



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**MEDIDA DE LA EFICIENCIA CUÁNTICA RELATIVA DE TUBOS
FOTOMULTIPLICADORES DEL EXPERIMENTO HAWC**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A:

ADRIANA GABRIELA ROCHA GUZMÁN



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ERNESTO JOSE MARIA DE LA SALETE BELMONT
MORENO
CIUDAD UNIVERSITARIA CDMX 2018**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Apellido paterno
Apellido materno
Nombre (s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta

2. Datos del tutor

Grado
Nombre (s)
Apellido paterno
Apellido materno

3- Datos del sinodal 1

Grado
Nombre (s)
Apellido paterno
Apellido materno

4. Datos del sinodal 2

Grado
Nombre (s)
Apellido paterno
Apellido materno

5. Datos del sinodal 3

Grado
Nombre (s)
Apellido paterno
Apellido materno

6. Datos del sinodal 4

Grado
Nombre (s)
Apellido paterno
Apellido materno

7. Datos del trabajo escrito

Título
Subtítulo
Número de páginas
Año

1. Datos del alumno

Rocha
Guzmán
Adriana Gabriela
57888497
Universidad Nacional Autónoma de México
Física
Facultad de Ciencias
304030093

2. Datos del tutor

Dr
Ernesto Jose Maria de la Salette
Belmont
Moreno

3. Datos del sinodal 1

Dr
Alejandro
Crespo
Sosa

4. Datos del sinodal 2

Dra
Donají Xóchitl
Cruz
López

5- Datos del sinodal 3

Fís
Arturo Ismael
Iriarte
Valverde

6. Datos del sinodal 4

M. en I.
Fernando
Garfias
Macedo

7. Datos del trabajo escrito

Medida de la Eficiencia Cuántica Relativa
De Tubos Fotomultiplicadores del
Experimento HAWC
104 pp
2018

“Amo el canto del zenzontle”

Nezahualcóyotl (1402-1472)

Monarca de la Ciudad-Estado de Tetzcuco en el México antiguo.

Ejerció el poder y se desempeñó notablemente como poeta, erudito y arquitecto.

*Nehuatl nictlazotla in centzontototl icuicauh,
Nahuatl nictlazotla in chalchihuitl Itlapiz
Ihuan in ahuiacmeh xochimeh;
Zan oc cenca noicniuhtzin in tlatatl,
Nehuatl nictlazotla.*

*Amo el canto del zenzontle,
Pájaro de cuatrocientas voces.
Amo el color del jade
Y el enervante perfume de las flores,
Pero más amo a mi hermano: el hombre.*

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, por haberme dado la vida y por permitirme el haber llegado hasta este momento importante de mi formación escolar; ya que sin ellos esto no hubiese sido posible.

A mi madre, Carmen Guzmán, que es el pilar más importante en mi vida, por siempre demostrarme su cariño y apoyo incondicional. Por creer en mí y darme las herramientas para poder así llegar hasta aquí.

A mi padre, Benjamin Rocha, pieza fundamental en mi vida, que a pesar de la distancia física, siento que esta conmigo en todo momento, sin él no hubiese logrado todo lo que he obtenido hasta ahora.

A mis hermanas: Isabel y Olga por siempre estar conmigo en todo momento y por su gran gran apoyo incondicional.

A mis hermanos: Víctor y Daniel sin ellos éste camino no hubiese sido posible, por sus consejos y valiosa ayuda en todo momento para conmigo.

A mis sobrinos: Erick, Andrés, Eduardo, Jocelyn y Emilio, por aguantar mis regaños, pero a quienes quiero mucho.

Todos mis amigos y amigas de la carrera y de la vida: Karina Holguín, Angélica Juárez, Víctor Reyes, Hugo Reséndiz, Ernesto Paas, Elías Angulo, Ángel Rosario, Maricela Solis, Fidel Urquiza, Karen Torres y Sergio Alonso.

Finalmente a todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

Adriana Gabriela Rocha Guzmán

Agradecimientos

En este trabajo de tesis realizado en la Universidad Nacional Autónoma de México, quiero agradecer a todas aquellas personas las cuáles directa o indirectamente estuvieron implicadas en la realización del mismo.

Especial y principalmente a mi director de tesis, Dr. Ernesto Jose Maria de la Salette Belmont Moreno, mi más amplio agradecimiento por permitirme trabajar a su lado, por su confianza, enseñanzas, paciencia, por su valiosa dirección y apoyo para realizar este trabajo. Cuya experiencia y educación han sido mi fuente de motivación y de curiosidad durante este último tiempo.

Al Instituto de Física IFUNAM, por brindarme la oportunidad de trabajar en sus instalaciones, al proyecto HAWC por permitirme trabajar en él, sin ello no habría sido posible todo este trabajo, al Dr. José Rubén Alfaro Molina por su ayuda en todo momento en la realización del experimento, a mis sinodales: Dra. Donají Xóchitl Cruz López, Fís. Arturo Ismael Iriarte Valverde, M. en C. Fernando Garfías Macedo y Dr. Alejandro Crespo Sosa.

A la UNAM, Facultad de Ciencias y al Instituto de Ingeniería para ser precisa a los proyectos PADHPOT y PUMAGUA.

A todos mi mayor reconocimiento y gratitud.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 9 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1.1 MARCO TEÓRICO..... | 10 |
| 1.1.2. RADIACIÓN CÓSMICA..... | 11 |
| 1.1.3. ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS | 11 |
| 1.1.4. CASCADAS ATMOSFÉRICAS | 12 |
| 1.1.5. CASCADAS DE RAYOS GAMMA | 13 |
| 1.1.6. DETECCIÓN DE RADIACIÓN CÓSMICA | 14 |
| 1.2. RADIACIÓN CHERENKOV | 14 |
| 1.2.1. DETECCIÓN DE CASCADAS ATMOSFÉRICAS..... | 16 |
| 1.2.2. TELESCOPIOS CHERENKOV Y ARREGLOS DE DETECTORES EN LA SUPERFICIE | 16 |
| 1.3. PROYECTO HAWC | 17 |
| 1.3.1. OBSERVATORIO HAWC..... | 18 |
| 1.3.2. DISEÑO DEL OBSERVATORIO | 19 |
| 1.3.3. DETALLES DEL OBSERVATORIO HAWC..... | 20 |
| 2. MOTIVACIÓN | 23 |
| 2.1. HIPÓTESIS..... | 24 |
| 3. INSTRUMENTACIÓN..... | 27 |
| 3.1. FOTODIODO DE SILICIO SIPD | 27 |
| 3.1.1. FOTO-DETECTORES DE ESTADO SÓLIDO..... | 27 |
| 3.1.2. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y FOTODIODOS | 27 |
| 3.1.3. FOTODIODO DE SILICIO HAMAMATSU S1227-1010BQ..... | 28 |
| 3.2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE BAJO VOLTAJE KEITHLEY 2280S-603 | 32 |
| 3.3. ESPECTRÓMETRO “OCEAN OPTICS USB40002” | 32 |
| 3.4. TUBOS FOTOMULTIPLICADORES | 34 |
| 3.4.1. BREVE HISTORIA DE LOS FOTOCÁTODOS..... | 34 |
| 3.4.3. EMISIÓN SECUNDARIA | 34 |
| 3.5. ESTRUCTURA DE LOS PMT | 35 |
| 3.5.1. ¿QUÉ ES UN PMT? | 35 |
| 3.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DE UN PMT: EMISIÓN DE FOTOELECTRONES..... | 35 |
| 3.5.3. TRAYECTORIA ELECTRÓNICA | 37 |
| 3.5.4. MULTIPLICADOR DE ELECTRONES (SECCIÓN DEL DINODO)..... | 38 |
| 3.5.5. OPERACIÓN DE UN TUBO FOTOMULTIPLICADOR..... | 39 |
| 3.5.7. CARACTERÍSTICAS DE UN TUBO FOTOMULTIPLICADOR | 41 |
| 3.5.8. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS FOTOCÁTODOS..... | 41 |
| 3.5.8. MATERIAL DE LA VENTANA | 43 |
| 3.5.9. RESPUESTA ESPECTRAL CARACTERÍSTICA (SENSIBILIDAD RADIANTE Y EFICIENCIA CUÁNTICA) | 44 |
| 3.5.10. UNIFORMIDAD DE SENSIBILIDAD | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5.11. SENSIBILIDAD LUMINOSA..... | 46 |
| 3.6. FUENTE DE PODER DE ALTO VOLTAJE C.A.E.N. MODELO N471 | 48 |
| 3.7. MODULO DIGITALIZADOR CAEN N6742 | 49 |
| 3.8. GENERADOR DE ONDAS “TEKTRONIX AFG3102” | 50 |
| 3.9. OSCILOSCOPIO DE ALMACENAMIENTO DIGITAL | 51 |
| 3.10. PROGRAMA ROOT (DATA ANALYSIS FRAMEWORK) | 52 |
| 3.11. MULTÍMETRO KLEIN TOOLS MM1000 | 52 |
| 3.12. TUBO FOTOMULTIPLICADOR HAMAMATSU R5912..... | 53 |
| 3.13. DIODOS LED..... | 58 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 61 |
| 4.1. INTRODUCCIÓN | 61 |
| 4.2. PROCEDIMIENTO | 61 |
| 4.3. CALIBRACIÓN EN INTENSIDAD..... | 73 |
| 4.4. CALIBRACIÓN DE LA EC DEL PMT | 75 |
| 5. ANÁLISIS | 83 |
| 5.1. DESARROLLO | 83 |
| 5.2. CALIBRACIÓN DEL LED | 84 |
| 5.3. CÁLCULO DE LA EC..... | 86 |
| 5.4. FUENTES DE ERROR | 88 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 89 |
| 7. BIBLIOGRAFIA..... | 90 |
| APÉNDICE A..... | 93 |
| APÉNDICE B | 96 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIG. 1.1. ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS EN EL RANGO DE 10^{11} eV a 10^{21} eV . DÓNDE SE OBSERVAN LOS CAMBIOS EN LA PENDIENTE “RODILLA” Y “TOBILLO”..... | 13 |
| FIG. 1.2. LADO IZQUIERDO; DIAGRAMA DE CASCADA ATMOSFÉRICA PRODUCIDA POR UN RAYO GAMMA, CONOCIDO COMO CASCADA ELECTROMAGNÉTICA Y DE LADO DERECHO: DIAGRAMA DEL PROCESO DE UNA CASCADA ATMOSFÉRICA PRODUCIDA POR UN RAYO O HADRÓN (CASCADA HADRÓNICA)..... | 14 |
| FIG. 1.3. DIAGRAMA DEL ÁNGULO DE CHERENKOV EL CUAL SE FORMA EN UN FRENTE DE ONDAS DEBIDO A LA INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA DE LOS PULSOS ELECTROMAGNÉTICOS DESPEDIDOS POR EL MATERIAL DIELECTRICO AL PASAR UNA PARTÍCULA CON VELOCIDAD MAYOR A LA VELOCIDAD FASE DE LA LUZ EN EL MEDIO. | 16 |
| FIG. 1.4. ARREGLO DE IACS’S, HESS, HIGH ENERGY STEREO SCOPIC SYSTEM EN NAIBIA. | 17 |
| FIG. 1.5. VISTA DEL ARREGLO DE TANQUES DEL OBSERVATORIO HAWC EN PUEBLA. | 19 |
| FIG. 1.6. SIMULACIÓN DEL PASO DE UNA PARTÍCULA CARGADA (LÍNEA ROJA) A TRAVÉS DE UN TANQUE Y LA EMISIÓN DE LUZ CHERENKOV (LÍNEAS VERDES). ASÍ CÓMO LA UBICACIÓN DE LOS 4 PMT’S: LATERALES A,B Y EL CENTRAL C. | 20 |
| FIG. 3.1. SECCIÖN TRANSVERSAL DE UN FOTODIODO DE SI. LA LUZ INCIDE DESDE LA IZQUIERDA PASANDO POR UNA CAPA AISLANTE PROTECTORA, UNA CAPA P, LA CAPA DE DEPLEXIÖN, LA CAPA N Y EL ELECTRODO DE CONEXIÖN, CÁTODO. | 27 |
| FIG. 3.2. COEFICIENTE DE ABSORCIÖN PARA DIFERENTES LONGITUDES DE ONDAS O ENERGÍAS Y DIFERENTES MATERIALES. | 28 |
| FIG. 3.3. FOTODIODO DE SILICIO SIPD HAMAMATSU S1227-1010BQ SENSIBLE DEL UV AL ROJO, DE 1 cm^2 DE ÁREA SENSIBLE CON VENTANA DE CUARZO ESPECIAL PARA FOTOMETRÍA DE PRECISIÖN. | 29 |
| FIG. 3.4. RESPUESTA ESPECTRAL DEL PD USADO, HAMAMATSU S1227-1010BQ, SENSIBLE DESDE EL UV HASTA EL ROJO. | 29 |
| FIG. 3.5. RELACIÖN DE CORRIENTE EN CORTO DEL SIPD I_{SH} Y LA ILUMINACIÖN QUE RECIBE $[IX]$. EL COMPORTAMIENTO ES EXTREMADAMENTE LINEAL EN 6 ÓRDENES DE MAGNITUD [10]. | 30 |
| FIG. 3.6. FUENTE DE PODER DE CC KEITHLEY 2280S-60-3. SE PUEDE AJUSTAR AL VOLTAJE, LA CORRIENTE, EL INTERVALO DE CORRIENTE, EL MODO DE MEDICIÖN, NIVELES DE PROTECCIÖN Y OTRAS FUNCIONES EN LA PANTALLA DE INICIO. | 32 |
| FIG. 3.7. ESPECTRÖMETRO OCEAN OPTICS USB4000. | 33 |
| FIG. 3.8. ESPECTRÖMETRO OCEAN OPTICS USB4000 POR DENTRO: 1 CONECTOR, 2 ABERTURA, 3 FILTRO, 4 ESPEJO COLIMADOR, 5 REJILLA, 6 ESPEJO DE ENFOQUE, 7 LENTE COLECTORA, 8 DETECTOR, 9 FILTRO OFLV, 10 VENTANA DE CUARZO. | 33 |
| FIG. 3.9. ESTRUCTURA DE UN TUBO FOTOMULTIPLICADOR PMT. | 35 |
| FIG. 3.10. MODELO DE BANDAS: FOTOCÁTODO ALCALINO, EG= BRECHA NERGÉTICA, EA= AFINIDAD ELECTRÖNICA. | 36 |
| FIG. 3.11. MODELO DE BANDAS: FOTCÁTODO SEMICONDUCTOR COMPUESTO. | 36 |

| | |
|--|----|
| FIG. 3.12. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN TUBO FOTOMULTIPLICADOR, TIPO DINODO CENTRADO LINEALMENTE, 1 A 10= DINODOS, 11= ÁNODO Y F= ELECTRODO DE ENFOQUE. | 38 |
| FIG. 3.13. DINODO DE EMISIÓN SECUNDARIA..... | 39 |
| FIG. 3.14. MÉTODO OPERATIVO BÁSICO EN UN PMT. | 40 |
| FIG. 3.15. CONTADOR DE FOTONES. | 41 |
| FIG. 3.16. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS FOTOCÁTODOS DEL MODO DE TRANSMISIÓN. | 42 |
| FIG. 3.17. TRANSMITANCIA ESPECTRAL EN DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES DE VENTANA. | 44 |
| FIG. 3.18. RESPUESTA DEL OJO Y DISTRIBUCIÓN DE LA LÁMPARA DE TUNGSTENO 2856K. | 46 |
| FIG. 3.19. DIAGRAMA DE MEDICIÓN DE LA SENSIBILIDAD LUMINOSA DEL CÁTODO. | 47 |
| FIG. 3.20. DIAGRAMA DE MEDICIÓN DE LA SENSIBILIDAD DEL ÁNODO. | 47 |
| FIG. 3.21. FUENTE DE PODER DOBLE DE ALTO VOLTAJE C.A.E.N. MODELO N471. | 49 |
| FIG. 3.22. FAST ADC MODULO DIGITALIZADOR CAEN N6742. | 50 |
| FIG. 3.23. GENERADOR DE FUNCIONES AFG3102, MARCA TEKTRONIX, DE FORMAS DE ONDAS ARBITRARIAS U DE PULSOS DE LA SERIE AFG3000. | 51 |
| FIG. 3.24. OSCILOSCOPIO TEKTRONIX TSD2024C. | 52 |
| FIG. 3.25. MULTÍMETRO TOOLS MM1000. | 53 |
| FIG. 3.26. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL PMT HAMAMATSU R5912 SEGÚN FABRICANTE [25]. | 56 |
| FIG. 3.27. CURVA DE SENSIBILIDAD Y EFICIENCIA CUÁNTICA DEL R5912 USADO EN EL OBSERVATORIO HAWC SEGÚN FABRICANTE [25]. | 57 |
| FIG. 3.28. DIDOS EMISORES DE LUZ, COMÚNMENTE LLAMADOS LED POR SUS SIGLÁS EN INGLÉS. A LA IZQUERDA SU ENCAPSULADO Y A LA DERECHA SU CONTRUCCIÓN INTERNA. | 58 |
| FIG. 3.29. POLARIZACIÓN DE LA UNIÓN P-N EN UN DIODO LED. PRODUCCIÓN DE FOTONES COMO CONSECUENCIA DE LA RECOMBINACIÓN ENTRE COLECTORES Y HUECOS (PARTE SUPERIOR). EL FENÓMENO DE LA RECOMBINACIÓN EN UN DIAGRAMA DE ENERGÍA (PARTE INFERIOR) [29]. | 59 |
| FIG. 4.1. FOTOS ILUSTRATIVAS DE LA “CAJA OSCURA” QUE SE ELABORÓ EN EL LABORATORIO. DE LADO IZQUIERDO SE APRECIA EL PD Y FRENTE DE ÉSTE UN DIODO LED. DE LADO DERECHO SE APRECIA LA CAJA CERRADA. | 63 |
| FIG. 4.2. ESQUEMA DE LA CAJA OSCURA PARA LA CALIBRACIÓN DEL LED EN INTESIDAD A) LED, B) PD DE FOTMETRÍA, C) CAJA DE ALUMINIO, D) CAJA DE NYLON NEGRO, E) CONECTORES BNC. | 63 |
| FIG. 4.3. DE IZQUIERDA A DERECHA: FUENTE DE ALIMENTACIÓN KEITHLEY 2280S-60-3, ESPECTRÓMETRO OCEAN OPTICS USB4000, MULTÍMETRO DIGITAL KLEIN TOOLS MM1000, PC CON EL SOFTWARE DEL ESPECTRÓMETRO. | 64 |

| | |
|--|----|
| FIG. 4.4. DE IZQUIERDA A DERECHA: FUENTE DE ALTO VOLTAJE KEITHLEY 2280S-60-3, CAJA OSCURA Y ESPECTRÓMETRO OCEAN OPTICS USB4000. | 65 |
| FIG. 4.5. ESPECTRO DEL LED BLANCO CON UN MÁXIMO EN 452 NM CON OTRO MÁXIMO EN 532 NM. | 65 |
| FIG. 4.6. ESPECTRO DEL LED MORADO PERO QUE EN REALIDAD CONSTA DE DOS PICOS UNO EN 440 NM Y OTRO EN 642 NM. | 66 |
| FIG. 4.7. ESPECTRO DEL LED UV, SU LONGITUD DE ONDA ES DE 396 NM CON UNA SEMIANCHURA FWHM DE 14 NM, $s=6$ | 66 |
| FIG. 4.8. ESPECTRO DEL LED AZUL CON UN MÁXIMO EN 458 NM Y UNA SEMIANCHURA FWHM DE 19 NM, $\sigma=8$. EN ESTE ESPECTRO NO SE APRECIA UN SEGUNDO PICO, COMO EN EL CASO DEL LED MORADO Y BLANCO. | 67 |
| FIG. 4.9. ESPECTRO DEL LED VERDE OPACO CON UN MÁXIMO EN 560 NM Y UNA SEMIANCHURA FWHM DE 25 NM, $\sigma=11$. EN ESTE ESPECTRO NO SE APRECIA UN SEGUNDO PICO, COMO EN EL CASO DEL LED MORADO Y BLANCO AUNQUE CIERTAMENTE EL MÁXIMO NO ES MUY SIMÉTRICO. | 67 |
| FIG. 4.10. ESPECTRO DEL LED VERDE CON CAPSULA CONTENEDORA TRANSPARENTE CON UN MÁXIMO EN 567 NM Y UNA SEMIANCHURA FWHM DE 18 NM, $\sigma=8$. EL PICO DEL MÁXIMO ES SIMÉTRICO. | 68 |
| FIG. 4.11. ESPECTRO DEL LED AMARILLO OPACO CON UN MÁXIMO EN 587 NM Y UNA SEMIANCHURA FWHM DE 14 NM, $\sigma=6$ | 68 |
| FIG. 4.12. ESPECTRO DEL LED NARANJA CON UN MÁXIMO EN 607 NM Y UNA SEMIANCHURA FWHM DE 13 NM, $s=5$ | 69 |
| FIG. 4.13. ESPECTRO DEL LED ROJO CON MÁXIMO EN 627 NM Y UNA SEMIANCHURA FWHM DE 16 NM, $s=7$ | 69 |
| FIGURA 4.14. DIAGRAMA DÓNDE SE MUESTRA LA TÉCNICA PARA ENCONTRAR EL ÁNGULO EN CADA PATRÓN DE LUZ DE CADA LED. DÓNDE A ES EL ÁNGULO, D LA DISTANCIA DEL LED AL PMT, R EL RADIO. | 71 |
| FIG. 4.15. ILUMINACIÓN DEL LED ULTRAVIOLETA. LA MANCHA CENTRAL TIENE UN ÁNGULO DE 35°, EL COLOR ES INCORRECTO PUES ES DEBIDO PRINCIPALMENTE A FLUORESCENCIA DEL PAPEL DONDE SE PROYECTA. NÓTESE LA POCA SIMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DISPAREJA DE LA ILUMINACIÓN. | 72 |
| FIG. 4.16. MANCHA DE ILUMINACIÓN DEL LED AZUL LA MANCHA CENTRAL ES DE 15° LA INTERMEDIA ES DE 27°. NÓTESE LA POCA SIMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DISPAREJA DE LA ILUMINACIÓN. | 72 |
| FIG. 4.17. MANCHA DE COLOR DE LA ILUMINACIÓN DEL LED VERDE LA PARTE CENTRAL MÁS INTENSA CUBRE 16° Y LA EXTERIOR 25°. NÓTESE LA POCA SIMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DISPAREJA DE LA ILUMINACIÓN. | 72 |
| FIG. 4.18. MANCHA DE COLOR DE LA ILUMINACIÓN DEL LED NARANJA. LA MANCHA CENTRAL ES DE 15° LA INTERMEDIA ES DE 27°. NÓTESE LA POCA SIMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DISPAREJA DE LA ILUMINACIÓN. | 73 |
| FIG. 4.19. MANCHA DE COLOR DE LA ILUMINACIÓN DEL LED NARANJA. LA MANCHA CENTRAL ES DE 25° LA INTERMEDIA ES DE 35°. NÓTESE LA DISTRIBUCIÓN DISPAREJA DE LA ILUMINACIÓN. | 73 |
| FIG. 4.20. MANCHA DE COLOR DE LA ILUMINACIÓN DEL LED ROJO A LA ALTURA DEL TUBO PMT. LA ZONA MÁS INTENSA ES DE 15° Y LA SIGUIENTE CUBRE 20°. NÓTESE LA POCA SIMETRÍA DE ESTA, ASÍ COMO LAS DIFERENTES INTENSIDADES EN VARIAS ZONAS. LOS COLORES ESTÁN ALTERADOS, POR LA RESPUESTA AL COLOR DE LA CÁMARA DE FOTOGRAFÍA. | 73 |
| FIG. 4.21. SE MUESTRA LA CORRIENTE EN CORTO CIRCUITO, I_{SH} , DEL PD EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN DEL LED. LA ESCALA ES LOG-LOG DADO QUE HAY GRAN DISPERSIÓN EN LOS VALORES DE CORRIENTE CON LOS QUE FUNCIONAN LOS LED. LOS COLORES EN LAS LÍNEAS CORRESPONDEN AL COLOR DEL LED, VIOLETA ES UV. | 75 |

| | |
|---|----|
| FIG. 4.22. CORRIENTE EN CORTO, I_{SH} , EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE APLICADO AL PD QUE ES PROPORCIONAL A LA ILUMINACIÓN Y POR TANTO AL NÚMERO DE FOTONES EMITIDOS COMO FUNCIÓN DEL VOLTAJE APLICADO A LOS LED. LOS COLORES DE LAS LÍNEAS CORRESPONDEN AL COLOR DEL LED, VIOLETA ES UV..... | 76 |
| FIG. 4.23. ARREGLO DE CONEXIONES DEL PMT. | 77 |
| FIG. 4.24. ESQUEMA DE LA CAJA DE MADERA UTILIZADA PARA LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA CUÁNTICA DE UN PMT DEL PROYECTO HAWC. A) LED B) PMT C) SOPORTE DE PVC D) CAJA DE MADERA, LA CUAL SE PINTÓ DE NEGRO E) BLINDAJES ÓPTICOS ADICIONALES F) CONEXIÓN DE ALTO VOLTAJE Y SALIDA DE LA SEÑAL DEL PMT Y CONEXIÓN DE BAJO VOLTAJE DEL LED. | 77 |
| FIG. 4.25. TUBO PMT EN EL INTERIOR DE LA CAJA DE MADERA. | 78 |
| FIG. 4.26. TÍPICO PULSO CON EL QUE SE ALIMENTARON LOS LED. TIEMPO DE SUBIDA Y TIEMPO DE BAJADA, MENOR A 10 NS CADA UNA Y ANCHO DEL PULSO, LO MÍNIMO DEL GENERADOR, DÁNDONOS UNA SEMI-ANCHURA DE APROXIMADAMENTE 5 NS. | 79 |
| FIG. 4.27. DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE LA CAJA DESACOPLADORA DE SEÑAL: R1 20 K Ω , R2 100 K Ω R3 24 Ω , R4 100 M Ω , C1 10. NF Y C2 66. NF. | 79 |
| FIG. 4.28. DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE TOMA DE DATOS. | 80 |
| FIG. 4.29. ESPECTRO TÍPICO DONDE SE MUESTRAN LOS PICOS QUE INDICAN EL FONDO O PEDESTAL EN EL ORIGEN (CERO ELECTRONES) Y LOS PICOS INDICANDO, EL PRIMER FOTO ELECTRÓN, LOS DOS FOTOELECTRONES Y ASÍ SUCESIVAMENTE. TAMBIÉN INDICA EL ÁREA QUE SE DEBE INTEGRAR PARA OBTENER EL NÚMERO TOTAL DE FOTOELECTRONES. | 81 |
| FIG. 4.30. CAPTURA DE PANTALLA DEL PROGRAMA ROOT. DE ABAJO HACIA ARRIBA: EL PROGRAMA TE PIDE EL VOLTAJE (1500 V EN LA PANTALLA), DESPUÉS DE UN INTERVALO DE TIEMPO FINALIZA EL "RAMPING UP" Y NOS PREGUNTA EL PROGRAMA SI FINALIZAMOS (Q) O NO (M). | 82 |
| FIG. 5.1 CURVA DE LA EFICIENCIA CUÁNTICA ESPERADA DEL FOTOMULTIPLICADOR R5819 (VIOLETA) SUPERPONIÉNDOLE LOS PUNTOS EXPERIMENTALES (VERDES) EN UNIDADES ARBITRARIAS CALCULADOS CON SU RESPECTIVA INCERTIDUMBRE. SE MOVIÓ LA CURVA DE LA $E_{Q_{PMT}}$ PARA HACER COINCIDIR LOS VALORES EN EL COLOR VERDE. | 87 |
| FIG. A. CURVA DE PLANCK. | 97 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1.1. COMPARACIÓN ENTRE TELESCOPIOS CHERENKOV IACT Y ARREGLOS DE DETECTORES DE SUPERFICIE | 17 |
| TABLA 3.1. LISTA DE LOS COLORES LED UTILIZADOS JUNTO CON SU ENERGÍA Y NÚMERO DE FOTONES. | 30 |
| TABLA 3.2. REFERENCIA RÁPIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA ESPECTRAL..... | 41 |
| TABLA 3.3. REFERENCIA RÁPIDA PARA CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE RESPUESTA ESPECTRAL. | 42 |
| TABLA 3.5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL GENERADOR DE FUNCIONES AFG3102. | 50 |
| TABLA 3.6. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN EL PMT DE 8". | 53 |
| TABLA 3.7. CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS EN EL PMT DE 8". | 53 |
| TABLA 3.8. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS-ELECTRÓNICAS EN EL PMT DE 8". | 54 |
| TABLA 4.1. LED'S CALIBRADOS CON SU CORRESPONDIENTE LONGITUD DE ONDA. | 68 |
| TABLA 5.1. CARACTERÍSTICAS DEL LED Y PD ASÍ COMO VALORES CALCULADOS USADOS PARA EL CÁLCULO DE LA EC SEGÚN EL COLOR. $FWHM$ ES LA SEMI-ANCHURA DEL PICO DEL ESPECTRO EN CADA COLOR (VER SEC. 4.2). S_{PD} ES EL FACTOR DE CORRECCIÓN POR LA RESPUESTA LUMINOSA DEL PD SEGÚN GRAFICA DE LA FIG. 3.4. EC_{PD} ES LA EFICIENCIA CUÁNTICA DEL PD CALCULADA A PARTIR DE LA S_{PD} . FOTONES/LUX ES EL NÚMERO DE FOTONES POR LUX SEGÚN EL COLOR CALCULADO ABAJO USANDO EC. 5.7 Y 5.9A. | 82 |
| TABLA 5.2. EFICIENCIA CUÁNTICA EXPERIMENTAL EN UNIDADES ARBITRARIAS JUNTO CON SU INCERTIDUMBRE. | 87 |
| TABLA A1..... | 93 |
| TABLA A2..... | 93 |
| TABLA A3..... | 94 |
| TABLA A4..... | 94 |
| TABLA A5..... | 95 |
| TABLA A6..... | 95 |
| TABLA B..... | 96 |

RESUMEN

En ésta tesis presento el trabajo para hacer una primera aproximación a la medición de la eficiencia cuántica de un tubo fotomultiplicador de los usados en los detectores de agua del proyecto HAWC.

HAWC es un observatorio de rayos cósmicos que para detectar las partículas cargadas de los chubascos atmosféricos, usa fotomultiplicadores, para ver la radiación cherenkov de éstas. Es una primera aproximación ya que el observatorio calibra los tubos fotomultiplicadores con un láser verde (~ 532 nm). La técnica usada en este trabajo difiere un poco de la utilizada en HAWC, ya que utilicé 5 todos colores del espectro de luz.

La motivación de este trabajo es que en el reporte presentado por este observatorio, se da cuenta que el resultado de la simulación Monte Carlo y los datos obtenidos en el fotomultiplicador para un mismo evento, un muon de 5 GeV, difieren en un factor pequeño, pero no explicado. Las posibles razones mencionadas en el reporte son o una mala calidad del agua o una eficiencia cuántica errónea. Dado que la calidad del agua ha mejorado y la diferencia subsiste, es necesario estimar la eficiencia cuántica.

Para hacer esta medición iluminé un tubo fotomultiplicador de los usados en el observatorio con pulsos de luz con un número de fotones conocido a diferentes colores y calculé la eficiencia con que se producían fotoelectrones. Para esto, primeramente, calibré las fuentes de fotones monocromáticos. La luz de diferentes colores la produje usando diodos emisores de luz. La calibración del número de fotones emitidos función de la alimentación del diodo la hice usando un fotodiodo de fotometría y las curvas de calibración dadas por el fabricante.

La frecuencia del color se midió usando un espectrofotómetro. El resultado fueron 5 puntos de cinco frecuencias diferentes que caen dentro del intervalo de sensibilidad del fotomultiplicador. Estos puntos nos dicen que, en el fotomultiplicador usado, la eficiencia cuántica bajaba sensiblemente más en la región del ultravioleta que en la curva genérica dada por el fabricante.

La luz cherenkov tiene un máximo en el agua dentro del ultravioleta por lo que seguramente esto altera las mediciones. Este hecho indica que los fotomultiplicadores pueden tener una eficiencia cuántica muy diferente de la indicada en las hojas de características del PMT.

1. INTRODUCCIÓN

En esta tesis reporto el trabajo hecho en el Observatorio Cherenkov en Agua a Gran Altura, (HAWC) por sus siglas en inglés, *High Altitud Water Cherenkov*. En este observatorio se estudian la radiación cósmica más energética que se puede producir en el universo y que llega a la Tierra. Para estudiar esta radiación se estudian los remanentes que llegan a la superficie terrestre después de que la radiación cósmica chocó con la atmósfera a gran altura. Para detectar estos reductos a nivel tierra se usa el fenómeno de la luz cherenkov que generan los residuos de la colisión en el agua del detector. Esta radiación se detecta con elementos altamente fotosensibles conocidos como fotomultiplicadores. La radiación cherenkov que se produce en el agua tiene una gran variedad de colores, siendo más intenso en el ultravioleta. Para poder hacer una estimación de la energía de la radiación que llegó a la Tierra se requiere conocer la calibración de estos fotomultiplicadores. Esta calibración consiste en llevar de energía inicial a energía de fragmentos a nivel Tierra a luz cherenkov y a fotoelectrones y de ahí a carga eléctrica. En esta cadena de conversiones se encontró que al pasar de fotones de luz cherenkov a fotoelectrones en el fotomultiplicador había discrepancias, cosa que en esta tesis pretendo corregir.

En este trabajo medí la respuesta de estos tubos fotomultiplicadores conforme los iluminaba con luz de diferentes colores. En física la relación entre el número de fotones y fotoelectrones que se generan en el fotomultiplicador se conoce como Eficiencia Cuántica (EC) que es lo que se midió. Para esto previamente calibré las fuentes luminosas para saber en cada color cuántos fotones emitía cada una de ellas. Utilicé la técnica de contar fotones muy utilizada en física nuclear. Ésta técnica en resumen consiste en bajar la intensidad luminosa a cero e ir subiendo hasta que detectemos los primeros fotones, los resultados son relativos, aunque entre sí preservan su relación las mediciones de los diferentes colores.

1.1 MARCO TEÓRICO

La astronomía [1] nos explica cuáles son los mecanismos de la evolución de los astros y del cosmos. Es una de las primeras ciencias que el hombre ha venido practicando, haciendo girar la mirada al cielo para buscar respuestas en las estrellas, para entender el origen de la Tierra y el universo. Uno de los primeros astrónomos que hizo observaciones utilizando un telescopio fue sin duda Galileo Galilei (1564-1642) considerado “el padre de la astronomía moderna”. Pasando por la teoría electromagnética de James Clerk Maxwell

(1831-1879), la cual nos dice que las ondas electromagnéticas pueden viajar a la velocidad de la luz, hasta llegar al descubrimiento de los rayos gamma en 1900 por el físico-químico francés Paul Villar (1860-1934). Esta radiación, aparecen en procesos de decaimiento radioactivo, en otros procesos subatómicos como lo son la aniquilación de un par positrón-electrón y también se generan en fenómenos astrofísicos de gran violencia.

1.1.2. RADIACIÓN CÓSMICA

Los rayos cósmicos son partículas viajeras del universo en las cuales está inmersa la Tierra, se dice que ésta se encuentra inmersa en un “mar” de partículas. Cuentan con una gran velocidad, algunos núcleos con velocidad casi parecida a la de la luz, pues su energía es extremadamente elevada [2].

En 1912 el físico austriaco Víctor Franz Hess (1883-1964) realizó varios vuelos en globos aerostáticos, con la intención de medir la radiación como función de la altura. Con los datos recabados demostró que el origen de esta radiación se encontraba fuera de la atmósfera terrestre.

Los rayos cósmicos se clasifican según su origen. Se dividen en rayos cósmicos extra galácticos, aquellos que provienen de fuera de la Vía Láctea, rayos cósmicos galácticos, aquellos que provienen de la Vía Láctea y rayos cósmicos solares, que como su nombre lo dice, provienen de erupciones solares. También se clasifican como primarios: partículas cargadas, (90% protones, 9% partículas alfa y el resto son núcleos más pesados que el helio) y fotones que provienen del espacio exterior, y secundarios: producto de la colisión de los rayos primarios, es decir, choques o interacciones de rayos cósmicos primarios con núcleos de oxígeno y nitrógeno en la atmósfera, estos se componen de fotones, neutrones, electrones, positrones, muones, piones, etcétera.[3].

1.1.3. ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS

La energía de los rayos cósmicos es medida en unidades de eV. En la Fig. 1.1, se aprecia el espectro de energía en un intervalo de estudio de 10^9 eV - 10^{21} eV. Este espectro de energía de los rayos cósmicos ha podido ser estudiado hasta energías de 10^{18} eV. El espectro sigue una ley de potencias que decae rápidamente con la energía. Alrededor de 10^{15} eV hay un incremento del índice espectral, a este cambio se le conoce como “rodilla” y hay un segundo incremento que se le conoce como “tobillo”, este ocurre alrededor de 10^{19} eV.

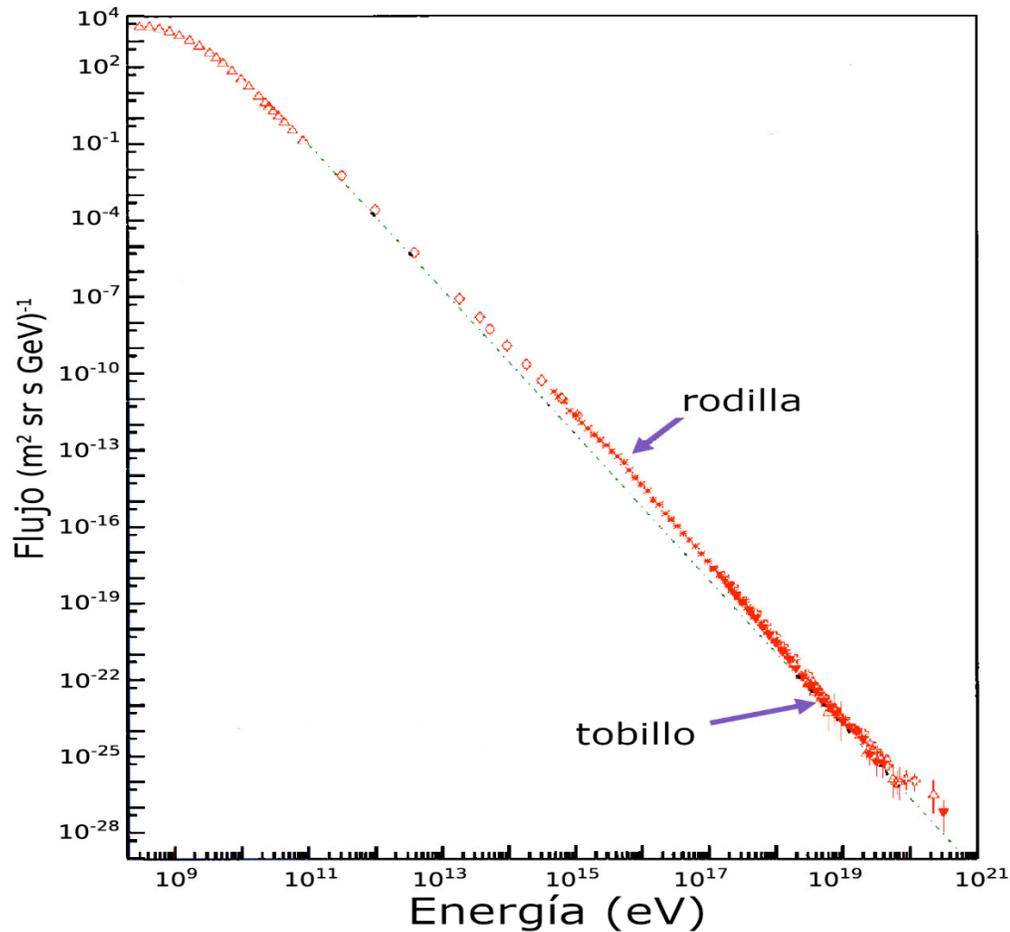


Fig. 1.1. Espectro de energía de los rayos cósmicos en el rango de 10^{11} eV a 10^{21} eV. Donde se observan los cambios en la pendiente “rodilla” y “tobillo”.

1.1.4. CASCADAS ATMOSFÉRICAS

Los experimentos de rayos cósmicos aprovechan los efectos de la llegada de flujo de partículas o de fotones muy energéticos en la atmósfera terrestre. Es a partir del ingreso de esta radiación primaria en la atmósfera, que se produce una serie de interacciones con la materia que se encuentra presente en la atmósfera, perdiendo su energía a través de encuentros con las moléculas de aire. Si la partícula entrante tiene suficiente energía se crean más partículas. Estas nuevas partículas continúan creando a su vez otras nuevas partículas y así sucesivamente. A este proceso de multiplicación se le conoce como una *cascada*, *chubasco* o *Extensive Atmospheric Showers (EAS)*, por sus siglas en inglés, Fig. 1.2.

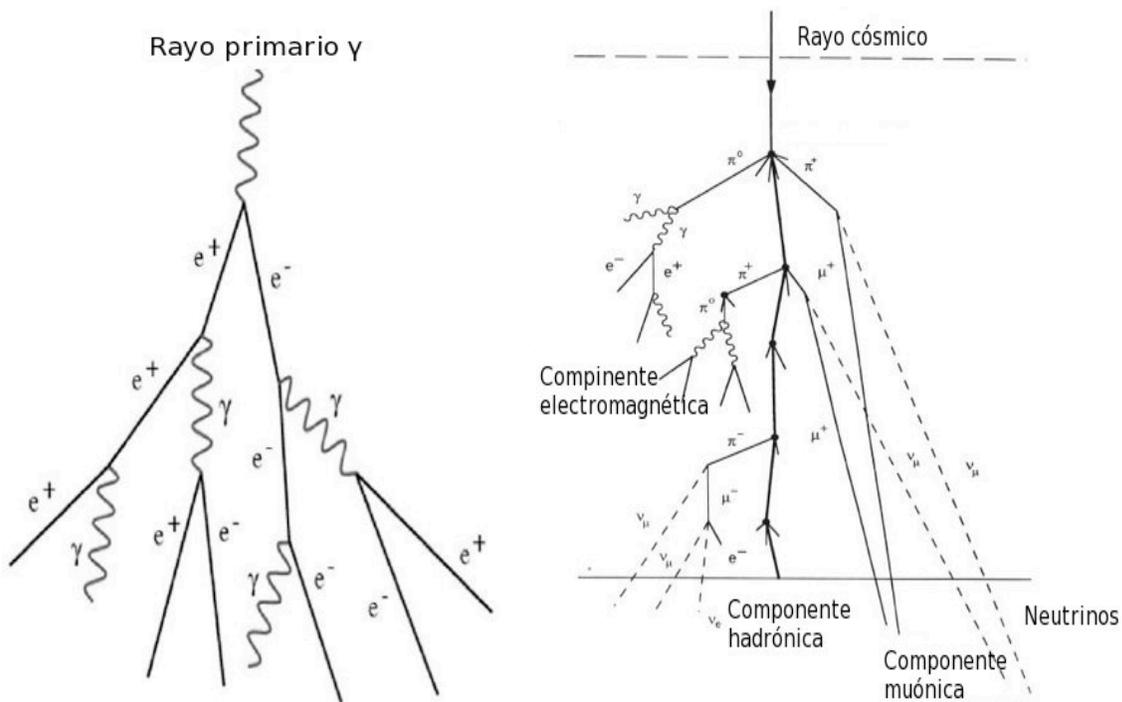


Fig. 1.2. Lado izquierdo: diagrama de cascada atmosférica producida por un rayo gamma, conocido como cascada electromagnética y de lado derecho: diagrama del proceso de una cascada atmosférica producida por un rayo cósmico o hadrón (cascada hadrónica).

Este proceso de multiplicación continuará hasta que la energía promedio por partícula caiga debajo de 80 MeV. En este punto, las interacciones llevan a la absorción de partículas y la cascada comienza a desvanecerse. La altura a lo que esto ocurre se le conoce como *máximo de la cascada*. La energía de las partículas primarias es de tal magnitud que los procesos que se encuentran implicados en la creación de nuevas partículas generan del orden de 10^{11} nuevas partículas, por lo que una importante porción de ellas logra alcanzar el nivel de la superficie terrestre.

1.1.5. CASCADAS DE RAYOS GAMMA

Cuando un electrón muy energético o un rayo gamma llega a la atmósfera e interacciona con átomos de la misma, se produce una *cascada electromagnética*. Dichas cascadas contienen principalmente electrones e^- , positrones e^+ y fotones γ . Si la partícula primaria es un rayo gamma entonces al interactuar con un átomo de la atmósfera se puede producir un par electrón-positrón, a dicho proceso se le conoce como *producción de pares*.

$$\gamma = e^- + e^+ \quad (1.1)$$

1.1.6. DETECCIÓN DE RADIACIÓN CÓSMICA

Cuando los rayos cósmicos entran en la atmósfera terrestre inician una reacción en cadena o cascada atmosférica, EAS. Para determinar el tipo, la energía y la dirección de la radiación primaria se utilizan las propiedades de las cascadas atmosféricas.

1.2. RADIACIÓN CHERENKOV

La Radiación Cherenkov [4] (Pavel Alekseyevich Cherenkov 1904 - 1990) es un fenómeno electromagnético que se origina cuando una partícula cargada (p^+ , e^- , e^+ , m^- , m^+ , ...) pasa a través de un medio dieléctrico a una velocidad mayor que lo que la luz c puede viajar en ese medio. Esta velocidad determina el índice de refracción del medio. El característico resplandor azul que se origina en el agua que rodea el núcleo de los reactores nucleares tiene su origen en la *radiación Cherenkov*. Pavel Alekseyevich recibió el premio Nobel de Física en 1958 por ser el primero en detectar esta radiación de manera experimental. Esta radiación fue predicha tiempo atrás por Oliver Heaviside a finales de 1888 y principios de 1889.

La Luz Cherenkov se emite principalmente en la región del ultravioleta (UV) [4] del espectro en un pequeño cono alrededor y en la dirección de movimiento de la partícula. Se sabe hasta el momento, que la velocidad de la luz c en el vacío es el límite para la velocidad de cualquier partícula en el Universo. Ninguna entidad cuántica con masa es capaz de viajar a la velocidad de la luz c ni superior. Pero esto es en el vacío, pues la radiación electromagnética se propaga a velocidades menores en cualquier otro medio, incluso a velocidades significativamente menores a c . Tal es el caso de la velocidad de propagación de la luz en el agua, la cual es de $0.75c$. Por lo que puede darse el caso de que las partículas materiales se propaguen más rápido en el agua que las ondas electromagnéticas.

Una partícula cargada típica en una EAS producirá de 10^8 a 10^9 partículas cerca de su máximo, estas cascadas producen grandes cantidades de radiación cherenkov en la dirección en que se propaga la cascada, en el aire o en el agua.

Si se tiene una partícula cargada que viaja a una velocidad v_p que es mayor a la velocidad de fase de la luz en el medio, dónde éste último tiene un índice de refracción n , entonces dicha partícula viaja a una distancia d en un tiempo t :

$$d = \beta ct \quad (1.5)$$

Dónde $\beta = \frac{v_p}{c}$

El pulso electromagnético que es producido por la partícula cargada al polarizar el medio viajará una cierta distancia que viene dada como:

$$d_p = \frac{c}{n} t \quad (1.6)$$

Comparando la distancia y la dirección a la que viajan la partícula y el pulso en un tiempo específico, se obtiene un triángulo rectángulo (Fig. 1.5) y utilizando trigonometría se podrá obtener el ángulo θ del cono de luz cherenkov, el cual esta dado por:

$$\cos(\theta) = \frac{d_p}{d} = \frac{1}{n\beta} \quad (1.7)$$

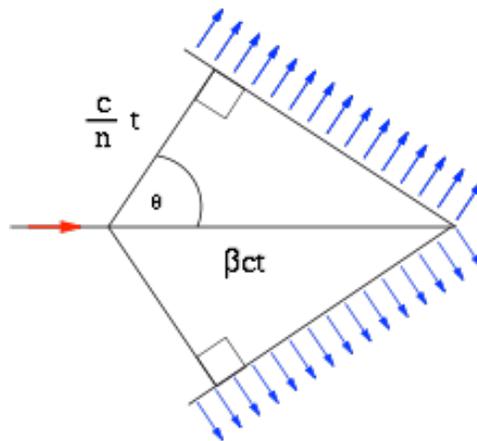


Figura 1.3. . Diagrama del ángulo cherenkov el cual se forma en un frente de ondas debido a la interferencia constructiva de los pulsos electromagnéticos despedidos por el material dieléctrico al pasar una partícula con velocidad mayor a la velocidad fase de la luz en el medio.

Este último ángulo se relaciona con la energía de la partícula utilizando la fórmula (1.7) y la fórmula relativista de la energía de una partícula conociendo su masa en reposo (1.8)

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0 c^2}{E}\right)^2} \quad (1.8)$$

Utilizando la fórmula 1.7 es posible obtener el ángulo θ de la radiación cherenkov para cualquier dieléctrico conociendo su índice de refracción n y la velocidad de la partícula cargada.

1.2.1. DETECCIÓN DE CASCADAS ATMOSFÉRICAS

Existen los *Detectores de agua Cherenkov* que pueden ser un estanque o tanques llenos de agua. En estos detectores una vez que las partículas cargadas llegan a este, al pasar a través del agua, estas emiten luz de cherenkov debido a que viajan más rápido que la velocidad de la luz en el agua y esta luz cherenkov es detectada por elementos fotosensibles como pueden ser PMT's.

También existen los llamados Telescopios de Imagen de Cherenkov en la Atmosfera, *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope* (IACT) por sus siglas en inglés (Fig. 1.6) que consisten en un espejo grande de una sola pieza, monolítico o mayor, formado de varios segmentos con la intención de enfocar la luz de cherenkov generada por una cascada atmosférica en el aire en un arreglo de PMT's, o fotomultiplicadores de Silicio, *Silicon Photomultipliers tubes*, (SiPMT), por sus siglas en inglés, que sean sensibles a luz ultravioleta.

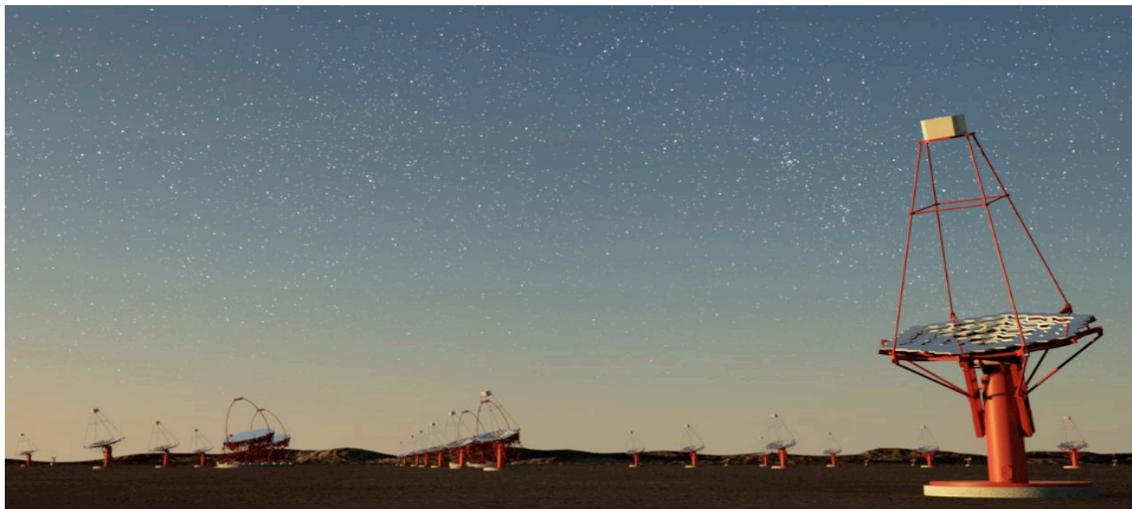


Fig. 1.4. Arreglo de IACS's, HESS, High Energy Stereoscopic System en Namibia.

1.2.2. TELESCOPIOS CHERENKOV Y ARREGLOS DE DETECTORES EN LA SUPERFICIE

¿Por qué preocuparse por tener dos técnicas de detección de rayos gamma de las EAS?. Porque cada técnica tiene su fortaleza y debilidad de manera que el uso de los dos métodos se complementa.

Por ejemplo, en una cascada creada por un rayo cósmico de menos de 1 TeV, pocas partículas penetrarán hasta el nivel de la superficie, sin embargo la luz Cherenkov llegará a la superficie y se disparará en un IACT. De manera que entonces un IACT tiene un umbral de energía más bajo que un arreglo de detectores cherenkov superficial. Desafortunadamente éstos también son instrumentos ópticos con un campo de visión

muy estrecho, y no pueden operar durante el día (donde la radiación Cherenkov es sobrepasada por la luz del sol) o cuando hay mal tiempo (cuando la atmósfera está cerrada por las nubes).

Los arreglos de detectores superficiales pueden operar en cualquier condición atmosférica y a cualquier hora del día. Sin embargo, estos son mucho menos sensibles a cascadas de baja energía que los IACT's. Y para la observación de rayos gamma son mucho menos eficientes al distinguir cascadas de rayos cósmicos de cascadas gamma. En la Tabla 1.1 se muestran las comparaciones entre estos dos tipos de detectores.

| | Telescopios Cherenkov IACT | Arreglos de detectores en la superficie |
|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Límites en energía | Bajo (<200 GeV) | Alto (>100 GeV) |
| Rechazo de señales de fondo | Excelente (>99,7%) | Moderado (>50%) |
| Campo de visión | Pequeño (<2°) | Grande (>45°) |
| Ciclo de trabajo | Bajo (5%-10%) | Alto (>90%) |

Tabla 1.1. Comparación entre telescopios cherenkov IACT y arreglos de detectores de superficie.

1.3. PROYECTO HAWC

A continuación se describen: el proyecto HAWC, los PMT (estructura física, funcionamiento y operación), un diodo emisor de luz, *Light Emitting Diode* (LED) por sus siglas en inglés y fotodiodo de silicio, *Silicon Photodiode* (SiPD), por sus siglas en inglés.

1.3.1. OBSERVATORIO HAWC

El observatorio HAWC [5] (Fig. 1.7), fue construido mediante una colaboración internacional México, Estados Unidos, Alemania y Polonia. El observatorio fue diseñado para estudiar los Rayos Gamma de origen cósmico de alta energía (100GeV-100TeV) indicadores de los fenómenos más violentos que ocurren en el universo como lo son explosiones de supernovas, núcleos activos de galaxias y los conocidos brotes de rayos gamma, *Gamma Ray Burst* (GRB) por sus siglas en inglés. Este observatorio se encuentra ubicado a 4100 m sobre el nivel del mar, a los pies del volcán Sierra Negra, municipio de Atzitzintla, estado de Puebla. HAWC es llamado el sucesor del observatorio de Rayos Gamma “Milagro”, el cual se encontraba en Nuevo México, Estados Unidos.

Al igual que HAWC, el método de la observación de Milagro era detectar Rayos Gamma de manera indirecta usando la producción de luz cherenkov en agua. Los telescopios cherenkov atmosférico observan sólo durante la noche y una parte reducida del cielo, mientras el observatorio HAWC cuenta con una gran abertura la cual cubre el 15% del cielo y es capaz de observar dos terceras partes del cielo durante un ciclo de 24 horas.



Fig. 1.5. Vista del arreglo de tanques del observatorio HAWC en Puebla.

1.3.2. DISEÑO DEL OBSERVATORIO

El observatorio HAWC está constituido por 300 detectores de luz cherenkov en agua, *Water Cherenkov Detector* (WCD) por sus siglas en inglés. Cada uno de estos detectores (Fig. 1.8) mide 7.3 m de diámetro y contienen agua hasta una altura de 4.5 m. Cada tanque contiene en su interior 180,000 litros de *agua ultra pura*¹. El volumen de esta agua se encuentra en una bolsa que aísla el agua de la luz exterior. Esta bolsa se encuentra fija y protegida con una capa de *geotextil*² dentro de cada tanque de acero. En el fondo de cada tanque hay 4 tubos PMT's, la dimensión de los 3 PMT que se encuentran ubicados cerca de las paredes, son 8 pulg de diámetro y están a 1.83 m de distancia del centro del tanque y separados entre sí 120°^o (se les denomina a cada uno de estos tres PMT's: A, B y D). El último PMT mide 10 pulg de diámetro y se encuentra en el centro del tanque (llamado PMT C). En total todo el arreglo contiene 1200 PMT's.

¹ El agua de alta pureza es requerida completamente libre de compuestos disueltos y sólidos suspendidos. El trabajo demanda agua de esta naturaleza, para remover las posibles interferencias que las sales y materiales disueltos puedan tener con la luz Cherenkov.

² Un geotextil o geotextido es una tela permeable y flexible de fibras sintéticas, principalmente polipropileno y poliéster, las cuales se pueden fabricar de forma no tejida o tejida dependiendo de su uso o función a desempeñar.

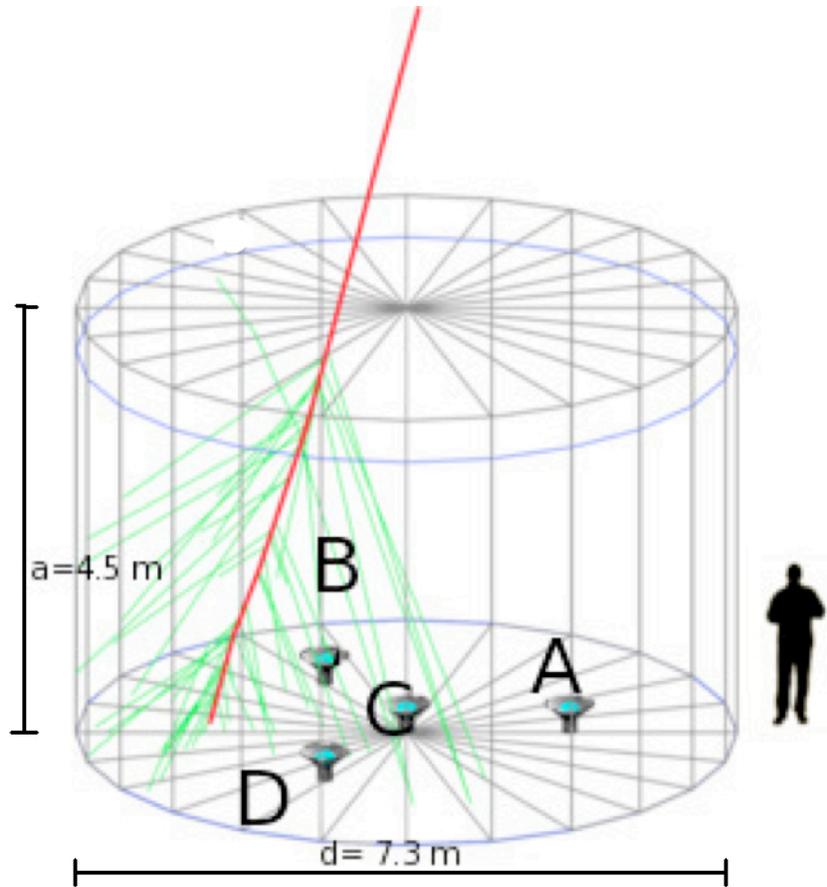


Fig .1.6. Simulación del paso de una partícula cargada (línea roja) a través de un tanque y la emisión de Luz Cherenkov (líneas verdes). Así como la ubicación de los 4 PMT's: laterales A,B y el central C.

En los WCD, la cantidad de luz detectada por los PMT's se maneja en unidades de fotoelectrones, *photoelectron* (pe), por sus siglas en inglés. La cadena del sistema de adquisición de datos, Data Acquisition System (DAQ) por sus siglas en inglés, se inicia con estos pe registrando la carga y el tiempo de la luz detectada en cada PMT. Un sistema de láser y fibras ópticas está conectado a todas las unidades WCD proporcionándole señales de luz de intensidad variable y conocida y tiempos fijos con el fin de conocer constantemente la calibración de todas las unidades [6].

1.3.3. DETALLES DEL OBSERVATORIO HAWC

Dentro del detector, los tubos PMT's observan la luz cherenkov producida por todas las partículas cargadas producto de las EAS. La producción de luz cherenkov es extremadamente eficiente dentro del agua debido a su índice de refracción. El ángulo del cono de luz viene dado por la ecuación (1.7).

Esta ecuación dice que el ángulo depende del índice de refracción del medio, si se toma el índice de refracción del agua que es $n_{\text{agua}} = 1.3$ se tendrá que el ángulo de apertura de radiación cherenkov será aproximadamente de 43° . Si se compara con el ángulo que da con el índice de refracción del aire $n_{\text{aire}} = 1.0003$, que es de 1° , se ve claramente que en el agua es mucho mayor, por esta razón los detectores de Cherenkov en aire tienen un campo de visión muy pequeño.

Cómo el ángulo Cherenkov en agua es grande, las partículas cargadas que llegan al tanque se pueden detectar fácilmente. Estas señales al ser detectadas, son procesadas y analizadas para encontrar cascadas de rayos gamma.

Para saber cuál es la energía que tiene la partícula primaria que provocó la cascada, se debe tomar en cuenta la resolución en energía del observatorio HAWC. Cuando la resolución es pequeña se tendrá una buena aproximación de la energía de la partícula inicial. La resolución en energía de HAWC se ha calculado en base a eventos simulados. Arriba de 10 TeV la resolución en energía es inferior al 50% de la energía real, es decir que la energía de las partículas observadas arriba de este límite permitirá reconstruir la energía dentro del 50% de la energía verdadera. Este es una gran mejora al respecto de la resolución en energía de Milagro, la cual era $>100\%$ para casi todo su rango de energías (100GeV - 100 TeV).

2. MOTIVACIÓN

De acuerdo a las simulaciones Monte Carlo³ (hechas por el observatorio), donde los muones atmosféricos pasan por los tanques usando el paquete GEANT4⁴ y donde también se simulan mediante CORSIKA⁵ cascadas atmosféricas propagándolas a la simulación de GEANT4 de los WCD. Estos resultados se compararon con eventos reales detectados en HAWC, para poder así, identificar el evento primario que inició la cascada atmosférica.

En este punto apareció una diferencia entre las simulaciones y los datos [6]. El número de pe obtenidos de los datos en los PMT's exteriores difería de los calculados en la simulación. Se calcula un factor de 1.6 de sobreestimación por parte de GEANT4 del número de pe en los PMT's externos. Para un muon pasando directamente por el fotocátodo de 8 pulg de HAWC se calculan 20.5 fotones, detectándose únicamente 12.66 fotones [6]. La colaboración HAWC tiene la hipótesis de que la discrepancia sale de una incorrecta conversión de fotones a fotoelectrones o una modelación incorrecta de la absorción del agua, dado que son los dos únicos parámetros capaces de restar un número significativo de pe .

Es a partir de este problema de inconsistencia entre los valores en la simulación y las medidas en el número de pe que surge la motivación del presente trabajo. Es decir, se tratará de encontrar una explicación del problema sobre la inconsistencia entre los valores de la simulación y los valores reales arrojados. Para ello se utilizará una metodología para encontrar la eficiencia cuántica del tubo PMT a utilizar

Otro problema que surgió durante el presente trabajo y que puede también alterar significativamente las mediciones y su comparación con las simulaciones es el hecho que la luz cherenkov es polarizada. Al chocar la luz no polarizada y más si es polarizada con la superficie curva de los PMT's habrá una parte no despreciable de luz que no entre al PMT. Esta última situación no se considera en este trabajo.

³ El método Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias.

⁴ GEANT (for Geometry And Traking) Herramienta de software para la simulación de detectores: geometría, seguimiento, respuesta del detector, ejecución, gestión de eventos y pistas, visualización e interfaz de usuario. Para muchos procesos físicos. Se encuentra disponible una selección de diferentes modelos en la siguiente dirección. https://geant4.web.cern.ch/support/getting_started/about_geant4

⁵ CORSIKA (Cosmic Ray Simulatio for Kascade) es un programa para la simulación detallada de cascadas de partículas iniciadas por partículas de rayos cósmicos de alta energía. Los protones, los núcleos ligeros hasta el hierro, los fotones y muchas otras partículas pueden tratarse como primarios.

2.1. HIPÓTESIS

El Observatorio HAWC se encuentra en la sierra de Puebla, donde los tanques se encuentran expuestos al aire libre⁶. Este trabajo no se realizó en las mismas condiciones físicas en las cuales se encuentran los tubos PMT en el observatorio. Por lo cual coloqué el PMT en una caja de madera, para iluminarlo en total oscuridad. Cabe aclarar que, aunque no trabajé en las mismas condiciones que en el observatorio, este método usado es válido ya que la técnica utilizada de iluminación del PMT con diodos LED es correcta puesto que utilicé las longitudes de onda comprendidas en el intervalo de sensibilidad del PMT usado en los WTC del observatorio.

Para encontrar la inconsistencia en el número de pe , utilicé LED's, que por su propiedad de luz monocromática proporciona cada color del espectro de la luz blanca. En especial me enfoqué en el LED ultravioleta UV (380 nm), ya que ésta longitud de onda es la más importante en la radiación cherenkov.

Para buscar la fuente de la diferencia en un factor de 1/1.6 en el número de pe considero los dos factores bajo sospecha. En particular, el agua, se vio que su absorción según la ventana de frecuencias de la luz cherenkov no parece ofrecer un error respecto de los valores usados en la modelación. En cambio, en la conversión de fotones a fotoelectrones, el mismo fabricante indica [7] que las curvas de Eficiencia Cuántica (EC) que proporciona son indicativas pues cada PMT se comporta diferente y en diferentes partes del fotocátodo del mismo PMT.

Con base en lo anterior planteo tres suposiciones: a) la fuente de la discrepancia es la curva de EC de los PMT's, b) se podrá medir la EC en valores relativos a diferentes longitudes de onda y c) supongo que la iluminación que proporciona un LED es uniforme dentro del ángulo indicado por el fabricante y que la sensibilidad del PMT es pareja en toda su superficie [8] [9].

No pretendo hacer una medida de valores absolutos pues la misma compañía HAMAMATSU indica que se requiere un laboratorio especializado con equipo sofisticado y con patrones calibrados que se obtienen de laboratorios primarios, que no se tienen al alcance.

Con lo anterior propongo iluminar un mismo PMT con diodos LED, dentro del espectro al que es sensible dicho PMT, que se calibrarán en frecuencia mediante un espectrómetro y de igual manera calibraré estos en intensidad mediante un SiPD, usado en fotometría de precisión que es sensible desde el ultravioleta UV , 380 nm, hasta el

⁶ Ver sección 1.3.2. DISEÑO DEL OBSERVATORIO

infrarrojo (IR), 800 nm. Cabe destacar que este SiPD no se puede usar en "*photon counting*".

En resumen: supongo que la discrepancia entre simulación y datos es debida a una EC diferente a la suministrada por el fabricante. En este trabajo se medirá esta EC a 5 frecuencias diferentes.

3. INSTRUMENTACIÓN

Cómo las condiciones del experimento son diferentes al observatorio, se cuentan con algunos materiales diferentes. También para el desarrollo del experimento y la toma de medidas, se utilizaron diferentes equipos, con una breve descripción para el fin con que fueron utilizados. A continuación se enuncian.

3.1. FOTODIODO DE SILICIO SiPD

3.1.1. FOTO-DETECTORES DE ESTADO SÓLIDO

Estos receptores ópticos convierten la luz en carga eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico. Las características de estos receptores ópticos son en general, alta sensibilidad (EC hasta 40%), respuesta rápida, bajos niveles de ruido, bajo costo y una alta confiabilidad (sensibilidad estable).

3.1.2. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y FOTODIODOS

En la Fig. 3.1., se muestra un corte transversal de un fotodiodo. El material de la capa P está en la superficie sensible a la luz y el material N forma el sustrato. La capa P de un fotodiodo de Si (Silicio) se forma difundiendo Boro (B) en un grueso de $1\ \mu\text{m}$ y la región neutra de la unión se conoce como capa de deplexión. Variando el grueso de la capa P y de la capa N así como la concentración de impurezas se controla la respuesta espectral.

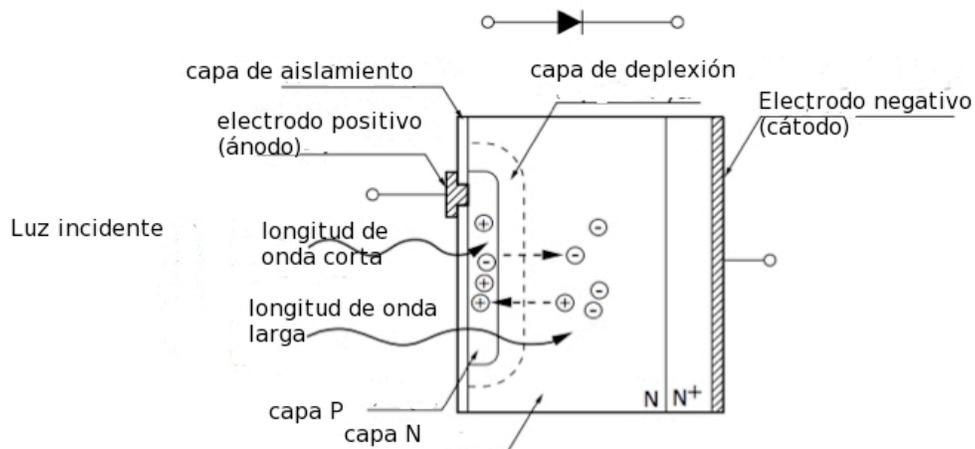


Fig. 3.1. Sección transversal de un fotodiodo de Si. La luz incide desde la izquierda pasando por una capa aislante protectora, una capa P, la capa de deplexión, la capa N y el electrodo de conexión, cátodo.

La Fig. 3.2., muestra la gráfica donde se puede observar el coeficiente de absorción para diferentes longitudes de onda o energías y diferentes materiales.

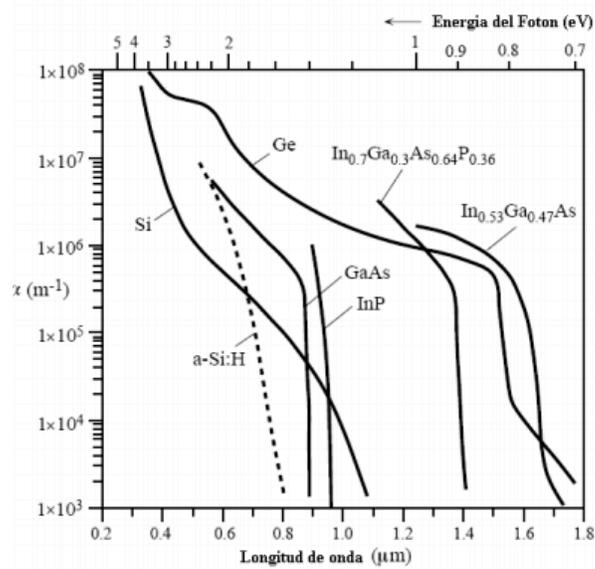


Fig 3.2. Coeficiente de absorción para diferentes longitudes de ondas o energías y diferentes materiales.

3.1.3. FOTODIODO DE SILICIO HAMAMATSU S1227-1010BQ

El Fotodiodo de silicio, usado para calibrar la intensidad de los LED es un SiPD HAMAMATSU S1227-1010BQ (Fig. 3.3) de alta sensibilidad en el ultravioleta con ventana de cuarzo y con sensibilidad hasta el rojo (645-700 nm) y suprimida en el lejano infrarrojo (50-1000 μm). Es fabricado y calibrado para fotometría de precisión a bajos niveles de iluminación. Cuenta con un área sensible de 1 cm² y bajo ruido (corriente oscura= 100 pA). Su respuesta espectral cubre desde el UV hasta el IR, (Fig. 3.4) con una eficiencia cuántica máxima del 35%.

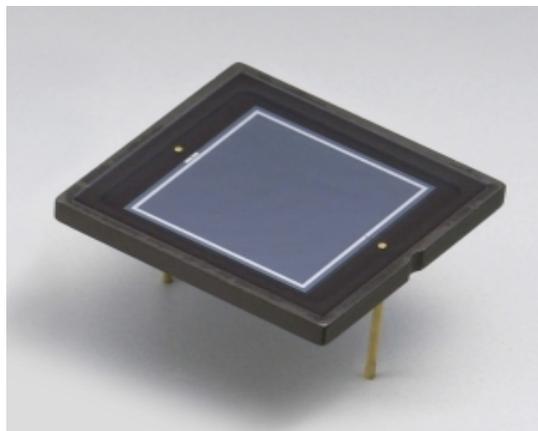
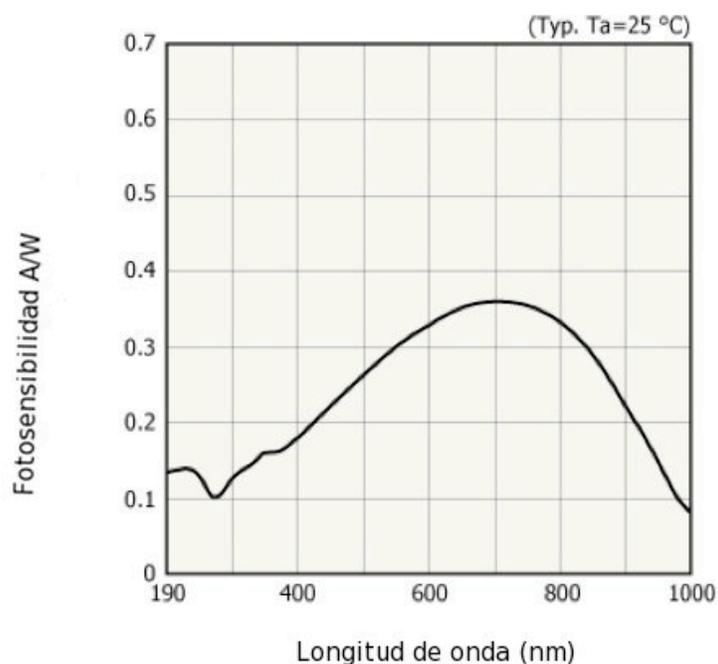


Fig 3.3. Fotodiodo de silicio SiPD HAMAMATSU S1227-1010BQ sensible del UV al Rojo, de 1cm^2 de área sensible con ventana de cuarzo especial para fotometría de precisión.



KSPDB009

Fig 3.4. Respuesta espectral del PD usado, HAMAMATSU S1227-1010BQ, sensible desde el UV hasta el rojo.

Éste dispositivo fue utilizado con el fin de calibrar en intensidad cada uno de los diodos LED. Para lo cual se construyó un dispositivo que se describe en Metodología. En la Fig. 3.4., se muestra la respuesta espectral característica del fotodiodo con ventana de cuarzo usado en las medidas.

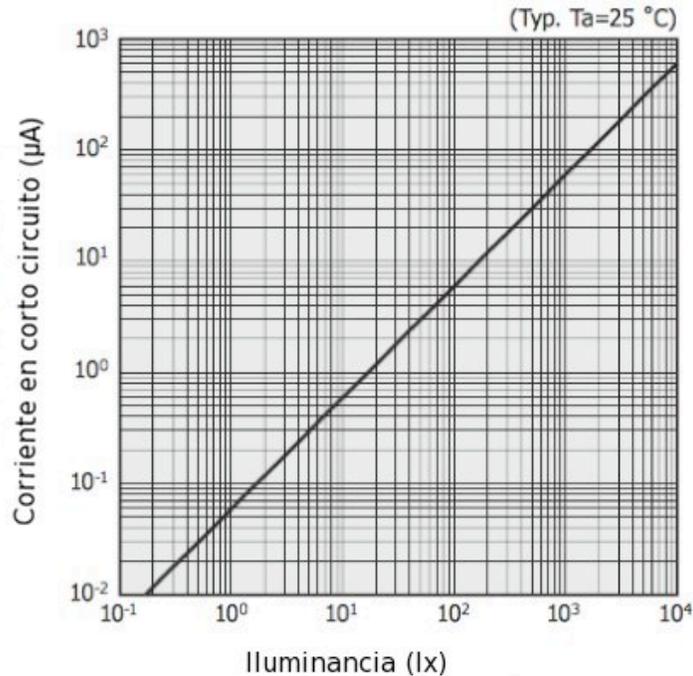


Fig 3.5. Relación de corriente en corto del SiPD I_{sh} y la iluminancia que recibe [lx]. El comportamiento es *extremadamente lineal* en 6 órdenes de magnitud [10]

En la gráfica de la Fig 3.5, se muestra la linealidad que hay entre iluminancia en lux [lx] y la corriente en corto circuito de respuesta I_{sh} . La escala de iluminancia se puede cambiar de lx a fotones a partir de las siguientes definiciones [11][12] [13][14]:

Es importante resaltar que el lux es una medida *fotométrica*, que es dependiente de un espectro, y no *radiométrica*, que es absoluta [15].

- **Lux:** [lx] Unidad *fotométrica* de intensidad de iluminación o luminancia (*illuminance* en inglés) del SI, que equivale a la iluminación de una superficie que recibe normal y uniformemente un flujo luminoso de 1 lumen por metro cuadrado.
- **Lumen:** [lm] Unidad *fotométrica* de flujo luminoso del SI, que equivale al flujo luminoso emitido por una fuente puntual de 1 candela de intensidad en un ángulo sólido de 1 estereorradián.
- **Candela:** [cd] Unidad *fotométrica* de intensidad luminosa del SI, se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz ($\lambda = 555$ nm) y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 watt por estereorradián.

Con las definiciones anteriores se encuentran las siguientes equivalencias, dónde las longitudes de onda de cada LED

$$1 \text{ lx amarillo} = \left| 5.42 \times 10^{15} \frac{\text{fotones}}{\text{m}^2 \text{s}} \right| [589 \text{ nm}]$$

$$1 \text{ lx UV} = \left| 3.50 \times 10^{15} \frac{\text{fotones}}{\text{m}^2 \text{s}} \right| [380 \text{ nm}]$$

$$1 \text{ lx rojo} = \left| 7.17 \times 10^{15} \frac{\text{fotones}}{\text{m}^2 \text{s}} \right| [780 \text{ nm}]$$

Cómo a algunos LED se les cortó el ánodo (pata larga) y cátodo (pata corta), y otros más se quedaron con éstos últimos sin cortar, se les denominó C corto y L largo. También se les denominó opaco o transparente ya que algunos diodos LED por defecto de fábrica tienen la cápsula plástica diferente.

| COLOR LED | ENERGÍA eV | No. De fotones |
|------------------------|------------|------------------------|
| Ultravioleta | 3,130 | $3,66 \times 10^{15}$ |
| Azul | 2,706 | $4,23 \times 10^{15}$ |
| Verde C | 2,217 | $5,17 \times 10^{15}$ |
| Verde opaco L | 2,213 | $5,17 \times 10^{15}$ |
| Verde transparente | 2,186 | $5,24 \times 10^{15}$ |
| Amarillo transparente | 2,115 | $5,42 \times 10^{15}$ |
| Amarillo opaco | 2,112 | $5,427 \times 10^{15}$ |
| Naranja transparente C | 2,056 | $5,57 \times 10^{15}$ |
| Naranja transparente L | 2,049 | $5,59 \times 10^{15}$ |
| Rojo transparente | 1,986 | $5,77 \times 10^{15}$ |
| Rojo opaco L | 1,977 | $5,79 \times 10^{15}$ |
| Rojo opaco C | 1,961 | $5,84 \times 10^{15}$ |

Tabla 3.1. Lista de los colores LED utilizados junto con su energía y número de fotones.

3.2. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE BAJO VOLTAJE KEITHLEY 2280S-603

Es una fuente de poder de 60V@3.2A de alta precisión y alta estabilidad [16]. Cuenta con bajo nivel de ruido, (Fig. 3.6).



Fig 3.6. Fuente de poder de CC Keithley 2280S-60-3. Se puede ajustar el voltaje, la corriente, el intervalo de corriente, el modo de medición, niveles de protección y otras funciones en la pantalla de inicio.

La mediciones de corrientes se hace con una resolución de 6 ½ dígitos. Suministra corrientes de carga desde 100 nA hasta 1A con resolución de 10 nA y resolución en voltaje de 0.1 mV.

Esta fuente de alimentación se utilizó para alimentar la corriente en los diodos LED.

3.3. ESPECTRÓMETRO “OCEAN OPTICS USB40002”

El espectrómetro USB4000 (Fig. 3.8.) se basa en la dispersión de la luz mediante una rejilla de difracción en un diseño conocido como *Czerny -Turnes*. Incluye una rejilla de difracción, un sensor y electrónica de alta velocidad que provee una respuesta espectral y resolución óptica en una sola unidad.



Fig 3.7. Espectrómetro Ocean Optics USB4000

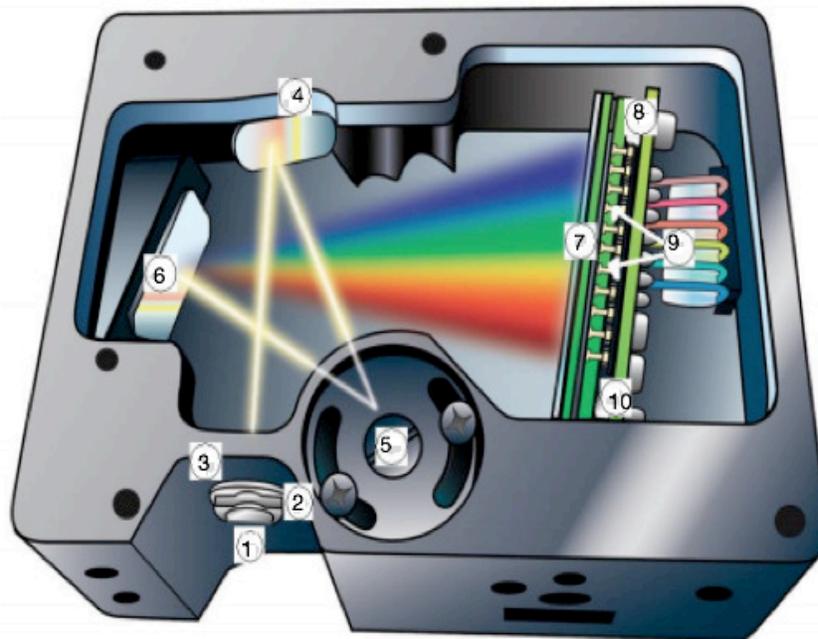


Fig 3.8. Espectrómetro Ocean Optics USB4000 por dentro. 1 Conector, 2 Abertura, 3 filtro, 4 Espejo colimador, 5 rejilla, 6 espejo de enfoque, 7 lente colectora, 8 Detector, 9 Filtro OFLV, 10 Ventana de cuarzo.

Los datos del espectrómetro se programan dentro de un chip de memoria en el espectrómetro, el software de operación de espectroscopia lee estos valores para facilitar la configuración y el intercambio entre computadoras, si se ejecuta en los sistemas operativos: Linux, Mac o Windows. El USB4000 funciona con una alimentación de +5V proporcionada a través del conector USB.

Al ser iluminado el espectrómetro con los LED obtuve los espectros de cada uno y así las longitudes de onda.

3.4. TUBOS FOTOMULTIPLICADORES

3.4.1. BREVE HISTORIA DE LOS FOTOCÁTODOS

Para comenzar a hablar sobre los tubos PMT, es necesario hacer un breve repaso sobre la historia del desarrollo de los fotocátodos [18].

Se atribuye el descubrimiento del Efecto Fotoeléctrico al físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) en el año de 1887. En 1905, el físico alemán Albert Einstein (1879-1955) sacó a la luz el artículo *“Sobre un punto de vista heurístico referente a la emisión y la transformación de la luz”* explicando el efecto fotoeléctrico. En 1913 se desarrolla un tubo fotoeléctrico. En 1929 se desarrolló un fotocátodo compuesto por Ag-O-Cs (Plata-Oxígeno-Cesio) por Koller and Campbell [18]. Al siguiente año, ellos mismos, tuvieron éxito al producir un fototubo usando el fotocátodo anterior al ahora conocido como S-1.

3.4.3. EMISIÓN SECUNDARIA

Se puede provocar la emisión de electrones por los metales por impacto de electrones primarios o de otras partículas, como por ejemplo, iones gaseosos. Los mecanismos físicos precisos por los que se comunica la energía cinética de las partículas incidentes a los electrones metálicos y les permite escapar no están totalmente determinados. Para cuantificar los datos experimentales se utiliza el coeficiente de emisión secundaria que se define como sigue:

$$Y = \frac{\text{número de electrones emitidos}}{\text{número de electrones incidentes}} \quad (3.1)$$

Dónde Y varía en un margen amplio, desde 10^{-2} hasta 10^2 .

La emisión secundaria se utiliza en los multiplicadores electrónicos, dispositivos diseñados especialmente para producir una copiosa emisión de electrones secundarios.

3.5. ESTRUCTURA DE LOS PMT

3.5.1. ¿QUÉ ES UN PMT?

Un PMT es un tubo de vidrio sellado al vacío que consiste en una ventana de entrada, un fotocátodo, un electrodo de enfoque, dinodos multiplicadores de electrones y un ánodo como se muestra en la Fig 3.10.

En resumen, detecta luz que entra en el PMT y produce una carga a la salida a través de los procesos que se describen a continuación:

- a) La luz pasa a través de la ventana de entrada
- b) La luz excita los electrones en el fotocátodo de modo que los fotoelectrones son emitidos al vacío (efecto fotoeléctrico externo).
- c) Los fotoelectrones son acelerados y enfocados por el electrodo de enfoque en los primeros dinodos, donde son multiplicados por medio de la emisión secundaria de electrones. Esta emisión secundaria se repite en cada uno de los siguientes dinodos.
- d) Los electrones secundarios multiplicados emitidos desde el último dinodo son finalmente recogidos en el ánodo.

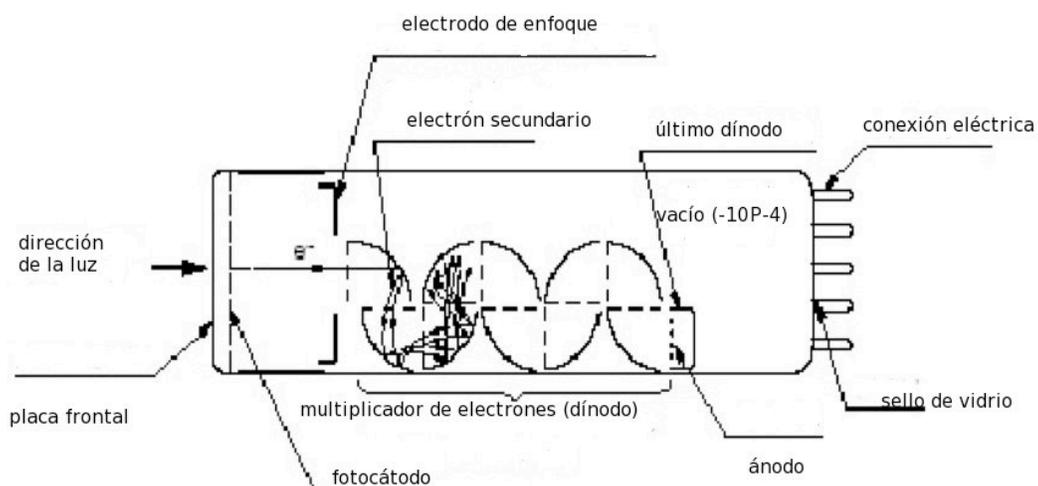


Fig 3.9. Estructura de un Tubo Fotomultiplicador PMT

3.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA FÍSICA DE UN PMT: EMISIÓN DE FOTOELECTRONES

La conversión fotoeléctrica tiene la siguiente clasificación: Efecto Fotoeléctrico externo, el cual emite fotoelectrones al vacío, y Efecto Fotoeléctrico interno, el cual los fotoelectrones son excitados a una banda de conducción del material.

Cómo un fotocátodo es un semiconductor, se puede describir usando modelos de banda: fotocátodo alcalino (Fig. 3.11) y fotocátodo semiconductor compuesto (Fig. 3.12). $h\nu \psi$

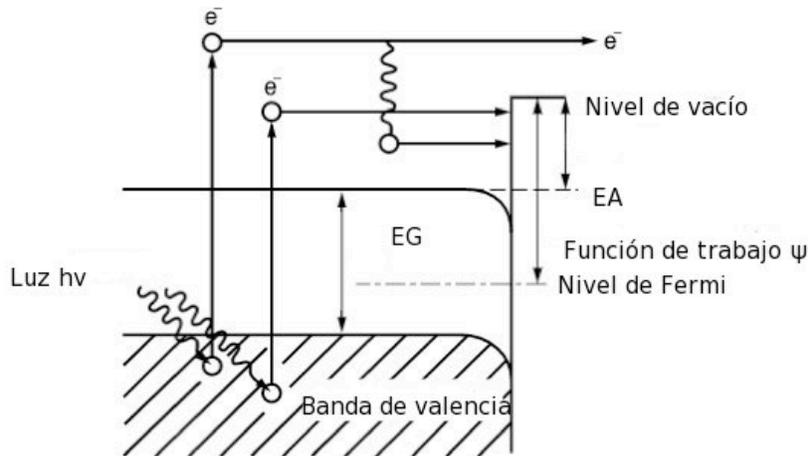


Fig 3.10. Modelo de bandas: fotocátodo alcalino, EG=brecha energética, EA= afinidad electrónica

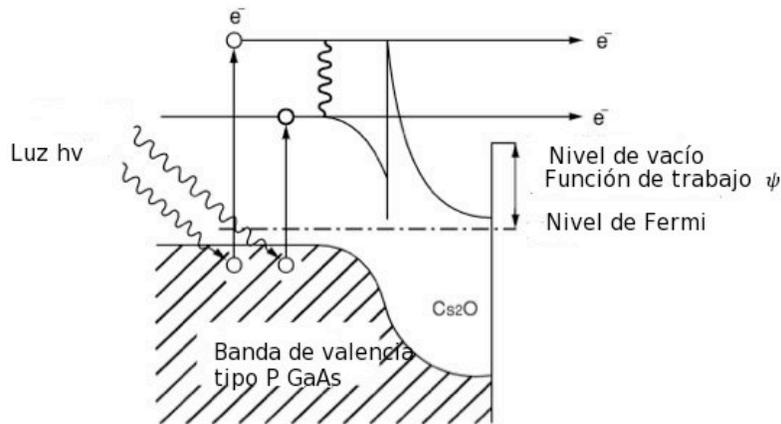


Fig 3.11. Modelo de bandas: fotocátodo semiconductor compuesto

En un modelo de bandas de semiconductores, existe un intervalo de banda prohibida o brecha energética (Energy Gap, EG) la cual no puede ser ocupada por electrones; la afinidad electrónica (Electron Affinity, EA) es un intervalo entre la banda de conducción y la barrera de nivel de vacío (nivel de vacío), y la función de trabajo (ψ) que es una diferencia de energía entre el nivel de Fermi y el nivel de vacío.

Cuando un fotón choca con un fotocátodo, los fotones de la banda de valencia absorben la energía de los fotones ($h\nu$) y se excitan, difundiéndose hacia la superficie del fotocátodo. Si los electrones difundidos tienen suficiente energía para alcanzar la barrera del nivel del vacío, se emiten en el vacío como fotoelectrones. Lo anterior se puede expresar en un proceso de probabilidad y eficiencia cuántica $\eta(\nu)$. La relación de electrones de salida a fotones incidentes está dada por la siguiente relación:

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P\nu}{K} + \left(\frac{1}{1 + 1/KL} \right) * P_s \quad (3.2)$$

Donde:

ν : Frecuencia de la luz

R : coeficiente de reflexión

$P\nu$: Probabilidad de que la absorción de luz pueda excitar electrones a un nivel mayor que el nivel de vacío.

K : coeficiente de absorción total de fotones

L : longitud media de escape de electrones excitados

P_s : probabilidad de que los electrones que alcanzan la superficie del fotocátodo pueden ser liberados en el vacío

De la ecuación (3.3), si elegimos un material apropiado que fija los parámetros R , k y $P\nu$, los factores que dominan la eficiencia cuántica serán L (longitud media de escape de electrones excitados) y P_s (probabilidad de que los electrones que alcanzan la superficie del fotocátodo pueden ser liberados en el vacío).

Los fotocátodos se pueden clasificar por los procesos de emisión de un fotoelectrón en *modo de reflexión* y *modo de transmisión*. Sólo explicaré el segundo método ya que fue el que se ocupé en el experimento. El fotocátodo de modo de transmisión, como el que trabajamos, es usualmente depositado como una delgada película sobre una placa de vidrio la cual es ópticamente transparente. En este proceso los fotoelectrones son emitidos en la misma dirección de la luz incidente. El fotocátodo de modo de transmisión se utiliza para los PMT frontales que detectan la luz de entrada a través del extremo de una capsula cilíndrica.

3.5.3. TRAYECTORIA ELECTRÓNICA

Con el fin de recoger fotoelectrones y electrones secundarios de manera eficiente y también minimizar el tránsito de estos electrones dentro del PMT, el diseño de los electrodos debe ser optimizado a través del análisis de la trayectoria del electrón.

La eficacia de la colección del primer dinodo es la relación entre el número de electrones que aterrizan en el área efectiva del primer dinodo al número de fotoelectrones emitidos.

La sección de dinodos está constituida por hasta diez etapas de electrodos de emisión secundaria que tienen una superficie curva. El arreglo de los dinodos debe estar diseñado para evitar iones y reacción a la luz en las últimas etapas.

La Fig 3.13, muestra la sección transversal de un tubo fotomultiplicador parecido al que se usó en este trabajo, el cual muestra la estructura de dinodos centrados linealmente, mostrando las trayectorias típicas del electrón.

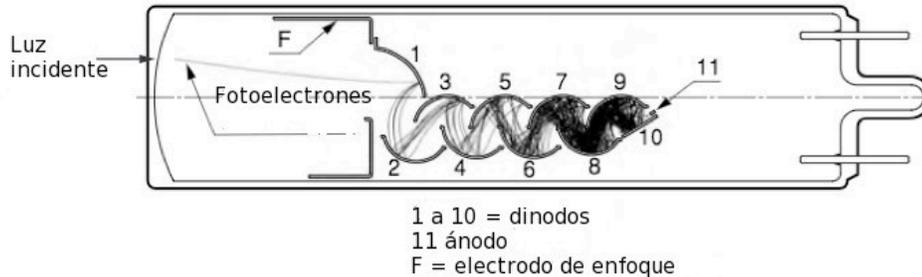


Fig 3.12. Sección transversal de un tubo fotomultiplicador, tipo dinodo centrado linealmente, 1 a 10 = dinodos, 11 = ánodo y F = electrodo de enfoque.

3.5.4. MULTIPLICADOR DE ELECTRONES (SECCIÓN DEL DINODO)

Los fotoelectrones emitidos desde el fotocátodo son multiplicados por el primer dinodo a través del último dinodo (hasta 19 dinodos), con una amplificación de corriente que oscila entre 10 y 100 veces cada etapa, y finalmente son enviados al ánodo.

Los principales materiales emisivos secundarios utilizados para los dinodos son antimoniuro alcalino SnK o SnA, óxido de berilio (BeO), fosfuro de galio (GaP) y fosfuro de galio y arsénico (GaAsP). Estos materiales están cubriendo el sustrato del electrodo hecho de níquel, acero inoxidable o una aleación de cobre y berilio. En la Fig. 3.14 se muestra un modelo de multiplicación de emisiones secundarias de un dinodo.

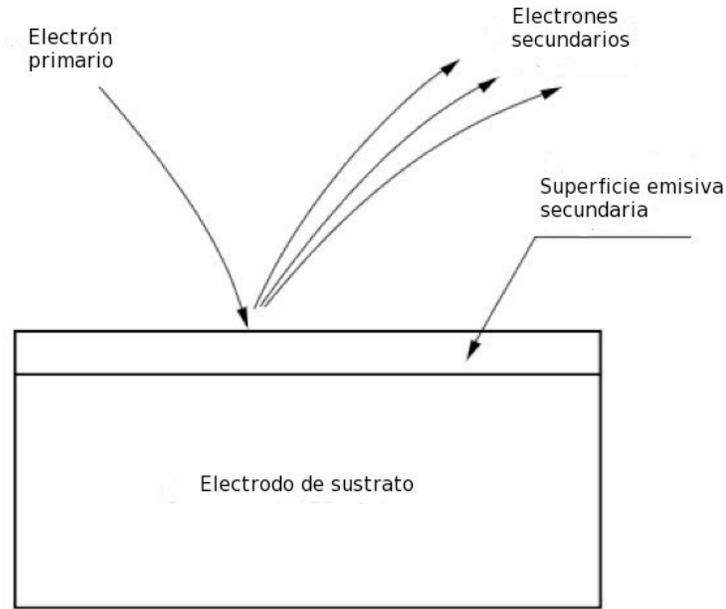


Fig 3.13. Dinodo de emisión secundaria

Cuando un electrón primario con una energía inicial E_p choca contra la superficie de un dinodo, δ electrones secundarios son emitidos. Estos δ , son el número de electrones secundarios por cada electrón primario, y es llamado "relación de emisión secundaria".

3.5.5. OPERACIÓN DE UN TUBO FOTOMULTIPLICADOR

i.- DISPOSITIVOS PERIFÉRICOS

La operación de un tubo fotomultiplicador requiere una fuente estable de alto voltaje (regularmente oscila entre 1 a 2 kV), un circuito divisor de voltaje que distribuye el voltaje de manera óptima por cada dinodo, debe contar con una carcasa para blindar de la luz externa, y algunas veces cuenta con una protección para el tubo fotomultiplicador que lo protege de campos magnéticos (Fig. 3.15).

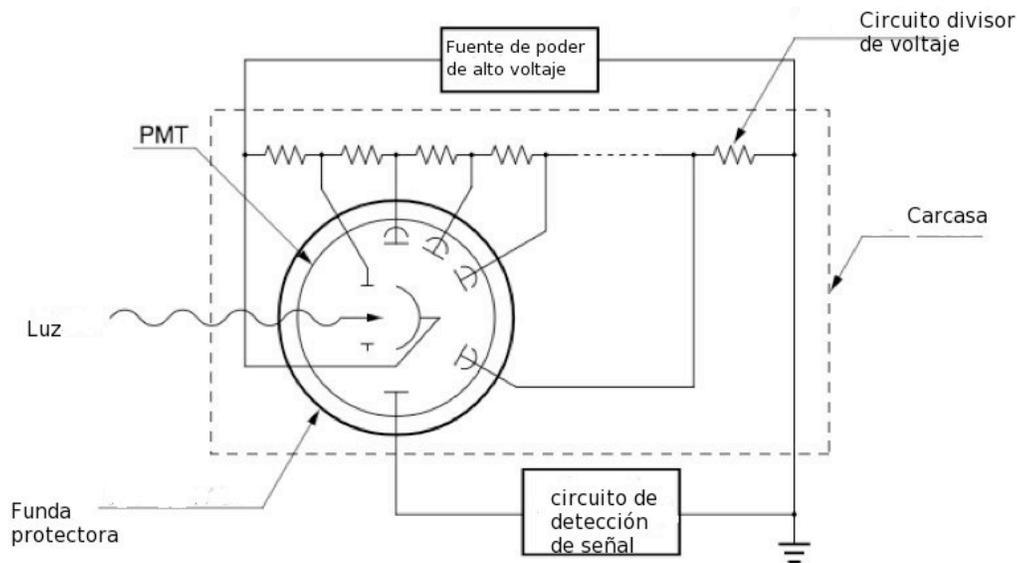


Fig 3.14. Método operativo básico en un PMT.

ii.- FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE ALTO VOLTAJE

Como la ganancia de un tubo fotomultiplicador es alta del orden 10^6 , son muy susceptibles a variaciones en la fuente de alimentación de alto voltaje. Si la estabilidad de salida de un PMT se mantiene en 1%, entonces la estabilidad de la fuente de alimentación se debe mantener dentro del rango de 0.1%.

iii.- CARCASA (PROTECTOR)

Cómo se sabe un PMT cuenta con una alta sensibilidad (puede llegar a detectar un solo fotón), por lo que puede medir luz extraña diferente a la que va a ser medida. Esto ocasiona la disminución de señal-ruído, por lo que es necesario una carcasa ópticamente sellada que proteja de la luz externa.

3.5.6. MÉTODO DE OPERACIÓN (CIRCUITOS DE CONEXIÓN)

Yo usé el método de conteo de fotones, mido la luz contando los fotones individuales que son la unidad más pequeña de la luz (Fig. 3.17). Los pulsos de salida del PMT se amplifican y sólo los pulsos con una amplitud mayor que la altura de pulso de discriminación pre-establecida se cuentan como señales de fotones.

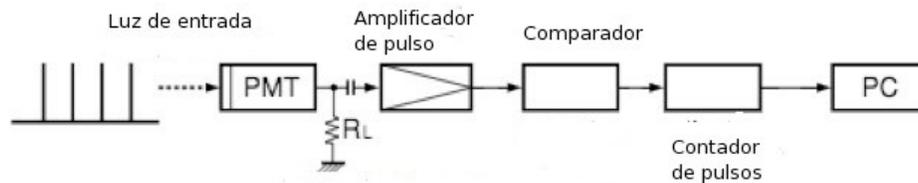


Fig 3.15. Contador de fotones.

3.5.7. CARACTERÍSTICAS DE UN TUBO FOTOMULTIPLICADOR

A continuación se describen las diferentes características de un tubo fotomultiplicador. El intervalo espectral de un PMT en la longitud de onda larga (IR) está determinado por el fotocátodo y el límite inferior de longitud de onda corta (UV) está determinado por el material de la ventana.

3.5.8. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS FOTOCÁTODOS

La mayoría de los fotocátodos están hechos de semiconductores compuestos que consisten en metales alcalinos con una función de trabajo bajo. Abajo se enlistan las características del fotocátodo que usé:

- a) *Bi-alkalino (Sb-Rb Antimonio-Rubidio-Cesio, Sb-K-Cs Antimonio-Potasio-Cesio)*: Éste fotocátodo que es el usado en nuestro caso recibe el nombre de "Bi-alkalino" dado que emplean dos tipos de materiales alcalinos. Los fotocátodos tienen un rango de respuesta espectral del ultravioleta al visible, tienen una gran sensibilidad y una corriente oscura muy baja. También proporciona una sensibilidad en el azul que coincide con la emisión de un escintilador o de emisión cherenkov.

Las Figuras 3.18 se muestran las características típicas de respuesta espectral de los fotocátodos más usados.

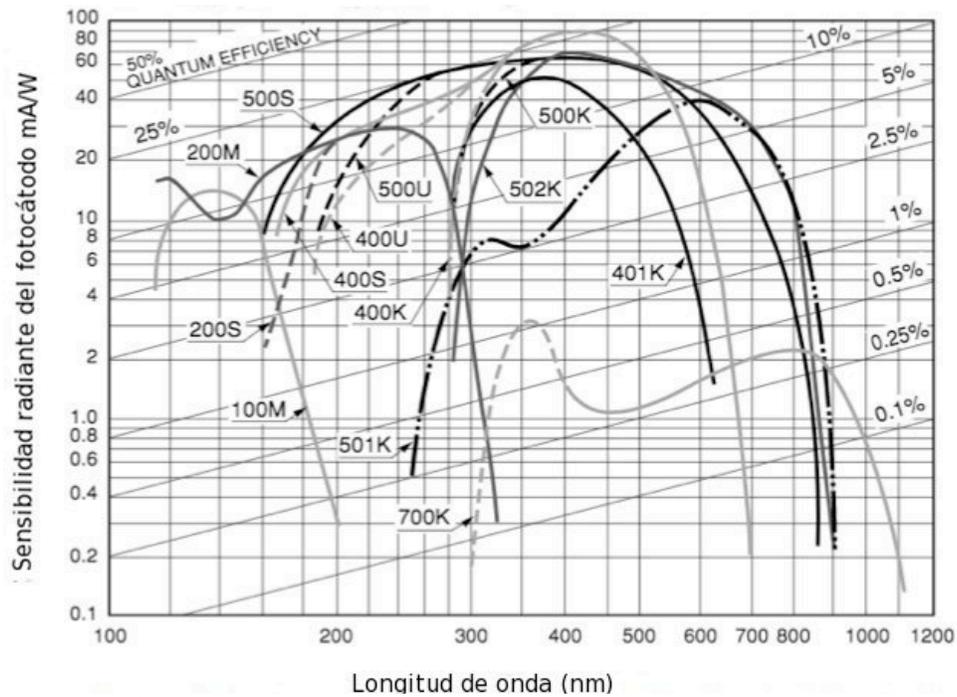


Fig 3.16. Características típicas de respuesta espectral de los fotocátodos del modo de transmisión.

| Código de la curva (número S) | Material del fotocátodo | Material de la ventana | Sensibilidad Luminosa (tipo) ($\mu A/lux$) | Respuesta Espectral | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--|----------------------|-----------------------|------|---------------------|------|
| | | | | Rango espectral (nm) | Longitud de onda | | | |
| | | | | | Sensibilidad radiante | | Eficiencia Cuántica | |
| | | | | | (mA/W) | (nm) | (%) | (nm) |
| 350K (S-4) | Sb-Cs | Borosilicato | 40 | 300 a 650 | 48 | 400 | 15 | 350 |

Tabla 3.2. Referencia rápida de las características de respuesta espectral.

| Código de la curva (número S) | Material del fotocátodo | Material de la ventana | Sensibilidad Luminosa (tipo) ($\mu A; nm$) | Respuesta Espectral | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--|----------------------|-----------------------|------|---------------------|------|
| | | | | Rango espectral (nm) | Longitud de onda | | | |
| | | | | | Sensibilidad radiante | | Eficiencia Cuántica | |
| | | | | | (mA/W) | (nm) | (%) | (nm) |
| 400K | Bi-Alcalino | Borosilicato | 95 | 300 a 650 | 88 | 420 | 27 | 390 |

Tabla 3.3. Referencia rápida para características típicas de respuesta espectral.

3.5.8. MATERIAL DE LA VENTANA

En los fotocátodos la radiación UV tiende a ser absorbida por el material de ventana por lo que el límite inferior de longitud de onda corta se determina por la transmitancia del material de la ventana. Se enlistan algunos de los materiales de ventana usados comúnmente:

- Cristal de Borosilicato*: Este es el material de ventana más común y el usado en el PMT de este trabajo. Debido a que el cristal de borosilicato tiene un coeficiente de expansión térmica muy cercano al de la aleación de Kovar que utiliza para las conexiones eléctricas de los tubos fotomultiplicadores, a menudo se denomina “vidrio de Kovar”. El vidrio de borosilicato no transmite radiación ultravioleta de menos de 300 nm. Además, algunos tipos de fotomultiplicadores frontales que usan un fotocátodo bi-alcalino emplean un cristal de borosilicato especial (llamado “vidrio libre de K”) conteniendo una mínima cantidad de potasio (K^{40}) pues este puede causar conteo de fondo no deseado.
- Cristal de MgF_2 (Fluoruro de Magnesio)*: Los cristales de haluro alcalino son superiores en la transmisión de la radiación ultravioleta, pero tienen la desventaja de la delicuescencia⁷.
- Zafiro*: Al_2O_3 muestra una transmitancia intermedia entre el vidrio transmisor de UV y la sílice sintética en la región ultravioleta. El cristal de zafiro tiene un corte de longitud de onda corta en la vecindad de 150 nanómetros, que es ligeramente más corto que el de sílice sintética.

La Fig. 3.20 ejemplifica las características de transmitancia espectral de diferentes materiales de ventana.

⁷ Propiedad que presentan algunas sales y óxidos, principalmente de absorber moléculas de vapor de agua del aire húmedo de forma de hidratos. Este fenómeno ocurre si la presión parcial de vapor de agua en el aire es mayor a la presión del vapor del sistema de hidrato a la temperatura dada.

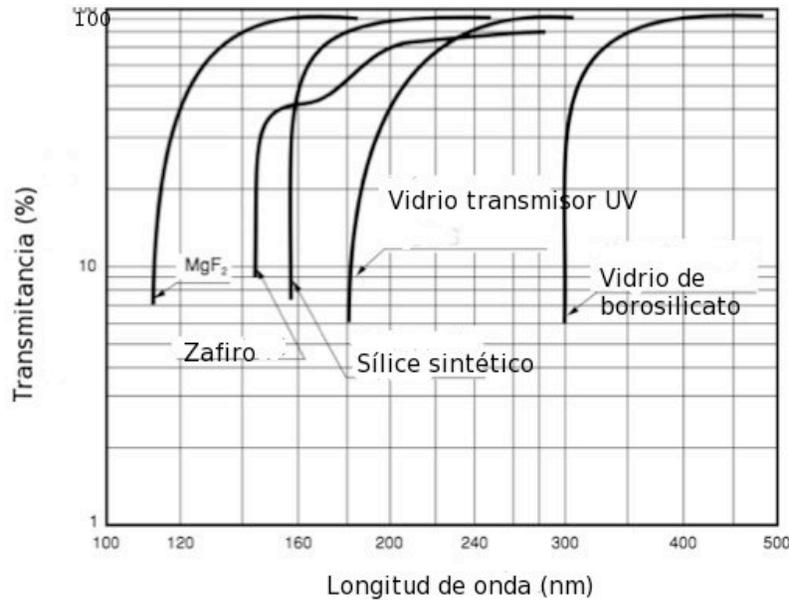


Fig 3.17. Transmisión espectral en diferentes tipos de materiales de ventana.

3.5.9. RESPUESTA ESPECTRAL CARACTERÍSTICA (SENSIBILIDAD RADIANTE Y EFICIENCIA CUÁNTICA)

La fotocorriente producida por un nivel dado de luz incidente cambia con la longitud de onda. Esta relación longitud de onda/respuesta es conocida como *respuesta espectral característica* y se expresa numéricamente en términos de la *sensibilidad radiante* o de la *eficiencia cuántica*.

- Sensibilidad radiante:** La sensibilidad radiante está definida como la corriente fotoeléctrica generada por el fotocátodo dividido por el flujo radiante incidente a una longitud de onda dada, se expresa en unidades de A por W (A/W). Además se usa también la *respuesta característica espectral relativa* en las que la sensibilidad radiante máxima se normaliza al 100%.
- Eficiencia cuántica:** La eficiencia cuántica es la relación entre los fotones incidentes y los fotoelectrones resultantes en la corriente de salida, sin considerar los niveles de energía individuales del fotón dado, teniendo como resultado una curva característica de respuesta espectral ligeramente diferente a la de sensibilidad radiante. La eficiencia cuántica está simbolizada por η y generalmente se expresa como un porcentaje. En el presente trabajo la llamaremos EC_{PMT} (o EC_{PD}). Los fotones incidentes transfieren energía a los electrones en la banda de valencia de un fotocátodo, sin embargo no todos estos electrones se emiten como fotoelectrones. Esta fotoemisión tiene lugar de acuerdo con un cierto proceso probabilístico. Los fotones a longitudes de onda más cortas llevan una energía más alta en comparación con aquellos a longitudes de onda más largas y contribuyen a un aumento en la probabilidad de fotoemisión. Como resultado, la eficiencia

cuántica máxima se produce a una longitud de onda ligeramente más corta que la longitud de onda de la sensibilidad radiante máxima.

- c) **Medida y cálculo de las características de la respuesta espectral:** Para medir la *sensibilidad radiante* y la *eficiencia cuántica*, se utiliza como estándar secundario un detector de *fototubo o semiconductor estándar calibrado con precisión*. En primer lugar, el flujo radiante incidente L_p en la longitud de onda de interés es medida con el fototubo estándar o con el detector de semiconductores. Enseguida, se ajusta el tubo fotomultiplicador a medir y se mide la fotocorriente I_k . Por lo que la sensibilidad radiante S_k (A/W) del tubo fotomultiplicador puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$S_k = \frac{I_k}{L_p} \left(\frac{A}{W} \right) \quad (3.4)$$

La eficiencia cuántica EC se puede obtener de S_k usando la siguiente ecuación:

$$EC(\%) = \left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \right) (S_k) = \left(\frac{1240}{\lambda} \right) (S_k) (100\%) \quad (3.3)$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Donde h es la constante de Planck, λ es la longitud de onda de la luz incidente (nm), c es la velocidad de la luz en el vacío y e es la carga del electrón. La eficiencia cuántica EC se expresada en porcentaje.

- d) **Rango de respuesta espectral (Límites de longitudes de onda cortas y largas):** La longitud de onda a la que la respuesta espectral cae en el lado de longitud de onda corta se denomina límite de longitud de onda corta o corte, mientras que la longitud de onda a la que la respuesta espectral cae en el lado de longitud de onda larga se denomina límite de longitud de onda larga o corte. El rango entre el límite de longitud de onda corta y el límite de longitud de onda larga se llama *rango de respuesta espectral*.

3.5.10. UNIFORMIDAD DE SENSIBILIDAD

La uniformidad sensitiva de un fotocátodo (sensibilidad) es el área expresada por este valor, el cual es muy pequeño en comparación con los fotodiodos, usualmente menor a 1%. La medida es llevada hacia abajo usando decenas de μm de luz condensada (655 nm LED, etc.). Además, después de usar un amplificador interno con una avalancha de fotodiodos, el valor de la uniformidad se compara con el de un fotodiodo con pérdida de un dígito aproximadamente.

3.5.11. SENSIBILIDAD LUMINOSA

La medición de la respuesta espectral de un PMT requiere un costoso sistema sofisticado y toma mucho tiempo. Por lo tanto, es más práctico evaluar la sensibilidad de los PMT comunes en términos de sensibilidad luminosa. La iluminancia en una superficie a un metro de distancia de una fuente de luz puntual de una candela (cd) es de un 1 lux. Un lumen es igual al flujo luminoso de un lux pasando un área de un metro cuadrado. La sensibilidad luminosa es la corriente de salida obtenida del cátodo o ánodo dividido por el flujo luminoso incidente (lumen) de una lámpara de tungsteno a una temperatura de distribución de 2856 K. La Fig. 3.21 muestra la sensibilidad visual y la distribución espectral relativa de una lámpara de tungsteno 2856 K.

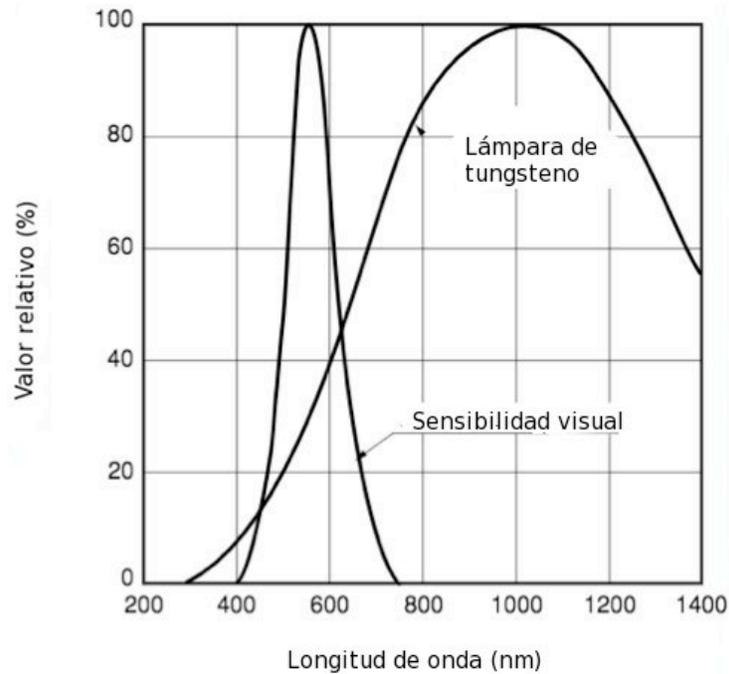


Fig 3.18. Respuesta del ojo y distribución espectral de la lámpara de tungsteno 2856 K.

La *sensibilidad luminosa* es un parámetro conveniente cuando se compara la sensibilidad de los PMT del mismo tipo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el “lumen” es la unidad de flujo luminoso con respecto a la sensibilidad visual estándar y no hay significado físico para los PMT que tienen un intervalo de respuesta espectral más allá de la región visible (350 a 750 nm). La *Sensibilidad luminosa* se divide en tres parámetros:

- a. **Sensibilidad luminosa del cátodo:** La sensibilidad luminosa del cátodo se define como la corriente fotoeléctrica generada por el fotocátodo (corriente catódica) por el flujo luminoso de una lámpara de tungsteno operada a una temperatura de distribución de 2856 K. (Fig. 3.22)

- b. **Sensibilidad luminosa del ánodo:** La sensibilidad luminosa del ánodo se define cómo la corriente de salida del ánodo por flujo luminoso incidente en el fotocátodo. En esta medición, se da una distribución de voltaje apropiada a cada electrodo como se muestra en la Fig 3.23.
- c. **Índice de sensibilidad azul y relación de rojo a blanco:** El índice de sensibilidad azul y relación de rojo a blanco a menudo se utiliza para la comparación simple de la respuesta espectral de tubos PMT. La sensibilidad azul es la corriente catódica obtenida cuando se coloca un filtro azul delante del PMT en las mismas condiciones para la medición de la sensibilidad luminosa. Dado que el flujo de luz que entra en el PMT ha sido transmitido una vez por el filtro azul, no puede ser representado directamente en lúmenes.

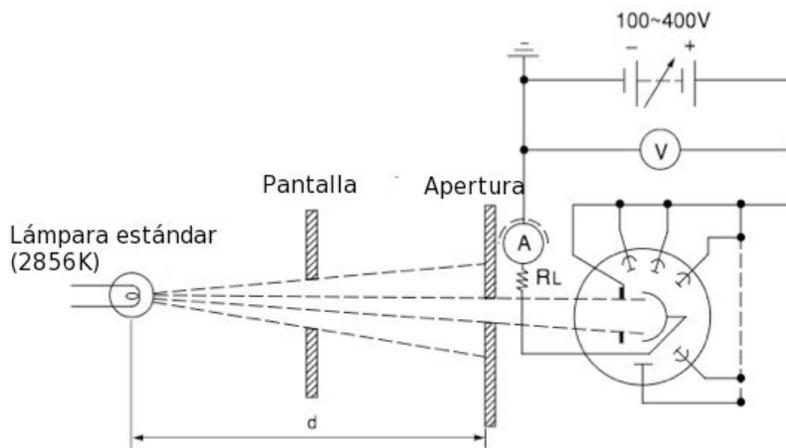


Fig 3.19. Diagrama de medición de la sensibilidad luminosa del cátodo.

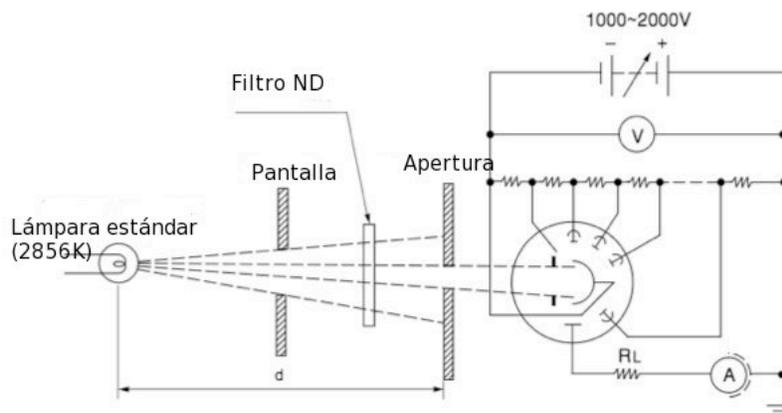


Fig 3.20. Diagrama de medición de la sensibilidad luminosa del ánodo.

AFTERPULSE

Este fenómeno se presenta como un pulso en la salida de los PMT siempre asociado a un pulso de señal real con un retraso en tiempo de uno cuantos microsegundos, en estos PMT es alrededor de 6 μ s. Un PMT puede tener o no *afterpulse* y en un tiempo y de tamaño diferente. La explicación más aceptada es que se trata de iones de gas residual dentro del tubo al vacío que son ionizados por los electrones y que también se aceleran y alcanzan al ánodo. Por su mayor masa su velocidad es más baja y llegan tiempo después. En mis mediadas debido a que tengo una ventana de tiempo sincronizada y corta estos pulsos quedaban fuera en tiempo y no se ven si existieran.

Pseudopulso: no existe.

3.6. FUENTE DE PODER DE ALTO VOLTAJE C.A.E.N. MODELO N471

El modelo N471 C.A.E.N. (Fig. 3.23) [19] es una fuente de poder de alto voltaje (Módulo de Instrumentación Nuclear NIM, por sus siglas en inglés)⁸ de dos canales, que se aloja en un módulo NIM de una sola unidad de ancho, cada canal puede llegar hasta a 8 kV. Tiene un amplio rango de corriente y voltaje, con capacidad ideal para alimentar un detector, como lo son los PMT. Todos los componentes de alto voltaje están encapsulados en caucho de silicona. El panel frontal se muestra en la Figura 3.24.

El conector de salida de alto voltaje, que se encuentra en el panel posterior, son conectores hembra (SHV Safe High Voltage) para cables tipo coaxial. Todos los conectores de control son tipo LEMO⁹.

⁸ <http://www.caen.it/csite/Product.jsp?Type=Product&parent=21>

⁹ <https://www.lemo.com/es/miniatura/conector-00>



Fig 3.21. Fuente de poder doble de alto voltaje C.A.E.N. Modelo N471.

Esta fuente de poder se usó para alimentar el voltaje de operación del PMT que debe ser alto voltaje ($\sim 2\text{kV}$) baja corriente (μA) de alta estabilidad.

3.7. MODULO DIGITALIZADOR CAEN N6742

El módulo convertidor analógico digital rápido, *fast ADC* (FADC) por sus siglas en inglés, es un digitalizador de 16 canales [20] basado en la técnica de “switched capacitor” que digitaliza pulsos analógicos de 0-1 V a un valor de 12 bits a una frecuencia de muestreo de 5 Giga Hertz a partir de una señal de inicio y por un espacio de 200ns. Tiene la capacidad de comunicarse con una computadora vía fibra óptica (Fig. 3.25).



Fig 3.22. FAST ADC CAEN Modulo Digitalizador CAEN N6742.

El fin con el que se usó el FAST ADC fue para digitalizar los pulsos provenientes del PMT. Este convertidor se pasa de la señal analógica del PMT a señal digital que podía ser guardada en la computadora.

3.8. GENERADOR DE ONDAS “TEKTRONIX AFG3102”

Es un generador con circuitos de estado sólido [21] (Fig. 3.26). Se puede elegir entre 12 formas de onda estándar distintas. En el caso de generación de pulsos, el tiempo de transición de los flancos de subida y bajada se pueden ajustar de manera independiente. Este instrumento dispone de una base de tiempo altamente estable con una deriva de tan sólo ± 1 ppm al año. Con este generador se alimentan los Leds para que emitan pulsos de luz del orden de ns.

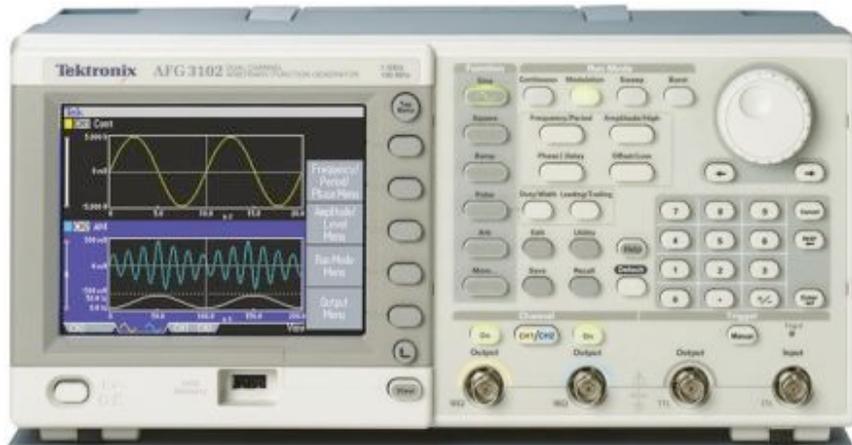


Fig 3.23. Generador de funciones AFG3102, marca TEKTRONIX, de formas de ondas arbitrarias y de pulsos de la serie AFG3000.

| Características | |
|---------------------------------|---|
| Canales | 2 |
| Forma de ondas | Seno, cuadrado, pulso, triangular, $\sin(x)/x$, aumento exponencial y decaimiento, Gaussiana, Lorentz, |
| Frecuencia senoidal | 1 mHz a 100 MHz |
| Frecuencia de pulso | 1 mHz a 50MHz |
| Ancho de onda | 8 nano-segundos a 999 segundos |
| Tiempo de subida o bajada | 5 nano-segundos a 625 segundos |
| Ancho de banda de ruido (-3 dB) | 100 MHz |
| Exactitud | $\pm(1\% + 1mV)$ |

Tabla 3.5. Características generales del Generador de Funciones AFG3102.

3.9. OSCILOSCOPIO DE ALMACENAMIENTO DIGITAL

Osciloscopio digital para laboratorio [22] de alto rendimiento (Fig. 3.27). Algunas especificaciones son las siguientes:

- Anchos de banda de 200 MHz
- 4 canales completamente aislados y flotantes, más impedancia aislada entrada de disparo externo
- Tasas de muestreo de hasta 2 GS/s en tiempo real en todos los canales
- Longitud de registro de 2.5 k puntos en todos los canales.

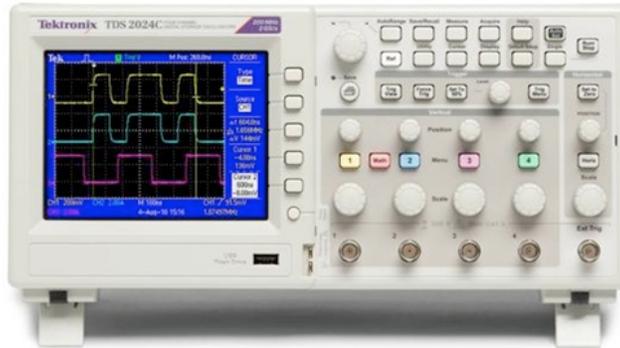


Fig 3.24. Osciloscopio Tektronix TSD2024C.

La función principal para lo cual se utilizó el osciloscopio fue para ver la forma y los tiempos de señal con lo que alimentaba los LED y la sincronía de disparo.

3.10. PROGRAMA ROOT (DATA ANALYSIS FRAMEWORK)

Para el análisis de los espectros capturados por el PMT se utilizó el paquete ROOT [23]. Esencialmente se convirtió de eventos a espectro, se ajustó una gaussiana para extraer su pico máximo y semi-anchura. El sistema ROOT es un marco para el procesamiento de datos el cual fue desarrollado en el CERN. Este sistema se maneja en lenguaje C++. El sistema esta originalmente dirigido al análisis de datos en la física de partículas.

Este programa se utilizó para poder ver los espectros de los fotoelectrones que llegaban al PMT, y así analizarlos.

3.11. MULTÍMETRO KLEIN TOOLS MM1000

Multímetro digital [24] usado en la escala de 0-400 μA resolución: 0.1 μA , precisión 1% + 5 cifras. Se hicieron mediciones y se encontró una caída de voltaje de máximo 5 mV indicando un "burden voltage"¹⁰ de 100 mV/mA el cual es típico de estos multímetros en esta escala de μA (Fig. 3.28).

¹⁰ Caída de voltaje en la resistencia interna de un medidor de corriente.

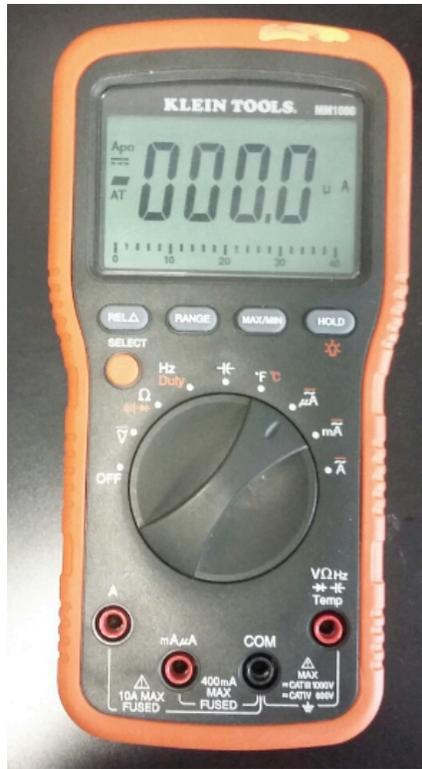


Fig 3.25. Multímetro Klein Tools MM1000.

Se utilizó el multímetro para encontrar el voltaje en los diodos LED cuando se calibraron en intensidad y para medir la corriente en corto I_{sh} .

3.12. TUBO FOTOMULTIPLICADOR HAMAMATSU R5912

En el observatorio HAWC se usan dos tipos de tubos PMT, similares pero diferenciados primariamente por el diámetro del fotocátodo y su sensibilidad. El modelo más grande de 10 pulg, R7081-100, se compró con mayor eficiencia cuántica (40%) y se utiliza como PMT central. Los laterales, R5912 de 8 pulg (ver Fig 3.29) utilizados en MILAGRO, se utilizaron como PMT laterales. En ambos casos se trata de PMT's marca HAMAMATSU [25] y con fotocátodo semiesférico de gran área (ver Tabla 3.6 y 3.7). También entre sus características sobresalientes están su gran estabilidad y baja corriente oscura (ver Tabla 3.8).

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE EL PMT DE 8" (ver Fig. 3.29)

| Característica | Descripción |
|----------------------------------|---------------------|
| Diámetro del área efectiva | 202 mm |
| Superficie típica del fotocátodo | 380 cm ² |
| Número de etapas | 10 |
| Tipo de estructura | "Box & line" |
| Peso | 1.1 kg |

Tabla 3.6. Características mecánicas en el PMT de 8".

CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS

| Característica | Descripción |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material de la ventana y del cuerpo | Vidrio de borosilicato |
| Material del fotocátodo | Bialkali |
| Respuesta espectral (Fig. 3.29) | 300 nm a 650 nm |
| Frecuencia de máxima sensibilidad | 420 nm |

Tabla 3.7. Características ópticas en el PMT de 8".

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS-ELECTRÓNICAS TÍPICAS

| Característica | Descripción |
|-----------------------------------|--------------------|
| Voltaje de operación | 1500-2000 V |
| Ganancia | 1.0×10^7 |
| Eficiencia Cuántica Máxima | 25% (Fig.3.30) |
| Tiempo de tránsito de un electrón | 55 ns |
| Tiempo de subida de señal | 3.8 ns |
| Corriente oscura | 50 nA |

Tabla 3.8. Características eléctricas-electrónicas en el PMT de 8".

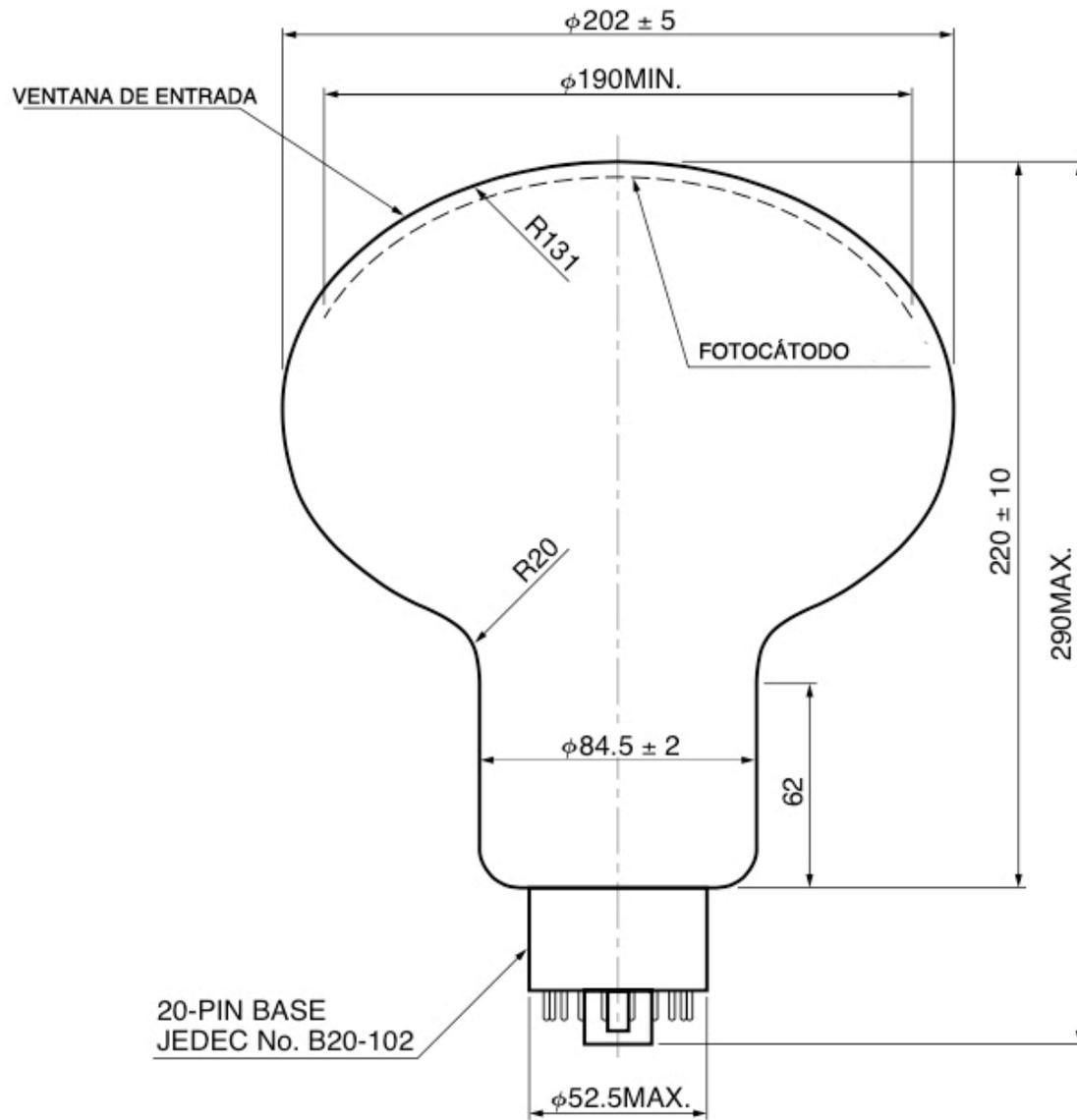


Fig. 3.26. Características mecánicas del PMT HAMAMATSU R5912 según fabricante [25]

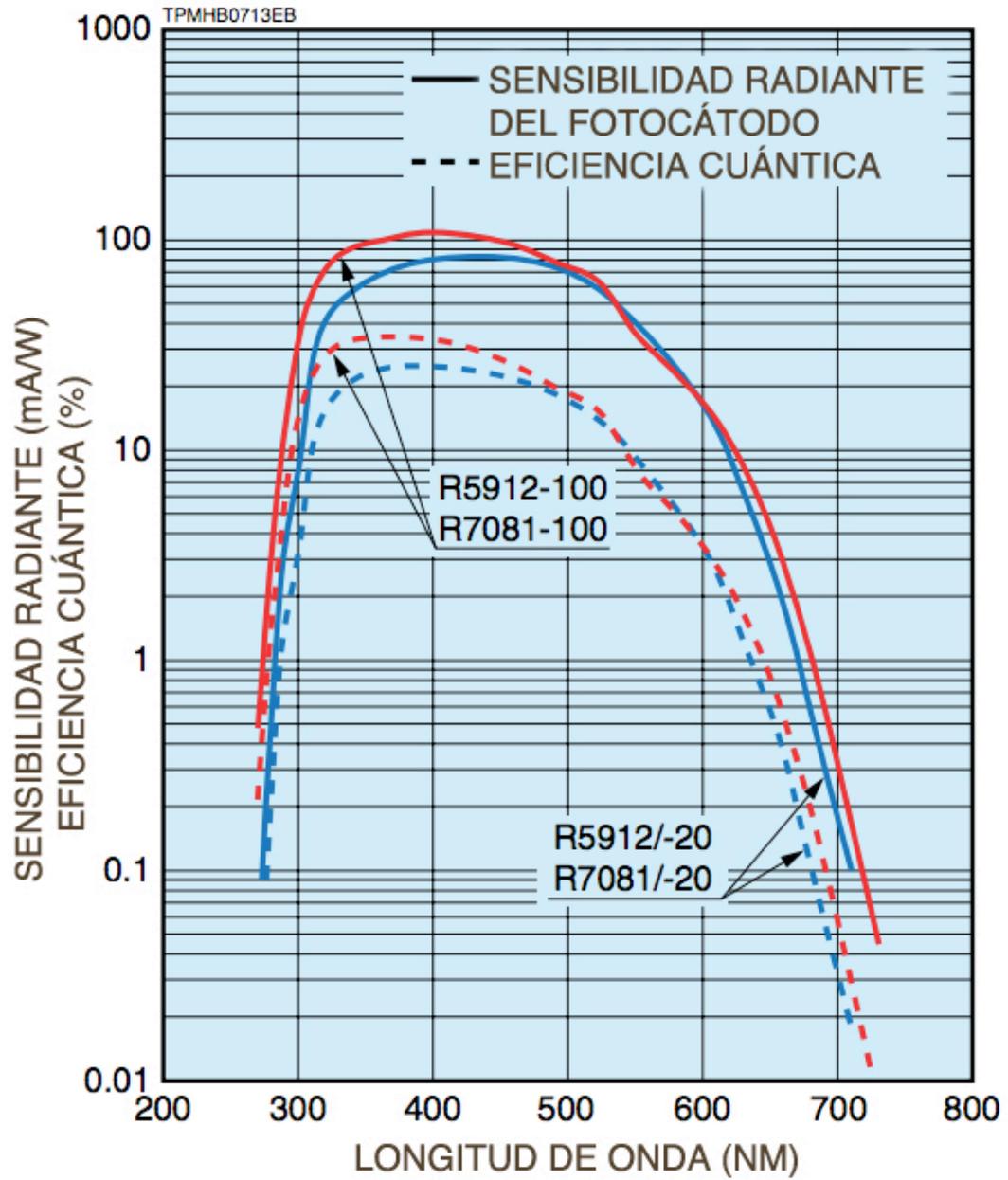


Fig. 3.27. Curvas de Sensibilidad y eficiencia cuántica del R5912-20 usado en el observatorio HAWC según fabricante [25].

3.13. DIODOS LED

El LED, pertenece a la familia de diodos hechos a base de semiconductores (Fig. 3.31) [26 -29]. Los colores de luz emitidos por un LED dependen del tipo del material del semiconductor utilizado.

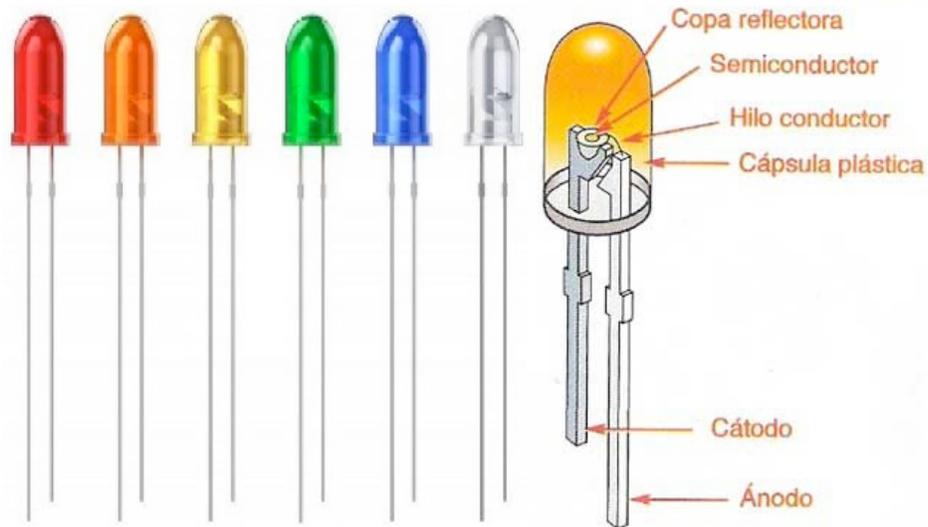


Fig 3.28. Diodos emisores de luz, comúnmente llamados LED por su nombre en inglés. A la izquierda su encapsulado común y a la derecha su construcción interna.

Un LED tiene la forma de una pequeña lámpara incandescente. En contraste con una lámpara incandescente, el diodo LED, no requiere un filamento por lo que no usa calor para producir luz. El funcionamiento y funciones de un diodo LED en un circuito electrónico son similares a un diodo. Los LED emitirán luz cuando este se energiza con voltaje de conducción (Fig. 3.32).

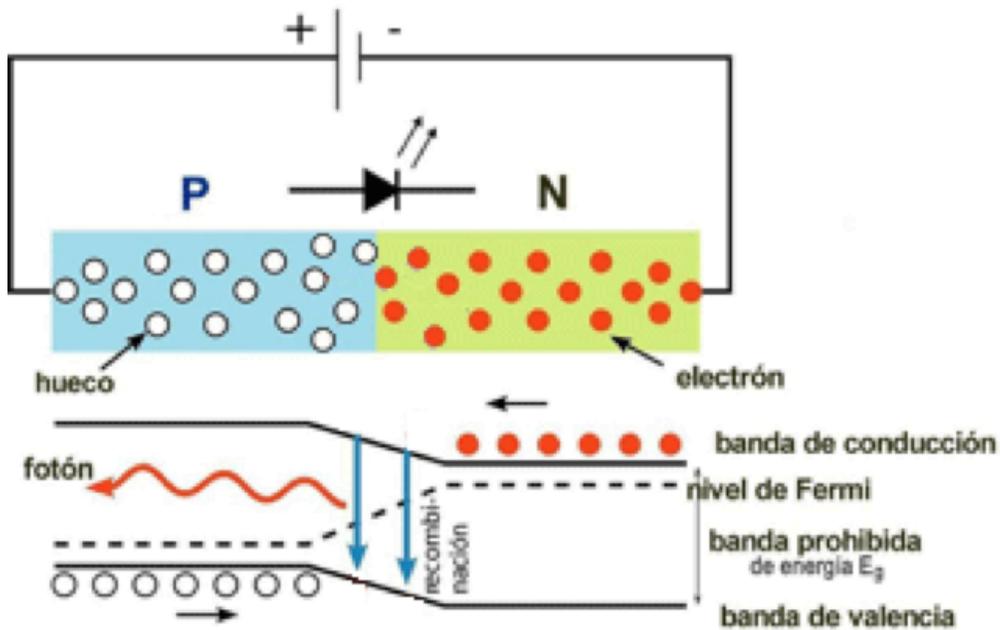


Fig 3.29. Polarización directa de la unión P-N en un diodo LED. Producción de fotones como consecuencia de la recombinación entre electrones y huecos (parte superior). El fenómeno de la recombinación observado en un diagrama de bandas de energía (parte inferior) [29].

El diodo LED consiste en un chip semiconductor con impurezas creando así una unión entre materiales P y N. Cuando el diodo LED es alimentado en forma de conducción, el exceso de electrones de material N se moverán a áreas cercanas el área de agujeros en exceso (material tipo P). Cuando los electrones se reúnen con el agujero se recombinarán y emitirán luz monocromática (luz de un solo color).

4. METODOLOGÍA

4.1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de esta tesis es medir la EC en forma relativa, (relativa entre las diferentes longitudes de onda) del fotocátodo de un PMT usado en el observatorio HAWC. Para lo cual se procederá a iluminar un PMT con fotones de diferentes longitudes de onda, de fuentes previamente calibradas en intensidad en forma relativa entre sí. Se usará la técnica del fotón único dado que ésta nos permite contar con cierta precisión el número de fotones que arriban al PMT. Se usarán diodos LED como fuentes monocromáticas que se calibrarán en frecuencia mediante un espectroscopio y en intensidad mediante un PD. La calibración en intensidad será relativa entre los diferentes LED pues no se cuenta con instrumental ni fuentes calibradas para tan baja intensidad como la que un PMT puede detectar. Se usará un PD que se utiliza para fotometría de precisión.

4.2. PROCEDIMIENTO

Construí una “caja oscura” para poder colocar los LED’s y de esta manera poder calibrarlos en intensidad. Utilicé como base una caja de NYLON¹¹ negro y la forré con una capa de lámina de aluminio para formar la caja y garantizar la oscuridad y bajo ruido electrónico (Fig. 4.1). Dentro de la caja coloqué uno frente a otro, por un lado, el LED como fuente de luz a calibrar y enfrente el PD de fotometría (Fig. 4.2). Las medidas de la caja quedaron: 5.3 ± 0.1 cm de ancho por 9.5 ± 0.1 cm de largo por 4.8 ± 0.1 cm de alto. Una vez terminada la caja instalé en ambos extremos unos conectores BNC (Bayonet Neill-Concelman) por facilidad ya que este es el conector que mejor se le ajustó a la caja. Usé cable coaxial por un lado para conectar el voltaje del LED y en el otro extremo otro BNC para conectarse a un micro amperímetro digital.

Conecté al LED la fuente de poder “Keithley 2280S-60-3” (Figura 3.5); la cual indicaba el voltaje e intensidad de corriente con la que se alimentaba a los LED’s con alta precisión. Conecté a la salida del PD un micro-amperímetro digital "KLEIN TOOLS MM1000" Fig. 3.31.

¹¹ Un **polímero de tipo sintético**, el cual se encuentra dentro del grupo de las **poliamidas** (PA). El nylon es una **fibra** que se encuentra elaborada mediante la policondensación de una diamina en conjunto con un diácido y el **número** de moléculas de carbono que se encuentra integrando las cadenas entre el ácido y la amina se va a señalar luego de las iniciales de la poliamida un ejemplo de ello es el denominado nylon 6.6, por tal **razón** se puede decir que dicho compuesto es el resultado de la **unión** entre la hexametilendiamina y el ácido hexanodioico.

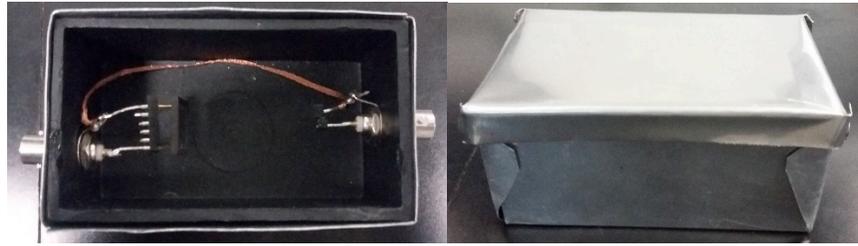


Fig. 4.1. Fotos ilustrativas de la “caja oscura” que se elaboró en el laboratorio. De lado izquierdo se aprecia el PD y frente de este un diodo LED. De lado derecho se aprecia la caja cerrada.

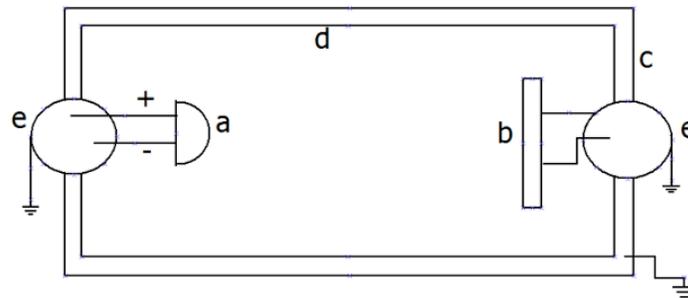


Fig. 4.2. Esquema de la caja oscura para la calibración del LED en intensidad. a) LED, b) PD de fotometría, c) caja de aluminio, d) caja de NYLON negro, e) conectores BNC.

Montada la “caja oscura” con todos los aditamentos antes mencionados, procedí a medir el voltaje mínimo y máximo de cada LED, el voltaje mínimo detectado por el PD y el voltaje máximo con el cual se puede alimentar cada diodo, el fabricante indica que la corriente máxima a la que se pueden alimentar los diodos es de 20 mA. Todo lo anterior con la finalidad de encontrar el espectro de cada diodo posteriormente. En total se trabajó con 8 distintos colores de LED’s: blanco, morado, UV, azul, verde, amarillo, rojo y naranja.

Una vez obtenido lo anterior, encontré la longitud de onda λ para cada LED, para ello añadí al sistema montado el espectrómetro “Ocean Optics, USB4000”; que se conecta a una computadora en la cual se le coloca el software propio del espectrómetro. Para evitar que el espectrómetro midiera luz “ruido”, elaboré una pequeña cápsula de poli cloruro de vinilo (PVC) y que pinté de color negro, dentro de éste coloqué cada LED para por último colocarlo en la entrada del detector del espectrómetro (Fig. 4.3).

Cabe mencionar, que para cada LED a excepción del UV, tomé dos tipos de mediciones, ya que por defecto de fábrica cuentan con diferente cápsula contenedora. Por ellos se les nombra “transparente” y “opaco”. De igual manera a algunos LED’s procedí a cortar el ánodo para reducir el tamaño, se les nombra “C” de corto y “L” de largo.

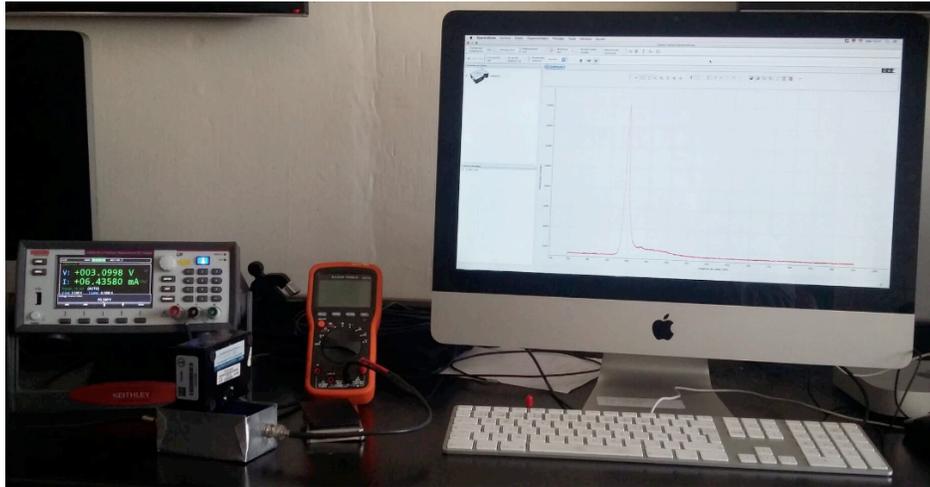


Fig. 4.3. De izquierda a derecha: Fuente de alimentación Keithley 2280S-60-3, Espectrómetro Ocean Optics USB4000, Multímetro digital Klein Tools MM1000, PC con el software del espectrómetro.

A cada LED le tomé el espectro de emisión, variando el voltaje según el color que se iba utilizando. A cada pico de los espectros le ajusté una gaussiana usando el paquete GNUPLOT¹², el cual nos da también la semi-anchura a la mitad del máximo, FWHM (Full Width Half Maximum) por sus siglas en inglés de la cuál se obtuvo la σ utilizada para el cálculo de la incertidumbre. Esto lo hice para todos los colores de LED. El único color de LED que no se esperaba ningún resultado fue del LED blanco, ya que es una mezcla de frecuencias (ver Fig. 4.5).

¹² Gnuplot es un programa flexible para generar gráficas de funciones y datos. Es compatible con los sistemas operativos más populares (Linux, UNIX, Windows, Mac OS X...). El código fuente tiene copyright pero se distribuye libremente (es decir, no tiene que pagarlo). Fue creado originalmente para permitir a los científicos y estudiantes visualizar las funciones matemáticas y los datos de forma interactiva, pero ha crecido para admitir muchos usos no interactivos, como los scripts web. También se utiliza como un motor de trazado por aplicaciones de terceros como Octave. Gnuplot ha sido apoyado y en desarrollo activo desde 1986.

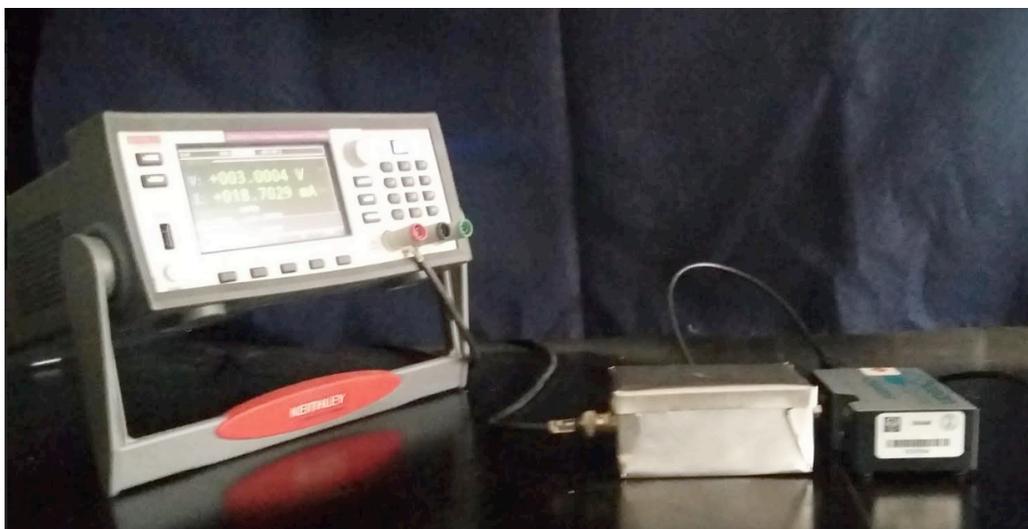


Fig. 4.4. De izquierda a derecha: Fuente de alto voltaje Keithley 2280S-60-3, caja oscura y espectrómetro Ocean Optics USB4000.

Tomé 10 espectros a cada color de LED medido, a continuación se muestran un espectro por cada color. La captura elegida se basó en la calidad de la imagen. (Figuras 4.5-4.13).

A partir de aquí, los LED's blanco y morado los descarté para iluminar el PMT, ya que presentan dos picos debido a una mezcla de frecuencias.

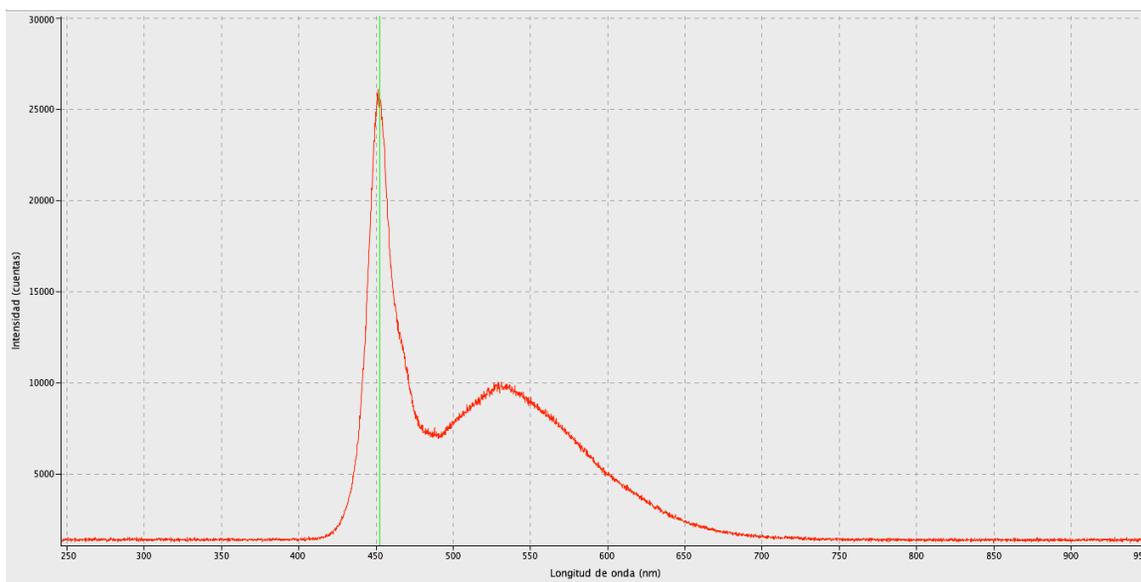


Fig. 4.5. Espectro del LED blanco con un máximo en 452 nm con otro máximo en 532 nm.

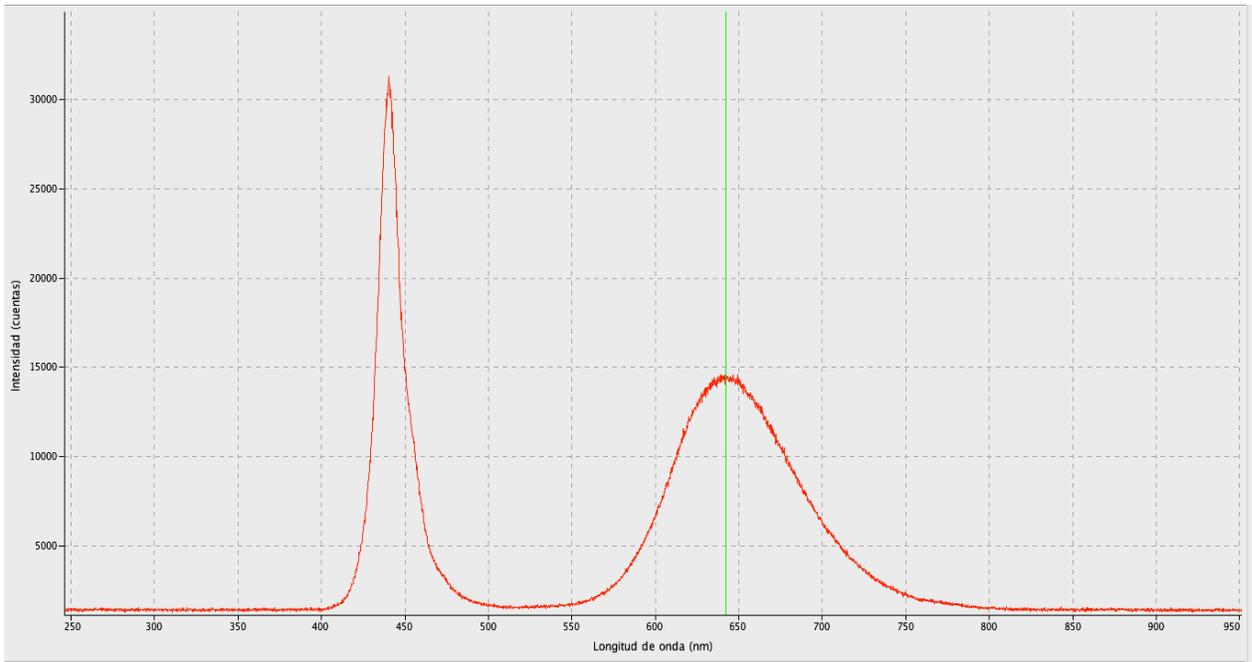


Fig. 4.6. Espectro del LED morado pero que en realidad consta de dos picos uno en 440 nm y otro en 642 nm.

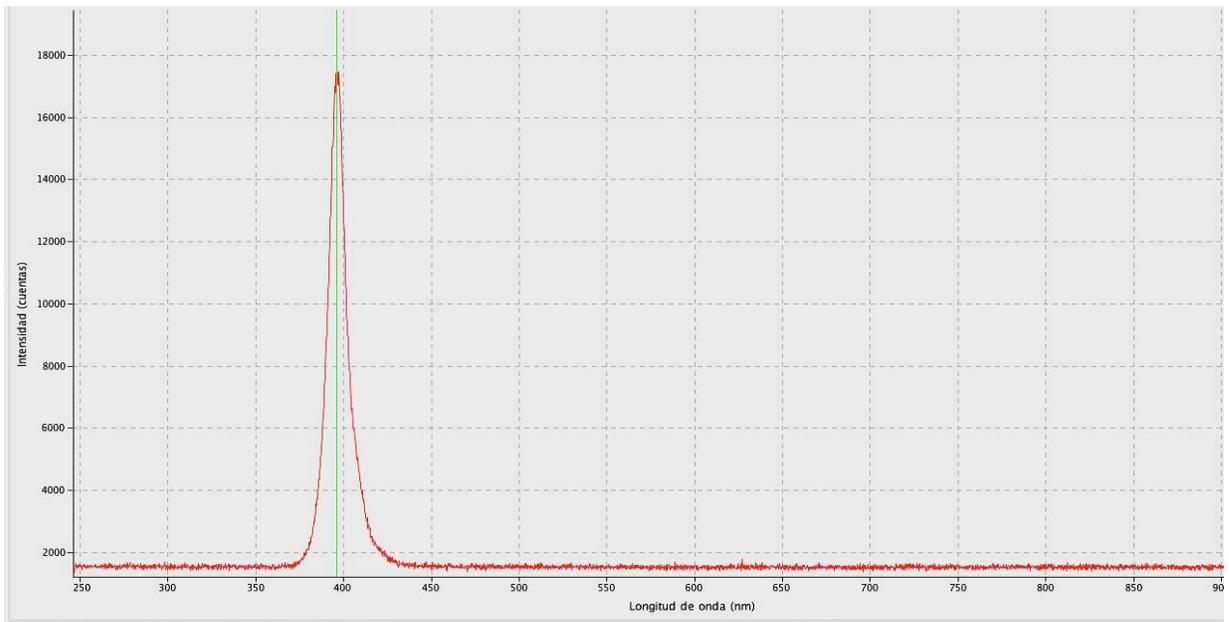


Fig. 4.7. Espectro del LED UV, su longitud de onda es de 396 nm con una semianchura FWHM de 14 nm, $\sigma=6$.

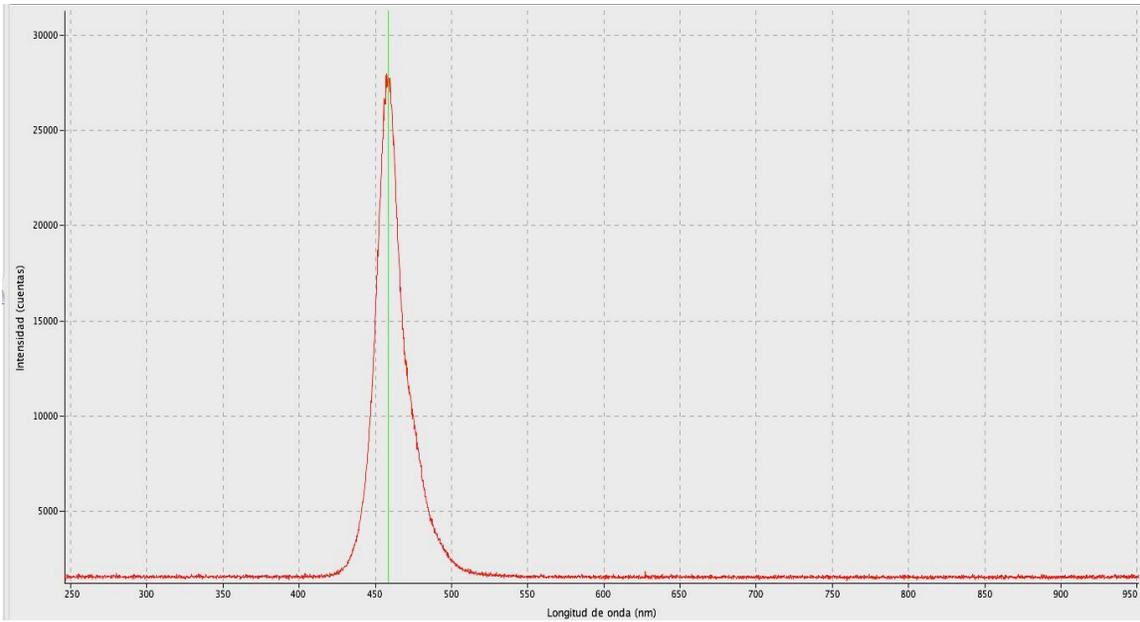


Fig. 4.8. Espectro del LED Azul con un máximo en 458 nm y una semianchura FWHM de 19 nm, $\sigma=8$. En este espectro no se aprecia un segundo pico, como en el caso del LED morado y blanco.

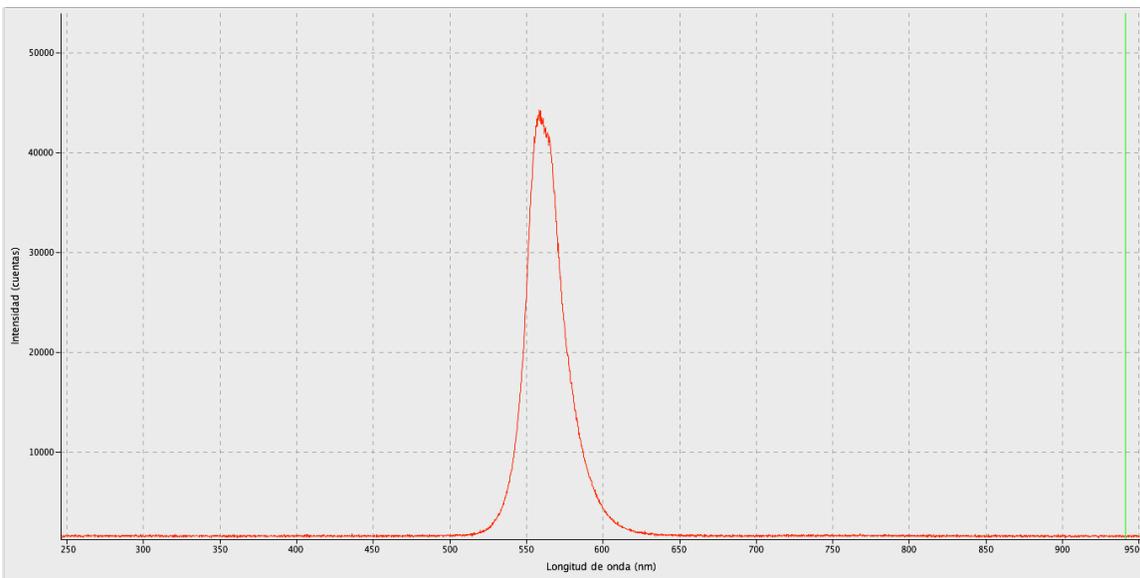


Fig. 4.9. Espectro del LED verde opaco con un máximo en 560 nm y una semianchura FWHM de 25 nm, $\sigma=11$. En este espectro no se aprecia un segundo pico, como en el caso del LED morado y blanco aunque ciertamente el máximo no es muy simétrico.

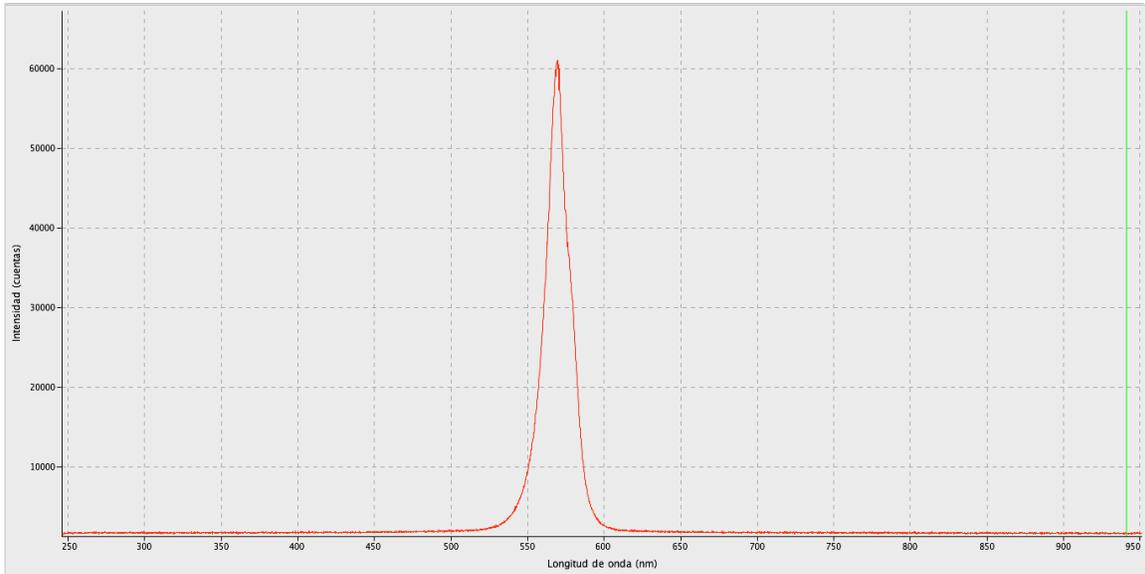


Fig. 4.10. Espectro del LED verde con capsula contenedora transparente con un máximo en 567 nm y una semianchura FWHM de 18 nm, $\sigma=8$. El pico del máximo es simétrico.

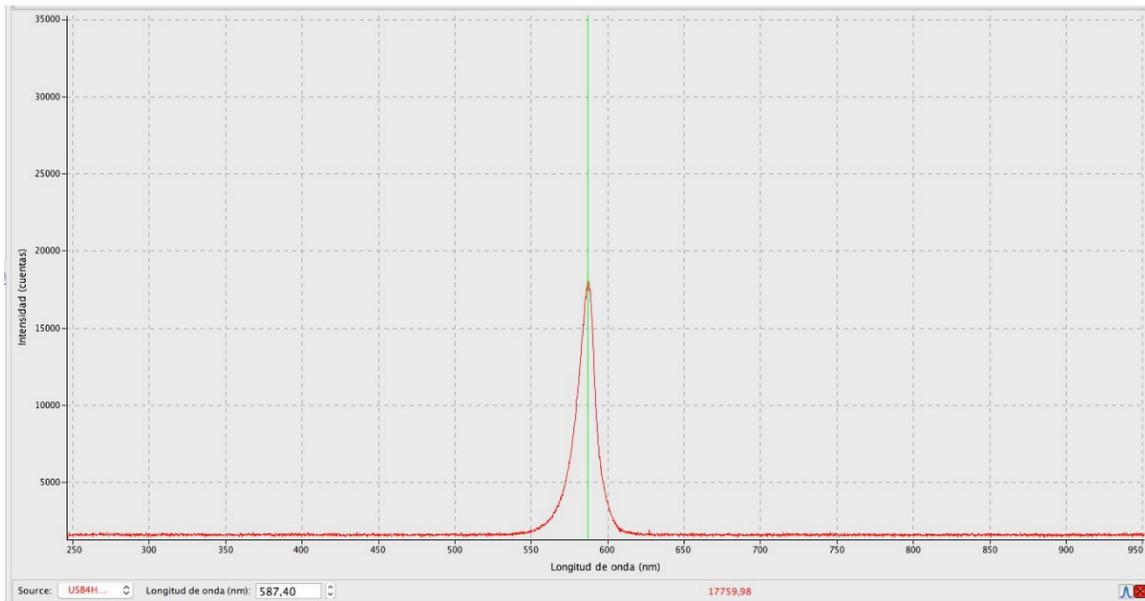


Fig. 4.11. Espectro del LED amarillo opaco con un máximo en 587 nm y una semianchura FWHM de 14 nm, $\sigma=6$.

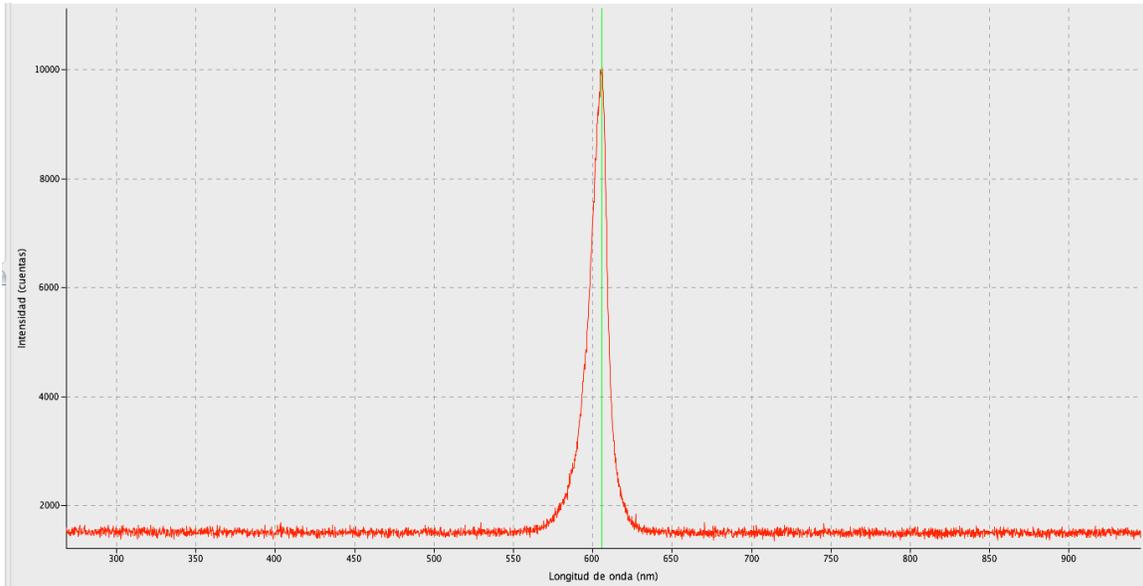


Fig. 4.12. Espectro del LED naranja con un máximo en 607 nm y una semianchura FWHM de 13 nm, $\sigma=5$.

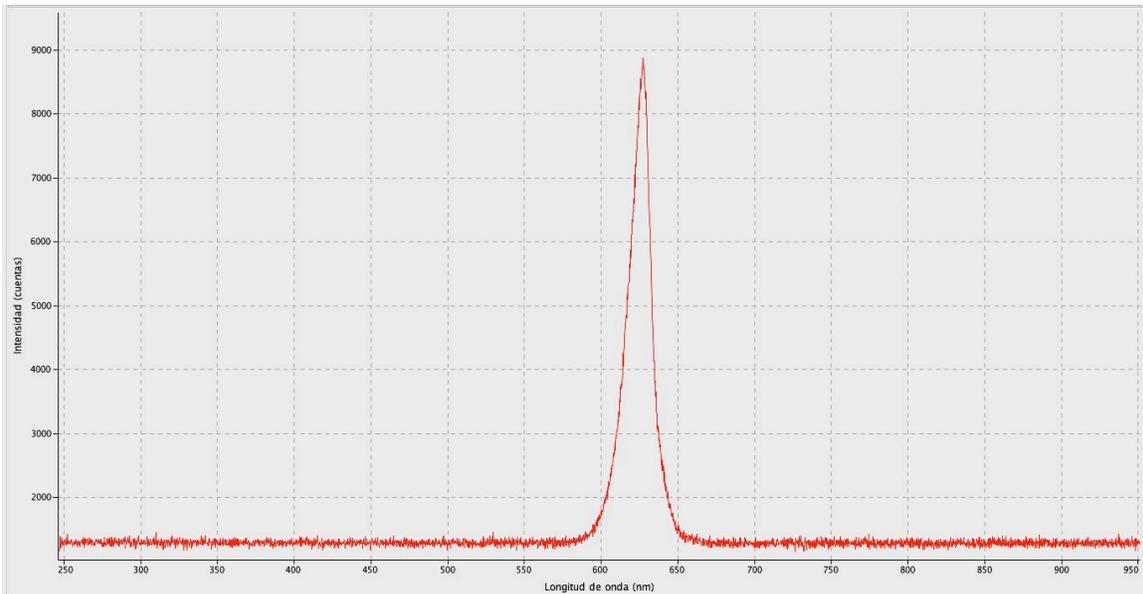


Fig. 4.13. Espectro del LED rojo con máximo en 627 nm y una semianchura FWHM de 16 nm, $\sigma=7$.

Casi todos los LED son monocromáticos con algo de dispersión, sin embargo apareció una mezcla de colores en el LED morado/rosa (Tabla 4.1) y por tanto no lo usé para esta tesis (ver Fig. 4.6 espectro morado).

La longitud de onda λ para cada espectro la encontré del centro de la gaussiana ajustada a cada uno de los picos.

| Color | Longitud de onda (nm) | Segunda longitud de onda (nm) |
|------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Ultravioleta | 396 | - |
| Morado | 442 | 640 |
| Blanco | 446 | 541 |
| Azul transparente | 458 | - |
| Verde opaco C | 559 | - |
| Verde opaco L | 560 | - |
| Verde transparente | 567 | - |
| Amarillo transparente | 586 | - |
| Amarillo opaco | 587 | - |
| Naranja transparente C | 603 | - |
| Naranja transparente L | 605 | - |
| Rojo transparente | 624 | - |
| Rojo opaco L | 627 | - |
| Rojo opaco C | 632 | - |

Tabla 4.1. LED's calibrados con su correspondiente longitud de onda.

Una situación observada y posible futura fuente de problemas es su *no homogeneidad* en la iluminación. A continuación se muestra el espectro de iluminación de cada diodo LED, las cuales tomé iluminando con cada LED una superficie dentro del dispositivo que se utilicé para meter el PMT, conociendo las distancias se logré encontrar los ángulos de iluminación para cada LED. Encima del PMT coloqué una hoja de papel recostada sobre una tabla, la distancia LED-PMT es 21 cm \pm 0.1 cm, se midió el diámetro de la mancha de luz de cada LED sobre la hoja de papel, para así poder encontrar el ángulo α , de todos los LED's, la siguiente forma: (ver Fig. 4.14.)

$$\alpha = \tan(\alpha) = \frac{r}{d}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r}{d}\right) \quad (4.1)$$

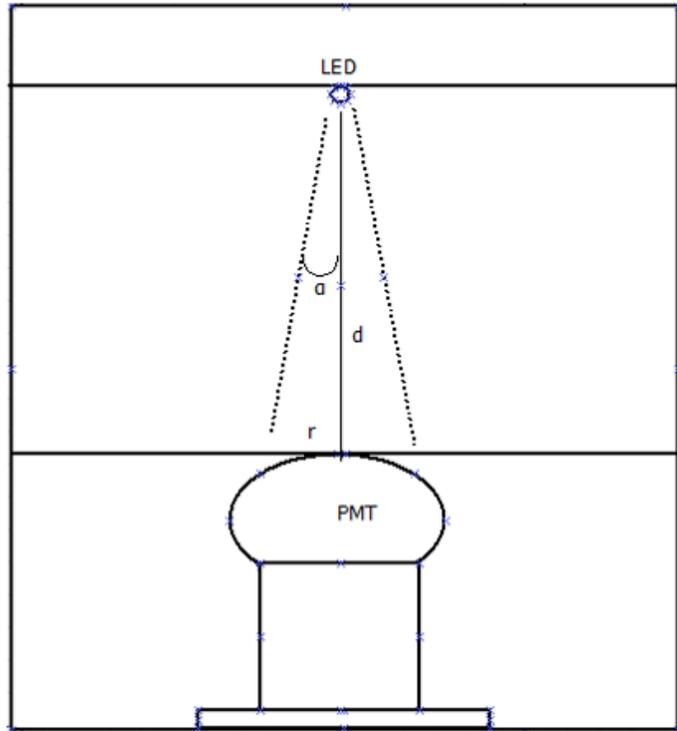


Figura 4.14. Diagrama dónde se muestra la técnica para encontrar el ángulo en cada patrón de luz de cada LED. Dónde α es el ángulo, d la distancia del LED al PMT, r el radio.

Aunque todos mostraban un patrón de luz circular aproximadamente, el ángulo de iluminación variaba entre 15° y 35° , ver Figuras 4.14 a 4.19.

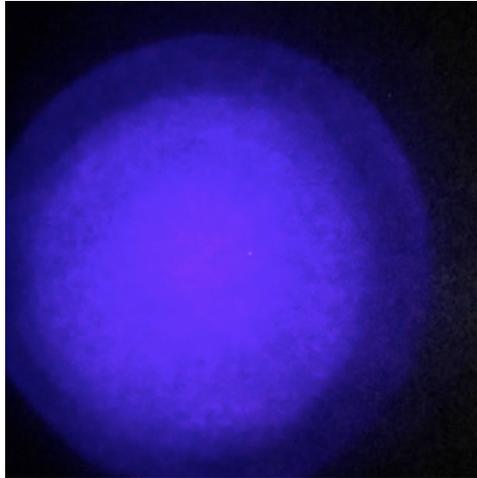


Fig. 4.15. Iluminación del LED ultravioleta. La mancha central tiene un ángulo de 35° , el color es incorrecto pues es debido principalmente a fluorescencia del papel donde se proyecta. Nótese la poca simetría y distribución dispereja de la iluminación.

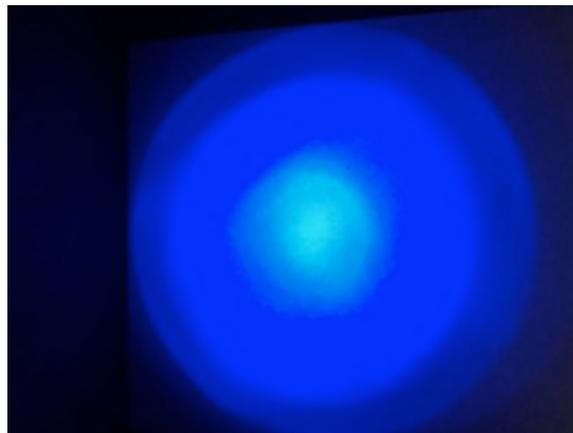


Fig. 4.16. Mancha de iluminación del LED azul la mancha central es de 15° la intermedia es de 27° . Nótese la poca simetría y distribución dispereja de la iluminación.

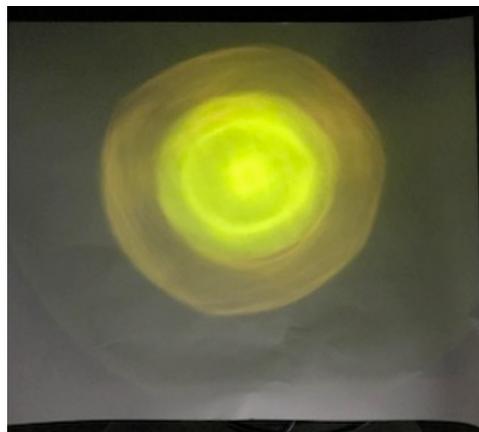


Fig. 4.17. Mancha de color de la iluminación del LED verde la parte central más intensa cubre 16° y la exterior 25° . Nótese la poca simetría y distribución dispereja de la iluminación.

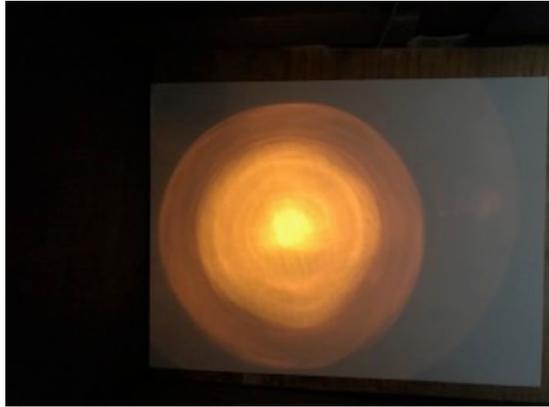


Fig. 4.18. Mancha de color de la iluminación del LED naranja. La mancha central es de 15° la intermedia es de 27° . Nótese la poca simetría y distribución dispereja de la iluminación.

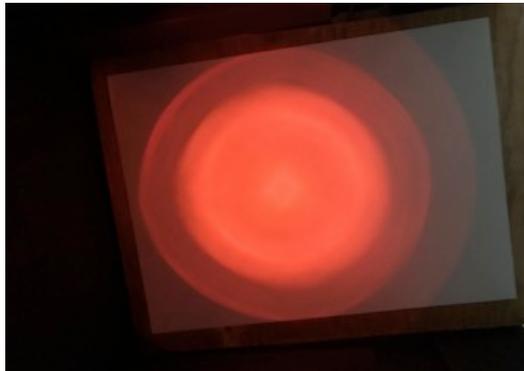


Fig. 4.19. Mancha de color de la iluminación del LED naranja. La mancha central es de 25° la intermedia es de 35° . Nótese la distribución dispereja de la iluminación.

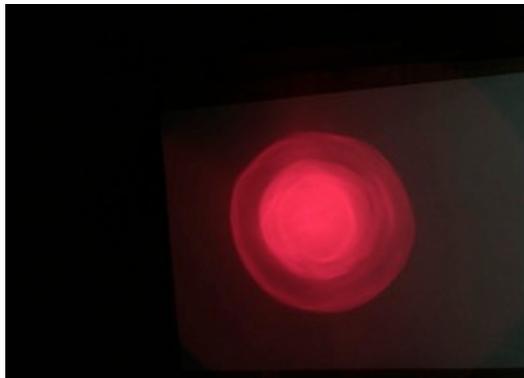


Fig. 4.20. Mancha de color de la iluminación del LED rojo a la altura del tubo PMT. La zona más intensa es de 15° y la siguiente cubre 20° . Nótese la poca simetría de esta, así como las diferentes intensidades en varias zonas. Los colores están alterados, por la respuesta al color de la cámara de fotográfica.

4.3. CALIBRACIÓN EN INTENSIDAD

Para la calibración en intensidad luminosa de los LED usé la “caja oscura” de NYLON, antes mencionada. En el interior instalé cada uno de los LED en frente del PD, apunté la distancia LED - PD y procedí a hacer las medidas.

Alimenté los LED's con una fuente de poder KEITHLEY de alta precisión y fui proporcionando voltaje en pasos de 0.01 V, anoté la corriente que circulaba por cada uno de los LED's. Alimenté los LED hasta un máximo de 20mA. Por el otro lado conecté la salida del PD a un micro amperímetro KLEIN TOOLS en la escala de μA sin ninguna resistencia intermedia. La intensidad de luz incidente es directamente proporcional a la corriente en corto circuito del PD conocida como I_{sh} [10].

A continuación, se presentan las gráficas de la respuesta luminosa según los LED.

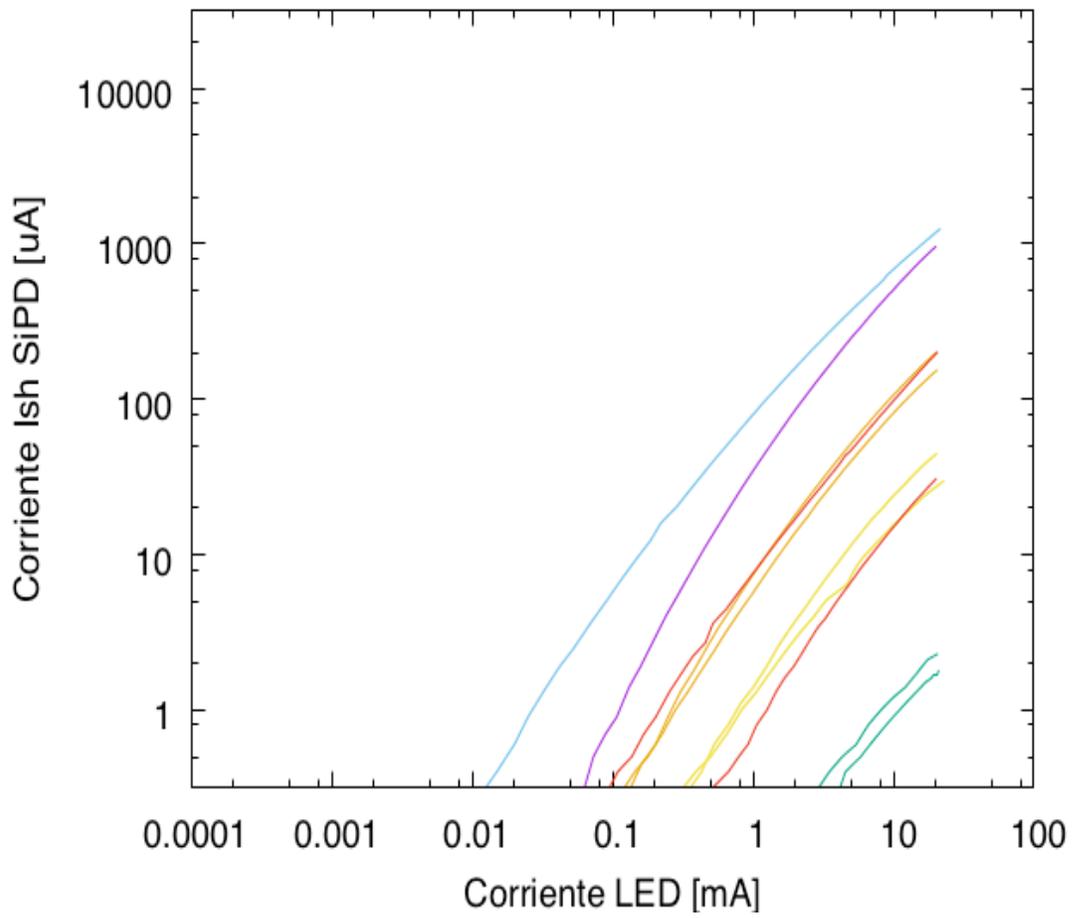


Fig. 4.21. Se muestra la corriente en corto circuito, I_{sh} , del PD en función de la corriente de alimentación del LED. La escala es Log-Log dado que hay gran dispersión en los valores de corriente con los que funcionan los LED. Los colores en las líneas corresponden al color del LED, violeta es UV.

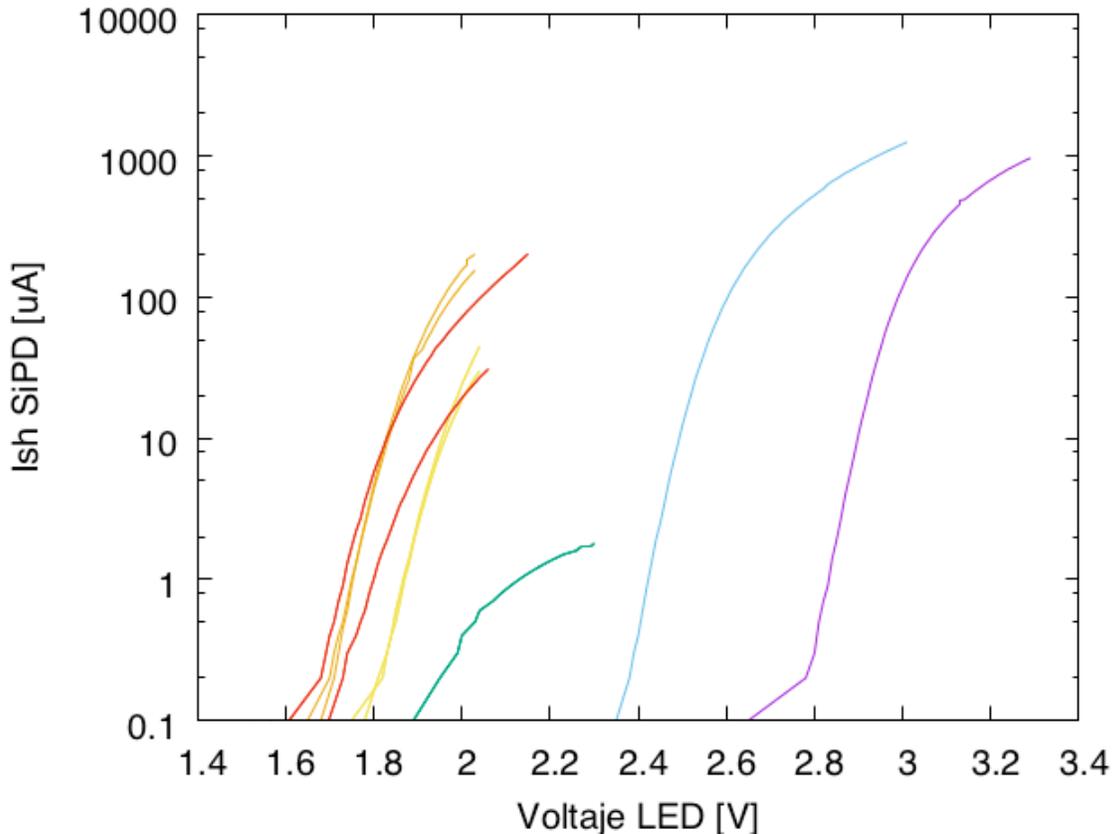


Fig. 4.22. Corriente en corto, I_{sh} , en función del voltaje aplicado al PD que es proporcional a la iluminación y por tanto al número de fotones emitidos como función del voltaje aplicado a los LED. Los colores de las líneas corresponden al color del LED, violeta es UV.

Los LED son semiconductores que trabajan por corriente, es decir, la corriente es la que determina su funcionamiento y no el voltaje. En particular, la intensidad luminosa de los LED, la cantidad de fotones, es función directa de la corriente que pasa por él, como se aprecia en las gráficas de las Figs. 4.20 y 4.21. A cada LED le apliqué la corrección por la respuesta espectral del PD en función de la longitud de onda y la corrección del espectro de la fuente usada por el fabricante para calibrar el PD.

4.4. CALIBRACIÓN DE LA EC DEL PMT

Una vez calibrados cada LED en cuanto a corriente-intensidad de fotones, procedí a colocar el LED y el PMT en la caja oscura de madera con medidas: 80cm ± 0.1 cm, por 30cm ± 0.1 cm, por 35 cm ± 0.1 cm (Fig. 4.24). El tubo PMT a analizar se sostiene en una base de PVC mostrando la superficie fotosensible al LED a una distancia de 21 cm ± 0.1 cm sobre ella, ver Fig. 4.23 y Fig. 4.24.

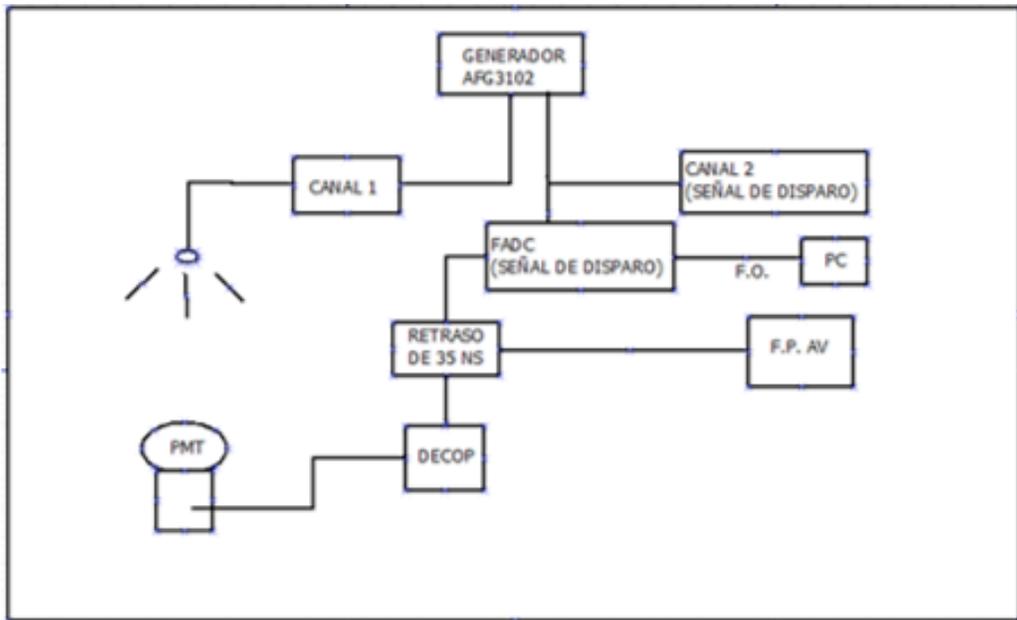


Fig. 4.23. Arreglo de conexiones del PMT.

Las luces LED las coloqué en una cápsula negra para evitar reflejos en las paredes.

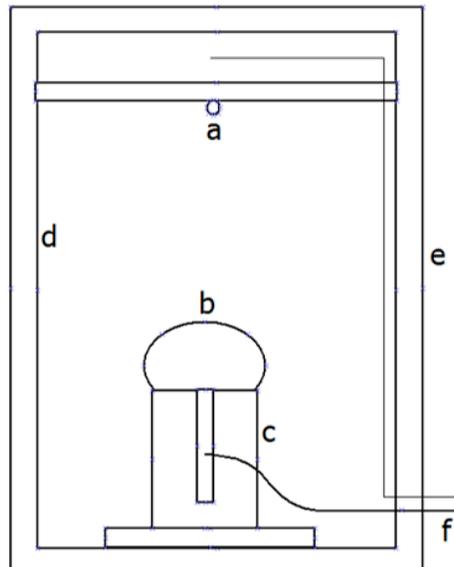


Fig. 4.24. Esquema de la caja de madera utilizada para la medición de la Eficiencia Cuántica de un PMT del proyecto HAWC. a) LED b) PMT c) Soporte de PVC d) Caja de madera, la cual se pintó de negro e) Blindajes ópticos adicionales f) Conexión de alto voltaje y salida de la señal del PMT y conexión de bajo voltaje del LED.



Fig. 4.25. Tubo PMT en el interior de la caja de madera

Para que el LED emitiera pulsos luminosos cortos se conectó a un canal de un generador de funciones "Tektronix AFG3102". En un segundo canal se generó un pulso con un retraso de 35 ns respecto al primer canal que sirve de disparo para la toma de datos en el módulo digitalizador FADC. Este retraso es necesario para compensar el tiempo de tránsito del pulso del generador al PMT y el tránsito de los electrones dentro del tubo. El LED fue alimentado con un pulso de altura variable de la más corta duración que daba el generador. Se usó una frecuencia de 1 kHz para los pulsos, dado que era la máxima que el FADC podía aceptar sin tiempo muerto; el voltaje que se le aplicó a los LED oscilaba entre 1.2 - 3.3 V, esto dependía del color de LED que se estuviese utilizando. La forma del pulso fue de menos de 10ns de subida y menos de 10ns de bajada, así como un ancho de menos de 20ns, ver Fig. 4.26.

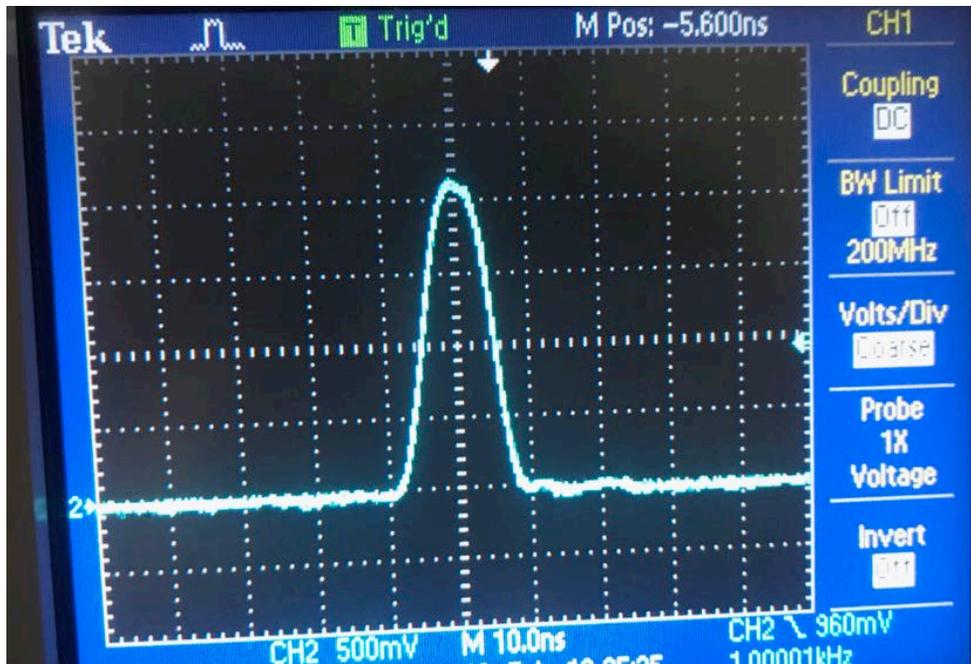


Fig. 4.26. Típico pulso con el que se alimentaron los LED. Tiempo de subida y tiempo de bajada, menor a 10 ns cada una y ancho del pulso, lo mínimo del generador, dándonos una semi-anchura de aproximadamente 5 ns.

Se conectó el PMT a la fuente de poder de alto voltaje “CAEN N471” (Fig. 3.25), el voltaje que se utilizó para el PMT oscilaba entre 1200-1800 V. La señal de los *pe*'s que ve el PMT que va montada sobre el alto voltaje se extrae mediante una caja desacopladora, con el siguiente diagrama electrónico, Fig. 4.27.

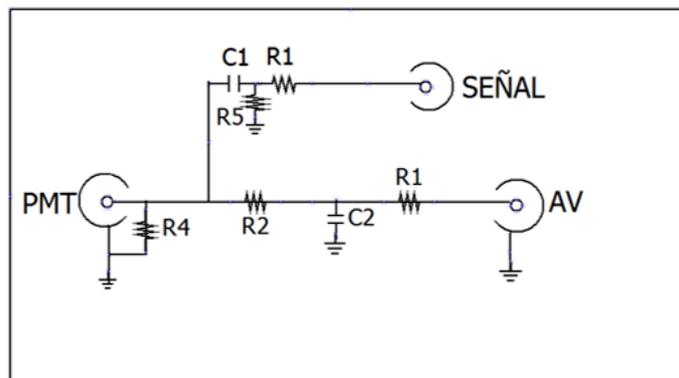


Fig. 4.27. Diagrama electrónico de la caja desacopladora de señal: R1 20 k Ω , R2 100 k Ω R3 24 Ω , R4 100 M Ω , C1 10. nf y C2 66. Nf.

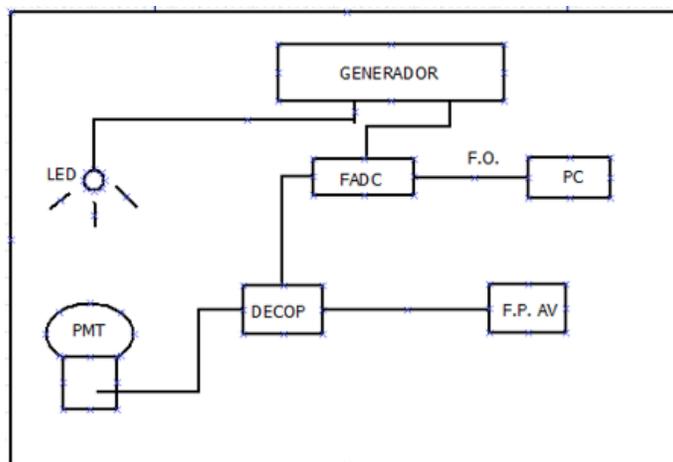


Fig. 4.28. Diagrama electrónico de toma de datos.

Una vez conectado todo el equipo, comencé por el LED color UV y en orden descendiente de energía. El voltaje que utilicé para polarizar el PMT fue de 1500 V.

Para hacer esta calibración utilicé la técnica del *“fotón único”* que consiste en iluminar el PMT con luz pulsada; se baja la intensidad luminosa con la que se ilumina hasta que el PMT no detecte nada. Posteriormente se va aumentando lentamente la intensidad luminosa hasta que el PMT empiece a detectar fotones. En ese punto se toma un espectro y se sigue elevando la intensidad luminosa en pasos pequeños. Bajo este régimen se puede observar cuando se detecta consecutivamente un fotoelectrón, dos fotoelectrones y así sucesivamente.

Para ver el espectro de cada LED utilicé el programa de cómputo **ROOT**, el cuál es usado en el laboratorio. Para iniciar la toma de datos se creó una cuenta en la computadora de análisis del grupo y le di las instrucciones para poder obtener espectros. En cada toma de datos calculaba el pedestal de cada espectro. En la Fig. 4.29, se muestra un espectro típico, el cuál no es un espectro de mi calibración sino de una anterior.

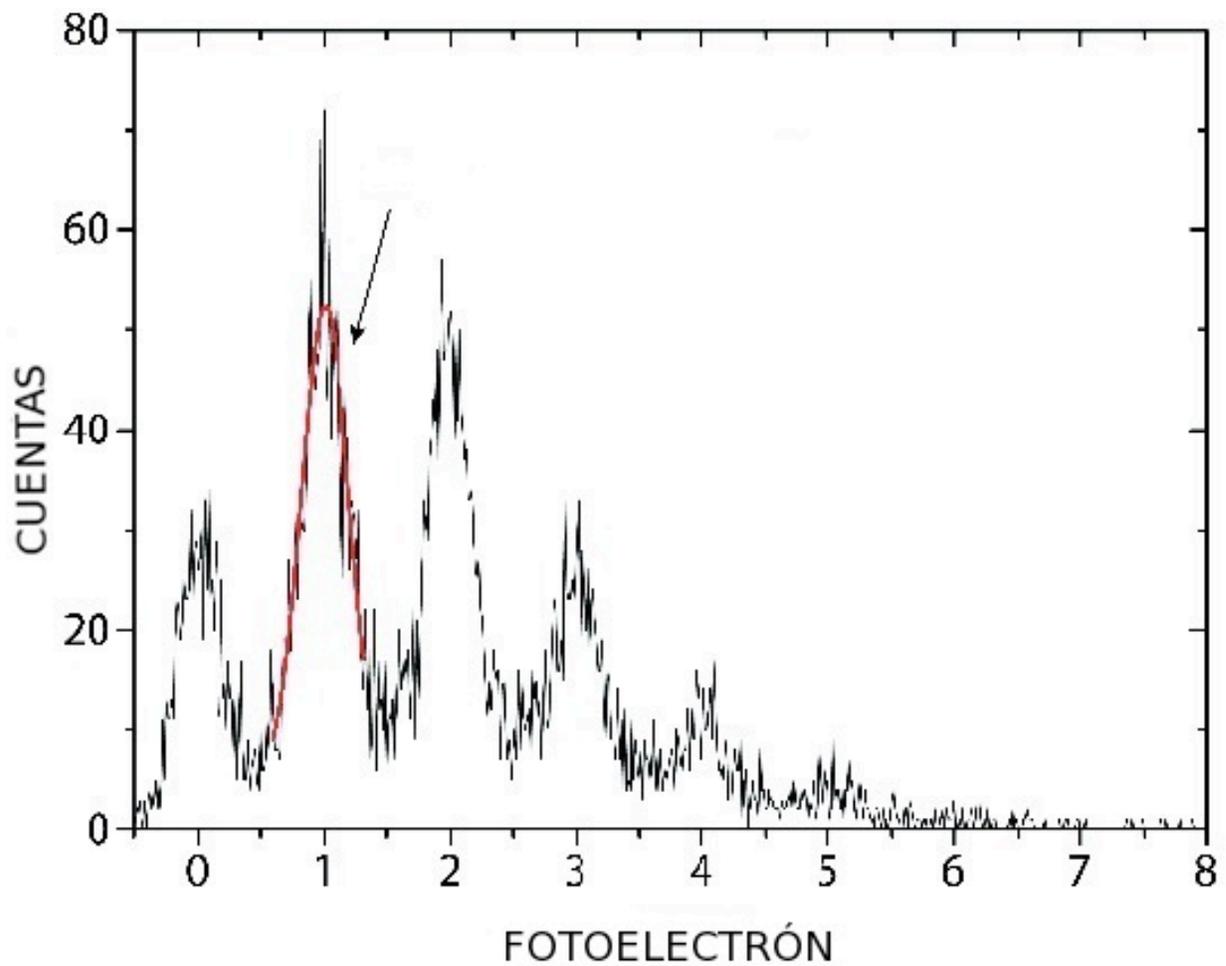


Fig. 4.29. Espectro típico donde se muestran los picos que indican el fondo o pedestal en el origen (cero electrones) y los picos indicando, el primer foto electrón, los dos fotoelectrones y así sucesivamente. También indica el área que se debe integrar para obtener el número total de fotoelectrones.

```
[ruben@daq On6Ch]$ ./HV6Ch-3 2
Que polaridad (p o n)
p
-----
Polaridad Positiva

Voltaje maximo permitido por Hardware: 1829 V.
Corriente maxima permitida por Hardware: 251 I.

Número de canales: 2
Voltaje de salida: 10 (Real: 1 V.)

Dame el voltaje del canal 0 1500
Dame el voltaje del canal 1 10

Ramping up, toma 1 segundos llegar a 10 Volts
0
1

ya pasaron 1 segundos
Canal: 0 Voltaje uData: 2609 (Real: 260 V.)
Canal: 1 Voltaje uData: 108 (Real: 10 V.)

q para terminar el programa:
m para modificar el programa:
```

Fig. 4,30. Captura de pantalla del programa ROOT. De abajo hacia arriba: El programa te pide el voltaje (1500 V en la pantalla), después de un intervalo de tiempo finaliza el “Ramping up” y nos pregunta el programa si finalizamos (q) o no (m).

Como ya mencioné, extraía dos señales del generador para así sincronizar el pulso en el LED con la compuerta del FADC para que aceptara señales únicamente cuando coincidiera en tiempo con el encendido del LED.

La toma de datos del PMT se hizo mediante software propio del FADC y por la forma de operar del ADC de muestreo se guardaba en forma de pulsos en *modo evento*. Esto es, se guardaba pulso por pulso para posteriormente, fuera de línea, analizarlos formando lo espectros usando instrucciones de ROOT.

En los espectros ya armados se localizaron los máximos pertenecientes al pedestal (ruido electrónico que aparece cuando tenía 0V en la entrada del FADC) y el pico perteneciente a 1 fotoelectrón, 2 fotoelectrones y más.

Se escogieron los espectros que sólo tuvieron 1 fotoelectrón claramente definido y no el 2do pico perteneciente a 2do fotoelectrón (o al menos pequeño respecto al de 1 fotoelectrón), con ellos trabajé. Se integró el pico que correspondía a 1 fotoelectrón, cuidando de escoger espectros donde se pudiera separar del pedestal, que corresponde a ruido y también se separa limpiamente de la zona correspondiente al 2do fotoelectrón. Con Esto finalmente obtuve una lista de valores de longitud de onda-voltaje en el LED - y número de fotoelectrones que veía el PMT.

5. ANÁLISIS

A continuación se muestran los cálculos de la EC (ver sec. 3.5.9 y 4.1) relativa del PMT, EC_{PMT} , para cada una de las longitudes de onda que fueron medidas.

En el proceso de medir la EC relativa del PMT hay diferentes variables instrumentales que no se conocen en forma absoluta, (ver fuentes de error conocidos) y afectan en forma sistemática a las mediciones. Estas variables afectan por igual a todos los puntos medidos en las diferentes longitudes de onda por lo que afectan como una constante multiplicativa igual para todos los colores. Con esto salvo una constante, la curva de EC relativa donde la relación de la EC entre los diferentes colores es correcta pero no el valor absoluto.

Se usan unidades arbitrarias dado que no se tienen patrones calibrados pero la relación de EC_{PMT} entre los diferentes colores será válida pues se usa la misma disposición experimental y los mismos criterios para todas las longitudes de onda. En la Tabla 5.1 se tiene concentrada la información de cada color de LED usado.

| COLOR | λ [nm] | E [eV] | FWHM [nm] | S_{PD} [A/W] | EC_{PD} [%] | Fotones/lux [10^{15}] |
|----------|-------------------|-----------|--------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| UV | 396 | 3.1309 | 14 | 0.182 | 61.1 | 2.919 |
| Azul | 458 | 2.7070 | 19 | 0.227 | 62.0 | 3.376 |
| Verde | 567 | 2.1866 | 18 | 0.307 | 68.7 | 4.179 |
| Amarillo | 586 | 2.1157 | 14 | 0.321 | 70.5 | 4.319 |
| Naranja | 603 | 2.0561 | 13 | 0.333 | 69.9 | 4.444 |
| Rojo | 624 | 1.9869 | 16 | 0.348 | 69.6 | 4.599 |

Tabla 5.1. Características del LED y PD así como valores calculados usados para el cálculo de la EC según el color. FWHM es la semi-anchura del pico del espectro en cada color (ver Sec. 4.2). S_{PD} es el factor de corrección por la respuesta luminosa del PD según grafica de la Fig. 3.4. EC_{PD} es la eficiencia cuántica del PD calculada a partir de la S_{PD} . Fotones/lux es el número de fotones por lux según el color calculado abajo usando ec. 5.7 y 5.9a.

5.1. DESARROLLO

Los fotoelectrones que reporta el PMT, $FE_{PMT}(\lambda)$, es el número de fotones que llegan al fotocátodo, $F_{PMT}(\lambda)$, ajustados por la eficiencia cuántica $EQ_{PMT}(\lambda)$ del PMT.

$$FE_{PMT}(\lambda) = (F_{PMT}(\lambda))(EQ_{PMT}(\lambda)) \quad (5.1)$$

El número de fotones F_{PMT} , con que iluminé el fotocátodo son los fotones emitidos por el LED, F_{LED} , corregidos por un factor debido a la fracción de ángulo sólido y la geometría en general con que iluminamos el fotocátodo. Este factor es el mismo para todas las longitudes de onda por lo que salvo una constante:

$$F_{PMT} \propto F_{LED} \quad (5.2)$$

Como todas las mediciones las hice en idéntica geometría y con los mismos criterios, todos los valores de constantes que sean independientes de la longitud de onda las agrupé en un solo valor que haré unitario.

5.2. CALIBRACIÓN DEL LED

El número de fotones emitidos por un LED, $F_{LED}(\lambda)$, es proporcional a la corriente con la que se alimenta I_{LED} . Sin embargo, esta relación varía de LED a LED por lo que no se utilizó y se calibraron usando un fotodiodo PD, de fotometría, iluminado por el LED en cuestión.

Para el proceso de calibración de los LED tengo que en los PD la cantidad de luz incidentes (en lux) es directamente proporcional (en forma *lineal* en 5 décadas, Fig. 3.4, [10]) a la corriente en corto circuito I_{sh} del PD iluminado.

$$Ix \propto I_{sh} \quad (5.3)$$

Con esto, se tiene que el número de fotones incidentes es proporcional a la cantidad de luz recibida por el PD en *lux* y que a su vez es proporcional a I_{sh} . El valor en lux se corrige por dos factores, uno debido a la sensibilidad del PD a los diferentes colores, S_{PD} (Fig. 3.3), y otro porque el PD fue calibrado por el fabricante usando una fuente no monocromática, ver más adelante.

El S_{PD} está directamente relacionada a la eficiencia cuántica de este PD, EQ_{PD} , mediante la ecuación [10]:

$$EQ_{PD}(\lambda) = \frac{S_{PD}(\lambda)(1240)}{\lambda} \quad (5.4a)$$

$$EQ_{PD}(\lambda) \propto \frac{S_{PD}(\lambda)}{\lambda} \quad (5.4b)$$

El comportamiento del PD según el color se observa en la curva de la Fig. 3.4 y los valores según la frecuencia está en la tabla 5.1.

La segunda corrección se debe a que calibración del PD fue hecha por el fabricante usando una fuente estándar (un cuerpo negro) a 2856°K (Apéndice B) y aquí se midió una fuente monocromática. De esto, el valor de I_x deberá ser dividido para normalizar por los factores de intensidad relativa $P(\lambda)$ de cada frecuencia en esta fuente. Al final se tendrá:

$$I_x(\lambda) = \frac{I_s}{E_{CPD}(\lambda) P(\lambda)} \quad (5.5)$$

Definiciones (ver sección 3.1.2)

$$1 \text{ lux} = I_x = \frac{1 \text{ lumen}}{\text{m}^2}$$

$$1 \text{ lumen} = lm = \frac{1 \text{ candela}}{\text{sr}}$$

$$1 \text{ candela} = cd = \frac{1 \text{ W}}{683 \text{ sr}}$$

$$1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ joule}}{\text{s}}$$

$$\text{Energía: } E[J] = \frac{(h)(c)(\pi)}{\lambda[\text{m}]} \quad \text{o} \quad E[eV] = \frac{1240}{\lambda[\text{nm}]} \quad (5.6), (5.7)$$

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$
 $c = 3 * 10^8 \text{ m/s} = 3 * 10^{17} \text{ nm/s}$
m = metro,
sr = estereorradián,
w = potencia en W,
 λ = longitud de onda en nm o m según se indique
1m = 10^9 nm

De las definiciones de lux, lumen y candela y tomando los valores de constantes, área, tiempo y ángulo solido en una sola constante, pues son las mismas para todos los colores:

$$w(\lambda) \propto I_x(\lambda) \quad (5.8)$$

Dado que cada fotón según el color tiene diferente energía, se ajustó el número de fotones según λ , por lo que se pasó de I_x a número de fotones según su frecuencia [11 - 15]. Número de fotones por J de una longitud de onda λ :

Número de fotones

$$F(\lambda) = (w(\lambda)(\lambda[\text{nm}])(5.03 \times 10^{15})) \quad (5.9a)$$

$$F(\lambda) \propto (w(\lambda)(\lambda[\text{nm}])) \quad (5.9b)$$

Con todo esto, se tiene que el número de fotones emitidos por el LED y medidos en el PD según el color, $F_{LED}(\lambda)$, será proporcional a:

$$\frac{(F_{LED}(\lambda) \times (\lambda) \times (x(\lambda)))}{\frac{S_{PD}(\lambda)}{P(\lambda)}} \quad (5.10)$$

5.3. CÁLCULO DE LA EC

Se hace el número de fotones que llegan al PMT proporcional al número de fotones emitidos por el LED, (5.2), por lo que usando (5.10), salvo constante de proporcionalidad:

$$F_{PMT}(\lambda) \propto \frac{(x)(\lambda)}{(S_{PD}(\lambda)P(\lambda))} \quad (5.11)$$

Usando (5.3)

$$FPMT(\lambda) \propto \frac{I_{sh}(\lambda)}{(S_{PD}(\lambda)P(\lambda))} \quad (5.12)$$

Y con (5.1)

$$\frac{FE_{PMT}(\lambda)}{EC_{PMT}(\lambda)} \propto \frac{(x)I_{sh}(\lambda)}{(S_{PD}(\lambda)P(\lambda))} \quad (5.13)$$

Y despejando finalmente se tiene la fórmula para calcular un valor proporcional a la eficiencia cuántica, $EQ_{PMT}(\lambda)$.

$$EQ_{PMT}(\lambda) = \frac{(FE_{PMT}(\lambda)S_{PD}(\lambda)P(\lambda))}{(x)I_{sh}(\lambda)} \quad (5.14)$$

Con esta fórmula y los valores medidos se obtiene finalmente (salvo una constante igual para todos) los valores reportados en la tabla 5.2. En el apéndice A se encuentran los valores de las mediciones hechas.

Valores Experimentales calculados para la EQ_{PMT}

| | | |
|--|---|--|
| UV $EQ_{PMT}=0.2 \Delta$ $\Delta EQ_{PMT}=0.08$ | Azul $EQ_{PMT}=2.24$ $\Delta EQ_{PMT}=0.5$ | Verde, $EQ_{PMT}=6.70$ $\Delta EQ_{PMT}=X$ |
| Amarillo $EQ_{PMT}=297.$ $\Delta EQ_{PMT}=X$ (no se usa) | Naranja $EQ_{PMT}=20.2$ $\Delta EQ_{PMT}=X$ | Rojo $EQ_{PMT}=111.$ $\Delta EQ_{PMT}=X$ |

Tabla 5.2. Eficiencia cuántica experimental en unidades arbitrarias junto con su incertidumbre.

Grafiqué estos puntos con su barra de incertidumbre y la superponemos a la curva de EC_{PMT} del PMT R5819 dada por el fabricante. Se escaló mediante una constante la curva de la EQ del PMT multiplicándolo por 2, Fig. 5.1.

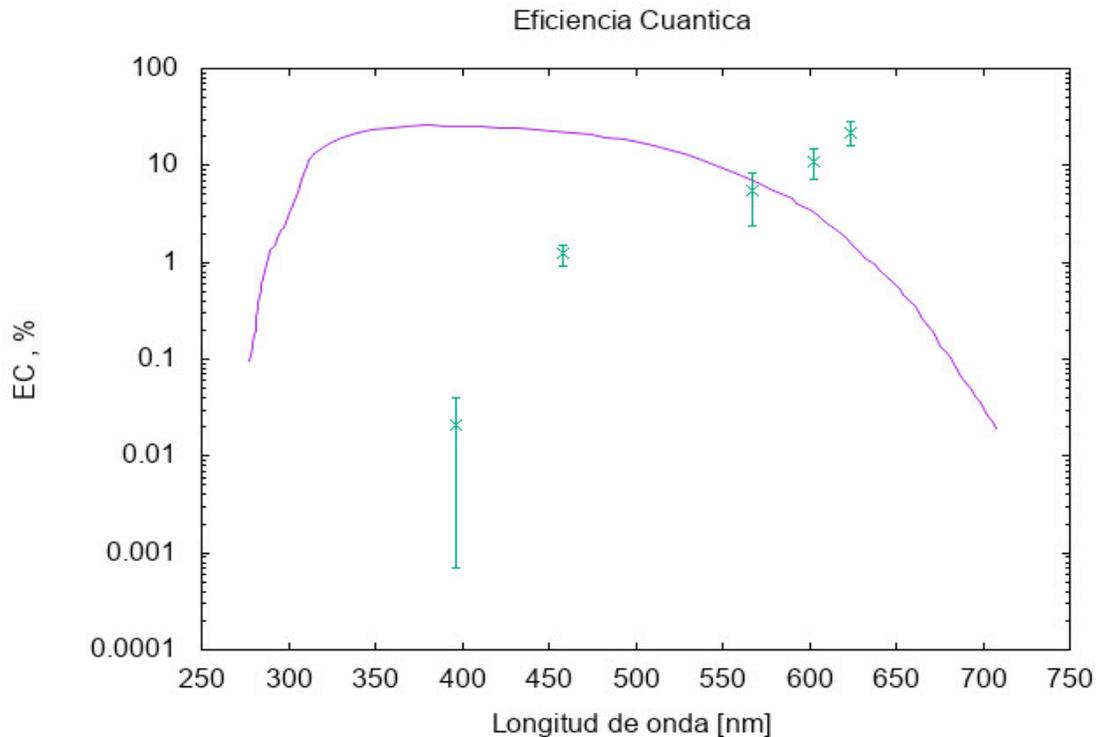


Fig. 5.1 Curva de la eficiencia cuántica esperada del fotomultiplicador R5819 (violeta) superponiéndole los puntos experimentales (verdes) en unidades arbitrarias calculados con su respectiva incertidumbre. Se movió la curva de la EQ_{PMT} para hacer coincidir los valores en el color verde.

5.4. FUENTES DE ERROR

A continuación, se presentan lugares donde hay un error conocido que afectan las mediciones. Estos errores se pueden remediar, pero a un costo económico y de tiempo alto por lo que está fuera de la intención del presente trabajo. Esta tesis sirve para iniciar un trabajo más meticuroso de la medición de la EQ ya conociendo los problemas que se pueden encontrar.

- a) La mancha de luminosidad del LED no es uniforme y aunque el dispositivo geométrico fue igual para todos los componentes (LED, PD y PMT), para una misma geometría a diferentes ángulos hay diferente intensidad no equivalente entre los LED.
- b) Las mediciones de corriente I_{sh} menor que $0.5 \mu A$ resultan con una incertidumbre mayor al 100%.
- c) La integración de la región de 1 fotoelectrón tiene contaminación de los picos de dos o más fotoelectrones.
- d) Dado que la mancha de la luz del LED es no-uniforme, y de trabajos anteriores [32] se encontró que la sensibilidad de la superficie del PMT también es no-uniforme, al iluminar con los diferentes LED hay una suma de errores.
- e) Aunque es de esperarse, no es seguro que en todos los materiales del LED haya la misma proporcionalidad entre un pulso y una corriente continua y habría que comprobar.

6. CONCLUSIONES

De la gráfica de la EC del PMT medida al compararla con la sugerida por el fabricante, se observa que al acercarse al UV, la EC comienza a diferir de la sugerida bajando fuertemente, por lo que es muy posible que efectivamente, la EC de los PMT sea la culpable de la diferencia entre los valores medidos y los calculados para el número de fotones. Esto es, suponer una EC del 30% para los PMT's es un valor muy optimista pues en la gráfica del fabricante (Fig.3.30) 30% es el máximo esperado, ni siquiera el promedio. Además en la luz cherenkov la componente hacia longitudes de onda corta aumenta su intensidad.

Adicionalmente, a) Cada PMT es posible que tenga una curva de EC diferente de la curva sugerida por el fabricante y diferentes entre si. b) La respuesta cerca del UV, que es la zona más luminosa de la luz cherenkov, tiene una EC que pudiera no ser la esperada. En el UV, la gráfica de la EC del fabricante baja rápidamente, pero mis mediciones indican, que en el tubo medido, baja aún más rápido.

Con todo esto se ve que es conveniente a futuro.

1. Medir la QE de cada PMT.
2. Es importante medirla en el mayor número de frecuencias.
3. Si se usa la técnica usada en el presente trabajo, es importante usar mas fuentes luminosas hacia el UV e entremedias
4. Si es posible, obtener una fuente calibrada a nivel fotones o un PMT calibrado.
5. En el capítulo anterior se mencionaron las fuentes de error conocidas. Estas hay que eliminarlas o tenerlas bien cuantificadas.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Instituto de Astronomía, UNAM, 2017, www.astroscu.unam.mx/IA/index.php?option=com_content&view=article&id=577&Itemid=237&lang=es
- [2] Vizcaya Hernández Ana Paula, “*Identificación de Muones y sus aplicaciones en el Proyecto HAWC*” Tesis de Licenciatura, 2016, Física, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] González Manuel, 2012, Tesis de Maestría, “*Caracterización de un detector de centelleo para determinación de composición de rayos cósmicos primarios en el observatorio Pierre Auger*”, recuperado de: fisica.cab.cnea.gov.ar/particulas/html/labdpr/student/maestria-gonzalez.pdf, (2018).
- [4] J. V. Jelley, 1958, “*Cerenkov Radiation and its applications*”, United Kingdom Atomic Energy Authority, Pergamon Press, pages 331.
- [5] *HAWC Collaboration*, recuperado de: www.hawc-observatory.org/, (2018).
- [6] Joshua Wood, “*Identifying Atmospheric Muon Signatures in HAWC Data*”, April 2015, HAWC Technical Note.
- [7] Hamamatsu Photonics K. K. Electron Tube Center, (2007), “*Photomultiplier tubes: Basics and Applications*”, Word Technical Writing, Inc., Tercera edición.
- [8] Jim Linnemann, MSU, June 25, 2015, Internal HAWC Note, “*Some Notes on Phototube (and a bit calibration)*”.
- [9] N. Narros, T. Kaptanaglu, B. Kimmelman, J.R. Klein, E. Moore, J. Ngyyen, K. y Stavreva, R. Svoboda, December 23 (2015). *Characterization of the ETEL D784UKFLB 11 inch Photomultiplier Tube*, Nucl. Instrum. Meth. A852 (2017) pp.15-19.
- [10] Hamamatsu Photonics K. K. Solid State Division, (2017), “*Si Photodiodes lineup of Si Photodiodes for UV to near IR radiation*”, Japan Cat. No. KSPD0001E11, AS, www.hamamatsu.com
- [11] Berthold Technologies GmbH & Co. (2018), recuperado de: <https://www.berthold-bio.com> (2018)
- [12] R. W. Thimijan and R. D. Heins, 1983, “*Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units Measure: A Review of Procedures for Interconversion*”, HortScience, 18(6)818.
- [13] Vos, J. J. (1978). Colorimetric and photometric properties of a 2-deg fundamental observer. *Color Research and Application*, 3, 125-128.

[14] Loyd A. Jones, Colorimetry: Preliminary Draft of a Report on Nomenclature and Definitions, J. Opt. Soc. Am. **27**(6) 207-213 (1937)

[15] Newport. *Optical Radiation Terminology and Units*, recuperado de https://www.newport.com/n/optical-radiation-terminology-and-units,Optical_Radiation_Terms_And_Units.PDF (2018)

[16] Tektronix Corp. (2017), Precision Measurement DC Power Supplies, Reference Manual, Keithley 077085502, Series 2280, www.tek.com/keithley

[17] Ocean Optics Inc., USB4000 Fiber Optic Spectrometer, Installation and Operation Manual, Document Number 211-00000-000-02-201604, 2008, Halma Company, recuperado de: www.oceanoptics.com, (2018)

[18] “*Fotomultiplicador, Historia, Estructura Y Principios De Funcionamiento, Consideraciones De Uso, Las Aplicaciones típicas, Aplicaciones De Alta Sensibilidad*”
Recuperado de: www.clubensayos.com/Ciencia/Fotomultiplicador-Historia-Estructura-Y-Principios-De/1483722.html-, (2017)

[19] CAEN, 12 de febrero de 1993, *Technical Information Manual* recuperado de: www.tunl.duke.edu/documents/public/electronics/CAEN/caen_n471.pdf, (2018).

[20] Rev. 8- January 30th, 2017, CAEN Tools for Discovery, Electronic Instrumentation, User Manual UM4295 N6742, 16+1 Channel 12bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer, recuperado de: www.caen.it/cs/site/CaenProfList.jsp?parent=360&Type=WOCateg&prodsupp=y, (2018).

[21] Tektronix, Inc., (2005), *Test Equipment Solutions Datasheet*, Arbitrary/ Function Generators: AFG3021, AFG3022, AFG3101, AFG3102, AFG3251, AFG3252, recuperado de: www.testequipmenthq.com/datasheets/TEKTRONIX-AFG3102-Datasheet.pdf, (2018).

[22] Tektronix Inc., (2003), TSD2000C Series, *Digital Storage Oscilloscopes User Manual*, recuperado: [www.tek.com/www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/21%20RC%20and%20RLC%20Circuits/Tek%20TDS2002C%20User%20Manual%20\(US\).pdf](http://www.tek.com/www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/21%20RC%20and%20RLC%20Circuits/Tek%20TDS2002C%20User%20Manual%20(US).pdf), (2018).

[23] *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (European Council for Nuclear Research)*, Recuperado de: home.cern/, (2018).

[24] *Klein Tools Inc.*, Instruction Manual MM1000 (English), recuperado de: https://www.kleintools.com/sites/kleintools/files/instructions/MM1000_Digital-Multimeter-Instructions.pdf, (2018).

- [25] *Hamamatsu Photonics K.K.*, Sept 1998 IP, TPMH1235E01, Photomultiplier Tube R5912, recuperado de: www.datasheetcatalog.com, (2018)
- [26] *Electrocomponentens PLC*, docseurope.electrocomponents.com/webdocs/05ed/0900766b805ed9a8.pdf, (2018)
- [27] *Zainuri Ikhsan, Electric World*, recuperado de: antekel.blogspot.mx/2015/04/workings-and-functions-of-led-light.html, (2018).
- [28] Tarun Agarwal, *El Procus Electronics Projects Focus*, recuperado de: www.elprocus.com/light-emitting-diode-led-working-application/ (2017).
- [29] Wikipedia, LED, recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode, (2018)
- [29a] *Así funciona*, 2015, recuperado de: www.asifunciona.com/fisica/af_leds/af_leds_3.htm (2017).
- [30] A.A. Watson. Extensive Air Showers and Ultra High Energy Cosmic Rays. Leeds, UK. 2002.
- [31] P.Vanegas et al. "Characterization of the HAWC R5912 photomultipliers", 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro 2013, the Astroparticle physics conference

APÉNDICE A

Medidas de número de fotoelectrones y de calibración del LED

UV

$\lambda=396\text{nm}$ $\Delta\lambda=6\text{nm}$, $S_{PD} = 0.182$, $P=0.0365$

| RUN | Voltaje [V] | I_{sh} [μA] | ΔI_{sh} [μA] | $FE_{PMT} = \Sigma$ | ΔFE_{PMT} | $\propto EC_{PMT}$ | $\propto \Delta EC_{PMT}$ |
|-----|-------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| 243 | 3.40 | 246 | 3 | 1546 | 40 | 1.05E-4 | 3E-6 |
| | | 1259 | 13 | | | 2.06E-5 | 7E-7 |
| 249 | 3.45 | 330 | 4 | 8430 | 90 | 4.29E-4 | 9E-6 |
| | | 1407 | 15 | | | 1.01E-4 | 2E-6 |
| 250 | 3.50 | 638 | 7 | 15822 | 130 | 4.16E-4 | 8E-6 |
| | | 1556 | 16 | | | 1.71E-4 | 3E-6 |

Tabla A1

$EC_{PMT}(\text{ultravioleta}) = 2.07\text{E-}4 \pm 2\text{E-}4$

Azul

$\lambda=458$ $\Delta\lambda=8\text{nm}$, $S_{PD} = 0.227$, $P = 0.0988$

| RUN | Voltaje [V] | I_{sh} [μA] | ΔI_{sh} [μA] | $FE_{PMT} = \Sigma$ | ΔFE_{PMT} | $\propto EC_{PMT}$ | $\propto \Delta EC_{PMT}$ |
|-----|-------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| 233 | 2.50 | 12.3 | 0.6 | 2232 | 50 | 8.86E-3 | 4E-4 |
| 234 | 2.55 | 31.5 | 0.8 | 9599 | 100 | 1.49E-2 | 5E-4 |
| | | 35.6 | 0.9 | | | 1.32E-2 | 4E-4 |

Tabla A2

$EC_{PMT}(\text{azul}) = 1.23\text{E-}2 \pm 3\text{E-}3$

Verde $\lambda=567$ $\Delta\lambda=8\text{nm}$, $S_{PD} = 0.302$, $P = 0.281$

| Voltaje [V] | I_{sh} [μA] | ΔI_{sh} [μA] | $FE_{PMT} = \Sigma$ | ΔFE_{PMT} | $\propto EC_{PMT}$ | $\propto \Delta EC_{PMT}$ |
|-------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| 1.90 | 0.4 | 0.5 | 59 | 10 | 2.21E-2 | 3E-2 |
| | | | 69 | 10 | 2.58E-2 | 3E-2 |
| | 0.1 | 0.5 | 59 | 10 | 8.83E-2 | 4E-1 |
| | | | 69 | 10 | 1.03E-1 | 5E-1 |
| 2.00 | 5.1 | 0.6 | 561 | 20 | 1.65E-2 | 2E-3 |
| | | | 648 | 30 | 1.9E-2 | 2E-3 |
| | 2.1 | 0.5 | 561 | 20 | 4.00E-2 | 1E-2 |
| | | | 648 | 30 | 4.62E-2 | 1.1E-2 |
| | 1.0 | 0.5 | 561 | 20 | 8.40E-2 | 4E-2 |
| | | | 648 | 30 | 9.7E-2 | 5E-2 |
| 2.10 | 9.1 | 0.6 | 3959 | 60 | 6.51E-2 | 4E-3 |
| | | | 4591 | 70 | 7.55E-2 | 5E-3 |
| | 17. | 0.7 | 3959 | 60 | 3.49E-2 | 2E-3 |
| | | | 4591 | 70 | 4.04E-2 | 2E-3 |

Tabla A3

$EC_{PMT}(\text{verde}) = 5.41\text{E-}2 \pm 3\text{E-}2$

Amarillo $\lambda=586\text{nm}$, $\Delta\lambda=6\text{nm}$, $S_{PD} = 0.321$, $P = 0.318$ (NO SE USARON)

RUN=269 1.8V $\Sigma=2608$ $\Delta=50$

| I_{sh} [μA] | ΔI_{sh} [μA] | $\propto EC_{PMT}$ | $\propto \Delta EC_{PMT}$ |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------|
| 0.1 | 0.5 | 4.54E0 | 2E1 |
| 0.2 | 0.5 | 2.27E0 | 5E0 |
| 0.4 | 0.5 | 1.14E0 | 1E0 |

Tabla A4

$EC_{PMT}(\text{amarillo}) = 2.65 \pm 2\text{E}0$

Naranja $\lambda=603\text{nm}$ $\Delta\lambda=5\text{nm}$, $S_{PD}=0.333$, $P=0.352$
 RUN=266 1.8V $\Sigma=3590$ $\Delta=60$

| I_{sh} [μA] | ΔI_{sh} [μA] | $\propto EC_{PMT}$ | $\propto \Delta EC_{PMT}$ |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| 4.6 | 0.5 | 1.52E-1 | 2E-2 |
| 6.9 | 0.6 | 1.01E-1 | 9E-3 |
| 8.8 | 0.6 | 7.93E-2 | 6E-3 |

Tabla A5

$$EQ_{PMT}(\text{naranja}) = 1.11\text{E-}1 \pm 4\text{E-}2$$

Rojo $\lambda=624\text{nm}$ $\Delta\lambda=7\text{nm}$, $S_{PD}=0.348$, $P=0.393$
 $\Sigma=7349$ $\Delta=90$

| RUN | Voltaje | I_{sh} [μA] | ΔI_{sh} [μA] | $\propto EC_{PMT}$ | $\propto \Delta EC_{PMT}$ |
|-----|---------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| 270 | 1.8 | 5.7 | 0.6 | 2.83E-1 | 3E-2 |
| | | 6.2 | 0.6 | 2.60E-1 | 3E-2 |
| | | 8.9 | 0.6 | 1.81E-1 | 1.3E-2 |
| | | 10.6 | 0.6 | 1.52e-1 | 9E-3 |

Tabla A6

$$EC_{PMT}(\text{rojo}) = 2.19\text{E-}1 \pm 6\text{E-}2$$

Espectro de radiación de un cuerpo a $T=2856^{\circ}\text{K}$ usado para calibrar el PD por la compañía Hamamatsu. B_{λ} = Radiancia espectral.

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT)-1} \delta 0$$

APÉNDICE B

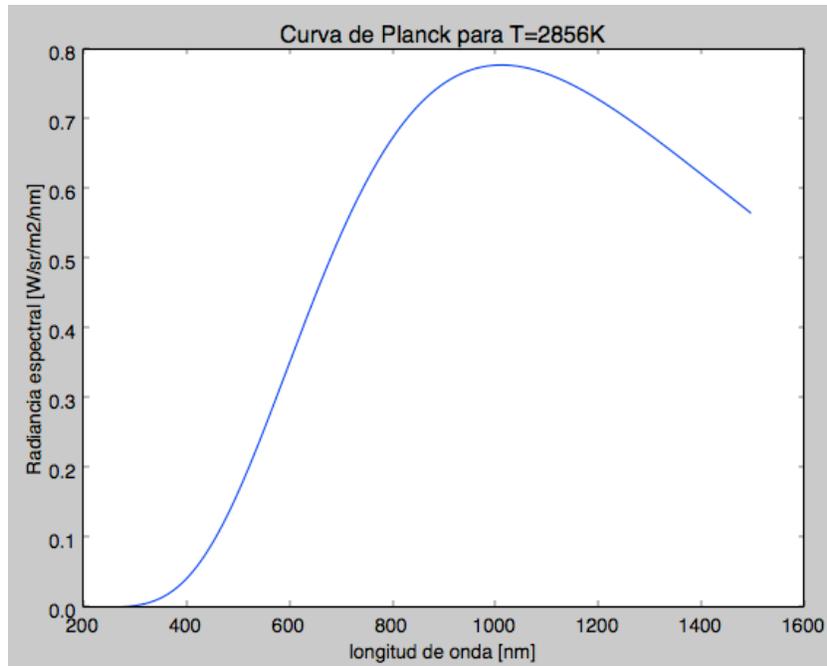


Fig. A. Curva de Planck

Con los siguientes valores de importancia para ajustar la eficiencia:

| longitud de onda [nm] | Radiancia [w/sr/m ² /nm] |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 396 | 0.0365 |
| 458 | 0.0988 |
| 559 | 0.266 |
| 560 | 0.268 |
| 567 | 0.281 |
| 586 | 0.318 |
| 587 | 0.320 |
| 603 | 0.352 |
| 605 | 0.356 |
| 624 | 0.393 |
| 627 | 0.398 |
| 632 | 0.408 |

Tabla B

