



北京师范大学天文系

Astronomy Department, Beijing Normal University



致密星并合电磁对应体

高鹤

北京师范大学天文系

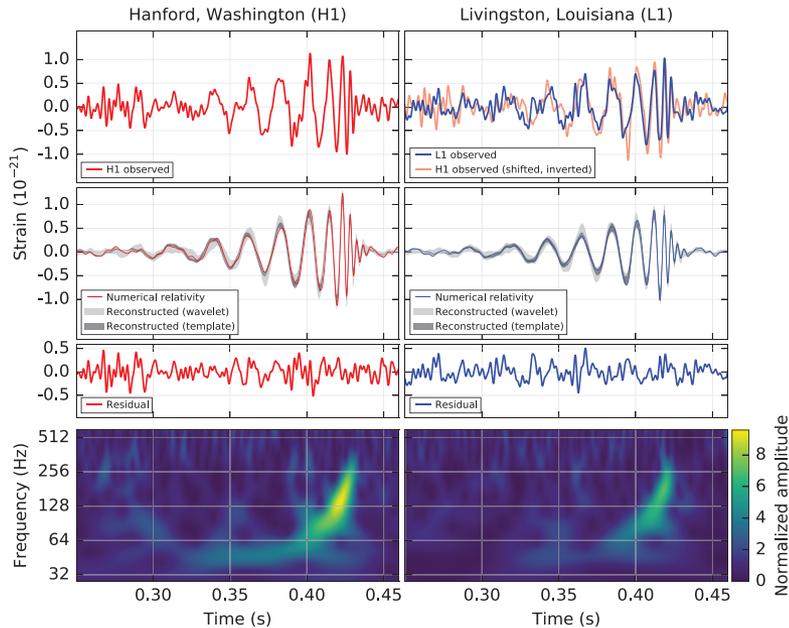
首届LHAASO合作组会议

2016/08/16

@ 南开大学

引力波天文学时代已经到来

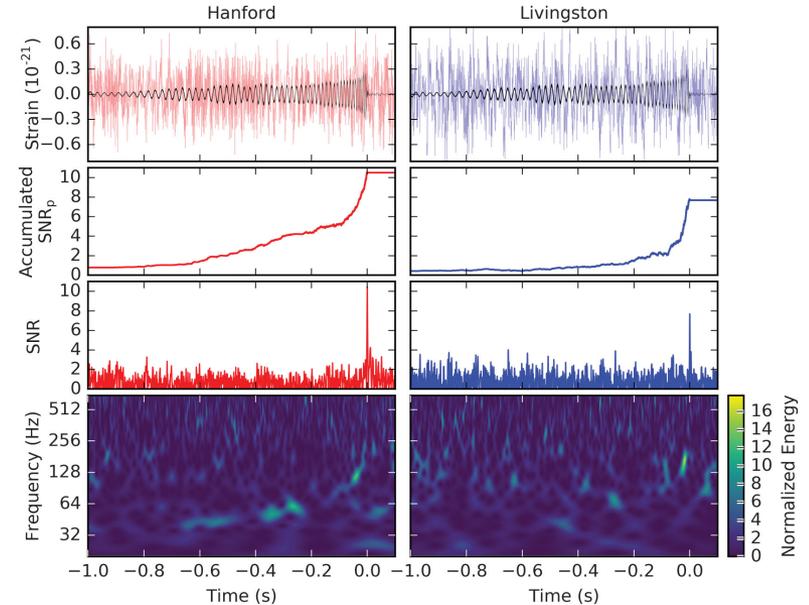
GW150914



Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	410^{+160}_{-180} Mpc
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

Abbott et al. 2016, PRL, 116, 061102

GW151226

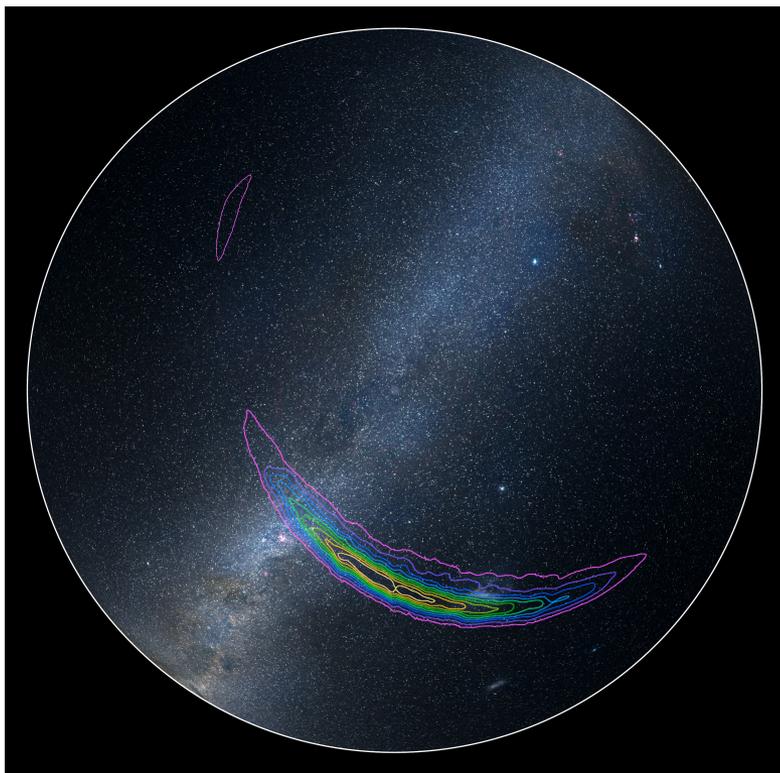


Primary black hole mass	$14.2^{+8.3}_{-3.7} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$7.5^{+2.3}_{-2.3} M_{\odot}$
Chirp mass	$8.9^{+0.3}_{-0.3} M_{\odot}$
Total black hole mass	$21.8^{+5.9}_{-1.7} M_{\odot}$
Final black hole mass	$20.8^{+6.1}_{-1.7} M_{\odot}$
Radiated gravitational-wave energy	$1.0^{+0.1}_{-0.2} M_{\odot} c^2$
Peak luminosity	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$ erg/s
Final black hole spin	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$
Luminosity distance	440^{+180}_{-190} Mpc
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

Abbott et al. 2016, PRL, 116, 241103

引力波电磁对应体探测重要意义

GW150914位置



定位误差：~600平方度

- 美国天文十年发展规划：
 - 引力波及其电磁对应体
- 确认引力波信号的天体起源
- 研究引力波源的天体物理性质（比如引力波源的距离、宿主星系等）
- 利用引力波源研究宇宙的几何和动力学（标准铃声）

引力波电磁对应体研究现状

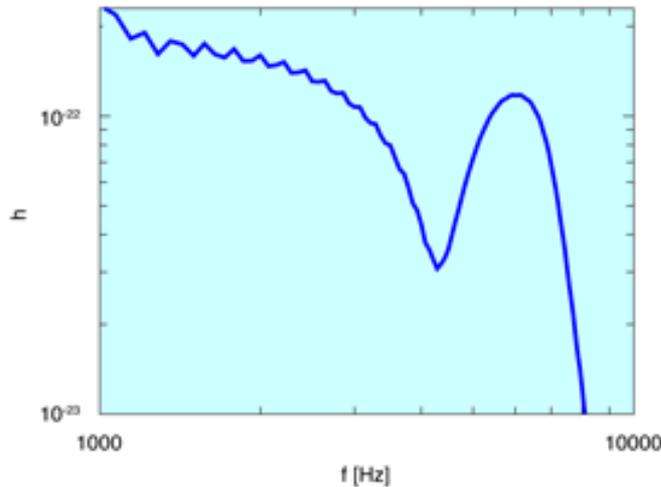
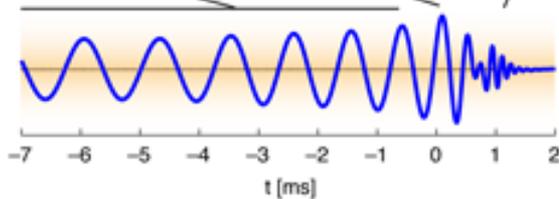
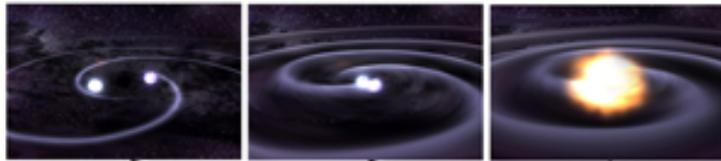
- 理论研究

- 理论模型构建；
- 理论模型例证搜寻；
- 联合探测实现后的引力波天文学；

- 观测研究

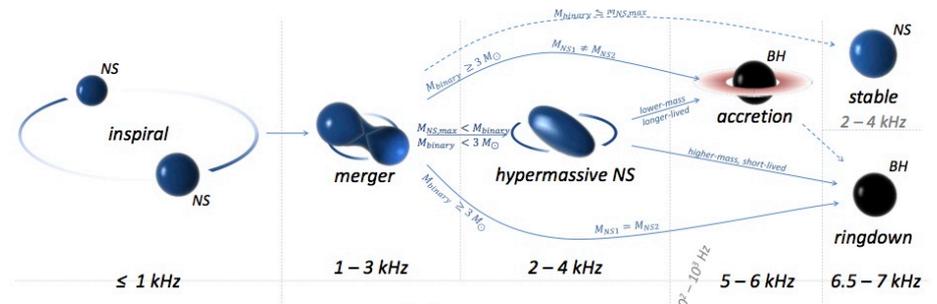
- 引力波信号 / 电磁信号联合探测观测策略研究；
- 现有望远镜研究；
- 未来望远镜展望；
 - GWAC+EP

引力波暂现源电磁信号理论模型



Kiuchi et al. 2010, PRL, 104, 141101)

- 双黑洞并合
 - 黑洞带电？双黑洞起源于同一个恒星？双黑洞之一携带少量吸积盘？
- 中子星-黑洞并合
 - 短伽玛暴
 - Kilonova
- 双种子星并合
 - 电磁信号取决于并合中心产物
 - 黑洞？
 - 大质量快转磁星？

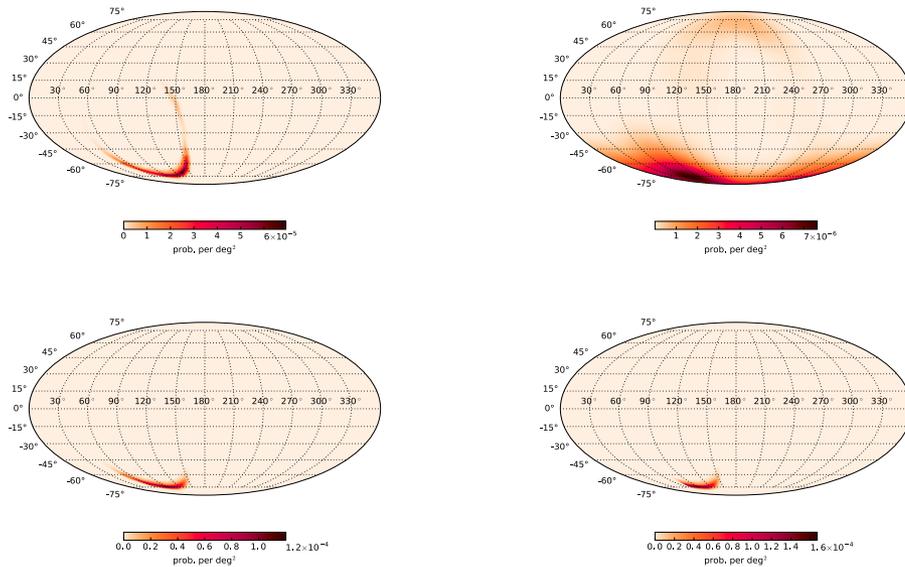


Bartos, I., Brady, P., Marka, S. 2012, arXiv:1212.2289

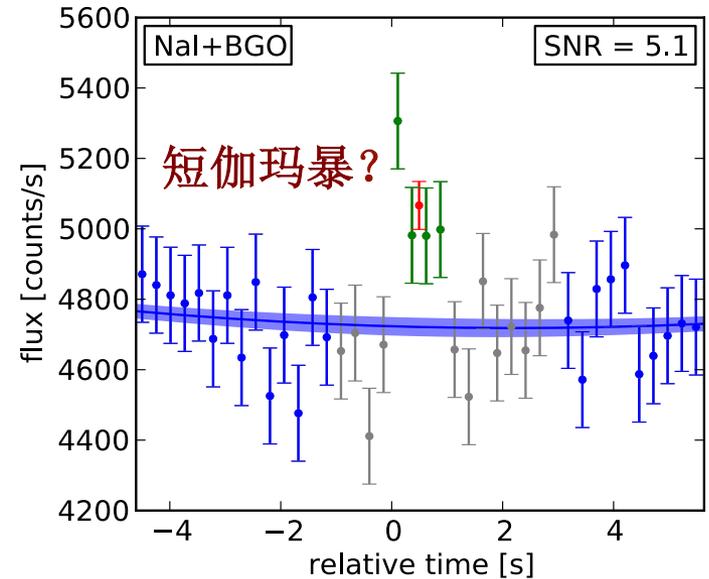
双黑洞并合电磁对应体?

GBM (*Fermi*): 8keV-40MeV; ~70%天区

GW150914—GBM: 引力波信号之后0.4s开始
持续了1s左右的硬X射线源 (光子能量大于
50keV)



GBM detectors at 150914 09:50:45.797 +1.024s

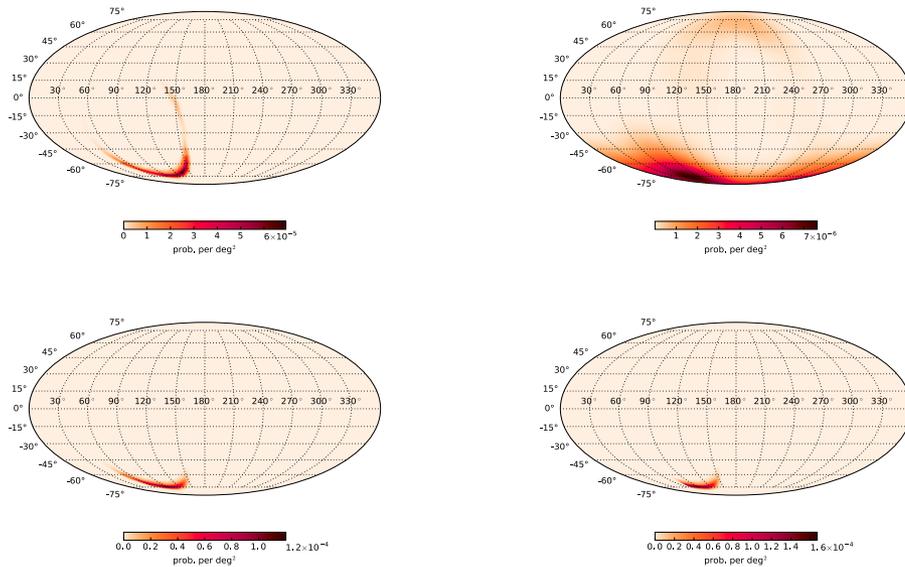


- 辐射集中在50Kev以上
- 辐射开始时间在GW150914信号后0.4s
- 持续时间1s左右
- 信号方向与引力波位置误差大致符合
- 光度: $L \sim 1.8 \times 10^{49}$ erg/s

双黑洞并合电磁对应体?

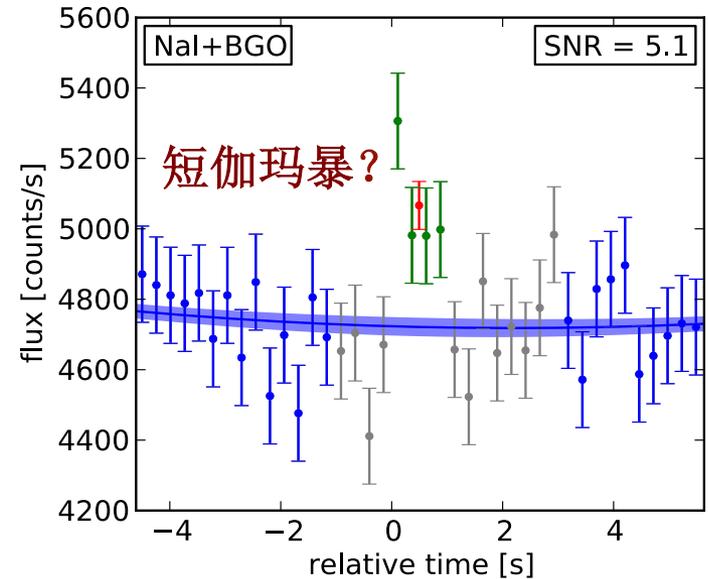
GBM (*Fermi*): 8keV-40MeV; ~70%天区

GW150914—GBM: 引力波信号之后0.4s开始持续了1s左右的硬X射线源 (光子能量大于50keV)



Connaughton V. 2016, arXiv:1602.03920

GBM detectors at 150914 09:50:45.797 +1.024s



黑洞带电?

Zhang B. 2016, arXiv:1602.04542

双黑洞起源于同一个恒星?

Loeb A. 2016, arXiv:1602.04735

双黑洞之一携带少量吸积盘?

Perna R. + 2016, arXiv:1602.05140

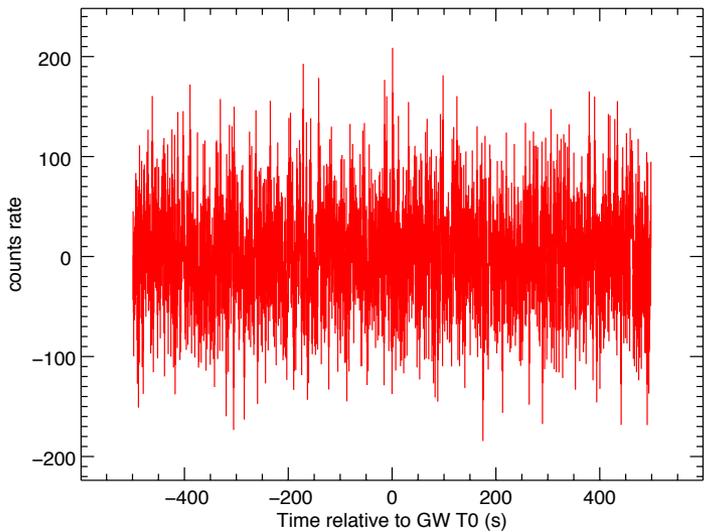
GW150914只有引力波辐射?

Zhang S.N. +. 2016, arXiv:1604.02537

GBM (*Fermi*): 8keV-40MeV; ~70%天区



**GW150914—GBM
是真的引力波对应体吗？**



Xiong S.L. 2016

?

?

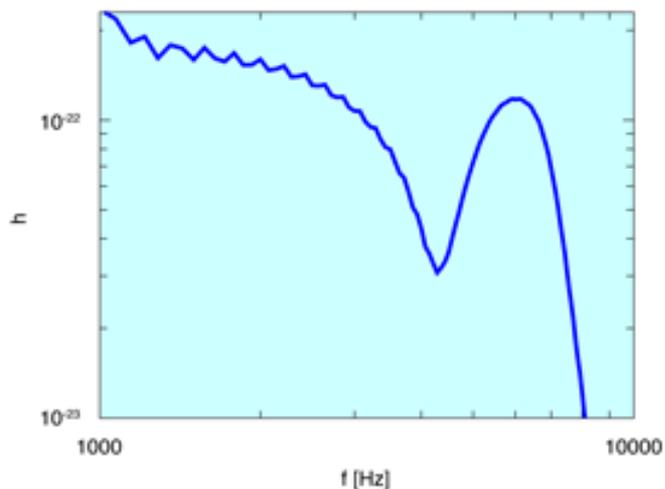
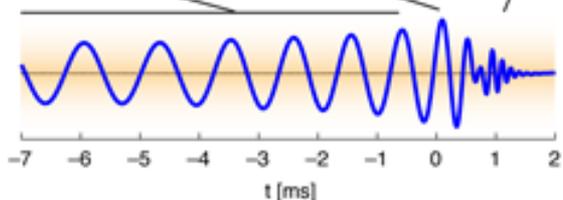
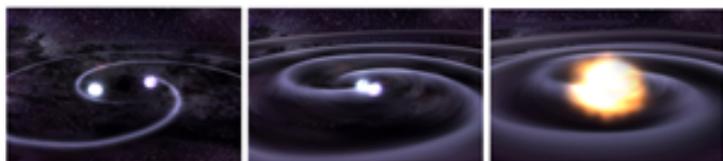
?

?

RA	Dec	SC ϕ	SC θ	NaI 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	BGO 0	1	Prob. %
83.98	-72.85	342	160	144.8	122.0	83.1	117.8	76.1	71.2	161.5	142.0	97.3	149.2	103.3	108.6	70.8	109.2	12.1
101.99	-73.87	349	156	139.9	117.1	79.2	115.2	75.4	66.5	161.6	145.5	101.3	149.4	104.1	113.4	66.1	113.9	10.0
118.31	-72.94	354	151	134.9	112.3	75.6	112.0	74.2	61.6	159.9	148.3	105.0	149.3	105.4	118.3	61.3	118.7	10.3
132.04	-70.44	357	147	129.9	107.6	72.4	108.5	72.8	56.7	157.0	150.1	108.3	149.0	106.9	123.2	56.5	123.5	11.2
140.85	-66.63	358	142	125.2	103.3	69.9	104.4	70.7	51.7	153.1	150.5	110.9	148.7	109.0	128.2	51.5	128.5	10.3
147.53	-62.51	359	137	120.3	98.8	67.4	100.3	68.9	46.7	148.8	150.2	113.5	147.5	110.9	133.2	46.5	133.5	7.4
151.18	-57.97	358	132	115.5	94.5	65.5	96.0	66.9	41.7	144.3	148.8	115.6	146.2	113.0	138.2	41.5	138.5	5.8
153.363	-53.091	360	127	111.2	90.8	64.7	91.2	64.0	37.0	139.4	145.9	116.5	145.2	115.9	142.9	36.7	143.3	3.7
153.933	-48.239	359	122	106.7	87.1	64.0	86.6	61.6	32.2	134.5	142.8	117.4	143.5	118.4	147.7	31.8	148.2	1.8
155.331	-43.208	358	116	102.5	83.7	64.1	81.7	58.6	27.7	129.5	138.9	117.4	141.9	121.4	152.1	27.1	152.9	2.0
151.172	-7.256	342	84	75.4	66.7	76.2	45.6	39.5	21.9	93.6	105.2	105.6	124.1	141.1	157.9	18.7	161.3	4.8

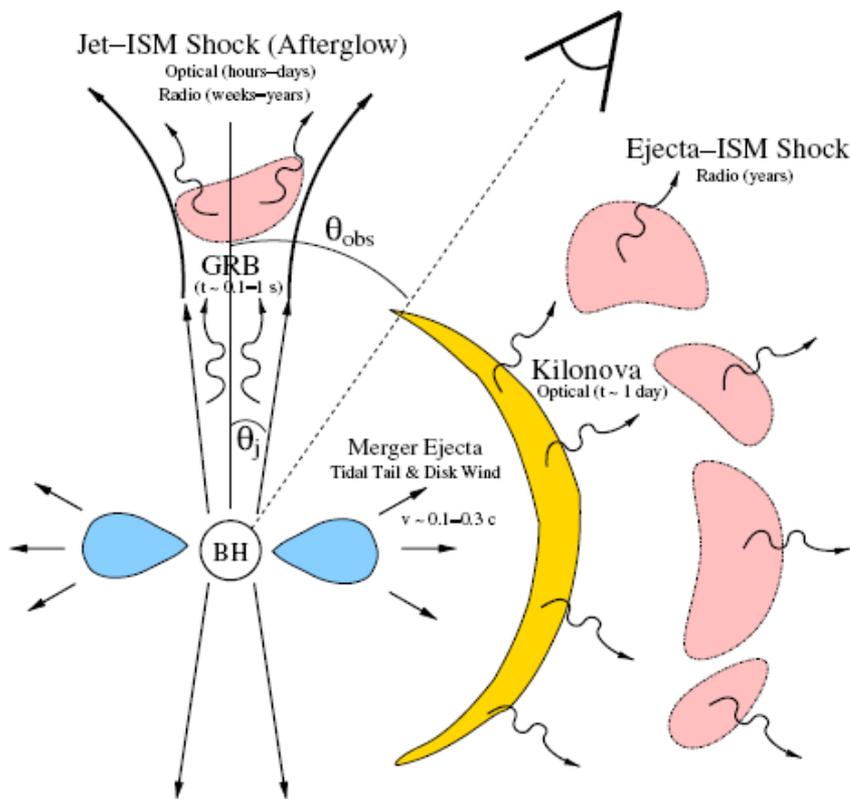
Sigma of excess: 1.3 1.8 **0.6** 1.1 **2.4** **1.7** 1.3 1.6 1.5 **2.2** 1.6 0.7 **2.3** **2.6**

双中子星并合电磁对应体



- 银河系内**已发现**存在**双中子星系统**
- 在**双脉冲星**系统PSR 1913+16发现有**引力波辐射间接证据**（豪斯、泰勒因此获诺贝尔物理奖）
- 通过**数值模拟**，已经发现并合过程中引力波辐射存在“**chirp**”信号
- 与这类引力波信号**成协的电磁信号**是怎样的？

双中子星并合电磁对应体



Metzger & Berger, 2012

短时标伽玛射线暴

多波段暂现源

时标 ~ 小时、天、周，甚至年

Li-Paczyński Nova

Li & Paczyński, 1998

光学耀发

时标 ~ 几天

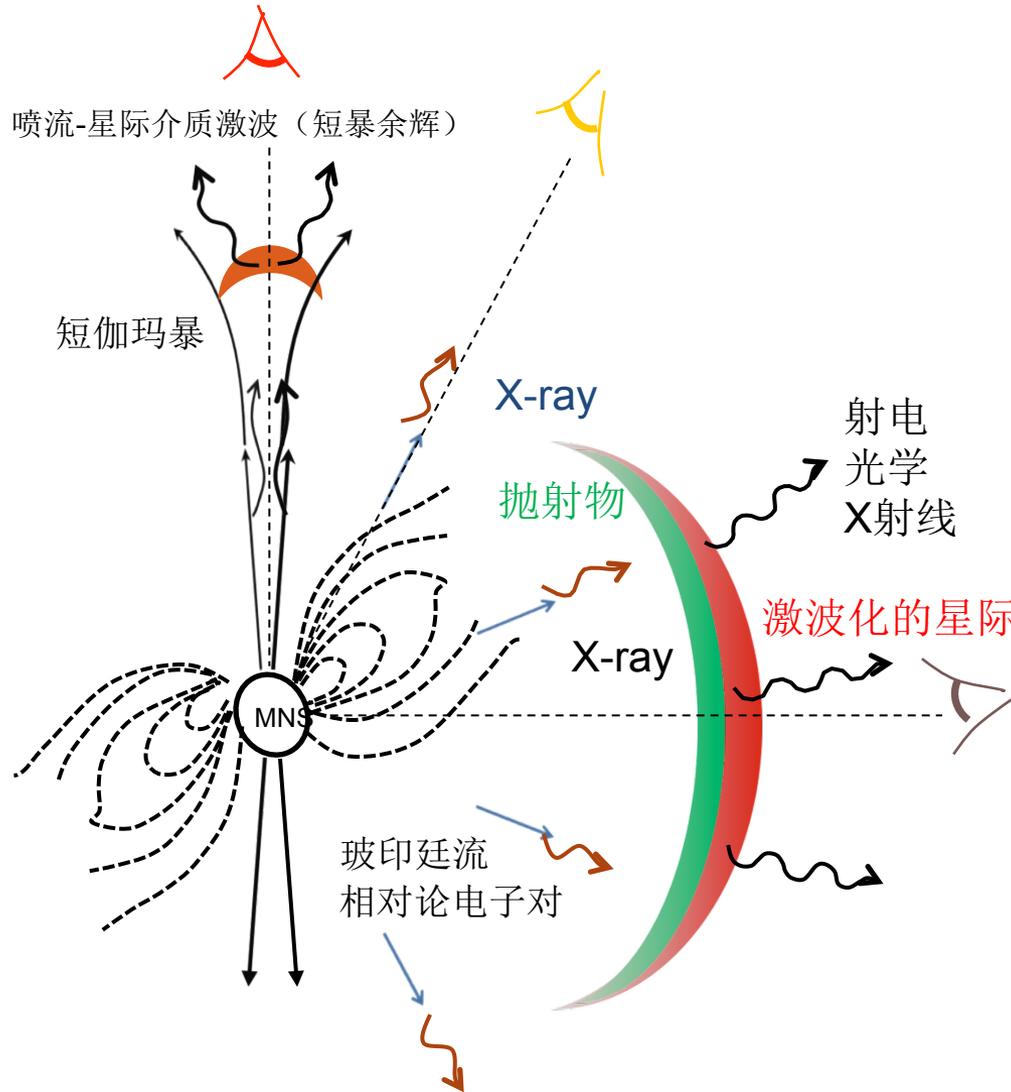
抛射物在星际介质中驱动的外激波

Nakar & Piran, 2011

射电余辉

时标 ~ 几年

双中子星并合电磁对应体



Gao et al., 2013, ApJ

短伽玛暴

后期中心天体活动
~ X射线平台相 & X射线耀发

磁耗散X射线余辉

$10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
1000 ~ 10000 s
Zhang, 2013

激波突破抛射物X射线闪

$10^{-11} - 10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
1000 ~ 10000 s
Li & Yu, 2015

“光球”辐射

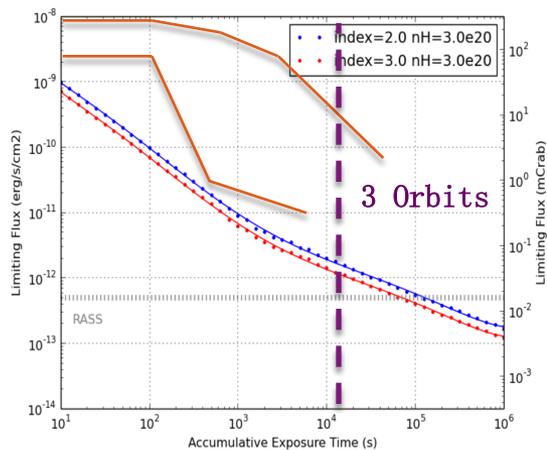
明亮光学耀发
时标 ~ 几天
Yu, Zhang & Gao, 2013

中心磁星能量注入的外激波

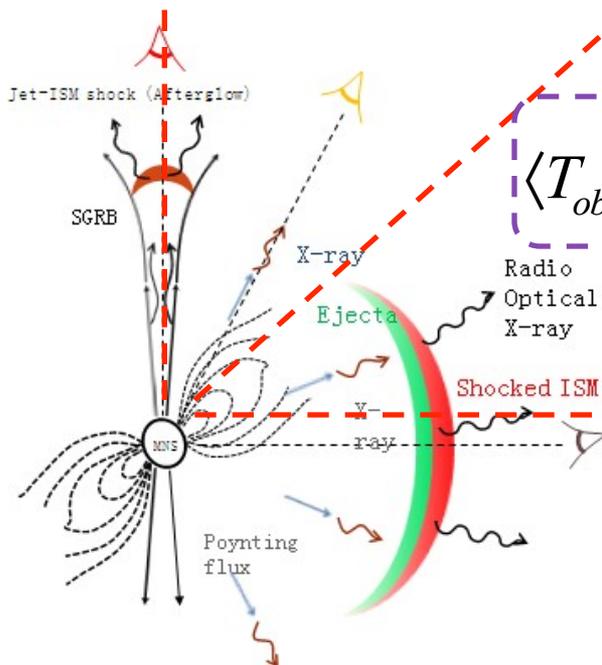
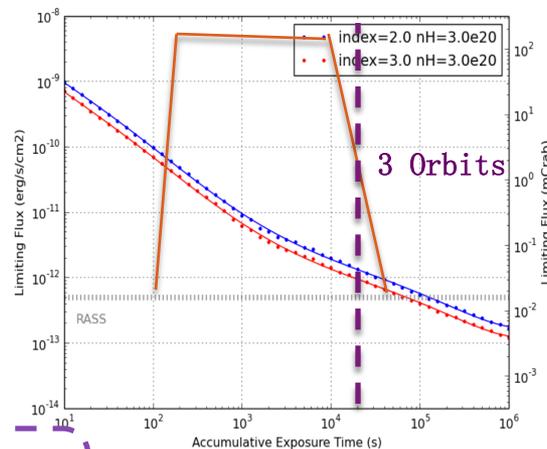
多波段明亮暂现源
~ 小时、天、周, 甚至年
Gao, Ding, Wu, Zhang & Dai, 2013
Wang & Dai, 2013

所有方向都有X射线辐射!

SGRB

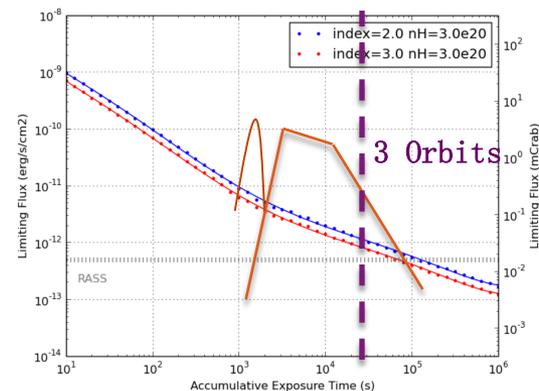


磁耗散X射线余辉



$$\langle T_{obs} \rangle \approx 10^3 \sim 10^4 \text{ s}$$

激波突破抛射物X射线闪+磁耗散X射线余辉+外激波余辉辐射



双中子星并合中心产物

基本假设

- 短伽玛暴（全部或部分）由双中子星并合产生
- 银河系中探测到的双中子星质量分布具有普适性
- 短伽玛暴中观测到“内耗散平台”的样本对应并合产物为大质量中子星，平台结束对应中子星坍缩成黑洞

主要结论

- 物质状态方程 $M_{\max} = 2.37 M_{\odot} (1 + 1.58 \times 10^{-10} P^{-2.84})$
- 双中子星并合产生40%黑洞，30%稳定中子星，30%中子星→黑洞
- 并合产生大质量中子星初始自转周期接近1毫秒；
- 大质量中子星磁场较高： 10^{15} 高斯
- 磁耗散效率很高，大于40%
- 磁星椭率较大，磁星自转减速由引力波辐射主导

引力波**电磁**对应体**研究现状**

- **理论研究**

- 理论模型构建；
- 理论模型**例证**搜寻；
- 联合探测实现后的引力波天文学；

- **观测研究**

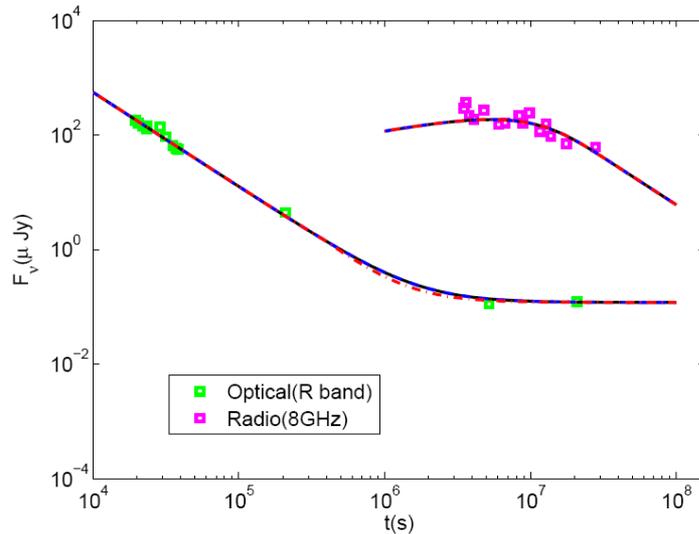
- 引力波信号 / 电磁信号联合探测观测策略研究；
- 现有望远镜研究；
- 未来望远镜展望；
 - GWAC+EP

NS-NS: 电磁辐射信号例证搜寻 (1)

——帕洛玛暂现源工厂相对论暂现源

PTF11agg

观测特征



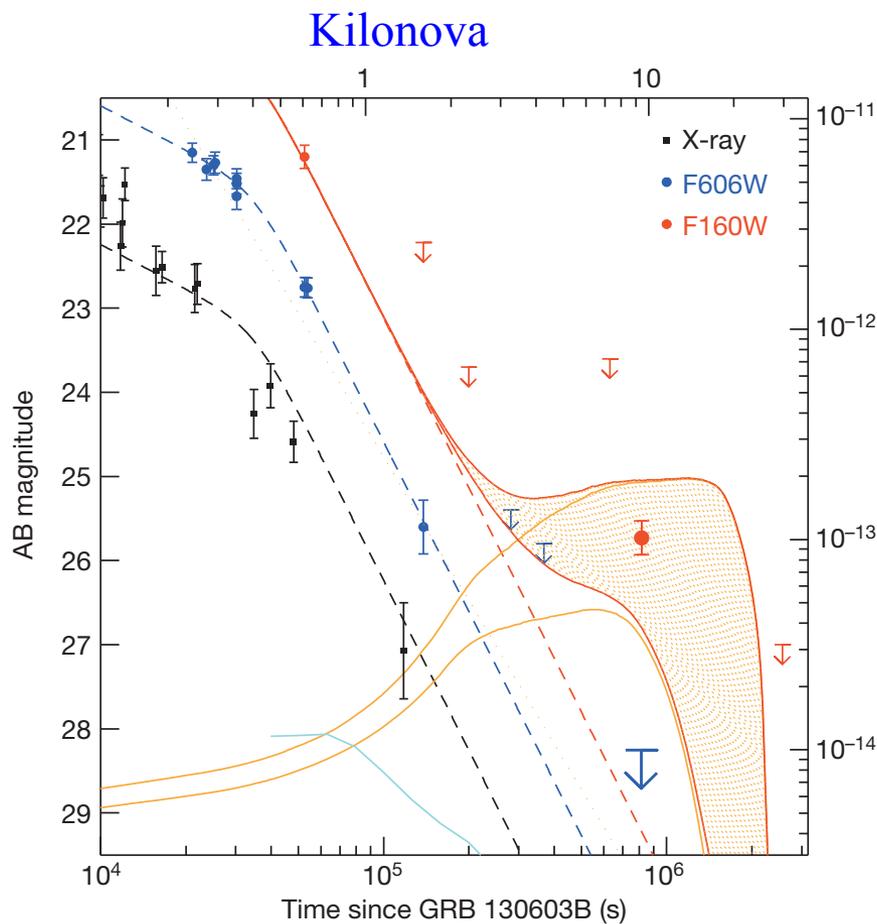
- 没有任何高能对应体
- 光学信号按幂指数函数下降
- 射电信号先上升后下降
- 射电观察表明该事件起源于相对论运动物体

z	n (cm $^{-3}$)	ϵ_e	ϵ_B	η	ξ	p
0.5	1.0×10^{-4}	0.4	0.08	0.09	0.3	3.2
1	2.4×10^{-3}	0.4	0.06	0.09	0.3	3.2
3	0.26	0.4	0.03	0.09	0.3	3.2

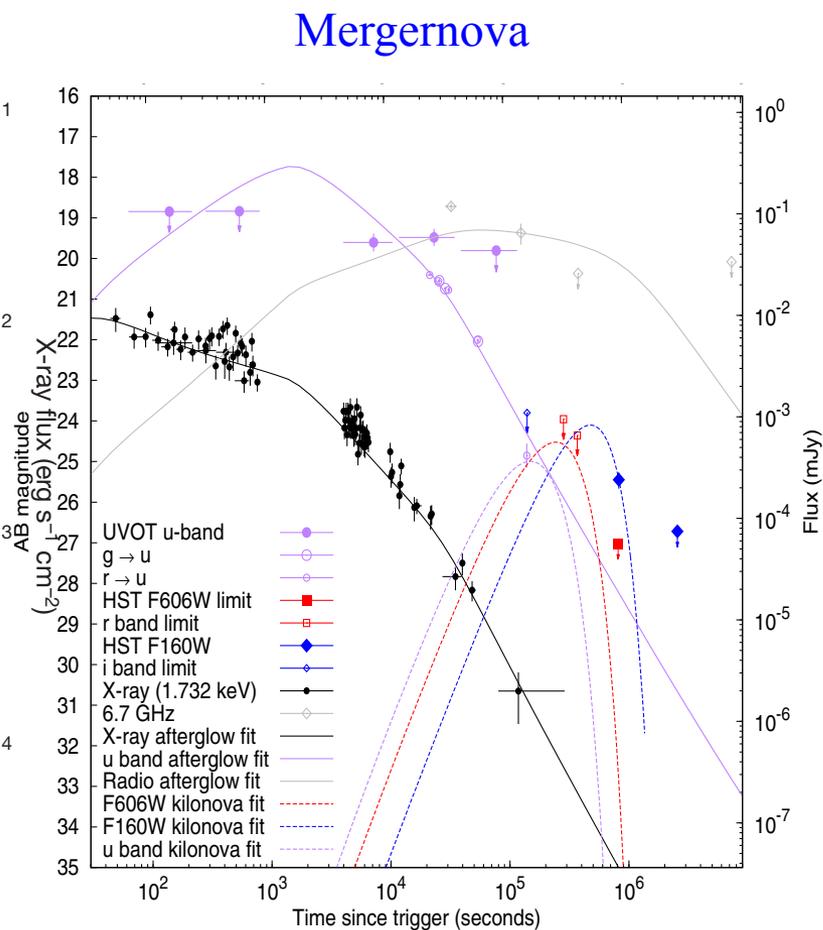
X.-F. Wu, H. Gao, X. Ding et al. 2013 ApJ

NS-NS: 电磁辐射信号例证搜寻 (2)

——GRB130603B余辉晚期红外增亮



Tanvir et al. Nature 2013

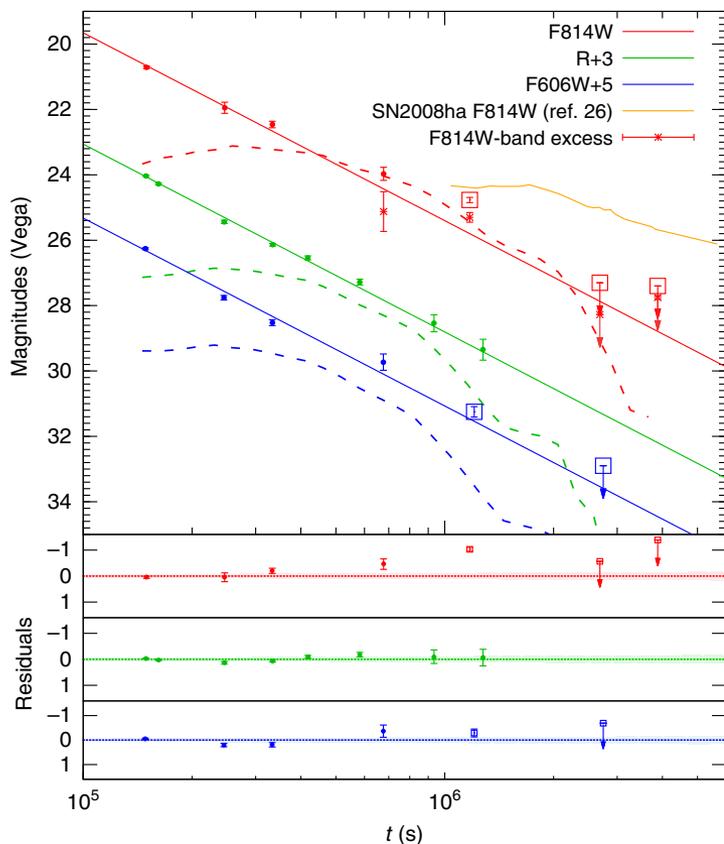


Fan et al. ApJ 2013

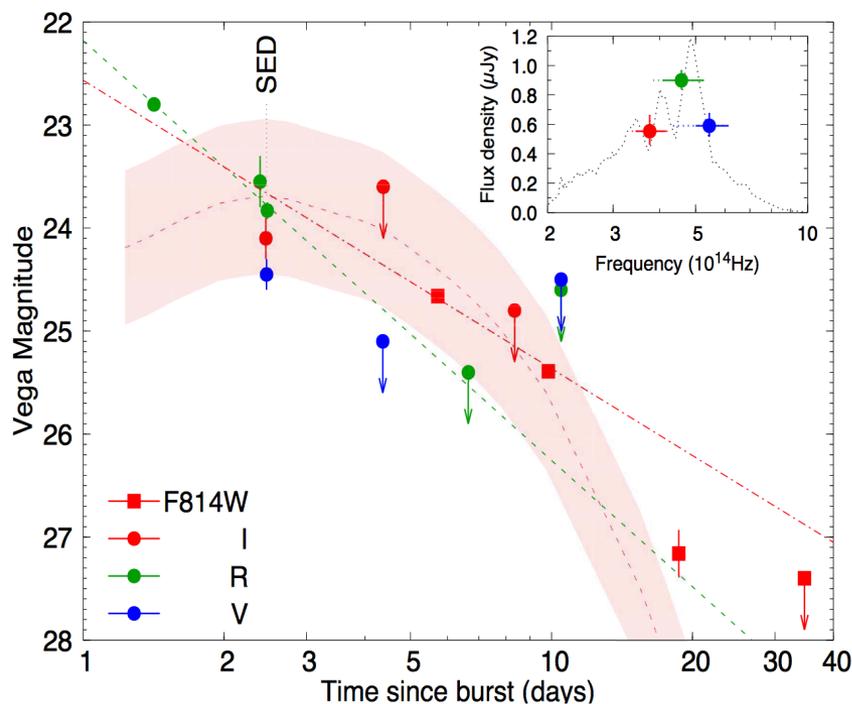
NS-NS: 电磁辐射信号例证搜寻 (3)

—— GRB060614、GRB050907余辉晚期红外增亮

GRB060614



GRB050907

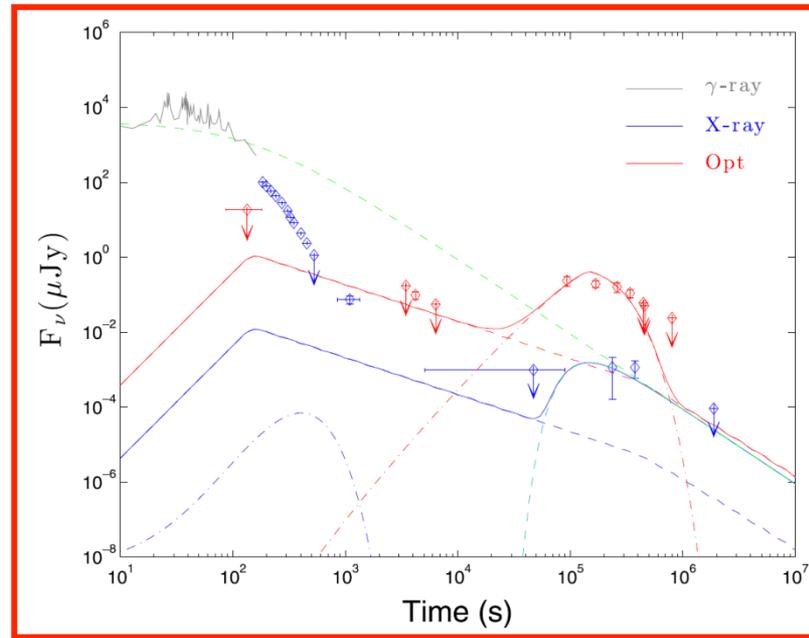
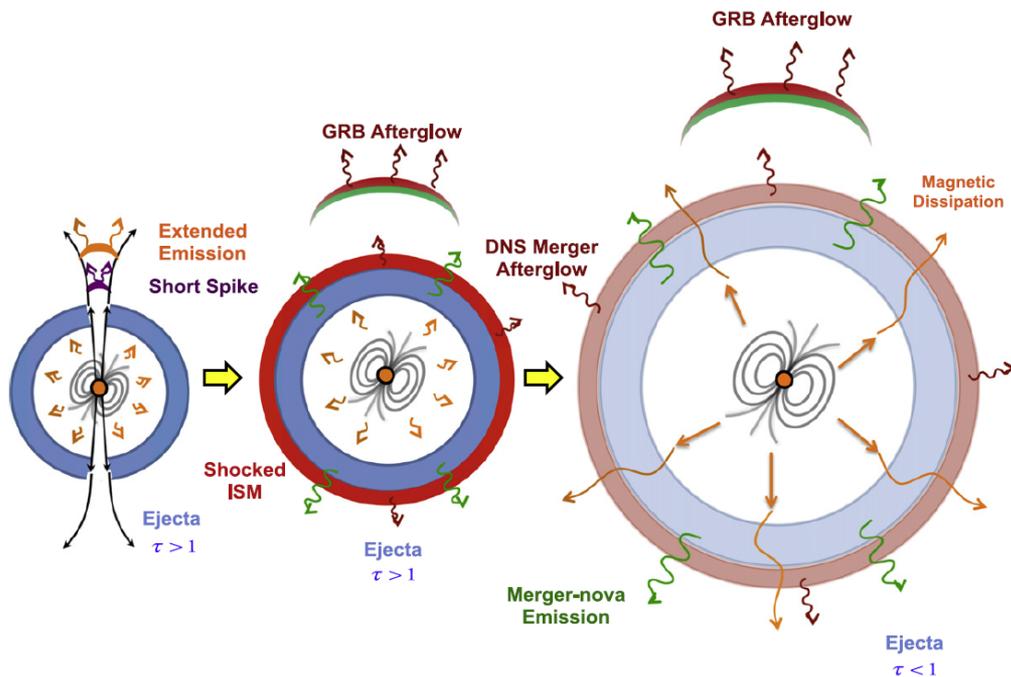


Jin et al. 2016, Arxiv 1603.07869

Yang et al. 2015, NatCo

NS-NS: 电磁辐射信号例证搜寻 (4)

——GRB080503余辉晚期X射线与光学增亮



物理图像:

双中子星并合, 中心遗迹为磁星

- (1) 两极形成相对论喷流, 产生短暴;
其余方面有非相对论物质抛射 (光深 >1);
磁星磁偶极辐射 (Poynting flux, e^+e^-);
- (2) 两极闭合, 抛射物光深 >1 ;
- (3) 抛射物光深 <1 .

短暴GRB080503模型解释和拟合:

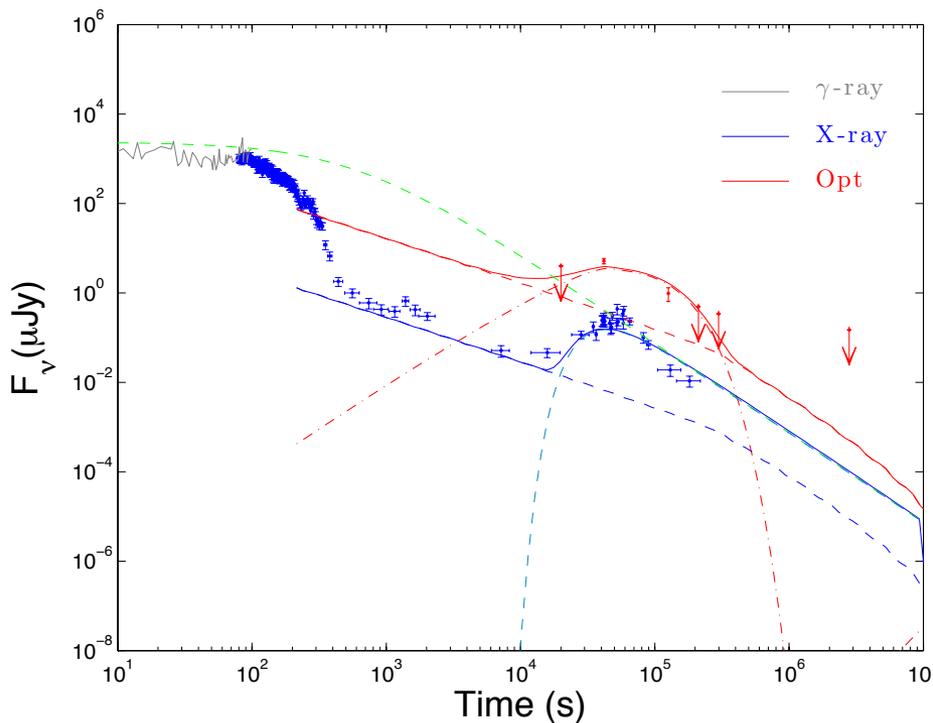
- (1) 短暴X射线延展辐射: 磁星偶极辐射磁耗散; 磁星自转减慢时标: 约100秒;
- (2) 100秒-1天X辐射: 两极闭合, 抛射物光深 >1 ;
- (3) 1天左右的X增亮: 抛射物光深 <1 , 磁偶极耗散残余辐射 (t^{-2});
- (4) 1天左右光学增亮: merger-nova

NS-NS: 电磁辐射信号例证搜寻 (5)

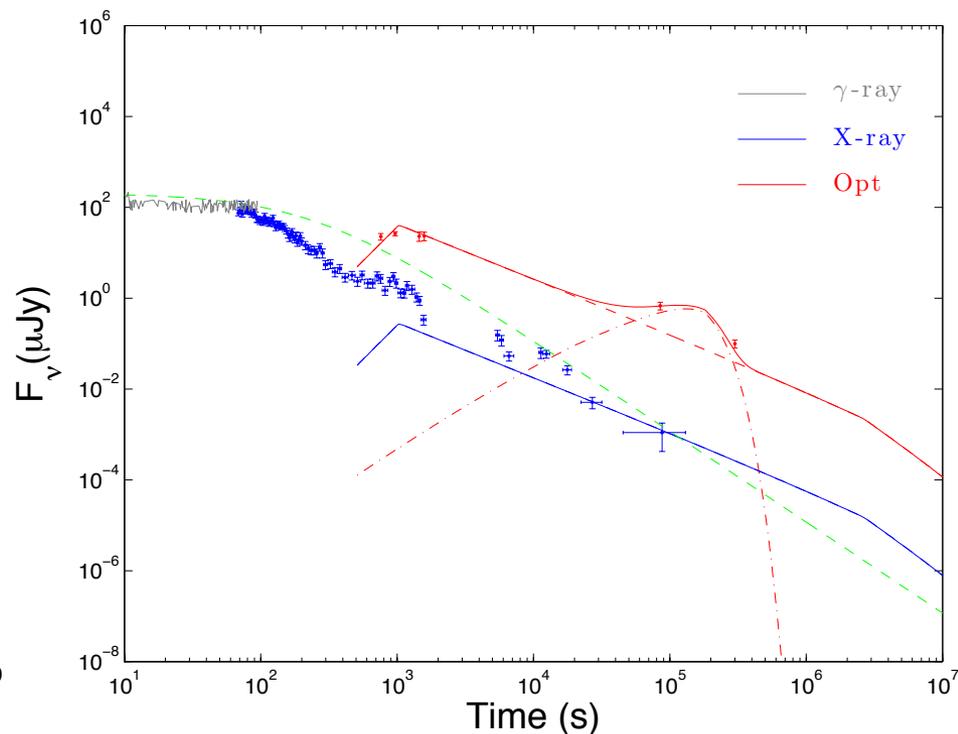
—— GRB050724/GRB070714B晚期X射线与光学增亮

Gao et al. , 2016, arXiv:???

GRB 050724



GRB 070714B



引力波电磁对应体研究现状

- 理论研究

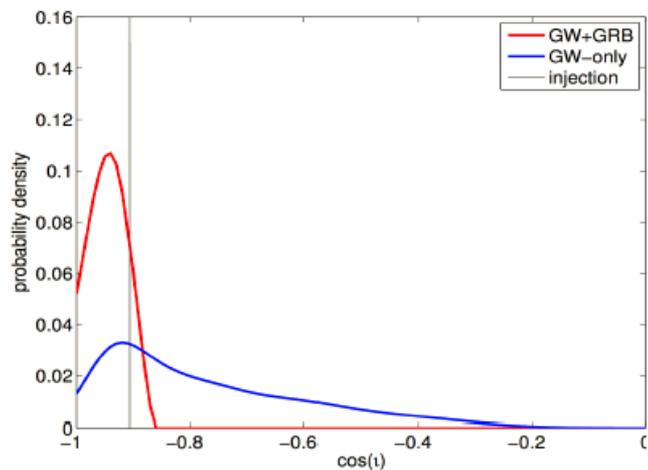
- 理论模型构建；
- 理论模型例证搜寻；
- 联合探测实现后的引力波天文学；

- 观测研究

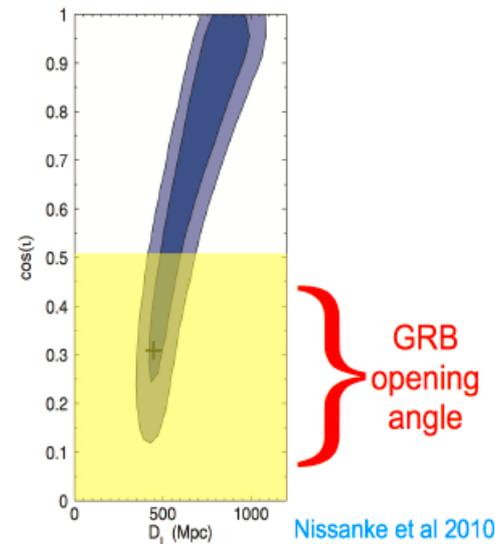
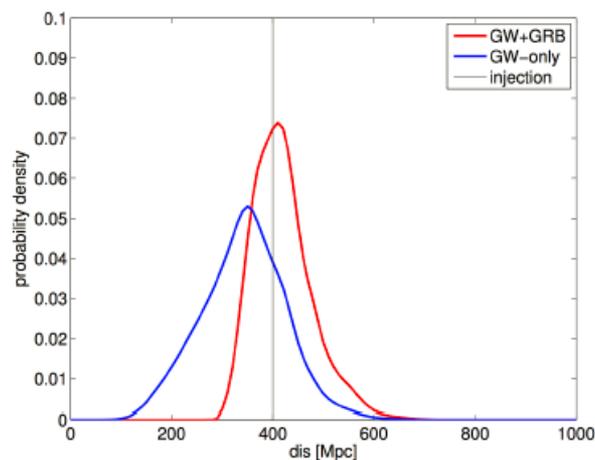
- 引力波信号 / 电磁信号联合探测观测策略研究；
- 现有望远镜研究；
- 未来望远镜展望；
 - GWAC+EP

联合探测实现后的引力波天文学(1)

- 1) 精确定位引力波暂现源，进而确定引力波暂现源的天体物理起源；
- 2) 为光学射电等其他波段提供位置信息，促成对引力波暂现源的多波段观测；
- 3) 通过多波段观测证认宿主星系，进而确定引力波源的红移；
- 4) 通过引力波数据与电磁观测数据结合，打破引力波探测中相关参数的兼并性问题，如距离和指向角之间的兼并；



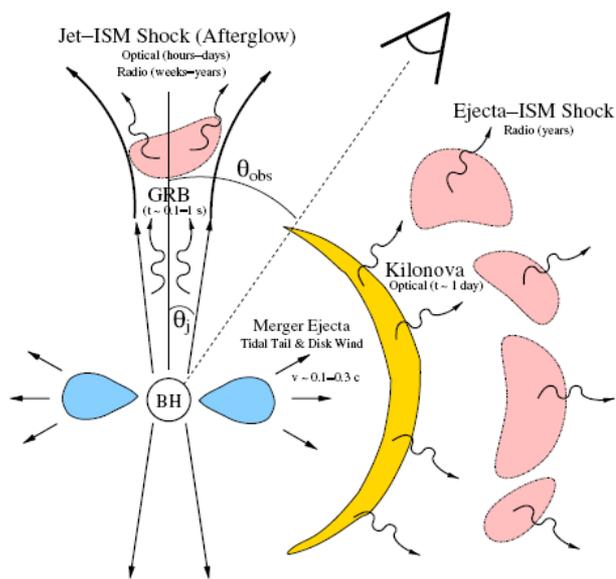
Fan et al. 2015



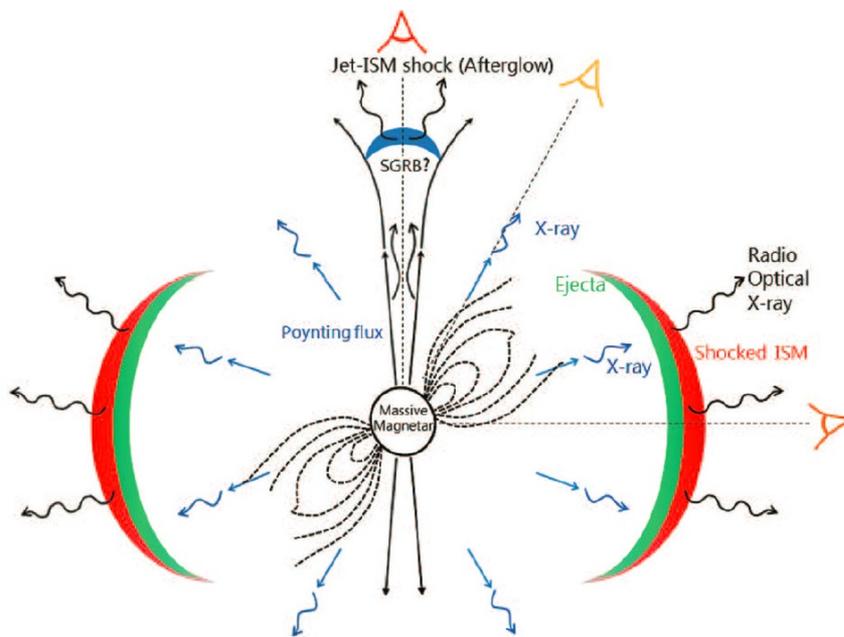
Nissanke et al 2010

联合探测实现后的引力波天文学(2)

- 1) 引力波暂现源**是否存在电磁对应体**，其**辐射性质**如何（**双黑洞并合?**）；
- 2) 中子星-黑洞、双中子星并合事件是否真的是**短伽玛射线暴**的起源？
- 3) 双中子星并合中心产物究竟是**黑洞还是磁星**，或者两者**比例**究竟是多少？（**高压高密状态物质状态方程**）
- 4) 如果并合产物确定为磁星，利用电磁辐射的流量值推算出**磁星的磁场与自转周期**，可以对中子星表面**磁场放大机制、自转能损耗机制**等开展深入研究；



Metzger & Berger, 2012



Gao et al., 2013

联合探测实现后的引力波天文学(3)

- 1) 通过独立测量的红移-距离关系来研究宇宙的膨胀行为;
- 2) 如果有30个左右的联合探测事件, 就能将哈勃常数限制到~1%的精度, 与JWST的预期成果媲美。

Network	LIGO+Virgo (LLV)	LLV+LIGO India	LLV+KAGRA	LLV+LIGO India+KAGRA
NS-NS Isotropic	5.0% (15)	3.3% (20)	3.2% (20)	2.1% (30)
NS-NS Beamed	1.1% (19)	1.0% (26)	1.0% (25)	0.9% (30)
NS-BH Isotropic	4.9% (16)	3.5% (21)	3.6% (19)	2.0% (30)
NS-BH Beamed	1.2% (18)	1.0% (25)	1.1% (24)	0.9% (30)

Nissanke et al. 2013

Table 2 Systematics error budget on H_0 : past, present, and future

Known	Key Project	Revisions	Anticipated	Basis
Systematics	(2001)	(2007/2009)	<i>Spitzer/JWST</i>	
(1) Cepheid Zero Point	± 0.12 mag	± 0.06 mag	± 0.03 mag	Galactic Parallaxes
(2) Metallicity	± 0.10 mag	± 0.05 mag	± 0.02 mag	IR + Models
(3) Reddening	± 0.05 mag	± 0.03 mag	± 0.01 mag	IR 20–30 \times Reduced
(4) Transformations	± 0.05 mag	± 0.03 mag	± 0.02 mag	Flight Magnitudes
Final Uncertainty	± 0.20 mag	± 0.09 mag	± 0.04 mag	Added in Quadrature
Percentage Error on H_0	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 2\%$	Distances

Freedman & Madore 2010

联合探测实现后的引力波天文学(4)

- 1) 利用引力波信号与电磁信号到达时间差限制引力子质量；
- 2) 利用引力波信号与电磁信号到达时间差检验爱因斯坦等效原理，开展“银河系比萨斜塔”实验

爱因斯坦等效原理 (EEP) :

中性粒子在真空引力场中运动，与粒子的内禀性质（结构、成分）无关。

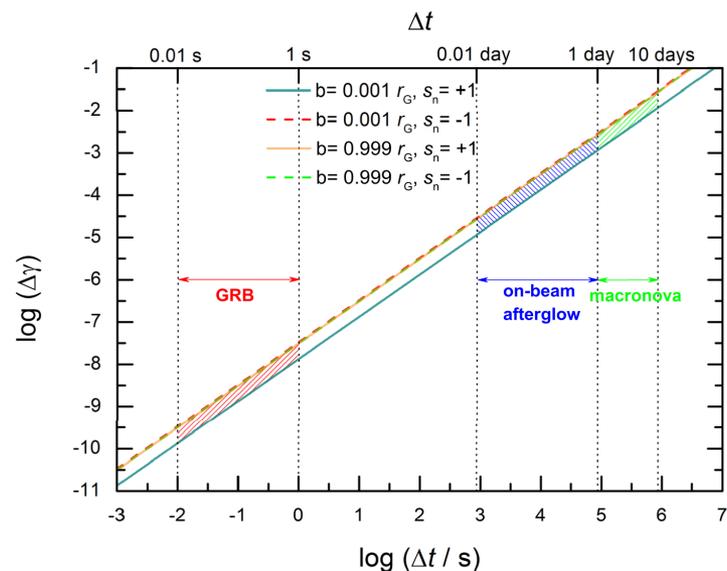
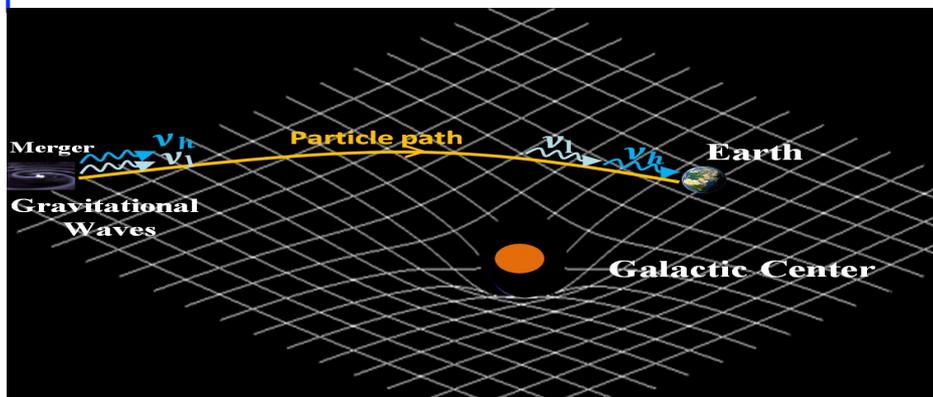
无静止质量粒子在球对称度规时空中的运动：

$$ds^2 = B(r)dt^2 - A(r)dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

后牛顿(PPN)展开： $A = 1 + \frac{2\gamma M}{r} + \dots$

后牛顿参数 γ 单位质量引起的空间曲率大小

广义相对论要求： $\gamma = 1$



引力波**电磁**对应体**研究现状**

- 理论研究

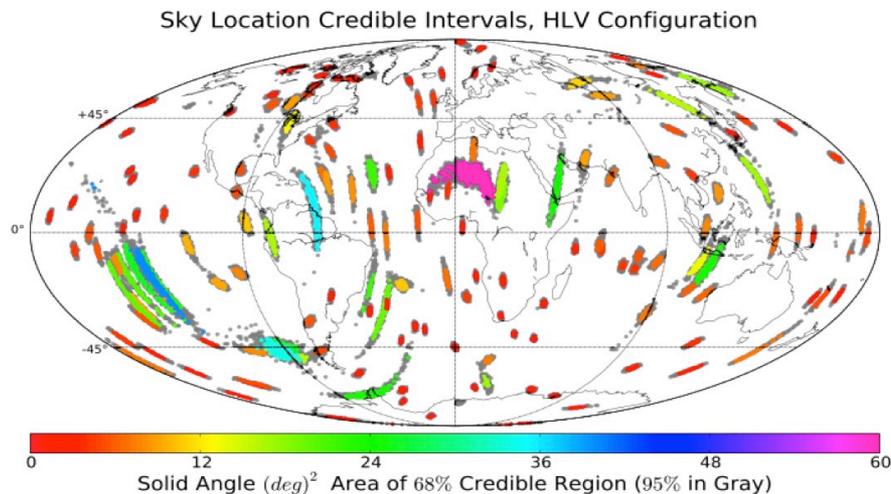
- 理论模型构建；
- 理论模型例证搜寻；
- 联合探测实现后的引力波天文学；

- **观测研究**

- 引力波信号 / 电磁信号联合探测**观测策略**研究；
- 现有望远镜研究；
- 未来望远镜展望；
 - GWAC+EP

引力波 / 电磁信号联合探测策略

引力波的空间定位误差圈



Rodriguez et al 2014

定位精度：~几十至上百平方度

~并合触发Advanced-LIGO/Virgo
之前的几十秒?

• 小视场望远镜

- 引力波信号处理提前预警;
- 星系星表的建立以及小望远镜的联合初选;
- 小视场望远镜的快速响应和快速转动搜寻。

• 大视场望远镜

- 与GW同时触发, 并马上进行后随观测;
- 收到GW触发通知后, 快速响应进行后随观测;
- 在GW探测器离线数据中和数据库中寻找关联事件, 可能找到显著度相对较低的GW事件;
- 及时筛选有效信号, 触发引力波探测器。

引力波**电磁**对应体**研究现状**

- 理论研究

- 理论模型构建；
- 理论模型例证搜寻；
- 联合探测实现后的引力波天文学；

- 观测研究

- 引力波信号 / 电磁信号联合探测观测策略研究；
- **现有望远镜研究**；
- 未来望远镜展望；
 - GWAC+EP

现有望远镜研究

Chu, Howell, Rowlinson, Gao et al., 2016, MNRAS

高能探测器

Instrument	Energy Range	FoV [deg ²]	Sensitivity [erg sec ⁻¹ cm ⁻²]	Exposure Time	Response Time	Ref
<i>Swift</i> - BAT	15-300 keV	4600	1.2×10^{-8}	-	Coincident Observation	[1]
<i>Swift</i> - XRT §	0.3-10 keV	0.15	6×10^{-12}	10	1-2 hours	[1]
Fermi - GBM	8 keV –40 MeV	30000	4×10^{-8}	-	Coincident Observation	[2]
Fermi - LAT†	0.02-300 GeV	8000	1.4×10^{-7}	100s	30s post GBM trigger	[2]
CTA †	0.03 – 100 TeV	6 – 8 deg ²	6×10^{-9} @ 25GeV	1000s	20–60secs	[3]
CTA (Survey mode) †	0.03 – 100 TeV	~1000 deg ²	6×10^{-8} @ 25GeV	1000s	20–60secs	[3]
H.E.S.S. †	0.05 – 20 TeV	15	~ 6×10^{-8} @ 25GeV	1000s	30s	[3]
SVOM - ECLAIRS	4-250 keV	89	7.2×10^{-10}	1000s	~ 1-2 hours	[4]
SVOM - MXT	0.2-10 keV	64 arcmin	5.6×10^{-11}	10s	~ 1-2 hours	[4]

光学望远镜

Telescope	FoV [deg ²]	Limiting Magnitude R-band	Exposure	Ref
TAROT	3.5	18	60	[1]
SkyMapper	5.7	21	110s	[2]
Zadko	0.15	21	180s	[3]
Pan-STARRS	7.0	24	30s	[4]
GOTO	18.0-36.0	21	5m	[5]
BlackGEM	40.0	22	5m	[6]
Zwicky Transient Facility (ZTF)	47	20.5-21	30s	[7]
Ground based Wide-Angle Camera (GWAC)	8000	16	10s	[8]

现有望远镜研究

Chu, Howell, Rowlinson, Gao et al., 2016, MNRAS

射电望远镜

Name	Frequency Range	FOV (sq-degs) [sq-degs]	limiting flux density	Response Time	Ref
MWA	80-300 MHz	610 deg ² @150 MHz	20 mJy	< 10s of secs	[1]
ASKAP	700 MHz-1.8 GHz	30 deg ² @1.4 GHz	640 μJy beam ¹ (10s int)	< mins	[2] †
LOFAR LBA (Inner)	10-90 MHz	450 deg ² @60 MHz	5 mJy @60 MHz	< min	[3]
LOFAR HBA (Core)	110-250 MHz	48 deg ² @180 MHz	0.6 mJy @180 MHz	< min	[3]
APERTIF	1-1.7 GHz	8 deg ² @1 GHz (>100 deg ²)†	0.1 μJy		[4]

现有望远镜 / 探测器可能实现 γ 射线（如果存在的话）与射电辐射信号探测

SIGNAL TYPE	TARGET	TIME RANGE (s)	Gamma		X-ray	Optical/IR	Radio	
			High (> 10 MeV)	Low (< 10 MeV)			High (> 1 GHz)	Low (< 1 GHz)
Jet Related	SGRB Prompt	0-5	✓	✓	?	?		
	SGRB Afterglow	10 ->	✓		✓	✓	✓	?
	Reverse Shock	60-10000	?	?	?	?	✓	?
Isotropic Ejecta Related	Kilonova	1000 ->			?	✓		
	Ejecta Afterglow	10000 ->			?	?	?	?
Other Signals	Magnetar Wind Dissipation	1-1000	?	✓	✓	?	?	?
	FRB (early)	-5 -10					?	?
	FRB (late)	10-10000					?	?

Red	Response fast enough FoV within range	Blue	Fast response FoV too small	✓	Observed
Green	Response too slow FoV within range	Yellow	Response too slow + FoV too small	?	Predicted

现有望远镜 / 探测器对GW150914电磁对应体搜寻结果

Xin & Meng 2016

望远镜 / 探测器	视场	波段	观测时间 (相对 GW150914 爆发时刻)	覆盖 GW150914 的天区	观测结果
GBM	>2pi 弧度	8KeV-30MeV	无时延	70%	弱信号 GW150914-G BM,
<u>Integral</u> /SP1	256 平方度	18KeV-8MeV	无时延	100%	无
<u>IceCube</u> / Antares	2pi 平方 弧度	中微子	无时延	100%	无
LAT	2.5 弧度	20MeV-300GeV	-	0	无
BAT	1.4 弧度	15KeV-15KeV	-	0.0%	无
XRT	23.6 角分	0.3KeV-10KeV	2 天后	2.0%	无
UVOT	17 角分	170nm-600nm	2 天后	~0.0%	无
<u>iPTF</u>	2.6 度	光学波段	3 天后	2.3%	无
<u>DECam</u>	2.2 度	光学波段	4 天后	3.0%	无
Pan- <u>Starrs</u>	3 度	光学波段	4 天后	4.2%	无

引力波**电磁**对应体**研究现状**

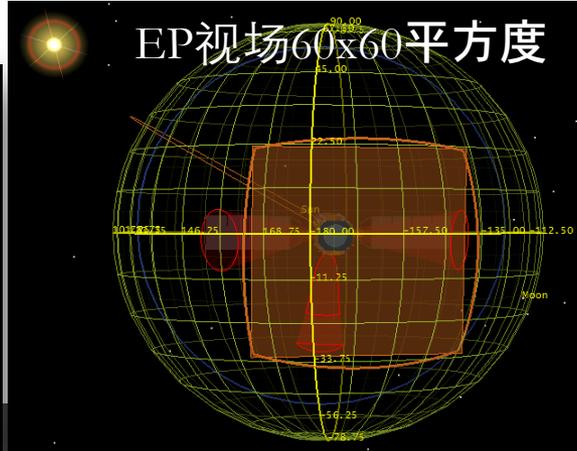
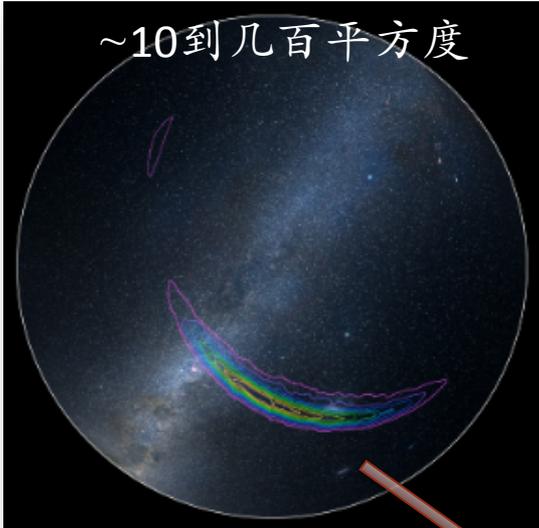
- 理论研究

- 理论模型构建；
- 理论模型例证搜寻；
- 联合探测实现后的引力波天文学；

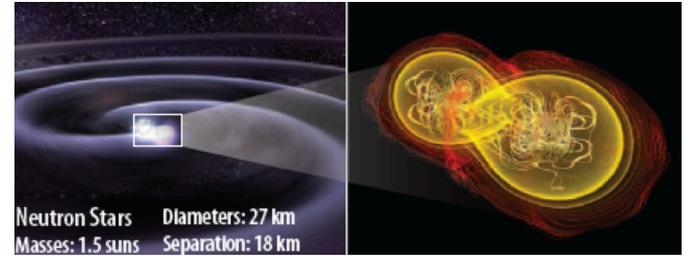
- 观测研究

- 引力波信号 / 电磁信号联合探测观测策略研究；
- 现有望远镜研究；
- **未来望远镜展望**；
 - **GWAC+EP**

未来望远镜展望：爱因斯坦探针 (EP)

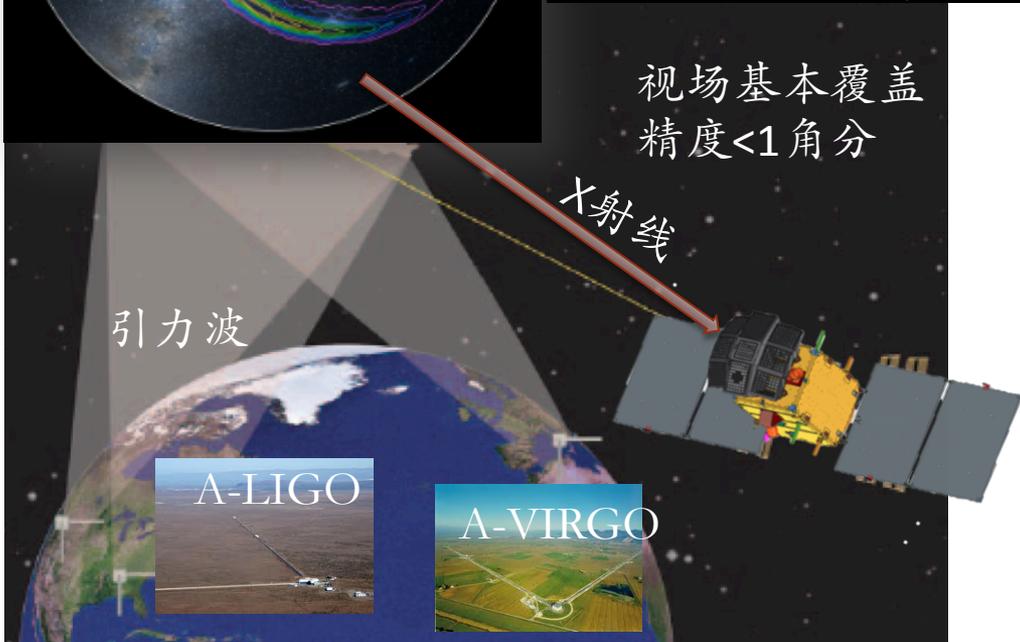


中子星-中子星，黑洞-中子星

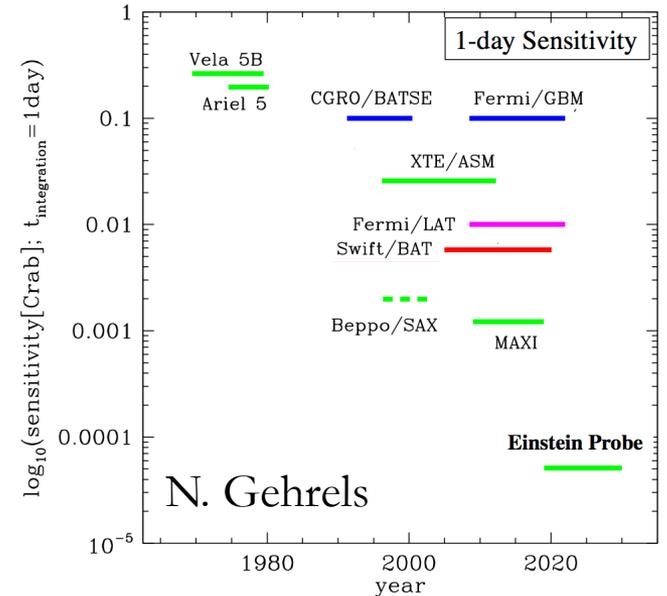


伴随电磁辐射 (X-射线)

视场基本覆盖
精度<1角分



High Energy All-Sky Monitors

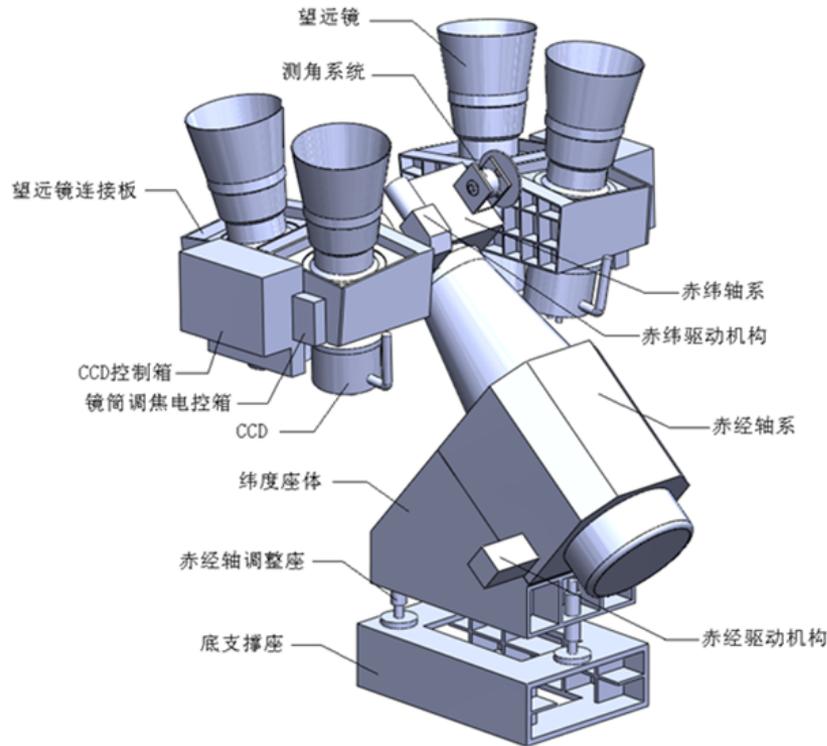


未来望远镜展望：SVOM地面阵列 (GWAC)

望远镜数目： 36*2 (4个/单元)
 综合视场： 5000*2平方度
 极限星等： 15.0-16.0等 (5-10秒)



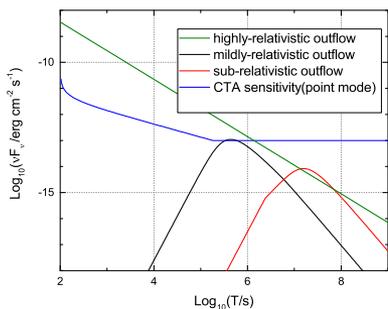
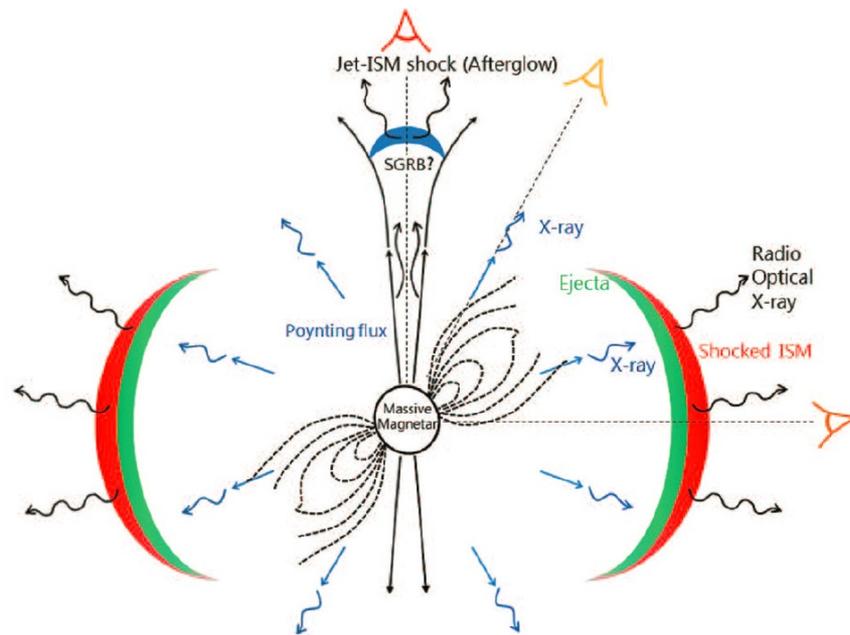
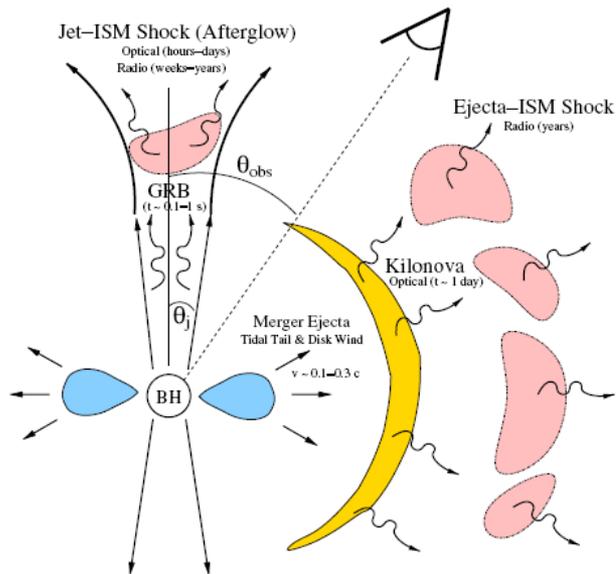
SVOM - Global
 Astronomie - CNES
 Paris



Wei J.Y.'s slides

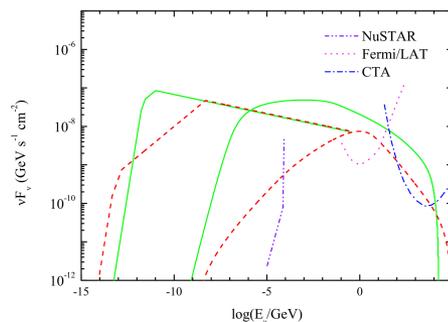
巡天项目	综合视场 (平方度)	极限星等 (V Mag)
WIDGET	~4000	11
Pi of the Sky	~1600*2	12
TORTORA	~720	11
RAPTOR-Q	~15000	9.5
Mini-GWAC	~5000	12.5
GWAC	~5000	16.0

双中子星并合高能辐射



抛射物与星际介质
相互作用产生正向
激波的SSC辐射。

Zhu & Wang, 2016



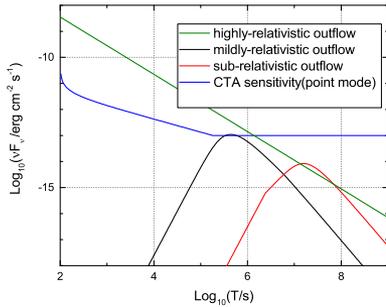
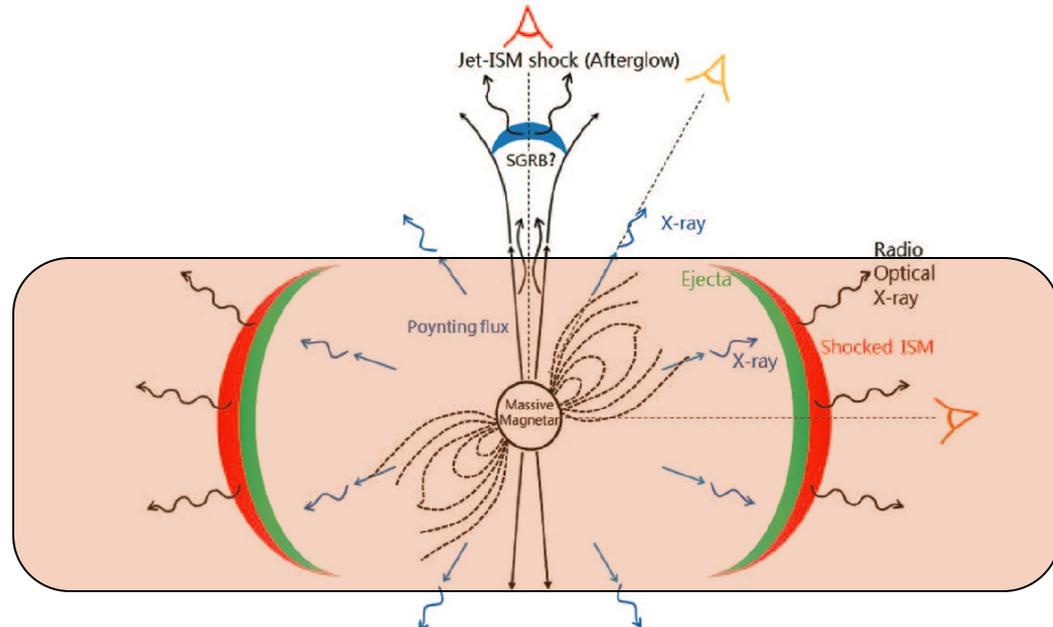
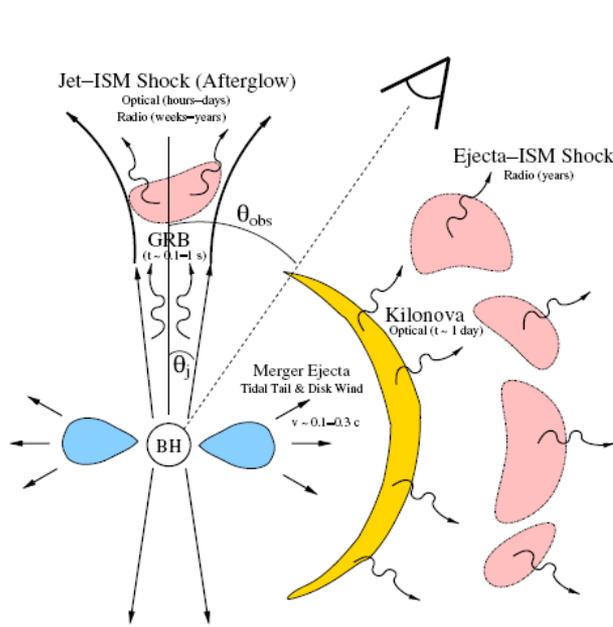
磁星星风与抛射物
相互作用产生反向
激波的SSC辐射。

Wang et al., 2016

抛射物与星际介质
相互作用产生正向
激波的SSC辐射?

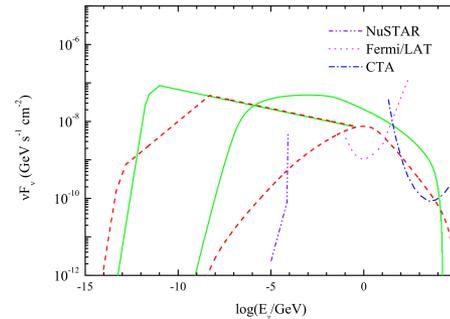
Gao et al., 2016

双中子星并合高能辐射



抛射物与星际介质
相互作用产生正向
激波的SSC辐射。

Zhu & Wang, 2016



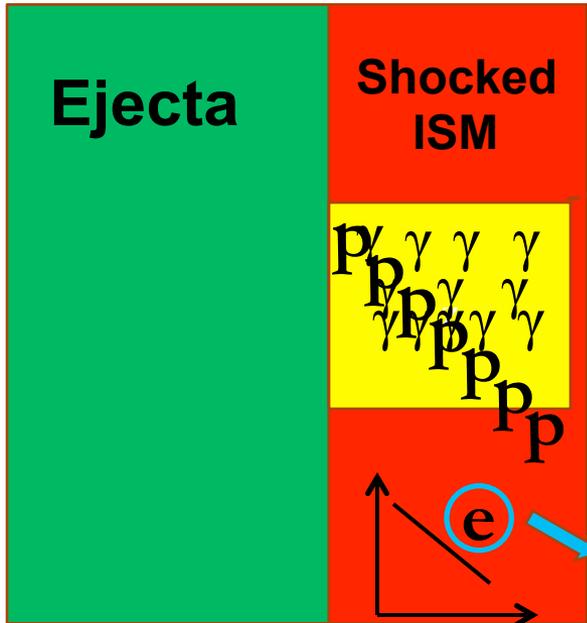
磁星星风与抛射物
相互作用产生反向
激波的SSC辐射。

抛射物与星际介质
相互作用产生正向
激波的SSC辐射?

Wang et al., 2016

Gao et al., 2016

双中子星并合高能辐射



Gao et al, 2013, PRD, 88, 043010

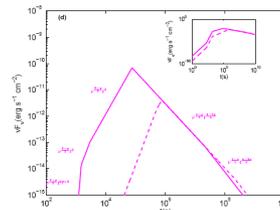
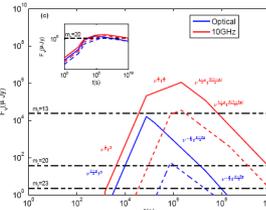
Δ -resonance condition: $E_p E_\gamma \sim \frac{m_\Delta^2 - m_p^2}{2} \Gamma^2 = 0.147 \text{ GeV}^2 \Gamma^2$

$$p\gamma \rightarrow (\Delta^+ \rightarrow) \begin{cases} n\pi^+ \rightarrow n\mu^+\nu_\mu \rightarrow ne^+\nu_e\bar{\nu}_\mu\nu_\mu, & 1/2 \\ p\pi^0 \rightarrow p\gamma\gamma, & 1/2 \end{cases}$$

$E_\gamma \sim \text{PeV}$

$f_\gamma \sim f_\nu \sim 10^{-5} \text{ GeV cm}^{-2}$

EM



$\tau_\gamma ? 1$



Cascade



100GeV LAT

单个事件: $N_{\text{ice}} \sim 10^{-3} / \text{event}$

对TeV光子背景的贡献?

$A_{\text{eff}} \sim 10^4 \text{ cm}^2$

Atwood+, 2009

双中子星并合高能辐射

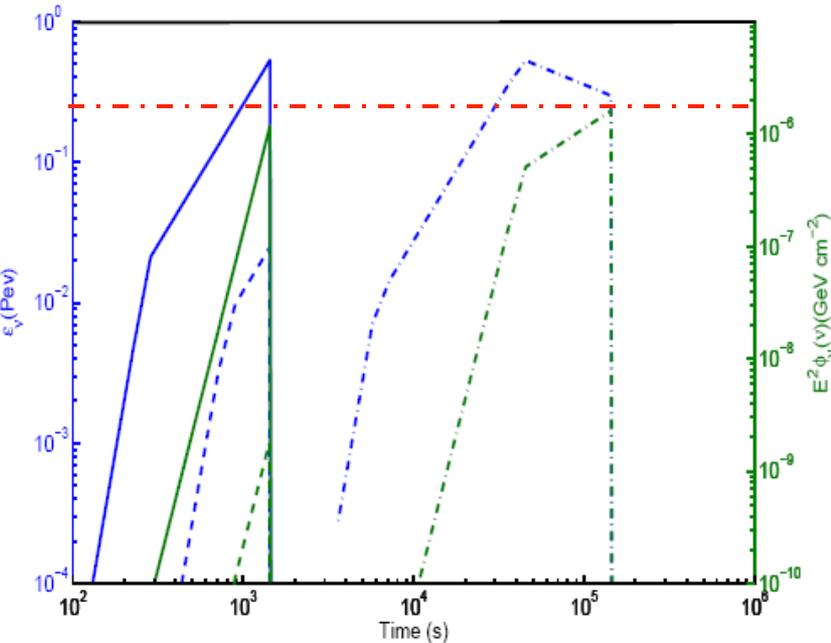


FIG. 1. Examples of the evolution of neutrino energy ϵ_ν and neutrino fluence f_ν for different dynamics: Case I (dash-dot), Case II (solid) and Case III (dash). Blue lines represent ϵ_ν and green lines show f_ν . Model parameters: $n_0 = 1, \eta = 0.1, \sigma_0 = 10^7$ and $R_0 = 10^7$. Assuming the NS+NS merger event happens at 300Mpc.

Gao+, 2013, PRD, 88, 043010

单个事件探测概率

发生在300Mpc处的最佳事件

$$E_\nu \sim \text{PeV}$$

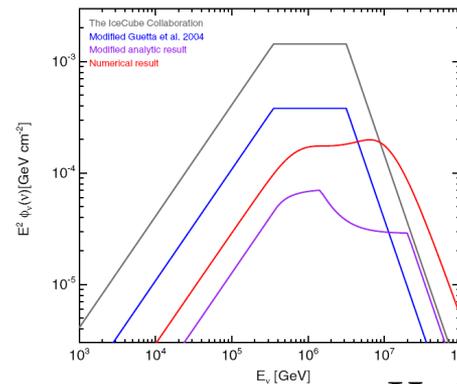
$$f_\nu \sim 10^{-5} \text{ GeV cm}^{-2}$$



$$N_{\text{ice}} \sim 10^{-5} / \text{event}$$

300 Mpc以内的事件率: $0.1 \sim 10^3 \text{ yr}^{-1}$

随机背景贡献



GRB: (300Mpc)

$$10^{-4} \text{ GeV cm}^{-2}$$

GRB事件率:
 $\sim 10 \text{ yr}^{-1}$

He+, 2012