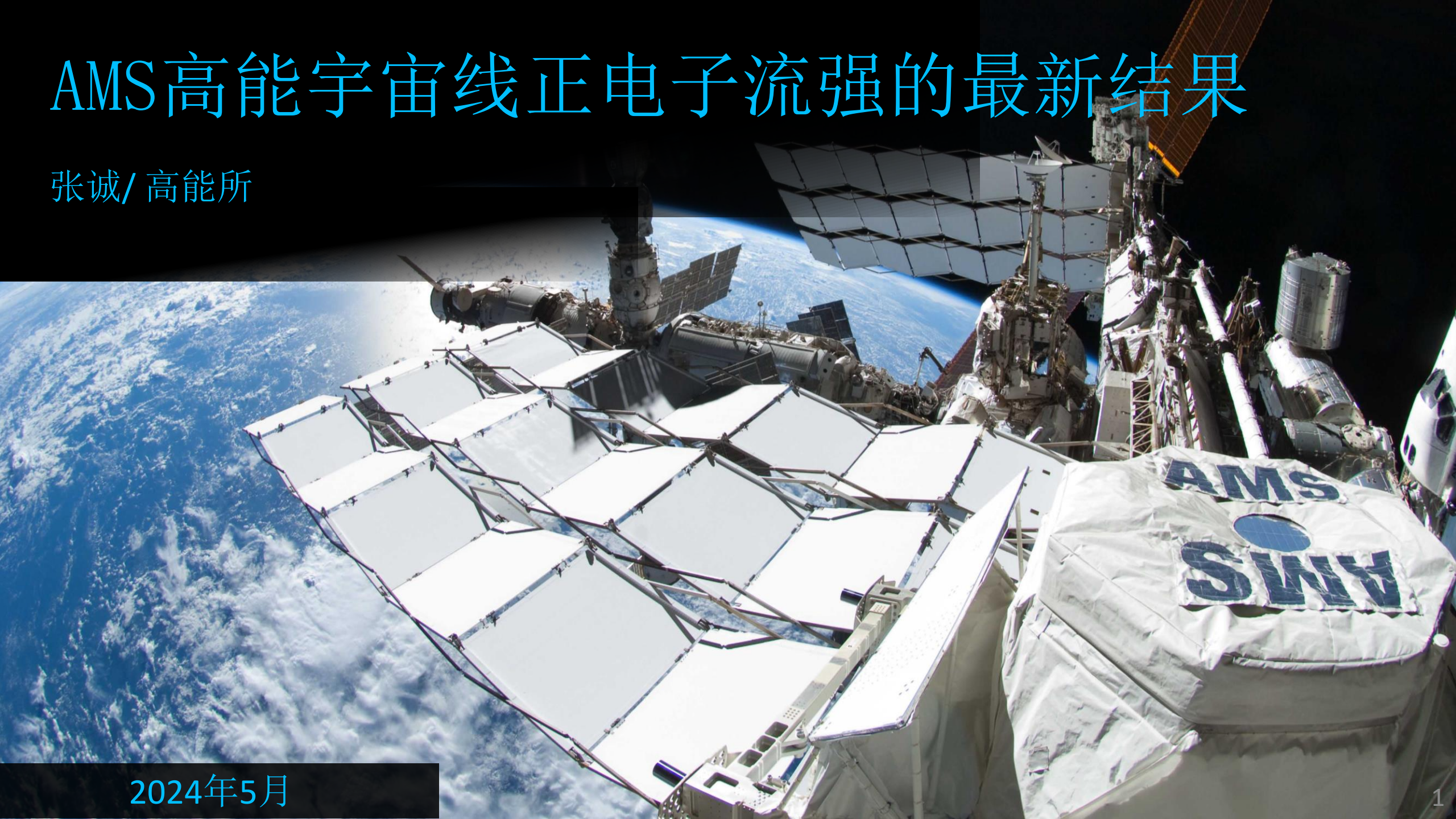


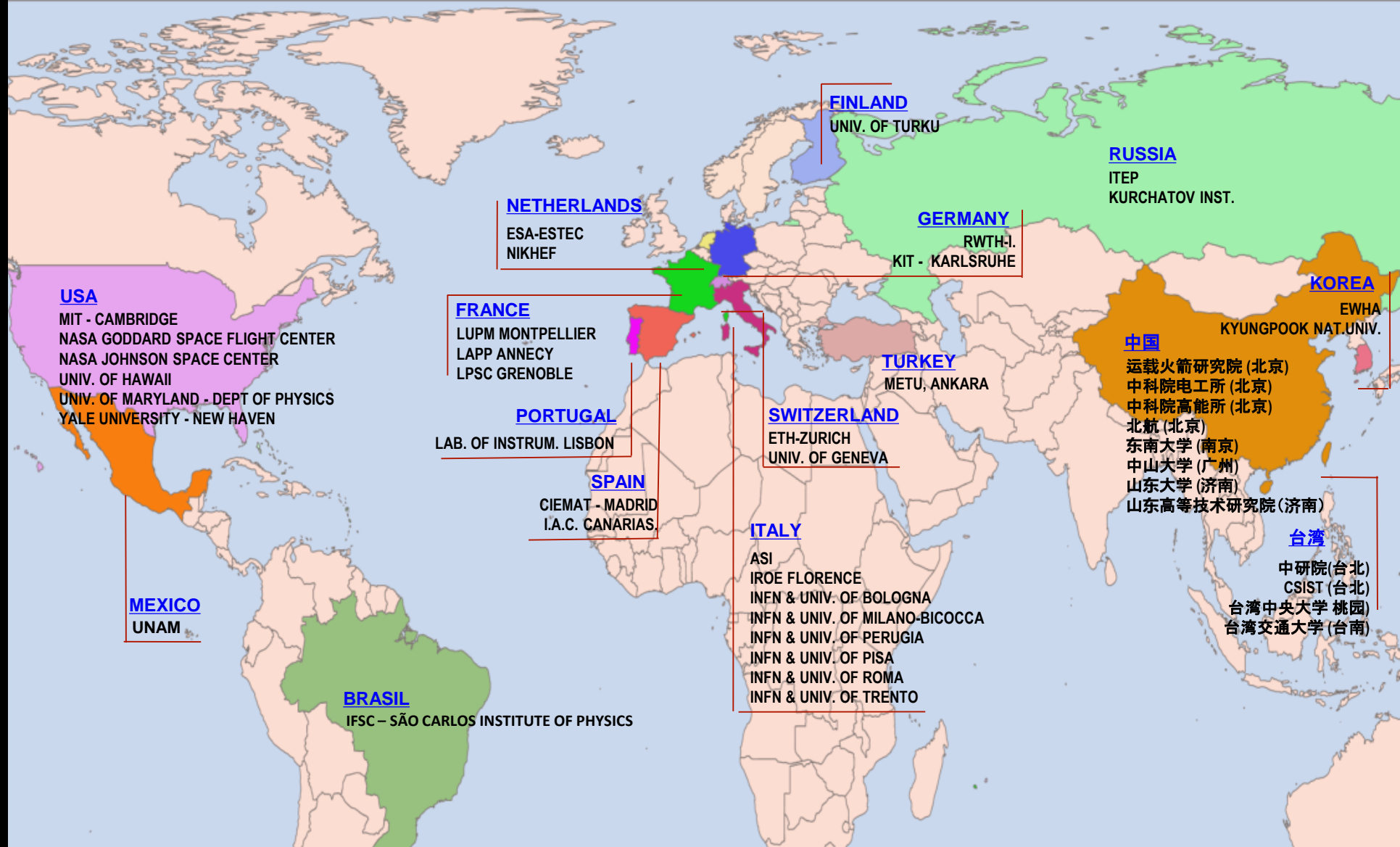
# AMS高能宇宙线正电子流强的最新结果

张诚/高能所



2024年5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

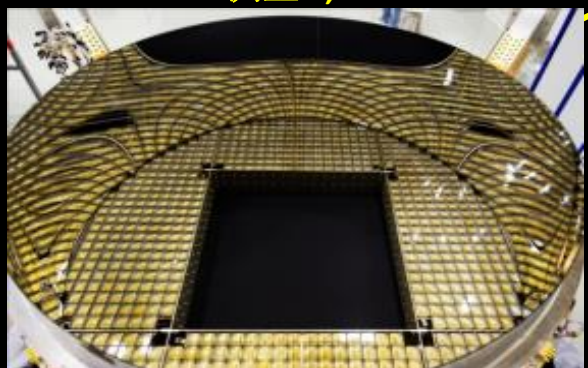
穿越辐射探测器 (TRD)  
鉴别  $e^+$ ,  $e^-$



硅微条径迹室 (Tracker)  
测量  $Z$ ,  $P$



切伦科夫探测器 (RICH)  
测量  $Z$ ,  $E$



电磁量能器 (ECAL)  
测量  $E$  of  $e^+$ ,  $e^-$



上层飞行时间计数器 测量  $Z$ ,  $E$



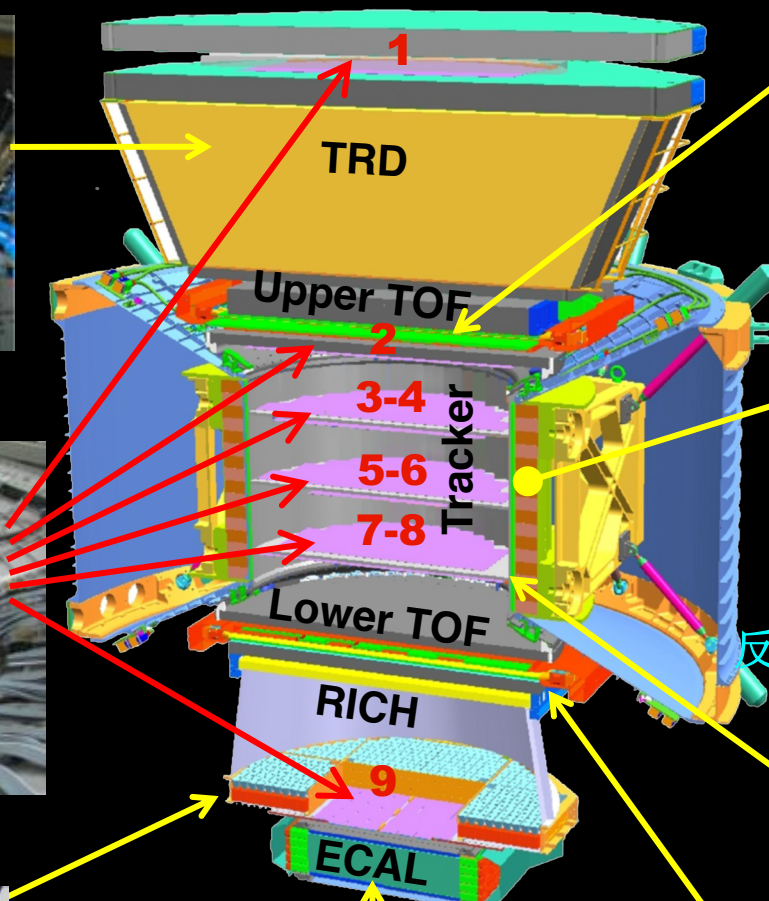
永磁体 识别  $\pm Z$ ,  $P$



反符合计数器 (ACC) 排除侧面入射粒子

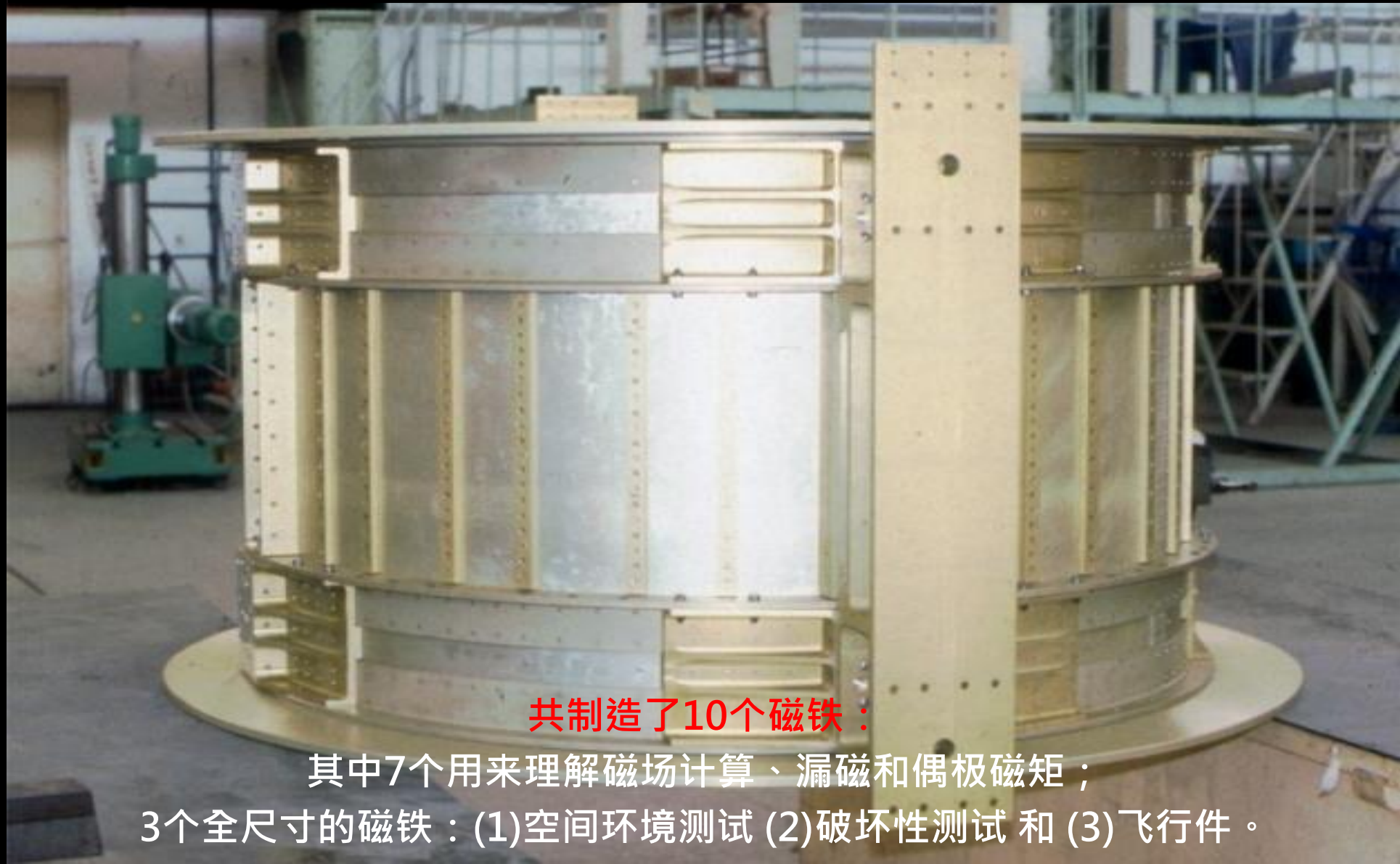


下层飞行时间计数器 测量  $Z$ ,  $E$





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：

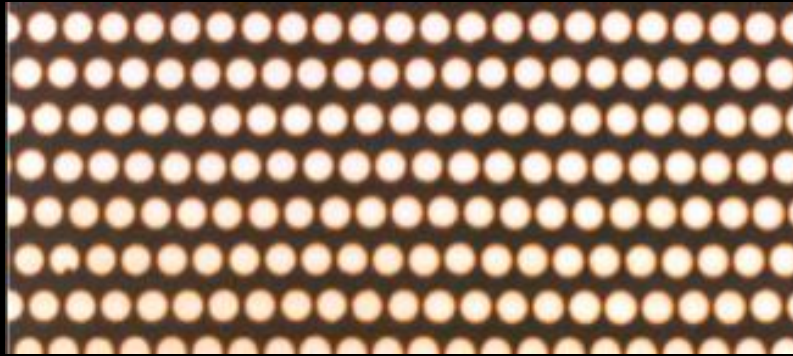
其中7个用来理解磁场计算、漏磁和偶极磁矩；

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



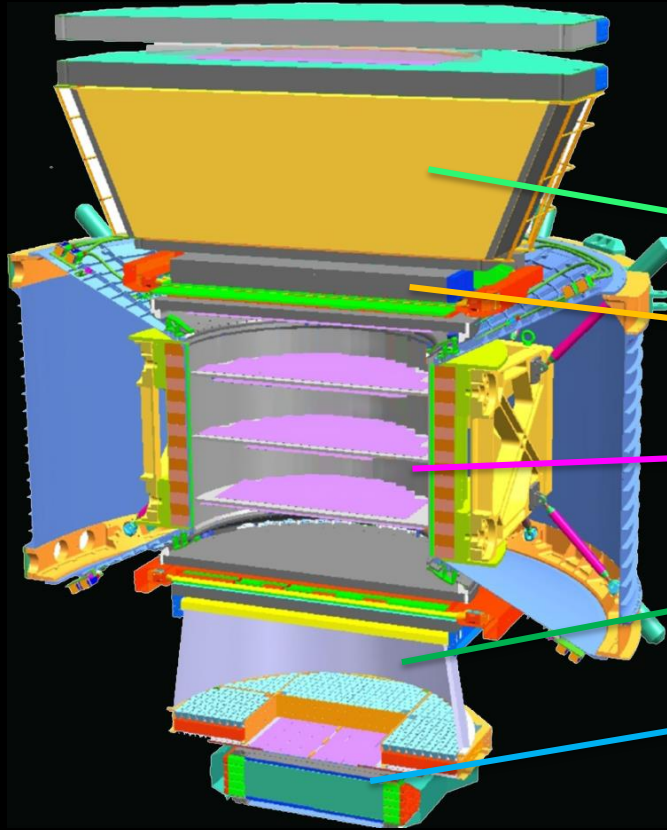
50,000根直径1毫米的光纤  
均匀分布在600公斤的铅中。



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



物质

反物质

	$e^-$	P	Fe	$e^+$	$\bar{P}$	$\bar{He}$
TRD						
TOF						
Tracker + Magnet						
RICH						
ECAL						

AMS可以从1,000,000个质子本底中挑选出1个正电子信号；

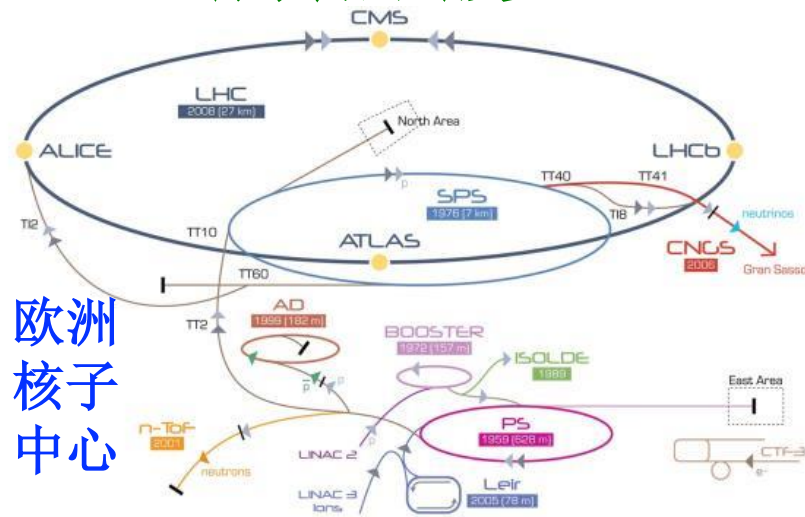
能够清晰地区分电子和正电子直到TeV；

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



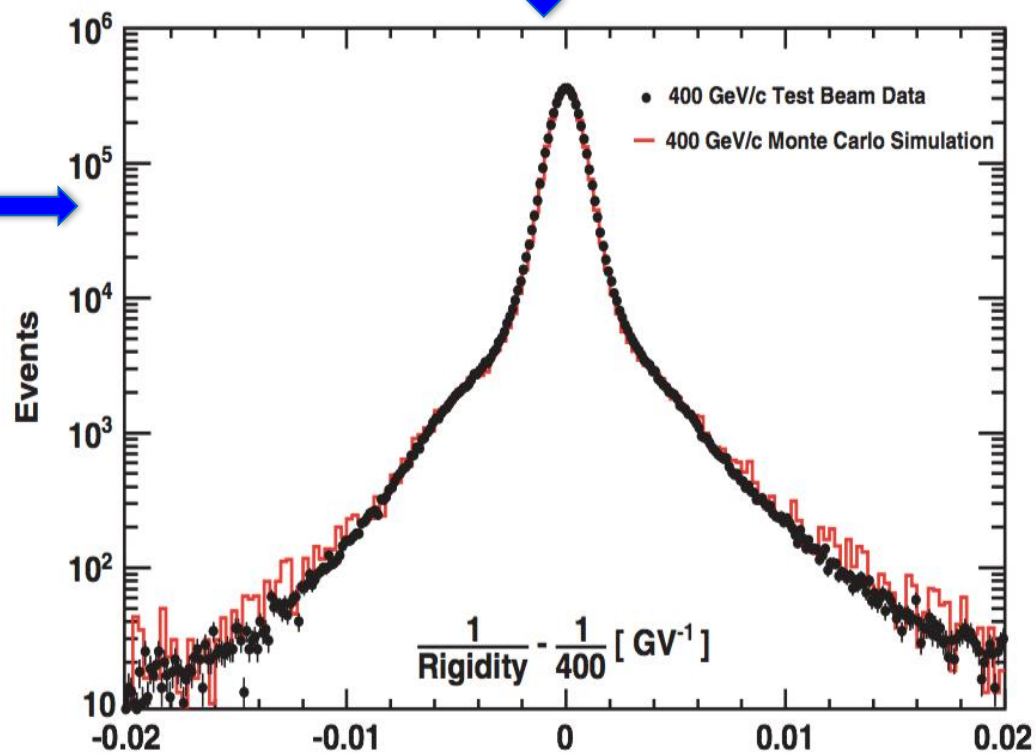
欧洲核子中心



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

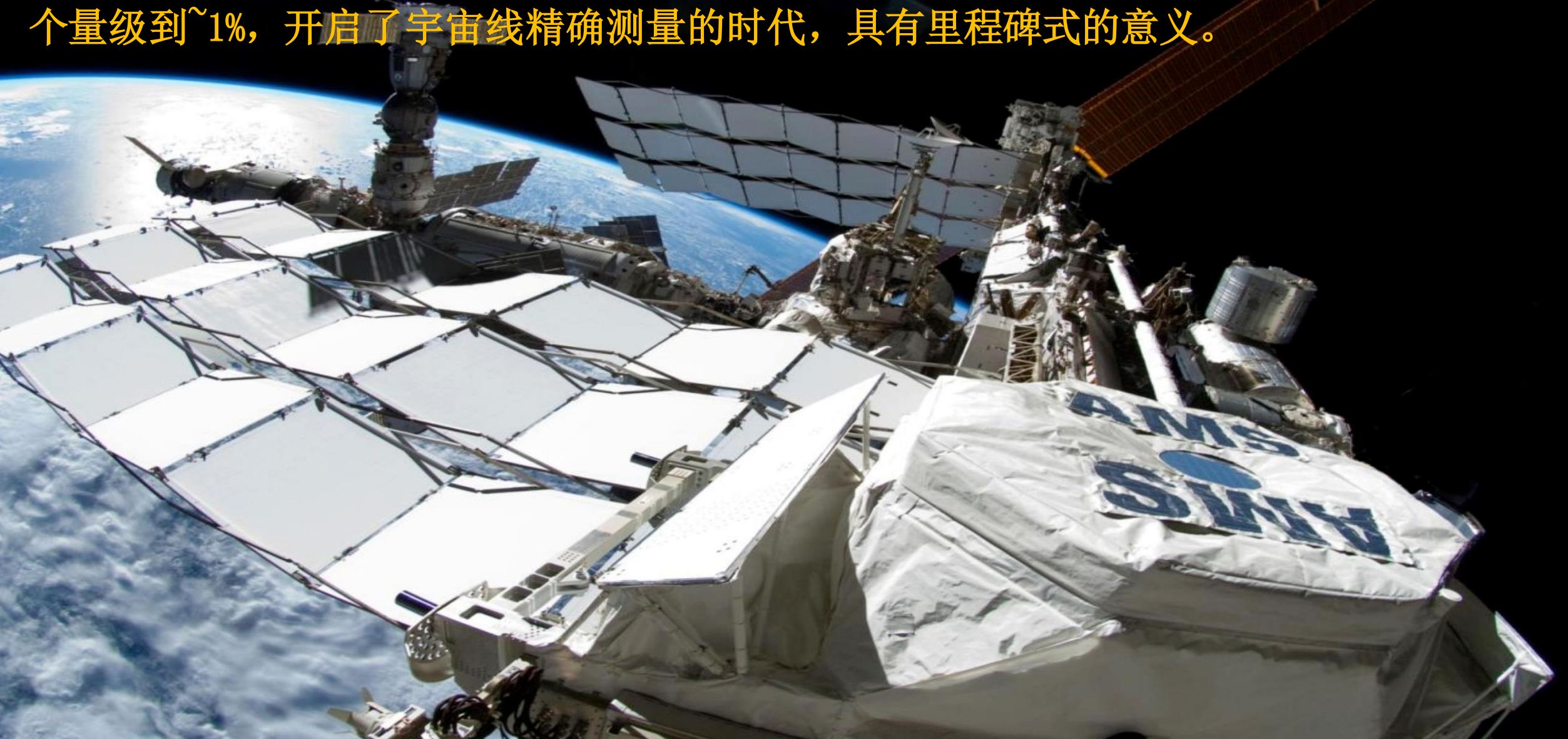


模拟数据 与 束流测试数据  
符合程度达到~5个数量级



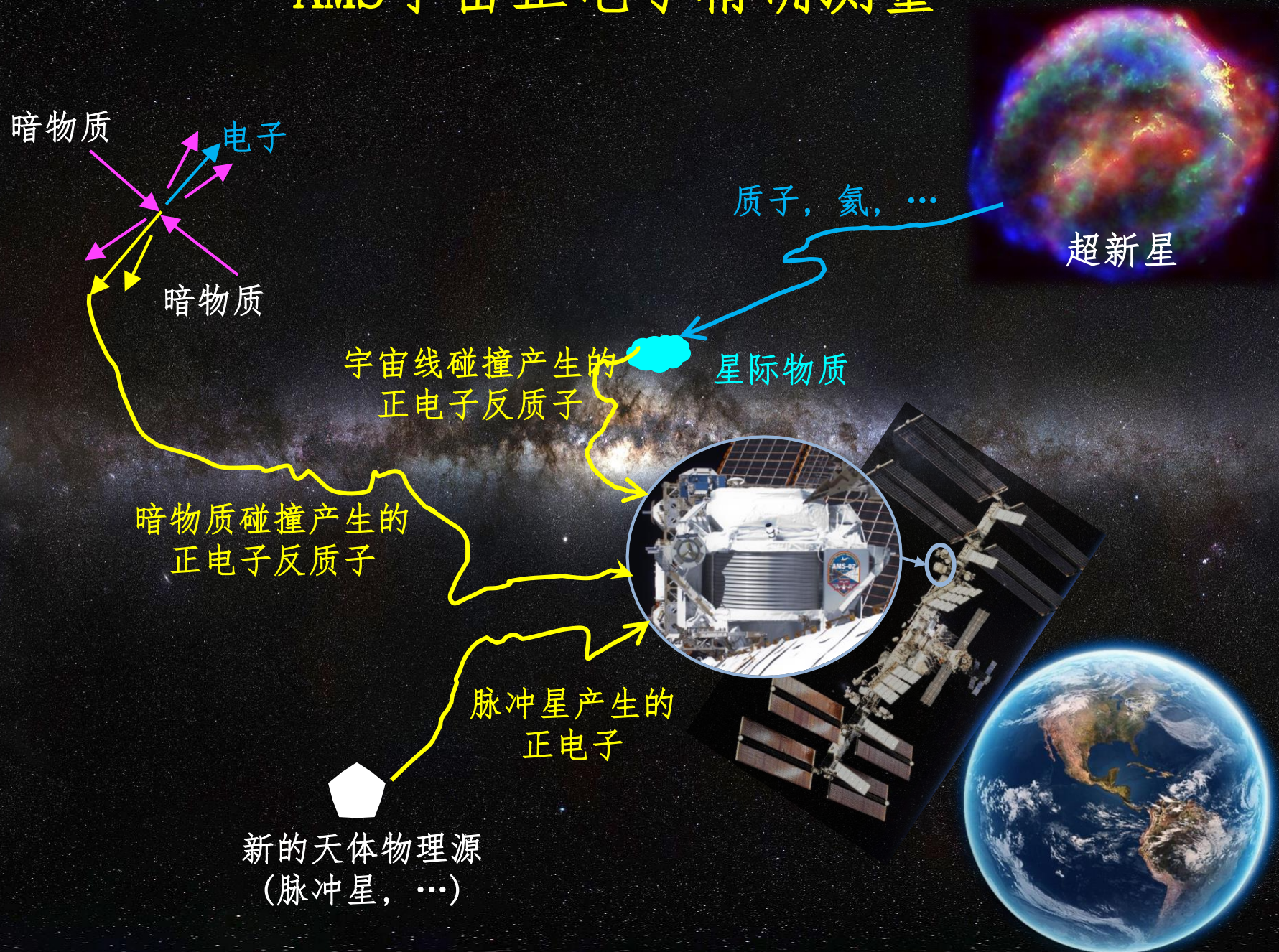
AMS在国际空间站已经持续运行接近13年，在GeV到TeV能区收集了超过2300亿的宇宙线事例，远超以往所有实验收集的宇宙线事例总和，并将持续到至少2030年。

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。



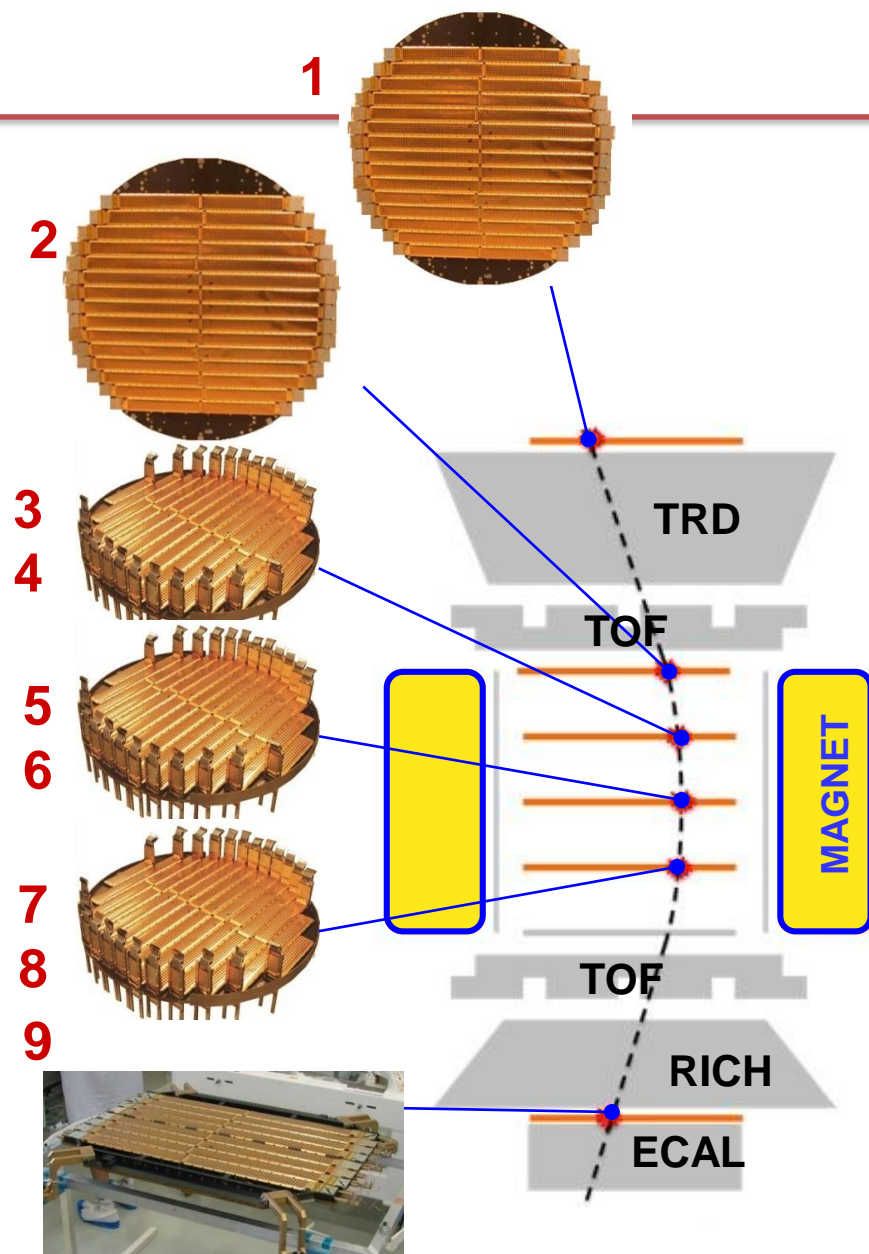


# AMS宇宙正电子精确测量

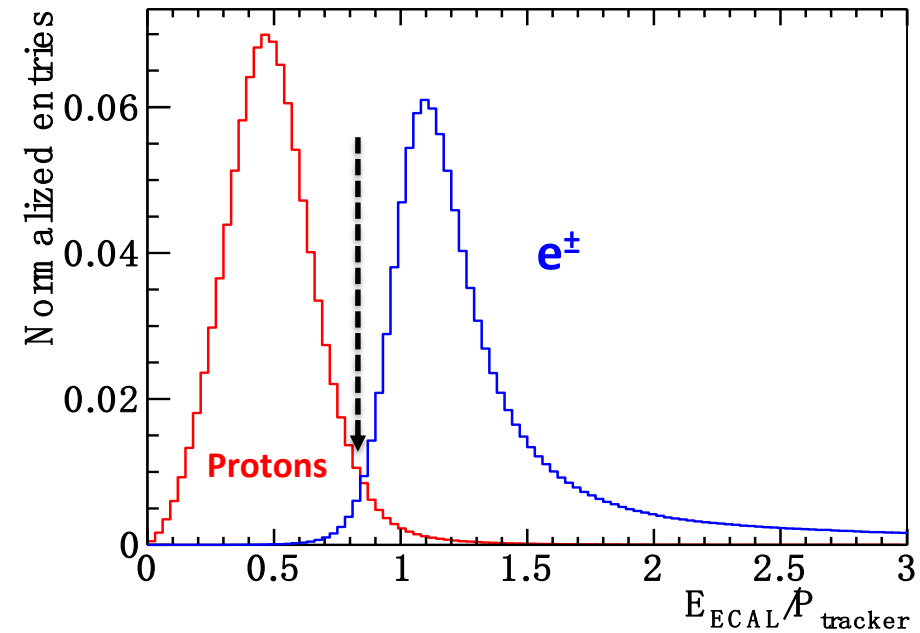




# 能量和刚度的测量



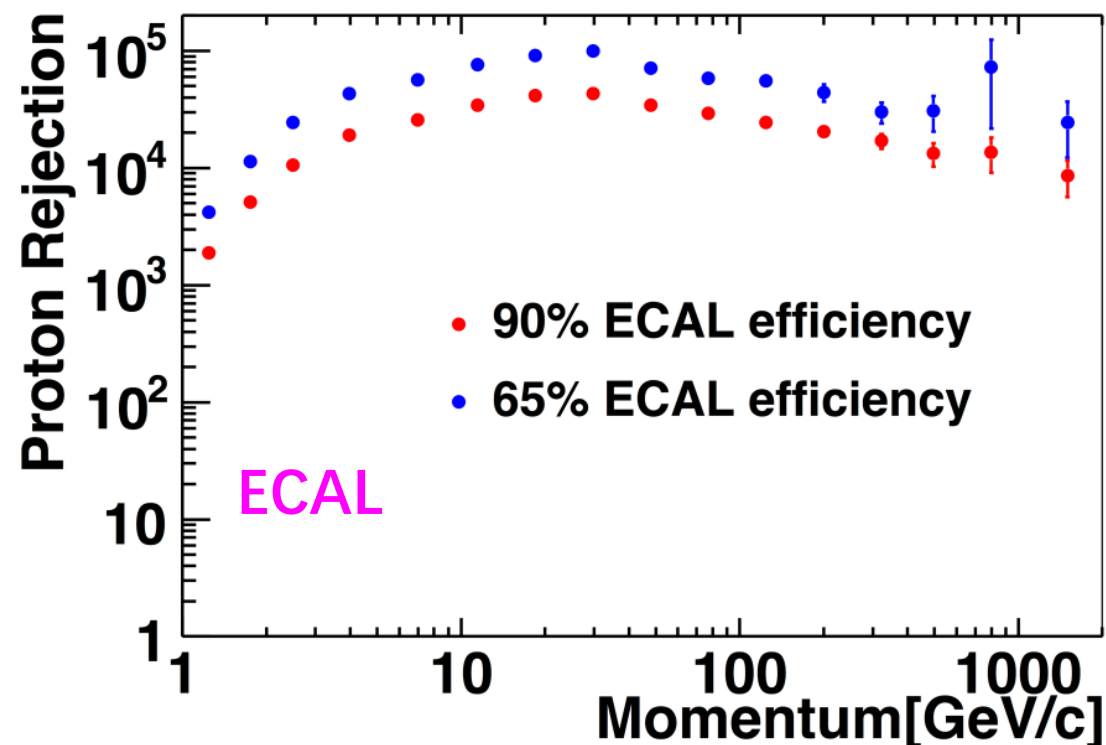
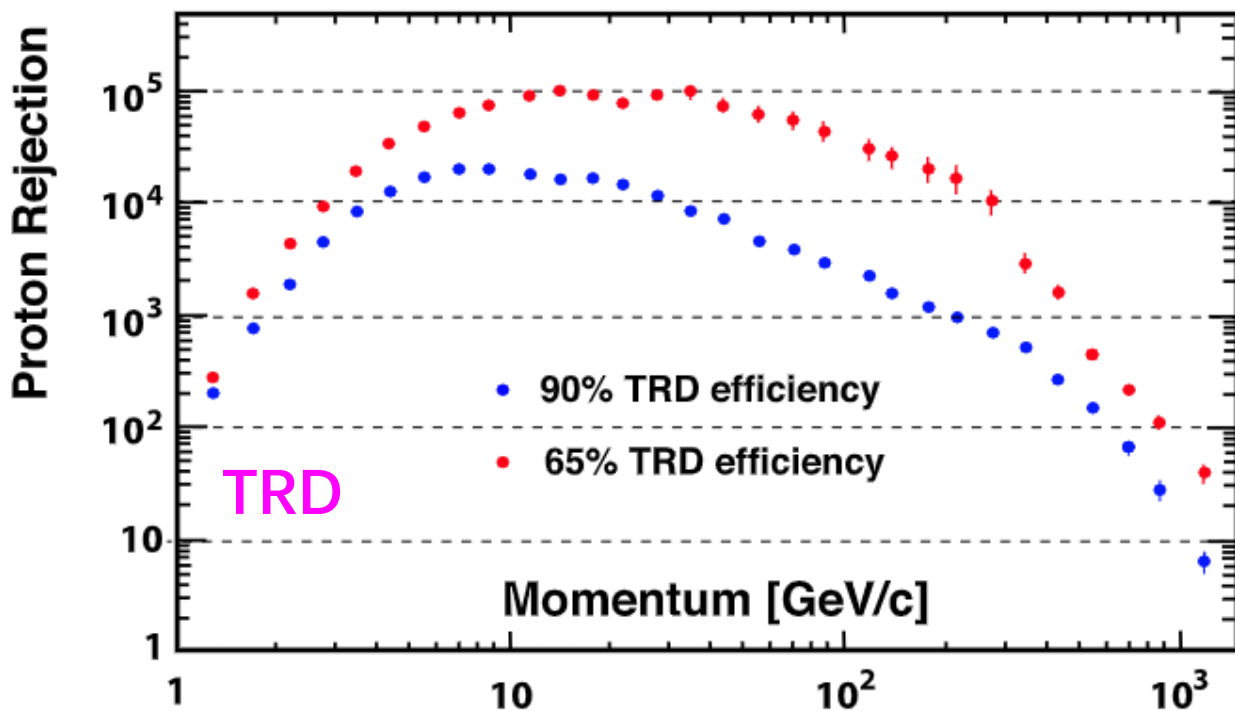
L1 to L9: 3m level arm;  
单点位置分辨率10微米;



- 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, 可以提供独特的粒子识别能力

# 质子鉴别

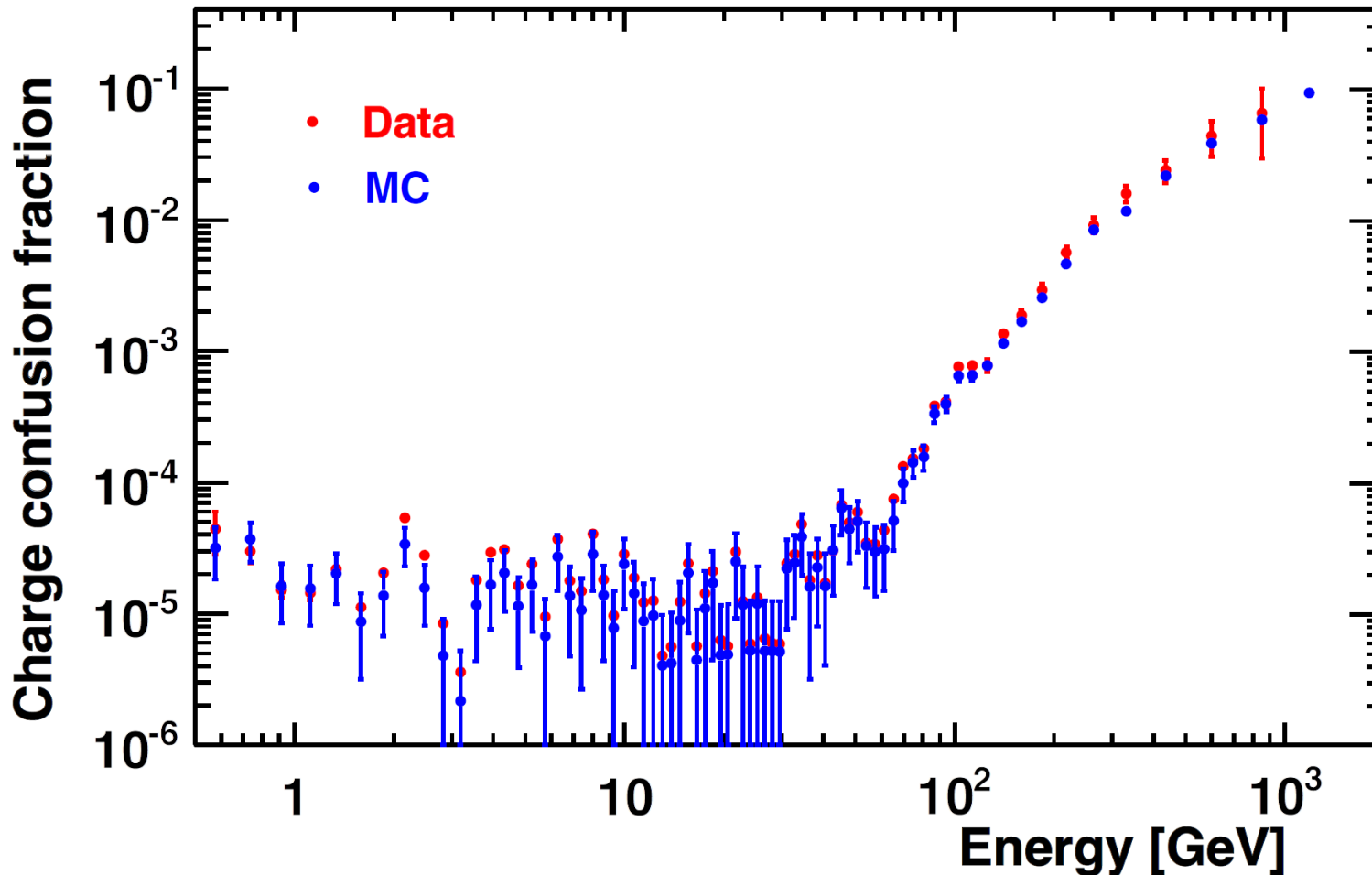
- ECAL和TRD分别提供了独立的电子/质子鉴别。
- 总的质子鉴别能力达到 $10^6$ （90%信号效率）



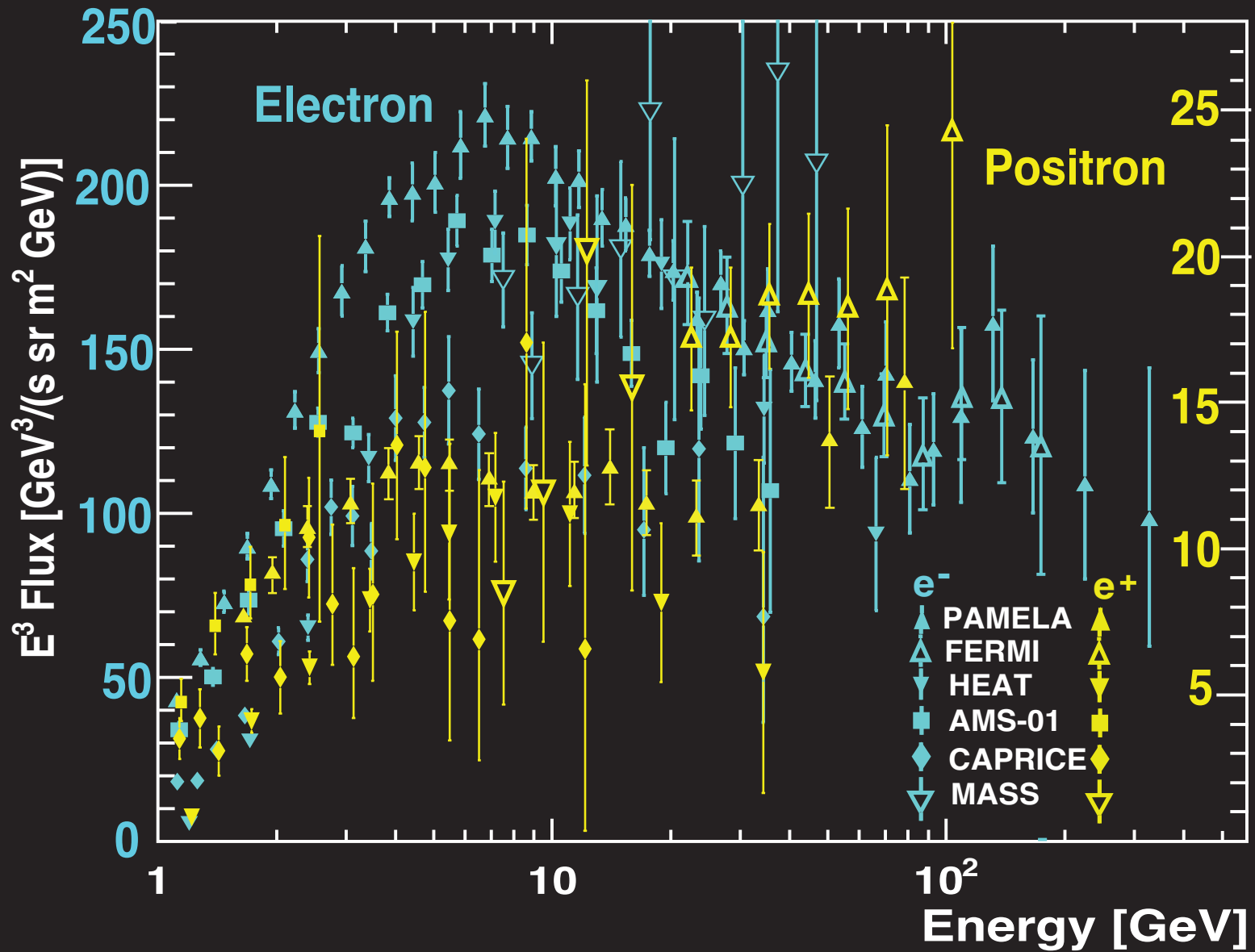


# 电荷误判鉴别

电荷误判鉴别变量综合了多个子探测器的信息（tracker, TOF, ECAL），在全能区内都有着良好的鉴别效率。

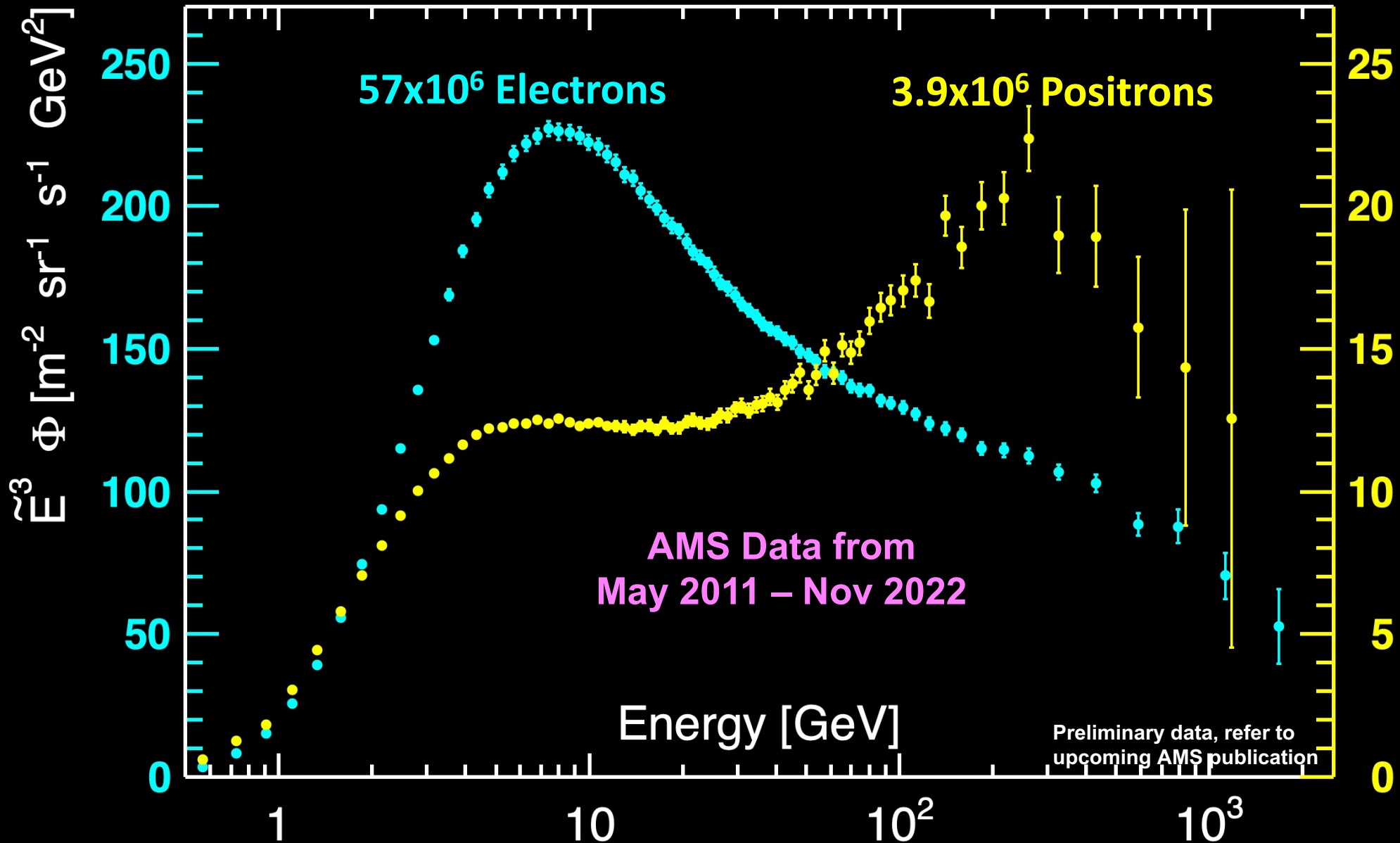


# AMS之前的电子和正电子测量

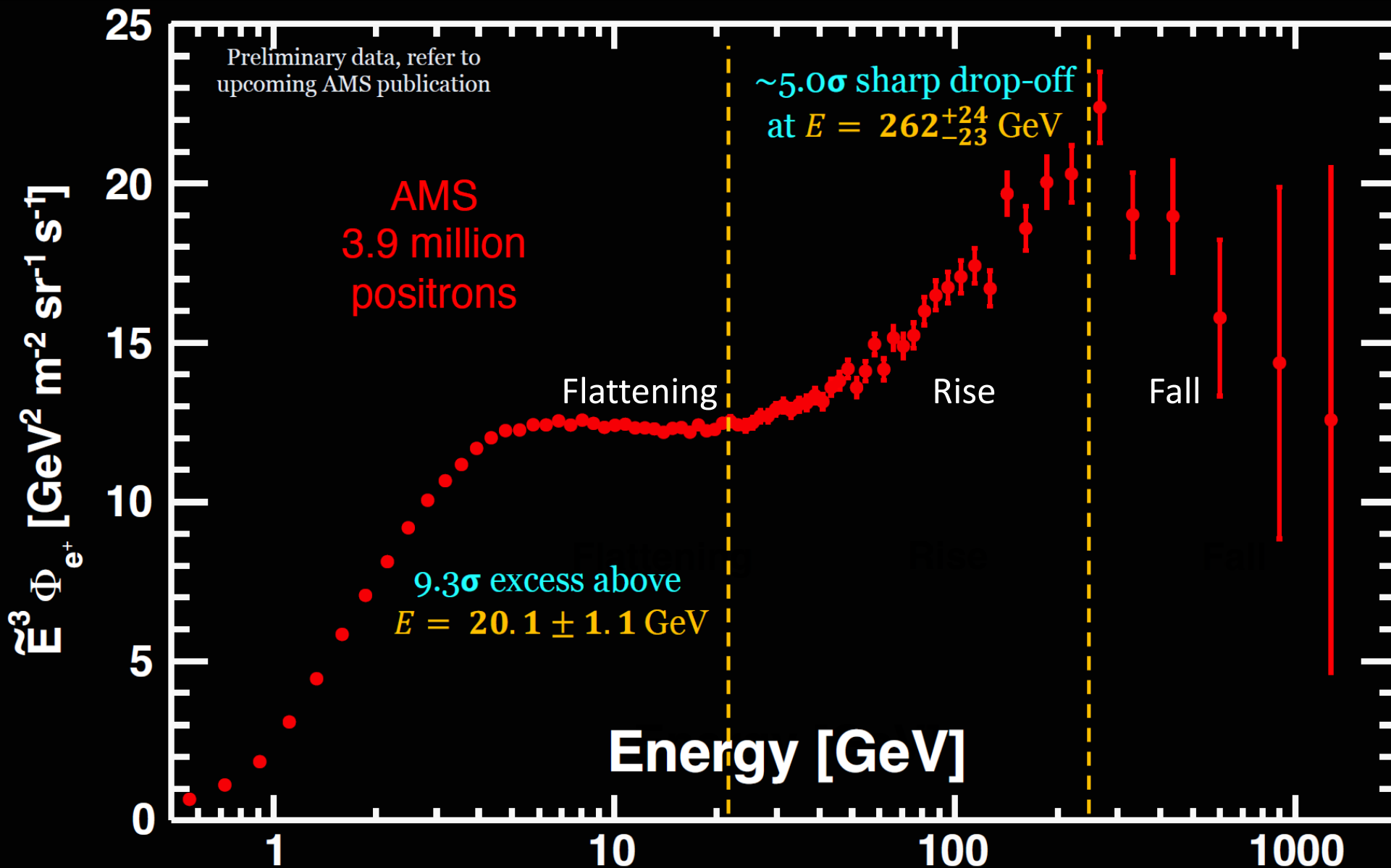




# AMS电子和正电子最新测量结果



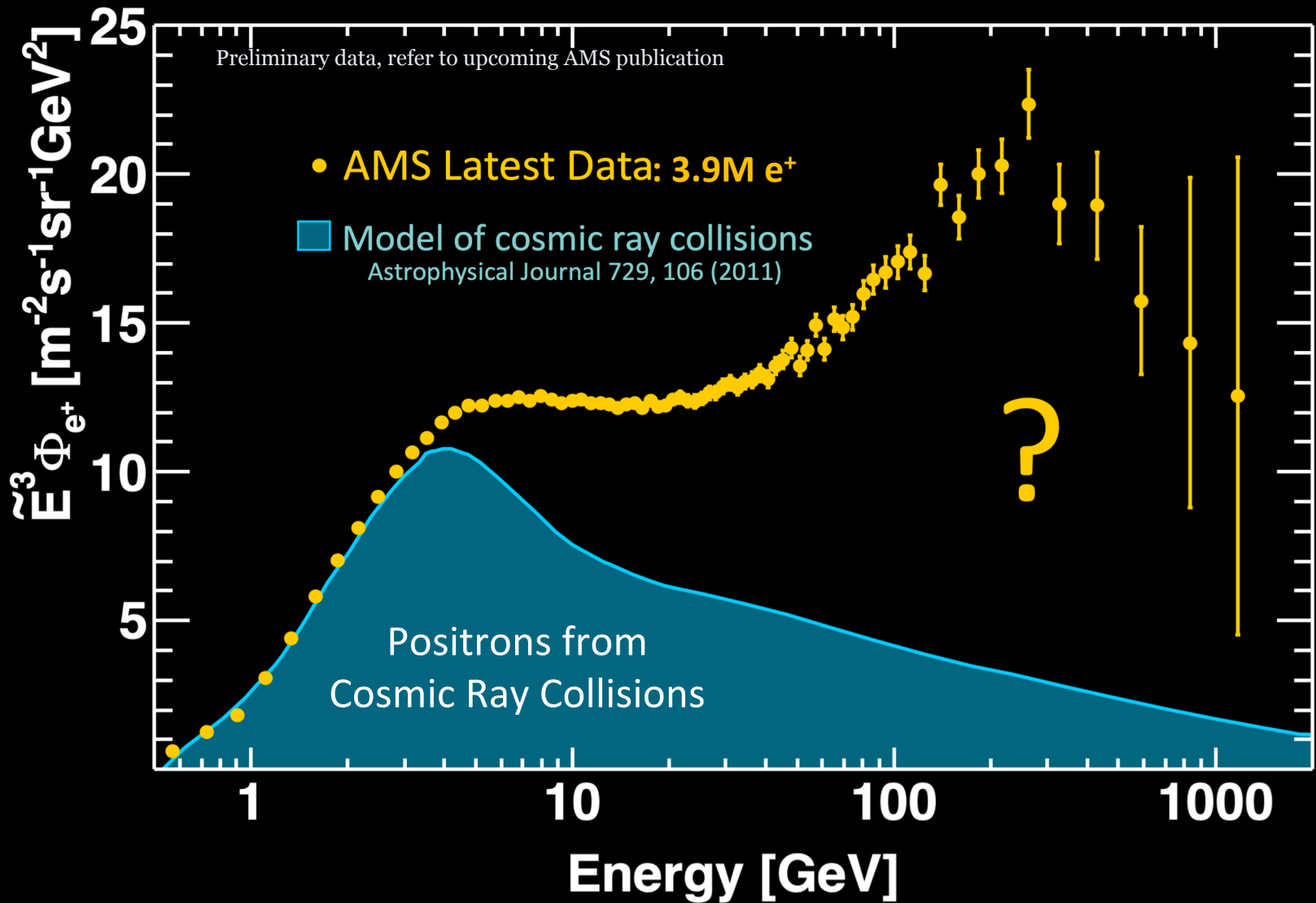
# 正电子流强谱的独特性质





# 正电子反常超出的来源

独特的能谱结构不能被传统的宇宙线模型解释

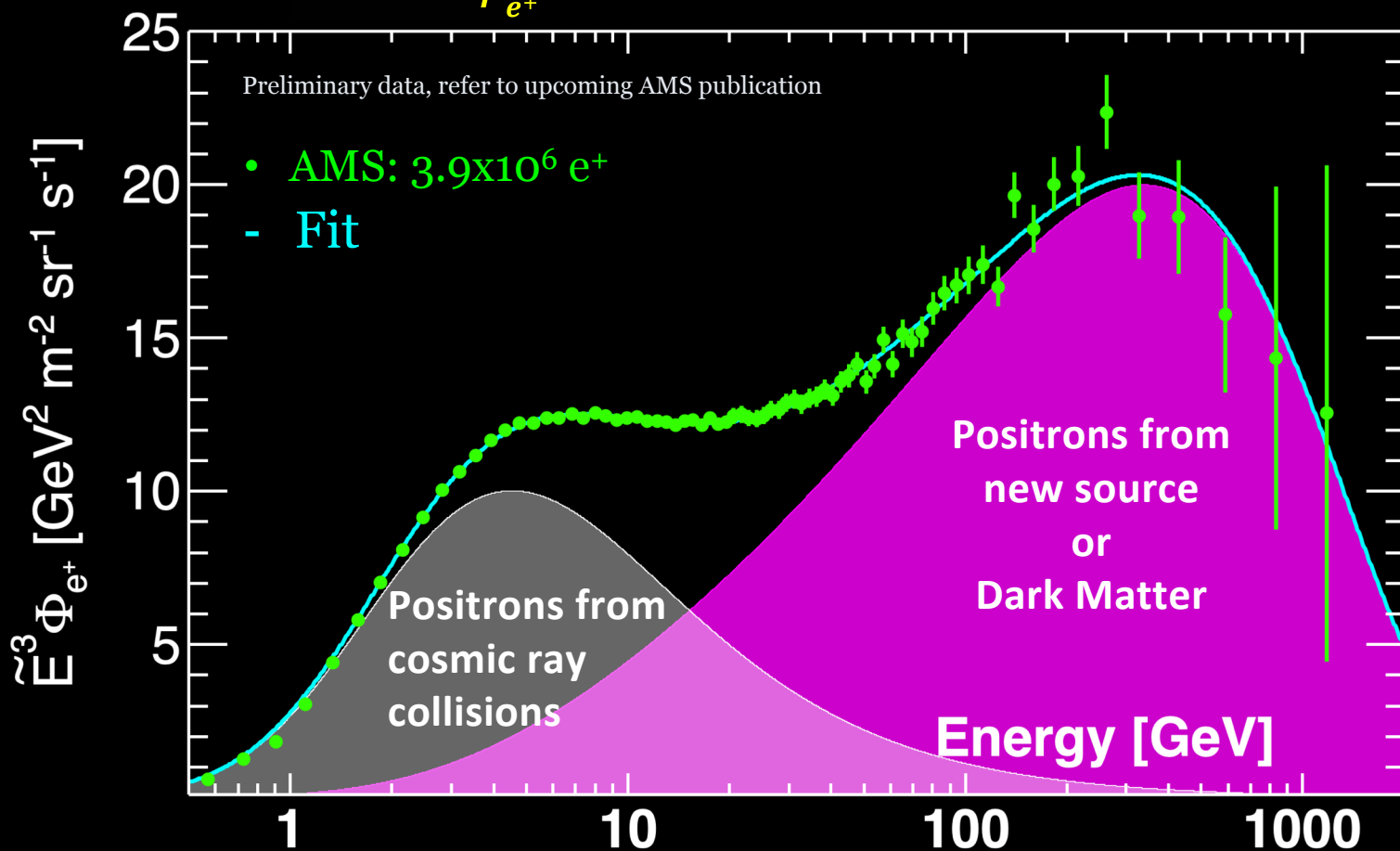


正电子流强可以描述为来自宇宙线碰撞的低能成分和来自于暗物质或者脉冲星的带截止能量 $E_s$ 的高能成分。

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

Solar Collisions      New Source or Dark Matter

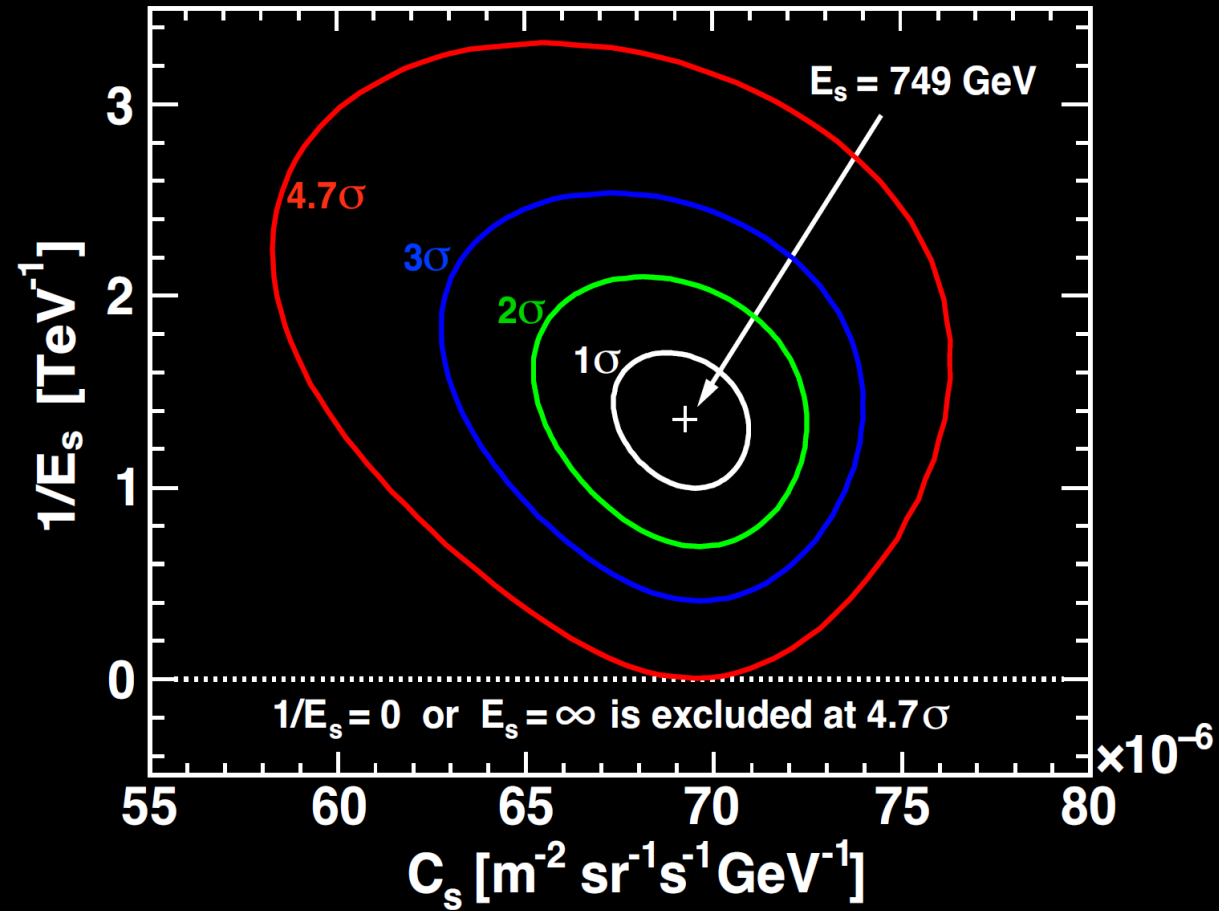
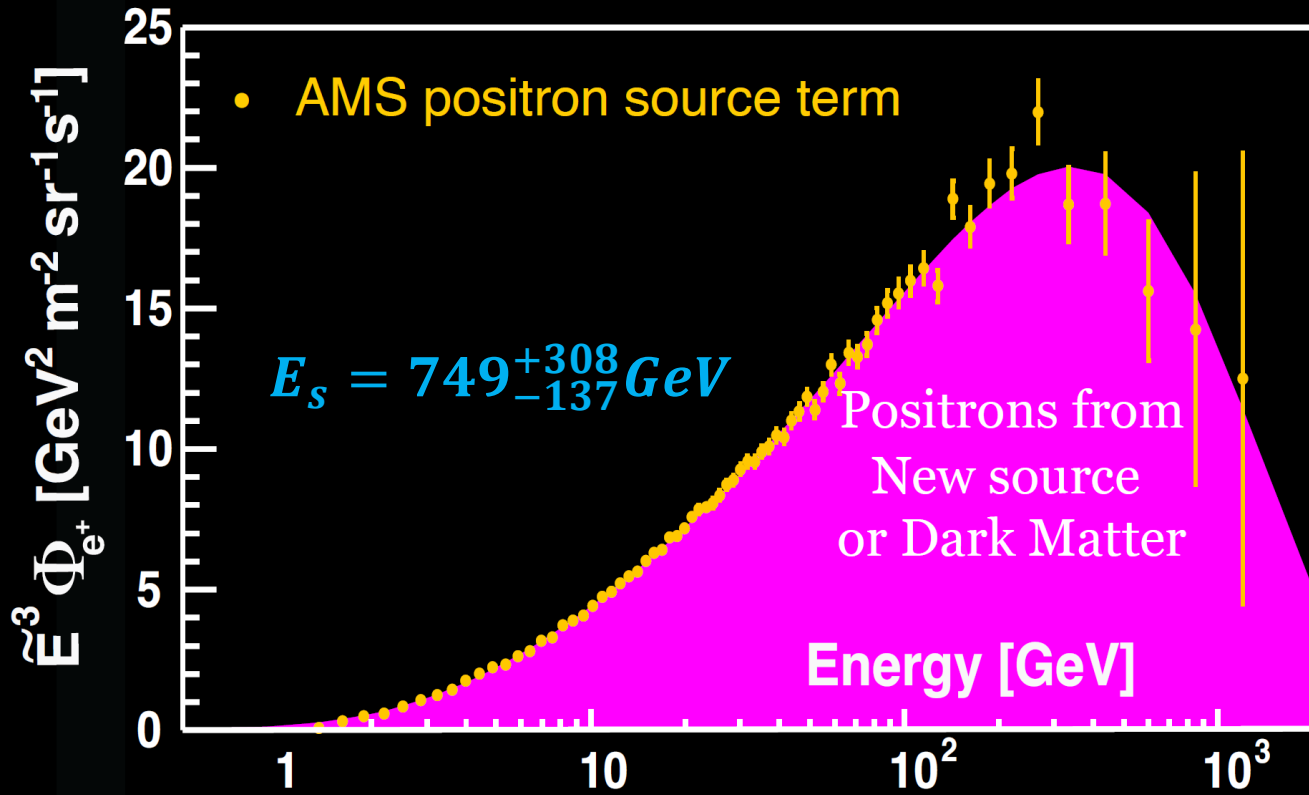
$$\hat{E} = E + \varphi_{e^+}$$



高能区域的截止能量是之前未曾观测到的新特征

# 高能截止能量 $E_s$ 具有 $4.7\sigma$ 的置信度

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





# AMS探测器的升级

AMS 2011-2025

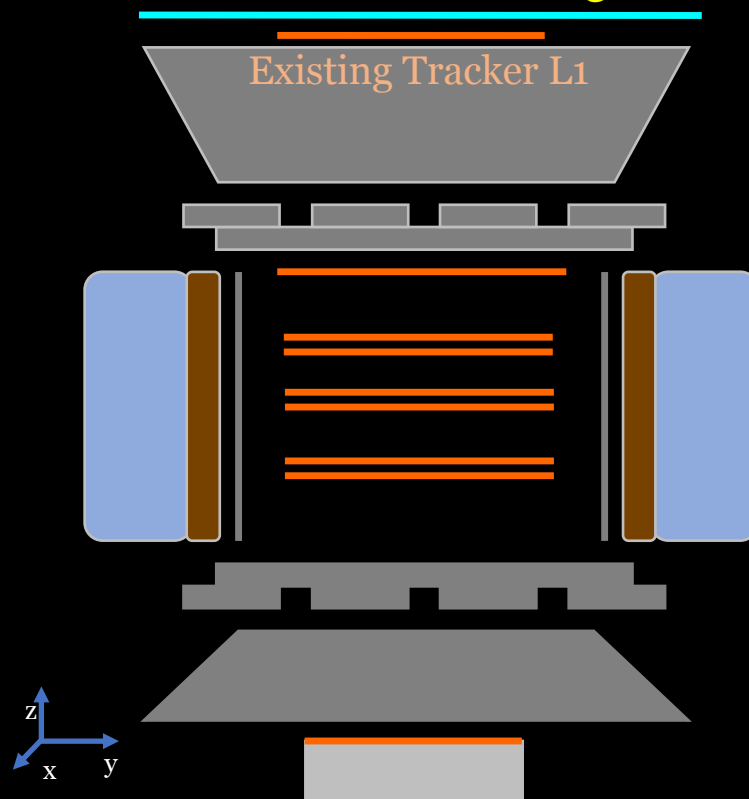
探测器持续运行取数



最新结果所用数据: 2011-2022

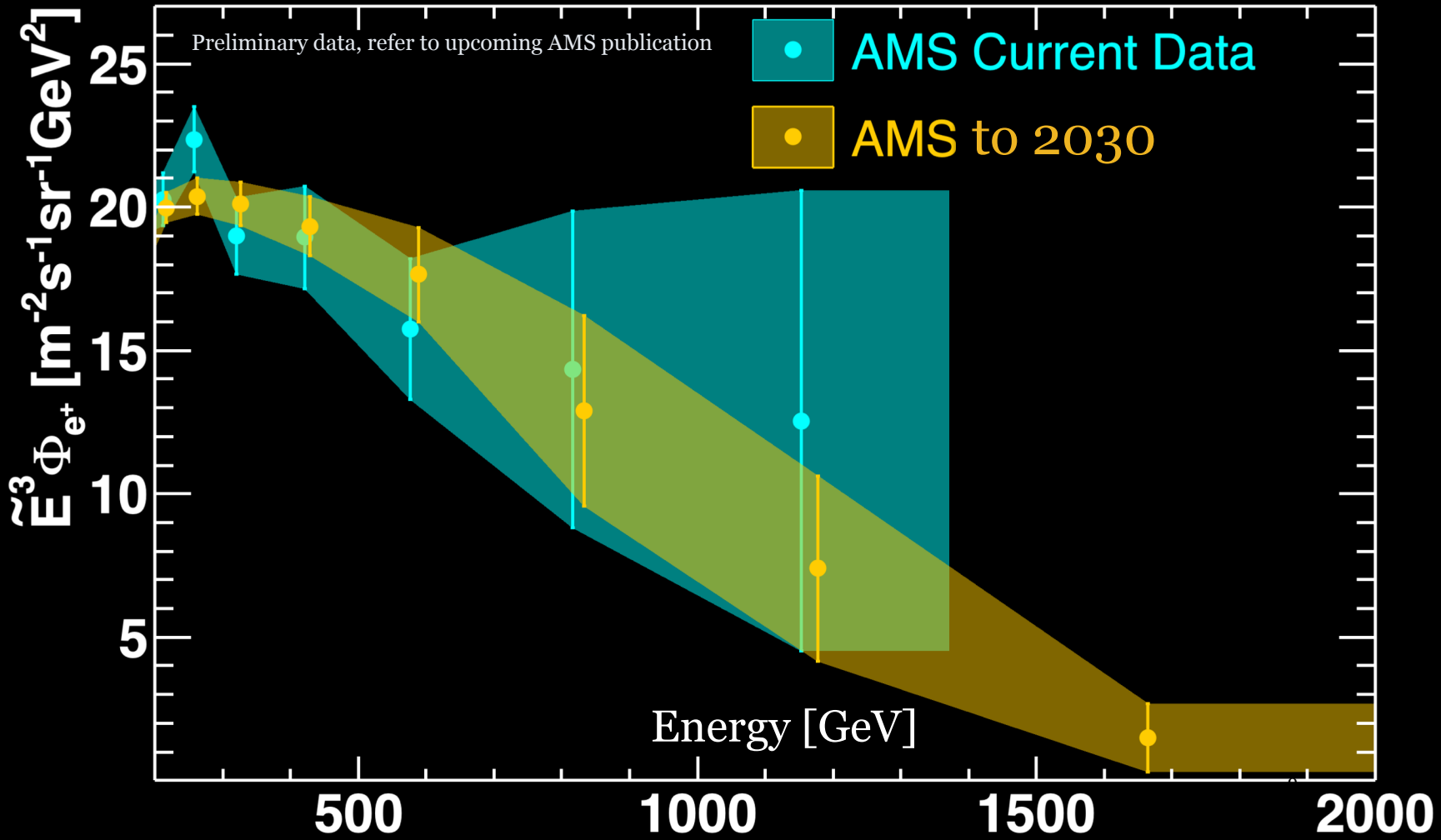
AMS 2025-2030

新加的共  $8\text{m}^2$  硅微条探测器层  
AMS的接收度提升至  $300\%$



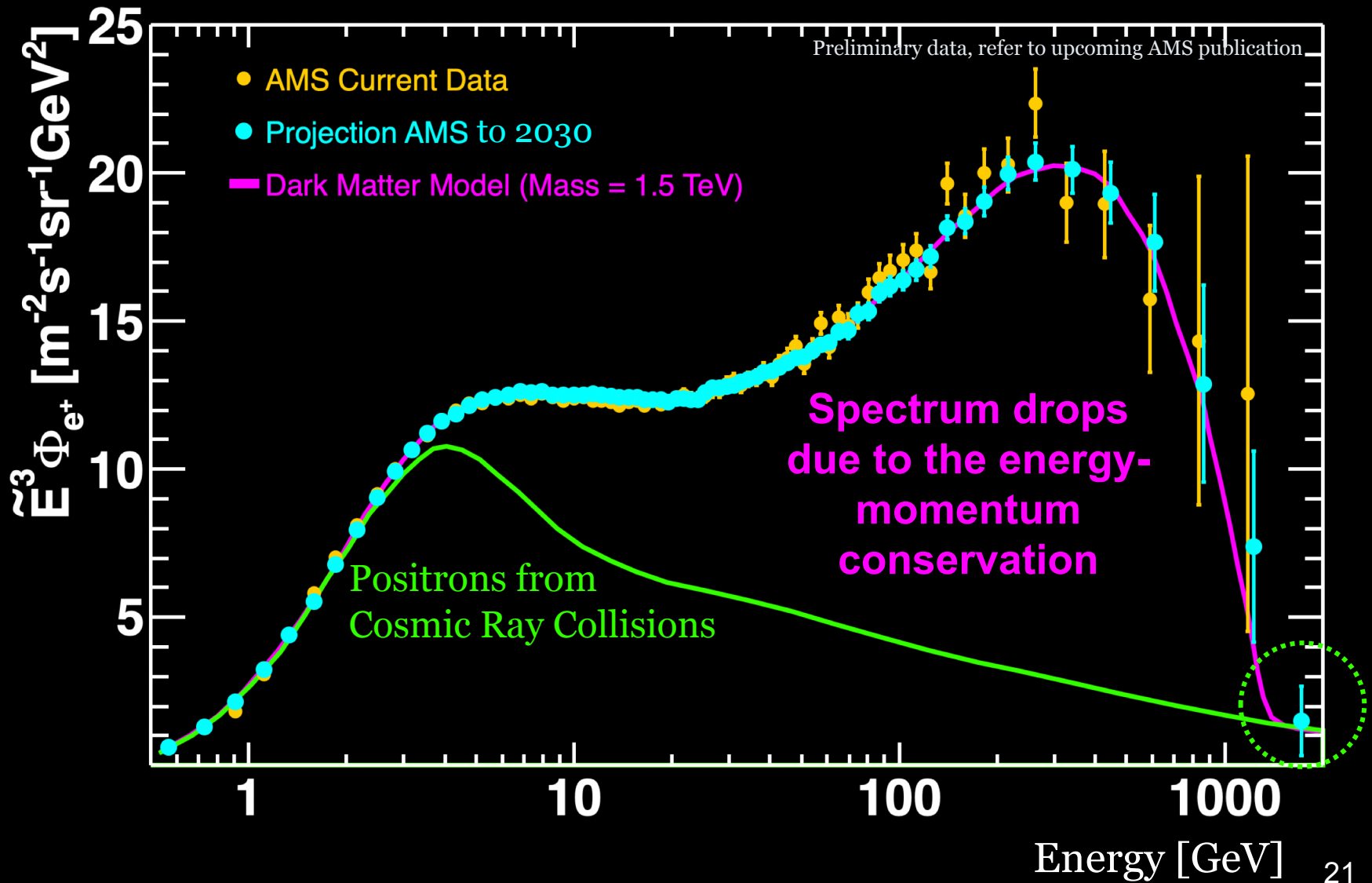
持续运行至2030年

相比于目前结果，到2030年AMS将能把正电子流强谱的测量能区从1.4TeV扩展至2TeV并将流强谱误差减少一半。



# 到2030年的宇宙线正电子和暗物质模型预期

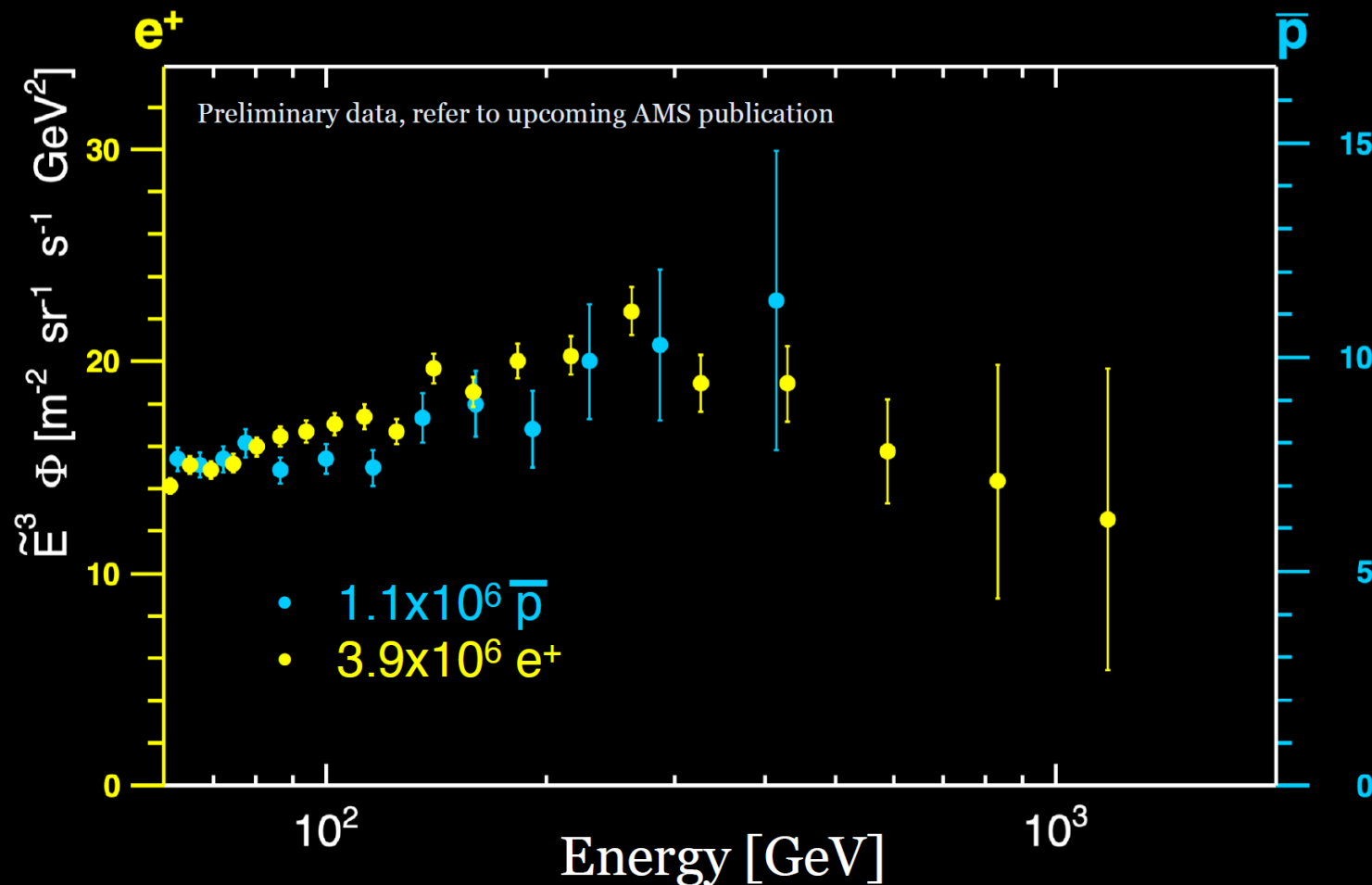
AMS将能确认正电子流强谱在\*\*高能区域的迅速下降\*\*，以及按照暗物质模型的预期正电子在最高能区是否只来源于宇宙线碰撞





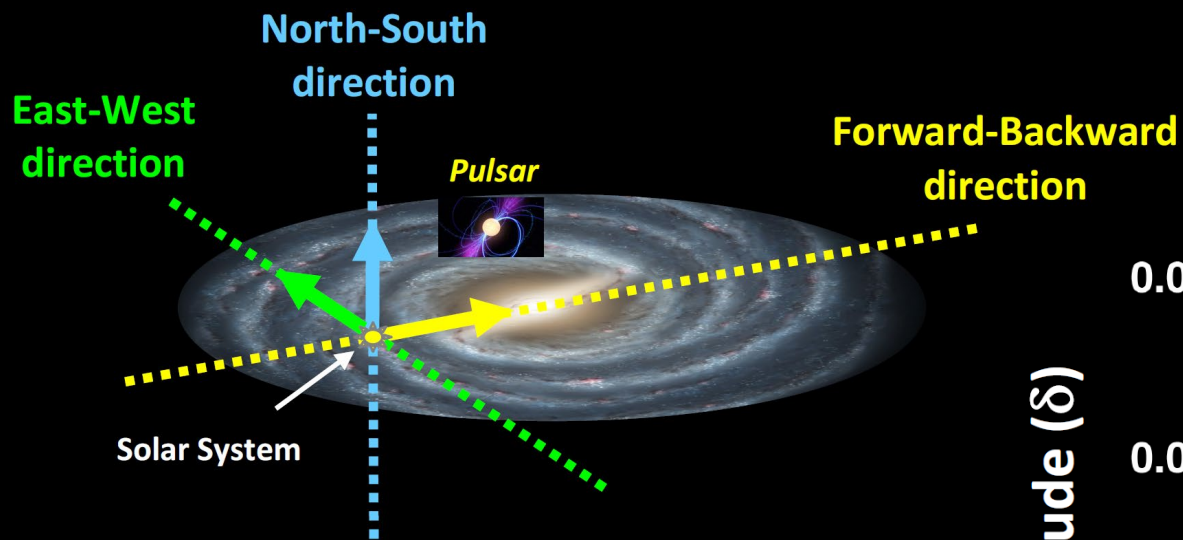
# 高能正电子来源：脉冲星模型

- ▶ 脉冲星可以产生并加速正电子到很高能量
- ▶ 反质子在最高至525GeV表现出与正电子几乎一致的随能量变化趋势
- ▶ 脉冲星不会产生反质子

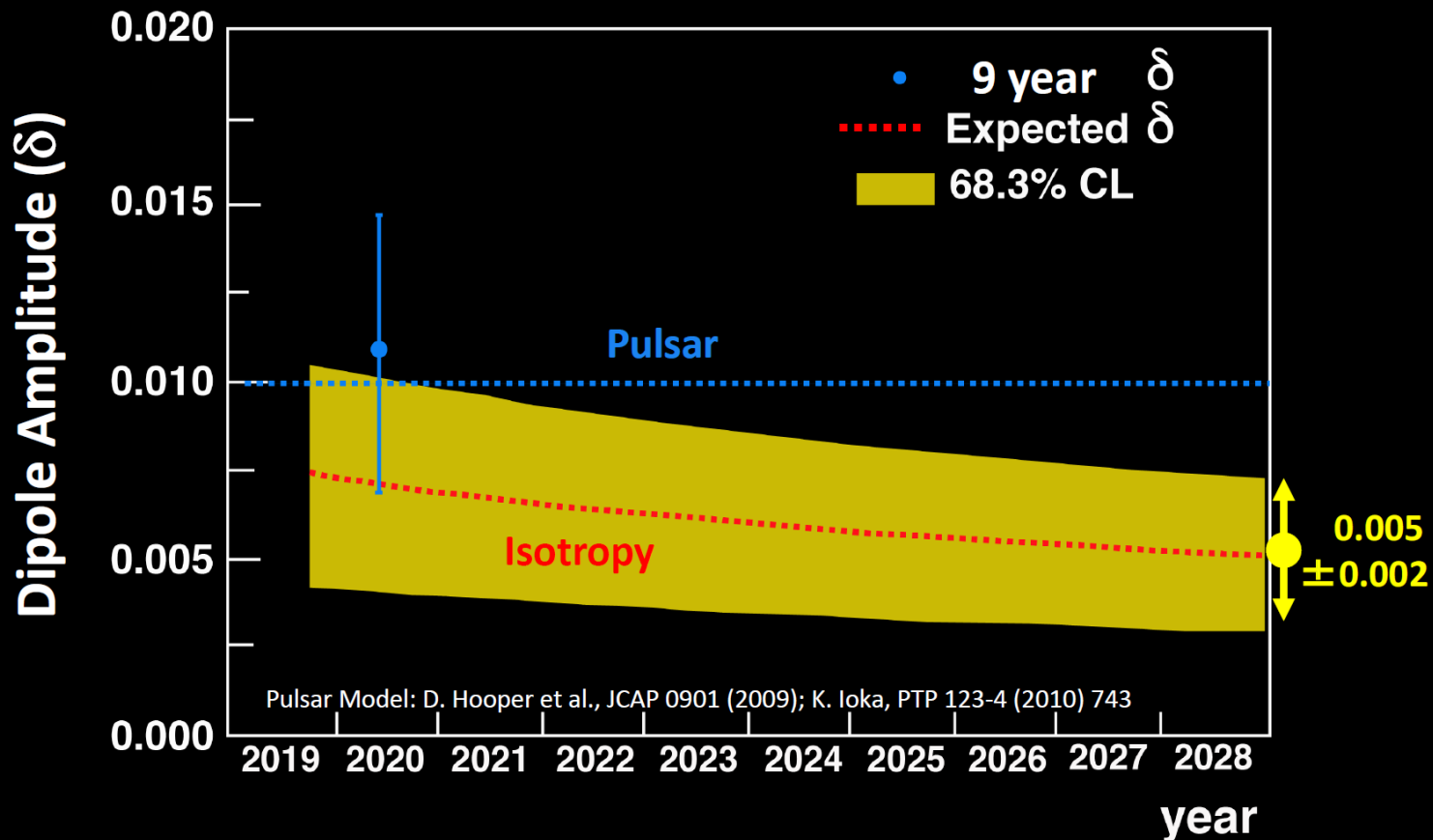


正电子与反质子流强谱更详细的比较见唐志成报告《AMS反质子和宇宙线基本带电粒子》

到2030年，AMS的正电子统计事例数将可以实现对各向异性的精确测量，在99.93%置信度下对暗物质来源和脉冲星来源进行区分



来源于脉冲星的正电子将有明确的方向性





# 总结与展望

- AMS对宇宙线正电子的精确测量已经扩展至1.4TeV
- 宇宙线正电子能谱显示 特别的随能量变化趋势:
  - (a) 从20.1GeV开始显著上升
  - (b) 从262 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749 GeV的截止能量, 其显著性达到 $4.7\sigma$ .
- 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.**
- 基于AMS升级和持续收集数据直到国际空间站使命结束 (不早于2030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

# A sample of recent theoretical models explaining AMS positron and electron data (overall >3000 citations)

- 1) H. Motz, H. Okada, Y. Asaoka, and K. Kohri, *Phys.Rev. D102* (2020) 8, 083019
  - 2) Z.Q. Huang, R.Y. Liu, J.C. Joshi, X.Y. Wang, *Astrophys.J.* 895 (2020) 1, 53
  - 3) R. Diesing and D. Caprioli, *Phys.Rev. D101* (2020) 10
  - 4) A. Das, B. Dasgupta, and A. Ray, *Phys.Rev. D101* (2020) 6
  - 5) F. S. Queiroz and C. Siqueira, *Phys.Rev. D101* (2020) 7, 075007
  - 6) Z.L. Han, R. Ding, S.J. Lin, and B. Zhu, *Eur.Phys.J. C79* (2019) 12, 1007
  - 7) C.Q. Geng, D. Huang, and L. Yin, *Nucl.Phys. B959* (2020) 115153
  - 8) S. Profumo, F. Queiroz, C. Siqueira, *J.Phys.G* 48 (2020) 1, 015006
  - 9) D. Kim, J.C. Park, S. Shin, *JHEP* 04 (2018) 093
- and many other excellent papers ...

- 1) P. Mertsch, A. Vittino, and S. Sarkar, *Phys.Rev. D* 104 (2021) 103029
  - 2) P. Zhang et al., *JCAP* 05 (2021) 012
  - 3) C. Evoli, E. Amato, P. Blasi, and R. Aloisio, *Phys.Rev. D103* (2021) 8, 083010
  - 4) K. Fang, X.J. Bi, S.J. Lin, and Q. Yuan, *Chin.Phys.Lett.* 38 (2021) 3, 039801
  - 5) C. Evoli, P. Blasi, E. Amato, and R. Aloisio, *Phys.Rev.Lett.* 125 (2020) 5, 051101
  - 6) O. Fornieri, D. Gaggero, and D. Grasso, *JCAP* 02 (2020) 009
  - 7) P. Cristofari and P. Blasi, *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* 489 (2019) 1, 108
  - 8) K. Fang, X.J. Bi, and P.F Yin, *Astrophys.J.* 884 (2019) 124
  - 9) S. Recchia, S. Gabici, F.A. Aharonian, and J. Vink, *Phys.Rev. D99* (2019) 10, 103022
- and many other excellent papers ...

- 1) E. Amato and S. Casanova, *J.Plasma Phys.* 87 (2021) 1, 845870101
  - 2) Z. Tian et al., *Chin.Phys.* C44 (2020) 8, 085102
  - 3) W. Zhu, P. Liu, J. Ruan, and F. Wang, *Astrophys.J.* 889 (2020) 127
  - 4) P. Liu and J. Ruan, *Int.J.Mod.Phys. E28* (2019) 09, 1950073
  - 5) R. Diesing and D. Caprioli, *Phys.Rev.Lett.* 123 (2019) 7, 071101
  - 6) W. Zhu, J. S. Lan and J. H. Ruan, *Int. J. Mod. Phys. E27* (2018) 1850073
- and many other excellent papers ...

## AMS Publications on electrons and positrons

- 1) M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 141102.  
APS Highlight of the Year 2013  
10-year Retrospective of Editors' Suggestions
- 2) L. Accardo et al., *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 121101.  
Editor's Suggestion
- 3) M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 121102.  
Editor's Suggestion
- 4) M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 221102.
- 5) M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* 122 (2019) 041102.  
Editor's Suggestion
- 6) M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* 122 (2019) 101101.
- 7) M. Aguilar et al., *Physics Reports*, 894 (2021) 1.

## Dark Matter

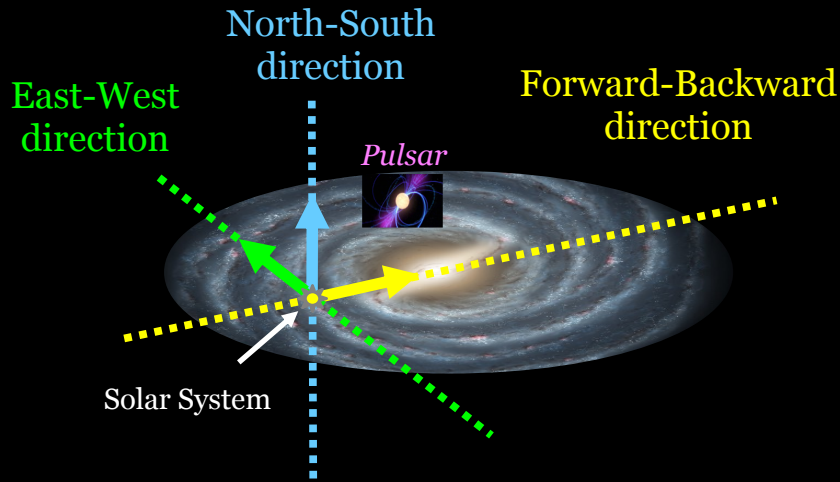
## Astrophysical sources

## Propagation



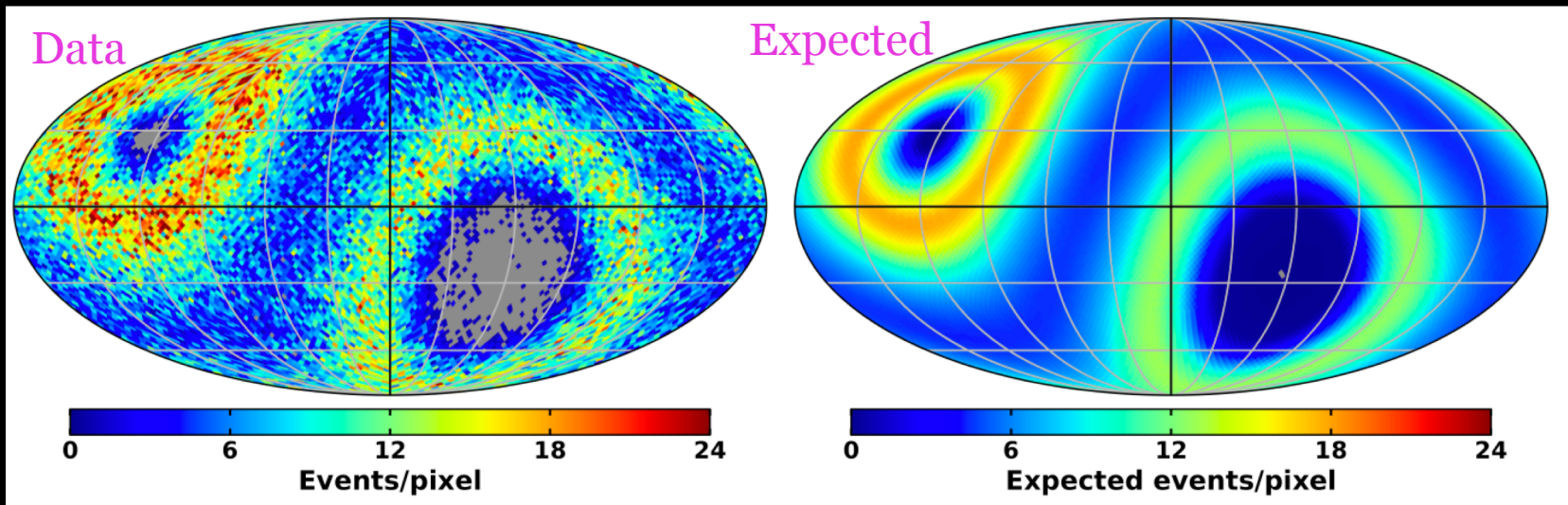
# Positron Anisotropy and Dark Matter

Astrophysical point sources will imprint a higher anisotropy on the arrival directions of energetic positrons than a smooth dark matter halo.



Dipole anisotropy:

$$\delta = 3\sqrt{C_1/4\pi} \quad C_1 \text{ is the dipole moment}$$





# 正电子流强谱的独特性质

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

