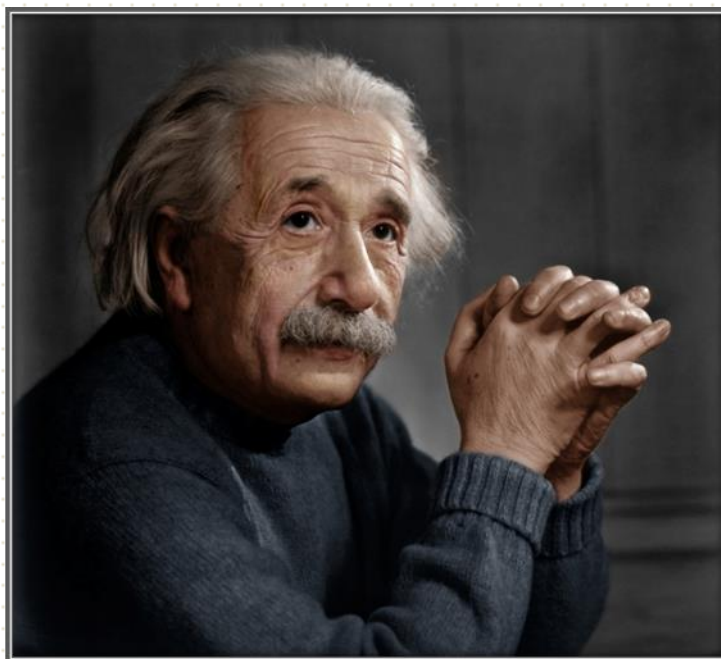


科技部科普活動計畫 站上巨人的肩膀

偉大科學家傳記讀本輔助講義

第三部：愛因斯坦的故事



作者：高涌泉

美國加州大學柏克萊分校物理博士

國立臺灣大學物理系教授

國立臺灣大學科學教育發展中心主任

愛因斯坦

青年愛因斯坦

天才也有落寞的時候，這是愛因斯坦不甚得意的過去，以及一段貧窮但無限美好的時光。



愛因斯坦在伯恩的專利局工作期間，與哈比希特(左起)、索羅文成立了「奧林匹亞學院」，一起探討哲學、科學與文學等，渡過一段美好而充實的青年歲月。(攝於 1903 年)

1894 年,愛因斯坦 15 歲，正在德國慕尼黑念中學。他的家人因為生計之故，在這一年 6 月搬到義大利米蘭居住。愛因斯坦不能跟著去，因為他得留下來把中學文憑拿到手。愛因斯坦很不滿意這樣的安排。一來他本來就不喜歡有軍隊味道

的德國中學，而學校老師也不喜歡他，例如就曾有老師對他說：「你只要坐在教室裡就會妨礙到老師應得的尊敬。」顯見厭惡權威的他與一板一眼的教育格格不入（不過他的成績還相當好，絕不是傳言中學業表現很糟的學生）。加上現在他得和家人分離，只能獨自住在宿舍裡，由遠房親戚照顧，當然覺得非常沮喪。

不快樂的愛因斯坦在父母不知情之下，下了決心一定要到義大利和家人團聚，就算沒有文憑也要離開德國。他設法拿到一份醫生證明，裡頭寫說愛因斯坦健康欠佳，必須在家人照顧下長期療養才能康復。他另外還拿到數學老師的一封信，證明他的數學能力已達大學水準。數學老師這麼說並沒太誇張，因為愛因斯坦已經自修了微積分，而且對於物理的理解也相當深刻，例如他在 16 歲就想過，如果他能以光速前進會看到什麼事情這種問題。

徜徉在自由的教育環境

愛因斯坦忽然自行輟學回到義大利家中，他的父母難免擔心他是否自毀前程，還好愛因斯坦答應他們一定會用功自修，以考上蘇黎世的聯邦理工學院。1895 年 10 月，愛因斯坦參加了聯邦理工學院工程系的入學考。他這時才 16 歲半，比正常入學年齡 18 歲要小不少。結果他落榜了，原因是除了物理與數學之外，其他科目都考得不夠好。不過聯邦理工學院的校長很欣賞他的潛力，告訴他只要拿到了高中文憑，就可以不必再經考試直接入學念書。所以愛因斯坦便前往瑞士德語區內的阿勞（Aarau）中學註冊就讀，同時寄宿在溫特勒（Jost Winteler）先生家中。

愛因斯坦發現，阿勞中學充滿自由精神，和德國中學的權威氣息大為不同，他非常喜歡這樣的教育環境。愛因斯坦後來跟朋友說：「我對這間學校留下了不可磨滅的印象。」溫特勒先生是阿勞中學的歷史與古典文學老師，他將愛因斯坦視同家人，愛因斯坦也很喜歡這家人，他和溫特勒的女兒瑪麗（Marie Winteler）尤其互相看得順眼；溫特勒的一個兒子後來還娶了愛因斯坦的妹妹馬雅（Maja Winteler）。

1896 年秋天，愛因斯坦拿到了高中文憑，終於得以進入蘇黎世聯邦理工學院就讀。他的目標已經不是當個工程師，而是想當一位專門教授數學與物理課程的高中專科教師。愛因斯坦老早就想放棄德國公民的身份，他在那一年也拿到了從出生地德國烏爾姆（Ulm）所發出的文件，證明他已經不是德國公民。他大學四年期間的生活費為每個月 100 瑞士法郎，都是親戚所支助的，他每個月會從中存下 20 法郎以做為將來歸化為瑞士籍的費用。他在 1899 年 10 月提出歸化申請，而在 1901 年 2 月成為瑞士公民。

率性而為的大學生活

不過愛因斯坦在聯邦理工學院的四年間並不是全然無憂無慮的。在家庭方面，他父親的生意經營得並不成功，讓身為長子的他心情相當沉重。例如他曾在給妹妹的信中說：「我已經成年，卻只能在旁看著（父母的遭遇）……一點忙也幫不上，我純然只是父母的負擔而已……我要是沒活著就好了。」在學校方面，他必須在四年內通過兩次關鍵的考試，除此之外，老師不會太介意他做些什麼。所

以愛因斯坦平常還是依著自己的性子，沒有規規矩矩地去上他不喜歡的課，而多把時間花在自修上與物理實驗室裡；他自己花功夫研讀的東西包括馬克士威的電磁學理論、馬赫的力學、波茲曼的氣體動力學等。但是他讀的這些高深物理，卻未必能夠讓他通過學校的考試。

還好，他的同班同學葛羅斯曼（Marcel Grossmann）是個循規蹈矩的好學生，除了認真上課之外，也非常用心做筆記；葛羅斯曼很欣賞愛因斯坦的才氣，認為愛因斯坦將來一定非池中之物，所以毫不吝嗇地將自己漂亮的筆記在考前借給愛因斯坦應急。如果沒有葛羅斯曼這樣子幫忙，愛因斯坦恐怕得更大費周章才能順利畢業。（多年以後，愛因斯坦在發展廣義相對論時碰上了數學困難，他又找上了那時擔任數學教授的葛羅斯曼，才學到了微分幾何與張量分析。）但是愛因斯坦的女朋友及同班同學米勒娃（Mileva Marić）卻沒能和他一起在 1900 年 7 月通過畢業考試。米勒娃隔年 7 月又考了一次，還是沒過關。

米勒娃是塞爾維亞人，比愛因斯坦大四歲。她的父親是中級公務員，所以家境大約比愛因斯坦還好些。在那個年代，人們還不習慣女性研習物理，米勒娃只有跑到社會風氣較自由的瑞士念大學，成為聯邦理工學院愛因斯坦那一班唯一的女學生。當時周圍的朋友覺得米勒娃是個客氣、話少且有些憂鬱的人，但是她卻和愛因斯坦很談得來，兩人漸墜入情網。愛因斯坦的母親一開始非常反對兩人交往，但是愛因斯坦可不是輕易屈服的人，在一場家庭小革命以及一段曲折的路途之後（米勒娃在 1902 年初生下了兩人的女兒列瑟，這個私生女後來下落不明，可能是被人收養了），米愛兩人終於在 1903 年 1 月結婚。

早熟的心靈

愛因斯坦年幼時，有兩個接觸自然奧秘的經驗：首先是他父親在他四、五歲時拿了個羅盤給他，他看到了羅盤指針在沒有與外物接觸的情況下，竟然會固定朝向一個方向！這件事讓他留下了深刻而永恆的印象——事物在表面之下顯然隱藏了一些東西。

另一項重大經驗是，他在 12 歲時拿到了一本解說歐幾里得平面幾何的小書，裡頭有許多第一眼看來並不顯然為真、但卻又可以證明的敘述，對於少年愛因斯坦來說，這些既清晰又確定的內容是極為神奇的事。對於頭次接觸到幾何證明的人而言，看到純思考竟可以導致確定的知識，的確非常奇妙。這兩件經驗顯然引導了愛因斯坦走向獨立於我們人類存在的廣大世界，促使他奉獻於對於這個世界的思索。

少年時的愛因斯坦很早熟，很早就體悟到不停追逐多數人一輩子的希望與奮鬥是虛無的，而且這種追逐是很殘酷的，但是每個人為了肚皮卻無法不參與這種競逐。再者，儘管加入競逐可以滿足肚皮，卻不能滿足一個會思考、有感覺的人。對於這樣的人而言，第一個出路就是宗教。在他小的時候傳統教育機器把宗教灌輸到每個小孩身上，因此他自己便有了很深刻的宗教信念。

然而，這種宗教信念在他 12 歲時卻突然中斷，原因是當時他閱讀了一些科普書籍，因而深信聖經中的很多故事不可能是真的。此外，他亦發現國家會透過謊言，刻意欺騙年輕人。對於年輕的愛因斯坦來說，這是個心碎的經驗。從此他再也不輕易地相信各式權威，而他一輩子也因為這樣，而對於任何特定社

會環境中的信念都抱著懷疑的態度。

自此，愛因斯坦的面前開展了一個廣大的世界，「它獨立於我們人類而存在，以一個巨大的、永恆的謎佇立於我們面前」；而「我們透過查驗與思考，起碼可以了解這個世界的一部份。對於這個世界的思索就像一種解放似地向我招手，而且我很快就注意到我所欽佩的很多人都因奉獻於這種思索而尋得內在的自由與心安。」愛因斯坦在他的《自傳筆記》如此說道。

在已知的可能框架內，從思維上去掌握這個人之外的世界，便成了他最高的目標。「過去與現在和他有類似動機的人們，以及他們的洞見，已成了不可遺失的朋友。前往這個樂園的路途並不像前往宗教樂園的路途那樣舒服或誘人，但是它還是一樣值得依賴，我從來沒有後悔選擇了這一條路。」他自述的這段心路歷程充份解說了其人生羅盤的來源。而他年紀輕輕就能看出「這種追逐是很殘酷的」，的確算得上早熟。



愛因斯坦的心靈，從很小的時候即獲得啟發。圖為愛因斯坦和妹妹馬雅，當時愛因斯坦五歲，馬雅三歲。終其一生，馬雅都是愛因斯坦最親愛的密友（攝於1884年）。

失業

話說回來，1900 年 7 月愛因斯坦從聯邦理工學院畢業，他萬萬沒想到在接下來的兩年裡，日子會過得相當不如意。首先，在當年的畢業班當中，他是唯一未能留校擔任助理的學生。愛因斯坦把這件事怪罪到聯邦理工學院韋伯（Heinrich Weber）教授頭上，他認為是韋伯從中作梗他才喪失助理一職。韋伯本來很欣賞愛因斯坦，但是後來似乎受不了愛因斯坦不把老師看在眼裡的態度，曾對愛因斯坦說：「你很聰明，但有個缺點，你聽不進別人的話！」愛因斯坦我行我素的作風還是讓他吃到了大苦頭。

雖然一時失業，愛因斯坦仍在 1900 年底完成了他第一篇科學論文，送交著名期刊《物理年報》（Annalen der Physik）發表。他在 1901 年 3 月把這篇文章寄給德國萊比錫大學的奧斯特瓦得（Wilhelm Ostwald，1909 年諾貝爾化學獎得主）教授，希望能因此得到奧斯特瓦得賞識而獲聘為助理，但是奧斯特瓦得並未回信。愛因斯坦在那年 4 月又把論文寄給荷蘭來登大學的教授開默林昂內斯（H. Kamerlingh Onnes，1913 年諾貝爾物理獎得主），也同樣沒申請到任何職位。

愛因斯坦的父親在 1901 年 4 月背著他寫了封信給奧斯特瓦得教授。今天回頭讀這封信，令人無法不有所感觸，信裡這麼說：「……我兒子艾伯特·愛因斯坦今年 22 歲，在蘇黎世聯邦理工學院讀了四年，去年以優異的成績通過數學與物理的學位考試。但是自那時至今，他都找不到助理的工作，而只有這種職位才能讓他繼續在理論與實驗物理的方向繼續深造。每個能夠評量他的人都稱讚他的天份，無論如何，我可以向你保證他非常勤勞，而且極度熱愛科學。我的

兒子對於他找不到工作極不快樂，而且越來越相信自己是科學這條路上的失敗

者……因為我們不是有錢人，所以他也為了變成我們的負擔而苦惱不已……

我懇求你讀一讀他發表於《物理年報》的論文，並希望你可以寫幾句鼓勵的話給他，好讓他重拾生命與工作的喜悅。除此之外，萬一你能夠給他一個助理的工作，我亦將感激不盡……」無論奧斯特瓦得教授是否真的依愛因斯坦父親的請求而寫封信來鼓勵他，愛因斯坦依舊沒有找到工作，不過九年之後（1910年），奧斯特瓦得倒是頭一位提名愛因斯坦角逐諾貝爾獎的人。

1901年5月，愛因斯坦開始四處當起高中代課教師與私人家教，課餘他還是把心思用於物理研究上。他寫信給朋友說已經放棄了到大學工作的野心，因為他「在目前的情況下，還能保持對於科學研究的能力與熱忱」。1901年底，愛因斯坦送交一份論文給蘇黎世大學，希望申請博士學位；論文主題是氣體動力論，不過審查未獲通過。但在這個挫折之後，他的運氣開始好轉。

匱乏而美好

愛因斯坦與好友成立了奧林匹亞學院，

無拘無束地探索哲學、科學與文學，渡過一段貧窮卻美好的時光。

1901年12月，愛因斯坦依據公開的徵人廣告向瑞士伯恩專利局申請工作。

在此之前，他已經透過關係知道他有到專利局任職的機會，牽線的人正是同學葛羅斯曼與其父親。1902年2月，愛因斯坦搬到伯恩，預期專利

局會給他好消息。6月底，他開始到伯恩專利局工作，擔任實習三等技員，年薪

3500 法朗。他的父親在那年 10 月過世。有了較穩定的工作，他隔年 1 月就娶了米勒娃，再隔年 5 月大兒子誕生，9 月他在專利局的試用期屆滿，成為正式職員。再隔年，也就是 1905 年，他一連完成了好幾篇論文，改變了物理與人類文明的方向。

在等待專利局工作的期間，愛因斯坦的主要收入來自擔任數學與物理家教。他在報紙上刊登了一個廣告，說願意以一小時三法朗的收費，教授數學與物理。一位伯恩大學的哲學學生索羅文（Maurice Solovine）看到廣告找上門來，說他想多學一些扎實的學問如物理；結果兩人一見如故，所謂的上課變為天南地北的討論。隔幾天，愛因斯坦便對索羅文說，與其無益地單方面授課，不如兩人定期見面討論共同感興趣的話題。後來另一個朋友哈比希特（Conrad Habicht）也加入聚會。三人成立了「奧林匹亞學院」，無拘無束地探索哲學、科學、文學等課題。對於三人來說，學院的活動是一段物質上匱乏但無限美好的時光。

50 多年後，索羅文與哈比希特在巴黎碰了面，兩人寄了封明信片給那時在普林斯頓的「奧林匹亞學院院長愛因斯坦」，說他們永遠留了個座位給他。愛因斯坦那時身體已經不是太好，但童心還在，便回了封信給「不朽的奧林匹亞學院」，裡頭說道：「妳的成員創造了妳，以開妳那些歷史更悠久的姊妹學院的玩笑。我在多年的細心觀察之後，才知道當初的玩笑實在開得真好。」他最後署名：「現在僅是一位通訊會員的愛因斯坦」。

來自哲學的啟發

愛因斯坦在 16 歲便設想出極出色的「想像實驗」，展現其哲學慧根。

著名天文學家錢卓斯卡是愛因斯坦的仰慕者，他曾在 一場紀念歐本海默的演講中，提出這個問題：「大家都認為愛因斯坦在 20 世紀物理學的地位是獨一無二的。不過或許還是有人要問，為什麼如此？就物理學家的知識而言，我們其實可以舉出好幾個人，他們的重要貢獻可能比愛因斯坦還有用——無論如何，起碼和愛因斯坦的貢獻相當。以下是這類人物的一些例子：勞倫茲、龐卡赫、拉塞福、波耳、費米、海森堡、狄拉克、薛丁格。」

錢卓斯卡自己的答案是：「毫無疑問的，愛因斯坦獨特之處在於：他除了對狹義相對論、布朗運動，以及光子概念的貢獻之外，還是廣義相對論唯一的發現者。」雖然廣義相對論未必和原子論一樣，應成為每個物理學家的必備知識，但是研讀過這個理論的人，都會同意大數學家魏爾（Hermann Weyl）對它的評價：「廣義相對論是人類推理性思維能力最偉大的例子。」錢卓斯卡本人是相對論專家，很能體會愛因斯坦在廣義相對論上所表現出來的偉大創造力與卓越思維能力，所以會以廣義相對論這項工作來區別愛因斯坦與其他大物理學家。

就愛因斯坦的成就如何超越其他人而言，我當然認同錢卓斯卡的答案，不過這並沒有回答大家其實更感興趣的問題：愛因斯坦的天才如何與眾不同？但這個問題不會有什麼客觀、有意思的答案，甚至可能有人會覺得愛因斯坦根本並沒有比，譬如說，狄拉克來得聰明。可是如果我們問：愛因斯坦在氣質上、在

提問的方式上，與其他一流物理學家有什麼不同？這個問題就值得討論。

我以為，愛因斯坦在氣質上與其他著名物理學家確有相當不同之處，尤其是小他一輩以上的海森堡、狄拉克、費米，以及二次大戰後成名的施溫格、費曼、葛爾曼，乃至當紅的威爾切克、維頓等人。相異之處主要在於愛因斯坦遠比他們更像哲學家：愛因斯坦的哲學涵養非常深厚，而且清楚地呈現在他的物理研究上，例如對於相對論以及量子力學的研究。

愛因斯坦在其〈自傳筆記〉一文中，說明了他如何發現狹義相對論：「我 16 歲時曾經想到（關於馬克士威方程式的）一種吊詭：如果我以速度 c （真空中的光速）去追一束光，則我應該看到一束靜止的光，也就是在空間中來回震盪的電磁場。但是，無論就經驗或是就馬克士威方程式而言，這種現象似乎並不存在。」愛因斯坦在 16 歲便能設想出如此出色的「想像實驗」，已展現其哲學慧根。愛因斯坦繼續說：「狹義相對論的根源已經包含在這個吊詭之中。當然，今天每個人都知道，只要時間的絕對性（亦即同時性的絕對性）這項假設依然不自覺地留在我們潛意識之中，則一切想要圓滿澄清這個吊詭的企圖都註定失敗。只要能認清時間的絕對性其實只不過是任意的假設，就能看出問題的答案。發現這項關鍵點所需的那種批判性思考，就我而言，基本上來自休姆與馬赫的哲學作品。」

早在 1915 年，愛因斯坦便在信中告訴朋友許立克，他狹義相對論的思想受了馬赫的影響，又說「但休姆的影響更大，因為就在發現狹義相對論之前不久，我認真研讀了休姆《論人性》的德文翻譯。如果沒有研讀這些哲學作品，我非

常可能會找不到答案。」愛因斯坦究竟從休姆與馬赫那裡得到什麼啟發？休、馬二人的哲學立場是：任何觀念皆應立基於知覺經驗之上，一切超越經驗之外的觀念都必須質疑。絕對時間的概念就是一種沒有經過檢驗的假設，愛因斯坦之所以能毅然摒棄這個大家習以為常的假設，靈感即來自休、馬的哲學思想。1924年他回憶說：「在思考了七年卻一無所獲之後，我忽然想出了答案，那就是我們對於空間與時間的觀念與定律，除非它們清楚立基於經驗上，否則是無效的。」一旦推翻了絕對時間，光速在各座標中都是定值這件事就不再弔詭。愛因斯坦便是如此想出狹義相對論，而來自哲學的啟發是關鍵。

$$E = MC^2$$

歷史上有些年份，在我不甚出色的記憶中，留有特別鮮明的印象。原因多半是在那些年份裡發生了物理史上的大事。例如提及 1687 年，我就會想到牛頓在那年發表了《自然哲學的數學原理》這部奇書。又如提起 1925 年，它對我的意義就是海森堡(W. Heisenberg, 1901-1976)那年七月開啟了量子力學革命。有一次翻魯迅的書，猛然想到孫文也是在 1925 年過世，竟然有些訝異之感。

二十世紀物質科學進展奇速，幾乎每隔幾年就會有重要的物理發現。所以值得一提的年份比比皆是。不過在這些年份中我最喜歡 1905 年。那一年在瑞士專利局當三等技師的愛因斯坦(Albert Einstein, 1879-1955)，一連發表了幾篇驚世之作，引入了革命性的觀點，宣告新的天才來臨。愛因斯坦那時才二十六歲，正式的博士學位還沒拿到，與大他四歲的太太米麗娃(Mileva Einstein, 1875-1947)和一歲的大兒子住在伯恩的公寓裡。文章發表後，愛因斯坦原先預測馬上就會出現嚴酷的抗拒與批判，沒想到一時之間居然風平浪靜沒有回應。漸漸地迴響出現了，而且都還是相當正面的。物理大師普朗克寫了封信請教一些讓他略感困惑之處，這讓愛因斯坦非常興奮。他也收到一些要寄給「伯恩大學愛因斯坦教授」的信。有人專程跑到專利局想與他當面討論，也有人詢問能否來和他一起研究。

就在幾年前，愛因斯坦想要在學校謀一職，卻處處碰壁，而只能棲身於專利局。居然一下子麻雀變鳳凰，在學術界聲譽陡起。不過愛因斯坦在專利局並未

因此而立即受到禮遇，隔年四月，他才被提升為二等技師。雖然愛因斯坦一直要到 1909 年才能離開專利局轉至蘇黎士大學任教〔薪水其實並無增加〕，他的歷史地位已經確立了。

普林斯敦大學出版社在 1998 年發行了《愛因斯坦的奇蹟年(Einstein's Miraculous Year)》一書，其副標題是「五篇改變物理面貌的論文」。書中收錄了愛因斯坦 1905 年五篇論文的英文翻譯，也找了名家寫序與導讀。對於我這種不能流利地讀德文原著的人來說，這是一本很棒的書。收錄的第一篇論文是關於分子大小的推論，這也是愛因斯坦的博士論文。第二篇從微觀角度分析布朗運動。第三篇奠定了特殊(狹義)相對論的基礎。在相對論裡，時間與空間二者再也不是互不相干的獨立體，而是結合成相互依賴不可分割的時空連續體。相對論的一個重要結論是物體的質量(M)與能量(E)密切相關，二者可以互換。它們的關係是能量等於質量乘上光速(C)的平方。也就是 $E = MC^2$ 。第四篇論文即在說明一個物體如果放出能量為 E 的輻射，則它減少的質量就為 E 除以光速的平方。第五篇論文提出光量子的概念，並以此為本來分析光電效應。文章中所預測的效應在 1915 年為美國人密立根以實驗證實。為此愛因斯坦獲得 1921 年諾貝爾物理獎。這篇文章也是愛因斯坦自認在五篇文章之中唯一可以稱得上是「革命性」的文章。普朗克(M. Planck, 1858-1947)是第一位提出量子概念的人，不過進一步敢把光看待成是由粒子似的光量子所組成的人是愛因斯坦。因為光量子的存在是絕對無法從古典的馬克斯威爾電磁學中推論出來，所以說愛因斯坦的想法是革命性的毫不為過。

不過光量子對不熟悉物理發展的一般人來說還是相當陌生的。大家比較經常聽到的是第三、四篇的內容，即相對論與 $E=MC^2$ 這個可以說是二十世紀最具象徵意義的科學公式。1938 年德國物理學家發現中子撞擊鈾原子核之後，可以誘使鈾分裂成氙與鋇及幾個中子。這些分裂物的質量總和小於鈾的質量。根據質能公式，減少的質量就會轉化成分裂物的「大量」動能。腦筋動得快的科學家馬上就想到可以利用這些被釋放的動能來摧毀物體。這就是威力強大的原子彈之原理。原子彈「及爾後的氫彈」的出現改變了人類的歷史，今天我們還活在其巨影之下。要論斷核子武器的是非功過不是件容易的事。

愛因斯坦在 1914 年轉至柏林大學任教授一職。1919 年二月他與米麗娃離婚，離婚協議書講明未來的諾貝爾獎金歸米麗娃所有。同年六月再娶大他五歲的表姊艾爾莎(Elsa Einstein，1876-1936)。1939 年他寫信給美國羅斯福總統指出原子彈的可能性及擔憂德國或許已有造彈計劃。1940 年入美國籍。他在 1916 年完成了苦思十年的廣義相對論，成功地結合了狹義相對論與萬有引力。一般公認此理論是「最美麗的理論」。愛因斯坦過世於 1955 年，過世前二十年致力於追求「統一場論(unified field theory)」，皆未成功。

今日愛因斯坦已成為天才的代名詞，是眾多天才研究者的研究對象。大家都希望挖掘出他那豐沛創造力的秘密。我以為更耐人尋味的是他那卓絕的獨立性格。他從來都是個獨行俠，沒有附合過什麼學派或組織。愛因斯坦大約是我知道最能享受寂寞的人。他以二十六歲年輕之齡孤獨地於專利局憑一己之力揭開了自然的奧秘，給我非常真實的「雖不能至，心嚮往之」之感。

遠見還是反動—愛因斯坦與波耳

量子力學是 20 世紀最成功的理論之一，可是愛因斯坦卻不喜歡這個理論。他是跟不上時代了呢？還是慧眼獨具？

愛因斯坦的物理直覺在 20 世紀無人能出其右。他在新舊物理交替之際，常能發人所未見，眼力既遠又準。尤其是對於基本原理的闡發，往往可以超越傳統思維，同輩的物理高手只能甘拜下風。可是這樣一位向來在引發革命的天才，竟然一輩子不肯接受量子力學這門也是革命性的學問，難道是他敏銳的判斷力生鏽了？或者他的確瞧出了量子力學的破綻？

量子力學是非常奇特的科學：一方面它的定律可以讓理論學家精準地算出實驗的種種結果（這點愛因斯坦也承認）；另一方面，這些定律所呈現出的微觀世界卻又非常不可思議，難免引人半信半疑，而這正是愛因斯坦不喜歡的部分。一般科學家通常會以實用的觀點看待量子力學，他們即使「不懂量子力學」，也可以成為相當稱職的量子技師，所以不會在意比較微妙的意義問題。但是愛因斯坦念茲在茲的正是本質性的東西，所以他當然要對量子力學的意義追究到底。

愛因斯坦曾經對朋友說，他思索量子問題的時間百倍於思索廣義相對論的時間。他在量子力學出現之後，提出了一個又一個的「想像實驗」，希望能藉以暴露量子力學的內在矛盾。對於愛因斯坦尖銳的挑戰，量子力學陣營出面迎戰的人是波耳（Niels Bohr）。論戰開始時，二人都已是獲得諾貝爾獎的大人物，也是相互景仰的好友。波耳自 1927 年起，至 1955 年愛因斯坦過世止，從未間斷地

想要說服愛因斯坦接受量子力學「真理」。反過來，愛因斯坦也一直想讓波耳承認量子力學並不完備。在這場歷史性的爭論中，兩人都沒能折服對方，不過多數（尤其是新一代的）物理學家是傾向波耳的。

波耳是丹麥人，比愛因斯坦小六歲。他在 1913 年提出了第一個可以成功解釋氫原子光譜的半古典氫原子模型，從此成為原子物理的掌門人。對於發現量子力學的年輕一代如海森堡、狄拉克等人而言，波耳是他們的精神導師。海森堡在《物理與哲學》一書中回憶，他與波耳在 1926~27 年間於哥本哈根面對如何詮釋量子力學的問題，經常

討論了好幾小時，直到深夜，最後幾乎絕望了。討論結束後，我獨自到隔壁的公園走一走，不停地問自己：自然可能像原子實驗中所看到的那麼荒謬嗎？

波耳和海森堡絞盡腦汁的心得，一般稱為「哥本哈根詮釋」；對於多數物理學家來說，它至今依然是量子力學的正統詮釋。大致上講，哥本哈根詮釋的意思如下：

1. 任何物理實驗的結果必定是以古典物理的語言（物理量）來描述的，譬如一個粒子的位置、動量和角動量等。
2. 在古典物理中，我們可以精準地預測與測量出這些物理量。但是在微觀的量子世界中，物理量會受到「不確定原理」的限制，測量的結果依狀況可能有無可避免的誤差。對於特定物理量而言，我們只能用量子力學法則，去計算在實驗中測量到其各種值的機率。以一個電子的位置為例，假設我們知道電子最初的位置，我們就可以用薛丁格方程式，算出

之後任何時刻在某個空間位置找到電子的機率函數。

3. 但是這個機率函數並不代表電子真實的運動情形。譬如說，我們以光去照射氫原子，看到其中電子的位置是 x_1 ，過了一段時間之後，我們又用光去尋找電子的位置，發現它這次出現在 x_2 位置；量子力學可以告訴我們的是在 x_2 處找到電子的機率有多大，可是我們卻不能由此推論出「電子在兩次觀測之間，一定是在某個地方，所以它必然循著某一條未知的軌跡從 x_1 跑到 x_2 」。這樣的推論假設了電子只會表現出「粒子」的性質（所以才有「軌跡」可言），但是這卻會導致和實驗不相容的結果。
4. 「波動」與「粒子」這兩個性質在古典物理中是相互矛盾的，只能有一個成立，粒子不會有波動性，而波也不會有粒子性。但是在量子物理中，電子卻可以依據實驗的型態而展現出波動性或粒子性。譬如說，如果我們一直將光照射在電子上面，我們就會看到電子的運動的確是有軌跡可言。這時電子展現了粒子性，但是這樣的電子就無法表現出波動性。只有當我們不用光去觀察電子時，它才會呈現波動性。量子力學把波動性與粒子性看成是「互補」的性質。

「是不是只有當你在看月亮的時候，

它才會在那而嗎？」

愛因斯坦不喜歡哥本哈根詮釋，因為這種詮釋意味著微觀物體的性質會受到「觀測」這個步驟的影響，所以沒有「客觀」的本性。他相信觀測者（儀器）不應該出現在對於自然世界最深刻的描述中，也就是說他相信最底層的自然有

所謂的「客觀實在性」。愛因斯坦曾經問朋友：「是不是只有當你在看月亮的時候，它才會在那兒嗎？」言下之意是他無法接受電子在兩次測量之間沒有所謂「真實的物理狀態」可言的說法。愛因斯坦認為量子力學只能提供一群微觀系統的統計性描述，而無法描述單一的物理系統（例如單一個原子）；既然物理理論的目標在於完整地描述一切自然系統，量子力學就不會是完備的最終理論。他有句名言清楚地表達了這個信念：「上帝不玩骰子。」他不反對量子力學在邏輯上可以自圓其說，但是他堅信存在著一個比量子力學更完備的理論，可以講清楚介於兩次測量之間的電子究竟是什麼玩意兒。這種能夠穿透機率迷霧而滿足客觀實在性要求的理論，一般稱為「隱變數理論」。

但是隱變數理論究竟可不可能呢？或者它只是愛因斯坦個人的反動幻想而已？貝爾（John Bell）是少數對於這個問題下過功夫的人之一，他在 1966 年提出了著名的貝爾不等式，證明了某一類型的隱變數理論是不可能的。貝爾是同情愛因斯坦的，但是後來還是得承認：

歷史站在正統詮釋這一邊。愛因斯坦是個理智的人，其他人只是把頭埋在沙裡。我覺得愛因斯坦在這件事上所表現的智力超過波耳太多了。所以，對我而言，愛因斯坦的點子行不通是很可惜的事。合理的事就是行不通！

儘管波耳一直在得分，還是沒有人敢肯定地講愛因斯坦絕對沒有翻身的機會。

愛因斯坦的以太

依據廣義相對論，真空具有物理特性，在此觀點下，以太是存在的。

在 20 世紀初，也就是在馬克士威 過世約四分之一世紀後，幾乎所有物理學家都相信依賴以太概念的馬克士威電動力學違背了相對性原理，既然馬克士威理論與實驗全然相符，所以出錯的當然是相對性原理。能夠不受這個集體偏見影響的只有在瑞士專利局上班的年輕愛因斯坦，以及數學大師龐卡赫等極少數人。

不過深信電動力學定律與相對性原理相容是一回事，能夠把其間道理講得清清楚楚則又是另一回事。愛因斯坦自己也要在思索了這個問題七年之後，也就是直到 1905 年，才恍然大悟關鍵在於時間：傳統的絕對時間概念必須拋棄，也就是「同時性」沒有絕對的意義；譬如說，若有兩個事件對於靜止於月台的觀測者而言是同時的，則對於在鐵軌上等速前進的火車中的觀測者來說，這兩件事並不會同時發生。這個想法當然極為奇怪，不過也只有如此，才能融合電動力學與相對性原理，也才能說明光速何以對於任何觀測者而言都是一樣的。

當然，愛因斯坦在提出嶄新的時空觀之後，也必須修改牛頓的動力學定律，以便讓力學現象依舊遵循相對性原理， $E=MC^2$ 這個著名公式也因此而出現。所以，愛因斯坦的狹義相對論的主旨就是在所有慣性坐標系中，物理定律都是一樣的，即物理方程式有相同的形式；換句話說，一切慣性坐標系都是等價的，

觀測者不能僅憑物理定律來判斷自己是否在等速運動。

狹義相對論雖然非常漂亮地解決了大難題，但是也有明顯的不足之處。首先，狹義相對論的相對性原理只局限於慣性坐標系之間的相對性，如果碰上加速坐標系就失效了；其次，牛頓的萬有引力是一種瞬時的超距力，違背了光速是速度上限這個狹義相對論原則。所以物理學家就面臨了兩項挑戰：(1)如何推廣原本只適用於慣性坐標系的相對性原理，以適用於任意坐標系；(2)如何建構出符合相對性原理的重力理論。

在牛頓力學中，相對性原理是無法推廣至加速坐標系的。想像我們坐在等速前進的火車廂內，一但火車加（減）速，我們會馬上感受到往後（前）的慣性（假）力，如此一來，就察覺了自己在改變運動狀態，因此加速運動是絕對的。所以儘管大半物理學家都認同萬有引力理論應該修正以避免抵觸狹義相對論，卻未必認可狹義相對論應推廣至廣義相對論的必要性。不過愛因斯坦有不同的看法。

愛因斯坦年輕時熟讀過奧地利物理學家馬赫所著《力學的科學》，極為信服書中對於牛頓絕對空間概念的犀利批判，所以愛因斯坦對於將相對性原理推廣至一般狀況，一直有很高的期待。但怎麼著手呢？突破時刻發生於 1907 年，他那年想到了「一生中最快樂的點子」：對於一位從屋頂自由落下的觀測者而言，重力場並不存在。因此「重力場與因電磁感應而產生的電場類似，其存在只有相對意義。」換句話說，愛因斯坦體認到因加速度而產生的慣性力，與重力是不可區分的，兩者是同一回事，我們無從以慣性力來判斷自己是否在運動！

因此愛因斯坦認定推廣相對性原理與建構新重力理論其實是同一項任務，也找到了切入點：依據狹義相對論，同樣的鐘只要位於（任意）加速坐標系中不同位置，其指針就可以有不同的走速，而同樣的尺只要是位於不同地方就可以有不同的長短；從這認知出發，愛因斯坦很快就想到時空是彎曲而不是平坦的，而且重力現象可以看成是彎曲時空的幾何效應。順著這條路努力走下去，愛因斯坦終於在 1915 年 11 月底找到描述彎曲時空（即重力場）的方程式；這個方程式的形式在廣義坐標變換之下不會改變。他後來反省說：「依據廣義相對論，真空具有物理特性，在此觀點下，以太是存在的。」也就是說，愛因斯坦把描述彎曲時空的度規張量看成是一種新類型的以太，因為它不是物質，卻又具有物理性質。

愛因斯坦革命

黑體輻射與一群氣體分子的類比，引導愛因斯坦提出了革命性的光量子概念。

對於黑體輻射現象的闡釋，物理學家公認普朗克與愛因斯坦兩人要居首功：首先，普朗克於 19 世紀最後一年找到了正確的數學公式以描述輻射強度與頻率的關係；五年後，愛因斯坦以普朗克公式為基礎提出光量子假設，認為電磁輻射是由離散的光量子構成的。普朗克雖然知道他的公式與古典物理格格不入，卻從沒放棄以傳統觀點來理解輻射公式，所以他一直不願接受愛因斯坦的光量子，以致於年長愛因斯坦 21 歲的普朗克在 1913 年推薦愛因斯坦成為普魯士科學院院士時，還這麼介紹他：「總之，愛因斯坦對於現代物理中的眾多重要問題，都有了不起的貢獻。儘管他的推測偶爾會失去準頭，例如他的光量子假說就是如此，但這不應該被看做太大的缺點。」

當時跟普朗克一樣反對光量子假說的人其實還不少，愛因斯坦當然非常清楚這些質疑源自光量子假說過於大膽，他 1905 年 5 月就曾寫信給好友這麼介紹剛完成的光量子論文：「這篇文章的主題是輻射與光的能量特徵，非常具革命性。」愛因斯坦也向朋友說明了那個「奇蹟年」所完成的另幾項重要工作，如狹義相對論、布朗運動理論等，但他都沒有再用「革命性」這麼強烈的字眼來形容。

何以愛因斯坦會說光量子是革命性的觀點，卻不這麼形容大家都認為很玄的狹義相對論？那當然是因為就邏輯而言，狹義相對論可說是古典馬克士威電磁場論的延伸，可是光量子卻全然不見容於古典電磁學。

既然光量子的概念如此不合理，那麼愛因斯坦是怎麼想到的？我在之前的文章討論黑體輻射時，並沒有說明這一點。「如何想到」這種問題雖然大家會感興趣，但是很難回答，因為作者不見得會在論文中將自己的探索歷程明白呈現出來。還好愛因斯坦的文章寫得很好，我們能從中了解他的思路。

愛因斯坦 1905 年的光量子論文題目，是相當低調與隱晦的〈一個關於光的產生與轉換的 heuristic 看法〉。heuristic 這個字不好翻譯，有人譯為「啟發性」或「試探性」；比較完整地說，它的意思是「並不嚴謹、而是來自實驗與嘗試的假設，對於發現或解決問題有指引作用。」文章一開始就清楚點出問題的核心：「物理學家用於描述氣體與其他有質量物體所使用的理論概念，與描述真空中電磁現象的馬克士威理論，存在著深刻的差異。對於大量但個數仍有限的原子與電子，我們只要掌握了它們的位置與速度，就可完全決定系統的狀態；但是對於空間中的電磁狀態來說，我們必須使用連續的空間函數，來確定某一體積內的電磁狀態，亦即數目有限的變數是不足以完整描述電磁狀態的。」所以，愛因斯坦探討的正是「粒子」（離散）與「波」（連續）這兩個對立的觀點。

對於光而言，儘管馬克士威電磁波理論似乎非常成功，但愛因斯坦指出電磁波理論在黑體輻射等現象上遇到麻煩，反而是將輻射看成由光量子組成的氣體有其優點。愛因斯坦的「試探性」推論是這樣的：他從高頻區間的普朗克公式（在這區間此公式會化約成「維因定律」）出發，然後依據熱力學定律推算出在一定體積內黑體輻射於此高頻區間的「熵」，他發現輻射的熵隨著體積變化的情形，和一群氣體分子的熵與其體積的關係是一樣的！他便從這個相似性推測「只

要維因定律成立，低密度單頻率輻射的熱力學行為就好像它是由相互獨立的能量（大小為頻率乘上普朗克常數）量子所組成。」所以，革命性的光量子概念起自於愛因斯坦將兩個公式（關係）類比在一起。

雖然愛因斯坦開啟了量子革命，但物理學家並未如「哥白尼革命」般，稱之為「愛因斯坦革命」。原因之一應該是愛因斯坦最終竟然反對起量子概念，因為他不能接受沒有軌跡可言的光量子。朋友曾聽他說：「我思索量子問題的時間，是我思索廣義相對論時間的 100 倍。」

行遠自邇

愛因斯坦從未寫過自傳，只有在六十七歲時抵不過朋友的勸說才寫下「像是我自己計聞的東西」，裡頭回顧了他的思想歷程：例如四、五歲時父親拿羅盤給他看，他頭一次體認到「事物的背後深深地隱藏了某種東西」、十二歲受到歐基里得平面幾何的震撼、後來讀了物理/科學哲學家馬赫(Ernst Mach, 1838-1916)的《力學歷史(History of Mechanics)》而擺脫了對機械觀的盲目信仰等等。文中甚至還有「牛頓，原諒我」的字句，然而卻隻字未提及一般生活、親友、經歷。文章最後愛因斯坦自問自答：「這樣可以算是計聞嗎？」，「是的，因為像我這一類人的本質正在於他想了些什麼以及如何想，而不是他做了什麼或承受了什麼……」句中愛因斯坦特地用不同的字體強調了第一個「什麼」與「如何」兩個字。

對於這麼一位強調思索的大人物，我們難免好奇他自己有沒有什麼最滿意的點子。很多人或許不知這個有意思的問題愛因斯坦其實公開過答案，我們可以在最好的一本愛因斯坦傳記《上帝的心眼不易捉摸 (Subtle is the Lord)》第九章中找得到。此書作者物理學/史家派斯(A. Pais, 1918-2001)用愛因斯坦的一句話「我一生中最快樂的想法」作為本章的標題。派斯說愛因斯坦在一九二〇年為《自然(Nature)》雜誌寫了一篇文章回顧廣義相對論的發展，後來因為文章太長而未發表，不過還好手稿留了下來，現今存放於紐約市的摩根圖書館。愛因斯坦在這份「摩根手稿」中解釋了廣義相對論的起源。

這段有歷史意義的故事得從一九〇七年講起。那一年，愛因斯坦二十八歲，物理界內行人雖然都知道愛因斯坦非池中之物，但他尚未能跳離瑞士專利標準局，還得繼續他二等技師的工作。當時某期刊邀請他寫一篇回顧狹義相對論的論文。就在寫作之時，愛因斯坦認知他必得試圖修正牛頓的重力論以符合狹義相對論的要求。至那時止，雖然不乏這類修正理論，但還沒有任何一個能讓愛因斯坦滿意。十三年後他在「摩根手稿」裡回憶說：「就在當時當地，我想到了人生中最快樂的想法。」一九二二年愛因斯坦訪問京都，演講中也有如此生動的描述：「我當時坐在伯恩專利局辦公室的椅子上，忽然我有了這想法……它促使了我邁向重力論。」

這個讓愛因斯坦那麼高興的靈感就是「重力場與因電磁感應而產生的電場類似，其存在只有相對的意義。因為對於一位從屋頂自由落下的觀測者而言——至少在他的附近，**重力場並不存在**。」(文中以不同字體來強調重點全然是愛因斯坦自己的意思)讓我用稍微不同的方式來詮釋這想法的意義：假設我站在靜止於摩天大樓頂的電梯內，左手拿鉛球，右手拿乒乓球。如果我同時放開雙手，鉛球與乒乓球會以同樣的加速度筆直往下掉，最後同時撞上電梯地板(假設空氣摩擦力很小，可以忽略)。如果用牛頓重力論來解釋此一現象，我們會說鉛球與乒乓球二者都感受到地球施加的重力。因為此重力與質量成正比，所以任何物體都有相同的落地加速度(因為依據牛頓第二定律，物體加速度等於所受重力除以質量)。好玩的地方在於如果在我鬆手之前，先讓電梯自由落下，然後我才放開手，此時我會發現鉛球與乒乓球相對於我而言是靜止的自由浮體，並不會落向

地板(任何人在遊樂場玩過刺激的「自由落體」都會了解這一點)。所以重力不見了！也就說重力的存在與否取決於觀測者的坐標——靜止(相對於地球)坐標中有重力(場)，自由落體坐標中無重力(場)。物理學家早就知道電場或磁場的存在與否與觀測者的坐標有關。愛因斯坦體認到重力場與電磁場的類似之處，這就是他「一生中最快樂的想法」。

一般人可能還是會納悶這個靈感第一眼看起來好像還不算太深奧，它真是那麼了不起的點子嗎？是的，因為愛因斯坦終於找到破解重力奧秘的切入點。讓我再換個角度解釋就會很清楚：如果我們可以利用坐標轉換(從靜止坐標切換到自由落體坐標)來消除重力，我們當然也可以用坐標轉換來製造重力。以具體的例子說，在太空中不受重力影響的太空船，如果從靜止狀態改成以等加速往前進，原先手持鉛球與乒乓球的太空人鬆手後，太空人、鉛球與乒乓球會以相同的加速度往太空船尾部墜落(或說地板靠了上來)，就好像在地球表面受到重力一樣。用這個觀點來詮釋重力，可以很自然的解釋為何在地表的物體都有一樣的重力加速度(中學生都知道這是加利略發現的)，要不然我們得要額外的假設重力質量與慣性質量相等才能夠說明加利略的發現。

在愛因斯坦的狹義相對論中，慣性坐標系有特殊的地位。愛因斯坦對於這一點一直不太舒服。現在他發現如果進一步把不受限制的任意坐標系包括進來，就等於把重力效應考慮在內，他當然是興奮萬分。從這「最快樂的想法」出發，重力現象就與強調坐標轉換的幾何問題結合起來。愛因斯坦下一個目標就是尋找描述時空幾何的方程式。這項極端困難的工作花了他最精華的八年時間：自

一九〇七年起至一九一五年底找到「愛因斯坦方程式」止。最後的成果就是公認最漂亮的物理理論——廣義相對論。

愛因斯坦語錄

愛因斯坦過世後，留下了非常豐富的文書檔案。依據愛因斯坦的遺囑，這些檔案歸好友那坦(Otto Nathan, 1893-1987)與秘書杜卡斯(Helen Dukas, 1896-1982)掌管。在兩位過世後，遺囑指明檔案的所有權則永久屬於位於耶路撒冷的希伯來(Hebrew)大學。這些檔案內容包括已發表或未發表的文章手稿，札記，往來書信等等。研究愛因斯坦的科學史家正逐步從檔案中整理出《愛因斯坦論文集(The Collected Papers of Albert Einstein)》，由普林斯頓大學出版社陸續發行。這項出版計劃非常龐大，目前已經出版了八冊，共近五千頁，全部預計有二十五冊，希望在未來數年內能完全出版。(有興趣者可參見愛因斯坦檔案網站：

www.albert-einstein.org 與愛因斯坦出版計劃網站：www.einstein.caltech.edu)

對於一般人來說，這些份量頗重的學術性書籍，可望不可及。不過參與愛因斯坦出版計劃的一位編輯卡拉普萊斯(Alice Calaprice)另外整理出了一本《愛因斯坦語錄(The Quotable Einstein)》，就平易近人多了。她說因為經常接到查詢，想知道愛因斯坦究竟有沒有或是在何時何地講過某一句“名言”，或是要知道名言所用的精確字句是什麼？卡拉普萊斯發現這些問題常常找不到(起碼不是很輕易就能發現)答案。所以她動了念頭想編一本愛因斯坦比較重要或有意思的語錄。《愛因斯坦語錄》第一版發行於一九九六年，第二(擴增)版則是二〇〇〇年。

先前愛因斯坦忠心耿耿的秘書杜卡斯已經編過一本《愛因斯坦的人性面(Albert Einstein, the Human Side)》，從愛因斯坦檔案裡(尤其是書信)中找出一些

正面的，可以激勵人心的材料，以彰顯傳奇的、和藹的愛因斯坦。相較而言，卡拉普萊斯的《愛因斯坦語錄》就沒有刻意的要隱惡揚善(或隱善揚惡)，所以引用了檔案中私密的愛因斯坦和家人的書信，讓大家了解愛因斯坦是怎樣的一位(不完全稱職的)丈夫與父親，反而更能真實地展現出愛因斯坦的“人性面”。

以下我就從《愛因斯坦語錄》中選譯幾則，大家或許可以看出愛因斯坦獨特的幽默與人生觀：

「我已經認清人際關係之無常，所以學會把自己和熱與冷隔離開來，這樣才能較能保證溫度的平衡。」

「選擇少數幾個人，投以無限的愛慕，認為他們有超人的心智與品格，我認為這樣是很不公平的，甚至是沒有品味的。可是我的命運就是如此。我的實際能力與成就實在遠不及一般的評價。」

「為了懲罰我蔑視權威，命運把我變成了權威。」

「如果我的相對論證明是對的，德國會說我是德國人，法國會說我是世界公民。如果相對論錯了，法國會說我是德國人，德國會說我是猶太人。」

「想像比知識重要，因為知識是有限的，而想像則涵蓋了整個世界，它刺激進步，是演化的起源。」

「我沒有特殊的才能，有的只是強烈的好奇心。」

「恐懼與愚蠢常常是人類多數行為的基礎。」

「要抵抗有組織的力量只能依賴另一有組織的力量，儘管我不喜歡這樣，但沒有別的办法。」

「依我看來，民族主義只是窮兵黷武與侵略所找的好聽理由罷了。」

「當我在評判一個理論時，會問自己，如果我是上帝，會這樣來安排世界嗎？」

「在我很長的一生，我學到了一件事：雖然與現實比較起來，我們一切的科學非常原始、幼稚，但它卻是我們所擁有最珍貴的東西。」

「親愛的後世：如果你們沒有變得更和平，更有公義，而且大致上講，比我們更明理，那麼就下地獄去吧！在此表達這一點熱切期盼的是在下愛因斯坦。
普林斯頓，一九三六年，五月四日。」

從以上幾則短語錄，可以看出愛因斯坦頗通曉世事，絕非象牙塔裡的蛋頭學者。他的性格、信仰從整本《語錄》很鮮明地跳出來。不過我們或許還不能完全看出他也是(在很多人眼中)文筆一流的作家，這就要從愛因斯坦其他較長篇的著作，包括他與第一任妻子米列娃之間的情書下手了。

Copyright © 2016 高涌泉 All rights reserved.

國立臺灣大學物理系 2016/8/28 修訂