

汉译达夫高等物理学

	頁數
折射及色散.....	573
透鏡.....	582
補充折射現象.....	591
干涉.....	595
繞射.....	599
光學器及度量.....	609
輻射能之發射及吸收.....	622
由於吸收之影響.....	636
輻射與原子構造.....	642
雙折射及偏極化.....	646
光之量子論.....	664
習題.....	668
補充習題.....	681
常數表目錄.....	Vii
用爲符號之希臘字母.....	Vii
索引.....	705

常數表目錄

力學及物性

	頁數
擴散係數.....	141
粘滯性係數.....	127
液體之壓縮係數.....	127
密度.....	105
力學單位之因次.....	164
彈性係數.....	111
轉動慣性.....	66
表面張力.....	136

熱學

沸點.....	244, 257
水沸點因壓力之改變.....	244
膨脹係數與氣體之壓力.....	217
液體之膨脹係數.....	214
線膨脹係數.....	209
氣體溫度計之改正.....	290
臨界值.....	252
機器之效率.....	298
燃燒熱.....	234
熔解熱.....	239
氣化熱.....	247
凝固點.....	237
氣體與蒸氣之比熱.....	229
液體與固體之比熱.....	225
標準溫度.....	206
各種尺度上之溫度.....	198
導熱性.....	264
水之蒸氣張力及蒸氣密度.....	240

電磁學

介質常數.....	309
-----------	-----

	頁數
錳產物之蛻變.....	491
電磁係統之單位.....	440
電化當量.....	415
電機勢.....	417
鉅鐵電偶之電動勢.....	407
鐵之導磁係數.....	391
電阻係數.....	97

音 學

吸收係數.....	539
音樂之間隔.....	521
音之速度.....	509

光 學

全反射之臨界角.....	591
夫牢因和斐 (Fraunhofer) 氏線.....	634
折射率及色散率.....	579, 581
結晶體之折射率.....	655
光轉偏極係數.....	663
一般之波長.....	620
對數表.....	675
正弦及正切.....	677
物理常數.....	679

用爲符號之希臘字母

α Alpha	η Eta	μ Mu	σ Sigma
β Beta	θ Theta	ν Nu	τ Tau
γ Gamma	κ Kappa	π Pi	ϕ Phi
Delta	λ Lambda	ρ Rho	ω Omega

物理學教科書

力學及物性

Worcester 工業學院 物理學名譽教授

科學博士 A. Wilner Duff 著

導 言

1. 物理學是一種科學 我們藉着感覺，可以推知在圍繞

着我們的物質宇宙中，有許多的物體存在。利用我們的感覺還可以知道這些物體有許多共同的特性，例如：慣性 (Inertia) 重量 (Weight) 和彈性 (Elasticity) 等。並且我們把這些似乎各物體都含有的各式特性歸於物質 (Matter)。所有物質本身是有慣性的，各物體之間的相互作用和給與人類感覺上的影響是由於在它裡邊有些非物質的東西存在。這東西叫做能量 (Energy)。它的界說，以後再講，但是它所表現的東西我們全都曉得。像太陽，燃料，和升高的水所給與的，同時又是自然界裡和工業上各種動作所常常需要的工具就是。

物理學是物質與能量的性質的科學 這個概括的敘述，並不能把它和化學清楚地分開，而且，實際上，雖然可以概括的講，化學是討論質 (Substance) 的組成和分解的；但在這兩種科學中間，是不能畫出固定的界限。工程學的各種分科也是討論物質和能量的性質的，但是從它的應用方面着眼。

一種科學不只是關於某問題的許多知識而已。在很古的時候，關於各種動作和過程的物理結果人類已然有許多有價值的知識，但

只在努力把它組織成系統，並且找出各種事實間的關係之後，物理學才開始。各種物理現象間的關聯被發現，被說明的愈多時，物質世界現象的解釋才愈科學化。在現在，物理學在這方面，比別種科學進步的多多，並且，爲簡單地說明物理科學的現狀起見，不但要說出最要的觀察所得而且要指出這些事實間的相互關係，乃是我們應抱的目的。

在有些問題裡面，當我們進行研究的時候，可以看出來關於觀察所得事實間的關係，比別的部分了解得更清楚，就像在力學裡邊，現象間的關係是了解得非常正確，使我們從很少的幾個關於物體運動的定律出發就能推出那極複雜運動的解釋了。

在其他部分，我們却只能不斷地從一個原理儘可能尋出它的邏輯的結果，並且從別的原理照樣的做下去。

把許多事實分類研究之後，而得到一個普通的原理，叫做歸納法 (Induction)。例如；萬有引力定律是牛頓 (Newton) 在仔細比較落體和月球行星的運動之後才發現的，在得到一個概括許多現象的普遍原理之後，我們可以從它起頭推去其他已知或未知的事實，就像在幾何學裡邊，從一個定理推出其他定理一樣。這樣的手續叫做演繹法 (Deduction)。在一本簡要的物理書中，我們必須常用演繹法，但是如果篇幅允許的話，還要努力說明重要的基本原理是怎樣用歸納法發現的。

2. 量度 (Measurement) 在任何科學裡，當尋求各事實間的關係時，成功的首要條件，就是事實的認識應力求確實。關於物體的大小和重量之質 (Qualitative) 的陳述只說出大或小，是沒有多大用的。這同一個性質的量 (Quantitative) 的陳述把這物體的大小和重量與某一個公認的標準的比值，就給出來了。這樣的標準就叫做單位 (Unit)，並且它對於單位的數字比值就叫做

被量的東西的數字的量度或數量 (Magnitude).

《有些量度是直接的，就是拿要量的量和那類的單位去直接比較，例如我們把尺或碼放在棍旁去量它的長度就是。但是大多數的量度是間接的。例如要量火車的速度我們量它所走的距離和所需要的時間，用計算的方法我們就得到火車的速度是多少單位速度了。

3. 觀察和實驗 (Observation and Experiment)

有些科學裡，僅僅用觀察，就是，記下來環境和發生的事實，就是主要並且僅有的獲得知識的方法了。例如天文學家不能改變天體的運動，他僅能去觀察。在物理學裡，觀察也佔重要的位置，但是實驗限制了環境和事實以謀得到更有價值觀察，却佔更重要的位置。因此，假如我們想知道地球如何吸引物體，並且這引力是否隨處不同，僅憑觀察由不同高度自由落下的物體是不能有多大進展的。但是假如把物體上面拴一根繩以限制他的落下並且使它像擺一樣的擺起來，我們就可以做更精確的觀察，並且得一個有價值的知識。這也許是觀察自由落下物體所永不能得到的。因為這個理由，物理學大體還是一種實驗的科學，就是說，物理學家靠着精細的實驗去求知識，然後用推理的方法，尤其是用簡捷正確的推理形式叫做算學的由實驗的結果裡提出可能的知識來。

4. 假說和理論 (Hypothesis and Theory) 當一種事實或現象和其他事實或現象的邏輯關係還沒發現時，它是不能明瞭或是不能解釋的。但當被指出與其他習見的現象有關係並且這關係的性質很清楚時，它就被解釋了。

真空管裡水銀的升高，在發現它因高度而不同並且與空氣對於槽裡水銀的壓力有關係以前，是莫明其妙而不能解釋的。在這樣情形下，所謂解釋是說找出要解釋的東西和其他東西間的因果關係就

是了。後者本身也許還沒有解釋。比如空氣發生壓力的經過直到最近才有解釋。

一個假設的解釋，在它的正確性還不能無疑的時間，是叫做假說。假設去說明空氣（或任何氣體）壓力的假說就是說空氣是由飛動的質點組成的，它們對一個面上的撞擊就是我們所說面上的壓力，這個假設的說明就叫做氣體動力假說 (Kinetic hypothesis of gases)。假設的成立，在科學裏佔很重要的地位，因為它鼓勵試驗它的真確性的研究，並且，即使發現這特殊的假說，不適合，可是試驗的過程中常常可以確定許多新事實，同時達到正確解釋的路徑也就做成了。理論這個名詞有時候也用做假說的意思，但最好是限制它的意義僅指一個推廣的解釋或是一個証實了的假說。我們談到氣體動力論 (Kinetic theory of gases) (227節)的時候意思是這樣的。

5. 原因和結果 (Cause and Effect) 當某種事實發生，另外一種事實也必然隨着發生的時候，在普通語言裏，我們習慣地把前一種叫做後一個的原因，後一個叫做前一個的結果，比如槍裏面火藥的爆發認為是槍彈發射的原因，而後一件事是認為爆發的結果，在說兩件事情的因結關係的時候，我們不只是說一件事情永遠是隨他一件事情發生，而且假說它們的關係中有些不變的東西，就是說我們相信自然 (Nature) 在相同的環境中永遠有相同的動作。

6. 物理定律 (Physical laws) 在仔細研究一切現象之後，常常使我們能夠概括的說在什麼環境中要發生什麼事。很古的觀察已經得到了物體如果未經支持就要落到地上的結論了，這樣的概括原理就是一個物理定律。更廣的研究常可以得到一個更普遍的定律。所以，研究落體，月球和行星的運動使牛頓就得到了兩個

物體互相吸引的結論，研究物理學的目的是爲得到更廣泛更普遍的物理定律。任何這樣的定律在沒有能用正確的數學形式敘出來以前是很不完善的，而且需要精密的度量，用度量和計算的方法，牛頓得到了物體間引力的定律，叫做萬有引力定律 (Law of Universal Gravitation) 一個物理定律是說明在某種情況之下要發生某種事實的定則。

物理定律的證明有時候是直接的，就是說一個定律是從一些觀察和實驗的事實裡推斷出來，就像在幾何學裡從一個定理證其他定理一樣。例如萬有引力定律可以從已知的月球和行星的運動推演出來 (150 節) 但在許多情形裡，証明是間接的，去表明由定律所推出的結果都與觀察和實驗相合，力學的基本定律就是這樣證明的。(37 節)

7. 物理學的分科 (Subdivisions of Physics) 爲方便起見，物理學可以分爲下列幾部分：

- | | |
|---------------------|------------------------------------|
| 1. 力學 (Mechanics) | 4. 電磁學 (Electricity and magnetism) |
| 2. 波動 (Wave Motion) | 5. 音學 (Sound) |
| 3. 熱學 (Heat) | 6. 光學 (Light) |

力學

8. 力學是物理學的一部分。它是討論物體的運動和使運動變化的原因的，它包含兩部分，一部分叫做運動學 (Kinematics)，裡面是討論各種不同的運動，另一部分叫做力學 (Dynamics)，內容是研究運動的原因的。運動學，或運動的研究，和幾何學的區別是在運動學須要計算時間，幾何學則不然。力學 (Dynamics) 又常分爲動力學 (Kinetics) 和靜力學 (Statics) 二科，前面的研究物體的運動，後面討論物體雖受使它運動的各作用，但因各作用所生的影響恰能相抵消而它仍能保持靜止狀態 [有些學者把力學 (Dynamics) 這個字作動力學 (Kinetics) 解釋，] 在下面的初等力學裡將各部分完全分開是不方便的，不過爲便利和簡單起見次序有前後就是了。

運動學

位移的幾何學 (The Geometry of Displacement)

9. 移動和轉動 (Translation and Rotation) 運動 (Motion) 可以分爲兩種。一物體運動時，它上面各點所走的直線若全都方向相同，大小相等就叫做移動 (Translation)。例如火車在直軌上走，和拖車由勻平斜坡上滑下，全是移動。在這類的情形，物體上各點作完全相同的運動。所以將這樣物體上的任一點的運動說明，這物體的運動就完全明白了，因為這個原因我們討論這種物體的運動，可以把它當作一個單獨的質點 (Particle)。

當一物體作轉動 (Rotation) 的運動時，它上面各點，全以一直線爲中心而各作圓周運動；這條直線叫做轉動軸線 (Axis of Rotation)。磨石，飛輪和鞦韆全是這樣運動。這樣的物體上任意的兩點，在任何時間全作不同的運動，除非這兩點在平行轉動軸的一條直線上才行；離軸的越遠的點作的圓越大，並且比離軸近的點運動得要快。

許多種的運動是非常複雜的，但是無論如何總可以認爲是由移動和轉動合併而成。

因爲一個作純粹移動而不轉動的物體，是和一點一樣，所以最好是先討論點的運動。

10. 一點的位置 (Position of a Point) 一點的位置，可以由它對於其他的點，線或平面的距離，或距離的方向而決定。說明一點位置的最簡方法，就是給出它對於某點的距離和方向，這個某點叫做起點或原點 (Origin)。

假如點的運動不能離開一定直線或曲線時，它們的位置，可以由它們和線上一定原點的距離而定。原點的一方叫做正反方向叫做負例如鐵路上的任何站的位置。可以他站爲原點，而以這站和原點的正負距離而定。

假如點的運動不能離開一平面或曲面時，它的位置可以由它和面上的一定原點的距離和方向而決定，或由它和通過原點的兩垂線的距離而定，結果是一樣的。例如地面上的一點可以由它與原點的

東西距離和南北距離而定。不限定在線上或面上的點，它的位置可以由它和空間的一定原點的距離和方向而定，或由它與通過原點的三個互相垂直平面的正負距離而定，結果是一樣的。

在第一種情形裡，位置是由一個數目決定，在第二種情形裡是兩個數，在第三種情形裡是三個數。運動限於一個定直線上的點叫做有一個自由度，限於在一個定平面上的叫做有兩個自由度，不受任何限制的，叫做有三個自由度。

上面位置的說明是相對位置的說明，就是說明一點的位置和原點的位置間的關係。絕對位置或是沒有標準點或標準系的位置是沒法說的。並且不能給它固定的意義。以後位置這個字除非另有說明全是指相對位置。作標準的點就是在地球面上的一點。

11. 長度的單位 要確定位置，我們必須有長度的單位才成。物理學裡所用的主要單位就是米 (meter) 或是它的倍數或分數。米的定義就是在巴黎國際度量衡局裡的鈹，鉑 (Platinum-iridium) 棒在攝氏零度時，兩線間的距離。設計者打算叫它等於四分之一經度圈的十萬分之一。米的百分之一叫做厘米 (Centimeter = 0.01 meter)，這就是我們常用的長度。其他米的分數是分米 (Decimeter = 0.1 meter) 和毫米 (millimeter = 0.001 meter) 最大的距離常用仟米 (Kilometer = 1000 meter)。

在說英語的國度裡流行用的長度單位是碼 (yard) 和它的倍數或分數。英國碼的法定長是存在倫敦財政部裡的青銅棒上兩線在華氏表 62 度時候的距離，英國碼的法定長是 1 米的 $\frac{5600}{3937}$ 。

12. 位移 (Displacement) 位置的變化叫做位移。要說明它必須指出它的數值和方向 (Magnitude and direction)。比如，往東北十哩就是一個船或火車的位移的說明。注意在說明位移

的時候我們不必談到時間。其實位移是一種幾何的觀念，它本身並不需要考究時間。



圖1. 一個方向線代表一個位移

爲幫助我們討論關於位移的問題，我們常將位移的圖解畫在一張紙上（或一塊黑板上）。所以一直線 AB ，要用它代表上面所說的位移時，須取適當的尺度（Scale）。例如以一綫代表 5 哩的實際位移，使它的長度能代表位移的大小。其次，它對於代表他位移的直線也要有適當的方向。當直線這樣的用以代表位移時， AB 和 BA 是代表大小相同而方向相反的位移。

爲簡便起見，我們常說，「位移 AB 」，意思就是「圖解裡 AB 所代表的位移」，但是爲清楚的原故，有時全部的說明必須全寫出來。

13. 位移的相加 (Addition of Displacement) 假若一支船先向東航行 10 哩，然後，又向北航行 10 哩，這時它必在起點的東北 10 $\sqrt{2}$ 哩的地方，或者我們可以說前面兩位移合成第三個，若物體的一位移以 AB 代表，第二位移以 BC 代表，兩位移的和就爲 AC 所代表（見圖 2）；用作 AB 和 BC 的尺度量得 AC 之長，我們就求出 AC 所代表的組合位移的大小，這就是合成位移的三角形法 (Triangle method)。

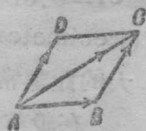


圖 2.

如若我們作 AD 和 BC 平行且相等，又作 DC 和 BA 平行且相等，則 AD 和 DC 所代表的位移之和，像以前一樣，就是 AC 所代表的位移。用圖解求位移的組合時，兩條相等且平行的直線 AD 和 BC ，顯然的認爲代表相同的位移的， AB 和 DC 也認爲是這樣的，無論何時，兩條相等且平行的直線，永遠代表相同的位移。這和我

們給位移的定義——位置的變動，是相合的，因為如果兩個物體移動平行且相等的距離，無論它們的起點如何，位置的變動總是一樣的，就好像無論一座樓原來是高多少，添上同樣高的一層樓，總產生同樣的高度變化一樣。

這樣又給我們一個位移合成法，假如拿 AB 和 CD 代表兩個位移，它們的和就由 AC 代表， AC 就是平行四邊形 $ABCD$ 過 A 點的對角線，這就叫做位移的平行四邊形加法。大體上這和三角形法一樣並且我們用來沒有什麼不同。

要把三個位移 AC , CD , DB 相加 (圖3)，我們必須先求前兩個的和，然後再用平行四邊形或三角形法和第三個相加。要去計算結果的位移是相當複雜，不過用圖解法倒是很簡單。我們所需要做的事就是用 AC , CD , DB 依次序當作邊畫一個多邊形。 AB 就是位移的總和。這結果與相加的次序無關可以由圖上的虛線看出來。

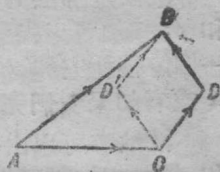


圖3. 位移的幾何加法

上面我們已經說了位移的依次相加，但位移可以同時發生，但在兩種情形中位移的加法是一樣的。例如一個人在一個向前走 10 呎的船上，同時在甲板上橫走 5 呎這人的結果位移就和先後走這兩個距離一樣。

位移的加法顯然和算術或代數的加法不同，兩個數值同為 10 的位移的和，若非方向相同，結果總不是 20，位移的加法是包括三角形，平行四邊形，或多邊形作圖的幾何法，這些方法，適用於有大小方向的量，這樣的量是非常多的。

假如我們用三角形法把兩個位移 AB 和 BA (圖2) 相加，我們必須旋轉 BC 直到 C 與 A 重合，在這種情形結果是零或者寫 $AB + BA = 0$ ，因此就位移而論 $BA = -AB$ 。

14. 位移的分解和減法 (Resolution and Subtraction of Displacements)

我們既然能將許多的位移用它們的幾何合來代替，所以也可以將一個位移用許多位移來代替，這許多的位移合起來就是原來的位移。這叫做將一位移分解成部分 (Components)。例如將一位移 AC (圖2) 分解成已知方向的兩位移，我們可由 A 作已知方向的直線，然後以 AC 為對角線完成平行四邊形 $ABCD$ ， AB 和 AD 是所求的分位移，因為它們的和是 AC 。

減法是加法的反面。由 10 減去 4，就是要求一個數，6，使它和 4 相加可以得到 10，同理由 PR 位移 (圖4) 減去 PQ 位移，就是一個位移使它和 PQ 相加能得到 PR 。由三角形加法這個顯然是 QR 或者如果我們完成平行四邊形 $PQRS$ ，它就是和 QR 相等的 PS 。

減法也可以由一種略微不同的步驟演算，由三角形法，將 QP 和 PR 相加就可以得 QR ，這是顯明的，所以減一位移的時候，我們可以反轉它的方向，然後相加。這種加法可以用 $PO' = QP$ 的平行四邊形 $PQ'SR$ 演算，所得的結果是位移 PS ，和上面一樣。

15. 向量和無向量 (Vector Quantity

and Scalar Quantity) 位移屬於所謂向量

(Vector Quantities)，就是兼有大小和方向的量

(Magnitude and direction)。其他的向量是速度，

力，等。將許多的速度或多的力相加時，所用的方法

和位移的合成法一樣。

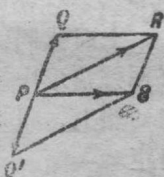


圖4. 位移的減法

力，等。將許多的速度或多的力相加時，所用的方法
和位移的合成法一樣。
不含有方向的量叫做無向量 (Scalar Quantities) 例如質量，
體積等，這些裡邊任何一個量都用一個數目來決定而沒有方向觀念，
這些量的加減法就同算術或代數裡的一樣。

速度

16. 速度 就是位置變動的速率或是位移的變化率 (rate)

因為位移有一定的方向和大小，速度也有一定的方向和大小，或者

說速度也是向量。所以“每小時 20 哩”這句話不能作為一個速度的完全說明，因為它僅僅把大小給出來了而並沒有規定方向，可是“往東每小時 20 哩”這句話就是一個速度的完全說明了。為清楚起見，“每小時 20 哩”這句話可以叫做一個快慢 (Speed) 的說明。它僅僅說明了一個速度或是一個位置變動的大小，而沒有談到方向的變更。當我們所要考究的運動全部在一條直線上的時候，快慢和速度就無需加以區別了。

17. 等速度 (Constant Velocity) 當一點在相等的時間隔裡所發生的位移都相同的時候，它的速度就叫做相等或均勻的 (Constant or uniform)。相等的位移必定是要大小和方向都相同。所以，作等速運動的點必定是在一條直線上運動，等速度的大小就是單位時間內位移的大小。所以，假如用 v 代表等速的大小， s 代表在 t 時間內的位移那麼 $s=vt$ 。

單位速度就是一點在單位時間內的單位位移，例如一秒鐘一厘米或是每秒一厘米，或者更簡單一點 $1\text{厘米}/\text{秒}$ 。這單位設有特殊的名稱，這式子 $\frac{\text{厘米}}{\text{秒}}$ 就可以當作名字。

18. 變速度 (Variable Velocity) 當一點在相等的時間內的位移不相等時，它的速度就是變速度。在依次的相等時間內，位移可以：(1) 僅有大小的不同，像一點以變速度在一條直線上運動就是，(2) 僅有方向的不同，像一點以相等的快慢在圓周上運動就是，(3) 大小和方向都不相同。像一點以變速度在曲線上運動就是，我們先要考究第一種情形就是直線運動 (Rectilinear motion)。

19. 平均速度和瞬時速度 (Average Velocity and Instantaneous Velocity) 在變速度的直線運動裡，我們怎樣決定速度的大小呢？在這種情形，有兩種方法可用。假如我們把某一個時間隔裡所行的全距離用時間去除，就得到那時間隔裡的平均速

度。例如，我們求得直軌上的一列火車，由一站到他站的時間，而以這時間去除全距離，我們就能得到兩站之間平均速度了。若以 s 表全距離，以 t 表示全時間，而以 $\bar{v}$ 表示平均速度則 $\bar{v} = \frac{s}{t}$ 。所以 $s = \bar{v}t$ 。

在某時期內平均速度的大小，不能告訴我們在這時間內運動變化的情形。假如我們要知道這運動的情形更深些，我們必須將全時期分為許多小部分，並且求出來每部分的平均速度。所分的部分越小，每一部分的平均速度越可以近似的代表在這部分內任何瞬時的實際運動率。現在我們要注意運動開始 t 時間後的某瞬時。假如我們求出在這瞬時之後的一個短時間 Δt 的平均速度，並且假設我們漸漸減小 Δt 的值，而同時求出在每個減少 Δt 的內的平均速度，我們就知道這平均速度很快的接近一個有定極限的值了。這極限值就是在瞬時 t 的瞬時速度 (Instantaneous velocity) 說得再簡單點，假使 Δs 在時間 t 之後一個極短時間 Δt 內的位移，在時間 t 的瞬時速度就是當 Δt 近於零時， $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 所接近的極限值。這個更可以簡寫作下面形式：

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

最後的簡寫是用在微分 (Differential calculus) 裡而用的。

當一點的速度是等速時，上面所規定的瞬時速度就和 17 節所規定的一樣，因為 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 在任何時間內的任何瞬時全相等。所以假設是在時間 t 內的全距離 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 的每個值全等於 $\frac{s}{t}$ 就是單位時間內所經過的距離。

假如上面規定的一點的瞬時速度是變動的，我們也可以用一個相等的速度來量它的大小。假設，當瞬時速度是 v 時，這點以等於 v 的等速度開始運動，這個等速度的大小就是這點在單位時間內

所要走的距離，所以我們也可以說一點的瞬時速度的大小就是假若它的速度不變，在單位時間內所要走的距離。

20. 時間的單位 想要量度或決定速度，我們必須用時間的單位。在物理學裡，常用的時間就是平均太陽秒 (Mean solar second). 它的定義是一個平均太陽日的 $1/86400$ 也就是在一年裡太陽連續橫過任何地點的子午線兩次所需的時間的平均數的 $1/86400$ 。也就是普通的鐘或錶的秒。

21. 曲線運動 (Curvilinear motion) 當一點在連續時間隔裡的位移有不同的方向時，它必是在彎曲的路徑上運動。例如把一個球斜向往上拋或是火車在彎曲的軌道上面走時的情形都是。假如在某時刻 t 一點的位置是在 P 處在稍遲的某時間，比方說 $(t + \Delta t)$ ，是在 Q 處這時間裡的位移就是 PQ (圖5) 與假如我們用 Δs 表示 PQ 的弦長並且像以前一樣考究 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 的極限值，我們就得出在 P 位置的點在 t 時刻的瞬時速度。當 PQ 減小時 PQ 最後無限近於 P 點的切線，所以， P 點瞬時速度的方向就是 P 點的切線方向。同時這也就是在 P 點的位置變化率的正確意義。假如我們把 Δs 當作弧長 PQ 並且假定它把 Q 向 P 逐漸減小，也可以得同樣的結果，因為弦長和弧長在極限時候的比值是一。



圖 5.

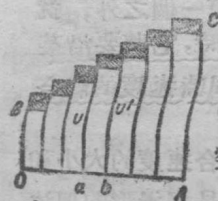


圖6. 快慢的圖表

22. 快慢的圖表 (Graph of speed)

一個表示動點快慢的曲線叫做快慢曲線，(Speed Curve) 假設 OA (圖6) 是直線 OA 代表我們要考究的運動的時距 t 的長把 OA 分成多數的小等分。在 O 點畫垂線 OB 表示在時距 t 開始時的快慢。在每一部分的起點都照樣畫垂線，表示在那些點快慢的瞬時值。然後經過這些垂線的頂點畫一條光滑的曲線 BC 。