

Halliday · Resnick

Physics

物理學

第一冊

譯者

王唯農

王明建 蔡正治

東華書局印行

物理學

第 一 冊

著 者

雷 士 勒 霍 立 德

譯 者

王 唯 農

王 明 建 蔡 正 治

東 華 書 局 印 行



版權所有・翻印必究

中華民國五十五年十二月初版

中華民國六十七年十一月十一版

大學
用書 **物 理 學**

第一冊 定價 新臺幣陸拾元整

(外埠酌加運費滙費)

原 著 者	雷士勒	霍立德
譯 者	王唯農	王明建 蔡正治
發行人	卓 鑫	森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司	
	臺北市博愛路一〇五號	
	電話：3819470 郵撥：6484	

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
(55024)

物理常數

(參閱附錄A之附表, 該表較完整)

光速	c	3.00×10^8 米/秒 = 1.86×10^5 哩/秒
質量能量關係	$c^2 (=E/m)$	$931 \text{ Mev/amu} = 8.99 \times 10^{16}$ 焦耳/仟克
重力常數	G	6.67×10^{-11} 牛頓米 ² /仟克 ²
普遍氣體常數	R	8.31 焦耳/摩爾 °K = 1.99 卡/摩爾 °K = 0.0823 升 atm/摩爾 °K
水的三相點	T_{tr}	273.16 °K
導磁常數	μ_0	1.26×10^{-6} 亨利/米
容電常數	ϵ_0	8.85×10^{-12} 法拉/米
亞佛加德羅常數	N_0	6.02×10^{23} 分子/摩爾
波爾茲曼常數	k	1.38×10^{-23} 焦耳/分子 °K
蒲朗克常數	h	6.63×10^{-34} 焦耳秒
基本電荷	e	1.60×10^{-19} 庫侖
電子靜止質量	m_e	9.11×10^{-31} 仟克
電子荷質比	e/m_e	1.76×10^{11} 庫侖/仟克
質子靜止質量	m_p	1.67×10^{-27} 仟克
電子磁矩	μ_e	9.27×10^{-24} 焦耳/tesla

物 理 性 質

空氣密度(STP)	1.29 仟克/米 ³
水密度(20°C)	1.00×10^3 仟克/米 ³
水銀密度(20°C)	13.6×10^3 仟克/米 ³
乾燥空氣(STP)中之聲速	331 米/秒 = 1090 呎/秒
重力加速度(標準)	$9.81 \text{ 米/秒}^2 = 32.2 \text{ 呎/秒}^2$
標準大氣壓力	1.01×10^5 牛頓/米 ² = 14.7 磅/吋 ² = 760 毫米水銀柱
地球平均半徑	6.37×10^6 米 = 3960 哩
地球-太陽平均距離	1.49×10^8 仟米 = 92.9×10^6 哩
地球-月球平均距離	3.80×10^5 仟米 = 2.39×10^5 哩
地球質量	5.98×10^{24} 仟克
水的熔解熱(0°C, 1 atm)	79.7 卡/克
水的汽化熱(100°C, 1 atm)	539 卡/克
冰的熔點	0.00°C = 273.15°K
空氣(20°C)之比熱比(γ)	1.40
鈉光黃色雙線的波長	5892 Å
水的折射率(@ 5892 Å)	1.33
冕牌玻璃的折射率(@ 5892 Å)	1.52

原書上册序

本書根據 *Physics for Students of Science and Engineering* (1960) 一書之上册，在過去六年於大學中之教學經驗修訂而成。雖然改變極多，但該書之根本綱要及其基礎哲理仍未改變。對下册將涉及之相對論和量子物理學，增以大量之準備材料，以助其順利處理；同時在古典方面，編排更堅強之基礎。

循此方針之若干主要改變是：全書更強調參考坐標系在物理量度和理論中的重要；改良牛頓定律和力定律的處理，著重現代的見解；更清楚的分析慣性和非慣性系的概念，及有助於確定觀念之特殊應用；極注意巨觀現象的微觀模型，從摩擦和碰撞現象至比熱、熱膨脹和起伏現象；出現於各種物理系統中之位能觀念，有極清晰的提示；在轉動系統中角動量具更重要之地位，並推廣至不對稱物體和運動軸系；稍較普遍之振盪的論述，包含二體振盪和折合質量觀念及非諧振盪；在古典物理學中變質量系統的正確處理方法；包含在“古典”領域中自然發生之量子觀念；及更重視熱動過程的統計說法和近代觀點。

第二章介紹單位向量，且之後即用以簡化公式之推導，或對物理現象以更清楚，更具幾何形像，或更佳分析的討論。本書用更多附表以摘錄和展示觀念、方程式及物理數據，並便於比照。特殊或高深的論題列入可隨意選授之節內，仍用小字刊印，且在新編之補遺內包括若干更特殊或高深的材料。在適當之處，曾將甚多題材有系統之予以近代化——諸如標準和單位，名稱和符號，參考資料和附錄等。圖形均已仔細重新設計以提高教學之效，使其一致，及說明對當代物理學之大量應用。

在 *Physics for Students of Science and Engineering* 書中之例題大多數仍予留用，且予適當之變更和改進。並已增添甚多新例題，藉在重要之處提高興趣和了解，均係教學經驗認為需要者。原有習題和問題約保留百分之25，新增問題和習題約逾一半。此等大量問題和習題，使艱難程度和興趣及應用範圍有廣泛之選擇。本書篇幅之增加

全由於附屬材料所致——問題、習題、例題、表、附錄和圖形——深信有益於教師和讀者。

數年來許多教師和讀者對1960版曾予建設性批評，特別是 Kenneth Brownstein, Benjamin Chi, Ben Josephson, Jr., James C. Kemp, H. E. Rorschach, Jr., 及 Robert Weinstock 諸君，曾多方賜予卓見和協助，謹致謝忱。當在哈佛大學撰編此書時，Gerald Holton 教授多有慨助，雷士勒衷心銘感。深盼我等之努力對讀者和教師更有助益。

1966年元月

雷士勒
霍立德

譯 本 序

在1960年霍立德與雷士勒合著之 *Physics for Students of Science and Engineering* 問世，1962年將下冊予以修正，發行以來，已被普遍採用。本年又將上冊大量修改，並更名為 *Physics*；全書對物理學之基本觀念，古典力學的適用範圍，及近代物理學的基本概念，均予深入闡釋及討論。數學方面全部用向量和微積分，程度大為提高。最近二十年來，物理學發展之範圍甚廣，進步亦大，本書取材新穎，立論精闢，頗能適合近年教學之需。國外著名大學如哈佛，麻省理工等校均採用此書。為便利國內學生易於閱讀並能徹底了解起見，故予譯述。

全書譯文，盡量接近原文字義，流暢通順為原則；但在艱澀之處，則以淺近之中文句法表達，而不失物理意義為主。所有名詞翻譯，以教育部公布之物理學名詞為準，其原文字義變更，及新生名詞未及列入者，均按其物理意義，予以訂定，務使文意相符，簡明劃一為原則。書內對甚多高深論題，歷史敘述及哲理解說，均以小字排印，屬於選用教材，可酌情決定取捨。

本書譯校，以時間短促，疏漏之處難免，尚祈教師及讀者諸君隨時指正，俾於再版時修訂，至深感荷。

王唯農 王明建 蔡正治 謹識

五十五年十一月於國立清華大學

物 理 學

第 一 冊 目 次

第一章 量度	1~12
1-1 量度	1-2 物理量, 標準及單位
1-3 參考坐標系	1-4 長度標準
1-5 時間標準	1-6 單位制
第二章 向量	13~27
2-1 向量和純量	2-2 向量之加法, 幾何法
2-3 向量之分解與相加, 解析法	
2-4 向量之乘法	2-5 向量與物理學的定律
第三章 一維運動	28~48
3-1 力學	3-2 質點運動學
3-3 平均速度	3-4 瞬時速度
3-5 一維運動——變速度	3-6 加速度
3-7 一維運動——變加速度	3-8 一維運動——等加速度
3-9 單位和因次的一致	3-10 自由落體
3-11 自由下落之運動方程式	
第四章 平面運動	49~68
4-1 位移、速度和加速度	4-2 等加速度之平面運動
4-3 拋射體運動	4-4 等速圓周運動
4-5 圓周運動之切向加速度	4-6 相對速度和加速度

第五章 質點動力學 (一).....69~93

- | | |
|--------------|----------------|
| 5-1 古典力學 | 5-2 牛頓第一定律 |
| 5-3 力 | 5-4 質點; 牛頓第二定律 |
| 5-5 牛頓第三運動定律 | 5-6 力學單位制 |
| 5-7 力定律 | 5-8 重量與質量 |
| 5-9 測量力之靜力步驟 | 5-10 牛頓運動定律之應用 |

第六章 質點動力學 (二)..... 94~112

- | | |
|---------------------|----------|
| 6-1 導論 | 6-2 摩擦力 |
| 6-3 等速圓周運動之動力學 | 6-4 力與偽力 |
| 6-5 古典力學、相對論力學及量子力學 | |

第七章 功與能113~128

- | | |
|------------------|---------------|
| 7-1 導論 | 7-2 不變力所作之功 |
| 7-3 變力所作之功——一維情形 | |
| 7-4 變力所作之功——二維情形 | |
| 7-5 動能與功-能定理 | 7-6 功-能定理之重要性 |
| 7-7 功率 | |

第八章 能量守恆.....129~154

- | | |
|---------------------|------------|
| 8-1 導論 | 8-2 保守力 |
| 8-3 位能 | 8-4 一維保守系統 |
| 8-5 只與位置有關之一維力問題的全解 | |
| 8-6 二維和三維保守系統 | 8-7 非保守力 |
| 8-8 能量守恆 | 8-9 質量與能量 |

第九章 線動量守恆155~177

- | | |
|------------|-------------|
| 9-1 質量中心 | 9-2 質量中心之運動 |
| 9-3 質點的線動量 | 9-4 質點組的線動量 |
| 9-5 線動量守恆 | 9-6 動量原理之應用 |

9-7 變質量系統

第十章 碰撞178~204

- | | |
|---------------|--------------|
| 10-1 何謂碰撞？ | 10-2 衝量與動量 |
| 10-3 碰撞時的動量守恆 | 10-4 一維碰撞 |
| 10-5 力之“真實”量度 | 10-6 二維與三維碰撞 |
| 10-7 截面積 | 10-8 反應與衰變過程 |

第十一章 轉動運動學205~220

- | | |
|--------------------------------|----------------|
| 11-1 轉動 | 11-2 轉動運動學——變數 |
| 11-3 等角加速度之轉動 | 11-4 轉動量為向量 |
| 11-5 質點圓周運動時線運動學與角運動學之關係——純量形式 | |
| 11-6 質點圓周運動時線運動學與角運動學之關係——向量形式 | |

第十二章 轉動動力學 (一).....221~250

- | | |
|-------------------|---------------|
| 12-1 導論 | 12-2 作用於質點之轉矩 |
| 12-3 質點之角動量 | 12-4 質點組 |
| 12-5 轉動之動能與轉動慣量 | 12-6 剛體之轉動動力學 |
| 12-7 剛體之聯合移動與轉動運動 | |

第十三章 轉動動力學 (二) 及角動量守恆.....251~271

- | | |
|-----------------|----------------|
| 13-1 導論 | 13-2 陀螺 |
| 13-3 角動量與角速度 | 13-4 角動量守恆 |
| 13-5 角動量守恆的其他方面 | 13-6 轉動動力學——複習 |

附錄 單號習題解答272~277

第一章

量 度

1-1 量 度

當計劃鋪設第一條大西洋海底電纜時，負責建造的公司聘請一位年青工程師威廉湯生* (William Thomson 1824-1907) 為顧問。湯生常用自己發明的儀器作許多電的精密度以解決若干遭遇到的問題。其經過實驗所作之建議未被採納，主要因當局對涉及之基本原理不甚了解而未能接受之故；後來由於計劃的失敗，促使當局仔細考慮湯生的見解，經採納湯生的意見後，卒於 1858 年圓滿完成此電纜。此經驗有助於湯生得到下述常被引用的觀點：

“我時常說，對你談論之事物，當能加以測量並且能以數字表示時，則你對它已有所了解但當你不能用數字表示時，你的知識是含糊而不充分者；這或許是知識的開始，但無論如何，在你的思想上尚未進入科學的領域。”

有些科學家並不認為只有可以精確測量的形象才是研究的對象，但無人會否認量度對於科學的重要性。在科學史上，常因理論與精確量度間之微小而重要的差異，而導致新穎和更廣泛之理論的發展；若科學家對自然現象只作性質的解釋而感滿意，則不會發生上述的進展。

1-2 物理量、標準及單位

物理學常用些能够表示物理定律之物理量，例如力、時間、速度、密度、溫度、電荷、磁化率等等。其中許多是日用語彙，如力和溫度等，此等日用語彙，其意義有時含混不清，或與科學用詞含義不同。

爲了物理學的目的，基本量應予明確定義。一種觀點是當已定出物理量之測量步驟時，則該量即已具定義，這稱為操作觀點。因爲此種定義本是由一套實驗室操作而導致具有單位之數字。操作可包括數學計算。

物理量常分爲基本量和導出量。此劃分是任意的，一量在某一運算中可爲基本

* 1892 年，已是英國第一流科學家的湯生被封爲凱爾文爵士。湯生並是熱力學創造者之一，且尚有許多其他成就。

量,而在另一運算中則為導出量。欲定義“導出量”須基於其他的物理量,例如速度、加速度和體積常被認作導出量;基本量不能以其他物理量定義之。基本量的數目,是對所有物理量有一致和明確的描述時,所需之最少數目。常視為基本量者有長度和時間。基本量的操作定義包括二步驟:第一,標準的選擇;第二,標準與被測的量之比較步驟的建立,以使所得數字和單位為量度結果。

理想標準有兩個主要特性: **易得與不變**。這兩個要求常不相容,兩者之間應予協調。起初多著重於易得性,但由於科學與工藝上日增的需要,因而著重於不變性。例如熟悉的碼、呎和吋是直接由人的臂、足和拇指定出,現在對這種粗略的長度標準不再滿意,需用變動較少的標準,甚至犧牲其易得性。

假定我們已選定長度標準是一棒,定棒的長度為一米。以此棒直接與另一棒比較,斷定後者恰為前者之三倍,就稱第二棒長三米。實際上大多數的量不能與長度標準作直接比較,通常需要步驟比較複雜的間接方法。這種間接量度需要某些假設與直接量法相關聯。

例如某時欲知自火箭發射站至月球表面間的距離。一間接方法為:由發射站送出一雷達信號,信號從月球表面返回到發射站的接收機。只要測得信號往返時間及知道雷達信號的速率,即可由速率與一半時間區間的乘積得其距離。其間假定信號的速率不變且沿直線行進。速率應由另外的實驗測之,長度標準即出現於操作步驟中。

天體間的距離,譬如恆星與地球的距離,不能以直接方法測得。有些恆星距離較近,可用三角測量法:以更遠的恆星為背景,隔六個月地球自其軌道直徑一端行至他端時觀察恆星的位置。用地球軌道的直徑作基線,由所測數據可得所需距離。星雲與地球之距離達數百萬光年,係以較三角法更複雜的間接測量法測得(一光年大約為 10^{16} 米,參閱習題 6)。

一如測大距離,極小距離如分子與原子中的距離,亦需用間接方法測量。例如質子的有效半徑,曾以粒子散射實驗測得為 1.2×10^{-15} 米。表 1-1 列示能測量之長度範圍。

表 1-1. 已測得之長度

	米
迄今(1964)所探測到之最遠的似星體*之距離	6×10^{25}
最近的星雲距離(仙女座星雲)	2×10^{22}
銀河半徑	6×10^{19}

* quasar = quasi-stellar radio source.

最近的恆星距離(人馬星座)	4.3×10^{16}
最遠的行星(冥王星)之平均軌道半徑	5.9×10^{12}
太陽半徑	6.9×10^8
地球半徑	6.4×10^6
自由氣球所達之最大高度(1959 年)	4.6×10^4
人之身長	1.8×10^0
英漢四用辭典厚度	5×10^{-2}
本書一頁之厚度	1×10^{-4}
脊髓灰白質炎病毒大小	1.2×10^{-3}
氫原子半徑	5.0×10^{-11}
質子之有效半徑	1.2×10^{-15}

1-3 參考坐標系

同一物理量由相互運動的諸觀察者測量時，可能有不同之值。一列火車的速度，在地上的觀察者測得一值，在高速汽車上測得不同之值，而坐在火車上的觀察者測得其值為零。從各觀察者之觀點所測得之值同等“正確”；並無一值比其他值更具根本上的優點。

概言之，物理量的測量值與觀察者作此量度的參考系有關。如上述之速度顯然為如是之物理量。其他物理量，如質點的位移、二事件間之時間區間、電場或磁場等均如此。上列四例待講到相對論時，才能充分了解。

在物理學的早期，認為有一特定參考系存在，此參考系有超過所有其他參考系之基本優點，即所謂絕對參考系。就在此系中對靜止觀察者而言，物理量均有“真實”值或“絕對”值。這種觀點現已被放棄，因數十年來以實驗尋求此絕對參考系之努力均告失敗。

試研討互作等速度運動，且均對固定恆星作等速運動之參考系。如此之參考系（不加速不轉動）稱為慣性參考系。實驗證明所有慣性系對於物理現象之量度均相等。在不同系中觀察物理量，能測得不同的數值。但物理量間的相互關係，即物理定律，對所有的觀察者均相同。

例如觀察者在不同慣性系中，測原子碰撞時各粒子的動量。測得各粒子的動量和粒子組的總動量之數值因不同之慣性系而不同，但是各觀察者將發現不論所得之值為何，碰撞前後粒子組的總動量相等，換言之，各觀察者將發現碰撞遵守動量守恒律；將在第九章詳細討論此定律。

雖然物理定律在所有慣性系中相同，但物理量的測得值可能不同。故讀者應了解在特定問題中之參考系為何？

1-4 長度標準*

第一具長度的真正國際標準是一鉑銻合金棒，稱為標準米，存於法國巴黎附近的國際度量衡局。棒之兩端各鑲一金塞，上刻細線，兩線間之距離定為一米（在 0°C 且以規定方法支持之時）。本來米之定義為由北極經巴黎的子午線至赤道距離的千萬分之一。但在標準米造成後，準確測量發現稍有差異（約 0.023% ）。

因標準米不易取得，故有精確複製品送存世界各國。這些副標準用以校驗其他較易取得的量尺。故所有的尺、測微儀或游標尺均經顯微鏡及劃分機以複雜的步驟與標準比較而取得法定效用。英語國家所用的碼亦如此得來，自 1959 年來經國際協議訂定如下：

$$1 \text{ 碼 (yard)} = 0.9144 \text{ 米,}$$

相當於

$$1 \text{ 吋} = 2.54 \text{ 厘米。}$$

尙有反對以合金米棒為原始長度標準之異議：如該棒在火災或戰爭中易遭毀損；不易精確複製；不易取得等。最重要者，用顯微鏡比較細線的技術，所作長度標準的準確性，已不能符合近代科學與工藝之要求。標準米所能獲得之最高準確性為 10^7 分之一，若導航迴旋鐵鑽孔時有此誤差，則在作對月球的瞄準時，誤差將達一千哩。

1864年，菲佐 (Hippolyte Louis Fizeau 1819-1896) 首先倡議以光波長度為長度標準。後來干涉儀（見第 43 章）的發展帶給科學家一精密的光學儀器，能以光波之波長為長度的比較標準。光波長約 3×10^{-5} 厘米用以測量數厘米長之棒可準確至一波長之極小分數。以波長作長度比較能達 10^9 分之一的精確度。由於長度之比較的精確度需要增，而力求最佳之光源。

1961 年，國際協議採取長度的原子標準。選定以鉀之特別同位素 (Kr^{86}) 電弧光中橘黃色光線（以光譜記號 $2p_{10}-5d_5$ 鑑別之）在真空中之波長為標準。現定義此光之 1,650,763.73 個波長為一米。此波長數是仔細測量標準米的長度而得者，並使基於光波長之新標準儘量與合金米棒之舊標準一致。圖 1-1 陳示作為長度標準之 Kr^{86} 光源。

選擇原子標準，除增加長度量度之精確外，尙有其他優點：如產生光線的原子

* 關於長度標準之精確討論，可參閱 H. Barrell 所著之 "The Metre"，刊於 Contemporary Physics 1962 年第 3 卷，415 頁。

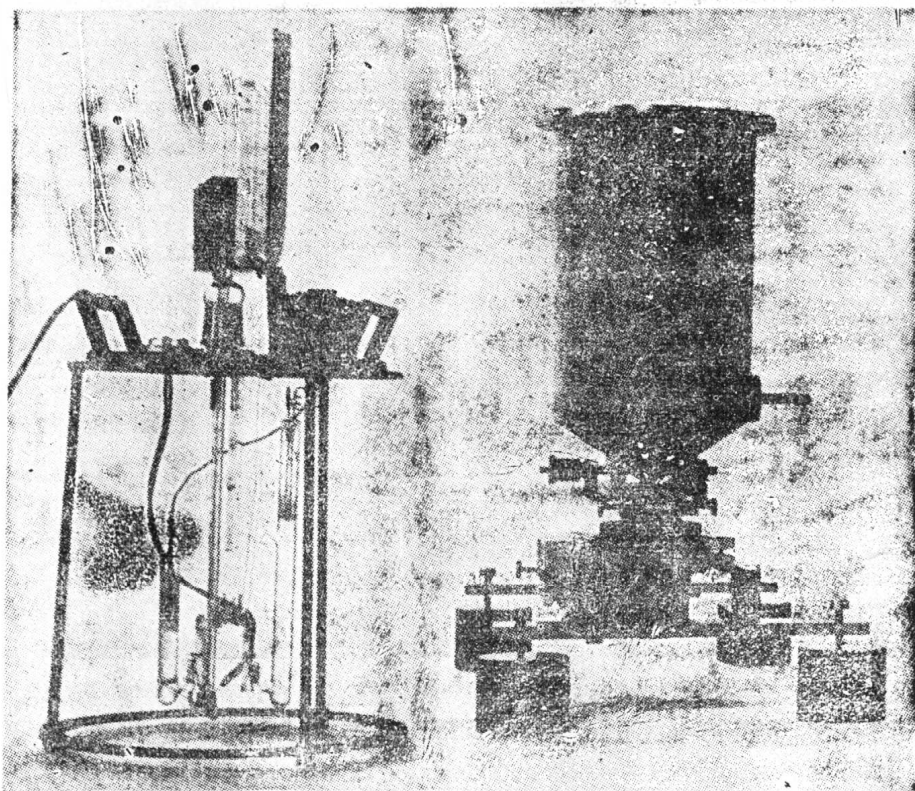


圖 1-1 由保護容器內取出之 Kr^{86} 光源。操作時以液態氮冷卻此燈。(英國 Teddington, 國立物理實驗室提供)。

到處可獲得，且所有同種類之原子均相同，因而發射相同波長之光線。因此原子標準既易得且不變。所選擇之特別波長是 Kr^{86} 之唯一特徵波長，極其顯明確定，且高純度之 Kr^{86} 同位素容易取得並所費不大。

1-5 時間標準

時間的量度有不同的兩方面：爲了日常生活及某些科學之目的，須要以日時定事件發生的次序；大部分科學工作中，須知道事件持續的久暫。舉例言之，對於一振盪系統，如微波振盪器或音響共振器，須知道其振盪的頻率。故任何時間標準應能

回答下列兩問題：“何時？”、“持續多久？”或“頻率為何？”*表 1-2 列示能測量之時間區間的範圍。

表 1-2. 已測定之時間區間

	秒
地球年齡	1.3×10^{17}
Cheops 金字塔年齡	1.5×10^{11}
人類平均壽命(美國)	2×10^9
地球公轉週期(一年)	3.1×10^7
地球自轉週期(一天)	8.6×10^4
回聲二號人造衛星週期	5.1×10^3
自由中子半衰期	7.0×10^2
人類正常心跳週期	8.0×10^{-1}
A 調音叉週期	2.3×10^{-3}
μ 介子半衰期	2.2×10^{-6}
波長 3 厘米之微波振盪週期	1.0×10^{-10}
分子轉動週期	1×10^{-12}
中性 π 介子半衰期	2.2×10^{-16}
1 Mev 伽瑪射線振盪週期(計算值)	4×10^{-21}
快速基本粒子穿過中等原子核之時間(計算值)	2×10^{-23}

任何重複發生的現象均能用以量度時間；量度之法為計數重複次數，例如擺、彈簧圈或石英晶體均可使用。自古以來，以地球自轉作時間標準，現在仍為日常生活及法定的時間基準。地球自轉一週定為一(平均太陽)日，一(平均太陽)秒為一日的 86,400 分之一，以地球自轉訂定的時間稱為世界時(UT)。

因科學需要高度精確，1956 年國際度量衡會議 (International Congress of Weights and Measures) 根據地球之公轉重新定秒。特別以 1900 回歸年的 1/31,556,925.9747 為一秒，這種特別選擇使時間標準不變。以地球公轉定義的時間稱為星曆時(ET)。

UT 與 ET 均須由天文觀察釐定，因這些觀測須費時數週(於 UT)或數年(於 ET)，故需要用經天文觀測校正的優良地面時鐘為副。石英晶體鐘利用電以維持石英薄片的自然週期振動，正好當作時間的副標準。最好的石英鐘一年內之最大誤差為 0.02 秒。

時間標準之最通常用途為測定頻率。在無線電波長範圍內，利用石英鐘以電子

* 關於時間標準之精確討論，可參閱 Louis Essen 著之 “Accurate Measurement of Time”，刊於 Physics Today, 1960 年七月號。