



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

***BÚSQUEDA DE LA CONTRAPARTE ELECTROMAGNÉTICA
DE ONDAS GRAVITACIONALES CON EL OBSERVATORIO DE
RAYOS GAMMA HAWC***

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

P R E S E N T A

EDWIN ANTONIO GALVÁN GÁMEZ

TUTORES
DR NISSIM ILLICH FRAIJA CABRERA
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA, UNAM
DRA. MARÍA MAGDALENA GONZÁLEZ SÁNCHEZ
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

**Búsqueda de la contraparte electromagnética
de ondas gravitacionales con el observatorio de
rayos gamma HAWC**

T E S I S

*QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)*

PRESENTA:

Edwin Antonio Galván Gámez

Supervisores de tesis:

Dr. Nissim Illich Fraija Cabrera
Instituto de Astronomía, UNAM

Dra. María Magdalena González Sánchez
Instituto de Astronomía, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México

Enero de 2020

1. Datos del alumno	1. Datos del alumno
Apellido paterno	Galván
Apellido materno	Gámez
Nombre(s)	Edwin Antonio
Instituto de Astronomía	Instituto de Astronomía
Programa	Programa de posgrado en astrofísica
Número de cuenta	308082379
2. Datos del tutor 1	2. Datos del tutor 1
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Nissim Illich
Apellido paterno	Fraija
Apellido materno	Cabrera
3. Datos del tutor 2	3. Datos del tutor 2
Grado	Dra. en Ciencias.
Nombre(s)	María Magdalena
Apellido paterno	González
Apellido materno	Sánchez
4. Datos del sinodal 1	4. Datos del sinodal 1
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	William
Apellido paterno	Lee
Apellido materno	Alardín
5. Datos del sinodal 2	5. Datos del sinodal 2
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Diego
Apellido paterno	López Cámara
Apellido materno	Ramírez
6. Datos del sinodal 3	6. Datos del sinodal 3
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Ibrahim Daniel
Apellido paterno	Torres
Apellido materno	Aguilar
7. Datos del sinodal 4	7. Datos del sinodal 4
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Rodrigo
Apellido paterno	Sacahui
Apellido materno	Reyes
8. Datos del sinodal 5	8. Datos del sinodal 5
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Fabio
Apellido paterno	De Colle
9. Datos del trabajo escrito.	9. Datos del trabajo escrito
Título	Búsqueda de la contraparte electromagnética de ondas gravitacionales con el observatorio de rayos gamma HAWC
Subtítulo	
Número de páginas	101 pp
Año	2020

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi familia, David Leonardo, María Virginia y Julio Antonio. Gracias por su apoyo en este proceso de mi vida. A mis compañeros de posgrado por sus útiles discusiones en los cursos de la maestría, continuando con mis asesores Nissim Fraija y Magdalena González por sus consejos. Finalmente y no menos importante a mi comité sinodal, William Lee, Fabio de Colle, Diego López Cámara, Ibrahim Torrez y Rodrigo Sacahuí por sus comentarios para mejorar esta tesis. También me gustaría agradecer a mi comité tutorial, Edmundo Moreno, Alejandro Ruelas y Eric Vázquez por estar al pendiente de mi progreso y por sus comentarios siempre acertados a lo largo de la maestría.

Agradezco los recursos otorgados para la realización de la presente tesis de: Laboratorio Nacional HAWC de rayos gamma, DGAPA-UNAM PAPIIT proyectos no. AG100317, IA102019, IG101320, Red HAWC, Posgrado en Astrofísica del Instituto de Astronomía - UNAM y a la Colaboración del instrumento HAWC. Finalmente agradezco a Conacyt por brindarme la beca nacional con CVU 893937

Finalmente, quisiera agradecer a:

- Simone Dichiara
- Israel Martínez Castellanos
- José Andrés García González

Que me apoyaron significativamente para poder realizar este análisis.

Glosario

BATSE:	Burst and Transient Source Experiment
BBH:	Binary Black Hole
BNS:	Binary Neutron Star
Fermi-GBM:	Fermi Gamma Ray Burst Monitor
Fermi-LAT:	Fermi Large Area Telescope
GCN:	The Gamma-ray Coordinates Network
GraceDB:	Gravitational-wave candidate event database
H.E.S.S.:	High Energy Stereoscopic System
HAWC:	High Altitude Water Cherenkov
HETE:	High Energy Transient Explorer
MAGIC:	Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope
NSBH:	Neutron Star Black Hole
PMT:	Photomultiplier Tube
Swift-BAT:	Swift Burst Alert Telescope
Swift-UVOT:	Swift Ultraviolet/Optical Telescope
Swift-XRT:	Swift X-Ray Telescope
VLA:	Very Large Array

1 Índice general

2	1. Introducción	15
3	1.1. Modelo de la Fireball	21
4	1.2. Afterglow	23
5	1.2.1. Características básicas de la <i>fireball</i>	25
6	1.3. Radiación de Sincrotrón	28
7	1.3.1. Espectro de sincrotrón	28
8	1.4. Radiación de Compton Inversa	31
9	1.5. Progenitores	36
10	1.6. Observaciones de GRBs en el rango de los TeVs	37
11	2. Motivación Científica	43
12	2.1. Una ventana hacia la astrofísica	
13	multimensajera: GW 170817/GRB 170817A	43
14	2.2. HAWC	44
15	3. Búsqueda de contraparte SSC de destellos de rayos gamma	50
16	3.1. Análisis	50
17	3.2. Resultados y discusión del GRB 170817A	56
18	3.3. Resultados y discusión de GRBs similares al GRB 170817A . .	63
19	4. Conclusiones	73
20	A. Mapas de Significancia	76
21	B. Mapas de Significancia para GRBs similares al GRB 170817A	80
22	C. Conferencias nacionales e internacionales	90

23 Índice de figuras

24	1.1. Esquema que representa las contrapartes electromagnéticas	
25	producida por una fusión de objetos compactos en función	
26	del ángulo de visión del observador. La emisión del destello de	
27	rayos gamma sólo es detectada para observadores con un un	
28	ángulo de visión $\theta_{obs} \lesssim \theta_j$. Imagen tomada de Metzger and	
29	Berger (2012).	20
30	1.2. Los GRBs presentan una gran variabilidad entre ellos mismos,	
31	en la Figura se aprecian las curvas de luz de 12 GRBs detec-	
32	tados por el satélite BATSE. Imagen tomada de Ruffini et al.	
33	(2005)	22
34	1.3. Evolución del factor de Lorentz en la <i>fireball</i> . En ella se aprecia	
35	los lugares donde se producen las distintas emisiones de los	
36	GRBs; γ_{th} son los fotones térmicos de la fotosfera, γ los rayos	
37	gamma producidos por choques internos, finalmente, γ , X, O,R	
38	la radiación del <i>afterglow</i> producida por choques externos con	
39	el medio interestelar. Imagen tomada de Mészáros (2006).	24
40	1.4. <i>Afterglow</i> en el cercano infra rojo del GRB 050724 y de su	
41	galaxia anfitriona. Las imagenes fueron adquiridas a 0.49 días	
42	(izquierda) a 2.63 días (centro) y el mapa residual (derecho)	
43	en donde queda evidenciado la detección del <i>afterglow</i> . El re-	
44	cuadro pequeño del lado izquierdo muestra la detección del	
45	<i>afterglow</i> en rayos X detectado por Chandra (círculo) mien-	
46	tras que la elipse muestra la detección del <i>afterglow</i> en radio	
47	por el VLA. Imagen tomada de Berger et al. (2005).	25
48	1.5. Espectro de sincrotrón de un choque relativista con una po-	
49	blación de electrones descrita por una ley de potencias en los	
50	regímenes de <i>fast</i> y <i>slow cooling</i> respectivamente. Imagen to-	
51	mada de Sari et al. (1998).	32

52	1.6. Curva de luz del GRB 190114C. Los colores representan al	
53	experimento que le dió seguimiento a este destello. La línea	
54	vertical punteada en color gris representa el final de la fase	
55	temprana de la emisión. Imagen tomada de Acciari et al. (2019b).	38
56	1.7. Espectro energético del GRB 190114C en 5 intervalos de tiem-	
57	po. De 68-100 s en azul, de 110-180 s en amarillo, de 180-360	
58	s en rojo, de 360-625 s en verde y finalmente de 625-2,400 s	
59	en morado. Los cuadros grises exhiben los rangos energeticos	
60	en los que operan los telescopios que dieron seguimiento a este	
61	GRB. El segundo pico se aprecia desde unos 200 MeV hasta 1	
62	TeV. Imagen tomada de Acciari et al. (2019b).	39
63	1.8. En el panel superior se observa la curva de luz del GRB 180720B.	
64	Al igual que la Figura 1.6 cada uno de los colores representa	
65	los distintos observatorios que siguieron este destello. Notamos	
66	que el <i>afterglow</i> de este GRBs en rayos gamma de altas ener-	
67	gías (puntos rojos) se presenta una vez finalizada la emisión	
68	temprana. En el panel inferior, se muestra el comportamiento	
69	del índice de fotones a lo largo de la emisión. Imagen tomada	
70	de Abdalla et al. (2019).	41
71	1.9. Fotones con energías >100 MeV detectados por Fermi-LAT,	
72	asociados con una probabilidad >90 % al GRB 190114C. La	
73	línea roja representa la energía máxima que pueden alcanzar	
74	los fotones producidos por radiación de sincrotrón asumiendo	
75	un medio estratificado compuesto por un viento estelar y	
76	un medio constante, similar al medio circumestelar. La línea	
77	amarilla representa la transición del medio, mientras que la	
78	región morada indica la región donde MAGIC detectó los fo-	
79	tones provenientes de este GRB. Los círculos en color negro	
80	representan a los fotones que no pueden ser descritos por ra-	
81	diación de sincrotrón. Imagen tomada de Fraija et al. (2019e)	
82	42

83	2.1.	Proyección de la esfera celeste con la posición de la onda gravitacional. La región en verde claro, que consta de dos bandas elongadas que confinan la posición de la onda gravitacional detectada por LIGO. La región en verde es la región de detección por LIGO-Virgo. La banda azul clara es la región de error obtenida por IPN entre los tiempos de retraso de Fermi e Integral, mientras que la región en azul oscuro es la obtenida de Fermi-GBM. Los recuadros muestran la detección del evento transitorio en óptico claramente detectada a ~ 10 hrs. Posteriormente, a ~ 20 días el evento transitorio en óptico no están en los límites de detección. Imagen tomada de Abbott et al. (2017)	45
84			
85			
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			
93			
94			
95	2.2.	Línea de tiempo de las campañas de observaciones de la onda gravitacional GW 179817A. El panel está dividido en dos tipos de mensajeros. En la parte superior, ondas gravitacionales, en donde se aprecia la detección realizada por los observatorios LIGO-Virgo. Los renglones inferiores representan el espectro electromagnético en distintas bandas. En orden ascendente a descendente son; rayos gamma (lila), rayos X (en azul), ultra violeta (morado), óptico (verde), infrarojo (rojo) y finalmente radio (naranja), las detecciones están representadas con círculos, mientras que las barras representan límites superiores al flujo. Cada uno de los recuadros que sobre salen en la línea del tiempo representa la detección del evento (onda gravitacional/fotones) por algunos instrumentos. Imagen tomada de (Abbott et al., 2017).	46
96			
97			
98			
99			
100			
101			
102			
103			
104			
105			
106			
107			
108			
109	2.3.	Esquemas de HAWC. En el panel izquierdo se ilustra la distribución de los 300 <i>WCDs</i> embebido por los <i>outriggers</i> . En el panel derecho se esquematiza cada uno de los <i>WCDs</i> con la correspondiente distribución de los <i>PMTs</i> comparados con los <i>outriggers</i> , a escala humana. La línea roja representa la cascada producida por el rayo gamma entrando al tanque, mientras que los rayos verdes el paso del frente de la cascada, produciendo fotones Cherenkov en el tanque. La separación entre cada <i>WCD</i> es de 12 a 18 cm. Imagen tomada de Jardin-Blicq and Joshi (2017).	47
110			
111			
112			
113			
114			
115			
116			
117			
118			

119	3.1.	En el panel superior de HAWC se ilustra la posición del GRB	
120		170817A (punto rojo) en coordenadas galácticas. La región	
121		sombreada en azul representa el campo de visión donde HAWC	
122		presenta su sensibilidad óptima. En el panel inferior, se apre-	
123		cia el tránsito de la onda gravitacional respecto el ángulo ce-	
124		nitral de HAWC (línea roja). La línea vertical negra representa	
125		el momento en el que ocurrió el destello (T_0), mientras que	
126		la línea azul marino representa el momento en que el GRB	
127		170817A entró ($T_0 + 8$ horas) en el óptimo campo de visión	
128		de HAWC (región verde).	51
129	3.2.	Energías iniciales y finales del rango de energías que contri-	
130		buyen a la tendencia central de la prueba estadística de la	
131		búsqueda de una fuente puntual en función de la declinación.	
132		La contribución depende también del índice central del espec-	
133		tro, de este modo, cada color representa el rango de energía	
134		que representa para un índice espectral de $\alpha = 2.0$ (rojo), $\alpha =$	
135		2.5 (azul) y $\alpha = 3.0$ (verde). Imagen recreada de (Abeysekara	
136		et al., 2017c).	55
137	3.3.	Mapas de significancia centrado en la posición del GRB 170817A.	
138		En la fila superior se muestran los bins temporales $\mathbb{B} =$	
139		$1, 2, 3, 4$. En el siguiente renglón los bins $\mathbb{B} = 5, 6, 7, 8$ respec-	
140		tivamente, finalmente en el renglón inferior los bins $\mathbb{B} = 9, 10$.	
141		Para la definición de los días, véase la tabla 3.1. Todos los ma-	
142		pas están centrados en la posición del GRB 170817A.	57
143	3.4.	Mapas de significancia del. GRB 170817A. De izquierda a de-	
144		recha se muestran las ventanas de tiempo $\mathbb{B} = \{1, 2, \text{ y } 3\}$	
145		respectivamente. Los mapas se encuentran centrados en la po-	
146		sición de la onda gravitacional. Notamos que las observaciones	
147		son consistentes con fluctuaciones del <i>background</i>	58
148	3.5.	Sensibilidad quasi diferencial de HAWC para destellos de 1 se-	
149		gundo de duración cómo función del ángulo cenital (en colores	
150		se muestran las declinaciones de $50^\circ, 40^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$ y sobre	
151		el cenit de HAWC), definido como el flujo promedio en media	
152		década que pueda resultar en una detección de al menos 5σ .	
153		Figura recreada de (Martinez-Castellanos, 2019d)	61

154	3.6.	Curva de luz obtenida por la campañas de observación; en	
155		radio (color oro y rojo), óptico (cian) rayos X (azul marino) de	
156		GRB 170817A. En negro los límites derivados en este trabajo,	
157		en el panel izquierdo los obtenidos en la primera búsqueda,	
158		mientras que en el panel derecho, los obtenidos por la segunda	
159		búsqueda. La línea azul describe el flujo de rayos X, mientras	
160		que la línea negra es el flujo teórico producido por <i>SSC</i> . Datos	
161		tomados de (Troja et al., 2017).	62
162	3.7.	Localización de los GRBs propuestos por (von Kienlin et al.,	
163		2019). La región sombreada en azul representa el campo de	
164		visión óptimo de HAWC en coordenadas galácticas, mientras	
165		que la región en blanco representa el área donde HAWC no es	
166		sensible. El punto rojo representa el evento de la onda gravi-	
167		tacional GW 170817.	64
168	3.8.	Transito de los GRBs propuestos a ser similares al GRB 170817A	
169		al momento de su ocurrencia sobre el cielo de HAWC. La lí-	
170		nea punteada representa el t_0 , mientras que la franja verde	
171		representa el estado del detector. Una herramienta de verifi-	
172		cación independiente es la línea roja, que muestra el <i>rate</i> del	
173		experimento.	66
174	3.9.	Comparación de los límites superiores al flujo en el 95 % del	
175		intervalo de confianza de los GRBs estudiados en la tabla 3.3.	
176		Los límites en los GRBs 170111B y 180511A en líneas puntea-	
177		das son aquellos donde se asume un <i>redshift</i> de $z=0.3$, mientras	
178		que en línea sólida se asume un <i>redshift</i> similar al del GRB	
179		170817A.	70
180	3.10.	Mapas de significancia de los GRBs 150101B, 170111B y 180511A	
181		en orden descendiente partiendo desde el primer renglón. De	
182		izquierda a derecha se muestran las ventanas temporales, a 1,	
183		10 y 100 días respectivamente.	72
184	A.1.	Mapas de significancia en función de los bins de multiplicidad	
185		del GRB 170817A de la primer ventana temporal.	77
186	A.2.	Mapas de significancia en función de los bins de multiplicidad	
187		del GRB 170817A de la segunda ventana temporal.	78
188	A.3.	Mapas de significancia en función de los bins de multiplicidad	
189		del GRB 170817A de la tercera ventana temporal.	79

190	B.1. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
191	150101B para la primer ventana de tiempo.	81
192	B.2. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
193	150101B para la segunda ventana de tiempo.	82
194	B.3. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
195	150101B para la tercer ventana de tiempo.	83
196	B.4. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
197	170111B para la primer ventana de tiempo.	84
198	B.5. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
199	170111B para la segunda ventana de tiempo.	85
200	B.6. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
201	170111B para la tercer ventana de tiempo.	86
202	B.7. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
203	180511A para la primer ventana de tiempo.	87
204	B.8. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
205	180511A para la segunda ventana de tiempo.	88
206	B.9. Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB	
207	180511A para la tercer ventana de tiempo.	89

208 **Índice de cuadros**

209 1.1. Eventos detectados en las corridas O1 y O2 por los observa-
 210 torios LIGO-Virgo. Todos los eventos salvo el GW170817 son
 211 eventos producidos por agujeros negros. El evento GW170817
 212 es el único hasta el momento a la cual se ha logrado detección
 213 de radiación electromagnética, proveniente del GRB 170817A. 17
 214 1.2. Eventos detectados en las corridas O3 que involucran al me-
 215 nos una estrella de neutrones. La segunda columna muestra
 216 la probabilidad de que el evento sea producido por un siste-
 217 ma binario de estrella de neutrones (BNS) y de un sistema
 218 confirmado por una estrella de neutrones y un agujero negro
 219 (NSBH). La tercer columna muestra la cantidad de eventos
 220 similares esperados por año en LIGO-Virgo. La cuarta colum-
 221 na muestra el rango en que se detecto la onda gravitacional
 222 y finalmente la cuarta columna muestra la incertidumbre al
 223 90 % en la posición de la onda gravitacional. 19

224 3.1. Resultados del análisis sobre las distintas ventanas de tiempo
 225 seleccionadas para el seguimiento del GRB 170817A. 60
 226 3.2. Tabla de GRBs propuestos por (von Kienlin et al., 2019) . . . 68
 227 3.3. Resultado del análisis sobre los GRBs propuestos por (von
 228 Kienlin et al., 2019). Comparamos los límites obtenidos con el
 229 GRB 170817A. 69

230 Resumen

231 Los destellos de rayos gamma (GRBs) son emisiones transitorias de ra-
232 diación gamma que dura desde una milésima de segundo hasta miles de
233 segundos. Históricamente, estos eventos se han clasificado en base a su du-
234 ración; los destellos cortos, de hasta 2 segundos de duración y los destellos
235 largos, que duran hasta unos miles de segundos. La detección en longitudes
236 de onda de los rayos X, el óptico y el radio de la emisión tardía de los GRBs
237 ha permitido establecer algunas características de los GRBs, tales cómo la
238 distancia, galaxias anfitrionas, características del medio circundante, entre
239 otras. En todo caso la detección continua siendo debatida. Recientemente
240 se han detectado fotones de por encima de 100 GeVs de los destellos largos,
241 GRB 180720B, GRB 190114C y GRB 190829A por los observatorios Che-
242 renkov atmosféricos H.E.S.S. y MAGIC. Estos destellos son los primeros en
243 los cuales se han detectado fotones de estas energías.

244
245 Los mecanismos radiativos involucrados apuntan a ser radiación de sin-
246 crotrón la que produce los fotones de keV-MeV, mientras que la emisión de
247 fotones por encima de 100 GeVs es asociada a la radiación Compton auto-
248 inducida (SSC), producida por electrones energéticos interactuando con los
249 fotones producidos por radiación sincrotrón en el jet. Está radiación ha sido
250 detectada a ~ 10 hrs posteriores al destello en el GRB 180720B y ~ 100 s
251 después del destello en el caso del GRB 190114C. Esto indica que la radiación
252 Compton fue producida en la emisión tardía de cada destello.

253
254 En el escenario de los GRBs cortos, la detección del GRB 170817A aso-
255 ciado a la onda gravitacional GW 170817 por los observatorios LIGO-Virgo
256 lo convierte en la primera detección conjunta de esta naturaleza, permitiendo
257 confirmar al esquema de fusión de objetos compactos (ya sea un sistema bi-
258 nario de estrellas de neutrones o un sistema binario estrella de neutrones con

259 un agujero negro) como los progenitores de los GRBs cortos. Este destello
260 presentó un flujo creciente de la emisión tardía en rayos X, óptico y radio
261 hasta ~ 120 días después del destello.

262

263 HAWC es un observatorio de rayos gamma sensible desde los 300 GeV has-
264 ta los 100 TeVs con campo instantáneo del cielo de 2 sr y un ciclo útil $>95\%$
265 es ideal para poder seguir un evento de esta naturaleza. Suponiendo que los
266 fotones son radiados por la emisión de sincrotrón en el rango de energía de
267 los rayos X, estos sirven como fotones semilla para poder producir emisión
268 Compton autoinducida. Está emisión debería de seguir un comportamiento
269 similar al presentado en las otras longitudes de onda de baja energía. En este
270 trabajo se asume un flujo producido por SSC en el *afterglow* del GRB y se
271 establecen límites superiores al flujo de esta emisión en el rango de energía de
272 1 TeV a 100 TeVs. En este trabajo se proponen dos estrategias de búsqueda
273 de la contraparte electromagnética de la onda gravitacional GW 170817A en
274 el rango de energías de los TeVs con el observatorio de rayos gamma HAWC.
275 La primer estrategia se basa en ventanas de tiempo consecutivas del orden
276 de días, la cuál es sensible a un pico prominente en el flujo con duración de
277 días y la segunda estrategia, con ventanas de tiempo acumulativas logarítmi-
278 camente equiacumulativas, que es sensible a un flujo creciente en el orden de
279 meses. En ambas estrategias no se encontró evidencia de la señal electromag-
280 nética en el rango de energía de los TeVs y se derivaron limites superiores al
281 flujo de esta posible radiación.

282

283 Recientemente, se ha propuesto una muestra de 13 GRBs de 10 años de
284 datos de Fermi-GBM que tienen características observables similares al que
285 presentó el GRB 170817A. De estos 13 GRBs, 6 de estos destellos, incluidos
286 el GRB 170817A ocurrieron dentro del campo de visión de HAWC. Esto es
287 una ventaja para un observatorio como HAWC debido a que puede volver
288 a examinar esa posición en el cielo y buscar emisión en esa dirección. Por
289 cuestiones operacionales, se han descartado de esa muestra dos destellos, el
290 GRB 130502A y el GRB 140511A. Aplicando la estrategia de ventanas de
291 tiempo equiacumulativas logarítmicamente, se busco la emisión en el rango
292 de energía de TeVs de los destellos GRB 150101B, GRB 170111B y GRB
293 180511A. Las observaciones realizadas de estos destellos con HAWC mues-
294 tran que son consistentes con fluctuaciones del fondo. Para estos destellos
295 también se han derivado límites a la constante de normalización del flujo en
296 el rango de energía de TeVs.

297

298 A pesar de que el GRB 170817A ocurrió a una distancia de ~ 40 Mpc,
299 siendo uno de los más cercanos detectados hasta la fecha, fue un destello
300 poco luminoso y se presentó a una declinación de -23.4° con una posición
301 marginal para HAWC. De haber ocurrido con un mejor ángulo cenital so-
302 bre HAWC, este destello debió de haber sido detectado por HAWC, pues se
303 mejora su sensibilidad hasta dos ordenes de magnitud. En contraparte, los
304 destellos GRB 150101B y GRB 180511A los cuales ocurrieron con un buen
305 ángulo cenital sobre HAWC son desfavorecidos por su corrimiento al rojo, en
306 el caso del GRB 150101B presenta un corrimiento al rojo de $z = 0.134$ y para
307 el caso del GRB 180511A Fermi-GBM no emitió alguna circular de detección
308 y por lo tanto, no se tienen observaciones en otras longitudes de onda, así
309 que se asume un corrimiento al rojo de $z=0.008$ y de $z = 0.3$. El flujo produ-
310 cido por estos destellos se ve afectado por la absorción de luz extra galáctica
311 de fondo, la cual es atenuado exponencialmente. Este fenómeno complica la
312 detección de los GRBs a energías de TeV.

313

314 Esta es la primera vez que se busca emisión de GRBs que no son en
315 ventanas de tiempo múltiples del T_{90} y realizada en ventanas de tiempo del
316 orden de meses. La detección del GRB 170817A, así como la de los destellos
317 GRB 180720B, GRB 19010114C GRB 190829A replantea la búsqueda de
318 emisión tardía de los GRBs en el régimen de los rayos gammas de altas
319 energías.

320 Capítulo 1

321 Introducción

322 Los destellos de rayos gamma (GRBs) son emisiones transitorias de ra-
323 diación gamma que dura desde una milésima de segundo hasta miles de se-
324 gundos. Históricamente se han clasificado a los (GRBs) en base a su duración
325 en dos poblaciones, los GRBs cortos con una duración menor a dos segundos
326 y los GRBs largos, con una duración mayor a 2 segundos (Kouveliotou et al.,
327 1993). Estos eventos tienen dos períodos de emisión, la emisión temprana ó
328 radiación principal (*prompt emission*) y una emisión tardía (*afterglow*). La
329 *prompt emission* está caracterizada por un episodio de breves e intensos des-
330 tellos de rayos gamma, principalmente de energías de MeVs. Presenta una
331 variabilidad irregular (como la que se observa en la Figura 1.2) que pueden
332 durar desde unos milisegundos hasta centenas de segundos en los GRBs lar-
333 gos. Estos rayos gamma se producen en la región interna de un chorro (jet)
334 producido por un plasma colimado, el cuál es expulsado a velocidades ultra-
335 relativistas provenientes de una estrella de neutrones o de un agujero negro
336 que se origino a partir de la muerte de una estrella masiva. La etapa del *after-*
337 *glow* está caracterizada por una emisión que abarca un rango de longitudes
338 de onda más amplio y que decae gradualmente en períodos de tiempo más
339 grandes que el producido en la *prompt emission*. Está radiación se produce
340 debido a la interacción del jet con el medio circumestelar. La radiación de la
341 *prompt emission* es producida por choques internos en el jet, mientras que
342 el *afterglow* es producido por choques externos del jet con el medio ambiente.

343
344 La bimodalidad presente en la duración de los GRBs sugiere un proge-
345 nitor distinto para ambas clases de destellos. Debido a la corta duración
346 de los GRBs cortos, de hasta decenas de milisegundos, apuntan a sistemas

347 de objetos compactos con tiempo de escalas de milisegundos. El modelo de
348 progenitor preferido es la fusión (*merger*) de sistemas binarios de objetos
349 compactos, los cuales involucran a dos estrellas de neutrones (BNS) o una
350 estrella de neutrones y un agujero negro (SNBH) (Eichler et al., 1989; Na-
351 rayan et al., 1992). La fusión se origina debido a la pérdida de energía y
352 momento angular. Dicha energía es emitida en ondas gravitacionales.

353

354 La detección conjunta de ondas gravitacionales y de destellos de rayos
355 gamma, tanto de la *prompt emission* y del *afterglow* es relevante en varios
356 aspectos, principalmente porque confirma al esquema de fusión de objetos
357 compactos como progenitor de GRBs cortos. Está radiación producida por
358 los GRBs tiene como firma una señal que puede ser detectada por la red
359 avanzada de detectores de ondas gravitacionales LIGO¹ y Virgo² (Fairhurst,
360 2011). Esta red tiene una región de localización de ondas gravitacionales de
361 $\sim 100 \text{ deg}^2$ (Berger, 2014), el cual representa un reto para buscar una con-
362 traparte electromagnética proveniente de una onda gravitacional. Hasta el
363 momento, LIGO-Virgo han realizado 3 campañas de observación, denomina-
364 das O1, O2 y O3. La corrida O1 se realizó del 12 de septiembre de 2015 al
365 19 de enero de 2016, mientras que la segunda corrida O2 se realizó del 30 no-
366 viembre de 2016 al 25 de Agosto de 2017 (Abbott et al., 2019), actualmente
367 se realiza la corrida O3 que inició el 1 de abril de 2019 y se espera que finalizó
368 el 30 de abril de 2020³. De las corridas O1 y O2 se detectaron 11 eventos. En
369 la corrida O2 se ha detectado la única señal detectada de manera conjunta de
370 una onda gravitacional detectada por una fusión de estrellas de neutrones y
371 de la detección de un GRB, la onda gravitacional GW 170817A. Parámetros
372 cómo la masa de cada uno de las componentes en esos sistemas, la distancia
373 a la cuál ocurrió la onda gravitacional y la región del 90 % de incertidumbre
374 en el cielo (Abbott et al., 2019) se presentan en la tabla 1.1. Posteriormente,
375 en la corrida O3 se han emitido 60 alertas en el portal GraceDB⁴ con pro-
376 babilidades de ocurrencia menores a 1 por año. De esas alertas, sólo 42 han
377 sido confirmadas como eventos reales.

378

379 La tabla 1.2 muestra los eventos que involucran al menos una estrella
380 de neutrones en el sistema que produjo la onda gravitacional. Estos even-

¹<https://www.ligo.caltech.edu/>

²<http://www.virgo-gw.eu/>

³<https://www.ligo.org/scientists/GWEMalerts.php>

⁴<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3/>

Evento	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	d_L/Mpc	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.7}_{-3.1}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	440^{+150}_{-170}	182
GW151012	$23.2^{+14.9}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	1080^{+550}_{-490}	1523
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.5}$	450^{+180}_{-190}	1033
GW170104	$30.8^{+7.3}_{-5.6}$	$20.0^{+4.9}_{-4.6}$	990^{+440}_{-430}	921
GW170608	$11.0^{+5.5}_{-1.7}$	$7.6^{+1.4}_{-2.2}$	320^{+120}_{-110}	392
GW170729	$50.2^{+16.2}_{-10.2}$	$34.0^{+9.1}_{-10.1}$	2840^{+1400}_{-1360}	1041
GW170809	$35.0^{+8.3}_{-5.9}$	$23.8^{+5.1}_{-5.2}$	1030^{+320}_{-390}	308
GW170814	$30.6^{+5.6}_{-3.0}$	$25.2^{+2.8}_{-4.0}$	600^{+150}_{-220}	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	40^{+7}_{-15}	16
GW170818	$36.4^{+7.5}_{-4.7}$	$26.7^{+4.3}_{-5.2}$	1060^{+420}_{-380}	39
GW170823	$39.5^{+11.2}_{-6.7}$	$29.0^{+6.7}_{-7.8}$	1940^{+970}_{-900}	1666

Tabla 1.1: Eventos detectados en las corridas O1 y O2 por los observatorios LIGO-Virgo. Todos los eventos salvo el GW170817 son eventos producidos por agujeros negros. El evento GW170817 es el único hasta el momento a la cual se ha logrado detección de radiación electromagnética, proveniente del GRB 170817A.

381 tos son 12 de los 42 eventos detectados en total y en ninguno de los casos se
 382 ha encontrado contraparte electromagnética (e.g. Schoorlemmer, 2019b; Aya-
 383 la, 2019; Schoorlemmer, 2019a; Martinez-Castellanos, 2019a; Galván, 2019a;
 384 Martinez-Castellanos, 2019b; Galván, 2019b; Martinez-Castellanos, 2019c;
 385 Galván, 2019c). Las distancias reportadas en la columna 4 de la tabla 1.2
 386 son consistentes con la sensibilidad esperada por LIGO-Virgo para detectar
 387 ondas gravitacionales producida por BNS (Abbott et al., 2019). Finalmente
 388 la quinta columna, muestra que las regiones de error son aún un desafío para
 389 poder encontrar la contraparte electromagnética en regiones tan grandes del
 390 cielo.

391

392 Lograr la detección de la contraparte electromagnética proveniente de las
 393 ondas gravitacionales tiene fuertes consecuencias. Más allá de probar el es-
 394 cenario de objetos compactos como progenitores de GRBs cortos, también
 395 proporciona información exacta del lugar de la fusión, una asociación con la
 396 galaxia anfitriona, y ayuda a estimar la distribución de escalas de tiempo de
 397 las fusiones. Además también da información del comportamiento del ma-
 398 terial post fusión, del disco de acreción, del jet y del material eyectado de
 399 manera dinámica o influenciada por vientos. En la Figura 1.1 se aprecia un
 400 esquema que ilustra las contrapartes electromagnéticas de un sistema bina-
 401 rio de objetos compactos como función del ángulo de visión del observador
 402 θ_{obs} . Un disco de acreción (en color azul) produce un jet relativista, el cuál
 403 esta colimado. Este jet produce un GRB corto. Debido a que la emisión es
 404 relativista, la radiación en rayos gamma está restringida a observadores con
 405 un ángulo de visión $\theta_{obs} \lesssim \theta_j$. La emisión del *afterglow* es producida por la
 406 interacción del material del jet con el medio circunestelar, en color rosa. La
 407 emisión en la banda del óptico es detectada por observadores con un ángulo
 408 de observación $\theta_{obs} \lesssim 2\theta_j$. La emisión en radio se observa en todos los án-
 409 gulos de observación una vez que el jet relativista desacelera a velocidades
 410 medianamente relativista, en escalas de tiempo de meses a años. La emisión
 411 isótropica en óptico/cercano al infra-rojo de la kilonova resultante (en color
 412 amarillo) puede acompañar la fusión, alimentada por el decaimiento radiacti-
 413 vo del proceso r de elementos sintetizados en el material eyectado. En Berger
 414 (2014) se estima que para un GRB corto en la línea de visión del observador,
 415 se espera un flujo en rayos X de $F_X \sim 5 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con un brillo en
 416 la banda R del óptico $R \sim 20 \text{ mag}$ puede ser detectado, por los instrumentos
 417 actuales. Sin embargo, resulta complicado escanear de manera efectiva esa

Evento	Sistema	FAR/años	d_L /Mpc	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
S190425z	BNS (>99 %)	$1/6.98 \times 10^{04}$	156 ± 41	7461
S190426c	BNS (49 %)	$1/1.62 \times 10^{00}$	377 ± 100	1131
S190510g	BNS (42 %)	$1/3.58 \times 10^{00}$	227 ± 92	1166
S190718y	BNS (2 %)	$1/1.15 \times 10^{00}$	227 ± 165	7246
S190814bv	NSBH (>99 %)	$1/1.55 \times 10^{25}$	267 ± 52	23
S190901ap	BNS (86 %)	$1/4.50 \times 10^{00}$	241 ± 79	14753
S190910d	NSBH (98 %)	$1/8.52 \times 10^{00}$	632 ± 186	2482
S190910h	BNS (61 %)	$1/1.13 \times 10^{00}$	230 ± 88	24264
S190923y	NSBH (68 %)	$1/1.50 \times 10^{00}$	438 ± 133	2104
S190930t	NSBH (74 %)	$1/2.05 \times 10^{00}$	108 ± 38	24220
S191205ah	NSBH (93 %)	$1/2.53 \times 10^{00}$	385 ± 164	6378
S191213g	BNS (77 %)	$1/1.11 \times 10^{00}$	201 ± 81	4480

Tabla 1.2: Eventos detectados en las corridas O3 que involucran al menos una estrella de neutrones. La segunda columna muestra la probabilidad de que el evento sea producido por un sistema binario de estrella de neutrones (BNS) y de un sistema confirmado por una estrella de neutrones y un agujero negro (NSBH). La tercer columna muestra la cantidad de eventos similares esperados por año en LIGO-Virgo. La cuarta columna muestra el rango en que se detecto la onda gravitacional y finalmente la cuarta columna muestra la incertidumbre al 90 % en la posición de la onda gravitacional.

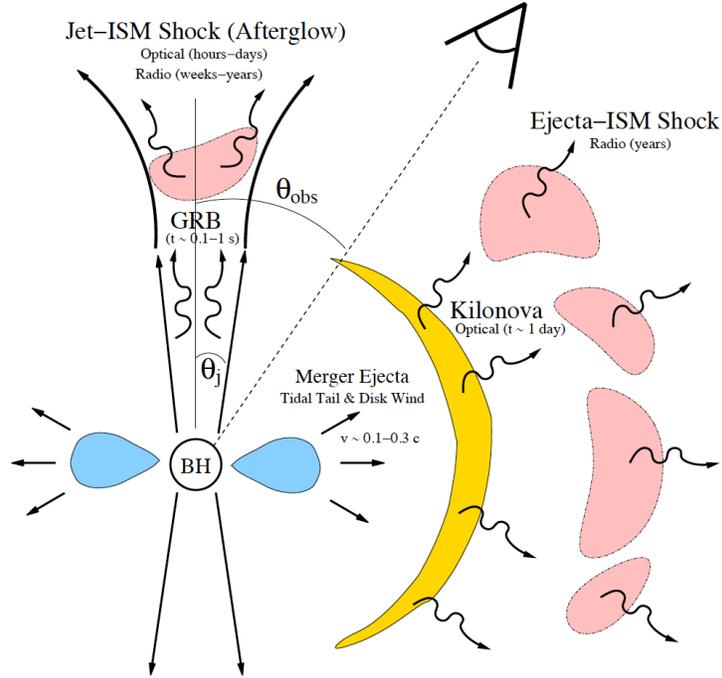


Figura 1.1: Esquema que representa las contrapartes electromagnéticas producida por una fusión de objetos compactos en función del ángulo de visión del observador. La emisión del destello de rayos gamma sólo es detectada para observadores con un un ángulo de visión $\theta_{obs} \lesssim \theta_j$. Imagen tomada de Metzger and Berger (2012).

418 cantidad de región del cielo por *Swift-XRT*⁵ que tiene un campo de visión
 419 (*FOV*) de 0.25 deg^2 (Burrows et al., 2000). Finalmente en Metzger and Ber-
 420 ger (2012) calculan la tasa de eventos que se espera de este tipo, utilizando la
 421 distribución de *redshift* de GRBs cortos y extrapolando para un corrimiento
 422 al rojo de $z \lesssim 0.1$. Dichos autores asumen un *FOV* de *Swift-BAT*⁶ y estiman
 423 una tasa de 0.3 cada año.

424

425 Los GRBs cortos se distribuyen dentro de un rango de corrimiento al rojo
 426 de z de 0.1 - 1.5 en donde la distribución de corrimiento al rojo parece estar
 427 afectada por la sensibilidad de *Swift-BAT* (Berger, 2014). La detección de

⁵https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/xrt_desc.html

⁶https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/bat_desc.html

428 GRBs cortos a corrimientos al rojo $z \lesssim 0.5$ en donde es sensible la detección
429 de supernovas ha exhibido la falta de asociación a supernovas. La mayoría de
430 estos límites son para GRBs cortos en galaxias con formación estelar. Esto
431 sugiere que estos ambientes no son asociados con estrellas masivas. Debido
432 a que los GRBs ocurren tanto en galaxias tempranas y tardías, donde apro-
433 ximadamente el 20 % de la muestra son provenientes de galaxias tempranas
434 (Berger, 2014) indica que la tasa de GRBs está influenciada tanto de la masa
435 estelar y del la actividad de formación estelar.

436

437 1.1. Modelo de la Fireball

438 Partamos del observable más característico de los GRBs, la variabilidad
439 que presenta la curva de luz. La variabilidad puede ir del orden de microse-
440 gundos a segundos (véase Figura 1.2). Podemos acotar el radio de la región
441 de emisión de la radiación que observamos considerando esa variabilidad. Si
442 $\Delta t \sim 1$ ms, de esta manera, si consideramos Δt la diferencia de tiempo entre
443 la emisión más lejana y la más cercana al observador podemos calcular el
444 tamaño de la región de emisión; $c\Delta t < R_{emi} \approx 3 \times 10^2$ km, donde c es la ve-
445 locidad de la luz en el vacío y R_{emi} es el radio de la región donde se emite la
446 radiación. Además, en base a la detección del *afterglow* (sección 1.2) podemos
447 estimar la energía isotrópica⁷, $E_{iso} = 10^{48-53}$ erg. Entonces, cualquier modelo
448 que busque describir la naturaleza de los GRBs debe de ser capaz de predi-
449 cir la liberación de esa cantidad de energía en un pequeño intervalo de tiempo.

450

451 El modelo de la *fireball* fue introducido por primera vez en 1978 (Cavallo
452 and Rees, 1978). En este modelo se establecen restricciones en la luminosi-
453 dad, escalas de tiempo, espectros, etc. El modelo de la *fireball* es un plasma
454 muy caliente conformado de e^- , e^+ , rayos γ y bariones (Protones y neutro-
455 nes). Esto tiene entre muchas cosas, inconvenientes en el sentido de que la
456 creación de pares es eficiente, del tal forma que la opacidad de fotones a ~ 1
457 MeV es muy alta, contraponiéndose a observaciones que muestran este flujo
458 (Matz et al., 1985) en el que se evidencia que la creación de pares no debería
459 de ser tan efectiva.

460

⁷La energía isotrópica es la energía que el observador percibe asumiendo una emisión isotrópica.

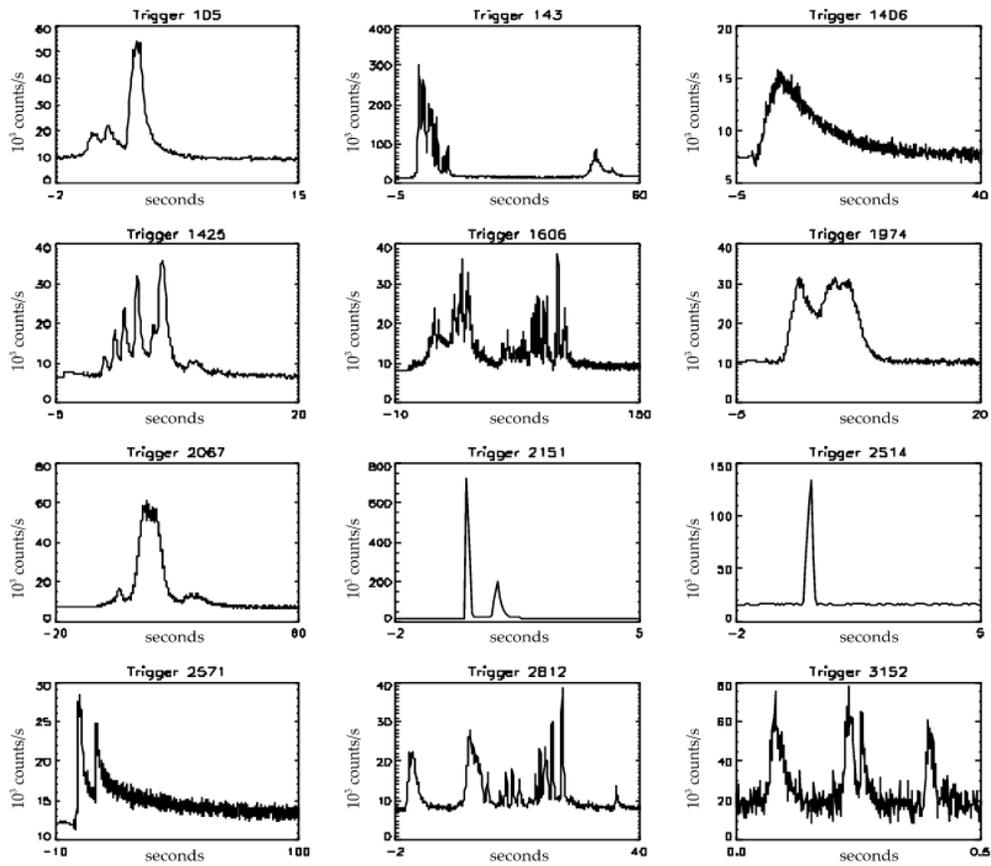


Figura 1.2: Los GRBs presentan una gran variabilidad entre ellos mismos, en la Figura se aprecian las curvas de luz de 12 GRBs detectados por el satélite BATSE. Imagen tomada de Ruffini et al. (2005)

461 Este argumento no es del todo válido para un escenario cosmológico, lo
462 que nos permite tener *fireballs* que son opacas. Se esperan que las *fireballs* se
463 expandan relativísticamente (Goodman, 1986; Paczynski, 1986), esto genera
464 que la radiación se vea desplazada al azul, de tal manera, que fotones de
465 rayos X se verían como fotones de rayos gamma en el marco del observador.
466 La expansión relativista permite suprimir la producción de pares mediante
467 el factor de Lorentz (Γ). El espectro de fotones está modelado por una ley de
468 potencias $dN/dE \propto E^{-\alpha}$ con un valor típico para $\alpha \sim 2$. Para valores típi-
469 cos de $\Gamma \sim 100$ la fuente comienza a ser ópticamente delgada (Lithwick and
470 Sari, 2001; Piran, 1999). Así, asumiendo estos valores del factor de Lorentz y
471 suponiendo un GRB corto, la distancia de la región de emisión al progenitor
472 sería de $R_{emi} \approx 6 \times 10^{14}$ cm.

473

474 1.2. Afterglow

475 El satélite Swift (Gehrels et al., 2005) equipado con los instrumentos BAT
476 (del inglés *Burst Alert Telescope*), XRT (del inglés *X-Ray Telescope*) y UVOT
477 (del inglés *Ultraviolet/Optical Telescope*) junto con el satélite HETE-2 (Ric-
478 ker et al., 2003) detectaron el *afterglow* en rayos X del GRB 050509b dentro
479 de una ventana espacial de $9''$. Observaciones en un campo más profundo en
480 la banda del óptico no revelaron emisión de *afterglow* en óptico, en cambio
481 encontraron una galaxia elíptica masiva a $z=0.225$ cerca de la región de error
482 de la emisión en rayos X y radio con una probabilidad de 10^{-3} de estar aso-
483 ciados la emisión en *afterglow* con esta galaxia (Berger, 2014). En la Figura
484 1.4 se aprecia la banda K (cercano infrarrojo) del GRB 050709 superpuestos
485 con la región de error del *afterglow* en rayos X y en radio. Este GRB no
486 presentó una remanente de supernova asociada, lo cuál también dividía en 2
487 tipos los posibles progenitores de los GRBs como veremos en la sección 1.5.

488

489 La detección de los *afterglows* permitió demostrar que la energía y la
490 escala de densidad para GRBs cortos es más pequeña que para los GRBs
491 largos (Berger et al., 2005), que los GRBs suceden a distancias cosmológicas,
492 que su emisión del *afteglow* son similares, pero más débil en los cortos y
493 la ausencia de una supernova sugiere progenitores distintos. En la siguiente
494 década, Swift junto con otros observatorios en rayos gamma identificó ~ 70
495 GRBs cortos con una contraparte en rayos X, óptico y en menor medida en

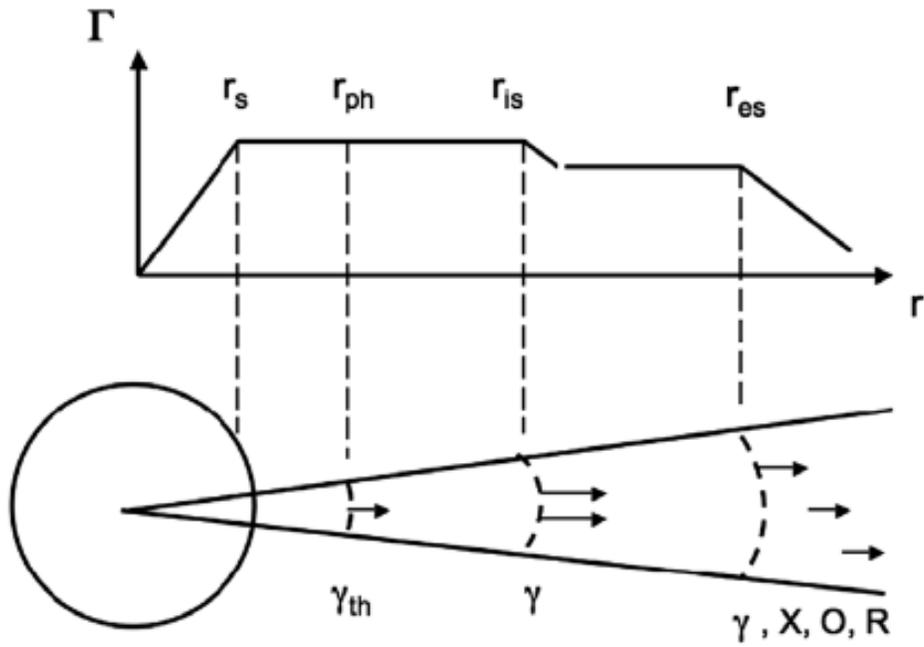


Figura 1.3: Evolución del factor de Lorentz en la *fireball*. En ella se aprecia los lugares donde se producen las distintas emisiones de los GRBs; γ_{th} son los fotones térmicos de la fotosfera, γ los rayos gamma producidos por choques internos, finalmente, γ, X, O, R la radiación del *afterglow* producida por choques externos con el medio interestelar. Imagen tomada de Mészáros (2006).

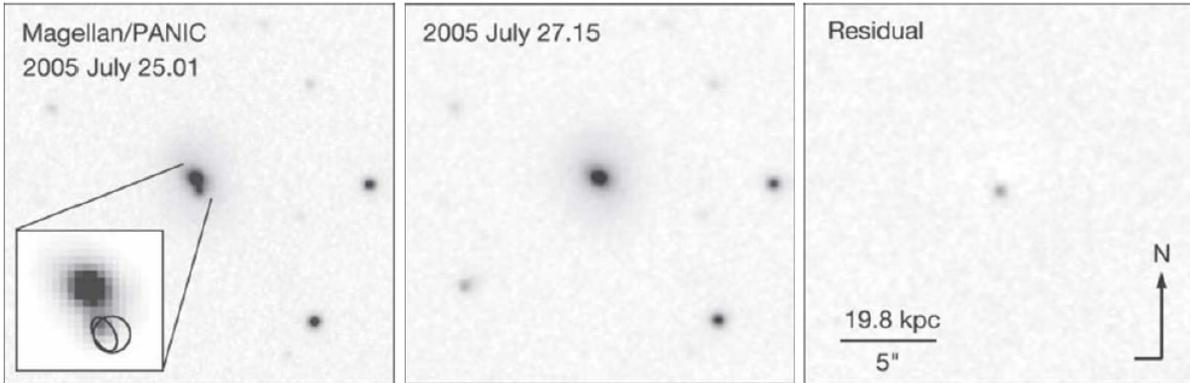


Figura 1.4: *Afterglow* en el cercano infra rojo del GRB 050724 y de su galaxia anfitriona. Las imagenes fueron adquiridas a 0.49 días (izquierda) a 2.63 días (centro) y el mapa residual (derecho) en donde queda evidenciado la detección del *afterglow*. El recuadro pequeño del lado izquierdo muestra la detección del *afterglow* en rayos X detectado por Chandra (círculo) mientras que la elipse muestra la detección del *afterglow* en radio por el VLA. Imagen tomada de Berger et al. (2005).

496 radio (Berger, 2014; Ricker et al., 2003).

497 1.2.1. Características básicas de la *fireball*

498 A continuación veremos algunas de las características básicas en el mode-
 499 lo de la *fireball*. Partimos primero con la energía característica de la *fireball*
 500 E_0 . A partir de ella, definimos como la tasa de energía a masa $\eta = E_0/M_0c^2$
 501 donde M_0 es la carga bariónica, además, $M_0 \ll E_0/c^2$. La *fireball* tiene un
 502 radio inicial R_{ini} en donde las partículas tiene un factor de Lorentz $\Gamma = 1$.

503

504 * Al inicio la fireball es ópticamente opaca y se expande radialmente con
 505 una súper luminosidad de Eddington y la energía interna sólo puede
 506 ser transformada en energía cinética del plasma.

507 * En la fase de aceleración comienza expandiéndose y los vectores veloci-
 508 dad de las partículas quedan confinadas dentro de un ángulo cada vez
 509 más pequeño a lo largo de la dirección radial. Mientras que la velocidad

510 de dispersión continua isotrópica en el marco de referencia comóvil. La
 511 temperatura en el marco de reposo T' (El sistema primado corresponde
 512 al sistema de reposo) y el factor de Lorentz Γ podemos obtenerlas de
 513 la siguiente manera;

- 514 - Considerando una expansión adiabática, entonces, $T'V'^{(\gamma-1)} = \text{cte}$
 515 es una relación que se cumple. Además $V' \propto R^3$ (con R el radio de
 516 la *fireball*). Asumiendo un índice adiabático $\gamma_{adi} = 4/3$, entonces;
 517 $T' \propto R^{-1}$.
- 518 - La energía total, que son las contribuciones de la energía cinética
 519 y la energía interna está expresada como $E_0 = \Gamma M_0 (kT'/m_p + c^2)$
 520 donde k es la constante de Boltzmann. Debido a que nos encon-
 521 tramos en un escenario relativista, entonces, el primer término es
 522 dominante, podemos asumir $E_0 \propto \Gamma T'$. Debido a que la energía
 523 total es constante, entonces, $T' \propto \Gamma^{-1}$. De la expresión del inciso
 524 anterior se concluye $R \propto \Gamma$.

525 De este último punto podemos observar que el factor de Lorentz del
 526 plasma aumenta linealmente conforme el radio de la *fireball* hasta que
 527 se alcanza el radio de saturación R_{sat} , donde; $R_{sat} \propto \Gamma_{max} R_{ini}$. En esta
 528 etapa se transforma adiabáticamente la energía térmica de la *fireball* en
 529 energía cinética. En la Figura 1.3 R_{sat} corresponde al radio r_s y ocurre
 530 en el rango entre 10^9 y 10^{10} cm.

531 La *fireball* en expansión relativista tiene pares e^\pm en equilibrio de tal
 532 manera que domina la opacidad provocando una alta profundidad óptica,
 533 sin embargo a la distancia R_{sat} , los pares salen del equilibrio y comienzan a
 534 recombinarse debajo de la temperatura comóvil $T' \sim 17$ keV. De lo anterior
 535 se condujo a;

- 536 ■ El espectro de fotones producido es térmico, a diferencia del espectro
 537 no térmico observado en los GRBs.
- 538 ■ La escala de tiempo en la que los fotones escapan son comparables en
 539 la duración a la cual el flujo se vuelve ópticamente delgado (cuestión de
 540 mili segundos), que es demasiado corto para la mayoría de los GRBs.

541 Para solucionar esto, se propuso una nueva versión de la *fireball*; una
 542 *fireball* con choques externos (Rees and Meszaros, 1992) que admite la po-
 543 sibilidad de choques internos que puede disipar una fracción substancial de

544 la energía cinética antes de interactuar con el medio ambiente (Rees and
545 Meszaros, 1994). Se propone una pequeña contaminación bariónica (10^{-7} -
546 $10^{-5} M_{\odot}$) para solucionar los dos problemas antes mencionados.

547 ✓ La interacción de los bariónes con el medio circundante, durante los
548 choques relativistas permiten producir la suficiente energía a la *fireball*
549 para poder radiar un espectro no térmico.

550 ✓ A una temperatura de cuerpo negro de algunos MeVs, la recombinación
551 de pares comienza a un radio menor al radio de saturación R_{sat} . En este
552 momento, la profundidad óptica baja, pero aún no es menor de 1 y la
553 radiación no puede escapar. Se define el radio de la fotosfera R_{ph} aquel
554 cuando la profundidad óptica llega a ser la unidad $\tau = 1$, y la radiación
555 logra escapar.

556 Estos modelos están basados en que el material eyectado (*outflow*) ultra
557 relativista es capaz de producir ondas de choques, de tal modo, que si estas
558 ondas de choques suceden poco después de que la *fireball* se convierte en óp-
559 ticamente delgada entonces, estas ondas de choques son capaces de convertir
560 la energía cinética del plasma en energía interna de las partículas y de los
561 fotones. De manera directa esto nos impone la necesidad de contar con un
562 gran número de partículas, especialmente electrones, los cuáles serán acele-
563 rados en las ondas de choques. Los electrones radian a través de sincrotrón
564 (véase sección 1.3) o mediante, radiación sincrotrón auto-Compton (*SSC*)
565 (abordado en la sección 1.4) dando el lugar al espectro no térmico observado
566 en los GRBs (Frajia et al., 2017b,a).

567
568 Estas ondas de choques están divididas en 2 tipos, los choques exter-
569 nos que interactúan con el medio externo circundante a la fuente, los cuales
570 explican la radiación detectada en el *afterglow* (véase 1.2) en las distintas
571 longitudes de onda. Producen ondas de choques reversos (*reverse shocks*)
572 que atraviesan el material eyectado. El otro tipo de choques son los choques
573 internos, los cuales son el resultado del plasma interactuando consigo mismo.
574 El escenario de choques internos - externos no tiene ninguna dependencia
575 con el origen del motor central (Frajia et al., 2016a,b).

576 1.3. Radiación de Sincrotrón

577 Son tres los parámetros fundamentales para la caracterización de la emi-
 578 sión de sincrotrón; γ_e el factor de Lorentz de los electrones, B la intensidad
 579 del campo magnético y el factor de Lorentz del material eyectado. Tomando
 580 en consideración el hecho de que los fotones observados en el marco de re-
 581 ferencia del observador están recorridos a frecuencias más cortas por efectos
 582 relativistas, la frecuencia de sincrotrón ν_c en el marco del observador es;

$$\nu_c(\gamma_e) = \frac{q_e B \gamma_e^2 \Gamma}{2\pi m_e c}, \quad (1.1)$$

583 donde q_e y m_e son la carga y la masa del electrón, respectivamente. De la
 584 misma manera, la potencia emitida en un fluido en el marco de referencia co-
 585 móvil por un electrón es; $P'_{sin} = (4/3)\sigma_T c U_B \gamma_e^2$, y en el marco del observador
 586 es $P_{sin} = \Gamma P'_{sin}$. En ambas ecuaciones, $U_B = B^2/8\pi$ es la densidad de campo
 587 magnético y σ_T es la sección eficaz de Thompson.

588
 589 Podemos estimar el tiempo de enfriamiento del electrón en el marco de
 590 referencia en comovimiento del flujo es $t' = \gamma_e m_e c^2 / P'_{sin}$ y además $t \sim \Gamma^{-1} t'$
 591 en el marco de referencia del observador. Entonces, el tiempo de enfriamiento
 592 de sincrotrón es;

$$t_{sin}(\gamma_e) = \left(\frac{3m_e c}{4\sigma_t U_B \gamma_e} \right) \frac{1}{\Gamma}, \quad (1.2)$$

593 de este modo se cumple que $t_{sin}(\gamma_e) \propto \gamma_e^{-1} \Gamma^{-1}$. Reemplazando en la ecuación
 594 1.1 podemos definir a γ_e en función de la frecuencia del electrón en el marco
 595 del observador;

$$t_{sin}(\nu) = \frac{3}{\sigma_T} \sqrt{\frac{2\pi m_e c q_e}{B^3 \Gamma}} \nu^{-1/2} \propto \Gamma^{-1/2} \nu^{-1/2}. \quad (1.3)$$

596 El tiempo de enfriamiento depende de la frecuencia ν del fotón, pero no
 597 depende de la energía del electrón γ_e . Sí los electrones con energía γ_e son
 598 capaces de producir fotones de energía $h\nu$, t_{sin} es una cota inferior a la escala
 599 de tiempo de la variabilidad de los GRBs, debido a que el destello no puede
 600 tener picos que sean más cortos que su tiempo de enfriamiento (Piran, 2004).

601 1.3.1. Espectro de sincrotrón

602 Buscando estudiar en general el espectro de sincrotrón producido por
 603 una población de electrones, se asume que presentan un espectro no térmico

604 descrito por un ley de potencias con índice espectral $p \geq 2$ (Sari et al., 1998).
 605 Para electrones con factores de Lorentz mayores a γ_m , esto es;

$$N(\gamma_e) \sim \gamma_e^{-p} \text{ si } \gamma_e > \gamma_m, \quad (1.4)$$

606 de donde $\langle \gamma_e \rangle \propto \gamma_m$.

607

608 Debido a que la mayor parte de los electrones tienen una energía cerca-
 609 na a $E_{min} = \gamma_m m_e c^2$ podemos considerarla como la energía característica
 610 de la población de electrones. De la misma manera, γ_m caracteriza al fac-
 611 tor de Lorentz típico que corresponde a la frecuencia de sincrotrón típica
 612 $\nu_m = \nu_{sin}(\gamma_m)$.

613

614 Debido a que los electrones son acelerados detrás de un choque que se
 615 está propagando a través de un medio frío y uniforme con una densidad n ,
 616 la densidad de partículas y la densidad de energía detrás del choque están
 617 dadas por $4\Gamma n$ y $4\Gamma^2 n m_p c^2$, respectivamente, donde m_p es la masa del protón
 618 (Blandford and McKee, 1976).

619

620 En Sari et al. (1998), los autores muestran que, asumiendo que una frac-
 621 ción constante ε_e de la energía del choque se transfiere a los electrones;

622

$$\gamma_m = \varepsilon_e \left(\frac{p-2}{p-1} \right) \left(\frac{m_p}{m_e} \right) \Gamma. \quad (1.5)$$

623 También se asume que la densidad energética de campo magnético detrás
 624 del choque es una fracción constante ε_B de la energía del choque, entonces el
 625 campo magnético está dado por;

$$B = (32\pi m_p \varepsilon_B n)^{1/2} \Gamma c. \quad (1.6)$$

626 El cálculo de la potencia de sincrotrón P_{sin} asume que los electrones no
 627 pierden una cantidad significativa de su factor de Lorentz mientras radian.
 628 Esto es; si $\gamma_e < \gamma_c$ siendo un valor crítico de la energía, expresado como;

$$\gamma_c = \left(\frac{6\pi m_e c}{\sigma_T \Gamma B^2 t} \right). \quad (1.7)$$

629 Esto quiere decir que un electrón con factor de Lorentz $\gamma_e > \gamma_c$ se enfriará a γ_c
 630 en un tiempo t . A medida de que los electrones se van enfriando, la frecuencia

631 de emisión de sincrotrón varia como γ_e^2 , mientras que la energía del electrón
 632 varia como γ_e , de este modo la potencia espectral; $P_\nu \sim P(\gamma_e)/\nu(\gamma_e) \sim \nu^{-1/2}$
 633 en el intervalo de frecuencias $\nu(\gamma_c) < \nu < \nu(\gamma_e)$.

634

635 El espectro total de radiación de sincrotrón del electrón consiste en tres
 636 segmentos (Sari et al., 1998)

637 ■ El rango de bajas energías del espectro de fotones es $F_\nu \propto \nu^{1/3}$. Esta es
 638 una característica del espectro de sincrotrón (Meszaros and Rees, 1993;
 639 Katz, 1994) independientemente de la forma de la distribución de los
 640 electrones.

641 ■ Por otro lado, los electrones más energéticos se enfrían de manera más
 642 rápida y emiten prácticamente toda su energía $\gamma_e m_e c^2$ a su frecuencias
 643 de sincrotrón. El número de electrones con está energía va como γ_e^{-p+1}
 644 mientras que la energía es proporcional a γ_e^{-p+2} (Vedrenne and Atteia,
 645 2009). Mientras que la energía depositada en el rango de frecuencias
 646 $\sim \nu_{sin}(\gamma_e) \propto \gamma_e^2$, el flujo queda determinado como $F_\nu \propto \gamma_e^{-2} \propto \nu^{-p/2}$.
 647 Entonces, la parte de más altas energías del espectro de sincrotrón tiene
 648 una dependencia con índice espectral de la población de electrones.

649 ■ Ahora, en el rango intermedio, el espectro varía dependiendo del régi-
 650 men de enfriamiento. Se define el régimen de enfriamiento rápido (*fast*
 651 *cooling*) si se cumple la condición $\gamma_m > \gamma_c$ y el escenario de enfriamien-
 652 to lento (*slow cooling*) cuándo se cumple la condición $\gamma_c > \gamma_m$ (Sari
 653 et al., 1998).

654 En el caso del enfriamiento rápido, los electrones se enfrían a γ_c y la
 655 potencia espectral a ν_c es $\sim N_e P_{\nu,max}$ donde $N_e = 4\pi R^3 n/3$ es el número
 656 de electrones barridos en el flujo después del choque. En este caso el flujo
 657 observado F_ν está dado por;

$$F_\nu = \begin{cases} (\nu/\nu_c)^{1/3} F_{\nu,max} & \nu_c > \nu, \\ (\nu/\nu_c)^{-1/2} F_{\nu,max} & \nu_m > \nu > \nu_c, \\ (\nu_m/\nu_c)^{-1/2} (\nu/\nu_m)^{-p/2} F_{\nu,max} & \nu_c > \nu, \end{cases} \quad (1.8)$$

658 con $\nu_m := \nu(\gamma_m)$ y $F_{\nu,max} := N_e(P_{\nu,max}/4\pi D^2)$ al flujo máximo observado de
 659 una fuente a distancia D .

660

661 En el caso del enfriamiento lento únicamente los electrones que satisfacen
 662 la condición $\gamma_e > \gamma_c$ pueden enfriarse. Se le conoce como enfriamiento lento
 663 debido a que los electrones que cumplen $\gamma_e \sim \gamma_m$, forman la gran mayoría
 664 de la población de electrones. Entonces, el flujo de fotones observado F_ν esta
 665 descrito por;

$$F_\nu = \begin{cases} (\nu/\nu_m)^{1/3} F_{\nu,max} & \nu_m > \nu, \\ (\nu/\nu_m)^{-(p-1)/2} F_{\nu,max} & \nu_c > \nu > \nu_m, \\ (\nu_c/\nu_m)^{-(p-1)/2} (\nu/\nu_c)^{-p/2} F_{\nu,max} & \nu > \nu_c. \end{cases} \quad (1.9)$$

666 Se espera que el escenario del enfriamiento rápido se produzca al inicio del
 667 GRB, cuándo los electrones deben de emitir su energía de manera efectiva.
 668 Sí el tiempo de enfriamiento es demasiado prolongado, no puede explicarse
 669 la variabilidad, estaría suprimida. La transición entre enfriamiento rápido a
 670 lento se espera que suceda en la fase temprana de los choques externos, es
 671 decir, al inicio del *afterglow*.

672

673 A bajas energías energías se presenta la auto absorción de sincrotrón en
 674 el espectro, con dependencias $\nu^{5/2}$ ó ν^2 (Rybicki and Lightman, 2008). En
 675 algunos casos, el efecto de auto absorción puede ser relevante en el *afterglow* y
 676 aparece típicamente en radio (Waxman, 1997; Katz and Piran, 1997; Granot
 677 et al., 1999).

678 1.4. Radiación de Compton Inversa

679 Es aceptado de que los fotones radiados en la emisión temprana (*prompt*
 680 *emission*) de los GRBs son producidos por radiación de sincrotrón, pero ra-
 681 diación de sincrotrón auto-Compton aún está en debate. Evidencias de este
 682 proceso en GRBs se han observado en los GRB 180720B, GRB 190114C
 683 y GRB 190829A (Abdalla et al., 2019; Acciari et al., 2019a,b; de Naurois,
 684 2019). Este proceso es importante debido a que esta asociado a una radia-
 685 ción de sincrotrón. La idea es la siguiente, fotones producidos por electrones
 686 vía sincrotrón en una región de emisión y esos mismos fotones vuelven a ser
 687 reenergizados por el mismo grupo de electrones.

688

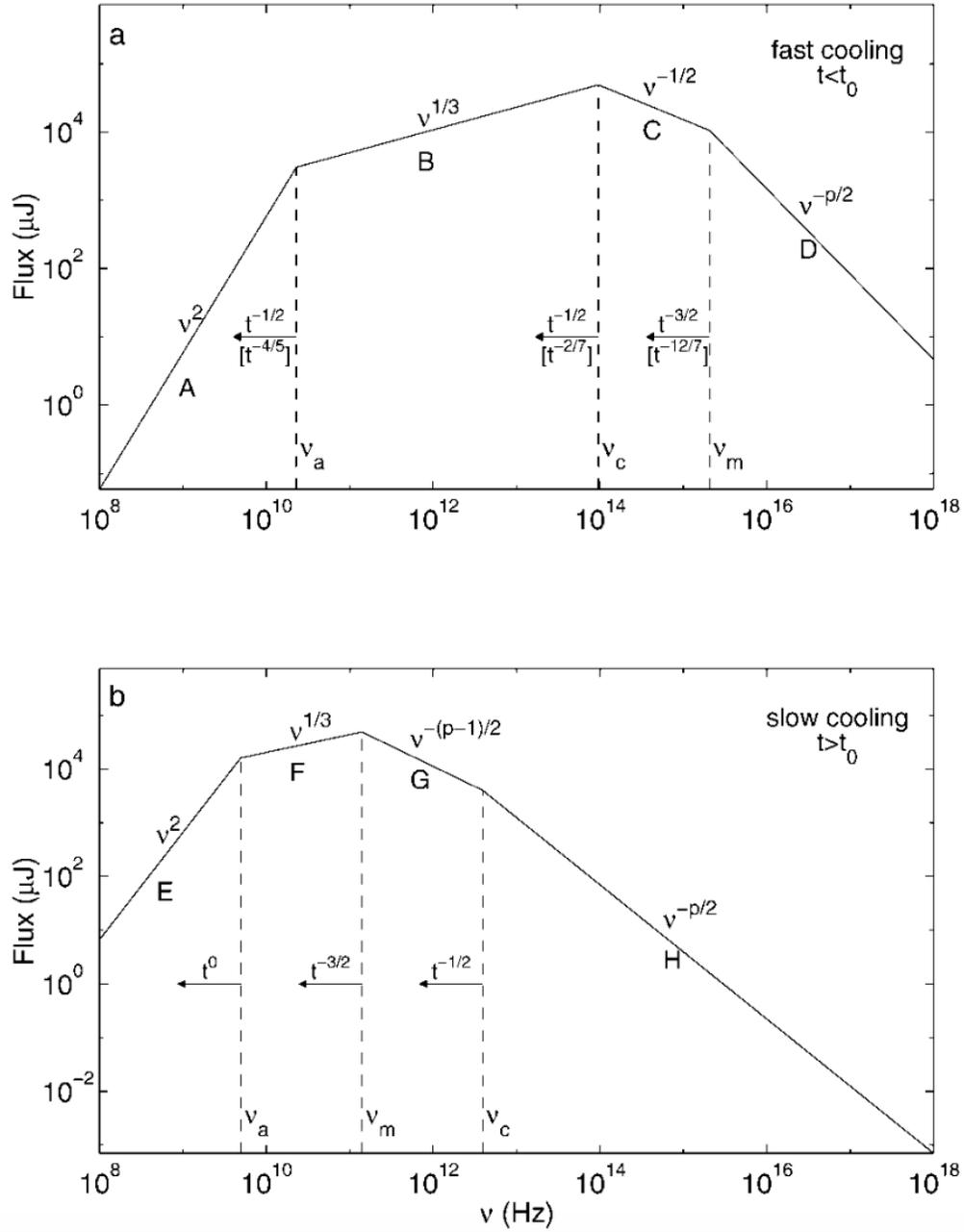


Figura 1.5: Espectro de sincrotrón de un choque relativista con una población de electrones descrita por una ley de potencias en los regímenes de *fast* y *slow cooling* respectivamente. Imagen tomada de Sari et al. (1998).

689 Definimos el parámetro Y como:

$$Y := \frac{P_{IC}}{P_{syn}} \propto \frac{U_{syn}}{U_B} \quad (1.10)$$

690 donde U_{syn} es la densidad de energía de los fotones producidos por sincrotrón,
 691 U_B es la densidad energética del campo magnético. Consideramos la emisión
 692 de SSC de primer, segundo, tercer, ..., etc orden como:

$$Y_1 = Y = \frac{P_{SSC,1}}{P_{syn}} \propto \frac{U_{syn}}{U_B}, \quad Y_2 = \frac{P_{SSC,2}}{P_{SSC,1}} \propto \frac{U_{SSC,1}}{U_{syn}}, \dots \quad (1.11)$$

694 con $U_{SSC,1}$ definida como la densidad de energía de los fotones producidos en
 695 el proceso SSC de primer orden. Así que la potencia total de emisión de los
 696 electrones en el régimen de Thompson se escribe como:

$$P_{Tot} = P_{syn} + P_{SSC,1} + P_{SSC,2} + \dots = P_{syn}(1 + Y_1 + Y_1 Y_2 + \dots). \quad (1.12)$$

697 Para el *afterglow* como en la emisión temprana en el rango de energía de sub
 698 MeVs, la emisión de los rayos gamma es atribuida a radiación de sincrotrón,
 699 entonces la contribución de radiación SSC puede ser despreciada (Zhang,
 700 2018), por lo que la potencia total queda descrita como:

$$P_{Tot} = P_{syn}(1 + Y). \quad (1.13)$$

702 En caso de que sea necesario una corrección por efectos de Klein-Nishina en
 703 la emisión de SSC a primer orden, el parámetro Y es corregido por un factor
 704 $Y_{KN} < 1$. Esta corrección está definida como:

$$Y(\gamma) = \frac{U_{syn}}{U_B} Y_{KN}(\gamma), \quad (1.14)$$

706 donde:

$$Y_{KN}(\gamma) \sim \min \left[1, \left(\frac{\Gamma m c^2}{\gamma h \nu_{syn}} \right)^2 \right], \quad (1.15)$$

707 con Γ el factor de Lorentz del plasma eyectado, γ el factor de Lorentz en el
 708 marco de referencia comóvil y ν_{syn} es la frecuencia de sincrotrón en el cuál
 709 se encuentra el pico del flujo νF_ν producido por radiación de sincrotrón en

710 el marco de referencia del observador. El factor $\frac{\Gamma mc^2}{\gamma h \nu_{syn}}$ es el cociente entre la
 711 masa del electrón con energía mc^2 y la energía del fotón semilla en el marco
 712 de referencia del electrón.

713
 714 En el caso de que no sea necesaria una corrección de Klein-Nishina en
 715 el término de primer orden de SSC , pero si contribuye a un término mayor,
 716 el término de corrección $Y_{KN}(\gamma)$ debe de ser introducido en el valor corres-
 717 pondiente $Y(\gamma)$ al cuál es relevante, reemplazando a la frecuencia ν_{syn} de la
 718 ecuación 1.14 con la frecuencia típica del fotón semilla.

719
 720 El parámetro Y conecta los parámetros micro físicos del choque con los
 721 procesos SSC . Se definen ϵ_ϵ y ϵ_B como la fracción de energía interna de
 722 los choques que es distribuida a los electrones y al campo magnético res-
 723 pectivamente. Considerando el caso de emisión de SSC de primer orden y
 724 considerando la ecuación 1.10 se obtiene que la densidad de energía de los
 725 fotones producidos por sincrotrón es $\frac{1}{1+Y}$ de la energía total de los electrones,
 726 mientras que la fracción que va a SSC es $\frac{Y}{(1+Y)}$, entonces se obtiene;

$$Y = \frac{L_{SSC}}{L_{Syn}} = \frac{U_{syn}}{U_B} = \frac{\eta_e U_e / (1 + Y)}{U_B} = \frac{\eta_e \epsilon_e}{\epsilon_B (1 + Y)}, \quad (1.16)$$

727 donde η_e es la eficiencia de radiación del electrón, que toma los valores;

$$\eta_e = \begin{cases} 1 & \text{enfriamiento rapido,} \\ \left(\frac{\gamma_e}{\gamma_m}\right)^{2-p} & \text{enfriamiento lento,} \end{cases} \quad (1.17)$$

728 de la ecuación 1.16 podemos obtener la ecuación $Y^2 \epsilon_B + Y \epsilon_B - \eta_e \epsilon_e = 0$ la
 729 cuál tiene la siguiente solución;

$$Y = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\eta_e \epsilon_e / \epsilon_B}}{2}, \quad (1.18)$$

730 la cuál en los casos asintóticos las soluciones son:

$$Y \simeq \begin{cases} \left(\frac{\eta_e \epsilon_e}{\epsilon_B}\right) & Y \ll 1, \\ \left(\frac{\eta_e \epsilon_e}{\epsilon_B}\right)^{1/3} & Y \gg 1. \end{cases} \quad (1.19)$$

731 La forma general del flujo observado de Compton Inverso (Sari and Esin,
732 2001) es:

$$F_{nu}^{IC} = \Delta' \sigma_T \int_{\gamma_m}^{\infty} N(\gamma) d\gamma \int_0^{x_0} F_{nu}(x) dx \quad (1.20)$$

733 donde $F_\nu(x)$ es el flujo específico de sincrotrón, Δ' es el tamaño comóvil de
734 la región de emisión y $x_0 \sim 0.5$ es establecido para poder asegurar conser-
735 vación de la energía (Zhang, 2018). De este modo, el espectro de radiación
736 Compton auto inducida de las ecuaciones 1.8 y 1.9 que corresponden a los
737 escenarios de enfriamiento rápido y enfriamiento lento derivados en Sari and
738 Esin (2001) tiene los espectros de SSC descritos por las ecuaciones 1.21 y
739 1.22 respectivamente (Gao et al., 2013):

740

$$F_{nu}^{IC} \simeq \tau_{es} F_{\nu, max} x_0 \begin{cases} \frac{5}{6} \left(\frac{\nu_a}{\nu_c} \right)^{1/3} \left(\frac{\nu}{\nu_{ca}^{IC}} \right), & \nu < \nu_{ca}^{IC}, \\ \frac{9}{10} \left(\frac{\nu}{\nu_{cc}^{IC}} \right)^{1/3}, & \nu_{ca}^{IC} < \nu < \nu_{cc}^{IC} \\ \frac{1}{3} \left(\frac{\nu}{\nu_{cc}^{IC}} \right)^{-1/2} \left[\frac{28}{15} + \ln\left(\frac{\nu}{\nu_{cc}^{IC}}\right) \right], & \nu_{cc}^{IC} < \nu < \nu_{cm}^{IC} \\ \frac{1}{3} \left(\frac{\nu}{\nu_{cc}^{IC}} \right)^{-1/2} \left[\frac{2(p+5)}{(p+2)(p-1)} - \frac{2(p-1)}{3(p+2)} + \ln\left(\frac{\nu_{mm}^{IC}}{\nu}\right) \right], & \nu_{cm}^{IC} < \nu < \nu_{mm}^{IC}, \\ \frac{1}{(p+2)} \left(\frac{\nu_c}{\nu_m} \right) \left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}} \right)^{-p/2} \left[\frac{2(p+5)}{3(p-1)} - \frac{2(p-1)}{3(p+2)} + \ln\left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}}\right) \right], & \nu > \nu_{mm}^{IC}. \end{cases} \quad (1.21)$$

741 y

$$F_{nu}^{IC} \simeq \tau_{es} F_{\nu, max} x_0 \begin{cases} \frac{5(p-1)}{2(p+1)} \left(\frac{\nu_a}{\nu_m} \right)^{1/3} \left(\frac{\nu}{\nu_{ma}^{IC}} \right), & \nu < \nu_{ma}^{IC}, \\ \frac{3(p-1)}{2(p-1/3)} \left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}} \right)^{1/3}, & \nu_{ma}^{IC} < \nu < \nu_{mm}^{IC} \\ \frac{(p-1)}{(p+1)} \left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}} \right)^{(1-p)/2} \left[\frac{4(p+1/3)}{(p+1)(p-1/3)} + \ln\left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}}\right) \right], & \nu_{mm}^{IC} < \nu < \nu_{mc}^{IC} \\ \frac{(p-1)}{(p+1)} \left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}} \right)^{(1-p)/2} \left[\frac{2(2p+3)}{(p+2)} - \frac{2}{(p+1)(p+2)} + \ln\left(\frac{\nu_{cc}^{IC}}{\nu}\right) \right], & \nu_{cm}^{IC} < \nu < \nu_{mm}^{IC}, \\ \frac{(p-1)}{(p+1)} \left(\frac{\nu}{\nu_{mm}^{IC}} \right)^{-p/2} \left(\frac{\nu_c}{\nu_m} \right) \left[\frac{2(2p+3)}{(p+2)} - \frac{2}{(p+2)^2} + \frac{(p+1)}{(p+2)} + \ln\left(\frac{\nu}{\nu_{cc}^{IC}}\right) \right], & \nu > \nu_{cc}^{IC}. \end{cases} \quad (1.22)$$

742 Finalmente, asumiendo la convención $\nu_{ij}^{IC} = 4\gamma_i^2 \nu_j x_0$ donde los subíndices
743 $i, j = a, c, m$ denotando auto absorción, enfriamiento e inyección mínima al

744 factor de Lorentz γ_i y la frecuencia ν_i respectivamente.

745 1.5. Progenitores

746 Por un lado, los GRBs largos están asociados a un escenario denominado
747 *colapsar*. Este escenario involucra a una estrella Wolf-Rayet (WR) o un sis-
748 tema de dos estrellas de este tipo espectral. El escenario de los GRBs cortos
749 involucra a un sistema en donde dos objetos compactos se fusionan⁸, ya sea
750 un sistema de estrellas de neutrones (NS-NS) ó un sistema de una estrella
751 de neutrones y de un agujero negro (NS-BH). En ambos escenarios se gene-
752 ra el mismo fenómeno; un agujero negro de unas cuantas masas solares con
753 un disco de acreción. Se espera que el disco sea de varias masas solares en
754 el escenario del colapsar, mientras que en el escenario del *merger*, se espera
755 un disco de acreción más modesto $\sim 1 \times 10^{-1} M_{\odot}$. En Mészáros et al. (1999)
756 se estima que la energía de estos progenitores no debe de diferir más de un
757 orden de magnitud.

758

759 Para ambos progenitores hay dos grandes reservorios de energía, la ener-
760 gía de ligado del disco y la energía de *spin* del agujero negro (Mészáros and
761 Rees, 1997). El primero puede proporcionar hasta el 40 % de la masa en
762 reposo del disco (asumiendo que el disco se encuentra a su máxima rotación
763 del agujero negro), mientras que el segundo puede proporcionar hasta el 29
764 % de la masa en reposo del agujero negro.

765

766 Los mecanismos que extraen energía del sistema son;

- 767 ■ Aniquilación de neutrinos vía el canal $\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-$ que puede apro-
768 vechar la energía térmica liberada por disipación viscosa en el disco
769 (Rosswog et al., 2003).
- 770 ■ La extracción de energía rotacional del disco debido a la disipación
771 de campos magnéticos generados por la rotación diferencial del disco
772 (Price and Rosswog, 2006).
- 773 ■ La extracción de energía del agujero negro por el proceso de Blandford-
774 Znajek (Blandford and Znajek, 1977).

⁸A este escenario se la conoce coloquialmente como *merger*.

775 Independientemente del mecanismo que alimente a los jets, la energía iso-
776 trópica que puede extraerse es suficiente para poder evitar una colimación
777 extrema, así que desde el punto de vista energético, los colapsos y las fu-
778 siones de objetos compactos son ideales como posibles progenitores. Ambos
779 tipos de GRBs se han logrado asociar a estos progenitores, por parte de los
780 GRBs largos se han logrado identificar con supernovas cercanas. Para GRBs
781 cortos, fue hasta el 17 de Agosto de 2017 (véase capítulo 2) en donde el in-
782 terferómetro LIGO, junto con su símil Virgo encontraron una débil señal en
783 la región del GRB 170817A detectado por Fermi-GBM, donde además, de
784 asociar un sistema binario compacto⁹ como progenitor de GRBs, se encontró
785 la contraparte electromagnética del progenitor de las ondas gravitacionales.
786

787 1.6. Observaciones de GRBs en el rango de los 788 TeVs

789 Las detecciones de los destellos: GRB 180720B, GRB 190114C y GRB
790 190820A son las primeras detecciones de GRBs las cuales presentan eviden-
791 cia de radiación Compton auto inducida. Estos GRBs fueron detectados por
792 telescopios Cherenkov en la superficie de la Tierra. La primera detección de
793 un GRB en este rango fue la del GRB 190114C (Acciari et al., 2019a,b) por
794 el telescopio Cherenkov atmosférico MAGIC. La distribución espectral de
795 energía de este GRB presentó un doble pico (Acciari et al., 2019b), la que es
796 una característica de un espectro de radiación Compton auto inducida (Frai-
797 ja et al., 2019a,e). Esta característica se aprecia en las figuras 1.6 y 1.7. Se
798 interpreta el segundo pico cómo la radiación producida por *SSC*. Un espectro
799 producido únicamente por radiación de sincrotrón no mostrará este segundo
800 pico. La componente de rayos gamma de muy altas energías es observada
801 hasta 40 minutos después del evento. Este tiempo es mucho más grande que
802 el tiempo usual que dura la fase temprana de la emisión del GRB, usualmente
803 hasta un par de decenas de segundos, esto se aprecia en la figura 1.6 en la cuál
804 la fase temprana termina al rededor de 25 segundos, dando inicio al *afterglow*.

805 El *afterglow* del GRB 180720B en rayos gamma¹⁰ fue detectado por Fermi-
806

⁹Un sistema binario de estrellas de neutrones.

¹⁰En el rango energético desde 100 MeV hasta 100 GeV

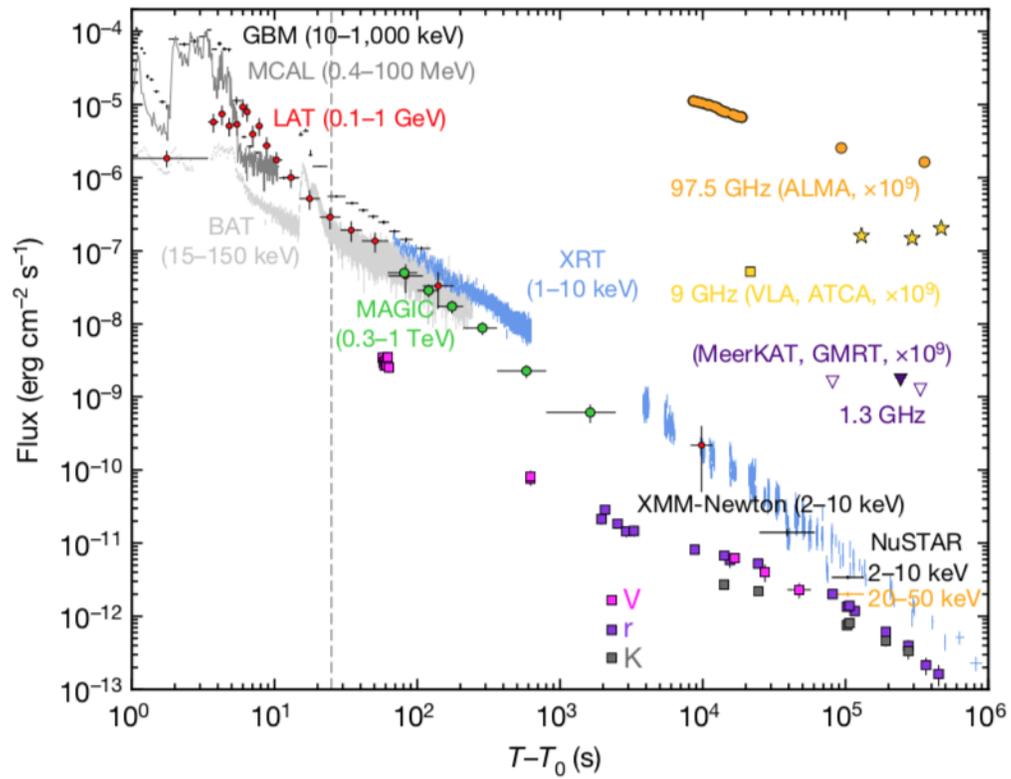


Figura 1.6: Curva de luz del GRB 190114C. Los colores representan al experimento que le dió seguimiento a este destello. La línea vertical punteada en color gris representa el final de la fase temprana de la emisión. Imagen tomada de Acciari et al. (2019b).

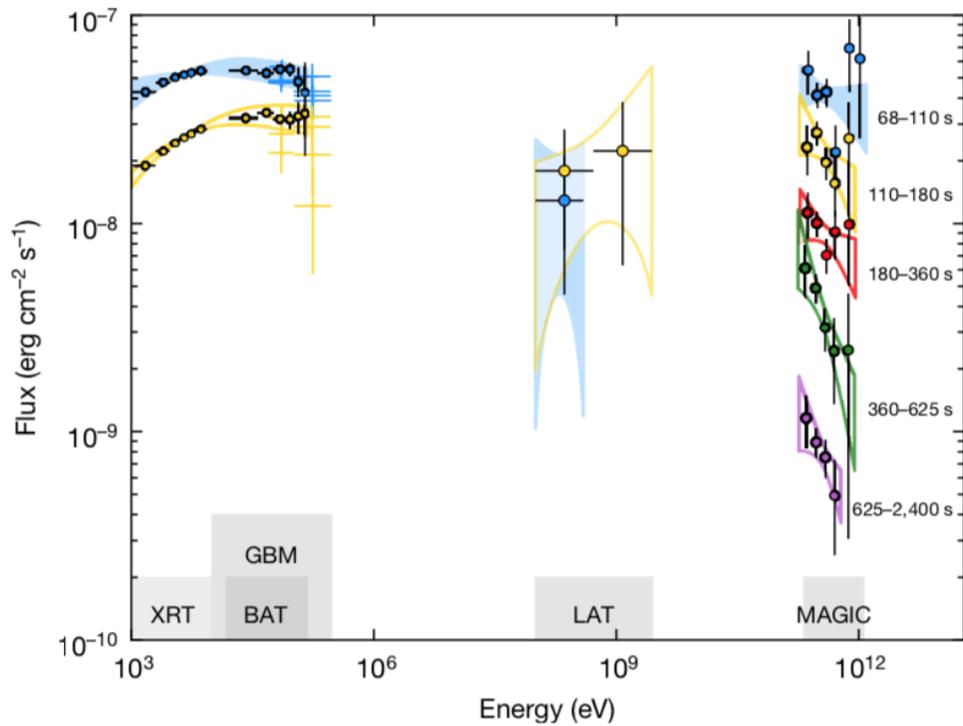


Figura 1.7: Espectro energético del GRB 190114C en 5 intervalos de tiempo. De 68-100 s en azul, de 110-180 s en amarillo, de 180-360 s en rojo, de 360-625 s en verde y finalmente de 625-2,400 s en morado. Los cuadros grises exhiben los rangos energeticos en los que operan los telescopios que dieron seguimiento a este GRB. El segundo pico se aprecia desde unos 200 MeV hasta 1 TeV. Imagen tomada de Acciari et al. (2019b).

807 LAT hasta $T_0 + 700$ segundos después del destello. El fotón más energético
 808 detectado en este GRB durante ese intervalo de tiempo fue de 5 GeVs a
 809 $T_0 + 142.4$ (Ajello et al., 2019). Este GRB se produjo fuera del campo de vi-
 810 sión de H.E.S.S. y debido a que este destello cumplió las condiciones para ser
 811 parte del programa de seguimiento de GRBs de H.E.S.S. (Piel et al., 2019) se
 812 realizaron observaciones 10 horas posteriores al destello con una exposición
 813 total de 2 horas, logrando detectar el *afterglow* en rayos gamma de muy altas
 814 energías con una significancia estadística de 5σ *post-trial*. Para descartar una
 815 posible fuente de rayos gamma del altas energías, se realizaron observaciones
 816 de 18 a 25 días después del destello con una exposición de 6.5 horas. Estas
 817 observaciones eran consistentes con el fondo. En la Figura 1.8 se aprecia el
 818 comportamiento de este destello en distintos rangos energéticos. En ella se
 819 exhibe que la emisión de rayos gamma de alta energía se produce en el *after-*
 820 *glow* del GRB para posteriormente decaer.

821
 822 Estos comportamientos sugieren que la emisión de rayos gamma de altas
 823 energías se produce en el *afterglow* del destello. Esta radiación es producida
 824 por radiación de sincrotrón o por radiación Compton auto inducida. Estimar
 825 la energía máxima de sincrotrón ε_{syn}^{max} provee evidencia suficiente para poder
 826 discernir de estos dos escenarios. La energía máxima que los electrones pue-
 827 den tener en el sistema de referencia comóvil a la región donde ya ocurrieron
 828 los choques, es estimada igualando las escalas de tiempo de aceleración τ_{acc}
 829 y la pérdida de energía τ_{loss} , esta es principalmente debido a radiación de
 830 sincrotrón. Estos dos tiempos escalan con el factor de lorentz γ y de la inten-
 831 sidad del campo magnético B de la forma $\tau_{acc} \propto \gamma B^{-1}$, mientras que $\tau_{loss} \propto$
 832 $\gamma^{-1} B^{-2}$. Entonces, el factor de lorentz máximo es $\gamma_{max} \propto B^{-1/2}$. De éstas dos
 833 expresiones, la máxima energía de sincrotrón emitida es $\varepsilon_{syn}^{max} = B\gamma^2$. Enton-
 834 ces notamos que ε_{syn}^{max} es independiente de B . Valores numéricos en el marco
 835 comóvil de los choques estiman que $\varepsilon'_{syn}{}^{max} \approx 50 - 100$ MeV. (Acciari et al.,
 836 2019a). En la figura 1.9 apreciamos el número de fotones en un intervalo de
 837 energía. De esta imagen podemos apreciar de manera clara que los fotones
 838 detectados por MAGIC no son producidos por radiación de sincrotrón, esto
 839 apunta que estos fotones tienen que producidos por emisión Compton auto-
 840 inducida (Fraija et al., 2019e). De manera análoga ocurre lo mismo para el
 841 destello GRB 180729A (Fraija et al., 2019d).

842

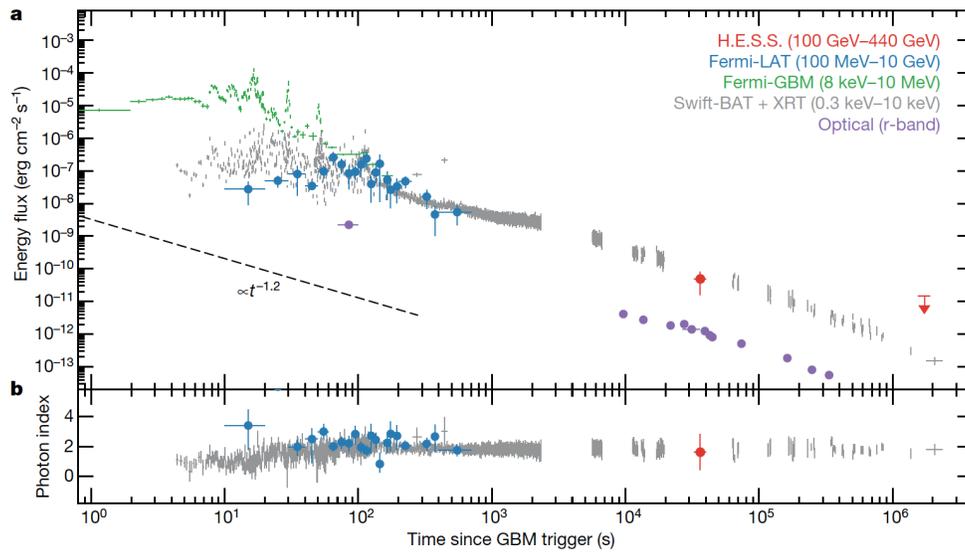


Figura 1.8: En el panel superior se observa la curva de luz del GRB 180720B. Al igual que la Figura 1.6 cada uno de los colores representa los distintos observatorios que siguieron este destello. Notamos que el *afterglow* de este GRBs en rayos gamma de altas energías (puntos rojos) se presenta una vez finalizada la emisión temprana. En el panel inferior, se muestra el comportamiento del índice de fotones a lo largo de la emisión. Imagen tomada de Abdalla et al. (2019).

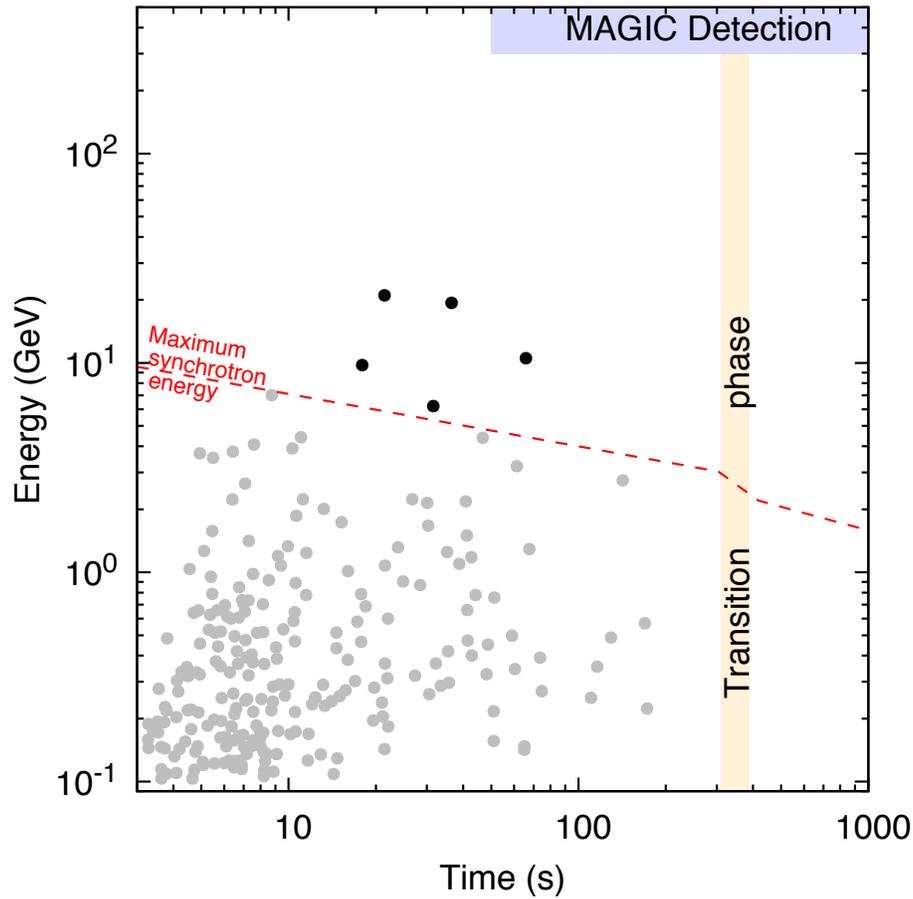


Figura 1.9: Fotonos con energías >100 MeV detectados por Fermi-LAT, asociados con una probabilidad >90 % al GRB 190114C. La línea roja representa la energía máxima que pueden alcanzar los fotonos producidos por radiación de sincrotrón asumiendo un medio estratificado compuesto por un viento estelar y un medio constante, similar al medio circumestelar. La línea amarilla representa la transición del medio, mientras que la región morada indica la región donde MAGIC detectó los fotonos provenientes de este GRB. Los círculos en color negro representan a los fotonos que no pueden ser descritos por radiación de sincrotrón. Imagen tomada de Fraija et al. (2019e)

843 Capítulo 2

844 Motivación Científica

845 2.1. Una ventana hacia la astrofísica 846 multimensajera: GW 170817/GRB 170817A

847 El 17 de Agosto de 2017 a las 12:41:06.47 UT el monitor de rayos gamma
848 *GBM* a bordo del satélite espacial Fermi disparó la alerta del Destello de
849 Rayos Gamma corto GRB 170817A (von Kienlin et al., 2017). Apuntaba a
850 ser otro de los ~ 2 GRBs detectados cada semana, generando la GCN co-
851 rrespondiente 14 segundos después del destello. Seis minutos después, en la
852 Tierra, en el interferómetro *LIGO* en Hanford apareció un candidato a onda
853 gravitacional en latencia baja. Este candidato tomó relevancia debido a que
854 era consistente con un evento de la fusión de dos estrellas de neutrones y con
855 una diferencia de ~ 2 segundos con el GRB 170817A (Clasey Essick, 2017;
856 Connaughton, 2017).

857
858 En la figura 2.1 se muestra la fracción del cielo en donde se detectó la
859 onda gravitacional (en color verde) por los interferómetros LIGO y VIRGO.
860 Superponiendo la región en la cuál el satélite Fermi-GBM y posteriormente
861 el satélite Agile¹ detectaron el GRB 170817A (región azul). Esta coincidencia
862 espacial y temporal permitió relacionar estos eventos. Finalmente la oportu-
863 na detección en la banda del óptico por el LBT (*Large Binocular Telescope*
864 *Observatory*) (Rossi, 2017) permite tener certeza de la posición del GRB así
865 como de la galaxia anfitriona, NGC 4993 (Coulter et al., 2017) a una distan-

¹<http://agile.rm.iasf.cnr.it/>

866 cia de 40 Mpc de la Tierra. Sin lugar a dudas este evento ha sido hasta el
867 momento uno de los más cercanos registrados hasta la fecha y destinado a
868 ser una piedra angular dentro de la astrofísica.

869

870 Las observaciones dentro de las 24 hrs. del colapso (de ahora en adelante
871 *merger*) de estrellas de neutrones son importantes pues es en este momento
872 donde se debe de descartar si un posible transitorio en óptico podría ser o no
873 el *afterglow* del GRB, así como para, poder encontrar una galaxia anfitriona.
874 En la figura 2.2 se muestra una línea del tiempo de los primeros ~ 24 días
875 después de la fusión a distintas longitudes de onda. Finalmente el *afterglow*
876 en rayos X y radio se detectó a los 9 y 16 días respectivamente manteniendo
877 un flujo creciente hasta ~ 120 días posteriores a la fusión. Algunos traba-
878 jos que han discutido esta evolución son por ejemplo Fraija et al. (2019g);
879 D’Avanzo et al. (2018); Lazzati et al. (2018); Nynka et al. (2018); Fraija et al.
880 (2019c) .

881

882 2.2. HAWC

883 El observatorio de rayos gamma HAWC (del inglés *High Altitude Water*
884 *Cherenkov*) se encuentra localizado en el volcán pico de Orizaba, en el estado
885 de Puebla, en México. Localizado a 4,100 m s.n.m. HAWC está constituido
886 por 300 detectores Cherenkov en agua (*Water Cherenkov Detector* o simple-
887 mente tanques) en su arreglo principal. El arreglo principal esta rodeado de
888 354 detectores más pequeños (*outriggers*) que permiten mejorar la sensibili-
889 dad a cascadas de mayor energía (Jardin-Blicq and Joshi, 2017). Cada WCD
890 consta de una estructura cilíndrica de 7.5 m de diámetro con una altura de 5
891 m. Dentro de la estructura metálica está contenida una bolsa (*bladder*) con
892 una capacidad de $\sim 200,000$ l. Dentro del *bladder* están colocados 4 tubos
893 fotomultiplicadores (o PMT del inglés *PhotoMultiplier Tube*). Uno central de
894 10 pulgadas Hamamatsu R7081-MOD, rodeado de 3 PMTs de 8 pulgadas
895 Hamamatsu R5912 (Abeysekara et al., 2017b). La distribución de los WCDs,
896 así como de los PMTs se esquematizan en la figura 2.3.

897

898 Debido a estas características, HAWC tiene un campo instantáneo de 2
899 sr del cielo entre las declinaciones $\delta \in [-26^\circ, +64^\circ]$ y un ciclo útil de $>95\%$.
900 HAWC presenta una mayor eficiencia en el rango energético de 300 GeV a los

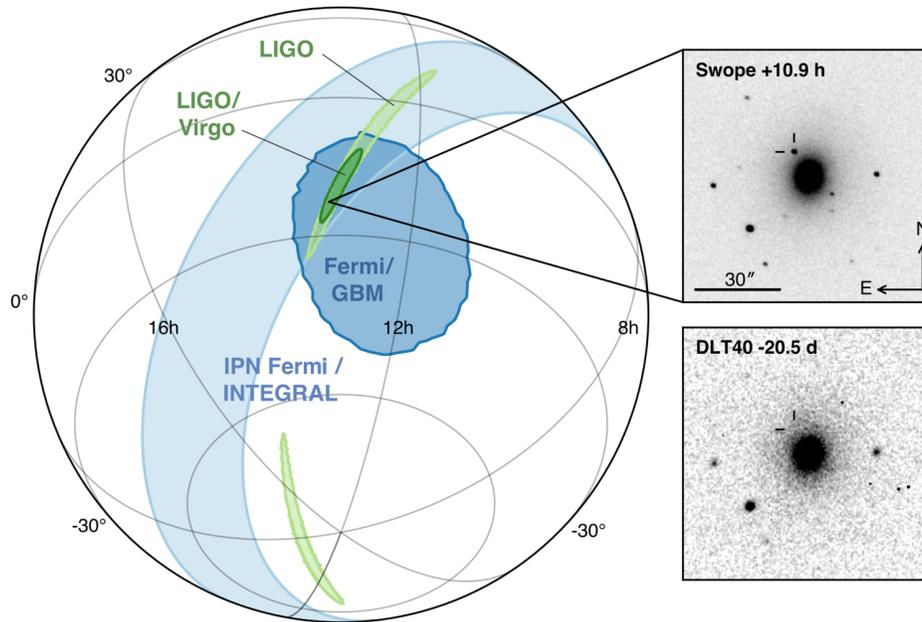


Figura 2.1: Proyección de la esfera celeste con la posición de la onda gravitacional. La región en verde claro, que consta de dos bandas elongadas que confinan la posición de la onda gravitacional detectada por LIGO. La región en verde es la región de detección por LIGO-Virgo. La banda azul clara es la región de error obtenida por IPN entre los tiempos de retraso de Fermi e Integral, mientras que la región en azul oscuro es la obtenida de Fermi-GBM. Los recuadros muestran la detección del evento transitorio en óptico claramente detectada a ~ 10 hrs. Posteriormente, a ~ 20 días el evento transitorio en óptico no están en los límites de detección. Imagen tomada de Abbott et al. (2017)

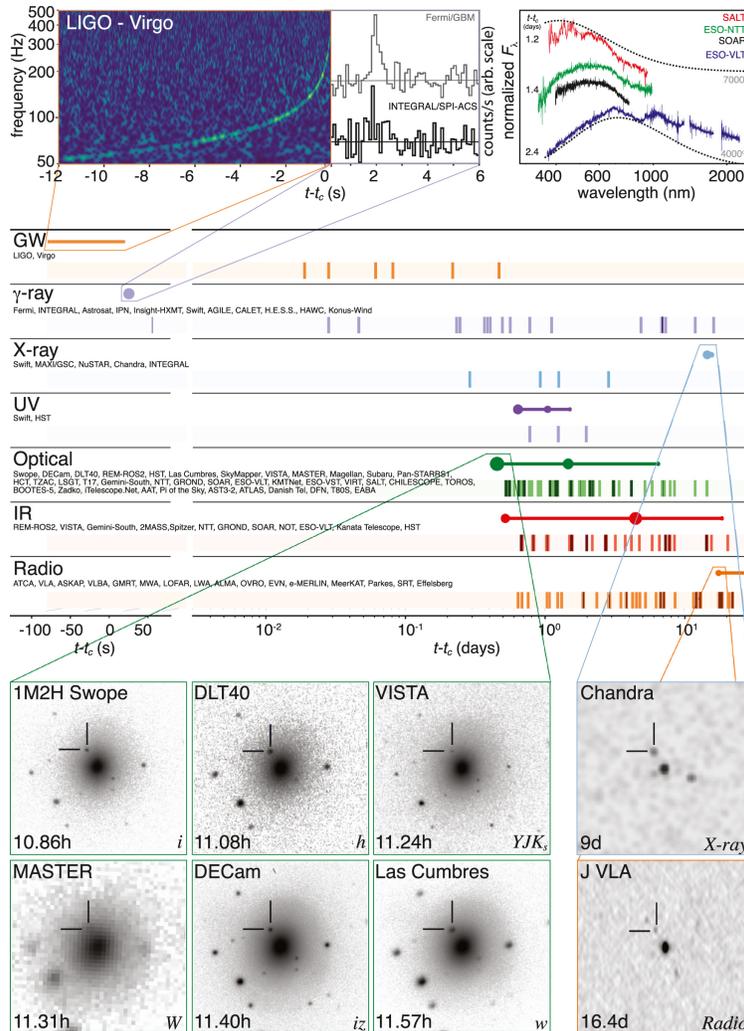


Figura 2.2: Línea de tiempo de las campañas de observaciones de la onda gravitacional GW 179817A. El panel está dividido en dos tipos de mensajeros. En la parte superior, ondas gravitacionales, en donde se aprecia la detección realizada por los observatorios LIGO-Virgo. Los renglones inferiores representan el espectro electromagnético en distintas bandas. En orden ascendente a descendente son; rayos gamma (lila), rayos X (en azul), ultra violeta (morado), óptico (verde), infrarojo (rojo) y finalmente radio (naranja), las detecciones están representadas con círculos, mientras que las barras representan límites superiores al flujo. Cada uno de los recuadros que sobre salen en la línea del tiempo representa la detección del evento (onda gravitacional/fotones) por algunos instrumentos. Imagen tomada de (Abbott et al., 2017).

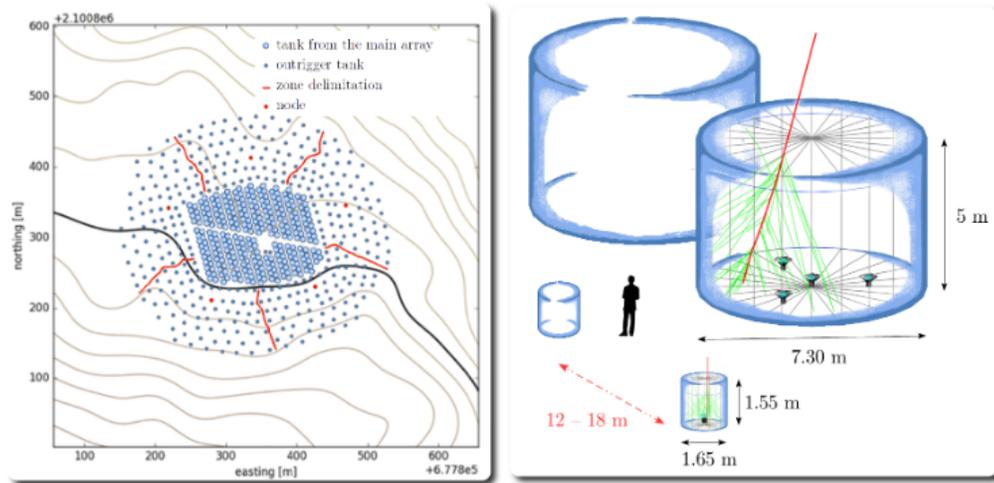


Figura 2.3: Esquemas de HAWC. En el panel izquierdo se ilustra la distribución de los 300 *WCDs* embebido por los *outriggers*. En el panel derecho se esquematiza cada uno de los *WCDs* con la correspondiente distribución de los *PMTs* comparados con los *outriggers*, a escala humana. La línea roja representa la cascada producida por el rayo gamma entrando al tanque , mientras que los rayos verdes el paso del frente de la cascada, produciendo fotones Cherenkov en el tanque. La separación entre cada *WCD* es de 12 a 18 cm. Imagen tomada de Jardin-Blicq and Joshi (2017).

901 100 TeV. En este rango óptimo de operaciones tiene una resolución angular
 902 de $\gtrsim 0.1^\circ$ (Abeysekara et al., 2017b).

903

904 El análisis descrito en esta tesis no es el primer programa que HAWC im-
 905 plementa para búsqueda de GRBs. Algunos trabajos de interés podrían ser
 906 encontrados en Zaborov (2013) donde se discute la capacidad de HAWC de
 907 poder detectar emisión por encima de 50 GeV, colocando un límite superior
 908 sobre el GRB 111016B. Posteriormente, Taboada and Gilmore (2014) dis-
 909 cuten las capacidades de HAWC de detectar GRBs en rangos de energía de
 910 cientos de GeV. En este trabajo se estima que HAWC debería de detectar 1
 911 GRB cada 0.6 años, aunque se considera un instrumento mucho más sensible
 912 a energías de unos TeV que el actual. Esto produce que se sobrestimen el
 913 número de GRBs esperados.

914

915 Uno de los GRBs más luminosos detectados, fue el GRB 130427A (Ac-
916 kermann et al., 2014). Al momento del destello, el GRB se encontraba dentro
917 del campo de visión de HAWC, desafortunadamente, HAWC se encontraba
918 en mantenimiento y funcionaba por debajo del 10 % de su óptimo. Sin em-
919 bargo, se logró derivar un límite superior al flujo reportado en Abeysekara
920 et al. (2015).

921

922 Adicionalmente, en Alfaro et al. (2017) se analizan los GRBs dentro de
923 los primero 18 meses de operaciones de HAWC realizando un análisis en las
924 escalas de tiempo de las curvas de luz en los rangos de energía en keV-MeVs
925 detectados por los satélites Fermi y Swift. Debido a que no hay evidencia de
926 que HAWC detectará estos destellos, límites superiores al flujo son derivados.

927

928 En Wood (2018) y en (Fraija and Gonzalez, 2019) se discuten los pro-
929 gramas de HAWC en tiempo real, que escanean el cielo dentro del campo de
930 visión de HAWC en distintas ventanas de tiempo. Para aquellas ventanas con
931 un umbral de falso positivo (FAR^2) $< 1 \times 10^{-1}$ por año se publica una circular
932 de *GCN*³ y para aquellas que presentan un $FAR < 12$ por año se distribuyen
933 como alertas que motivan a la comunidad a hacer un seguimiento en distintas
934 frecuencias. Estos valores tan pequeños del FAR reducen la probabilidad de
935 que un evento sea producido por fluctuaciones del fondo. En Wood (2018) se
936 especifica cómo se estima este FAR asumiendo una estadística de Poisson en
937 el programa de monitoreo de GRBs en HAWC.

938

939 Finalmente, en Galván-Gómez et al. (2019) se presentan algunos resulta-
940 dos preliminares de este trabajo y en Martínez-Castellanos (2019d) se discute
941 el análisis/seguimiento en tiempo real de las alertas producidas por LIGO
942 buscando una posible señal en rayos gamma en ventanas de tiempo de 0.3,
943 1, 3, 10, 30, y 100 segundos después del tiempo inicial de la fusión de objetos
944 compactos.

945

946 En esta tesis se utiliza el análisis estándar de HAWC publicado en Abey-
947 sekara et al. (2017b), Abeysekara et al. (2017c) y Abeysekara et al. (2017a).
948 En particular, los mapas de significancia utilizados son mapas en días side-
949 rales realizados como se describe en Abeysekara et al. (2017a). Los trabajos

²*False Alarm Rate*

³*The Gamma-ray Coordinates Network*

950 anteriores de GRBs utilizan un análisis específico para intervalos de tiempo
951 de segundos y horas. En esta tesis, debido a que la búsqueda propuesta es en
952 tiempos de días, semanas y meses, los mapas siderales son suficientes. Para
953 detalles del análisis consultar las referencias antes mencionadas.

954 Capítulo 3

955 Búsqueda de contraparte SSC de 956 destellos de rayos gamma

957 La detección del GRB 170817A ocurrió inicialmente fuera del campo de
958 visión de HAWC y fue hasta 8 horas después que entró en su campo de vi-
959 sión. HAWC no detectó emisión asociada a este destello y concluye que el
960 flujo debe de ser menor que $1.7 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en un intervalo de confianza del
961 95 % (Abbott et al., 2017). Por otro lado, cómo se menciono en el capítulo
962 anterior, el *afterglow* del destello en rayos X se detectó 9 días después (Tro-
963 ja et al., 2017) y alcanzó su máximo 120 días después de la emisión inicial
964 (D’Avanzo et al., 2018; Margutti et al., 2018). En esta tesis suponemos que
965 de haber emisión en el rango de energía de TeVs, esta debe de provenir como
966 resultado de radiación Compton auto inducida de la emisión tardía en rayos
967 X. Por está razón se realiza un análisis para su búsqueda en escalas de tiempo
968 de semanas y meses. Se utiliza el software, algoritmos y análisis estándar de
969 HAWC publicados en Abeysekara et al. (2017c), Abeysekara et al. (2017a) y
970 Abeysekara et al. (2017b). Aquí sólo se mencionan los puntos más relevantes
971 para este análisis.

972

973 3.1. Análisis

974 La sensibilidad óptima de HAWC está dentro de las declinaciones -26° y
975 $+64^\circ$ tal y como muestra la región sombreada de la Figura 3.2. Se define un
976 tránsito sobre HAWC como el período de tiempo en el que una fuente tran-

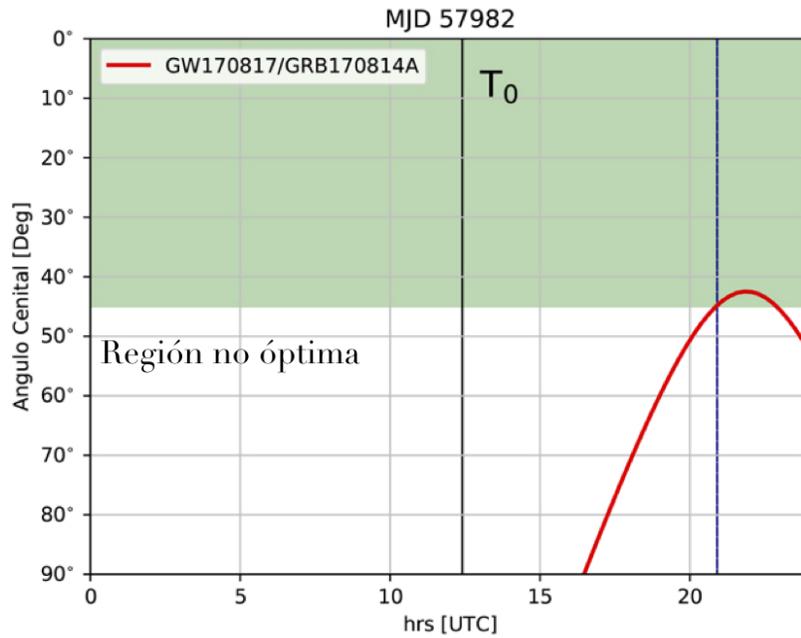
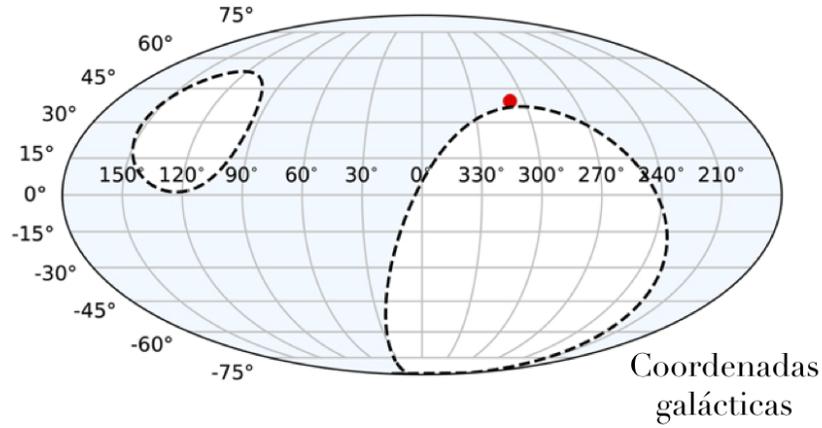


Figura 3.1: En el panel superior de HAWC se ilustra la posición del GRB 170817A (punto rojo) en coordenadas galácticas. La región sombreada en azul representa el campo de visión donde HAWC presenta su sensibilidad óptima. En el panel inferior, se aprecia el tránsito de la onda gravitacional respecto el ángulo cenital de HAWC (línea roja). La línea vertical negra representa el momento en el que ocurrió el destello (T_0), mientras que la línea azul marino representa el momento en que el GRB 170817A entró ($T_0 + 8$ horas) en el óptimo campo de visión de HAWC (región verde).

977 sita entre un ángulo cenital de 0° a 45° del cénit de HAWC en un día sideral.
978 En Abeysekara et al. (2017a) se muestra que la mayor cantidad de emisión
979 proveniente de una fuente cómo la nebulosa del Cangrejo ó los Markarian
980 421 y 501 se detecta dentro de las 4 horas del tránsito centradas en el cenit
981 de HAWC. En el caso del GRB 170817A el tránsito es de ~ 2 horas (como
982 se aprecia en la Figura 3.2), que es la mitad del valor óptimo para el estudio
983 de fuentes por HAWC.

984

985 En esta tesis se utilizan mapas del cielo en días siderales presentados en
986 (Abeysekara et al., 2017a). Estos mapas se construyen en función de la As-
987 cención Recta (R.A.) unos para R.A. <3 hrs ó R.A. >21 hrs y otros para 3
988 hrs $<R.A. \leq 21$ hrs. El objetivo de esta definición es asegurar que el tránsito
989 de una fuente está completamente contenido dentro de un sólo mapa inde-
990 pendentemente del sistema de adquisición de datos.

991

992 La multiplicidad del evento es el la fracción de PMTs que registran se-
993 ñal asociada a una cáscada de partículas entre los disponibles (Abeysekara
994 et al., 2017b). Se construye un mapa sideral para 9 intervalos consecuti-
995 vos mutuamente excluyentes de multiplicidad. Cada mapa está segmentado
996 por coordenadas de posición utilizando el pixelaje definido cómo HEALPix¹
997 (Górski et al., 2005) en donde cada uno de los píxeles cubre la misma área
998 de superficie. Se utiliza una resolución de 1024 píxeles a lo largo de la esfera
999 (cada píxel tiene un ancho angular de 0.06°).

1000

1001 La estimación del *background* se obtiene mediante un procedimiento de
1002 integración directa (Atkins et al., 2003; Abeysekara et al., 2017b). Se cons-
1003 truyen mapas con el *background* esperado. Los mapas de señal se construyen
1004 seleccionando las cascadas mediante cortes de calidad que excluyen datos
1005 recolectados en condiciones inestables, cómo por ejemplo, durante el mante-
1006 nimiento del detector. Del mismo modo, no se construyen mapas cuándo los
1007 datos cubren menos del 50 % del tránsito de la fuente.

1008

1009 Sobre los mapas de background y señal se realiza el análisis estándar de
1010 HAWC (eg Abeysekara et al., 2017c,b) para los destellos analizados en es-
1011 ta tesis. Con los mapas de señal y *background* se construyen los mapas de
1012 significancia considerando el método de máxima verosimilitud (*maximum li-*

¹<https://healpix.sourceforge.io/>

1013 *likelihood*) que se utiliza cuándo la razón señal a ruido es baja. La significancia,
 1014 σ está dada por:

$$\sigma^2 = \sum_i 2 \left[N_i \ln \left(1 + \frac{S_i}{B_i} \right) - S_i \right] \quad (3.1)$$

1015

1016 donde N_i es el número total de cuentas observadas, S_i es la suma de las
 1017 cuentas esperadas de la señal correspondiente a un espectro específico, B_i
 1018 es el número de cuentas de fondo observadas y finalmente i corresponde al
 1019 intervalo de multiplicidad. El espectro se asume cómo una ley de potencias
 1020 con un índice espectral de 2.5 y una energía de pivote E_{piv} de 1 TeV.

1021

1022 Cuando no se encuentra detección significativa se calculan límites supe-
 1023 riores a la normalización del espectro A dentro del 95 % del intervalo de con-
 1024 fianza utilizando estadística de Feldman & Cousins (Feldman and Cousins,
 1025 1998). Calcular el intervalo de confianza a 2σ (95.45 %) en un régimen Gaus-
 1026 siano, conociendo el *background* y asumiendo una señal pequeña. Dado un
 1027 flujo conocido f_t y el *background* b la probabilidad de medir un flujo f es:

$$\mathbb{P}(f | f_t, b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(b + f_t)}} \exp \left(-\frac{(f - f_t)^2}{2(b + f_t)} \right) \quad (3.2)$$

1028 esto puede aproximarse a:

$$\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi b}} \exp \left(-\frac{(f - f_t)^2}{2b} \right) \quad (3.3)$$

1029 debido a que el *background* es dominante sobre la señal. De este modo, para
 1030 cada valor de f_t necesitamos encontrar un intervalo $[f_1, f_2]$ tales que cumplan
 1031 la ecuación:

$$\int_{f_1}^{f_2} \mathbb{P}(f | f_t, b) df = 0.95 \quad (3.4)$$

1032 desde que tenemos únicamente una restricción para dos incógnitas, consi-
 1033 deramos la siguiente estrategia para derivar un límite superior. Para esto,
 1034 consideramos los límites de integración de la siguiente manera, $f_2 = \infty$ y
 1035 $f_1 = f_t - 1.69\sqrt{b}$. De este modo hemos logrado obtener un flujo medido f_m ,
 1036 donde el intervalo de confianza está compuesto por todos aquellos f_t tales
 1037 que $f_m \in [f_1, f_2]$. Esto significa que, sin importar cuál haya sido el valor

1038 verdadero, el intervalo lo contiene el 95 % del tiempo.

1039

1040 Entonces el límite superior al flujo en el intervalo de energía de E_{min} a
1041 E_{max} está dado por:

$$F_{lim} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} E^2 \frac{dN}{dE} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} A \left[\frac{E}{E_{piv}} \right]^{2-\alpha} \exp(-\tau(E, z)) dE \quad (3.5)$$

1042 donde $\frac{dN}{dE}$ es la diferencial del número de fotones por unidad de área por uni-
1043 dad de tiempo donde τ es la absorción debido al fondo de luz extragaláctica,
1044 asumiendo el modelo de Franceschini (Franceschini et al., 2008). Los límites
1045 superiores al flujo son obtenidos de acuerdo a dos hipótesis de corrimiento al
1046 rojo que corresponden al valor central para destellos largos $z = 1.0$ y cortos
1047 $z = 0.3$ (Berger, 2014). La energía mínima y máxima de la integral dependen
1048 fuertemente de la declinación y del índice espectral de la fuente, como se
1049 muestra en la Figura 3.2.

1050

1051 Como se menciono anteriormente, la estrategia de búsqueda antes de
1052 la detección del GRB 170817A, se realizaba durante la emisión principal
1053 (*prompt emission*) y durante multiples del T_{90} . El escenario óptimo para la
1054 búsqueda de emisión de una contraparte es cuándo se conoce la morfología
1055 de la curva de luz. En este caso, sabemos que la duración de la emisión en el
1056 rango de energía de TeVs asumiendo un modelo *SSC* es del orden de meses.
1057 Sin embargo, debido a la sensibilidad del instrumento, el máximo de la emi-
1058 sión podría observarse antes o después del máximo de la emisión en rayos X.
1059 Incluso, por tiempo menor que meses, por lo que, se sugieren dos tipos de
1060 búsquedas. La primera, en ventanas de tiempo consecutivas, pensada para
1061 detección de un pico prominente de duración de unos cuantos días. La segun-
1062 da en ventanas de tiempo logarítmicamente equiacumulativas, ideada para
1063 emisión constante durante la emisión en rayos X. En la primera búsqueda
1064 consideramos 120 días en 10 ventanas temporales consecutivas de 12 días de
1065 duración, mientras que en la segunda se consideran 3 ventanas de tiempo
1066 equiacumulativas en escala logarítmica.

1067

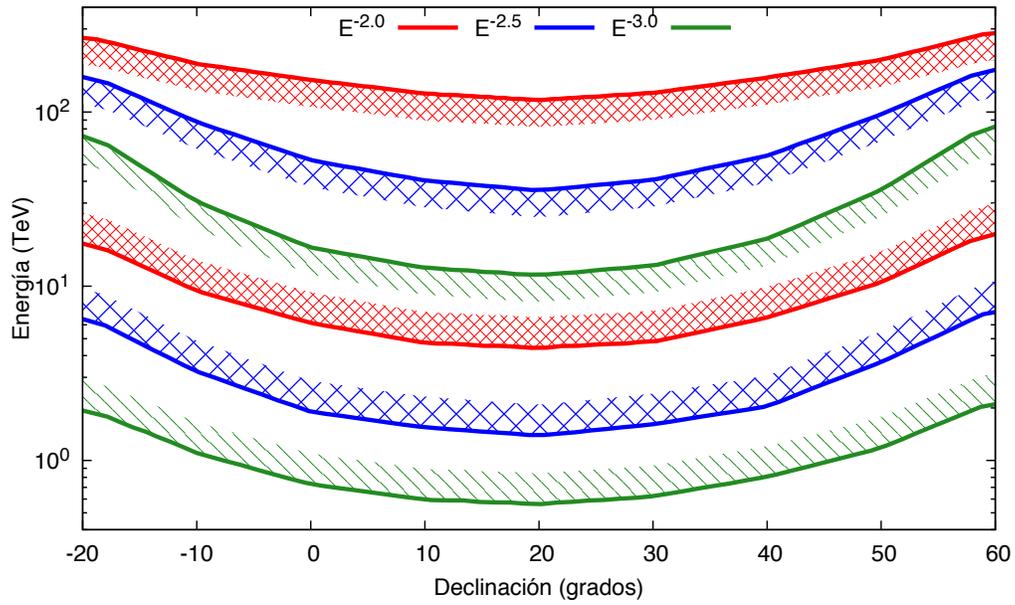


Figura 3.2: Energías iniciales y finales del rango de energías que contribuyen a la tendencia central de la prueba estadística de la búsqueda de una fuente puntual en función de la declinación. La contribución depende también del índice central del espectro, de este modo, cada color representa el rango de energía que representa para un índice espectral de $\alpha = 2.0$ (rojo), $\alpha = 2.5$ (azul) y $\alpha = 3.0$ (verde). Imagen recreada de (Abeysekara et al., 2017c).

1068 3.2. Resultados y discusión del GRB 170817A

1069 Los mapas de significancia para el destello GRB 170817A para cada ven-
1070 tana de tiempo se muestran en la Figuras 3.3 y 3.4 y en la tabla 3.1. Como
1071 se observa, la máxima significancia obtenida fue de 2.14σ para la octava
1072 ventana temporal, entre los días julianos modificados (*MJD*) 58069 y 58081.
1073 La significancia en todos los casos es consistente con fluctuaciones estadís-
1074 ticas del *background* por lo que se derivan límites superiores al flujo cómo
1075 se describe en la sección anterior. Los límites están dados en la última co-
1076 lumna de la tabla 3.1. Se calculan en el intervalo de energía de 4 a 100 TeVs
1077 asumiendo un índice espectral de 2.5 y una declinación de -23° y un corri-
1078 miento al rojo de $z = 0.009$. El límite superior al flujo correspondiente a la
1079 primera ventana temporal de la segunda búsqueda corresponde al publicado
1080 en (Abbott et al., 2017). En el caso de la segunda búsqueda el comporta-
1081 miento decreciente de los límites en función del tiempo se debe al aumento
1082 en la exposición correspondiente a cada ventana temporal. Mientras que en
1083 la primera búsqueda, el comportamiento de los límites esta dominado por
1084 las fluctuaciones del *background* y el tiempo de exposición. Por ejemplo, la
1085 sexta ventana tiene el mayor tiempo de exposición pero la señal observada es
1086 casi el *background* esperado, mientras que, la octava ventana temporal tiene
1087 la menor exposición y la mayor fluctuación positiva por lo que, es el límite
1088 menos restrictivo al flujo. Se observa una mayor cantidad de significancias
1089 negativas para la primera búsqueda, que se interpreta como una sobreesti-
1090 mación del *background* debido a la baja exposición de ~ 1 día por el corto
1091 tránsito y probablemente por la baja sensibilidad de HAWC en el ángulo
1092 cenital del destello.

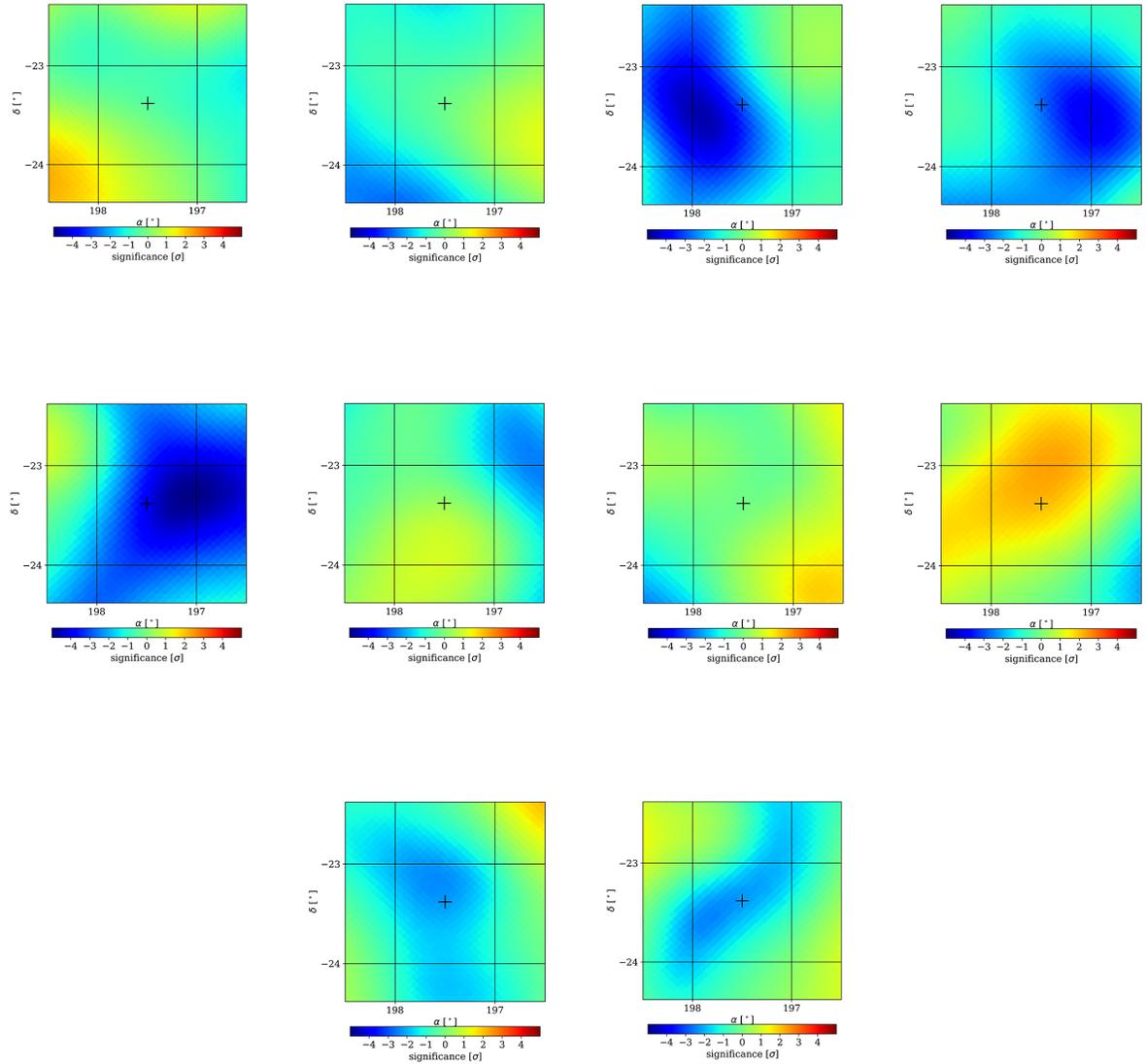


Figura 3.3: Mapas de significancia centrado en la posición del GRB 170817A. En la fila superior se muestran los bins temporales $\mathbb{B} = 1, 2, 3, 4$. En el siguiente renglón los bins $\mathbb{B} = 5, 6, 7, 8$ respectivamente, finalmente en el renglón inferior los bins $\mathbb{B} = 9, 10$. Para la definición de los días, véase la tabla 3.1. Todos los mapas están centrados en la posición del GRB 170817A.

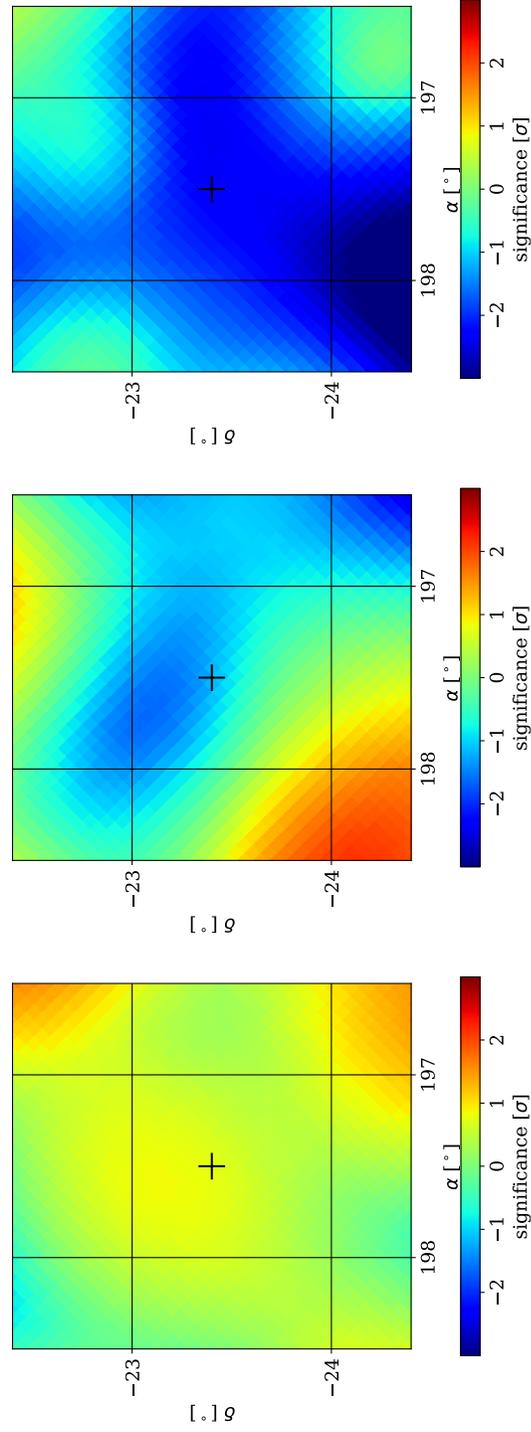


Figura 3.4: Mapas de significancia del. GRB 170817A. De izquierda a derecha se muestran las ventanas de tiempo $\mathbb{B} = \{1, 2, \text{ y } 3\}$ respectivamente. Los mapas se encuentran centrados en la posición de la onda gravitacional. Notamos que las observaciones son consistentes con fluctuaciones del *background*.

1093 Para poder interpretar estos límites, se calcula la emisión teórica en el
 1094 rango de energía de HAWC considerando la emisión observada en rayos X
 1095 como fotones semilla de radiación Compton auto inducida. Entonces la ecua-
 1096 ción 3.6 nos da:

$$\nu F_{\nu}^{ssc} = Y(\nu F_{\nu}^{syncX}), \quad (3.6)$$

1097 Siendo Y el parametro de Compton. Este parametro está definido como; $Y =$
 1098 $\eta (\epsilon_e/\epsilon_B)^{1/2}$. A su vez, η , la densidad está definida como $\eta = (\gamma_{e,c}/\gamma_{e,m})^{2-p}$.
 1099 El análisis multifrecuencia permite determinar $(\gamma_{e,c}/\gamma_{e,m}) = 1 \times 10^8$, así como
 1100 $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 1 \times 10^{-4}$ y $p = 2.2$ los cuales son valores estándar ampliamente
 1101 usados en la literatura (e.g. Dermer et al., 2000; Tam et al., 2008; Lazzati
 1102 et al., 2018; Fraija et al., 2019f).

1103
 1104 En la Figura 3.6 se muestran las densidades de flujos como función del
 1105 tiempo para GRB 170817A observadas desde el radio hasta los rayos X. En
 1106 ambos paneles se muestran los límites superiores al flujo a una energía de 1
 1107 TeV, en el panel izquierdo para la primera búsqueda y en el panel derecho
 1108 para la segunda búsqueda. Mientras en longitudes de onda menos energéticas
 1109 vemos un flujo creciente alcanzando un máximo a los 120 días. En el escenario
 1110 de los TeVs no hay emisión observada. Los límites superiores al flujo en TeV
 1111 son menos de 2 órdenes de magnitud superiores a la predicción teórica de
 1112 radiación producida por Compton inverso. Los límites no son restrictivos al
 1113 marco teórico. Pero hay que considerar que el ángulo cenital de este destello
 1114 es muy desfavorable para HAWC. De haber sucedido con un ángulo cenital
 1115 menor a 15° los límites, podrían mejorar hasta dos órdenes de magnitud tal
 1116 como se muestra en la Figura 3.5. Además, interpretaciones teóricas (Fraija
 1117 et al., 2019f,b; Gottlieb et al., 2019; Lazzati et al., 2018) al comportamiento
 1118 temporal del *afterglow* requieren de una observación del destello fuera del eje
 1119 del jet (*off-axis*). Para un destello observado en el eje del jet (*on-axis*) el flujo
 1120 del *afterglow* podría aumentar al menos un orden de magnitud reflejándose
 1121 en la emisión de TeVs esperada. En otras palabras un destello sobre cenit de
 1122 HAWC y *on-axis* podría dar una señal positiva en HAWC.

1123

Ventana Temporal	Periodo de tiempo (MJD)	Tiempo efectivo (hrs)	Significancia (σ)	Límite superior $A e^{-\tau(1 \text{ TeV}, 0.009)}$ ($\times 10^{-12} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
1	57982 - 57994	30.66	-0.48	22.40
2	57994 - 58006	31.55	-0.21	22.70
3	58006 - 58019	30.34	-2.79	6.80
4	58019 - 58031	30.51	-2.74	8.55
5	58031 - 58044	30.51	-3.97	5.85
6	58044 - 58056	33.90	0.30	30.30
7	58056 - 58069	29.15	-0.13	23.30
8	58069 - 58081	23.88	2.14	67.30
9	58081 - 58094	32.86	-2.25	9.90
10	58094 - 58106	29.73	-2.22	7.48
1	57982	2.01	0.73	135.00
2	57983 - 57992	20.10	-1.31	18.50
3	57993 - 58092	194.97	-2.35	2.60

Tabla 3.1: Resultados del análisis sobre las distintas ventanas de tiempo seleccionadas para el seguimiento del GRB 170817A.

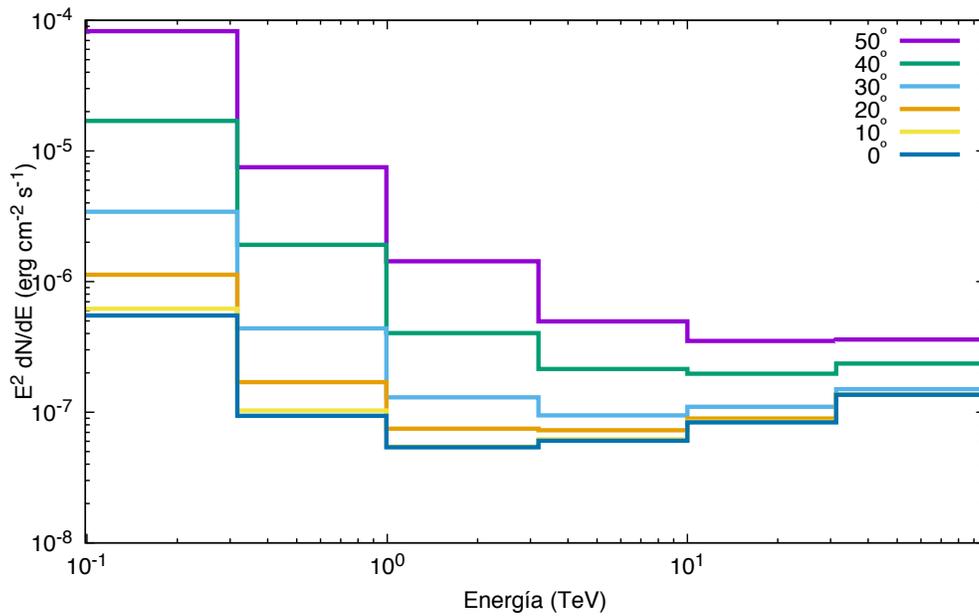


Figura 3.5: Sensibilidad quasi diferencial de HAWC para destellos de 1 segundo de duración cómo función del ángulo cenital (en colores se muestran las declinaciones de 50°, 40°, 30°, 20°, 10° y sobre el cenit de HAWC), definido como el flujo promedio en media década que pueda resultar en una detección de al menos 5σ . Figura recreada de (Martinez-Castellanos, 2019d)

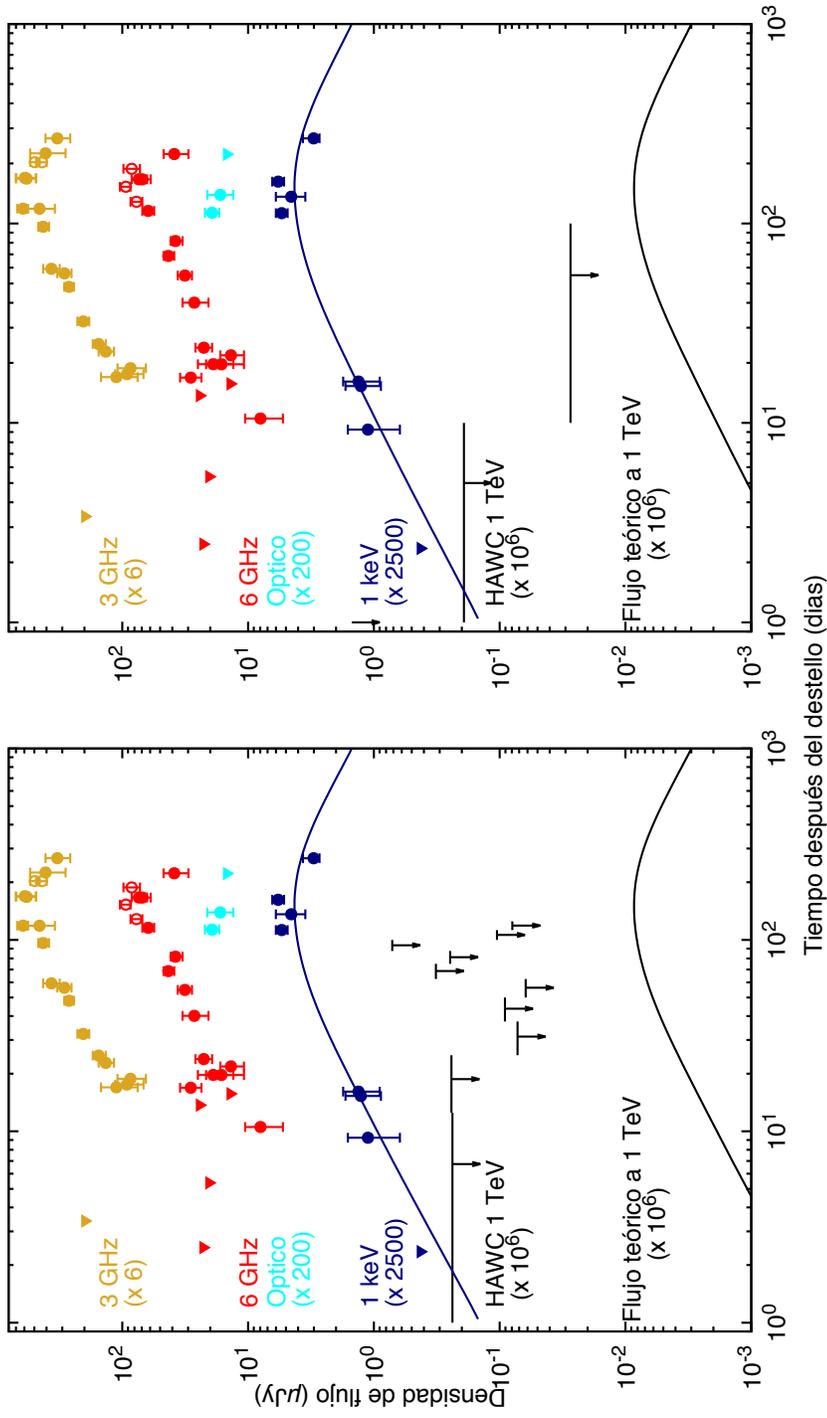


Figura 3.6: Curva de luz obtenida por la campañas de observación; en radio (color oro y rojo), óptico (cian) rayos X (azul marino) de GRB 170817A. En negro los límites derivados en este trabajo, en el panel izquierdo los obtenidos en la primera búsqueda, mientras que en el panel derecho, los obtenidos por la segunda búsqueda. La línea azul describe el flujo de rayos X, mientras que la línea negra es el flujo teórico producido por *SSC*. Datos tomados de (Troja et al., 2017).

1124 3.3. Resultados y discusión de GRBs similares 1125 al GRB 170817A

1126 Con los resultados del destello 170817A, se ha vuelto a revisar (von
1127 Kienlin et al., 2019) los datos de Fermi-GBM para buscar eventos simila-
1128 res al GRB 170817A. Se revisaron 2357 destellos, 1959 largos, 395 cortos y
1129 3 sin duración determinada. Como cortes de selección se requirió que T_{90}
1130 < 5 s en el rango energético 50 - 300 keV (Kouveliotou et al., 1993) y que
1131 $(T_{50, inicio} - T_{90, inicio})/T_{90} < 0.2^2$. A los destellos que pasaron los cortes se les
1132 analizó su curva de luz con un método de bloques Bayesianos para identificar
1133 aquellas curvas con dos bloques característicos a la emisión principal y a la
1134 kilonova. Un conjunto de 13 GRBs incluido el GRB 170817A resultaron iden-
1135 tificados con este análisis. En esta sección se analizan estos GRBs utilizando
1136 la segunda búsqueda con el análisis descrito en la sección 3.1 debido a ser
1137 más sensible.

1138
1139 De la muestra de 13 GRBs listados en la Tabla 3.2 propuestos por von
1140 Kienlin et al. (2019), 6 destellos de la muestra ocurrieron dentro del tiem-
1141 po de operaciones de HAWC, estos destellos van desde el GRB 130502A al
1142 GRB 180511A. Su localización en el cielo se aprecia en la Figura 3.7. Los
1143 GRBs 130502A y 140511A son una excepción a este trabajo. En el caso del
1144 GRB 130502A se descarta debido a que los mapas diarios no estaban imple-
1145 mentados por HAWC al momento del destello. En el caso del GRB 140511A
1146 ocurrió fuera del campo de visión de HAWC como se muestra en la Figura 3.7.
1147

²Donde $T_{90, start}$ $T_{50, start}$ es el tiempo de inicio del T_{90} y T_{50} respectivamente.

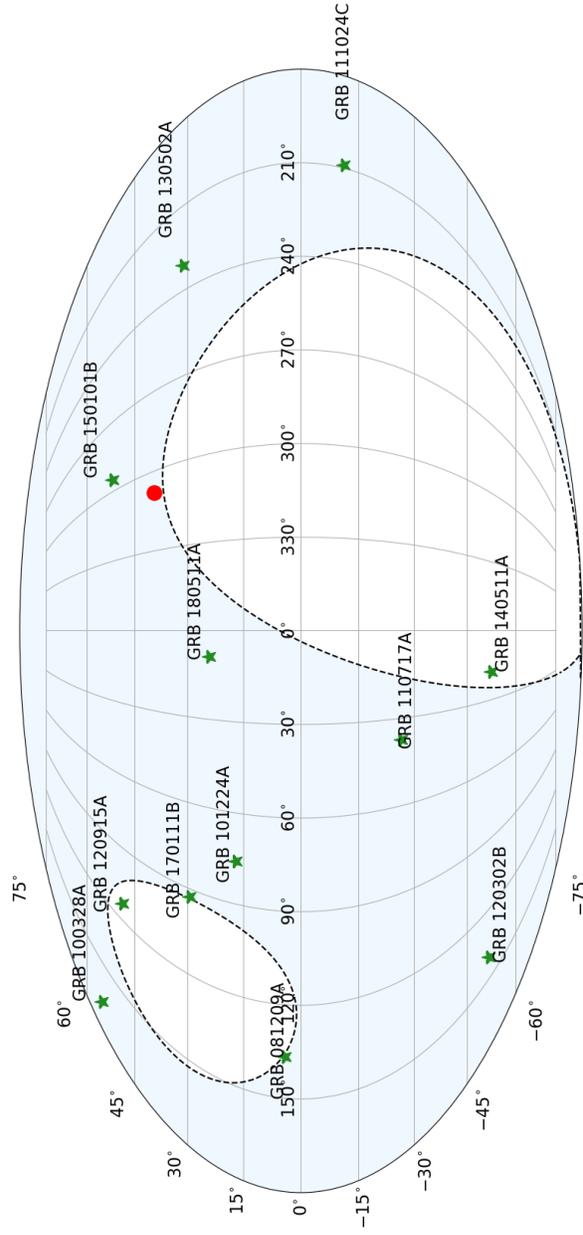


Figura 3.7: Localización de los GRBs propuestos por (von Kienlin et al., 2019). La región sombreada en azul representa el campo de visión óptimo de HAWC en coordenadas galácticas, mientras que la región en blanco representa el área donde HAWC no es sensible. El punto rojo representa el evento de la onda gravitacional GW 170817.

1148 Estos destellos tienen un tránsito de poca duración sobre HAWC. Los
1149 tránsitos de estos destellos se muestran en la Figura 3.8. El destello con me-
1150 jor ángulo cenital es el GRB 130502A con un máximo ángulo cenital de 20° .
1151 Como se mencionó anteriormente, este destello queda fuera de este análisis.
1152 Omitiendo este caso, son los destellos GRB 150101B y GRB 180511A que
1153 tienen un mejor ángulo cenital. Los GRBs restantes pasan por la región óp-
1154 tima de HAWC al menos en una pequeña fracción de tiempo.
1155

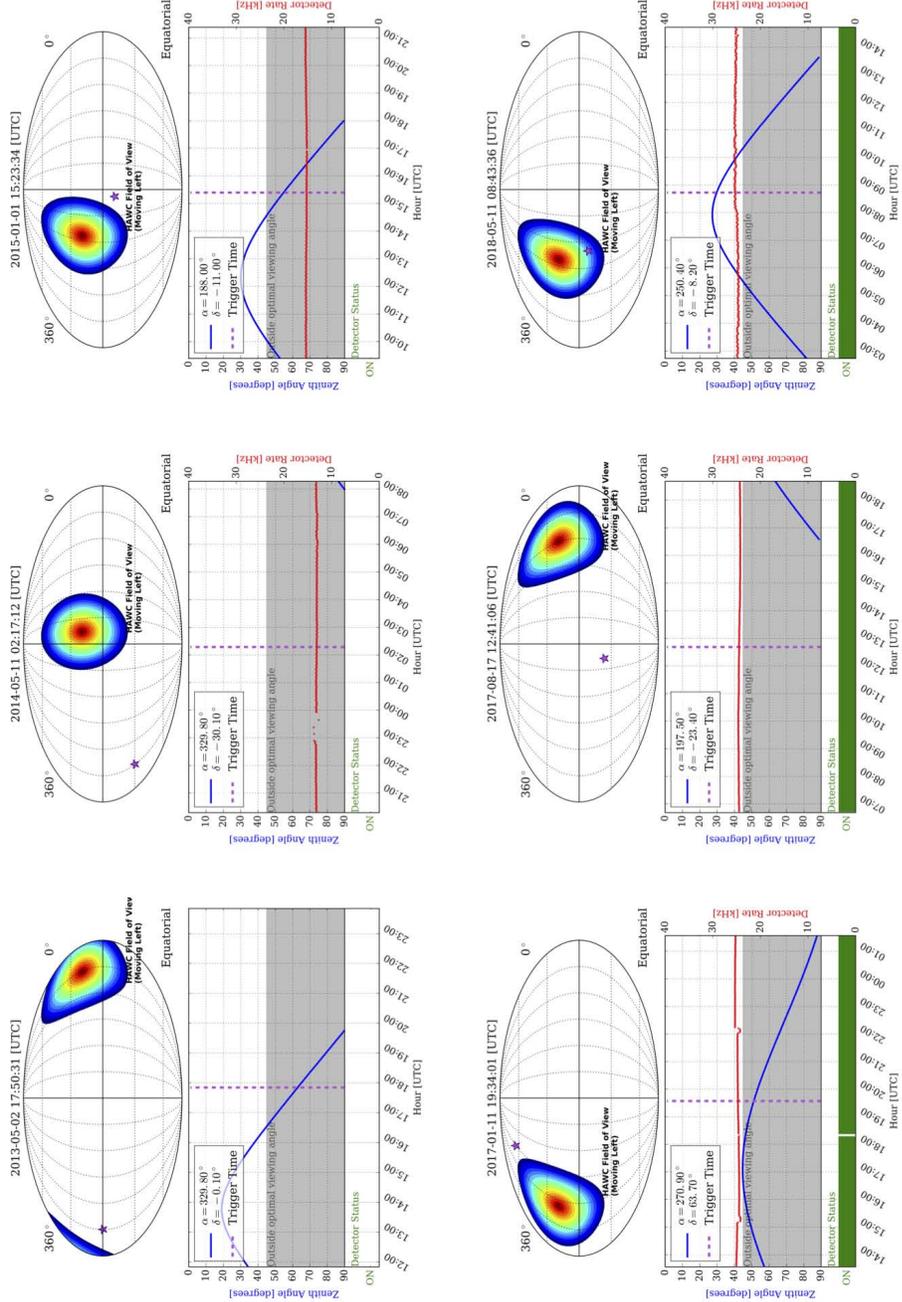


Figura 3.8: Transito de los GRBs propuestos a ser similares al GRB 170817A al momento de su ocurrencia sobre el cielo de HAWC. La línea punteada representa el t_0 , mientras que la franja verde representa el estado del detector. Una herramienta de verificación independiente es la línea roja, que muestra el *rate* del experimento.

1156 Adicionalmente se agrega una corrección más al análisis presentado en la
 1157 sección 3.1. La cuál consiste en una corrección a la significancia estadística
 1158 obtenida por cada búsqueda. Esto es debido que la búsqueda de la señal es
 1159 en una ventana con una incertidumbre que van desde $\sim 1^\circ$ hasta 15° . Esta
 1160 corrección está relacionada al número de intentos de búsqueda en una venta-
 1161 na espacial. La ventana de búsqueda esta centrada en la posición del destello
 1162 (columnas 4 y 5 de la Tabla 3.2), mientras que la columna 6 de la Tabla 3.2
 1163 hace referencia al tamaño de la ventana.

1164
 1165 Esta corrección es a posteriori sobre la máxima significancia estadística
 1166 obtenida en cada búsqueda. La cantidad de intentos (*trials*) en cada ventana
 1167 se calcula mediante la ecuación 3.7:

$$T_s = \left(\frac{1}{0.25} \right)^{2/\pi} \approx \frac{5}{deg^2}, \quad (3.7)$$

1168 donde 0.25 es la típica resolución angular de HAWC. Entonces, la cantidad
 1169 de *trials* está definido como:

$$\mathcal{N}_T = \mathcal{A}_W T_s, \quad (3.8)$$

1170 definiendo a \mathcal{A}_W como el área de la ventana de búsqueda. Ahora, para poder
 1171 determinar cómo se ve afectada la significancia a posteriori. Recordemos que
 1172 la probabilidad rechazando una hipótesis nula está dada por la expresión;

$$Q = 1 - P, \quad (3.9)$$

1173 donde la probabilidad P está dada por la distribución de acumulación de una
 1174 función estándar normal definida en la ecuación 3.10:

$$P(Z \leq z) \equiv \int_{-\text{inf}}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (3.10)$$

1175 donde $u = \frac{x-\mu}{\sigma}$. De este modo, considerando la probabilidad obtenida de la
 1176 ecuación 3.9 y multiplicando por la cantidad de intentos calculados en toda la
 1177 ventana de búsqueda con la ecuación 3.8 se obtiene la significancia *post-trial*.
 1178 La nueva significancia sera aquella z_p evaluada en 3.10. Esta significancia
 1179 está reportada en la cuarta columna de la tabla 3.3.

1180

GRB	Tiempo (UTC)	T_{90} (s)	R.A. (deg)	Dec. (deg)	Error (deg)	Redshift
081209A	23:41:56.39	0.192 ± 0.143	45.3	63.5	4.9	-
100328A	03:22:44.60	0.384 ± 0.143	155.9	47.0	4.8	-
101224A	05:27:13.86	1.728 ± 1.680	285.9	45.7	0.1	-
110717A	04:19:50.66	0.112 ± 0.072	308.5	-7.9	7.5	-
111024C	21:30:02.24	0.969 ± 1.032	91.2	-1.8	13.2	-
120302B	17:19:59.08	1.600 ± 0.779	24.1	9.7	13.9	-
120915A	00:00:41.64	0.576 ± 1.318	209.4	67.3	5.9	-
130502A	17:50:30.74	3.328 ± 2.064	138.6	-0.1	0.0	-
140511A	02:17:11.46	1.408 ± 0.889	329.8	-30.1	8.8	-
150101B	15:23:34.47	0.080 ± 0.928	188.0	-11.0	0.0	0.134
170111B	19:34:01.39	3.072 ± 1.318	270.9	63.7	6.7	-
170817A	12:41:06.47	2.048 ± 0.466	197.5	-23.4	0.0	0.009
180511A	08:43:35.79	0.128 ± 1.207	250.4	-8.2	15.1	-

Tabla 3.2: Tabla de GRBs propuestos por (von Kienlin et al., 2019)

GRB	Duración del transito (hrs)	Días sidéreos efectivos	Significancia <i>post trial</i> (σ)	Límite superior A ($\times 10^{-12} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
150101B	4.51	1	-0.86	22.20
		10	0.70	8.88
		99	0.94	2.90
170111B	0.99	1	~ 0	164.00
		10	~ 0	45.80
		92	~ 0	33.70
170817A	2.01	1	0.73	135.00
		10	-1.31	18.50
		97	-2.35	2.60
180511A	4.83	1	~ 0	28.50
		10	1.01	9.32
		100	0.46	0.75

Tabla 3.3: Resultado del análisis sobre los GRBs propuestos por (von Kienlin et al., 2019). Comparamos los límites obtenidos con el GRB 170817A.

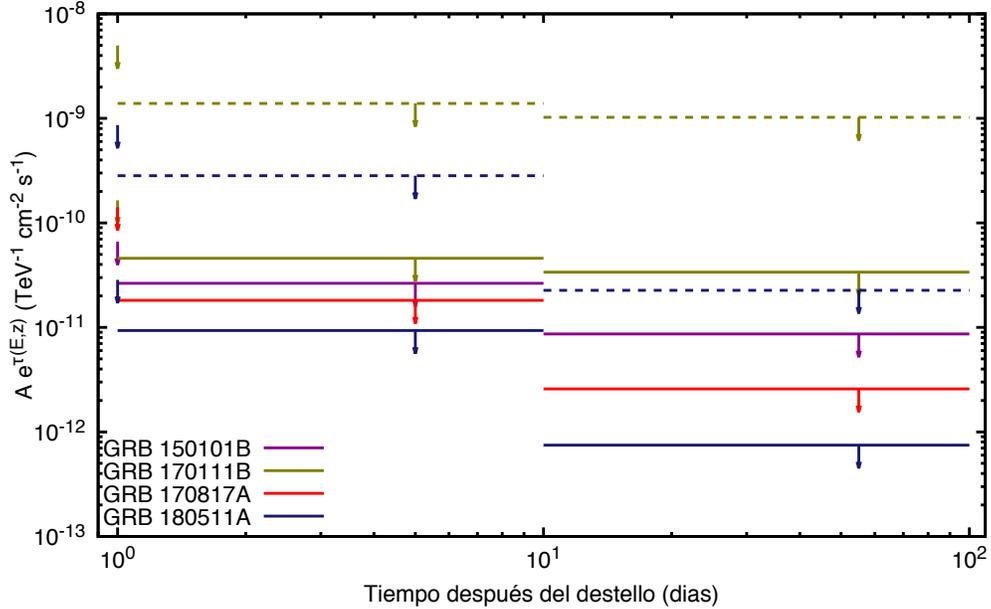


Figura 3.9: Comparación de los límites superiores al flujo en el 95 % del intervalo de confianza de los GRBs estudiados en la tabla 3.3. Los límites en los GRBs 170111B y 180511A en líneas punteadas son aquellos donde se asume un *redshift* de $z=0.3$, mientras que en línea sólida se asume un *redshift* similar al del GRB 170817A.

1181 Apreciamos de la Tabla 3.3 que el destello GRB 180511A es el más restric-
1182 tivo de la muestra analizada. Este destello sólo fue detectado por Fermi-GBM
1183 y no se le realizó ningún seguimiento pues ninguna GCN fue enviada (von
1184 Kienlin et al., 2019). Asumiendo un corrimiento al rojo de $z = 0.009$ (véase
1185 sección 3.1) el límite del GRB 180511A es ~ 3 veces más restrictivo que el
1186 obtenido por el GRB 170817A. Este destello es el que mayor exposición tu-
1187 vó sobre HAWC, en la segunda columna de la Tabla 3.3 podemos apreciar
1188 el tiempo de exposición de estos destellos. En la Figura 3.9 se aprecian los
1189 límites superiores a la constante de proporcionalidad A (véase ecuación 3.5).
1190 Las líneas sólidas son los límites asumiendo un corrimiento al rojo de $z =$
1191 0.009 , mientras que las líneas punteadas son los límites asumiendo un corri-
1192 miento al rojo $z = 1.0$, a excepción del GRBs 150101B del cuál se conoce su
1193 corrimiento al rojo.

1194

1195 El GRB 150101B es menos restrictivo que el GRB 170817A. A pesar de
1196 tener un óptimo ángulo cenital y ser el segundo con mayor exposición, el lí-
1197 mite obtenido para este destello no es restrictivo debido a su alto corrimiento
1198 al rojo de $z = 0.134$. Esta tendencia se aprecia en la Figura 3.9. En el primer
1199 renglón de la Figura 3.10 se muestra el mapa de significancia de este destel-
1200 lo. Estos mapas están centrados en la posición del destello. La significancia
1201 estadística de este destello es consistente con fluctuaciones del *background*.

1202

1203 El caso del GRB 170111B es el destello menos restrictivo de todos los
1204 GRBs de la muestra. En la Figura 3.9 se aprecia que estos destellos no son
1205 restrictivos, ni asumiendo un corrimiento al rojo de $z = 0.009$ y de $z = 1.0$.
1206 Los mapas de significancia de este destello están en el segundo renglón de la
1207 Figura 3.10. La primera ventana temporal presenta una franja rojiza, esto
1208 es debido a una mala estimación del fondo debido a que se localiza en una
1209 región marginal de la región óptima de HAWC. Los mapas están centrados en
1210 la posición del GRB. La significancia estadística *post trial* de esta búsqueda
1211 en cada una de las ventanas temporales de este destello es consistente con
1212 fluctuaciones del *background*.

1213

1214 Finalmente, el GRB 180511A es el destello que presenta límites más res-
1215 trictivos que el GRB 170817A asumiendo un corrimiento al rojo de $z = 0.009$
1216 tal cómo se aprecia en la Figura 3.9. Sin embargo, este destello sólo fue de-
1217 tectado por Fermi-GBM y no se emitió ninguna circular (von Kienlin et al.,
1218 2019). En el escenario de un corrimiento al rojo de $z = 1.0$, este límite dejaría
1219 de ser restrictivo para una posible emisión de SSC en el rango de energía de
1220 los TeVs. Los mapas de significancia de este destello se encuentra en la últi-
1221 ma fila de la Figura 3.10. La significancia *post trial* obtenida en cada una de
1222 las ventanas temporales de este destello es consistente con fluctuaciones del
1223 *background*. A pesar de ser ~ 3 veces más restrictivos que el GRB 170817A
1224 no es lo suficientemente restrictivo para una posible emisión de SSC prove-
1225 niente de este destello.

1226

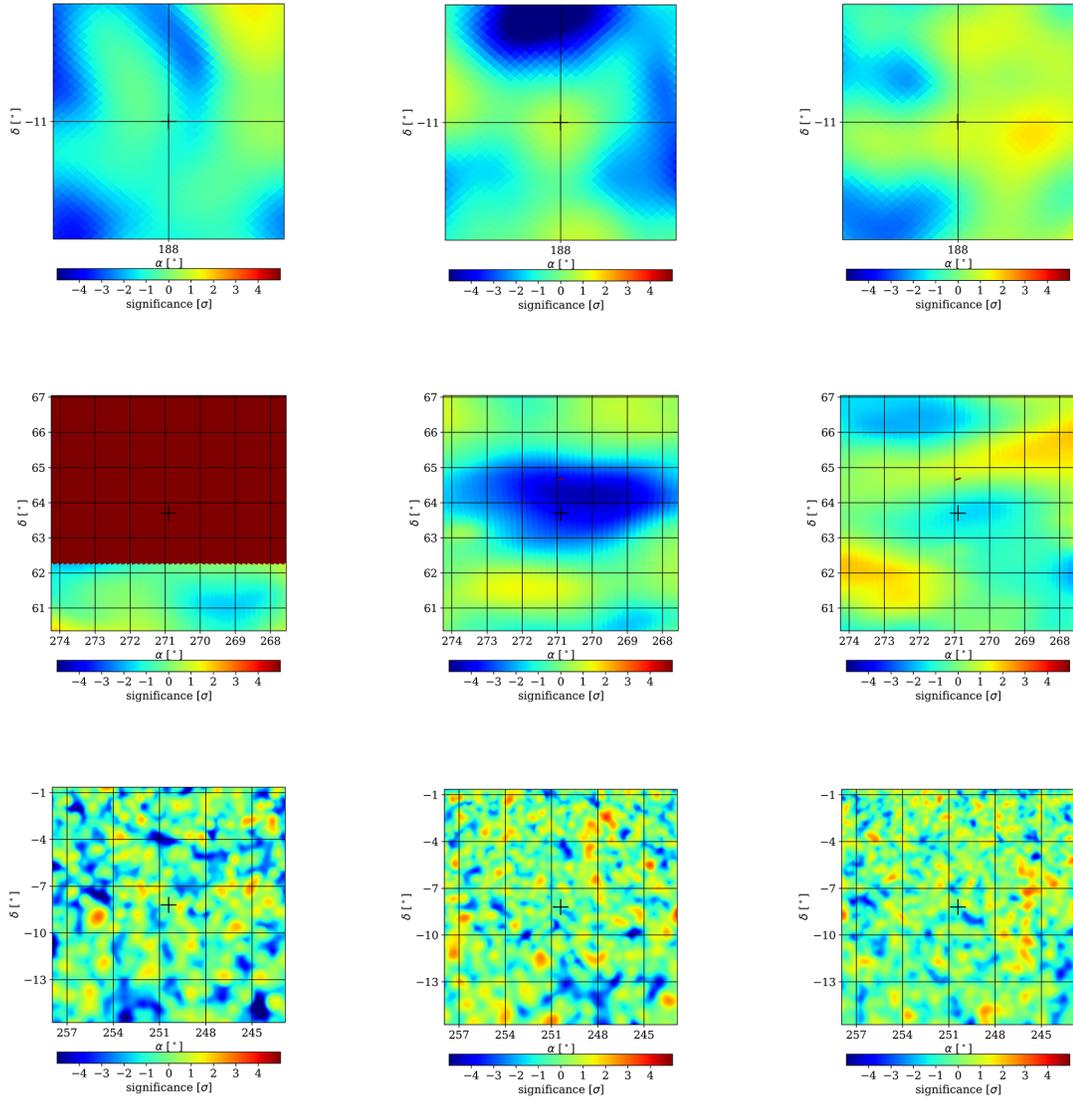


Figura 3.10: Mapas de significancia de los GRBs 150101B, 170111B y 180511A en orden descendiente partiendo desde el primer renglón. De izquierda a derecha se muestran las ventanas temporales, a 1, 10 y 100 días respectivamente.

1227 Capítulo 4

1228 Conclusiones

1229 Han pasado 50 años desde la detección del primer GRB y 47 desde que
1230 invaden la curiosidad de la comunidad científica. Durante este período de
1231 tiempo se han tenido que sortear incógnitas fundamentales para su entendi-
1232 miento como ¿Qué origina un GRB? ¿A que distancias se producen? ¿Tienen
1233 alguna dirección preferencial? y ¿De qué tamaño es la región del motor central
1234 para liberar tales cantidades de energía en escalas de tiempo de segundos? Se
1235 ha encontrado respuesta a la mayoría de estas preguntas, pero se han abierto
1236 nuevas incógnitas. Definitivamente, el GRB 170817A es uno de estos casos
1237 por su asociación con la onda gravitacional GW 170817 detectada por los
1238 observatorios LIGO-Virgo, marcando una nueva era en la astrofísica multi-
1239 mensajera.

1240

1241 Antes de la observación de GRB 170817A, los esfuerzos para buscar con-
1242 trapartes de GRBs a energías de cientos de GeV y hasta TeV se concentraban
1243 en los primeros segundos después del disparo o *trigger* inicial, principalmente
1244 en coincidencia con T_{90} o múltiplos de éste. Algunos reportes de búsqueda
1245 en minutos, horas o días después del GRB fueron resultado del tiempo en
1246 reposicionar el telescopio o de la espera para que el destello se posicionara
1247 dentro del campo de visión del instrumento. Físicamente estaban justificadas
1248 las búsquedas coincidentes o cercanas a T_{90} pues el proceso de aceleración
1249 mas probable es el SSC ya sea con los fotones semillas de la emisión principal
1250 en rayos X duros o del *afterglow*. Entonces se espera que de haber emisión en
1251 cientos de GeV o en TeV, ésta seguirá un comportamiento temporal similar
1252 al flujo de los fotones semilla y el *afterglow* o contraparte en óptico, radio y
1253 rayos X mostraba un comportamiento decreciente en el tiempo. El hecho de

1254 que la contraparte en radio y rayos X de GRB 170817A tuviera un máximo
1255 de emisión aproximadamente 120 días después de la emisión principal justi-
1256 fica una búsqueda completamente diferente a las realizadas alrededor de T_{90} .
1257 La originalidad de esta tesis está en la presentación justificada por primera
1258 vez del seguimiento durante días de GRBs, en particular de GRB 170817A
1259 y destellos de características similares, con instrumentos sensibles a energías
1260 de TeV.

1261

1262 En particular, en este trabajo se presenta el seguimiento del destello GRB
1263 170817A durante aproximadamente 120 días con el observatorio de rayos
1264 gamma HAWC. Para ello se propusieron dos búsquedas, cada una con una
1265 estrategia diferente en la selección de las ventanas de tiempo a cubrir. En
1266 la primera estrategia, se consideraron ventanas de tiempo consecutivas, ca-
1267 da una de aproximadamente 10 días. Esta búsqueda es más sensible a una
1268 emisión en TeV con un pico prominente de duración de unos cuantos días.
1269 No se encuentra emisión en TeV asociada al destello en ninguna ventana
1270 de tiempo. Las observaciones son consistentes con fluctuaciones del ruido de
1271 fondo. La segunda búsqueda considera tres ventanas de tiempo consecutivas
1272 de 1, 10 y 100 días aproximadamente. Esta búsqueda es más sensible a una
1273 emisión constante pero significativa durante todo el período. No se observa
1274 emisión en TeV en ninguna de las ventanas de tiempo y las observaciones
1275 son consistentes con fluctuaciones del ruido de fondo. En ambos casos se
1276 asume un índice espectral de 2.5 que corresponde a la emisión SSC con la
1277 contraparte de sincrotrón en el radio o rayos X. Se realizó el calculo teórico
1278 de la contribución en SSC esperada para comparar con los límites obtenidos.
1279 Desafortunadamente los límites están mas de 7 órdenes de magnitud por en-
1280 cima de lo esperado con las condiciones medibles del destello como su energía
1281 total, índice espectral, etc.

1282

1283 La posición en el cielo de GRB 170817A fue desfavorable pues se presentó
1284 en una declinación de -23° , una región con sensibilidad marginal para HAWC.
1285 A esta declinación el tránsito de la posición del destello es de apenas de 2
1286 horas de duración. El rango óptimo de declinación en HAWC es entre -26°
1287 y 60° . Dentro de ese rango, los límites al flujo impuestos por HAWC mejo-
1288 rarían al menos dos órdenes de magnitud sobre los reportados en esta tesis.
1289 Aún así cinco órdenes de magnitud por arriba de lo esperado teóricamente.
1290 Sin embargo, los modelos que describen la contraparte en radio y rayos X
1291 sugieren de que la observación del destello haya sido fuera de eje (*off-axis*) o

1292 desalíneada al eje del chorro de emisión. Si esto fuese cierto, una observación
1293 alíneada con el eje (*on-axis*) incrementaría la predicción teórica por algunos
1294 órdenes de magnitud. Recordemos que la luminosidad de este destello fue ba-
1295 ja e inicialmente fue detectado en el rango de los rayos gammas. Por lo que
1296 no es descabellado pensar, que otro destello en una declinación mas favorable
1297 a HAWC y visto alíneado con el eje sería un buen candidato para hallar una
1298 contraparte en rayos gammas de energías de TeV.

1299

1300 Se extendió la búsqueda con la estrategia para aquellos GRBs propuestos
1301 por von Kienlin con propiedades observables similares al GRB 170817A. No
1302 se encontró emisión en TeV y las observaciones son consistentes con fluctua-
1303 ciones de ruido de fondo. Cuando se asume un corrimiento al rojo similar
1304 al GRB 170817A ($z=0.009$), GRB 180511A presenta el límite superior en el
1305 flujo más restrictivo. Este destello no generó ningún tipo de alerta a la co-
1306 munidad, por lo que no hubo campañas de seguimiento en otras frecuencias.

1307

1308 Finalmente, ya no como parte de esta tesis pero como extensión de este
1309 trabajo se esta realizando la misma búsqueda para todos los destellos cortos
1310 en el campo de visión de HAWC. Preliminarmente aún no se ha observado
1311 emisión en TeV en ellos aunque el análisis no ha terminado. Es importante
1312 mencionar que gracias a la capacidad del observatorio HAWC de ver todo el
1313 cielo que pasa por encima de él y que se almacenan estos datos, es que pode-
1314 mos regresar a realizar búsquedas en otros tiempos y con otras condiciones
1315 de búsqueda. Como parte de HAWC, este trabajo es realizado dentro del pro-
1316 grama de seguimiento de GRBs. Aunado a este trabajo existe un programa
1317 dedicado al seguimiento de alertas de ondas gravitacionales por LIGO/Virgo.

1318

1319 Hasta la fecha, la no observación de destellos a energías de TeV es con-
1320 sistente con lo esperado de ~ 1.3 por año (ver capítulo 2.2). Las nuevas
1321 detecciones de MAGIC y H.E.S.S. de emisión por arriba de cientos de GeV
1322 da nuevas esperanzas a que la emisión cerca de 1 TeV sea posible. Además,
1323 HAWC ha mejorado su software de reconstrucción, mejorando su sensibili-
1324 dad a eventos con energías por debajo de unos cuantos TeV. Es posible, que
1325 cuando estas mejoras estén implementadas podamos detectar algún o algunos
1326 destellos de rayos gamma.

1327 Apéndice A

1328 Mapas de Significancia

1329 A continuación se presentan los mapas de significancia por cada uno de
1330 las ventanas temporales de la segunda búsqueda. La Figura A.1 es por la
1331 primer ventana, la Figura A.2 por la segunda ventana y finalmente A.3 por
1332 la tercer ventana de tiempo. El hecho de que en la Figura A.1 falte el bin
1333 de multiplicidad 9 es debido a que el *background* está mal calculado. Con un
1334 análisis distinto al realizado en este trabajo podría obtenerse ese mapa, pero
1335 se ha desestimado pues ese bin es el más energético, del cuál no se espera
1336 emisión.

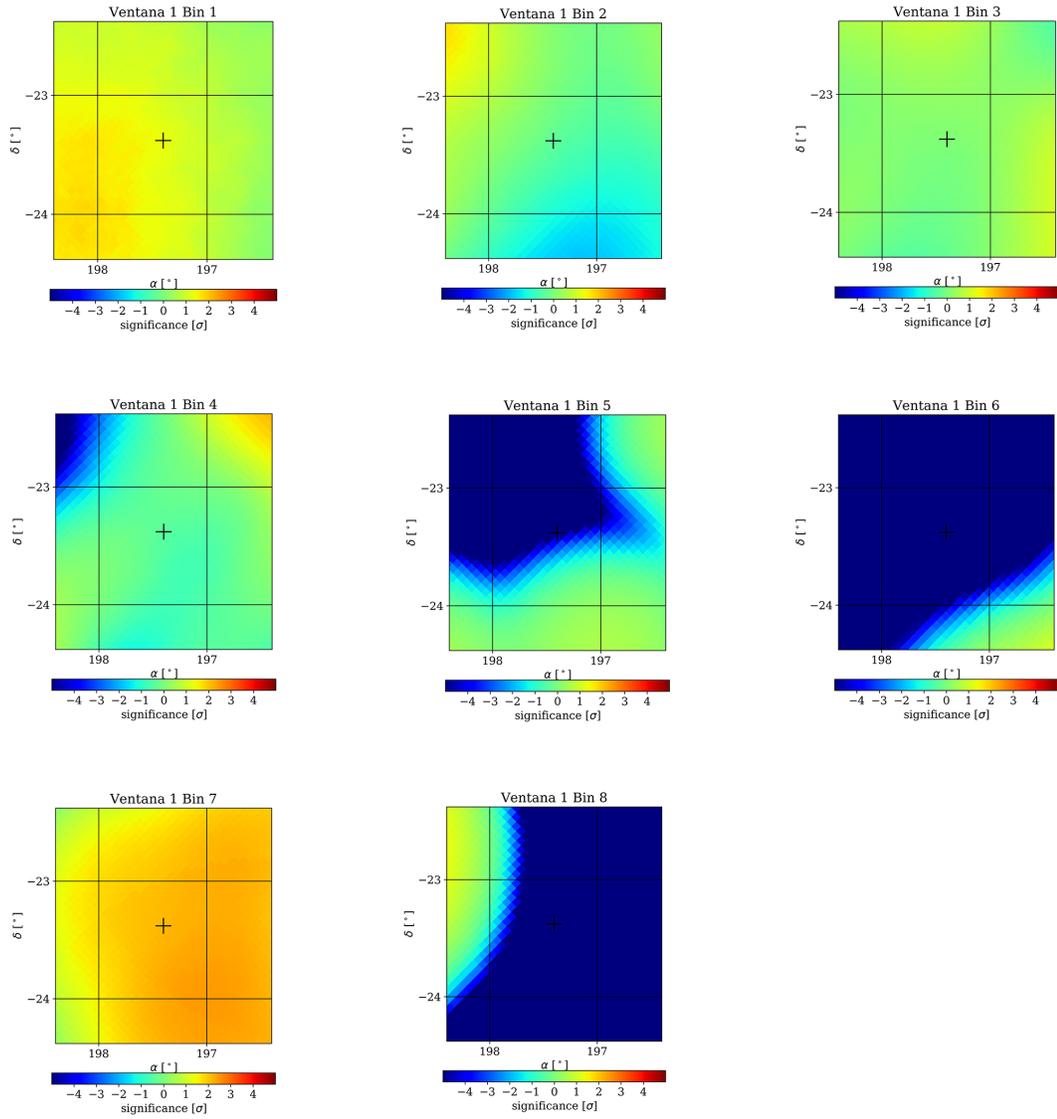


Figura A.1: Mapas de significancia en función de los bins de multiplicidad del GRB 170817A de la primer ventana temporal.

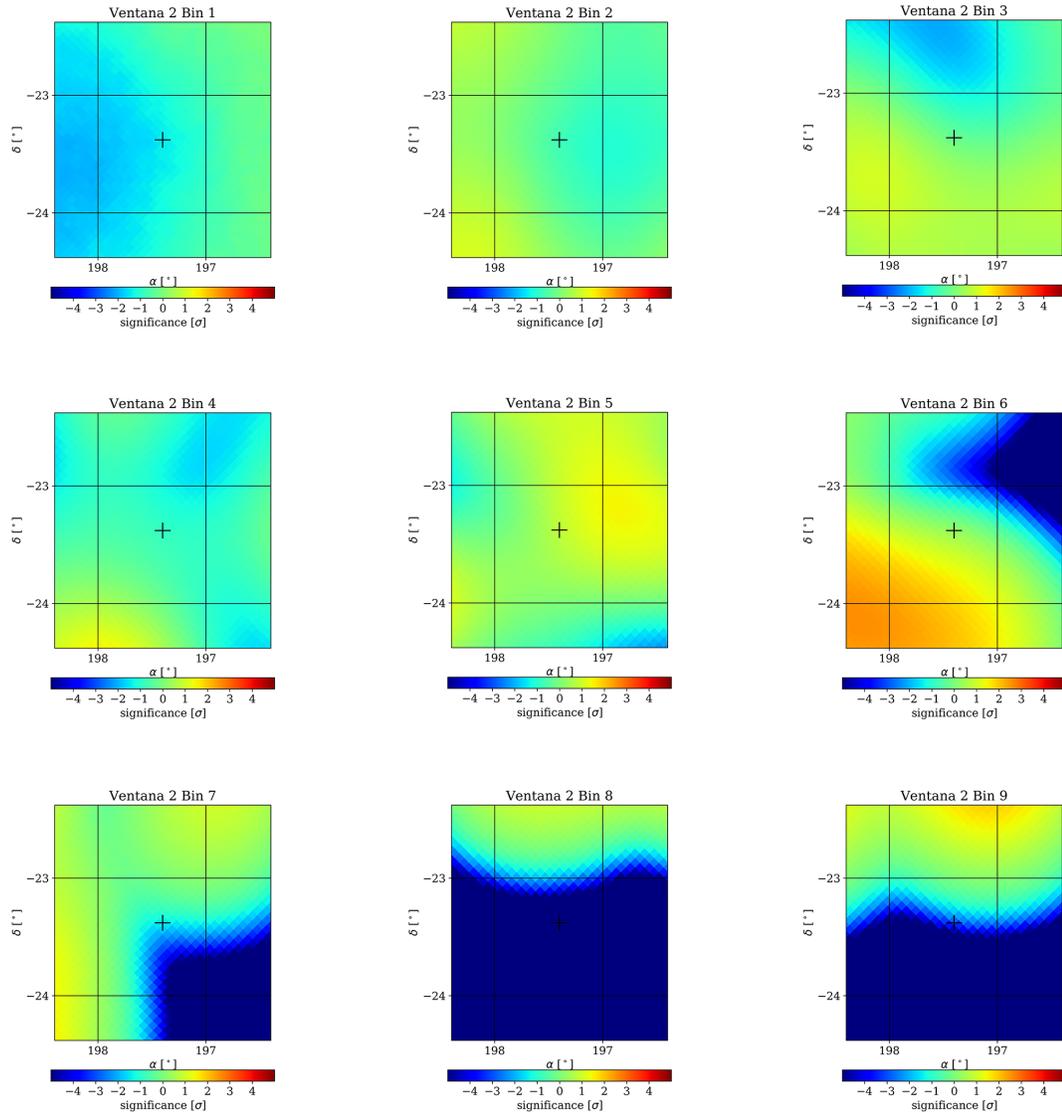


Figura A.2: Mapas de significancia en función de los bins de multiplicidad del GRB 170817A de la segunda ventana temporal.

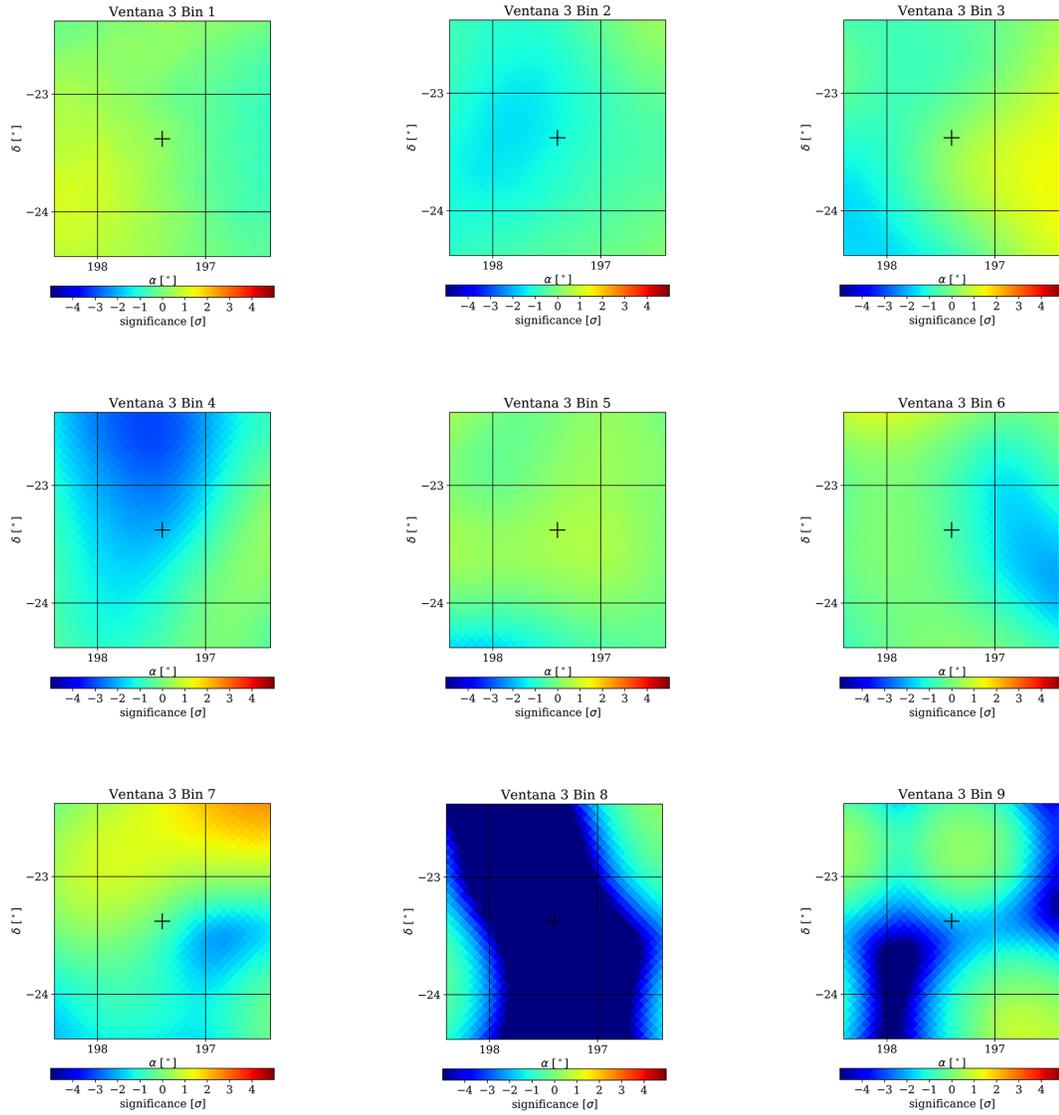


Figura A.3: Mapas de significancia en función de los bins de multiplicidad del GRB 170817A de la tercera ventana temporal.

1337 Apéndice B

1338 Mapas de Significancia para 1339 GRBs similares al GRB 170817A

1340 Los mapas de significancia de los GRBs 150101B, 170111B y 180511A en
1341 sus tres ventanas de tiempo se muestran en la Figura 3.10 centradas en la
1342 posición que reporta Fermi-GBM, mientras que la Figura 3.8 muestra su tran-
1343 sito al momento de su origen sobre el cielo de HAWC, esta Figura también
1344 incluyen a los GRBs 130502A y 140511A. Desafortunadamente, el estudio
1345 del GRB 130502A hubiera sido significativo en el sentido de que es el que
1346 más tiempo transcurre dentro de la región de máxima sensibilidad de HAWC.

1347
1348 Los mapas de significancia en función de la multiplicidad para las venta-
1349 nas temporales 1,2 y 3 para los GRBs son las Figuras; B.1, B.2 y B.3 para el
1350 GRB 150101B, las Figuras B.4, B.5 y B.6 para el GRB 170111B y finalmente
1351 lo son las Figuras B.7, B.8 y B.9 para el GRB 180511A. Notamos que en
1352 estos bins tampoco hay evidencia de un claro exceso sobre el *background*
1353 que genere indicios de detección de la señal de alguno de estos eventos. Nue-
1354 vamente, la Figura B.5 muestra una ausencia del mapa de significancia del
1355 bin de multiplicidad 8, esto es nuevamente a una incorrecta estimación del
1356 *background* en ese bin. También se extiende al bin de multiplicidad 9, que
1357 muestra una franja roja. La Figura 3.8 exhibe que la posición de este GRB
1358 está en la frontera y es marginal a HAWC.

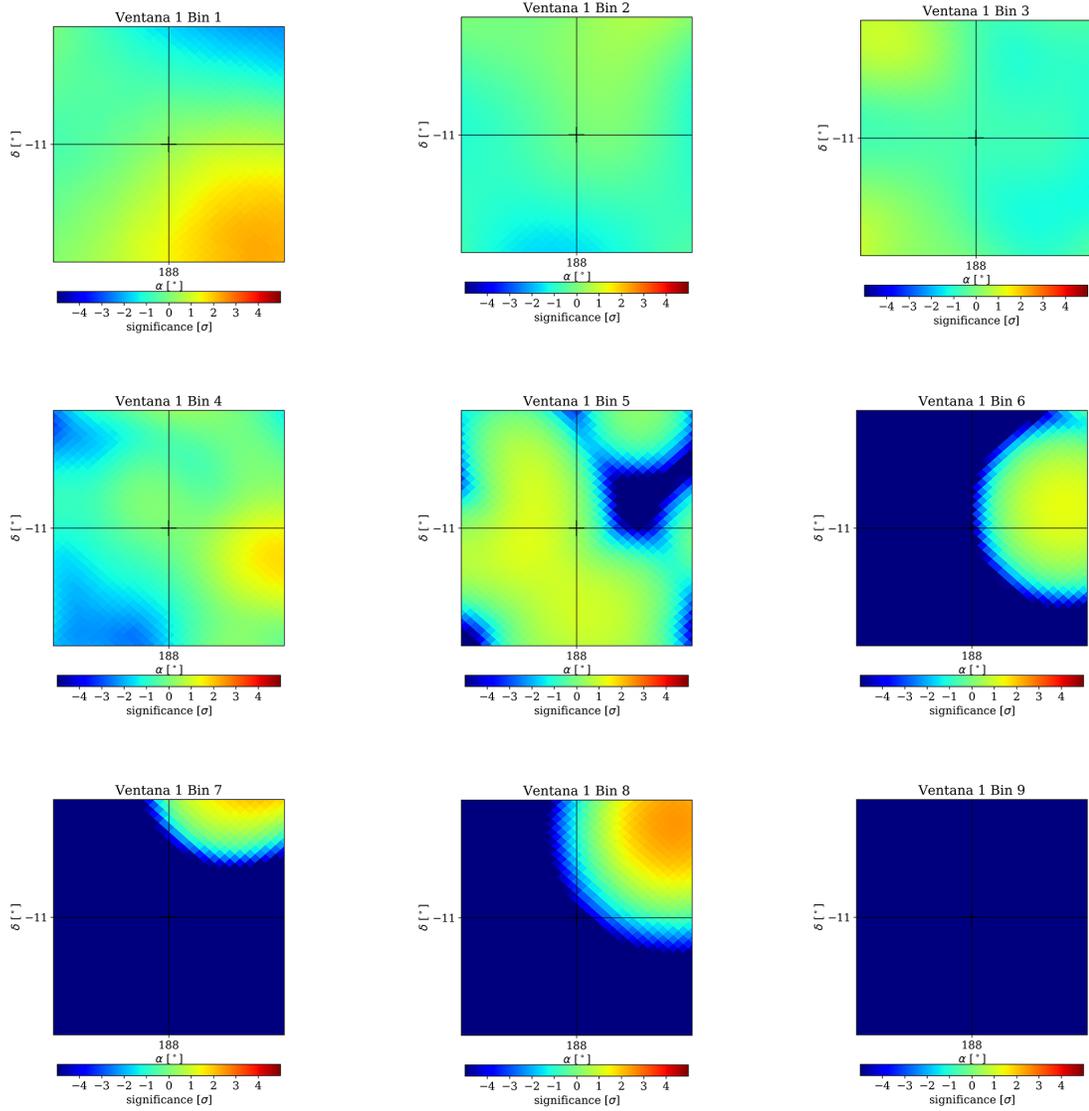


Figura B.1: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 150101B para la primer ventana de tiempo.

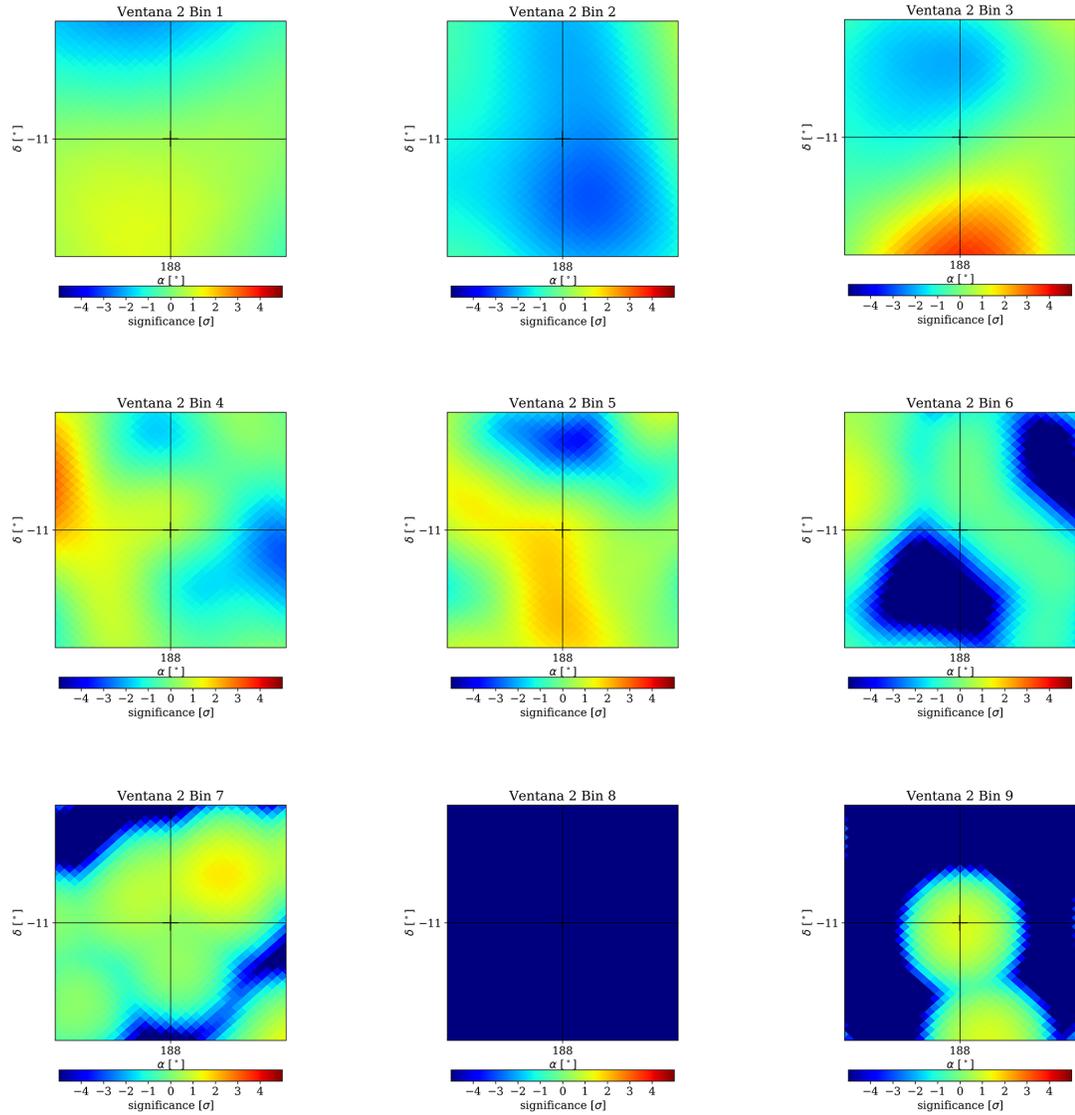


Figura B.2: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 150101B para la segunda ventana de tiempo.

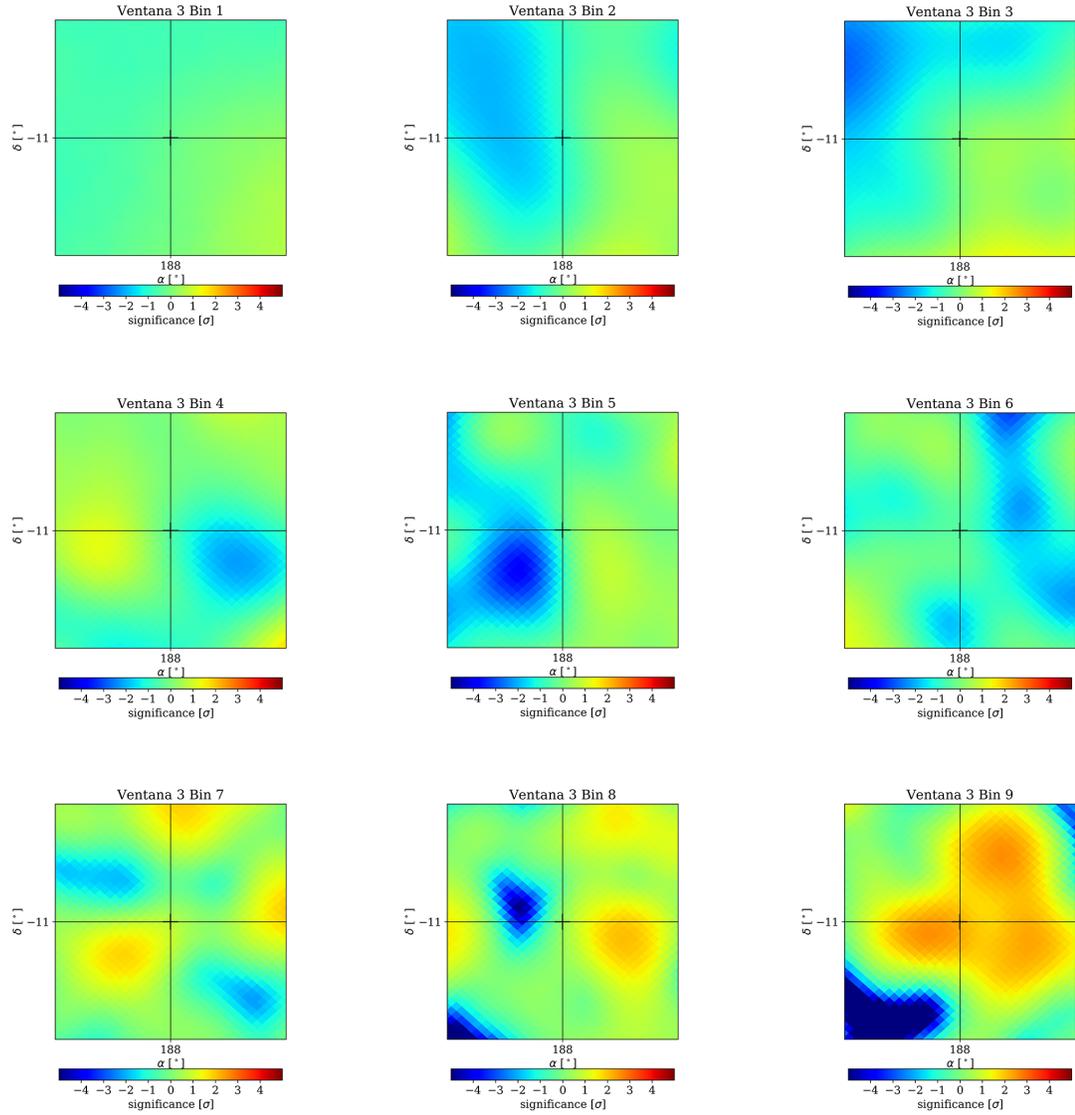


Figura B.3: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 150101B para la tercer ventana de tiempo.

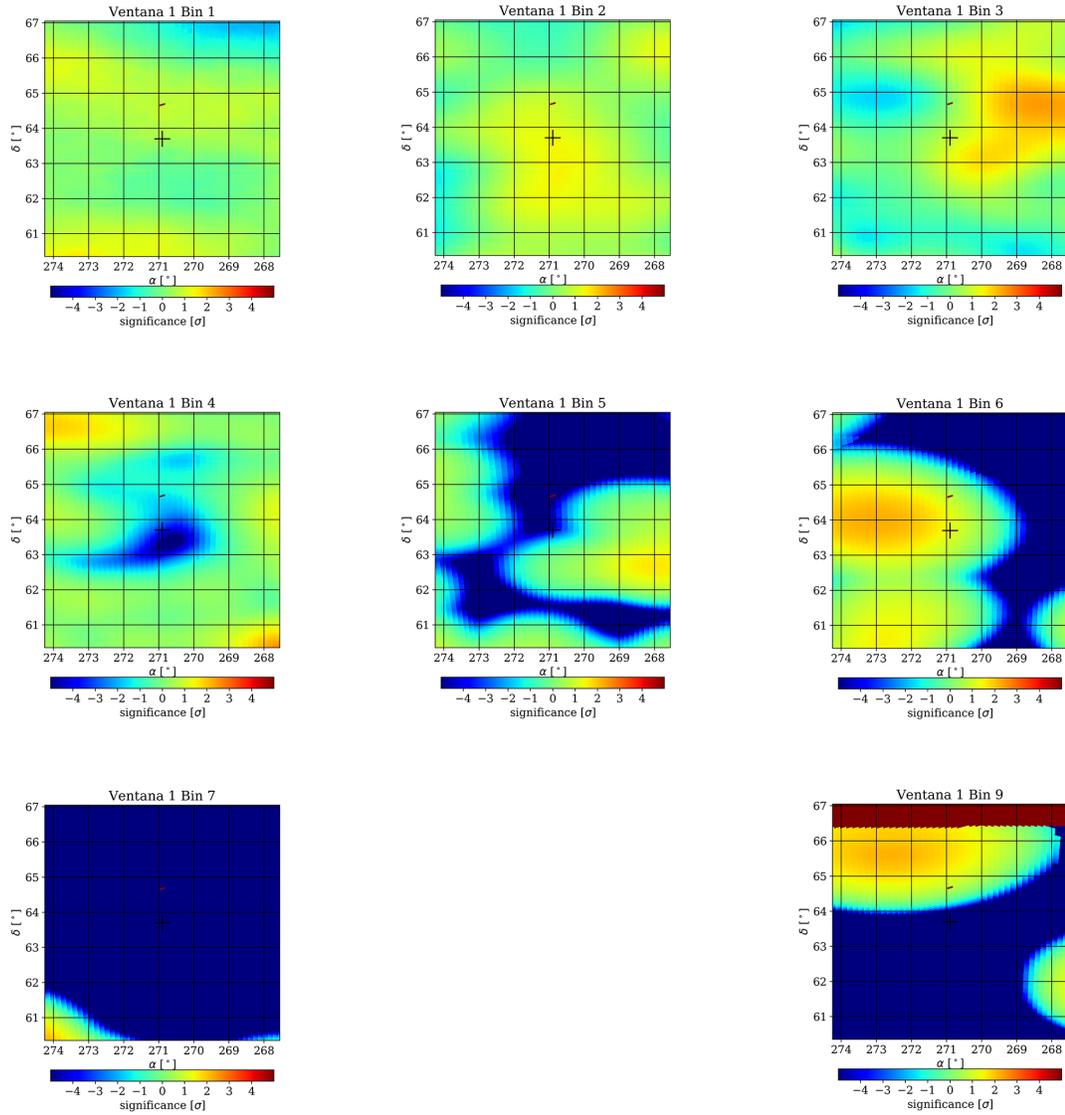


Figura B.4: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 170111B para la primer ventana de tiempo.

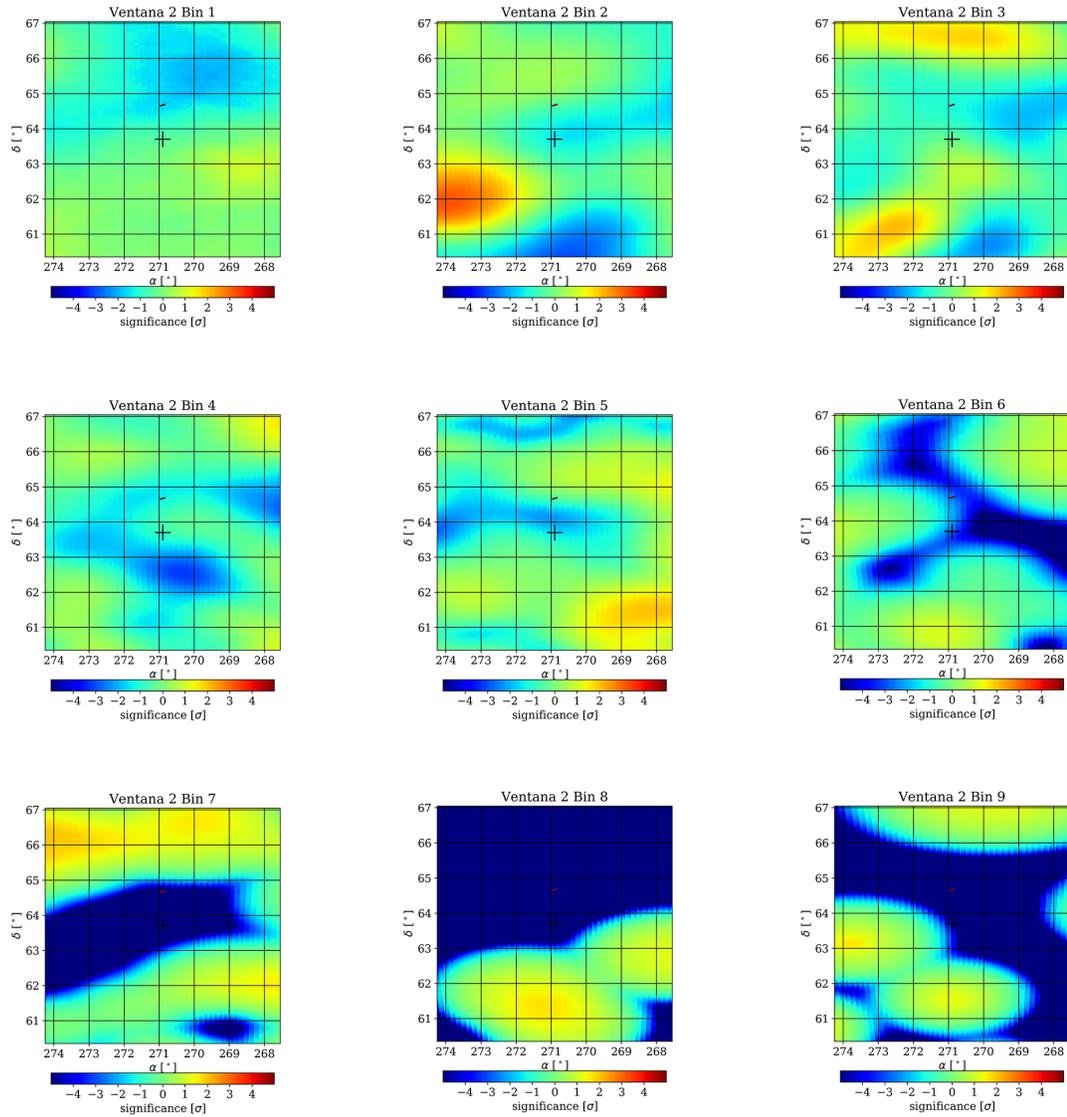


Figura B.5: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 170111B para la segunda ventana de tiempo.

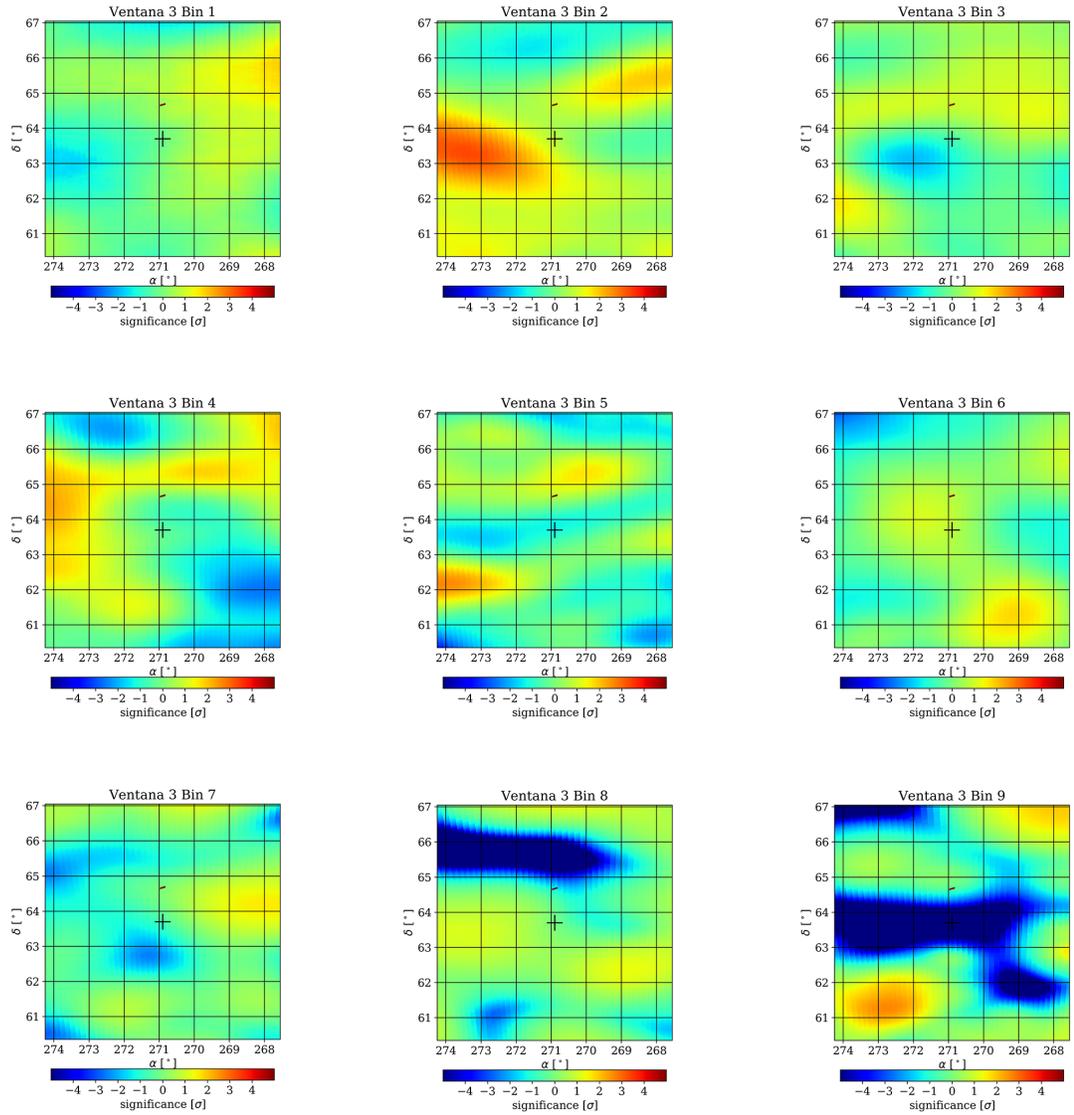


Figura B.6: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 170111B para la tercer ventana de tiempo.

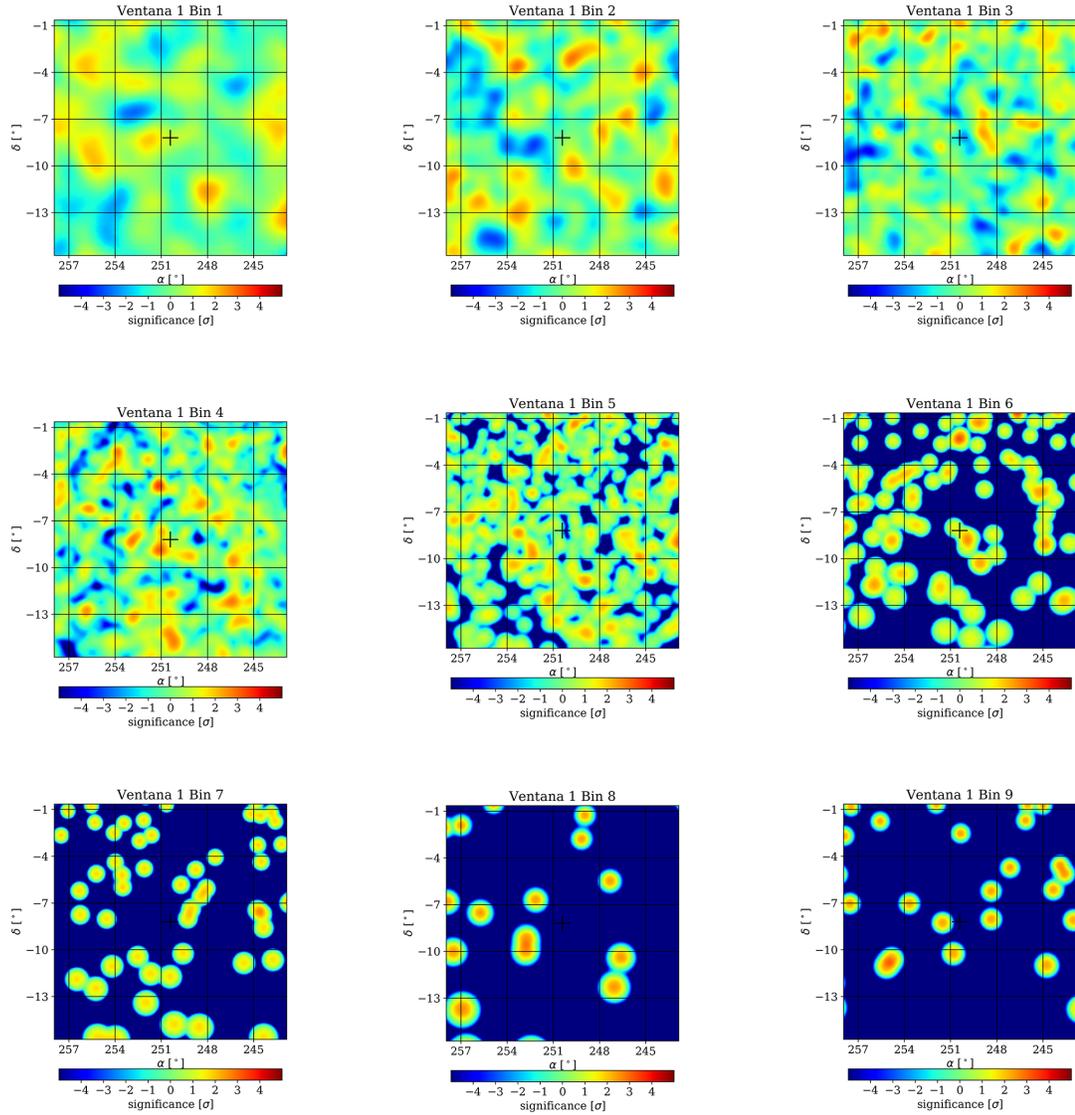


Figura B.7: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 180511A para la primer ventana de tiempo.

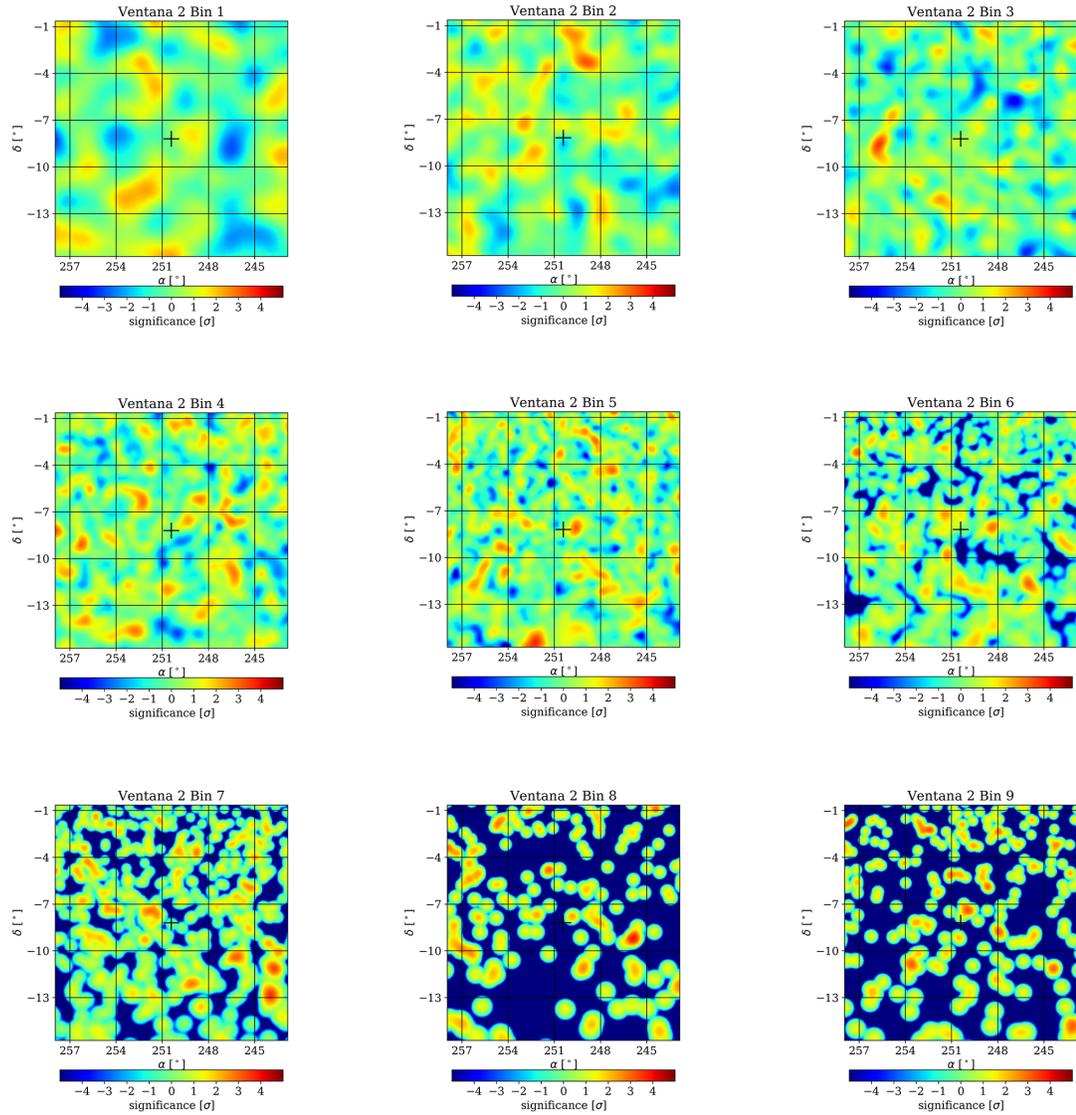


Figura B.8: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 180511A para la segunda ventana de tiempo.

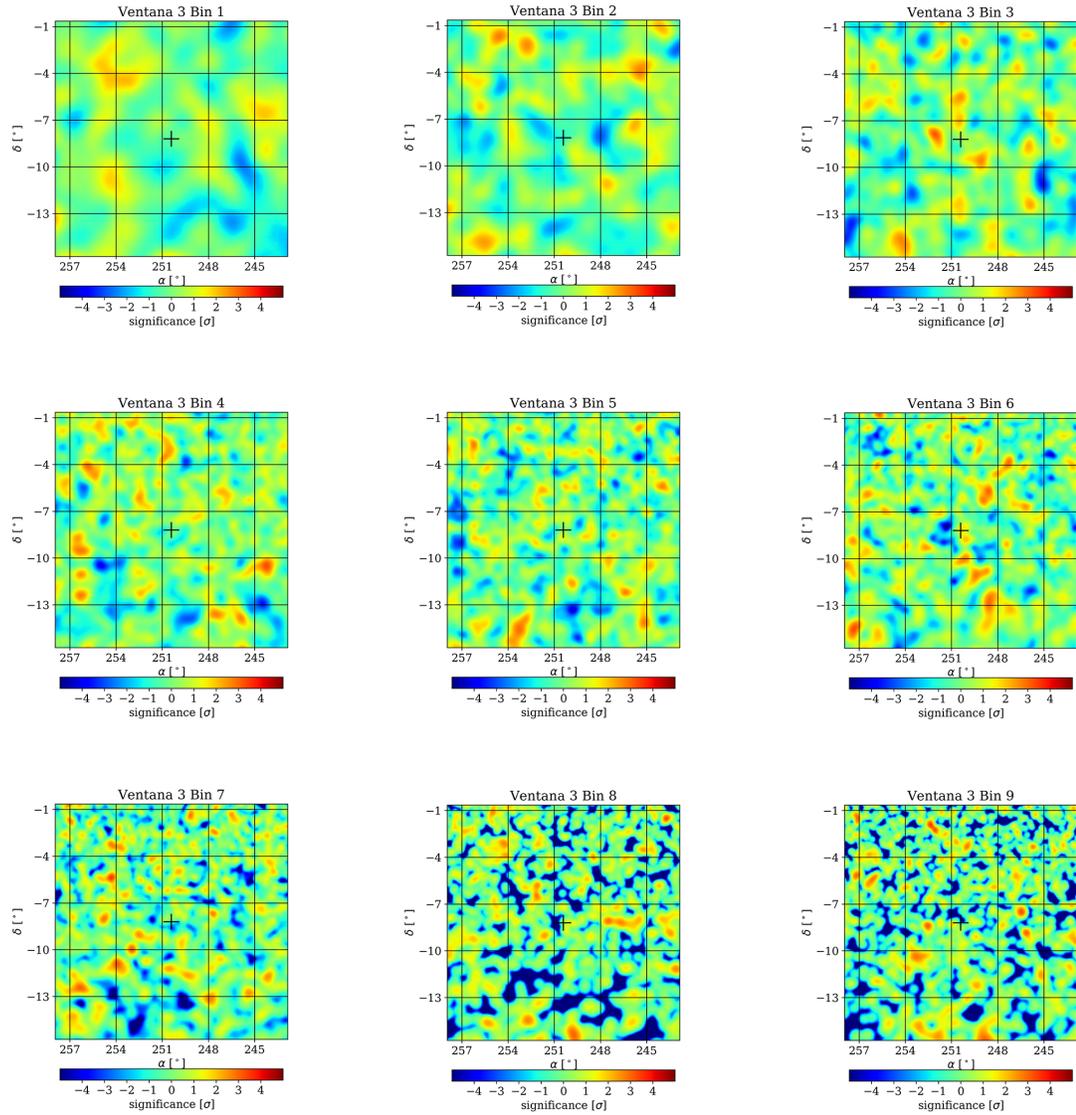


Figura B.9: Mapas de significancia de los bins multiplicativos del GRB 180511A para la tercer ventana de tiempo.

1359 Apéndice C

1360 Conferencias nacionales e 1361 internacionales

1362 Los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de esta tesis han sido
1363 presentados en las siguientes conferencias:

- 1364 ■ Búsqueda de fotones de muy alta energía procedente de los destellos de
1365 rayos gamma con el Observatorio HAWC. Congreso Nacional de Física.
1366 Tabasco, México. Octubre 6-11 2019.
- 1367 ■ Search for very-high-energy photons from Gamma-ray bursts with HAWC.
1368 International Cosmic Ray Conference. Madison, Estados Unidos. Julio
1369 24 - Agosto 1 2019.
- 1370 ■ Search for very-high-energy emission with HAWC from GW170817
1371 event. International Cosmic Ray Conference. Madison, Estados Uni-
1372 dos. Julio 24 - Agosto 1 2019.
- 1373 ■ Monitoring the TeV sky with HAWC. Monitoring the non-thermal Uni-
1374 verse 2018. Cochem (Mosel), Alemania. Septiembre 18-21 2018.
- 1375 ■ Inverse Compton scattering and short Gamma-ray bursts. TeV Particle
1376 Astrophysics 2018. Berlín, Alemania. Agosto 27 - 31 2018.
- 1377 ■ Search of late time emission from GRB 170817A. Deciphering the Vio-
1378 lent Universe. Playa del Carmen, Mexico. Diciembre 11 - 15 2017.

1379 Bibliografía

- 1380 Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., Acernese, F., and
1381 et. al. (2019). GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of
1382 Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First
1383 and Second Observing Runs. *Physical Review X*, 9(3):031040.
- 1384 Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., and et. al. (2017).
1385 Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *ApJL*,
1386 848:L12.
- 1387 Abdalla, H., Adam, R., Aharonian, F., Ait Benkhali, F., and et.al. (2019). A
1388 very-high-energy component deep in the γ -ray burst afterglow. *nature*,
1389 575(7783):464–467.
- 1390 Abeysekara, A. U., Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., Álvarez, J. D., and et.
1391 al. (2017a). Daily Monitoring of TeV Gamma-Ray Emission from Mrk
1392 421, Mrk 501, and the Crab Nebula with HAWC. *ApJ*, 841:100.
- 1393 Abeysekara, A. U., Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., and et.al. (2017b). Ob-
1394 servation of the Crab Nebula with the HAWC Gamma-Ray Observatory.
1395 *ApJ*, 843:39.
- 1396 Abeysekara, A. U., Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., and et.al. (2017c).
1397 The 2HWC HAWC Observatory Gamma-Ray Catalog. *ApJ*, 843:40.
- 1398 Abeysekara, A. U., Alfaro, R., Alvarez, C., and Álvarez, J. D. e. (2015).
1399 Search for Gamma-Rays from the Unusually Bright GRB 130427A with
1400 the HAWC Gamma-Ray Observatory. *ApJ*, 800(2):78.
- 1401 Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., and et.al.
1402 (2019a). Teraelectronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C.
1403 *nature*, 575(7783):455–458.

- 1404 Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Engels, A. A., and et.al. (2019b).
 1405 Observation of inverse Compton emission from a long γ -ray burst. *nature*, 575(7783):459–463.
 1406
- 1407 Ackermann, M., Ajello, M., Asano, K., and Atwood, e. (2014). Fermi-lat ob-
 1408 servations of the gamma-ray burst grb 130427a. *Science*, 343(6166):42–
 1409 47.
- 1410 Ajello, M., Arimoto, M., Axelsson, M., Baldini, L., and et. al. (2019). A
 1411 Decade of Gamma-Ray Bursts Observed by Fermi-LAT: The Second
 1412 GRB Catalog. *ApJ*, 878(1):52.
- 1413 Alfaro, R., Alvarez, C., Álvarez, J. D., Arceo, R., and et.al. (2017). Search
 1414 for Very-high-energy Emission from Gamma-Ray Bursts Using the First
 1415 18 Months of Data from the HAWC Gamma-Ray Observatory. *ApJ*,
 1416 843(2):88.
- 1417 Atkins, R., Benbow, W., Berley, D., Blaufuss, E., and et.al. (2003). Obser-
 1418 vation of TeV Gamma Rays from the Crab Nebula with Milagro Using
 1419 a New Background Rejection Technique. *ApJ*, 595:803–811.
- 1420 Ayala, H. (2019). LIGO/Virgo S190426c: HAWC follow-up. *GRB Coordinates*
 1421 *Network, Circular Service, No. 24235, (2019), 24235.*
- 1422 Berger, E. (2014). Short-Duration Gamma-Ray Bursts. *Annual Review of*
 1423 *Astronomy and Astrophysics*, 52:43–105.
- 1424 Berger, E., Price, P. A., Cenko, S. B., Gal-Yam, A., and et.al. (2005). The
 1425 afterglow and elliptical host galaxy of the short γ -ray burst GRB 050724.
 1426 *nature*, 438:988–990.
- 1427 Blandford, R. D. and McKee, C. F. (1976). Fluid dynamics of relativistic
 1428 blast waves. *Physics of Fluids*, 19:1130–1138.
- 1429 Blandford, R. D. and Znajek, R. L. (1977). Electromagnetic extraction of
 1430 energy from Kerr black holes. *mnras*, 179:433–456.
- 1431 Burrows, D. N., Hill, J. E., Nousek, J. A., Wells, A. A., Short, A. D., Willin-
 1432 gale, R., Citterio, O., Chincarini, G., and Tagliaferri, G. (2000). *Swift*
 1433 *X-Ray Telescope*, volume 4140 of *Society of Photo-Optical Instrumenta-*
 1434 *tion Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 64–75.

- 1435 Cavallo, G. and Rees, M. J. (1978). A qualitative study of cosmic fireballs
1436 and gamma-ray bursts. *mnras*, 183:359–365.
- 1437 Clasey Essick, R. (2017). LIGO/Virgo G298048: Fermi GBM trig-
1438 ger 524666471/170817529: LIGO/Virgo Identification of a possible
1439 gravitational-wave counterpart. *GRB Coordinates Network, Circular*
1440 *Service, No. 21505, (2017)*, 21505.
- 1441 Connaughton, V. (2017). LIGO/Virgo G298048: Fermi GBM trigger
1442 170817.529 and LIGO single IFO trigger. *GRB Coordinates Network,*
1443 *Circular Service, No. 21506, (2017)*, 21506.
- 1444 Coulter, D. A., Foley, R. J., Kilpatrick, C. D., Drout, M. R., and et.al. (2017).
1445 Swope Supernova Survey 2017a (SSS17a), the optical counterpart to a
1446 gravitational wave source. *Science*, 358:1556–1558.
- 1447 D’Avanzo, P., Campana, S., Salafia, O. S., Ghirland a, G., and et.al. (2018).
1448 The evolution of the X-ray afterglow emission of GW 170817/ GRB
1449 170817A in XMM-Newton observations. *AAP*, 613:L1.
- 1450 de Naurois, M. (2019). GRB190829A: Detection of VHE gamma-ray emission
1451 with H.E.S.S. *The Astronomer’s Telegram*, 13052:1.
- 1452 Dermer, C. D., Chiang, J., and Mitman, K. E. (2000). Beaming, Baryon
1453 Loading, and the Synchrotron Self-Compton Component in Gamma-Ray
1454 Bursts. *ApJ*, 537(2):785–795.
- 1455 Eichler, D., Livio, M., Piran, T., and Schramm, D. N. (1989). Nucleosynt-
1456 hesis, neutrino bursts and γ -rays from coalescing neutron stars. *nature*,
1457 340(6229):126–128.
- 1458 Fairhurst, S. (2011). Source localization with an advanced gravitational wave
1459 detector network. *Classical and Quantum Gravity*, 28(10):105021.
- 1460 Feldman, G. J. and Cousins, R. D. (1998). Unified approach to the classical
1461 statistical analysis of small signals. *PRD*, 57:3873–3889.
- 1462 Fraija, N., Barniol Duran, R., Dichiara, S., and Beniamini, P. (2019a). Syn-
1463 chrotron Self-Compton as a Likely Mechanism of Photons beyond the
1464 Synchrotron Limit in GRB 190114C. *ApJ*, 883(2):162.

- 1465 Fraija, N., De Colle, F., Veres, P., Dichiara, S., Barniol Duran, R., and et.al.
1466 (2019b). Description of atypical bursts seen slightly off-axis. *arXiv e-*
1467 *prints*, page arXiv:1906.00502.
- 1468 Fraija, N., De Colle, F., Veres, P., Dichiara, S., Barniol Duran, R., Galván-
1469 Gámez, A., and et.al. (2019c). The Short GRB 170817A: Modeling the
1470 Off-axis Emission and Implications on the Ejecta Magnetization. *The*
1471 *Astrophysical Journal*, 871(1):123.
- 1472 Fraija, N., Dichiara, S., Pedreira, A. C. C. d. E. S., Galvan-Gamez, A., Be-
1473 cerra, R. L., and et.al. (2019d). Modeling the Observations of GRB
1474 180720B: from Radio to Sub-TeV Gamma-Rays. *ApJ*, 885(1):29.
- 1475 Fraija, N., Dichiara, S., Pedreira, A. C. C. d. E. S., Galván-Gámez, A.,
1476 Becerra, R., and et.al. (2019e). Analysis and Modeling of the Multi-
1477 wavelength Observations of the Luminous GRB 190114C. *ApJL*,
1478 879(2):L26.
- 1479 Fraija, N. and Gonzalez, M. M. (2019). Search for very-high-energy photons
1480 from Gamma-ray bursts with HAWC. In *36th International Cosmic*
1481 *Ray Conference (ICRC2019)*, volume 36 of *International Cosmic Ray*
1482 *Conference*, page 679.
- 1483 Fraija, N., Lee, W., and Veres, P. (2016a). Modeling the Early Multiwave-
1484 length Emission in GRB130427A. *ApJ*, 818(2):190.
- 1485 Fraija, N., Lee, W. H., Araya, M., Veres, P., Barniol Duran, R., and Guiriec,
1486 S. (2017a). Modeling the High-energy Emission in GRB 110721A and
1487 Implications on the Early Multiwavelength and Polarimetric Observa-
1488 tions. *ApJ*, 848(2):94.
- 1489 Fraija, N., Lee, W. H., Veres, P., and Barniol Duran, R. (2016b). Modeling
1490 the Early Afterglow in the Short and Hard GRB 090510. *ApJ*, 831(1):22.
- 1491 Fraija, N., Lopez-Camara, D., Pedreira, A. C. C. d. E. S., Betancourt Ka-
1492 menetskaia, B., Veres, P., and Dichiara, S. (2019f). Signatures from
1493 a Quasi-spherical Outflow and an Off-axis Top-hat Jet Launched in a
1494 Merger of Compact Objects: An Analytical Approach. *ApJ*, 884(1):71.

- 1495 Fraija, N., Pedreira, A. C. C. d. E. S., and Veres, P. (2019g). Light Curves of
1496 a Shock-breakout Material and a Relativistic Off-axis Jet from a Binary
1497 Neutron Star System. *ApJ*, 871(2):200.
- 1498 Fraija, N., Veres, P., Zhang, B. B., Barniol Duran, R., Becerra, R. L., and
1499 et.al. (2017b). Theoretical Description of GRB 160625B with Wind-
1500 to-ISM Transition and Implications for a Magnetized Outflow. *ApJ*,
1501 848(1):15.
- 1502 Franceschini, A., Rodighiero, G., and Vaccari, M. (2008). Extragalactic
1503 optical-infrared background radiation, its time evolution and the cosmic
1504 photon-photon opacity. *Astronomy and Astrophysics*, 487(3):837–852.
- 1505 Galván, A. (2019a). LIGO/Virgo S190910d: No counterpart candidates
1506 in HAWC observations. *GRB Coordinates Network, Circular Service*,
1507 *No. 25696, (2019)*, 25696.
- 1508 Galván, A. (2019b). LIGO/Virgo S190923y: No counterpart candidates
1509 in HAWC observations. *GRB Coordinates Network, Circular Service*,
1510 *No. 25813, (2019)*, 25813.
- 1511 Galván, A. (2019c). LIGO/Virgo S191205ah: No counterpart candidates
1512 in HAWC observations. *GRB Coordinates Network, Circular Service*,
1513 *No. 26354, (2019)*, 26354.
- 1514 Galván-Gómez, A., Fraija, N., and Magdalena Gonzalez, M. (2019). Search
1515 for very-high-energy emission with HAWC from GW170817 event. *arXiv*
1516 *e-prints*, page arXiv:1908.10031.
- 1517 Gao, H., Lei, W.-H., Wu, X.-F., and Zhang, B. (2013). Compton scattering
1518 of self-absorbed synchrotron emission. *mnras*, 435(3):2520–2531.
- 1519 Gehrels, N., Chincarini, G., Giommi, P., Mason, K. O., and et.al. (2005).
1520 Erratum: “The Swift Gamma-Ray Burst Mission”. *ApJ*, 621:558–558.
- 1521 Goodman, J. (1986). Are gamma-ray bursts optically thick? *ApJL*, 308:L47–
1522 L50.
- 1523 Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., Wandelt, B. D., and et.al. (2005).
1524 HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast
1525 Analysis of Data Distributed on the Sphere. *ApJ*, 622:759–771.

- 1526 Gottlieb, O., Nakar, E., and Piran, T. (2019). Detectability of neutron star
1527 merger afterglows. *mnras*, 488(2):2405–2411.
- 1528 Granot, J., Piran, T., and Sari, R. (1999). Synchrotron Self-Absorption in
1529 Gamma-Ray Burst Afterglow. *ApJ*, 527:236–246.
- 1530 Jardin-Blicq, A. and Joshi, V. (2017). HAWC upgrade for multi-TeV γ -ray
1531 detection. In *6th International Symposium on High Energy Gamma-Ray
1532 Astronomy*, volume 1792 of *American Institute of Physics Conference
1533 Series*, page 070010.
- 1534 Katz, J. I. (1994). Low-frequency spectra of gamma-ray bursts. *ApJL*,
1535 432:L107–L109.
- 1536 Katz, J. I. and Piran, T. (1997). Persistent Counterparts to Gamma-Ray
1537 Bursts. *ApJ*, 490:772–778.
- 1538 Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., Bhat, N. P., and et.al.
1539 (1993). Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts. *ApJ*,
1540 413:L101.
- 1541 Lazzati, D., Perna, R., Morsony, B. J., Lopez-Camara, D., and et.al. (2018).
1542 Late Time Afterglow Observations Reveal a Collimated Relativistic Jet
1543 in the Ejecta of the Binary Neutron Star Merger GW170817. *prl*,
1544 120(24):241103.
- 1545 Lithwick, Y. and Sari, R. (2001). Lower Limits on Lorentz Factors in Gamma-
1546 Ray Bursts. *ApJ*, 555:540–545.
- 1547 Margutti, R., Alexander, K. D., Xie, X., Sironi, L., and et.al. (2018). The
1548 Binary Neutron Star Event LIGO/Virgo GW170817 160 Days after Mer-
1549 ger: Synchrotron Emission across the Electromagnetic Spectrum. *ApJ*,
1550 856:L18.
- 1551 Martinez-Castellanos, I. (2019a). LIGO/Virgo S190901ap: No counterpart
1552 candidates in HAWC observations. *GRB Coordinates Network, Circular
1553 Service, No. 25607, (2019)*, 25607.
- 1554 Martinez-Castellanos, I. (2019b). LIGO/Virgo S190910h: No counterpart
1555 candidates in HAWC observations. *GRB Coordinates Network, Circular
1556 Service, No. 25715, (2019)*, 25715.

- 1557 Martinez-Castellanos, I. (2019c). LIGO/Virgo S190930t: No counterpart can-
1558 didates in HAWC observations. *GRB Coordinates Network, Circular*
1559 *Service, No. 25885, (2019)*, 25885.
- 1560 Martinez-Castellanos, I. (2019d). Search for very-high-energy gamma-ray
1561 counterparts of gravitational waves with HAWC. *arXiv e-prints*, page
1562 arXiv:1908.06122.
- 1563 Matz, S. M., Forrest, D. J., Vestrand, W. T., Chupp, E. L., and et.al. (1985).
1564 High-energy emission in gamma-ray bursts. *ApJL*, 288:L37–L40.
- 1565 Mészáros, P. (2006). Gamma-ray bursts. *Reports on Progress in Physics*,
1566 69(8):2259–2321.
- 1567 Meszaros, P. and Rees, M. J. (1993). Gamma-Ray Bursts: Multiwaveband
1568 Spectral Predictions for Blast Wave Models. *ApJL*, 418:L59.
- 1569 Mészáros, P. and Rees, M. J. (1997). Poynting Jets from Black Holes and
1570 Cosmological Gamma-Ray Bursts. *ApJL*, 482:L29–L32.
- 1571 Mészáros, P., Rees, M. J., and Wijers, R. A. M. J. (1999). Energetics and
1572 beaming of gamma ray burst triggers. *New Astronomy*, 4:303–312.
- 1573 Metzger, B. D. and Berger, E. (2012). What is the Most Promising Electro-
1574 magnetic Counterpart of a Neutron Star Binary Merger? *ApJ*, 746(1):48.
- 1575 Narayan, R., Paczynski, B., and Piran, T. (1992). Gamma-Ray Bursts as the
1576 Death Throes of Massive Binary Stars. *ApJL*, 395:L83.
- 1577 Nynka, M., Ruan, J. J., Haggard, D., and Evans, P. A. (2018). Fading of the
1578 X-Ray Afterglow of Neutron Star Merger GW170817/GRB 170817A at
1579 260 Days. *ApJL*, 862(2):L19.
- 1580 Paczynski, B. (1986). Gamma-ray bursters at cosmological distances. *ApJL*,
1581 308:L43–L46.
- 1582 Piel, Q., Arcaro, C. H. E., Ashkar, H., Bissaldi, E., and et.al. (2019). Gamma-
1583 Ray Burst observation at Very High Energy with H.E.S.S. In *36th In-*
1584 *ternational Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, volume 36 of *Intern-*
1585 *ational Cosmic Ray Conference*, page 761.

- 1586 Piran, T. (1999). Gamma-ray bursts and the fireball model. *physrep*, 314:575–
1587 667.
- 1588 Piran, T. (2004). The physics of gamma-ray bursts. *Reviews of Modern*
1589 *Physics*, 76:1143–1210.
- 1590 Price, D. J. and Rosswog, S. (2006). Producing Ultrastrong Magnetic Fields
1591 in Neutron Star Mergers. *Science*, 312:719–722.
- 1592 Rees, M. J. and Meszaros, P. (1992). Relativistic fireballs - Energy conversion
1593 and time-scales. *mnras*, 258:41P–43P.
- 1594 Rees, M. J. and Meszaros, P. (1994). Unsteady outflow models for cosmolo-
1595 gical gamma-ray bursts. *ApJL*, 430:L93–L96.
- 1596 Ricker, G. R., Atteia, J. L., Crew, G. B., Doty, J. P., and et.al. (2003). The
1597 High Energy Transient Explorer (HETE): Mission and Science Overview.
1598 In Ricker, G. R. and Vanderspek, R. K., editors, *Gamma-Ray Burst and*
1599 *Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the*
1600 *HETE Mission*, volume 662 of *American Institute of Physics Conference*
1601 *Series*, pages 3–16.
- 1602 Rossi, A. (2017). GW170817/GRB170817A: LBT optical detection. *GRB*
1603 *Coordinates Network, Circular Service, No. 22763, (2017), 22763.*
- 1604 Rosswog, S., Ramirez-Ruiz, E., and Davies, M. B. (2003). High-resolution
1605 calculations of merging neutron stars - III. Gamma-ray bursts. *mnras*,
1606 345:1077–1090.
- 1607 Ruffini, R., Bernardini, M. G., Bianco, C. L., Chardonnet, P., and et.al.
1608 (2005). The Blackholic energy: long and short Gamma-Ray Bursts (New
1609 perspectives in physics and astrophysics from the theoretical understand-
1610 ing of Gamma-Ray Bursts, II). In Novello, M. and Perez Bergliaf-
1611 fa, S. E., editors, *XIth Brazilian School of Cosmology and Gravitation*,
1612 volume 782 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages
1613 42–127.
- 1614 Rybicki, G. and Lightman, A. (2008). *Radiative Processes in Astrophysics*.
1615 Physics textbook. Wiley.

- 1616 Sari, R. and Esin, A. A. (2001). On the Synchrotron Self-Compton Emission
1617 from Relativistic Shocks and Its Implications for Gamma-Ray Burst
1618 Afterglows. *ApJ*, 548:787–799.
- 1619 Sari, R., Piran, T., and Narayan, R. (1998). Spectra and Light Curves of
1620 Gamma-Ray Burst Afterglows. *ApJL*, 497:L17–L20.
- 1621 Schoorlemmer, H. (2019a). LIGO/Virgo S190510g: HAWC follow-up. *GRB*
1622 *Coordinates Network, Circular Service, No. 24441, (2019)*, 24441.
- 1623 Schoorlemmer, H. (2019b). LIGO/VirgoS190425z: HAWC follow-up. *GRB*
1624 *Coordinates Network, Circular Service, No. 24173, (2019)*, 24173.
- 1625 Taboada, I. and Gilmore, R. C. (2014). Prospects for the detection of GRBs
1626 with HAWC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*,
1627 742:276–277.
- 1628 Tam, P. H., Xue, R. R., Wagner, S. J., Behera, B., and et.al. (2008). VHE
1629 γ -ray Afterglow Emission from Nearby GRBs. In Aharonian, F. A., Hof-
1630 mann, W., and Rieger, F., editors, *American Institute of Physics Confe-*
1631 *rence Series*, volume 1085 of *American Institute of Physics Conference*
1632 *Series*, pages 471–474.
- 1633 Troja, E., Piro, L., van Eerten, H., Wollaeger, R. T., and et.al. (2017). The
1634 X-ray counterpart to the gravitational-wave event GW170817. *nature*,
1635 551:71–74.
- 1636 Vedrenne, G. and Atteia, J. (2009). *Gamma-Ray Bursts: The brightest ex-*
1637 *plosions in the Universe*. Springer Praxis Books. Springer Berlin Hei-
1638 delberg.
- 1639 von Kienlin, A., Meegan, C., and Goldstein, A. (2017). GRB 170817A:
1640 Fermi GBM detection. *GRB Coordinates Network, Circular Service*,
1641 *No. 21520, #1 (2017)*, 21520.
- 1642 von Kienlin, A., Veres, P., Roberts, O. J., Hamburg, R., and et.al. (2019).
1643 Fermi-GBM GRBs with Characteristics Similar to GRB 170817A. *ApJ*,
1644 876:89.
- 1645 Waxman, E. (1997). γ -Ray Burst Afterglow: Confirming the Cosmological
1646 Fireball Model. *ApJL*, 489:L33–L36.

- 1647 Wood, J. (2018). An All-Sky Search for Bursts of Very High Energy Gamma
1648 Rays with HAWC. *arXiv e-prints*, page arXiv:1801.01550.
- 1649 Zaborov, D. (2013). The HAWC observatory as a GRB detector. *arXiv*
1650 *e-prints*, page arXiv:1303.1564.
- 1651 Zhang, B. (2018). *Leptonic Processes*, page 182?220. Cambridge University
1652 Press.