



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**Análisis de eventos luminosos
detectados desde el espacio**

Tesis Presentada en la

**Facultad de Ciencias
Físico-Matemáticas**

como requisito para la obtención del grado de

**Doctor en Ciencias (Física
Aplicada)**

por

Oliver Isac Ruiz Hernandez

asesorado por

Dr. Oscar Mario Martínez Bravo

Puebla, Pue.

13 de Julio de 2023

Análisis de eventos luminosos detectados desde el espacio

Tesis

Oliver Isac Ruiz Hernandez Dr. Oscar Mario Martínez Bravo



Título: Análisis de eventos luminosos detectados desde el espacio.

Estudiante: Oliver Isac Ruiz Hernandez

COMITÉ

Dr. Humberto Antonio Salazar Ibargüen
Presidente

Dr. Martín Rodolfo Palomino Merino
Secretario

Dra. Ana Aurelia Avilez López
Vocal

Dr. Enrique Barradas Guevara
Suplente

Dr. Oscar Mario Martínez Bravo
Asesor

Gracias

Al Dr. Oscar Mario Martínez Bravo por su apoyo y el conocimiento que me transmitió en el desarrollo de este trabajo. A la colaboración del TUS y en particular a los Doctores Pavel A. Klimov, Sergei Sharakin y Mikhail Zotov por la información y datos proporcionados que se utilizaron en este trabajo, así como de fructíferas discusiones sobre el análisis de los datos aquí presentados. A la colaboración del JEM-EUSO por permitirme participar en diversas conferencias del equipo de análisis. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la asignación de la beca de Doctorado al CVU No. 849205, sin la cual este trabajo no habría sido posible. Así como a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP-BUAP) por su apoyo para la publicación de algunos resultados en revistas de investigación.

Índice general

1. Los Rayos Cósmicos	1
1.1. Detección de rayos cósmicos	3
1.2. Incógnitas	7
2. Eventos Transitorios Luminosos	11
2.1. Sprites	11
2.2. Jets Azules	13
2.3. Elfos	14
3. Meteoroides y Meteoros	19
3.1. Interacción de meteoroides con la atmósfera	20
4. El detector TUS	25
5. Análisis de Datos y Resultados	31
5.1. Algoritmo de traza lineal (LTA)	32
5.2. Dirección de arribo	33
5.3. Eventos tipo EAS	35

5.3.1. Reconstrucción de los eventos tipo EAS	38
5.3.2. Precisión de la reconstrucción	39
5.3.3. Hipótesis sobre el origen de los eventos	41
5.4. Eventos Meteoros	43
5.4.1. Reconstrucción de dirección de arribo	44
5.4.2. Magnitud de los eventos	47
6. Conclusiones	51
6.1. Trabajo futuro	52
A. Trabajos derivados de la investigación	55

Resumen

El detector TUS (Tracking Ultraviolet Set-up) es el primer telescopio de fluorescencia enfocado a medir Chubascos atmosféricos extensos de partículas secundarias (EAS por sus siglas en inglés) desde el espacio. Operó como parte del equipo científico del satélite Lomonosov desde Abril del 2016 hasta finales del 2017. A pesar de que su modo principal de operación tuvo una resolución temporal de $0.8 \mu s$ para detectar EAS, también conto con otros modos de operación capaces de medir diferentes fenómenos luminiscentes más lentos en el rango del ultravioleta cercano.

En este trabajo se estudiaron las características cinemáticas y ángulos de arribo de dos tipos de eventos detectados por el TUS. Los eventos tipo EAS, medidos con una resolución temporal de $0.8 \mu s$ y los eventos meteoro del TUS con resolución de $6.6 ms$. Ambos eventos presentaron patrones espaciales en forma de una traza “gruesa” y un desplazamiento característico del pico de la señal en el tiempo.

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción sobre los Rayos cósmicos, antecedentes históricos y métodos de detección más comunes. Todo esto como una motivación del trasfondo que impulso el desarrollo del detector TUS.

En el capítulo 2 se describen a grandes rasgos los llamados Eventos Transitorios Luminosos, los cuales son fenómenos luminosos de muy corta duración asociados con descargas eléctricas que tienen lugar en diferentes regiones de la atmósfera.

En el capítulo 3 se da una breve explicación de algunos de los procesos físicos involucrados en la fenomenología de los meteoros.

En el capítulo 4 se describe el detector TUS y algunos detalles técnicos sobre el ins-

trumento, así como sus modos de operación.

En el capítulo 5 se presenta el análisis de los datos realizado y los resultados obtenidos. Primero se abordan los eventos tipo EAS y posteriormente se describe el estudio realizado para los eventos meteoro del TUS.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo realizado, resumiendo brevemente los resultados más relevantes del estudio. También se expone el trabajo futuro.

Capítulo 1

Los Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas cargadas muy energéticas que bombardean la Tierra continuamente a una razón de alrededor de 10'000 partículas por metro cuadrado por segundo para energías de 1 GeV. La cantidad de partículas se reduce rápidamente con el incremento en su energía, partículas con energía por encima de 10^{19} eV llegan a una razón de alrededor de una partícula por kilómetro cuadrado por año. De manera histórica el evento más energético detectado fue observado el 15 de octubre de 1991 por el detector Fly's eye en Utah, EUA. La energía medida del rayo cósmico fue de 3.2×10^{20} eV (Clay and Dawson, 1997). Con el trabajo reciente de la colaboración de Pierre Auger (Halim et al., 2023), se ha incrementado la estadística del número de eventos cercanos a este rango de energía, pues reportaron 100 chubascos creados por partículas de muy alta energía en el rango de 78-166 EeV (10^{18} eV), grabados entre el 1 de enero de 2004 y el 31 de Diciembre de 2020.

La composición de los rayos cósmicos a energías muy altas aun no está del todo determinada pues el muy bajo flujo impide su medición directa. Las masas deducidas en el extremo del espectro de energías no permiten realizar una predicción clara, pues se mezclan componentes ligeras y pesadas, las observaciones sugieren que a medida que su energía incrementa también lo hace la contribución de núcleos pesados (Aab et al., 2020b).

Antecedentes

En 1912 el científico Viktor Hess realizó un experimento en globo (figura 1.1), llevando a bordo dos electros copios, los cuales son instrumentos que reaccionan en la presencia de un campo eléctrico y permiten medir la densidad de partículas cargadas en el ambiente. A medida que fue ascendiendo, la cantidad de partículas cargadas incrementó hasta que el globo alcanzó su máxima altitud (~ 5000 m). La suposición de Hess fue que el incremento se debía a radiación penetrando en la atmósfera proveniente del espacio. En una ocasión posterior realizó un experimento similar en globo durante un eclipse solar y encontró que no había cambio en la radiación ionizante. Su conclusión fue que la radiación provenía de alguna otra fuente que no era el Sol. Este suceso histórico marcó el inicio del estudio de los rayos cósmicos.

En 1929, Skobeltsyn construyó una cámara de niebla para estudiar las propiedades de los electrones emitidos en decaimientos radioactivos. Entre las trazas estudiadas, encontró algunas que eran difícilmente deflectadas y parecían electrones pero con energías mayores a 15 MeV. Posteriormente, identificó éste fenómeno con electrones secundarios producidos por la “ultra radiación γ de Hess”. Estas fueron las primeras imágenes de trazas de rayos cósmicos.



Figura 1.1: Fotografía del momento posterior al vuelo en globo de Hess, cuando se descubrió la radiación penetrando en la atmósfera. Imagen modificada de (Longair, 2011)

En 1938, Pierre Auger y sus colegas realizaron observaciones de la “ultra radiación γ de Hess” con varios detectores separados, mediante este experimento descubrieron los

chubascos atmosféricos extensos de partículas secundarias (EAS por sus siglas en inglés). Mediante su experimento, hallaron que dichos chubascos atmosféricos pueden extenderse en dimensiones mayores a los 100 metros sobre el nivel del suelo y contienen millones de partículas ionizantes. Además, las partículas responsables de iniciar los chubascos deben haber tenido energías superiores a 10^{15} eV en la parte superior de la atmósfera. Este hecho mostró evidencia directa sobre la aceleración de partículas cargadas hasta energías extremadamente altas en fuentes astrofísicas (Longair, 2011).

1.1. Detección de rayos cósmicos

Los EAS

Un chubasco atmosférico extenso de partículas secundarias o “Extensive air shower” en inglés, es caracterizado por un disco delgado de partículas radialmente muy extendido que se propaga esencialmente a la velocidad de la luz a lo largo del eje del chubasco. Dicho disco exhibe un frente ligeramente curvado, tiene una alta densidad en el centro y ésta disminuye aproximadamente de manera exponencial al incrementar la distancia del radio. Experimentalmente la localización de la máxima densidad define la posición del eje del chubasco al impactar en el suelo. Las partículas cargadas producen Cherenkov óptico altamente polarizado, así como emisión radio mientras se propagan a través de la atmósfera, también producen fluorescencia en el aire a lo largo de sus trazas, lo cual deja una larga columna de aire ionizado que se recombina lentamente (Grieder, 2011).

Detectores de superficie

El método más común para detectar rayos cósmicos, consiste en arreglos de detectores que registran la llegada de las partículas del disco al nivel del suelo. Por consiguiente, el chubasco es registrado solamente como una “imagen” de dos dimensiones en un momento de su desarrollo. El patrón producido por las partículas del chubasco es circular para chubascos verticalmente incidentes, mientras que con el incremento del ángulo cenit, el patrón cambia a una forma elíptica asimétrica. Cabe mencionar que el campo magnético terrestre también afecta el desarrollo del chubasco produciendo asimetría.

Los parámetros más relevantes para reconstruir un chubasco por medio de arreglos de detectores de partículas, son el tiempo de llegada t_i del i -ésimo detector con respecto a algún tiempo de referencia t_0 , la densidad de partículas ρ_i , y la localización del detector x_i e y_i . Actualmente los detectores más comunes utilizados en éste tipo de arreglos son centelleadores y/o tanques Cherenkov, para mediciones rápidas y densidad de partículas o deposición de energía (Grieder, 2011). En la figura 1.2, se muestra un tanque Cherenkov utilizado en el observatorio Pierre Auger.

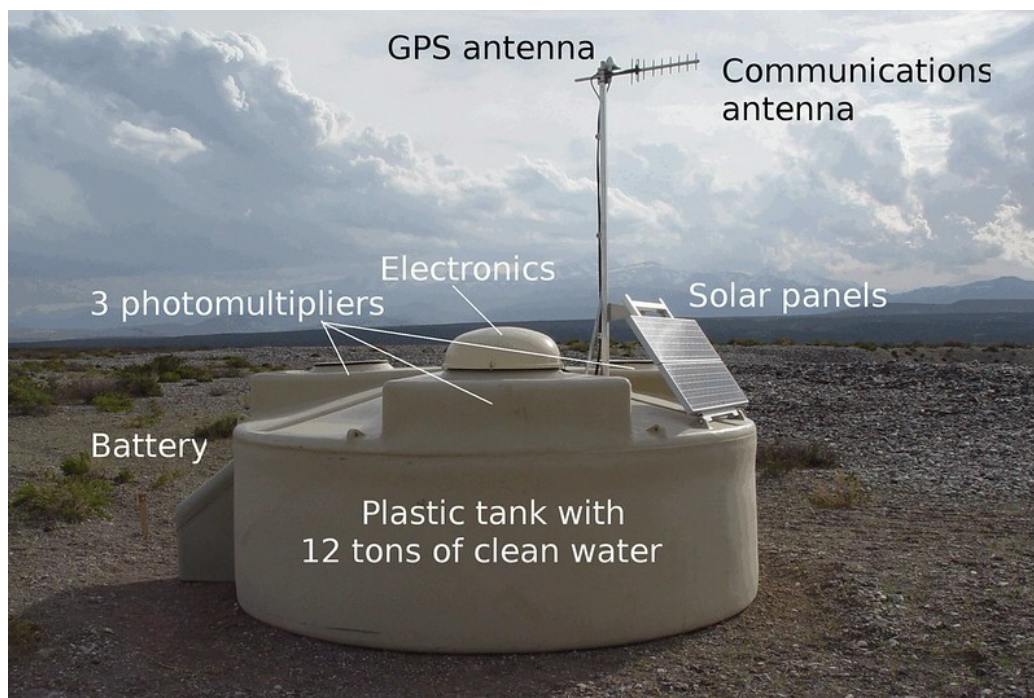


Figura 1.2: Ejemplo de detector de superficie. Fotografía de un tanque Cherenkov del observatorio Pierre Auger (Tomado de: <https://www.flickr.com/photos/134252569@N07/21573277143/in/album-72157656013297308/>).

Detectores de Cherenkov de aire

Los conjuntos de detectores ópticos con gran aceptación angular y de gran apertura que graban la emisión Cherenkov atmosférica de los EAS, operan de manera muy similar a los arreglos de detectores de partículas. A diferencia de los telescopios Cherenkov empleados para astronomía de rayos gamma, que utilizan un gran espejo colector de luz con un campo de visión muy angosto con una muy alta resolución angular y que puede apuntar en

cualquier dirección del cielo nocturno (figura 1.3), los arreglos de detectores Cherenkov de ángulo amplio cubren simultáneamente una gran fracción del cielo y detectan cualquier evento que se encuentre en su campo de visión (figura 1.4).



Figura 1.3: Ejemplo de telescopio Cherenkov empleado para astronomía de rayos gamma. Fotografía de los telescopios del experimento HESS (Tomado de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=61288242>).

Este tipo de detectores pueden ser utilizados solamente durante noches claras sin luna y las condiciones atmosféricas deben ser revisadas frecuentemente para mediciones precisas. La información más relevante obtenida por estos detectores es el número de densidad Q_i de los fotones ópticos al tiempo de llegada t_i y las coordenadas x_i e y_i de los detectores.

Debido a la generalmente buena transparencia de la atmósfera para la porción óptica de la emisión Cherenkov (baja absorción y dispersión), la luz que se recolecta contiene fotones de todas las etapas del chubasco a lo largo de su trayectoria. Así, éste tipo de detectores permite obtener una “imagen” de tres dimensiones del evento (Grieder, 2011).

Detectores de fluorescencia de aire

La fluorescencia atmosférica producida por los EAS es emitida de manera isotrópica, principalmente en la banda de 300 a 400 nm, originada por moléculas de Nitrógeno neutro (segunda banda positiva) o Nitrógeno ionizado (primera banda negativa). Debido a la naturaleza isotrópica, en principio es posible observar los EAS de todas direcciones, por lo

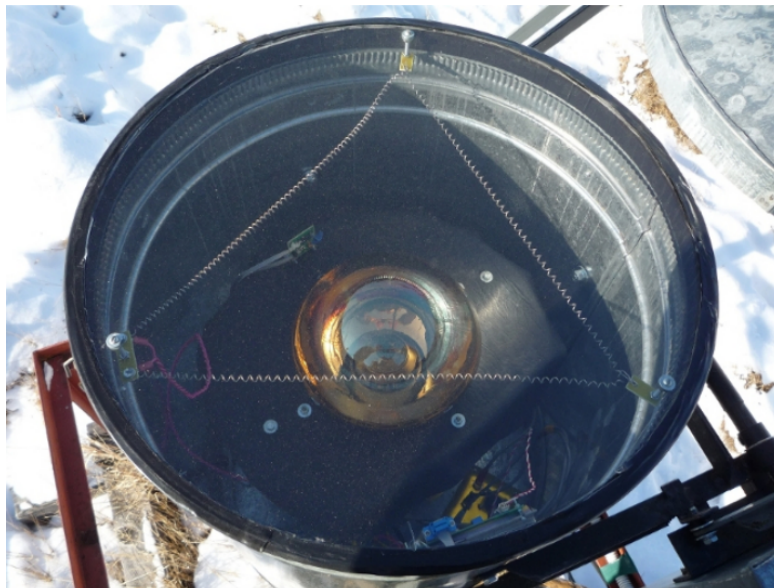


Figura 1.4: Ejemplo de telescopio Cherenkov de ángulo amplio. Fotografía del interior de un módulo óptico del experimento Tunka-133. Tomado de (Kostunin et al., 2019).

cual se necesita un detector que pueda observar y seguir EAS alrededor del mismo. Dada la semejanza de éste tipo de detectores con el ojo de una mosca, este tipo de detectores a veces es llamado detector de fluorescencia de aire tipo ojo de mosca.

Las observables relevantes para este tipo de detectores son la densidad de fotones Q , la dirección de llegada instantánea de los fotones, es decir, el ángulo zenith θ y azimuth ϕ , y el tiempo de llegada t .

Éste tipo de detectores consisten principalmente en un gran número de módulos ópticos detectores (grandes tubos fotomultiplicadores individuales o clusters de pequeños tubos), los cuales apuntan cada uno en una dirección particular cubriendo una parte limitada de ángulo sólido del cielo. Actualmente grandes espejos o sistemas de espejos son colocados para recolectar una mayor cantidad de luz. La figura 1.5, muestra un ejemplo de éste tipo de detectores. Con éstos detectores es posible monitorear una gran cantidad de volumen de la atmósfera sobre una gran cantidad de área, por lo cual es esperado que graben chubascos raros de ultra alta energía que choquen muy lejos y puedan ser perdidos por un arreglo muy grande (Grieder, 2011).

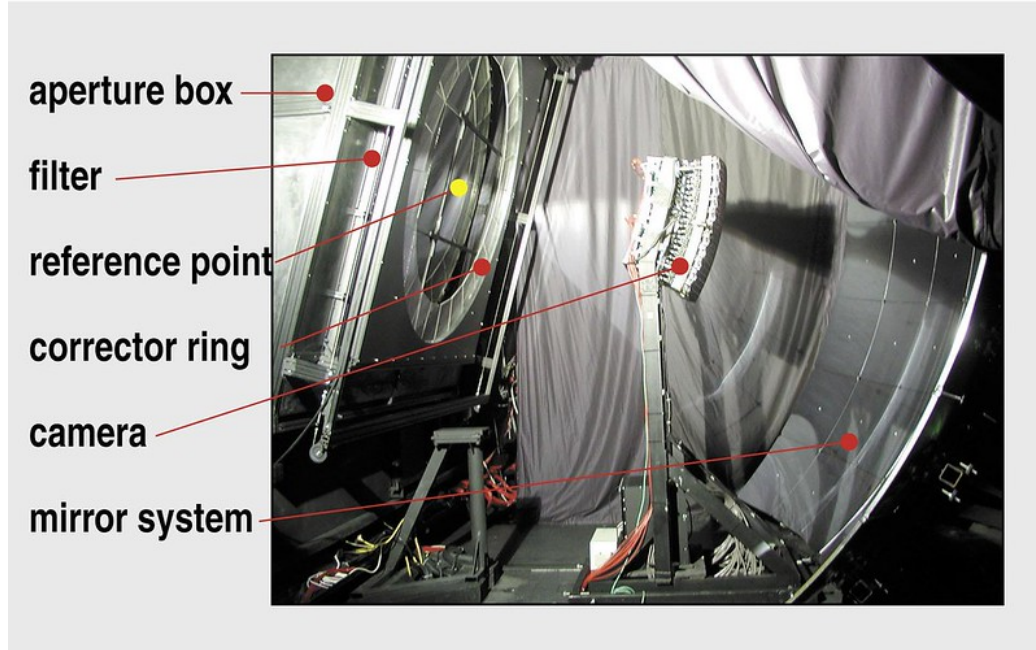


Figura 1.5: Ejemplo de detector de fluorescencia de aire. Fotografía de un detector de fluorescencia del observatorio Pierre Auger (Tomado de: <https://www.flickr.com/photos/134252569@N07/22414306455/in/album-72157654097333143/>). A la izquierda se puede ver la apertura por donde entra la luz y enfrente se encuentra el sistema de espejos que ilumina la cámara (arreglo de tubos fotomultiplicadores).

1.2. Incognitas

El espectro de energía de los rayos cósmicos indica el flujo de partículas de los rayos cósmicos en función de la energía, figura 1.6. Para la región del espectro que no se ve afectada por las partículas que se propagan a través del viento solar ($E \geq 10^9$ eV), el flujo puede expresarse mediante una ley de potencias:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}, \quad (1.1)$$

donde el coeficiente espectral γ cambia con la energía debido a los efectos de producción de partículas. El espectro de los rayos cósmicos se compone de dos regiones: rodilla (energías menores a 10^{15} eV con $\gamma \sim -2.7$ a $\gamma \sim -3.1$) y tobillo (energías mayores a 10^{18} eV, con $\gamma \sim -2.7$). Se ha observado otra discontinuidad llamada segunda rodilla, que se presenta a energías entre $10^{17,6}$ y $10^{17,8}$ eV con $\gamma \sim -3.3$.

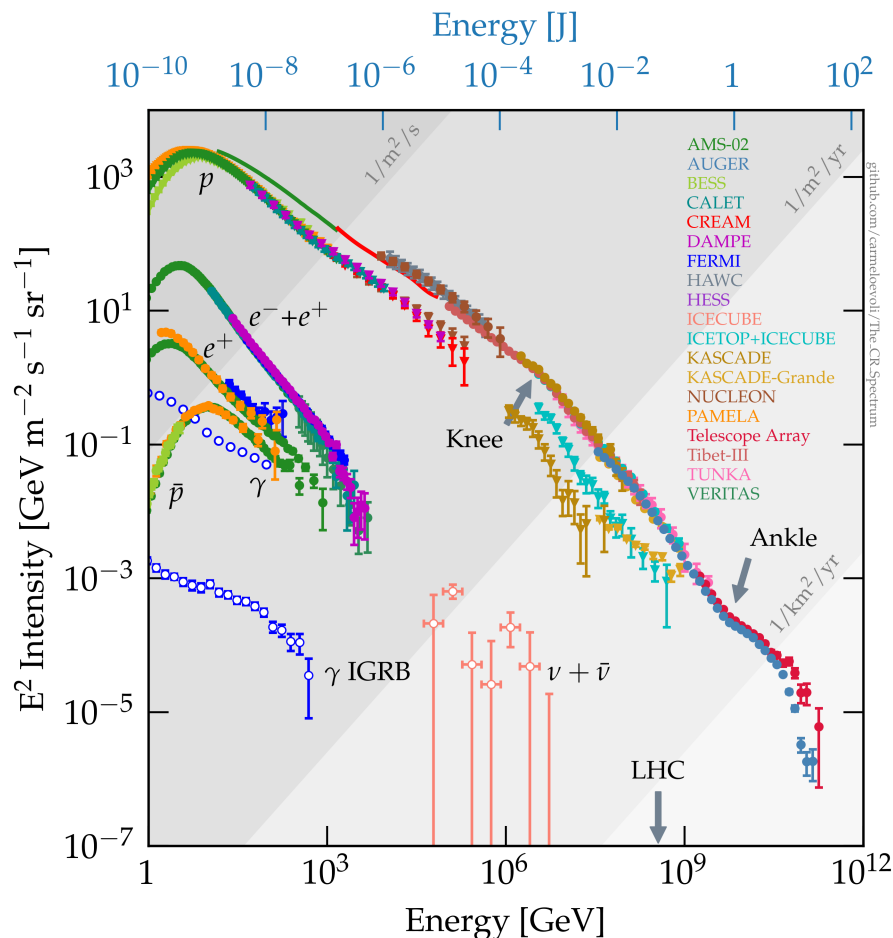


Figura 1.6: Espectro de energía de los rayos cósmicos (Evoli, 2020). Se indica con una flecha gris la región de la rodilla (Knee) y el tobillo (Ankle).

En 1966, K. Greisen, G. Zatsepin y V. Kuzmin predijeron que podría haber un límite en el espectro de energía de los rayos cósmicos causado por la producción de piones en colisiones entre protones de los rayos cósmicos y fotones del fondo cósmico de microondas (CMBR). Esta supresión es llamada corte GZK (o límite GZK), en honor a sus descubridores, y se presenta a 6×10^{19} eV (Thomson, 2006).

El origen de los rayos cósmicos con energía extrema (EECRs), esto es, con energía mayor a 10^{18} eV, representó uno de los misterios del área de investigación de los rayos cósmicos durante mucho tiempo. Desde que se estableció la existencia de los EECRs en 1960, surgieron varias especulaciones sobre si dichas partículas eran creadas en nuestra galaxia o si provenían de objetos extragalácticos. Gracias a resultados obtenidos por el

Observatorio Pierre Auger en Argentina, el cual es el observatorio de rayos cósmicos más grande que se ha contruido, dicho misterio fue resuelto. Utilizando datos de partículas con energía promedio del orden de 10^{19} eV, lograron establecer que la dirección de llegada es $\sim 6\%$ más grande en una mitad del cielo que del lado opuesto, además mostraron que la dirección de llegada indica un origen extragaláctico (Aab et al., 2017). En la figura 1.7, se muestra un mapa del cielo en coordenadas ecuatoriales, indicando el flujo de rayos cósmicos por encima de 8×10^{18} eV. Se puede apreciar una anisotropía en una región alejada del centro galáctico, indicando una fuente extragaláctica para los EECRs.

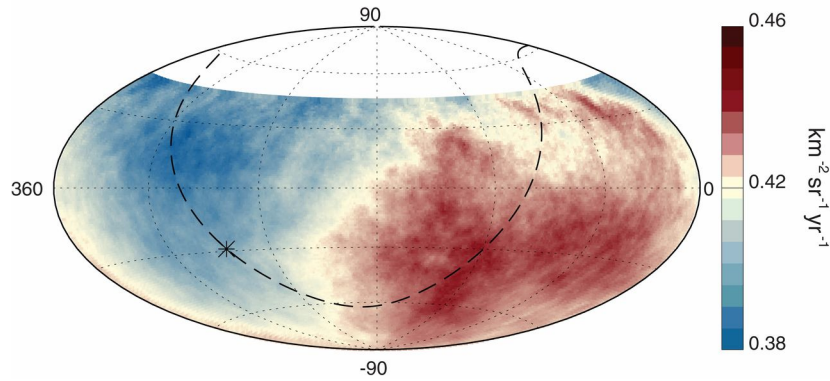


Figura 1.7: Mapa del cielo en coordenadas ecuatoriales, donde se muestra el flujo de rayos cósmicos por encima de 8×10^{18} eV. El centro galáctico está marcado con un asterisco y el plano galáctico está indicado con una línea discontinua. Tomado de: (Aab et al., 2017).

Pese a los esfuerzos realizados en las investigaciones de los rayos cósmicos, aún quedan incognitas por responder como la máxima energía que pueden alcanzar y su composición. Debido a que los rayos cósmicos con energía por encima del corte GZK tienen un flujo más bajo que un evento por siglo por kilómetro cuadrado (Aab et al., 2020a), son necesarias enormes áreas de detección para recolectar suficiente estadística.

Un detector de EECRs establecido en el espacio tiene la ventaja de una gran exposición y cobertura uniforme de la esfera celeste. La idea de observaciones de EECRs desde el espacio fue propuesta originalmente por John Linsley a inicios de la década de los 80 (Benson and Linsley, 1981). El principio de observación se basa en la detección de la luz UV producida por los EAS en la atmósfera de la Tierra, así como la radiación Cherenkov delantera reflejada por la superficie de la Tierra o por la parte superior de nubes densas.

El concepto original de Linsley fue adelantado para su época debido a la falta de tecnología para llevarlo a cabo. Con el paso de los años la idea de Linsley maduro en Estados Unidos (EUA) y Europa con diferentes conceptos. En Europa el proyecto evoluciono en el EUSO (Extreme Universe Space Observatory) y en 2006, los equipos Japoneses y de EUA redefinieron la mision como un observatorio unido al KIBO, el módulo de experimento Japones (JEM por sus siglas en inglés) de la estación espacial internacional. Así la misión fue renombrada y surgió el JEM-EUSO. En 2013, hubo una reorientación sobre el programa y se cambió el nombre a Join Experiment Missions for Extreme Universe Space Observatory, manteniendo el acrónimo anterior. Sin embargo, el programa incluyo varias misiones (figura 1.8): el EUSO-TA desde tierra (Abdellaoui et al., 2018), desde globos estratosféricos el EUSO-Balloon (Adams et al., 2015a), EUSO-SPB1 (Wiencke and Olinto, 2017) y EUSO-SPB2 (Adams et al., 2017) y desde el espacio empleando detectores de fluorescencia para probar la técnica observacional, el TUS (Klimov et al., 2017) y el Mini-EUSO (Bacholle et al., 2021). El objetivo final del programa es realizar las misiones espaciales de escala media llamada K-EUSO (Casolino et al., 2017) y de gran escala POEMMA (Olinto et al., 2021).

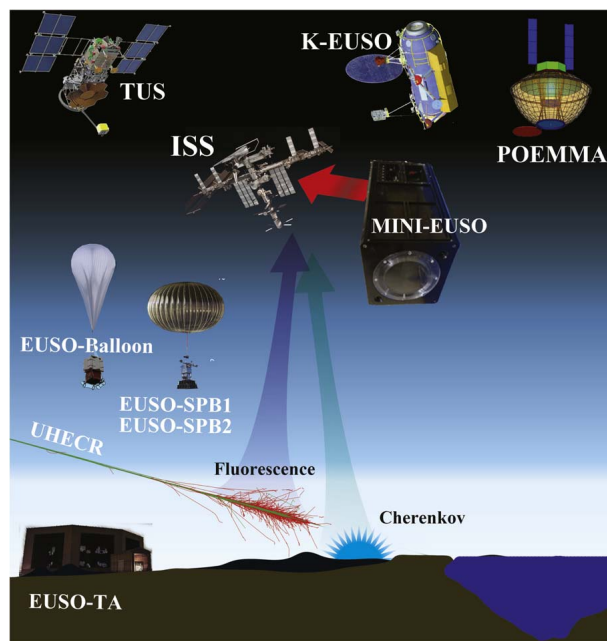


Figura 1.8: Imágen representativa de los proyectos del programa JEM-EUSO. Tomado de (Bacholle et al., 2021).

Capítulo 2

Eventos Transitorios Luminosos

Los Eventos Transitorios Luminosos o comunmente abreviados en la literatura como TLEs, es el nombre que se le ha dado a una colección de diferentes fenómenos luminosos y de muy corta duración, que tienen lugar en un amplio rango de altitudes en la Estratósfera, Mesósfera y la baja Termósfera, desde al rededor de 15 hasta 105 km en una cercana conjunción con la actividad electrica troposférica (Pasko et al., 2012).

2.1. Sprites

En 1994 Lyons (Lyons, 1994), reportó resultados de un experimento en el cual se monitoreo sistemáticamente la estratosfera a niveles de 100-800 km sobre elevadas planicies en la región central de Estados Unidos de América, del 6 al 21 de julio de 1993. En su trabajo exhibió complejas estructuras de luz observadas por encima de grandes tormentas eléctricas, dichas estructuras mostraron diversas formas y una amplia variedad de brillos, en su artículo Lyons llamó a este tipo de fenómenos “Sprites” debido a una sugerencia hecha por D. Sentman en 1993.

Morfológicamente los Sprites representan uno de los fenómenos más complejos, pues presentan diferentes formas:

1. Columnas rectas: columnas de luz delgadas, verticales y alargadas.

2. Forma de Zanahoria: compuesto de un cuerpo central con forma de corazón, con numerosas protuberancias como tentáculos que se convulsionan, similares a hojas o cabellos.
3. Medusas o fuegos pirotécnicos: mayores en volúmen o área, con un gran cuerpo brillante y un toldo sobrepuesto encima de numerosos tentáculos descendientes.
4. Sprites con ángulo: columnas bifurcadas con canales brillosos extendiendose diagonalmente (Pasko, 2010).

Las altitudes de iniciación de los “tentáculos” de descenso son de 66-89 km, y las de ascenso son de 64-78 km (Stenbaek-Nielsen et al., 2010), las serpentinadas de descenso crean características de Sprite tipo columna mientras que las serpentinadas de ascenso forman amplios y difusos Sprites del tipo zanahoria; generalmente los sprites se manifiestan en grupos y su duración puede variar desde 1 ms hasta decenas de milisegundos (Lyons et al., 2008).



Figura 2.1: Fotografía de Sprites (Tomado de: <https://okoplanet.su/pogoda/newspogoda/388562-krasnoe-siyanie-v-nebe-nad-gorami-v-slovakii.html>). Como se puede notar en la parte inferior suelen generarse “tentáculos” que se desvanecen.

Los eventos sprites ocurren después de fuertes descargas eléctricas positivas nube-suelo, esto es, el descenso de carga positiva de las nubes hacia el suelo. Aunque también se han observado sprites después de descargas eléctricas negativas nube-suelo, pero en menor me-

cida. Estudios recientes mostraron que $\sim 25\%$ de los sprites son asociados inequívocamente con rayos supercríticos negativos, los cuales se concentraron principalmente en regiones tropicales debajo de los 20° de latitud, mientras que los asociados a descargas positivas se esparcen en regiones de elevada altitud de hasta 50° (Chen et al., 2019).

2.2. Jets Azules

(Wescott et al., 1995) reportó en 1995 una de las primeras emisiones ópticas documentadas de eventos con forma cónica extendiéndose de manera ascendente sobre la parte superior de tormentas eléctricas y exhibiendo una coloración azul. Los eventos reportados, fueron grabados durante junio y julio de 1994, por cámaras blanco-negro y a color que iban a bordo de los aviones de campaña Sprites94, el Rockwell jet commander y el Westwind 2. Obtuvieron cincuenta y seis ejemplos de éste tipo de fenómenos en un intervalo de 22 minutos durante una tormenta sobre Arkansas, en su trabajo examinaron algunos posibles mecanismos para explicar la naturaleza de dichos fenómenos, pero no hallaron una teoría satisfactoria, sin embargo, se le atribuye a dicho reporte la mención del término “Jets Azules” ¹ por primera vez como referencia a dicho fenómeno atmosférico.

Se ha calculado por medio de triangulaciones que la altitud promedio de iniciación de los Jets Azules es de 17.7 km y su extensión superior de 37.2 ± 5.3 km, al analizar secuencias de imágenes se ha estimado que poseen una velocidad vertical de 112 ± 24 km/s; además se ha medido el ángulo de apertura del cono de 18 Jets Azules, resultando en un valor de $14.7^\circ \pm 7.5^\circ$, así como un tiempo de vida de 200 a 300 ms (Pasko, 2008). Se cree que los efectos ópticos de los Jets azules se debe a la descarga eléctrica a gran escala en la estratósfera seguido por la excitación de moléculas de N_2 por impacto de electrones. La emisión de la segunda banda positiva del N_2 (N_22P) se vuelve dominante en la estratósfera, lo cual produce el color azul predominante en la emisión azul de los Jets azules (Pasko, 2010).

¹En el texto original en inglés el término correcto es “Blue Jets”.



Figura 2.2: Fotografía de Jet azul, modificado de (Chanrion et al., 2017). Los jets azules presentan una estructura en forma cónica y se propagan de manera ascendente.

2.3. Elfos

En 1992 Boeck et al., reportó una luminosidad transitoria a una altura de aproximadamente 95 km, su observación coincidió con un relámpago en una tormenta tropical oceánica justo debajo del evento (Boeck et al., 1992). Sin embargo, fue hasta 1996 con el reporte de (Fukunishi et al., 1996), que se documentó de manera espacial y temporal éste tipo de fenómeno utilizando un fotómetro de alta velocidad multicanal y cámaras CCD ² de imagen intensificada, los dispositivos fueron llevados a Colorado como parte de la campaña Sprites95 del 15 de Junio al 6 de Agosto de 1995. Observaron destellos ópticos difusos con una duración menor a 1 ms y con una escala horizontal de 100 a 300 km, los cuales tuvieron lugar a una altitud de 75 a 105 km justo después de la aparición de rayos del tipo nube-suelo pero antes de la aparición de Sprites, fue en dicho artículo que denominaron a este tipo de eventos como “Elfos” (En inglés el término es Elves que corresponde a las siglas de **E**missions of light and **v**ery-low frequency (VLF) perturbations due to **e**lectromagnetic pulse (EMP) sources).

Los elfos son discos toroidales de color rojo que se expanden rápidamente, resultado de un EMP de una descarga del tipo nube-suelo, la altitud a la que se genera es entre 80 y 100 km además el disco puede tener un diámetro de 400 km o más, su aparición sucede aproximadamente 0.3 ms después de la aparición de la descarga (Rycroft, 2006).

²Charge-Coupled Device



Figura 2.3: Fotografía de Elfo (Tomado de: spaceweathergallery.com). La imagen muestra un elfo generado sobre una poderosa tormenta eléctrica en la República Checa.

Los eventos aparentemente más comunes son los Sprites, Jets azules y Elfos, sin embargo, se han detectado nuevos tipos de fenómenos que se han añadido a la familia de los TLEs, como los “Halos”, figura 2.4, que son breves resplandores descendentes con una extensión de 40 a 70 km (Barrington-Leigh et al., 2001; Frey et al., 2007), “Jets Gigantes”, figura 2.5, los cuales forman un camino directo de contacto eléctrico entre la parte superior de una nube tormentosa y la baja ionósfera (Pasko et al., 2002; Su et al., 2003), así como “Terrestrial Gamma-ray Flashes” (TGFs) los cuales son destellos intensos de rayos gama producidos a una altitud de aproximadamente 12 km (Briggs et al., 2010; Fishman et al., 1994), y una nueva forma de TLE producido a su consecuencia (Xu et al., 2017). En la figura 2.6, se muestra una ilustración de los diferentes tipos de TLEs y en la tabla 2.1, se muestran las duraciones típicas o características de diferentes tipos de TLEs.

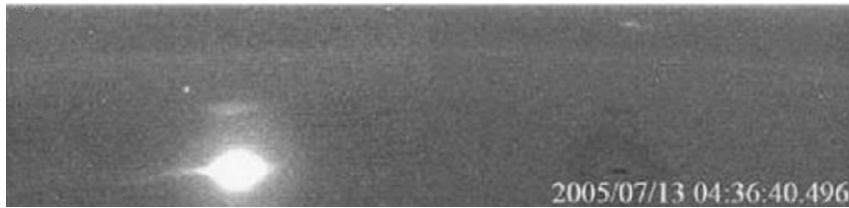


Figura 2.4: Fotografía de Halo, tomado de (Chern et al., 2015). En la imagen se puede notar la forma ovalada que presentan los halos.

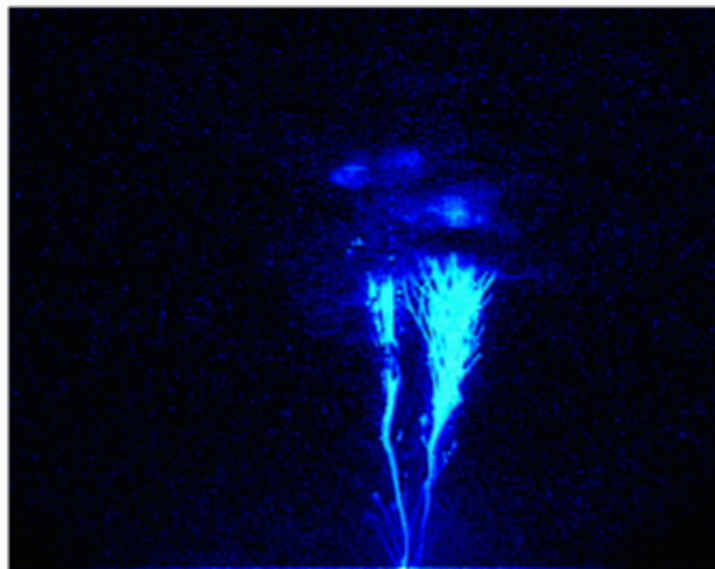


Figura 2.5: Fotografía de Jet Gigante (Tomado de: <http://pasko.ee.psu.edu/Nature/paskoenhanced.jpg>). Como se muestra en la imagen, éste fenómeno presenta una forma cónica ascendente similar a la del jet azul.

Tabla 2.1: Duraciones típicas o características de TLEs.

Tipo de TLE	Duración (ms)	Tamaño (km)	Altitud (km)
Jets Azules	200 - 300	3 - 20	20 - 40
Jets Gigantes	< 300	70 - 90	
Sprites	< 10	25 - 50	40-90
Elfos	< 1	> 300	84 - 87
Halos	< 10	< 100	70 - 85

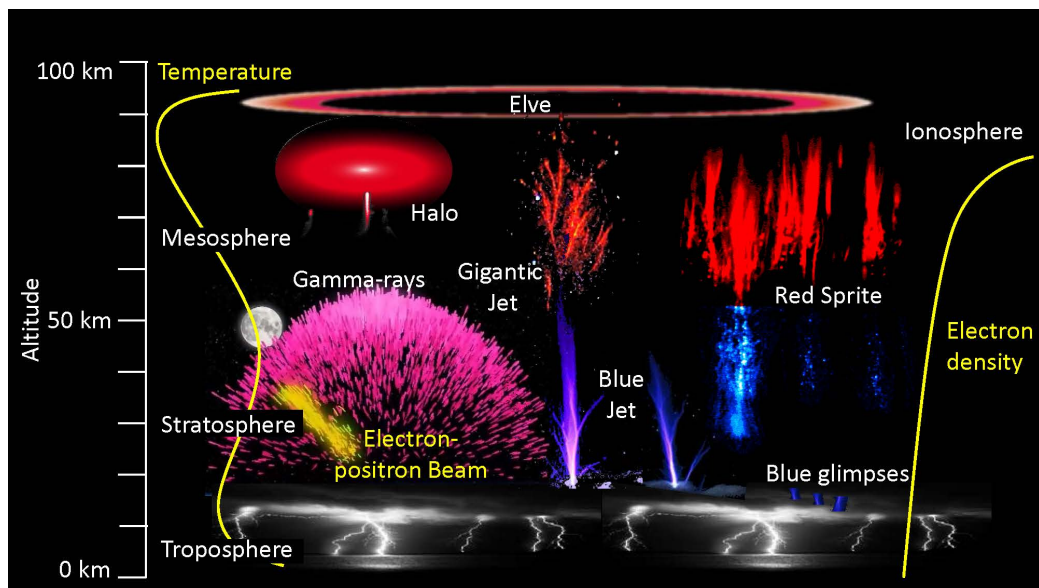


Figura 2.6: Ilustración de eventos transitorios luminosos (Tomado de: <https://www.nasa.gov/image-feature/upper-atmosphere-phenomena-caused-by-thunderstorms>).

Capítulo 3

Meteoroides y Meteoros

Los asteroides son escombros rocosos, de hierro o gélidos que vuelan en el espacio. Los meteoroides son pequeños asteroides con dimensiones desde unas micras hasta 1 metro ¹, los cuales golpean la atmósfera de la Tierra a velocidades hipersónicas, en su mayoría desde 11 hasta 72 km/s, las cuales corresponden a las velocidades de escape de la Tierra y del sistema solar respectivamente. Generalmente, a lo largo del paso del meteoroides a través de la atmósfera hay iones liberados y electrones libres, en muchos casos la desexcitación de los iones produce luz visible (Ceplecha et al., 1998; Ciziczo et al., 2001; Spurný and Ceplecha, 2008), dicha luz es conocida como meteoro ². La interacción del meteoroides en la atmósfera empieza con una fase de precalentamiento a una altura entre 300 a 100 km, entonces el material de la superficie se sublima y se produce una capa de vapor caliente a temperaturas mayores a 2000 K alrededor del cuerpo, este fenómeno es llamado ablación (Opik, 1958). A temperaturas alrededor de 2500 K el material fundido empieza a evaporarse, los iones alrededor de esta capa alcanzan estados excitados y emiten luz en el proceso de desexcitación. La altura inicial de este fenómeno está en el rango de 120 a 75 km (Carbary et al., 2003; Love and Brownlee, 1991). Debido al choque térmico, el cuerpo se desintegrará en el rango de 70 a 30 km de altura. Un meteoroides típico finaliza perdiendo toda su masa sin cambiar radicalmente su velocidad. Normalmente el tiempo de evaporación tiene una duración entre 0.5 hasta 3 segundos (Adams et al., 2015; Cellino

¹Información tomada de: <https://amsmeteors.org/resources/posters/>

²Un meteoro es la luz emitida por un meteoroides o un asteroide al entrar en la atmósfera.

et al., 2012).

3.1. Interacción de meteoroides con la atmósfera

Existen dos casos límites en la interacción de los meteoroides con la atmósfera. Si el meteoroides es suficientemente pequeño o su altitud de vuelo es suficientemente alta, su interacción sucede en un régimen libre de moléculas, esto es, cuando el “camino libre” de las moléculas de aire es mayor que la dimensión lineal (radio) del meteoroides. El impacto del momentum y energía son transmitidos directamente al núcleo del meteoroides por golpe directo de las moléculas de aire (Opik, 1958). En este régimen el material evaporado o pulverizado no blindo la superficie del meteoroides; no hay interacciones de átomos abalanzados entre sí. Por otro lado, grandes meteoroides a relativamente bajas altitudes son descritos de manera satisfactoria por modelos hidrodinámicos, ya que se forma una onda de choque (Popova, 2004).

La fenomenología de los meteoros puede ser modelada de la siguiente manera. El meteoroides es el núcleo sólido del meteoros. El jet de átomos vaporizados que emergen del meteoroides, mezclados con aire, es llamado “coma” cuando aún no se ha desacelerado completamente, esto es, mientras los elementos aún mantengan una considerable fracción de la energía cinética original de movimiento delantero. En la coma es donde ocurre la principal disipación de energía cinética de los meteoroides ordinarios; también es el foco del impacto de radiación, la principal fuente de luminosidad de los meteoros visibles (Opik, 1958).

A suficiente distancia detrás el meteoroides, la velocidad de traslación de la coma es desacelerada muy por debajo de la velocidad molecular media de la atmósfera circundante, entonces es convertido en la estela de la cola, en forma de una columna rezagada detrás del meteoroides. La estela de la cola se expande a partir de la difusión turbulenta y gaseosa, asumiendo una forma paraboloide. Excepto para los primeros 10^{-3} segundos después del paso del meteoroides, la columna es tan estrecha que puede ser aproximada a un cilindro (con irregularidades debido a la turbulencia) (Opik, 1958).

El *tren persistente* o simplemente *tren*, es observado como una banda de luz a lo largo

3.1. INTERACCIÓN DE METEOROIDES CON LA ATMÓSFERA

de porciones de los rastros de meteoros rápidos y luminosos después de que los meteoros han desaparecido. Su diámetro es del orden de 0.1 a 1 km y su tiempo de visibilidad es de unos pocos segundos a varios minutos o más. El tren es frecuentemente confundido con el *rastro*, el cual denota el camino luminoso del meteorito (Opik, 1958).

En la figura 3.1, se muestra un esquema con las diferentes regiones de un meteorito. La región C_1 corresponde a la porción del frente de la coma, la cual se desplaza con una velocidad de translación w_1 , además se genera una velocidad de expansión v debido a la penetración directa y la expansión de la nube de vapor-aire. La región C_2 es la cola de la coma, donde el desplazamiento tiene lugar con una velocidad translacional reducida w_2 , en dicha región sucede la expansión por difusión de eddy y de gas ($D_t + D_g$). La región J corresponde a la estela del tren donde hay una expansión por difusión de gas (D_g). T es la región del tren persistente.

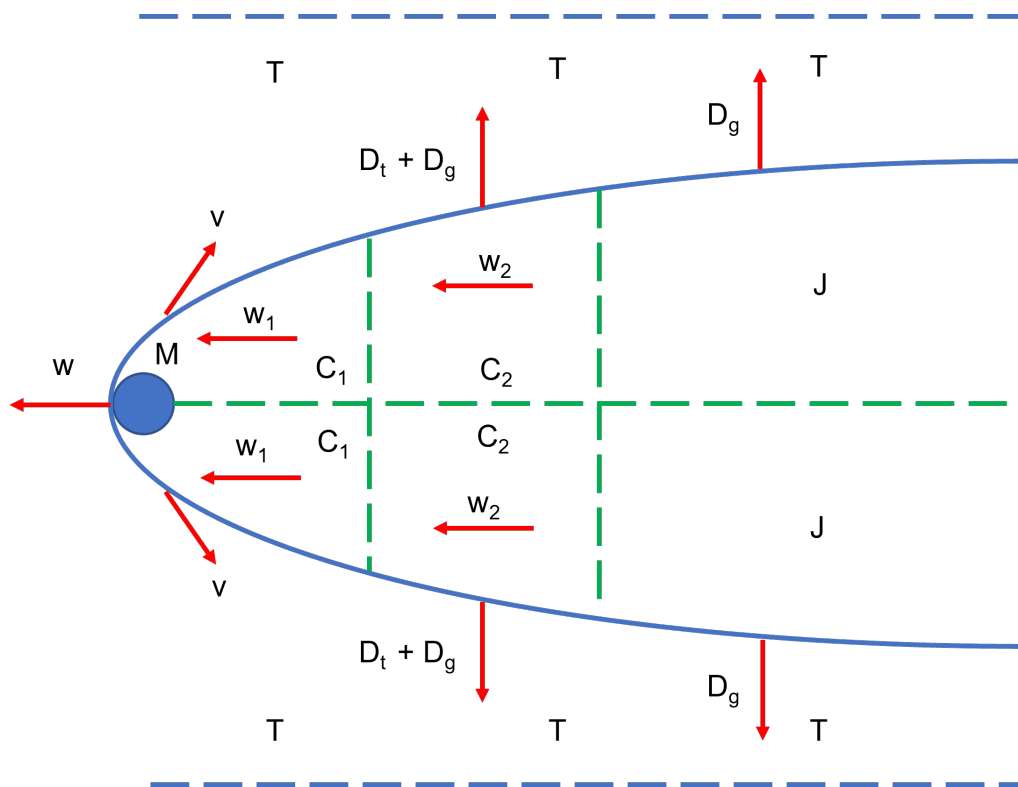


Figura 3.1: Fenómeno del meteorito. Se muestran diversas regiones de un meteorito M con velocidad w , a su paso por la atmósfera. Para más detalles ver el texto.

Durante el vuelo de descenso la densidad de la atmósfera, al igual que la intensidad de vaporización incrementan, mientras el área superficial del meteorito reduce por la

ablación. La luminosidad del meteoro, la cual es el producto tanto de la emisión debida a la atmósfera como de la vaporización, varía de acuerdo a una “curva de luz” sesgada (Opik, 1958). La curva de luz (LC) de un meteoro es un proceso de emisión no trivial, debido a la interacción del meteoroides con la atmósfera Terrestre. La luminosidad de un meteoro varía de acuerdo a la masa inicial, densidad y velocidad del meteoroides. La morfología de la LC también cambia de acuerdo al meteoro ”padre” (Campbell-Brown and Koschny, 2004). Por ejemplo, un meteoroides de un solo cuerpo producirá una LC que incrementa gradualmente hasta su pico de luminosidad y despues un deacimientto exponencial, con un tiempo de subida mayor al teimpo de decaimientto. Para meteoros de alta velocidad, es típica la presencia de un breve incremento en la luminosidad en el punto terminal (llamarada) debido a una fragmentación repentina y/o cambios en circunstancias físicas con más evaporación o ionización (Ceplecha et al., 1998). Por otro lado, meteoroides de bolas de polvo pueden producir multiples morfologías de LC como pico temprano, simétrica, plana, etc (Murray I. S., 2002).

La razon de ablación determina la deposición de masa, influencia el momento y la energía liberada en la atmósfera, lo cuál esta realacionado con la radiación y ionización del meteoro. La curva de luz que es producida por la intensidad de la radiación, puede modelarse por la siguiente ecuación:

$$I = \tau \left(\frac{V^2}{2} \frac{dM}{dt} + MV \frac{dV}{dt} \right), \quad \alpha = \frac{\beta}{\mu V} \frac{dM}{dt}, \quad (3.1)$$

donde I es la intensidad de la radiación, V y M son la velocidad y la masa del meteoroides, τ la eficiencia luminosa y β la eficiencia de ionización, α es la concentración lineal de electrones, μ es la masa promedio de un átomo del meteoroides ablacionado (Popova, 2004). Para partículas pequeñas, su velocidad es aproximadamente constante y la intensidad puede ser considerada solamente proporcional a la perdida de energía cinética del meteoroides, esto es, el primer término del lado derecho de la ecuación 3.1. En la figura 3.2, se muestra la simulación de una curva de luz típica de un meteoroides solido, la cual presenta un lento ascenso hasta alcnaazar su máxima intensidad y un posterior rápido descenso.

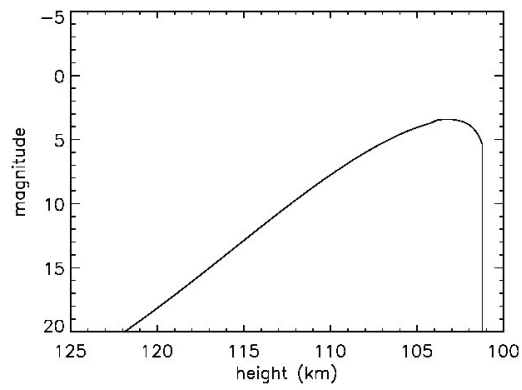


Figura 3.2: Curva de luz de un meteoroides sólido, tomado de (Campbell-Brown and Koschny, 2004).

Capítulo 4

El detector TUS

El proyecto espacial "Lomonosov" fue iniciado y liderado por la Universidad Estatal de Moscú, una organización educativa multidisciplinaria y líder científica en Rusia, la cual ha dirigido los objetivos científicos de las ciencias espaciales hacia el estudio de los problemas actuales más pertinentes. La colaboración está formada por universidades e institutos de diferentes países, Rusia, Estados Unidos de América, México, Korea, Dinamarca y España¹. Los temas científicos estudiados con la misión Lomonosov son:

- Rayos Cósmicos Ultra Energéticos (UHECR por sus siglas en inglés) con energías de 5×10^{19} a 10^{20} eV cerca del corte de energía Greizen-Zatsepin-Kuzmin (GZK).
- Gamma-Ray Bursts (GRBs) entre rangos ultravioleta y gamma.
- Fenómenos transitorios UV en la atmósfera superior, como una continuación de los proyectos espaciales "Universitetsky-Tatiana", "Universitetsky-Tatiana-2" y Vernov. Entre estos proyectos, la facultad de ciencias Físico Matemáticas de la BUAP formó parte del proyecto "Universitetsky-Tatiana 2".
- Dinámica de partículas magnetosféricas, su aceleración, procesos de transporte y pérdida, así como su rol en la generación de fenómenos transitorios y cuasi-estacionarios en la atmósfera superior en los rangos óptico y de rayos-X.

¹<https://lomonosov.sinp.msu.ru/project/collaboration>

El detector TUS (Tracking Ultraviolet Set-up) es un telescopio de fluorescencia que está a bordo del Satélite "M. Lomonosov" entre otros dispositivos científicos, figura 4.1, los cuales fueron desarrollados para estudiar diversos fenómenos astrofísicos. Fue lanzado el 28 de Abril de 2016 desde el cosmódromo de Vostochny en Rusia y tiene una órbita solar síncrona a una altitud de alrededor de 500 km (Sadovnichii et al., 2017). El TUS tiene cuatro modos de operación que permiten grabar diferentes fenómenos físicos sobre todo el cielo con un campo de visión (FOV) de ± 4.5 grados (ó 80 km x 80 km en la superficie terrestre a nivel del mar).

Principales Componentes del TUS

El detector TUS es un telescopio de fluorescencia que apunta hacia la superficie de la tierra y está conformado por cuatro partes principales:

1. Espejo Concentrador Segmentado (SMC): Es un espejo parabólico tipo Fresnel (Diaz-Anzures et al., 2004), con un área de 2 m² y longitud focal de 1.5 m, consta de 7 segmentos hexagonales hechos de una estructura de panal de fibra de carbono reforzado por una placa de aluminio. La superficie plástica del espejo esta cubierta por una capa de aluminio y protegida por un cubierta de Fluoruro de Magnesio (MgF₂), depositado a través de un proceso de evaporación en vacío. Su reflectividad a una longitud de onda de 350 nm (promedio para fluorescencia atmosférica) es del 85 %. El espejo fue sometido a diferentes pruebas que demostraron la estabilidad de su calidad óptica bajo condiciones espaciales. El tiempo de vida esperado del espejo supera los tres años, figura 4.2. El funcionamiento del SMC es reflejar la fluorescencia proveniente de la atmósfera y enfocarla al detector a bordo.
2. Fotodetector (PD) o cámara: Es un arreglo cuadrado de 256 tubos foto multiplicadores (PMTs) Hamamatsu R1463 con un cátodo multialcalino de diámetro de 13 mm. Su eficiencia cuántica es de alrededor del 20 % a 350 nm de longitud de onda. El cátodo multialcalino fue elegido en lugar de la unidad bi-alcalina usada tradicionalmente en detectores de fluorescencia a nivel del suelo, debido a su rendimiento lineal en un amplio rango de temperaturas. Se emplearon guías de luz especiales con entradas cuadradas (15 mm x 15 mm) y salidas circulares para llenar uniformemente



Figura 4.1: Detector TUS a bordo del Satélite "M. Lomonosov".

el campo de visión del detector. El arreglo está dispuesto en forma de matriz de 16 x 16 (16 módulos con 16 PMTs cada uno), cada módulo tiene su propio sistema de procesamiento de datos digital para el primer nivel de selección de eventos, basado en una FPGA Xilinx ², así como un suministro de alto voltaje controlado por el FPGA para ajustar la ganancia de los PMTs a la iluminación de fondo, figura 4.3. Cada PMT tiene un campo de visión de $\sim 0.56^\circ$ y recibe la fluorescencia reflejada

²Matriz de puertas programables o en inglés field-programmable gate array.

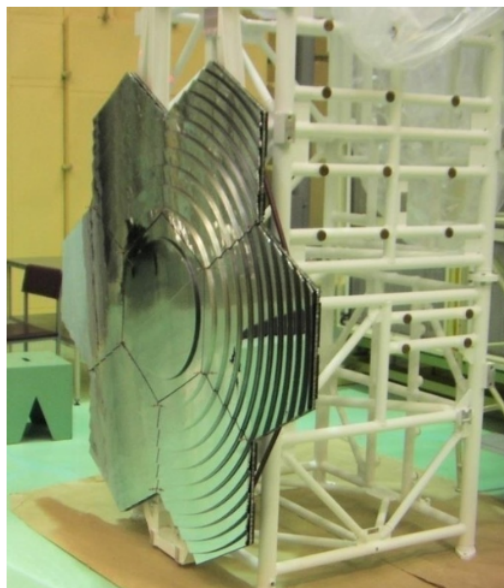


Figura 4.2: Espejo concentrador segmentado en la estructura del Satélite "M. Lomonosov".

por el SMC, después la convierte en una señal y gracias al procesamiento digital de datos, es posible crear una imagen con estas señales.

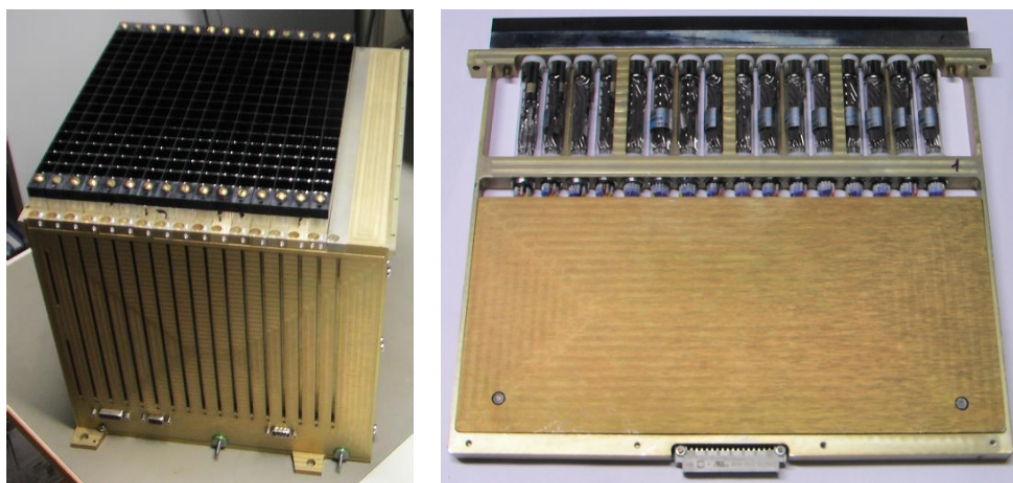


Figura 4.3: Fotodetector del TUS (izquierda) y uno de los módulos con PMTs (derecha).

3. Sensor de Luz Solar (SLS): Mide la intensidad de la luz proveniente de la Tierra, éste se encuentra junto al marco de la superficie del espejo y apunta hacia el nadir. El SLS consta de dos fotodiodos sensibles y electrónica, figura 4.4, su información es enviada a la unidad de información del satélite una vez por segundo. Su función

principal es enviar información al sistema asociado con los módulos de alto voltaje que alimenta los PMTs para cambiar la ganancia de estos y prevenir que se dañen por una alta exposición de luz.

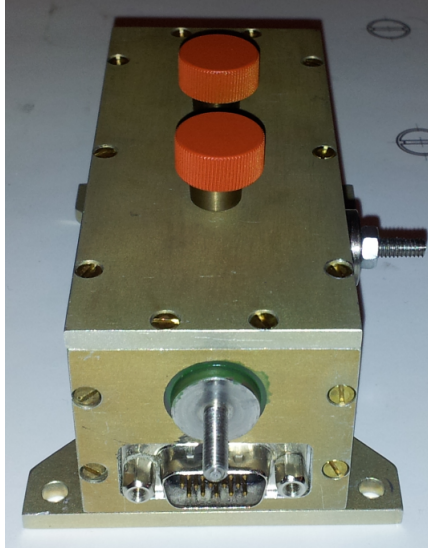


Figura 4.4: Sensor de Luz Solar. Las tapas que se encuentran encima son cubiertas protectoras de los fotodiodos

4. Sistema de Movimiento del Fotodetector (PDMS): A niveles elevados de intensidad de luz resultante de luz solar directa, la unidad de información del satélite comanda al PDMS y éste mueve el fotodetector fuera del enfoque del espejo para evitar que la cámara se dañe.

Modos de Operación

El TUS fue diseñado con el objetivo principal de la observación de Rayos Cósmicos Extremadamente Energéticos (EECRs), pero también es capaz de medir destellos de relámpagos, Eventos Transitorios Luminosos (TLEs) y micrometeoritos. Los diferentes modos de operación del TUS son: EAS, TLE-1, TLE-2 Y METEOR, los cuales corresponden a diferentes intervalos de tiempo de adquisición de datos, dichos intervalos de tiempo fueron escogidos en base a la duración típica o característica de cada fenómeno producido en la atmósfera superior.

El modo EAS está enfocado a la detección de chubascos atmosféricos extensos (EAS),

por lo cuál su tiempo de muestreo es de $0.8 \mu\text{s}$; como se mencionó en un capítulo previo hay diferentes tipos de TLEs, por consiguiente el modo TLE-1 tiene un tiempo de muestreo de $25.6 \mu\text{s}$ para detectar un tipo de TLE y el modo TLE-2 tiene un tiempo de muestreo de 0.4 ms para detectar otro tipo de TLE; por otro lado, el modo METEOR tiene el tiempo de muestreo más largo comparado con los anteriores, el cuál es de 6.6 ms para detectar micrometeoritos, pues tienen una duración de entre 0.1 a 1 s . En la tabla 4.1 se muestran las características temporales de los modos de operación del TUS. Cada evento registrado por el TUS consta de 256 tiempos de muestreo y pesa alrededor de 100 Kbytes, el límite de datos dedicado para los datos del TUS en la unidad de memoria es de 250 Mbytes por día aproximadamente (Klimov et al., 2017).

Tabla 4.1: Características temporales de los modos de operación del TUS.

Modo de Operación	Tiempo de Muestreo τ	Tiempo Total ΔT
EAS	$1\tau_0 = 0.8 \mu\text{s}$	$256\tau = 205 \mu\text{s}$
TLE-1	$2^5\tau_0 = 25.6 \mu\text{s}$	$256\tau = 6.6 \text{ ms}$
TLE-2	$2^9\tau_0 = 0.4 \text{ ms}$	$256\tau = 105 \text{ ms}$
METEOR	$2^{13}\tau_0 = 6.6 \text{ ms}$	$256\tau = 1.7 \text{ s}$

Capítulo 5

Análisis de Datos y Resultados

El detector TUS fue lanzado en órbita como parte del equipo científico del satélite Lomonosov el 28 de Abril del 2016, operó de una manera regular hasta el 4 de Diciembre de 2017, cuando el satélite enfrentó algunos problemas técnicos que no permitieron la transmisión de los datos experimentales a la Tierra. Debido a que su objetivo primordial fue probar la posibilidad de detectar EAS desde el espacio, el TUS operó en su mayoría en modo EAS, registrando casi 80 mil eventos, con unos pocos de ellos lo suficientemente interesantes para ser analizados a profundidad ya que mostraron un perfil de señal y duracion similar a lo esperado por EECRs, inclusive más brillantes.

Un evento capturado por el TUS está conformado por 256 imagenes de 256 pixeles cada una, o visto de otra forma es un conjunto de 256 señales con una duración de 256 unidades de tiempo muestral. Las señales que exceden de manera significativa el fondo son denominados pixeles activos (PA). La suma de las señales de los pixeles activos con fondo substraído es llamada curva de luz (CL). La duración luminiscnete de la CL fue caracterizada por medio de la mitad de la amplitud de la duración completa (FDHM por sus siglas en inglés) y la asimetría como la razon del tiempo de decaimiento de la señal con el tiempo de subida (tomado a la mitad de la máxima amplitud).

5.1. Algoritmo de traza lineal (LTA)

El problema de reconstruir la fluorescencia de los EAS como una traza lineal en la superficie focal de un detector orbital fue estudiado en detalle en algunos trabajos de la colaboración del JEM-EUSO (Adams et al., 2015b; Berat et al., 2010). Para utilizar los métodos planteados en tales artículos, se requieren dos cosas: 1) ajuste de la óptica y el fotodetector, esto es, que el tamaño característico de la imagen (instantánea) sea aproximadamente igual al tamaño del fotosensor y 2) un gran número de pixeles activos en la imagen. La primera condición conlleva a una localización bastante precisa del punto de la traza, mientras que la segunda se requiere para obtener errores estadísticos pequeños de las estimaciones resultantes. En el caso del detector TUS, ninguna de las condiciones previamente mencionadas se satisface. La función puntual de dispersion (PSF) es bastante grande, de modo que la imagen instantánea es distribuida sobre 4 a 6 pixeles vecinos, además la longitud de la traza no excede de manera significativa su “grosor”.

Por otro lado, la reconstrucción de los eventos se puede lograr mediante un modelo probabilístico por inferencia Bayesiana de la distribución posterior a los parámetros desconocidos de la traza y la CL. En tal caso, la información requerida son las coordenadas de los centros de los pixeles activos y los valores de las señales en el instante de tiempo dado. Las señales deben ser re-escaladas debido a la sensibilidad de cada pixel, de modo que los coeficientes de sensibilidad y las PSF son utilizados como información a priori. Sin embargo, dicha información se conoce con una gran incertidumbre, pues las sensibilidades de los pixeles cambiaron en gran medida durante la operación del detector en órbita, mientras que la PSF del espejo del TUS varía en tamaño y forma en todo el FOV del fotodetector.

Para contrarrestar las dificultades para la reconstrucción de eventos detectados por el TUS, se planteó un enfoque heurístico. La idea fue descrita primero en (Tkachev, 2017) y posteriormente modificada en (Khrenov et al., 2020). El método consiste en hacer una aproximación de la dependencia temporal de las coordenadas de los puntos de la traza, $X(t) = X_m + U_x(t - T_m)$, de acuerdo a la distribución de las coordenadas X_i de los centros de los pixeles activos, T_m es estimado al hacer un ajuste a la CL, los parámetros U_x y X_m se obtienen al minimizar la suma:

$$\sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k)^n (X_0 + t_k U_x - X_i)^2, \quad (5.1)$$

donde i corre sobre el número de PA, $k_1(i)$ y $k_2(i)$ son los tiempos iniciales y finales de la “ventana de actividad” para el i -ésimo pixel, n la potencia de los pesos W_i , X_i el centro del i -ésimo pixel. Esta ecuación es aplicada de manera independiente para las coordenadas en X e Y. Para reducir la aproximación rugosa asociada con la pixelización, los pesos W_i son proporcionales al valor de la señal suavizada (curva ajustada) al tiempo t . La operación del LTA es controlada por dos hiperparámetros, n el valor del exponente que “modula” los pesos y el valor umbral q_{act} que define la ventana de actividad.

5.2. Dirección de arribo

El sistema óptico del detector proyecta el movimiento del objeto fuente en el movimiento de la imagen a lo largo de la traza en el plano focal. Para un sistema óptico ideal (libre de aberraciones), la velocidad U de la imagen puntual se relaciona con la velocidad angular aparente ω de la fuente de luz por medio de la distancia focal f , de la forma $U = \omega f$.

Si la fuente de luz puntual se mueve en la atmósfera a una velocidad constante a lo largo de un camino rectilíneo, su imagen también se moverá a lo largo de una traza rectilínea en el plano focal, de modo que la estructura de la imagen depende solamente de la PSF de la óptica. La dirección de movimiento del objeto luminoso (dirección de arribo) puede ser determinada al calcular las componentes de la velocidad del movimiento a lo largo de la traza.

En el sistema de coordenadas local, la dirección de arribo $\vec{\Omega}$ puede establecerse utilizando los ángulos acimut ϕ y cenit θ como: $\vec{\Omega} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$, con $\vec{\Omega}$ en dirección opuesta a la velocidad de la fuente. Si denotamos por χ el ángulo entre $\vec{\Omega}$ y la línea de visión \vec{s} (véase figura 5.1), el movimiento angular de la fuente puede expresarse a través de la velocidad de la fuente v por medio de la ecuación:

$$v/c = \frac{\sin \chi_0}{\sin(\chi - \chi_0)}, \quad \tan(\chi_0) = V/c. \quad (5.2)$$

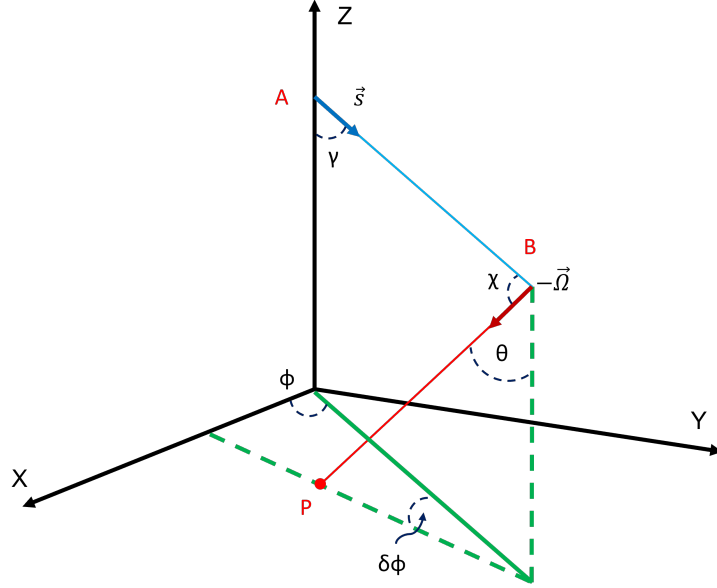


Figura 5.1: Sistema de coordenadas local. En el diagrama se muestra la línea de visión (azul) y dirección de arriba (rojo). El detector se encuentra en A, la fuente en B y la fluorescencia detectada en P. Ver el texto para una explicación sobre los ángulos.

Para un valor fijo de velocidad lineal aparente V , diferentes geometrías de la traza corresponden a diferentes velocidades de una fuente. Si $\chi < 2\chi_0$, no hay trazas. La velocidad mínima del objeto en movimiento es $v_{min} = c \sin \chi_0$ y corresponde a una traza en dirección hacia arriba con un ángulo con respecto a la línea de visión $\pi/2 + \chi_0$. Dependiendo de la situación, la ecuación 5.2 puede tomar una de las siguientes formas:

- Fuente no relativista ($v \ll c$): $\omega R = v \sin \chi$
- Fuente relativista ($v \sim c$): $\omega R = v \sin \chi / (1 + \frac{v}{c} \cos \chi)$
- Fuente ultra-relativista ($v \approx c$): $\omega R = c \tan(\chi/2)$

donde R es la distancia al detector.

Cuando se observa en el nadir, $\chi \approx \theta$. Para eventos fuera del eje, $\cos \chi = \cos \gamma \cos \theta - \cos(\delta\phi) \sin \gamma \sin \theta$, donde γ es el ángulo del campo y $\delta\phi$ es el ángulo entre $\vec{\Omega}$ y \vec{s} proyectado

en el suelo. Para γ pequeño, la diferencia entre χ y θ puede ser estimado como una corrección pequeña. Así pues, para fuentes ultra-relativistas en el sistema de coordenadas local geográfico, se puede hallar:

$$\phi = \Phi_{det} - \arctan(U_y/U_x), \quad \theta = 2 \arctan(U/U_0) + \gamma \cos(\delta\phi) \quad (5.3)$$

con $U_0 = fc/R$ y Φ_{det} la dirección acimut del movimiento del detector. Para el TUS, $U_0 = 0.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $R = 500 \text{ km}$ y $\Phi_{det} \sim -160^\circ$ para los eventos tipo EAS.

El movimiento a lo largo de la traza no es uniforme, sin embargo, ya que solo la parte más luminosa de la traza puede ser detectada, la variación en velocidad puede ser despreciada. Así, para estimar el ángulo cenit, se puede utilizar la ecuación 5.3 con los parámetros R , γ y $\delta\phi$ del punto máximo, esto es, $\tan \gamma \approx \sqrt{X_m^2 + Y_m^2}/f$, $\tan \delta\phi \approx Y_m/X_m$, donde (X_m, Y_m) son las coordenadas del punto máximo.

5.3. Eventos tipo EAS

Entre los eventos detectados por el TUS, se identificó una clase denominada tipo EAS debido al típico patrón espacio-temporal similar al esperado como producido por fluorescencia de EAS. Para este tipo de eventos es posible identificar más de 8 PA, los cuales se alinean en alguna dirección conformando una traza “gruesa”. En la tabla 5.1, se muestra la lista de los eventos tipo EAS, así como su localización geográfica y el número de PA. El nombre del evento indica la fecha de registro en formato: año, mes y día. En el caso de estos eventos, la CL presenta un característico rápido incremento en la señal hasta alcanzar un máximo, seguido de un descenso ligeramente lento. En (Khrenov et al., 2020), se reconstruyó el evento TUS161003 para probar la hipótesis de su origen como EAS. Sin embargo, la energía de éste candidato a EAS estimada por la amplitud de la luminiscencia, corresponde al menos a 1 ZeV (10^{21} eV) de acuerdo con simulaciones en el software ESAF (EUSO Simulation and Analysis Framework) (Berat et al., 2010). Considerando la baja exposición ($1200\text{-}1400 \text{ km}^2 \text{ sr año}$) y un muy empinado espectro de rayos cósmicos en este rango de energía, la probabilidad de que el TUS halla registrado un evento extremadamente energético es muy baja (del orden de $10^{-3}\text{-}10^{-5}$).

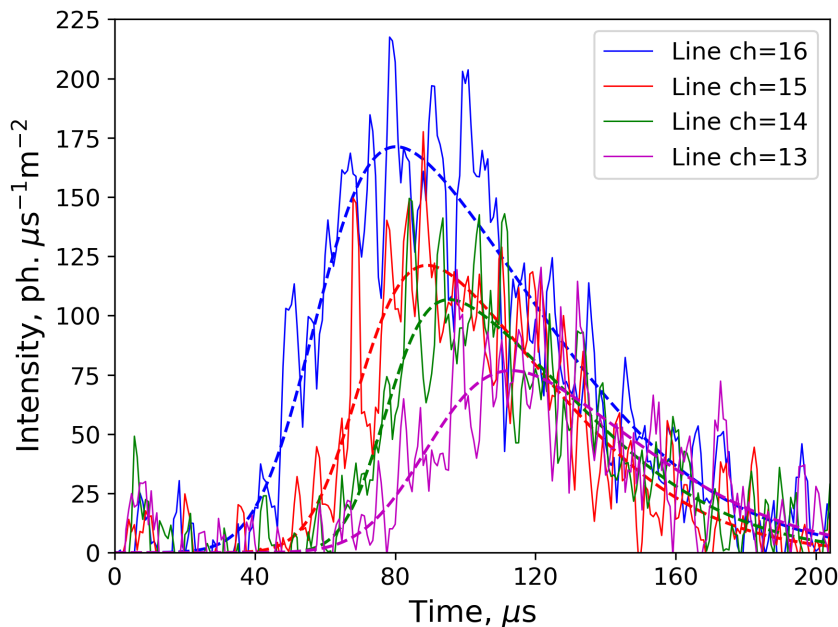


Figura 5.2: Movimiento de los picos del evento TUS170915, de la línea ch=16 (curva azul) a ch=13 (curva magenta). Las líneas cortadas son el resultado de las aproximaciones SkewGauss.

Además de las características antes mencionadas, éste tipo de eventos se caracterizan por presentar un desplazamiento en el tiempo de los picos de las señales en los PA, lo cual es una consecuencia del movimiento de la imagen a lo largo de la traza. La figura 5.2 muestra las señales activas del evento TUS170915, con sus aproximaciones a las curvas por medio de la función SkewGauss (Azzalini and Capitanio, 2014). Los PA fueron agrupados en cuatro "líneas" perpendiculares a los módulos del fotodetector. El pico de las señales sumadas a lo largo de las líneas presenta un movimiento en el tiempo, de la línea ch=16 a la línea ch=13. Dicho movimiento es típico para un objeto relativista con una región luminiscente del tamaño de un pixel o menos en el FOV (fuente puntual).

Tabla 5.1: Lista de eventos tipo EAS y su localización (las coordenadas geográficas corresponden al centro del FOV del TUS). El número de pixeles activos se indica en la última columna.

Evento	Tiempo (UTC)	Latitud	Longitud	Localización	# de PA
TUS161003	05:48:59	44.08°N	92.71°W	Minnesota	10
TUS161031	10:25:18	61.30°N	155.69°W	Alaska	8
TUS170915	06:30:18	40.31°N	107.07°W	Colorado	12
TUS171010	04:26:04	34.83°N	77.39°W	Carolina del norte	15
TUS171029a	06:39:09	35.27°N	110.78°W	Arizona	8
TUS171029b	11:13:26	65.90°N	168.07°W	Alaska	9

Para seleccionar los PA de estos eventos, la amplitud de la señal suavizada por un movimiento promedio a lo largo de 8 unidades de tiempo muestral fue estudiada con diferentes umbrales, posteriormente los pixeles pre-seleccionados fueron probados por localización espacial (pixeles vecinos) y temporal (proximidad al máximo). Para extraer la señal activa de cada uno de los PA, primero se realizó la conversión de la señal de cuentas analógico digital (ADCs por sus siglas en inglés) a la densidad del flujo de fotones, expresado como el número de fotones por metro cuadrado por microsegundo. Posteriormente se aproximó la señal por una función paramétrica con forma asimétrica y se agregó una constante para evaluar el fondo (nivel base de la señal). Los ajustes de las señales activas de cada PA, así como de la CL fueron realizados por medio de la función SkewGauss debido al conveniente control sobre su asimetría.

En la figura 5.3, se muestra como ejemplo la CL del evento TUS170915, el cual consta de 12 PA y una máxima amplitud de $A = 442 \text{ fotones}/(\mu\text{s m}^2)$, un FDHM = $72 \mu\text{s}$ y una asimetría de 1.69.

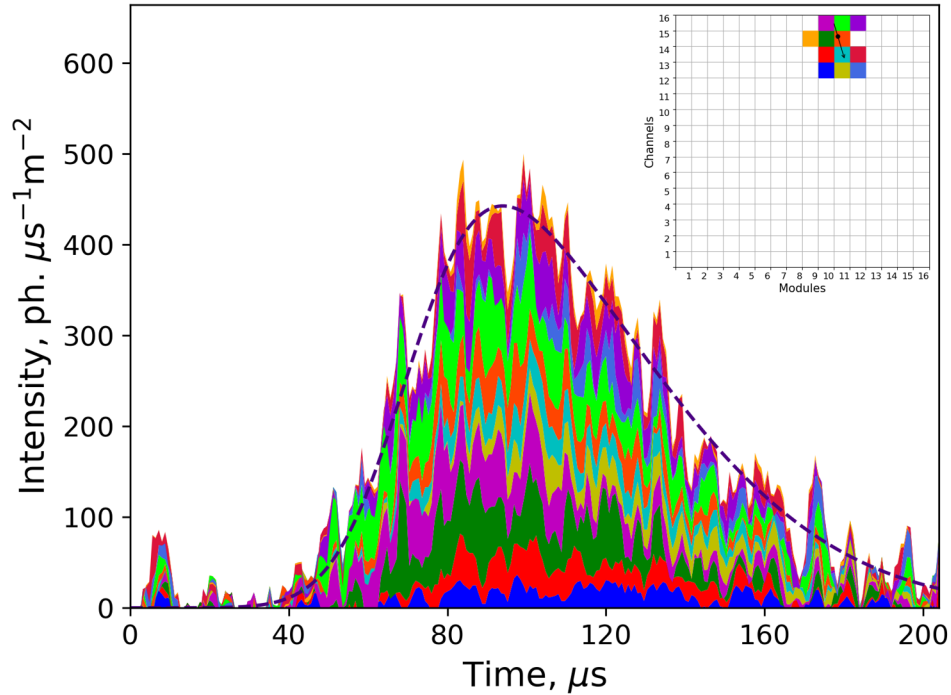


Figura 5.3: Curva de luz del evento TUS170915 y su aproximación por la función Skew-Gauss. Inserción: mapa de pixeles con los pixeles activos y traza reconstruida.

5.3.1. Reconstrucción de los eventos tipo EAS

Una vez reconstruidas las CL de los eventos tipo EAS, se procedió a utilizar el LTA (ecuación 5.1) para reconstruir la cinemática de cada evento. En la tabla 5.2, se muestran los resultados de la reconstrucción de las CL para cada evento, así como los parámetros de la cinemática aparente de la fuente de movimiento. La velocidad angular $\omega = U/f$ de la línea de visión a la fuente, caracteriza su movimiento solo en el plano de la imagen y no depende de la distancia a la fuente. Por otro lado, la velocidad lineal aparente $V = \omega R$ y la longitud de la traza $\Delta L = V \cdot 2FDHM$, las cuales son proyectadas en el plano de la imagen, fueron obtenidas asumiendo que la distancia de la fuente al detector coincide con la altura de la órbita del satélite (entre 475 y 495 km). De la penúltima columna de la tabla 5.2, se puede ver que todos los eventos son de naturaleza relativista.

Tabla 5.2: Reconstrucción de CL (amplitud, duración y coeficiente de asimetría) y parámetros de movimiento aparente.

Eventos	A_{\max} , ph. m ⁻² μs ⁻¹	FDHM, μs	Asimetría	ω , rad/s	V/c	ΔL , km
TUS161003	205	49.4	1.56	210	0.34	10.0
TUS161031	121	61.8	2.18	122	0.20	7.4
TUS170915	442	72.0	1.69	173	0.28	12.1
TUS171010	452	62.8	1.82	179	0.28	10.6
TUS171029a	193	46.6	1.59	112	0.18	4.9
TUS171029b	443	63.8	1.61	81	0.13	4.9

Un aspecto a considerar en los eventos detectados por el TUS es que parte de la luminiscencia no pudo ser reconocida debido al gran tamaño de la PSF, lo cual llevó en el caso de los eventos tipo EAS a una CL deformada (cola alargada de la curva). Además, debido a la imprecisión de la calibración de sensibilidad absoluta de los píxeles, existe una incertidumbre en las estimaciones de la amplitud, duración y asimetría. Ambos efectos fueron considerados como un “error de medición”. Finalmente se empleó la ecuación 5.3 para obtener los ángulos de arribo de cada evento. En la tabla 5.3, se muestran los ángulos de arribo en coordenadas horizontales (ϕ, θ) y en coordenadas ecuatoriales (ascensión recta α y declinación δ). Las direcciones de arribo no se concentran en ninguna dirección en particular.

Para el caso de dos eventos la reconstrucción es posible sin error adicional, en tres de los eventos el error no es mayor a dos grados y en un caso no fue posible estimar el error debido a que el evento fue capturado en el borde del detector y parte de su señal no fue

Tabla 5.3: Dirección de arribo en coordenadas horizontales (ϕ, θ) y ecuatoriales (α, δ). Error para ϕ y característica especial al registro en la última columna.

Events	$\phi, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	Comentarios
TUS161003	144	38	308	65	
TUS161031	166	26	343	83	$\Delta\phi_{\text{mes}} = 2^\circ$
TUS170915	86	28	311	33	$\Delta\phi_{\text{mes}} = 1^\circ$
TUS171010	231	28	41	49	
TUS171029a	333	17	35	19	$\Delta\phi_{\text{mes}} < 1^\circ$
TUS171029b	16	11	33	55	evento de borde

registrada.

5.3.2. Precisión de la reconstrucción

Con el fin de conocer la precisión del LTA al reconstruir los eventos tipo EAS, se realizó un estudio en una base de datos de 1000 eventos simulados con características similares a las de los eventos registrados por el TUS. Por conveniencia, la traza y la CL fueron simulados directamente en el plano focal del fotodetector.

Los resultados de la reconstrucción de las direcciones de arribo para un evento simulado pueden ser expresados como errores, esto es, considerando la diferencia entre el ángulo reconstruido y los valores verdaderos, $\Delta\phi \equiv \phi_{\text{rec}} - \phi_0$ y $\Delta\theta \equiv \theta_{\text{rec}} - \theta_0$

Al reconstruir toda la base de datos, es posible conocer la precisión estadística del método. Para valores fijos de los hiperparámetros del LTA (n y q_{act}), los histogramas de los errores pueden caracterizar la precisión mediante su media (μ) y desviación estandar (σ). En el estudio se utilizaron los errores RMS como medida de la incertidumbre del LTA, esto es, $\text{RMS} = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$.

Para fijar los valores de los hiperparámetros del LTA, se estudiaron curvas de error para la base de datos, así fue posible hallar el valor óptimo para el exponente $n = 1,5$, sin embargo, los valores del umbral de actividad q_{act} no pudieron ser fijados a un valor específico para toda la base de datos. Para hallar el valor óptimo de q_{act} se realizó una reconstrucción de evento por evento para estudiar el comportamiento de la dependencia de las curvas con respecto a este parámetro y así establecer prescripciones para cada ángulo. En la figura 5.4, se muestra el comportamiento típico de la reconstrucción de los

ángulos de arriba para un evento de la base de datos. La forma de la curva de ϕ tiene una región a pequeños valores de q_{act} con un medio asintótico de la curva, donde ϕ_{rec} tiene variaciones pequeñas, llamamos a esta elección de valor prescripción AV. Por otro lado, la curva de θ puede tener diversas formas con varios máximos locales. El primer máximo que corresponde al menor valor de q_{act} , lo llamamos punto de gradiente cero (ZGP) y se utilizó como prescripción para escoger a θ_{rec} .

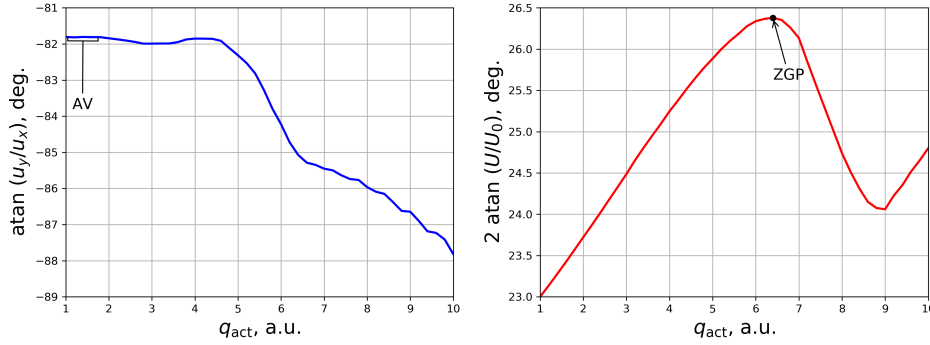


Figura 5.4: Comportamiento típico de una curva de reconstrucción para un evento simulado: La curva de ϕ muestra una región AV para un umbral pequeño (izquierda), y la curva de θ muestra la región con un ZGP (derecha).

La figura 5.5, muestra los histogramas de la reconstrucción de los ángulos para la base de datos simulada, utilizando la prescripción AV para $\Delta\phi$ se obtuvieron valores de media y desviación estandar $\mu = 0,2^\circ$ y $\sigma = 5,3^\circ$, mientras que utilizando la prescripción ZGP para $\Delta\theta$ se obtuvo $\mu = 0,9^\circ$ y $\sigma = 4,7^\circ$. Finalmente como valores representativos de la incertidumbre del LTA, se obtuvo $\Delta\phi_{RMS} = 5,3^\circ$ y $\Delta\theta_{RMS} = 4,8^\circ$.

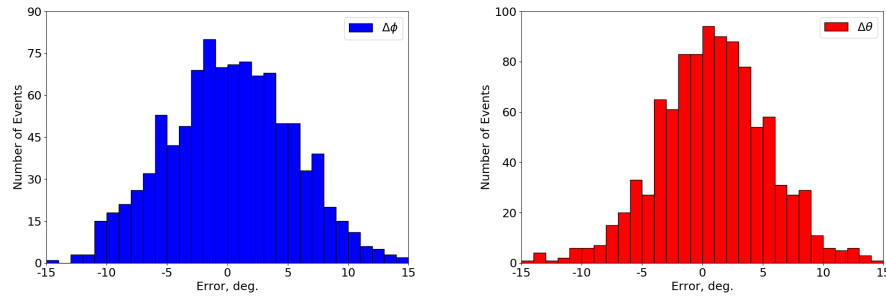


Figura 5.5: Histogramas de error para la base de datos. Izquierda: para el ángulo ϕ con la prescripción AV. Derecha: para el ángulo θ con la prescripción ZGP. $\Delta\phi = (0,2 \pm 5,3)^\circ$, $\Delta\theta = (0,9 \pm 4,7)^\circ$ (Notación: media \pm desviación estandar).

5.3.3. Hipótesis sobre el origen de los eventos

Mediante el recurso Google Earth ¹, se realizó un estudio de los objetos localizados en las inmediaciones de las trazas de los eventos tipo EAS. En todos los casos se encontraron uno o más aeropuertos en los alrededores. En la figura 5.6, se muestra la traza (línea magenta con un círculo) del evento TUS170915, la cual es una continuación de la pista del aeropuerto *Craig Moffat County* considerada dentro de la precisión de la reconstrucción. Los cuadrados blancos indican los PA del evento ($\sim 5 \times 5 \text{ km}^2$ por pixel), el círculo magenta indica la posición del máximo.

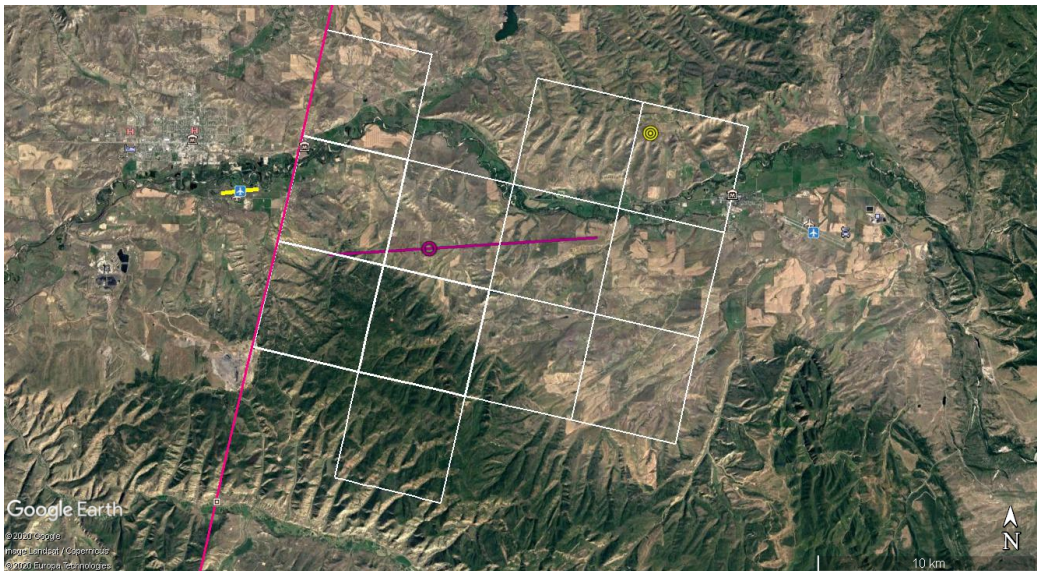


Figura 5.6: Mapa de Google Earth para el evento TUS170915. La línea amarilla corresponde a la pista del aeropuerto Craig Moffat County. Traza reconstruida en magenta con un círculo (“punto máximo”).

Considerando lo antes mencionado se asumió que el origen de los eventos fue antropogénico y se formuló la hipótesis de que la traza de los eventos coincidía con la continuación de la pista de un aeropuerto, lo cual debe cumplir con dos condiciones: 1) una pequeña diferencia $\Delta\phi$ entre la dirección de la traza y la dirección de la pista, y 2) localización cercana.

La precisión del ángulo entre la proyección de la traza en la superficie Terrestre y la dirección de la pista $\Delta\phi$ corresponde a la precisión de la reconstrucción del ángulo acimut ϕ . Así pues, $\Delta\phi$ debe encontrarse dentro del error metódico ($\sim \pm 5^\circ$) y de medición

¹<https://earth.google.com>

(tabla 5.3). Por otro lado, la principal incertidumbre en la posición de la traza se debe a la imprecisión de la marca de tiempo del registro de los eventos. La marca de tiempo se transmitió con una precisión de un segundo, lo que corresponde al desplazamiento del detector a lo largo de la dirección de movimiento de alrededor de 8 km. Además, a veces ocurrió desincronización durante la operación del TUS y conllevó a un incontrolable desplazamiento del tiempo de 1-3 segundos.

Para tres de los seis eventos, fue posible confirmar la hipótesis propuesta. Para dos casos se encontró un error adicional en $\Delta\phi$, el cuál puede ser explicado debido a las propiedades peculiares de reconstrucción (p.ej. evento de borde). Solamente un evento no encontró una correspondencia con la hipótesis. Existen varias posibles explicaciones para la correspondencia entre la dirección y localización de las trazas. La fuente de luz UV alineada linealmente puede ser debido a un sistema de luces de precaución de un avión al aproximarse a la pista. Además las luces montadas en el avión para aterrizaje iluminan el terreno y la pista, las cuales pueden ser vistas fácilmente a 100 millas de distancia. Sin embargo, en cualquiera de los casos anteriores, es difícil explicar el característico patrón espacio-temporal de los eventos detectados por el TUS.

Por otro lado, se hallaron diferentes tipos de estaciones de radio localizadas cerca de los aeropuertos. Un rango omnidireccional de alta frecuencia (VOR² por sus siglas en inglés) es usado para determinar el azimuth de la dirección de movimiento de un avión. Para cada evento tipo EAS se identificaron las estaciones VOR más cercanas usando el recurso <https://www.airnav.com>. Como ejemplo en la figura 5.6, se muestra la estación Hayden VOR (40.5201°N, 107.3049°W) marcada con un círculo amarillo; considerando una compensación no mayor a 0.5 s es posible visualizar la traza del evento TUS170915 entre la pista del aeropuerto y el VOR.

Sin embargo, la hipótesis de que los eventos tipo EAS esten asociados a la activación de las capas bajas de la ionósfera debido a una señal de radio de un VOR, es deficiente. Por ejemplo, la principal energía producida por un relampago de un pulso electromagnético que genera un elfo se lleva a cabo en el rango VLF (3-30 kHz), mientras que la señal de radio generada por la estación VOR tiene una frecuencia en el rango de 108-118 MHz y el poder de un transmisor VOR es mucho más débil al de un relámpago.

²Very high frequency omnidirectional range

5.4. Eventos Meteoros

Durante 250 horas de observación nocturna en el modo METEOR, el TUS detectó un total de 13 eventos con curvas de luz y trazas en el plano focal similares a las producidas por un meteoro, dichos eventos fueron denominados *eventos meteoro del TUS*. En la tabla 5.4, se muestra la lista de los eventos, tiempo UTC y localización geográfica del centro del FOV del TUS al momento del registro, así como la intensidad UV y magnitud absoluta del máximo de cada evento. El nombre de cada evento representa la fecha de registro en el formato: año, mes y día. Estos eventos se distribuyeron alrededor del globo, con cuatro de ellos sobre la tierra y el resto sobre océanos. Uno de los criterios de selección fue que el evento contara con al menos 5 PA, a excepción del evento TUS170318a que contó solamente con 3 PA debido a que una parte del evento se localizó fuera del FOV del TUS y otra parte pasó a través de un módulo muerto (módulo descompuesto). Las características que compartieron estos eventos son: 1) conjunto de PA conformando un patrón en forma de una traza “gruesa”, y 2) el pico de la señal se mueve de pixel a pixel a lo largo de la traza.

Tabla 5.4: Eventos meteoro del TUS: tiempo UTC de registro, Latitud y Longitud geográfica del centro del FOV del TUS, intensidad UV (I) y magnitud absoluta (M_U , ver definición en el texto).

Evento	UTC	Lat.	Long.	I , 10^6 ph/m ² s	M_U
TUS161230	19:44:46	9.38°S	49.34°E	17.6	4.0
TUS161231	05:06:54	2.08°N	89.72°W	241	1.1
TUS170103	14:31:08	53.77°N	138.88°E	118	1.9
TUS170105	16:54:56	16.84°N	95.15°E	228	1.2
TUS170106	18:09:26	11.66°S	72.82°E	281	1.0
TUS170318a	01:27:04	31.31°N	31.26°W	175	1.5
TUS170318b	10:56:39	14.14°N	176.25°W	377	0.6
TUS170318c	15:54:32	44.29°S	100.34°E	401	0.6
TUS170319	20:11:56	52.37°S	33.62°E	740	-0.1
TUS170321	01:35:37	45.51°N	30.43°W	21600	-3.7
TUS171110	05:40:44	66.45°N	84.6°W	62.4	2.6
TUS171111a	02:22:15	0.17°N	51.8°W	186	1.4
TUS171111b	11:47:16	0.22°S	166.89°E	439	0.5

Para estimar una amplitud, duración y asimetría de la CL de cada evento, éstas fueron ajustadas por medio de la función Skew Gauss. La amplitud de los eventos se muestra en las dos últimas columnas de la tabla 5.4. El FDHM de los eventos meteoro del TUS varía de 0.1 a 0.4 s, a excepción del evento más luminoso con un FDHM mayor a un segundo.

El comportamiento típico de la CL de un evento meteoro del TUS presenta un incremento monótonico en la señal hasta alcanzar un valor máximo y después un decaimiento abrupto. La figura 5.7, muestra dicho comportamiento para el evento TUS171111b. El pico al final del evento fue asociado a una llamarada, lo cuál es típico para algunos meteoros brillantes (Borovička et al., 2007).

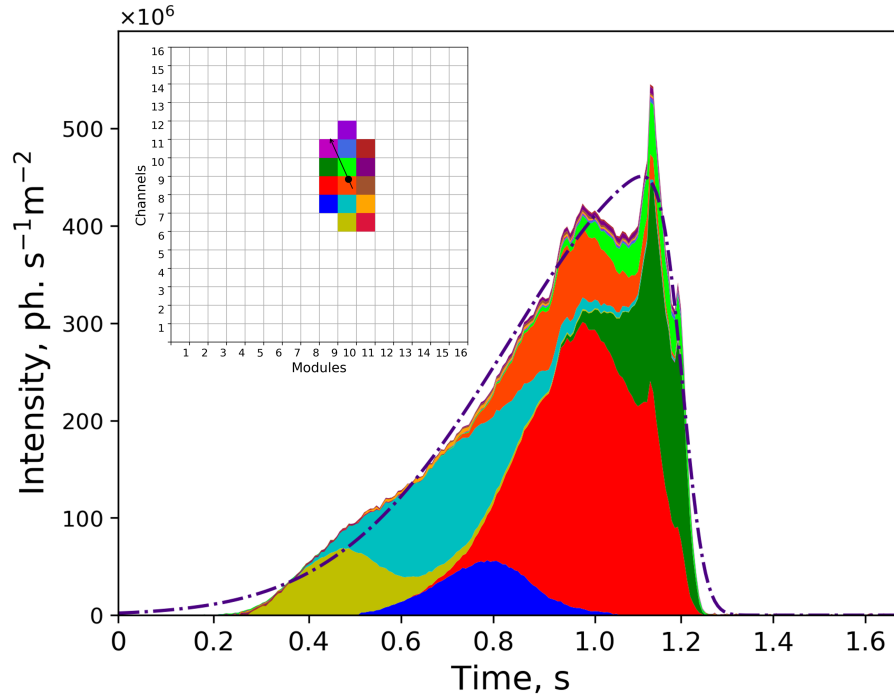


Figura 5.7: Evento TUS171111b con una curva de luz típica. La línea punteada corresponde a la aproximación Skew Gauss. Inserción: mapa de píxeles activos y traza reconstruida.

Dos de los eventos meteoro del TUS presentaron un rápido incremento de la señal con un relativamente lento decaimiento, dicho comportamiento es conocido en la literatura como “pico temprano”. Las CL de los eventos meteoro del TUS tienen estructuras complejas con dos o más picos, sin embargo, dicho comportamiento es asociado a la presencia de uno o varios píxeles debilmente sensibles en la traza³.

5.4.1. Reconstrucción de dirección de arribo

Al asumir que los eventos detectados por el TUS son meteoros, es importante reconstruir su dirección de arribo. Para ello es necesario tomar en cuenta la velocidad del satélite

³Píxeles cuya señal registrada cambia drásticamente con pequeños cambios de la señal detectada.

(~ 7.9 km/s) al momento de la reconstrucción, ya que es del mismo orden de la velocidad de los meteoros estándar del “sistema solar” (~ 30 km/s). Para reconstruir la dirección de arribo se utilizó el LTA, considerando la velocidad y dirección de movimiento del detector.

Para transformar las componentes de la velocidad U_x y U_y en las direcciones de arribo del movimiento de la fuente de luz, se necesita la velocidad de la fuente y la distancia R entre el objeto y el detector. Para el caso de los eventos meteoro del TUS, la velocidad de la fuente es desconocida. De modo que se escogió la velocidad aparente de meteoros correspondiente a lluvias de meteoros conocidas, variando su valor ± 5 km/s para estudiar su influencia en la reconstrucción. La distancia $R = 400$ km se utilizó como valor típico para observación desde la órbita del TUS.

Para estudiar la precisión de la reconstrucción del LTA en eventos meteoros, se simuló una base de datos de 1000 eventos con características similares a los eventos detectados por el TUS. Se tomó en cuenta la variación en las sensibilidades de los pixeles, así como los pixeles “muertos”. El error asociado a la reconstrucción de la dirección de arribo se consideró como un ángulo de separación

$$\cos \gamma = \sin \delta_v \sin \delta_r + \cos \delta_v \cos \delta_r \cos(\alpha_v - \alpha_r), \quad (5.4)$$

donde α y δ son la ascensión recta y la declinación respectivamente, y los subíndices representan el valor verdadero (v) y reconstruido (r). Se utilizó el percentil 68 del ángulo de separación (γ_{68}) como una medida de la precisión de la dirección de reconstrucción. El estudio de la reconstrucción con el LTA en la base de datos simulados, mostró que si conocemos el valor exacto de velocidad de la fuente en movimiento, entonces $\gamma_{68} \sim 10^\circ$, mientras que si se sobreestima la velocidad de la fuente por 1 km/s, se genera un desplazamiento del valor “verdadero” alrededor de un grado.

La asociación de los eventos meteoro del TUS con lluvias de meteoros, se realizó emparejando las fechas de registro de los eventos con el calendario de actividad de lluvias de meteoros del 2017 de la IMO⁴. Solamente cuatro eventos del TUS tuvieron una dirección cercana al radiante aparente de la lluvia de meteoros, con un valor de γ razonablemente compatible con el error de reconstrucción γ_{68} , los resultados para estos eventos se muestran

⁴International Meteor Organization, <https://www.imo.net/resources/calendar/>

en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Comparación de los radiantes aparentes de los eventos meteoro del TUS (α , δ) y las lluvias de meteoros del 2017 (RA, Dec), y ángulo de separación (γ). Los valores están en grados.

Evento	α	δ	Lluvia	RA	Dec	γ
TUS170103	247.1	39.8	Quadrantids	230	49	15.2
TUS170318c	274.9	-33.5	γ Normids	239	-50	31
TUS171110	53.3	26.4	N. Taurids	58	22	6.2
TUS171111b	69.4	22.1	N. Taurids	58	22	10.6

El evento TUS170318c presentó un valor de γ grande, sin embargo, puede ser explicado debido a que la traza de dicho evento cruzó zonas con varios pixeles muertos y el máximo del evento se ubicó en una región similar. La parte “faltante” del evento condujo a una sobreestimación del ángulo cenit reconstruido.

Por otro lado, algunos de los eventos meteoro del TUS fueron asociados con meteoros esporádicos (Campbell-Brown and Jones, 2006). En la figura 5.8, se muestra el evento TUS170318b con una típica CL y una traza bien reconstruida. La velocidad aparente de la lluvia de meteoros “ γ – Normids” a la que fue asociado el evento (56 km/s), no corresponde al valor mínimo de velocidad empleado para la reconstrucción (66 km/s), de hecho el radiante normids se encontraba bajo el horizonte al momento del registro del evento. La velocidad empleada para la reconstrucción está dentro del rango de meteoroides de alta velocidad (45-70 km/s) de las fuentes esporádicas apex (Campbell-Brown, 2008).

Considerando el amplio FOV del TUS, se estudió la posibilidad de detectar otro satélite por el TUS. Un satélite iluminado por la luna puede producir una traza rápida, la cual pudo ser medida por el TUS y emular un meteoro. Para este trabajo, se analizaron ~ 16000 órbitas de satélites al momento de detectar los eventos meteoro del TUS.

Para predecir la posición de los satélites en una region cercana al FOV del TUS, se utilizó el código Skyfield (Rhodes, 2019), el cual reconstruye las orbitas de satélites al implementar la rutina de propagación de satélite SGP4. La información proporcionada consistió en elementos orbitales de satélites de archivos TLE (Two-Line Element), los cuales fueron obtenidos del sitio web CelesTrak⁵. El estudio mostró que para cada evento

⁵<https://celestrak.org/>

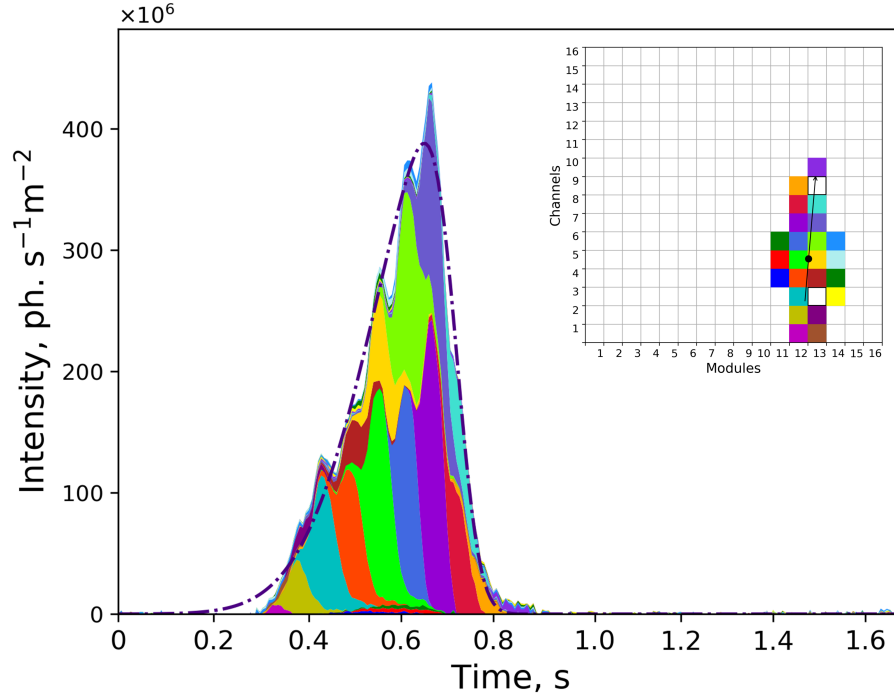


Figura 5.8: Meteoro esporádico TUS170318b. Inserción: mapa de pixeles y traza reconstruida

meteoro del TUS no hubo más de 10 satélites cerca del FOV del TUS y un análisis posterior reveló que ninguno de los candidatos pudo haber sido la fuente de luz que produjo las CL de los eventos debido a la diferencia de altitud de los satélites. La altitud del TUS es de $R = 470\text{-}500$ km, mientras que los “candidatos” se hallaron en varias ocasiones por encima del TUS (más de 700 km) y solo en dos ocasiones por debajo del TUS pero fuera de su FOV.

5.4.2. Magnitud de los eventos

La luminosidad de los meteoros es medida tradicionalmente en una escala logarítmica. Para ello se introduce el concepto de un valor absoluto, el cual compara el flujo de fotones en el detector F en un ancho de banda particular con un cierto flujo de referencia F_0 :

$$M = -2,5 \log(F/F_0) - 5 \log(d/d_{ref}), \quad (5.5)$$

donde el último término toma en cuenta la diferencia en distancia al objeto d con la referencia $d_{ref} = 100$ km. El TUS trabaja en la banda U (longitud de onda efectiva $\lambda_{ef} = 366nm$), por lo cual $F_0 = 0.77 \cdot 10^8 phs^{-1}m^{-2}nm^{-1}$ (Bessell et al., 1998). Para calcular F , se divide la intensidad medida de la CL por el ancho de banda del filtro UFS1 el cual es usado en los pixeles del TUS, $\Delta\lambda_{TUS} \sim 140nm$.

Los resultados de la luminosidad del pico de todos los eventos meteoro del TUS se presentan en las últimas dos columnas de la tabla 5.4. La magnitud absoluta típica de un meteoro registrado por el TUS está en el rango $0.5^m - 2.0^m$, lo cual es muy luminoso. El evento más luminoso detectado por el TUS fue el evento TUS170321, el cual tiene 37 PA y un pico con una amplitud mayor a $2 \times 10^{10} phs^{-1}m^{-2}$, lo cual es dos órdenes de magnitud mayor a los otros eventos meteoro del TUS. La magnitud absoluta medida ($\sim -3.7^m$) sugiere que dicho evento podría ser un bólido⁶. La figura 5.9, muestra la CL y mapa de PA de éste evento. La estructura compleja que presenta puede deberse parcialmente a los módulos y pixeles muertos. No se encontró una correspondencia del evento TUS170321 con bólidos o superbólidos reportados por el CNEOS⁷ y bólidos de la IMO⁸, debido a que el TUS se encontraba lejos de las redes de detección al momento del registro.

⁶El término en inglés es fireball.

⁷Center for Near Earth Objects Studies, <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>

⁸https://fireballs.imo.net/members/imo_view/browse_events

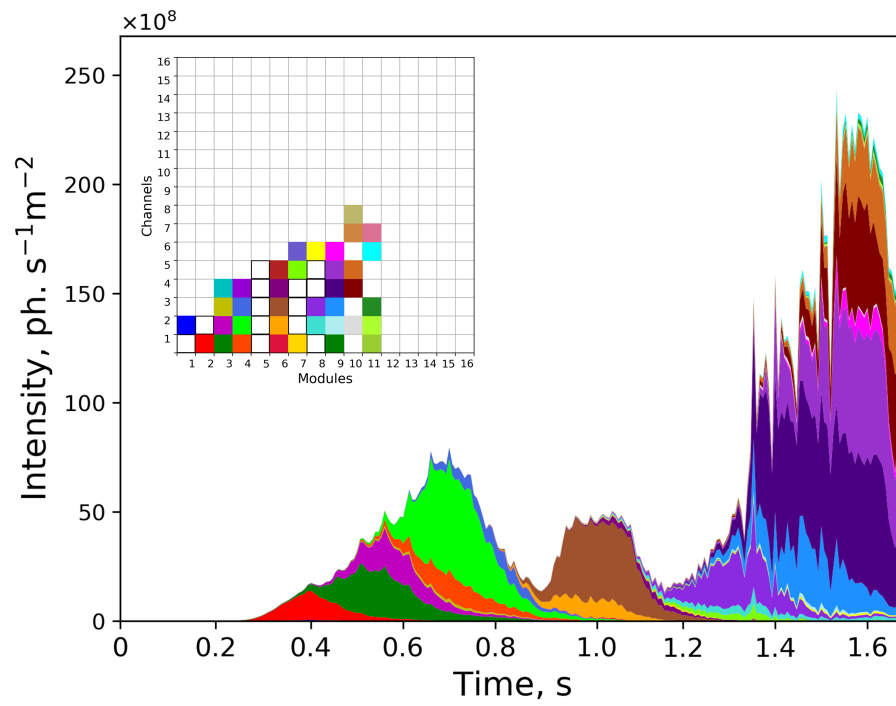


Figura 5.9: Meteoro más luminoso detectado por el TUS, evento TUS170321. Inserción: mapa de pixeles.

Capítulo 6

Conclusiones

El detector orbital TUS, debido a su espejo concentrador de gran área y fotodetector altamente sensitivo, fue capaz de detectar señales UV inaccesibles para otros dispositivos.

En este trabajo se analizaron los llamados eventos tipo EAS con una curva de luz de duración característica de al rededor de $100 \mu s$ y un notable desplazamiento espacial del pico de la señal. La reconstrucción de dichos eventos es complicada debido a la corta longitud de la traza, asimetría de la imagen y una incertidumbre en la distribución de sensibilidades de los pixeles. El método para reconstruir los parámetros de cinemática desarrollado hizo posible determinar la dirección de arribo de la fuente de los seis eventos estudiados, lo cual corresponde a un movimiento relativista descendente con ángulos cenit de 10° a 40° . Considerando el nombre de dicho eventos, es difícil asociarlos a fluorescencia producida por EAS debido a que la intensidad de la señal es significativamente grande (debería corresponder a primarios de ZeV). Todos los eventos se localizaron en regiones de los Estados Unidos de América y fueron asociados a pistas de aeropuertos, lo cual permitió formular hipótesis sobre el origen antropogénico de los eventos, sin embargo, dichas hipótesis enfrentan problemas con la interpretación de los patrones espacio-temporales. En el caso de que los eventos tipo EAS tengan un origen antropogénico, el determinar sus características mediante el análisis de datos de nuevos detectores orbitales como el Mini-EUSO, hará posible excluírlos de análisis posteriores en las misiones espaciales de nuevas generaciones como K-EUSO y POEMMA.

Por otro lado, se analizaron 13 meteoros registrados por el detector TUS, reconstruyendo su dirección de arribo y determinando su luminosidad. Cuatro eventos fueron correlacionados como pertenecientes a lluvias de meteoros dentro de un aceptable error de reconstrucción, algunos de los del resto fueron asociados a meteoros esporádicos. La uniformidad de la matriz de sensibilidad, así como los pixeles muertos afectaron significativamente la calidad de los resultados. Considerando las características del detector TUS, éste tenía el potencial de medir meteoros de débil brillo en un amplio rango de masas con gran estadística, sin embargo, el sistema de disparo del TUS fue diseñado para grabar eventos del tipo EAS y no fue optimizado para grabar señales relativamente lentas, lo cual condujo a la detección de algunos eventos con luminosidades relativamente elevadas. La observación de meteoros desde el espacio abre nuevas posibilidades de mediciones espectrométricas en el rango ultravioleta medio y lejano, lo cual permitiría conocer más sobre la intensidad y mecanismo de emisión de luz UV de los meteoros.

La experiencia ganada con las observaciones realizadas por el detector TUS deberían ser usadas en el diseño de misiones futuras, como en la optimización de sistemas de disparo, resolución temporal, observación estereo y trabajo en conjunto con instalaciones con base en la Tierra.

La investigación realizada en este trabajo, fue publicada en artículos de investigación. El estudio de los evento tipo EAS fue publicado en (Sharakin and Hernandez, 2021), mientras que parte de la investigación de los eventos meteoros del TUS se incluyo en (Barghini et al., 2022) y el estudio completo en (Ruiz-Hernandez et al., 2022). Las portadas de dichos artículos se muestran en el apéndice A.

6.1. Trabajo futuro

Una de las técnicas actualmente utilizadas en el análisis de datos es el desarrollo de metodologías Bayesianas, lo cual consiste en crear una distribución posterior (p.ej. de los parámetros del modelo de interes) de la mezcla de una distribución a priori (información externa de datos observados) y un modelo likelihood (derivado del modelado de los datos). Recientemente investigadores de diversas áreas como astronomía, ecología, ciencias del medio ambiente, sector de salud, etc., se han enfocado en análisis con modelos Baye-

sianos debido a que las ciencias parecieran funcionar como los principios Bayesianos, esto es, en cada etapa de desarrollo científico la nueva información es usada para ajustar la información anterior basandose en los modelos de lo que se desea explicar. Otra razón es que recientemente los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de sistemas de cómputo capaces de tratar con algoritmos complejos basados en MCMC (Markov Chain Monte Carlo), así como el desarrollo de algoritmos más eficientes disponibles en una variedad de paqueterías Bayesianas de diferentes lenguajes de programación.

Como trabajo futuro se propone incursionar en el desarrollo de modelos para la explicación de ciertos fenómenos físicos como los mecanismos de emisión de luz en los TLEs, o la relación entre la morfología de la curva de luz de los meteoros y el meteoróide que la produce mediante metodologías Bayesianas, lo cual permite inferir el valor de parámetros difíciles de medir mediante la elección o formulación de una distribución likelihood adecuada.

Apéndice A

Trabajos derivados de la investigación



PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB

RECEIVED: October 7, 2020

REVISED: December 19, 2020

ACCEPTED: March 2, 2021

PUBLISHED: July 26, 2021

TECHNICAL REPORT

Kinematics reconstruction of the EAS-like events registered by the TUS detector

S. Sharakin^{a,*} and O.I. Ruiz Hernandez^b

^aLomonosov Moscow State University,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, GSP-1,
Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

^bBenemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas,
Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570, Puebla, México

E-mail: sharakin@mail.ru

ABSTRACT. The Tracking Ultraviolet Set-up (TUS) is the world's first orbital imaging detector of Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) and it operated in 2016–2017 as part of the scientific equipment of the Lomonosov satellite. The TUS was developed and manufactured as a prototype of the larger project K-EUSO with the main purpose of testing the efficiency of the method for measuring the ultraviolet signal of extensive air shower (EAS) in the Earth's night atmosphere. Despite the low spatial resolution ($\sim 5 \times 5 \text{ km}^2$ at sea level), several events were recorded which are very similar to EAS as for the signal profile and kinematics. Reconstruction of the parameters of such events is complicated by a short track length, an asymmetry of the image, and an uncertainty in the sensitivity distribution of the TUS channels. An advanced method was developed for the determination of event kinematic parameters including its arrival direction. In the present article, this method is applied for the analysis of 6 EAS-like events recorded by the TUS detector. All events have an out of space arrival direction with zenith angles less than 40° . Remarkably they were found to be over the land rather close to United States airports, which indicates a possible anthropogenic nature of the phenomenon. Detailed analysis revealed a correlation of the reconstructed tracks with direction to airport runways and Very High Frequency (VHF) omnidirectional range stations. The method developed here for reliable reconstruction of kinematic parameters of the track-like events, registered in low spatial resolution, will be useful in future space missions, such as K-EUSO.

KEYWORDS: Data analysis; Data reduction methods

*Corresponding author.



© 2021 The Author(s). Published by IOP Publishing Ltd on behalf of Sissa Medialab. Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/T07013>

2021 JINST 16 T07013



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Advances in Space Research xxx (xxxx) xxx

**ADVANCES IN
SPACE
RESEARCH**
(a COSPAR publication)
www.elsevier.com/locate/asr

UV telescope TUS on board Lomonosov satellite: Selected results of the mission

Dario Barghini^{a,b}, Mario Bertaina^{a,*}, Alberto Cellino^b, Francesco Fenu^{a,b}, Silvia Ferrarese^a
Alessio Golzio^a, Oliver I. Ruiz-Hernandez^c, Pavel Klimov^d, Antonio Montanaro^{a,1}
Anthony Salsi^{a,2}, Sergei Sharakin^d, Ksenia Sigaeva^{d,e}, Mikhail Zotov^d

^a Department of Physics - University of Turin, Via P. Giuria 1, Turin 10126, Italy^b National Institute of Astrophysics - Astrophysical Observatory of Turin, Via Osservatorio 20, Pino Torinese 10025, Italy^c Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570 Puebla, Mexico^d Skobel'syn Institute of Nuclear Physics - Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, Moscow 119991, Russia^e Faculty of Physics - Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, Moscow 119991, Russia

Received 25 October 2021; received in revised form 23 November 2021; accepted 30 November 2021

Abstract

The Tracking Ultraviolet Setup (TUS) was the first orbital detector aimed to check the possibility of recording ultra-high energy cosmic rays (UHECRs) at $E \gtrsim 100$ EeV by measuring the fluorescence signal of extensive air showers in the atmosphere. TUS was an experiment funded by the Russian Space Agency ROSCOSMOS, and it operated as a part of the scientific payload of the Lomonosov satellite since April 2016 till late 2017. During its mission, TUS registered almost 80,000 events in its main operation mode, with a few of them being sufficiently interesting to be more deeply scrutinized as they showed light profile and duration similar to UHECR events, even though much brighter. At the same time, the data acquired by TUS in different acquisition modes have been used to search for more exotic matter such as strangelets and nuclearites, and to measure occurrence, time profile and signal amplitude of different classes of transient luminous events among other scientific objectives, showing the interdisciplinary capability of a space-based observatory for UHECRs. In this paper, we report a selection of studies and results obtained with the TUS telescope which will be presented and placed in the context of the present and future missions dedicated to the observation of UHECRs from space such as Mini-EUSO, K-EUSO and POEMMA.

© 2021 COSPAR. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Ultra-high energy cosmic rays; Nuclearites; Transient luminous events

1. Introduction

The cosmic ray spectrum spans over 11 orders of magnitude in energy and reaches limits well beyond those of the

most powerful accelerators created by mankind. Above 10^{18} eV, these particles are called ultra-high energy cosmic rays (UHECRs). At energies above 5×10^{19} eV, UHECR sources probably involve physical processes occurring in extreme extragalactic environments as very few known astrophysical objects can satisfy the requirements imposed by the observed spectrum, composition, and lack of strong anisotropies (Kotera and Olinto, 2011). At this energy, the flux becomes as low as one event per century per square

* Corresponding author.

E-mail address: bertaina@to.infn.it (M. Bertaina).¹ Now at: DET Department of Electronics and Telecommunications - Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 24, Turin 10129, Italy.² Now at: Laboratoire Lagrange - Observatoire de la Côte D'Azur, Boulevard de l'Observatoire, CS 34229, Nice 06304, France.<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.044>

0273-1177/© 2021 COSPAR. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Please cite this article as: D. Barghini, M. Bertaina, A. Cellino et al., UV telescope TUS on board Lomonosov satellite: Selected results of the mission, *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.044>



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Planetary and Space Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/pss

Meteors observations by the orbital telescope TUS

Oliver I. Ruiz-Hernandez^{a,*}, Sergei Sharakin^b, Pavel Klimov^b, Oscar M. Martínez-Bravo^a

^a Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570, Puebla, Mexico

^b Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia



ARTICLE INFO

Keywords:

TUS
Orbital detector
Meteor
Reconstruction
Lomonosov satellite

ABSTRACT

The TUS (Tracking Ultraviolet Set-up) detector is the first fluorescence telescope aimed to measuring Extensive Air Showers (EAS) from space and operated till December 4th, 2017. Despite the main operation mode with a 0.8 μ s temporal resolution of the TUS detector was devoted for EAS detection, also it was able to measure different slower luminescent phenomena in the near ultraviolet range. One of the TUS operation modes had 6.6 ms temporal resolution and was used to measure micro-meteors and thunderstorm activity. The high sensitivity of the device due to large area of an optical system, makes it a potentially powerful tool for studying dim and fast glow in the Earth's atmosphere. In this work we present the kinematics reconstruction of 13 events recorded by the TUS during 250 h of operation, which possess the expected characteristics produced by a meteor (characteristic linear track and light curve). We discuss the possible source of them and their luminosity. This experience of orbital meteor observations is useful for planning similar research in the future more sensitive space missions.

1. Introduction

Meteoroids hit the Earth's atmosphere at hypersonic velocities, mostly from 11 up to 72 km/s, which corresponds to the escape velocities from the Earth and the Solar system respectively. Generally there are released ions and free electrons along the meteoroid path through the atmosphere, in many cases the de-excitation of the ions produce visible light (Ceplecha et al., 1998; Cizic et al., 2001; Spurný and Ceplecha, 2008). The interaction of the meteoroid in the atmosphere starts with a preheating phase at a height between 300 and 100 km, then the surface material sublimates and a layer of hot vapor to temperatures above 2000 K is produced around the body, this phenomenon is called ablation (Opik, 1958). At temperatures around 2500 K the melted material starts to evaporate, the ions in this surrounding layer reach excited states and emit light in the de-excitation process. The beginning height of this phenomenon is in the range of 120 to 75 km (Carbary et al., 2003; Love and Brownlee, 1991). Due to the thermal shock, the body will disintegrate in the range of 70 to 30 km height. A typical meteoroid ends losing all its mass without radically change its velocity. Normally, the evaporation time has a duration between 0.5 up to 3 s (Adams et al., 2015; Cellino et al., 2012).

The detection of meteors from orbit was previously reported (McCord et al., 1995), however, most satellites with sensors able to detect

meteoroids as fireballs have military purposes and because their main objective do not include the scientific study of meteors, rarely these results are published (Reynolds, 1992; Tagliaferri et al., 1994). Considering the capabilities of such instruments, most probably recorded events like meteors are lost with data reduction or archived as classified activities but are usually not made public. Despite the fact that the detection of meteors are mainly from ground-based observing stations as the European Fireball Network, some works in the literature have pointed the potentially advantages by measuring meteors from space in the ultraviolet (UV) region (Carbary et al., 2003; Jenniskens et al., 1998, 2002). Detailed measurements of meteors in UV band are quite rare, see (Kasuga et al., 2005).

An interesting possibility to measure and study meteors in the near UV wavelength band is provided by sensitive detectors developed in the frame of the JEM-EUSO¹ Program (Bertaina, 2021), initially focused on the registration of weak extensive air shower (EAS) fluorescence from ultra-high-energy cosmic rays (UHECR). The JEM-EUSO Collaboration develops the idea proposed by (Benson and Linsley, 1981) and its activity lead to a design of such detectors as Mini-EUSO (Bacholle et al., 2021), KLYPVE-EUSO (K-EUSO) (Casolino et al., 2017; Garipov et al., 2015; Klimov et al., 2022) and JEM-EUSO (Adams et al., 2015). The Mini-EUSO detector operates on board the International Space Station (ISS) since 2019.

* Corresponding author.

E-mail address: oliver.ruizhernandez@viep.com.mx (O.I. Ruiz-Hernandez).

¹ Joint Experiment Missions for Extreme Universe Space Observatory, <https://www.jemeuso.org/>.

<https://doi.org/10.1016/j.pss.2022.105507>

Received 28 December 2021; Received in revised form 5 April 2022; Accepted 10 May 2022

Available online 13 May 2022

0032-0633/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Certificate of Scientific Participation

Presented to

Oliver-Isac Ruiz-Hernandez

of

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico

for the


oral presentation titled

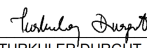
The orbital telescope TUS: Reconstruction of events with track

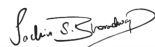
at the

2022 Canadian-Cuban-American-Mexican Graduate Student Physics Conference


JOELUIS CERUTTI TORRES
C²AM Organizer, Sociedad Cubana de Física


HAYDEE HERNANDEZ ARELLANO
C²AM Organizer, Sociedad Mexicana de Física


TURKULER DURGUT
C²AM Organizer, Canadian Association of Physicists


SACHIN S BHARADWAJ
C²AM Organizer, American Physical Society



Bibliografía

- Aab, A., et al. (The Pierre Auger Collaboration), 2020a. Measurement of the cosmic-ray energy spectrum above 2.5×10^{18} eV using the pierre auger observatory. *Phys. Rev. D* 102, 062005. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.102.062005>, doi:10.1103/PhysRevD.102.062005.
- Aab, A., et al., 2020b. Features of the energy spectrum of cosmic rays above 2.5×10^{18} – 10^{19} eV using the pierre auger observatory. *Physical Review Letters* 125, 121106. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.121106>, doi:10.1103/PhysRevLett.125.121106, arXiv:2008.06488.
- Aab, A., et al., 2017. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV. *Science* 357, 1266–1270. URL: <https://science.bibliotecabuap.elogim.com/doi/abs/10.1126/science.aan4338>, doi:10.1126/science.aan4338, arXiv:<https://science.bibliotecabuap.elogim.com/doi/pdf/10.1126/science.aan4338>.
- Abdellaoui, G., et al., 2018. EUSO-ta “ first results from a ground-based euso telescope. *Astroparticle Physics* 102, 98–111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650518301191>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.05.007>.
- Adams, J.H., et al., 2015. JEM-EUSO: Meteor and nuclearite observations. *Experimental Astronomy* 40, 253–279. doi:10.1007/s10686-014-9375-4.
- Adams, J.H., et al., 2015a. The EUSO-Balloon pathfinder. *Experimental Astronomy* 40, 281–299. URL: <https://doi.org/10.1007/s10686-015-9467-9>, doi:10.1007/s10686-015-9467-9.

-
- Adams, J.H., et al., 2015b. Performances of JEM-EUSO: angular reconstruction. *Experimental Astronomy* 40, 153–177. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10686-013-9371-0>, doi:10.1007/s10686-013-9371-0.
- Adams, J.H., et al., 2017. White paper on EUSO-SPB2 [arXiv:1703.04513](https://arxiv.org/abs/1703.04513).
- Azzalini, A., Capitanio, A., 2014. *The Skew-Normal and Related Families*. Cambridge University Press. pp. 24–54.
- Bacholle, S., et al., 2021. Mini-euso mission to study earth uv emissions on board the iss. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 253, 36. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/abd93d>, doi:10.3847/1538-4365/abd93d.
- Barghini, D., et al., 2022. Uv telescope tus on board lomonosov satellite: Selected results of the mission. *Advances in Space Research* 70, 2734–2749. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117721008930>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.044>. *astrophysics of Cosmic Rays*.
- Barrington-Leigh, C.P., Inan, U.S., Stanley, M., 2001. Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106, 1741–1750. doi:10.1029/2000ja000073.
- Benson, R., Linsley, J., 1981. Satellite observation of cosmic ray air showers. *International Cosmic Ray Conference* 8, 145–148.
- Berat, C., et al., 2010. Full simulation of space-based extensive air showers detectors with ESAF. *Astroparticle Physics* 33, 221–247. doi:10.1016/j.astropartphys.2010.02.005, [arXiv:arXiv:0907.5275v3](https://arxiv.org/abs/0907.5275v3).
- Bessell, M.S., Castelli, F., Plez, B., 1998. Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for o - m stars. *Astronomy and Astrophysics* 333, 231–250.
- Boeck, W.L., et al., 1992. Lightning induced brightening in the airglow layer. *Geophysical Research Letters* 19, 99–102. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/91GL03168>, doi:<https://doi.org/10.1029/91GL03168>, [arXiv:https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/91GL03168](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/91GL03168).
-

-
- Borovička, J., Spurný, P., Koten, P., 2007. Atmospheric deceleration and light curves of Draconid meteors and implications for the structure of cometary dust. *Astronomy and Astrophysics* 473, 661–672. doi:10.1051/0004-6361:20078131.
- Briggs, M.S., et al., 2010. First results on terrestrial gamma ray flashes from the fermi gamma-ray burst monitor. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009JA015242>, doi:<https://doi.org/10.1029/2009JA015242>, arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2009JA015242>.
- Campbell-Brown, M.D., 2008. Directional Variation of Sporadic Meteor Activity and Velocity. Springer New York, New York, NY. pp. 79–84. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-78419-9_12, doi:10.1007/978-0-387-78419-9_12.
- Campbell-Brown, M.D., Jones, J., 2006. Annual variation of sporadic radar meteor rates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 367, 709–716. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09974.x.
- Campbell-Brown, M.D., Koschny, D., 2004. Model of the ablation of faint meteors. *Astronomy and Astrophysics* 418, 751–758. doi:10.1051/0004-6361:20041001-1.
- Carbary, J.F., et al., 2003. Leonid meteor spectrum from 110 to 860 nm. *Icarus* 161, 223–234. doi:10.1016/S0019-1035(02)00064-7.
- Casolino, M., et al., 2017. KLYPVE-EUSO: Science and UHECR observational capabilities. *PoS ICRC2017*, 368. doi:10.22323/1.301.0368.
- Cellino, A., Dell’Oro, A., Bertaina, M., 2012. The planned JEM-EUSO mission and applications to meteor observation. *Memorie della Societa Astronomica Italiana - Journal of the Italian Astronomical Society* 20, 35–42.
- Ceplecha, Z., et al., 1998. Meteor phenomena and bodies. *Space Science Reviews* 84, 327–471.
- Chanrion, O., et al., 2017. Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms. *Geophysical Research Letters* 44, 496–503. doi:10.1002/2016GL071311.
- Chen, A.B.C., et al., 2019. On negative sprites and the polarity paradox. *Geophysical Research Letters* 46, 9370–9378. doi:10.1029/2019GL083804.
-

-
- Chern, R.J.S., Lin, S.F., Wu, A.M., 2015. Ten-year transient luminous events and earth observations of formosat-2. *Acta Astronautica* 112, 37–47. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576515001113>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.02.030>.
- Clay, R., Dawson, B.R., 1997. *Cosmic bullets : high energy particles in astrophysics* / Roger Clay and Bruce Dawson. Allen & Unwin St Leonards, N.S.W.
- Cziczco, D.J., Thomson, D.S., Murphy, D.M., 2001. Ablation, flux, and atmospheric implications of meteors inferred from stratospheric aerosol. *Science* 291, 1772–1775. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1057737>, doi:[10.1126/science.1057737](https://doi.org/10.1126/science.1057737), arXiv:<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1057737>.
- Diaz-Anzures, J., et al., 2004. Low-frequency fresnel mirrors for fluorescence detectors. *Astroparticle Physics* 21, 407–413. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650504000532>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2004.03.003>.
- Evoli, C., 2020. The cosmic-ray energy spectrum. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4396125>, doi:[10.5281/zenodo.4396125](https://doi.org/10.5281/zenodo.4396125).
- Fishman, G.J., et al., 1994. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. *Science* 264, 1313–1316. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.264.5163.1313>, doi:[10.1126/science.264.5163.1313](https://doi.org/10.1126/science.264.5163.1313), arXiv:<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.264.5163.1313>.
- Frey, H.U., et al., 2007. Halos generated by negative cloud-to-ground lightning. *Geophysical Research Letters* 34. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007GL030908>, doi:<https://doi.org/10.1029/2007GL030908>, arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2007GL030908>.
- Fukunishi, H., et al., 1996. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophysical Research Letters* 23, 2157–2160. doi:[10.1029/96GL01979](https://doi.org/10.1029/96GL01979).
- Grieder, P., 2011. *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects - A Tutorial, Reference Manual and Data Book*. Springer Berlin Heidelberg. URL: <https://books.google.com.mx/books?id=wdR5AQAACAAJ>.
-

-
- Halim, A.A., et al., 2023. A catalog of the highest-energy cosmic rays recorded during phase i of operation of the pierre auger observatory. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 264, 50. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/aca537>, doi:10.3847/1538-4365/aca537.
- Khrenov, B.A., et al., 2020. An extensive-air-shower-like event registered with the TUS orbital detector. *J. Cosmology Astropart. Physics* 2020, 033. doi:10.1088/1475-7516/2020/03/033, arXiv:1907.06028.
- Klimov, P.A., et al., 2017. The TUS Detector of Extreme Energy Cosmic Rays on Board the Lomonosov Satellite. *Space Science Reviews* 212, 1687–1703. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s11214-017-0403-3>, doi:10.1007/s11214-017-0403-3, arXiv:1706.04976.
- Kostunin, D., et al., 2019. Tunka advanced instrument for cosmic rays and gamma astronomy. *Journal of Physics: Conference Series* 1263, 012006. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1263/1/012006>, doi:10.1088/1742-6596/1263/1/012006.
- Longair, M.S., 2011. *High energy astrophysics* – an introduction. 3 ed.. Cambridge University Press. p. 34. doi:10.1017/CB09780511778346.002.
- Love, S., Brownlee, D., 1991. Heating and thermal transformation of micrometeoroids entering the earth’s atmosphere. *Icarus* 89, 26–43. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0019103591900858>, doi:[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90085-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90085-8).
- Lyons, W.A., 1994. Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video. *Geophysical Research Letters* 21, 875–878. doi:10.1029/94GL00560.
- Lyons, W.A., et al., 2008. Supercells and sprites. *Bulletin of the American Meteorological Society* 89, 1165 – 1174. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/89/8/2008bams2439_1.xml, doi:<https://doi.org/10.1175/2008BAMS2439.1>.
- Murray I. S., Beech M., S.M., 2002. Leonid light curve morphology: review of 1998–2001 data, in: *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors - ACM 2002*. International Conference, pp. 297–299.
-

-
- Olinto, A.V., et al. (POEMMA), 2021. The POEMMA (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) observatory. *JCAP* 06, 007. doi:10.1088/1475-7516/2021/06/007, arXiv:2012.07945.
- Opik, E.J., 1958. *Physics of Meteor flight in the Atmosphere*. Interscience Publishers, New York.
- Pasko, V.P., 2008. Blue jets and gigantic jets: Transient luminous events between thunderstorm tops and the lower ionosphere. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 50. doi:10.1088/0741-3335/50/12/124050.
- Pasko, V.P., 2010. Recent advances in theory of transient luminous events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115, 1–24. doi:10.1029/2009JA014860.
- Pasko, V.P., et al., 2002. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature* 416, 152–154. doi:10.1038/416152a.
- Pasko, V.P., Yair, Y., Kuo, C.L., 2012. Lightning related transient luminous events at high altitude in the earth’s atmosphere: Phenomenology, mechanisms and effects. volume 168. doi:10.1007/s11214-011-9813-9.
- Popova, O., 2004. Meteoroid ablation models. *Earth, Moon, and Planets* 95, 303–319. URL: <https://doi.org/10.1007/s11038-005-9026-x>, doi:10.1007/s11038-005-9026-x.
- Rhodes, B., 2019. Skyfield: High precision research-grade positions for planets and earth satellites generator. arXiv:1907.024.
- Ruiz-Hernandez, O.I., et al., 2022. Meteors observations by the orbital telescope tus. *Planetary and Space Science* 218, 105507. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063322000939>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.pss.2022.105507>.
- Rycroft, M.J., 2006. INTRODUCTION TO THE PHYSICS OF SPRITES , ELVES AND INTENSE LIGHTNING DISCHARGES Basic Properties of the Atmosphere Global Scale Variations (Horizontal Scale greater. Physics .
-

-
- Sadovnichii, V.A., et al., 2017. "Lomonosov" satellite space observatory to study extreme phenomena in space. *Space Science Reviews* 212, 1705–1738. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-017-0425-x>, doi:10.1007/s11214-017-0425-x.
- Sharakin, S., Hernandez, O.R., 2021. Kinematics reconstruction of the EAS-like events registered by the TUS detector. *Journal of Instrumentation* 16, T07013. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/t07013>, doi:10.1088/1748-0221/16/07/t07013.
- Spurný, P., Cepelcha, Z., 2008. Is electric charge separation the main process for kinetic energy transformation into the meteor phenomenon? *Astronomy and Astrophysics* 489, 449–454. doi:10.1051/0004-6361:200810069.
- Stenbaek-Nielsen, H.C., et al., 2010. Sprite initiation altitude measured by triangulation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009JA014543>, doi:<https://doi.org/10.1029/2009JA014543>, arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2009JA014543>.
- Su, H.T., et al., 2003. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. *Nature* 423, 974–976. URL: <https://doi.org/10.1038/nature01759>, doi:10.1038/nature01759.
- Thomson, G.B. (HiRes), 2006. Observation of the GZK Cutoff by the HiRes Experiment, in: 14th International Seminar on High Energy Physics: Quarks 2006. arXiv:astro-ph/0609403.
- Tkachev, L., 2017. Search for EAS candidates with the TUS /Lomonosov orbital experiment: results of preliminary data reconstruction and analysis, in: Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2017), p. 527. doi:10.22323/1.301.0527.
- Wescott, E.M., et al., 1995. Preliminary results from the sprites94 aircraft campaign: 2. blue jets. *Geophysical Research Letters* 22, 1209–1212. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95GL00582>, doi:<https://doi.org/10.1029/95GL00582>, arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/95GL00582>.
-

Wiencke, L., Olinto, A., 2017. EUSO-SPB1 Mission and Science. PoS ICRC2017, 1097.
doi:10.22323/1.301.1097.

Xu, W., et al., 2017. A novel type of transient luminous event produced by terrestrial gamma-ray flashes. *Geophysical Research Letters* 44, 2571–2578. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016GL072400>, doi:<https://doi.org/10.1002/2016GL072400>, arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2016GL072400>.