

因誰而落？

文·圖／黃宇廷

當人們提到論量子物理時，腦海中浮現的第一景象通常是一群微小閃爍的粒子，在原子的世界裡跳躍穿梭不知道在瞎忙什麼。即便現代生活裡處處可見運用量子物理的科技，但憑藉著尺度上巨大的鴻溝，我們或多或少都對這奇異世界保持著“你們高興就好”的態度。當然許多量子物理所引伸的概念，諸如絕對的不確定性，共存的互異現實，以及觀察行為本身對於現態的改變，不斷的啟發許多哲學思辨與文學藝術作品。當初海森堡與玻爾之間的歧異至今仍在許多科普論壇上爭議著，甚至躍上舞台而成為東尼獎獲獎作品《哥本哈根》，從物理的爭論蔓延到政治，甚至人們彼此的回憶。本質上，量子是一個對我們而言距離遙遠可忽視的世界。

但就在我們呱呱墜地的那一刻，量子物理就深深的影響了所有人的第一個人生經驗：墜落。我們之所以會落下是因為地球的地心引力總是把我們拉向地面。這個向下拉的力量跟月球圍繞著地球週轉的原理是一樣的，就是物體跟物體之間互相拉近的萬有引力——重力。重力跟另一個我們熟悉的遠距力——電磁力，有一個本質上的差別。兩個物體之間的電磁力可以相吸也可以相斥，端視兩個物體的電荷或磁矩是同性或異性。但重力總是相吸，為什麼呢？答案就在量子力學裡。

回到我們國高中的時代，或許還記得當初學到的牛頓力學裡重力的公式是：

$$F = + \frac{Gm_1m_2}{r}$$

其中G代表牛頓常數， m_1 、 m_2 是兩個物體間的質量，一個恆正的量，而r代表之間的距離。這式子的關鍵就是等號右邊的正號。也就是說萬有引力之所以永遠相吸就是因為右邊永遠都會是正號。如果那時自詡浪漫，或許會把這正號圈起來寄給心儀的對象。然後，就發現自己其實是一個魯魯的呆子了。言歸正傳，我們看到重要的是這個符號，但它為什麼必然是正的呢？

讓我們快轉到去年暑假的熱門電影《歐本海默》，本片重現了當年科學家造第一個原子彈的各種掙扎糾結。原子彈的原理是藉由核裂的過程將損失的質量藉由能量釋放出來，也就是一個質能互換的故事。這就是狹義相對論裡有名的 $E = Mc^2$ ，告訴我們在靜止座標系裡質量與能量是等價的。換句話說，我們大可以把先前的公式裡的質量換成能量。

這樣做的話，新的式子告訴我們當能量不斷地提高，重力就變得越來越強大，最終導致災難性的結論，是重力變得無限大了。到底要多高能量才能開始見識到這個發散效應？這個能量尺度是由牛頓常數G界定的，基本上在我們的世界裡只有在宇宙初期或是黑洞裡才會發生，所以大家不用擔心。但是作為一位理論學家，我們的天職就是把現有的理論推向極限，see how far the theory takes us。

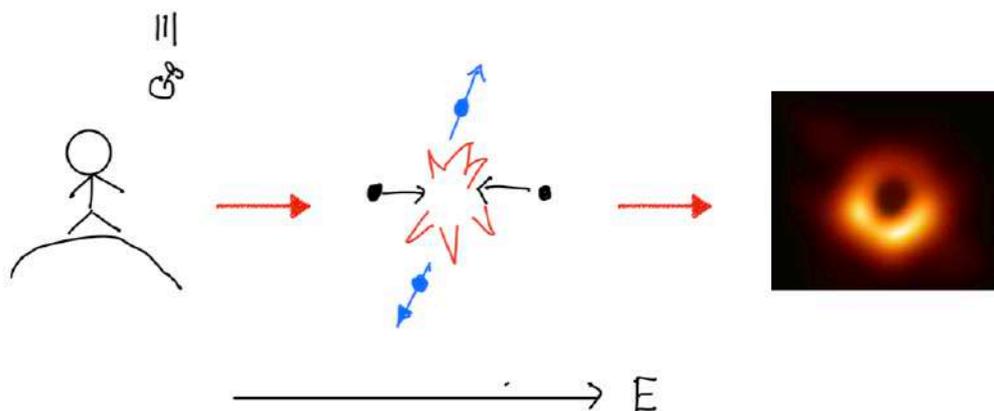
通常物理理論出現無限大的結論時，代表原有的理論不適用了，我們需要新的理論來銜接舊的論述。那麼，在這些極端能量下會發生什麼？根據測不準原理，高能量等價於短距離，也就表示進入了量子物理的範疇了。因此上述的發散意味著我們所需要的新理論，就是要描述量子重力。量子重力的真面貌是什麼，至今仍為高能物理裡的核心議題。某種程度上這有點諷刺。重力是人類最早認識到的作用力，千年前人們在觀星譜出星體態天穹上的路徑時，就發現了重力的定律。其他的作用力，如電磁力，弱衰變力，強核作用力，都是近百年才發現的作用力。後者早在量子物理發現後的幾十年間就找到了量子化的描述，而量子重力至今卻遲遲未有定論。「超弦理論」是一個熱門的建構量子重力理論的框架，但距離透過實驗驗證仍有很長的路要走。

不用擔心，我們今天的故事不需要知道量子重力到底是什麼。我們只需要知道這發散必定是由量子重力的效應來修正的。在量子物理中，一切的描述都是藉由概率表示。概率這個東西有一個所有人都知道的性質，那就是「永遠都不會是負的」。我們或許會容忍別人說「付出百分之兩百的心力」，但如果有人說「一件事發生的機率是負百分之百」，我們鐵定會懷疑他是AI。既然量子效應在這故事裡都是以機率的形式出現，代表其效應永遠為正（對專家而言這裡說的就是Optical Theorem）。至此我們來到了這故事的關鍵：既然重力是正比於能量的，它終究會在高能量時發散，而這發散又是要由量子效應來抵消。既然量子效應是正的，他所負責抵消的東西也就必然是正的！因此量子物理告訴了我們，前面式子等號的右邊只能是正的！

我們可以拿電磁力做為對照。電磁力也是另一個古老的力，跟重力一樣是長距力，也就是兩個物體之間的距離不論多遠都會有作用。再次回到國中的回憶裡，理化課本上的庫倫力給的是如下公式：

$$F = -\frac{Kq_1q_2}{r}$$

這裡 q_1 、 q_2 為兩物體的電荷，可同號可異號。注意到這式子的分子上並沒有質量，因此透過質能互換後並沒有因為高能量而發散的問題。或許你會問難道不能有大電荷這種東西嗎？如果有的話，不是在極大電荷時也有發散問題？但只要稍微細想，要有大電荷就必



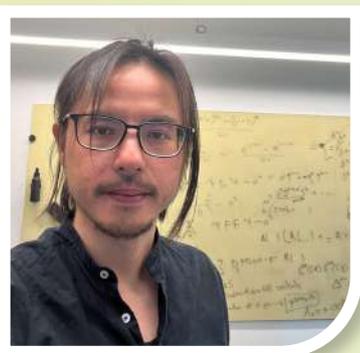
一顆蘋果在地球上墜落的重力效應，在高能量時轉換為粒子間藉由重力子交互作用所產生的散射所描述。在更高能量時會被深藏在黑洞裡的量子重力效應而修正。

須把同電荷的東西併在一起。但同性電荷會相斥，於是疊加電荷到一定程度，相斥力會大到無法再往上加。既然電磁力是沒有同樣的高能量發散問題，等號右邊的正負號就跟高能量出現的量子效應無關了。

回到了故事的起源，也就是我們在這世界落腳的那一刻。原來量子物理的機率本質默默地確保了這偉大的一腳是可以踏踏實實的著地。而這量子效應的真面目是什麼就是量子重力研究的課題了。某種程度上我們可以說，量子物理學告訴我們為什麼終將飄落，而量子重力則是在試圖回答「因誰而落」。（本期專題策畫／理學院副院長吳俊輝教授）

參考文獻：

- [1] N. Arkani-Hamed, T. C. Huang and Y. t. Huang, “Scattering amplitudes for all masses and spins” , *JHEP* 11, 070 (2021)
- [2] N. Arkani-Hamed, T. C. Huang and Y. t. Huang, “The EFT-Hedron” , *JHEP* 05, 259 (2021)
- [3] S. Caron-Huot, D. Mazac, L. Rastelli and D. Simmons-Duffin, “Sharp boundaries for the swampland” , *JHEP* 07, 110 (2021)



黃宇廷 小檔案

2009 畢業於紐約州立大學石溪分校，並先後在加州大學洛杉磯分校，密西根大學以及普林斯頓高等研究院擔任博士後。於 2014 年返回臺大物理系任教。曾獲吳大猷年輕學者，日本仁科亞洲紀念講，國際華人物理學會亞洲獎，以及國科會傑出研究獎。於 2023 年獲選為臺灣物理學會會士。致力於高能物理裡散射震幅方面之研究。