

# Лабораторная работа № 2

## Гамма-спектрометр на основе сцинтилляционного счетчика

### Кафедра физики ускорителей

Вероника Бояркина, Вячеслав Федоров, Анна Шуклина

## Теория

### Принцип действия сцинтилляционного счётчика

- Заряженная частица, проходя через сцинтиллятор, помимо ионизации атомов и молекул, возбуждает их.
- Возвращаясь в невозбуждённое (основное) состояние, атомы испускают фотоны с энергией видимого, ближнего ультрафиолетового или инфракрасного диапазонов (сцинтилляция или радиолюминесценция).
- Фотоны, попадая на катод ФЭУ, выбивают электроны, которые усиливаются внутри ФЭУ, в результате чего на аноде возникает электрический импульс, который дополнительно усиливается и регистрируется электроникой.
- Детектирование нейтральных частиц (нейтронов,  $\gamma$ -квантов) происходит по вторичным заряженным частицам (электроны, позитроны, ядра отдачи и осколки расщепленных ядер), образующимся при взаимодействии нейтронов и  $\gamma$ -квантов с атомами сцинтиллятора.

### ФЭУ

Фотоэлектронный умножитель — это электровакуумный прибор, в котором для преобразования светового потока в поток электронов в вакууме используют внешний фотоэффект, а число электронов умножается за счёт эффекта вторичной эмиссии

### Сцинтилляторы

- Если принять коэффициент вторичной эмиссии одинаковым для всех  $n$  динодов, коэффициент усиления умножителя ( $G$ ):
$$G = \sigma^n$$
- Коэффициентом вторичной эмиссии ( $\sigma$ ) называют среднее количество вторичных электронов, выбиваемых одним первичным электроном.
- Средняя амплитуда на аноде ФЭУ при регистрации вспышки из  $N_\gamma$  фотонов:  $A = N_\gamma \cdot \eta \cdot \epsilon_C \cdot G$
- ФЭУ также имеет отличную от единицы эффективность сбора фотоэлектронов на первый динод ( $\epsilon_C$ ).

Конверсионная эффективность — эффективность преобразования сцинтиллятором энергии заряженной частицы в световую  
Световой выход — это число фотонов люминесценции на единицу энергии, потерянной ионизирующей частицей в сцинтилляторе  
Отклик сцинтилляционного счётчика характеризуют количеством фотоэлектронов, зарегистрированных ФЭУ, на единицу поглощенной в сцинтилляторе энергии (практическая эффективность):  $N_{(p.e.)}/M\text{эВ} = L \cdot \eta \cdot N_\gamma / M\text{эВ}$   $L$  — коэффициент светосбора,  $\eta$  — квантовая эффективность фотодетектора  
Чем больше практическая эффективность сцинтилляционного счётчика, тем лучше его энергетическое разрешение. Коэффициент светосбора  $L$  зависит от прозрачности сцинтиллятора к собственному излучению, формы и размера сцинтиллятора и световодов, качества поверхности и отражающего покрытия. Для максимальной практической эффективности счётчика необходимо, чтобы максимум спектра излучения сцинтиллятора совпадал с максимумом спектра квантовой эффективности фотодетектора.

Время высвечивания характеризует продолжительность световой вспышки сцинтиллятора  $I(t) = I_0 \exp(-t/\tau)$   $\tau$  — время высвечивания, в течение которого интенсивность падает в  $e$  раз

### Неорганические сцинтилляторы

- Высокая плотность вещества и большой атомный номер, что способствует эффективному поглощению  $\gamma$ -квантов на небольшой толщине кристалла
- Тяжелые неорганические кристаллы применяются для регистрации электронов (позитронов) высокой энергии
- Механизм сцинтилляции неорганических кристаллов — зонная теория.

### Органические сцинтилляторы

Малый атомный номер ( $Z_C = 6$ ,  $Z_H = 1$ ), небольшая плотность (около  $1 \text{ г/см}^3$ ) и небольшая эффективность поглощения  $\gamma$ -квантов. Они применяются для регистрации заряженных частиц. Наиболее высокой конверсионной эффективностью обладают сцинтилляторы, содержащие ароматические соединения. Органические сцинтилляторы могут быть подразделены на три широких класса: кристаллы, пластики и жидкости. Кристаллы, такие как антрацен, стильбен и нафталин очень прочны и имеют довольно высокий световыход, но их люминесцентное излучение анизотропно, что ухудшает в определенных ситуациях энергетическое

разрешение. Жидкие сцинтилляторы — раствор одного или нескольких флюоресцирующих веществ (р-терфенил, (b-)PBD, PPO и др.) в органическом растворителе (толуол, ксилол, бензол, декалин и т.п.). Также в растворитель могут быть добавлены спектросмещающие добавки (POPOP, bis-MSB, BBQ и др.) для лучшего согласования излучения со спектральной чувствительностью фотодетектора.

•Пластические сцинтилляторы — раствор флюоресцентных добавок, который после полимеризации образует твердое вещество. В качестве полимерной основы чаще всего используют поливинилтолуол (ПВТ) или полистирол. •В органических сцинтилляторах отдельные молекулы слабо взаимодействуют друг с другом, то есть энергетические уровни отдельных молекул практически не возмущены присутствием соседних молекул. Поэтому можно считать, что характер взаимодействия заряженных частиц с веществом органического сцинтиллятора не зависит от его агрегатного состояния и сводится к ионизации и возбуждению отдельных молекул непосредственно заряженной частицей. Механизм сцинтилляций в органических материалах можно описать как последовательная передача энергии возбуждения от молекул основы к первичным центрам флуоресценции и затем к последующим центрам с постепенным понижением энергии излучаемых фотонов.

## Сцинтилляционный счётчик как гамма-спектрометр

Гамма-спектрометр — прибор, измеряющий энергию  $\gamma$ -квантов. Состоит из детектора  $\gamma$ -квантов (сцинтилляционного счётчика), линейного усилителя и амплитудного анализатора импульсов (ЗЦП или АЦП). Гамма-спектрометр должен иметь достаточно большую эффективность полного поглощения энергии  $\gamma$ -кванта и хорошее энергетическое разрешение. Для эффективного полного поглощения  $\gamma$ -кванта на небольшой длине в сцинтилляционных спектрометрах применяют неорганические кристаллы высокой плотности и с большим атомным номером элементов, входящих в их состав. Чтобы гамма-спектрометр имел хорошее энергетическое разрешение сцинтиллятор должен иметь высокий световыход, а счётчик в целом — высокую практическую эффективность и хорошую однородность светосбора.

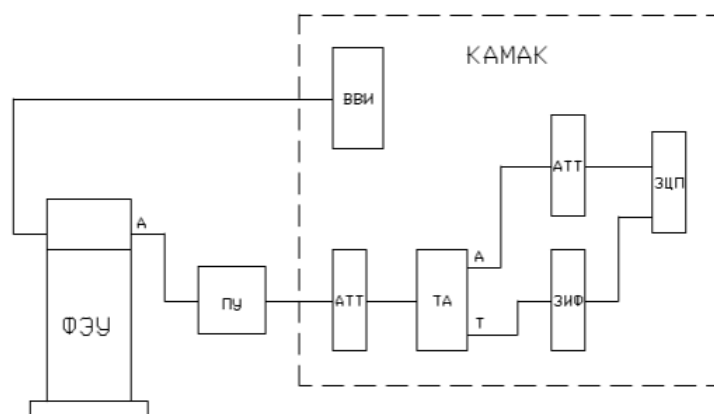
## Эффективность гамма-спектрометра

см. формулы в методичке

## Энергетическое разрешение гамма-спектрометра

см. формулы в методичке

## Установка



1 фотоэлектронный умножитель ФЭУ-143, 2 высоковольтный источник В0308 (ВВИ), 3 время-амплитудный блок (ТА), 4 аттенюаторы — 2 блока А0608 (АТТ), 5 блок ЗИФ D0302 (линия задержки + формирователь импульсов), 6 зарядово-цифровой преобразователь С0312 (ЗЦП), 7 сцинтилляторы в светоотражающей обертке с одной открытой гранью: NaI(Tl), ор- тогерманат висмута (BGO), пластиковый сцинтиллятор (на основе ПВТ), 8 радиоактивный изотоп  $^{137}\text{Cs}$ .

## Программное обеспечение

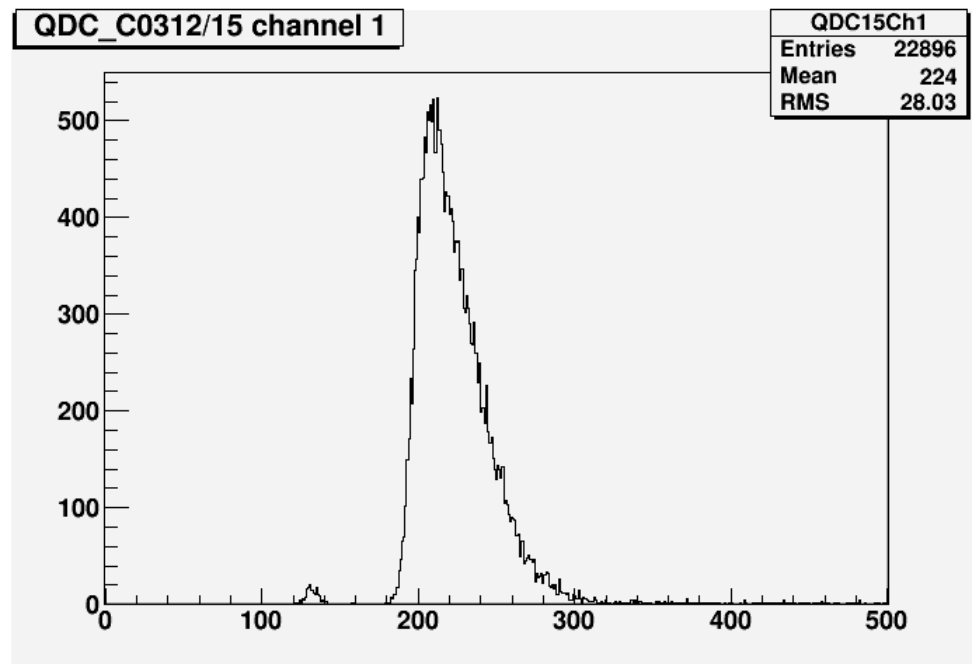
ROOT

## Задания

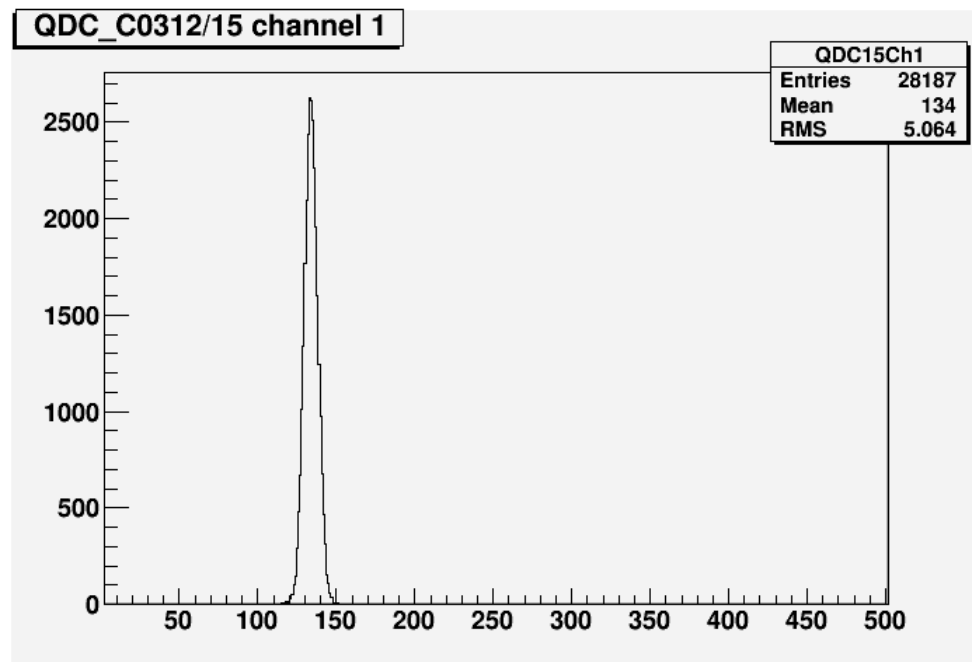
1. Убедиться, что кожух ФЭУ завинчен, чтобы наружный свет не попадал на фотока- тод.

2. Запустить управляющую программу. Установить напряжение питания ФЭУ равное 1300 В.

3. При небольшом ослаблении (3+3 db) набрать амплитудный спектр импульсов темнового тока фотоумножителя и определить центр тяжести полученного распределения.

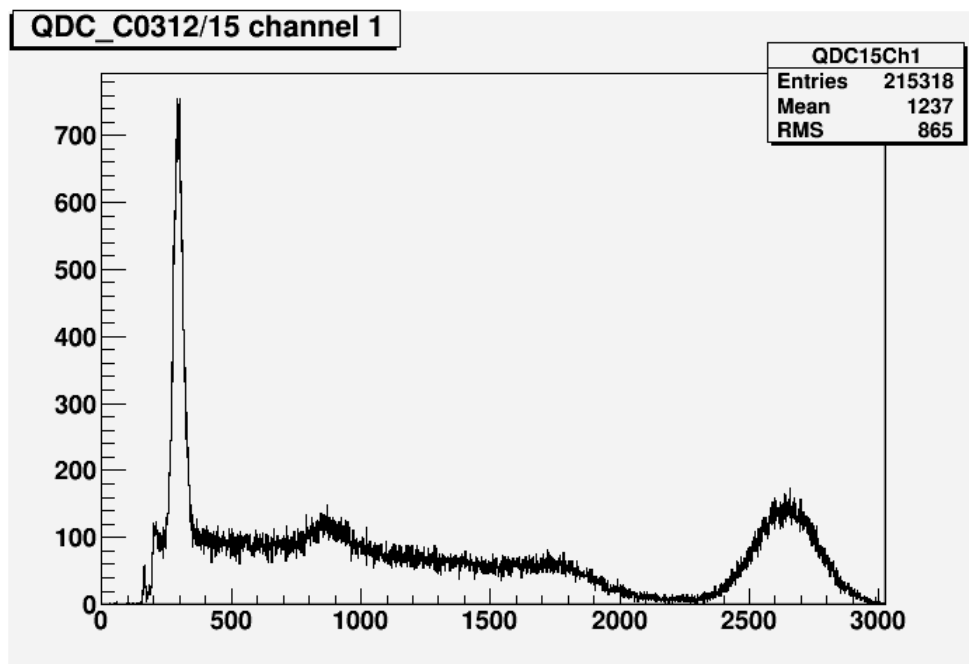


4. При том же значении ослабления откалибровать положение пьедестала, для чего набрать амплитудный спектр при значении задержки в первом канале ЗИФ равной 50 мкс, при этом ворота ЗЦП будут не совпадать по времени с сигналом. Центр тяжести спектра даст амплитуду, соответствующую пьедесталу. Пьедестал необходимо учитывать при определении амплитуды сигнального спектра.

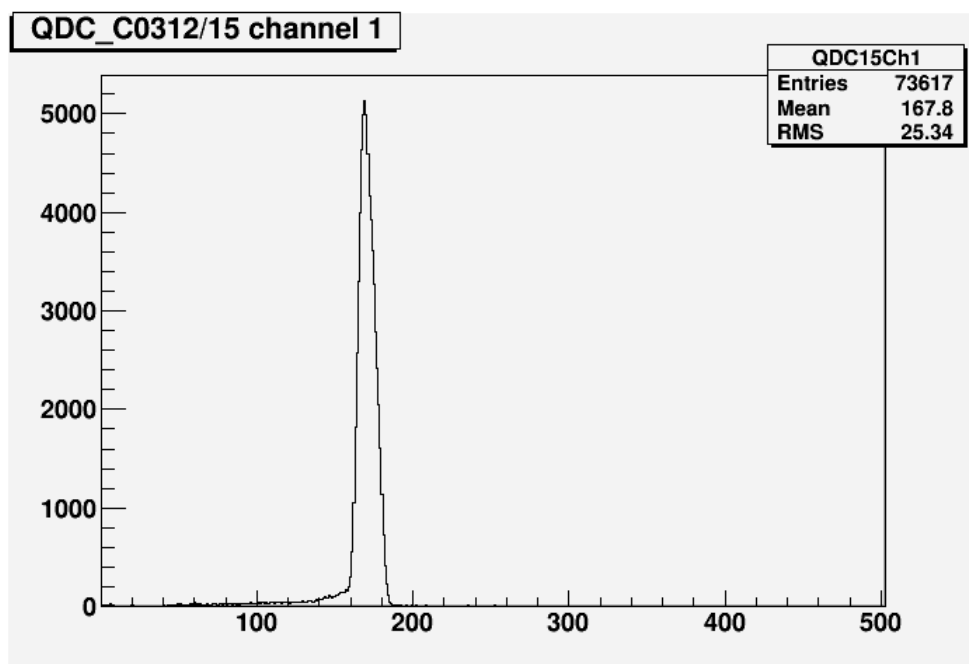


5. Снять высокое напряжение и установить на фотокатод ФЭУ сцинтиллятор NaI(Tl) с изотопом  $^{137}\text{Cs}$ . Подать высокое напряжение на фотоумножитель и установить такое ослабление аттенюатора, чтобы наблюдать спектр импульсов, соответствующий

6. Набрать амплитудный спектр и определить амплитуды соответствующие максимуму пика полного поглощения, краю спектра комптоновских электронов и максимуму пика обратного рассеяния. Также измерить полную ширину на полувысоте пика полного поглощения (ПШПВ).

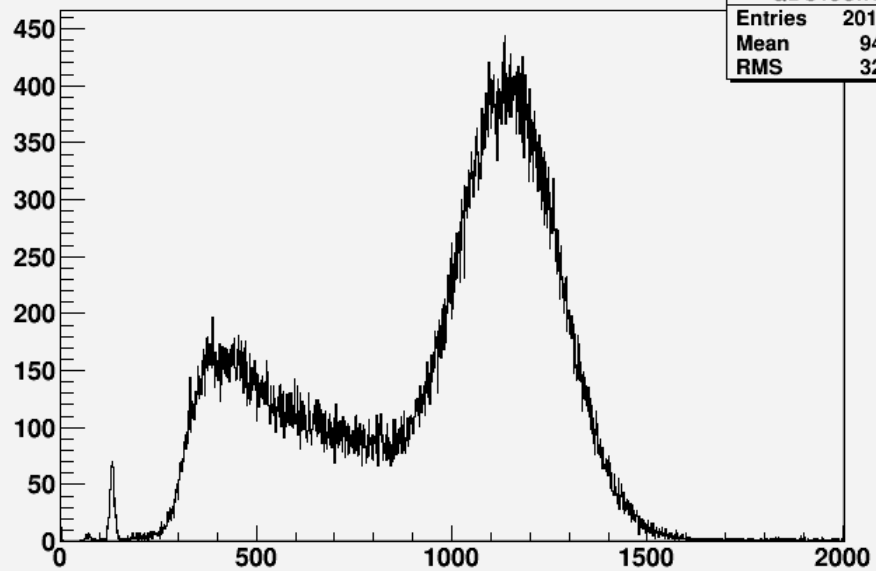


Не меняя ослабление, откалибровать пьедестал, как описано в п.4, и учесть его при вычислении амплитуд.

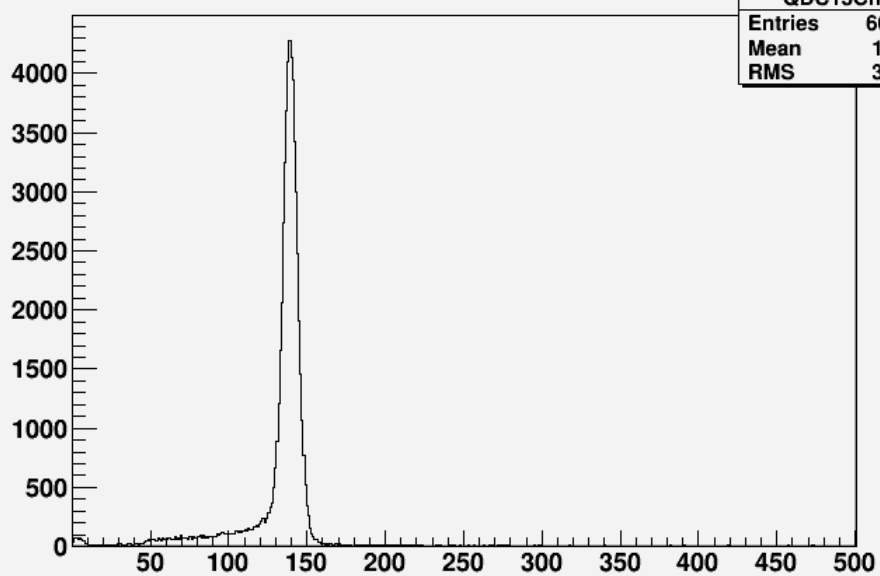


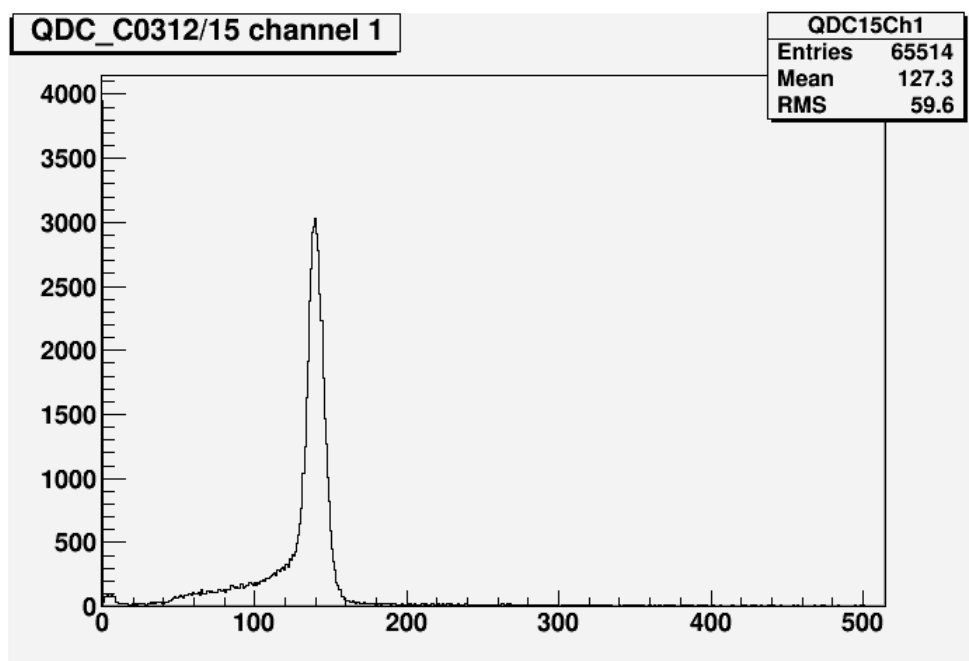
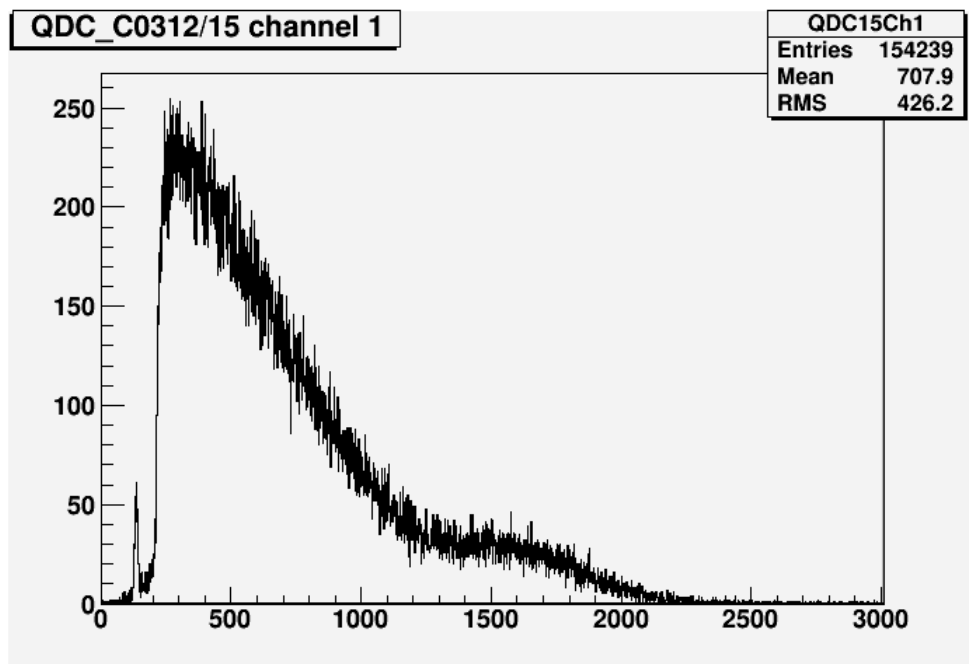
7. Аналогично получить спектры импульсов для BGO и пластического сцинтиллятора. Для BGO измерить положение пика полного поглощения и ПШПВ, а для пластического сцинтиллятора — положение края спектра комптоновских электронов. Для обоих спектров откалибровать и учесть пьедестал.

QDC\_C0312/15 channel 1



QDC\_C0312/15 channel 1





8. Закончив измерения, не забудьте убрать изотоп  $^{137}\text{Cs}$  в свинцовый домик!

## Обработка и представление результатов

1. Для отчета необходимо иметь распечатанные амплитудные спектры темнового тока ФЭУ, сцинтилляционного счетчика с NaI(Tl), BGO, пластическим сцинтиллятором.

```
In [16]: import pandas as pd
```

```
In [17]: columns = ['amplitude', 'scintillator', 'channel', 'width', 'attenuation']
data_df = pd.DataFrame([[0, 'dark current', 224-134, 40, 3+3],
                        [662, 'NaI', 2638-167, 300, 21+18],
                        [184, 'NaI', 850-167, 300, 21+18],
                        [662, 'BGO', 1136-135, 300, 21+3],
                        [662, 'plastic', 1571-127, 300, 21+3],
                        [478, 'plastic', 300-127, 500, 21+3]],
                        columns=columns)
```

```
In [18]: data_df['number'] = data_df['channel']/10**(-data_df['attenuation']/20)
data_df['energy'] = data_df['amplitude']/data_df['number']
```

```
In [19]: data_df
```

Out[19]:

	amplitude	scintillator	channel	width	attenuation	number	energy
0	0	dark current	90	40	6	179.573608	0.000000
1	662	Nal	2471	300	39	220228.106813	0.003006
2	184	Nal	683	300	39	60872.439075	0.003023
3	662	BGO	1001	300	24	15864.780857	0.041728
4	662	plastic	1444	300	24	22885.857699	0.028926
5	478	plastic	173	500	24	2741.865223	0.174334

3. Определить энергетическое разрешение  $\Delta E/E$  сцинтилляционного счетчика с кри-сталлом NaI(Tl) и с BGO.  $\Delta E$  — полная ширина на половине высоты пика полного поглощения в кэВ,  $E = 662$  кэВ.

```
In [20]: data_df['resolution'] = data_df['width']/data_df['channel']
```

```
In [22]: data_df
```

Out[22]:

	amplitude	scintillator	channel	width	attenuation	number	energy	resolution
0	0	dark current	90	40	6	179.573608	0.000000	0.444444
1	662	Nal	2471	300	39	220228.106813	0.003006	0.121408
2	184	Nal	683	300	39	60872.439075	0.003023	0.439239
3	662	BGO	1001	300	24	15864.780857	0.041728	0.299700
4	662	plastic	1444	300	24	22885.857699	0.028926	0.207756
5	478	plastic	173	500	24	2741.865223	0.174334	2.890173

# Вопросы

см. методичку

```
In [ ]:
```