

Работа 1.1.4.

Измерение интенсивности радиационного фона

Корнеев Е.С.

Измерение интенсивности радиационного фона

Цель работы: применение методов обработки экспериментальных данных для изучения статистических закономерностей при измерении интенсивности радиационного фона.

В работе используются: счетчик Гейгера-Мюллера, блок питания, компьютер с интерфейсом связи со счетчиком.

Случайный разброс результатов измерений может быть связан как с погрешностью измерений, так и со случайными изменениями самой измеряемой величины. Поток космических частиц, которые составляют большую часть радиационного фона, изменяется со временем случайным образом. Если изменения происходят около какого-то значения, то говорят, что величина флуктуирует. В таком случае характеристиками этой величины в целом являются ее среднее значение и среднеквадратичное отклонение от того среднего. Для нахождения среднего значения и среднеквадратичного отклонения применяются те же методы, которые используются при расчете средних значений и случайных погрешностей измерений.

Космические лучи разделяют на первичные, которые приходят на орбиту Земли из космоса, и вторичные, которые возникают благодаря взаимодействию первичных с атмосферой Земли и составляют основную часть космических лучей, доходящих до поверхности Земли.

Подавляющая часть первичных лучей приходит к Земле из Галактики и лишь небольшая часть связана с активностью Солнца. О механизме возникновения космических лучей в Галактике пока существуют лишь гипотезы. Часть излучения возникает в звездах Галактики также, как на Солнце во время хромосферных вспышек. Более мощное излучение, по-видимому, связано со вспышками сверхновых звезд и образующимися при этом импульсами. Большую роль в ускорении космических частиц могут играть возникающие при вспышках сверхновых звезд плазменные облака, движущиеся с огромными скоростями, и галактические магнитные поля.

Первичные космические лучи — поток стабильных частиц, имеющих большую кинетическую энергию, которая составляет от 10^9 до 10^{21} эВ. Установлено, что во всем пространстве поток частиц одинаков по всем направлениям (изотропен).

Основной величиной, характеризующей количество частиц в космических лучах, является интенсивность I . По определению интенсивность есть число частиц, падающих в единицу времени на единичную площадку, перпендикулярную к направлению наблюдения, отнесенное к единице телесного угла (стерадиану). Единицей измерения при этом является

$$\frac{\text{число частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с}}$$

В случае изотропного распределения направлений космических лучей, что действительно имеет место вне атмосферы Земли, плотность F потока частиц (из полусферы направлений) равна

$$F = 2\pi \int_0^{2\pi} I \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta = \pi I \left(\frac{\text{число частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с}} \right)$$

Концентрация частиц, имеющих абсолютное значение скорости V :

$$n = \frac{4\pi I}{V} \left(\frac{\text{число частиц}}{\text{см}^3} \right)$$

Отметим, что подавляющее большинство частиц вне атмосферы движется со скоростями, близкими к скорости света, поэтому для оценки концентрации n вместо V можно использовать скорость света c . Отметим также, что вблизи поверхности Земли интенсивность космического излучения пропорциональна $\cos^2(\theta)$, где θ — угол с вертикалью.

Плотность потока частиц измеряется количеством частиц, проходящих за 1 секунду через площадку в 1 см^2 . На расстоянии порядка 50 км над поверхностью Земли плотность потока частиц равна приблизительно $1 \text{ частица/см}^2 \cdot \text{с}$. Большую часть потока здесь составляют частицы с энергией порядка 10 ГэВ, частицы с меньшей энергией практически отсутствуют, что, видимо, связано с влиянием магнитных полей Земли и Солнечной системы.

В основном первичные космические лучи состоят из протонов (92%) и ядер гелия (6.6%) — называемых α -частицами. Обнаружены и более тяжелые ядра (вплоть до никеля), составляющие в сумме около 0.8%. Электронов и позитронов набирается примерно 1%, причем позитронов в 10 раз меньше, чем электронов. Число γ -квантов с энергиями больше 10^8 эВ составляет всего 0.01%.

Временные изменения интенсивности потока первичных космических лучей невелики. Их изменения в основном для частиц порядка 1 ГэВ связаны с изменениями магнитных полей в Солнечной системе, вызываемых 11-летними циклами солнечной активности, 27-дневным периодом вращения Солнца вокруг своей оси, а также хромосферными вспышками на Солнце (5-13 вспышек в активный год) и магнитными бурями в магнитосфере Земли. Попадая в атмосферу Земли, первичные космические лучи взаимодействуют с ядрами атомов атмосферных газов и образуют вторичные космические лучи. Из 100 000 протонов первичных космических лучей до поверхности Земли доходит только один. Но появляются вторичные протоны, которые вместе с мюонами и нейтронами составляют так называемую жесткую компоненту космических лучей. Жестким называется излучение, проходящее через свинцовую пластину толщиной 10 см.

Мягкая компонента (задерживаемая свинцовой пластиной), состоит в основном из электронов, позитронов и фотонов. Мягкая компонента существует вблизи поверхности Земли лишь потому, что она генерируется жесткой. Плотность потока мягкой компоненты космических лучей с увеличением высоты возрастает быстрее, чем жесткой. На уровне моря плотность потока мягкой компоненты в вертикальном направлении составляет примерно половину плотности потока жесткой компоненты, которая равна $1.7 \cdot 10^{-2}$ частиц/см² · с, а на высоте 15 км плотность мягкой компоненты в 4-5 раз больше, чем жесткой. Общая плотность потоков максимальна на высоте приблизительно 17 км. В целом космические лучи на уровне моря приблизительно в 100 раз менее плотны, чем на верхней границе атмосферы, и на 2/3 состоят из мюонов. Анализ дна океана показал, что в среднем плотность потока не изменилась за последние 35 тысяч лет.

Плотность потока лучшей вблизи поверхности земли сильно зависит от направления. Она максимальна в вертикальном и минимальна в горизонтальном, что связано с увеличением пути, проходимого лучами в атмосфере. Небольшие изменения плотности потока вторичных космических лучей со временем вызваны изменениями в атмосфере Земли давления, температуры и магнитных полей.

В настоящее время, хотя уже построены мощные ускорители частиц, космические лучи остаются единственным источником частиц сверхвысоких энергий. Но приходят такие частицы не часто. Частица с энергией 10^{19} эВ пролетает через площадь в один квадратный метр вблизи земной поверхности один раз в 2 тысячи лет. Конечно, если площадь увеличить, например, до 10 квадратных километров, то это будет происходить один раз в несколько дней. Частицы больших энергий можно зарегистрировать по издаваемому ими вторичному потоку частиц, называемому атмосферными ливнями частиц. Общее число частиц в ливне, зарождающемся на высоте примерно в 20—25 км над Землей, может достигать многих миллионов и покрывать площадь в несколько квадратных километров. Одновременное появление большого числа частиц на значительной площади служит подтверждением их общего происхождения и позволяет установить энергию образовавшей их частицы.

Космические лучи и естественная радиоактивность Земли и воздуха являются основным источником ионов в нижней части атмосферы Земли (до высот порядка 60 км). Ионизация в атмосфере с увеличением высоты вначале падает, а выше 1 км начинает возрастать, особенно резко с высоты 3 км. На высоте 5 км число ионов в единице объема в 3—4 раза больше, чем вблизи поверхности Земли, а на высоте 9 км — уже в 30 раз больше.

Обнаружить космические лучи и измерить их интенсивность можно по ионизации, которую они производят. Для этого используется специальный прибор — счетчик Гейгера—Мюллера. Счетчик представляет собой наполненный газом сосуд с двумя электродами. Существует несколько типов таких счетчиков. Используемый в данной работе (СТС-6) представляет собой тонкостенный металлический цилиндр, который является одним из электродов (катодом). Другим электродом

(анодом) является тонкая нить, натянутая вдоль оси цилиндра. Чтобы счетчик работал в режиме счета частиц, на электроды необходимо подать напряжение 400 В. Частицы космических лучей ионизируют газ, которым наполнен счетчик, а также выбивают электроны из его стенок. Образовавшиеся электроны, разгоняясь в сильном электрическом поле между электродами, соударяются с молекулами газа и выбивают из них новые вторичные электроны, которые в свою очередь разгоняются и снова выбивают электроны из молекул газа. В результате образуется лавина электронов, и через счетчик резко увеличивается ток.

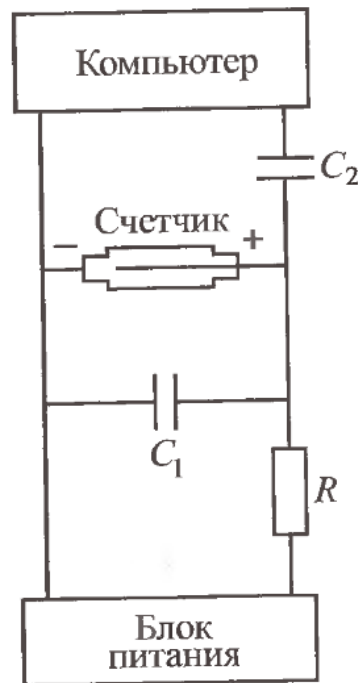


Рис. 1: Схема включения счетчика

Постоянное напряжение подается на счетчик от блока питания через сопротивление R . В исходном состоянии электроды и конденсатор C_1 заряжены до напряжения 400 В. Разделительный конденсатор C_2 не пропускает постоянное напряжение источника питания в интерфейсные схемы компьютера.

При возникновении тока через счетчик заряд на датчике и конденсаторе C_1 обеспечивает развитие электронной лавины на короткое время. В процессе разряда энергия поступает от заряженного конденсатора C_1 , подсоединенного параллельно счетчику. Разряд в счетчике прекратится, когда напряжение на счетчике уменьшится до значения при котором разность потенциалов внутри счетчика на длине свободного пробега электрона не превышает потенциала ионизации. За время порядка нескольких RC_1 схема приходит в исходное состояние. При этом через конденсатор C_2 в электронную схему интерфейса компьютера будет передан короткий импульс.

Емкость конденсатора C_1 не должна быть ни слишком милой, ни слишком большой. Запасенной в конденсаторе энергии должно хватать на создание лавинного

процесса, но вместе с тем время зарядки конденсатора от блока питания ($\tau \sim RC_1$), называемое мертвым временем счетчика, не должно быть слишком большим, так как в течение этого времени счетчик не может регистрировать частицы (обычно мертвое время составляет несколько микросекунд). В нашей установке этим условиям вполне удовлетворяет емкость самого счетчика, и конденсатор C_1 отсутствует.

Сопротивление резистора R также не должно быть ни слишком большим (это увеличивает мертвое время счетчика), ни слишком малым, чтобы конденсатор за время разряда не успевал существенно зарядиться и лавина гасла. Обычно $R \sim 1\text{МОм}$.

Число зарегистрированных частиц зависит от времени измерения, размеров счетчика, состава газа и давления в нем, а также от материала, из которого сделаны стенки счетчика. Значительную часть регистрируемых частиц составляет естественный радиоактивный фон.

Вариации потока частиц, которые существенны при измерениях в данной работе, связаны с кратковременными вариациями условий его возникновения и распространения в атмосфере Земли. Как уже говорилось, в данной работе измеряется величина (плотность потока частиц), которая меняется со временем случайным образом. Методы обработки результатов те же, что и для расчета случайных погрешностей. Что касается погрешности измерений потока частиц с помощью счетчика Гейгера-Мюллера, то оценки показывают, что они малы по сравнению с изменениями самого потока или, как говорят, с флуктуациями потока. Погрешности измерений определяются в основном временем, в течение которого восстанавливаются нормальные условия в счетчике после прохождения каждой частицы и срабатывания счетчика. Это время называется временем разрешения. Размеры счетчика должны быть такими, чтобы время между попаданием частиц в счетчик было больше времени разрешения.

В данной работе измеряется число частиц, проходящих через счетчик за 10 и 40 секунд. Выбор времен измерения связан с тем, чтобы можно было убедиться в том, что при большем времени лучше выполняется нормальное распределение величин и гистограмма более симметрична, чем при малых временах, когда при обработке лучше было бы воспользоваться методами, основанными на распределении Пуассона.

Среднеквадратичная ошибка числа отсчетов, измеренного за некоторый интервал времени, равна корню квадратному из среднего числа отсчетов за тот же интервал: $\sigma = \sqrt{n_0}$. Однако истинное среднее значение измеряемой величины неизвестно, потому в формулу для определения стандартной ошибки отдельного измерения приходится подставить не истинное среднее значение n_0 , а измеренное значение n :

$$\sigma = \sqrt{n} \quad (1)$$

Формула (1) показывает, что, как правило (с вероятностью 68%), измеренное число частиц n отличается от искомого среднего не более чем на \sqrt{n} . Результат измерений записывается так:

$$n_0 = n \pm \sqrt{n} \quad (2)$$

Обратимся теперь к следующему важному вопросу. Пусть мы провели серию из N измерений, в результате которых получены числа n_1, n_2, \dots, n_N . Эти результаты мы до сих пор использовали чтобы определить, как сильно значения, полученные в отдельных измерениях, отличаются от истинного значения. Этот вопрос важен главным образом для выяснения того, насколько достоверен результат, полученный в отдельном измерении, однако можно использовать это для нахождения среднего значения с лучшей точностью. При N измерениях среднее значение, очевидно, равно

$$\langle n \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (3)$$

а стандартную ошибку найти по формуле:

$$\sigma_{\text{отд}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \langle n \rangle)^2} \quad (4)$$

В соответствии с формулой (1) стоит ожидать, что эта ошибка будет близка к $\sqrt{n_i}$, то есть $\sigma_{\text{отд}} \approx \sigma_i = \sqrt{n_i}$, где в качестве n_i можно подставить любое из полученных n . Поскольку n_i различны, то будем получать различные оценки, что вполне естественно. Ближе всего к значению $\sigma_{\text{отд}}$, определенному по формуле (4), лежит $\sqrt{\langle n \rangle}$, т.е.

$$\sigma_{\text{отд}} \approx \sqrt{\langle n \rangle} \quad (5)$$

Величина $\langle n \rangle$ из формулы (3), полученная путем усреднения результатов серии из N опытов, не вполне совпадает с n_0 и сама является случайной величиной. Теория вероятностей показывает, что стандартная ошибка отклонения $\langle n \rangle$ от n_0 может быть определена так:

$$\sigma_{\langle n \rangle} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (n_i - \langle n \rangle)^2} = \frac{\sigma_{\text{отд}}}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

При написании второй части равенства мы использовали (4).

Обычно наибольший интерес представляет на абсолютная, а относительная точность измерений. Для рассмотренной серии из N измерений относительная ошибка отдельного измерения (ожидаемое отличие $\langle n \rangle$ от n_0)

$$\varepsilon_{\text{отд}} = \frac{\sigma_{\text{отд}}}{n_i} \approx \frac{1}{\sqrt{n_i}} \quad (7)$$

Аналогично определяется относительная ошибка в определении среднего по всем значениям $\langle n \rangle$:

$$\varepsilon_{\langle n \rangle} = \frac{\sigma_{\langle n \rangle}}{\langle n \rangle} = \frac{\sigma_{\text{отд}}}{\langle n \rangle \sqrt{N}} \approx \frac{1}{\sqrt{\langle n \rangle N}} \quad (8)$$

При написании последнего из равенств (7) значение $\sigma_{\text{отд}}$ было подставлено из формулы (5).

Таким образом, относительная точность измерения $\langle n \rangle$ определяется только полным числом отсчетов и не зависит от интервалов разбиения серии (по 10, 40 или 100 с). Этого, конечно, и следовало ожидать, так как все измерения вместе составляют одно более продолжительное измерение, в котором всего зарегистрировано $\sum n_i = \langle n \rangle N$ отсчетов. Как мы видим, относительная точность измерения постепенно улучшается с увеличением числа отсчетов (а значит, и с увеличением полного времени измерений).

С помощью формулы (7) найдем, что для измерения интенсивности космического излучения с точностью до 1% необходимо получить, по крайней мере, $100^2 = 10000$ отсчетов, для точности 3% достаточно 1000 отсчетов, при точности 10% нужно всего 100 отсчетов и т.д. При этом точность измерения не зависит от того, получены ли все 1000 или 10 000 отсчетов в одном или нескольких независимых опытах.

Приступаем к работе

Ознакомившись с устройством установки, включим компьютер и запустим программу STAT. Для начала проведем демонстрационный эксперимент, который позволит ознакомиться с основным экспериментом. Проведя его, займемся основным.

Подождем, пока компьютер снимет измерения. Получим таблицу данных, на основании которых мы можем построить необходимые гистограммы.

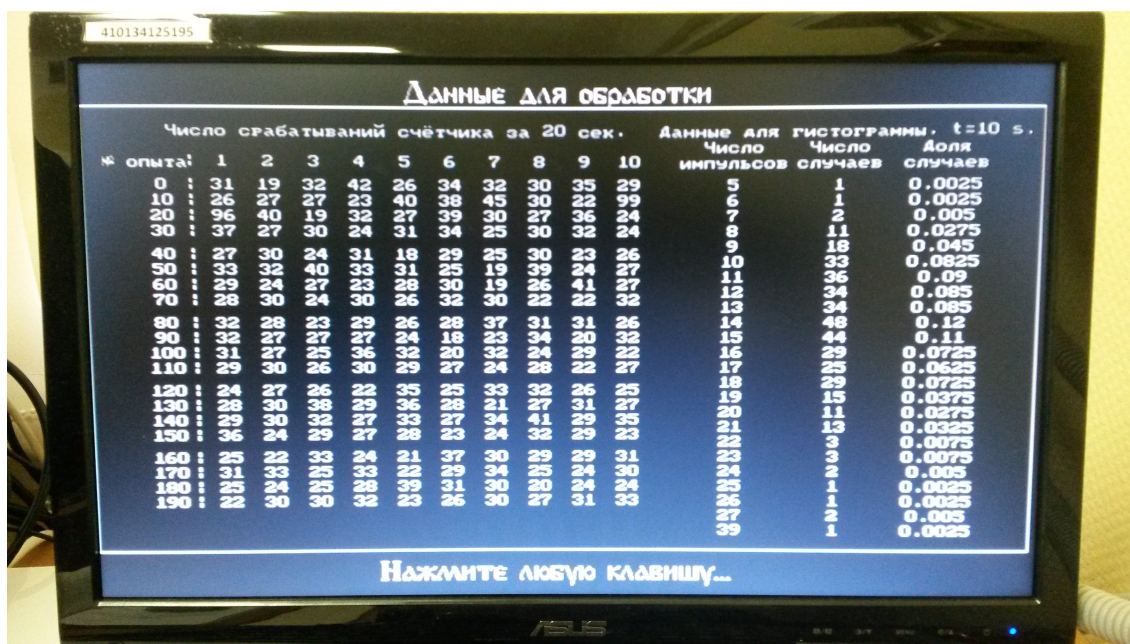
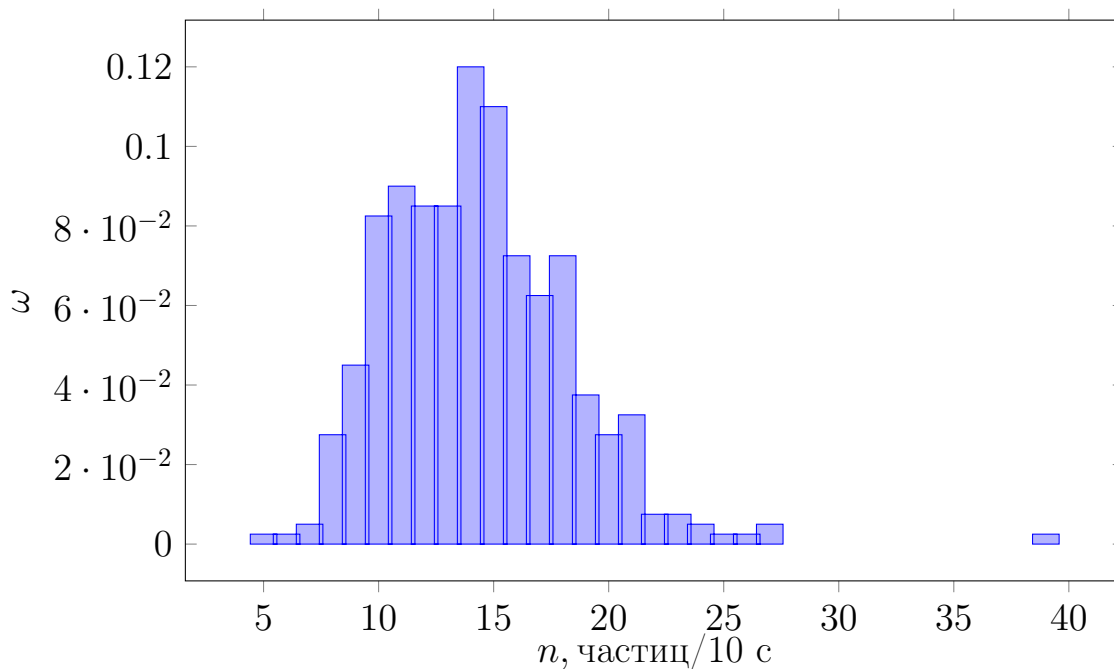


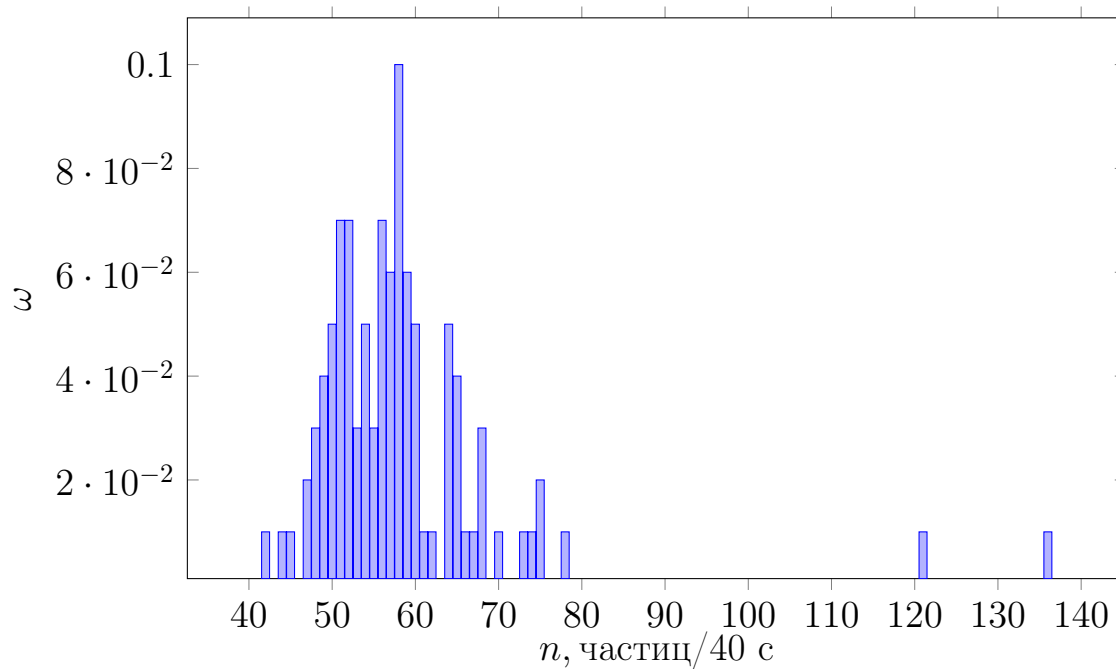
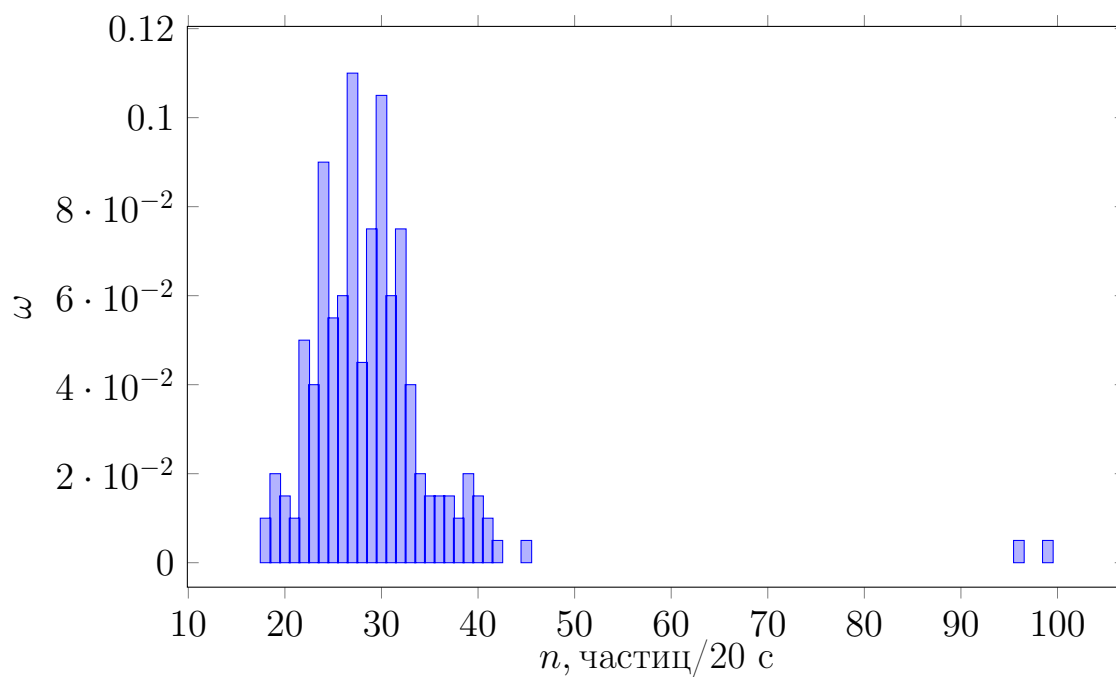
Рис. 2: Таблица измерений

Отсюда можно построить гистограмму, отражающую зависимость ω от n , где

$$\omega = \frac{\text{число случаев, когда за 10 с прилетело } n \text{ частиц}}{\text{полное число измерений } N}$$



Аналогично получим гистограммы для 20 и 40 секунд, пересчитав значения из таблицы:



Определим среднее число срабатываний счетчика за 10, 20, 40 секунд:

$$\langle n_1 \rangle = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} n_i = \frac{5840}{400} = 14.6$$

$$\langle n_2 \rangle = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} n_i = \frac{5840}{200} = 29.2$$

$$\langle n_3 \rangle = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} n_i = \frac{5840}{100} = 58.4$$

Найдем среднеквадратичную ошибку отдельного измерения по формуле (4):

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} (n_i - \langle n_2 \rangle)^2} = \sqrt{\frac{14528}{200}} = 8.52$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} (n_i - \langle n_3 \rangle)^2} = \sqrt{\frac{15146}{100}} = 12.31$$

Проверим справедливость формулы (5):

$$\sigma_2 \approx \sqrt{\langle n_2 \rangle}; \quad 8.52 > \sqrt{29.2} = 5.40$$

$$\sigma_3 \approx \sqrt{\langle n_3 \rangle}; \quad 12.31 > \sqrt{58.4} = 7.64$$

Значения σ , полученные из экспериментальных точек, сильно отличаются от ожидаемых, так как в процессе эксперимента мы нарочно подносили радиоактивное вещество к счетчику, провоцируя всплеск количества регистрируемых частиц.

Найдем число случаев, попадающих в определенный диапазон значений:

Ошибка	Число случаев	Доля случаев, %	Теоретическая оценка, %
$\pm\sigma_2 = \pm 8.52$	171	85.6	68
$\pm 2\sigma_2 = \pm 17.04$	197	98.5	95
$\pm\sigma_3 = \pm 12.31$	89	89.0	68
$\pm 2\sigma_3 = \pm 24.62$	98	98.0	95

Теперь рассмотрим относительную полуширину распределений:

$$\frac{\sigma_2}{\langle n_2 \rangle} = \frac{8.52}{29.2} = 0.29$$

$$\frac{\sigma_3}{\langle n_3 \rangle} = \frac{12.31}{58.4} = 0.21$$

Видно, что несмотря на то, что $\sigma_2 < \sigma_3$, относительная полуширина для 40с меньше, чем для 20с, что наблюдается и на гистограммах.

Определим стандартную ошибку величин $\langle n_2 \rangle$ и $\langle n_3 \rangle$: по формуле (6)

$$\sigma_{n_2} = \frac{\sigma_2}{\sqrt{N_2}} = 0.60$$

$$\sigma_{n_3} = \frac{\sigma_3}{\sqrt{N_3}} = 1.23$$

Посчитаем относительную ошибку по (7):

$$\varepsilon_{n_2}^1 = \frac{\sigma_{n_2}}{\langle n_2 \rangle} \cdot 100\% = 2.1\%$$

$$\varepsilon_{n_3}^1 = \frac{\sigma_{n_3}}{\langle n_3 \rangle} \cdot 100\% = 2.1\%$$

$$\varepsilon_{n_2}^2 = \frac{100\%}{\sqrt{\langle n_2 \rangle N_2}} = 1.8\%$$

$$\varepsilon_{n_3}^2 = \frac{100\%}{\sqrt{\langle n_3 \rangle N_3}} = 1.3\%$$

Окончательно получим:

$$n_{20s} = 29.2 \pm 0.5$$

$$n_{40s} = 58.4 \pm 0.8$$

Таким образом, при помощи счетчика Гейгера-Мюллера мы изучили плотность потока космического излучения, собрали статистику и обработали полученные данные. В результате мы убедились в том, что излучение действительно подвержено нормальному распределению и рассмотрели различные случаи, разбивая все время измерений на различные временные отрезки.

Отдельно стоит отметить, что для работы со статистикой была написана программа, принимающая на вход таблицу данных 10×20 , записанную в файл `1.txt`, содержащая измерения за 20 секунд. Программа создает файл `stats.txt`, содержащий данные, необходимые для вычислений, а также код для LaTeX, позволяющий вставить графики в отчет о проделанной работе. Данная программа в скомпилированном виде прилагается к отчету.

Список использованной литературы:

1. "Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие. В трех томах. Т1. Механика"/А.Д.Гладун, Д.А.Александров, Ф.Ф.Игошин и др.; Под редакцией А.Д.Гладуна. — МФТИ, 2004.
2. "Набор и верстка в системе L^AT_EX"/С.М.Львовский. — 2003.