

编者按 建国以来,特别是改革开放以来,我国陆续建成了一批大科学装置,对促进我国科技事业和相关事业的发展起到了积极作用。虽然从总体上来说,我国大科学装置在规划、管理和规模体量上与世界先进水平和建设国家科技创新体系的需求相比还有相当差距,尚不能满足我国科技发展的要求;但同时也存在着各科研机构因对大科学装置的了解和认识不足,而未能使其潜力得到充分发挥的问题。目前,我院正与国家有关部委积极沟通,争取联合成立大科学装置专项基金,面向全国资助科研用户利用大科学装置积极开展多学科研究。为加强我院乃至全国广大科研工作者对大科学装置的了解与认识,进一步推动‘小科学’研究与大科学装置的结合,充分发挥大科学装置对各学科研究强有力的支撑作用,本刊与我院基础科学局合作,特设‘大科学装置’专栏,系统介绍我院乃至我国大科学装置的建设与运行管理成果及各装置的研究支撑能力。

北京正负电子对撞机^{*}

中国科学院高能物理研究所

中国科学院基础科学局

(北京 100049)

(北京 100864)

关键词 北京正负电子对撞机,北京同步辐射光源

1 科学背景

粒子物理学是研究物质结构的最小单元构成及其相互作用规律的前沿学科,在宇宙的起源和进化、天体的形成和演化等许多领域的研究中起着十分重要的作用,有力地带动了各相关学科的发展。上世纪 50 年代以来,粒子物理实验一直是国际上基础科学研究的前沿之一,目前粒子物理还有许多未解决的问题,特别需要实验验证。要从实验上研究基本粒子的内部结构,就必须能够深入探测到粒子的内部,设法用‘炮弹’打碎‘基本粒子’。

从实验角度讲,粒子物理的发展方向可分为基于加速器的和不基于加速器的研究。高能加速器可以产生高能量带电粒子,轰击

物质内部,探索粒子内部的奥秘。为达到更高的能量,降低造价,科学家们想到了用两束高能粒子相撞,从而使打碎‘基本粒子’的能量更高,这就是对撞机。目前世界上最大的粒子对撞机在欧洲核子研究中心,能量为 14TeV,周长约 27 公里。

粒子物理的基本理论是 Glashow、Weinberg 和 Salam 提出的‘标准模型’。标准模型统一了电磁相互作用和弱相互作用,称为电弱相互作用,并预言了传播弱相互作用的粒子 Z 和 $W^\pm$ 。标准模型获得了巨大的成功,迄今为止所有的粒子物理实验结果都与标准模型的预言一致。但是标准模型不是粒子物理理论的终结,标准模型还有许多问题有待解决,如 Higgs 粒子是标准模型中最关键的粒子,赋予了轻子和夸克的质量,但是迄今为止尚未发现;还有量子色动力学的问题和 CP 破坏 (Charge-Parity violation) 问题。

^{*} 本文由高能物理研究所陈和生 BEPCII 工程经理, E-mail:chenhs@ihep.ac.cn、罗小安,基础科学局彭子龙共同组稿
收稿日期:2008 年 7 月 2 日

因此,精确检验标准模型,并探索突破标准模型的新物理现象,是当今国际粒子物理实验研究的焦点,预期通过高能物理实验,可取得原创性的突破进展。

2 装置综述

北京正负电子对撞机(Beijing Electron-Positron Collider, BEPC)于1988年建成,是我国唯一的一台高能粒子对撞机,主要进行高能物理实验研究,同时还可进行同步辐射实验研究、中能核物理实验研究和慢正电子实验研究等,属于多功能的大型科学实验装置。

2.1 立项

1972年8月,以张文裕院士为首的18位科学家上书周恩来总理,建议建立我国自己的粒子物理实验基地。这个建议立即得到了周总理的支持。根据总理指示,中科院高能物理所于1973年2月正式成立。

1975年3月,国家批准了高能加速器预研基地的建设计划(七五三工程),但不久因政治原因而停止;1977年11月,中央批准建造一台50 GeV的质子同步加速器,代号为“八七工程”。后因工程规模过于庞大而下马。科学家们经过反复论证,建议建造一台 2×2.2 GeV的正负电子对撞机(BEPC),同时利用高速运转的电子在轨道弯曲处产生的同步辐射光做实验,实现“一机两用”。该方案在方毅同志的主持下,最终得到邓小平同志的肯定。1983年4月国务院批准了该计划,1984年10月7日BEPC工程破土动工。

BEPC主要由注入器——电子直线加速器、输运线、储存环、北京谱仪(BES)和同步辐射装置(BSRF)组成。它的建造主要依靠我国自己的力量完成。1988年10月16日,BEPC首次实现了正负电子对撞,对撞亮度为 8×10^{27} cm²s⁻¹。科学家和工程人员仅

用4年就建成了我国第一台正负电子对撞机,其建造速度达到了当时国际高能加速器的建造水平。以著名物理学家王淦昌院士为首的近40位全国著名的物理和加速器专家组成国家技术鉴定委员会,认为该装置:“主要技术指标和性能参数已达到或超过设计要求,具有80年代国际先进水平”。

BEPC工程成功的意义已远远超出了其本身的科学意义,成为改革开放下振奋精神、自力更生、艰苦创业的典范。

2.2 运行

BEPC建成后有两种运行模式:

(1)高能物理实验运行——正负电子在储存环的对撞点实现对撞,束流能量为1—2.8 GeV, BEPC的BES研究探测高能物理对撞事例,进行数据分析,研究 τ -粲物理;

(2)同步辐射专用光实验运行——只有电子在储存环中运行,在弯转磁铁和扭摆磁铁处发射出同步辐射光,经过特殊的前端区和光束线引到实验站进行多学科实验研究。电子束的能量为2.2—2.5 GeV,同步辐射光具有强度高,准直性好,能量范围广(从深紫外到硬X光)等优异特性,是一种研究物质结构和电子结构的高性能光源。

目前,还实现了第三种运行模式——兼用光模式,即在進行高能物理实验运行的同时,开展同步辐射实验,大大增加了同步辐射用户的实验时间,现已取得了初步成果。

BEPC每年运行9个月以上,每天24小时开机运行。依托BES形成了以我国为主的大型国际合作组——BES国际合作组,包括国内的20多所大学和研究机构,以及美国、日本、俄罗斯、德国的10多所大学和研究所,共同开展物理分析和研究。每年在中国召开BES国际合作组会议,确定实验方案,交流物理分析结果。BES已获得了大批重要的物理结果,在 τ -粲物理的实验研究



中国科学院

处于国际领先地位。

BSRF 实验涉及的学科非常广泛, 其研究领域涵盖了物理、纳米科学、材料科学、信息科学、化学化工、生命科学、资源环境、医学等, 每年有来自国内外的近百个研究机构和大学的 1 000 多名用户在 BSRF 进行 200 多个课题实验, 一般每年的实验时间不少于 3 个月。BSRF 也是国家纳米中心的协作实验室。

另外, 在直线加速器的末端还建立了中能核物理实验装置, 在储存环进行高能物理或同步辐射实验期间, 将电子束偏转到核物理试验站, 开展束流实验和辐照实验; 或将正电子束偏转到实验站, 开展纳米材料、先进半导体、核材料和高分子材料领域的研究。

1990 年国家批准建立 BEPC 国家实验室, 负责 BEPC 的运行和对外开放。BEPC 国家实验室设立了学术委员会, 学术委员会设高能物理、同步辐射和粒子加速器 3 个专业委员会。

3 研究综述

BEPC 既是一台大型高能物理实验装置, 又是一台多学科实验平台, 可开展同步辐射实验、核物理实验和慢正电子实验等科学研究。BEPC 自 1988 年实现首次对撞以来, 经过 20 年的实验运行, 取得了一批科研成果, 其中一些研究成果在国际上产生了重大影响, 例如:

1990 年, BEPC 工程获国家科技进步奖特等奖。BEPC 的建造成功被称作是继原子弹、氢弹、导弹、人造卫星等之后, 我国取得的又一伟大成就。国外的科学家称, 这是“中国科学发展的伟大进步, 是中国高能物理发展的里程碑”。

作为“八七工程”的预研项目, 高能所建造了国内第一台质子直线加速器, 培养出了

加速器队伍和专家, 并有能力参与国外的加速器设计和建造工作。1991 年, 北京 35 MeV 质子直线加速器获国家科技进步奖一等奖。

BEPC 上完成的 2—5 GeV 正负电子湮灭到强子反应截面的精确测量(R 值)精度比国际上的实验提高了 2—3 倍。该成果对粒子物理标准模型的精确检验有重要贡献, 对与物质质量起源密切相关的 Higgs 粒子质量的预言产生了重大影响。2004 年, 该成果获国家自然科学奖二等奖。

1993 年, BES- τ 轻子质量的精确测量获中科院自然科学奖一等奖。测量精度比国际上原有结果提高了 5 倍, 被认为是“近期国际高能物理领域最重要的实验结果之一”。BEPC 上产生的物理成果越来越受重视, 国际权威粒子数据表 PDG 已引用了 BES 成果 420 多项, 表明我国在聚物理领域已处于国际领先地位。

BES 实验已发现 5 个多夸克态新强子候选者, 尤其是 X(1835) 被 PDG 认为可能是质子-反质子束缚态。发现 X(1810) 和 X(1580) 两个新共振结构, 可能来源于多夸克态或其他新型强子, 在国际高能物理界引起很大反响。

2003 年, 科学家通过在 BSRF 和其它装置上实验, 获得了具有重要生物学意义的 SARS 冠状病毒蛋白酶大分子结构, 这是世界上首次解析出 SARS 冠状病毒蛋白酶的三维结构。其成功, 对于 SARS 的防治, 具有重要的意义。

中科院生物物理所和植物所的科研人员完成的“菠菜主要捕光复合物的晶体结构”测定工作, 在世界上率先测定了这一复合体的三维结构, 从而破解了国际公认的、具有高度挑战性的前沿难题。2004 年 3 月 18 日, Nature 以封面文章的形式发表了这项成果。该研究工作中用于解析三维结构的高

分辨率衍射数据是在 BSRF 新建成的生物大分子晶体学线站获得的。这标志着 BSRF 已有能力为国内自主开展高难度的蛋白质结构解析研究工作提供先进的实验平台。

2007 年 8 月, 北京生命科学所柴继杰研究组在 Nature 发表 “The structural basis for activation of plant immunity by bacterial effector protein AvrPto” 的文章: 利用 BSRF 获得的第一个细菌效应蛋白 AvrPto 和植物中对应的抗性蛋白 Pto 的复合物晶体结构, 并基于该结构和相关实验结果, 提出了 AvrPto 通过解除 Pto 对防御响应的抑制引发疾病抗性的机制。

粒子物理研究属基础科学, 具有不保密性和可广泛国际合作的特点, 是引进高新技术的窗口, 又是开发新技术的基地。在 BEPC 建造过程及以后的改造中, 许多关键部件采取了世界上独一无二的方法进行研制生产, 使国内相关企业在相关技术领域有了较大提高和突破, 带动了我国机械、电子工业技术的高科技发展, 大幅提升了国内加速器设备制造及相关高技术产业能力, 使我国的加速器建造水平实现了重大跨越。BEPC 改造过程中大量使用了国际高能物理和加速器领域最先进的超导技术, 包括射频超导技术、高性能超导插入磁铁、大型探测器超导磁体和大型液氮低温制冷系统, 使用先进的 CsI 晶体电磁量能器, 研制新型快电子学、利用 PC 集群并行处理、区域存储网络、大型数据库系统等, 填补了我国加速器领域的许多空白。

高能物理的国际合作对我国的网络技术的发展做出了突破性贡献。1986 年 8 月高能所通过卫星线路实现到欧洲核子研究中心的远程登录; 1988 年 8 月建立了北京到欧洲核子研究中心 X.25 通讯线路, 高能所的计算机进入国际因特网第一个中国节点; 1993 年建立了高能所到美国加州的 64

K 卫星数据专线; 1994 年 5 月高能所引进 www, 建立了中国第一个网站。

高能所工厂承接了对撞机大量磁铁的制作, 形成了独立自主的制造工艺和技术, 批量生产的磁铁质量达到了国际水平, 近期出口美国、日本、韩国等国家, 获得了国外专家的一致好评。同时, 磁铁的磁场测量技术也得到了国外专家的认可, 美国专家认为 “高能所的磁铁产品的物理性能达到或超出了我们的期望”。高能所生产的各种加速器部件已开辟国内市场并远销欧、亚、美等 10 多个国家和地区, 一些前沿高技术已成功转移到生产企业。已研发的高技术产品有: 地那米电子辐照加速器、10 MeV/4—15 kW 电子辐照加速器、工业 CT、电子帘、正电子断层扫描机 PET、医用加速器、医用加速管、各类加速器部件、环境中子监测器、环境 γ 监测器等。

对撞机涉及的领域非常广泛, 国内许多工业界参与了 BEPC 工程建设, 锻炼了队伍, 培养了人才, 并大幅提升了工业制造水平, 特别是在大功率脉冲电源、高稳定性的大功率电源、超高真空技术、高频技术、快电子学技术、束流测量、控制系统、低温技术和超导设备制造等方面, 取得了质的飞越。

目前加速器技术的应用范围越来越广, 工业辐照加速器、医用加速器、强流加速器等都开始或即将推广应用。小型工业辐照加速器已用于材料、食品等的辐照, 取得了很好的经济效益; 电子加速器辐照应用于设备消毒, 癌症病人的放射性治疗; 强流加速器将应用于洁净核能源, 造福人类。

BEPC 建造的成功标志着我国在大科学工程方面取得突破, 它的实验运行取得了丰富的物理研究成果, 受到了国外同行的关注, 使我国在高能物理的聚物理研究方面获得了世界领先水平。重要国际物理会议多次邀请中国的高能物理学家做大会报告, 介绍



中国科学院

BEPC 的物理成果。

为继续保持我国在粲物理研究方面的领先地位,更好地发挥对撞机的作用,从1993年开始,对 BEPC 进行了升级改造,改造后对撞机的对撞亮度达到了改造前的2倍,BES 的性能也有所提高,增加了高能物理实验的效率,在国际竞争中仍保持领先水平。1999年2月,改造项目通过了中科院组织的验收。鉴定委员会认为“BEPC/BES/BSRF 已经达到了此次改进的要求,各项设备和束流性能都达到了设计指标,并在高能物理和同步辐射的实验中得到验证”。

4 BEPC 重大改造工程

2000 年高能所提出了我国高能物理和先进加速器发展目标,建议将 BEPC 进行重大改造,储存环采取“麻花”轨道方式,将对撞亮度提高30倍,投资估算4亿元人民币。后根据国际竞争态势,以及国际高能物理的研究状况及加速器的发展水平,科学家们提出应进一步提高 BEPC 的亮度,建议采取多种先进技术,使对撞亮度提高100倍,这个方案即是 BEPCII。BEPCII 的建设目标是对 BEPC 和 BES 进行重大改造,采用多束团、大交叉角对撞方式,成为当前国际上最先进的双环对撞机之一。它利用 BEPC 的隧道,在现有的储存环内再建设一个储存环,新老两个半环在南北两个对撞区分别交叉,形成两个等同的储存环,西外环和东内环形成正电子环,东外环和西内环形成电子环。每个环分别有93个束团,在南对撞区对撞。同时 BEPCII 还采用了超导高频技术和超导插入磁铁技术,这样能够将亮度提高100倍。位于南对撞区的 BES 将进行全面改造,适应 BEPCII 高计数率运行的要求,并大幅提高测量精度和粒子识别能力,减少系统误差,与 BEPCII 的高亮度提供的高统计精度相匹配,满足在粲能区进行精确测量的要求,为

我国在今后相当长的时期内继续保持粲物理研究的国际领先地位,取得原始创新性物理成果奠定基础。BEPCII 投资6.4亿元人民币,建设周期5年。

BEPCII 的物理窗口属于国际高能物理实验研究的高精度前沿。它的工作能区为2—4.4 GeV,通过高统计、高精度的测量,研究微扰和非微扰量子色动力学及其过渡阶段性质,精确测量 CKM 矩阵元、研究 J/ψ 、 ψ' 和 $\psi(3770)$ 能区内的稀有衰变,研究轻强子谱, J/ψ 家族和激发态重子等前沿课题,并寻找胶子球、夸克-胶子混杂态和奇异态等新粒子,探索新的物理现象,对粒子物理的发展具有重大意义。

2003年2月10日,国务院总理办公会议批准了 BEPCII 项目建议书。12月30日,中科院下发文件同意 BEPCII 开工建设。

2004年4月30日,BEPC/BES 结束了15年来的科学实验任务,进入 BEPCII 全面启动阶段。率先改造的是直线加速器,于当年11月19日完成主体改造,电子束调试成功,改造后的 BEPC 年底开始向所内外同步辐射用户开放。此后,BEPC 边运行、边改造,这在国际上尚为首例。

储存环从2005年7月开始改造,经过16个月的艰苦努力,于2006年11月9日安装完 BEPCII 储存环所有主体设备,11月18日电子束流成功地在 BEPCII 储存环中积累,这个速度在世界加速器调束的历史上也是少见的。2007年3月25日,BEPCII 成功实现正负电子对撞,2008年2月1日,BEPCII 实现了 $530\text{ mA} \times 530\text{ mA}$ 的多束团对撞,亮度超过 $1 \times 10^{32}\text{ cm}^2\text{s}^{-1}$,是 BEPC 的10倍。

BEPCII 是“一机多用”,加速器的重大改造同时也大幅提高了其同步辐射运行的

(转至299页)

查结果向主管部门、相关企业和研究机构通报。

(2) 建立软件事故案例档案, 对涉及软件问题的数据进行系统的收集、整理和统计, 供相关部门、企业和研究机构分析、研究, 为逐步形成软件可靠性和安全性的评价体系提供基础数据。

2 加强并提升软件评测中心的作用

在加强软件评测中心业务素质培训的同时, 将其功能从单纯“在软件中找错”提升到“帮助把错误尽可能消灭在萌芽状态”。评测中心可以利用所积累的经验和案例, 发现高安全、高可靠软件开发过程中存在的主要问题和薄弱环节, 通过提出解决方案以及制定相应的设计和编程准则等方式, 帮助软件厂商降低软件产品的错误率。

其他政策性建议: 逐步建立软件可靠安

全性评价体系; 加强高可靠安全软件基础研究。

主要技术性建议:

软件生存周期的各个阶段, 包括需求分析、规约、设计、编程、测试、维护, 都应当为所能达到的可靠安全性提供证据。这些证据应形成相互衔接的、完整的链条, 作为文档的独立部分加以保存, 以便分析和检查。测试是提供这种证据的重要手段之一, 但要清醒地认识到测试的局限性。对于可靠性安全性至关重要的软件系统, 应考虑使用更为安全的编程语言、严格的过程管理以及形式化的设计与开发方法。

其他技术性建议: 将与可靠安全性密切相关的代码集中到尽可能少的模块; 从系统工程的角度考虑软件可靠安全问题。



中国科学院

(接 368 页)

性能。目前在束流能量为 2.5 GeV 时, 流强已超过 250 mA、束流寿命 10 小时, 同步辐射硬 X 光强度提高了一个数量级以上, 实验性能和效率明显提高, 并进一步扩展兼用光运行。BEPCH 建造期间仍继续为同步辐射用户提供专用光实验, 得到用户的一致好评。目前 BEPCH 已开展了 3 轮同步辐射专用光实验, 合计 4 个月。BEPCH 建造过程中, 还进行了核物理实验和慢正电子实验等科学研究。

2007 年底, BEPCH 的注入器——直线加速器改造通过了中科院组织的工艺测试, 所有指标均达到或超过设计指标, 性能达到国际先进水平; 2008 年 3 月, BEPCH 的同步辐射专用光模式也通过了中科院组织的工艺测试, 能量为 2.5 GeV, 流强大于 250 mA,

所有指标均达到设计要求。大型高能物理探测器 BESIII 已安装到位, 经过联合调试, 各子探测器工作正常, 已观测到了宇宙线事例, 并已开始与加速器联合调试。

目前, 科学家们正发扬连续作战的精神, 争取 2008 年底达到 BEPCH 的验收指标, 按时完成任务。

BEPCH 建成之后, 其亮度是美国康奈尔大学对撞机设计亮度的 3—7 倍, 预期每年能获取 80 亿 J/ψ 事例, 或 20 亿 $\psi(2S)$ 事例, 为粒子物理实验研究提供高统计量的数据和小的系统误差的精确测量, 并探索新的物理现象。预计投入运行后 3—5 年内, 将获得若干对世界高能物理研究产生重大影响的创新性物理成果。

(相关图片请见封三、封四)

北京正负电子对撞机

邓小平题



小平同志为BEPC工程奠基(1984年10月7日)



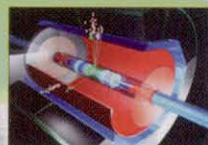
江泽民总书记视察BEPC(1989年10月6日)



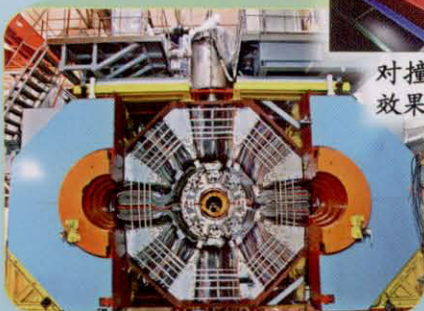
时任中央书记处书记的胡锦涛同志
视察BEPC(1994年9月16日)



BEPCII直线加速器



对撞区与谱仪
效果图

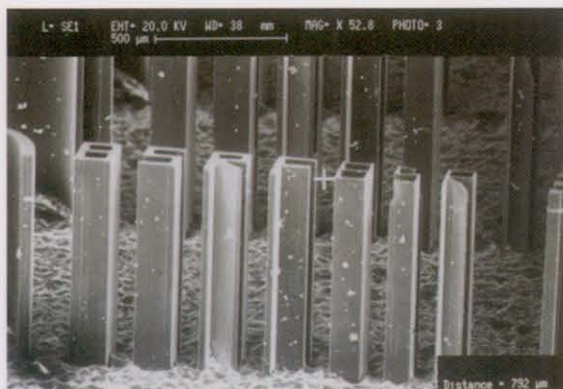


北京谱仪(BESIII)

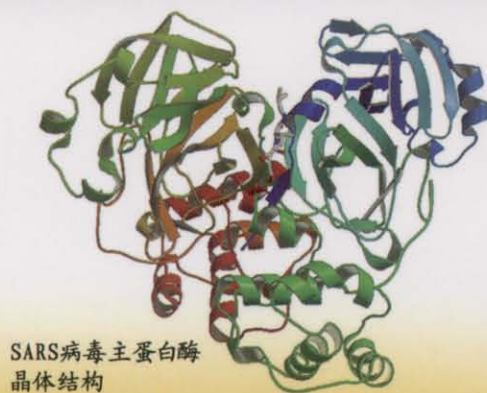


BEPC储存环(单环)

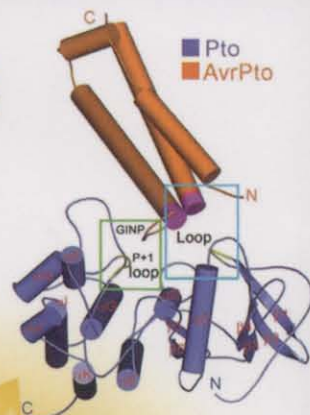
北京同步辐射装置



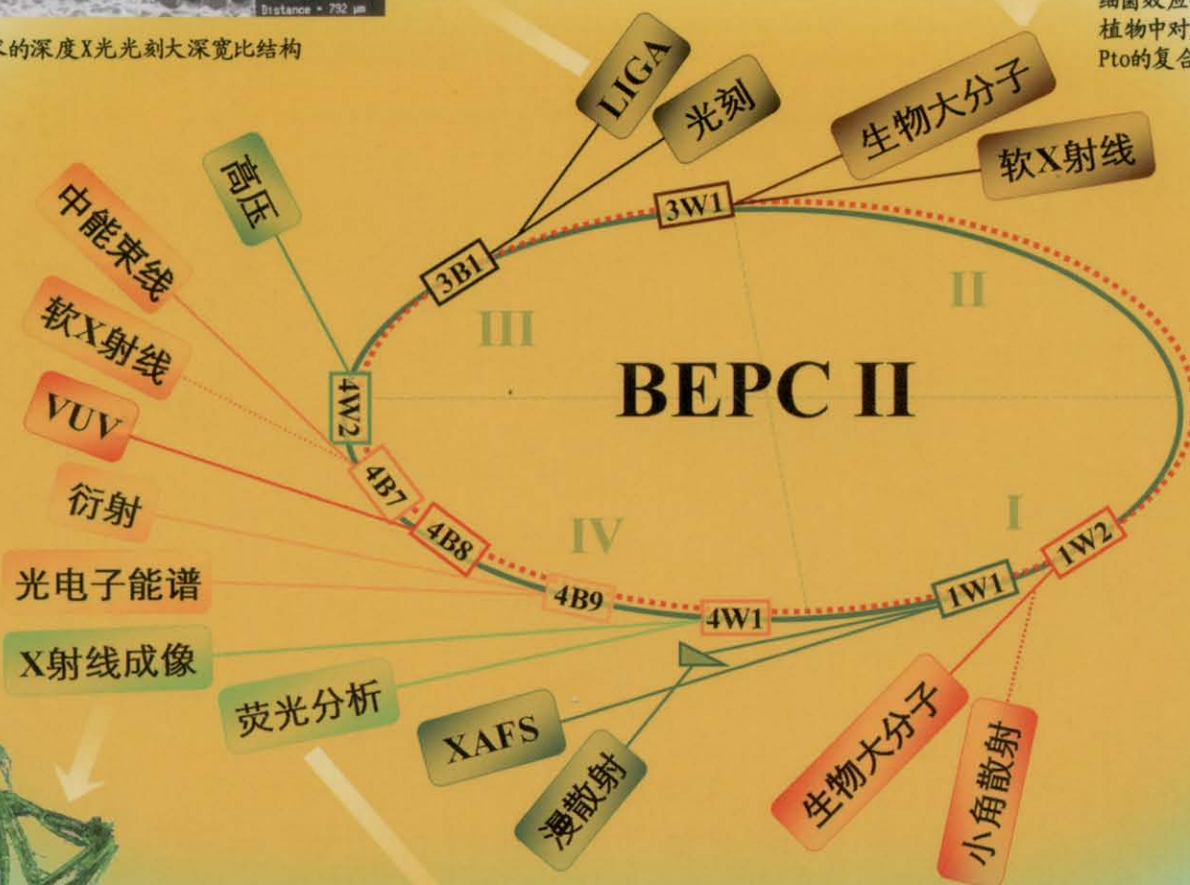
采用LIGA技术的深度X光光刻大深宽比结构



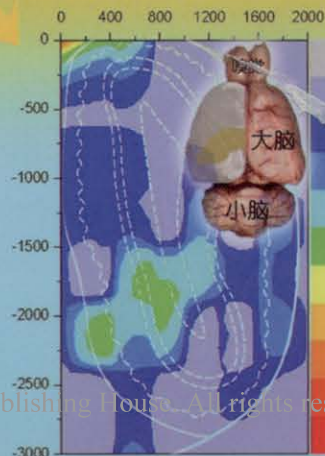
SARS病毒主蛋白酶
晶体结构



细菌效应蛋白AvrPto和
植物中对应的抗性蛋白
Pto的复合物晶体结构



利用X射线相位衬度CT成像方法
完成的苍蝇样品的三维重建



利用X射线荧光分析方法微区扫描
80纳米TiO₂颗粒进入小白鼠脑部后的分布

ISSN 1000-3045

