

在 LEP 上的精确实验

张家铨

(中国科学院高能物理研究所 100049)

引言

在大型正负电子对撞机 (Large electron-positron collider, LEP) 上的一些实验以空前的精确度确立了粒子物理学的标准模型 (SM), 包括所有的辐射修正。这些精确的实验结果引导物理学家能够预言顶夸克和希格斯玻色子的质量, 后来这些预言都被证实了。一些具有标志性的实验结果是规范耦合常数的精确测量, 这些测量结果排除了在标准模型里相互作用力的统一, 但是在标准模型的超对称性扩展理论里允许相互作用力统一。这进一步激发了研究人员在超对称性理论 (SUSY) 和大统一理论 (GUT) 方面的兴趣, 特别是在标准模型无法解释难以捉摸的暗物质的时候, 超对称性理论则为暗物质的存在提供了很好的解释。此外, 超对称性理论消除了标准模型的二次发散和预言了源自辐射电弱对称性破缺的希格斯机制, 预言了类标准模型希格斯玻色子的质量小于 130 GeV, 与大型强子对撞机 (LHC) 上发现的希格斯玻色子的结果一致。

1. 粒子物理标准模型理论

现在夸克和轻子被认为是基本粒子, 粒子物理标准模型是描述夸克和轻子的强和电弱相互作用的相对论量子场论。相对论量子场论的第一个成功例子是量子电动力学, 它描述了电磁相互作用是通过交换无质量的光子进行的。W 和 Z 玻色子传递弱相互作用, 弱相互作用的短程特性意味着 W 和 Z 是有质量的规范玻色子。

基于局域规范对称性的相对论量子场论有两

个基本问题: (i) 在标准模型中不允许规范玻色子具有质量, 因为他们破坏了对称性; (ii) 高能行为导致截面、质量和耦合常数为无穷大。1964 年, 希格斯 (P. Higgs) 等人解决了第一个问题, 他们建议规范玻色子的质量是通过在真空中无所不在的标量 (希格斯) 场的相互作用产生的, 所以在产生质量的动力学拉格朗日函数里不需要明确的质量项。2012 年在大型强子对撞机上发现了希格斯场量子——希格斯玻色子。因此发现, 恩格勒 (F. Englert) 和希格斯被授予 2013 年度的诺贝尔物理学奖。通过“重整化”发散的质量和耦合常数为可观测量解决了第二个问题。重整化的电弱理论很成功, 计算和观测的辐射修正相互符合。在正负电子对撞机上做的一些电弱作用精确实验正确预言了顶夸克和希格斯玻色子的质量。特霍夫特 (G. 't Hooft) 和韦尔特曼 (M. Veltman) 在解决第二个问题做的计算在正负电子对撞机上得到验证之后, 他们被授予了 1999 年度的诺贝尔物理学奖。

下面首先讨论在正负电子对撞机上做的几个电弱精确实验, 这些实验非常详细地测量了标准模型的量子结构。然后讨论标准模型以外的物理。标准模型是基于 $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ 对称性群的乘积, 所以自然而然的问题是: 为什么有三个群? 为什么我们不能将这些群统一成一个更大的群 $SU(5)$, 将几个标准的群作为它的子群? 结果是戏剧性的: 因为每个 $SU(n)$ 群预言有 n^2-1 个规范玻色子, 这就导致规范玻色子的数目加倍 (标准模型有 12 个规范玻色子; 在 $SU(5)$ 里有 24 个规范玻色子)。在 $SU(5)$ 里 $SU(2)$ 的轻子和 $SU(3)$ 的夸克包含在相同的多重

态里,自动地导致轻子和夸克之间新的轻子数和重子数破坏的相互作用。这就不可避免地导致质子通过新规范玻色子的相互作用衰变成轻子和夸克。在标准的SU(5)里质子寿命估计为 10^{31} 年。实验的极限值比这个预言值大两个数量级以上,这样就排除了标准模型的大统一,但却不能排除标准模型的超对称性延伸扩展所导致的大统一,后者预言质子有更长的寿命。

为了解释在大统一理论里质子有更长的寿命,新规范玻色子必须是重的。多重呢?假定通过SU(5)对称性破缺为SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)对称性,这些规范玻色子获得了质量,就像W和Z玻色子通过SU(2) \otimes U(1)对称性破缺为U(1)对称性获得质量一样。在SU(5)破缺能标之上我们得到了有一个规范耦合常数的大统一理论。在正负电子对撞机上精确测量的规范耦合常数扩展延伸到更高能量表明,在标准模型里大统一被排除在外,但在标准模型超对称性延伸扩展里允许规范耦合统一,而且有趣的是能标与质子长寿命一致。通过大统一理论估计的能标和由拟合规范耦合的统一得到的超对称性能标获得相同的结果,这个结果很快地受到广泛的重视。

超对称性理论是在20世纪70年代早期作为一个独特的旋转和平移庞加莱(Poincaré法国数学家)群的对称性的扩展而得到的,庞加莱群基于内部量子数,即自旋的对称性。超对称性理论需要同等数量的玻色子和费米子,这只有在特定条件下才能实现,即标准模型的每个费米子(玻色子)都有其超对称性玻色子(费米子)伙伴。这导致粒子谱加倍,但是到目前为止没有观测到超对称性伙伴,如果它们存在,它们必须比标准模型粒子更重。超对称理论受欢迎不仅仅是因为规范耦合统一,它还克服了标准模型的几个缺点。特别是它提供了具有正确的宇宙大爆炸遗留物密度的暗物质候选者。另一方面,超对称理论的主要问题是预言的标准模型粒子的超对称伙伴没有被观测到,可能是因为大型强子对撞机的亮度或者能量不够高。

2. 正负电子对撞机

精确实验需要正负电子(e^+e^-)对撞的干净本底环境。欧洲核子研究中心(CERN)主任,亚当斯(J. Adams),于1976年成立了一个研究小组来调研产生和研究W和Z玻色子的大型正负电子对撞机,当时预言W和Z玻色子的质量约为65和80 GeV。皮埃尔(Pierre Darriulat)领导的小组在一年半以后提交了一个著名的黄皮报告。这个报告里面提到了物理学方面的很多预想。正负电子对撞机最终于1982年获得批准,随即开始建造,于1989年建造完成并开始运行和获取实验数据。实现这样一个大型项目的困难,肖伯尔(H. Schopper),在正负电子对撞机建设期间他是欧洲核子研究中心总所长,做了明白地表述。他论述了技术、科学、管理和政治方面的问题,还论述了参与正负电子对撞机上的大型国际合作实验建设的社会企业,每个国际合作实验约有500位物理学家,还提到了互联网(World-Wide-Web),这是在正负电子对撞机运行期间由欧洲核子研究中心IT部的伯纳斯-李(T. Berners-Lee)和卡约(R. Cailliau)发明的,目的是改善大型国际合作的通信和数据处理。

在同一期间,斯坦福直线加速器中心(SLAC)着手建造一台直线对撞机,它是用阻尼环和末端弯曲改造现存的直线加速器,有序地使加速的电子和正电子束进行对撞。

正负电子对撞机的45 kHz束团交叉率与斯坦福直线加速器中心的120 Hz的重复率相对比,前者的数据样本快速地增长,很快地超过了后者的数据样本,因为正负电子对撞机的峰值亮度为 10^{32} cm⁻²s⁻¹,每个实验收集数据的速度为大约1000个Z玻色子/小时。通过自旋退极化技术精确地测定束流能量,可以确定束流能量的精确度达到0.2 MeV或者相对精度为 5×10^{-6} 。另外,还有许多意外惊喜的事件,像由于月球和地球之间的引力相互作用发生潮汐或者日内瓦湖里的水量与束流能量的相关性。正负电子对撞机轨道长度变化几毫米对应于束流能量

变化几兆电子伏,这些效应是由地球地壳的弹性引起的。日内瓦和巴黎之间的高速火车TGV也引起短期内的束流能量波动,在法国铁路罢工期间这些波动没有了,终于明白引起这些波动的原因后,开始调整正负电子对撞机磁铁的电流回路减小它们带来的影响。Z玻色子质量的最终不确定度大约为2 MeV,大多来源于束流能量的涨落,主要是因为偶极磁体磁场随时间变化引起的。正负电子对撞机的27千米长的隧道的示意图及其实验人员如图1所示,1989年7月正负电子对撞机开始运行,实验者的快乐笑脸展示了他们获得成功的喜悦。

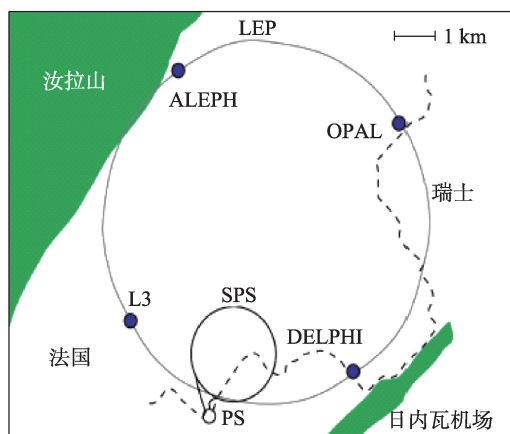
1995年,正负电子对撞机能量升级到WW和ZZ对产生阈值,后来提升到208 GeV,寻找希格斯粒子。可以设置一个置信水平(C.L.)95%的希格斯粒子质量下限114.4 GeV,只比在2012年大型强子对撞机上发现的希格斯粒子质量低11 GeV。如果用超导腔填满正负电子对撞机所有可用空间,正负电子对撞机可以达到更高能量,在这种情况下,高到超对称性理论预言的希格斯粒子质量130 GeV是可能达到的。来自大型强子对撞机和美国的Tevatron升级竞争所带来的时间和财务压力导致了2000年决定停止正负电子对撞机运行。回想起来,希格斯玻色子可能应该早在10年前在正负电子对

撞的清洁环境下被发现和研究。

3. 在正负电子对撞机上的四个探测器

在正负电子对撞机上总共有四个探测器:ALEPH (Apparatus for LEP physics), DELPHI (Detector with Lepton and Hadron Identification), L3 (Letter of Intent 3), OPAL (Omnipurpose Apparatus for LEP)。这四个探测器都是大 4π 探测器,尺寸通常在每个方向上大约10米,重量超千吨的装置。他们是为了研究Z玻色子衰变末态中的强子、电磁和轻子组分而设计的,但他们使用了不同的实验技术,如磁谱仪的分辨率,电磁和强子量能器,以及粒子识别范围。此外,所有探测器在束流管外都安装了升级的硅顶点探测器,能够定位原初碰撞顶点的精确度通常为几微米。

大型探测器运转所需的资源需要大规模的人员合作来支撑,在正负电子对撞机开始设计和建造时每个实验通常有250位物理学家同时进行探测器的设计和研制,在末期增加到500位物理学家,参与的科研机构大约20至50个。他们中的大多数来自欧洲成员国,也有来自中国、日本、以色列、俄罗斯和美国的物理学家。



(a)



(b)

图1 (a) 正负电子对撞机储存环和4个实验装置以及前节加速器(PS和SPS);(b) 1989年7月正负电子对撞机开始运行和人们幸福的笑脸

一个正负电子对撞机为什么需要多达4个实验装置。两个不就足够了吗？四个探测器不仅有些多余，而且有不同系统的不确定性。实验结果证明多一些实验装置对研究和减小涨落是极其重要的。例如，在四喷注事例中有许多标准偏差过大和质量约115 GeV的类希格斯粒子的信号，如果主要基于三个ALEPH的类希格斯粒子信号事例，标准偏差大，加上所有其他实验数据，标准偏差会减小到小于 2σ ，其意义是很大的。从观测的希格斯粒子的质量，我们现在知道，它确实是一个统计涨落。由四个实验数据相结合得到的结论是，四喷注超额是一个涨落。

尽管每个实验的数据样本都很大，但在有关轻子衰变模式的比率方面，统计误差仍占主要地位，结合四个实验的数据获得的结果误差减小了两倍。四个实验结合也有助于控制常见的系统理论错误的风险。

四个实验联合组成几个专题合作工作组将所有实验数据结合进行分析以得到问题的最准确的答案。这样的大型合作，甚至是由不同的国际合作组做数据结合是高能物理历史上的一个转折点，不仅对正负电子对撞机是重要的，而且对于大型强子对撞机也是一个很好的借鉴。

4. 精确实验的一些重要结果

正负电子对撞机的峰值亮度为 $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，每

个实验收集数据的速度为大约1000个Z玻色子/小时，在正负电子对撞机运行期间，物理学家获取的巨大数据样本（17百万个事例）为精准地检验粒子物理标准模型理论奠定了坚实的基础。下面简要地分析一些重要的验证结果。

4.1 W和Z玻色子质量的量子修正

弱相互作用是由有质量的W和Z玻色子进行传递的。在实验上精确地测量W和Z玻色子的质量对于检验粒子物理标准模型理论的正确性具有十分重要的意义。在理论上，给出了包含了辐射修正的W和Z玻色子质量预言值。

通过标准模型重整化方案，韦尔特曼计算了从希格斯玻色子和费米子环到弱规范玻色子的辐射修正，如图2(a)所描绘，并且令人惊讶地发现辐射修正依赖于顶夸克质量的平方。对于希格斯粒子质量，二次项恰好具有零振幅，所以只留下了对数依赖关系。通过希格斯机制破坏电弱对称性后，质量本征态成为初始(对称的)拉格朗日函数 ($W^i, i=1, 2, 3$ 对于SU(2)群, B 对于U(1)群) 的规范玻色子的线性组合： $W^\pm = (W^1 \mp W^2)/\sqrt{2}$, $Z = -B \cos \theta_w + W^3 \sin \theta_w$, $\gamma = B \sin \theta_w + W^3 \cos \theta_w$ ，这里电弱混合角 θ_w 是U(1)和SU(2)群的耦合常数之比： $\tan \theta_w = g'/g$ 及其与电荷的关系如图2(b)中所示，意味着 $e = g \sin \theta_w$ 。

因为希格斯机制预言规范玻色子的质量正比

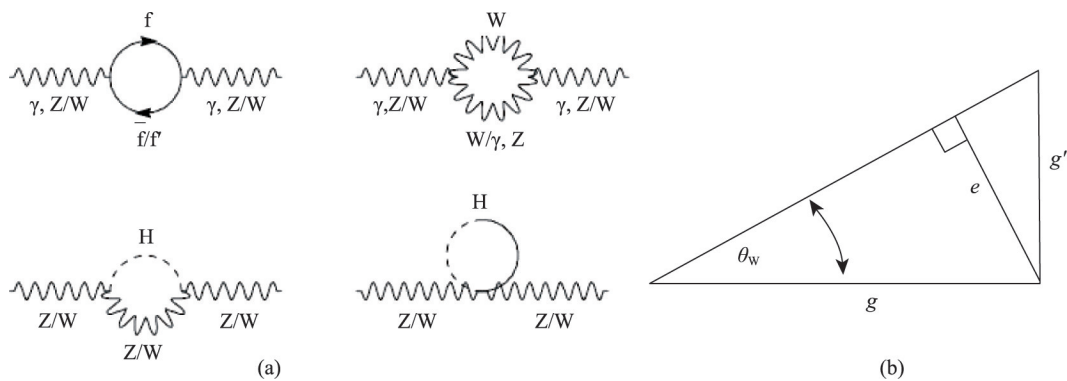


图2 (a) 标准模型的圈修正；(b) 规范耦合之间的关系

于规范耦合,人们发现:

$$\cos \theta_w = \frac{g}{\sqrt{g'^2 + g^2}} = \frac{M_W}{M_Z} \text{ 或者 } \rho_0 = \frac{M_W^2}{M_Z^2 \cos^2 \theta_w}$$

在标准模型中 $\rho_0=1$,但是对于更复杂的希格斯结构它可以偏离1。 μ 通过交换W进行衰变,所以W的质量与 μ 子衰变常数有关: $G_F=\pi\alpha/(\sqrt{2}\sin^2\theta_w M_W^2)$,这导致 $M_W^2=A^2/\sin^2\theta_w$, $M_Z^2=A^2/(\sin^2\theta_w \cos^2\theta_w)$,其中 $A=\sqrt{\pi\alpha/\sqrt{2}G_F}=37.2805$ GeV。由A值得到 $\sin^2\theta_w=0.2314$, $M_Z=88$ GeV。然而,这些关系只有在树图水平下才成立,并且通过圈修正进行调整(见图2(a)):

$$\sin^2\theta_w = \left(1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2}\right) = \frac{A^2}{1 - \Delta r}$$

这里 Δr 是辐射修正因子,它与顶夸克质量有平方依赖关系,与希格斯质量有对数依赖关系。这些定义在所谓的在壳重整化方案中是有效的,在这种情况下,电弱混合角由规范玻色子的在壳质量定义: $\sin^2\theta_w \equiv 1 - M_W^2/M_Z^2$ 。

物理学家们用在壳重整化方案分析正负电子对撞机上的电弱精确测量数据,取得了与理论预言值符合得非常好的结果。

4.2 标准模型截面、不对称性和分支比

正电子和电子(e^+e^-)湮灭到费米子对的微分截面可以写为:

$$\frac{2s}{\pi} \frac{1}{N_c^f} \frac{d\sigma_{\text{ew}}}{d\cos\theta}(e^+e^- \rightarrow f\bar{f}) = \alpha^2(s) [F_1(1 + \cos^2\theta) + 2F_2 \cos\theta] + B。$$

这里,

$$\begin{aligned} F_1 &= Q_c^2 Q_f^2 \chi Q_c Q_f g_V^e g_V^f \cos\delta_R + \chi^2 (g_V^e{}^2 + g_A^e{}^2)(g_V^f{}^2 + g_A^f{}^2), \\ F_2 &= -2\chi Q_c Q_f g_A^e g_A^f \cos\delta_R + 4\chi^2 g_V^e g_A^e g_V^f g_A^f, \\ \tan\delta_R &= M_Z \Gamma_Z / (M_Z^2 - s), \\ \chi(s) &= (G_F s M_Z^2) / \left(2\sqrt{2}\pi\alpha(s) \left[(s - M_Z^2)^2 + \Gamma_Z^2 M_Z^2 \right]^{1/2}\right), \end{aligned}$$

$\alpha(s)$ 是依赖能量的电磁耦合常数, θ 是出射费米子相对于电子束方向的散射角。颜色因子 N_c^f 等于1(对于轻子)或3(对于夸克), $\chi(s)$ 是传播子项; B 代表源自电弱项图的微小贡献。在峰值周围横截面是不对称的,如图3(a)中所示。

因为在镜像里轴矢量改变符号,在上述公式中轴矢量耦合对应于余弦项,这导致了截面角依赖的不对称性或在极化束流情况下的极化不对称性。对于费米子f不对称因子定义为:

$$A_f = \frac{2g_V^f g_A^f}{g_V^f{}^2 + g_A^f{}^2} = \frac{2g_A^f/g_V^f}{1 + (g_A^f/g_V^f)^2}$$

截面和不对称性因子的测量结果和计算值展示在图3和表1中。人们从前半球的积分截面(σ_F)和后半球的积分截面(σ_B)发现了截面的前-后不对称性(A_{FB}), $A_{FB}=(\sigma_F - \sigma_B)/(\sigma_F + \sigma_B)=3A_e/4A_f$,对于左手和右手极化电子,截面 σ_{LR} 的左-右不对称性,

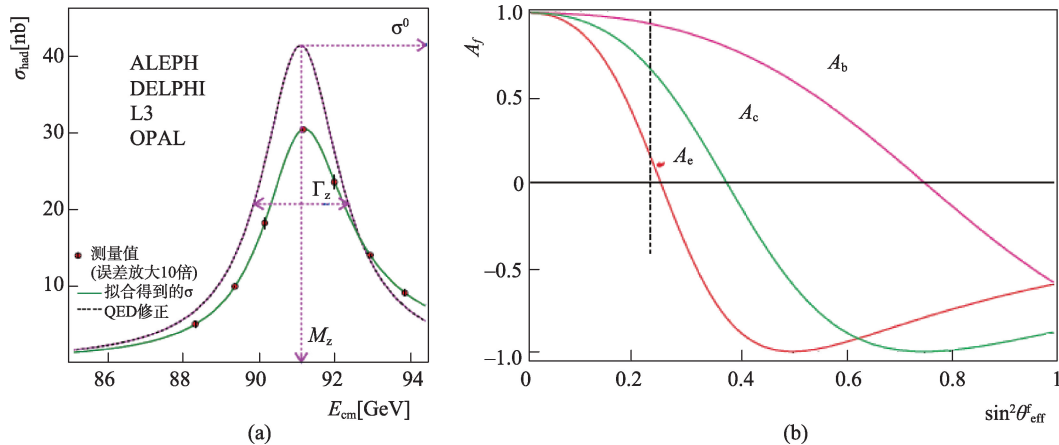


图3 (a) 有辐射和无辐射强子截面; (b) 对于各种费米子末态非对称性对 $\sin^2\theta_w$ 的灵敏度

表1 对于 $x = \sin^2\theta_w = 0.2315$, Z玻色子的分支比

粒子符号	耦合常数(方程(4))			分支比	
	gV	gA	$\sum(g_V^2 + g_A^2)$	计算值	观察值
ν_e, ν_μ, ν_τ	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$3\left(\frac{1}{2}\right)^2 + 3\left(\frac{1}{2}\right)^2$	20.5 %	20.00±0.06 %
e, μ, τ	$-\frac{1}{2} + 2x$	$-\frac{1}{2}$	$3\left(-\frac{1}{2} + 2x\right)^2 + 3\left(\frac{1}{2}\right)^2$	10.3 %	10.097±0.0069 %
u, c	$\frac{1}{2} - \frac{4}{3}x$	$\frac{1}{2}$	$6\left(\frac{1}{2} - \frac{4}{3}x\right)^2 + 6\left(\frac{1}{2}\right)^2$	23.6 %	23.2±1.2 %
d, s	$-\frac{1}{2} + \frac{2}{3}x$	$-\frac{1}{2}$	$6\left(-\frac{1}{2} + \frac{2}{3}x\right)^2 + 6\left(\frac{1}{2}\right)^2$	30.3 %	31.68±0.8 %
b	$-\frac{1}{2} + \frac{4}{3}x$	$-\frac{1}{2}$	$3\left(-\frac{1}{2} + \frac{4}{3}x\right)^2 + 3\left(\frac{1}{2}\right)^2$	15.3 %	15.12±0.05 %

$A_{LR} = (\sigma_L - \sigma_R) / (\sigma_L + \sigma_R) = A_e$, 它们全都由比值 g_A/g_V 决定。

弱混合角完全决定分支比 $\sum(g_V^2 + g_A^2) / \sum_{tot}$, 这里分子是对被考虑的费米子求和, 总合计是对所有可能的费米子求和。对于 $x = \sin^2\theta_w = 0.2315$, 计算的分支比与观测值很好地相符合, 如表1所示。

4.3 正负电子对撞机-I的电弱结果

2006年在《物理学报告》(Physics Reports)上发表了正负电子对撞机-I产生Z的实验数据在标准模型的框架内进行描述和解释的论文, 2013年又发表了正负电子对撞机-II产生W对的实验数据在标准模型的框架内进行描述和解释的论文。该对撞机的4个实验, 1990年至1995年共收集了1700万个Z事例, 分布在7倍的质心能量范围, 大部分数据是在峰值亮度下获取的。总截面由 $\sigma_{tot} = (N_{sel} - N_{bg}) / (\epsilon_{sel} \mathcal{L})$ 给出, 其中 N_{sel} 是在末态中选择的事例数, N_{bg} 是本底事例数, ϵ_{sel} 是包括接收度在内的选择效率, \mathcal{L} 是积分亮度。

亮度由小角度的巴巴散射确定, 使用BHLUMI程序计算接收度和截面, 巴巴散射截面的高阶的不确定性约为0.061%。利用高角分辨率硅探测器的量能器, 实验获得的亮度误差大约为0.1%, 这导致总截面的实验误差可以与经过高阶修正的理论的不确定性相比较。

接收度主要受探测器的几何接收度限制。电磁量能器的几何接收度通常是 $|\cos\theta| \leq 0.7$, μ 子径迹室通常是 $|\cos\theta| \leq 0.9$ 。在接收度内触发效率高, 因

为事例可以通过多种信号触发, 例如, 径迹跟踪器触发、量能器触发和组合触发。电子和 μ 子对的选择效率在95%以上, 对于 τ 子对末态选择效率为70%至90%。对称的Breit-Wigner函数可以用质量、截面分布宽度和峰高描述。轻子的截面可以用强子和轻子宽度的比率参数化: $R_l^0 = \Gamma_{qq} / \Gamma_{ll}$ 由各个实验得到的这些参数的拟合值和它们的组合显示在图4中。

4.4 标准模型约束

如果知道3个规范耦合、规范玻色子的质量和顶夸克的质量以及希格斯玻色子, 上述截面和不对称性在标准模型中都可以预言。因为电磁和弱耦合通过规范玻色子质量相关联, 只需要2个耦合常数: $\alpha(M_Z)$ 和 $\alpha_s(M_Z)$ 。此外, M_W 可以和 G_F 交换, 从最近的测量得到 μ 子寿命精确度到0.5 ppm, G_F 测量值为: $G_F = 1.1663787(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ 。这个值足够精确, 在拟合中可以认为是一个常数。轻费米子的质量对截面只有很小的影响, 并且可以足够精确地计算其影响。原则上从低能量运行测量的值知道 $\alpha(M_Z)$, 但是包括夸克的圈修正有大的不确定性。因此, 5夸克强子态对于 $\Delta\alpha_{had}^{(5)}(M_Z^2)$ 的贡献在拟合中作为一个参数(而不是 $\alpha(M_Z)$), 并且 $\Delta\alpha_{had}^{(5)}(M_Z^2)$ 在实验上满足标准模型约束。那么, 可测量拟合的标准模型参数是: $M_Z, M_t, M_H, \alpha_s, \Delta\alpha_{had}^{(5)}(M_Z^2)$ 。给定这些参数可以用程序TOPAZ0, ZFITTER或GAPP计算出所有可观测量。

顶夸克质量估计值后来通过直接测量被证实, 如在图5(a)中的Tevatron实验的数据点所示, 这又

进一步与大型强子对撞机上的测量值相符合,如图 5(b)所示。

对于 M_t 和 M_W , 由拟合 Z-极数据和初步的数据, 这些参数为: $M_Z = 91.1874 \pm 0.0021$, $M_t = 178.5 \pm$

3.9 GeV , $M_H = 129_{-49}^{+74} \text{ GeV}$, $\alpha_s = 0.1188 \pm 0.0027$ 和 $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2) = 0.02767 \pm 0.00034$ 。可观测量值的计算值和测量值之间的差别,如图 6 所示。希格斯粒子的质量和 $\sin^2\theta_w$ 之间的关系如图 7(a)所示, 对角线

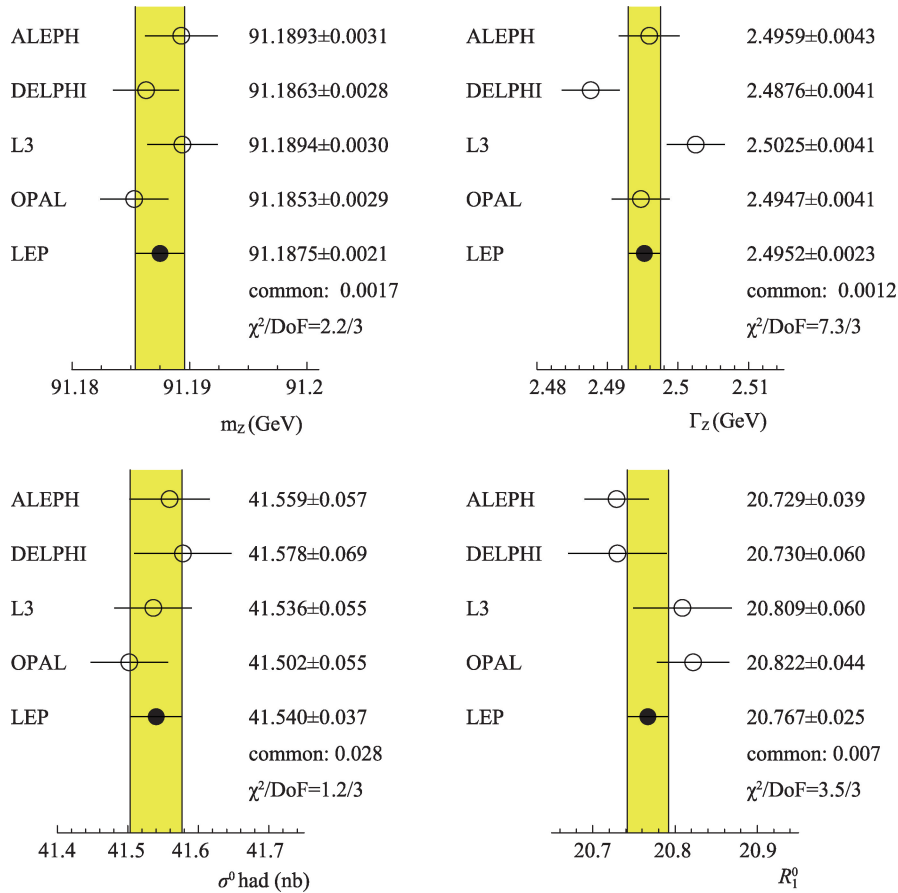


图4 Z玻色子的质量,宽度(上图),峰位截面和强子与轻子宽度(下图)之比的拟合值

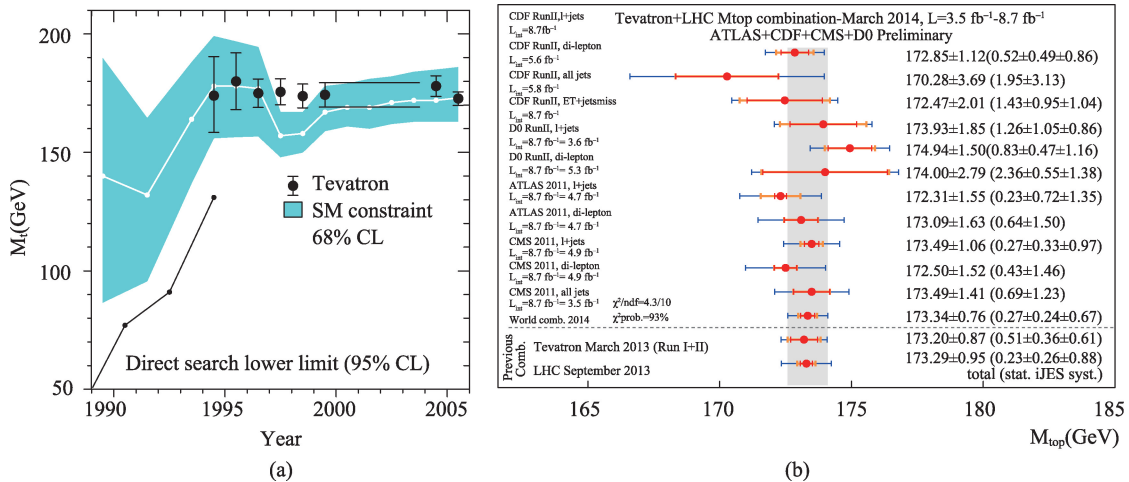


图5 (a) 测量的顶夸克质量对时间。正负电子对撞机数据的电弱拟合(阴影), Tevatron实验测量(数据点)(b) 各个实验测量的顶夸克质量汇总

显示了标准模型的预言。两个水平带显示由 A_{LR} 和 $A_{FB}^{0,b}$ 得到的 $\sin^2\theta_w$ 值,这导致完全不同的希格斯粒子质量。垂直(黄色)带显示在标准模型的超对称性扩展中预期的希格斯粒子质量。在大型强子对撞机上观测到的希格斯玻色子的质量落在这个

带里,标准模型的预言在 $\sin^2\theta_w$ 处的交叉值接近从平均不对称性获得的值。在图 7 (b) 中展示了在希格斯玻色子发现之前由正负电子对撞机-I和斯坦福直线加速器中心的数据对希格斯粒子质量所作的推测。

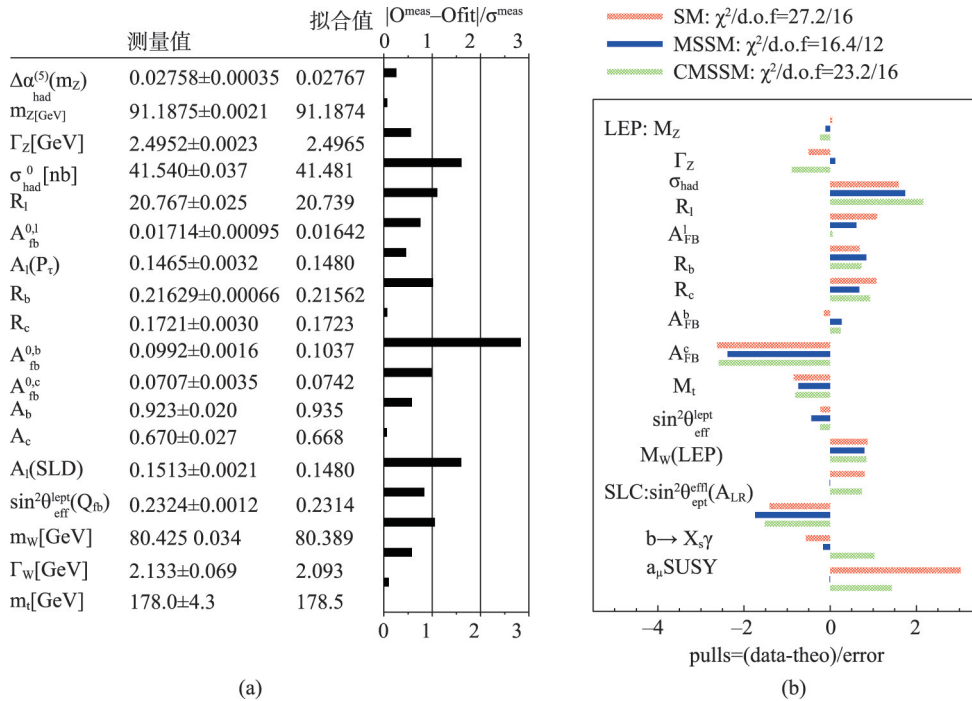


图 6 (a) 对于精确的电弱可观测量,测量值和计算值的比较;用标准误差表示的差别(“线长度”)之图示。 $\chi^2/\text{d.o.f}$ 拟合值为 18.3/13, 对应于 15% 的概率; (b) 对于标准模型,最小超对称性标准模型(MSSM)和约束的最小超对称性标准模型(CMSSM),标准误差(线长度)的比较

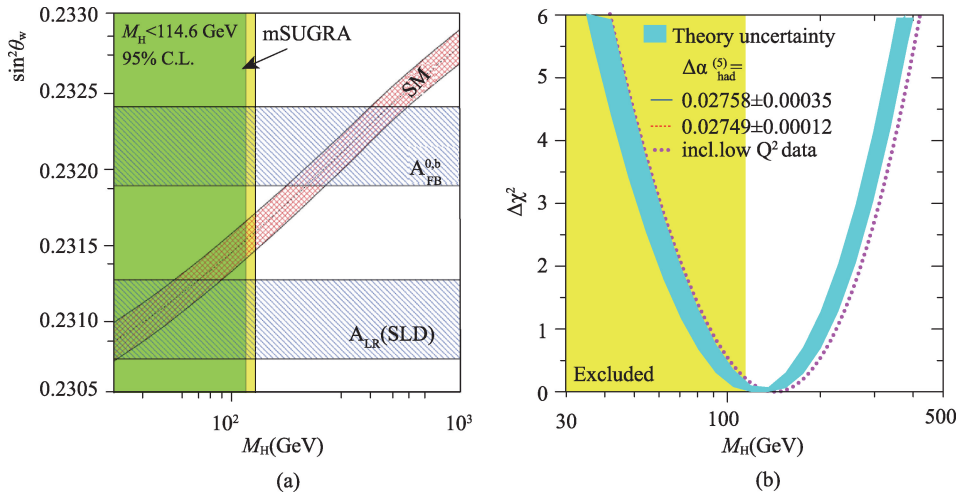


图 7 (a) $\sin^2\theta_w$ 的值随希格斯粒子的质量变化关系图。两个水平带对应于源自 A_{LR} 和 $A_{FB}^{0,b}$ 的 $\sin^2\theta_w$ 的值。对角线带对应于从总体拟合得到的标准模型预言参量值。由正负电子对撞机数据, $M_H < 114.3$ GeV 的阴影(绿色)区域被排除在外; (b) 在希格斯玻色子发现之前由正负电子对撞机-I和斯坦福直线加速器中心的数据得到 $\Delta\chi^2$ 分布作为希格斯粒子质量的函数,而且包括了源自 M_W 和 M_t 的约束。最低值对应于 $M_H = 129 \pm {}^{74}_{49}$ GeV

4.5 正负电子对撞机-II 的电弱结果

我们可以用正负电子对撞机-II 的 W 对产生数据研究规范玻色子的自耦合。W 对在 e^+e^- 湮灭中通过 t 通道中微子交换和 s 通道光子、Z 和希格斯粒子交换产生。为了补偿规范玻色子的纵向成分的差异需要希格斯粒子交换。人们通过计算验证, 在高能量下振幅抵消, 即 $A_\nu + A_\gamma + A_Z = -A_H$ 。然而, 希格斯粒子交换正比于 $m_e \sqrt{s} / M_W^2$, 所以对于 $\sqrt{s} \approx M_W^2 / m_e \approx 10^7 \text{ GeV}$ 这一项是重要的。在正负电子对撞机-II 能量下, 纵向截面可以被忽视, 只有 A_γ 、 A_ν 和 A_Z 是重要的。它们中的每一项随能量的平方增加, 但 A_Z 与其他的振幅有负的干涉。 A_ν 、 $A_\nu + A_\gamma$ 和总截面的能量依赖关系显示在图 8 (a) 中。

人们观测到标准模型的预言和数据之间良好的相符性。图 8(a) 截面的形状对 M_W 是敏感的。这个形状与 W 末态的不变质量分布结合可以得到: $M_W = 80.376 \pm 0.033 \text{ GeV}$ 和 $\Gamma_W = 2.195 \pm 0.083 \text{ GeV}$, 这与在 Tevatron 上测量的质量符合, 如图 8 (b) 所示。直接测量的 W 质量的世界平均值 ($M_W = 80.385 \pm 0.015 \text{ GeV}$) 略高于间接测量的 W 质量, 后者源自总的电弱拟合 ($M_W = 80.363 \pm 0.006 \text{ GeV}$)。

4.6 量子色动力学 (QCD) 结果

正负电子对撞机-I 数据是研究量子色动力学的

一个理想之地。高 Z 玻色子产生截面和强子的大分支比 ($\approx 70\%$, 见表 1), 具有下列里程碑式的重要意义: (i) 胶子的自相互作用的直接展示, 因此在实验上确认了渐近自由的基础; (ii) 强耦合常数的精确实验测量; (iii) 对底夸克质量的跑动和强耦合常数的跑动做比较。

截面的精确测量使得人们在 Z 标度下可以确定强耦合常数。不同的归一化给出不同的强耦合常数: $\alpha_s = 0.1154 \pm 0.0040$ 和 $\alpha_s = 0.1225 \pm 0.0037$ 。相对于亮度归一化, 截面的低值与中微子代数的低值相关联, 确定 $N_\nu = 2.982 (8)$, 误差是 2.3σ 。

总结

正负电子对撞机和斯坦福直线加速器中心的电弱精确数据为标准模型的量子结构提供了引人注目的验证。不仅顶夸克和希格斯玻色子的质量可以从量子修正推导出来, 而且也可以从规范耦合运行数据中得出结论, 标准模型是大统一理论的一部分, 在这种情况下标准模型的对称性由另一种对称性, 即超对称性扩展了。超对称性理论解决了标准模型的几个问题: (i) 电弱对称性破缺 (EWSB) 不需要特别引入, 而是通过辐射修正引入的; (ii) 电弱对称性破缺预言类标准模型 (SM-like) 的希格斯玻色子的质量低于 130 GeV ; (iii) 因为希格斯质量

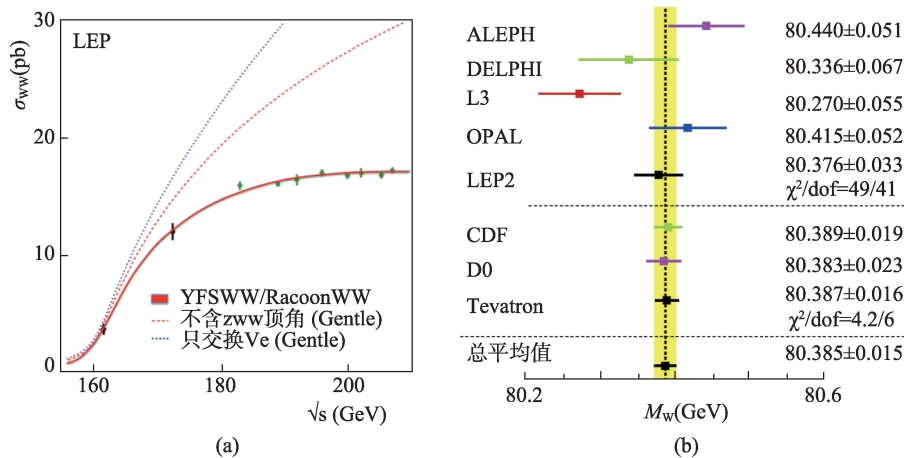


图 8 (a) 在正负电子对撞机-II 能量下 W 对产生截面与质心能量的关系。作为能量的函数, 无 ZWW 顶点的截面会偏离, 如图中点线所示, 对于这种情况只呈现 t 通道中微子交换或者中微子和光子交换 (“无 ZWW”); (b) 直接测量的 W 玻色子质量的比较

项从正到负的缓慢跑动,电弱对称性破缺解释了大统一理论和电弱标度之间的巨大区别;(iv) 对于这些希格斯粒子的质量项的正确跑动,电弱对称性破缺要求顶夸克的质量是在 140 至 190 GeV 之间;(v) 标准模型圈修正的二次发散在超对称理论中消失了,因为圈里同等数量的费米子和玻色子之间相互抵消了;(vi) 如果人们假定在大统一理论标度下汤川耦合统一,超对称理论预言了底夸克与 τ 轻子的质量之比;(vii) 最轻的超对称粒子是完美的动力学模型的候选者,因为它的自湮灭截面在数量级上提供了正确的大爆炸遗留物的密度。

麻烦问题是:预言的超对称粒子在哪里?大型强子对撞机排除超对称夸克(squarks)和超对称胶子(gluinos)低于 TeV 标度。然而,对于超对称粒子质量高达几 TeV,规范统一是完全可能的。而且对于更重的超对称粒子二次发散抵消的讨论,仅仅是定性的。不管怎样,人们期待超对称夸克和超

对称胶子是最重的粒子,因为它们周围是胶子云,所以超规范子(gauginos)和希格斯粒子可能是相当轻的。在大型强子对撞机上这些粒子只有弱产生截面,没有足够的探测灵敏度。例如,对于 $3\text{-}\tau$ 轻子通道相关的 WZ 产生,在 8 TeV 目前亮度大约为 20/fb 的情况下大型强子对撞机通常产生 2500 事件/每个实验。假设超对称伙伴更重,截面减少因子大约为 $1/M^4$,或者超过两个数量级,则把它们带到了发现的边缘。即使在大型强子对撞机的全能量和积分亮度为 3000/fb 的情况下,至 2030 年左右达到这个积分亮度,也可能什么都没有发现,原因或者是因为超对称粒子仍较重,或者自然可能存在不同于超对称的方法从而绕过标准模型的缺点。

本文摘自 60 Years of CERN Experiments and Discoveries 中 W. de Boer 所著的 Precision Experiments at LEP。希望了解更多细节的读者也可参考《CERN60 年的实验与发现》中译本(将于近期由科学出版社出版)的相应章节。



科苑快讯

折纸算法助你成为折纸大师

如果你曾试图折一只纸蝴蝶,却无助地发现折出的东西竟然像七扭八歪的翼手龙,一定就会明白折纸也需要技巧,新的算法将有助于解决这个问题。一旦你在计算机上生成一个多面体设计方案,比如说小兔子,Origamizer(一个生成折纸方法的软件)就会把一系列三角形映射到一张纸上,然后告诉你怎样折叠多余的纸,用正确的方法聚拢在一起。Origamizer 的一位研究者设计了以前的算法,但是需要将纸剪裁或折叠成一长条,最后的成品会有很多接缝。

新方法则有能力叠成“滴水不漏”的形状:纸的边缘就是 3D 形状的边缘,比如碗的边缘,再也不会

有接缝。研究者计划在 2017 年 7 月举行的第 33 届国际计算几何研讨会上,介绍他们的研究工作。图中的小兔是在 2011 年参考 Origamizer 的早期版本,用钢片折成的。



(高凌云编译自 2017 年 6 月 27 日《欧洲核子中心快报》)