

科學圖書大庫

# 狹義相對論

譯者 林爾康 魏元勳

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

# 狹義相對論

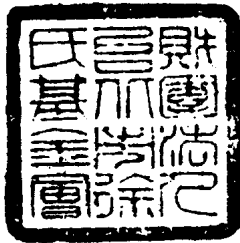
譯者 林爾康 魏元勳

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七日三版

## 狹義相對論

基本定價 2.60

譯者 林爾康 國立清華大學教授  
魏元勳 國立清華大學教授

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  
發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 1 5 7 9 5 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

## 我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成爲事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤爲社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啓發，始能爲蔚爲大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啓導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尙有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏爲監修人，編譯委員王洪鎧氏爲編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分爲叢書，合則大庫。爲欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特掬誠呼籲：

**自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師：**

**旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；**

**大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者**

主動地精選最新、最佳外文學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

## 原著者序

麻州理工學院設有一個教育研究中心，（即從前的科學教育中心），其工作為研究課程的改進，教導的程序，輔助教材的應用以及主要針對大專學生研究學習的方法。此中心是於1960年由麻州理工學院成立的，第一任中心主任是已故的弗利德曼 (Francis L. Friedman) 教授。但是，自從1961年以來，此中心的主要資助者則為國家科學基金會 (the National Science Foundation)；另外凱特倫基金會 (Kettering Foundation)，謝爾公司基金會 (Shell Companies Foundation)，維可土利亞基金會 (Victoria Foundation)，格蘭德基金會 (W. T. Grant Foundation) 以及稟基金會 (Bing Foundation) 亦均有慷慨的捐贈。

麻州理工學院物理學導論叢書，可以說是此中心工作的主要產物。按照計劃，這一套叢書應該是一組連續的卷冊，內容含蓋了物理學的主要領域。此叢書的主旨在於強調創立物理學理論、所需在實驗方面和直覺的交互影響，我們希望對許多啓蒙的課程，不管是着重於古典物理學 (classical physics) 的論說，還是包含了很多原子和量子 (atomic and quantum) 物理學的，這一套叢書都能提供各種必要的基礎。當然，我們也希望各卷冊能在內容的深淺程度和書寫的體裁上互相一致，不過我們並不想把此叢書的各卷冊密切配合，使其嚴密的連接。相反地，我們的計劃是使每一卷冊都能合理的自我完備、自成一個體系，以便能當作一個獨立的課本，適合很多不同課程的使用。

現在的這一卷冊稱為狹義相對論 (Special Relativity) 導論，是為那些對牛頓力學 (Newton mechanics) 僅有中等基礎，對光學和電學的基本原理有適當認識的學生所編寫的。書內對理論的探討採用傳統的方式（為了要適合既定的程度），因為此種方式的探討不需要太多的電磁學理論 (electromagnetic theory)，僅檢討一些有關運動學 (kinematics) 和動力學 (dynamics) 的問題。不過，在最後一章中我們還是討論了一些相對論所能提供的、有關電與磁間互相關係的知識。我們曾把本書的主要章節當作普通物理學的一部份，在麻州理工學院，對一年級和二年級的學生試教過，結果很有成效；但

是本書的全部內容也能自成完備的體系，適於更高年級的學生當作相對論導論來研讀。

正如叢書內的其他各冊一樣，這本書的完成也得力於很多學生和教師的思想，批評和建議。關於教師方面福來德蘭德爾 (M. W. Friedlander) 教授〔華盛頓大學 (Washington University)〕，邁次奈爾 (A. W. K. Metzner) 教授〔聖的亞哥州立學院 (San Diego State Collegeit)〕以及韋士 (Rainer Weiss) 教授〔麻州理工學院〕的詳細批評都是非常有助的。

我特別感謝太師曼 (Jack R. Tessman) 教授〔塔弗茨大學 (Tufts University)〕，因為他不但曾經參與此物理學導論叢書的計劃工作，而且對本書的完成也頗有所貢獻。他和作者曾於1963年至1964年在麻州理工學院試教本書的初稿；後來，關於加添的資料和重新編寫的技巧，作者又曾和他仔細的討論，徵求他的意見，把他的建議編入書中。我還要特別說明：本書的最後一章，關於相對性理論和電學的討論，主要是根據太師曼教授的一篇有深遠影響的分析性文章而寫的；在那篇文章內，他對電磁理論的主要結果，包括加速度力場 (the acceleration fields)，都曾有所推展〔參看 Am. J.

Phys. 第34卷第1048—1055頁(1966年)和 Am. J. Phys. 第35卷第523—527頁(1967年)〕。

作者也感謝史密絲 (M. K. Smith) 教授和柔士 (James A. Ross) 教授，因為他們對本書的準備工作都曾作過有價值的協助。

福倫戚 (A. P. French)

1968年2月於麻塞諸賽州  
(Massachusetts)劍橋市 (Cam-  
bridge)。

# 目 錄

原著者序	1
第一章 <u>牛頓力學的背棄</u>	1
<u>牛頓</u>	3
最大速率	4
光子	9
光子底能量-動量關係	11
物質和輻射：能量底慣性	13
能量，動量，和質量	17
新的動力學正確嗎？	21
一恒定力作用下的運動	23
“兩底端不相連接的 <u>愛因斯坦</u> 箱子”	24
評論	25
習題	26
第二章 <u>關於光傳播的困惑</u>	35
光底性質	36
傳光的以太	37
星體的光行差	38
修改的光行差實驗	42
費佐對牽引係數的測量	45
<u>麥可生</u> - <u>毛勒</u> 實驗的前因	47
<u>麥可生</u> - <u>毛勒</u> 實驗	49
結論	55
習題	57
第三章 <u>愛因斯坦和勞倫茲</u> - <u>愛因斯坦轉換</u>	61



緒言：長度收縮假說	61
愛因斯坦對相對性原理的重新闡釋	63
伽利略和牛頓的相對性原理	64
牛頓定律的轉換	66
愛因斯坦和 $c$ 底萬有性	68
第二假設和觀察上的證據	69
同時性底相對性	71
勞倫茲 - 愛因斯坦轉換	73
勞倫茲轉換的一則應用	78
明考斯基座標圖：時間 - 空間	79
空間 - 時間不變量	80
習題	82

#### 第四章 長度和時間間隔的測量與相對性 85

觀察者	85
點事件和其轉換	88
時間之測量	90
勞倫茲收縮	92
時間之膨脹	93
用宇宙射線內的介子觀察時間膨脹現象	94
時間膨脹實驗的另一解釋	100
再談時間和長度測量	102
用雷射光所作的麥可生 - 毛勒實驗	106
相對論的確是有相對性的	107
時 - 空間隔和因果關係	113
習題	116

#### 第五章 相對論的運動學 123

速度的轉換	123
快速運動光源底輻射情形	125
光在運動介質內的傳播：牽引係數	129
橫方向的運動：星球底光行差	130
杜卜勒效應	132

再談杜卜勒效應	140
杜卜勒效應和時間膨脹現象	143
再一次地尋找以太	146
用眼睛觀看運動的時鐘和其他物體所產生的問題	148
加速運動	151
學生子問題	153
習題	158
<b>第六章 相對論動力學 — 碰撞問題和守恒定律</b>	<b>165</b>
對彈性碰撞的兩種觀點	166
對非彈性碰撞的兩種觀點	169
守恒定律的進一步評註	173
光子的吸收和放射	174
莫斯巴效應	178
光子火箭	180
質粒的創生	182
散射	189
杜卜勒效應的重新述說	194
習題	198
<b>第七章 再談相對論動力學</b>	<b>205</b>
能量-動量不變量及其應用	205
能量和動量的勞倫茲轉換	208
四向量	213
相對論動力學內的力	214
相對論性質粒所受的磁力	219
力轉換的一般法則：作用及反作用	221
習題	225
<b>第八章 相對論與電學</b>	<b>229</b>
庫倫定律	230
作用在運動電荷上的磁力	232
引入相對論方式的探討	234
庫倫定律的轉換	235

作用在靜止試驗電荷上的力	236
作用在運動試驗電荷上的力	243
沿一直線分佈的電荷所產生的力場	249
磁場和相對論	253
載電流導線作用在運動電荷上的磁力	255
再談磁力與勞倫茲收縮	259
兩個載電流導線間的互相作用力	261
電和磁的測量單位和系制	263
習題	266
<b>尾語</b>	269
<b>參考書簡介</b>	273
<b>習題答案</b>	277

在實驗哲學 (experimental philosophy) 裡，我們認為由歸納很多現象而獲得的定理 (proposition) 是確實正確或非常近於正確的……直至我們發現到能使該定理更正確或容有例外的其他現象。

摘自牛頓 (Sir Issac Newton) 所著的 *Principia* 一書 (1686年) 出版。

相對論的產生是由於需要，由於老的理論內有一些不能克服的、嚴重而深刻的矛盾。新理論的精神在於它的一致性和明確性，僅用一些能令人非常心服的假設就解決了那些矛盾的難題。老的力學對於涉及低速率的現象是正確的，它是新力學的一個極限情況。

摘自愛因斯坦 (A. Einstein) 和尹凡德 (L. Infeld)  
合著的 *The Evolution of Physics* 一書 (1938年出版)

## 第一章

# 牛頓力學的背棄

當你看到或聽到相對性 (relativity) 這個名詞的時候，你會立即聯想到什麼呢？很可能你會想到愛因斯坦 (Albert Einstein) 這個人名或  $E = mc^2$  這個方程式，或者幻想着那些費時多年到遙遠太空旅行歸來的人青春不老的情景。愛因斯坦所稱的他的狹義相對論 (special theory of relativity) 對很多種智慧的啓發都有很大的貢獻——甚至在六十年後的今天仍然效用不減。1900年左右愛因斯坦及其他一些人所作的狹義相對論方面的推展，在描述和解說自然世界 (Physical world) 的方法上很可以說是人類所作的許多最大進步之一。不過相對性的基本觀念却是和伽利略 (Galileo) 及牛頓力學一樣古老的。粗略的說，正是因為確立了相對性的觀念，物理定律才會在很多不同的參考系 (reference frame) 中有相同的數學形式。那麼，愛因斯坦所作的又是什麼竟使他的名字幾乎與本書書名有同樣的意義呢？答案是：他曾指引我們將相對性的觀念應用到所有的物理經驗上，而不必僅限於有限的一些現象。他更特別肯定地指出就是涉及高速率運動——尤指其速率接近於光速的運動

——的變化過程也不能違背相對性的原則、而當作例外；他所提出的這種統一性 (unification) 確實含有一些不平常的意義，因為由此推導出的結果好像違反我們憑直覺或常識所作的推斷；例如，慣性質量會因速率增加而增加，以及所謂的孿生子反論問題 (twin paradox) 等，這些都是古典理論 (classical theories) 不會引起的。不過也正是像這一類的奇異事件，才使得愛因斯坦對相對性所作的有系統陳述顯得如此震驚世俗，才使得他的相對論令人神迷而引起廣大的興趣，達到在整個物理學發展史中沒有前例的程度。

我們前此曾說過相對性的觀念早在愛因斯坦以前即已存在，而且也曾經溶鑄於牛頓力學之中。但是直到牛頓去世約兩百年之後，人們才認識到：假若持用牛頓力學的基本特徵，則某些觀察到的效應——大都是小而精微的——實在難能加以說明。從歷史上看，那些違背古典理論，迫使人們修正觀念的事實是出現在電磁現象中的，特別是在光的傳播方面。但是主要由於愛因斯坦個人的貢獻，人們很快地就體會出：不僅以電動力學 (electrodynamics) 著稱的特殊學門，就是所有的各種動力學確實也都受到了影響。

愛因斯坦所代表的象徵以及他偉大的標記是能憑藉極少數僅有的數據 (data) 推演出最深奧及能影響深遠的結論。當然現在也有一些人努力着這類高明的工作，但是就他們所推導出的偉大結論和歸納出的一般法則 (generalizations) 常常錯誤而言，他們便不能稱為現代的愛因斯坦。實際上愛因斯坦創立他的狹義相對論僅靠着一個定理 (proposition)，就是：不管如何觀察，光從一點經由真空進行至另一點所需的時間等於該兩點的相對間隔 (separation) 除以萬有速度 (universal velocity)  $c$ ，此萬有速度的大小與任一觀察者所在的實驗室在真空中運行的任何速度無關，既有這個定理，則用它來推演相對論不但不困難（一旦愛因斯坦告訴了我們方法）在邏輯上亦甚清晰，更能引人入勝；這些我們將在本書中加以敘述。此一推演始於光學的改革，再修正了運動學，進而指導我們如何來重訂質粒的動力學。然而今日我們已得到很多關於極高速率質粒動力學的直接證據；因為這些證據本身一開始就明白地顯示：假若我們希望那些為人熟知的質粒，例如電子，不管以多大速率運行都能用一種力學予以滿意的描述，則我們必須修正牛頓的理論。在這開頭的第一章中，我們將儘快地說明修正後的動力學。當然就某一方面來說，這只是粗略的概述，而且無疑地不夠嚴密；不過，看一看：假若不用許多相對論內的數學式子，如何也能至少導出那些主要的結論，這或許會使人感覺興趣，而且有其本身的價值。

首先讓我們將所擬修正的力學略作介紹，因為不知曉它的內容，我們難

能欣賞和明瞭它和新動力學的關係——有那些對二者是相同的，又有那些對二者是不相同的。

## 牛 頓

牛頓力學只考慮質粒受力作用時的運動。在牛頓力學中質粒被假定為質點 (material point)，它的運動狀態是由它在空間的位置隨時間變化的關係式來描述的；(假設我們很清楚地明瞭空間和時間這兩個不相關聯的觀念，雖則它們不能適宜地加以定義)。牛頓深信絕對空間 (absolute space) 的存在，不過他承認我們不能描繪出物體在絕對空間內的運動狀態。所以我們不談物體在絕對空間內的位置，只定義物體對物體的相對位置；此種觀念正像牛頓在他的數學原理 (Principia) 一書中所寫的一樣，“因此，我們用相對的位置和運動來取代絕對的位置和運動”<sup>\*</sup>。

但是，儘管我們採用的位置和速度都是相對的，我們却也知道加速度顯然為絕對的或基本的量。牛頓動力學不但把握着了加速度  $\mathbf{a}$  的此種特性，而且還把它與質粒所受的外力  $\mathbf{F}$  關聯在一起。這種方法的處理有很大的收穫，因為我們由此發現了：質粒獨有的一種恆定性質——它的慣性質量  $m$ ——可以經由  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  聯繫質粒的加速度和其所受的外力。假如  $\mathbf{F}$  的大小和方向可由一明確的力定律 (law of force) 獲知——例如萬有引力的情形——則古典力學即成爲解說自然現象的一種學說，而牛頓的第二定律就不僅僅只是用  $m$  和  $\mathbf{a}$  所表達的  $\mathbf{F}$  的定義了<sup>\*\*</sup>。

即使對力定律不能明確地知曉，我們尚有線動量守恆定理 (the conservation of linear momentum) ——它是牛頓力學內主要論題之一——可茲應用。假設慣性質量是物體的不變特性，而且任何外力的作用可以略而不計，我們能證明 (這是力學的實驗基礎之一) 兩個或更多個互相作用物體的動量  $m\vec{v}$  和是一個常數。爲了方便起見，我們常用一個單獨向量  $\vec{p}$  代表動量；我們知道

\* 參看由 Sir I. Newton 原著，A. Motte 翻譯，F. Cajori 修訂的 *Mathematical principles of Natural Philosophy And His System of the World (Principia)* 一書，1962年 Berkeley 市 Univ. California press 出版。

\*\* 參看 A. Einstein 於 1936 年在 *J. Franklin Inst.* 第 221 卷第 349—382 頁所發表的 "Physics and Relativity" 一篇文章；這篇文章後來又重刊印在 Einstein 所著的 *Ideas and Opinions* 一書中，此書在 1954 年經 New York 市 Crown 書局出版。還請參看 N. Austern 於 1961 年在 *Am. J. Phys.* 第 29 卷第 617 頁發表的文章。

在古典力學裡，任何質粒的  $p/v$  比值都是一個不變的量。

最後，我們還有能量守恆原理 (the principle of conservation of energy) 實際上，這個原理已超出了爲牛頓力學所嚴格劃定的界限之外。依照這個原理，假若我們知道任何一個特殊的力定律，我們可以發現作用於一質粒上的功 (work) 可由對應的動能 (kinetic energy) 變化來表達，即：

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (1-1)$$

而且，質粒由此方式所獲得的動能亦可轉變爲其他形式的能量。例如，該質粒若在某介質內受介質阻力而終於靜止，則有熱能（即熱量）放出。我們對能量守恆原理有很大的信心（因爲有很多在本質上互相吻合一致的證據）所以在上述的例子中，我們絲毫不加猶疑地承認對熱能的測量即等於對質粒在進入介質前的動能測量——當然，我們得先有理由忽略可能經由輻射，聲波，介質變形等所耗損的能量。

於是，空間和時間，力及加速度和慣性質量，動量和能量這些觀念組成了古典力學的一些基礎，使古典力學得以在兩百多年以來都能顯然屹立無恙。但是，我們已知道古典力學的結構並不完美，它已明顯地露出了一些裂痕。這些裂痕大多數（並非全部）看起來都與極高速率的質粒運動有關。現在就讓我們來看看這些發生裂痕的地方吧。

## 最大速率

假若按照牛頓力學內的公式來推算，在理論上，並不能獲得任何限制物體速度不能超過的最大極限 (limit)。例如，我們能想像到：若一物體連續遭受一個恒定的、大小等於該物體在地球表面所受重力的力作用時，其加速度將永遠爲  $9.8$  米/秒<sup>2</sup>；又若該物體原來是靜止的，則一年以後其速度將爲  $3 \times 10^8$  米/秒，兩年以後其速度將爲  $6 \times 10^8$  米/秒，以此類推（讀者不妨花點時間自己驗算一下這些數字）。再若物體很輕小，我們即可想到用一遠比  $mg$  爲大的力，使此物體迅速地——或許只需數分鐘或數秒鐘的時間——達到如此大的速度。再者，即使力的大小方向都不恒定，我們也能計算出：使質量爲  $m$  的物體以某速率  $v$ ： $v = \sqrt{\frac{2K}{m}}$  運行所需要的功，因爲此功等於物體的動量  $K$ 。不過，當我們試將一質粒加速到上述那樣大的速率時，我們發見實際的觀測結果和牛頓力學的預測有巨大的差別。我們現在就以這一件事

作為第一個清晰的例證來說明古典力學不能符合所有動力學現象的實情。

因為電子的質量在力的效應上遠比其電荷的為小，所以電子易於加速到達很高的速率——比我們在日常生活中所經歷的任何物體的速率還大千萬倍以上。就以電子在真空管內的運動為例，若跨於陰陽兩極的電壓僅為 100 伏，則電子從陰極（假若電子在此處是靜止的）被加速至陽極，也能具有大約高達 6,000 公里/秒的速率（若兩極相距僅幾毫米，則電子的加速度約為  $10^{13}g$ ）。然而，即使在此情況下，牛頓力學還能符合事實的適用。不過，假若加速電子的電壓不是幾百伏而是幾百萬伏的時候，則解說電子的運動狀態迫切需要修正牛頓力學的程度，就很顯著地明朗了。關於這一點，我們可用一卷探索動能在 15 百萬電子伏 (MeV) 以內的電子、其速率和動能關係的實驗紀錄影片來說明\*。

圖一所示的是該實驗裝置的略圖。此實驗能直接測量電子在直線加速器 (linear accelerator 簡稱 linac) 內的飛行時間 (time of flight)。圖一左方所示的是一個范·德·格拉夫 (Van de Graaff) 加速器；它的功用是作為直線加速器的電子發射器，其內的靜電作用能給予電子最高可達 1.5 百萬電子伏的能量。此後電子就進入了直線加速器的主體，經歷一系列的漂移管 (drift tube) 而逐漸加速；其經過 *A*、*B* 間飛行路程 (flight path) 所需的時間則用儀器加以紀錄。操縱直線加速器的無線電頻率系統 (the radiofrequency system) 可使電子獲得更高的能量（最高可至 15 百萬電子伏）；影片中有一段用來說明：僅在直線加速器的第一節（緊接 *A* 點後面的一節），如何用此種操縱方法使電子獲得 4.5 百萬電子伏的實際情形。我們即將從實驗的結果看出：即使在 4.5 百萬電子伏的情況下，在 *A*、*B* 兩點間的全程中電子的速率也差不多是不變的。

范·德·格拉夫 加速器負高壓端的電子槍所放出的是間歇性的電子小群 (electron burst)（每放完一個電子小群約  $3 \times 10^{-8}$  秒的時間）。每當電子小群通過 *A* 或 *B* 點時，*A*、*B* 兩處被絕緣的金屬極板便會接收到電子信號。此電子信號再經兩條等長的電纜接到以陰極射線管為主的示波器內。因兩電纜等長，兩個電子信號分別從 *A*、*B* 兩點至示波器所需的時間相等；而示波器鏡面上所顯示的兩個脈波 (pulse)（圖 1-2）就可以用來確實地測量某一電子小群

\* 電影片名為 The Ultimate Speed，由任職於 Mass. 州 Newton 市 Education Development Center 的 W. Bertozzi 監製。詳細說明，可參看 W. Bertozzi 於 1964 年在 Am. J. phys. 第 32 卷第 551 - 555 頁發表的文章。



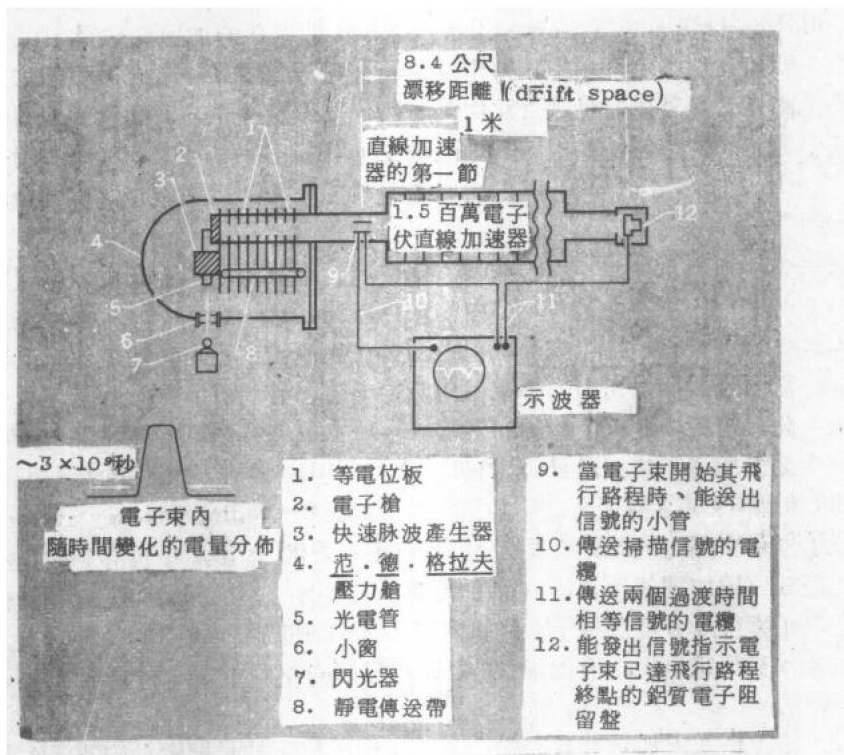


圖 1-1 高能電子飛行時間測量儀器的略圖 (摘自 W. Bertozzi 所作的最大速率實驗)。

從 A 至 B 所需的時間了。例如圖 1-2 所顯示的時間 ( $t$ ) 約為  $3.3 \times 10^{-8}$  秒 (橫軸上每一大格  $\approx 10^{-8}$  秒)。又 A、B 間的飛行路程經測量為 8.4 米, 所以由速率的定義, 可知: