

欧洲粒子物理发展战略和LHC计划

马基茂 董国梁

欧洲是近代人类文明的摇篮和科学技术的发祥地。但是，二次世界大战的破坏使世界科学的中心从欧洲转移到了美国。战后，随着经济的复兴，欧洲各国都很重视对科技发展的投入，英国、法国、意大利和原联邦德国很快建成了一批规模较大的原子核和粒子物理实验基地。为了集中力量，一批富有远见的欧洲科学家要求联合起来。在联合国教科文组织的倡导下，经过几年的筹划，欧洲11个国家（比利时、丹麦、联邦德国、法国、希腊、意大利、荷兰、挪威、瑞典、瑞士和南斯拉夫）于1954年9月29日正式在瑞士日内瓦建立了欧洲核子研究中心（CERN），英国于1955年2月也加入了该组织，迈出了欧洲科学发展具有决定性意义的一步。从此，欧洲粒子物理研究取得了迅速的稳步发展，并在不长的时间内取得了重大成就。1973年，CERN的科学家们在气泡室中首先发现了弱中性流事例；1978年，质心能量为43GeV的正负电子对撞机PETRA在原西德汉堡的德国同步加速器中心（DESY）正式运行，并在强子事例的三喷注发现中取得了出色的成绩；1981年，CERN首先实现了高能质子对撞，其后又在高流强的反质子束研究中取得了突破，并于1983年由鲁比亚（Rubbia）领导的实验组在SPS高能正负质子对撞机上发现了 Z^0 和 W^\pm 中间玻色子。这些成绩确立了欧洲在这个领域中的领先地位。

二十年来，粒子物理学家一直把注意力放在以下四个尚未解决的问题：

1. 完善标准模型的精密检验并理解质量的起源。温伯格（Weinberg）和萨拉姆（Salam）分别在1967和1968年由于引入了黑格斯（Higgs）机制实现了弱电统一理论的真空自发破缺，并赋予中间玻色子以静止质量。尽管他们的理论取得了很大成功，但是这个理论要求的黑格斯粒子至今没有找到，人们会问，质量起源是不是黑格斯机制，还是别的什么？

2. 理解三代夸克和轻子。LEP实验测量了 Z^0 的一系列衰变过程的部分宽度，由此可推断中微子只有三代，即夸克和轻子也只有三代。但在这三代夸克和轻子中， t 夸克尚未找到，对 b 夸克、 τ 轻子和 ν_τ 中微子 ν_τ 知道得也甚少。此外，弱作用的不对称性，特别是CP破坏，也需要在CKM（Cabbibo-Kobayashi-Maskawa）矩阵的结构下弄清楚。CKM矩阵涉及到三个转动角度和一个复数相移。目前的实验对其中的一个角度的测量精度较好，其余的两个角度和相因子的测量精度就很差。标准模型认为某些弱作用过程中的

CP不守恒现象正是归因于这个复数相因子。

3. 发现宇宙中的暗物质。有越来越多的证据表明宇宙中存在大量的“不可见”的暗物质。最直接的证据来自对银河系中可见物质的天文观察。观察到在螺旋形银河系中的转动速度独立于它们离开银河中心的距离。如果不存在（不可见的）暗物质，这个速度应随着距离的增加而减小。中微子和超对称性（SUSY）粒子都是暗物质的强有力的候选者。无论对粒子物理还是对天体物理，暗物质的寻找与研究都是一项意义重大的工作。

4. 在高温高压核物质中寻找被量子色动力学（QCD）预言的新物质相，即夸克-胶子等离子体。由核物质到夸克-胶子等离子体的相变于1975年就由卡比玻（Cabbibo）和珀里西（Parisi）提出，此后理论物理学家做了许多工作来研究这种新相变。他们估计相变温度为200MeV左右，并得出了初步相图。李政道教授高度评价这个领域的研究，他认为利用相对论性重离子碰撞来研究夸克-胶子等离子体这种新物质形态及其有关的相变特性是未来物理学的一个新的重要方向。

根据这些物理目标，欧洲科学家在70年代获得成功的基础上于80年代初及时提出了LEP、HERA和Gran Sasso实验计划。这三大实验计划各具特点，并互相补充。其中Gran Sasso实验室主要用于中微子和暗物质方面的探测研究，而LEP和HERA则可从从事粒子物理的许多精密的最前沿领域研究。80年代末以来，这三大实验中心先后建成并投入运行，成为国际粒子物理的著名研究中心。今天，充分利用、开发这几个中心的研究潜力并继续作出世界领先的工作成为欧洲科学家90年代的战略安排。

LEP和HERA的研究潜力可以延至本世纪末。为了在本世纪末和下个世纪初把粒子物理研究提高到一个新水平，继续保持在粒子物理研究领域中的地位，欧洲科学家今天又着手制定下一代宏伟的实验计划-LHC计划。众所周知，大型的高能物理实验计划需要约10年的建造周期，从这个意义上讲，高明的物理学家必须具备战略眼光，及早做出合理安排。

一、LEP、HERA和Gran Sasso Lab-欧洲90年代的三大研究中心

80年代初以来，欧洲物理学家精心设计、建造了世界上最大的正负电子对撞机-LEP、世界上第一个高能电子-质子对撞机-HERA以及世界上最大的地下粒

子物理与宇宙线实验室-Gran Sasso Lab,把粒子物理研究推进到一个新阶段。

1. LEP(Large Electron-Positron collider):

LEP 计划于 1981 年 12 月被 CERN 当局批准。该计划分为两期,第二期(称 LEP 200)的正负电子束能将达到 100GeV,亮度为 $2.8 \times 10^{31} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。LEP 于 1983 年 9 月破土动工,经过 6 年的紧张建设,耗资 9 亿 1 千万瑞士法郎(当时约值 5 亿多美元)完成了第一期工程称 LEP 1)。LEP 1 的正负电子束能为 55GeV,亮度为 $1.1 \times 10^{31} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。LEP 在 CERN 原来的加速器系统基础上发展而成,主环穿过瑞士和法国边界,周长 27 公里。LEP 1 的主要参数列于表 1。

表 1 LEP 1 的主要参数

| | |
|--------------------------------------|----------------------|
| 开始物理实验时间 | 1989 |
| 最大束能 (GeV) | 55 |
| 亮度 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) | 1.1×10^{31} |
| 束团长度 (cm) | 1.8 |
| 束流半径 (10^{-6}m) | 水平 200; 垂直 8 |
| 对撞点数目 | 4 |
| 周长 (km) | 26.66 |

LEP 的四个对撞点上安排了 ALEPH、DELPHI、L3 和 OPAL 四个大型实验。这些实验云集了世界上约 2000 名高能物理学家以及人数相近的工程技术人员,每个实验的投资均在 1 亿美元以上。LEP 计划已在本刊 1989 年第 4 期专文介绍。

1989 年秋,LEP 物理实验工作开始。三年来,LEP 一直运行在 Z^0 区,各实验组开展了直接寻找黑格斯粒子和 t 夸克的工作。在 Z^0 区没有发现它们,但为它们设置了质量下限。LEP 的各实验组都测量了 Z^0 衰变的强子(和轻子)道的线形(line shape)、轻子耦合常数、轻子和重夸克在 Z^0 峰处的前后不对称性、 τ 轻子极化及其前后不对称性,这些测量结果把对标准模型的检验提高到一个新水平。根据这些测量结果,标准模型可以估算 t 夸克和黑格斯粒子的质量范围。此外,LEP 实验还寻找了标准模型以外的一些理论(如超对称性理论、大统一理论等)所预言的粒子,对这些粒子给出了质量下限。LEP 实验取得了很大成功,著名理论物理学家温伯格对此给以高度评价:“由于 LEP 实验的成功,弱电理论已经达到很高的精度,已经可以和量子电动力学的精度相匹敌。”

1994 年起,LEP 将运行于质心能量 200GeV 能区(LEP200),这时可以产生 W^\pm 粒子,并把对标准模型检验的精度从目前的 1% 提高到 0.1%。

2. HERA(Hadron-Electron Ring Accelerator)

HERA 建于德国 DESY 实验室,是世界上第一个高能电子-质子对撞机。与以往的各种对撞机不同,

HERA 采用了一种完全不对称的方式,以 30GeV 的电子与 820GeV 的质子对撞。主环周长 6.3 公里,设计亮度为 $1.5 \times 10^{31} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,共有 3 个对撞点。HERA 计划于 1981 年年初提出并于 1984 年得到联邦德国政府批准,估价 6.54 亿德国马克(当时约值 4 亿美元),要求经费的 15%—20% 由外国承担。许多国家的研究机构参加了这一工程,其中意大利的贡献最大,提供了 208 块质子环超导二极管磁铁(总共为 416 块)。HERA 对撞机已于 92 年 5 月 31 日晚实现了 e-p 的首次对撞。表 2 列出了 HERA 的主要参数。

表 2 HERA 的主要参数

| 对撞的粒子种类 | e p | |
|--------------------------------------|----------------------|------------------|
| | 最大束流能量 (GeV) | e 30 |
| 对撞质心能量 (GeV) | 314 | |
| 亮度 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) | 1.5×10^{31} | |
| 束团长度(cm) | e 0.85 | p 8.5 |
| 束流半径 (10^{-6}m) | e 280(水平);37(垂直) | p 265(水平);84(垂直) |
| 周长 (km) | 6.336 | |
| 对撞点数目 | 3 | |

HERA 提供了研究轻子对核子深度非弹性散射的最前沿基地,而这类研究是揭示强子的夸克和胶子结构的主要手段。动量转移越大,由散射轻子探测的距离尺度就越小。在一个特定的高能实验中,可达到的动量转移洛仑茨不变量的运动学上限即为轻子和核子的质心能量。由 HERA 的 314GeV 质心能量可以获得 10 倍于先前的轻子-强子散射的动量转移,从而可以探测 10^{-12}cm 的核子结构。在这样的尺度下,甚至可能发现夸克本身。

在传统的质心能量为 20—30GeV 的电子和质子的深度非弹性散射实验中,人们往往忽略末态中强子态的详情。每个散射事例用两个变量来表征,其一是 q^2 ,轻子的洛仑茨不变性四动量转移的平方;其二是 ν ,在实验室系统中轻子的能量损失。如果深度非弹性电子散射确实是对准自由夸克的弹性散射,那么测出的结构函数只依赖于无量纲的标度无关变量 $x = q^2/2M\nu$ (M 为质子质量),而不独立地依赖于其中的每一个变量。这个所谓的标度无关性是比约肯(Bjorken)于 1967 年提出的。在夸克图象中,一个具体的散射事例的 x 也正好就是被击夸克所携带的质子动量中的份额。结构函数简单地描述了一个高能质子的动量在其夸克之间的分布。HERA 不仅能使深度非弹性散射的 q^2 测量比原先高两个数量级,而且能将 x 测量值降低两个数量级,达到 10^{-4} 。这种接近于 $x = 0$ 的新的测量既有

实际重要性,又有理论重要性。那些正为下一代质子-质子对撞机(LHC和SSC)设计探测器和实验方案的科学家需要估计各种反应截面,但只有当测出这些低 x 范围内的质子结构函数时,才能进行这些截面的计算。更为重要的是,质子中的夸克密度随 x 的减小而增长。在 x 为 10^{-4} 时,夸克密度非常大,人们期望会有有趣的非微扰,但仍可计算的效应。在极低的 x 情况下测量结构函数并发现这些结构函数如何背离比约肯标度无关性也将会改善我们对胶子动量分布的了解。

HERA 可以用作一个“粲工厂”。HERA 的电子-质子对撞将在每年内产生 1 亿个粲(D)介子。这些 D 介子在对撞点的毫米距离内衰变。HERA 探测器将使各种稀有 D 衰变模式的分支比改善至少一个数量级。这些稀有 D 衰变模式对标准弱电理论的任何细微变化都极其灵敏。稀有 D 衰变的测量也可用来更精确地确定 CKM 矩阵元。研究 HERA 产生的 D 和其它重夸克介子的最主要作用是告诉我们质子内部的胶子分布,这是因为在电子-质子对撞中胶子对重介子产生的影响要比在强子-强子对撞中的影响大得多。

HERA 也可用来寻找轻夸克(leptogluark)。轻夸克是那些将 QCD 和弱电理论成为统一结构的理论所预言的。如果轻夸克的质量和耦合作用合适,在 HERA 的实验上将会清晰地显现出来。与美国 1TeV 束能的 P-P 对撞机 Tevatron 上的实验不同,HERA 不必使轻夸克成对产生,它产生于一个电子和一个夸克的直接聚变。这样,HERA 上的实验可以把轻夸克质量的寻找范围一直推到 300GeV。

HERA 的不对称特点决定了探测器的不对称性。HERA 对撞产生的终态粒子显著地倾向于质子的方向,探测器必须适应这一特点。HERA 有三个对撞点。Zeus 实验安排在南厅,这是一个以美国、意大利为主的多国合作组。H1 实验安排在北厅,参加者来自 11 个国家;德国人居多。在 HERA 的能区,交换 W^{\pm} 的带电流反应可能会使终态中出现由夸克引起的强子喷注。因此,对强子喷注的探测十分重要。Zeus 的量能器采用了铀补偿技术,由铀板和闪烁材料夹层组成,总重 500 吨。为改进电子识别,量能器单元中包括了硅探测器,使用了总面积 50m² 的大约 50000 块硅片。H1 使用了传统的液氩量能器,由吸收体板和液氩夹层组成。其中,电磁量能器部分的吸收体为铅,强子量能器部分为不锈钢。两个探测器都使用超导磁体产生很强的磁场(分别为 1.7 和 1.2 Tesla)在径迹区偏转带电粒子的轨道以测量它们的动量。

HERA 的第三个对撞点(东厅)将建造第三台探测器 HERMES,它用于测量质子夸克结构的自旋依赖性。这项工作要求对电子和质子进行纵向极化。采用专门设计的磁铁系统,可以使电子的横向极化在对撞区变为纵向极化。但人们无法使 HERA 的质子束极

化,因此 HERMES 的设计中含有一个极化氢(或氘)气体靶。用了这种固定靶,质子能量就只有 8GeV 了。

在 1992 年 8 月的达拉斯国际高能物理会议上,HERA 的两个实验组 Zeus 和 H1 发表了首次物理报告。两台探测器都得到了非常干净电子-质子对撞数据,并且探测了以前未探测过的一些动量区域,特别是已经能够探索光生率在新能区的行为。这些报告得到与会者的广泛兴趣。人们预期,在下一国际高能会议上,HERA 的物理工作将成为主要话题。

3. Gran Sasso Lab

Gran Sasso 实验室位于意大利首都罗马东北约 130 公里的亚平宁山脉中段 Gran Sasso 地区,属意大利国家核物理研究所(INFN)。它是世界上最大的地下物理实验室,进行粒子物理、天体物理等方面的研究。目前,该实验室的首批探测器已投入运行或部分运行。

建造 Gran Sasso 实验室的计划由意大利物理学家齐基吉(Zichichi)于 1981 年提出,1982 年被批准。从 1984 年起,共用了约 4 年时间,耗资近 1000 亿里拉(当时约值 1 亿美元)完成了实验室的建造。实验室分为地面和地下两部分。作为主体部分的地下实验室是在高速公路上一条长 10.4 公里的穿山隧道中点处向旁边开挖的,因此大型设备进出十分方便。它由 A、B、C 三个实验大厅(每个约长 100 m、宽 18 m、高 20 m)、服务区及一系列进出、安全隧道组成,总挖掘土方量达 18 万 m³。地下实验室上面岩层的厚度约 1400 m,非常有效地屏蔽了除中微子以外的宇宙线,减弱系数达 10^{-6} ,同时保留了感兴趣的大于 1TeV 宇宙线 μ 子的研究机会。该地区的地质构成为水成岩,具有极低含量的天然放射性元素,例如铀和钍。中子本底很小,热中子通量为 $10^{-4}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,比同类地下实验室约小 1 个数量级,比地面的低本底实验室小 3—4 数量级。Gran Sasso 实验室以其独有的特点成为世界上著名的地下物理实验中心,特别适于做高灵敏度、低本底、有时是大规模的稀有作用和稀有衰变的实验研究,例如各类空间中微子的探测,中微子振荡研究,磁单极子、暗物质的探测,质子衰变、双 β 衰变研究等。

A 厅分为两半,一半放置由一个欧-美合作组研制的 Gallex 探测器,利用放射化学方法研究太阳中微子。该探测器使用了以氯化物形式存在的 30 吨镓,通过由太阳中微子引起镓原子到锗原子的反应测量太阳中微子通量。预期的中微子作用率极低,约为 1 原子/天,这意味着每次 15 天左右照射后,在 30 吨镓中寻找 15 个左右发生过作用的原子。先是用复杂的化学处理过程把极少量的锗原子分离出来,浓聚以后在仔细屏蔽的低本底正比计数管中测量这些锗原子的放射性衰变计数。为保证测量的可靠性,上述每一步骤都必须小心准确,特别是避免各种可能的放射性污染。同

如何学习高中物理中 现代物理知识

张恒州



20世纪,物理学自身、物理学与其他学科的交叉及其在技术上的应用,都达到了空前的发展速度。今天,人们无论读报刊、看电视还是听广播,都会遇到与现代物理有关的知识。如核电站的建设,航天飞机的升空,人造卫星、各种空间探测器的发射及其在太空的运行,各种加速器的建成,超导研究的新进展,海湾战争中新式武器的使用等等。因此,作为一名合格的高中生,必须具备一定的现代物理知识。

中学物理教材中,现代物理知识比较少,除了“光的本性”、“原子和原子核”两章以外,尚有一些阅读材料,比较通俗地、定性地介绍了现代物理学中的一些重大发现、基本观点和主要结论。虽没有多少定量计算,但理论思维要求较高。

学习现代物理知识,首先要掌握基本观点。比如,电子和天然放射现象的发现,说明原子核有复杂的内部结构,基本粒子并不基本,从而树立物质无限可分的观点;通过光的粒子性和玻尔原子模型建立起量子的观点;由质能关系认识质量和能量、质量守恒和能量守恒间的联系;从光的波粒二象性和物质波,认识到微观世界具有不同于宏观世界的特殊规律。

现代物理学研究的对象都通常超出了人们自身直

时,实验的时间必须很长,以保证足够的统计性。

A厅的另一半放置一个大体积探测器 LVD,该实验由意大利、原苏联以及中国、美国等国物理学家合作进行。LVD探测器的设计与阿尔卑斯山勃朗峰地下的探测器 LSD相似,但体积大了20倍。它最终使用1800吨液体闪烁体和流光管夹层研究中微子天体物理,特别是观测超新星爆发时的中微子爆。

B厅内的探测器叫 Marco,意为磁单极子、天体物理和宇宙线物理观测站。实验由意大利和美国合作进行。这个“多功能”的探测器由交替地放置的闪烁体、流光管和吸收体组成,整个探测器分成6节。6节都装好时,长72m的探测器差不多将填满整个大厅。

C厅计划放置 Icarus(宇宙线及稀有地下信号成像探测器),由现任 CERN 总主任鲁比亚领导。探测器最终计划为15000吨液氩 TPC 型漂移室,将以前所未有的精度测量各种稀有作用和衰变。现在,一个3吨模型已经在 CERN 研制成功。在实验室外部的山上,建立了 EAS-TOP 实验站进行广延大气簇射观测。这使人们可以将地下观测和地上观测联系起来。

一些小型实验也充分利用了 Gran Sasso 的“安静”环境,这些实验包括暗物质探测,两个寻找双β衰

变感觉的范围,物理学家在研究过程中,充分施展了他们的聪明才智,巧妙地设计出许多精湛的实验,我们在学习时要努力让这些实验中闪现出的智慧之光去启迪自己的心灵,如卢瑟福的α粒子散射实验和α粒子轰击氮核的实验,体现了高超的科学思维能力。他运用的这种黑箱思维方法现已成为研究原子、原子核和基本粒子等结构的重要方法。如用电子与质子的弹性散射来探测质子内的夸克结构;用中性粒子散射探测核子内的质量分布……,同时,运用高速粒子做“炮弹”的实验方法,直接促使了加速器的诞生。还有各种探测射线的方法,无一不展现出设计者卓越的实验才华。托马斯·扬的双缝干涉实验,把一个光源复制成两个完全相同的光源,满足了相干条件,这是何等的巧妙。迈克尔逊旋转棱镜法测光速、劳伦斯发明回旋加速器的思路和技巧,都堪称人类智慧之结晶。我们同时还要从物理学家分析物理现象的思维过程中吸取营养,提高自己的形象思维和抽象思维能力。如想像卢瑟福怎样从α粒子的大角散射现象提出原子核式结构模型等。

通过对光的本性、原子的结构等的认识过程,了解研究问题的基本方法:实验(事实)——理论假设——实验(提供新事实)——修正理论(或建立新假设);通过人类认识自然的艰难曲折历程,树立不怕挫折、勇于探索、忠于事实的求知精神和献身精神,并吸取科学先辈成败之经验和教训。这也是在学习中值得注意的问题。

变的实验以及寻找引力波实验等。

去年6月,Gran Sasso 实验室的 Gallex 组在西班牙格林那达的92年中微子会议上宣布了一年来太阳中微子测量的新结果,引起了巨大轰动。Gallex得到的太阳中微子流强为 $(83 \pm 19 \pm 8)$ SNU*,式中后两项分别代表统计误差和系统误差。这是第一次包括了太阳中质子-质子聚变中微子的测量结果,它是太阳中微子的主要部分,位于能谱的低能区(反应阈值0.24 MeV,最大能量~0.42 MeV)。这一结果虽仍低于标准太阳模型预期值两个标准偏差,但高于美国戴维斯(Davis)进行多年的氯探测器实验和日本水契仑柯夫探测器 Kamioka 实验结果,它们主要测量太阳中微子能谱中¹⁰B产生的高能部分(阈值分别为0.81 MeV和9.1 MeV)。特别是,同位于俄国高加索山区由俄-美合作建造的同类镓探测器 SAGE 结果相比,1991年给出 $(20^{+15}_{-20} \pm 32)$ SNU 和1992年8月又给出58 SNU, Gallex 的结果要大得多。人们正在期待着有关实验、特别是 Gallex 高统计的新结果。(待续)

* SNU: 太阳中微子单位,指每个靶原子每秒俘获 10^{-26} 个太阳中微子。