

奧本海默——物理、原子彈與人生

●湯兆昇

早前電影《奧本海默》(Oppenheimer)風靡全球，一段本來鮮為人知的原子彈歷史，頓時成為城中熱話。作為一個學物理的人，少不免會對影片中的科學情節以及物理學大師的風采有一點期待。不過三個小時的電影似乎太長，而且信息量極之密集，在鏡頭火速閃過的三言兩語之間，就蘊含着極多複雜的細節，不熟悉科學和歷史背景的話，很難充分了解。之後看到坊間不少影評，都是圍繞着人物生平、政治背景、主角內心的交戰、主客交錯角度的表達手法、角色性格展現等作討論，反而很少交代影片中人物的背景和科學細節。無疑澎湃的感情糾結、快速節奏和強烈張力，很易令人懾服，但電影內很多細節所埋藏的故事也扣人心弦。與其單單說電影，不如分享一下我對這段科學史和奧本海默(J. Robert Oppenheimer)個人一些零碎的了解，希望這篇另類的評論不至於抹殺了大家看電影的興致。本文的附錄簡介了原子彈的物理，或許對大家了解影片的科學內容有幫助。

一 為甚麼是奧本海默？

相信不少人看完電影後都會有一個疑問，為甚麼要找奧本海默領導曼克頓計劃(Manhattan Project)①製造原子彈？他是個煙不離手的自由主義者，愛開馬天尼烈酒派對，體型消瘦，看起來不很健康；和那個年代的青年人一樣思想

左傾，弟弟、情人、太太和朋友都和共產黨有密切關係；私生活有點混亂；喜歡詩作，研究梵文和印度教等在人們看來不着邊際的思想；情緒既不穩定，又沒有管理經驗，完全不似老練、深諳政治的人②。

在任命奧本海默領導曼克頓計劃的科學研究時，格羅夫斯(Leslie R. Groves)將軍力排眾議，他在戰後受訪時簡單地說了一句：「他是真正的天才！」③事實上，奧本海默學識非常廣博，幾乎甚麼都懂，很快就能了解所有重要的發現及掌握現實情況，無論是化學、理論物理還是機械車間的細節，他把一切記於腦內加以分析，抓住重點，提出解決方案，然後迅速給予同袍指示。人們都覺得他是最好的領導者。核子物理學家魏斯科普夫(Victor F. Weisskopf)讚揚奧本海默說：「他不是坐在主任辦公室做決定，他讓自己的智力以至身體親臨於每一項決定性的步驟，當測量到新的效應、構想出新的想法時，他總是在研討室和實驗室……正是他持續而強烈的存在，讓我們所有人產生了一種直接參與的感覺；它營造了一種熱情和挑戰的獨特氛圍，這種氛圍貫穿整個地方。」④

奧本海默並不是一個典型的理論物理學者，如電影表述一樣，他的非凡領導能力與個人魅力、感染力、人性溫暖關係密切。理論物理學家泰勒(Edward Teller)說：「奧本海默可能是我見過最好的實驗室主管……他對人的心理有無比尋常的洞察力，這對於物理學家來說是

非常罕見的」，「最終來到洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos) 工作的一萬多人中，奧本海默和數百人關係密切，我的意思是，他知道這些人之間的關係，以及如何推動他們工作。他知道如何以組織、哄騙、幽默感、緩和情緒等方法有力地領導他們，儘管他看似甚麼都沒有做。」^⑤ 理論物理學家貝特 (Hans A. Bethe) 讚揚奧本海默雖然聰明絕頂，聽到任何事情就立刻明白，將其融入到總體方案中，得出正確結論，但卻可以讓每一個人都感到他關心、重視自己在做甚麼；與人談話時，他經常強調別人的工作對於整個項目的成功非常重要，言語和舉止表現優雅，他從來沒用惡劣的態度令同事難堪，也沒有讓任何人感到自卑^⑥。因為奧本海默早年在學院中培養了很多人才，所以他人脈非常廣，能網羅當時美國最頂尖的科研和技術人員，知人善任。當同事之間在工作或性格上有衝突，他也有能力介入，找出解決方法。這些特質都對曼克頓計劃的成功非常重要。

二 在課室和原子彈之間

奧本海默的驚人才智、對人的親和力和感染力也讓他學術和教學上取得豐厚的成果。他早年在哈佛大學取得化學學士學位，後來到英國劍橋大學做實驗物理研究，但覺得自己不適合做實驗，一度感到迷失^⑦，後來到歐洲大陸求學，跟從鼎鼎大名的物理學家玻恩 (Max Born) 在德國哥廷根大學做理論物理研究，只用了兩年時間就在 1927 年獲得博士學位。當時只有二十三歲的奧本海默與玻恩發表了一篇量子力學應用於分子研究的文章^⑧，後來被廣泛應用，使分子波函數和大分子性質的計算更具效率，成為奧本海默被引用得最多的著作。也許奧本海默的出生遲了一點，未能於二十世紀初參與創造量子力學，與波耳 (Niels Bohr)、海森堡 (Werner Heisenberg)、薛丁格 (Erwin Schrödinger) 等躋身開山祖師之列。但他於 1929 年回到美國後，卻積極把歐洲的量子力學研究帶進美國，在加州大學柏克萊分校創立了理論物

理學院，並同時於柏克萊和加州理工學院工作。奧本海默在物理學的最大貢獻，大概不是他本人的研究工作，而是建立了當時美國最好的理論物理研究中心，推進最新的研究，連結人脈。

在奧本海默之前，美國的理论物理雖然也有一些傑出的代表，但與歐洲相比，整體來說是相當不起眼的。那幾年在美國成長的優秀理論物理學家，大多數在人生的某個階段受過奧本海默的培養，許多人是他的研究生，還有一些人作為博士後研究員來到他這裏。他的教學、獨特的學術風格和個人榜樣塑造了學生對物理學的態度^⑨。儘管奧本海默不斷刺激學生思考、討論，有時有點尖酸，但學生卻十分受落。他們親切地稱奧本海默為“Oppie”，這個暱稱後來進入洛斯阿拉莫斯國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory) 中^⑩。奧本海默熱衷和學生長時間討論物理問題，討論膠着時就跟他們談天說地，或者去看齣電影。出身紐約富裕猶太裔家庭的他，有時會請學生到很好的餐廳吃飯。猶太裔學生瑟伯爾 (Robert Serber) 回憶說：「那是大蕭條後的日子，學生們都很窮。美食、美酒和優雅生活距離他們許多人都很遙遠，Oppie 向他們展示的正是這種陌生的生活方式。」^⑪ 奧本海默本來想為瑟伯爾在柏克萊謀取教席，但遭到上級反對，認為系中有一個猶太人已經足夠了。後來瑟伯爾成為曼克頓計劃的主要人物之一，在電影中也見到這個角色。奧本海默用心教學，經年累月地經營關係，培育人才，所以他領導曼克頓計劃時擁有廣泛的人脈和龐大的號召力，是有其原因的。

在電影中，奧本海默最初走進柏克萊的課室裏，雖然只有一個學生，卻無礙他興奮地講起量子力學來，後來吸引到的學生愈來愈多，鏡頭中奧本海默派發試卷，黑板上滿是量子力學的波函數，學生都很渴望學習歐洲最新的物理學。奧本海默的高中英語老師曾發現他在解釋技術問題方面有特殊天賦，這時就大派用場。正如他後來說，他沒有刻意尋找學生，只是傳播他熱愛的理論，由自己的同事、學生開

始，然後是非物理學生或任何願意聽的人^㉔。電影中有一幕奧本海默向學生提到星星在死亡階段的塌縮，問學生知不知道星星的最終命運，引領他們追尋星光寂滅時那未知的奧秘。現實中，奧本海默和他在柏克萊其中一個最早的博士生沃爾科夫 (George Volkoff) 於1939年發表了一項關於中子星的研究^㉕，發現如果中子星的質量超越了某個極限，強大的重力便會使它繼續塌縮。後來人們才知道，這最終會使星星塌縮成黑洞。這是奧本海默第二多被引用的科研成果。今天我們教授天文學時，也會提到中子星的質量不會大於約三個太陽質量，就是源於奧本海默的計算。

從奧本海默在歐洲畢業到柏克萊的歲月中，他與學生的研究成果甚豐。他的研究涉獵光譜的量子理論^㉖、電子場致發射^㉗、量子電動力學的前期理論^㉘、原子核受碰撞引發的核反應^㉙、宇宙射線、介子理論^㉚、致密天體物質等理論。不像其他知名物理學家，他沒有單一的驚世發現，但許多工作都十分具有前瞻性，為後來量子電動力學和核子物理的發展打下重要基礎。奧本海默的學生很多都有傑出的成就^㉛，後來都成為美國著名物理機構的主管，不少與原子能計劃有關。上面提及的瑟伯爾最初與奧本海默一起研究高層大氣受宇宙射線撞擊所產生的粒子，以及中子星物質等，兩人成為長期研究夥伴。瑟伯爾參與曼克頓計劃後，為剛來洛杉磯的物理學家主持了五個短講，利用基本物理方程、非常有限的核子物理實驗數據，加上巧妙估算，便把製造原子彈的藍圖勾畫出來，在數據上與後來真實的原子彈頗為接近。資料保密令解除以後，這些講座內容成書出版，就是著名的《洛杉磯阿拉莫斯入門》(The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb)^㉜。

電影裏的洛杉磯阿拉莫斯國家實驗室出現了很多二十世紀的物理學巨星。羅倫斯 (Ernest O. Lawrence) 自柏克萊時期已是奧本海默的合作夥伴，因發明迴旋加速器於1939年獲得諾貝爾物理學獎，迴旋加速器標誌着粒子物理時代的來

臨。他與奧本海默的性格南轅北轍，一個不羈、一個嚴謹，兩人卻惺惺相識，優勢互補。羅倫斯不間斷地做實驗，奧本海默以理論解釋、管理資源，和諧合作^㉝。羅倫斯的「電磁同位素分離器」可以提煉濃縮鈾 (見附錄)，對製造原子彈尤為重要。電影中奧本海默把彈珠放進魚缸，意味着團隊正在一點一滴地累積濃縮鈾。這一幕應該是虛構的，卻生動地讓觀眾了解累積濃縮鈾的困難。泰勒我行我素，不善與人相處，之後還得罪不少人。與現實一樣，電影中記述了當時製造原子彈仍未成功，泰勒已經對它感到不滿意，想快點利用核融合製造更厲害的氫彈，奧本海默當然覺得製造氫彈太遙遠了，專注製成原子彈、盡快結束戰爭才是上策。冷戰時期，泰勒終於製成了氫彈，即使他的參與不是決定性的，但仍有人稱他為「氫彈之父」。貝特研究恆星內部各種核融合機制，解釋恆星的能量來源，後來於1967年獲得諾貝爾物理學獎。奧本海默一直很器重貝特，欣賞他的計算能力，讓他領導理論組的研究，但可能因此令泰勒不滿。拉比 (Isidor I. Rabi) 因研究核磁共振於1944年獲得諾貝爾物理學獎。電影中他與奧本海默的對話，顯示他好像對原子彈的道德問題有所保留。戰時他專心研究雷達，相信它有助盟國取得勝利。他始終沒有全心參與曼克頓計劃，但奧本海默容許他以訪客身份出現於洛杉磯阿拉莫斯。

電影中一些不太起眼的角色也大有來頭。例如，奧本海默參觀費米 (Enrico Fermi) 的受控核反應堆。費米因研究中子撞擊誘發的放射性以及發現超鈾元素，成為1938年諾貝爾物理學獎得主^㉞。費米與西拉德 (Leo Szilard) 等人在1942年於芝加哥大學首次成功製造受控核反應堆CP-1，開展了原子能的和平用途。核反應堆可以用作製造鈾元素，與鈾一樣，鈾也可用作製造原子彈 (見附錄)，這就是為甚麼製造核反應堆是曼克頓計劃的一部分。費米有極強的估算能力，他目擊首次原子彈試爆時^㉟，在6尺的高度散落紙碎，當空氣中的衝擊波經過，紙碎在落地前被吹到2.5米之外。他由此估算出原爆的

威力約相當於一萬噸TNT炸藥²⁹。在鏡頭偶然出現、打非洲鼓、傻裏傻氣、不戴墨鏡在車上直視試爆的那一位是費曼 (Richard Feynman)，他以量子力學的路徑積分表述、量子電動力學等研究聞名於世，於1965年獲得諾貝爾物理學獎。費曼是人所共知的「物理頑童」，據他後來在《別鬧了，費曼先生！》(“Surely You’re Joking, Mr Feynman!”: *Adventures of a Curious Character*)一書記載，他在洛斯阿拉莫斯國家實驗室空閒時不斷破解軍方的夾萬密碼，令上級非常頭痛。可惜這套電影的主角是奧本海默，上述這些「神人」的經典估算和傳奇故事都未有呈現在鏡頭中。

就如現實一樣，電影中波耳突然在洛斯阿拉莫斯出現，令眾人感到非常興奮。波耳告訴奧本海默，納粹德國還是想用「重水」作核反應堆的減速劑，奧本海默得知德國人用錯了方法³⁰，遂報以一笑。波耳是量子力學的開山祖師，是物理學界的靈魂人物。他被納粹德國追捕，連夜帶同家人從哥本哈根乘小船逃到瑞典，再隻身乘轟炸機逃到英國，輾轉到了美國。波耳談到希特勒時充滿了蔑視，警告人們德國的核工業正在發展，美國人必須搶先一步發展出原子彈，藉此鼓勵他們努力工作，振奮人心。奧本海默曾說「在許多人還沒有脫離擔憂和害怕時」，波耳「讓這事業看起來有希望」³¹。儘管波耳對洛斯阿拉莫斯的一切都表現得感興趣，他也知道「他們並不需要我幫助製造原子彈」³²，因為那裏已經有足夠的人才，而洛斯阿拉莫斯國家實驗室的規模和龐大的資源投入，也是歐洲無法比擬的。

第二次世界大戰後，奧本海默和許多物理學家一樣，回到學院裏繼續做研究，他因領導曼克頓計劃而聲名大噪，不過這時期的他已經很少發表論文。著名理論物理學家蓋爾曼 (Murray Gell-Mann) 認為奧本海默心神不定，沒有耐心寫長篇論文或做很長的計算；他的著述不多，但都相當精彩；他總是激勵其他人進行研究，而他的影響力非常巨大³³。這或許正是奧本海默中年後的寫照。1947年，他開始主管普林斯

頓高等研究院，直至1967年離世。研究院網羅各學科最頂尖的理論學者，在自由、不受財政壓力的環境下做研究，成員包括愛因斯坦、波耳、狄拉克 (Paul M. A. Dirac) 等頂級物理學家。過往研究院只專注於服務已成名的科學家，奧本海默到來後，卻讓大量有活力的年輕學者參與³⁴。他從學院到國際層次舉辦很多研討會，而且總不忘參與其中。終其一生，奧本海默不遺餘力培育下一代。物理學家兼科學史作者派斯 (Abraham Pais) 這樣描寫那時期奧本海默對年輕物理學家的感染力：「他可以向年輕人傳達一種感覺，讓他們覺得那個時代的物理學與他們有非凡的關聯，並讓他們有一種參與偉大冒險的感覺。」奧本海默教學嚴格，敦促年輕人不要放鬆，要相信知識，學習是個人的使命，他說：「物理學的美好日子就在前方；我認為，我們有希望生活在物理科學的英雄時代，成為它的一員；過往，這個廣闊的新經驗領域給了我們新的教訓，也教導我們它新的秩序」，「實踐科學、努力學習的人相信知識是好的」，「努力取得成果，然後告訴別人，沒有事情比這更讓人感到滿足」³⁵。直至生命最後的日子，奧本海默仍然對物理學的發展充滿好奇心。貝特回憶說：「奧本海默總是在那裏刺激討論、批評、鼓勵他人和澄清問題。即使直到最後幾天（我在他去世前幾個月見過他，當時他已經病得很重），他仍然熱衷於研究所有粒子和理論物理學，深刻地討論問題，對下一步感到好奇。」³⁶

三 陷落、衝突

奧本海默既有物理學家的率性和天真，亦有他獨有的自由不羈思想和浪漫情懷。作為龐大軍事實驗室的主管和後來的國家英雄、政治人物，這些性格絕對不是好事。可以想像，這樣的人要嚴格遵守軍方的規矩和保密守則是何等困難。在那個年代，年輕學生對社會和政治產生興趣，思想左傾十分自然。聰明如奧本海默，或許已料到自己左傾的政治思想，加上身邊的人很多都是共產黨員，始終會為他帶來麻

煩。他雖然對加入共產黨有保留，戰時亦拒絕向與蘇聯有聯繫的人提供機密情報，但對於人際關係和私生活，卻是率性而為，不理他人的眼光。年輕時的奧本海默把自己困在狹小的世界裏，對外界的事物不感興趣，但到1936年有了重大的轉變²²。與現實一樣，電影中描述了在柏克萊當副教授的奧本海默與當時還是研究生的塔特洛克 (Jean Tatlock) 愛得火熱，塔特洛克積極參與左翼活動，引發他對政治的興趣。在大蕭條時期，奧本海默為新移民和失業的農民發聲，透過美國共產黨為西班牙內戰募捐，支持共產黨扶植的西班牙第二共和國，又資助納粹德國的難民。電影中，他在家中召開工會會議，讓與左翼團體有聯繫的學生走入課室、實驗室進行政治活動，惹來夥伴羅倫斯的不滿。奧本海默又愛上了普寧 (Katherine Puening)，即後來他的妻子基蒂 (Kitty)。基蒂曾經嫁給在西班牙內戰中犧牲的共產黨員達萊特 (Joe Dallet)，基蒂本人也是前共產黨員。最傳奇的是，正在領導曼克頓計劃的奧本海默無視安全保密守則，1943年6月外出工作期間與塔特洛克在餐廳約會，之後在她三藩市的寓所留宿。塔特洛克患有嚴重抑鬱症，1944年1月被父親發現在寓所中自殺身亡。不少人懷疑塔特洛克是自殺還是他殺；當然，是否如電影般，有一隻戴着手套的手把她按進水裏，那又是另一回事了。

1947年，奧本海默被委任為新成立的美國原子能委員會 (AEC) 總顧問委員會主席，為戰後原子能發展政策提供意見。政府表面上對他委以重任，但事實上聯邦調查局 (FBI) 和軍方在內的國家安全組織，在戰時從未停止過調查奧本海默。他多年來與左翼份子千絲萬縷的關係，最終都在1954年的安全許可聽證會上被用作證據，質疑他對國家的忠誠、是否違反保密原則。雖然最後奧本海默沒有被嚴厲對待，但他的安全許可證遭撤銷，再無法參與及影響政府的核發展政策。電影中奧本海默每次面對官方保安質詢時，為了保護自己、幫親人朋友辯護，想說謊又不擅長，因而顯得茫然和慌亂。

他的親密戰友泰勒在聽證會中說奧本海默的行為「令他困惑」，鏡頭中的奧本海默不禁倒抽一口涼氣。當然，泰勒永遠我行我素，也與他長期支持發展氫彈有關，這是愛好和平的奧本海默所反對的。

電影似乎給人一種感覺，即官方對奧本海默的質疑很大程度上與他和美國原子能委員會主席施特勞斯 (Lewis Strauss) 的私人恩怨有關。施特勞斯好像是所有陰謀的幕後黑手，原因是覺得奧本海默輕視他，也可能是嫉妒奧本海默的才華。他以為奧本海默在愛因斯坦面前說他壞話，在會議中又取笑他。電影中施特勞斯說出他心中痛恨奧本海默的一幕，完全是張牙舞爪的壞人。不過在現實中，觸發矛盾的可能是美國與蘇聯的核軍備競賽。奧本海默一開始已經想限制原子彈的使用，1945年10月，他在杜魯門 (Harry S. Truman) 總統面前說的一句「我的手沾了血」，或許已經令某些人覺得他軟弱無力²³。二戰後奧本海默利用他在原子能委員會的影響力，游說美國及國際社會防止核擴散，提倡建立國際機構遏止核武發展，又反對發展氫彈²⁴，惹來不少政界及軍方人士的反感。與其說是出於恩怨，不如說是崇尚發展核武的人想把奧本海默從政治舞台上拉下來。杜魯門決定發展氫彈，奧本海默與其他持反對意見的原子能委員會成員便辭職。事實上，聽證會只是奪去了奧本海默的政治影響力，毋損他的學術成就和眾人對他的支持。後來原子能委員會也想做點事情，平息科學界對聽證會判決的不滿。1963年，奧本海默獲原子能委員會頒授恩里科·費米獎 (Enrico Fermi Award)，以表揚他在核物理領域的高度成就。

四 世界的毀滅者？

奧本海默有否為製造原子彈感到後悔？大概沒有人知道確切的答案。他的性格本身就是矛盾和複雜的，曼克頓計劃期間獨自承受着在工作、人際關係和道德上的龐大壓力，難免身

心不安。在電影中，奧本海默一方面得知原子彈導致的死亡和痛苦，一臉無奈茫然，另一方面又要以英雄的姿態出現，接受同胞、政府和社會熱烈的祝賀和讚賞。有一幕呈現奧本海默腦內已混亂得天旋地轉，卻被掌聲和歡呼聲所圍繞，勉力說出振奮人心的話，為最終的勝利而歡呼。正如奧本海默多年後承認的那樣，他也感到自卑，對自己一生的行為始終感到「一種非常強烈的反感和錯誤感」^⑤。雖然他意識到自己所做的都是必須、有效而重要的，但那並不是故事的全部，他需要以別人的視角看待自己和所做的工作，以緩解他在道德和人性上的矛盾，彌補迷失的自我。透視自己的矛盾和軟弱，也讓他得以洞察他人，這或許能解釋他對人的同理心及謙和的表現。

現實中，愛因斯坦和奧本海默的確有過接觸，但電影中兩人的談話應該是虛構的，而奧本海默也從未邀請過愛因斯坦驗證關於原子彈的計算。愛因斯坦的出現就好像神話小說中的先知或神祇，他要告訴奧本海默，如果他打開了潘朵拉的盒子，就免不了要承擔後果，包括現在和未來因原子彈造成的死亡，也要面對被政客和其他人利用、冷待和遺棄。奧本海默被人引用得最多的恐怕不是他的物理學著作，而是在1965年，即他逝世前兩年，一段關於印度教經典的話，據說是在回憶原爆的情景時想起的，現在網絡上亦流傳着他說這些話的影片^⑥：

我們知道世界將不一樣。有些人笑了，有些人哭了。大多數人都沉默了。我記得印度教經典《薄伽梵歌》中的一句話：毗濕奴試圖說服王子他應該履行自己的職責，為了給他留下深刻的印象，毗濕奴呈現出他的多臂形態並說道：「現在我變成了死亡，世界的毀滅者。」我想，我們都有這樣的想法。

《薄伽梵歌》描述阿周那王子與敵對陣營展開了俱盧之戰，兩軍對峙時，阿周那看見很多自己的親人和朋友在敵軍陣營中，感到困惑和悲

傷。化身為馬車夫的毗濕奴（印度教中眾生的守護神，拯救世人危難）勸導阿周那，要承擔起自己的責任作戰，放棄對外在成敗與榮辱，以及內在欲望與感官的執著，以奉獻的精神臣服於神，以求解脫。

奧本海默應該早知道，一旦承擔起製造原子彈的責任，就會面對痛苦與矛盾，他看見日本人因原子彈而死去，可能就像阿周那看見敵對陣營的親友死去一樣悲痛。他雖然會因勝利而得到光榮，但同時亦會受辱，就如愛因斯坦的預言。與其說電影中的愛因斯坦好像是一個先知，不如說這其實是奧本海默與自己的內心對話。奧本海默可能認為必須像阿周那一樣放下自己，承擔起責任作戰，因為這是歷史和自然的演化給予他的使命。物理學家明白自然定律，透視世界的運作，但二十世紀的量子力學正好告訴我們，觀測者也是量子系統的一部分，我們無法逃離自然而變成旁觀者，必須參與其中。奧本海默畢生研究量子力學，最後發現自己置身於世界的巨大漩渦中，無法自拔，甚至變成了世界的毀滅者。可能唯有透過宗教的精神奉獻，他才能獲得解脫。

註釋

① 曼克頓計劃是1942至1946年間美國為研發出人類首枚原子彈而制訂的軍事計劃，由美軍少將格羅夫斯（Leslie R. Groves）統領，奧本海默則負責領導研發及製造原子彈。

②③ Andrew J. Rotter, *Hiroshima: The World's Bomb* (Oxford: Oxford University Press, 2008), 103-105; Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (New York: Simon & Schuster, 1986), 444; 105.

④⑤⑥⑦⑧⑨ Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, 448; 57; 539; 57; 525; 445-46; 57.

⑩ Victor F. Weisskopf, "The Los Alamos Years", *Physics Today* 20, no. 10 (1967): 39-42.

⑪ 電影中奧本海默把毒藥注射入蘋果的一幕，就是針對他的實驗導師布萊克特（Patrick Blackett）。當然，在現實中波耳（Niels Bohr）沒有差點吃掉毒蘋果。

⑧ M. Born and R. Oppenheimer, "Zur Quantentheorie der Molekeln", *Annalen der Physik* 389, no. 20 (1927): 457-84. 該文所發展出的「玻恩—奧本海默近似方法」(Born-Oppenheimer approximation)就是以兩位作者命名的。

⑨⑩⑪ Hans A. Bethe, "J. Robert Oppenheimer, 1904-1967", *Biographical Memoirs of Fellows of The Royal Society*, vol. 14 (November 1968): 396-97; 406-407; 409.

⑩ 洛斯阿拉莫斯國家實驗室成立於二戰期間，位於美國新墨西哥州。曼克頓計劃以它為主要的研究基地。

⑪ Robert Serber, "The Early Years", *Physics Today* 20, no. 10 (1967): 35-39.

⑫ Alice K. Smith and Charles Weiner, "The Young Oppenheimer: Letters and Recollections", *Physics Today* 33, no. 4 (1980): 24-33.

⑬ 奧本海默受到威爾遜山天文台(Mount Wilson Observatory)的科研人員以及他朋友托勒曼(Richard Tolman)的影響，開始對廣義相對論和天體物理感興趣。他和沃爾科夫假設中子星是中子構成的簡併態物質，用描述球對稱物體在流體靜力學平衡下的廣義相對論方程，以及托勒曼之前的結果，推導出所謂「托勒曼—奧本海默—沃爾科夫極限」(Tolman-Oppenheimer-Volkoff, TOV limit)，中子星質量如超越了TOV極限，便會在重力下進一步塌縮。

⑭ 奧本海默計算了在光電效應，以及在紫外線、X射線範圍的連續吸收的情況下，氫原子的光譜線強度。後來人們發現這些結果及計算方法可以應用於研究恆星內部的不透明度。

⑮ 電子場致發射(Field electron emission)是物體表面受很強靜電場引起的電子發射，可以利用量子隧穿效應(Quantum tunnelling effect)解釋。

⑯ 奧本海默首先從理論說明狄拉克方程(Dirac equation)的負能量解對應於一顆質量和電子相同、但電荷相反的粒子，就是三年後安德森(Carl D. Anderson)發現的「正電子」。他研究電子—正電子對產生等現象，並嘗試利用狄拉克方程建立量子場論，屬於量子電動力學的早期嘗試，完備的量子電動力學要到上世紀40、50年代才出現。

⑰ 奧本海默與他的博士生菲臘絲(Melba N. Phillips)計算原子核被重氫(氘)撞擊造成的人工放射性現象，即所謂「奧本海默—菲臘絲過程」(Oppenheimer-Phillips process)。

⑱ 包括宇宙射線在大氣層產生的 π 子、粒子陣雨，以及 π 子在原子核中傳遞強作用力等。

⑲ 例如奧本海默的博士生蘭姆(Willis Lamb)後來因為發現了「蘭姆位移」(Lamb shift)而獲得1955年的諾貝爾物理學獎。蘭姆位移是真空中量子漲落導致的原子能級輕微改變。

⑳ Robert Serber, *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb*, ed. Richard Rhodes (Berkeley, CA: University of California Press, 1992).

㉑ B. Cameron Reed, *The History and Science of the Manhattan Project* (Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014), 56-65.

㉒ 1945年7月16日的「三位一體」(Trinity)核試，成功引爆的就是鈾原子彈。

㉓ J. I. Katz, "Fermi at Trinity", *Nuclear Technology* 207, issue sup1: S326-34. 實際上「三位一體」原子彈的爆炸威力約為21,000噸TNT炸藥，但費米利用這樣簡單的估算得出正確的數量級，已經很了不起。

㉔ 德國人做實驗量度石墨對中子的減速作用時，因為所用的石墨有雜質，得出錯誤結果，令他們不用石墨而改用重水作減速劑，但生產重水很困難，而德國人在挪威的重水設施又被盟軍破壞，這就是納粹德國無法製造原子彈的原因之一。有關德國人的石墨實驗，詳見B. Cameron Reed, "Walther Bothe's Graphite: Physics, Impurities, and Blame in the German Nuclear Program", *Annalen der Physik* 532, issue 7 (2020): 1-5。

㉕ Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, 524. 據說這句話有一個沒有經過修訂的版本：「〔波耳〕讓這麼令人毛骨悚然的事業看起來有希望。」

㉖②③ Kai Bird and Martin J. Sherwin, *American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer* (New York: Alfred A. Knopf, 2005), 375; 344-47, 418, 423-24.

㉗ Abraham Pais, "The Princeton Period", *Physics Today* 20, no. 10 (1967): 42-48.

㉘ 杜魯門後來聲稱他帶有諷刺意味地回答：「不要緊，洗一洗就沒有了。」參見Andrew J. Rotter, *Hiroshima*, 106。

㉙ 參見www.youtube.com/watch?v=Ib13y nu3lac。

附錄：原子彈的物理簡介

很多人把奧本海默說成是「原子彈之父」，但原子彈的製造相當複雜，涉及物理、化學、爆炸品、金屬冶煉、電子工程和結構工程等許多不同範疇，若不是美國當時投入巨大資源，並不可能成事。原子彈不是奧本海默個人的創造，而是結合了很多科學家多年來的努力。

核裂變和連鎖反應

1938年，德國物理學家哈恩 (Otto Hahn) 和施特拉斯曼 (Fritz Strassmann) 發現核裂變。簡單來說，一些龐大而不穩定的原子核 (例如是鈾 [Uranium, U])，會分裂成兩個較細小的原子核，從而釋放巨大能量。人工的核裂變可以由中子撞擊原子核引發。核裂變釋出的能量遠遠多於日常的化學反應，兩者相差超過數千萬倍。這就是為甚麼核爆釋出的能量遠比化學材料造成的炸彈多，一個原子彈就可以摧毀整個城市^①。

用中子撞擊鈾原子核引發的裂變會釋放出兩至三個中子，這些中子會撞擊更多鈾原子核，引發更多裂變。西拉德等物理學家立即想到，這是一個「連鎖反應」，可以讓中子數目以指數速度增加，最終導致大量裂變和能量的釋放，造成龐大爆發。西拉德害怕納粹德國搶先一步造出原子彈，說服愛因斯坦去信羅斯福 (Franklin D. Roosevelt) 總統，建議美國率先發展核工業。信中提到德軍已經佔領捷克並停止了鈾礦的出口，因此美國亦應盡早保障自身核燃料的供應，並加快核實驗研究的步伐。這就揭開了原子彈研究的序幕^②。

問題是，天然的鈾有兩種同位素，它們的化學特性相同，但原子核的質量差了一點，U-238 較重，U-235 較輕，在中子撞擊下，U-235 比 U-238 更易進行裂變，因此只有用高濃度的 U-235 才可製造原子彈 (圖1)。在天然的鈾中，U-235 的比例只有 0.7%，其餘都是 U-238。因此，要從鈾礦中提煉出含量極少的 U-235 相當困難。經過提煉，U-235 濃度含量超過天然含量的鈾，稱為「濃縮鈾」。因為 U-235 和 U-238 兩者的化學特性相同，不能靠化學方法分離，而只能靠物理方法。此時，奧本海默在柏克萊的合作夥伴羅倫斯的實驗技術就大派用場。羅倫斯利用「電磁同位素分離器」，把帶電的鈾離子射進磁場中，由於較輕的離子 U-235 在磁場中旋轉的軌跡半徑較小，便可把它們分離出來。1945年7月，六十多公斤可用於製造原子彈

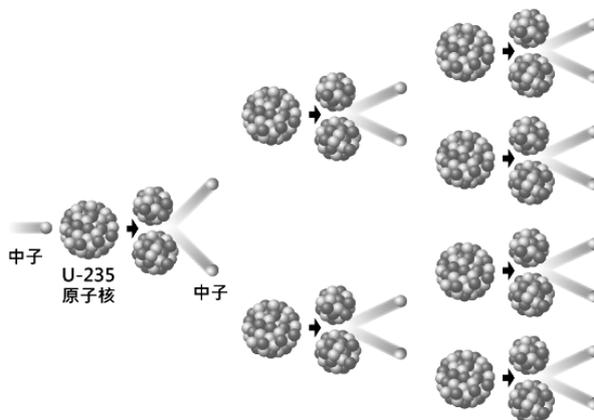


圖1 U-235 的連鎖反應，每次裂變產生兩至三顆中子。(圖片來源：香港中文大學物理系)

的濃縮鈾已被分離出來，後來落在廣島的原子彈「小男孩」(Little Boy)，便是利用這些鈾製造的。提煉濃縮鈾的另一個方法是利用氣體的擴散。當高溫的氣體經過一個很多孔的介質，較輕的氣體粒子會有較多機會通過，所以走出來的氣體中 U-235 比例會較多。如果讓氣體通過許多層這樣的介質，U-235 的比例便愈來愈高。當時，這個方法只用於初步增加 U-235 的濃度。當 U-235 的濃度達到 36%，會被送往電磁同位素分離器進一步處理，直至濃度達到 90%，可用於製造原子彈。後來才發現氣體擴散法比電磁方法更有效。問題是，無論是電磁方法還是氣體擴散方法，它們的效率都極低，意味着要投放大量資源建造實驗室和儀器，經年累月地提煉，才可獲得足夠的濃縮鈾^③。當時只有美國有能力投放足夠的資源和人力，加上美國遠離歐洲戰場，不用擔心實驗室被轟炸，所以最後才能成功。

臨界質量與爆發的時間窗口

要有多少濃縮鈾才足夠製造原子彈呢？這涉及所謂「臨界質量」的概念。試想像一個鈾製造的球體。鈾原子核在裂變中釋出中子，中子會在周圍胡亂運動，與其他鈾原子核碰撞，但不是每一個碰撞都會產生裂變，引發裂變有一定機率。有些中子未引發下一輪裂變，便從球體的表面跑掉了。如果跑掉的中子多於球體內新產生的中子，中子便會愈來愈少，無法維持連鎖反應。球體愈大，中子離開球體前碰撞的機會便愈多，更容易引發裂變。所以存在一個臨界質量，到達這質量，中子流失的速率便等於中子產生的速率。換句話說，必需有大於臨界質量的濃縮鈾，才可使中子數目不斷以指數增加，導致大量裂變並引致

爆發，製成原子彈。另外，一般都會在濃縮鈾外面加一層中子反射物料，包裹着鈾球，把部分本來將要流失的中子重新反射回鈾球之中，增加裂變的機會。這樣臨界質量便可降低，用更少的濃縮鈾造成相同的破壞④。

不過，實際的情況並非上述那麼簡單。當連鎖反應開始後，能量釋放極多，核物料會變得極熱，被氯化而迅速爆開，當原子核和中子之間的距離增加到一定程度，連鎖反應便會停止。問題是在連鎖反應停止之前，是否已經有足夠多的裂變進行，產生預期的毀滅性效果。裂變釋放出的中子有一個能量的分布，能量低的中子較多，能量高的較少。能量低的中子速度也低，不妨稱為「慢中子」，而能量高的則稱為「快中子」。量子力學的計算表明，慢中子引發裂變的機率遠高於快中子。驟眼看來，似乎應該依賴慢中子引發核爆，但實際上慢中子實在走得太慢了，爆炸完成前它們能引發的裂變很少。計算表明，快中子在連鎖反應中增加得極快，剛好能夠在物料爆開之前引發大量裂變，造成毀滅性的爆炸。裂變的時間窗口一瞬即逝，只有數千萬分之一秒或更短，掌握它對原子彈的成功引爆極之關鍵。以「小男孩」為例，在整個爆發完成之時，只有約2%的鈾進行了裂變，其餘98%沒有裂變的鈾都散布到天空中⑤。所以，大部分的鈾只是為了讓鈾的總質量超越臨界質量，沒有直接參與核反應。試想想，數十公斤的鈾，竟然只要令當中的2%裂變，就可以毀掉一個城市，可知原爆的厲害。相反，在和平用途的核反應堆中，一切要在受控的情況下緩慢進行，就會利用慢中子進行裂變。費米在1942年成功操作第一個受控核反應堆CP-1，利用慢中子進行裂變，用石墨作減速劑，使中子速度降低，並插入控制桿，調節核反應速度。

鈾原子彈

另一種可以用作製造原子彈的放射性物質是鈾(Plutonium, Pu)。 Pu-239 比 U-235 更具放射性，也更易進行裂變，所需的臨界質量比 U-235 小很多，但 Pu-239 不是天然物質，它是由 U-238 人工產生的。 U-238 俘獲了中子後會變成 U-239 ，之後會經歷兩次 β 衰變，變成 Pu-239 。而要產生大量 U-238 中子俘獲，便需要大型的核反應堆，這就是為甚麼費米的受控核反應堆會成為曼克頓計劃的一部分。CP-1只是試驗性質，之後他們又在華盛頓州哥倫比亞河畔的漢福德(Hanford)建造了多個很大功率(250-MW)的

核反應堆，提供足夠的 Pu-239 製造原子彈⑥。「三位一體」(Trinity)測試用的原子彈，以及後來投在長崎的「胖子」(Fat Man)都是鈾原子彈。

引爆方法

最後，一個很重要的問題是如何引爆原子彈。當核物料的質量大於臨界質量，便即時會爆炸，無法儲存。引發原爆的方法主要有兩個，第一個是比較簡單的槍式(圖2)，把核物料分為兩部分，一部分是柱體芯，另一部分是柱體環，引爆炸藥推動柱體環，套進柱體芯與之結合，令核物料的質量大於臨界質量，從而引發核爆。第二種是比較複雜的內爆式(圖3)，一部分核物料位於球體中心，另一部分位於外圍，引爆炸藥產生內爆，把外圍的物料推向中心。由於鈾比鈾更具放射性，背景中子量高，使鈾彈更易爆發，故核物料需要更高的速度會聚，而必需使用內爆式⑦。

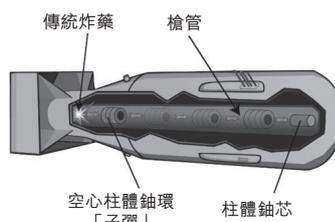


圖2 槍式引爆方法
(圖片來源：Dake, CC BY-SA 3.0)

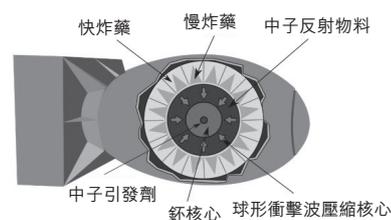


圖3 內爆式引爆方法
(圖片來源：Auis, CC BY-SA 2.5)

註釋

①② B. Cameron Reed, *The History and Science of the Manhattan Project* (Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014), 71-87, 90-95; 120-23.

③ B. Cameron Reed, *The Manhattan Project: A Very Brief Introduction to the Physics of Nuclear Weapons* (Sun Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2017), chap. 4, 1-2; *The History and Science of the Manhattan Project*, 190-212.

④ Robert Serber, *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb*, ed. Richard Rhodes (Berkeley, CA: University of California Press, 1992), 25-33.

⑤ Robert Serber, *The Los Alamos Primer*, 9-13; Jonathan Logan, "The Critical Mass", *American Scientist* 84, no. 3 (1996): 263-77.

⑥⑦ B. Cameron Reed, *The Manhattan Project*, chap. 4, 9-12; chap. 5, 1-10.