



2023年校园宇宙线观测暑期学校

探索宇宙 从宇宙线观测开始

8月24-27日 成都

主办单位

校园宇宙线观测联盟

承办单位

《现代物理知识》编辑部 西南交通大学物理科学与技术学院

支持单位



国科大关心下一代工作委员会



中国科学院大学教育基金会
University of Chinese Academy of Sciences Education Foundation



国家高能物理科学数据中心
National HEP Data Center

宇宙线电荷正负问题

中国科学院高能物理研究所

校园宇宙线联盟技术组

董绪强 侯超



目录

01

如何判断粒子带电性

02

原初宇宙线的带电性

03

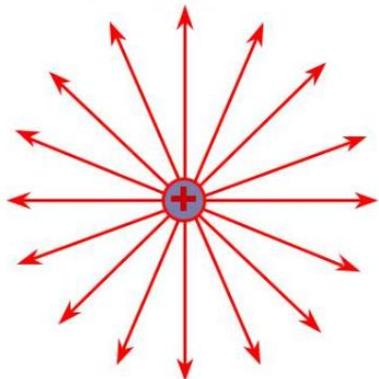
小结

04

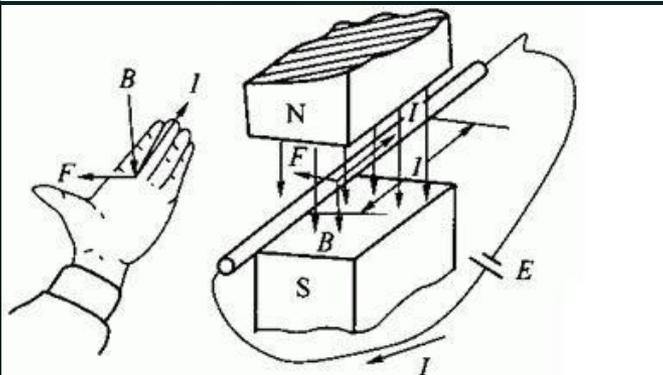
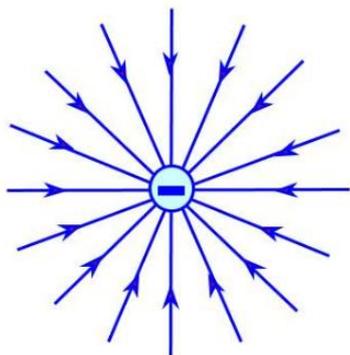
知识拓展

如何判断粒子带电性

正点电荷



负点电荷



通电导体在磁场中受力方向的判断

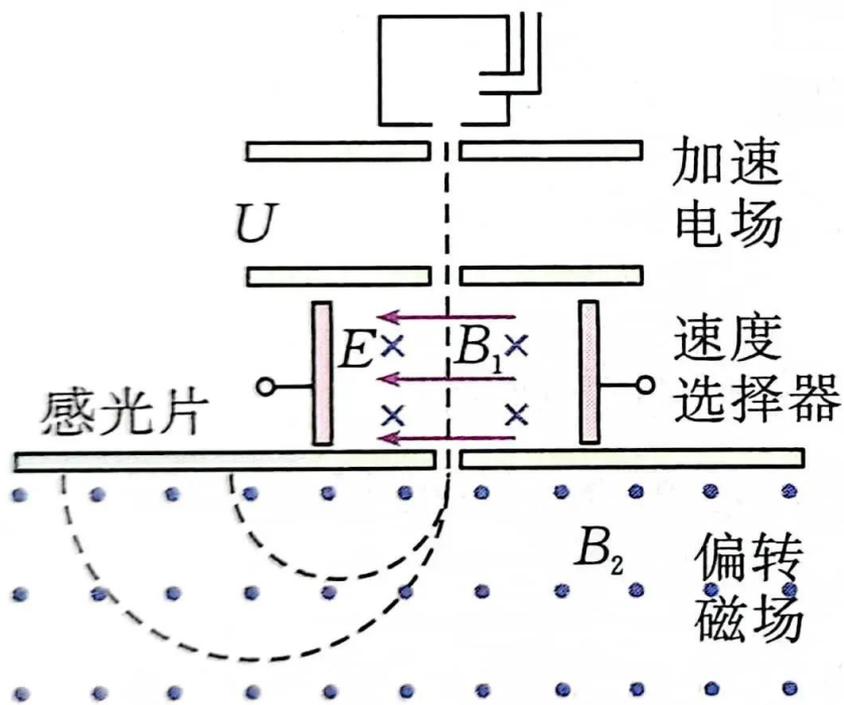
粒子的带电性：正电和负电
二者在电场和磁场中有不同的行为（受力方向相反）：

电场中，带电粒子受到电场力的影响，正电荷的受力方向沿着电场线，负电荷相反

磁场中，带电粒子受到洛伦兹力的影响，按照左手定则判断受力方向

我们可以利用带电粒子在电场或者磁场中的运动情况来判断其带电情况

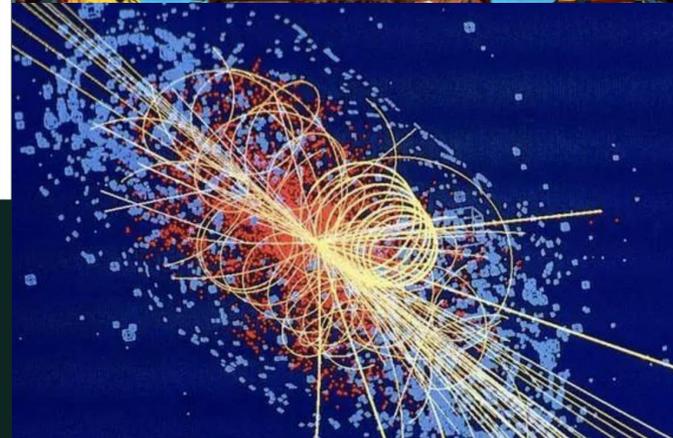
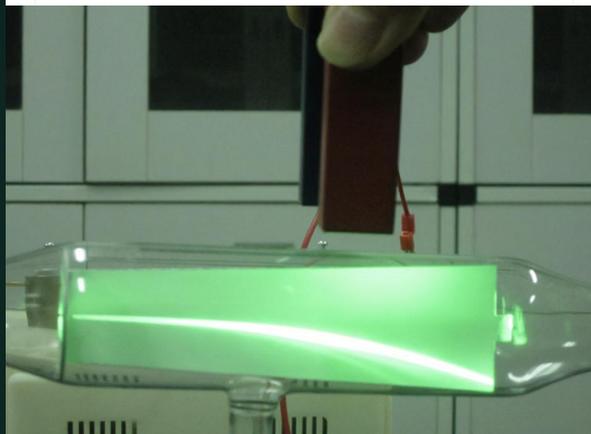
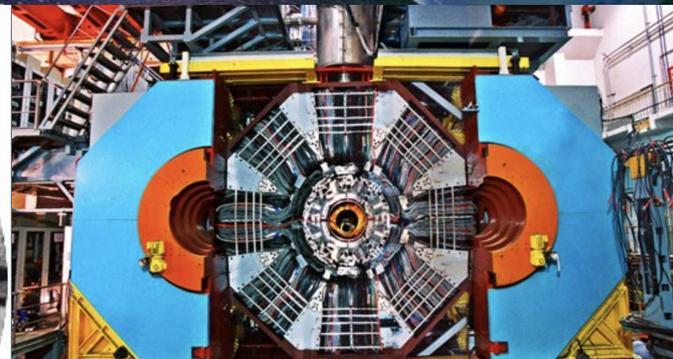
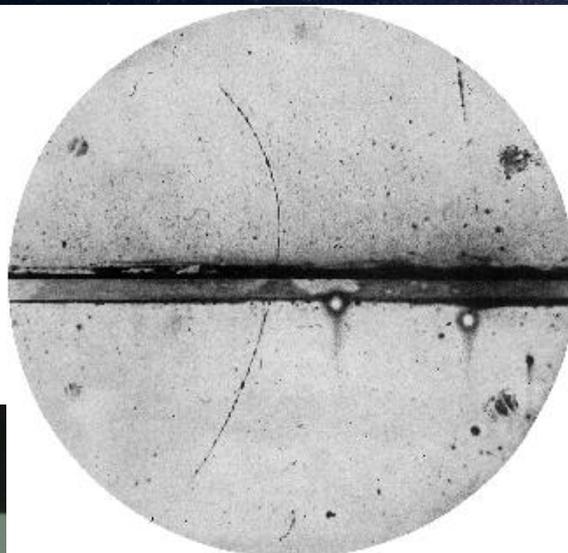
质谱仪



利用加速电场加速粒子，
在速度选择器里面筛选
出 $v=E/B$ 的粒子

在偏转磁场中，相同电荷量粒子，偏转半径大的质量大还是偏转半径小的质量大？

利用带电粒子在电磁场中的运动情况的应用



阴极射线管：电子直线运动过程中受到电场影响发生偏转

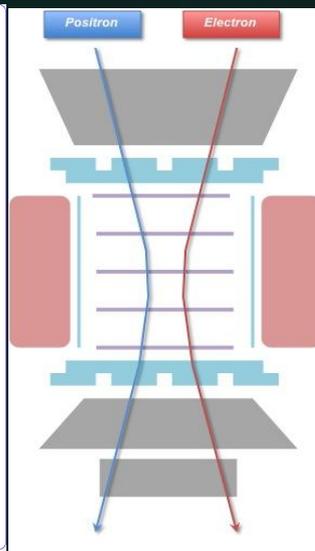
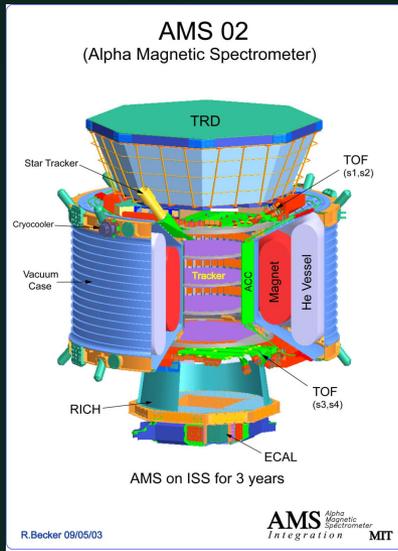
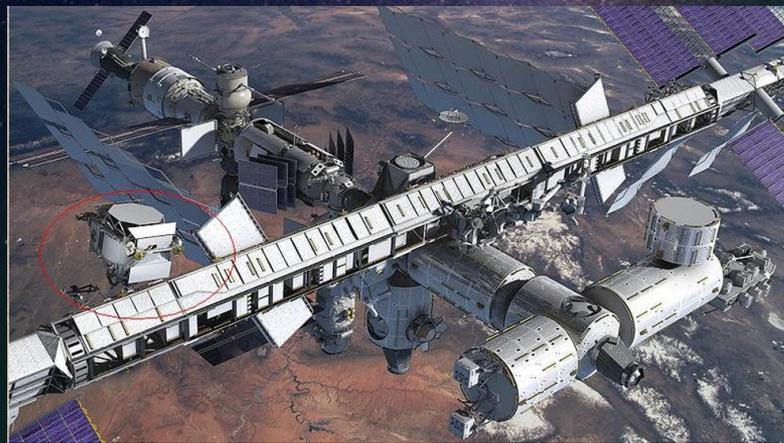
云室：早期研究次级宇宙线粒子

北京谱仪：带电粒子的轨迹辨别其种类

原初宇宙线的带电性：将磁谱仪搬到太空——阿尔法磁谱仪

阿尔法磁谱仪，Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) 2011.5月发射升空，国际空间站轨道高度400km

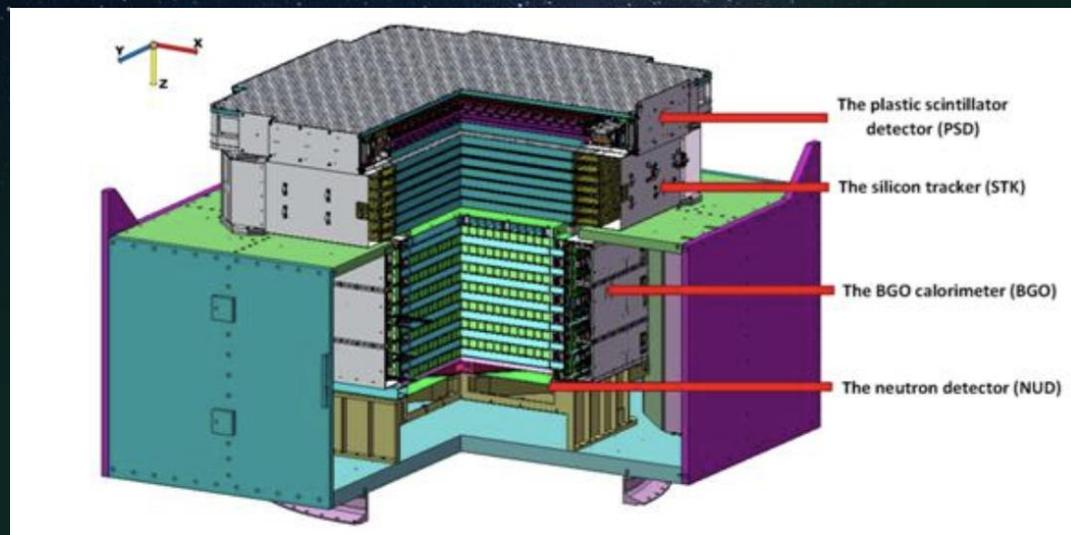
多种探测器符合测量，实现对原初宇宙线能谱与成分丰度的精确测量



	Positron	Electron				
300 GeV	e^-	e^+	P	$\bar{\text{He}}$	γ	γ
TRD	⋮ V V V	⋮ V V V			⋮ V V V	
TOF	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
Tracker	⤴	⤵	⤴	⤴	⤴	
RICH	○	○	○	○	○	○
Calorimeter	⤴ ⤴ ⤴	⤴ ⤴ ⤴	⤴ ⤴ ⤴	⤴ ⤴ ⤴	⤴ ⤴ ⤴	⤴ ⤴ ⤴

原初宇宙线的带电性：暗物质探测卫星（DAMPE）

- 是我国首颗空间天文卫星
- 多种探测器符合测量出入射粒子的电荷、方向和精确能量信息，探测宇宙线能量高达TeV
- 计划通过在空间观测高能电子（包括正电子）和伽玛射线能谱，来寻找暗物质粒子的存在证据，并开展宇宙射线起源及伽马射线天文方面的相关研究



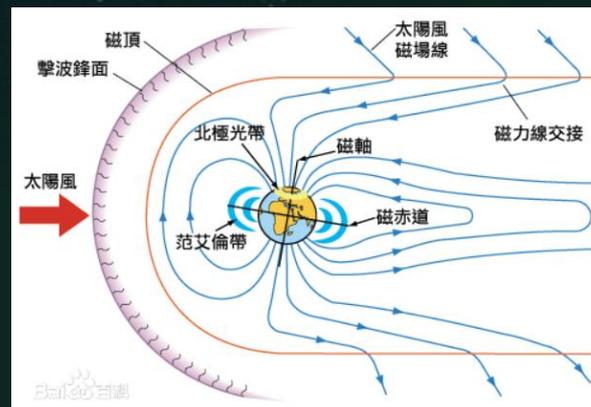
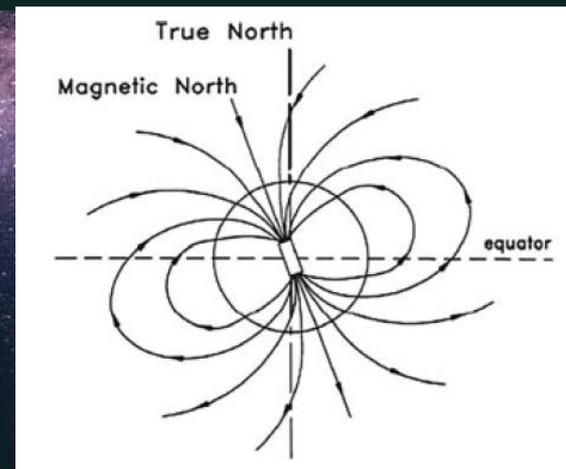
原初宇宙线的带电性：飞到大气层顶部

- 探测器搭载气球，卫星和空间站到大气层上部或大气层外测量原初宇宙线
- 气球运载的宇宙线能量和质量（CREAM）实验：南极上空飞行六次161天，在平均高度~38.5千米，元素光谱测定 $Z=1-26$ 核，覆盖宽能量范围：
~10GeV到100TeV



原初宇宙线的带电性：地磁场

- 利用宇宙线在天然的地球磁场中发生偏转的性质的来判断正负
- 地球磁场：地球内部延申至太空
- 组成
 - 基本磁场（99%）
 - 地核内熔融铁热对流形成电流，产生磁场，地表近似磁偶极子
 - 外援磁场（大气层以上），在太阳风的影响下变形
- 场强大小：0.25-0.65G，从两极至赤道逐渐减弱
- 地磁倾角： -90° （上）和 90° （下）之间，在北半球向下倾，在磁南极指向正下方，并随纬度下降而逐渐向上，至“地磁赤道”处完全与地表平行（ 0° ）。往南，倾角继续向上，直到磁北极处指向正上方。



原初宇宙线的带电性：月影

- 地月距离约38万千米，是地球半径约60倍
- 月亮阴影是宇宙线在穿过星际空间向地球传播的过程中，由于受月球的遮挡使得在月亮方向的宇宙线出现缺失。宇宙线大部分是带电粒子，所以其从月球传到地球过程中要受到地磁场的作用而偏转，相应月亮阴影的位置也会偏移，偏移量与带电粒子的能量成反比，地磁场对正负粒子偏转的方向相反。
- 练一练：假设宇宙线是正电荷，左手定则判断宇宙线向东偏转，向天空反推出**月影向西偏移**，负电荷则向东偏移
- 地面宇宙线阵列实验结果：随着能量的增加，月亮阴影向西的偏移越来越小。
- 得出结论：宇宙线主要带正电

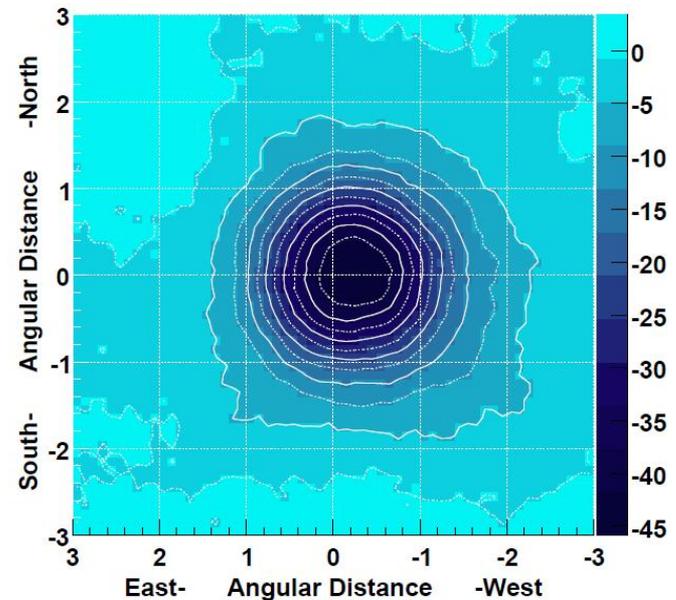
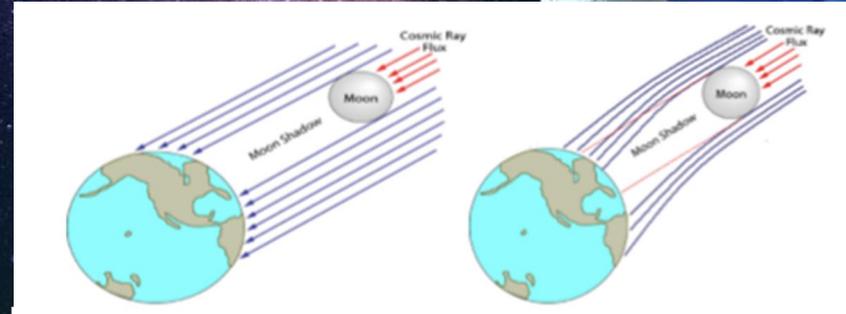
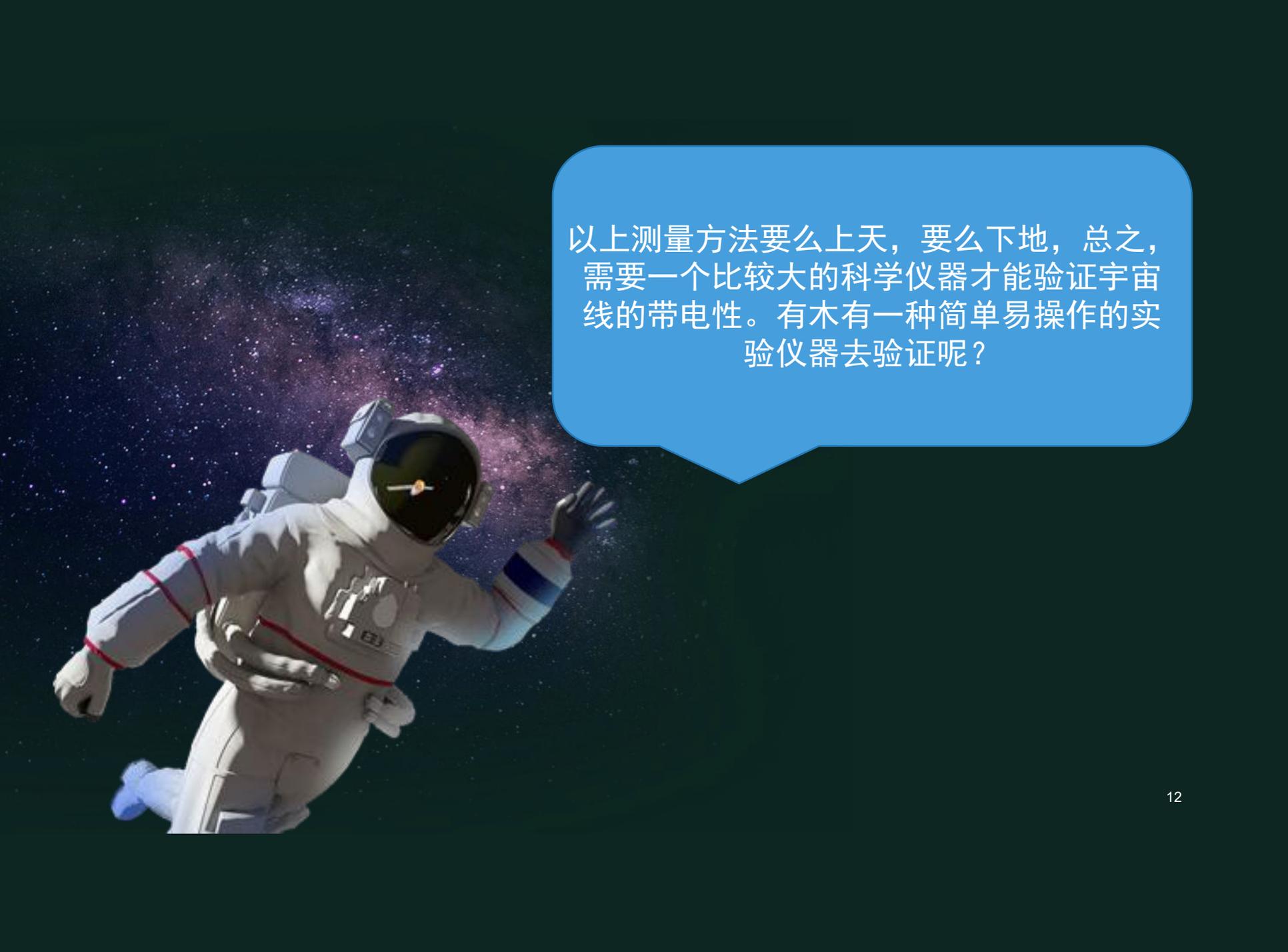


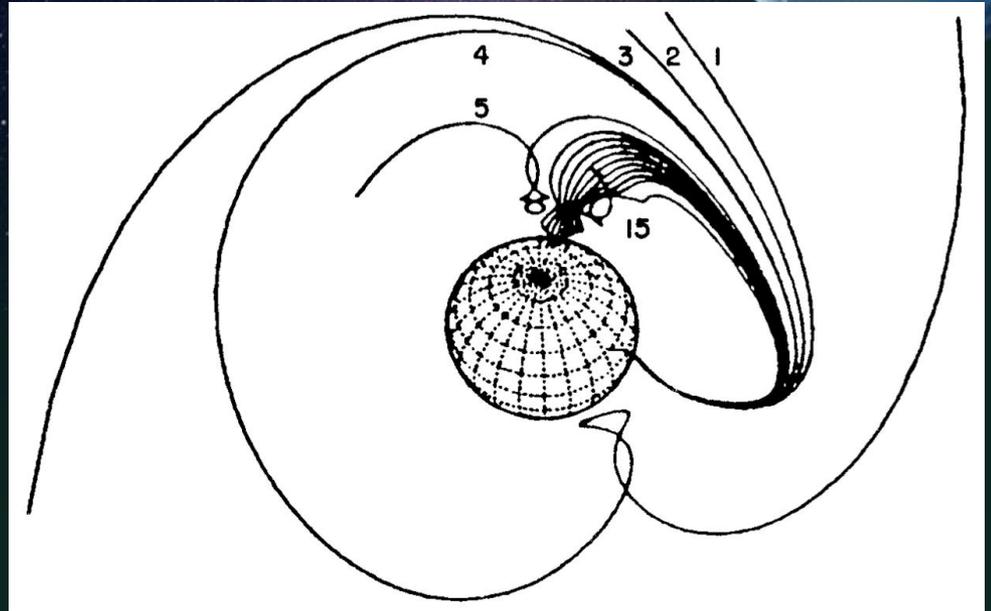
FIG. 2.— Significance map of the deficit event densities observed by the Tibet-III array for 1318.9 live days, made using the events with $\sum \rho_{FT} > 10^{1.25}$ ($> \sim 2$ TeV), in the square area of $6^\circ \times 6^\circ$ whose origin is at the apparent center of the moon. The scale at right shows the level of significance of the deficit event density in terms of the standard deviation σ .

An astronaut in a white spacesuit is floating in space, with the Milky Way galaxy visible in the background. The astronaut is positioned in the lower-left quadrant of the frame, looking towards the right. The background is a deep black space filled with stars and the colorful dust lanes of the Milky Way.

以上测量方法要么上天，要么下地，总之，
需要一个比较大的科学仪器才能验证宇宙
线的带电性。有木有一种简单易操作的实
验仪器去验证呢？

原初宇宙线的带电性：东西效应

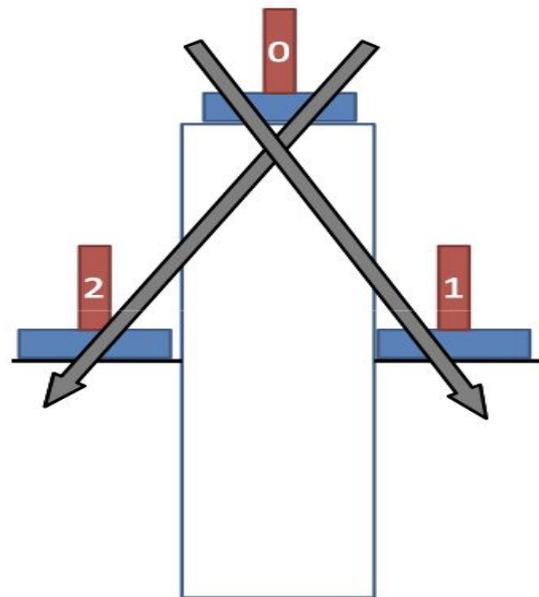
- 1903年，挪威地球物理学家斯托末研究了从远处投射到地球磁场中的带电粒子的运动。利用地球磁场的偶极分布模型，及带电粒子在磁场中动量和角动量守恒，同过洛伦兹方程推导，得到在地球周围某些区域，对于给定能量和方向的带电粒子是不能进入的。即对不同方向入射的宇宙线的截止动量是不同的。电荷正负在方向上具有相反的规律。



当入射角向西偏的时候，4会变成3，5会变成4。反之，4会变成5，3会变成4。这就导致西多东少

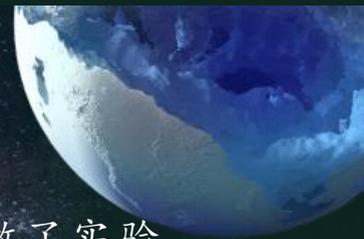
原初宇宙线的带电性：东西效应

- 1930年，柏林的布鲁诺·罗西 (Bruno Rossi) 听说了斯托末关于带电粒子在地球磁场中运动的理论后，在1930年7月3日发送给《物理评论》的一封信中，他预测宇宙射线的到达方向应该存在不对称性，这取决于它们的电荷符号。这种效应在赤道附近更为明显。
- 由于地磁场的存在，当带电宇宙线经过磁场时就会受磁场偏转，由于对不同方向的粒子的截止刚度不一样，对于正电荷即东边的截止刚度比西边的高，所以西边的宇宙线强度较高，这就是著名的“东西效应”
- 罗西使用电子真空管记录来自盖革计数器的同步脉冲。他将探测器排列成三角形，粒子来自系统轴方向才可以产生计数，这叫做“宇宙线望远镜”。实验中望远镜指向东方，然后指向西方，并对两个倾斜中发现的计数进行比较。
- 罗西的实验证明，地球磁场会使传入的带电粒子阵雨发生弯曲



原初宇宙线的带电性：东西效应

- 由此，多位实验物理学家在不同地点多次进行了东西效应实验测量：
- 1930年罗西在佛罗伦萨（北纬43.7度）附近的Arcetri物理研究所做了实验，没有看到明显的东西效应
- Johnson和Street于1933年在华盛顿山上做了实验，坐标为 55° N，海拔1920m，发现东西分布基本对称。
- 1933年秋，罗西与Sergio Benedetti合作，在阿斯马拉附近的厄立特里亚，地磁纬度较低（北纬13度），海拔较高，为测量提供了很好的观测条件，这一次显示了很好的东西效应，**表明大部分宇宙射线是正的**。
- 1933年4月，Johnson利用莱迈特雷和瓦利亚塔的计算并根据Compton的强度测量估计赤道和 34° 之间的地磁纬度上可以检测到不对称性。
- 路易斯·阿尔瓦雷斯和康普顿也对莱迈特雷和瓦利亚塔的计算感兴趣，他们在墨西哥进行了一场测量运动，结果表明，在天顶角 30° 和 65° 之间的角度上，**西方强度大于东方强度** 在 45° 左右达到最大值。在赤道地区是最明显的¹⁵，海平面约为15%。在较高的海拔差异更大。较大纬度的不对称性降低，在 50° N，这只有2%或3%。他们的论文相继发表在同一期的“物理评论”中。



原初宇宙线的带电性：东西效应

- 在一固定天顶角下，不同方向测粒子通量，南面的通量等于北面，西面高于东面。东西效应可以用地磁截止动量随入射角的变化来解释。在赤道，东面来的粒子截止能量60GeV，西面是10GeV，东面来的宇宙线粒子能谱有比较大一部分被截断了。
- 东西不对称性定义为：
- θ 是天顶角， λ 是纬度， h 为高度
- $h_1 > h_2$ ，则 $\epsilon(h_2) > \epsilon(h_1)$
- $\lambda_2 > \lambda_1$ ，则 $\epsilon(\lambda_2) < \epsilon(\lambda_1)$
- $\theta_2 > \theta_1$ ，则 $\epsilon(\theta_2) > \epsilon(\theta_1)$
- 在大天顶角下（>60度），大气厚度增加，造成不对称的低能粒子被吸收，东西效应不存在了

$$\epsilon(\theta, \lambda, h) = \frac{l_w(\theta) - l_E(\theta)}{1/2[l_w(\theta) + l_E(\theta)]}$$

原初宇宙线的带电性：东西效应

实验测量东西效应

- **实验装置：校园宇宙线项目的缪子望远镜系统**
- **实验方法：分别转动望远镜轴分别东西方向偏某一固定天顶角（小于50度），分别测量事例率，计算东西计数率不对称性。**

$$\epsilon = \frac{R_W(\theta) - R_E(\theta)}{1/2[R_W(\theta) + R_E(\theta)]}$$

- **实验环境周围无建筑物遮挡；**
- **北京（北纬40度）进行了测量：**
两台探测器间距1米，望远镜轴分别向东和西偏30度；
每次测量事例数不小于1万，统计误差小于1%；
每个方向分别进行了两次测量

东：2.21±0.02 西：2.28±0.02

$$\epsilon = (3.2 \pm 1.4)\%$$



原初宇宙线的带电性：东西效应的实验拓展

- 不同的学校位于不同的纬度和海拔，同样的测量结果上传，可比较不同纬度和不同海拔的东西计数的不对称性；

可测量不同的天顶角，比较不对称性；

比较不同纬度的测量结果。

实验条件：

- (1) 实验环境周围无建筑物遮挡；
- (2) 每次测量事例数大于1万，可使统计误差 $<1\%$ 。
- (3) 可多次测量取平均值降低测量误差；
- (4) 信号脉冲幅值100mV左右（调整高压），电子学阈值设置在10-15mV，以保证较好的信噪比，和东西地磁场对探测器的影响。

小结

- 回顾了高中物理电荷在电磁场中运动知识及利用左手定则判断电荷在磁场中的受力情况，讲解了质谱仪的原理
- 讲解了几种测量宇宙线带电性的实验和原理：
 - 直接探测：空间探测器，高空气球
 - 间接探测：月影，东西效应
- 实验展示了东西效应的测量结果

中学园地

宇宙线电荷正负问题

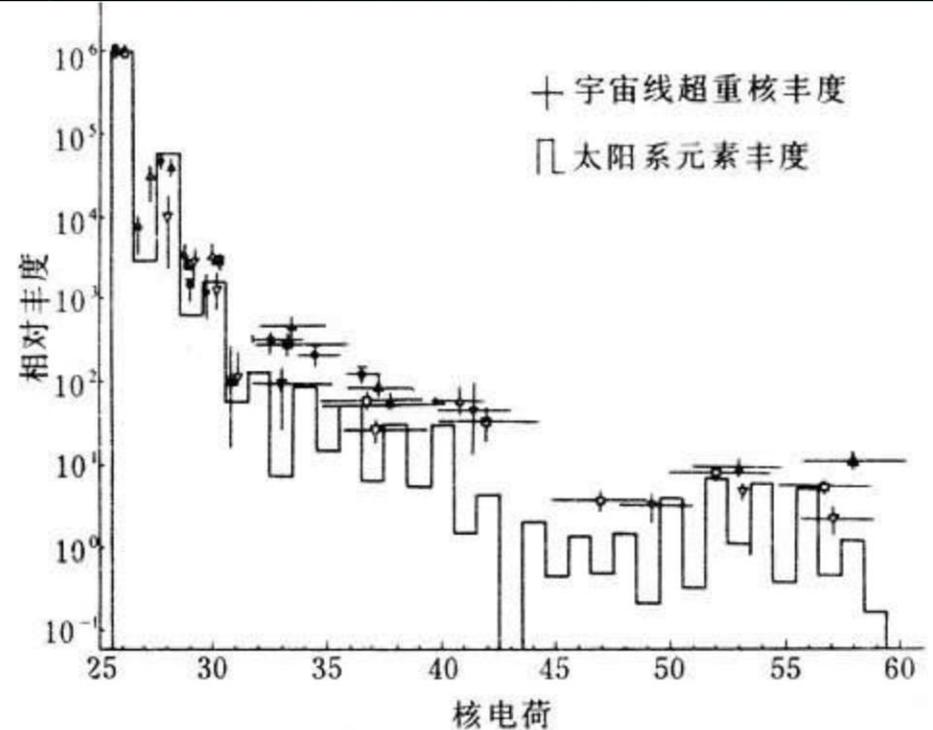
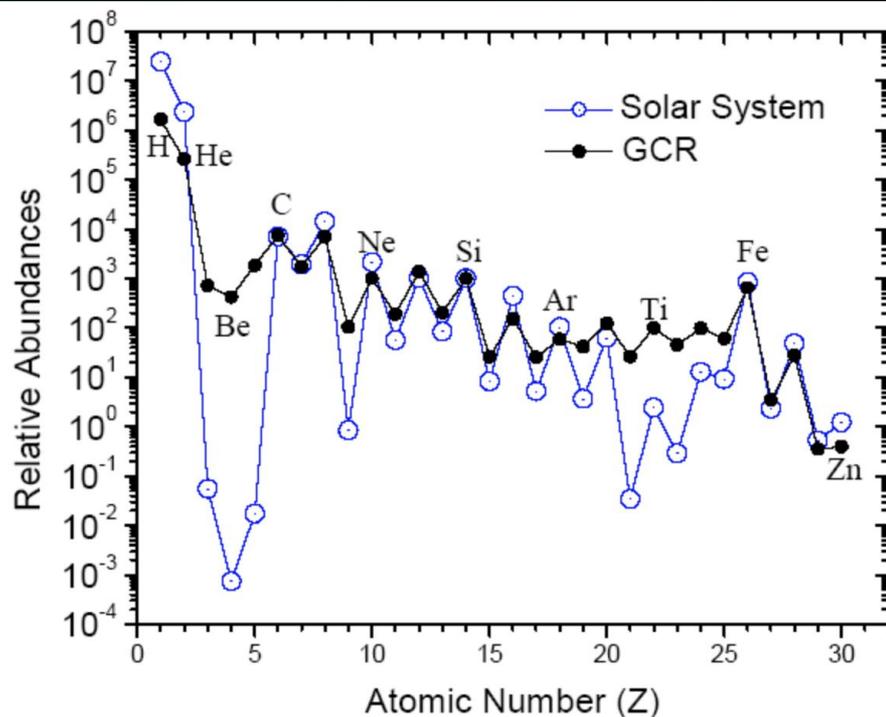
侯超 董绪强

(中国科学院高能物理研究所 100049)



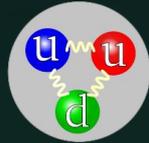
知识拓展

- 在大气层顶部，已测到宇宙线粒子中含量最多的是质子，其次是氦核，还有少量重核（比重大约9:1:0.1），这些原子核构成宇宙线的99%。另有约1%的电子， γ 和超高能中微子只占极小的一部分。
- 宇宙线的某些元素比太阳系的丰度高（Li、Be、B、Ti、V、Cr、Mn），它们可能是在宇宙线传播过程中由重核（C、O、Fe）与星际介质碰撞碎裂产生的



知识拓展

- 我们的物质世界是由基本粒子组成的。并非无限可分。
- 粒子物理标准模型：一共有61种基本粒子
- 粒子的基本粒子的组成决定了它是否带电，带多少电荷量
- 质子： uud ，电荷： $2 \times \frac{2}{3} - 1 \times \frac{1}{3} = 1$ ，因此质子带1个单位正电荷
- 中子： udd ，电荷： $\frac{2}{3} - 2 \times \frac{1}{3} = 0$ ，中子不带电
- 电子： e ，电荷： -1 ，电子带一个单位负电荷



	种类	世代	反粒子	色	总计
夸克	2	3	成对	3	36
轻子	2	3	成对	无色	12
胶子	1	1	自身	8	8
W粒子	1	1	成对	无色	2
Z粒子	1	1	自身	无色	1
光子	1	1	自身	无色	1
希格斯粒子	1	1	自身	无色	1
总计					61

课程总结

- **教学目标：认识宇宙线电荷的正负及成分**
- **知识目标：**
 1. **理解电场和磁场对带电粒子有力作用及其对运动状态的改变。**
 2. **会使用左手定则判断地球磁场对入射宇宙线洛伦兹力的方向。**
 3. **了解与宇宙线电荷正负有关的观测现象。**
- **德育目标：**
 1. **培养学生的科学思维能力，用科学的角度看物质世界；**
 2. **建立理论知识与实际观测现象的联系。**

