

# 粒子物理

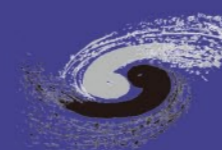
## Particle Physics

宇宙大尺度观测已经达到130亿光年，但是我们没有看到“边”

——宇宙向大的方向延伸是无限的！

宇宙小尺度观测已经达到千万亿分之一厘米，我们依然没有寻到“头”

——宇宙向小的方向延伸也是无限的！

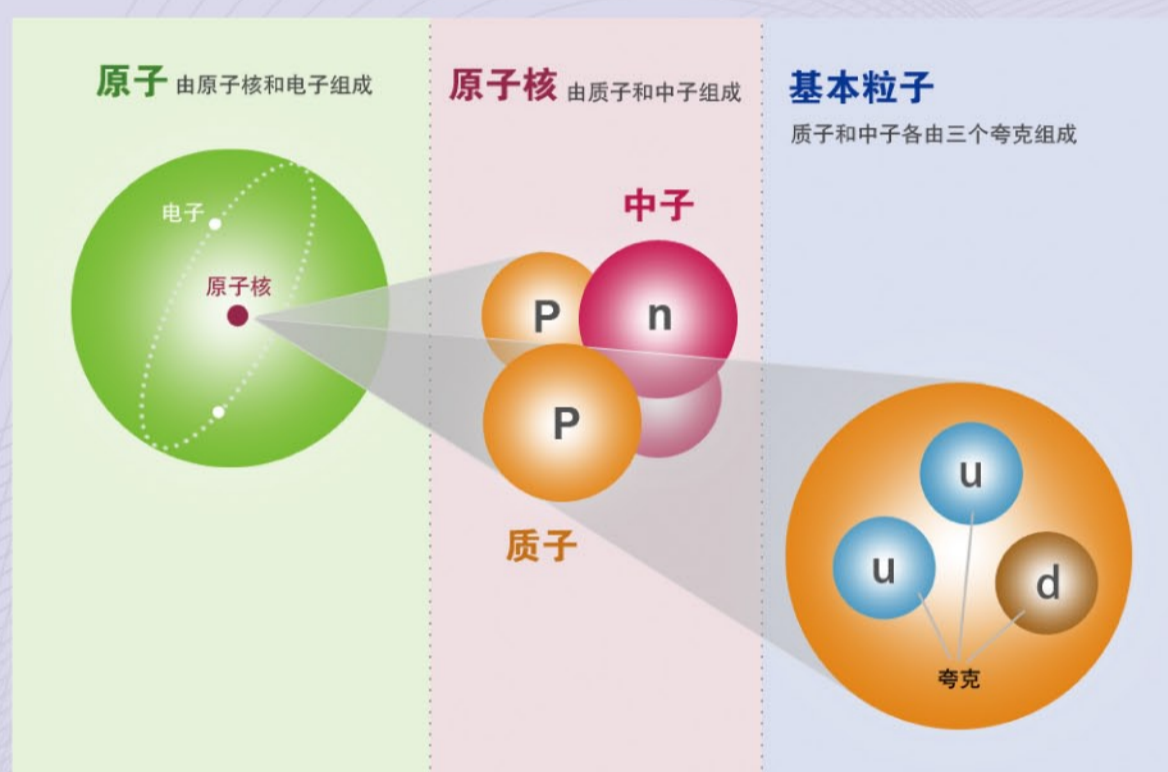


## » 什么是粒子物理

粒子物理又称高能物理，研究比原子核更深层次的微观物质的结构性质，及其在很高的能量下相互转化的现象、原因和规律。

随着物理学的不断发展，人类对物质构成的认知逐渐深入，“基本粒子”的定义也随之发生变化。早期，人们认为质子、中子、电子、 $\mu$ 子是构成物质的最小单元，即“基本粒子”，在发现 $\pi^+$ 、 $K^+$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Delta$ 等百余种其他“基本粒子”后，物理学家猜测这些“基本粒子”还有内部结构。

要研究这些“基本粒子”的内部结构，实验上需要把粒子加速到很高的速度（也就是很高的能量）然后让它们碰撞，一般需要几百兆电子伏（MeV）到几百千兆电子伏(GeV)甚至更高的能量，通过分析碰撞后的产物可以推测粒子是由什么组成的。目前，已知的构成物质的基本粒子有12种，包括6种夸克、3种带电轻子和3种中微子。



■ 原子结构示意图

观测对象	尺度 (cm)	探针能量	实验工具
细胞/细菌	$10^{-3}\sim 10^{-5}$	0.1~10eV	光学显微镜
分子	$\sim 10^{-7}$	~1keV	电子显微镜、同步辐射装置等
原子	$\sim 10^{-8}$	~10keV	同步辐射装置等
原子核	$\sim 10^{-12}$	>100MeV	低中能加速器
强子	$\sim 10^{-13}$	>1GeV	高能加速器
夸克、轻子	$< 10^{-16}$	>1TeV	对撞机

■ 微小对象的尺度和相应的观测方法

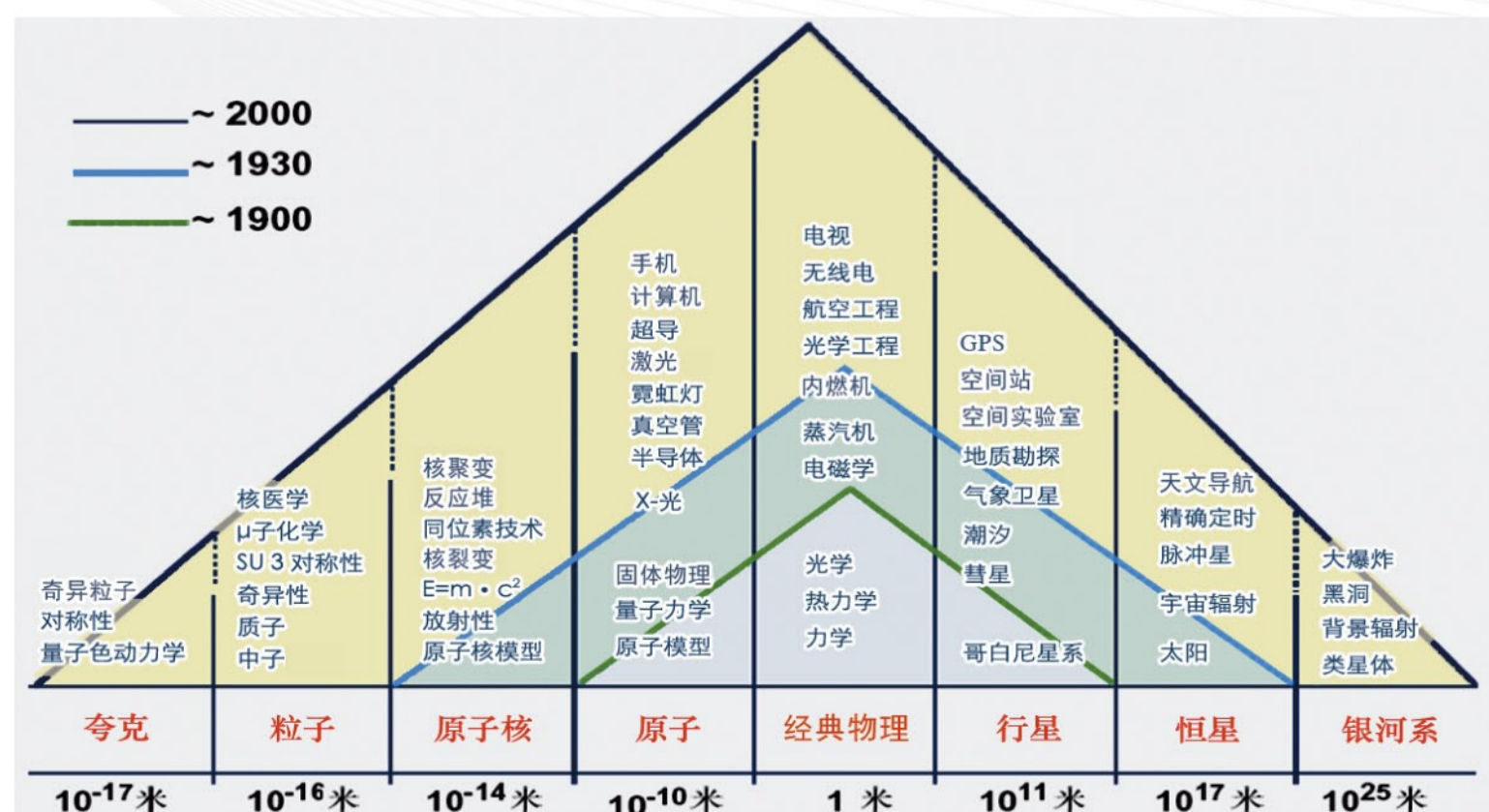
## » 粒子加速器——认识微观世界的利器

在物理学中，人们对任何一个问题的认识，都是随着实验和理论的发展而逐步加深的。随着科学技术的进步，科学家们用来观测物质结构的实验装置越来越先进，从显微镜到粒子加速器，人类对物质构成的认知也越来越深入，逐步从细胞/细菌水平发展为分子、原子、原子核、强子、夸克水平。

早期粒子物理的研究手段是宇宙线观测，以后逐步发展到以粒子加速器和大型探测器为主的大科学装置。粒子加速器利用电磁场，将微小带电粒子加速到非常高的能量，速度接近光速，然后“轰击”到固定的靶上或彼此对撞，用探测器来探测并记录碰撞所产生微小粒子的各种信息，如粒子径迹、衰变产物、飞行时间、动量、能量、质量等，以研究微观物质深层次的结构和运动规律。

## » 今天的科学 明天的技术

物质微观结构的研究是各门学科的基础。物理、化学、材料科学、生物、医学、农业……都离不开物质微观研究的成果。历史上物质结构研究的每一进展都有重大应用，粒子物理也不例外。



### » 基于加速器的粒子物理研究

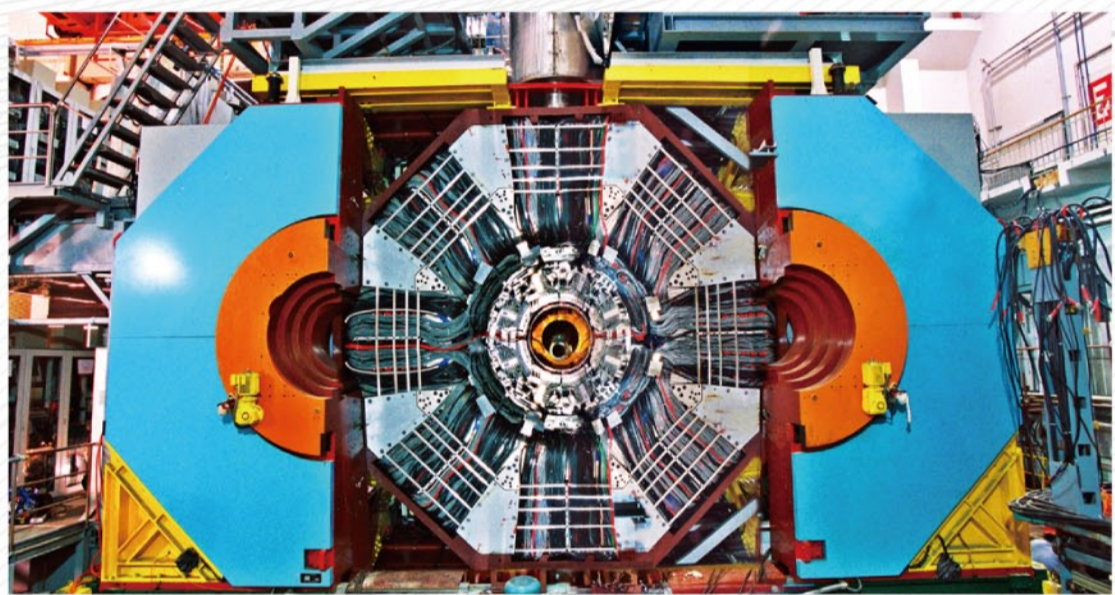
■ 我国第一台大科学装置——北京正负电子对撞机（BEPC）于1988年10月建成并稳定运行，为我国开展粒子物理实验创造了条件，并取得了许多重要的物理成果，特别是粲物理实验研究处于国际领先地位，高能所也因此成为世界高能物理实验研究中心之一。

■ 北京正负电子对撞机于2004年至2008年进行了重大改造。改造后的BEPCII成为粲物理能区国际领先的双环对撞机。2013年，BEPCII亮度已比改造前提高了70倍。北京谱仪III（BESIII）是BEPCII上的大型粒子探测器，它测量正负电子对撞后的衰变产物，重建对撞过程，以开展物理研究。

■ 欧洲核子研究中心建造的LHC是世界上最大的大型强子对撞机，质子束流的总能量能达到14万亿电子伏特。高能所对LHC上的CMS和ATLAS探测器的建造作出重要贡献。CMS和ATLAS两个实验的物理目标是寻找Higgs粒子、额外维度和宇宙中神秘的暗物质。



■ BEPCII储存环双环



■ 北京谱仪III

### » 非加速器粒子物理研究

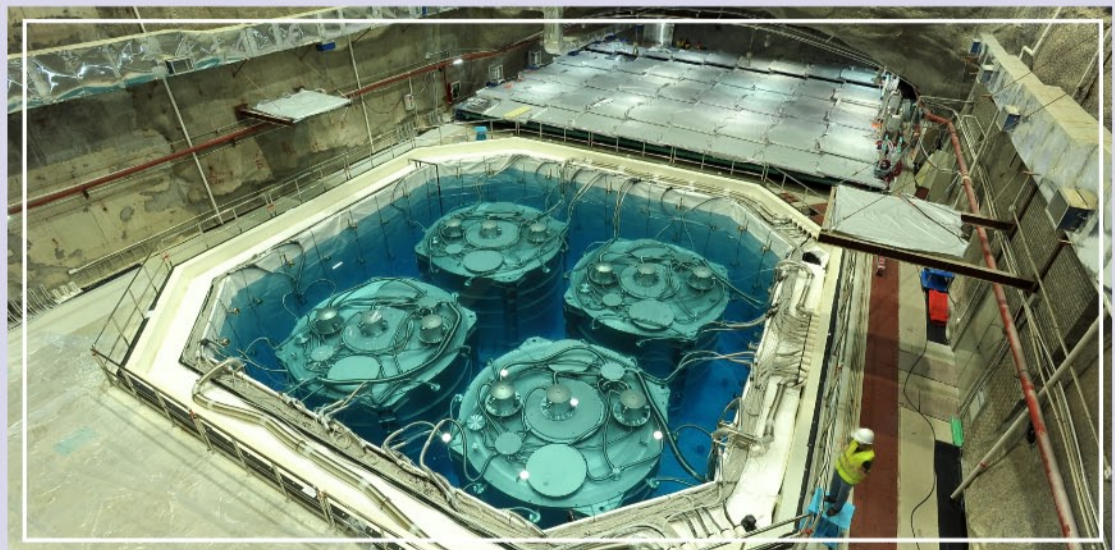
■ 粒子物理研究在天体物理和宇宙起源与进化的研究中起着极为重要的作用，并与天体物理、宇宙线学交叉融合形成了粒子天体物理。高能所作为我国粒子天体物理实验领域的主要研究基地，主要进行宇宙线观测、中微子物理研究、天体物理研究、空间科学实验、深地实验等非加速器粒子物理研究。

■ 1990年，高能所在海拔4300米的西藏羊八井建立了国际宇宙线观测站，中日合作建设了广延大气簇射阵列，1998年中意合作建设了全覆盖阻性板探测器。依托这些大型宇宙线探测器，可以开展宇宙起源、天体演化、太阳活动等科学问题的研究。

■ 2012年10月，以我为主的重大国际合作项目——大亚湾反应堆中微子实验站全面建成，利用反应堆中微子实验精确测量中微子物理参数 $\theta_{13}$ ，为中微子物理、天体物理、宇宙学等前沿科学研究提供精确的初值输入。



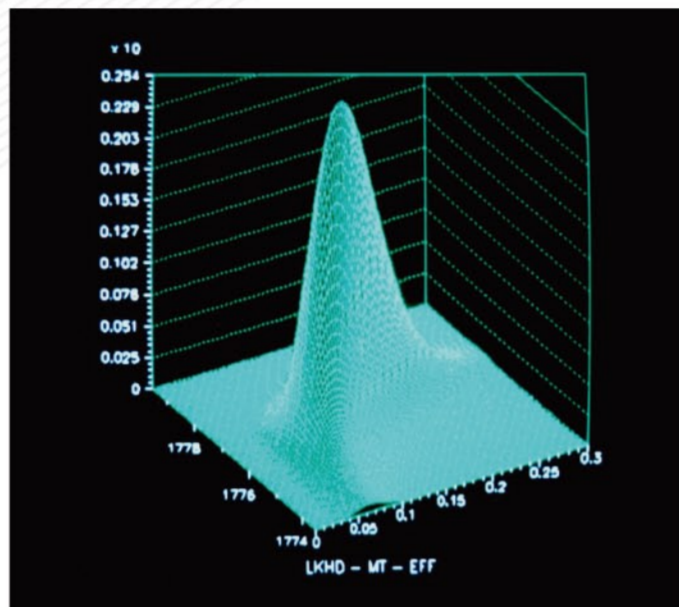
■ 西藏羊八井国际宇宙线观测站，左侧为中日合作AS $\gamma$ 实验阵列，右侧为中意合作ARGO-YBJ实验大厅



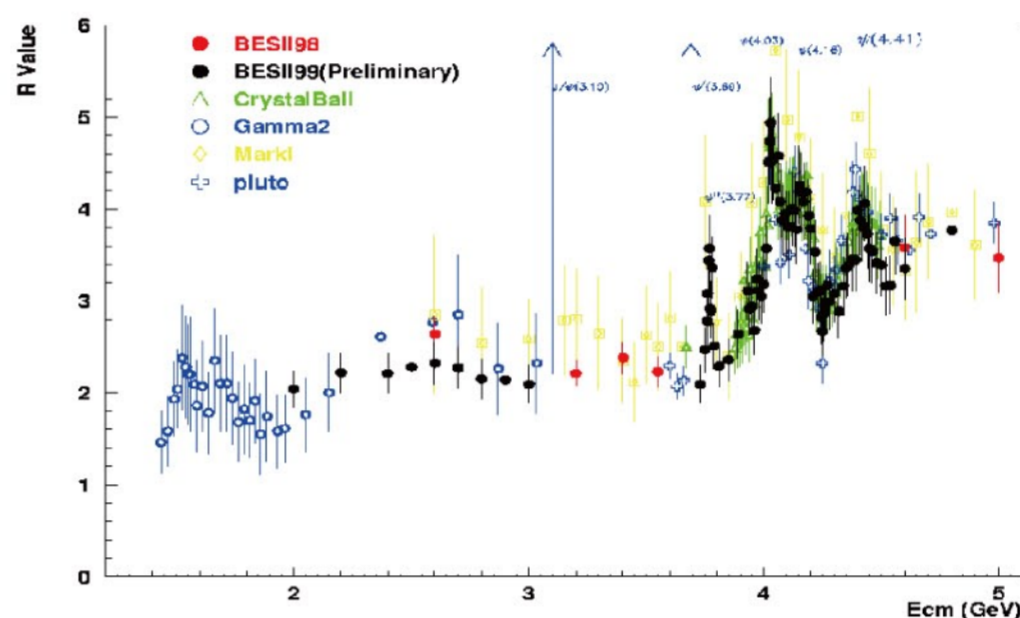
■ 大亚湾反应堆中微子实验站

## » 粲物理研究处于国际领先水平

■ 北京谱仪国际合作组取得了大批重要的物理成果，包括  $\tau$  轻子质量的精确测量、2–5GeV 强子反应截面的精确测量、发现新的共振结构  $Z_c(3900)$  等，在  $\tau$ -粲物理能区的研究处于国际领先水平。国际权威的《粒子物理手册》(PDG) 2010 年版引用北京谱仪国际合作组的实验数据近 600 项。



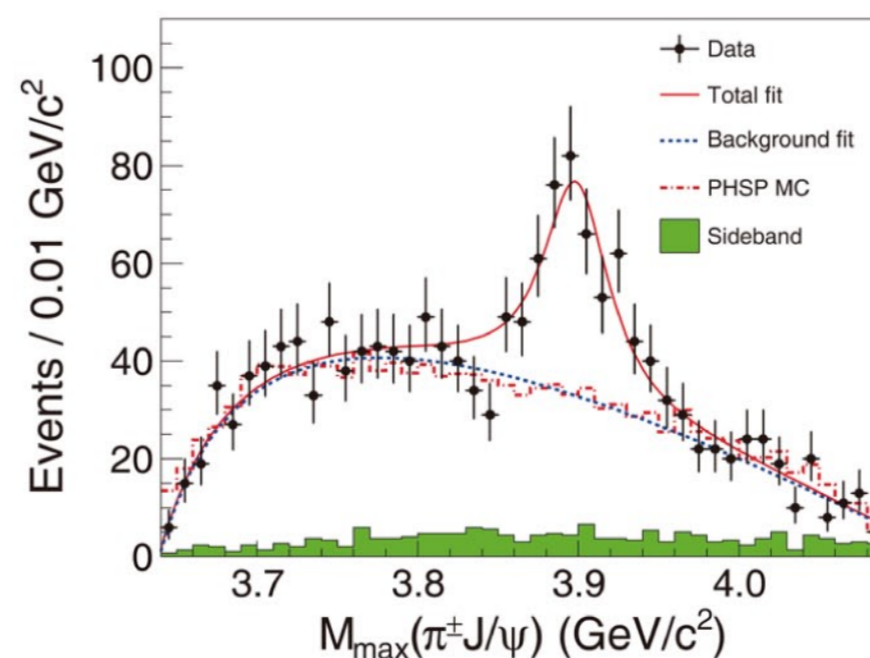
■ “ $\tau$  轻子质量的精确测量”将  $\tau$  轻子质量的测量精度提高了10倍，并将该质量值降低了3倍标准偏差，消除了人们对轻子普适性的怀疑，验证了标准模型理论中的轻子普适性假设



■ “2–5GeV强子反应截面的精确测量”将平均测量精度提高了2–3倍，使精细结构常数  $\alpha(M_z^2)$  的误差减少了2倍，大大提高了标准模型对Higgs粒子质量的预测精度

■ BESIII 实验拥有目前世界最大的  $J/\psi$ ,  $\Psi'$  和  $\Psi(3770)$  数据样本,进一步巩固和发展了我国在粲物理研究领域的国际领先地位。截至 2013 年 8 月已在美国《物理评论快报》等国际一流学术刊物上发表文章 50 多篇，在国际会议上报告 100 余次，其中约一半为特邀大会报告。

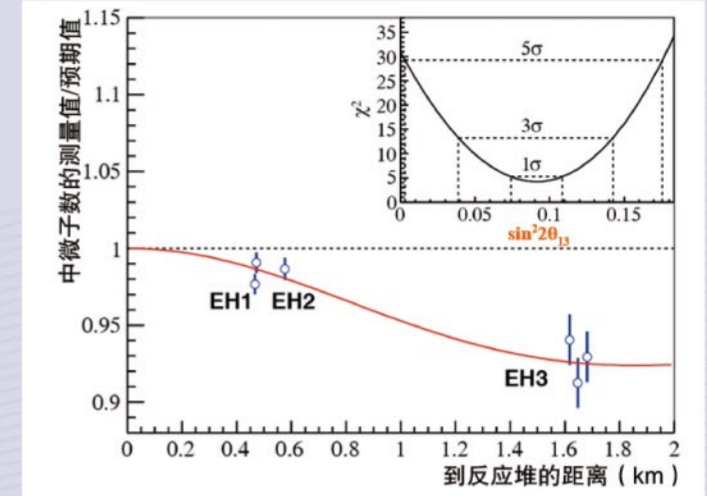
■ BESIII 实验在 2013 年采集的数据中发现一个新的共振结构，命名为  $Z_c(3900)$ 。粲能区的粒子一般都含有粲夸克和反粲夸克，称为粲偶素。粲偶素粒子都是中性的，不带电荷。新发现的  $Z_c(3900)$  含有粲夸克和反粲夸克且带有和电子相同或相反的电荷，提示其中至少含有四个夸克,可能是科学家们长期寻找的一种奇特态强子。2013 年 6 月,论文发表在美国《物理评论快报》上,《自然》杂志发表了题为“Quark quartet opens fresh vista on matter (夸克‘四重奏’开启物质世界新视野)”的报道。



■ 北京谱仪III实验发现的新的共振结构 $Z_c(3900)$

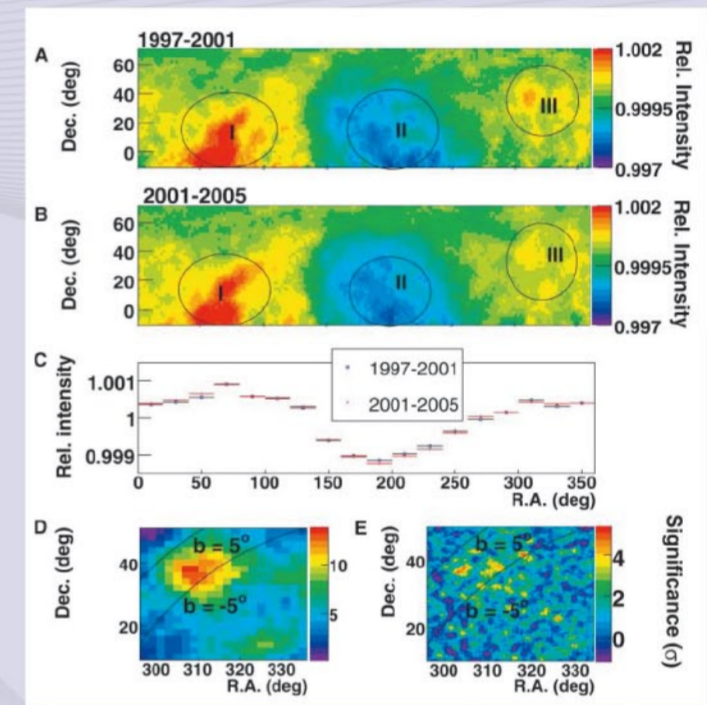
## » 反应堆中微子实验跃居世界领先水平

■ 2012年3月8日，大亚湾中微子实验以5.26的置信度发现新的中微子振荡，并测量到其振荡几率为9.2%，误差为1.7%。由于采取了一系列新方法与新设计，实验达到了前所未有的精度，无振荡的几率仅为千万分之一。论文于2012年4月27日发表在美国《物理评论快报》。该发现为未来中微子物理的发展指明了方向，被评价为中微子物理的一个里程碑，入选美国《科学》杂志2012年度全球十大科学突破。



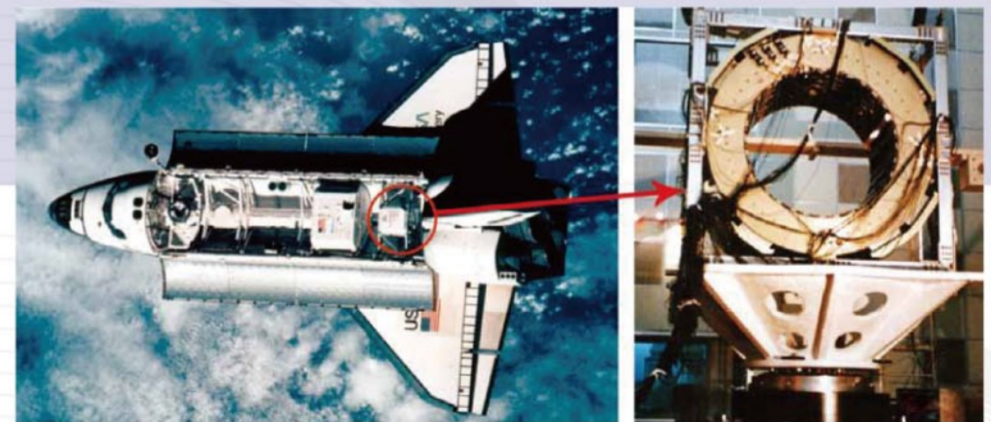
## » 宇宙线物理研究取得里程碑式成果

■ 依据西藏羊八井国际宇宙线观测站“大气簇射探测器阵列”所获得的近四百亿观测事例，中日合作AS $\gamma$ 实验发现宇宙线各向异性以及围绕银河系中心旋转的证据，物理结果于2006年10月发表于美国《科学》杂志。



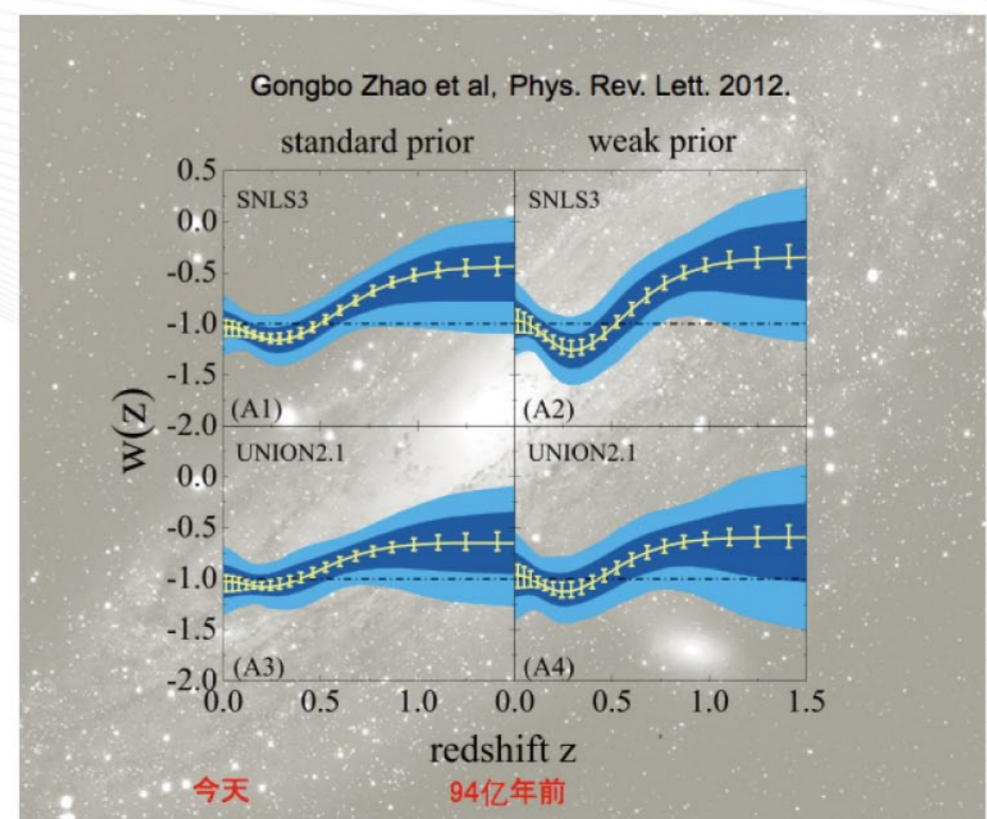
## » 暗物质、暗能量研究崭露头角

■ AMS实验是大型国际合作项目，其科学目标是寻找宇宙中的反物质、暗物质及精确测量宇宙线的成分和能谱。高能所作为主要力量参与了永磁体系统和主结构、电磁量能器的研制。2013年4月，实验发表了第一批物理成果，高能所在物理分析工作中起了重要作用。



■ AMS-01永磁体系统在进行环境模拟实验

■ 2004年高能所理论物理室张新民研究组提出了精灵 (Quintom) 暗能量模型，其特点是状态方程越过-1，开创了暗能量研究的新领域，至2013年8月该论文单篇引用689次。2012年，该组及合作者从最新的天文观测数据中重组出了暗能量状态方程 $w$ 从宇宙43亿年至今随时间演化的历史，发现 $w$ 在 $2.5\sigma$ 的置信度内随时间变化，且越过 $w=-1$  (见右图)。



## » 中国粒子物理的未来发展

		目前运行中	未来规划中
基于加速器的粒子物理实验	高精度前沿	北京谱仪III实验 国际合作: BelleII、PANDA、COMET实验	国际合作: 国际直线对撞机 Higgs工厂→质子对撞机
	高能量前沿	国际合作: CMS、ATLAS实验	
非加速器粒子物理实验	地下暗物质和中微子实验	大亚湾中微子实验	江门中微子实验
		国际合作: EXO双β衰变实验 国际合作: 暗物质实验	锦屏地下实验
	地面宇宙线实验	羊八井宇宙线实验	LHASSO宇宙线实验
	空间实验	国际合作: AMS实验 硬X射线调制望远镜	宇宙高能辐射和暗物质粒子探测HERD

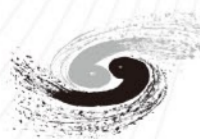
■ **高精度前沿实验**: 利用高亮度加速器和高精度探测器, 获得高统计性的精确测量数据, 精确检验标准模型, 探索超越标准模型的新现象。代表有美国的B介子工厂、日本的B介子工厂、意大利的 $\phi$ 工厂和中国的北京正负电子对撞机(BEPCII)等。BEPCII将是未来十年在2–4.6GeV能区研究 $\tau$ -粲能区物理唯一的实验装置, BEPCII上的BESIII实验将积累千兆量级的世界上最大的共振态数据样本, 保持我国在 $\tau$ -粲物理研究领域的领先地位。

■ **高能量前沿实验**: 利用高能量对撞机和高精度探测器, 寻找Higgs粒子和超越标准模型的新粒子, 探索新物理现象。代表有欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC), 计划建造中的国际直线对撞机(ILC)和研讨中的Higgs工厂。2012年7月, 欧洲核子中心宣布发现疑似Higgs粒子后, 世界各大实验室相继提出建造环形正负电子对撞机作为Higgs工厂。中国科学家也于2012年9月提出了建造周长为50km(70 km)的环形Higgs工厂的建议, 该装置未来可升级为质子对撞机。

■ **地下中微子和暗物质实验**: 由于山体对宇宙射线和人类活动的屏蔽, 地下实验室是开展中微子物理和暗物质探测等重大基础性前沿课题的理想场所。大亚湾实验精确测量到中微子物理的重要参数 $\theta_{13}$ 后, 中微子质量顺序成为科学前沿的热点问题。江门中微子实验将在地下700米建设实验站, 开展测量中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数等科学前沿研究, 发展中国在中微子研究领域的领先地位。同时, 高能所计划利用中国锦屏地下实验室开展暗物质探测、双 $\beta$ 衰变等方面的研究。

■ **地面宇宙线实验**: 宇宙线物理学是一门重要的前沿交叉学科, 对粒子物理学、天文学和宇宙学的研究具有重要意义。高能所在海拔4300米的西藏羊八井建有宇宙线观测站, 中日AS $\gamma$ 实验、中意ARGO-YBJ实验在高能宇宙线和 $\gamma$ 射线天文学, 特别是大视场巡天观测领域处于国际先进行列。目前高能所正在规划建设第三代 $\gamma$ 射线巡天望远镜LHAASO, 将开展探索高能宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和新物理前沿的研究。

■ **空间实验**: 随着现代航空航天技术、空间探测技术的发展, 大量科学前沿研究在宇宙空间开展, 其中对占宇宙物质构成27%的暗物质的探测研究尤为重要。中国“暗物质探测”计划的第一步是2015年发射一颗暗物质粒子探测卫星, 通过高分辨探测高能 $\gamma$ 射线和电子能谱, 寻找暗物质粒子; 第二步是2020年前后在中国空间站安装高能宇宙辐射探测设施HERD, 进行暗物质粒子物理性质、宇宙线能谱和成分测量等方面的研究, 有望为银河系宇宙线起源问题的解决作出重要贡献。



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

地址: 北京市石景山区玉泉路19号乙

邮编: 100049

电话: 010-88235008

传真: 010-88233105

网址: www.ihep.cas.cn