

# 我国粒子物理研究进展<sup>\*</sup>

## ——50 年回顾

戴元本

顾以藩

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080) (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 文章从实验和理论两个方面回顾了 50 年来我国粒子物理研究的发展过程和成就。

**关键词** 中国粒子物理,实验,理论

### PROGRESS OF PARTICLE PHYSICS IN CHINA —— A REVIEW OF THE LAST FIFTY YEARS

Dai Yuanben

(*Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Gu Yifan

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

**Abstract** We review the history of the development and accomplishments of the research on particle physics in our country over the last fifty years from both the experimental and the theoretical aspects.

**Key words** particle physics in China, experiment, theory

新中国成立前后,正值粒子物理学形成为物理学的一门独立分支学科并开始迅速发展的时期.粒子物理亦称高能物理,40年代后期和50年代初 $\mu$ 子的辨认, $K_s$ 等一列新粒子的发现和量子电动力学的惊人成功,开辟了物理学的一个崭新天地.又以 $\pi$ 介子束在加速器上的人工产生作为历史标志,突破了依赖宇宙线开展实验的限制,从此开始了对于亚原子核层次微观世界物理现象的精细系统的研究.半个世纪以来,粒子物理学蓬勃发展,取得了许多辉煌成就.在这样的背景下,伴随着我们国家的发展,我国粒子物理的理论实验研究从少数先行者开始,经历了艰苦创业和发展的过程,逐步走向国际前沿.在庆祝建国50周年的时候,回顾这一历程,总结业已取得的成绩,是很有意义的.本文谨从实验和理论两个方面分别概述我国粒子物理50年来的研究进展.

#### 1 实验粒子物理

建国伊始,我国粒子物理实验研究一片空白.50年代初,在云南落雪山海拔3180m处建立了宇宙线实验站,开展应用云室进行高能核作用以及奇异粒子产生过程与性质的研究.值得一提的是,数年间累积奇异粒子事例数居世界宇宙线实验站前列.

在国际上,当时粒子物理研究刚刚进入第一代大型加速器实验阶段.1956年,我国制订第一个科学发展十二年远景规划,首次提出了建造一台高能加速器的设想,以之作为发展我国实验粒子物理的第一步.与此同时,我国作为

\* 国家自然科学基金资助项目和攀登计划项目

1999-06-10收到

前苏联杜布纳联合原子核研究所创建成员国之一,积极投入了在该所大型加速器上开展粒子物理实验的工作.通过参加具体实践,培养了第一批高能加速器与物理实验人才.在我国与苏联等国科学工作者合作完成的研究项目中,王淦昌先生领导的研究组在当时世界上能量最高的 10 GeV 质子同步稳相加速器上发现  $\bar{\nu}_\tau$  反超子的成果最为重要和突出<sup>[1]</sup>.

这个研究组针对当时粒子物理实验研究状况(一方面新强子陆续发现,另一方面寻找重子族反粒子成为热点),确定了在新的能区里不失时机地建造一台 24L 丙烷气泡室,开展以寻找新粒子为主要目标的研究方案.他们用动量为  $8.3 \text{ GeV}/c$  的  $\pi^-$  介子束照射放置在强度为 1.37 T 磁场内的气泡室,从 4 万张照片的扫描中找到一个  $\bar{\nu}_\tau$  的产生与衰变事例.此项发现为 50—60 年代间确立粒子-反粒子对称性提供了重要的实验证据,是继 1958 年美国 Alvarez 组发现中性  $\bar{\nu}_\tau$  之后发现的另一个超子族反粒子,早于 1962 年欧洲原子核研究中心(CERN)发现  $\bar{\nu}_\tau$  反超子.

1965 年后,我国退出联合原子核研究所,决定建立自己的高能物理研究基地.建造高能加速器的计划自 1956 年以来几经起落之后重新启动,在理论设计的同时,还进行了选址.但是,不久这项计划又因“文化大革命”开始而宣告终止.

正是在“文化大革命”这段时间里,国际粒子物理取得了突破性的进展,电弱统一理论与量子色动力学相继提出,标准模型引发了实验验证的热潮,而我国此时的粒子物理实验工作却前景渺茫.

宇宙线实验仍旧是可以利用来开展我国粒子物理研究的实际途径.60 年代中期,我国在云南落雪山附近海拔 3220m 处建立了一个新的高山站,建造了大型云室组合,进行了反常电磁簇射与其他研究.1972 年,在研究高能现象时,观察到一个可以被解释为弱作用荷电重粒子的事例,其寿命下限约为  $5 \times 10^{-9} \text{ s}$ <sup>[2]</sup>.

1972 年 7 月,周恩来总理在给张文裕等人

向中央呼吁发展我国高能物理的回信中,亲笔写下了以后广为传播的批示:“这件事再也不能延迟了.科学院必须把基础科学和理论研究抓起来,同时又要将理论与科学实验结合起来.高能物理研究与高能加速器的预制研究应成为科学院要抓的主要项目之一.”但是,一直到“文化大革命”结束为止,高能加速器的建造仍旧停留在纸面上.只是到了 1977 年以后启动的“87 工程”(预定第一步建造一台 50 GeV 质子同步加速器)预制阶段才真正办了一些重要的实事,其中包括建成设备完善的实验工厂,开展了加速器主要部件的预先研究,创建了其他有关实验条件,为以后建成高能物理实验基地以及对撞机工程的顺利进行打下了必要的基础.大约从 1975 年开始,在原来核探测技术与核电子学的基础上,逐步开展了与粒子物理实验相关的各类粒子探测器、快电子学和计算机数据处理技术的研究,并做出了成绩.1980 年,“87 工程”因国家调整国民经济而“下马”.

从 1978 年起,我国同时开始了利用国外高能加速器培养实验研究人才和开展国际合作研究的一个新阶段.1978 年至今,通过参加美国、西欧和日本主要研究机构的前沿粒子物理实验研究,我国科学工作者有幸亲身经历了近代粒子物理领域中的一系列关键性事件与重要发现.其中有:三喷注现象的发现和胶子存在的证据,电弱理论的早期检验与精确验证,中间玻色子  $W^+$  与  $Z^0$  粒子的发现,顶夸克  $t$  的寻找与实验证明,轻子代的数目的确定,以及第一批胶球候选者  $\chi$  粒子的发现,等等.通过参加国际合作,还培养了实验与工程技术人才,获得了跟踪与引进国外先进技术、促进我国多方面实验技术乃至高技术产业发展的长期效果.

在此期间,我国一些实验工作者还立足于国内条件,想方设法地开展尽可能接近国际前沿课题的小型实验研究,诸如寻找自由夸克、磁单极子等的尝试以及通过测量正电子偶素三光子衰变的连续能谱验证 QED 理论等.在 80 年代形成的世界范围的中微子测量热潮中,中国原子能科学研究院与中国科学院理论物理研

研究所的一个合作组将一台有铁双聚焦稳定同位素分离器改造成为高分辨、高亮度的谱仪,用于电子反中微子质量测量.这个合作组采用测量氚核衰变能谱端点附近谱形的方法,给出了电子反中微子质量平方值  $m^2 = -31 \pm 75 \pm 48\text{eV}^2$ ,相应于 95%置信度下  $m < 12.4\text{eV}^{[3]}$ .这个上限值与《粒子物理手册》目前的估算值  $m < 15\text{eV}$  相当.中国科学院高能物理研究所和理论物理研究所的一个合作小组,在京西门头沟煤矿离地面 512m 岩层垂直厚度(相当于 1300m 水层)的井下,开展了我国首次双衰变实验<sup>[4]</sup>.这个小组采用中国科学院长春光学精密机械研究所研制的  $\text{CaF}_2$  大单晶兼作双放射源和探测器,累计取数 7588.5h,测得<sup>48</sup>Ca 无中微子双衰变的寿命下限  $T_{1/2} > 9.5 \times 10^{21}$ 年(76%置信度),相应于 Majorana 中微子质量上限  $m < 8.3\text{eV}$  ( $\nu = 0$ )及右手流混合参数  $0.75 \times 10^{-5}$  ( $m = 0$ ),较原有寿命下限测量值提高了 4 倍,质量上限下推了 2 倍多.

“87 工程”的下马却带来了我国高能加速器发展的根本转机.1981—1982 年间,经过国内外专家反复论证,重新制定了建造一台质心系能量为 3—4.4 GeV 可调(计划以后提高到 5.6 GeV)的正负电子对撞机的方案,即北京正负电子对撞机(或称 BEPC)工程<sup>[5]</sup>.这个工程项目于 1984 年 10 月破土动工,至 1989 年 7 月通过国家技术鉴定,投入正式运行,用于进行粒子物理研究,同时开展同步辐射实验.

北京正负电子对撞机的建造成功,结束了我国粒子物理没有自己的加速器作为实验研究基地的历史.差不多与对撞机同时,建成了开展物理实验的大型探测装置——北京谱仪<sup>[5]</sup>,安置在对撞机的一个对撞点上(在另一对撞点上进行了实验筹备工作,1987 年后中止).北京谱仪的组成部分包括了多种粒子探测器以及相应的电子学系统、触发判选系统和数据在线获取系统,由此生成正负电子对撞末态  $e, \mu, K, p,$  等粒子的数目、类别以及特定的物理量(如动

量、能量、亮度)等基本数据,记录在磁带上,以供进一步处理和物理分析之用.与国外同类设备相比,北京正负电子对撞机在亮度上达到了美国 SPEAR 对撞机的 2 倍,北京谱仪则具有与美国 MARK 探测器相当的性能,而增添了新的重要功能,如  $dE/dx$  分辨及中性触发.北京谱仪自 1990 年初正式投入运行到 1995 年夏进入全面改进升级阶段为止,先后在若干质心系能量下开展轻子与强子物理研究,取得了一批具有国际先进水平以及国际领先的物理成果.在这一过程中,北京谱仪(BES)合作组从国内合作扩大到国际合作,参加的单位除中国科学院高能物理研究所外,还有中国科学技术大学、山东大学、华中师范大学、杭州大学、北京大学、上海交通大学、Boston U., CIT, Colorado State U., MIT, SLAC, SSCL, UC Irvine, U. Hawaii, UT Dallas 和 U. Washington.在 BES 合作组已经发表的物理结果中,具有代表性的(依时间顺序)有以下几个方面.

### 1.1 轻子质量的精确测量

1990—1991 年间,粒子物理出现三代轻子普适性的“危机”,表现为利用实验测定的  $\mu$  子和轻子的质量、寿命及电子分支比数据推出弱耦合常数  $g_\mu$  与  $g$  之间的比值偏离轻子普适性预期值 1 约 2.4 个标准偏差,从而引起了广泛关注.在国际上提出了由 BES 合作组重新测量轻子质量  $m$  的建议.

BES 合作组凭借在  $\tau$  阈能附近测量的优势,采用数据驱动的扫描方案,于 1991 年间实现了  $m$  的精确测量,所得结果  $m = 1776.9^{+0.18+0.25}_{-0.21-0.17}\text{MeV}$  (误差第一项为统计误差,第二项为系统误差),较 1992 年世界平均值降低了 7 MeV,而精度提高了 10 倍左右<sup>[6]</sup>.

同年德国 ARGUS 组,稍后美国 CLEO 组也分别发表了与 BES 一致的测量结果.在新测的数据当中,以 BES 在  $\tau$  阈能处直接测量的精度为最高.修订了的  $m$  世界平均值结合  $\tau$  的寿命与轻子分支比近年来的精细测量结果,使  $e-\mu-\tau$  轻子普适性在高精度下重新得到确认.

## 1.2 粲介子 $D_s$ 衰变的研究

BES 合作组于 1992 年开始开展  $D_s$  物理研究,从 1992 到 1994 年为止,在质心系能量 4.03 GeV 处,总共采集了积分亮度为  $22.3 \text{ pb}^{-1}$  的数据.

在 BES 之前,MARK 首先在正负电子对撞过程中,在  $D_s$  介子成对产生的阈能附近实现了  $D_s$  的实验观测,所采用的质心系能量为 4.14 GeV. 此处产生的粲介子对事例以  $D_s \bar{D}_s^*$  为主,合计积累了积分亮度为  $6.3 \pm 0.46 \text{ pb}^{-1}$ .

BES 合作组选择了与 MARK 组不同的质心系能量 4.03 GeV,得以避开  $D_s \bar{D}_s^*$  产生阈能,获得较易与本底区别开来的纯净  $D_s \bar{D}_s$  事例,重建了清晰的  $D_s$  信号. 利用这个积分亮度大约 4 倍于 MARK 的数据样本,BES 组实现了 MARK 提出而未能实现的若干测量任务.

BES 组开展了  $D_s$  介子衰变常数  $f_{D_s}$  的直接测量. 重赝标介子 ( $D, D_s$  及  $B$ ) 衰变常数对于研究  $B$  介子衰变中的混合和  $CP$  破坏问题具有重要意义,实验上通过测量其纯轻子衰变宽度来直接测定. 但是  $B$  介子轻子衰变率预期为小,故由之测定  $B$  介子衰变常数  $f_B$  非当前实验能力之所能及,而惟有采用其理论计算值. 测量  $f_{D_s}$  则可用以检验此类计算,对所用理论模型作出甄别. 虽然粲介子的纯轻子衰变率也小,但与  $D$  介子衰变常数  $f_D$  (及  $f_B$ ) 相比, $f_{D_s}$  的测量在实验上最为可行.

在 BES 组之前,已有两家得到  $f_{D_s}$  的非绝对测量结果. BES 组基于观测到的 3 个  $D_s$  纯轻子衰变候选事例,得到  $D_s \rightarrow \mu$  的衰变宽度,从而导出  $f_{D_s} = 430^{+150+40}_{-130-40} \text{ MeV}^{[7]}$ . 这个结果不依赖于亮度及  $D_s \bar{D}_s$  产生截面,且无模型相关假设,虽然误差很大,但作为首次直接测量的结果,仍具有其重要性. BES 合作组还基于 1 个  $D$  介子的纯轻子衰变事例测得其衰变分支比,并定出了  $f_D = 300^{+180+80}_{-150-40} \text{ MeV}$ .

BES 合作组首次实现了  $D_s \rightarrow \phi$  衰变绝对分支比  $B_\phi$  的直接测量. 归一化问题一直是  $D_s$  介子衰变实验的主要困难所在. 迄今为止,它的

许多衰变分支比都是相对于  $B_\phi$  测量的. 为要得到后者的绝对值,需进一步借助于对若干输入量(如  $D_s$  产生总截面)的理论估算,而不同的理论估算常常差别很大,目前发表的  $B_\phi$  值自 2% 至 5.1% 不等. BES 合作组采用 MARK 制定的方法,基于 2 个完全重建的事例,得到了  $D_s^+ \rightarrow \phi^+$  不依赖于积分亮度和产生截面的绝对分支比  $B_\phi = (3.9^{+5.1+1.8}_{-1.9-1.1})\%$ ,较 MARK 组测得的上限  $B_\phi < 4.1\%$  (90% 置信水平)前进了一步<sup>[8]</sup>.

目前,《粒子物理手册》推荐的  $B_\phi$  世界平均值是根据 BES 组和 CLEO 组(在 BES 组后进行绝对测量的另一家)两家数据计算所得的结果,其他所有与模型相关的测量结果均已不复采用. 稍后,BES 合作组又进行了  $D_s^+ \rightarrow \phi X^+$  单举分支比的直接测量,由此导出的  $B_\phi$  值与以前测得的结果一致.

BES 合作组还发表了  $D_s$  单举电子的半轻子衰变分支比  $B(D_s \rightarrow eX)$  的测量结果,由此导出的  $D_s \rightarrow eX$  衰变宽度与 MARK 组原来测定的  $D^+ \rightarrow eX$  与  $D^0 \rightarrow eX$  衰变宽度结果一致,支持粲介子半轻子道衰变以旁观者模型为主的假设<sup>[9]</sup>.

## 1.3 $J/\psi$ 辐射衰变研究——寻找胶球的实验进展

BES 合作组自 1990 年 1 月开始至 1991 年 5 月止,总共采集了粲夸克偶素  $J/\psi$  粒子的大约 9 百万个事例,与 80 年代中法国 DM2 实验在 DCI 对撞机上所建立的  $J/\psi$  数据样本大体相当. BES 组(不包括美国成员)基于这批数据开展了以利用  $J/\psi$  的辐射衰变过程为主寻找奇特介子——胶球的研究.

粒子物理强相互作用理论——量子色动力学的非阿贝尔性质决定传递强作用的场量子即胶子的自耦合性质,预言了胶子束缚态或称胶球的存在. 寻找这种特殊物态的实验努力已经持续了 20 年以上. $J/\psi$  的辐射衰变被认为是可能产生大量胶球的过程. 在 80 年代的寻找热潮中,发现了若干胶球候选者. 然而,确认胶球的目标远未达到.

BES组进一步提供了  $f_J(2220)$  粒子存在的实验证据,并且揭示了它作为  $2^{++}$  张量胶球候选者的若干重要性质.  $f_J(2220)$  粒子于 1986 年为 MARK 组在  $J/\psi \rightarrow K^+ K^-$  和  $K_S^0 K_S^0$  两个含有奇异夸克的衰变道中发现,却未被 DM2 组在更大的数据样本中所证实. BES 组通过反复分析,首先在 MARK 报道的两个衰变道中分别以大约 4 个标准偏差的显著性证实了 MARK 的发现,随后又在两个非奇异衰变模式  $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^-$  和  $p\bar{p}$  中观察到显著性稍小的类似信号<sup>[10]</sup>. 最近还在  $J/\psi \rightarrow \pi^0 \pi^0$  衰变道中观察到了  $f_J(2220)$  的证据<sup>[11]</sup>. 综合这个粒子的已知特征——具有很窄的衰变宽度 ( $\sim 20\text{MeV}$ ), 在与  $KK$  衰变道中呈现的味对称性质 [ $\Gamma(\pi^+ \pi^-)/\Gamma(KK) = 1.0 \pm 0.5$ ], 以及在  $J/\psi$  辐射衰变中大量产生 {衰变分支比  $B[J/\psi(2220)] > 250 \times 10^{-5}$ } 等, 表明它有可能是一个适当的胶球候选者.

另一方面, 欧洲原子核研究中心的晶体桶 (crystal barrel) 组和 JETSET 组在  $p\bar{p}$  湮没反应产生的  $K^+ K^-$ ,  $\pi^+ \pi^-$ ,  $K_S^0 K_S^0$ ,  $\pi^0 \pi^0$  及  $\eta$  末态中均未观察到  $f_J(2220)$  的信号. 此类实验本底较大, 可能是其未能获得肯定结果的一个原因. 目前,  $f_J(2220)$  在《粒子物理手册》中仍被列为有待确证的粒子, 而其自旋究竟是 2 或 4 也需要在大统计量下予以确定. 一旦自旋为 2 得到肯定, 必将进一步加强它作为张量胶球的地位.

BES 组对  $f_J(1710)$  粒子的研究也获得了颇有兴趣的结果. 这个由美国晶体球实验组首先在  $J/\psi$  衰变道中发现的胶球候选者, (早期称为  $\psi'$  粒子) 以后又在  $J/\psi$  其他衰变道以及  $p\bar{p}$  中心产生过程和  $p$  反应过程中观察到. 但是, 大量研究给出了关于这个粒子的互相矛盾的结果, 尤其突出的是, 它的自旋宇称究竟是  $0^{++}$  或是  $2^{++}$ , 说法不一. 最近有人重新分析 MARK 的数据, 在  $J/\psi \rightarrow 4\pi$  末态中观察到了  $0^{++}$  (位于  $\sim 1750\text{MeV}$ ) 和  $2^{++}$  ( $\sim 1620\text{MeV}$ ) 两个态. BES 组的研究选择了  $J/\psi \rightarrow K\bar{K}$  道, 考虑到它可能是  $f_J(1710)$  粒子作为胶球候选者的一个重要衰变道<sup>[12]</sup>. 在

$J/\psi \rightarrow K^+ K^-$  的  $K^+ K^-$  不变质量谱中, 观察到了相应于  $f_J(1710)$  的信号, 表现为一个很宽的共振峰. 采用推广矩方法的分析显示,  $f_J(1710)$  峰区的低质量端 (位于  $1696 \pm 5_{-34}^{+9} \text{MeV}$ ) 为  $2^{++}$  的成分而高质量端 ( $1781 \pm 8_{-31}^{+10} \text{MeV}$ ) 为  $0^{++}$  的成分. 进一步的分析指出,  $f_J(1710)$  的  $0^{++}$  成分衰变为两个胶子的分支比较大, 意味着它具有相当大的胶球成分. QCD 格点计算预言最轻的胶球应是质量约在  $1.5 - 1.7 \text{GeV}$  之间的标量粒子, 这和 BES 组的分析是一致的.

BES 组还研究了另一个最早的胶球候选者 ( $\psi(1440)$  (原称  $\psi'$  粒子)). 运用分波法分析了  $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^-$  与  $K^+ K^- \pi^0$  过程, 分别在  $\pi^+ \pi^-$  与  $K^+ K^- \pi^0$  不变质量谱中观察到 ( $\psi(1440)$ ) 的信号, 确认了它的自旋宇称为  $0^{-+}$ <sup>[13]</sup>. 在  $K^+ K^- \pi^0$  不变质量谱中, 还看到在 ( $\psi(1440)$ ) 低质量端  $f_J(1420)$  的迹象.

#### 1.4 (2S) 衰变研究

BES 合作组于 1995 年初完成粲夸克偶素 ( $2S$ ) 粒子数据的采集工作, 建成当前世界上最大的 ( $2S$ ) 数据样本, 合计 ( $2S$ ) 衰变事例数为 380 万, 大约相当于在此之前美国 MARK 采集数据的 3.8 倍, MARK 的 10 倍以上, 从而为开展 ( $2S$ ) 以及其他粲夸克偶素的物理研究创造了良好条件.

粲夸克偶素是粲夸克及其反粒子组成的束缚态 ( $c\bar{c}$ ). 这种简单的二体系统提供了研究夸克间力的理想“实验室”, 对发展量子色动力学 (QCD) 理论起着十分重要的作用, 被喻为量子色动力学的氢原子. 但是, 在第一个粲夸克偶素  $J/\psi$  粒子发现之后许多年里, 有关粲偶素物理的知识仍然相当匮乏, 已有的研究多集中于  $J/\psi$ , 其他粲偶素有限的早期研究从 80 年代初起的一个时期中基本上陷于停顿, BES 合作组开启了在正负电子湮没过程中研究粲偶素物理的崭新阶段, 最近几年的研究已使这个领域的面貌有了很大改观.

在 ( $2S$ ) 的轻子衰变方面, BES 合作组首次测量了 ( $2S$ )  $\pi^+ \pi^-$  衰变分支比  $B$ , 所得

结果与已有的  $B_{cc}$  和  $B_{\mu\mu}$  数据一起在实验误差范围内符合  $B_{cc} \cong B_{\mu\mu} \cong B / 0.3885$  的关系,提供了在  $c\bar{c}$  夸克系统中同时比较三代轻子性质的独特机会.

在强衰变方面,北京谱仪之前的研究在比较径向激发粒子  $(2S)$  与其基态  $J/\psi$  粒子的对应衰变道时,观察到两者之间的相似性,基本符合微扰 QCD 理论的预言,即  $J/\psi$  与  $(2S)$  强衰变宽度之比近似地等于它们衰变为轻子对的分支比之比,采用后者最新的世界平均值,这个比值约等于 14%. MARK 组于 1983 年报道了两个衰变道  $(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$  及  $K^* \rightarrow K^+\pi^-$  相对于  $J/\psi$  严重压制的异常情况,虽然再未观察到其他例外,但是解释这两个反常表现的理论努力却始终未得满意结果,文献上称为“疑难”.

BES 合作组开展了  $(2S)$  强衰变以二体衰变道为重点的系统研究.自 1994 年以来,在未态介子对为不同自旋宇称组合模式的衰变过程中,观察到了如下一系列新的实验事实<sup>[14]</sup>:

(1) 在  $1^-0^-$  模式的  $(2S)$  衰变过程中,以当前最高的实验灵敏度确证了“疑难”的存在,测得的  $(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$  及  $K^* \rightarrow K^+\pi^-$  衰变分支比新的上限与  $J/\psi$  相应衰变率之间的比值偏离 14% 关系,压低竟接近两个数量级,成为当前粒子物理中少见的反常现象.

(2) 发现了  $(2S)$  衰变过程中新的反常压制现象,见于  $1^-2^+$  模式的 4 个二体道  $f_2, a_2, K^* \rightarrow K_2^* \pi^0$  及  $\phi_2(1525)$ <sup>[14]</sup>. 此项发现首次突破了多年来反常限于  $1^-0^-$  模式的认识,而且基于强子螺旋性守恒定理的分析, $1^-2^+$  模式是强子螺旋性守恒定理所允许的,而  $1^-0^-$  模式则是禁戒的.

(3) 与发现新的反常同时,在  $1^+0^-$  及  $1^-0^+$  模式中也首次观察到了不表现出反常压制的二体强衰变道  $(2S) \rightarrow b_1$  及  $\phi_0$  等,从而排除了  $(2S)$  二体强衰变道均为压制的猜测.

(4) 在  $1^-0^-$  模式中,第一次测出  $(2S) \rightarrow K^* \rightarrow K^0 \pi^0$  衰变分支比,发现其与  $(2S) \rightarrow K^* \rightarrow K^+\pi^-$  衰变分支比之比显著大于 1,显示出强烈的同位旋对称性破坏效应.区别于  $J/\psi$  的情

况,后者的比值略小于 1,可归因于  $u$  夸克与  $d$  夸克的质量差.此外,还在  $1^-0^-$  模式中观察到  $(2S)$  首例衰变成强子的电磁过程  $(2S) \rightarrow \pi^0 \gamma$ ,其衰变分支比大于  $(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$  等而无反常表现.这些事实表明,  $(2S)$  的  $1^-0^-$  衰变的强作用成分被严重压制,达到了电磁作用的水平.

BES 合作组还开展了  $(2S)$  辐射衰变为普通介子过程的研究<sup>[15]</sup>. 在  $1^-0^-$  模式( $1^-$  为光子)中,首次测出了  $(2S) \rightarrow \pi^0 \gamma$  及  $(2S) \rightarrow \eta \gamma$  衰变分支比,它们相对于  $J/\psi$  均表现出压制,但不如同样模式的二介子衰变道严重;在  $1^-2^+$  模式中首次测出  $(2S) \rightarrow f_2 \pi^0$  衰变分支比,其相对于  $J/\psi$  的比值与理论预期值一致,而与同样模式的二介子衰变道  $f_2$  等的反常压制不同.

BES 合作组所获得的新的实验结果丰富了人们对粲偶素族粒子的认识,展现了  $(2S)$  衰变不能从其基态  $J/\psi$  简单地定量外推的重要性. BES 的结果还向原有解释“疑难”的几个理论模型提供了一系列实验反证,向粲偶素强衰变理论提出挑战,由此推动了新一轮理论研究(1997 年以来,在已有 4 种解释“疑难”的理论方案之外又提出了 5 个新的理论模型).最近,这些结果也开始应用于其他重要理论问题(如深入研究  $CP$  破坏的来源,分析研究  $2\text{GeV}$  至  $J/\psi$  质量范围内的介子谱等)的探讨上面.

### 1.5 $c_s$ 及其他粲偶素研究

BES 合作组于 1995 年起将粲夸克偶素强衰变研究从  $(2S)$  扩展到了  $c_s$  三重态( $J = 0, 1, 2$ ). BES 建立的 380 万  $(2S)$  数据样本通过  $(2S)$  的光子跃迁过程产生 95 万  $c_s$  衰变事例,为研究  $c_s$  提供了极佳条件.

90 年代以来,非相对论 QCD 理论获得发展,特别是新的因子化方案提出后解决了长期存在的红外发散问题,使重夸克偶素 P 波衰变率的严格计算得以系统改进.有关  $c_s$  产生与衰变的实验数据自然地检验理论迫切所需.虽然最近几年来  $c_s$  的实验研究由于质子-反质子湮没实验技术的发展而有所进展,但是涉及  $c_s$  强衰变的系统研究仍未能实现.  $c_s$  早期的实

验数据亟待更新和充实。

BES 合作组选用  $c_{\nu}$  的两个  $0^{-}0^{-}$  衰变模式  $^{+}^{-}$  及  $K^{+}K^{-}$  道实现了  $c_{0}$  总宽度的细致测量,提前高质量地实现了美国 E835 实验原来计划进行的测量<sup>[16]</sup>,误差较粒子数据表的原有结果降低 1 倍而可靠性有质的提高<sup>[17]</sup>。此外,还首次测量了  $c_{\nu}$  包括  $c_{0}$   $P\bar{P}$  在内的 16 个新的衰变道分支比(或上限),更新了 17 个衰变道分支比,大部分数据的精度明显提高,其中一部分数据已经在粲偶素 P 波态湮没过程的单举与遍举理论分析中得到应用。与此同时,寻找了粲偶素  $c_{\nu}(2S)$  粒子(未确定其存在),还重新测量了  $c_{0}$  及  $c_{\nu}$  粒子的质量,前者精度较原来的世界平均值提高了 2.8 倍,而后者则显示出与美国 E760 组最新测量结果 3 的分歧<sup>[17]</sup>。

利用  $(2S)$  数据样本通过  $(2S)$   $J/\psi \rightarrow ^{+}^{-}$  过程可以获得 120 万个很好标记的  $J/\psi$  事例,提供  $J/\psi$  衰变分支比精确测量及其他特定测量之用。BES 合作组完成了对于重夸克物理及相对论核碰撞物理均有重要应用意义的  $J/\psi$  轻子衰变分支比  $B(J/\psi \rightarrow e^{+}e^{-})$  及  $B(J/\psi \rightarrow \mu^{+}\mu^{-})$  的直接测量,给出目前世界上最精确的结果,总误差小于 2%<sup>[18]</sup>。此项数据连同 BES 组分析  $J/\psi$  共振宽度所得结果在收入粒子数据表后,使世界平均值精度得以成倍提高。

北京谱仪实验在北京正负电子对撞机上取得的成绩鼓舞了我国高能加速器与实验粒子物理学工作者的士气,增强了他们继续前进的信心。从 1993 年开始的 BEPC/BES 改进升级工作已于 1999 年初完成。在对撞机亮度、探测器性能及在线数据获取能力有了显著提高的情况下,新一轮实验运行——2—5 GeV 能区  $R$  值测量正在进行之中。与此同时,我国粒子物理实验工作者还积极参加了国际合作的其他大型粒子物理实验项目,如美国和日本的 B 介子工厂实验,欧洲原子核研究中心的 CMS 高能强子对撞实验、L3 宇宙线实验、AMS 国际空间站实验以及意大利的 ICARUS 长基线中微子实验等。这些实验都将在最近几年里陆续投入运行。

北京正负电子对撞机以后的高能加速器计划已经成为我国粒子物理学界共同关注的中心问题。方案之一是建造一台“ $e^{-}e^{+}$  工厂”。这是 80 年代间国际上提出的新一代的正负电子对撞机,以运行于轻子及粲夸克的产生阈能区而具有高亮度(高出 BEPC 两个数量级达到  $10^{33}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )为特点,可以延伸北京谱仪的现有物理研究而开展高精度实验。讨论中也提出了渐进的方案,即在 BEPC 的基础上逐步提高亮度以期达到  $10^{32}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的水平。我国高能加速器如何发展无疑将对我国实验粒子物理的发展前景产生直接的深远影响。

由于篇幅所限,本文未能涉及宇宙线与高能天体物理方面的许多工作,也未能列入全部有关文献。作者在此表示歉意。

## 2 理论粒子物理

新中国建立的初期,我国只有屈指可数的人从事于粒子物理理论的研究。50 年代中期,随着国际上粒子物理学的蓬勃发展,粒子物理研究在我国开始迅速发展。彭桓武、张宗燧、胡宁、朱洪元几位老前辈的理论物理学家培养出一批新生力量。在各大大学也有一批新人成长起来。到“文化大革命”前夕,我国已经有了一支相当规模的队伍。

当时的研究工作在相当大的程度上是在封闭条件下进行的,对国际上粒子物理学的新进展的了解往往要靠迟到的国外期刊,国际上对我国的研究工作知之甚少。1957 年至 1962 年间有几位粒子物理学工作者先后在位于前苏联杜布纳的联合原子核研究所工作,这是当时一个对外联系的窗口。

虽然有这些不利条件,这一时期中还是取得了几项突出成果:周光召和希洛柯夫合作提出和发展了螺旋度振幅的理论<sup>[19]</sup>(Jacob 和 Wick 也独立地发展了此理论)。这是分析相对论性粒子反应过程的角分布和极化的一个基本理论工具,对粒子物理学有重要意义。1961 年,周光召的另一篇文章<sup>[20]</sup>与盖尔曼的文章一起

建立了轴矢量流部分守恒理论. 粒子物理的这个规律一方面与强相互作用的手征对称性自发破缺这一基本特性相联系, 另一方面又是研究强子的弱相互作用的重要工具, 实验和理论的发展已经充分证明了它的重要性. 1965年至1966年夏, 北京基本粒子理论组提出和研究了关于强子结构的层子模型<sup>[21]</sup>. 此前, 盖尔曼最早在 SU(3) 对称的流代数理论中作为“数学符号”引入了“夸克”场. 1964年, 他在一篇短文中提出这种场也可能对应于真实的带分数电荷的粒子, 但随后的实验探测未发现夸克. 另一方面, 坂田昌一提出了所有强子都是由质子、中子和重子组成的模型. 1964年, 坂田来北京参加“北京科学讨论会”, 毛泽东主席从一分为二的哲学出发对他的思想很赞赏. 基于当时迅速积累的大量强子共振态质量谱的规律性和上述的理论发展, 1965年, 北京基本粒子组成员, 特别是朱洪元, 明确地提出了所有强子都由属于物质结构的下一层次的几种粒子组成的观念, 这种下一层次的粒子被称为层子. 由此出发, 北京基本粒子组通过引入作为层子束缚态的强子波函数和由层子场构成的弱、电作用, 对一大批强子散射和衰变过程进行了研究, 考虑了分数电荷的夸克方案和整数电荷的方案并尝试探索层子之间强相互作用的性质. 这是国际上最早的此类研究之一. 模型中的一些基本观念后来得到了公认. 参加北京基本粒子组工作的有原子能研究所的朱洪元、何祚庥、汪容、冼鼎昌, 北京大学的胡宁、高崇寿、刘连寿、宋行长、杨国桢等, 中国科学院数学研究所的戴元本、朱重远等, 中国科学技术大学的刘耀阳等共约 40 人.

除上述重要成果外, 还有一些在当时是国际先进的工作, 如周光召关于光子-核子散射色散关系的工作, 冼鼎昌、何祚庥、朱洪元关于散射双色散关系研究的工作等.

在我国“文化大革命”期间, 国际上基于夸克模型和规范场论发展出了弱电统一的温伯格-萨拉姆模型和强作用的量子色动力学理论, 迎来了粒子物理学的又一个高潮. 而国内的研究工作却长期被搁置, 拉开了与国际前沿的

距离. 直到“文化大革命”的后期, 粒子物理理论的研究才有部分的恢复. 在这段时期内的工作成果有: 1975年, 吴咏时、戴元本关于非 Abel 规范场中费米子电磁形状因子高能行为的三圈图领头对数项的计算, 提出了非 Abel 规范场的 Sudakov 因子的指数化, 国外 Cornwall 和 Tiktopoulos 也得到此结果; 1976年, 侯伯宇、段一士、葛墨林给出 t'Hoof 磁单极的拓扑不变量, 此工作是独立于 Arafune 等人的工作的; 还有李华钟、郭硕鸿、冼鼎昌、吴咏时等关于磁单极和经典规范场的工作.

“文化大革命”以后, 我国实行的改革开放政策打破了科学研究的封闭局面, 我国科学与国际科学界有了较广泛的交流, 我国粒子物理理论工作者大都曾到国外短期或长期工作. 他们在国际合作和竞争中做出了一批在国际上有影响的工作. 邝宇平和颜东茂合作提出了重夸克偶素激发态的强跃迁过程的一个合理模型和计算方案, 在解释激发态的衰变宽度等方面相当成功<sup>[22]</sup>. 周光召、郭汉英、侯伯宇、宋行长、吴可、侯伯元和王世坤用微分几何方法研究规范场论的大范围性质, 导出了手征有效的拉氏量中的反常项和 Jacobi 恒等式的反常等结果<sup>[23]</sup>. 徐湛、张达华、张礼发展了一种多胶子过程螺旋度振幅的方法, 使原本很复杂的计算大为简化<sup>[24]</sup>. 杜东生首先对 B 介子的非轻子衰变中的 CP 破坏效应作了较广泛的分析, 并预言顶夸克的质量大于 50 GeV<sup>[25]</sup>. 李重生与 Braaten 等人合作对一系列有兴趣的物理过程计算了量子色动力学和超对称理论的圈图修正<sup>[26]</sup>. 邝宇平、何红建、李小源指出文献原有结果的错误, 给出了对称性破缺理论中的等价定理的正确形式和严格证明<sup>[27]</sup>. 这个定理对研究电弱对称性破缺机制颇为有用. 张肇西、陈裕启指出, 对 B<sub>c</sub> 介子的产生过程起决定作用的一种碎裂函数是可以计算的, 并首先给出了它的正确公式<sup>[28]</sup>. 此外还有赵光达在 (2, 2) [即 f<sub>J</sub>(2220)] 粒子的胶球解释和非相对论 QCD 中的色八重态理论方面, 黄涛在大动量转移的介子遍举过程方面, 庆承瑞和何祚庥在衰变中微子质量



实验的理论分析方面,朱伟在深度非弹性过程方面等一批工作在国际上也受到注意。

由于篇幅所限,上面提到的工作中有一部分未能列入下面的文献中。此外,我国有一支人数相当多的队伍工作于数学物理领域。他们做了不少有影响的工作,其中一部分与粒子物理有些关系,也未能列入本文中。在此一并致歉。

1989年北京正负电子对撞机建成,随后BES组开始了高能实验工作。我国有了自己的高能物理实验基地,为我国粒子理论工作者与实验工作者密切合作创造了条件。对于BES组的实验,我国粒子理论工作者在物理问题的选择、辐射修正的计算、J/ψ实验的理论分析方法和实验结果的物理解释方面都做了不少工作。与我国实验工作者的讨论为粒子理论工作者深入和及时了解实验结果提供了可能。例如,对(2.2)粒子实验结果,理论工作者作出了解释,(2S)的一些实验结果在正式发表前就被理论工作者利用。

由于“文化大革命”时期教育和科研的荒废和改革开放在新的环境下科研人才的流失,在近20年中,我国的粒子物理研究像许多其他学科一样面临人才断层的问题。在这种情况下,我国一批人过中年和接近老年的粒子理论工作者在科研经费不足的情况下坚持努力工作,做出了好的成绩,上述在国际上有影响的工作大都是他们完成的。可喜的是,最近几年有一批在国外学习和在国内取得博士学位后出国工作的优秀青年粒子理论工作者回到祖国,他们在国外做研究生或博士后期间做出了一些出色的工作。可以期待青年一代接过上一代的班,把我国的粒子物理理论研究推进到更高的水平。

总观上述实验和理论两方面的情况,建国50年来,我国的粒子物理研究虽然经历不少困难,还是有了很大的发展,取得了一系列在国际上有影响的、包括一些具有重要学术意义的成果。我国高能物理实验基地的建成和实验工作的开展提高了我国在这个领域的地位。这些成绩增强了大家的信心。从历史的经验和教训当中,我们体会到以下几点:第一,必须稳定一支

由热爱科学、有奋斗精神的人组成的队伍,着重吸引更多的有才华的年轻人,同时要充分发挥中年以上的人的作用;第二,要大力提倡和发扬创造精神,争取做出引导国际潮流的工作;第三,要更好地开展国际交流;第四,主要的工作要立足于国内。我们相信,随着我国经济建设的发展和综合国力的增强,我们有条件做到以上几点,我国的基础科学研究,包括粒子物理研究,一定能够攀登新的高峰,在国际上取得与我们伟大的国家相称的地位。

## 参 考 文 献

- [1] ,1960,38:1356
- [2] 中国科学院高能物理研究所云南站.物理,1972,1:57
- [3] Sun Hancheng,Liang Dongqi,Chen Shiping *et al.* Chinese J. Nucl. Phys.,1993,15:261
- [4] You K *et al.* Phys. Lett. B,1991,265:53
- [5] 谢家麟主编.北京正负电子对撞机和北京谱仪.杭州:浙江科学技术出版社,1996
- [6] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1992,69:3021; Phys. Rev. D,1996,53:20
- [7] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1995,74:4599
- [8] BES Collaboration. Phys. Rev. D,1995,52:3781
- [9] BES Collaboration. Phys. Rev. D,1997,56:3779
- [10] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1996,76:3502
- [11] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1998,81:1179
- [12] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1996,77:3959
- [13] BES Collaboration. Phys. Lett. B,1998,440:217; Phys. Lett. B,1998,446:356
- [14] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1996,81:5080; APS Divisional Meeting,Los Alamos,USA,1999
- [15] BES Collaboration. Phys. Rev. D,1998,58:097101
- [16] BES Collaboration. Phys. Rev. Lett.,1998,81:3091
- [17] BES Collaboration. Phys. Rev. D,1999,60: hep - ex/9812016
- [18] BES Collaboration. Phys. Rev. D,1998,58:092006
- [19] Chou K C,Shirokov M I. JETP,1959,36:90
- [20] Chou K C. Soviet Physics JETP,1961,12:492
- [21] 原子能,1966年第3期,第7—8期;北京大学学报(自然科学版),1966年第2期
- [22] Kuang Y P, Yan T M. Phys. Rev. D,1981,24:2874
- [23] Chou K C, Guo H Y, Wu K *et al.* Phys. Lett.,1984,134:67; Hou B Y. Chinese Phys. Lett.,1985,2:49
- [24] Xu Z, Chang D H, Chang L. Nucl. Phys. B,1987,291:392

- [25] Du D S ,Zhao Z Y. Phys. Rev. Lett. ,1987 ,59 :1072 ;Du D S. Phys. Rev. 1986 ,34 :3414
- [26] Braaten E,Li C S. Phys. Rev. D ,1990 ,42 :3888 ; Braaten E,Li C S , Yuan T C. Phys. Rev. Lett. ,1990 ,64 : 1709
- [27] He H J ,Kuang Y P,Li X Y. Phys. Rev. Lett. ,1992 ,69 : 2619
- [28] Chang C H ,Chen Y Q. Phys. Rev. D ,1992 ,46 :3845

## 我国粒子加速器的现状和发展\*

方守贤

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 文章对我国主要的粒子加速器——北京正负电子对撞机(BEPC)、兰州重离子加速器(HIR-FL)、合肥国家同步辐射装置(NSRL)3台机器以及新的第三代光源——上海同步辐射装置项目的现状进行了简要介绍。另外,对应用低能加速器也作了扼要回顾。

**关键词** 加速器,现状

### BRIEF OVERVIEW OF PARTICLE ACCELERATORS IN CHINA

Fang Shouxian

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** The present status and further development of three main particle accelerators in China—the Beijing Electron Positron Collider (BEPC), Heavy Ion Accelerator of Lanzhou (HIRFL), Hefei Synchrotron Radiation Facility (HESYRL) and the new Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) are briefly reviewed. In addition, low energy accelerators used chiefly for applications are also described.

**Key words** accelerator, status

## 1 基础研究用的加速器

### 1.1 北京正负电子对撞机(BEPC)

BEPC建造的主要目的为高能物理实验并兼顾同步辐射应用,最佳时每年正常运行时间平均约为5500h,运行效率可达95%。

对于高能物理实验,随着运行经验的积累, BEPC的积分亮度从1992年至1995年不断得到提高,近10年来,获取了大量实验数据,做了一些非常重要的物理实验。如轻子质量的测量精度提高了10倍,胶子球候选者(2230)粒子的确认和新的衰变道的发现及研究, $D_s$ 粒子

的研究, $J/\psi$ 粒子共振参数的测定,物理的研究,以及2—5 GeV能区的 $R$ 值测量等。

在同步辐射方面,每年大约有两个多月的时间在专用模式上运行,此时电子的能量为2.2 GeV,流强为80—100mA,大约有100多个从研究所及大学来的用户在现有11个实验站上进行不同学科领域里的研究。

1995年至1998年间, BEPC进行了多方面的改进及提高,首先是直线加速器,一台由美国

\* 1999-04-19收到初稿,1999-06-01修回  
作者1999年5月8日在中国物理学会第7届全国会员代表大会暨学术报告会上所作的邀请报告