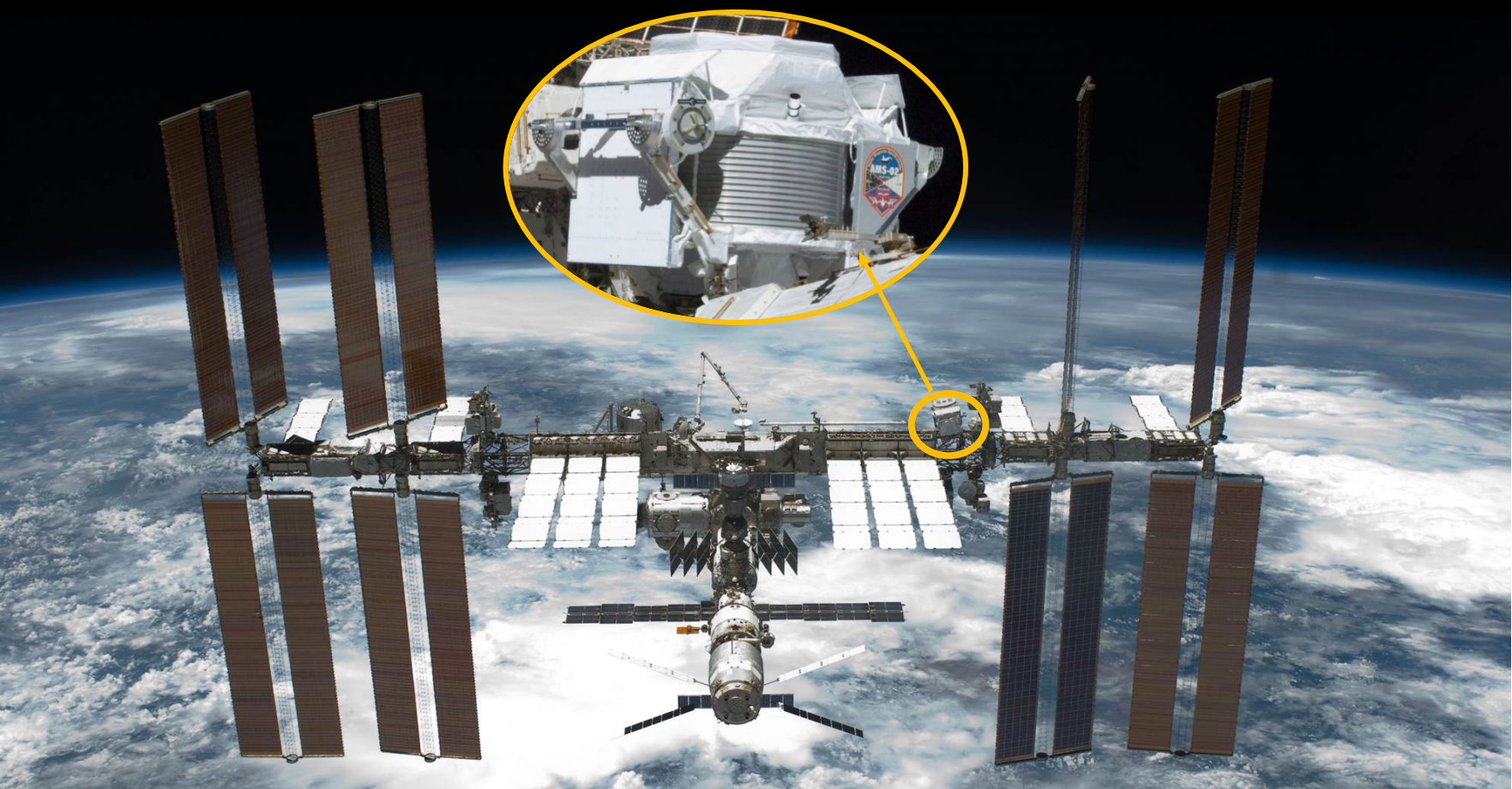


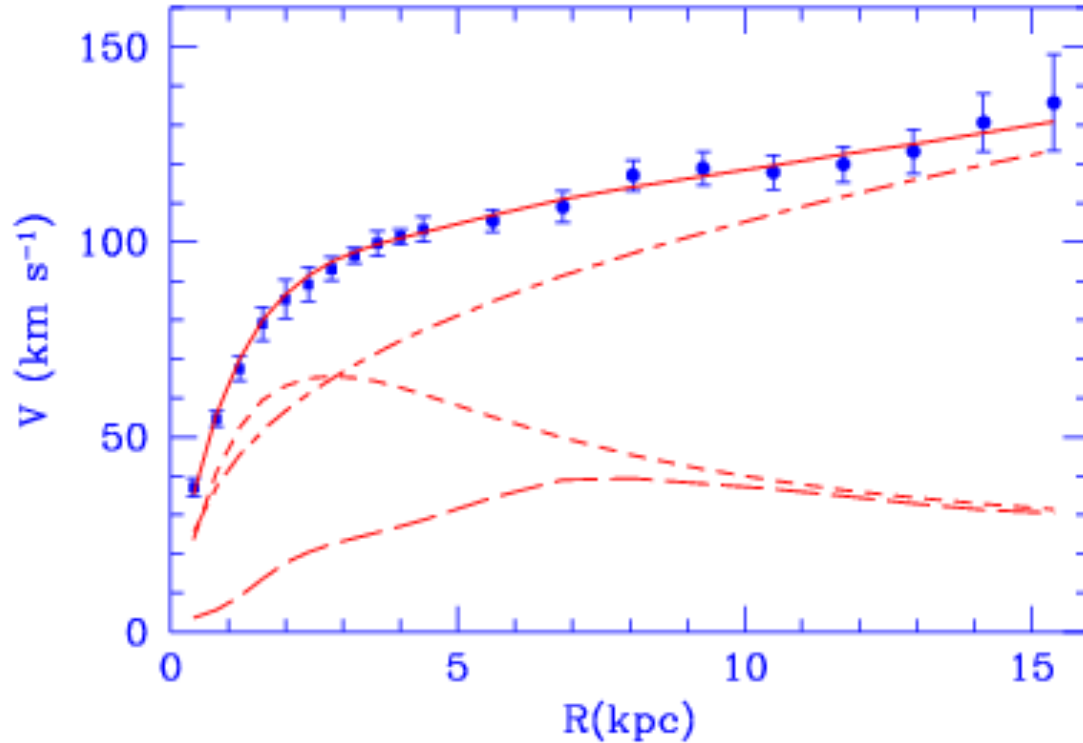
# 用阿尔法磁谱仪(AMS)探测暗物质和研究宇宙线在太阳系中的传播



中国科学与技术大学研讨会  
2023年04月28日

冯劼  
[fengj77@mail.sysu.edu.cn](mailto:fengj77@mail.sysu.edu.cn)

# 当今物理界的难题-暗物质

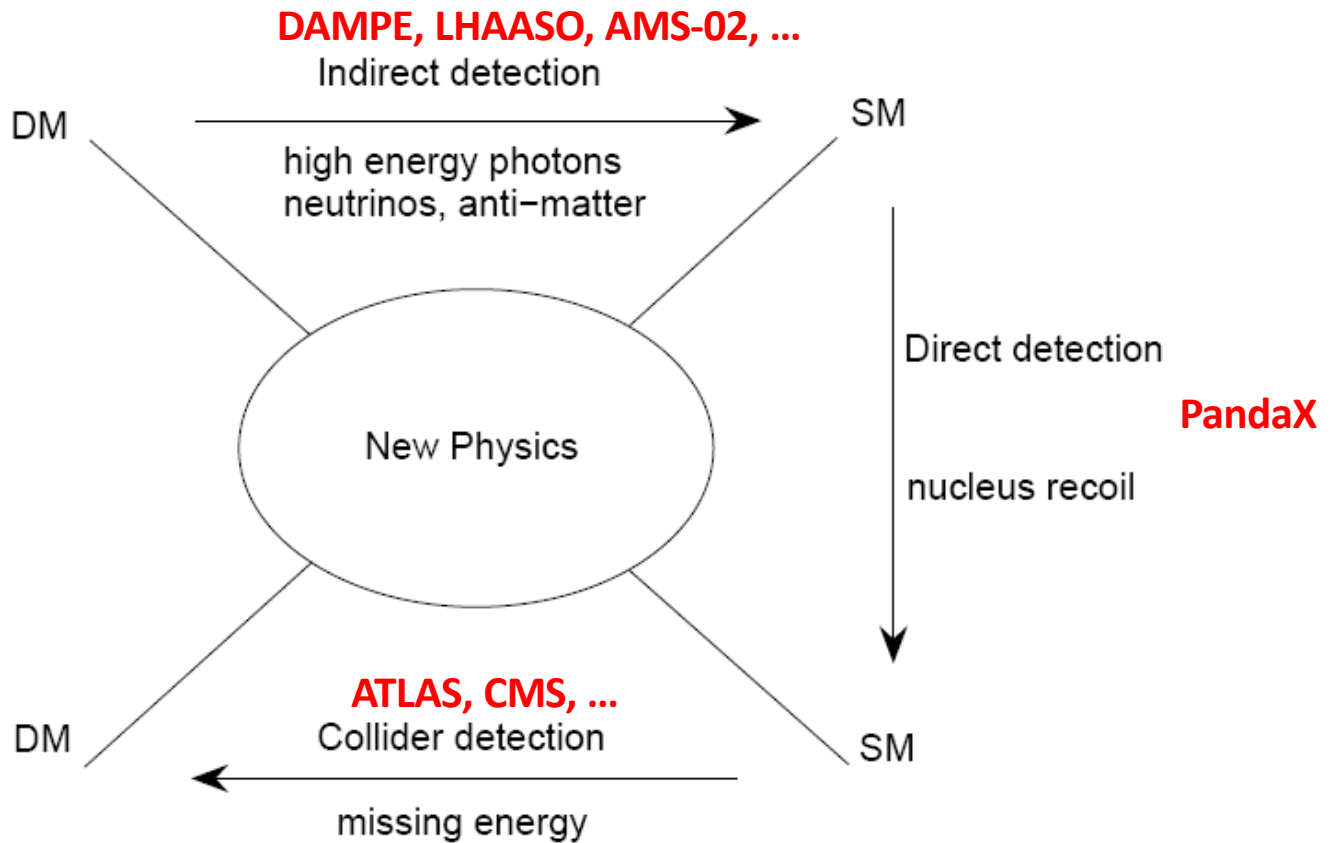


由**星系旋转曲线**可知：实际测得的线速度大于可见物质分布算出来的线速度。说明存在看不见的物质提供引力。

由**引力透镜效应**和**X射线观测星系团**结果也直接证明存在暗物质。

由**微波背景辐射**可以测得宇宙中暗物质的含量。

# 如何寻找暗物质？



# 当今物理界的难题-反物质世界

标准的宇宙大爆炸模型要求产生等量的物质和反物质。

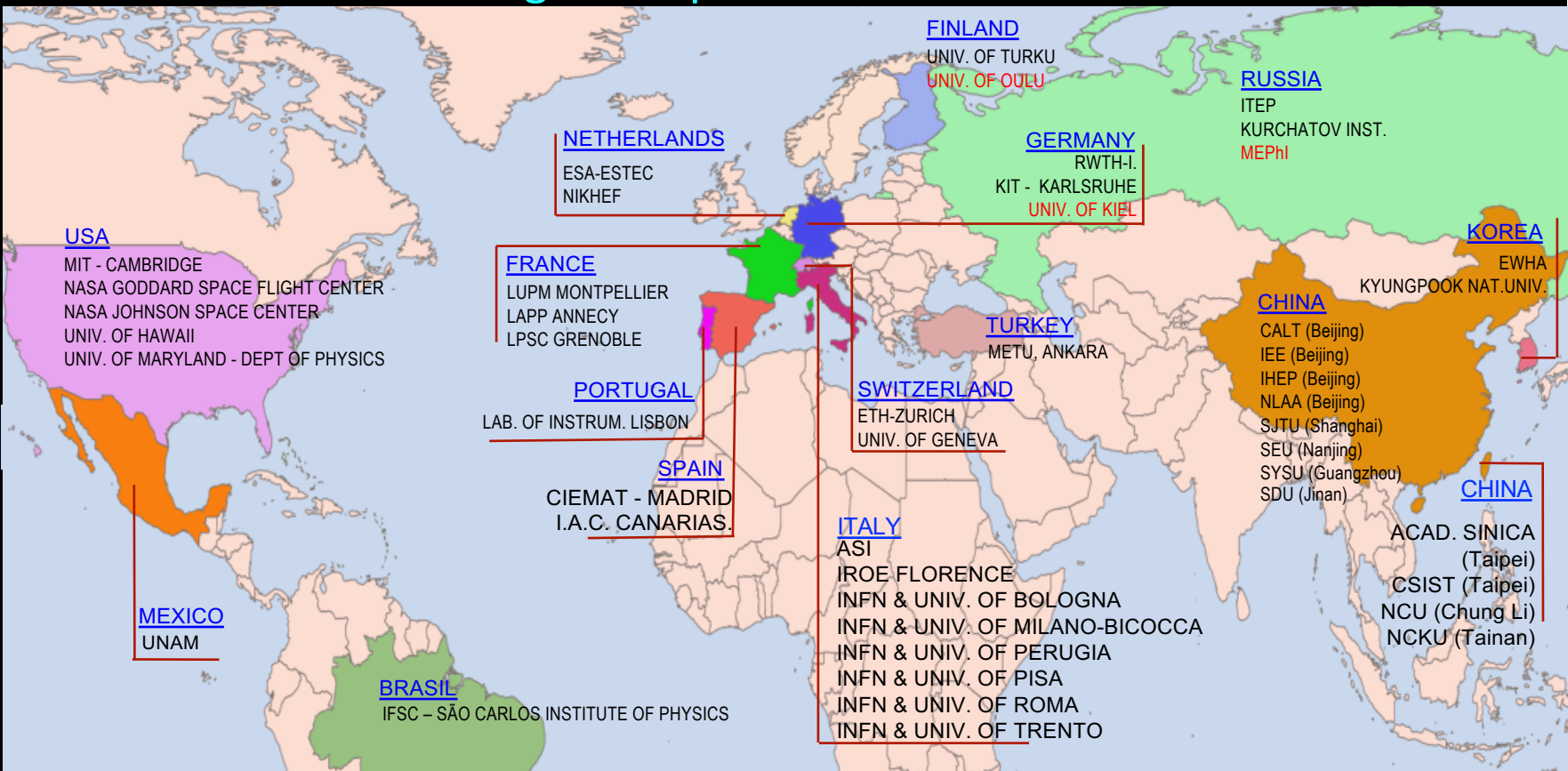
反物质

物质

到目前为止，实验还没观察到能产生正反物质不对称的机制（强CP破坏、质子衰变等）。  
在宇宙射线中，没探测到反核子。

# AMS 是一个国际合作组织

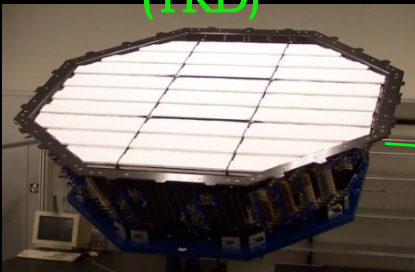
650个物理学家和工程师花费了17年时间建造阿尔法磁谱仪Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)



这个探测器在欧洲和亚洲建造，然后在日内瓦的欧洲核子研究中心 (CERN) 组装

# AMS是太空版的加速器实验级别的 精密粒子探测器

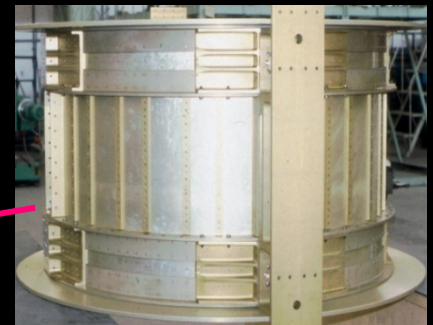
穿越辐射探测器  
Transition  
Radiation Detector (TRD)



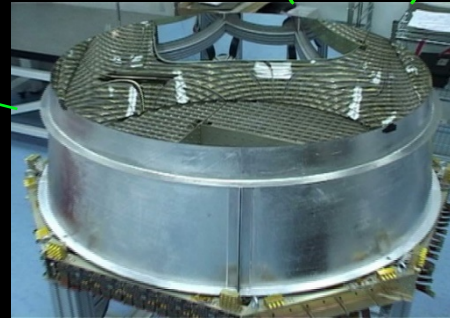
飞行时间探测器  
Time of Flight  
Counters (TOF)



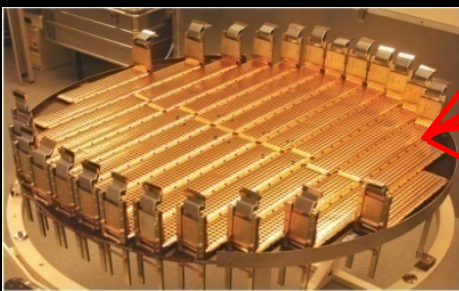
磁铁 Magnet



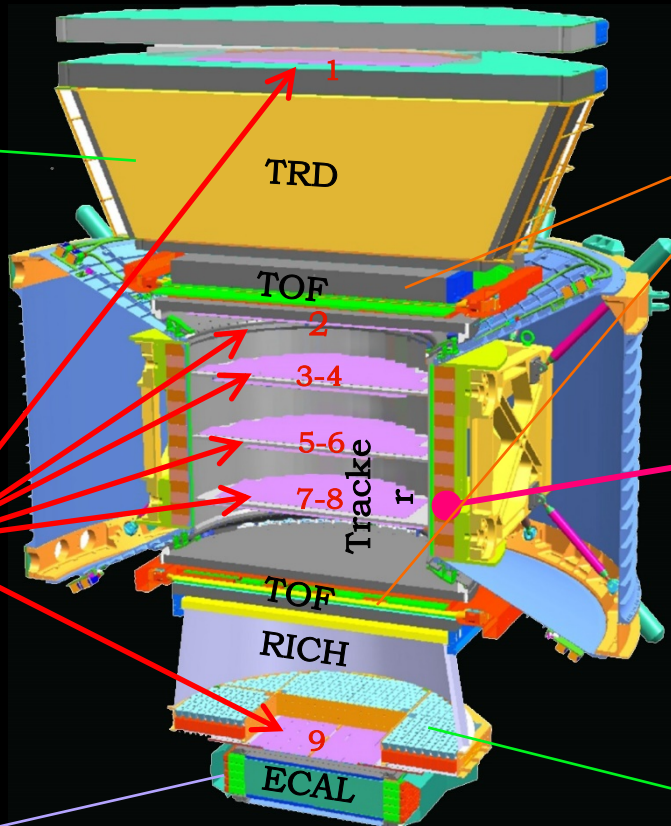
环成像切伦科夫探测器  
Ring Imaging  
Cherenkov (RICH)



硅径迹探测器  
Silicon Tracker

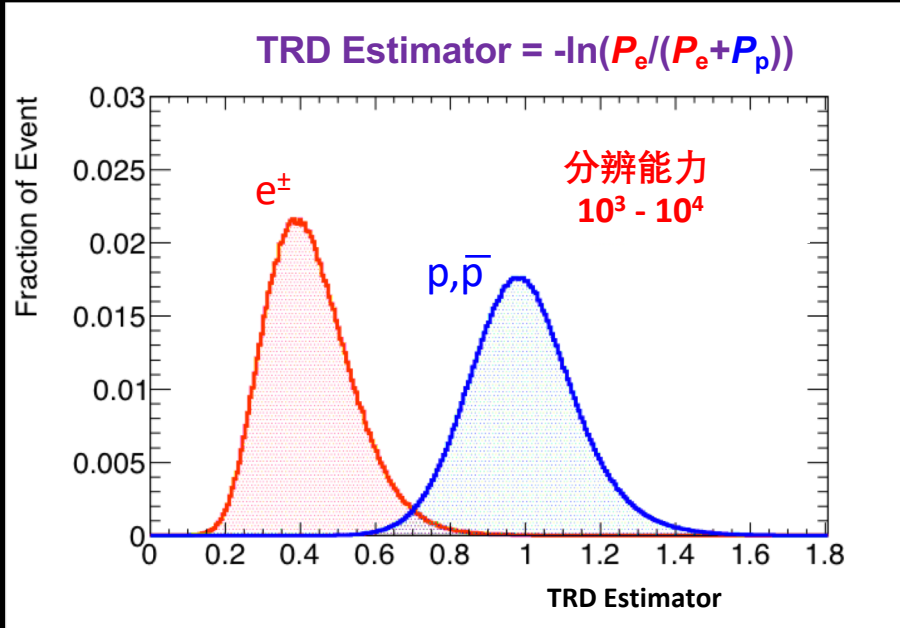
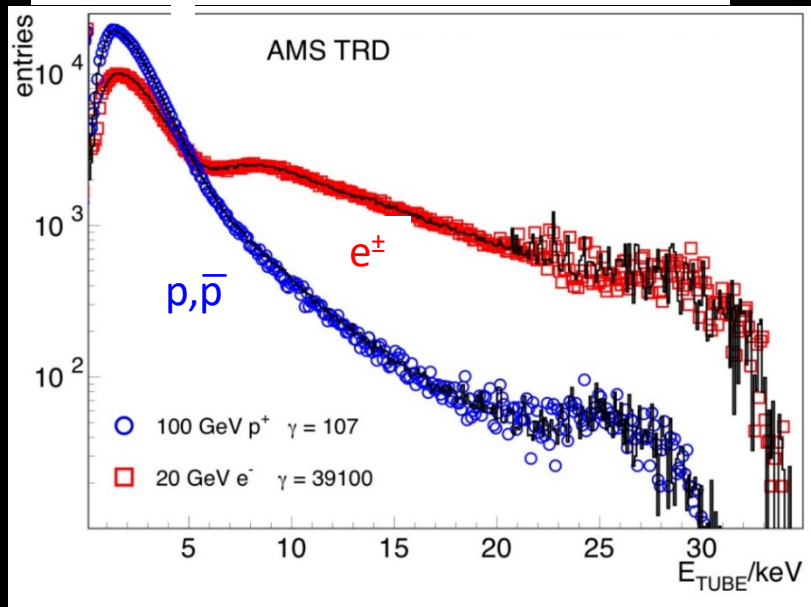
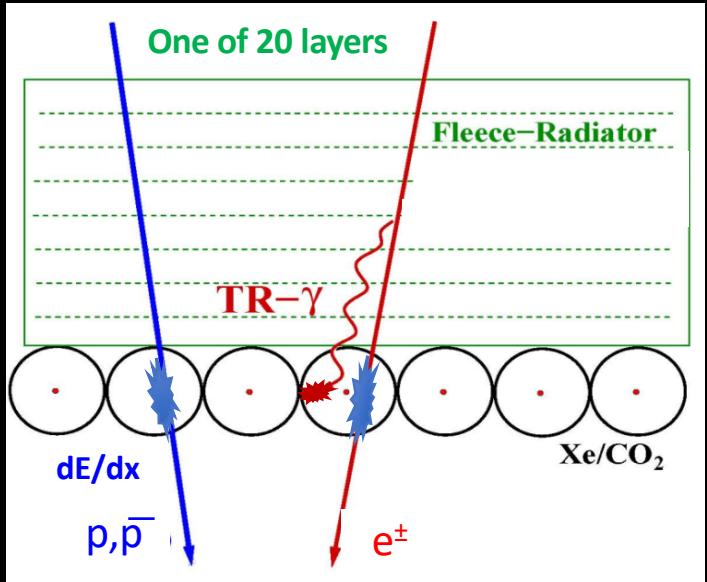


电磁量能器  
Electromagnetic  
Calorimeter (ECAL)



5m x 4m x 3m  
7.5 吨

# 穿越辐射探测器(TRD)

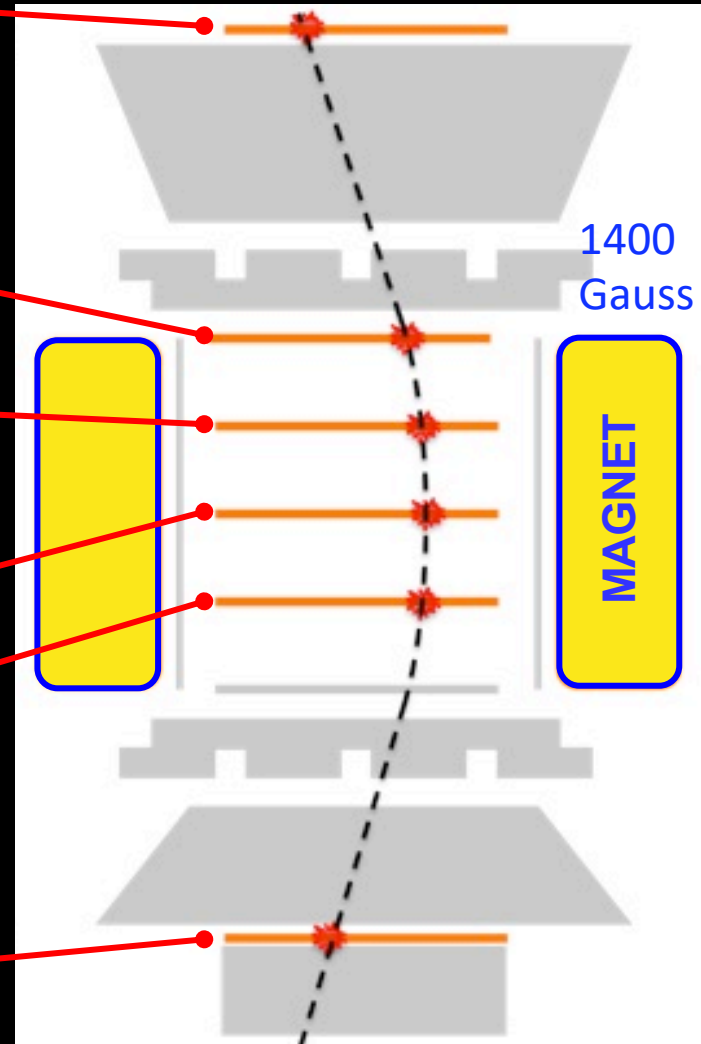
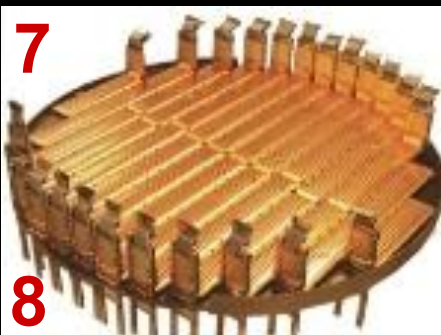
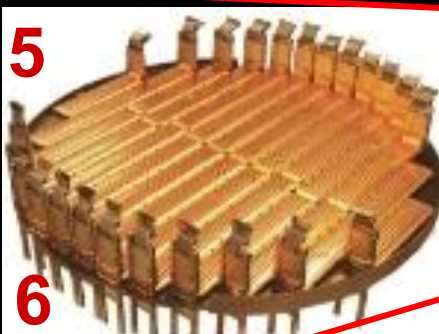
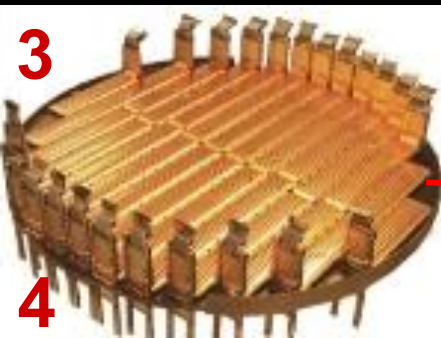
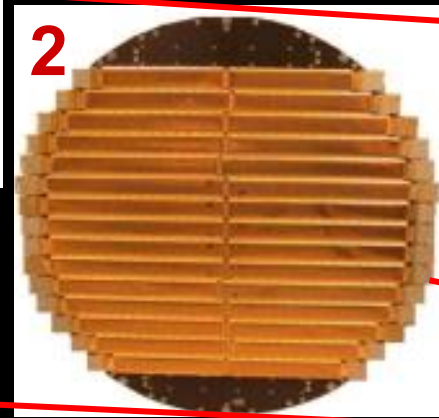


# 硅径迹探测器

位置分辨率为 5-10 微米

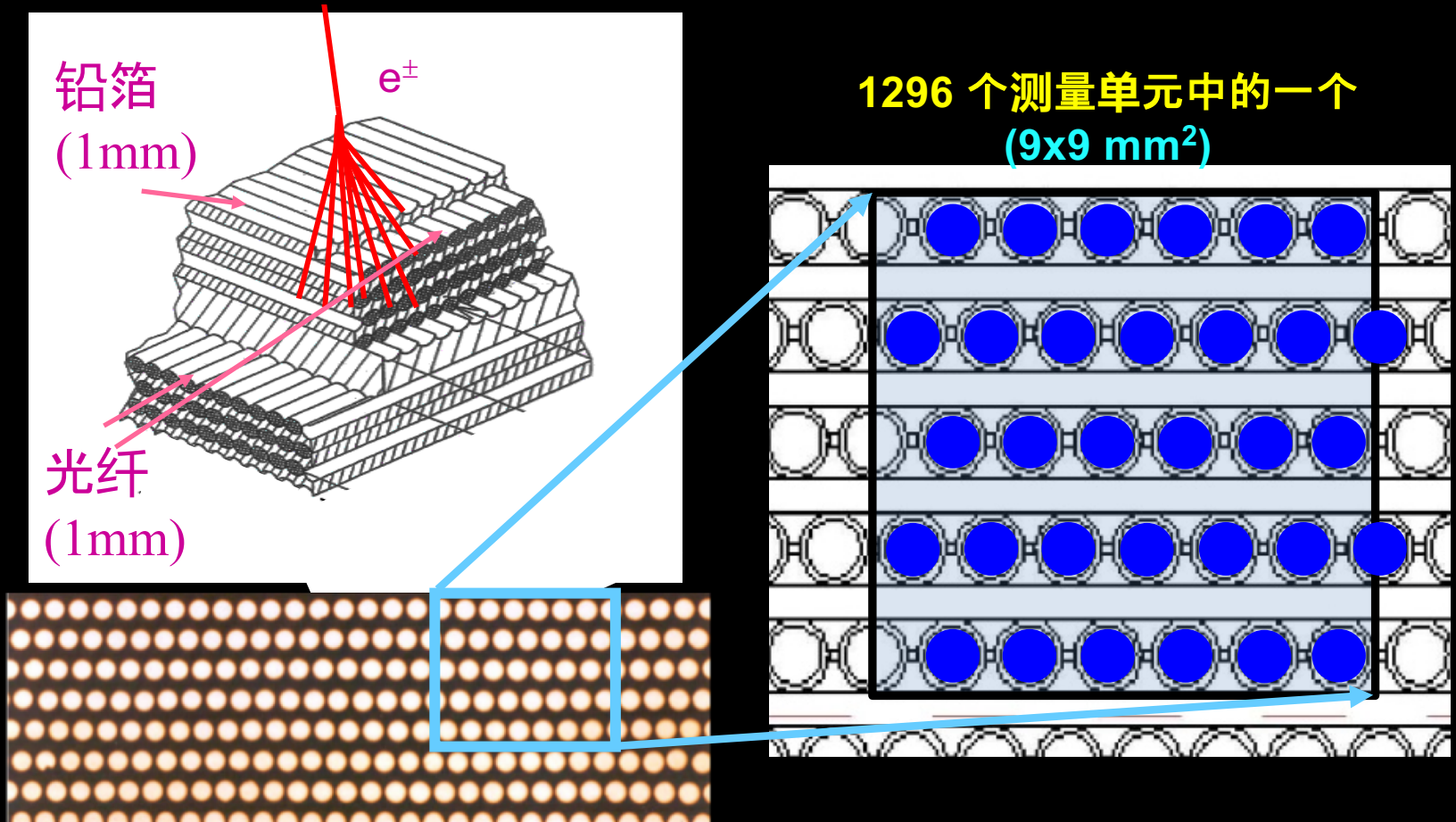
测量粒子动量  $P$  和核电荷数  $Z$

对于  $Z=1$  的粒子, 可测量的最大磁刚度  $(P/Z) - 2TV$





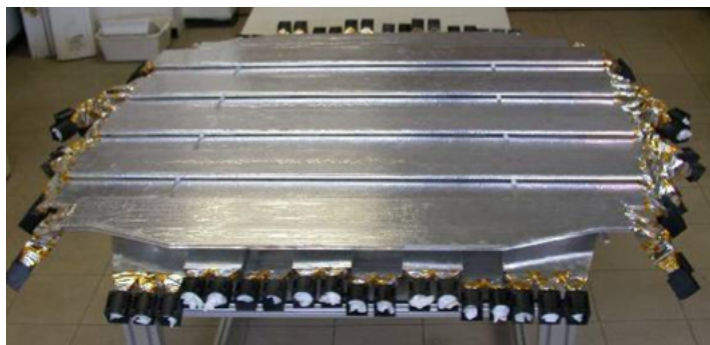
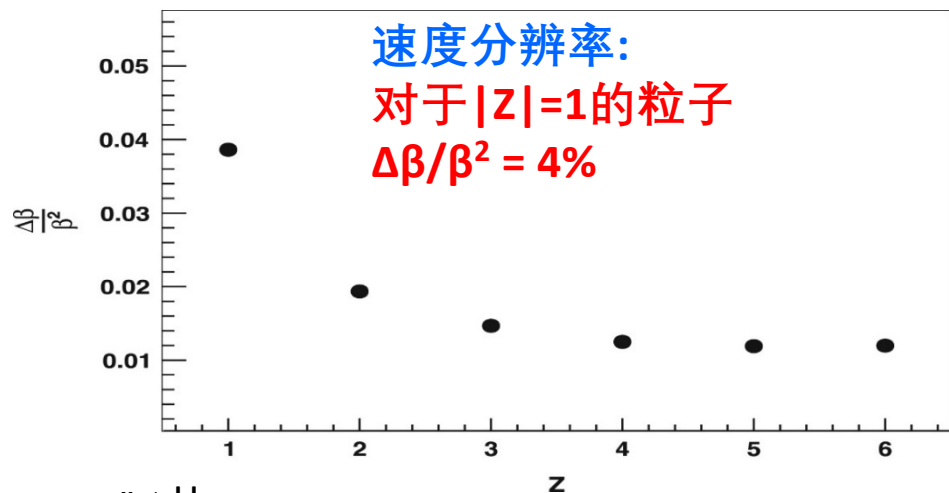
# 电磁量能器 (ECAL)



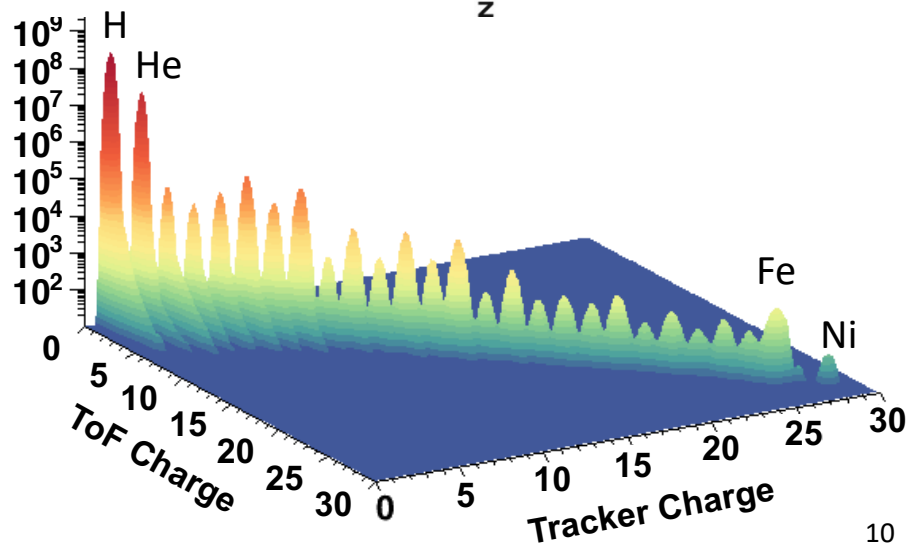
ECAL有17个辐射长度的厚度，进行三维测量。  
可以精确测量高达TeV能量的正负电子方向和能量  
在最高能量，正负电子的能量分辨率约为2%

# 飞行时间探测器(TOF)

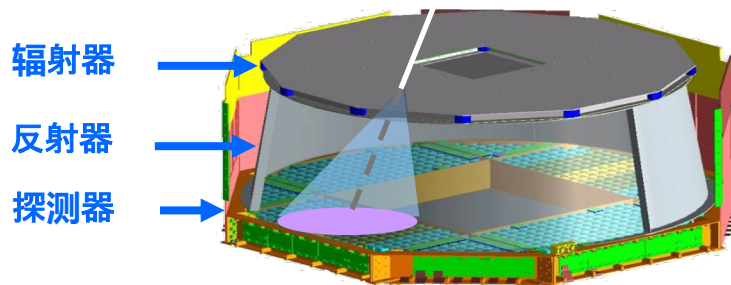
对于 $|Z|=1$ 的情况：时间分辨率为160ps



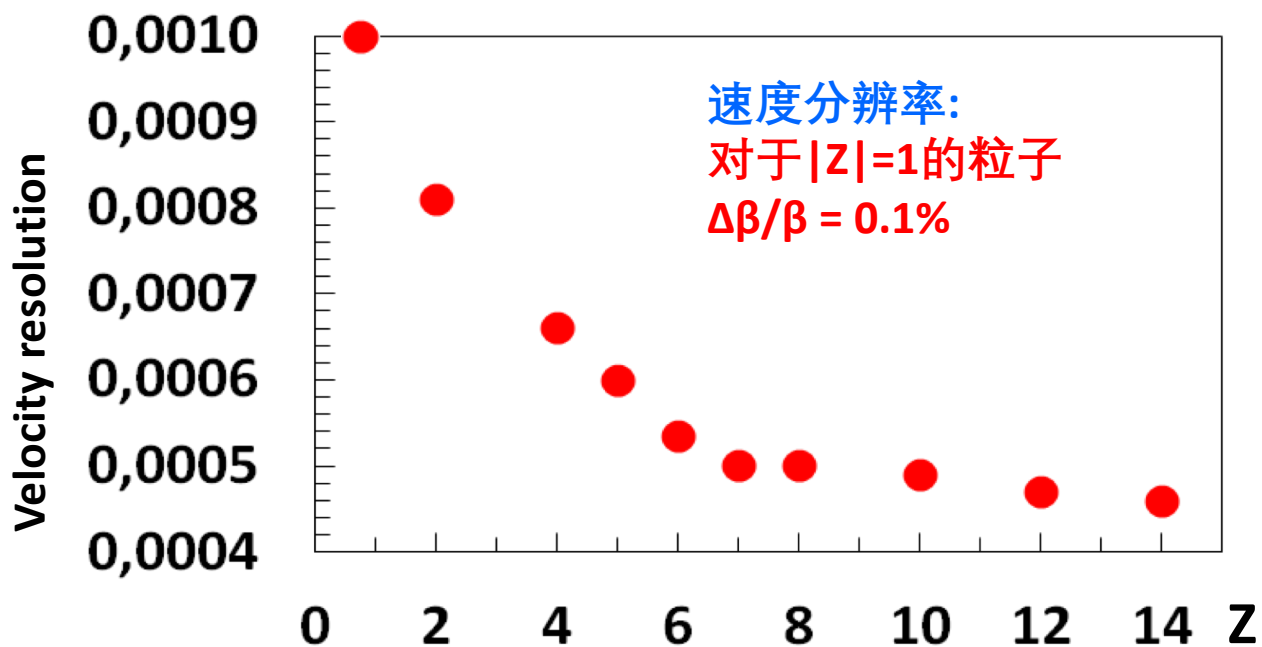
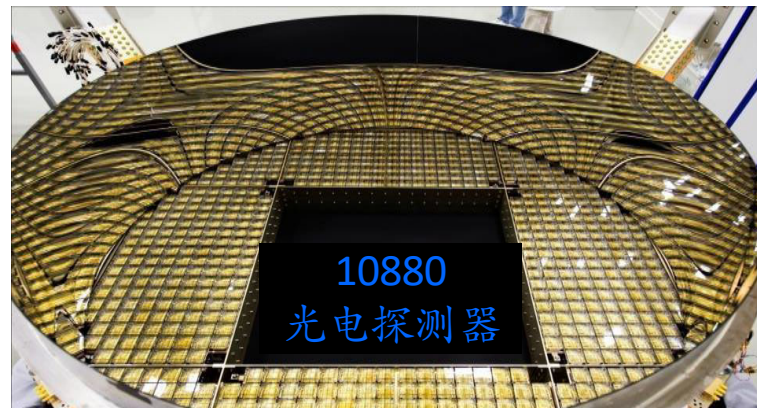
粒子质量是从TOF和Tracker的组合测量中得到.



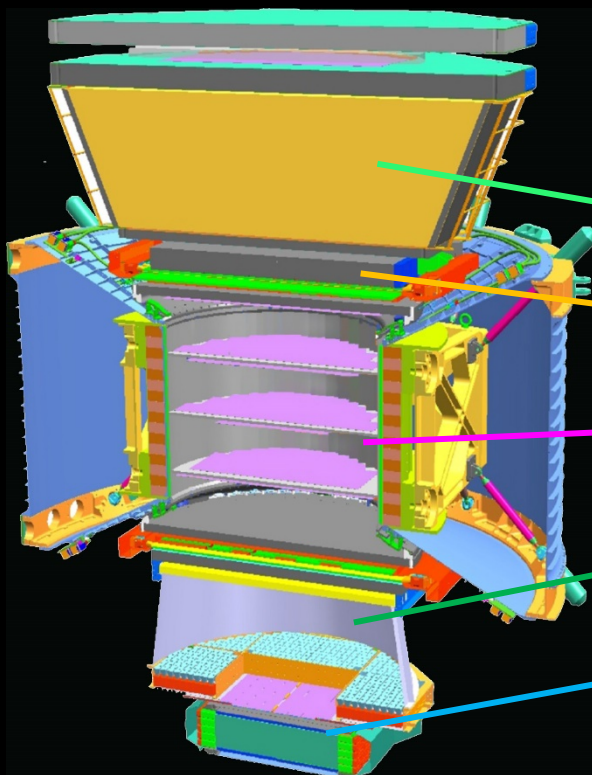
# 环形成像切伦科夫探测器(RICH)



光强  $\propto Z^2$   
 $\Theta \propto V$



# AMS 是唯一一个在太空中的磁谱仪



物质

反物质

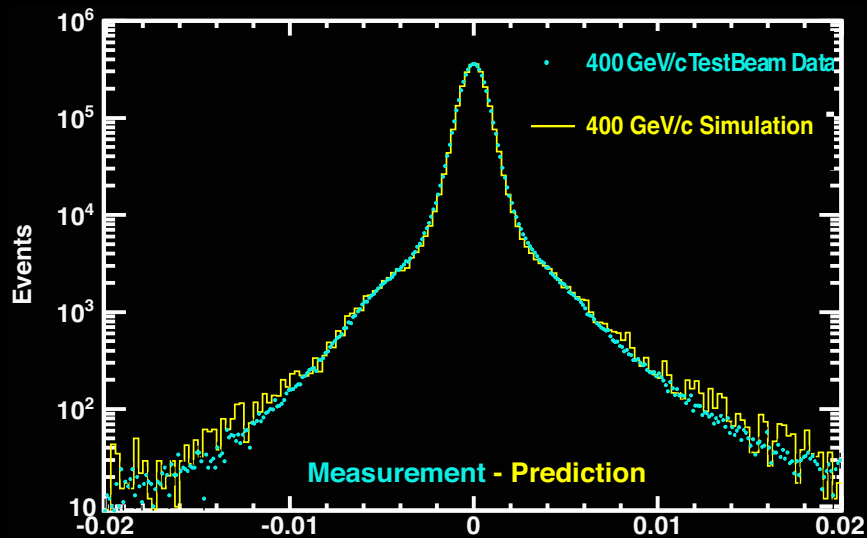
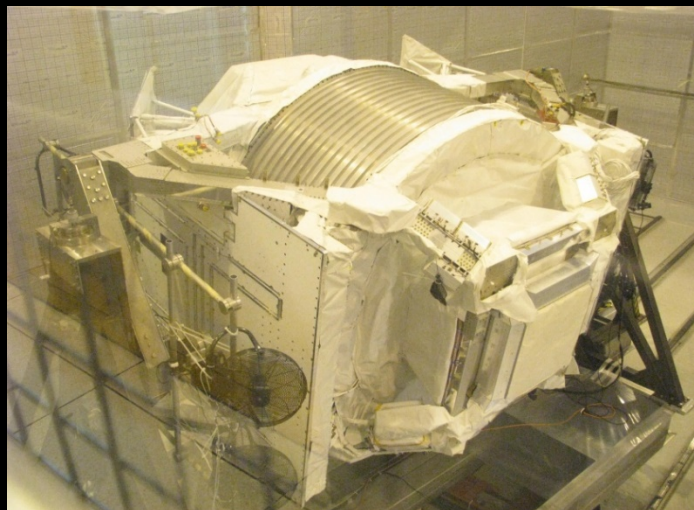
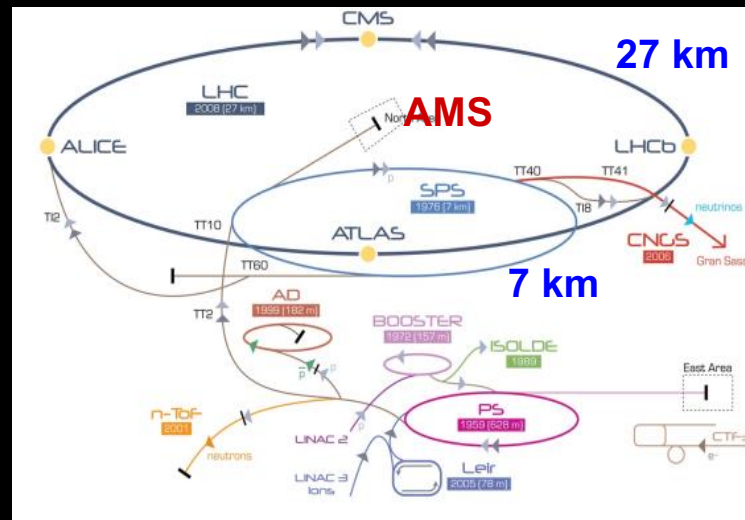
	$e^-$	P	Fe	$e^+$	$\bar{P}$	$\bar{He}$
TRD						
TOF						
Tracker + Magnet						
RICH						
ECAL						

宇宙射线用以下物理量定义:

- 能量 (E 单位为 GeV)
- 电荷 (Z - 在元素周期表中的位置: H Z=1, He Z=2, ...)
- 磁刚度 ( $R=P/Z$  单位为 GV)

# 在CERN校准

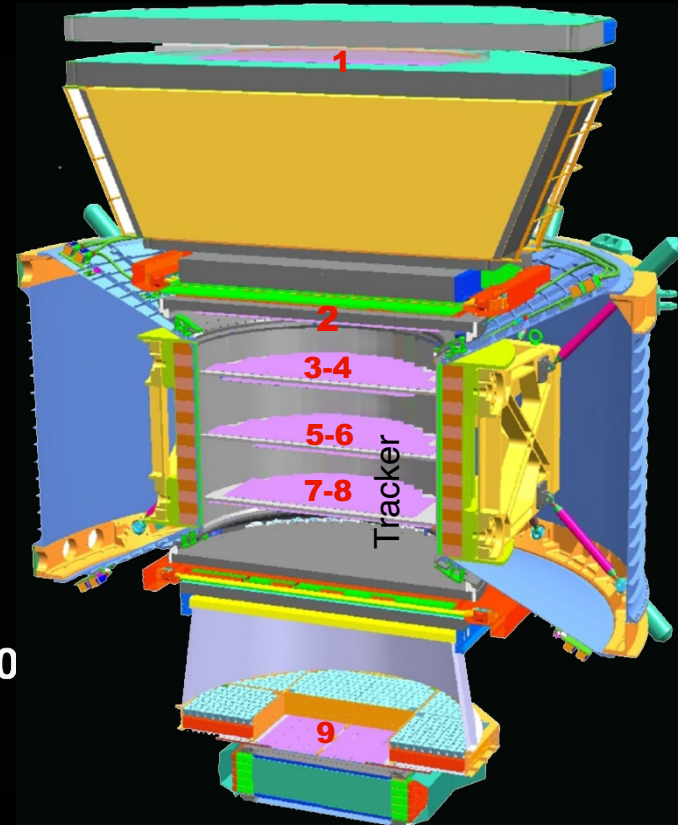
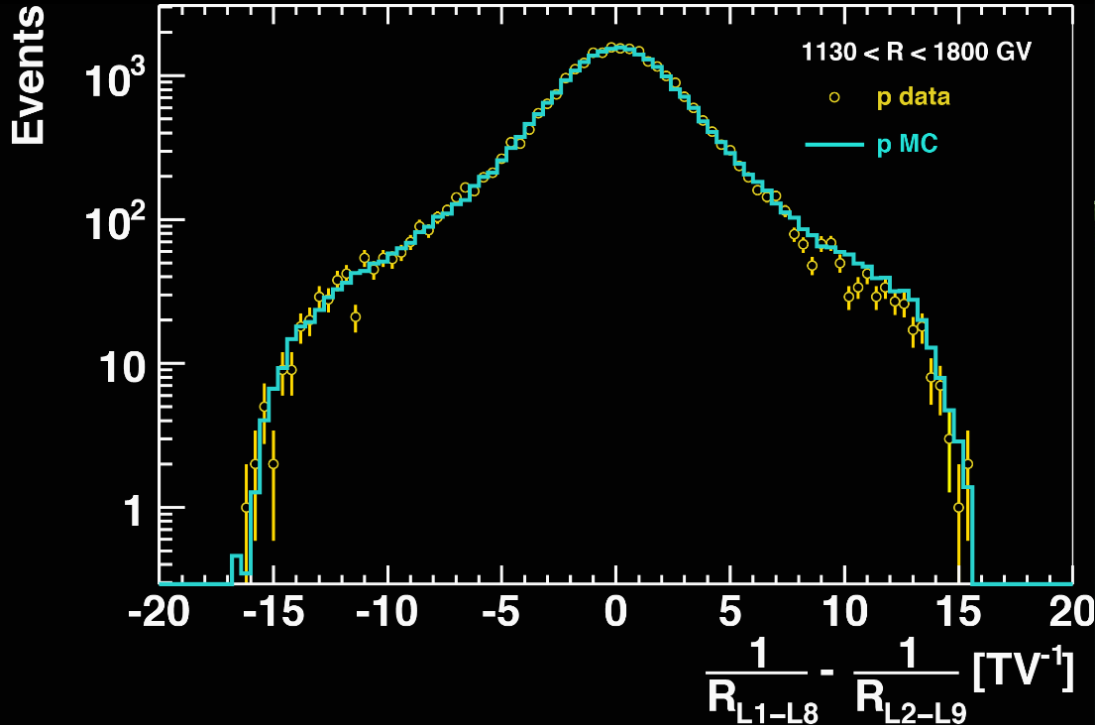
用了不同能量的不同粒子束流



# AMS的独特性质:

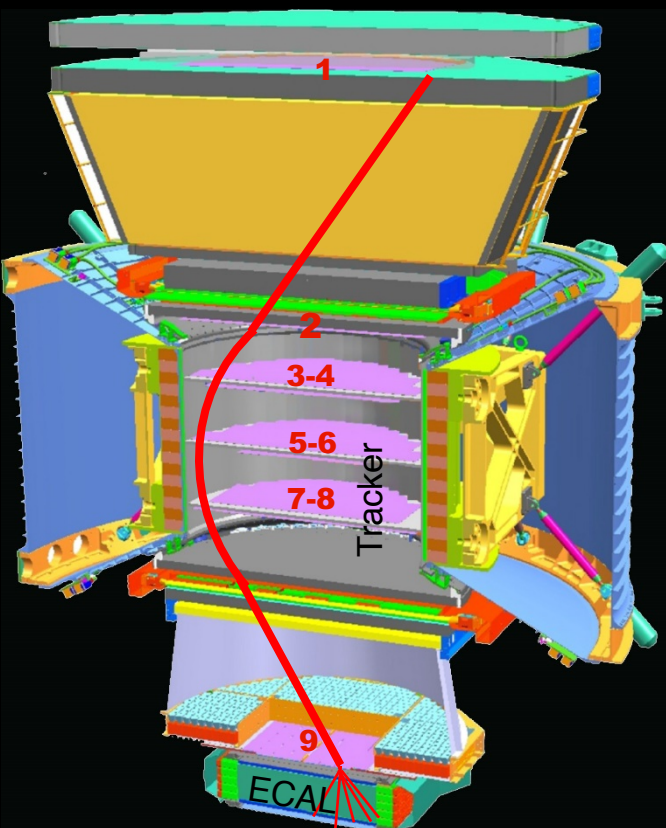
用空间站数据来确定探测器的性能，达到TeV能区

在束流测试能量以上的能区  
进行校准

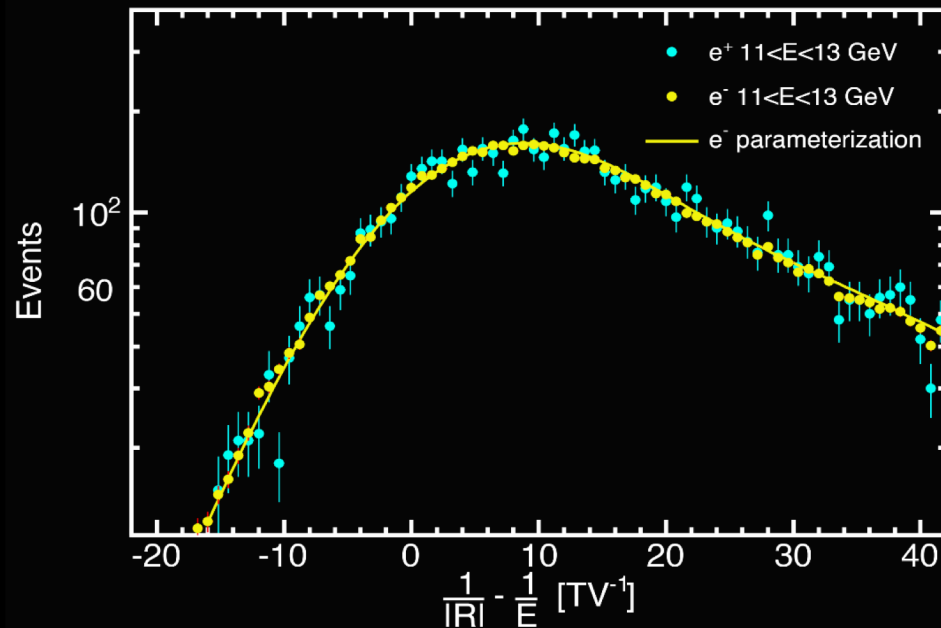


用径迹探测器的不同部分确定磁刚度的测量结果

# AMS的独特性质:

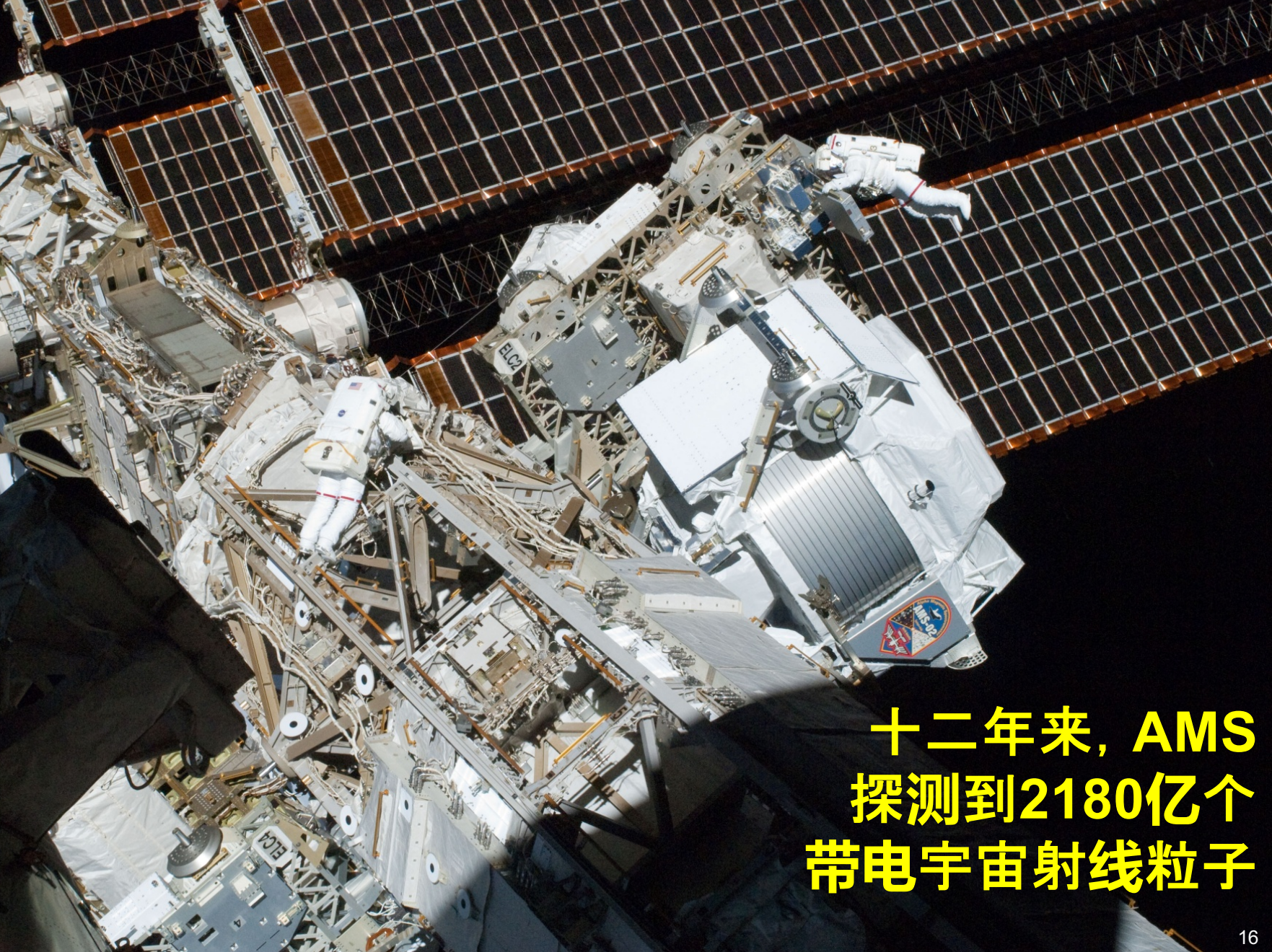


## 刚度大小的准确度



受到正电子统计量的限制，刚度的准确度为  $0.033 \text{ TV}^{-1}$ 。

这个刚度大小随时间而不变



**十二年来, AMS  
探测到2180亿个  
带电宇宙射线粒子**



- 宇宙中的基本粒子: **电子、质子、正电子、反质子**。他们基本上不衰变,能穿过宇宙空间。
- **质子,电子**以及其他初级宇宙射线在超新星遗迹中 (SNRs) 产生和加速。这些粒子与星际介质相互作用产生包括反物质粒子在内的次级粒子: **正电子、反质子**。
- 像暗物质那样的新的粒子源产生等量的粒子和反粒子。

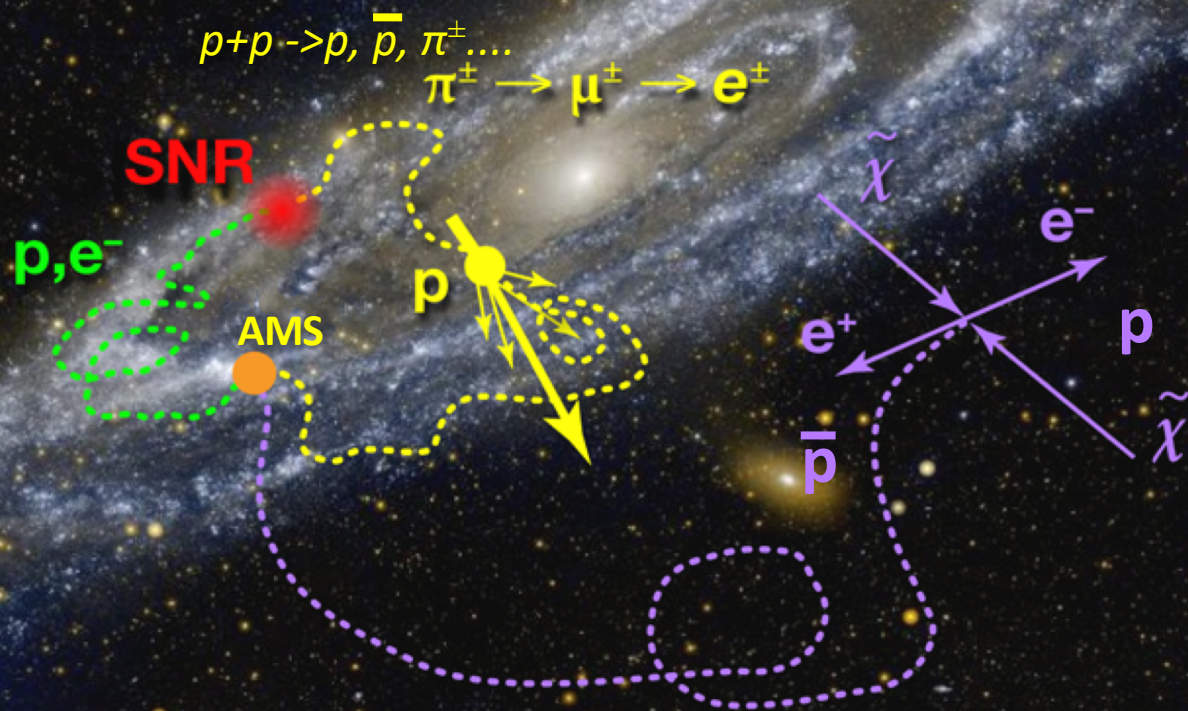


Image: GALEX, JPL-Caltech, NASA; Drawing: APS/Alan Stonebraker

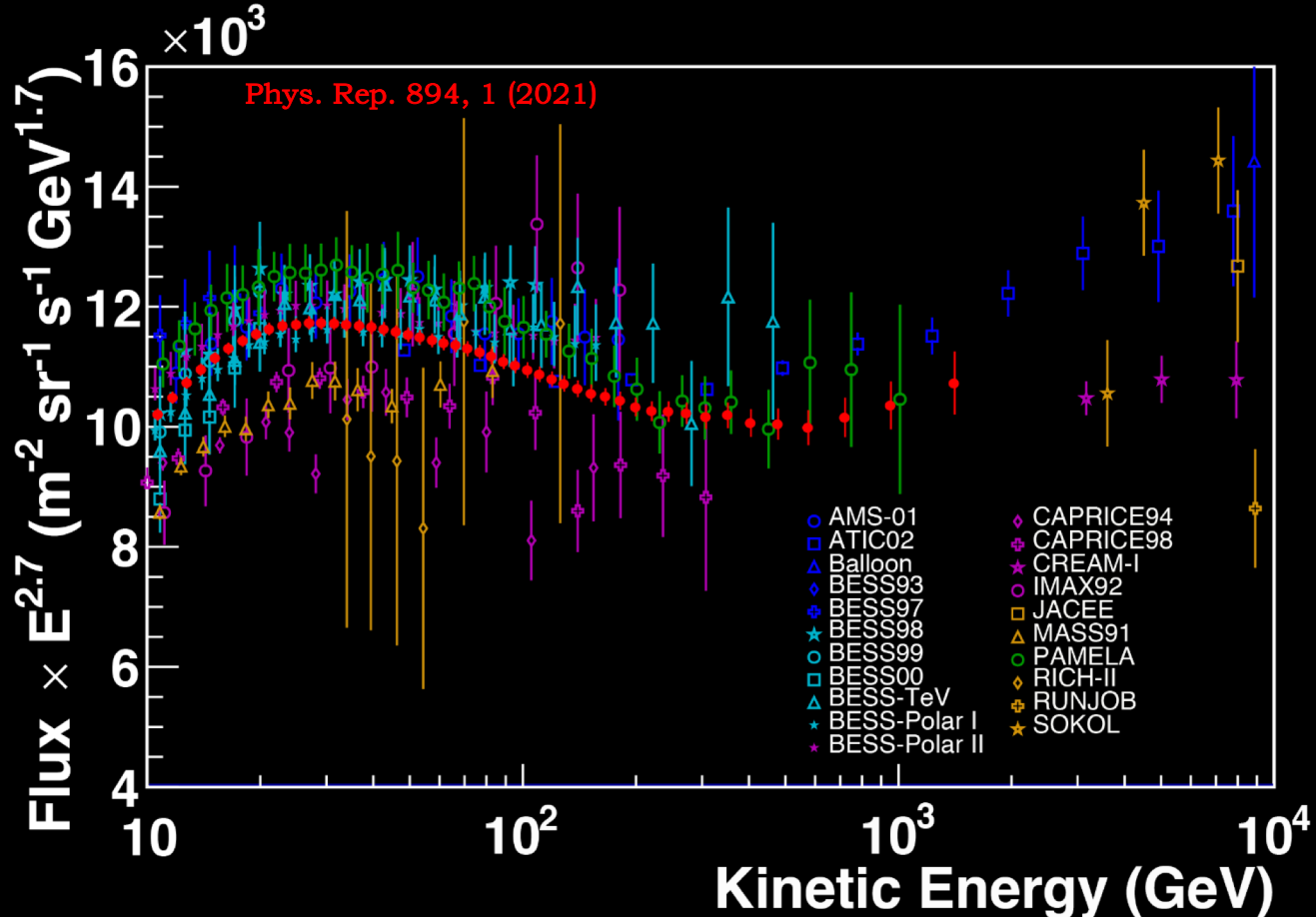
在空间中寻找新物理的主要方法就是测量与比较这些粒子的流强 17

# 最新的AMS测量的质子能谱

最新结果 - 10亿质子

结果显示能谱在200GeV以上逐渐往上。

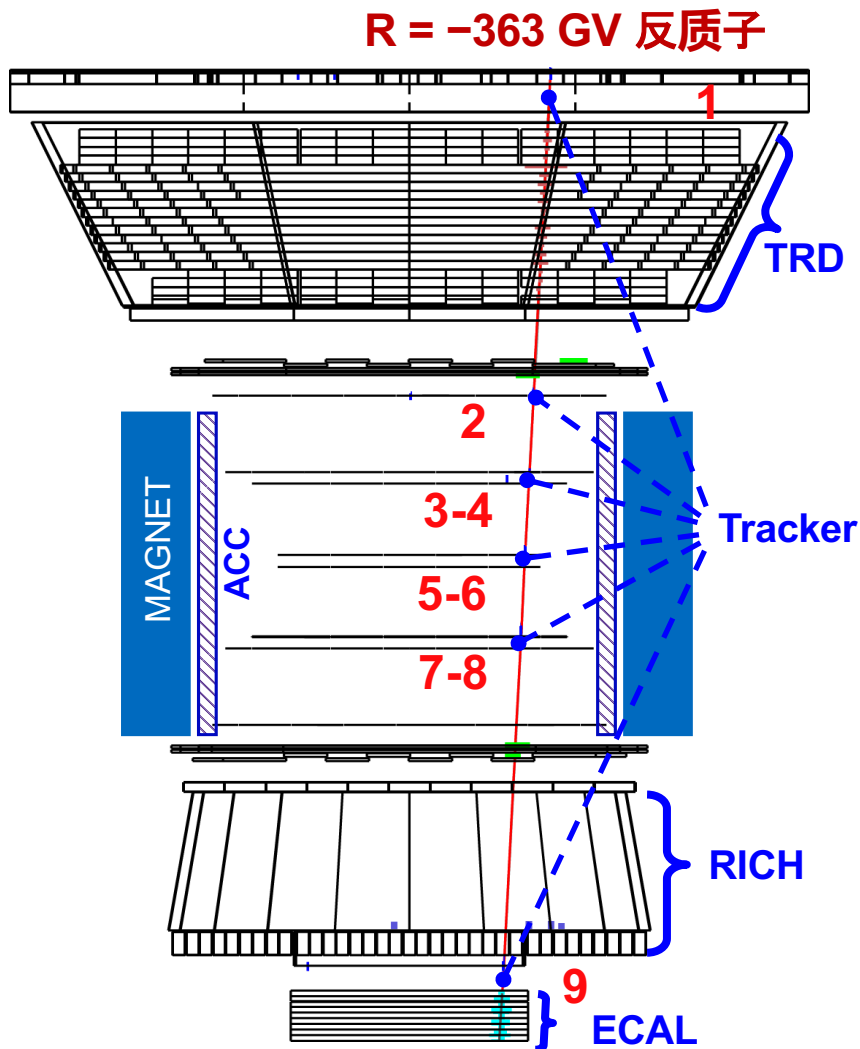
该结果与之前发表的结果一致 (PRL 114, 171103 (2015)).



# 反质子分析

反质子的流强大约是质子的 $10^{-4}$ 。达到百分之几精确度的实验结果要求我们能从**百万**个本底事例中只有**一个**误判。

- TOF & RICH: 选择从上往下穿过探测器的粒子以及测量其速度
- TRD & ECAL: 抑制电子带来的本底
- Tracker: 测量刚度和辨别测量错误的质子。
- 我们用径迹探测器和TOF的信息组合成了一个电荷误判鉴别器Charge Confusion Estimator, 以此抑制测量刚度为负的质子的本底。



# 高能区的反质子鉴别

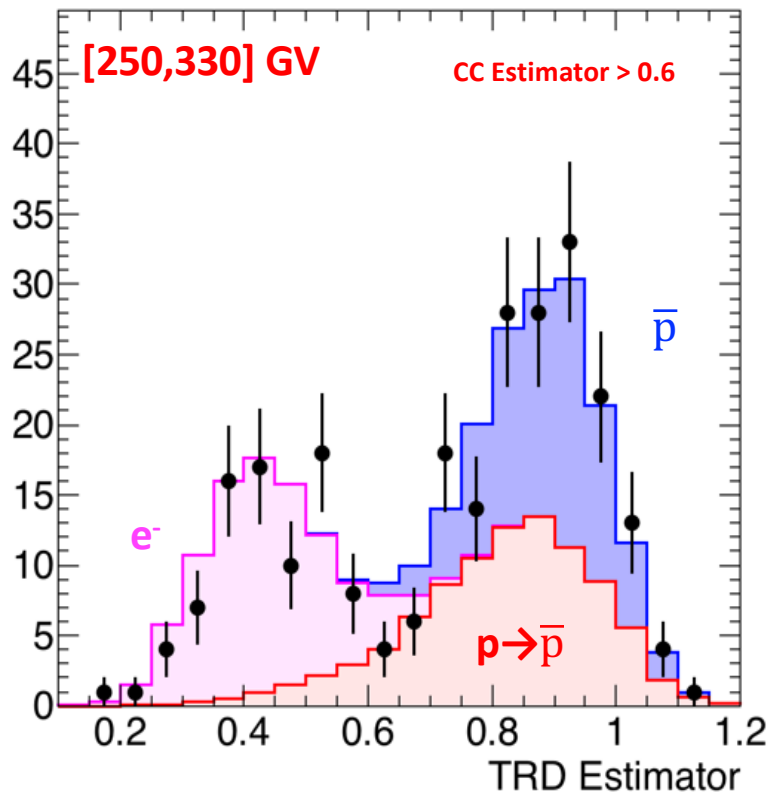
•反质子的信号在信号区域清晰可见

在刚度为1到525GV范围内，一共鉴别出 $5.60 \times 10^5$ 个反质子。

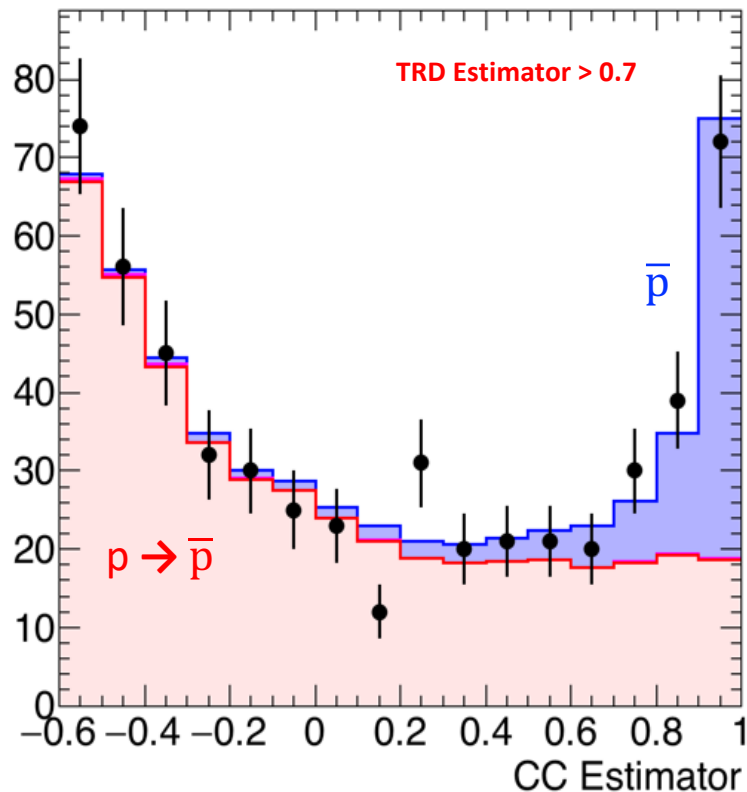
•电子：用TRD estimator抑制

•电荷误判质子：用Charge Confusion estimator 鉴别

TRD Estimator Projection



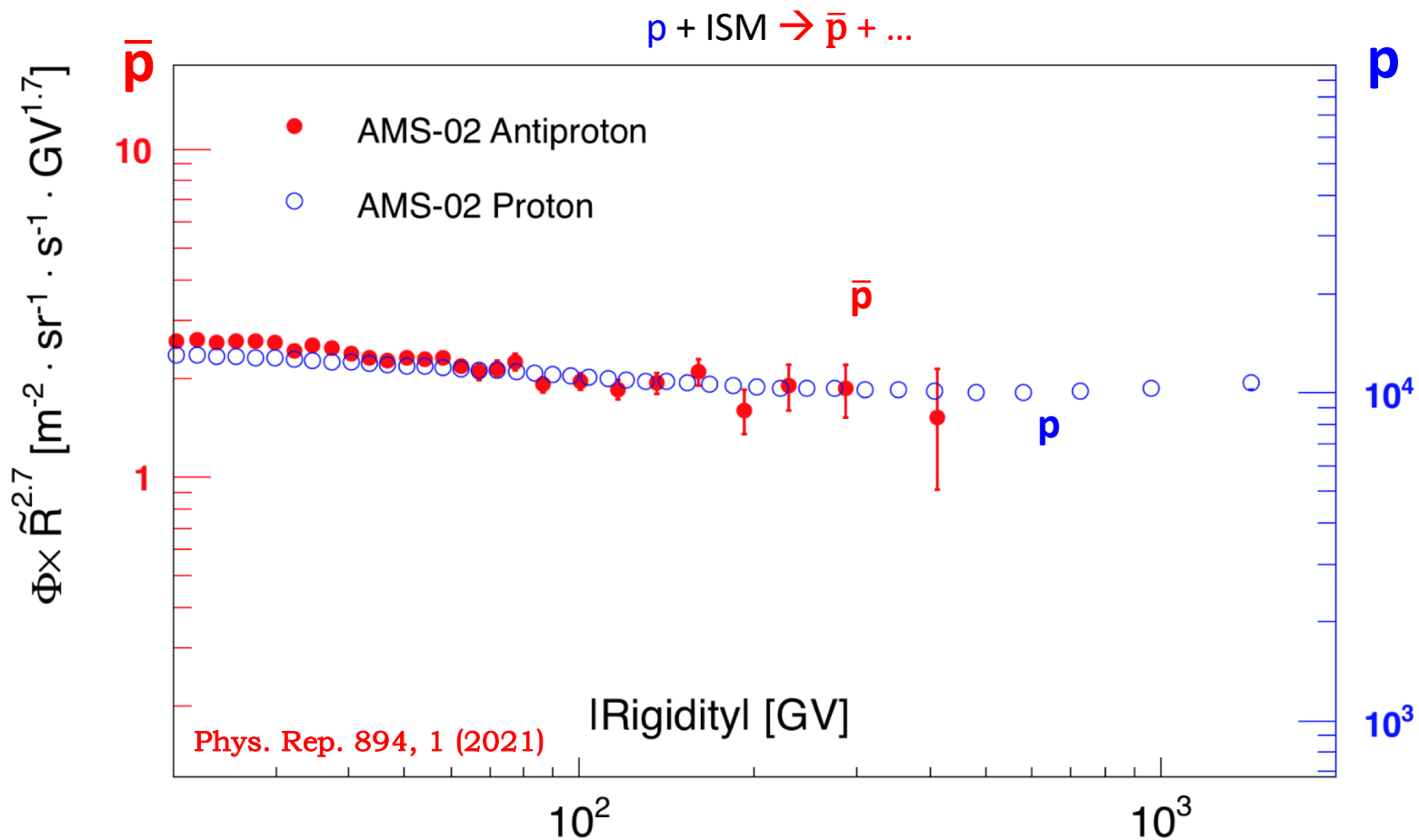
Charge Confusion (CC) Estimator Projection



在100GV以上，超过3500个反质子被探测器捕捉。  
而其他所有实验只有3个。

# 反质子流强性质的精确研究

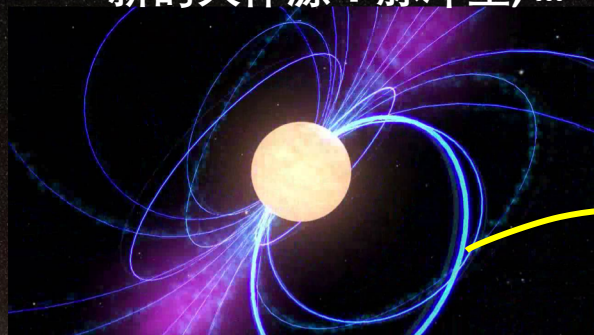
如果 $\bar{p}$ 主要由星际介质中产生的次级粒子组成，它们的磁刚度谱应该跟 $p$ 不一样：



- 世界上首次，AMS观察到在60 GV能量以上， $p$  和  $\bar{p}$  的刚度谱有完全一样的刚度依赖：违背了反质子只由质子与星际介质相互作用产生的理论。

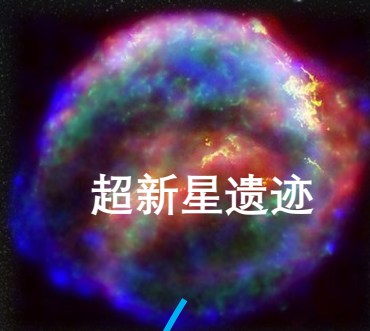
# 宇宙射线的来源

新的天体源：脉冲星，...



脉冲星产生的正电子

超新星遗迹



质子，  
电子，...

星际介质

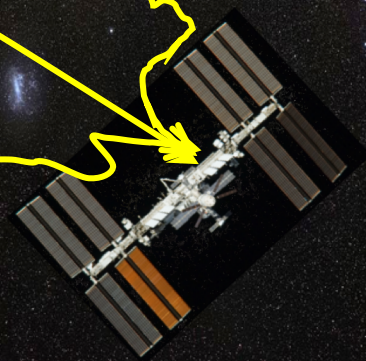
碰撞中产生的  
正电子、反质子

暗物质

暗物质产生的  
正电子、反质子

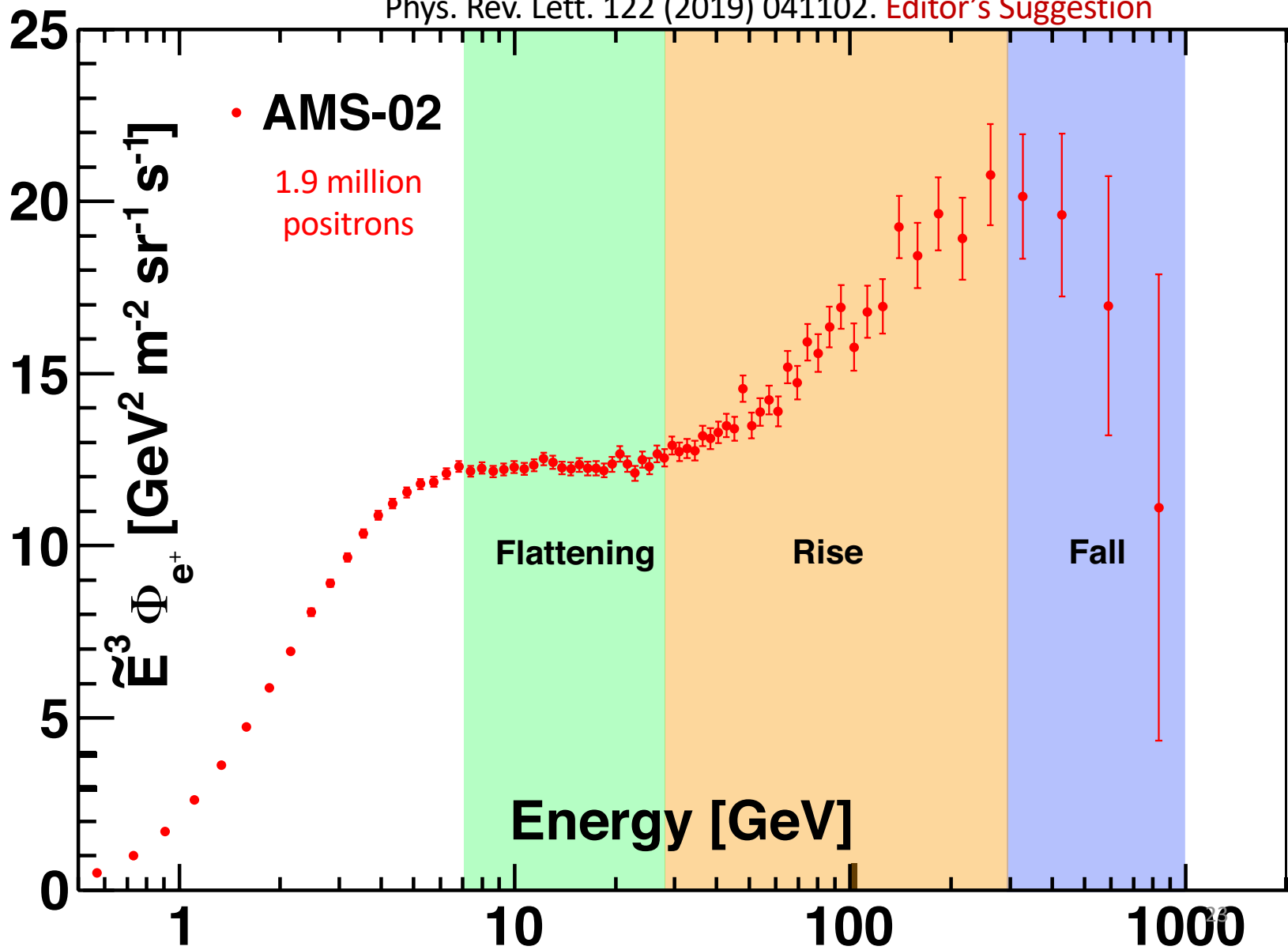
电子、质子...

暗物质

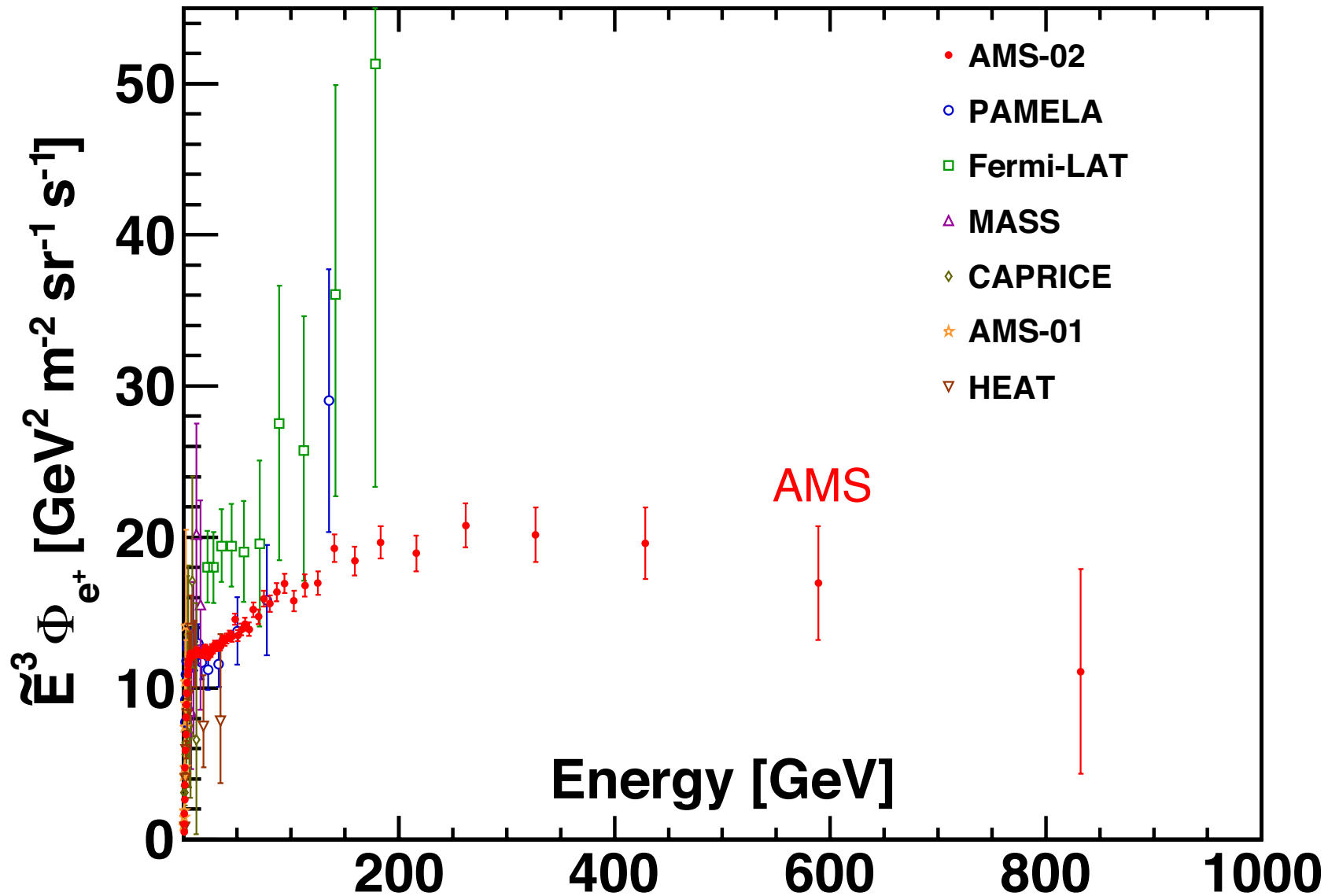


# 进一步理解宇宙线正电子来源

Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 041102. Editor's Suggestion



# 跟其他测量结果的对比

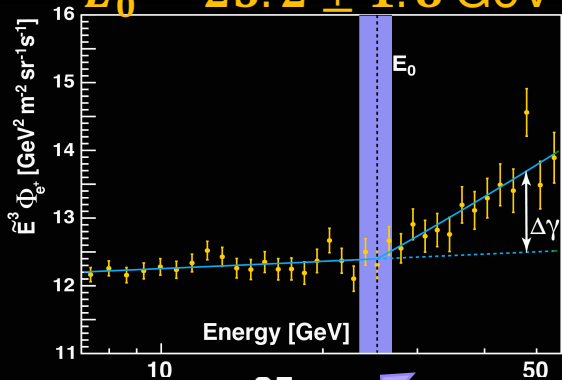




用函数拟合数据  $\Phi_{e^+}(E) = \begin{cases} CE^\gamma, & E \leq E_0; \\ CE^\gamma (E/E_0)^{\Delta\gamma}, & E > E_0. \end{cases}$

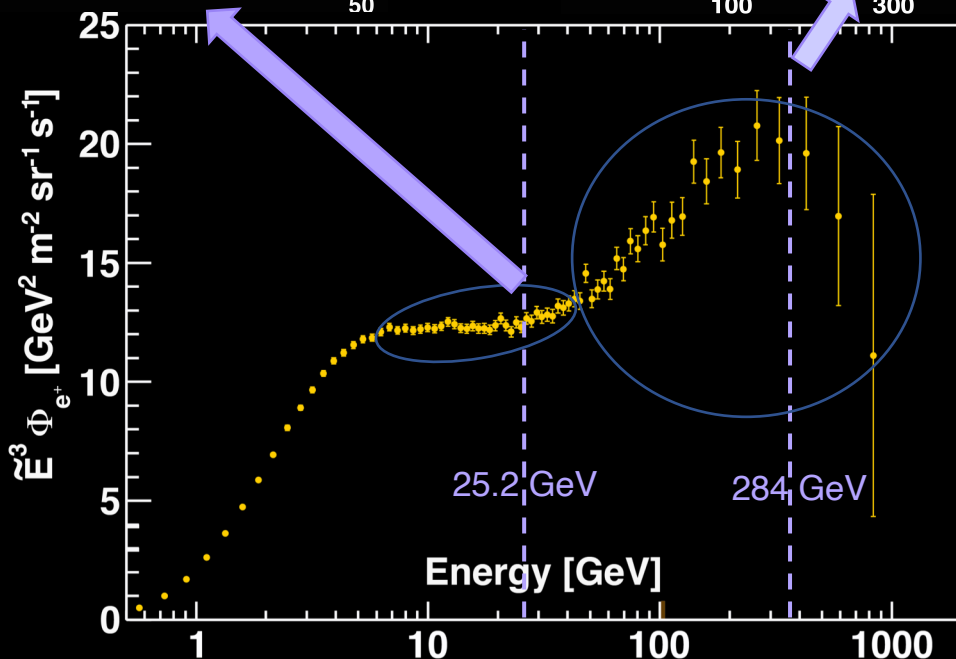
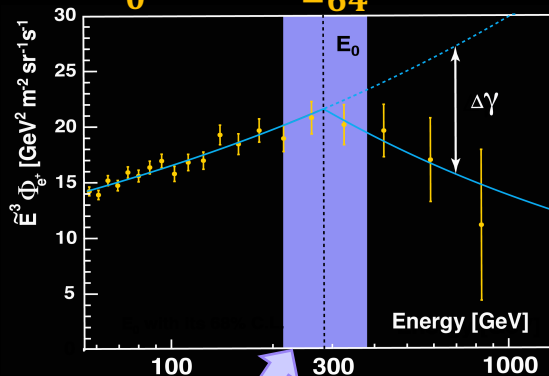
(a) 在此能量发现了超出

$E_0 = 25.2 \pm 1.8 \text{ GeV}$



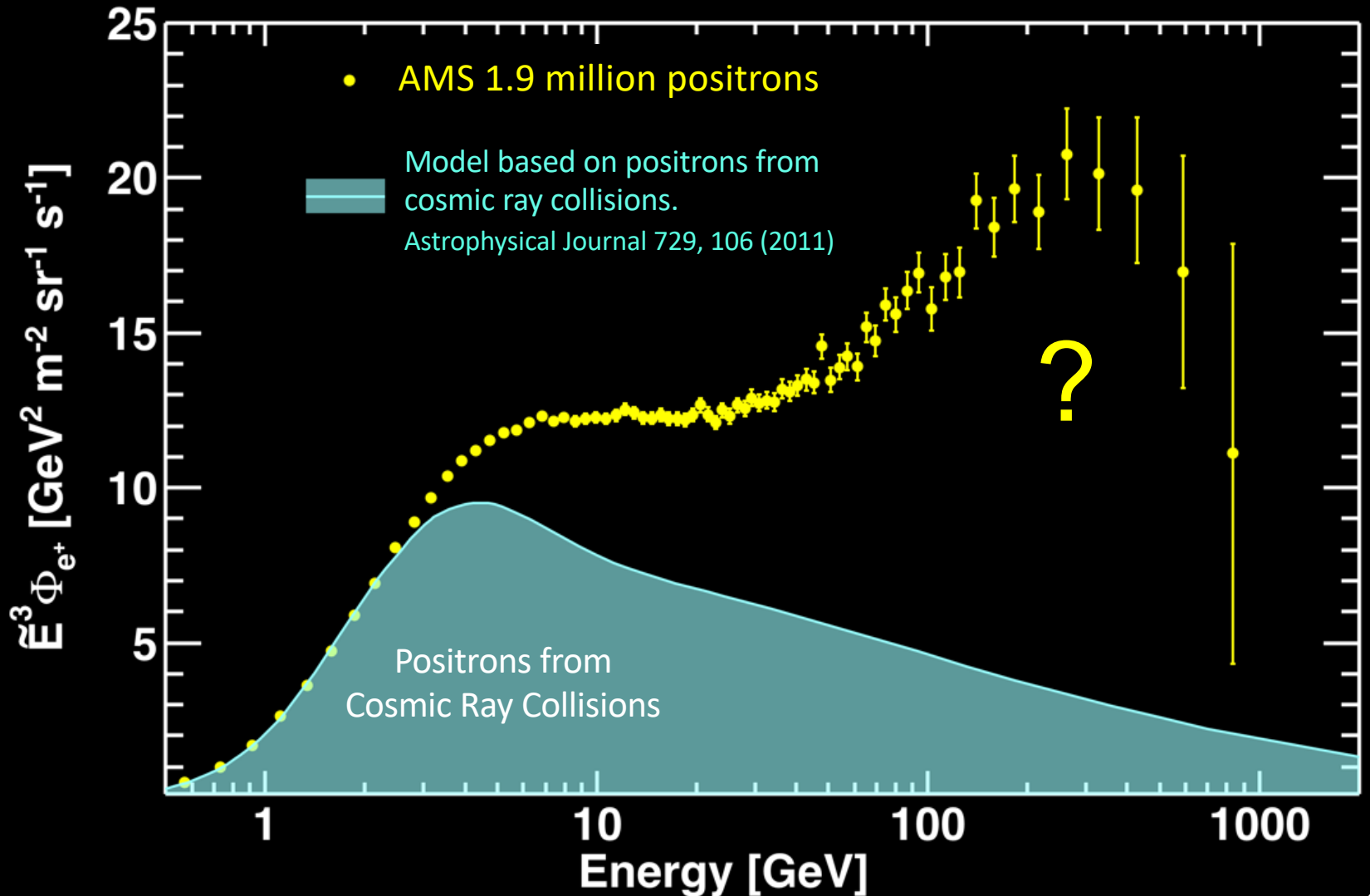
(b) 在此能量发现了急剧下降

$E_0 = 284^{+91}_{-64} \text{ GeV}$



# 正电子的来源

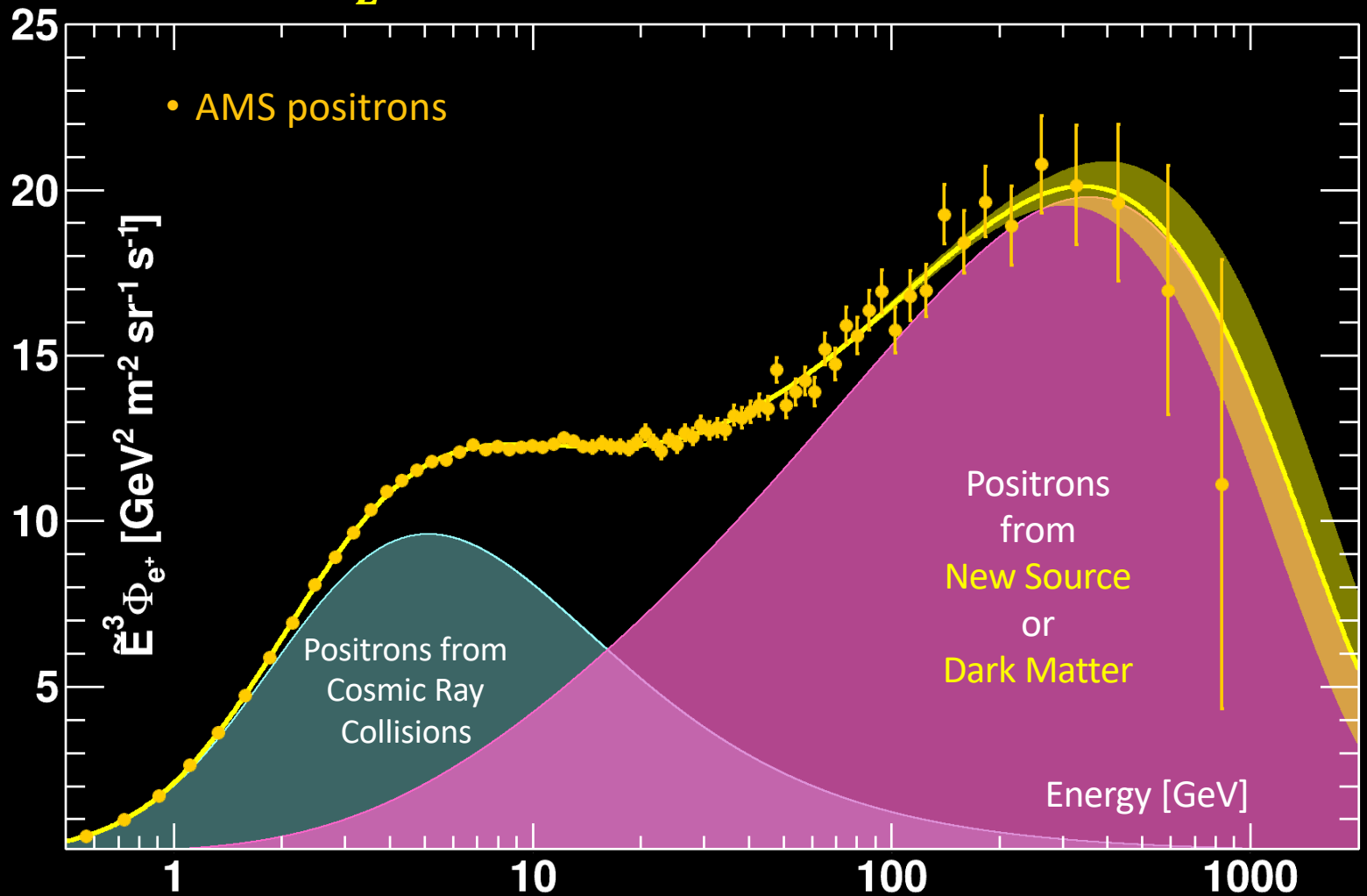
低能的正电子主要由宇宙射线碰撞产生



正电子能谱可以用宇宙射线碰撞产生的低能部分加上一个带有截止能量  $E_s$  的新的源或者暗物质产生的高能部分的总和

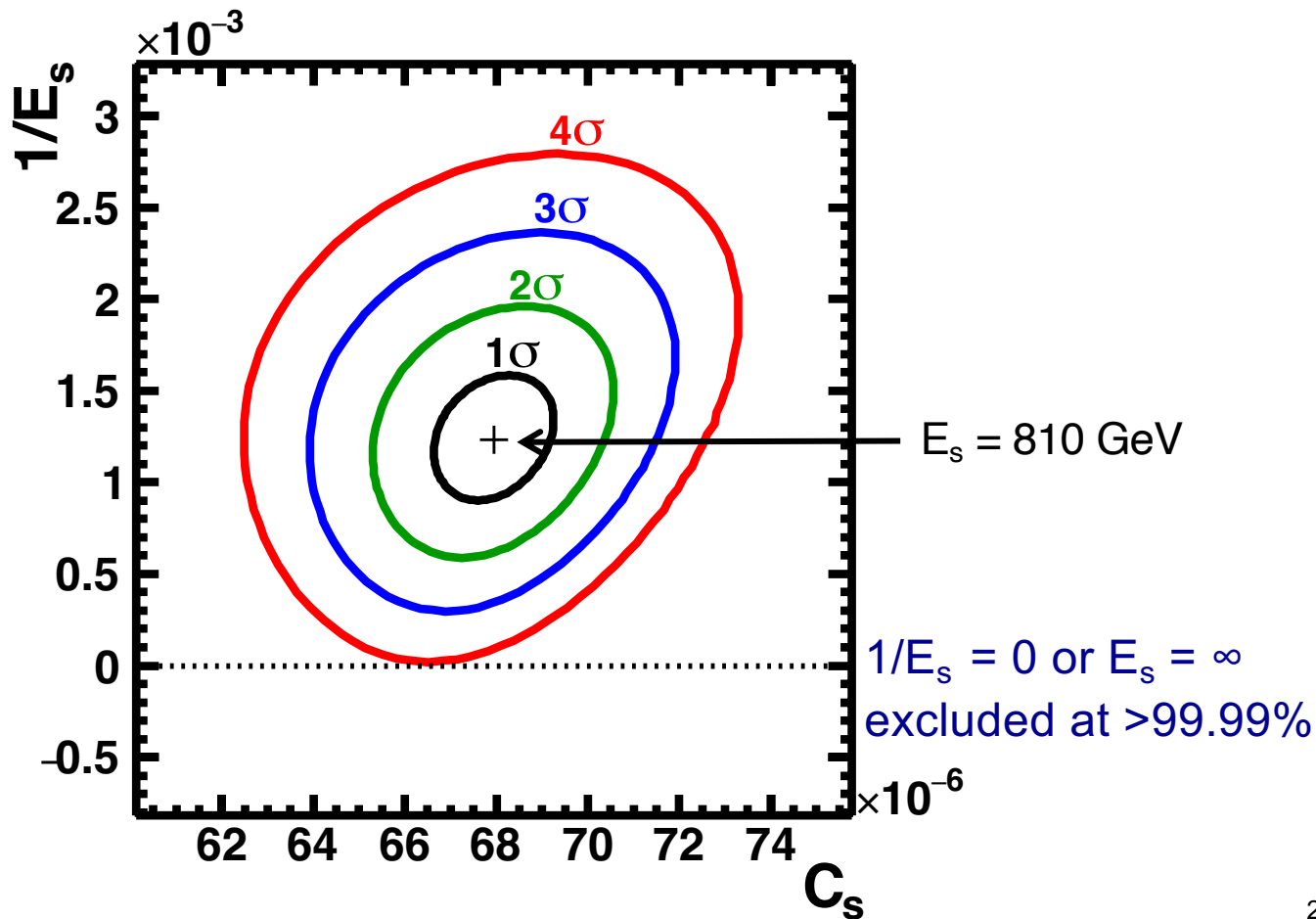
$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[ C_d (\hat{E}/E_1)^{\gamma_d} + C_s (\hat{E}/E_2)^{\gamma_s} \exp(-\hat{E}/E_s) \right]$$

Collisions      New Source or Dark Matter



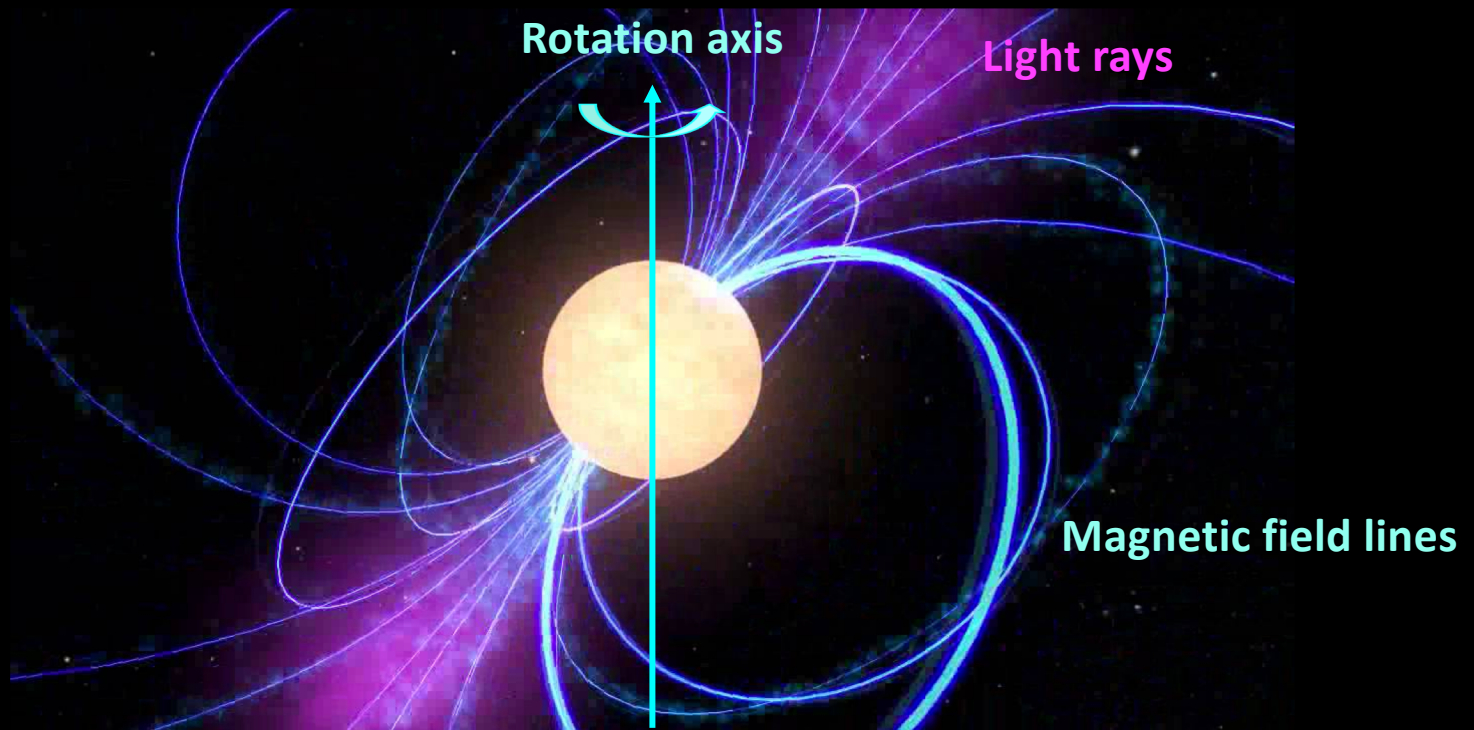
一个有限能量的源项  $E_s = 810^{+310}_{-180}$  GeV,  
置信度超过99.99%.

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



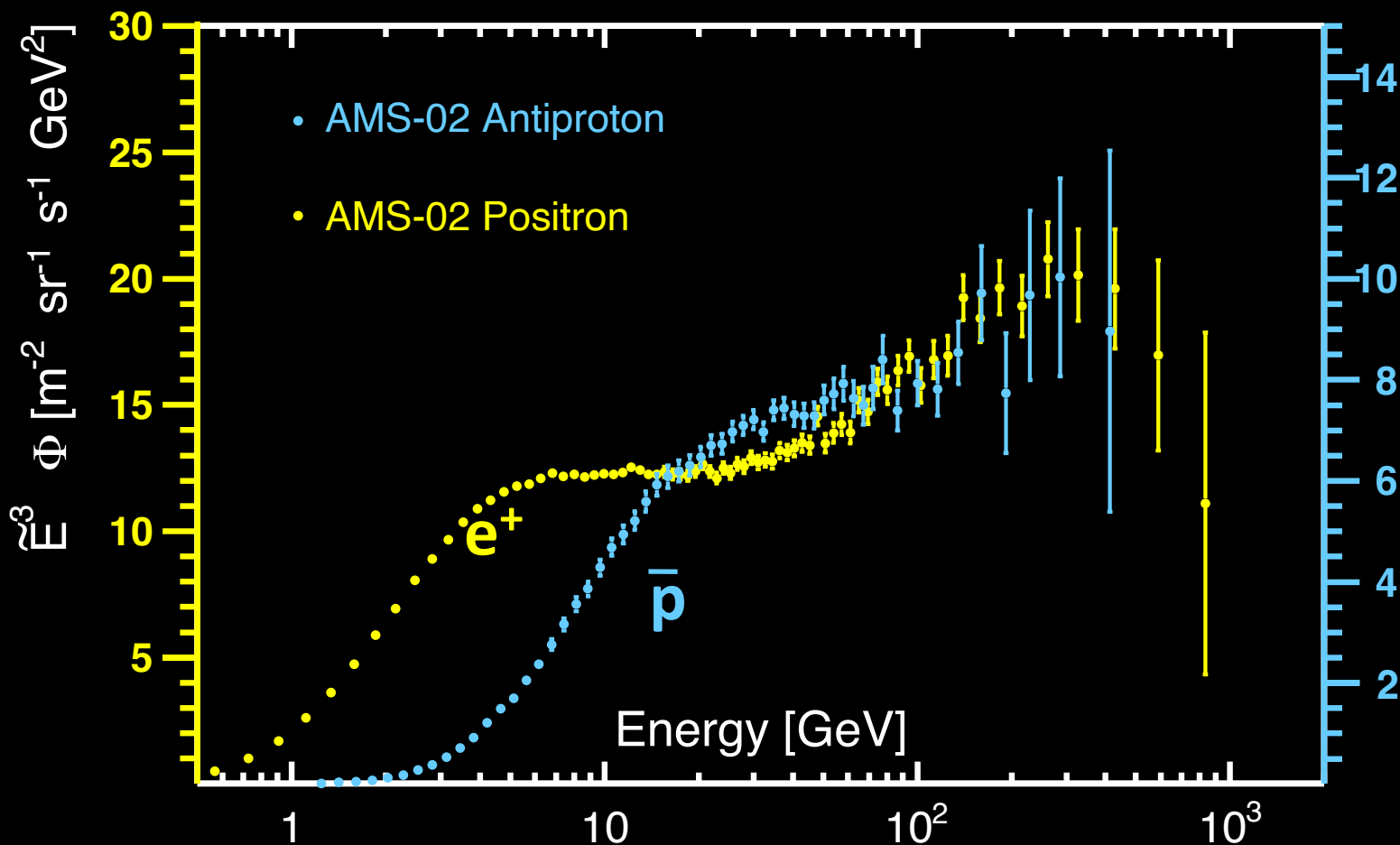
# 脉冲星产生的正电子

1. 脉冲星会产生和加速正电子。
2. 脉冲星不会产生反质子。
3. 脉冲星产生正电子会导致地球上观察到的正电子偏向某些方向。



# AMS 物理结果:

## 反质子数据有着正电子能谱的趋势



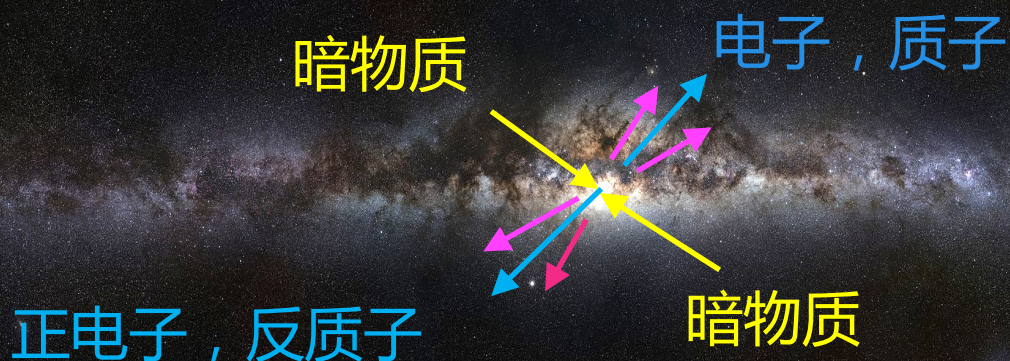
- The similarity between antiproton and positron indicate a primary source of positron and antiprotons.
- Their behavior is inconsistent with pulsar origin of positrons

# 暗物质

暗物质碰撞产生正电子和反质子。

质量为 $M$ 的暗物质粒子运动缓慢。

两个暗物质粒子对撞前的总能量  $\approx 2M$ 。

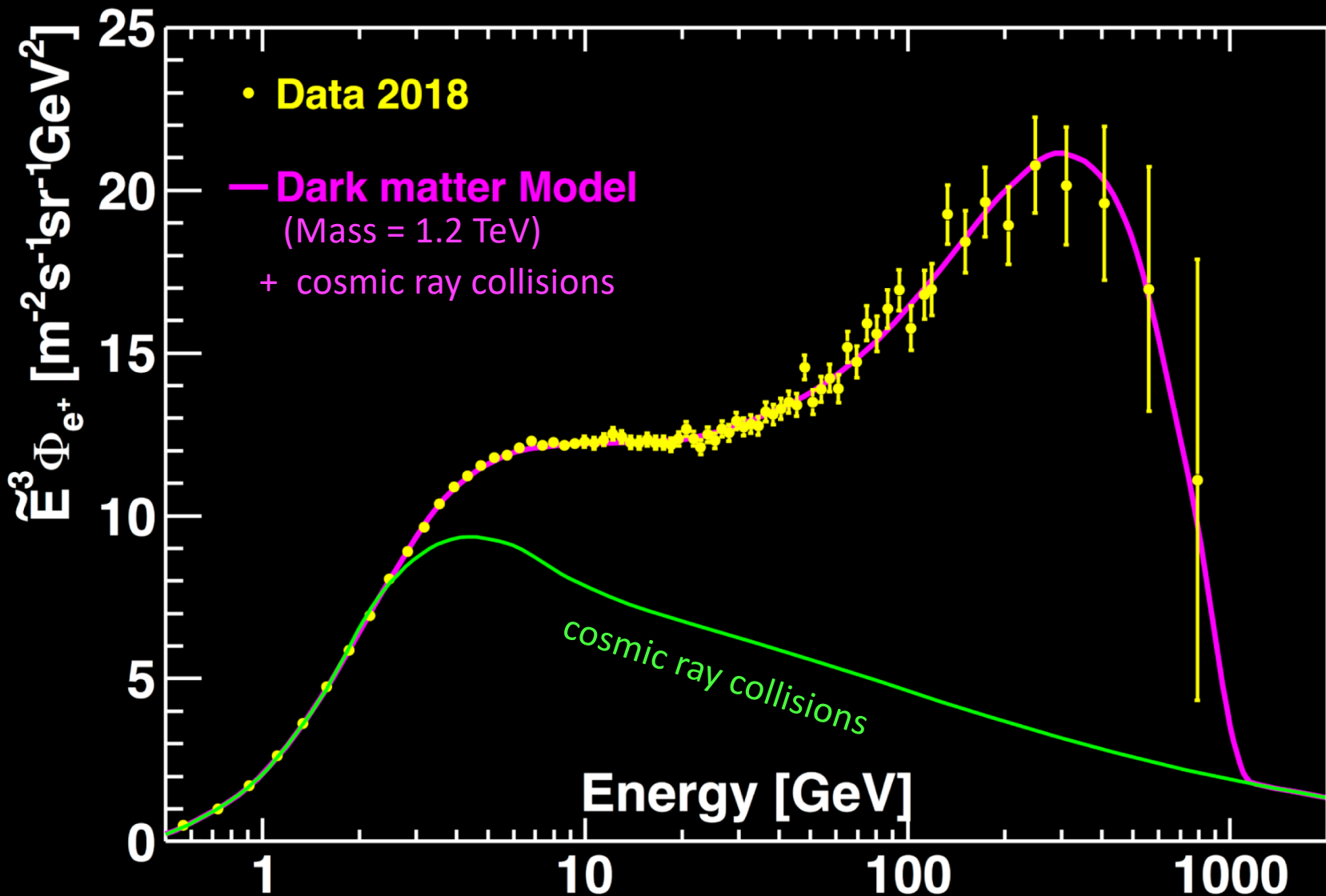


能量守恒和动量守恒定律要求：

正电子或者反质子能量一定小于 $M$ 。

所以，能谱在能量为 $M$ 处会有截至。

# 正电子和暗物质 2018

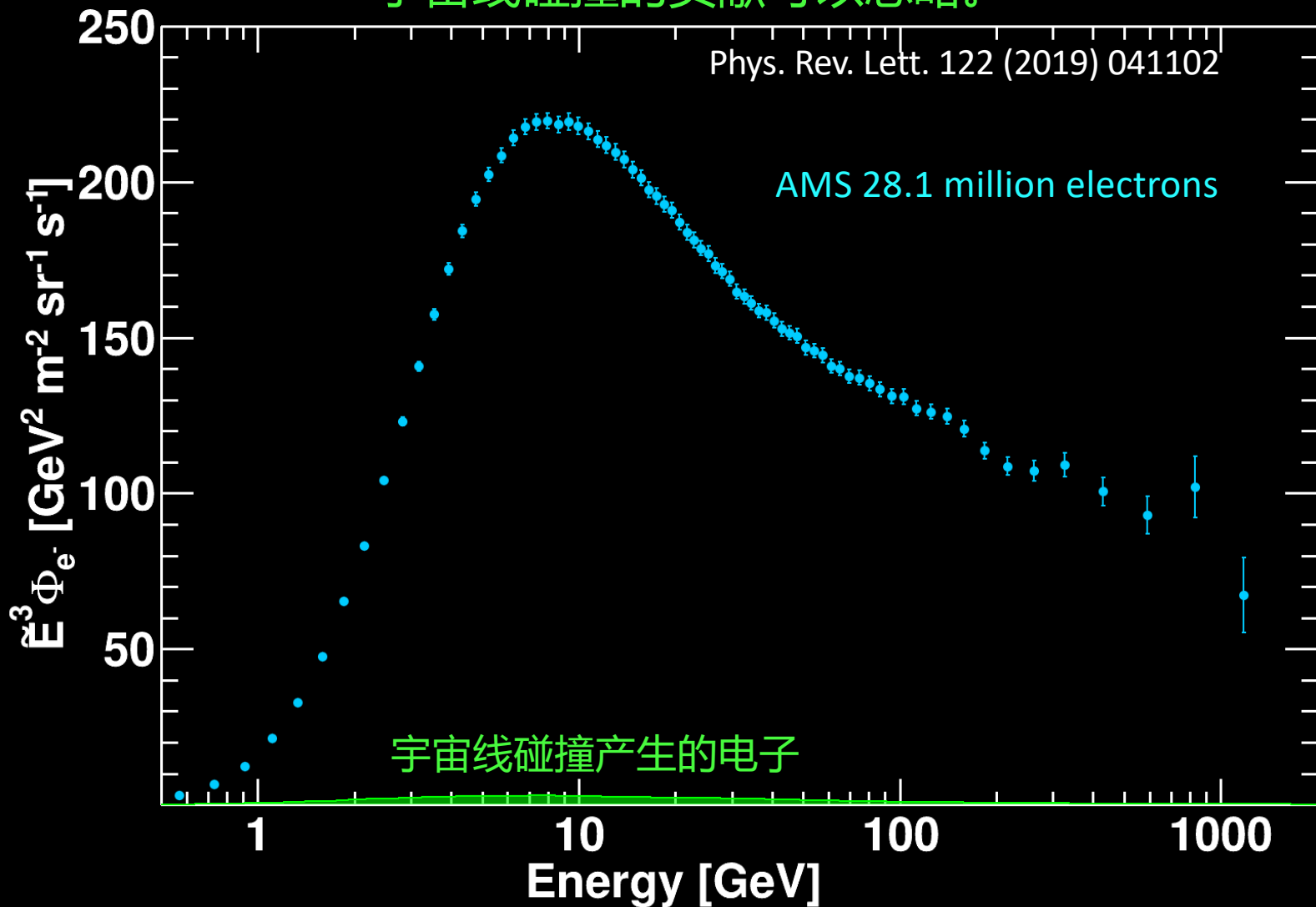




# AMS 物理结果:

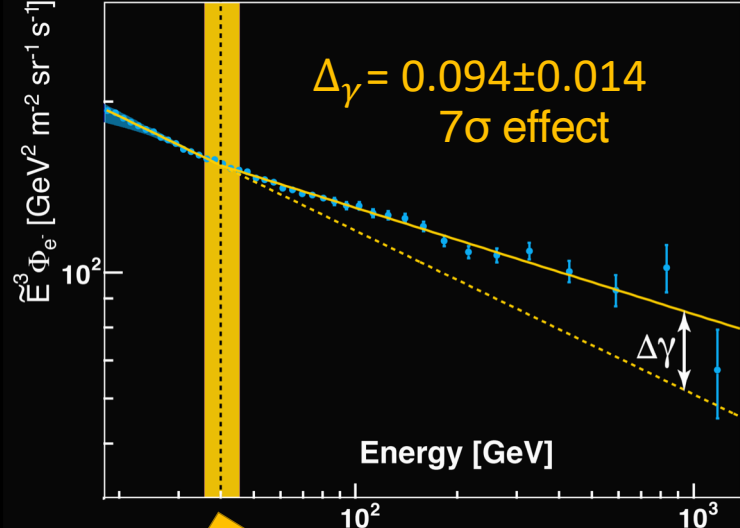
## 宇宙线电子的来源

宇宙线碰撞的贡献可以忽略。



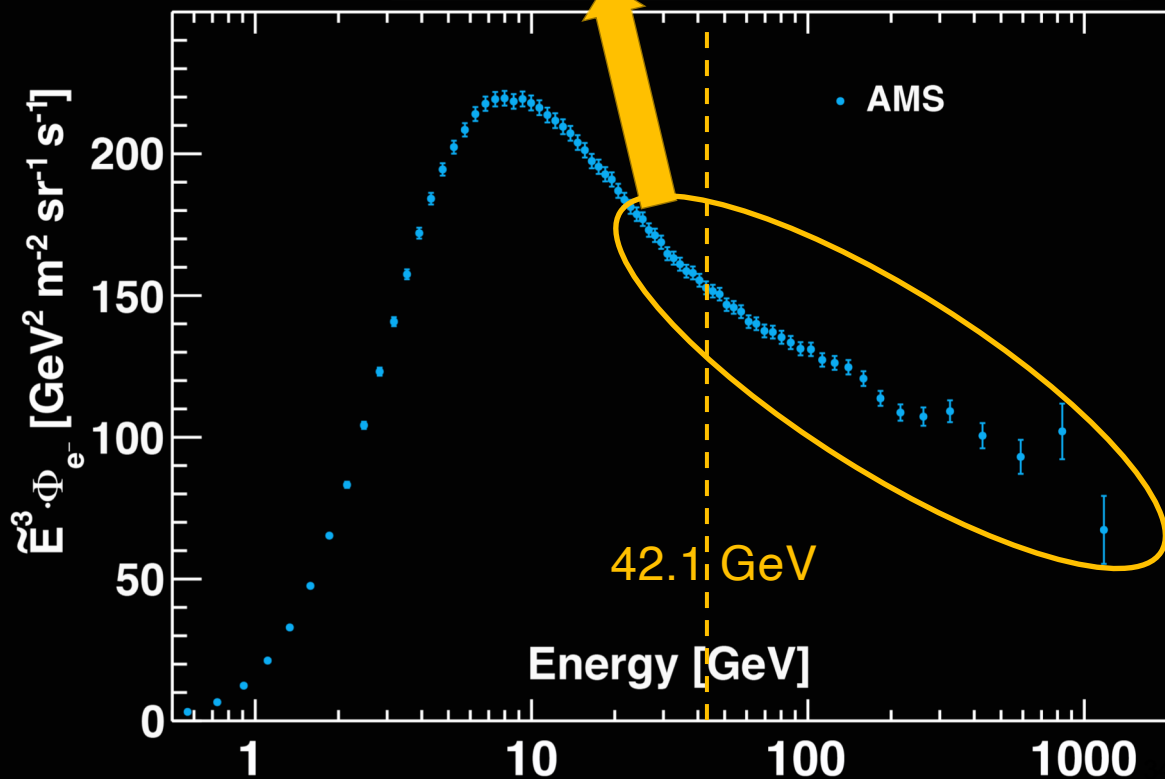
对数据进行拟合

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



在此观察到明显上升

$$E_0 = 42.1_{-5.2}^{+5.4} \text{ GeV}$$



电子流强可以用两个幂律谱的和来表示:

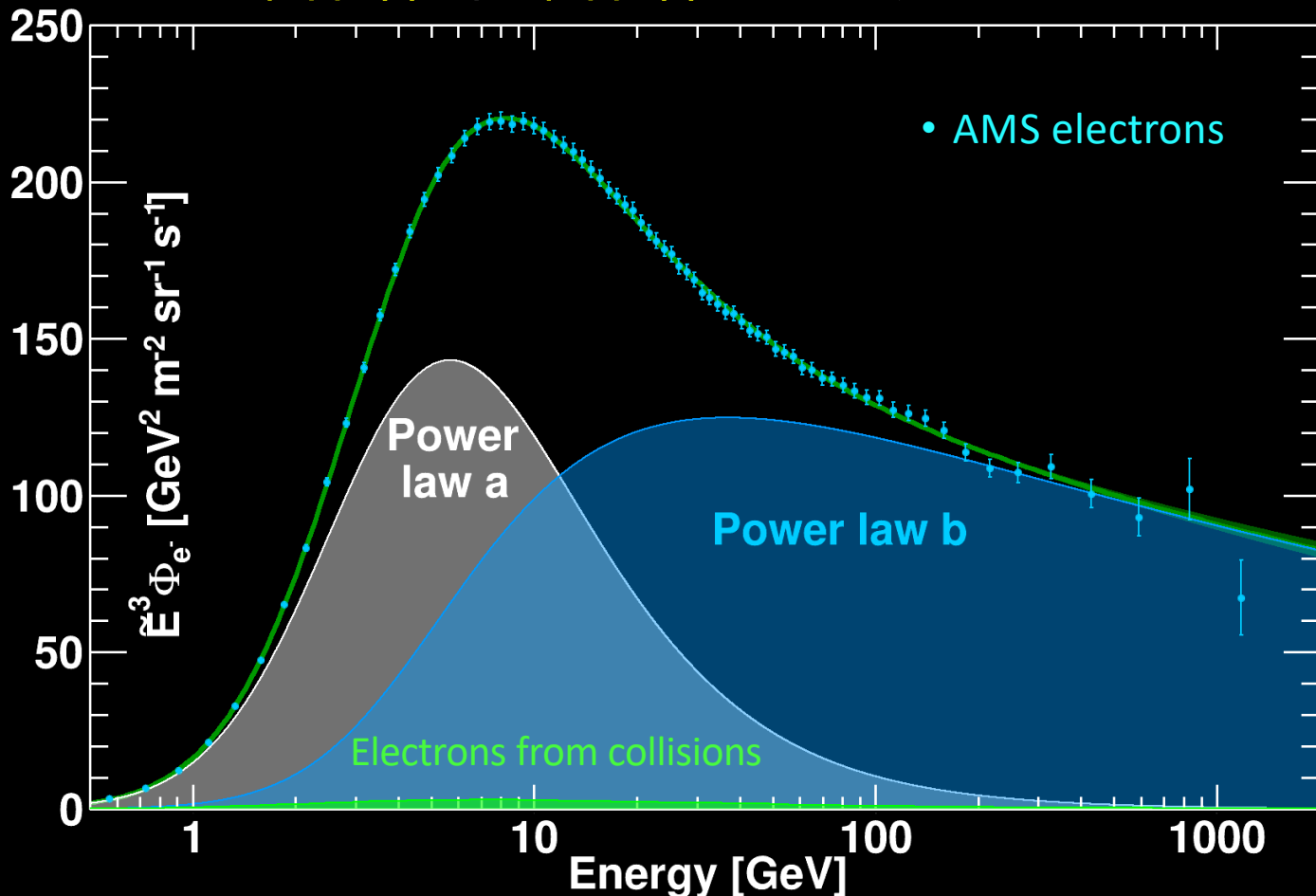
$$\Phi_{e^-}(E) = S(E) \left[ C_a (\hat{E}/E_a)^{\gamma_a} + C_b (\hat{E}/E_b)^{\gamma_b} \right]$$

Solar &  
low-energy

幂律谱  $a$

幂律谱  $b$

幂律谱  $a$  和幂律谱  $b$  的来源是什么?



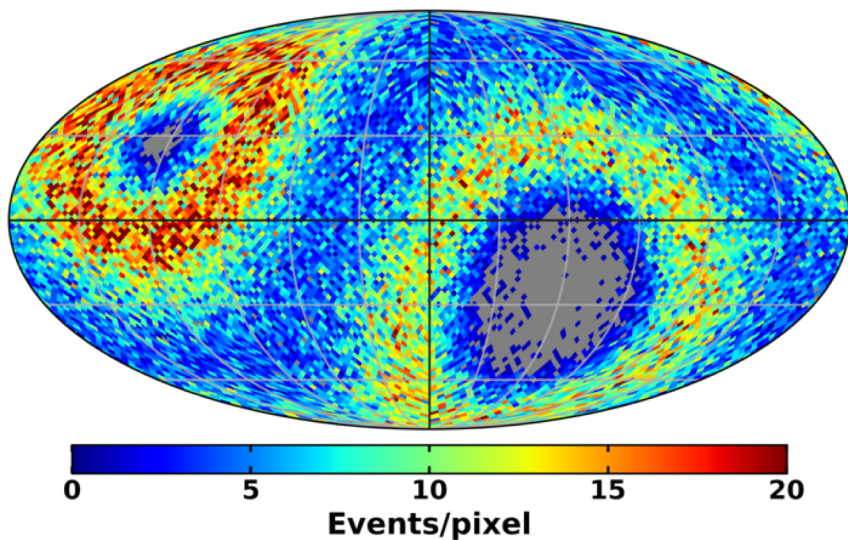
# 正电子各向异性和暗物质

像脉冲星那样的天体物理源会往高能正电子能谱注入更高的各向异性。而暗物质则不会。

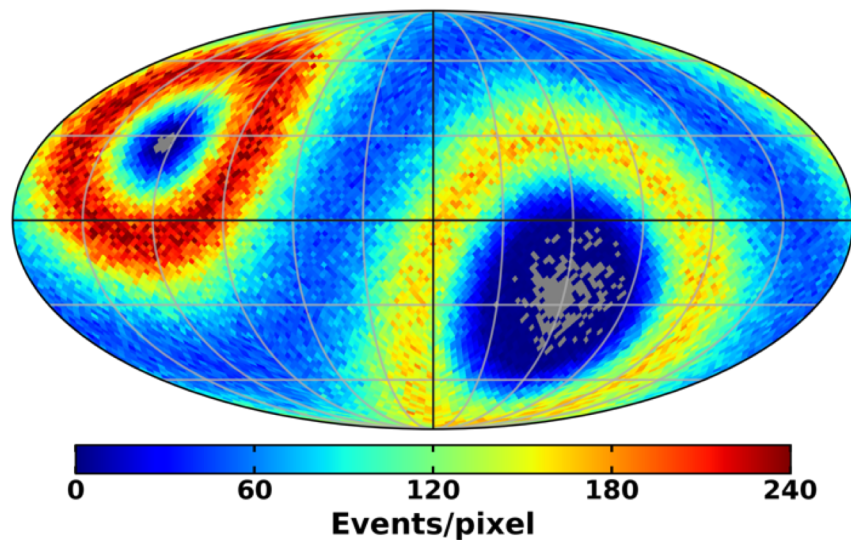
The anisotropy in galactic coordinates

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

**positrons**



**electrons**



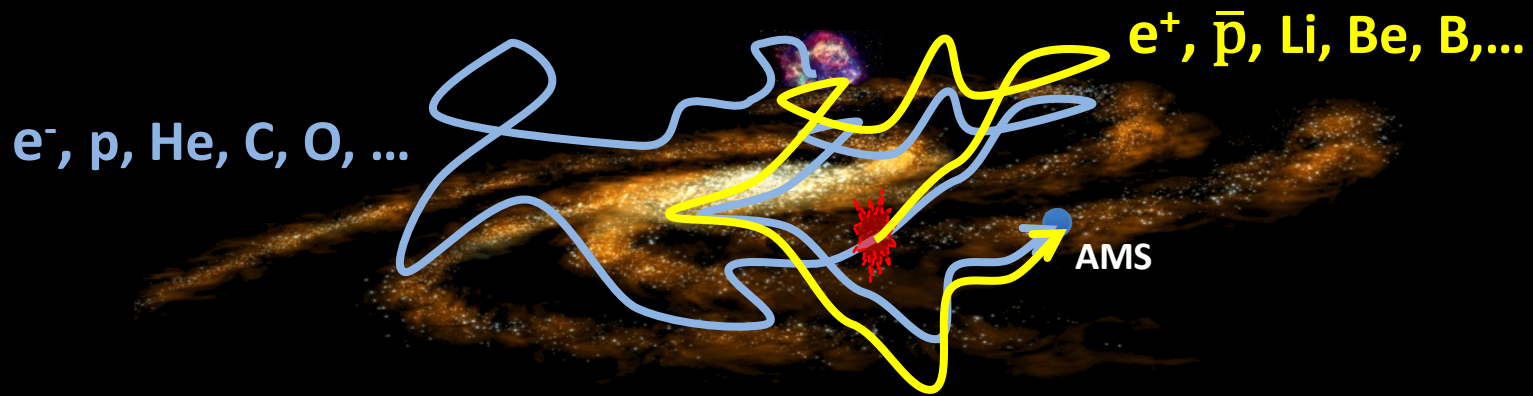
Currently at 95% C.L.:  
for  $16 < E < 350$

positrons:  $\delta < 0.019$   
electrons:  $\delta < 0.005$

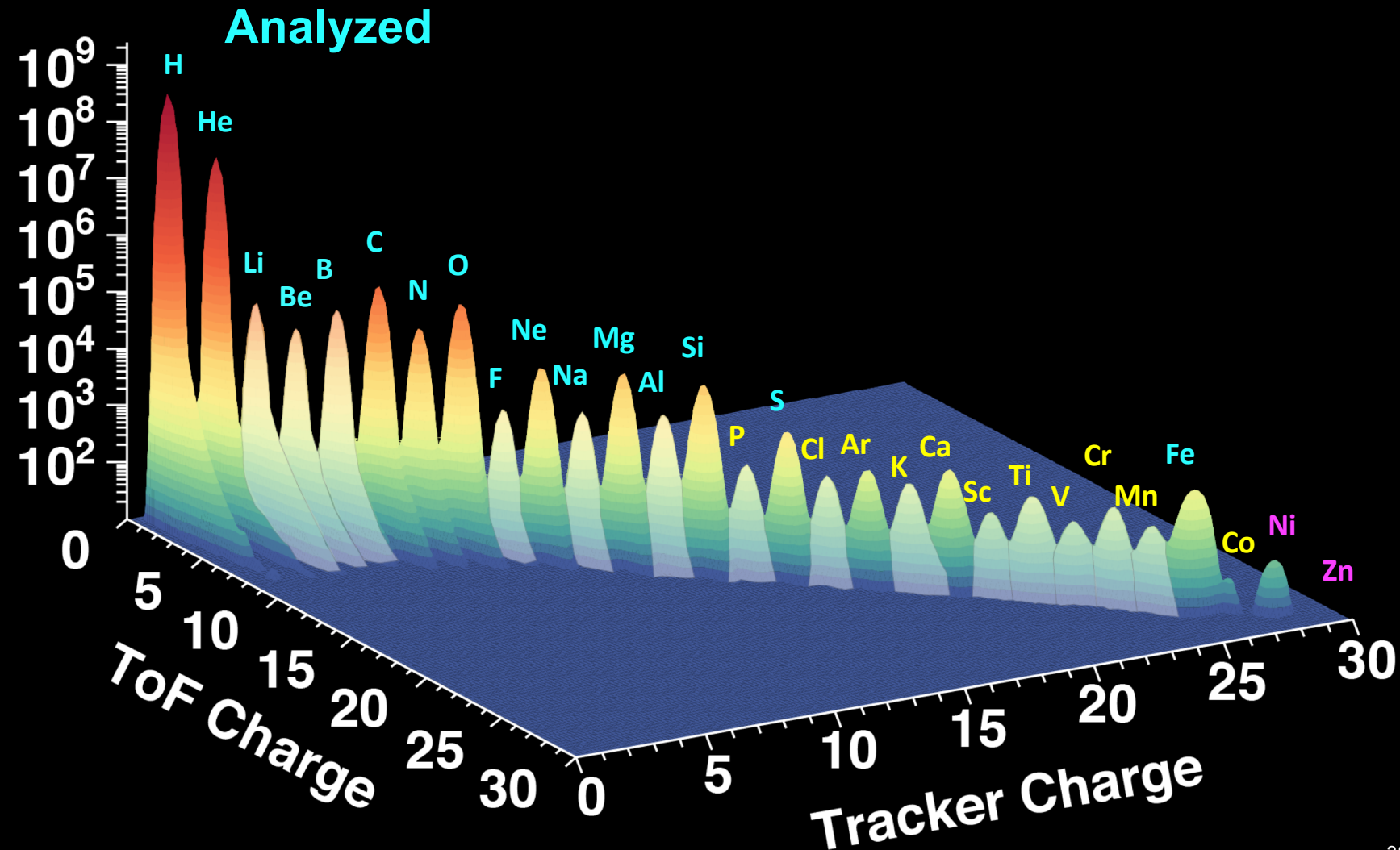
宇宙射线可以分为两类：

初级 ( $e^-$ ,  $p$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{O}$ , ...) 和 次级 ( $e^+$ ,  $\bar{p}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{B}$ , ...).

次级宇宙射线由初级宇宙射线与星际介质的碰撞产生。  
它们携带了飞行的历史以及星际介质的信息。



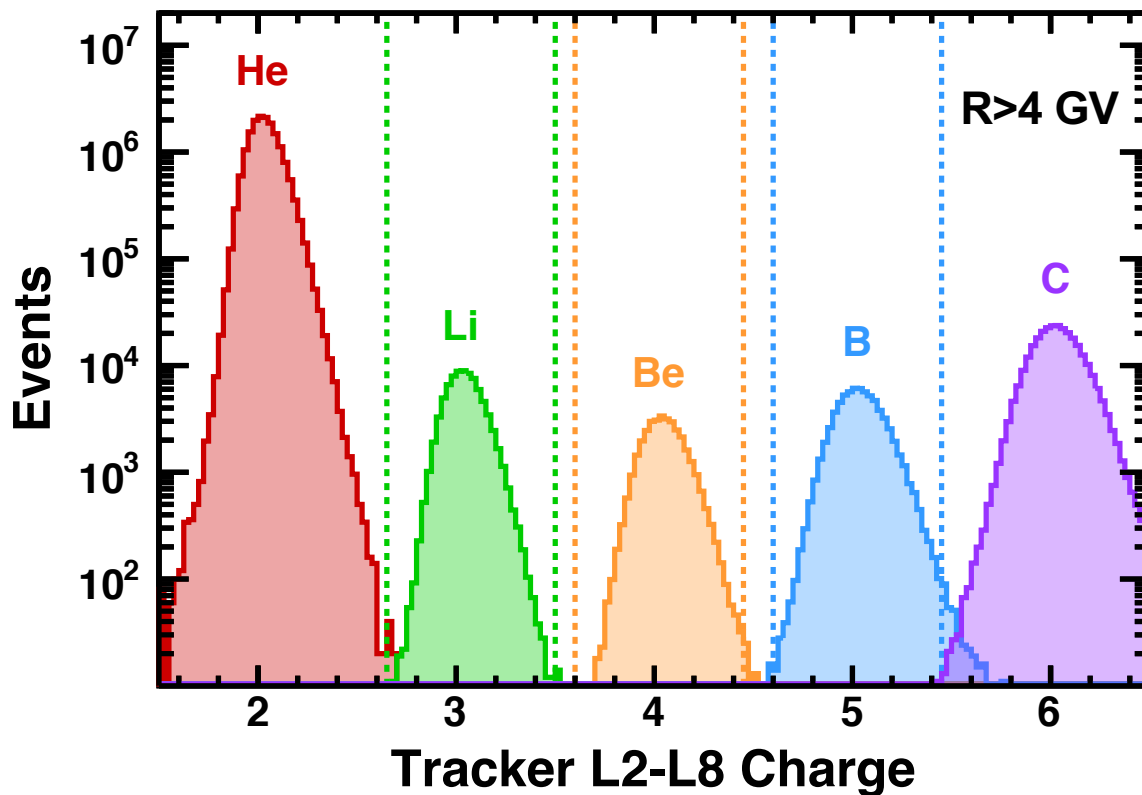
# AMS 测量宇宙射线核子



# 核子电荷鉴别

径迹探测器L2-L8探测到的电荷有非常好的分辨率

$$\Delta Z = 0.08 - 0.12 \quad (3 \leq Z \leq 5).$$

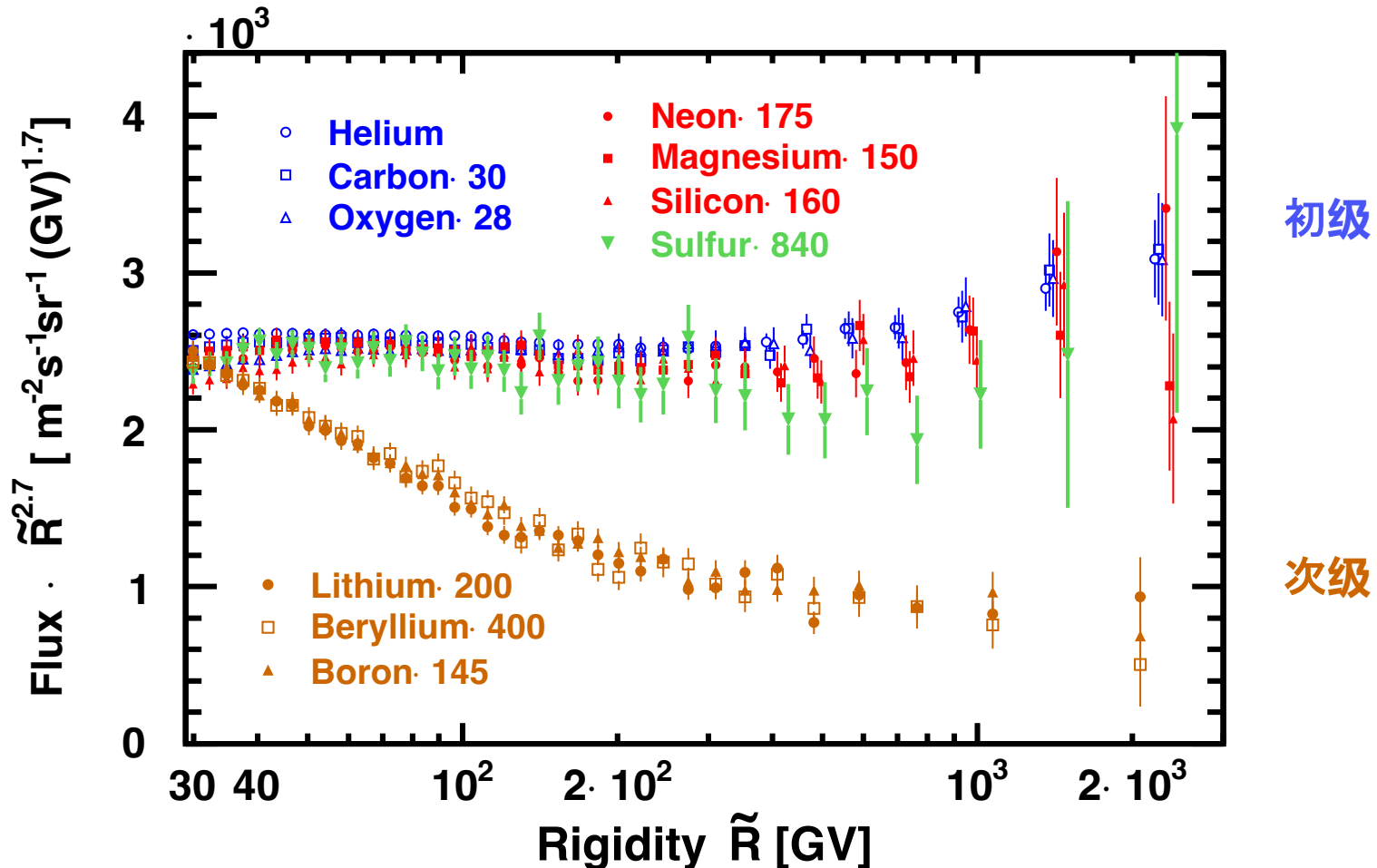


来自其他核子的电荷污染可以忽略。

# 初级和次级宇宙射线流强随刚度变化

都在200 GV以上与单一幂律谱背离。

但他们能谱的磁刚度依赖非常不同。

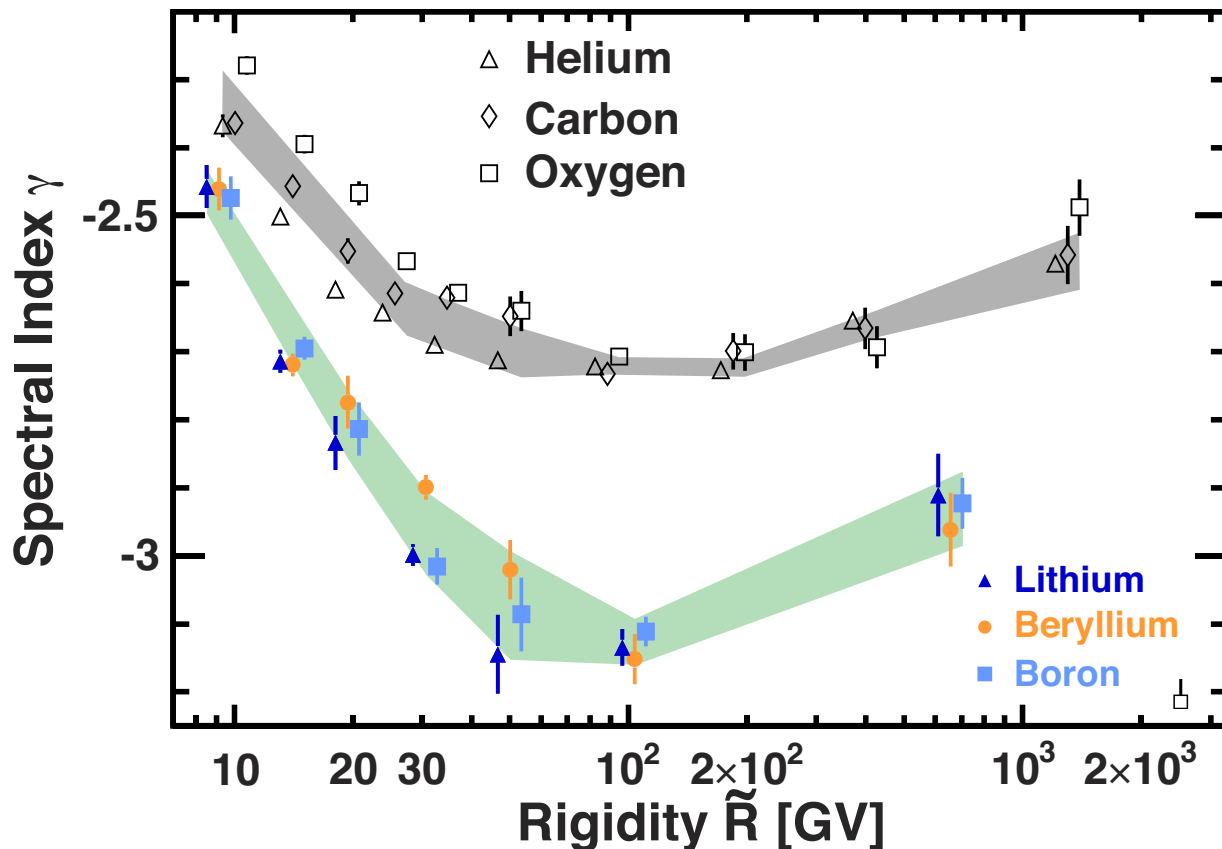




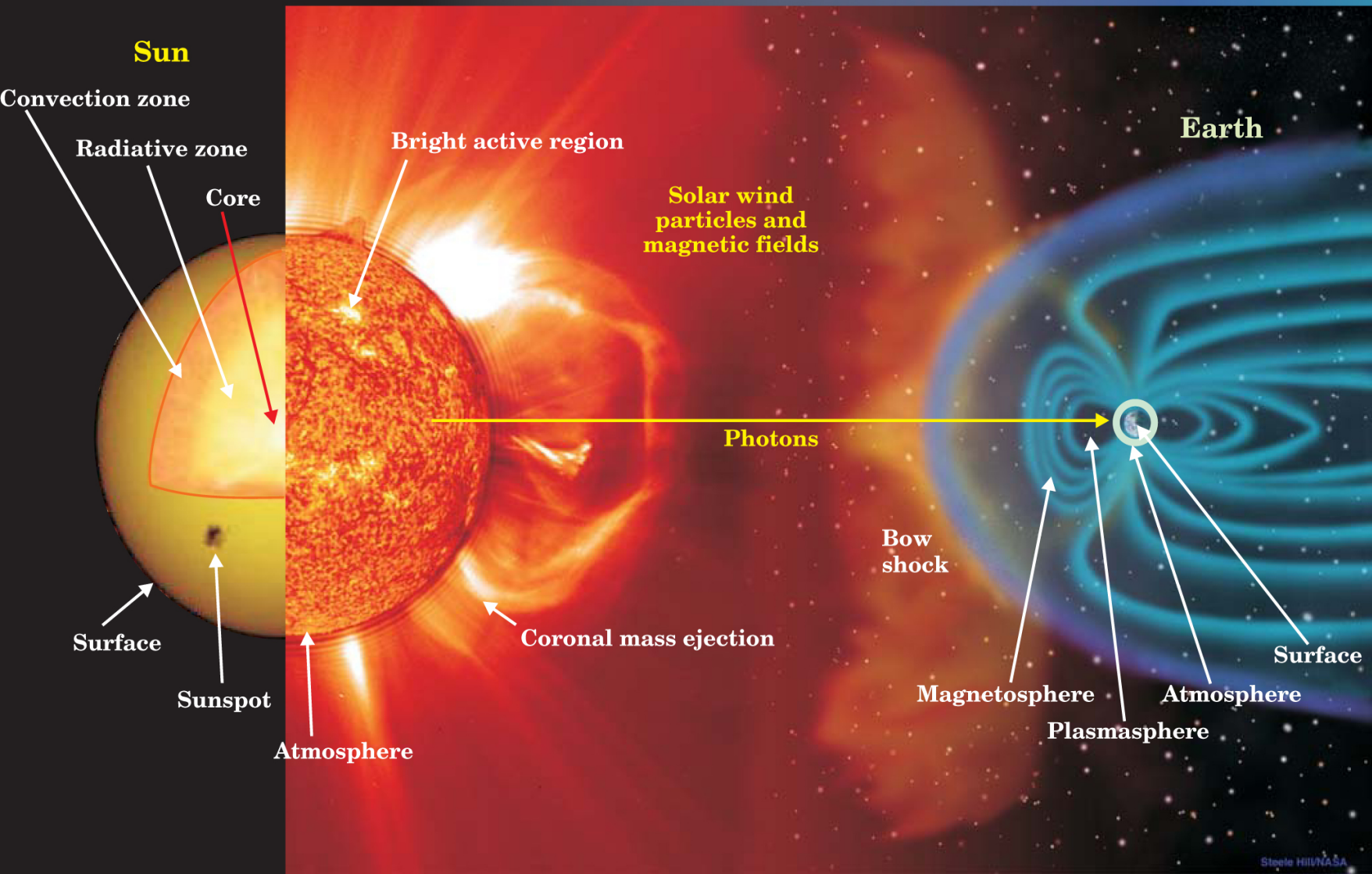
# 初级和次级宇宙射线能谱的幂律指数

$\Phi = CR^\gamma$  ( $\Phi$  is the flux;  $C$  is a constant;  $\gamma$  is the spectral index)

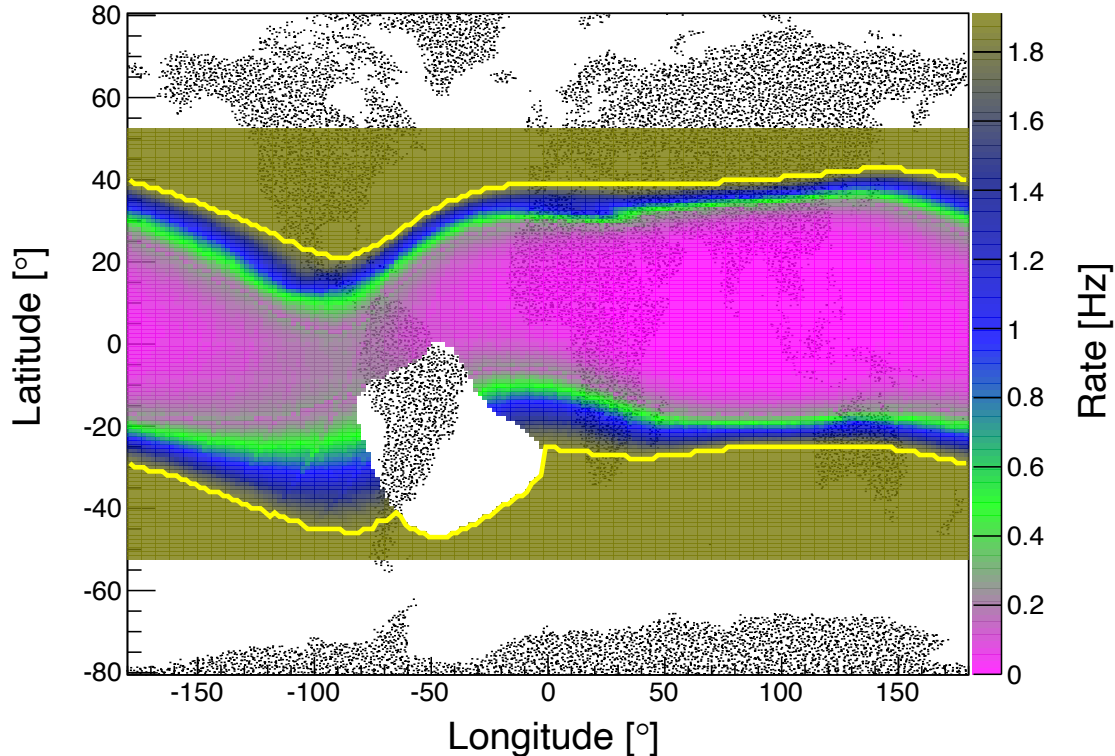
次级宇宙线能谱的幂律指数几乎完全一样，  
但与初级宇宙线的刚度依赖**非常不同**。



在200 GV以上, 次级宇宙线的能谱指数比初级宇宙线**增加得更快**。



# 地球磁场屏蔽效应

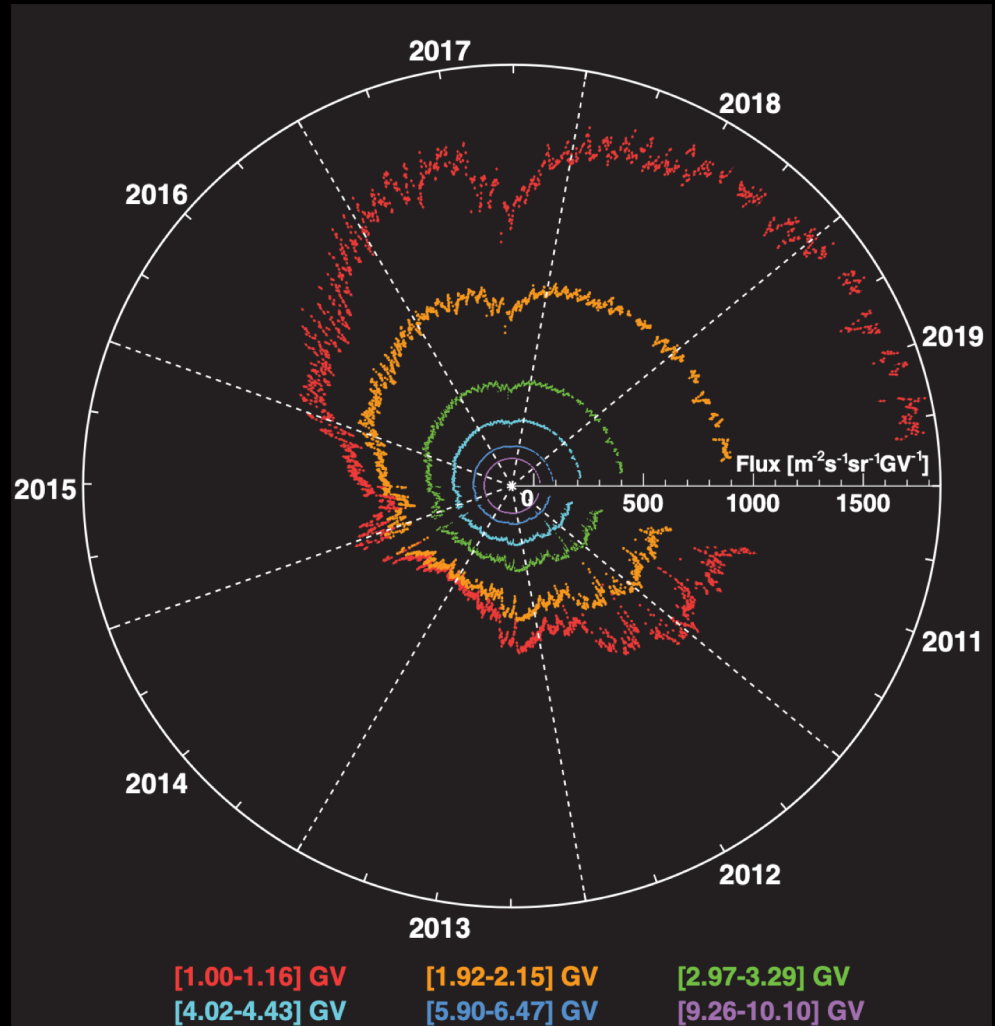


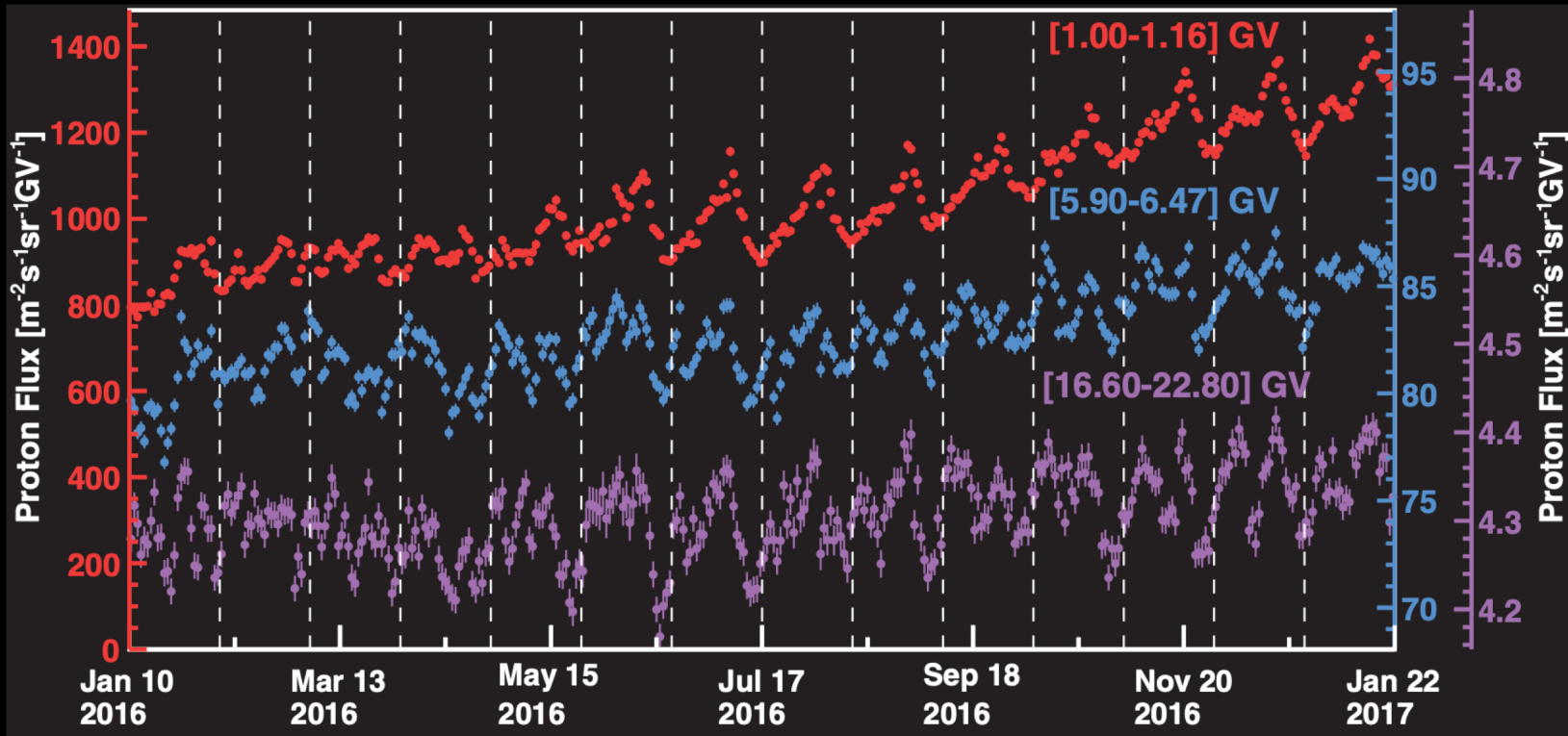
- 由于地球磁场的屏蔽，一部分低能的粒子不能被探测器探测到。
- 对于每个测量的能量区间，探测到的质子流量与空间位置有关。
- 左图展示了10GV附近的质子流量随着地球不同经纬度的变化。
- 测量10GV的质子流强，我们要用质子流强是常数的部分，就是图中黄线以外的部分。

Proton rate as a function of location at 9.26-10.10 GV. Yellow lines indicate a region where the proton rate is constant. The data taken out of the yellow lines are used in the flux measurement.

## 2011年到2019年， 宇宙线质子能谱日 变化表明：

- 1) 从2014年到2019年，质子能谱在上升，其中1GV宇宙线质子强度变化有3倍。表明太阳磁场会很大程度上影响宇宙线强度。
- 2) 2016年，从各个能量区间都看到了明显的27天周期。





从2016年1月到2017年1月，我们看到了宇宙线强度在上升，而且发生了周期为27天的周期性变化。

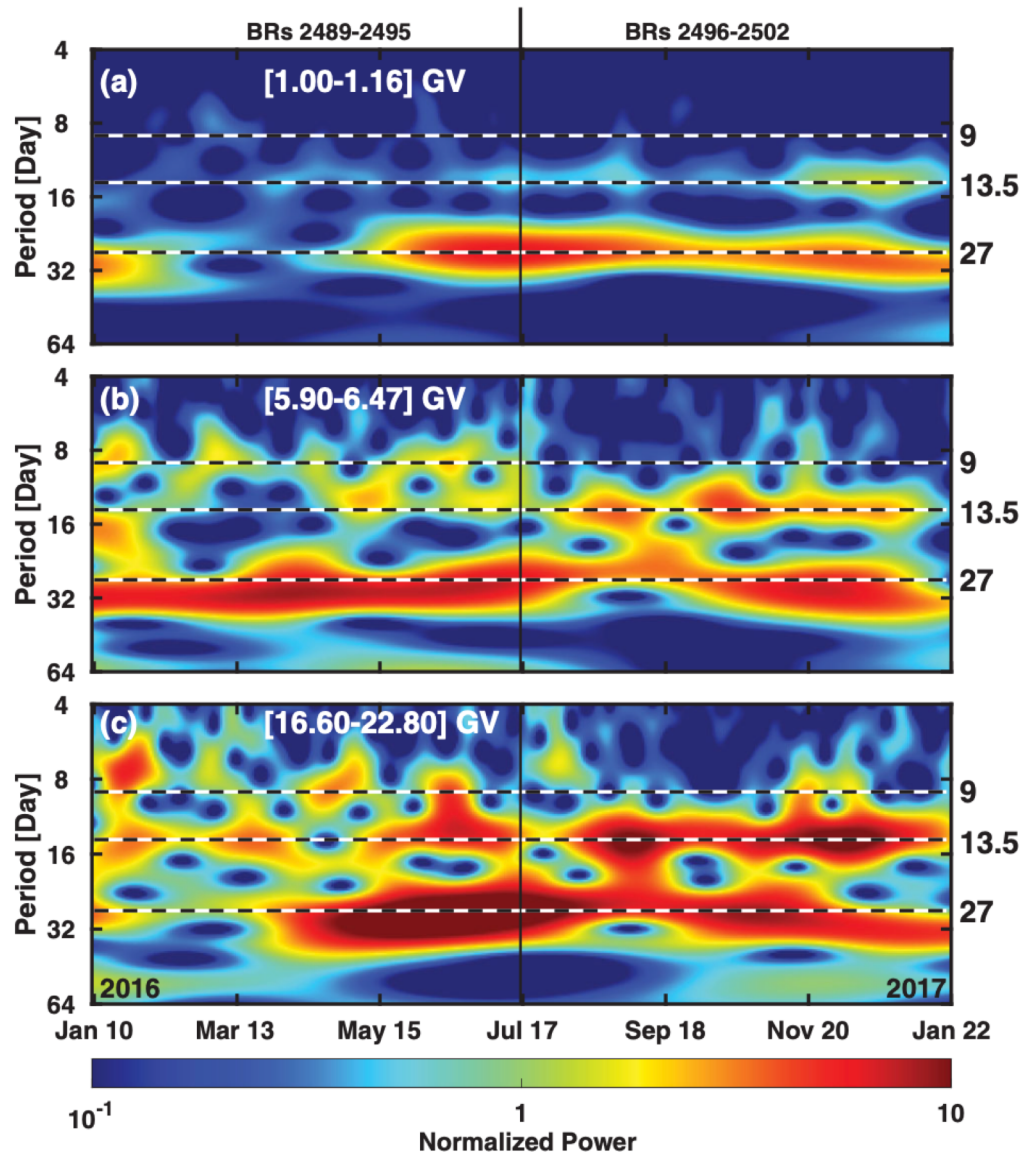
对2016年每个能量段的质子能谱做wavelet分析（随时间变化的傅立叶变换），可以看到其周期随时间的变化：

(a) 在1GV，特别是中间6个月，27天周期很明显，与太阳自转周期27天吻合。

(b) 在6GV，27天周期明显。后6个月，除27天周期外，出现了明显的13.5天周期。

(c) 在20GV，后6个月，13.5天周期幅度与27天周期幅度相当。而且前6个月出现了9天的周期。

这些现象表明太阳活动对不同的能量宇宙线有不同的影响。



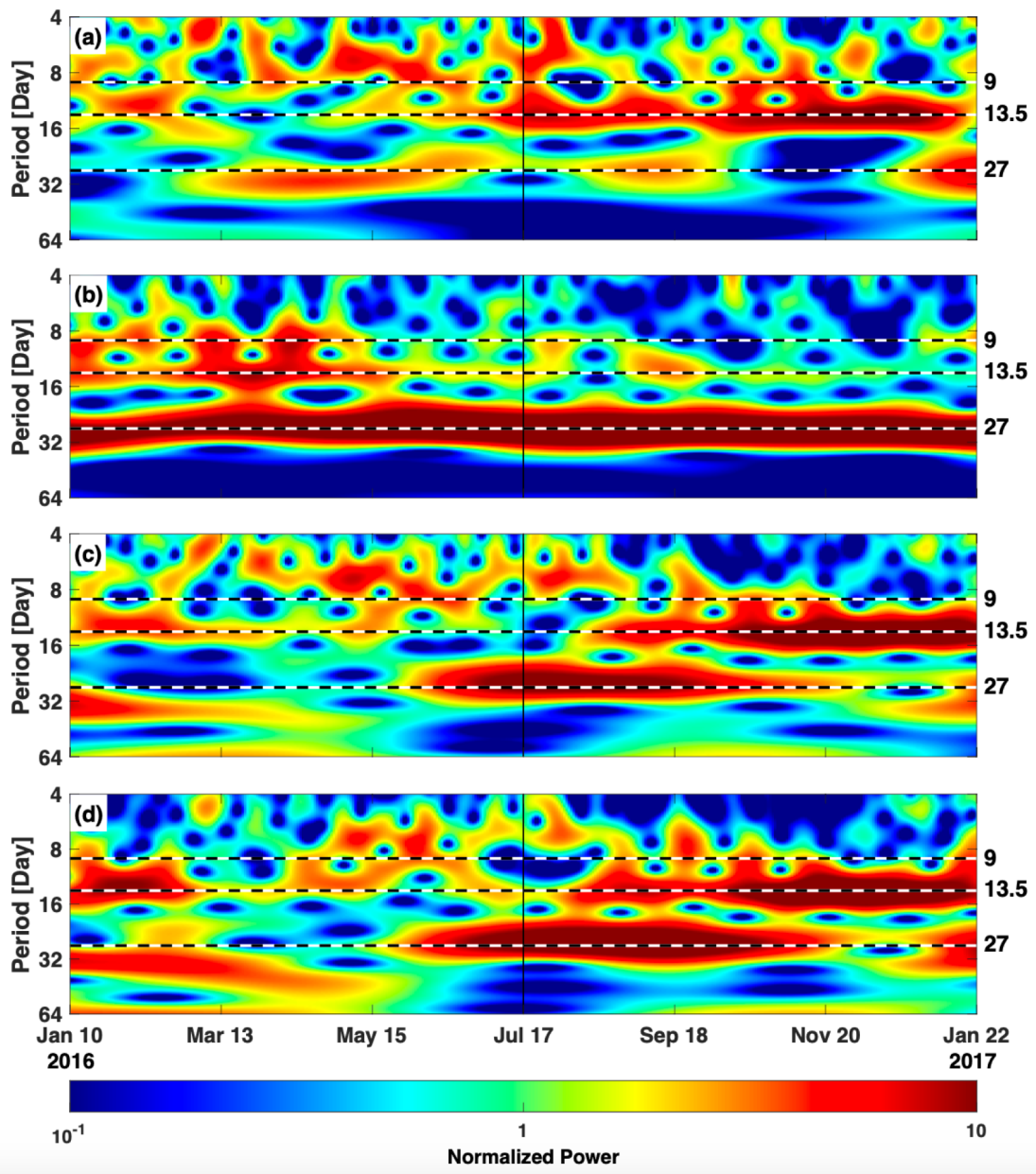
## 对2016年太阳参数做 wavelet 分析

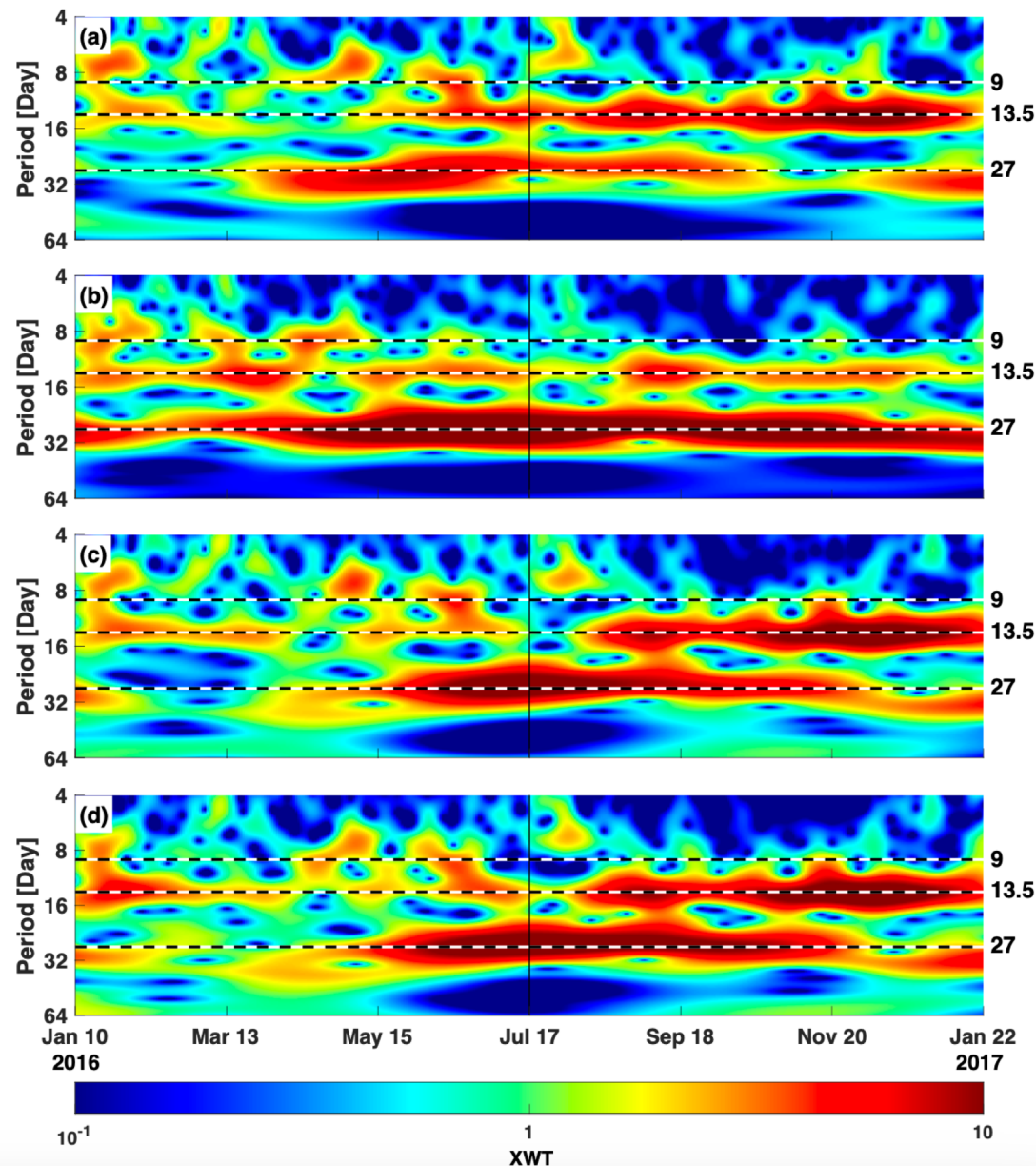
(a) 行星际磁场强度：  
2016年的后6个月，  
存在13.5天周期。

(b) 行星际磁场的径向  
分量（沿日地方向）：  
一直存在27天周期。  
前6个月存在9天周期。

(c) 太阳风质子密度：  
2016年的后6个月，  
存在13.5天周期。  
中间6个月存在27天  
周期

(d) 太阳风速度：  
2016年的后6个月，  
存在13.5天周期。  
中间6个月存在27天  
周期





## Cross wavelet transformation (XWT) : [16.6-22.8]GV质子能谱和太阳参数

**(a) 行星际磁场强度:** 引起2016年的后6个月13.5天周期。中间6个月的27天周期。

**(b) 行星际磁场的径向分量 (沿日地方向) :** 引起27天周期和13.5天周期

**(c) 太阳风质子密度 :** 引起2016年的后6个月13.5天周期。中间6个月的27天周期

**(d) 太阳风速度 :** 2016年的后6个月13.5天周期。中间6个月的27天周期。

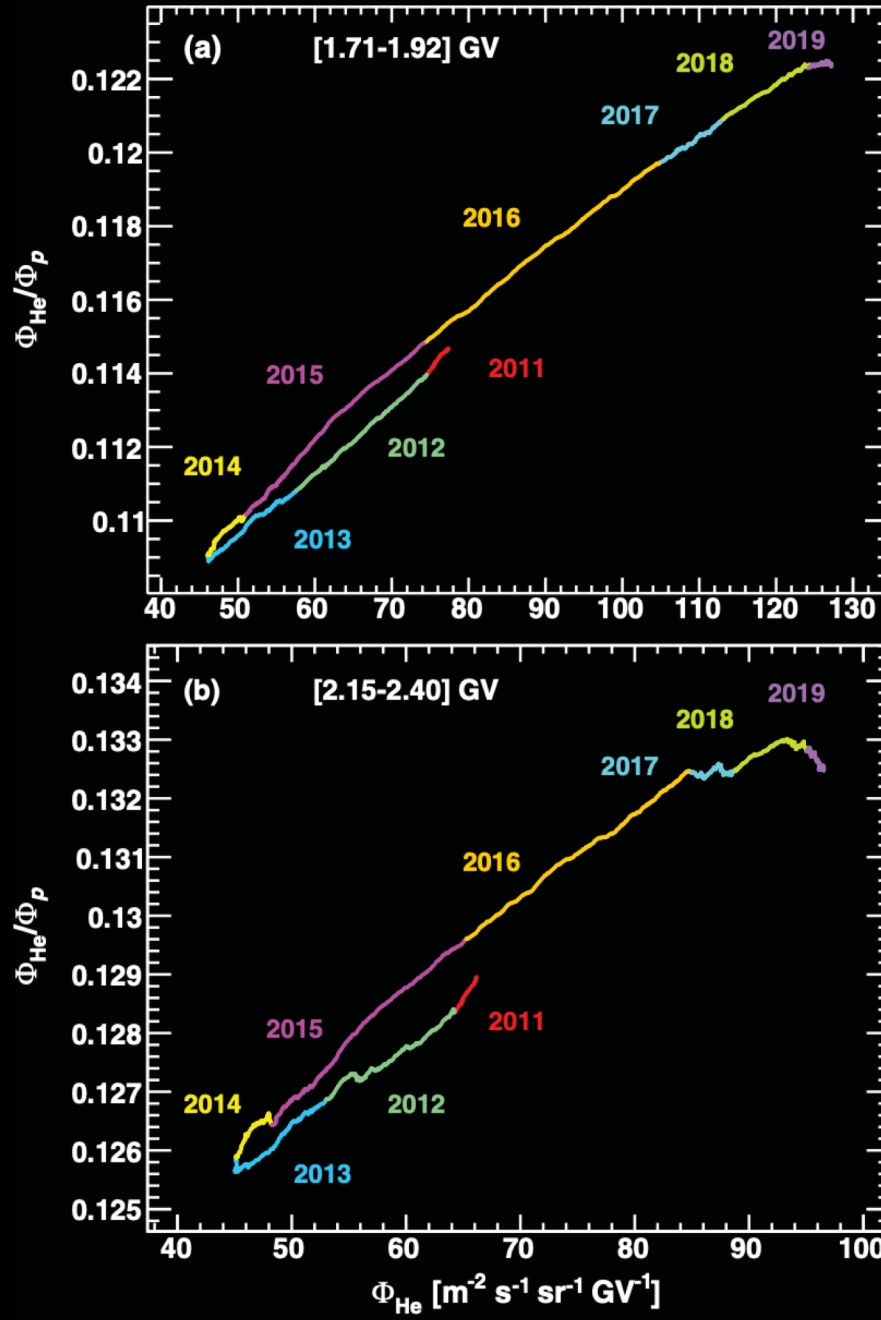


# 氦核与质子

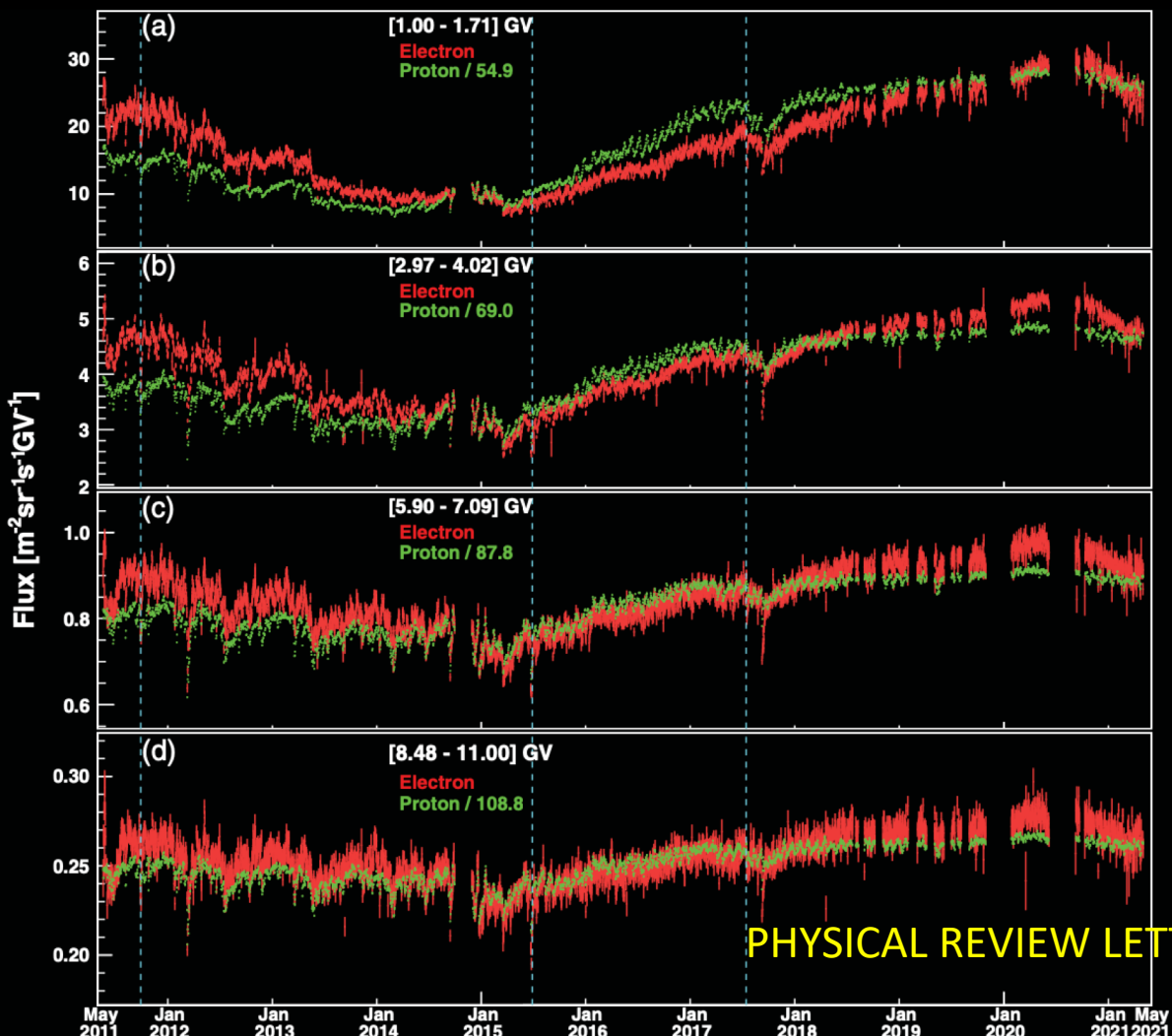
14个Bartels Rotations的数据移动平均。不同颜色代表不同的年份。

- 1)  $\phi_{He}/\phi_p$ 不是常数，随 $\phi_{He}$ 变化，说明太阳调制与粒子核质比有关。
- 2) 在2014年太阳高年前， $\phi_{He}/\phi_p$ 沿着一条线变化；2014年后， $\phi_{He}/\phi_p$ 沿着另一条线变化。

PHYSICAL REVIEW LETTERS 128,  
231102 (2022)

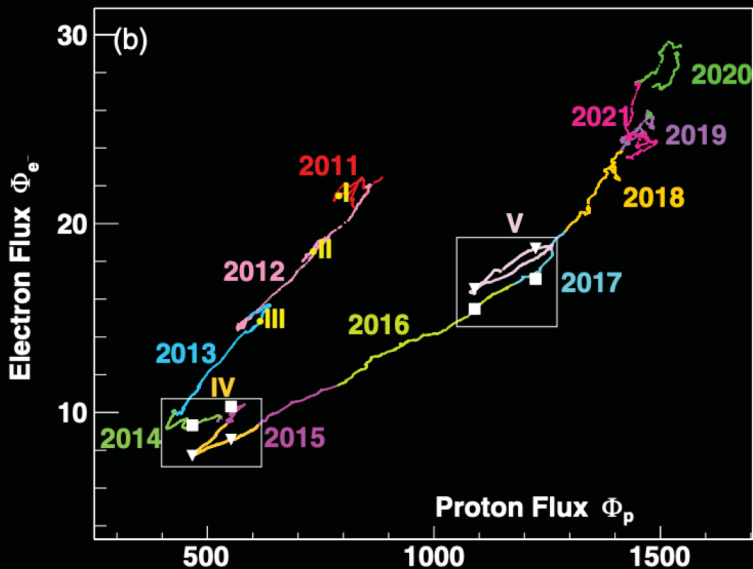
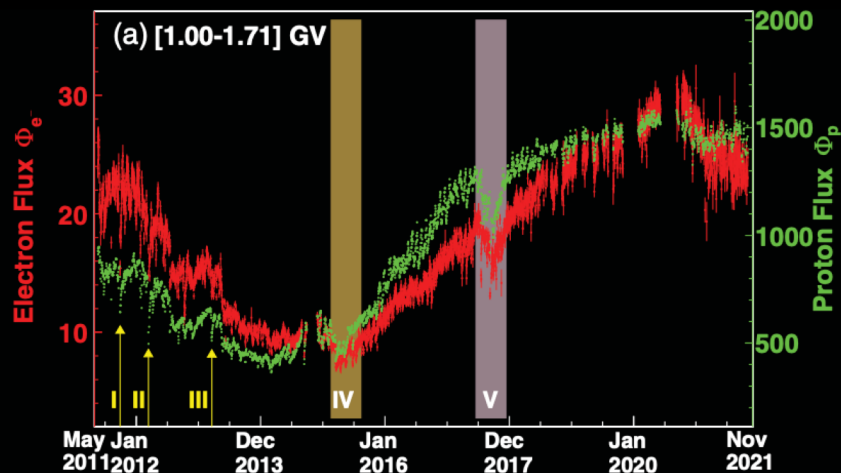


# 电子与质子



电子与质子的能谱明显不重合。表明太阳调制对正负电荷的影响不一致。

# 电子与质子



上图电子与质子的能谱明显不重合。太阳调制对正负电荷的影响不一致。下图2个Bartels Rotations的数据移动平均。不同颜色代表不同的年份。

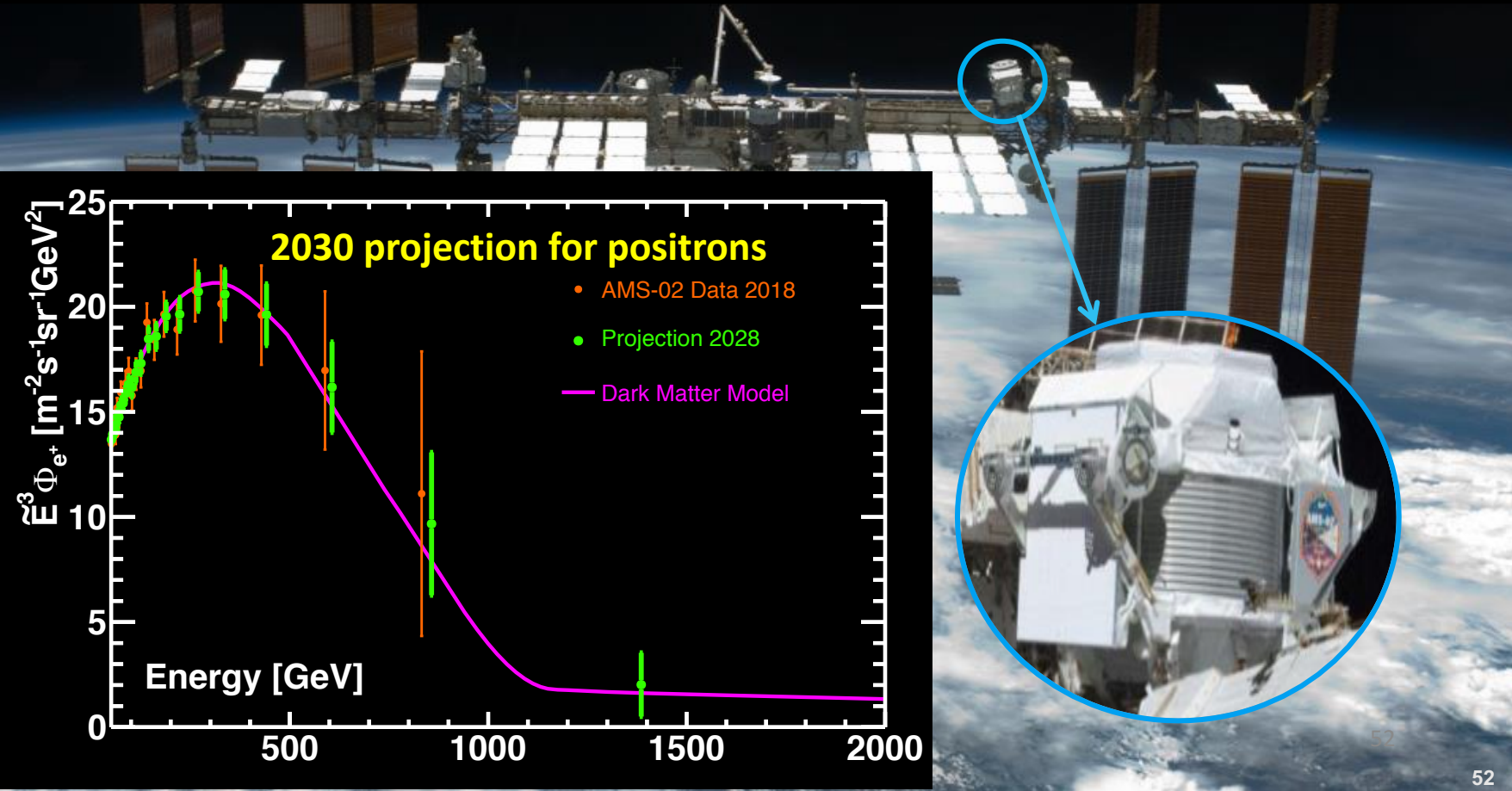
- 1) 电子与质子流强并不线性相关。
- 2) 2014年太阳高年附近，电子与质子相比有延迟。
- 3) 2017年的福布斯下降期间，电子与质子相比有延迟。

PHYSICAL REVIEW LETTERS 130, 161001 (2023)

AMS 在太空中利用不同的宇宙射线粒子做基础物理研究。

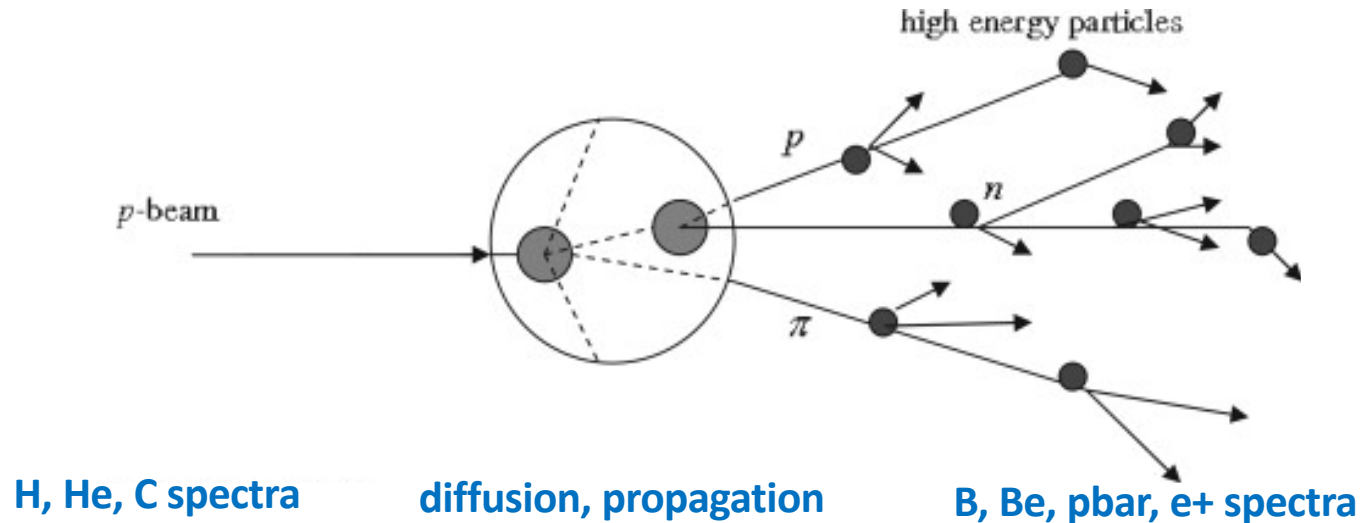
已经观察到一些新的令人兴奋的结果。

在空间站的运行阶段，AMS会继续收集和分析数据。因为用一个像AMS那样精密的探测器探索未知世界，我们可以预期有新的发现。





# Astro-physical background of cosmic ray (CR) antiparticles



CR antimatter is produced in collisions of the CRs -- protons and He -- with interstellar gas.

# Transport Equation

$$Q = Q_{pri} + Q_{sec}$$

$Q_{pri} \propto R^{-\nu}$ : primary source term;

$$Q_{sec} = \sum_j \Gamma_j^{sp} \psi_j$$

*secondary production term from spallation of  $j$  nuclei with rate  $\Gamma_j^{sp}$*

$\Gamma = \beta cn\sigma$ : destruction rate for collisions of gas with density  $n$  at velocity  $\beta c$  and cross section  $\sigma$ .

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = Q + \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} \psi) - \psi \Gamma + \frac{\partial}{\partial E} (\dot{E} \psi)$$



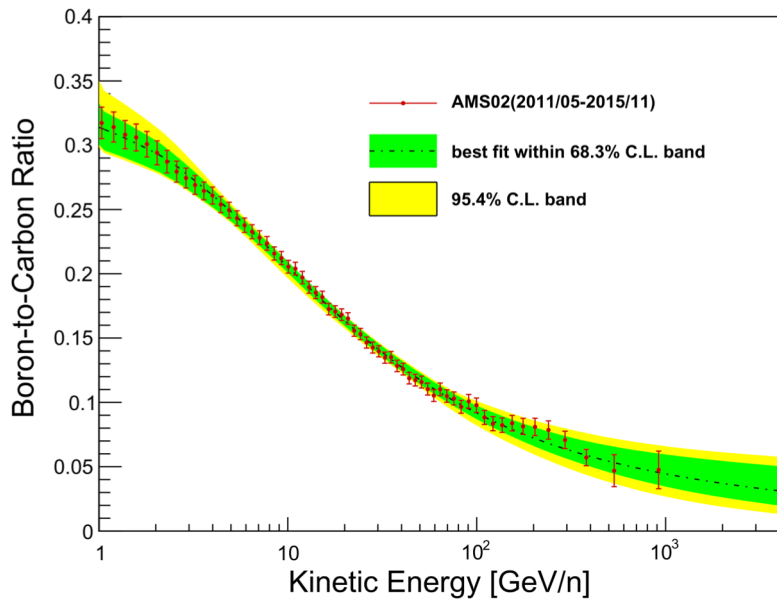
$D(R) \propto R^\delta$ : rigidity ( $R = \frac{p}{Z}$ ) dependent diffusion coefficient



$\dot{E} = -\frac{dE}{dt}$ : ionization and Coulomb losses

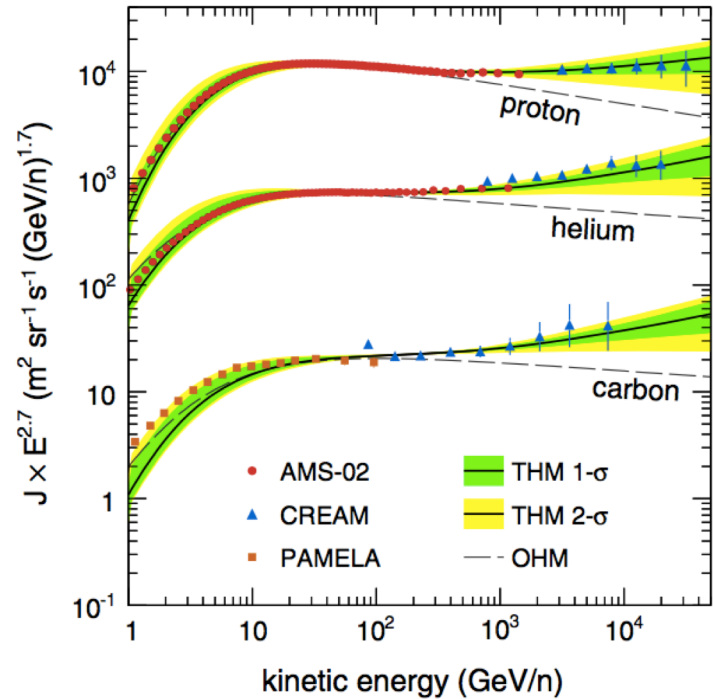
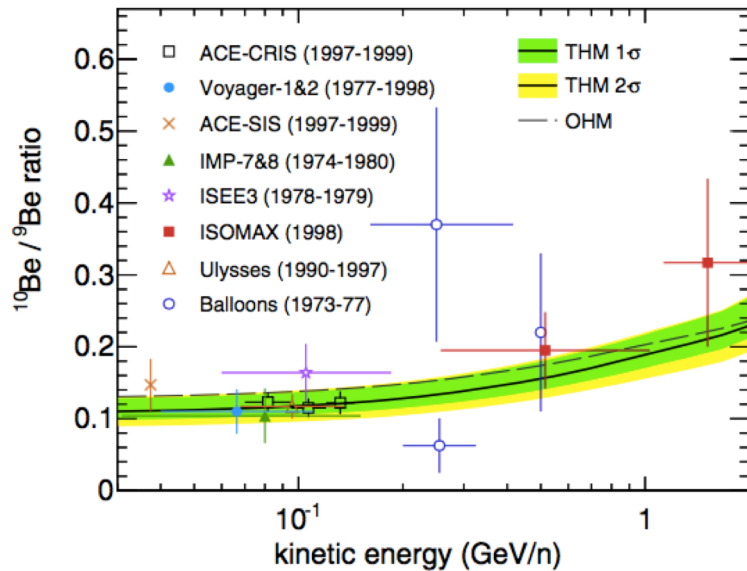


$\psi = \psi(E, r, z)$ : particle number density



Data sample to constrain parameters in a spatial-dependent model [Two-halo model (THM)]:

- 1) H, He and C spectra
- 2) B/C
- 3)  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$



Also refer to: Jie Feng, et al., Phys. Rev. D **94**, 123007

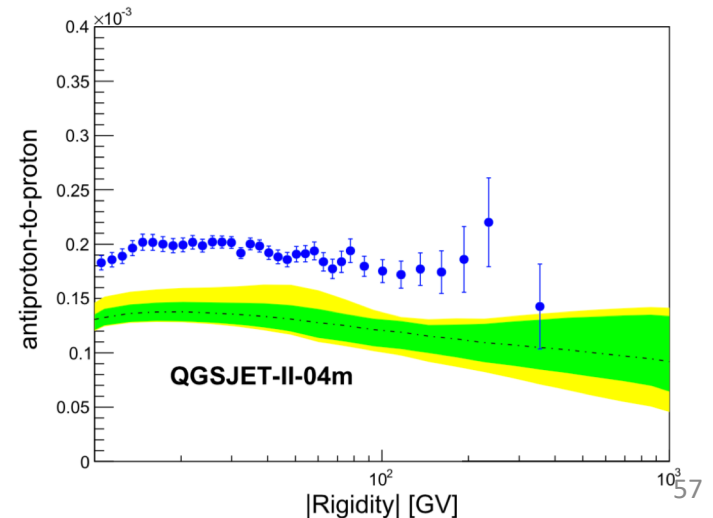
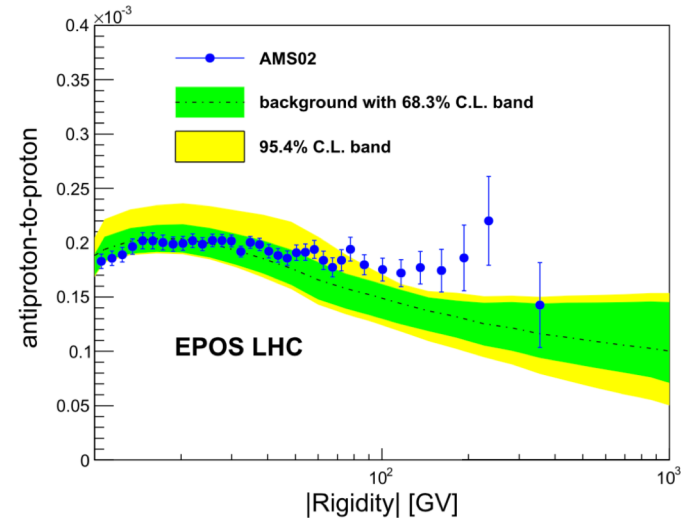


# Predicted antiprotons

EPOS-LHC and QGSJET-II-04m are most advance MC generators to date.

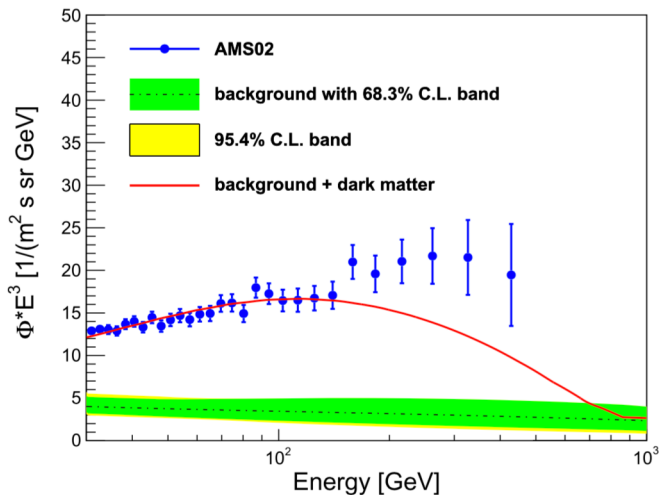
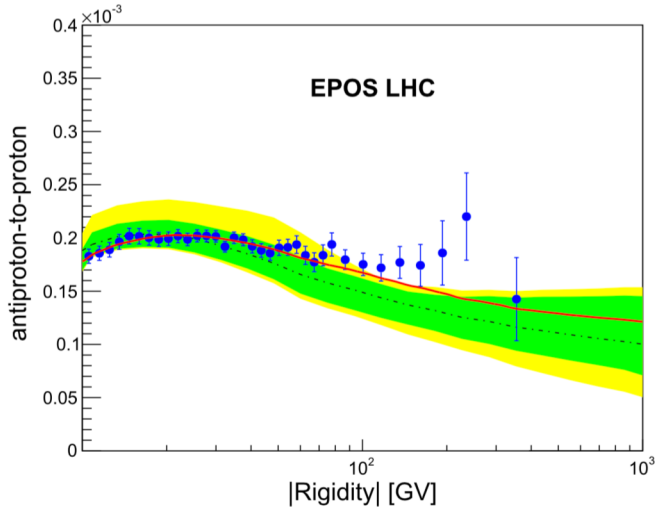
Both generators predict that the antiproton-to-proton flux ratio is lower than AMS-02 measurement.

It is likely that dark matter scenario can explain this.



Jie Feng and Hong-Hao Zhang,  
Astrophys. J. 858, 116 (2018)

# Single Channel results:



- 1 channel with EPOS LHC:

$$\chi\chi \rightarrow \tau^+\tau^-$$

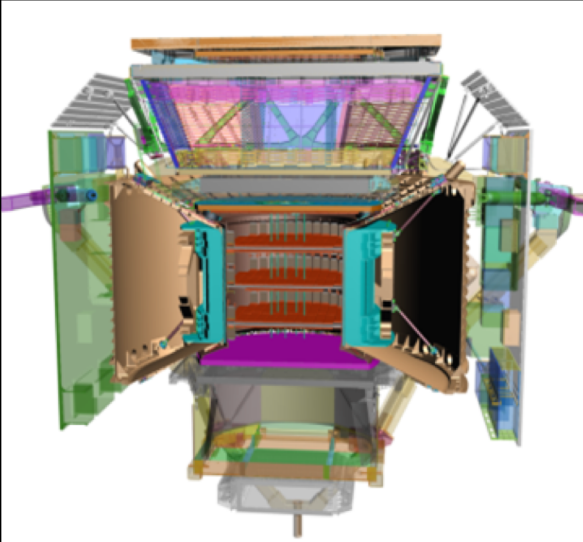
$$m_\chi = 783 \pm 56 \text{ GeV}$$

$$\langle\sigma v\rangle = (261.20 \pm 23.93) \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

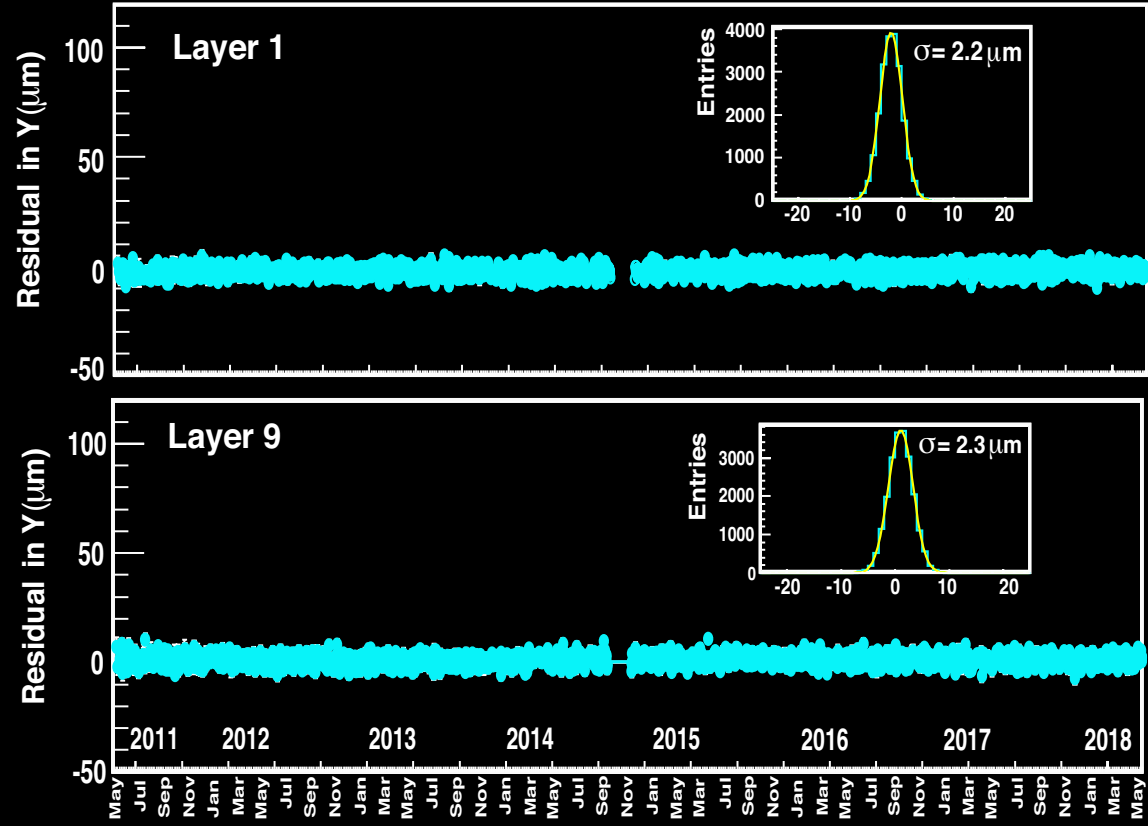
$$\chi^2/n.d.f. = 161.82/207$$

- No channel with QGSJET-II-04m

# Tracker stable to 2 microns over eight years



**Inner tracker (Layer 2-  
Layer 8) alignment  
( $< 1$  micron)  
monitored with infrared  
lasers**



**Outer tracker stable to 2 microns over 8 years**

**Maximal Detectable Rigidity – 2TV for Z=1 particles**

# Electromagnetic Calorimeter (ECAL)

