

黑洞 動搖物理之本

量子資訊認為黑洞蒸發會撼動物理學的基石

作者：基汀斯 Steven B. Giddings

譯者：戴守煌

作者簡介：基汀斯是加州大學聖塔芭芭拉分校物理學教，研究領域為黑洞資訊理論與弦論。他的休閒嗜好是挑戰地心引力的攀岩，他曾戲稱如果要寫自傳，標題一定會有「重力」兩個字。



黑洞 Cygnus X-1 的想像圖。(NASA/CXC/M.Weiss)

黑洞或許是宇宙中最深奧、最神秘的天體。我們有絕佳的證據支持它存在，甚至是宇宙中無所不在。但它們卻對物理學的基礎產生致命的威脅，特別是針對局域性（locality）以及時空的基本地位。這種顛覆性的結論源自於小孩也會問的問題（許多讀者小時候可能也問過）：如果把東西丟進黑洞裡，會發生什麼事？

我們手上最有力的重力理論（也就是廣義相對論及其修正理論）預測黑洞存在，也受到愈來愈多的證據支持。黑洞的效應在星系尺度上特別顯著。它們在許多星系中扮演中央引擎的角色，造就了許多壯觀的天文現象，例如活躍星系核（active galactic nuclei）、類星體、以及範圍遠達數十萬光年、含有高達百萬太陽質量物質的巨大噴流等 [延伸閱讀 1]。還有愈來愈多的證據揭露它們在星系形成上扮演的角色，天文物理學家認為大多數星系中心都有個黑洞。最明確的證據來自我們的銀河系，中心的天體重達四百萬太陽質量。針對周圍恆星軌道影像的研究結果顯示，該天體大小不超過預測中黑洞半徑的一千倍 [延伸閱讀 2]。未來即將進行的研究將會深入直探黑洞半徑的影像。除了「黑洞」以外，我們對這類天體並沒有其他合理的描述。

雖然觀測結果大力支持黑洞的存在，但是量子場論的理論架構對於這種奇特的天體並無法提出一致的解釋。若能了解它們，將會開拓出一條直指物理學根基的新途徑。

洞察量子重力的思想實驗

黑洞的基本概念相當簡單，連小學生都為之著迷：它是逃逸速度超過光速 c 的天體。這個概念源自一位（英國國教）教區主任牧師兼自然科學家米歇爾（John Michell）。他在 1783 年發現，一個密度與太陽相同的天體，如果直徑是太陽的五百倍，就會變成黑洞。他用的是非相對論性的牛頓重力理論，得到的卻是正確的相對論性黑洞半徑公式。他

的論點簡而言之如下所述：一個質量為 m 的質點在質量為 M 的球產生的重力場中運動，其總能量可表示為

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GmM}{r}$$

其中 v 是質點的速度， r 是質點所在的半徑位置， G 是牛頓重力常數。如果質點的總能量 $E = 0$ ，就剛好可以脫離重力場到達無窮遠處。假設它的初始速度為 c ，「質點剛好脫離重力場」這個條件，決定了球體的初始半徑 $R(M) = 2GM/c$ ，也就是現在所稱 M 質量的史瓦茲席德半徑（Schwarzschild radius）。地球質量的 R 大約是 1cm，太陽質量的 R 大約是 3km。

目前對於重力的古典解釋是透過廣義相對論與愛因斯坦方程式。在 1916 年，也就是愛因斯坦方程式公諸於世幾個禮拜後，史瓦茲席德（Karl Schwarzschild）發表了一組解，描述一個球對稱質量所產生的重力場。這個史瓦茲席德解就是最簡單的黑洞，基本特性如下頁圖 1 所示。

在愛因斯坦的理論裡，重力大小以時空曲率來表示。黑洞中心點的曲率為無限大。這個惡名昭彰的奇點（singularity）代表物理學在該處失效，是時空中一個無法仔細研究的點。在古典物理學中，沒有任何東西可以從位於 R 的事件視界（event horizon）以內逃脫出來，奇點對於黑洞外的世界並不會產生任何影響。然而追尋能夠弭平奇點的物理卻成為探索量子重力論的動機之一。許多人認為，正確的量子論述將可以解決這種奇點。

理論物理學家心知肚明，量子重力論帶來的挑戰遠遠不止於解決奇點。廣義相對論的動力學變數是時空度量（spacetime metric，或譯時空度規），將它量子化乍看之下並不困難。在量子力學當中，我們考慮的是動力學變數的波函數，這些「態」的演變是透過某種么正時間演化算子（unitary evolution operator）來進行。這類算子的形式通常是以 e 為底的指數函數，其冪為某漢米

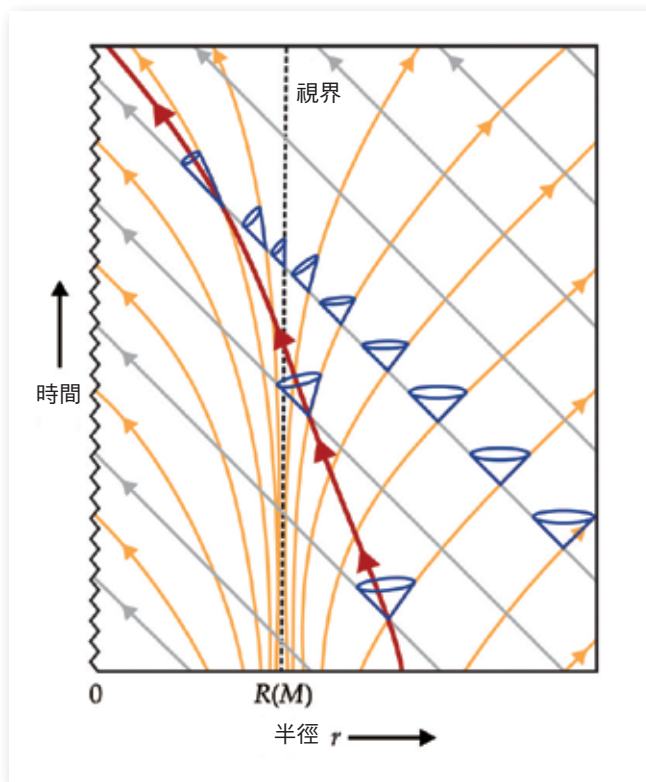


圖 1 史瓦茲席德黑洞解的時空幾何可用好幾種不同的方式來描述。在本圖中，入射光線永遠沿著朝向上方 45° 的入射座標線前進，射出光線則會在半徑 r 無窮遠處漸進於朝向上方的 45° 線。帶有質量的粒子因為速度較慢，前進方向必定位於由入射與射出光線構成的光錐（藍色部分）內，如紅色路徑所示。垂直虛線是史瓦茲席德半徑 $R(M)$ ，依質量大小而定，正好也是事件視界的位置。沒有任何光線可以從虛線以內逃逸到無窮遠處。事實上，任何由視界以內出發的路徑都會被吸引到中心點 $r = 0$ ，也就是時空曲率無窮大的奇點。

的量子行為，可幫助我們了解測量的侷限、量子力學的本質和測不準原理（uncertainty principle）。

這個重要的（應該也是關鍵的）量子重力思想實驗，是設想一對量子粒子在能量極高與撞擊參數（impact parameter）極小的條件下對撞，產生量子黑洞。這會發生什麼事呢？

黑洞的創生與蒸發

預測這個思想實驗結果的第一步是從古典物理出發。直覺告訴我們，如果兩顆極端相對論性粒子在小於其質心能量 E 之史瓦茲席德半徑 $R(E/c^2) = 2GE/c^4$ 的距離對撞，它們的能量密度就會高到足以形成黑洞。

這個直觀解答已經通過許多重要的檢驗。針對高能對撞粒子產生重力的解析研究揭露了黑洞的存在，細節如圖 2 所示。最近的高效能廣義相對論數值分析也確認，高能對撞的過程中會形成黑洞。

量子物理修正了古典的物理圖像。特別是粒子的量子彌散（quantum spreading）原則上會妨礙視界的形成。在 E 很大的情況下，彌散的尺度與粒子的德布羅意波長（de Broglie wavelength）相當，大約是 $\hbar c/E$ （其中 \hbar 是蒲朗克常數）。如果這個波長比預測的視界尺度 $R(E/c^2)$ 小，就可能在量子彌散的情況下形成黑洞。 E 如果大於蒲朗克能量 $E_p = \sqrt{\hbar c^5/G}$ ，就會滿足黑洞創生的條件。在能量遠大於 E_p 的情況下，這種量子非局域化相對來說就沒那麼重要，而且因為視界周圍的時空曲率很小，古典圖像便成為量子圖像的良好近似。有趣的是，這似乎徹底改變海森堡顯微鏡思想實驗的結

爾頓函數（Hamiltonian）乘上時間再除以虛數 i 。就重力而言，我們考慮的是度量的波函數，直接推導可得到惠勒－德維特方程式（Wheeler-DeWitt equation），類同於薛丁格方程式。

可惜魔鬼總是藏在細節裡。一旦我們試圖得到更精確的表示式，特別是透過微擾理論的話，量子振幅就會跑出無限多個無窮大。這種永無止境的無窮大反應了「不可重整化」的問題。

過去幾十年來，奇點與不可重整化一直是量子重力研究的重點。不過在我看來，還有一個更深刻的問題沒有獲得同等關注，解決它對於重力量子論述的建立更為關鍵。這個問題來自於一個思想實驗。

思想實驗在探討艱深的物理概念向來都有良好的成效。在狹義或廣義相對論的理解上，設想從移動的火車觀察光或從下落的電梯觀察光的行為，都成為極為重要的工具。此外，透過想像中的海森堡（Werner Heisenberg）顯微鏡發出的光波觀察粒子

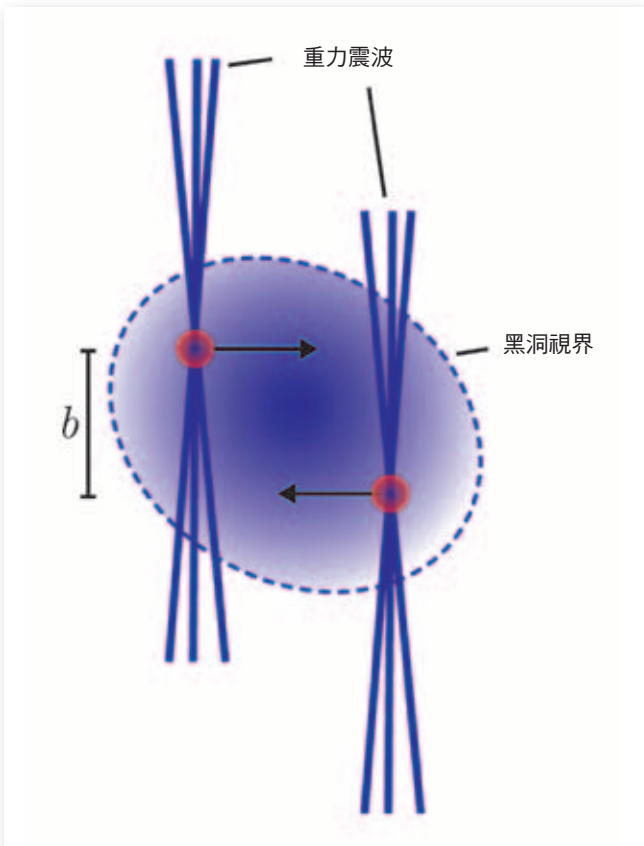


圖 2 在電場與磁場中，極端相對論性粒子的重力線被壓縮在橫向平面上，形成重力震波（gravitational shock wave）。重力震波以外的時空基本上是平坦的。廣義相對論指出，如果撞擊參數 b 遠小於對撞粒子質心能量的史瓦茲席德半徑，就會形成黑洞視界。因此，黑洞的創生就限制了高能對撞對於更小距離尺度的解析力。

論，也就是增加能量便能探索更小的尺度。重力顯然產生新的解析度限制，尺度為 $R(E/c^2)$ 。

量子物理還產生了一個古典理論所沒有的效應：黑洞蒸發。霍金（Stephen Hawking）分析大型黑洞的半古典幾何，發現粒子會透過類似量子穿隧（quantum tunneling）的過程輻射出去，造成黑洞逐漸變小，直到剩下跟蒲朗克質量 $M_p = E_p/c^2$ 差不多的質量為止。到了這個階段，由於巨大的曲率與量子擾動的緣故，霍金的計算不再適用。

問題是，以上思想實驗的結局是什麼？我們目前的物理學架構並無法提供合理解答。即便這只是個思想實驗，這種缺憾依然十分惱人。更糟的是，理論學家已經想出 TeV 尺度的重力理論，能在 LHC

BOX

密度矩陣與遺失的資訊

雙態系統（two-state system）可以清楚說明純態（pure state）、混合態（mixed state）與其密度矩陣（density matrix）及熵（entropy）等概念，例如由「上」與「下」兩種態組成的自旋態系統。首先，

1 $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$

是一個純態的例子。對應的密度矩陣為

2 $\rho_1 = |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\uparrow\rangle\langle\downarrow| + |\downarrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$.

相反地，另外一種密度矩陣

3 $\rho_2 = |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$.

則是來自混合態，意謂它無法用任何 $|\psi\rangle$ 態表示出 $|\psi\rangle\langle\psi|$ 。馮諾曼熵（von Neumann entropy）可反映出態的「純」度，定義為 $S = -\text{Tr}(\rho \ln \rho)$ （Tr 意指矩陣的跡，trace）。 $\rho_1 = |\psi\rangle\langle\psi|$ 意謂 $S(\rho_1) = 0$ ，而 $S(\rho_2) = \log 2$ 也不難算出。因此，從密度矩陣 ρ_1 演變為 ρ_2 違反了么正性（unitarity），導致量子資訊遺失。

如果藉由取跡而移除一個純態中的部分自由度，通常會產生混合態。舉例來說，帶有相關聯自旋的雙自旋系統可作為描述黑洞內部與外部自由度的簡化模型。如果將該系統中的某個純態表示為

4 $|\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B)$.

那麼在 $\rho' = |\psi'\rangle\langle\psi'|$ 中，如果先取系統 B 的跡，便可得到

5 $\rho_A = \sum_{i=\uparrow,\downarrow} {}_B\langle i|\rho'|i\rangle_B$,

這是一個類似方程式 (3) 的混合態密度矩陣。

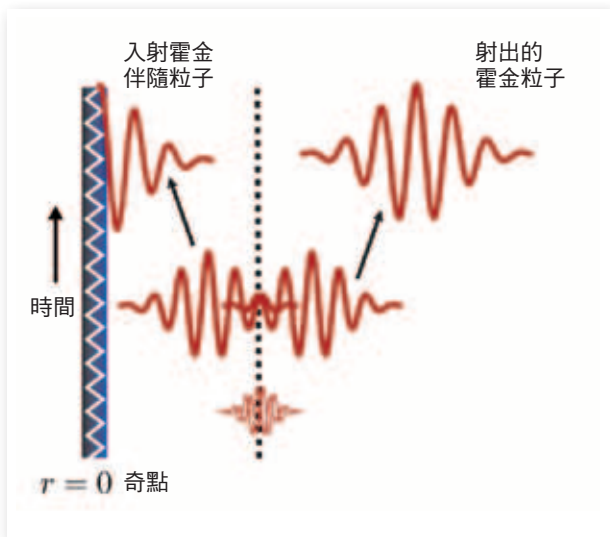


圖 3 霍金發現，在黑洞的幾何中，視界（由垂直虛線代表）附近的真空擾動被拉扯開來，形成逃離黑洞的射出粒子，以及掉入 $r = 0$ 奇點的伴隨激發態。由於黑洞外和黑洞內的激發態具有量子相關連性，因此黑洞外的態所遺失的量子資訊就會等同於黑洞內的態。

之類的高能粒子對撞機裡造出黑洞 [延伸閱讀 3]。如果這個世界真的像這個理論描述的這樣，關於結局的問題將成為真正的實驗問題。

量子資訊的命運

么正演化是量子力學的關鍵性質。它與可逆性息息相關：么正演化使一個初態演變為某個明確的終態，在過程中範數（norm）保持不變，機率也是。因此這個程序可以逆轉，重建出原本的初態。這種基本性質使量子力學中的量子資訊守衡。

為了說明黑洞蒸發抵觸么正性，我們需要更仔細了解前者。霍金輻射可視為一種熱輻射，其溫度與黑洞半徑成反比。所謂的熱態（thermal state），就是一種失去許多微觀資訊的態，熵描述的就是這種性質。貝肯斯坦（Jacob Bekenstein）認為黑洞的熵 S_{BH} 與其視界的面積 A 成正比： $S_{BH} = Ak_B c^3 / 4G\hbar$ ，其中 k_B 是波茲曼常數 [1]。

如果了解霍金的計算中資訊遺失的成因，首先要注意落入古典黑洞中的觀測者，在通過視界時並不會看到任何不尋常的事發生。因此我們預期視界

附近的態看起來跟真空沒什麼兩樣。然而量子效應會使真空產生擾動，而黑洞的強大重力場會把這種擾動拉扯開來，一半成為射出的霍金粒子（形成霍金輻射），另一半則成為入射粒子（也就是霍金伴隨粒子），掉入黑洞中心，如圖 3 所示。外界觀察者只看到霍金輻射。如果要建構霍金輻射的量子敘述，就必須將黑洞內部的自由度加總去除，建構出所需的量子密度矩陣。但是霍金粒子與消失的伴隨粒子具有相關聯性（correlated），因此密度矩陣所描述的乃是混合態而不是純態。混合態的馮諾曼熵代表有多少「遺失的資訊」被黑洞內部的伴隨粒子帶走。第 19 頁的 BOX 提供一個簡單的例子，說明上述概念。

黑洞之所以包藏遺失的資訊，是量子場論的局域性造成的。前面已經藉由霍金伴隨粒子解釋過遺失的資訊，不過實驗者也可以將《數理人文》的文章或其他富含資訊的物體丟入黑洞中。資訊一旦進入視界以內就無法脫離黑洞，除非跑得比光速還快。在量子場論中，局域性習慣被表述成，資訊傳播的速度無法超過光速。

霍金一開始倡議的是，一旦黑洞到達蒲朗克質量，在最後的爆發之後會帶著所有遺失的資訊消失不見 [2]。由於黑洞可以從純量子態形成，蒸發後卻變成混合態，產生帶著許多熵的輻射，這種演化並不符合量子力學的特性，而是屬於某種更廣義的形式，不遵守么正性。

當粒子以極高能對撞 [3]，像上文的關鍵思想實驗中的狀況時，兩個粒子組成的純態在散射之後變成一個多粒子的態，也就是霍金想法中的非純態。從純態開始的演化可用一個散射矩陣來表示（稱做 S -矩陣）。霍金的構想 [2] 將這個矩陣推廣成一種非么正線性映射，變成密度矩陣之間的對應。最重要的是，這種推廣的映射造成資訊遺失。

這種非么正演化產生的問題，套用葛爾曼（Murry Gell-Mann）引自英國作家懷特（Terence H.

White) 的格言就是「量子物理中任何沒被禁止的事就一定會發生。」如果黑洞能銷毀量子資訊，而且黑洞會出現在虛過程 (virtual process，例如費曼圖中的環圈) 中的話，么正性的破壞必然會擴及所有層面的物理。班克斯 (Thomas Banks)、佩斯金 (Michael Peskin) 與薩斯金 (Leonard Susskind) 率先指出 [4]，這將導致整個世界進行非么正性、能量不守衡的演化程序，溫度高達 E_p/k_B 數量級。雖然有少數人不認同 [5]，不過這個結論目前被大部分物理學家接受。

為了挽救量子力學，我們或許可以考慮另外一種可能，也就是黑洞並未完全蒸發，最後留下一個儲存所有遺失資訊的殘骸 (remnant)。這些殘骸類似粒子，帶有蒲朗克質量，能夠持久存在。但若要儲存任意大小初始黑洞的資訊，這些殘骸就得有無窮多內在態，以便描述各種可能的霍金伴隨粒子或掉入黑洞各種物體的組態。

黑洞殘骸應該也要遵守量子力學，尤其是如果將霍金粒子與伴隨粒子的創生現象加以推廣，似乎沒有任何理由能阻止黑洞殘骸的成對創生。但是基本量子法則告訴我們，如果某種物質成對創生的機率與其內在態簡併度 (degeneracy) 無關，那麼總產生率就會與簡併度成正比。這種假想中的黑洞殘骸，其簡併度是無界的 (unbounded)，意謂只要某個物理程序的能量足以產生一對殘骸，就會產生無窮多對殘骸，無論每個內在態產生殘骸對的振幅有多大。這個世界將會炸成一堆黑洞殘骸。

總而言之，量子資訊因為局域性而無法逃逸；除非違反量子力學與能量守恆，否則無法銷毀；除非犧牲穩定性，否則無法保留在殘骸裡。這就是黑洞資訊悖論的基本要素。

霍金錯在哪裡？

霍金用的是半古典的做法，因此值得我們去探究，他對黑洞的失落資訊的計算是否夠精確，足以

產生真實悖論。舉例來說，我們可以試著計算黑洞的量子態，對黑洞內的自由度求跡，算出黑洞外的密度矩陣以及對應的馮諾曼熵，得知黑洞遺失的資訊。在計算古典幾何的量子擾動時，霍金對這些態取了近似。我們可以運用相對論裡選擇所需時間切面 (也就是定義等時面) 的自由，來改進霍金的工作，特別是選擇張成 (span) 黑洞內部與外部的空間切面，避開奇點。這種「性質優良」的切面可以明確建立出來。然後我們就可以試著計算這些切面上的量子態，並且對牛頓常數 G 進行系統化的展開。

這個方法會碰到障礙。短時間間隔裡的量子態的形式可以算出來，但確切算出霍金輻射在長時間內的量子態與熵卻是一大挑戰。特別是這些性質優良的切面到最後會變成極限，不見得是有效的動力學描述。這種狀況還有關於微擾展開碰到的困難，在達到 $R(M)S_{BH}(M)/(k_Bc) \propto (M/M_p)^2 R(M)/c$ 的數量級的蒸發時間之前就會變得問題重重。有趣的是，量子資訊理論出發的論點認為，在這個時間尺度上，資訊必須開始從黑洞中逃出 [6]。此外，針對另一個類似系統，也就是膨脹宇宙的量子態微擾計算，也顯示類似的問題會發生在相近的時間尺度上。

由此看來，各種證據顯示，「霍金錯在哪裡？」的答案在於缺乏相關時間尺度上對於遺失資訊的確切微擾計算能力，因此顯示霍金的故事並沒有導致真實悖論 [7]。如今許多物理學家 (包括霍金本人) 預期，在黑洞逐漸縮小的過程中，遺失的資訊的確會從黑洞中逃逸出來。至於資訊洩漏的物理是什麼，目前仍不清楚。

事實上，資訊問題反映了基礎物理原理在根本上的矛盾。這些原理包括量子力學 (特別是么正演

① 譯註：貝肯斯坦已於 2015 年 8 月 16 日過世。

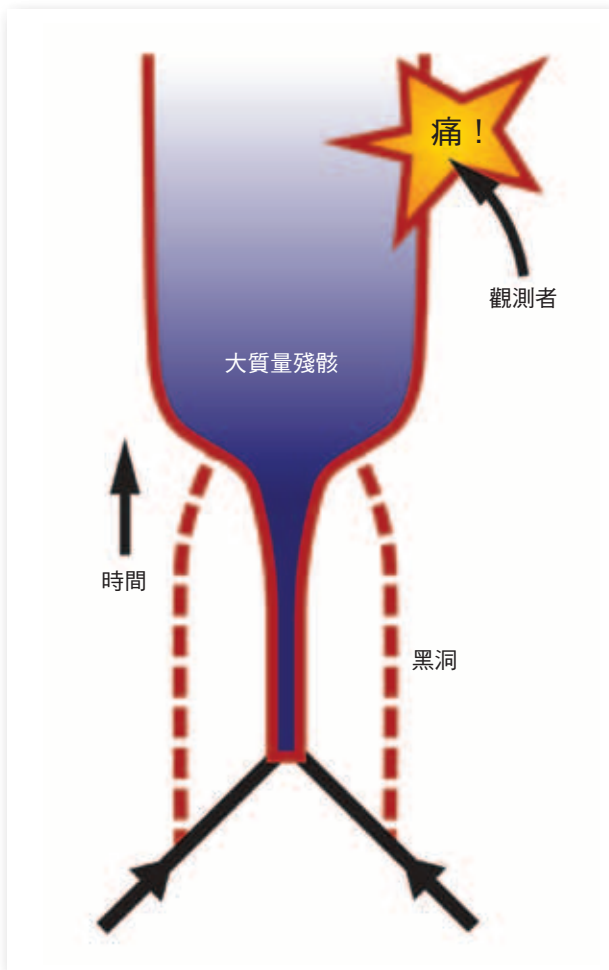


圖 4 大質量殘骸方案是非局域性的。在這些模型裡，黑洞躍遷為大質量天體，表面位於原本視界的位置（圖中虛線）以外。本圖中的黑洞由一對粒子對撞產生（如黑線所示）。為了能夠抵達視界，表面膨脹的速度必須比光速還快，這就違反了量子場論的局域性。墜落的觀測者高速遭遇殘骸表面時（類似掉進中子星）將會撞得四分五裂，除非有奇蹟出現。這種方案的變化形式包括絨毛球（fuzzball）模型與火牆（firewall）模型。

化）、勞侖茲不變性及其推廣、局部座標獨立性，以及局域性。這些原理意謂大自然受到量子場論描述，將量子場論延伸應用到廣義相對論與彎曲時空時，局部座標獨立性也得以推廣。

物理原理之間的矛盾意謂，其中的一個或數個原理必須加以修正。其中局域性在重力的量子敘述中看起來最不牢靠。嘗試修正其他原理常會因為不滿足一致性而胎死腹中，而且與實驗結果相矛盾。雖然量子場論的局域性與因果律和一致性息息相關，

但重力當中的局域性卻很難精確闡述。不論哪種原理需要修正，如果資訊真的可以從黑洞中逃脫，其中的物理定律將是以全新而未知的方式運作。

來自弦論的解答？

解決資訊問題的其中一個方法，是從已知的理論架構中尋找可用的修正。其中最具潛力的候選人是弦論（string theory），這個理論在處理不可重整化性方面已獲得成功，在解決奇點上也有不錯的進展。弦論透過兩種方式修正局域性。第一種是因為弦是一種「延伸物體」，不是點狀物。第二種是透過全像原理（holography）[8]。

許多物理學家認為，弦的「延伸性」有助於資訊的逃逸，例如由於高能對撞可能激發出延伸的弦[9]。但是進一步研究發現，在黑洞形成時，弦的表現看起來就像粒子一樣，因此單靠延伸性並無法解決問題。

全像原理的想法是，每一個位於時空體（bulk）中的重力理論，都有一個侷限在其邊界上的等價量子場論描述 [延伸閱讀 4]。原則上，么正的邊界理論應該會對應到體內部的么正黑洞形成與蒸發過程。不過這裡的魔鬼一樣藏在細節裡。我們需要一本夠詳細的字典來告訴我們體內部與邊界上理論的關聯性，以便找出小於體的曲率半徑尺度下的 S -矩陣。理論物理學家尚未找到一本如此詳細的字典，因此在推導體重力理論的微粒化描述（fine-grained description）時也碰到障礙。

全像原理經常與互補性（complementarity）[8] 相提並論，後者認為黑洞內外的可觀察量（observable）是互補的，有點類似波耳（Niels Bohr）的互補性可觀察量，例如量子力學中的位置與動量。這導致在一般物理敘述中，黑洞內部與外部可觀察量無法同時加以討論。如果互補性是對的，將是對局域性量子場論的重大修正。

局域性的修正

1992年，在全像與互補性原理出現之前，我已經提出一種解決黑洞資訊問題的方法，以某種嶄新的、非局域性的物理將資訊從黑洞內部傳送到視界外。我考慮的方案牽涉到所謂的「大質量殘骸」（massive remnant），也就是初始黑洞躍遷為一種新天體，具有攜帶資訊的態以及位於原本視界之外的表面。圖4說明此一概念。大質量殘骸能夠與外界交互作用，或者產生衰變，遺失的資訊可透過其中任一種方式取回。這個方案並不遵守局域性，至少就蒸發黑洞的半古典時空幾何來說是這樣，因為天體表面必須從黑洞中心附近膨脹到視界之外，速度因此超過光速。

過去二十幾年來，理論物理學家從基本的大質量殘骸方案中變化出許多不同的具體實現方式。其中之一叫做絨毛球（fuzzball），用弦論激發態描述大質量殘骸（取代黑洞）的態。最近提出的火牆（firewall）[11]則描述一種簡併極限，其中殘骸的表面正好位於視界上。

大質量殘骸與傳統黑洞有很大的不同。觀測者如果掉進黑洞裡，通過視界的時候並不會觀察到任何戲劇性的事發生；然而一個落入殘骸的觀測者將會在抵達表面時經歷痛苦的撞擊，類似撞向中子星表面。除此之外，一般預期大質量殘骸表面會反射能量。有些物理學家臆測，絨毛球（fuzzball）因為互補性的緣故，表面不會產生痛苦的交互作用與反射[10]。不過這種想法並未被廣泛接受。

為了容許么正演化與資訊從黑洞中逃逸（至少就大略的半古典幾何而言），物理顯然需要某種非局域性。我們可以探討傳統物理論述至少必須進行哪些修正。么正性的維持是否非得用到大質量殘骸，例如絨毛球或火牆，或者還有較溫和的非局域性的資訊傳播方式？

有種想法是，黑洞不斷透過某些微弱的效應慢慢

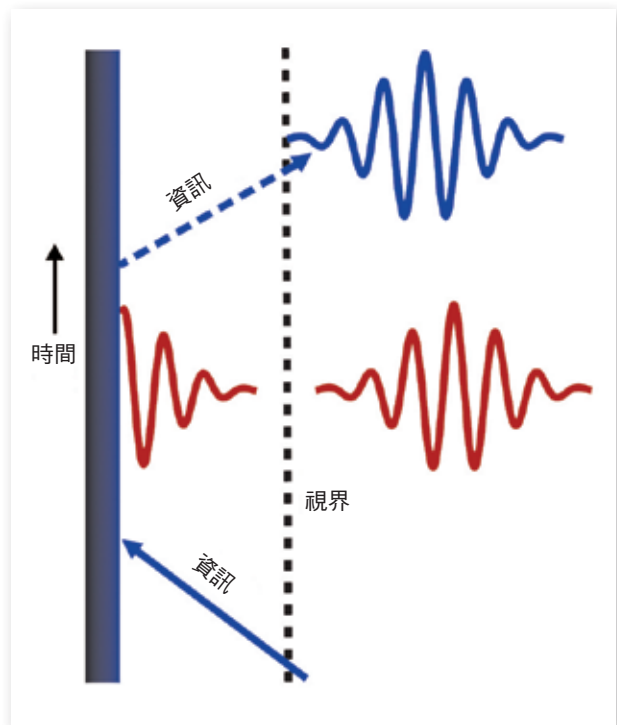


圖5 某種可使資訊從黑洞中慢慢洩露出來的構想，假定傳統量子場論的局域性受到修正[12]。物質或霍金激發態的資訊在黑洞內部僅停留有限的時間，然後在黑洞周遭突現為量子（藍色波形），並且逃逸到無窮遠處，改變霍金輻射的形態（紅色波形）。如果對應的粒子帶有足夠長的波長，並不見得會傷害落入黑洞的觀測者。

地外洩資訊，這些效應對於落入黑洞的觀測者只會產生極小的衝擊。我在一系列的研究論文中試圖描述這種演化。這些論文將次系統間的量子資訊傳輸參數化，而這些次系統對應到黑洞及其周遭的環境。我也發展出一些特定模型[12]，拓展參考資料[6]與[13]的應用範疇。其中一項重要成果是，每單位時間 $R(M)/c$ 內僅需釋出一個帶有 $R(M)$ 等級波長的量子，便可達成我們所需的資訊傳輸。而將資訊移轉到這些量子、乃至它們後續逃脫黑洞的過程（如圖5所示），都不需要對遭遇它們的觀測者施以激烈的效應。

局域性的修正是激進的，等於拋棄了量子場論其中一根支柱。但是對於解決重力難題而言，這已經是最不激進的方式。非局域式演化一直被反覆研究，但通常一下就放棄，因為它所帶來的量子場論

修正會導致非因果性與悖論。任何局域量子場論的合理非局域修正，都必須與嚴密約束下的理論架構吻合，特別是符合日常條件下（與黑洞無關）的量子場論預測。對量子場論進行適切修正遭遇的各種困難，讓我們開始質疑經由時空的基本描述方式。另外一種可能的方法，是把希爾伯特空間（Hilbert space）當作一種更基本的存在，而時空與局域性都是從類網路結構的希爾伯特空間突現（emerge）出來的近似 [12,14]。

我認為，對於一致性與么正性的黑洞（及宇宙學）量子敘述的需求，應該當成追求新物理原理的重要指引。例如，動力學必須能提供 S - 矩陣的重力版本，並且滿足物理上與數學上的重要約束 [3]。

目前的么正性危機有點像古典原子的穩定性危機。那個年代的古典物理，在電子到達電荷中心之前都能為演進過程提供一致的描述，雖然與實驗結果並不吻合。然而，要正確描述原子，就需要引入嶄新的量子力學原理，以便描述玻耳半徑以內的物理。這些新原理從解開原子物理之謎的努力中發展出來，因此而犧牲古典力學也在所不惜。這種情況或許會再度發生，正確物理的可靠架構將為我們提供不可或缺的指引。∞

本文出處

Physics Today 66 (2013) 4, p.30. <http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/66/4/10.1063/PT.3.1946>

譯者簡介

戴守煌畢業於台大物理系，英國德倫大學（Durham University）基本粒子理論博士，現為南臺科技大學助理教授。

延伸閱讀

► Jon Miller and Chris Reynolds “Black holes and their environments”, *Physics Today* 60 (2007) 8, p.42. 介紹黑洞如何影響星系形成以及星系的規模。

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/60/8/10.1063/1.2774097>

► Bertram Schwarzschild, “Infrared adaptive optics reveals stars orbiting within light-hours of the Milky Way’s center”, *Physics Today* 56 (2003) 2, p.19. 介紹銀河系中心周圍恆星的運動軌道研究。

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/56/2/10.1063/1.1564335>

► [3] Nima Arkani-Hamed, Savvas Dimopoulos and Georgi Dvali “Large extra dimensions: A new arena for particle physics”, *Physics Today* 55 (2002) 2, p.35. 介紹在加速器中產生黑洞。

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/55/2/10.1063/1.1461326>

► [4] Igor R. Klebanov and Juan M. Maldacena “Solving quantum field theories via curved spacetimes”, *Physics Today* 62 (2009) 1, p.28. 介紹全像原理。

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/62/1/10.1063/1.3074260>