

Задача астрофизического практикума.

Исследование фотоэлектронного умножителя.

В.Г. Корнилов, Д.В. Черясов

Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга

Версия для 3 курса, 4 июня 2017 года

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — один из основных приёмников оптического излучения, применяемых в астрономии. Фотоэлектронный умножитель, также как и фотодиод, прибор с зарядовой связью (ПЗС) относится к фотоэлектрическим приёмникам оптического излучения, в которых энергия поглощённого фотона переходит в энергию (фото)электронов. Появление фотоэлектронов меняет электрические свойства вещества (возникновение фототока, заряда, изменение проводимости т.д.) что и регистрируется привычными техническими средствами.

Другой класс приёмников основан на преобразовании энергии оптического излучения в энергию кристаллической решётки вещества, когда поглощение фотонов приводит к повышению температуры поглотившего излучение прибора. Такие приёмники, в отличие от фотоэлектрических, как правило, неселективны, т.е. обладают возможностью регистрировать излучение в очень широком диапазоне длин волн. Основным представителем этого класса приёмников — болометр (или радиометр), широко применяющийся в астрономических исследованиях в инфракрасной области спектра.

Фотоэлектронный умножитель работает на основе внешнего фотоэффекта, когда образовавшиеся фотоэлектроны выходят из вещества фотокатода в вакуум. Именно фотокатод является основным элементом преобразования оптического излучения (света) в электрический ток. Физические основы этого процесса и важные условия и подробности рассматриваются в курсе В.Г. Корнилова "Приёмники оптического излучения и их применение". Здесь отметим, что основной характеристикой такого преобразования является красная граница фотоэффекта для данного вещества фотокатода, лежащая обычно в диапазоне от 700 нм до 1300 нм.

Несмотря на то, что в последние 10–15 лет основным оптическим приёмником в астрономии стала ПЗС матрица, обладающая более высокой квантовой эффективностью (отношением числа рождённых фотоэлектронов к числу упавших фотонов) и свойством координатной чувствительности, ФЭУ находит широкое применение в исследованиях, где главным является измерение общего потока от астрономического объекта в очень широком диапазоне блеска (динамический диапазон качественного современного ФЭУ на 2 порядка превышает динамический диапазон ПЗС матрицы) либо с высоким временным разрешением (временное разрешение ФЭУ лежит в области наносекунд, тогда как для ПЗС это в лучшем случае миллисекунды) либо в ультрафиолетовом диапазоне спектра (эффективность ФЭУ для диапазона короче 350 нм обычно выше чем у ПЗС матрицы). Цель настоящей задачи — получить представление о фотоэлектронном умножителе, его основных характеристиках, современных методах работы с ним.

1 Физика фотоэлектронного умножителя.

1.1 Устройство и работа ФЭУ.

Зарегистрировать один вышедший из фотокатода электрон практически невозможно, (1 фотоэлектрон в секунду соответствует току $1.6 \cdot 10^{-19}$ А) поэтому фотоэлементы применялись в начале века только при исследованиях очень ярких звёзд. Принципиальным для техники астрономических наблюдений явилось изобретение в 40-х годах фотоумножителя (Photomultiplier tube, PMT) — прибора, обладающего возможностью усиления фототока катода, или другими словами — умножающими количество электронов в миллионы раз.

Устройство и функционирование ФЭУ мы рассмотрим на примере ФЭУ-29, как наиболее наглядного. Его внешний вид представлен на Рис. 1. Данный прибор использовался в ядерной физике для регистрации сцинтилляционных вспышек и малопригоден для астрономических наблюдений. Поэтому в установке применяется другой фотоумножитель — ФЭУ-79. ФЭУ-29 умножитель с мультищелочным (сурьмяно-цезиевым) полупрозрачным фотокатодом, нанесённым (изнутри) на верхний торец стеклянной колбы, где в вакууме смонтированы и остальные электроды фотоумножителя.



Рис. 1 Фотоумножитель ФЭУ-29. Хорошо видна система динодов.

Этот фотоумножитель схематично изображён на Рис. 2. Выводы от всех электродов

ФЭУ осуществлены через основание колбы, заделанной в пластмассовый цоколь. Для простоты на Рис. 2 выводы нарисованы через боковую стенку колбы.

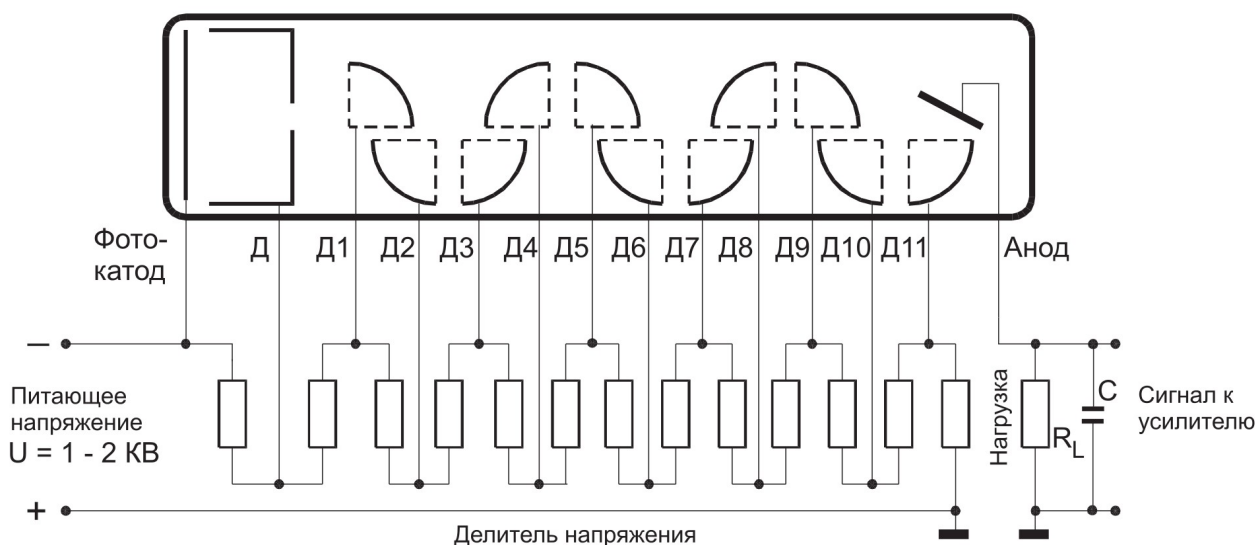


Рис. 2: Схематичное изображение фотоэлектронного умножителя, включённого в электрическую цепь. Пояснения в тексте.

Умножение числа фотоэлектронов (или, иначе, усиление фототока) происходит на динодной системе, содержащей в этом ФЭУ 11 динодов. В других ФЭУ количество динодов бывает от 9 до 13. Работа динода основана на эффекте вторичной электронной эмиссии — явления, когда первичный электрон, попадая на динод, выбивает несколько электронов (называемых вторичными). Сколько в среднем появляется вторичных электронов, зависит и от энергии первичного электрона и от материала динода. Эта величина называется коэффициентом вторичной эмиссии δ и обычно для современных ФЭУ лежит в пределах от 3 до 10.

Чтобы вылетевший из фотокатода фотоэлектрон пришёл на 1-ый динод, имея достаточную энергию, потенциал динода должен быть на несколько десятков или сотен вольт более положительным. Аналогично, чтобы появившиеся с 1-ого динода примерно δ вторичных электронов достигли следующего 2-ого динода, обладая достаточной энергией, потенциал 2-ого динода также должен превышать потенциал 1-ого на 100–200 В. Очень важно при этом, чтобы все вторичные электроны попали именно на динод, а не на стойки электродов и стекло колбы. Реальные конструкции динодных систем весьма разнообразны, каждый тип имеет свои особенности.

В результате, со 2-ого динода выходит электронное облако из примерно δ вторичных электронов. Процесс умножения происходит лавинообразно и с последнего динода на специальный электрод коллектор (также называемый анодом) приходит уже $G = \delta^m$ (m — число динодов) электронов, принося заряд порядка 10^{-13} Кулон за время порядка 20 нс. Такая величина уже вполне может быть зарегистрирована средствами электроники. Протяжённость лавины во времени t_p определяется различными траекториями движения и скоростями отдельных электронов. Величина G называется коэффициентом усиления (или умножения) ФЭУ.

Ещё один электрод в ФЭУ-29 и ФЭУ-79 расположен между фотокатодом и первым динодом и называется фокусирующей диафрагмой. Работает он как электростатическая линза и служит для того, чтобы фотоэлектроны из периферийных частей фотокатода не смогли попасть в динодную систему для умножения. Для того чтобы на каждый электрод ФЭУ подать соответствующий потенциал, обеспечивающий оптимальную работу прибора, используется делитель напряжения, также изображённый на Рис. 2. Простейший вариант состоит из нескольких одинаковых сопротивлений, включённых последовательно друг с

другом. Общее сопротивление делителя обычно составляет $2 \div 10$ МОм. На один конец делителя, соединённый с фотокатодом, подаётся питающее напряжение U обычно около -2000 В, а другой конец заземлён, т.е. находится при нулевом потенциале. В таком делителе междинодное напряжение равно $U/13$, т.е. примерно 150 В. Диафрагма и диноды последовательно подключаются к точкам соединения резисторов. Анод соединяется с землёй через нагрузочное сопротивление R_L . Существенным является то, что параллельно с этим сопротивлением обязательно включена некая ёмкость C — это либо реальный конденсатор, либо просто паразитная ёмкость, образованная элементами реальной конструкции и входной ёмкостью дальнейшей электронной схемы. Эти три элемента образуют выходную (анодную) цепь ФЭУ, сигнал с которой и подаётся на вход электронной схемы (усилителя) для дальнейшего усиления и регистрации.

Итак, подведём итог. Если на фотокатод ФЭУ попадает n_{ph} фотонов в секунду (поток фотонов), каждый из которых с вероятностью η вызывает появление фотоэлектрона, то поток фотоэлектронов (число фотоэлектронов в секунду) $n_e = \eta n_{ph}$. Вероятность η называется квантовым выходом фотокатода и для конкретного материала фотокатода зависит в первую очередь от длины волны кванта света. Каждый фотоэлектрон вызывает лавину электронов, содержащую в момент прихода на анод ФЭУ в среднем G электронов, с общим зарядом qG (q — заряд электрона). Следовательно, 1) число лавин электронов или, иначе, импульсов ФЭУ в единицу времени n пропорционально потоку фотонов n_{ph} , 2) полный заряд, приходящий на анод в секунду, (или анодный фототок) составляющий $qG\eta n_{ph}$, также пропорционален n_{ph} .

Эти два обстоятельства и определяют два основных метода регистрации сигнала ФЭУ. Исторически первым стали использовать метод измерения постоянного тока, заключающийся в измерении среднего значения протекающего через нагрузку R_L тока. Поскольку время усреднения (от долей до десятков секунд) определяется постоянной времени $\tau_e = R_L C$, в этом случае значение сопротивления R_L должно быть велико (десятки и сотни МОм).

Способ же счета лавин может быть реализован при малых значениях постоянной времени τ e выходной цепи. В этом случае сигнал на сопротивлении R_L представляет собой последовательность отрицательных импульсов напряжением длительностью τ со средней амплитудой

$$h = \frac{qGR_L}{\tau} \quad (1)$$

Длительность импульса $\tau \approx \tau_p$ если $\tau_e < \tau_p$ и $\tau \approx \tau_e$ в противоположном случае. Каждый такой импульс может быть отдельно обнаружен, поэтому можно подсчитать их общее число за единицу времени. Этот способ регистрации называется методом счета фотонов (или импульсов). Важной особенностью этого метода является неизбежное наличие критерия обнаружения импульса. Обычно для этого используется так называемая дискриминация, т.е. сравнение электрического сигнала с неким пороговым уровнем T , превышение которого интерпретируется как наличие пригодного для дальнейшей регистрации импульса.

1.2 Особенности реальных фотоумножителей.

Существует ряд эффектов, искажающих прямо пропорциональную зависимость между световым потоком, падающим на фотокатод, и фототоком или числом зарегистрированных анодных импульсов тока. Прежде всего, это темновой ток или темновой сигнал n_D — сигнал, который обнаруживается на выходе ФЭУ, даже если прибор находится в полной темноте. Источников для возникновения такого сигнала несколько.

При комнатной температуре наиболее существенным является термоэмиссия электронов с фотокатода и динодов. Термоэмиссия обусловлена тем, что распределение электронов по энергиям при ненулевой температуре не ограничено со стороны высоких энергий и, с

учётом большого числа электронов в объёме фотокатода, всегда есть электроны, способные эмитировать из фотокатода. Такой электрон не отличим от фотоэлектрона и также приводит к образованию лавины и появлению выходного сигнала.

Величина термоэмиссии зависит от свойств материала фотокатода (эффективные в красной области спектра фотокатоды как правило имеют и большую термоэмиссию), тонкостей технологии (наличие примесей), размеров фотокатода (эмиссия пропорциональна площади) и температуры (охлаждение на 20°C понижает термоэмиссию на порядок). Для реальных ФЭУ она может быть от единиц до многих десятков тысяч импульсов в секунду при обычной температуре. Среди ФЭУ-79 также попадаются экземпляры как с очень низким, так и очень высоким значением темнового тока.

Термоэмиссия с динодов имеет меньшее значение, поскольку число степеней умножения для таких электронов, по крайней мере, на 1 меньше, и выходные импульсы в среднем в δ и более раз слабее. В методе счета фотонов существенная часть таких импульсов может быть исключена из дальнейшей регистрации. Другими источниками темнового сигнала (тока) являются: распад радиоактивных атомов в стекле колбы, космические лучи, автоэмиссия под действием электрического поля и т. д. Понятно, что теперь при измерении светового потока мы должны учесть присутствие темнового сигнала, и световому потоку на фотокатод ФЭУ будет соответствовать не полное число n , а разность $n - n_d$. Заметим, что флуктуации n_d неизбежно будут входить в эту разность. Поэтому именно флуктуации темнового сигнала называются собственным шумом ФЭУ, который ограничивает возможность измерения слабых световых потоков. Это же относится и к другим приёмникам излучения.

Другим важным эффектом, искажающим уже линейную зависимость между потоком излучения и выходным сигналом ФЭУ, является нелинейность. Нелинейность присуща как методу измерения тока, так и методу счета фотонов, хотя её причины различны. Для первого метода основным является эффект пространственного заряда, искажающего электрическое поле между динодами. При большой освещённости количество электронов, находящихся одновременно между последними динодами, так велико, что их электрическое поле препятствует нормальному ускорению последующих электронов. Следовательно, коэффициент умножения прибора G уменьшается.

В случае счета импульсов нелинейность вызывается тем, что продолжительность импульса τ конечна (в лучшем случае $\approx \tau_p$, для ФЭУ-79 это $20 \div 30$ нс), а световой поток и поток выходных импульсов носит стохастический характер. При больших световых потоках и, следовательно, большом значении n , средний промежуток по времени между импульсами $1/n$ сравним с τ и вероятность того, что время, проходящее между последовательными импульсами окажется меньше их длительности, возрастает. Это приводит к слиянию двух соседних выходных импульсов ФЭУ в один и к уменьшению общего числа сосчитанных импульсов.

1.3 Режим питания ФЭУ, счётные характеристики.

Поскольку коэффициент вторичной эмиссии зависит от энергии первичного электрона, т.е. от междинодного напряжения, полное усиление G также зависит от приложенного к ФЭУ напряжения питания. Эта зависимость очень велика и представляется выражением $G(U) \sim U^{p_m}$, где p_m обычно около $5 \div 10$. Это обстоятельство накладывает строгие требования к стабильности высоковольтного источника питания, особенно в методе измерения тока.

При работе в режиме счета фотонов изменение амплитуд импульсов от питающего напряжения приводит к зависимости числа зарегистрированных импульсов n от U , поскольку изменяется соотношение между порогом дискриминации и средней амплитудой импульсов. Эта зависимость имеет достаточно сложную форму. Пример таких зависимостей $n = n(U)$,

называемых счётными характеристиками ФЭУ, приведён на Рис. 2. Чтобы объяснить главные особенности счётной характеристики, нужно вернуться к процессу умножения электронов диодной системой.

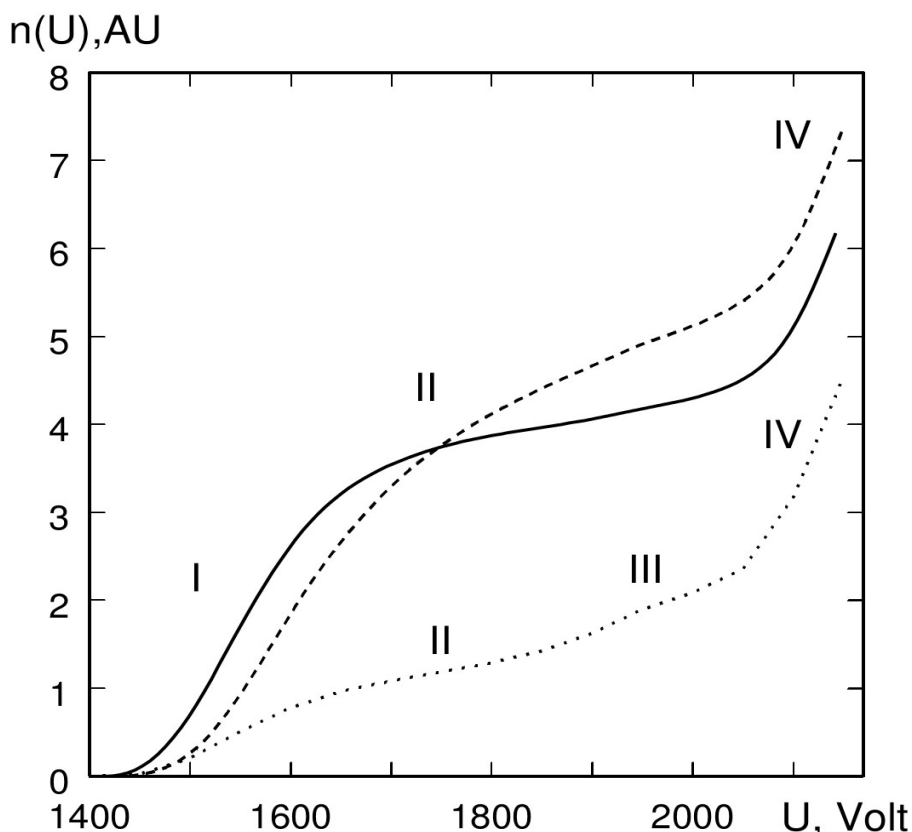


Рис. 3: Пример счётных характеристик ФЭУ. Сплошная и пунктирная кривые — для светового и темнового сигналов. Штриховая — для ФЭУ без одноэлектронного пика в АРИ.

Вторичная эмиссия по своей природе процесс вероятностный, причём распределение вероятности получить k вторичных электронов близко к распределению Пуассона с параметром δ . Поскольку δ не велико (~ 4), то ширина распределения относительно велика. Достаточно вероятны события с числом вторичных электронов, скажем, 1 и 10. Определяющим для общего умножения является первый диод, на последние диоды приходит сразу много электронов и флуктуации величины умножения на них относительно малы. В результате, амплитуды выходных импульсов также флуктуируют в несколько раз, даже если все они порождены фото- или термоэлектроном с фотокатода.

Если учесть, что на выходе ФЭУ присутствуют также импульсы другого происхождения, то распределение выходных импульсов по амплитудам (АРИ — амплитудное распределение импульсов) ещё более усложняется. К тому же эти распределения различны для разных экземпляров ФЭУ по технологическим причинам. В методе счета фотонов анализ АРИ важен для обоснованного выбора порога дискриминации, ведь необходимо зарегистрировать как можно больше "световых" импульсов и отсеять как можно больше "шумовых" импульсов, чтобы повысить итоговое отношение сигнал/шум.

Упрощённые АРИ для темнового сигнала (пунктирная линия) и в случае значительного светового сигнала (сплошная) показаны на Рис. 4. Для ФЭУ, оптимального для использования метода счета фотонов, характерен так называемый одноэлектронный пик. Между этим пиком и левой экспоненциальной ветвью (диодные и другие импульсы, шумы электроники) находится долина — место для правильной установки порога дискриминации (T_d или T_L). К сожалению, таких ФЭУ в обычной партии немного. Чаше встречаются

экземпляры с АРИ с замытым или вообще отсутствующим одноэлектронным пиком (штриховая линия на Рис. 4). Такие умножители мало пригодны для измерений в режиме счёта фотонов. Кроме амплитуды импульса, соответствующей одноэлектронному пику, бывает полезна другая характерная величина — медианное значение амплитудного

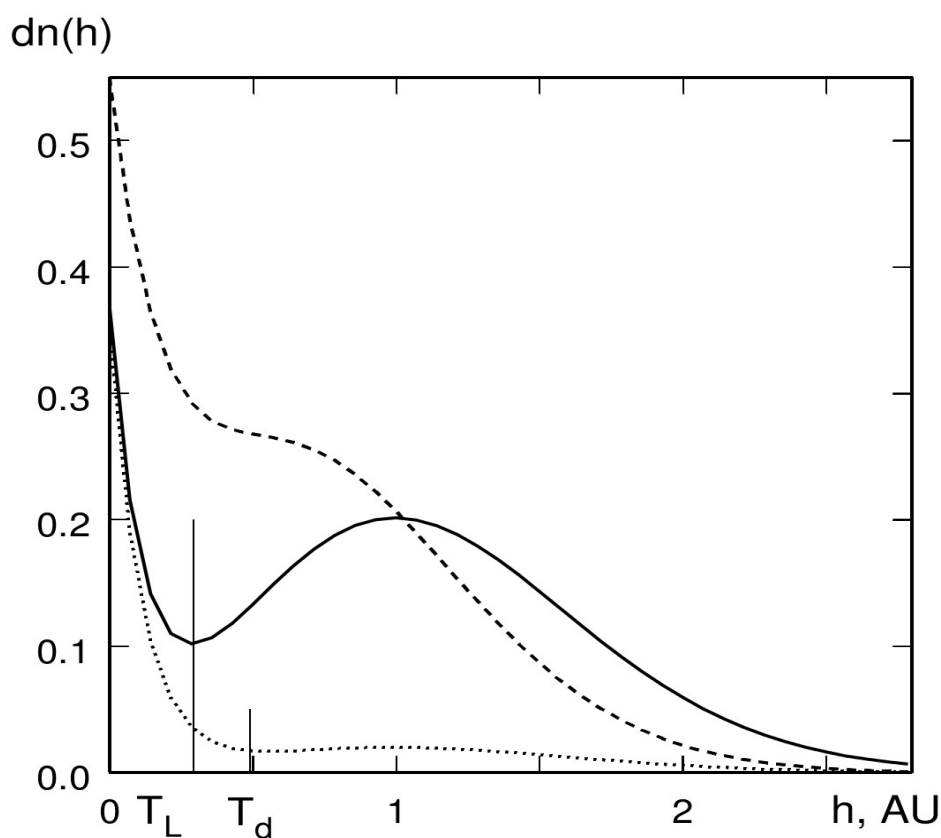


Рис. 4: Пример амплитудных распределений при достаточном освещении (сплошная и штриховая кривые — хороший и плохой ФЭУ) и в темноте (пунктирная кривая).

распределения. Она лучше определяется из экспериментальных данных и характеризует АРИ даже в отсутствие одноэлектронного пика. Если увеличить напряжение питания U , то в первом приближении АРИ пропорционально растянется по оси амплитуд в соответствии с зависимостью $G(U)$. Однако, если учесть, что амплитуда диодных импульсов от напряжения зависит слабее, а для шумов электроники вообще нет явной зависимости, то экспоненциальная ветвь должна растянуться меньше. Относительная ширина одноэлектронного пика также слегка уменьшится. Как результат, долина может стать глубже.

Теперь ясно, что участок I счётной кривой на Рис. 3 при фиксированном пороге соответствует ситуации, когда средняя амплитуда импульсов ещё меньше или порядка порога дискриминации. Когда же она возрастает настолько, что почти все катодные импульсы регистрируются, крутизна счётной характеристики значительно уменьшается (участок II). На счётных кривых для темнового сигнала (пунктирная линия) и с незначительной подсветкой заметен участок III — начало счета диодных импульсов. На счётных характеристиках в случае сильной засветки (сплошная линия) ФЭУ этот участок практически не виден. Штриховой линией обозначена счётная характеристика для ФЭУ без одноэлектронного пика в АРИ.

Наконец, обсудим причины резкого роста характеристики на участке IV. Было бы заманчиво увеличить напряжение питания так, чтобы амплитуда импульсов ФЭУ стала настолько большой, чтобы отпала необходимость в их дальнейшем усилении средствами

электроники. Однако, при достижении некоторого предельного коэффициента усиления резко возрастает роль ионной и оптической обратной связи. Ионная обратная связь возникает из-за того, что под влиянием электронов лавины происходит ионизация некоторых атомов остаточного газа и положительный ион, также разгоняясь в электрическом поле, может достичь фотокатода. В этом случае он способен породить сразу несколько вторичных электронов и в умножителе возникнет новая лавина. Оптическая обратная связь возникает в случае попадания на фотокатод фотонов, возникающих при люминесценции анода или последнего динода под влиянием электронных ударов.

В любом случае это проявляется как появление на выходе ФЭУ дополнительных импульсов (после-импульсов), задержанных на некоторое время относительно обычных. Конструкции фотоумножителей разрабатываются так, чтобы уменьшить эти обратные связи, и доля их при нормальном напряжении питания невелика (меньше нескольких процентов). Однако с повышением плотности электронов в лавине и увеличением их энергии вероятность этих эффектов начинает быстро расти, и при некотором напряжении питания процесс роста становится неуправляемым — возникает само-поддерживающийся разряд. В такой ситуации возможно необратимое разрушение анода и последних динодов. При увеличении питающего напряжения возрастает значение и авто-эмиссии, приводящей к возникновению классического электрического разряда.

2 Практические аспекты использования ФЭУ.

2.1 Статистика измерений с ФЭУ.

Как уже упоминалось, собственный шум ФЭУ определяется флуктуациями его темнового сигнала n_D . Полезный сигнал n_s , т.е. тот сигнал, который несёт информацию о световом источнике, всегда определяется как $n_s = n - n_D$. Величины n и n_D статистически независимы, поэтому полный шум, присущий величине n_s , равен $(\sigma_n^2 + \sigma_D^2)^{1/2}$, где σ_n^2 и σ_D^2 — дисперсии величин n и n_D . Для характеристики возможности успешного измерения полезного сигнала в той или иной ситуации служит отношение "сигнал к шуму":

$$SN = \frac{n - n_D}{(\sigma_n^2 + \sigma_D^2)^{1/2}} \quad (2)$$

Это широко используемая величина, однако более наглядным является обратное отношение, просто равное относительной точности измерения полезного сигнала:

$$\epsilon = \frac{1}{SN} = \frac{(\sigma_n^2 + \sigma_D^2)^{1/2}}{n - n_D} \quad (3)$$

Заметим, что в общем случае вместо темнового сигнала используется понятие фоновый сигнал, включающий все имеющиеся сигналы за исключением полезного. Например, при измерении блеска звезды фоновым сигналом будет сумма темнового сигнала и светового сигнала от некоторого участка неба.

Если измеряется световой поток от постоянного источника и условия измерений не меняются, то сигналы n и n_D стационарны. При правильной работе ФЭУ и регистрирующей электроники эти сигналы практически всегда близки к пуассоновскому процессу - распределение отдельных отсчётов описывается распределением Пуассона, а их дисперсии равны средним значениям: $\sigma_n^2 = \bar{n}$ $\sigma_D^2 = \bar{n}_D$

Это обстоятельство можно использовать для оценки потенциальной возможности или планировании измерений. Однако при оценке реальной апостериорной точности измерений лучше использовать определяемые в процессе измерений оценки дисперсий. Сравнение этих оценок с ожидаемыми для пуассоновского процесса позволяет контролировать правильность

измерений. Но следует иметь в виду следующие обстоятельства: 1) световой поток может быть и не пуассоновским (например: излучение лазера, атмосферное мерцание звёзд и т.д.); 2) наличие после-импульсов различной природы увеличивает дисперсию в $1+x$ раз (где x — вероятность появления после-импульса) для светового и для темнового сигналов; 3) компоненты темнового сигнала, за исключением термоэмиссии, не являются пуассоновскими, поэтому при охлаждении ФЭУ статистика темнового сигнала может значительно измениться; 4) при больших световых потоках эффект нелинейности меняет не только среднее значение, но и величину дисперсии (этот факт используется далее для определения величины нелинейности).

Предыдущие формулы для оценки точности определения полезного сигнала зависимость от времени накопления t содержат неявно. Чтобы выделить эту зависимость, следует вспомнить, что дисперсия суммы t независимых одинаково распределённых величин в t раз больше дисперсии одной случайной величины. Это общее свойство стационарных процессов, при этом процесс может не быть пуассоновским. Поэтому отношение SN растёт пропорционально $t^{1/2}$, а относительная ошибка уменьшается как $t^{-1/2}$. В нестационарной ситуации (например, при значительных изменениях светового потока) увеличение времени накопления может привести к обратному эффекту.

2.2 Выбор оптимального режима работы ФЭУ.

В методе счета импульсов режим работы (рабочая точка) определяется двумя параметрами: напряжением питания U и значением порога дискриминации T . Выбором этих параметров достигаются две цели: 1) обеспечить наилучшую статистическую точность измерений и 2) обеспечить максимальную стабильность, т.е. устойчивость по отношению к изменению параметров аппаратуры. Совместное решение иногда достижимо только для какого-то определённого светового потока, что в астрономической практике является слишком жёстким ограничением. Поэтому обычно рабочая точка выбирается отдельно для очень слабых объектов (n_s сопоставимо с n_D) и первой цели и отдельно для ярких объектов ($n_s \gg n_D$) и второй цели. Для некоторых, но не для всех, ФЭУ эти две рабочих точки практически совпадают. Для решения первой задачи требуется получить (или как говорят, снять) семейство счётных характеристик в широком диапазоне напряжений U при нескольких значениях порога дискриминации T . Характеристики нужно снять для темнового сигнала и для случая слабой подсветки. Затем, используя формулу 3, вычисляется семейство зависимостей $\epsilon(U, T)$. Минимальное значение этой зависимости и будет определять рабочую точку (T_w, U_w) для этого случая.

Для ярких объектов необходимо установить световой поток таким, чтобы световой сигнал был на 2 – 3 порядка больше темнового. В этом случае влиянием темнового сигнала можно пренебречь и получать только семейство световых счётных характеристик. Условие максимальной стабильности по U и T можно сформулировать как поиск такой точки (T_w, U_w), где минимальны относительные изменения сигнала n при изменении питающего напряжения или порога дискриминации. Если учесть, что $dn/n = d(\ln n)$, то ищется минимум $d(\ln n)/dU$ и $d(\ln n)/dT$. Хотя переменные T и U сильно связаны друг с другом, однако по ряду причин их нужно рассматривать независимыми (см. раздел 1.3). В практике, область изменения этих параметров ограничена возможностями аппаратуры, и реальный минимум может оказаться за этими пределами.

Понятно, что можно анализировать не счётные характеристики для разных значений порога, а зависимости $n(T)$, полученные при разных напряжениях U — интегральные распределения амплитуд импульсов. Амплитудное распределение (АРИ) может быть получено дифференцированием этой функции по порогу. Однако, эта операция для данных

измерений (данных с ошибками) некорректна. Улучшить ситуацию можно путём предварительного сглаживания интегрального распределения.

2.3 Метод определения нелинейности.

Уже упоминалось, что эффект нелинейности изменяет статистические характеристики сигнала с выхода ФЭУ. Распределение становится уже пуассоновского, меняется и среднее значение и дисперсия. Как понятно из раздела 1.2, нелинейность определяется соотношением длительности импульса и среднего промежутка между ними, т.е. величиной tn . Величина t может и не быть равна длительности импульса на выходе ФЭУ, если в электронной схеме существуют элементы ещё сильнее растягивающие импульс. В любом случае эту величину, можно рассматривать как некий параметр, имеющий размерность времени и описывающий влияние нелинейности.

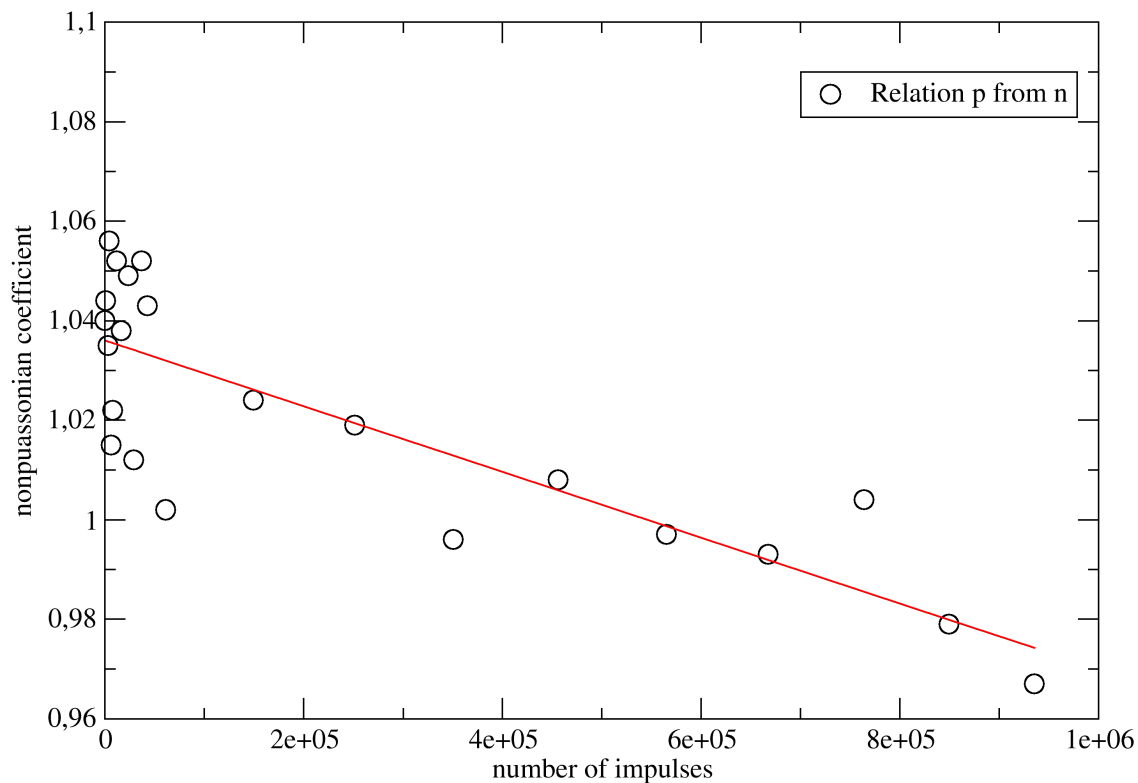
Учёт нелинейности — это определение поправки, которую нужно прибавить к измеренной величине n' , чтобы получить истинную n . В линейном приближении, которое хорошо работает пока $tn < 0.1$, используется выражение:

$$n = n'(1 + tn) \quad (4)$$

Используя это соотношение можно получить выражение для коэффициента непуассоновости $p = \sigma_n^2/n$ для измеренного и истинного сигнала:

$$p' = p(1 - 2tn') \quad (5)$$

Таким образом, при увеличении светового сигнала определённая по измерениям величина p' будет линейно уменьшаться. Наклон этой зависимости соответствует величине $2t$. Рис. 4, построенный по реальным измерениям, иллюстрирует изложенный метод.



для ФЭУ, высоковольтный разъём 3 (с резьбой) и сигнальный байонетный разъём 4. С противоположной стороны стакан закрыт фланцем 5 с вмонтированным затвором, закрываемым поворотом ручки 6. К фланцу на резьбе прикручен осветитель 8 со своим коллиматором 7. Если коллиматор с осветителем снять, то будет доступен ослабитель А, находящийся в углублении фланца. Если разъединить коллиматор и осветитель — будет доступен ослабитель В, закреплённый на осветителе шпильками.

Высоковольтный разъём основания соединяется кабелем 10 с таким же разъёмом на управляемом блоке питания 9. К сигнальному разъёму подключается фотометрический модуль 11, который с другой стороны подсоединяется к линии 12. Все сегменты линии равноценны, кроме сегмента 13, идущего от блока питания 9 к осветителю. Разветвление линии может быть обеспечено простым телефонным тройником 14. Линия также подключается к блоку питания и идёт к компьютеру. На гнездо 15 блока питания подаётся постоянное напряжение +12 В от обычного сетевого адаптера.

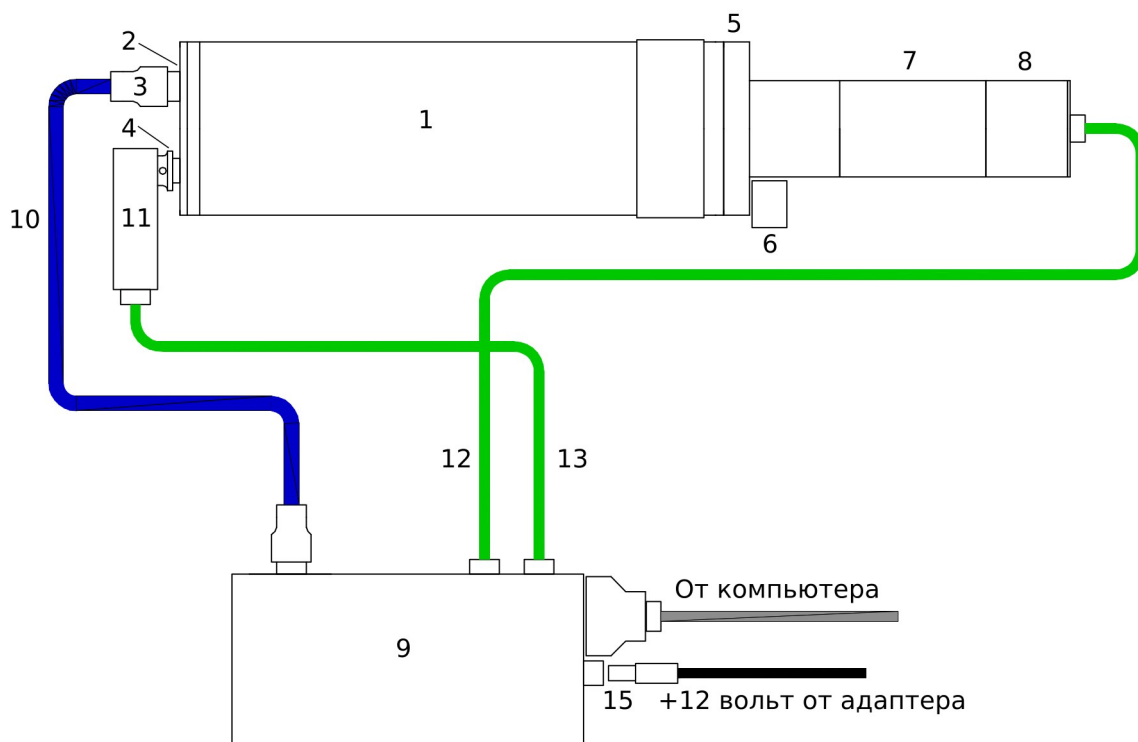


Рис. 6: Установка для исследования фотоэлектронных умножителей и соединения между её блоками.

Блок питания, фотометрический модуль и осветитель являются отдельными устройствами и могут быть применены в другой аппаратуре. Эти модули выполняют присущие им функции по командам приходящим к ним по линии от компьютера, а также передают компьютеру необходимую ему информацию.

3.2 Блок питания.

Блок питания предназначен для выработки из напряжения +12 В, поступающего на него от сетевого адаптера AV 6121, напряжения +5 В для питания модулей (осветитель нуждается дополнительно в напряжении +12 В) и высоковольтного напряжения от 1000 до 2000В для питания ФЭУ. Высокое напряжение может быть включено, выключено и изменено соответствующей командой. Зелёный светодиод на передней стенке блока сигнализирует о присутствии входного напряжения +12 В. Красный — загорается при включённом высоком

напряжении. Жёлтый светодиод вспыхивает, если по линии передаются данные. Время стабилизации высокого напряжения после его включения или изменения его значения сравнительно мало — около 2 – 5 секунд. В управляющей программе предусмотрена задержка, блокирующая проведение измерений в это время.

3.3 Осветитель.

Осветитель содержит в качестве источника света трёхцветный светодиод. На самом деле это три полупроводниковых кристалла смонтированных в одном корпусе. Эти светодиоды могут включаться по-очереди. Интенсивность излучения любого светодиода зависит от двух основных факторов: тока, протекающего через р-п переход, и температуры перехода. От тока интенсивность зависит примерно пропорционально, а от температуры — примерно -1% на 1°C . Чтобы обеспечить необходимую стабильность излучения, светодиод помещён в термостате, где с точностью $\pm 0.2^\circ$ поддерживается постоянная температура. В этой связи, после включения питания осветителя интенсивность излучения стабилизируется примерно за 5 – 10 минут, а после изменения уровня излучения или его цвета — за 3 – 4 минуты. Это надо иметь ввиду при выполнении точных измерений.

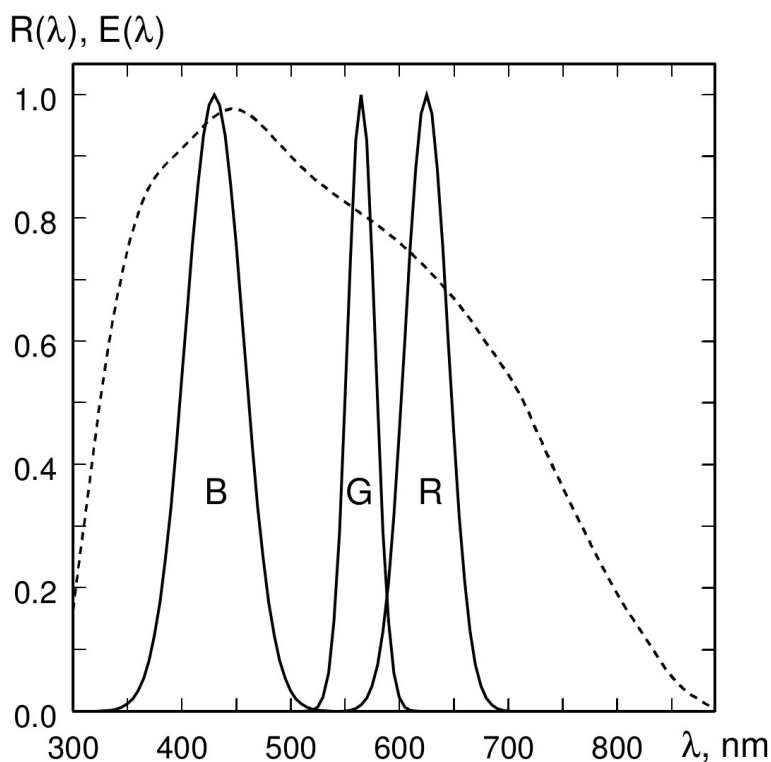


Рис. 7 Спектральные характеристики излучения осветителя и относительная чувствительность ФЭУ-79.

Интенсивность излучения регулируется относительной величиной тока, которая устанавливается командой компьютера в диапазоне от 0.000 до 1.000 с шагом примерно 0.004. Следует иметь в виду, что, из-за конструктивных особенностей электроники осветителя, установленная “нулевая” интенсивность соответствует некоторому малому потоку света. Поэтому измерения темнового тока лучше производить с установкой цвета dark (см. ниже) и закрытым затвором.

Спектральные характеристики излучения светодиодов показаны на Рис. 7, где для сравнения пунктирной линией нанесена типичная относительная чувствительность мультищелочного ФЭУ-79. Кривые излучения обозначены соответствующими буквами: В - синий, G – зелёный и R – красный. Числовые характеристики приведены в таблице.

Цвет излучения	Центральная длина волны	Полуширина полосы
Синий	430 нм	65 нм
Зелёный	565 нм	30 нм
Красный	625 нм	45 нм

Перед светодиодом стоит рассеиватель, ограниченный круглой диафрагмой диаметром 4 мм. Коллиматор строит изображение этого светящегося пятна в плоскости, вынесенной вперёд на расстояние 57 мм. Этот вынос необходим, чтобы при калибровке осветителя это пятно полностью попадало на светочувствительный элемент радиометра. При установке осветителя с коллиматором на стенд, это пятно совпадает с плоскостью фотокатода.

Дополнительно, на осветитель установлен нейтральный светофильтр, ослабляющий поток излучения в 100 – 200 раз (ослабитель В). Если отсоединить коллиматор от осветителя, то этот светофильтр можно снять.

3.4 Фотометрический модуль.

Фотометрический модуль объединяет в себе несколько электронных узлов, используемых в методе счета фотонов. Это прежде всего широкополосный усилитель, усиливающий импульсы от ФЭУ до амплитуды, необходимой дискриминатору импульсов для правильной работы (см. раздел 1.3). На выходе дискриминатора появляются только те импульсы, амплитуда которых больше порога дискриминации T . Значение порога устанавливается по команде компьютера, пределы его изменения от 0.1 до 3.6 мВ. Точность установки порога около 0.01 мВ, повторяемость ещё лучше. Входное сопротивление усилителя составляет 100 Ом, оно и служит нагрузкой R_L . Электрическая постоянная времени выходного узла ФЭУ с этим усилителем $\tau_e \approx 1 \div 2$ нс, что значительно меньше длительности импульса ФЭУ-79 (см. раздел 1.1).

С выхода дискриминатора импульсы поступают на счётчик, подсчитанное (накопленное) за определённое время число импульсов передаётся компьютеру для последующей обработки. Измерение потока ведётся методом микроэкспозиций, т.е. реально 1-секундное накопление состоит из 250 отдельных накоплений по 4 мс. Понятно, что их сумма просто равна числу импульсов ФЭУ за секунду (потоку импульсов n), но дополнительно имеется возможность определить надёжную оценку (в статистическом смысле) реальной дисперсии σ_n^2 . Точность этой оценки тем лучше, чем на большее число микроэкспозиций разбит 1-секундный интервал.

3.5 Управляющая программа

Ещё одним важным компонентом установки является управляющая измерениями программа для РС, работающая под ОС Linux. Запускается она как testpmt из рабочего каталога, в котором будут создаваться выходные файлы. После запуска программа проверяет связь и наличие всех трёх модулей и, если обнаруживает ошибку, сообщает об этом и завершает работу. Если все нормально — запрашивает номер исследуемого ФЭУ. Под этим номером будет создан выходной файл, содержащий результаты измерений, расширение .dat добавляется автоматически. При появлении на экране "подсказки" — > можно вводить команды. Команды и их описания сведены в таблицу.

Команда	Описание команды	Аргумент
quit	Выход из программы	нет
help	Выдача списка команд на экран	нет
comm	Запись комментария	Строка следует за командой через пробел
hv	Установка высокого напряжения, или его выключение	Значение в вольтах от 1000 до 2000. 0 - выключить
lev	Задание порога дискриминации	Значение в мВ от 0.1 до 3.6
exp	Установка времени накопления	Значение в секундах
run	Запуск измерения	Если указан — количество повторов измерения
dark	Выключить осветитель	нет
blue	Включение синего светодиода	Интенсивность от 0 до 1.000
green	Включение зелёного светодиода	Интенсивность от 0 до 1.000
red	Включение красного светодиода	Интенсивность от 0 до 1.000

Аргументы отделяются от команды пробелами. Команды hv и lev допускают несколько аргументов (до 20) разделённых пробелами. Если введено несколько аргументов, то организуется цикл по этой переменной. Причём цикл по высокому напряжению внешний по отношению к циклу по порогу дискриминации, по окончании этого цикла восстанавливается первое значение высокого напряжения. После завершения циклического измерения цикл не сбрасывается и повторный запуск командой run приведёт к повторению цикла. Чтобы отменить цикл по какой либо переменной, необходимо ввести эту команду с одним аргументом.

В остальных командах лишние аргументы игнорируются. Допускается сокращение команды до двух букв. Запущенное измерение можно прервать, нажав ESC .

В выходном файле результат содержится в восьми колонках. Первая — текущее время, затем напряжение питания ФЭУ U, порог дискриминации T , средний измеренный поток импульсов p, относительная точность среднего Q, коэффициент непуассоновости p, интенсивность света и в последней колонке его цвет, обозначенный буквами B, G, R. Выключенное состояние обозначается буквой D в колонке цвета и указанная интенсивность при этом не имеет значения.

При выходе из программы командой quit выключается высокое напряжение и все установленные значения основных параметров запоминаются в файле fev.cfg и при новом запуске программы автоматически устанавливаются из него. Новые данные будут находиться в том же выходном файле, если вы ввели тот же номер фотоумножителя.

4 Содержание и порядок выполнения задачи

4.1 Общие замечания к проведению эксперимента

Каждый лабораторный эксперимент, за исключением дорогостоящих и продолжительных, проводится несколько раз для уменьшения возможной ошибки измерения и поиска наилучших параметров. Таким образом рекомендуется производить сначала тестовые измерения для того, чтобы иметь представление что же должно быть в конечном результате.

Так же необходимо следить за долговременной стабильностью параметров установки. При подаче высокого напряжения на ФЭУ необходимо время, чтобы темновой ток и остальные режимы (например температура резисторов делителя и температура осветителя) стабилизировались. Особенно важно, когда фотоумножитель находился на свету (был «засвечен»).

Так же при выполнении задачи возможны нештатные ситуации, такие как потеря связи с установкой, иные проблемы технического характера, в случае которых управляющая программа сообщит об ошибке. В этом случае необходимо выйти из программы, выключить и включить питание установки, затем снова запустить управляющую программу.

4.2 Подготовка к выполнению измерений

Прежде чем начать выполнение задания, необходимо проверить соединения установки, убедиться что затвор осветителя закрыт (флажок в горизонтальном положении). Затвор необходимо закрывать при откручивании осветителя для замены светофильтров. Далее необходимо проверить, что фотоумножитель подключен к высоковольтному разъёму, осветитель к гнезду В блока управления, а модуль счёта к гнезду А, подано питание 12 вольт. Длинный кабель должен быть подключен к входному гнезду RS485/LPT конвертера.

Включите установку вставлением адаптера в розетку. Далее необходимо подождать некоторое время для выхода на режим.

Тем временем создадим рабочую директорию.

1) Открываем терминал. По умолчанию мы находимся в домашней директории /home/student4/. Проверить содержимое можно при помощи команды ls без аргументов.

2) Создаём рабочую директорию mkdir имя_директории

Имя директории удобнее писать латиницей, чтобы каждый раз не переключать раскладку.

3) Переходим в рабочую директорию командой cd имя_директории/

Слэш / в конце обязателен. При наборе первых нескольких символов имени директории и нажатии клавиши Tab Вам будут предложены варианты доступных в текущей директории имён. Выйти обратно можно командой cd ..

4) После этого запускаем программу командой testpmt, которая создаст в рабочей директории файл с номером фотоумножителя и Вы будете складывать временные файлы. Так же стоит помнить, что для стабилизации яркости осветителя необходимо время порядка 10 минут.

4.3 Задание 1. Поиск рабочей точки фотоумножителя

В этом задании нужно получить счётные характеристики для темнового сигнала, при слабом световом потоке и для ярких объектов. Ослабители А и В должны быть установлены на свои места. Для подсветки рекомендуется использовать зелёный излучатель. Не забудьте открыть затвор ФЭУ при измерении световых характеристик.

Чтобы получить данные измерений для построения счётных характеристик, нужно после команды `hν` ввести, как её аргументы, необходимые значения высокого напряжения (обычно от 1500 до 2000 Вольт с шагом 50 – 100 Вольт), а после `lev` — необходимые значения порогов дискриминации (5 – 8 точек из диапазона от 0.3 до 3.6 мВ). Затем запустить измерение командой `run`. Например

```
hν 1500 1600 1700 1800 1900 2000
```

```
lev 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8
```

```
run
```

Следует помнить, что цикл по высокому напряжению внешний относительно цикла по порогу дискриминации.

Величина времени накопления отдельной точки выбирается экспериментальным путём по величине относительной ошибки исходя из пробных измерений. Получив измерения и следуя пояснениям раздела 2.2, определить рабочие точки ФЭУ для обоих случаев. Для вычисления относительной ошибки полезного сигнала можно воспользоваться формулой:

$$\epsilon = \frac{1}{SN} = \frac{(\epsilon_n^2 n^2 + \epsilon_d^2 n_d^2)^{1/2}}{n - n_d}$$

куда входят только данные из таблицы измерений.

Представить графики кривых $SN(U)$ (или $\epsilon(U)$ — на выбор), по которым определялась рабочая точка для измерений слабых объектов. Представить графики счётных характеристик $\ln p(U)$, по которым определялась рабочая точка для измерений ярких объектов. Отметить в отчёте выбранную рабочую точку U_w и T_w и соответствующее значение темнового сигнала p_D .

Графики можно строить в любой удобной Вам программе. В приложении 1 рассмотрен способ построения графиков при помощи программы `xmgrace` и обработки файлов данных при помощи языка `awk`.

4.4 Задание 2. Определение характеристик АРИ

Установить интенсивность света, соответствующую случаю ярких объектов. Измерить кривую интегрального распределения импульсов по амплитудам во всем диапазоне порогов (0.1 – 3.6 мВ) для рабочего напряжения U_w и для пониженного на 200 – 300 вольт напряжения питания. Определить (интерполяцией или экстраполяцией) значения T_m порога, при котором поток импульсов p составляет 0.5 от потока в рабочей точке, т.е. медианы соответствующих АРИ.

Используя формулу зависимости амплитуды импульса (усиления) ФЭУ от напряжения питания в виде $G(U) \sim U^{pm}$, вычислить показатель степени pm . В отчёте представить кривые интегральных распределений и определённые по ним характеристики АРИ. Установите выбранные значения U_w и T_w для всех последующих измерений.

4.5 Задание 3. Определение нелинейности

Определение нелинейности производится при включённом красном излучателе. Начните измерения с минимального светового потока. Для каждого значения интенсивности излучателя получите несколько измерений по 40 сек. Желательно при малых потоках шаг по интенсивности выбрать поменьше, чтобы получить для них более надёжное значение коэффициента непуассоновости p .

По полученным данным построить зависимость величины p от потока импульсов p (см. Рис. 5) и определить параметр нелинейности τ , как описано в разделе 2.3. Представить

график и отметить в отчёте значение параметра нелинейности. Используя полученное значение τ в качестве длительности импульса ФЭУ и медианное значение амплитуды импульса из задания 2, по формуле 1 вычислить усиление G в рабочей точке.

4.6 Задание 4. Анализ результатов эксперимента

После выполнения работы необходимо представить графики $SN(U)$ или $\epsilon(U)$, графики счётных характеристик $\ln n(U)$ для светового сигнала и темнового в случае слабых объектов, по которым производился выбор рабочей точки. Графики амплитудного распределения импульсов $n(T)$ минимум для двух напряжений, график зависимости коэффициента непуассоновости от количества импульсов. Так же значения всех параметров, описанных в заданиях. Сделать вывод о пригодности данного фотоумножителя для астрономических наблюдений.

Типовая задача 1: Оценить звёздную величину звезды, похожей на Солнце, наблюдаемой на 2.5 метровом телескопе с исследованным фотоумножителем в полосе B , при пропускании оптики и атмосферы 0.5, у которой возможно обнаружить транзит экзопланеты с размером Земли с максимальным временем накопления 1 час. Квантовую эффективность ФЭУ принять равной 8%

Типовая задача 2: Оценить минимальную звездную величину, которую можно наблюдать с 2.5-метровым телескопом, с пропусканием атмосферы и оптики 0.5 в полосе V с исследованным фотоумножителем. Квантовая эффективность 2%.

Приложение 1. Построение графиков с помощью xmgrace в ОС Linux

Для графической иллюстрации выходных и производных данных измерений удобно (в ОС Linux) использовать программу построения графиков xmgrace, в которой можно также проводить и вычисления с колонками входных данных. Для ввода данных в программу можно использовать диалог Data|Import|ASCII, где выбрать тип данных (Load as: Single set для одной серии данных, NXY для нескольких; в первом случае также можно выбрать варианты с дополнительными колонками ошибок по X и/или по Y – XYDX, XYDY, XYDXDY) и файл (возможно, изменив расширение в поле Filter). Альтернативно, ввести данные можно с командной строки, например:

```
$ xmgrace xy.dat;  
$ xmgrace -nxu xy1y2.dat;  
$ xmgrace -settype xydy xydy.dat
```

Узнать про использование программы можно с помощью команды `man xmgrace` или `xmgrace -h`.

Кроме того, удобно пользоваться также и консольной программой `awk` работы с таблицами данных, чтобы с колонками производить перестановки, выделения и вычисления. Примером использования этой программы (см. `man awk`) является выделение из фрагмента выходного файла `888_part.dat`, созданного программой `testpmt`, счётных характеристик в файлы по порогам дискриминации:

```
awk '{print $1,$3,$3*$4 » "$2".dat"}' 888_part.dat
```

Здесь мы печатаем первую, третью и произведение третьей и четвёртой колонок (то есть абсолютное значение ошибки измеренного потока) в выходные файлы, имя которых задается значением порога дискриминации во второй колонке и расширением `.dat`. Перед запуском такой команды надо стереть результаты прежних запусков этой команды командой `rm ???.dat` (предполагается, что значение порога имеет один знак после запятой). Из файла

888_part.dat перед работой удалите метки времени и другую ненужную информацию. После работы этой команды посмотреть счётные характеристики (с ошибками потоков) можно одной командой:

```
xmgrace -settype xydy ??.dat.
```

Список литературы

- [1] Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. М.: Наука. 1977. с.230-263.
- [2] Young A.T. Photomultipliers, in: Methods of Experimental Physics. V.12, Part A. NY.: Acad Press. 1974.