

科學圖書大庫

相 對 論

譯者 江紀成 李 琳

徐氏基金會出版

064,1

科學圖書大庫

相 對 論

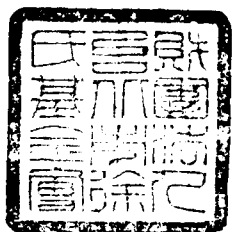
譯者 江紀成 李 琳

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有



不許翻印

中華民國六十八年三月十八日再版

相對論

基本定價 0.70

譯者

江紀成

中央研究院物理研究所助理研究員

李琳

清華大學物理系助教

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686號
7815250號

發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第15795號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話9719739

愛因斯坦小傳

公元前四世紀，亞里斯多德（Aristotle）已發展了一物理的理論系統。此後，幾乎兩千年溜過去了，始有一位傑出得足以與亞里斯多德匹配的物理學家出現，他就是愛沙克·牛頓（Sir Issac Newton）。在他的「自然哲學的數學原理」（Mathematical Principles of Natural Philosophy）裡提出了新的運動定律（Laws of Motion）完全取代了亞里斯多德的學說。但是不到三百年，牛頓物理（Newtonian Physics）却又面臨挑戰。

當我們回想到，牛頓以及他的後繼者，成功地以物質質點的運動及物質間相互施與的引力（萬有引力——譯者註）幾乎解釋了每樣已知的物理現象，着實令人驚奇。然而到十九世紀的下半個世紀裡，某些像電、光以及天文方面的物理現象；已日漸明顯地不能再用古典力學作合理解釋。爲了說明這些現象，乃有相對論（Theory of Relativity）物理的建立。

愛因斯坦及他的相對論，革新了物理學的基礎。在廿世紀的初期十年間，所發表的一連串的論文中，愛因斯坦摒棄了如：絕對時間、絕對空間以及超距作用（action-at-a-distance）等牛頓的觀念；認爲時間與空間已不再是絕對的，而是與觀察者相對的，以力場（Field of Force）的觀念代替了超距作用的想法。

相對論以其自身所敘的「絕對」取代了牛頓物理中的「絕對」，光速就是最著名的新「絕對」量；相對論物理中認爲光速是任何物體在理論上所能達到的速度極限。相對論也規定了自然律（Laws of Nature

) 中一不變的特質

一自然律，當它的原有坐標系 K 的空一時變數 (Space-time Variable) ……爲另一新坐標 K' ……取代後，若此自然律的形式不變，則爲自然通律 (General Law of Nature)。(相對論第24頁)

這就是愛因斯坦的說法，告訴我們自然通律的形式與其參考系 (Reference System) 無關。

假如這些自然律與任一特殊參考系無關，再假設光速爲絕對的不變量，那麼其他某些在古典力學中認爲是不變量的，均變成變量、或相對的了。在這些量裡，例如物質的質量；「物體的慣性質量」愛因斯坦寫道：「不是常數，是隨物體的質量而改變」(第26頁)。文中幾行之後，愛因斯坦宣佈了現在極著名的方程式 $E=mc^2$ ，這方程式的意義是說，物體的質量等於物體的質量與光速平方的乘積。如果依照愛因斯坦指出的 E 與 mc^2 間相等的關係「我們可知 mc^2 項……只是物體具有的能量。」(第26頁)

不管好也罷，壞也罷， $E=mc^2$ 這個方程式於一九四五年打開了原子時代 (Atomic Age) 的大門。目前全體新一代的科學家都已走向了時代的尖端，相對論本身幾乎已被一堆新的理論與發現推入背後。然而，阿爾伯特·愛因斯坦永遠是相對論之父、原子時代的象徵。在此我們要介紹的是他對他在科學上的成就，所作簡易而大衆化的表白。

阿爾伯特·愛因斯坦，一八七九年三月十四日生於德國的烏姆 (Ulm) 城，稍後隨家搬往慕尼黑，他在這裡開始入學。後來，他的家遷往義大利，於是他往瑞士繼續他的學業，入 Zurich 工藝學校，想成爲教員，但却無法獲得教師的職位，於是在瑞士標準局謀得一份工作，

工作之餘致力於數學及物理學的研究。

一九〇五年他廿六歲的時候，愛因斯坦發表了四篇論文，每篇論文都提出一個新的假說 (Hypothesis)：(1)特殊相對論；(2)質能相等；(3)液體中布朗運動 (Brownian Motion) 的解釋；(4)光之光子論基礎。這些發現，開展了他的科學生命，他成了 Zurich 大學物理學教授，接着在一九一〇年，接受布拉格 (Prague) 理論物理講座，一九一二年重返 Zurich，任他的母校瑞士聯邦工藝學校教授。一九一三年赴柏林，任柏林大學教授，並為凱薩·威廉學院 (Kaiser Wilhelm Institute) 及普魯士皇家科學會 (Royal Prussian Academy of Science) 會員。

這些地位促使愛因斯坦與其他權威物理學者間的合作，他發表了大量技術性的論文，致力於他的相對論及重力論 (Theory of Gravitation)。這件工作於一九一六年完成普遍相對論 (General Theory of Relativity) 時達於頂點。

普遍相對論的邏輯嚴緊，對它雖是有利的推薦，但如要被科學界普遍地接受，還須等待實驗上的支持。一個英國科學探險隊，在愛丁頓爵士 (Sir Arthur Eddington) 的領導下，負責實驗愛氏普遍相對論的假說：來自遙遠星球的光線，行經太陽附近時，會因受太陽重力的吸引而彎曲。根據此探險隊在一九一九年拍攝的日蝕照片，分析的結果，證實了愛因斯坦的假說。

整個第一次世界大戰期中，愛因斯坦留居於柏林，但由於他個人的愛好，更基於一九〇〇年取得瑞士公民資格的事實，使他得以保持中立。一九二二年他獲得諾貝爾物理學獎。此後他旅行了很多的地方，為他的學說發表演說，並致力於人類和平的工作。回到柏林後，他繼續參加高深理論的工作，像波爾 (Bohr)、得·布洛葉 (de Broglie)、薛

丁格 (Schrödinger)、朋恩 (Born) 及海森堡 (Heisenberg) 等偉大的物理學家當時都是此種理論性工作的前驅。同時，國際局勢日漸惡劣，德國威瑪共和迅即破滅。一九三三年反猶太的納粹黨在希特勒的領導下，終於得到政權。此時愛因斯坦決定加入美國新澤西州新成立的普林斯敦高等研究所。在那裡，一直到他正式退休，許多年來，他為重力及電磁力作統一解釋的工作，並繼續為他的量子力學的或然率解釋 (the probabilistic interpretation of quantum mechanics) 作嚴密校正的工作。

在第二次世界大戰的前夕，旅美避難的科學家們，顧慮到利用核能 (Nuclear Energy) 製造超級炸彈的可能性，恐懼德國納粹科學家朝向這方面工作。他們希望美國也負責進行這樣的一個研究計劃；為使美國政府有興趣從事這件工作，他們請求愛因斯坦的支持。愛因斯坦寫給羅斯福總統的信使「曼哈頓計劃」(“Manhattan Project”) 得以實現。最後發展了核子武器。一九五五年四月十八日，愛因斯坦逝世於普林斯頓。

原作者序

本書儘量從一般科學及哲學的觀點，將相對論真切的內涵介紹給對相對論有興趣、但不瞭解理論物理數學演繹的讀者。本書的內容，約以相當於大學入學考試的程度為標準，所以全文雖短，但讀者尚須化費不少的耐心與意志力。作者以最簡明的方式，將本書主旨忠實地介紹給讀者，為求敘理清晰，作者曾一再審查，至於文字與表現的華美，則不在注意之列。作者堅信傑出的理論物理學家波茲曼 (L. Boltzmann) 所謂的，追求事物外表的華美，是裁縫師與鞋匠的事情。這並不是說作者已經為那些一見到題目就感到困難的讀者解除了困難。在另一方面，我却以「繼母」的方式來處理相對論的經驗物理的基礎。這樣，不熟習物理的讀者，就不會有像漫遊森林的遊客，因被樹木遮蔽了視線，而不見森林全貌的那種茫然無緒的感覺了。願這本書能為一些人帶來深思的一段快樂時光。

阿爾伯特·愛因斯坦

1916年，12月

相 對 論

目 錄

愛因斯坦小傳	I
原作者序	V
第一部份 特殊相對論	1
第一節 幾何命題的物理意義	1
第二節 坐標系	3
第三節 古典力學中的空間與時間	5
第四節 伽里略坐標系	6
第五節 限制意義的相對性原理	7
第六節 古典力學中的速度相加原理	9
第七節 相對性原理與光傳播定律的明顯不相容性	9
第八節 物理學中時間的觀念	11
第九節 同時性的相對性	13
第十節 距離的相對概念	15
第十一節 羅倫茲轉換式	16
第十二節 運動中的量棒與時鐘的特性	19
第十三節 速度的相加定理，Fizeau 實驗	21
第十四節 相對論的啓示	23
第十五節 理論的一般結果	24
第十六節 經驗與特殊相對論	27
第十七節 閔可斯基的四度空間	30

第二部份 普遍相對論	33
第十八節 特殊相對論與普遍相對論.....	33
第十九節 重力場.....	35
第二十節 普遍相對性假設——慣性質量與重力質量相等.....	37
第二十一節 古典力學基礎及特殊相對論基礎的缺陷.....	40
第二十二節 普遍相對性原理的幾個推論.....	42
第二十三節 時鐘及量棒在轉動參考體上的性質.....	44
第二十四節 歐氏連續及非歐連續.....	47
第二十五節 高斯坐標.....	49
第二十六節 考慮成歐氏連續的特殊相對論的空一時連續.....	51
第二十七節 普遍相對論的空一時連續不是歐氏連續.....	53
第二十八節 普遍相對論的確切的系統講述.....	55
第二十九節 普遍相對論對重力場問題的解答.....	56
第三部份 宇宙整體論	61
第三十節 牛頓理論在宇宙學上的困難.....	61
第三十一節 「有限」而「無界」的宇宙存在的可能性.....	62
第三十二節 根據普遍相對論的空間的結構.....	65
附錄 I 羅倫茲轉換式的簡略推導〔補充 §11〕.....	67
附錄 II 閔可斯基的四度空間（「世界」）〔補充 §27〕.....	71
附錄 III 證實普遍相對論的實驗.....	72

第一部份 特殊相對論

§ 1. 幾何命題的物理意義

你們之中大多數的人，在求學時都學過幾何，而得以認識歐幾里德幾何學（歐氏幾何學）(Euclid's Geometry) 的精萃。由於那些負責老師們的反覆叮嚀，逼使你們在閣樓上化費無以計數的時間，去牢記——也許尊敬的程度要甚於對它的喜歡——那些幾何學中美妙而莊嚴的結構。由過去的經驗，你們自然會對那些宣稱幾何學中的命題 (proposition) ——即使是最無道理的命題——為不真實的人投以鄙視的眼光。但是，假如有人問起你們：「那麼，你們憑什麼認為命題為真呢？」也許你們那種驕傲的感覺會立刻離你們而去，讓我們稍為地想一想這個問題。

幾何學是由某些像「面」、「點」及「直線」的觀念所建立的。由這些觀念，多多少少可以聯想到一些確定的思想，同時，幾何學也是由某些簡單的命題(公理)所建立。由於這些公理，才使我們欣然地把幾何命題當「真」地接受。基於邏輯法的辯證，我們會覺得我們在強迫自己接受所有由公理引出的，即已被證明的命題。當一個命題，以公認的方式由公理導出，這個命題是對的(「真」)，那麼，單一命題是不是「真」的問題，就簡化到公理是不是「真」的問題了。其實，我們早就知道，這個問題不僅得不到答案，而且完全沒有意義，我們不能問：為什麼兩點間只有一條直線為真，我們只能說：歐氏幾何學所討論的東西中，有一種稱為「直線」的東西，每一直線都具有一種性質，就是：直線上的兩點只能決定唯一的直線。「真」的觀念並不與純粹幾何學的主張符合，

因為我們總習慣將「真」這個字與一個「實在」的物體相對應，然而，幾何學並不關心經驗事物與幾何觀念間的關係，幾何學所討論的只是幾何思想中邏輯的關連性。

雖然如此，我們仍然不難明瞭，稱幾何命題為「真」會使我們有受迫感覺的原因。幾何觀念與自然界中多少有點確實的物體相對應，毫無疑問的，這些自然界中的物體是產生這種觀念的唯一原因。爲了給幾何結構有最大可能的邏輯統一性 (the largest possible logical unity)，這種因素必須從幾何中摒除。例如，目測剛體上兩記號間「距離」的習慣，及在一個適當的位置將三點連在一直線上的習慣，都已根深蒂固地深入我們的想像之中。

如果依照我們的思想習慣，在歐氏幾何命題中，再補充一命題，就是：在一剛體上的兩點，永遠與某同一的距離（線段）相對應，與此剛體位置的改變無關；這樣，歐氏幾何的命題就變成此剛體的可能相對位置的命題⁽¹⁾。幾何學如果依這種方式來加以補充，就會被視爲物理學中的一支了。我們既曾討論過幾何命題是否滿足由幾何觀念而聯想的實際事物，現在我們可以用這種方式來解說幾何命題是否爲「真」；用不太嚴密的說法：我們所瞭解的「真」的幾何命題，乃由直尺及圓規所構成。

當然，在這種情形下，幾何命題的真實性就只好由不太完整的經驗中得到。目前，我們先假設幾何命題爲「真」，待討論普遍相對論時，再討論「真」的極限，以及此極限的推廣。

註(1) 把直線應用到自然現象上，就會有這種情形。例如 B 爲剛體上的一點，位於兩已知點 A 、 C 間，當 AB 與 BC 的距離和爲極小時，此三點在一直線上。這種假設雖不完整，但對目前的目的，已敷使用。

§ 2. 坐標系

基於已敘述的距離的物理解釋，剛體上兩點間的距離可以度量。爲了達成度量的目的，我們需要一個作爲度量標準的「距離」（長度爲 S 的小棍棒），用它一次又一次地將全部距離量完。若 A 、 B 爲剛體上的兩點，依照幾何的法則，可將 AB 用直線連接起來，然後由 A 開始，到 B 爲止，每隔 S 的距離作一記號。於是， A 、 B 間的距離值，可由記號的個數得到，這種方法是所有長度度量的基本⁽¹⁾。

敘述一種事件的情況或物件在空間中的位置，都以剛體（參考體）上的某一與此事件或物件相符合的點來標定。這種方式，不僅可應用於科學上的敘述，也適用於日常生活中。例如分析一個特定的地點「倫敦、他法加方場」⁽²⁾，我得到下列的結果：地球就是這個特定地點的參考剛體，「倫敦、他法加方場」是一個有特定名字的確定的地點（點），此點與發生的事件在空間中相合⁽³⁾。

這種將地方加以特別指定的方法，僅僅討論剛體表面上的地方，與位於表面上可相互區別的點有關。但是，我們可以不受上面的兩種限制，而不改變位置的特定性質。例如，要定出「倫敦、他法加方場」上空的浮雲與地面的相對位置，只要在他法加方場上垂直豎立一長達雲霄的長竿。長竿的高度可由標準量棒量得。再加上竿腳的位置，我們就可以把地方定出。基於這個例子，我們可發展出一精密的位置觀念（conception of position）。

(a) 我們想像一個可以作爲特定地方參考的參考剛體，同時，這個參考剛體與我們需要知道位置的物件相接觸。

(b) 爲指出物件的位置，我們以一數（例如：由量度棒量得的長竿的長度）來代替指定的參考點。

(c) 即使並未實際豎立可以達到雲端的長竿，但我們可以在地面上不同的位置，用光學方法觀察雲朵，根據光傳播的性質，決定能到達雲端的竿長。

由此，我們可以看出，用數值度量的方法可以敘述位置，使我們毋需關心參考剛體上記號位置的存在。在度量物理學 (Physics of Measurement) 上應用笛卡兒坐標系 (Cartesian System of Coordinates) 就可達到這個目的。

三個互相垂直、固定於剛體上的平面，組成笛卡兒坐標系。由於有坐標系作參考，任何事件發生的情況，均可由三個互相垂直的線或坐標 (x 、 y 、 z) 上的特定長度予以決定。事件的坐標 (x 、 y 、 z) 可由事件垂直落於三個互相垂直的平面上的點而定。這三條垂線的長度，可由量棒依歐幾里德幾何學的規則加以度量。

實際上，構成坐標系的剛面 (rigid surface) 並不存在，同時，坐標的大小又不能由硬棒實際的量取。所以物理學或天文學如要有精確的結果，特定位置的物理意義須依從上項考慮來尋求⁽⁴⁾。

於是，我們得到下列的結果，任何空間事物的敘述須包涵在這個事件用作參考的參考剛體內。歐氏幾何學中關於「距離」的定律，物理上

註(1) 我們假定度量的結果是一個整數。這種困難，可以將量棒加以分度的刻劃來克復，這種度量的方法，並不需要任何基本新方法。

(2) 原名爲 "Potsdamer Platz, Berlin"，英譯者改爲現名。

(3) 在這裡，「在空間相合」的意義，並不需要更進一層地來研究。這種概念，已明顯的保證能適用於實際，其見解不可能會有出入。

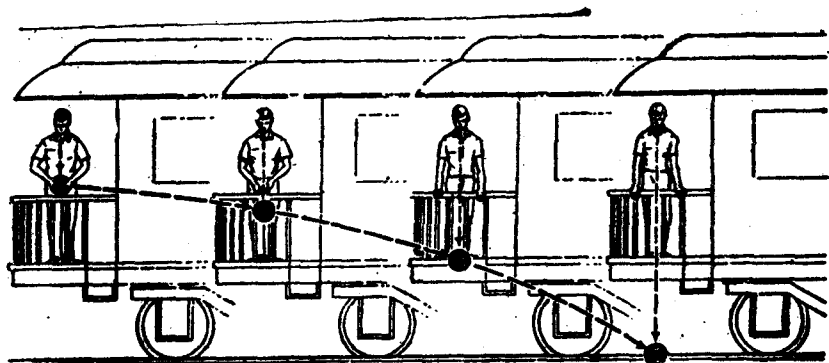
(4) 這種觀點的修改及作更精確的說明，還會在本書的第二部分「普遍相對論」中詳述。

代表的意義，自然毫無疑問的是剛體上兩記號間的關係。

§ 3. 古典力學中的空間與時間

「力學的目的在述說物體在空間如何隨時間而改變其位置」。如果把力學的目的用這種簡單易懂的方式表示出來，不再加以嚴密的反證與詳盡的解說，我將於心不安。我們試看這個定義的誤謬。

在此，我們對「位置」及「空間」瞭解得並不清楚。當我站在一列等速前進的火車車廂的窗口，把一塊石頭由窗口落到鐵路路基上，如果空氣的阻力不計，我看到石頭是沿一直線下落，但對一個在路上的行人來說，他看到石頭是沿一拋物曲線落下。現在，我請問：這塊石頭「位置」的移動，到底是「真」的沿一直線呢？還是沿一拋物線？還有，這裡所指的「在空間」中運動，是指甚麼？由前一節，這問題的答案是非常明顯的。首先，我們須完全摒棄像「空間」這種意義模糊，連一點概



站在車廂中的人，自車廂中投下石塊。如空氣阻力不計，他所看到的石塊是沿一直線落下。但自路基觀之，則石塊落下的路徑為一拋物線。

念都無從掌握的字眼。我們用「對一實際參考體的相對運動」來代替「空間」。參考物體（火車車廂或路基）的相對位置，已在前節中詳細定義。如果我們以在數學敘述中非常有用的「坐標系」來取代「參考物體」，我們說：石頭對固定於車廂上的坐標系作直線的相對運動，但對固定於地上（路基）的坐標系，是作拋物線（parabola）的相對運動。由這個例子，我們可以極清楚地知道，沒有一個可以獨立存在的軌跡（德文原文為「位移曲線」⁽¹⁾），有的只是一個與特定參考物體相對的軌跡。

爲了將運動作澈底的敘述，我們必須說明物體怎樣隨時間而改變它的位置，即對軌跡上的任一點來說，必須說明物體在某一點上的時間。這些軌跡的數據，須加上時間的定義來補充，根據這個定義，這些時間值成爲所觀察的大小（度量的結果）。如果基於古典力學的觀點，只需由下面的解說，就可滿足我們的要求。假想有兩個構造完全相同的時鐘，一個拿在車廂窗口的人的手中，一個則在行人的手中，這兩個觀察者各依自己手中的時間，來決定石頭在觀察者自身的參考物體上，每一分鐘的位置。在這裡，光速所產生的誤差可以不計。在後面，我們將它與另一個較大的困難一起，再作詳細的討論。

§ 4. 伽里略坐標系

伽里略—牛頓力學中最著名的基本定律——慣性定律（Law of Inertia），可寫爲：與其他物體距離很遠的物體，靜止的繼續靜止，運動的繼續作直線等速運動。這個定律不僅涉及物體的運動，同時也指

註(1) 即指物體運動時所循的曲線。

示出力學中的參考物體或坐標系。可見到的固定星座是慣性定律中最好的參考體。如果我們使用一個固定於地球上的坐標系，那麼，每一個固定星座都以一天文日 (astronomical day) 的巨大半徑圓與這個坐標相對運動。但這種運動違反所敘述的慣性定律。因此，如要符合此一定律，我們必須選定一座標系，使固定星座對這個坐標系的相對運動不為一圓。這種令相對運動遵守慣性定律的坐標系，稱為「伽里略坐標系」。伽里略—牛頓力學中的定律，也只能適合於伽里略坐標中。

§ 5. 限制意義的相對性原理

爲了容易解說明白，讓我們再利用等速前進的火車車廂爲例題，我們稱火車運動爲等速平移（等速是指火車運動的速率和方向均不改變——爲常數。平移是指車廂的位置僅對路基作相對改變，但在移動時，並無轉動的情形發生。）讓我們想像一隻在空中飛過的烏鴉，在地面上看來，烏鴉以等速沿一直線飛行，如我們在運動中的火車車廂中看這烏鴉，就會發現烏鴉是以另一種不同的方向和速率在飛行，不過，烏鴉還是沿直線作等速運動。簡要地說：如果一個質量爲 m 的物體，在坐標系 K 上作等速直線運動，則其對第二個坐標系 K' 的相對運動，也與在 K 坐標系中的相同，成等速直線運動。這樣，對坐標系 K 而言，坐標系 K' 爲一等速平移的坐標。依照前節中的討論，則會有下面的結果：

如果 K 爲一伽里略坐標系，則任一坐標系 K' 對 K 作等速平移時， K' 也是一伽里略坐標系。伽里略—牛頓力學的定律，在 K' 上的形式應與在 K 上的形式相同。

我們更進一步地將這個原則普遍化：若設 K' 爲一不轉動，但對 K 作等速運動的坐標系，則在 K' 上運行的自然現象與在 K 上運行的自然