

“悟空” 巡天之正/反电子太阳调制



张云龙

中国科学技术大学

代表“悟空”号合作组

2026年4月22日



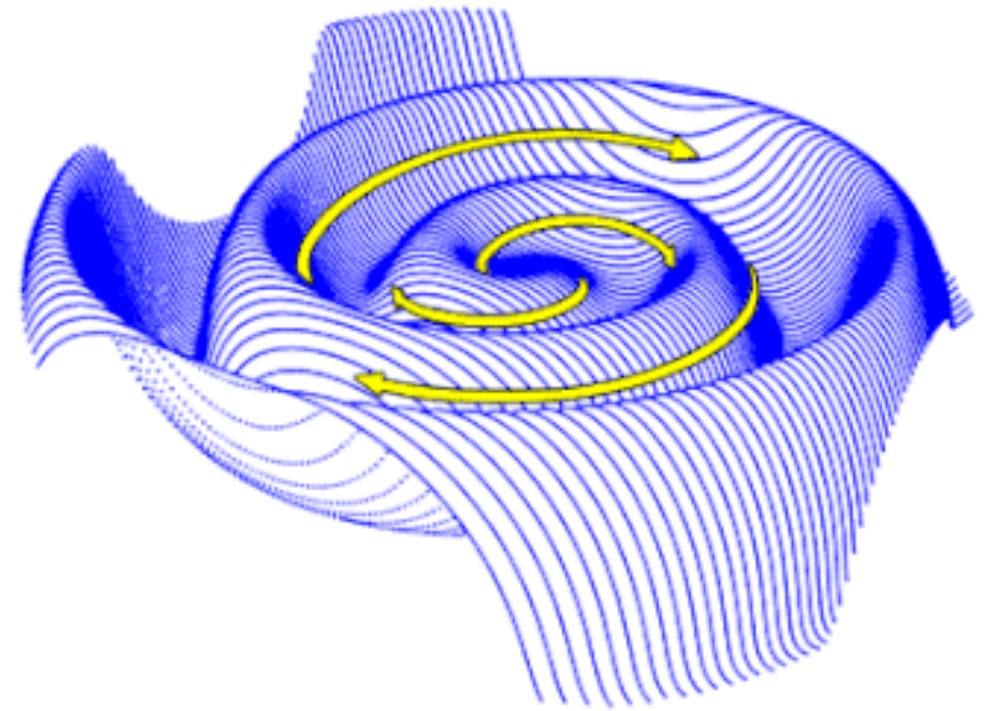
提纲

- 研究背景
- “悟空”号
- 正负电子结果
- 总结



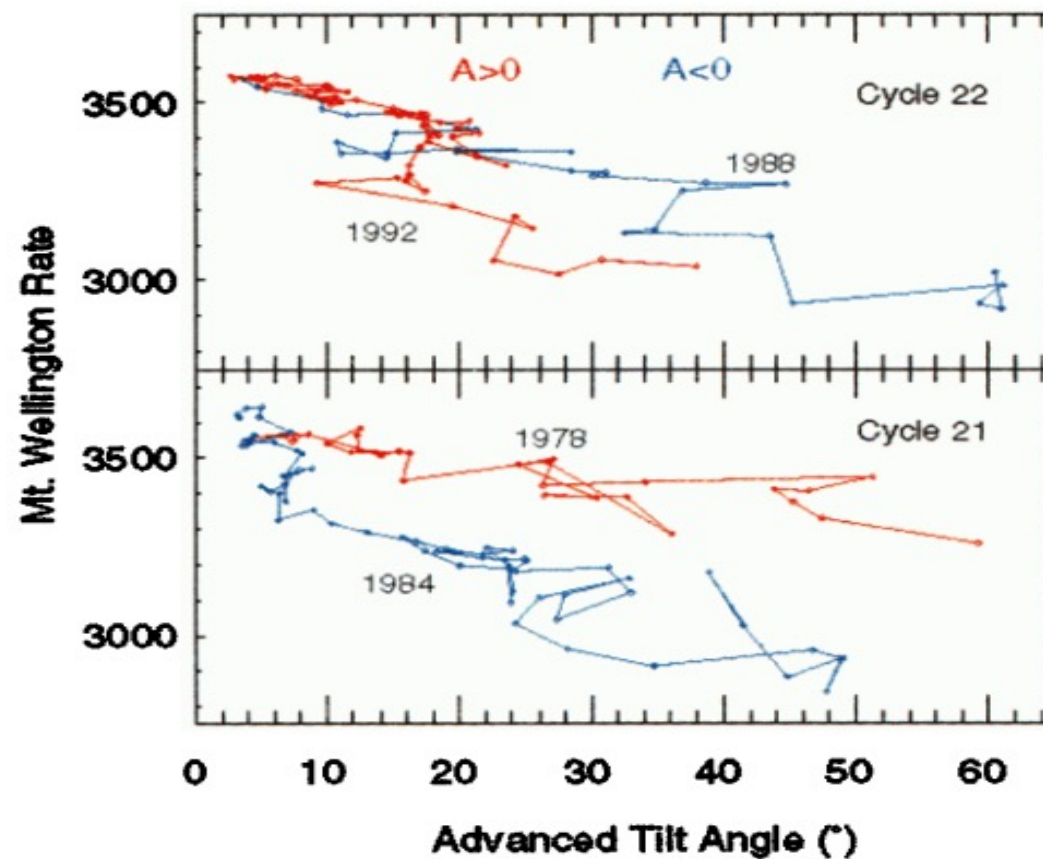
研究背景

- 帕克输运方程用于描述高能宇宙线在太阳风等离子体磁场中的传播、调制等行为
- 漂移效应在宇宙线传输中具有重要作用
 - 导致宇宙线强度与日球电流片（HCS）倾角之间呈现出反相关关系
- 粒子漂移效应与其所带电荷极性（ q ）以及太阳磁场极性（ A ）相关
 - $qA > 0$, $qA < 0$



不同太阳磁场极性下的宇宙线调制

- 惠灵顿山中子监测站 (Mt. Wellington neutron monitor)
 - BF3正比计数器
- 中子计数率反应了质子、氦核等宇宙线的强度
- Cane等人基于第21和22太阳周期的数据，开展了宇宙线调制与HCS倾角关系的研究
 - 整体上在 $A > 0$ 、 $A < 0$ 未观察到明显差异
 - 风险：不同时段观测，很难排除其它调制参数的影响



Cane, H. V., et al. "Cosmic ray modulation and the solar magnetic field." *Geophysical Research Letters* 26.5 (1999): 565-568.



CALET — 不同电荷极性宇宙线调制研究

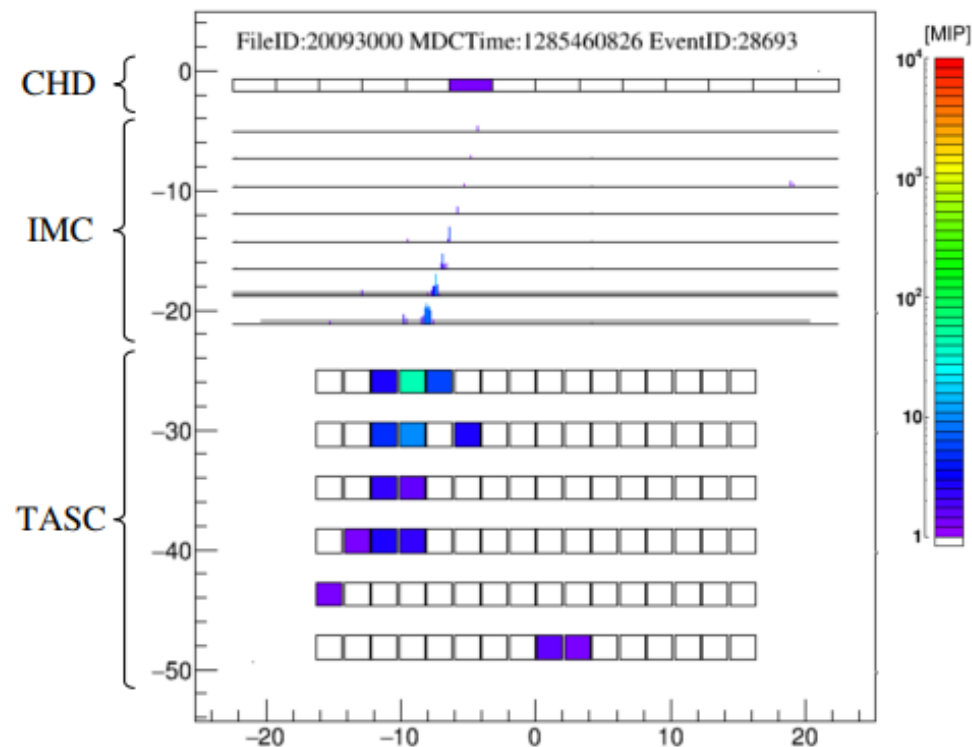
- 运行于国际空间站上的大型高能宇宙线探测装置

- 电荷分辨: 0.1 e
- 径迹分辨: 0.24° @ 10 GeV
- 能量分辨: 15% @ 1 GeV

- 采用低能触发

- 利用地磁场选择磁刚度 ~ 3.8 GV

- 电子, 扣除了7%的正电子
- 质子, 结合MC, 选择能量沉积[1,3 GeV]



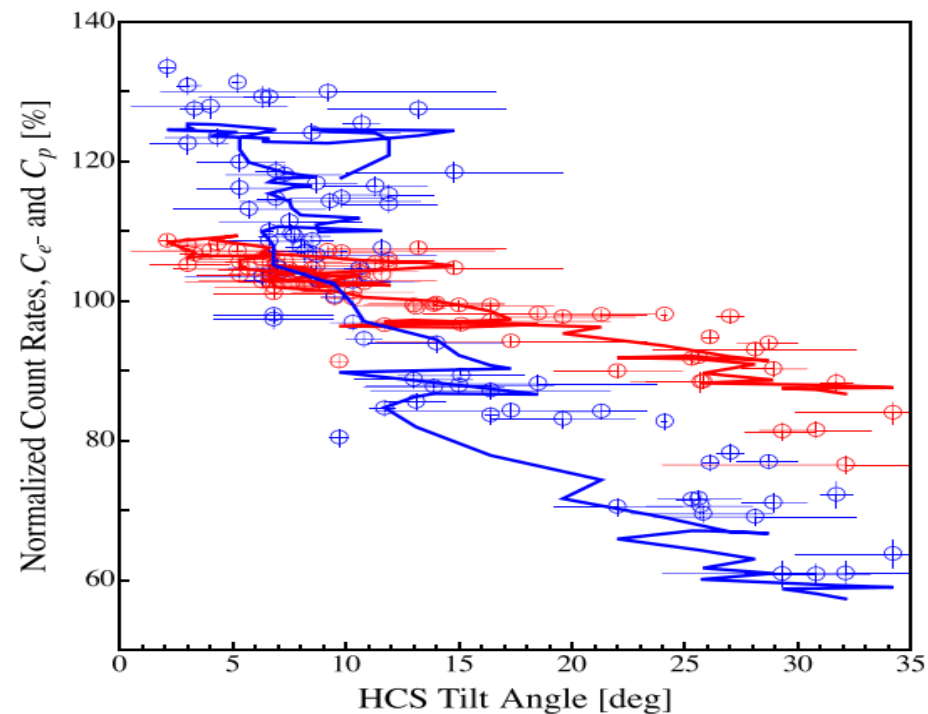
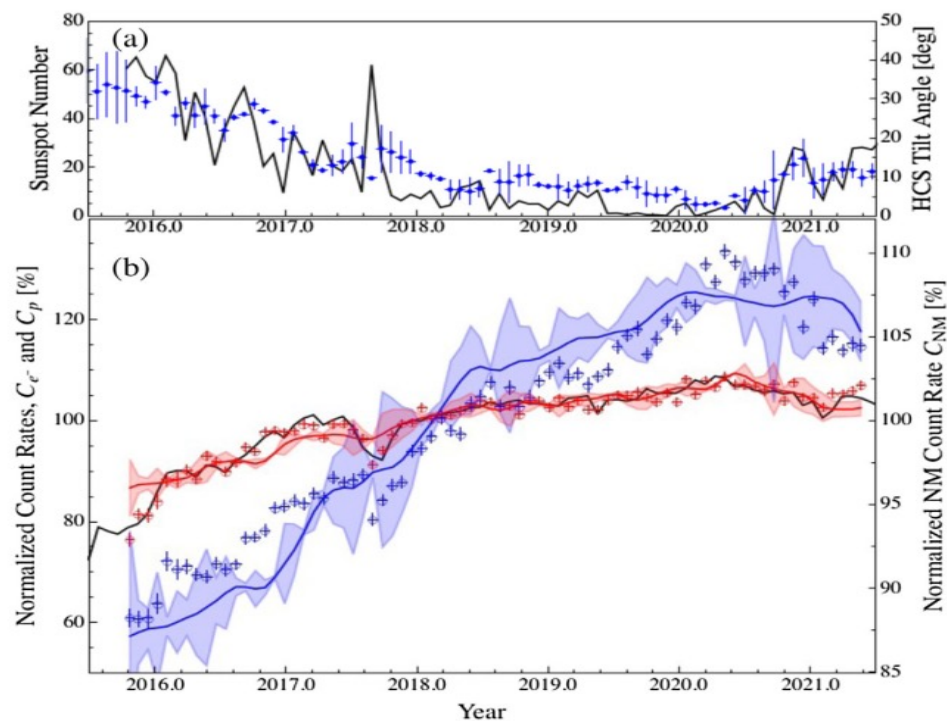
3.9 GeV候选事例



CALET—不同电荷极性宇宙线调制研究

Physical Review Letters 130.21 (2023): 211001.

- HCS倾角 ——— 太阳黑子



- 电子事例率 ——— 中子监测器 Oulu
- 质子事例率 ——— 漂移模型的数值计算

- 电子 ——— 漂移模型的数值计算
- 质子 ——— 漂移模型的数值计算



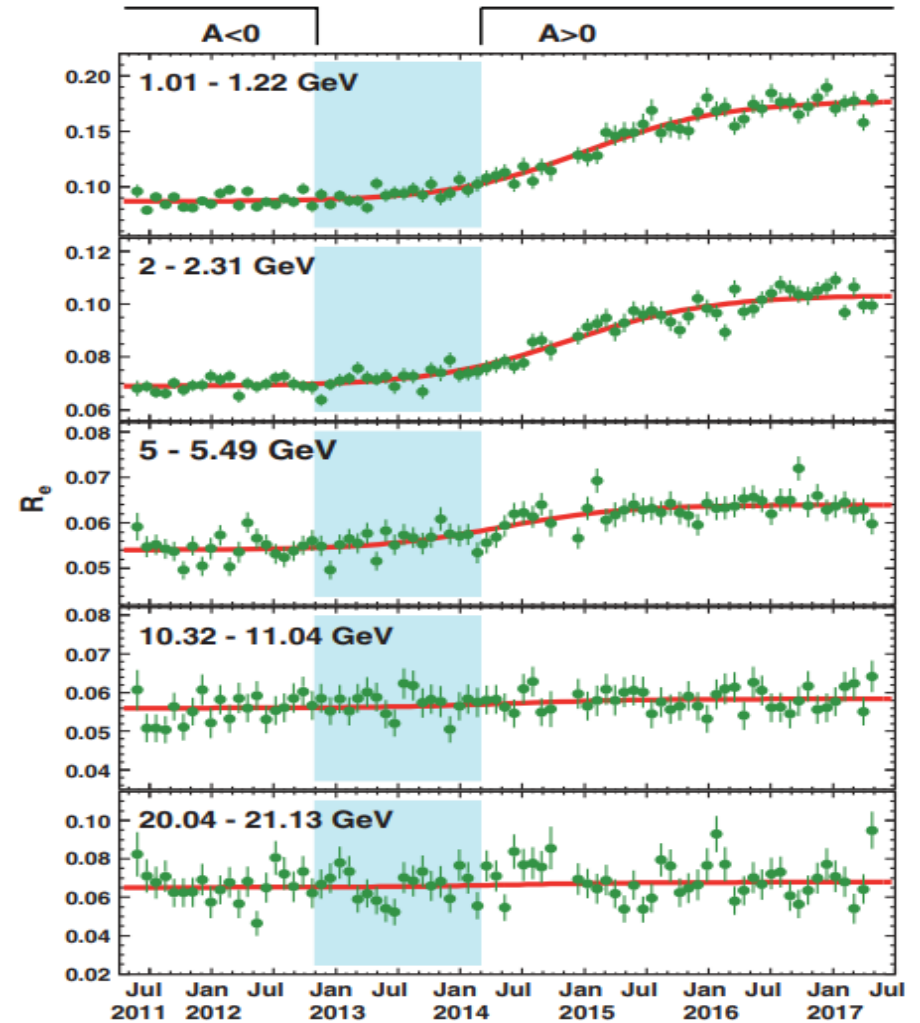
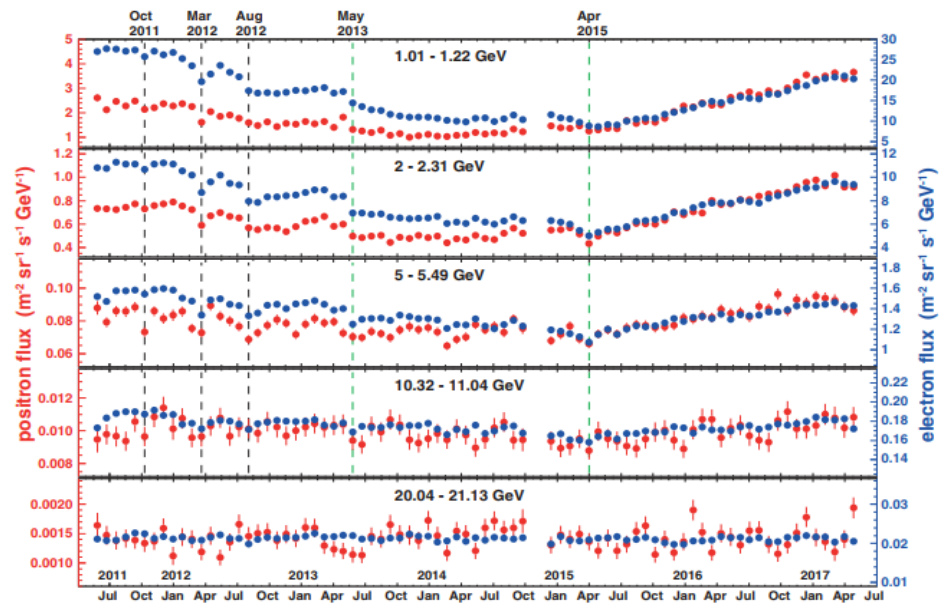
AMS02

- AMS02磁谱仪

- 1400 高斯磁场
- 可以有效区分正负电荷粒子

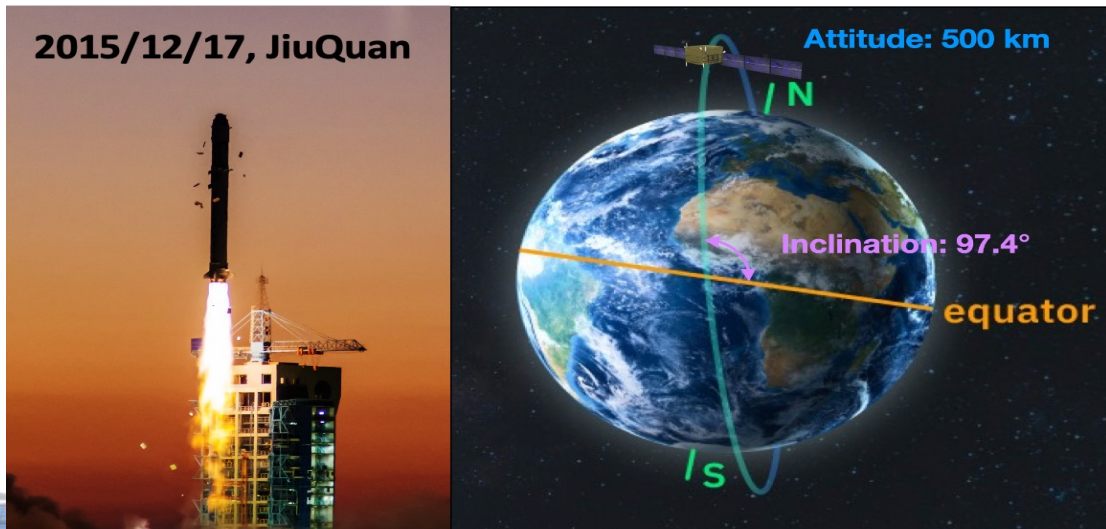
- 正电子比例随时间的变化

- 这样反应了不同电荷极性宇宙线的调制不同



“悟空”号

- 2015年年底成功发射
- 已在轨稳定运行超过10年，下传了约200亿个高能宇宙线数据



CNINA

- Purple Mountain Observatory, CAS
- University of Science and Technology of China
- Institute of High Energy Physics, CAS
- Institute of Modern Physics, CAS
- National Space Science Center, CAS



ITALY

- INFN Perugia and University of Perugia
- INFN Bari and University of Bari
- INFN Lecce and University of Salento
- INFN LNGS and Gran Sasso Science Institute

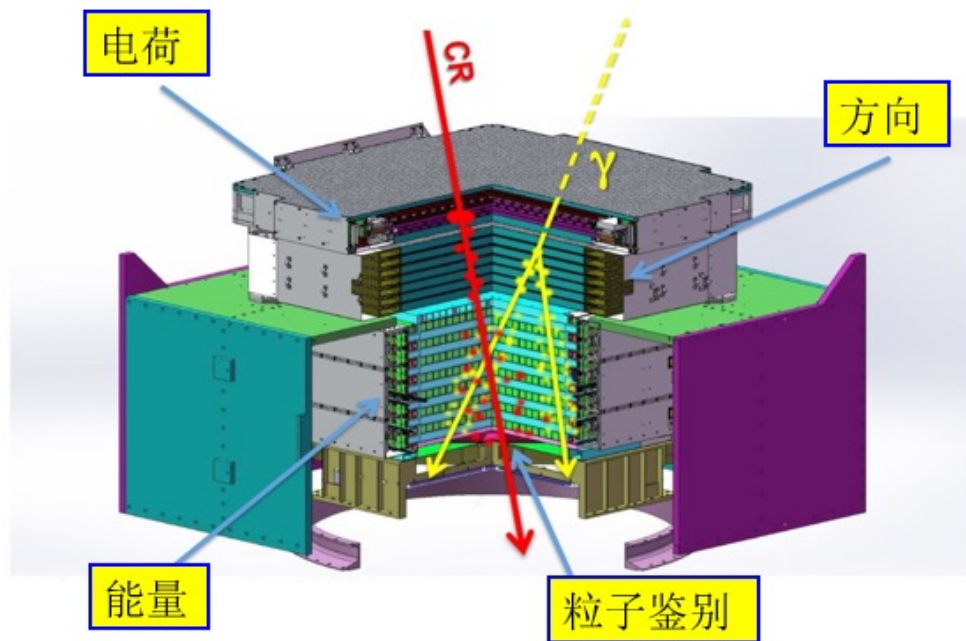


SWITZERLAND

- University of Geneva



“悟空”号谱仪



探测器	接收度 ($\text{m}^2 \text{sr}$)	量能器辐射长度	能量分辨率
AMS02	0.05	17	10% @ 1 GeV
CALET	0.1	28	15% @ 1 GeV
DAMPE	0.3	32	6% @ 1 GeV



塑闪阵列探测器



硅径迹探测器

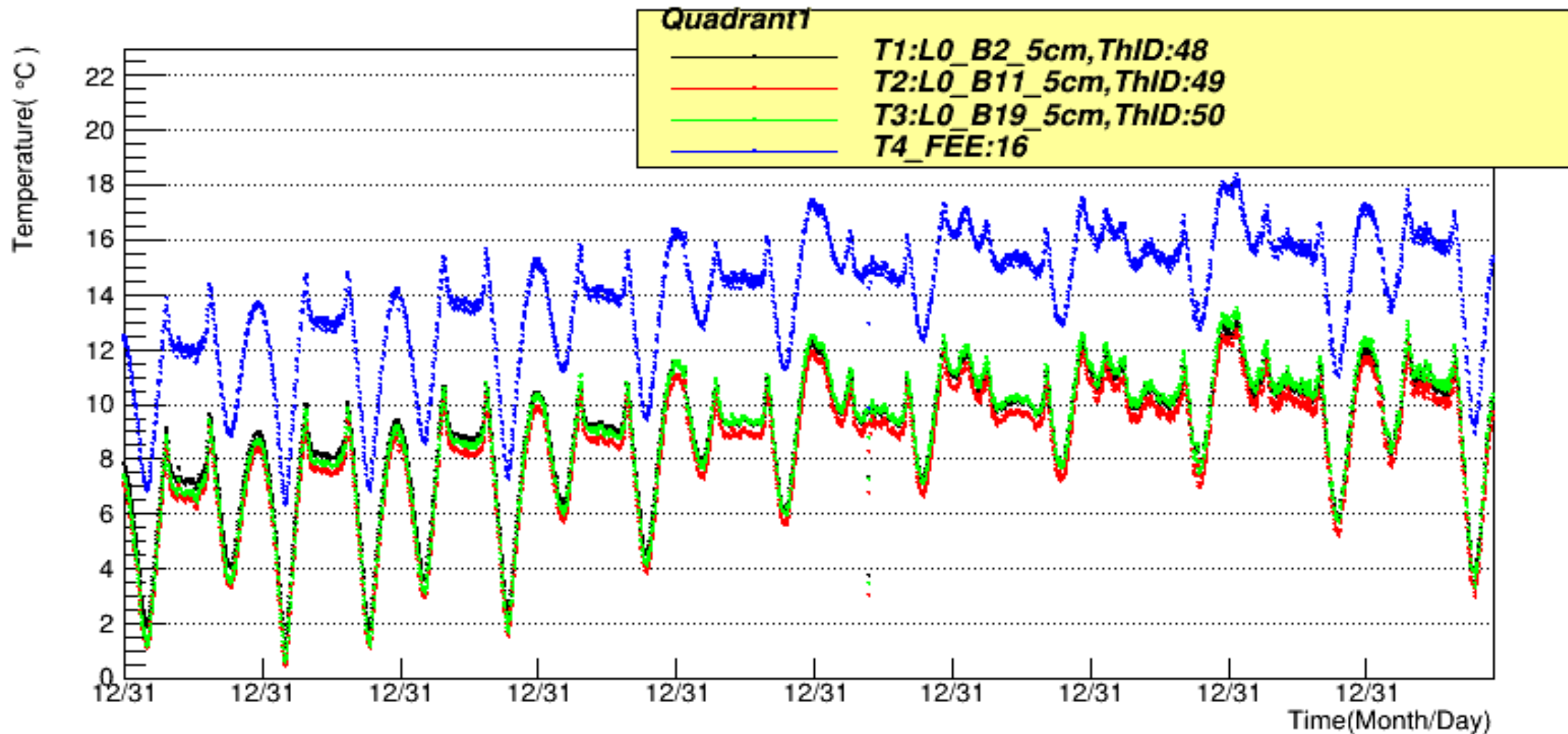


BGO量能器

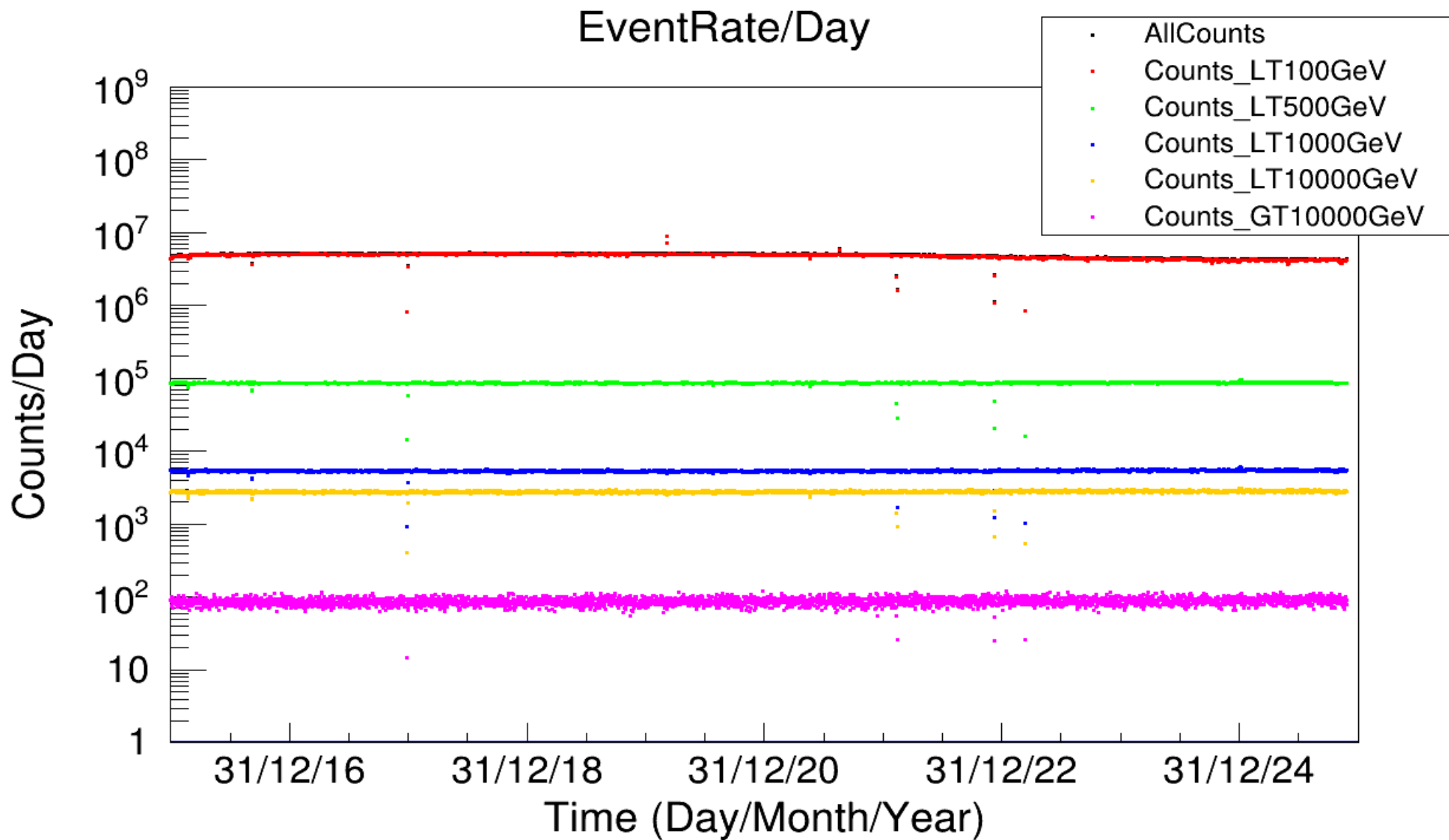


中子探测器

在轨温度变化

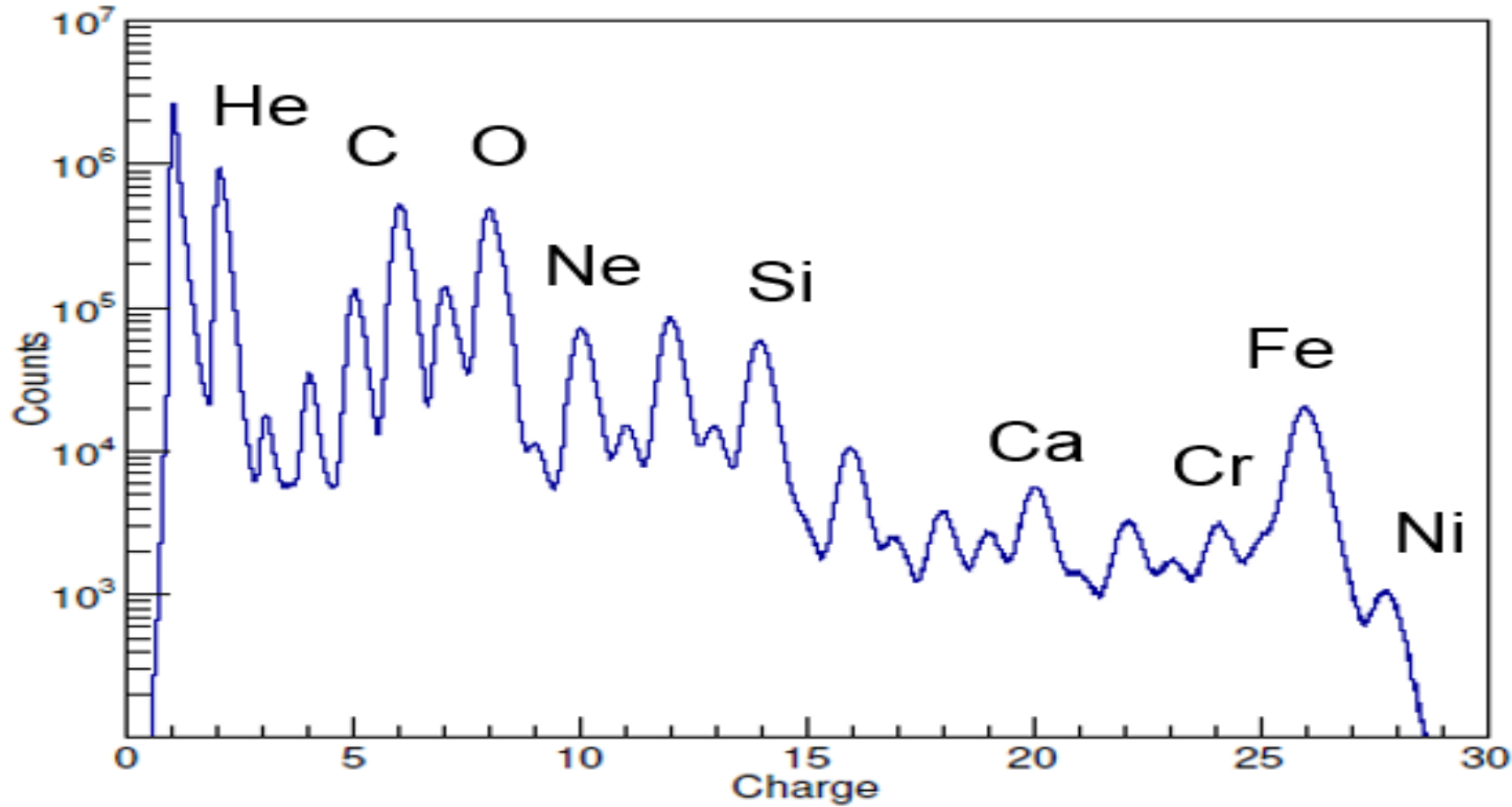


数据率



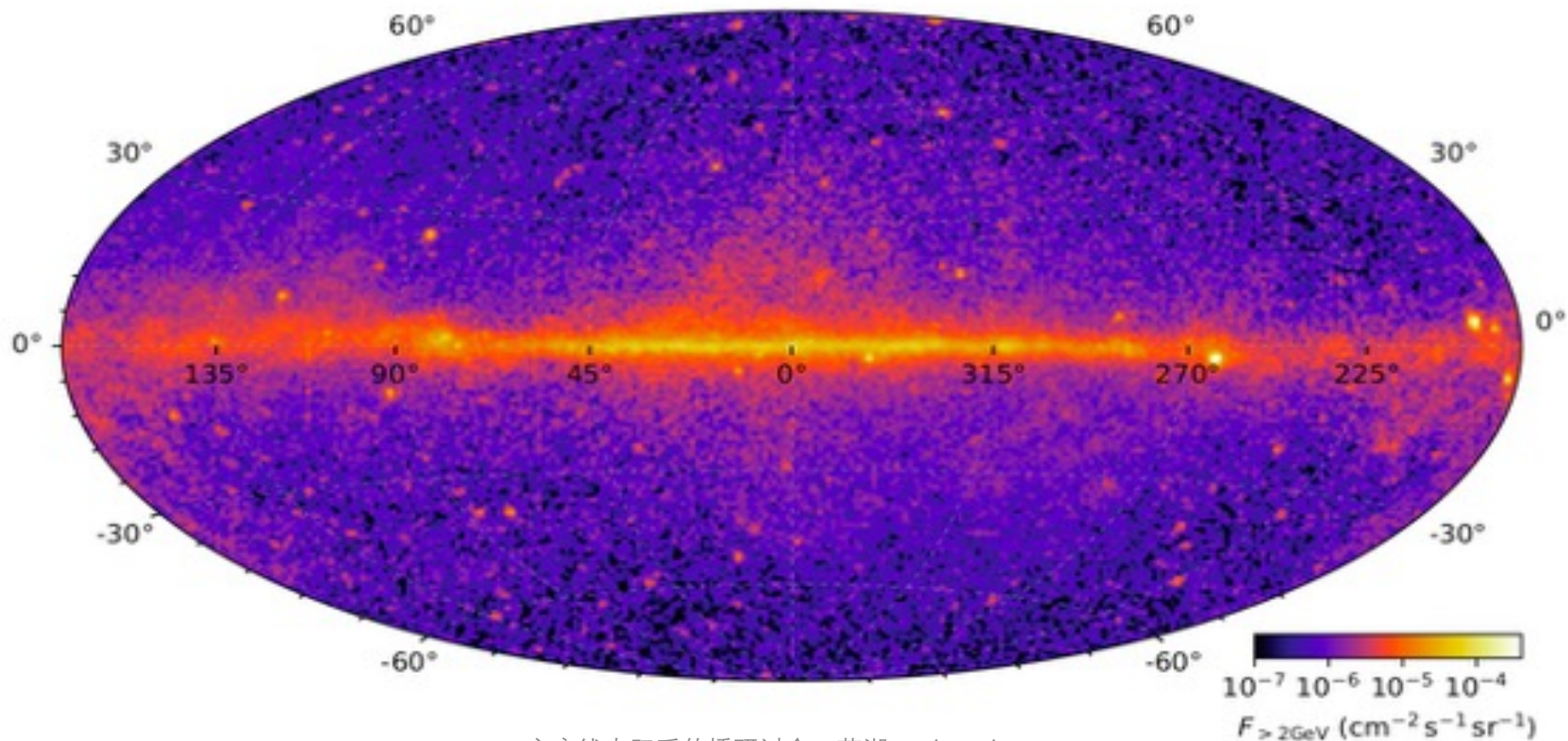
电荷测量

- 电荷分辨: $0.06e @ Z=1$



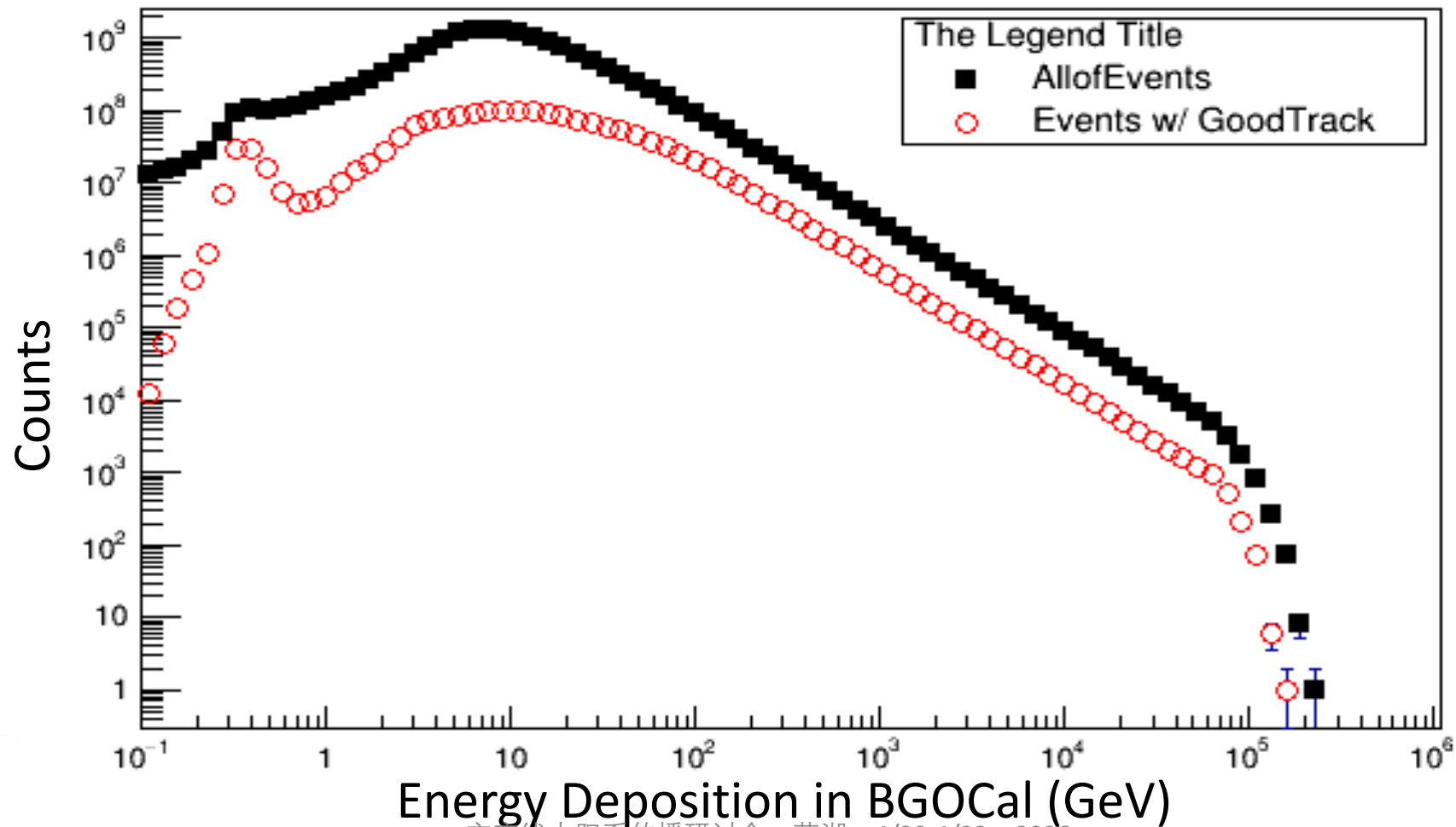
径迹测量

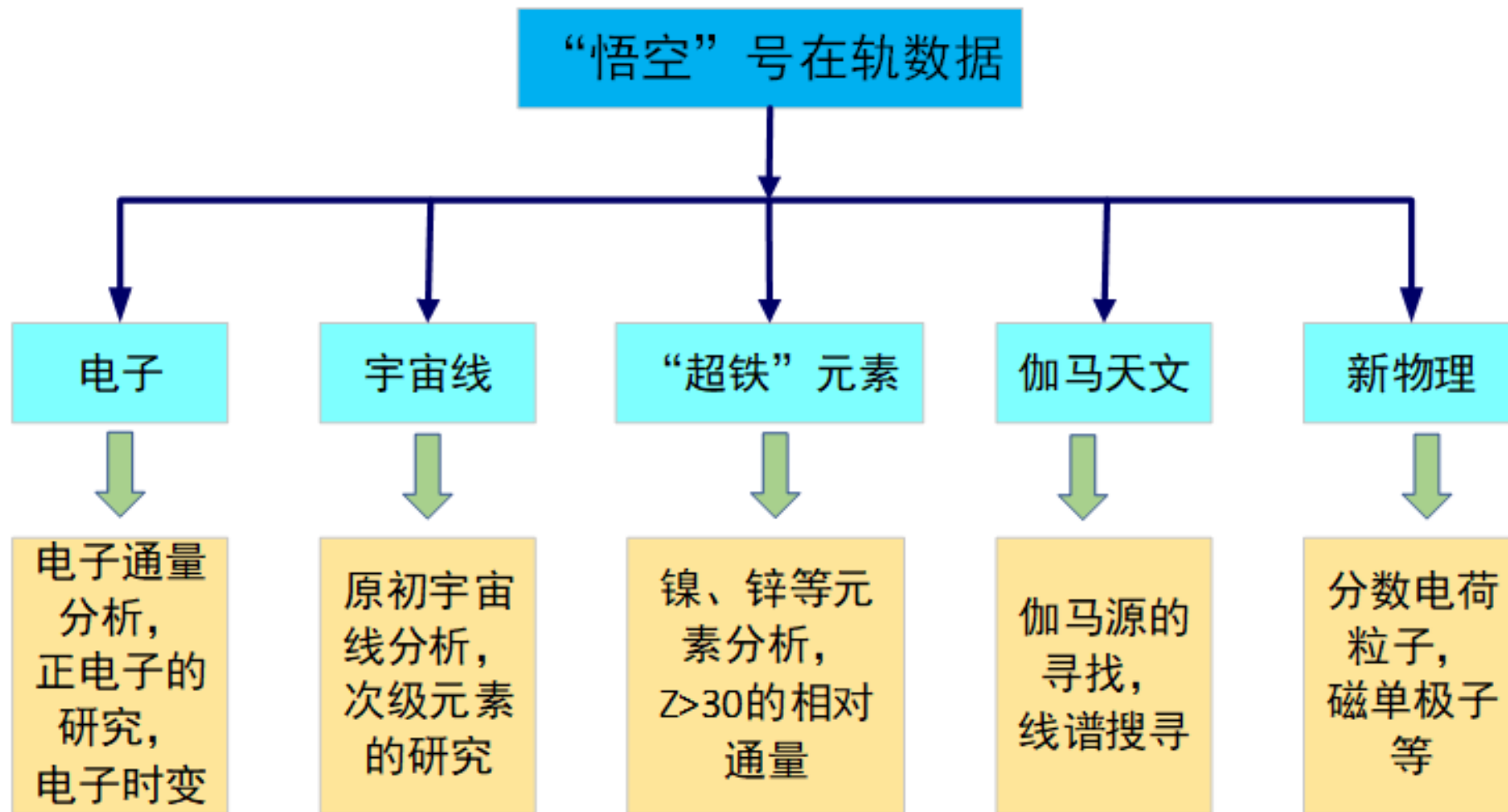
- 角分辨: 0.2° @ 10 GeV



能量测量

- 能量分辨率: TeV电子 $\sim 1\%$





“悟空”号在轨数据

电子

电子通量
分析,
正电子的
研究,
电子时变

宇宙线

原初宇宙
线分析,
次级元素
的研究

“超铁”元素

镍、锌等元
素分析,
 $Z>30$ 的相对
通量

伽马天文

伽马源的
寻找,
线谱搜寻

新物理

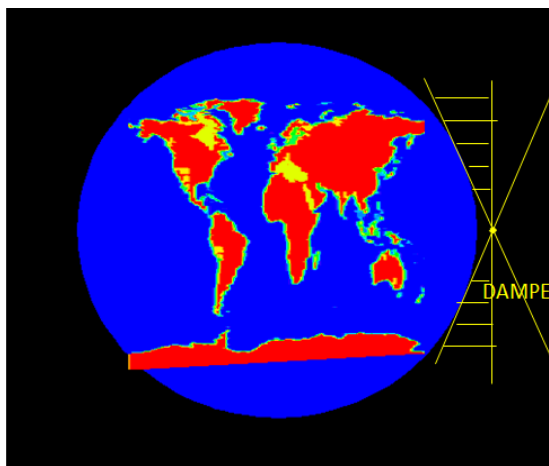
分数电荷
粒子,
磁单极子
等

- 1, 如何区分正负电荷粒子
- 2, 如何区分电子信号和质子本底

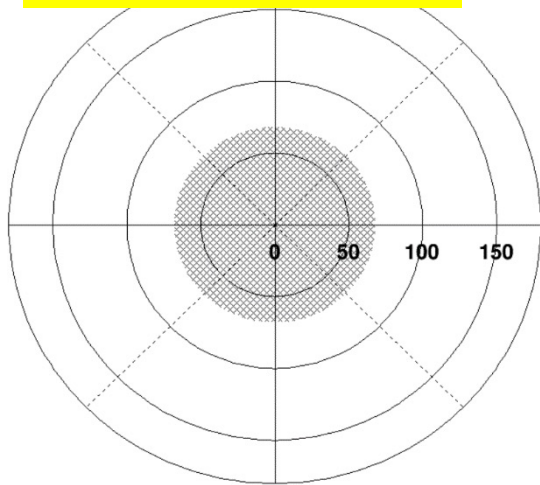


挑战I: 区分正、负电荷粒子

- ◆地磁场可以对 e^\pm 的径迹进行偏转，相当于改变了地球阴影的形状
- ◆可以在电子的地球阴影区寻找正电子，反之亦然

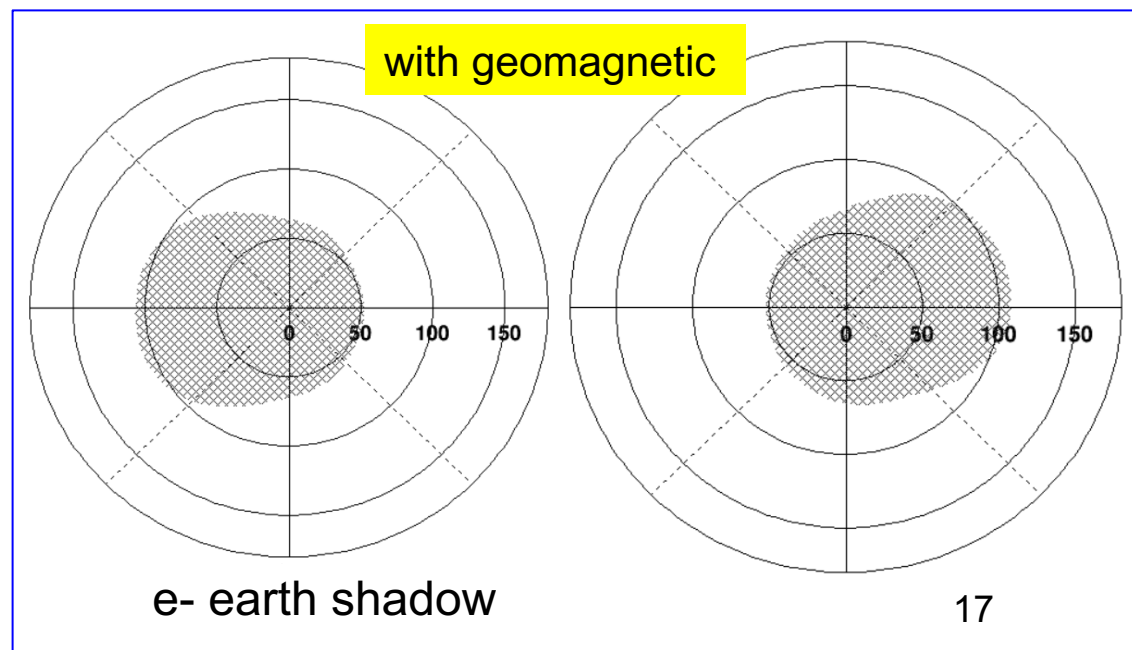


without geomagnetic



e^\pm earth shadow

with geomagnetic



e^- earth shadow

17

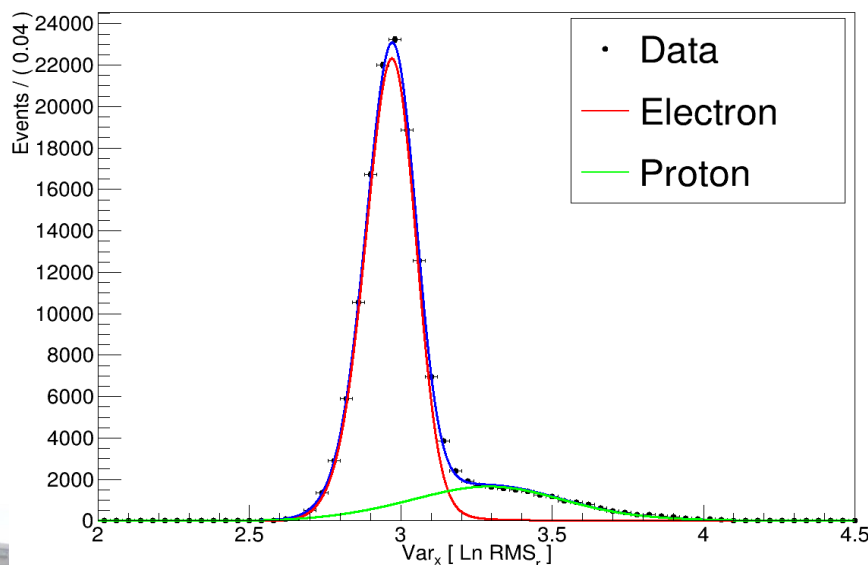
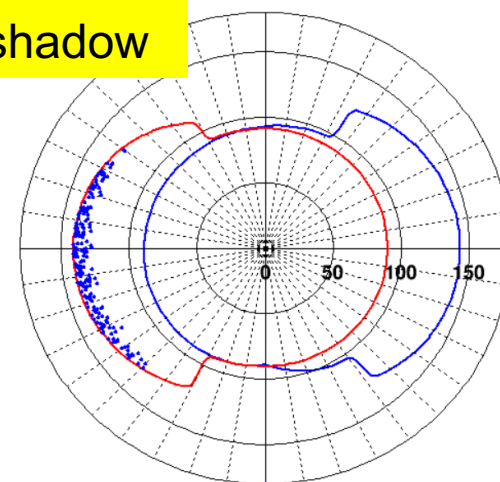
e^+ earth shadow



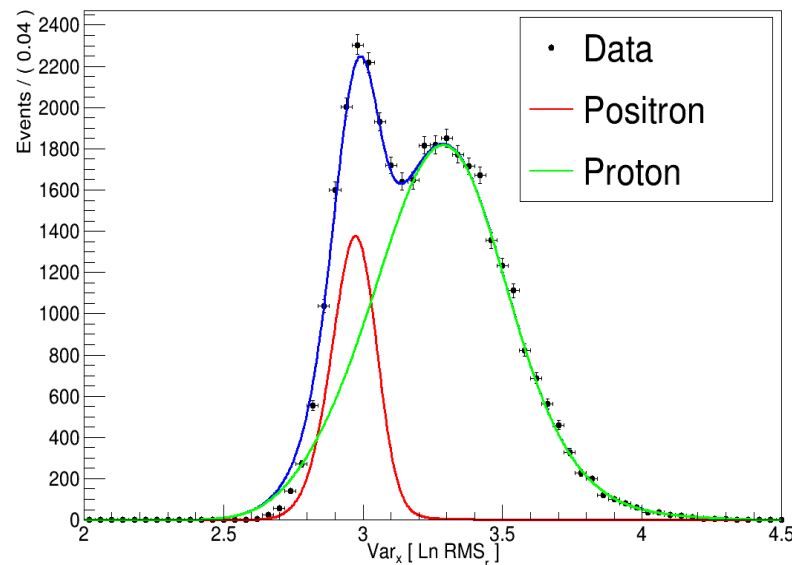
挑战II: (正) 电子/质子鉴别

- ◆ 基于DAMPE的数据, 开展了正/负电子的分析
- ◆ 同时根据粒子簇射轮廓在量能器中的行为开展粒子鉴别
 - ◆ 质子是正/负电子的主要本底
- ◆ 因为卫星指向原因, 我们只能针对一个相对较窄的能区开展研究

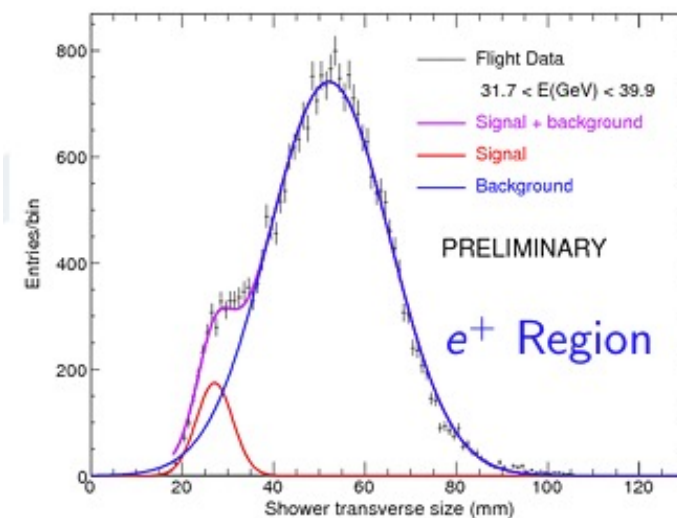
The events in e- shadow



11.5 – 13.2 GeV 负电子



11.5 – 13.2 GeV 正电子

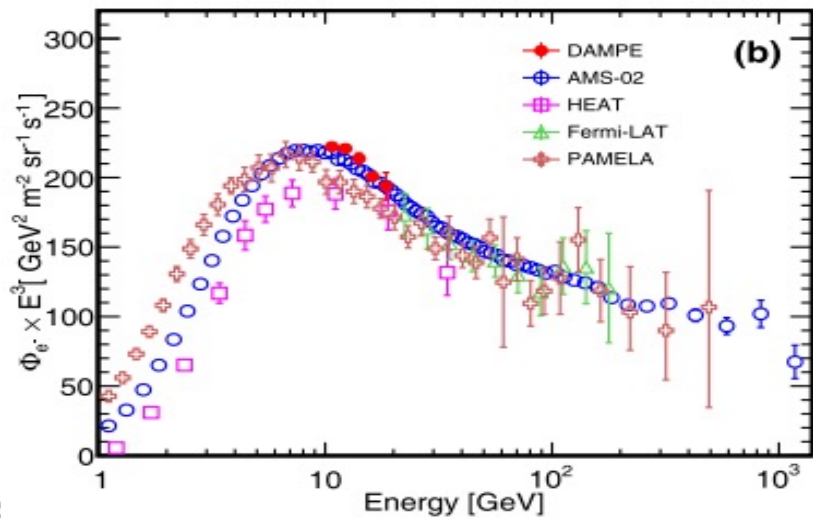


FERMI-LAT

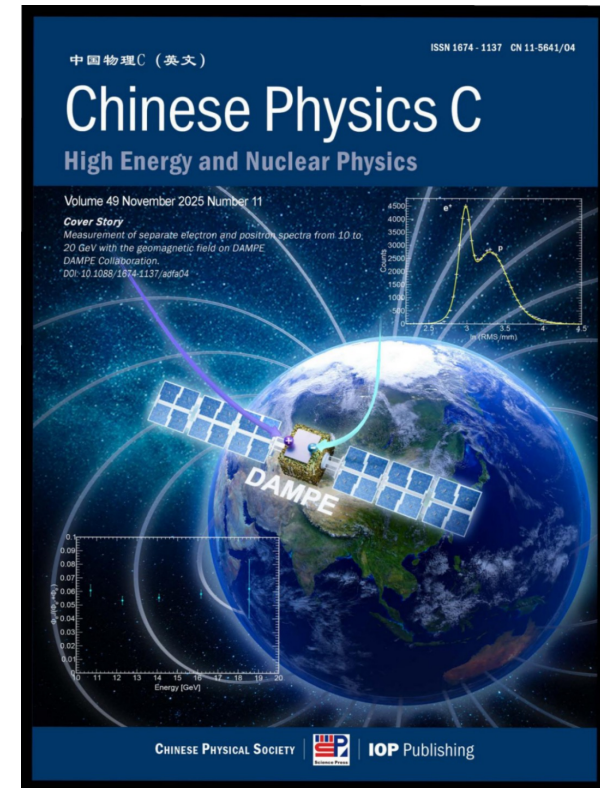
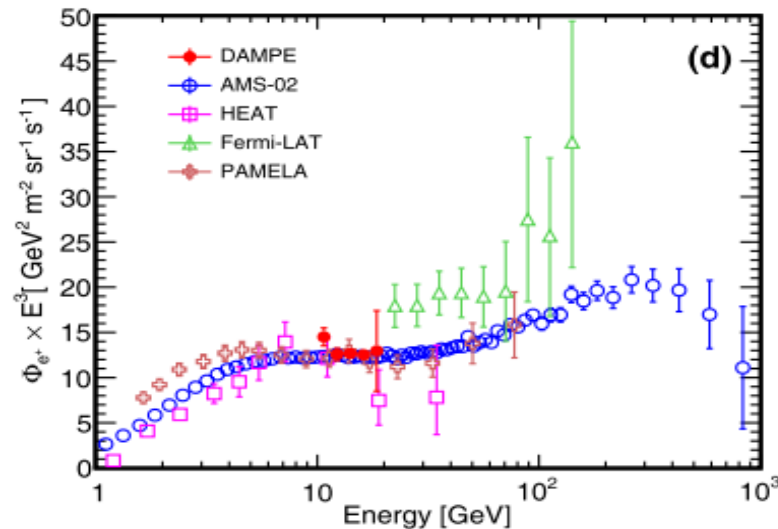
正、负电子通量

- ◆ 得到了 10 -20 GeV 能区的正/负电子微分通量谱
- ◆ 该结果与 AMS02 磁谱仪测试的结果一致，拓展了 FERMI-LAT 低能区间

电子

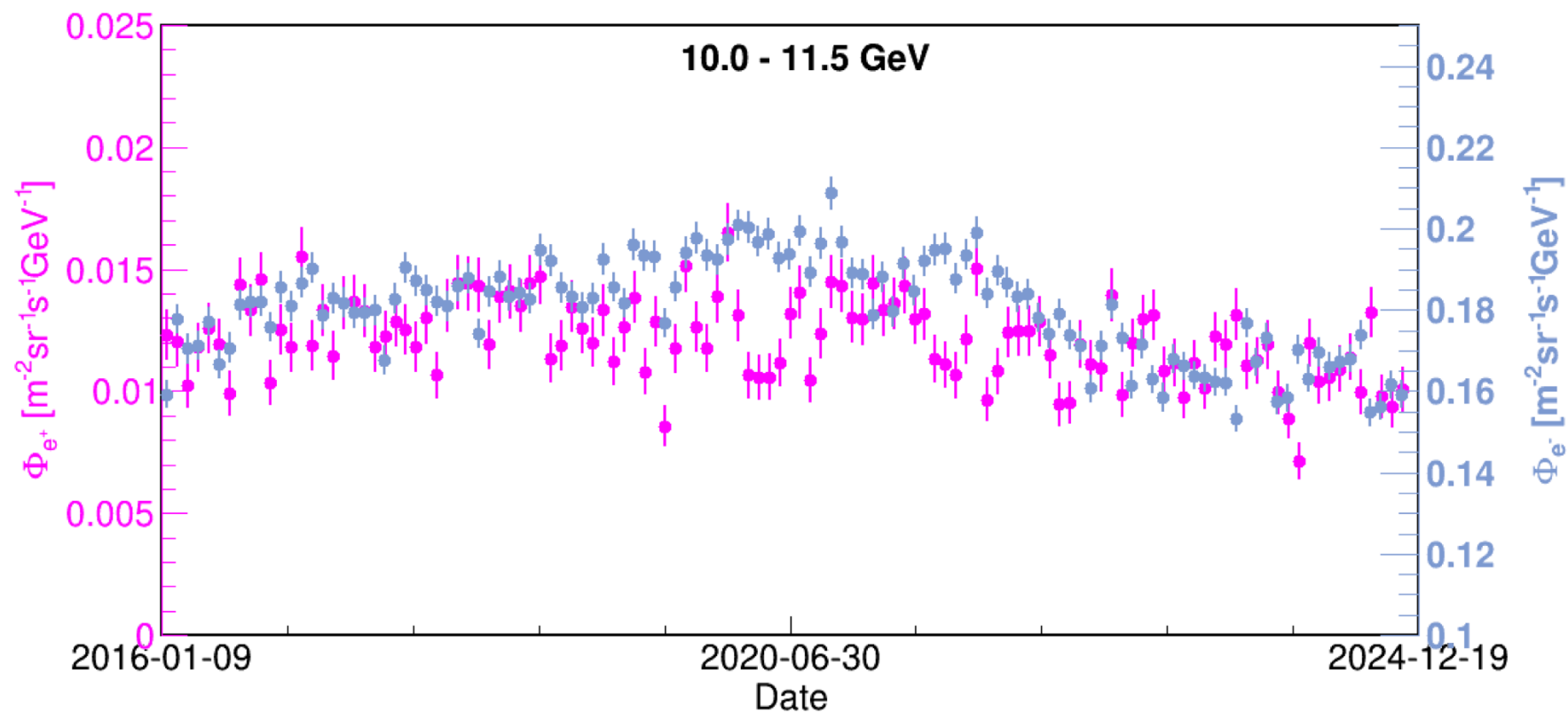


正电子



正、负电子的时变研究

- 由于能量偏高，时变行为不明显
- 下一步计划开展“低能区”研究



总结

- 粒子漂移效应在宇宙线传输过程中有着重要作用
- 粒子漂移效应是与其电荷极性相关
- 开展不同电荷极性宇宙线的太阳调制研究，可以检验漂移效应对调制的贡献，为输运理论提供约束
- “悟空”号已成功在轨运行超过10年时间，取得了大量的高质量宇宙线数据，为开展科学研究提供了基础
- 基于地磁场开展正、负电子太阳调制的研究有望提供关键证据



总结

- 粒子漂移效应在宇宙线传输过程中有着重要作用
- 粒子漂移效应是与其电荷极性相关
- 开展不同电荷极性宇宙线的太阳调制研究，可以检验漂移效应对调制的贡献，为输运理论提供约束
- “悟空”号已成功在轨运行超过10年时间，取得了大量的高质量宇宙线数据，为开展科学研究提供了基础
- 基于地磁场开展正、负电子太阳调制的研究有望提供关键证据

谢谢!



Backup



Backup

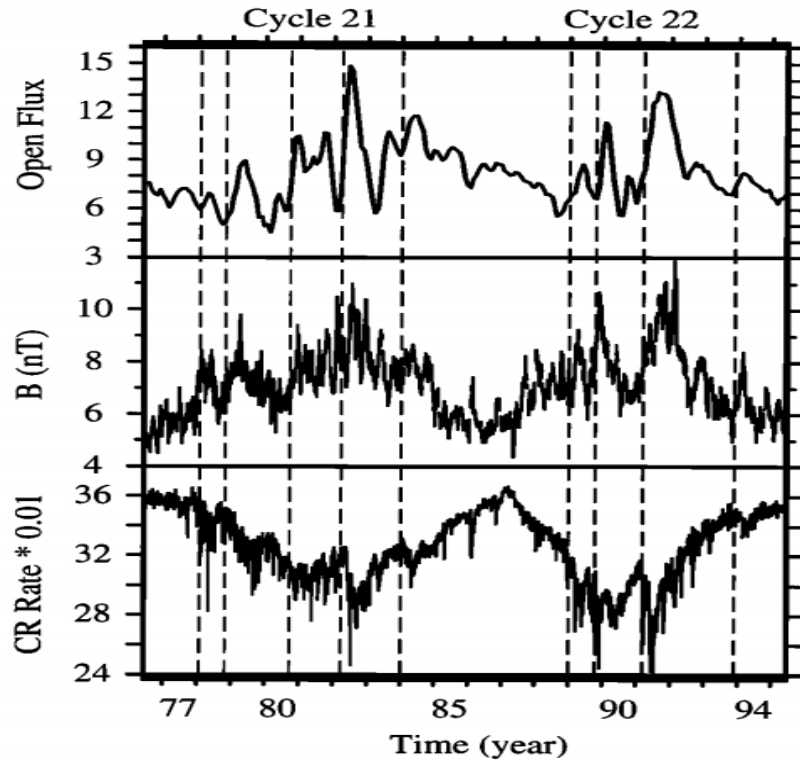


Figure 1. Time profiles of solar open magnetic flux (monthly averages extrapolated from photospheric observations by Y.-M. Wang, private comm.), the magnitude of the IMF at 1 AU (27-day running means) and the count rate (daily averages) of cosmic rays measured at Mt. Wellington. Vertical lines indicate times of the major field enhancements at the Sun associated with changes in the cosmic ray rate.

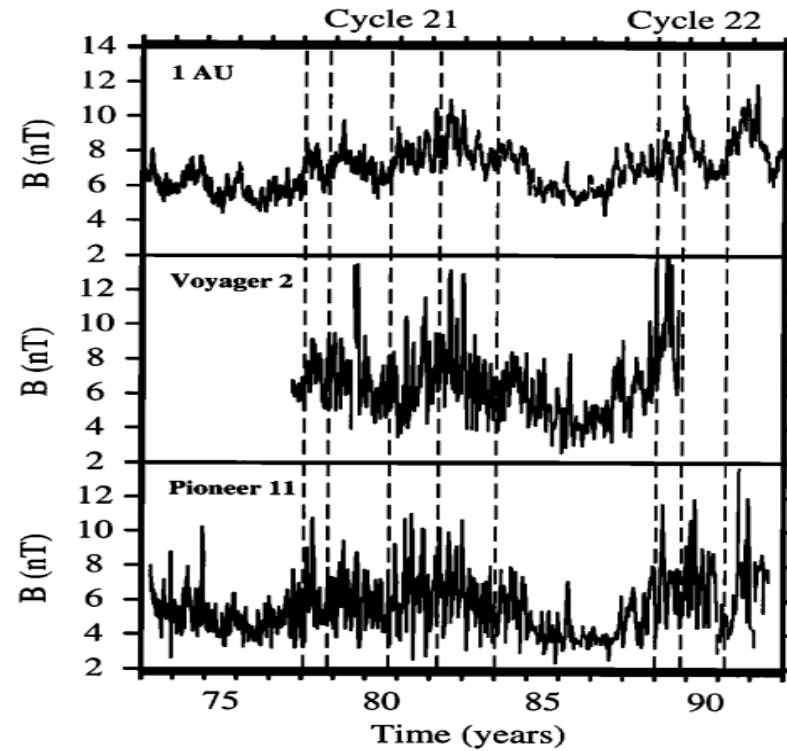


Figure 2. IMF strength at 1 AU, Voyager 2 and Pioneer 11 (27-day running means). The data from Voyager 2 and Pioneer 11 have been radially adjusted to 1 AU.

to be superimposed on the general structure which already exists at 1 AU.



Backup

太阳周期图表

