

粲夸克的实验发现*

陈缮真[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2025-02-25 收到

[†] email: shanzhen.chen@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250303

CSTR: 32040.14.wl20250303

Experimental discovery of the charm quark

CHEN Shan-Zhen[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘 要 文章回顾了粲夸克的实验发现历程。20 世纪 60 年代, 卡比博提出弱相互作用中的混合角理论, 解释了奇异粒子的衰变, 但无法完全解释 K 介子衰变速率的异常。1970 年, 格拉肖等人基于 Glashow—Iliopoulos—Maiani 机制, 预言了粲夸克的存在以解决这一矛盾。1974 年, 丁肇中团队在布鲁克海文国家实验室通过质子—铍靶实验发现了质量约 3.1 GeV 的 J 粒子, 而里克特团队在斯坦福 SPEAR 对撞机上独立观测到同一能区的 ψ 粒子, 后统称为 J/ ψ 粒子。这一发现直接证实了粲夸克的存在, 推动了标准模型的发展, 被称为“十一月革命”。在粲夸克被发现之后, 中国成功建成北京正负电子对撞机(BEPC), 成为国际上粲物理研究的重要力量。粲夸克的发现不仅验证了理论预言, 也为粒子物理学和高能实验技术的发展奠定了里程碑。

关键词 粲夸克, GIM 机制, BEPC

Abstract This article reviews the experimental discovery of the charm quark. In the 1960s, Nicola Cabibbo proposed the mixing angle theory in weak interactions to explain the decay of strange particles, but it failed to resolve the anomaly in the decay rate of K mesons. In 1970, Sheldon Glashow, John Iliopoulos and Luciano Maiani introduced the so-called GIM mechanism, predicting the existence of the charm quark to resolve this discrepancy. In 1974, Samuel C. C. Ting's team at Brookhaven National Laboratory discovered the J particle (mass ~ 3.1 GeV) via proton-beryllium target experiments, while Burton Richter's team independently observed the ψ particle at the SPEAR collider at Stanford. The unified discovery, named the J/ ψ particle, directly confirmed the existence of the charm quark and marked the “November Revolution” in particle physics. Subsequent experiments identified charmonium states and charmed hadrons, advancing research in charm physics. After the discovery of the charm quark, China constructed the Beijing Electron-Positron Collider (BEPC), becoming a key player in international charm physics research. The discovery of the charm quark not only validated theoretical predictions but also laid a cornerstone for the development of the Standard Model and high-energy experimental technologies.

Keywords charm quark, GIM mechanism, BEPC

* 国家重点研发计划(批准号: 2022YFA1601901)、国家自然科学基金(批准号: 12205312)资助项目

1 粲夸克被发现之前的间接实验证据

20世纪50年代之前,随着对宇宙线和天然放射性材料的研究,以及对粒子加速器的初步应用,很多粒子已被发现,但是,人们尚不清楚这些粒子之间有什么联系。

物理学家希望能像化学中的元素周期表一样,总结出粒子之间的关系,因此,对不同粒子的性质研究成为了当时粒子物理学的主要目标之一。

在这些粒子中,有一些粒子,包括 Σ 粒子、 Λ 粒子和 K 粒子等的性质显得尤为特殊和奇怪。一般来说,质量越大的粒子,寿命会越短,但这些粒子的寿命远比依据它们质量推测出的寿命更长(大约 10^{-10} s)。20世纪50年代,粒子物理学家中野董夫(Nakano Tadao)、西岛和彦(Nishijima Kazuhiko)和盖尔曼(Murray Gell-Mann)等人分别引入了“奇异数(S)”这一量子数^[1-3],这些性质奇特的粒子被赋予了非0的奇异数。

奇异数不为0的粒子的性质迅速引起了很多科学家的好奇,这其中奇异数不守恒的衰变($\Delta S \neq 0$)过程成为了研究的重点。1963年,意大利物理学家卡比博(Nicola Cabibbo)在研究奇异数量子数不为0的粒子的弱相互作用衰变强度时,提出了一个观点,认为在轻子矢量流中,轻子弱相互作用与规范玻色子的耦合只能在同一“代”内进行,即,电子传递一个 W 粒子后只能产生电子中微子,缪子传递一个 W 粒子后只能产生缪子中微子,不会发生跨代的相互作用。而对于非轻子粒子的衰变,弱相互作用则可以被认为是奇异数发生了变化($\Delta S \neq 0$)和未发生变化($\Delta S = 0$)两种不同的矢量流的叠加: $V_{\text{hadron}} = aV(\Delta S = 0) + bV(\Delta S = 1)$,其中 a 和 b 是某一种常数,满足 $a^2 + b^2$

$= 1$ 。由于前述关系的存在, a 和 b 符合单位圆上坐标的形式,因此可以写成同一角度的三角函数,即 $a = \cos \theta_c$, $b = \sin \theta_c$, θ_c 即卡比博角^[4]。通过构造 θ_c ,可以使得 $V(\Delta S = 0)$ 和 $V(\Delta S = 1)$ 具有与电子或缪子的矢量流相同的强度。在这种假设之下,弱相互作用耦合的本征态可以认为是将强相互作用本征态的基矢旋转一个角度得到的。如果将卡比博的理论用现代物理学知识进行总结,可以写成如下形式:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \end{pmatrix}_L.$$

其中,目前的实验测量发现 θ_c 约为0.225。

在此理论中,带电轻子经弱相互作用衰变成中微子的耦合常数可以被写为 g ,下夸克(d)经弱相互作用衰变成上夸克(u)的耦合常数为 $g \cos \theta_c$,奇异夸克(s)经弱相互作用衰变成上夸克的耦合常数为 $g \sin \theta_c$ 。以上衰变过程的费曼图如图1所示。

卡比博的理论成功解释了很多粒子,尤其是奇异量子数不为0的粒子的衰变速率或衰变宽度。比如:

纯轻衰变: $\Gamma(\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu) \propto g^4$;

半轻衰变($\Delta S = 0$): $\Gamma(n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e) \propto g^4 \cos^2 \theta_c$;

半轻衰变($\Delta S = 1$): $\Gamma(\Lambda^0 \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e) \propto g^4 \sin^2 \theta_c$ 。

然而,卡比博的理论在解释 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的衰变宽度时,却遇到了重大问题。根据卡比博的理论,可以计算出该衰变的速率正比于 $g^8 \sin^2 \theta_c \cos^2 \theta_c$,然而实验观测到的衰变速率却远低于这一速率。这一现象预示着,或许有上、下、奇异夸克之外的新粒子参与了这一过程。

1970年,格拉肖(Sheldon Glashow)、伊利奥普洛斯(John Iliopoulos)和马亚尼(Luciano Maiani)发表了一篇关于弱相互作用强度的文章^[5],他们在卡比博理论的基础上,提出了GIM机制。GIM机制认为,“上型”夸克(上夸克、粲夸克),会通过弱相互作用衰变为“下型”夸克(下夸克、奇异夸克)的混合,而“下型”夸克的混合可以用2维的旋转来描述,即:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}.$$

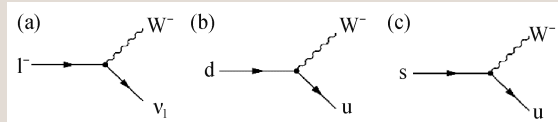


图1 (a)带电轻子、(b)下夸克、(c)奇异夸克分别通过弱相互作用衰变过程的费曼图。这些过程的耦合常数分别是 g 、 $g \cos \theta_c$ 、 $g \sin \theta_c$ 。

卡比博—GIM 模型可以推断出第四种夸克，即粲夸克(c)的存在，而粲夸克的存在可以成功解释 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的衰变速率问题。即由下夸克参与的反应过程(对反应速率的贡献约为 $g^4 \sin \theta_c \cos \theta_c$)和由粲夸克参与的反应过程(对反应速率的贡献也约为 $g^4 \sin \theta_c \cos \theta_c$)会互相抵消，因此， $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的总体衰变速率应正比于 $(g^4 \sin \theta_c \cos \theta_c - g^4 \sin \theta_c \cos \theta_c)^2$ ，即接近于 0，如图 2 所示。由于粲夸克和上夸克质量不同，以上抵消效果并不彻底，但结果仍远小于没有粲夸克参与的过程，并符合实验观测结果。

格拉肖等人对于粲夸克的存在非常有信心，在 1974 年 4 月下旬于波士顿召开的一场学术会议上，格拉肖甚至公开打赌说，在下一届这样的会议之前，带有粲夸克的粒子将会被发现，“如果没有被发现，我承诺吃掉我的帽子”。而伊利奥普洛斯则在两个月后的另一个会议上做出了类似的预测，他的赌注是几箱美酒。

在实验上也有越来越多的间接证据被发现，很多现象无法仅用三种夸克来解释。一些科学家甚至根据中性 K 介子的两种质量本征态间的质量差估算出粲夸克的质量在 1.5 GeV 左右^[6]，因此，在实验上寻找粲夸克存在的直接证据变得日益重要。

2 发现粲夸克前的实验准备

来自于麻省理工学院的丁肇中在 1965 年之后一直致力于研究矢量介子，这些矢量介子包括 ρ 、 ω 和 ϕ 粒子等，这些粒子可以衰变成正负电子对，并且它们的自旋宇称量子数 $J^{PC} = 1^{-}$ ，与光子的自旋宇称量子数相同，因此在当时也被称为“重光子”。这些粒子可以通过强相互作用衰变，因此寿命很短，在 $10^{-23} \sim 10^{-24}$ s 的数量级。由于量子力学中的不确定性原理，粒子的寿命和能量的不确定度之间存在反比关系，因此这些矢量介子的能量不确定度，即共振宽度可达数个至上百 MeV。丁肇中在位于德国汉堡的 DESY 实验上观察了这些粒子的产生以及它们衰变成正负电子对的过程，为了研究是否有更多的、能量更高的矢

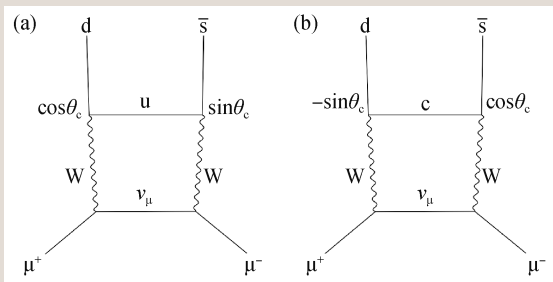


图 2 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变过程中的上夸克参与的过程贡献(a)与粲夸克参与的过程贡献(b)的费曼图。两者的耦合强度大小相似，但互相抵消

量介子，丁肇中意识到，他需要能量更高的束流源和分辨率更好的探测器来实现这一目标。

1972 年，丁肇中团队向位于美国东海岸的布鲁克海文国家实验室提出了一项实验计划，此时，该实验室拥有一台束流能量高达 30 GeV 的质子交变梯度同步加速器(Alternating Gradient Synchrotron, AGS)，利用这台加速器加速质子，使之轰击铍原子组成的靶，这个过程有可能产生一对正负电子和其他粒子：

$$p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + X,$$

通过重建正负电子的衰变过程，便可以得到衰变成这些正负电子的上级粒子的一些性质。

最终，这一实验计划被布鲁克海文国家实验室批准，并获得了 1000 小时的束流时间。之后，丁肇中实验团队花了将近 18 个月，搭建了一台利用多丝正比室等实验技术，质量分辨率达到 5 MeV 的探测器，探测器的简化示意图如图 3 所示。这台探测器由两个位于束流前向的探测臂组成，两臂均与束流方向成 14.6° 的夹角，可以分别收集来自对撞点的、经磁场弯曲的正负电子信号。在一切准备就绪后，实验的数据获取过程于 1974 年正式开始。

同样是在 1972 年，位于美国西海岸的斯坦福直线加速器中心建成了另一个粒子物理研究设备——正负电子对撞机 SPEAR。里克特(Burton Richter)是对撞机的主要设计者和建设者之一。不同于布鲁克海文的质子加速器，在 SPEAR 的加速器隧道内被加速的粒子是正负电子，正负电子束流的能量分别可达到 3 GeV。并且不同于布鲁克

海文只加速一束粒子轰击靶物质，SPEAR实验是将两束正负电子束流分别加速，然后使之相向而行并碰撞，因此碰撞能量可达6 GeV。

由于在轰击靶实验中，被加速的质子与靶粒子的质心系不同于实验室坐标系，会带走大量的动能，因此在相互作用发生的质心系中，能够参与相互作用的质心能量远低于束流能量。在AGS对撞机上，实验能达到的最大质心能量大约是8 GeV。而在SPEAR对撞机中，质心系即实验室坐标系，能够使被加速的正负电子的动能全部参

与到相互作用中，因此能够通过较低的束流能量达到较高的对撞质心能量。此外，在对撞靶实验中，由于质子和靶物质原子都不是基本粒子，因此有可能产生不同质量的粒子，对撞产物较为复杂，而在正负电子对撞机中，正负电子对撞时会湮灭，将能量传递给真空，并产生新的粒子。在特定对撞能量的情况下，有可能会产生较为干净的对撞产物。

由于正负电子对撞机的对撞产物不会像轰击靶实验一样向前冲，而是在 4π 的空间内都有可能分布，因此SPEAR实验的探测器是一个圆柱体的、包围了接近 4π 空间角的探测器。SPEAR实验探测器的结构如图4所示。

在AGS和SPEAR两个实验设备之外，位于意大利Frascati实验室的ADONE对撞机于更早些的1969年完成了建设，并已经开始了实验数据的获取。ADONE对撞机也是一个正负电子对撞机，束流能量是每条1.5 GeV，因此碰撞能量达到了3 GeV。

3 夸克的实验发现

含夸克粒子最早的实验记录可能来自于1971年科学家对宇宙线的实验观察^[7]。在同一时期，莱德曼(Leon Lederman)在AGS加速器上观察质子束流轰击靶产生的正负缪子对的反应截面时，也曾在3 GeV附近发现一个意想不到的凸起^[8]，但是因为探测器的分辨率不足以做更精细的观察，这些实验都没有导致夸克的发现。

1974年4月，丁肇中团队的实验探测器在布鲁克海文实验室完成建设，并正式开始了数据获取过程。1974年8月，丁肇中团队开始将实验磁场调整到可接受正负电子不变质量2.5—4.0 GeV能量的强度，得益于远超之前实验分辨率的探测器，在同年9月，丁肇中团队中两个分析小组分别分析实验数据时，同时在正负电子不变质量3.1 GeV附近发现了一个非常细的共振态结构。这一峰值不能被任何一个当时已知的理论描述，因此丁肇中团队对此发现非常谨慎。

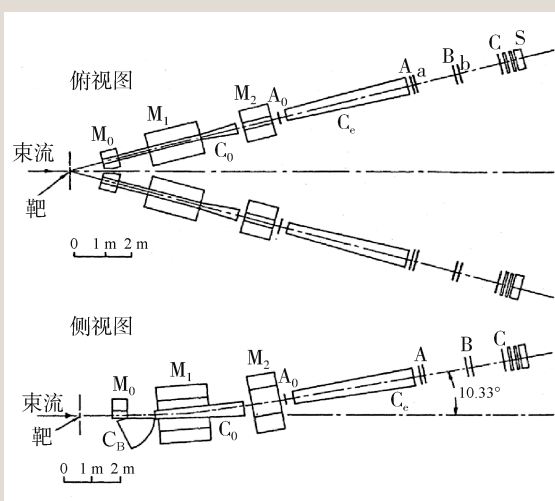


图3 丁肇中团队在AGS加速器上的实验探测器示意图。上图为俯视图，下图为侧视图。图中 M_0 、 M_1 、 M_2 是偏转磁铁， C_B 、 C_0 、 C_e 为切伦科夫计数器， A_0 、 A 、 B 、 C 为共计11层的多丝正比室， a 、 b 是两个描述仪， S 是铅玻璃以及簇射计数器

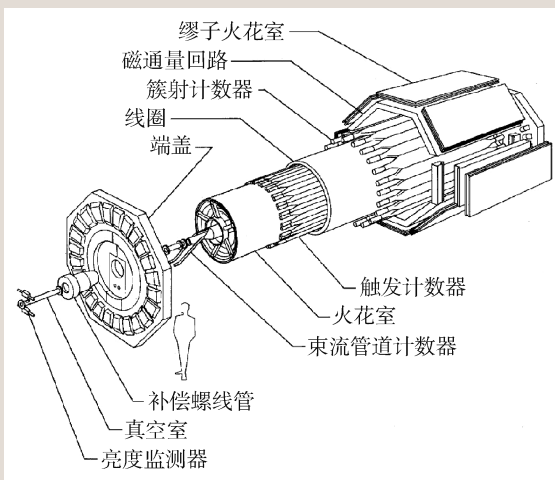


图4 SPEAR实验上的探测器示意图

在接下来的两个月中，丁肇中向布鲁克海文实验室的高能物理主任罗纳德·罗(Ronald Rau)申请了更多的束流实验时间，而在新束流时间内，丁肇中团队还将实验的磁场强度降低10%，结果仍然能在3.1 GeV附近看到清晰的共振态结构，因此团队排除了探测器接受度造成的影响。丁肇中团队一共在3.1 GeV附近看到242个数据事例，如图5(a)所示。诸多检验的结果都表明，这个新的共振态结构是一种从未被发现过的、具有全新性质的新粒子。

而在斯坦福加速器实验室的SPEAR对撞机上进行实验的团队，在1974年11月也将对撞能量调整到3.1 GeV附近，通过进行对撞能量的扫描，并测量各种状态的反应截面的形式，于11月9日在3.105 GeV能量处观测到一个细的共振态结构，如图5(b)所示。丁肇中恰好于11月

10日访问了斯坦福加速器实验室，在11月11日，两个团队共同宣布，他们分别发现了一个质量在3.1 GeV附近的新粒子。丁肇中将这个粒子命名为J粒子，里克特将这个粒子命名为 ψ 粒子。为方便交流，学界普遍将这一粒子称为J/ ψ 粒子。

丁肇中在公布这一发现前，联系了意大利Frascati实验室的ADONE实验的负责人。由于产生这一新粒子所需的质心能量仅比ADONE的设计工作能量高出约0.1 GeV，因此ADONE实验立刻决定将运行能量稍稍提高至新粒子的质量。3天之后，新粒子的信号也以极其清晰的方式在ADONE实验的实验数据中出现。

1974年12月2日，丁肇中团队、里克特团队，以及ADONE实验团队的3篇关于新粒子的文章被发表在《物理评论快报》上^[9-11]。这个粒子后来被证明是由一对正反粲夸克组成。因此，1974年11月的发现证明了粲夸克的存在，证实了GIM机制，也推动了粒子物理学标准模型的发

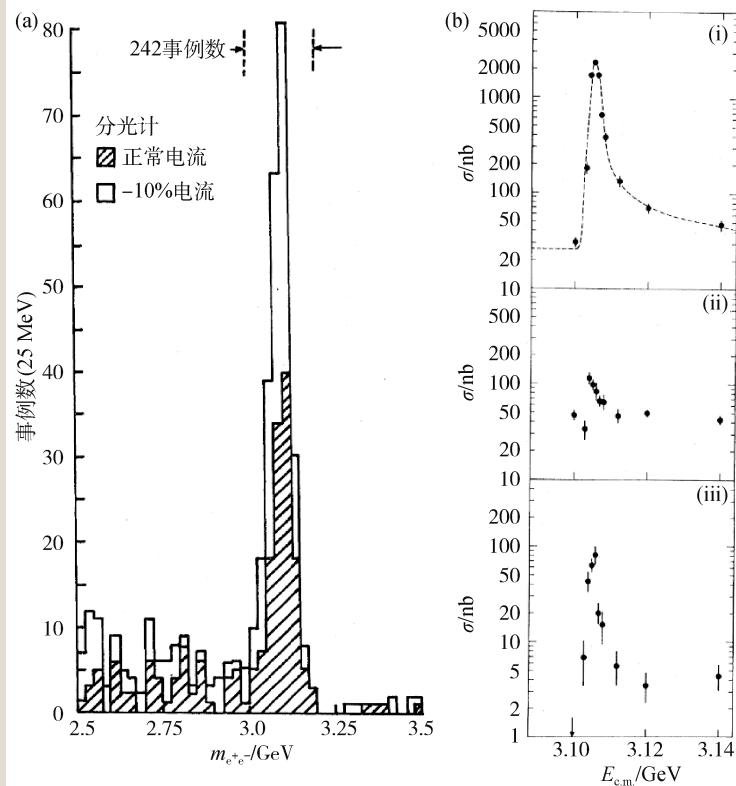


图5 (a)丁肇中团队发现J粒子的实验数据图；(b)里克特团队发现 ψ 粒子的实验数据图

展。这一成果后来也被人们称为粒子物理学领域的“十一月革命”。

格拉肖因粲夸克的发现也赢下了“吃帽子”的赌局，在三年后再次召开的同一个会议上，所有参会者都吃下了一顶由糖果制成的小“帽子”。

4 发现粲夸克的影响

在J/ ψ 粒子被三个实验发现和验证之后，世界各地的加速器和对撞机实验都对此类粒子进行了研究。SPEAR对撞机上的研究小组在发现 ψ 粒子后，十天后又宣布用同样的方法在3.7 GeV附近发现了J/ ψ 粒子的激发态，即 ψ' 粒子^[12]。1977年，SPEAR对撞机上的研究小组又宣布发现了J/ ψ 粒子的另一个激发态 ψ'' ^[13]。这些粒子都是由一对正反粲夸克组成的粲夸克偶素。

粲夸克和反粲夸克都是自旋1/2的粒子，当它

们形成粲偶素时,两个夸克的自旋可以是反平行的,也可以是平行的。当正反粲夸克的自旋为反平行时,总自旋 $S=0$,可构成自旋单态,而当正反粲夸克的自旋为平行时,总自旋 $S=1$,这时可构成自旋三重态。 J/ψ 粒子, ψ' 粒子以及 ψ'' 均为自旋单态粒子,而自旋三重态粒子,包括 χ_{c0} 、 χ_{c1} 、 χ_{c2} ,也很快在对撞机实验上被发现^[14]。

除了粲偶素之外,粲夸克也可以与轻的夸克结合,形成显粲粒子,这些粒子包括 D^0 (粲夸克与反上夸克结合)、 D^+ (粲夸克与反下夸克结合)、 D_s^+ (粲夸克与反奇异夸克结合)。前文提到的 ψ'' 的质量高于两个质量最小的显粲粒子(D^0 或 D^+)之和,因此可以衰变成一对正反 D^0 或 D^+ 粒子。

自“十一月革命”之后,大量的含有粲夸克的粒子被发现,使得对含粲粒子进行研究成为粒子物理发展的必经之路,建造一台新的、高亮度的、在相应能区运行的正负电子对撞机成为了研究相关课题的迫切需求。

1977年8月,获得诺贝尔奖后的丁肇中访问中国,接受邓小平会见时,邓小平表示:“科学技术要赶超世界先进水平,可以在部分领域或一些方面先赶超。科研设施要从最先进的着手,而高能加速器就是个重点。”^[15]

1979年1月1日,中美正式建交,同年1月29日至2月5日,邓小平访美。期间签订了《中美科学技术合作协定》,同时签订了下属的第一个子协定《中美高能物理合作协定》。根据这一协定,中美高能物理领域正式建立了一套跨国合作机制,这一机制的一项主要合作内容就是完成高能加速

器设计、建设工程,帮助中国实现其高能物理目标。在这一合作协定的框架下,并在丁肇中、李政道等海外华人科学家的支持下,大量中国高能物理人才在美国和欧洲得到了系统的训练,为在中国建造加速器奠定了人才基础。

当年,中国高能物理学界正在酝酿一个建造质子加速器的计划。然而,由于国情所限,该计划困难重重。而正是由于粲夸克的发现,使得科学家意识到,在 τ 轻子和含粲夸克粒子能区的正负电子对撞机有着巨大的科研潜力。

在李政道的建议下,当时的中国物理学家形成共识:建造一个运行在 τ 轻子和含粲夸克粒子能区的、束流能量在2.2 GeV的正负电子对撞机既符合我国国情,又能够聚焦国际上新兴和前沿的 τ —粲物理课题。至此中国的物理学研究正式走进了粲物理领域。

1984年10月7日,北京正负电子对撞机(BEPC)正式开工建设,1988年10月16日,建成的北京正负电子对撞机成功实现正负电子对撞。同年,在相同能区运行,但亮度已被北京正负电子对撞机超越的SPEAR对撞机停止了束流对撞。北京正负电子对撞机成为了世界上在 τ —粲能区亮度最高、能力最强的对撞机。在接下来数十年的运行中,BEPC和它的升级版BEPC II在粲物理领域取得了许多重要的成果。时至今日,北京正负电子对撞机上的北京谱仪实验已积累了世界上最大的来自正负电子对撞机的含粲夸克粒子样本,这使得中国成为了国际上粲物理研究的最重要力量。

参考文献

[1] Nakano T, Nishijima K. Prog. Theor. Phys., 1953, 10(5):581
 [2] Nishijima K. Prog. Theor. Phys., 1955, 13(3):285
 [3] Gell-Mann M. Il Nuovo Cimento, 1956, 4:848
 [4] Cabibbo N. Phys. Rev. Lett., 1963, 10:531
 [5] Glashow S L, Iliopoulos J, Maiani L. Phys. Rev. D, 1970, 2:1285
 [6] Gaillard M K, Lee B W. Phys. Rev. D, 1974, 10:897
 [7] Niu K, Mikumo E, Maeda Y. Prog. Theor. Phys., 1971, 46:1644
 [8] Christenson J H, Hicks G S, Lederman L M *et al.* Phys. Rev. D, 1973, 8:2016

[9] Aubert J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33:1404
 [10] Augustin J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33:1406
 [11] Bacci C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33:1408
 [12] Abrams G S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33:1453
 [13] Rapidis P A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1977, 39:526
 [14] Braunschweig W *et al.* Phys. Rev. B, 1975, 57(4):407
 [15] 中共中央文献研究室编. 邓小平年谱 1975—1997(上). 北京: 中央文献出版社, 2004. pp.183—184