

宇宙黑洞與哈斤

[賴昭正](#)

我曾認為資訊將在黑洞中被銷毀，這是我最大的錯誤——至少是我在科學上的最大錯誤。

— [史帝分·哈斤](#) (Stephen Hawking)

早在 1783 年英國的天文學家教士米謝耳 (John Michell) 就透過簡單計算 (見本文中之「脫離地球的臨界速度」) 謂：如果某些天體的密度與太陽一樣，但其直徑超過太陽的 500 倍，則物體需具超過光速才能脫逃其表面。1796 年拉布拉斯 (Pierre-Simon LaPlace) 也獨立地預測巨大發光體可能因為這一關係，而變成了我們看不見的「暗星」。天文學家曾經非常高興可能偵測到此一不放光、但可透過重力影響其他附近星球的巨大物體。但到了 19 世紀初期，科學家漸漸了解了光是一種波動、懷疑會受重力的影響而漸漸淡忘了此一種大物體存在的可能性。

黑洞

1915 年愛因斯坦發表了時空會因重力而變形的普遍相對論 (general theory of relativity)。11 月，自願從軍、在蘇俄前線負責計算砲彈軌跡之德國天文學家蘇瓦茲德 (Karl Schwarzschild) 大概是太無聊了，在讀完了愛因斯坦之論文後，竟然將它應用到只有一個不旋轉之星球的宇宙上，用他的特別坐標體系，精確地解出愛因斯坦的重力場方程式 (註一)。他 12 月 11 日寫信給愛因斯坦說：「儘管在猛烈的烽火下，這戰爭 (第 1 次世界大戰) 對我還是蠻寬厚的：它還是讓我能夠遠離去馳騁在你的見解上。」愛因斯坦回信謂：



[蘇瓦茲德](#) (1873–1916)

我對你的論文非常感興趣，我從沒想到可以這麼簡單精確地解決這一個問題。我非常喜歡你對這一題目的數學處理。下星期四我將稍加解釋地將你的論文介紹給 (普魯士) 科學院。

蘇瓦茲德在該論文裡發現宇宙中的所有星球將因為重力的關係而內縮崩潰到密度為無窮大的一中心點：重力場方程式在該處是無解 (像 "2/0")。蘇瓦茲德及愛因斯坦都不相信這樣的星球可能存在，他們認為那只是數學上的奇異點 (singularity)；在星球縮小到這點之前一定會有我們現在尚不清楚之物理發生。

除了中心點外，在現在稱為「蘇瓦茲德半徑」 (Schwarzschild radius)

$$R_s = 2GM/c^2$$

處（式中 M 為星球質量， G 為重力常數， c 為光速）也出現無解；物理學家對其物理意義以及是否會在自然界中出現爭辯了幾十年。1958年美國物理學家分克斯坦（David Finkelstein）終於了解到了該半徑球面代表「事件地平線」（event horizon）：任何掉進去的物體——包括光——再也永遠跑不出來了！因為連光線都跑不出來，故永遠是黑的；1967年，聽說在一位學生的建議下，理論物理學家惠洛（John Wheeler）開始採用「黑洞」（black hole）這一後來被廣泛採用的名詞。

恆星的命運

雖然早在1783年天文學家就已經在銀河系內發現散射微弱白光之星球；但到了20世紀初他們才摸清我們之所以只看到微光乃是因為它們體積很小又遠的關係，事實上這些星球是很重的（密度高到非常難以令人相信），其表面溫度也可能高到100,000度的——因之後來被稱為白矮星（white dwarf）。1926年英國劍橋大學教授福樂耳（Ralph H. Fowler）率先用當時漸趨成熟之量子力學來解釋：這些星球在融核燃料用盡後，因重力的關係而繼續其內縮崩潰，壓縮電子可存在的空間，但因為保利不相容原則（Pauli exclusion principle，註二），這些電子便群起反抗，產生電子簡併壓力（electron degeneracy pressure），阻止了內縮崩潰而達到了一個平衡狀態的白矮星（註三）。1931年，拿印度政府獎學金到劍橋大學留學的19歲千桌沙卡（Subrahmanyan Chandrasekhar）將電子質量因運動而變重的相對論效應考慮進去，預測了如果星球的質量小於太陽的1.44倍（現在稱為千桌沙卡界限，Chandrasekhar limit，註四），那麼白矮星便是該星球不可避免的命運。福樂耳與千桌沙卡師徒兩人因在這方面的貢獻而獲得1983年諾貝爾物理獎。

白矮星內部因不再進行核融反應製造能量，其溫度將慢慢降低而由白轉棕，變成棕矮星（brown dwarf），最後變成黑矮星（black dwarf）而在漆黑的天空中失跡（是我們將看不見、而不是真正的消失）。如果星球的重量大於1.44倍太陽的質量呢？那重力將大於電子簡併壓力，使得星球繼續內縮崩潰，將電子及質子壓成中子。因中子也像電子一樣，須服從保利不相容原則，故繼續壓縮的結果將產生中子簡併壓力來反抗重力。如果星

脫離地球的臨界速度

假設地球的半徑為 R ，則依牛頓定律，一質量為 m 在 r 處（ $r < R$ ）所受的重力為

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

式中 M 為地球的質量， G 為重力常數。要將 m 往上提升一無限小的距離 dr ，則需做功

$$dW = G \frac{Mm}{r^2} dr$$

因此要將 m 從地球表面往上提升到無限遠的外太空，共需做功（不懂微積分沒有關係）：

$$W = \int_R^\infty dW = \int_R^\infty G \frac{Mm}{r^2} dr = G \frac{Mm}{R}$$

所以一個物體 m 要想逃離地球的引力，它至少必須具備動能

$$\frac{1}{2}mv^2 = G \frac{Mm}{R}$$

意即要想逃離地球的引力，其最小運動速率 v_e 必須是

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

將已知之 G 、 M 值代入，我們將發現如果地球的半徑大約是1公分時，那麼物體就必須具有光速才逃離地球的引力。此一臨界半徑值

$$R_s = 2GM/c^2$$

即是蘇瓦茲德半徑。

球的質量大約只有太陽質量的 2~3 倍，則重力及中子簡併壓力將達到一個平衡形成中子星（neutron star）。如果星球的質量更大呢？那就沒有什麼我們現在已知之物理能阻止它繼續壓縮成黑洞！

黑洞的發現

當壓縮到事件地平線後，因任何資訊都沒有辦法從裡面跑出來，對外界的我們來說，這個星球等於從此從宇宙中消失了：在宇宙空間中留下了一個半徑為蘇瓦茲德半徑之圓球黑洞；任何掉進去裡面的物體均將如石沉大海，沒有外人能知道它到底怎麼樣了！事實上依普遍相對論，時間在重力場下將變慢（重力場越強，時間越慢），因此歐本海默（J. Robert Oppenheimer）及學生史納德（Hartland Snyder）1939 年時在美國發表了一篇論文，謂對於一位站在蘇瓦茲德半徑外的人來說，星球的內陷好像在蘇瓦茲德半徑處停住了，需要無限長的時間才能通過——一位隨它內陷的人（或者任何掉進去的東西）將好像永遠處於自由落體的狀態！所以許多天文學家均認為小於蘇瓦茲德半徑的黑洞只有在宇宙誕生時就必須發生的：稱為原始黑洞（primordial black hole）。有趣的是：愛因斯坦當年也在德國發表了一篇論文證明黑洞是不可能存在的！

在許多的科幻小說裡，黑洞常被形容成一個宇宙的清道夫：吞噬所有周遭的一切東西——包括星球。但事實上黑洞只像是一個看不見的微小太陽（如果太陽能內陷成黑洞，其蘇瓦茲德半徑大約只有 3 公里），只是重力吸引力強大多了而已：只要不跑進事件地平線內，任何物體都可以在其外面流蕩或像地球繞日一樣運轉的。因為完全看不見，所以我們只能「間接地」證明黑洞的存在。現在天文學家都認為 1972 年在天鵝座（Cygnus the Swan）所發現之極強 X 光光源是一黑洞造成的。哈斤於 1974 年與加州理工學院的蘇爾內（Kip Thorne，因發現重力波而獲 2017 年諾貝爾物理獎）睹那光源（現稱為 Cygnus X-1，離地球約 6000 光年）不是一個黑洞，1990 年在許多新資料的支持下，他終於認輸了。雖然「已經知道」的黑洞大約只有 50 個，但天文學家估計整個宇宙可能有上千萬的黑洞；星系（galaxy）中心也都可能有超級質量黑洞（supermassive black hole，太陽質量的百萬倍）存在。

2015 年 9 月 14 日，雷射干涉儀重力波觀測站（LIGO, laser interferometer gravitational wave observatory）所偵測到的重力波（註五）不但被認為是黑洞相撞而產生的，也被認為是首次「直接」觀測到黑洞存在的證據：因為用黑洞特性模擬出來的數據，最符合實驗觀測到的結果。觀測站科學家們（1012 位團隊成員，註六）估計那兩顆黑洞的質量分別約為太陽的 29 倍及 36 倍，相撞時所放出的能量大約為所有宇宙恆星所放出之能量的十倍！

在「愛因斯坦的最大錯誤——宇宙論常數」一文裡（註七），筆者提到了早在 30 年代，就有天文學家從星群的運動中，懷疑到宇宙中尚存在有其它看不到的「暗物體」（dark matter）！科學家也像世俗人一樣喜歡追風隨俗，一旦有人提出「暗物體」，其存在的證據便開始排山倒海地出現，只是到現在除了知道這些「暗物體」是看不見及具有重力作用外，尚沒有人知道它們到底是什麼「東西」！據估計，這些暗物體大約為宇宙中

可見物體的五倍！黑洞不是也看不見且具有重力作用嗎？黑洞可能就是「暗物體」嗎？「暗物體」是在宇宙生成時就產生的，因此已有科學家懷疑它們可能正是「原始黑洞」——在一些合理的假設下，「原始黑洞」群的相撞也可符合偵測到之重力波的數據！

哈斤輻射

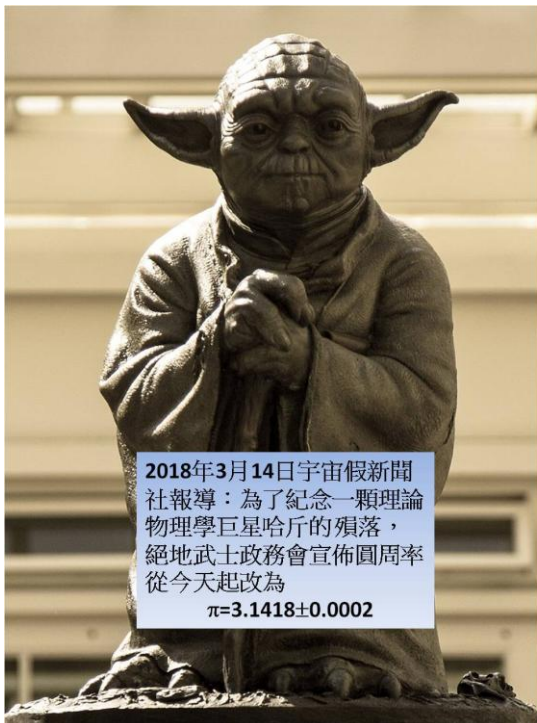
黑洞雖然不是一個宇宙的清道夫，但他真的是一個只進不出的垃圾桶嗎？1974年，英國劍橋大學教授哈斤（Stephen Hawking）將普遍相對論的時空彎曲現象用到量子場論（quantum field theory）內，竟然發現了一震驚整個理論物理學界的結論：「黑洞並不是如我們所描畫的那麼黑」，而是不停地在輻射能量！重力場論（普遍相對論）及量子場論（量子力學）是近代物理的兩大成就；但前者似乎僅適用於巨觀世界，而後者則僅適用於微觀世界。這對於不相信上帝是會那麼笨手笨腳的物理學家來說，簡直是一個侮辱，因此統合它們是近代物理的一大目標。哈斤是第一位將它們在宇宙論裡結合的物理學家，因此許多人認為他是愛因斯坦以後最偉大的天才（註八）。



哈斤（1942-2018）

在近代物理裡，真空已不再是真的什麼都沒有（註九）。依量子力學之測不準原理，真空事實上是不停地在產生成對的粒子及反粒子——但它們又立即結合互毀將能量還給真空——的場所。如果產生於事件地平線附近的反粒子掉進去了黑洞，那它便無法再與粒子

相結合，粒子將帶能量往反方向跑掉：羊毛出在羊身上，這些能量當然只好由黑洞提供。哈斤計算發現這些能量的分佈正如熱物體之黑體輻射，其溫度與黑洞質量成反比，我們現在稱此一黑洞輻射為哈斤輻射（Hawking radiation）。所以原則上黑洞是會因哈斤輻射而蒸發掉的；但因太陽大小之黑洞的哈斤溫度大約只有 10^{-7} °K，而宇宙背景的溫度為 3°K，所以一般的黑洞還是會淨賺（吸熱比放熱多）而越來越大的；只有在宇宙剛生成就存在的原始黑洞（只原子一般的大小）才會迅速地蒸發掉。哈斤曾希望原始黑洞還有一些還在宇宙中遊浪；如被發現，他說「（我）將可獲得一個諾貝爾獎」；另外一個或許能發現原子般大小的黑洞的地方是歐洲的強子對撞機（Large Hadron Collider）內。哈斤於今年3月14號不幸逝世——將與牛頓、達爾文等一代科學宗師一樣，葬在英國君主安葬或加冕登基之西敏寺。因諾貝爾獎是不發給在天堂之人，他的諾貝爾獎是無望了，我們只能在此為他扼腕。



授權改自 Wikimedia Commons ©SA 2.0

黑洞資訊悖論

雖然黑洞因現在之宇宙條件可以暫保生命，但原則上它們遲早都要蒸發掉的：這將造成一個現在被稱為「黑洞資訊」遺失的「悖論」（black hole information paradox）。量子力學雖然「推翻」（嚴格來說應該是「修正」）了古典的因果論，但它還是像古典力學一樣具有時間的對稱性（註十）：分不出過去與將來，因此資訊是不滅的。比如讀者將筆者之兩本巨著「量子的故事」及「我愛科學」燒成灰，原則上我們還是可以循原來之軌跡，重新尋回那兩本書之內容的！顯然那兩本書的灰是不一樣的：它們還保持著原來之資訊。可是如果灰是一樣呢？那兩本書的資訊顯然在燃燒的過程中丟失了，我們再也回不去了！哈斤雖然證明了黑洞不是全黑，但他卻也證明了天下的「烏鴉」一般黑，因此只要看到一隻烏鴉就等於看到了全部的烏鴉：只要質量（、旋轉、及電量）相同，不管黑洞當初是由什麼東西造成或組成的，最後總是變成同樣的輻射（蒸發掉）。

又如筆者在「愛因斯坦的最後一搏—EPR 悖論」（註十一）一文裡所談的：兩個粒子相互作用後便永遠糾纏在一起，形成了一個量子體系（不管他們分開多遠或者多久），因此當我們去量左邊粒子之位置時，右邊的粒子也將立即受到影響崩潰到一固定位置。可是如果其中一個粒子不幸掉進去了黑洞，從此便與外界隔絕，即使黑洞蒸發而完全消失也無法回收其原來資訊，那「量子糾纏態」顯然應該不覆存在了——這與實驗結果不符！這「量子糾纏態」事實上就在黑洞之事件地平線附近不停地產生——哈斤輻射的來源。

這資訊在黑洞中永遠遺失的理論違反了基本物理，因此顯然自哈斤 1981 年提出後便爭辯不休。好賭的哈斤（這次與蘇爾內站在同一線）終於在 1997 年與加州理工學院的另一位教授布利斯基（John Preskill）打了個賭（後者認為正確的重力量子理論出現後，一定可以解釋資訊不會被銷毀的）！2004 年，哈斤提出事件地平線應會因波動（fluctuate）而洩露出資訊，承認他輸了，如約地買了一本棒球百科全書給布利斯基（哈斤說他很想將該書燒成灰以後再給布利斯基——反正所有的資訊都還在那裡）。現在有關資訊如何可以不遺失的理論可以說是如雨後春筍、俯拾皆是：其中一個謂因所有事件均在蘇瓦茲德半徑處停住了，因此資訊並沒有遺失，而是保留在地平線表面處；還有一個則謂資訊將透過時空隧道跑到另一個黑洞去（看來喜歡科幻小說的讀者是有福了）！事實上哈斤本人就有好幾個版本：最後一個版本於 2016 年元月出現的（註十二）。

結論

此文是有感於哈金之突然辭世而寫：事實上除了科學外，更讓筆者敬佩的是他對生命的熱愛與執著。哈金曾說：「如果你覺得掉進黑洞裡，（請）不要放棄，總有辦法出去的。」筆者覺得那是雙關語，除了闡釋黑洞的特性外，可能更是他生活的寫照，以及給世人的鼓舞：遇到挫折不要輕言放棄！哈金 21 歲時就被診斷出患有慢性運動神經元病（motor neuron disease），醫生說大概只有兩年可活！43 歲時感染了肺炎，不但完全奪去了他說話的能力，還需 24 小時的醫療照顧。後輩子全是靠坐輪椅及透過電腦說話，

不但寫了一本全世界最暢銷之科普書「時間簡史」(A Brief History of Time, 1988; 第二版, 2005), 還到處演講寫作, 成為愛因斯坦以後之另一位家喻戶曉的科學家。

至於黑洞將來的前途如何, 筆者實在也不清楚! 在全世界都在努力推進男女平等、以及鼓勵女性從事科學的此時, 我們不妨以加州大學洛杉磯分校女天文學教授蓋芝(Andrea Ghez)的一段話來做結束:

我以為我當初所提出的問題是非常簡單的, 那僅是問: 「銀河系的中心有沒有巨質的黑洞。」但我之所以喜歡科學的原因之一是: 你最終將永遠碰到新的問題。

***** 註解 *****

- (註一) 愛因斯坦自己只能做近似解。
- (註二) 「原子的構造」, 科學月刊, 2010年3月號; 「我愛科學」, 第95頁。
- (註三) 事實上在崩潰成白矮星之前, 他們的質量都更大, 因此在核燃料用盡之後, 極速的重力內陷將使溫度劇增而導致爆炸, 將外圍的物質散射到宇宙中(宇宙中重元素的來源), 僅留下中心部分繼續內陷收縮。
- (註四) 千桌沙卡的這一「界限」曾被普遍相對論大師、讓愛因斯坦一夜成名之愛丁頓爵士(Sir Arthur Eddington)於1935年在倫敦皇家天文學社裡公開取笑。千桌沙卡曾經多次表示那是基於種族歧視之故; 因此他不喜歡英國, 於1937年元月移民到美國, 終其一生任教於芝加哥大學。
- (註五) 「愛因斯坦其實沒那麼神」, 泛科學, 2016/3/16; 「我愛科學」, 第172頁。
- (註六) 「諾貝爾獎和那些被賣掉的獎牌: 科學研究背後的名與利」, 泛科學, 2017/12/3。
- (註七) 「愛因斯坦的最大錯誤? — 宇宙論常數」, 科學月刊, 2011年12月號, 轉載於泛科學, 2011/12/11; 「我愛科學」, 第162頁。
- (註八) 哈斤說那全是「報紙的吹噓」過了頭。1990年他告訴洛杉磯時報謂: 「我符合一位傷殘天才的部分: 我至少是傷殘——雖然我不是像愛因斯坦一樣天才..... 群眾需要英雄, 他們將他捧成一位英雄, 現在則將我捧成一位英雄——雖然我的條件差得遠。」
- (註九) 「以太存在與否的爭辯」, 科學月刊, 2017年5月號; 「我愛科學」, 第77頁。
- (註十) 「對稱與物理」, 科學月刊, 2010年3月號; 「我愛科學」, 第178頁。「時間的方向性」, 科學月刊, 2016年2月號; 「我愛科學」, 第200頁。
- (註十一) 「愛因斯坦的最後一搏—EPR悖論」, 科學月刊, 2016年5月號; 「我愛科學」, 第72頁。
- (註十二) 哈斤認為他這次的理論可以實驗證明的, 因此如果他的預測對了, 他將可得一個諾貝爾獎。如果讀者也想得一個諾貝爾獎, 顯然這是一片等待開發的肥沃土地。

***** 參考資料 *****

- (1) 「近代宇宙中的空間與時間」，新竹市國興出版社（1981 年）。
- (2) 「[我愛科學](#)」，台北市華騰文化有限公司出版（2017 年 12 月）。本書收集了筆者自 1970 年元月到 2017 年八月間在科學月刊及其他雜誌發表過的文章。