

从掌心加速器到大科学装置

孙扬

上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

E-mail: sunyang@sjtu.edu.cn

“大科学装置”的概念由发明第一台回旋加速器的欧内斯特·劳伦斯(Ernest Lawrence)提出. 从 20 世纪 30 年代开始, 由于对建造更大加速器的财政需求很高, 劳伦斯意识到未来科学技术上的进步必须依托政府支持下的大型科技平台. 通过第二次世界大战期间曼哈顿计划的实施, 美国从中直接受益的是当时留下的几处设施在战后全部成为国家实验室. 本文回顾美国几个主要国家实验室的历史及现状, 指出国家实验室模式可以形成一股强大的科学发展推动力, 能在许多科学技术领域中起到国际引领作用. 这种以大科学装置为中心、以有效的国家计划和资金投入为保证的科学研究模式值得深入研究以供借鉴.

1 劳伦斯的加速器与大科学装置概念的提出

欧内斯特·劳伦斯是核科学的先驱, 因研制回旋加速器而获得 1939 年诺贝尔物理学奖^[1]. 在劳伦斯之前, 可以说整个世界的科学研究都属于“小科学”, 其特点是研究由个人单独或在小规模团队中开展. 劳伦斯首次倡导了一种新的模式, 即建立由大型研究团队承担的“大科学装置”, 由政府或者其他团体投入所需要的人力和资金, 例如著名的美国劳伦斯·伯克利国家实验室(Lawrence-Berkeley National Laboratory), 其历史可以追溯到劳伦斯在 1931 年创建的小型“辐射实验室”.

不同于那个时期从欧洲去美国的大批科学家, 劳伦斯是土生土长的美国人. 他于 1925 年在耶鲁大学(Yale University)获得物理学博士学位. 1928 年, 他被加利福尼亚大学伯克利分校(University of California, Berkeley)聘为物理学副教授, 两年后在 29 岁时成为正教授, 是该大学当时最年轻的正教授. 那时, 国际上的顶级物理学家们都在探索原子核的内部结构. 当时在英国剑桥大学(University of Cambridge)工作的物理学家、被誉为核物理之父的欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford)利用从放射性重原子核辐射发出的 α 粒子作为炮弹, 成功地从氮气(N_2)中撞出氢(H)原子核, 从而发现了质子. 然而, 这些通过天然放射性产生的 α 粒子能量有限. 含有正电荷的原子核本身被强大的核力紧紧地束缚在一起, 排斥射入的同样带正电的 α 粒子,



孙扬 上海交通大学物理与天文学院特聘教授. 1985 年由阿登纳基金会资助赴德国留学, 1991 年慕尼黑工业大学理论核物理专业获博士学位, 其后多年在欧洲和美国工作, 包括在美国橡树岭国家实验室(当年曼哈顿计划的实施地之一)工作 8 年. 研究领域涉及原子核结构理论、强关联多体物理以及核天体物理等.

因此, 用于这类研究的理想炮弹是数百万电子伏特或更高能量的粒子. 可是, 如何加速 α 粒子和其他带电粒子呢?

使劳伦斯享誉国际的发明始于一张不起眼的草图. 1929 年的一个晚上, 坐在图书馆的劳伦斯瞥见一篇期刊论文, 对其中的一张图产生了强烈兴趣(推测应是挪威人 Rolf Widerøe 关于直线加速器的雏形). 劳伦斯看到的这张图描绘了一种产生高能粒子的装置, 它需要以直线方式组成多级推动. 劳伦斯发现, 在实际应用中, 这种粒子加速器必然需要做得很长, 不适宜搭建在他所在大学的实验室里. 在考虑如何能使加速器做得更加紧凑时, 劳伦斯决定在电磁铁的两极之间设置一个圆形加速腔. 当质子在连接到交变电位的两个半圆形电极之间加速时, 磁场将带电质子保持在螺旋路径中. 加速大约 100 圈之后, 质子将变成一束高能粒子, 可以用于轰击实验目标. 他的第一台回旋加速器的直径只有 4 英寸(约 10 cm), 可以拿在一只手中, 堪称一台掌心加速器.

1933 年, 劳伦斯应邀参加在比利时召开的第七次物理索尔维会议(Solvay Conference). 这是世界顶级物理学家的定期聚会, 参会的科学家几乎全部来自欧洲, 只是偶尔会邀请像罗伯特·密立根(Robert Millikan)或阿瑟·康普顿(Arthur Compton)这类杰出的美国科学家参加. 那一次, 劳伦斯被邀请介绍他的回旋加速器.

在接下来的每一次重复探索中, 只要前面的一次接近成功, 劳伦斯就开始计划更大的机器. 随着设计的回旋加速器越来越大, 在整个 20 世纪 30 年代, 劳伦斯不得不开

始寻求资助,用以组建大型团队来制造更大型的机器。

第二次世界大战开始后,劳伦斯开始把加速器技术用于军事项目。1940 年 12 月,劳伦斯的同事格伦·西博格(Glenn Seaborg, 1951 年诺贝尔化学奖得主)和埃米利奥·塞格雷(Emilio Segrè, 1959 年诺贝尔物理学奖得主)使用 150 cm 回旋加速器加速氘(D)核来轰击铀-238(^{238}U),产生出一种新元素镎-238(^{238}Np);镎-238 再通过 β 衰变成为钚-238(^{238}Pu);而钚-238 的同位素钚-239(^{239}Pu)可以产生核裂变,这就为制造原子弹提供了另一种燃料。劳伦斯同时考虑将裂变同位素铀-235(^{235}U)与铀-238 分开的问题,这个过程就是现在常说的铀浓缩。分离铀同位素只能通过这两种同位素之间很小的质量差逐步分离。劳伦斯将他原来的 94 cm 回旋加速器转换成一个巨大的质谱仪,叫做“加州大学回旋加速器”。当时,来自中国的女学生吴健雄跟随劳伦斯读博士参加了这项工作,并且由塞格雷直接指导。后来,吴健雄成为一位出色的实验核物理学家。她设计的钴-60(^{60}Co) β 衰变实验验证了弱相互作用下的宇称不守恒,这项实验助李政道和杨振宁获得了 1957 年诺贝尔物理学奖。

从那时起劳伦斯就坚信,一个大型科学研究项目需要通过大科学装置,由具有不同专业领域的人组成团队共同完成。他的这种团队合作理念成为他们实验室的传统,至今仍在继续。大科学装置可以为探索未知世界、发现自然规律、实现技术变革提供极限研究手段,是科学突破的重要保障。战争结束后,劳伦斯为了从政府那里获得大型科学装置计划资助进行了广泛的宣传活动,他因此成为大科学装置早期的主要倡导者。

从 20 世纪 50 年代开始,除了以加速器和反应堆为代表的核物理大科学装置之外,还逐步形成了粒子物理、聚变物理和天文学等领域的专用大科学装置,以及后来为开展探索物质世界的结构及其相互作用规律等研究,特别是为多学科交叉前沿研究提供先进研究手段的平台型装置,如大型强子对撞机、先进光源、先进中子源、强磁场装置、强激光装置、各类大型天文望远镜等。

2 美国的国家实验室

大科学装置的概念不同于一般的小型科研仪器,它的建造和运行需要一个有效的平台。1942 年,随着曼哈顿计划的开始实施,这个最终制造出人类历史上第一个核武器的军事工程派生出了一系列以研究武器和发展军用材料为目标的秘密科研地点。战后,美国原子能委员会(United States Atomic Energy Commission, AEC; 现为美国能源部, United States Department of Energy, DOE)接管了这些战时临时建立的实验室,并将它们转为永久的实验室,就是今天的美国国家实验室。早期的国家实验室一般都包括一个或者几个科学装置(如粒子加速器或核反应堆)。各个国家实验室都可以从政府获得资金和基础设施的保障,用于开

展各领域的科学研究,特别是与物理学有关的研究。实践证明,这种由政府出资、私有企业或研究型大学承担科研任务的管理模式在美国大获成功。

美国的国家实验室里有常驻的工作人员和科学家,同时允许外来的访问学者莅临实验室进行科学上的交流,或借用实验室的设备和仪器进行科学研究。集中的资金和智力资源使得美国的这些国家实验室成为大科学研究的典范。这些闻名世界的国家实验室大多从核物理研究开始,但是发展到今天,它们已经在许多不同的科技领域里起到了国际引领作用。下面以几个美国主要的国家实验室为例,介绍这些实验室凭借大科学装置所取得的科学成就。

2.1 劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence-Berkeley National Laboratory, LBNL)

劳伦斯伯克利国家实验室,简称伯克利实验室。当年劳伦斯对大型机器和大笔资金的要求很高,他曾于 1946 年向曼哈顿计划项目申请 200 多万美元用于辐射实验室的扩建。战争结束后,劳伦斯的辐射实验室成为首批加入美国原子能委员会的实验室之一。从 20 世纪 50 年代至今, LBNL 一直保持着作为主要国际物理研究中心的地位,共计有 12 名与伯克利实验室相关的人员获得了诺贝尔奖。

自 20 世纪 50 年代以来, LBNL 取得的最重要的科学成就是多种超铀元素的发现,这些发现为元素周期表增加了 14 个新元素。借助于强大的粒子加速器, LBNL 的物理学家们发现了 85 号元素砹(Astatine, At)、93 号元素镎(Neptunium, NP)、94 号元素钚(Plutonium, Pu)、95 号元素镅(Americium, Am)、96 号元素锔(Curium, Cm)、97 号元素锫(Berkelium, Bk)、98 号元素锿(Californium, Cf)、99 号元素镱(Einsteinium, Es)、100 号元素镱(Fermium, Fm)、101 号元素钿(Mendelevium, Md)、102 号元素镎(Nobelium, No)、103 号元素镱(Lawrencium, Lr)、105 号元素镱(Dubnium, Db)以及 106 号元素镱(Seaborgium, Sg)。其中,镱、镎、镱、镱(Sg)分别是以伯克利实验室、加利福尼亚州、劳伦斯和西博格的名字命名的。

现在伯克利实验室的研究项目几乎遍及所有的科学领域^[2],包括至少 6 个主要研究重点:基础能源科学、生物和环境系统科学、先进科学计算、物质的基本属性、未来加速器,以及为未来的可持续发展开发能源技术创新。

1954 年开始运行的 10 亿电子伏特加速器(Bevatron)是伯克利实验室早期建造的一项大科学装置。在设计 Bevatron 时,人们只是假设每个粒子都有一个带相反电荷的反粒子,这种性质被称为电荷对称。所设计的 Bevatron 具有足够的能量来产生反质子,因此可以检验电荷对称性假设。1955 年, Bevatron 发现了反质子。埃米利奥·塞格雷(Emilio Segrè)和欧文·张伯伦(Owen Chamberlain)因领导该科研项目而获得 1959 年诺贝尔物理学奖。此后不久,布鲁

斯·考克(Bruce Cork)及其同事在 Bevatron 又发现了反中子。

由美国能源部资助的高级光源(Advanced Light Source, ALS)是位于 LBNL 的一个重要装置。ALS 是世界上可以产生最亮紫外线和软 X 射线的光源之一,能提供多种极亮的高质量光源,为来自世界各地的研究人员提供科学实验手段。

更令人赞叹的是,当年以核物理研究为主的伯克利实验室竟然在探索宇宙起源和演化方面作出了重大贡献。最引人注目的突破是宇宙加速膨胀的发现。在 20 世纪 80~90 年代,那里的物理学家和天文学家组建了超新星宇宙学计划(Supernova Cosmology Project, SCP),这个项目的主持人是伯克利实验室的索罗·珀尔穆特(Saul Perlmutter)。他们使用 Ia 型超新星作为“标准烛光”来测量宇宙的膨胀率,并成功地激发了国际竞争。结果在 1998 年初,SCP 和 High-Z 超新星搜索团队宣布了令世人惊讶的发现,即宇宙膨胀正在加速,其原因很快被命名为“暗能量”,珀尔穆特和高红移团队的亚当·里斯(Adam Riess)与布莱恩·施密特(Brian Schmidt)因此共获 2011 年诺贝尔物理学奖。

伯克利实验室对社会的贡献还体现于科学技术在日常生活中的直接应用。LBNL 的资深研究人员阿瑟·罗森菲尔德(Arthur Rosenfeld)是 1968 年诺贝尔物理学奖得主路易斯·阿尔瓦雷茨(Luis Alvarez)的学生,但是得益于伯克利实验室宽松的科研氛围,从 1974 年开始,罗森菲尔德的研究兴趣转向能源与环境。从 1975 年直到他 2017 年去世,罗森菲尔德一直是提高能源效率的主要倡导者。他的实验室引领了多项先进技术:节能型荧光灯、低耗电冰箱、智能窗户等,这些技术从根本上提高了用电效率,使全球能源消耗及温室气体排放巨幅度减少。据估计,他的研究成果每年可为美国能源消耗节省约 1000 亿美元,而且这一数字还在不断增长。

2.2 阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)

阿贡国家实验室的前身是 1942 年费米(Enrico Fermi)在芝加哥大学(The University of Chicago)领导的冶金实验室(Metallurgical Laboratory),后来成为曼哈顿计划最早的一部分。冶金实验室曾在芝加哥大学校园足球场下建造了世界上第一座核反应堆:芝加哥一号堆,在那里,费米团队首次证明了核裂变链式反应的可行性。二战后实验室搬到芝加哥西南处不远的杜佩奇县(DuPage County, Illinois),于 1946 年被正式更名为阿贡国家实验室,开始专门从事与核物理和核技术相关的研究,并应美国原子能委员会的要求,为和平核能研究计划开发新型核反应堆。ANL 在爱达荷州(Idaho)建造的芝加哥 4 号堆于 1951 年在世界上第一次利用核电点燃了一串 4 个电灯泡,使核能应用超出了核武器的范畴,为用于发电的商用反应堆奠定了基础。

ANL 发展了多种先进的反应堆和燃料循环技术,用

以实现安全、可持续的核电发电。这些研究包括实验沸水反应堆、快中子反应堆等。ANL 的科学家还研究如何对废核燃料进行再加工,使废物减少高达 90%。ANL 还设计了世界上供第一艘核动力潜艇使用的反应堆。

1987 年,ANL 首次成功展示了一种被称为等离子体尾场加速的先驱技术,该技术可以用比传统加速器更短的距离加速粒子。除此之外,该实验室还在物理和化学基础研究方面保持着强大的实力。阿贡的化学家们参与了元素周期表中 99 号元素镱和 100 号元素镱的发现。

阿贡串列直线加速器系统(Argonne Tandem Linac Accelerator System, ATLAS)是世界上第一个用于库仑势垒附近能量的重离子加速器。这个装置适合研究原子核的性质以及天体物理中恒星核心燃料过程的物理,帮助了解从较低能量(通常发生在燃烧的恒星中)到最高能量(在“大爆炸”之后不久发生)原子核之间的反应。

位于 ANL 的先进光子源(Advanced Photon Source, APS)是由美国能源部资助的国家同步辐射光源装置。该设施于 1995 年完工,产生了当时世界上最亮的 X 射线。每年都有科学家使用 APS 在材料科学和生物科学领域进行最前沿的基础和应用研究。截至 2015 年,APS 已解决了 30 种已知 G 蛋白偶联受体蛋白质结构中的 21 种。

ANL 还有个著名的研究中心,即纳米材料中心(Center for Nanoscale Materials, CNM)。CNM 是美国能源部的 5 个纳米科学研究中心之一,提供研究纳米技术和纳米材料的基础设施和仪器。

1946~1959 年间在阿贡核物理实验室工作的玛丽亚·戈佩尔特-梅耶(Maria Goeppert-Mayer)是继居里夫人之后的第二位女性诺贝尔物理学奖得主。戈佩尔特-梅耶婚后移民到美国时,阿贡刚正式成为国家实验室,她被任命为资深物理学家,同时在 ANL 与芝加哥大学核物理研究所工作。她在研究元素的丰度时注意到,具有特定中子或质子数 2、8、20、28、50、82 和 126 的元素往往比其他元素丰度更大,表明这些具有中子或质子“幻数”的原子核更稳定,因此在自然界中更常见。受到费米的启发,戈佩尔特-梅耶证明了由于核子的自旋-轨道相互作用,原子核内部形成了壳,核子表现出强烈的单粒子运动壳效应。原子核的壳效应后成为原子核结构物理的中心问题。由于这项工作,戈佩尔特-梅耶与汉斯·延森(J. Hans D. Jensen)和尤金·维格纳(Eugene Wigner)共获 1963 年诺贝尔物理学奖。

2.3 橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)

橡树岭国家实验室是一个由美国能源部资助的多学科研究国家实验室,位于田纳西州(Tennessee)靠近诺克斯维尔城(Knoxville)的橡树岭镇。橡树岭镇原来并不存在,是美国陆军工程兵团(United States Army Corps of Engineers, USACE)于 1942 年建立,属于曼哈顿计划的一部分。

费米于“芝加哥一号堆”之后在这里开发了世界上第二个链式核反应堆, X-10 是一个用于连续运行的反应堆, 主要用于产生医用放射性同位素。

ORNL 有着悠久的能源研究历史, 自 1945 年以来进行了许多核反应堆试验。20 世纪 50 年代, 在 ORNL 进行的大部分研究的目的是将核反应堆作为一种产生能源的方式, 其中一个项目是建造世界上第一个轻水反应堆, 现已成为许多现代核电站的模式。

ORNL 承担了新型核反应堆的早期研发, 于 1954 年建成了国际上第一个小型熔盐堆实验装置, 运行最高温度达到 871°C, 在当时是人类首次将核反应堆运行到如此高温的状态。这个熔盐堆虽然没有使用钍(Thorium, Th), 但它证明了熔盐堆的可行性。1966 年初, 另一个设计功率为 10 MW 的熔盐堆建成并成功运行, 这次是以钍作为核燃料。这个钍基熔盐实验堆运行很平稳, 一直运行到了 1969 年底停堆。

目前, ORNL 有着美国能源部系统规模最大的科学和国家实验室年度预算, 研究计划专注于高性能计算、中子科学、材料、能源、系统生物学和国家安全。

ORNL 是世界上最强大的超级计算机所在地, 从 1992 年以来, 美国国家计算科学中心(National Center for Computational Sciences, NCCS)一直在 ORNL 监管高性能计算。自 2012 年, ORNL 的 Titan 超级计算机在世界 TOP500 榜单中多次排名第一; 2019 年, 它的“高峰(Summit)”超级计算机再次排名世界之首。

ORNL 另一个领先国际研究领域的大科学装置是产生中子的设施。中子是窥视物质内部结构的优越探针^[3]。ORNL 有 3 个中子源: 高通量同位素反应堆(High Flux Isotope Reactor, HFIR), 橡树岭电子直线加速器(Oak Ridge Electron Linear Accelerator, ORELA)和散裂中子源(Spallation Neutron Source, SNS)。HFIR 通过恒定的核反应提供稳定中子束, 而 ORELA 和 SNS 是粒子加速器, 产生中子脉冲。HFIR 曾经提供了世界上最高的恒定中子通量, 自 1965 年以来一直用于材料研究, 也是医疗放射性同位素的主要来源。SNS 于 2006 年投入运行, 此后其束流功率已升级至 1 MW, 计划将继续增加至 3 MW。

2.4 洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)

洛斯阿拉莫斯国家实验室最初也是二战期间建立的实验室, 曾是曼哈顿计划实施的主体部分。1942 年底, 曼哈顿计划的负责人莱斯利·格罗夫斯将军(General Leslie Groves)在访问劳伦斯的辐射实验室时, 与加利福尼亚大学伯克利分校的物理学教授罗伯特·奥本海默(Robert Oppenheimer)会面。奥本海默的任务是组织原子弹研制工作。当时, 由于曼哈顿计划的指挥中心所在地必须满足在保密、后勤、安全等方面特定的军事要求, 奥本海默选择

了洛斯阿拉莫斯农场学校为研制地点。它位于新墨西哥沙漠的帕哈里高原, 在圣达菲西北方向约 65 km 处, 这就是今天 LANL 的前身。当时, 其他实验室(如橡树岭和阿贡)专注于铀和钚原子弹燃料的生产, 而 LANL 是整体设计的协调中心, 是曼哈顿计划的核心。LANL 汇集了许多世界上最著名的科学家, 其中包括众多诺贝尔奖获得者。

自 20 世纪 40 年代以来, 洛斯阿拉莫斯负责开发氢弹和其他类型的核武器。1952 年, 劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)成立, 成为 LANL 的“竞争对手”。那时 LANL 和 LLNL 是美国国家实验室系统负责核武器库的专项实验室, 其中也包括基础科学研究、粒子加速器开发和核聚变研究。

冷战结束后, 这两个国家实验室都转向科学多样化, 以适应“非战争”科学技术的发展。今天, 洛斯阿拉莫斯依然是世界上最大的科学和技术机构之一, 在国家安全、太空探索、核聚变、可再生能源、医学、纳米技术和超级计算等领域开展多学科研究。

通过实验室、政府机构、大学和工业界的合作, LANL 有着 3 个主要的大科学装置设施: (1) 综合纳米技术中心, 由 LANL 和桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratory)共同运营, 在两个实验室均设有设施, 研究纳米级材料在微尺度和宏观尺度系统和设备中设计、性能和集成的科学原理; (2) 洛斯阿拉莫斯中子科学中心(Los Alamos Neutron Science Center, LANSCE), 有着世界上最强大的直线加速器, 为科学应用提供强大的中子源, 能够进行支持民用和国家安全研究的实验; (3) 国家高磁场实验室(National High Magnetic Field Laboratory, NHMFL), 运作一个高磁场研究的国际用户计划。

3 大科学装置与国家实验室模式

第二次世界大战后, 美国凭借以核科学为代表的科技优势迅速成为世界头号强国。从历史角度来看, 美国得以成功的一个原因是曼哈顿计划的具体实施地点在战后各自逐步发展成隶属美国能源部的国家实验室。这些美国国家实验室的共同特点是都有大科学装置, 其背后始终有政府支持, 形成强大的科技力量, 在许多科技领域里起到国际引领作用。从那时起, 科学技术发展中逐渐出现了一种新的态势, 即许多科学领域已经发展到这样一个地步, 研究获得的每一次突破, 甚至前进中的每一步, 大都离不开大科学装置^[4,5]。世界各国以巨大的投入建立大科学装置的推动力即在于此。大科学装置的发展状态决定一个国家在众多领域的前沿研究取得突破的能力, 从而决定这个国家在国际上的科学技术竞争能力。

大科学装置都是通过较大规模投入和工程建设来完成, 建成后在具有充分的资金保障下能够长期稳定运行, 开展持续的科学技术活动。对于这种长期投资, 制定科学

目标是关键的第一步。实现重要科学技术目标的大型设施，其目标必须面向科学技术前沿，为一个国家的经济建设、国家安全和社会发展作出战略性、基础性和前瞻性贡献。国家实验室正是这样一个通过由国家规划、直接管理的方式来建造和运行大科学装置的模式。

从本文列举的例子可见，以美国为代表的西方发达国家的科学技术水平和强大国际竞争能力在相当大的程度上是通过高水平的国家实验室机构体现的，它的基本特点是科研任务明确、科研力量集中、国家投资集中。在具体运作上，则体现出学科多样、学科交叉，发展新型、边缘科学和突破重大新技术的能力。这些研究机构一般都拥有最先进的大科学装置，甚至大科学装置群作为支撑其强大科技竞争力的基本条件。

美国各国家实验室一般都明确制定和不断更新一些优先发展计划，以确保实验室在未来的几十年内能够牢牢立足于国际领先地位。以伯克利实验室为例，目前他们宣称 ALS 升级项目会将 ALS 变为世界上最明亮的软 X 射线同步加速器光源，能完成世界上任何现有或计划中的光源都无法完成的科学实验。在人工智能方面，科学机器学习 (Machine Learning for Science) 使用复杂的算法和功能强大的计算机从海量的原始科学数据进行推理，可以在微观和原子尺度上观察事物，测量人眼无法察觉的振动，或捕获数百万光年以外物体的高分辨率图像。伯克利的科学家们计划在材料、能源、环境、生物学、基因组学以及粒子物理与核物理、天文学等领域收集、组织和存储庞大的科学数据集，并利用高级互联网使这些数据集易于被搜索使用。

近年来，我国高度重视科研基地的发展，建设了一批由不同科研单位管理运行的国家重点实验室。作为承担我国科学装置建设和运行的主要力量，中国科学院先后建设和运行了北京正负电子对撞机及北京同步辐射装置、合肥同步辐射装置、兰州重离子加速器与冷却储存环装置、上海光源、郭守敬望远镜 (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST) 和天眼 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 等一批科学装置，在我国基础科学研究和经济社会发展中发挥了作用。就科学装置建设的数量来说，我国的国际排名还是比较靠前的，而且装置的质量也具有国际水平，部分装置对各交叉学科具有一定的促进作用。不过从管理模式和理念上看，这些还属于扩展型的“小科学”，还不是与西方发达国家匹敌的大型科研基地。这些装置的科学目标一般比较单一，很少见到那种带动学科多样和交叉、新型的边缘科学，因而在促进社会发展方面的作用不够显著。这说明我国科研基础的整体水平还有待发展，还需要形成真正的规模性、多样化的研究团队。同时，要营造一种宽松的学术环境，鼓励计划外的创新，才有可能出现劳伦斯的掌心加速器这类“从零到一”的突破。

国家实验室的运作涉及科学、技术和管理诸多方面，是个复杂的系统工程。以国家为主导的大科学工程必须充分体现国家需求，在决策上要考虑具体国情，避免简单照搬其他国家的模式。同时，我们要虚心借鉴国际上著名实验室的成功经验，把发展真正的大型科研基地作为科技兴国的重要举措，而有效地建设和运行大科学装置则是实现这一目标的重要组成部分。

致谢 感谢国家重点研发计划(2016YFA0400501)和国家自然科学基金(U1932206)资助。

推荐阅读文献

- 1 Childs H. An American Genius: The Life of Ernest Orlando Lawrence, Father of the Cyclotron. New York: Dutton, 1968
- 2 Brechin G. Imperial San Francisco: Urban Power, Earthly Ruin. Berkeley: University of California Press, 1999
- 3 Sun Y. The story of “Spallation Neutron Source” (in Chinese). iScientist, 2017 [孙扬. 趣话中子——你所不知道的“散裂中子源”的故事. 我是科学家, 2017]
- 4 Yau S-T, Nadis S, Xianyu Z Z, He H J, trans. From the Great Wall to the Great Collider: China and the Quest to Uncover the Inner Workings of the Universe (in Chinese). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016 [丘成桐, 史蒂夫·纳迪斯, 著. 鲜于中之, 何红建, 译. 从万里长城到巨型对撞机: 中国探索宇宙最深层奥秘的前景. 北京: 电子工业出版社, 2016]
- 5 Gao J. CEPC-SppC Accelerator: From conceptual design to technical design (in Chinese). Mod Phys, 2020, (1): 18–26 [高杰. CEPC-SppC 加速器——从概念设计到技术设计. 现代物理知识, 2020, (1): 18–26]

Summary for “从掌心加速器到大科学装置”

From the pocket accelerator to major scientific facilities

Yang Sun

School of Physics & Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

E-mail: sunyang@sjtu.edu.cn

The concept of “major scientific facility” was put forward by Ernest Lawrence, who invented the first cyclotron in 1929. Before Lawrence, all scientific research in the entire world can be said as “small science”, which is characterized by the research carried out by individuals or in small size of groups. Since the 1930s, due to the high financial need to build larger accelerators, Lawrence realized that a major scientific research project needs to be completed by a team with people of different expertise. His concept of teamwork has become a tradition in their laboratory at Berkeley and continues to this day. Major scientific facilities can provide ultimate research methods for exploring unknowns, which may likely lead to scientific breakthroughs. Since then, a new trend has gradually emerged in the development of science and technology, that is, every major breakthrough obtained in research, and even a significant step forward, is largely inseparable from installations of large facilities. This is precisely the impetus for countries all over the world to build major scientific facilities with huge investment. The development status of large scientific facilities determines a country’s ability to make such breakthroughs in cutting-edge research, and thus determines the country’s scientific and technological competitiveness in the world.

Through the implementation of the Manhattan Project during the Second World War, the United States was directly benefited from the fact that the remaining facilities at that time all became national laboratories after the war. Following Lawrence’s original concept about the teamwork with major scientific facilities, the present article briefly reviews the history and current status of several national laboratories in the United States, and points out that the national-laboratory model can indeed form a strong scientific development impetus and play an international leading role in scientific and technological fields. I take four US national laboratories as examples: The Lawrence-Berkeley National Laboratory, the Argonne National Laboratory, the Oak Ridge National Laboratory, and the Los Alamos National Laboratory, to show that the model, centered on large-scale facilities with the management guaranteed by effective national plans and capital investment, is worthy of in-depth study for reference. In recent years, China has strongly emphasized the importance in the development of scientific research bases and has built a number of key laboratories. It is pointed out that comparing with the standard of the world-leading laboratories, China still needs to narrow the gap in management and in operation.

major scientific facility, national laboratory, teamwork, basic science research, competitiveness in science and technology

doi: 10.1360/TB-2020-0751