快速射电暴高能辐射的相关研究

王敏浩¹, 高鹤^{1*}, 王界双², 李兵³, 俞云伟⁴, 刘彤⁵, 戴子高⁶

1. 北京师范大学天文系, 北京 100875;
2. 上海交通大学李政道研究所, 上海 200240;
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
4. 华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079;
5. 厦门大学天文系, 厦门 361005;
6. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023

*联系人, E-mail: gaohe@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-02-06; 接受日期: 2020-03-20; 网络出版日期: 2020-09-18

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)和国家自然科学基金(编号: 11543005, 11603003, 11633001)资助项目

摘要 快速射电暴(FRB)是一类高度色散且短时标的射电爆发现象, 大多数定位于高银纬地区并且光变曲线呈简单的单脉冲结构. FRB在其大致毫秒量级的持续时间内可释放出的总能量约为 10^{38} – 10^{40} erg, 其发生率约为 10^3 – 10^4 Gpc⁻³ yr⁻¹, 远高于同样条件下伽马暴(GB)的事件率. 目前已公布超过100个FRB事件, 人们构建了几十个理论模型来试图解释这类现象, 如双致密星并合、致密天体的坍缩、中子星与小天体的碰撞及相互作用、磁星的巨耀发以及脉冲星的巨脉冲等. 但依赖单一射电波段的观测还很难对诸多模型进行辨别, 而FRB的多波段辐射很有可能对其模型及爆发机制给予有效的甄别或限制, 因而多波段探测对FRB的研究至关重要. 本文详细地归纳和整理了FRB的主要理论模型, 并重点分析了各种理论预言的高能电磁辐射的情况, 同时介绍了我国正在研制建设中的GECAM卫星将如何凭借其在伽马射线的全天、高灵敏度及宽能段的监测能力, 对这些理论模型进行一定的筛选与验证.

关键词 中子星, 脉冲星, 射电与微波

PACS: 97.60.Jd, 97.60.Gb, 95.85.Bh

1 快速射电暴观测特征

自2007年Lorimer等人^[1]首次发现快速射电暴(FRB)以来, 无论是理论还是观测的研究都取得了长足的进步. 但对于其物理起源机制的讨论, 仍没有很好的定论^[2]. 就目前的探测结果来看, FRB是极其明亮的毫

秒时标射电爆发现象, 其典型的峰值流量在央斯基量级. FRB的观测能谱较窄, 且较强地依赖于探测FRB的仪器的探测能段. 早期的FRB数据大多来自于Parkes望远镜以及Arecibo望远镜, 其观测频率都在1.5 GHz左右. 也有部分来自GBT和UTMOST望远镜的探测, 这些FRB的观测频率在约0.8 GHz频段. 近年来, ASKAP

引用格式: 王敏浩, 高鹤, 王界双, 等. 快速射电暴高能辐射的相关研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129503

Wang M H, Gao H, Wang J S, et al. High-energy counterpart for fast radio bursts (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129503, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0032

望远镜在1.3 GHz频段、CHIME卫星在0.4–0.8 GHz频段探测到了越来越多的FRB事件. 根据迄今为止的观测结果, 在充分考虑了观测天区覆盖和选择效应后, 人们估算出超过1 Jy流量阈值的FRB事件率约为 10^3 – $10^4 \text{ sky}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ^[3–9], 该结果要远高于同样条件下伽马射线暴(伽马暴)的事件率. 虽然根据不同望远镜的巡天结果得出FRB的事件率或许相差可达约一个数量级, 但考虑到样本较少及天区覆盖相差较大等影响因素, 总体上可认为是一致的.

同一FRB的不同频率信号到达时间存在延迟效应, 即存在色散. 延迟时间与信号的频率之间大致满足负二次方关系, 这意味着色散主要由辐射在冷等离子体中的传播所引起. 因此, FRB的色散量(DM)也就反映了传播路径上的等离子体中自由电子的柱密度(也有人提出天体的旋转也会引起一定程度的高度色散现象^[10]). 已探测到的FRB大部分出现在高银纬处, 而它们的DM值分布在 100 – 2600 pc cm^{-3} ^[11]之间, 远大于相同银纬处脉冲星给出的DM值, 由此可推断FRB很有可能来自于银河系之外.

目前人们针对已发现的FRB大致将其归于两类: 重复的FRB和非重复的FRB. 目前已发表的FRB大多数是非重复的, 只有少部分是重复的(如FRB 121102, FRB 180814等)^[4,12–14]. 重复的FRB 121102率先被定位在红移约为0.19273的矮星系内, 且在恒星形成率较高的区域附近^[4], 由此有力地支持了FRB(至少重复的FRB)河外起源的猜想. 对于大多数非重复的FRB来说, 测量其红移比较困难. 随着协同观测研究的不断深入以及大型干涉阵列望远镜的投入, 目前已有多个非重复暴实现了高精度定位, 如FRB 190523, 色散量DM约为 760 pc cm^{-3} , 通过定位确定其宿主星系红移 z 约为0.66^[15]; 还有ASKAP探测到的FRB 180924, 其DM值约为 $361.42 \text{ pc cm}^{-3}$, 旋转量RM值约为 $(14 \pm 1) \text{ rad m}^2$, 通过定位确定其宿主星系红移 z 为0.3214. 有趣的是, 这两例非重复FRB的宿主星系完全不同于FRB 121102的宿主星系, 其质量很大且恒星形成率较低^[15,16]. 根据目前的FRB宿主星系探测结果, 基本可以确定绝大部分(或全部)FRB, 无论是重复还是非重复, 均起源于银河系之外. 但是FRB宿主星系的具体性质如何, 重复FRB与非重复FRB的宿主星系性质是否一致等问题还有待更多的观测来回答.

目前人们对于少数重复与非重复FRB进行了偏振

测量, 发现不同FRB的偏振性质差别很大^[11]: 有些FRB完全没有出现偏振(如FRB 140518等), 有些FRB仅出现圆偏振(如FRB 140514等), 有些FRB仅出现线偏振(如FRB 121102等), 而有些则既出现了圆偏振又出现了线偏振(如FRB 110523等). 对于有线偏振测量的源, 通过测量偏振角度随着频率的变化, 可以获得其旋转量RM的值. 色散量DM和旋转量RM的结合为人们进一步了解FRB源附近及传播路径上的磁场情况提供了重要线索^[17]. 具有较高RM值的射电辐射源, 很可能来自一个致密且具有高磁场的环境. 目前的观测发现不同的FRB可能具有的RM值差别很大^[11]: 有些FRB的RM值较小, 如 $\sim 10 \text{ rad m}^{-2}$ (FRB 150215等), 这与银河系背景磁场造成的效果相符合; 而有些FRB的RM值很大, 如 $\sim 220 \text{ rad m}^{-2}$ (FRB 160102), 这预示着相应的FRB应该起源于致密的高磁场环境. 有趣的是, FRB 121102的RM值要比非重复FRB的高了两个量级(RM约 10^5 rad m^{-2}), 并且其极化方位角在每次爆发中近乎保持不变, 不显示脉冲星脉冲信号中常见的S形曲线, 本征极化方位角在脉冲到脉冲之间也没有明显变化, 其时间尺度为月的量级^[18]. 此外, 重复FRB 121102去法拉第旋转后的偏振率为100%, 而非重复的FRB如FRB 180301的约为30%线性偏振和70%圆偏振. 偏振信息是否说明重复FRB与非重复FRB起源的环境不同? 甚至不同的非重复FRB起源的环境也不同? 解答这些问题需要更多的数据积累.

探测技术的进步以及数据的逐步完善让FRB的研究不断地推进. 目前人们构建了大量的理论模型试图去更好地理解该爆发现象. 考虑到FRB的光变时标很短(毫秒量级), 且FRB具有极高的亮温度值(1 Jy的FRB所对应的亮温度约为 $3.4 \times 10^{35} \text{ K}$, 而距离我们几千秒差距远的银河脉冲星的典型亮温度为 $3.4 \times 10^{26} \text{ K}$), 通常认为FRB的起源与致密星相关, 且辐射具有相干性. 有观点认为, 重复和非重复的FRB或许有不同的产生机制: 对于重复FRB, 可能的起源包括软伽马射线重复暴(SGR)的强耀发、脉冲星的巨型脉冲、中子星与小天体的碰撞相互作用以及等离子体流与脉冲星的相互作用等; 非重复FRB通常被认为是具有灾变性事件产生, 相对较强, 可能的产生机制包括双中子星并合、双白矮星并合、双黑洞并合, 还有大质量中子星坍缩等. 也有观点认为我们探测到的全部或部分的非重复FRB, 其本质上也是重复的, 只是受限于探测器

的灵敏度或探测器监测时间的长度, 我们才没有探测到其重复信号而已. 如果真是如此, 所有的FRB可能具有相同的起源, 且大部分灾变性事件产生FRB的模型都要被排除掉.

而为了研究并甄别这些模型, 对FRB的多波段探测至关重要. 考虑到FRB稍纵即逝的观测特点, 想要探测到与之同时发生或前后很短时间内发生的其他波段的信号, 需要该波段的探测器具有大视场且全时监测的特点, 而高能卫星探测器恰好具有此优势. 因此高能电磁波段有望成为第一个找到或排除FRB对应体的波段. 在下述文章中, 我们将首先对现有的FRB高能辐射对应体的搜寻工作做一个简单的总结. 之后, 对目前文献中主流理论模型进行详细的归纳与整理, 并重点分析各种理论下FRB可能伴随的对应体, 特别是高能辐射对应体(详见[补充材料](#)中的表1, 此处主要参考Platts等人^[19]的总结工作). 最后我们详细讨论了GE-CAM卫星(卫星简介详见[第4节](#))将来可能对FRB伴随高能辐射研究发挥的作用.

2 FRB高能辐射对应体研究现状

证认FRB的多波段辐射对于了解FRB的起源和物理机制非常关键, 所以自FRB发现以来, 其多波段辐射特别是伽马射线和X射线波段的探索就一直在进行. Thornton等人^[3]在发现FRB 110220, 110627, 110703, 以及120127后就对这些源的相应位置和时间段内可能的伽马射线/X射线以及光学波段的辐射进行了检索, 未发现可能与这4个FRB相关的暂现活动, 特别是没有已知的GRB与它们相对应. 由于GRB是具有高度集束性的伽马射线辐射, 如果FRB与它们关联, 则射电辐射必然是以不同的集束方式进行^[3]. Keane和Petroff^[7]报道了第一个实时观测而发现的FRB 140514, 由12台从X射线(Swift/XRT在暴后8.5 h开始对该源进行了长达4500 s的观测)到射电波段的望远镜对其进行了跟踪观测, 但并没有识别到该源的多波段对应体, 因而可以排除该FRB源自于附近($z < 0.3$)超新星和长GRB. Masui 2015搜索了FRB 110523定位区域的NASAIPAC河外数据库, 发现没有与之相关的X射线或伽马射线源^[20]. 对于第一个证认宿主星系但存在争议的FRB 150418, Fermi的GRBs数据中没有与之相关的数据, 而Swift对该源长期的监测也只给出持续辐射流量上限约为

$7-9 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[21]. 对于法拉第旋转($(12.0 \pm 0.7) \text{ rad m}^{-2}$)和磁场($< 21 \text{ nG}$)很低的FRB 150807, Ravi等人^[22]使用Swift/XRT在爆发后17 h对该源进行近千秒的监测, 并给出其在0.2–10 keV能段的流量上限为 $6.6 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

虽然FRB的高能辐射后续观测和协同观测并没有明确证认快速射电暴的X射线以及伽马射线的高能辐射, 但这些观测以及限制可以给其理论研究提供帮助, 对于其前身星模型及辐射机制给予有效的限制, 比如限制参数空间, 这也是该方面研究的关注点. 如Cunningham等人^[23]于2018报告了使用Fermi/GBM, Fermi/LAT和Swift/BAT进行14个FRB高能辐射对应体搜索的研究, 未发现确切的对应体, 却分别给出了时间为~0.1, 1, 10, 100 s这4个时间跨度的高能辐射流量上限以及高能辐射与射电辐射的流量比值上限. 没有观测到高能辐射这一事实与脉冲星巨脉冲(类似于蟹状脉冲星)模型的预期是相符合的, 但是射电流量限制的结果表明射电流量大于最极端(宇宙学距离)的巨脉冲的情况几个量级. 这也表明磁星的巨耀发有可能是FRB的起源, 然而将射电与高能辐射的流量比值的限制与2004年观测到的磁星SGR 1860-20的巨耀发数据相比较, 有一半的样本(6/12)还是比较不符合的. 以上研究表明, 搜索和分析高能辐射数据对于摸清FRB的起源是有效的.

对于FRB的高能辐射的研究也可以通过搜索其他望远镜的历史观测数据来展开. Yamasaki等人^[24]分析了Fermi/LAT七年的观测数据, 并对其中的100个伽马射线暴候选体进行研究, 发现高纬度($b > 20^\circ$ 或者 $b < -20^\circ$)的天区并没有存在与FRB成协的伽马射线源. 根据低银纬天区的高能伽马射线源与该天区的FRB数据, 他们给出了GeV伽马射线与射电流量比值的上限为 10^8 . 这个比率对于限制黑洞前身星模型和双星绕转系统模型的参数空间起到一定的作用. Xiao等人^[25]研究了重复暴FRB 121102的脉冲星模型的高能辐射情况, 根据现有的X射线/伽马射线高能辐射的观测流量信息, 对FRB 121102的PWN模型中的脉冲星自转周期和磁场强度进一步限制, 其参数空间比之前研究得更好. Madison等人^[26]对GBT的2 GHz接收器所获得的6个低红移短GRBs数据进行深入的FRB搜索, 没有发现任何FRB, 这意味着任何与这些GRBs对应的任何FRB的各向同性辐射能量一定不能超过 10^{38} erg , 这个限制

与重复暴FRB 121102中探测到的最低能量爆发事件相当. 通过类比重复暴FRB 121102的宿主星系与长GRBs以及和超亮超新星(SLSNe)的宿主星系, 有研究者提出在GRB和SLSNe中诞生的年轻磁星可能是重复FRB的中心引擎^[27]. Men等人^[28]通过使用Arecibo望远镜和GBT望远镜对6个GRB的遗迹进行专门观测来检验这类假设, 总共约20 h的观测未发现这些遗迹中存在任何FRB, 因此得到的零探测概率为 8.9×10^{-6} , 这一结果并不支持FRB的年轻磁星模型, 但是考虑到GRB源中的磁星可能已经处于平静期的情况, 因此也并不能完全排除这一模型. Law等人^[29]通过VLA超大型阵列在3 GHz频率下对10个SLSN-I观测了5年以上, 对一些快速光变的FRB进行了搜寻, 并使用相同的数据对在磁星驱动的超新星模型中预期的后期射电辐射进行了深度成像搜索, 但未找到FRB. 预测在更高频率或不久的将来进行的射电观测也许会探测到这些信息, 这将有助于限制年轻脉冲星及其产生环境的特性^[29].

由于其重复暴FRB 121102的定位精确以及较近的距离, 故对于该暴的高能辐射观测和搜索研究比较多. Scholz等人^[5]和Younes等人^[30]、Bogdanov^[31]以及MAGIC合作组^[32]分别给出基于XMM-Newton, NuSTAR Chandra Fermi/GBM以及MAGIC协同观测结果与FRB 121102成协的伽马射线或X射线辐射的观测限制, 其5–10 keV的持续5 ms的X射线流量上限约为 $10^{-10} \text{ erg cm}^{-2}$, 这意味这X射线光度上限约为 $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$. 而对于伽马射线甚至百GeV以上的更高能段, 与FRB成协的脉冲流量限制比较差. 对于重复暴FRB 121102的高能辐射对应体(持续源), Scholz等人^[33]和Chatterjee等人^[34]给出的0.5–10 keV的X射线能段流量上限约为 $5 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 而Zhang等人^[35]则根据Fermi/LAT的历史数据给出了更高能的100 MeV–10 GeV辐射流量限制.

随着搜索和观测到非重复暴和重复暴数目的增加(目前已发现超过100个非重复暴和11个重复暴(见FRB数据网站<http://frbcat.org>)), 以及重复暴的重复爆发次数的增加(FRB 121102自2012年发现至今共重复爆发超过1600多次, 其中FAST声称在短期内观测超过1200次来自该暴的重复爆发事件^[36], 此外FRB 180814两个月内观测到6次重复爆发^[13]), FRB相关的高能辐射观测前景也趋于火热. 目前已有不少研究中使用Fermi和Swift, AstroSAT以及AGILE等卫星的与FRB爆发时间

或者位置相关的伽马射线/X射线观测数据来搜索和约束相关能段的高能辐射流量^[37,38], 由于一部分FRB是历史观测数据中发现的, 所以也有基于回溯BeppoSAX观测数据的研究^[39]. 现如今越来越多的高灵敏度射电望远镜(例如DSA-10, CHORD, ASKAP等射电阵列)及X射线/伽马射线高能望远镜组织快速响应的联合观测, 以深入研究FRB的起源和机制, 力求在FRB的研究中获得突破. 而未来的e-ASTROGAM^[40], eROSITA^[40]和ART-XC^[41]以及AMEGO^[42]等高能望远镜的运行, 将极大地丰富观测条件, 这将会对FRB的高能辐射观测和起源研究提供更大的支持.

3 FRB理论模型

3.1 双致密星的并合与相互作用

双致密星系统(包括双白矮星、白矮星-中子星、白矮星-黑洞/双中子星/中子星-黑洞以及双黑洞系统)的并合与相互作用是目前被广泛讨论的FRB的物理起源之一.

有人认为, FRB的起源可能与有白矮星参与的双致密星相互作用有关. 例如, Gu等人^[43]认为中子星与白矮星系统在演化晚期, 当双星系统中白矮星逐渐充满洛希瓣, 物质从白矮星的大气层通过拉格朗日点转移到中子星的吸积范围并被中子星所吸积. 当被吸积的磁化物质到达中子星表面时会发生磁重联过程, 此后电子会很快被加速到相对论速度并沿着中子星的磁场线加速运动同时发出很强的电磁辐射(曲率辐射)^[43], 由此可以产生重复的FRB. 而Liu^[44]提出, 如果白矮星与中子星直接碰撞, 可能会使得大量的电子从白矮星喷射到中子星的磁层里面, 强烈的磁重联过程使得电子被加速到相对论性速度, 并产生强烈的相干曲率辐射, 由此可以产生非重复的FRB^[44]. 此外, Li等人^[45]提出白矮星与黑洞的碰撞会产生一个瞬时吸积盘并从中发射出强大的偶发性磁泡, 两个连续的磁泡之间的碰撞会导致灾变性的磁重联过程并释放出大量的自由磁能从而形成正向激波. 这些正向激波经过碰撞区内的冷磁化等离子体时通过同步辐射产生非重复的FRB信号^[45]. 最后, 有研究指出FRB信号源可能源自于双白矮星并合后形成的快速旋转且高度磁化的大质量白矮星的极冠区. 在此区域, 磁场被表面的较差自转或磁不稳定效应所扭曲从而触发磁重联过程. 电子束在极向电

场中被加速或被巨大的内部能量加速为GRB火球, 随后其将沿着开放的磁场线运动, 并发射相干曲率辐射, 从而产生非重复的FRB^[46], 但是值得注意的是, 最新的研究表明相干曲率辐射机制在磁场低于 10^{12} G的情况下无法持续在同一个方向辐射超过1 ns^[47], 而通常白矮星磁场最高只能达到 10^9 G^[48], 因此该模型的可行性取决于并合后是否能产生更强的磁场。

此类有白矮星参与的双致密星相互作用模型在解释FRB高事件率方面具有一定的优势. 由于此类模型往往伴有较强的吸积过程, 如此产生FRB的同时(或其前后), 都有可能伴随较强的高能辐射。

另一方面, 有人认为FRB应该起源于比白矮星更致密的两类致密星(中子星或黑洞)所组成的双星系统. 如果这类系统中的一颗星或双星具有较强的磁场, 在接近并合时, 双星相互绕转的过程中FRB可能会通过磁制动、磁重联或磁通量的变化而产生. 例如, Zhang^[49]最早指出对于双黑洞并合过程, 如果两个黑洞中至少有一个黑洞携带着一定数量的被磁层所保留的电荷, 那么这两个黑洞的引力绕转将产生一个垂直于轨道平面的磁偶极子而且在并合的过程中会随着磁矩快速变化, 这将导致坡印廷流的产生, 而如果在并合的最终阶段黑洞的电荷达到一定数量, 磁层的活动将会产生非重复的FRB(Zhang在最新的工作中进一步提出在双中子星、中子星黑洞并合过程中, 只要其中一个致密星带有足够大的电荷, 都有可能通过上述机制产生非重复的FRB). 2016年, Liu等人^[50]进一步提出非重复的FRB可能起源于双克尔-纽曼黑洞的磁层坍缩. 这个过程破坏了与电离层运动有关的磁场源, 磁场快速重新结合的过程中加速周围的带电粒子, 从而通过相干曲率辐射产生FRB。

通过双黑洞并合产生典型能量的FRB, 需要黑洞带电量约 10^{17} C以上. 虽然远低于黑洞理论上的极限带电量, 但在真实的天文环境下, 使得黑洞带电且维持一定的时间仍是未解问题. 因此有人认为, 双致密星并合产生FRB, 一定需要中子星的参与, 因为中子星自身比较自然地带有较强的磁场和一定数量的带电粒子。

有观点认为在双中子星并合最后阶段的某一时刻, 它们的磁场结构应与双星系统的旋转相同步, 偏轴旋转磁偶极子的磁制动或者磁层中的等离子体效应将会以类似于射电脉冲星的发射方式向外发出相干射电辐射, 从而产生非重复FRB^[24,51]. Wang等人^[52,53]则是利

用单极感应和偶极感应模型来研究双中子星在其引力绕转最后阶段的物理过程, 他们认为, 在此条件下, FRB可能来自于双中子星系统在其最终绕转期间的电磁相互作用过程. 在这个模型中, 双星系统中的一个中子星有很强的磁场, 而另一个中子星的磁场可以很强也可以很弱, 当两个中子星的磁层相互作用或者弱磁场中子星穿过强磁场中子星的磁层时会产生一个电动势, 通过这个电动势电子瞬间被加速到相对论速度而产生同步辐射, 此时辐射形式主要为伽马射线辐射, 即伽马暴前兆辐射. 同步加速辐射使得电子迅速耗散掉垂直于磁力线方向的动量, 然后这些电子沿着磁力线运动, 产生相干曲率辐射, 从而产生非重复FRB. Mingarelli等人^[54]提出在黑洞与中子星并合的过程中, 两者的磁场会发生相互作用, 这个作用过程被称为“黑洞电池”过程, 该过程可以产生一个持续几毫秒且光度为 10^{40} – 10^{41} erg s⁻¹的瞬时射电辐射, 这或许可以解释一部分的FRB起源问题. 在此类的双中子星或中子星-黑洞系统相互作用模型中, 辐射时标可以比较自然地解释, 因为双星并合的时标也是毫秒级. 而对宿主星系的研究也一定程度上支持双致密星的并合的模型. 最新的观测证据表明FRB 180924^[16]和FRB 190523^[15]的宿主星系均为大质量星系, 并且观测到的FRB位置都显著偏离星系中心, 意味着这两个FRB更可能产生于年老的星族. 但是这类模型无法解释全部的FRB, 因为目前双中子星的并合率(约为 1540^{+3200}_{-1220} Gpc⁻³ yr⁻¹^[55])比FRB的爆发率低一个数量级。

这类模型所产生的FRB, 将大概率伴随着高能辐射(大多数的短伽马暴将会与FRB成协). 其中高能辐射即可能与FRB同时产生, 也可能产生于FRB之后. 这有可能对应着FRB 131104和伽马射线暂现源Swift J0644.5-5111疑似成协事件^[56-58]. 不仅如此, 这类模型所产生的FRB还会伴随着高频引力波信号. 通过对比FRB信号与引力波信号的达到时间, 可以帮助区分具体模型。

3.2 致密星的坍缩过程

不同于双致密星的并合模型, 有观点认为非重复的FRB应该起源于单个致密星的坍缩过程. 例如, 早在2014年, Falcke和Rezzolla^[59]就提出当一个孤立且磁化的超大质量中子星在稀薄的环境中坍缩成黑洞时, 在一个自由落体时间尺度(约小于1 ms)内, 中子星将

释放所携带的磁层, 磁层将经历剧烈的磁重联过程从而产生猛烈的磁激波快速地向外传播, FRB可在此过程中产生. Zhang^[60]指出由于有些GRB的中心引擎很可能是超大质量中子星, 如果这些超大质量中子星塌缩会产生FRB, 则FRB与伽马暴可能成协出现, 且伽马暴将发生在FRB前 10^2 – 10^4 s. 对FRB与伽马暴的联合搜寻可以有效地检验该模型.

不同于中子星坍缩成黑洞的模型, Shand等人^[61]提出随着中子星的老化, 其自旋下降的同时会导致中心密度的上升. 如果其质量足够大, 那么就会发生相变过程而后形成夸克星. 相变的过程中, 中子星会以相对论性的速度向外抛射壳层中的富中子物质, 这些物质将会通过快中子俘获过程产生非稳定重元素, 而后重元素经过一系列衰变释放大量的MeV电子, 这些电子将在夸克星的强磁场下通过同步辐射产生非重复的FRB^[61]. 该情况下FRB可能会伴随着X射线或伽马射线等高能辐射.

Zhang等人^[62]则认为FRB可能产生于夸克星的壳层坍缩过程. 一方面, 在夸克星的壳层坍缩后, 其极冠区附近的磁力线会因较差自转或者磁不稳定性而受到干扰和扭曲^[62]. 另一方面, 在夸克星壳层坍缩后其内部变热并裸露出来, 会在其极强的电场中产生正负电子对^[63], 夸克星极冠区的正负电子对将被磁场加速到相对论速度后沿着磁力线运动形成一个薄壳, 磁重联之类的瞬时耗散过程可能会被触发, 磁能将在短时间内释放出来, 而后随着这个薄壳的膨胀, 这些电子的相干辐射会产生非重复的FRB^[62]. 此模型下, 不确定是否会伴随高能辐射信号.

3.3 磁星模型

早在2002年, 也就是第一例FRB被发现之前, Lyutikov^[64]就提出类似于太阳耀发过程产生III型射电暴的机制, 软伽马重复暴(SGR)的耀发同样会产生剧烈的短时标射电爆发. 在2007年第一例FRB被发现后, 2007年Popov和Postnov^[65]立刻提出了FRB源于此SGR的巨耀发模型. 2014年Lyubarsky^[66]同样提出FRB可能来自于银河系外的磁星耀发, 只是FRB具体的产生机制有所不同. Lyubarsky认为磁星耀发的开始阶段将催生一个伴随磁星风传播的强磁化脉冲, 该脉冲与磁星风云中的等离子体相互作用所产生的正反激波将通过同步脉泽辐射产生FRB. 然而, Beloborodov^[67]在其

2017年的文章中指出, Lyubarsky的模型中需要的磁星耀发能量过高, 且此种外激波的平复时标相对较长, 因此Lyubarsky的模型可能无法解释重复FRB较短的爆发间隔. Beloborodov认为重复的FRB应该产生于超级活跃而且年轻的磁星, 这些磁星会在它附近产生大量不同能量的毫秒量级时间尺度的耀发. 不同耀发之间相互碰撞所催生的内激波将通过同步脉泽辐射产生重复的FRB.

磁星模型可以比较自然地解释FRB的重复性. 由于磁星周围的强磁场存在, 如此产生的FRB应该具有较大的RM值, 这似乎也符合FRB 121102的观测相吻合, 未来更多的重复FRB的RM观测将有助于鉴别该模型. 在该模型下, FRB有可能会伴有高能辐射, 例如Lyubarsky^[66]在其模型中预言FRB在产生的同时会伴随着毫秒量级时间尺度的TeV光子辐射, 该辐射在一定距离范围内可以被探测到(小于100 Mpc).

对这些年轻磁星的起源角度而言, 它们当然很可能诞生于大质量恒星的塌缩过程, 但原则上它们也可能诞生于致密星的合并过程^[68]. 如果是后一种情况, 则可以兼具合并模型的一些优点, 比如解释FRB的距离分布和FRB位置与宿主星系中心的偏离等观测结果.

3.4 其他的理论模型

除上述模型外, 人们还提出了许多其他模型试图解释神秘的FRB现象. 例如Geng和Huang提出^[69,70], 中子星与小行星或彗星等小天体的单次碰撞可以产生非重复的FRB. 在第一例重复FRB 121102被报道之后, Dai等人^[71]提出, 如果一个强磁化脉冲星与一个携带有小行星带的恒星相互绕转, 每当脉冲星穿过其伴星的小行星带, 就可能与带内多个小行星发生碰撞, 从而产生重复的FRB. 在该模型框架下, 重复的FRB可能具有一定的周期性, 其周期约为脉冲星与伴星的绕转周期. 当然, 在一些情况下, 如小行星带中的小行星质量分布非常不均匀, 或者一次穿过脉冲星的引力扰动破坏了小行星带的轨道运动等等, 该周期性也可能不存在. 有趣的是, 最近 CHIME/FRB射电望远镜对重复FRB 180916.J0158+65进行了长达一年的观测, 发现其爆发有周期性, 其周期约为16.35 d^[72]. 如果该观测结果正确, 对中子星与小行星碰撞产生FRB的模型将是有力的支持.

除此之外, 已提出的理论模型还包括脉冲星的星

震^[73], 变星的波动辐射^[74], 超导宇宙弦的振荡和爆发^[75-77], 被强磁化等离子体包围的克尔黑洞与AGN相互作用^[78], 原初黑洞在中子星内部吸积导致中子星的磁层脱落过程^[79], 轴子与致密天体的相互作用(轴子星与中子星、轴子星与黑洞、轴子星团与中子星、轴子星云与黑洞)^[80-88], 宇宙梳模型^[89,90] 等等(附加材料中的表对不同模型的前身星、辐射机制、重复性以及是否存在其他波段尤其是高能辐射对应体进行了总结). 众多模型对立的局面, 恰恰说明了单纯地利用射电辐射很难确定FRB的真正起源, 我们急需FRB的多波段观测限制.

4 GECAM对FRB高能辐射的研究前景

随着FRB的研究不断推进, 越来越多的探测仪器已经或即将投入到对FRB的观测中, 其中包括Parkes, Arecibo以及Green Bank Telescope, 还有我国的500 m口径球面望远镜(FAST^[91,92])和65 m天马望远镜、加拿大的CHIME项目以及未来的平方公里阵列(SKA^[93])等大型射电望远镜. 由于FRB随机发生且并非实时触发, 因此其多波段对应体的探测同样需要大视场不间断的搜寻, 以期之后在数据库中能发现与FRB实现匹配的源. 高能卫星探测器以其大视场的优势, 有望最早找到或排除FRB的高能对应体. 目前, Fermi卫星搭载的GBM探测器是在轨运行的空间天文卫星当中对伽马射线暂现源监测能力最强的探测器, 但受地球遮挡、南大西洋异常区等影响, 其全天覆盖度仍然较为有限. GECAM卫星是我国计划在2020年底前发射的卫星系统, 由两颗共轨共轭运行的卫星组成, 旨在实现对伽马射线暂现源的全天监测^[94]. 凭借全天视场以及高灵敏度, GECAM将是探测FRB高能对应体的理想探测器, 如果FRB存在高能辐射, 那么GECAM能监测几乎所有FRB(平均来说GECAM将监测>90%的FRB, 具体比例取决于FRB探测器重点搜索的天区位置)的高能辐射情况.

如前文所述, 目前有关FRB的大多数模型都认为, FRB起源于与致密星(中子星、黑洞等)相关的物理过程, 该过程中有较大可能产生伴随的高能辐射. 如果FRB伴随的高能辐射能够被GECAM所探测, 则高能辐射的观测性质, 乃至高能辐射与FRB到达时间的先后顺序都可能为鉴别FRB模型提供强有力的支持. 比

如同样与致密星密切相关的伽马射线暴(GRB), 它们比FRB更稀有且能量更高, 根据其产生机制, 人们认为部分FRB很有可能与GRB成协. 但从观测的角度出发, 迄今为止, 仅有Swift/BAT报道探测到一例疑似与FRB成协的GRB. 但由于BAT视场仅覆盖全天的近10%, 这个FRB发生时恰巧落入了BAT的视场边缘, 导致探测器的响应和成像结果的不确定性增加. 此外, BAT有限的视场也使其只探测到约300 s的信号, 增加了证认的难度. GECAM具有全天视场, 将对>90%以上FRB进行几乎不间断(当一颗星短暂经过SAA区时对约30%天区暂时失去覆盖)的监测. 如果GECAM探测到与FRB成协的GRB, 则可以排除那些不能产生GRB的起源模型. GECAM(6 keV–5 MeV)比Swift/BAT(15–150 keV)能段更宽, 有利于获得高精度的能谱信息便于分析高能辐射的性质, 研究FRB的前身星和辐射机制. 另一方面, 能够同时产生FRB与GRB的模型, 预言产生FRB与GRB的先后顺序并不相同. 举例来讲, 假设双中子星系统就是FRB的前身星, 如果FRB产生于并合旋进阶段, 则FRB将先于GRB被探测, 而如果FRB产生于并合产生的超大质量中子星, 则FRB将晚于GRB被探测. 如此, FRB与GRB的探测顺序可以帮忙进一步对模型进行甄别与验证.

如果对于全部FRB的监测均没有发现高能对应体, 那么可以为FRB的高能辐射给出光度上限或高能辐射的辐射立体角上限. 考虑到FRB的事件率很高, 因此这些观测上限会非常强以至于对部分模型起到排除作用. 同样结合其他低能对应体探测的结果, 可以对FRB的辐射谱以至辐射机制给出强烈的限制.

综上所述, GECAM的观测将有助于回答“各种类型的快速射电暴(重复、非重复)是否与高能电磁对应体成协”这一关键问题, 从而为揭示FRB的起源、辐射机制等提供关键证据. 如果在探测中发现FRB的高能对应体, GECAM将迅速引导大量的后随多波段(软X射线、光学、射电等)观测^[95,96], 通过光学等波段的观测实现FRB宿主星系的观测以及对FRB红移的测量. 通过对重复以及非重复FRB的距离、光度等信息的统计分析进一步确定这两类FRB是否为同一类源, 或者是否还存在其他更多种类的FRB. 未来一定有红移探测的FRB样本, 可以成为强有力的宇宙学探针, 也可用来探索重子物质密度与空间分布并解决重子物质缺失问题^[97,98]、限制暗能量状态方程参数^[99-102]、研究

宇宙电离历史及大尺度结构^[98,103,104]、限制爱因斯坦弱等效原理^[105–107]、限制光子静止质量以及研究星系际介质磁场等问题^[17,108,109]。引力波与电磁波的联合探测开启了多信使天文学新时代^[110]，可以预见，FRB将是未来多信使时代重要的研究目标，也是研究极端物理问题的天然实验室。

5 总结

凭借独特而有趣的观测性质，FRB已迅速成为天

体物理领域最热门的研究对象之一。受限于探测波段的单一性，FRB的产生源以及辐射机制仍然非常不确定。目前被提出的产生FRB的模型已有数十种。探测技术的进步以及数据的逐步完善固然有助于对不同模型的限制与甄别，而要实现FRB产生机制的最终确定，对FRB的多波段探测至关重要。凭借全天视场以及高灵敏度的优势，我国即将发射的GECAM卫星系统将是检测FRB高能对应体比较理想的探测器之一，有望提升FRB高能对应体的探测能力，为最终确定FRB起源提供重要帮助。

补充材料

本文的补充材料见physcn.scichina.com。补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责。

参考文献

- 1 Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin. *Science*, 2007, 318: 777–780, arXiv: [0709.4301](https://arxiv.org/abs/0709.4301)
- 2 Li L B, Huang Y F, Geng J J. Progress in the researches of fast radio bursts, progress in astronomy (in Chinese). 2017, 35: 429–227 [李龙彪, 黄永锋, 耿金军. 快速射电暴的观测及理论研究进展. 天文学进展, 2017, 35: 429–227]
- 3 Thornton D, Stappers B, Bailes M, et al. A population of fast radio bursts at cosmological distances. *Science*, 2013, 341: 53–56, arXiv: [1307.1628](https://arxiv.org/abs/1307.1628)
- 4 Spitler L G, Cordes J M, Hessels J W T, et al. Fast radio burst discovered in the arecibo pulsar ALFA survey. *Astrophys J*, 2014, 790: 101, arXiv: [1404.2934](https://arxiv.org/abs/1404.2934)
- 5 Scholz P, Spitler L G, Hessels J W T, et al. The repeating fast radio burst FRB 121102: Multi-wavelength observations and additional bursts. *Astrophys J*, 2016, 833: 177, arXiv: [1603.08880](https://arxiv.org/abs/1603.08880)
- 6 Champion D J, Petroff E, Kramer M, et al. Five new fast radio bursts from the HTRU high-latitude survey at Parkes: First evidence for two-component bursts. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2016, 460: L30–L34, arXiv: [1511.07746](https://arxiv.org/abs/1511.07746)
- 7 Keane E F, Petroff E. Fast radio bursts: Search sensitivities and completeness. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 447: 2852–2856, arXiv: [1409.6125](https://arxiv.org/abs/1409.6125)
- 8 Lawrence E, Vander Wiel S, Law C, et al. The nonhomogeneous poisson process for fast radio burst rates. *Astron J*, 2017, 154: 117, arXiv: [1611.00458](https://arxiv.org/abs/1611.00458)
- 9 Oppermann N, Connor L D, Pen U L. The Euclidean distribution of fast radio bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 461: 984–987, arXiv: [1604.03909](https://arxiv.org/abs/1604.03909)
- 10 Song Q, Huang Y, Feng H, et al. The radiation mechanism of fast radio bursts. arXiv: [1707.08979](https://arxiv.org/abs/1707.08979)
- 11 Petroff E, Hessels J W T, Lorimer D R. Fast radio bursts. *Astron Astrophys Rev*, 2019, 27: 4
- 12 Amiri M, Bandura K, Bhardwaj M, et al. Observations of fast radio bursts at frequencies down to 400 megahertz. *Nature*, 2019, 566: 230–234
- 13 Andersen B C, Bandura K, Bhardwaj M, et al. Chime/FRB discovery of eight new repeating fast radio burst sources. *Astrophys J*, 2019, 885: L24, arXiv: [1908.03507](https://arxiv.org/abs/1908.03507)
- 14 Kumar P, Shannon R M, Osłowski S, et al. Faint repetitions from a bright fast radio burst source. *Astrophys J*, 2019, 887: L30, arXiv: [1908.10026](https://arxiv.org/abs/1908.10026)
- 15 Ravi V, Catha M, D’Addario L, et al. A fast radio burst localized to a massive galaxy. *Nature*, 2019, 572: 352–354
- 16 Bannister K W, Deller A T, Phillips C, et al. A single fast radio burst localized to a massive galaxy at cosmological distance. *Science*, 2019, 365:

- 565–570, arXiv: [1906.11476](#)
- 17 Akahori T, Ryu D, Gaensler B M. Fast radio bursts as probes of magnetic fields in the intergalactic medium. *Astrophys J*, 2016, 824: 105, arXiv: [1602.03235](#)
- 18 Michilli D, Seymour A, Hessels J W T, et al. An extreme magneto-ionic environment associated with the fast radio burst source FRB 121102. *Nature*, 2018, 553: 182–185, arXiv: [1801.03965](#)
- 19 Platts E, Weltman A, Walters A, et al. A living theory catalogue for fast radio bursts. *Phys Rep*, 2019, 821: 1–27, arXiv: [1810.05836](#)
- 20 Masui K, Lin H H, Sievers J, et al. Dense magnetized plasma associated with a fast radio burst. *Nature*, 2015, 528: 523–525, arXiv: [1512.00529](#)
- 21 Keane E F, Johnston S, Bhandari S, et al. The host galaxy of a fast radio burst. *Nature*, 2016, 530: 453–456, arXiv: [1602.07477](#)
- 22 Ravi V, Shannon R M, Bailes M, et al. The magnetic field and turbulence of the cosmic web measured using a brilliant fast radio burst. *Science*, 2016, 354: 1249–1252, arXiv: [1611.05758](#)
- 23 Cunningham V A, Cenko B. A search for high-energy counterparts to fast radio bursts. In: Proceedings of the American Astronomical Society Meeting. 2018. 231: 243.08
- 24 Yamasaki S, Totani T, Kiuchi K. Repeating and non-repeating fast radio bursts from binary neutron star mergers. *Publ Astron Soc Jpn*, 2018, 70: 39, arXiv: [1710.02302](#)
- 25 Xiao D, Dai Z G. Constraining parameters in pulsar models of repeating FRB 121102 with high-energy follow-up observations. *Astrophys J*, 2017, 846: 130, arXiv: [1708.03729](#)
- 26 Madison D R, Agarwal D, Aggarwal K, et al. A deep targeted search for fast radio bursts from the sites of low-redshift short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2019, 887: 252, arXiv: [1909.11682](#)
- 27 Margalit B, Berger E, Metzger B D. Fast radio bursts from magnetars born in binary neutron star mergers and accretion induced collapse. *Astrophys J*, 2019, 886: 110, arXiv: [1907.00016](#)
- 28 Men Y, Aggarwal K, Li Y, et al. Non-detection of fast radio bursts from six gamma-ray burst remnants with possible magnetar engines. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 489: 3643–3647, arXiv: [1908.10222](#)
- 29 Law C J, Omand C M B, Kashiyama K, et al. A search for late-time radio emission and fast radio bursts from superluminous supernovae. *Astrophys J*, 2019, 886: 24, arXiv: [1910.02036](#)
- 30 Younes G, Kouveliotou C, Huppenkothen D, et al. FERMI/gamma-ray burst monitor upper limits assuming a magnetar origin for the repeating Fast Radio Burst source, FRB 121102. *The Astronomer's Telegram*, 2016, 8781
- 31 Bogdanov S. Coordinated X-ray and radio observations of the repeating fast radio burst. In: Proceedings of the 42nd COSPAR Scientific Assembly. Pasadena, 2018. E1.17-31-18
- 32 Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. Constraining very-high-energy and optical emission from FRB 121102 with the MAGIC telescopes. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 481: 2479–2486, arXiv: [1809.00663](#)
- 33 Scholz P, Bogdanov S, Hessels J W T, et al. Simultaneous X-ray, gamma-ray, and radio observations of the repeating fast radio burst FRB 121102. *Astrophys J*, 2017, 846: 80, arXiv: [1705.07824](#)
- 34 Chatterjee S, Law C J, Wharton R S, et al. A direct localization of a fast radio burst and its host. *Nature*, 2017, 541: 58–61, arXiv: [1701.01098](#)
- 35 Zhang B B, Zhang B. Repeating FRB 121102: Eight-year Fermi-LAT upper limits and implications. *Astrophys J*, 2017, 843: L13, arXiv: [1705.04242](#)
- 36 Di L, Zhang X X, Qian L, et al. FAST detects multiple bursts in L-band from FRB 121102. *The Astronomer's Telegram*, 2019, 13064
- 37 Cunningham V, Cenko S B, Burns E, et al. A search for high-energy counterparts to fast radio bursts. *Astrophys J*, 2019, 879: 40, arXiv: [1905.06818](#)
- 38 Sun S, Yu W, Yu Y, et al. A search for short-term hard X-ray bursts in the direction of the repeating FRB 121102. *Astrophys J*, 2019, 885: 55, arXiv: [1909.07626](#)
- 39 Guidorzi C, Marongiu M, Martone R, et al. A search for gamma-ray prompt emission associated with the lorimer burst FRB 010724. *Astrophys J*, 2019, 882: 100, arXiv: [1907.08386](#)
- 40 de Angelis A, Tatischeff V, Grenier I A, et al. Science with e-ASTROGAM. *J High Energy Astrophys*, 2018, 19: 1–106, arXiv: [1711.01265](#)
- 41 Khokhriakova A D, Popov S B. Detectability of neutron star—white dwarf coalescences by eROSITA and ART-XC. *J High Energy Astrophys*, 2019, 24: 1–5, arXiv: [1909.10810](#)
- 42 Griffin S. Subsystem development for the all-sky medium energy gamma-ray observatory (AMEGO) prototype. In: Proceedings of the 36th

- International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). Madison, 2019
- 43 Gu W M, Dong Y Z, Liu T, et al. A neutron star—white dwarf binary model for repeating fast radio burst 121102. *Astrophys J*, 2016, 823: L28, arXiv: [1604.05336](#)
 - 44 Liu X. A model of neutron-star—white-dwarf collision for fast radio bursts. *Astrophys Space Sci*, 2018, 363: 242, arXiv: [1712.03509](#)
 - 45 Li L B, Huang Y F, Geng J J, et al. A model of fast radio bursts: Collisions between episodic magnetic blobs. *Res Astron Astrophys*, 2018, 18: 061, arXiv: [1803.09945](#)
 - 46 Kashiyama K, Ioka K, Mészáros P. Cosmological fast radio bursts from binary white dwarf mergers. *Astrophys J*, 2013, 776: L39, arXiv: [1307.7708](#)
 - 47 Wang J S, Lai D. Fast radio bursts and their associated nebulae or afterglows. arXiv: [1907.12473](#)
 - 48 Briggs G P, Ferrario L, Tout C A, et al. Origin of magnetic fields in cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 481: 3604–3617, arXiv: [1809.08741](#)
 - 49 Zhang B. Mergers of charged black holes: Gravitational-wave events, short gamma-ray bursts, and fast radio bursts. *Astrophys J*, 2016, 827: L31, arXiv: [1602.04542](#)
 - 50 Liu T, Romero G E, Liu M L, et al. Fast radio bursts and their gamma-ray or radio afterglows as Kerr-Newman black hole binaries. *Astrophys J*, 2016, 826: 82, arXiv: [1602.06907](#)
 - 51 Totani T. Cosmological fast radio bursts from binary neutron star mergers. *Publ Astron Soc Jpn*, 2013, 65: L12, arXiv: [1307.4985](#)
 - 52 Wang J S, Yang Y P, Wu X F, et al. Fast radio bursts from the inspiral of double neutron stars. *Astrophys J*, 2016, 822: L7, arXiv: [1603.02014](#)
 - 53 Wang J S, Peng F K, Wu K, et al. Pre-merger electromagnetic counterparts of binary compact stars. *Astrophys J*, 2018, 868: 19, arXiv: [1810.00170](#)
 - 54 Mingarelli C M F, Levin J, Lazio T J W. Fast radio bursts and radio transients from black hole batteries. *Astrophys J*, 2015, 814: L20, arXiv: [1511.02870](#)
 - 55 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101, arXiv: [1710.05832](#)
 - 56 DeLaunay J J, Fox D B, Murase K, et al. Discovery of a transient gamma-ray counterpart to FRB 131104. *Astrophys J*, 2016, 832: L1, arXiv: [1611.03139](#)
 - 57 Gao H, Zhang B. Implications from the upper limit of radio afterglow emission of FRB 131104/Swift J0644.5-5111. *Astrophys J*, 2017, 835: L21, arXiv: [1611.06481](#)
 - 58 Peng Z K, Wang S Q, Liu L D, et al. Constraining the environmental properties of FRB 131104 using the unified dynamical afterglow model. *Astrophys J*, 2018, 861: 147, arXiv: [1806.03441](#)
 - 59 Falcke H, Rezzolla L. Fast radio bursts: The last sign of supramassive neutron stars. *Astron Astrophys*, 2014, 562: A137, arXiv: [1307.1409](#)
 - 60 Zhang B. A possible connection between fast radio bursts and gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2014, 780: L21
 - 61 Shand Z, Ouyed A, Koning N, et al. Quark nova model for fast radio bursts. *Res Astron Astrophys*, 2016, 16: 011, arXiv: [1505.08147](#)
 - 62 Zhang Y, Geng J J, Huang Y F. Fast radio bursts from the collapse of strange star crusts. *Astrophys J*, 2018, 858: 88, arXiv: [1805.04448](#)
 - 63 Usov V V. Usov replies. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4775, arXiv: [astro-ph/9811193](#)
 - 64 Lyutikov M. Radio emission from magnetars. *Astrophys J Lett*, 2002, 580: L65
 - 65 Popov S B, Postnov K A. Hyperflares of SGRs as an engine for millisecond extra-galactic radio bursts. In: Proceedings of the Conference Dedicated to Viktor Ambartsumian's 100th Anniversary. Yerevan, Byurakan: Gitutyun Publishing House of NAS RA, 2010. 129–132
 - 66 Lyubarsky Y. A model for fast extragalactic radio bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 442: L9
 - 67 Beloborodov A M. A flaring magnetar in FRB 121102? *Astrophys J*, 2017, 843: L26, arXiv: [1702.08644](#)
 - 68 Cao X F, Yu Y W, Zhou X. Compact binary mergers and the event rate of fast radio bursts. *Astrophys J*, 2018, 858: 89, arXiv: [1803.06266](#)
 - 69 Geng J J, Huang Y F. Fast radio bursts: Collisions between neutron stars and asteroids/comets. *Astrophys J*, 2015, 809: 24, arXiv: [1502.05171](#)
 - 70 Huang Y F, Geng J J. Collision between neutron stars and asteroids as a mechanism for fast radio bursts. In: Proceedings of the Frontiers in Radio Astronomy and FAST Early Sciences Symposium 2015. Guiyang: Astronomical Society of the Pacific, 2016. 502: 1
 - 71 Dai Z G, Wang J S, Wu X F, et al. Repeating fast radio bursts from highly magnetized pulsars traveling through asteroid belts. *Astrophys J*, 2016, 829: 27, arXiv: [1603.08207](#)
 - 72 Amir M, et al. (CHIME/FRB Collaboration). 2 Periodic activity from a fast radio burst source. arXiv: [2001.10275](#)

- 73 Wang W, Luo R, Yue H, et al. FRB 121102: A starquake-induced repeater? *Astrophys J*, 2018, 852: 140, arXiv: [1710.00541](#)
- 74 Song Q W, Huang Y, Feng H Q. The radiation mechanism of fast radio bursts. arXiv: [1707.08979](#)
- 75 Cai Y F, Sabancilar E, Vachaspati T. Radio bursts from superconducting strings. *Phys Rev D*, 2012, 85: 023530, arXiv: [1110.1631](#)
- 76 Yu Y W, Cheng K S, Shiu G, et al. Implications of fast radio bursts for superconducting cosmic strings. *J Cosmol Astropart Phys*, 2014, 2014 (11): 040, arXiv: [1409.5516](#)
- 77 Costa R, Gordin J E B, Weltman A. Are fast radio bursts generated by cosmic string cusps? arXiv: [1807.01976](#)
- 78 Gupta P D, Saini N. Collapsing supra-massive magnetars: FRBs, the repeating FRB121102 and GRBs. *J Astrophys Astron*, 2018, 39: 14, arXiv: [1709.00185](#)
- 79 Mottez F, Zarka P. Radio emissions from pulsar companions: A refutable explanation for galactic transients and fast radio bursts. *Astron Astrophys*, 2014, 569: A86, arXiv: [1408.1333](#)
- 80 Abramowicz M A, Bejger M. Fast radio bursts explained. arXiv: [1704.05931](#)
- 81 Iwazaki A. Fast radio bursts from axion stars. arXiv: [1412.7825](#)
- 82 Iwazaki A. Axion stars and fast radio bursts. *Phys Rev D*, 2015, 91: 023008, arXiv: [1410.4323](#)
- 83 Iwazaki A. FRB and dark matter axions. arXiv: [1512.06245](#)
- 84 Iwazaki A. Axion stars and repeating fast radio bursts with finite bandwidths. arXiv: [1707.04827](#)
- 85 Raby S. Axion star collisions with Neutron stars and fast radio bursts. *Phys Rev D*, 2016, 94: 103004, arXiv: [1609.01694](#)
- 86 Tkachev I I. Fast radio bursts and axion miniclusters. *Jetp Lett*, 2015, 101: 1–6, arXiv: [1411.3900](#)
- 87 Rosa J G, Kephart T W. Stimulated axion decay in superradiant clouds around primordial black holes. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 231102, arXiv: [1709.06581](#)
- 88 Van Waerbeke L, Zhitnitsky A. Fast radio bursts and the axion quark nugget dark matter model. *Phys Rev D*, 2019, 99: 043535, arXiv: [1806.02352](#)
- 89 Zhang B. A “cosmic comb” model of fast radio bursts. *Astrophys J*, 2017, 836: L32, arXiv: [1701.04094](#)
- 90 Zhang B. FRB 121102: A repeatedly combed neutron star by a nearby low-luminosity accreting supermassive black hole. *Astrophys J*, 2018, 854: L21, arXiv: [1801.05436](#)
- 91 Jiang P, Peng B, Li D, et al. Editorial. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959501
- 92 Jiang P, Yue Y L, Gan H Q, et al. Commissioning progress of the FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959502, arXiv: [1903.06324](#)
- 93 An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 989531, arXiv: [1901.07756](#)
- 94 Li X Q, Wen X Y, An Z H, et al. The GECAM and its payload (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129512 [李新乔, 文向阳, 安正华, 等. GECAM卫星有效载荷简介. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129512]
- 95 in ’t Zand J J M, Bozzo E, Qu J L, et al. Observatory science with eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029506, arXiv: [1812.04023](#)
- 96 Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein probe: Exploring the ever-changing X-ray universe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039502 [袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502]
- 97 McQuinn M. Locating the “missing” baryons with extragalactic dispersion measure estimates. *Astrophys J*, 2014, 780: L33, arXiv: [1309.4451](#)
- 98 Deng W, Zhang B. Cosmological implications of fast radio burst/gamma-ray burst associations. *Astrophys J*, 2014, 783: L35, arXiv: [1401.0059](#)
- 99 Gao H, Li Z, Zhang B. Fast radio burst/gamma-ray burst cosmography. *Astrophys J*, 2014, 788: 189, arXiv: [1402.2498](#)
- 100 Zhou B, Li X, Wang T, et al. Fast radio bursts as a cosmic probe? *Phys Rev D*, 2014, 89: 107303, arXiv: [1401.2927](#)
- 101 Walters A, Weltman A, Gaensler B M, et al. Future cosmological constraints from fast radio bursts. *Astrophys J*, 2018, 856: 65, arXiv: [1711.11277](#)
- 102 Wei J J, Wu X F, Gao H. Cosmology with gravitational wave/fast radio burst associations. *Astrophys J*, 2018, 860: L7, arXiv: [1805.12265](#)
- 103 Zheng Z, Ofek E O, Kulkarni S R, et al. Probing the intergalactic medium with fast radio bursts. *Astrophys J*, 2014, 797: 71, arXiv: [1409.3244](#)
- 104 Masui K W, Sigurdson K. Dispersion distance and the matter distribution of the universe in dispersion space. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 121301, arXiv: [1506.01704](#)
- 105 Wei J J, Gao H, Wu X F, et al. Testing Einstein’s equivalence principle with fast radio bursts. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 261101, arXiv: [1512.07670](#)
- 106 Nusser A. On testing the equivalence principle with extragalactic bursts. *Astrophys J*, 2016, 821: L2, arXiv: [1601.03636](#)
- 107 Tingay S J, Kaplan D L. Limits on Einstein’s equivalence principle from the first localized fast radio burst FRB 150418. *Astrophys J*, 2016, 820:

- L31, arXiv: [1602.07643](#)
- 108 Wu X F, Zhang S B, Gao H, et al. Constraints on the photon mass with fast radio bursts. *Astrophys J*, 2016, 822: L15, arXiv: [1602.07835](#)
- 109 Shao L, Zhang B. Bayesian framework to constrain the photon mass with a catalog of fast radio bursts. *Phys Rev D*, 2017, 95: 123010, arXiv: [1705.01278](#)
- 110 Gao H. GW170817: The key to the door of multi-messenger astronomy including gravitational waves. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 059531

High-energy counterpart for fast radio bursts

WANG MinHao¹, GAO He^{1*}, WANG JieShuang², LI Bing³, YU YunWei⁴, LIU Tong⁵
& DAI ZiGao⁶

¹ Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

³ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ School of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430097, China;

⁵ Department of Astronomy, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

⁶ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

The fast radio bursts (FRB) are a type of radio bursts with a high dispersion and short time scale. Most of them are known to be located in the high galactic latitude area and the light curve is known to be a simple single pulse structure. The total energy released by FRB is approximately 10^{38} – 10^{40} erg in the duration of approximately several milliseconds; and the rate of FRB is about approximately 10^3 – 10^4 Gpc⁻³ yr⁻¹, which is much higher than that of GRB under the same condition. At present, >100 FRB events have been published, and theoretical models have been constructed to explain such phenomena, such as the combination of double compact stars, the collapse of compact stars, the collision and interaction between neutron stars and small celestial bodies, the giant flare of magnetic stars and the giant pulse of the pulsars. However, it is difficult to distinguish between these models based on a single radio band, and the multi-band radiation of FRB is likely to effectively distinguish or restrict this model and its mechanism; hence, multi-band detection is very important for the research of FRB. In this paper, the main theoretical models of FRB are summarized and organized in detail, and the situation of high-energy electromagnetic radiation in these theories has been emphatically analyzed. In addition, the GECAM satellite under construction in China will be expected to actualize the monitoring of gamma-ray in the whole sky, full time and wide energy range, and its future detection results will be expected to screen and verify these theoretical models.

neutron stars, pulsars, radio and microwave

PACS: 97.60.Jd, 97.60.Gb, 95.85.Bh

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0032](#)