

高能加速器近期的几个大工程

何 景 棠

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

量子论和相对论的发现和确立是 20 世纪基础科学的最伟大的事件, 它们是现代科学技术的基础, 改变了整个人类的生活方式。例如, 人们制造了原子弹、氢弹, 建造了核电站; 随着集成电路的迅速发展, 计算机已经普及到家庭, 人们坐在家里就可通过网络了解全世界发生的事。20 世纪后期, 在总结新的实验事实的基础上, 理论上创立了粒子物理的标准模型, 所有核物理和粒子物理的实验结果都和标准模型的预言相一致。在人们为标准模型而欢呼的时候, 实验上测量到存在中微子振荡现象, 说明中微子有质量, 这就超出了标准模型, 说明标准模型需要完善和发展。此外, 宇宙学多年的实验研究, 说明宇宙的质量中, 暗物质占了 90% 以上。

超对称理论是标准模型最自然的发展, 它可以解释标准模型不能解释的问题及宇宙学的问题。超对称模型是指费米子(电子, μ 子, τ 子, 夸克等) 都有相应的玻色子伙伴粒子 (Selectron, Smuon, Squark 等), 而传递相互作用的玻色子(光子, 中间玻色子, 引力子) 都有相应的费米子伙伴粒子 (photino, zino, wino, gravitino)。简单地说, 超对称模型就是费米子和玻色子的对称。这样, 粒子的总数目翻了一番。但是, 目前实验上还没有找到任何一个超对称理论预言的新粒子。原因可能是它们的质量太大, 目前的加速器的能量太低, 不足以产生它们。

理论家和实验家都相信超对称理论的正确性。人们认为超对称理论在 21 世纪所起的作用可能与量子论和相对论在 20 世纪所起的作用相比美。

为了检验新理论, 开辟新领域, 获得新发现, 人们越来越迫切需要能量越来越高的加速器, 此外, 天体物理与粒子物理的结合, 也需要能量更高的加速器。

一、正在建造的高能加速器大工程

1. 在日内瓦欧洲核子研究中心 CERN 正在建

造的大型强子对撞机 LHC (Large Hadron Collider), 它是一个高能质子-质子对撞机, 将安装在 CERN 原有的大型电子正电子对撞机 LEP 的周长为 27 千米的坑道内, 对撞束质子的能量为 $7\text{TeV} \times 7\text{TeV}$ 。它的目标是两个: 首先是寻找目前仍未发现的 Higgs 粒子, 其次是寻找超对称粒子。LHC 对撞机的造价估计约为 20 亿美元。

在 LHC 上工作的将有 4 套探测装置: ATLAS, CMS, LHCb 和 ALICE。ATLAS 和 CMS 的造价估计约为 4 亿美元, LHCb 和 ALICE 尚处于设计阶段, 虽然未有确切的价格估计, 但估计造价也要以数亿美元计。LHC 将于 2006 年建成并投入运行。

2. 美国费米实验室正在改进的千京电子伏加速器 Tevatron。它是质子-反质子对撞机, 对撞能量为 $1\text{TeV} \times 1\text{TeV}$ 。它的目标也是寻找 Higgs 粒子和超对称粒子。原有的探测装置 D0 和 CDF 也同时经过改进, 以便与改进后的 Tevatron 相匹配。新的 Tevatron 将于 2002 年投入运行。

3. 日本已批准建造的日本强子设备 JHF (Japan Hadron Facility), 它由日本原子能研究所 (Japanese Atomic Energy Research Institute, JAERI) 和日本高能物理研究所 (KEK) 共同建造, 它的能量为 50GeV , 能量虽然不是世界最高, 但它的流强是目前世界上最高的。它是一个多用途的复合体, 包含了核物理, 中子物理, 介子物理, 高能粒子和中微子振荡实验等。加速器第一期工程的投资约为 12 亿美元, 包括第二期工程的整个加速器投资约为 16 亿美元。计划于 2005 年建成。

二、正在讨论将要兴建的高能加速器大工程

1. 电子-正电子直线对撞机

全世界有 4 个地方正在讨论建造高能电子-正电子直线对撞机。由于电子质量较小, 如果采用圆形轨道的加速器, 电子拐弯时要放出同步辐射 X

光,从而损失能量,因而不能用圆形轨道的加速器把电子或正电子加速到高能。要把电子或正电子加速到高能,只能采用直线加速器。

德国正在讨论以德国为主加上国际合作来建造一台名为 TESLA 的束流能量为 500—800GeV 的电子-正电子超导直线对撞机;日本和美国也分别讨论建造束流能量为 0.5—1TeV 的电子-正电子直线对撞机,而欧洲核子研究中心正在讨论建造能量更高的名为 CLIC 的 Multi-TeV 的电子-正电子直线对撞机。

2. $\mu^+ \mu^-$ 对撞机和中微子工厂

由于 μ 子的质量约为电子质量的 200 倍,因此 μ 子在圆形轨道加速拐弯时的同步辐射损失要比电子少,所以仍可以采用圆形加速器把 μ 子加速到高能。如果把加速器作特殊的安排,让它的某些直线段很长,则 μ 子在这些直线段内会衰变而放出中微子,产生流强很大的中微子束,人们把它叫做中微子工厂。人们可以利用流强很大的中微子束进行长基线中微子振荡实验,以便研究中微子的各种性质。所以, μ 子贮存环在同时加速 μ^+ 和 μ^- 时,就是 $\mu^+ \mu^-$ 对撞机,如果只加速 μ^+ 或 μ^- 就成为中微子工厂。

目前,美国和欧洲核子研究中心正在讨论建造 $\mu^+ \mu^-$ 对撞机和中微子工厂的各种方案。

3. 非常大的强子对撞机 VLHC (Very Large Hadron Collider)。目前,欧洲核子研究中心正在建造的 LHC 是世界上能量最高的质子-质子对撞机。在美国正在讨论建造比 LHC 更大的能量更高的名为 VLHC 的强子对撞机,以便研究 LHC 未能包括的超高能物理。

三、竞争与合作

高能物理从第二次世界大战以后开始创立时起,全世界就开始了激烈的竞争。50 年代初,西欧 12 个国家联合建造欧洲核子研究中心,当时以苏联为首的 12 个社会主义国家就联合起来在莫斯科郊区的杜布纳(Dubna)建立了联合核子研究所,并在世界上首先建成了当时世界上能量最高的能量为 10GeV 的质子加速器。王淦昌先生领导的小组就是利用这台加速器在世界上首先发现了反 Σ^- 超子。后来 CERN 的能量为 28GeV 的 PS 和美国的能量为 30GeV 的 AGS 质子加速器先后建成,杜布纳就落后了。

1974 年, J/ψ 粒子发现之后,为了深入研究 J/ψ

粒子和粲介子的性质,在美国的 SLAC 建造了最大束流能量为 4.2GeV $\times$ 4.2GeV 的 SPEAR 电子-正电子对撞机和新一代的探测装置 Mark III 而法国于 1976 年建成了能量为 1.85GeV $\times$ 1.85GeV 的电子-正电子对撞机 DCI 和探测装置 DM₂。在 Υ 粒子发现之后,为了研究 Υ 家族的性质,德国在汉堡的 DESY 建成了对撞能量为 5.1GeV $\times$ 5.1GeV 的电子-正电子对撞机 DORIS,而美国在康奈尔建成了最大对撞能量为 6GeV $\times$ 6GeV 的 CESR 电子-正电子对撞机。为了首先发现顶夸克,德国建成了对撞能量为 19GeV $\times$ 19GeV 的电子-正电子对撞机 PETRA,而美国在 SLAC 建成了对撞能量为 18GeV $\times$ 18GeV 的电子-正电子对撞机 PEP。在 PEP 和 PETRA 没有探测到顶夸克的情况下,日本建造了对撞能量为 30GeV $\times$ 30GeV 电子-正电子对撞机 TRISTAN,而美国则在 SLAC 建造了对撞能量为 50GeV $\times$ 50GeV 的电子-正电子直线对撞机 SLC, CERN 则建造了对撞能量为 50GeV $\times$ 50GeV 的大型电子-正电子对撞机 LEP。LEP 的最大贡献是在测量中间玻色子 Z^0 的衰变宽度中,定出只存在 3 代中微子。

为了寻找中间玻色子, CERN 建造了对撞能量为 270GeV $\times$ 270GeV 的质子-反质子对撞机 $\overline{\text{Sp}}\text{pS}$,当时美国计划建造对撞能量为 400GeV $\times$ 400GeV 的质子-质子对撞机 ISABELL,后因用于加速器的超导磁铁质量不过关,眼看要落后于 CERN 的 $\overline{\text{Sp}}\text{pS}$,美国的 ISABELL 于 1981 年下马了。鲁比亚领导的小组于 1983 年利用 $\overline{\text{Sp}}\text{pS}$ 找到了中间玻色子 w^+ , w^- 和 z^0 。

为了重新赶上欧洲的 CERN,美国在费米实验室建造了对撞能量为 1TeV $\times$ 1TeV 的质子-反质子对撞机 Tevatron,果然工作在 Tevatron 上的两台探测装置 D0 和 CDF 于 1997 年都分别探测到顶夸克存在的实验证据。

为了仔细研究中性 K 介子系统中的各种 CP 破坏现象,意大利建造了质心能量为 1020MeV (ϕ 介子质量)的正负电子对撞机 DA Φ NE,此对撞机也常常被称为 ϕ 介子工厂。

为了研究 B 介子衰变时的 CP 不守恒现象,美国建造了能量为 9GeV $\times$ 3.1GeV 的不对称的电子-正电子对撞机 PEP II 和探测装置 BaBar,而日本建造了能量为 8GeV $\times$ 3.5GeV 的不对称的电子-正电子对撞机 KEKB 和探测装置 Belle。

广义相对论的实验验证

孙 光 东

(华北航天工业学院 廊坊 065000)

自 1687 年《自然哲学的数学原理》问世以来,牛顿力学取得了很大的成功与发展。很少有理论能和万有引力定律的预言的准确性相比拟。但即使如此,牛顿的理论也不是十分完善的。一个例子是水星的近日点的进动。水星轨道长轴的方向在空间不是固定的,在一世纪内会转动 5601 秒弧度。用牛顿理论计算出所有行星对它的影响后,还差 43 秒弧度与观测不符,另外,牛顿引力理论有一个很严重的缺陷,就是它认为引力的传播不需要时间。例如,如果太阳表面某处突然爆发日珥(喷出明亮的气团),按牛顿理论,其引力变化在地球上即时即可发现,这一点直接违反了狭义相对论,因为这一理论指出任何信号的传播速度是不能大于光速的。

爱因斯坦建立狭义相对论后,就开始研究关于引力的新理论,并且在 1915 年创立了广义相对论。狭义相对论告诉我们,空间和时间不是绝对的,它们和参照系的运动有关。广义相对论则告诉我们,在引力物体的近旁,空间和时间要被扭曲。行星的轨道运动并不是由于什么引力的作用,而是由于这种时空的扭曲。引力就是弯曲时空的表现。爱因斯坦

为了寻找 Higgs 粒子和超对称粒子,需要建造能量更高的质子对撞机。80 年代末,当 CERN 计划建造对撞能量为 $7\text{TeV} \times 7\text{TeV}$ 的大型强子对撞机 LHC 时,当时 CERN 的所长朔佩尔曾向美国科学家建议共同建造,共同使用。因为 LHC 的建造费用约 20 亿美元,欧洲和美国各负担 10 亿美元,但美国科学家牛气十足,要自己建造对撞能量比 LHC 更大的超级超导对撞机 SSC,造价估计约 30 亿美元,1993 年时,虽然周长为 40 千米的准备安装 SSC 的坑道已经挖好,但后来估计实际造价可能要增加许多,美国国会便通过决议,令 SSC 下马。美国科学家只好到日内瓦参加 LHC 合作研究了。

目前,各国科学家已经认识到,上述的高能电子-正电子直线对撞机, $\mu^+ \mu^-$ 对撞机和中微子工厂,

将引力、空间与时间三者联系起来,是人类认识自然界历史上的一次大飞跃。

狭义相对论发表之后,遇到两个严重困难。第一,作为狭义相对论基础的惯性系,无法严格定义,通常把不受外力的物体保持静止或匀速直线运动状态的参考系(也即牛顿第一定律在其中成立的参考系),定义为惯性系。然而,什么叫“不受外力”呢?人们又定义在惯性系中保持静止或匀速直线运动状态的物体为“不受外力”的物体。我们看到,定义惯性系,要用不受外力的物体,而又不受外力又要用到惯性系,形成逻辑循环。第二,万有引力定律不能写成四维张量的形式。这就是说,万有引力定律不是洛伦兹协变的,不满足狭义相对论。为了克服第一个困难,爱因斯坦主张去掉惯性系在理论中的特殊地位,把相对性原理从“一切惯性系平权”推广到“一切参考系(包括惯性系和非惯性系)平权”。他抓住了“引力质量与惯性质量相等”这一显而易见但又被大家忽略的事实,提出等效原理的思想,从而把上述两个困难结合起来加以克服。

利用万有引力效应来定义的质量称为引力质

VLHC 等,由于造价昂贵,超出任何一个国家的经济实力,可能世界上只能各建造一台,可能采用的模式是:一国为主,国际合作。现在,德、日、美和 CERN 都争相开展设计和预先研究,都想以自己为主,让别人参加合作。

在世界经济合作与发展组织(OECD)的倡议下,于 2000 年 4 月 13—15 日在英国伦敦召开了一个全球科学论坛(Global Science Forum, GSF)会议,由世界各主要高能物理活跃的国家代表参加会议,讨论上述问题。伦敦会议决定 2002 年中再开一次 GSF 会议,讨论 21 世纪初的 20—30 年中,加速器和非加速器粒子物理实验,理论粒子物理和粒子天文物理以及必须建造的大型设施。