

赵忠尧先生的发现和 丁肇中先生的实验

李祖豪 张 诚 孙泽同 整理

(中国科学院高能物理研究所 100049)

赵忠尧先生最早(1930年)在实验上观测到反物质的存在。1930年,赵忠尧先生在美国《物理评论》杂志上发表了《硬 γ 射线散射》的文章。这篇文章一个重要的结论是 γ 射线在通过重金属铅后会产生额外的散射光。

赵忠尧先生的这个发现预示了反物质的存在。 γ 射线在通过重金属铅后会产生额外的散射光是因为(图1): γ 射线在通过重金属铅后产生正负电子对——电子是物质,正电子是反物质;正电子与铅里面的电子湮灭产生的 γ 射线就是赵忠尧先生发现的“额外的散射光”。

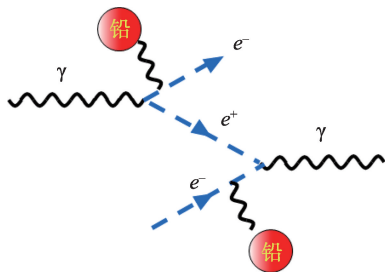


图1 光通过铅之后,产生正负电子对,其中的正电子又和电子湮灭变成光

赵忠尧先生的发现——光可以变成正负电子对,启发了丁肇中先生的一系列实验。

1. 测量电子半径

1948年,费曼(Feynman)、施温格(Schwinger)和朝永振一郎(Tomonaga)提出的量子电动力学理论(QED)被当时几乎所有的实验所证明,他们也因此获得了诺贝尔物理学奖。量子电动力学中认为电

子是没有体积的。

哈佛大学从事这种实验的专家和著名的教授们从1960年开始,经过若干年的研究,在1964年得到了电子是有体积的结论(电子的半径为 10^{-13} ~ 10^{-14} 厘米),如图2所示。这个结果得到了康奈尔大学团队独立测量结果的验证。这样的实验结果与量子电动力学理论中电子没有体积的假设不一致,他们的结果受到物理学界重视和广泛关注。

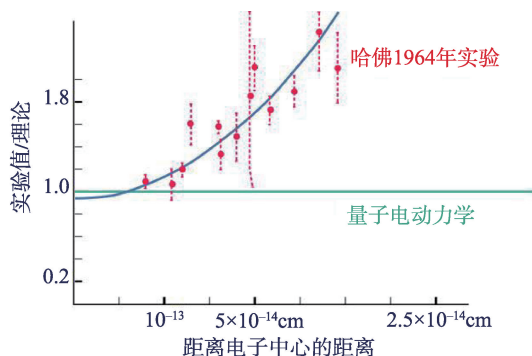


图2 哈佛大学测量电子半径实验的结果

电子是否有半径涉及现代物理学的基础,丁肇中先生决定用新的方法重做电子半径测量实验。1965年丁肇中先生到德国汉堡新建的60亿电子伏特电子加速器(DESY)去做这个实验。丁肇中先生根据赵忠尧先生光产生正负电子对的结论,在德国DESY每秒钟入射1000亿个60亿电子伏特的光子的加速器上,用如图3所示的大型粒子物理探测器进行电子半径测量的实验。

1966年,实验的8个月后,丁肇中先生的小组完成了实验,发现电子实际上没有可测量的尺寸,

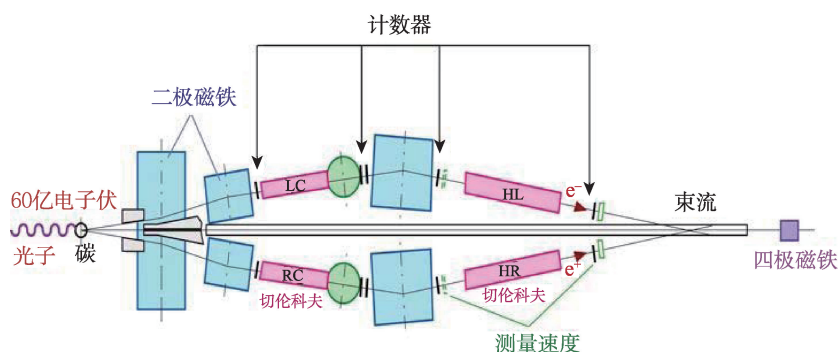


图3 DESY 电子半径测量实验装置图

半径小于实验的测量精度 10^{-14} 厘米,结果与量子电动力学理论预言完全一致,从而证明了量子电动力学是正确的(图4)。这个结果在1966年在伯克利的罗切斯特会议(现在国际高能物理会议的前身)上首次宣布。

2. 光子和重光子的一系列实验

重光子即有质量的光子,它与光子有着相同的量子数。重光子有 $\rho \rightarrow \pi\pi$ 共振态,有 $\omega \rightarrow \pi\pi\pi$ 共振态,有 $\Phi \rightarrow K^+K^-$ 共振态等。

光子和重光子的量子数相同,光子的质量为0,而重光子有质量。在高能时,由于 $E=mc^2$,重光子和光子之间应该可以相互转化(这里的 m 是指动质量)。由于共振态的不同,重光子 ρ 和 ω 衰变不会发生干涉,但 ρ 和 ω 都能变成光子,光子可以衰变成正负电子对,因此 ρ 和 ω 衰变能够产生 e^-e^+ 衰变干涉。

ρ 和 ω 转化的实验非常困难,因为实验需要 e^-e^+ 和 $\pi\pi$ 的粒子分辨能力达到一亿分之一以上,所以之前的实验都没有找到过 ρ 和 ω 的转化。

丁肇中先生设计了一个新的探测器来做 ρ 和 ω 转化的实验,实验结果(图5)与 ρ 和 ω 可以互相转化的预测相符,而不符合无相互转化的预测,从而证明 ρ 和 ω 可以相互转化的理论。

同时丁肇中先生的实验还观察到传统理论认为不可能存在的 $\omega \rightarrow \pi\pi$ 衰变。重光子 ρ 是 $\pi\pi$ 共振态, ω 是 $\pi\pi\pi$ 共振态,因此重光子 ρ 和 ω 衰减不会发生干涉;但 ω 可以转化为光子,光子再转化成 ρ , ρ 再衰变为 $\pi\pi$,因此 $\omega \rightarrow \pi\pi$ 衰变是可能存在的。

当时有很多人讨论这个问题,包括获得诺贝尔奖的 Glashow 和 Steinberger,这是一个很重要的物理现象,但在此之前很多人进行过寻找但都没有发现。丁肇中先生的团队首次发现这种现象,并且用氢靶、碳靶和铅靶,所得到的结果都测量到 $\omega \rightarrow \pi\pi$ 衰变,证明只有 $\rho \rightarrow \pi\pi$ 衰变的理论是不正确的。

3. J 粒子实验

上述的一系列实验都表明光子和重光子有相似性质,并且它们之间可以相互转化。在当时就有

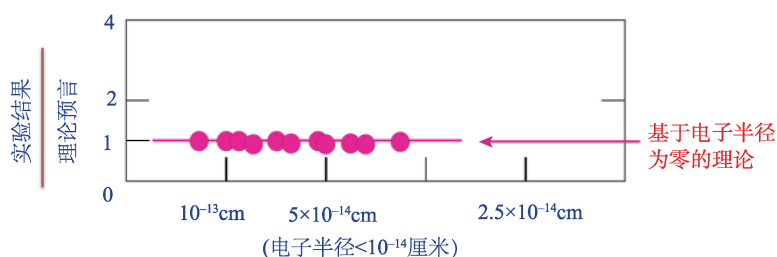
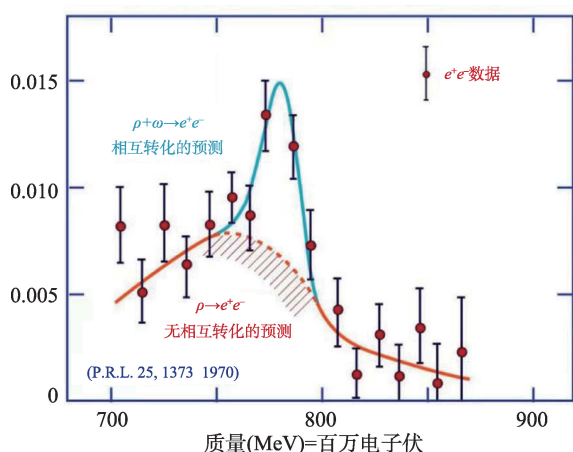


图4 DESY 电子半径测量结果

图5 重光子 ρ 和 ω 之间相互转化的实验

这样一个问题:为什么所有的重光子的质量都与质子的质量相近(10亿电子伏特)?

丁肇中先生设计了一个当时最精密的探测器,决定到质子加速器上寻找更重的重光子。这个实验在美国的布鲁克海文实验室实施(图6)。

J粒子实验设计要求从100亿个已知粒子中找到一个新粒子转化为正负电子对的事例。这个前所未有的精度,要求探测器必须每秒至少100亿个高能量的质子打到探测器上,同时需要达到100万分之一的精度来排除 $\pi^+\pi^-$ 本底;这么多的质子输入探测器所产生的放射线会彻底破坏探测器,对工作人员也是非常危险,所以必须发展全新的、非常精确的,

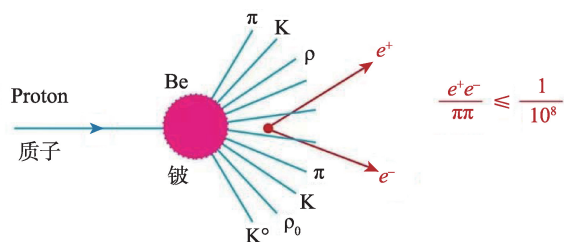


图6 新粒子寻找原理图

在非常强的放射线下也能正常工作的探测器。

如图7为J粒子实验的最终实验布置: M_0, M_1 , 和 M_2 是偶极磁铁; A_0, A, B , 和 C 是多丝正比室; a 和 b 分别是 8×8 的径迹室; S 表示三排铅玻璃和簇射计数器; C_B, C_0 , 和 C_c 是气体切伦科夫计数器。探测器可以独立测量动量 p 和角度 θ 从而可以得到最佳的质量分辨率。

实验的屏蔽装置由高密度的5吨铀,100吨铅来屏蔽 γ, e, μ , 10000吨水泥来屏蔽 P, K, π 粒子,软中子被放在各个方向的5吨肥皂截获。

在J粒子实验装置研制中,研发了很多的新仪器,包括特别精密的多丝正比室(现在展出于美国华盛顿的国家科技馆)。

1974年丁肇中先生的实验组发现了J粒子,它具有奇异的特性:它的寿命是已知的其他共振态粒子的一万倍,这类类似于在地球的一个偏远地区突然

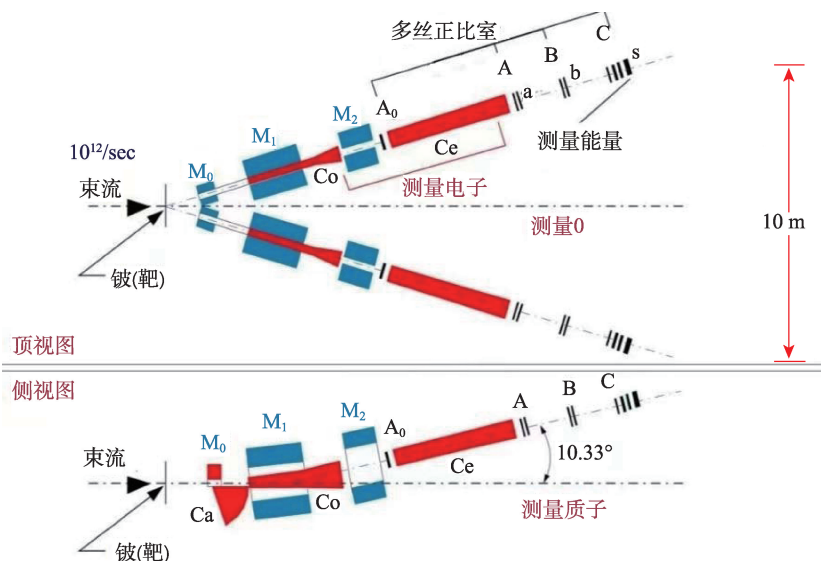


图7 J粒子实验装置图

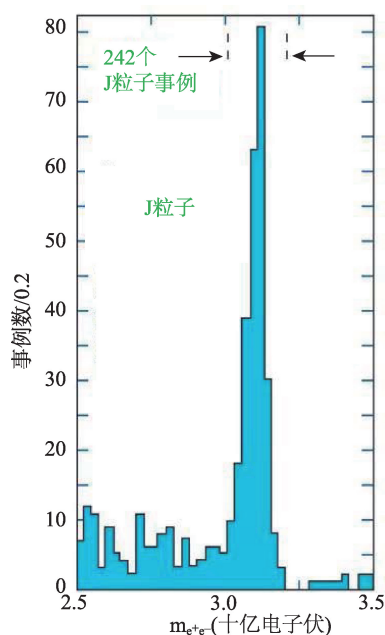


图8 J粒子质量分布

发现了一个村庄,在那里,人们的寿命都是一百万岁左右,这就表示这个村子里的人和普通人是完全不一样的;这种新粒子的发现,证明了宇宙中有新的物质存在,它们是由新的夸克组成的,丁肇中先生实验组把它命名为J粒子(图8)。

J粒子的发现,改变了物理学界当时长期认为的世界上只有三种夸克的观念,改变了我们对于物质基本结构的认识,丁肇中先生也因此获得1976年的诺贝尔物理学奖。继J粒子之后,新的粒子又陆续被人们找到,现在我们已经知道,至少存在六种不同的夸克(u, d, s, c, b, t)。

4. Mark-J 实验

20世纪70年代,丁肇中先生在德国PETRA的300亿电子伏特对撞机上,继续之前光变成正负电子的实验而发展出Mark-J实验,主要研究正负电子对撞后,到底有什么现象,最后Mark-J实验发现了胶子。

“文革”后,1977年8月,邓小平建议每年派10位科学家参加丁肇中先生的工作,从那时起到现在,许多中国科学家参加丁肇中先生的团队,做出了世界公认贡献。图9为赵忠尧先生及科学院领



图9 赵忠尧先生及中国科学院领导访问Mark-J实验

导访问Mark-J实验时的合影。

宇宙中有四种力。一种是引力,引力的来源和传输我们并不了解;电磁力由光传输;弱相互作用力由 Z^0 、 $W^\pm$ 传输;强相互作用力由胶子传输。

胶子的发现是物理学的重大进展。1979年9月2日美国《纽约时报》报道了丁肇中先生团队发现胶子的新闻,中间有一段特别指出,27名中国科学家参加了这次试验,在有关高能物理的国际合作研究史上,这是中国第一次的突出贡献。当年的《人民日报》也报道了丁肇中先生领导的实验小组发现胶子的新闻。

5. L3 实验

在寻找宇宙中的基本粒子的道路上有很多需要回答的基本问题:有多少种电子、夸克?电子、夸克的大小是多少?电子和夸克能被分解成更小的粒子吗?为了探索这些基本问题,继续以前光变成正负电子的实验,丁肇中先生在欧洲核子中心CERN的正负电子对撞机LEP(1000亿电子伏特的正电子和1000亿电子伏特的电子对撞)上进行了L3实验(图10、图11)。对撞时的温度是太阳表面温度的4000亿倍,也是宇宙诞生最初(1000亿亿分之一秒时)的温度。这是首次美国、前苏联、中国、欧洲各地19个国家和600名科学家共同参加的大型国际合作。

L3实验的磁铁重1万吨,探测器中有300吨铀,



图10 《人民日报》报道丁肇中团队发现胶子的消息

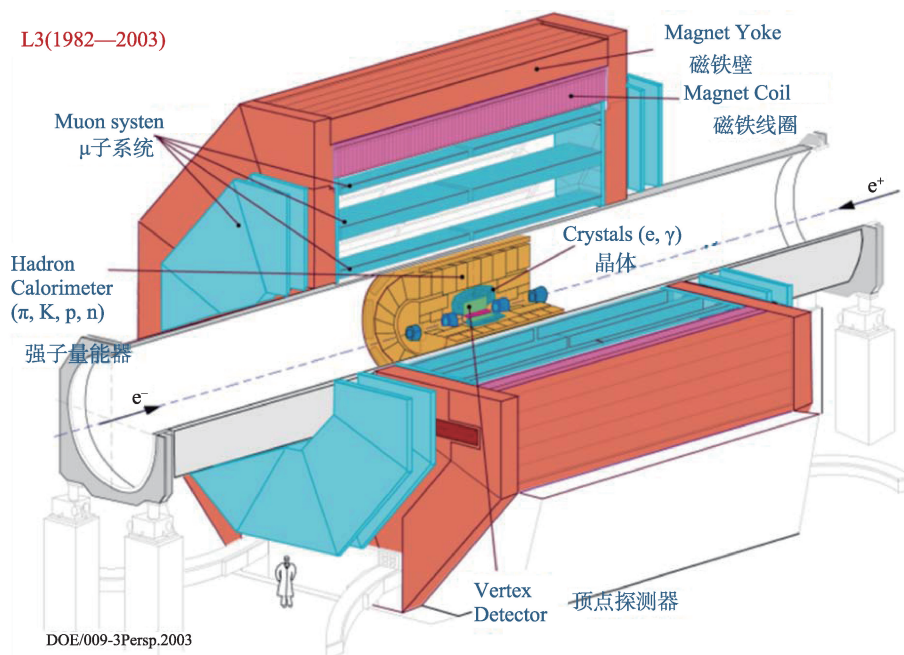


图11 L3实验装置图

这些铀都是由前苏联制造提供的。中国的主要贡献包括精密仪器——上海的硅酸盐所研发的BGO晶体。BGO晶体是透明的,其密度与钢相同,当时全世界的BGO年产量只有4公斤,而上海硅酸盐研究所在三年内为L3实验生产了所需的12吨BGO晶体(图2)。现在,BGO晶体被广泛应用于工业和医学领域。

在L3实验的数据分析中,多位中国科学家包括

陈和生院士和王贻芳院士做出了非常重要的贡献。

L3实验发表了300多篇文章,培养了300多博士。L3实验的主要结果可以总结为以下四点:第一,宇宙中只有3种不同的电子(e , μ , τ)及其对应的中微子和6种不同的夸克(u , d , s , c , b , t);第二,电子是没有体积的,电子半径小于 10^{-17} 厘米;第三,夸克也是没有体积的,夸克的半径小于 10^{-17} 厘米;第四,所有的结果都与电弱理论相符合。

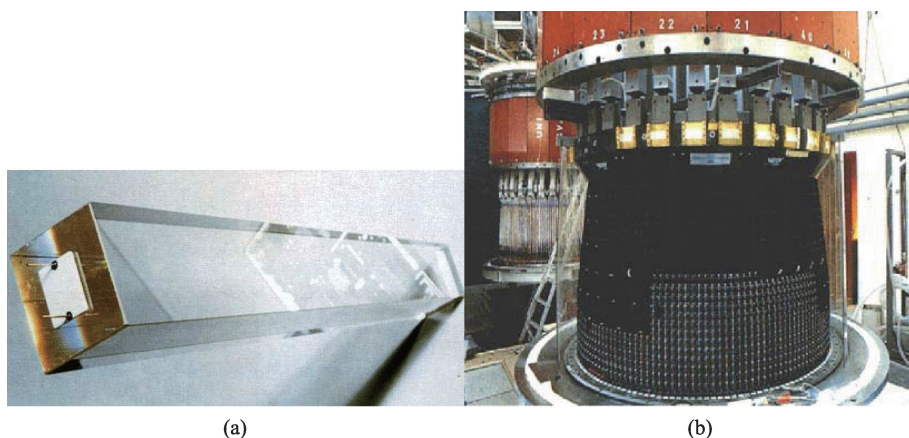


图12 (a)L3实验的BGO晶体;(b)L3实验的BGO晶体,共计12000条,12吨

6. 阿尔法磁谱仪(AMS)实验

国际空间站上的阿尔法磁谱仪AMS,其主要的科学目标之一就是寻找宇宙中高能量正电子的来源。此外,AMS的主要科学目标还包括寻找宇宙中的原初反物质以及探索宇宙线的起源加速和传播机制。AMS实验也是由丁肇中先生领导的大型国际合作项目,由来自16个国家和地区的600多位科学家组成。探测器于2011年5月16日搭乘“奋进

号”航天飞机发射升空,于3天之后安装在国际空间站并开始持续运行取数,至今已收集了超过2100亿宇宙线事例,并将持续运行到国际空间站使命结束(不早于2030年)。

AMS是当今唯一长期在外太空运行的大型精密粒子物理磁谱仪(图13),具有接收度大、曝光时间长、测量精度高等特点,能够精确测量从GeV到TeV能段的宇宙线成分与能谱。

根据现有的了解,宇宙中正电子来源有三种

AMS-02: 唯一的太空TeV精密磁谱仪

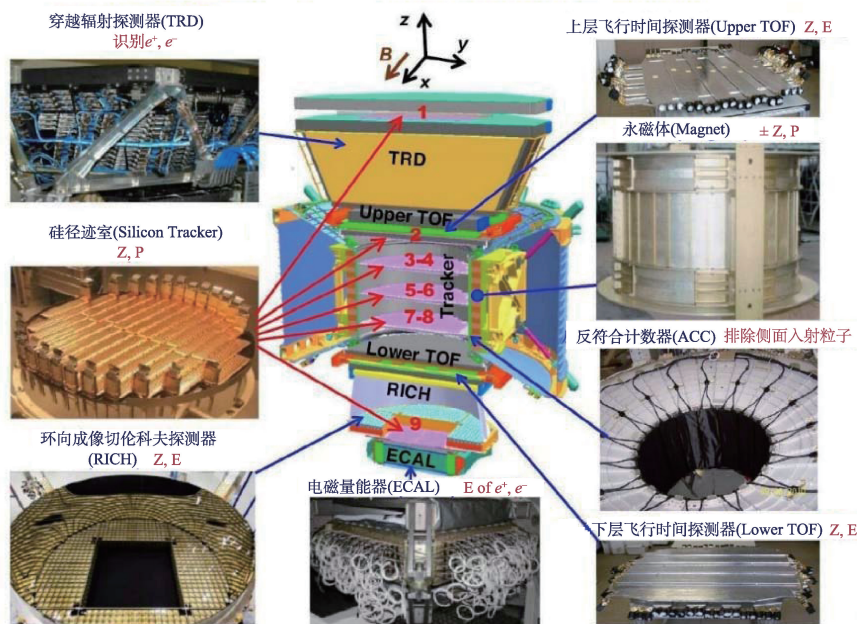


图13 AMS探测器

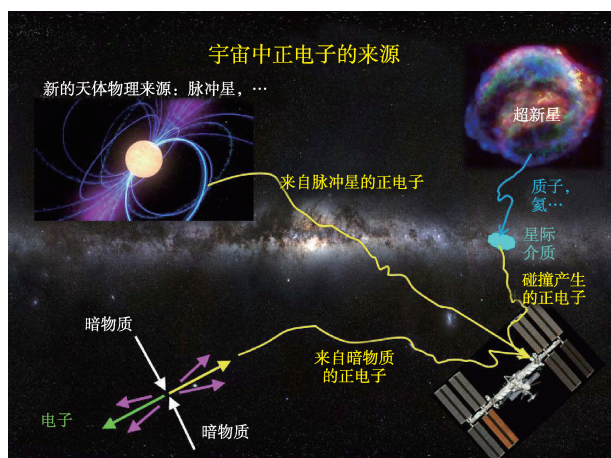


图14 宇宙中正电子的来源

(图14)。第一,宇宙线和星际物质碰撞而产生的正电子;第二,新的天体源如脉冲星产生的正电子(但由于反质子的质量很大,脉冲星是不产生反质子的);第三,暗物质与暗物质碰撞湮灭,产生正电子。

AMS实验利用10年运行收集到的340万从低能端到1.4万亿电子伏特的正电子事例得到的宇宙线正电子能谱如图15所示,在较低能部分与宇宙线碰撞理论符合得很好;而高能量的正电子则远超宇宙线碰撞的预期,并且带截止能量,预示其来自于“源”,可能是脉冲星或者暗物质。

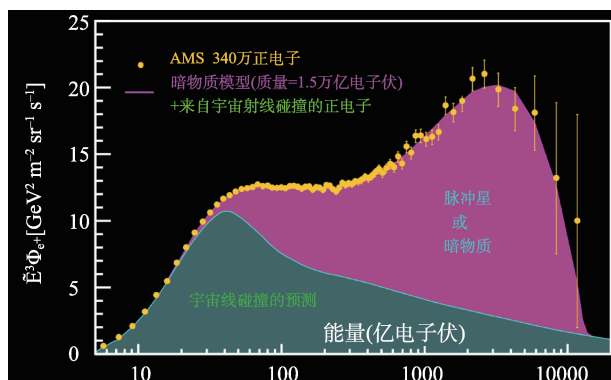


图15 AMS最新测量的宇宙线正电子流强谱结果

反质子是不能由脉冲星产生(因为正反质子质量大,脉冲星的伽玛产生的正反质子对的可能性很小)。而AMS的实验结果首次发现高能反质子与正

电子的能谱具有着相似的能谱形状(如图16所示),预示着二者可能有相同的来源,而脉冲星不能够产生反质子,这一结果预示高能正电子不是由脉冲星产生。

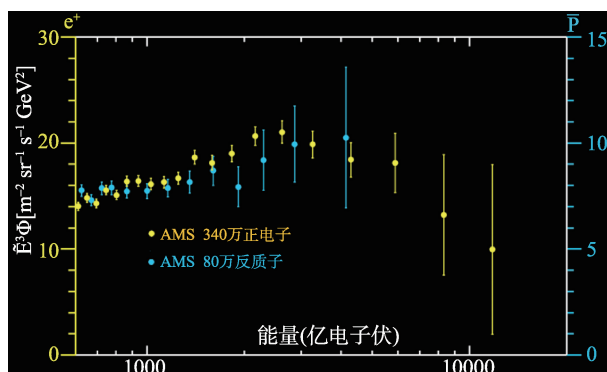


图16 AMS正电子流强谱与反质子流强谱的比较图

AMS实验已经对电荷为1到14的质子到硅,以及电荷等于26的铁的宇宙线原子核能谱做了精确测量,得到了一系列意料之外的结果,为宇宙线起源加速和传播机制的研究提供了重要的实验依据;AMS实验还发现了几个宇宙线反氦原子核候选事例,如果确认其来自于原初宇宙线,将为解答“反物质缺失之谜”提供重要的实验依据。

宇宙是最广阔的实验室,AMS得到的实验结果与先前的宇宙线理论并不一致,说明了对宇宙的认识十分有限。AMS将在国际空间站上持续运行至2030年,届时收集的更多的宇宙线数据,将拓展,甚至改变我们对宇宙的理解。AMS最重要的目标是探索未知,寻找我们从未想过或发现过的自然现象。

千里之行,始于足下。赵忠尧先生的工作,启发了丁肇中先生的实验。

注:本文根据丁肇中先生在“赵忠尧先生诞辰120周年学术研讨会”上的报告《赵忠尧院士的工作改变了我的实验》整理。