

4 以粲物理、中微子物理为代表的粒子物理研究

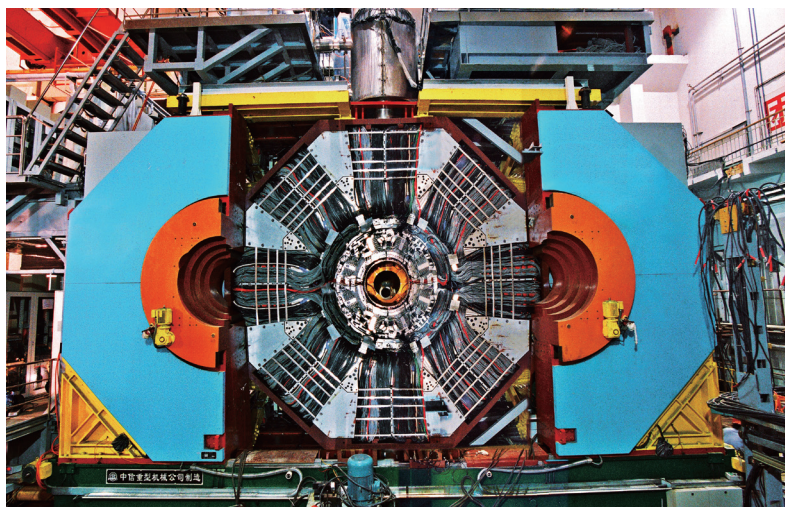
北京正负电子对撞机/北京谱仪实验发现四夸克物质（粲物理）

北京正负电子对撞机（BEPC）是我国第一台大科学装置，1988年10月建成，被《人民日报》称为“这是我国继原子弹、氢弹爆炸成功、人造卫星上天之后，在高科技领域又一重大突破性成就”。2004—2008年，BEPC进行了重大改造，对撞亮度提高了80倍以上，成为国际上最先进的双环对撞机之一，也是粲能区迄今为止亮度最高的对撞机。北京谱仪III（BESIII）是运行在BEPCII上唯一的粒子物理实验，通过正负电子对撞研究物质的基本结构。BESIII实验国际合作组由来自11个国家和地区的55个成员单位、400多位科学家组成。自2009年运行以来，BESIII合作组在强子谱、粲偶素和类粲偶素以及粲物理研究等方面取得多项重大物理成果。

粒子物理夸克模型认为介子由一个夸克和一个反夸克，重子是由三个夸克或三个反夸克组成。夸克模型的预言与很多实验事实一致，表明它非常成功。然而描述夸克之间强相互作用的标准动力学理论——量子色动力学并不排除这些常规强子以外的其他粒子的存在，如混杂态（除夸克外还有激发的胶子）、分子态（两个或多个介子或重子束缚在一起）、多夸克态（含四个夸克或更多）、胶子球（只含胶子不含夸克）等。实验上人们对非常规强子——奇特强子态的寻找一直没有停止，但长期没有发现可靠的证据表明已观测到它们的存在。

BESIII合作组于2013年3月宣布发现了一个新的共振结构 $Z_c(3900)$ ，因为其中含有一对正反粲夸克且带有和电子相同或相反的电荷，提示其中至少含有四个夸克，这极有可能是科学家们长期寻找的介子分子态或四夸克态。相关研究论文发表在2013年6月21日 *Physical Review Letters* 上。这一发现得到了国际物理学界的高度评价。*Nature* 杂志发表了题为“夸克‘四重奏’打开了物质世界一扇崭新的大门”的新闻报道，强调“找

到一个四夸克构成的粒子将意味着宇宙中存在奇特态物质”；2013年12月30日，美国物理学会在其主办的 *Physics* 杂志公布了2013年物理学领域11项重要成果，“发现四夸克物质”位列榜首。

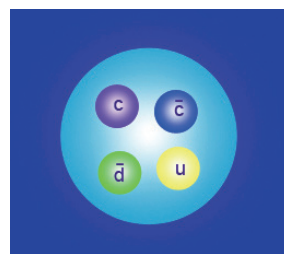
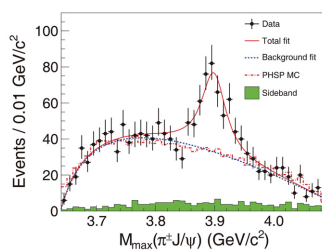


北京谱仪III

随后，BESIII合作组又发现了 $Z_c(4020)$ 和 $Z_c(4025)$ ，它们极有可能是 $Z_c(3900)$ 质量较高的伴随态；发现了 $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 的中性态；确定了 $Z_c(3900)$ 的自旋宇称量子数。这些发现揭示了可能的四夸克物质谱系的存在，对于理解物质结构有重要意义。 $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 等奇特强子态的发现，将我国的强子物理实验研究推进了一大步，BESIII实验已步入奇特态强子研究领域的国际最前列。BEPC和BEPCII是大量高技术的集成，并成为众多高新技术的源泉和高新技术产业的摇篮。BEPC和BEPCII的许多关键部件的研制采取了世界上独一无二的方法，大量采用国际先进技术，填补了我国加速器领域的多项空白，使国内企业在相关技术领域有了大幅度提高和突破，带动了我国机械、电子工业技术的高科技发展，大大提升了我国加速器设备制造及相关高技术产业能力，

推进了我国医用加速器、辐照加速器和工业 CT 等产业的发展。国内很多企业在参与 BEPC 和 BEPCII 的建造过程中实现了跨越式发展。

另外，在建设 BEPC 和开展高能物理实验国际合作中，高能物理所在国内率先实现计算机国际联网，1986 年进入国际 Internet，90 年代初引进了 www 网页，并向全国推广，对我国网络技术的发展起到了巨大的推动作用。



左图 BESIII 实验发现的带电类粲偶素 $Z_c(3900)$ ；右图 它可能的夸克结构示意图

专家点评

人类对微观世界物质组成的探索是无止境的。粒子物理学的研究表明，组成原子核的质子和中子并不是最“基本”的粒子，它们其实都是由三个夸克组成的。实验上已经发现了六种夸克，按其质量从轻到重排序为：上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克、顶夸克。其中粲夸克的质量约为质子质量的 1.5 倍。一对粲夸克和反粲夸克可以组成一个被称作粲偶素的介子家族。北京正负电子对撞机的对撞能量正好设定在产生粲偶素的能区，是目前国际上粲粒子能区亮度最高的加速器。北京谱仪合作组（BESIII）在粲物理实验研究中取得了多项国际领先的成果，其中类粲偶素四夸克态的发现就是最突出的成果之一。传统的夸克模型只包含由三个夸克组成的重子和一对正反夸克组成的介子。BESIII 发现的 $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 等共振结构很可能是一种新型强子，即所谓的“四夸克态”，它们由含有粲夸克和轻夸克的两个夸克和两个反夸克组成，其中包括由一对粲介子组成的粲介子分子态。“四夸克态”的发现和确认将是对传统夸克模型强子分类的突破，对于理解物质世界的组成和强相互作用的本质具有重要意义。这也标志着在新型强子态研究领域 BESIII 实验已步入国际最前列。

点评专家

赵光达 中科院院士、粒子物理学家，北京大学物理学院理论物理所教授。1994 年被评为国家有突出贡献的

中青年专家。1997 年获周培源物理奖。在粒子物理学的强子物理和量子色动力学等方面做出了突出贡献。

中微子物理研究国际领先——大亚湾反应堆中微子实验发现新的中微子振荡

假如人的视力能够放大 10 万亿倍，我们就进入了最微观的粒子物理世界，会发现四周有不计其数的微观粒子穿梭不停，其中最多的就是光子和中微子。中微子在微观的粒子物理和宏观的宇宙起源及演化中均扮演着极为重要的角色。

中微子又可以分为电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子，不同类型的中微子可以在飞行中从一种类型转变成另一种类型，即“中微子振荡”。中微子振荡现象说明

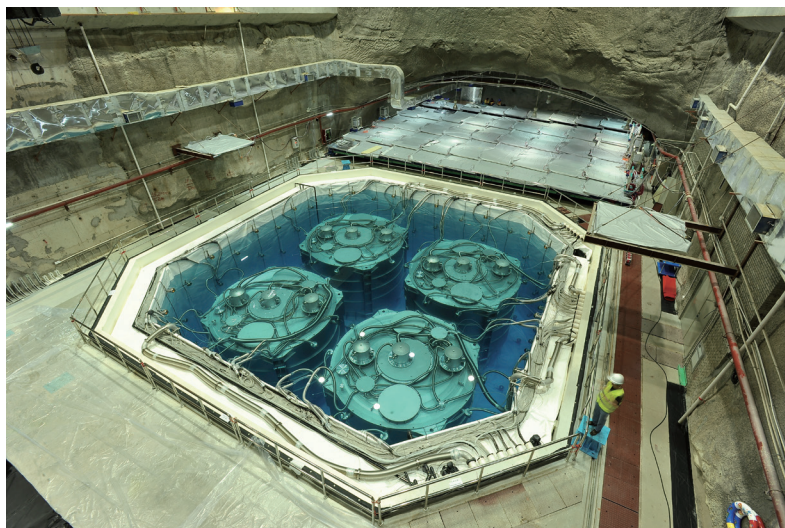
了中微子是有质量的，这突破了粒子物理标准模型对中微子的描述。因此，对中微子的深入研究有可能导致新物理理论框架的发现。

中微子振荡模式在理论上有三种，1998 年日本超级神冈实验发现大气中微子振荡（对应中微子混合角 θ_{23} ），随后太阳中微子振荡（对应中微子混合角 θ_{12} ）也被多个实验证实，日本的梶田隆章和加拿大的阿瑟·麦克唐纳因此获得了 2015 年诺贝尔物理学奖。第三种振荡

对应中微子混合角 θ_{13} ，因测量难度更大，一直没有被发现，是科学界关注的焦点。

建于深圳的大亚湾反应堆中微子实验，是中微子物理研究的大型国际合作实验，6个国家和地区的40个科研机构参加，中科院高能物理所是牵头单位。通过探测来自反应堆的中微子，于2012年3月精确测量到物理学中的基本参数——中微子混合角 θ_{13} ，首次观察到第三种中微子振荡模式。此后，科学家们又根据实验数据三次发表了更为精确的 θ_{13} 值，明确了未来中微子物理研究的发展方向，也为今后中微子物理、天体物理、宇宙学等前沿科学研究提供精确的初值输入，对基本粒子物理的大统一理论、寻找与鉴别新物理，甚至揭开宇宙起源中的“反物质消失之谜”都具有重要意义。

这项我国本土诞生的重大物理成果标志着我国的中微子实验研究从无到有并走到了世界前列。实验结果一经发布，立即在全球科学界引起热烈反响，被评价为中微子物理的里程碑，入选了美国 *Science* 杂志评选的2012年度“十大科学突破”，大亚湾中微子实验首席科学家和整个团队也因此获得了2016年“基础物理学突破奖”，这是中国科学家和以中国科学家为主的实验团



大亚湾中微子实验装置

队首次获得该奖项。实验团队和个人还获得了美国物理学会潘诺夫斯基奖、亚太物理学会杨振宁奖、中科院杰出成就奖等多个国际国内奖项。

作为大亚湾中微子实验二期的“江门中微子实验”正在建设中，实验站将建在广东开平打石山地下700米深处，计划2020年投入运行。这是我国主持的第二个大型中微子实验，不仅可以通过研究反应堆中微子振荡测量中微子质量顺序，还可以探测太阳中微子、超新星爆发产生的中微子等，涉及众多天体物理和宇宙学的基本问题。

专家点评

中国的角色转变无疑也（给未来高能物理的发展）增加了悬念。从历史上看，中国只是粒子物理界的小角色，但在2012年，凭借在反应堆驱动的中微子物理研究上的骄人成绩，她走上了世界舞台。该实验成果揭示了三种类型中微子中的两个的混合，远超预期。这个大的混合意味着中微子和反中微子之间基本对称性的差异有可能在长基线实验中观察到，解释宇宙早期物质与反物质之间的不平衡现象。（摘自英国 *Nature* 杂志，2013年，504期，第368页）

点评专家

Nigel Lockyer 美国费米国家加速器实验室主任，曾任加拿大英属哥伦比亚大学和美国宾夕法尼亚大学教授。2007—2013年担任加拿大国家粒子物理与核物理实

验室（TRIUMF）主任。因测量到反常长寿命的B介子获得2006年美国物理学会潘诺夫斯基奖。