

我所经历的 5 个物理实验

My Experiences in Five Physical Experiments

丁肇中/Samuel C C Ting

麻省理工学院, 马萨诸塞州 02139- 4307, 美国

Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139- 4307, USA

[摘要] 结合亲身经历的 5 个物理实验, 讲解了从事科学研究的独到体会。

[关键词] 实验物理; 电子; J 粒子; 胶子; L3; 阿尔法磁谱仪

[中图分类号] O4-1

[文献标识码] D

[文章编号] 1000- 7857(2006)11- 0005- 05

Abstract: The author presents his experiences on scientific research by introducing his five important physical experiments.

Key Words: experimental physics; electrons; particle J; gluons; L3; AMS

CLC Number: O4-1

Document Code: D

Article ID: 1000- 7857(2006)11- 0005- 05

实验是自然科学的基础, 理论如果没有实验的证明, 是没有意义的。当实验推翻了理论以后, 才可能创建新的理论, 理论不可能推翻实验。

我想通过介绍我所做的 5 个物理实验, 来谈谈自己从事科学研究的体会。

1 第一个实验——测量电子的半径

根据量子电动力学——1948 年费曼、施温格和朝永振一郎提出的理论, 电子是没有体积的。这个理论被当时所有的实验所证明, 他们因此而获得了诺贝尔奖。但是, 1964 年, 美国哈佛大学和康奈尔大学著名的教授们与多年专门从事这种实验的专家们, 用几年的时间, 做了 2 个不同的实验, 得出了意外的结果——量子电动力学是错误的, 电子是有体积的。他们的结果受到物理学界的认可和重视。

因为这是关于物理基本观念的实验, 所以我决定用不同的方法来测量电子的半径。那个时候, 我刚拿到博士学位, 没有任何经验, 所以没有人相信我能做出这样的实验, 也没有人支持我。

1965 年, 我决定放弃在美国大学的前途, 到德国利用新建的加速器用不同的方法重做实验。8 个月以后, 我的实验证明, 量子电动力学是正确的, 电子是没有体积的, 它的半径小于 10^{-14} cm。图 1 是我当时做实验的仪器。

因此, 我的第一点体会是: 不要盲从专家的结论。我没有做这个实验以前, 都是世界级的专家在做这个实验。

2 第二个实验——新粒子家族的发现

在 1974 年以前, 物理界认为, 所有的粒子是由 3 种夸克所组成的。我的问题是: 为什么宇宙中只有 3 种夸克? 为了寻找新的夸克, 我决定建立一个高灵敏度探测器。在 20 世纪 70 年代初, 我设计了这个实验。实验要求的精确度是极高的, 相当于在

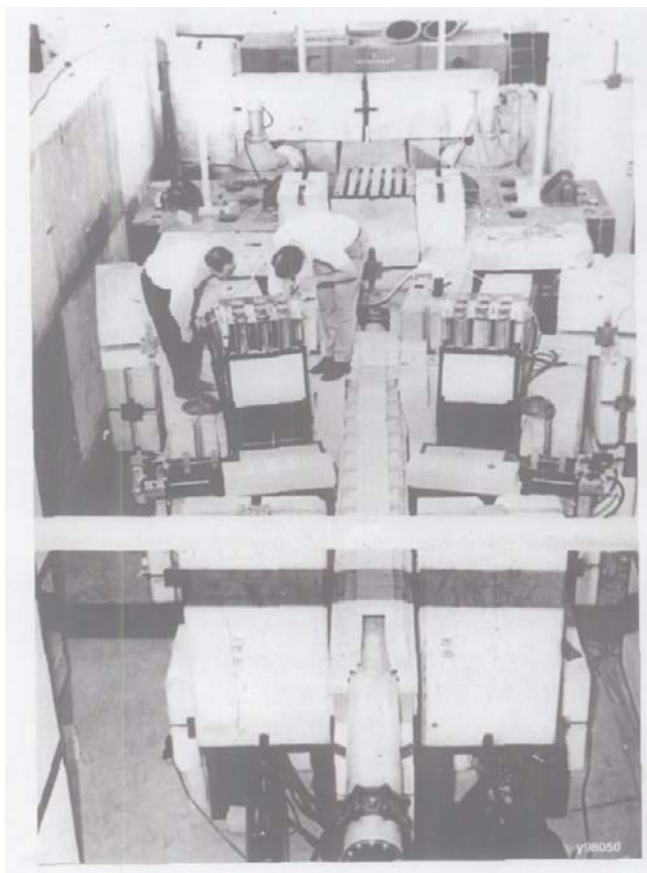


图 1 测量电子半径的实验仪器

Fig. 1 Test facilities to measure the size of electrons

收稿日期: 2006- 09- 19

作者简介: 丁肇中, 男, 祖籍山东日照, 实验物理学家, 诺贝尔奖物理学奖获得者, 现任美国麻省理工学院物理学系讲座教授, 主要从事高能实验粒子物理学研究; E- mail: ting@lns.mit.edu

北京下雨时,每秒钟有 100 亿个雨滴,如果有一个雨滴是红色的,我们要从这 100 亿个雨滴里把那个红色雨滴找出来。当时,这个实验不受物理学界欢迎,因为大家都相信只有 3 种夸克,也没有人相信如此困难的实验能够做成功。实验几乎被世界上每一个实验室所拒绝。

直到 1972 年,美国的布鲁凯文实验室接受了我们的实验。为了能 100 亿个已知粒子中找到一个新的粒子,这个实验必须具备以下条件:① 必须每秒钟输入 100 亿个高能量的质子到探测器上,这么多的质子输入到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的;② 必须发展全新的、非常精确的、在非常高的放射线下能正常工作的全部仪器;③ 必须设计安全的屏蔽系统。图 2 为实验设备(J 粒子探测器),当时实验输入每秒 100 亿个能量 300 亿电子伏特的质子,并用 10 000 吨水泥、5 吨的 U^{238} 、100 吨铅和 5 吨肥皂作为放射屏蔽。它的分辨率高达 $100\text{ }\mu\text{m}$ 分辨速度达 20 MHz。J 粒子探测器现展于美国国家科技馆(见图 3)。



图 2 J 粒子磁谱仪(在布鲁凯文实验室)

Fig. 2 The Particle J Spectrometer at BNL

2 年以后,我们果然发现了一种新的粒子(J 粒子),它具有奇异的特性——寿命比已知的粒子长 1 万倍。很快,人们又发现了同样寿命的类似粒子。它的重要性类似于我们发现一个偏僻的村子里面所有的人都是百万岁左右,这就表示这个村子里的人是和普通人完全不一样的。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,我们把它命名为 J 粒子。J 粒子的发现,改变了物理学界长期认为世界上只有 3 种夸克的观念,改变了人类对于物质基本结构的认识。继 J 粒子被发现之后,人们又找到了新的粒子,现在我们已经知道,世界上至少存在 6 种不同的夸克。

由于此项工作,我获得了 1976 年的诺贝尔物理学奖。在诺贝尔奖历史上,从来没有人用中文做过演讲,我决定在颁奖仪式上用中文进行演讲。我说:“得到诺贝尔奖,是一个科学家最大的荣誉。我是在旧中国长大的,因此想借这个机会向发展中国家的青年们强调实验工作的重要性。中国有一句古话:‘劳心者治人,劳力者治于人’。这种落后的思想对发展中国家的青年们有很大的害处。由于这种思想,很多发展中国家的学生们都偏向于理论的

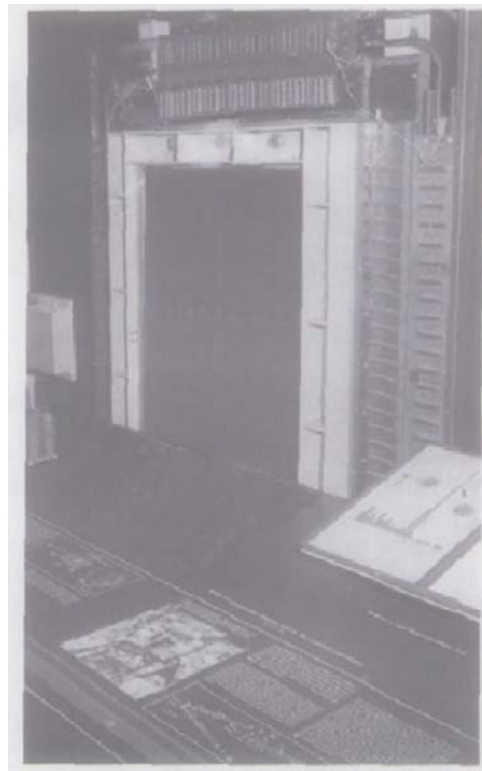


图 3 J 粒子探测器(展于美国国家科技馆)

注:分辨率 $100\text{ }\mu\text{m}$ 同时能分辨 20 MHz

Fig. 3 The J Particle Spectrometer at Smithsonian

研究,而避免实验工作。事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别,物理学是从实验产生的。我希望由于我这次得奖,能够唤起发展中国家的学生们的兴趣,而注意实验工作的重要性。”

获诺贝尔奖以后,叶剑英元帅写了一首诗给我:“攻城不怕坚,攻书莫畏难,科学有险阻,苦战能过关。”

我的第二点体会是,要对自己有信心,做你认为正确的事,不要惧怕困难,不要因为大多数人的反对而改变自己的正确想法;同时,决策机构要给优秀的年轻人机会。

3 第三个实验——胶子的发现

什么是胶子?在原子外面是电子,里面是原子核,原子核里面是核子,核子里面是夸克。宇宙中有 4 种力,即引力、电磁力、弱力和强力。引力,其来源到现在还没有人知道是怎么回事;电磁力,由光子传输,电子和原子核间的力,就是光子传输;弱力,由 Z^0 、 $W^\pm$ 子传输;强力由胶子传输(见图 4)。

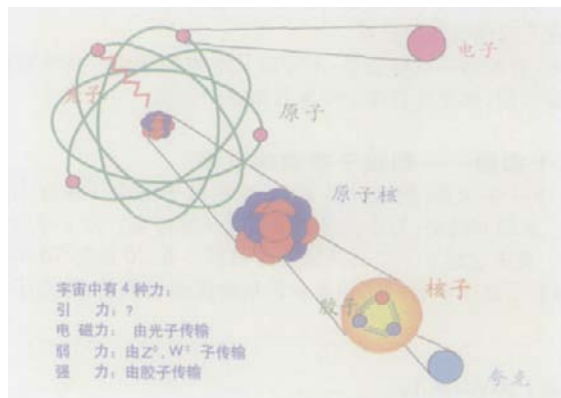


图 4 发现胶子的意义

Fig. 4 The value of discovering gluons

1977 年 8 月，邓小平建议每年派 10 位科学家参加我的工作。从那个时候起，中国科学家开始参加我的科研团队，并做出了世界上公认贡献。邓小平曾对我说，对科技工作，要想得远一点，看得宽一些；一是要派人出去学习，二是要请人来讲学；不但科研机构这样，企业也要这样。我曾经多次见到邓小平先生，每次见到他，我都向他介绍我的工作。他对物理很有兴趣，问我很多问题，同时也向我讲述战争年代的经历。他是我接触过的国家领导人和科学家中最特殊的。

20 世纪 70 年代，我在德国 PETRA 的 300 亿电子伏电子对撞机(见图 5)上进行实验，原来的目标是继续测量电子半径。



图 5 PETRA 的 300 亿电子伏电子对撞机

Fig. 5 The 300 GeV Electron-Positron Collider at PETRA

然而，做实验的时候，我突然注意到，在正电子和电子对撞的时候，可能产生夸克、反夸克和胶子的 3 种粒子喷注(示意图见图 6)。

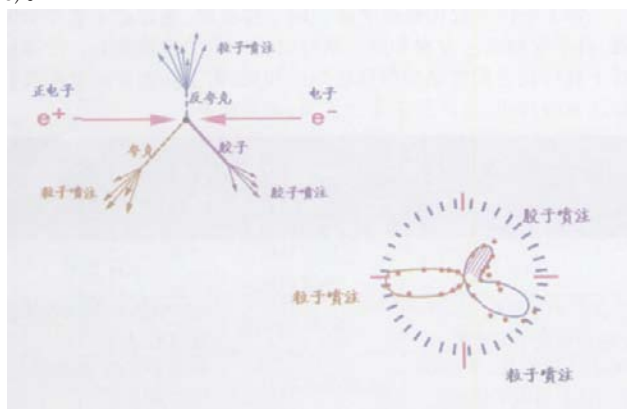


图 6 胶子的发现

Fig. 6 The discovery of gluons

1979 年 9 月，美国《纽约时报》头版报道了我们发现胶子的消息。中国的《参考消息》1979 年 9 月 11 日转载了《纽约时报》这条消息，称 27 名中国科学家参加了这次主要的实验，在有关核粒子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。1979 年 9 月 5 日，《人民日报》刊载了题为“丁肇中教授领导的实验小组发现胶子”的报道，称这种新粒子发现引起全世界科学界极大兴趣。中国科学院高能物理研究所唐孝威等 20 多位科学工作者参加了这项实验研究。

我的第三点体会是，做科学研究对意料之外的现象要有充分的准备。

4 第四个实验——在欧洲核子中心的 L3 实验

这个实验是在欧洲核子中心的周长 27 km 的加速器(见图 7)

上进行的，1 000 亿电子伏正电子与 1 000 亿电子伏电子对撞，温度为太阳表面 4 000 亿倍的温度，也是宇宙诞生最初的 1 000 亿亿分之一秒时的温度。

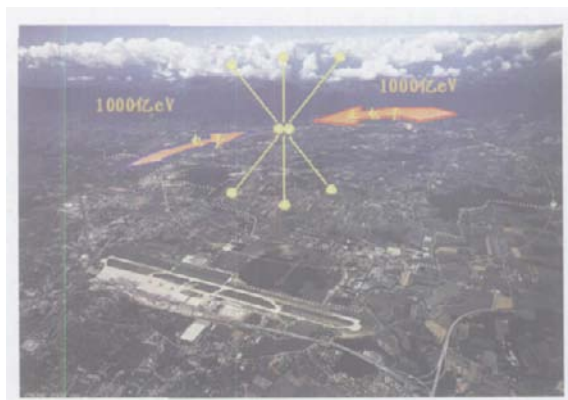


图 7 在欧洲核子中心的 L3 实验场

Fig. 7 The L3 experiment at CERN

L3 实验是首次由美国、前苏联、中国、欧洲等 19 个国家的 600 名科学家共同参加的大型国际合作。中国政府非常支持 L3 实验，包括给了一个非常先进的计算机和在上海硅酸盐研究所生产的 BGO 晶体。我们开始做这种 BGO 晶体的时候，全世界的产量才只有 4 kg，很不幸的是我们需要 12 吨。怎么办呢？我还记得上海硅酸盐研究所的严冬生院士专门告诉我们他们可以做，所以尽管当时德国人、法国人都比较反对，最终我还是决定在上海做 BGO 晶体。结果做得非常成功。现在他们所的晶体产品已被广泛用于工业及医学领域。

L3 实验共发表了 271 篇文章，有 300 人为此获得博士学位。实验结果可以用 3 句话来表达：① 宇宙中只有 3 种不同的电子；② 电子是没有体积的，其半径小于 10^{-17} cm；③ 夸克也是没有体积的，其半径小于 10^{-17} cm。很多优秀的中国科学家参与了这个实验并回国工作。

我的第四点体会是，主持国际科学合作，要选科学上最重要的题目；只有这样，才能引起参加国科学家的最大兴趣，才能得到参加国政府长期的优先支持。

5 第五个实验——国际空间站上的 AMS 实验

国际空间站长 109 m，宽 80 m，AMS 实验 (Alpha Magnetic Spectrometer, 阿尔法磁谱仪) 是国际空间站唯一的大型科学实验，也是人类第一次把磁谱仪送入太空(见图 8)。AMS 的目标是寻找由反物质组成的宇宙，探讨暗物质和宇宙线的来源。



图 8 国际空间站上的 AMS

Fig. 8 The AMS experiment on ISS

在大爆炸的理论中,宇宙起源时的温度非常高,大爆炸之前没有物质,因此大爆炸以后物质与反物质的数量应该一样多。现在宇宙已经存在 150 亿年,有我们身边各种物质组成的宇宙,大爆炸后产生的反物质在什么地方?

什么叫反物质呢? 1928 年,英国科学家狄拉克注意到在相对论和量子力学的方程式中,把质量“ m ”变换符号为“ $-m$ ”,方程式不会改变。他问“ $-m$ ”有什么意义,因而提出反物质理论。在发现反电子后,他于 1933 年获诺贝尔奖。1965 年,《纽约时报》头版一则报道:“物理学家造出复杂的反物质”,介绍了我的实验:发现由反物质组成的反原子核。1965 年 5 月,《参考消息》以“中国旅美科学家发现‘双逆粒子’”为题,转载了台湾《中央日报》的相关报道,并介绍了我及我的父亲。

人类研究天文现象的最早文字记录是甲骨文记载的公元前 3300 年发生的超新星大爆炸,而更详细的有关超新星爆炸的记录是在宋朝 1054 年关于《金牛座星》的记载。在过去 40 年里,天文学和宇宙论的突破性发展,仍源于对光和电波的观测,如用哈勃望远镜、地面望远镜等,在这一领域由此也产生了近 10 位诺贝尔奖得主。可是,宇宙线里面除了光以外,还有带电的粒子,带电的粒子有质量,所以它就被大气层吸收了,无法在地球上观测到。粒子因为带电,要分辨电荷的符号,就必须用磁铁来探测;而至今没有一个精密的磁谱仪在太空观测到带电粒子,主要是因为无法将超导磁铁送入太空。AMS 是第一个送入太空的磁谱仪。

这个实验将在太空站运行 3 年,可以收到很多正物质的原子核。但是,能不能找到反氦、反碳等反物质呢? 3 年中如果没有任何这方面的发现,就显示了在可见的宇宙范围内,没有反星系存在,因而宇宙的演化不遵守物质与反物质的对称性。

AMS 实验是美国、中国(台湾)、俄罗斯、芬兰、法国、德国、意大利、瑞士等国首次在空间领域的合作,共有 56 所大学和研究所以及 600 位科学家进行合作。中国有很多大学和研究机构参加 AMS 实验工作,包括东南大学、上海交通大学、中山大学、山东大学,中科院电工所、高能所,航天部一院、五院等等,其中把磁铁放到太空中所遇到的困难就是被中科院电工所和航天部一院克服的。实验飞行进行 2 次。第一次(AMS01)用来掌握磁体在太空中运作的基本技术;第二次(AMS02)用来寻找反物质。

1998 年我们把 AMS01 实验组装好后,航天飞机带入太空飞行 10 天。发现了外太空中许多从未了解的、想象不到的现象。例如,在靠近赤道的地区,正电子的数量为电子的 4 倍。

《科技日报》1998 年评出的当年度世界 10 大科技新闻中有一条是,阿尔法磁谱仪首次升空运行正常。该条新闻报道:6 月 2 日,装有中国制造的巨大永磁体的阿尔法磁谱仪首次搭乘美国发现号航天飞机升空;此磁谱仪将安装于未来的国际空间站,用以探测宇宙中的反物质粒子;在此次实验中磁谱仪运行正常。

当时有很多美国科学家都认为这项实验是不会成功的。1998 年实验成功以后,我们把全部的时间用在制造 AMS02 上。AMS02 有 30 万个数据读出通道,650 个微处理器,用 -271°C 的超导磁铁,所有的仪器制造都没有任何以往的经验可以借鉴,也没有任何以前的资料和数据可以参考。现在,这些仪器已经开始运往日内瓦组装。

图 9 中,穿越辐射探测器是测量电子的,飞行时间探测器是测量速度的,超导磁铁和硅微条探测器测量电荷的符号与大小,也测量动量,量能器测量光子和电子,切伦可夫计数器测量速度和电荷。硅微条探测器飞行件已经建造完成,共 8 层,总面积 6.6 平方米,有 20 万个数据通道,是最精密的大面积硅探测器之一。量能器由法国、意大利和中科院高能物理研究所的陈和生、吕雨生、庄红林等人合作完成。AMS 超导磁铁现在正在美国的约翰逊太空中心组装。

中国政府对这个实验也非常有兴趣,我曾经向胡锦涛主席报

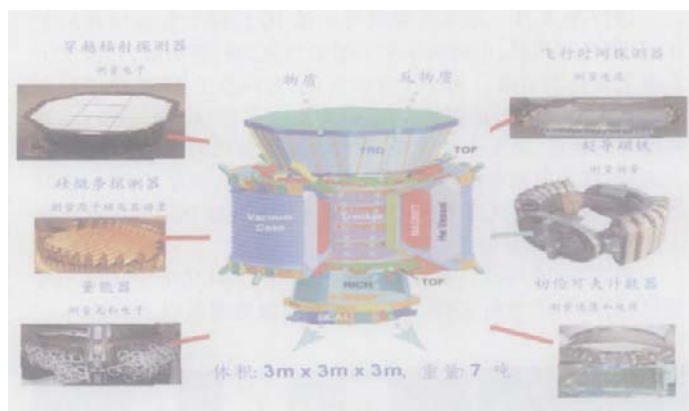


图 9 阿尔法磁谱仪的探测器

Fig. 9 Detectors of AMS02

告过中国参加 AMS 实验的意义。对于中国大学而言,第一,由于 AMS 实验工作是由世界上包括美国的麻省理工学院、耶鲁大学,瑞士的苏黎士高工、日内瓦大学,意大利的罗马大学等知名大学共同来完成,中国的大学可以和这些大学进行长期的合作和竞争;第二,大学具有学科综合优势和充分的学术自由,在研究中能发挥创造性的作用,在过去一百年里,获得诺贝尔物理奖的科学家大多来自于大学,因此大学的参加特别有意义。

对于中国航天事业而言,第一,AMS 实验是由美国宇航局、俄罗斯宇航局、欧洲宇航局、意大利宇航局、德国宇航局参加和支持的,中国的航天专家可以借此与这些机构进行长期的、高水平的技术交流和竞争;第二,可以得到 AMS 实验所发展的先进的航天技术,例如,用于空间的快电子系统、空间超导磁铁技术等。

表 1 给出了近代物理学研究的一些发现。通过这个表你会发现,科学家的实际发现和原定研究目标一点关系都没有。专家们对于目标设定的意见是根据已知的知识,而实际的发现就是要打破已知的知识,这样科学才会发展、才会前进。

表 1 近代物理学的发现
Tbl. 1 Recent discoveries in physics

新仪器	原定目标 (专家意见)	实际发现
20 世纪 60 年代, 美国 300 亿电子伏质子加速器	πN 相互作用	2 种中微子, 时间反演破缺, J 粒子
20 世纪 70 年代, 美国 60 亿电子伏正负电子对撞机	量子电动力学	部分子, 第 4 种夸克, 第 3 种电子
20 世纪 70 年代, 美国 400 亿电子伏质子加速器	中微子物理	第 5 种夸克, 第 6 种夸克
20 世纪 80 年代, 德国 300 亿电子伏正负电子对撞机	第 6 种夸克	胶子(1979 年中国科学家参与)
2000 年, 日本地下实验室	质子寿命	中微子有质量
哈勃望远镜	银河探索	宇宙曲线、暗能量
AMS 太空磁谱仪	反物质	?

我的第五点体会是,自然科学的研究工作是具有竞争性的,只有第一,没有第二。没有人知道谁是第二个发现相对论的。

6 基础研究可改变整个世界和人类的生活

如果你要求物理学家,哪怕是最伟大的物理学家,对一个新发现的实际应用做出预言,你会听到如下的回答。

1930 年,物理学家恩内斯特·卢瑟福:“通过打碎原子来产

生能量是不合算的。任何希望将原子嬗变转化成能源的想法都是空想。”

1926 年，物理学家李·德福斯特：“电视从理论和技术而言是可行的，从商业和经济的角度来看，我认为是不可能的，它只不过是浪费时间的梦想。”

1880 年，开尔文爵士：“X 射线是个骗局。”

人们注意到，在科学金字塔中（见图 10），由于新的应用在不断扩大（金字塔高度增大），基础研究也在不断拓宽它的底部（金

字塔底部拓宽）。随着科学的不断发展，基础研究越来越走到了科学金字塔最外面的角落，因此，有时候基础研究因为它远离日常生活而会受到人们的责难和质疑。只有当过了一段时间科学金字塔的应用部分长高后，公众对原本奇怪的科学新现象逐渐熟悉了，基础研究看上去才比较接近实际，从而被人们所理解。

我认为，没有任何理由断定今后科学金字塔不会继续拓宽和长高。

从发现一个科学新现象到这一科学成果的市场化，大约需要 20~40 年的时间，对政治家和实业家来说，这样一段时间常常是太长了。但是，科学研究工作不会是一帆风顺的，当深入到未知领域时，很难做出预言。在科学研究领域，错误经常是成功的一个组成部分。因此，基础研究需要充分的自由空间和长期的展望。

许多人认为，如果一个国家想要在技术和经济方面具有竞争力，必须集中于能立即有市场效益的实用性技术的发展，并使经济持续发展。我们常常听到这样的争议：是支持‘无用的’基础科学，还是将资源集中于技术的转化和应用研究？从历史的观点来看，后一种观点是目光短浅的。

如果一个社会将自己局限于技术转化，显然，经过一段时间，基础研究不能发现新的知识和新的现象后，也就没有什么可以转化的了。技术的发展生根于基础研究之中。我们可以看到，如果没有对基础研究和教育方面的投资，发展经济的实用主义途径是不可能持久的。

这正如 1977 年 8 月邓小平同志对我说的：对科技工作要想得远一些，看得宽一些。

（注：本文根据丁肇中教授 2006 年 9 月 16 日在“2006 中国科协年会”上所作的大会报告整理而成，并经作者修订、确认。）

（责任编辑 胡春华）

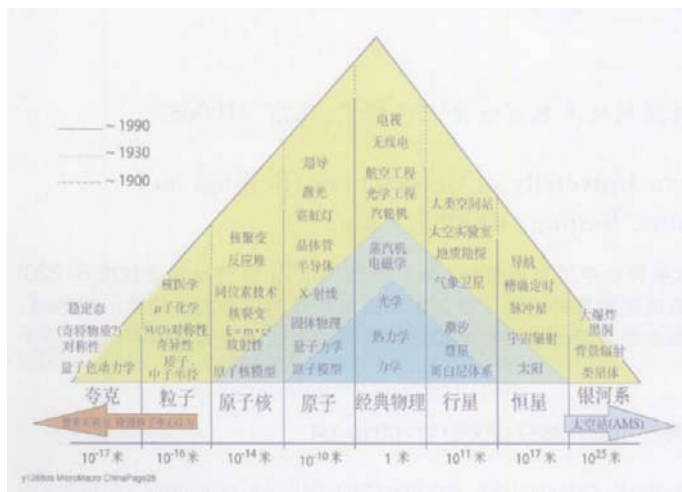


图 10 科学金字塔

Fig. 10 The pyramid of science

注：该图底部的两个箭头是我们的两个实验方向

·封面文字说明·

中日物理学家取得宇宙射线研究里程碑

看似空无一物的太空中其实穿梭着稀疏而高能的粒子，它们构成了宇宙射线。来自中国和日本的物理学家的最新研究结果表明，我们银河系之中的高能宇宙射线等离子体正在和星际气体、恒星一起围绕银河系的中心旋转。

研究人员通过对“西藏大气簇射探测器阵列”所获得的大量数据进行分析，发现介于 10^{12} ~ 10^{15} eV 能量区间的宇宙射线的流强在不同方向上存在微小的差别。这种现象就如同一个人在基本无风的环境中从某些方向上感觉到丝丝的微风；如果宇宙射线等离子体在银河系中是静止不转的，那么太阳系在围绕银河系中心运动的过程中会感受到宇宙射线等离子体向后刮去的风，因而不同方向上遇到的宇宙射线的流强将会显示出不同，这一现象被称为 Compton-Getting 效应。

但研究人员认为他们观测到的风并不意味着宇宙射线是相对银河系不转的。“宇宙射线的风是由银河系局部环境造成的——正如我们在‘风口’上可以感受到风是由于局部地形造成的，而并不表明大气层不随地球旋转。”中科院高能物理研究所研究员胡红波告诉《科技导报》记者，“研究中探测到的宇宙射线的各向异性可能来自银河系磁场的局部结构，也可能来自临近的宇宙线的源。”

实际上，研究人员在接近 10^{15} eV 能量上的探测表明，太阳系与宇宙射线之间并不存在 Compton-Getting 效应。这就表明宇宙射线是和



太阳系一起围绕银河系中心运动的。“我们由此推测，在整个银河系里，在此能量之下宇宙射线等离子体都和恒星与气体物质一样环绕银河系的中心旋转。”研究人员表示。

此外，研究还发现了新的宇宙射线“风源”，其中除了高能带电粒子的贡献之外，还应当有中性伽马射线的贡献，这些现象有可能暗示在这个方向有离太阳系不太远（比如数百光年之外）的宇宙射线的加速源。

以上研究结果发表在 10 月 20 日美国的《科

学》杂志上，研究参与者来自以中科院高能物理研究所和日本东京大学宇宙线研究所为主的 25 家中日研究机构。研究人员表示，这些实验观测结果为研究宇宙射线起源、加速和传播等问题提供了宝贵的实测信息，并为进一步研究银河系大尺度磁流体密度波和同步辐射探测手段提供了重要的实验依据。

研究中的数据是在位于我国西藏自治区拉萨市西北的羊八井宇宙射线观测站采集到的。该站地处海拔 4 300 m 目前配备有成功运行了 16 年的中国与日本合作的“西藏大气簇射探测器阵列”（Tibet Air Shower Array）和中国与意大利合作的“羊八井天体物理辐射地基观测装置”（Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at Yangbajing, 简称 YBJ-ARGO）。

胡红波研究员介绍说，我国研究人员下一步一方面将会与意大利科学家合作，在很大的天区里对能量较低的宇宙射线进行探测，研究包括太阳在内的银河系内或银河系外的宇宙射线加速源；另一方面会尝试改进装置，在 10^{14} eV 以上的能区开展高灵敏度的中性伽马射线观测。这两方面的探测都将是目前国际上最先进的。

本期封面图片为“西藏大气簇射探测器阵列”探测宇宙射线的艺术表现图。在现实情况中，宇宙射线是无法肉眼看到的。图片由张良绘制。

（本刊记者 黄永明）