



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



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

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



创益家
HOME



国家高能物理科学数据中心
National HEP Data Center

宇宙线是从哪里来的？

——太阳是否为宇宙线源

中国科学院高能物理研究所
校园宇宙线观测联盟技术组
熊峥、南云程、武莎



课程介绍

□ 宇宙线是什么，如何被发现的？

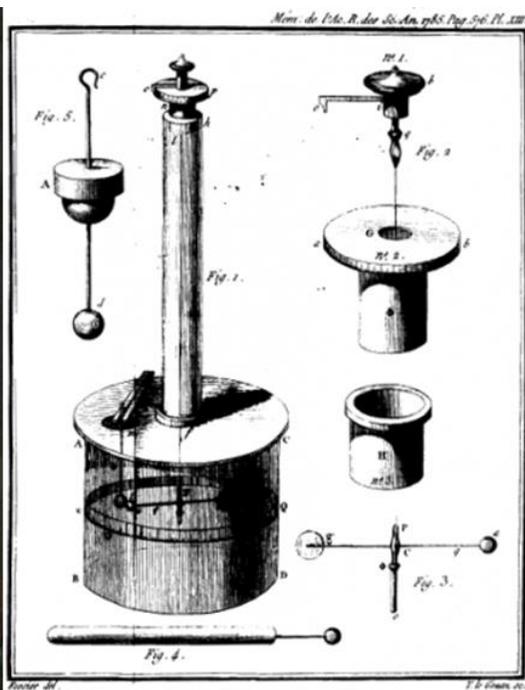
□ 宇宙线是从哪里来的？



这一切要从库伦发现扭称
会自发漏电开始说起！



我的扭称总是在漏电，为什么啊，先记录下来吧



库仑(C. A. de Coulomb, 1736-1806, 法国)和他基于验电器原理制作的扭力天平

通过改变小球的电荷量和悬丝扭转的距离，发现了库仑定律 $F \propto q_1q_2/r^2$

612 MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE ROYALE

TROISIÈME MÉMOIRE SUR L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME.

De la quantité d'Électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné, soit par le contact de l'air plus ou moins humide, soit le long des soutiens plus ou moins idio-électriques.

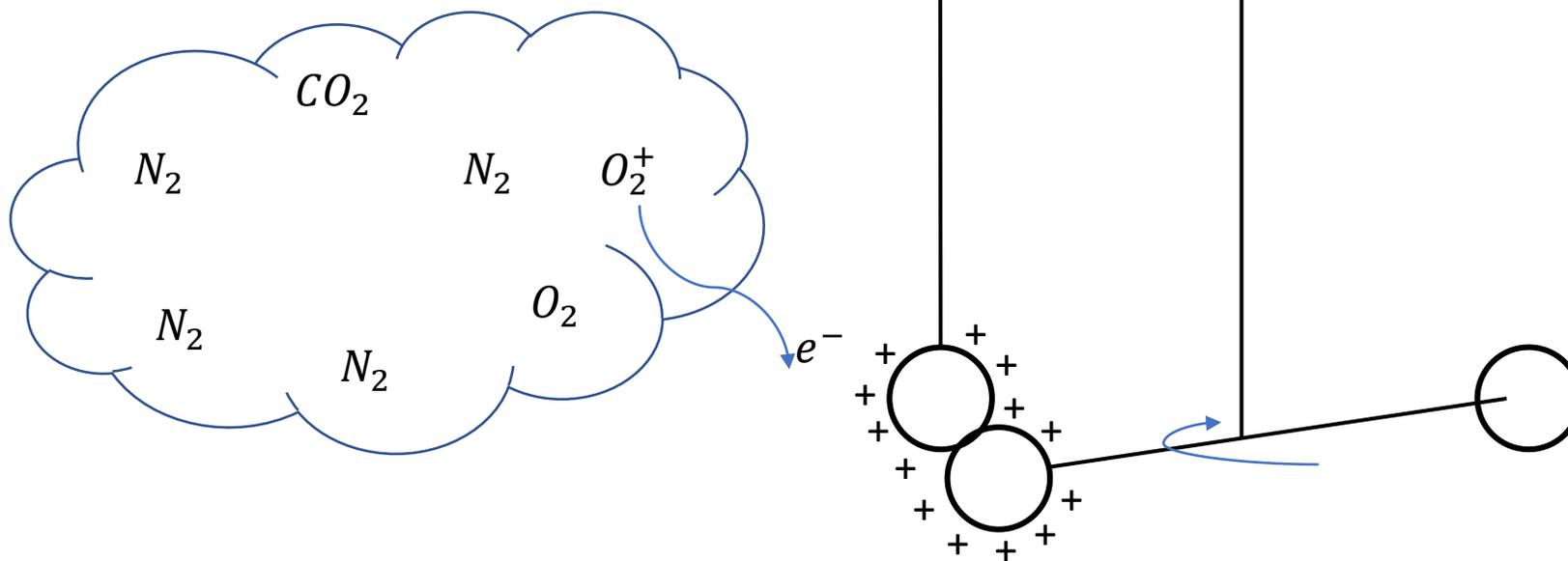
Par M. COULOMB.

1785年库仑提交给法国皇家科学院关于电与磁现象研究的报告中，记载了自己制作扭称的不能永久的保持电荷的情况。

他更换了更绝缘的材料但仍然会漏电，最后他认为是空气电离带走了小球上的电荷。

在库仑的理解中

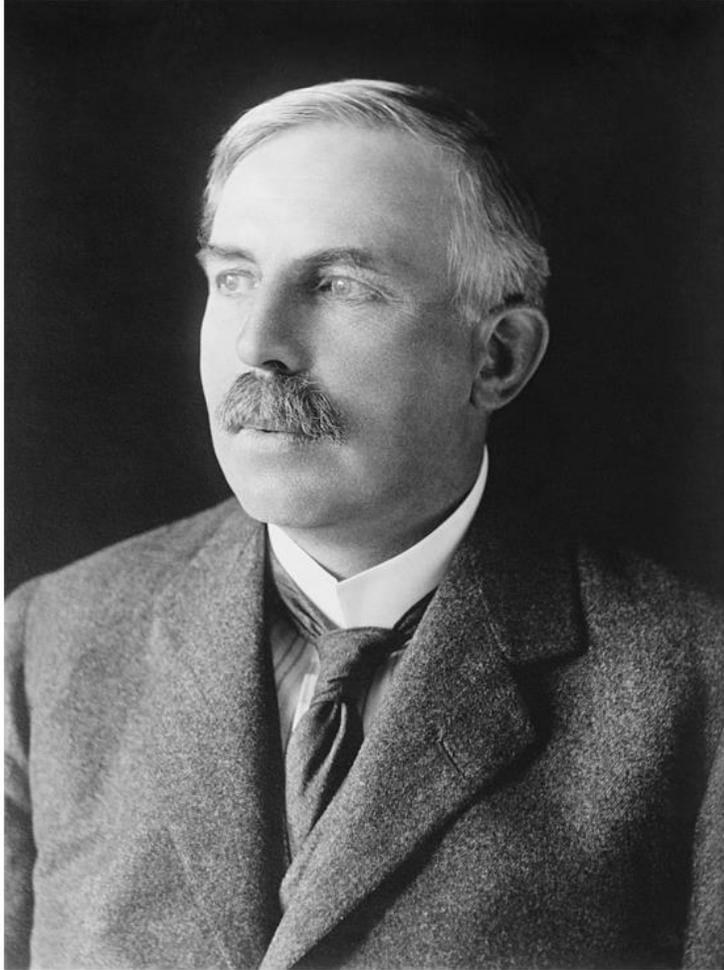
那么，空气为什么会电离？



相互排斥的小球由于带有相同电荷减少，悬丝仍提供之前的扭力，两球彼此靠近。

空气中电离出来的负电中和了小球上的电荷，让扭称漏电了。

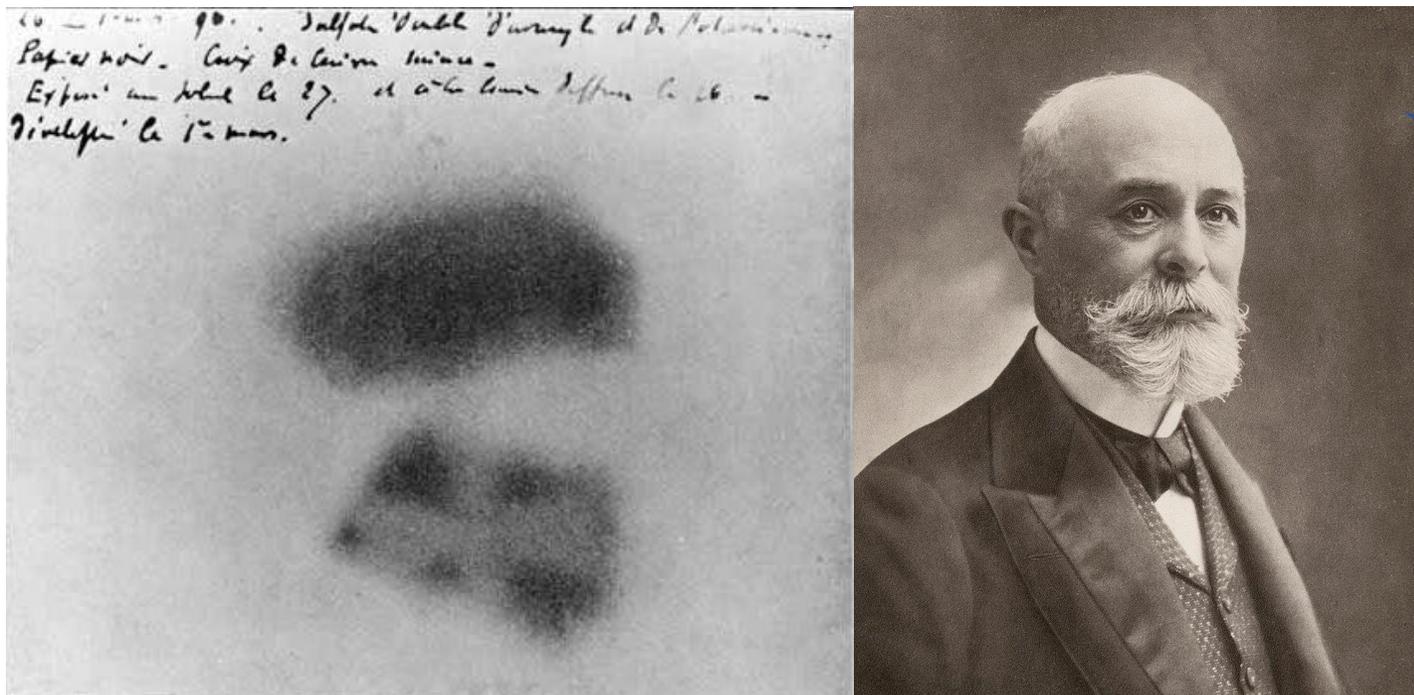
空气自发电离是**辐射**导致，但是辐射源在哪？



卢瑟福 (Ernest Rutherford, 1871-1937, 英国) 提出原子核模型

- 1903年卢瑟福发现暴露于X-ray气体中产生电离。因此他认为空气自发电离也是辐射导致。
- 他用铁和铅把验电器完全屏蔽起来，电离速率几乎可减少约三分之一，但验电器内部的空气还是会发生电离。
- 在论文中卢瑟福提出设想，也许有某种贯穿力极强的辐射从外面进入验电器，从而激发出二次放射性。

19和20世纪之交的人们对辐射和放射性还并不了解



我因为1896年发现了天然放射性，获得了Nobel Prize

贝克勒尔 (A. H. Becquerel, 1852-1908, 法国) 与他发现放射性的底片
贝克勒尔同时是居里夫人的博士生导师

天然放射性最早是在矿物铀盐发现的，当时人们也相信放射性是来自于地表和地下的矿物。

陆地有天然放射性矿物，这可能是空气电离的原因？

离辐射源越近，辐射
强度越大，空气电离
速率越快



验证“穿透辐射”是否来自于地面

支持穿透辐射来自地底!



沃尔夫(Theodor Wulf, 1868-1946, 法国)

在1910年，沃尔夫比较埃菲尔铁塔塔顶和地面两种情况下的电离强度的实验。

他发现电离现象随着高度增加变弱，在塔顶的辐射大约是地面的64%。

但是减弱的比例低于他的理论预期，没有完全确证他的假说。

建造埃菲尔铁塔采用的钢铁中含有放射性。



埃菲尔铁塔(高324m)



(Domenico Pacini, 1878-1934, 意大利) , 他用和沃尔夫类似设计的探测器在测量空气电离速率(摄于1910年10月20号)

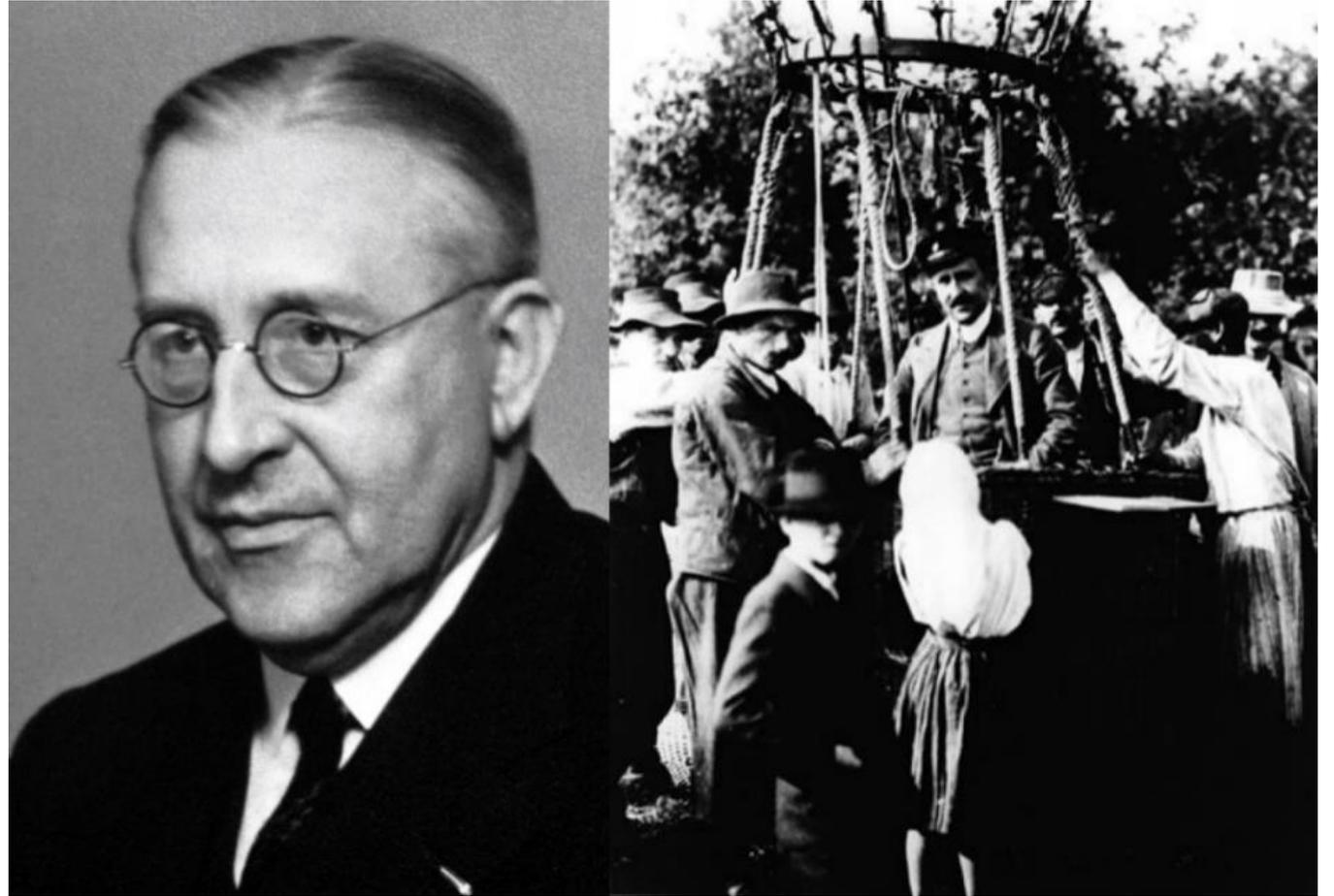
发现水下的电离率比水面处略低, 得出了与前人不同的结论。
即大气中存在一种与地壳中的放射性物质无关的穿透性辐射。

帕西尼在陆地上、海上和热那亚海湾 (Golfo di Genova) 的水下用验电器做电离速率的测量。

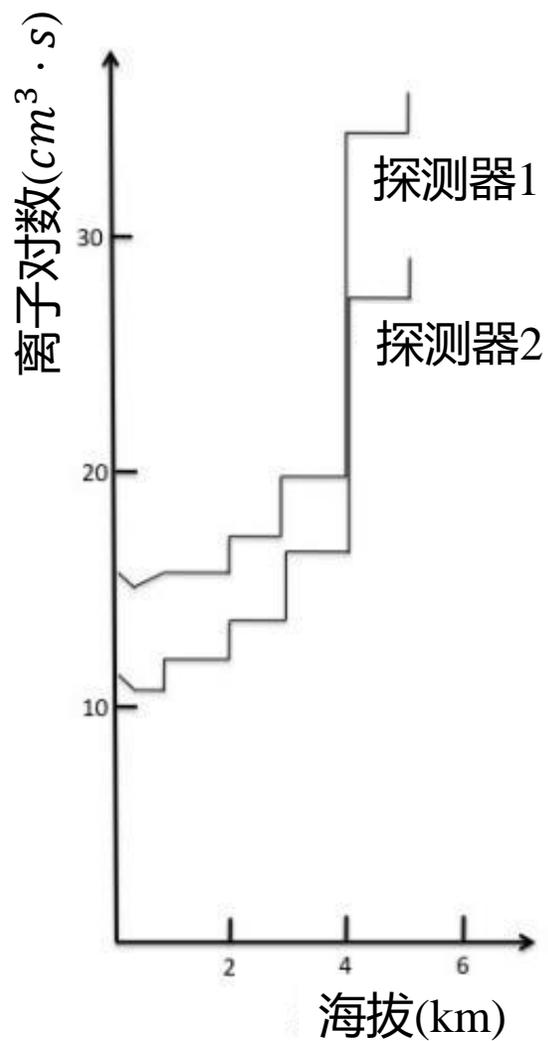


热那亚海湾(Golfo di Genova)

- ◆ 为了测量远离地球表面的电离辐射，一些研究人员在 20 世纪头十年乘坐气球飞行，进行高空的电离速率测量。
- ◆ 在1911至1913年期间，赫斯带着验电器一共飞行了10次，其中最高达到了5300m！



赫斯 (Victor F. Hess, 1883-1964, 奥地利), 气球飞行爱好者

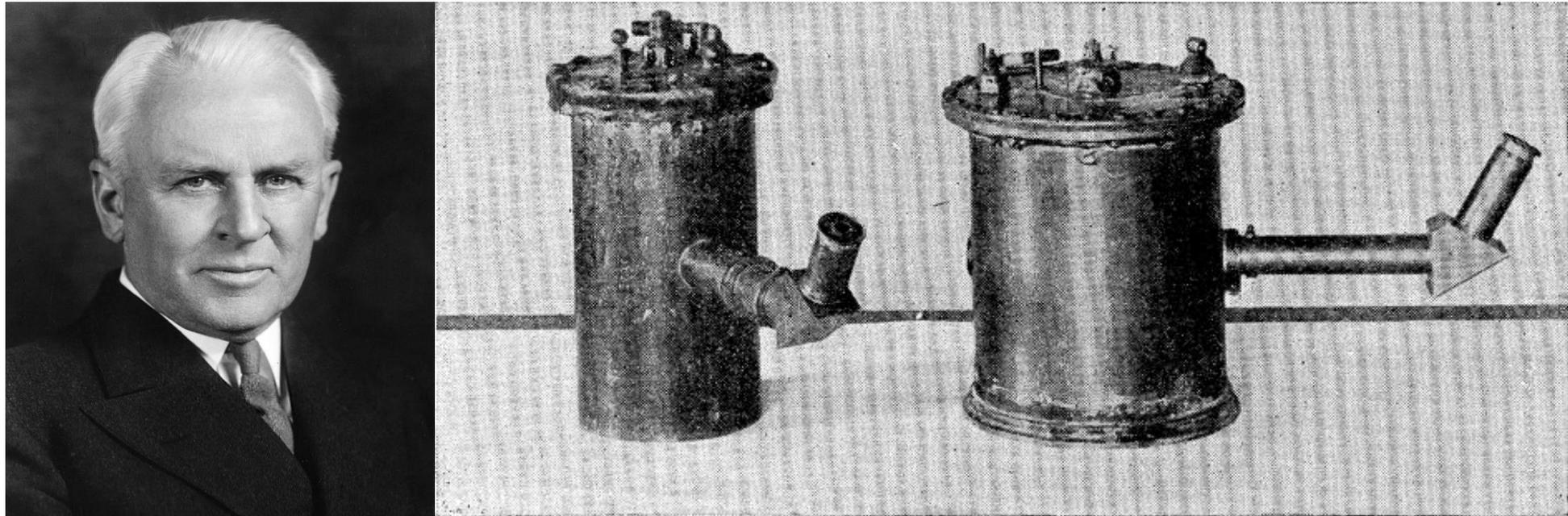


- 随着海拔的上升, 电离速率先缓缓的减少。
- 随后在海拔5300米处, 发现电离速率增加到海平面的三倍左右。

三年做了10次气球飞行, 证明了让空气电离的辐射源主要来自于宇宙。

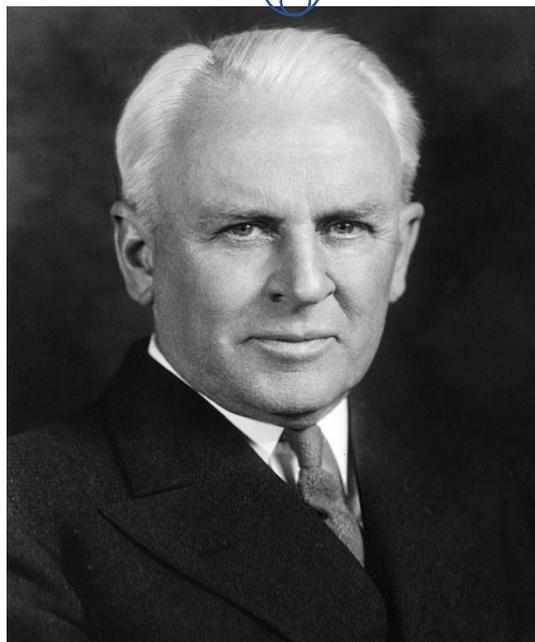


- 密立根把探测器放在无人操作的气球上，在1500米的高空测到的辐射强度不到赫斯测量结果的四分之一。密立根认为根本没有地球之外来的电离辐射。
- 随后的实验结果和分析实验细节表明，辐射量的差异是因为美国德州和中欧的地磁场差异引起的。



密立根(Robert A. Millikan, 1868-1953, 美国)和他用于测量电离速率的静电器

做科学嘛，最重要的是严谨



1926年，密立根在加利福尼亚州群山中的缪尔湖（Muir Lake，海拔3392m）和慈菇湖（Arrowhead Lake，海拔1577m）中做实验。

通过比较电离速率与湖水深度的关系发现，同样水深的情况下，探测器在缪尔湖测得的电离速率会快于慈菇湖。只有将缪尔湖的探测器再往深处下放2m，两者的电离速率才接近。

2m深度的水对辐射的屏蔽作用大概和1800m厚度的大气对辐射的屏蔽作用相当。

这一结果使密立根和更多的人信服了赫斯“辐射一定来自天上”的结论。

用距离(长度)单位来描述对辐射的屏蔽和吸收作用并不贴切。
可以用相互作用深度(*Interaction Depth, X*) $X = \rho \cdot r$

海平面大气密度 0.00125g/cm^3

水的密度 1g/cm^3

1m深的水和800m厚的海平面大气对辐射有相同的屏蔽作用！

密立根在他的一篇论文中创造了“宇宙射线” (cosmic ray) 一词，并认为宇宙射线是银河系中“原子诞生的初啼” (birth cries of atoms)。

时间线:

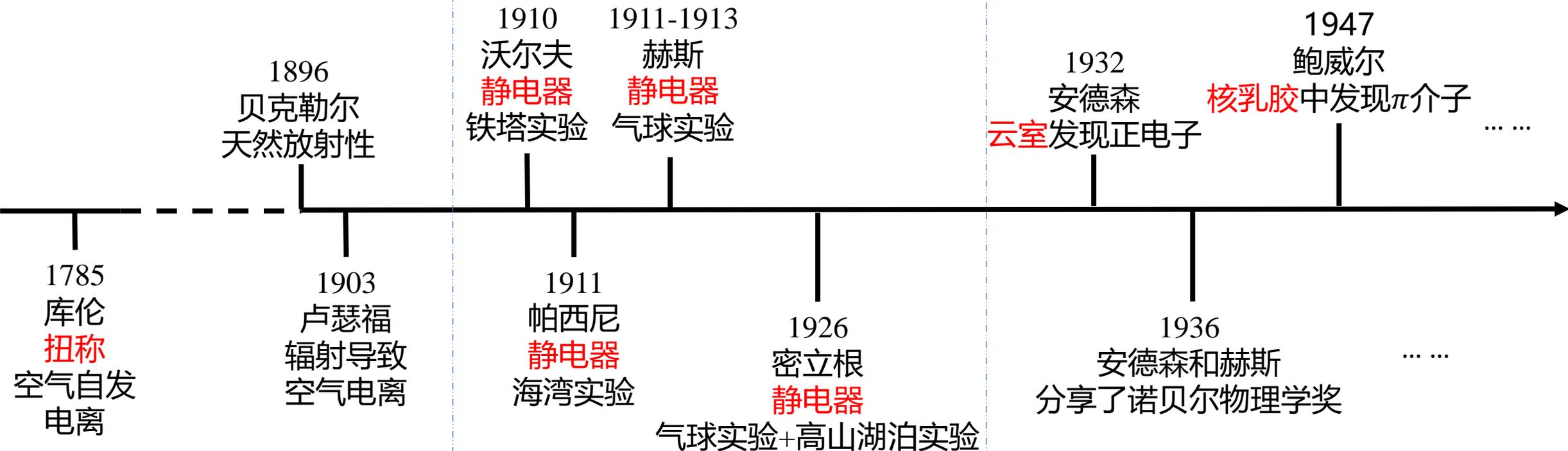
□ 确认空气电离来自于辐射

花了120年, 4~5代人的探索

□ 确认辐射来源来自于宇宙

花费了20年, 一代人的探索

□ 从宇宙线中发现新的粒子

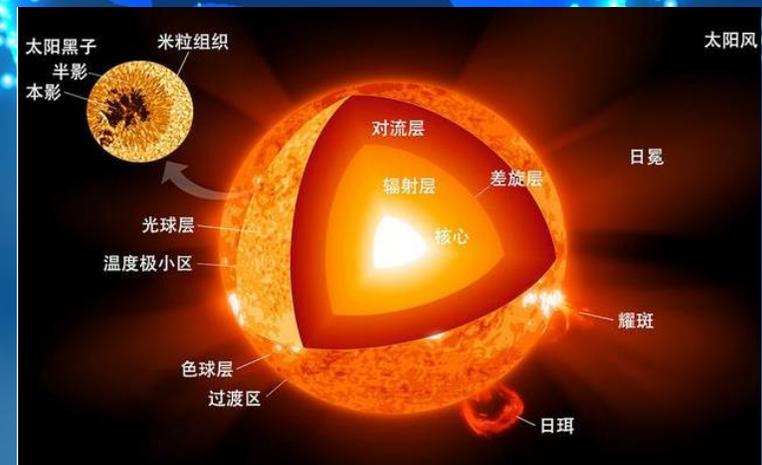


宇宙线从哪里来？



太阳-距离我们最近的恒星

- 太阳是太阳系的中心天体;
- 太阳质量:
大约是地球的33万倍, 占整个太阳系99.86%;
- 化学成分:
3/4质量为氢, 其余为氦、氧、碳等;
- 结构组成:
里三层: 日核、辐射区、对流区
外三层: 光球层、色球层、日冕层



“太阳辐射”-地球能量的主要来源

- **能量来源：**

在日核中发生质子-质子间聚变反应；

1s约有450万吨的物质释放出 10^{45} eV能量；

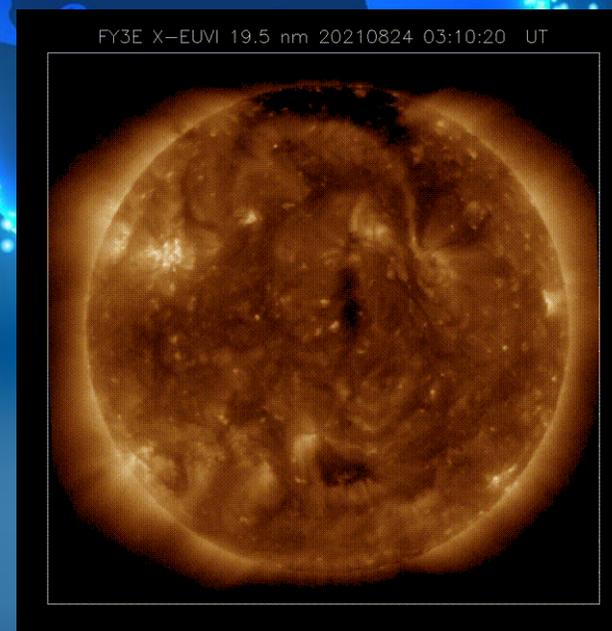
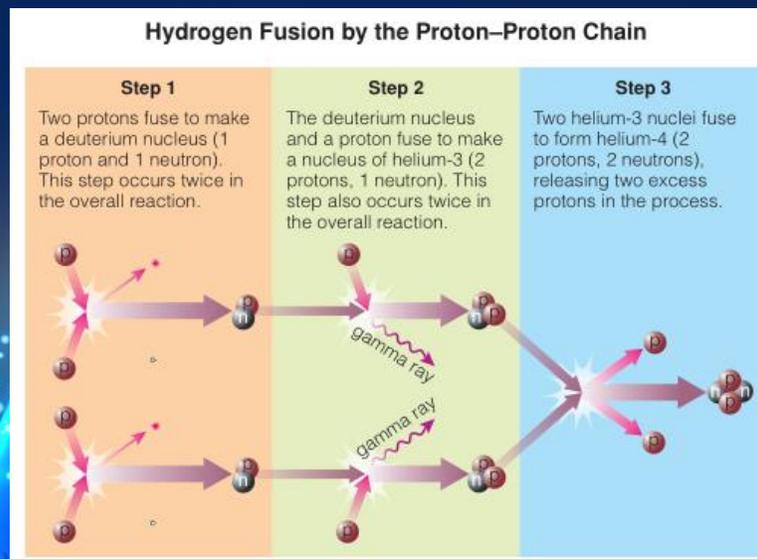
- **向外输送：**

依次经过太阳内部向外通过辐射输送出去。

- **观测：**

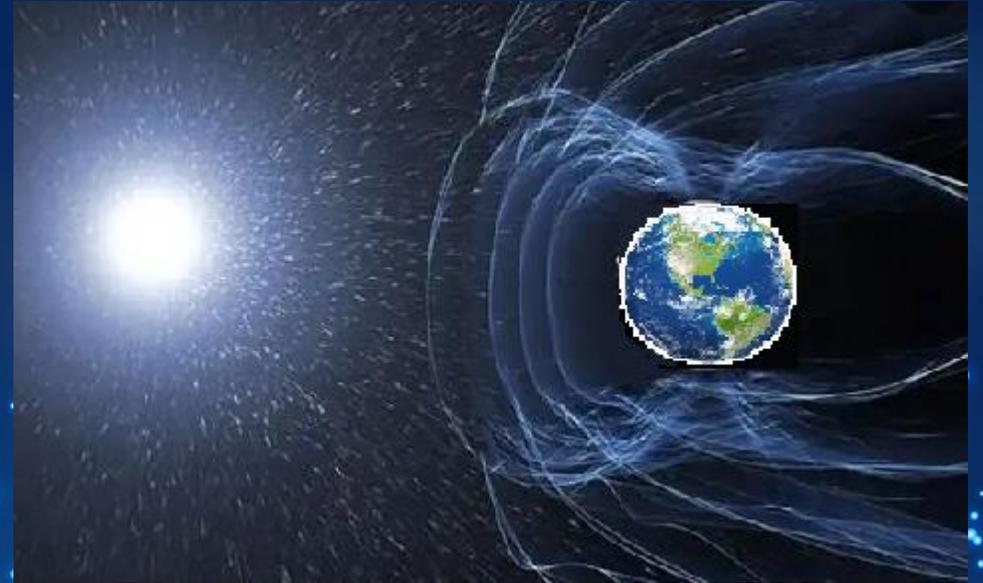
风云三号观测“极紫外”“X射线”

太阳最外层大气——日冕数天内的变化被精准捕捉，太阳活动区、冕洞等也清晰可见。



“太阳”-粒子发射器

- 太阳风：
从太阳上层大气射出的超声速等离子体带电粒子流。
- 质子：
1942年2月28日和3月7日福布什观测到来自于太阳的高能质子。



赫斯观测到的“辐射”来源于太阳么？

- 1911-1912。赫斯在白天和夜晚乘坐气球测量的空气电离，发现没有存在明显的差别。
- 1912年4月17日。赫斯在几近日全食期间将气球上升到1900-2750米的高空，发现此时空气电离并未减少。

他推断他观测到的这种辐射的主要来源不可能是太阳——它必须来自更远的宇宙。

思考：我们如何用校园宇宙线实验探索“太阳是否是宇宙线的起源”？



穿透性“辐射”起源于哪里？

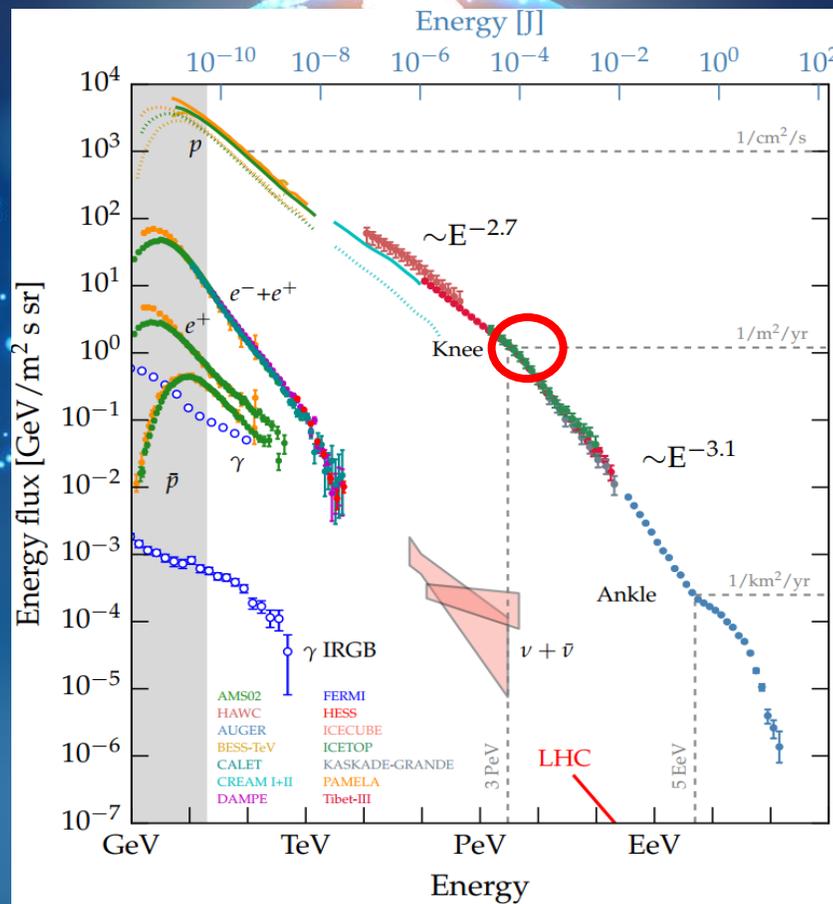
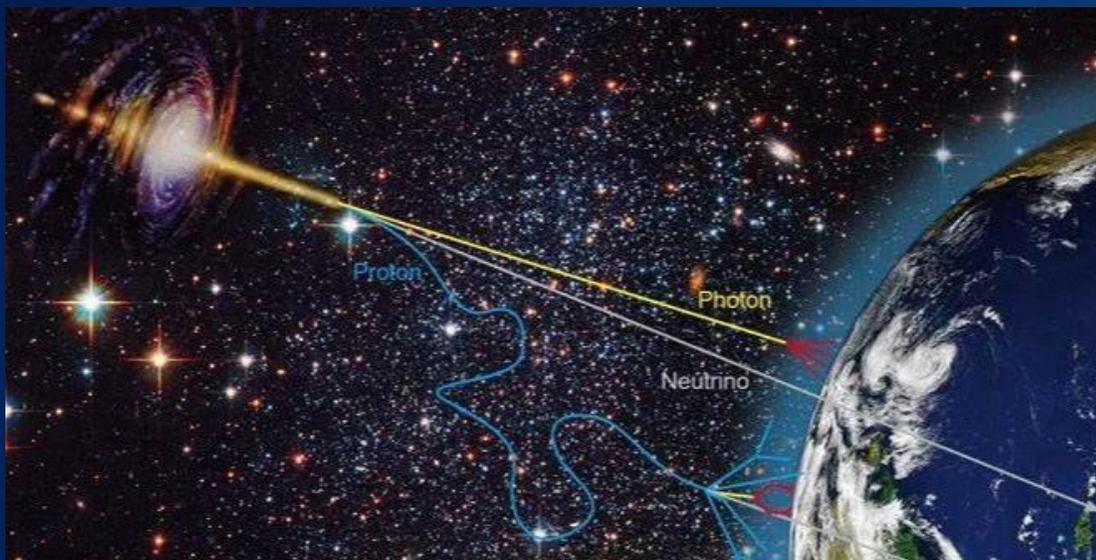
难在哪里？

宇宙线中绝大部分粒子是带电的原子核，只有少量的电子、光子和极难探测的巨大数量的中微子。

在宇宙空间的星际磁场中经过了漫长的传播过程，受到洛伦兹力的影响，它们在到达地球前就失去了原初方向信息。

如何做？ (1) 极高能宇宙线

$E > 10^{19} \text{eV}$ ，这些极高能的宇宙线非常少，在1平方千米的面积上100年才落下1个。

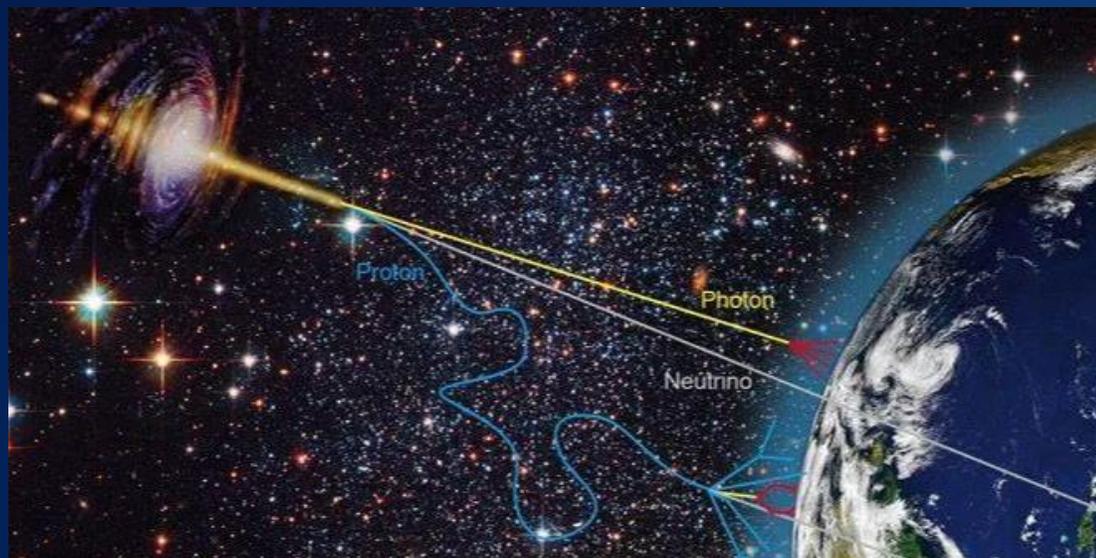


穿透性“辐射”起源于哪里？

难在哪里？

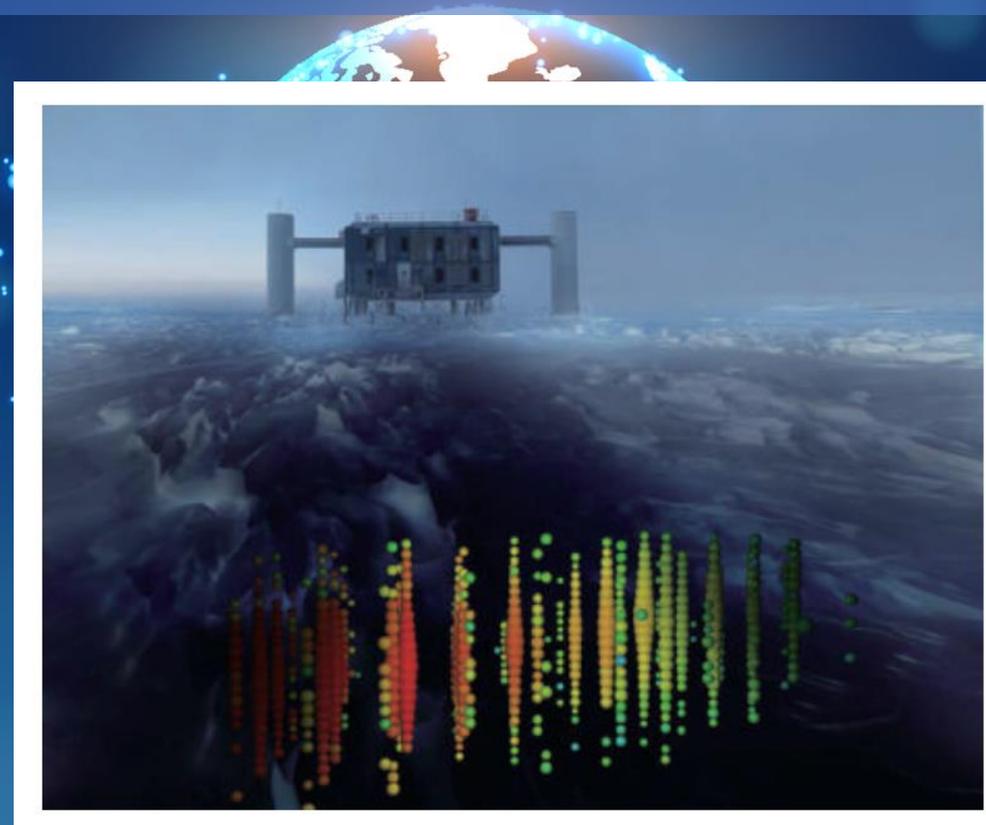
宇宙线中绝大部分粒子是带电的原子核，只有少量的电子、光子和极难探测的巨大数量的中微子。

在宇宙空间的星际磁场中经过了漫长的传播过程，受到洛伦兹力的影响，它们在到达地球前就失去了原初方向信息。



如何做？ (2) 中微子

中微子与其他物质发生相互作用的截面极小，不容易被探测到。



穿透性“辐射”起源于哪里？

难在哪里？

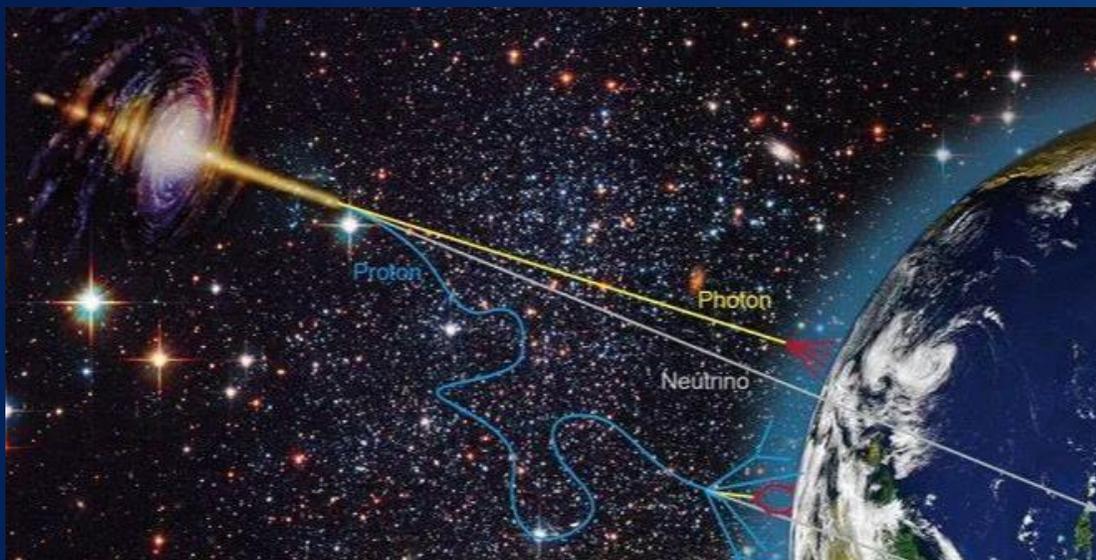
宇宙线中绝大部分粒子是带电的原子核，只有少量的电子、光子和极难探测的巨大数量的中微子。

在宇宙空间的星际磁场中经过了漫长的传播过程，受到洛伦兹力的影响，它们在到达地球前就失去了原初方向信息。

如何做？ (3) 伽马射线

随着空间和地面探测技术的发展，已经有5000多个GeV源，251个TeV伽马源被观测到和43个超高能伽马射线源。

然而高能伽马也可以由源区加速的高能电子产生，并不一定直接与宇宙线关联。



宇宙线候选源

脉冲星



双星系统



活动星系核



伽马射线暴



课程知识点

1. 了解宇宙线的发现过程，明确宇宙线的概念。
2. 太阳不是宇宙线的主要来源。
3. 宇宙线的起源问题仍然困扰着人类。
4. 掌握探究问题的方法：从调研出发，提出猜想，设计实验方案来论证猜想。

