10}B , который расположен на 718 кэВ выше основного состояния. Поэтому характерным признаком этой реакции является испускание нейтронов в совпадении с γ -квантами с энергией 718 кэВ. Лишь небольшое число природных нуклидов с $Z \leq 30$ имеет порог реакции (p, n) $E_{\text{порог}} < 1500$ кэВ: ^3H (1018 кэВ), ^{14}C (671 кэВ), ^{41}K (1233 кэВ), ^{55}Mn (1031 кэВ), ^{70}Zn (1458 кэВ).

Эксперименты проводились на ускорителе Ван-де-Граафа. Мишень, облучаемая пучком протонов, укреплялась на дне медного цилиндра Фарадея, установленного в чувствительном объеме детектора нейтронов, который был собран из полиэтиленовых блоков, содержащих 6 счетчиков с газом ^3He . Вероятность регистрации одиночного нейтрона, испущенного из мишени, равнялась $0,105 \pm 0,005$. Мишень наносилась на Al подложку с помощью масс-сепаратора. Количество атомов ^{10}Be на ней ($6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) определялось по уровню β -активности. Использовалась система коллимации пучка. Фон нейтронов, генерированных на краях коллиматоров, контролировался и был пренебрежимо мал. Минимальный шаг изменения энергии протонов составлял 10 кэВ.

Результаты экспериментов с мишенью ^{10}Be и фоновых экспериментов с мишенями из Al и ^9Be показаны на рис. 4. Они позволяют заключить, что кривая I (рис. 4), полученная при облучении протонами ^{10}Be , соответствует энергетической зависимости поперечного сечения реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$. Вклад в эту кривую ядерных реакций, протекающих на примесях ^3H , ^{14}C , ^{55}Mn , ^{10}B и др., возможно, содержащихся в мишени из ^{10}Be , пренебрежимо мал. Максимум поперечного сечения реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$ при энергии $E_{\text{порог}} = 1050$ кэВ составляет $\sigma = 260$ мб, среднее поперечное сечение в диапазоне $E_{\text{порог}} = 1030-1400$ кэВ $\bar{\sigma} \approx 180$ мб.

Полученные результаты позволяют оценить предел чувствительности

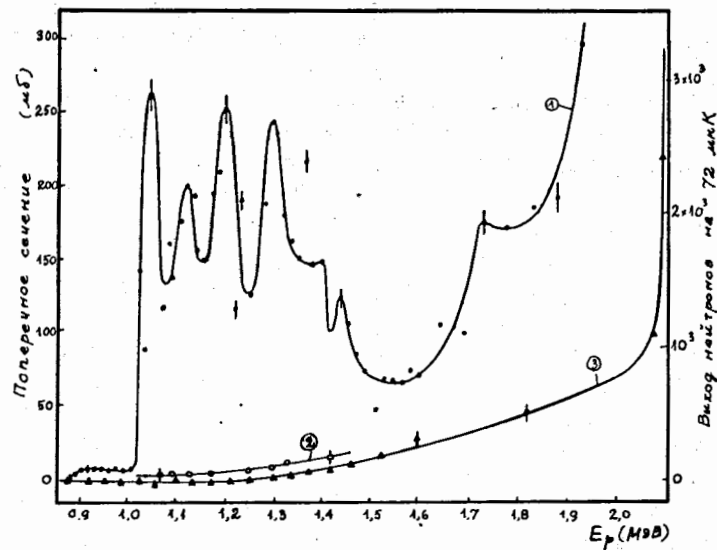


Рис. 4. Зависимость выхода нейтронов от энергии бомбардирующих протонов (лаб. сист.). Мишень: 1 — ^{10}Be , 2 — Al, 3 — ^9Be . Справа указан счет нейтронов на интегральный поток протонов 72 мкК. На левой шкале дано поперечное сечение реакции $^{10}\text{Be}(p, n)$, рассчитанное для кривой I с учетом вероятности регистрации нейтронов, равной 0,105.

метода определения ^{10}Be , основанного на регистрации совпадений нейтронов реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$ с γ -квантами 718 кэВ. Этот предел определяется минимально допустимым уровнем скорости счета γ - n совпадений и составляет 10^7 атомов ^{10}Be при условии, что площадь мишени равна 1 мм^2 , интенсивность пучка протонов — 10^{14} с^{-1} , вероятность регистрации нейтрона — 0,5, γ -кванта — 0,05, скорость счета γ - n совпадений $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. При облучении мишеней в диапазоне энергии протонов 1030–1400 кэВ толщина их рабочего слоя может составлять до 1 мг/см^2 . При этом предел чувствительности определения ^{10}Be составит 10^7 атомов или 10^{-11} атомов на атом ^9Be .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Выполнена автоматизация измерений на нейтронном детекторе, состоящем из 56 пропорциональных ^3He -счетчиков, которая способствовала

осуществлению контроля работы всех узлов детектора и позволила вести поиск редких микропробоев на ^3He -счетчиках. Фон одиночных нейтронных импульсов уменьшен от 100 час^{-1} до 70 час^{-1} , фон множественных нейтронных событий - от $2,5 \text{ сут}^{-1}$ до 1 сут^{-1} .

2. Предложена и осуществлена новая методика определения содержания бериллия по реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$, основанная на регистрации γ -н совпадений. С применением в качестве источника α -частиц препарата ^{210}Po интенсивностью $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ в телесном угле 2π стерад достигнут предел чувствительности $0,1 \text{ мкг}$ бериллия.

3. Определены вероятности заселения уровней ядра ^{30}P (70% - основное состояние, 15% - уровень с энергией возбуждения 709 кэВ, 15% - уровень с энергией возбуждения 1454 кэВ), образующегося в реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{30}\text{P}$ при $E_\alpha = 5,0-5,3 \text{ МэВ}$, и средняя вероятность (11%) заселения уровня 891 кэВ ядра ^{22}Na , образующегося в реакции $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Na}$ в диапазоне $E_\alpha = 3,5-5,0 \text{ МэВ}$. Дана оценка чувствительности метода определения Al и F , основанного на регистрации γ -н совпадений в реакции (α, n) . При использовании α -источника ^{210}Po интенсивностью $3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ предел чувствительности анализа составляет 5% по концентрации и 10 мкг по массе Al , 0,2-1,0% по концентрации и $10-15 \text{ мкг}$ по массе фтора.

4. Определены выходы γ -квантов, испускаемых в реакциях $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$ ($E_\gamma = 1263, 2236 \text{ и } 3498 \text{ кэВ}$) и $^{19}\text{F}(\alpha, p)^{22}\text{Ne}$ ($E_\gamma = 1275 \text{ кэВ}$) при облучении толстых мишеней Al и F α -частицами ^{210}Po . Определены выходы γ -квантов с энергией 109,85 и 197,05 кэВ, испускаемых с двух нижних уровней ^{19}F , заселяемых в результате кулоновского возбуждения α -частицами ^{210}Po . Даны оценки чувствительности определения Al и F по методике, основанной на регистрации указанных γ -квантов.

5. Предложена и испытана новая методика анализа пищевых продуктов на содержание азота белка, основанная на регистрации γ -квантов с энергией 871 кэВ, испускаемых в ядерной реакции $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$. Показано, что при изучении образцов зерна с концентрацией азота около 2% точность анализа 10% достигается в измерениях продолжительностью 5 мин с α -источником ^{210}Po с интенсивностью 10^9 с^{-1} в телесном угле 2π стерад.

6. Поперечное сечение реакции $^{10}\text{Be}(p, n)^{10}\text{B}$ измерено в диапазоне энергии протонов 893-1929 кэВ с разрешением 10 кэВ. При энергии $E_{\text{лаб}} = 1050 \text{ кэВ}$, близкой к порогу реакции с образованием ^{10}B в первом возбужденном состоянии I^+ , $E^* = 718 \text{ кэВ}$, наблюдался максимум $\sigma = 260 \text{ мб}$. Среднее поперечное сечение $\bar{\sigma} \approx 180 \text{ мб}$ в диапазоне энергии протонов $E_{\text{лаб}} = 1030-1400 \text{ кэВ}$. Дана оценка предела чувствительности определения ^{10}Be по методу γ -н совпадений: 10^7 атомов или 10^{-11} атомов ^{10}Be на атом ^9Be .

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Фам Нгок Чыонг. Автоматизация измерений событий спонтанного деления на нейтронном детекторе. - ОИЯИ, Р10-85-442, Дубна, 1985, с. 10.
2. Фам Нгок Чыонг, Тер-Акопян Г.М., Кабаченко А.П. Методика определения бериллия по реакции (α, n) . - ОИЯИ, Р15-85-411, Дубна, 1985, с. 8.
3. Фам Нгок Чыонг, Тер-Акопян Г.М., Фан Ван Ан, Иванов М.П. Применение α -частиц ^{210}Po для определения содержания легких элементов в образцах (алюминий, фтор, азот). - ОИЯИ, 18-85-579, Дубна, 1985, с. 12.
4. Тер-Акопян Г.М., Фам Нгок Чыонг, Еремин Н.В., Стрижов В.Ф., Кабаченко М.П., Челноков Л.П. Реакция $^{10}\text{Be}(p, n)$ при энергии протонов $< 2 \text{ МэВ}$. Возможный высокочувствительный способ определения ^{10}Be . - ОИЯИ, Р15-85-775, Дубна, 1985, с. 12.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 декабря 1985 года.