

# LEP 轻中微子种类数目的测量

童国梁 摘译

(中国科学院高能物理研究所 100049)

在 LEP (Large Electron-Positron Collider, 大型正负电子对撞机) 加速器数据采集的最初几周内, ALEPH, DELPHI, L3 和 OPAL 四个实验组就已经确认了存在三种中微子。而这个结论是依据标准模型 Z 玻色子的“不可见”宽度与 Z 玻色子的产生及随后发生的强子衰变截面之间的关系得出的。

此轮实验在 Z 玻色子共振及其附近采集的全部数据精确测得的轻中微子的种类数目 (Species) 为  $2.9840 \pm 0.0082$ 。测量结果的不确定性主要源自对用作确定实验亮度的小角巴巴 (Bhabha) 散射过程的了解。

通过  $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  过程简洁的直接观察, 独立确认了该实验结果, 在该实验中, 仅仅探测一个初态辐射光子, 而探测器的其余部分都没有留下探测信息。

本结果确认了存在三种带电轻子的预期, 这是对天体物理学和宇宙学的贡献。与 LEP 其他的成就一起, 这个结果的精确性也是对 CERN 自成立以来第四个 10 年全球合作的一个见证。

## 1 引言

LEP 建造了当时最大的科学装置, 设计来推动知识前沿研究和加深对电弱相互作用标准模型的理解, 高精度测量当时被发现不久的 Z 和 W 玻色子的性质。

在 LEP 上每产生的 5 个 Z 玻色子就有一个衰变为一个质量小于 Z 玻色子一半的“轻中微子”。该种衰变宽度和 Z 玻色子产生继而发生强子衰变的截面之间的标准模型关系可以推断出轻中微子种类数目,  $N_\nu$ 。

LEP 加速器束流于 1989 年 7 月 14 日实现第一次循环。第一次数据采集的能量设定在 90GeV 附近, 这与 UA1 和 UA2 测量的 Z 玻色子的质量是一致的。约于 1989 年 10 月, 四个 LEP 实验, 即 ALEPH,

DELPHI, L3 和 OPAL 各自都发表了描述 Z 玻色子性质的第一篇论文。这些早期观察已把  $N_\nu$  约束到 3 左右。

## 2 理论原理

LEP 物理项目的基础是研究 Z 玻色子的谱线形状 (lineshape)。这包括电弱相互作用标准模型的参数测量, 通过描述 Z 玻色子产生和衰变的物理可观察量的研究来证明它的内部一致性。在这些可观察量中, Z 玻色子的“不可见”宽度是与它衰变到中微子相关的, 并可得到  $N_\nu$ 。这一节面向指导  $N_\nu$  测量的可观察量以及一些关键的理论假设。

### 2.1 Z 玻色子的宽度

Z 玻色子的宽度定义为

$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{\text{had}} + N_\nu \Gamma_{\nu\nu} \quad (1)$$

式中前三项分别为 Z 玻色子衰变到电子、 $\mu$  子和  $\tau$  子的衰变宽度,  $\Gamma_{\text{had}}$  是其衰变到 u, d, s, c 和 b 夸克的宽度, 而  $\Gamma_{\nu\nu}$  是其衰变到中微子的宽度。同时测量和  $\Gamma_Z$  与 Z 玻色子的强子和轻子宽度有关的可观察量就能使我们确定  $N_\nu$ 。Z 玻色子衰变到每一种费米子对的分支比与 Z 玻色子的耦合强度以及与标准模型的参数有如下的关系:

$$\Gamma_{ff}^f = N_c^f \frac{G_F m_Z^3}{6\sqrt{2}\pi} (|G_{Af}|^2 R_{Af} + |G_{Vf}|^2 R_{Vf}) + \Delta_{\text{ew/QCD}} \quad (2)$$

式中  $N_c^f$  为强色数 (夸克为 3, 轻子为 1),  $G_F$  为费米常数, 可由  $\mu$  子衰变确定,  $R_{Af}$  和  $R_{Vf}$  分别为因子化的末态 QED 和 QCD 修正, 这些修正分别来自非零费米子质量对轴矢量和矢量项的贡献,  $\Delta_{\text{ew/QCD}}$  代表不可因子化的电弱和 QCD 修正, 而  $G_{Af}$  和  $G_{Vf}$  分别为 Z 玻色子对费米子对的轴矢量和矢量的有效耦合, 它们可以表达为

$$G_{Af} = \sqrt{R_f} T_3^f, \quad (3)$$

$$G_{Vf} = \sqrt{R_f} (T_3^f - 2Q_f K_f \sin \theta_w) \quad (4)$$

形状因子  $R_f$  和  $K_f$  把耦合和“在壳”(on-shell)修正全部吸收于电弱混合角  $\theta_w$ ,  $Q_f$  和  $N_3^f$  分别为费米子的电荷和弱同位旋的第 3 分量。

## 2.2 实验可观察量

四个实验可观察量描述了 Z 玻色子共振附近的强子和轻子截面, 并把  $N_\nu$  与 Z 玻色子的谱线形状联系起来:

- (1) Z 玻色子的质量,  $m_Z$ ;
- (2) Z 玻色子的宽度,  $\Gamma_Z$ ;
- (3) 强子顶点截面

$$\sigma_{\text{had}}^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{\text{had}}}{\Gamma_Z^2} \quad (5)$$

(4) Z 玻色子衰变到强子与衰变到无质量轻子分支宽度  $\Gamma_{ll}$  之比, 如假设轻子具有普适性, 即为

$$R_l^0 = \frac{\Gamma_{\text{had}}}{\Gamma_{ll}} \quad (6)$$

由于  $\tau$  轻子质量不可忽略的, 需引入修正  $\Gamma_{ll} = \delta_\tau \Gamma_{\pi\pi}$ , 这里  $\delta_\tau = -0.23\%$ 。第 5 个实验可观察量为轻子前后不对称性, 此观察量对决定  $N_\nu$  不太重要, 仍在假定轻子普适性的条件下:

- (5)  $A_{\text{FB}}^0$

定义为向前出射的(也就是带负电轻子“继续”沿着入射电子的方向)末态轻子在 Z 玻色子截面顶点的不对称性, 或向后方向, 写成通式  $A_{\text{FB}} = (\sigma_F - \sigma_B) / (\sigma_F + \sigma_B)$ 。

## 2.3 对 $N_\nu$ 的灵敏性

与  $N_\nu$  直接有关的关键实验观察量是

$$R_{\text{inv}}^0 = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_{ll}} = N_\nu \left( \frac{\Gamma_{\nu\nu}}{\Gamma_{ll}} \right) \quad (7)$$

$R_{\text{inv}}^0$  的可贵之处在于实验和理论的不确定性被有效控制于 Z 玻色子宽度的数值中。

结合公式 (2) 和 (5),  $R_{\text{inv}}^0$  可以写成

$$R_{\text{inv}}^0 = \left( \frac{12\pi R_l^0}{\sigma_{\text{had}}^0 m_Z^2} \right)^{\frac{1}{2}} - R_l^0 - (3 + \delta_\tau), \quad (8)$$

又结合式 (7), 此式就表示了  $N_\nu$  和强子顶点截面之间

的关系。此依赖关系主导了  $N_\nu$  的确定, 图 1 给出了当预言轻中微子种类数目为 2, 3 和 4 时可能测得的 Z 玻色子共振附近强子产生截面的比较。图 1 的曲线展示了 LEP 数据对  $N_\nu$  的巨大的统计灵敏度。

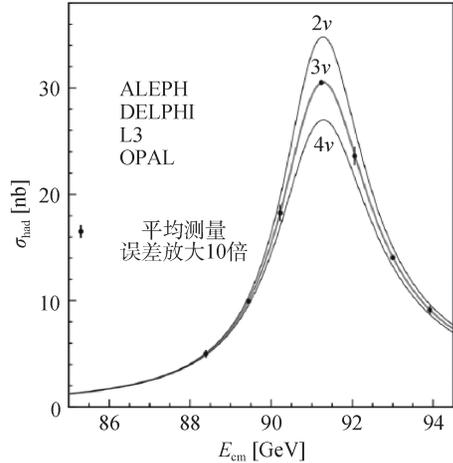


图 1 LEP 质心能量置于 Z 玻色子共振附近强子截面的测量。图组合了 LEP 四个实验的结果。曲线分别展示了预言中微子种类数目分别为 2, 3 和 4 的状况。为了进一步表示测量的高灵敏性, 图上的结果的不确定性被放大了十倍

有件事很重要, 即概括一下描述  $N_\nu$  对 LEP 的物理观察量的依赖关系时用到的一些假设: 轻子普适性; Z 玻色子只能衰变为已知的费米子; 中微子的质量可以忽略; 并且 Z 玻色子与中微子的耦合可由标准模型描述。

## 3 实验测量

### 3.1 Z 玻色子衰变的探测

四个 LEP 实验的设计被优化, 使其能够在可能的预算、技术和科学的约束下高效率探测 Z 玻色子的衰变。几百个科学家、技术员和工程师组成的团队设计、打样、建造和装配了直径和长度超过 10 米、重量达到几千吨的复杂装置。各探测器的基本设计原理是类似的, 而在一些子探测器上则选用了显著不同的技术, 以最终减少综合的系统不确定性。

图 2 给出了四个探测器的三维剖视图。所有这些探测器都是辐射型的, 并且前后对称。设计的共同部件 - 子探测器一个接一个地连接, 从束流轴向外依次为径迹室, 外面环绕量能器和弯曲磁体, 然后, 最外

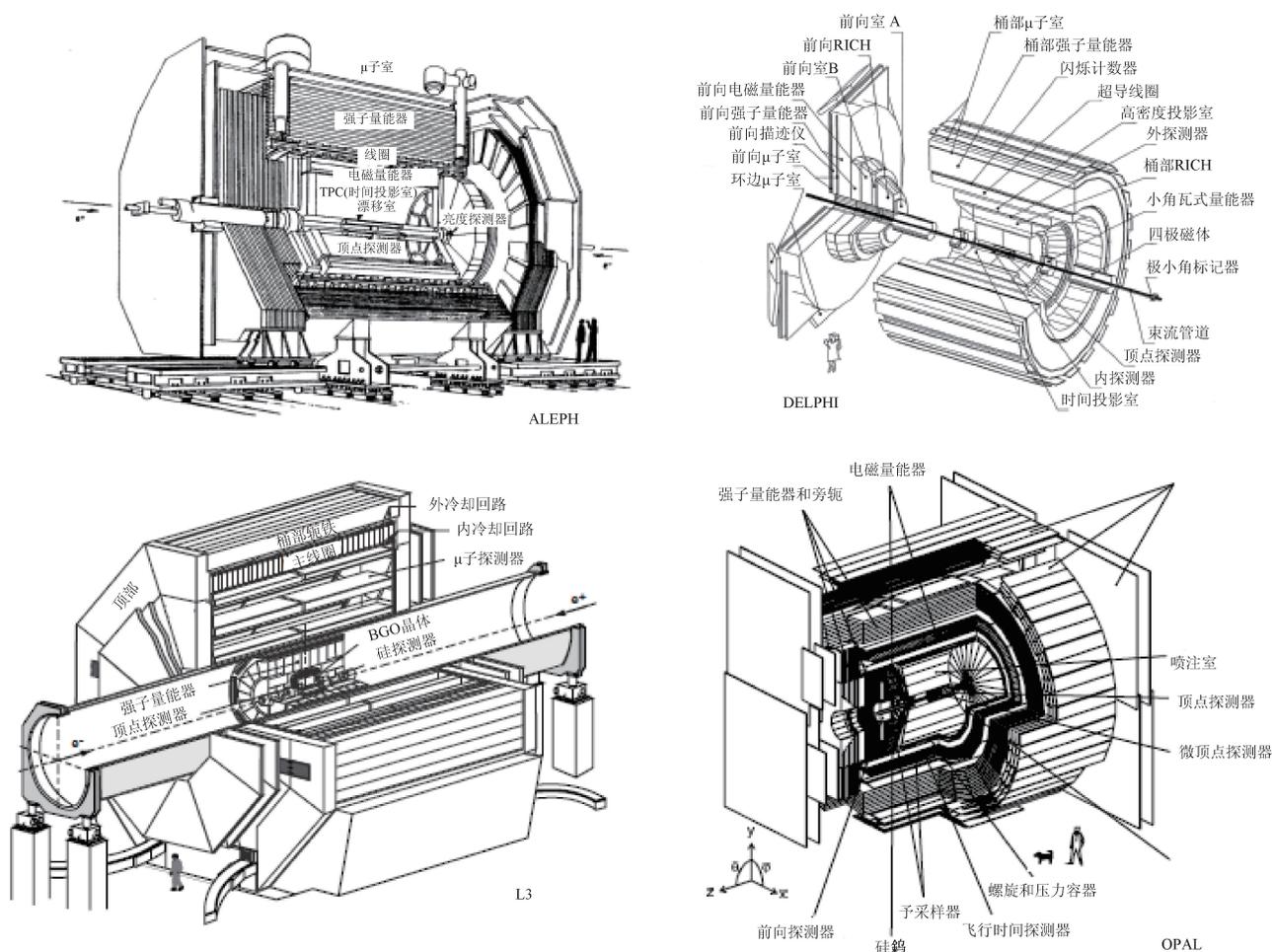


图2 LEP 探测器剖面展示: ALEPH, DELPHI, L3 和 OPAL

层为  $\mu$  子谱仪。L3 探测器有些例外，它的全部  $\mu$  子谱仪都包含在磁场之中。某些子探测器依赖于已掌握的技术，例如寻迹的丝室或量能器上的晶体和闪烁计数器，推动了规模和精度上的技术进步（例如 L3 BGO 电磁量能器，或者是它的高精度的  $\mu$  子谱仪）。其他子探测器也都依赖于较新的技术，那样大的规模都是以前从未部署过的（例如 ALEPH 和 DELPHI 的时间投影室，ALEPH 的液氙量能器以及 DELPHI 的环状成像 Cerenkov 探测器 RICH）。

LEP 探测器的一些性能举例：

- ALEPH 寻迹系统的横向动量分辨率  $\sigma(1/p_t) = 0.6 \times 10^{-3} \text{GeV}^{-1}$ ;
- DELPHI RICH 的  $K^+$  鉴别在 30% 污染情况下的效率达到 70%;
- 对 45GeV 的电子，L3 电磁量能器的能量分辨率  $\Delta E/E \approx 1.4\%$ ;

- 对 45GeV 的  $\mu$  子 L3 的  $\mu$  子谱仪的动量分辨率  $\Delta p/p \approx 2.5\%$ 。

图 3 展示了 Z 玻色子衰变的探测原理。强子事例在中心径迹室具有高多径迹，在量能器中留下能量沉积，并能重建出两个背靠背的全喷注。高喷注多重性可能是罕见的高阶 QCD 过程。Z 玻色子衰变成正负电子对的特征是在中心径迹室中有两条背靠背的径迹，并在电磁量能器中留下高能信号。Z 玻色子衰变成  $\mu$  子对的特征是在中心径迹室仅留下背靠背的径迹，在电磁量能器和强子量能器中留下最小电离能损沉积，并在  $\mu$  子室中留下径迹。Z 玻色子衰变成  $\tau$  子对探测具有更大的挑战性，需要根据  $\tau$  的不同衰变道综合分析探测器中的丢失能量，低多重性喷注、电子和  $\mu$  子。

### 3.2 数据样本

自 1989 年的试运行直到 1995 年 LEP 加速器在 Z

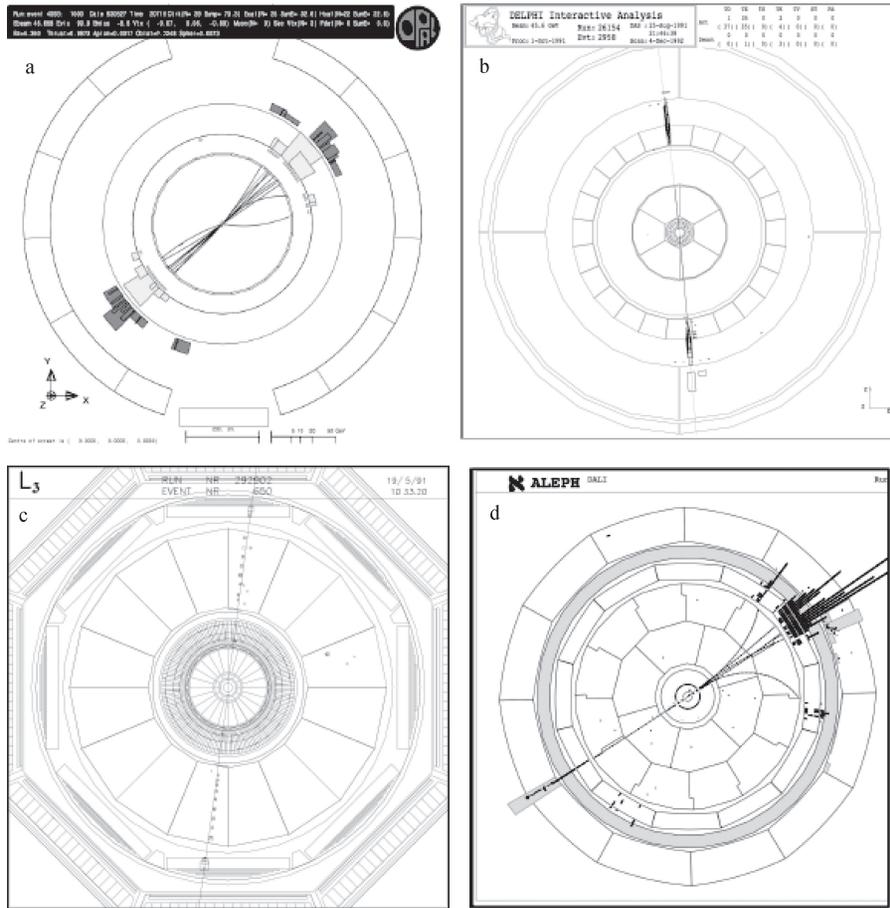


图3 四个 LEP 探测器 Z 玻色子的事例显示 (a)OPAL 探测器的强子衰变，两个高多重性背靠背喷注；(b)DELPHI 正负电子对衰变，此事例的特征是在中心径迹室有一对背靠背的径迹，在电磁量能器中沉积的能量接近束流能量；(3)L3 探测器中  $\mu$  子对衰变，它的特征是在  $\mu$  子室（置于图中最外层），在强子、电磁量能器以及中心径迹室相应径迹都有最小电离能量沉积，飞行时间探测器确信那些径迹来自对撞顶点，而不是来自宇宙线；(d)ALEPH 探测器中的  $\tau$  子对衰变，此时在一个半球中探测到一个电子（径迹以及在量能器沉积能量的特点被鉴定），而在反方向是个低多重性的喷注并带着全部丢失能量。所有这些图中，束流轴都垂直于纸面

玻色子共振峰及其附近能量点运行。在 1990 和 1991 年，用 1GeV 的间隔做能量扫描，提供了第一次绘制的 Z 玻色子共振峰图谱。在接着的几年中，高亮度数据采集集中在 Z 玻色子共振峰上，而在 1993 年和 1995 年分别在高于或低于 Z 玻色子共振峰 1.8GeV 处

的非峰值处增加了两个能量点，以进一步约束 Z 玻色子的谱线形状。

四个实验一共探测到 1700 万个 Z 玻色子衰变。表 1 提供了每个实验积分亮度的细目表以及探测到的强子和轻子终态的事例数。

表 1 质心能量和交付给每个实验的亮度，以及被四个实验在强子和轻子衰变模式采集到的事例数。由于亮度太低以及实验条件相对控制等原因，1989 年的数据样本没有用于 Z 玻色子谱线形状研究

年份	质心能量 [GeV]	实验的积分亮度 [ $\text{pb}^{-1}$ ]	探测到的总强子事例数 [ $\times 10^3$ ]	探测到的总轻子事例数 [ $\times 10^3$ ]
1990/91	88.2–94.2	27.5	1660	186
1992	91.3	28.6	2741	294
1993	89.4, 91.2, 93.0	40.0	2607	296
1994	91.2	64.5	5910	657
1995	89.4, 91.3, 93.0	39.8	2579	291

### 3.3 截面和不对称性测量

Z 玻色子的每一种衰变的截面由下式测定  $\sigma_{\text{tot}} = (N_s - N_b) / \epsilon \mathcal{L}$ ，式中  $N_s$  是所选事例数， $N_b$  为本底过程造成的预期数， $\epsilon$  是包括几何接受度在内的选择效率，而  $\mathcal{L}$  是积分亮度。LEP 实验的  $N_b$  和  $\epsilon$  是由描述 Z 玻色子产生和衰变以及本底过程的蒙特卡罗模拟程序得到的。那些模拟程序所产生的事例通过探测器的详细模拟，同样的软件也用于重建对撞事例。这些工作流程多年来通过数据检查和改良，给出了极其准确的探测器模拟。

每种末态的不对称性由式  $A_{\text{FB}} = (N_F - N_B) / (N_F + N_B)$  测量，这里  $N_F$  和  $N_B$  分别为“继续”沿着电子入射方向前进的带负电的轻子的计数，或者是“反向”出射的计数。

LEP 采集到大统计量的 Z 玻色子样本使每个实验测得的截面具有很低的统计不确定性，强子道和轻子道的不确定性分别为 0.5‰ 和 2.5‰。实验性不确定性主要来自从数据和蒙特卡罗对效率和接受度的计算以及选择步骤。在强子道中这类不确定性的变化范围为 0.4‰~0.7‰，轻子道的变化范围为 1‰~7‰，而对  $\tau$  子对衰变道，这个数值会更高一点。对于不对称性测量，实验性不确定性的绝对值在 0.0005 和 0.0030 之间，这里较高的值对应的是  $\tau$  子对这个衰变道。统计不确定性是系统不确定性的 2~5 倍。

各实验的截面和不对称性测量的共有的系统不确定性是不能减少的。主要的来源是：LEP 能量的标定；使用相同的蒙特卡罗模拟信号和本底过程；标准模型可观察量参数化的理论不确定性，贡献给电子-正电子末态以及总 QED 末态修正的理论不确定性。共有的系统不确定性的最重要的来源影响了亮度的决定。

### 3.4 亮度测量

正如式 (7) 和 (8) 以及图 1 所展示的， $N_s$  强烈依赖于强子截面的数值。当探测器被很好理解的情况下，很大的事例计数限制了统计不确定性，这时的  $N_s$  精度依赖于亮度测量的准确性。LEP 实验利用探测小角巴巴散射做瞬时亮度测量。此过程的好处是有很高的作用截面，因而可以忽略统计不确定性，并且由 Z 玻色

子自身产生的贡献也很低。

配置径迹室的一对专用的量能器紧密安装在 LEP 束流管道的前后小角区，通常与束流线成 30 至 50 毫弧度安装。为了精密运行，这些仪器必须针对危险的条件进行保护，在达到稳定对撞之前，束流已被熟练控制，然后对携带与束流能量相近的、并在前向和后向区均沉积能量的带电粒子做符合计数：这就是典型的巴巴散射信号。事例计数同时也详细记录了瞬间亮度的条件，继而就可获得总积分亮度。决定亮度的实验性的系统不确定性被很好地控制在 0.03%~0.09% 范围。

所有的实验都依靠相同的蒙特卡罗模拟程序和体现最高水平的理论计算来估算被接受的小角巴巴散射截面并推导亮度。通过不断改进这些计算余下 0.061% 的理论不确定性，这些不确定性主要来自真空极化，高阶修正和轻费米子对的产生。

LEP 实验中截面和不对称性的广泛结合，加上显著的统计方面的优越性减少了几个不相关的实验性系统不确定性。同时，在决定亮度不确定性方面的理论不确定性对于所有的实验都是公共的，因此是不能减少的。它对强子顶点截面测量的不确定性中差不多占了一半，并且在确定的  $N_s$  系统不确定性中占主要地位。

### 3.5 结果

每一个 LEP 实验在不同能量点的强子和轻子终态中提取截面和不对称性，这对应于约 200 个的单独测量。这样的测量可以得到 Z 玻色子谱线形状的精密的描述并相应获得标准模型的参数。

一个额外而崭新的跨实验组之间的合作努力导致了 LEP 电弱工作组 (LEP ElectroWeak Working Group) 的建立。该组有权建议和安排跨组的谱线形状测量，由此显著减少了统计和系统的不确定性。每个实验都以商定的格式与全相关矩阵提供自己的测量结果。LEP 电弱工作组把各组的输入的数据结合起来，以比每个单独实验得到的统计样本高得多的精确度确定了 Z 玻色子谱线形状可观察量，并检查了这些实验结果的总体一致性以及它们对理解标准模型的意义。表 2 提供了 2.2 节中引入的可观察量在轻子普适性的假设下的综合结果。该综合结果以拟合优度  $\chi^2/\text{d.o.f.} = 36.5/31$

表 2 综合的 LEP 结果, 以及它们与关键观察量的相关性 (2.1 节)

观察量	综合 LEP 测量	相关性				
		$m_z$	$\Gamma_z$	$\sigma_{\text{had}}^0$	$R_1^0$	$A_{\text{FB}}^{0,1}$
$m_z$	$91.1875 \pm 0.0210 \text{ GeV}$	1.000				
$\Gamma_z$	$2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$	-0.023	1.000			
$\sigma_{\text{had}}^0$	$41.540 \pm 0.037 \text{ nb}$	-0.045	-0.297	1.000		
$R_1^0$	$20.767 \pm 0.025$	0.033	0.004	0.183	1.000	
$A_{\text{FB}}^{0,1}$	$0.0171 \pm 0.0010$	0.055	0.033	0.006	-0.056	1.000

显示了各实验结果的相容性。

利用全部 LEP 数据样本通过测得的 Z 玻色子分支比宽度比对轻子普适性的假设做了检验, 得到  $\Gamma_{\mu\mu}/\Gamma_{ee}=1.0009\pm 0.0028$  以及  $\Gamma_{\tau\tau}/\Gamma_{ee}=1.0019\pm 0.0032$ , 注意到这一点是很重要的。

利用式 (7) 式和 (8) 式以及标准模型中 Z 玻色子衰变到中微子和轻子宽度之比值

$$(\Gamma_{\nu\nu}/\Gamma_{ll})_{\text{SM}} = 1.99125 \pm 0.00083, \quad (9)$$

轻中微子种类数目就可以被确定为

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082. \quad (10)$$

请记住导致这个结果的四个关键假设:

- 轻子普适性成立;
- 不存在 Z 玻色子衰变到那些已知费米子以外的衰变;
- 中微子质量可以忽略;
- Z 玻色子与中微子的耦合由标准模型描述。

### 3.6 不确定性

$N_\nu$  的不确定性小于千分之三。它可以分解成三部分:

$$\delta N_\nu \sim 10.5 \frac{\delta n_{\text{had}}}{n_{\text{had}}} \oplus \frac{\delta n_{\text{lep}}}{n_{\text{lep}}} \oplus 7.5 \frac{\delta \mathcal{L}}{\mathcal{L}}. \quad (11)$$

前两项是与截面和不对称性测量时分别在强子和轻子道所选事例数的不确定性有关。第三项是从亮度测量不确定性推导得到的参数化不确定性。

亮度测量不确定性的最大贡献来自已经在 3.4 节讨论过的理论不确定性 (0.061%)。此项单独的不确定性带给  $N_\nu$  产生的不确定性为 0.0046, 占  $N_\nu$  总不确定性的一半以上。

## 4 $N_\nu$ 的直接测量

LEP 实验通过探测  $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  过程中的可见

单光子对  $N_\nu$  进行另一种简洁测量。在 Z 玻色子共振处, 随着 Z 玻色子衰变到中微子, 此末态主要是通过小角光子的初态辐射得到的, 这种辐射具有急剧下降的能谱。交换一个虚 W 玻色子的 t 道的贡献是比较小的。

在 Z 玻色子共振处,  $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  过程的截面可以表示为

$$\sigma_{\nu\bar{\nu}\gamma}^0(s) = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{s \Gamma_{ee} N_\nu \Gamma_{\nu\nu}}{(s - m_Z^2) + s^2 \Gamma_Z^2 / m_Z^2} + \text{W 玻色子交换项} \quad (12)$$

此截面基本上正比于  $N_\nu$ 。仔细地测量此过程的截面, 控制好剩余本底源和总接受度就可以得到  $N_\nu$ 。此过程的截面显著低于 Z 玻色子共振。因此  $N_\nu$  直接测量的统计准确性要次于间接测量一个量级。同时, 直接测量不需依赖 Z 玻色子只能衰变到已知的费米子的假设。可能衰变到可见的“奇特”粒子混杂在其他可见道中间, 特别混杂在强子末态中, 原则上也会改变 Z 玻色子的谱线形状并导致不正确的测量。

直接测量关键性的实验挑战来自对单光子事例的探测, 而且要求在探测器中没有其他信息。四个 LEP 实验设计了复杂的分析链并在某些情况下使用专用的触发系统来记录这些“单光子”事例。扣除本底后四个实验在 Z 玻色子共振处约探测到 2500 个单光子事例, 这些事例具有不同的能量阈值和有效体积, 如表 3 所示, 表上也给出了具体的数据样本以及信噪比。

图 4 展示了测量截面作为质心能量以及对  $N_\nu$  依赖性函数的一个例子。对截面的理论模型进行拟合, 并假设 Z 玻色子与中微子之间具有标准模型耦合, 得到的  $N_\nu$  的直接测量结果列于表 3 中。这些结果可以综合成:

$$N_\nu = 3.00 \pm 0.08. \quad (13)$$

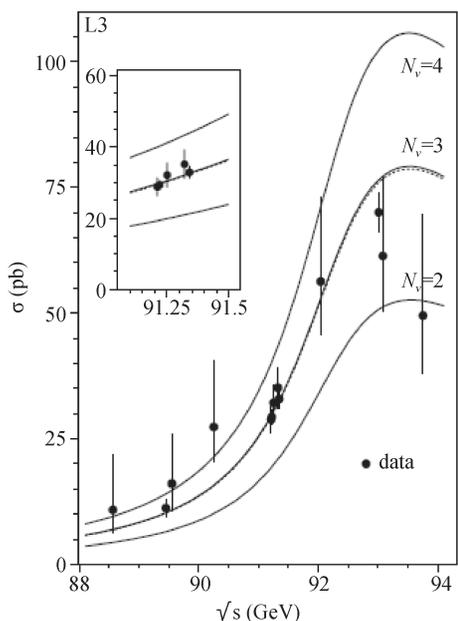


图4 L3 实验在围绕 Z 玻色子共振对  $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  过程作为质心能量函数的截面测量。光子能量的下限为 1GeV, 而有效 (探测) 体积为  $|\cos\theta_\gamma| < 0.71$ 。对轻中微子种类数目为 2, 3 和 4 的预言也展示在图中。虚线表示对数据点的拟合

表 3 四个 LEP 实验围绕 Z 玻色子共振的单光子事例的分析。

实验组	$\mathcal{L}_{[pb^{-1}]}$	$E_\gamma > [GeV]$	$ \cos\theta_\gamma  <$	s/b	$N_\nu$
ALEPH	15.7	1.5	0.74	1.8	$2.68 \pm 0.20 \pm 0.20$
DELPHI	67.6	3.0	0.70	2.7	$2.89 \pm 0.32 \pm 0.19$
L3	99.9	1.0	0.71	6.0	$2.98 \pm 0.07 \pm 0.07$
OPAL	40.5	1.75	0.70	11.0	$3.23 \pm 0.16 \pm 0.10$
平均 (包括较低能量)					$3.00 \pm 0.08$

注: 表中, 积分亮度,  $\mathcal{L}$ , 光子能量阈值,  $E_\gamma$ , 有效体积,  $|\cos\theta_\gamma|$ 。表中也给出了信噪比 s/b, 每个实验组测得的  $N_\nu$ , 以及四个实验测得的  $N_\nu$  的平均值。表中  $N_\nu$  测量值不确定性的前一项为统计性不确定性, 后一项则为系统性不确定性

这几个 LEP 实验在质心能量高于 Z 玻色子共振的区域重复进行了该项测量。

四个实验在质心能量高于 Z 玻色子共振处以相当低的本底一共收集到 6200 个单光子事例。包括较低能量的数据, 在所有 LEP 能量直接测量决定轻中微子种类数目的综合结果是:

$$N_\nu = 2.92 \pm 0.05. \quad (14)$$

## 5 结论

1989 年, LEP 的 ALEPH, DELPHI, L3 和 OPAL 各合作组在数据采集的最初几周内就报告了轻中微

子种类数目约为 3。这是一个引人注目的成就, 它见证了 LEP 加速器的性能, 探测器的早期知识, 以及 CERN 在头四十年中对 LEP 物理上的总体规划。该计划采集了 5 年多的数据, 用了十多年的时间发展复杂的分析技术以得到 LEP 实验的综合结果, 最终确定的轻中微子种类的数目为

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082.$$

主要的不确定性来自于决定实验亮度的小角巴巴散射过程的理论控制。本实验结果依赖于四个重要的假设: 轻子普适性成立; Z 玻色子只衰变为已知的费米子; 中微子质量可以忽略; Z 玻色子与中微子耦合符合标准模型。

在 Z 玻色子及更高的直到 209GeV 质心能量, 直接测量了  $e^-e^+ \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  过程, 经独立验证得到的结果为  $N_\nu = 2.92 \pm 0.05$ 。

这个结果是 LEP 物理计划杰出的项目之一。它第一次排除了第四种 (即第四代味) 轻中微子的存在, 对天体物理学和宇宙学的有关理论模型提出了严格限制。实验结果的高精度进一步限制了 Z 玻色子衰变过程中奇特粒子存在的可能。

LEP 探测器第一次通过真正意义上的全球合作来建造, 参加 CERN 项目的美国和亚洲科学家阵容强大。规模空前的 LEP 合作对于粒子物理作为一项事业而言是真正全球化模式, 也成了 CERN 历史上最近二十多年来作为 LHC 时代前奏的实验室模式。发表的 LEP 高精度测量结果的论文由 2500 个作者签署, 这在论文发表史上也是史无前例的。

一方面, 精确测量轻中微子种类数目对我们理解宇宙具有根本的重要性。另一方面, 全球通过成千上万专事奉献的个人的合作努力, 集智慧和创造力之大成, 取到了这个结果, 这种合作努力是我们人类集体遗产的一部分。

摘译自 60 years of CERN Experiments and Discoveries 中 Salvatore Mele 所著的 *The Measurement of the Number of light Neutrino Species at LEP*。希望了解更多细节的读者也可参考“CERN 60 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。