



精細結構常數

● 傅俊結*

在數學上我們遇到很多的常數，例如，把任何一個圓的周長除以它的直徑是不變的，就是所謂的圓周率，還有自然對數的底數等等，在物理上也是一樣，例如，萬有引力常數，普朗克常數，光速，電子的電荷等等。只不過，這些物理常數都是帶有單位的。今天所要介紹的精細結構常數，是物理上一個很重要的常數，但是，它不像前面提到的物理常數一樣，帶有單位。它純粹是一個實數，沒有單位。當我們把大自然三個很基本的物理量，光速、電子所帶的電荷量及量子力學中的普朗克常數，做一個簡單的算術運算。確切的說，就是普朗克常數乘以光速去除以電子電荷的平方和圓周率的兩倍的乘積，這時候所有的單位都消掉了，我們得到一個純粹的數，大約是 $137.035999\dots$ 。這個數對數學家來講，最基本的問題，就是它到底是無理數還是有理數。物理學家有興趣的並不是這種問題。所謂的精細結構常數就是這個數的倒數，大部分的情況下，我們就用 137 分之一來表示精細結構常數。

精細結構常數對物理學家的趣味性及重要性來講，有兩個很有名的故事可以補充。這兩個故事跟兩位諾貝爾物理獎得主有關，一個是提出量子力學中不相容原理的包立 (Pauli)，包立晚年生病住在瑞士的一間醫院，有一天，他的一個朋友去他的病房探視他。包立跟他的朋友說，你知道我的病房號碼是幾號嗎？就是 137 。包立的科學興趣，有大部分的時間，就是要了解精細結構常數的奧秘。另外一個故事跟鼎鼎大名的費恩曼有關，費恩曼對精細結構常數，曾經說過這樣的一段話：「這個該死的數，自從被

* 傅俊結，南台科技大學電子工程系副教授。

發現以來，一直是個謎。很多優秀的理論物理學家都將這個數貼在牆壁上，為它大傷腦筋。它是物理學中最大的謎之一，一個該死的謎。一個魔幻般的數來到我們這個世界，可是沒有人能夠理解它。你也許會說上帝之手寫下了這個數，而我們並不知道上帝是怎樣下的筆。」

當普朗克（Planck）首先引進量子的概念，也就是能量並不是連續的，來解釋黑體輻射的現象，20世紀的兩大科學革命，除了愛因斯坦的相對論之外，量子力學的發展從此展開。1913年丹麥物理學家波爾（Bohr），借助普朗克的能量量子的想法，發表了他的原子模型，用來解釋氫原子光譜的不連續性。波爾的原子模型假設電子只能在特定的能量軌道上繞原子核做圓周運動，當電子從一個能量軌道跳到另一個能量軌道，電子就會吸收或者發射相差能量的對應的光子，因此就有所謂的光譜線。氫原子的光譜線不只不連續，進一步的分析發現，一條光譜線實際上是由好幾條靠得很近的光譜線組成的。波爾的原子模型並不能解釋這個精細結構的現象。後來德國物理學家索末菲爾德（Sommerfeld）對波爾的原子模型提出了一些改進，建立了所謂的索末菲爾德模型。在這個模型中，電子繞原子核運動的軌道並不是圓形，而是橢圓形。電子的能量軌道不僅與波爾模型中的主量子數有關，還與角動量量子數有關。不同的角動量量子數的軌道之間的能量差跟某個不帶單位的常數的平方成正比，這個不帶單位的常數，就是所謂的精細結構常數，因為是索末菲爾德為解釋光譜的精細結構所引進的。

精細結構常數被引進量子力學之後，有很多的物理學家甚至數學家，都想要嘗試從物理學理論，或者任何的數學方法，來推導出這個常數。但是到目前為止，都還沒成功。表面上看起來，精細結構常數只是另外一些帶有單位的物理常數的算術組合，但是隨著量子力學的發展，科學家發現精細結構常數有更深刻的物理意義。前面所提到的波爾模型和索末菲爾德模型，雖然可以成功解釋氫原子的光譜及其精細結構，但是這兩個模型要解釋具有兩個電子氦原子光譜時就遭遇到重大的困難。後來藉由奧地利物理學家薛定諤（Schrodinger）所提出的波動力學，以及英國物理學家狄拉克（Dirac）結合波動力學和相對論所提出的相對論量子力學，可以更清楚解釋光譜的精細結構，狄拉克認為精細結構的現象，是電子的自旋磁矩與電子繞原子核運轉所形成的磁場耦合的結果。





對精細結構常數的更精準討論，就是前面提到的費恩曼所提出的量子電動力學。量子電動力學研究兩個帶電粒子之間如何的交互作用，這種交互作用是透過光子的吸收和發射來計算，這個計算雖然很複雜，但是跟實驗的結果比較，可以準確到小數點後面十幾位。這個理論跟我們講說，任何的電磁交互作用的現象都可以用精細結構常數的冪級數來表達，因此就賦予精細結構常數一個全新的涵義，它是電磁交互作用中，電荷之間耦合強度的一種度量。簡單講說，就是電磁交互作用的強度的一種表示。

近代理論物理學家對精細結構常數，最有興趣的一個問題就是，它真的是常數嗎？它會隨時間而改變嗎？包括精細結構常數在內的很多物理上的常數，有很多科學家認為，從整個宇宙的歷史來看，它們並不是真正的常數。最有名的就是狄拉克的大數假說。在七十幾年前，狄拉克寫了一篇文章，在文章中他指出光線穿越整個宇宙所需的時間，跟光線穿越一個電子所需的時間的比值大約等於十的四十次方，一個質子和電子之間，靜電力與萬有引力的比值，也大約等於十的四十次方。狄拉克認為，如此大的兩個比值竟然如此的接近，應該不是簡單的巧合可以解釋，這背後應該是有更深層的理论存在。狄拉克進一步猜測，如果這兩個數之間存在一個簡單的比例關係，萬有引力常數應該與宇宙的年齡成反比。也就是說，早期的宇宙，其萬有引力常數應該比現在大。這就是有名的狄拉克大數假說。從這個觀點出發，有些科學家認為，精細結構常數也不是真正的常數，雖然愛因斯坦的廣義相對論不允許精細結構常數隨時間而改變。

十幾年前報章媒體有一條新聞震撼了科學界，因為這些媒體所下的標題是，愛因斯坦的相對論被推翻了。原來是，有一個澳洲的天文物理學家韋伯，他所領導的一個研究小組，他們觀測離我們有十幾億光年的類星體的光譜，並做了一個非常精確的測量分析，他們的實驗結果表明，早期的精細結構常數比現在小大約百萬分之7。如果這個結果是正確的，那愛因斯坦的廣義相對論可能真的要修正了。但是，有些科學家質疑韋伯他們的觀測結果，後來這個新聞也就不了了之了。

