

国际空间站AMS实验最新成果

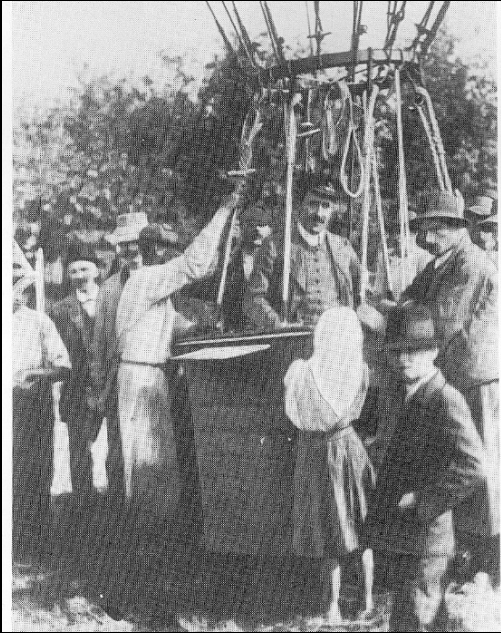
许伟伟

山东高等技术研究院 & 山东大学
(代表AMS合作组)

AMS



超越一个世纪的宇宙线研究



1912: 宇宙射线

诺贝尔奖(1936) Victor Hess

粒子

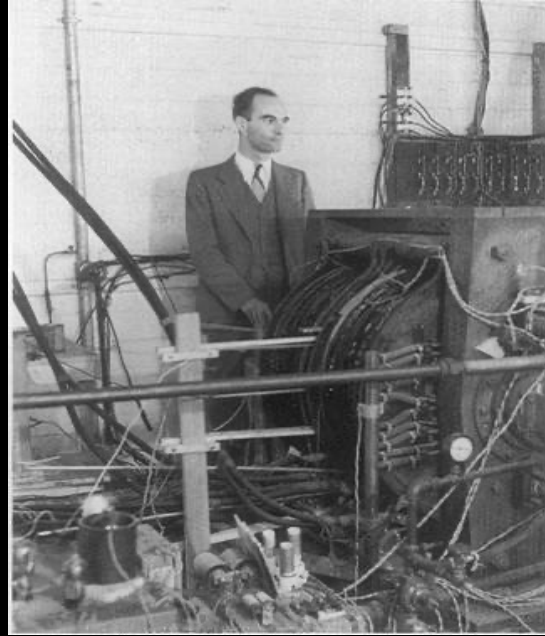
1936: Muon (μ)

1949: Kaon (K)

1949: Lambda (Λ)

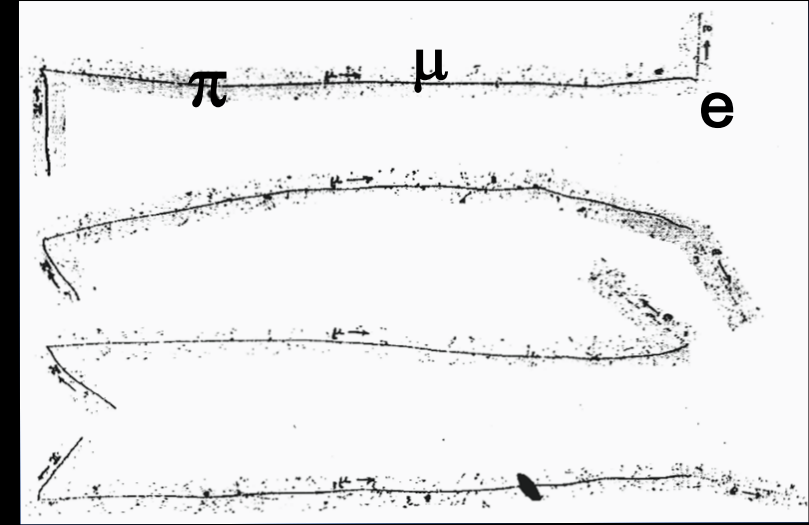
1952: Xi (Ξ)

1953: Sigma (Σ)



1932: 正电子

诺贝尔奖(1933) Carl Anderson



1947: 介子

诺贝尔奖(1950) Cecil Powell

1965: 宇宙微波背景辐射

诺贝尔奖(1978) Aron Penzias, Robert Wilson

1987: 宇宙中微子

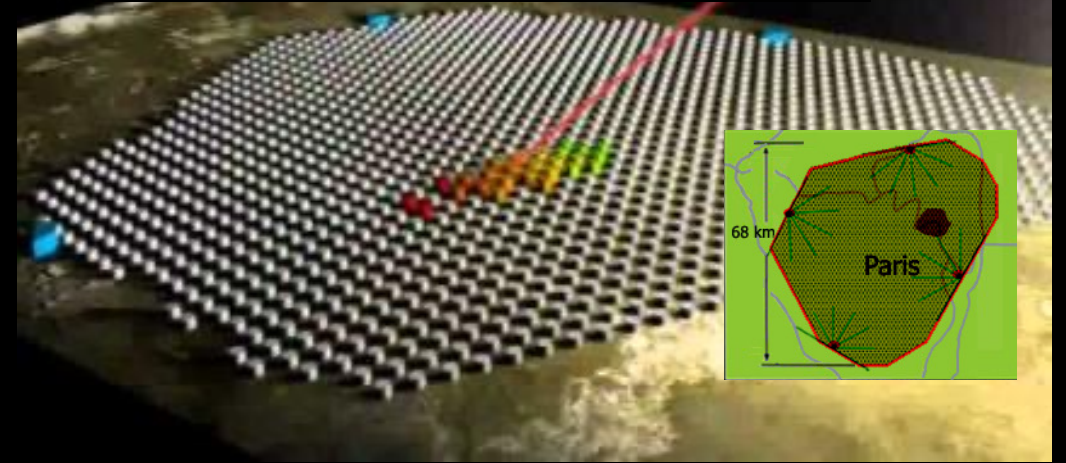
诺贝尔奖(2002) Raymond Davis, Masatoshi Koshiba

地面宇宙线实验



HAWC

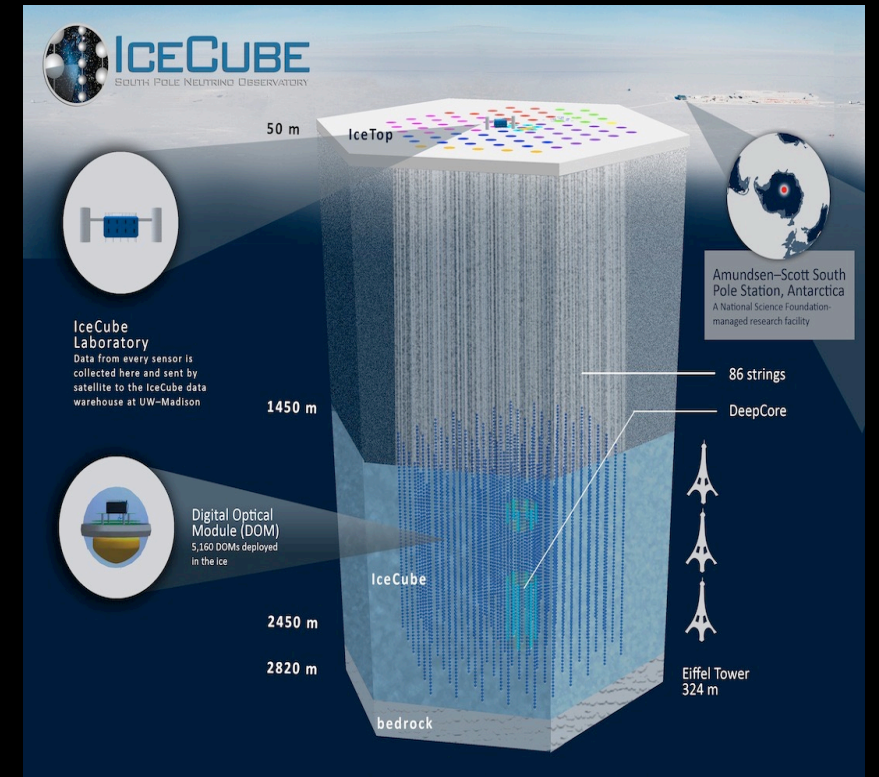
The Pierre Auger Observatory



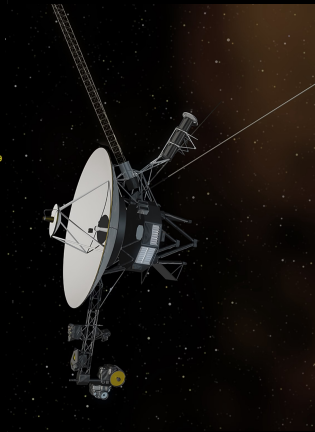
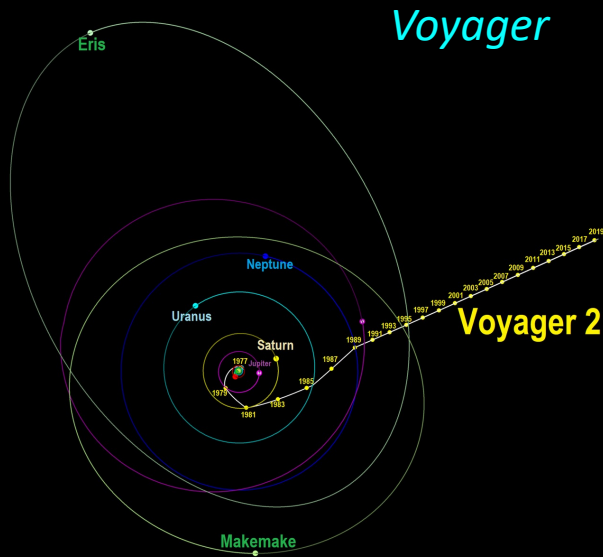
LHASSO (“拉索”)



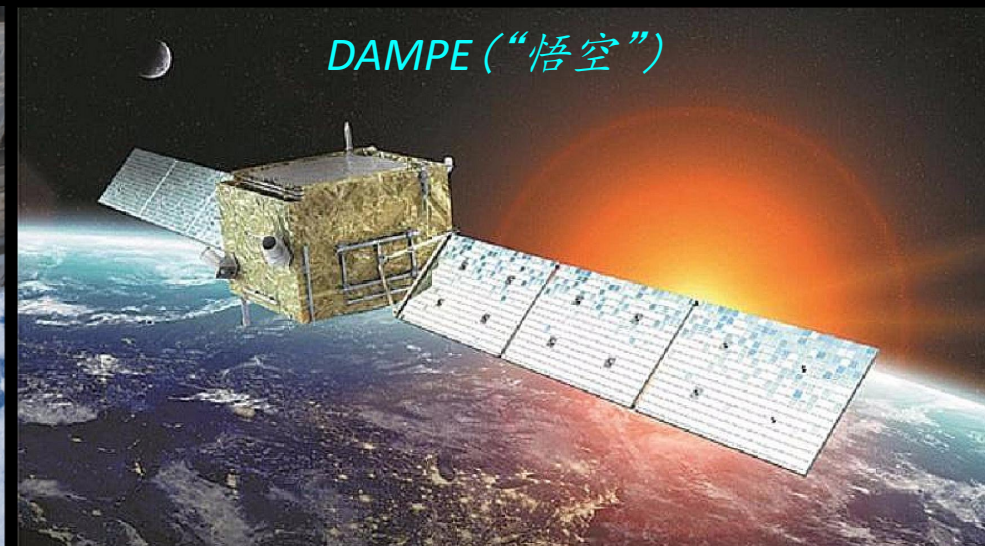
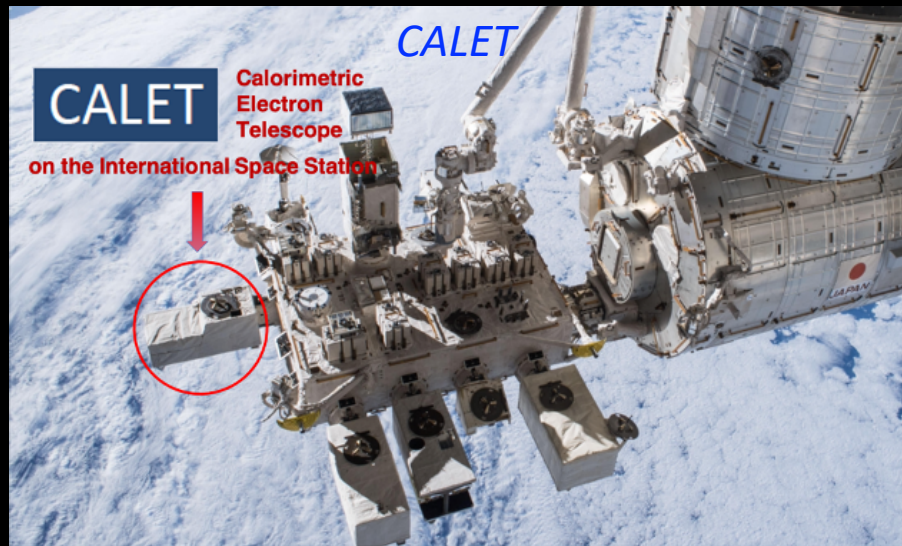
HESS



在太空运行的无磁铁的量能器实验



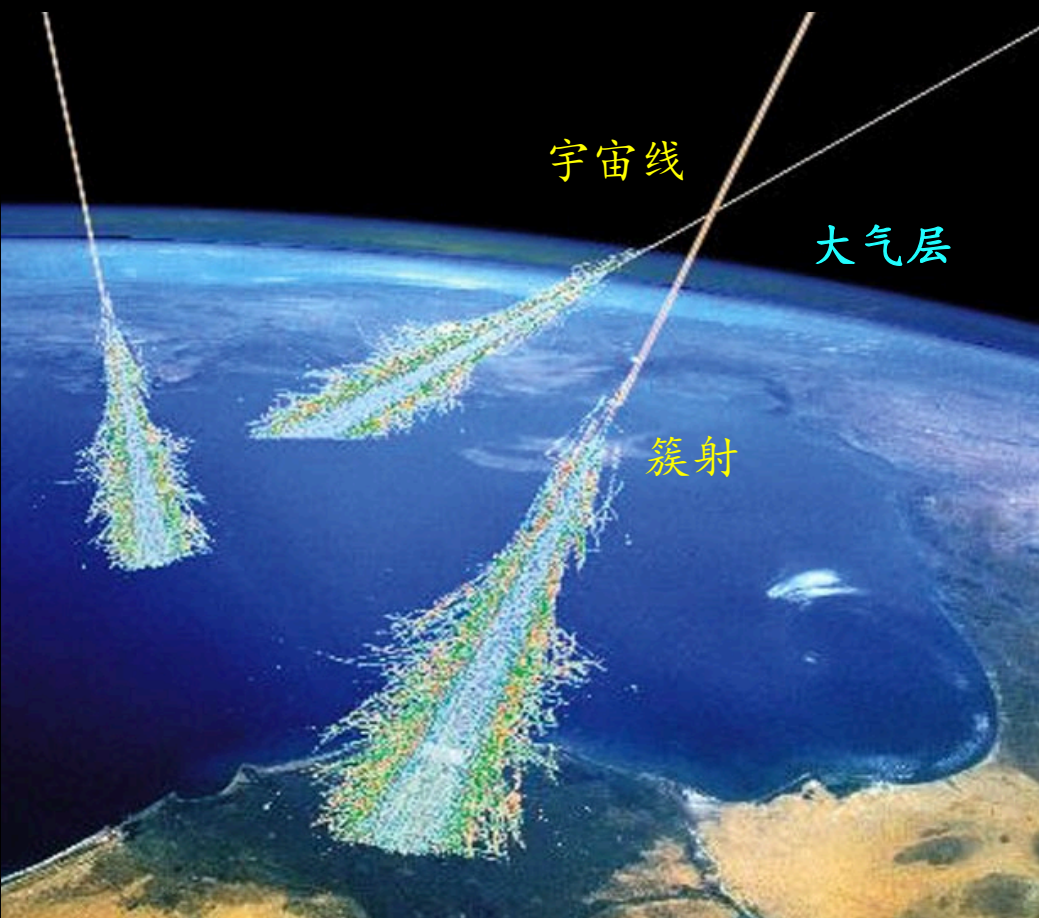
Fermi-LAT



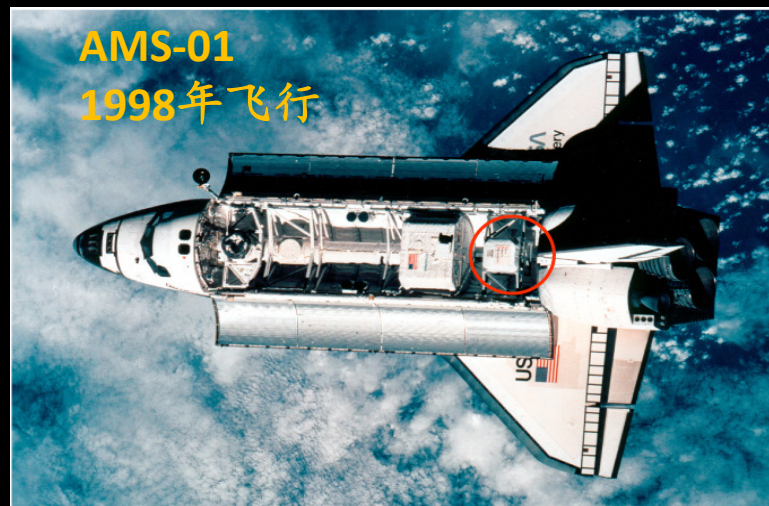
国际空间站上的AMS实验

带电宇宙线与大气层（相当于10米的水）
相互作用，产生簇射。

难以在地面上精确研究带电宇宙线的性质。

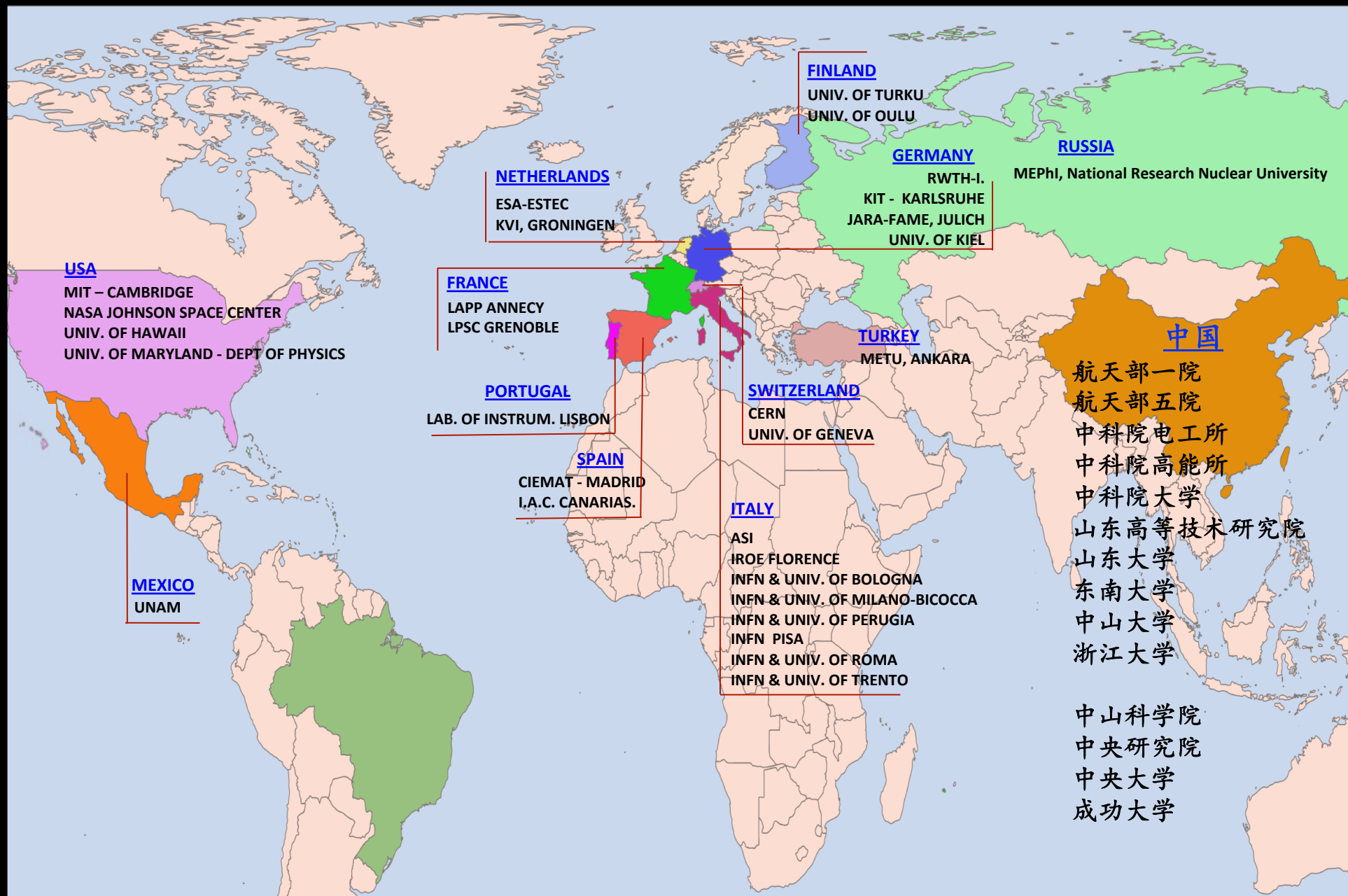


测量宇宙线电荷($\pm Z$)和动量，
需要在外太空运行磁谱仪。



AMS通过长期精确测量宇宙线，
研究暗物质、反物质、宇宙线起源和空间辐射，
寻找新的物理现象

AMS 国际合作组



中国是AMS实验发起国之一



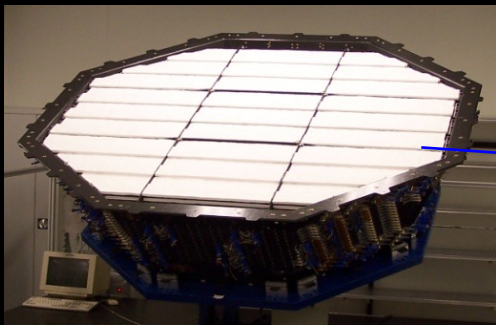
陈和生院士

王贻芳院士 丁肇中教授

1994年在休斯顿举办的第一次AMS会议

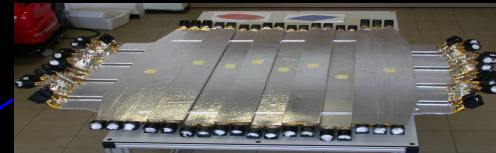
AMS 是在外太空运行的粒子物理实验

穿越辐射探测器 TRD



5x4x3 m³, 重7.5吨, 30万路信号

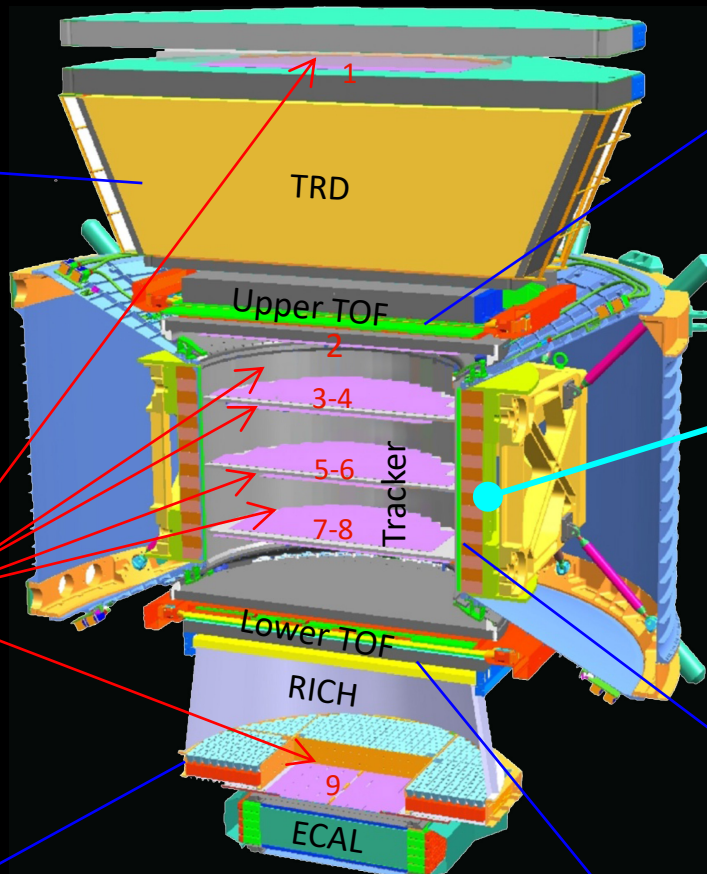
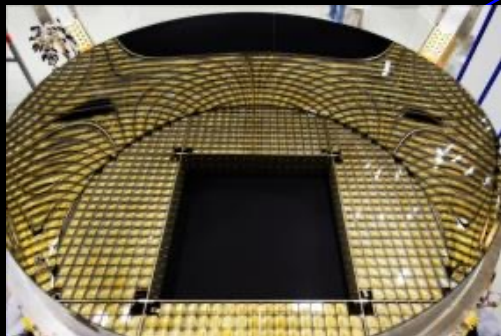
上层飞行时间探测器 UTOF



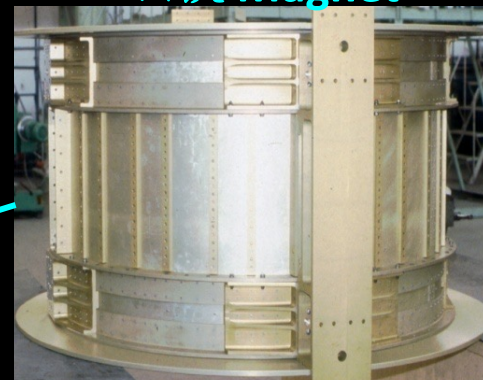
硅探测器 Tracker



切伦科夫探测器 RICH



磁铁 Magnet



反符合计数器 ACC



电磁量能器 ECAL



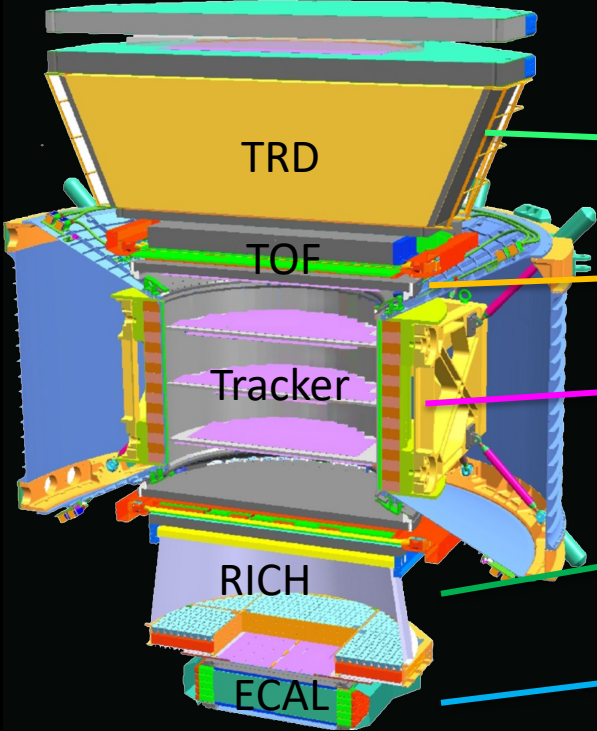
下层飞行时间探测器 LTOF



AMS探测器多次精确测量宇宙线性质

物质

反物质



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

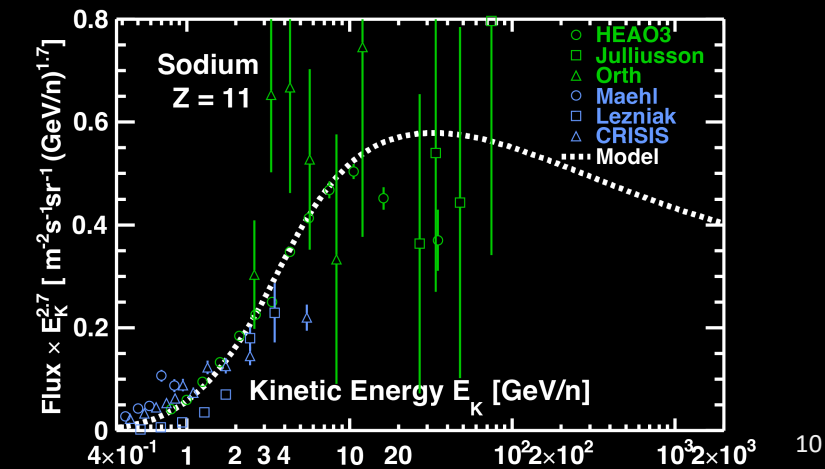
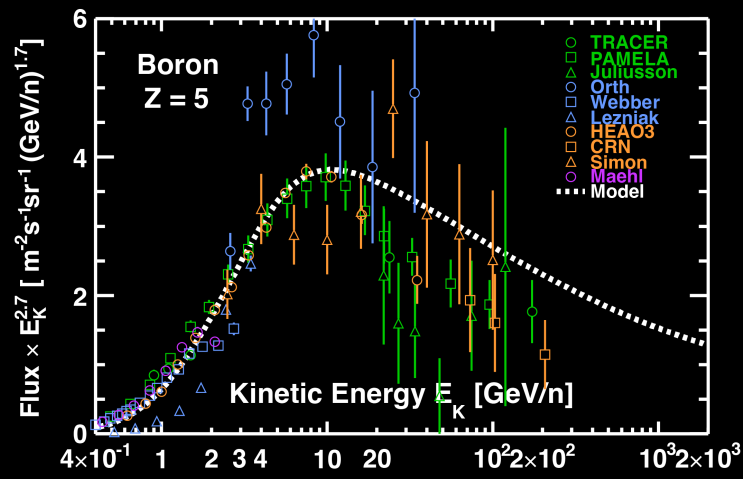
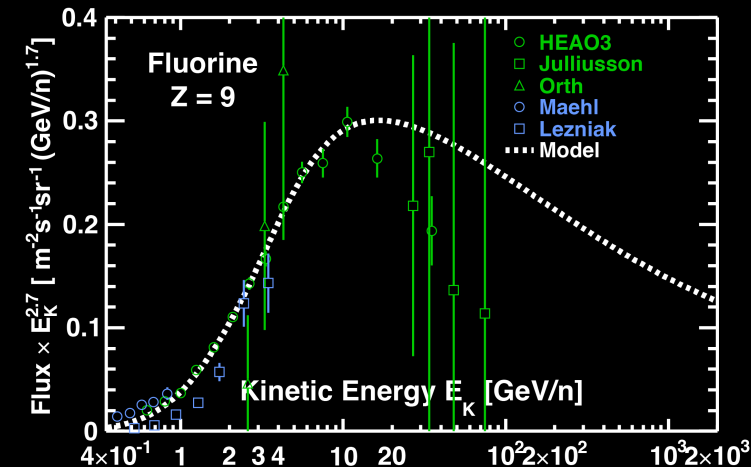
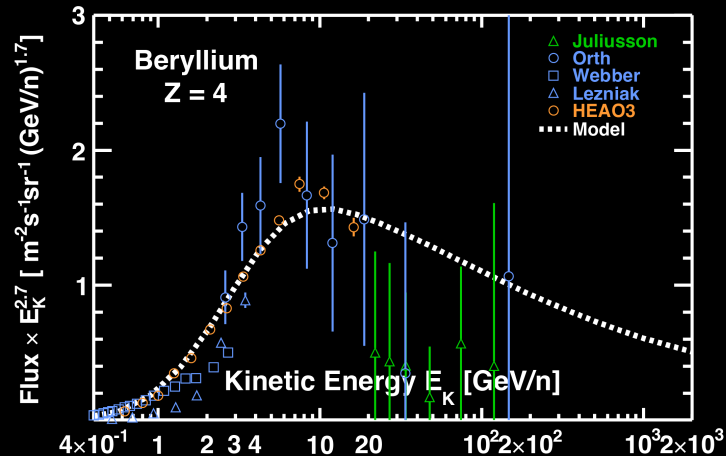
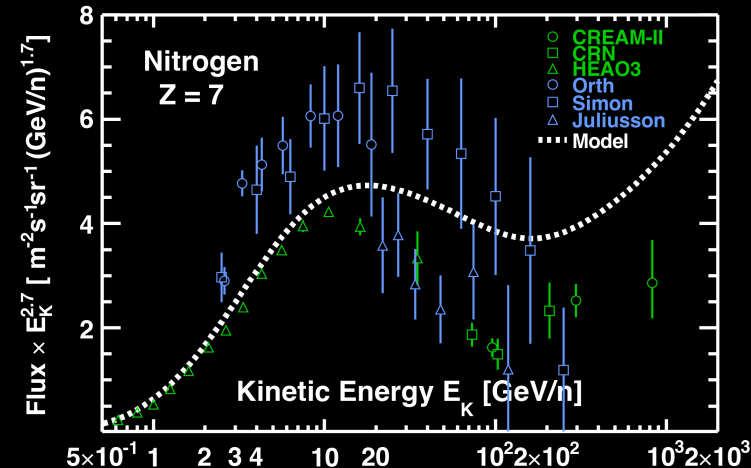
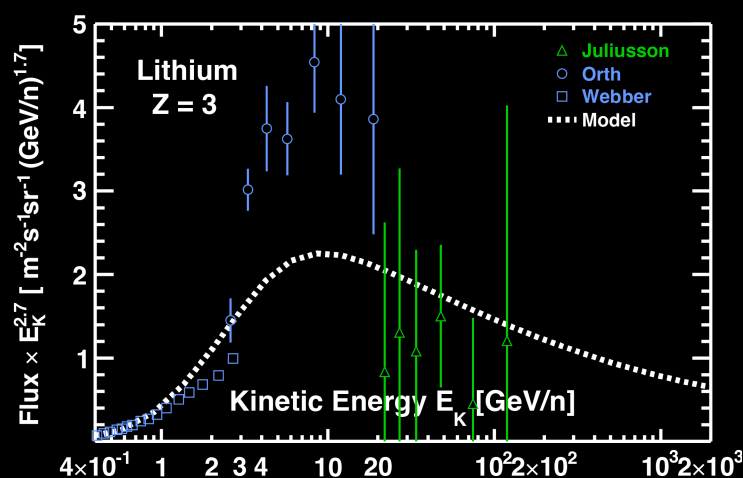
- 动量 (P , GeV/c)
- 电荷 (Z)
- 刚度 ($R=P/Z$, GV)
- 能量 (E , GeV/A)
- 流强 (particles/(s sr m² GeV))

Periodic Table of the Elements																		2																												
1 H Hydrogen 1.008	2 He Helium 4.003																																													
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012																	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180																							
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 Al Aluminum 26.982	4 Si Silicon 28.086	5 P Phosphorus 30.974	6 S Sulfur 32.066	7 Cl Chlorine 35.453	8 Ar Argon 39.948											13 K Potassium 39.098	14 Ca Calcium 40.078	15 Sc Scandium 44.956	16 Ti Titanium 47.88	17 V Vanadium 50.942	18 Cr Chromium 51.996	19 Mn Manganese 54.938	20 Fe Iron 55.933	21 Co Cobalt 58.933	22 Ni Nickel 58.693	23 Cu Copper 63.546	24 Zn Zinc 65.39	25 Ga Gallium 69.723	26 Ge Germanium 72.61	27 As Arsenic 74.922	28 Se Selenium 78.96	29 Br Bromine 79.904	30 Kr Krypton 83.80											
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.29											55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanides		72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinides		104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Nh Nihonium [284]	114 Fl Flerovium [289]	115 Uu Ununpentium [288]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]																												

AMS之前的宇宙线 实验研究

一个世纪以来，宇宙
线实验的精度推进到
了50%。

很多不同的理论能够
解释实验数据。

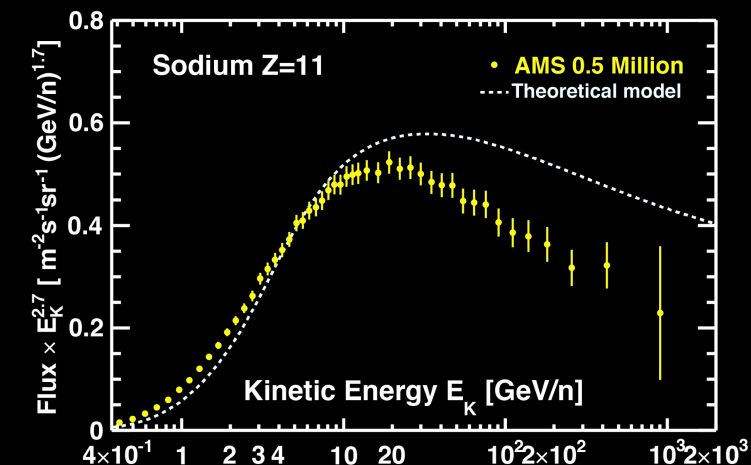
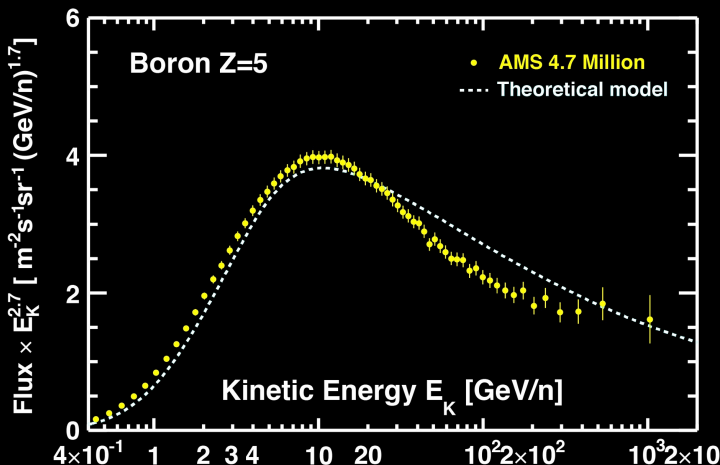
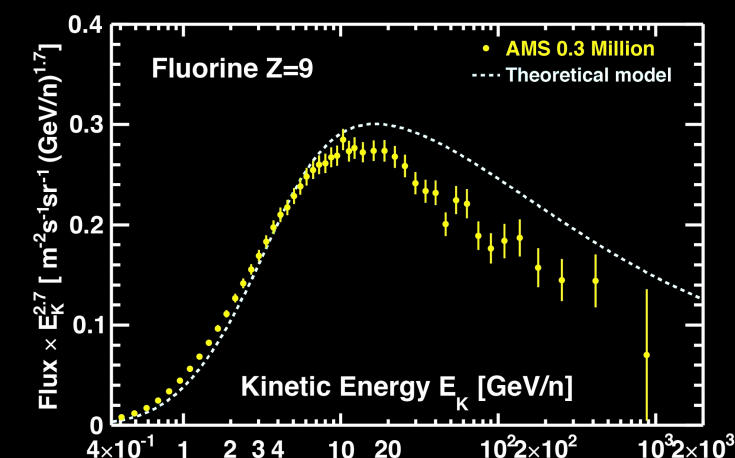
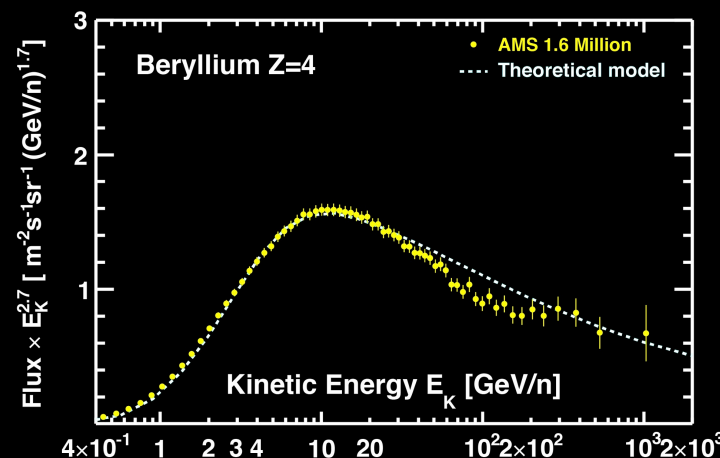
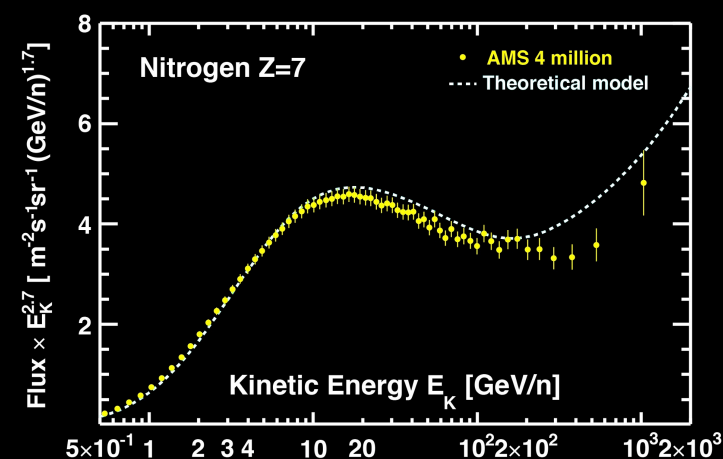
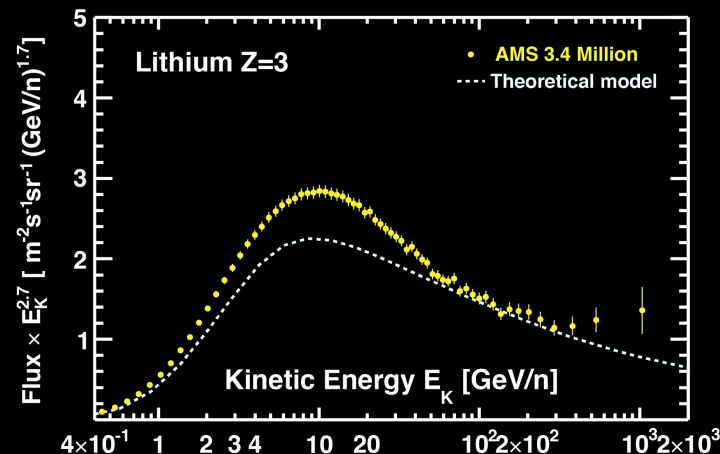


AMS实验

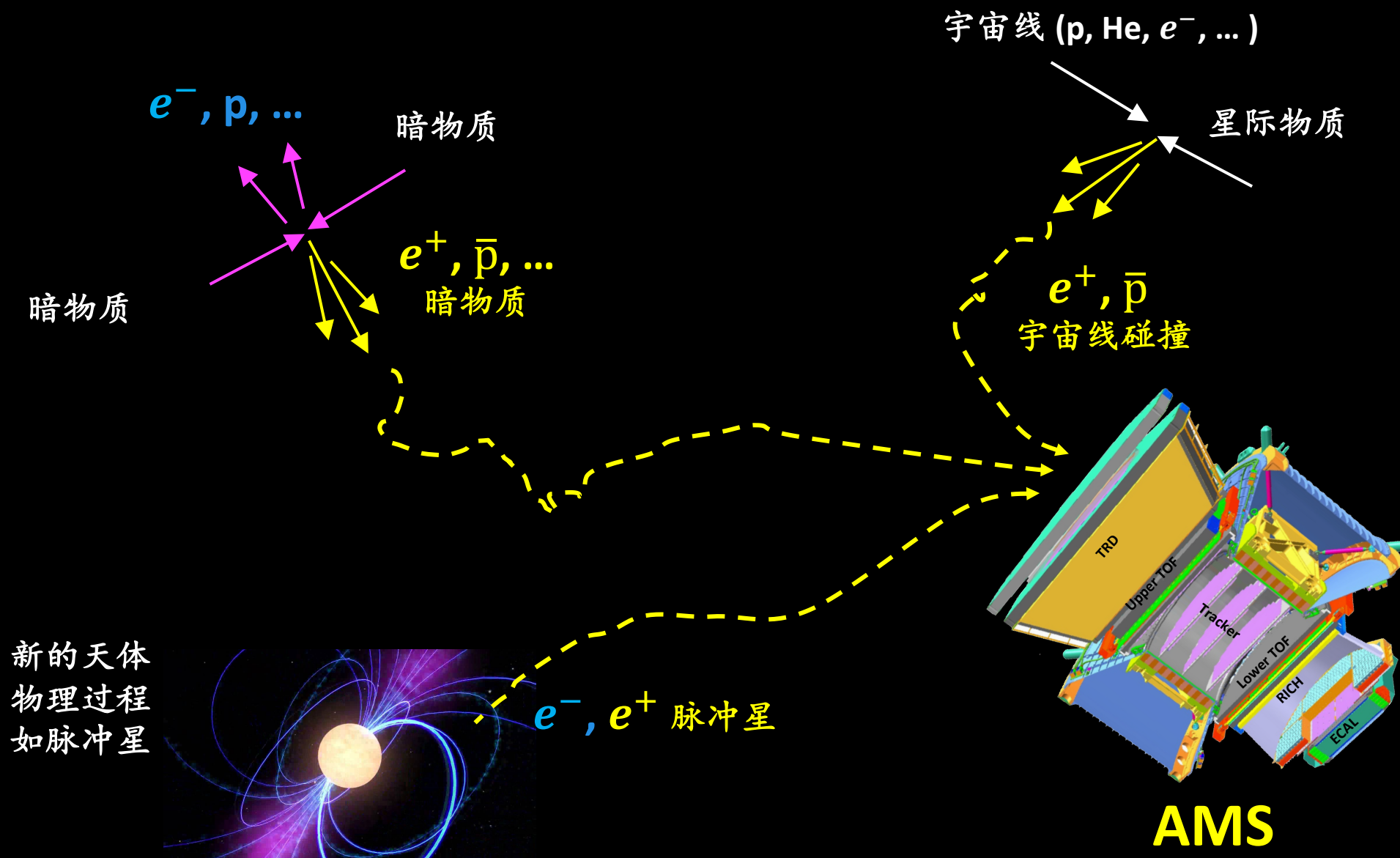
2011年以来，收集超过
2600亿个宇宙线事例

能量达到TeV，精度~1%
不能用现有的理论解释

需要发展新的宇宙线理论



正电子 e^+ , 电子 e^- 和反质子 $\bar{p}$ 的最新结果



AMS正电子能谱

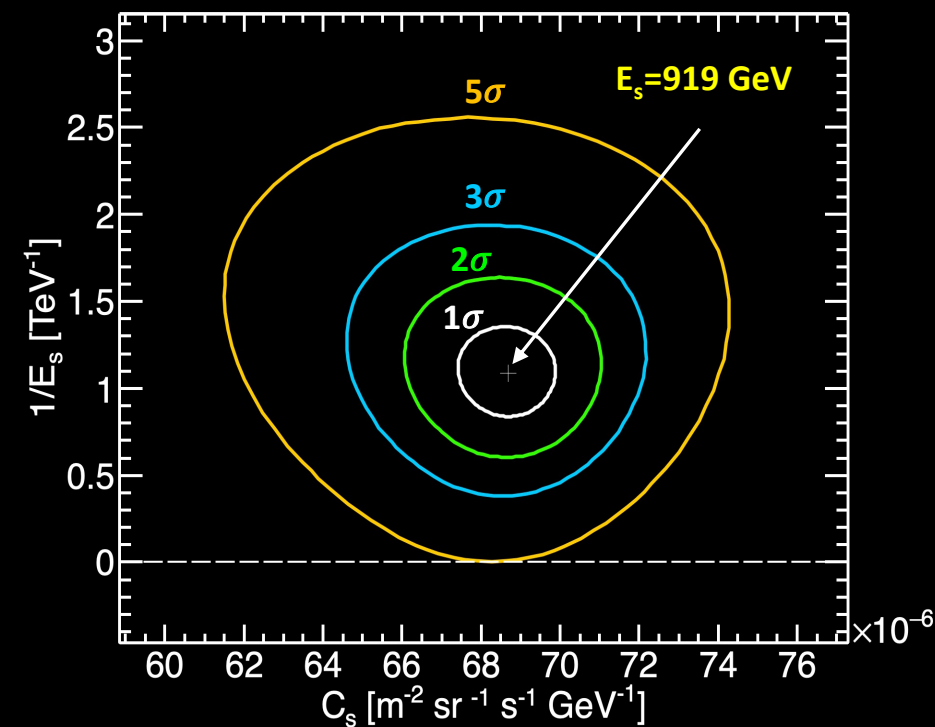
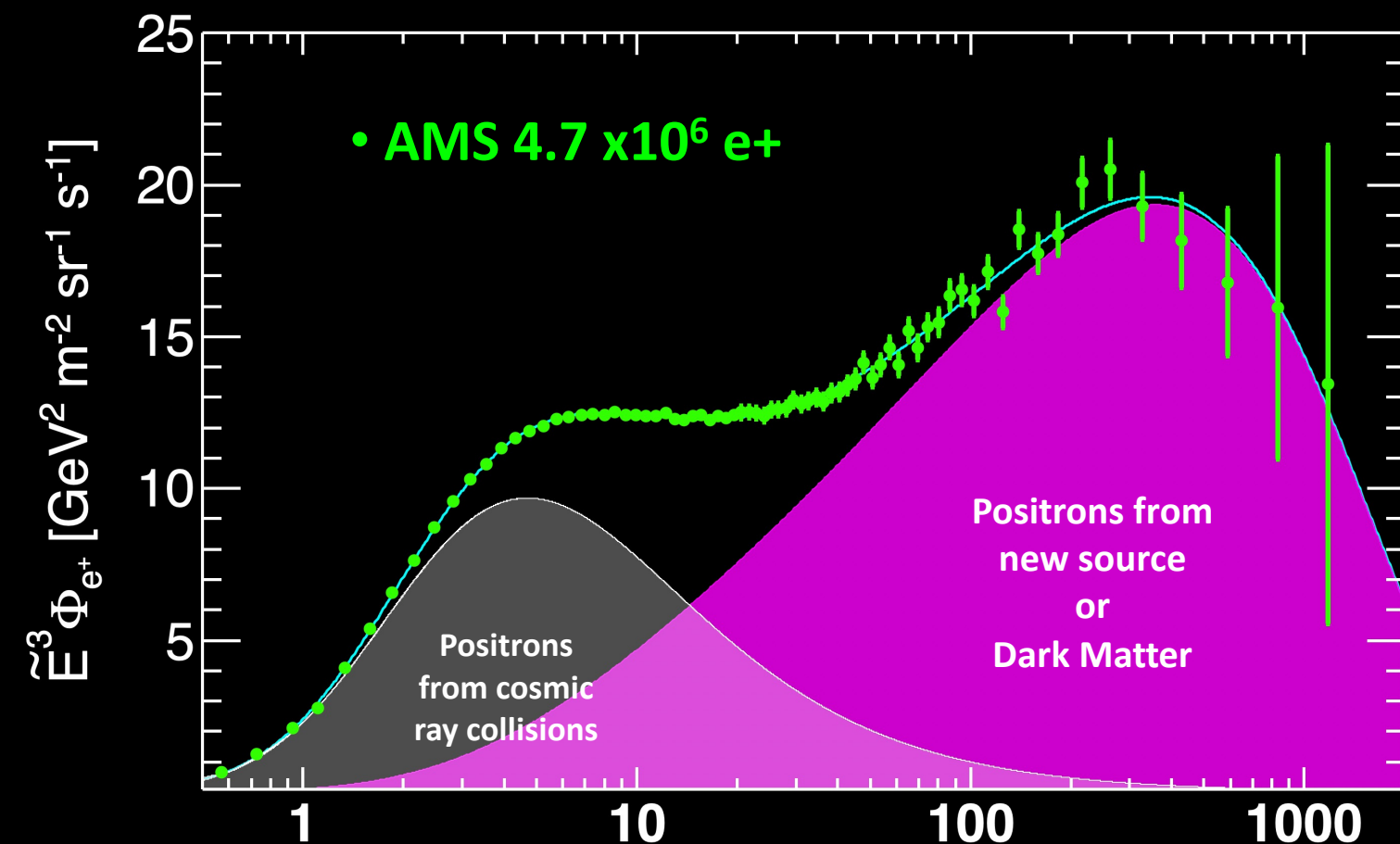
可以描述为两个成分的叠加

太阳
调制

低能成分
宇宙线碰撞

高能成分
脉冲星或暗物质

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



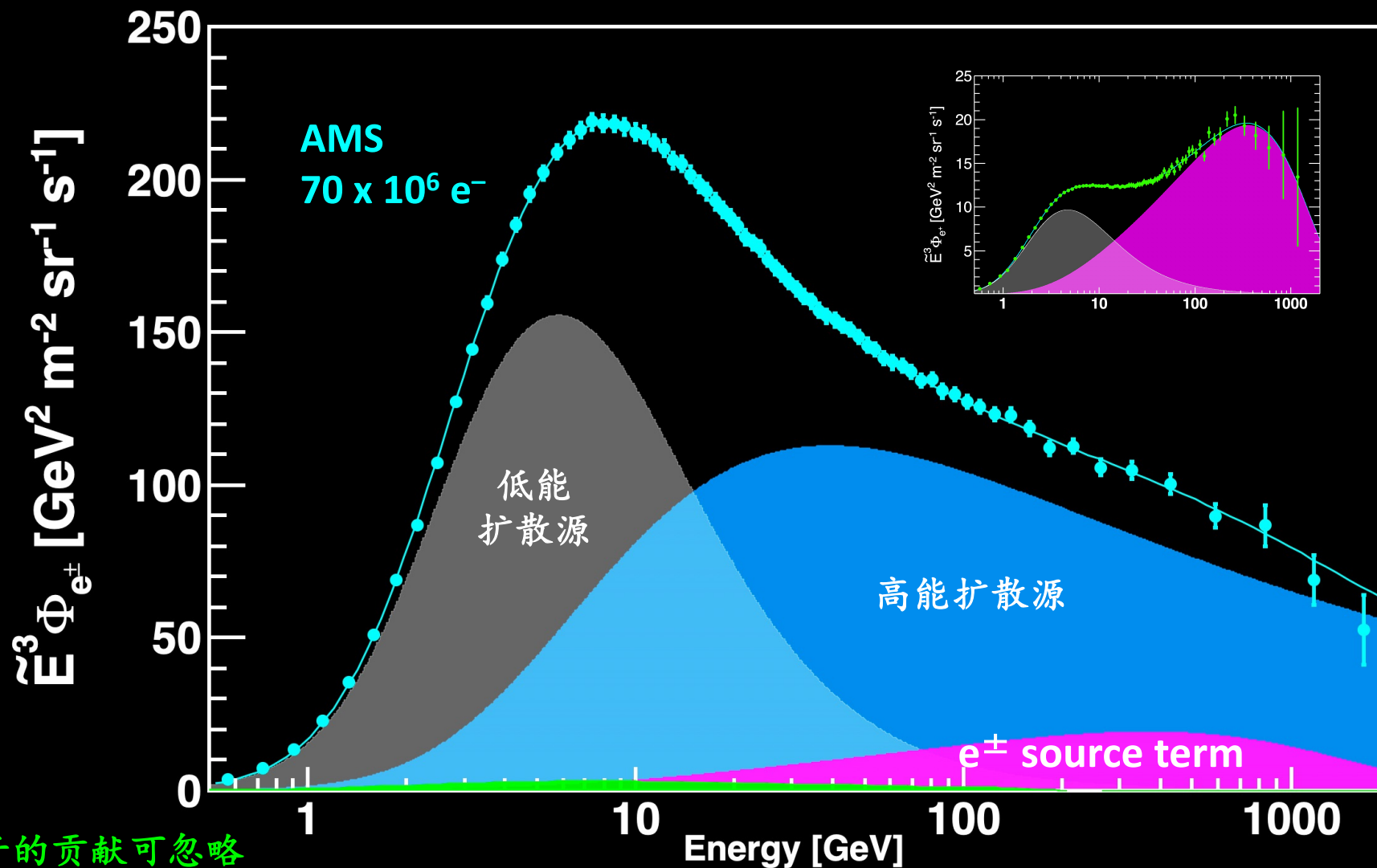
高能成分存在截止能量 E_s
显著性为 5 σ

AMS电子能谱

可以拟合成两个幂律谱成分(a, b)和正电子源成分

$$\Phi_{e^-}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} (C_a \hat{E}^{\gamma_a} + C_b \hat{E}^{\gamma_b} + \text{Positron Source Term})$$

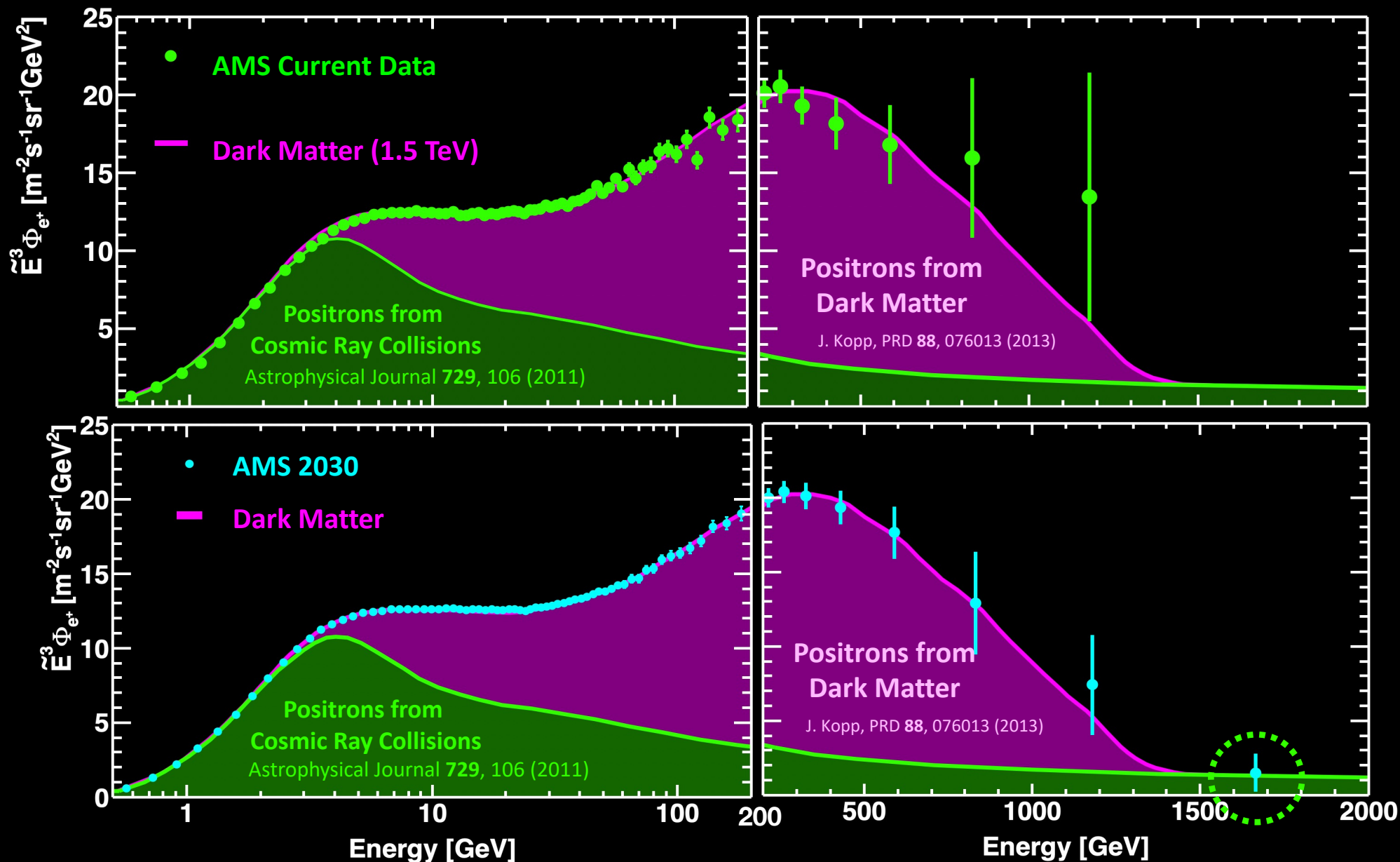
电荷对称的高能源



99.3% CL

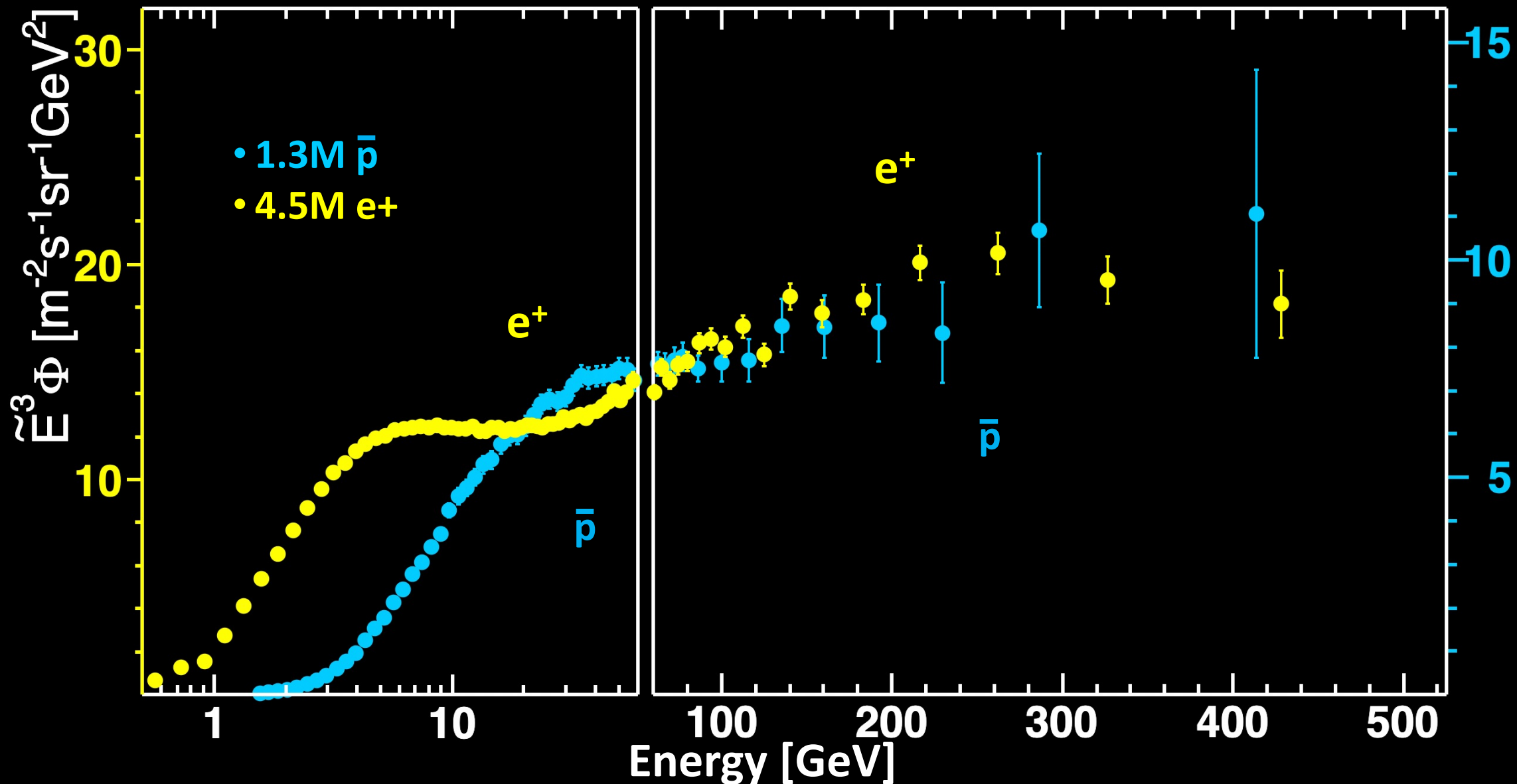
AMS正电子预期结果 (2030)

能量至2 TeV，确认正电子能谱在截止能量以上是否快速下降

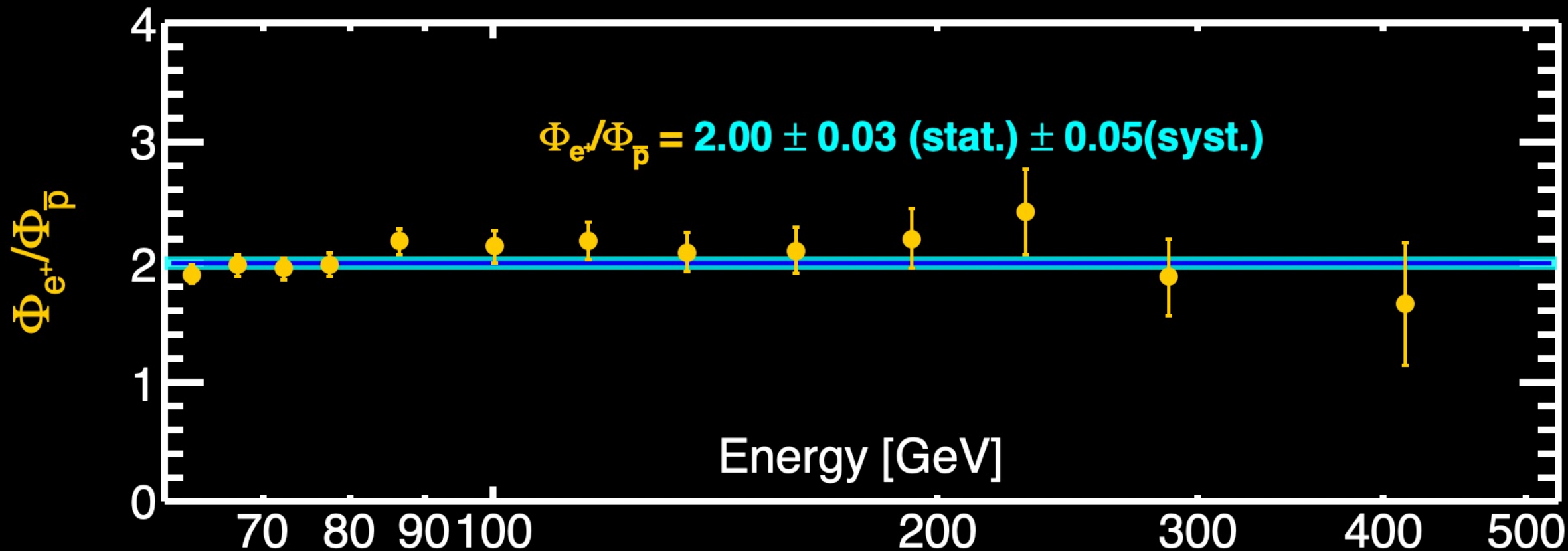


宇宙线反质子的特性

反质子和正电子在能量60 GeV以上具有相同的能谱特征



反质子和正电子

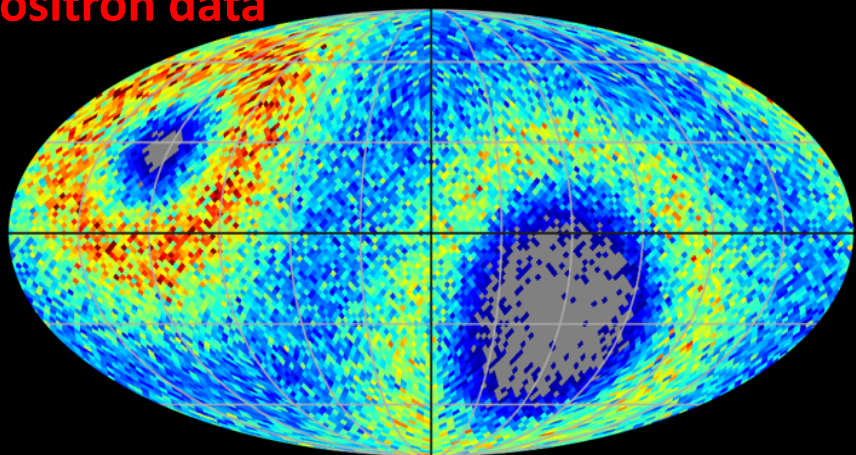


反质子和正电子流强相同的能量依赖性，
对高能正电子源的脉冲星假设和超新星遗迹假设提出了挑战。

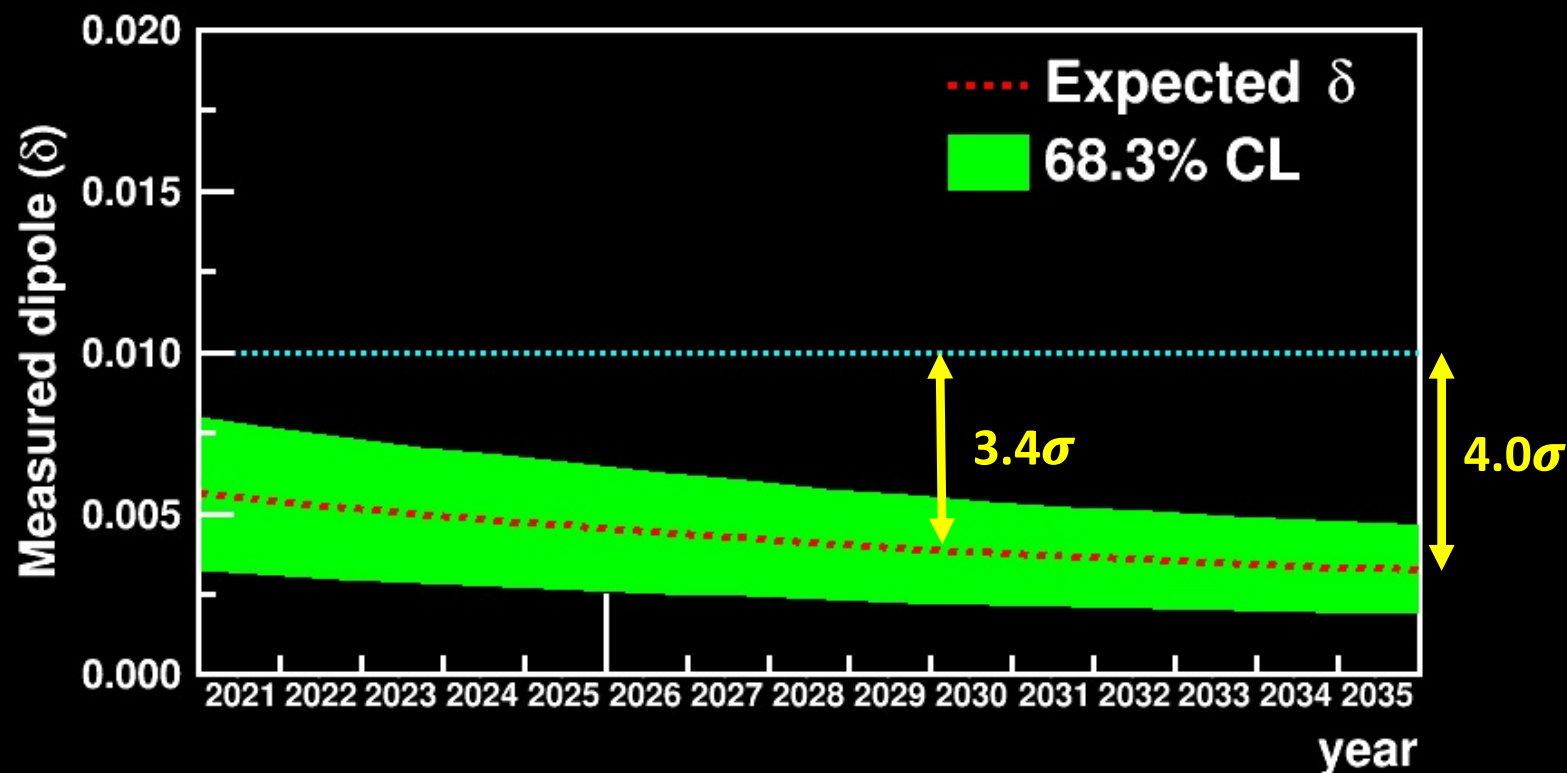
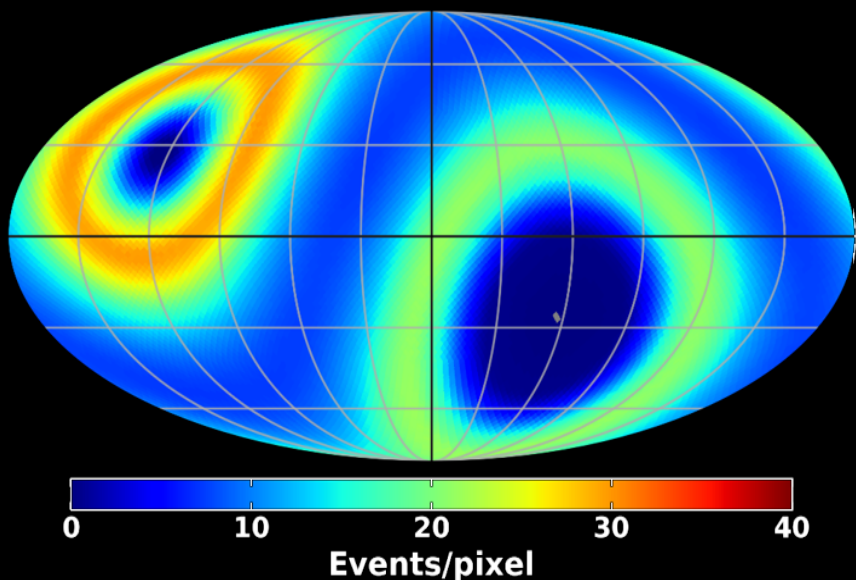
正电子各向异性

点状的天体源会导致正电子的到达方向存在各向异性；
而更均匀的暗物质晕则不会。

Positron data

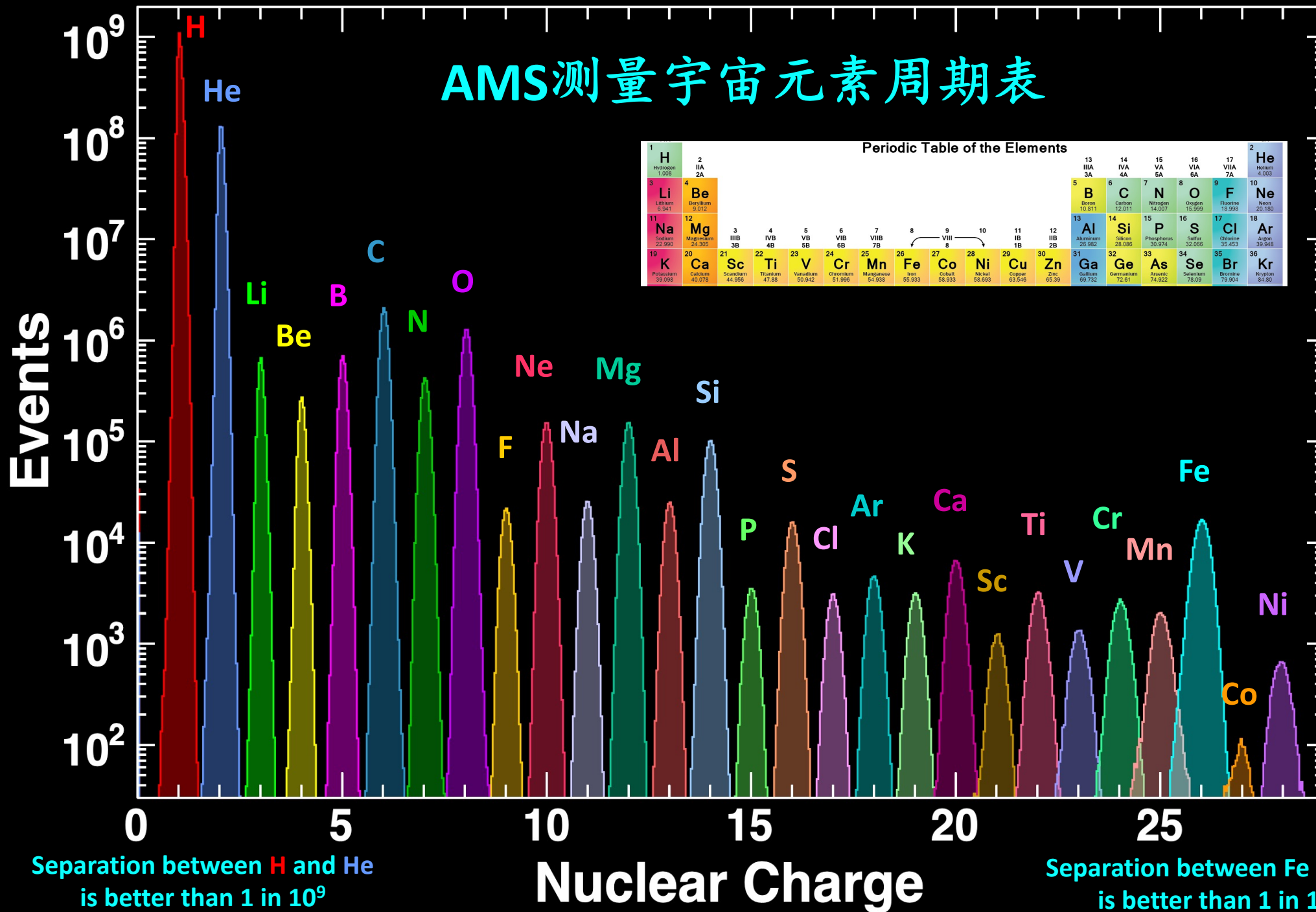


Isotropic map



到2030年, 各向异性的测量精度提高, 使得暗物质和脉冲星的区分程度达到 99.93% C.L.

AMS测量宇宙元素周期表

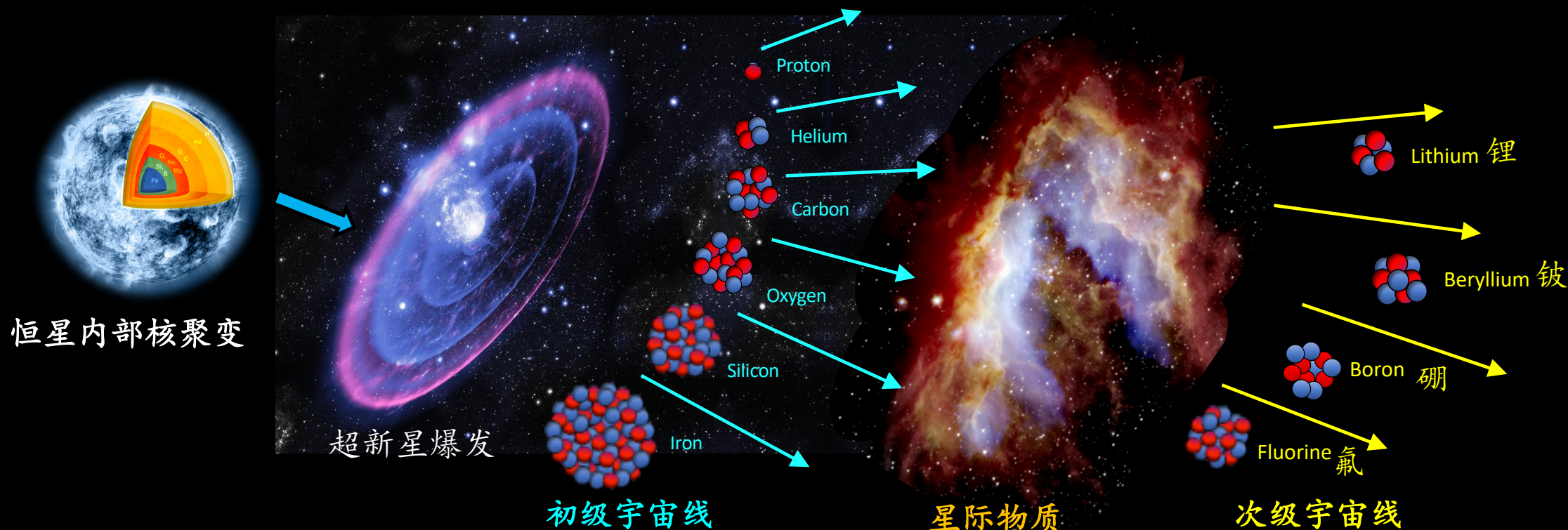


宇宙线的起源

初级宇宙线C, O, Ne, Mg, Si, ..., Fe

在恒星演化过程由核聚变产生，通过
超新星爆发的激波获得能量。

初级宇宙线与银河系内的传播过程中
与星际物质碰撞，产生次级宇宙线
锂Li, 铍Be, 硼B, 和 氟F

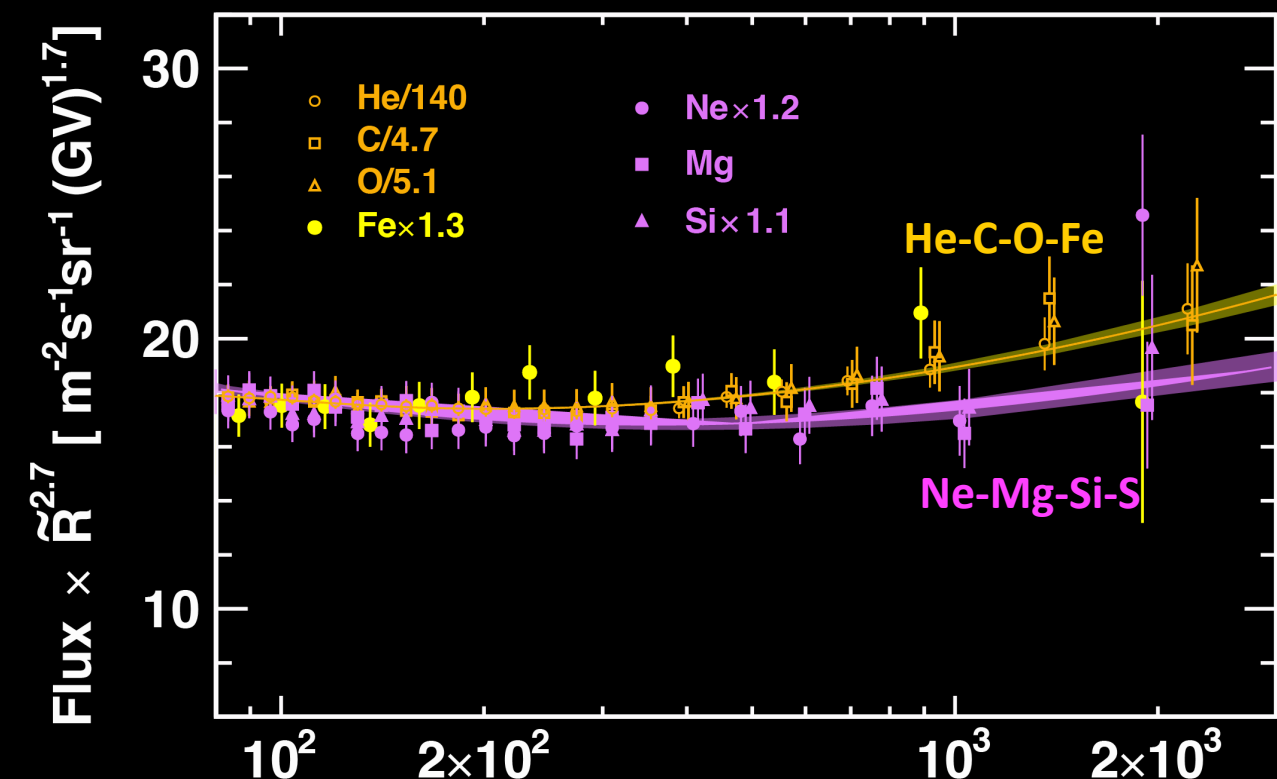


测量宇宙线能谱是理解宇宙线的起源和传播的基础。

地球上的锂、铍、硼和氟是由宇宙线碰撞产生的。

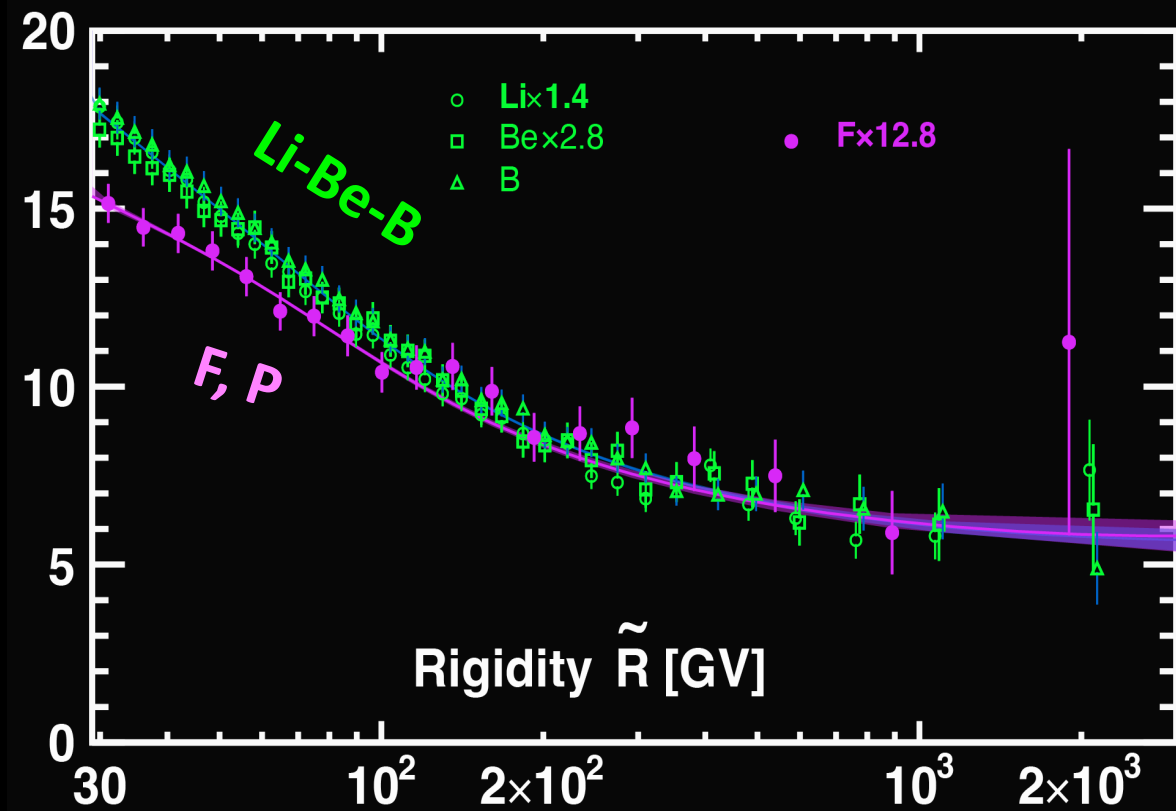
意料之外的结果：宇宙线的分类

Ne-Mg-Si-S 具有一致的刚度依赖性，
但与较轻的 He-C-O-Fe 不同



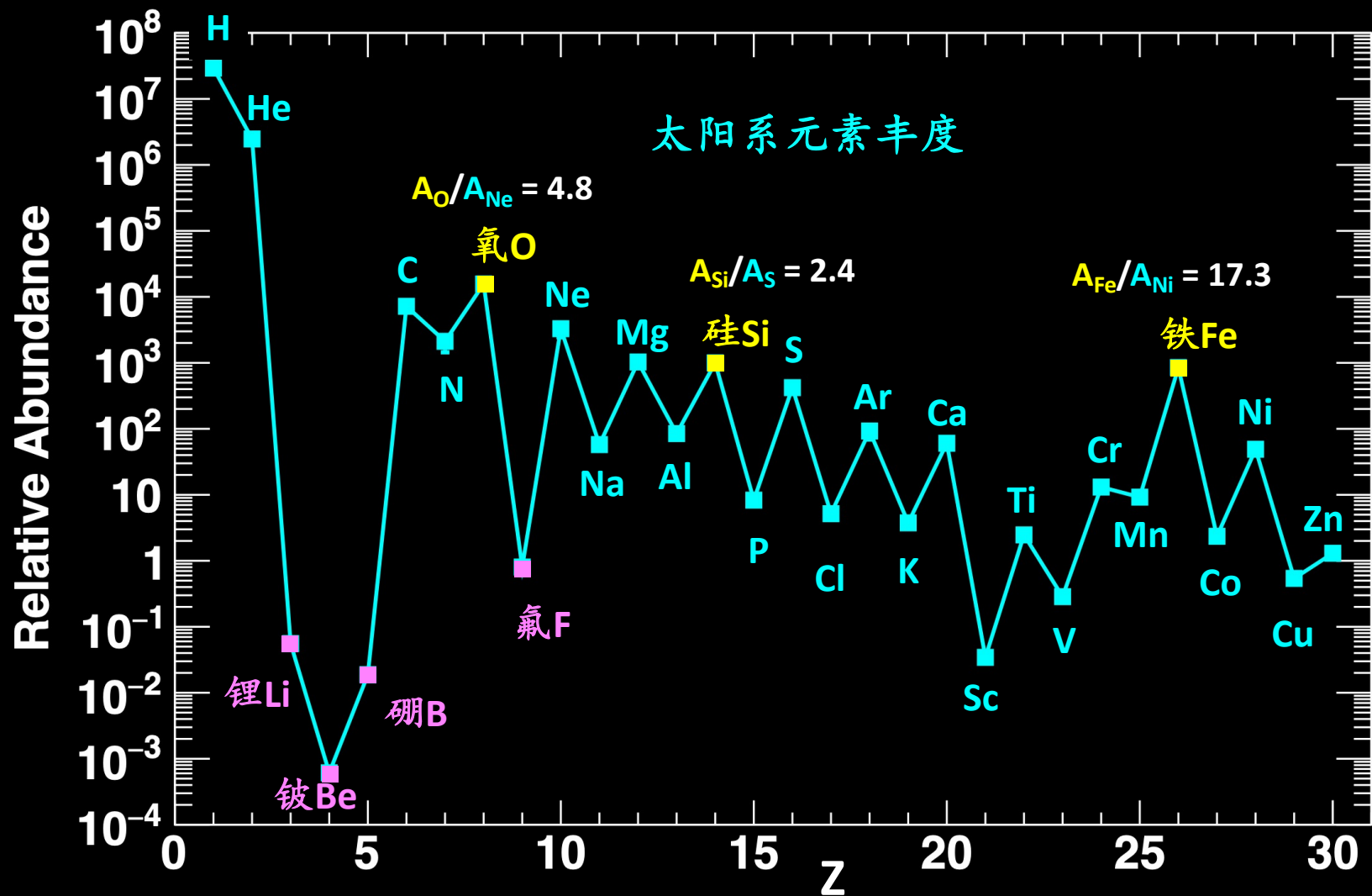
“初级宇宙线”有两类

氟(F)与锂-铍-硼(Li-Be-B)
具有不同的刚度依赖性

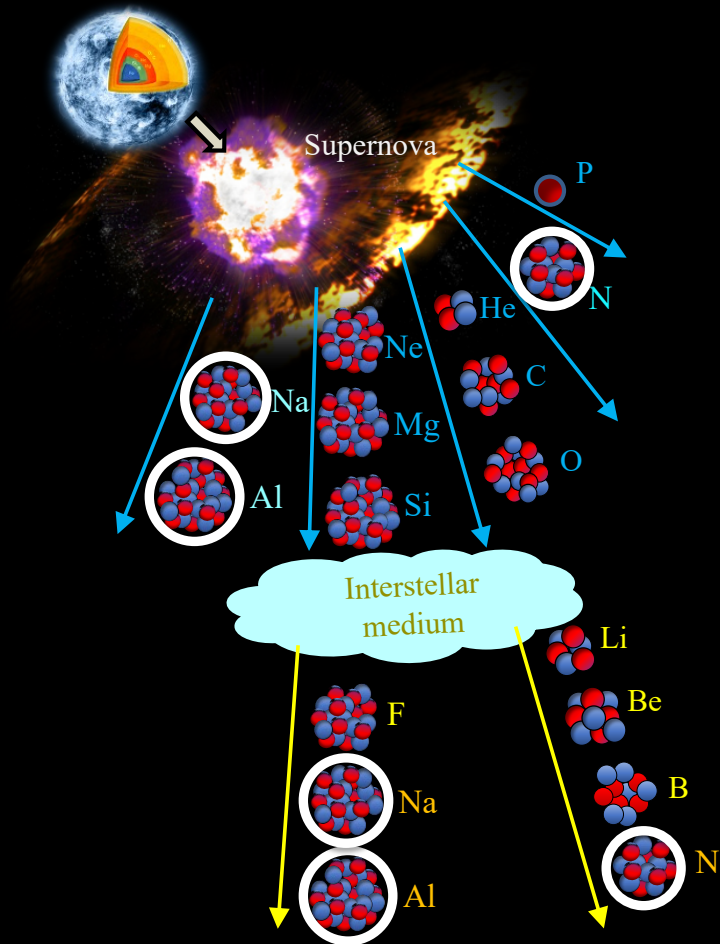


“次级宇宙线”也至少有两类

宇宙线的初级和次级成分

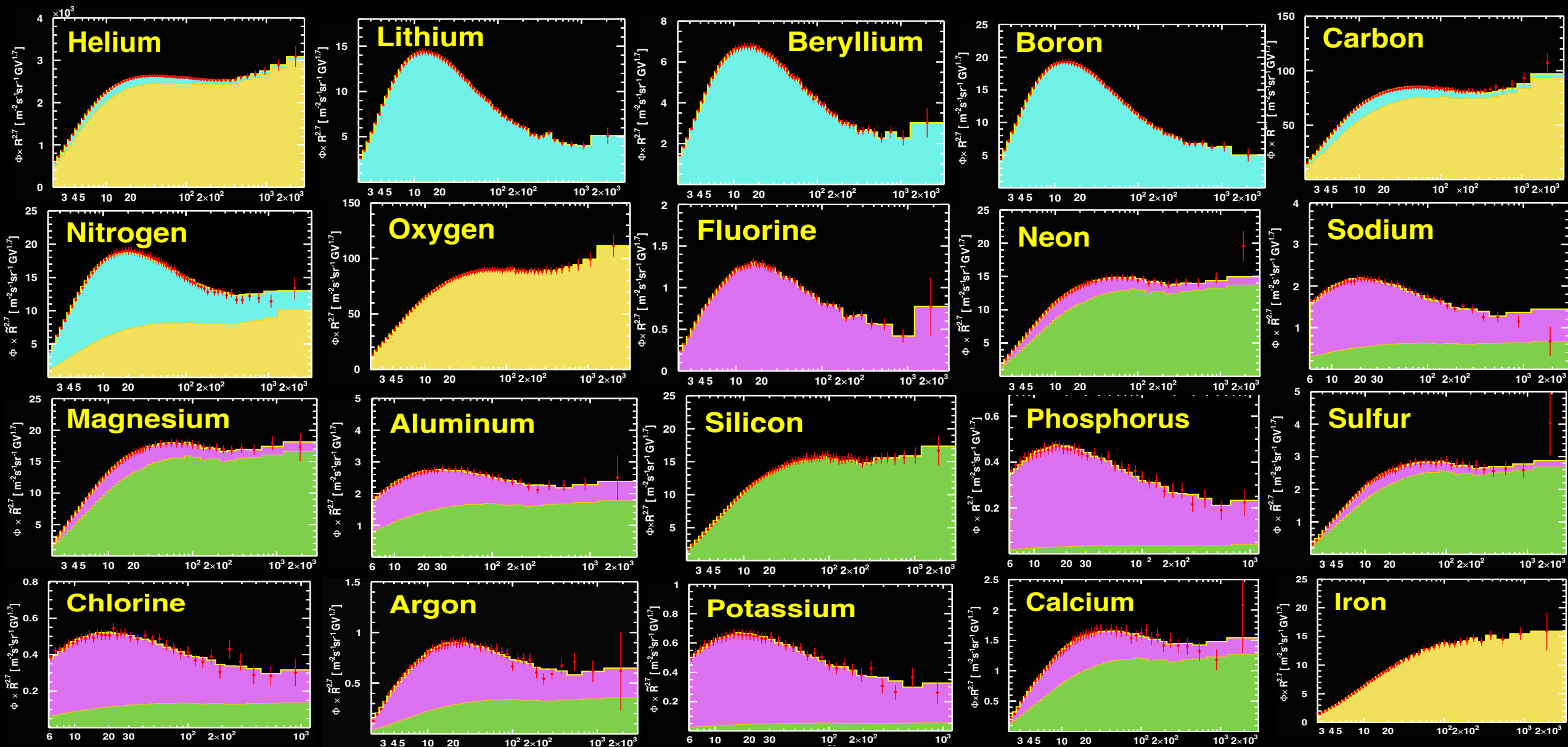


氧、硅、铁是典型的初级宇宙线
 锂、铍、硼、氟是典型的次级宇宙线



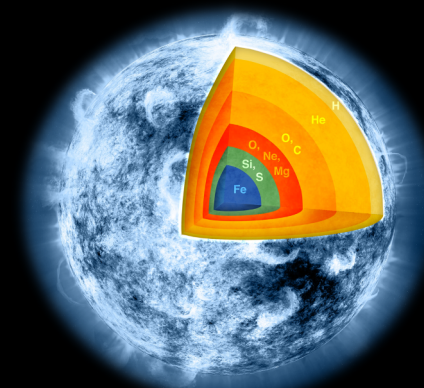
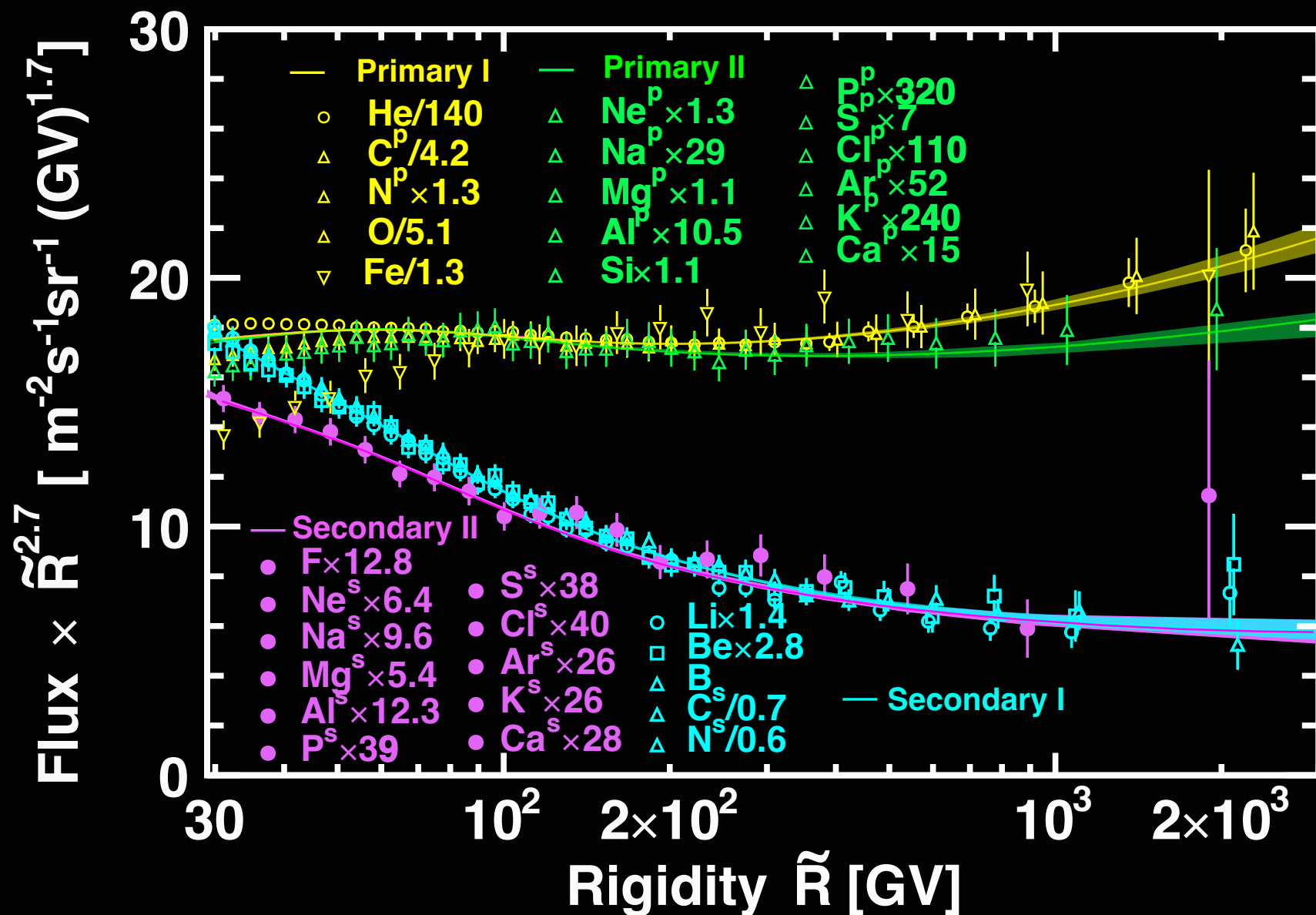
更多的情况是：
 初级成分 + 次级成分

AMS已测量的20种原子核能谱， 可以描述为两类初级成分，两类次级成分，或者它们的混合



AMS测量的20种元素（氦至钙、铁）

两类初级成分，两类次级成分



初级成分

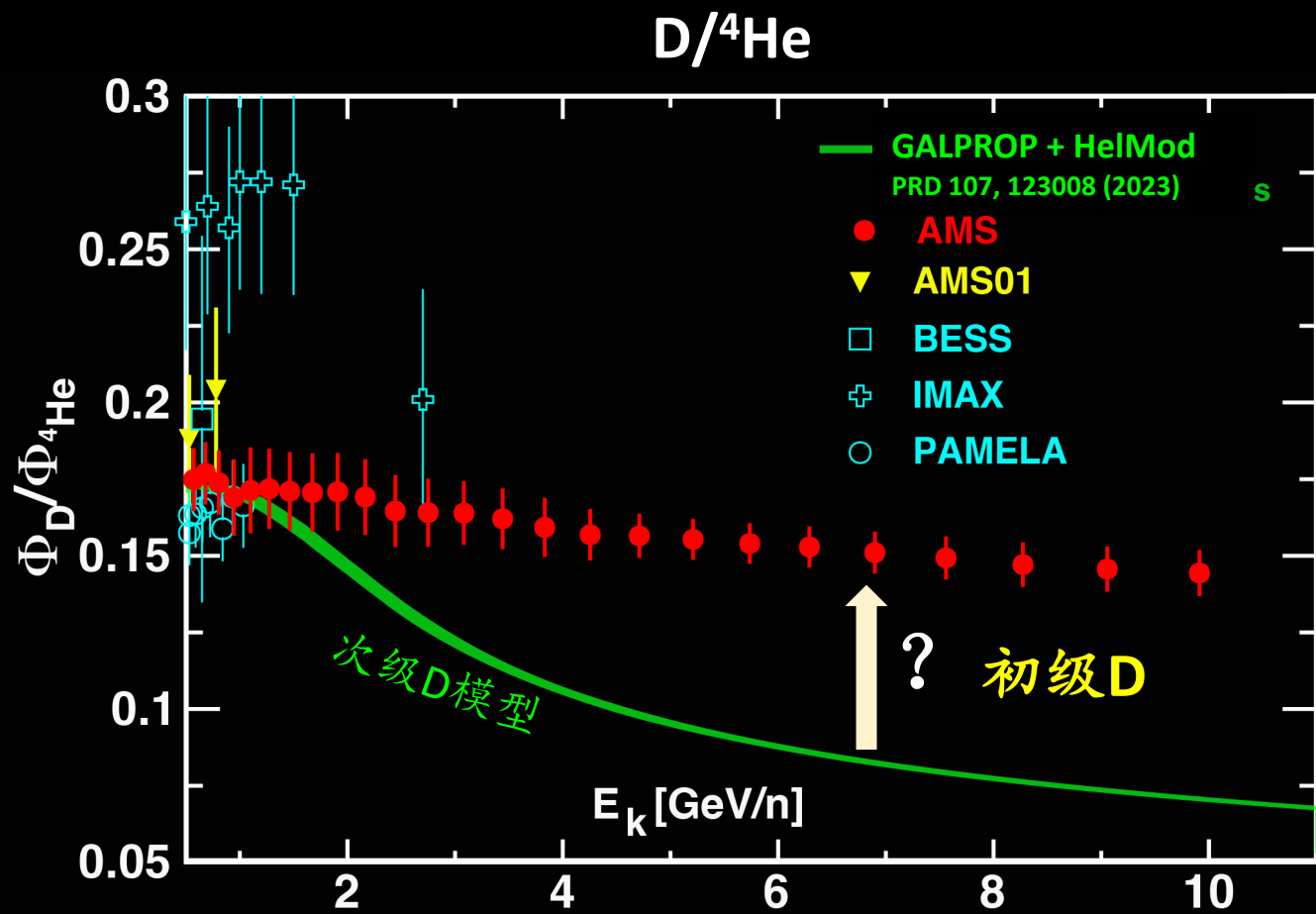
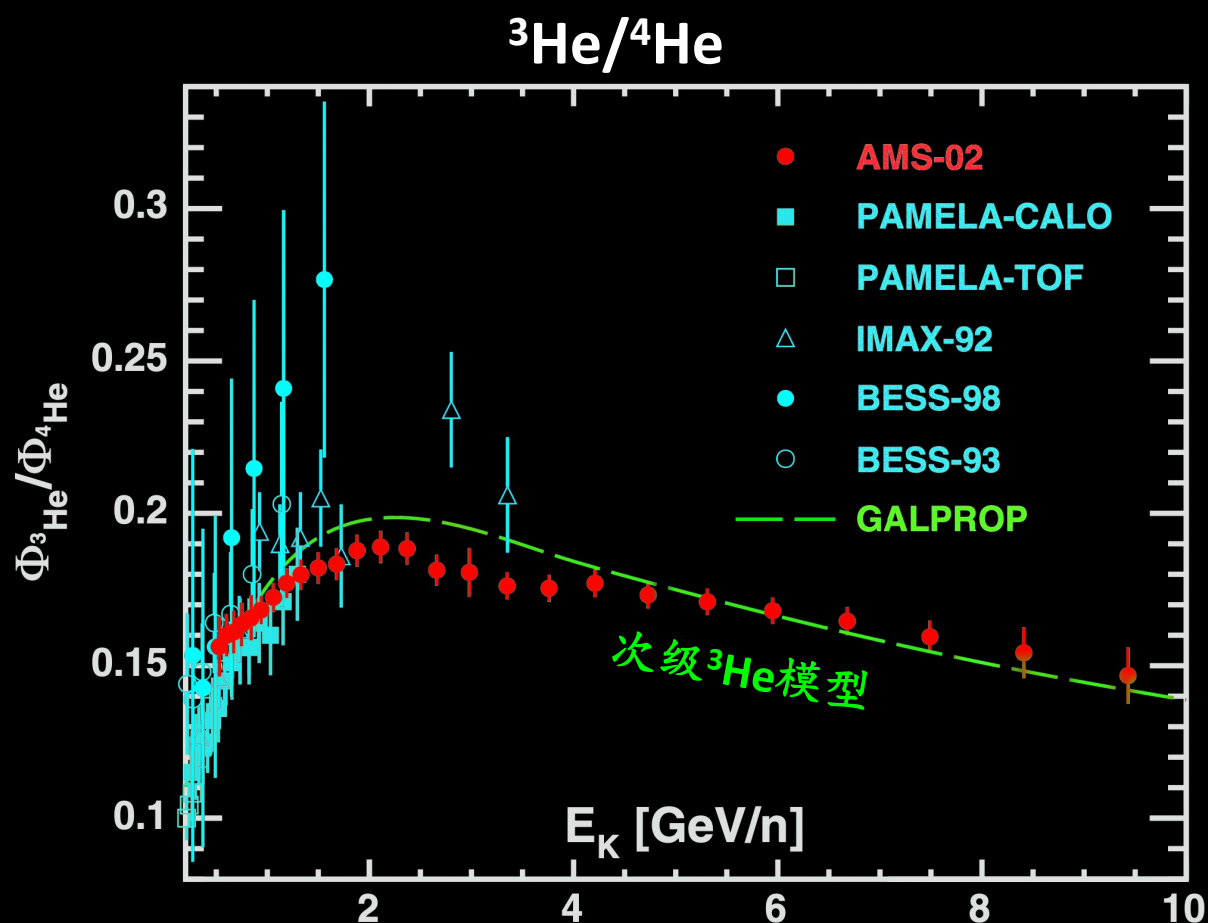


次级成分

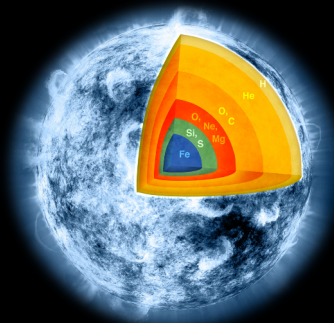
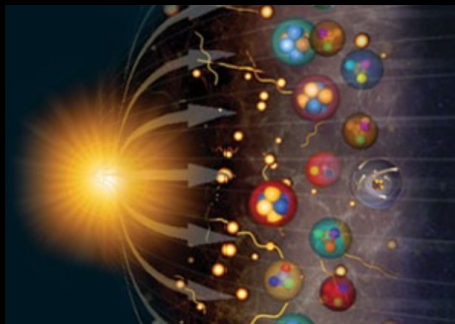
宇宙线同位素

宇宙大爆炸产生的原初 $D/p \sim 10^{-5}$ 。

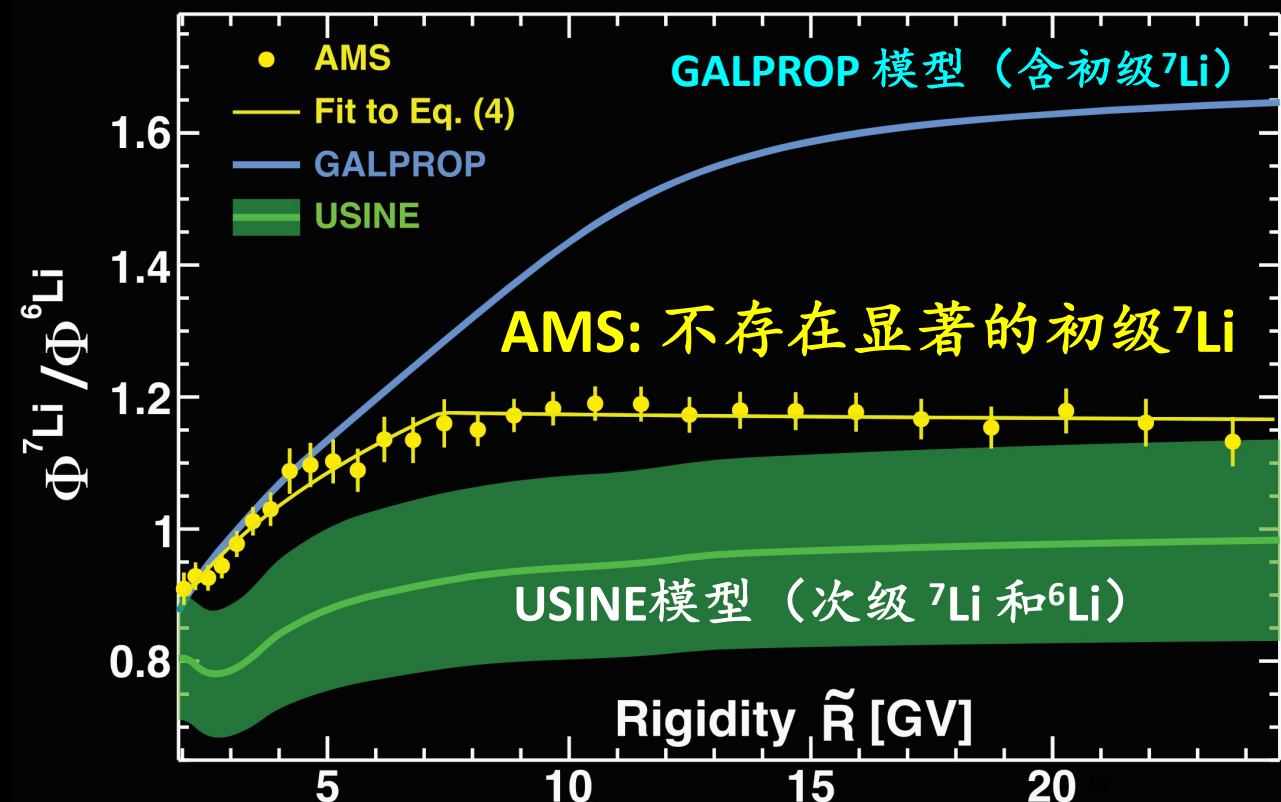
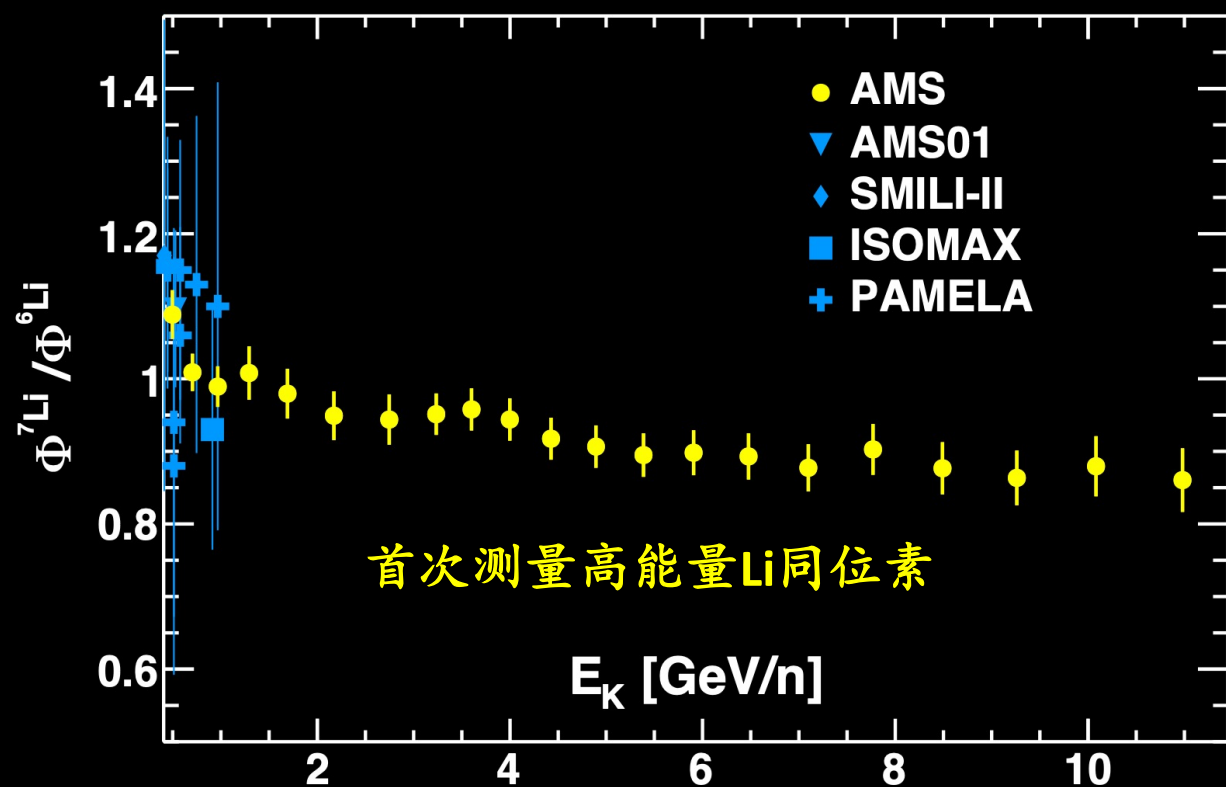
理论认为，宇宙线中的 D 和 3He 是次级宇宙线，由 4He 等原子核的碎裂产生。



锂同位素的起源：是否存在初级 ^7Li ？



1. 原初：宇宙大爆炸核合成 2. 初级：恒星演化（新星爆发） 3. 次级：宇宙线和星际物质碰撞



宇宙中的铍同位素

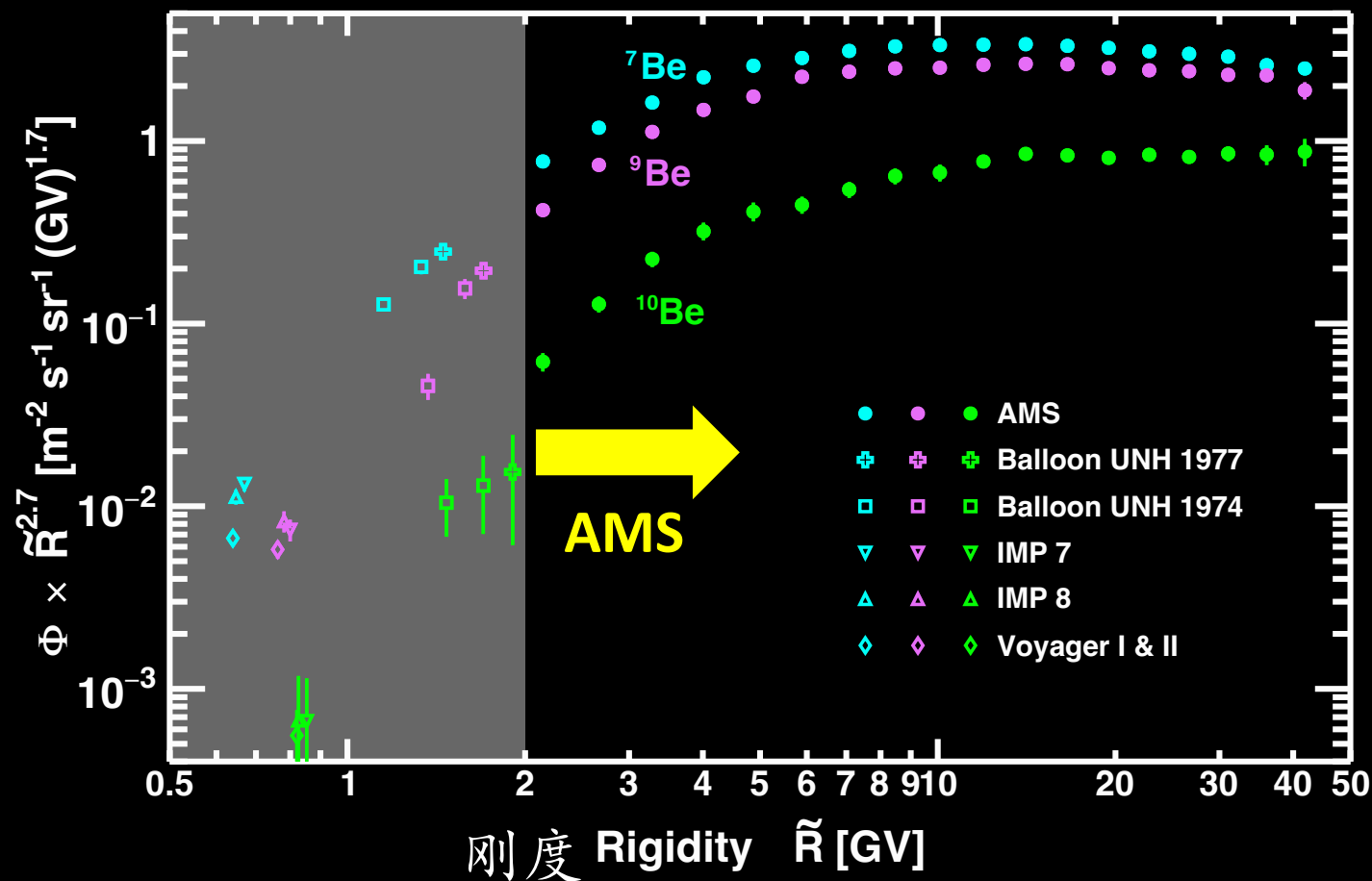
^7Be , ^9Be , ^{10}Be

^9Be 是稳定的核素，在整个银河系晕内传播
 ^{10}Be 在传播到银河系边界之前可能衰变为 ^{10}B

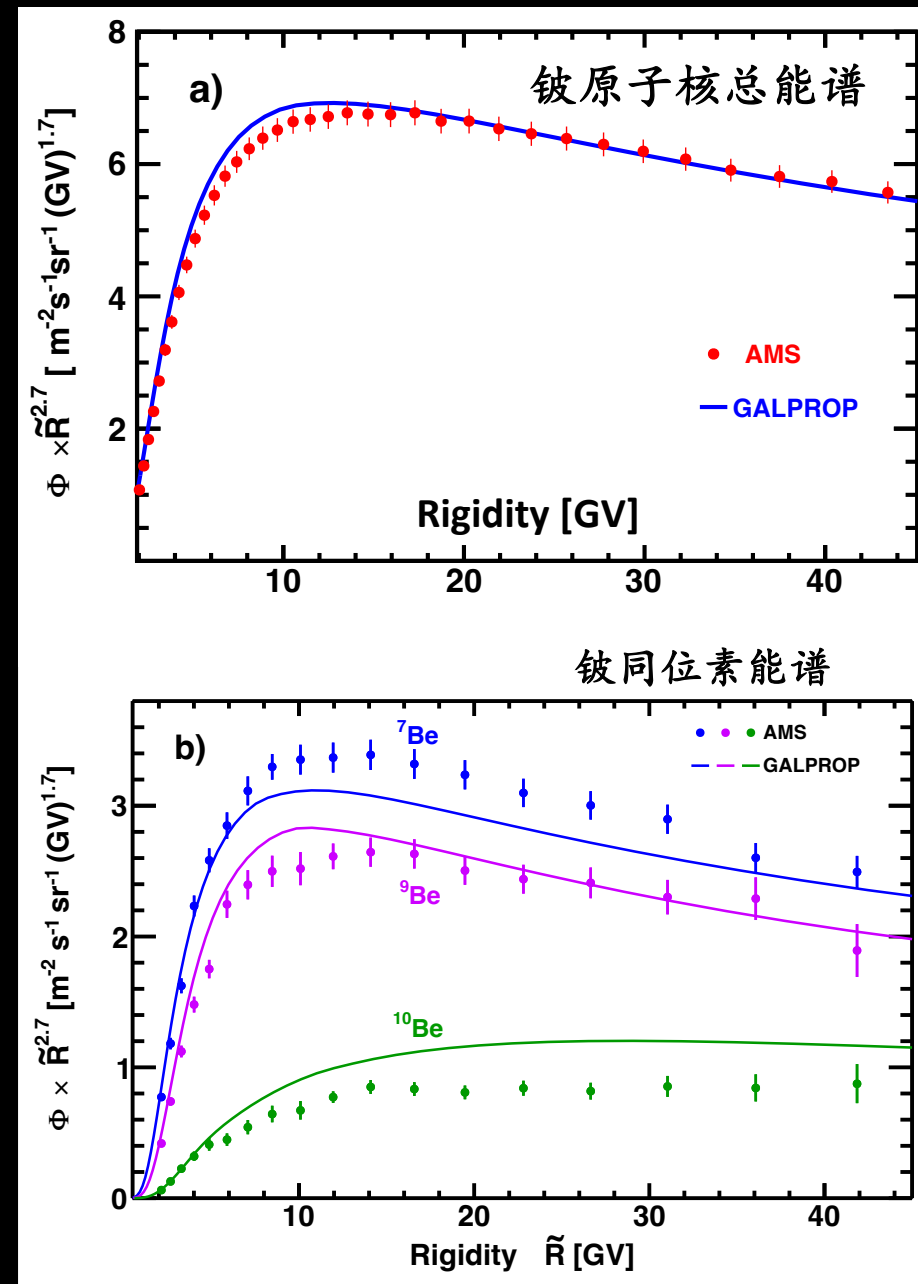


$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 用于测量银河系晕的厚度 L

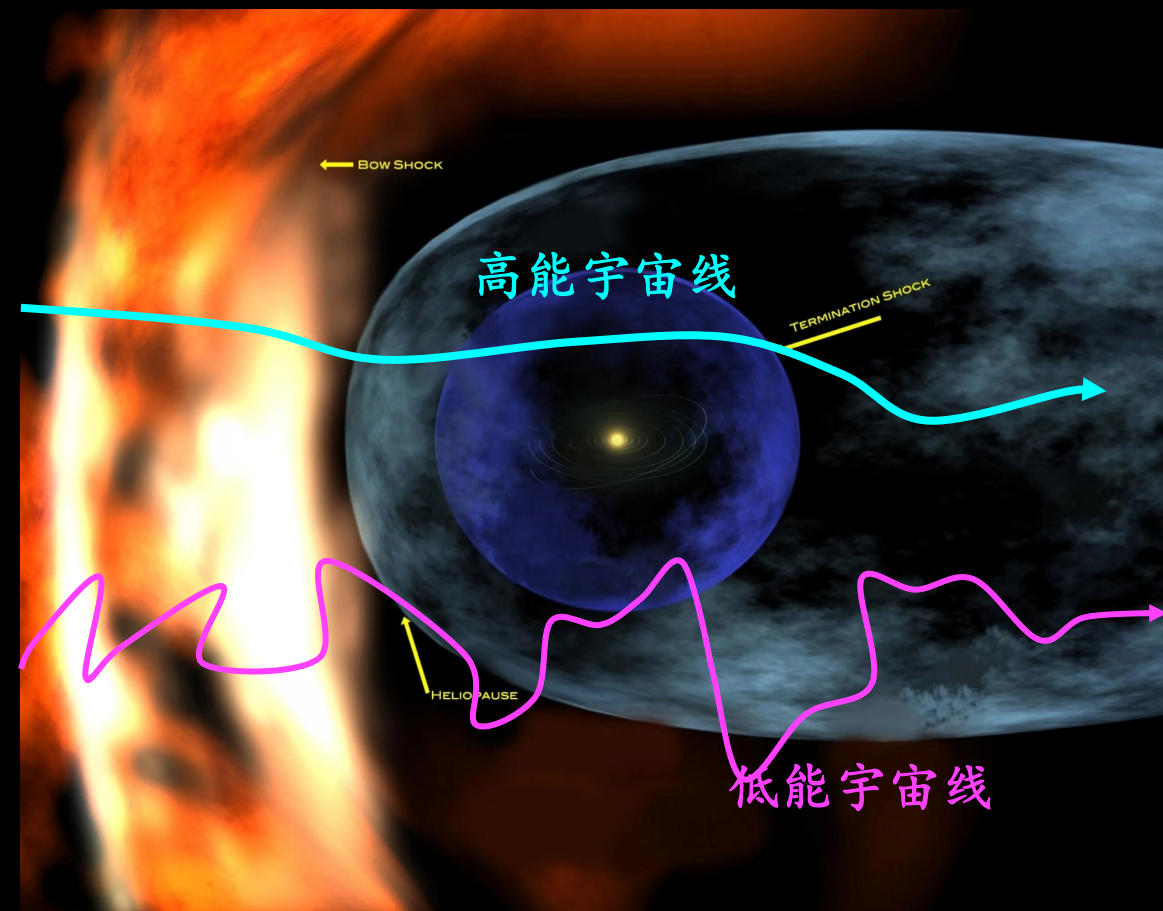
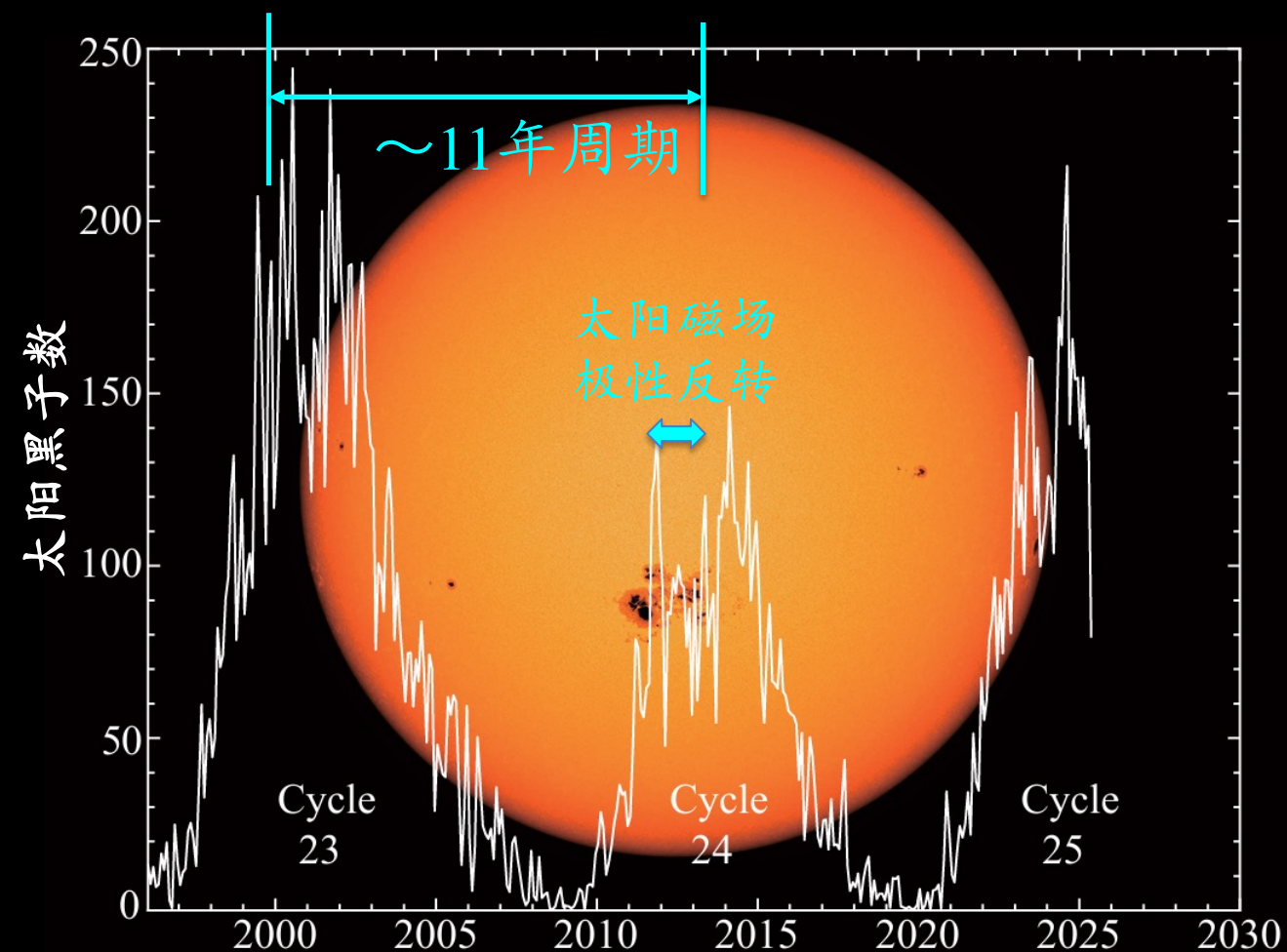
AMS铍同位素测量结果



AMS显著拓展了能量覆盖范围；
GALPROP通过参数调整可解释AMS铍核的总能谱，
但无法解释同位素能谱



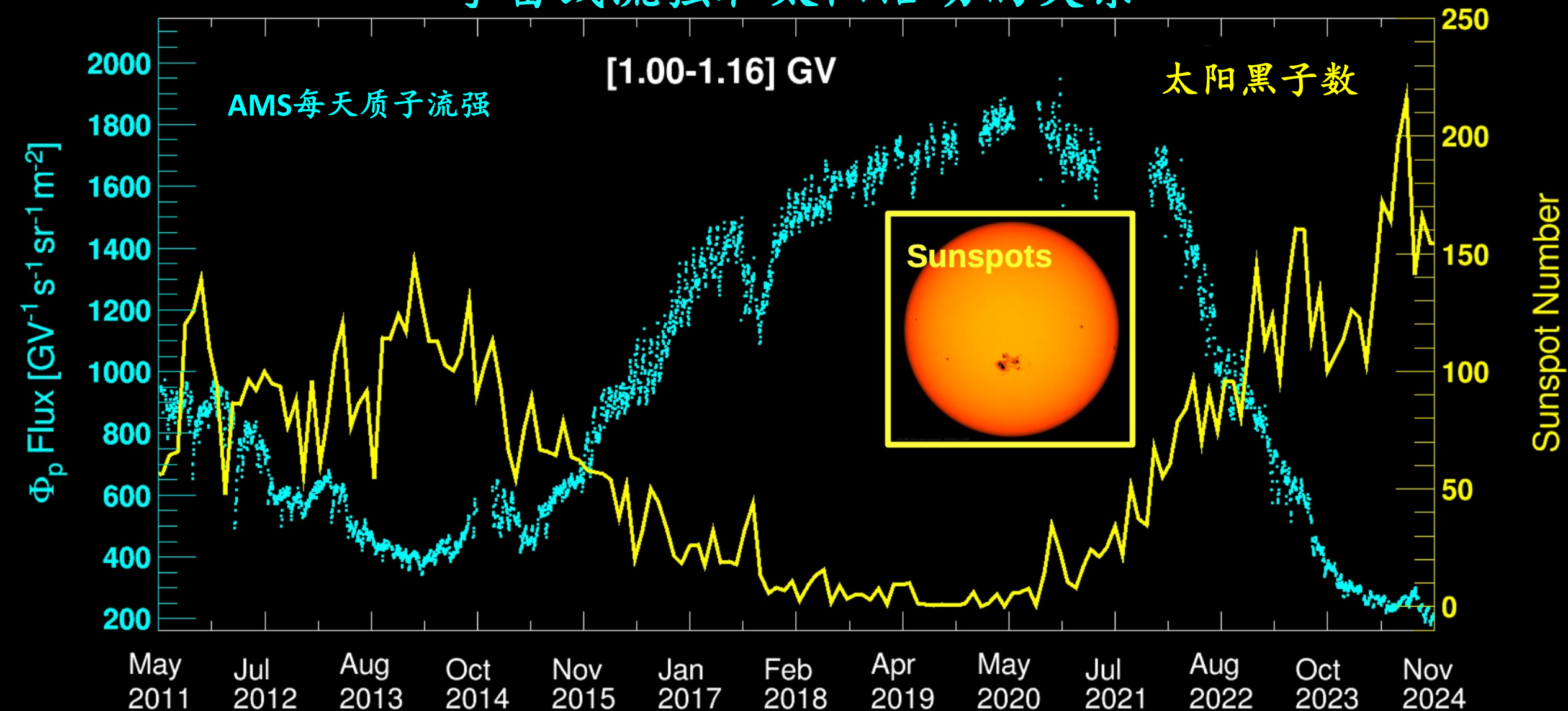
宇宙线在太阳系内的传播规律



太阳活动强度存在~11年周期，太阳磁场每~11年反转方向。

低能宇宙线被太阳系不规则磁场多次偏转，流强受太阳活动影响而随时间变化。

宇宙线流强和太阳活动的关系



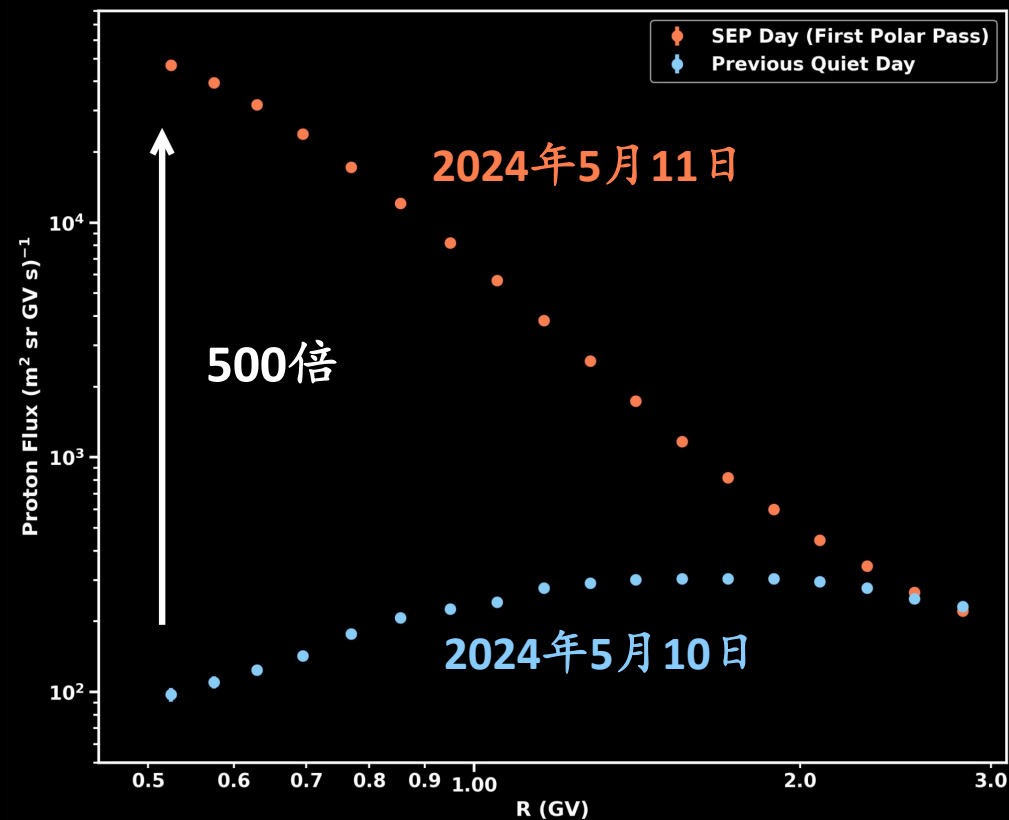
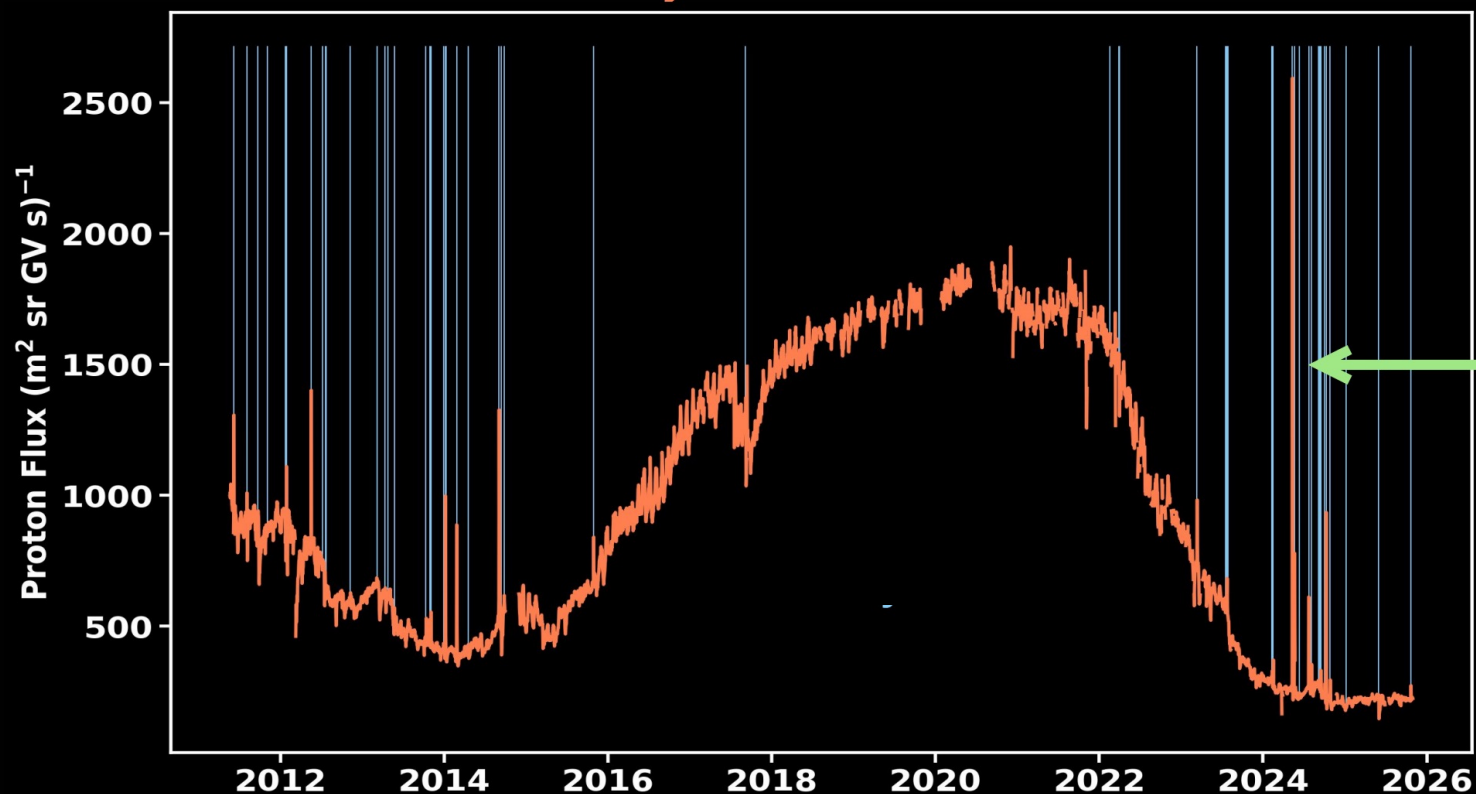
AMS在近两个完整太阳周期（2011-2030年）

以精细的时间尺度 测量不同类型宇宙线流强的时间演化

太阳高能粒子事件 (SEP)

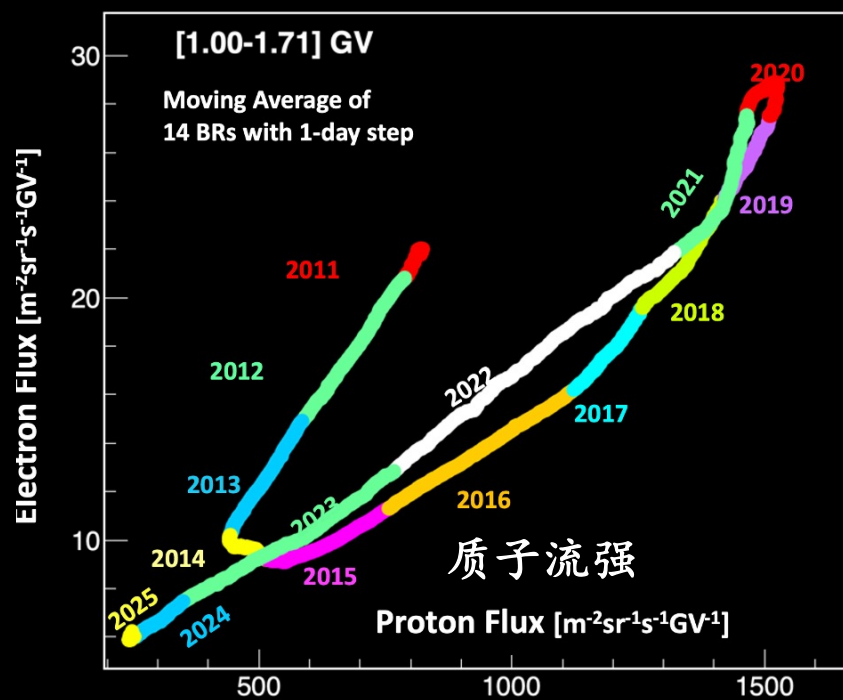
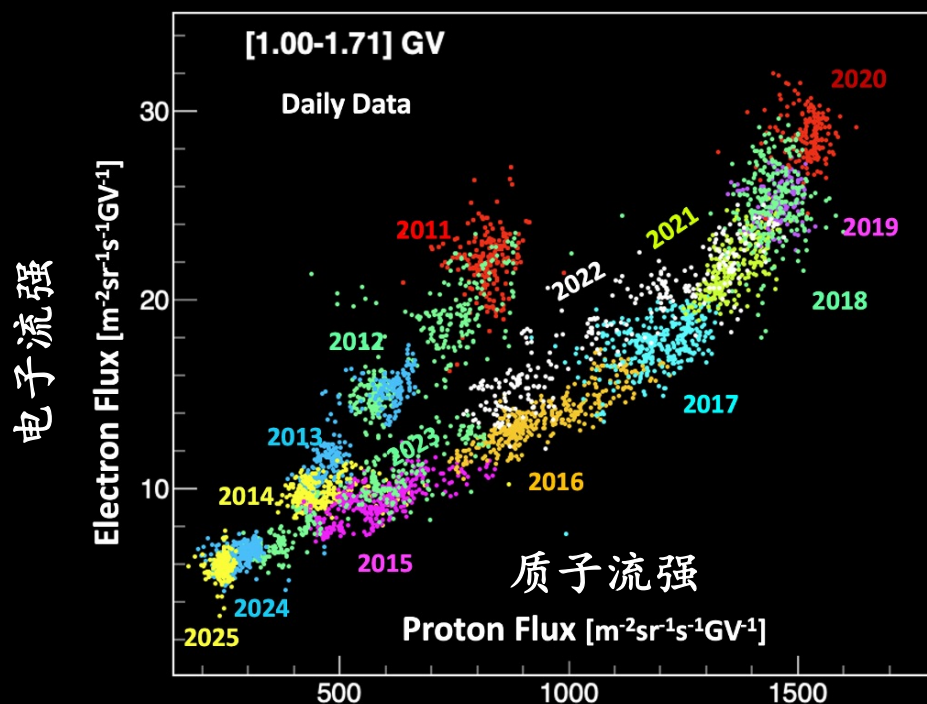
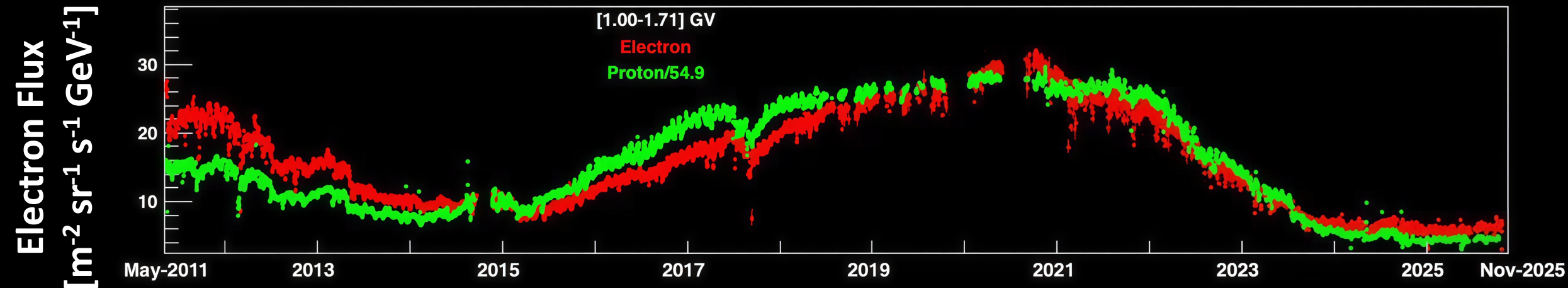
SEP是空间粒子辐射的主要来源之一，导致辐射剂量瞬时增加

Daily Proton Flux at 1 GV



自2011年5月至2025年11月，AMS观测到72次SEP

宇宙线每天电子流强



电子 $Z=-1$, 质子 $Z=+1$

电子流强和质子流强的时间演化存在“时滞效应”



太阳调制与粒子电荷符号有关

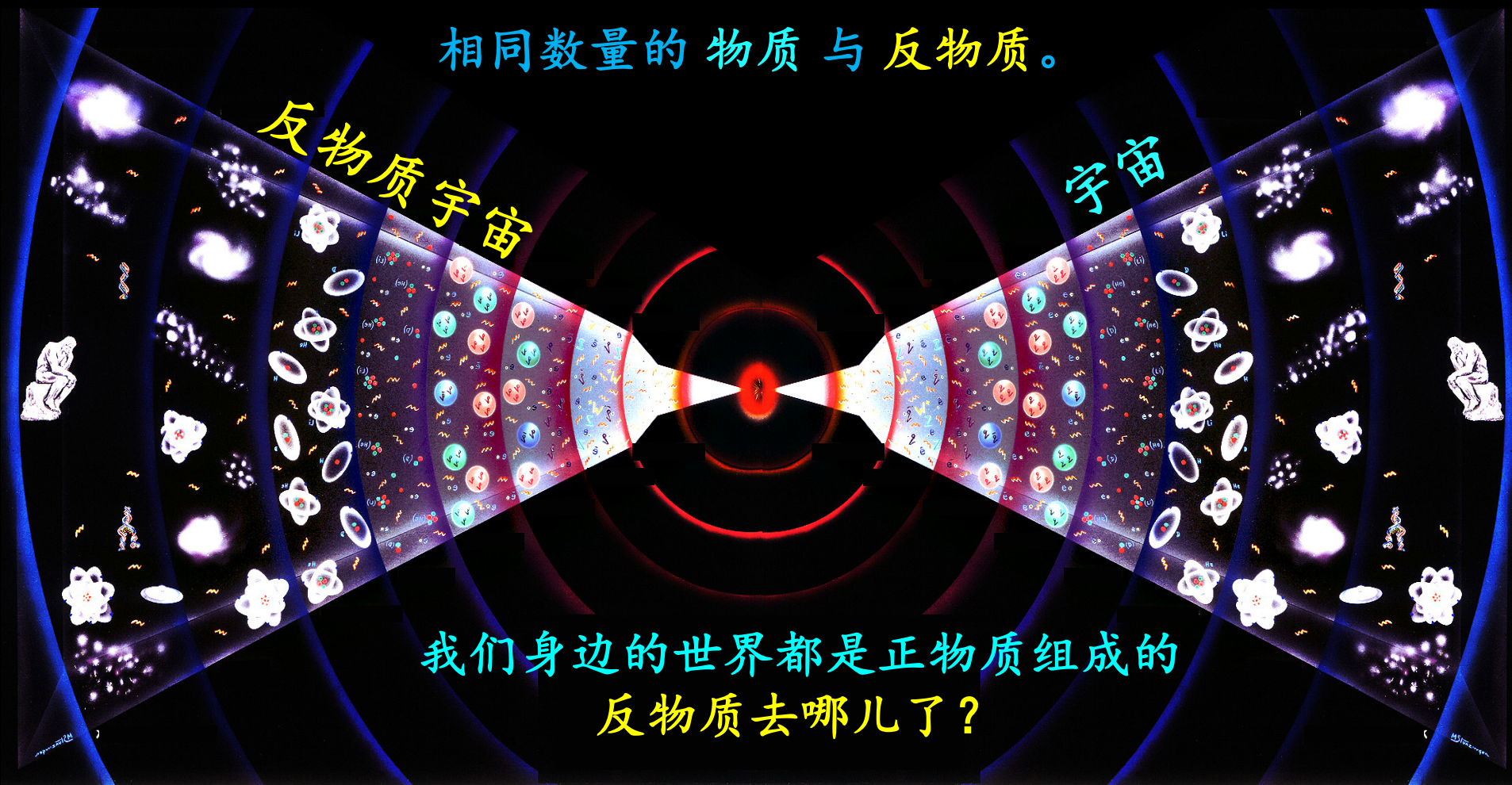
寻找 由反物质组成的宇宙

如果宇宙起始于大爆炸，

大爆炸之前是真空；

大爆炸之后应该有

相同数量的 物质 与 反物质。

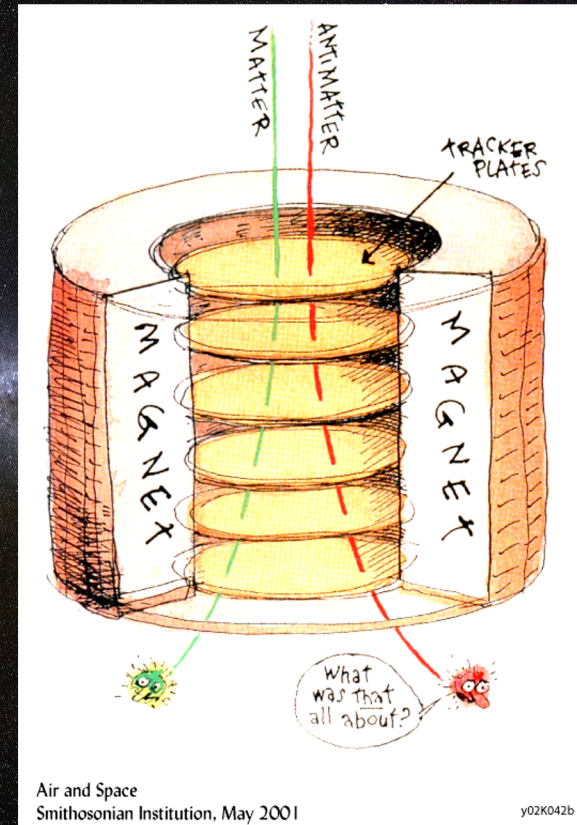
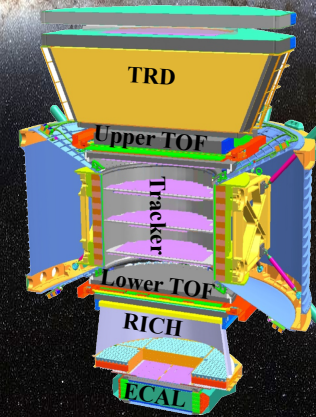
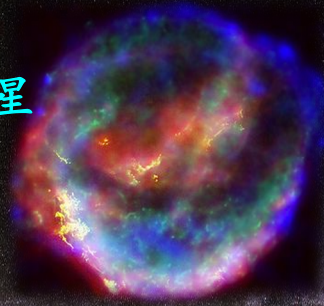


AMS寻找重质量反物质的最新结果

物质：质量M，电荷Z；
反物质：质量M，电荷-Z。

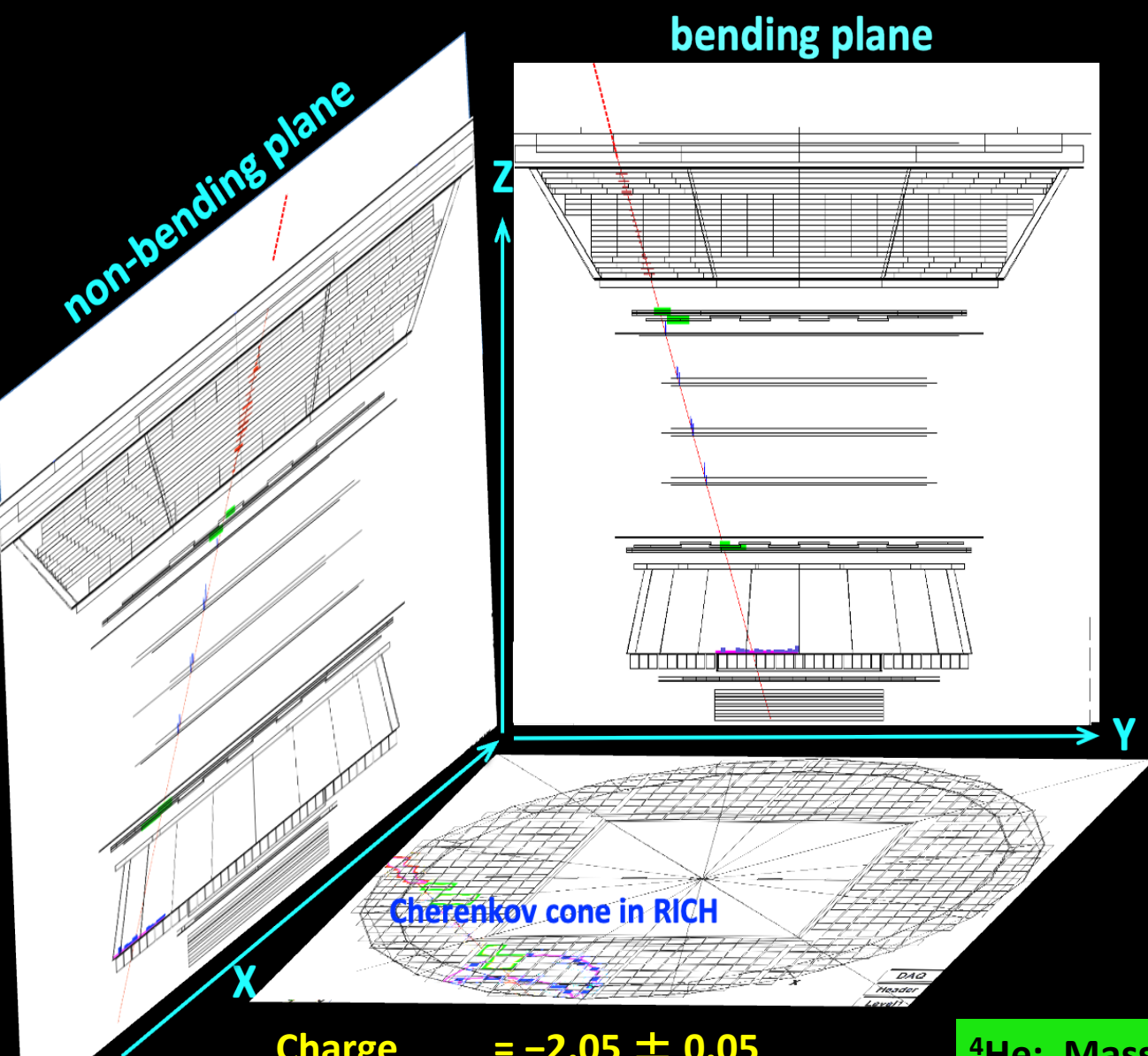
$\bar{D}$, $\bar{He}$, $\bar{C}$, $\bar{O}$...

反物质恒星



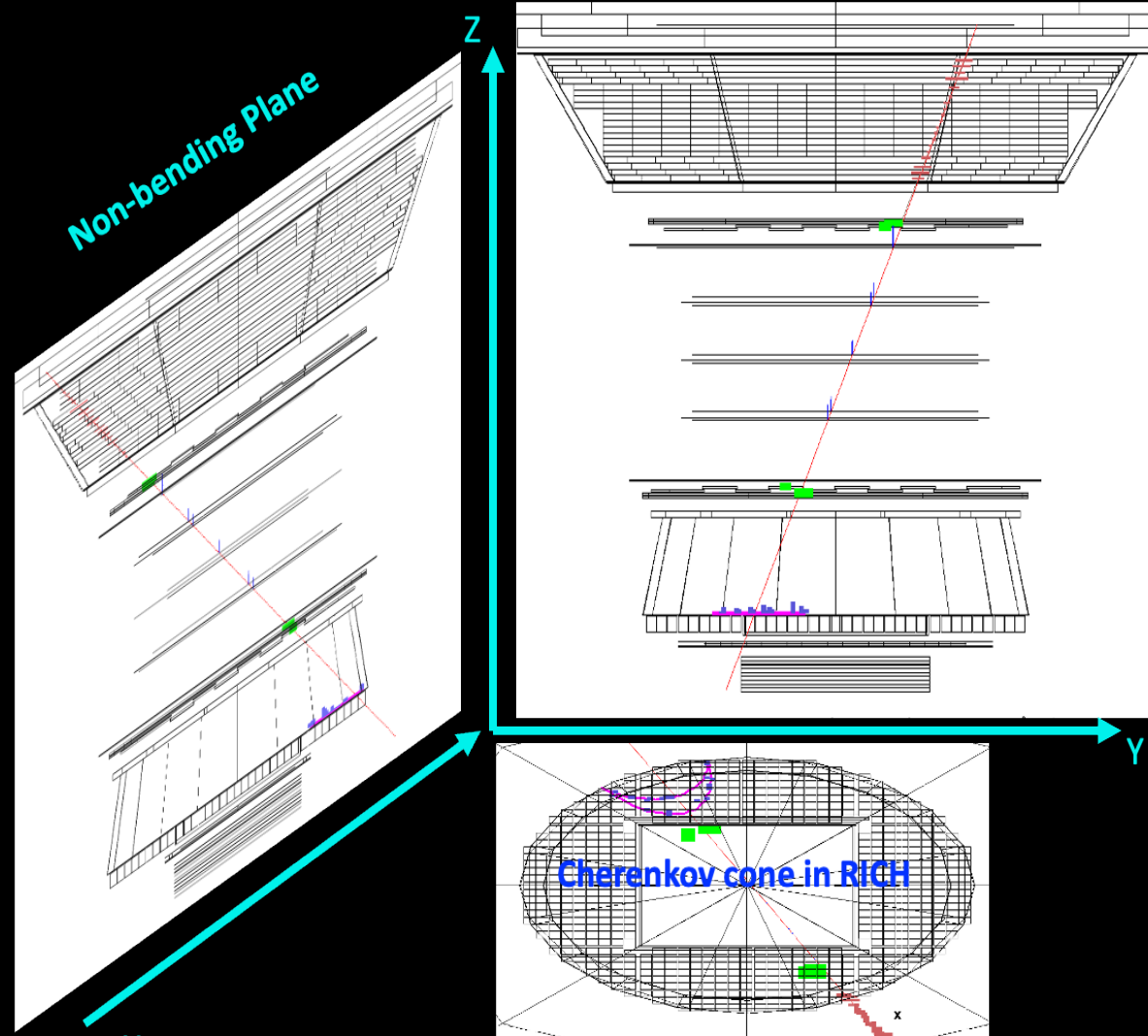
AMS是在太空运行的唯一反物质谱仪

反氦候选事例



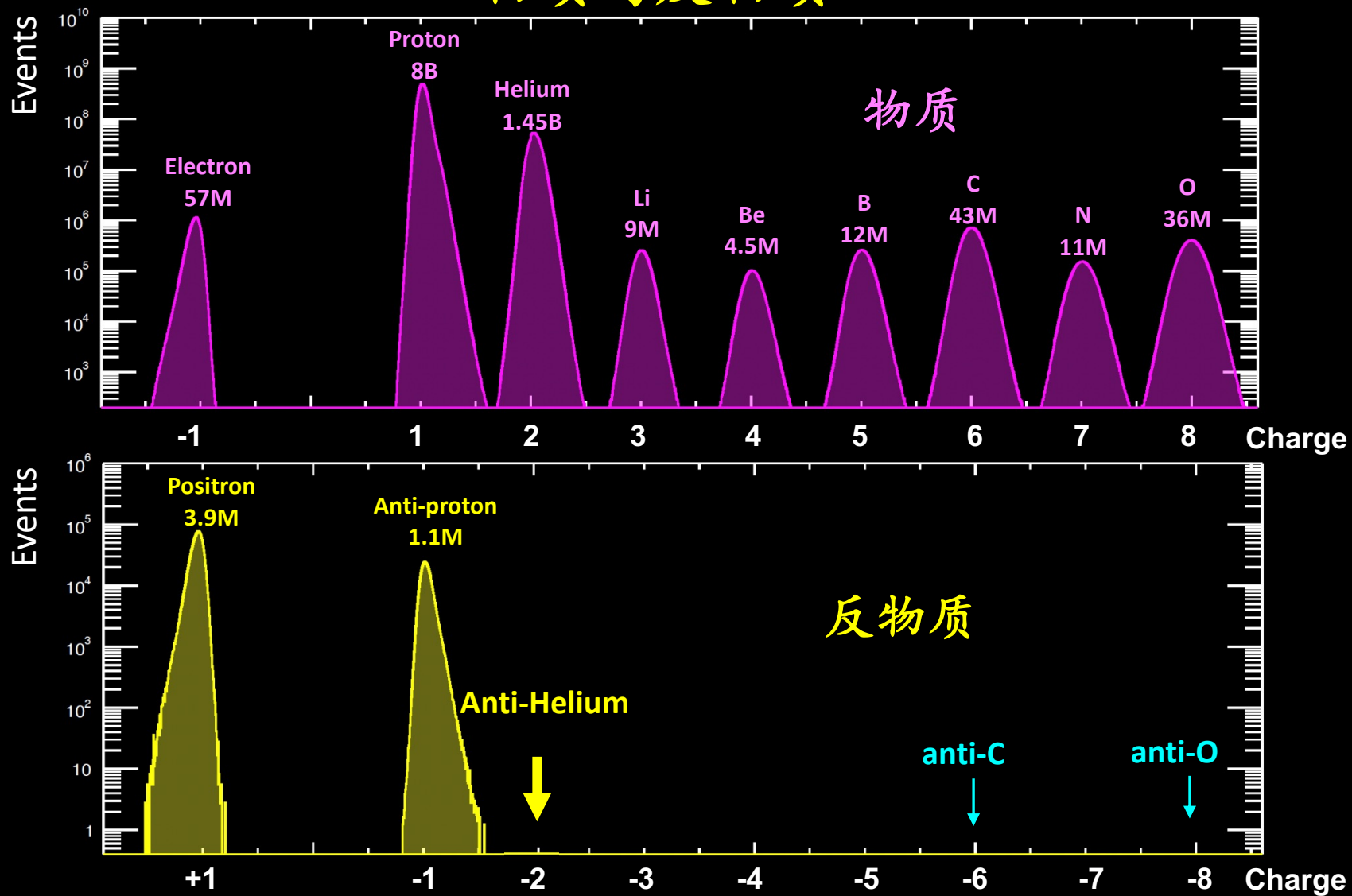
Charge = -2.05 ± 0.05
 Mass = $3.81 \pm 0.29 \text{ GeV}/c^2$

^4He : Mass = $3.73 \text{ GeV}/c^2$
 Charge = +2



Charge = -2.00 ± 0.05
 Mass = $3.15 \pm 0.53 \text{ GeV}/c^2$

物质与反物质



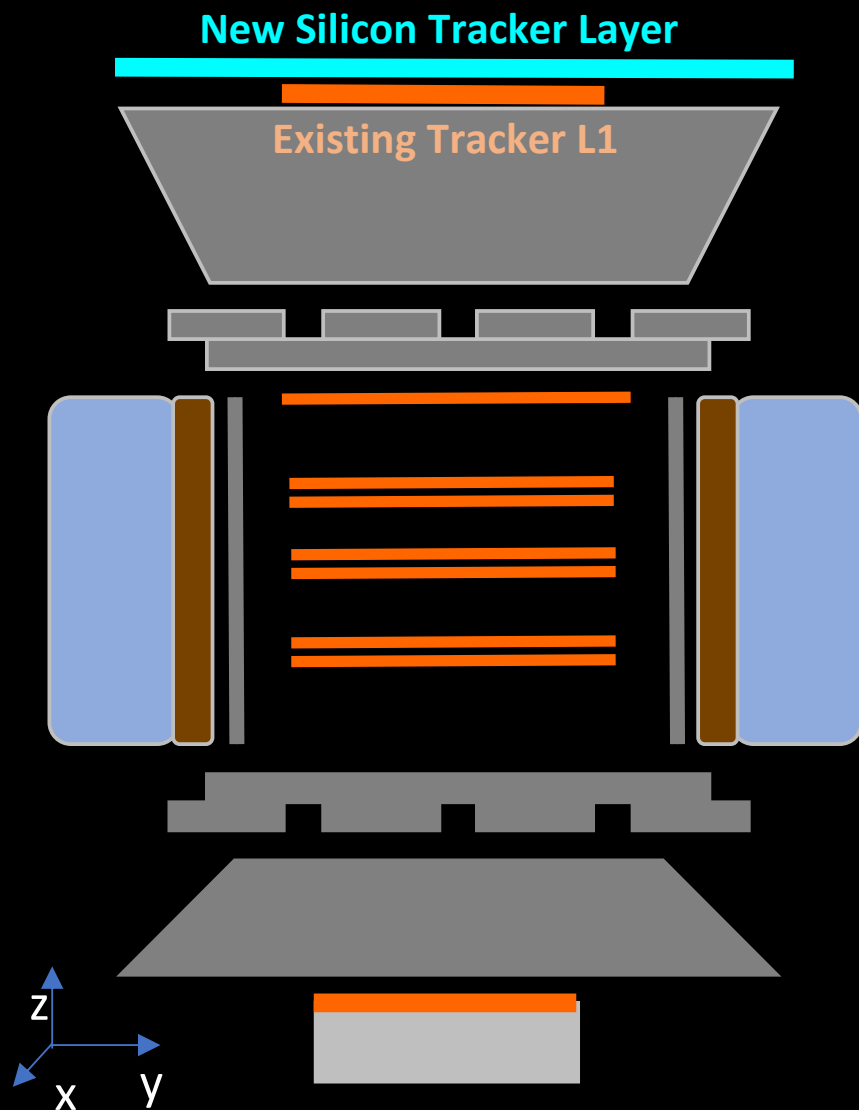
到2030年, 升级后的AMS将增加对反物质的径迹位置测量,
以进一步研究: 反氦, 反氦, 反碳和反氧.

AMS Publications in *Physical Review Letters*

>8900 citations to date

1) Phys. Rev. Lett. 110 , 141102 (2013)	Editors' Suggestion. Viewpoint in <i>Physics</i> . Highlight of 2013. Ten-Year Editors' Suggestion retrospective	
2) Phys. Rev. Lett. 113 , 121101 (2014)	Editors' Suggestion	
3) Phys. Rev. Lett. 113 , 121102 (2014)	Editors' Suggestion. Featured in <i>Physics</i> .	
4) Phys. Rev. Lett. 113 , 221102 (2014)		
5) Phys. Rev. Lett. 114 , 171103 (2015)	Editors' Suggestion	
6) Phys. Rev. Lett. 115 , 211101 (2015)	Editors' Suggestion	
7) Phys. Rev. Lett. 117 , 091103 (2016)		
8) Phys. Rev. Lett. 117 , 231102 (2016)	Editors' Suggestion	
9) Phys. Rev. Lett. 119 , 251101 (2017)		
10) Phys. Rev. Lett. 120 , 021101 (2018)	Editors' Suggestion. Featured in <i>Physics</i> .	
11) Phys. Rev. Lett. 121 , 051101 (2018)		
12) Phys. Rev. Lett. 121 , 051102 (2018)	Editors' Suggestion	
13) Phys. Rev. Lett. 121 , 051103 (2018)		
14) Phys. Rev. Lett. 122 , 041102 (2019)	Editor's Suggestion	
15) Phys. Rev. Lett. 122 , 101101 (2019)		
16) Phys. Rev. Lett. 123 , 181102 (2019)	Editors' Suggestion	
17) Phys. Rev. Lett. 124 , 211102 (2020)	Editors' Suggestion. Featured in <i>Physics</i> .	
18) Physics Reports 894 , 1 (2021)		
19) Phys. Rev. Lett. 126 , 041104 (2021)		Featured in <i>Physics</i> .
20) Phys. Rev. Lett. 126 , 081102 (2021)	Editors' Suggestion	
21) Phys. Rev. Lett. 127 , 021101 (2021)		
22) Phys. Rev. Lett. 127 , 271102 (2021)		
23) Phys. Rev. Lett. 128 , 231102 (2022)		
24) Phys. Rev. Lett. 130 , 161001 (2023)	Editors' Suggestion. Viewpoint in <i>Physics</i> .	
25) Phys. Rev. Lett. 130 , 211002 (2023)	Featured on <i>Phys.org</i>	
26) Phys. Rev. Lett. 131 , 151002 (2023)		APS Press Announcement
27) Phys. Rev. Lett. 132 , 261001 (2024)	Editors' Suggestion. Featured in <i>Physics</i> .	
28) Phys. Rev. Lett. 134 , 051002 (2025)	Editors' Suggestion. Viewpoint in <i>Physics</i> .	APS Press Announcement
29) Phys. Rev. Lett. 134 , 051001 (2025)		APS Press Announcement
30) Phys. Rev. Lett. 134 , 201001 (2025)	Editors' Suggestion. Featured in <i>Physics</i> .	APS Press Announcement
31) Phys. Rev. Lett. 136 , 241002 (2026)		APS Press Announcement

AMS硅探测器升级

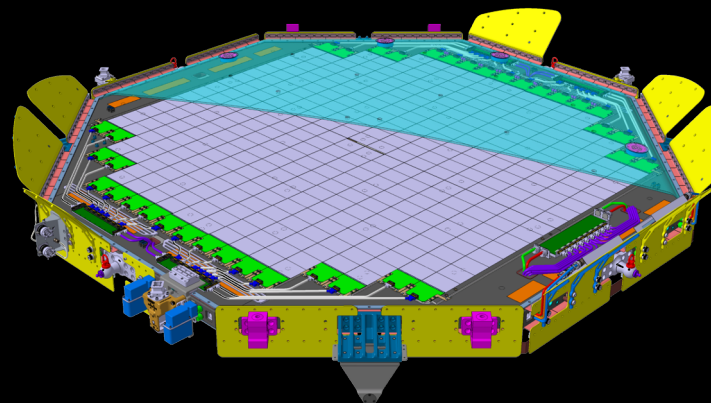


增加2层硅微条探测器, 每层 $\sim 4\text{m}^2$

对高能宇宙线的接收度增加至 300%
(10年的数据相当于现有探测器30年数据)

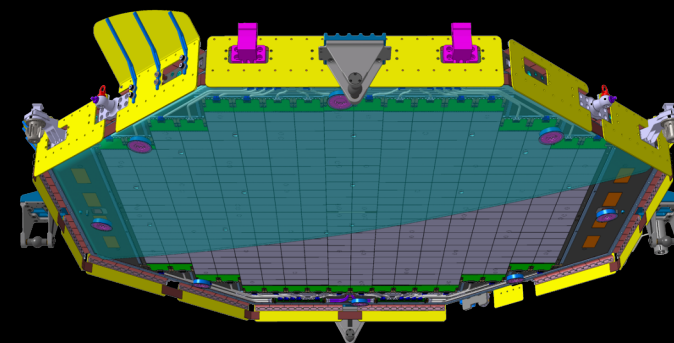
L0-Y

磁场偏转方向
7微米分辨



L0-U

旋转 45°
偏转方向 10 微米
非偏转方向 10微米



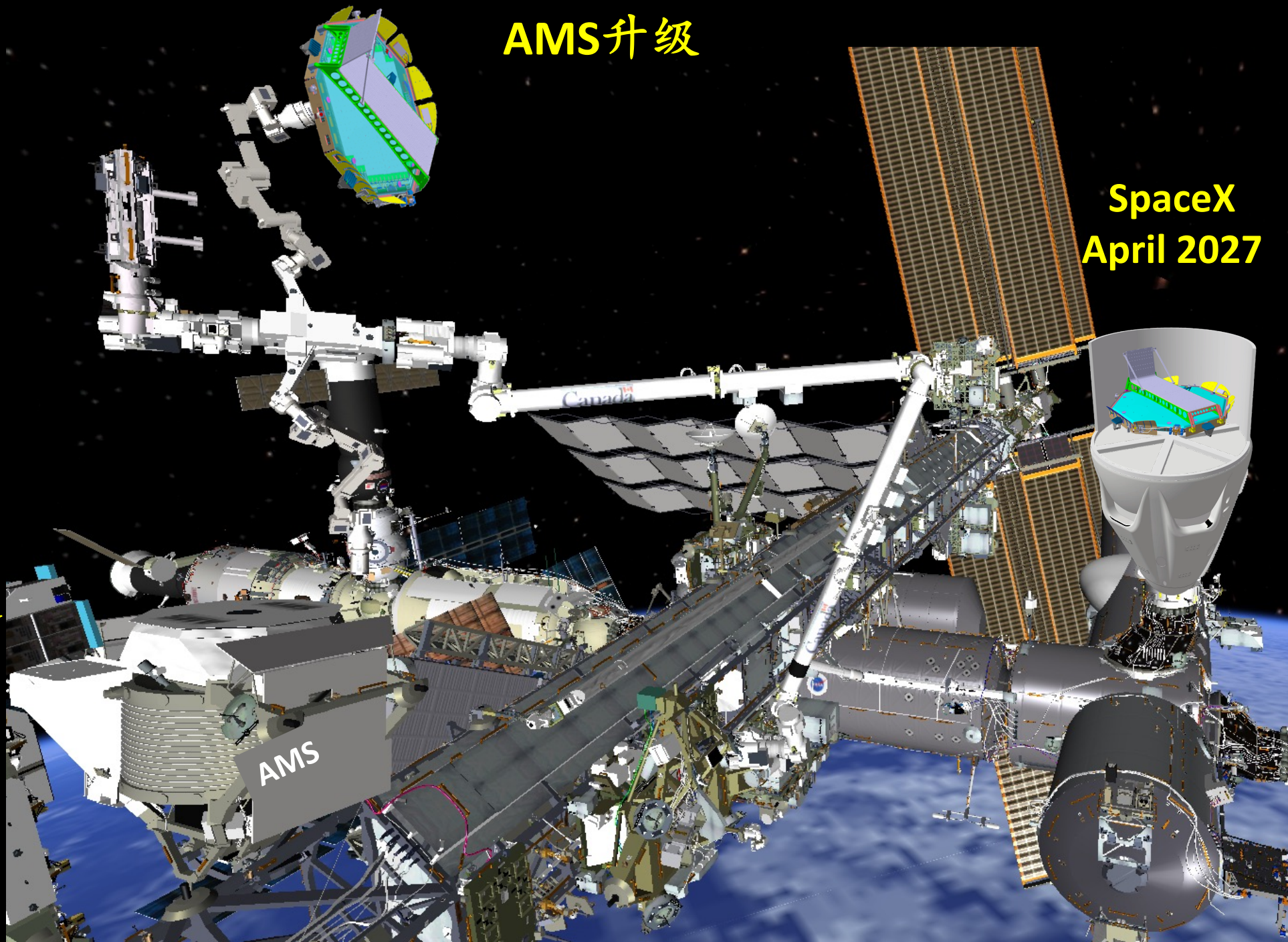
中国科学院高能物理研究所和山东高等技术研究院
承担硅探测器模块研制任务

AMS升级

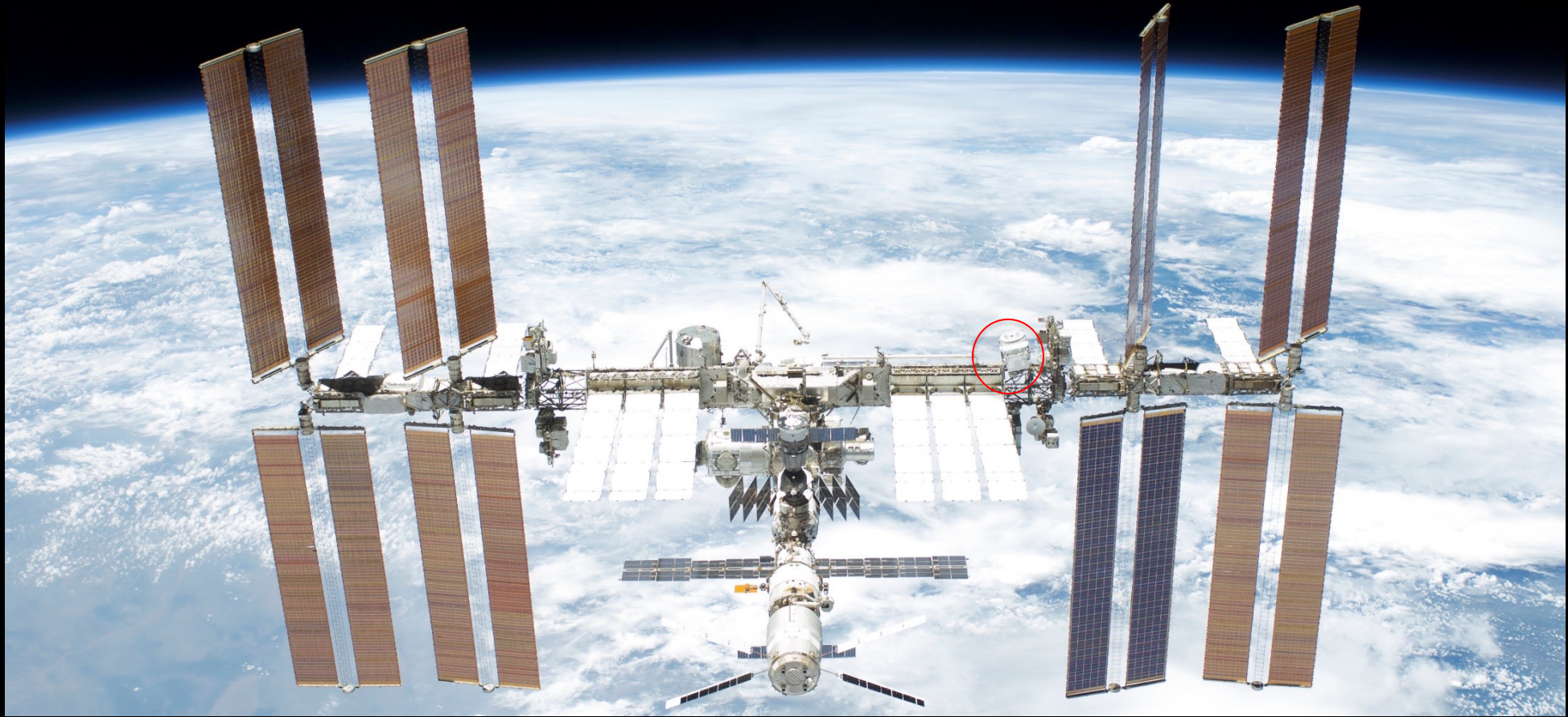
SpaceX
April 2027

+74000
电子学通道

宇航员
安装



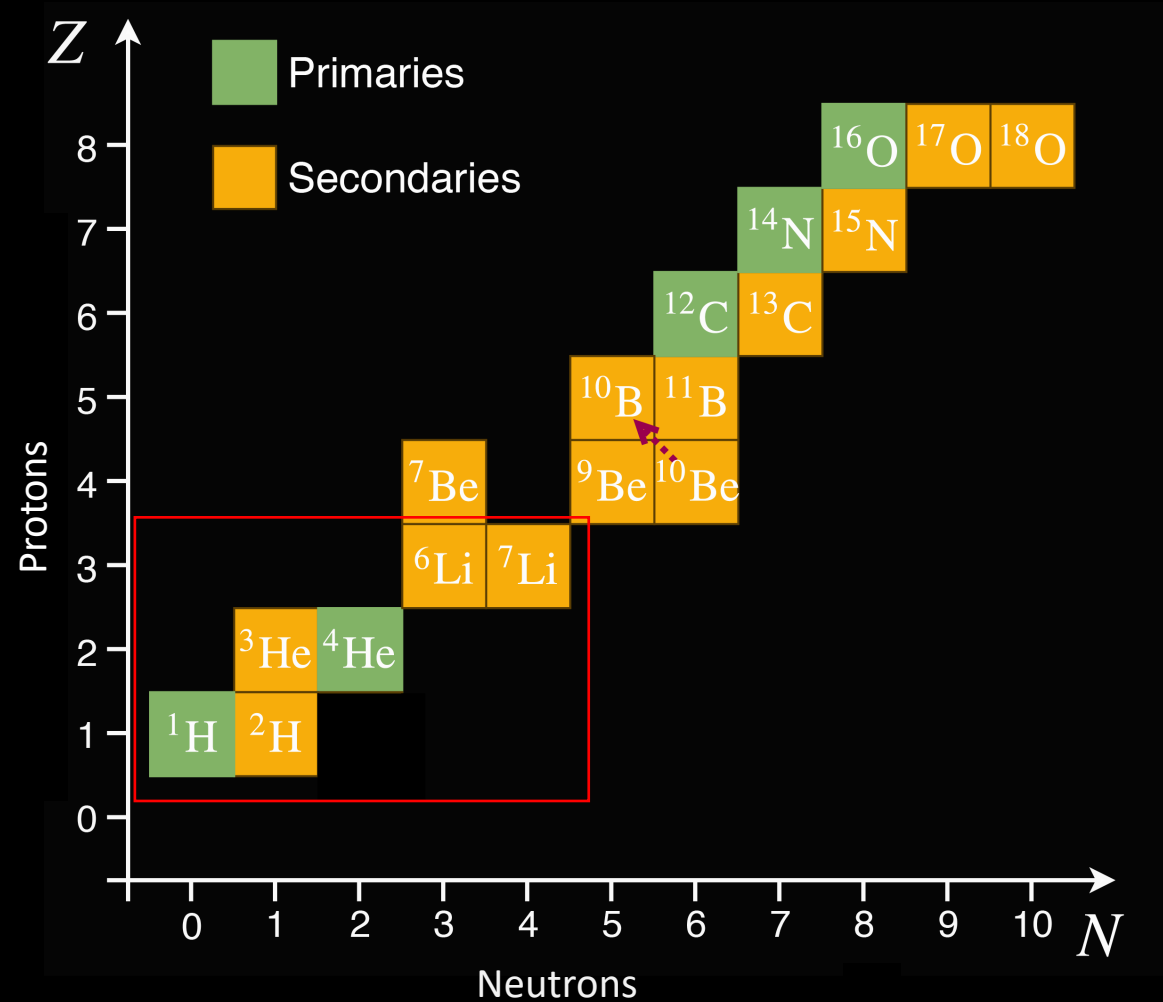
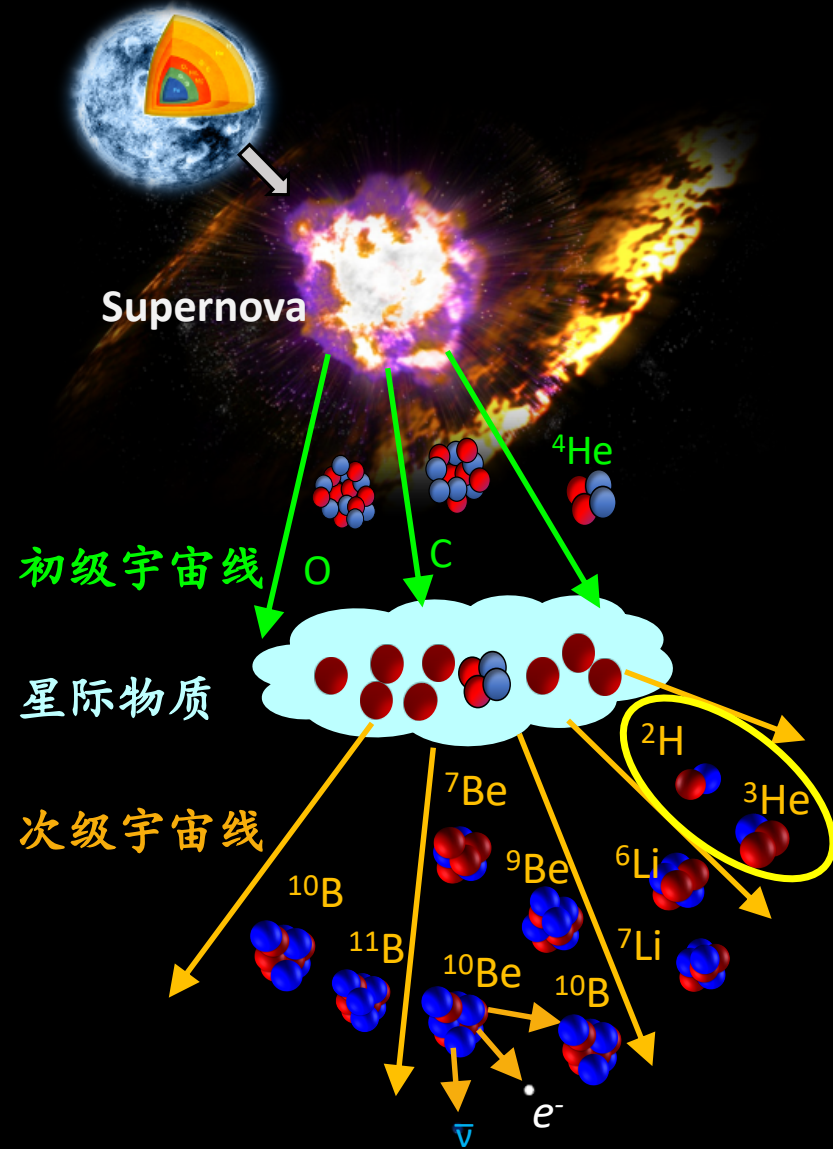
AMS 已持续运行15年，收集了超过2600亿个宇宙线事例。
AMS现有观测结果与现有的理论不符合，带来了宇宙的新认识。



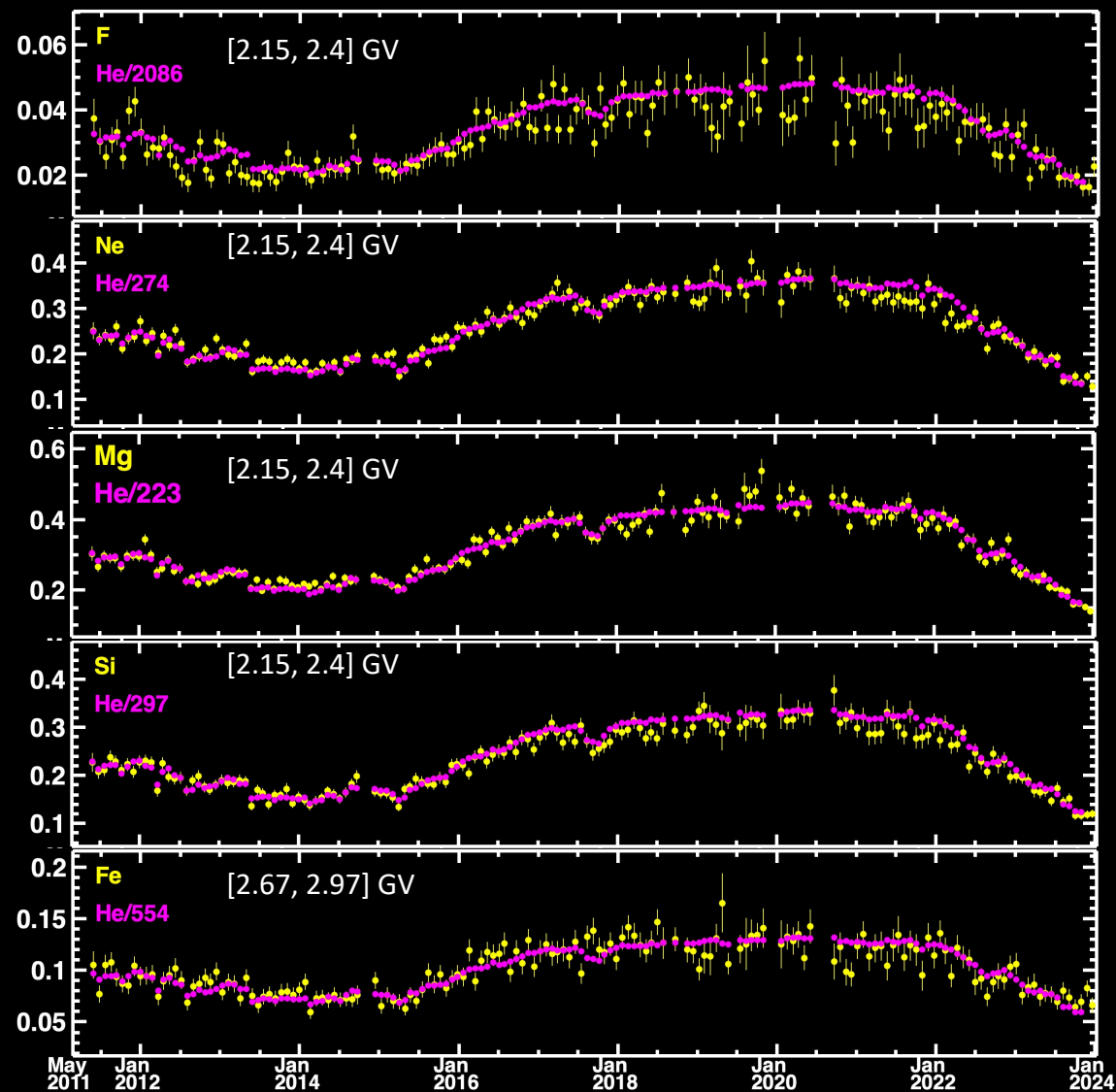
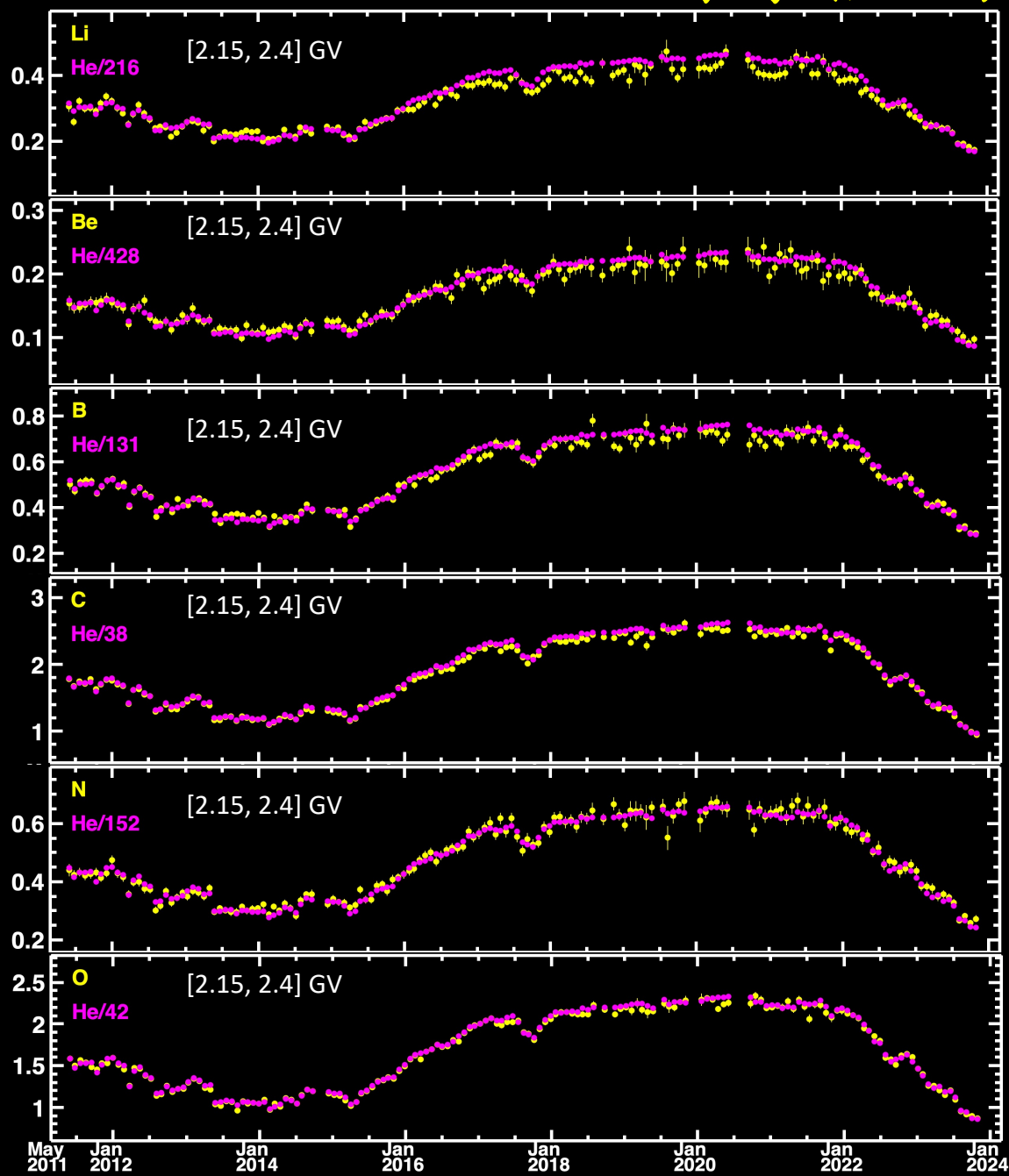
AMS将在国际空间站的寿命内(>2030年)持续的收集数据，
将继续拓展 甚至改变 我们对宇宙的认识。

宇宙线同位素

同位素成分和能谱为宇宙线起源研究提供不可替代的信息



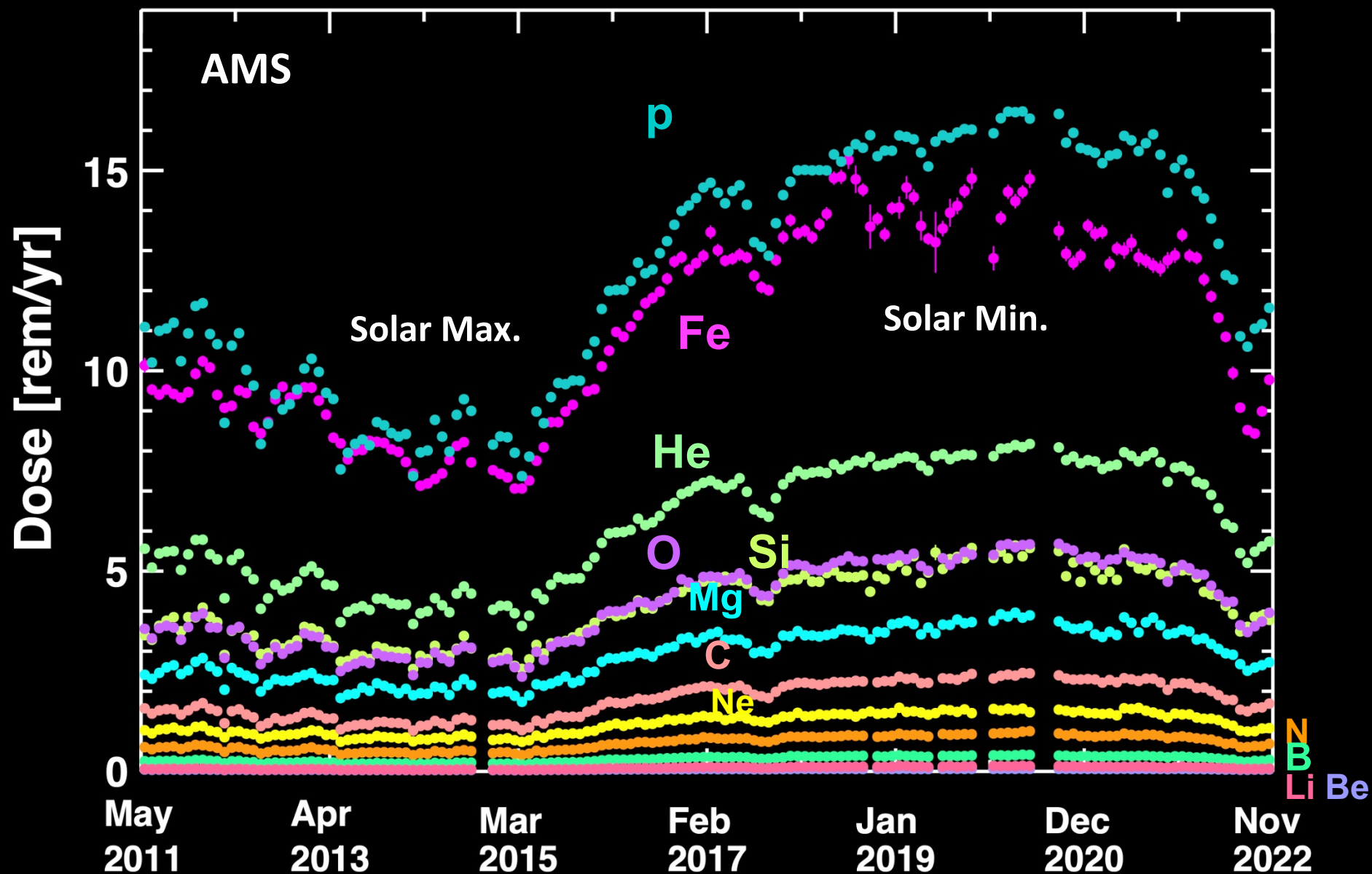
原子核流强的时间变化



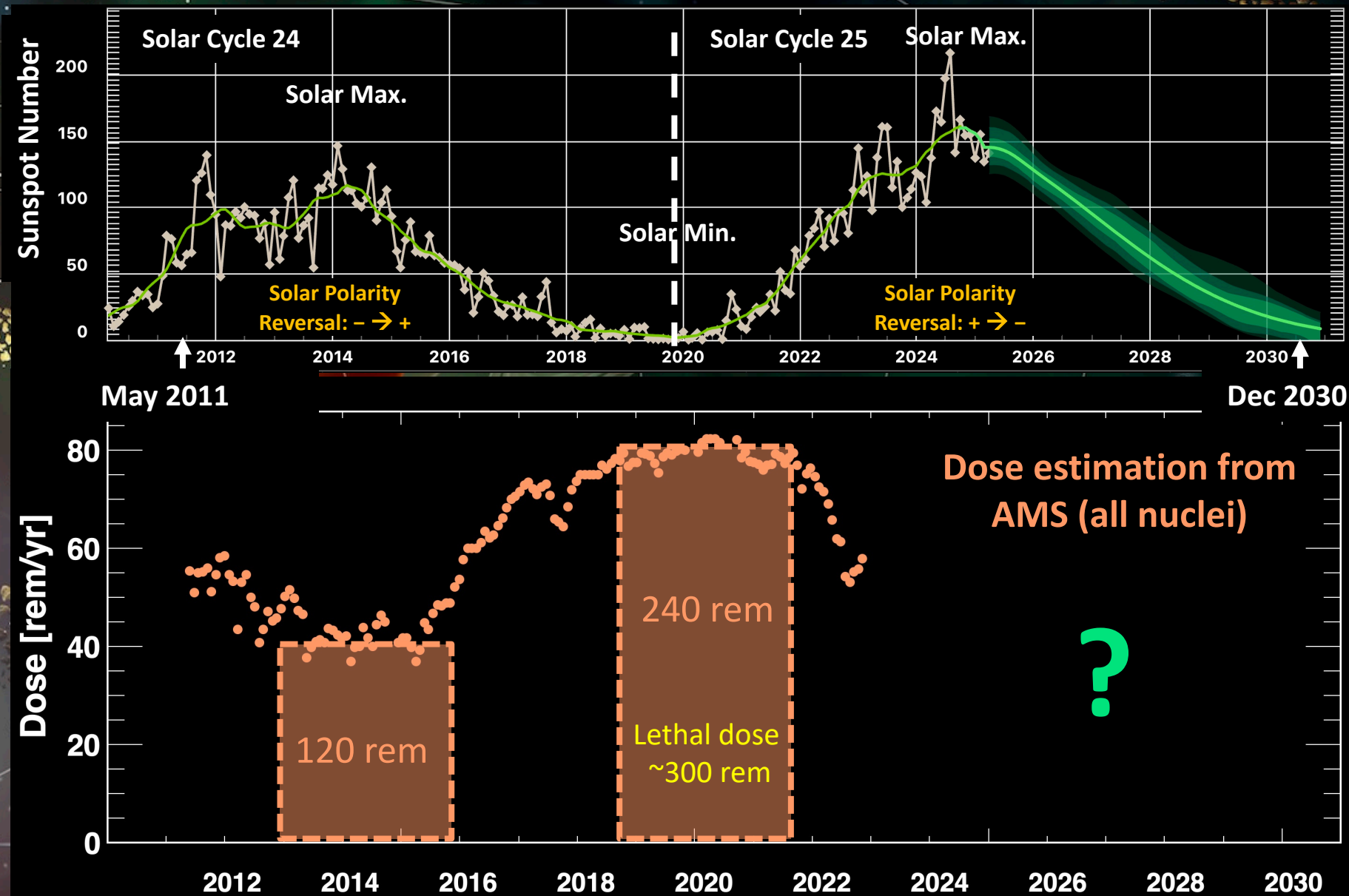
已经发表 $Z = 1 \sim 8$, 初步结果 $Z = 9, 10, 12, 14, 26$

基于AMS数据计算的皮肤辐射剂量

辐射损伤 $\propto Z^2$



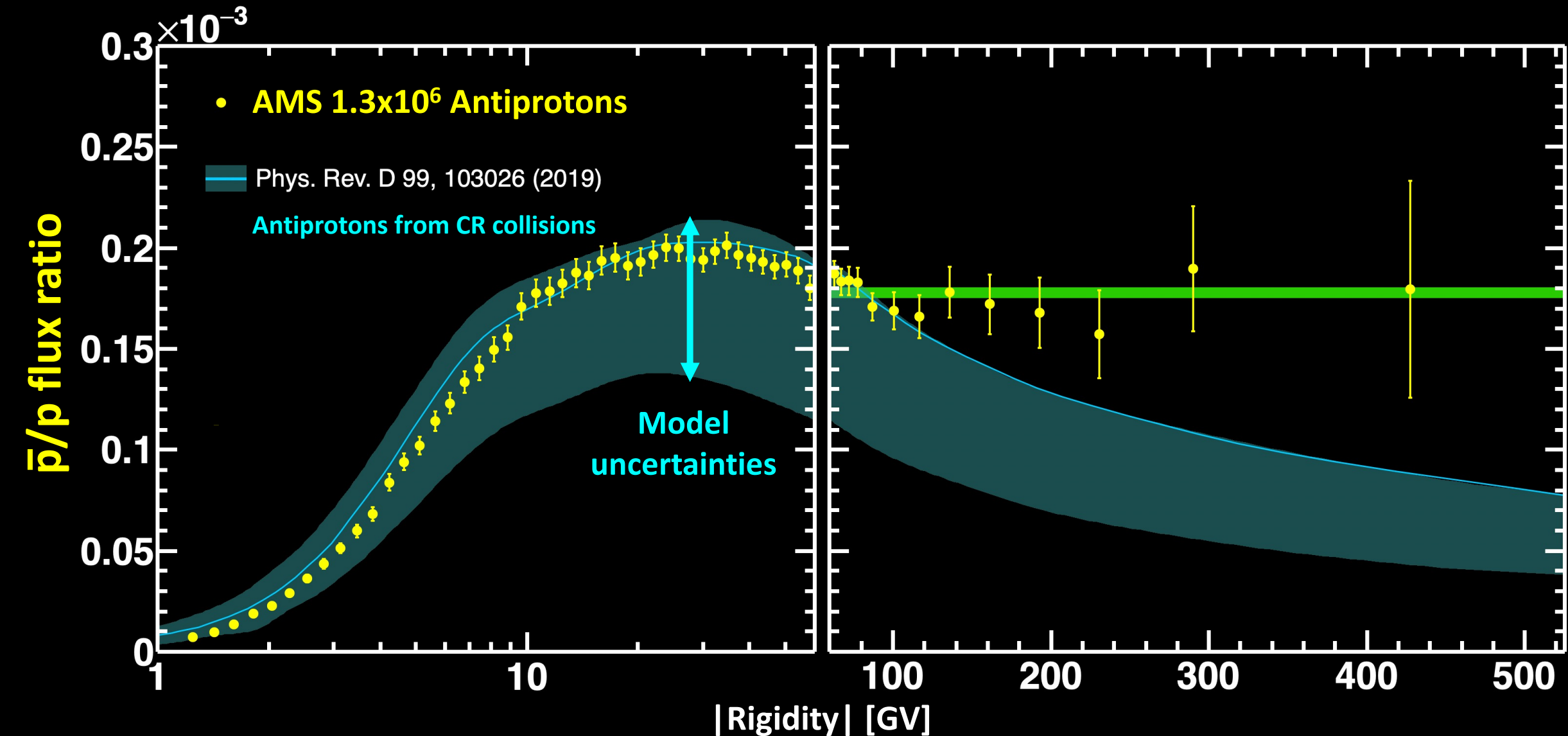
人类太空探索的必需知识:评估和预测宇宙线辐射伤害



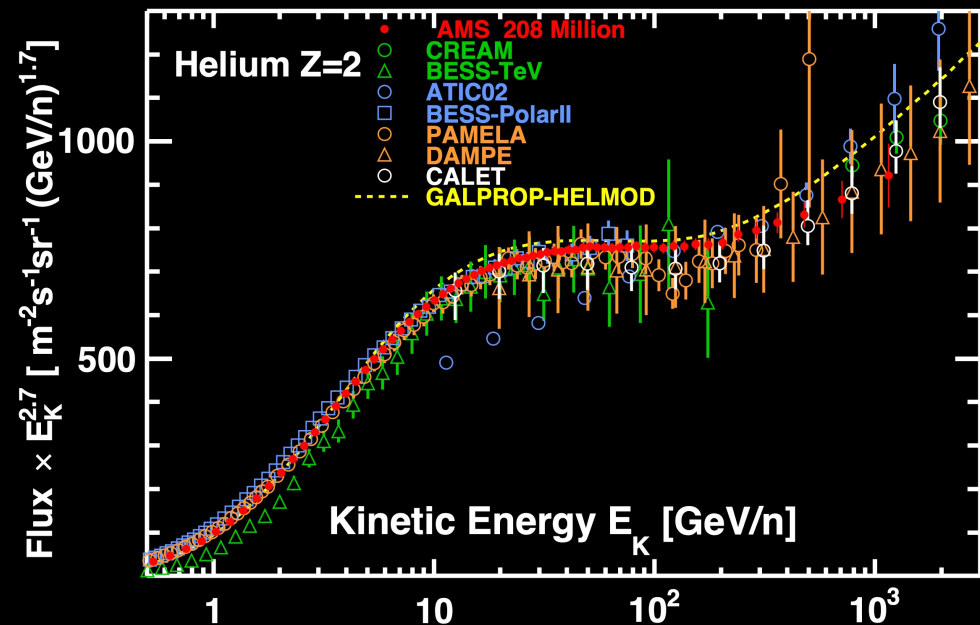
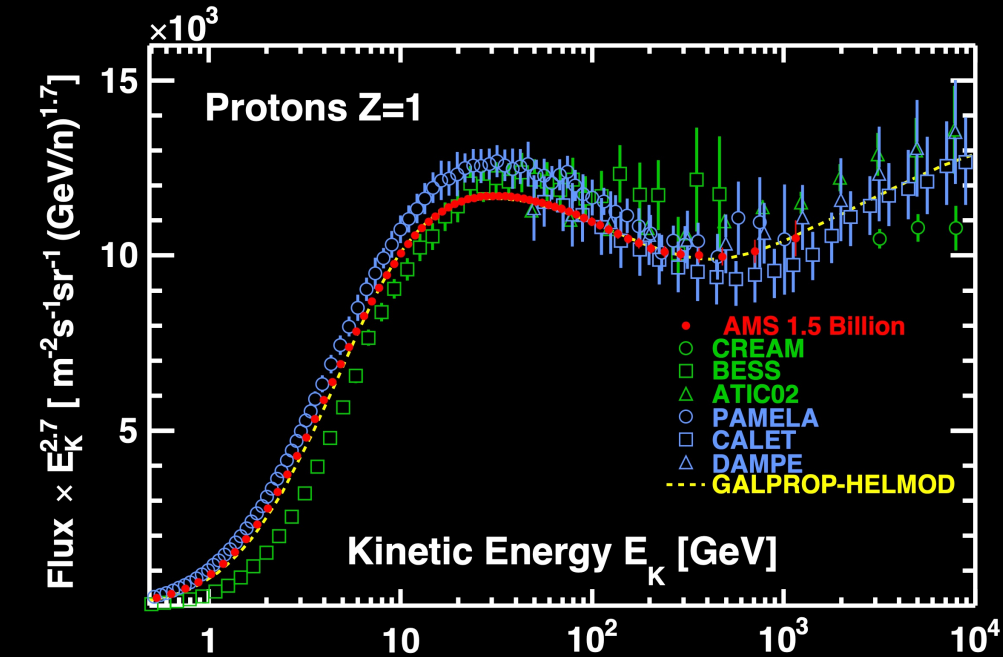
通过AMS系统测量近地轨道辐射环境, 保障航天活动安全

反质子

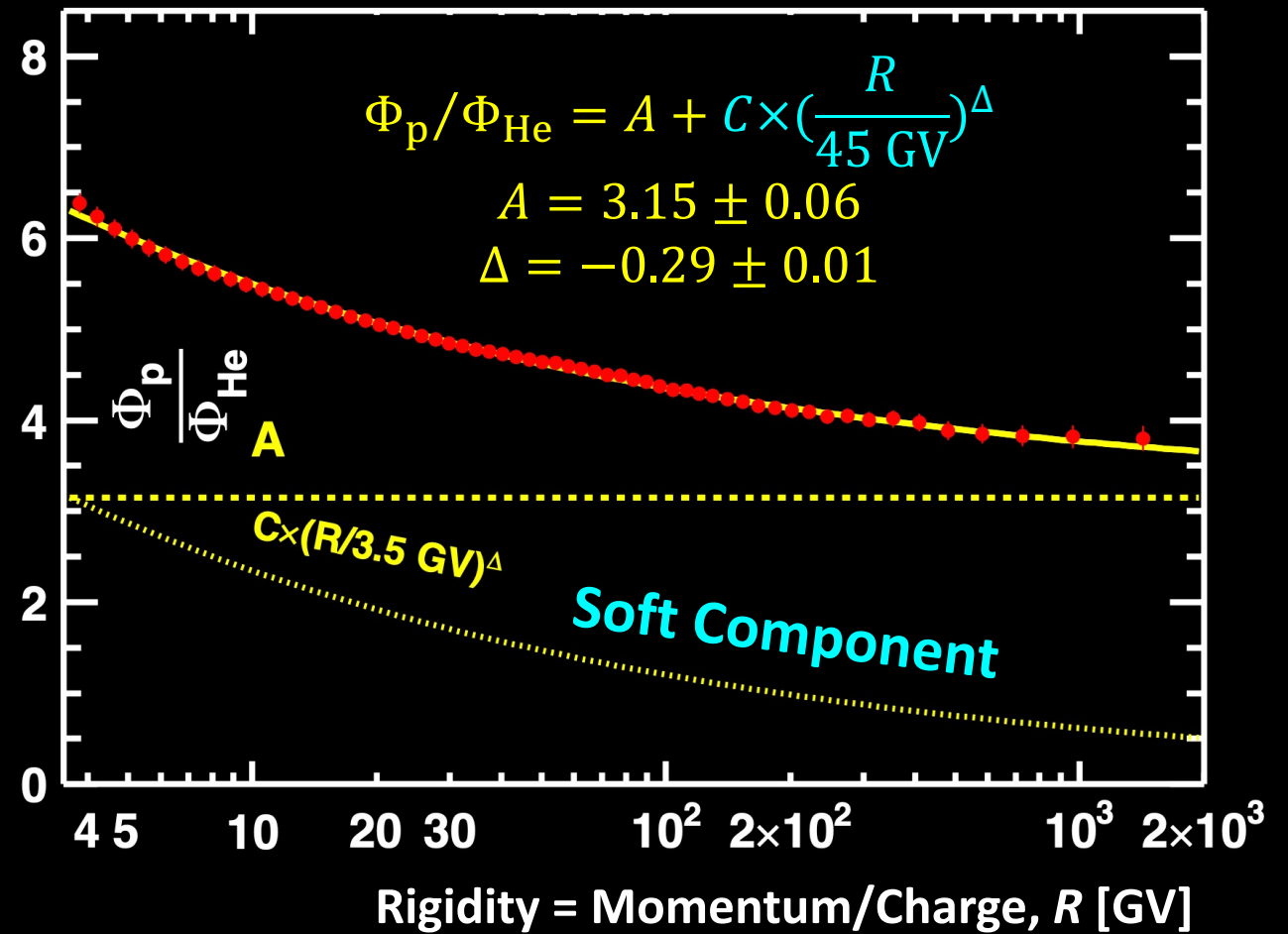
反质子和质子的流强在60 GV以上具有相同的刚度依赖性



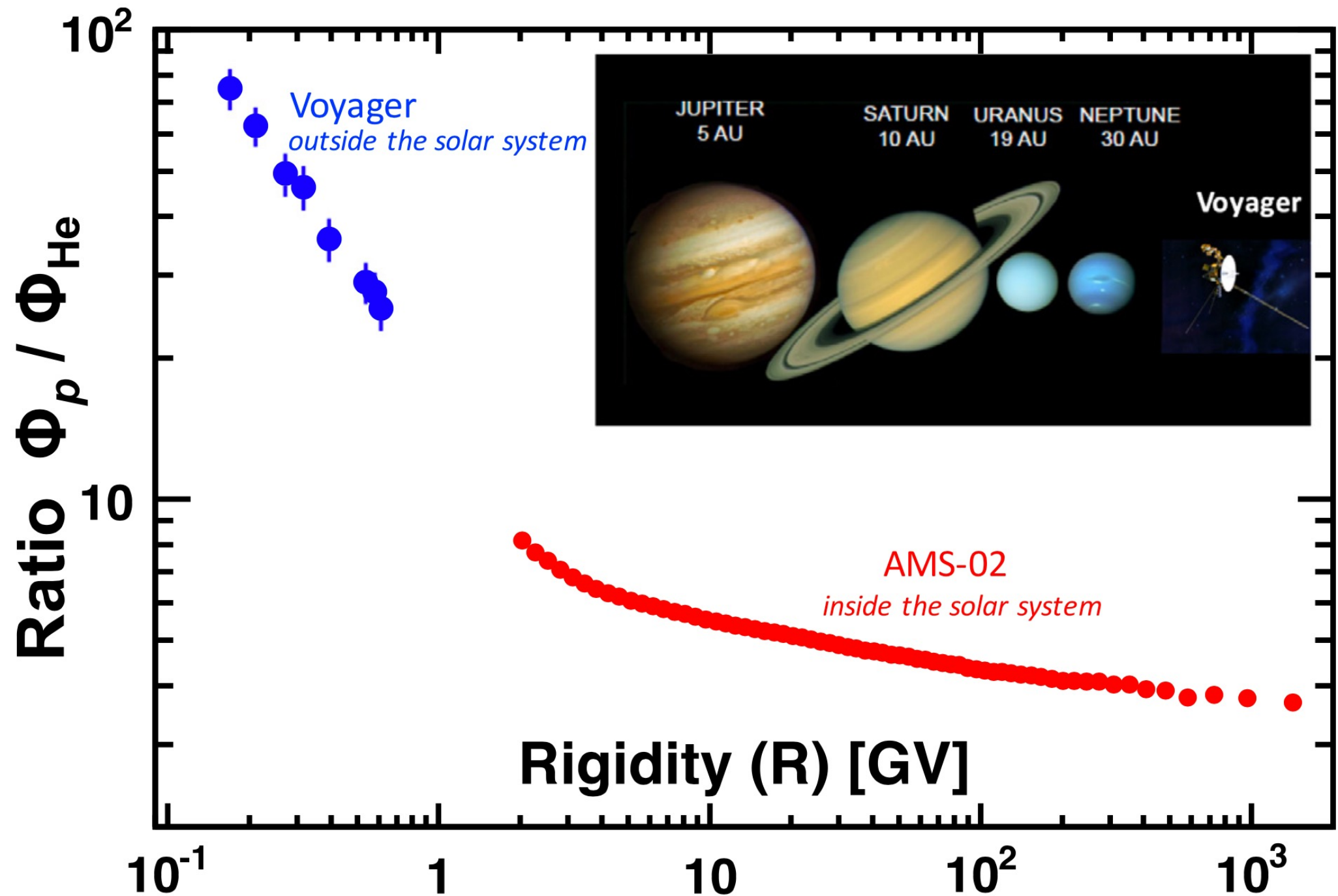
Cosmic Proton and Helium: The Most Abundant Element



Proton/Helium Flux Ratio and A Soft Component in Proton



What is the origin of the soft component?

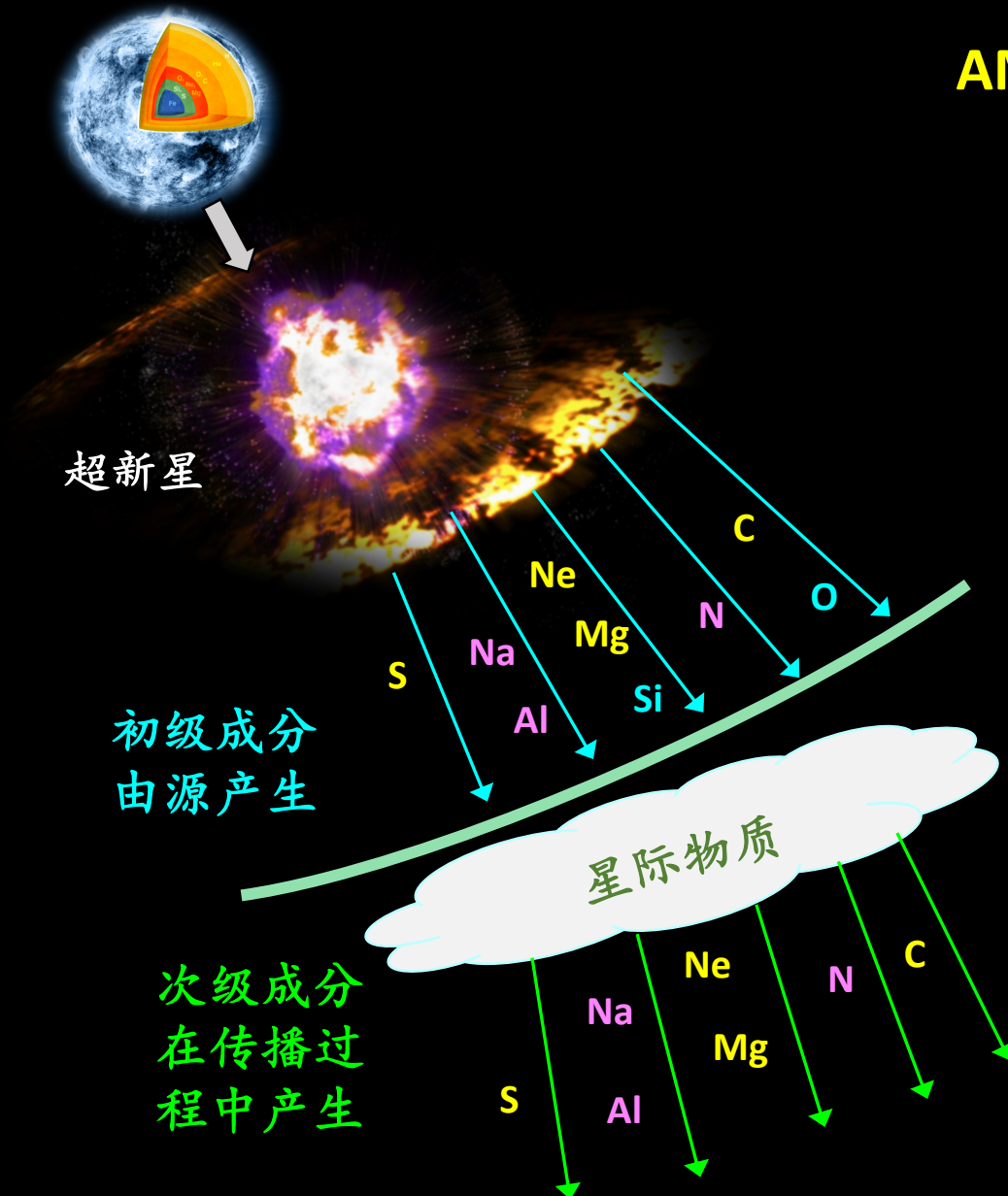


初级成分：元素丰度

AMS第一次以模型无关的方法测量

宇宙线源的相对元素丰度

(在传播过程之前)



$$\Phi_{\text{C}} / \Phi_{\text{O}} \quad 0.83 \pm 0.025$$

$$\Phi_{\text{N}} / \Phi_{\text{O}} \quad 0.09 \pm 0.002$$

$$\Phi_{\text{Ne}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 0.83 \pm 0.025$$

$$\Phi_{\text{Mg}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 1.01 \pm 0.025$$

$$\Phi_{\text{Na}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 0.038 \pm 0.003$$

$$\Phi_{\text{Al}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 0.105 \pm 0.004$$

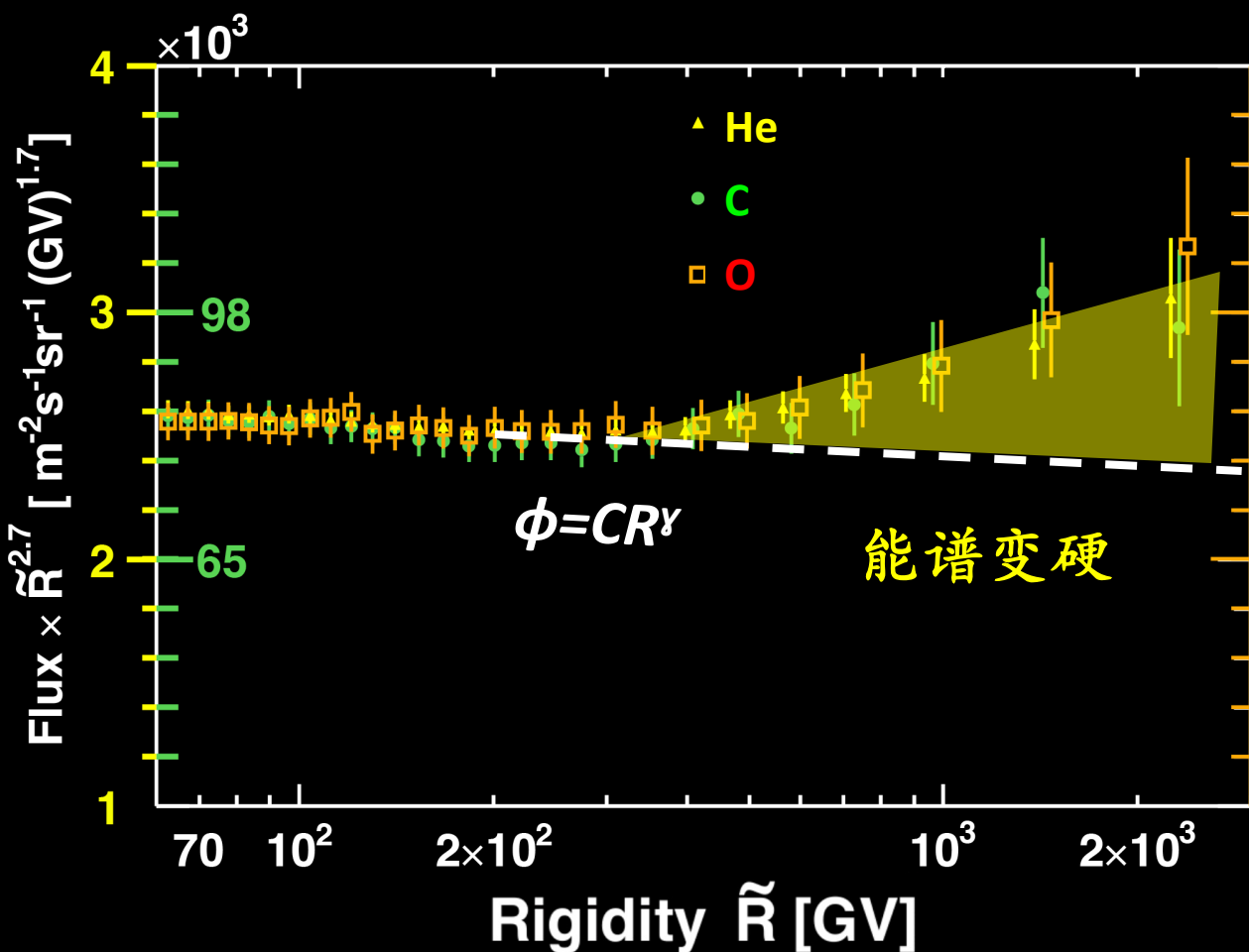
$$\Phi_{\text{S}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 0.16 \pm 0.006$$

$$\Phi_{\text{Ar}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 0.021 \pm 0.002$$

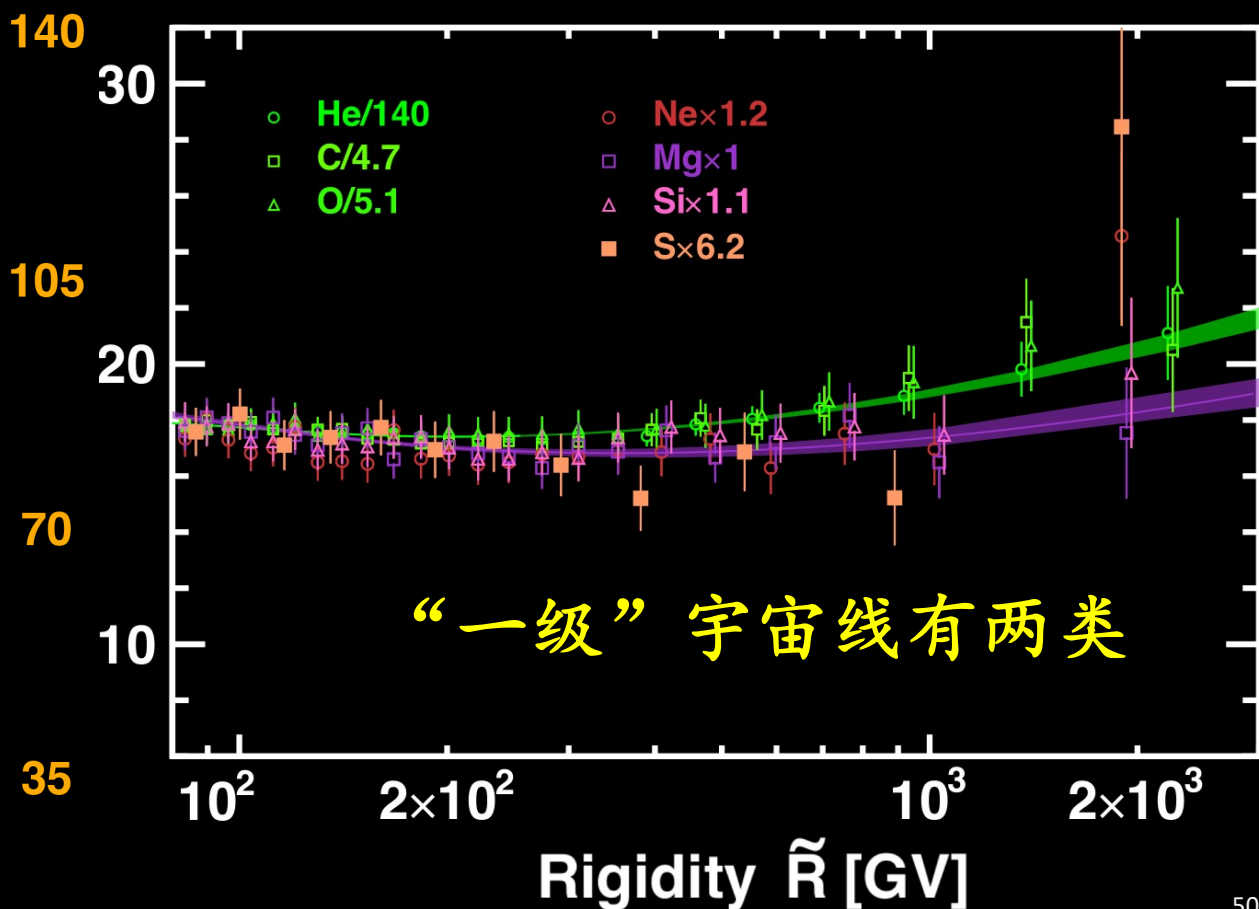
$$\Phi_{\text{Ca}} / \Phi_{\text{Si}} \quad 0.076 \pm 0.003$$

“一级”宇宙线的性质

在60 GV以上，较轻的一级宇宙线 He-C-O
具有相同的刚度 ($R=P/Z$) 依赖性，
且都在200GV处 以相同的方式变硬



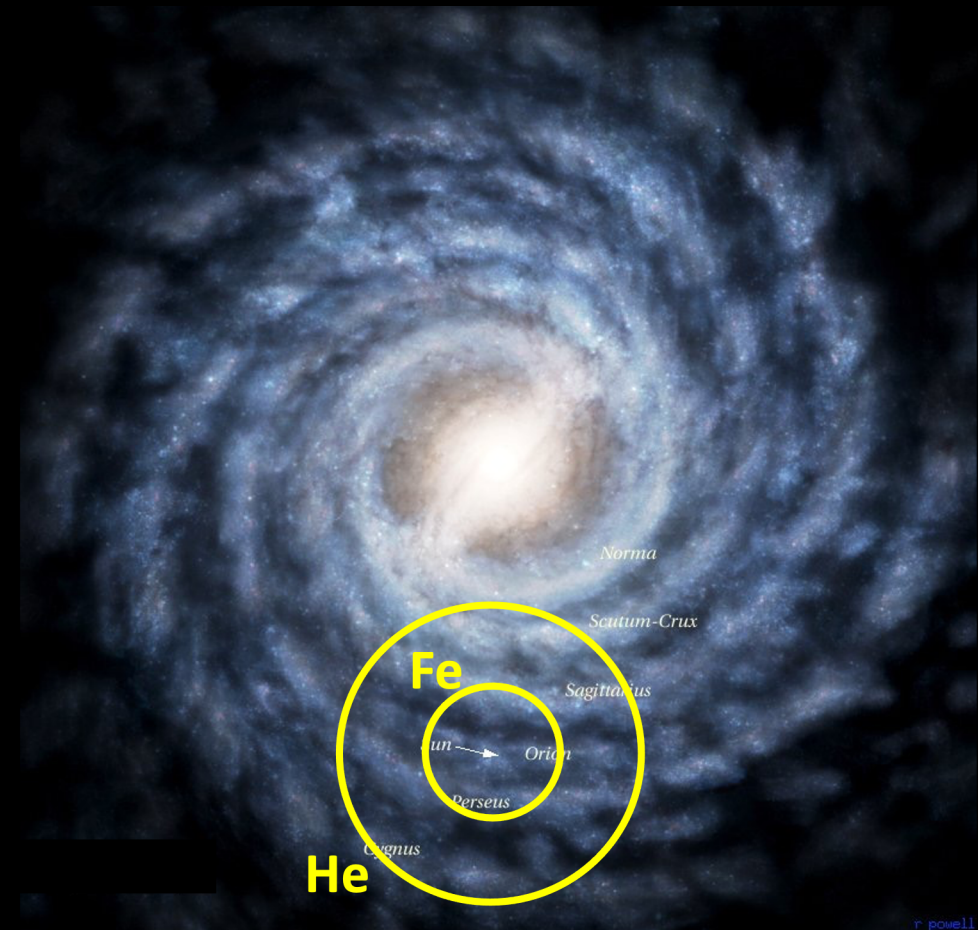
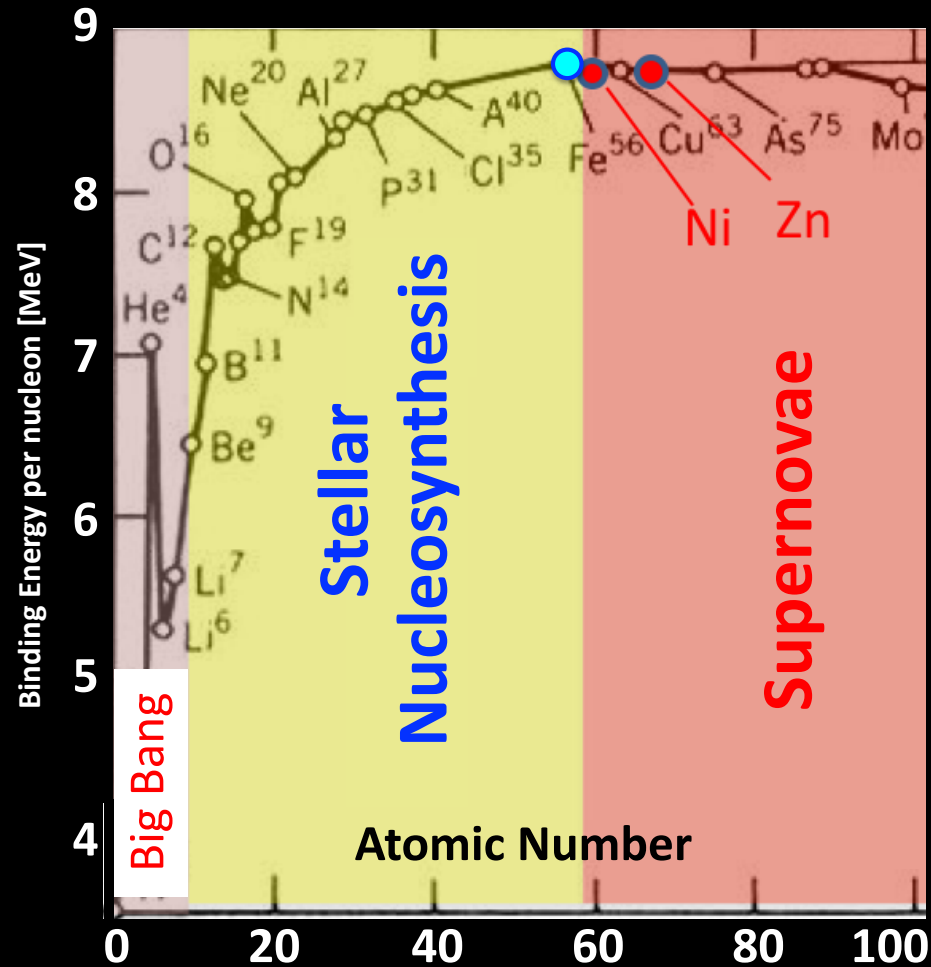
更重的初级宇宙线 Ne-Mg-Si-S
具有一致的刚度依赖性,但与较轻的
He-C-O 不同



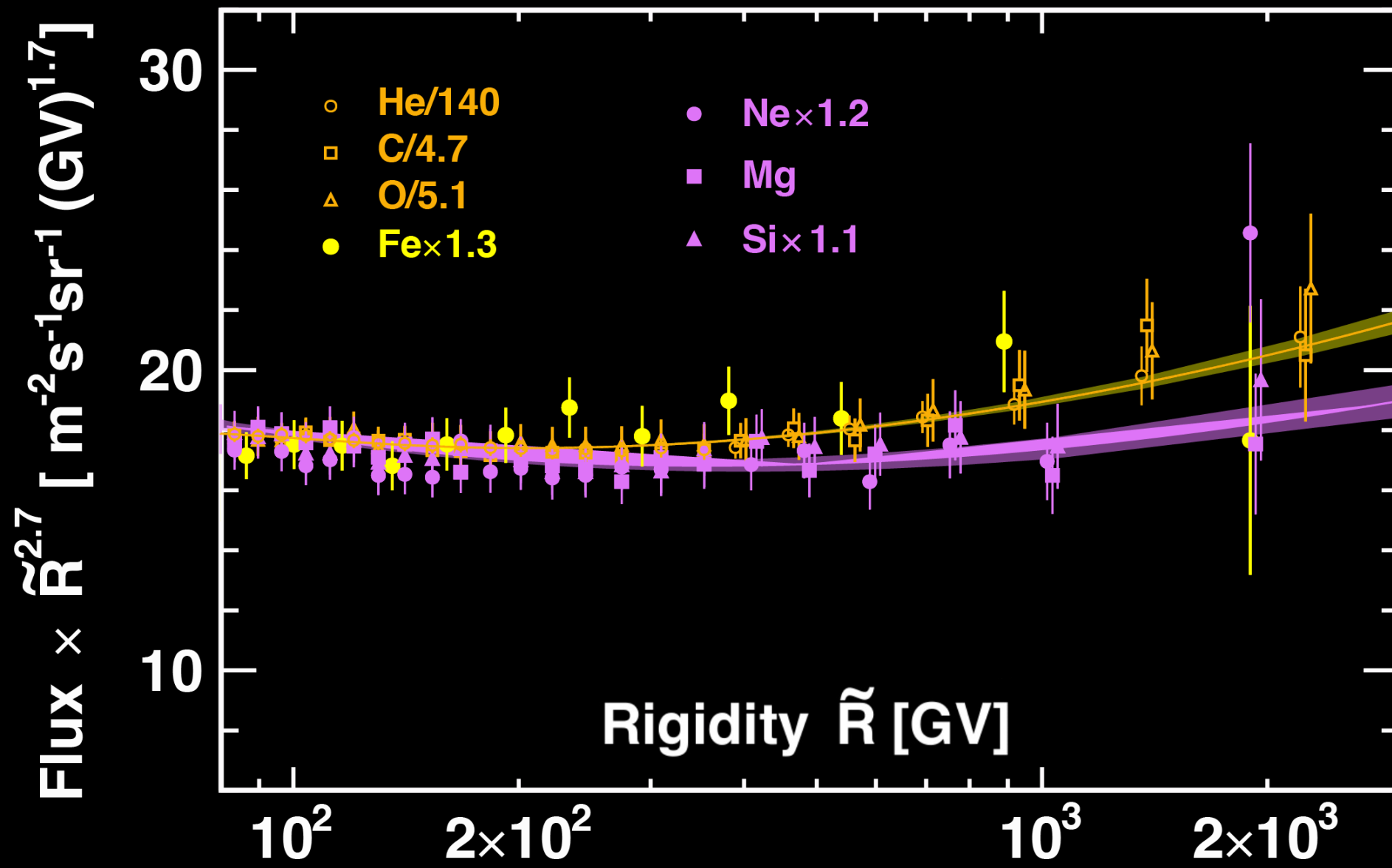
宇宙中的铁原子核

铁是恒星演化过程中产生的最重的元素，
对于理解宇宙线的起源至关重要

铁原子核的碎裂截面更大，传播
距离短，来自更近的银河系空间

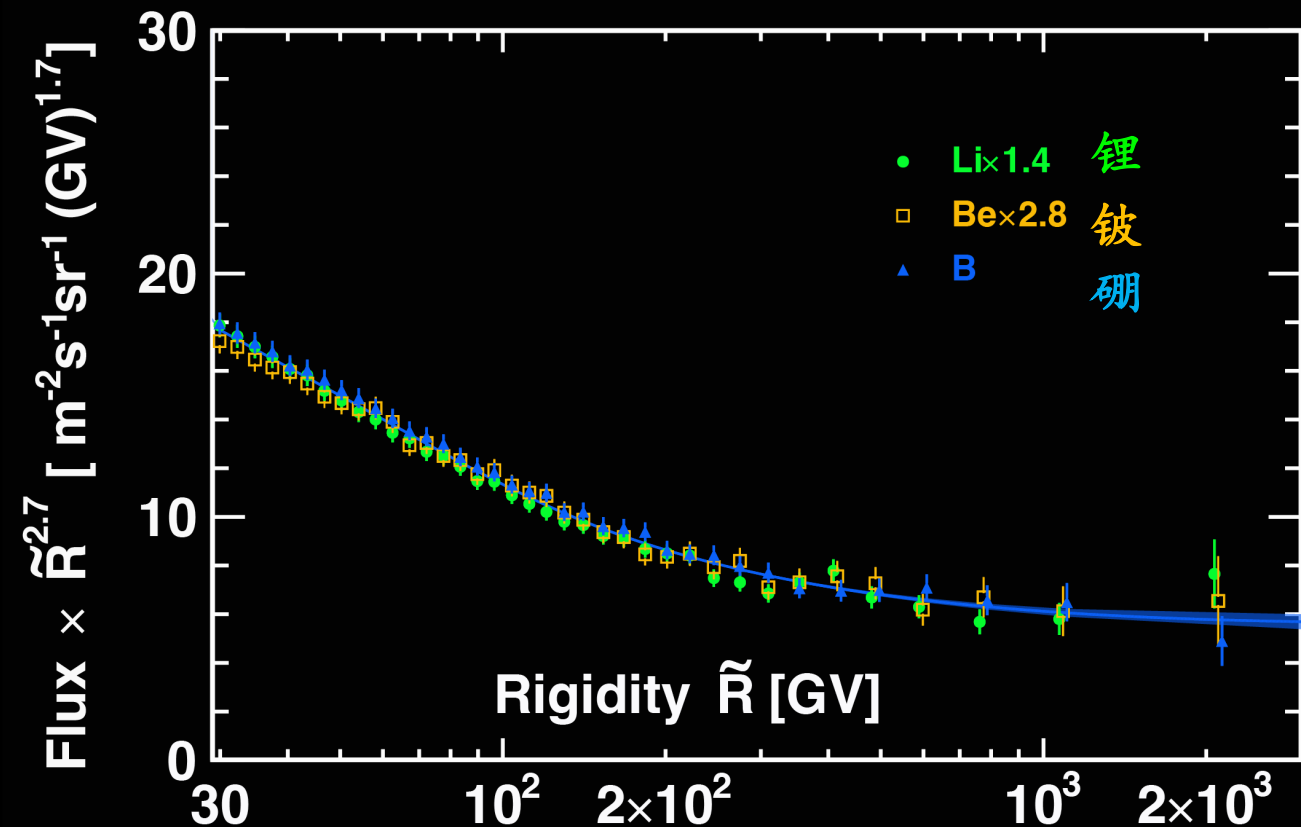


铁原子核的能谱特征属于更轻的He-C-O组，
而不是预期的更重的Ne-Mg-Si组

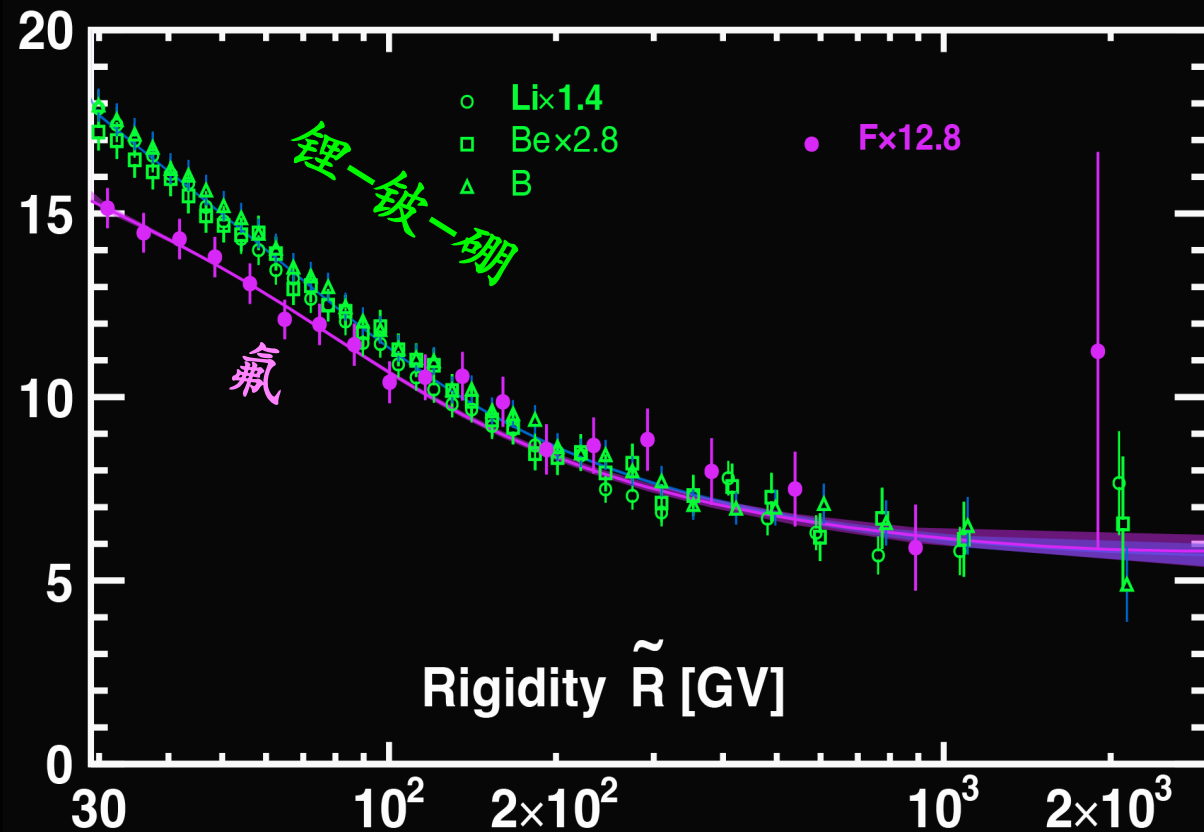


“二级”宇宙线的性质

锂-铍-硼能谱具有相同的刚度依赖性，
属于同类“二级宇宙线”

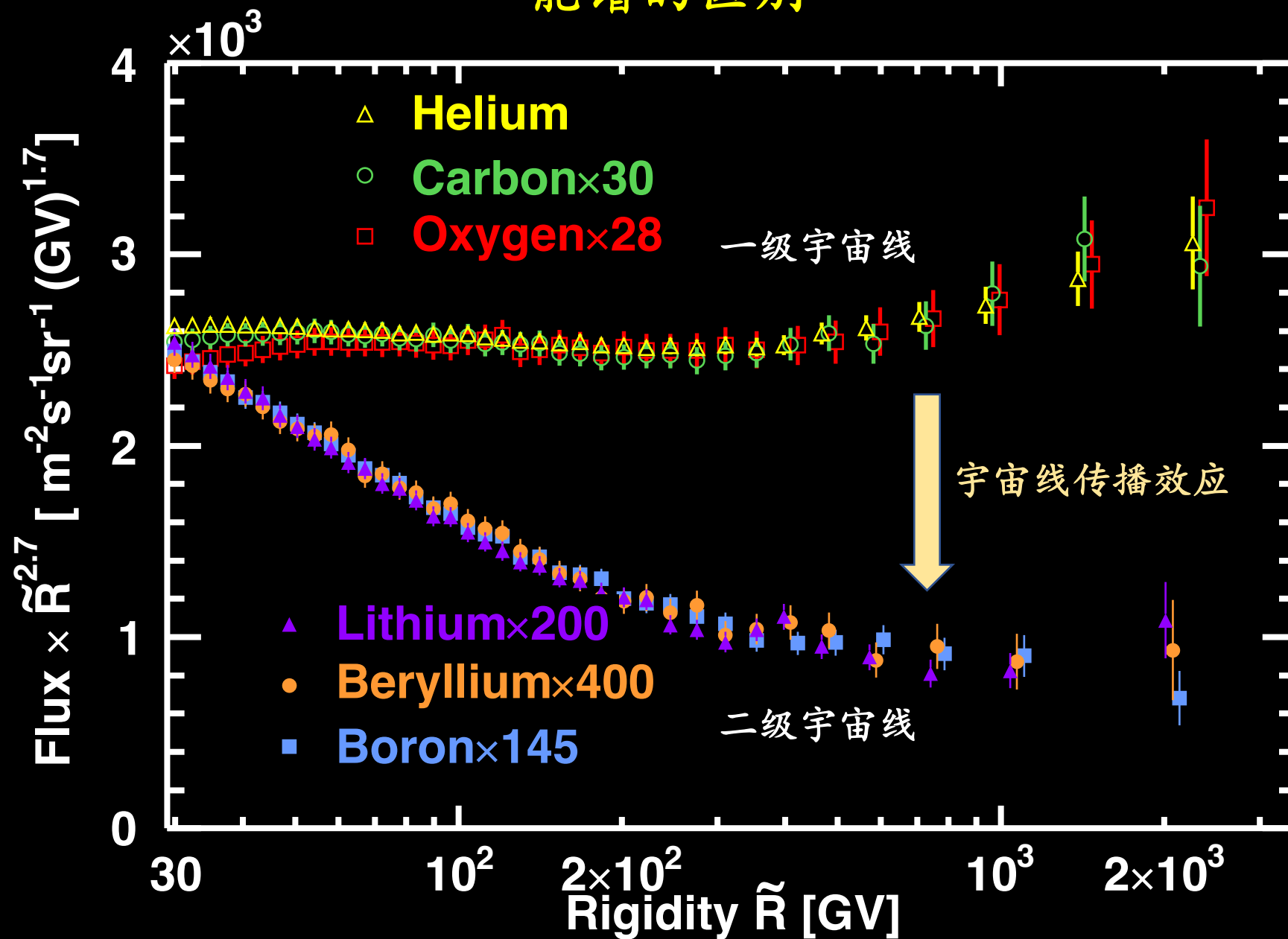


氟 (F) 与 锂-铍-硼 具有不同的刚度依赖性
属于两类不同的“二级宇宙线”

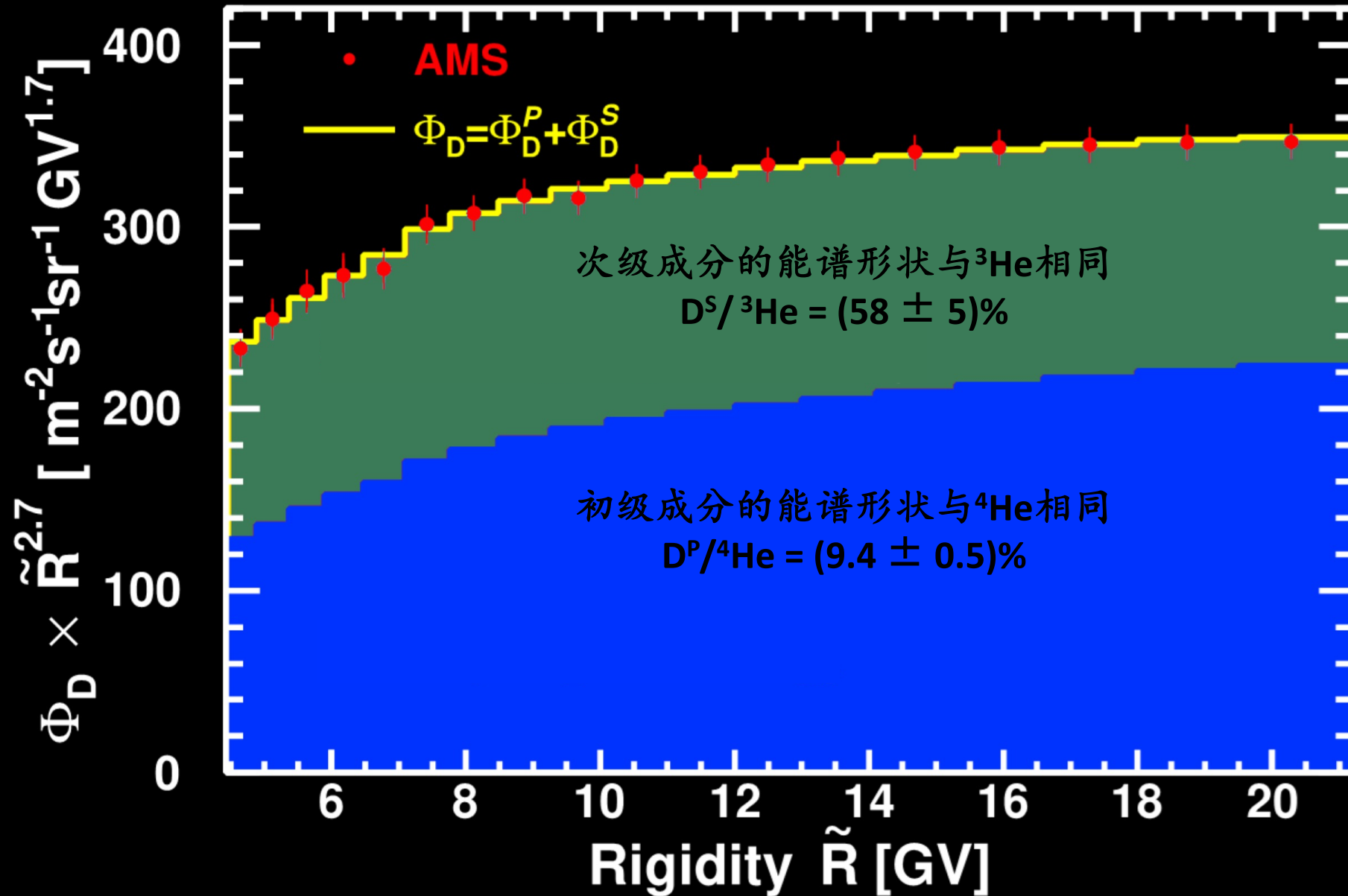


“二级”宇宙线也至少有两类

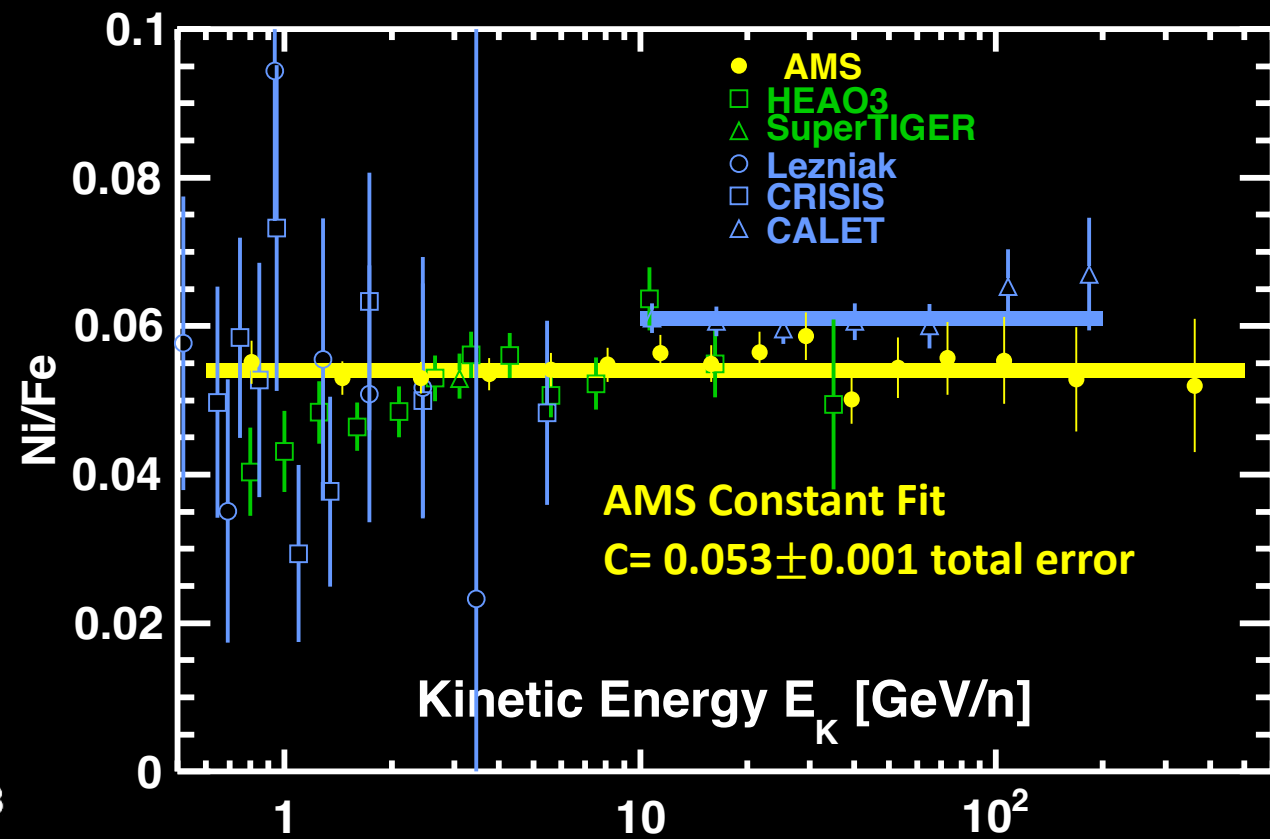
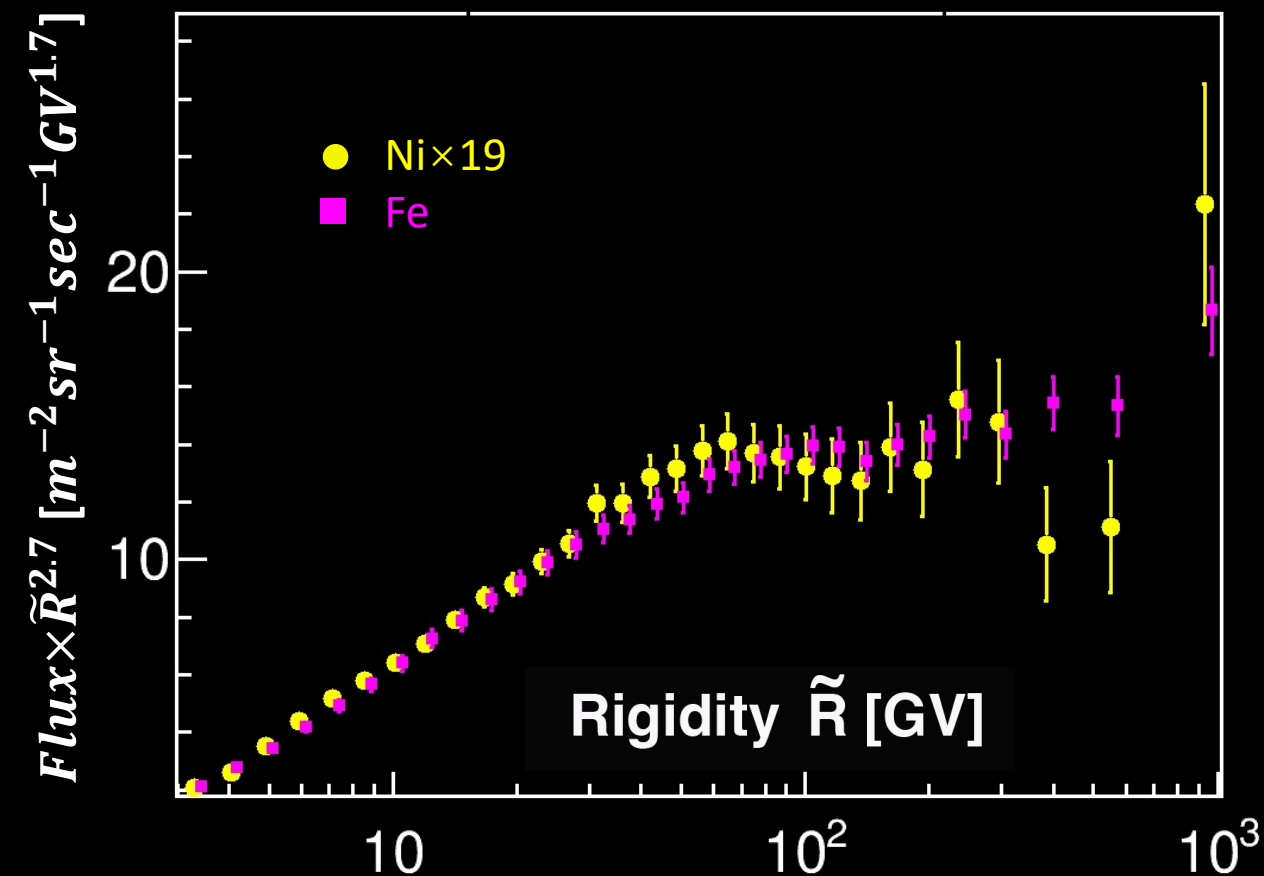
一级宇宙线 He-C-O 和 二级宇宙线 Li-Be-B 能谱的区别



氦同位素的初级与次级成分



铁 和 镍 具有相同的刚度依赖性

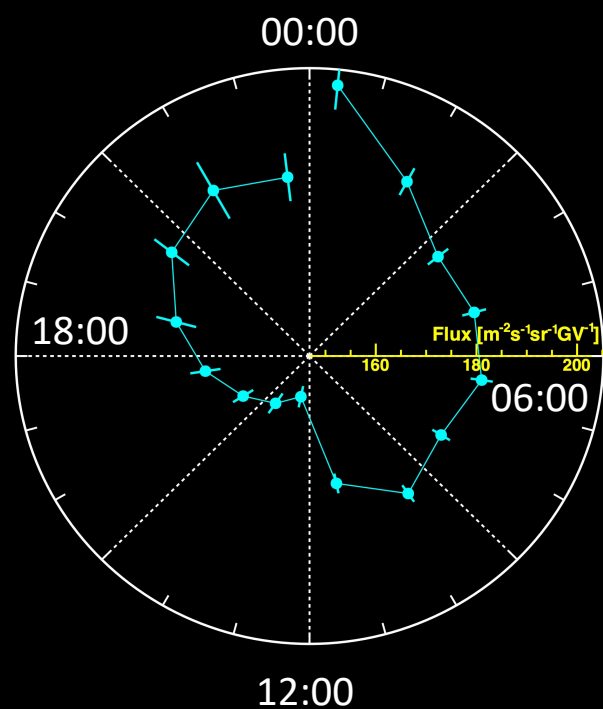


到2030年，AMS将精确测量镍和锌的能谱

AMS以不同的时间尺度测量宇宙线流强的变化

Hourly

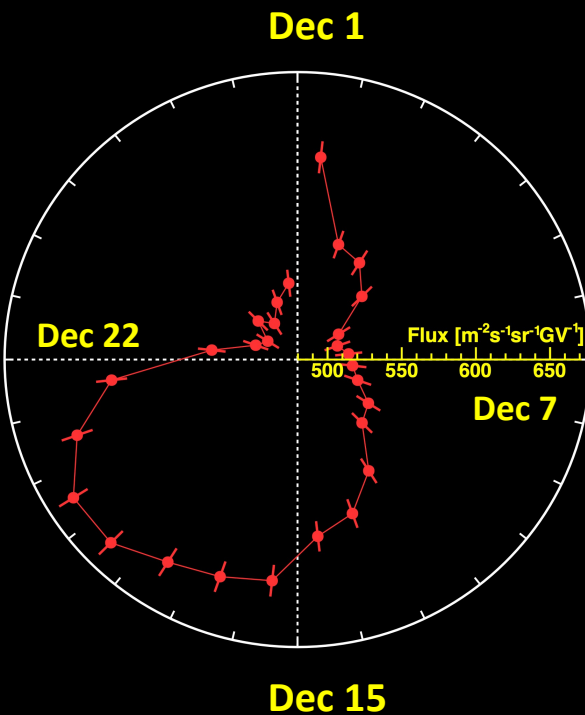
Sep 8, 2017



[4.02-4.43] GeV/c

Daily

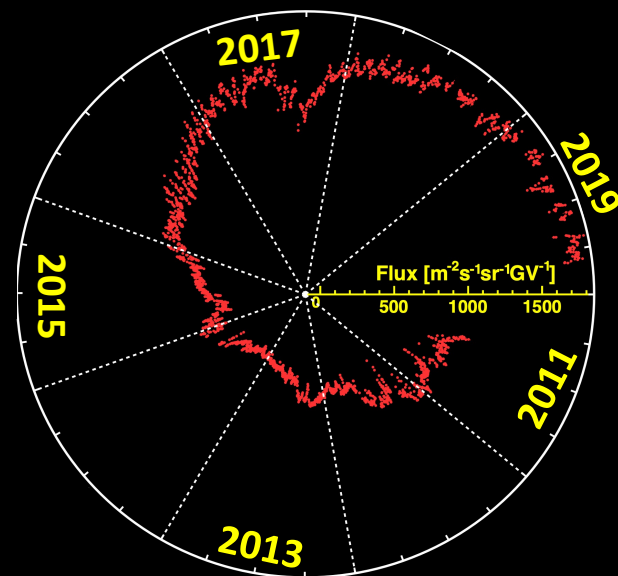
Dec 2014



[1.00-1.16] GeV/c

Yearly

2011-2019

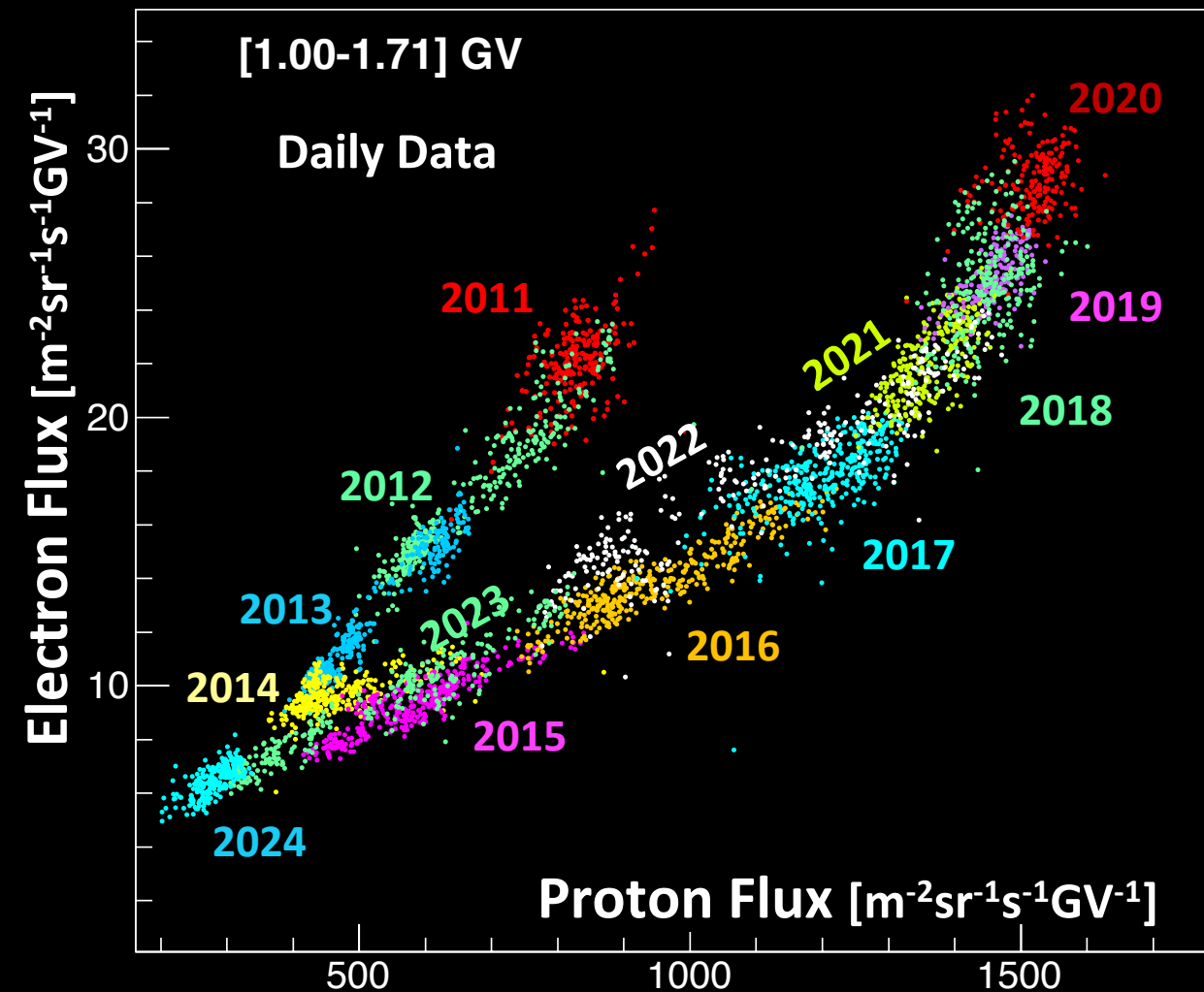


[1.00-1.16] GeV/c

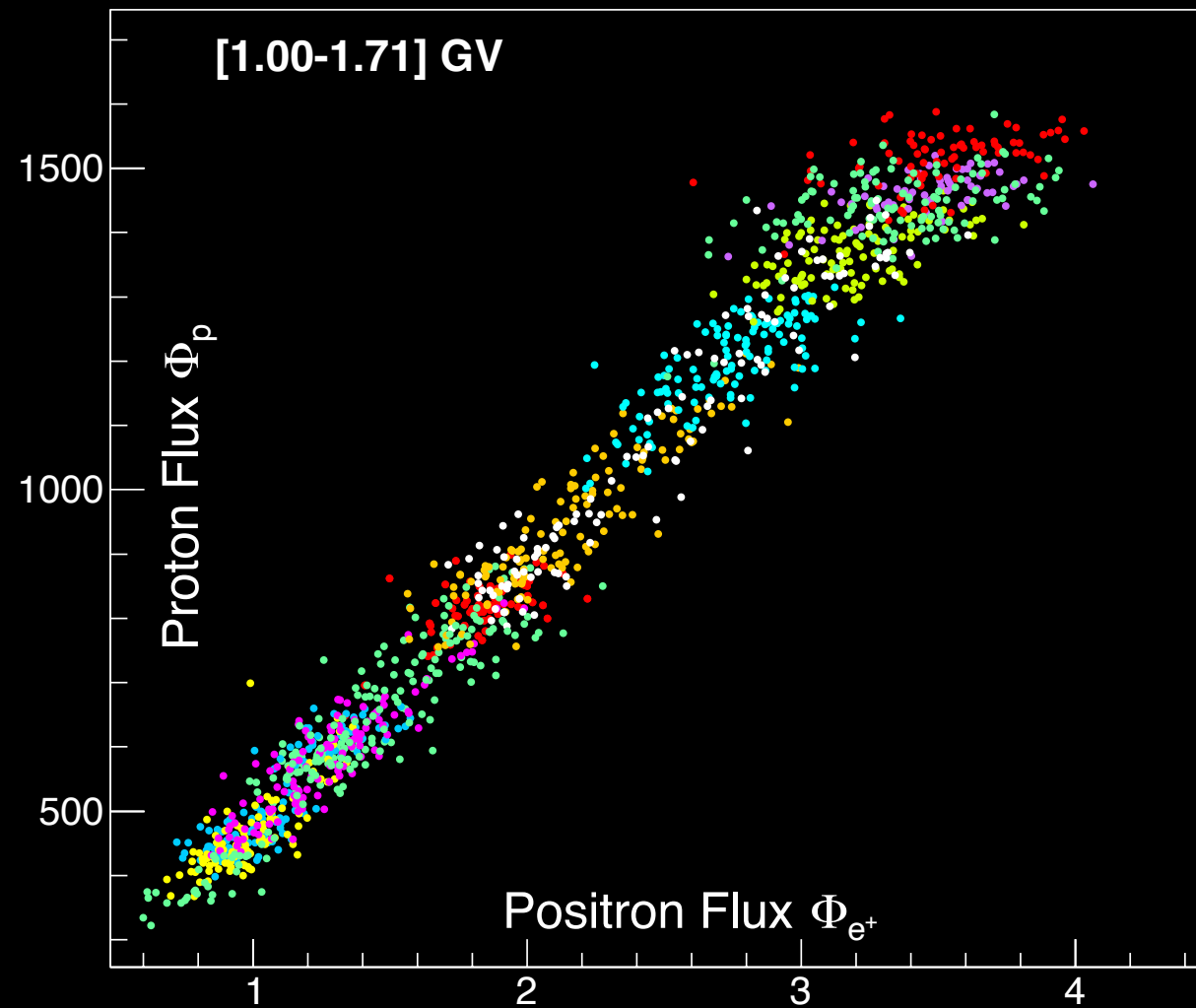
宇宙线质子流强

太阳调制效应与粒子电荷的关系

电子 - 正电子：相同质量，相反电荷

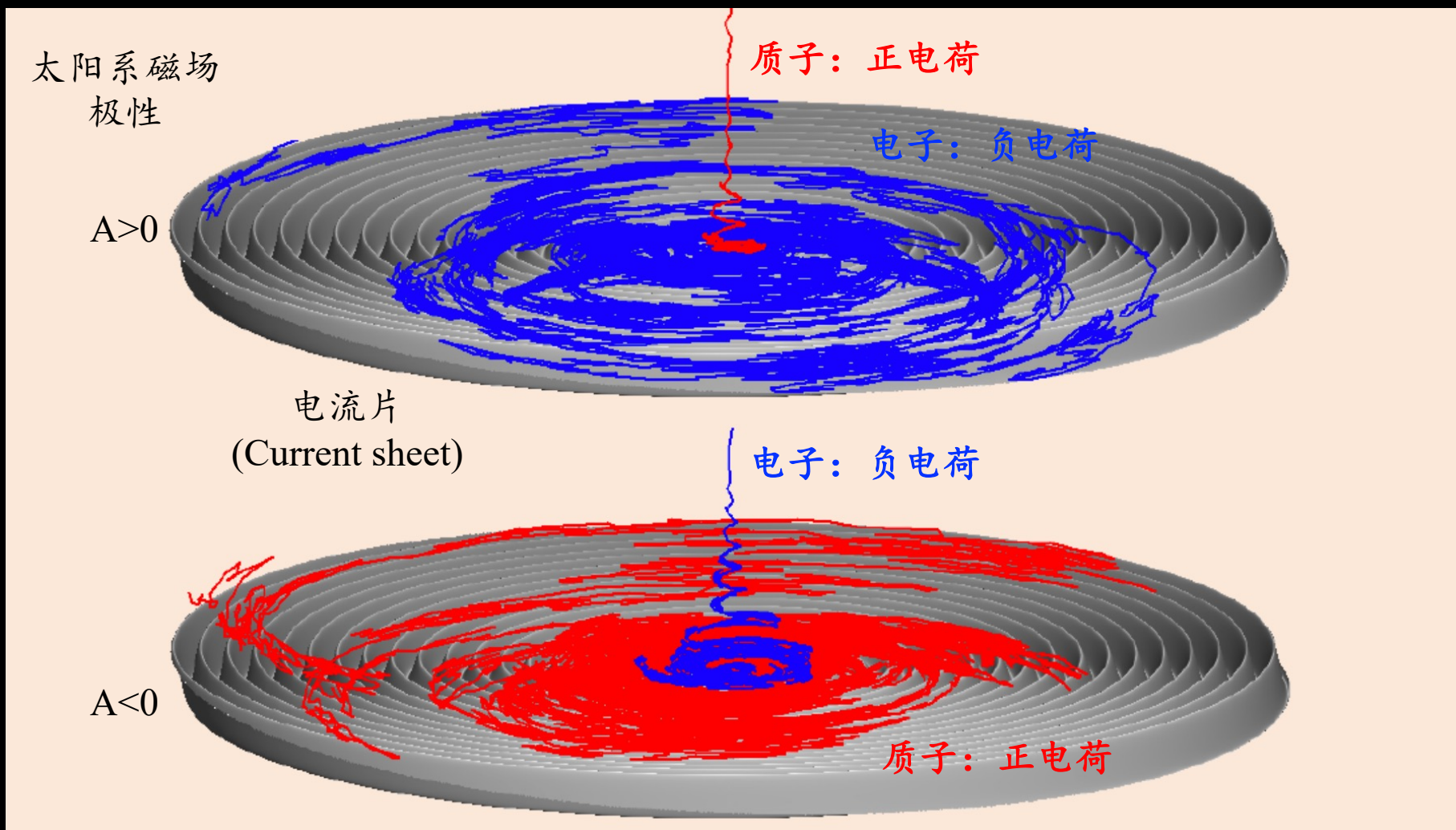


质子 - 正电子：相同电荷，不同质量

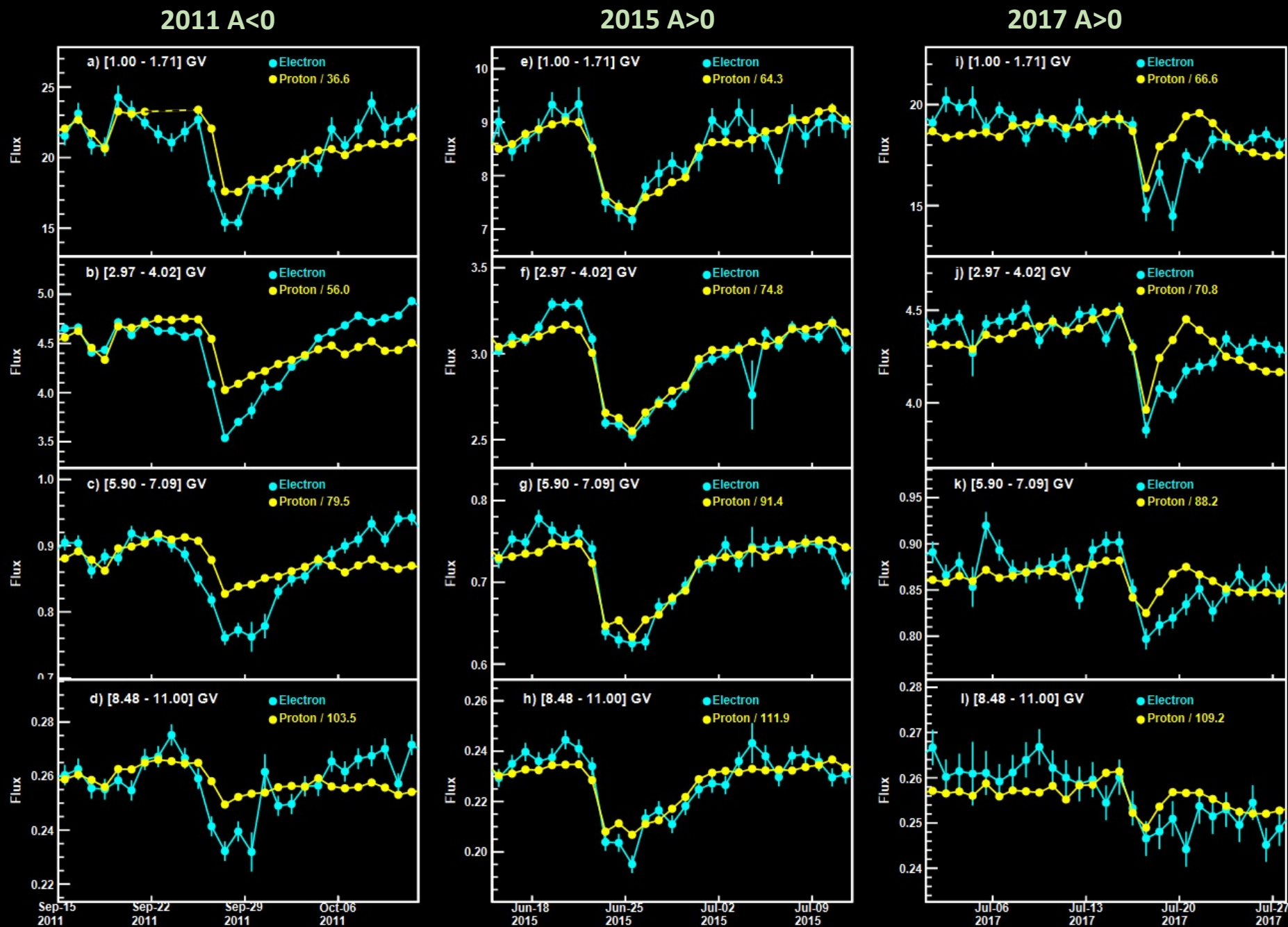


太阳调制效应与电荷符号有关

太阳调制的电荷依赖性



电子和质子流强短期变化规律的差异



AMS和空间粒子辐射环境

