

- algebras, and the Monster, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83 (1986), 3068-3071.
- 3.Cheng, S.-J.; Kac, V. G.: A New $n=6$ superconformal algebras, *Comm. Math. Phys.* 186 (1997) 219-231.
- 4.Cheng, S.-J.; Kac, V. G.: Conformal Modules, *Asian J. Math.* 1 (1997) 181-193. Erratum: Conformal Modules, *Asian J. Math.* 2 (1998) 153-156.
- 5.Cheng, S.-J.; Kac, V. G.: Generalized Spencer cohomology and filtered deformation of \mathbb{Z} -graded Lie superalgebras, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998) 1139-1180.
- 6.Cheng, S.-J.; Kac, V. G.: Structure of \mathbb{Z} -graded Lie superalgebras of vectorfields, *Transformation Groups*, 4, No. 2-3 (1999) 219-272.
- 7.D'Andrea, A.; Kac, V. G.: Structure theory of finite conformal algebras, *Selecta Math. New Ser.* 4 (1998) 377-418.
- 8.Frenkel, I. B.; Lepowsky, J; Meurmann, A.: Vertex operator algebras and the Monster, Academic Press, New York, 1988.
- 9.Guillemin, V. W.: A Jordan-Hölder decomposition for a certain class of infinite-dimensional Lie algebras, *J. Diff. Geom.* 2 (1969) 313-345.
- 10.Guillemin, V. W.: Infinite-dimensional primitive Lie algebras, *J. Diff. Geom.* 4 (1970) 257--282.
- 11.Kac, V. G.; van de Leur, J.: On Classification of superconformal algebras, In: S. J. Gates et al. (eds), *Strings 88*, World Scientific (1989) 77-106.
- 12.Kac, V. G.: Vertex algebras for beginners, University lecture notes vol. 10, AMS, Providence, 1996.
- 13.Kac, V. G.: Classification of infinite-dimensional simple linearly compact Lie superalgebras, *Adv. Math.* 139 (1998) 1-55.
- 14.Kac, V. G.: Superconformal algebras and transitive group actions on quadrics, *Comm. Math. Phys.* 186 (1997) 233-252.
- 15.Shchepochkina, I.: The five exceptional simple Lie superalgebras of vector fields, hep-th/9702121 (1997).



程舜仁

學經歷：

美國西北大學學士、碩士(1988)

美國哈佛大學碩士、博

士(1993)

Max-Planck Institute für Mathematik (1993-1994)

國立成功大學數學系副教授(1994- 迄今)

美國麻省理工學院數學系訪問學者(1997-1998)

實驗尋找 Higgs 粒子的 現狀與展望

張元翰 國立中央大學物理系副教授

侯書雲 國立中央大學物理系副研究員

粒子物理領域研究物質的最基本結構(即所謂基本粒子)和作用力,在這個領域,有一

套非常成功的理論，它解釋了至今所有實驗上觀測到的現象，稱為粒子物理的“標準模型”，這套理論將構成物質的基本粒子分為三個家族的夸克(quark)及輕子，每一家族中有2個夸克和2個輕子，同時也預測了這些基本粒子間的交互作用，共分為重力、強作用、弱作用與電磁作用四種，自然界的現象均可用這一套理論來解釋，可說是集粒子物理界數十年來所有努力的大成。

標準模型不單解釋已觀測到的現象，同時也預測了一些新的現象，許多預測的現象在九零年代的粒子物理實驗中被證實了，讓我們對標準模型有很強的信心，然而，標準模型的理論中有一個關鍵的現象，即對稱破壞而產生的 Higgs 粒子，至今尚未被發現。Higgs 粒子的重要性在於它的存在使所有其它粒子有了質量，實驗上沒有觀測到 Higgs 粒子，使標準模型非常不完備，有許多理論上的參數也無法確定。事實上，Higgs 粒子是標準模型所描述的粒子中惟一尚無法確認的，其存在與否也是粒子物理現今最重要的問題之一。

實驗上未能找到 Higgs 粒子，並不代表它不存在，最有可能的是它太重了，無法在現有的實驗中產生。這其中的關連就在於愛因斯坦的質能互換 $E=mc^2$ ，譬如，要在實驗室看到一個質量(m) 10^{-25} 公斤的 Higgs 粒子，我們必須提供至少 mc^2 (即 9×10^{-9} 焦耳) 的能量，這個能量在日常生活中是微不足道的，問題是我們必須將它集中到基本粒子的大小的空間範圍中，才有可能將有能量全部轉換成一個粒子。基本粒子非常之小(半徑在 10^{-15} 米以下)，如果將 9×10^{-9} 焦耳能集中到一個質子大小的空間中，其能量密度相當於 2×10^{36} (焦耳/米³)，這比一般物質的能量密度大上 10^{16}

倍(例如，將普通鐵塊的質量完全轉換成能量，將得到能量密度約為 7×10^{20} 焦耳/米³)，這麼高的能量密度地球上惟有在高能加速器中才可能達到(甚至太陽內部或氫彈爆炸中心都離此甚遠)，在高能加速器中，我們利用強大的電磁波將電子或質子加速到極高的能量，再讓這些高能粒子正面相撞，在相撞的過程中將粒子所帶的動能轉變為新生粒子的質量，這些新生粒子在碰撞後四散飛出，我們利用在碰撞點周圍建立的大型探測器來觀察，在其中尋找是否有 Higgs 粒子的蹤跡。

由以上可知，要產生(並觀測) Higgs 粒子的關鍵在於加速器的能量現在世界上能量最高的加速器首推在美國芝加哥費米實驗的 Tevatron 及在瑞士歐洲核子物理中也(CERN)的 LEP，Tevatron 由於其它因素(見下文)，並不適用於找尋 Higgs 粒子，因此，LEP 是現在尋找 Higgs 粒子的關鍵所在。

在 LEP 加速器，正負電子被加速至 95 GeV (1 GeV = 十億電子伏特，相當於 1.6×10^{-10} 焦耳) 的能量，再讓正負電子相撞，LEP 是圓周型加速器，在其圓周上有四個碰撞點，四個大型探測器就置於這些碰撞點上，來觀察高能碰撞的產物，我們(中央大學高能實驗組)所參加的 L3 實驗，即建造並操作其中之一的 L3 探測器，這個探測器長、寬、高各約 12 米，總重八千噸，內有數百萬個探測元件，用來偵測粒子的軌跡與能量。實驗工作者將 L3 看到的信號加以整理、分析，重建碰撞那一瞬間的作用過程。

在 LEP 的正負電子碰撞中，共有 190 GeV 的能量可以被轉成質量。在非常小的機會下，碰撞可產生一個 Higgs 粒子及一個所謂的 Z^0 粒子， Z^0 粒子是已被確認的基本粒

子，質量為 $91\text{GeV}/c^2$ ，在這個情形下，有 $99\text{GeV}/c^2$ 的能量可用來產生 Higgs 粒子，也就是說，我們僅能看到 $99\text{GeV}/c^2$ 以下的 Higgs，如果 Higgs 的質量重於 $99\text{GeV}/c^2$ ，那麼 LEP 的實驗就無法觀測到，只能留待下一個階段能量更高的加速器繼續尋找。

在實際的工作上，探測器的數據之分析解釋是非常具挑戰性的工作，前面已提到，Higgs 即使可以產生，其發生機會也很小，約是所有碰撞反應中的千分之一的機會，同時，大量類似 Higgs 粒子的其它粒子也會在碰撞中產生，再加上探測器本身的測量誤差，很容易會有誤認的情況（稱為背景信號）。前述的 Tevatron 加速器上，因為是正負質子碰撞，其產生 Higgs 的比例更小得多，即使有 Higgs 粒子也無法在眾多假信號中分辨出來。在 L3 實驗，我們針對探測器的特性，發展出許多分析工具，其中最重要的即是 B- 標定與利用電腦神經網路做篩選的方法，這些方法大幅減少背景信號，使尋找 Higgs 粒子成為可行，我們在 1997、1998 及 1999 年的分析，確定了在現階段的數據中沒有 Higgs 粒子，也因此得到，如果 Higgs 粒子存在，其質量必定比 $95\text{GeV}/c^2$ 要高，是當時最好的成果。

展望未來，LEP 加速器的能量將被提昇至 200GeV ，我們可用類似的分析方法將尋找 Higgs 的範圍推展至 $109\text{GeV}/c^2$ 。LEP 將在 2000 年九月結束其 10 年的運行。在此之後，尋找 Higgs 有兩個方向，一是將在 2000 年開始的 Tevatron RunII，在這裏同樣有很高的背景事例，但由於提高了加速器及探測器的性能，有希望能尋找 $100\text{GeV}/c^2$ 左右的 Higgs 粒子。另一個地點則是在 CERN 新建的 LHC 加速器，它將會把能量範圍提高 10 倍

左右，配合新一代高解析度的探測器，能在 $100-1000\text{GeV}/c^2$ 的範圍內尋找 Higgs 粒子。理論上，如果 Higgs 在這個範圍內仍不見蹤影，則必定有不同於標準模型的新機制存在，因此，不論是否發現 Higgs 粒子，LHC 都將對粒子物理有重大的貢獻。台灣的團隊（包括中研院、台大、中大）也十分積極尋求參與 LHC 的實驗中的工作，期望繼續我們在 LEP 實驗中的工作，於不久的將來找到這個最重要的粒子。



張元翰

學經歷：

國立臺灣大學物理系
學士(1983)

美國麻省理工學院物

理學博士(1990)

美國麻省理工學院博士後研究(1990-1992)、研究員
(1992-1994)

國立中央大學物理系副教授(1994- 迄今)



侯書雲

學經歷：

國立成功大學物理系
學士(1984)

美國馬利蘭大學物理

學博士(1991)

美國耶魯大學物理系博士後研究(1991-1993)

國立中央大學物理系博士後研究(1993-1997)、副研
究員(1997-1999)

美國密西根大學物理系研究員(1999- 迄今)