

黑洞氣象指南

✧ 物理一 吳智弘

“黑洞是上帝除以零的地方！”



他是誰？

史蒂芬·霍金(Stephen Hawking, 1942-)，出生在伽利略逝世及牛頓誕生那年的 300 周年；曾任劍橋大學盧卡斯講座(Lucasian Chair of Mathematics)教授，他很自豪以前牛頓也當過；最近卸下職務並且寫了一本自傳。

他怎麼了？

他得了肌肉萎縮性側索硬化症，全身癱瘓，不能發音，只能藉由高科技輔助，打字及靠臉部肌肉溝通。他喜歡與人打賭，不但逢賭必輸且樂此不疲。(當然都是物理學的賭注啦！我們下面就要介紹其中一個)之前他因黑洞上新聞版面，最近又因預測世界盃奪冠方程式上新聞！

他說了什麼？

“黑洞不存在！”

為什麼呢？且聽我娓娓道來。

一個不整理房間的理由

在進入正題之前，得先介紹一些 trivial 但核心的想法，那就是熱力學第二定律的概念——熵(entropy)。熵是一種混亂程度的定量指標，而熱力學第二定律想告訴你的就是這個宇宙的混亂程度只會一直增加！

試想你的房間現在髒亂得不堪入目，它現在混亂程度肯定很高，你辛辛苦苦花了大把力氣整理，讓它變得整潔有秩序，你肯定以為房間的“熵”下降了，實則不然：在你花這些體力的同時，你的熵也增加了，而且增加的幅度必定大於等於你使房間熵減少的幅度！唉...真是可憐阿，白忙了一場，所以以後這便可以作為你不整理房間的藉口啦。

更令人感到恐怖的是，熱力學第二定律說明了這個宇宙只會不斷混亂下去，永無止盡，直到“熱寂”為止.....我們還是回歸正題吧！

前所未見的聯繫

以下的內容假設讀者已經對黑洞有一些基本認知。雖說基本，其實你只要知道，事件視界(event horizon)是一個連光都無法逃出的時空，因為奇異點的無限性質導致廣義相對論和其他物理定律都在那邊失效了。黑洞是一個由廣義相對論預測的奇異點，外面包裹著事件視界——不然就是“裸”奇異點啦。

時間在 1970 年，霍金在女兒出生幾天後有次他睡前的靈光一閃——不要懷疑，有些人是我們無法企及的天才。霍金稱這是他對黑洞研究的一次“大澈大悟”：他發現了一個公式 $S = Ac^3/4\hbar G$ 。(S是熵，A是視界面積，c是光速，G是牛頓重力常數， \hbar 是化約的普朗克常數)

貝肯斯坦(Bekenstein)跟霍金發現當兩個黑洞碰撞合併時，最後黑洞的表面積(事件視界的面積)會大於先前兩個黑洞的表面積相加。這種性質跟熵非常類似，顯示視界的面積似乎可以當作是黑洞的熵。

這暗示了重力與熱力學之間有著前所未見的深奧連繫！於是黑洞不管是站著看坐著看趴著看還是躺著看都像是有熵，有熵就表示有溫度，有溫度就會有輻射.....等等，黑洞不是一個連光都無法逃逸的東西嗎？嘿嘿，其實不然，但我們還得先介紹另一個概念。

天下“有”白吃的午餐

除了為人熟知的共軛變數間的不確定性原理(uncertainty principle)，還有一個時間與能量的不確定性原理告訴我們： $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ 。 ΔE 代表了能量的不準度， Δt 則代表了時間的不準度。(當然這兩個量有明確的意思，不過等到你修量子力學再去追究吧！)

這個量子力學中最美妙且最詭異的公式，深刻地指出了真空的性質。怎麼說呢？請看著上面的，想著你如果不斷的把 Δt 調小， ΔE 便相應的增大，如此我們便能預測在真空中會不斷的有能量冒出來，形成一對對正反粒子的纏結對；當正反粒子相遇又會互相湮滅形成光子。這件事我們稱之為量子起伏(quantum fluctuation)。這表明了真空一點都不空，它其實非常狂亂！但這豈不是違反能量守恆？沒有關係，你只要在有限的時間內歸還即可，天下是“有”白吃的午餐

哟！

黑洞一點都不“黑”

霍金將上述的想法套用到黑洞上，發現了一件大概可說是其學術生涯的最高成就——霍金輻射，說明了他先前對於黑洞有熵的想法是正確的：黑洞也確實一點都不黑，它會放出令反核人士聞而色變的輻射呢！

這個機制大致是這樣的。黑洞在事件視界附近會不斷因為量子起伏產生正反粒子的纏結對。當帶著負能量的反粒子被黑洞的重力場吞噬的同時，正粒子逃脫出來，也就從“虛擬”變成“真實”的了。因為反粒子的負能量同時使得黑洞質量減少，結果就好像黑洞放出輻射一般！但不是說連光都逃不出去嗎？其實，輻射是在事件視界外面“一點點”產生的！而這個事實也正是我們接下來要談的“資訊喪失悖論”的原因。

如果有輻射就表示黑洞會隨著時間蒸發！且質量越大速度就越慢，聽起來很唬人對不對？但現在多數理論物理學家相信這是對的。儘管霍金輻射的結果還沒為霍金贏得諾貝爾物理學獎，但霍金豁達的認為自己已經得到比諾貝爾獎更珍貴的“基礎物理獎”，這是頒給儘管尚未獲得實驗證明，但對理論有重大貢獻的人的獎項，其金額超過諾貝爾獎金。好了，我們即將進入一個波瀾壯闊的戰場，繫好安全帶吧！

閣樓上惹出的麻煩

1981年，霍金已經專注黑洞研究十五年之久，幾乎沒有人認為霍金輻射是有問題的概念。但某天在舊金山的一處閣樓上，他宣佈了一件事，使他的物理學同事們大感不安！不過他漸漸明白，黑洞的方程式固然簡潔而優美，但在其樞紐卻潛藏著一個悖論，必將侵蝕物理學的根基！

這個悖論威脅到量子力學的根本原則——資訊守恆定律(the law of information conservation)。也就是說，我們不再保證，資訊永遠不會從宇宙流失！

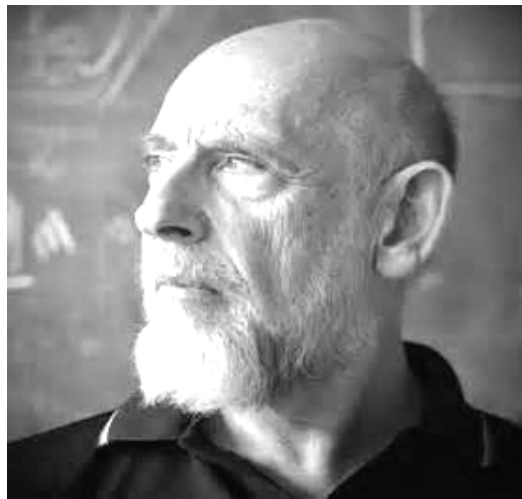
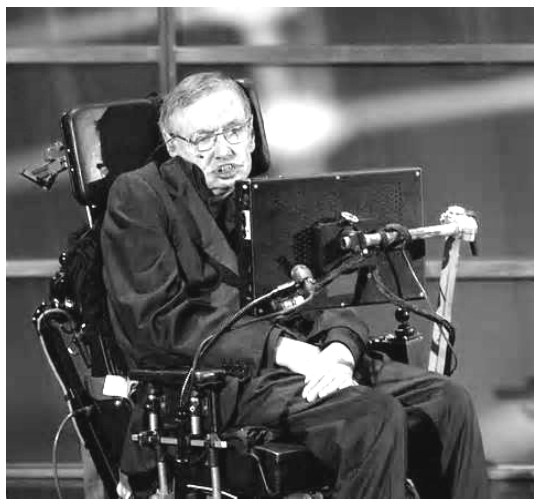
但是“資訊”指的是什麼呢？可以想像一個貝肯斯坦提出的思考實驗。沒有什麼東西墜入黑洞時，能比光子所帶的資訊更少，但光子本身仍會把落入黑洞的地點資訊帶進去。要是我們放進一個資訊量僅僅一個位元的光子，那麼根據測不準原理，它的不確定性達到最高，也就是說墜入點的機率好像散開在整個事件視界了，其波長必定極長(能量極小)。但這顆光子實際在黑洞內部，增加黑洞質量，同時擴增事件視界的面積。黑洞帶有資訊，就是這個意思。

霍金所言對在場的物理學家而言並無特別之處。因為固然外界無法取得資訊，但像這種守密不宣的資訊並未違反資訊守恆，資訊仍然留存在黑洞中，所以整個宇宙的資訊仍是守恆的：縱使黑洞將所有有序的資訊全都打亂，但我們也可以將其重新編碼組裝成原來的樣子，就好比滴一滴紅墨水到水缸中，等紅墨水擴散完畢後，我們似乎沒辦法讓它重回原樣。但是如果你有錄影的話，你只需將它倒著放即可，你會看到紅墨水恢復成一滴。而這中間並未違反物理學定律，資訊怎麼會流失呢？

其實很簡單，答案就藏在霍金輻射中：因為霍金輻射是在事件視界外面一點點產生的，所以不會攜出黑洞本身的資訊；可是黑洞的質量卻減少了，這豈不是意味著有資訊從這個宇宙中流

失了呢？

黑洞戰爭



上面這兩張聳動的照片，對戰雙方分別是：

劍橋大學史蒂芬·霍金 v.s. 史丹佛大學萊納·薩斯金 (Leonard Susskind)

目前這場戰爭一波未平一波又起，傷亡人數不明！

薩斯金當時人就在那座閣樓上。他事後回顧心中的震撼，“倘若資訊果真喪失在黑洞中一去不返，資訊的喪失肯定不只發生在那裡——宇宙一定有某些片段遺失了。那麼我們自以為是的科學認識，沒有一種可以相信。我們可以把可預測性忘掉，忘了因果相依關係。”而霍金也察覺，現場大概只有薩斯金能夠完全瞭解他這項宣布的意涵。他回顧道，“萊納·薩斯金心煩意亂。”

他們為什麼這麼說呢？

跟我有什麼關係？

因為資訊喪失悖論將導致量子決定論的崩潰！

古典決定論的概念從牛頓時代就有了。我們知道，一個系統的行為原則上可以完全被牛頓定律描述。法國科學家拉普拉斯(Laplace, 1749-1827)曾經提出一個有趣的概念——“拉普拉斯的惡魔”：試想如果有一個強大的智能生物，能夠知道宇宙中每個原子確切的位置和動量，也可以數值地解出聯立的二階方程式，便能推算宇宙事件的整個過程，包含過去與未來。這便是古典決定論的觀點。

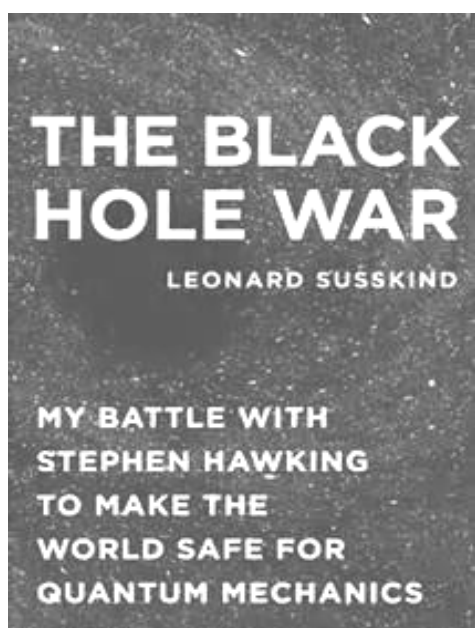
但是大家知道，在近代物理以後，這樣的古典決定論已經被宣告不可能了：所謂明確的位置和動量的概念已經被拋棄了。取而代之的是量子決定論：因為所有的量子事件都可以用機率來表示，所以在原則上一個極為強大的智能仍然能夠推算過去與未來每件事情發生的機率。

但是如果資訊從宇宙中遺失了，從此你再也不能夠以此做任何推測，量子決定論將會崩潰！這可跟你大有關係了，牽涉到你是否還能繼續留存在這個宇宙中而不會隨時消失！

另闢戰場

與此同時，霍金也開啟了另一場賭盤，他與索恩支持資訊會從黑洞遺失，但是 Preskill 不相信。於是他們簽下一張賭據，輸的人要賠償贏者一本百科全書，以補償遺失的資訊。不過霍金可是“逢賭必輸”，最後的結果想當然耳是霍金在 2004 年認輸了。但是索恩仍舊負隅頑抗，最後霍金賠給 Preskill 一本棒球百科全書，Preskill 將它高舉過頭，彷彿是贏得溫布頓網球比賽男子冠軍一樣。

不過霍金是怎麼輸的呢？



薩斯金回顧那場閣樓之會：“史蒂芬臉上有種史蒂芬式的神情，以一抹淡淡微笑表示：‘你就算不相信它，我還是對的，這點可別搞錯。’我們絕對肯定史蒂芬錯了，卻看不出是為什麼。”

而在接下來的幾年，薩斯金始終無法放手不管資訊悖論的問題：“從某個角度而言，我腦中所想的一切，幾乎都可以牽扯上墜入黑洞的資訊最後的命運為何，全都為了因應那個深邃、精闢的問題而發。……逼得我們必須重新思考物理學的底層基礎。”由此薩斯金為了擊敗霍金而發展出了一套理論，他也對於這個理論改變了物理學的現狀感到非常滿意。這套理論最早的版本是由另一位諾貝爾獎得主特霍夫特發展出來的，由薩斯金重新命名為“全像原理”(holographic principle)。

只是個投影？

我們來作個思考實驗，：假設有個人叫包柏，另一個人叫艾莉絲，他們小倆口吵了架，包柏一把將艾莉絲推入黑洞(真殘忍)，因為相對論的效應，艾莉絲會感覺自己很快的墜入黑洞之中。在此之前她已經因為頭腳間的重力差被拉成麵條了，所以她不會有四分五裂的痛苦，所以請不用擔心。包柏在外面幸災樂禍的看著，他將會看到艾莉絲憤恨與哭泣的眼神瞪著他，然後越來越慢，因為光需要更長的時間才能抵達包柏的眼睛。直到通過事件視界之後光逃不出來了，包柏似乎看到艾莉絲那幽怨的眼神永遠凝結在黑洞表面一般，而驚嚇的雙腿軟下，但他應該不需要擔心鬼魂索命，因為沒有東西可以逃出黑洞！

包柏認為艾莉絲凝住了，艾莉絲卻認為自己不斷墜落，這兩個觀點是相當不同的。薩斯金決定深入探究為何兩種觀點可以同時成立。關鍵是，因為艾莉絲越過了事件視界，不可能再回來跟我交換意見，就算包柏緊追艾莉絲一起跳下，艾莉絲依然大幅領先朝向奇異點，包柏永遠都追不上。他們兩個都不可能知道彼此故事版本間是矛盾的。

於是薩斯金等人提出了黑洞互補原理(black hole complementarity)，來說明這種觀察者雙方都永遠看不出哪裡出問題的現象，這得名自二十世紀早期量子力學革命的哥本哈根學派領導者波耳的互補原理(complementarity principle)，亦即波粒二象性(wave-particle duality)。就好像光可以同時是粒子又是波，兩種描繪不相容且彼此矛盾，但卻都是必要的。所以到底是內部還是外部的觀察者是對的呢？答案是：兩者都是對的！

為什麼？根據全像原理，黑洞的資訊不是儲存在內部，而是在其邊界的事件視界上。如同全像圖一般，一幅三維的影像事實上儲存在一個二維表面上，資訊並沒有因為進入黑洞而被毀，艾莉絲的訊息一直都攤放在表面上，就在那裡，並沒有喪失。所以位於在事件視界上的霍金輻射也可以帶走資訊了！

弦(閒)論登場

但這一切要怎麼發生呢？弦論給了一個解釋。我知道有許多物理學家對於弦論抱持不置可否的看法，不過現在黑洞資訊悖論確實圍繞在弦論的議題上，我們只需要稍為提要即可：這個理論認為所有的基本粒子(夸克與電子)都是由一條條的“弦”所構成！而這些弦的不同震盪模式化身成不同種類的粒子。夠簡單吧？但是這樣的理論卻要求我們的宇宙是具有 11 個維度的。(以上只不過是概略的描述) 所以說，現在討論的黑洞根本不是一個我們宇宙中真正四維時空的黑洞啦！

回到剛剛的思想實驗。既然基本粒子是由一條條振動的弦所構成，包柏在視界之外觀看弦墜入黑洞，而弦的振動也隨之減緩下來，就這樣慢慢的……慢慢的“攤開”，隨著那條弦向外攤開，它攜帶的所有資訊全都敷開在整個事件視界，各個弦最後構成一席綿密的網絡，既然所有事物都是由弦構成，所有掉入黑洞的東西都會像這樣攤開來，形成覆蓋黑洞表面的巨大弦織面。所以就包柏而言，艾莉絲根本沒有落入黑洞，她到了視界就停止，隨後輻射回太空，看來他要擔心鬼魂索命啦！(可參考 Discovery 摩根費里曼之穿越蟲洞系列中的黑洞謎團，在最後有薩斯金的現身說法，並提供弦論解釋的生動動畫)

薩斯金宣布戰爭結束，同時把所有的故事寫在下面那本書中，但他堅稱，其實早就該結束了：“只怪霍金就像個不幸士兵在森林徘徊多年，卻不知道戰爭早已結束。”因為霍金沒有完全接受這套解釋而設法自己提出了一套解法，但是霍金已經接受黑洞不會喪失資訊的這個共識而在 2004 年賠償 Preskill 一套棒球百科全書。

但戰爭真的結束了嗎？

乾脆弄個防火牆！

更多的人投入了這場戰爭，這將會是一場人力與物力的總體戰！因為最新的研究顯示，黑洞互補原理的解法中，有一些理論上的不一致。

剛剛提到，霍金輻射中的那對正反粒子是一對糾纏得你儂我儂的纏結對。薩斯金想要讓霍金輻射帶走訊息的方法，就是要那個跑出去的正粒子同時與反粒子還有之前黑洞內部的粒子纏結，這樣才能攜有黑洞的訊息。不過這將會違反一個原理，叫做“monogamy of entanglement”：

一個粒子不能夠同時跟兩個粒子進行纏結。“monogamy”，一夫一妻制，就是說如果你把正粒子想成花心的老公，反粒子想成獨守空閨的結髮妻，那黑洞中的粒子就是小三啦，一個男人怎麼可以同時搞上兩個女人呢？這是不合情不合理也不合法的！

於是一群突發奇想的物理學家們在 2012 年提出了一個稱為“黑洞防火牆”(black hole firewall)的想法。因為不能夠同時進行纏結，可能要有某種機制在“瞬間”打斷這種纏結，而這種打斷的過程可能會放出大量的能量，由此便在黑洞的事件視界上建造了一座“防火牆”，燒毀任何想通過事件視界的資訊。不過這樣的解釋可能會違反愛因斯坦的廣義相對論！

重啟黑洞戰爭

霍金在今年(2014)的一月提出一篇沒有任何方程式的論文，僅短短四頁，一頁是摘要，另一頁是參考資料，故實僅兩頁。題為 *Information Preservation and Weather Forecasting for Black Holes*。他認為如果有事件視界及防火牆，將違反量子場論的一個根本定理——CPT 對稱。

CPT 的意思是說，當我們把一個系統的時間軸反轉，電荷帶負號，座標系也鏡射之後，物理定律應該要保持不變。因為 CPT 若不成立，羅倫茲對稱(符合狹義相對論的一個座標變換)也會失效，這是非常嚴重的事情。

既然他認為沒有事件視界，也就沒有防火牆，也不可能有黑洞！他又提出，我們或許可以用一新的表觀視界(apparent horizon)來取代事件視界。他寫道，“Thus, like weather forecasting on Earth, information will effectively be lost, although there would be no loss of unitarity.”

但是這篇論文的内容隱晦不明，現在許多的物理學家仍舊在思考霍金論文中想表達的意見，也有一些人對此提出了批評。這也見證了薩斯金所說：“真正的科學是非常人性的，而且吵鬧不休！”

結語

我們繞了一大圈才終於大致掌握了霍金今年初所說的話。不要相信新聞媒體的報導，如果你有看到的話；因為當初正是因為我不相信新聞所講的莫名奇妙的報導，才驅使我去探究其中的來龍去脈。其實科學家所言看似難以理解的話語，背後都是有一個複雜且深遠的脈絡的。

但是資訊喪失悖論仍舊是一個物理學未解決的問題，它似乎暗示著一些我們尚未理解的黑洞性質。黑洞本身也是一個重大的難題，它的解決相信可以同時帶領我們解決宇宙初始的問題。可是若要探討宇宙初生的那一瞬間，我們必須找到一個真正的量子重力理論！（量子力學和廣義相對論的結合）

如果照霍金講的，廣義相對論、資訊守恒還是量子場論沒有辦法相容，所以我們究竟要放棄哪一個呢？這三個都是構成當代物理學根基中的一塊，缺一將會導致近代物理學的大翻轉，以及新的革命的開始，期待新一代的物理學家繼續投入探索這個看似心懷惡意的大自然！

最後仍要聲明，雖然我很希望未來能夠從軍參戰以報效國家，但以上言論不代表本人立場，有任何問題請直接聯絡霍金本人。如果他的電話打不通，不要氣餒，直接上飛機吧！

參考資料

以下的作品都可以做為進一步的延伸閱讀，除了前三項是教科書及論文外，其它皆屬科普類，可以看到許多非常有趣的物理學概念以及研究者的第一手描述。

1. Sean Carroll. *An Introduction to General Relativity: Spacetime and Geometry*. Upper Saddle River: Pearson, 2004.
2. Stephen Hawking (2014, 22 Jan.). "Information Preservation and Weather Forecasting for Black Holes." *arXiv*, 1401.5761. Retrieved March 15 2014, from: <http://arxiv.org/abs/1401.5761>
3. Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski, James Sully (2013, Feb. 11). "Black holes: complementarity or firewalls?" *arXiv*, 1207.3123. Retrieved March 15 2014, from: <http://arxiv.org/abs/1207.3123>
4. Leonard Susskind. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. New York: Little Brown and Company, 2008.
5. 史蒂芬·霍金(著)，吳忠超(譯)，《時間簡史》，藝文印書館，2006。
6. 史蒂芬·霍金(著)，杜欣欣、吳忠超(譯)，《黑洞與嬰兒宇宙以及相關文章》，藝文印書館，1995。
7. 史蒂芬·霍金(著)，葉李華(譯)，《胡桃裡的宇宙》，大塊文化，2001。
8. 史蒂芬·霍金(著)，郭兆林、周念縈(譯)，《圖解時間簡史》，大塊文化，2012。
9. 史蒂芬·霍金(著)，郭兆林、周念縈(譯)，《大設計》，大塊文化，2011。
10. 史蒂芬·霍金(著)，郭兆林、周念縈(譯)，《我的人生簡史》，大塊文化，2014。
11. 吉蒂·弗格森(著)，蔡承志(譯)，《時空旅行的夢想家—史蒂芬·霍金》，時報文化，2013。
12. Lee Smolin(著)，丘宏義(譯)，《量子重力》，天下文化，2003。
13. Brian Greene(著)，林國弘、侯孟奇、朱祖慧、蕭祺哲(譯)，《優雅的宇宙》，商務印書館，2003。
14. 丘成桐、史蒂夫·納迪斯(著)，翁秉仁、趙學信(譯)，《丘成桐談空間的內在形狀》，遠流，2012。
15. Clifford A. Pickover (著)，黃啟明(譯)，《黑洞旅遊指南》，年輪科學，2003。
16. Discovery 頻道，《摩根費里曼之穿越蟲洞——黑洞謎團》。