

AMS硫原子核能谱和宇宙线源的元素丰度

The background image shows a high-angle view of the International Space Station (ISS) in space. Two astronauts in white suits are visible, working on the station's complex structure. Large, dark solar panel arrays are prominent in the upper right and middle sections of the frame. The station's intricate metal framework and various scientific instruments are clearly visible against the blackness of space.

王兆民

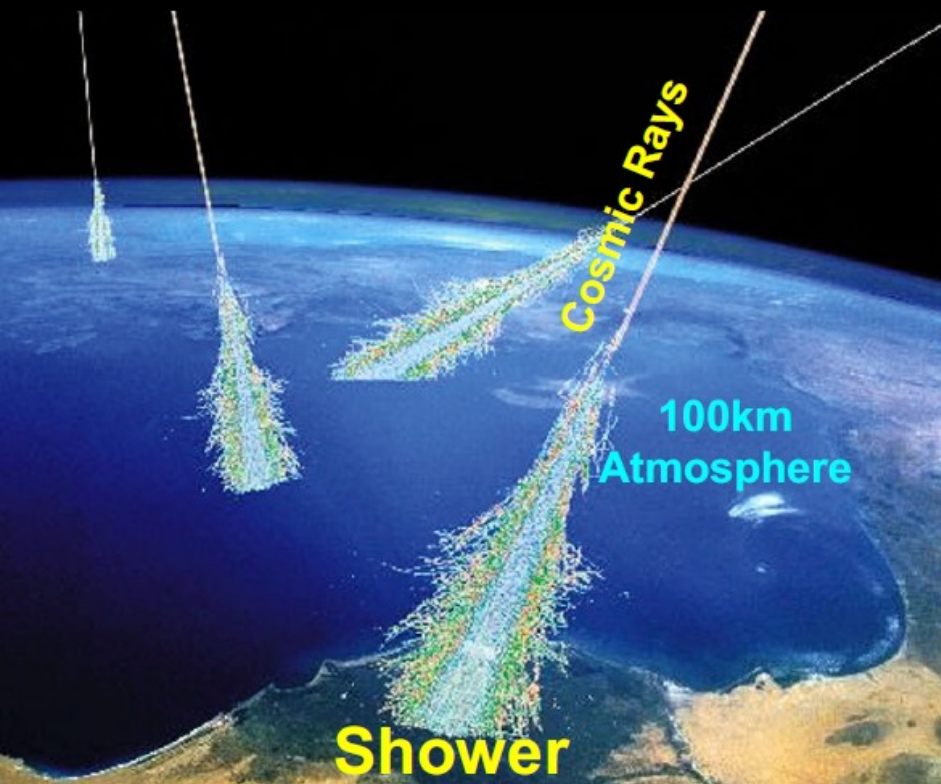
山东高等技术研究院

2024.05.09

第三届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

宇宙线与阿尔法磁谱仪实验

宇宙线是来自外太空的带电粒子，是宇宙中的重要信使。测量宇宙线能谱是研究宇宙线起源、加速和传播的实验基础，是理解我们宇宙的重要手段。受地球大气层的影响，地面探测器无法直接测量宇宙线粒子的电荷、动量等基本属性。**阿尔法磁谱仪 (AMS)** 是安装在国际空间站上的大型宇宙线探测设备，能够通过对宇宙线进行长时段高精度的观测，进而研究暗物质、反物质、宇宙起源等前沿物理问题。



AMS探测器

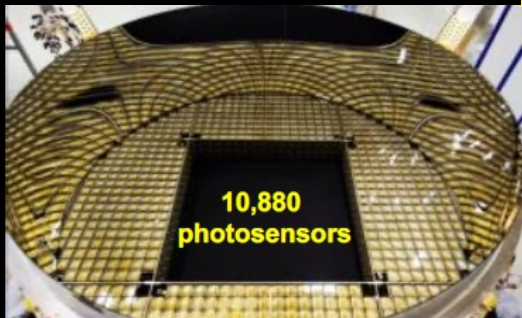
穿越辐射探测器 (TRD) :
鉴别电子、测量电荷



径迹探测器 (tracker) :
测量电荷、动量



环形切伦科夫探测器 (RICH) :
测量电荷、速度



电磁量能器 (ECAL) :
测量能量, 鉴别电子



上层飞行时间探测器 (UTOF) :
测量电荷、速度



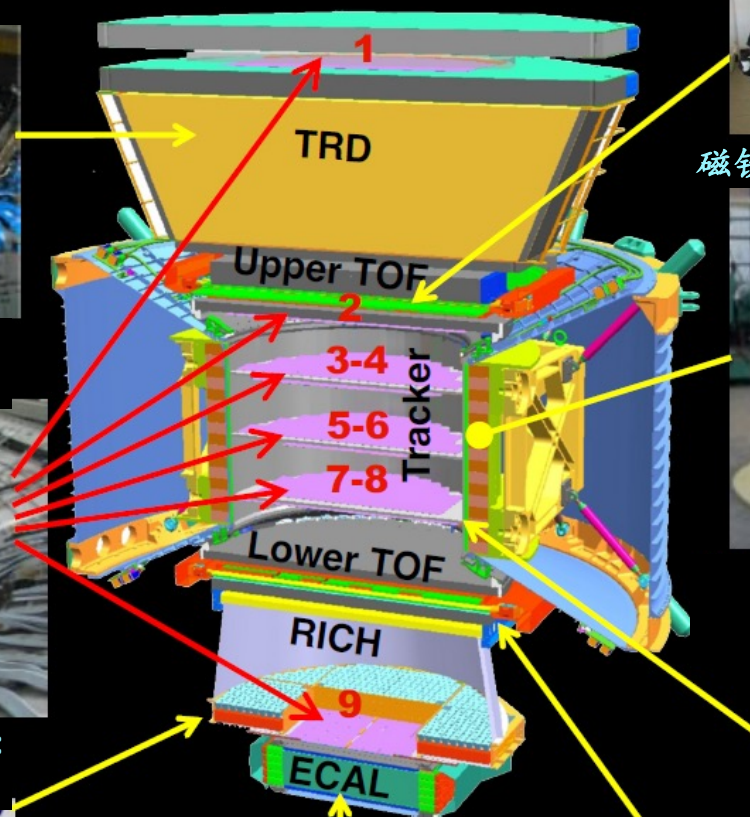
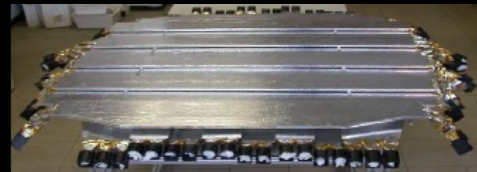
磁铁: 鉴别电荷符号、测量动量



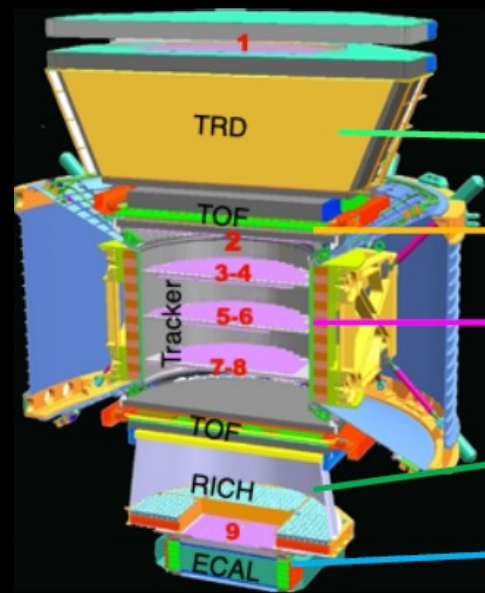
反符合计数器 (ACC) :
选择粒子入射方向



下层飞行时间探测器 (LTOF) : 测量电荷、速度



AMS对宇宙线粒子的测量



matter

antimatter

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

AMS能够对粒子的基本属性进行多次独立的测量:

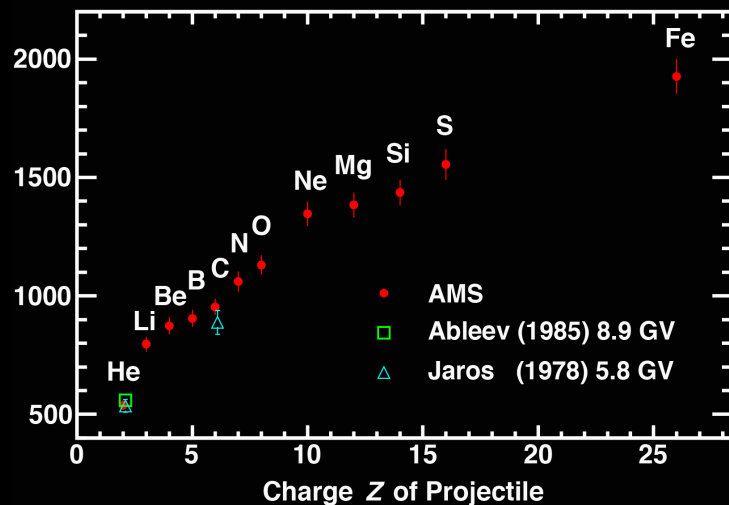
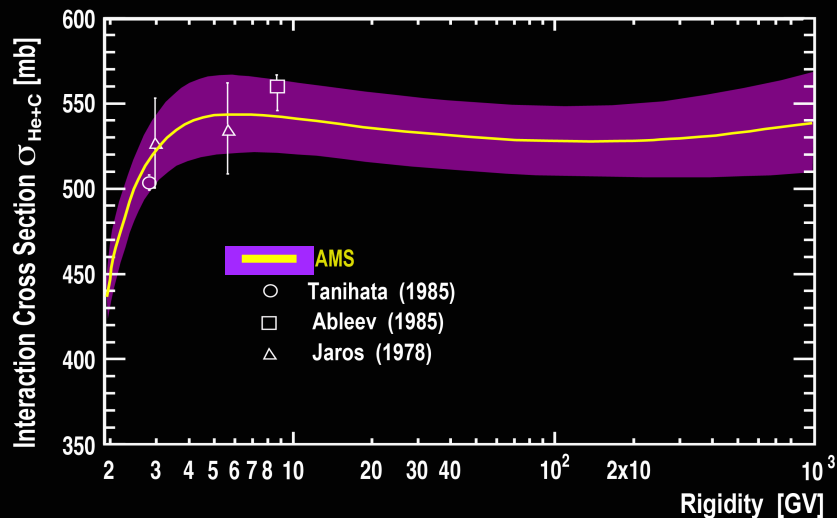
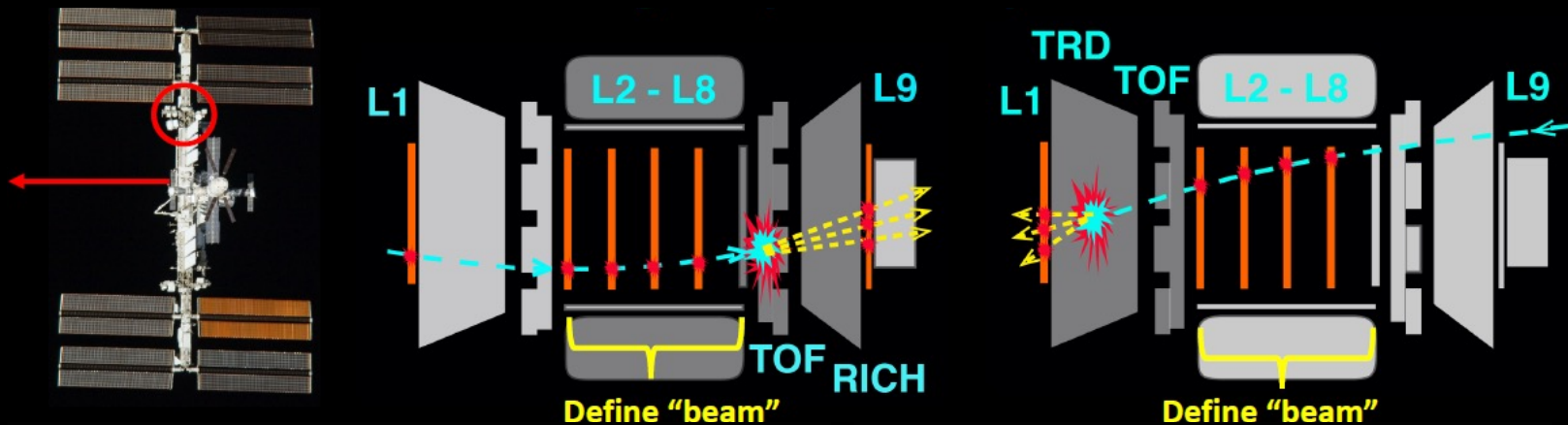
- 动量 ($P, \text{GeV}/c$)
- 电荷 ($\pm Z$)
- 刚度 ($R = P/Z, \text{GV}$)
- 能量 ($E, \text{GeV}/A$)

Periodic Table of the Elements

1 H Hydrogen 1.008	2 He Helium 4.003											13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
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 III B 3B	4 IV B 4B	5 V B 5B	6 VI B 6B	7 VII B 7B	8 VIII 8	9 VIII 9	10 VIII 10	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.933	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.09	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.90
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	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 [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium [223.020]	88 Ra Radium [226.025]	89-103	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 Uut Ununtrium [unknown]	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium [unknown]	116 Lv Livermorium [293]	117 Uus Ununseptium [unknown]	118 Uuo Ununoctium [unknown]

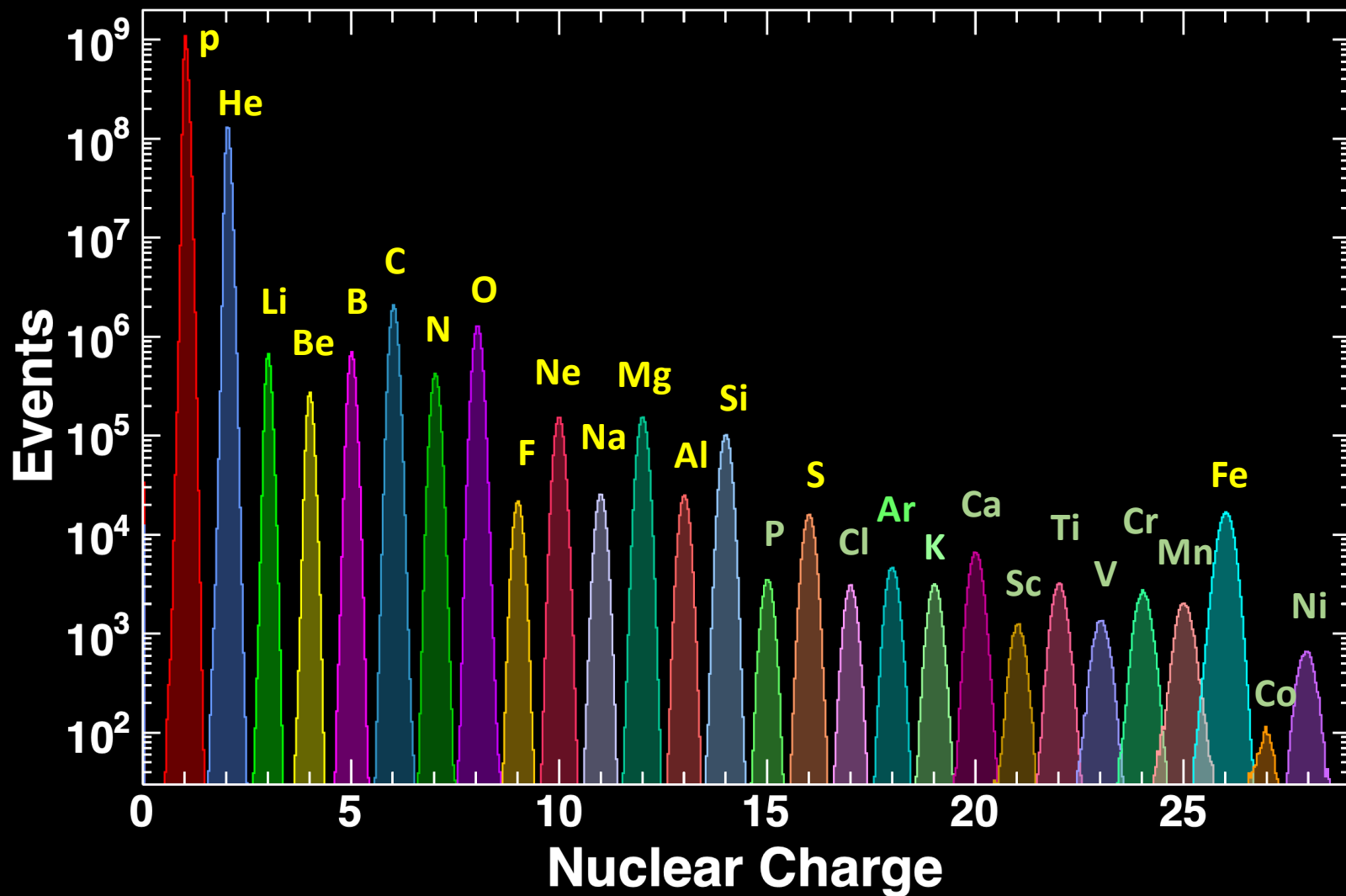
利用宇宙线测量原子核反应截面

AMS能够挑选出特定宇宙线粒子作为“束流”在太空开展“打靶”实验，测量原子核的反应截面。



基于测量结果，AMS修正了模拟数据中的核反应截面，进一步提升了测量精度

目前，AMS已发表16种宇宙线原子核能谱（电荷1-14, 16, 26），未来计划对电荷28以内的全部原子核能谱进行测量



宇宙线流强测量

宇宙线在刚度区间 $[R_i, R_i + \Delta R_i]$ 内的流强 Φ_i :

$$\Phi_i = \frac{N_i}{A_i \epsilon_i T_i \Delta R_i}$$

N_i : 宇宙线事例数

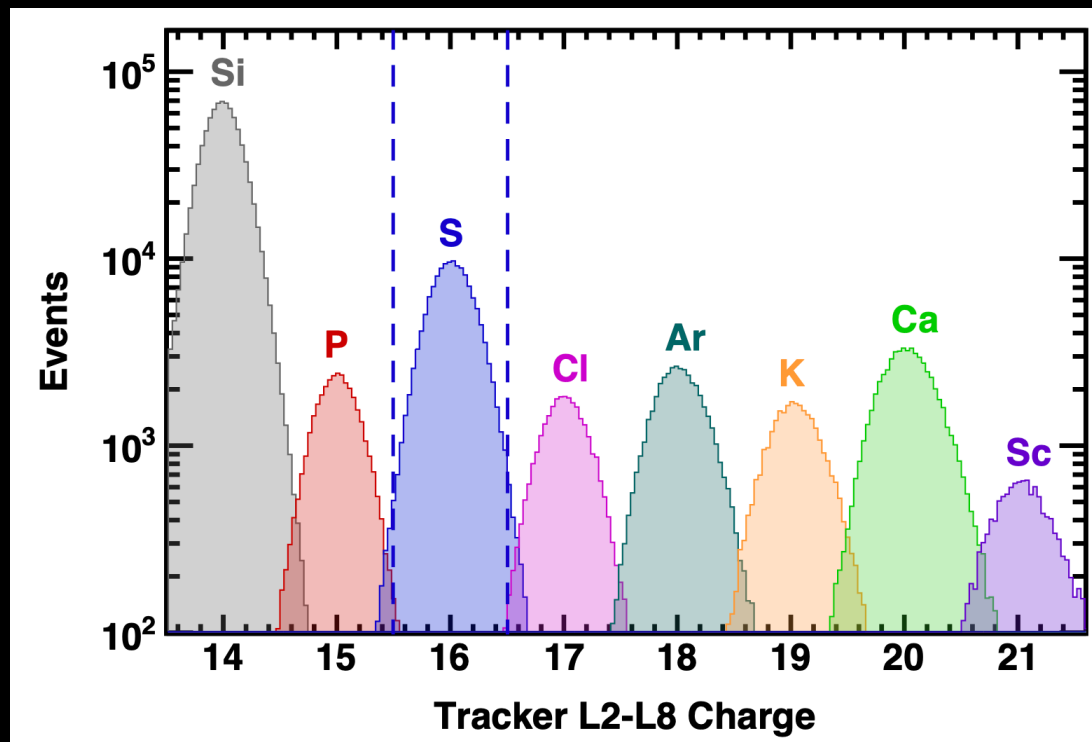
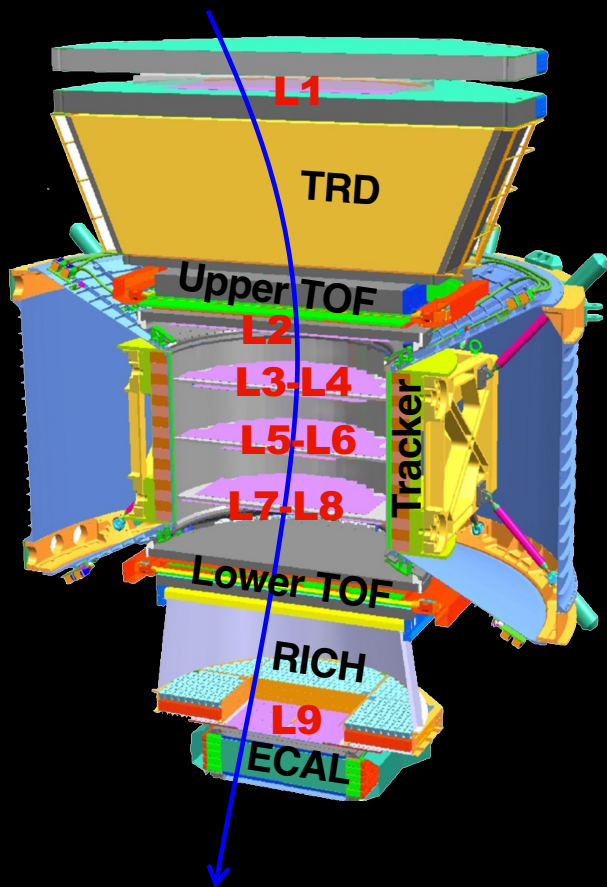
A_i : 有效接收度

ϵ_i : 触发效率

T_i : 曝光时间

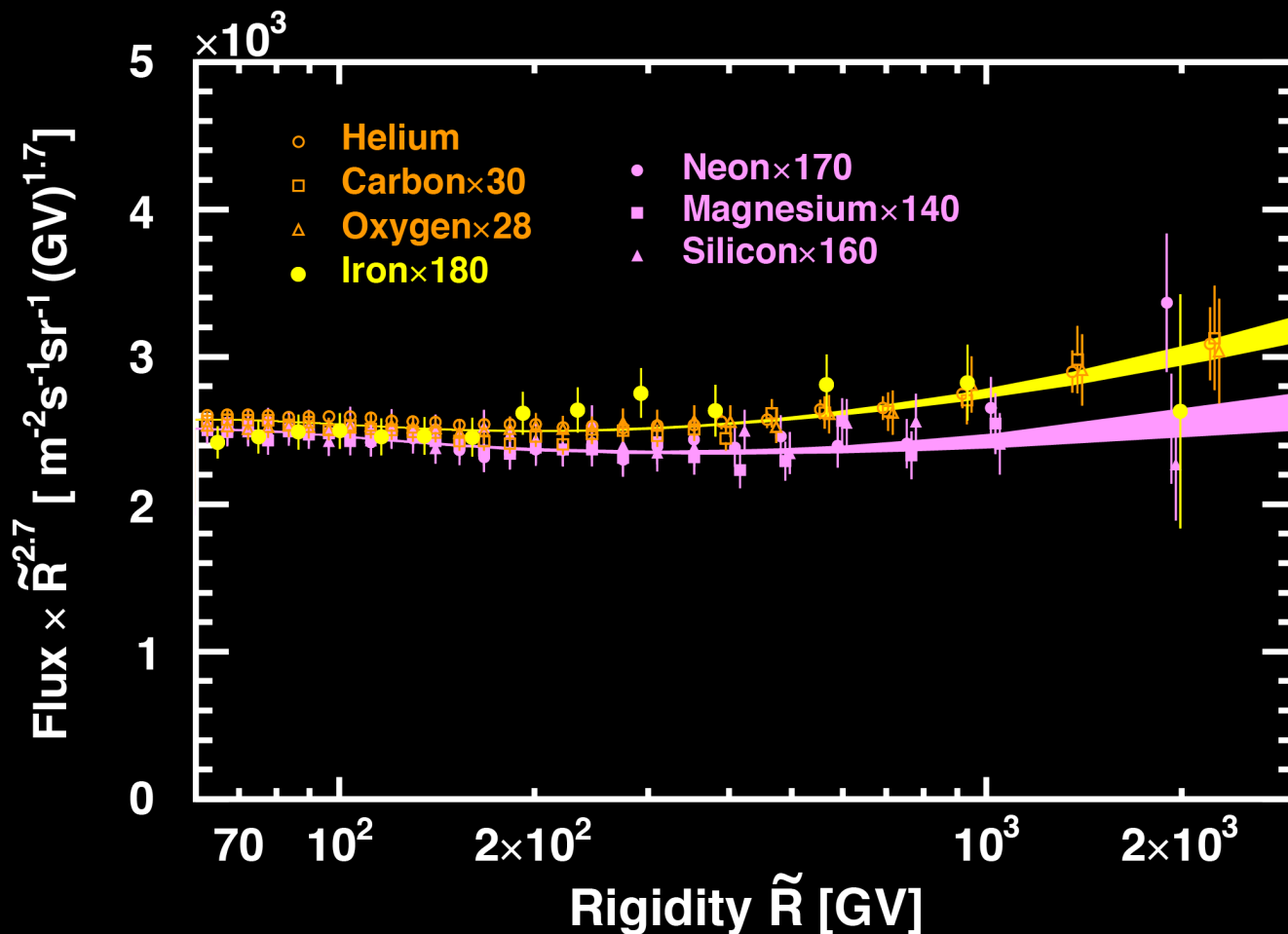
ΔR_i : 刚度区间宽度

宇宙线硫原子核事例选择



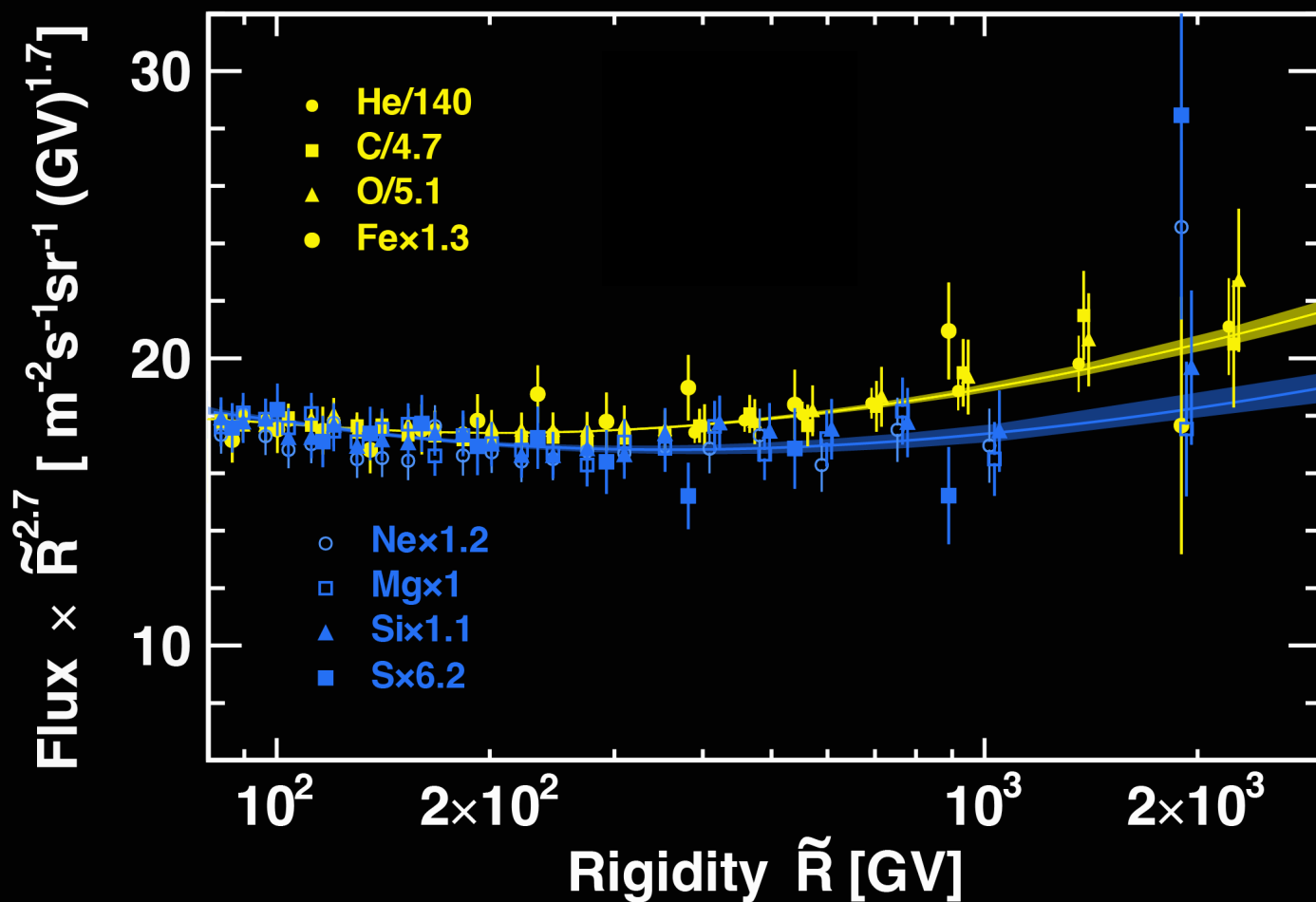
AMS在**2.15 GV - 3.0 TV**刚度范围内筛选选出约**38万**宇宙线硫原子核,由电荷误判所引入的本底**<0.1%**

初级宇宙线新发现



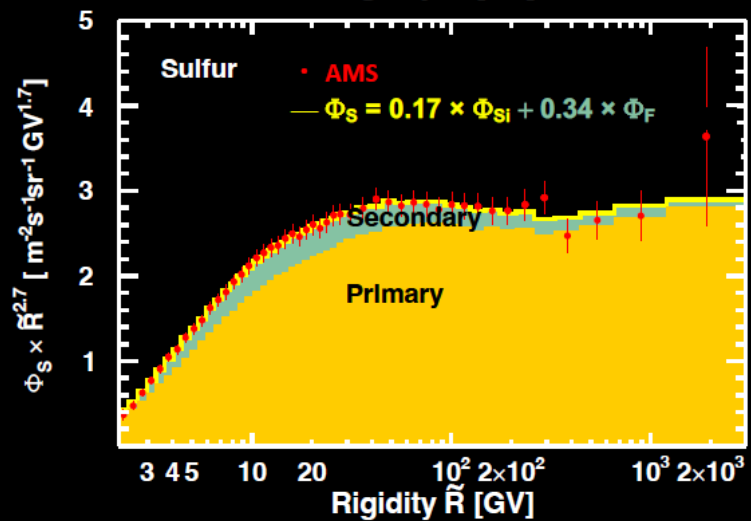
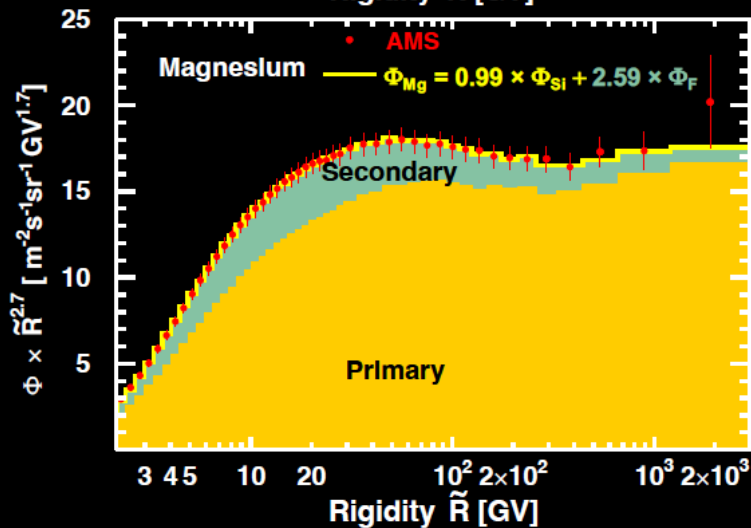
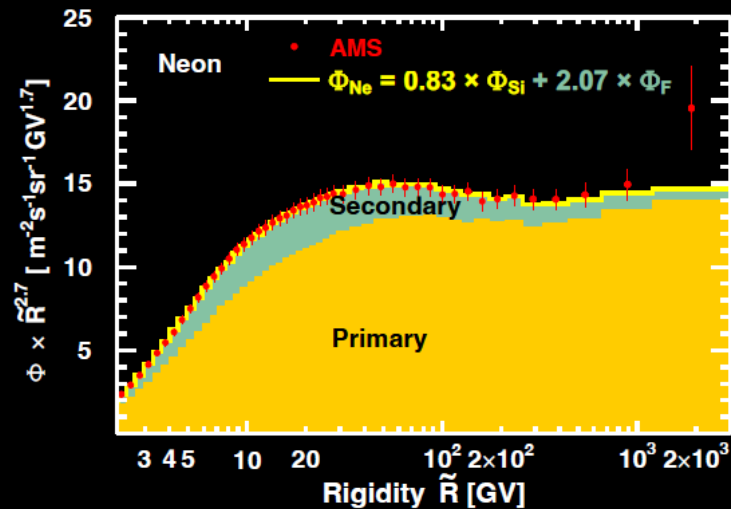
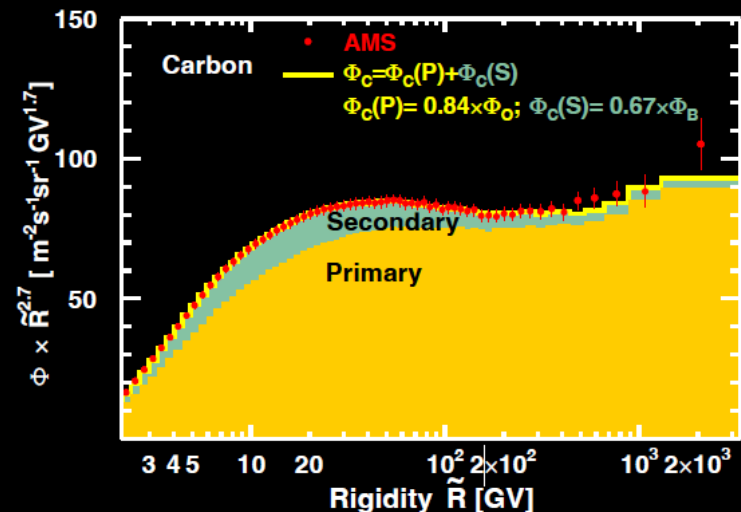
宇宙中存在以氦-碳-氧-铁和以氖-镁-硅为代表的至少两类初级宇宙线

初级宇宙线新发现



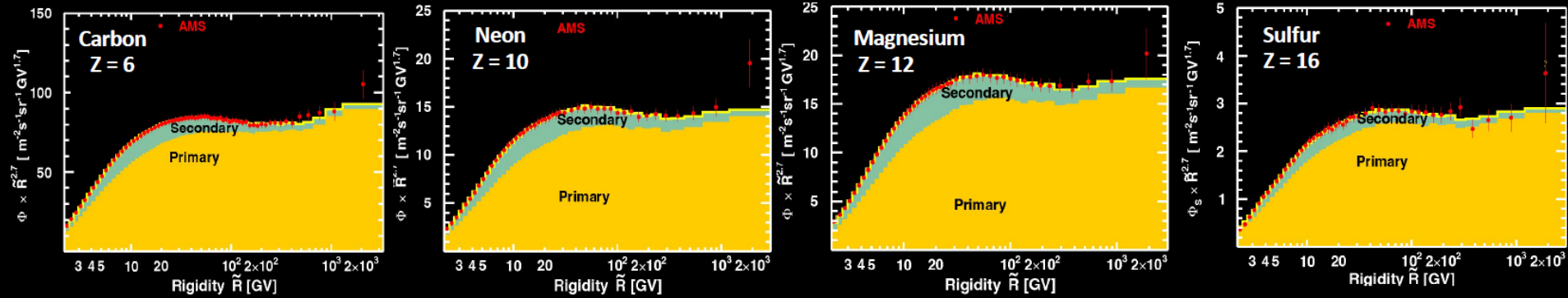
硫原子核能谱在80GV以上与氦-镁-硅能谱具有相同的刚度依赖性，属于同一类宇宙线

初级宇宙线新发现

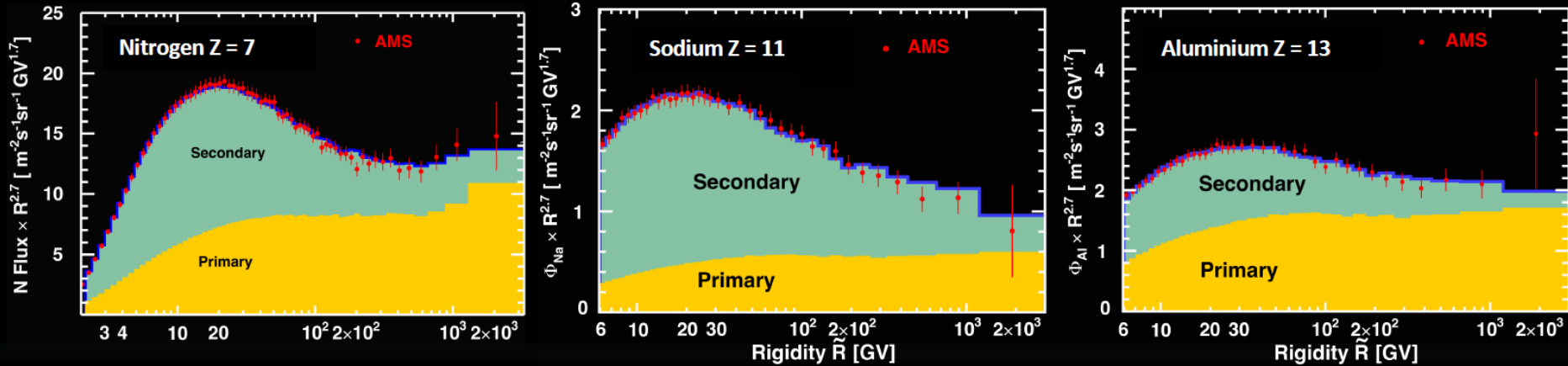


传统宇宙线模型所认定的初级宇宙线C、Ne、Mg、S均含有一定比例的次级成分(PRL 130, 211002, 2023)

初级宇宙线新发现



偶数原子核 C, Ne, Mg, S 能谱中, 初级成分占主导



奇数原子核 N, Na, Al 能谱 (PRL 127, 021101, 2021) 与偶数原子核能谱成分占比完全不同, 奇数原子核含有更多的次级成分

天体源处原子核丰度比

AMS以不依赖于模型的方法测量了

宇宙线源的元素丰度比

(传播过程之前)

Abundance
Ratio

Value at
the Source

C/O

0.836 ± 0.025

Ne/Si

0.833 ± 0.025

Mg/Si

0.994 ± 0.029

S/Si

0.167 ± 0.006

N/O

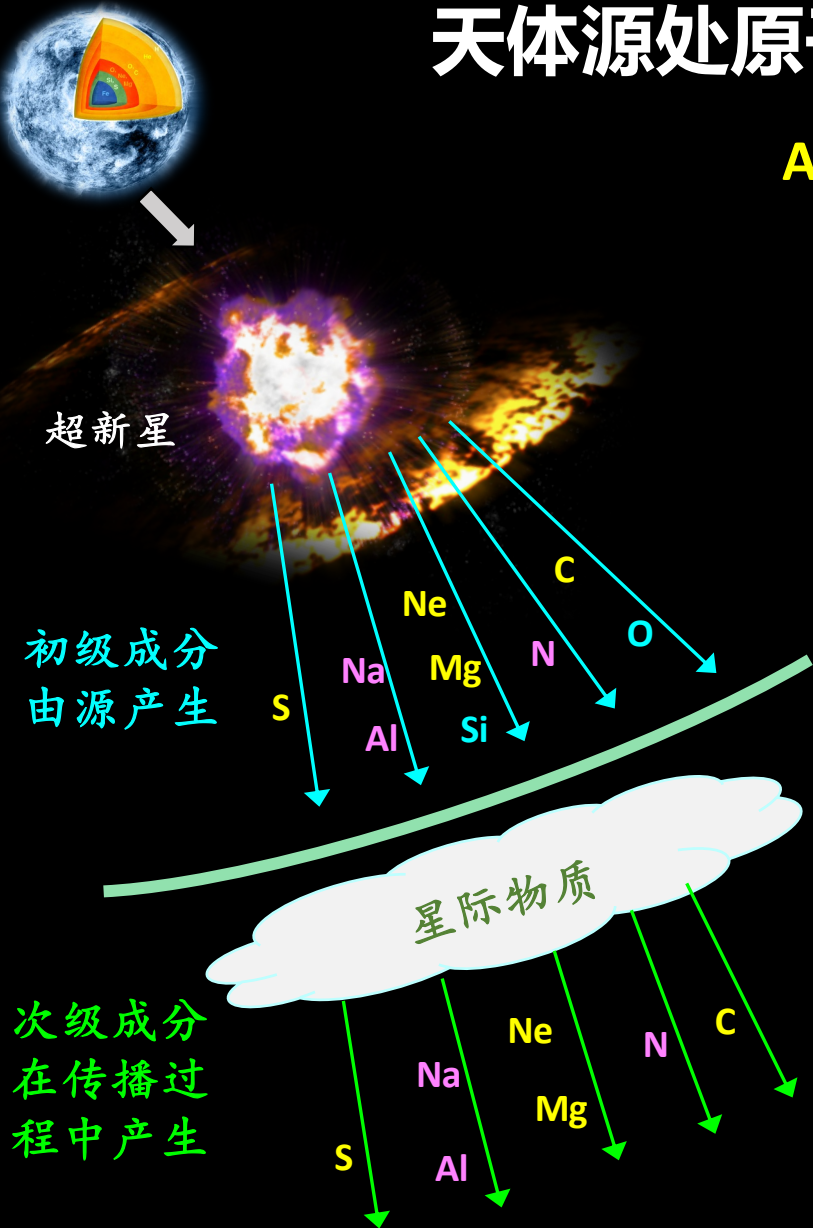
0.092 ± 0.002

Na/Si

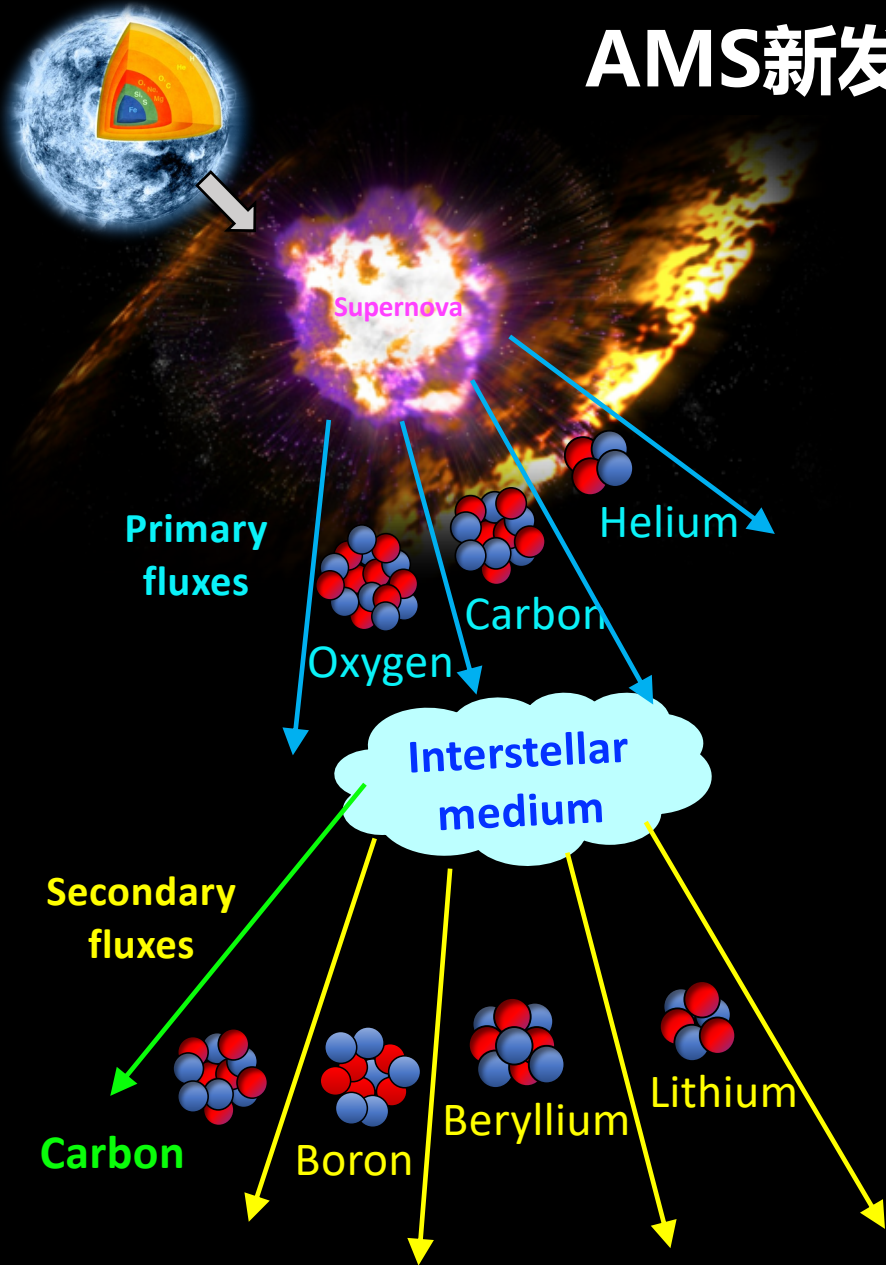
0.036 ± 0.003

Al/Si

0.103 ± 0.004

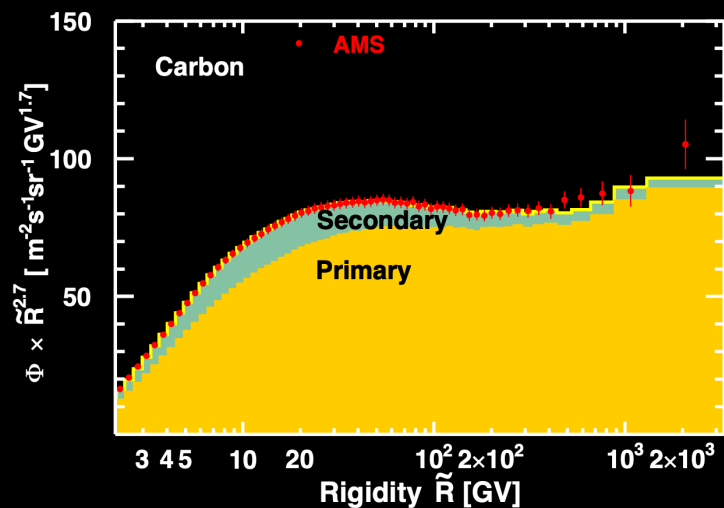


AMS新发现意义



在AMS之前, 普遍认为
C是纯的初级宇宙线,
B是纯的次级宇宙线。

因此, 硼碳比 (B/C)
被广泛的用于宇宙线传播模型



但C并不是纯的初级宇宙线。宇
宙线模型应如何正确的使用

B/C ?

总结

本报告介绍了AMS对宇宙线硫原子核能谱的最新观测结果，揭示了宇宙线领域的新现象：

- 硫原子核能谱在80 GV以上与氦-镁-硅能谱具有相同的刚度依赖性，而不同于氮-碳-氧-铁，目前AMS已经发现了以氮-碳-氧-铁和氦-镁-硅-硫为代表的两类初级宇宙线
- 传统的初级宇宙线碳、氮、镁、硫均含有一定比例的次级成分，但初级成分仍占主导地位
- 基于AMS的测量结果，能够以一种不依赖于模型的方法计算宇宙线源处的元素丰度比