

编者按:2019年11月7日,著名的美籍华人物理学家、中科院外籍院士、诺贝尔物理学奖获得者丁肇中先生在中国科学院前沿科学国际战略研讨会上,做了题为“与中国科学家合作四十年的物理学研究成果”的大会特邀报告。为了表达对中国文化的热爱之情,丁先生专门将原来的英文版本逐字逐句地改成中文版本,用中文做报告,并与听众分享了他1976年在诺贝尔物理学奖颁奖仪式上用中文演讲的经历,赢得了参会者的热烈欢迎。在报告后的座谈中,丁先生欣然应约以这个题目为《现代物理知识》写一篇文章。以下文章由参与合作的童国梁和李祖豪两位中国科学家根据丁先生报告整理而成,以飨读者。

与中国科学家合作的40年

丁肇中

(美国麻省理工学院)

实验是自然科学的基础,理论如果没有实验的证明,就没有意义。当实验推翻了理论以后,才可能得到新的理论。而理论是不可能推翻实验的。过去400年,我们对物质基本结构的了解,大都来自于实验物理。公元1612年,世界上第一个加速器,就是比萨斜塔。伽利略在上面证明了不同重量的东西同时落地。那个加速器能量非常低(0.0001 eV),可是为人类做出了最重要的贡献,至今也仍然存在。现在世界上最先进的加速器,是周长27千米的欧洲核子中心的加速器,能量非常高($1.4\times 10^{13}\text{ eV}$)。这个加速器的重要“发明”之一,就是现在的互联网。

1. 与中国科学家40年合作的第一个成果:发现胶子

经过四百多年的努力,我们对物质的结构有了



图1 比萨斜塔和CERN(瑞士法国边境)的大型强子对撞机

基本的了解:原子的外层是电子,里面是原子核。原子核里面是核子,核子里面是夸克,把夸克“绑”在一起的是胶子。这是我们得到的宇宙物质结构的最基本图像。

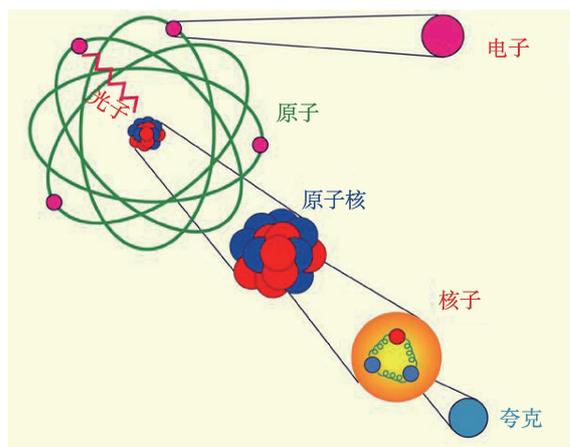


图2 宇宙物质及其相互作用的基本图像

文革后,1977年8月,邓小平主席建议每年派10位科学家参加我的实验。从那时至今,许多中国科学家参加我的团队,并做出了世界公认贡献。1978年第一批中国科学家由唐孝威院士带队参加了在德国正负电子对撞机PETRA的MARK-J实验的工作,从此开始了中国科学家和我长达四十多年的持续合作。



图3 1978年由唐孝威院士(右1)带队参加汉堡PETRA的Mark J实验合作研究的十名中国科学家,这是“文革后”中国首次派出参加国际合作研究的科学家

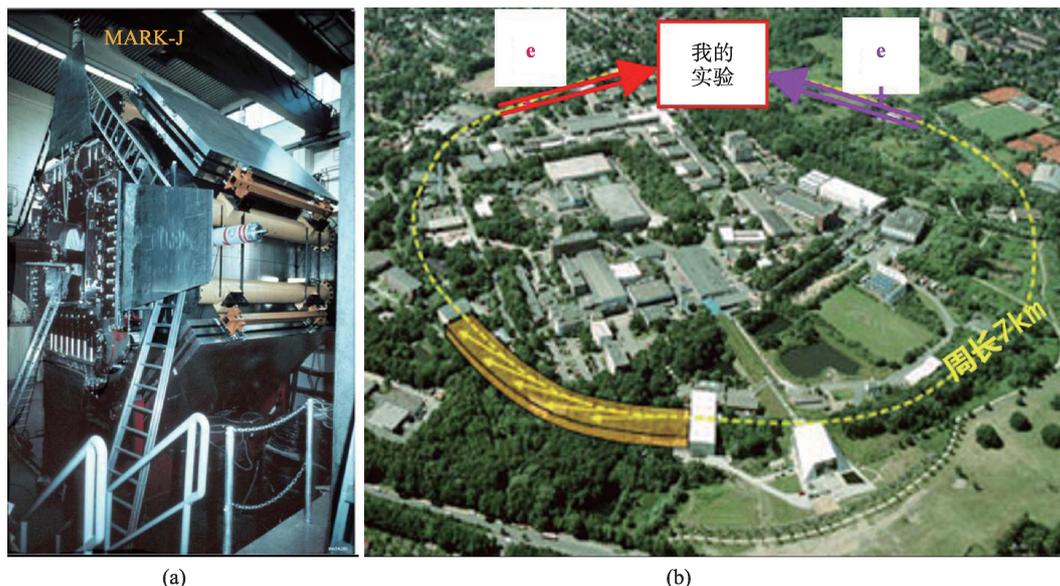


图4 (a)Mark J实验装置;(b)汉堡的PETRA正负电子对撞机,图上标出了Mark J实验在PETRA对撞机上的位置

在20世纪70年代,世界上最大的加速器,是在德国汉堡名为PETRA的300亿电子伏特的正负电子对撞机。Mark J实验目的是探测电子的半径。

在MARK-J实验中,发现了强相互作用媒介“胶子”。当能量很高的正电子和负电子对撞的时候,能量就变成质量,质量可以产生夸克。夸克

出来以后,就会产成一个喷注;对反夸克,也同样放出一个喷注。如果有胶子存在,随着胶子的能量增高,实验会发现三个喷注。发现相应的现象就意味着除了夸克以外,还有胶子。

单个的三喷注事例有很多的来源。我们通过测量大量的三喷注事例,发现它们的数量和分布与

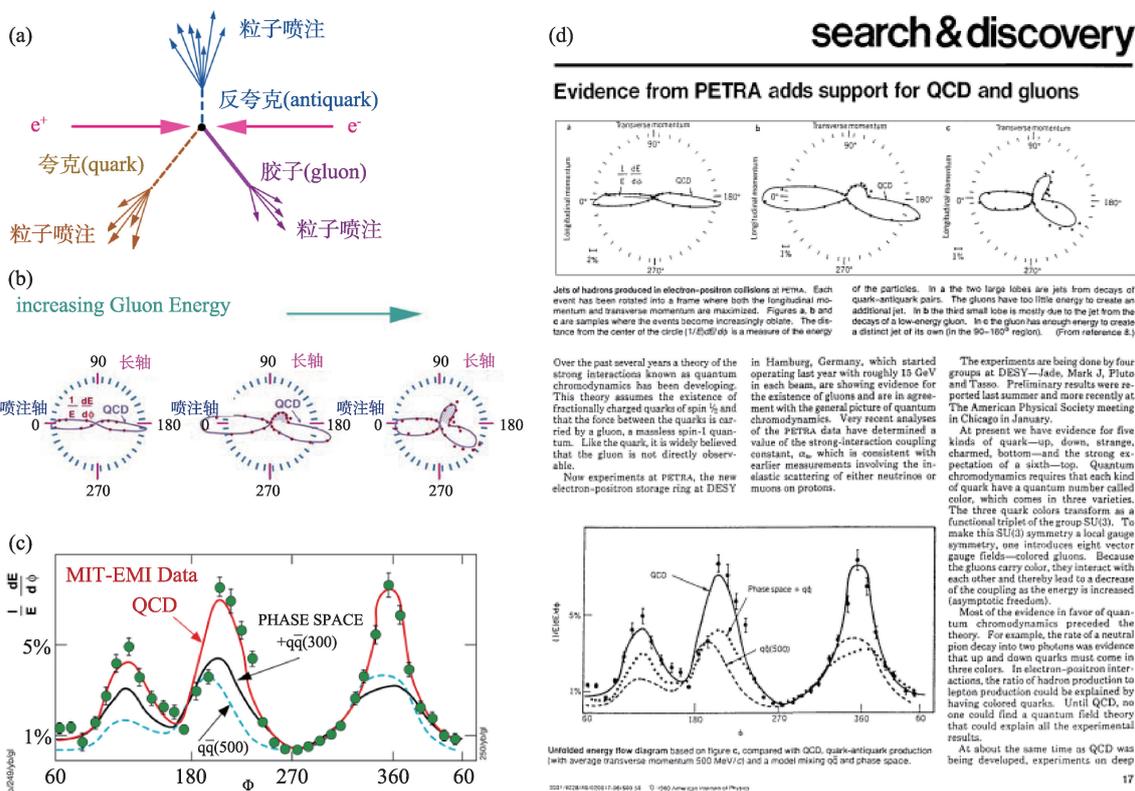


图5 (a) 正负电子对撞产生一对正反夸克和一个胶子示意图; (b) Mark J组的能流分布分析, 看到了三喷注现象; (c) 是(b)右图展开后的能流分布图, 数据分析结果与QCD一致; (d) 美国《今日物理》撰文介绍来自PETRA的实验证据支持QCD和胶子的理论

量子色动力学(QCD)是符合的。

胶子的发现是非常重要的。1979年9月2日, 美国《纽约时报》头版报道了我们发现胶子的消息。中间有一段说: 27名中国科学家参加了这次的实验。在有关粒子物理实验的国际合作研究项目史上, 这是第一次, 也是中国的一大贡献。当年的《人民日报》也报道了关于胶子的发现。

2. 与中国科学家合作 40 年的第二个实验: CERN(欧洲核子中心)L3 实验 (1982~2003)

与中国科学家合作的第二个实验是在欧洲核子中心 CERN 的正负电子对撞机 LEP 上进行的 L3 实验。在 LEP 对撞机中, 能量为 1000 亿电子伏的正电子和 1000 亿电子伏的电子进行对撞, 对撞时的温

度是太阳表面温度的 4000 亿倍, 也是宇宙诞生最初的温度 (1000 亿亿分之一秒时)。L3 实验的目标是要寻找宇宙中最基本的粒子, 研究问题包括在宇宙中有几种不同的电子? 电子到底有没有体积? 电子能不能分成更小的东西? 人们之前认为宇宙中只有三种夸克, 第四个夸克于 1974 年被我们实验发现以后, 现在第五种第六种都已经找到了。发现了第四种, 就意味着原来的观念是错误的。那么, 到底有多少种夸克? 夸克有多大? 夸克又能不能再分成更小的粒子?

L3 是由美国、前苏联、中国(包括台湾)、欧洲等 19 个国家的 600 名科学家, 共同参加的大型国际合作实验。实验用的核心仪器有一间屋子的大小, 包含诸多探测器, 其中重达 1 万吨的磁铁、探测器中的 300 吨铀, 均来自于前苏联。中国的主要贡献是由上海的中科院硅酸盐所生产的 BGO 晶体。BGO 晶

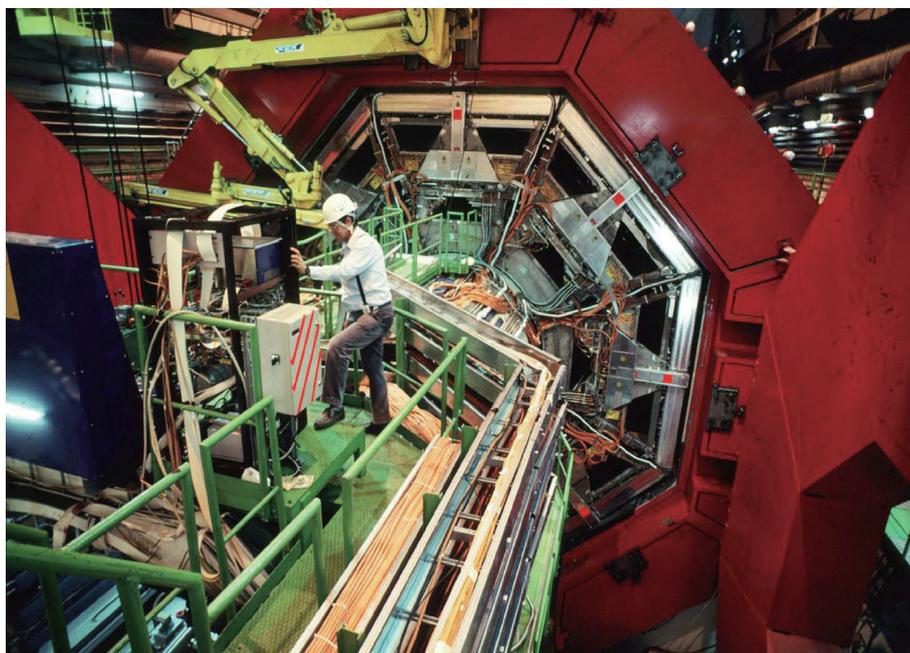


图8 L3探测器(部分)

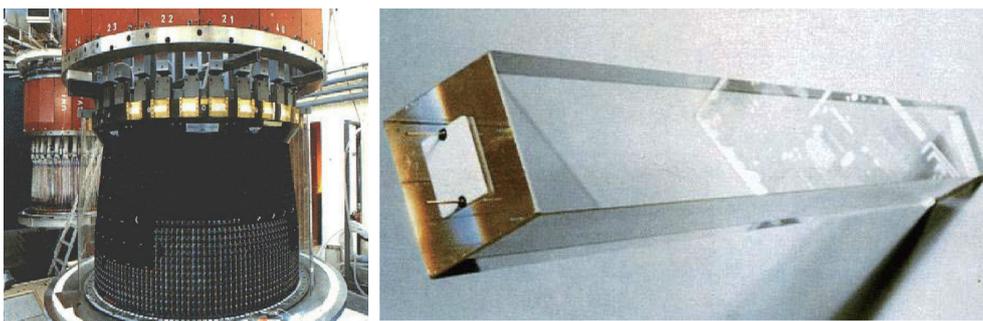


图9 中国科学院上海硅酸盐研究所生产的BGO晶体,共12000条,12吨

体是透明的,其比重和钢相同,当时世界年产量只有4千克,但实验需要12吨。这个问题被中科院上海硅酸盐所解决了。现在他们的晶体产品,已被广泛用于世界的工业及医学领域;此外,中国科学院高能物理研究所(陈和生、王贻芳等)对L3实验数据分析做出了重要贡献。

L3实验在20年内共发表了300篇文章,有300人获得博士学位。《科学美国人》用杂志封面文章专门介绍了L3实验。实验有许多重要的发现,实验表明:宇宙中只有三种不同的电子(即:电子、缪子和陶子,早期缪子和陶子被称为“重电子”-编者注)和六种不同的夸克;电子是没有体积的,电子的半径

小于 10^{-17} 厘米;夸克也是没有体积的,夸克的半径小于 10^{-17} 厘米等,所有的结果都与电弱理论符合。

3. 与中国科学家合作的第三个实验: 在国际空间站上的阿尔法磁谱仪 AMS

与中国科学家合作的第三个实验是国际空间站上的阿尔法磁谱仪 AMS 实验,也是现在正在进行的实验。AMS 实验从1994年开始,预计将进行到2028年以后。国际空间站是晚上除了月亮和金星以外最亮的“星”,长109米,宽80米,重490吨,造价约1000亿美元,是20世纪、21世纪人类最大的工

SCIENTIFIC AMERICAN

AUGUST 1991
\$3.50

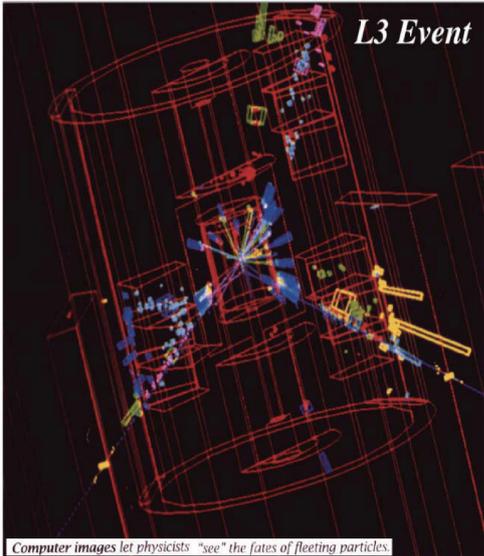


图10 《科学美国人》用封面文章专门介绍了L3实验

程,而AMS是空间站上唯一的大型磁谱仪,也是由美国、中国(包括台湾)、俄罗斯、芬兰、法国、德国、意大利、瑞士等16个国家和地区在空间中的合作。参与这次合作的共有60个大学 and 研究所,600多位科学家。中国参加的单位有中国科学院高能物理研

究所、中国科学院电工所、航天部一院、航天部五院、山东大学、东南大学、中山大学、台湾的中山科学院、“中央研究院”、“中央大学”和成功大学。

AMS的物理意义是研究宇宙线。宇宙中的粒子(宇宙线)的能量可以达到 10^{20} 电子伏特以上,这远远超过了地球上最大加速器可以加速的粒子能量,然而大部分宇宙线穿过100千米的地球大气层时会和大气发生相互作用,所以为了精确测量宇宙线的电荷和动量,需要在外太空运行磁谱仪,这也就是为什么要将AMS置于空间站上。

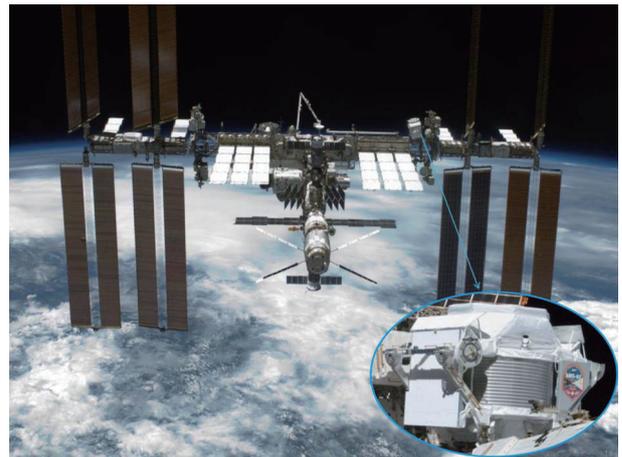


图11 在国际空间站上的阿尔法磁谱仪AMS

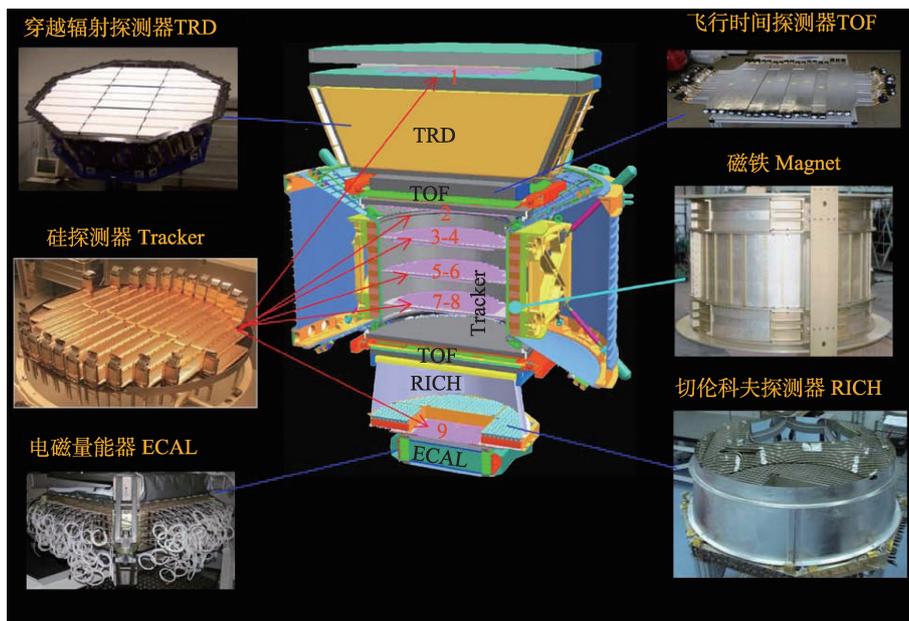


图12 阿尔法磁谱仪AMS及其各探测器部件

AMS探测器包括穿越辐射探测器、飞行时间计数器、硅微条探测器、永磁铁、环向成像切伦科夫探测器和电磁能量探测器等。整个探测器长5米,宽4米,高3米,重达7.5吨。所有的探测器都有我们发展的新技术,实验仪器非常精密。这个实验第一次可以精确测量带电宇宙线的电荷(量)、能量、动量,或者刚度。刚度等于动量除以电荷(量),电荷就是(元素在)周期表上的位置。

2003年2月1号,航天飞机“哥伦比亚”号爆炸,当时美国政府认为航天飞机太过危险,因此取消了所有空间飞行和空间站上的实验。我认为这个决定是错误的,因为做空间站的目的是要做科学实验。把空间站做好却没有科学实验,就没有什么意义了。经与多方协商,美国政府同意专门为AMS实验增加了一班航天飞机,将AMS送往空间站。2011年5月16日,专门运载AMS的“奋进号”航天飞机起飞,起飞时的重量为2008吨,5月19日,AMS被成功安装在国际空间站上。AMS取数运行已超过8年,迄今收集了超过1470亿宇宙线数据。在这8年里,探测器运行非常稳定,作为太空中最精密的磁谱仪,AMS能从100万个质子本底中筛选出一个正电子事例,可以在TeV能区准确分辨电子和正电子,可以精确测量宇宙线不同成分的能谱(到TeV量级)。

由于没有另一个实验计划再安放一个太空磁谱仪,所以AMS的数据一定要准确。因此,AMS合作组的所有文章都是在两个到四个团队得到相同结果(相对误差小于1%)后才发表。

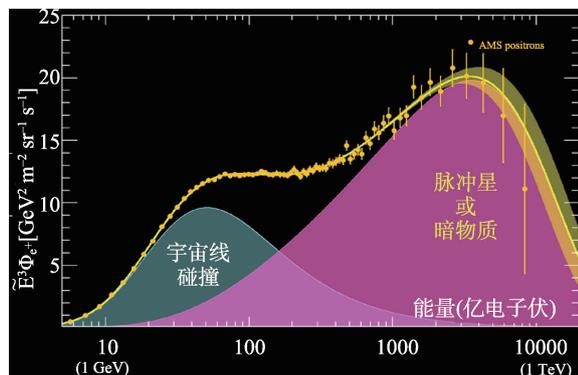


图13 AMS测得的正电子流强谱

AMS的物理成果

a. 暗物质的寻找

实验的第一个目标是寻找宇宙中暗物质的来源。怎样寻找暗物质?暗物质湮灭的时候变成能量,能量变成质量,产生正电子和反质子,传播到地球附近,可以被AMS探测到。

宇宙线中的正电子可能有三种主要来源:宇宙线碰撞,脉冲星或暗物质。AMS测量得到的0.5 GeV~1 TeV原初宇宙线正电子流强谱可以用来自宇宙线的碰撞的低能正电子和来自脉冲星或暗物质的高能正电子很好地拟合。

AMS测得的反质子能谱与正电子能谱具有类似的随能量变化特征,然而反质子模型不能由脉冲星产生。同时暗物质模型预测的正电子能谱在高能量快速的下降,目前高能时统计量不足,进一步积累数据继续分析,到2028年AMS将对正电子超出是否来自于暗物质做出确定性的结论。

AMS利用探测到的2800万电子数据同样分析得到0.5 GeV~1.4 TeV原初宇宙线电子流强谱的结果。对于电子,宇宙线碰撞产生的部分只占很小的比例,电子能谱的测量结果能用两个幂律谱 a 和 b 的叠加来解释,那么幂律谱 a 和幂律谱 b 的起源是什么?这为电子起源的研究提供了很好的思路。

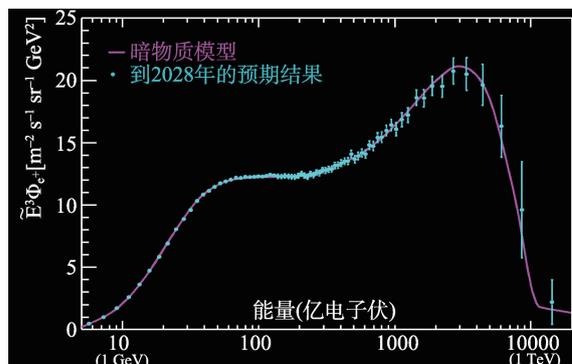


图14 到2028年AMS预期宇宙线正电子测量结果

宇宙中电子和正电子有不同的起源;电子能谱是两个幂律谱之和。正电子则有两个成分:低能量

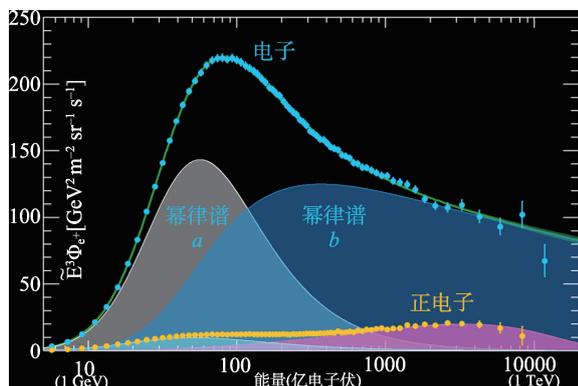


图 15 AMS 利用 6.5 年收集到的 2800 万电子数据分析得到 0.5 GeV~1.4 TeV 原初宇宙线电子流强谱的结果

正电子来自宇宙线碰撞；高能正电子来自脉冲星或暗物质。而反质子能谱则排除了正电子来自脉冲星的假设。

b. 精确测量宇宙线中原子核成分

AMS 的第二个目标：精确测量宇宙线。AMS 有 7 个探测器可以精确测量宇宙线原子核的电荷。一般认为宇宙线分两种：初级宇宙线和次级宇宙线。初级宇宙线是原始的宇宙线，比如质子、氦、碳、氧、铁等，它们在恒星内由核聚变产生，被超新星爆炸等剧烈的天体活动加速，后在宇宙中飞行几百万年，直到被 AMS 探测到。因此初级宇宙线携带了关于他们起源和传播的信息。除了初级宇宙线以外，还有次级宇宙线(锂、铍、硼、……)。次级宇宙线是由初级宇宙线和星际物质碰撞产生的，因此次级宇宙线可以提供宇宙线传播过程和星际物质的特性。目前 AMS 已经发表了原子序数 1 到 8 的原子核能谱，正在持续收集和分析之后原子序数的

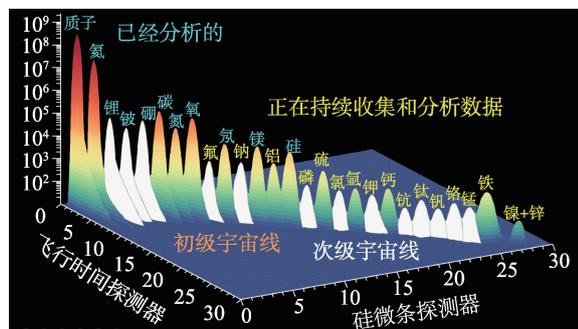


图 16 AMS 精确测量宇宙线中的原子核

原子核数据。

在 AMS 之前，一百年来全球测量质子流强的实验最好的结果仍具有很大的误差，相互之间不一致。这限制了人类对宇宙线的认识。不一样的实验结果无法对现有的理论进行验证。AMS 在人类历史上第一次实现了宇宙线的精确测量，质子能谱测量结果在 2000 亿电子伏前符合理论结果，但到 2000 亿电子伏之后就与理论预言的结果不同，这说明有未知的现象存在，推翻了几十年来的传统理论。

同时 AMS 测量结果发现，初级宇宙线(氦、碳、氧)随着刚度变化有相同的行为，次级宇宙线(锂、铍和硼)随着刚度也具有相同的行为，它们都在 2000 亿电子伏之后能谱发生变化，但二者变化的程度不同。AMS 所有的宇宙线实验结果都与理论不符合，这证明现有的宇宙线理论都是错误的。

c. 反物质的寻找

AMS 的另一个目标是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，那么大爆炸之后应该有相同数量的物质与反物质。在 AMS 之前的 50 年，没有实验在太空中精确地寻找到反物质。所以理论物理学家认为，反物质在宇宙演化中消失了。过去 50 年大家都在找对称性破坏，但实验发现的对称性破坏远远不足以支持反物质在宇宙演化中消失。

AMS 找到了几个反氦-4 的候选事例。其中一个事例动量 $= 32.6 \pm 2.5 \text{ GeV}/c$ ，电荷 $= -2.05 \pm 0.05$ 。其质量为 $3.81 \pm 0.29 \text{ GeV}/c^2$ ，而 ${}^4\text{He}$ 质量 $= 3.73 \text{ GeV}/c^2$ ，质量是一样的，唯一不同的就是携带的电荷正负不同。这表示宇宙中非常有可能有反粒子存在。除此之外，AMS 还找到了反氦-3 的候选事例。反氦的寻找十分困难，每 1 亿个氦数据中，只有 1 个反氦。为了确保数据的准确性，AMS 还将继续对探测器进行精确的验证。

d. 太阳活动对宇宙线的影响

AMS 还将提供人类探索外太空所必须的知识。众所周知，宇宙线的辐射会对宇航员的身体和

空间设备造成伤害。来自银河系的宇宙辐射约为每年 90 雷姆,而已知的致命剂量约为 300 雷姆,且由于太阳磁场的影响,辐射会产生周期性的变化。因此对于需要长期外太空活动的空间计划来说,宇宙线辐射变化的研究是必不可少的。

AMS 将精确测量 11 年完整太阳周期的重元素随时间和能量的变化。目前实验结果发现,质子和氦的流强每月有相同的变化,而且随时间和能量有很大变化,目前,质子和氦的宇宙线流强最大值和最小值差距约为 3 倍,在一个太阳活动周期内,这个差距可能会更大。实验结果还发现,质子和氦的流强随着时间,每天有完全相同的变化,且每天内的变化可以非常剧烈。AMS 实验将覆盖一个完整的太阳活动周期,可以确定一个太阳周期内宇宙线流强最小的时期,为宇航员的出舱活动等提供有利的信息。

目前,AMS 的所有结果都发表在《物理评论快报》(*Phys. Rev. Lett.*), 目前已经有 16 篇,其中大部分文章都被选为编辑推荐。特别是第一篇文章被选为《物理评论快报》编辑推荐十周年纪念,同样入选的文章包括第 117 号元素的发现和 LIGO 实验对引力波的观测,中国科学院高能物理研究所的李祖豪团队在其中做出了重要贡献。AMS 将在国际空间站的寿命内(>2028)持续地收集数据,实验结果将会拓展甚至改变我们对宇宙的认识。

从事多年科学研究的一些心得

实验推翻理论比验证理论更重要。费曼在我获得诺奖后发来的贺信中说:“你所发现的新现象是我没有预料到也不了解的。为什么诺贝尔奖要发给你呢? 不要因为获奖,就认为自己变成专家。我挑战你,能不能发现一些我可以理解的东西。”

要坚持自己的实验,不能因为名人的反对而放弃,即便他是诺奖获得者。历史多次证明,名人说的话不一定对。比如在德国 DESY 实验室建造正负电子对撞机的时候,最大的反对者是诺奖得主海森堡,而胶子正是在 DESY 的正负电子对撞机上发

现的。诺奖得主阿尔伯特·迈克尔逊说过:“物理科学最重要的基本定律已经全部被发现了”;诺奖得主马克斯·玻恩说过“我们认识的物理学,将会在 6 个月内完成”;诺奖得主拉比说过“斯坦福加速器的能量,150 亿~450 亿电子伏,大大超过了当前物理的需要”。

在他们说了这些话以后,物理学仍取得许多突破性的发现,高能物理学家在加速器实验中获得很多诺奖,改变了我们对宇宙的基本认识。所以说大加速器没有用是不可靠的。

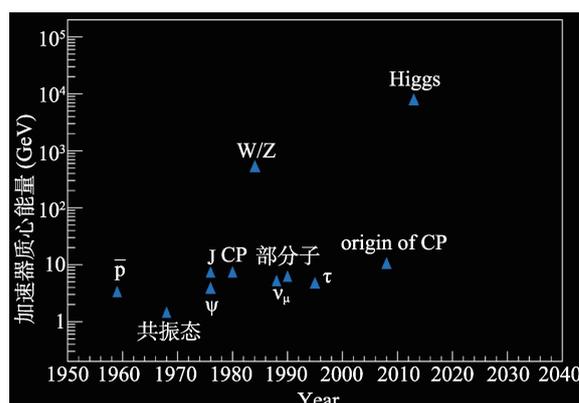


图 17 人类对物质的认知随加速器质心能量的增加不断深入

在与中国科学家卓有成效的 40 年合作中,我深切的体会到,中国有很多世界一流的实验物理学家。他们有想象力、有发展新技术及领导国际合作的经验和能力。他们可以主持最前沿的实验物理,继续为人类知识做出重要贡献。

