



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



极目卫星对空间环境的探测研究

王晨巍

cwwang@ihep.ac.cn

(代表GECAM团队和合作者)

GECAM首席: 熊少林研究员

Institute of High Energy Physics (IHEP)

2024-10-29

提纲

研究背景

- 项目背景
- 仪器介绍
- 运行状况

观测成果

(太阳、辐射带)

- 太阳耀斑
- 质子事件、地磁暴
- DRO空间环境

观测成果

(TGF、TEB)

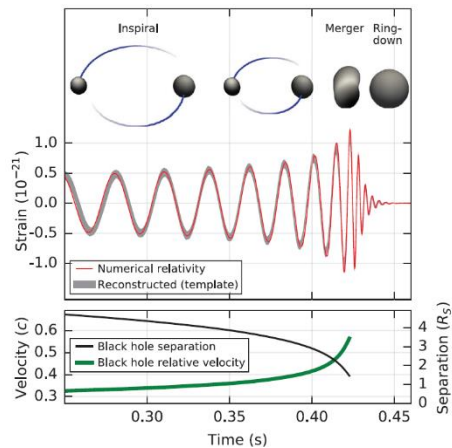
- TGF、TEB源表
- 多峰TEB-like
- 震荡型粒子事件

观测成果

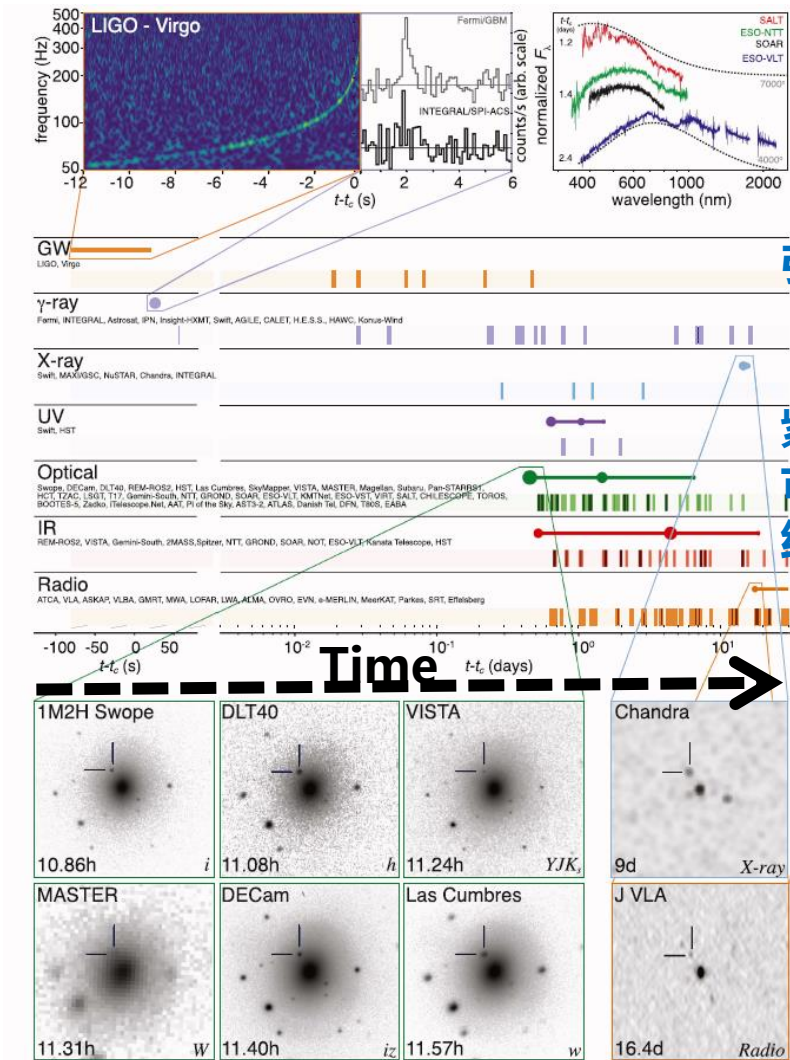
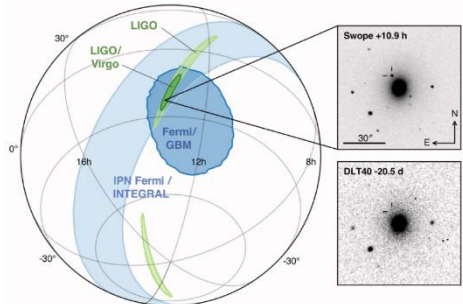
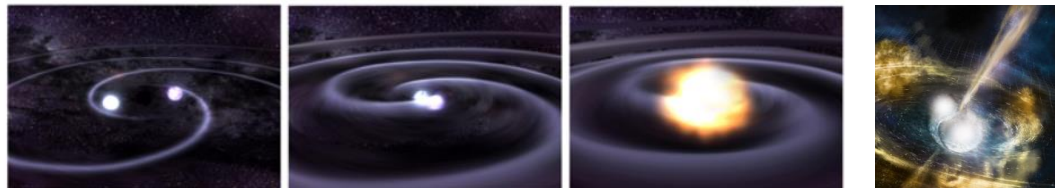
(方法研究)

- 粒子鉴别
- 投掷角测量
- 电离层扰动

GECAM项目简介



第一例引力波观测GW150914



引力波
γ射线
X射线
紫外线
可见光
红外线
射电

第一例引力波电磁对应体 GW170817/GRB170817A

GECA科学目标

高能天体物理

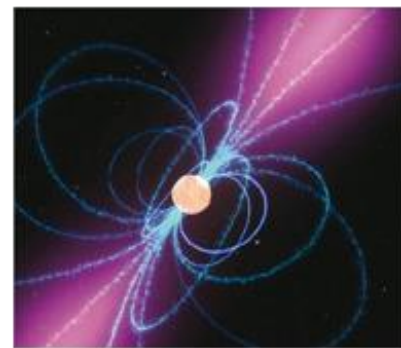
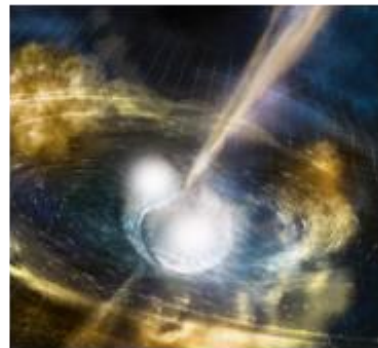
- 引力波/快速射电暴/高能中微子的高能电磁对应体
- 伽马射线暴
- 磁星
- X射线双星
- 黑洞潮汐瓦解事件

太阳物理

- 太阳耀斑

高能大气物理

- 地球伽马闪
- 地球电子束



极目卫星——GECAM-A/B

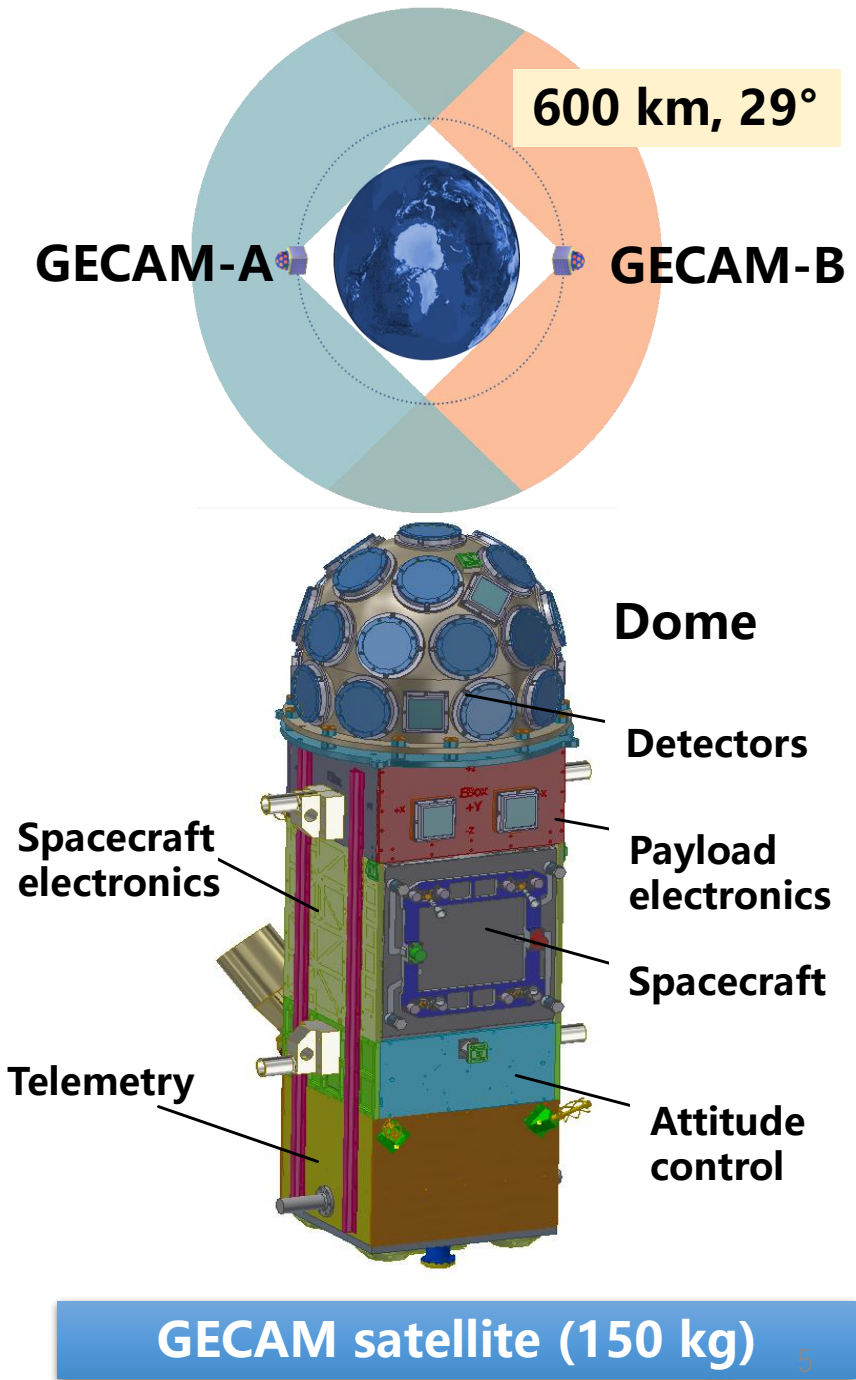
引力波暴高能电磁对应体全天监测器
Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor

性能	GECAM-A/B
能量范围	6 keV ~ 5 MeV
有效面积（单探头）	> 40 cm ²
时间分辨率	0.1 μs
能量分辨率	< 16%@59.5 keV

GECAM配备：

- 伽马射线探测器 (GRD, 圆形)——X/γ射线灵敏
- 8个荷电粒子探测器 (CPD, 方形)——带电粒子(e, p)灵敏

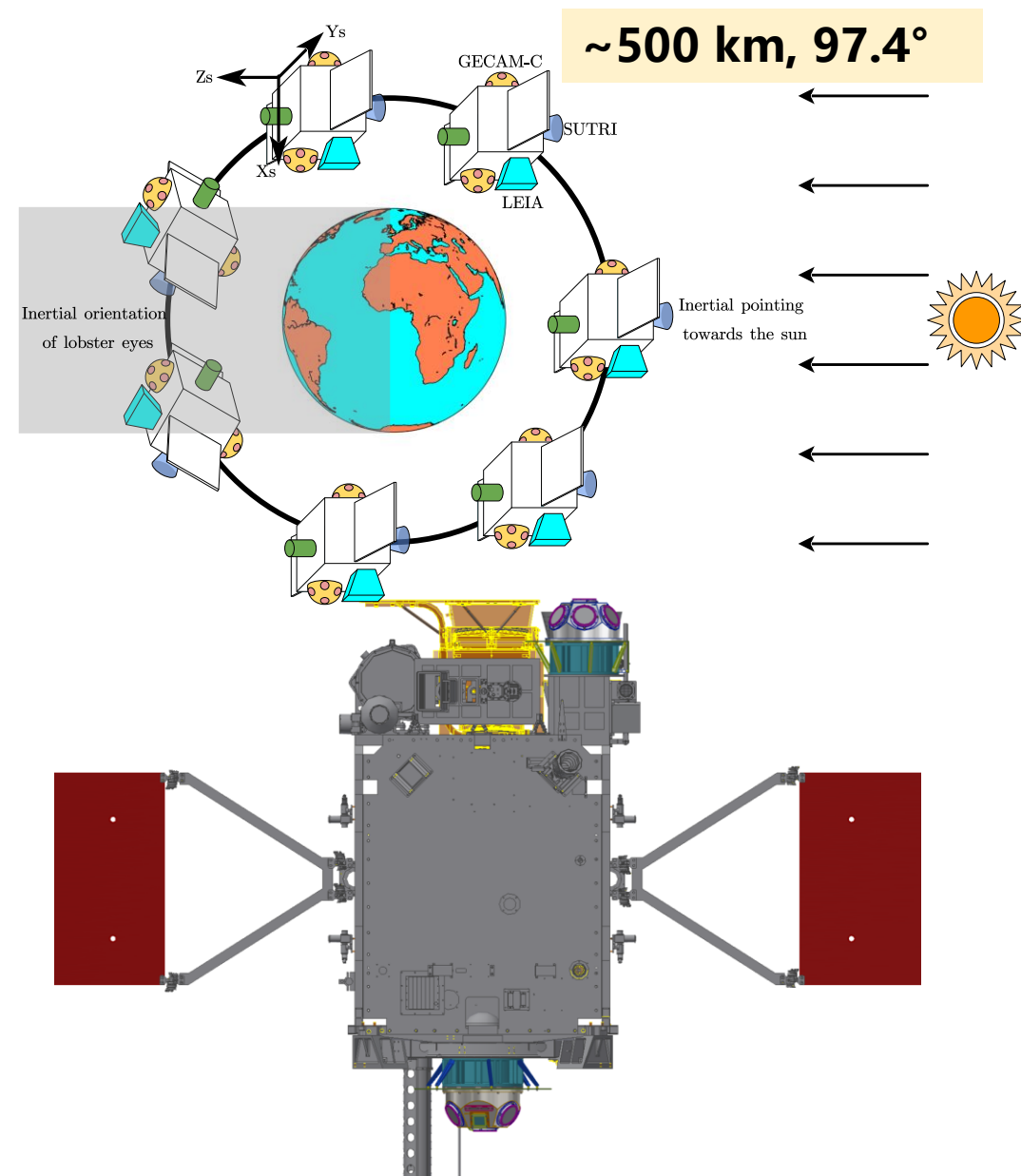
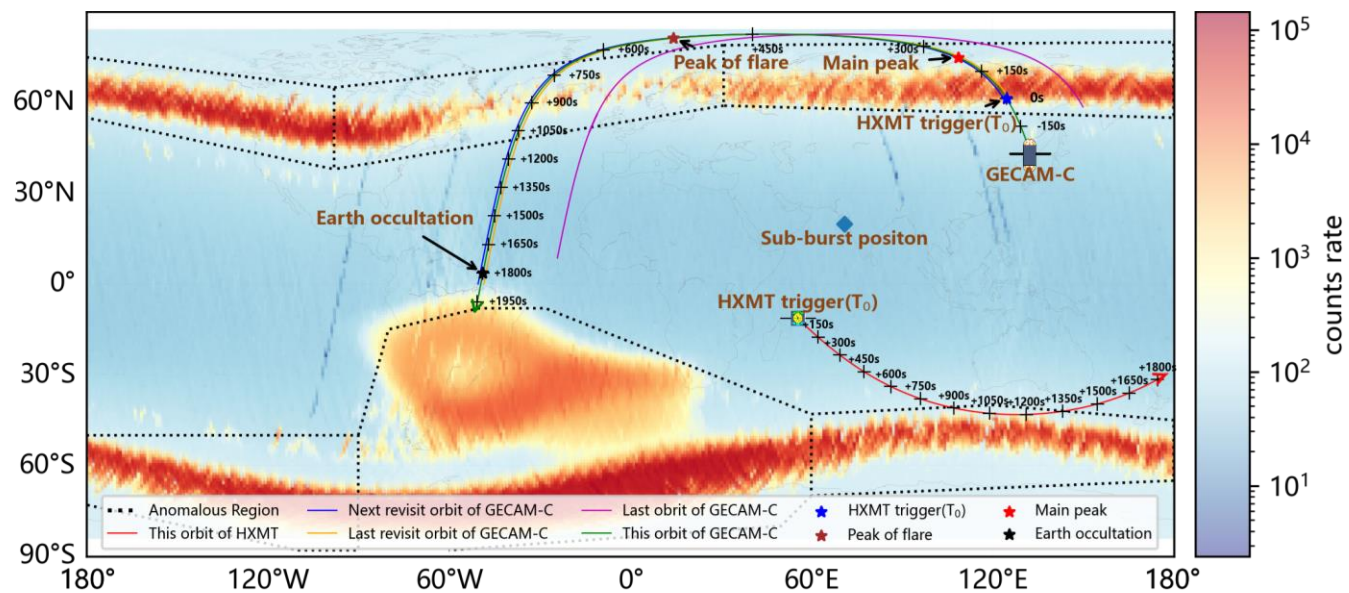
- 首个新型空间伽马射线探测器，高性能、无高压、轻量化
- 首次利用北斗导航系统实现准实时星地通信



GECAM-C (HEBS)

High Energy Burst Searcher

- 搭载于空间新技术试验卫星 (SATech-01)
- 性能同GECAM-A/B
- ~500km, 太阳同步轨道
- 辐射带内保持开机

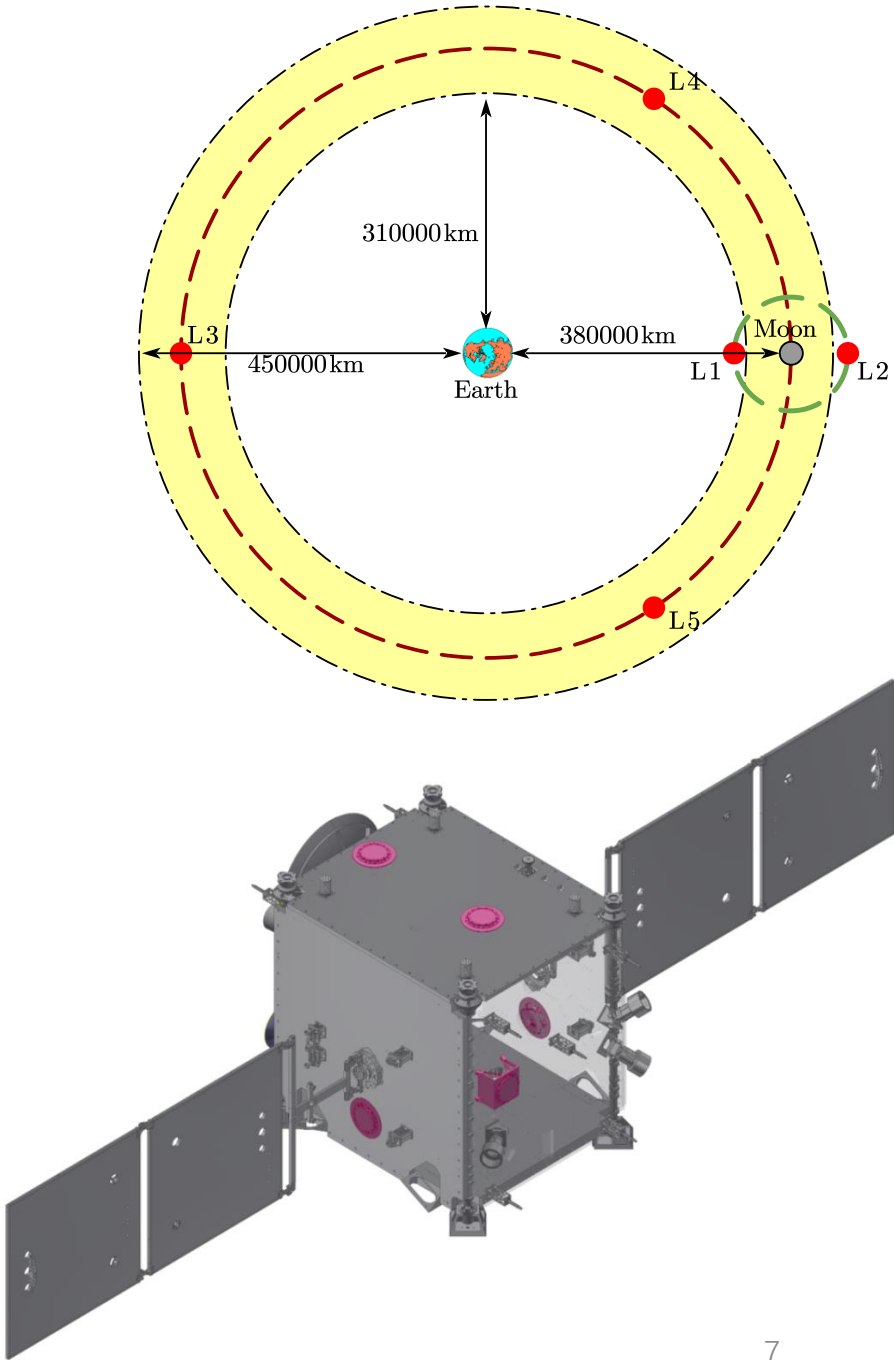


GECAM-D (GTM)

Gamma-ray Transient Monitor

- 搭载于DRO-A卫星运行在地月系统DRO 轨道:
 - 距离地球: 31,0000-45,0000km
 - 距离月球: 7,0000-9,0000km
- 具有无遮挡、长基线等优势
- 直接探测DRO轨道的空间辐照环境

性能	GECAM-D
能量范围	10 keV ~ 1 MeV
有效面积 (单探头)	> 100 cm ²
时间分辨率	0.1 μs
能量分辨率	< 18%@59.5 keV



成员	发射日期	轨道	探测能段（设计）	运行状态
GECAM-A	2020-12-10	LEO (600 km, 29°)	8-5000 keV	随机观测
GECAM-B			8-5000 keV	常规运行
GECAM-C (SATech-01/HEBS)	2022-07-27	SSO (500 km, 97.4°)	6-5000 keV	常规运行
GECAM-D (DRO-A/GTM)	2024-03-13	DRO (31,0000-45,0000km)	10-1000 keV	调试阶段

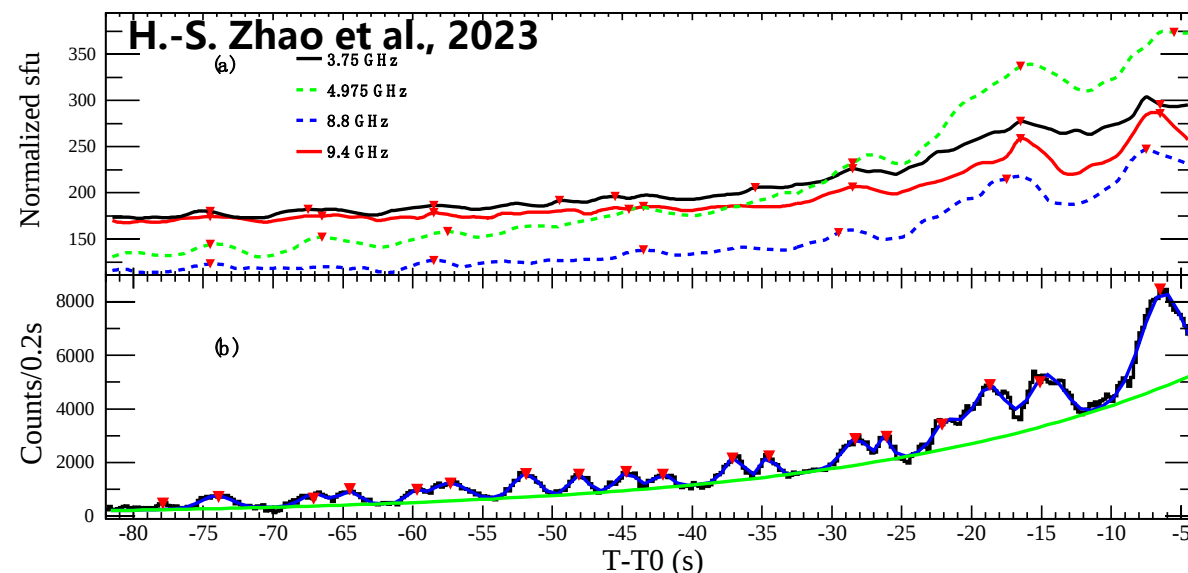
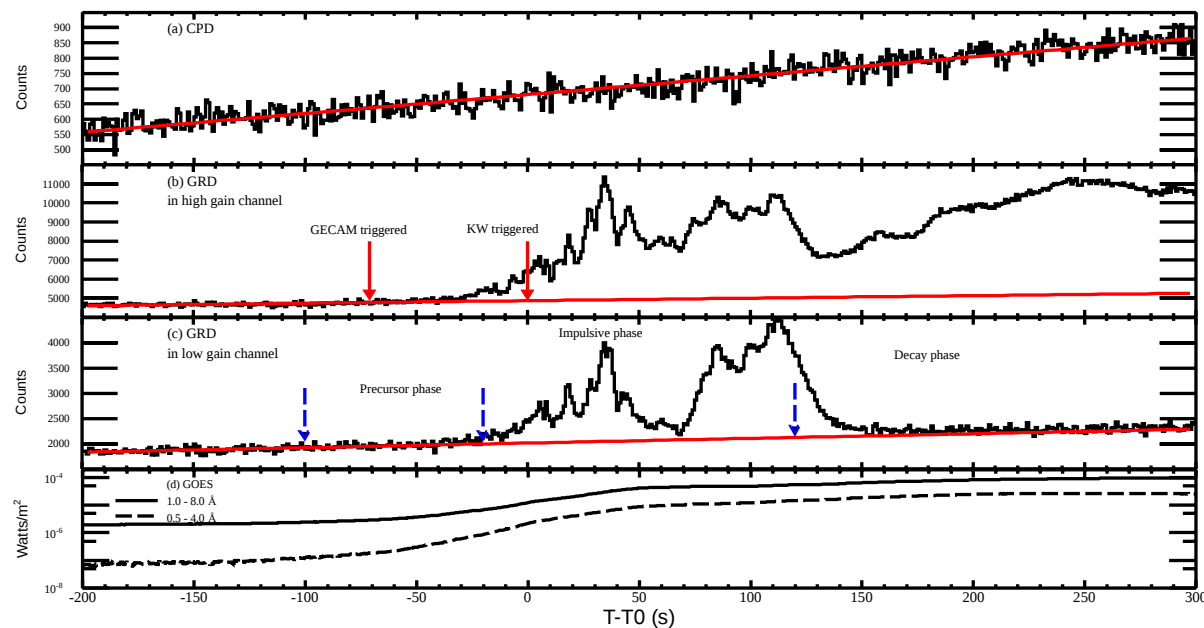
GECAM在空间环境探测方面具有巨大优势：

- 1. 多卫星、多轨道、快速重访
- 2. 宽能段、高时间分辨率 (0.1μs)
- 3. 大视场、多指向
- 4. 高灵敏度



观测成果 (太阳、辐射带)

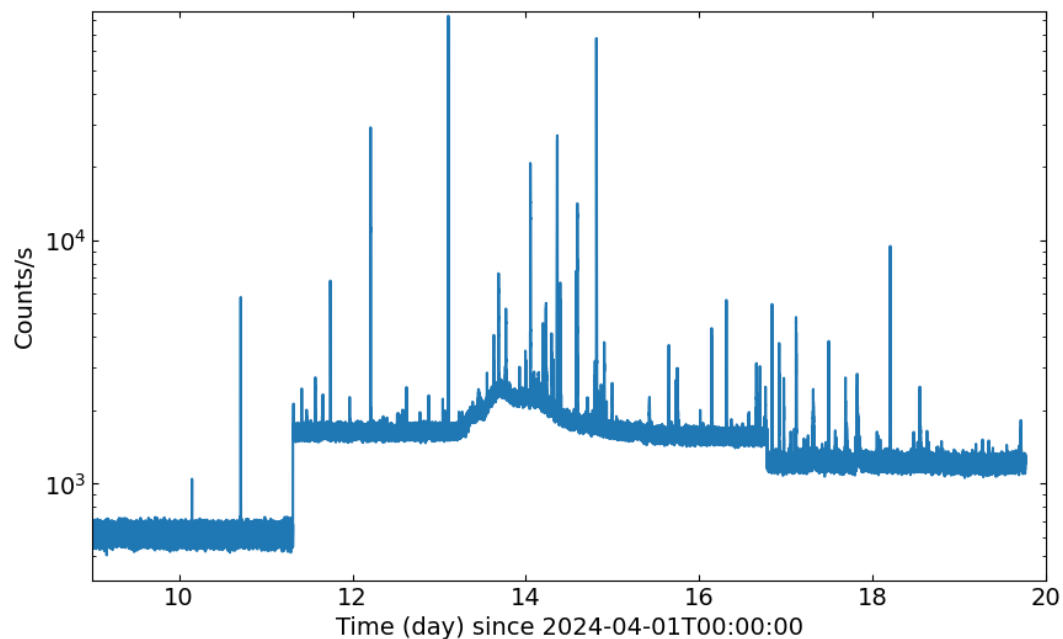




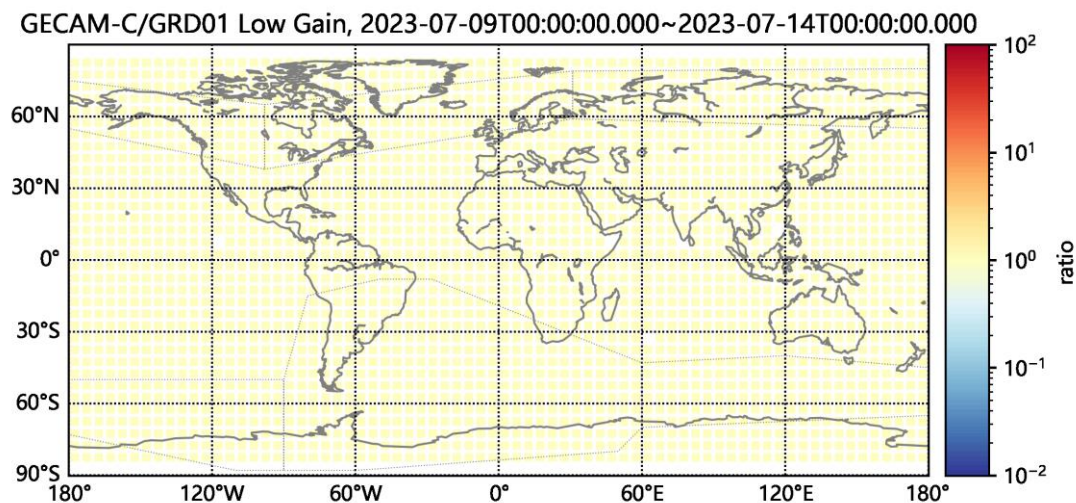
GECAM对太阳耀斑的观测优势

- 时间分辨率好、抗数据饱和能力强
- 多探头设计：指向太阳和偏离太阳方向的探头分别对先兆相和脉冲相进行了非常好的观测
- GECAM的大面积：耀斑初相发现了一系列成对出现的小峰，并与射电观测相匹配，很好的符合电流环合并模型

太阳耀斑、质子事件与地磁暴的监测

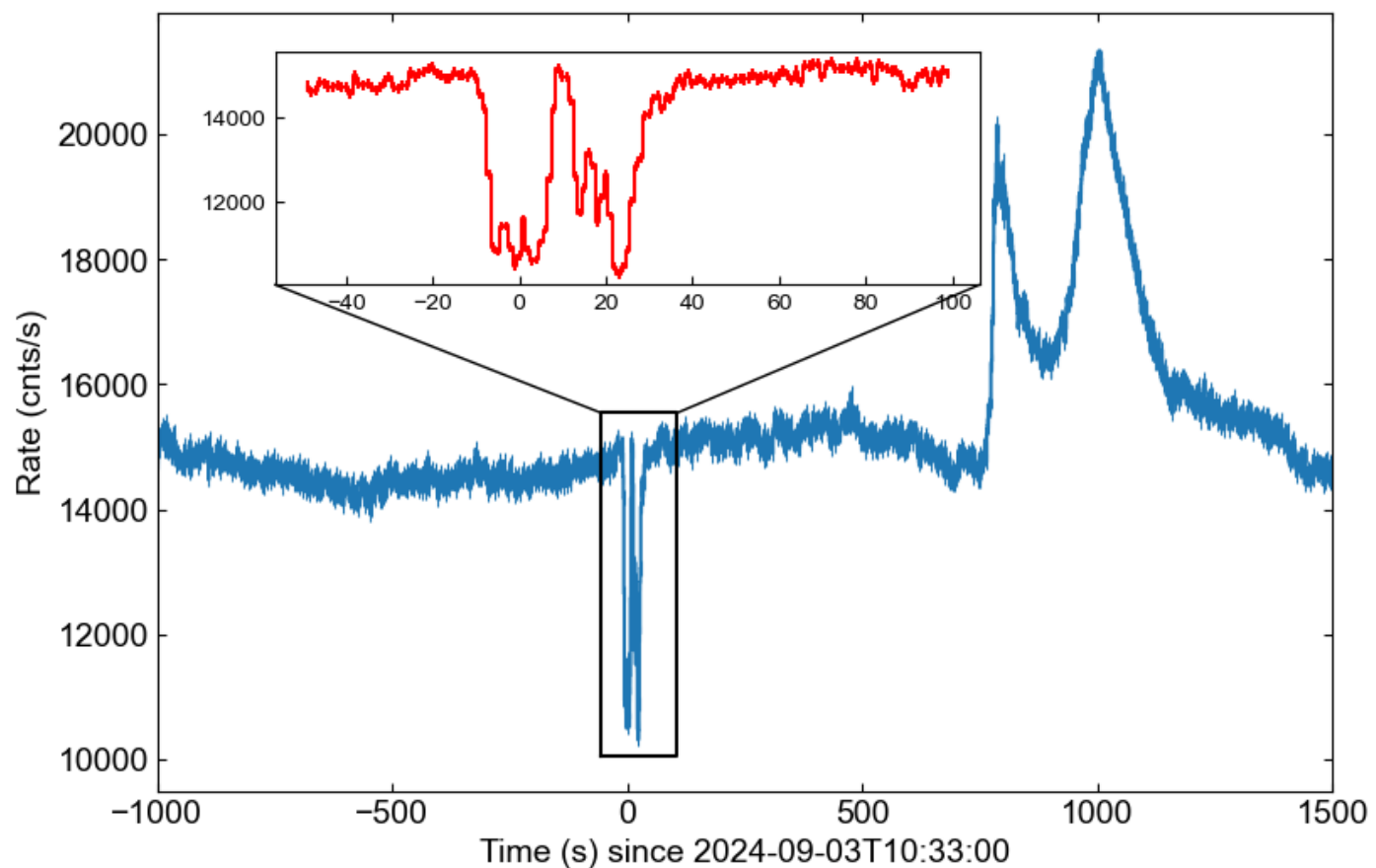


- 利用GECAM-D的无遮挡优势
- 可以实现对太阳硬X射线耀斑的持续监测
- 刻画太阳质子事件在DRO轨道的演化



- 基于GECAM-C构建了空间环境数据库
- 观测到太阳质子事件/地磁暴期间
南北极粒子通量的升高
以及内辐射带中粒子通量的异常降低

DRO轨道的空间环境探测



在DRO轨道上探测到了粒子通量的“dip”结构



观测成果 (TGF/TEB)

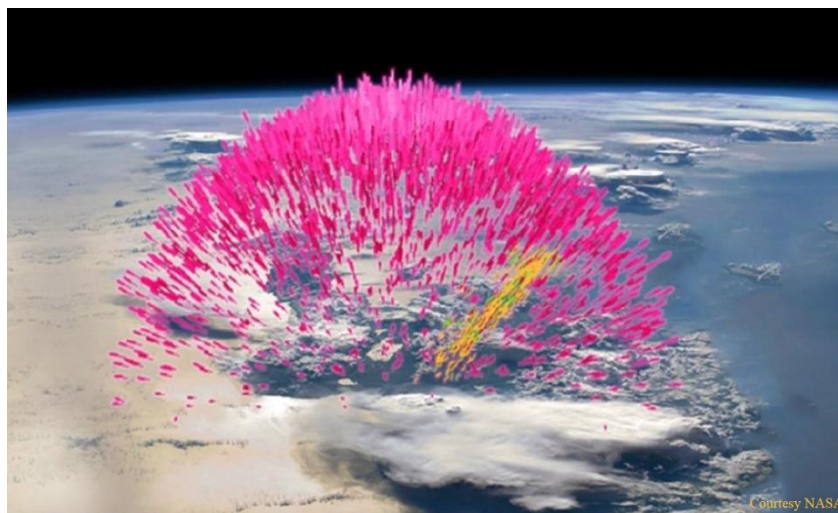


地球伽马闪(TGF)与地球电子束(TEB)

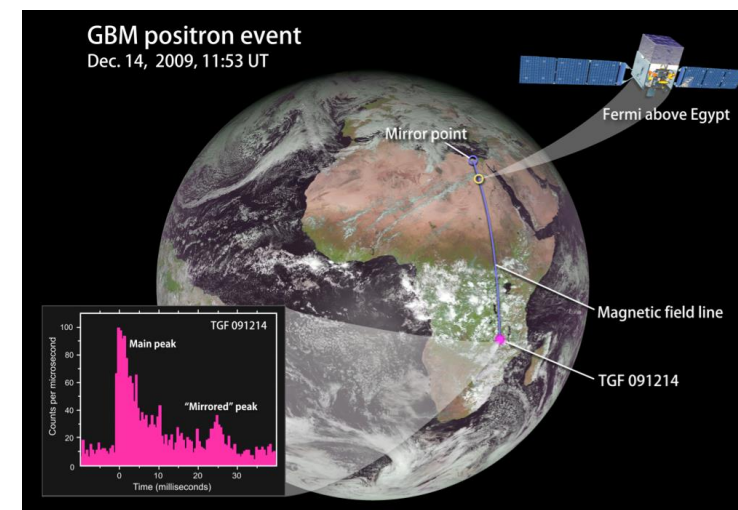
Terrestrial gamma-ray flash & Terrestrial Electron Beams

TGF是雷暴和闪电中产生的短暂的、高强度的伽马射线辐射
伴随产生电子束流，即TEB，目前主要由低轨道卫星探测研究

- 持续时间短(亚毫秒)
- 流强极高
- 能谱硬
- 光子可达100 MeV以上
- 呈现单脉冲或者多脉冲
- 跟闪电关联



地球伽马闪 (TGF) 示意图
粉色: 伽马射线, 橙色: 电子

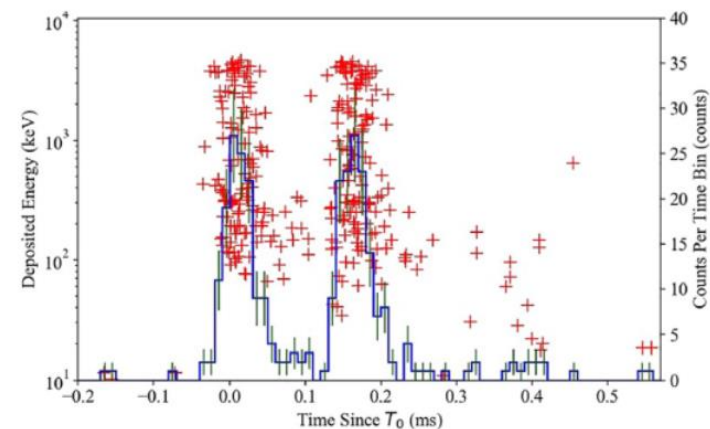
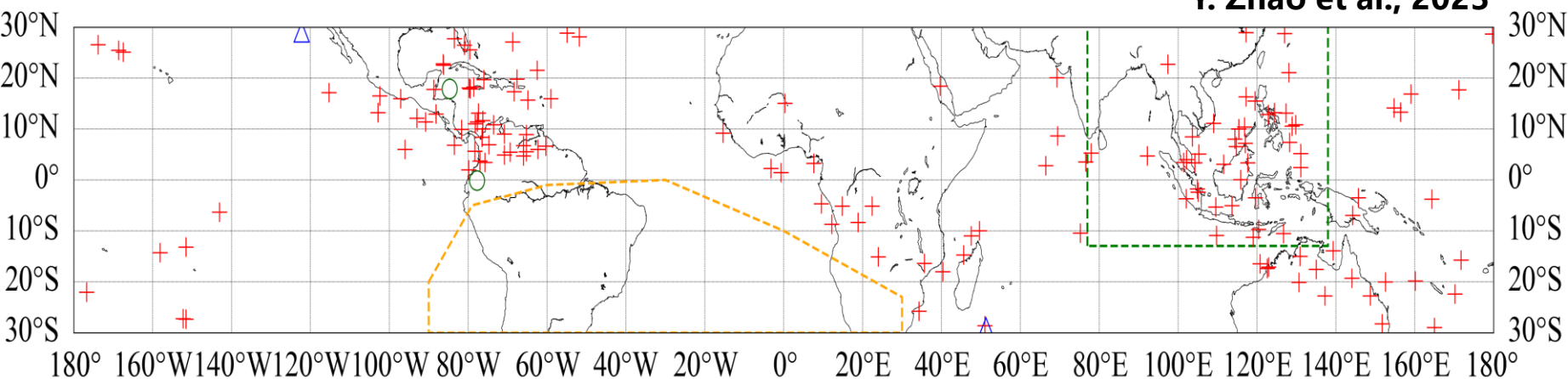


地球电子束 (TEB) 示意图

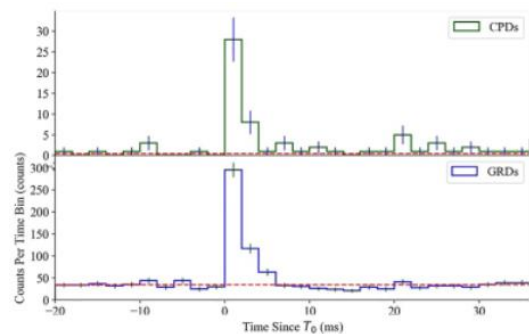
具有高时间分辨率、抗饱和、多探头指向的GECAM在TGF、TEB探测具有重要优势

GECAM-B first TGF/TEB catalog

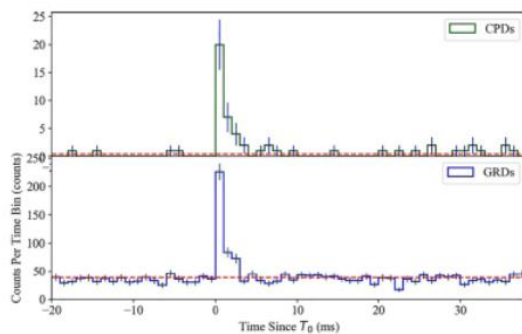
Y. Zhao et al., 2023



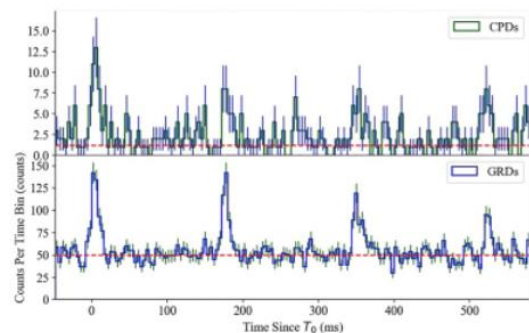
(a) T_0 UT 2021-02-01T02:09:25.6915



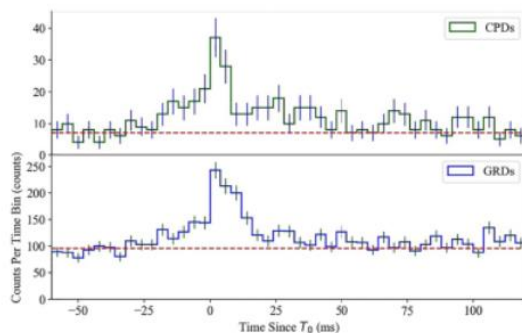
(a) TEB UT 2021-10-27T22:49:33.082



(b) TEB UT 2022-07-26T00:16:13.728



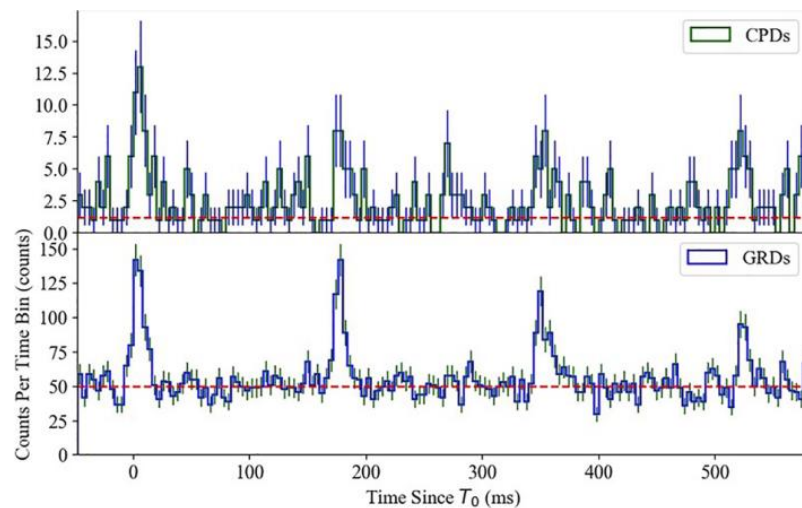
(c) TEB-like event UT 2021-09-11T18:34:40.552



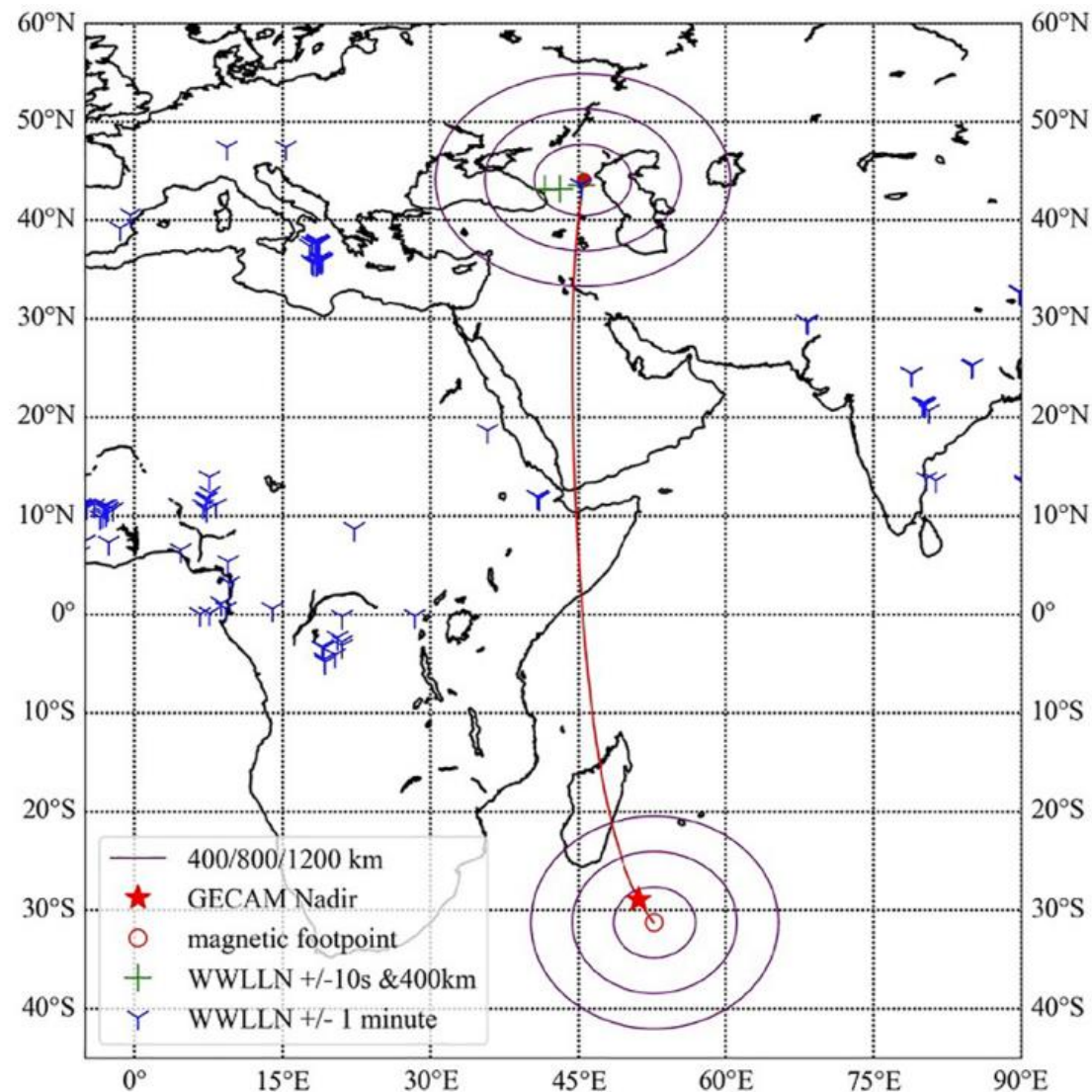
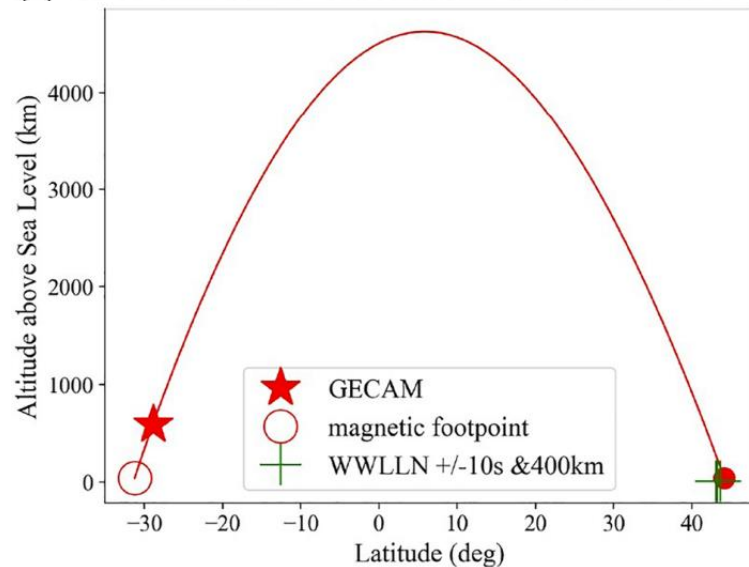
(d) TEB-like event UT 2021-07-10T01:46:36.710

通过系统地搜索GECAM前9个月的数据
发现了147个高亮度TGF
以及两个TEB和两个TEB-like

多峰TEB-like

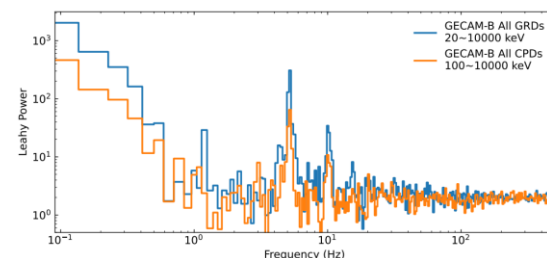
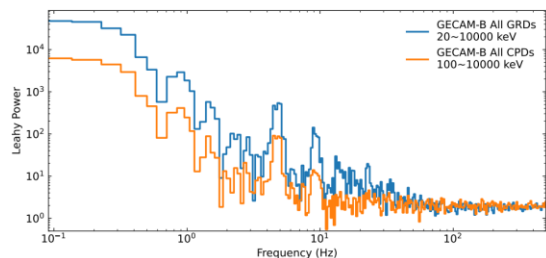
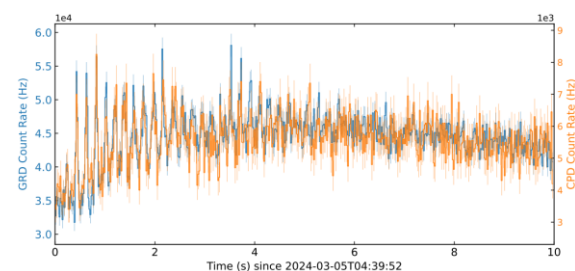
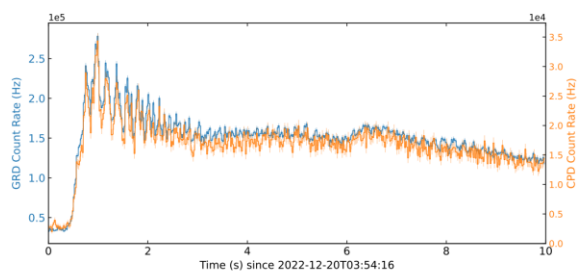
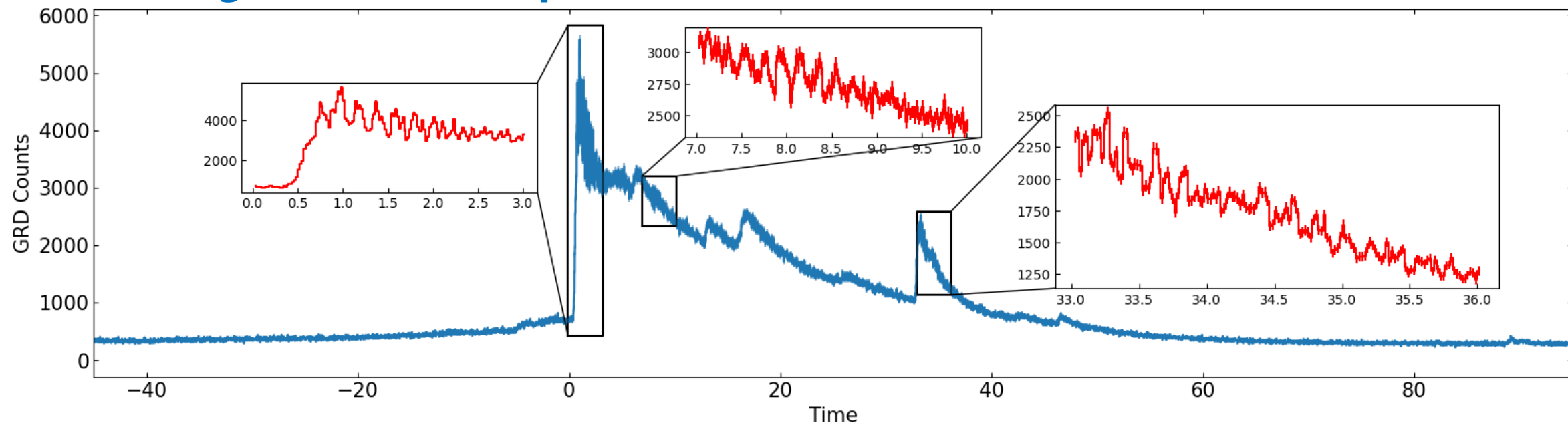


(c) TEB-like event UT 2021-09-11T18:34:40.552



首次观测到了多峰TEB-like现象

Oscillating Particle Precipitation (OPP)



GECAM独立—(首次)—探测到的一类具有极其显著周期性的新型空间事件!

Lightning-induced relativistic electron precipitation from the inner radiation belt

Received: 21 December 2023

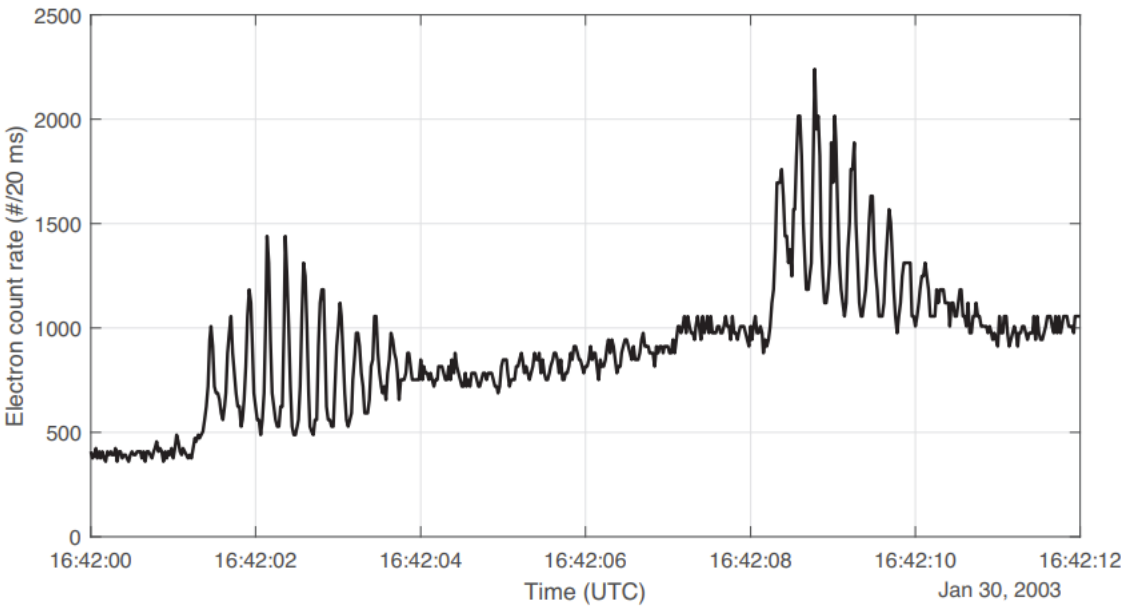
Accepted: 25 September 2024

Published online: 08 October 2024

 Check for updates

Max Feinland¹✉, Lauren W. Blum², Robert A. Marshall¹, Longzhi Gan³, Mykhaylo Shumko⁴ & Mark Looper⁵

The Earth’s radiation belts are maintained by a number of acceleration, loss and transport mechanisms, and the electron fluxes at any given time are highly variable. Microbursts, which are rapid (sub-second) bursts of energetic electrons entering the atmosphere from the magnetosphere, are one of the key loss mechanisms controlling radiation belt fluxes. Such rapid bursts are typically observed from the outer radiation belt and driven by interactions with whistler mode chorus waves, but they can also occur in the inner belt and slot region, driven by lightning-generated whistlers. This lightning-induced electron precipitation is typically observed at 10s–100s keV, but here we present direct observations of this phenomenon at MeV energies. This unveils a coupling between near-Earth processes, such as lightning, and radiation belt processes, such as relativistic electron microbursts, bridging the gap between Earth weather and space weather.



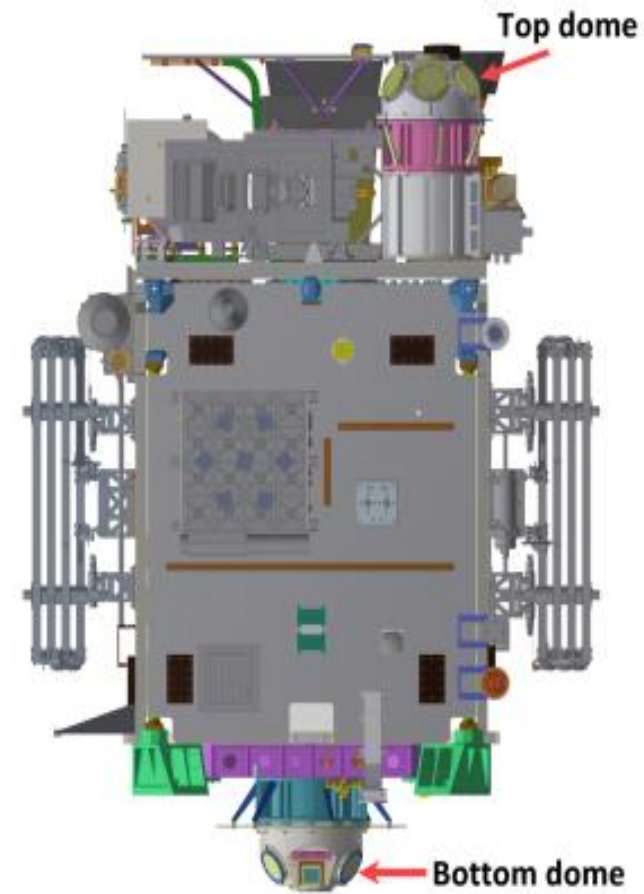
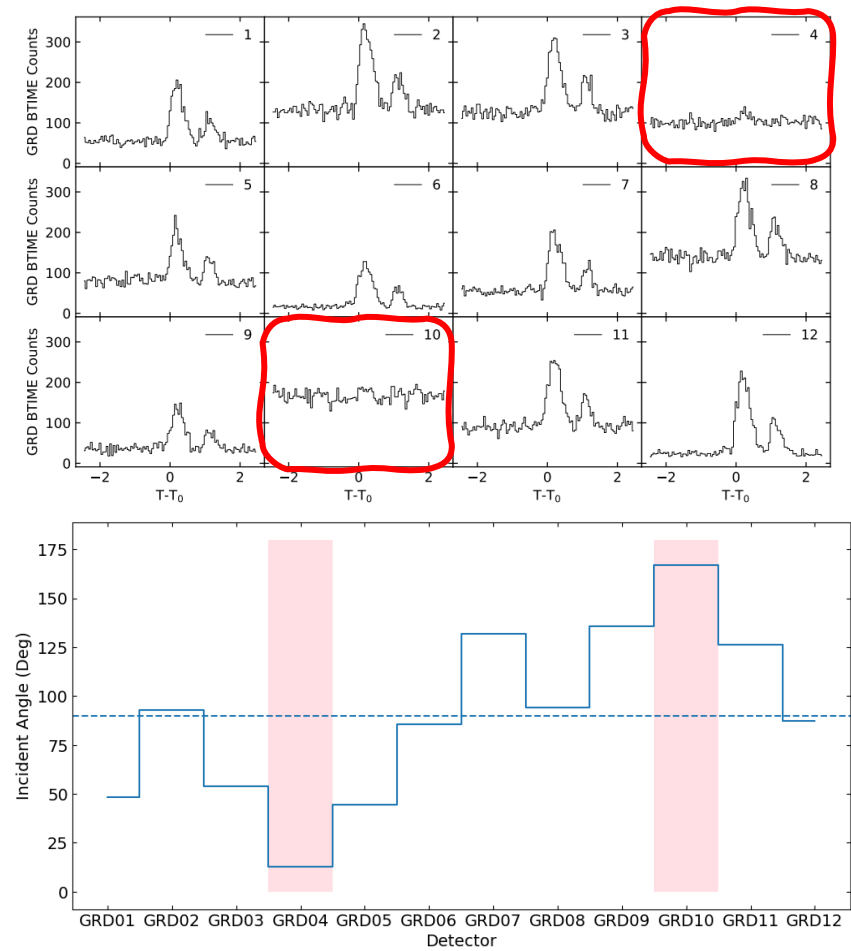
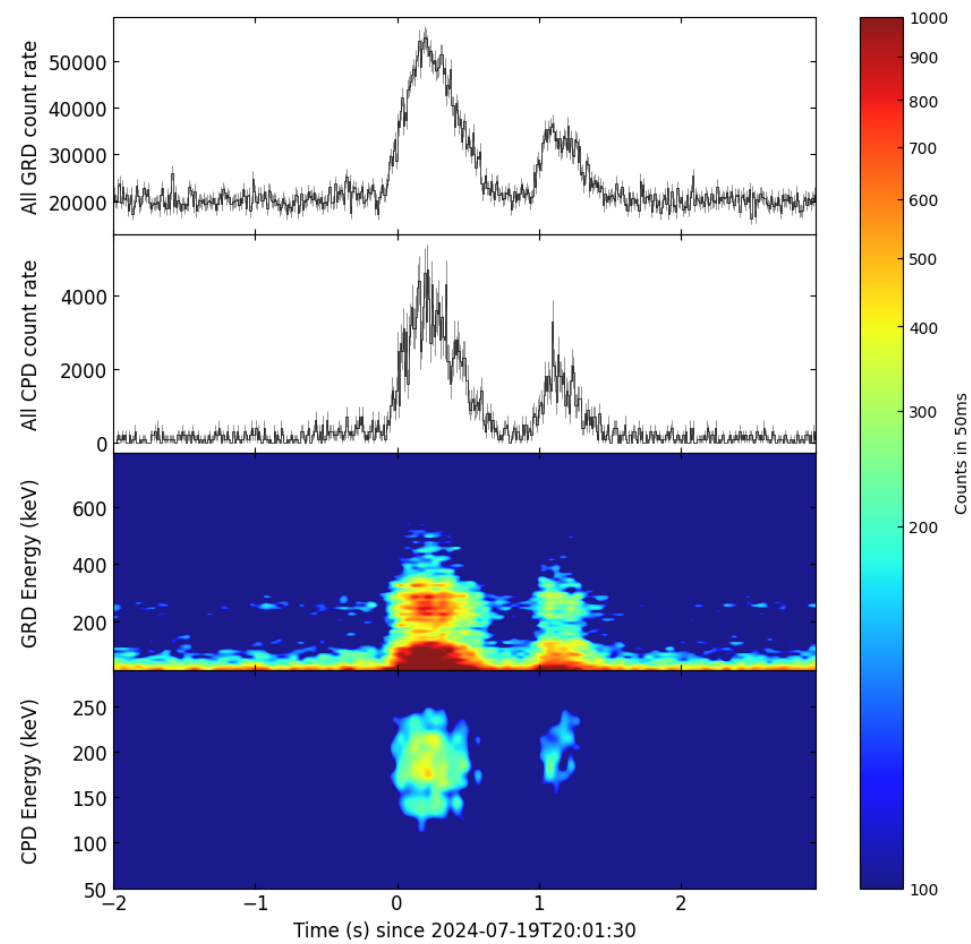
GECAM也可以在空间物理方面发挥重要作用！



观测成果 (方法研究)

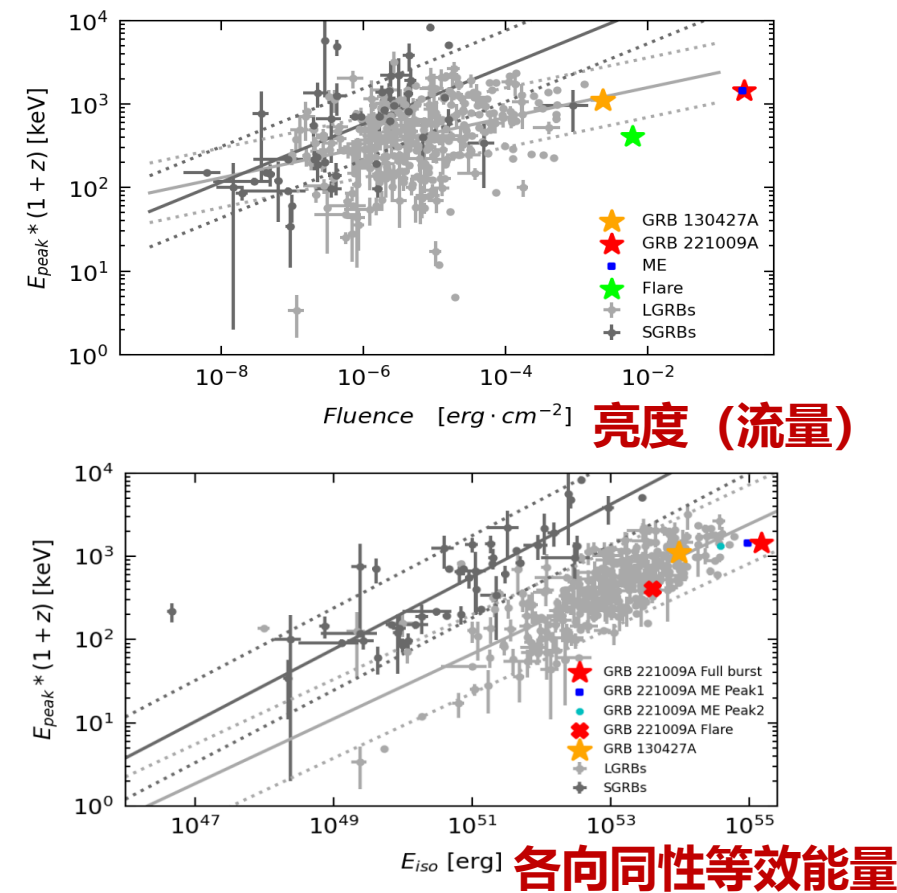
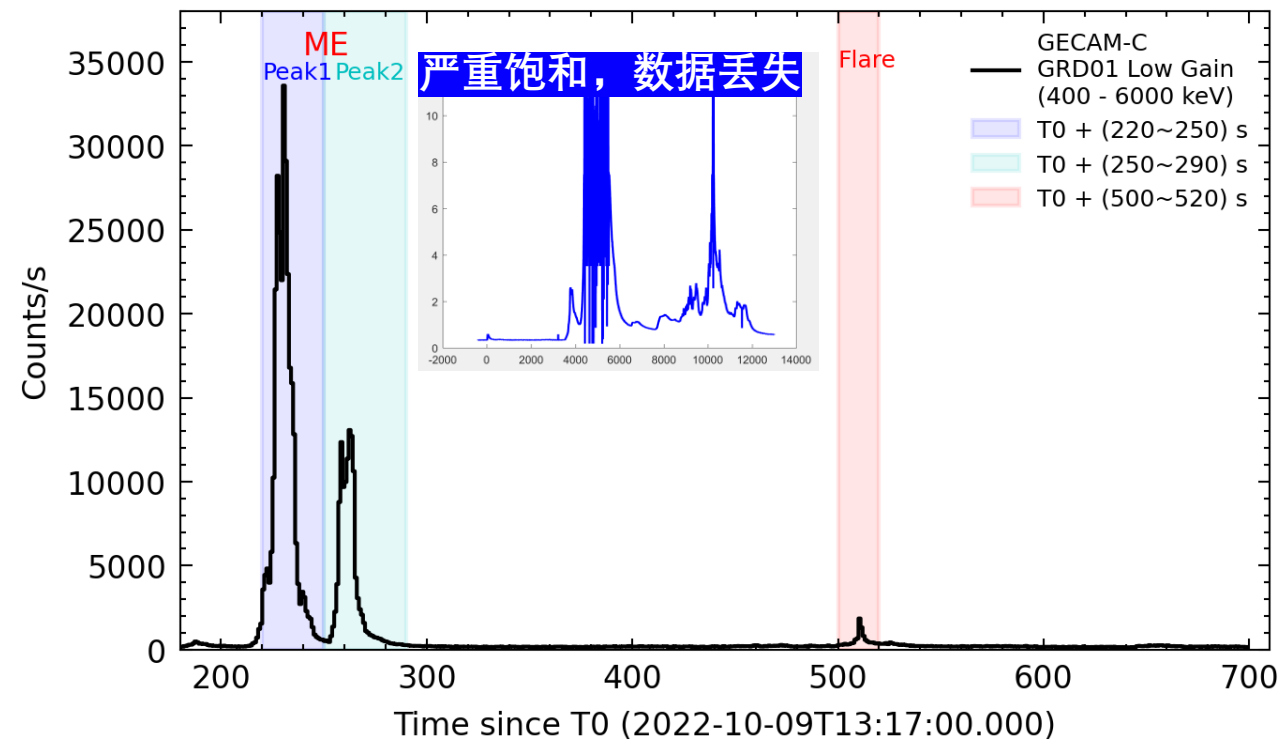


针对GECAM的投掷角测量



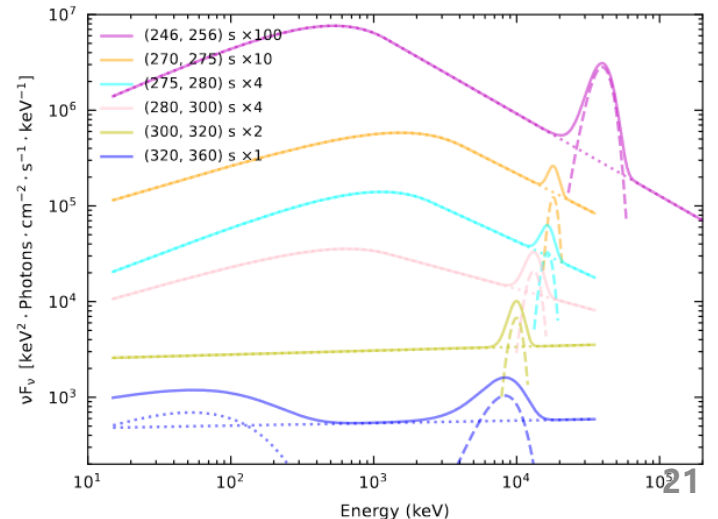
利用“观测+仿真”可以实现对投掷角的测量

GECAM+VLF测量极端爆发现象



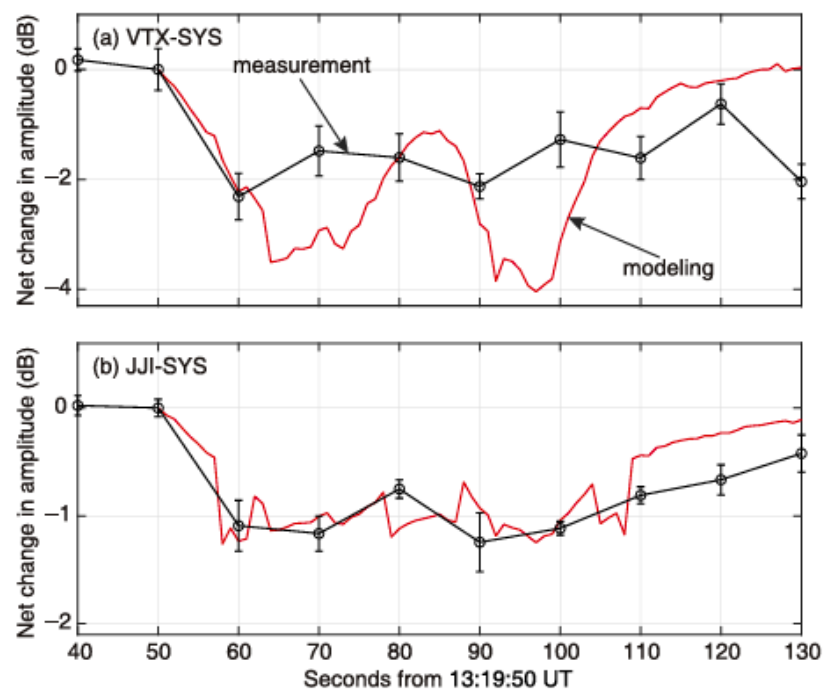
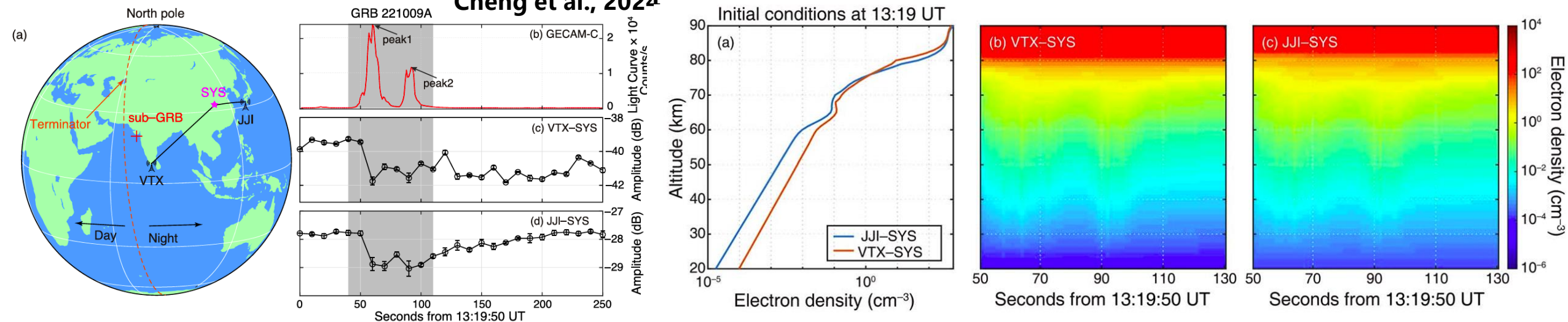
- 国际上已知质量最好的观测，精确测量并发现亮度和各向同性能量均打破伽马暴纪录
- 联合测量余辉拐折，推测喷流极端狭窄
- 首次揭示早期余辉的特殊能谱和jet break精细演化
- 发现了GRB中最高能量的谱线
- 首次给出了喷流中能量持续注入的证据
-

(An et al., 2023, Zheng et al., 2023, Zhang et al., 2024.....)



GECAM+VLF测量极端爆发现象

Cheng et al., 2024



- GRB 221009A 导致电离层发生剧烈扰动
- 基于VLF对电离层高度的测量，以及GECAM的高能能谱给出了GRB 221009A的低能能谱限制
- 该方法还可以用于测量其他极端爆发现象（如X45级耀斑）的能量或用来约束电离层模式

总结

- GECAM是一系列主要用于高能天体物理研究的监测器，但同样为空间物理研究做了特殊优化
- GECAM可以实现不同时间尺度上的太阳耀斑研究，以及地磁暴、质子事件的研究分析
- GECAM探测到了大量TGF与TEB样本
- GECAM首次观测到了多峰TEB-like，并从统计上揭示了多峰TEB-like与闪电、地磁暴的关联性
- GECAM独立（首次）探测到的一类具有极其显著周期性的新型空间事件
- GECAM在一定条件下可以实现对质子电子的鉴别、投掷角的测量

欢迎意见和建议！
也欢迎使用GECAM数据开展空间环境研究！

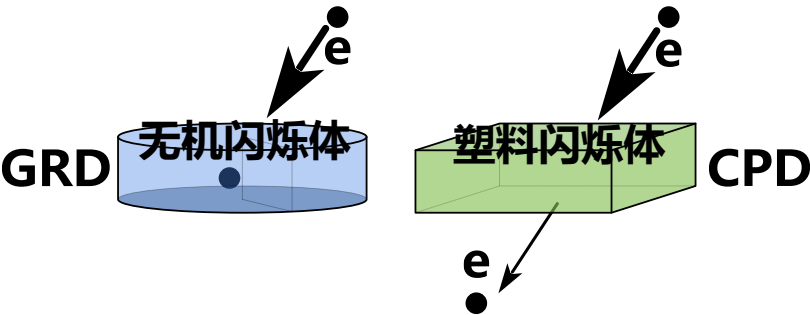
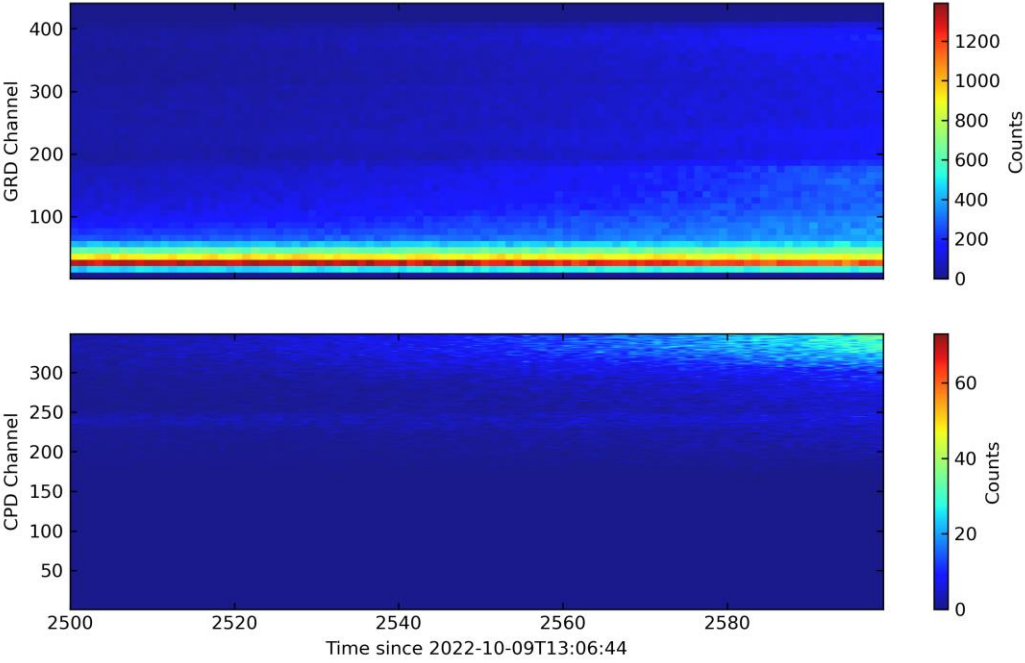
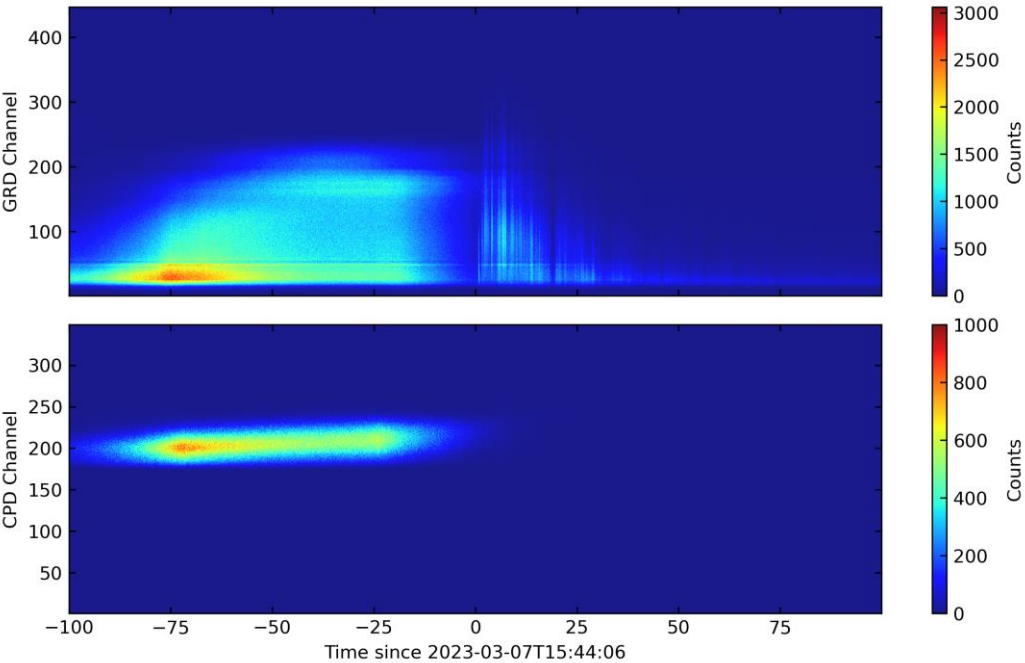
报告人：王晨巍 cwwang@ihep.ac.cn

GECAM首席：熊少林研究员 xiongsl@ihep.ac.cn



Back up

针对GECAM的电子、质子鉴别



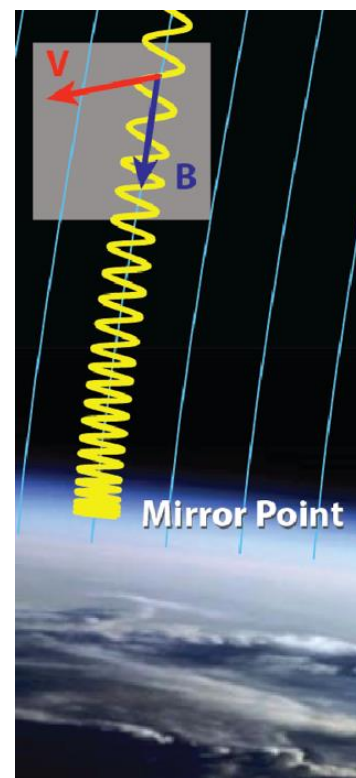
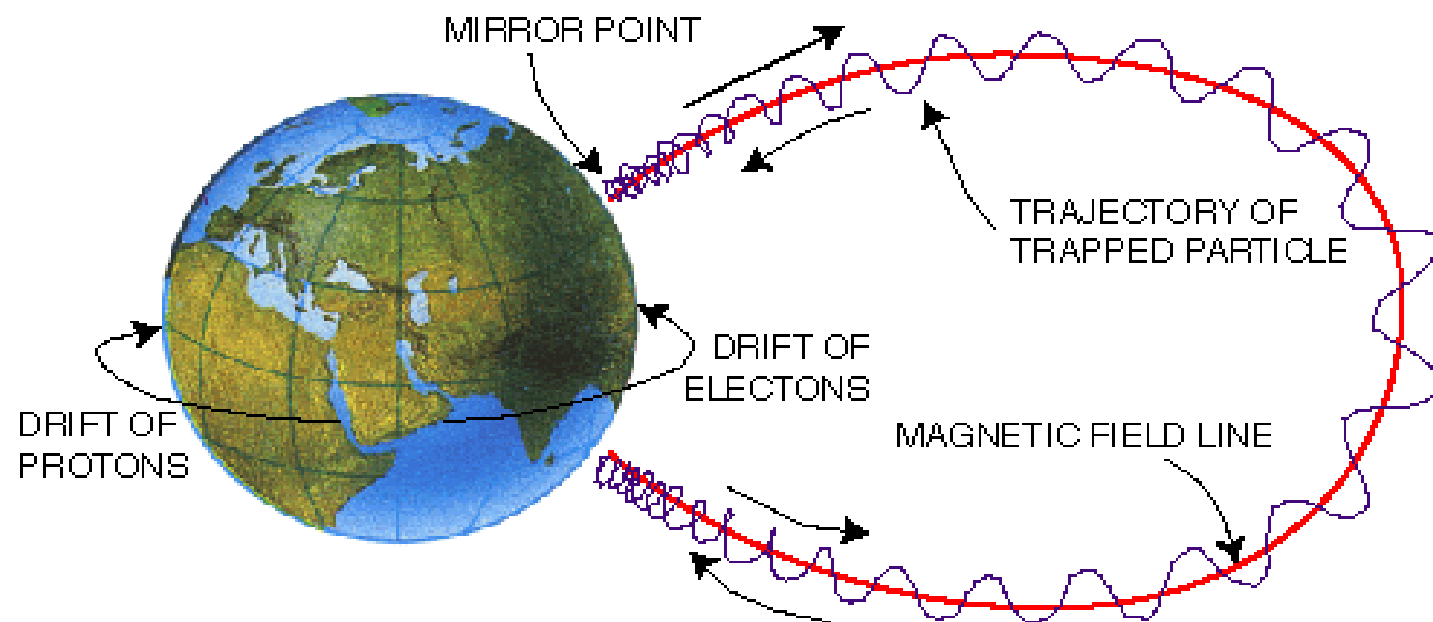
GRD	CPD	粒子种类
不穿透	不穿透	靠沉积能量差异进一步判断
不穿透	穿透	电子
穿透	穿透	无法鉴别

利用穿透能力的差异可以进行粒子鉴别

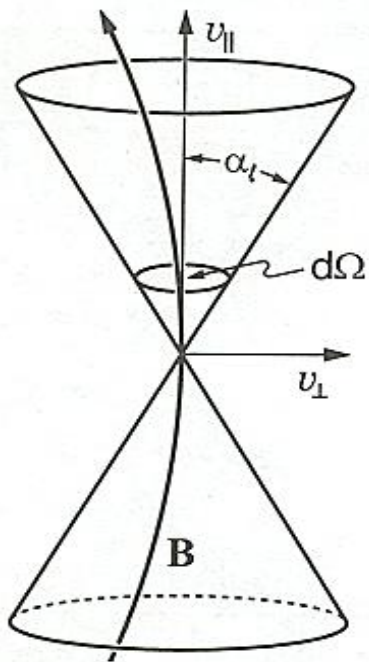
带电粒子在地磁场中的运动

三种运动模式：

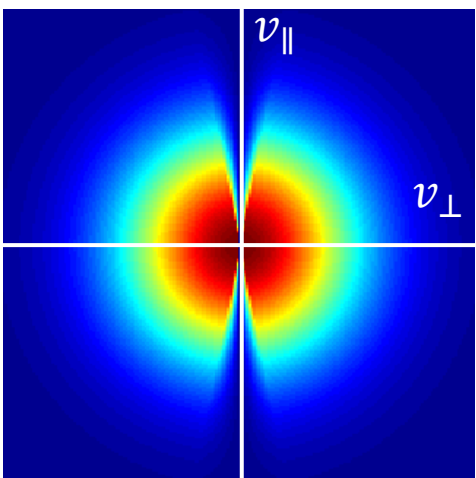
1. 回旋，典型周期~1 ms
2. 弹跳，典型周期~1 s
3. 漂移，典型周期~10 min



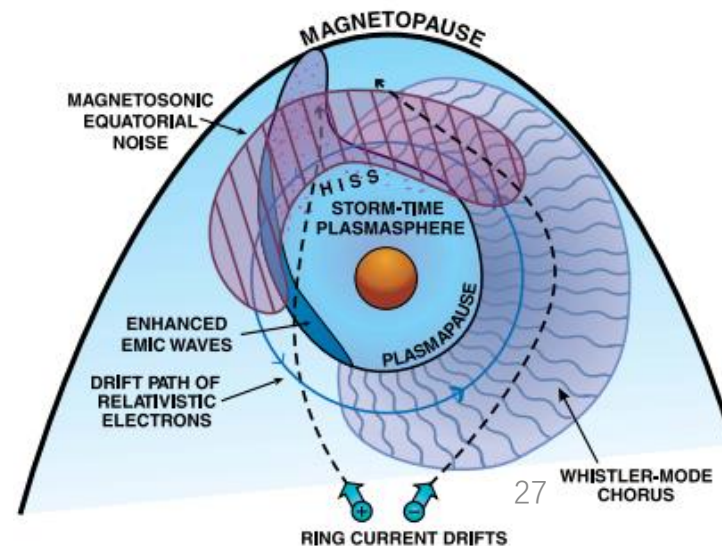
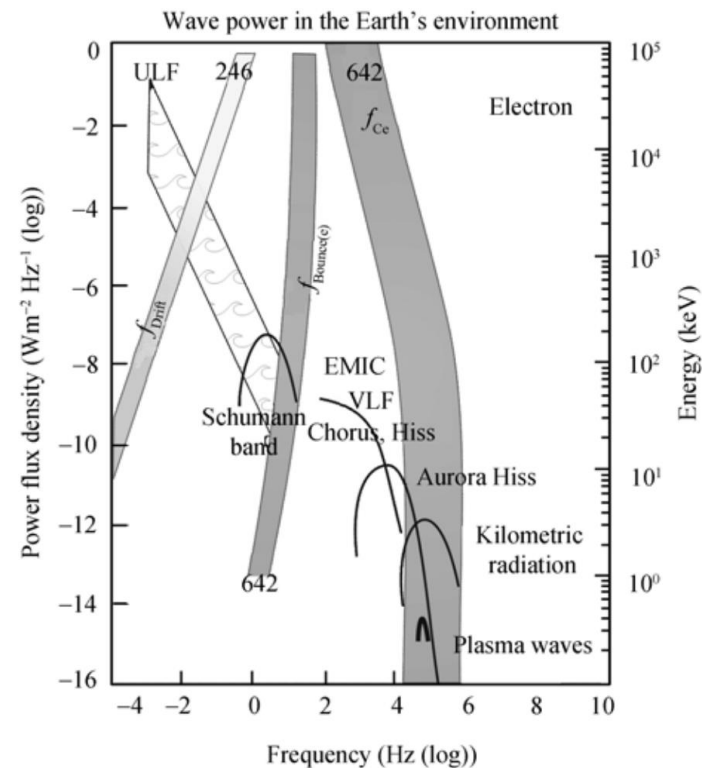
粒子沉降

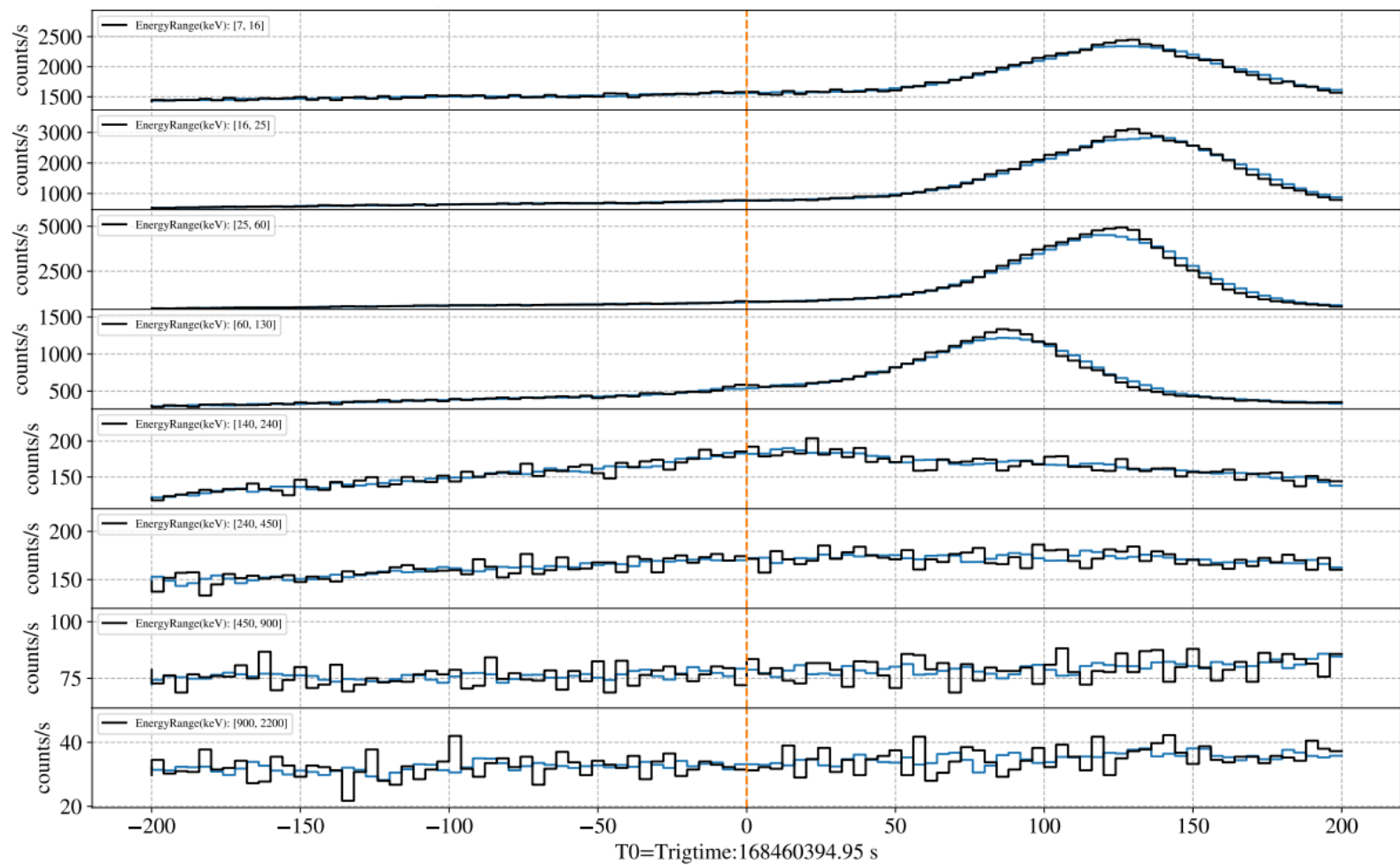


- 投掷角 α ：粒子运动方向与磁场的夹角
是空间物理最重要的参数之一
通常需要准直器结构
- 损失锥：投掷角小于一定值的粒子无法反弹
这部分粒子会进入大气层，即粒子沉降



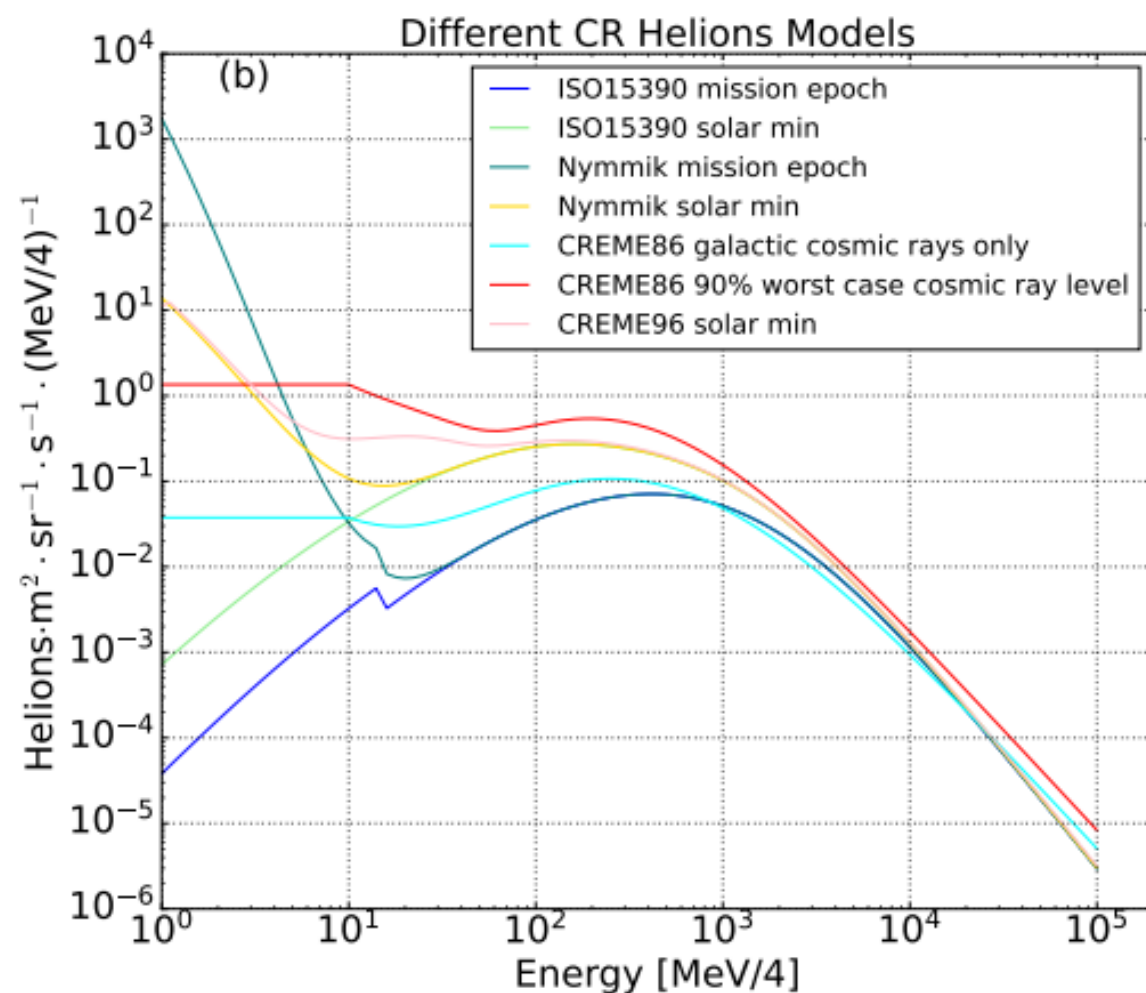
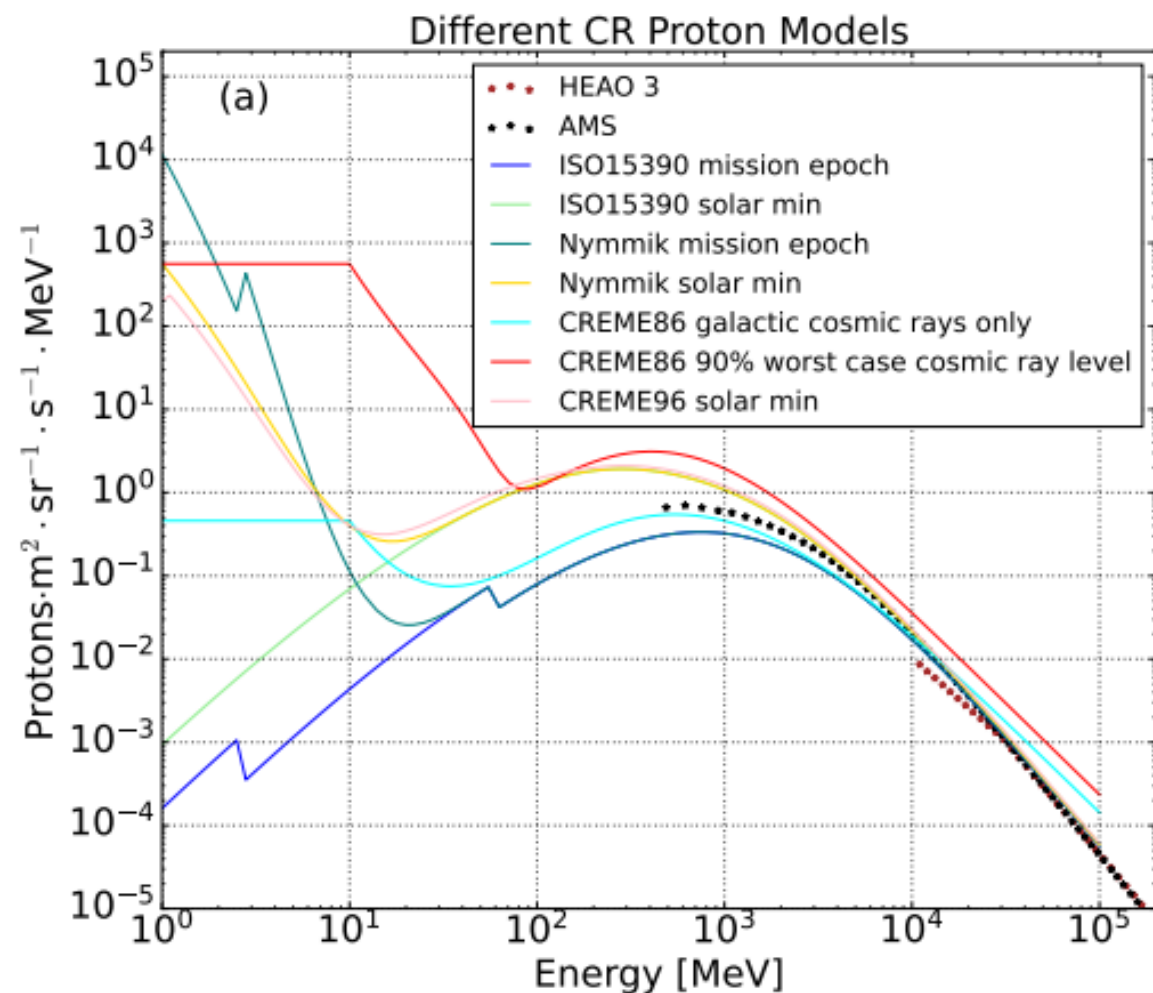
- 通过散射、加速可以使粒子的投掷角改变
并进入损失锥
- 产生来源包括不同频率的波动与带电粒子的
回旋、弹跳、漂移发生共振



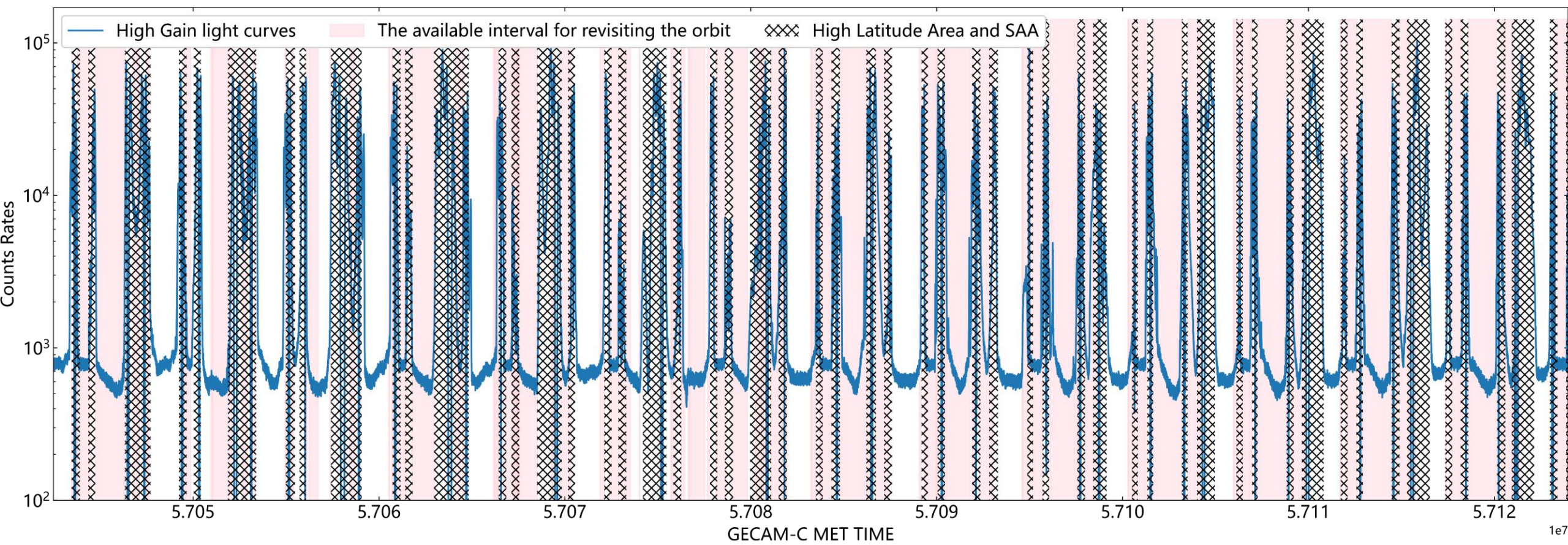


通常粒子沉降具有光滑缓变的鼓包状光变

宇宙线模型

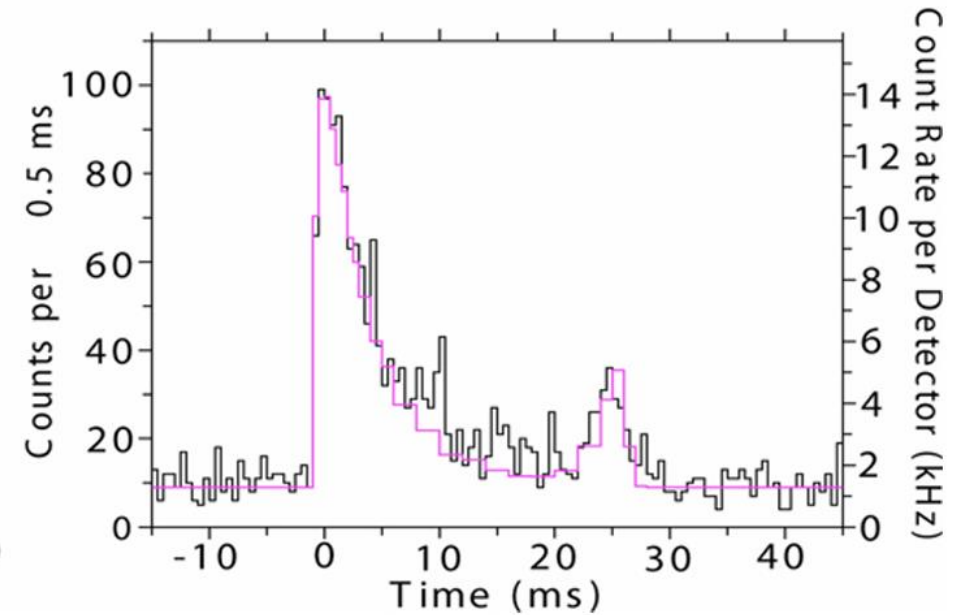
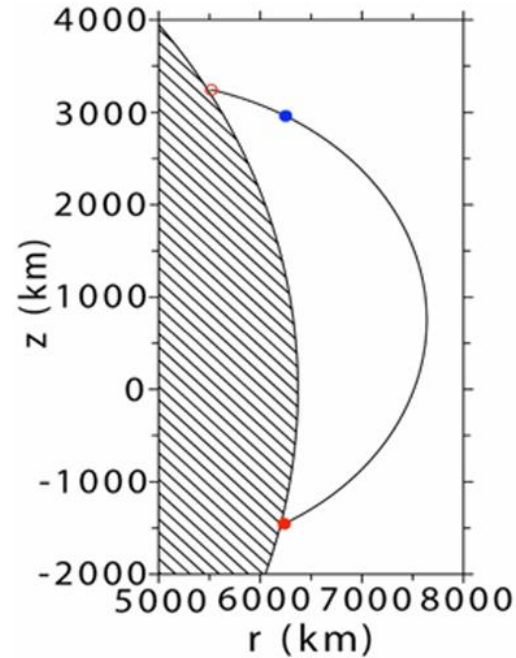
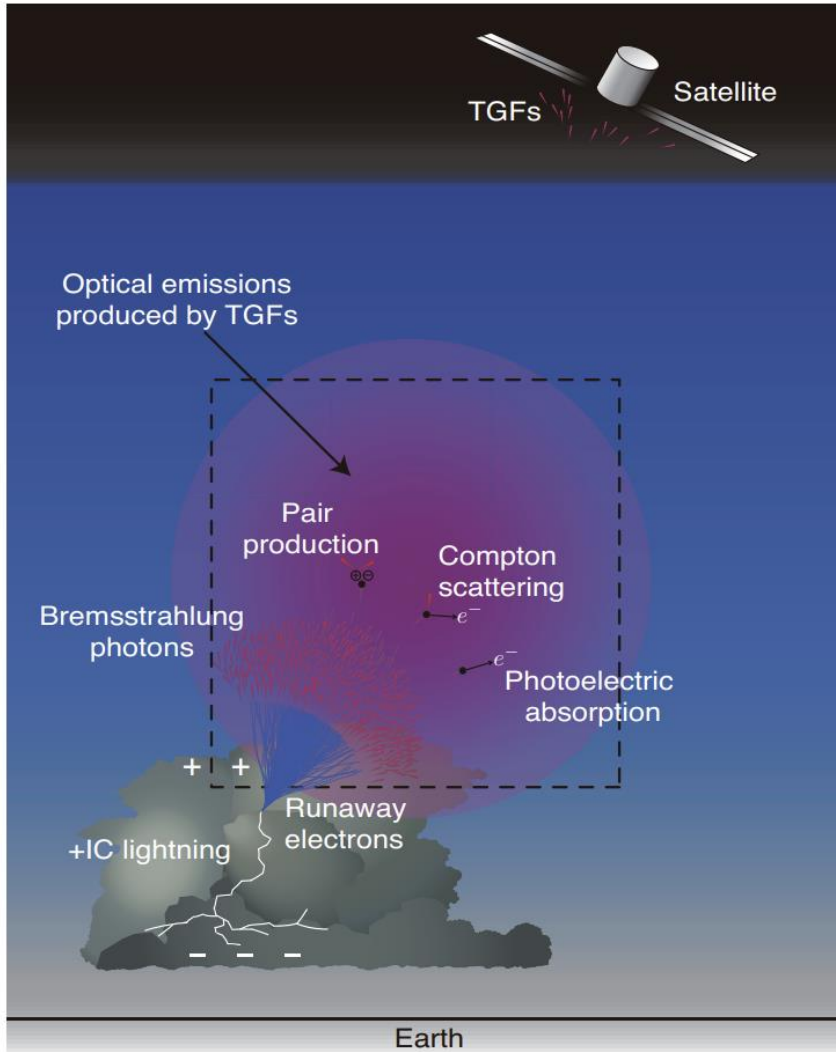


为什么要用GECAM研究“空间环境”：如何充分利用有效的观测时长



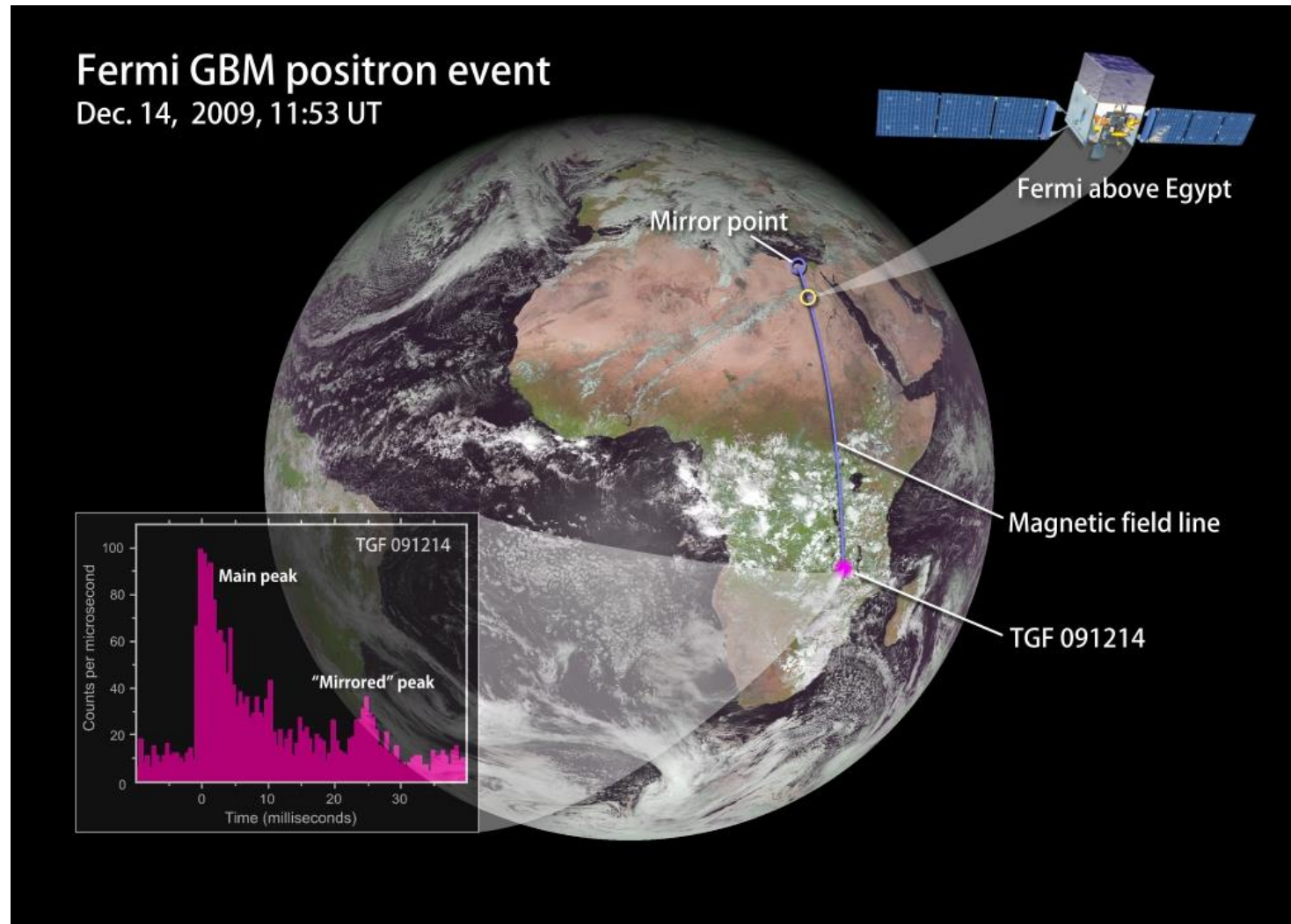
坏时间段占比高达40%

2.1TEB



- Duration: **tens of milliseconds**
- Energy: **tens of keV to tens of MeV**
- **Two peaks** with one directly from TGFs and the other one mirroring from the conjugate hemisphere

2.1TEB



- **Terrestrial electron beams** (Dwyer et al., 2008; Briggs et al., 2011; Sarria et al., 2021)