УДК: 539.16.17

М. С. Тезекбаева, А. В. Еремин

Изучение характеристик модернизированной детектирующей системы *GABRIELA* сепаратора *SHELS*

Работа посвящена актуальной проблеме современного эксперимента – регистрации α-частиц и гамма-квантов, испускаемых продуктами реакций полного слияния тяжелых ускоренных ионов с ядрами мишеней. Рассматривается использование кремниевых и германиевых полупроводниковых детекторов в экспериментах на кинематическом сепараторе SHELS. В 2015 г. детектирующая система GABRIELA была модернизирована. Одной из главных задач являлось создание новой высокочувствительной детектирующей системы в фокальной плоскости сепаратора, позволяющей регистрировать ядра отдачи и альфа-, бета-, гамма-распады как материнских, так и дочерних ядер; также планируется проведение экспериментов по синтезу новых изотопов тяжелых ядер с атомными номерами $Z \geq 82$, в том числе трансфермиевых элементов, исследованию свойств их радиоактивного распада и поперечных сечений образования с целью изучения новых закономерностей структуры ядер тяжелых элементов, определяющих свойства радиоактивного распада и процессы формирования тяжелых ядер.

Ключевые слова: GABRIELA, сепаратор SHELS, реакция полного слияния, альфа-распад, Si-,Ge-детекторы, энергетическое разрешение.

Об авторах

Еремин Александр Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Ядерная физика» Государственного университета «Дубна».

Тезекбаева Мерейгуль Сайлаубаевна — студент-магистр кафедры «Ядерная физика» Государственного университета «Дубна».

Комбинированная установка *GABRIELA* располагающаяся в фокальной плоскости сепаратора, включает в себя детектирующую камеру, фокальный двухсторонний детектор, один германиевый *Clover* детектор и 4 германиевых однокристальных детектора. Детектирующая сборка из полупроводниковых Si-детекторов («колодец») представляет собой фокальный двухсторонний 100×100 мм^2 стриповый детектор, по периметру которого расположены четыре боковых 128-стриповых детектора. Кремниевые детекторы обеспечивают регистрацию альфа-, бета-частиц и осколков деления в геометрии, близкой 4π.

В работе рассматривается устройство полупроводниковых детекторов и проводится их энергетическая калибровка. Основной задачей настоящей работы является анализ экспериментальных данных, полученных в ноябре 2015 г. и январе 2016 г. в экспериментах по изучению характеристик модернизированной детектирующей системы GABRIELA при помощи тестовых реакций $^{48}Ca + {}^{207}Pb \rightarrow {}^{255}No^*$, $^{48}Ca + {}^{207}Bi \rightarrow {}^{255}Lr^*$. Ведется поиск последовательных α-α, α-γ корреляций и ядро отдачи — α корреляций для детального изучения свойств радиоактивного распада изотопа ^{255}Lr и его дочерних изотопов.

Для калибровки многострипового кремниевого детектора установки GABRIELA была использована тестовая реакция $^{48}Ca + {}^{207}Pb \rightarrow {}^{255}No^*$ и определено энергетическое разрешение (рис. 2).

© Тезекбаева М. С., Еремин А. В., 2016

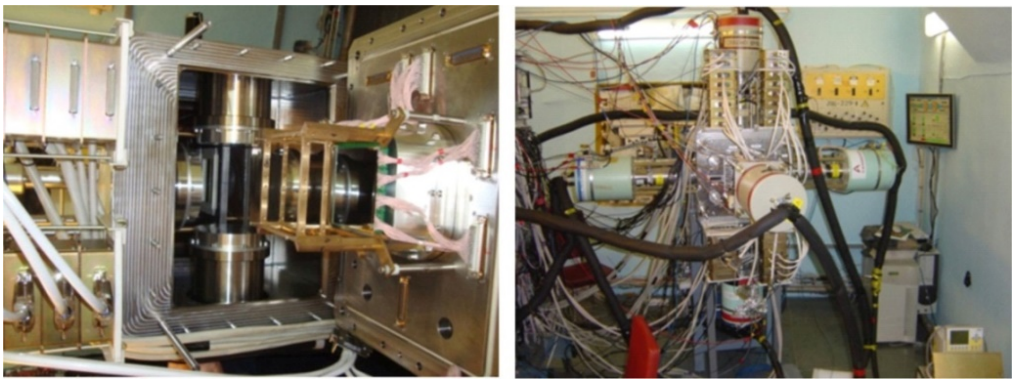


Рис. 1. Фотография слева: держатель с новыми фокальным и боковыми детекторами, расположенный на заднем фланце новой детекторной камеры. Фотография справа: новая детекторная камера. Германиевые гамма-детекторы окружают *DSSD* 100x100 мм^2, с задней стороны камеры располагается *Clover* германиевый детектор

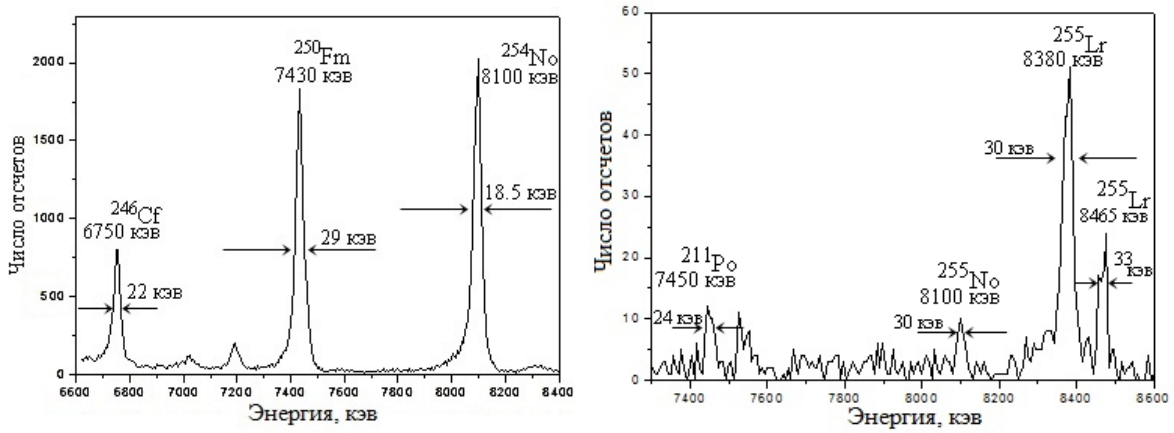


Рис. 2. Слева: идентификация пиков с определением энергетического разрешения для реакции ^{48}Ca + ^{207}Pb → ^{255}No*. Справа: идентификация пиков с определением энергетического разрешения для реакции ^{48}Ca + ^{207}Bi→^{255}Lr*

В ходе проведения эксперимента были изучены реакции полного слияния ^{48}Ca + + ^{208}Pb → ^{256}No* и ^{48}Ca + ^{209}Bi → ^{257}Lr*. Функции возбуждения для этих реакций были детально измерены в работах [4; 5]. Энергия пучка ^{48}Ca выбиралась близкой к максимуму функции возбуждения 2n канала. Следующим этапом в обработке данных являлось изучение характеристик радиоактивного распада изотопов 102 и 103 элементов (^{254}No и ^{255}Lr), которые образовывались в упомянутых выше реакциях.

Для реакции с ^{209}Bi проводился поиск корреляций типа ядро отдачи — альфа и мгновенные альфа — гамма.

Для распада ^{255}Lr велся поиск временного распределения коррелированных событий ядро отдачи — альфа. Параметры поиска показаны на рис. 3. Энергетический диапазон для альфа-частиц составил 8200—8600 кэв и был разделен на 2 диапазона для получения наиболее точных результатов корреляций. Диапазон значений для ядер отдачи был установлен 500—4000 каналов. Основываясь на табличных данных, временные условия для корреляций были выбраны от 0,1—5 периодов полураспада ^{255}Lr.

Для альфа-частиц в энергетическом диапазоне 8200—8400 кэв было получено время жизни $\tau = 45{,}32$ сек и период полураспада $T_{1/2} = \tau \ln 2 = 31{,}4$ сек. Для альфа-части ^{255}Lr в энергетическом диапазоне 8400—8600 кэв получен период полураспада $T_{1/2} = 2{,}61$ сек.

Распаду изотопа ^{255}Lr соответствуют два периода полураспада с определенными энергиями. Это говорит о том, что в одном случае распад происходит из основного состояния, а в другом случае — из изомерного.

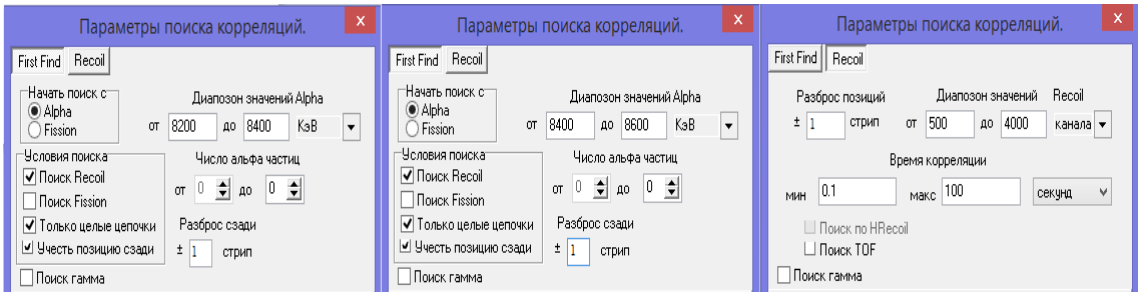


Рис. 3. Параметры поиска корреляций ядро отдачи – альфа для изотопа ^{255}Lr

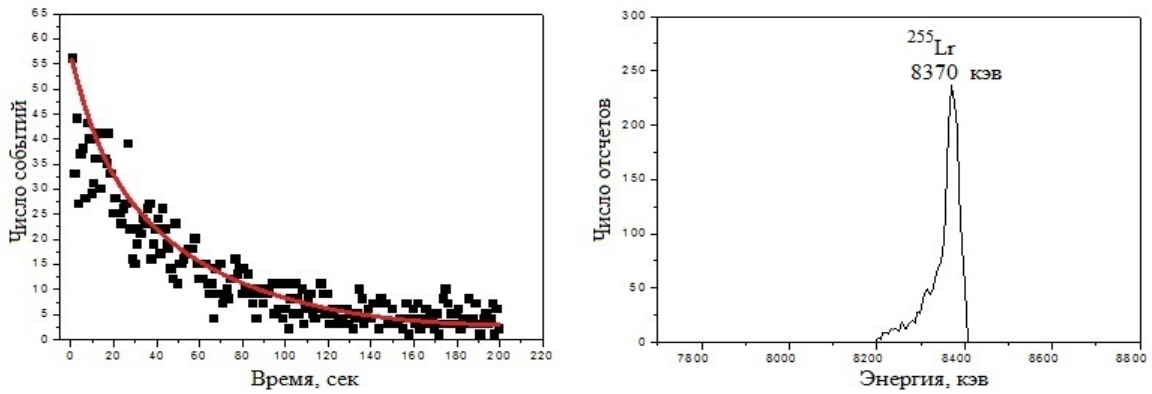


Рис. 4. Слева: временное распределение коррелированных событий ядро отдача — альфа, для альфа-частиц с энергией 8200—8400 кэв. Справа: коррелированная альфа-линия ^{255}Lr с энергией 8400—8600 кэв

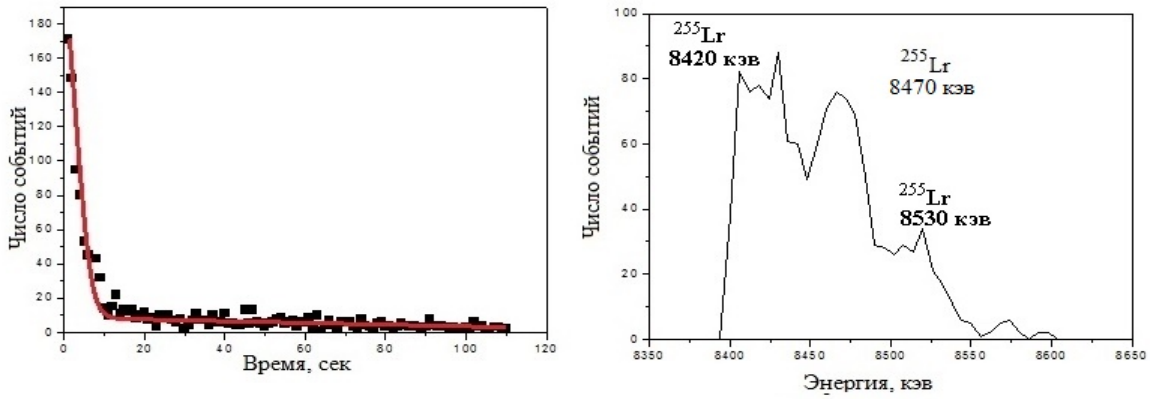


Рис. 5. Слева: временное распределение коррелированных событий ядро отдача — альфа, для альфа-частиц с энергией 8400—8600 кэв. Справа: коррелированные альфа-линии ^{255}Lr

В процессе обработки экспериментальных данных также проводился поиска и анализ мгновенных альфа-частиц с гамма-квантами. Для альфа-частиц, которые могут быть отнесены к распаду ^{255}Lr, проходил поиск гамма-квантов. Параметры поиска корреляций приведены на рис. 6.

Диапазон значений для альфа-частиц в этом случае брался общий от 8200 до 8700 кэв. Подключена опция «Поиск гамма» с указанием диапазона и временем корреляций.

Время корреляций подбиралось с учетом возможной разницы времен между разными крейтами КАМАК. Мгновенные события могут регистрироваться в разных крейтах, гамма-кванты в одном крейте, а альфа-частицы — в другом. Тогда разница регистрации между временами может составлять до 5 мксек. Для большей надежности был взят двух кратный запас — 10 мксек. Условия для ядер — отдачи остались теми же, что и при поиске корреляций ядро отдачи — альфа. На рис. 7 справа показаны коррелированные альфа-линии, а слева — гамма-линии тех гамма-квантов, которые коррелировали с альфа-частицами.

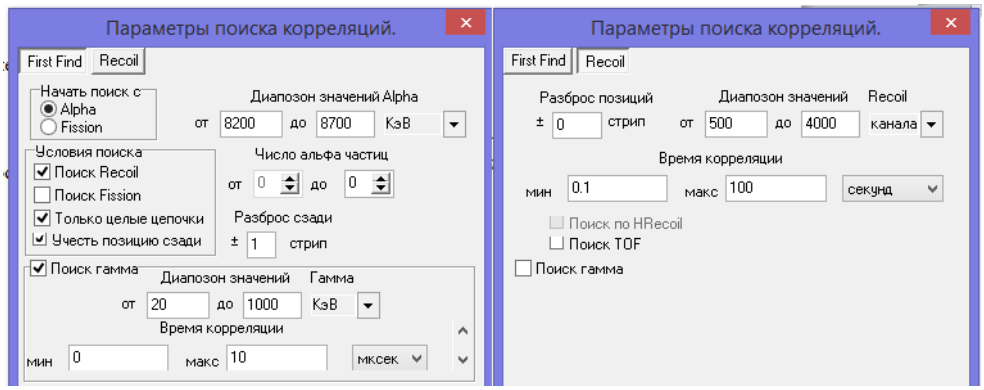


Рис. 6. Параметры поиска корреляционных совпадений между мгновенными альфа-частицами и гамма-квантами для изотопа ^{255}Lr

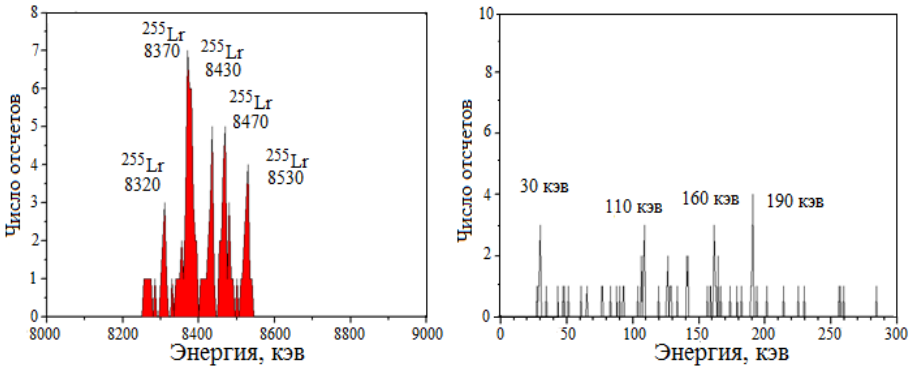


Рис. 7. Слева: коррелированные альфа-линии. Справа: коррелированные гамма-линии

Таким образом, по полученным данным из пункта можно построить схему распада для ^{255}Lr в основное и возбужденные состояния дочернего изотопа ^{251}Md.

На рис. 8 верхней жирной линией показано изомерное состояние изотопа ^{255}Lr с периодом полураспада $T_{1/2} = 2{,}6$ секунды, черной горизонтальной линией — основное состояние с периодом полураспада $T_{1/2} = 31{,}4$ секунды. Если изотоп ^{255}Lr испустит альфа-частицу с энергией 8420 кэв, то соответствующий ей гамма-квант будет иметь энергию 110 кэв.

Для реакции с ^{208}Pb проходил поиск ядро отдачи — альфа и альфа—альфа корреляций между материнским и дочерним ядрами ^{254}No–^{250}Fm.

На рис. 9 показаны условия поиска корреляционных совпадений ядро отдачи — альфа для изотопа ^{254}No.

Для распада ^{254}No велся поиск временного распределения коррелированных событий ядро отдачи — альфа. Энергетический диапазон был взят от 7950 до 8160 кэв. Временные условия составили 200 секунд, что соответствует четырем периодам полураспада ^{254}No, взятых из табличных данных.

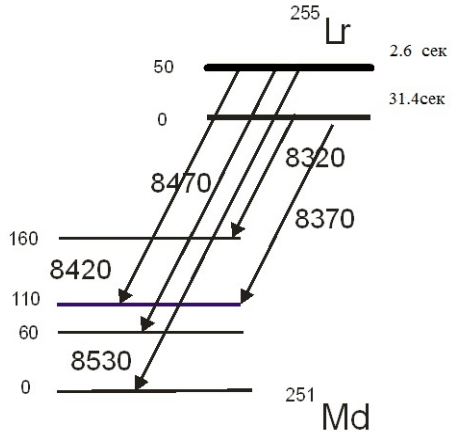


Рис. 8. Схема энергетических уровней для изотопа ^{255}Lr при распаде в основное и возбужденные состояния дочернего изотопа ^{251}Md

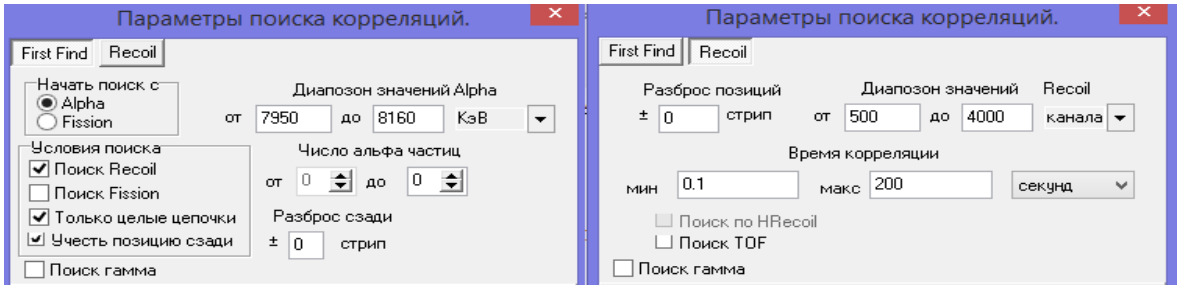


Рис. 9. Параметры поиска корреляций ядро отдачи – альфа для изотопа ^{254}No

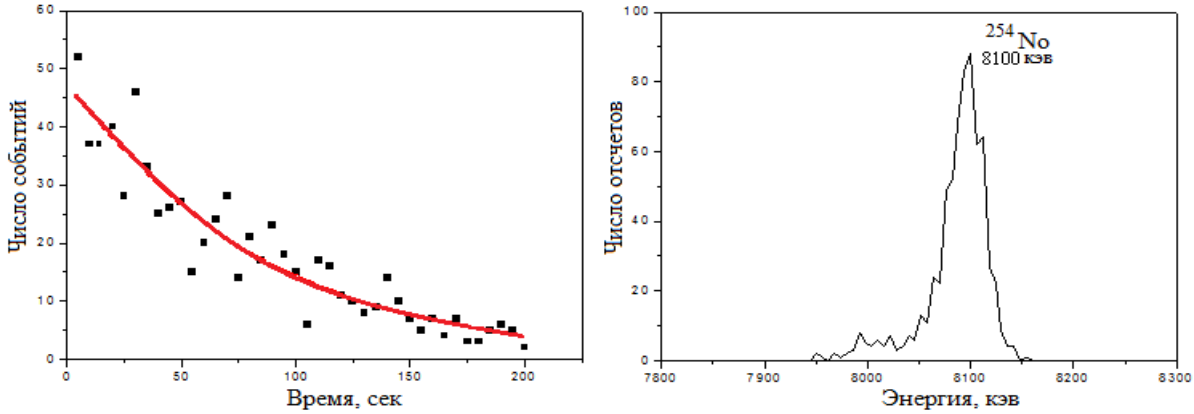


Рис. 10. Слева: временное распределение коррелированных событий ядро отдача — альфа, для альфа-частицы с энергией 7950—8160 кэв. Справа: коррелированная альфа-линия ^{254}Noс энергией 8100 кэв

Среднее время жизни составило t = 88,5 секунд, соответственно период полураспада равен $T_{1/2}$ = 61 секунде, что хорошо совпадает с табличными данными.

На рис. 11 показаны условия поиска альфа — альфа корреляций между ^{254}No–^{250}Fm.

В окне «FirstFind» указывается энергетический диапазон в кэв, в котором лежат альфа-частицы, испущенные материнским ядром ^{254}No. Указывается число альфа-частиц, с которыми происходит поиск совпадений. В графе «разброс сзади» указываем 0 стрипов, чтобы исключить случайные события, которые могу плохо повлиять на результат корреляций. Должны учитываться позиции стрипов сзади.

В окне «Alpha1» указывается диапазон энергий для альфа-частицы, испущенной дочерним ядром ^{250}Fm. Время корреляции устанавливается порядка трех времен полураспада дочернего ядра. По табличным данным период полураспада ^{250}Fm составляет $T_{1/2}$ = 30 минут.

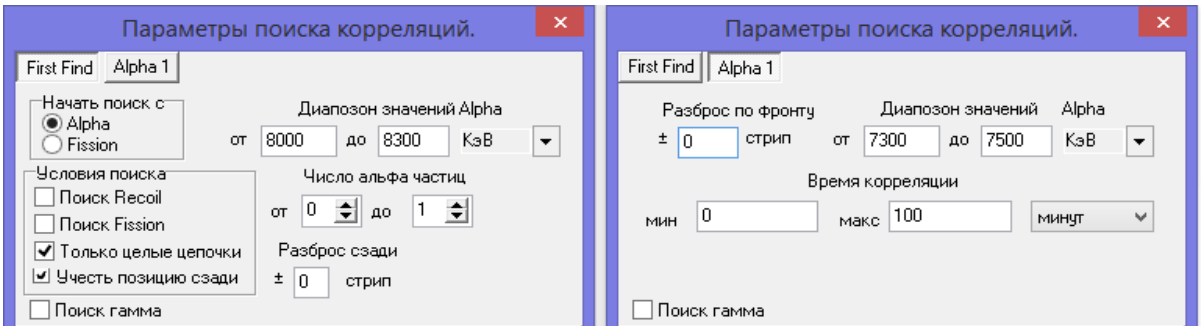


Рис. 11. Параметры поиска корреляций альфа-альфа между ^{254}No–^{250}Fm

В ходе поиска совпадений получен коррелированный альфа–спектр и, используя значения временных корреляций, определен период полураспада ^{250}Fm, показанный на рис. 12.

Среднее время жизни составило t = 1225 секунд, соответственно, период полураспада равен $T_{1/2}(^{250}\text{Fm})$ = 14,5 минут.

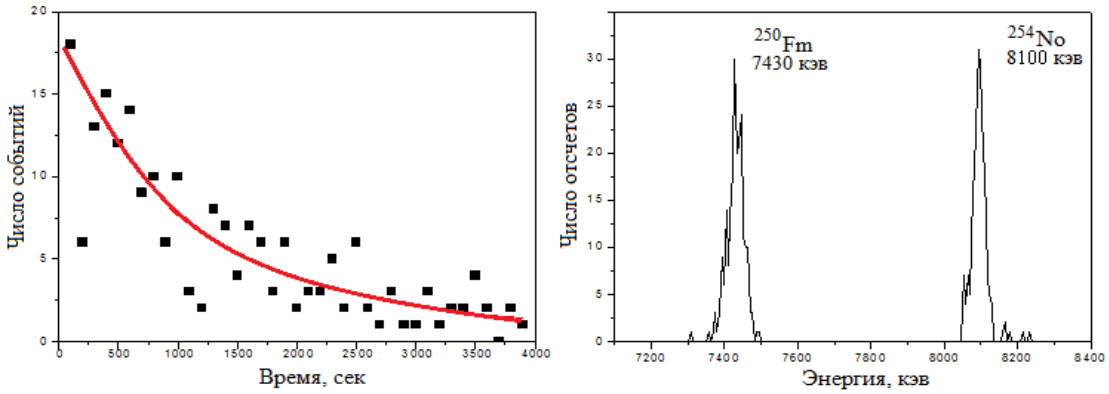


Рис. 12. Слева: временное распределение коррелированных событий альфа—альфа. Справа: коррелированные альфа-линии ^{250}Fm и ^{254}No

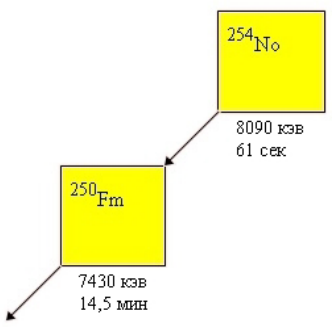


Рис. 13. Цепочка альфа-распада ^{254}No–^{250}Fm

Поиск новых изотопов. Метод корреляций имеет важное применение. В случае, если имеется цепочка альфа-распада, которая начинается в неизвестной области, и ее изотопы с известными свойствами радиоактивного распада и число зарегистрированных распадов позволяет быть уверенным, что ни одно из звеньев цепочки не пропущено, тогда, используя метод корреляций, т.е. фиксируя известные ядра, можно получить сведения о первоначальном изотопе и проследить последовательность распадов по цепочке вверх.

Библиографический список

1. Еремин, А. В. Первые экспериментальные тесты модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА / А.В. Еремин [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. – 2015. – Т. 12, № 1.

2. Еремин, А. В. Экспериментальные тесты модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА (*SHELS*) с использованием ускоренных ионов ^{50}Ti / А.В. Еремин [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. – 2015. – Т. 12, № 1.

3. Hauschild, K. GABRIELA: A new detector array for \gamma-ray and conversion electron spectroscopy of transfermium elements / K. Hauschild [et. al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 560. – 2006. – P. 388–394.

4. Hessberger F.P. et. al. Z. Phys. A 359. – 1997. – P. 415–425.

5. Hessberger F.P. et. al. Z. Phys. A 322. – 1985. – P. 557–566.

Поступила в редакцию
15.08.2016