



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009-20
ОРИ

И.Л. Ажгирей, С.П. Денисов, Г.И. Крупный, А.В. Левин,
Н.Н. Прокопенко, Я.Н. Расцветалов

АКТИВАЦИЯ ЯДЕР АРГОНА ПРОТОНАМИ ЭНЕРГИЕЙ 50 ГэВ

Направлено в *Radiation Measurements*

Протвино 2009

Аннотация

Ажгирей И.Л. и др. Активация ядер аргона протонами энергией 50 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2009-20. – Протвино, 2009. – 7 с., 5 рис., 2 табл., библиогр.: 5.

Исследовано образование гамма-активных радионуклидов в соударениях протонов с ядрами аргона при энергии 50 ГэВ. С этой целью сосуды Маринелли, наполненные аргоном и воздухом при 1 атм, были облучены пучком протонов ускорителя У-70 ИФВЭ. Сосуд с воздухом был использован для измерения уровня фона. За время эксперимента через сосуд с аргоном было пропущено $8,8 \times 10^{14}$ протонов. В статье представлены объемные активности нуклидов и сечения их образования.

Abstract

Azhgirey I.L. et al. Argon activation by 50 GeV protons: IHEP Preprint 2009-20. – Protvino, 2009. – p. 7, figs. 5, tables 2, refs.: 5.

Production of gamma radionuclides in collisions of 50 GeV proton beam with natural argon was investigated. The Marinelly vessels filled with gaseous argon and air at 1 atm pressure were exposed by the proton beam of the IHEP accelerator. Vessel with air was used to measure the background level. Total of $8,8 \times 10^{14}$ protons were passed through the vessel with gaseous argon during the experiment. Volume activities of nuclides and their production cross sections are presented.

Введение

Данная работа выполнена в рамках эксперимента HiLumi [1] по изучению характеристик модулей торцевых жидкоаргоновых калориметров ЕМЕС, НЕС и FCAL установки АТЛАС [2] в высокоинтенсивном пучке протонов ускорителя ИФВЭ. Основная цель эксперимента – исследование откликов модулей при разных интенсивностях пучка вплоть до величины, соответствующей светимости sLHC равной $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, и получение экспериментальных данных по радиационной стойкости калориметров и радиационной безопасности при работе с ними, особенно при аварийной эвакуации аргона в экспериментальный зал и/или окружающую атмосферу. Цель настоящей работы – изучение активации аргона в пучке протонов с энергией 50 ГэВ. Предварительные оценки показывают, что на ядрах аргона при этой энергии протонов образуется порядка 30 радионуклидов с периодами полураспада ($T_{1/2}$) от единиц минут до нескольких лет [3]. Этот ряд содержит бета- и гамма-излучающие радионуклиды от ^{41}Ar до ^7Be . Теоретические оценки сечений образования данных радионуклидов варьируются от единиц до нескольких десятков миллибарн. Экспериментальные данные по активации ядер довольно скудны, особенно при высоких энергиях. При расчёте концентрации суммарной радиоактивности, образующейся в жидкоаргоновых калориметрах установки АТЛАС при их облучении, возникает много неопределённостей. Поэтому важно иметь реперные экспериментальные данные по активации аргона пучком частиц с известными характеристиками для проверки используемых расчетных моделей. Работа была частично выполнена на средства фондов INTAS и РФФИ.

Постановка эксперимента

Исследования проводились с сосудами Маринелли ёмкостью 1 л. В одном случае сосуд заполнялся путём продува газообразным аргоном при атмосферном давлении, в другом – для фоновых измерений – атмосферным воздухом (малая механическая прочность не позволяла откачивать сосуды). Состав естественного аргона: ^{40}Ar (99,6%), ^{36}Ar (0,34%) и ^{38}Ar (0,06%). Конструкция сосуда в сборке исключала утечку газа в процессе облучения и измерения активности, что подтверждалось последующими измерениями периодов полураспада обнаруженных радионуклидов. Для выделения как можно большего числа радионуклидов в столкновениях протонов с аргонами стенки сосуда Маринелли должны быть выполнены из вещества с минимальным массовым числом. Мы использовали штатный сосуд Маринелли из полиэтилена, доработанный штуцерами для продува и бандажом для повышения его герметичности (рис. 1). Как на ядрах углерода (стенка сосуда), так и на ядрах аргона образуются только два конкурентных гамма-излучающих радионуклида – долгоживущий ^7Be ($T_{1/2} = 53$ дня) и короткоживущий ^{11}C ($T_{1/2} = 20,4$ мин). Образование этих нуклидов на ядрах аргона выделить достаточно сложно из-за большей плотности полиэтилена по сравнению с газообразным аргоном.



Рис. 1. Сосуды Маринелли.

Сосуды Маринелли с аргоном и воздухом облучались пучком протонов энергией 50 ГэВ в разрыве ионопровода (воздушный промежуток) канала №23 У-70. Пучок протонов диаметром 20 мм направлялся вдоль оси сосуда, суммарная толщина стенок которого по пучку составляла 2 мм. Перед сосудом располагалась алюминиевая фольга толщиной 200 мкм. По активации фольги определялось число протонов, прошедших через сосуд. Помимо фольги для мониторингирования интенсивности протонного пучка использовались камера вторичной эмиссии и ионизационная камера. Для идентификации и количественного анализа радионуклидов в облученных сосудах использовался гамма-спектрометр [4] с детектором из сверхчистого германия объемом 137 см³. Эффективность регистрации гамма-квантов спектрометром по отношению к кристаллу 3"×3" NaI(Tl) составляет около 30%. Собственное энергетическое разрешение спектрометра для $E_\gamma = 1332$ кэВ (линия ⁶⁰Co) составляет 2 кэВ. Эффективность регистрации гамма-квантов в сосуде Маринелли определялась по набору образцовых мер в той же геометрии. Для снижения фоновых загрузок спектрометр помещен в стальную защиту с толщиной стенок 100 мм (рис. 2). Положение сосуда Маринелли при измерениях на спектрометре показано на рис. 3 (входные защитные дверцы открыты).



Рис. 2. Германиевый гамма-спектрометр.



Рис. 3. Сосуд Маринелли в спектрометре.

Результаты

Для определения интегрального потока протонов в энергетическом спектре гамма-квантов алюминиевой фольги выделена линия $E_\gamma = 1275$ кэВ с выходом 0,999 гамма-квантов на распад, принадлежащая радионуклиду ^{22}Na , который образуется в реакции $^{27}\text{Al} (p, 3p3n) ^{22}\text{Na}$ с известным сечением 10,6 мб. Измеренный интегральный поток в экспозиции с сосудом, наполненным аргоном, оказался равным $8,8 \times 10^{14}$ протонов. Эта величина с точностью до 10% совпадает с результатом, полученным при помощи камеры вторичной эмиссии. Длительность экспозиции составила 470 мин, что при длительности цикла ускорителя около 10 сек приводит к средней интенсивности 3×10^{11} протонов за цикл. Последняя величина хорошо согласуется с результатами измерений ионизационной камерой.

В фоновом спектре гамма-квантов, показанном на рис. 4, идентифицированы радионуклиды ^7Be ($E_\gamma = 477$ кэВ) и ^{11}C ($E_\gamma = 511$ кэВ), образующиеся на ядрах углерода в полиэтилене (стенки сосуда), и незначительные следы ^{24}Na ($E_\gamma = 1369$ и 2754 кэВ) и ^{41}Ar ($E_\gamma = 1294$ кэВ). Образование ^{24}Na происходит как на малой примеси алюминия в полиэтилене, так и на ядрах ^{40}Ar . ^{41}Ar образуется на ядрах ^{40}Ar воздуха (доля ^{40}Ar в воздухе около 1%) тепловыми нейтронами в реакции (n, γ) , которые генерируются в результате потерь протонов пучка на веществе вакуумной камеры и мониторов и последующих взаимодействий в стенах экспериментального зала.

В спектре гамма-квантов от сосуда Маринелли с аргоном (рис. 5), кроме ^7Be и ^{11}C , идентифицированы: ^{38}S ($E_\gamma = 1942$ кэВ), ^{38}Cl ($E_\gamma = 2168$ кэВ), ^{39}Cl ($E_\gamma = 250, 1267$ и 1517 кэВ), ^{24}Na ($E_\gamma = 1369$ и 2754 кэВ), ^{28}Mg ($E_\gamma = 400, 941$ и 1342 кэВ), ^{41}Ar ($E_\gamma = 1294$ кэВ). При определении активности ^{38}Cl было учтено как прямое его образование под действием протонов на ядрах аргона, так и его доля от β -распада ^{38}S . По полученным значениям активностей радионуклидов и интегральной интенсивности протонного пучка были оценены экспериментальные сечения образования соответствующих радионуклидов. Они (σ_{exp}) приведены в третьей колонке табл. 1, погрешность результатов не превышает 20%. В таблице представлены также известные экспериментальные данные (σ_1) для протонов с энергией 1 ГэВ, оценки сечений ($\sigma_{\text{ст}}$), полученные

при помощи феноменологической аппроксимации Силберберга и Цао, и консервативные величины сечений (σ_{MH}), принятые в ЦЕРН для оценки активации воздуха. Данные по величинам σ_1 , σ_{ST} и σ_{MH} взяты из работы [3], значения σ_{ST} и σ_{MH} приведены для энергии протонов 50 ГэВ.

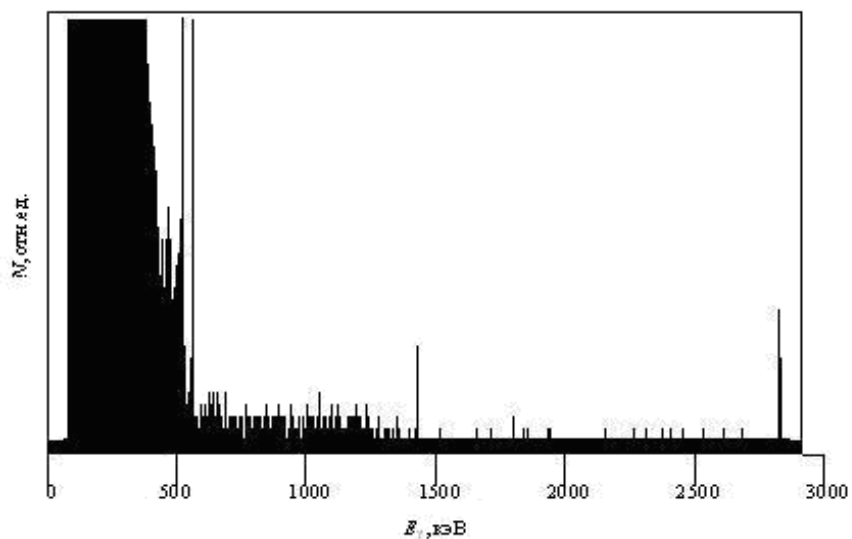


Рис. 4. Фоновый спектр гамма-квантов (сосуд Маринелли заполнен воздухом).

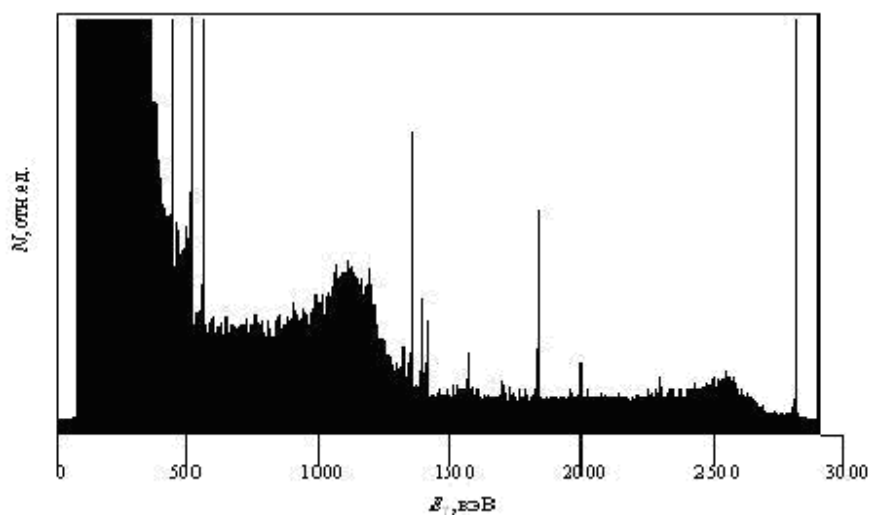


Рис. 5. Энергетический спектр гамма-квантов от сосуда Маринелли, заполненного аргонном.

Таблица 1. Сечения образования радионуклидов на аргоне протонами

Радионуклид	$T_{1/2}$	σ_{exp} , мб	σ_1 , мб	σ_{ST} , мб	σ_{MH} , мб
^{24}Na	15,0 час	8,4	4,3	4,3	4,3
^{28}Mg	20,9 час	1,8	0,6	0,85	0,6
^{38}S	170,4 мин	0,8	1	—	2,5
^{38}Cl	37,21 мин	7	12	100	16
^{39}Cl	55,6 мин	6	13	80	40

Полученные результаты позволяют рассчитать объёмные активности (ОА, Бк/л) идентифицированных радионуклидов. Значения ОА в табл. 2 приведены на конец сеанса облучения. Неопределённость в значениях ОА не превышает 8%. Там же приведены отношения ОА к допустимым объёмным активностям (ДОА), определяемым нормами радиационной безопасности НРБ-99 [5]. Как видно из таблицы, отношения ОА к ДОА значительно больше единицы для всех нуклидов.

Таблица 2. Объёмные активности радионуклидов

Радионуклид	ОА, Бк/л	ДОА, Бк/л	ОА / ДОА
^{24}Na	$4,51 \times 10^3$ **	28	160
^{28}Mg	$7,47 \times 10^2$	13	57
^{38}S	$1,97 \times 10^3$	*	—
^{38}Cl	$5,93 \times 10^6$	300	2×10^4
^{39}Cl	$5,28 \times 10^4$	300	176
^{41}Ar	$1,88 \times 10^4$ **	*	—

* По этим радионуклидам ДОА на внутреннее облучение не установлена.

** Данные приведены с учетом фоновых измерений.

Нам не удалось выделить образование ^7Be и ^{11}C на аргоне из-за большого фона, связанного с образованием этих радионуклидов на ядрах углерода в полиэтиленовых стенках сосуда. По этим же причинам не оценили образование на аргоне радионуклида ^{18}F с периодом полураспада 109,77 мин, у которого схема позитронного распада совпадает со схемой распада ^{11}C ($E_\gamma = 511$ кэВ, выход составляет два гамма-кванта на распад).

Заключение

Измерены объёмные активности и оценены сечения образования гамма-радионуклидов ^{24}Na , ^{28}Mg , ^{38}S , ^{38}Cl и ^{39}Cl в столкновениях протонов с ядрами аргона при энергии 50 ГэВ. Полученные данные могут быть использованы для проверки моделей, используемых для расчётов радиоактивности аргона в детекторах частиц, работающих в радиационных полях высокой интенсивности, в частности в торцевых калориметрах установки ATLAS на БАК.

Список литературы

- [1] Yu. Tikhonov, 2009. Operation of the ATLAS end-cap calorimeters at sLHC luminosities: an experimental study. Report at 11th Pisa Meeting on Advanced Detectors La Biodola, Isola d'Elba (Italy), May 24-30, 2009.
- [2] ATLAS Liquid Argon Calorimeter. Technical Design Report. CERN/LHCC 96-41.
- [3] M. Huhtinen, 1997. Determination of Cross Sections for Assessments of Air Activation at LHC, CERN/TIS-RP/TM/96-29, Geneva.
- [4] Г.И. Крупный, Г.Н. Стеценко и А.А. Янович. Препринт ИФВЭ 2000-30, Протвино, 2000.
- [5] Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Минздрав России, 1999.

Рукопись поступила 3 декабря 2009 г.

И.Л. Ажгирей и др.

Активация ядер аргона протонами энергией 50 ГэВ.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати	08.12.2009.	Формат $60 \times 84/16$.	Офсетная печать.
Печ. л.	0,56.	Уч.- изд. л.	0,9.
Тираж	80.	Заказ	1.
			Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2009-20, ИФВЭ, 2009
