



世纪之交的中国粒子物理*

陈和生

(高能物理研究所 北京 100039)

摘要 物理学在 20 世纪取得了巨大的进展,对物质微观结构的认识实现了 3 次重大的跨越,粒子物理的成就为其顶峰。世纪之交的中国粒子物理学,应当面向世界科学前沿,结合中国的国情,认真制订中国粒子物理的发展战略。在国内充分利用 BEPCII 进行粲物理精确测量前沿的研究,同时选择有特色的非加速器物理实验,如粒子天体物理实验、宇宙线观测、中微子物理实验等。我们应大力加强国际合作,重点搞好 LHC 实验,并积极部署大型直线对撞机的国际合作。高能物理研究基地还应当积极为其它学科提供先进手段和大型平台。

关键词 粒子物理,北京正负电子对撞机,粲物理,中微子物理,暗物质



陈和生研究员

1 20 世纪,物理学的世纪

物理学在 20 世纪取得了巨大的进展,使人类对物质微观结构的认识实现了 3 次重大跨越:发现原子有内部结构,由原子核和电子组成,形成了原子物理学;发现原子核有内部结

构,由质子和中子组成,形成了原子核物理学;发现核子有内部结构,由夸克组成,形成了粒子物理学。20 世纪物理学 3 个最重大发现是:量子理论,相对论和 DNA 双螺旋结构。最后一项成果属于生命科学领域,但它是在传统的物理学实验室由物理学家发现的。因此,20 世纪被当之无愧地称为物理学的世纪。

20 世纪物理学的研究成果转化成了许多新技术,产生了极其深远的影响。它们转化成为巨大的生产力,例如,原子能、半导体、电视、计算机、激光、手机等等,为人类从工业社会发展到信息社会奠定

了基础。同时物理学的研究成果还对社会和国际政治产生了深刻的影响,其中以核武器的影响最为深远。

物理学的研究成果为其它学科的发展提供了先进的研究手段,例如材料科学、生命科学、化学、天文学等等,并产生了一系列交叉研究的新前沿学科:生物物理、天体物理、粒子天体物理、宇宙论等等。

下面重点谈谈粒子物理在 20 世纪取得的主要成就。

50 年代起,随着物质微观结构研究前沿从原子核深入到基本粒子,粒子物理逐步形成物理学的一门独立的前沿学科。它研究物质微观结构的最小单元及其相互作用规律。早期粒子物理的研究手段是宇宙线观测,以后逐步发展到以高能加速器和大型探测器等大科学装置为主要研究工具,并成为了一门典型的大科学——设备规模大,投资高,建设和研究周期长。高能物理加速器和大型探测器的建设、实验研究普遍采取了国际合作的方式。

60 年代 Gel-Mann 提出了夸克模型,对当时发现的 200 多个强子成功进行了分类,并认为这些强子是由 2 到 3 个带分数电荷的夸克组成的,揭示出物质结构又一个新层次。由 Glashow, Weinberg 和

* 收稿日期:2004 年 9 月 7 日



Salam 提出的基于 $U(1) \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ 的标准模型^[1], 成功地将电磁相互作用和弱作用统一成为电弱作用, 准确地预言了传递弱带电流的玻色子 $W^\pm$ 和传递弱中性电流的玻色子 Z 。它对所有已知的基本粒子都正确地加以分类, 并认为构成物质结构的最小单元是三代夸克(u, d), (c, s)和(t, b)及三代轻子(ν_e, e), (ν_μ, μ)和(ν_τ, τ)。标准模型的理论预言与迄今为止所有已知实验结果一致, 精度达到 10^{-5} 。标准模型使粒子物理学达到了当代成功的顶峰。

近年来中微子物理的实验研究获得了重大的突破, 发现中微子有质量, 不同的中微子之间有振荡^[2], 即由一种中微子转换为另一种中微子, 物理学称之为中微子混合。精确测量中微子混合参数的实验研究成为国际粒子物理研究的热点。

粒子物理在宇宙的起源和进化、天体的形成和演化的研究中起着重要的作用。研究微观的粒子物理与研究宇观的天体物理和宇宙论的相互交叉、相互促进, 并形成了新的交叉学科——粒子天体物理, 成为了物理学的又一个发展前沿。

高能加速器和粒子物理实验还有力地推动了高技术的发展, 包括高性能计算、网络、WWW 网页、网格计算、超导技术等等。以先进加速器技术为基础的同步辐射、散裂中子源、自由电子激光等大型研究平台成为了多学科交叉研究的前沿研究手段。

2 中国粒子物理实验研究的发展

2.1 北京正负电子对撞机及其成果

北京正负电子对撞机(BEPC)由直线注入器、储存环、北京谱仪和北京同步辐射装置组成。BEPC 于 1984 年 10 月动工, 邓小平亲自为工程奠基。1988 年 10 月 BEPC 如期建成, 不超预算, 并在建成后迅速达到设计指标。10 月 24 日党和国家领导人视察 BEPC。邓小平发表了“中国必须在高科技领域占有一席之地”的著名讲话, 深刻地论述了发展中国高能物理的重要意义。BEPC 取得许多重要的物理成果, 特别是在粲物理实验研究处于国际领先地位, 在世界高能物理占领了一席之地。近年来 BEPC 的综合性能大幅度提高, 日获取事例数增加了 3—4

倍, J/ψ 和 ψ' 事例总数比国际上此前的实验多一个数量级^[4]。

BEPC/BES 的重大物理成果表明, τ 粲能区仍然有十分丰富的物理问题有待回答, 现已成为国际高能物理精确测量前沿的热点之一, 竞争激烈。美国康奈尔大学的加速器 CESR 将它的能量降到粲能区与 BEPC 竞争。这是为数不多的由我国的重大研究成果在国际基础研究产生的热点。近年来在这个能区有关发现多夸克态的报道使得这个能区物理的研究更加活跃。

依托 BEPC 的北京同步辐射装置成为我国主要的广谱同步光源, 是向社会开放的交叉前沿大型研究平台, 每年全国有 100 多个用户单位进行 300 多项实验, 获得了大批重要成果。

2.2 非加速器物理实验

我国在宇宙线观测领域有较好的基础, 取得了许多重要成果。1972 年高能物理研究所在云南高山宇宙线云室观察到了可能的未知中性重粒子。后来在海拔 5 500 米的甘巴拉山建立了大规模的乳胶室阵列。1990 年在海拔 4 300 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, 并不断扩展。1998 年起开展中意合作, 建设全覆盖阻性板探测器。近年来非加速器物理实验研究发展迅速, 向高能天体物理和粒子天体物理发展。中国参加了阿尔法磁谱仪国际合作组, 为它的首次飞行研制了永磁体系统和主结构, 并于 1998 年 6 月搭乘发现号航天飞机, 将人类第一个大型磁体送入了宇宙。 γ 爆探测器搭载“神舟二号”飞船于 2001 年成功地进行了飞行, 实现了我国空间粒子天体物理实验零的突破。

3 世纪之交的粒子物理学

3.1 物理学家的困惑

人类进入了 21 世纪, 社会普遍高度评价科学和技术的巨大作用, 世界各国都加大了对科学、技术和教育的投入, 知识经济正向我们走来。然而人们突然发现物理学似乎已经回答了物质结构的基本问题, 并相当完美。社会似乎已经再也没有了对物理学新的重大发现的欲望和期待。于是有人主张



物理学研究重点应从探索和发现转向应用物理学的基本理论解决技术转化;为其它学科研究提供工具和手段;发展交叉学科。进而对物理研究的投入在基础研究中的比例持续下降。在世界上大多数国家愿意学习物理学的学生比例和质量都在下降。所有这些令许多物理学家都陷于困惑之中。世纪之交,在展望 21 世纪的科学时,有人认为 21 世纪是材料科学的世纪,有人认为是生命科学的世纪,但似乎没人预言是物理学的世纪。

3.2 粒子物理学家的困惑

世纪之交,粒子物理学家的困惑更为突出。在许多人看来,粒子物理学似乎已回答了物质结构在粒子层次的主要问题,已经没有了物质结构研究新的重大发现的欲望和期待。不少人认为在可以预见的将来,粒子物理不大可能出现重大发现。粒子物理面临的是一片荒漠(desert)。冷战的结束,也使粒子物理研究的社会环境发生了微妙的变化。粒子物理实验要求的大科学工程的规模不断扩大,投资高,周期长,因而更增加困难。

3.3 世纪之交的粒子物理学面对严峻的挑战

虽然粒子物理学在 20 世纪已经成功地回答了许多问题,但在新世纪我们仍有更多更严峻的问题亟待回答。这是粒子物理学在新世纪发展的动力,是其生命力之所在。我们应当以物理学自身的观点来看待世纪之交的粒子物理,迎接严峻的挑战,抓住重大发展的历史机遇。

标准模型决不是粒子物理的终结,仍有许多重大问题亟待超越标准模型的新物理理论来回答:

Higgs 是标准模型中最关键的粒子,至今尚未发现。若到 1TeV 的能量标度还找不到它,就必须出现新的对称性破缺机制;

标准模型有太多参数有待解释,例如为什么是三代夸克和三代轻子?它们的质量差别为什么这样大?为什么出现夸克混合角?也许标准模型自身无法解释;

夸克禁闭的物理机制;

中微子物理的突破;

CP 破坏。

天文观测发现,宇宙中有大量不发光的物质,被称为暗物质,约占宇宙物质总量的 23%。普遍认为它们是弱作用重粒子,例如超对称粒子 Neutralino。寻找暗物质是粒子物理面临的重大挑战。

粒子物理面临的重大挑战是近年来发现的暗能量。对 High-z 超新星观测意外地发现宇宙正加速膨胀^[9]。按照 Einstein 宇宙方程,这种加速现象被解释为是充满宇宙暗能量的负压所造成的。与通常能量产生正的压力相反,暗能量最基本的特征是产生负的压力。目前研究结果认为暗能量占宇宙物质总量的 73%。必须指出,物理学界对暗能量的确切物理含义及其性质目前并无可接受的模型和假设。

综上所述,迄今为止粒子物理学仅能解释宇宙中物质的百分之几。暗能量与暗物质的探索和物理解释是对 21 世纪粒子物理学最严峻的挑战。这些巨大的挑战正是粒子物理学发展的强大动力。

3.4 粒子物理研究的国际前沿

世纪之交的粒子物理实验研究的国际前沿有两个主要领域:

(1) 基于加速器的物理实验,包括高能量前沿和高精度前沿。高能量前沿的研究目标是寻找 Higgs 粒子和超越标准模型的新粒子,探索新物理现象。高能量前沿使用世界上能量最高的加速器,例如日内瓦欧洲核子研究中心 CERN 的大型强子对撞机(LHC)。质心系能量为 14TeV 的质子对撞,预计在 2007 年投入运行。国际高能物理界正在讨论下一代的高能加速器,预计将是质心系能量为 0.5—3 TeV 的大型正负电子直线对撞机,可能在 12—15 年后建成。中国应当积极参与这项重大国际合作。

高精度前沿使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的数据,精确检验标准模型,探索超越标准模型的新现象。日本 KEK 和美国 SLAC 的 B 工厂、北京的 BEPCII 和意大利 Φ 工厂都是属于这样的设施。

(2) 非加速器物理实验,包括中微子实验、粒子天体物理实验、宇宙线观测、寻找稀有衰变等等。



近年来中微子实验取得了一系列重大成果,如日本的超级神冈和 Kamland,加拿大的 SNO 等。宇宙线观测试验的规模不断扩大,涉及超高能宇宙线(Auger)、 γ 天文,中微子天文等领域。粒子天体物理实验成为粒子物理与宇宙论、天体物理交叉前沿的新热点,例如 AMS 和 GLAST。

四 对中国粒子物理发展的战略思考

世纪之交的中国粒子物理学应当面向世界科学前沿,结合中国的国情,认真制定中国粒子物理的发展战略。在国内利用 BEPC 的基础,开展投资相对较少的粲物理精确测量前沿的研究。同时选择有特色非加速器物理实验,如粒子天体物理实验、宇宙线观测、中微子物理实验等。建设好羊八井国际宇宙线观测站,力争出重大物理成果。尽快实现硬 X 线调制望远镜巡天,寻找硬 X 射线点源。我们应大力加强国际合作,加强规划和组织,坚持“有所为,有所不为”,增加投入,重点搞好 LHC 实验,并积极部署大型直线对撞机的国际合作。高能物理研究基地还应积极为其它学科提供先进手段和大型平台,例如同步辐射装置、散裂中子源、自由电子激光等等。

4.1 BEPC 未来发展:BEPCII

BEPC 未来发展的物理窗口是 τ 粲能区高精度测量前沿物理研究,即进行高统计性和小系统误差的测量,精确检验标准模型,寻找稀有衰变,探索超越标准模型的新物理现象。BEPC 对该能区物理研究具有独特优势:运行在 J/ψ 和 ψ' 的共振峰、产生截面大、阈值区域本底小,是 B 工厂完全无法替代的。这项研究对量子色动力学(QCD)的发展,包括微扰 QCD 和非微扰 QCD 及其过渡区域十分重要,同时能探索新物理现象。精确测量的研究要求高统计事例,即要求高亮度加速器提供高事例率,以及高性能探测器能在高事例率下工作,能精确测量粒子的能量和动量,并精确识别粒子的种类。因此未来发展的最佳选择是对加速器和探测器做重大改造 (BEPCII/BESIII)^[4], 将亮度提高两个数量级。BEPCII 有望在国际高能物理前沿研究中获得更多原始创新性的重大成果:寻找新粒子(胶子球、多夸

克态、夸克胶子混杂态);精确测量 J/ψ 、 $\psi(2S)$ 、 ψ' 衰变性质;精密测量 CKM 矩阵元;轻强子谱和重子激发态研究;D 介子物理:(测量 f_D 和 f_{D^*});检验 VDM、NRQCD、PQCD(R 值精确测量)。

BEPCII 是一个国际先进的高亮度双环正负电子对撞机。它的设计方案^[5]是利用 BEPC 隧道,在现有的储存环内新建一个储存环。新老两对半环在南北对撞点交叉,形成两个等同的环。每个环内储存 93 个束团,每个环的流强大于 0.9A。在南对撞点实现大交叉角水平对撞(± 11 毫弧度)。同时采用超导高频腔、低阻抗真空盒、超导 micro- β 铁等技术手段,压缩束团长度。预期在质心系能量 3.78GeV 时,设计亮度能达到 $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,提高了 2 个数量级,是 CESRc 的 3—7 倍。

改造后同步辐射专用运行的硬 X 光强将提高一个数量级,并且仍然使用外环,光束线不变。

4.2 中微子物理实验

中微子在最微观的粒子物理世界和最宏观的宇宙起源及演化中都起着十分重大的作用。然而,由于中微子与物质的作用十分微弱,很难探测,因此对它的认识也最少。中微子的弱作用本征态不等于质量本征态,而是通过混合矩阵相互转换。自然界最基本的中微子物理参数有 6 个,目前有待测量的参数包括 $\sin^2 2\theta_{13}$ 、 δ 相因子和 Δm_{32}^2 的符号。中国在中微子物理实验研究方面具有重大发展的机遇。测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的方法是利用反应堆中微子实验,我国的大亚湾核电站具有得天独厚的条件,是世界上最佳的地点,应积极推动建立以我为主的国际合作。利用讨论中的日本 J-Parc 到北京的中微子束流进行超长基线中微子震荡实验可以测量 δ 相因子和 Δm_{32}^2 。

粒子物理学在世纪之交面临许多严峻的挑战,截至目前,它只能解释宇宙中物质的 3%—4%,因此,探索超越标准模型的新物理现象,寻找暗物质和暗能量是推动 21 世纪的粒子物理学发展的巨大动力。粒子物理学处于新的重大突破的前夜。中国粒子物理的发展战略应当利用 BEPCII,开展粲物



理精确测量前沿的研究。同时有选择地进行有特色的非加速器物理实验,如粒子天体物理实验、宇宙线观测、中微子物理实验等。我们应大力加强国际合作,重点搞好 LHC 实验,积极部署大型直线对撞机的国际合作。高能物理研究基地还应当积极为其它学科提供先进手段和大型平台,例如同步辐射装置,散裂中子源,自由电子激光等等。

主要参考文献

1 Weinberg S. Phys. Rev. Lett., 1967, 19: 1 264.

Glashow S L, Iliopoulos J, Maiani L. Phys. Rev., 1970, D2: 1 285.

2 Fukuda S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 3 999.

Ahmad Q R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 071 301.

3 Bennett C L *et al.* Astrophys. J. Supp., 2003, 148: 1

4 Hesheng Chen. Modern Physics Letters A Vol. 2003, 18(17): 1 141-1 144.

5 北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPCII 初步设计, IHEP-BEPCII-SB-03, 2003 年 11 月.

Partical Physics at the Cross of Centuries

Chen Hesheng

(Institute of High Energy Physics, CAS, 100039 Beijing)

Physics has made great progress in the 20th century as demonstrated in three important leaps regarding the understanding of microscopic structure of matter with the achievement of particle physics reaching its climax. Chinese particle physics at the cross of centuries is to face science frontiers in the world and its development strategy be carefully worked out according to the plan of the development of science and technology of our country and taking into account China's actual conditions. We shall make the best use of BEPCII for the frontier study on precision measurement of charm physics, while selecting non-accelerator physics with characteristics, such as particle astrophysics experiment, cosmic ray observation, neutrino physics experiment, etc. We should vigorously strengthen international collaboration by doing a better job of the LHC experiment and actively arranging for the international collaboration on the large linear collider. The research center for high energy physics should also provide other disciplines with advanced means and large platforms.

Keywords particle physics, BEPC, charm physics, neutrino physics, dark matter

陈和生 高能物理研究所所长,研究员。1946 年 8 月出生。1970 年毕业于北京大学技术物理系原子核物理专业。1978 年考取高能物理研究所研究生。1979—1982 年在德国汉堡德意志电子同步加速器中心 Mark-J 实验组工作。1982—1984 年在美国麻省理工学院物理系学习,获得物理学博士学位。1984 年美国麻省理工学院核科学实验室博士后。1984 年 12 月至今在高能物理研究所工作,1992 年聘为研究员,参加 L3、AMS 和 L3 宇宙线等实验。1997—1998 年任高能物理研究所副所长,1998 年起任高能物理研究所所长,主持北京正负电子对撞机重大改造工程。现任中国物理学会副理事长,中国高能物理学会理事长,International Committee for Future Accelerator (ICFA) 成员。在国内外学术刊物发表论文 300 余篇。获 2000 年度国家科技进步奖二等奖。