

ELVES: Fenómenos Luminosos Transitorios de la alta Atmósfera

Adriana Vásquez

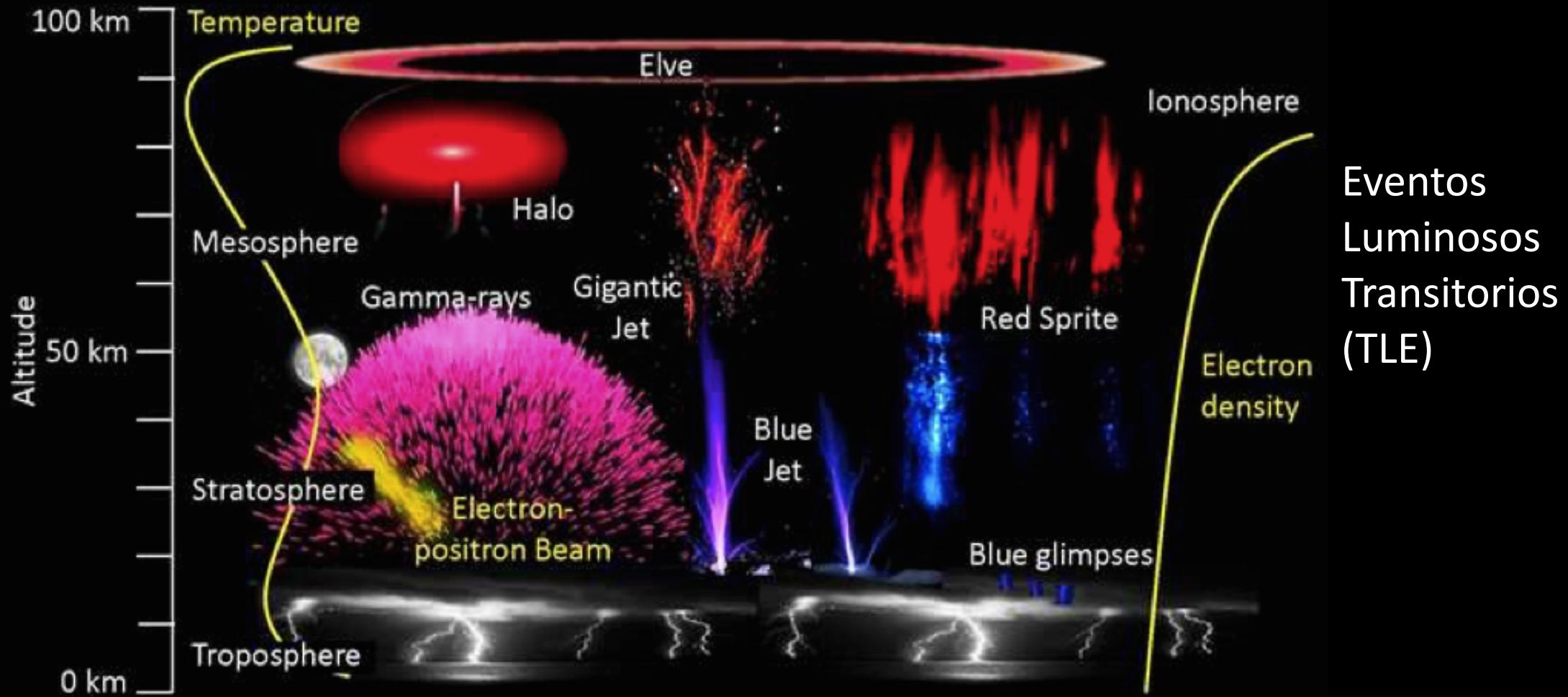
Examen de candidatura al Doctorado en Física

Directores:
Luis A. Núñez, Enrico Arnone y Roberto Mussa

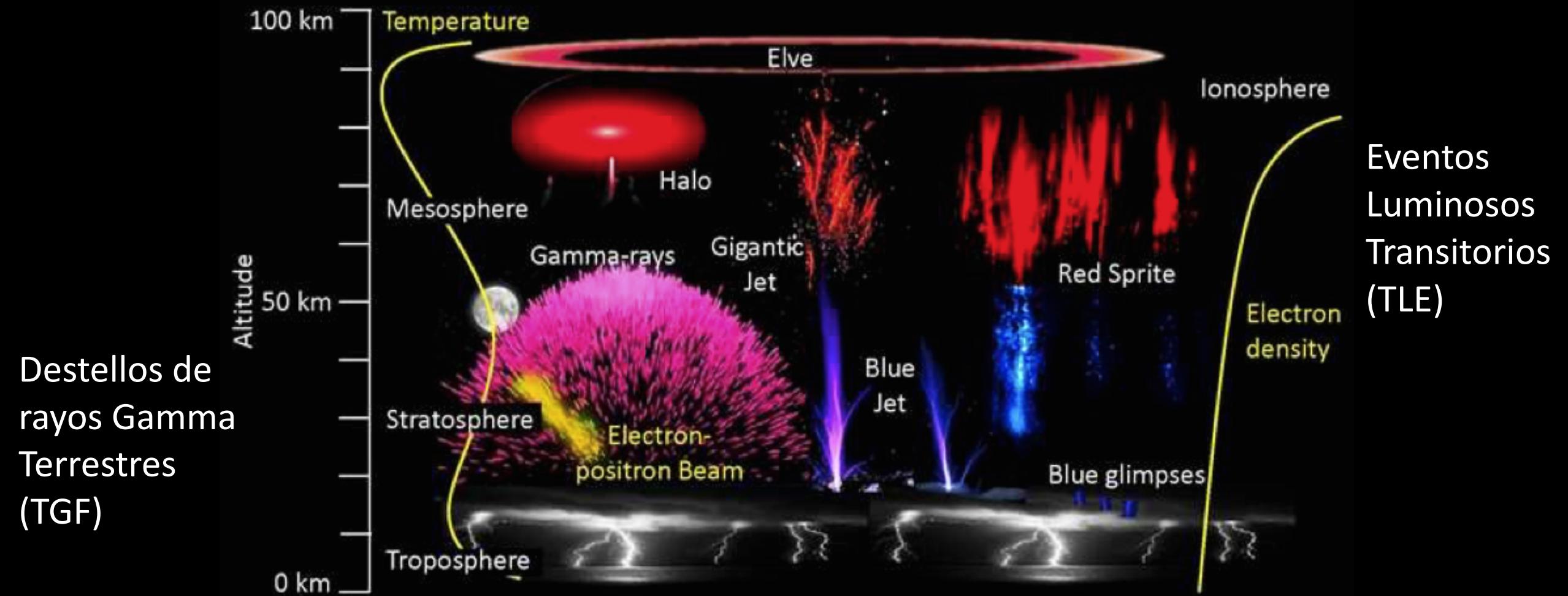
Contenido

1. Fenómenos en la atmósfera
 - Eventos Luminosos Transitorios (TLE)
 - Destellos de rayos Gamma Terrestres (TGF)
2. Mecanismos de producción de los TLE y TGF
 - Estructura de carga de las tormentas eléctricas
 - Tipos de descargas
 - Distribución global de los rayos y los TLE
3. Evolución en la observación de los ELVES
 - ELVES en el Observatorio Pierre Auger

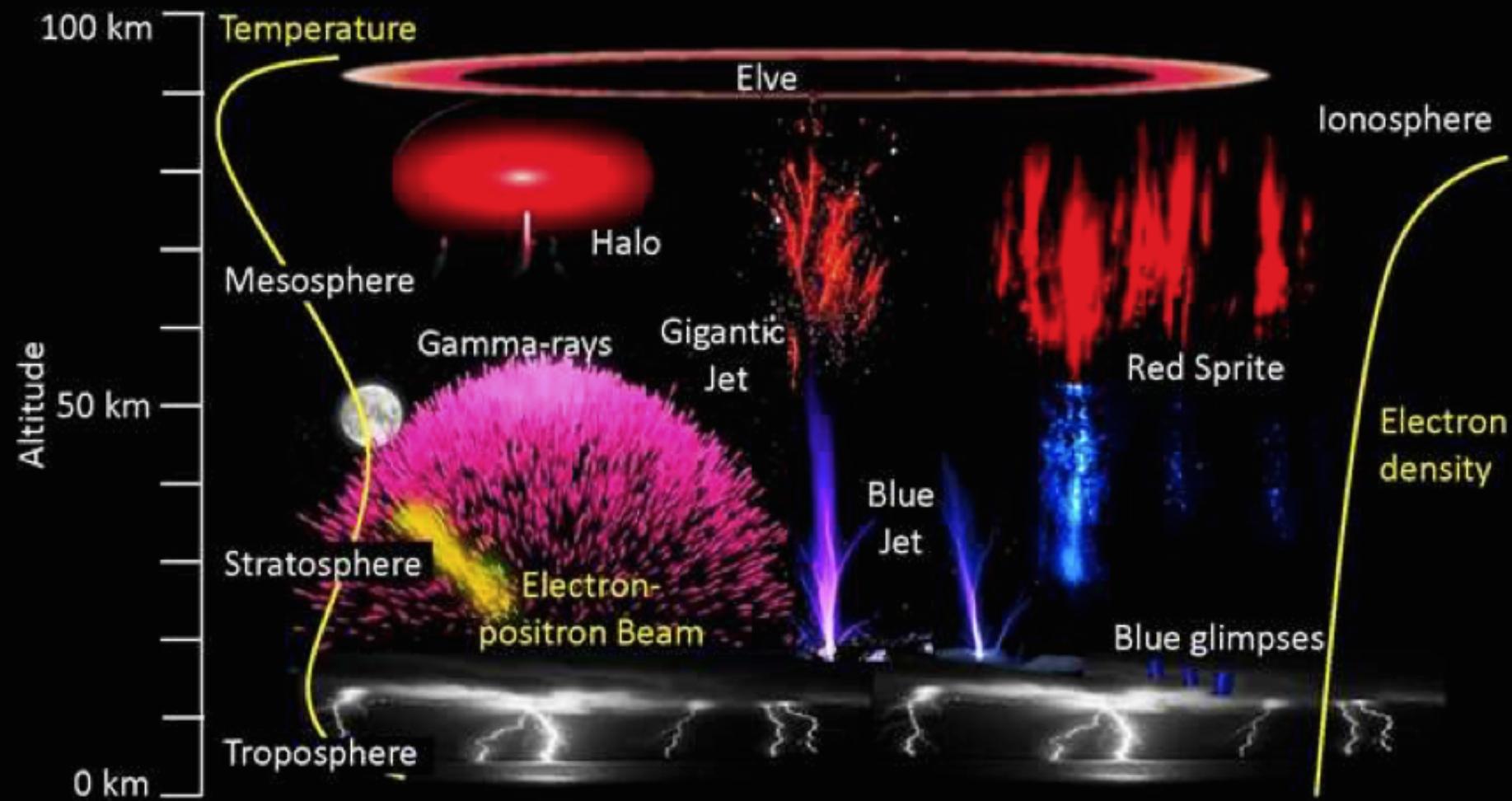
Fenómenos en la atmósfera



Fenómenos en la atmósfera



R.C. Franz et al. **Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system.**
Science, 1990.



R.C. Franz et al.

Television image of a
large upward electrical
discharge above a
thunderstorm system.
Science, 1990.

Transbordador Espacial NASA



W.L. Boeck et al. Geophysical R L ,1992.

CGRO

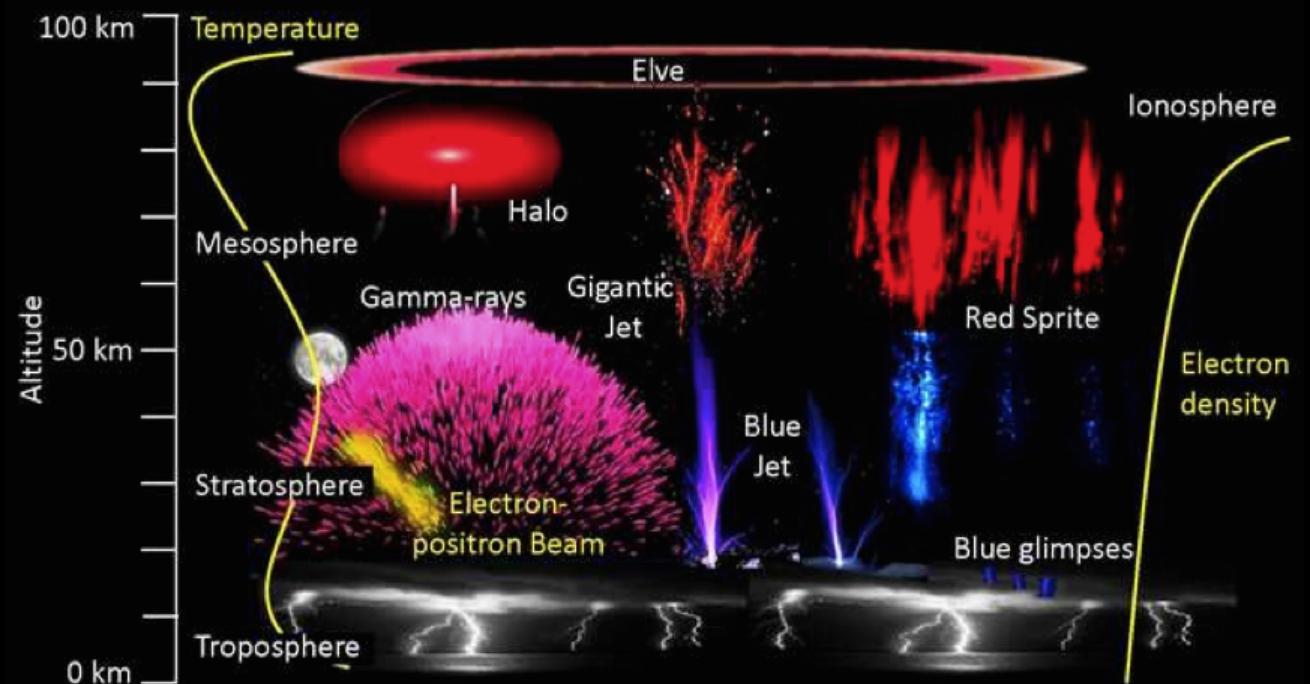


G.J. Fishman et al. Science, 1994.

YRFS



W. Lyons. J Geophysical R: Atmospheres, 1996.



TLE

○ TGF

□ Ambos

R.C. Franz et al.

Television image of a
large upward electrical
discharge above a
thunderstorm system.
Science, 1990.

ISUAL



A.B. Chen et al. J Geophysical R:
Space Physics, 2008.

Transbordador Espacial NASA



W.L. Boeck et al. Geophysical R L ,1992.

YRFS



W. Lyons. J Geophysical R: Atmospheres, 1996.

○ CGRO



G.J. Fishman et al. Science, 1994.

○ RHESSI

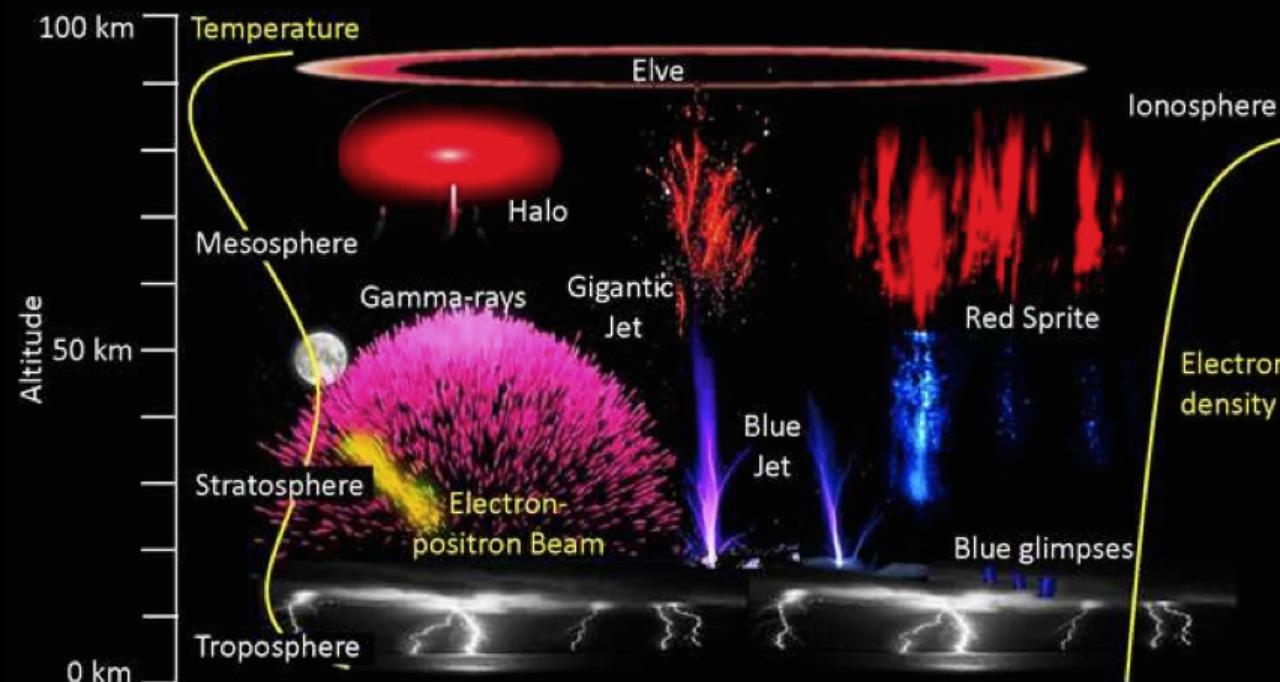


D.M. Smith et al. Science, 2005.

□ TARANIS



F. Lefevre et al. Space science
reviews, 2008.



TLE

○ TGF

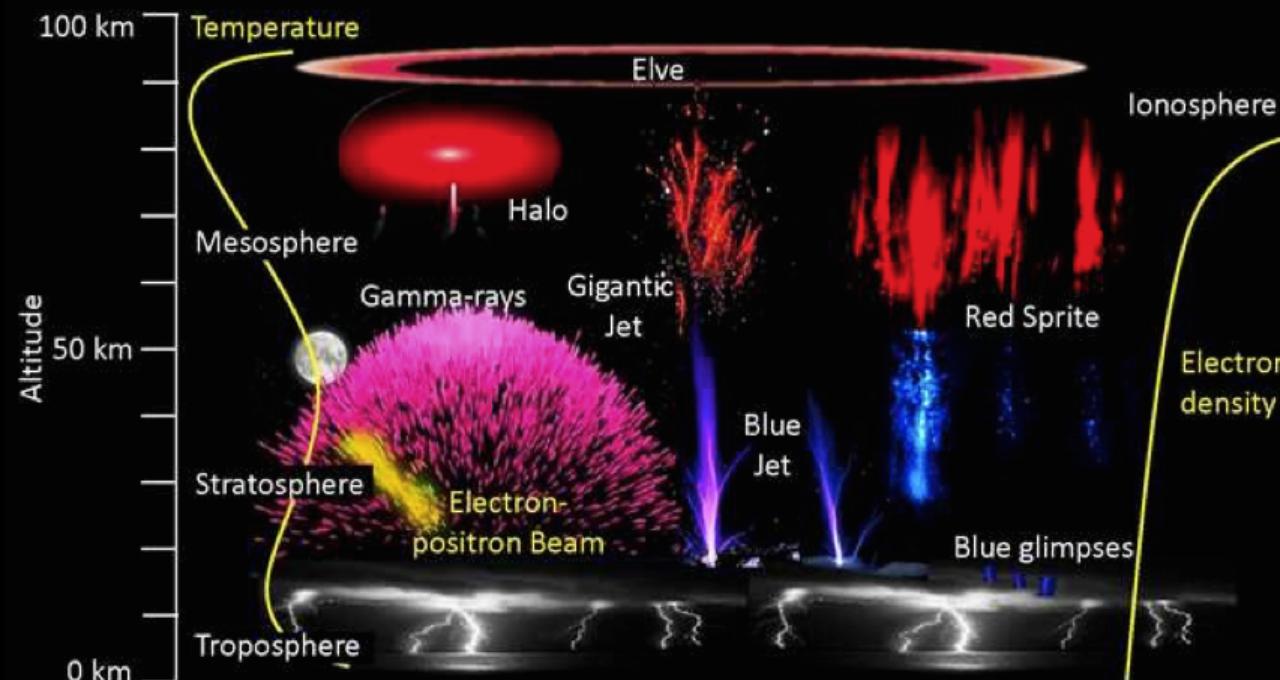
□ Ambos

R.C. Franz et al.

Television image of a
large upward electrical
discharge above a
thunderstorm system.
Science, 1990.

ISUAL

A.B. Chen et al. J Geophysical R:
Space Physics, 2008.



Transbordador Espacial NASA



W.L. Boeck et al. Geophysical R L ,1992.

YRFS



W. Lyons. J Geophysical R: Atmospheres, 1996.

CGRO



G.J. Fishman et al. Science, 1994.

RHESSI



D.M. Smith et al. Science, 2005.

TARANIS



F. Lefevre et al. Space science
reviews, 2008.

FIREFLY



D.E. Rowland et al. In 2011 Aerospace Conference.

AGILE



M. Marisaldi et al. J Geophysical R:
Space Physics, 2010.



ASIM

T. Neubert et al. Space Science
Reviews, 2019.

Fermi GBM



O.J. Roberts et al. J of Geophysical R:
Space Physics, 2018.

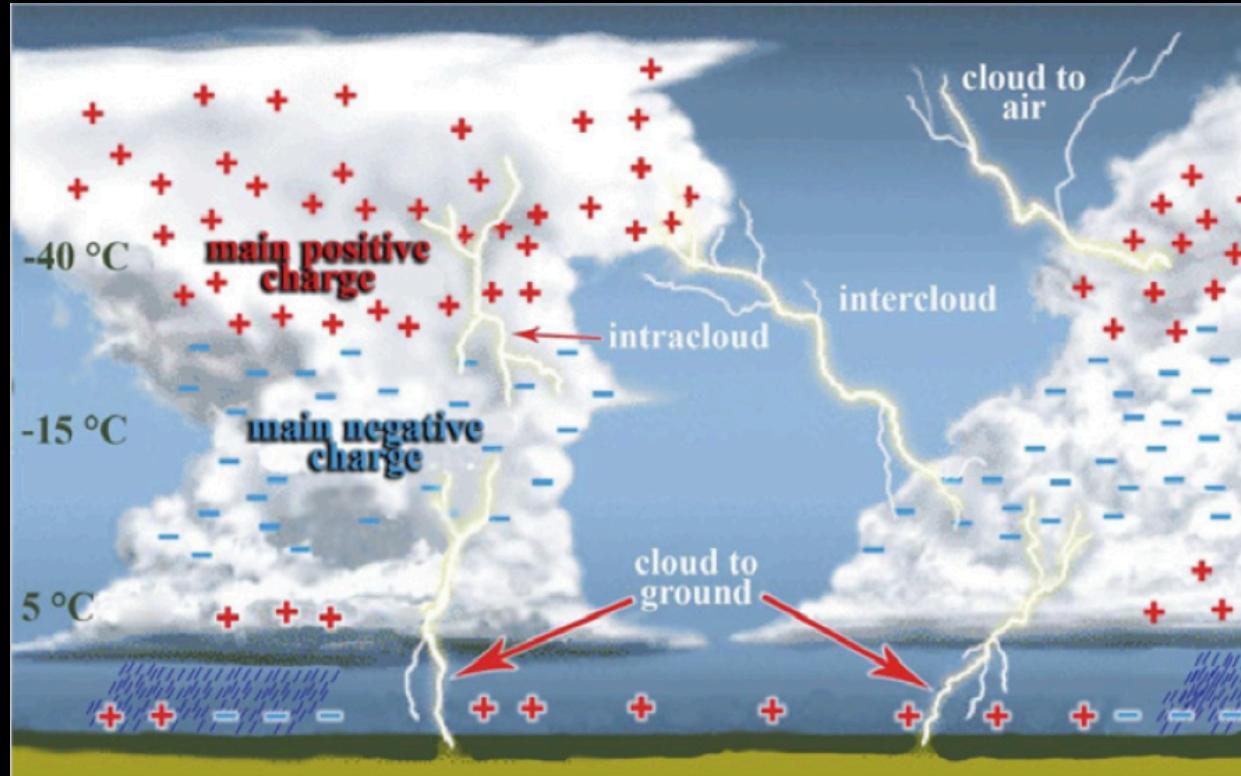
TLE

TGF

Ambos

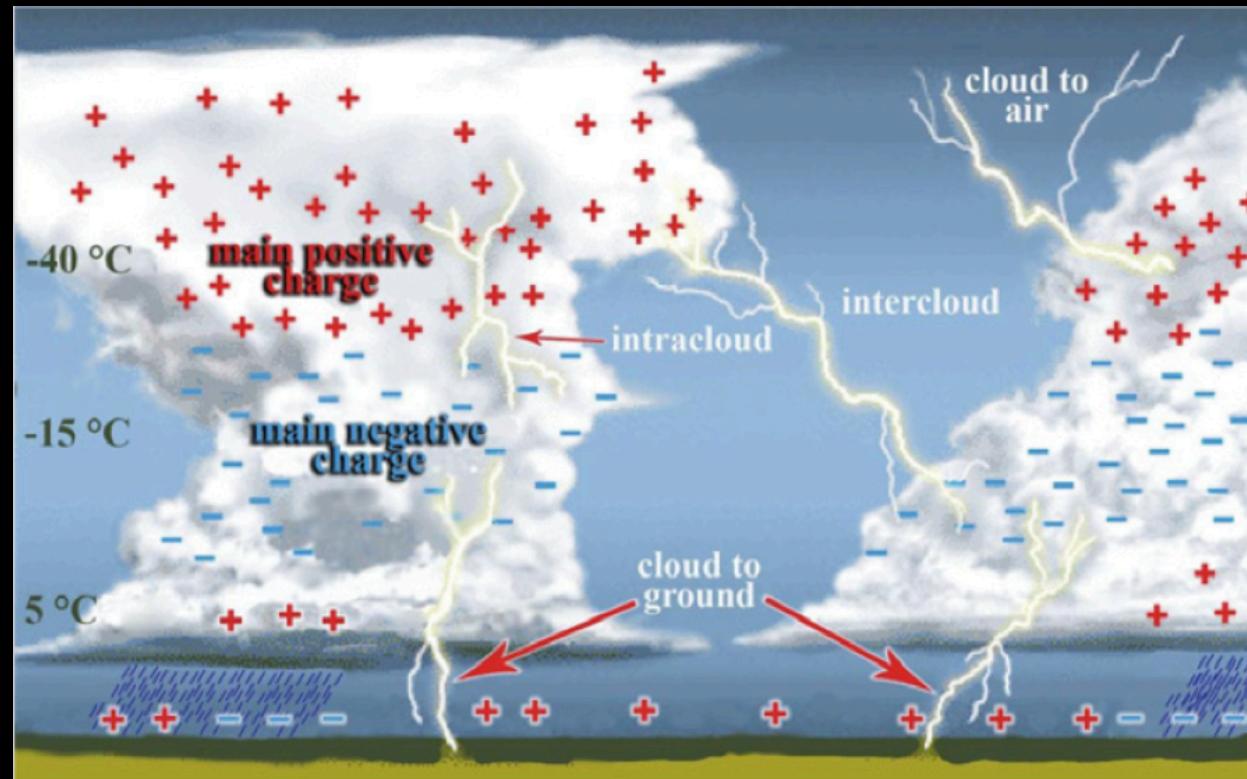
¿Cómo se producen estos fenómenos?

Estructura de carga

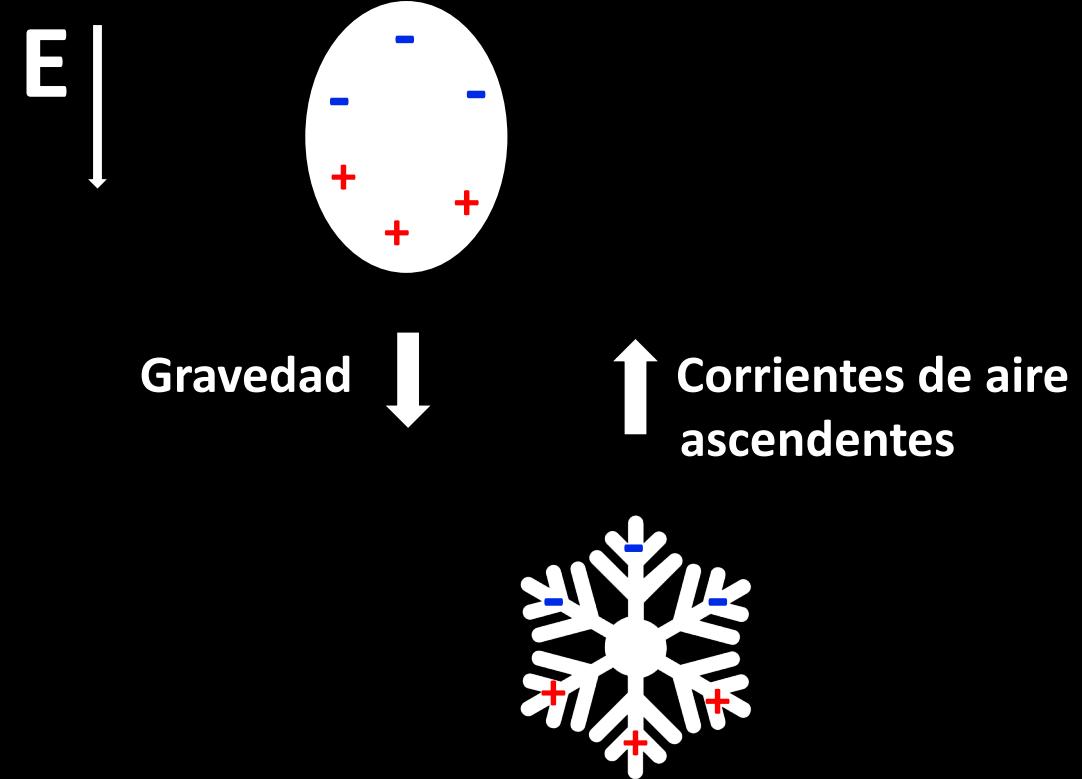


Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)

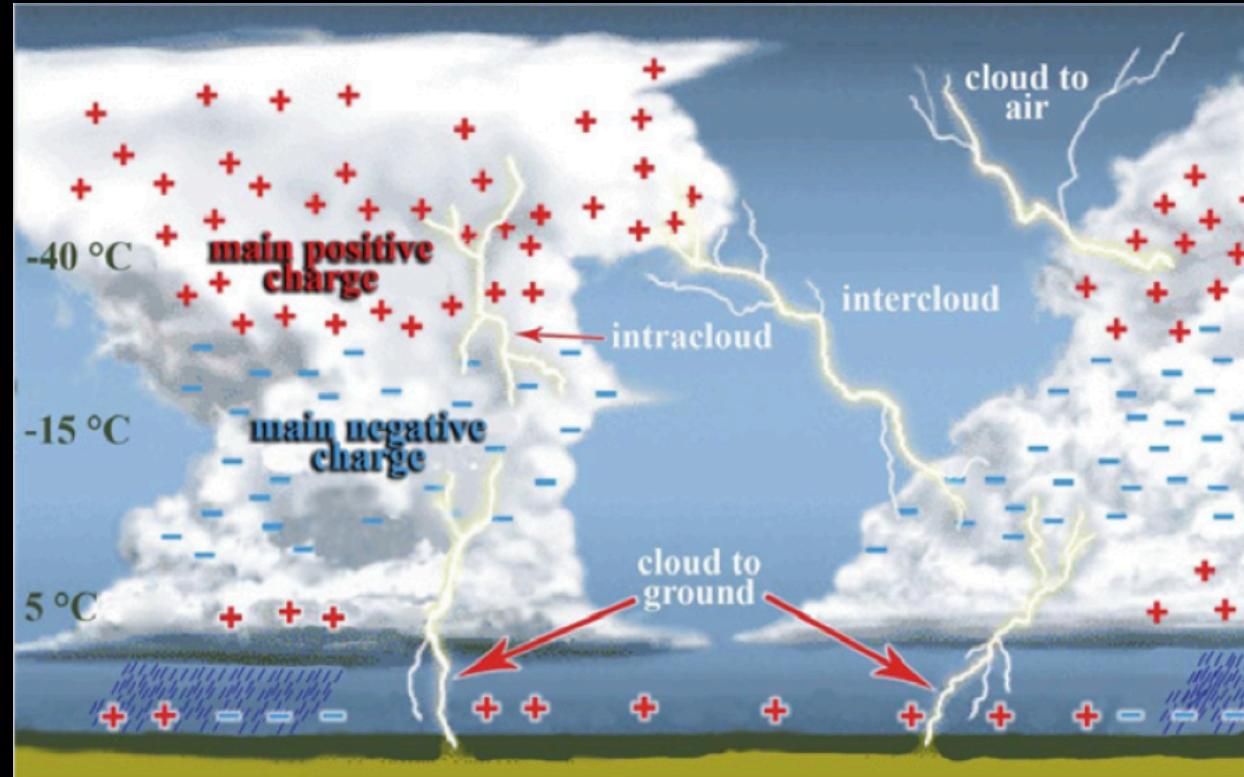
Estructura de carga



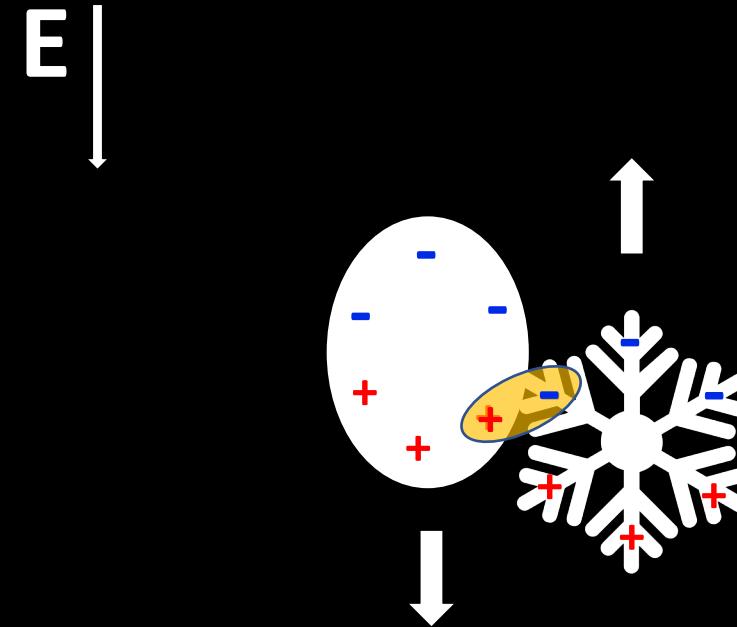
Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)



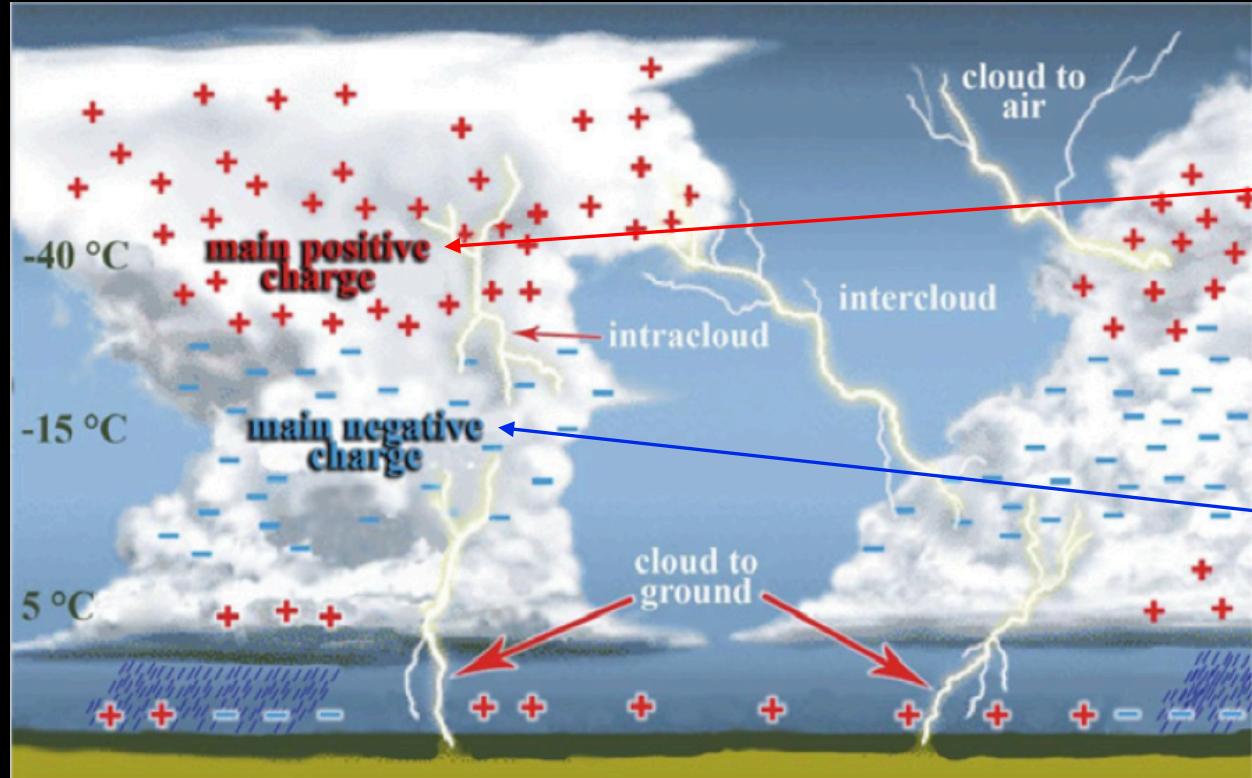
Estructura de carga



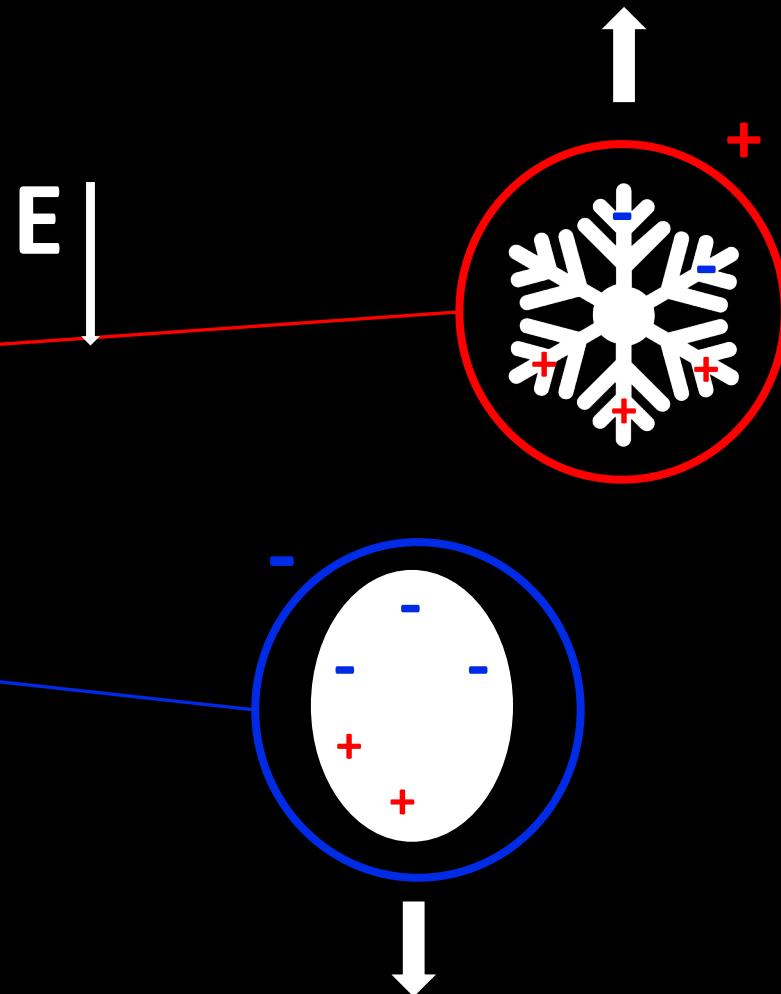
Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)



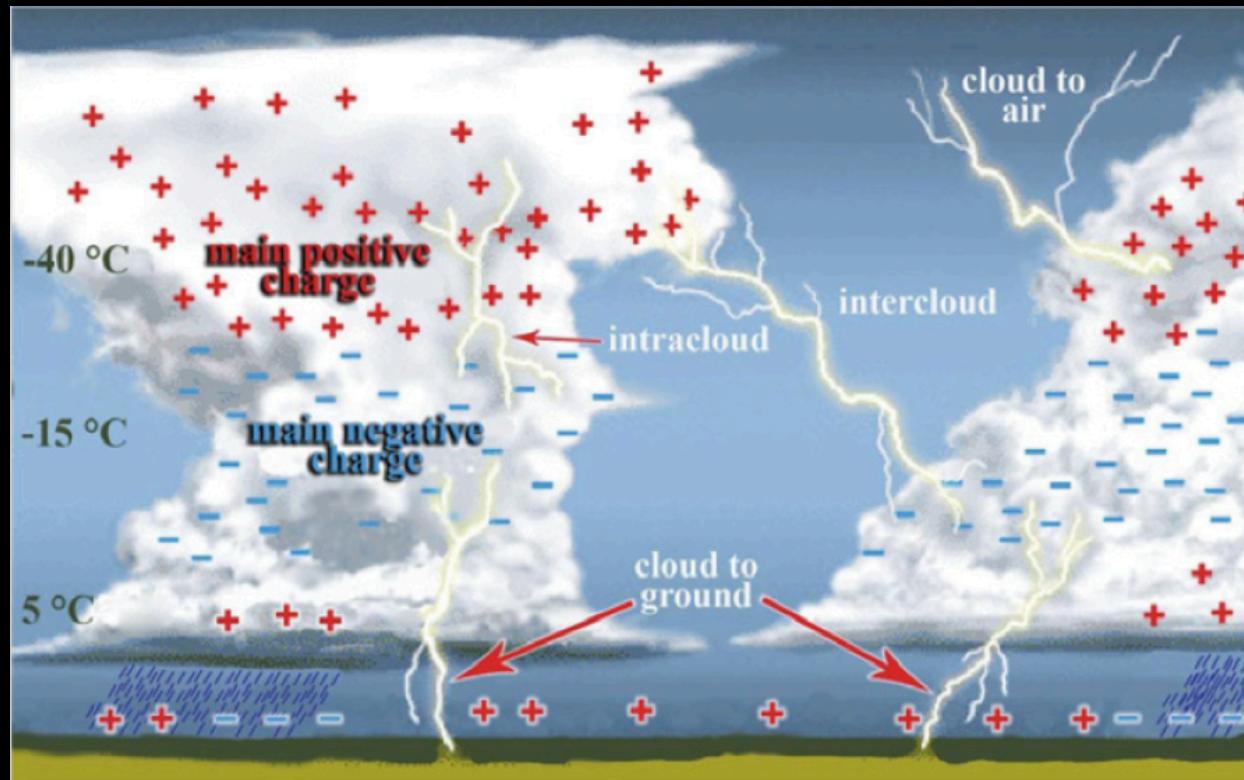
Estructura de carga



Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)



Estructura de carga



Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)

Tipos de descargas

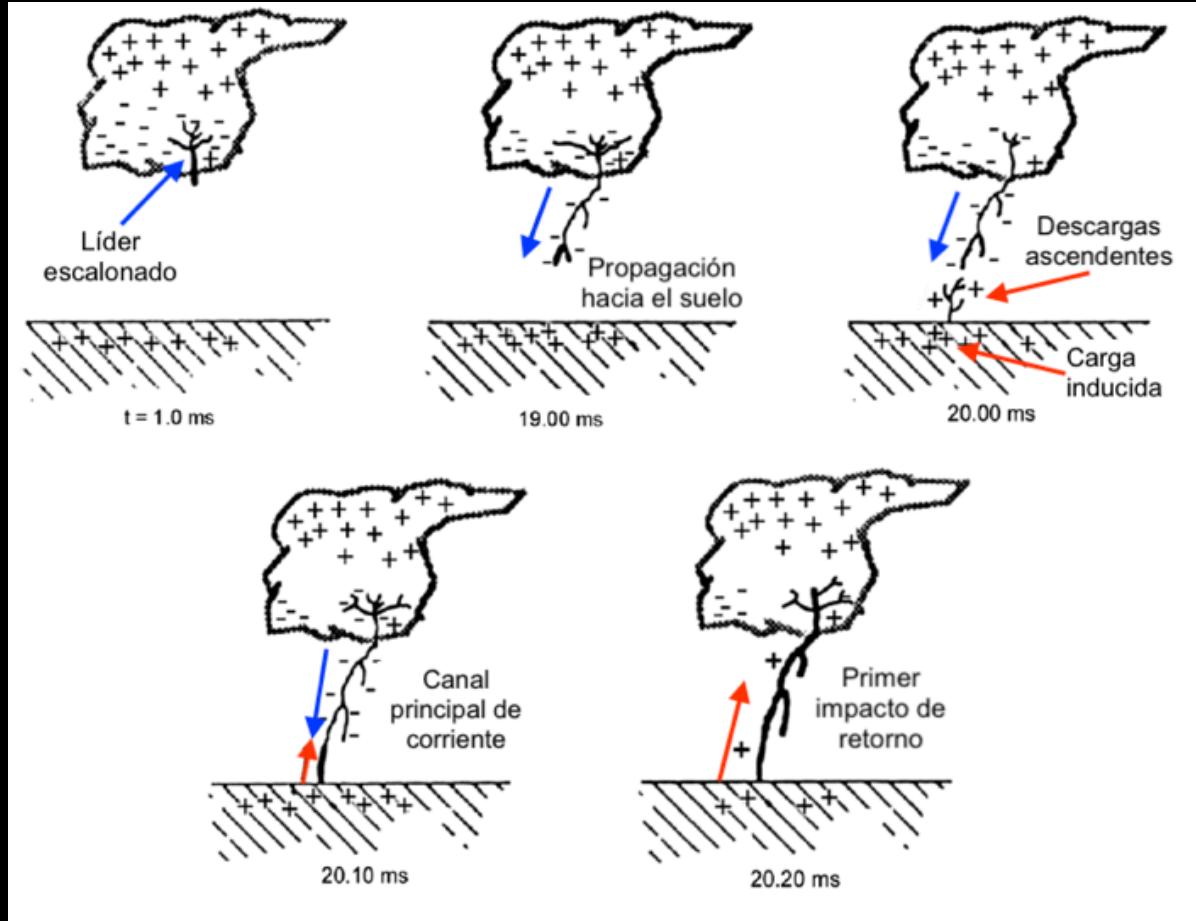
75% (IC, CC, CA)

25 % CG

90% -CG

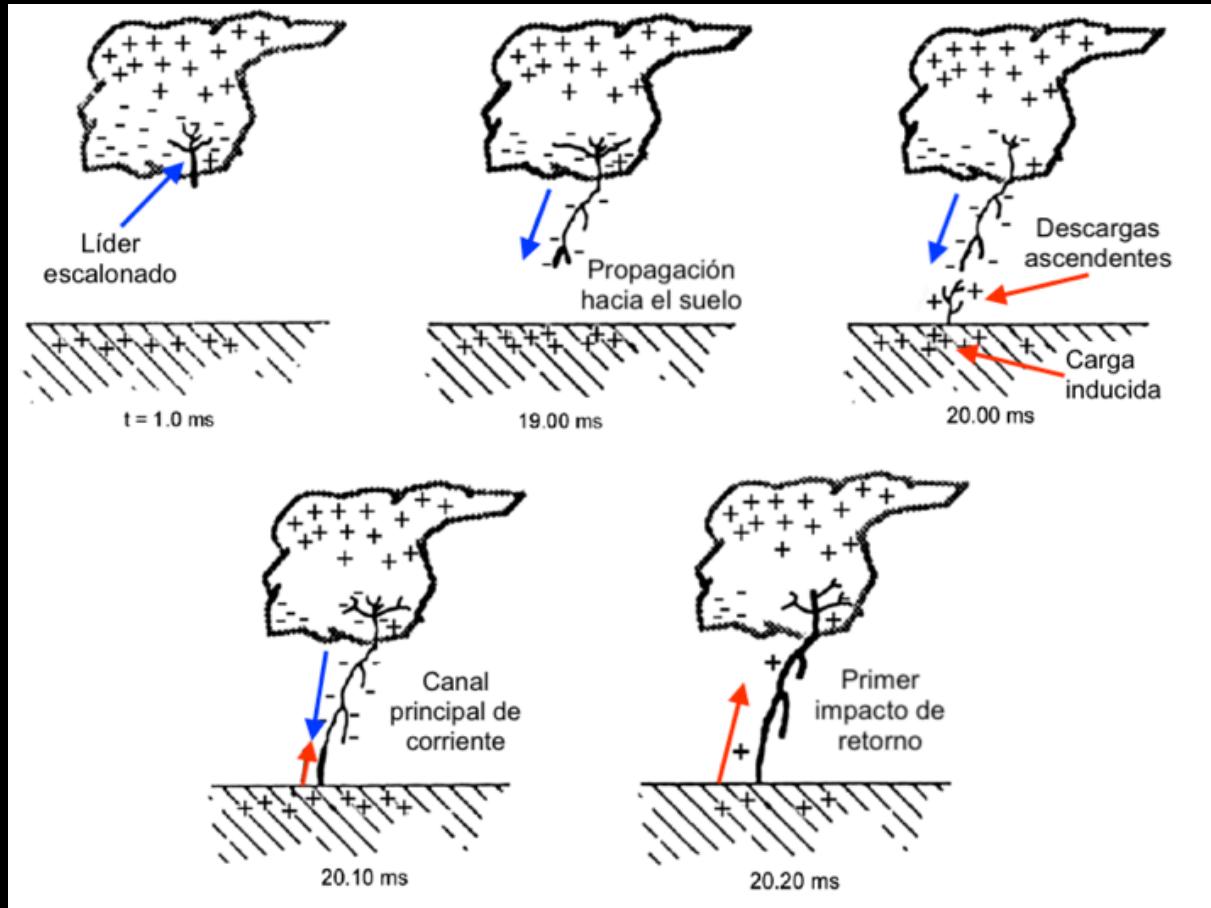
10% +CG

Esquema del desarrollo de una descarga -CG



Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)

Esquema del desarrollo de una descarga -CG

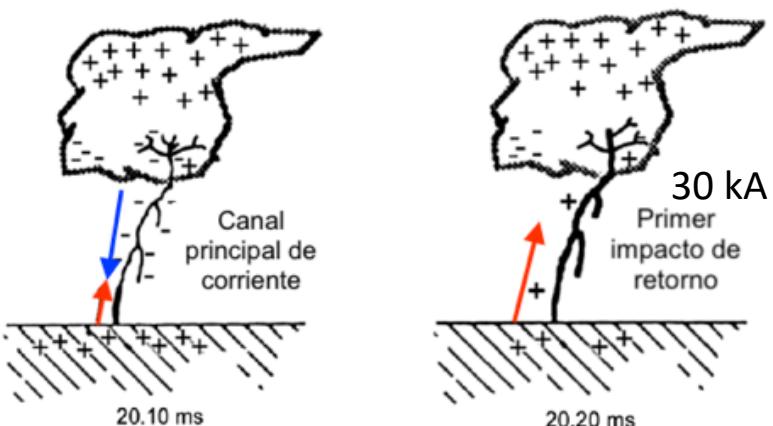
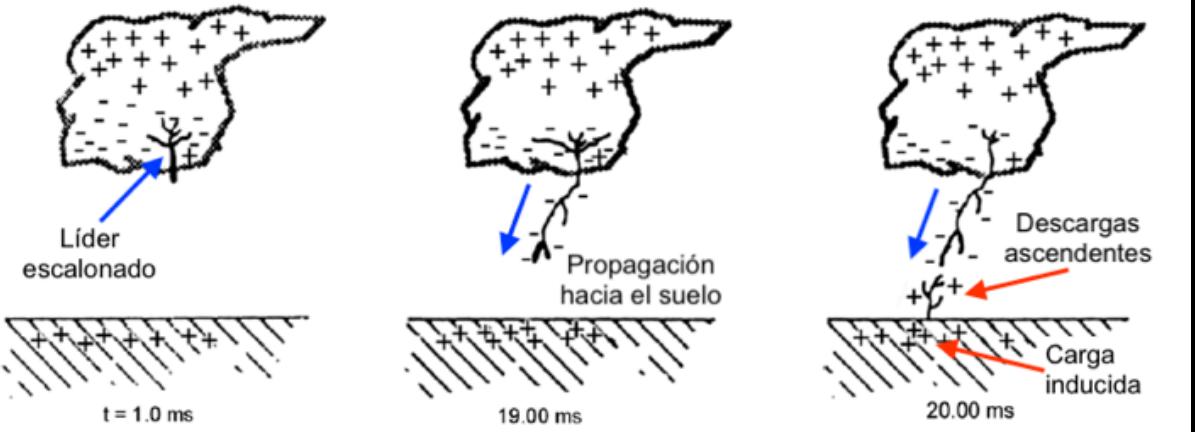


Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)



80% de los –CG tienen
de 3 a 5 impactos de
retorno

Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)



Mecanismos de producción de los TLE y TGF

Sprites

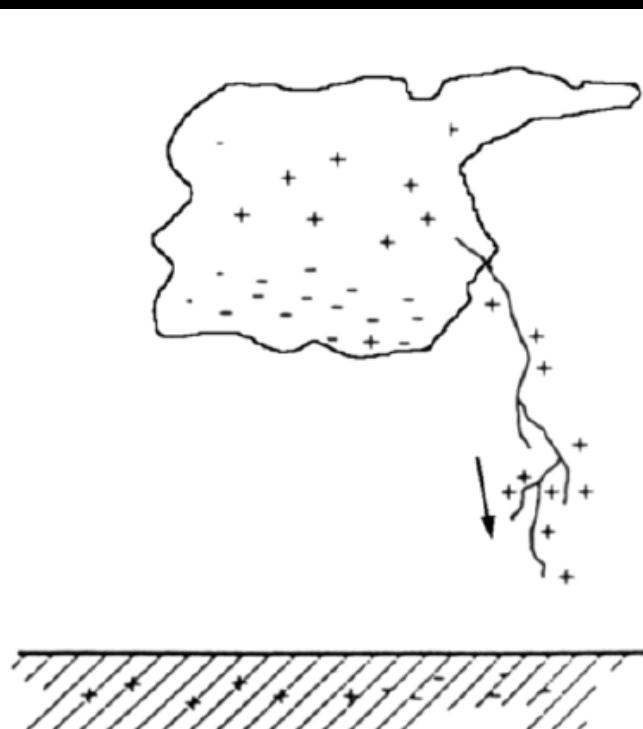
Plasma ramificado
rojizo (~ 40 km)

+CG

~ 1 MR

1-10 ms

Fullekrug et al. 2006, Springer S. B. M., v 225



Sprites	Blue Jets
Plasma ramificado rojizo ($l \sim 40$ km)	Rayos hacia arriba ($l \sim 40$ km)
+CG	$V = 10^5$ m/s
~ 1 MR	> 1 MR
1-10 ms	~ 300 ms

Dwyer et al. 2014, Physics R., 534(4)

Blue Jet (Transient Luminous Event) - Thunderstorm Darwin 8th Dec 2015
William Nguyen Phuoc



Primer Blue Jet capturado desde la ISS por Andreas Mogensen, 2015

Sprites

Blue Jets

Plasma ramificado
rojizo (~ 40 km)

Rayos hacia arriba
(~ 40 km)

+CG

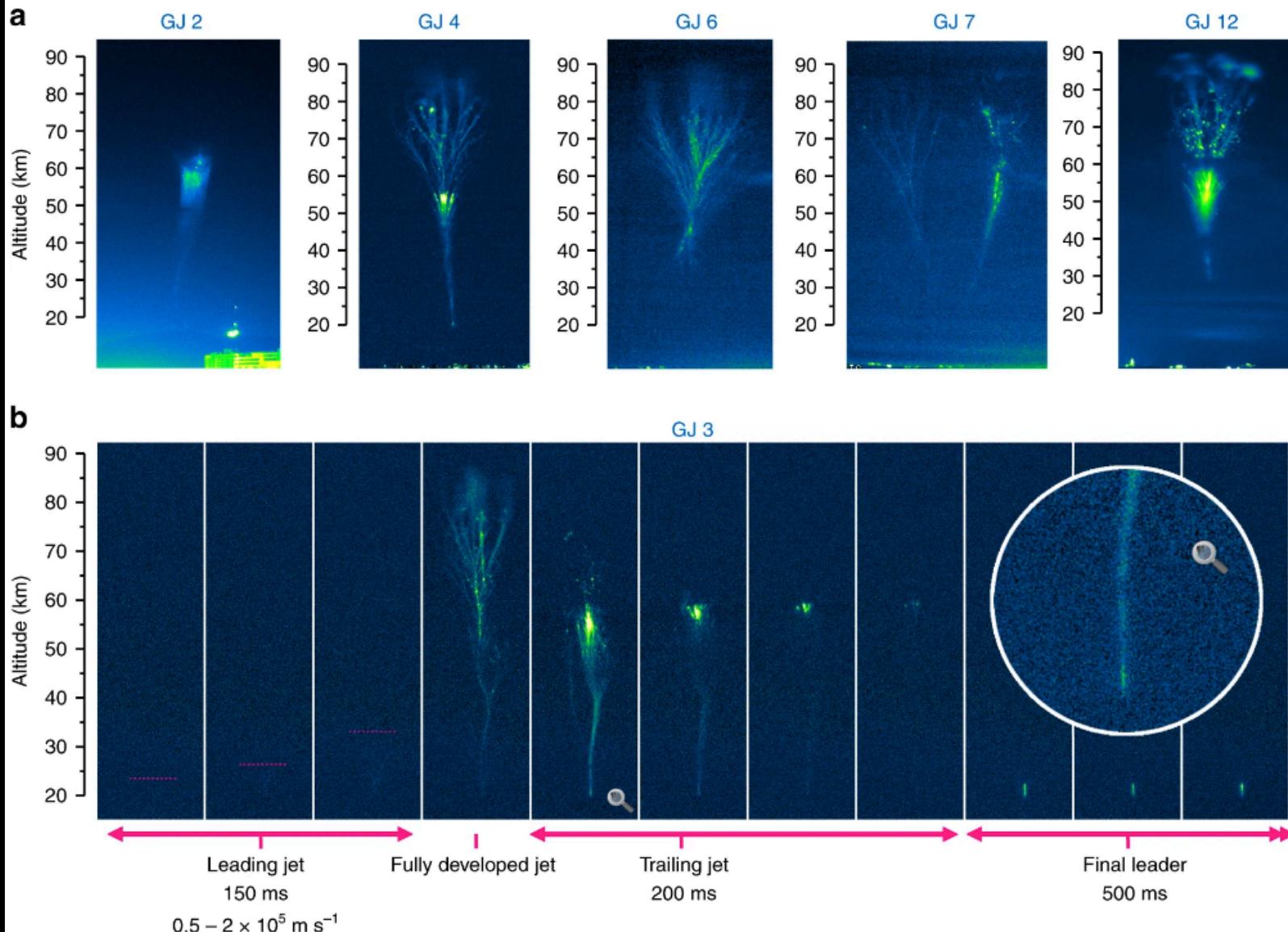
$V = 10^5$ m/s

~ 1 MR

> 1 MR

1-10 ms

~ 300 ms

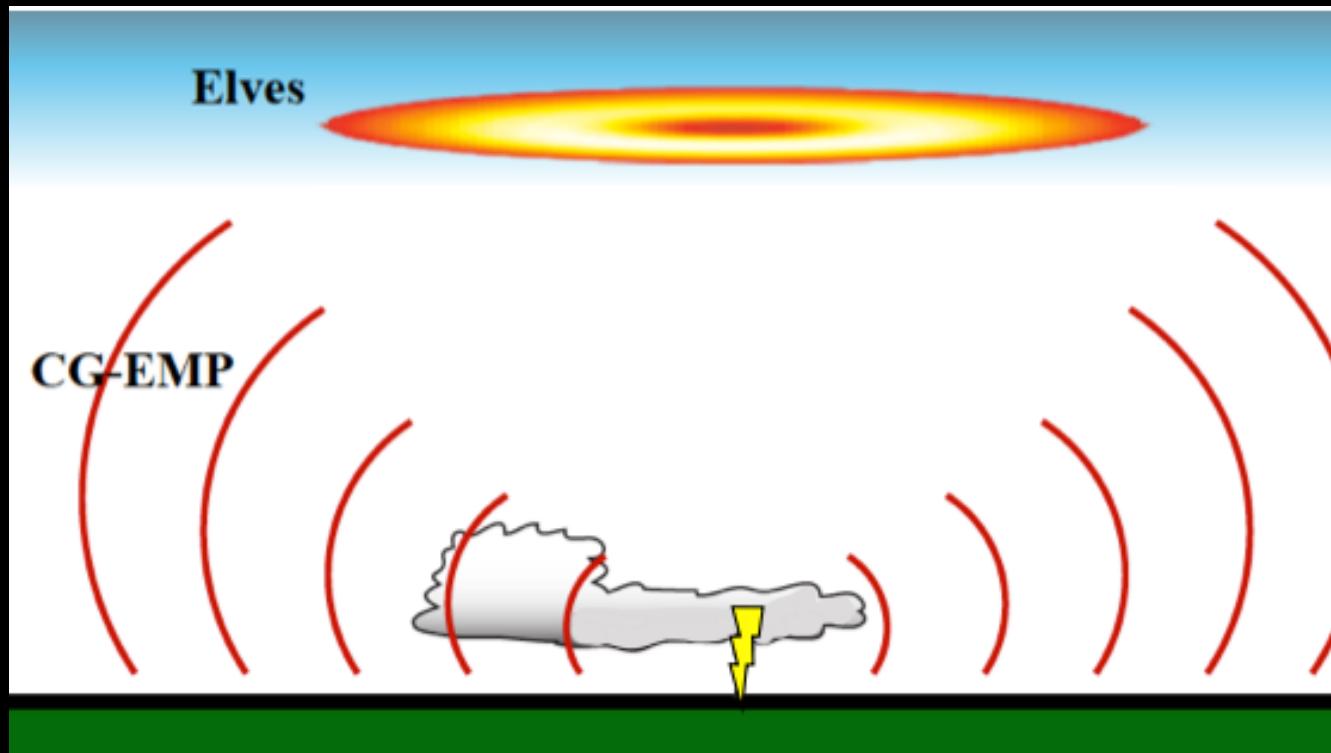


Nacimiento y desarrollo de Jets Gigantes en la Costa colombiana

Oscar A van der Velde et al. 2019, Nature communications, 10(1)

Sprites	Blue Jets	ELVES
Plasma ramificado rojizo ($I \sim 40$ km)	Rayos hacia arriba ($I \sim 40$ km)	Disco de luz roja de rápida expansión ($d \sim 300$ km)
+CG	$V = 10^5$ m/s	EMP de un -CG ó IC con $I > 80$ kA
~ 1 MR	> 1 MR	~ 1 MR
1-10 ms	~ 300 ms	~ 1 ms

Fullekrug et al. 2006, Springer S. B. M., v 225



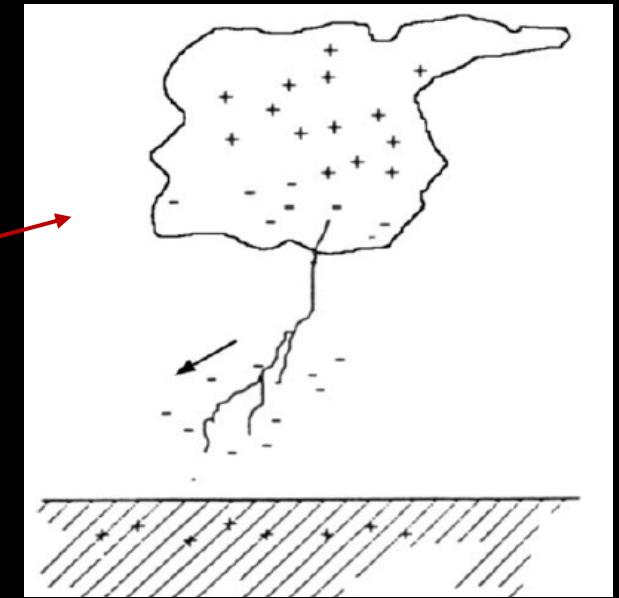
Sprites	Blue Jets	ELVES
Plasma ramificado rojizo ($I \sim 40$ km)	Rayos hacia arriba ($I \sim 40$ km)	Disco de luz roja de rápida expansión ($d \sim 300$ km)
+CG	$V = 10^5$ m/s	EMP de un -CG ó IC con $I > 80$ kA
~ 1 MR	> 1 MR	~ 1 MR
1-10 ms	~ 300 ms	~ 1 ms



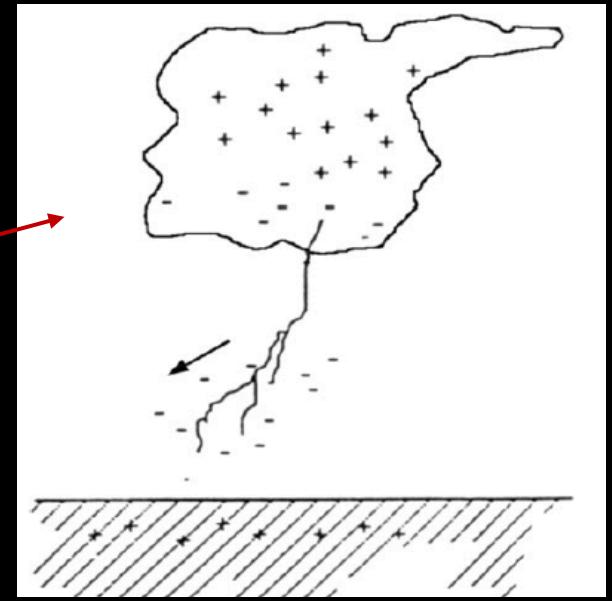
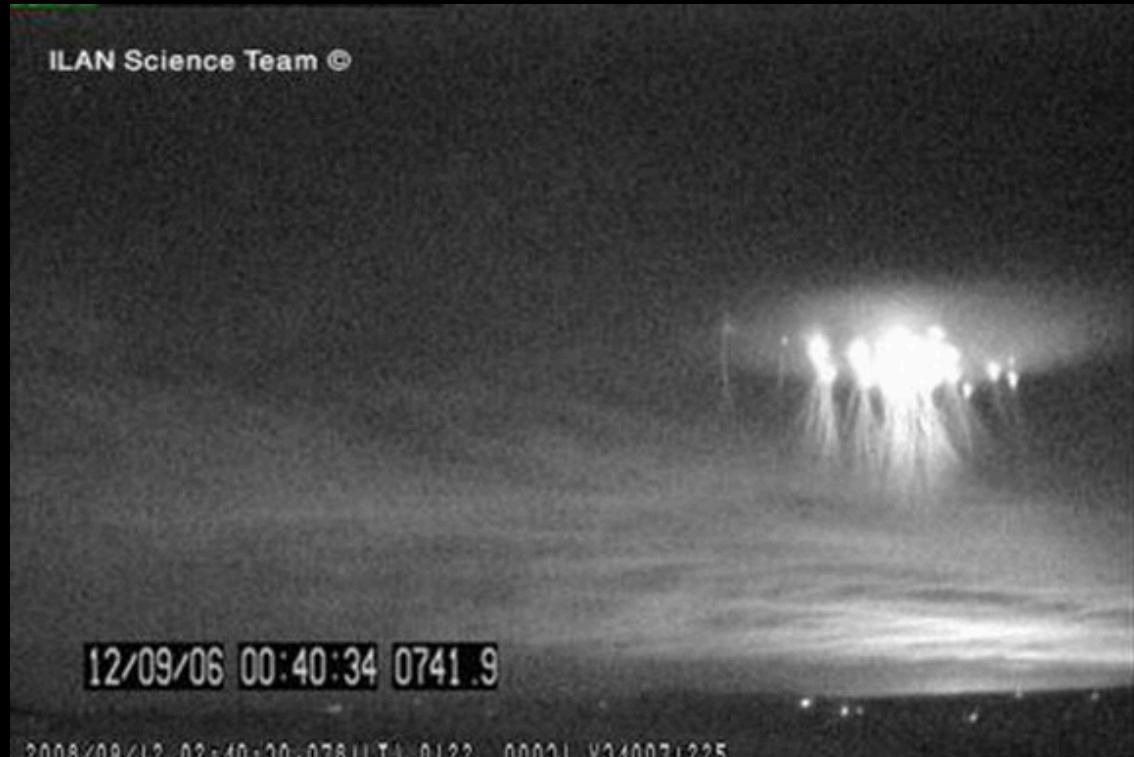
Foto de un ELVES junto a 3 sprites por el astrónomo Timo Kantola

Sprites	Blue Jets	ELVES	Halos
Plasma ramificado rojizo ($I \sim 40$ km)	Rayos hacia arriba ($I \sim 40$ km)	Disco de luz roja de rápida expansión ($d \sim 300$ km)	Disco de luz difusa ($d \sim 25$ km)
+CG	$V = 10^5$ m/s	EMP de un -CG ó IC con $I > 80$ kA	-CG solos +CG con Sprites
~ 1 MR	> 1 MR	~ 1 MR	$0.5 - 1$ MR
1-10 ms	~ 300 ms	~ 1 ms	~ 1 ms

Bering et al. 2004, Geophysical R. L., 31(5)

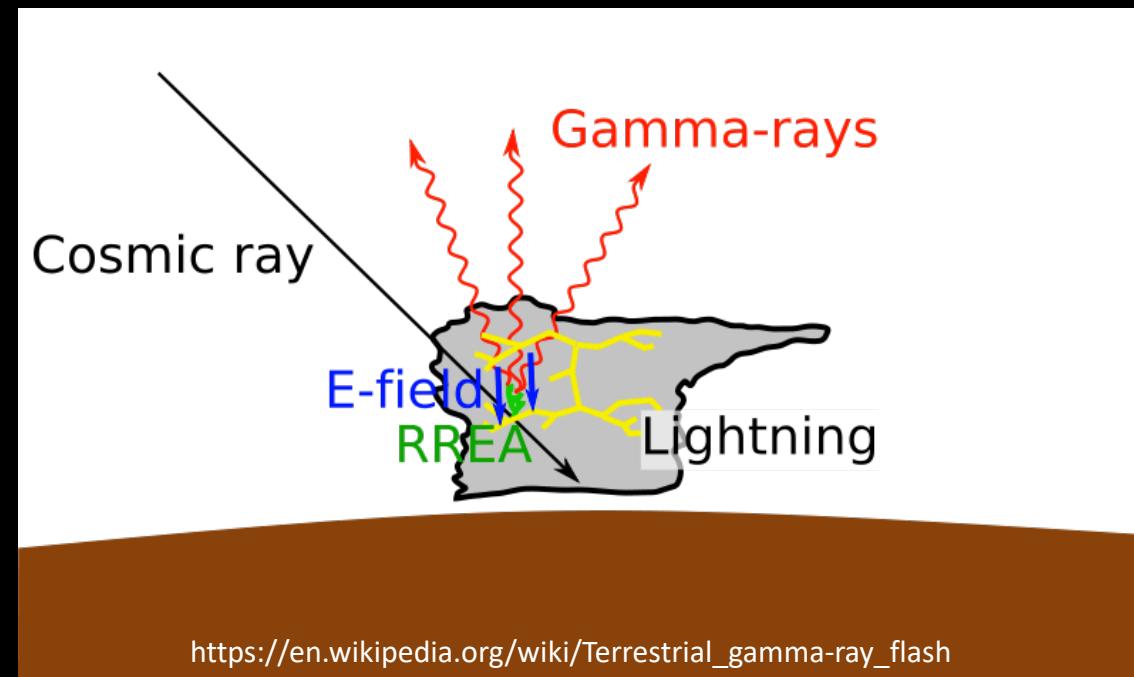


Sprites	Blue Jets	ELVES	Halos
Plasma ramificado rojizo ($I \sim 40$ km)	Rayos hacia arriba ($I \sim 40$ km)	Disco de luz roja de rápida expansión ($d \sim 300$ km)	Disco de luz difusa ($d \sim 25$ km)
+CG	$V = 10^5$ m/s	EMP de un -CG ó IC con $I > 80$ kA	-CG solos +CG con Sprites
~ 1 MR	> 1 MR	~ 1 MR	$0.5 - 1$ MR
1-10 ms	~ 300 ms	~ 1 ms	~ 1 ms



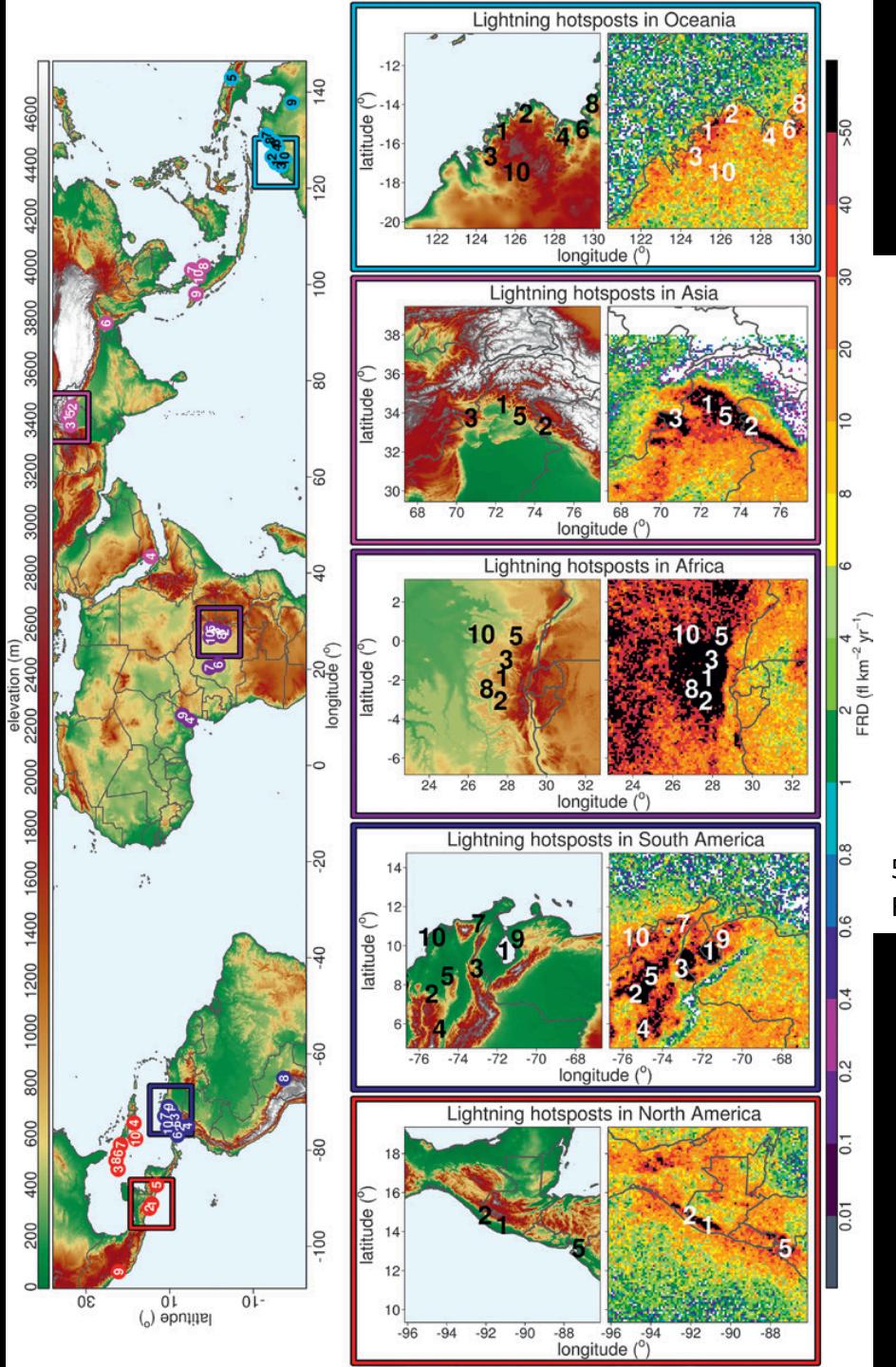
Sprites	Blue Jets	ELVES	Halos	TGF
Plasma ramificado rojizo ($I \sim 40$ km)	Rayos hacia arriba ($I \sim 40$ km)	Disco de luz roja de rápida expansión ($d \sim 300$ km)	Disco de luz difusa ($d \sim 25$ km)	Emisiones breves de gammas
+CG	$V = 10^5$ m/s	EMP de un -CG ó IC con $I > 80$ kA	-CG solos +CG con Sprites	Radiación de Bremsstrahlung de e-acelerados en los E de las tormentas
~ 1 MR	> 1 MR	~ 1 MR	0.5 - 1 MR	\sim MeV
1-10 ms	~ 300 ms	~ 1 ms	~ 1 ms	~ 1 ms

Lyu et al. 2018, Geophysical R. L., 45(4)
Neubert et al. 2020, Science, 367(6474)



Distribución global de rayos y TLE

Hotspots de rayos



Puesto	FRD ($\text{fl km}^{-2}\text{año}^{-1}$)	Lat ($^{\circ}$)	Lon ($^{\circ}$)	Sitio
1	232.52	9.75	-71.65	Lago de Maracaibo, Venezuela
2	205.31	-1.85	27.75	Kabare, R.D. del Congo
3	176.71	-3.05	27.65	Kampene, R.D. del Congo
4	172.29	7.55	-75.35	Cáceres, Colombia
5	143.21	-0.95	27.95	Sake, R.D. del Congo
6	143.11	34.45	72.35	Daggar, Pakistan
7	138.61	8.85	-73.05	El Tarra, Colombia
8	129.58	5.25	9.35	Nguti, Cameroun
9	129.50	0.25	28.45	Butembo, R.D. del Congo
10	127.52	-1.55	20.95	Boende, R.D. del Congo

5 años de observación del OTD y 3 del LIS.

R.I. Albrecht et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016.

Tasa global 46 rayos/s

VERANO AUSTRAL (J-S)

35 rayos/s

VERANO BOREAL (D-M)

60 rayos/s

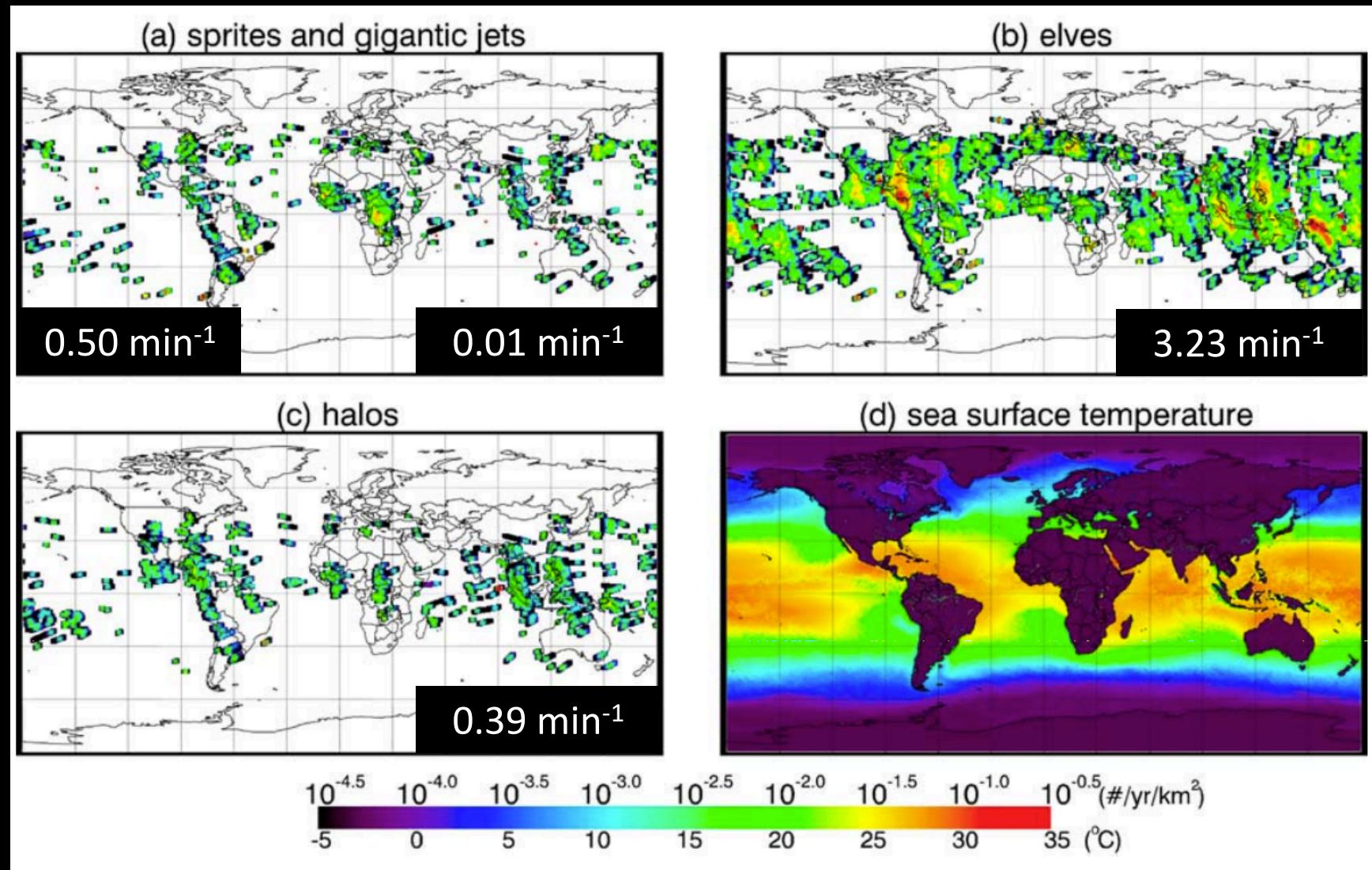


ISUAL

- Lanzado en 2004 en el satélite FORMOSAT-2
- Detección de TLEs con PMTs de 50-100 μ s

A.B. Chen et al. 2008, J. Geophysical R. Space Physics.

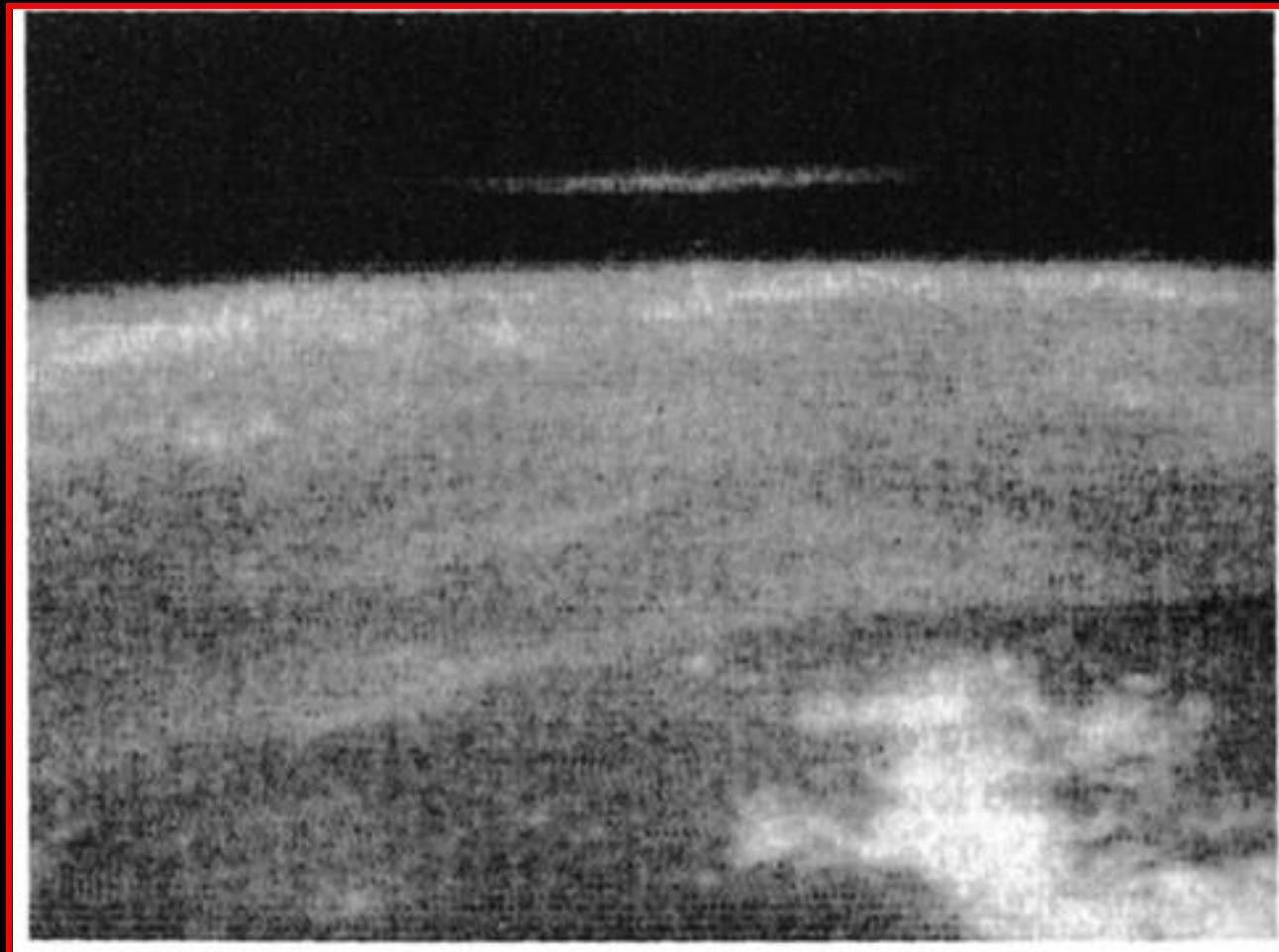
Tasa de ocurrencia global de los TLE 2004-2007



Evolución en la observación de los ELVES

Evolución en la observación de los ELVES

Capa brillante a 95 km
de altitud
en coincidencia con un
rayo

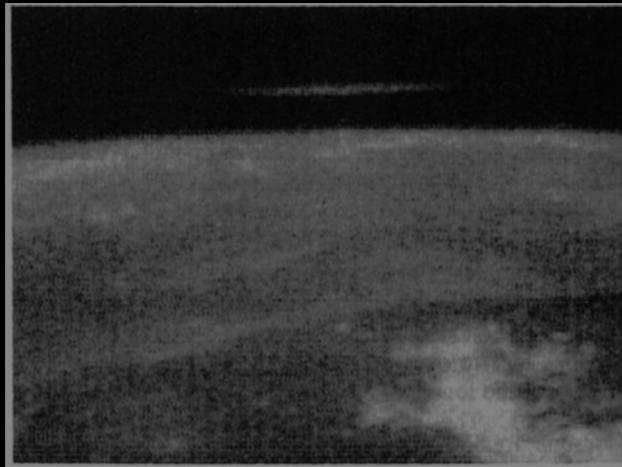


Cámara de 30 fps
Trasbordador Espacial STS-1

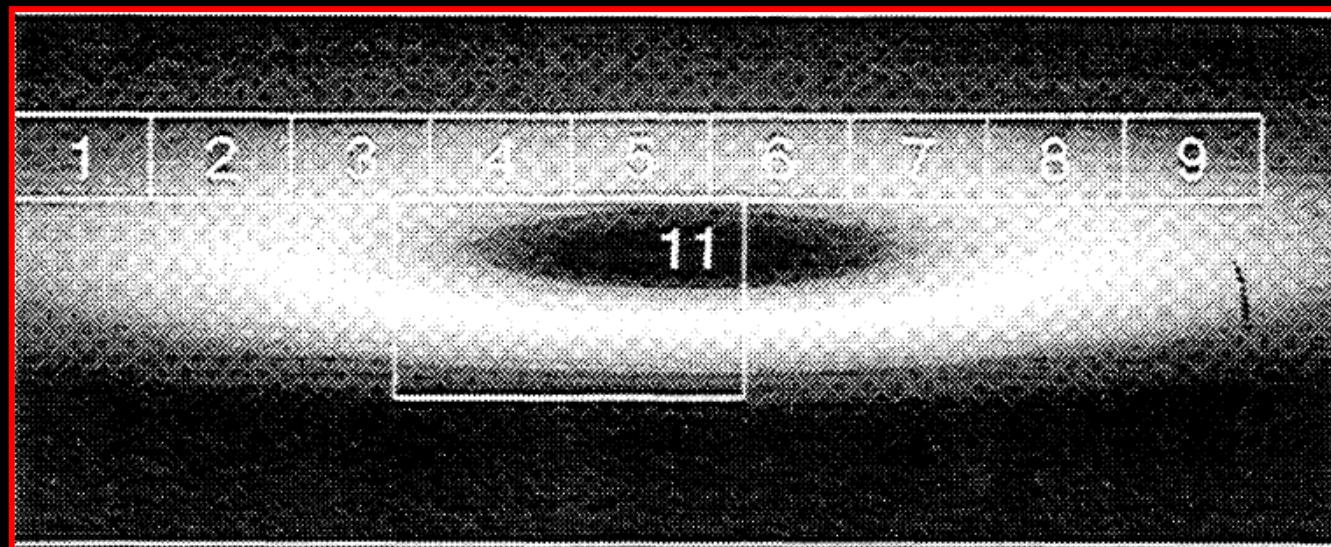
Boeck et al. 1992. Geophysical R.L., v 19, n 2.

Evolución en la observación de los ELVES

Cámara 30 fps

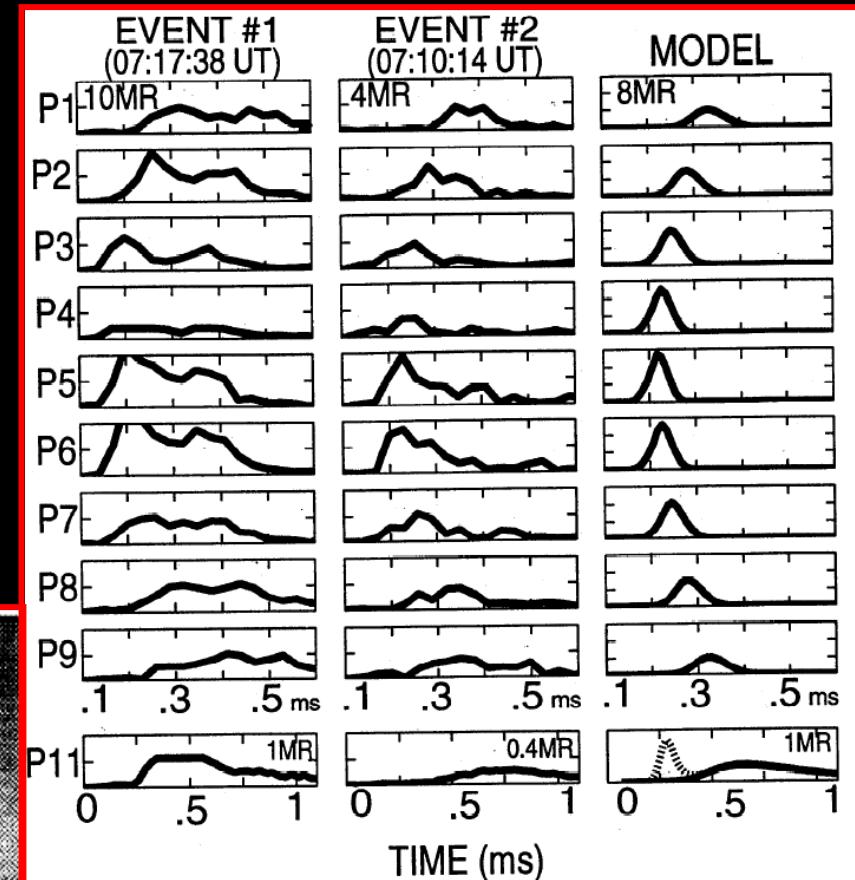


Boeck et al. 1992. Geophysical R.L., v 19, n 2.



Ojo de mosca:
Arreglo de PMT de $30 \mu\text{s}$

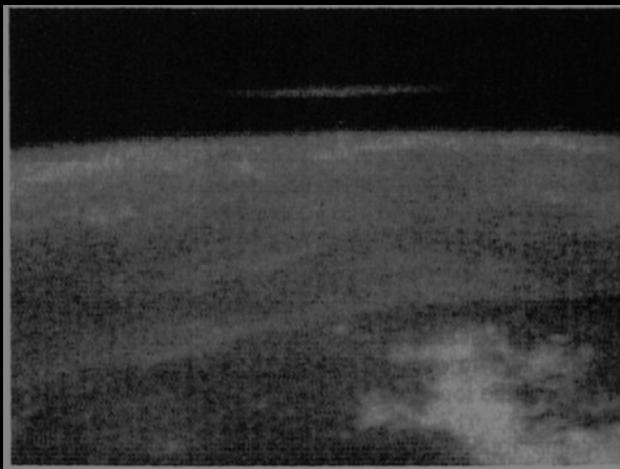
Rápida expansión lateral
de la luminosidad



Inan et al. 1997. Geophysical R.L., v 24, n 5.

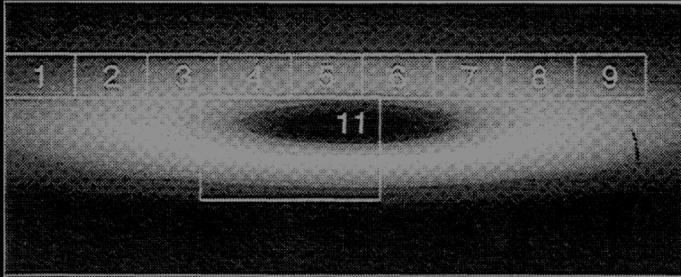
Evolución en la observación de los ELVES

Cámara 30 fps

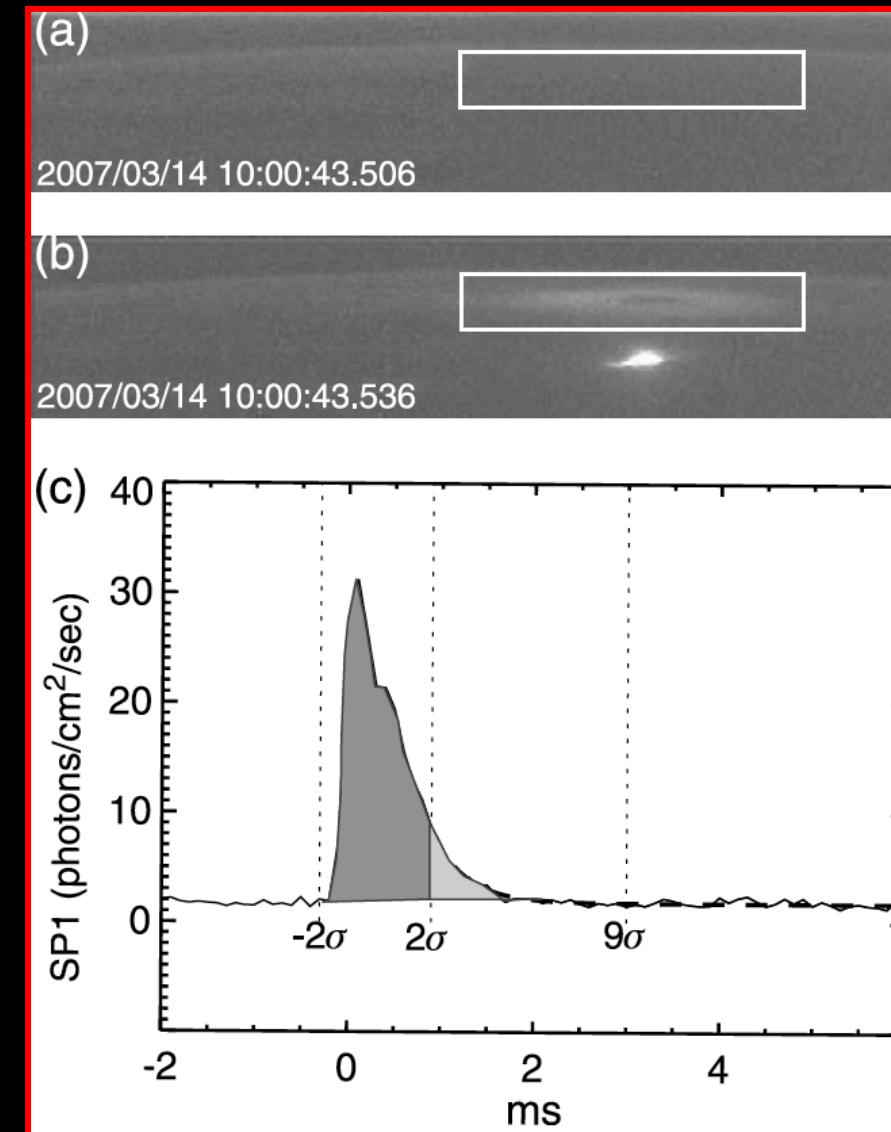


Boeck et al. 1992. Geophysical R.L., v 19, n 2.

Arreglo de PMT de 30 μ s



Inan et al. 1997. Geophysical R.L., v 24, n 5.



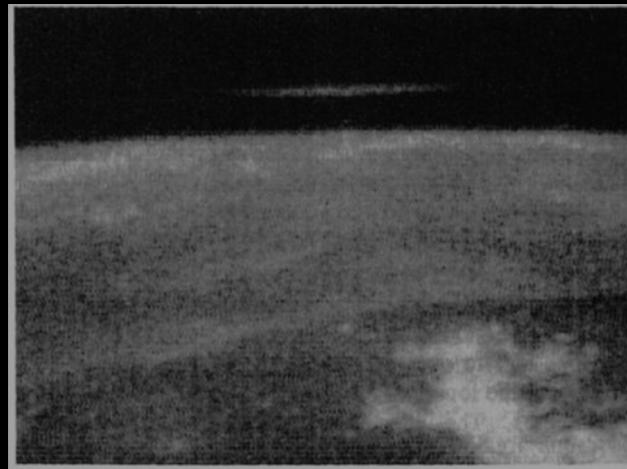
ELVES tenues en UV lejano

Espectrofotómetros del ISUAL

Rate 10 KHz

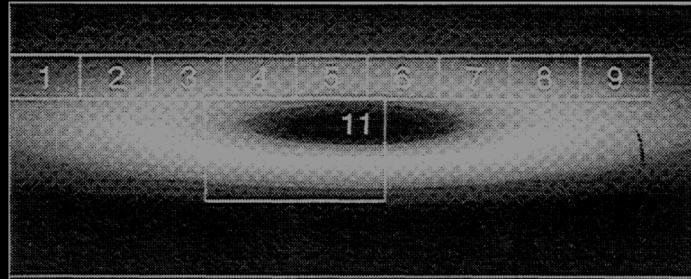
Evolución en la observación de los ELVES

Cámara 30 fps



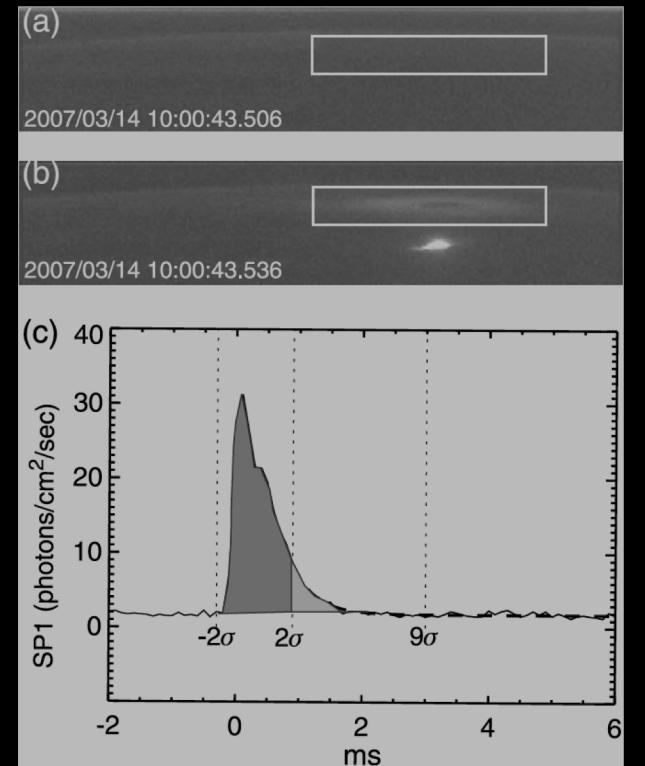
Boeck et al. 1992. Geophysical R.L., v 19, n 2.

Arreglo de PMT de 30 μ s



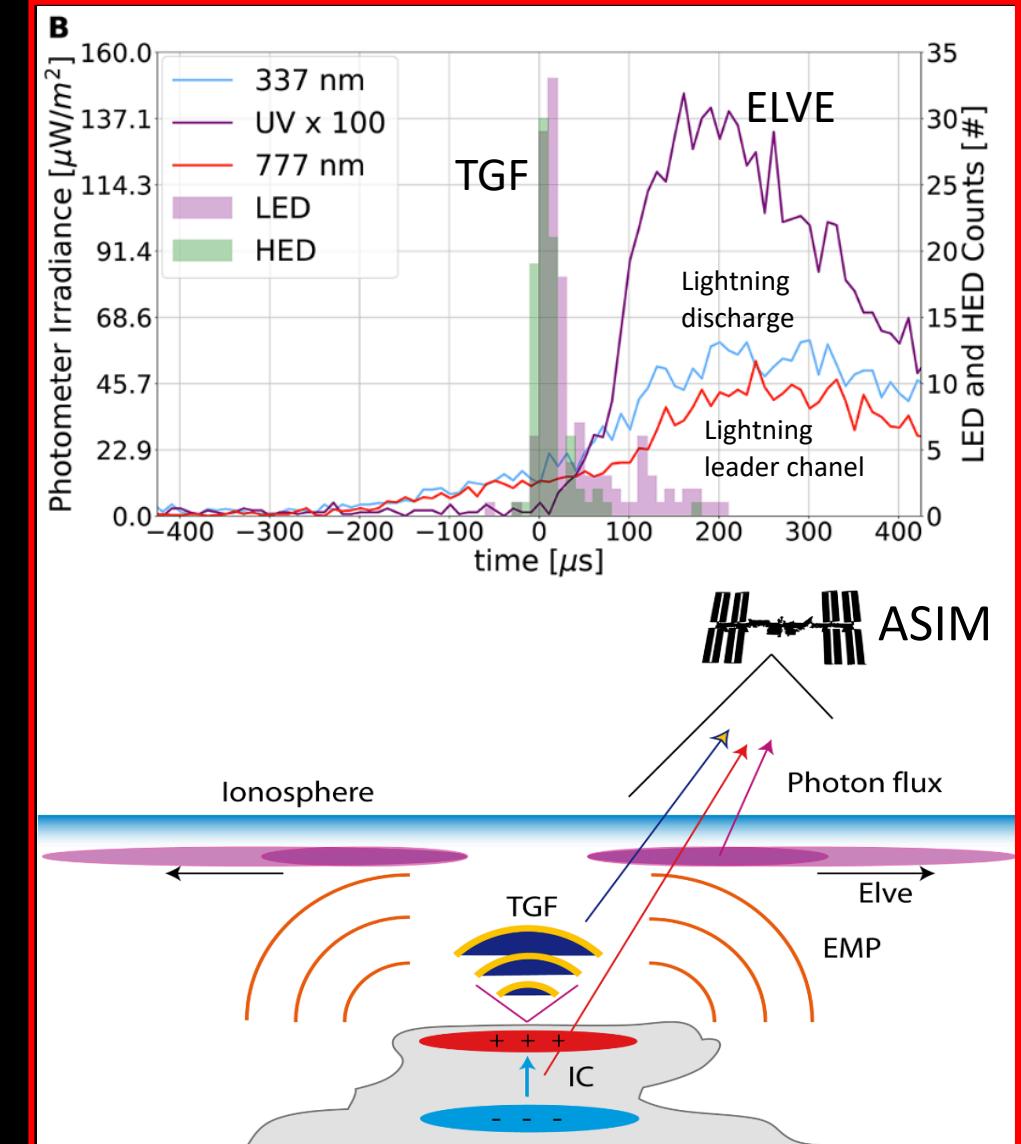
Inan et al. 1997. Geophysical R.L., v 24, n 5.

Rate 10 KHz



Chang et al. 2010. J. Geophysical R., v 115, A00E46.

Detección simultánea de un ELVES y un TGF

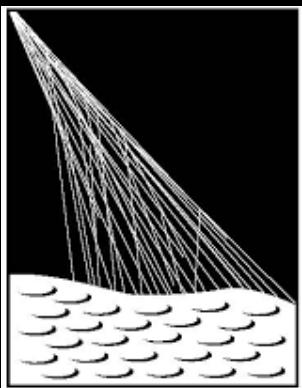


Neubert et al. 2020. Science, 367(6474).

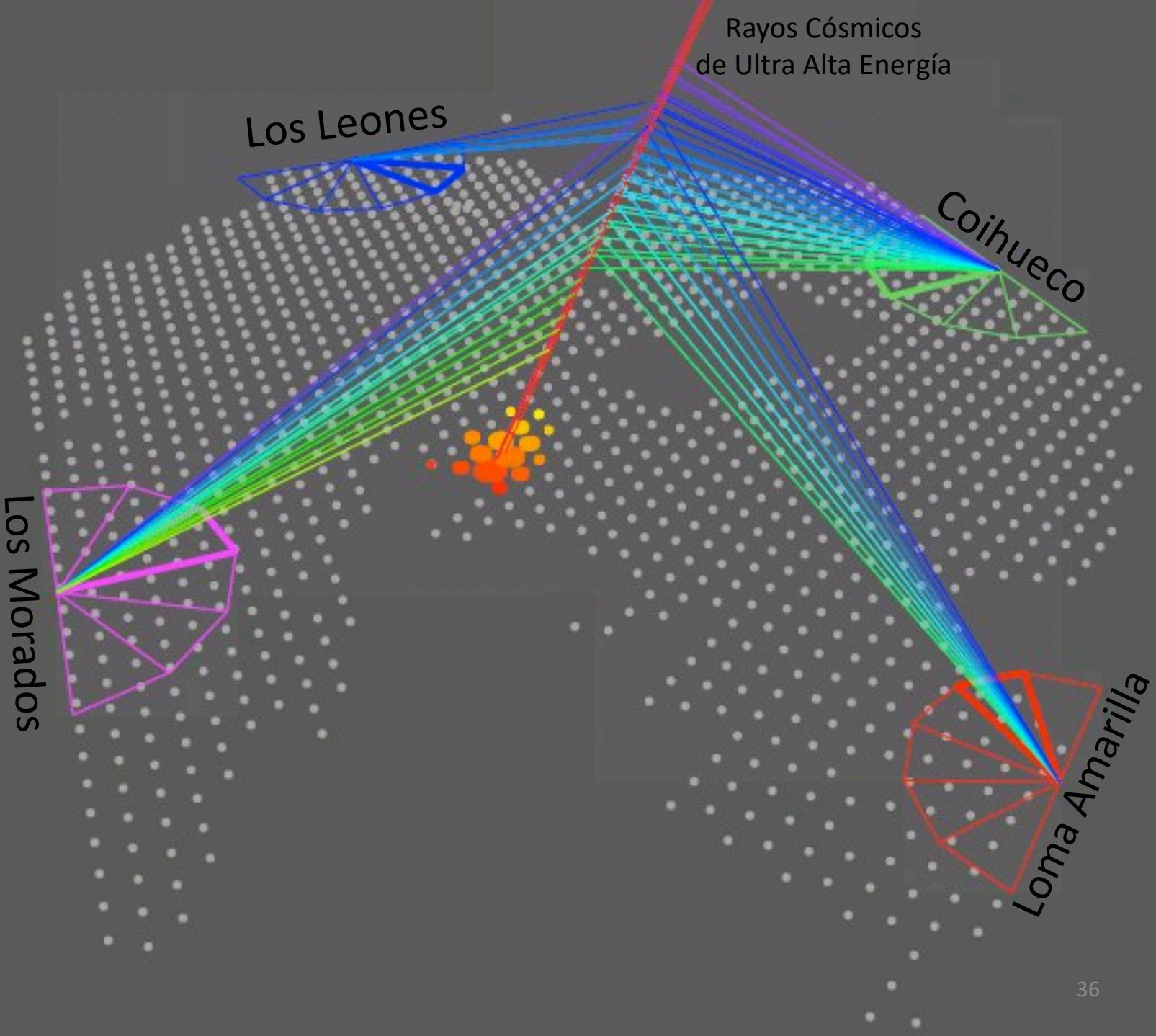
34

ELVES en el Observatorio Pierre Auger

ELVES en

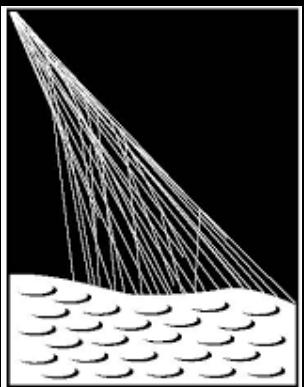


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

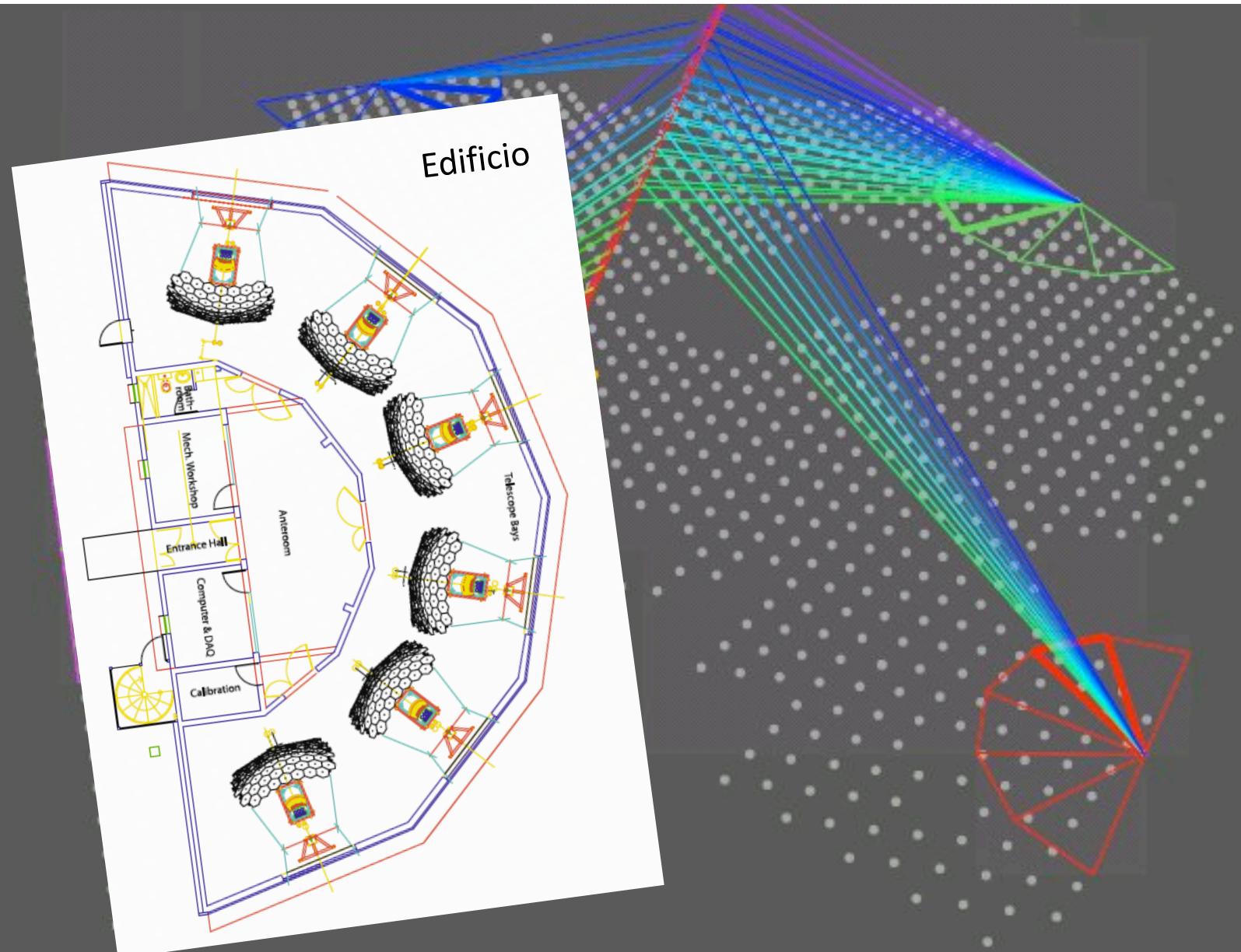


Detector de Fluorescencia (FD)

ELVES en

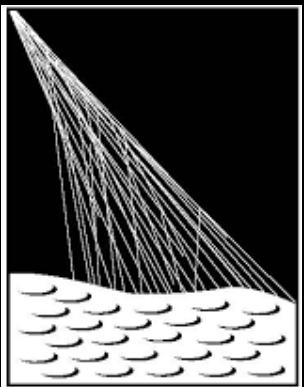


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

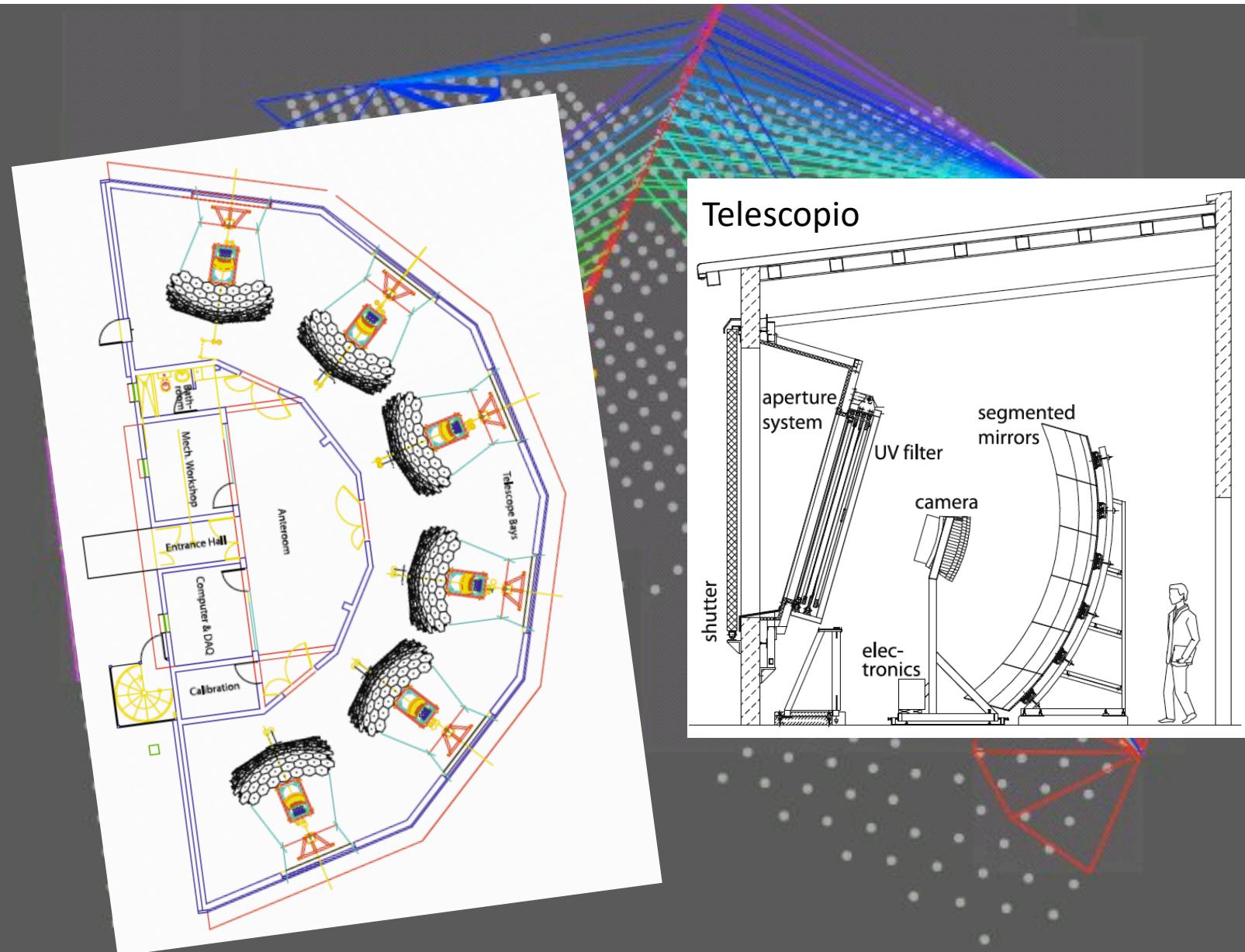


Detector de Fluorescencia (FD)

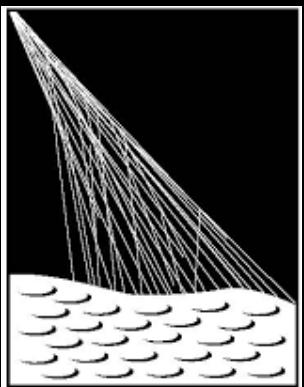
ELVES en



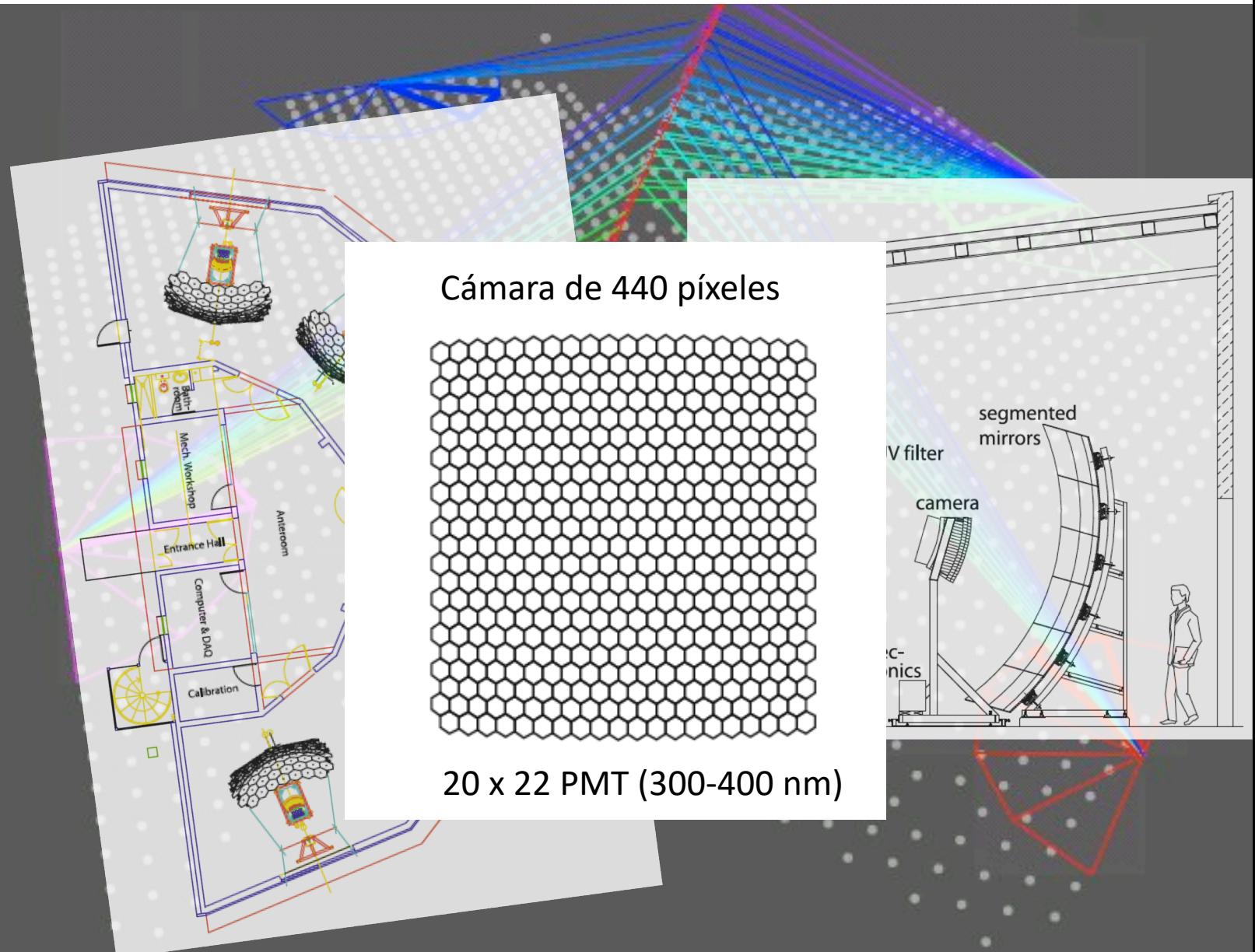
**PIERRE
AUGER
OBSERVATORY**



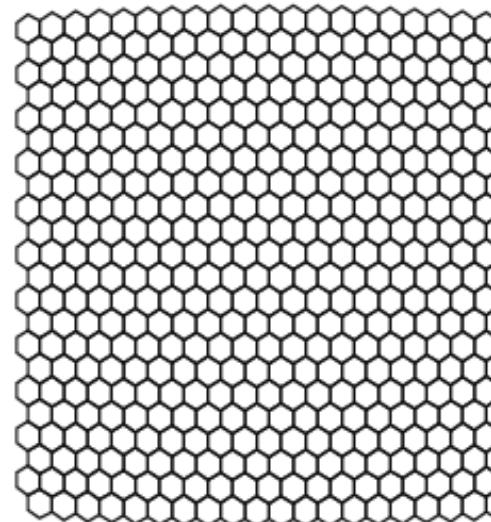
ELVES en



Detector de Fluorescencia (FD)

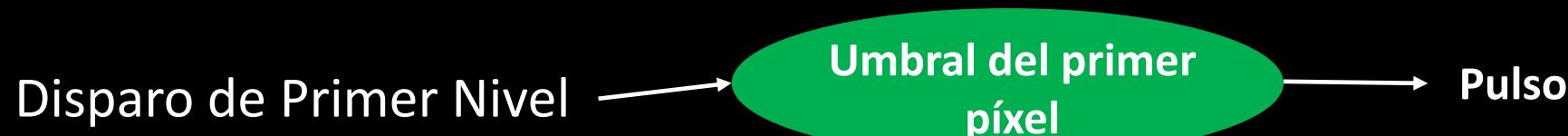


Cámara de 440 píxeles



20 x 22 PMT (300-400 nm)

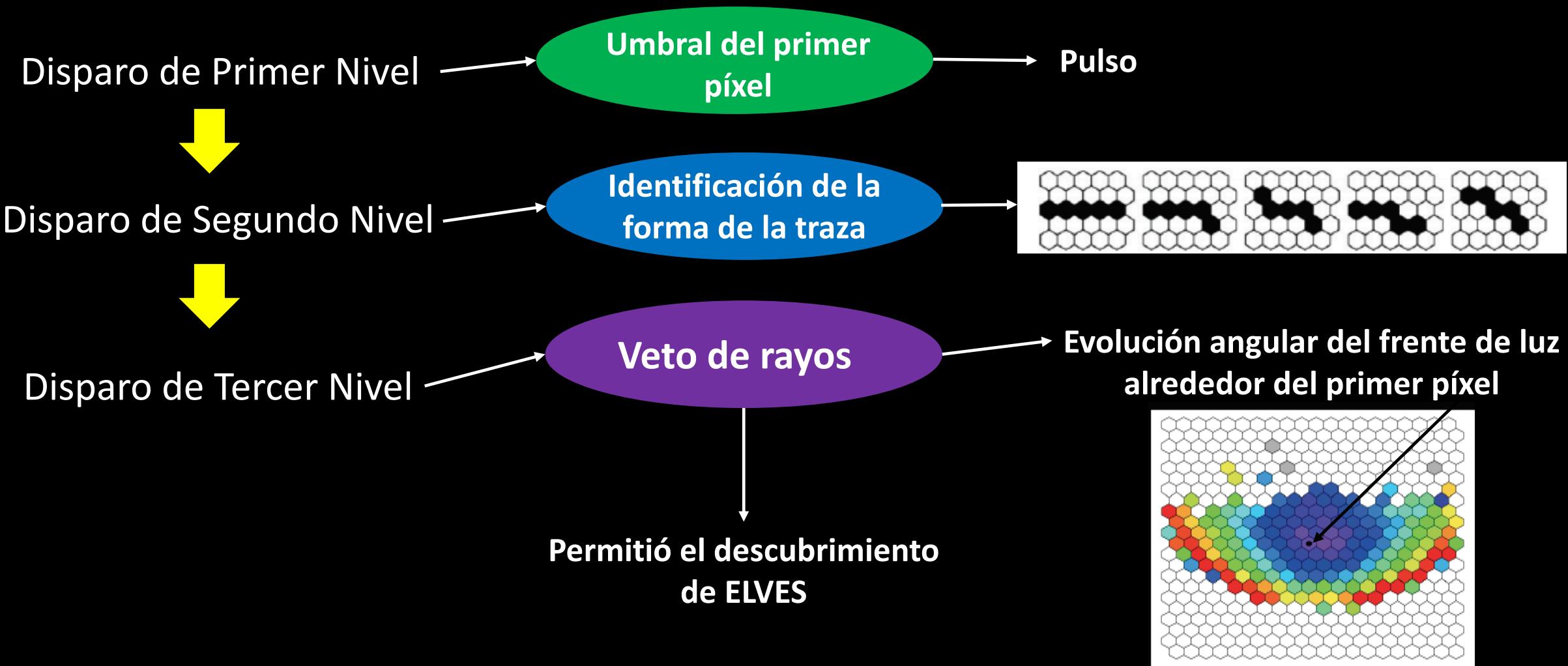
Sistema de disparo del FD

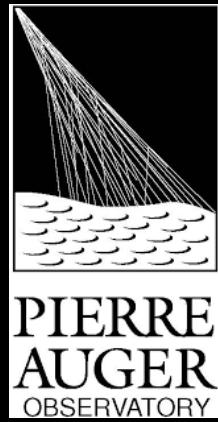


Sistema de disparo del FD

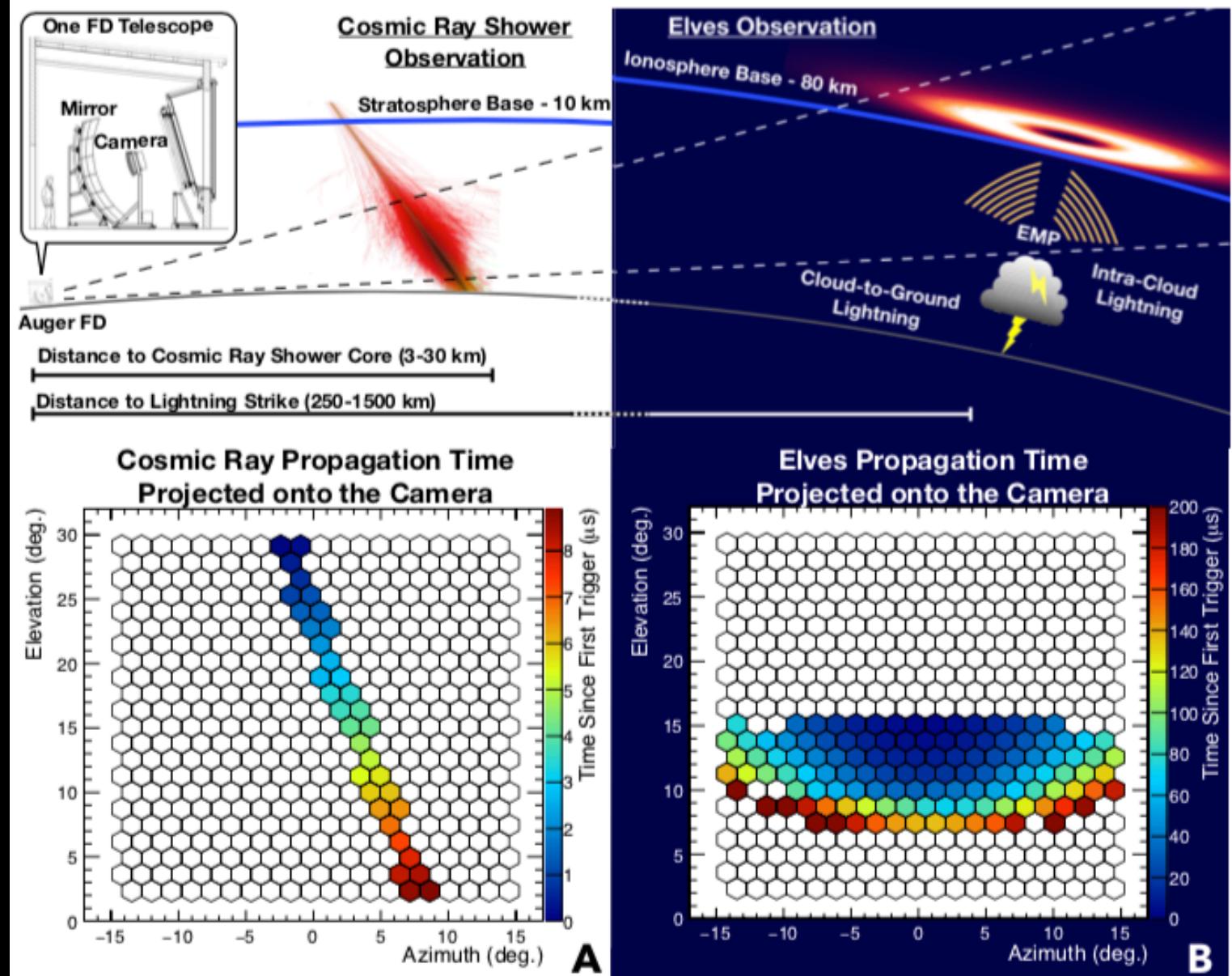


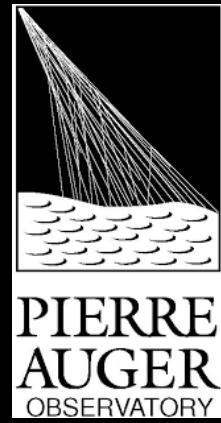
Sistema de disparo del FD





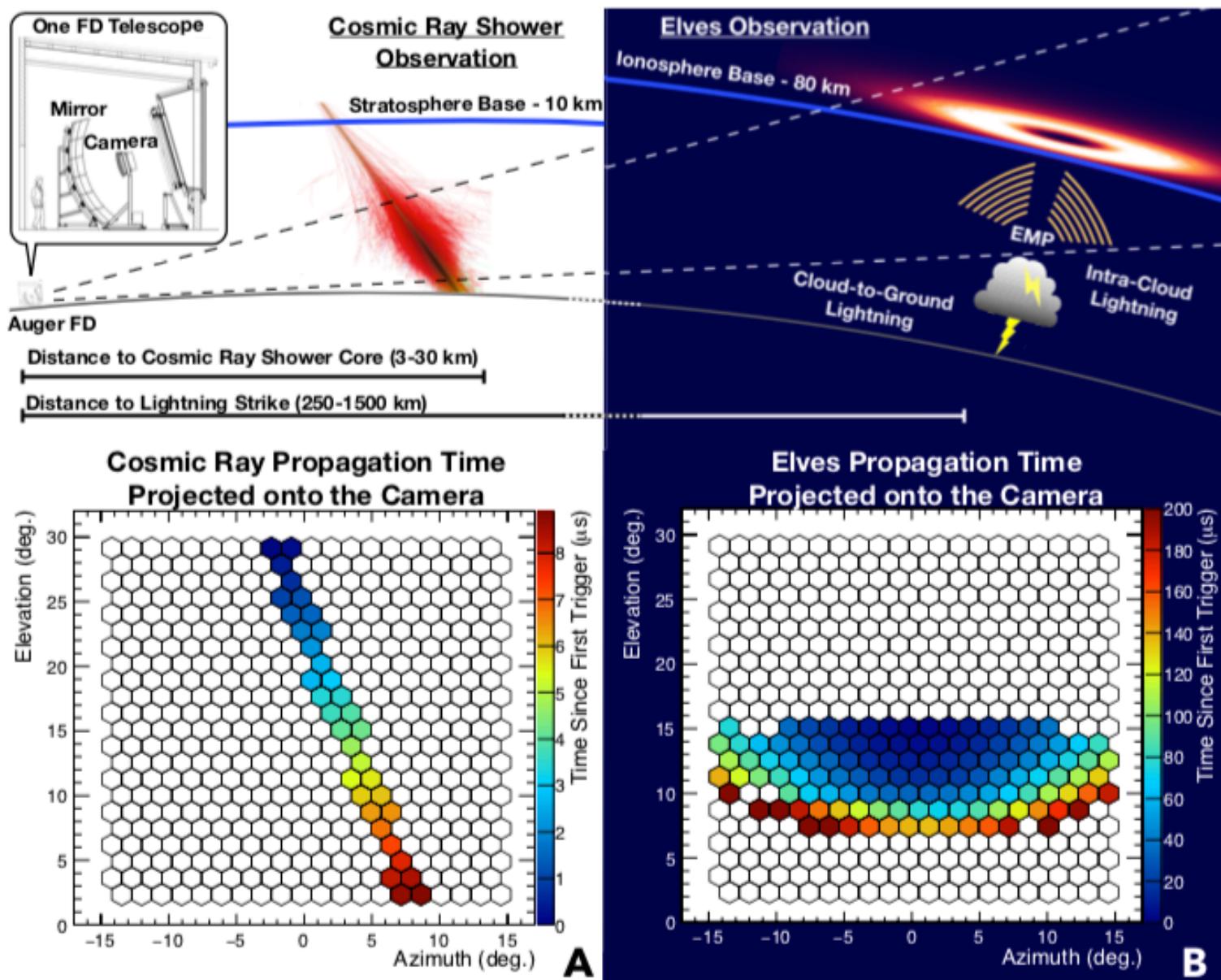
ELVES en el Detector de Fluorescencia



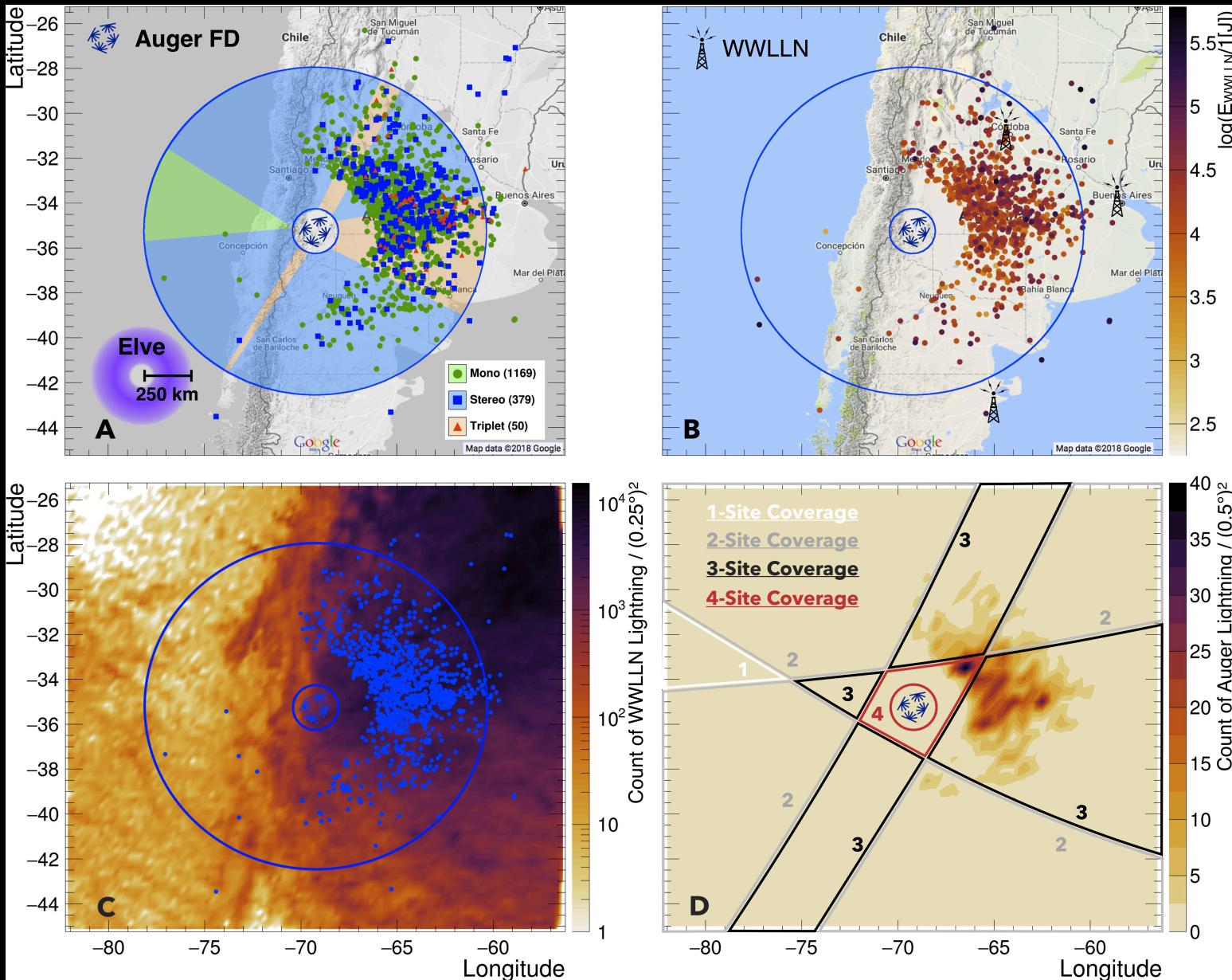


ELVES en el Detector de Fluorescencia

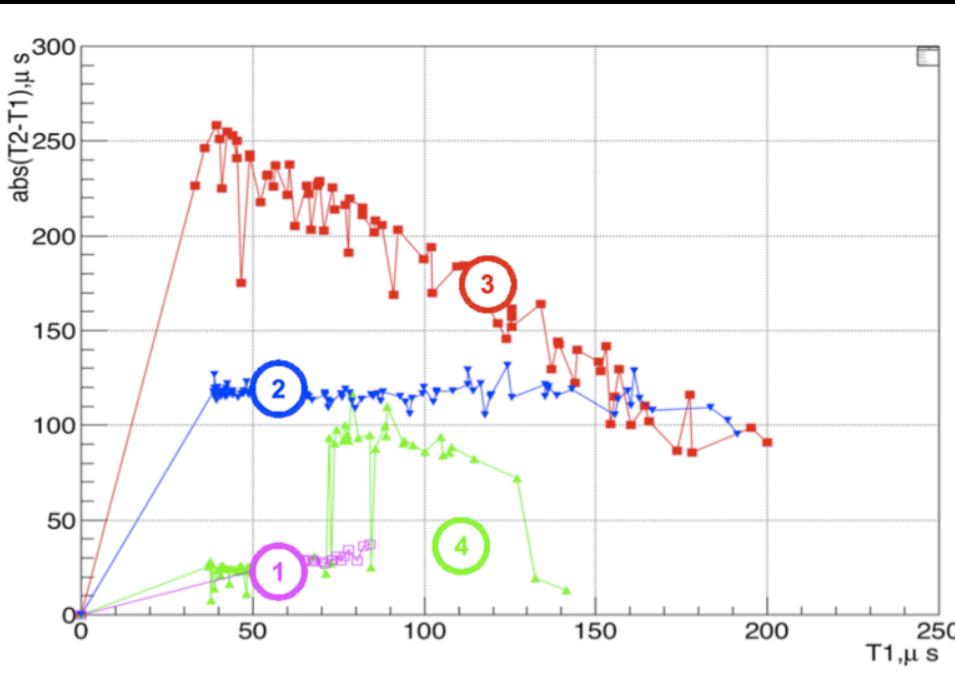
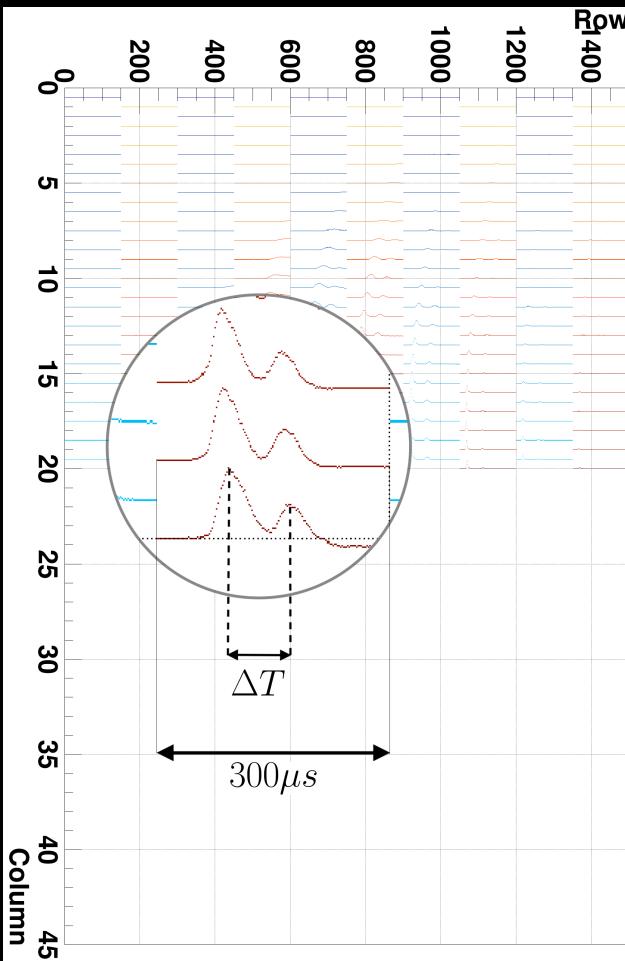
Año	Simple	Estéreo	Triplete	Total
2013 (4-12)	214	83	8	305
2014	425	128	19	572
2015	686	117	11	814
2016	673	151	21	845
2017	906	297	52	1255
2018 (1-9)	527	99	15	641
Total	3431	875	126	4432



ELVES en el Observatorio Pierre Auger



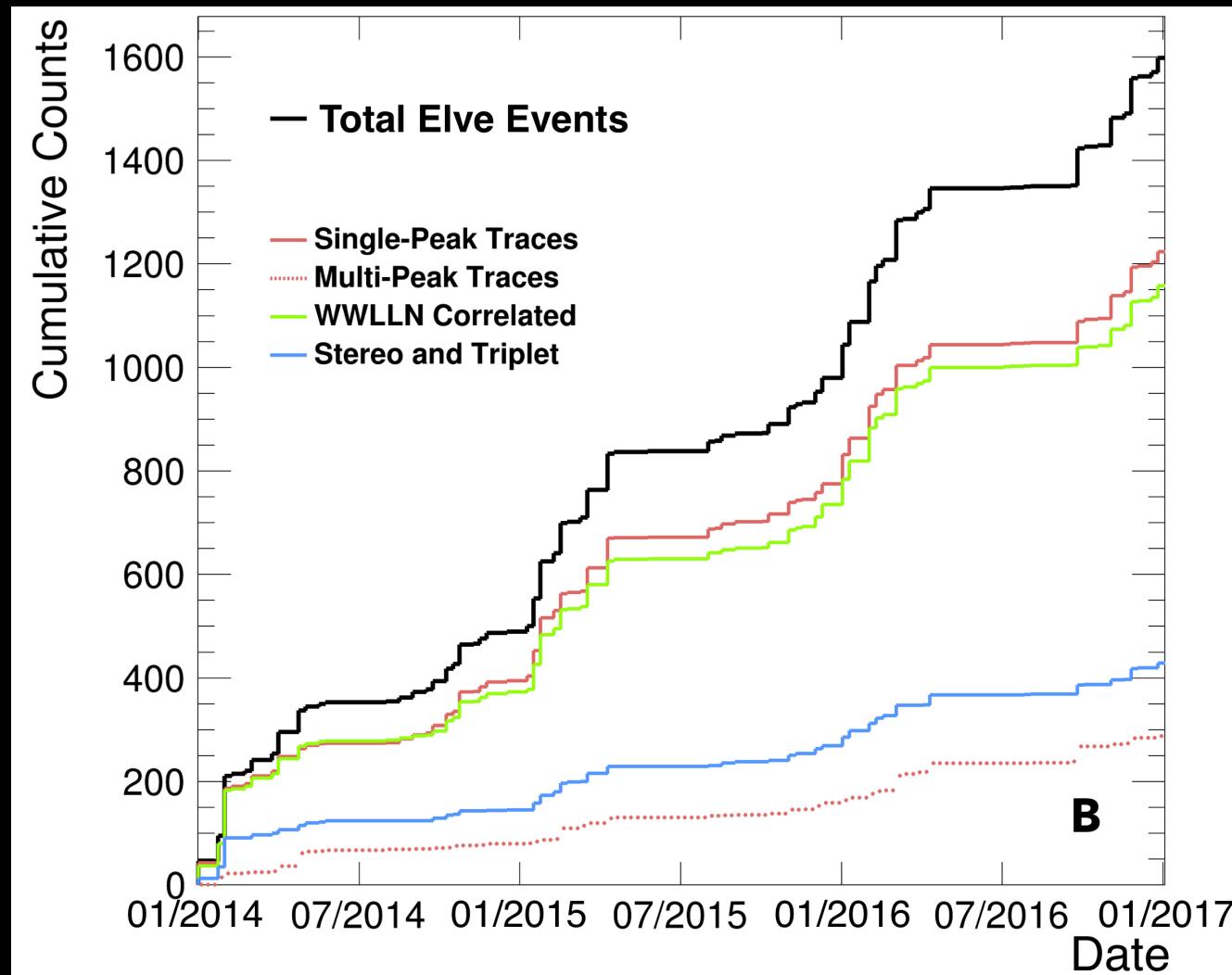
Clasificación de ELVES múltiples



R Mussa. In EPJ Web Conf., 2019.

1. Patrón de interferencia de un EMP por un IC que rebota en el suelo.
2. Primeras etapas del rayo o impactos de retorno muy cercanos.
3. ELVES simple superpuesto con otro TLE.
4. Asociado a la producción de TGF.

288 ELVES con múltiples pulsos compatibles con descargas IC



Preguntas abiertas

1. El problema de iniciación de los rayos

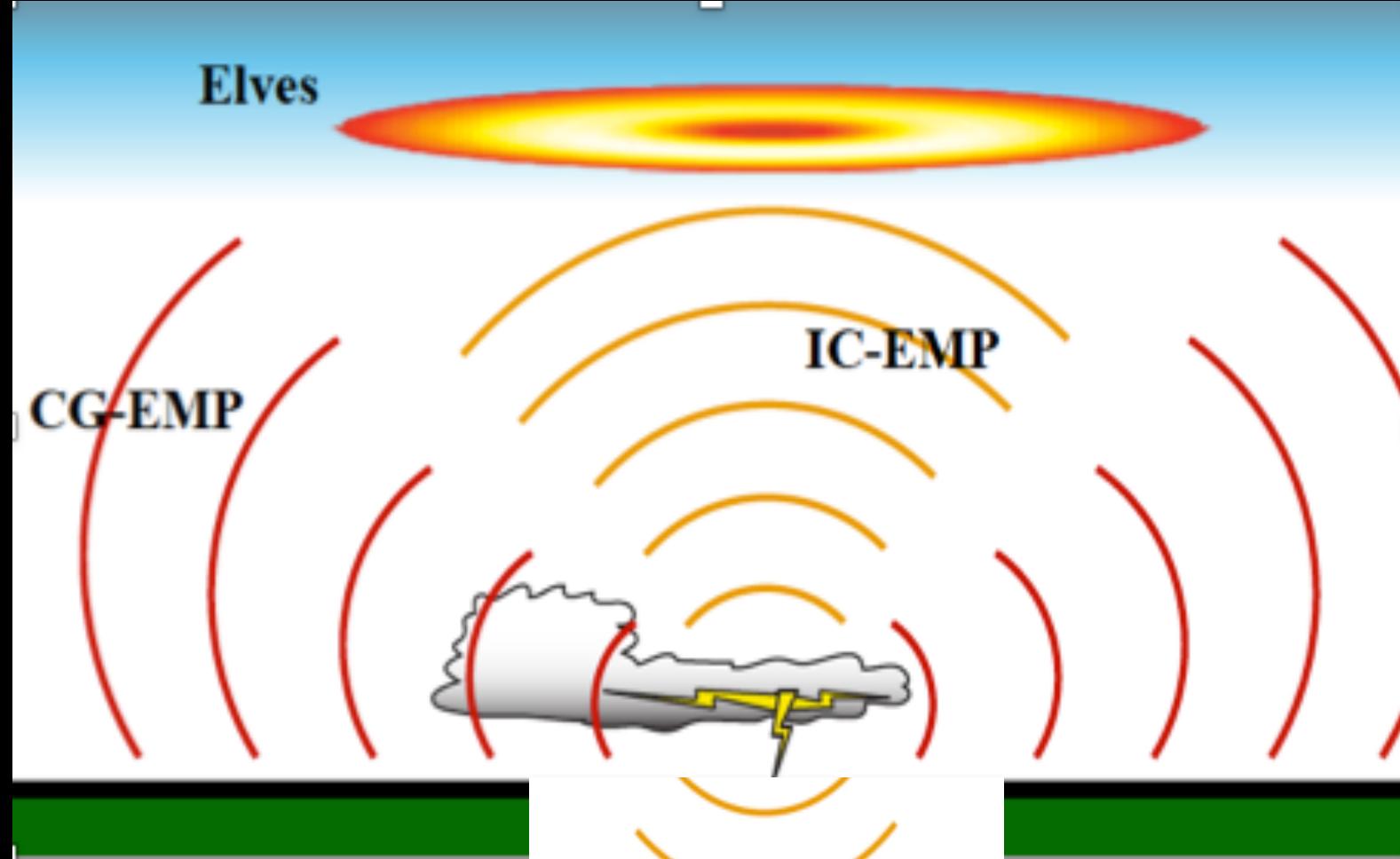
- Las medidas de $E_c \ll 23 \text{ kV/cm}$
- Vínculo entre los Rayos Cósmicos, rayos y el clima.

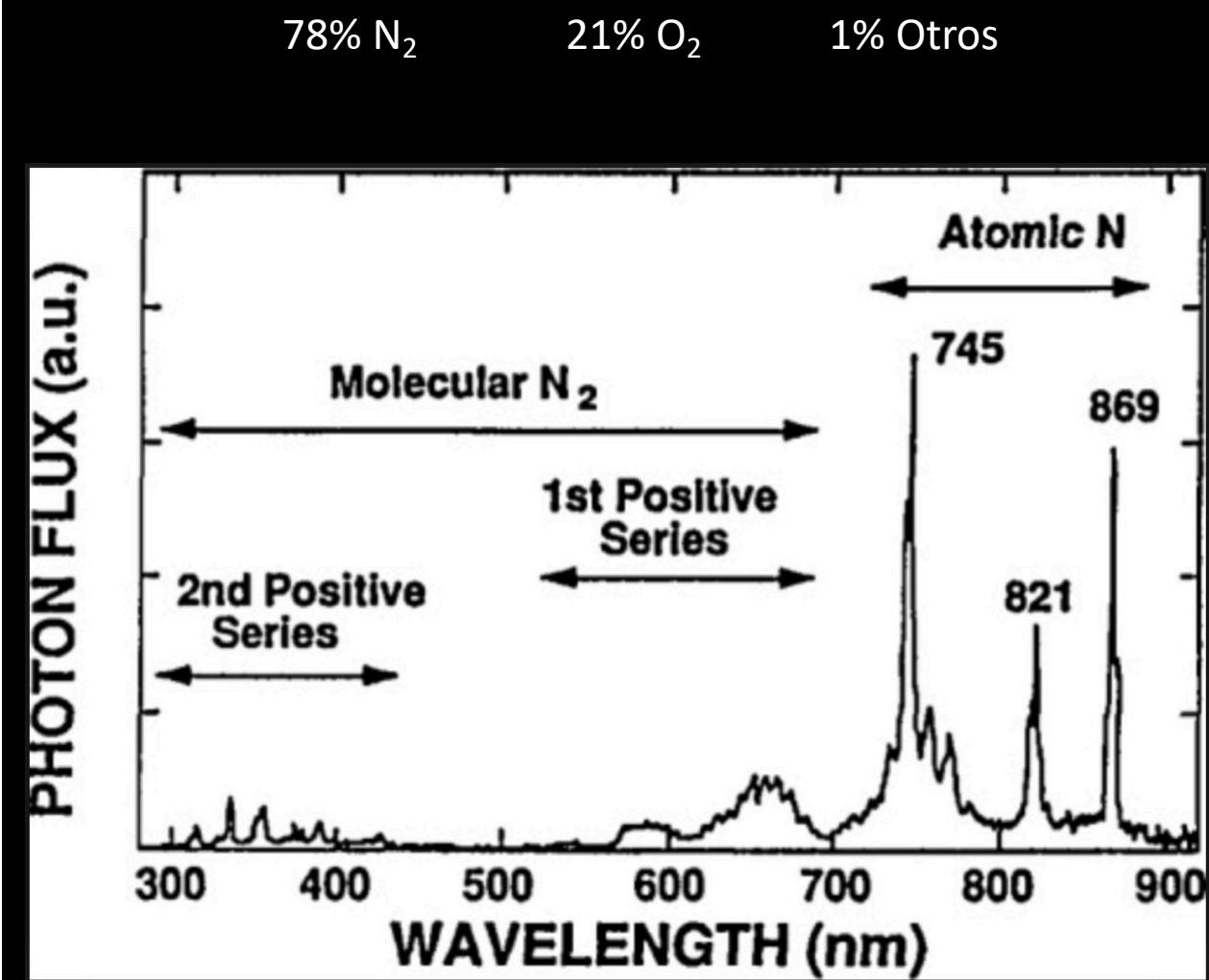
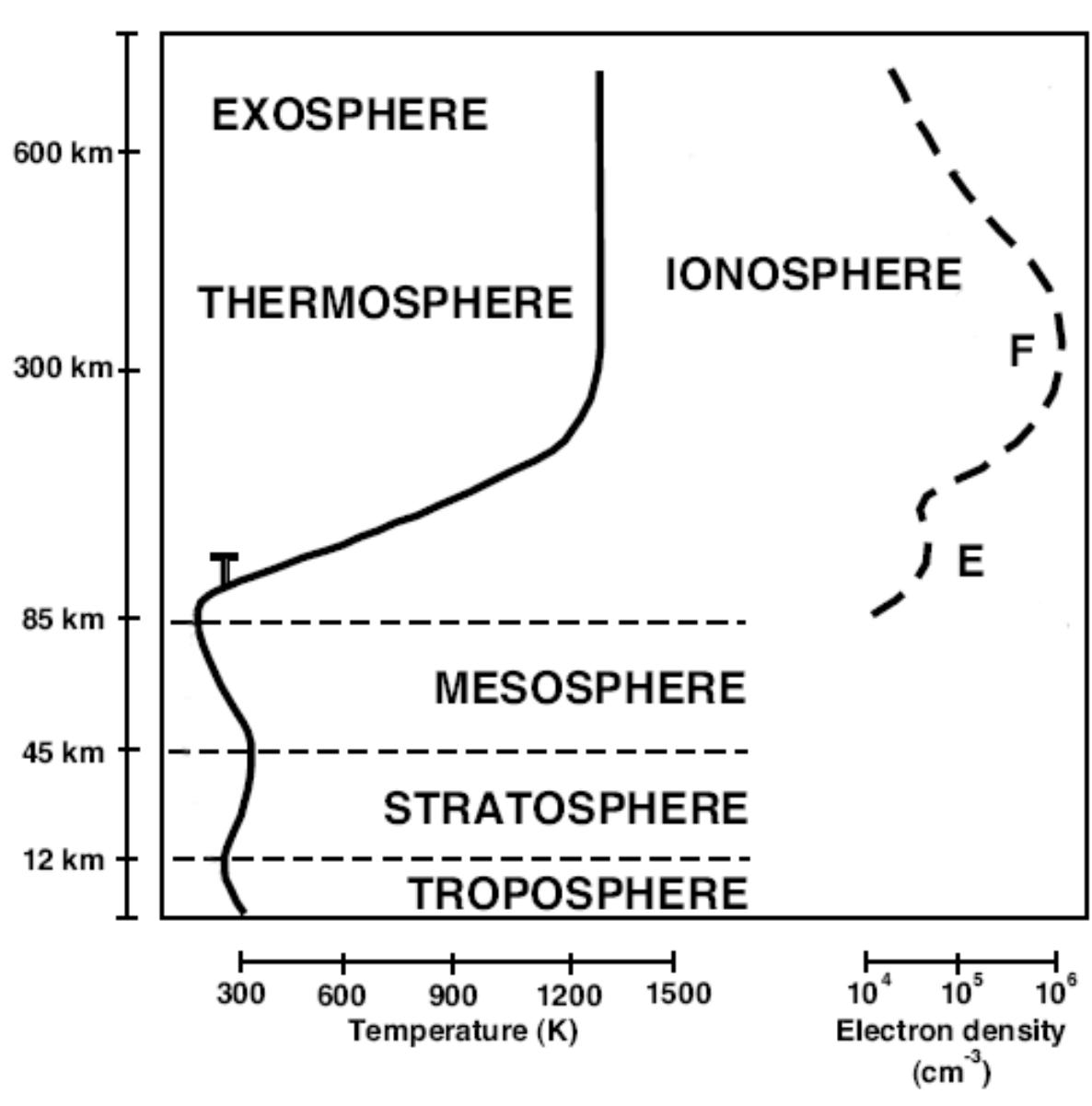
2. Procesos cinéticos de los TLEs y los TGFs.

3. Relación entre los TLEs, los TGFs y los rayos.

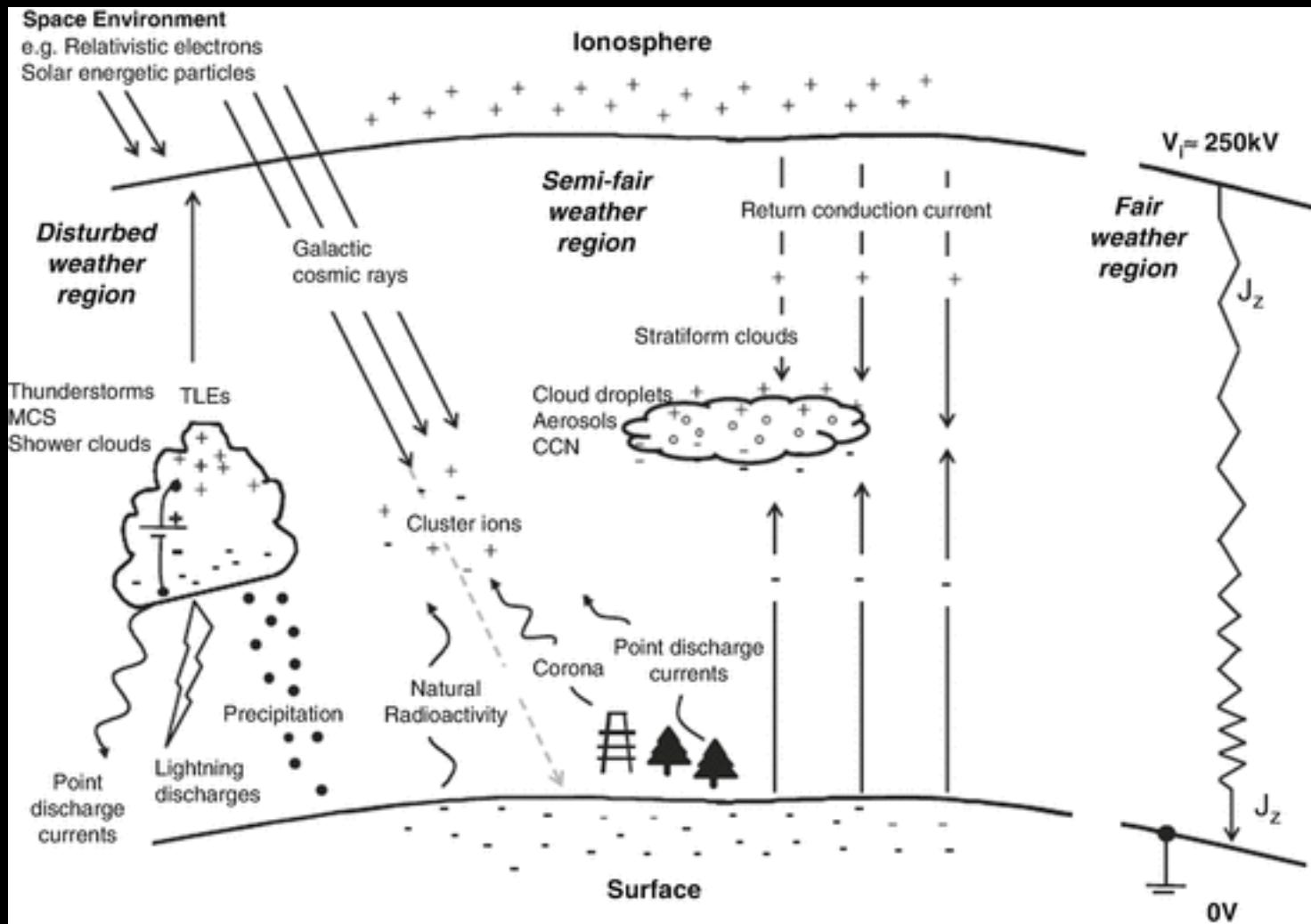
GRACIAS







Circuito Global Eléctrico

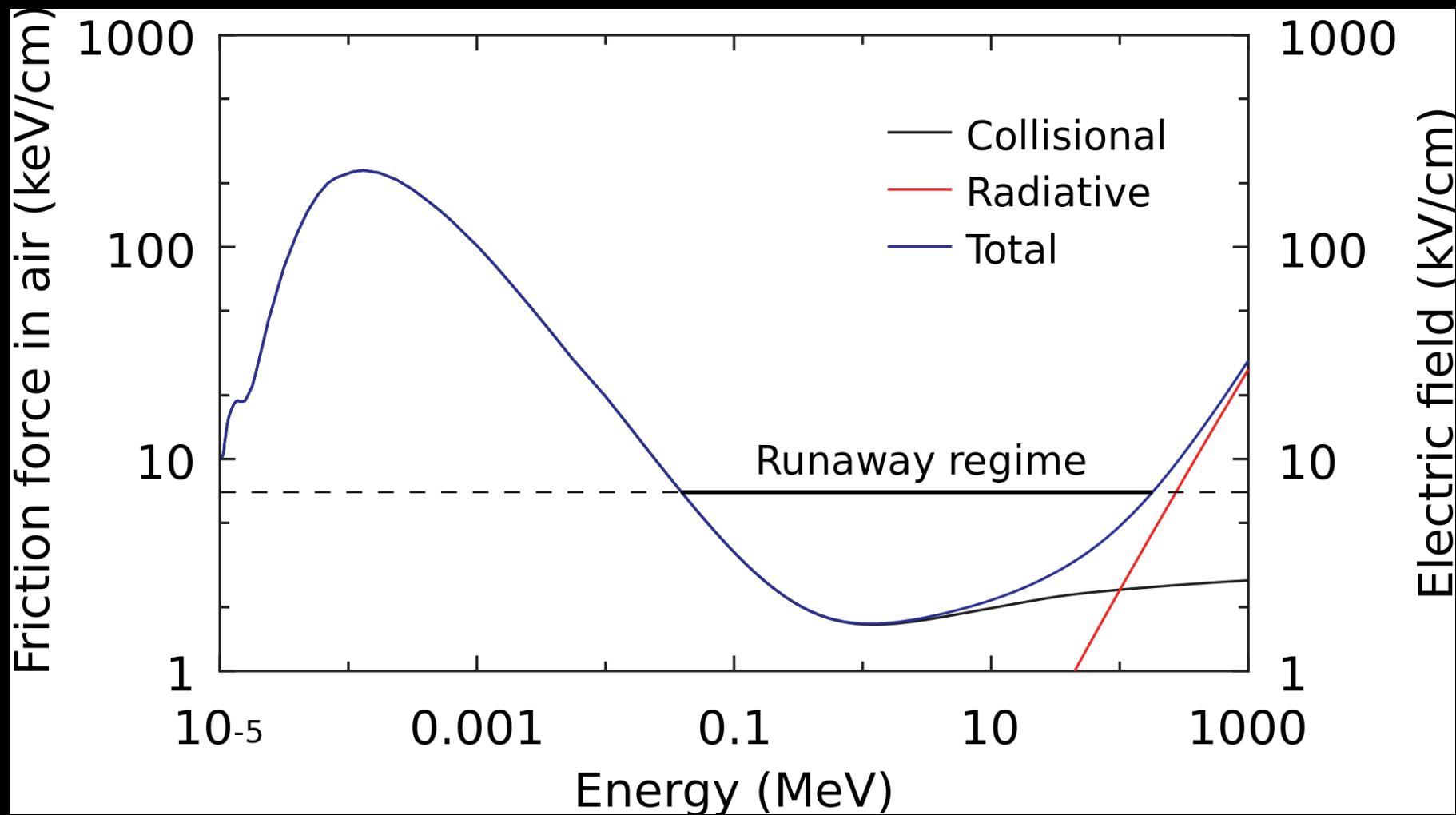


https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-52374-3_1

1 cm^2



$$1 \text{ R} = 10^6 \text{ fotones column}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



Reconstrucción de la ubicación y la emisión de luz de los ELVES

1. Se realiza un conjunto de ajustes polinomiales en los tiempos T_i del pulso de cada fila y cada columna, para obtener una primera estimación de la longitud y la latitud del rayo.
2. Se realiza otro ajuste para minimizar el $\chi^2 = \sum_{i=1}^N (T_i - \Delta T_0 - \overline{OPS}_i/c)^2$, donde ΔT_0 es el tiempo entre la emisión del EMP de la fuente y la observación de la primera luz en el diafragma del FD, \overline{OPS}_i es la suma de las distancias \overline{SP} y \overline{PO} (ver figura 3.4). En este caso se asume que la capa de emisión no tiene grosor y que la altitud es $H_{EM} = 92$ km.
3. El tercer ajuste se hace dejando libre la altitud de emisión H_{EM} .
4. El último ajuste se realiza permitiendo también que la altitud del rayo H_B , varíe sobre el nivel del mar.

