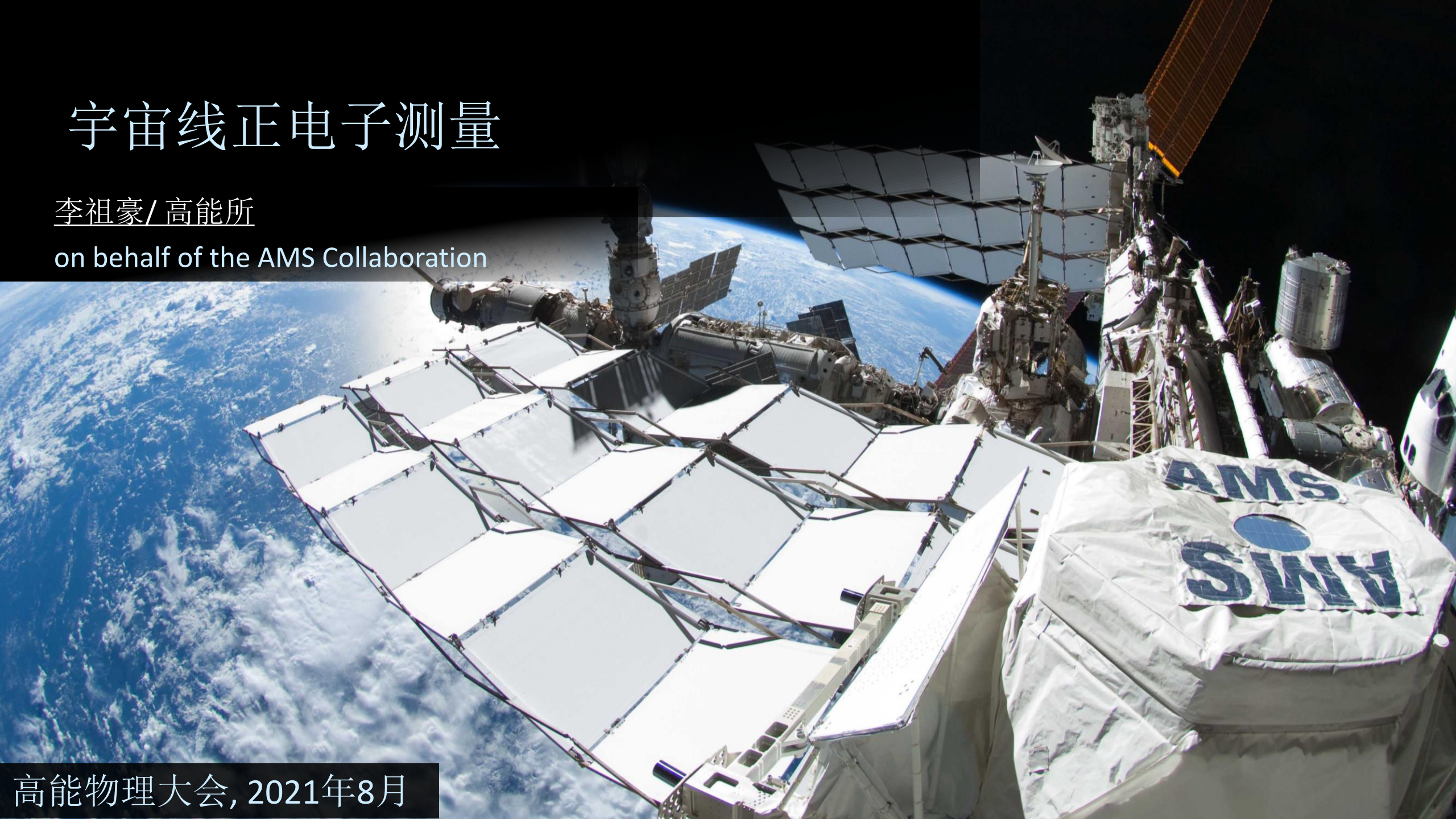


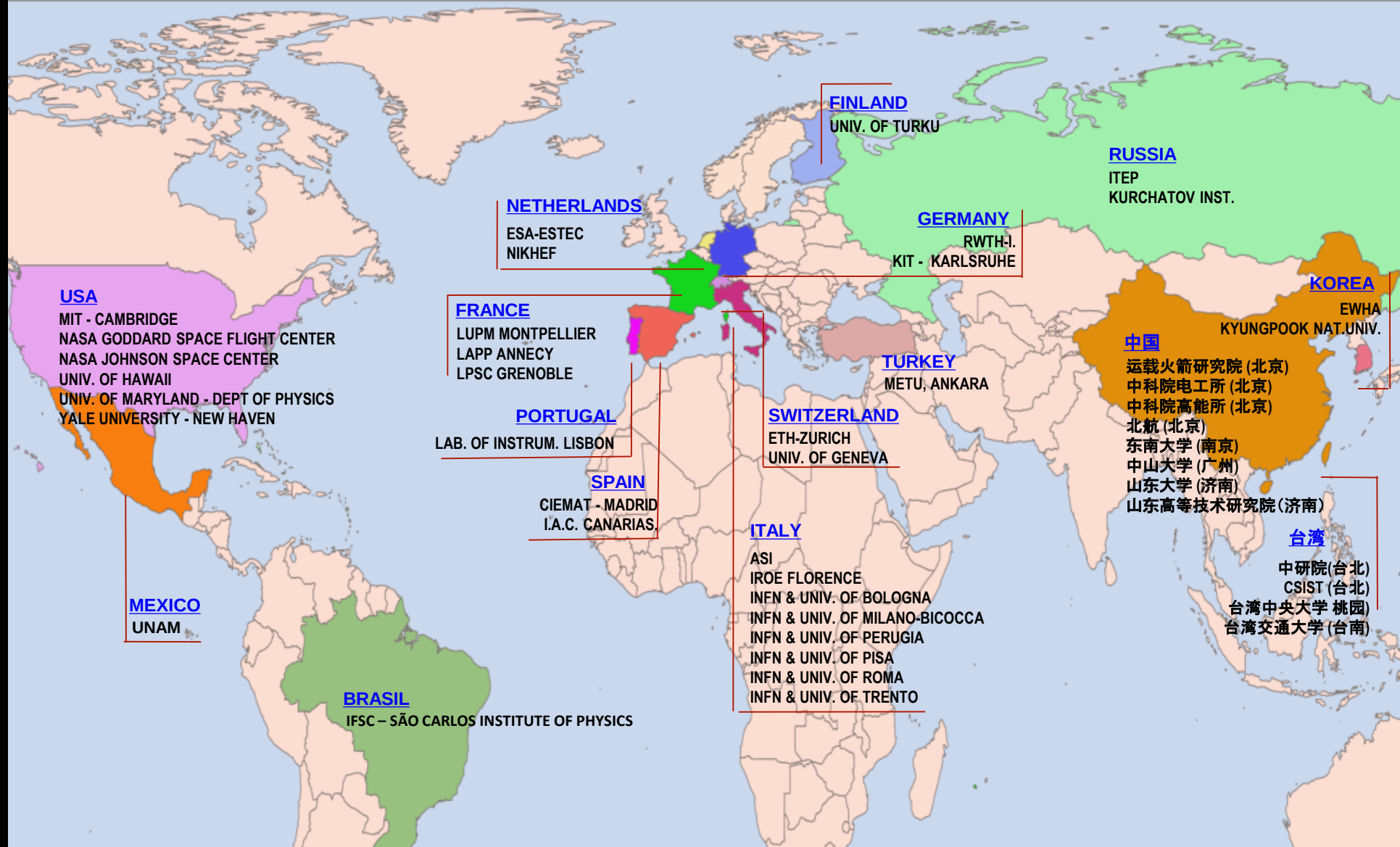
宇宙线正电子测量

李祖豪/高能所

on behalf of the AMS Collaboration



高能物理大会, 2021年8月



AMS实验是由诺贝尔奖获得者丁肇中先生领导的一个大型国际合作，由来自16个国家和地区的60多个研究所的600多位科学家组成。中科院高能所是实验的发起单位之一。

AMS-02探测器是唯一在太空运行的万亿电子伏精密磁谱仪

穿越辐射探测器
(TRD)



飞行时间计数器
(TOF)



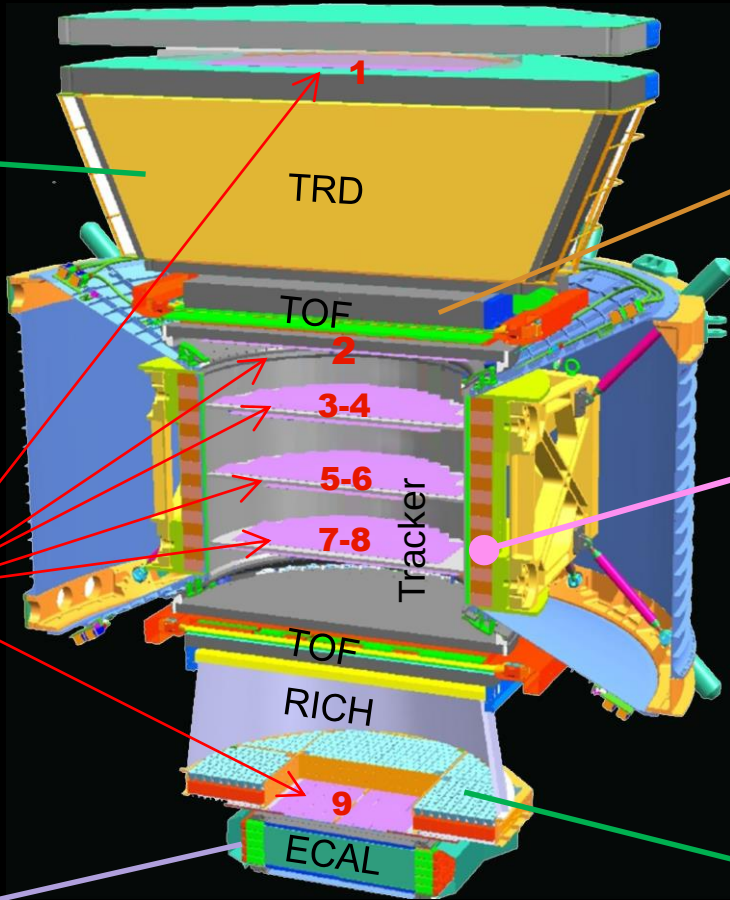
磁铁



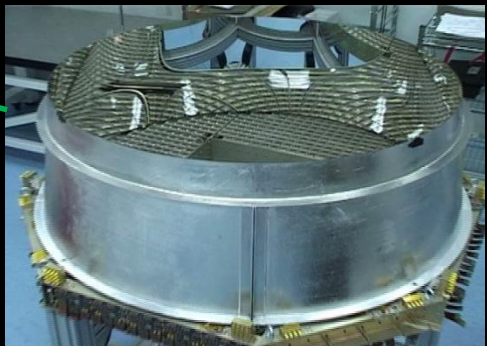
硅微条探测器



电磁量能器
(ECAL)

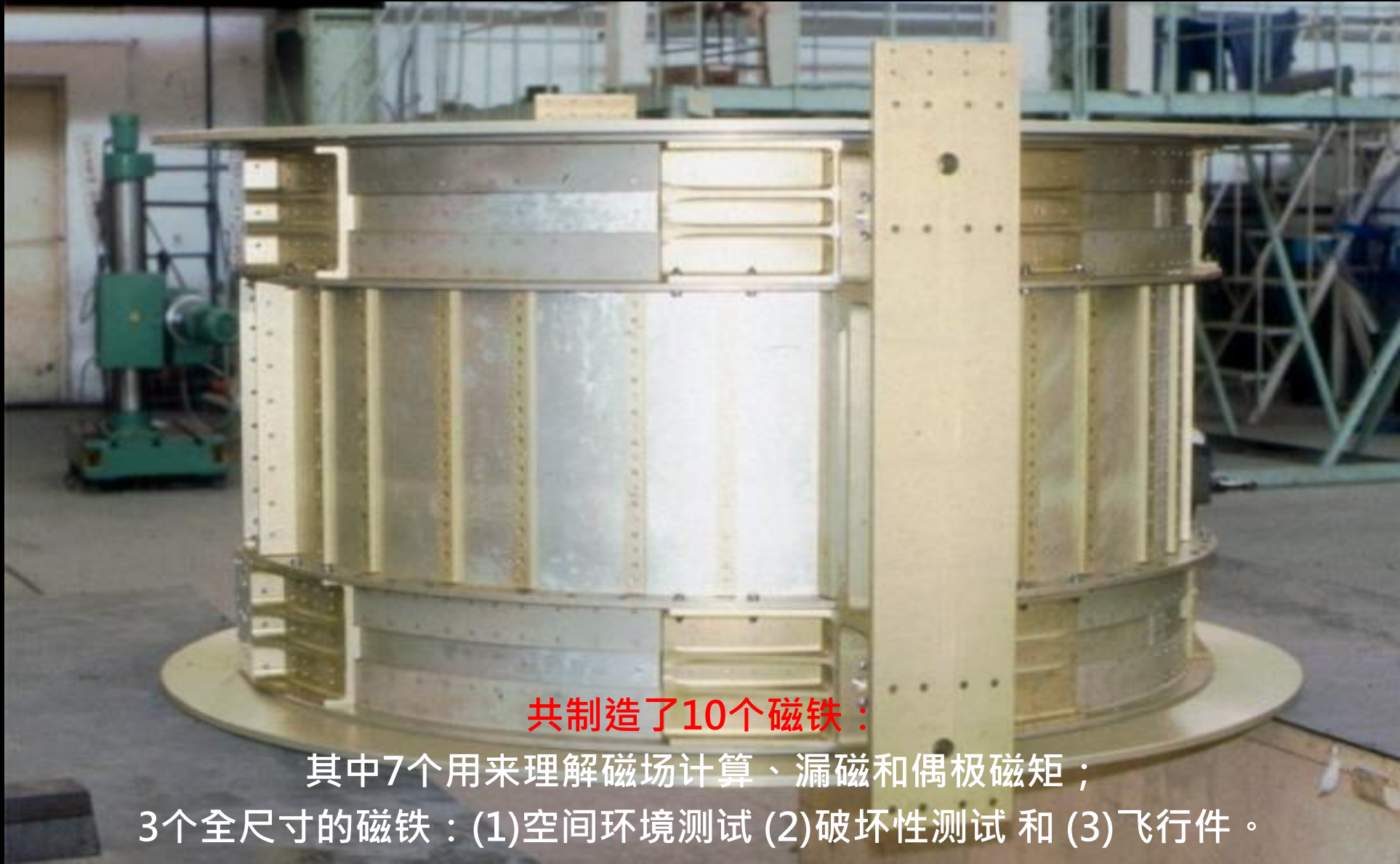


环向成像切仑科夫
探测器 (RICH)



30万道信号通路，650个微处理器。比NASA已有的处理器快10倍

AMS-01和AMS-02的“核心” 永磁铁
是在高能所陈和生院士领导下
由（中国科学院电工所、高能所、航天部一院）共同研制



共制造了10个磁铁：

其中7个用来理解磁场计算、漏磁和偶极磁矩；

3个全尺寸的磁铁：(1)空间环境测试 (2)破坏性测试 和 (3)飞行件。

电磁量能器

测量到万亿电子伏的电子的能量和方向

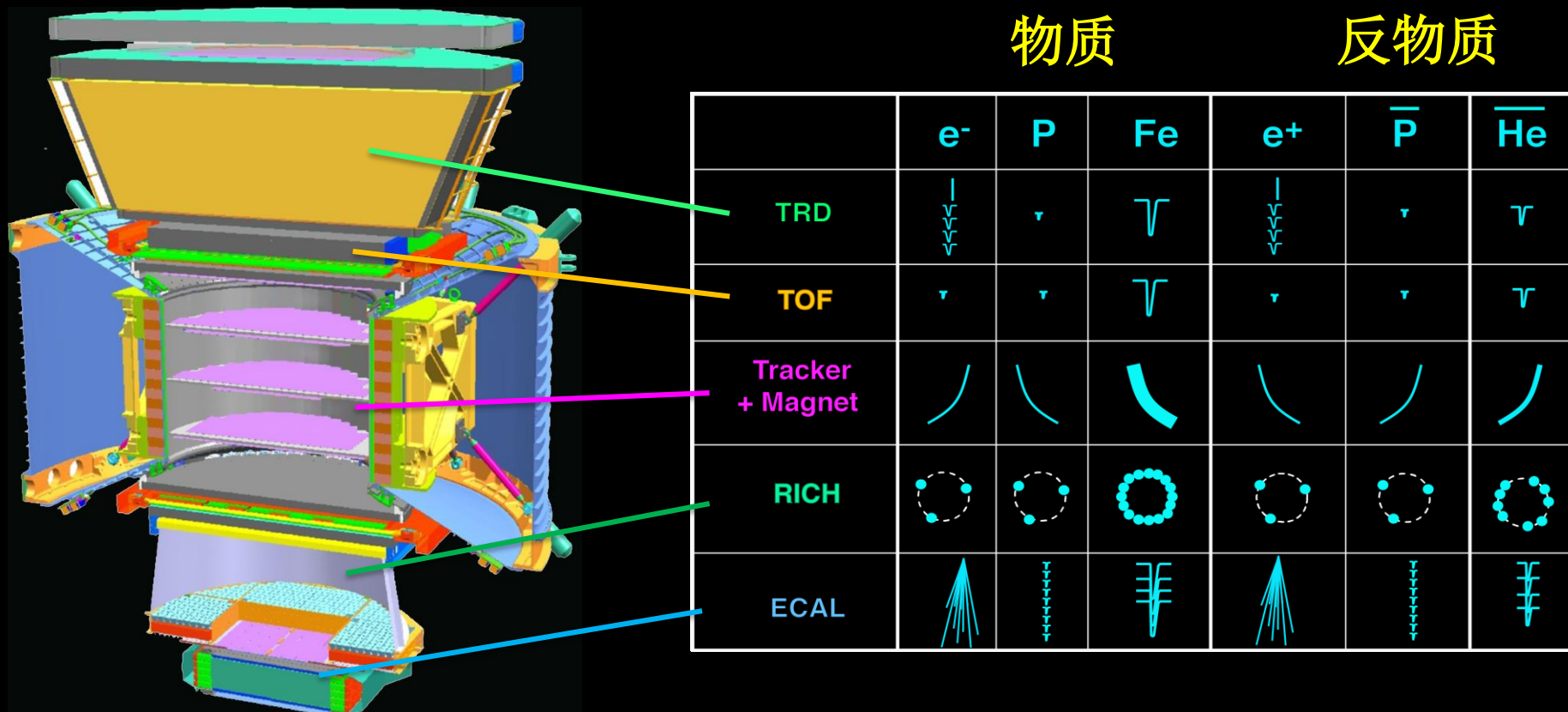


50,000根直径1毫米的光纤
均匀分布在600公斤的铅中。



由高能所，航天部一院、意大利比萨和法国LAPP共同研制，
是暗物质探测的关键子探测器之一

作为精密太空磁谱仪，AMS能精确区分和测量各种宇宙线粒子



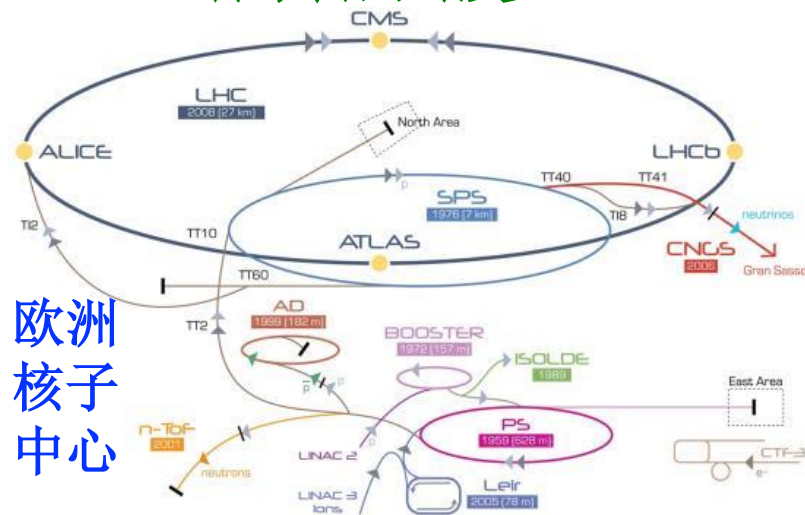
AMS可以从1, 000, 000个质子本底中挑选出1个正电子信号；

能够清晰地区分电子和正电子直到TeV；

可以精确测量到TeV的各宇宙线成份

探测器刻度 和 模拟

探测器刻度



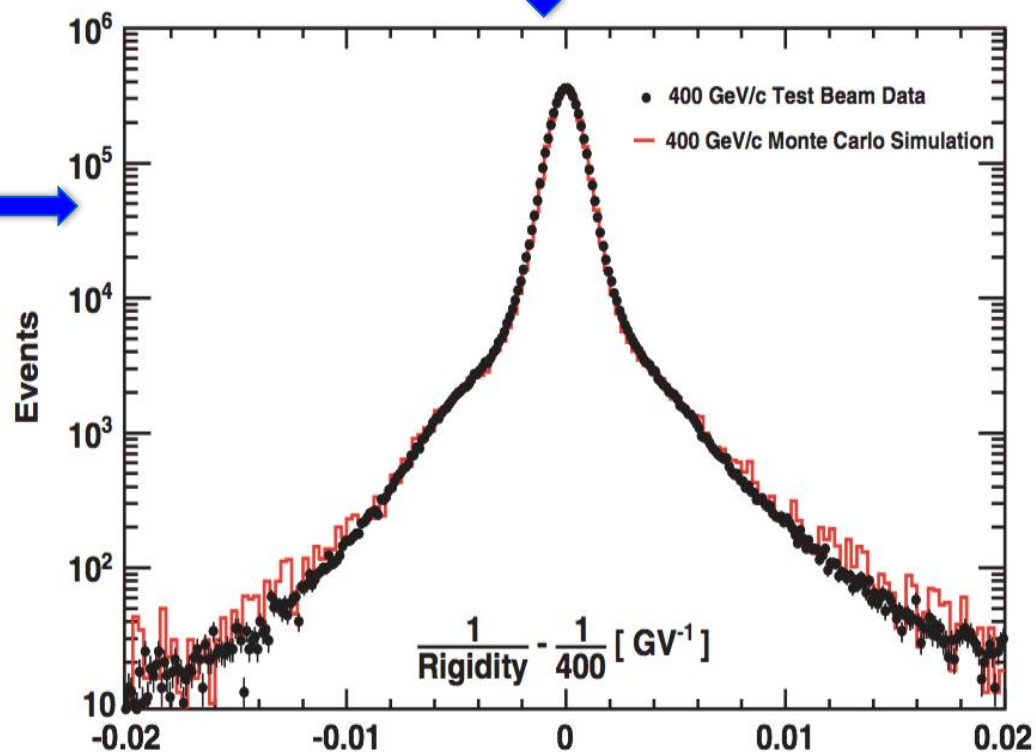
欧洲
核子
中心



粒子种类: $p, e^{\pm}, \pi^{\pm}$; 能量范围:
10-400 GeV; 2000个不同的位置

模拟

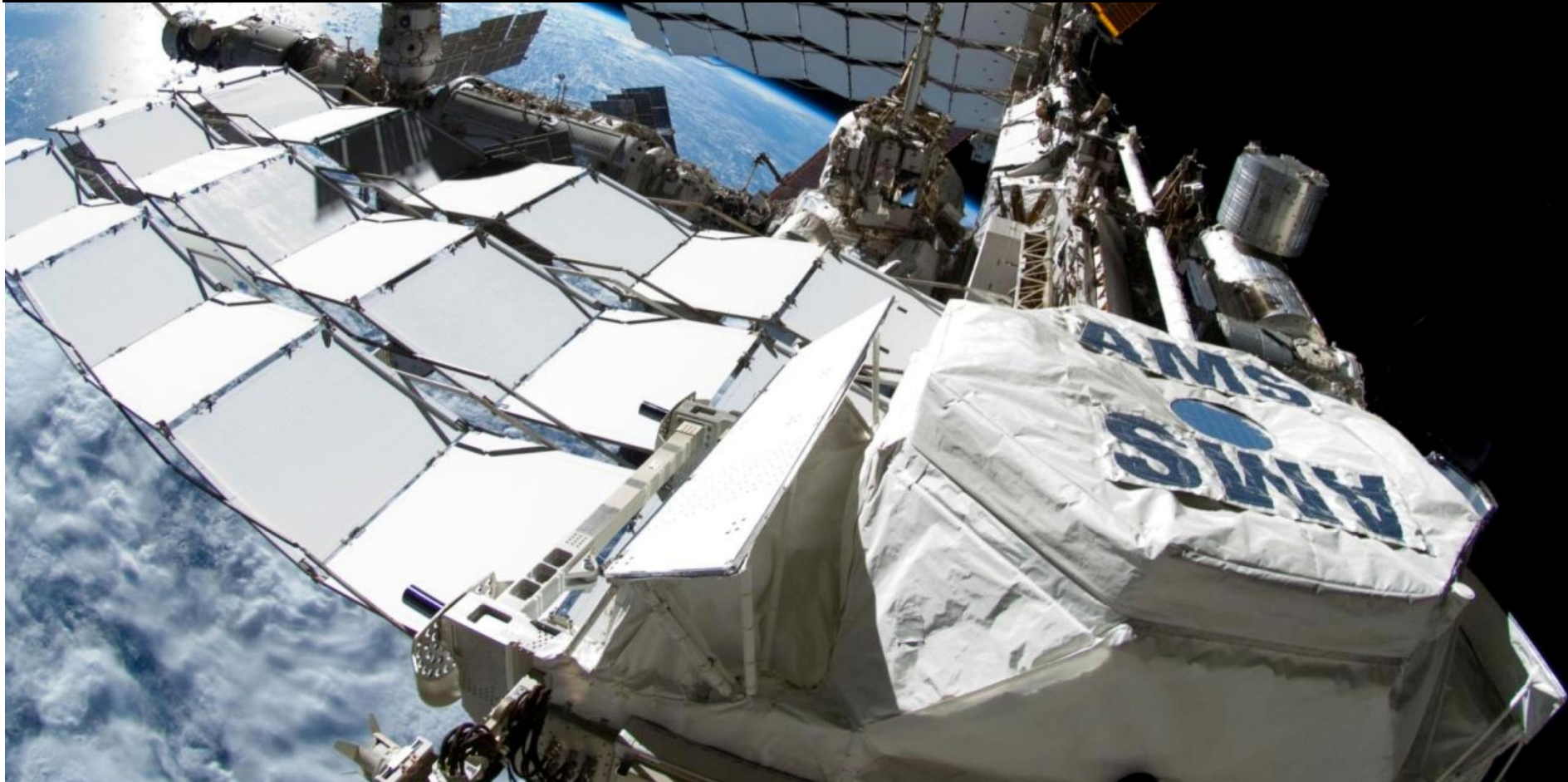
在CERN的
12,000 CPU
+ 各国的本地
计算集群



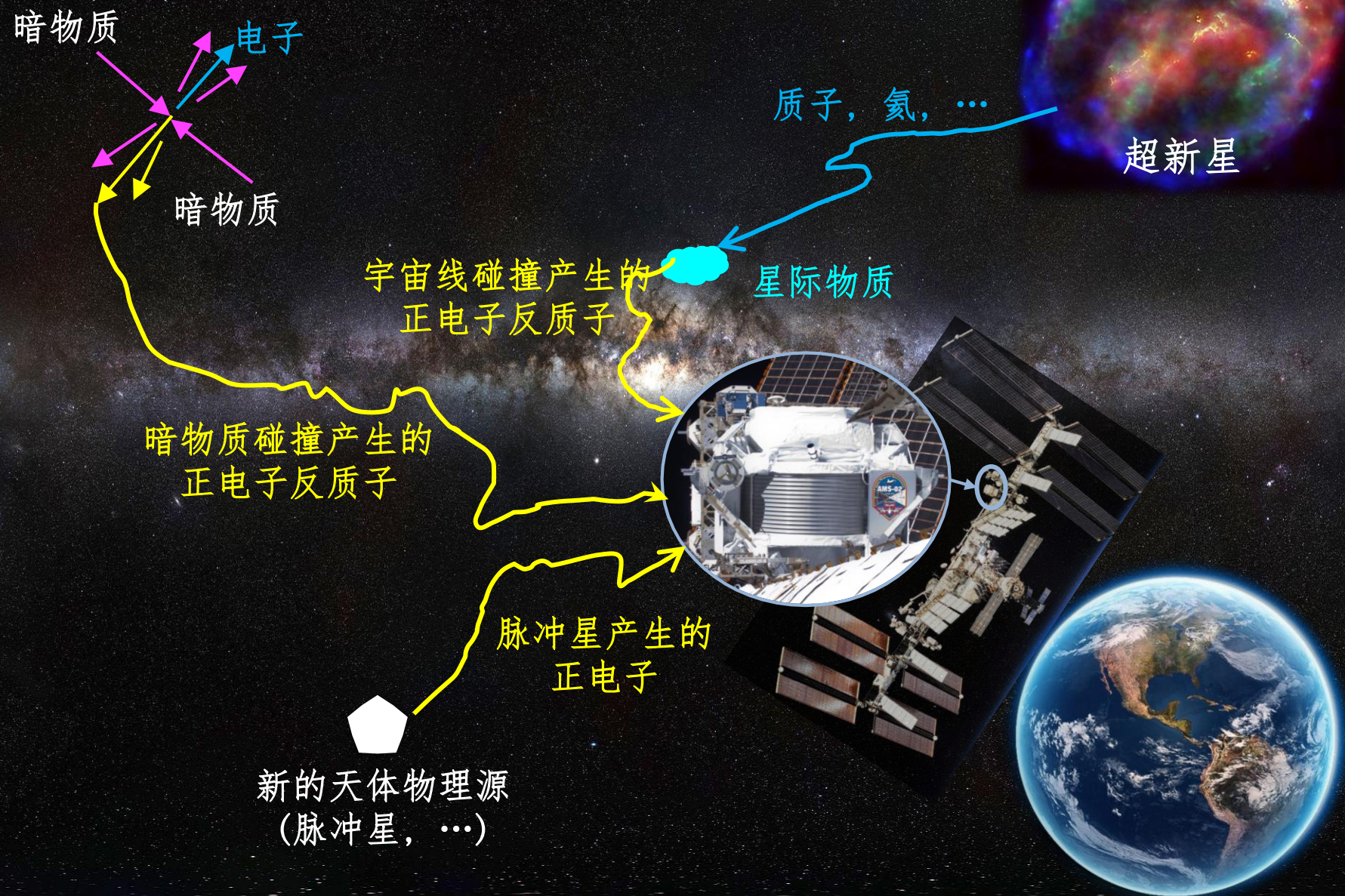
模拟数据 与 束流测试数据
符合程度达到~5个数量级

AMS在国际空间站已经持续运行超过10年，在GeV到TeV能区收集了超过1800亿的宇宙线事例，远超以往所有实验收集的宇宙线事例总和，并将持续到至少2028年。

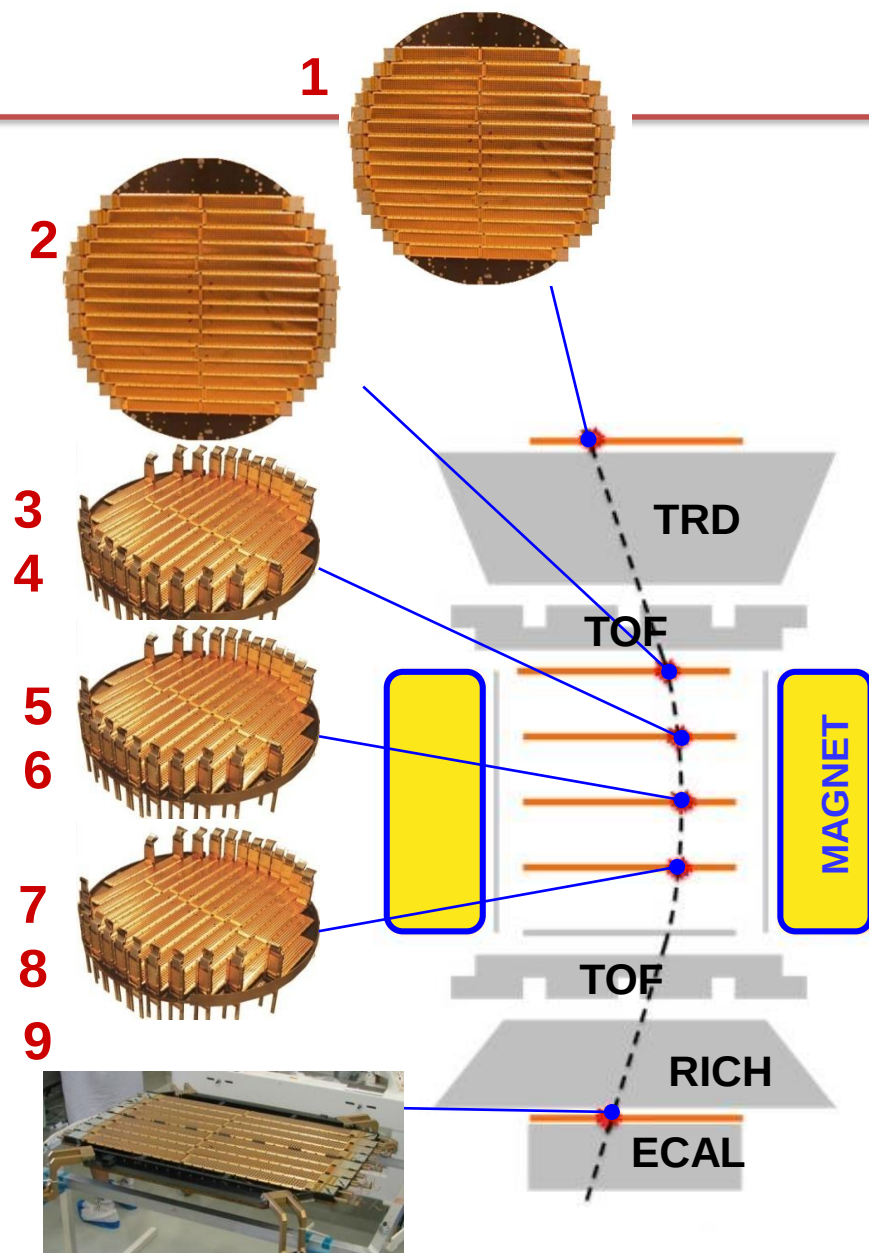
AMS以加速器粒子物理实验的精度在太空测量宇宙线，将宇宙线实验的精度提高一个量级到 $\sim 1\%$ ，开启了宇宙线精确测量的时代，具有里程碑式的意义。



AMS宇宙正电子精确测量

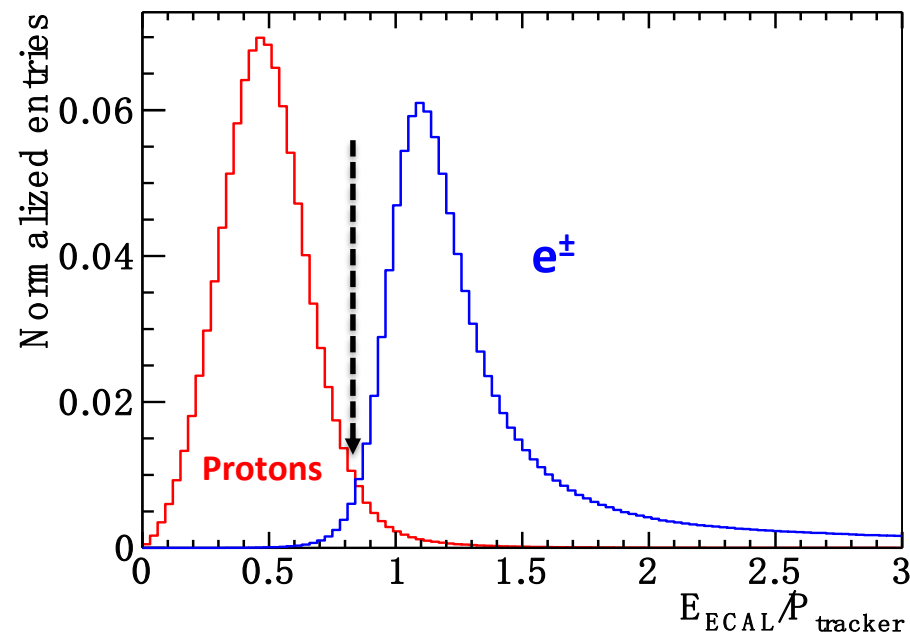


AMS实验正电子测量



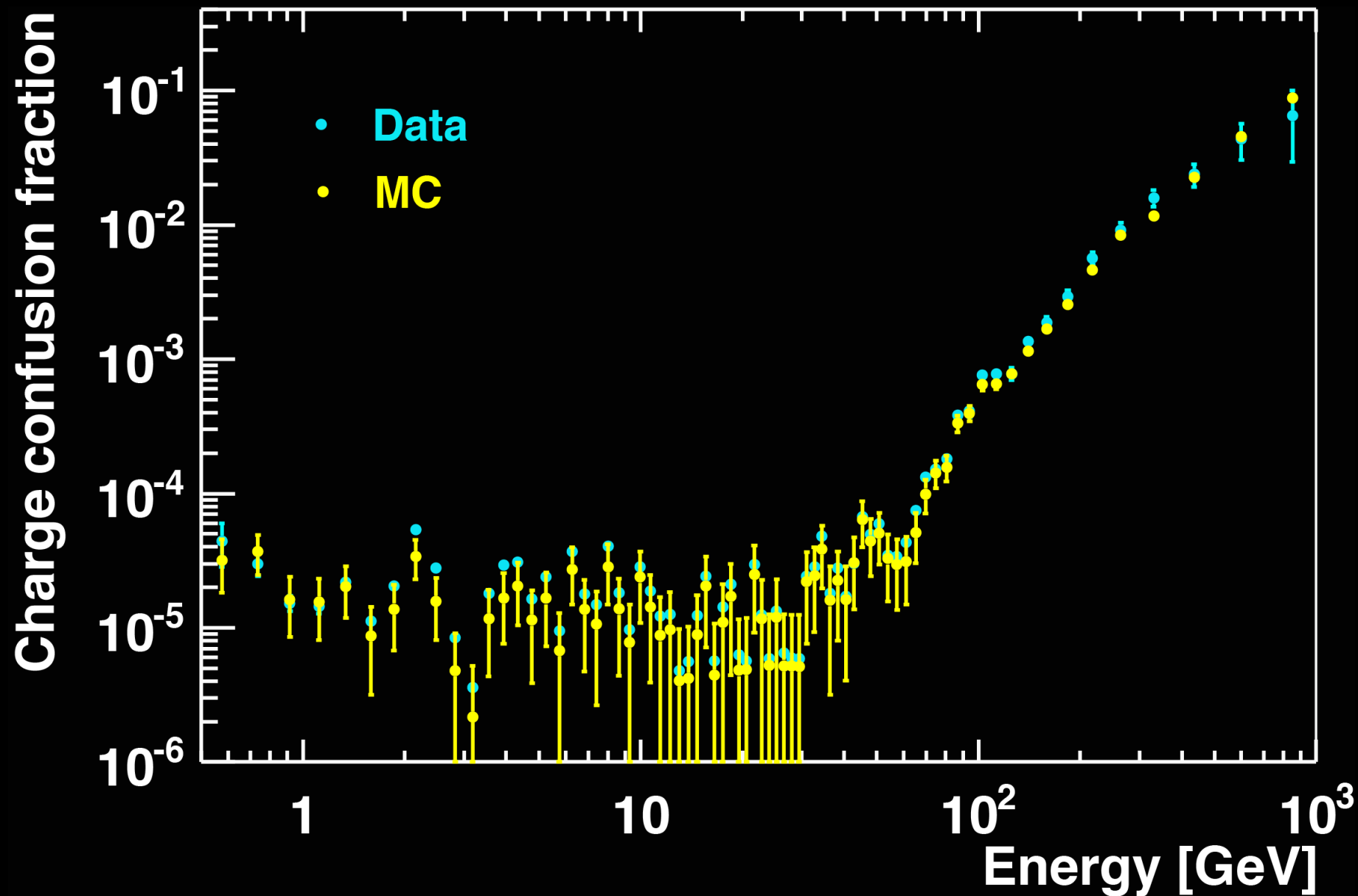
L1 to L9: 3m level arm;
单点位置分辨率10微米;

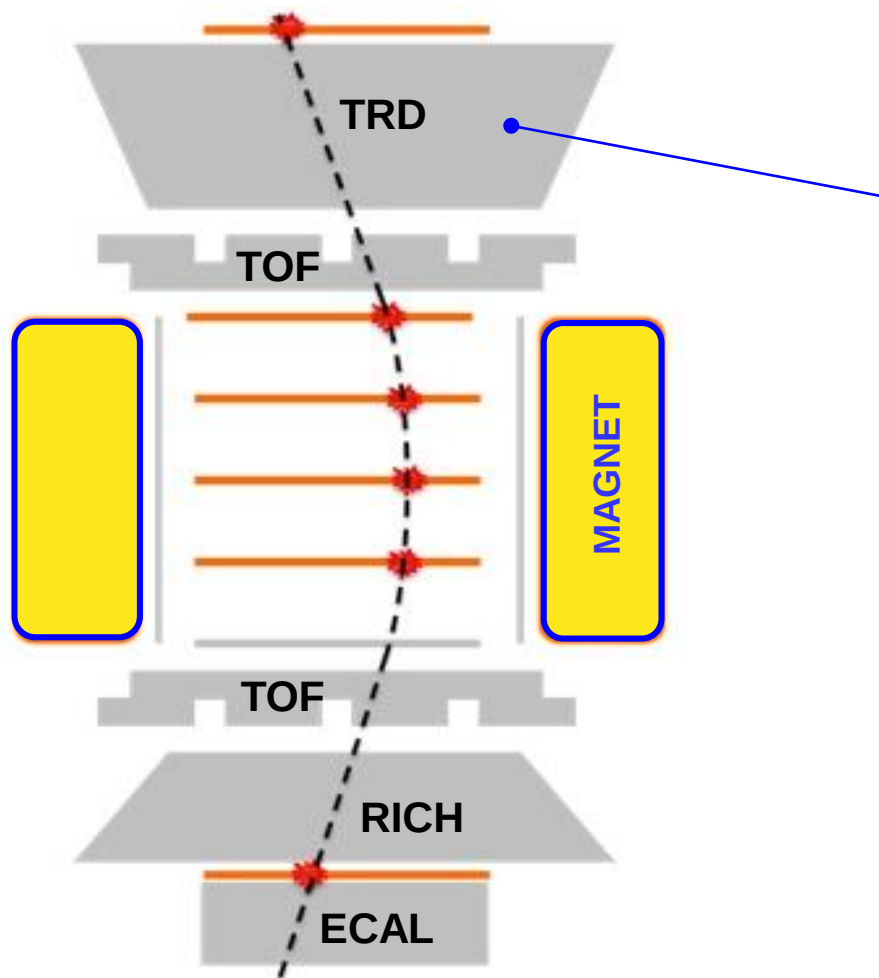
- Tracker和磁体测量正负电子的动量和电荷符号 直到几个TeV.
- AMS可以同时测量粒子的能量和动量，可以提供了独特的粒子识别能力



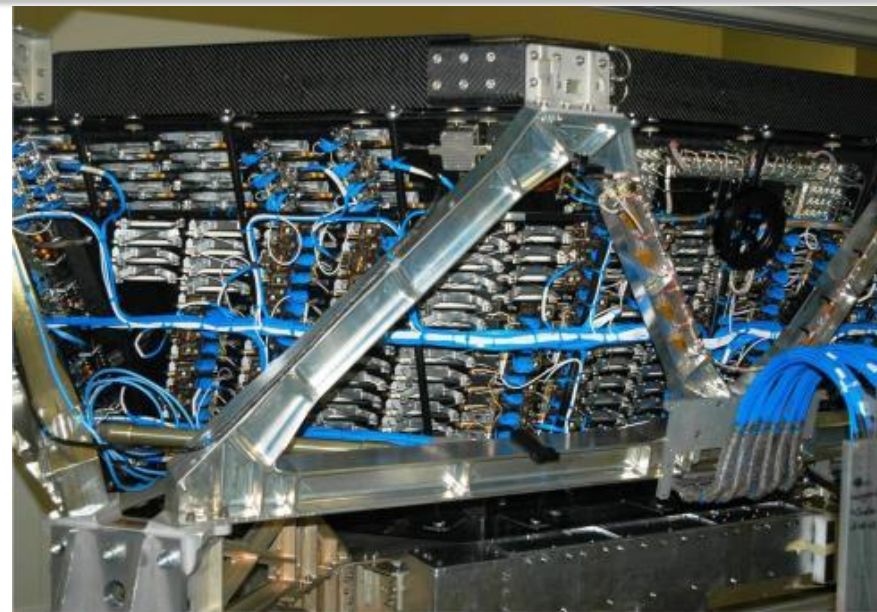
- 电子电荷误判识别:
 - 大角度散射,
 - 与探测器中物质相互作用.
 - 构造电荷误判识别工具 Λ_{CC} 直接从数据中得到电荷误判的大小

$e^\pm$ 的电荷荷误判可以通过蒙特卡洛模拟准确描述

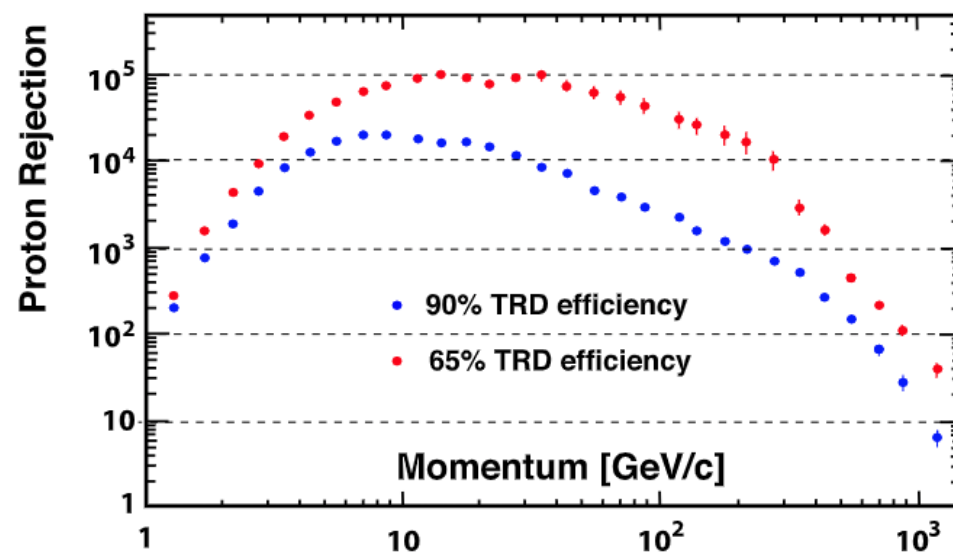


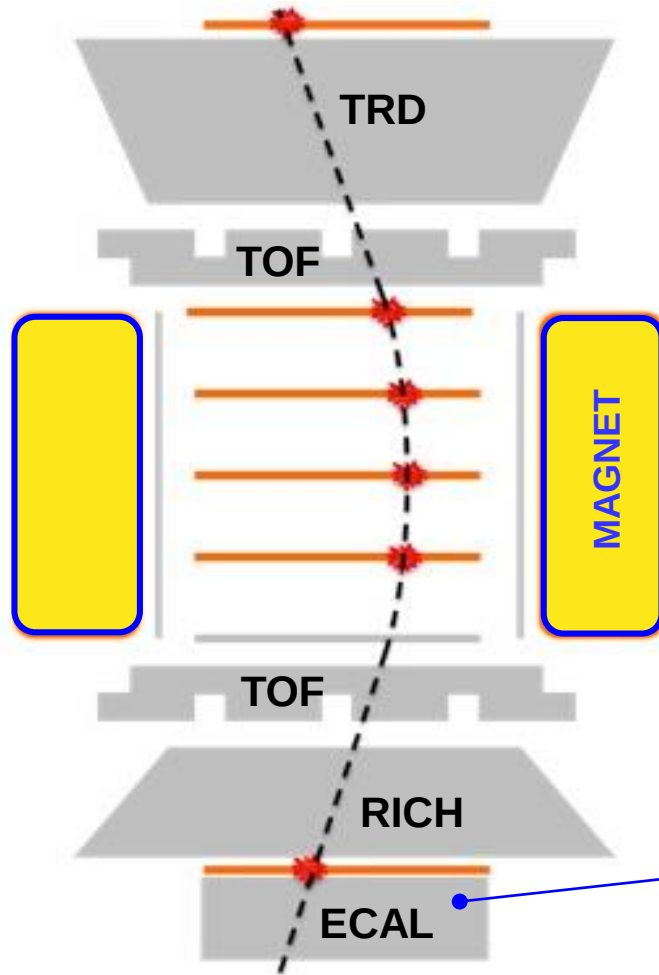


- TRD: 通过穿越辐射来识别 $e^\pm$ 和质子
综合20层正比管的信息构造 Λ_{TRD} 。

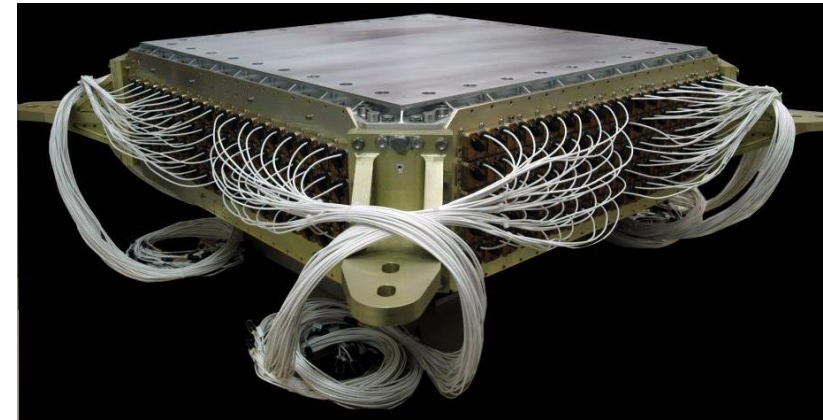
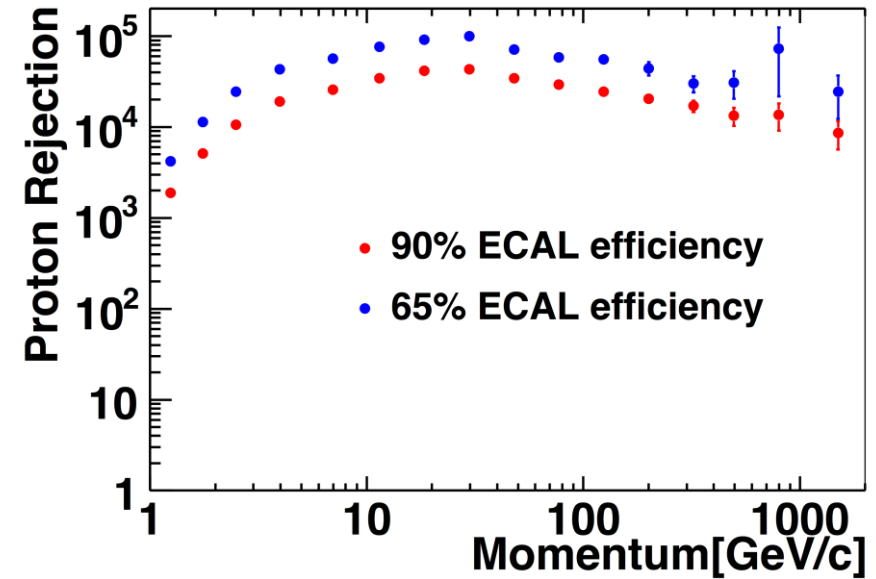


不同 $e^\pm$ 效率时的TRD质子排除能力





- ECAL: $17 X_0$, TeV Precision 3D measurement of the energy and shower development of electrons and positrons.

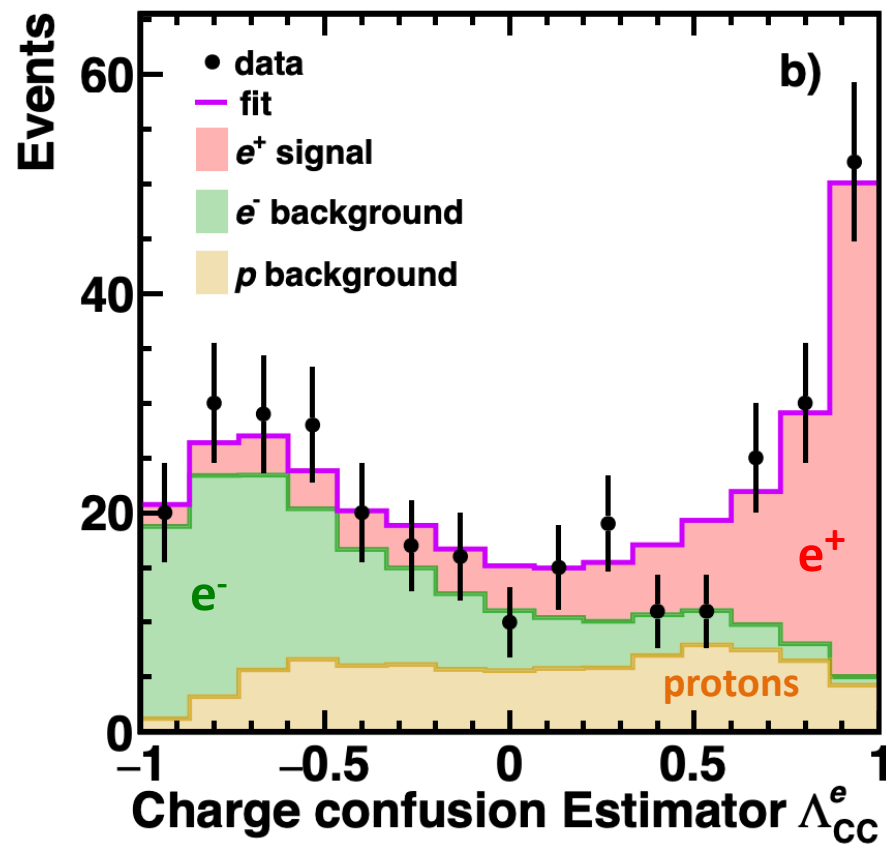
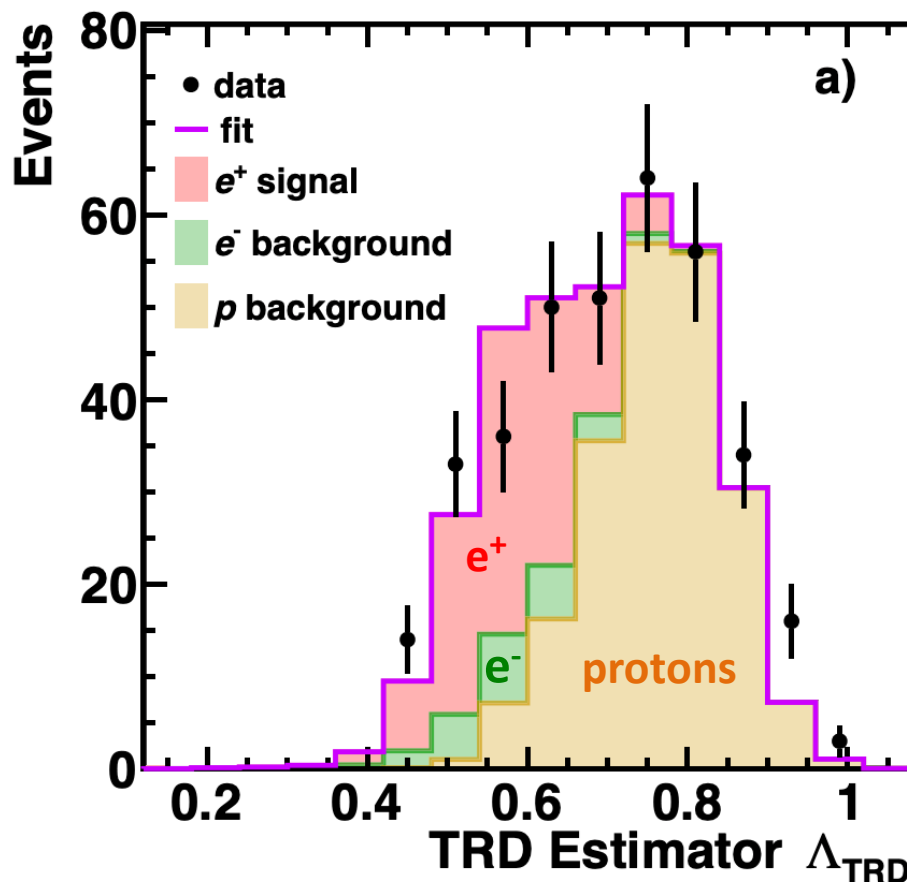


TRD and ECAL are separated by the Magnet
They have independent particle identification:
combined rejection > 1 in 10^6

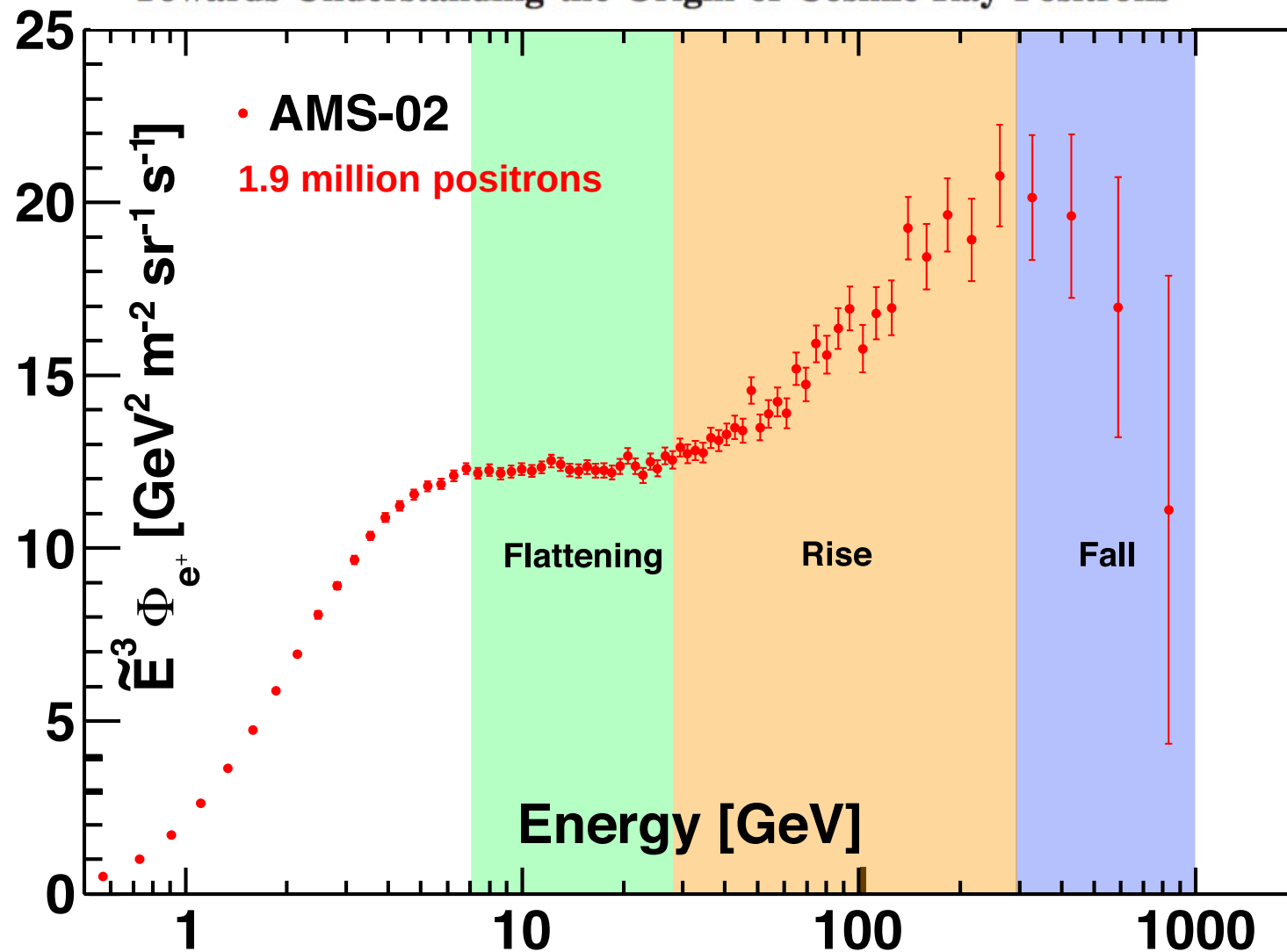
AMS正电子测量

- 用ECAL做初步筛选后, e^+ 的计数通过 $(\Lambda_{\text{TRD}} - \Lambda_{\text{CC}})$ 二维模板拟合得到
- 信号和本底的模板通过数据得到
 - 正电子信号在 Λ_{TRD} 和 Λ_{CC} 的信号区域
 - 质子本底: 通过TRD estimator Λ_{TRD} 来识别
 - 电荷误判的电子本底 measured 从数据中用 电荷误判 estimator Λ_{CC} 得到

拟合示例: 370 – 500 GeV 正电荷数据

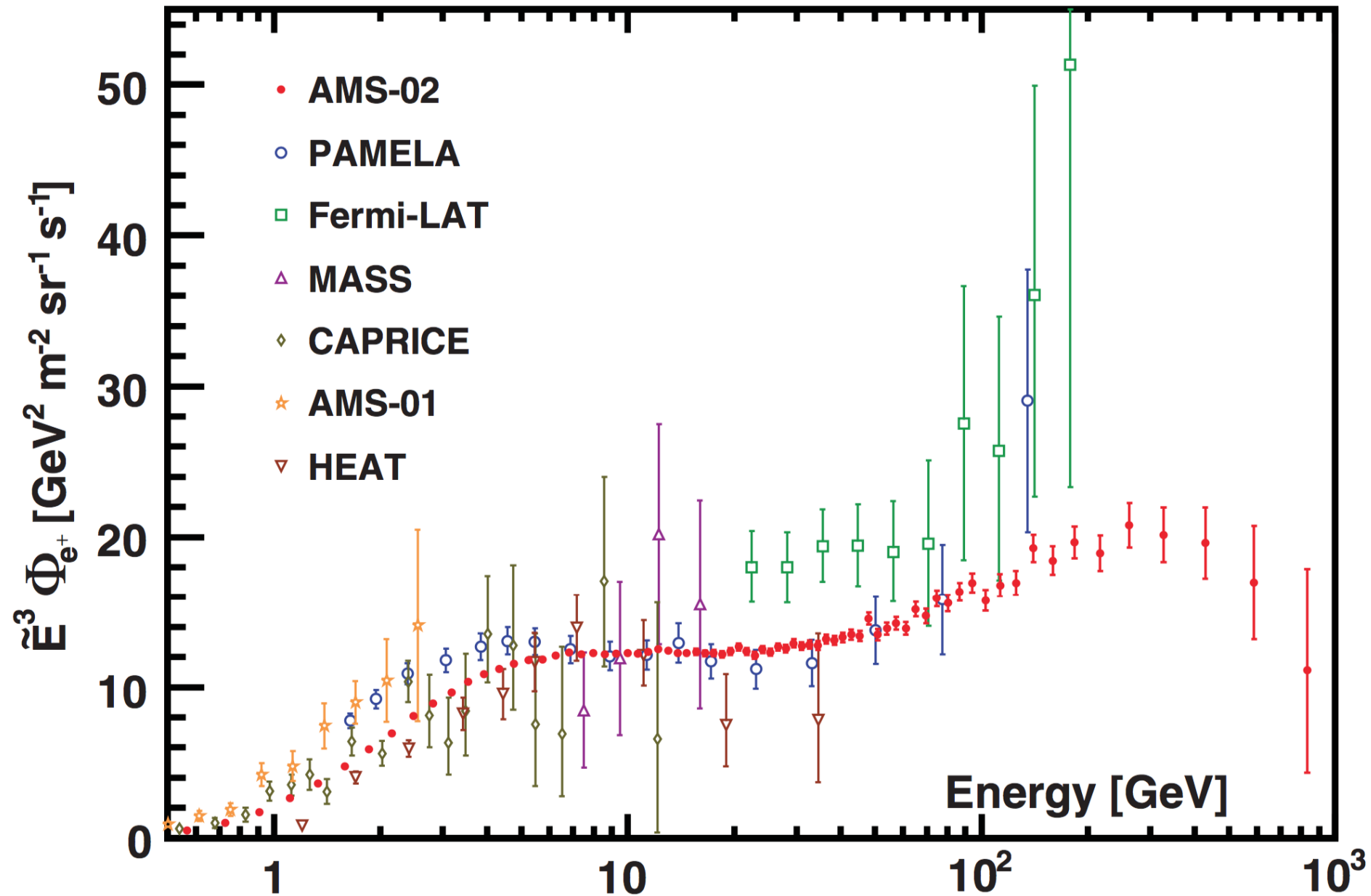


Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons

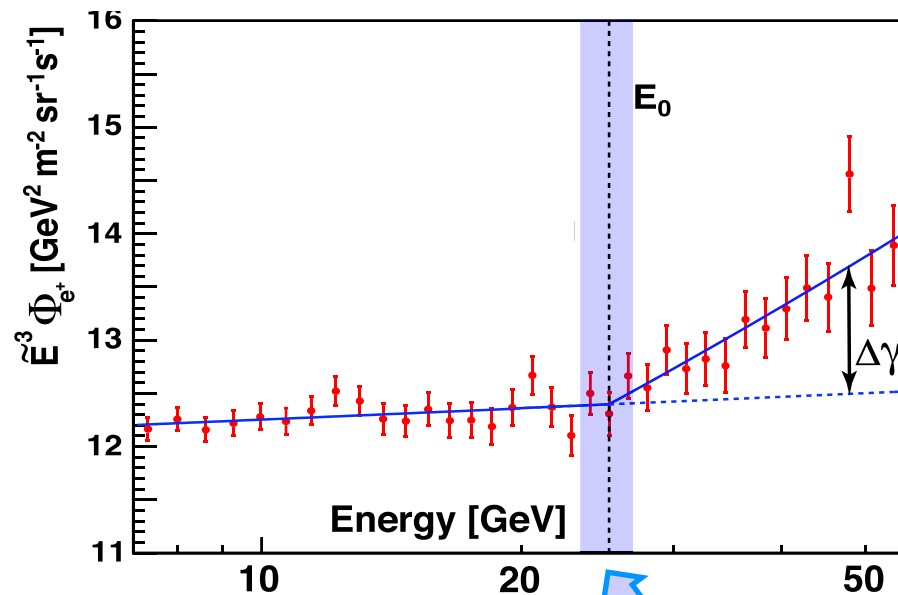


正电子能谱存在复杂的能量以来关系

AMS 正电子测量结果与以往实验的对比



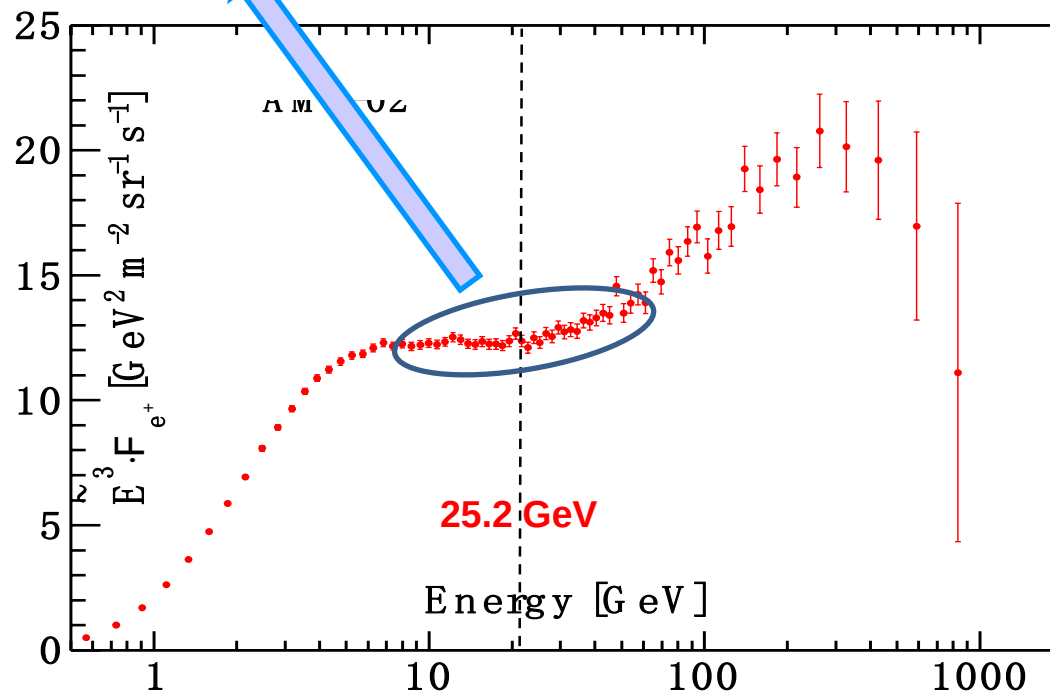
正电子能谱的独特特性



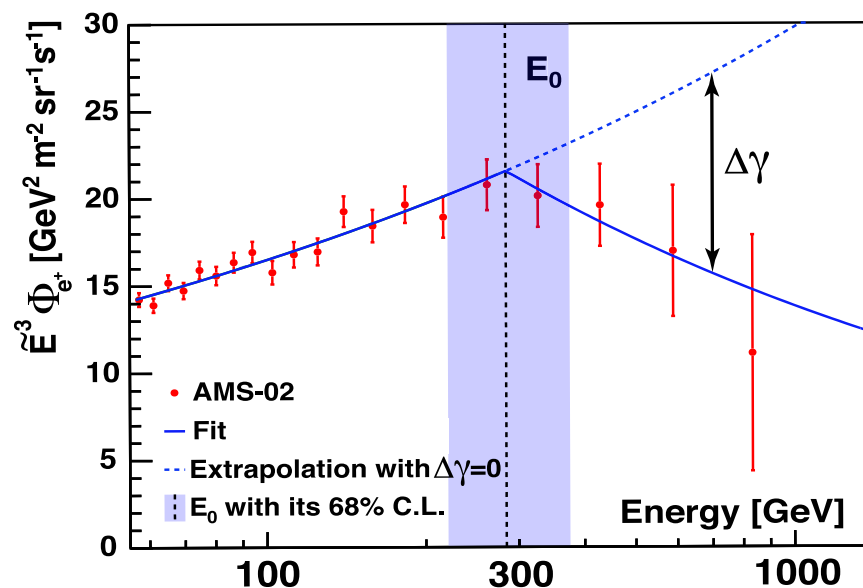
用如下公式拟合:

$$\Phi_{e^+}(E) = \begin{cases} CE^\gamma, & E \leq E_0; \\ CE^\gamma (E/E_0)^{\Delta\gamma}, & E > E_0. \end{cases}$$

从 $E_0 = 25.2 \pm 1.8$ GeV 开始
正电子能谱有显著超出
这个变化的显著性超过 6σ



正电子能谱的独特特性

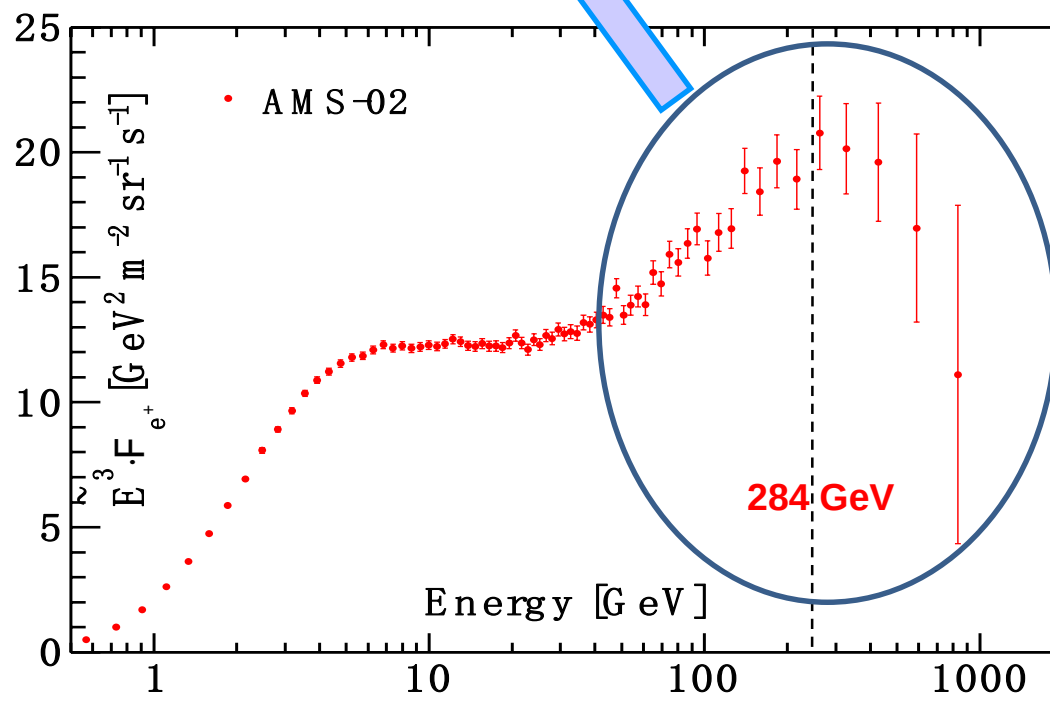


用如下公式拟合:

$$\Phi_{e^+}(E) = \begin{cases} CE^\gamma, & E \leq E_0; \\ CE^\gamma (E/E_0)^{\Delta\gamma}, & E > E_0. \end{cases}$$

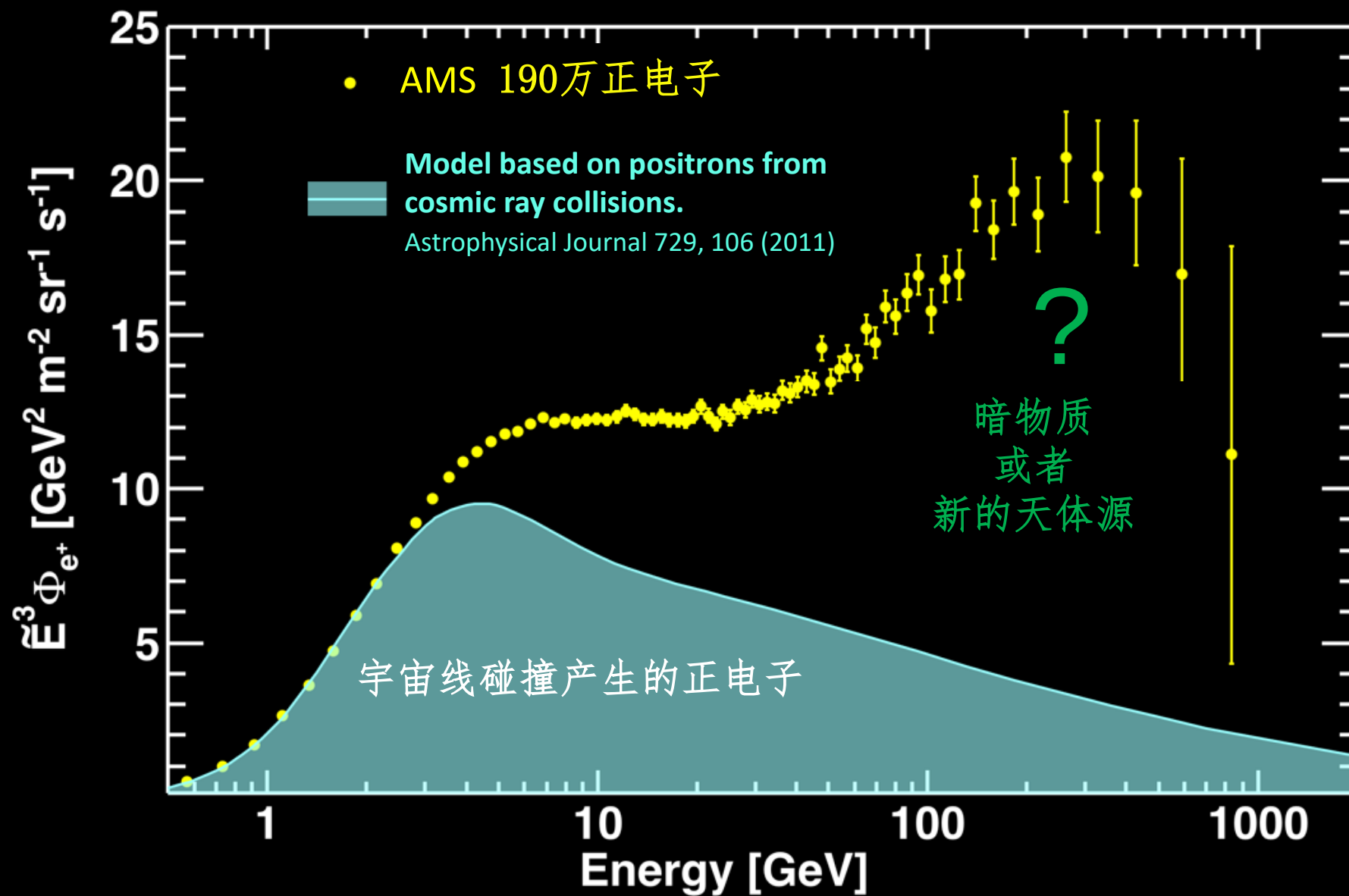
从 $E_0 = 284^{+91}_{-64}$ GeV 开始迅速下降

这个能谱拐折的显著性超过 3σ

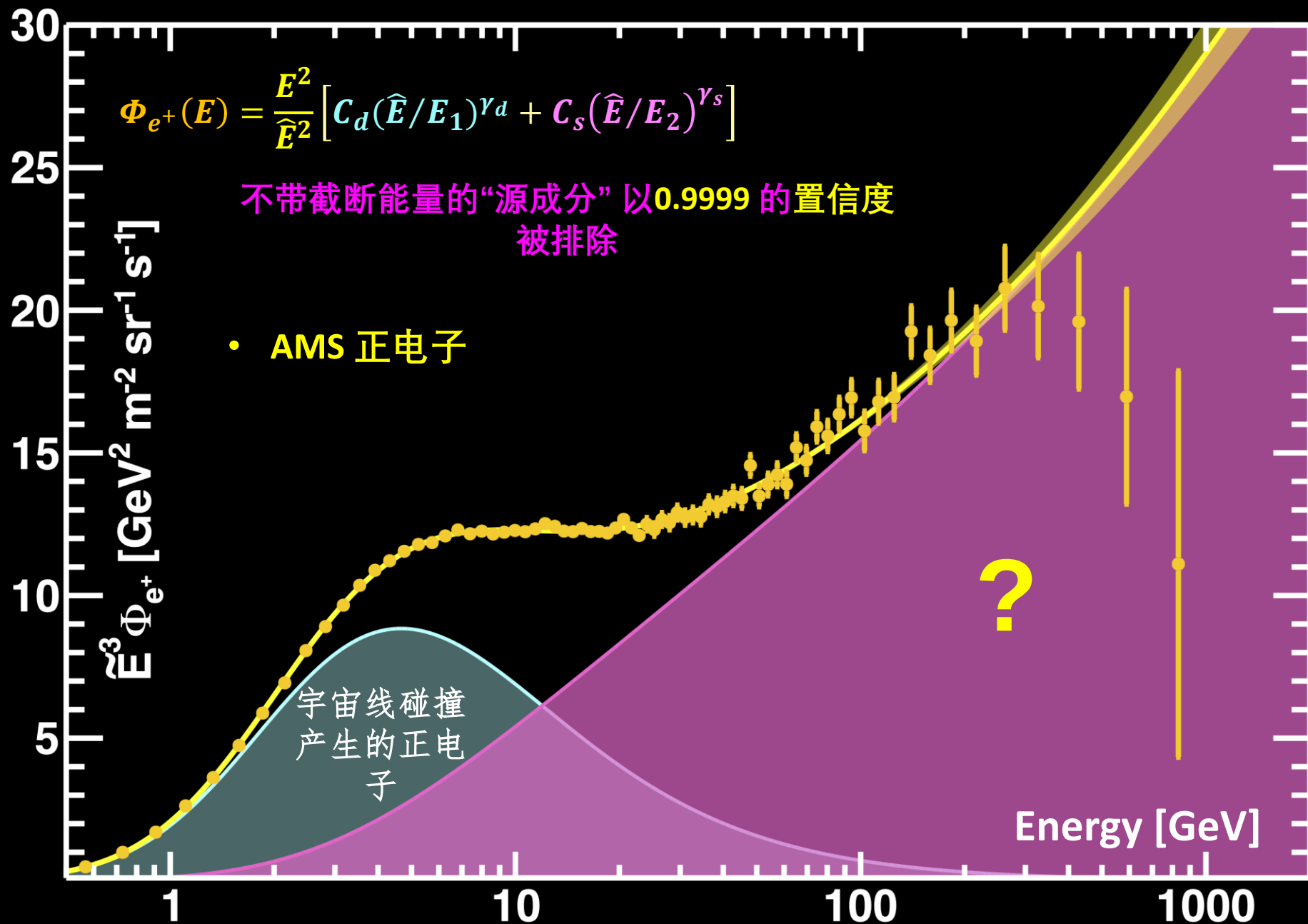


宇宙线正电子起源

独特的能谱结构不能被传统的宇宙线模型解释

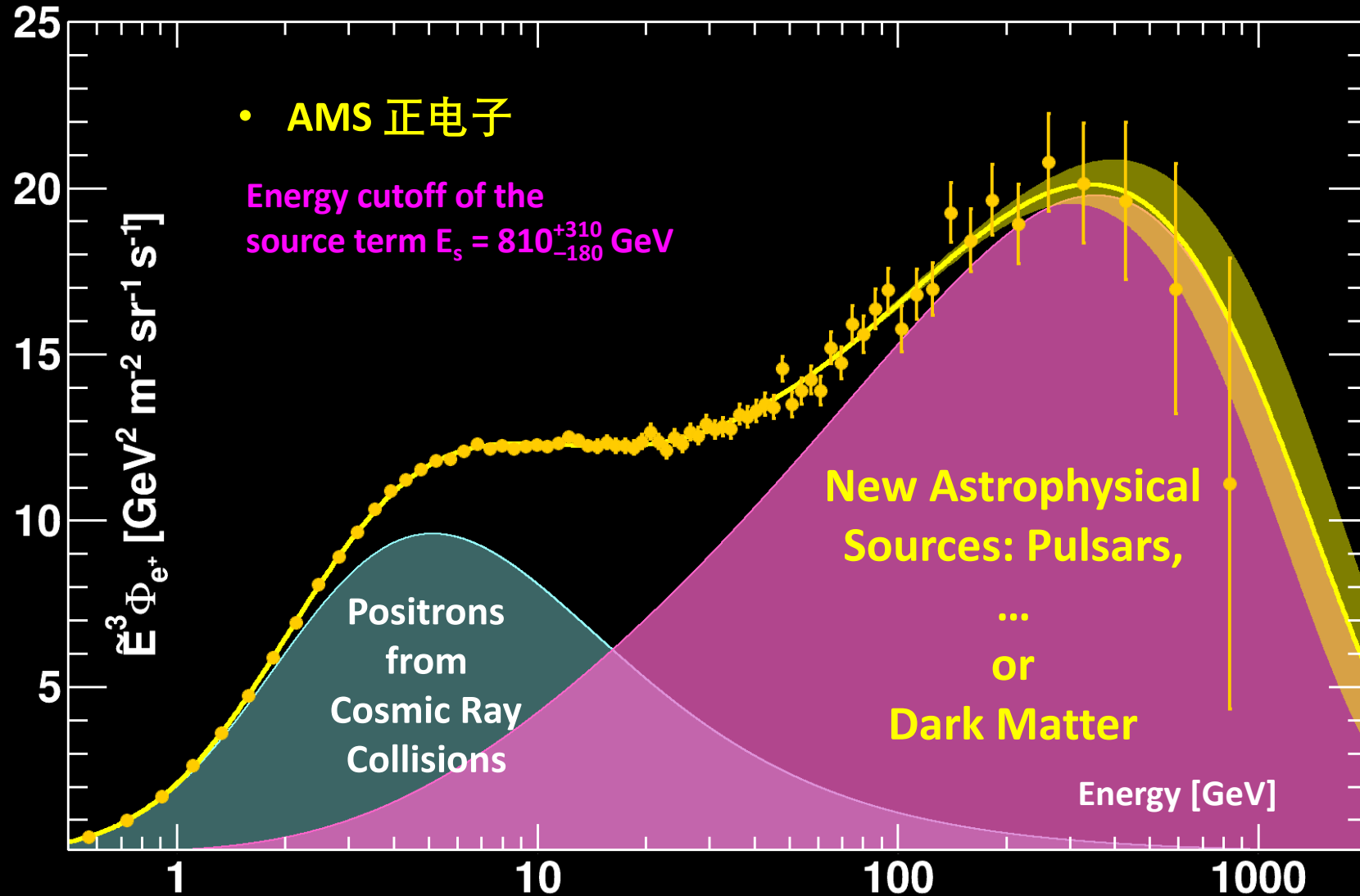


正电子能谱的能量截断



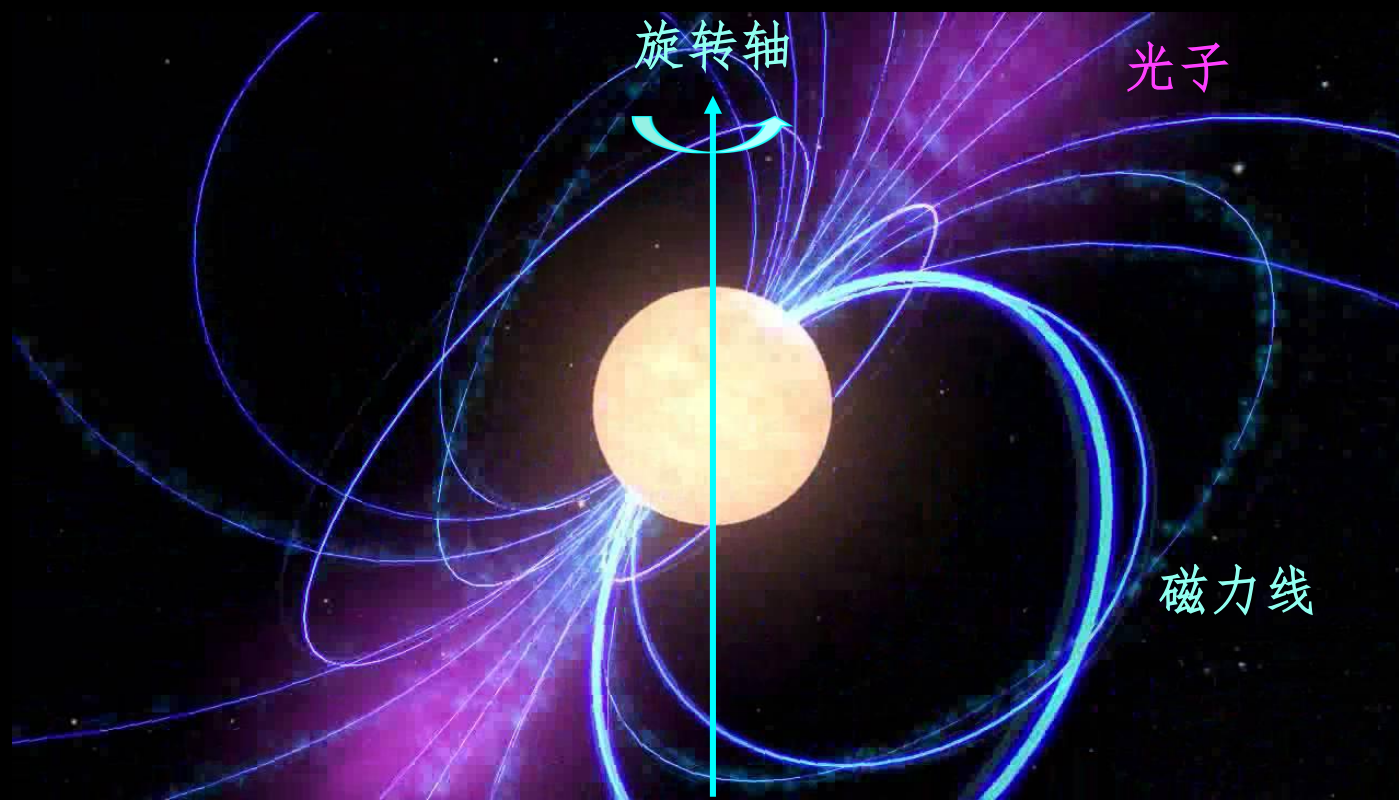
正电子流强可以描述为来自宇宙线碰撞的低能成分
和 来自于暗物质或者脉冲星的高能成分

$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[C_d (\hat{E}/E_1)^{\gamma_d} + C_s (\hat{E}/E_2)^{\gamma_s} \exp(-\hat{E}/E_s) \right]$$

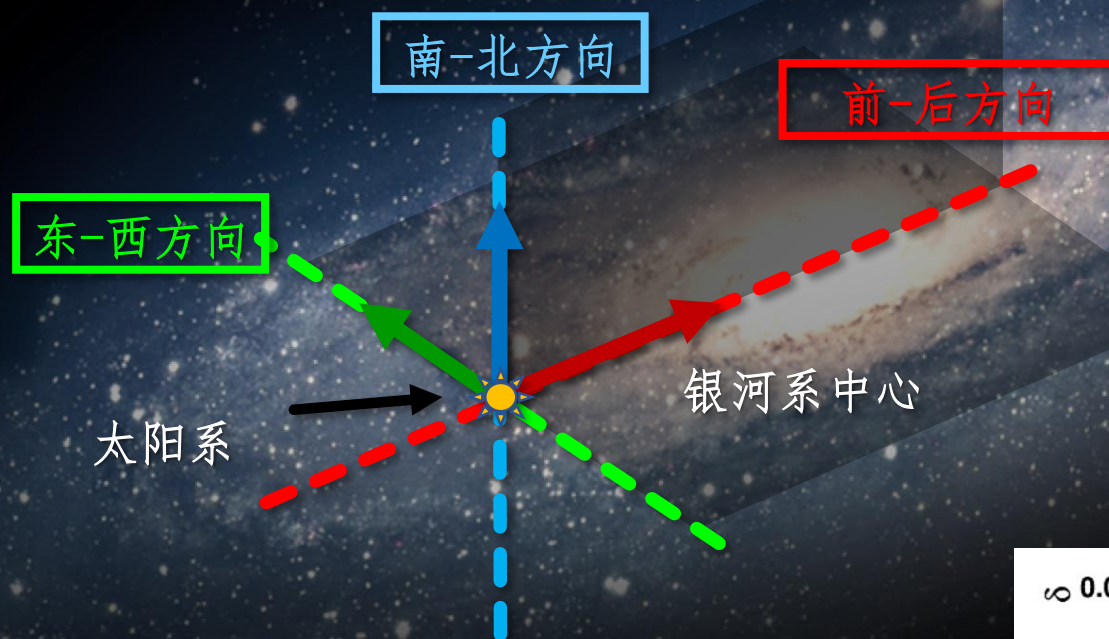


新的天体物理源：脉冲星

- 脉冲星可以产生并加速正电子到很高能量
- 来自于脉冲星的高能正电子会有各向异性
- 脉冲星不会产生反质子



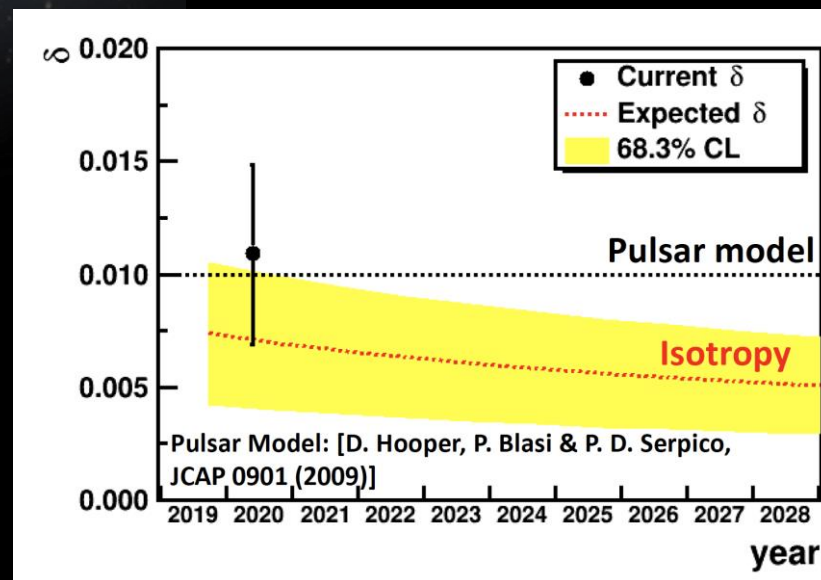
正电子各向异性的分析



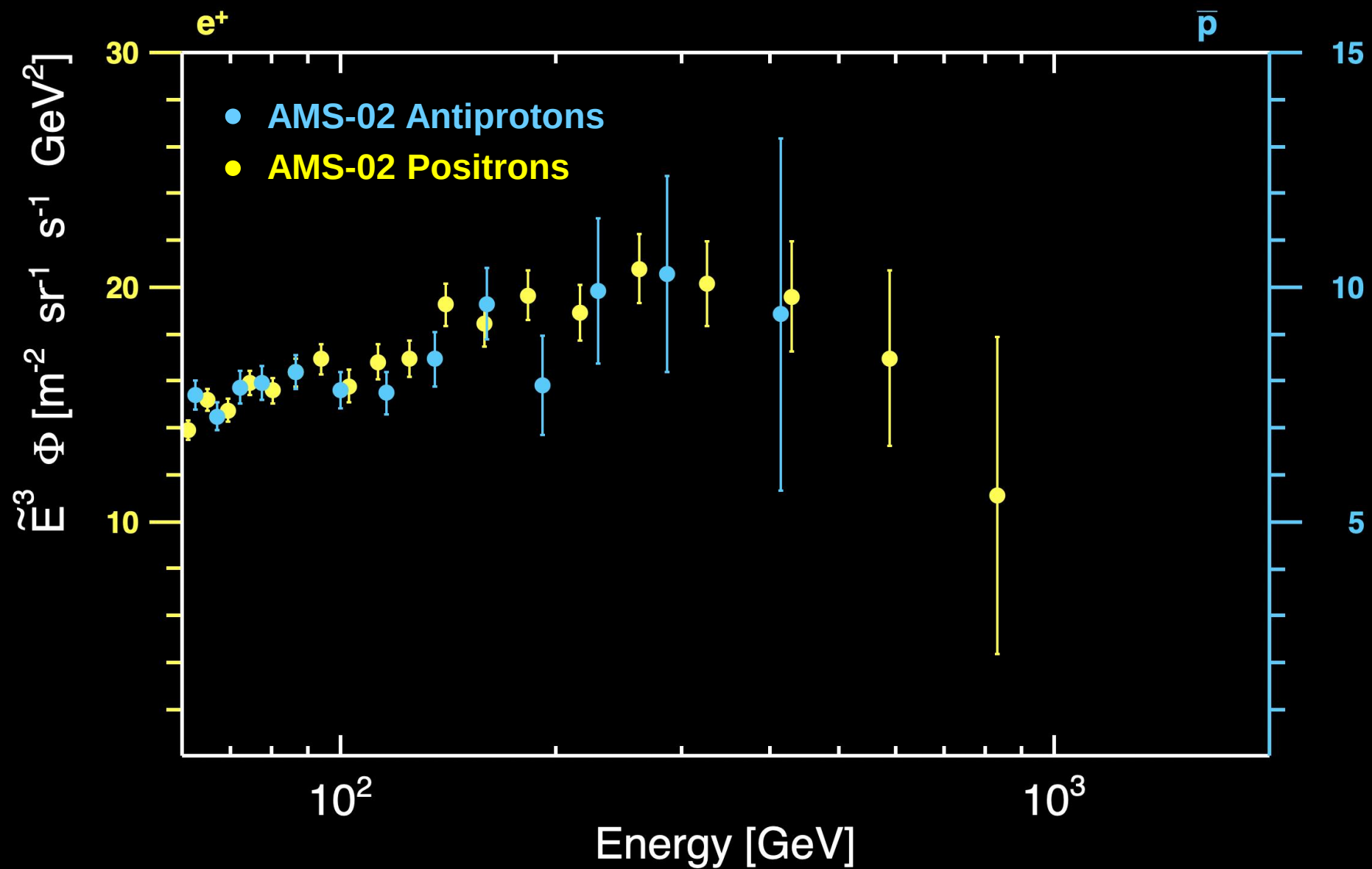
在银河系坐标
下测量宇宙线流强的入
射方向

结果符合各向同性

$16 < E < 500 \text{ GeV}$
的 e^+ 的dipole各向异性在95%
的置信度下 $\delta < 1.65\%$



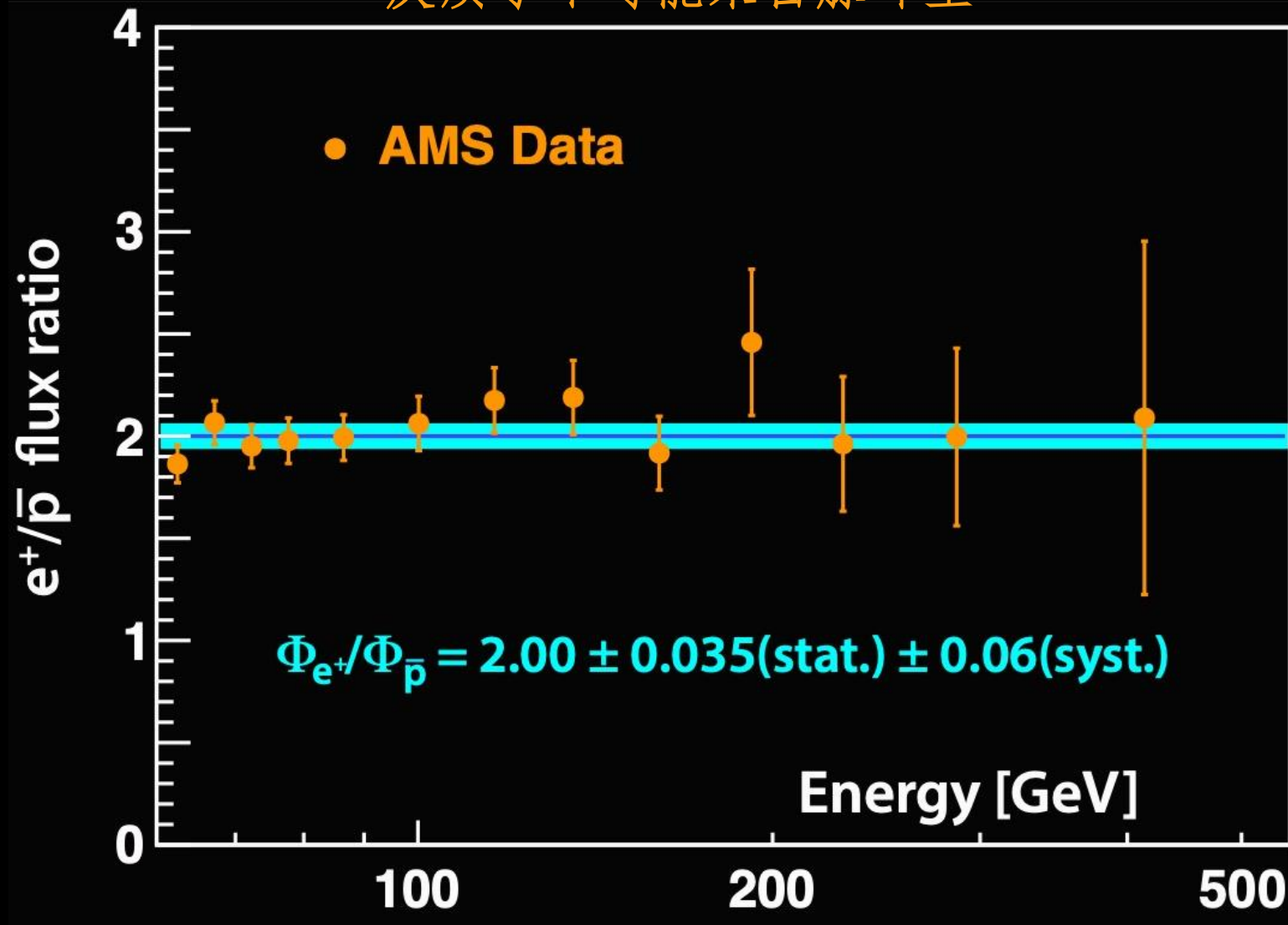
正电子和反质子 能谱有几乎一致的随能量变化趋势



正电子反质子比率

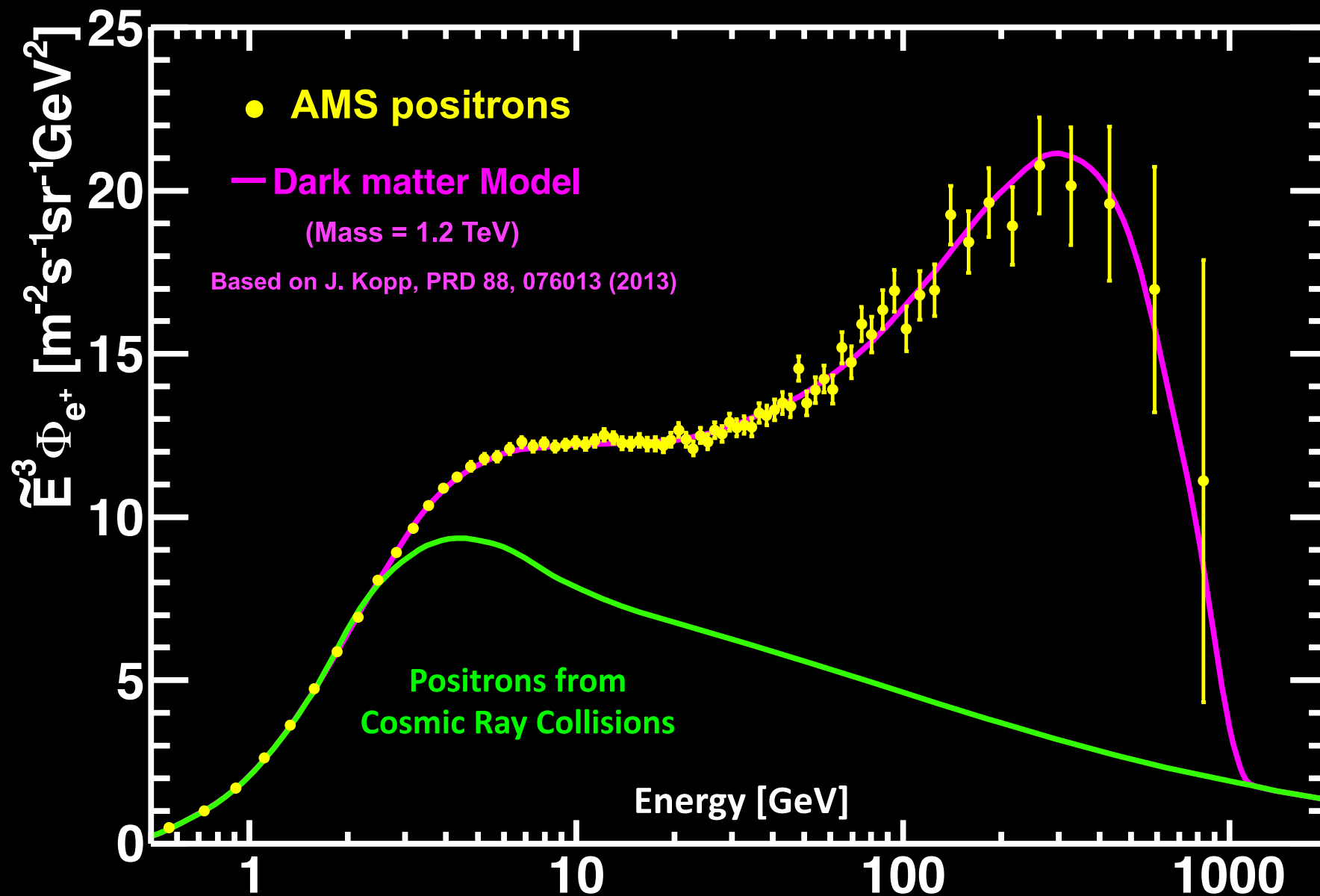
正电子和反质子比率 不随能量变化

反质子不可能来自脉冲星

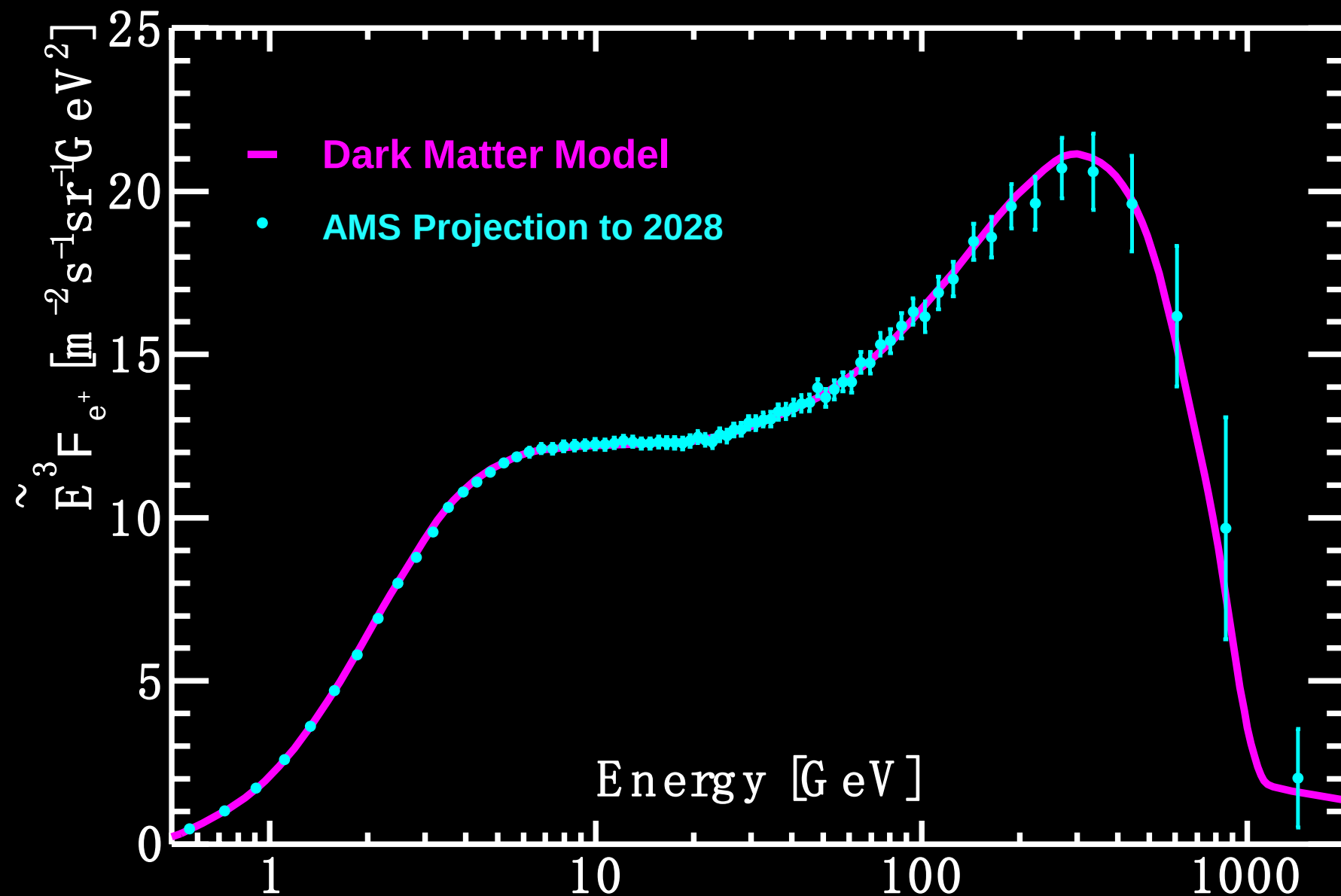


高能正电子来源

粒子物理来源: 暗物质



到2028年的宇宙线正电子和暗物质模型预期



总结与展望

- AMS对宇宙线正电子的精确测量已经扩展1TeV
- 宇宙线正电子能谱显示 特别的随能量变化趋势:
 - (a) 从 25.2 ± 1.8 GeV开始显著上升
 - (b) 284 GeV开始迅速下降,
- 正电子能谱可以用来自宇宙线碰撞的低能部分和来自新的“源”的成分的和来描述, “源成分” 有810GeV的截止能量, 其显著性超过 4σ .
- 这些特性不能用传统的宇宙线模型来解释
An primary source of high energy positrons.
- 持续收集数据直到国际空间站使命结束 (不早于2028年), 我们可以显著提升高能正电子的测量精度并扩展到更高能区, 将能够确定高能正电子的来源