



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Cámara Oscura con el fotomultiplicador multianodo para
obtener imágenes de fenómenos luminosos transitorios que se
generan en la parte alta de la atmósfera.

Tesis presentada al

Postgrado en Ciencias (Física Aplicada)

como requisito parcial para la obtención del grado de

DOCTOR EN CIENCIAS (FÍSICA APLICADA)

por

M. C. Ponce Lancho Epifanio Lorenzo

asesorado por

Dr. Oscar Mario Martínez Bravo.

Puebla Pue.
2014

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado del trabajo que he realizado en el Doctorado en Cs. Física Aplicada de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. Trabajo que requirió del apoyo e intervención de las autoridades del posgrado de la **FCFM** y de la propia universidad **BUAP**.

Agradezco principalmente a mi **Esposa e hijos**, quienes me han brindado su comprensión, apoyo, confianza y sobre todo paciencia.

Agradezco al **CONACyT** y principalmente al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, por el apoyo recibido a través del Programa de Becas-Tesis.

A mi asesor el **Dr. Oscar Mario Martínez Bravo**, por permitirme formar parte de su grupo de investigación por compartir conmigo su amplio conocimiento, por sus sugerencias, aportes y por haberme brindado las facilidades para concluir ésta tesis.

Al **Dr. Humberto Salazar Ibargüen**, por proponer, apoyar y dar continuo seguimiento de las actividades y trámites para la conclusión de esta tesis.

A todos mi mayor reconocimiento y gratitud.

Gracias!

Resumen

La atmósfera terrestre es un medio natural donde se pueden detectar los diferentes tipos de radiación y objetos que llegan desde el espacio. Entre ellos están: los rayos cósmicos, la radiación solar, la radiación de origen galáctica, extra-galáctica, etc. etc.. Uno de los fenómenos importantes que se presentan en la región nocturna de la tierra, son los fenómenos luminosos transitorios (TLEs, por sus siglas en ingles) caracterizados por la emisión de destellos muy brillantes (en la región UV la energía es superior a 0.1-1 MJ) con duración de (1-100 ms). Las primeras mediciones de luz de fondo en la región UV se realizaron con un fotodetector que estaba a bordo de los satélites “Tatiana” y “Tatiana-2”. Lo que midieron ambos satélites fueron “integrales”, pues realizaron mediciones en una región del espectro con un solo detector para continuar con el estudio de las características físicas de este tipo de fenómenos, es necesario estudiar su evolución espacial y temporal mediante instrumentos que permitan hacer estos estudios, lo que implica usar detectores de luz en dos dimensiones. La cámara fotodetectora que se desarrolla esta planeada para operar en experimentos espaciales dedicados al estudio de la aceleración de electrones en la atmósfera, las descargas eléctricas y del flujo de electrones relativistas de la magnetósfera a la atmósfera, entre otros.

La cámara oscura, es un dispositivo óptico simple, robusto, con profundidad de foco infinita, sin partes móviles, que permite obtener imágenes de manera nítida. Requisitos importantes para un dispositivo como el que se pretende colocar en satélites pequeños como los del programa espacial universitario. El fotodetector trabaja en la región cercana al UV (longitudes de onda de 300-400 nm). En la cámara se tienen 2 detectores operando en configuraciones diferentes, lo cual permite obtener imágenes de los destellos con diferente resolución en espacio y tiempo, las mediciones con la ayuda de la cámara permitirán probar un método efectivo para el estudio de los posibles destellos en la región UV que pudieran generar los rayos cósmicos ultraenergéticos (UHECR por sus siglas en ingles) en el momento en que entran a la atmósfera y estos interactúan con los átomos; también para estudiar las descargas eléctricas al excitar las moléculas de la atmósfera que a su vez emiten fotones en la región UV. Un método similar de obtener imágenes es con ayuda de un espejo concentrador y una matriz de fotomultiplicadores, adaptados para estudiar imágenes del disco que generan los chubasco de rayos cósmicos (detector TUS). La medición de los destellos en la parte nocturna de la atmósfera con ayuda de la cámara oscura, puede considerarse como una contribución en la preparación del experimento TUS y de la cámara oscura espacial que operarán conjuntamente a bordo del satélite universitario “Lomonosov”, así que estas mediciones permitirán dar una estimación de los TLEs y de la luz de fondo que se presenta en la región nocturna de la atmósfera.

Introducción

Desde hace más de una década, se han construido observatorios para el estudio de los eventos luminosos transitorios (TLE por sus siglas en inglés), la mayoría de estos experimentos realizaron observaciones en el rango visible y revelaron que los TLE, se desarrollan rápidamente, desde uno hasta unas cuantas centenas de milisegundo, abarcan enormes dimensiones, desde decenas hasta cientos de kilómetros. La brillantez y longitud de onda en la que radian, esta relacionada con la energía de los electrones presentes en el medio donde se generan, estos fenómenos tienen características de una explosión atómica, las cuales influyen en las radio comunicaciones, en la seguridad de vuelos de aviones y aeronaves. Durante la reconstrucción de datos experimentales obtenidos con experimentos de detección UV-IR a bordo de dos satélites artificiales universitarios “Tatiana” y “Tatiana-2”, revelaron el registro de una serie de fenómenos de corta duración y de muy alta intensidad, durante el monitoreo de luz de fondo en la región nocturna de la tierra. De igual manera, el observatorio Pierre Auger, en Argentina, ha logrado registrar estos fenómenos con el detector de fluorescencia. La naturaleza de los TLEs aun no es muy clara, por eso es necesario realizar más observaciones para incrementar la estadística de forma experimental. Para continuar con el estudio de las características físicas de este tipo de fenómenos en la región UV, es necesario estudiar su evolución espacial y temporal mediante instrumentos que permitan hacer estas mediciones, lo que implica usar detectores de luz bidimensionales. Por esta razón, construimos un detector capaz de construir imágenes lo suficientemente rápido y con un campo de visión que permita estudiar a los fenómenos mencionados anteriormente. La cámara oscura con el fotomultiplicador multiánodo es una caja negra con un pequeño orificio por el cual se observa la imagen del TLE, la cual se proyecta de forma invertida en la superficie pixelada del fotomultiplicador, el cual actúa como pantalla de proyección.

En los capítulos de esta tesis, se presenta lo siguiente: En el capítulo 1 presentamos un panorama general de la atmósfera terrestre. En el capítulo 2, describimos las características de los eventos transitorios luminosos (TLEs por sus siglas en inglés) y técnicas utilizadas por experimentos que han logrado registrarlos en la parte alta de la atmósfera. En el capítulo 3, describimos los detectores a bordo de satélites artificiales y terrestre, que han registrado algunos destellos en la región UV. En el capítulo 4, Presentamos el detector TUS y la cámara oscura espacial a bordo del satélite universitario “Lomonosov”. En el capítulo 5, presentamos el diseño y construcción de la cámara oscura, el fotomultiplicador multiánodo en calidad de fotodetector del instrumento, la electrónica del sistema y finalmente las mediciones de intensidades de luz registrados de la Luna en sus diferentes fases, así como la forma de algunos destellos que se lograron registrar, las mediciones se realizaron en el volcán Sierra Negra situado cerca de Puebla a una altura de 4300 metros sobre el nivel del mar, con el fin de reproducir de la manera más realista las condiciones en el espacio. Debido a que en un futuro cercano, la cámara oscura se pretende colocar en alguno de los satélites pequeños como los del programa espacial universitario.

Índice general

1. La atmósfera terrestre	9
1.1. Introducción	9
1.2. Estructura de la atmósfera	9
2. Destellos electromagnéticos observados en la atmósfera	15
2.1. Introducción	15
2.2. Detectores para obtener imágenes de los destellos electromagnéticos.	15
3. Detectores UV espaciales y terrestres	23
3.1. Introducción	23
3.2. El satélite artificial Universitario “Tatiana”	23
3.3. El satélite artificial Universitario “Tatiana-2”	30
3.4. El Observatorio Pierre Auger	37
4. El satélite universitario “Lomonosov” para detectar UHECRs y TLEs	41
4.1. Introducción	41
4.2. El telescopio espacial TUS	42
4.3. La cámara oscura espacial	44
5. La cámara Oscura	51
5.1. Introducción	51
5.2. Características de los destellos generados en la parte alta de la atmósfera	52
5.3. La cámara oscura	52
5.4. El fotodetector (PMT)	56
5.5. Sistema electrónico de la cámara oscura	61
5.6. Interfaz gráfica para configurar el modo de operación de la cámara oscura	66
5.7. Pruebas de laboratorio	68
5.8. Resultados obtenidos con la cámara oscura en el Volcán Sierra Negra	69
5.9. Conclusiones	75

Capítulo 1

La atmósfera terrestre

1.1. Introducción

Al considerar un modelo de la tierra, no se pueden ignorar los fenómenos que se presentan en la atmósfera, porque está directamente relacionada con la magnetósfera terrestre, la cual es el escudo protector del flujo de rayos cósmicos y del viento solar, que llegan a la tierra desde el espacio. Las observaciones actuales revelan que en la atmósfera, entre la superficie y la ionósfera, principalmente sobre regiones con nubes, se observan destellos generados por descargas eléctricas. La generación de estos fenómenos se asocia al estado actual de la ionósfera, al campo eléctrico y la conductividad presente en la atmósfera.

Antes de continuar con el estudio de estos destellos generados en la atmósfera, mencionemos algunas características de la estructura, composición y en general del campo eléctrico atmosférico.

1.2. Estructura de la atmósfera

Para tener un mejor entendimiento, dividimos a la atmósfera en varias partes y mencionamos las características de cada una de ellas. En la figura 1.1 mostramos la estructura, donde claramente se observa que la presión y temperatura dependen de la altura. El espesor total de materia atmosférica es de 1000 g/cm^2 (la presión sobre el nivel del mar 1000 mbar), la presión atmosférica disminuye exponencialmente con el incremento de la altura. A una altura cercana a los 100 km, la composición de la atmósfera se considera estable, con una composición del 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y el resto de impurezas de otros gases (principalmente cercano al 1% de argón), vapor de agua y partículas de polvo (aerosoles). En la tropósfera (a alturas entre 8-9 km) la concentración es de la mitad de la masa atmosférica. En esta región hay vapor de agua y partículas de hielo, en la mayoría aerosoles procedentes de la erosión del suelo y la actividad humana. El vapor de agua y las partículas de hielo dan origen a la formación de nubes (vea la figura 1.1), desempeñando un papel importante en los procesos eléctricos en la atmósfera. En la tropósfera, la temperatura desciende rápidamente con la altura (cerca del nivel del mar la temperatura de la atmósfera se determina por el calentamiento del sol sobre la superficie terrestre). En la estratósfera (a una altura de 10-50 km) la presión atmosférica es de alrededor de uno a dos ordenes de magnitud menor que en la tropósfera. En la estratósfera la capa de ozono juega un papel importante (molécula de oxígeno O_3), pues es la que se encarga de absorber la radiación ultravioleta solar (longitud de onda $\lambda < 300 \text{ nm}$). La temperatura de la estratósfera aumenta con la altura debido al aumento en el flujo de radiación UV proveniente del Sol.

Por encima de la estratósfera se encuentran la mesósfera y la termósfera, donde se encuentran las capas de la ionósfera, estas desempeñan un papel importante en los procesos eléctricos terrestres. Los iones de la ionósfera representan un pequeño porcentaje, alrededor de 10^{-5} del total de la masa de la ionósfera y la misma cantidad de moléculas en las capas anteriores.

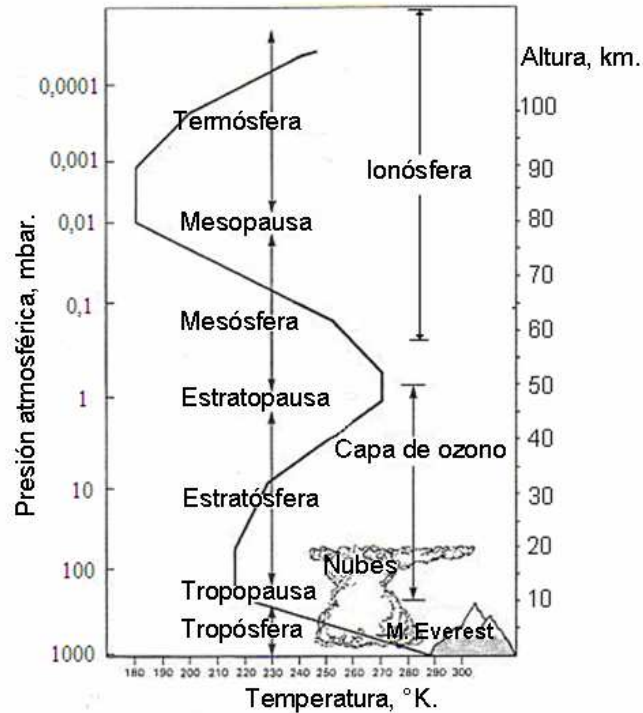


Figura 1.1: Estructura de la atmósfera. La parte derecha, muestra la altura sobre el nivel del mar. La parte izquierda, la presión de la misma, en milibares.

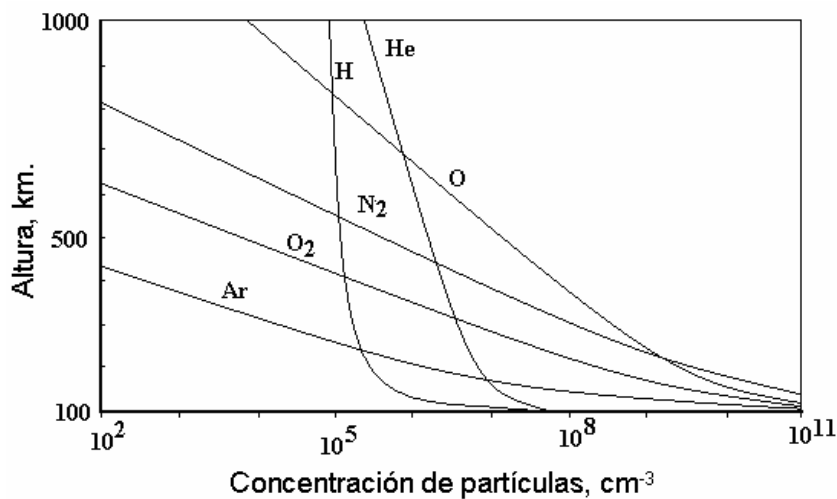


Figura 1.2: Composición química de la atmósfera a alturas superiores a los 100 km.

A alturas superiores a los 100 km, la exósfera, presenta un cambio significativo en la composición de la atmósfera, vea la figura 1.2. A partir de los 200 km, los átomos de oxígeno presentes en la atmósfera son los de mayor predominancia. A alturas mayores a 800 km, en la magnetósfera, los elementos que abundan son el helio y el hidrógeno.

Si en la tropósfera, el principal efecto del Sol es calentar la superficie de la tierra, entonces en la parte superior el efecto atmosférico es, la absorción de los rayos UV, rayos X y el flujo de carga de las partículas solares. Esta “radiación solar” no solo calienta la parte superior de la atmósfera, sino también cambia la composición molecular y iónica.

El constante cambio del campo eléctrico terrestre se debe a varios procesos: En la parte alta de la atmósfera el flujo de radiación UV y de rayos X provenientes del sol, ionizan los átomos y moléculas. Dichas moléculas pueden emitir fotones de fluorescencia, el espectro de fluorescencia que se obtiene es el que se muestra en la figura 1.3. La fluorescencia producida es baja y ligeramente depende de la altura y temperatura, como se muestra en la figura 1.4.

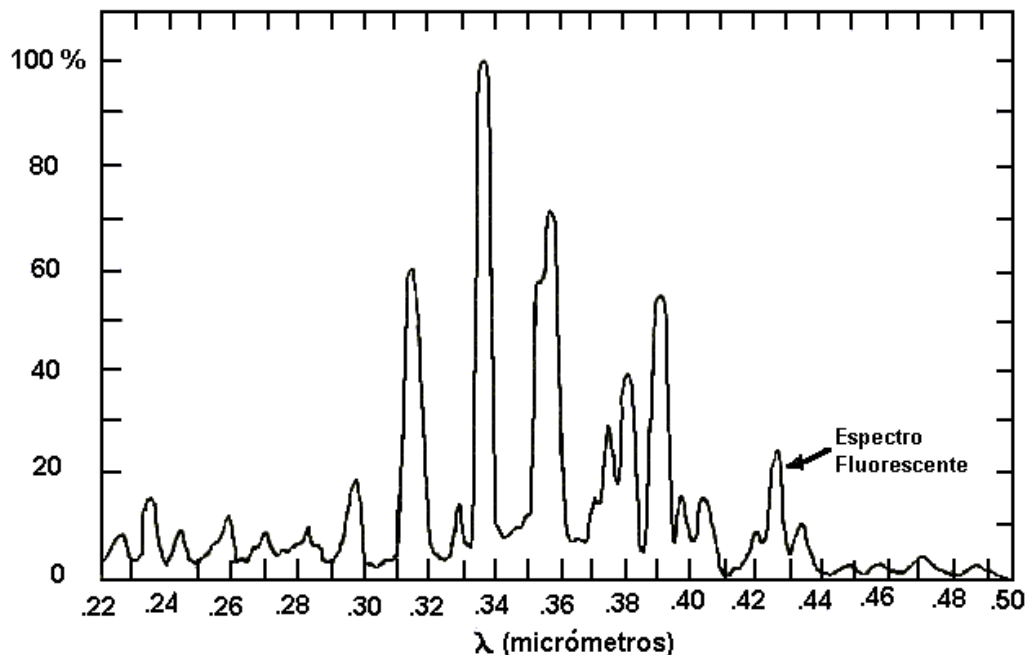


Figura 1.3: Espectro de radiación ultravioleta.

La rápida recombinación de iones y electrones surgen repentinamente formando una capa de iones en la atmósfera, en general son capas de iones con diferente carga y masa. La fuerza de gravedad y la rotación de la Tierra atrapan los iones cargados, teniendo como resultado a estos girando en el campo magnético terrestre, generando un campo eléctrico perpendicular a las líneas del campo magnético. En el ecuador donde las líneas del campo magnético son paralelas a la superficie de la Tierra, el campo eléctrico tiene la dirección vertical a la superficie terrestre. También, el movimiento de la tierra causa que los iones se vean afectados por la fuerza de gravedad de la Luna, por lo que se espera una pequeña perturbación en el campo eléctrico de la Tierra.

Otro de los generadores de campo eléctrico es la magnetósfera de la Tierra, figura 1.5. El flujo de iones del viento solar al atravesar el campo magnético de la Tierra, crea un campo eléctrico, la forma se relaciona

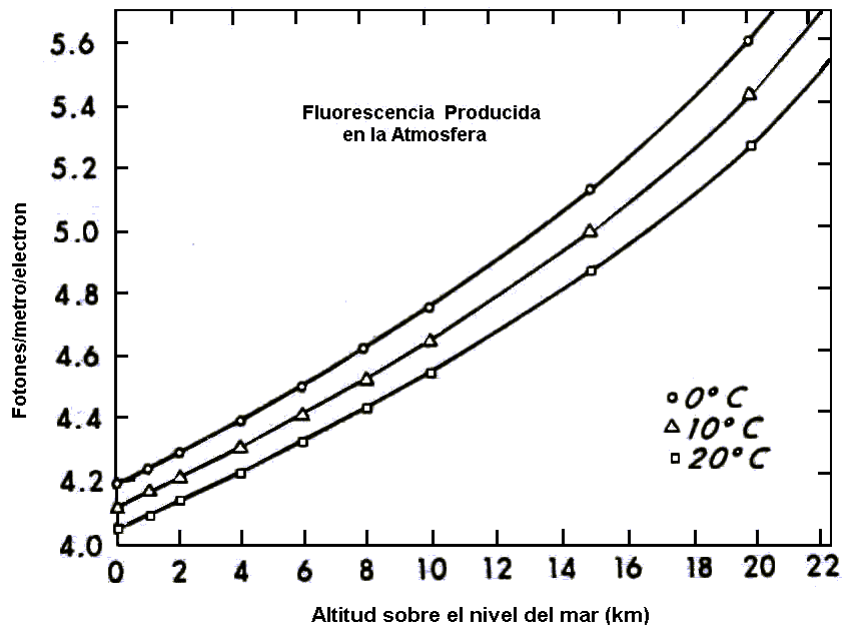


Figura 1.4: Producción de luz fluorescente con respecto a la altura y temperatura.

con la composición y estructura de la magnetósfera, con la dirección del viento y actividad solar. Para nosotros en la presente tesis solo nos interesa saber que el campo eléctrico es un generador activo de iones recombinándose en las regiones polares de la Tierra, generando una corriente constante. La energía liberada por este “generador magnético dinámico” es de aproximadamente 10^3 MW.

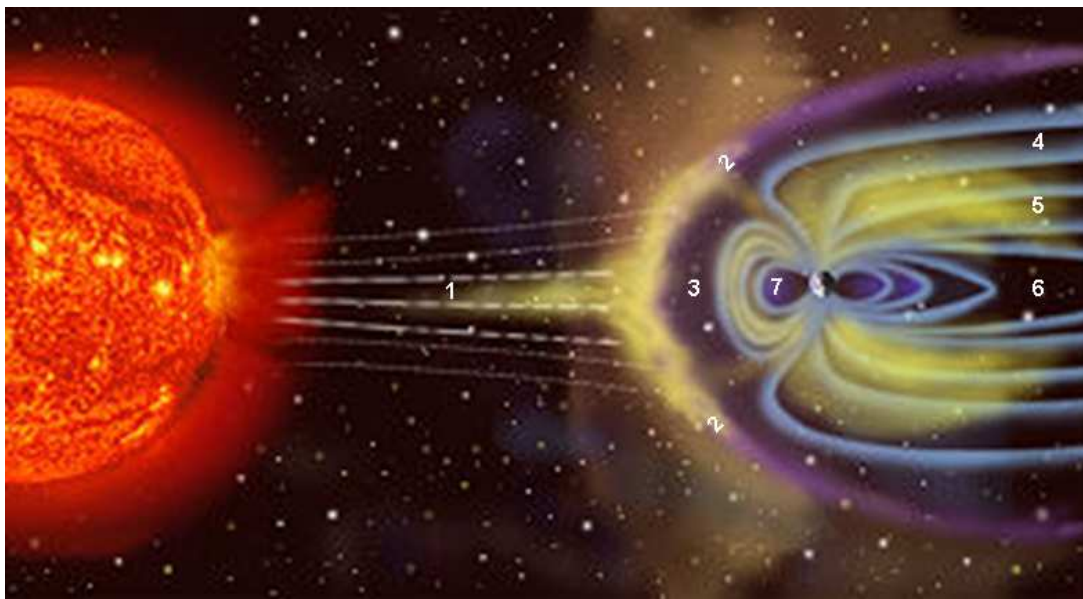


Figura 1.5: Representación esquemática de la magnetósfera: 1 Viento solar. 2 Onda de choque. 3 Región de transición. 4 Magnetopausa. 5 Magnetósfera. 6 Capa de plasma. 7 Región geomagnética.

La energía liberada por el campo eléctrico depende de la cantidad de iones presentes en la ionósfera, estos iones no solo se crean por el Sol (en la parte iluminada de la tierra, se debe a la radiación y viento solar, en la parte oscura solo al viento solar), sino también por otras fuentes. Los “rayos cósmicos” [1, 2, 3], tienen energía relativamente alta (energía promedio de 10 GeV), crean iones durante su trayecto en la atmósfera generando un máximo al haber recorrido unos 15 km. Otras fuentes, son los elementos radiactivos liberados por la corteza terrestre, estos ionizan el aire que se encuentra cerca de la superficie de la tierra, en particular el gas radón alcanza una máxima ionización a una altura de cientos de metros.

La principal fuente de iones en la atmósfera, son los que se generan durante las tormentas eléctricas (esta fuente en última instancia recibe la energía térmica solar). En toda la atmósfera continuamente se generan cerca de dos mil tormentas, la frecuencia de los relámpagos se estima aproximadamente de treinta por segundo. En la figura 1.6, se muestra la distribución de zonas activas con tormentas en la temporada de invierno en el hemisferio norte (Diciembre-Febrero) proporcionado por el GHCC Lightning Research Overview, 2000. Geográficamente, la mayoría de las tormentas eléctricas se generan en las regiones de África y América del sur, debido a la distribución no uniforme de iones de forma espacial y temporal en cada región de la tierra; como consecuencia se crea un campo eléctrico diferente en cada región, sin embargo, los fuertes vientos presentes en la parte alta de la atmósfera, realizan una rápida distribución de los iones en toda la superficie de la tierra; lo que hace que el campo eléctrico se estabilice y sea bastante uniforme teniendo un máximo en el ecuador.

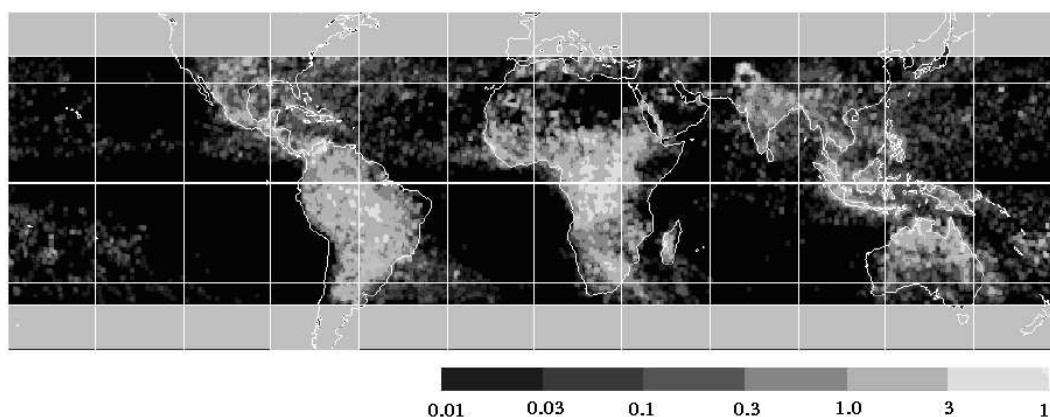


Figura 1.6: Distribución de generación de tormentas eléctricas en la Tierra (relámpagos/km/mes). La escala de grises indica el número de relámpagos observados.

El potencial del campo eléctrico terrestre oscila entre los 200 y 400 kV. En las regiones sin nubes es muy débil y el promedio de corriente es de aproximadamente $4 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$ (el promedio de la corriente terrestre es de aproximadamente 140 kA), esto indica que funciona el generador eléctrico de la tierra, con un promedio de potencia alrededor de 10^3 MW .

Las descargas eléctricas generadas en la atmósfera son acompañadas por emisiones de ondas de radio se crean por perturbaciones que sufre el campo eléctrico durante la descarga (nube-tierra, nube-nube) propagándose a la ionósfera e incluso hasta la magnetósfera. Las ondas de radio son del orden de Hertz, de frecuencias muy bajas, contribuyen bastante en la generación de fenómenos eléctricos atmosféricos, en el flujo del campo eléctrico y magnético de la magnetósfera y en los cambios estructurales de la misma.

Capítulo 2

Destellos electromagnéticos observados en la atmósfera

2.1. Introducción

Los recientes datos experimentales relacionados con los destellos registrados en la parte alta de la atmósfera, revelan que estos cubren un gran volumen (hasta 1000 km^3), abarcando el espectro óptico (ultravioleta, visible, infrarrojo) y radiación gama. Los destellos observados en la parte alta de la atmósfera a una altura de (50-100 km), debido al área que llegan a cubrir es comparable con las dimensiones de turbulencias atmosféricas (abarcen cientos de kilómetros de ancho), estos destellos están relacionados con las tormentas eléctricas, los grandes destellos son los más visibles debido a que su brillantez puede observarse a distancias considerables. Estos destellos, son generados por objetos provenientes del espacio (micrometeoritos), por la aceleración de partículas de alta energía (rayos cósmicos) y por la radiación electromagnética que emiten las tormentas eléctricas que se generan en la atmósfera. La detección y estudio de estos fenómenos luminosos nos permitirá conocer un poco del comportamiento de nuestra atmósfera y al mismo tiempo nos permitirá incrementar la estadística de los mismos.

2.2. Detectores para obtener imágenes de los destellos electromagnéticos.

Históricamente, los primeros destellos (descargas) que se observaron en la atmósfera fueron los relámpagos. Una de sus características del relámpago es que transversalmente es de tamaño pequeño pero su longitud puede alcanzar algunos kilómetros. Desde hace mucho tiempo se ha observado que las descargas eléctricas generadas en la atmósfera son de diferentes tipos. Las características típicas de estas es su resplandor difuso, se exhiben en una gran área y son acompañadas de un gran trueno. Las técnicas modernas para registrar descargas en la atmósfera, comenzó con el uso de detectores ópticos de imágenes que van a bordo de aviones y satélites, con los cuales se ha podido obtener información precisa de la generación de los destellos en la atmósfera. Otra de las características típicas de las descargas es que se exhiben en un gran espacio, resplandeciendo en la atmósfera superior, en la región de la mesósfera donde se encuentra la capa conductora de la ionósfera; las formas espacial y temporal de las descargas son muy variadas. Con ayuda de espectrómetros, se ha podido obtener el rango espectral de luz que emite el relámpago, los datos experimentales que se han obtenido revelan que la luz registrada varía en un amplio rango, desde el visible hasta el ultravioleta, a alturas inferiores a 50 km, a alturas superiores predomina la roja. Otra característica, es que tienen una duración de 1 a 100 ms, en algunos destellos, se puede observar la radiación ultravioleta (longitud de onda 300-400 nm), así como también los rayos X y Gama.

Con cámaras de video especiales (con tiempos de exposición de 10-20 ms) se han obtenido imágenes completas de las descargas de forma espacial y temporal. Las primeras descargas registradas en la parte alta de la atmósfera se realizaron con equipo especial a bordo de los aviones (Sprite-93, Sprite-94, Blue Sand-95 y el más exitoso EXL98) en misiones realizadas por los USA. Con ayuda de cámaras de video colocadas en la superficie y en el aire, se lograron registrar y clasificar algunas formas (tipos) de los destellos generados en la atmósfera (por su espectro de luz emitida, su duración y forma), como son los sprites, los destellos azules y los elfos, como se muestran en la figura 2.1.

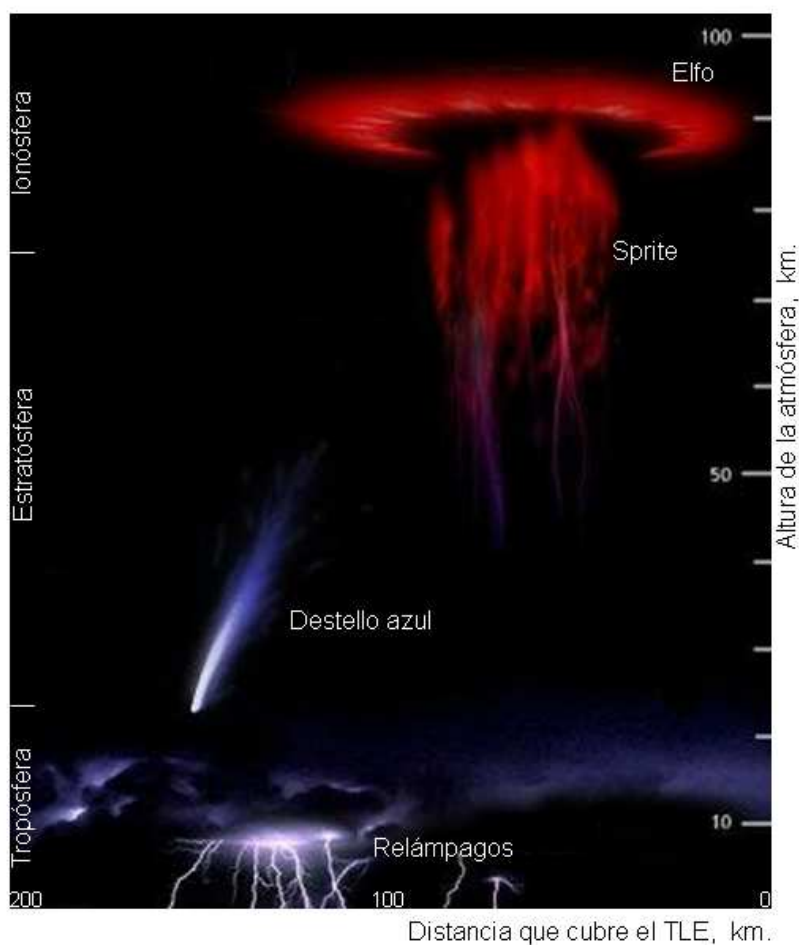


Figura 2.1: Eventos transitorios luminosos, TLEs por sus siglas en inglés.

Los **sprites** son destellos luminosos que se presentan en la parte alta de la atmósfera, en particular en la mesósfera, por lo regular por encima de grandes tormentas eléctricas, aunque el registro de los sprites son pocos, se estima que algunas tormentas los producen en cantidad. Típicamente, cuando la parte superior de las nubes está cargada positivamente y la parte inferior tiene una carga negativa, por lo general la base negativa de la nube es la que produce las descargas a tierra, pero a veces la parte superior, positiva, también puede descargarse a tierra, produciendo rayos de excepcional intensidad. Aproximadamente uno de cada veinte de estos rayos, tienen suficiente energía para producir un sprite, de duración de unas cuantas centenas de milisegundos.

Los **elfos** (elves), son pulsos electromagnéticos producidos por la descarga de fuertes rayos generados por fuertes tormentas eléctricas, son en esencia, intensos destellos de estática de radio que se propagan a la velocidad de la luz en todas direcciones. Cuando el frente de onda esférica, llega a cierta altura en la atmósfera (alrededor de 75 a 100 km), su campo eléctrico acelera los electrones con gran eficiencia haciendo que estos choquen con las moléculas de aire, excitándolas hasta que emiten luz. Este mecanismo genera anillos de luz que se van expandiendo con la intersección del pulso esférico a esta altura de la atmósfera. Esta intersección se ensancha velozmente (de hecho, a la velocidad de la luz), de modo que los anillos en expansión aparecen a la vista en forma de discos, de diámetro de ~ 100 km, con duración de \sim un milisegundo.

Los **destellos azules** (blue jets), se generan en la atmósfera a una altura menor a los 40 km, son difíciles de observar. Se ve una imagen en color que muestra que los destellos tienen un color azul profundo, por lo cual no son tan visibles como los tonos de los sprites y los elfos. Por esta razón la observación de estos fenómenos requiere de observaciones por encima de la parte densa de nubes en la atmósfera. Estos extraños destellos de luz azul fueron registrados por primera vez en una intensa tormenta producida en Arkansas, EEUU, en 1994. Los investigadores continúan intentando incrementar la estadística para explicar exactamente cómo se producen estos fenómenos.

En las figuras 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5, se muestran algunos destellos observados con videocámaras situadas en el aire y teniendo su campo de visión orientado horizontalmente.



Figura 2.2: Destello tipo sprite, generado en la ionósfera, registrado por la misión EXL98, el evento se registró el 22 de julio de 1998 a las 04:57:43, reportado en la tesis de Heavner, 2000. La parte superior del destello es rojo y la parte inferior es azul.

En los últimos años se empezaron a investigar los destellos generados en la parte alta de la atmósfera con ayuda de videocámaras y espectrómetros, instalados en la superficie de la Tierra y a bordo de satélites artificiales, Con instrumentación de las instalaciones ISUAL, colocados en la superficie terrestre y a bordo del satélite ROCSAT-2 et. al. 2005, se logró registrar la radiación electromagnética en el rango de longitudes de onda desde el UV hasta el IR, como se muestra en la figura 2.6.

En la figura 2.7 y 2.8, se muestra la imagen y los perfiles del destello de un elfo, obtenido con una videocámara y un espectrómetro, con instrumentos de ISUAL.

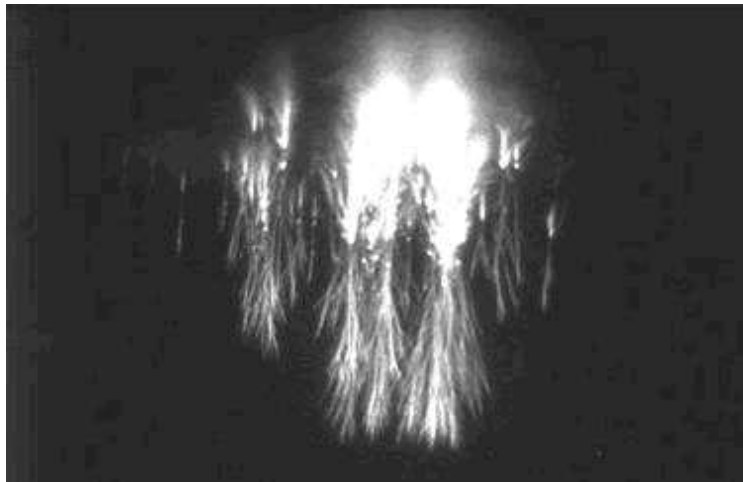


Figura 2.3: Imagen de un Sprite registrado en el año 2005, del trabajo de Cummer et. al. 2005.

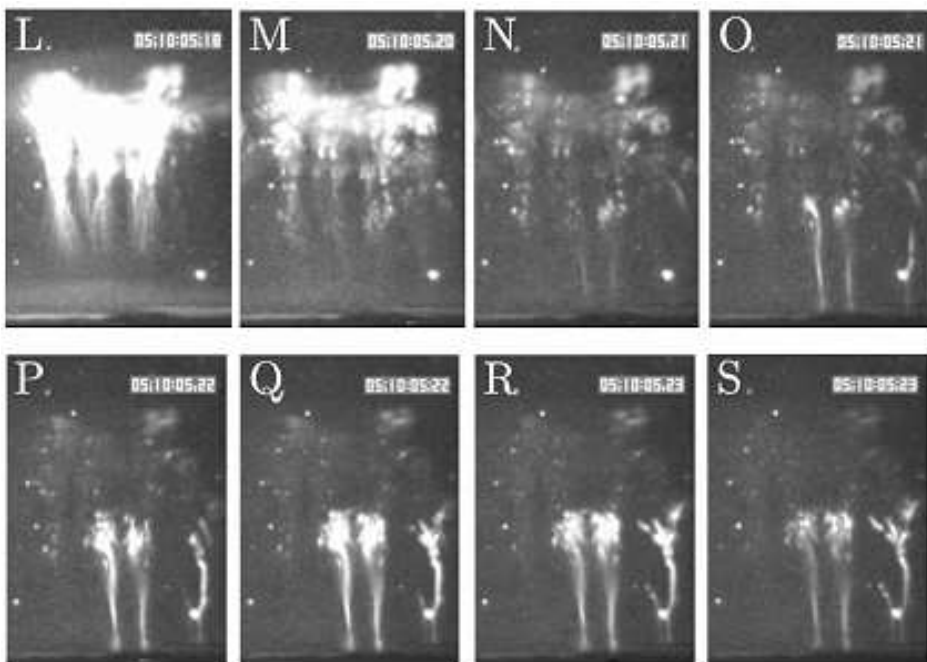


Figura 2.4: Diversas formas de sprites registrados con duración de unas cuantas decenas de milisegundos (reportados en la tesis de Heavner, 2000).

Las observaciones han demostrado que la mayoría de los destellos que se presentan en la parte alta de la atmósfera surgen cuando hay tormentas eléctricas, en algunos experimentos las videocámaras graban todo el desarrollo de las tormentas y posteriormente se seleccionan los eventos de interés. En otros experimentos dependiendo de la brillantez del destello, es como se examina la forma del mismo (de esta manera se puede conocer si el destello se generó entre nube y tierra, o entre nubes).

Los datos obtenidos con aparatara de ISUAL, que funcionaron durante las tormentas, han permitido realizar una distribución geográfica de cada tipo de destello, como se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.5: Destello azul, por lo general es mayor el tiempo de exposición (cientos de milisegundos) de estos destellos comparados con los sprites.

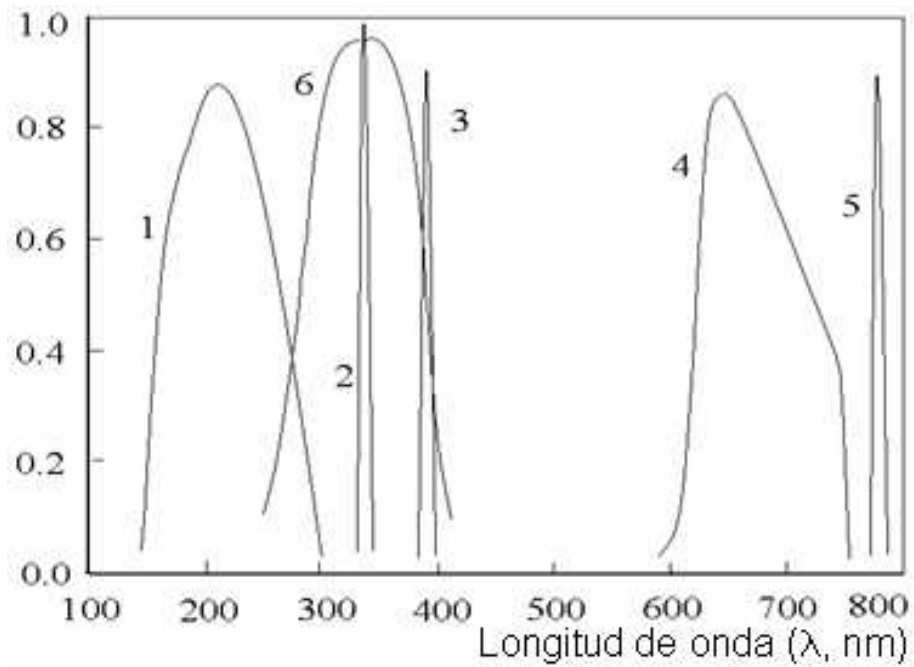


Figura 2.6: Rangos de longitudes de onda registrados por espectrómetros (Datos recopilados por la aparatara de las instalaciones ISUAL).



Figura 2.7: Imagen de un Elfo, registrado por los detectores (videocámara) de ISUAL.

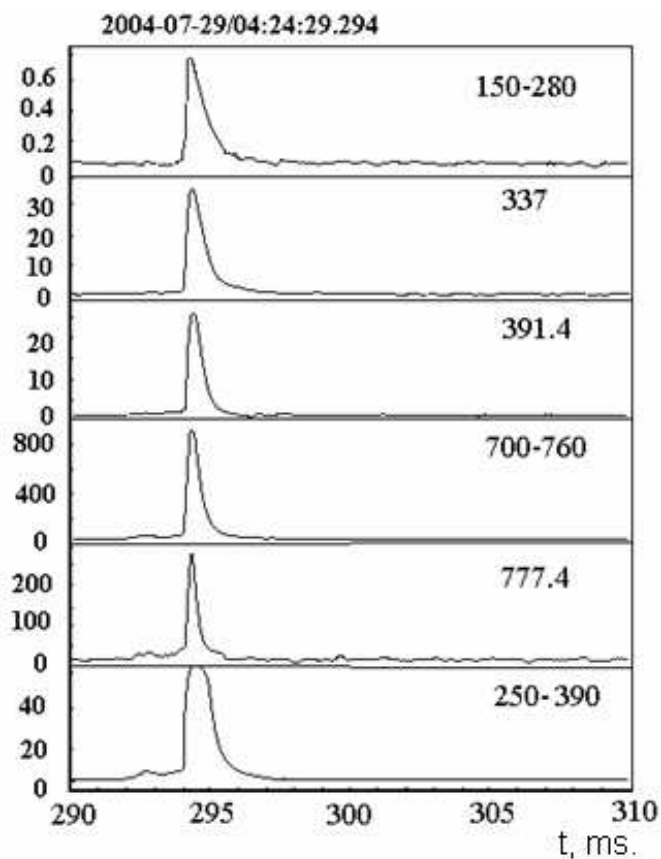


Figura 2.8: Señales registradas por los detectores ISUAL, en distintas longitudes de onda correspondientes a la imagen del elfo de la figura 2.7, se observa que el destello tiene una duración de varios milisegundos y emite en varias longitudes de onda, desde el UV hasta el IR.

Al mismo tiempo, los destellos tipo Elfo, los registro el experimento ISUAL. En la superficie y en los océanos, durante una alta actividad de tormentas eléctricas, la distribución geográfica se muestra en la figura 2.10.

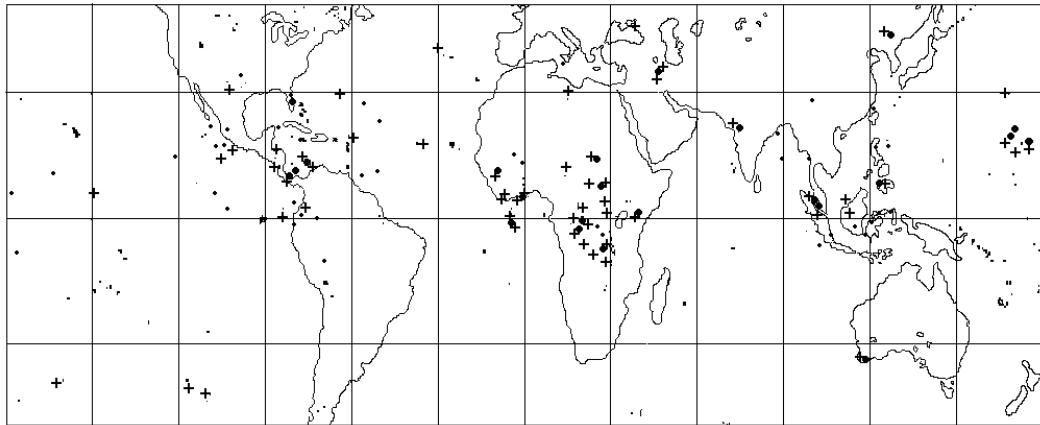


Figura 2.9: Distribución geográfica de los destellos registrados, (+) sprites individuales, (●) grupo de sprites datos de ISUAL año 2004. (Comparado con la distribución de destellos, figura 3).

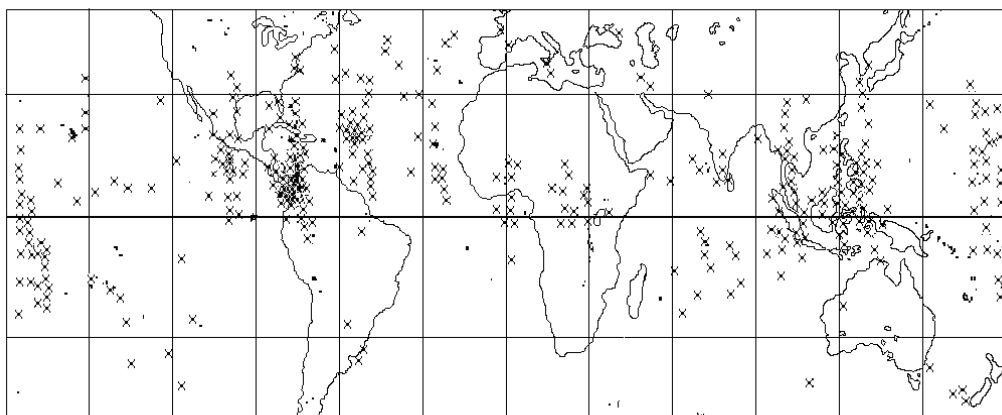


Figura 2.10: Distribución geográfica de Elfos registrados (x), datos de ISUAL, año 2004.

Capítulo 3

Detectores UV espaciales y terrestres

3.1. Introducción

En este capítulo, presentamos un resumen de la radiación ultravioleta registrada en la parte nocturna de la tierra, con experimentos científicos, desde el espacio, abordo de dos satélites de la Universidad Estatal de Moscú (el satélite Universitario “Tatiana” y “Tatiana-2”) y desde la superficie, con las cámaras de fluorescencia del observatorio Pierre Auger en Argentina. También presentamos una descripción de los instrumentos científicos para la detección de la radiación UV observada en el campo de visión de cada detector, al final mostramos la reconstrucción de datos experimentales de algunos eventos luminosos observados en la parte alta de la atmósfera. Los eventos luminosos transitorios (TLEs por sus siglas en ingles) se desarrollan rápidamente, de uno a unas cuantas centenas de milisegundo, abarcan enormes dimensiones, desde decenas a cientos de kilómetros. El brillo que generan los TLEs muestran la enorme energía que liberan en la atmósfera. La brillantez y longitud de onda en la que radian, esta relacionada con la energía de los electrones presentes en el medio, estos fenómenos tienen características de una explosión atómica y representan un peligro para los objetos que transitan en la parte alta de la atmósfera. Se espera que los datos obtenidos abordo de satélites artificiales y con experimentos terrestres, permitan comprender la naturaleza de los TLEs y la constante variación de radiación a alturas de 100 a 1000 km, las cuales influyen en las radiocomunicaciones, en la seguridad de vuelo de aviones y aeronaves. Este es un tema interesante que atrae la atención de varios científicos, para participar activamente en la creación de nuevas técnicas para estudiar de manera constante el comportamiento de nuestra atmósfera.

3.2. El satélite artificial Universitario “Tatiana”

Los instrumentos científicos (carga útil) abordo del satélite universitario “Tatiana” se desarrollaron en el Instituto de Física Nuclear de la Universidad Estatal de Moscú. Este satélite se realizó para conmemorar el 250 aniversario de la Universidad Estatal de Moscú. El aparato cósmico se puso en órbita el 20 de Enero del 2005 y operó con éxito hasta el 7 de marzo del 2007. El microsátélite estuvo girando en una órbita polar heliosincrónica, a una altura de ~ 950 km, a 82° de inclinación, peso de 25 kg, consumía 7 watts de potencia el voltaje de alimentación fue de 12.18 V, el flujo de información fue mayor a los 100 kbits/día. A bordo del satélite universitario “Tatiana” se instaló el detector de radiación ultravioleta DUV [10] (UV - longitud de onda de 300 a 400 nanómetros), diseñado para monitorear la luz de fondo atmosférica y la detección de TLEs. El detector de radiación UV a bordo del satélite artificial universitario “Tatiana” observó en la atmósfera un área circular de ~ 250 km de diámetro, el detector DUV almacenó los datos cuando la trayectoria del satélite entraba a la parte nocturna del planeta, en esta región la electrónica del detector tenía un control automático de ganancia del PMT con respecto a la luz de fondo detectada y de la brillantez de

los eventos observados en el campo de visión, continuaba con la detección hasta que pasaba al lado de día del planeta. El eje del campo de visión del detector UV siempre estuvo orientado hacia el centro de la tierra “nadir”, vea la figura 3.1. La transparencia de la atmósfera y la ionósfera en el rango de longitudes de onda de 300-400 nanómetros es alta, lo que permitió estudiar la fluorescencia con gran eficiencia. La órbita circular polar permitió que el satélite realizara la observación en prácticamente cualquier punto geográfico del planeta.

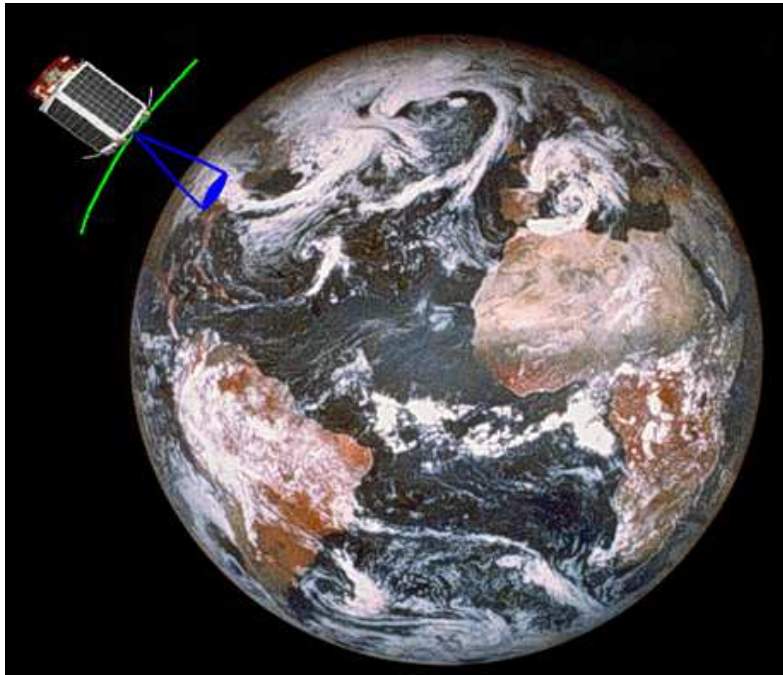


Figura 3.1: El satélite Universitario “Tatiana”. El eje del campo de visión del detector UV estuvo orientado hacia el centro de la tierra “nadir”, en la trayectoria del satélite el detector observaba en la atmósfera un área circular de ~ 250 km de diámetro.

El detector de radiación ultravioleta era un tubo fotomultiplicador (PMT por sus siglas en inglés), de alta eficiencia cuántica en la región UV y rapidez de respuesta. El PMT que se utilizó fue el R1463 con fotocátodo multialcalino y cristal reforzado, el cual le permitió trabajar de forma estable en un amplio rango de temperaturas, el PMT cumplió con todas las especificaciones para ser considerado en el experimento cósmico. La información más detallada del PMT se encuentra en [11]. La luz con longitudes de onda mayores a 400 nanómetros se atenuó en su totalidad colocando en la ventana del PMT el filtro UFS-1 (de 2.5 milímetros de espesor). El fotomultiplicador R1463 es de alta ganancia y permitió detectar señales correspondientes a un fotoelectrón. El diagrama a bloques del detector de radiación ultravioleta (DUV) se muestra en la figura 3.2. Se puede observar el colimador en la entrada del fotomultiplicador principal (orificios de diámetro de 0.5 milímetros y el espesor de la placa de 2 milímetros), el fotocátodo tenía un área efectiva $S=0,4 \text{ cm}^2$, el campo de visión del detector fue de 14.3° , que corresponde a un ángulo sólido $\omega = 0,06 \text{ sr}$. Un segundo PMT, estaba sellado completamente de la luz y idéntico al primero, este PMT se utilizó para registrar el paso de partículas cósmicas a través de la ventana de vidrio del PMT, detectando la luz Cherenkov que se produce y para medir la variación del flujo de partículas a lo largo de la trayectoria del satélite, pues se considera que puede ser una contribución significativa a la emisión de radiación UV de fondo observado en la atmósfera. Presumiblemente la luz de fondo real es la diferencia de lo que detectaron ambos PMTs.

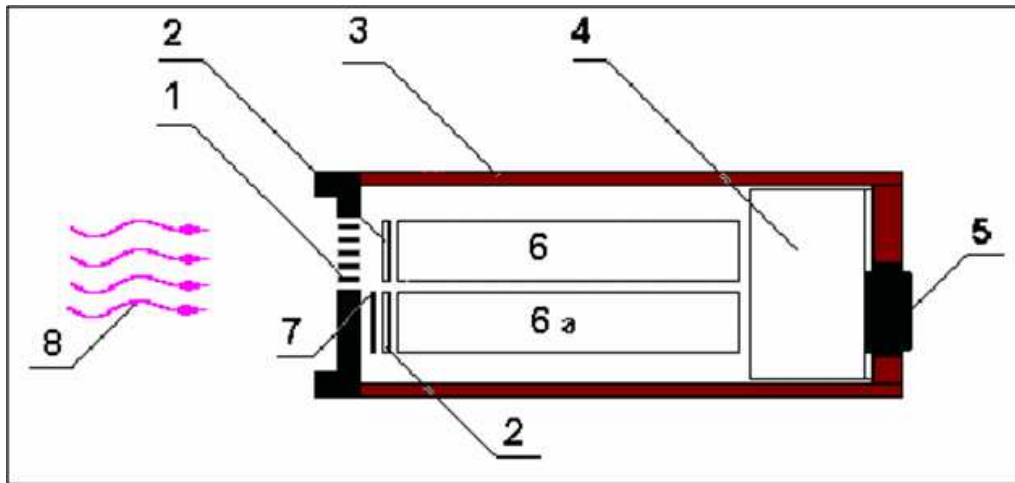


Figura 3.2: El detector ultravioleta (DUV). 1- Colimador. 2- Filtros UV. 3- Caja del detector. 4- Electrónica. 5- Conector de alimentación y cable de datos. 6- PMT con la ventana abierta. 6a- PMT con ventana cerrada. 7-Cubierta del PMT 6a. 8-Flujo de fotones UV.

Las señales de cada fotomultiplicador son enviadas a dos entradas de un multiplexor analógico de 4 canales posteriormente son digitalizadas con un convertidor de analógico a digital (ADC), de 2 mV de resolución y 1 MHz de frecuencia de muestreo. El código digital del ADC se envía al bloque lógico programable FPGA de la empresa Xilinx, el cual se encarga de seleccionar eventos y almacenarlos en su memoria. El sistema de control se muestra en la figura 3.3, en el sistema electrónico del detector DUV, se implementaron cuatro integradores de señal (osciloscopios), el primero almacenaba la información cada $16 \mu\text{s}$, el segundo cada $256 \mu\text{s}$, el tercero cada $4096 \mu\text{s}$ y el cuarto cada 64 ms , como se muestra en la figura 3.4, de esta manera se lograron registrar los eventos de mayor duración.

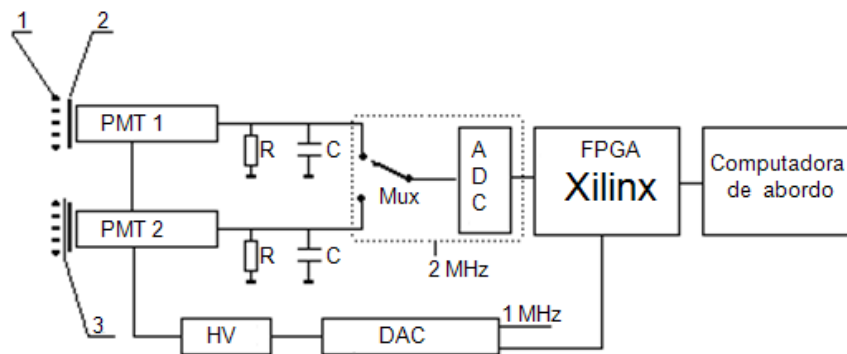


Figura 3.3: Diagrama a bloques del detector UV. 1- Colimador. 2- Los filtros UV. 3- Protector de luz del segundo PMT.

Desafortunadamente en esta misión espacial la capacidad de telemetría no permitió el almacenamiento completo de los datos de todos los TLEs registrados en la parte nocturna de la órbita, hacia la estación terrena se transmitieron los datos correspondientes del evento más energético, registrado en la región nocturna de cada órbita.

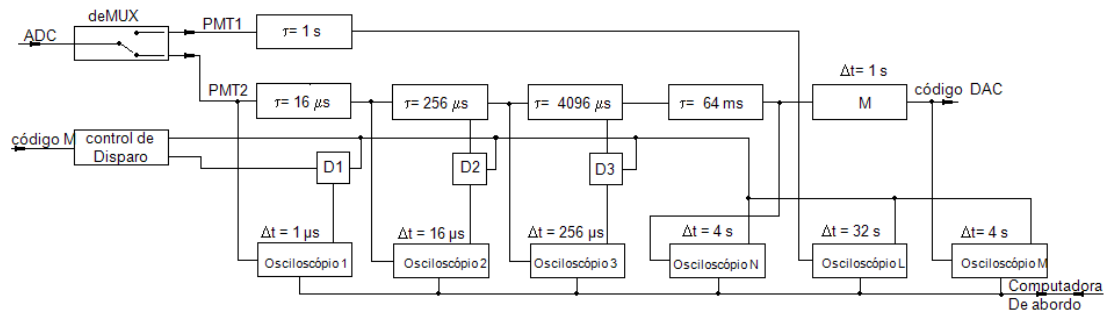


Figura 3.4: Diagrama a bloques de los osciloscopios implementados en el FPGA, para obtener eventos de mayor duración.

La intensidad de radiación UV se determina mediante el registro del código M, la ganancia del PMT y el código N que se obtiene del ADC. La calibración correspondiente a un fotoelectrón esta relacionada con la intensidad UV y se determinan por la siguiente fórmula:

$$I_{uv} = 5.2 \times 10^{16} N / (M^{6.45} T) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \dots\dots\dots(1)$$

Algunos eventos UV registrados con duración de 4 y 64 milisegundos se muestran en las figuras 3.5 y 3.6 para estos intervalos de tiempo puede observarse desde uno hasta varios pulsos de diferentes amplitudes.

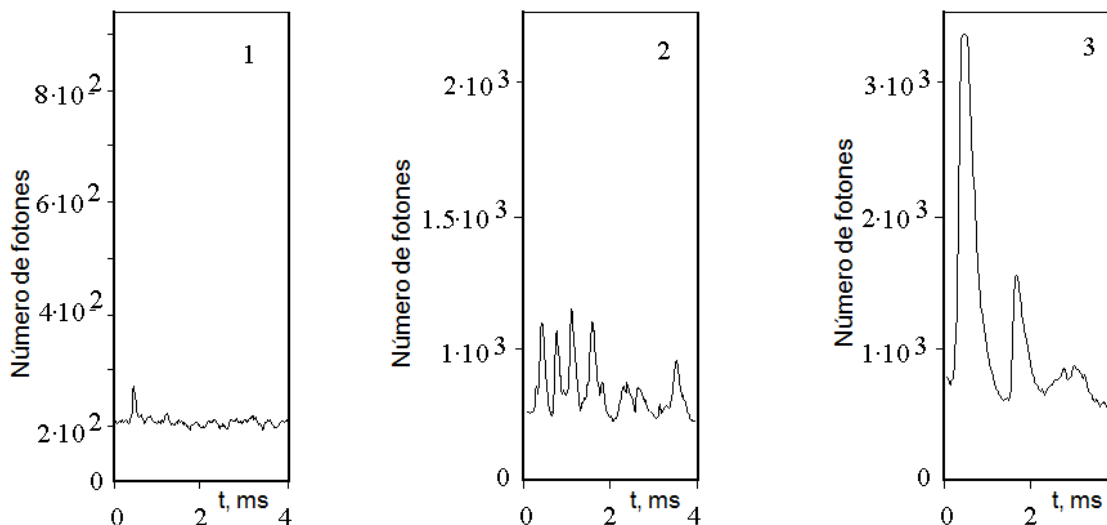


Figura 3.5: Ejemplo de eventos UV registrados en un intervalo de tiempo de 4 milisegundos, con tiempo de muestreo de 16 microsegundos. 1- Pulso registrado. (2,3)-Nivel de fondo y pulsos consecutivos.

De la formula (1), al interpretar los códigos M y N en intensidad UV, se obtienen los resultados que se muestran en las figuras 3.7 y 3.8. En estas gráficas, el eje de las abscisas es el número de mediciones realizadas (en incrementos de 4 segundos), el eje de las ordenadas representa la intensidad UV en fotones/cm²s sr.

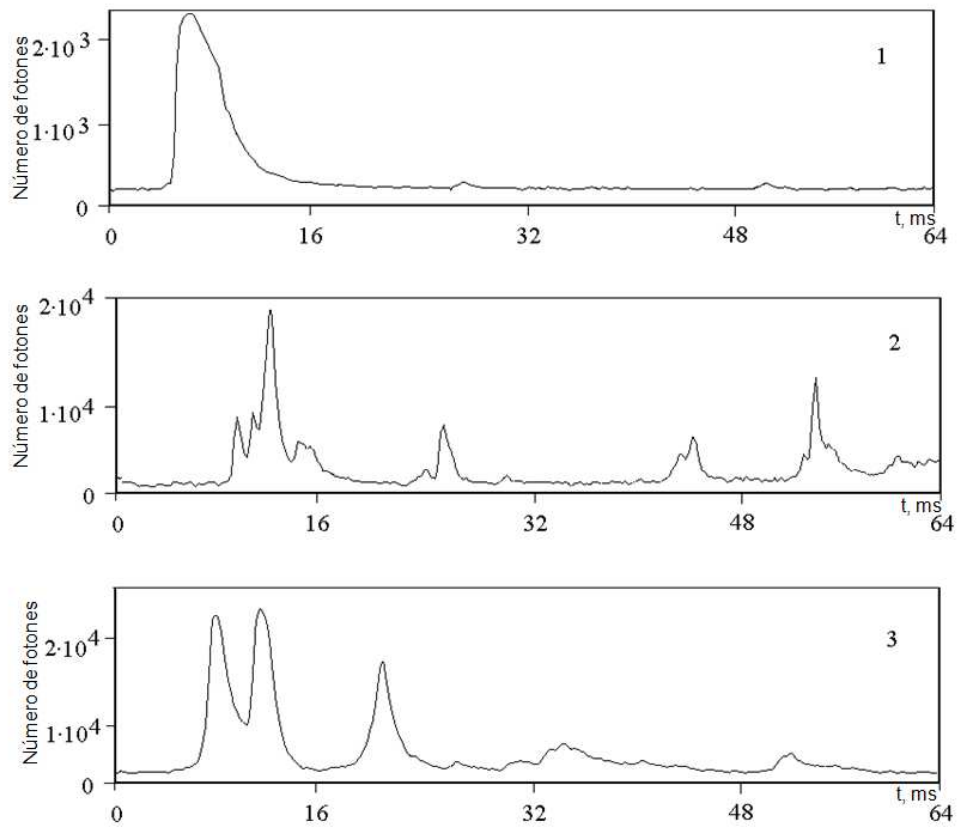


Figura 3.6: Ejemplo de eventos UV registrados en un intervalo de tiempo de 64 milisegundos, frecuencia de muestreo $256 \mu s$. 1- Ejemplo de registro de un solo pulso UV. (2,3)-Serie de pulsos consecutivos después de registrarse uno de gran amplitud.

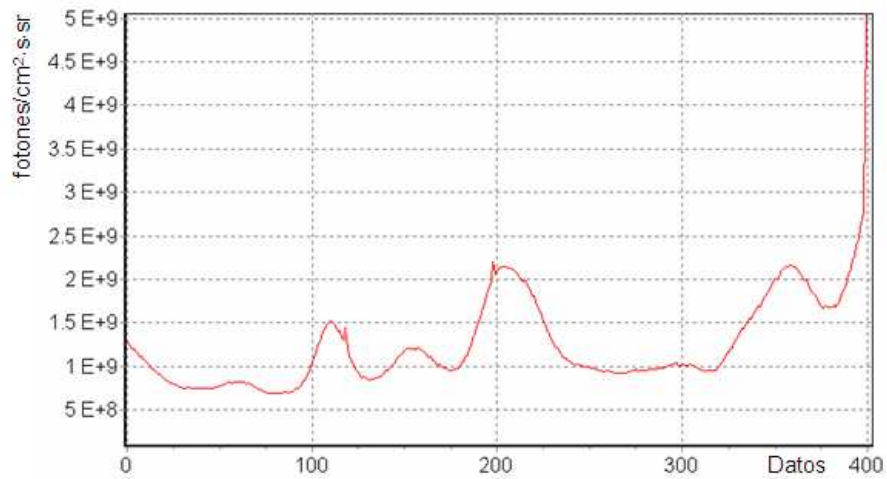


Figura 3.7: Intensidad de radiación UV detectada durante la trayectoria de vuelo en la región nocturna de la atmósfera terrestre, con Luna llena.

Los resultados muestran que durante el trayecto del satélite en la órbita, al entrar y salir de la parte nocturna del planeta, la intensidad UV cambia rápidamente, en la región nocturna varía con respecto al valor

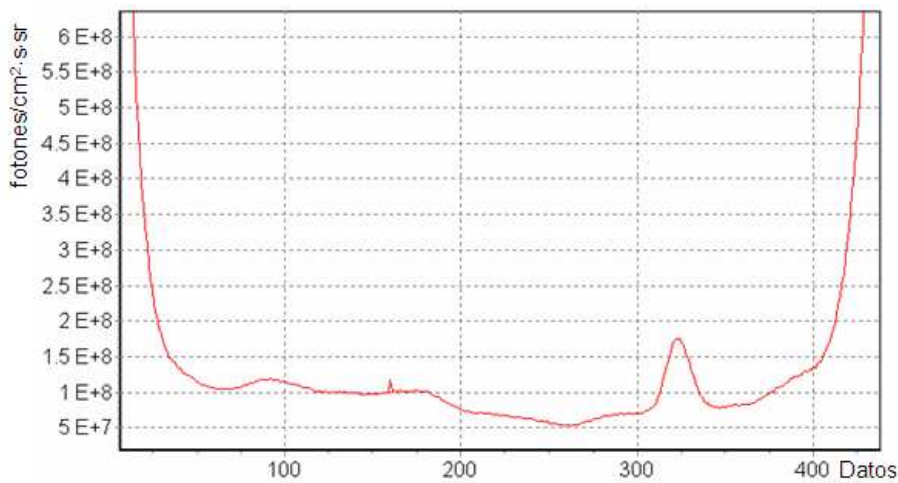


Figura 3.8: Intensidad de radiación UV detectada durante la trayectoria de vuelo en la región nocturna de la atmósfera de la tierra, con Luna nueva.

promedio correspondiente a la intensidad de luz UV de las estrellas, de los TLEs, de la intensa iluminación de las grandes ciudades e industrias, de las diferentes fases de la Luna (la dispersión de esta luz en las nubes y en la superficie de la tierra con el mar) etc. Debido a esto, tenemos como resultado los pulsos que se muestran en las últimas dos gráficas. Como se puede observar, el promedio de la intensidad de radiación UV durante el trayecto no es directamente proporcional a la fase de la Luna, figura 3.9, debido a que la intensidad de radiación UV para cada fase depende de su posición angular por encima del horizonte $\sigma = 90^\circ - \theta$ (θ es el ángulo cenital de la Luna). La intensidad UV debe ser proporcional al área iluminada de la Luna, pero para fases mayores, la intensidad UV depende de la altura a la que se encuentra nuestro satélite natural. La Luna llena se puede observar claramente a alturas en el rango $\sigma \sim 45^\circ$ - 90° .

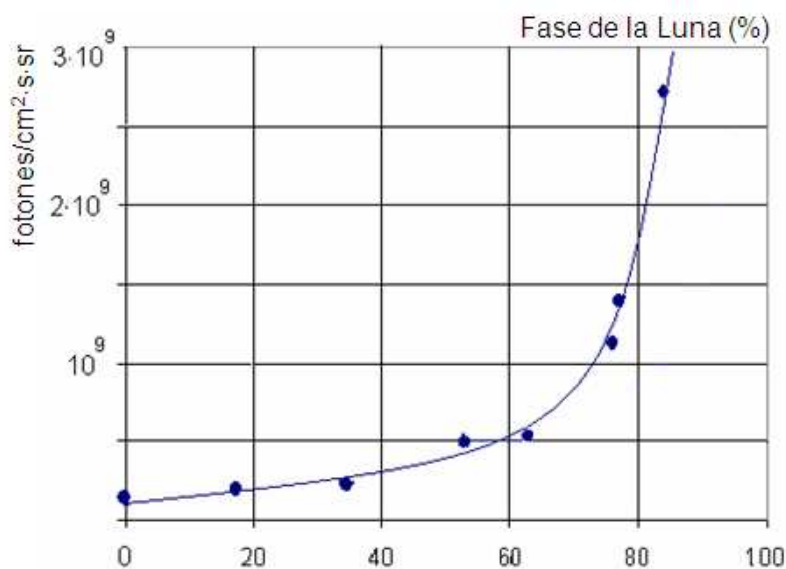


Figura 3.9: Intensidad promedio de radiación UV de las diferentes fases de la Luna. Las abscisas representan la fase (en %), La ordenada indica la intensidad UV en unidades de fotones/cm²s sr.

3.3. El satélite artificial Universitario “Tatiana-2”

El segundo satélite universitario “Tatiana-2”, creado en la Universidad Estatal de Moscú, trabajó exitosamente en la órbita desde Septiembre del 2009 hasta Enero del 2010. Los instrumentos científicos que llevo a bordo eran para estudiar el desarrollo espacial y temporal de los TLEs en varias longitudes de onda [12, 13] y para medir la carga de las partículas presentes en la órbita del satélite. Los aparatos científicos se elaboraron en colaboración con algunos centros de desarrollo e investigación científica y educativa. El instituto de Física Nuclear de la Universidad Estatal de Moscú-Rusia, fue la que coordinó la misión, la Universidad de las Mujeres de Seúl-Corea y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla México, participaron en los experimentos.

En el satélite Universitario “Tatiana-2” las mediciones se realizaban cada minuto. La configuración del detector de radiación UV fue idéntica a la que estuvo a bordo del satélite Universitario “Tatiana”. A este satélite se le incluyó un detector de radiación para las longitudes de onda roja e infrarroja, lo que permitió ampliar el rango de observación de los TLEs [14]. Uno de los principales resultados que se obtuvieron fue la ubicación de los TLEs en el mapa terrestre [15], en el que se observa que el Ecuador es la zona donde se registran más, debido a que en esta región las tormentas eléctricas tienen mayor actividad también en algunas regiones de América del sur, África Occidental y el sur de Asia.

La instrumentación científica a bordo del satélite Universitario “Tatiana-2” constó de tres módulos de detección: el detector ultravioleta y rojo-infrarrojo (DUFIK, por sus siglas en Ruso), el medidor del flujo de partículas (FZK, por sus siglas en Ruso), el telescopio basado en la tecnología de espejos micro-electro-mecánicos (MTEL, por sus siglas en Inglés) y una unidad de telemetría y comandos (BI), como se muestra en las figuras 3.10-3.11. Las características principales de cada detector se muestran en la tabla 3.1.

Detector	Tipo	Campo de visión	Longitud de onda, nm	Mbits/s
DUF	PMT	16°	240-400	1.5
IK	PMT	16°	610-800	1.5
FZK	Plástico centellador	Vea el texto	e ⁻ E>1 Mev	1.5
MTEL Telescopio	PMT	14°x14°	300-400	50
MTEL Espectrómetro	PMT	14°x14°	300-900	4

Tabla 3.1: Aparatos científicos a bordo del satélite Universitario “Tatiana-2”. Características principales.

El detector de radiación ultravioleta y rojo DUFIK, se muestra en la figura 3.12, Utilizó dos fotomultiplicadores de la empresa Hamamatsu serie R1463 (PMT1 y PMT2), La longitud de onda detectada se limitó en un rango de observación, con un filtro de luz UFS1 de 240 a 400 nanómetros y otro con el filtro KS11 de 610 a 800 nanómetros, ambos de 2 milímetros de espesor. El ángulo de visión de ambos detectores fue de 16°, utilizaron un colimador, el eje del campo de visión siempre estuvo orientado hacia el centro de la tierra, el diámetro de observación en la atmósfera fue de ~230 kilómetros. La intensidad de radiación atmosférica se midió cada minuto. La electrónica obtuvo perfiles temporales con tiempos de integración de 30 μ s. En la parte digital, el tiempo de muestreo de la señal se realizó cada 1 μ s, debido a la gran cantidad de datos para la telemetría, el almacenamiento de los datos se realizó cada milisegundo, de esta manera, por minuto se obtuvieron 128 datos, vea la figura 3.13, el algoritmo del sistema, en el intervalo de tiempo de un minuto, almacenó el evento de mayor amplitud y además, se consideró que el código N fuese mayor a 16. Se obtuvieron eventos de varias intensidades debido a la periódica retroalimentación entre el alto voltaje y la ganancia del PMT, el tiempo de autorregulación del alto voltaje se realizaba automáticamente cada minuto. El sistema realizó mediciones en dos longitudes de onda, algunas veces se detectó radiación IR durante el registro del evento UV [16].

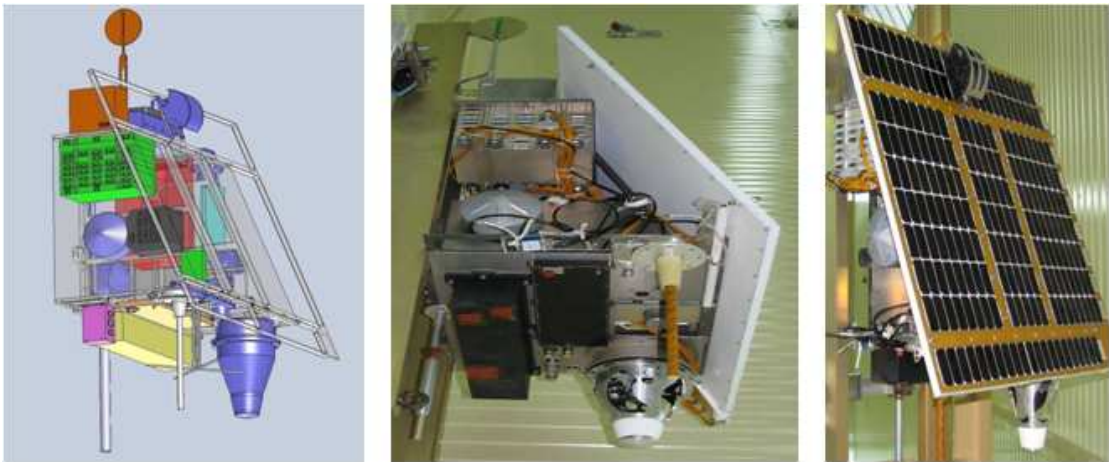


Figura 3.10: Izquierda- Estructura del satélite. Centro- Ubicación de los detectores DUFIK-caja negra plana y MTEL, caja negra rectangular. Derecha- Paneles solares que abastecieron de energía la misión espacial.

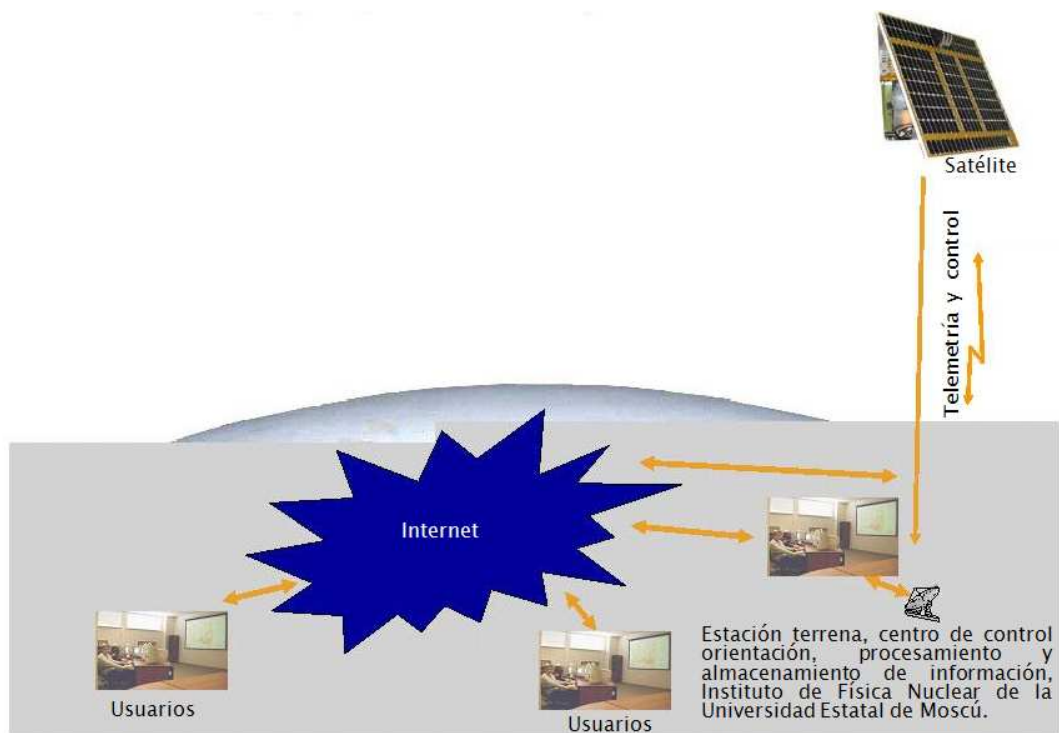


Figura 3.11: Telemetría de datos y control, entre el satélite universitario “Tatiana-2” y la estación terrena.

El detector de partículas cargadas FZK. El detector realizó mediciones en la órbita durante el tiempo que operó el satélite, las características del mismo se muestran en la figura 3.14, consta de una placa centelladora de 5 milímetros de espesor, 350 cm^2 de área con umbral de energía de $\sim 1 \text{ MeV}$, los electrones con energía mayor al umbral, generan fotones en el plástico centellador los cuales son colectados por la guía de luz (fibra óptica) y transportados hasta el fotocátodo del fotormultiplicador (PMT3), con características idénticas al DUFIK. La electrónica que utilizó formó parte del detector DUFIK, como se muestra en la figura 3.15. Las mediciones se realizaron en el trayecto del satélite cada minuto y en paralelo con el detector DUFIK.

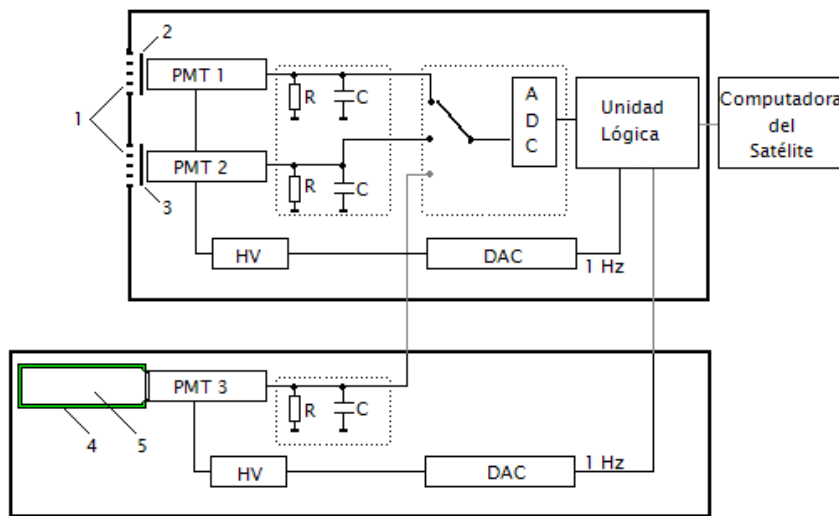


Figura 3.12: Diagrama a bloques del detector ultravioleta-rojo-infrarrojo y contador de partículas (DUFIK y FZK). 1 – Colimador. 2 - Filtro UV. 3 – Filtro rojo-infrarrojo. 4- Guía de luz. 5- Plástico centellador (área 350 cm², espesor 0.5 cm, umbral de energía promedio 1 MeV).

Para este detector los electrones al colisionar con el plástico centellador, internamente generaban una gran cantidad de fotones proporcional a la carga de las partículas. De la misma manera que el DUFIK, para poder medir partículas con mayor carga, cada minuto se autorregulaba el alto voltaje que polarizaba el PMT, se almacenaron 128 datos en el intervalo de tiempo de un minuto, después, de que se estabilizara la fuente de alto voltaje, paralelamente el DUFIK almacenó el evento más energético. Bajo esta condición se obtuvieron los perfiles temporales de radiación UV, IR y flujo de electrones en la órbita. De esta manera se pudieron etiquetar en latitud y longitud los TLEs registrados. El detector de partículas cargadas se diseñó para medir el flujo de electrones que existió a la altura de la órbita del satélite y el DUFIK para medir la radiación UV y IR, en la atmósfera nocturna del planeta, desde noches sin y hasta con Luna llena, la región de las auroras boreales y transiciones noche-día-noche.

El instrumento MTEL, para estudiar los fenómenos luminosos transitorios, constaba de un **telescopio T** y un **espectrómetro S**, mostrados en la figura 3.16.

El **telescopio T** se diseñó con micro espejos de silicio, trabajó en el rango de radiación ultravioleta (300 a 400 nm), tuvo un campo de visión de 14°, Utilizó como fotodetector, el fotomultiplicador de 8x8 pixeles las dimensiones de cada pixel eran de 2.5x2.5 mm, procesaba la imagen de un micro-espejo (de tamaño igual al del pixel) que estaba a una distancia focal f de separación del fotomultiplicador, la configuración integraba dos telescopios en uno solo, el primer telescopio tenía una distancia focal f de 9 cm, al considerarse una distancia de 800 km del satélite hasta la posición donde se supone se generan los eventos, cada pixel observaba en la atmósfera un área de 20x20 km², la matriz de 8x8 pixeles cubría un área total de observación de 160x160 km². Este telescopio tuvo la capacidad de observar eventos que durante su desarrollo, cubrían una gran área en la atmósfera. Para poder observar los eventos que abarcaban un área menor, se tuvo una segunda configuración, un telescopio con distancia focal de 36 cm, considerando la misma distancia a la que se genera el evento, como en el primer telescopio, cada píxel observaba en la atmósfera un área de 5x5 km², el arreglo de 8x8 pixeles cubría un área total de 40x40 km². Para controlar el campo de visión de 14° los micro-espejos se controlaron con sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS por sus siglas en ingles). El funcionamiento detallado de este telescopio se describe en [17].

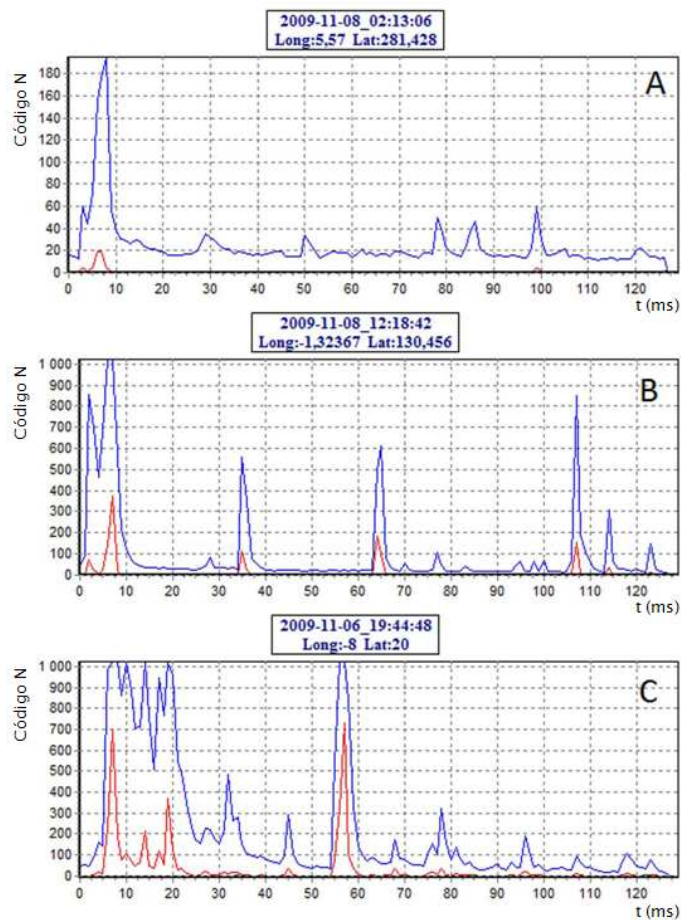


Figura 3.13: Perfiles temporales obtenidos de eventos en longitudes de onda UV e IR [16].

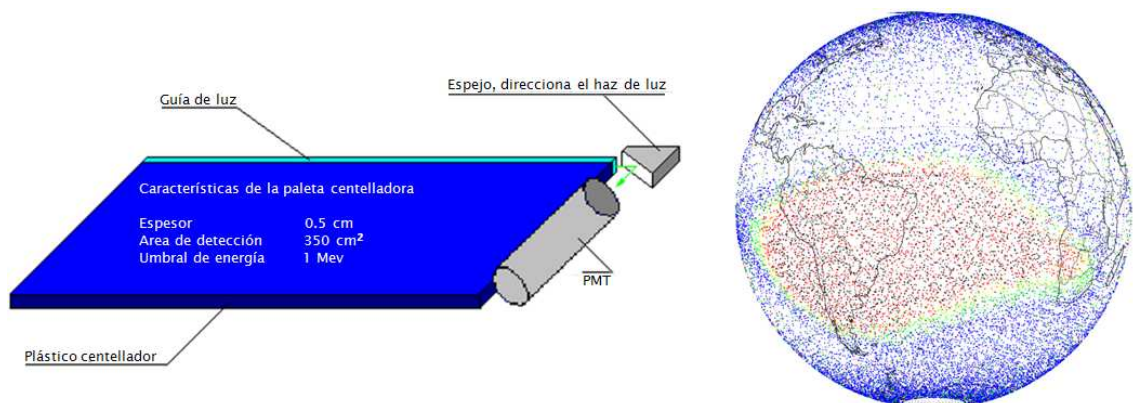


Figura 3.14: (Izquierda) El detector de partículas cargadas FZK, (Derecha) Reconstrucción de la anomalía de Brasil con datos crudos obtenidos por el propio detector.

El **espectrómetro S** se utilizó para monitorear el flujo de fotones en diferentes longitudes de onda, para ello se ocuparon 8 filtros distintos, cada uno cubrió 1/8 del área fotosensible del PMT; el espectrómetro tenía un campo de visión de 14°, observó a través de un orificio de 4 mm, el filtro estuvo a 14 mm del fotocátodo del

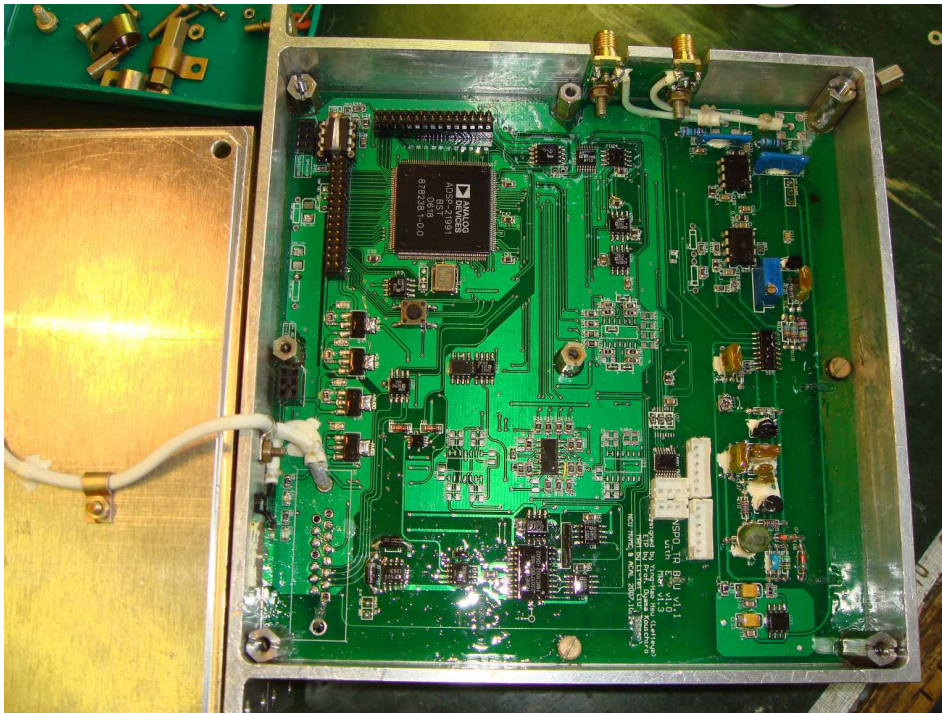


Figura 3.15: Electrónica del detector DUFIK y FZK.

fotomultiplicador, la longitud de onda de cada filtro tenía múltiplos de 75 nm, con el que se cubrió el rango desde 300 hasta 900 nm. La detección de fotones en diferentes longitudes de onda estuvo determinada por la sensibilidad espectral del PMT y por las calibraciones realizadas en el laboratorio. La electrónica del espectrómetro procesaba las señales de cada canal similar a la electrónica del DUFIK. La descripción detallada de los instrumentos científicos que operaron en el satélite universitario “Tatiana-2” se encuentran en [13], así como en <http://space.msu.ru>. En la Figura 3.17-3.18 se muestran los eventos transitorios que se esperaban detectar en la atmósfera.

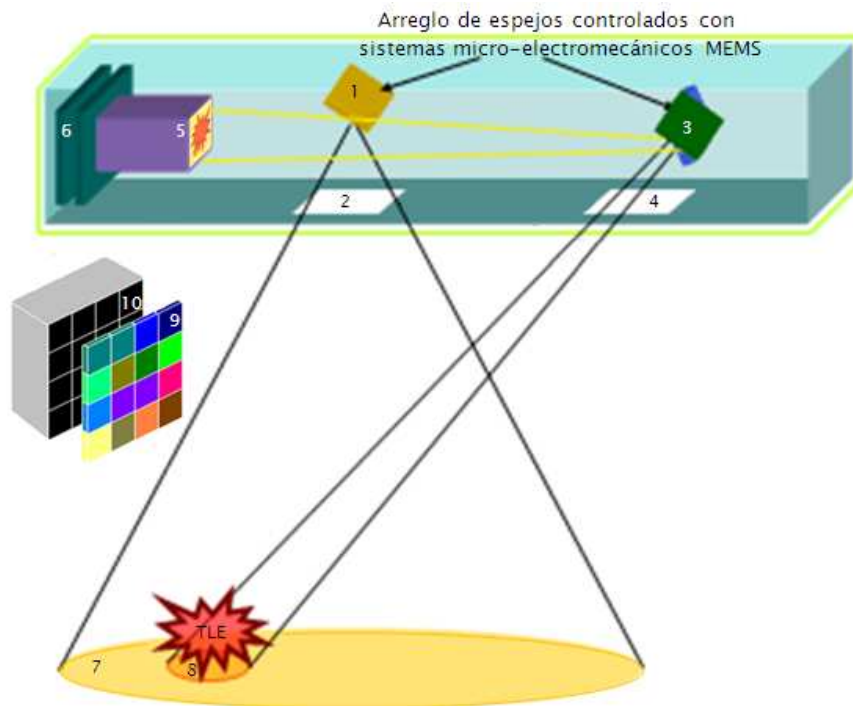


Figura 3.16: El experimento MTEL, telescopio T, 1 y 3- espejos de los telescopios, con tecnología MEMS para el control de su orientación. 2 y 4- Ventanas de observación. 5- Fotomultiplicador multiánodo de 8x8 pixeles. 6- Electrónica de los telescopios. 7 y 8- Área observada en la atmósfera por ambos telescopios. El espectrómetro S: 9 y 10- Arreglo de filtros de diferentes longitudes de onda y fotomultiplicador multiánodo utilizado para el espectrómetro.

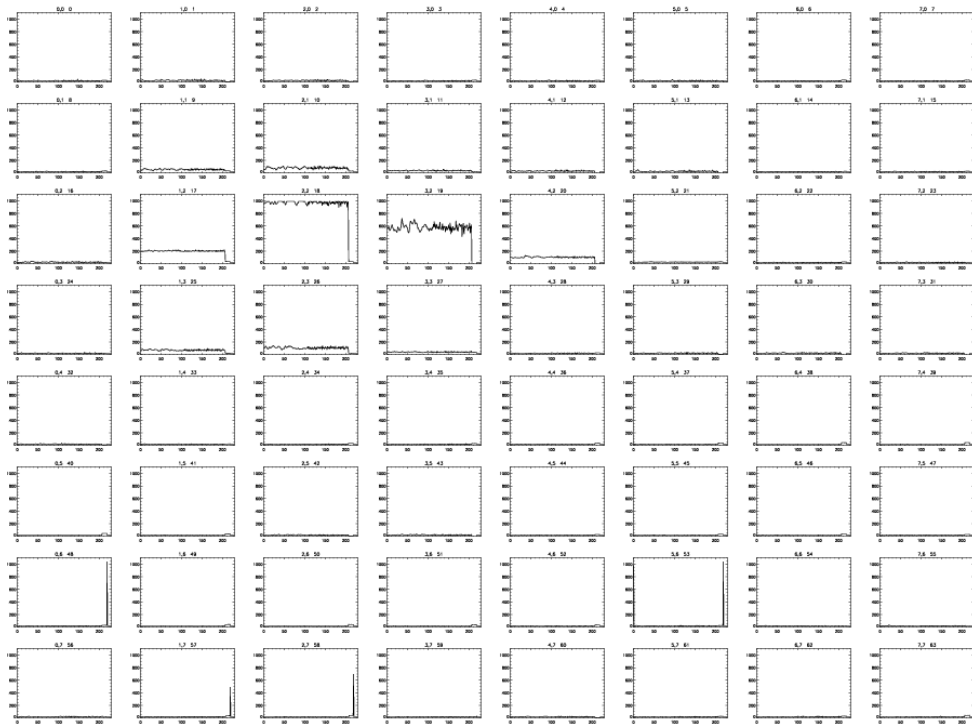


Figura 3.17: Evento observado en los 8x8 pixeles del telescopio de distancia focal $f=9$ cm [17].

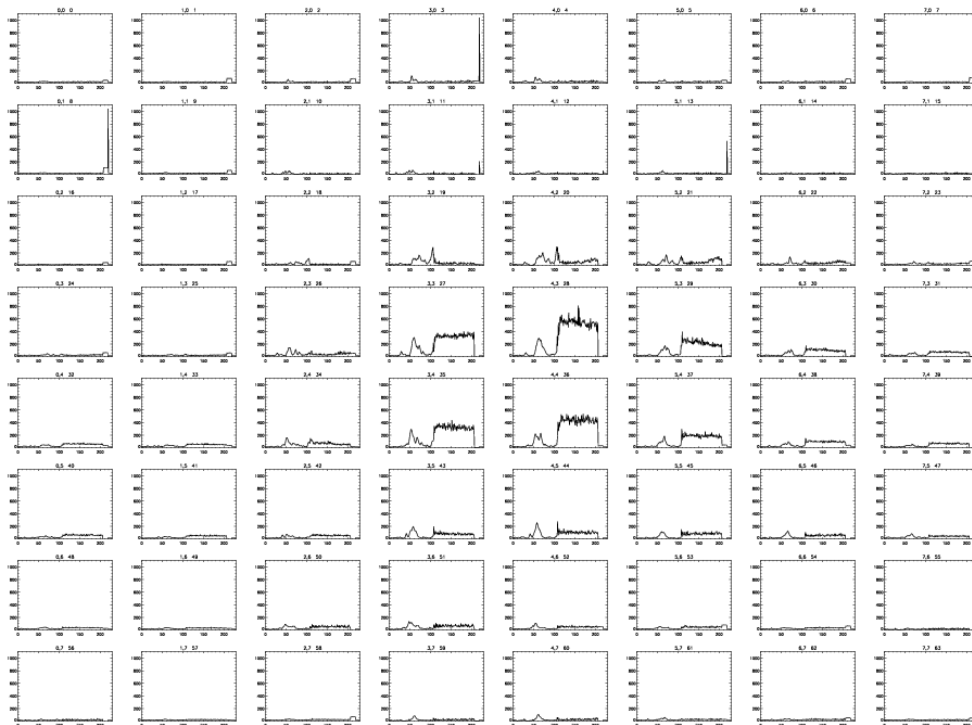


Figura 3.18: Evento observado por los 8x8 pixeles del telescopio de distancia focal $f=36$ cm [17].

3.4. El Observatorio Pierre Auger

A la Tierra han llegado desde tiempos inmemoriales, provenientes de todas direcciones, lo que hoy en día conocemos como rayos cósmicos, no son otra cosa, a pesar de su sugestivo nombre, que núcleos de átomos ordinarios despojados de sus electrones. Cada segundo, diez o veinte descendientes de estos subatómicos visitantes del espacio atraviesan nuestros cuerpos sin que nos demos cuenta y es por eso que el hombre no se percató de su presencia sino hasta principios del siglo pasado. Una de las propiedades que distingue a los rayos cósmicos de otros tipos de radiación y que explica el extraordinario papel que han desempeñado en el desarrollo de la física moderna, es que se han detectado algunos con altísima energía. En 1912 Victor Hess llevó a cabo una serie de vuelos en globos durante los cuales pudo medir el nivel de radiación ionizante hasta una altura de 5 km sobre el nivel del mar. Victor Hess descubrió que la cantidad de radiación ionizante aumentaba con la altura, lo cual implica que la tierra está siendo bombardeada por partículas de alta energía. Una de las tareas más actuales e interesantes de la astrofísica es investigar el origen de los rayos cósmicos de alta Energía (Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR por sus siglas en inglés).

A finales del siglo XX el interés en las partículas cósmicas más energéticas experimentó un importante resurgimiento. Este interés se concretó con el diseño y construcción de un nuevo detector, el Observatorio Pierre Auger del hemisferio sur, en la provincia de Mendoza en Argentina, como se muestra en la figura 3.19. El objetivo fundamental es el de estudiar la radiación cósmica de energías extremadamente altas por encima de 10^{18} eV hasta energías incluso superiores a 10^{20} eV. Es el único detector cuyo diseño está basado en el modo de detección "híbrido", emplea dos técnicas independientes de detección, La primera de ellas se basa, en la detección de la fluorescencia emitida por el nitrógeno atmosférico durante el desarrollo longitudinal del chubasco, la segunda se basa en la detección de las partículas de la lluvia al nivel del suelo. Su construcción inició en el verano de 1999 y ha estado tomando datos ininterrumpidamente, desde su construcción.

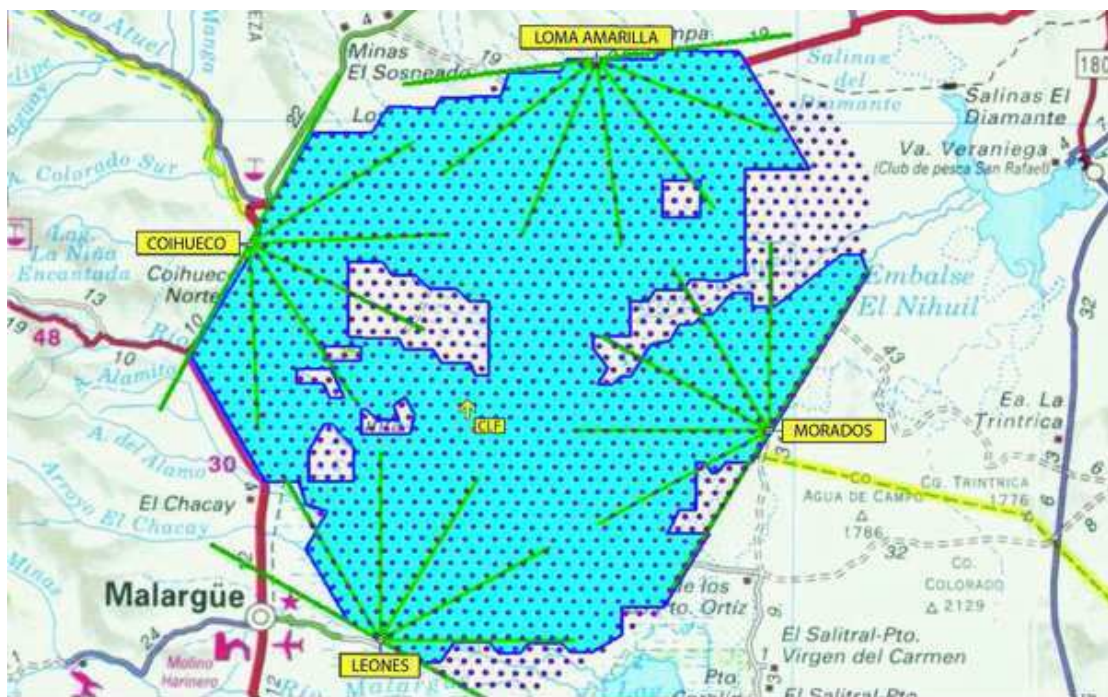


Figura 3.19: El Observatorio Pierre Auger, PAO, área de detección 3000km², los puntos representan los 1660 tanques Cherenkov. En el perímetro se observa la ubicación de las cámaras de fluorescencia.

El área de la superficie de detección es de 3000 km^2 , con la cual se espera obtener estadística de unas pocas decenas de eventos con energías superiores a 100 EeV . El detector está diseñado para ser completamente eficiente para chubascos con energía de 10 EeV y superiores. El umbral de energía se define por el espaciamiento de las estaciones de detectores cherenkov de agua, con un espaciamiento de 1.5 km entre ellos, un chubasco vertical de 10 EeV , impactará un promedio de 6 detectores lo cual es suficiente para reconstruir completamente el desarrollo del chubasco. El número total de detectores cherenkov de agua es de ~ 1660 . Cada detector es un tanque cilíndrico de 10 m^2 de superficie y 1.2 m de altura, figura 3.20. Los tanques son llenados con agua filtrada en la cual las partículas secundarias del chubasco producen luz por radiación Cherenkov.

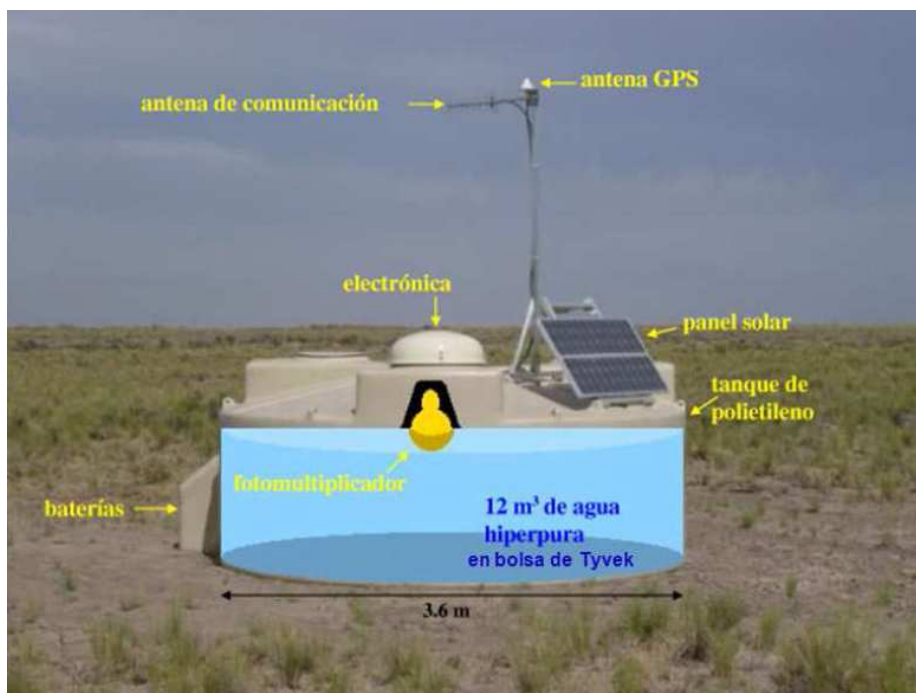


Figura 3.20: El detector de superficie del Observatorio Pierre Auger.

Debido al tamaño del arreglo, las estaciones tienen que trabajar de manera autónoma; son alimentadas por paneles solares y baterías, la comunicación con la estación central donde está instalado el sistema de recepción de datos está hecho con técnicas de telecomunicación.

El arreglo es completado por un dispositivo óptico que detecta los fotones de fluorescencia emitida por el nitrógeno atmosférico durante el desarrollo longitudinal del chubasco. El telescopio de fluorescencia (FD) consta de 440 PMTs exagonales, distribuidos de forma matricial en un arreglo de 20×22 pixeles. El área del espejo es de 11 m^2 , tiene un campo de visión de $30^\circ \times 30^\circ$, el rango de longitudes de onda de detección es de 300 a 420 nm , opera en noches claras y fase Lunar menor a la mitad. Una cámara de fluorescencia “ojo” consta de 6 telescopios, vea figura 3.21, teniendo así un campo de visión total de 180° . De la figura 3.19 en la periferia de la superficie de detección, se observa la red de cámaras de fluorescencia. Coihueco, los Leones, los Morados y Loma Amarilla.

El modo de operación de la cámara es el siguiente: Los pulsos son digitalizados cada 100 ns , la señal generada por cada PMT es evaluada por un sistema de disparo multietapas implementado en firmware y software, los datos se almacenan en intervalos de $100 \mu\text{s}$ de duración.

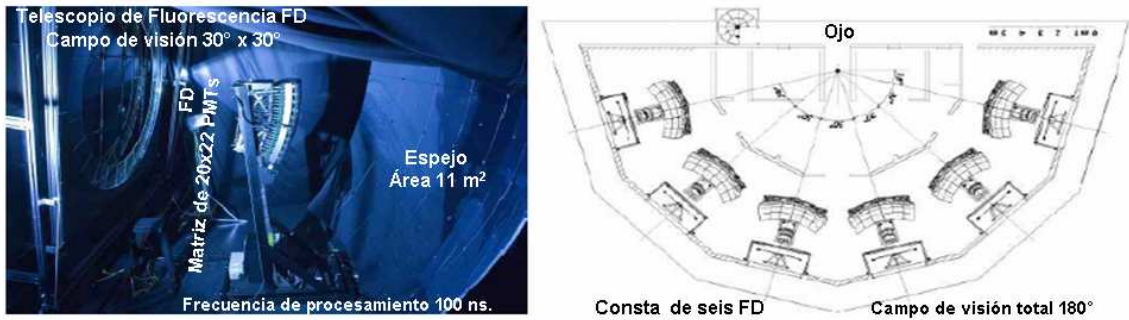


Figura 3.21: (Izquierda) El telescopio de fluorescencia. (Derecha) la cámara de fluorescencia del PAO.

Elfos registrados con las cámaras de fluorescencia del observatorio Pierre Auger.

El primer **elfo** se registró el 18 de Mayo del 2005, en una noche nublada, el evento fue registrado por el telescopio 6 de la cámara de fluorescencia “Los Morados”, a la 01:15:29, tiempo medio de greenwich GMT 800414142 GPS. El evento duro $\sim 700 \mu s$, como se muestra en la figura 3.22.

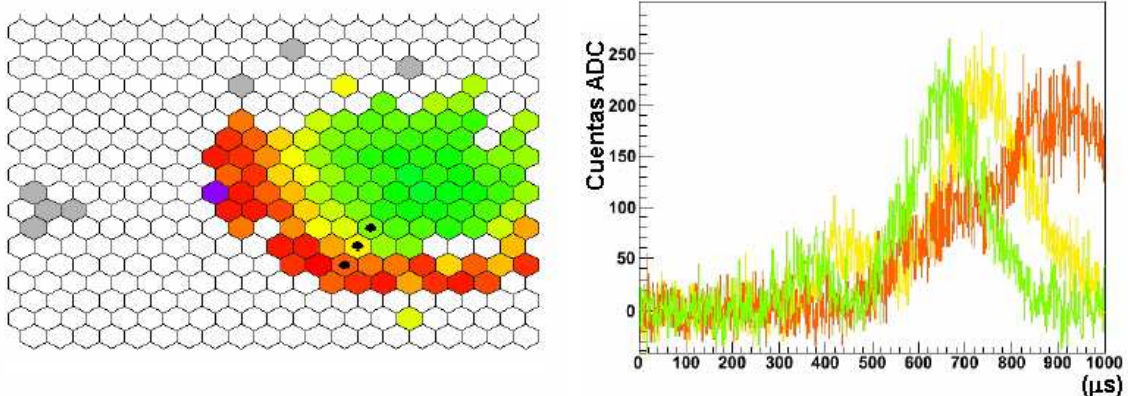


Figura 3.22: Elfo registrado con la cámara de fluorescencia “Los Morados” el 18/05/2005, a la 01:15:29 GMT, duración del evento 700 ms. (Izquierda) PMTs que registraron el evento. (Derecha) reconstrucción de las señales.

El segundo **elfo** se registró el 17 de Abril del 2007, en una noche transparente, el evento fue registrado por el telescopio 3, de la cámara de fluorescencia “Coihueco”, a las 00:49:59, tiempo medio de greenwich GMT 860806213 GPS. El evento duro $\sim 75 \mu s$, como se muestra en la figura 3.23.

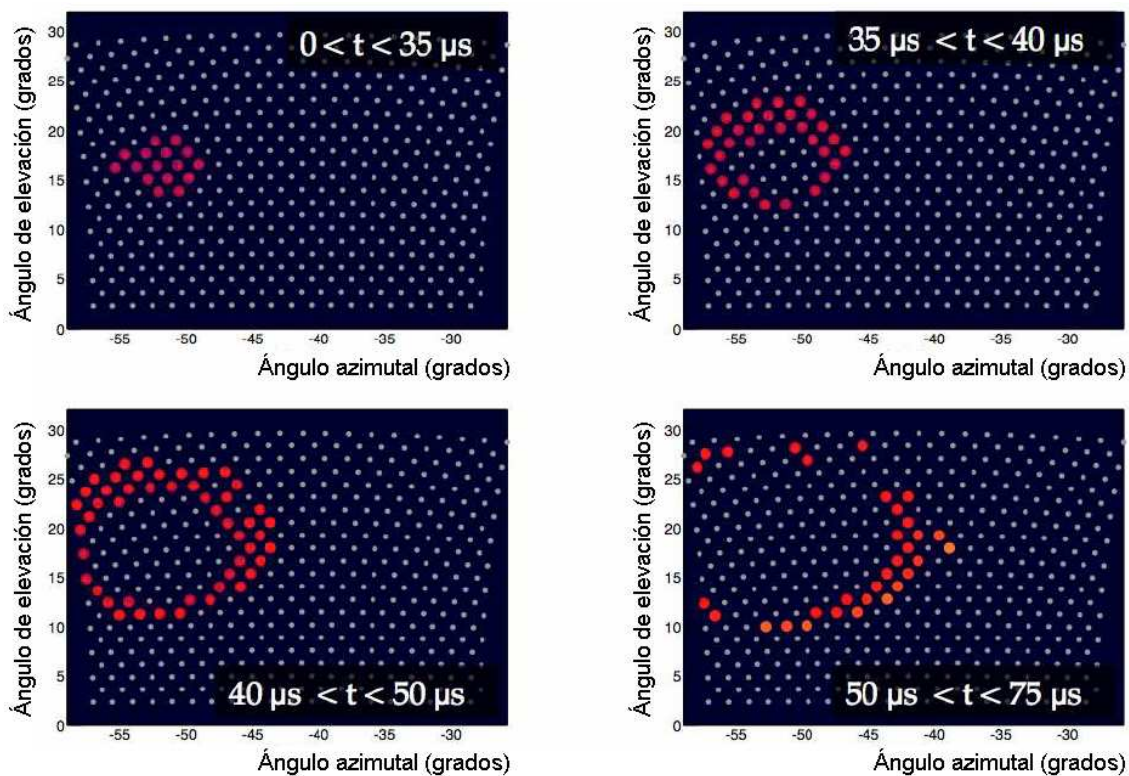


Figura 3.23: Elfo registrado con el telescopio 3 de la cámara de fluorescencia “Coihueco”, se muestra el desarrollo temporal del elfo en cuatro ventanas consecutivas.

En todos los eventos, en cada píxel, el ancho del pulso es mayor a $10 \mu s$, estos pulsos son mucho más amplios que los generados por los chubascos atmosféricos, donde típicamente, la duración es de unos pocos cientos de ns. Los detalles de los elfos registrados en el observatorio Pierre Auger los puede localizar en la referencia [34].

Capítulo 4

El satélite universitario “Lomonosov” para detectar UHECRs y TLEs

4.1. Introducción

El satélite “Lomonosov”, se desarrolla en el Instituto de Física Nuclear de la Universidad Estatal de Moscú, el aparato cósmico será el tercer satélite científico universitario después del “Tatiana” y “Tatiana-2”, misiones que operaron del 2005 al 2010. El nuevo satélite es de mayor peso, llevará a bordo varios experimentos científicos y será puesto en órbita en primavera del 2015.

La atmósfera terrestre es un medio natural donde se pueden detectar los diferentes tipos de radiación y objetos que llegan desde el espacio. Entre ellos están: los rayos cósmicos, la radiación solar, la radiación de origen galáctica y extra-galáctica, etc. etc. Por ejemplo, las partículas de alta energía, en su trayecto por la atmósfera, inicialmente generan trazas de luz de fluorescencia, posteriormente, generan cascadas de partículas secundarias, conocidas como lluvias ó chubascos de partículas (EAS por sus siglas en inglés), de los cuales se pueden obtener las características y parámetros principales de la partícula primaria (como son: energía, composición química, ángulo de llegada, etc.). En el universo además de las partículas cargadas también hay radiación gama, actualmente este es un tema muy discutido ya que estas partículas son las que generan en la atmósfera la radiación Cherenkov. Además, sabemos que el número de partículas que bombardean la atmósfera está limitado por los cinturones de radiación (partículas cargadas atrapadas en el campo magnético de la tierra), son enormes franjas ionizadas, la energía de las partículas en los cinturones de radiación es suficientemente alta, por ejemplo, hay electrones relativísticos de unos cuantos MeV, que son capaces de introducirse profundamente en la atmósfera y la ionizan exactamente igual que los chubascos generados por partículas cósmicas. Además de estos objetos cósmicos, en la atmósfera también influyen otros procesos físicos que se generan cerca de la superficie de la tierra, recientemente descubiertos “los fenómenos luminosos transitorios”, por su naturaleza es posible que estén asociados con las descargas eléctricas durante el desarrollo de fuertes tormentas. Los fenómenos descritos anteriormente llaman mucho la atención de científicos de todo el mundo, pero en particular los Mexicanos, Rusos y Coreanos, es por ello que trabajan en colaboración en algunos experimentos que llevará a bordo el satélite artificial universitario “Lomonosov” para poder registrar desde la órbita del satélite los fenómenos que se generan por las perturbaciones que sufre la atmósfera (en la parte nocturna).

4.2. El telescopio espacial TUS

En el satélite “Lomonosov” se instalarán una serie de instrumentos, entre ellos el principal conocido como telescopio cósmico TUS [18], con ayuda de este instrumento, por primera vez, se tratarán de registrar desde el espacio los rayos cósmicos de muy alta energía, con energías de $\sim 10^{19}$ - 10^{20} eV.

Actualmente, para los rayos cósmicos en la región de muy alta energía se tiene información limitada y de mucha discusión, particularmente en el espectro de energía y la composición química, esta incertidumbre no permite realizar conclusiones definitivas acerca de la naturaleza de los rayos cósmicos, de los mecanismos de aceleración y de la localización de las posibles fuentes extra galácticas. La detección desde el espacio es un método para estudiar los rayos cósmicos ultra energéticos, en el que la atmósfera de la Tierra actúa como un medio de detección gigante. El detector orbital TUS (Detector de trazas UV) está diseñado para observar la radiación ultravioleta (longitudes de onda de 300 a 400 nm) que se genera en la parte nocturna de la atmósfera terrestre [19].

El detector TUS, instalado a bordo del satélite “Lomonosov” se muestra en la figura 4.1, consta de un espejo concentrador de diámetro cercano a los 2 m, en el foco se encuentra el detector de radiación ultravioleta es una matriz de 16x16 tubos fotomultiplicadores, como se muestra en la figura 4.2 y 4.3. Este telescopio cósmico permitirá registrar la radiación ultravioleta generada antes y durante el desarrollo del chubasco de partículas que invaden la parte nocturna de la atmósfera, estadísticamente, la traza que generan las partículas en la parte alta de la atmósfera son muy rápidos, tienen duración de hasta unas pocas decenas de μs , el número de fotones que se logren registrar puede dar una estimación de la energía de la partícula primaria, porque medir el flujo de partículas, es extremadamente complicado, debido a que, para energías de 10^{19} eV, en la superficie de la tierra cae una partícula por km^2 cada año, lo cual hace que el método de detección desde el espacio sea competitivo con las instalaciones de detección terrestres, las características principales del detector se generalizan en la tabla 4.1.

Área del espejo, m^2	1.8
Distancia focal, cm	150
Tamaño del pixel, mm	15x15
Número de pixeles	256
Tiempo de muestreo, μs	0.8
Altura de la órbita, km	500
Umbral de energía de las partículas para UHECR, eV	7×10^{19}
Área de detección en la atmósfera, km^2	6400
Segmentos de trazas registradas por pixel, km	5

Tabla 4.1: Características principales del telescopio TUS, abordo de la misión espacial “Lomonosov”.

El eje de observación del detector TUS estará orientado hacia el centro de la tierra, la electrónica será capaz de proteger el fotodetector del enorme brillo de la atmósfera generado por los chubascos o por otros fenómenos atmosféricos. Mediante la medición de la traza de luz, los científicos podrán estimar la energía de las partículas que genera el chubasco y investigar si se trata de una partícula de alta energía [20].

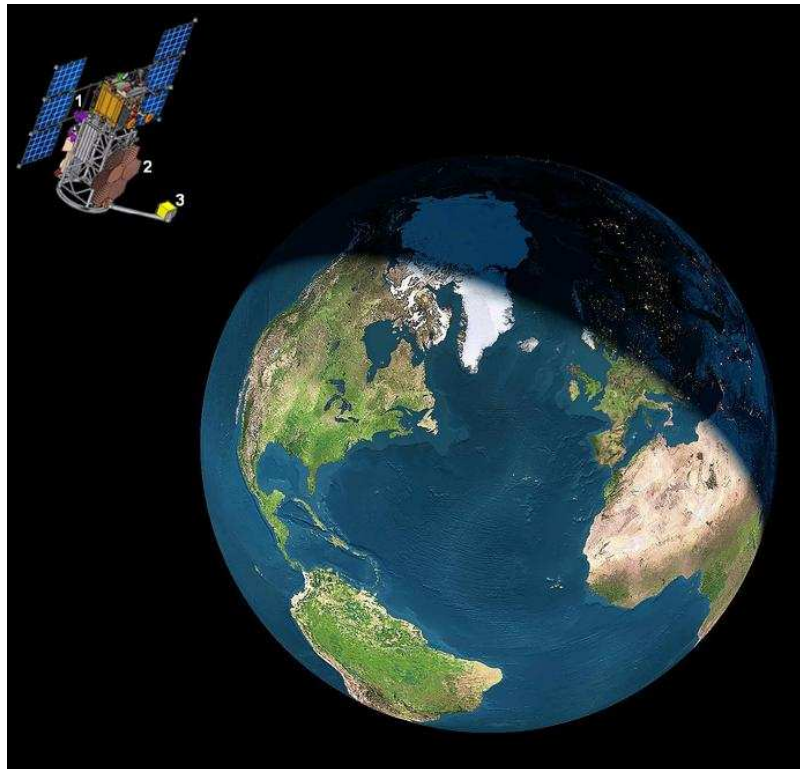


Figura 4.1: El telescopio cósmico TUS. 1- Satélite universitario “Lomonosov”. 2- Espejo concentrador exagonal segmentado. 3- Detector de radiación ultravioleta, mosaico de 256 fotomultiplicadores en un arreglo de 16x16 píxeles.

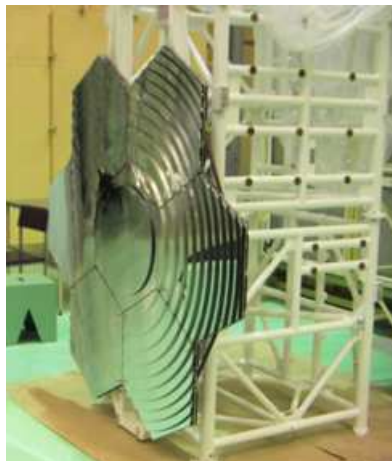


Figura 4.2: Espejo concentrador y el detector de radiación UV, realización de pruebas de laboratorio en las instalaciones de la Universidad Estatal de Moscú.

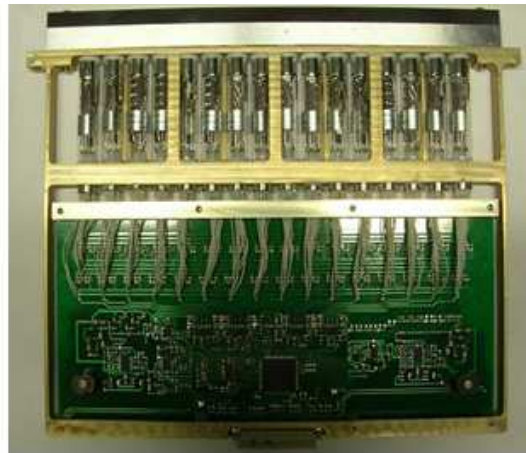
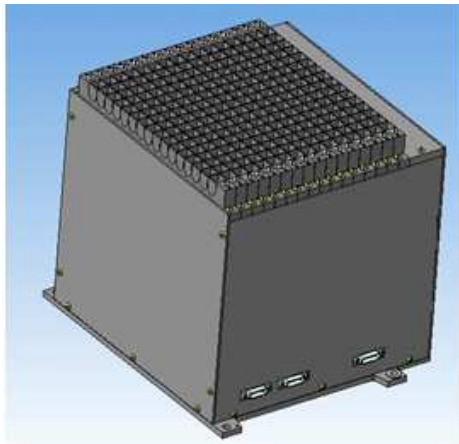


Figura 4.3: Detector de radiación ultravioleta - mosaico de 256 fotomultiplicadores, arreglo de 16x16 píxeles (izquierda). Una de 16 tarjetas electrónicas con PMTs que constituyen el telescopio TUS (derecha).

4.3. La cámara oscura espacial

En la parte alta de la atmósfera, entre las nubes y la ionósfera (de 10-70 km de altura), se han observado eventos luminosos transitorios (TLEs por sus siglas en inglés) de corta duración (de uno a cien milisegundos), emiten en un amplio rango del espectro (óptico, ultravioleta, infrarrojo y radiación gamma), Revelan que estos pueden llegar a cubrir en el espacio desde decenas hasta unos cuantos cientos de kilómetros, figura 4.4.

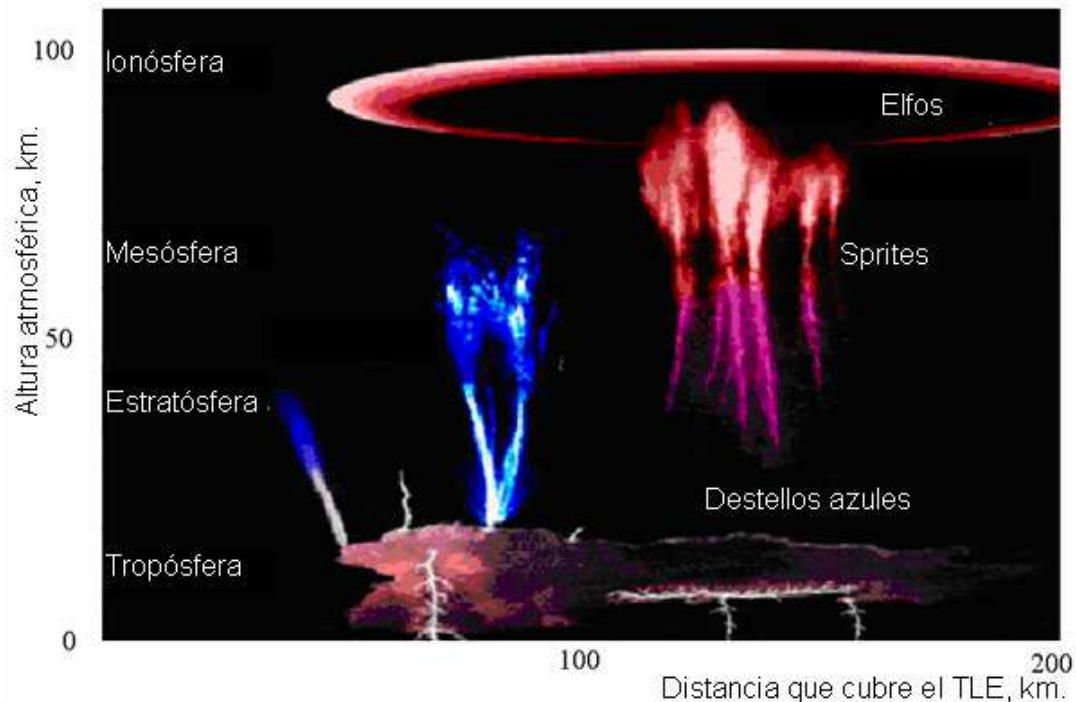


Figura 4.4: Los eventos luminosos transitorios que se generan en la parte alta de la atmósfera terrestre.

Recientes datos experimentales, de TLEs observados en la parte alta de la atmósfera, muestran de manera general, que están asociadas con el desarrollo de fuertes tormentas eléctricas, la energía que liberan las descargas es tan grande que dan origen a estos fenómenos geofísicos, Los mecanismos involucrados en la generación de estos fenómenos en la parte alta de la atmósfera son, el campo eléctrico de la tierra, el estado de la ionósfera, la cantidad de tormentas que se generan en la tropósfera, y las “mareas” provocadas por la Luna.

Para continuar con el incremento en la estadística de los TLEs, se propone el instrumento cámara oscura el cual consta de dos telescopios, vea la figura 4.5, el cual trabajará conjuntamente con el telescopio TUS, el instrumento operará en el rango UV (longitudes de onda 300-400 nm). Utilizará dos fotodetectores cada fotodetector es un tubo fotomultiplicador de 64 ánodos, las dimensiones de cada pixel es de 2.88x2.88 mm, los fotones registrados por cada pixel pasarán por un orificio del mismo tamaño localizado a una distancia focal f del fotocátodo del PMT, para el telescopio T75, $f=75$ mm, el tamaño de la imagen del evento luminoso que puede medirse en la atmósfera es de $\sim 160 \times 160$ km², con resolución de 20 km² por pixel. Con ayuda de este telescopio se pueden observar flashes con gran desarrollo transversal (que cubren diámetros de unos cuantos cientos de kilómetros). Para observar eventos luminosos de menor tamaño se considera un segundo telescopio, el T150, el cual tiene una distancia focal de 150 mm, la imagen que se observa en la atmosfera es de $\sim 80 \times 80$ km², con resolución de 10 km² por pixel. El protocolo de comunicación serial que también se desarrollo para la comunicación entre la computadora de laboratorio y la cámara oscura se muestra en la figura 4.6.

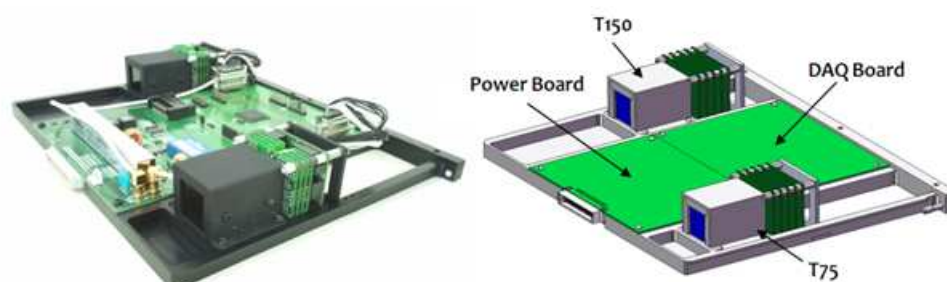


Figura 4.5: La cámara oscura espacial. En la parte izquierda puede observarse la distribución de cada parte que conforma la camara, En la parte derecha el la hubicación de los telescopios T75 y T150.

La cámara oscura de propósito espacial fue probada en el laboratorio de la Universidad Estatal de Moscú por el autor de esta tesis doctoral, para ello se utilizó un generador de pulsos y un diodo emisor de luz LED, por medio de un generador de funciones, el LED enviaba la señal de diferente amplitud y duración en forma de fotones, cada pixel del PMT reprodujo la señal emitida por el LED, vea las figuras 4.7, 4.8 y 4.9, el número de puntos del perfil de la señal fue proporcionado por los colegas de la Universidad de Las Mujeres Seúl (Corea). Las características principales para la reconstrucción se muestran en la tabla 4.2.

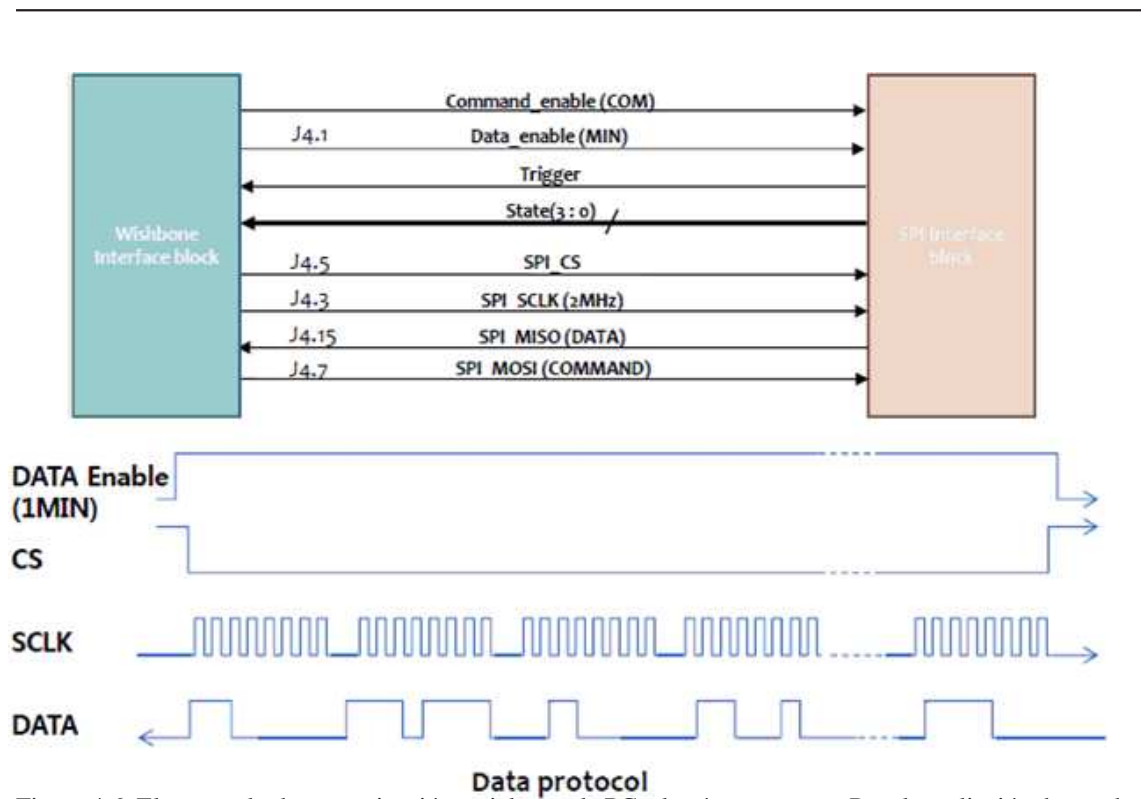


Figura 4.6: El protocolo de comunicación serial entre la PC y la cámara oscura. Para la realización de pruebas de laboratorio.

La aparatara científica abordo del satélite universitario “Lomonosov” está destinada para estudiar rayos cósmicos de más alta energía, TLEs, explosiones de rayos gama y la energía de las partículas atrapadas en la magnetósfera de la tierra.

Frecuencia de muestreo de cada frame	Número de frames
10 μ s	16
40 μ s	100
128 μ s	50
2560 μ s	25
10240 μ s	20
20480 μ s	8
Tiempo total de adquisición de datos	\sim 500 ms

Tabla 4.2: Número de frames obtenidos en diferentes frecuencias de muestreo, para un intervalo de tiempo de \sim 500 ms.

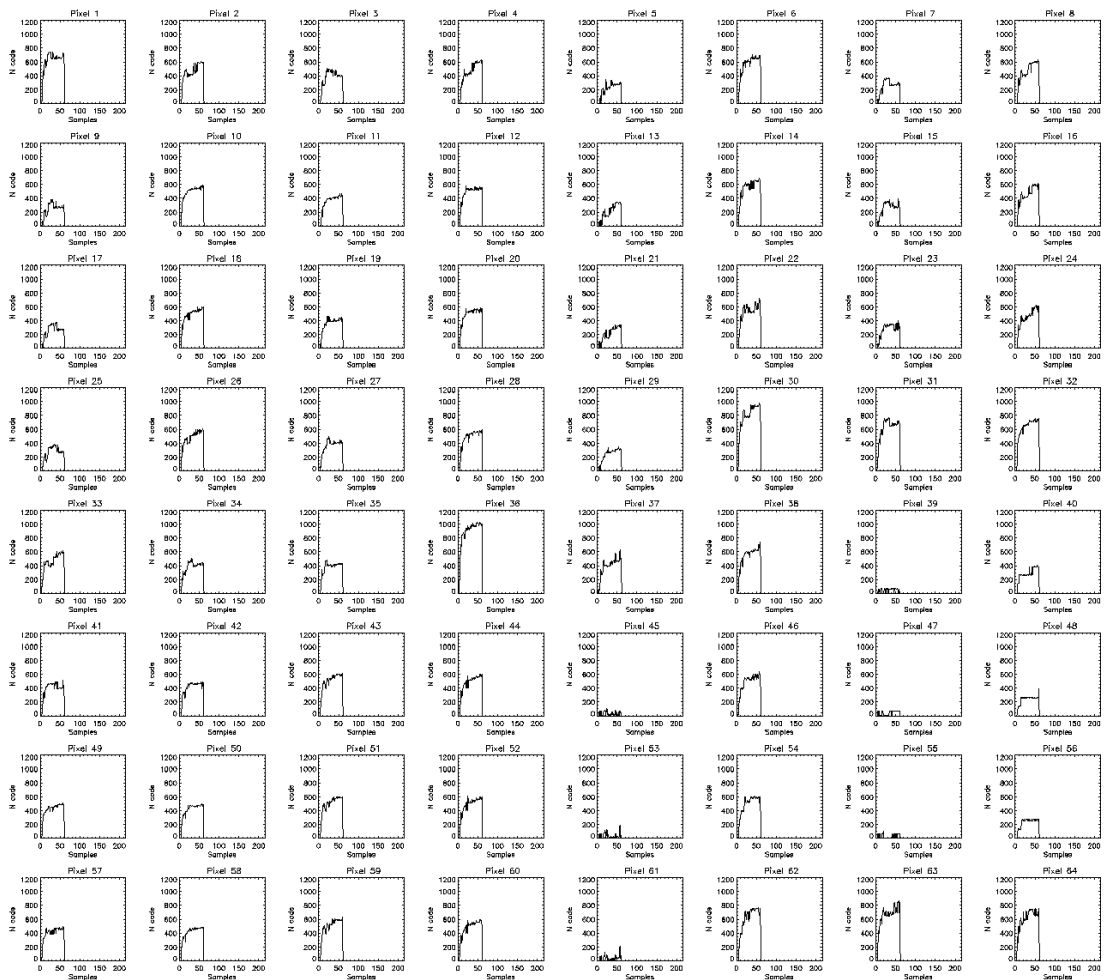


Figura 4.7: Reconstrucción de señales de 2 ms de duración.

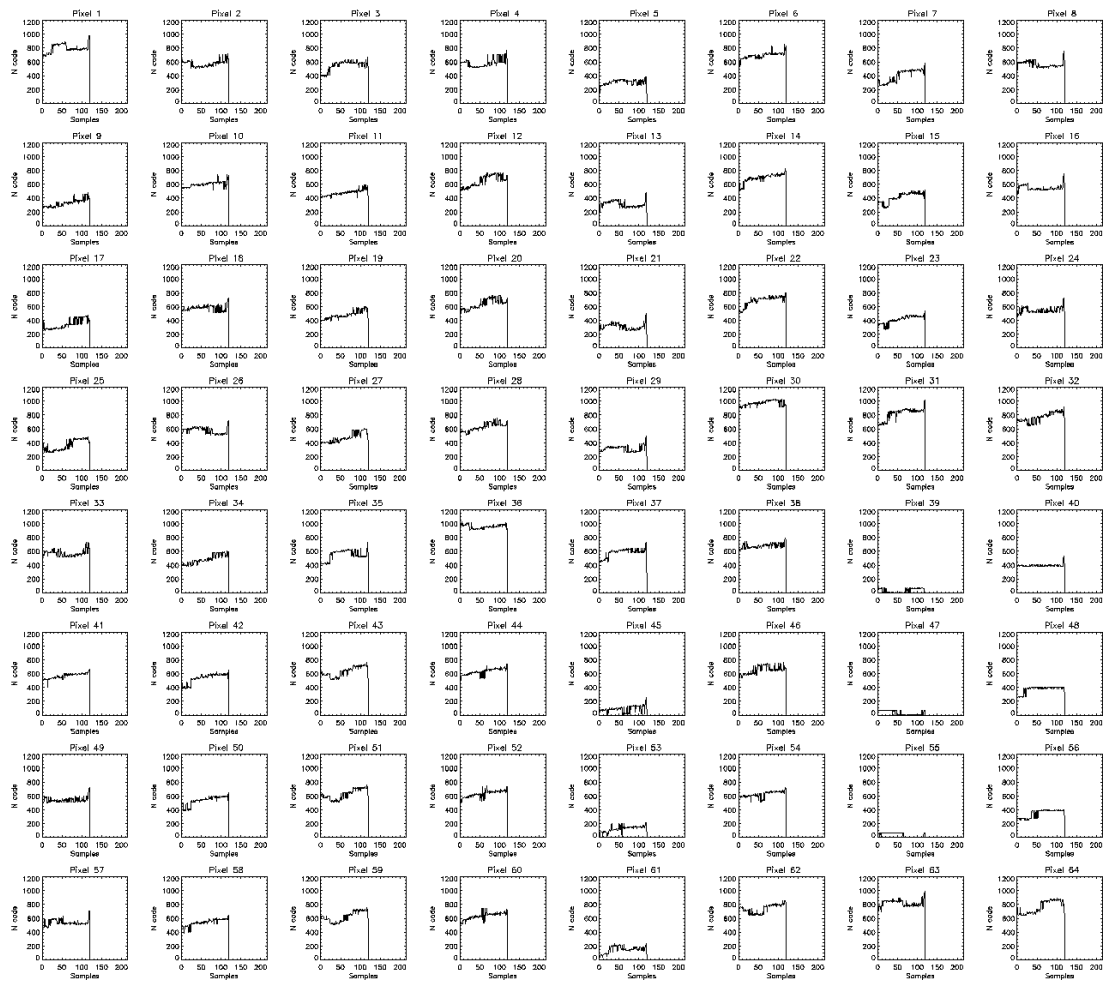


Figura 4.8: Reconstrucción de señales de 10 ms de duración.

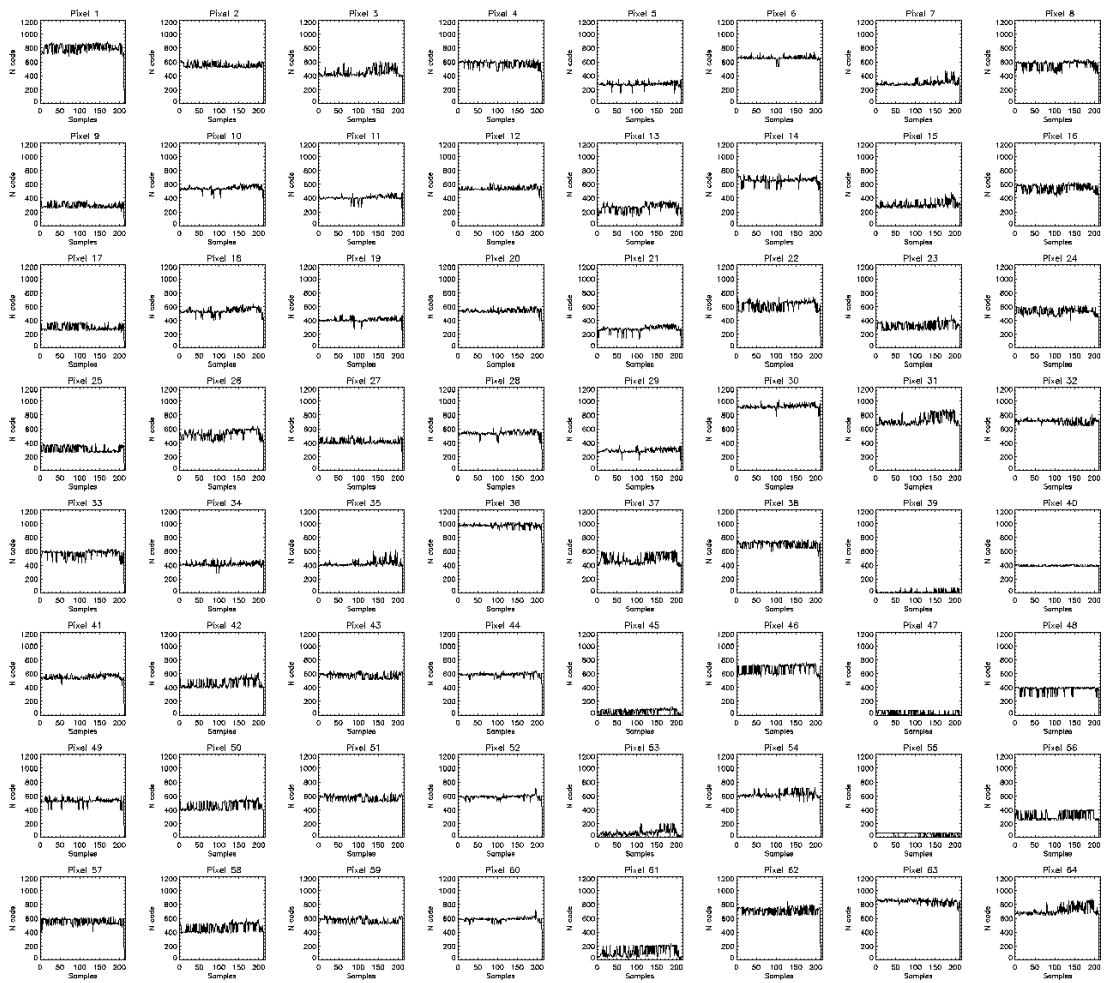


Figura 4.9: Reconstrucción de señales de 400 ms de duración.

Capítulo 5

La cámara Oscura

5.1. Introducción

La luz de fondo UV que se observa en la parte nocturna de la atmósfera, especialmente los eventos transitorios luminosos, la traza de micrometeoritos y las actividades humanas; se consideran fuentes que contribuyen a la luz de fondo atmosférica. La naturaleza de los eventos transitorios luminosos aun no es muy conocida y por eso es necesario obtener mas resultados de forma experimental.

El interés científico actual es monitorear la región nocturna de la parte alta de la atmósfera terrestre, a bordo de satélites artificiales y desde alturas estratégicas en la superficie, con el objetivo de estudiar la naturaleza de la fluorescencia y los eventos transitorios luminosos, que se generan en la región UV. Para poder crear modelos y pronosticar el comportamiento atmosférico a alturas de 100 a 1000 km, influenciada por, la actividad exterior cósmica, que servirían para tener un control total de las radio-comunicaciones, la seguridad de vuelos de satélites, aviones y de otros objetos que operen a estas alturas. Este es un tema interesante que deben considerar los científicos actuales que participan en la creación de técnicas de monitoreo terrestres y espaciales.

La cámara oscura, es un dispositivo óptico simple, robusto, con profundidad de foco infinita, sin partes móviles, que permite obtener imágenes de manera nítida. Requisitos importantes para un dispositivo como el que se pretende colocar en satélites pequeños, como los del programa espacial universitario [8, 9]. Se planea que opere simultáneamente con el telescopio de fluorescencia TUS que va a monitorear a la tierra en una órbita situada de 700-900 km de altura. El telescopio TUS registrará la traza que genera la partícula de muy alta energía durante su trayecto en la parte alta de la atmósfera, con la finalidad de poder determinar su dirección de llegada y su energía original. La cámara oscura registrará la luz de fondo UV y los posibles destellos que se originen en la misma región de monitoreo del telescopio TUS. Del experimento de colaboración BUAP-MSU, el detector ultravioleta a bordo del satélite "Tatiana" registró algunos eventos de fenómenos luminosos transitorios en la región UV, también se obtuvo la intensidad de luz UV que refleja la Luna en sus diferentes fases, dando como resultado una curva que se incrementa de forma exponencial. Para caracterizar la correcta operación de la cámara oscura en la superficie, como primer paso, se empleo la Luna como objeto astronómico para obtener nuestros resultados básicos y de calibración, con la cámara oscura se reprodujo la misma curva que se obtuvo con el experimento a bordo del satélite antes mencionado, se lograron registrar algunos fenómenos luminosos transitorios y la traza de luz UV que generaron algunas estrellas fugaces. Las mediciones se realizaron en el volcán Sierra Negra situado cerca de Puebla a una altura de 4300 metros sobre el nivel del mar, el eje de observación de la cámara que se considera es $\theta < 30^\circ$ sobre el Cenit, con este ángulo los fotones al atravesar la masa de aire, desde la altura donde se generan, hasta la superficie del detector, habrán perdido menos del 20 % de su energía.

5.2. Características de los destellos generados en la parte alta de la atmósfera

Históricamente, los primeros destellos observados en la atmósfera han sido los relámpagos producidos durante las tormentas eléctricas. Además de estos, existen algunos que se generan sobre las nubes y que han sido observados en diferentes longitudes de onda, con detectores a bordo de satélites, aviones e incluso con detectores terrestres. Los fenómenos ópticos más comunes son “los destellos azules” (Blue Jets), “Sprites rojos” (Red Sprites), “Elfos” (Elves) y la traza de micrometeoritos, Figura 5.1, todos estos contribuyen con la variación fotónica de fondo de la atmósfera.



Figura 5.1: Los eventos luminosos transitorios (Destellos) que se generan en la parte alta de la atmósfera.

Los destellos de la figura 5.1 tienen desarrollos temporales desde decenas de μs hasta centenas de milisegundo, durante este tiempo la radiación que generan cubre dimensiones de decenas a cientos de kilómetros en la ionosfera. La brillantez del destello está relacionado con su energía, particularmente estos destellos tienen características de explosiones atómicas y representan un peligro para los vuelos de aviones y cohetes.

Constantemente se está ampliando la estadística de las descargas atmosféricas generadas en la parte alta de la atmósfera, pero, para entender los diferentes tipos de destellos, es necesario comprender su desarrollo espacial y temporal, por eso proponemos observarlos con la cámara oscura que opera en la región UV, el cual es un detector rápido de imágenes en dos dimensiones.

5.3. La cámara oscura

La cámara oscura es una caja negra sin lentes, con un pequeño orificio y con una pantalla interior. La luz de una escena pasa a través de este único orificio y proyecta la imagen invertida en la pantalla interna de la cámara, como se muestra en la figura 5.2. La cámara oscura tiene varias virtudes notables, puede formar una imagen bien definida, prácticamente sin distorsión sobre un campo angular muy ancho (debido a la gran profundidad de foco) y sobre una extensa gama de distancias (debido a la gran profundidad de campo). Si

inicialmente el orificio es muy grande, no habrá imagen, debido al exceso de luz que entra. A medida que el diámetro del orificio disminuye, la imagen se forma, una mayor reducción del orificio hace que la imagen se vuelva borrosa.

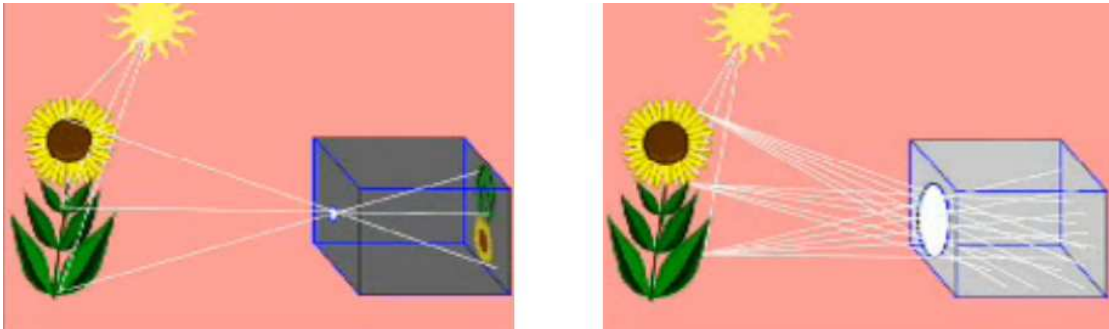


Figura 5.2: La cámara oscura produce imágenes del exterior a través de un orificio. Parte izquierda: Si el orificio es pequeño, solamente entra un rayo de luz en cada dirección, formando una imagen del exterior. Parte derecha: Si el orificio es grande, los rayos de luz entran en todas direcciones, haciendo que se ilumine el interior de la caja.

La cámara oscura para estudiar los destellos atmosféricos en la región UV consta de dos telescopios, cada uno de ellos ocupa como fotodetector un tubo fotomultiplicador pixelado (arreglo matricial de 8x8 pixeles) tipo Hamamatsu serie H7546B. El campo de visión del fotodetector se define por la distancia de separación f entre el fotodetector y el orificio de observación. Para estimar la imagen del fenómeno luminoso transitorio en el rango UV, se consideró que el diámetro del orificio de observación sea igual a las dimensiones de cada píxel, para el PMT que utilizamos, cada píxel es de 2 milímetros por 2 milímetros, esto implica que el diámetro del orificio debe ser de 2 milímetros. La cámara oscura consta de dos configuraciones ópticas.

La primera configuración la definimos como el **telescopio T-200**, la distancia entre el fotodetector y el orificio de observación es de 200 milímetros, es un telescopio de distancia focal larga, con esta configuración podemos observar con mayor resolución los eventos luminosos transitorios cuando se generen en la atmósfera. A través del orificio cada píxel tiene un campo de visión (FOV por sus siglas en inglés) de 0.01 radianes, equivalente a 0.5 grados, con este campo de visión, la Luna puede observarse en su totalidad por cada píxel del fotodetector, el FOV total que cubre la matriz de 8x8 pixeles es de 0.08 radianes, equivalente a 4.5 grados. Para tener una idea del área que podemos observar en la atmósfera supongamos que los eventos se generarán a una distancia de 100 km de la cámara con esto tenemos que un píxel observará un área en la atmósfera de 1 km^2 , para el arreglo de 8x8 pixeles el fotodetector observará un área en la atmósfera de $8 \times 8 \text{ km}^2$.

La segunda configuración la definimos como el **telescopio T-25**, la distancia entre el fotodetector y el orificio de observación es de 25 milímetros, es un telescopio de distancia focal corta, con esta configuración podemos monitorear mayor área en la atmósfera. Considerando las mismas dimensiones del orificio que en el telescopio anterior, cada píxel tiene un campo de visión de 0.08 radianes equivalente a 4.5 grados. Suponiendo que los eventos se generen a una distancia h de 100 km, entonces cada píxel observa un área en la atmósfera de $8 \times 8 \text{ km}^2$, para el arreglo de 8x8 pixeles, el fotodetector observa un área de $64 \times 64 \text{ km}^2$. De esta forma el telescopio T-25 tiene un campo de visión 8 veces mayor que el telescopio T-200. La tabla 5.1 muestra los detalles técnicos de cada telescopio. En la figura 5.3 se muestra la cámara oscura y la ubicación de cada telescopio. En la figura 5.4 se muestra la distribución de las partes que constituyen el detector.

De las mediciones realizadas a bordo del satélite universitario “Tatiana”, el detector UV durante su trayecto en la órbita, observó en la atmósfera un área circular de $\sim 5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($A = \pi r^2/2$), el radio de la circunferencia era de $\sim 125 \text{ km}$; el satélite tenía el control necesario para que el campo de visión del detector siempre estuviera orientado hacia el centro de la tierra. En cada ciclo orbital, el detector UV logró registrar por lo menos un TLE de más de 10^{22} fotones en un intervalo de tiempo de un milisegundo. Para nuestro caso estimamos el número de fotones que la cámara obscura registrará en su campo de visión; para obtener el número de fotones en cada píxel del fotor multiplicador por unidad de tiempo, considerando un promedio de fotones existentes en la atmósfera de 10^{22} , entonces el número de fotones en el campo de visión de cada píxel a una distancia de 10 km , es $\sim 1 \times 10^8 \text{ fotones/cm}^2$. El número de fotones que impactaran el área de la superficie del píxel cada milisegundo serán 4×10^6 , considerando que la eficiencia cuántica del PMT es del 20% , entonces el número de fotoelectrones que generará cada píxel sería del orden de 8×10^5 .

Fotomultiplicador Multiánodo MaPMT H7546B	¹ T-200	² T-25	Unidades
Dimensiones de cada píxel	2x2	2x2	mm x mm
Radio del orificio	1	1	mm
Distancia focal f	20	2.5	cm
Campo de vision por píxel	0.01	0.08	radianes
$\theta = \frac{2r}{f}$	0.5	4.5	grados
Suponiendo que los fenomenos se observarán a una distancia h	100	100	km
El área que se observa en la atmósfera es $h \cdot \theta$			
1 píxel Observará	1x1	8x8	km x km
La matriz de 8x8 pixeles observarán	8x8	64x64	km x km

Tabla 5.1: Parámetros técnicos de diseño de la cámara obscura.

Suponiendo que durante el monitoreo, la imagen del TLE se observa uniformemente en los 64 pixeles entonces cada píxel generará el mismo número de fotoelectrones, y como consecuencia tendremos una señal de amplitud constante en la salida de cada uno de ellos; en la realidad no sucede así, porque la brillantes del TLE durante su desarrollo espacial y temporal no es uniforme, lo que hará que algunos de los pixeles generen mas fotoelectrones que otros, como resultado generaran una señal de amplitud variable correspondiente al número de fotones que observe.

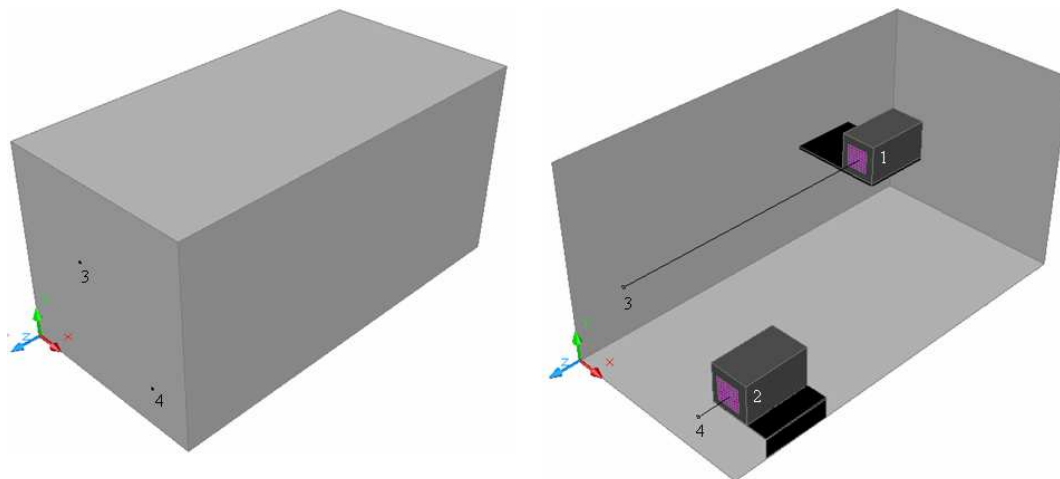


Figura 5.3: La cámara obscura. Parte izquierda: Caja de dimensiones $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$. 3- Orificio por el cual observa el telescopio T-200. 4- Orificio de observación del telescopio T-25. Parte derecha: Localización de cada telescopio en la cámara obscura. (1,3)- Telescopio T-200. (2,4)- Telescopio T-25.

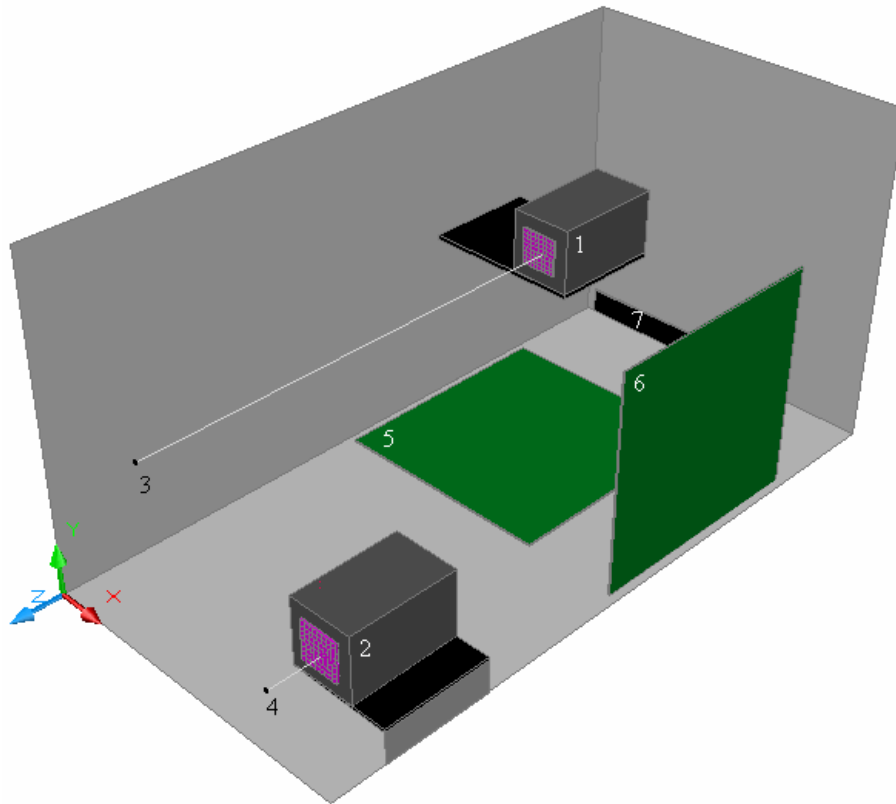


Figura 5.4: Distribución esquemática de las partes que constituyen la cámara oscura. (1,3)- Telescopio T-200. (2,4)- Telescopio T-25. (5,6) Placa electrónica PCB para el telescopio T-200 y T-25. 7- Puerto de comunicación del experimento con la computadora.

La desviación estándar σ de la media del número de fotoelectrones en cada pixel de la cámara, en un intervalo de tiempo de 64 milisegundos, está relacionada con la luz de fondo en la región UV que se presenta en la parte nocturna de la tierra, $v= 1 \times 10^8$ fotones/cm²s sr en noches sin Luna y $v=3 \times 10^9$ fotones/cm²s sr con Luna llena.

$$\sigma = (v \omega s t p)^{0.5}$$

Donde s – es el área del orificio de observación, $\omega = S/L^2$ - ángulo sólido del campo de visión del píxel
 t – tiempo de muestreo, $p = 0.2$ es la eficiencia cuántica del fotomultiplicador.

Tenemos que en una noche sin Luna, $\sigma \approx 0.7$ fotoelectrones, esto garantiza que podemos observar un fotoelectrón. Este bajo nivel de ruido es la principal característica de la cámara oscura. Se relaciona con el hecho de que la luz que llega al fotomultiplicador es a través de un pequeño orificio. En noches con Luna llena, considerando el número de fotones en la atmósfera de 10^{22} , $\sigma \approx 16$ fotoelectrones.

5.4. El fotodetector (PMT)

El tubo fotomultiplicador (PMT), frecuentemente se ocupa como detector de fotones, permite detectar el flujo de radiación, desde el más intenso hasta el más débil, desde 10^{10} hasta 10^{12} fotones por segundo, es de respuesta rápida, de 10^{-8} a 10^{-10} segundos, puede ser colocado en la intemperie o en el vacío, la señal que genera puede medirse fácilmente con un osciloscopio; el único inconveniente es que para su correcto funcionamiento tiene que utilizar una fuente de alto voltaje, del orden de 1 kV o más, dependiendo de la aplicación, existen de diferentes tamaños y características, en la figura 5.5 se muestra de manera general las partes principales de un PMT. El flujo de luz que impacta el fotocátodo, arranca electrones del material los cuales, debido al campo eléctrico que tiene la cámara del PMT, son enfocados al primer dinodo, en el que se multiplican y se enfocan al siguiente, el proceso se repite en cada dinodo, después del último, el flujo de electrones se enfocan al ánodo.

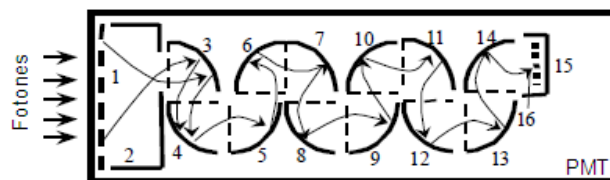


Figura 5.5: Diagrama esquemático del PMT. El fotomultiplicador consta de: 1- Fotocátodo. 2- cámara cátodica. 3-14 Dinodos. 15-16 Ánodo. Todas estas partes están integradas en el vacío.

La elección del PMT debe ser la adecuada, considerando: la radiación que se detectará, la forma geométrica, los materiales del fotocátodo, etc. Para fines prácticos, frecuentemente se hace referencia a la sensibilidad espectral del fotocátodo, vea la figura 5.6, la eficiencia cuántica está relacionada con la longitud de onda que se desea detectar.

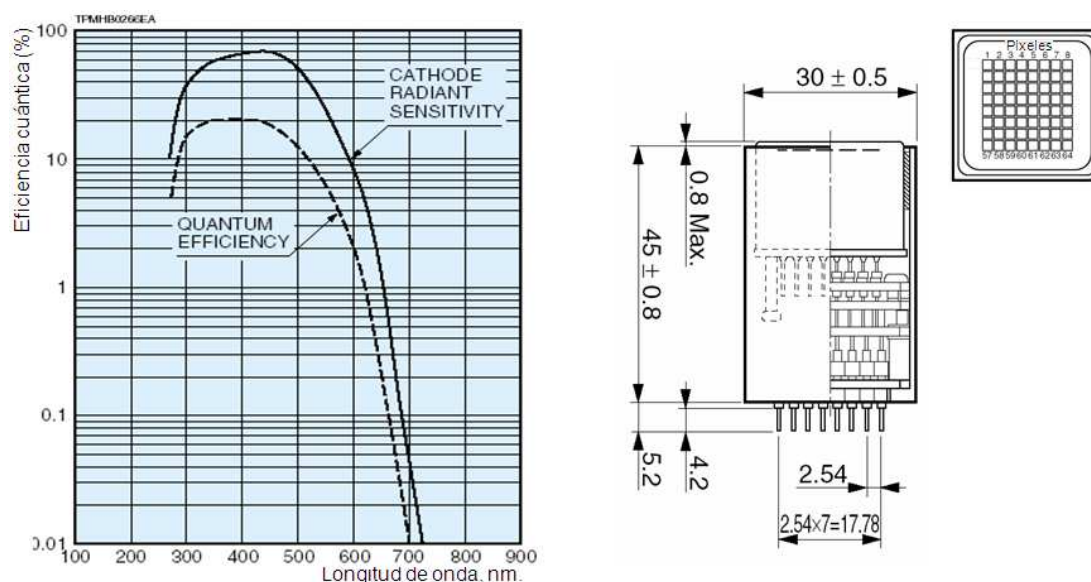


Figura 5.6: Características principales del fotomultiplicador multiánodo, serie H7546B de la empresa Hamamatsu Photonics. Respuesta espectral de la eficiencia cuántica (lado izquierdo). Forma y dimensiones (lado derecho).

Los fotomultiplicadores multiánodo (MaPMT) que se utilizan en la cámara oscura son de la empresa Hamamatsu photonics serie H7546B de 8x8 pixeles. Tienen las siguientes características: respuesta espectral de 300 a 600 nm, tiene la máxima respuesta a la longitud de onda de 400 nm, dimensiones de cada pixel 2x2 mm, separación entre pixeles 0.3 mm, área efectiva de detección 18.1x18.1 mm, tienen una eficiencia cuántica del 20 %, voltaje máximo de operación -1000 V, ganancia 3×10^5 , Inducción de señal entre ánodos continuos 2 %.

Frecuentemente el PMT se utiliza en experimentos de física nuclear, por citar el siguiente ejemplo, en el que una partícula de alta energía al atravesar una placa de plomo, este crea una mini-cascada de partículas secundarias, las cuales son registradas por el PMT, generando como salida un pulso de amplitud proporcional a la energía de la partícula incidente, esta señal es almacenada y reconstruida con un analizador de pulsos o osciloscopio para un posterior análisis.

Para hallar la respuesta a un fotoelectrón, existen varios métodos, nosotros empleamos el del espectro de amplitudes [21], la curva característica se muestra en la figura 5.7, donde puede observarse la separación del ruido y de la señal.

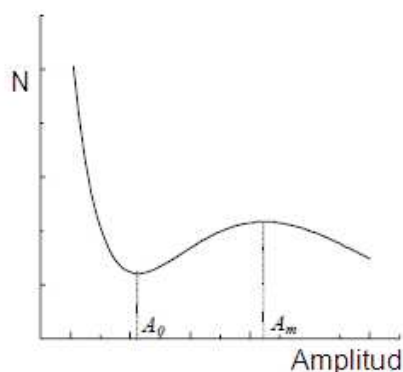


Figura 5.7: Respuesta a un fotoelectrón (SPE por sus siglas en inglés), forma del espectro de amplitud.

Como primer paso en el proceso de calibración de la cámara oscura, es necesario medir la respuesta a un fotoelectrón (SPE por sus siglas en inglés) de ambos MaPMTs. Para obtener la respuesta a un fotoelectrón proponemos el arreglo experimental de la figura 5.8, el cual consta de una caja negra de 40 centímetros de ancho, 40 centímetros de alto y 4 metros de largo, en un extremo colocamos el fotomultiplicador multianodo H7546B y en el extremo opuesto un LED; de las hojas técnicas del LED, se tiene: su ángulo de emisión es de 15° , considerando la distancia de 4 m, le llegará al MaPMT un frente de onda plano de 0.5 m, cubriendo en su totalidad el área efectiva de detección que es de 18.1x18.1 mm. Para nuestro caso, programamos el generador para que le suministre al LED pulsos de 3.25 volts en amplitud y 20 ns de ancho, de forma experimental; se incrementa el alto voltaje que polariza el fotomultiplicador hasta que en el osciloscopio logremos obtener pulsos diferentes del ruido electrónico del sistema. Para hallar el espectro del SPE, la relación que se considera es que el osciloscopio registre 10 señales de ruido (señales alrededor de 2 mV) por 1 de señal distinta al ruido (por ejemplo, señales mayores a 5 mV). El voltaje óptimo de operación para el fotomultiplicador, lo obtenemos cuando el máximo de la curva en el espectro de carga de respuesta a un fotoelectrón se encuentra alrededor de 1 pC y además este se separa totalmente del máximo de la curva del ruido. La respuesta al SPE se utiliza para convertir la señal analógica a flujo de fotones. Sin embargo, las señales que obtenemos de cada pixel están en unidades de voltaje, entonces, obtenemos el espectro de amplitud con las señales relacionadas a la respuesta del SPE, obteniendo formas de curvas similares al espectro de carga. El valor máximo de la curva a la respuesta del SPE será la medida básica

para obtener el número de fotones que registre el fotomultiplicador cuando este registre algún evento. De forma experimental se obtuvo que, el voltaje óptimo de operación fué de alrededor de 960 Volts. Del análisis de 30,000 eventos, para cada pixel del MaPMT, hallamos el espectro de amplitud producida por la respuesta a un fotoelectrón para los pixeles con máxima ganancia, vea la figura 5.9, para el resto de pixeles, vea las figuras 5.10 y 5.11. También hacemos notar que el pixel 28 de cada MaPMT, está alineado con el orificio de observación directamente [22]. Para fines prácticos, los MaPMTs se eligieron de tal forma que todos los pixeles tuvieran el SPE lo más cercano posible, de acuerdo a la hoja técnica, con el objetivo de evitar realizar ajustes en el momento de reconstruir los datos.

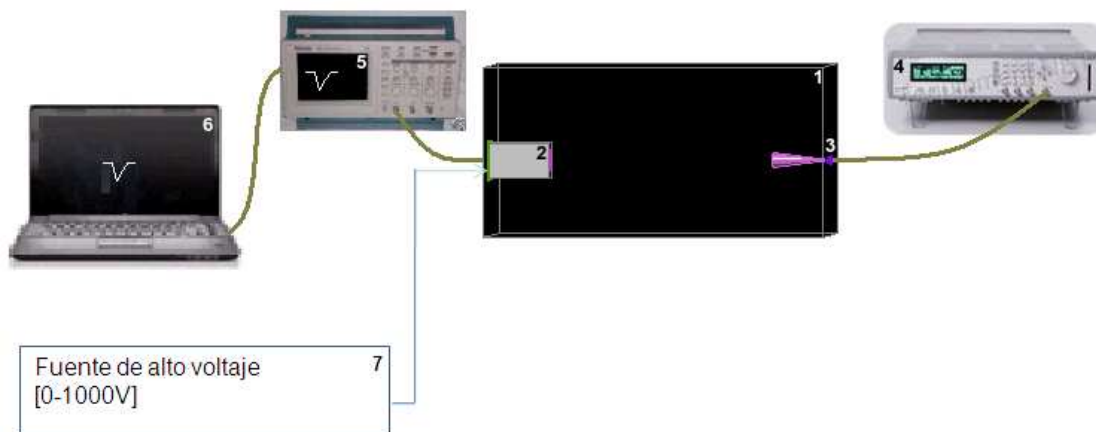


Figura 5.8: Arreglo experimental para obtener el espectro de amplitud de la respuesta a un fotoelectrón SPE. 1 – Caja negra de dimensiones $40 \times 40 \times 400 \text{ cm}^3$. 2 - Tubo de fotomultiplicador de la empresa Hamamatsu Photonics Serie H7546B. 3- LED UV. 4 - Generador de pulsos digital. 5 - Osciloscopio digital de dos canales con interfaz USB. 6- PC, almacena los pulsos del osciloscopio. 7 - Fuente de alimentación de alto voltaje.

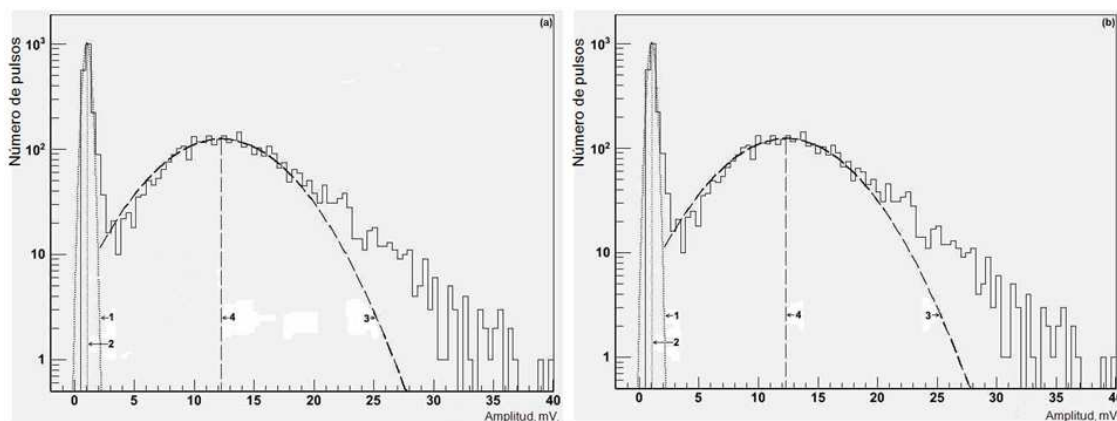


Figura 5.9: Espectro de amplitudes, respuesta a un fotoelectrón para el pixel de máxima ganancia de cada fotomultiplicador multianodo. a) SPE, pixel 57 para el MaPMT del telescopio T-200. b) SPE, pixel 49 para el MaPMT del telescopio T-25. 1-pulso de la distribución del ruido electrónico. 2- Promedio del ruido electrónico. 3- Ajuste de distribución de amplitudes correspondientes a un fotoelectrón. 4- Valor promedio de la distribución de amplitudes correspondientes a un fotoelectrón.

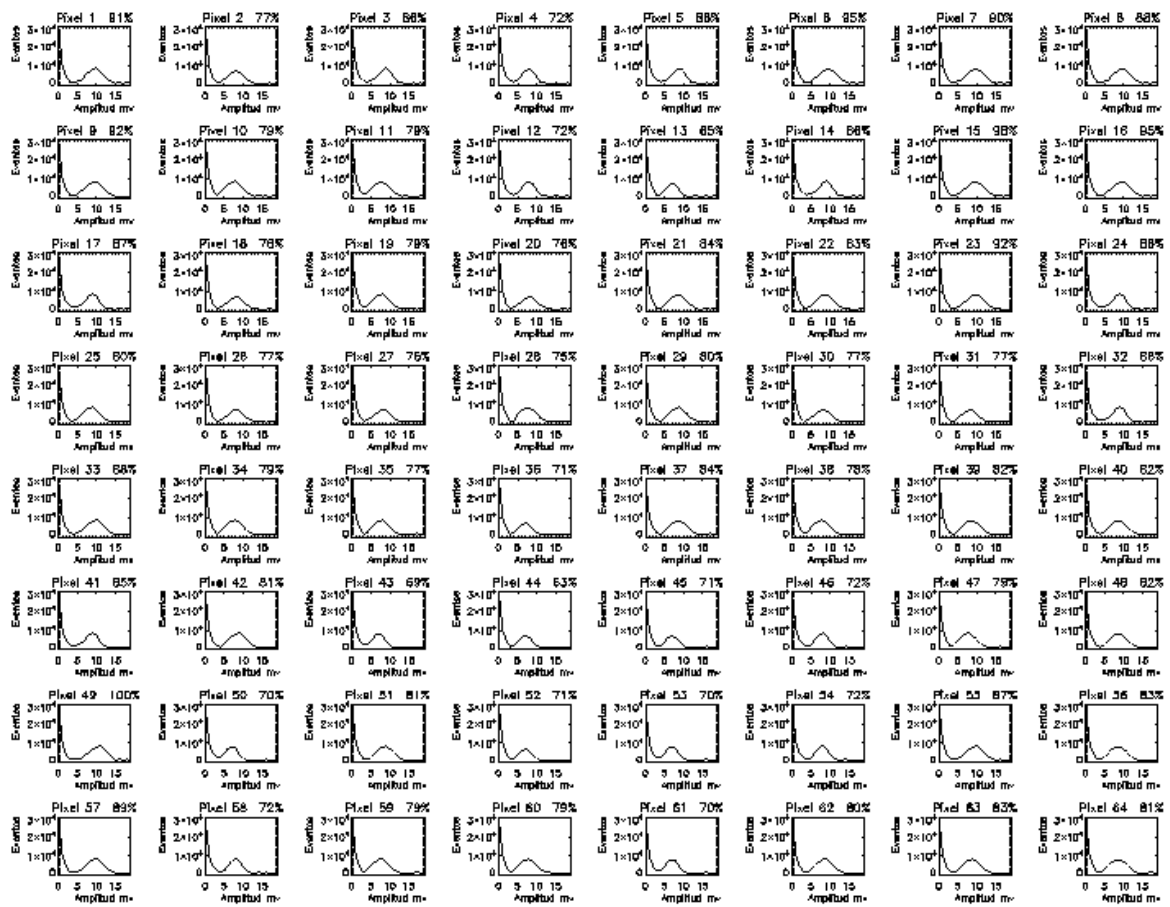


Figura 5.10: Espectro de amplitudes, respuesta a un fotoelectrón para el fotomultiplicador multiánodo H7546B Serie PA4142, utilizado en el telescopio T-200.

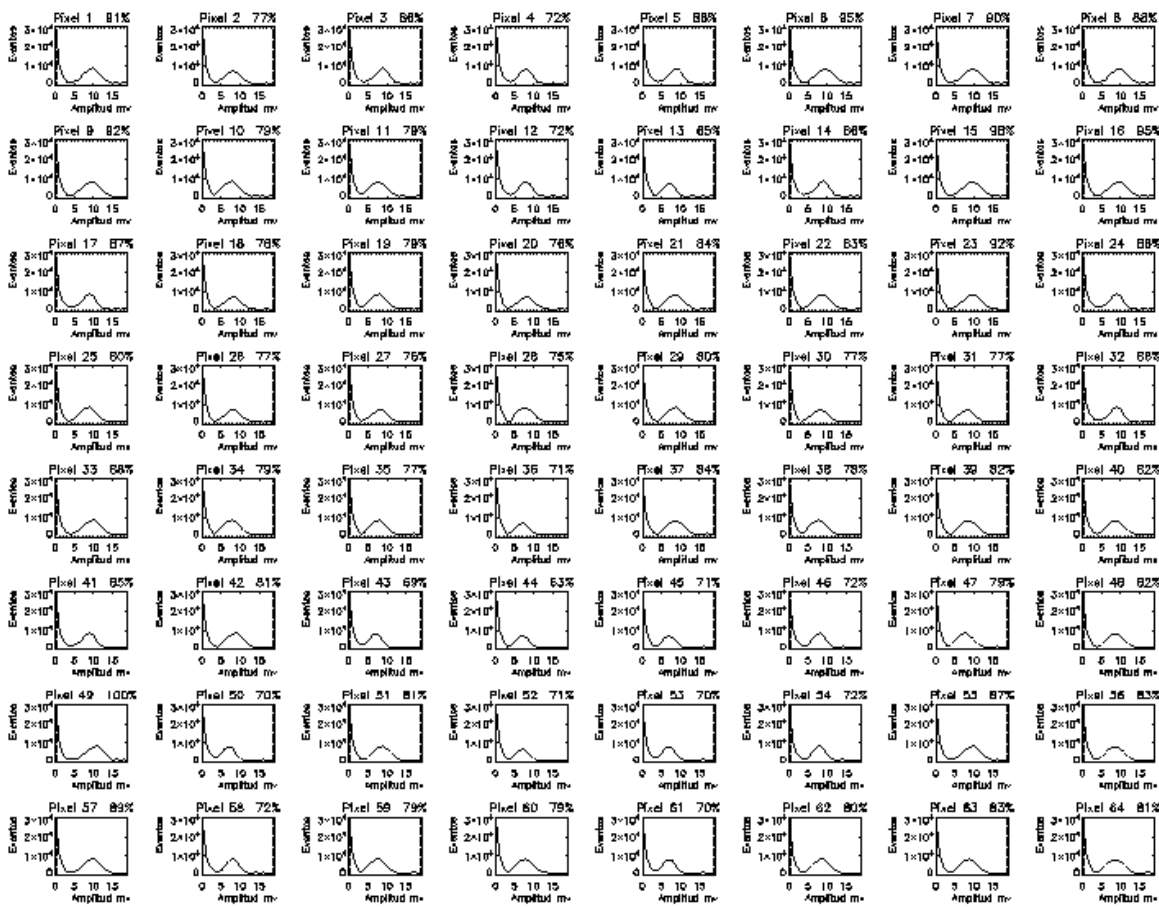


Figura 5.11: Espectro de amplitudes, respuesta a un fotoelectrón para el fotomultiplicador multiánodo H7546B Serie PA4159, utilizado en el telescopio T-25.

5.5. Sistema electrónico de la cámara oscura

La instrumentación electrónica de la cámara oscura, se diseñó con dispositivos electrónicos de alta velocidad de procesamiento y bajo consumo de energía, en la figura 5.12 se muestra el diagrama a bloques de la electrónica de la cámara oscura, en la figura 5.13 se muestra una de las dos placas electrónicas PCB, en la cual se puede observar que el sistema electrónico ocupa fuentes conmutadas, los cuales proporcionan el voltaje y corriente de operación óptimo para cada circuito electrónico. La electrónica completa junto con los dos MaPMTs se muestra en la figura 5.22.

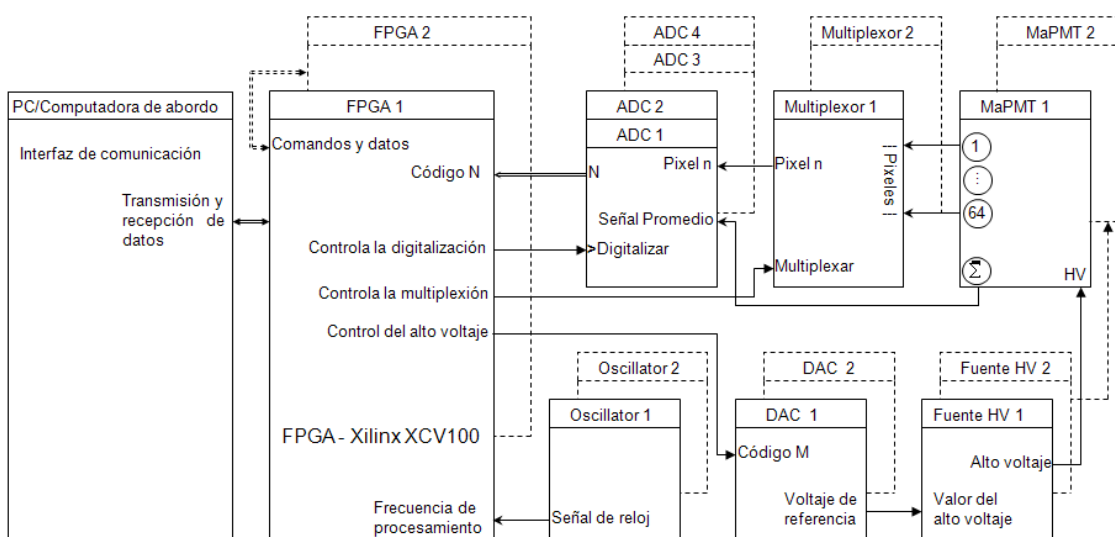


Figura 5.12: Diagrama a bloques de la electrónica de la cámara oscura. Líneas punteadas, para el telescopio T-200. Líneas continuas, para el telescopio T-25. El diagrama a bloques para cada telescopio consta de un fotomultiplicador multiánodo MaPMT H7546B, un multiplexor analógico de 64 canales, dos convertidores analógico-digital ADC, una fuente de alto voltaje, controlado por un convertidor digital-analógico DAC un arreglo de compuertas lógico programable FPGA y una interfaz de comunicación. La frecuencia de procesamiento del FPGA depende de la frecuencia del oscilador.

Para cada telescopio, las señales de los sesenta y cuatro pixeles del fotomultiplicador multiánodo MaPMT se conectan a la entrada de un multiplexor analógico de sesenta y cuatro canales; por medio del control de multiplexión, la señal de uno de los pixeles se envía a la entrada de un primer convertidor analógico digital ADC1, en donde su valor analógico es convertido a una palabra digital, código N, el cual se transfiere a un arreglo de compuertas lógico programable FPGA, en donde es procesado y almacenado. El MaPMT también proporciona una señal promedio de los sesenta y cuatro pixeles, la cual se conecta directamente a la entrada de un segundo convertidor analógico digital ADC2, el código que se obtiene, también se envía al FPGA para su evaluación y almacenamiento. El procesador principal de la electrónica de cada telescopio es un arreglo de compuertas lógico programable (FPGA por sus siglas en inglés) de la empresa Xilinx serie XCV100, además de controlar la multiplexión, digitalización de las 65 señales analógicas del MaPMT (64 pixeles más la señal promedio) y envío de información a la PC o computadora de abordo, también controla la fuente de alto voltaje, dependiendo del valor del código N, el FPGA cada minuto, envía una palabra digital, código M a un convertidor digital analógico DAC con la finalidad de regular el valor del alto voltaje, para que el MaPMT opere correctamente, para protegerlo de eventos muy intensos y de larga duración o incluso cuando el instrumento opere durante el día.

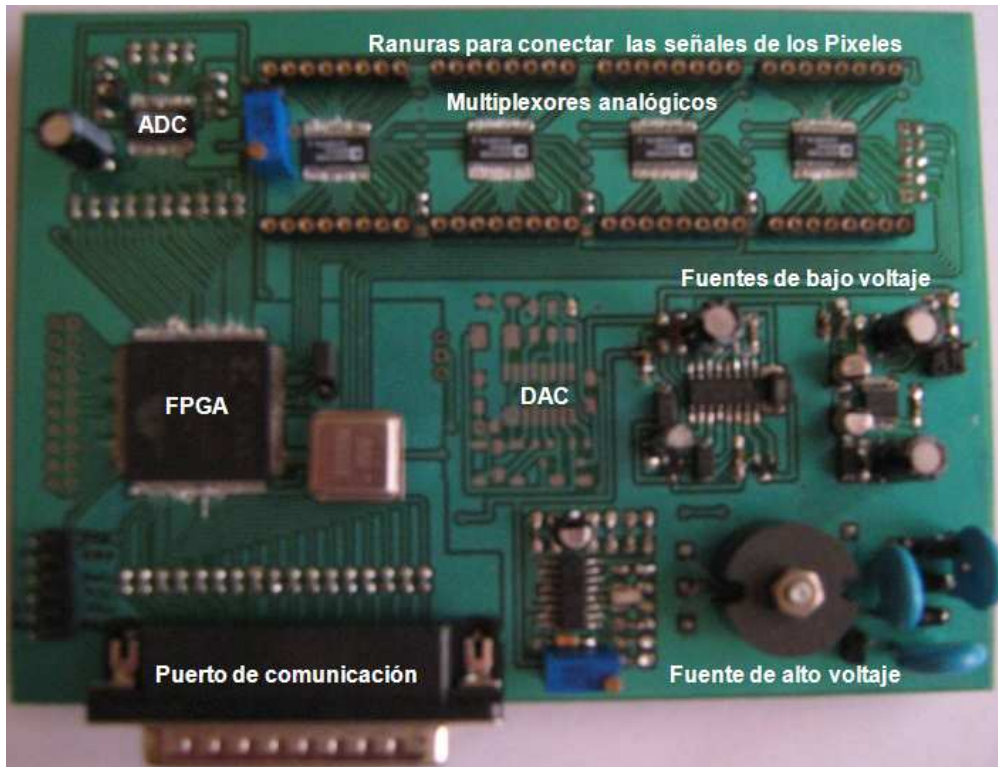


Figura 5.13: Una de las dos tarjetas electrónicas, la explicación extensa se encuentra en el texto.

El multiplexor analógico, es un dispositivo que por medio de un control digital, permite seleccionar una de varias señales analógicas conectadas en los canales de entrada, es decir, la señal analógica seleccionada pasará directamente a la salida. Actualmente, los multiplexores analógicos comerciales tienen un número limitado de entradas, como el de la empresa Analog Device serie ADG706 [23], es un multiplexor de 16 canales, la selección de un canal se realiza con código digital y niveles de voltaje CMOS aplicados a las entradas A0-A3, también incluye la entrada EN, para habilitar o deshabilitar la operación del dispositivo, el diagrama esquemático se muestra en la figura 5.14.

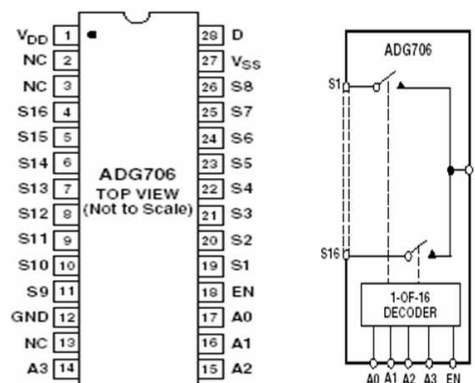


Figura 5.14: Multiplexor analógico de 16 canales de la empresa Analog Device serie ADG706.

Para obtener un multiplexor analógico de 64 canales, se utilizaron cuatro multiplexores ADG706 de 16 canales, como se muestra en la figura 5.15. Los ánodos al colector el flujo de electrones generados en los dinodos del fotomultiplicador, proporcionan señales negativas, el ADC que utilizamos solo procesa señales positivas, es por eso que después del multiplexor incluimos un amplificador operacional en configuración inversor de señal. El control del multiplexaje lo realiza el FPGA.

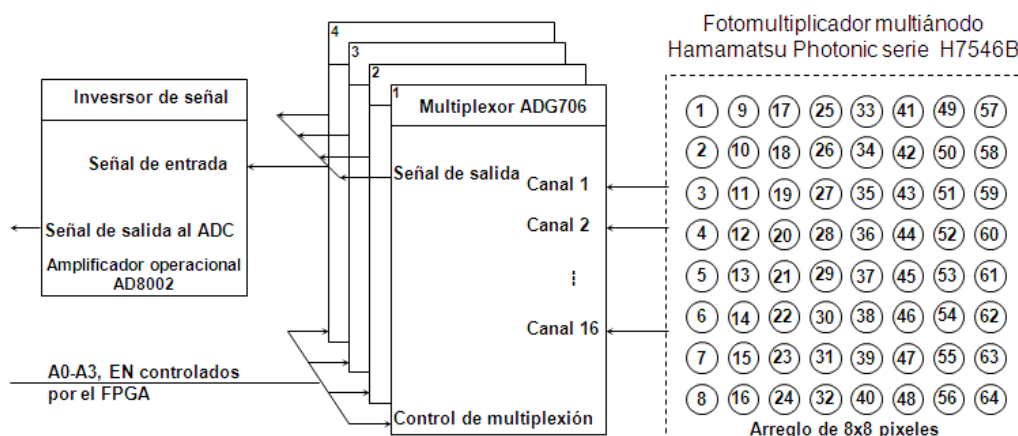


Figura 5.15: Diagrama a bloques de la construcción de un multiplexor analógico de sesenta y cuatro canales diseñado con cuatro multiplexores analógicos ADG706 de 16 canales. El ADC trabaja con señales positivas por eso después del multiplexor se añade un amplificador operacional con la configuración de inversor de señal.

El convertidos analógico digital ADC, es un dispositivo que representa la amplitud de una señal analógica en su entrada a una palabra digital de n bits como salida, la resolución del dispositivo se define por la relación entre la amplitud máxima de la señal aceptable en la entrada y el número de bits del ADC. Para nuestro caso, ocupamos el ADC de la empresa Anlog Device serie AD9203 [24], en la figura 5.16 mostramos el encapsulado y sus características principales. Es un dispositivo de bajo consumo de potencia, con frecuencia máxima de digitalización de 40 MHz, la amplitud máxima de la señal de entrada es de 2 V, la palabra digital que genera es de 10 bits, con los valores anteriores la resolución del ADC es de ~ 2 mV.

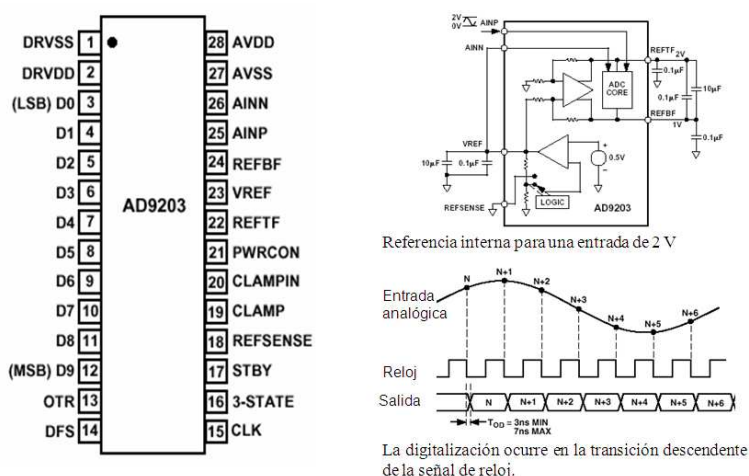


Figura 5.16: Encapsulado y características del ADC de la empresa Anlog Device serie AD9203.

Fuente de bajo voltaje. Se conocen como convertidores DC/DC o fuentes conmutadas, utilizan la técnica de modulación en frecuencia y ancho de pulso PWM, con configuración inductiva o capacitiva, según se requiera, generan el voltaje y corriente necesario a la salida. Para este proyecto, se utilizó el convertidor DC/DC de la empresa Maxim serie MAX797ESE [25] para generar 3.3 Volts, figura 5.17. También se utilizó el dispositivo electrónico de la misma empresa con serie MAX768 [26], para generar ± 5 Volts figura 5.18.

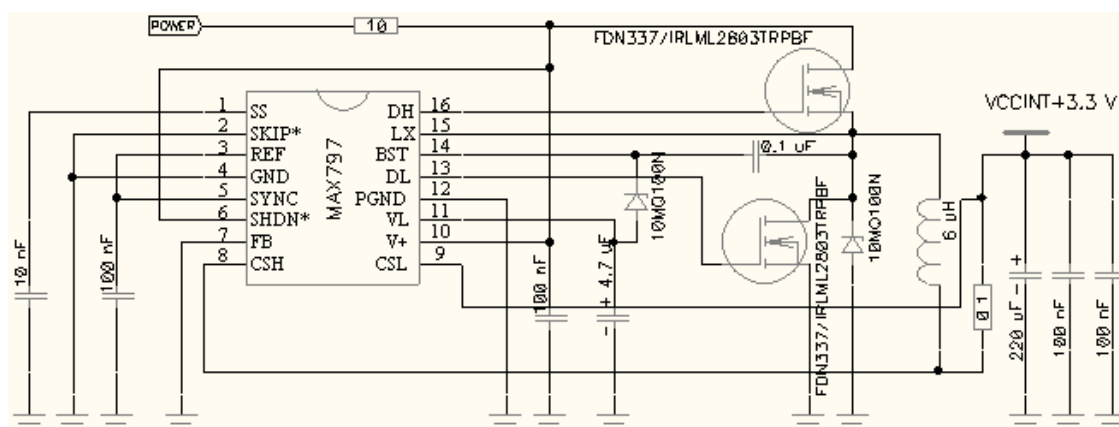


Figura 5.17: Convertidor DC/DC MAX797 configurado para generar un voltaje de 3.3 Volts a 1.5 A.

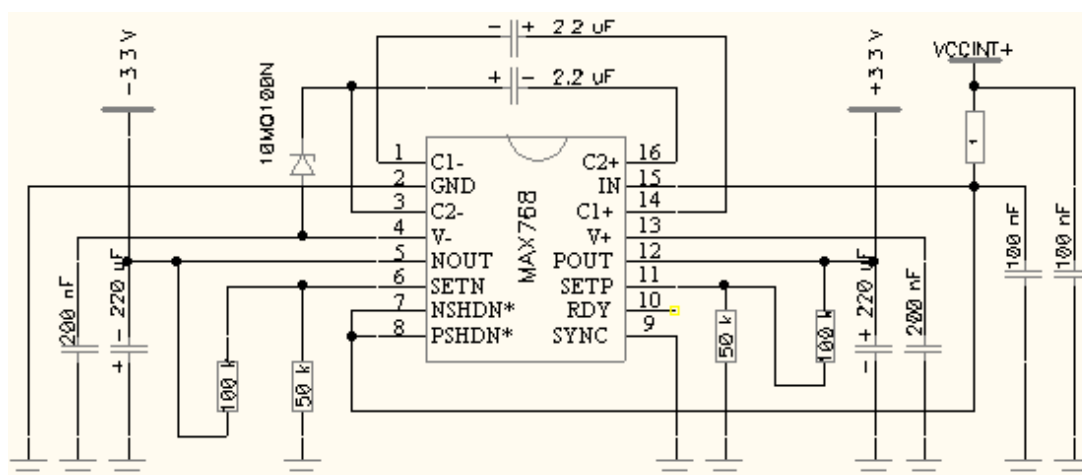


Figura 5.18: Convertidor DC/DC MAX768 configurado para generar un voltaje de ± 5 Volts, a partir de un voltaje de entrada positivo.

Fuente de alto voltaje. La cámara obscura utiliza una variante de la fuente de alto voltaje utilizado en los experimentos a bordo de la misión espacial “Tatiana” y “Tatiana-2”, desarrollado en el Instituto de Física Nuclear de la Universidad Estatal de Moscú. El diagrama esquemático se muestra en la figura 5.19, su funcionamiento se basa en el modulador de ancho de pulso de la empresa Texas Instruments serie TL598 [27]. La fuente de alto voltaje se regula con un convertidor digital analógico de la empresa Analog Device

serie AD7303 [28], con voltaje de salida de 5 V, es de 8 bits, con el que acepta un código del 0-256 generando un voltaje lineal de 0 a 2kV, para la cámara oscura, el voltaje máximo de los fotomultiplicadores es 1kV, entonces el rango de voltaje de salida del DAC será de 0 a 2.5V.

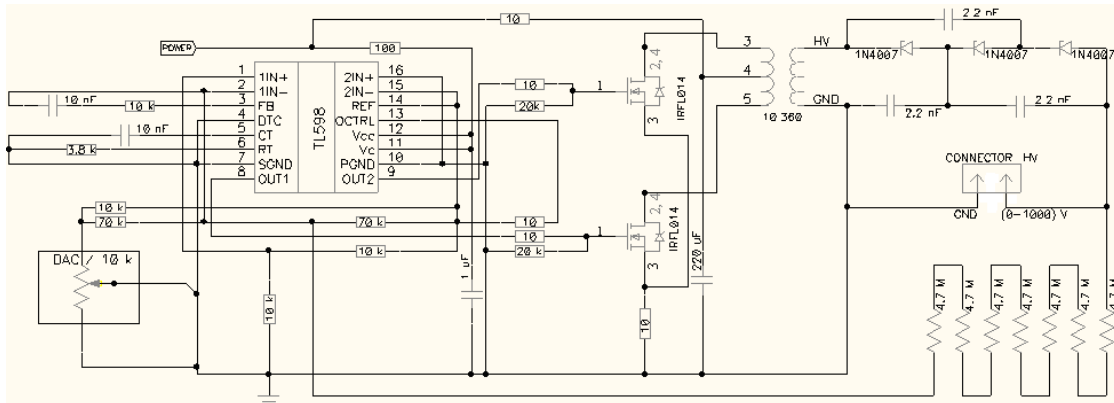


Figura 5.19: Diagrama esquemático de la fuente de alto voltaje de 0 a 1kV.

El procesador de la cámara oscura (FPGA) y la interfaz de comunicación. Cada tarjeta electrónica tiene como procesador principal un arreglo de compuertas lógico programable (FPGA por sus siglas en inglés) de la empresa Xilinx serie XCV100 [29], en la tabla 5.2 se muestran las características principales el FPGA controla la multiplexión y digitalización de las 64 señales analógicas del MaPMT, controla y monitorea la fuente de alto voltaje durante la operación del fotodetector con la finalidad de protegerlo de eventos muy intensos y de larga duración o incluso cuando el instrumento científico opere durante el día. de la figura 5.12, podemos observar que el FPGA del telescopio T-25 es el procesador principal de la cámara oscura, debido a que por medio de él, fluye la información de forma bidireccional entre la PC y el FPGA de cada telescopio. En la figura 5.20 mostramos la interfaz de comunicación entre la PC y el procesador principal de la cámara oscura.

Nombre	XCV100
Celdas lógicas	2700
Compuertas del sistema	108904
Memoria, número de bits	40960
Encapsulado TQ144 (20mmx20mm), pines libres	98

Tabla 5.2: Características principales del arreglo lógico programable FPGA de la empresa Xilinx, utilizado en la cámara oscura

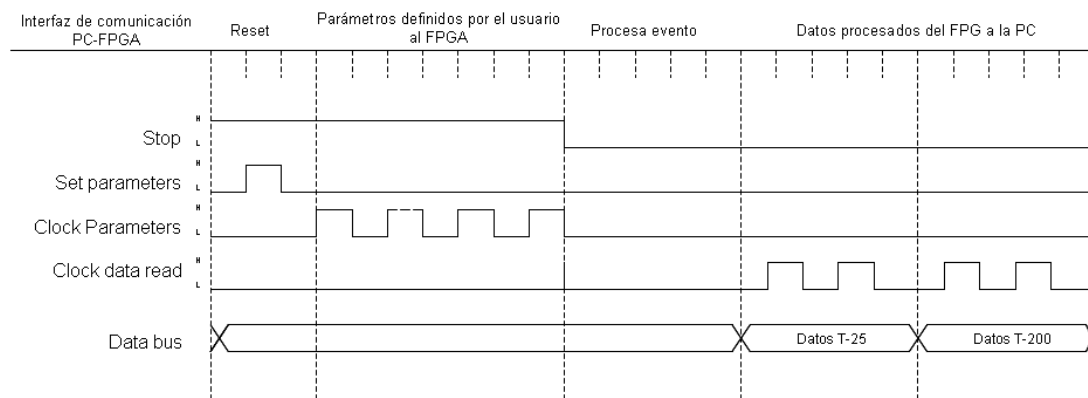


Figura 5.20: Diagrama esquemático de la interfaz de comunicación entre la PC y el FPGA. Se muestra la secuencia de procesamiento y adquisición de datos.

5.6. Interfaz gráfica para configurar el modo de operación de la cámara oscura

Las tareas que realiza el FPGA son definidas por el usuario desde la PC, se diseñó un programa en lenguaje gráfico LabView y se utilizó el puerto paralelo bidireccional de la PC para facilitar la configuración del modo de operación de cada telescopio de la cámara oscura, vea figura 5.21; esta interfaz gráfica consta de lo siguiente:

Señal a procesar. De cada fotomultiplicador tenemos las 64 señales y una señal extra definida como dinodo 12 o dinodo común, esta última tiene la propiedad de ser el promedio en amplitud de las 64 señales que generan los pixeles y es positiva. mediante la interfaz gráfica podemos elegir si el FPGA procesará las señales de los pixeles o del dinodo común.

Offset del sistema. Durante la operación de los fotodetectores, el ruido de fondo presente en la atmósfera se verá reflejado como un voltaje constante más la amplitud de las señales que se logren registrar producidas por los eventos luminosos, para fines prácticos según sea el caso, el sistema tiene la opción de poder eliminar o no el voltaje constante (offset).

Alto voltaje controlado. La interfaz gráfica nos da la opción de que el usuario defina el valor del alto voltaje de operación del PMT, como es el caso cuando se halla la respuesta a un fotoelectron SPE. También se tiene la opción de que el alto voltaje se ajuste de forma automática durante el monitoreo atmosférico.

Voltaje de umbral. Para considerar un evento válido, en esta opción definimos el valor del voltaje de umbral que debe superar la señal de uno de los 64 pixeles y del dinodo 12.

Forma de evaluar el evento. La forma en que consideramos si un evento es o no válido, se hace evaluando dos formas lógicas para las señales de cada fotodetector. La forma lógica "or", si la amplitud de la señal del pixel en proceso ó del dinodo 12 es mayor que los voltajes de umbral definidos, entonces se considera como evento válido. Para la forma lógica "and", si la amplitud de la señal del pixel y del dinodo 12 procesado es mayor que los voltajes de umbral definidos, entonces se considera como evento válido. El FPGA al considerar un evento válido, almacena las trazas posibles en un intervalo de tiempo que depende de la frecuencia de procesamiento, para nuestro caso, el FPGA tiene una memoria de almacenamiento de 4k x 10 bits. El FPGA obtiene el dato de forma digital, código N cada 1 ms, entonces cada 64 ms se procesa

nuevamente la señal de cada pixel.

Retardar el tiempo de adquisición. Esta opción nos permite ver de forma mas lenta la reconstrucción del evento en el programa de adquisición.

Por ejemplo, de la figura 5.21, los parámetros y valores definidos indican lo siguiente:

¹El telescopio T-200, procesará las señales de los 64 pixeles, se le sumará un voltaje constante offset de 10 mV a la señal de cada pixel, el alto voltaje de operación será constante de 960 volts, el evento se considera válido si la amplitud de la señal de cualquier pixel o la del dinodo 12 son mayores que 20 mV.

²El telescopio T-25, procesará la señal del dinodo 12, sin suma de offset 0 mV, el alto voltaje de operación lo ajustará de forma automática el FPGA dependiendo del ruido de fondo o brillantez de los eventos que se presenten en la atmósfera, el evento se considera válido si la amplitud de la señal de cualquier pixel supera los 10 mV y la señal del dinodo 12 es mayor a 15 mV.

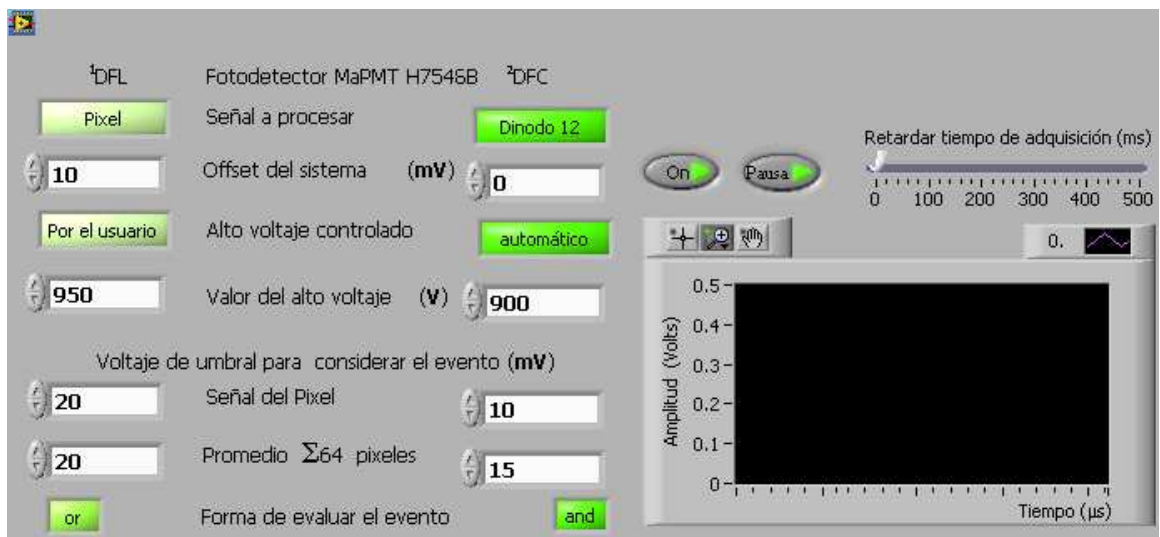


Figura 5.21: Interfaz gráfica, parámetros definidos por el usuario para configurar el modo de operación de cada telescopio que constituyen la cámara oscura.

5.7. Pruebas de laboratorio

Para realizar las pruebas de laboratorio de la cámara oscura, se ensamblaron todas las partes que la constituyen (fotomultiplicadores en calidad de fotoetectores, tarjeta electrónica, interfaz de comunicación etc. etc.) como se muestra en la figura 5.22. Posteriormente se utilizó un generador de pulsos y un diodo emisor de luz LED, el LED emitía la señal de diferente amplitud y duración en forma de fotones proporcionada por el generador, la cámara oscura, internamente, procesaba la señal del LED y a través del puerto de comunicación, la PC adquiría los datos y reconstruía la señal, el arreglo se muestra en la figura 5.23.



Figura 5.22: La cámara oscura, ensamble completo del sistema, se puede apreciar la posición de cada fotodetector correspondiente a cada telescopio.

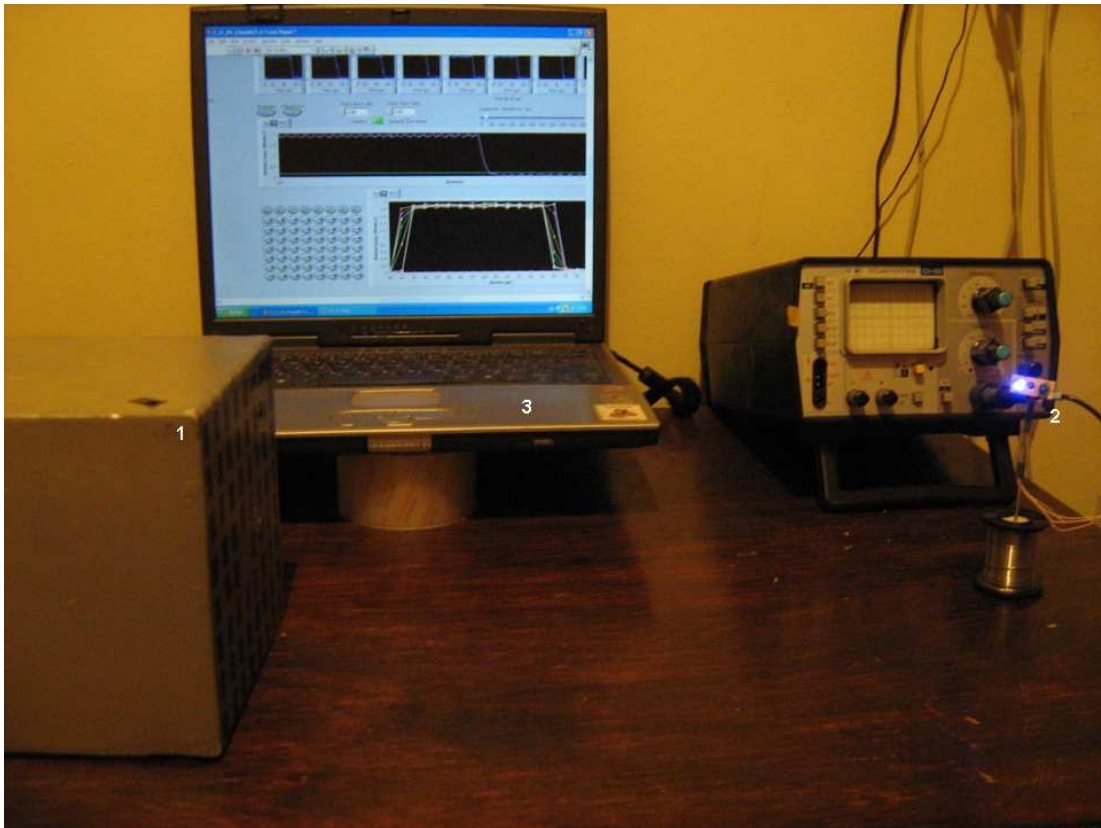


Figura 5.23: Pruebas de laboratorio, 1- Cámara oscura. 2- LED y generador de funciones. 3- Adquisición y reconstrucción de datos con la PC.

5.8. Resultados obtenidos con la cámara oscura en el Volcán Sierra Negra

Considerando la caracterización de respuesta a un fotoelectrón de cada fotomultiplicador multiánodo H7546B y teniendo el ensamblado completo del sistema. La cámara oscura se puso en operación en el volcán Sierra Negra situado cerca de Puebla a una altura de ~ 4300 metros sobre el nivel del mar, lo que nos motivo elegir este lugar, fué porque el satélite Universitario “Tatiana-2”, registró algunos TLEs UV en un radio de 500 km alrededor de este volcán, vea capítulo 3. En la figura 5.24 se puede observar que sobre el horizonte del volcán se tiene una atmósfera limpia y libre de nubes.

Una forma de probar y calibrar la cámara oscura, consiste en registrar el tiempo que tarda la Luna en atravesar un pixel. Para ello la cámara se colocó en una base de telescopio comercial, con la finalidad de apuntar y seguir la imagen de la Luna. Para el telescopio T-200, el tiempo que le tomó a la Luna en atravesar un pixel, fué de ~ 25 s. Para el telescopio T-25, el tiempo fue de ~ 60 s. Para ambos telescopios el máximo de la señal se registra cuando la imagen de la Luna cubre completamente el pixel, en la figura 5.25 se muestran los resultados.



Figura 5.24: El horizonte visto desde el volcán Sierra Negra, situado cerca de Puebla a una altura de ~ 4300 m.s.n.m

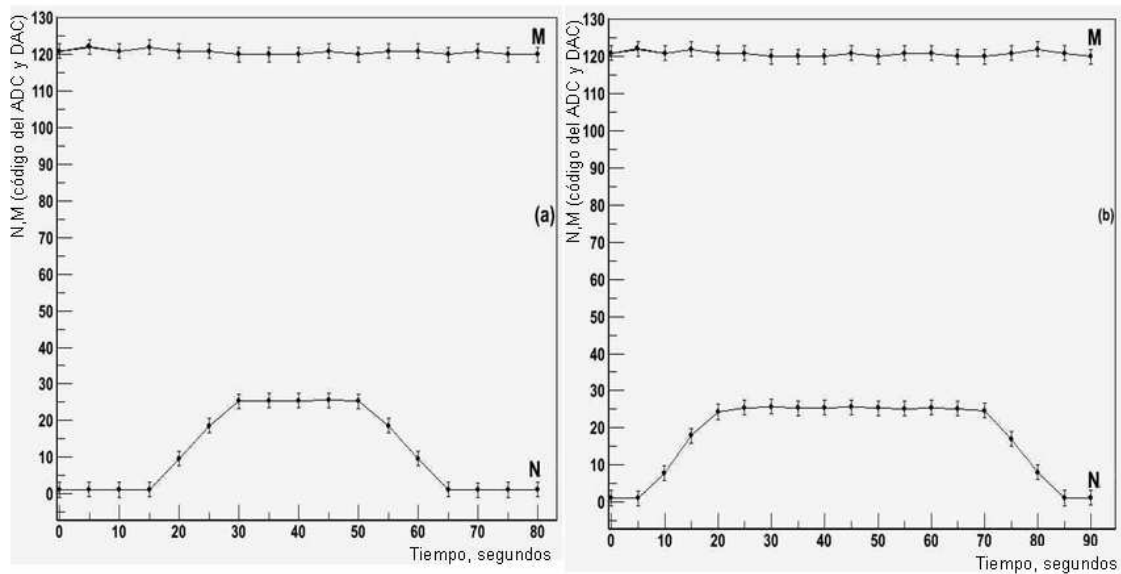


Figura 5.25: Tiempo que le toma la Luna en atravesar un pixel. a) Pixel del telescopio T-200. b) Pixel del telescopio T-25. Los puntos con barras de error, son datos experimentales. Las curvas continuas, son el valor promedio del código N y M.

Las primeras mediciones que se realizaron con la cámara oscura fueron, la obtención de la intensidad ó flujo de luz de la Luna en sus diferentes fases [30]. Durante las observaciones que se realizaron, el eje del detector siempre estuvo orientado a menos de 30° sobre el Cenit, para este ángulo, los fotones al atravesar la masa de aire hasta llegar al pixel del fotodetector, habrán perdido el 15 % de su energía inicial, para ángulos con mayor inclinación, la pérdida de energía se incrementa rápidamente. Los resultados que se muestran en las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y en la figura 5.26 se obtuvieron en noches totalmente claras con condiciones climáticas favorables.

Fase Lunar %	Altitud ($^\circ$)	$z=90^\circ$ -Altitud $^\circ$	Sec z	Energía perdida (%)
0	70	20	1.06	6
10	75	15	1.03	3
25	65	25	1.1	1
50	83	7	1	~ 0
75	73	17	1.04	4
95	68	22	1.07	7
100	72	18	1.05	5

Tabla 5.3: Parámetros considerados durante el monitoreo. Fase Lunar, es el % de Luna iluminada. Altitud es el ángulo del eje de observación de la cámara oscura sobre el horizonte. z, es la distancia angular con respecto al Cenit. Sec z, Masa de aire que atraviesa el fotón. Energía perdida, es la energía que pierde el fotón al atravesar la masa de aire.

Fase Lunar %	Señal del pixel	Fotones registrados	
	Amplitud \pm error (mV)	T-200 \pm error	T-25 \pm error
0	17 ± 1.0	1.52 ± 0.23	1.51 ± 0.23
10	21 ± 1.0	1.88 ± 0.23	1.87 ± 0.23
25	25 ± 2.0	2.23 ± 0.46	2.22 ± 0.46
50	46 ± 2.8	4.11 ± 0.65	4.09 ± 0.65
75	94 ± 3.4	8.39 ± 0.79	8.36 ± 0.78
95	270 ± 3.8	24.11 ± 0.88	24.00 ± 0.88
100	400 ± 7.8	35.71 ± 1.34	35.56 ± 1.34

Tabla 5.4: Número de fotones registrados por el pixel 28 de cada fotodetector. De la figura 5.9 (espectro de amplitudes del SPE) tenemos que, la amplitud promedio sin considerar el ruido del sistema es de: 11.2 mV, para el T-200 y 11.25 mV, para el T-25.

Para obtener el flujo de luz UV registrado por cada pixel, consideramos lo siguiente:

- Fotones promedio en la atmósfera 10^8 .
- Fotones que registra el pixel por unidad de tiempo, $n_{fotones}$.
- Absorción al atravesar la masa de aire, Sec z.
- Se observa alrededor de 4π (ángulo sólido de observación)

Con estas consideraciones se tiene que: $\phi_{uv} = 10^8 \frac{n_{fotones}}{cm^2 s} 4\pi \text{ Sec } z$

Fase Lunar %	Fotones/cm ² s		$\phi_{uv}(10^8)$	
	T-200 ± error	T-25 ± error	T-200 ± error	T-25 ± error
0	5.93E+05 ± 9.02E+04	5.90E+05 ± 9.00E+04	0.078 ± 0.012	0.078 ± 0.012
10	7.32E+05 ± 9.02E+04	7.29E+05 ± 9.00E+04	0.094 ± 0.011	0.094 ± 0.011
25	8.72E+05 ± 1.80E+05	8.68E+05 ± 1.80E+05	0.120 ± 0.024	0.120 ± 0.024
50	1.60E+06 ± 2.53E+05	1.60E+06 ± 2.52E+05	0.202 ± 0.031	0.201 ± 0.031
75	3.28E+06 ± 3.07E+05	3.26E+06 ± 3.06E+05	0.428 ± 0.040	0.426 ± 0.040
95	9.42E+06 ± 3.43E+05	9.38E+06 ± 3.42E+05	1.270 ± 0.046	1.260 ± 0.046
100	1.40E+07 ± 5.23E+05	1.39E+07 ± 5.22E+05	1.840 ± 0.069	1.830 ± 0.068

Tabla 5.5: Intensidad ó flujo de fotones en el rango UV registrados por el área del pixel, con los parámetros de observación considerados.

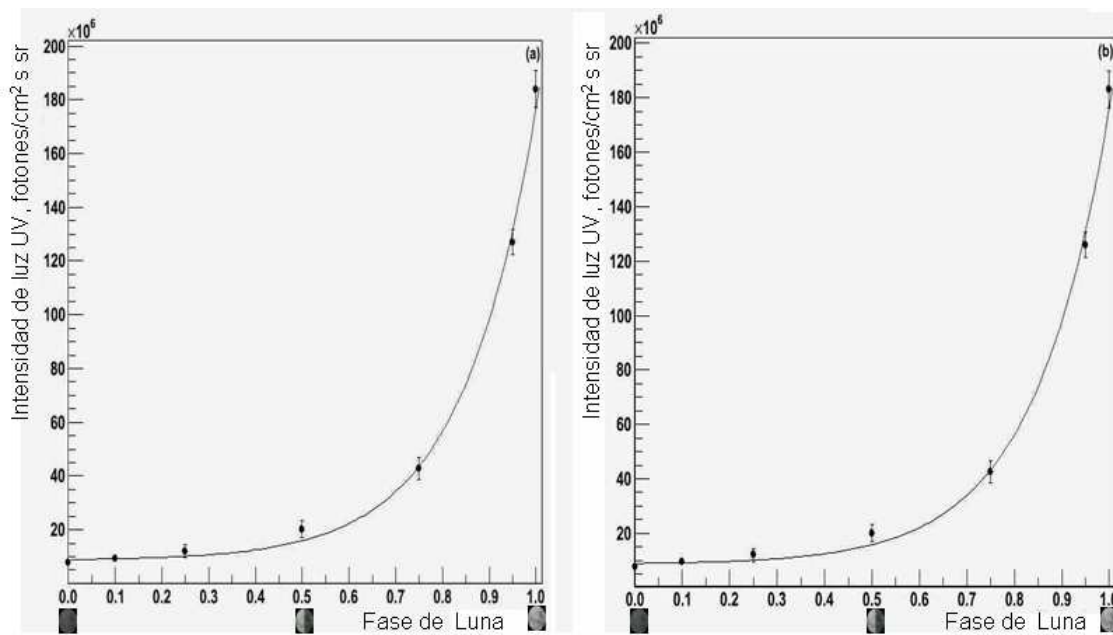


Figura 5.26: Promedio de luz UV registrado durante las diferentes fases de Luna con los fotomultiplicadores multianodo. a) T-200. b) T-25.

Algunos de los fenómenos luminosos que se lograron registrar con el telescopio T-200 [31][32][33], se muestran en las figuras 5.27 “Sprite”, 5.28 “Elfo”, 5.29 y 5.30 “Micro-meteorito” y en las figuras 5.31 y 5.32 son eventos que se observaron con el telescopio T-25. Para el sprite en dos dimensiones, es de la forma de eventos con desarrollo temporal registrados por los satelites “Tatiana” y “Tatiana-2”. La traza en forma de anillo se atribuye a un elfo, como los registrados con cámaras CCDs y espectroscopios, descritos en el capítulo 2. para el caso del micrometeorito, la traza es un segmento lineal como puede apreciarse durante su desarrollo.

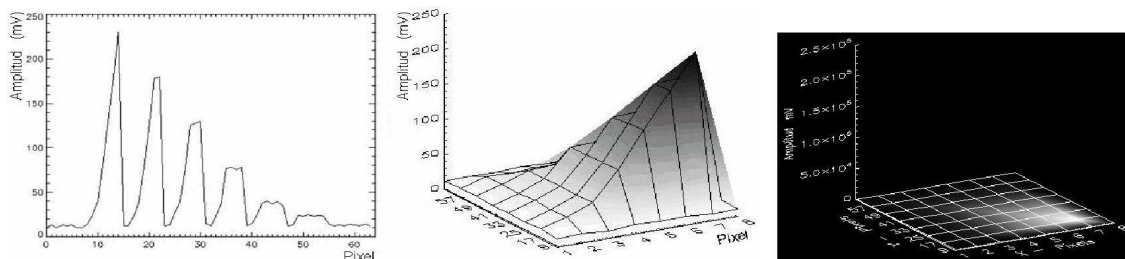


Figura 5.27: Traza UV de un TLE registrado el 24/07/2010, a las 2:55 am, hora local de México, observado en una diapositiva de 64 ms. (Parte izquierda) amplitud en mV registrado por cada pixel. (Parte central) desarrollo en espacio y tiempo del evento, registrado en el arreglo de 8x8 pixeles. (parte derecha) Contorno del evento.

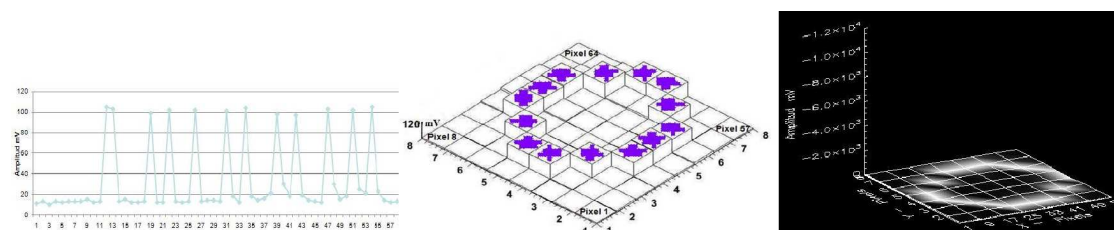


Figura 5.28: Elfo registrado el 11/06/2011, a las 0:35 am, hora local de México. En una diapositiva de 640 μ s, frecuencia de muestreo entre cada pixel, 10 μ s. (Parte Izquierda) amplitud en mV que registró cada pixel. (Parte central) imagen del evento en el arreglo de 8x8 pixeles. (Parte derecha) contorno del evento.

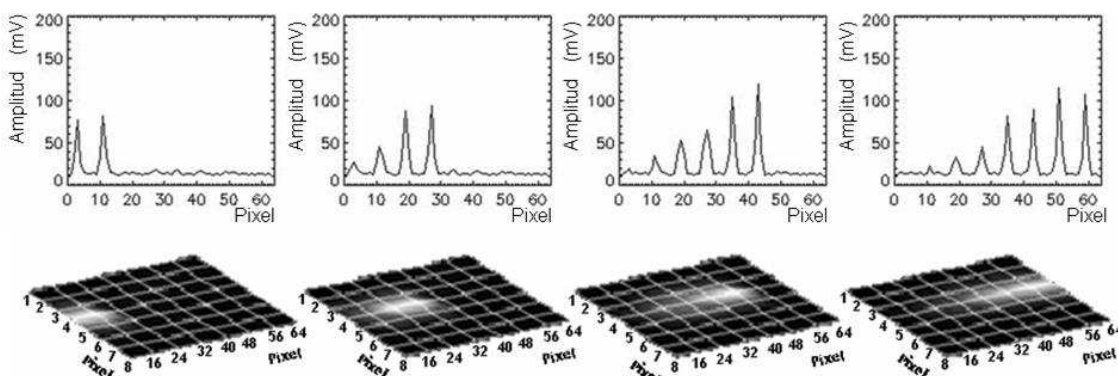


Figura 5.29: Traza UV de un micro-meteorito registrado el 22/10/2010, a las 3:20 am, hora local de México, observado durante 256 ms, en 4 diapositivas, de 64 ms cada una. cada diapositiva representa el desarrollo del objeto cosmico en el campo de visión de la cámara obscura. (Parte superior) amplitud en mV que registró cada pixel en cada diapositiva. (Parte inferior) traza del micrometeorito durante su desarrollo.

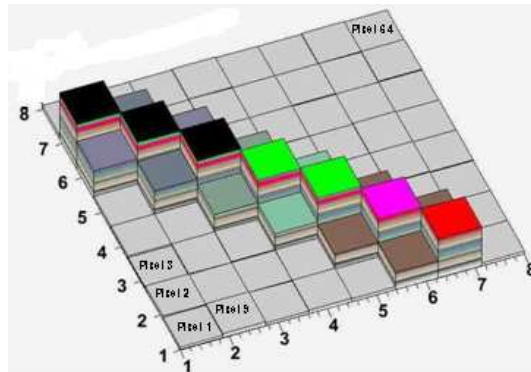


Figura 5.30: Traza UV de un micro-meteorito registrado el 19/10/2013, 4:20 tiempo de Mexico, observado durante 640 ms, con frecuencia de muestreo entre pixel 10 ms.

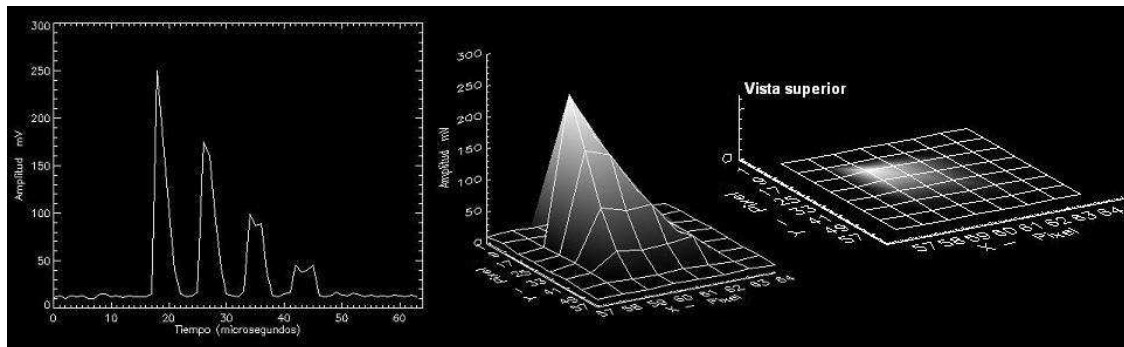


Figura 5.31: Traza UV de un TLE registrado el 10/07/2014, a las 10:35 pm, hora local de México, observado en una diapositiva de 64 ms. (Parte izquierda) amplitud en mV registrado por cada pixel. (Parte central) desarrollo en espacio y tiempo del evento, registrado en el arreglo de 8x8 pixeles. (parte derecha) Contorno del evento.

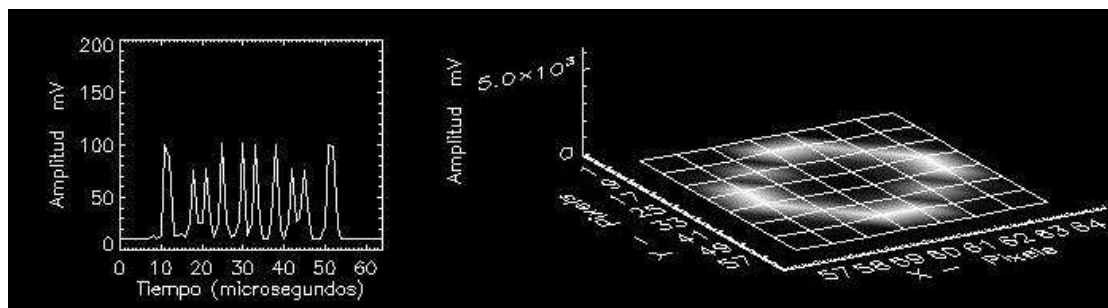


Figura 5.32: Elfo registrado el 15/07/2014, a las 9:50 pm, hora local de México. En una diapositiva de ~ 1 ms, frecuencia de muestreo entre cada pixel, $16 \mu s$. (Parte Izquierda) amplitud en mV que registró cada pixel. (Parte derecha) contorno del evento.

5.9. Conclusiones

La cámara oscura, es un dispositivo óptico simple, robusto, compacto, con profundidad de foco infinita, sin partes móviles, que permite obtener imágenes de manera nítida de los destellos en la región UV que se generan en la atmósfera.

Las aportaciones físicas que contemplan el proyecto cámara oscura son: El estudio de TLE's desde la superficie de la Tierra en la región UV, con alta sensibilidad y rapidez de muestreo, es la primera en su tipo (no se habían reportado este tipo de trabajos), por lo que se considera una aportación original. La cámara, muestra la posibilidad de efectuar estudios de caída de material circumterrestre (micrometeoritos) de manera estacional y desde diversos puntos, al instalar en un futuro cercano, ejemplares de esta en varios lugares del planeta.

Los resultados de los elfos registrados con la cámara de fluorescencia del observatorio Pierre Auguer, son parecidos en tiempo y forma, con los elfos registrados con la cámara oscura.

La colaboración en los programas satelitales universitarios BUAP-MSU, me permitió entender los fundamentos básicos del monitoreo de la luz de fondo y de los TLEs, adquirir experiencia en el análisis y reconstrucción de datos, como parte primordial, en la instrumentación, ya que a partir de esta, se diseñó la cámara oscura. ,

La calibración a la respuesta de un fotoelectrón (SPE por sus siglas en inglés) de cada fotomultiplicador multiánodo MaPMT H7546B, se utilizó para convertir la señal analógica a flujo de fotones. La respuesta a un fotoelectrón para cada pixel, se obtuvo con la ayuda de un arreglo experimental, el cual constó de una caja negra, en un extremo del interior se colocó el MaPMT H7546B y en el extremo opuesto un LED UV la separación entre ambos garantizó que un segmento plano del frente de onda, cubría en su totalidad el área efectiva de detección del MaPMT. Programamos un generador de funciones que le suministraba al LED UV pulsos constantes en amplitud y tiempo, se incrementó el alto voltaje de polarización del MaPMT hasta que en el osciloscopio se registró la relación del 10 % de señales mayores al ruido del sistema electrónico (ruido del sistema ≤ 2 mV). El voltaje óptimo de operación para el MaPMT, se obtuvo cuando el máximo de la curva del espectro de carga de respuesta a un fotoelectrón se encontraba alrededor de 1 pC y además este se separa totalmente del máximo de la curva del ruido, experimentalmente se obtuvo que el voltaje óptimo de operación es de alrededor de 960 ± 5 V. Ambos fotodetectores que constituyen la cámara oscura se seleccionan de manera que tengan casi la misma respuesta a un SPE proporcionado por el fabricante para que en el momento de procesar las señales se tengan resultados parecidos y no sea necesario realizar ajustes que puedan inducir errores. Como las señales que obtenemos de cada pixel y del dinodo común están en unidades de voltaje, entonces, a partir del espectro de carga se obtiene el espectro de amplitud, donde el valor máximo será la medida básica para obtener el número de fotones registrados por cada pixel. Donde el número de fotones se obtiene de dividir, la amplitud de la señal del pixel por el valor máximo del espectro de amplitud.

Durante la toma de datos realizados en el volcán Sierra Negra situado cerca de Puebla a una altura de 4300 metros sobre el nivel del mar, se consideró que el eje de observación de la cámara se orientara a ángulos $\theta < 30^\circ$ sobre el Zenit, para el máximo de este ángulo los fotones al atravesar la masa de aire pierden menos del 20 % de su energía. En base a estas consideraciones, pudimos reproducir la curva de intensidad/flujo de luz reflejada por la Luna en sus diferentes fases que se obtuvo con el satélite universitario "Tatiana". La cámara logró registrar destellos, con duraciones desde μ s hasta ms; se logró registrar la traza de micrometeoritos con duraciones de unas cuantas centenas de ms. El diseño, construcción, calibración y la obtención de resultados con la cámara oscura, nos anima para proponerla que se instale en futuras misiones

del programa espacial universitario. La misión espacial universitaria más cercana es el Lomonosov, para que trabaje en conjunto con el telescopio de fluorescencia TUS. No obstante, por el momento la cámara oscura seguirá operando en la superficie para incrementar la estadística de los eventos transitorios luminosos.

La cámara oscura que se ha desarrollado, puede ser mejorada para que pueda registrar eventos con tiempos de exposición de corta duración; eligiendo nuevos dispositivos de almacenamiento, podemos obtener un mayor tiempo de monitoreo del evento. Incluso se puede aumentar la resolución de la imagen a 16x16 pixeles, empleando el fotomultiplicador multiánodo adecuado y modificando algunas etapas del bloque de la electrónica.

Bibliografía

- [1] V. Hess, Phys. Z. 13, 1804 (1912).
- [2] Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics. Pierre Sokolsky. Addison-Wesley. 1989.
- [3] Cosmic Rays and Particle Physics. Thomas K. Gaisser. Cambridge University press. 1990.
- [4] <http://lectura.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/108/losrayos.htm>.
- [5] High Energy Astrophysics. M. S. Longair. Cambridge University Volume 1.
- [6] Particle Detectors. Claus Grupen. Cambridge University Press 1996.
- [7] Linsley and R. Benson, Proc, ICRC 17-th, Paris, 8, 145 (1981).
- [8] G.K. Garipov, B.A. Khrenov J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 20, 1891, (1994).
- [9] G.K. Garipov, B.A. Khrenov J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 21, 879, (1995).
- [10] G.K. Garipov, M. I. Panasyuk, y otros. Detector de radiaci[on ultravioleta abordo del satelite universitario "Tatiana" // PTE. 2006. No 1. Pag. 135–141.
- [11] G. K. Garipov, B. A. Khrenov, y otros. El tubo fotomultiplicador como detector de radiación ultravioleta en EAS // PTE. 2005. No 1. Pag. 108-111.
- [12] N. N. Vedelkin, A.V Dmitriev, G. K Garipov y otros. radiación ultravioleta de la atmósfera y variación con el flujo de electrones con energía >70 keV en la orbita del satélite "Tatiana", Física astronómica, 2009. No 4. Pag. 89-93.
- [13] Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., et al. Program of transient UV event research at Tatiana-2 satellite // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi: 10.1029/2009JA014765.
- [14] G. K. Garipov, P. A. Klimov, V. S. Morozenko, M. I. Panasyuk, and B. A. Khrenov. Time and Energy Characteristics of UV Flashes in the Atmosphere. Data of the Universitetsky Tatiana Satellite. ISSN 0010-9525, Cosmic Research, 2011, Vol. 49, No 5, pp. 391–398.
- [15] V. A. Sadovnichii, M. I. Panasyuk, I. V. Yashin, V.O. Barinobv, N. N. Vedenkin, N. A. Vlasova, G. K. Garipov, O. R. Grigoryan, T. A. Ivanova, V. V. Kalegaev, P. A. Klimov, A. S. Kovtyukh, S. A. Krasotkin, N. V. Kuznetsov, S. N. Kuznetsov, E. A. Muraveva, I. N. Myagkova, R. A. Nymmik, N. N. Pavlov, D. A. Parunakyan, A. N. Petrov, V. L. Petrov, M. V. Podzolko, V. V. Radchenko, S. Ya. Reizman, I. A. Rubinshtein, M. O. Ryazantseva, E. A. Sigaeva, E. N. Sosnovets, L. I. Starostin, V. I. Tulupov, B. A. Khrenov, V. M. Shakhparonov, A. V. Shirokov, S. Yu. Bobrovnikov, V. V. Aleksandrov, S. S. Lemak, V. S. Morozenko, V. M. Zhuravlev, E. A. Mareev, V. N. Blinov, N. N. Ivanov, V. A. Kozhevnikov, L. A. Makridenko, V. M. Krasnopeev, A. P. Papkov, J. Lee, I. Pak, J. Cotzomi, O. Martinez, E. Ponce, U. Salazar. Investigations of the Space Environment Aboard the Universitetskii Tatyana and Universitetskii Tatyana 2 Microsatellites. ISSN 0038-0946, Solar System Research, 2011, Vol. 45, No. 1, pp. 3–29.

- [16] G. K. Garipov, B.A. Khrenov, P.A. Klimov, V.V. Klimenko, E.A. Mareev, O. Martines, E. Mendoza, V.S. Morozenko, M.I. Panasyuk, I.H. Park, **E. Ponce**, L. Rivera, H. Salazar, V.I. Tulupov, N.N. Vedenkin, I.V. Yashin. Global Transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite. *Journal of Geophysical Research*, DOI:10.1029.
- [17] Park J.H, Garipov G.K, Jeon J.A, et al. Obscura telescope with a MEMS micromirror array for space observation of transient luminous phenomena or fast moving objects. *Optics Express*. 2008. V. 16. No 25. P. 20249–20257. doi: 10.1364/OE.16.020249.
- [18] V. Abrashkin, V. Alexandrov, Y. Arakcheev, A. Cordero, J. Cotzomi, M. Fingerd, G. Garipov, V. Grebenyuk, N. Kalmykov, B. Khrenov, P. Klimov, V.Koval, O. Martinez, E. Moreno, D. Naumov, A. Olshevsky, M. Panasyuk, I. Park, **E. Ponce**, C. Robledo, S. Sharakin, L. Tkatchev, V.Tulupov, R. Tyukaev, B. Sabirov, H. Salazar, O. Saprykin, A. Shirokov, L. Villasenor, I. Yashin, N. Zaikin, A. Zepeda. Space Detector TUS for Extreme Energy Cosmic Ray Study. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 166 (2007) 68–71.
- [19] V. Abrashkin, V. Alexandrov, Y. Arakcheev, J. Cotzomi, A. Diazc, M. Finger, G. Garipov, V. Grebenyuk, N. Kalmykov, B. Khrenov, S.H. Kim, P. Klimov, V.Koval, O. Martinez, S.W. Nam, D. Naumov, A. Olshevsky, M. Panasyuk, I.H. Park, J.H. Park, **E. Ponce**, A. Puchkov, C. Robledo, A. Rosado, I. Rubinstein, S. Sharakin, A. Silaev, L. Tkatchev, V.Tulupov, B. Sabirov, H. Salazar, O. Saprykin, L. Villasenor, I. Yashin, N. Zaikin. . Updated TUS space fluorescence detector for study of UHECR.
- [20] V.A. Sadovnichii, M.I. Panasyuk, A.M. Amelushkin, V.V. Bogomolov, V.V. Bengin, A.Yu. Drozdov, G.K. Garipov, N.N. Kalmykov, P.A. Klimov, B.A. Khrenov, V.S. Morozenko, V.L. Petrov, S.A. Sharakin, A.V. Shirokov, S.I. Svertilov, N.N. Veden'kin, and I.V. Yashin, E.S. Gorbovskoy, V.M. Lipunov, G.F. Smoot, B. Grossan, I. Park, J. Lee, G. Na, Yu. Shprits, V. Angelopoulos, C. Russell, A. Runov, D. Turner, R. Strangeway, R. Caron, S. Biktemerova, A. Grinyuk, D. Naumov, L. Tkachev, A. Tkachenko, O. Martinez, H. Salazar, **E. Ponce**. Study of Early Universe Extreme Phenomena on Lomonosov Space Mission. TUS doi10.10292009JA014765.
- [21] S. Yoshida, in: 29th ICRC, Pune, he15, 2005.
- [22] **E. Ponce**, B. Krenov, H. Salazar, et al. Pinhole camera for study of atmospheric UV flashes as a source of background in the TUS experiment. *Proc. 30th ICRC, Merida, Mexico, HE.1.5-148,2007*.
- [23] <http://www.analog.com/static/imported-files/data-sheets/ADG706-707.pdf>
- [24] <http://www.analog.com/static/imported-files/data-sheets/AD9203.pdf>
- [25] <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX796-MAX799.pdf>
- [26] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/73784/MAXIM/MAX768.html>
- [27] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl598.pdf>
- [28] <http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/SPI/AD7303.pdf>
- [29] <http://pdf.zener.ru/117694.pdf?datasheet-20Xilinx-20Inc-20XCV100-4TQ144C>
- [30] **E. Ponce**, B. Khrenov, M.I. Panasyuk, H. Salazar, O.Martinez, G. Garipov, P. Klimov. doi:10.1016/j.nima.2010.10.100
- [31] Martinez Bravo O, **Ponce Lancho E**, Salazar Ibarguen H. Observations with a pinhole camera from a high volcano in Mexico, 32th ICRC, Beijing-China, 2011,
- [32] **E. Ponce**, P. Klimov, H. Salazar, O. Martinez, Pinhole camera for study of atmospheric UV flashes as a source of background in the TUS experiment . ECRC PCR2 651, Moscow-Russian, 2012.

- [33] **E. Ponce**, H. Salazar, O. Martinez. Transient Luminous Events observed by a pinhole camera. 33th ICRC, Rio de Janeiro-Brasil, 2013.
- [34] R. Mussa for the Pierre Auger Collaboration, and G. Ciaccio. Observation of ELVES at the Pierre Auger Observatory. *Eur. Phys. J. Plus* (2012), 127:94 DOI 10.1140/epjp/i2012-12094-x.