

超對稱破缺(I)

文/林豐利

本文簡介與超對稱破缺相關的物理觀念。

尋找超對稱(supersymmetry)已經成為下一代高能物理加速器實驗所要努力的目標,因為就目前粒子物理的發展來看,超對稱是目前所知最有可能存在的不可或缺的物理要素。如果將來無法在下一代的加速器實驗中發現超對稱的蹤影,那麼粒子物理的發展將陷入空前的危機。

1. 紫外發散問題與超對稱

到目前為止,除了找不到希格斯(Higgs)粒子,所有粒子物理的實驗結果大致都可以在所謂粒子物理的標準模型(Standard Model)的理論架構下的到合理又精密的解釋。在這種情況之下,尋找希格斯粒子也可以說是尋找超越標準模型的新物理的窗口。不過,這個和超對稱有何關係呢?是大有關係。因為有了超對稱才可以給出合理的希格斯粒子的質量,也才能解釋為何標準模型是一個很好的有效理論(effective theory)。

希格斯粒子是所謂自旋為零的純量粒子(scalar particle),這與其他如夸克,電子,光子,W或Z玻色子等自旋1/2或1基本粒子不同。除此之外,它能夠產生凝聚(condensation)而不破壞時空對稱性,從而決定物理真空的構造。再者,它與其他粒子在自身質量的量子修正的行為上也極不同。

眾所周知,在量子場論中,物理量如質量或電荷的圈圖量子修正會有紫外發散,所以必須引進能量尺

度的截斷(cutoff),使得量子修正是有限值,這個截斷的大小將由能量更高的物理來決定。這樣一來,量子修正的大小就與紫外發散的行為以及這個截斷的大小有關。另外,如果我們要認定一個量子理論是有效理論,那麼這個理論所有的物理量(尤其是質量)的量子修正必須遠小於該理論所適用的最大值或能量尺度,否則就違背了微擾論的精神。對於已知的非純量基本粒子,它們的質量的量子修正的紫外發散行為是對數發散(log divergence),而對於純量粒子如希格斯粒子則是二次發散(quadratic divergence)。對於前者而言,引進一個很大的能量尺度的截斷如普朗克尺度並不會造成很大的質量修正。然而對於後者,我們必須微調(fine-tune)截斷與其他理論參數的大小才能得到一個合理大小的質量修正;換言之,這樣個理論並不能做為一個有效理論,因為高能量的物理會強烈影響低能量的物理,無法退耦(decouple),這與重整化群的觀點有矛盾。這個矛盾被物理學家稱做 hierarchy 問題,這裡的 hierarchy 指的是電弱理論的能量尺度與更基本的理論的能量尺度(如超弦理論的尺度或普朗克尺度)之間數量級上的巨大差異。

有個時期,高能物理學家曾提出許多想法來解決這個問題。這其中分為兩大類:一類主張希格斯粒子並不是基本粒子,而是由兩個費米子所組成的複合粒子(composite particle),這樣一來就沒有所謂純量粒子的紫外問題。這一類的理論統稱為 technicolor models,是類似於強作用力中的手徵對稱性破缺

(chiral symmetry breaking)。另一類的想法則是提出超對稱，因為在超對稱量子場論中，所有的粒子(包括純量粒子)的質量的量子修正都是對數發散或者是有限值，所以也沒有紫外問題。這兩類理論經過多年的競爭，techni-color 所預測的希格斯粒子的質量為實驗結果所排除，只剩下超對稱繼續等待實驗的檢證。

II. 超對稱破缺

為何超對稱量子場論沒有紫外問題呢？超對稱是平直時空的 Poincare 對稱性的推廣。基本粒子的質量與自旋在 Poincare 座標變換下保持不變，然而超對稱變換帶有 $1/2$ 的自旋，所以會將費米子與玻色子互換；換言之，在超對稱理論中，費米子與玻色子將成對出現，而且兩者有相同的質量與內空間的量子數如電荷或同位自旋符(isospin)等。由於這兩種粒子對量子真空能量的貢獻相等但不同號，所以超對稱理論的量子真空能量為零。同樣的，超對稱也使得粒子的質量及耦合常數沒有量子修正。這正是超對稱場論沒有紫外問題的原因。

然而，這並不是故事的結束。很顯然的，我們所處的世界並沒有超對稱，因為並沒有觀察到帶有相同質量以及量子數的超對稱粒子對。唯一合理的解釋就是超對稱在高能量的時候就自發性破缺(spontaneously broken)，而它殘餘的效果保證純量粒子的質量不會有紫外發散的問題。然而超對稱的自發性破缺機制是非微擾性的(non-perturbative)，到目前為止，除了極少數可解的超對稱量子場論，我們對超對稱破缺的機制的瞭解是很有限的。儘管如此，由超對稱破缺的殘餘效果所構成的有效場論可以很好的從重整化群的觀點來解釋電弱理論中希格斯機制的由來，從而提供了一個在標準模型的架構下來檢驗超對稱的實驗的基礎，這也是下一代加速器所要努力的目標。另外，超對稱大統一場論(Grand Unified Theory)

的重整化群則成功預測了它自身的自洽性，也就是，電弱及強三種作用力的耦合常數會在大統一場論的能量尺度附近很精密地趨於同一個值，原來的非超對稱的大統一場論是無法做到這一點的。不過，由於粒子譜的數目變兩倍，加上所多新的耦合常數，使得超對稱性的標準模型的參數的數目較原來的多上好幾倍，這也增加了尋找超對稱的困難。一般而言，新的超對稱粒子必須成對出現，所以質量最輕的超對稱粒子無法衰變成一般已知的標準模型的粒子，所以它是個穩定的新粒子，這也成為在下一代加速器實驗所要找尋的主要目標。

III. 暗物質與暗能量

另外值得一提的是，由於某些 sum rule 的限制，造成超對稱自發性破缺的純量粒子不可能帶有標準模型的量子數，否則它的質量會比它所對應的標準模型的費米子還輕，這與實驗觀測的結果不吻合。如此一來，超對稱的破缺必然是由新的，不帶標準模型量子數的粒子所造成，因此它們必須是電中性的，不發光，因此被稱為 Hidden sector。這些粒子如果大量存在的話，將有可能構成宇宙中的暗物質(dark matter)，這也是一些宇宙學家接受超對稱的原因之一。除了 hidden sector，我們還需要所謂的 Messenger sector，這些粒子同時帶有 hidden sector 與標準模型的量子數，不參與超對稱的破缺機制，卻可以透過交互作用來傳遞超對稱破缺的殘餘效果。最簡單的 messenger sector 就是重力，因為重力與所有的物質耦合。當然，我們也可以想到有可能有其他的很重的新粒子可以來做 messenger sector。

超對稱破缺與宇宙學的關係除了上述所提到的暗物質以外，它與宇宙中目前所觀測到的暗能量也有密不可分的關係。前面提到，超對稱量子場論的真空能量為零。但是，如果超對稱破缺，則真空能量的大

小將與超對稱破缺所發生時的能量尺度有關。而當真空能量與重力耦合時，則構成了宇宙中的暗能量。所以一旦瞭解超對稱的破缺機制，或許也同時可以解開暗能量的來源及其性質的謎團。當然，到目前無止，還沒人解開這些謎團，但也可以看出超對稱破缺機制連接著所多不同面向的重要物理問題。這些事實可以說明，雖然到目前為止還沒有觀測到超對稱，但它的存在與否的確至關重要，也希望下一代的高能加速器能夠發現它。

IV. 結語

七零年代初，為了在弦理論中引進費米子而意外發現了超對稱，到目前為止，超對稱的發展已經超過三十年了，它的應用及推廣也漸漸地滲透到各個領域。就純理論的層面而言，超對稱是一個很完美的數

學架構，透過對超對稱量子場論的研究，讓人們對量子場論中許多非微擾的現象有了新而深刻的瞭解，這些都是在非超對稱量子場論中所無法探討與達成的。不過，如此完美的數學結構是否為自然界所用，還必須由未來的實驗來判定。這種理論與實驗的必要的緊張關係正是科學得以進步的因素。且讓我們拭目以待吧！

作者簡介

林豐利

國立台灣師範大學物理系助理教授

專長：黑洞理論，超弦理論與宇宙學

<mailto:flin@phys.nthu.edu.tw>