

國家圖書館



002855421

大學叢書

高等物理學

下 冊

衛斯特發爾著
周君適 姚啓鈞譯



商務印書館發行

大學叢書

高等物理學

下冊

衛斯特發爾著
周君適·姚啓鈞譯



羅
甫
於
一
九
五
三

商務印書館發行

370
8755:3
V.3

第七編 光學及廣義輻射學

第二十九章 幾何光學

396. 輻射學之內容. 光源. 狹義輻射學亦稱光學,其內容爲關於光現象之研究,即物理現象之能引起吾人之視覺者. 但此外尚有同類之現象,不能爲人目所察見. 光學在輻射學中所處之地位猶如聲學之於機械振動學. 在廣義輻射學中,光學僅爲由於人類生理所限制之一小部份. 全部輻射學中之一切定律與觀念皆爲普遍的合理,故以下所述者,先僅及於能爲吾人直接目觀之狹義光學. 以下所謂光者,即指人目直接察見之輻射而言,即尋常語言中所謂光者是也.

各種光線之來源皆爲發光之物體. 但其何以發光之原因則大有不同. 大多數之情形皆由於物體之溫度. 固體與液體約至 525°C . 時始發可見之光 (Draper 氏定律). 此時開始所發之光,極微弱萬分,僅能於完全黑暗之處察見之,且僅能爲目中不司辨色之器官 (桿狀纖維, § 430) 所辨認;故光作灰白色,而吾人稱此項現象爲灰白熾. 溫度漸高,則物體先作紅熾,次作黃熾,而終爲白熾. 此外尚有其他原因,可

國家圖書館



002855421

使物體發光，如氣體中之放電，螢光，磷光以及化學作用等。有多種之動物亦能發光（如螢以及海中發光之微生物等）此數種之發光現象並非由於光源之高溫度，而另有其他之原因。但不論任何光源所發之光，其物理性質均屬相同，且均遵守公共之定律。故欲研究其普遍定律時，任何光源凡足以供吾人之需用者，均無不可。最爲便利之光源當推熾熱之物體（電燈，弧光燈，煤氣燈，油燭）。

物體之本身非爲光源（不發光體）者，遇有其他發光體之光投射其上時，至少有一部分之光爲其所折回，故亦可視作光線之出發點。於是該物體亦如自行發光者然。此種借光輻射之光源，周圍於吾人者觸目皆是。爲太陽所照耀之自然界，室內之牆壁與家具，天上之月與行星，凡此種種吾人所見之物體，蓋無一能本身發光者也。

不論由發光體或不發光體所發之光，祇須其種類相同者，其物理作用初無區別。

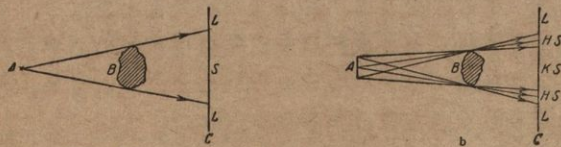
397. 光線。 自光源發出之光能達至其他之物體及吾人之目，故光必在空間中傳遞。按諸經驗，此種空間中似可不必充滿物質。由恆星發來之光在虛無一物之太空中經過非常遙遠之距離而達於吾人也，其傳播無需乎物質之存在，自無疑義。事實上光之傳播在絕對真空中爲最佳，蓋其速度爲最速，且能量可免損失也。

光自一物體射至他物體，其在路程之上，吾人不能見光。

僅當光線射至物體而該物體因之明亮時，吾人方覺光之存在。故在光所穿過之空間中苟充滿塵霧者，吾人可察見其軌道。精密言之，吾人所見者尚非為各條光線之軌道，而不過為此種軌道之終點而已。當光線遇有障礙物（塵霧微粒）時，即行停止前進。此一系列之小點者，乃為一未受擾亂之光線所經軌道之圖形。光線若穿過一狹小之孔而透入一暗室之中，則室內空氣中之塵埃凡在光線所經過之路程上者皆被照耀明亮，故吾人可見其路線。此項現象與自小孔中噴出之水流射線略有相似，故吾人以光線名之。光線者係指一極細之光束而言。理論上此種光束可視為非常細小，直可以一線表之。

398. 直線傳播。未受擾亂之光線軌道皆為直線。當其與物質性物體發生交互作用時，其前進方向始背此而偏轉（參閱 § 541）。

此項事實最明晰之作用莫過於不透明物體之影。命 A （第 352 圖 a ）為一理想的點狀光源， B 為一置於光路上之物體， C 為接收光線之平面（光屏），例如一白色之牆。按光



第 352 圖 a. 點狀光源之影。 b. 本影(KS)與半影(HS)。

之直線傳播原理而作圖，可知光屏上僅 L 處有光照射， S 處則無光。物體之影，即以此而生。

一切自然之光源皆佔有若干體積，決不能精密作點狀，惟弧光燈之用極細之炭棒者或庶幾近之。光源之發光面恆可視作由許多發光點（精密言之，為許多極小之基元發光面）聚合而成，其在光屏上之光的作用可視作各點之作用之和。因得下述之結論。射影之物體（第 352 圖 b ）僅能將其後面牆上 KS 一部份完全屏蔽，不使受光，由此引至光源面上任何一點之直線，無不穿過此物體之內部。此部份稱為本影。本影之內完全黑暗。光屏上其外明亮之部份 L 於物體之存在與否無關。此明亮之部份中任何一點均可與光源面上之各點以直線相連而無一通過物體之內部。介乎此二區域之間者為 HS 區，稱為半影，此部份中任何一點僅可與光源面上一部份之點以直線按上法相連，與其他部份之點則不能。光屏上此部份區域內確有光線到達，惟僅由於光源之一部份，愈接近本影之邊界者受光愈少。吾人設置身於此半影區域之中，而自其各處遙望光源，則能見之光源部份愈小者，該處所受之光愈少。自本影至半影，自半影至完全明亮之區域，其間明暗之變化初非突然；半影者僅為承前接後，自完全黑暗逐漸變為完全明亮而已。故影無鋒銳之邊緣。半影之闊狹繫乎發光面之大小，以及光源，射影體，光屏三者間距離之比。射影體之截面小於光源之面

積者，在距物體較遠之處每無本影而僅有半影。

日蝕者，月球適運行至太陽與地球之間，月球之影落於地面而成。月球之本影遠較地球之表面為小。故日之全蝕，僅限於地面上一小區域內方能見之。

月蝕者，地球運行至太陽與月球之間，地球之影落於月面而成，其影之大小適偶與月面之大小相等。月蝕時，地球上各處自能同時望見。其他行星之月球亦有與此相應之月蝕。

雙星者，係一雙互相密邇之恆星，彼此旋繞而成。吾人輒見某種雙星之亮度有週期的變化，此蓋因時而甲星行至地球與乙星之間，時而乙星行至地球與甲星之間，每隔勻均之時間，彼此更迭不已，以致一星將他星之光遮蔽所致。

針孔照相機（第 353 圖）為一不透光之匣，其前壁具有一細小之針孔，後壁置一毛玻璃片，如一照相機然。針孔之



第 353 圖 針孔照相機

前為光亮之物體 G 。此物體可不必為發光體。毛玻璃片上各點所受之光僅係自光源上之一點或一極小區域穿過針孔而來。片為此光所照後，即按光源各點之明暗與色澤而顯一清晰之圖形。故光源 G (物體) 在片上即生一像 B ，人

若自後方觀之，見像與實物適相倒立，且左右互易，如第 353 圖所示。命 g 為明亮之物體與針孔間之距離， b 為後壁至針孔間之距離， G 為實物之單向大小， B 為像之大小，則

$$B:G = b:g \quad (1)$$

B/G 之比稱為放大率；其值可較大於 1，亦可較小於 1，惟較小於 1 時則不為放大而為縮小。

若針孔十分細小，則像之清晰與否可無關乎 g 之距離。毛玻璃片若易以照相片，則用此種針孔照相機亦可攝取景物。惟此時所需露光之時間當較尋常之照相機為久。

祇須針孔較小於實物之組織，則像之清晰雖僅於孔之大小是視，但孔之形狀對於像之優劣毫無關係。

近視之人，自一穿有細孔之紙遙望遠物，雖無眼鏡，亦覺清晰。蓋此時與上述針孔照相機之作用相同，眼球之水晶體對於其後面之網膜上所成之像無復有重要之作用矣。

399. 光之速度。 據尋常之觀察，一似由光源所發之光可立即傳至觀察處而無需時間者。事實上則不然；惟光之傳播非常迅捷，對於吾人在地面上日常生活中所涉及之距離，僅需一非常短促之時間。真空中光之速度為 $3 \cdot 10^{10}$ [厘米]/[秒] = 300000 [千米]/[秒] (參閱 §327)。故光於 1 秒鐘內前進之距離，可等於地球周緣之七倍有半。

光自太陽射至地球需時 500 秒，自月球而來者約需時 1 秒許，自與太陽系相距最近之半人馬座 α 星 (即天狼星)

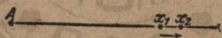
而來者需時4,3年。有星雲者,距地球非常遙遠,其發出之光須經數百萬年而始達地球。

在一切物質性物體(玻璃,水等物)中之光速皆較真空中者為小(參閱 § 409)。

測量光速最重要之方法有如下述:

1 Olaf Römer 氏法 (1676)。

Römer 氏利用木星之一個月球每隔均勻時間繞木星一次出現之月蝕以計算光之速度。欲明瞭此法,吾人可設想在空間內有一固定之光源 A (第 354 圖) 及一以速度 v 離開光源而運動之觀察者。設光源上有一種裝置,每隔相等時間後可將光源遮蔽,不使觀察者望見(月蝕)。命每二次此種光蝕相隔之時間為 T 。若觀察者靜止不動 ($v = 0$),則



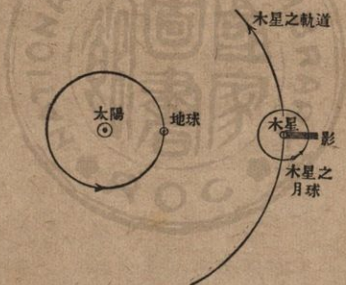
第 354 圖 Olaf Römer 氏法之說明

每隔相等之時間 T , 觀察者即望見光蝕一次, 惟每次所見者均在蝕後 x/c 之時間, 蓋此為光線行經光源與觀察者間之距離 x 所需之時間也。若觀察者以 v 速度背光源而運動, 則其所見二次光蝕相隔之時間當較長。命在 $t = 0$ 時, 有一次光蝕發生。此項現象傳至觀察者時, 觀察者已行至與光源相距 x_1 之處, 故於 $t_1 = x_1/c$ 時方得見之。當 $t = T$ 時, 第二次光蝕發生。迨傳至觀察者, 則觀察者已行至更遠之距

離 x_2 處，故於 $t_2 = T + x_2/c$ 時，觀察者方見第二次光蝕。是則觀察者所見第一次與第二次光蝕相隔之時間為 $t_2 - t_1 = T = T + (x_2 - x_1)/c$ 。觀察者本身在此 T 之時間內所行之路程為 $x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1) = vT'$ 於是

$$T' = T + v/c \cdot T' \text{ 或 } c = v \frac{T}{T' - T}.$$

若觀察者向光源運動，則按同理可得 $T' = T - v/c \cdot T'$ 。觀察者運動時，若與光源射來光線之方向成任何之角度，則結果又不相同。



第 355 圖 Olaf Römer 氏法之說明

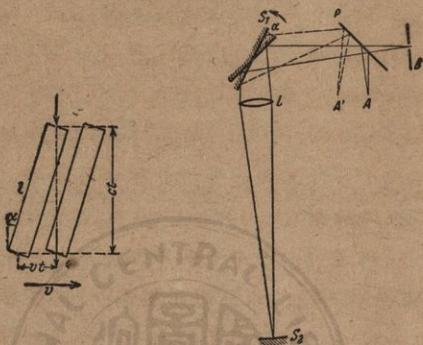
地球之繞日也，在長久之時期內將以一切可能之方向對木星而運動(第 355 圖)，故在地球上所見木星之月球每二次月蝕相隔之時間，當視地球與木星之相對運動而變。基於此項觀察及地球公轉之速度 v ，即可計算光速 c 之值。(上述之現象與 Doppler 氏效應 (§ 129) 僅在形式上相似)。

2. Bradley 氏法(1727).

欲明瞭 Bradley 氏法，吾人可設想一問題，即若何可使鉛直下降之雨滴穿過一僅於上下兩端開有小孔之圓管(第 356 圖)。若管為靜止，則須將管身持直，方可使雨滴落入，自無疑義。但若管在水平方向內以速度 v 而運動，則決不可仍將其持直。命管長為 l ，雨滴下落之速度為 c ，則雨滴穿過直立之管需時 $t = l/c$ 。在此時間之內，管已水平移過 $x = vt$ 之距離。故雨滴將不能自管之下端而出。欲達此目的，須使管身與雨滴下落之方向成一傾斜之角度 α ，自第 356 圖，不難察見應有 $\tan \alpha = v/c$ 之關係。自觀察所得之 α 角及速度 v ，即可計算雨滴下落之速度。

在 Bradley 氏法中，雨滴應易以自任一恆星射來之光線，而開有小孔之圓管則易以望遠鏡（吾人可用與前述理想的雨滴實驗原理完全相同之裝置）。此時 v 為地球沿軌道前進之速度。上述之思索仍屬無異。故欲使恆星之光線沿望遠鏡軸而進入視場之中心，須將望遠鏡按地球之運動方向向前傾側一某角度。換言之，將見光線似從另一方向而來，與事實上之方向不同，即恆星之位置似移動少許。一年之中，在天球兩極附近之恆星似繞行一小圓周，其半徑之視角為 $\alpha = 20,6''$ ，在黃道上諸星似在直線上前後移動，而其間諸星則似繞行小橢圓之周緣，其長軸與 α 角相等。此項現象吾人稱為光行差。自 α 及地球速度 $v = 30[\text{仟米}]/[\text{秒}]$

二者之值可計算光之速度等於 300000 [仟米]/[秒]。



第 356 圖 Bradley 氏法之說明 第 357 圖 Foucault 氏法之略圖

較此天文法更為精確者，有所謂地面法，即可在地面上實測者。諸法中以 Foucault 氏法為最重要。

3. Foucault 氏法

此法之原理可述之如下 (第 357 圖): 一束光線自光闌 B 透入，經過一平行面之玻璃板 P 而達於一平面鏡 S_1 ，此鏡可繞一與圖面垂直之軸而迅速轉動。光線即自此反射，經過透鏡 L 而會聚於凹鏡 S_2 ，務使光闌 B 之像適現於該處。至此光線復為凹鏡所反射，仍依原路回至平面鏡 S_1 ，自此再度反射。此項反射光線到達玻璃板 P 時，一部份又為此玻璃板所反射；若 S_1 鏡並不轉動，則光闌 B 之像將於 A 點出現。但若 S_1 轉動，則光線自 S_2 反射而回時，不再遇平面鏡

於其舊位，故自此以後，光線不循舊路進行，而另取一新路，二者間有一不大之交角。因之此時光闌之像視平面鏡靜止時已移過一短距離 $\delta = AA'$ ，而出現於 A' 點（第 357 圖中所示之比例，爲易於明瞭計已過份放大）。欲精密測量此項位移之值，可於光闌 B 中置一玻璃片，上刻極精細等距離之條紋，則其像中位置之遷移可十分精確測定之。

命 α 爲光線進行 $S_1 S_2 S_1 = 2l$ 時 S_1 鏡所轉過之角度。於是自 S_1 反射至 P 之一束光線所取之軌道與來時之軌道成 2α 之交角 (§ 405)。命曲折光程 $S_1 P A'$ 之長爲 r ，則位移 $AA' = \delta = 2\alpha r$ 。命 S_1 之角速度爲 $\omega = 2\pi\nu$ 。光線進行 $S_1 S_2 S_1 = 2l$ 之路程所需之時間爲 $t = 2l/c$ 。在此時間內 S_1 轉過之角度 $\alpha = \omega t = 2\pi\nu t = 4\pi\nu l/c$ 。故 $\delta = 8\pi\nu r l/c$ ，或 $c = 8\pi\nu r l/\delta$ 。

Foucault 氏僅用 l 爲 20 [米] 之距離已足測出光之速度。欲作精密之測量時，自須用更長之距離 l ，俾位移 δ 之值大增，而測量益可精密。最近 Michelson 氏所作光速測定中之距離竟逾 35 [千米]。此項距離可精確量至 5 [厘米]。八次不同之測量所得真空中光速之值皆不出 299795 與 299797 [千米]/[秒]之間。其平均值爲

$$c = 299796 \pm 4 \text{ [千米]/[秒]}$$

此項測量之精密度約達 0,001%。關於光速在電學中之測量法，見 §315。

Michelson 氏之測量自在空氣中舉行，上謂真空中者，係

將此項結果加以修正而得 (§ 409)。

Foucault 氏法雖以短距離而能得相當精密之結果，故吾人可用以測量液體等物質中之光速。此時光程 $S_1 S_2 S_1$ 之一部份穿過欲測之物質。最重要者，以此法測量光在運動物質，如流動之液體中之速度 (§ 536)。

400. 光通量，光源強度，照度，表面亮度。任何光源皆連續發射光能量（輻射能量）於空中。光為能量，故吾人稱為光量（與熱量之意義同）者，係指一光源在某時間內所發出之能量成可見光之形式者而言。一光源於 1 秒鐘內向一切方向發出之光量總值稱為該光源之光通量 Φ 。通常在各方向內光通量之密度，不全相等，換言之，一光源通常並不以等量之光向各方輻射。

在某一指定方向內之光源強度者，係指下值而言：

$$J = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (2)$$

式中 $d\omega$ 為極小之立體角。故在立體角 $d\omega$ 以內之光通量等於 $d\Phi = Jd\omega$ 。若光源向各方以同強度輻射，則光通量之總值為 $\Phi = 4\pi J$ 。光源強度之單位為標準燭光。此為一標準燈在其水平方向內所具之光源強度，燈之構造及燃燒情形均經法定，以醋酸戊烷 ($\text{CH}_3 \cdot \text{COOC}_5\text{H}_{11}$) 為燃料。

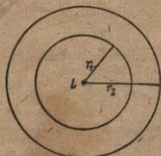
光通量之單位稱為 1 流明 (Lumen)。其值等於自一強度等於 1 [燭光] 之點狀光源，在一立體角 $\omega = 1$ 以內射出之量，相當於 0,00145 [瓦特] 之能量流。

一表面上之照度者，係指落於該面上 1 [厘米]² 或 1 [米]² 內之光通量而言。其單位為 1 [流明]/[厘米]² = 1 輻透 (Phot)，或 1 [流明]/[米]² = 1 勒克斯 (Lux)。

一面上(發光體或非發光體)之表面亮度者，為該面上 1 [厘米]² 之光源強度，其方向與該面垂直。其單位為 1 [燭光]/[厘米]² = 1 史蒂勃 (Stilb)。

有所謂 Lambert 氏餘弦定律者，在許多情形中，尚屬合理，其內容謂自一表面射出之光量，其射出之方向與該處之法線成一交角 φ 者，應與 $\cos \varphi$ 為正比。嚴格言之，此項定律惟對於某種發光體之表面不論自何方觀之，其表面亮度均為相同者方稱合理。故絕對合於此律之發光體有似光亮之圓板，到處亮度相等。太陽與此已頗相近似。

401. 距離定律。命 L (第358圖) 為一光源，在一半徑 r_1 之球面之中心。命光源強度 J 在一切方向內者皆為相等。於是自光源發出之光通量 $\Phi = 4\pi J$ 均勻分佈於球面 $4\pi r_1^2$ ，而球面上之照度為 $E_1 = 4\pi J / 4\pi r_1^2 = J / r_1^2$ 。將球面之半徑擴大至 r_2 ，則照度即變為 $E_2 = J / r_2^2$ 。故得



第 358 圖
照度與光源距離
關係之說明

$$E_1 : E_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2} = r_2^2 : r_1^2 \quad (8)$$

各方向內 J 之值不為常定時，此定律(光度距離定律)對於

發光之各方向各為合理。

按(3)式,一面上之照度依其與光源間距離之平方而遞減。前在§130中,嘗述一球面波之振動強度逐漸減弱之情形,至此又遇一相同之定律;事實上二者情形本屬相同,惟此處所涉者,不為機械振動而已。此二者皆可由能量原理推得之。光為能量。若此種能量毫不變成他種形式,則穿過半徑 r_1 之球面(第358圖)之光量必與穿過半徑 r_2 之球面者相等,蓋在二球面之間能量初無改變也。若光線進行時中途因被吸收而能量減損,則(3)式不復合理。

射於一表面上光線之方向若與該面之法線稱為入射法線)成一交角 φ (稱為入射角),則不難證明此時該面上之照度必將較垂直入射時弱 $\cos \varphi$ 倍(Lambert 定律)。蓋入射之光通量正比於 $\cos \varphi$ 也。

置強度 J_1 與 J_2 之二光源於二處,與某平面各相距 r_1 與 r_2 ,務使二光源在此面上之照度相等,即 $4\pi J_1/4\pi r_1^2 = 4\pi J_2/4\pi r_2^2$,則二光源強度之比應為

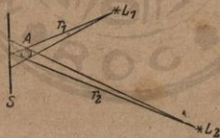
$$J_1 : J_2 = r_1^2 : r_2^2 \quad (4)$$

自一明亮之表面射至人目瞳孔中之光通量既反比於距離之平方,而該表面視面積之大小亦然,故不論遠近若何,物體之表面亮度恆為相同。但此時自仍須假設光在途中不被吸收。

關於明暗差之辨別,有精神物理的基本定律(W. Weber

氏 1825, Fechner 氏 1856), 殊為合理, 其內容謂二種光現象之亮度苟相差少許而尚能為吾人所辨出者, 則其最低之絕對差值應正比於亮度之本身。從此可知吾人若遇極微弱之二種光現象, 設其亮度之差尚不難直接辨出, 則於遇較強之二種光現象時, 其亮度差之絕對值雖仍與前者相同, 而吾人已不復能辨別之。

402. 光度學. 光度學為測量光源強度之學。測量時, 以欲測之光源與另一光源相較, 此另一光源之強度須先與標準燭光相比較, 而其強度之值為已知者; 有時即逕以欲測之光源與標準燭光本身比較之。大多數之光度法皆基於(4)式之應用。人目對於亮度之差頗能精密辨別, 尤以亮度較弱時更為可靠; 測量時實藉助於此項之事實。



第 359 圖 比影光度計

比影光度計 欲測之光源及用以作為比較之光源二者同列於一白色光屏 S 之前。密靠光屏之前, 又立有一棒 A (第 359 圖)。二光源同時將棒影射於光屏之上。移動光源之位置, 務使二影互相靠近。二影均非完全黑暗, 其所在之處原為二光源聯合照亮, 而今則僅為其所照射。故二

影處之照度各係由於一個光源。繼續移動光源之位置，直待二影明暗相仿，即二影中之照度相等而止。於是按(4)式知此二光源強度之比等於其與光屏間距離平方之比。

Bunsen 氏油斑光度計。緊張一紙於架上，而於其中心處塗一油斑 F (例如置少許脂肪質於該處微熱之使滲入紙中)。試先以光自其一方照射之。光為紙所反射，但在油斑處有大部份之光線得以穿過，而自紙之後面射出(第360圖)。於是自紙之明面視之，見油斑為明地中一較暗之點，而自紙之暗面視之，則見為暗地中一明亮之點。今若於其他方亦置一光源，則吾人可選擇二光源距離適當

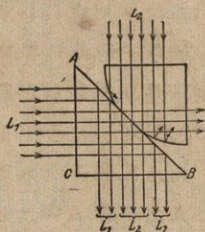


第360圖 油斑光度計之說明

之比，務使二面之照度合於下述之情形。例如自右方觀之，務使自左穿過油斑而來之光線適足以補償右面所缺之光，此所缺之部份蓋即為右光源發出之光線已穿過油斑而向左方射出者。苟若此，則油斑與其周圍明暗相同，而消滅不見。自左方觀之，其情形亦復相同。在此例中，(4)式仍為合理。欲得精密之結果，須將欲較之二光源順次與另一輔助光源相比較，而每次均須自同一方向觀察油斑。蓋在各觀察方向上，油斑每不能同時消滅故也。

欲作更精密之測量，常用 Lummer-Brodhun 二氏之光度計。其重要之部份為一所謂光度計稜鏡(第361圖)。此

由二塊玻璃製之直角稜鏡而成，其一塊之斜面磨成圓柱面，僅留中央一小部份仍為平面。二稜鏡互相接觸，如圖所示。欲比較之二光源光線各自一稜鏡之側面垂直射入。光線在稜鏡之中進行，迨遇玻璃界面與空氣相接之部份，即悉行反射（全反射），其



第 361 圖 Lummer-Brodhun
二氏光度計稜鏡

所以然者，將於 § 411 中詳述之；光線遇二稜鏡相接之處，仍前進如故。故自稜鏡面 BC 射出之光線，在視場中央者僅係來自光源 L_2 ，而在其周圍者皆來自光源 L_1 。故稜鏡 AB 之作用猶如油斑光度計之紙面。自此面射出之光線，半係由於一光源，半係由於他光源。二稜鏡相接觸之平面相當於油斑。故有稱之為『人工油斑』或『理想油斑』者。 AB 面所受二光源之照度相等時，接觸平面即消滅不見。實際測量時，二光源之光線並不直接射於稜鏡，而用二白色之面，置於與稜鏡面等距離之處，移動光源，使此二面明暗相等。此處(4)式仍為合理，惟須以二光源至二白色面間之距離計算之。此法可無需輔助光源。

除上述簡單之光度計外，尚有許多近代式之構造，基於他種之原理而成。但在一切情形中，測量之法恆不外調節欲測之光源在一面上所生之亮度，使與一已知之標準光源

在同面上所生之亮度相等。例如於較強之光源所發之光線中插入一可以移動之灰色玻璃劈板，由其移動之多寡即可測量爲其所減弱之照度，或於光線中插入二 Nicol 氏稜晶 (§ 457)，彼此可依同軸相對轉動者亦可。

凡用此種種之光度計時，明暗差之最終判斷皆須取決於吾人之目，而人目之靈敏度有限，且依各人之視力輒有主觀的歧異，故此法恆不免錯誤。以電學方法測量光源之強度可免此弊，而尤以藉助於光電管或矽光電管 (§ 489) 者爲佳。測量極微弱之亮度，如恆星之明暗等，非用此法不可。謹慎觀察照相片之變黑——惟變黑之深淺不與吸收射線之多寡成正比——亦可用以測量光度。

以純粹光學之方法精密測量光度時，僅於欲測之諸光源光色相若時方爲可能。白熾之電燈與略帶黃色之燭光已不能直接相較。

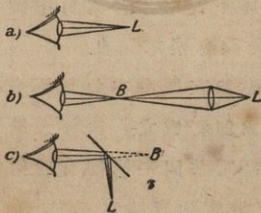
403. 幾何光學。 在此第二十九章中，光爲振動現象之事實尙可暫置弗論。此章中所謂幾何光學（以別於後章所述之波動光學）者，純係基於一種觀念，即自光源上一點所射出之光皆視爲係由光線所合成，此等之光線皆自該點發散。以該點爲頂點之立體角內所包含之全部光線稱爲光線束。

幾何光學中一重要之定理爲光路可逆定理。其意謂：一光線在某指定條件下所行之路程設爲已知，苟有其他同

類之光線亦在此路程上之一段按相反之方向進行時，則其以後進行之路程必與第一光線相同，惟方向相反。任何光線之路程皆可逆溯。但僅當反射或折射時，此項定理方可應用，遇繞射 (§ 445 以下) 時即失效。

在幾何光學之許多情形中，Fermat 氏原理 (§ 134) 頗有用處。應用於光學問題時，此原理亦稱為最短 (或最長) 光程定理，或稱光線到達最速 (或最遲) 定理。

404. 鏡像概論。自一物體，或最簡單者自一亮點 L 所發出之光線苟不變其方向而直達吾人之目者，吾人謂為直接得見此物體。在此例中，亮點為一圓錐之頂點，此圓錐係由自該點發散之光線所成，而以人目之瞳孔為底者，故該點為光線之直接出發點 (第 362 圖 a)。空間內一切物體表面上之各點皆發散光線，以直線射入吾人之目中，而吾人遂覺見此物體。



第 362 圖 物與像之辨別 a) 直視 b) 實像 c) 虛像

有時輒遇自一物體上各點所發散之光線束亦以同樣

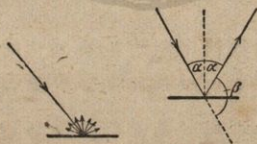
之情形而入於目中，惟此種之光線自物體而來不依直線進行。但人目之感覺恆僅直接以其目前光線之狀況為斷，故在此種光線所自發散之處，或似自該處發散者，吾人即見有物體存在。此種現象稱為物體之像。此處有二種可能之情形。第一種情形者，自物體上一點發出之光線經過任何光學儀器而會聚於空間之一點，再自該點以直線向各方進行，恰如自實物上之一點向各方發散者然。吾人稱此空間之點 B 為實物上一相應點之實像（第 362 圖 b ，穿過透鏡時之折射，見 § 414 以下）。實像可以一光屏承之。例如置一白色之表面於光線之會聚點 B 處，則其上各點之亮度一一與自物面上各點所射出之光相呼應。故該面上即現實物之像。尚有一種情形，光線似自 B 點發散，而實則射入目中之光線並非真正交於該點，而僅為其延長線之相交者。此時吾人所見者為虛像（第 362 圖 c ，遇平面鏡時之反射，見 § 406）。此種之像不能承於屏上，蓋射入吾人目中諸光線之幾何交點 B 事實上並非為光線會聚之點也。

物體上之各點能在像中亦如其原來之秩序作空間之排列者，實像或虛像即行成立。像可大於實物，亦可小於實物。像與實物有時可佔同一位置，有時似互相轉過一任意之角度。像之對於實物有時為正立，有時為倒立；此二種情形，最為吾人所注意。故吾人須區別放大之像與縮小之像，以及正像與倒像。有時像與實物之幾何形狀不為相似

者，稱爲畸變。

就實像言之，既可承於光屏之上，則其放大或縮小之觀念不難直接自像與實物單向大小之比而知之。虛像者僅能在光學儀器中以目觀察，其放大率當自他種觀點判斷之 (§ 422)。

405. 漫射與單向反射。反射定律。光線射於一面上時，輒多寡被該面所反射。吾人之得見非發光體者即以此光線遇之毫不反射之面，未之見也。此項現象稱爲光之反射 (參閱 § 132)。光線進行之方向即以此項作用而改變。在大多數情形中，一光線內各部份方向之改變並不完全相同；光線反射時輒向一切可能之方向而分散，漫無一定之限制。光線所遇之面即作爲向一切可能方向反射之出發點 (第 363 圖)。此種反射稱爲漫射，一條之光線即以此而分成無數之部份。



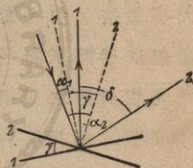
第 363 圖 漫射 第 364 圖 單向反射

極光滑之面，如潔淨之金屬面，玻璃面，晶體面以及液面等，光線遇之並不分裂，而僅改變其方向。此項步驟稱曰單向反射。單向反射遵守 § 132 所述之反射定律：入射線與反

射線二者與反射面上入射點之法線成相等之交角 α ，三線且在同一平面之內(第364圖)。

光線遇之能作單向反射之面亦稱為鏡面。純粹之銀面對於可見光為最佳之鏡面，例如日用玻璃鏡後面所塗之一層薄銀是。透明物體如玻璃及水等之界面遇有光線投射時，恆將其一部份之光反射，不論進入或射出物體時皆然(例如玻璃窗與水面能反射日光，厚玻璃鏡能生雙像，惟其由於鏡之前面所生者恆較弱)。

光線以入射角 α (即入射線與法線間之交角) 射於一單向反射之面上時，其反射線與入射線之交角恆為 $\beta = 180^\circ - 2\alpha$ (第364圖)。若鏡面轉過 γ 角，則反射線之方向改變 $\delta = 2\gamma$ (第365圖)。此蓋因 $\gamma = (\alpha_2 - \alpha_1)$ 而 $\delta = 2\alpha_2 - 2\alpha_1$ 故也。

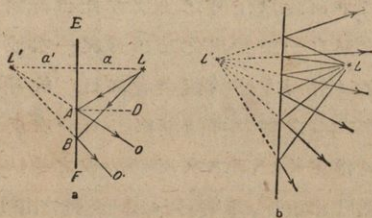


第365圖 鏡面轉動時反射光線方向之改變

物理儀器中欲精密測定極小之轉動角度者，輒利用反射光線方向之改變以圖之，此法在電學測量儀器中尤為多見。此種儀器中可以轉動之部份輒有一小鏡固繫於其上，光線自一定之方向射於鏡面，由此反射至一刻度尺，尺與鏡面相距為 a 。小鏡若轉過 γ 角，則反射光線之方向即轉過 2γ 角。刻度尺上之光點因之移過一距離，光線若幾近垂直投射且 γ 之角度不大，則此移過之距離等於 $2\gamma a$ ，故與 γ 成

正比。實用時，輒取一線狀之光源，如電燈中一段白熾之金屬絲，使之由鏡面反射至尺上。否則可取一明亮之刻度尺，其在鏡中之影以一望遠鏡窺之。望遠鏡中備有十字形之叉絲，以爲讀數之指標；可轉之小鏡位置每有變遷時，即見尺上另有一點來與叉絲相合。刻度尺離鏡面愈遠，則鏡之轉動雖小，光點在尺上移過之距離可頗大。例如刻度尺離鏡面 2 [米]，則小鏡轉過 1' 之角度後，尺上『光線指標』之移動已可逾 1 [毫米]。此種之裝置與附設一極長之指針同其示數且二倍於同長之真正指針。此種之光線指針無有質量，此爲其另一種優點。

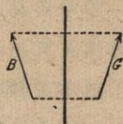
406. 平面反射鏡所生之像。在第 366 圖 *a* 中，命 *L* 爲一發光點，離平面反射鏡 *EF* 之距離爲 *a*。自此發出之光線遇鏡面後，各隨其入射角之大小而按不同之方向反射；此種反射後之光線似仍悉行會聚於鏡面後方之 *L'* 點，此點位於自 *L* 所作至鏡面之垂直線上，且亦與鏡面相距 *a*。



第 366 圖 平面鏡之成像

其證法如下: 1. $\angle LAE = \angle L'AE$, 又 $\angle LAB = \angle L'AB$,
 2. $\angle LBA = \angle L'BA$, 3. $AB = AB$. 因得 $\triangle ABL = \triangle ABL'$, $a = a'$,
 而 $LL' \perp EF$.

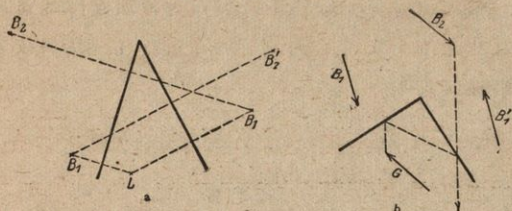
對於其他之光線亦可以同理證之。反射後全體光線之延長線悉交於 L' 點, 故悉似自該點而來(第 366 圖 b)。 L' 即為 L 點之虛像 (§ 404)。



將物體 G 上之各點按上法一一作出其像, 即可得平面鏡所生之像 B , 其作圖法如第 367 圖所示, 故由平面鏡所生之像為虛像, 與實物大小相等, 且成『鏡面對稱』。

人對平面鏡而立, 則其像左右相反, 蓋在實物為右者, 在像中仍為右, 左者仍為左, 但實物向鏡之一面在像中已對於實物轉過 180° 矣(大多數人之容貌並不十分對稱, 故在鏡中所見之像似與直接所見者不同)。

設有二平面鏡以任何之角度彼此相倚, 觀察者立於一適宜之地位, 則自一點發出之光線可經一次或多次在二鏡面間連續之反射而方達於觀察者之目。故可有許多之像生成; 普遍言之, 像之總數可達無限。第一次反射所成之像 (B_1, B'_1) 可視作虛物體, 第二次反射所成之像 (B_2, B'_2) 即為此虛物體之像, 以此類推(第 368 圖 a)。全體之像以及實物本身皆排列於一圓周之上, 以二鏡相交之角頂為其圓心。

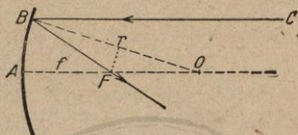


第 368 圖 角度鏡所生之像

二鏡之交角為 360° 之整數等分者，此項情形最為簡單。此時恆有若干之像互相併合。有所謂萬花筒者即基此理而作，不規則形式之物體經多次反射後輒成有規則之圖形。二鏡面相交 90° 之角度鏡亦頗饒興趣。第 368 圖 *b* 示一實物 *G* 經此鏡二次反射後所生之像 B_2 。此像之位置適與單獨平面鏡中所見者相反。人立此鏡之前，可窺得其本身之廬山真面，而左右不致互反。此時 B_1 與 B_2 為第一次反射所生之像。由此第二次反射所生之二像適併合一處，且第四，第六，第八等次反射之像亦均落於此處。第三，第五，第七等次反射所生之像與第一次者相重合。

407. 凹鏡。曲面反射鏡中當以鏡面為球面之一部份者，最為重要。反射之面向內凹陷者稱為凹鏡，向外凸出者稱為凸鏡。以下所述者恆假設鏡面僅為球面之一小部份，換言之，即鏡面之大小遠較其曲率半徑為小者。在鏡面中心點所立之法線稱為鏡軸，而依此方向進行之光線稱為主

光線。一光線射於凹鏡面上時，猶如射於該點處球面之切面，而自此作單向反射。垂直射於球面時（沿幅），仍依其原來之路程而反射。



第 369 圖 凹鏡反射之說明

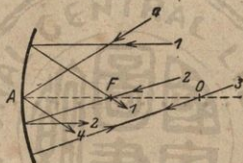
命一凹鏡之曲率半徑為 r ，一光線沿主軸之平行方向 CB 射於鏡面上之 B 點，而向 F 點反射（第 369 圖）。 O 為鏡面之曲率中心。按反射定律得 $\angle CBO = \angle FBO$ ，而吾人又知 $\angle CBO = \angle FOB$ ，故 $\triangle BFO$ 為二等邊三角形。於是 $FO = r/2 \cos \angle FOB$ 。前已假設鏡面不大，故 $\angle FOB$ 可視為極小。若此則 $\cos \angle FOB$ 幾與 1 相等；而吾人可命 $FO = r/2$ ，不致有顯著之錯誤。由此可知

$$AF = FO = f = \frac{r}{2} \quad (5)$$

根據上述之假設，凡與鏡軸平行之其他各光線亦皆與此相同。故平行於鏡軸之一切光線悉交於 F 點，即所謂凹鏡之焦點者是。此點之位置適在鏡面與其曲率中心間鏡軸上之中點。 $AF = f = r/2$ 之距離稱為凹鏡之焦距。其值等於曲率半徑 r 之半。

按光路可逆定理 (§ 403), 自焦點 F 發出之光線射於鏡面時, 即逆溯以上所述之路程而前進。故凡自焦點發出之光線遇鏡面反射後, 悉與鏡軸平行。

自光軸上極遠一點而來之光線, 即精密言之, 亦可視為彼此平行, 且亦平行於光軸。故反射後將悉數穿過焦點, 由此再向各方發散。故此極遠 (吾人輒稱為無限遠) 之一點恆生一實像於焦點之處。



第 370 圖 凹鏡反射四種最重要之情形

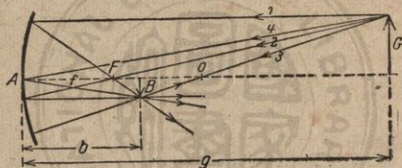
第 370 圖示凹鏡求像法四種最重要之例：

1. 與鏡軸平行之光線反射後通過焦點；
2. 穿過焦點之光線反射後與鏡軸平行；
3. 穿過曲率中心之光線恆垂直射於鏡面, 反射後仍溯原路而回；
4. 光線之落於鏡面與鏡軸之交點者, 其反射前後之方向與鏡軸成等角。

茲當申明下述之公約：像與實物在鏡面之同方者 (實像), 像與鏡面間之距離為正。不在同方者 (虛像) 其距離

爲負。

根據上述之定理，即可得凹鏡求像之法。此處吾人可注意，祇須鏡面不大，與前述假設之條件相合，則自物體上任一點發出之光線凡與鏡面相遇者，事實上皆或相交於一點（實像），或似相交於一點（虛像）。故欲覓得此交點之位置，即欲作出物體上一點之像，祇須觀察二條光線已足。關於凹鏡者，吾人已有四種頗易作圖之光線可資應用。命箭矢 G （第 371 圖）爲實物，今欲求其像。設實物與鏡面間之距



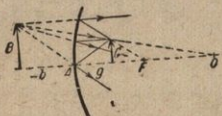
第 371 圖 凹鏡求像法（實像）

離 g 較 r 爲大。欲求箭矢尖端之像所在之處，吾人可自尖端出發按下述之順序作圖：1. 平行於鏡軸之光線反射後穿過焦點，2. 穿過焦點之光線，反射後與鏡軸平行，3. 穿過曲率中心之光線，反射後仍溯原路而回，4. 落於鏡面頂點 A 之光線以與鏡軸成等角之方向反射。此數光線之公共交點即爲箭矢尖端實像所在之處。同理可作實物上其他諸點之像。箭矢之足點原係位於鏡軸之上，其像自必仍在軸上。因得像 B 之距離爲 b ，如第 371 圖所示。此像爲：1. 實像，蓋因事實上光線確係相交於像點，2. 縮小，3. 倒立，4. 與實物在

鏡面之同方。

若實物之位置在第 371 圖所示之像處，則按光路可逆定理（將圖中一切光線之箭頭方向顛倒），不難直接推知此時之像必在前為實物所在之處，如 G 。故像與實物可以互換。此時像為實像，放大而倒立。物體之在焦點上者，因其所發之光線反射後悉與鏡軸平行，故其像在無限遠。將物體自無限遠逐漸移近鏡面，則其初時在焦點處所成無限小之像逐漸離開鏡面。實物移至曲率中心時，其像仍為倒立，其與鏡面間之距離與實物相等，且大小與實物相同。將實物移至焦點時，像移至無限遠，且為無限大。過此以往，若更將實物移近鏡面，則不再有實像矣。物體在二倍焦距以外者，像恆縮小，恰在二倍焦距處者，物與像同大，在二倍焦距以內者，像恆放大。

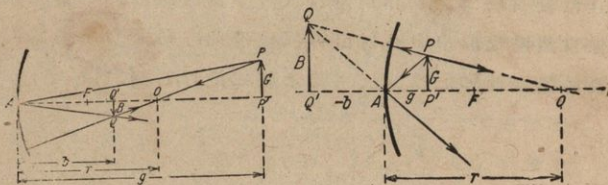
實物在焦距以內時，即成虛像，位於鏡之後方。其作圖法仍根據上述之定理，如第 372 圖所示。此像為虛像，正立，且恆較實物為大。作圖時吾人可不問光線是否事實上確係自焦點或曲率中心射出，抑或僅沿此方向而來，不過其延長線通過此等之點，其反射後光線之進行，初無二致。



第 372 圖 凹鏡求像法（虛像）

盥洗所用之鏡輒為彎曲頗微之凹鏡，庶可用以產生一稍稍放大之虛像。探海燈中亦用凹鏡，俾自光源發出之光得集中於一指定之方向。其法置光源於焦點之處，故射於鏡面上之光線反射後咸與軸平行。到達鏡面之一切光線在光源處所成之錐角愈大者，按此集中之光線所佔之成份愈多。但上述之規律多寡須嚴密遵守，故此錐角之大小因鏡面大小之限制而不能超過某定值。不受此種限制者當推拋物曲面鏡。置光源於此鏡之焦點時，凡射於鏡面上之光線悉數按鏡軸之平行方向而反射，與鏡面之大小無關，此可根據拋物線之幾何特性以證明之。

第 373 圖 *a* 示一實像之作圖法，取穿過曲率中心 O 及鏡面頂點 A 之二條光線。因 $\angle PAP' = \angle QAQ'$ 及 $\angle APP' = \angle AQQ' = 90^\circ$ ，故 APP' 與 AQQ' 二個三角形相似。命 G 為實物之大小， B 為像之大小， g 為實物與鏡面頂點 A 二者間之距離， b 為像與 A 點間之距離。於是



第 373 圖 凹鏡 a. 實像 b. 虛像

$$B:G = b:g. \quad (6)$$

但 OQQ' 與 OPP' 二個三角形亦為相似。故得

$$B:G = (r - b):(g - r)$$

於是

$$b:g = (r - b):(g - r)$$

或
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f} \quad (7)$$

再簡單變換之得

$$(g - f) \cdot (b - f) = f^2 \quad (8)$$

故焦距 f 為二長度 $g - f$ 及 $b - f$ 之幾何中項。

$\gamma = B/G$ 之比稱為單向放大率(或縮小率),按(6)式,其值為

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}. \quad (9)$$

若實物距離 g 及焦距 f 為已知,則利用(7)式或(8)式可以計算像之位置。又或測定 g 與 b 二值後,即可計算 f 及 r (參閱 449)。

實物在焦距以內時,像為虛像,且按上述之公約,像之距離 b 為負。自第 373 圖 b ,吾人可得下列之比例

$$\frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{r - b}{r - g}, \quad (10)$$

此式仍歸至(7)式。故此式對於凹鏡成像一切不同之情形均為合理。若(10)式中之 b 以其絕對值 $|b| = -b$ 代入,則得

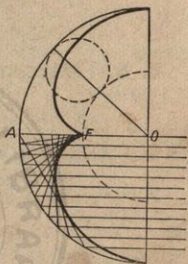
$$\frac{1}{g} - \frac{1}{|b|} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f}. \quad (11)$$

虛像之單向放大率爲

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{|b|}{g}. \quad (12)$$

虛像恆係正立，且較實物爲大。

若上述關於鏡面不可過大之條件不能滿足，則與鏡軸平行之諸光線，反射後不再悉數交於一點。此種反射之光線將有一包跡，稱爲焦散面。其與一平面之交線，稱爲焦散曲線，如第 374 圖所示。此可視爲一動圓沿一



第 374 圖 凹鏡之焦散曲線

定圓之圓周滾動時所作成，動圓之半徑爲 $r/4$ ，定圓以凹鏡之球心爲圓心，半徑爲 $r/2$ 。動圓與定圓在鏡軸上之切點爲 F ，——按前述之定義，此即爲焦點——焦散曲線者即爲動圓上之該點所描出之曲線。故焦散曲線爲一外擺線。平行入射之光線反射後咸擠聚於鏡面及焦散面二者間之空間中。

408. 凸鏡。 根據與 § 407 所述完全相同之思索，知凡與鏡軸平行之光線若投射於一凸鏡之面上，則反射後似咸自鏡面後鏡軸上一點而來，此點與鏡面頂點間之距離爲曲率

半徑之半，即 $-f = r/2$ (第 375 圖)。此點即所謂虛焦點，而 $-f$ 為凸鏡之(負)焦距。光線之向曲率中心而來者，恆垂直落於鏡面，故仍溯原路而反射；光線之落於鏡面頂點者，其反射前後之方向與鏡軸成等角。從此可得求像之法，恰與關於凹鏡者完全相同。



第 375 圖 凸鏡求像法

自第 375 圖可得下式之比例式：

$$\frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{r+b}{r+g} \quad (13)$$

從此可得

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = -\frac{2}{r} = \frac{1}{f} \quad (14)$$

此與凹鏡之公式，(7)式，完全相同。若以負焦距及負像距之絕對值 $|f| = -f$ 及 $|b| = -b$ 代入，

$$\text{則} \quad \frac{1}{g} - \frac{1}{|b|} = -\frac{2}{r} = -\frac{1}{|f|} \quad (15)$$

自第 375 圖，復得放大率為

$$\gamma = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g} = \frac{|b|}{g} \quad (16)$$

凸鏡之像恆爲虛像，正立，而較實物爲小。

409. 折射定律。光程。光線斜向穿過玻璃，水晶以及水等透明之物體而由此射出時，通常輒見其方向已變。光線之方向能爲此種物體所『彎折』；吾人稱此種現象爲折射。光線自一媒質進入他一光學性質不同之第二媒質時，折射現象恆必發生。其所以然者係由於光線在此二媒質中速度不同所致。尋常折射時，入射線，法線及折射線三者恆在同一平面之內。

折射之現象前已於普遍波動學中 (§ 133) 述及之。光亦爲一種之振動，但非爲機械振動。前述之規律在光學中形式上亦均能合用，折射定律即其一例。

$$n_{12} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (17)$$

此在光學中爲 Snellius 氏 (1615) 所發見。 n_{12} 稱爲第二媒質對於第一媒質之相對折射率。

(17) 式中 c_1 與 c_2 爲光在相接之二媒質 I 與 II 中之速度， α 與 β 爲界面二方光線與法線所成之角 (第 376 圖)。



第 376 圖 光線折射之說明

Fresnel 氏之折射線作圖法 (§ 133) 在光學中自亦仍為合理。光線在第一媒質中之速度若較大於第二媒質中，則折射線向法線彎折，即 $a > \beta$ ，(第 376 圖 *a*)，否則背法線而彎折，即 $a < \beta$ (第 376 圖 *b*)。真空中之光速較一切物質性物體中者為大；故真空之折射率為最小。吾人可命之為 1。一切物質性物體對於真空之折射率 (正常折射參閱 § 466) 恆較 1 為大。凡對於真空之折射率即逕稱為某物質之折射率 n 。此即為表中所載之值。第 30 表示有數種物質之折射率以為例。(所用之光線係為黃色之鈉線 [*D*-線]，溫度為 18° 。折射率與光色 [波長] 有關，後當述之)。氣體之折射率咸與 1 相差極微，空氣自亦不能例外。故在大多數情形中，折射物質之界面外雖有空氣存在，吾人可視之為真空而略去不計。

第 30 表 數種物質之折射率

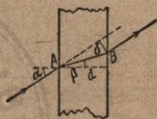
水	1,3332
冰	1,31
月桂油 (Kassiaöl)	1,605
二硫化碳	1,6291
冕牌玻璃, 輕	1,5153
冕牌玻璃, 重	1,6152
火石玻璃, 輕	1,6085
火石玻璃, 重	1,7515
火石玻璃, 最重	1,9
磷在 CS_2 中	1,97

二媒質對於真空之折射率各為 n_1 與 n_2 者，其相對折射率 n_{12} 為

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1}$$

甲物質之折射率較大於乙物質者，吾人謂甲物質之光性較密於乙物質（但此與物質之質量密度 ρ 毫無關係）！

試將光線射於白色之光屏上，於光路中斜向插入一平行平面之厚玻璃板，或平行面之水槽，中儲以水，則光屏上光斑之位置將見變易，蓋此時光線已平行於其原來之方向而移動也。自第 377 圖可見其側向移過之



第 377 圖 平行平面玻璃板內之折射

距離為 $\delta = AB \sin(\alpha - \beta)$ ，又 $AB = d / \cos \beta$ ($d =$ 板之厚度)。

於是得

$$\delta = d \cdot (\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta) / \cos \beta,$$

或因 $\sin \alpha = n \sin \beta$ ，故

$$\delta = d \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right).$$

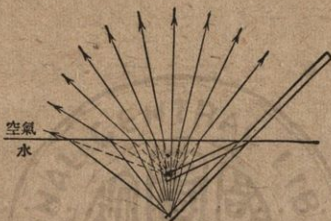
斜浸於水中之物體在水面以上之部份似覺彎折，而在水面以下之部分似覺縮短，其原因皆係光線在水中折射所致（第 378 圖）。

一光線在其軌道上二點間之光程者，係指光線在此二點間所經路程之長 s 與其所遇媒質之折射率 n 二者之相

乘積 ns 而言。命 c 爲該媒質中光線之速度， c_0 爲真空中光線之速度，則光線前進 s 路程時所需之時間爲

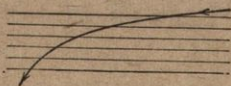
$$t = \frac{s}{c} = \frac{ns}{c_0} \quad (18)$$

從此可知光線前進相等之光程所需之時間亦相等。



第 378 圖 水中光線之折射

410. 曲光. 皺光. 種類相同而折射率不同之二層物質之界面上亦有折射發生。物質之密度隨處而異者，例如空氣中由於溫度之隨高度而變遷，即可見有此種之現象。若折射率之變遷連續無間，則光線遂因之彎曲，有如第 379 圖所示。例如海市蜃樓，即源乎是。自熱地面上昇之空氣溫度，每不甚均勻，故其對於光之折射亦不均勻。透過此種空



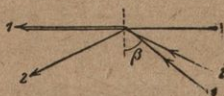
第 379 圖 折射率隨處變遷時所見光線彎曲之略圖 n 之值愈向下愈增

氣層之光線折射漫無定序，且不斷變易，故隔此空氣層以觀物時，似覺物體畸歪變幻，晃蕩不定。同理，溶液中各處濃度尚未調勻以前，輒見有相同之現象發生，是名皺光。星光之閃動亦由於大氣中此種之光之擾動。恆星與吾人之距離非常遙遠，由此達於人目之一束光線所成之錐體縱在地球大氣之最高層處，其截面較大於吾人之瞳孔者亦極微。大氣中些微之局部的光之擾亂已足波及光線至人目之傳播行星與吾人之距離遠較恆星為近，其射至人目之光線所成之錐體在大氣上層之截面已頗大，例如自火星而來者，其直徑約達10[米]。此時大氣中些微之局部的光之不均勻可彼此抵消，而星光亮度之閃爍不定可以免去。故行星之光不見閃動。

411. 全反射. 設有光線自光性較密之第一媒質射入光性較稀之第二媒質，其達於界面時之入射角為 β 。命二媒質之相對折射率為 $n_{12} = n_2/n_1$ ($n_2 > n_1$)。其在第二媒質中之出射角 α 可以下式表之：

$$\sin \alpha = n_{12} \sin \beta$$

若 $\sin \beta = 1/n_{12}$ ，則 $\sin \alpha = 1$ ，而 $\alpha = 90^\circ$ ，即光線離第一媒質後將沿其表面而出(第380圖，光線1)。入射角較大於此值時(第380圖，光線2)， $n_{12} \sin \beta > 1$ ；但 $\sin \alpha$ 不能大於1，故不再有適當之 α 角可合於折射定律。遇此種情形時，將無折射現象發生，二媒質之界面猶如一反射面，光線按反射定律(§405)



第 380 圖 全反射之說明

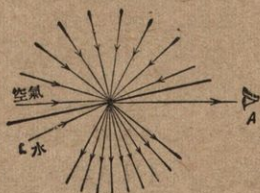
而仍折回第一媒質中。此項現象稱為全反射。蓋此時光線確係全部反射，不若尋常之所謂反射者，恆有一部分光線穿過反射面而入反射之媒質中，事實上并未全行反射也。以下式為定義之角度。

$$\sin \beta = \frac{1}{n_{12}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (19)$$

稱為該媒質對於第二媒質之全反射限角。一媒質若與真空(或空氣 $n_1=1$, $n_2=n$)相接，則 $\sin \beta = \frac{1}{n}$ 。全反射現象為 Kepler 氏(1611)所發見。吾人可注意僅當光線自光性較密之媒質射於界面時，全反射方能發生。

試於水面之下置一可以轉動之鏡，而將一光線射於其上，由此出發之光線任其遇水面而反射，則水面上之全反射現象(極限角約為 $48\frac{1}{2}^\circ$)頗易觀察；若於水中和以螢光劑(Fluoreszein)俾光線之軌道得藉以顯出，則觀察尤易。

按光路可逆之定理 (§ 403)，凡光線掠過光性較密之媒質表面如水面時，當即按全反射限角而折射入該媒質中，設自一切方向射來之光線(例如白晝之漫射日光)，悉落於水面上之某點，則由該點射入水中之光線咸因折射而羣集於

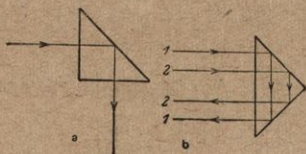


第 381 圖 水中折射及全反射之說明

一錐體之內，其頂角等於全反射限角之二倍(第 381 圖)；水面上其他各點亦莫不皆然。設觀察者置目 A 處，按圖中所示之方向觀察水面，則其所見之光線無一自水面上之空間而來者。僅有自水內一點發射之光遇水面而經全反射後，方依此方向入於觀察者之目。故以較大於全反射限角之入射角觀察水面時，水面如一鏡面。僅當人目在以全反射限角為界之立體角內時，方能自水中『向外瞭望』。此項現象可於大規模水族館側方之玻窗中觀察之，通常水面上之景物不可得見，所見者僅為水族館之內容，為水面所反射者。

物體在水中蔽以一層之空氣泡者，輒作銀光，此蓋由於空氣泡上之全反射而起。半儲水銀之試管浸入水中時，無水銀之部分反射較有水銀之部分為強，蓋遇空氣則全反射，遇水銀則作普通之反射，前者自較後者為完美也。

玻璃對於空氣之全反射限角小於 45° 。光線射入一直角玻璃稜鏡如第 382 圖 a 或 b 所示者，每因玻璃內之全反射而以與原方向成 90° (a) 或 180° (b) 之交角離稜鏡而出。



第 382 圖 全 反 射 稜 鏡

稜鏡望遠鏡即利用此理而作 (§ 425)。如第 382 圖 *b* 所示者，各光線排列之順序將因之顛倒，原在上方之光線經二次反射後已轉至下方。吾人可利用之以使像反正（反正稜鏡）。

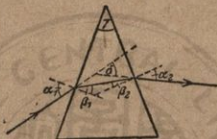
按 (19) 式，全反射限角與折射率 n 二者間有一簡單之關係，故由此可測定後者之值。有所謂折射計者，可供此項用途；器以液體或固體製成，種類頗夥。

透明體之折射率又可以下法測量之。取二種不同之液體，其一之折射率較大於透明體之值，其二則較小，混和之，使成一種液體，其折射率完全與透明體之值相等。此時二者光性相同，故透明體在液體中消逝不見。物體之無適宜表面足以直接測量者，此法尤見重要。混合液體之折射率頗易用一折射計測得之。

412. 稜鏡。 稜鏡為一種折射性物質所成之物體，截面為三角形，通常以玻璃製之，有特別之用途者，則用水晶，螢石，岩鹽等物質。稜鏡之表面至少須有二面磨琢極平。此二面所夾之角稱為稜鏡之折射角 (γ)。稜鏡之截面通常多作等邊三角形，其折射角為 60° 。第 383 圖示一光線穿過稜鏡

時之折射。不論光線以任何之角入射，其折射後恆背折射角之頂點而出。

設有光線以 α 角射於一稜鏡之面，今欲計算其偏向角 δ 之值，即光線射出稜鏡時離開其入射原方向之角度。除折射定律(17)式外，尚須採用二種關係，即 $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ 及 $\delta = (\alpha_1 - \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2)$ ，此二式不難自第 383 圖察見之。



第 383 圖 稜鏡內之折射

光線對稱穿過稜鏡，即 $\alpha_1 = \alpha_2$ 及 $\beta_1 = \beta_2$ 時，偏向角為最小。此時 $\beta_1 = \beta_2 = \gamma/2$ ，而 $\alpha_1 = \alpha_2 = (\delta + \gamma)/2$ ，故按折射定律，得

$$\sin \frac{\delta + \gamma}{2} = n \sin \frac{\gamma}{2} \quad (20)$$

利用此項關係，可自最小偏向角計算稜鏡物質折射率 n 之值。

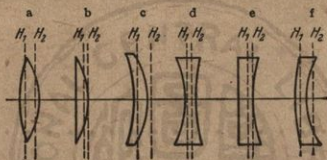
若折射角 γ 極小，而 n 亦不為太大，則偏向角 δ 亦為極小。於是 \sin 可以角度本身代之，因得 $\alpha_1 = n\beta_1$ ， $\alpha_2 = n\beta_2$ ， $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ ， $\alpha_1 + \alpha_2 = n\gamma$ ，而

$$\delta = (n - 1) \gamma.$$

以稜鏡實地作折射實驗時，若用白色光，則折射後光必

變遷,而有彩色出現。關於此項現象(色散),見§432。

413. 球形透鏡。球形透鏡為一種折射物質所成之物體,通常皆用玻璃,有二同軸之球面為其界面。其一面亦可為平面(透鏡面為球形,在一切情形中初非最為適宜。但欲製造界面為其他形狀之透鏡,非特頗為艱難,且亦頗不經濟)。按各種可能之配合,可得下列各類之透鏡(第384圖):



第384圖 透鏡形式

I. 會聚透鏡 II. 發散透鏡

1. 會聚透鏡

(a) 雙凸 (b) 平凸 (c) 凹凸

透鏡之屬於此類者,中部較邊緣為厚。

2. 發散透鏡

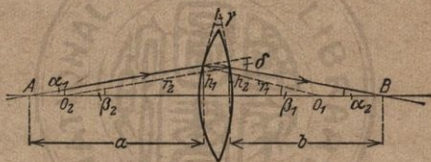
(a) 雙凹 (b) 平凹 (c) 凸凹

透鏡之屬於此類者,中部較邊緣為薄(關於 $H_1 H_2$ 之意義,見§418)。

導出下述各節之規律時,亦須假設有一種限制,與關於球面鏡者同,即透鏡之大小須遠較其界面之曲率半徑為小。

關於透鏡應有之觀念大致皆與球面鏡相同，故此處僅略述之。

414. 透鏡中之折射。 一光線自 A 點(第 385 圖)射出，與透鏡軸成 α_1 之交角，遇透鏡後經二次折射後復與透鏡軸交於他端之 B 點，而成 α_2 之交角。命 O_1 與 O_2 為透鏡二面之曲率中心， r_1 與 r_2 為其相應之曲率半徑。假設光線與透鏡軸相靠頗近，則 α_1 與 α_2 二角度均為頗小，而透鏡內之光線幾與鏡軸平行。實際上之情形恆與此頗為近似。



第 385 圖 導出透鏡公式之說明

命 δ 為由 A 點發出之光線經過透鏡後之偏向角。此角可用二種方法表示之。一方面 $\delta = \alpha_1 + \alpha_2$ ，為含有 α_1 與 α_2 二角之三角形之外角。他方面透鏡對於光線之作用猶如一狹稜鏡 (§ 412)，故 $\delta = (n - 1) \gamma = (n - 1)(\beta_1 + \beta_2)$ 。

因所涉之角度均為頗小，故得

$$\alpha_1 \approx \text{tg } \alpha_1 = \frac{h_1}{a}, \alpha_2 \approx \text{tg } \alpha_2 = \frac{h_2}{b}, \beta_1 \approx \sin \beta_1 = \frac{h_1}{r_1}, \beta_2 \approx \sin \beta_2 = \frac{h_2}{r_2}.$$

將此數值代入 δ 之二個等式，則 $h_1/a + h_2/b = (n - 1)(h_1/r_1 + h_2/r_2)$ 。前已假設 h_1 與 h_2 相差絕微，故即命 $h_1 = h_2$ ，

可無顯著之錯誤。於是

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}, \quad (21)$$

式中

$$f = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} = \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1)(r_1 + r_2)}. \quad (22)$$

透鏡之一面爲平面者 ($r_1 = r$, $r_2 = \infty$), 自(22)式可得

$$f = \frac{r}{n-1}. \quad (23a)$$

二面之曲率相等者 ($r_1 = r_2 = r$),

$$f = \frac{r}{2(n-1)}. \quad (23b)$$

f 之值僅視透鏡之幾何的與光學的性質而異, 故對於各透鏡各爲一特有之常數。 A 點若退至無限遠, 即 $a = \infty$, 則凡自 A 點射來之光線皆彼此平行而達於透鏡, 而(21)式即變爲 $1/b = 1/f$, 其意謂凡平行於透鏡軸之光線經過透鏡後將悉數通過一與透鏡相距 f 之 F 點。吾人稱 F 爲透鏡之焦點, f 爲其焦距, 與球面鏡同。由光路可逆之定理, 知光線由焦點發出而經過透鏡後, 悉將平行於鏡軸而前進。各透鏡皆有焦點二, 各在鏡面之一方。二焦點皆在鏡軸之上, 其與透鏡之距離 f 相等。

此處(21)式係自雙凸透鏡導出, 對於其他種種之透鏡, 不論一面爲平面, 抑或一面或二面均爲凹面, 該式亦均合理

惟凹面之曲率半徑須冠以負號。故一切會聚透鏡(第384圖 $a-c$)之焦距皆爲正,一切發散透鏡(第384圖 $d-f$)之焦距皆爲負。

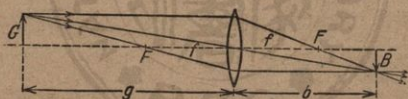
若不用焦距,則輒用透鏡之所謂焦度或稱折射度 D 者以代之。 $D = 1/f$, 其 f 之單位爲[米]。例如透鏡之焦距爲20[厘米]者,其焦度爲5度。會聚透鏡之焦度亦爲正,發散透鏡之焦度爲負。

光線斜射而穿過透鏡中心時,其與二鏡面相遇之處鏡面必相平行,故光線不致偏向,僅向側平行移過少許(§409)。吾人前已假設透鏡不爲太厚,故移過之距離必爲值甚微,可略去不計。遇薄透鏡時,此種之光線可視作以直線穿過鏡心,不受彎折。

(21) 式中不含 α_1 角,此角者,係光線自 A 點射出時與透鏡軸所成之交角。故對於由 A 點發出而穿過透鏡之任何光線,此式均爲合理。凡此光線悉交於 B 點,換言之, B 爲 A 之實像。對於一指定位置之 A 點,又可用另一條件以定出 B 點之位置,此另一條件者,謂一切光線自 A 點出發穿過透鏡而達於 B 點,其光程須爲等長。即光點之不在透鏡軸上者,其像亦遵守此項條件。通常二點之間輒有一所謂特優光路存在 (Fermat 氏原理, §§134 與 403), 爲二點間光程最長或最短之路線,但對於透鏡而言,物與像之間初無此種特優之光路。此即逕可視爲透鏡作用之本性。(參閱 §415,

第 388 圖及 § 449)。

415. 會聚透鏡。自一點出發之光線經過一會聚透鏡後，全部光線——關於透鏡之大小，仍受以前之限制——必或事實上確係相交於透鏡他方之一點，或僅似相交於透鏡同方之一點。前者成實像，後者成虛像。求像之法，祇須取用二條光線。仿 § 407 作圖之例，吾人茲有三種光線可資應用：1. 光線自出發點而來，平行於鏡軸者，至透鏡之後方穿過焦點，2. 光線在未達透鏡以前穿過焦點者，至透鏡之後方與鏡軸平行，3. 光線之通過透鏡中心者，僅向側平行移過少許，實際上並不彎折。作圖時，因已假設透鏡頗薄，故 1 與 2 二光線事實上在透鏡中雖經二次折射，可視為僅彎折一次。



第 386 圖 會聚透鏡之實像

按此法即可作出焦距以外一物體 G 之像 B ，如第 386 圖所示。像為實像，倒立，在此例中較實物為小。若視 B 為實物， G 為其像，則作圖法完全與此相同。此時像較實物為大。

自第 386 圖可見

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} = \frac{b-f}{f} = \frac{f}{f-f}$$

從此可得二方程式；若 g 與 f 爲已知，即可用以計算 b 之值，惟僅需其一式已足。事實上由此二式可得相同之結果，是爲作圖時所取三種光線確係相交於一點之明證。由簡單之計算得

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (24)$$

與球面鏡成像之公式相同。從前式更可得

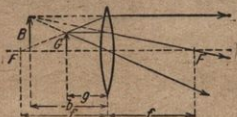
$$(g - f)(b - f) = f^2 \quad (25)$$

而關於單向放大率者有

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}. \quad (26)$$

仿球面鏡之例，吾人命像與實物各在透鏡之一方，而像爲實像時，像與透鏡間之距離 b 爲正。虛像與實物恆在鏡之同方，故其像距爲負。

將實物向內移至焦點時，自物體上各點發出之光線至透鏡之後方成平行前進。實物若離透鏡更近，則其光線在透鏡之後方發散，其延長線相交於與實物同方之一點。此時即成虛像，而像距 b 爲負。第 387 圖示求像之法。此時



第 387 圖 會聚透鏡之虛像

須注意 b 已爲負值,而自第 387 圖可見

$$\frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{-b+f}{f} = \frac{f}{f-g}$$

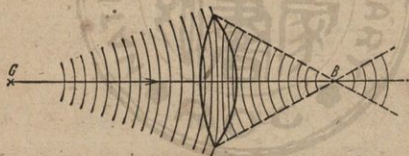
自此可得虛像之公式,亦與 (24) 及 (25) 二式相同. 以 $|b|$ 表像距之絕對值,即 $|b| = -b$ 則

$$\frac{1}{g} - \frac{1}{|b|} = \frac{1}{f} \quad (27)$$

單向放大率之值爲

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{|b|}{g} \quad (28)$$

γ 恆大於 1, 故會聚透鏡之虛像恆較實物爲大, 且恆爲正立.



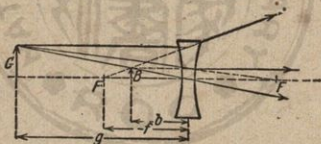
第 388 圖 會聚透鏡之作用(J. Picht 氏原作)

會聚透鏡之作用可以第 388 圖示之, 頗爲明晰. 圖中所示者爲透鏡軸上一點 G 所發出光線之球面波到達透鏡時之情形. 光線既入透鏡以內, 其速度即行減小; 出鏡後復增至原值. 穿過透鏡中部之光線在透鏡內所經之路程較穿過透鏡邊緣者爲長, 故其延遲也較甚. 原爲同心而向外擴展之球面波因即變爲同向一點 B 而收斂, 此 B 點者即爲

G 點之像。經過此點後復向外擴展(試與 § 414 之結論比較)。

416. 發散透鏡。關於發散透鏡內折射之思索大致與關於會聚透鏡者同。(22)式 (§ 414) 對於發散透鏡亦為合理,惟須注意曲率半徑之正負,已見前述。平行於透鏡軸而來之光線穿過透鏡以後即向各方發散,其延長線咸相交於透鏡前之一點,此點亦稱為焦點,與會聚透鏡同。故透鏡軸上無限遠一點之虛像現於焦點。虛像與透鏡間之距離為負,故吾人稱發散透鏡之焦距 f 為負。

穿過透鏡中心之光線並不折射,若又知焦點之位置,則藉此二者已可得發散透鏡求像之法,與關於會聚透鏡者同。



第 389 圖 發散透鏡之像

注意 b 與 f 之正負,自第 389 圖,即可得下列之比例式:

$$\frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{-f + b}{-f} = \frac{-f}{g - f} \quad (29)$$

自此式亦可導出(24)與(25)二式,故此二式對於各類之透鏡所成各種之像均為合理。以焦距與像距之絕對值 $|f| = -f$ 及 $|b| = -b$ 代入(29)式,得

$$\frac{1}{g} - \frac{1}{|b|} = - \left| \frac{1}{f} \right|. \quad (30)$$

關於單向放大率者，仍得

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{-b}{g} = \frac{|b|}{g}. \quad (31)$$

凹透鏡之像恆為虛像，正立而較實物為小。

417. 透鏡公式之討論。由普遍合理之(24)式可得下述之規律

就會聚透鏡言之，若 $g = \infty$ 時，則 $b = f$ ，而像生於焦點。

(太陽之像!)若 $g = f$ ，則像生於無限遠($b = \infty$)。 $g < f$ 時， b 為負而成虛像。 $g = b = 2f$ 時，放大率等於 1。若命物與像二者間之距離 $a = g + b$ ，常定不變，例如將物體置於定位而使之生一像於一固定之牆上，則自透鏡公式可得 g_1, b_1 與 g_2, b_2 二組之值，而 $b_2 = g_1, g_2 = b_1$ 。故透鏡在實物與光屏之間可得二個位置，均能成清晰之像。此二位置對稱的列於 a 距離中點之二旁，其一生放大之像，其一生縮小之像。若 $a = 4f$ ，則此二位置合一，而像與實物大小相等。 $a < 4f$ 時，不再能生實像。實測 g 與 b 之值，按(24)式即可計算會聚透鏡之焦距。

今再將透鏡與球面鏡成像之情形，即像距 b 與放大率 γ 二者對於物距 g 之關係，擇其要點，並列於下表。

$$\text{會聚透鏡與凹鏡} \dots \begin{cases} g = \infty \longrightarrow f \longrightarrow 0 \\ b = f \longrightarrow \pm\infty \longrightarrow -0 \\ \gamma = 0 \longrightarrow \pm\infty \longrightarrow -1 \end{cases}$$

$$\text{發散透鏡與凸鏡} \dots \begin{cases} g = \infty \rightarrow 0 \\ b = -f \rightarrow -0 \\ \gamma = -0 \rightarrow -1 \end{cases}$$

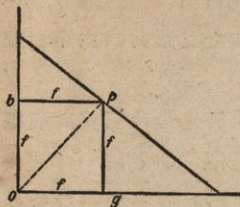
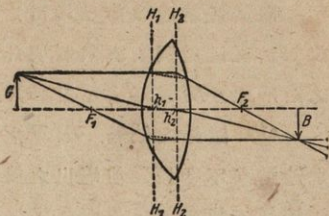
第 390 圖以圖形表示此項關係，視 b 為 g 之函數。就
會聚透鏡觀之，此為雙曲線，其漸近線為 $g = +f$ 與 $b = +f$
二直線。右邊一支相當於實像，左邊一支相當於虛像。僅
當 g 為正值時，此後者一支在物理學上方有意義，蓋按諸定
義， g 僅能為正值也。就發散透鏡觀之，其圖形亦為雙曲線
惟僅有右邊一支 g 為正值者，在物理學上方有意義。



第 390 圖 成像之情形

(a)用會聚透鏡(凹鏡) (b)用發散透鏡(凸鏡)

會聚透鏡及凹鏡之焦距可自 b 與 g 二值依下述之圖
解法頗易測定之(第 391 圖)。自 O 點出發作 g 與 b 二直線
互相垂直，另以一直線連接其二端，復自 O 點作一直線，與 g
及 b 二直線成 45° 之交角，而與連線交於 P 點，自 P 點更作
二直線各與 b, g 二線垂直。若此所成之正方形每邊之長

第 391 圖 自 b 與 g 二值以圖解法測定 f 

第 392 圖 厚透鏡之求像法

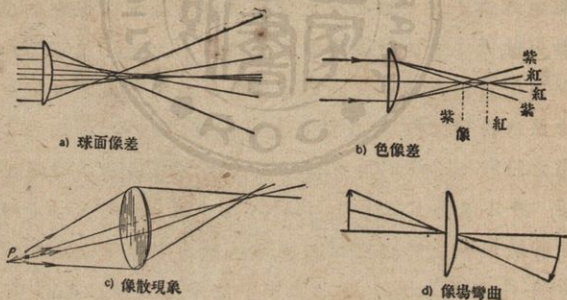
皆為 f ，蓋直接自第 391 圖可得 $(g - f) : f = f : (b - f)$ ，與 (25) 式完全相同。

418. 厚透鏡。透鏡之厚度較之相關之其他直線大小不能視為頗小時，上述簡單之求像法不再合用。但在此種透鏡中恆可作垂直於透鏡軸之二平面 H_1 與 H_2 (第 392 圖)，稱為主平面，其與鏡軸之交點 h_1 與 h_2 稱為主點；由此可按下述之法求得像之位置。厚透鏡亦有二焦點 F_1 與 F_2 ，其與二主點之距離相等，即 $F_1 h_1 = F_2 h_2 = f$ 。 f 之長仍稱為透鏡之焦距。於是即得求像之法，如第 392 圖所示。自與 F_1 同方射來，平行於鏡軸之光線直至主平面 H_2 統以直線示之，過此以後折向 F_2 。經過焦點 F_1 之光線以直線進行達於 H_1 ，自此以後折而平行於鏡軸。向主點 h_1 射來之光線方向不變，僅向側平行移過少許，經由主點 h_2 而射出。透鏡內光線真正所經之路以虛線表之。關於發散透鏡者亦然。

各種形式透鏡主平面之位置已見於 §413，第 384 圖。

關於透鏡成像前已導出之定律,在此處仍為合理。以前對於薄透鏡假設之限制,依此義言之,蓋謂其二主平面間之距離頗小,可以略去不計云耳。

419. 透鏡之缺點。 簡單之透鏡於應用時輒覺有種種之缺點,多不合於以前導出之簡單規律。其原因一方面由於透鏡不能為無限薄,而穿過透鏡者不能僅限於靠近鏡軸之光線,他方面則以白光原為各色之光混合而成,各色之折射多寡各有不同(色散 § 432)。由於此後者之現象,故透鏡對於各色之光各有不同之焦距[§ 466 (1) 式]。透鏡之缺點就其主要者言之,約有下述之數種:



第 393 圖 透鏡最重要之四種缺點

a) 球面像差 透鏡邊緣一帶之焦距較小於中央之部分。一光線束平行於透鏡軸而射至透鏡時,其經過邊緣一帶者相交之點與鏡面相距較近,而靠近鏡軸諸光線相交之

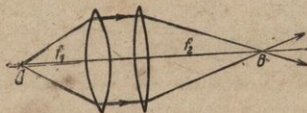
點與鏡面相距較遠(第393圖a).

b) 色像差 玻璃對於各種色光之折射率不同,紅色者最小,紫色者最大. 故自一物體所發出之白光中紅色部份相交之點與透鏡間之距離,較紫色部份之交點為遠(第313圖b).

c) 像散現象 透鏡對於其軸外物體上一點之焦距視通過透鏡面上各大圓弧之平面而異(第393圖c,透鏡以透視法表示之). 透鏡組之業經改正此項缺點者,稱為去像散透鏡. 照相機目鏡之有像散缺點者,其所成之像之邊緣上不能清晰,且見歪曲.

d) 像場彎曲 平面之與透鏡平行者,其像不復為平面而成曲面(第393圖d).

420. 透鏡組. 前述透鏡之種種缺點可用折射率不同之玻璃透鏡(冕牌玻璃,火石玻璃,見§409,第30表)多數合成一透鏡組以消除之(若此即成所謂去像散透鏡,消色差透鏡等等). 前已導得之公式對於此種之透鏡組仍可合用. 設二透鏡之焦距為 f_1 與 f_2 ,今欲計算此透鏡組之焦距 f ,吾人



第394圖 透鏡組之焦距

可設想一光點 G 在其一透鏡之焦點處 (第 394 圖)。由圖不難直接察見像必成於第二透鏡之焦點 B 處。應用 § 415, (24) 式即得

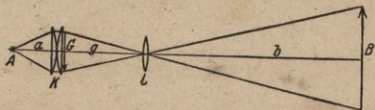
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (32)$$

換言之,透鏡組之焦度 $1/f$ 等於其各成份焦度之和。計算發散透鏡之焦距時仍當認之爲負。此種透鏡組之二主平面可遠在透鏡組之外。第 395 圖示一特別驚人之例。



第 395 圖 一種透鏡組之焦點與主平面(望遠鏡之物鏡)

421. 映畫器。照相機。映畫器之主要部份爲一強烈之光源 A (弧光燈,或特製之強光金屬絲電燈其發光面積不大者),聚光氣 K 及映射透鏡 L (物鏡,通常爲一透鏡組)。欲映之物體 G (玻璃畫片或膠質畫片等)置於聚光器之前(第 396 圖)。聚光器爲一大透鏡,或由焦距頗短之透鏡二三枚



第 396 圖 映畫器

合成之透鏡組，其用途在集中由光源而來射於畫片上之光線，俾悉行穿過映射透鏡 L 。映畫器中所有之焦距與距離須合於下述之二項條件。通常映畫器（畫片）與映射幕間之距離 l 及放大率 γ 二者均為常定不變之值。故 $l = g + b$ 及 $\gamma = b/g$ 二式均係預行指定。於是 b 與 g 之值可由此分別計算之。從此更可由透鏡公式 (§ 415, 24 式) 算出映畫器必需之焦距 f_1 。欲使光線完全穿過映射透鏡，則自光源而來經過聚光器之光線須使之相交於透鏡之中，換言之，光源之像須使之生於透鏡之中。命 a 為光源至聚光器間之距離， g 為玻璃畫片（聚光器）至映射透鏡間之距離，則聚光器所需之焦距 f_2 可由透鏡公式 $1/a + 1/g = 1/f_2$ 而得。由此可將已知之條件代入而計算所需之焦距。

吾人皆知照相機之用途在使物體經一透鏡作用而生之像得以保留於永久，且得以反覆重印之。欲達此目的，輒用一透鏡組（物鏡），使欲照之物體生一像於照相片之上；片面塗有溴化銀乳膠，因光之化學作用， (§ 510) 而乳膠起變化再經以後之處理（顯像）即成所謂底片，像遂可見。由此底片可將所照之相不拘次數任意重印。其他關於照相機之構造及用法茲不備述。

照相機中之『光強度』遠較針孔照相機 (§ 398) 中者為強，故前者遠勝於後者。蓋自物體上一點到達像上一點之光量正比於透鏡之孔徑，而針孔照相機之孔徑僅為細小之

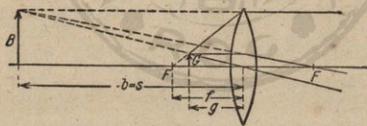
針孔也。

422. 關於放大鏡、顯微鏡、望遠鏡放大率之概論。由一透鏡射一像於幕或屏上，所謂放大率者，係指實物與像二者單向大小之比而言。例如一玻璃畫片面積為 9×12 ，其映射於幕上之面積為 270×360 ，則其單向放大率為 30 倍。

在下述之放大鏡、顯微鏡、望遠鏡三種光學儀器中，人目所見者皆為物體之虛像。此種虛像較之實物或為放大，或為縮小。用放大鏡及顯微鏡時，像係放大，用望遠鏡時，像係縮小。應用此種儀器之目的，初非在欲使之生一放大或縮小之像，而乃在欲藉以觀察物體之結構或輪廓此結構與輪廓者，苟不用此種儀器而僅憑肉眼，固不能辨別者也。有時吾人之位置離物體太遠，無法接近，雖欲見其輪廓而不可得，於是望遠鏡尚焉。有時以吾人之目不能無限接近物體（最近點約為 15 [厘米] § 428）而不克明察其結構，則此時當用放大鏡或顯微鏡。試就此問題最簡單之一例觀之，設有相鄰頗近之二點，與人目相隔一某距離。由目中睛珠之作用而像即生於網膜之上，此二點之像在網膜上更相密邇。祇須此二點並不同落於網膜上同一之感光器官（錐狀纖維或桿狀纖維，§ 430），則吾人所見者尚為分離之二點。自人目望之，此二點間距離之視角不得小於 $1'$ ，方可合於上述之情形。例如該二點與人目相距 100 [米] 者，其彼此間至少須相離 2.3 [厘米]。故吾人若欲明察物體之結構，可將其結

構之各成份在人目中所張之角亦即物體全部所張之角加以放大即得。設在此種儀器中所見物體虛像之視角爲 β ，不用儀器而以肉眼直接觀察(望遠鏡)或在最適宜情形中(放大鏡，顯微鏡)觀察所見物體本身之視角爲 α ，則此種儀器之放大率自當以 β 與 α 二角之比表之。今以 V 表視角之放大率，即 $V = \beta/\alpha$ ，以別於單向放大率 γ 。在以下之計算中， α 與 β 二角恆可視爲頗小，故可命 $\sin \alpha \approx \text{tg } \alpha \approx \alpha$ ， $\sin \beta \approx \text{tg } \beta \approx \beta$ (§8)。

423. 放大鏡。放大鏡爲一焦距頗短之會聚透鏡，吾人輒從此觀察實物之虛像，故可用以將實物放大 (§415)。欲觀察之物體 G 置於透鏡之下，其位置須在焦距 f 以內 (第 397 圖)。正常眼或業經校準之眼之明視距離約爲 $s = 25$



第 397 圖 放大鏡

[厘米]，像與眼相距此項距離而觀察時，眼最不費力。設物體在 s 距離處以肉眼觀察時所見之視角爲 α ，用放大鏡後所見之視角爲 β ，則於計算放大率時，自當取此二角之比。前者爲 $\text{tg } \alpha \approx \alpha = G/s$ 。用放大鏡後此角爲 $\text{tg } \beta \approx \beta = B/s$ ，故放大率爲 $v = \beta/\alpha = B/G$ 。按 §415， $B/G = -b/g$ 。觀察時吾

人之肉眼恆密接放大鏡，故 $|b| = -b = s$ ，而 $v = s/g$ 。再援用 § 415, (27) 式 $1/g - 1/|b| = 1/g - 1/s = 1/f$ ，即得

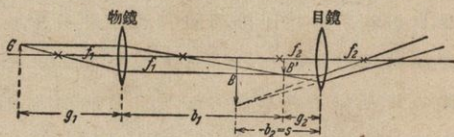
$$v = 1 + \frac{s}{f}, \quad (33)$$

通常焦距 f 遠較明視距離 s 為短，故此式幾等於 s/f 。此處 g 僅稍較 f 為小。

G 若不為實物而為任一物體之實像時，上述之理論仍屬合理。實像亦可為放大鏡所放大，惟自必僅限於由其發散之光線所成頗小之立體角以內。大多數光學儀器之目鏡即屬此種情形。此固與放大鏡無異。

較佳之放大鏡並非由一單獨透鏡所成而為一透鏡組；目鏡之構造尤為複雜。

424. 物鏡與目鏡所成之透鏡組。天文望遠鏡與顯微鏡皆為二會聚透鏡，或二透鏡組所成，即物鏡與目鏡是（第 398 圖），此為其相同之點。欲觀察之物體因物鏡之作用而生一倒立之實像於目鏡焦面之內，離焦面極近；目鏡之作用原如一放大鏡，實像即被放大，吾人可從而觀察之。故吾人



第 398 圖 物鏡與目鏡所成之透鏡組

所見者爲第一實像之倒立虛像。望遠鏡及顯微鏡之情形雖各不同，但有一公共基礎，今且普遍的視之爲由二會聚透鏡（或透鏡組）所成，其焦距爲 f_1 （物鏡）與 f_2 （目鏡），而計算其單向放大率 γ 之值。命 G 爲實物之大小， B' 爲由物鏡所生實像之大小， B 爲由目鏡所生虛像之大小。再命 g_1, b_1 與 g_2, b_2 各爲對於物鏡與目鏡之物距及像距，惟由目鏡成像之『實物』即爲由物鏡所成之實像。 b_2 爲虛像與目鏡間之距離，故爲負。於是按 § 415，得 $B/B' = -b_2/g_2$ 及 $B'/G = b_1/g_1$ ，而單向放大率之總值爲

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{B}{B'} \cdot \frac{B'}{G} = \frac{b_1}{g_1} \cdot \frac{-b_2}{g_2} = \gamma_1 \gamma_2. \quad (34)$$

又按 § 415，

$$b/g = f/(g-f) \text{ 或 } b/g = (b-f)/f.$$

茲先討論目鏡之放大率。關於此方面者，不論望遠鏡與顯微鏡，原理上初無差別。虛像須生於明視距離 $s = -b_2 = 25$ [釐米] 之處，一如前於放大鏡一節中所述，故單向放大率中關於目鏡之一部份可由上列之第二式而得 $-b_2/g_2 = (s - f_2)/f_2$ 。因 s 恆遠較 f_2 爲大，故通常可用近似式 $-b_2/g_2 = s/f_2$ 已足。關於物鏡者，上列 b/g 之二式均可採用，於是

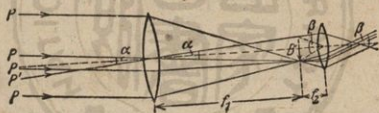
$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{f_1}{g_1 - f_1} \cdot \frac{s}{f_2} \quad (35 a)$$

或
$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{b_1 - f_1}{f_1} \cdot \frac{s}{f_2}. \quad (35 b)$$

天文望遠鏡與顯微鏡原理上之區別在前者 $g \gg f_1$, 後者 $b_1 \gg f_1$, 故關於前者應用 (35 a) 式, 而關於後者, 則應用 (35 b) 式.

425. 望遠鏡. 天文望遠鏡中光線之行徑可以第 399 圖示之. 物體在極遠之處, 圖中不能表示; 因即設想其為一箭矢, 而以 P 與 P' 表示自箭矢二端發射之光線. 於是 $\tan \alpha/2 = G/g_1$, $\tan \beta/2 = B/(-b_2)$. 因諸角均為頗小, 故 \tan 即可以角度之值代之, 於是得放大率

$$v = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{B}{G} \cdot \frac{g_1}{-b_2}.$$



第 399 圖 天文望遠鏡

今再引用 (35 a) 式, 其分母中之 f_1 遠較極大之物距 g_1 為小, 可略去不計. 此外又命 $b_2 = -s$ 於是

$$v = \frac{f_1}{f_2}. \quad (36)$$

故天文望遠鏡之物鏡焦距愈長, 目鏡焦距愈短者, 放大率愈強.

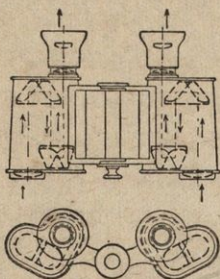
用望遠鏡以觀察日月行星以及地面上物體(惟所見者係倒像)時, 上述之思索均能符合. 但觀察恆星時, 不能藉以

放大，其效用僅在增高恆星之視亮度。恆星之距離遼遠異常，即用最強度之望遠鏡尚不足以使所見之星體在人目中之張角達於 $1'$ (§ 422)。故放大率即為最強，吾人亦僅見其為光點，或更準確言之，僅為其繞射影 (§ 448) 而已。遇此種情形時，望遠鏡之作用乃在使自恆星發出之一巨束平行光線射入物鏡頗大之鏡孔中，經物鏡與目鏡之作用而密擠成為較細之光線束，其截面與人目之瞳孔相仿 (第 400 圖)。故恆星亮度由此作用而增強之倍數等於物鏡面積 (鏡孔) 與目鏡面積 (或瞳孔大小) 之比。僅憑肉眼在最佳之情形中，祇能見 5 等或 6 等以上之星，用最強之望遠鏡時，可窺見 18 等之星。其光強之比約相當於 $1:10000$ 。



第 400 圖 恆星亮度之由望遠鏡而增強

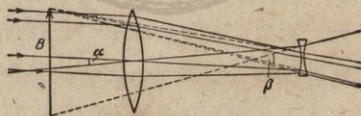
由簡單之天文望遠鏡中所見者恆為倒像，此在天文學中固無關輕重，但用以觀察地面上之物體則殊不便利。有稜鏡望遠鏡者，其構造之原理，與此相同，惟可免倒視之弊。其物鏡與目鏡間光線之行徑如第 401 圖所示，中經全反射稜鏡二，其一稜鏡使光線在鉛直方向內遷移，像即因之顛倒 (倒像稜鏡)。其另一稜鏡更將此像顛倒，使仍復原。第一稜鏡且更使光線向側遷移。稜鏡望遠鏡恆作雙目鏡式，因稜



第 401 圖 複鏡望遠鏡

鏡能使光線向側遷移，故其二物鏡間之距離較吾人二目間之距離（即目鏡間之距離）為大。吾人所見景物之空間的印象輒藉以增進，頗為顯著（§ 431）；較諸用二物鏡與二目鏡間距離相等之儀器（觀劇鏡）時，其關於像之遠近之關係，明晰多多矣。

此外尚有其他之設計可使像顛倒。目鏡由二透鏡合成，其一透鏡將實像再行顛倒而成正立之第二實像，其另一透鏡即作為放大鏡（地上望遠鏡）。Galilei 氏望遠鏡（觀劇鏡）中竟無實像產生，其目鏡為一凹透鏡，位於物鏡焦距以內，物體之虛像即由此而生，如第 402 圖所示。故 Galilei 氏望遠鏡之目鏡非為放大鏡。（36）式在此處不能應用

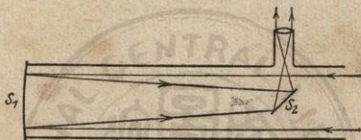


第 402 圖 Galilei 氏望遠鏡

目鏡為放大鏡之一類望遠鏡，所見為實像者，可於鏡管中置一通常為圓形之光闌（§ 427），俾同時與像清晰出現而視場得有精緻之界限。在 Galilei 氏望遠鏡中，此為不可能。

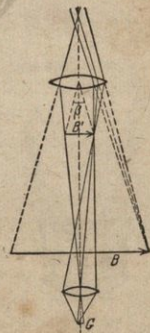
故視場之界線模糊不顯。

近日製造之巨大天文望遠鏡中，物鏡不用透鏡而代以凹面反射鏡。其最要之優點乃在此種之物鏡可免色散作用，且紫外線亦不致為其吸收。此類反射望遠鏡之一種構造法如第 403 圖所示。自恆星射來之光線，遇凹鏡 S_1 而反射至平面鏡 S_2 ，再由此折入管側之目鏡中。



第 403 圖 反射望遠鏡

426. 顯微鏡。顯微鏡之用途在使極微小之物體或極精細之結構得為吾人所目觀。此由一焦距極短之物鏡及一作為放大鏡用之目鏡二者而成。物體 G 置於物鏡之焦距 f_1 以外少許，其與物鏡間之距離為 g (第 404 圖)。圖中為易於明瞭計，物鏡與目鏡焦距之比不與實際情形相合。事實上物鏡之放大率遠較其後光線穿過目鏡時之放大率為強。



第 404 圖 顯微鏡

顯微鏡之放大率當以另一種觀點判斷之，與關於望遠鏡者不同。事實上

確可將欲觀測之物體移至吾人肉眼明視距離之處。命顯微鏡中其虛像在明視距離處之視角為 β ，將其置於該距離處而直接以肉眼觀察所見之視角為 α ，則放大率當為此二角之比。此二角可由 $\text{tg } \alpha/2 = G/s$ 與 $\text{tg } \beta/2 = B/s$ 二式而得，因 α 與 β 均為頗小，故

$$v = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{B}{G}.$$

顯微鏡之放大率即直接等於其單向放大率 γ 。試引用 (35b) 式，惟注意其分子中之焦距 f_1 遠較像距 b_1 為小，可略去不計，而 b_1 幾等於顯微鏡之管長 l 。於是得放大率之值為

$$v = \frac{ls}{f_1 f_2} \quad (37)$$

顯微鏡之物鏡與目鏡皆用透鏡組，以免透鏡之像差。

第 405 圖示一物鏡之例。

顯微鏡嚴密之理論須涉及繞射現象 (§ 445 以後)。



第 405 圖

顯微鏡物鏡之一種

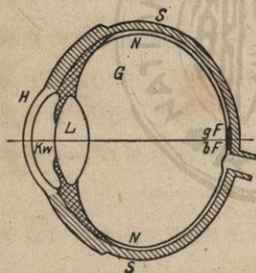
Helmholtz 與 Abbe 二氏嘗示明以顯微鏡觀察相離極近之二點，經最強烈之放大而尚能鑑別其為分離之二點者，該二點間最近之距離不得小於 $\delta = \lambda/n \sin \omega$ ，其 ω 係指自物體上一點發出之光線到達物鏡時所成錐角之半， n 為充滿於物體與物鏡間之物質之折射率 λ 為所用光線之波長。

$n \sin \omega$ 之值稱爲物鏡之數字孔徑。物體與物鏡之間若不爲空氣而爲一折射率較大之物質，則物鏡之數字孔徑必因之增加，而可以鑑別之距離 δ 將因之減小。故吾人常用 Abbe 氏之油浸裝置，以柏香木油 (Zedernholzöl) 代替空氣，此油之折射率等於物鏡物質之折射率 (均勻油浸法)。此時數字孔徑之值可達 1,4；若用一溴代萘 (Monobromnaphthalin)，且可達 1,6。苟用此種裝置之顯微鏡，則物體極精細之結構，其數量級與可見光之波長——約爲 $5 \cdot 10^{-5}$ [厘米] 左右——相埒者，尙能藉以鑑別之。若用紫外光，其波長 λ 更較可見光爲短 (§ 469)，則 δ 尙可減小。但人目不能見紫外光，故須用照相機以攝取其像。且透鏡須以水晶或其他能爲紫外線所穿過之物質製成 (關於超度顯微鏡，見 § 449)。

427. 光闌，叉絲，目鏡測微計。 由光學儀器之物鏡所產生之實像，苟能從目鏡中清晰察見之，則置實物於該處其距離與實像之距離相等者，亦必能同時清晰察見之。故吾人恆於實像所在之處置一光闌，已見前述；光闌者，爲一圓形之孔，孔旁之光悉被闌阻，而視場因得有精緻清晰之界線。許多光學儀器中，又於實像所在之處設有一種裝置，可藉以示明像上何點恰在儀器之軸上。此種裝置大都爲二交叉垂直之細絲，緊張於實像所在之處，名爲叉絲。叉絲亦可由置於實像平面處之平行面玻璃片上所刻互相垂直之二裂痕而成。顯微鏡中實像所在之處亦可置一精細刻度之玻璃

片(目鏡測微計),俾與實像同時在同一平面內清晰呈顯於吾人之目中. 欲校核玻璃片上之刻度,輒用另一刻度尺,其刻度之距離為已知者(物鏡測微計)置於物鏡之前,以比較目鏡測微計之若干刻度在像中相當於物鏡測微計之一刻度. 若此,則置於顯微鏡下物體之大小可藉目鏡刻度尺而測量之.

428. 眼. 人目之構造大要如第 406 圖所示. 眼球為一近似球形之體,其在光線進口處者前為角膜 H ,其後為前房 Kw ,液體充滿於其中. 再後為彩簾與瞳孔,以及睛珠 L ,



第 406 圖 眼之剖面

眼球之中部悉為膠狀之玻璃體 G 所充滿. 眼球外殼之構造複雜異常,其內壁蔽以網膜 N ,感光之器官在焉,此種器官由視神經而與腦中之視覺中樞相連接. 球殼之外為鞏膜 S .

睛珠之形狀調節適當時,眼所注視之景物即藉以產生一縮小而倒立之實像於網膜之上. 有中心凹陷 (Fovea centralis) 或稱黃斑 gF 者位於睛珠之軸上,為白晝時網膜上感光最敏之部份;吾人視物時,必將物體上吾人所注視之點之像生於黃斑之上.

眼之作用大致與尋常照相機類似。惟照相機中欲得準確之像距時可將透鏡移動，而眼中實像與睛珠間之距離則為眼之構造所限制，常定而不能變動。景物之遠近，千變萬化；若恆欲求其像之清晰，則睛珠之焦距須能改變方可。睛珠之折射率 n 既不能改易，則所能改易者僅為其曲率半徑而已。故睛珠之兩端為一種毛狀肌肉所繫住，其曲率半徑可藉肌肉之力以改變。肌肉鬆馳時，正常眼之睛珠可清晰視察遠處之物體。欲視察近物時，睛珠須賴肌肉之作用而彎曲。此種作用稱為調節。其運用起於不知不覺之間。細小之物體（書籍上之文字等）離眼約 25 [厘米] 時，正常之眼可不必劇度調節而得清晰明視之，故此項距離稱為正常眼之明視距離。物體之距離較短於 15 [厘米]（最近點）時，正常眼已不能調節。但近視眼對於更近之物體尙能視察清楚。蓋此時物體離眼愈近，則愈大而愈見清楚，是則近視之疾在此方面可謂為一種優點矣。

彩簾之用在節制射入目中之光量。瞳孔為一光闌，能自行按所遇之亮度而張縮。

在視神經進入眼球之處 bF ，網膜上無感光之器官。故就此處言之，眼不能見物，此處即稱為盲斑。盲斑亦位於視場之中，但吾人不覺其有缺陷者，一方面固由於習慣使然而他方面則由其在兩眼之視場中所佔之地位不同所致。吾人可以第 407 圖證明此盲點之存在。試閉左眼而以右

眼注視星形，距離頗近時，黑色之圓尚明顯可觀。眼漸遠離，黑圓漸隱，蓋此時黑圓之像正落於盲斑上也。眼離圖更遠，黑圓復見。

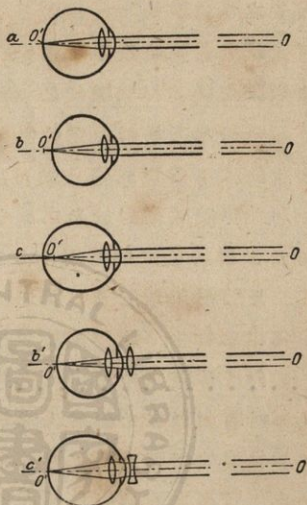


第 407 圖 盲點之表演

外界之景物在眼中之像雖被顛倒，而吾人仍覺其為正立者，其實初無足異。由於光感覺之排列順序所成之空間圖形與眼中所成像之位置毫無關係，蓋人自初生以來，觸覺與視覺恆同時並用；故此種之圖形乃為經驗之結果。嘗有人作一實驗，長期戴一能生倒像之稜鏡，以顛倒網膜上之像，久而久之，確能養成一種習慣，雖戴有此種之稜鏡，而所見之景物仍為正立。此純係心理的而非物理的作用。

429. 眼之缺點。眼鏡。近視眼之睛珠鬆馳時，像落於網膜之前方，不能達於網膜之上，故遠物不能清晰察見。其最近點與明視距離均離眼較近，不及 15 [厘米] 與 25 [厘米]。是知睛珠之焦距太短。欲救此弊，可戴發散透鏡之眼鏡，其負值之曲率可抵消睛珠為值太大之正曲率（第 408 圖 c 與 c'）。

遠視眼之睛珠鬆馳時，像落於網膜之後方，又不適在網膜之上，其焦距較之眼球之深度為太長，故欲清晰視察遠物須賴調節，而眼必歷久費力。其最近點與明視距離大於15 [厘米] 與25 [厘米]。瀏覽尋常書籍文字時，須將其置於離眼較遠之處，但此又使像形縮小，難於認辨。此種之眼視物時即覺疲勞。是項缺點可以會聚透鏡之眼鏡補救之，睛珠之曲率太短者，得藉以補足 (第408圖 *b* 與 *b'*)。



第408圖 *a*. 正常眼, *b*. 遠視眼, *c*. 近視眼, *b'*. 校正後之遠視眼, *c'*. 校正後之近視眼。

按解剖學言之，近視眼與遠視眼之缺點通常不在睛珠焦距之反常而由於眼球之軸之過長 (近視) 或過短 (遠視)。

眼之有像散性者，係由於角膜或睛珠不為精確之球形所致，蓋拱形之角膜對於像之產生，亦有關係也。此種之眼觀察一組互相垂直之條紋時，僅在同一方向內者，方得同時清晰察見。眼之有此種點者，亦可以磨琢適當之透鏡以

補救之。

430. 色覺,明暗中之視覺. 網膜上有二種感光之器官,即錐狀纖維與桿狀纖維是. 前者用以感覺明光下之物體,後者用以認辨黑暗中之物體,即該處之照度頗為微弱者. 錐狀纖維不僅司視覺,且兼司色覺. 關於色覺之詳情,見 § 478. 桿狀纖維對於光之感覺敏銳異常,遠非錐狀纖維所能及,惟對於色之感覺,則十分遲鈍.

光線射至錐狀及桿狀二種纖維時,其中所含之紫色素即起化學變化. 此種化學變化之結果影響於錐狀及桿狀纖維內視神經之末端,由此傳達至腦中,而引起對於光之感覺. 遇有劇烈之光線射入時,紫色素之消費較其重新製出之量為速,故網膜上該處對於光之感覺暫時大減,或竟完全停止. 強烈之光,易使目眩,直接凝視太陽或明亮之燈光後,雖已闔眼而猶留遺影,皆此故也.

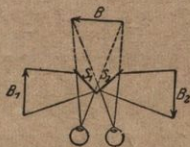
桿狀纖維感光最敏,對於白晝之光,此種纖維已因疲勞而失其作用. 故白晝時吾人之視覺端賴錐狀纖維. 在晦冥之處稍歷片刻後桿狀纖維即行復原(吾人在黑暗之中須摸索久之方能模糊辨物!),錐狀纖維本拙於感光,其作用久已停止後,桿狀纖維仍能工作不懈. 但桿狀纖維不司辨色,故黑暗中不能加以區別(『夜色蒼茫裏,貓兒一樣灰』).

錐狀纖維與桿狀纖維在網膜上之分佈完全不同. 錐狀纖維羣集於黃斑,佔據像之中區,他處頗為稀少. 桿狀纖

維則反是，黃斑中幾無其蹤跡而悉行分佈於網膜上其他各處。以此之故，吾人輒覺黑暗中所見之視場較日光中所見者為大，且黑暗中視場之中心似覺盲然無物。試於夜間注視一星，猶如日中注視一物然——若不故意為之，則自不能如此注視——，星光之像射於此時已盲之黃斑，而星似隱沒不見，若注視月面，則月面之大部分亦可隱去。

431. 視覺之空間性。吾人所受於眼之賜者，不僅光與色之感覺而已也，空間之印象，非特左右之排列，且包括前後之區別，亦莫不賴之。視覺之所以有空間性者當歸功於吾人之具有雙眼。二眼相離少許，故所見之像並不完全相同，但此種些微之不同，吾人類皆不能察覺。吾人所察覺之像恆僅起於二眼之一，大多數之人，皆由於右眼。另一眼中不知不覺之像與第一眼中之像略有不同，空間性之印象即由此而起，蓋平面上之圖形在二眼中所生之像決無相異也。獨眼之人對於遠近之判斷似較不易。

實體鏡者，藉圖畫之助，使生空間之印象者也，其構造之最簡單者，如第 409 圖所示。同一之景物由二相離少許之地位以照相機攝取其像，則所得之像必稍有不同。通常輒用特製之雙物鏡照相機以攝取之。倘若此所得之二像 B_1 與 B_2 置於二反射鏡 S_1 與 S_2



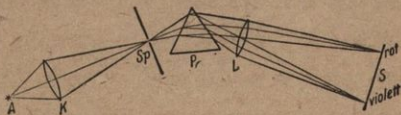
第 409 圖 實體鏡

之前，務使一目僅能望見一像，而二像似於 B 處空間的相合者然。腦中此時所得之印象，遂成空間的，前後層列，不爽絲毫，與相片所代表之景物無異。

按諸幾何學之原理，二眼間之距離愈大者，其視覺之空間性作用之擴展亦愈遠。故稜鏡望遠鏡 (§ 425) 二物鏡間之距離增加後，其作用等於增加二眼間之距離，所見物體之像之空間性可因之擴展至極遠之處，不若以肉眼遙望遠處之景物時，其深度之差已不能加以區別也。若物鏡間之距離與二眼間之距離相等，則所見物體左右兩方之大小雖已放大，而其遠近之印象並未同時隨之放大。故所見之景物在同一視線者似覺前後相擠過密。

吾人所觀察之物體，若離眼愈近，且其所涉前後之深度愈大者，二眼中所生之像相差愈多，而二者之印象愈不能合併。試以手指置於鼻前，而以眼注視遠處之牆壁，則同時可見二指。

432. 色散。白光穿過稜鏡時即有彩色出現，已見 § 412 所述。 A (第 410 圖) 為光源，例如一弧光燈，白光即由此射



第 410 圖 白光之色散現象

出， K 爲透鏡，將光線折射至隙縫 S_p ，俾該處全部得照耀明亮。緊接隙縫之後置一稜鏡 P ，其後爲透鏡 L 。若白光穿過稜鏡時並無變化，而稜鏡之位置適宜，則隙縫白色之像將出現於光屏 S 之上。但事實上不然。光屏之上輒現一彩色之闊帶，自紅而黃，而綠，而藍，而紫，順次列陳，光之偏向在紅色一端者較紫色一端爲小。此項現象稱爲光源之光譜，而此種之變化稱爲色散。所以然者係因白光可視爲光譜中一切彩色之混合色，而各色折射時偏向角之大小不同，紅色最小，紫色最大，故白光穿過稜鏡時卽爲其所分析，而其各成份一一單獨出現。各色之光各自產生一隙縫之像，光譜者，卽爲此種隙縫之像相並排列而成。

吾人可將此種之色併合，使之還原，而仍成白色，例如用一特製之機械，使稜鏡在一小角度內來回迅速轉動不息，卽可達此目的。蓋此時各種之色連續投射於光屏上不同之處，經吾人之眼與腦將其混合而仍得白色之印象。更佳者可於光線射入稜鏡之進口處置一光闌，此時光線尙作白色，復於光譜所在處之後方置一透鏡，俾將光闌之像投射於光屏之上。若此則自光闌中各點所發出之異色光線皆各重行會聚於一點，混合而仍成白色。於此種裝置中光譜最爲清晰之處，試插入一尖角之小稜鏡，此小稜鏡須以僅能使光線偏向而無顯著之色散作用者爲宜，俾光譜中僅有一部分之光線穿越此小稜鏡而過，則光屏上可見二光闌之像，互相

並列。光譜已被小稜鏡分成二區域，此二像各由此二區域中所含之色光混合而成。故二像皆有色；且二像之色彼此爲互補色，互補色者，即混合後可成白色者也。將光譜中大小不同之區域以光闌闌去，更可得不同之互補色。二互補色並列一處時最能引起美感，故在繪畫術中頗佔重要之地位。光譜之色稱爲純光譜色，不能再將其分散。此可以下述之實驗證明之：於光譜中置一第二隙縫與第一隙縫平行，俾光譜中僅有一頗狹之區域得以通過此第二隙縫，再用一稜鏡及一透鏡，使產生此第二隙縫之像於一光屏之上。此時所見者，僅爲通過第二隙縫之色。

由色散之事實知玻璃以及其他有折射性之物質對於不同之色各有不同之折射率，通常對於紅色者爲最小，對於紫色者爲最大。但有時原在光譜中部某色之折射率亦可較強於其他之色（反常色散，見 § 466）。

折射率不同之物質對於色散之作用亦各不同。各種不同之玻璃（冕牌玻璃，火石玻璃等）已示有強弱不同之色散作用，換言之，光線穿過稜鏡時之入射角雖同，而光譜中各色區域彼此之擴展則有異。

一物質之折射率與光在其中傳播之速度有密切之關係，已見 § 409 所述。自色散之事實可知各色之光在一折射物質中之速度亦各不同。

吾人可將折射率不同之物質（冕牌玻璃 K_r 與火石玻

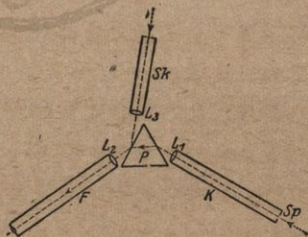
璃 F_1) 所製之二稜鏡合成一稜鏡組, 命其由於第一稜鏡之色散作用適與第二稜鏡所抵消, 而此時不再分散之光線之偏向則依舊不變(消色差稜鏡第411圖), 用折射率不同之物質所製之透鏡亦可



第411圖 以冕牌玻璃及火石玻璃成之消色差稜鏡

合成透鏡組, 使其由於色散作用所引起之缺點得藉以完全免除(消色差透鏡), 此在應用光學中, 尤屬重要

433. 分光計. 分光計(第412圖)可用以產生光譜, 並從而研究之. K 為準直管, 其前端有一隙縫 Sp , 欲研究之光即由此射入分光計. 準直管之他端為一透鏡 L_1 , 其與隙縫間之距離適等於其焦距. 故自隙縫中射入之光線經過透鏡後即平行前進. 於是進入稜鏡 P , 而其色即因以分散. 由各色所成之光線束離開稜鏡後固向各方發散, 但同色之光線則因其折射率相同而平行前進. 望遠鏡 F 可以移動; 各色之光各在物鏡 L_2 之焦面內重行聚會於不同之處, 而光譜之實像即於此處出現, 可以目鏡作為放大鏡而觀察之. 許多之分光計又有第三管 Sk 之添設者,



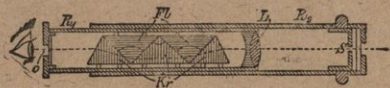
第412圖 分光計之略圖

其一端爲透鏡 L_3 ，他端適爲此透鏡之焦面，裝有刻度之玻璃片，而以燈照亮之。經過刻度尺之光線遇 L_3 而變成平行，射於稜鏡上光譜光線所自射出之一面。其一部份遂爲稜鏡面所反射，與光譜光線一同進入望遠鏡之內。因其亦爲平行之光線，故刻度尺與光譜二者之像在望遠鏡之像上同處一齊清晰出現。人自目鏡中窺之，同時得見光譜與刻度尺二者互相重合，刻度尺之條紋與光譜之各色平行，光譜爲明亮之條紋所截成若干等份。此種之刻度尺可以用以測量光譜。

分光計之作爲精密測量之用者，其望遠鏡與準直管均可繞儀器之軸而轉動，且轉過之角度可自圓周刻度尺計出之。亦有稜鏡臺可以轉動者。此種之儀器大概不備刻度尺管。

分光計之無刻度尺而其主要用途僅在觀察光譜者稱爲分光鏡；其有特種之設備，能於光譜實像所在之處置一照相片，俾得攝取光譜之像者，稱爲攝譜儀。

有時輒用許多稜鏡合成一組，使光線順次穿過以增強



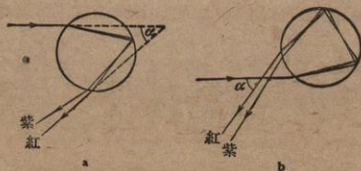
第 413 圖 直視分光鏡

R_1, R_2 可以伸縮之管， L 透鏡， S 隙縫， Kr 冕牌玻璃， Fl 火石玻璃， O 目鏡。

分光計之色散作用。

以折射率不同之物質(冕牌玻璃與火石玻璃)所製適當之稜鏡多枚,順次連合,可得一稜鏡組,仍有色散作用,即仍能產生光譜,但其光譜之中部可無偏向。此種之直視稜鏡有一大優點,即尋常稜鏡中光路之屈折可以免除。例如簡單之懷中分光鏡即應用此種之稜鏡而製(第413圖)。

434. **虹霓**。虹霓之成係由於日光在雨滴中之折射與反射(第414圖)。因各色之折射率不同,故日光中之紫色部份偏向最大,紅色部份偏向最小。命此後者之偏向角為 $360-\alpha$ 。按詳細之研究,知 α 角約為 41° 時,光線互相重疊,此時紫色光之偏向較此略大,紅光之偏向較此略小。故吾人見光線自一定之方向而來,此方向即由此偏向之條件及當時太陽之位置而定。一切此種之方向組成一錐面。故虹為一圓弧狀之帶,橫亘天空,位於太陽之對方(實際上光線係來自大氣中離地頗近之氣層中,即來自下降之雨滴)。示光譜之色,紅色在外,紫色在內(第414圖a)。光線在雨滴內若



第414圖 虹霓產生之說明

經二次反射，則又可另得一彩色之帶，稱爲霓，而前述祇經一次反射者稱爲虹，虹與霓中光譜色之順序適相顛倒，如第414圖b所示。

關於虹霓嚴密之理論，須用光之波動說以討論之。



第三十章 光之波動說 波動光學

435. 光性理論之歷史。關於光之本性之理論，最初有科學之根據者當推微粒說；創斯說者，以 Newton 氏爲代表 (1669)。此說之內容謂光之放射係由不可稱量之物質微粒自光源射出而成。與之反對者爲 Huygens 氏 (1677, 其前已有 Descartes 氏, 1637, 及 Hooke 氏 1665) 之波動說，謂光爲一種波動之現象，略與聲相似。

此二說之爭論綿延達二世紀之久，迄不能解決。迨十九世紀初葉，由於光之干涉現象之研究而吾人方承認波動說，其時 Thomas Young 氏 (1802)，最先以昔日 Leonardo da Vinci 氏 (1500) 曾經提及而 Grimaldi 氏 (1665) 曾經精確觀察之繞射現象作爲波動說之證明，且 Newton 氏圈 (§ 442) 之現象亦得藉以解釋。光線能發生干涉作用之事實可視爲光之波動性唯一毫無疑義之證據。

波動說既經確立，則光波究以何物爲憑藉之問題自必立即隨之而起。光線能在真空中傳播，是知光線之前進，不需尋常意義中之所謂物質。且更有進者，僅當光路中毫無物質存在時，光線之前進方可不受擾亂。當十九世紀之時，波動說方成立也，咸以爲自然界中一切之變化最終必須以力學說明之，換言之，必爲物質上或物質中之一種變化或狀

態。故當時以爲光線自光源發出而能在尋常意義中所謂真空內傳播者，此種空間必非完全真空，其中必爲一種物質所充滿，但此種之物質，除由光線傳播而得知其存在外，實無他法以認知之。於是光波可視爲此種物質各部分之機械振動，此種物質者，吾人以以太，宇宙以太，或逕以以太名之。但此種觀念不久即遇一頗大之困難。吾人以後即將述及光波爲橫振動，而按 § 125，橫振動僅能在固體中發生。無論如何，若認光波爲一物質性媒質之機械彈性振動，其結論必屬決不可能。且相對論中亦已證明決無光波所憑藉之物而能具有尋常物質之通性者 (§ 532)。今日之觀念則以爲空間本身在某方面視之，可認爲一種物理性的物質。換言之，吾人須認真空中可有一種狀態存在，此種狀態自一處傳至他處時，能量即藉以輸送。此種狀態即爲電場與磁場。今日物理學中仍有用以太二字者，其意義已與舊物理學中物質性之以太完全無關。今日之所謂以太者，僅指電與磁之狀態所憑藉之空間，亦即光所憑藉之空間而言，決非爲具有任何物質特性之物。

至 1900 年時，波動說對於一切光現象之解說似頗滿足。自茲以後，與之站於同一方面者（並非取而代之！）又有量子論（Planck 氏 1900）出現，此當於第三十三章中詳論之。本章之中，僅以能用波動說爲基礎而解釋之現象爲限（所謂經典的光學）。

前已屢述光爲一種電磁振動(Maxwell氏 1871)。但以下諸節中所述之光現象初不必以此說明之，僅視之爲一種週期振動之現象已足。

436. 光之頻率與波長，光譜色之本性。光振動之波長 λ 亦可由干涉之實驗測定之，如聲振動然。光之振動頻率 ν 純係取決於光源中發生之變化。其值不能直接測量；但若 λ 與光速度 c 均爲已知，則其值可自對於一切振動均爲合理之關係式 (§ 124)。

$$\lambda\nu = c \quad (1)$$

計算之。光線連續穿過數層靜止之媒質時，其頻率 ν 恆始終不變，但因 c 值隨物質(折射率 § 409)而異，故按(1)式，其波長亦變。命 λ_0 爲一光振動在真空中之波長，則該光線經過一折射率爲 n 之物質中時，

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (2)$$

氣體之折射率幾等於1，故光線在氣體中之波長與在真空中者相差極微。表中所列之波長通常係指真空中而言。

各種純光譜色之差別，在物理學上言之，係由於頻率或波長之不同。自紅色至紫色，波長遞減。光譜紅色一端邊緣之波長約爲770 [$m\mu$]，紫色一端者約爲400 [$m\mu$] ($1 [m\mu] = 10^{-7}$ [厘米])。自(1)式可計算紅色一端邊緣之頻率約爲每秒 $4 \cdot 10^{14}$ 次，紫色一端者約爲 $8 \cdot 10^{14}$ 次。故光譜中能爲吾人目視之一部份若用聲學中之述語言之，僅約爲一均。

在實用光譜學中測量波長時所用之單位通常為 Angström 氏單位 (\AA)。 $1[\text{\AA}] = 1/10 [m\mu] = 10^{-8}$ [厘米], 故上述二界限內之可見光譜約相當於 $4000-7700[\text{\AA}]$ 。

今日習慣上又鮮用波長, 而以所謂波數 $N = 1/\lambda$ [厘米] $^{-1}$ 者代之, 其中波長之單位用 [厘米], N 為 1 [厘米] 內所包含若干波長之數, 而按(1)式應等於 ν/c 。

437. 光之干涉 關於振動干涉現象之本性前已於 § 126 中備述之。 頻率相等之二振動相遇時, 干涉作用即行發生。 二振動或互相加強, 或互相減弱, 視二振動位相之差而定; 位相之差為 180° , 且振動強度相等者, 二振動完全互相抵消。

聲之干涉可以完全同調之二音叉證明之。 由此吾人似可推測光之干涉亦必能由完全同類之二光源作同樣之實驗而發生。 但事實上則不然。 僅當光線同時自同一光源上同一點發出, 重行會合於空間之一點時, 方見有干涉作用出現; 此種之光線稱為相干光線。 光線之自物體上射出也, 係由於其各個原子中某種之變化 (§ 496 以下)。 欲使干涉發生, 須命相遇之二波列在振動一週期 $\tau = 1/\nu$ 之時間內位相關係始終維持不變方可; 此對於非相干光線決不可能。 故僅有波列之發自光源中之同一處, 其發射舉動完全相同者, 方能起干涉之作用。

此種發射舉動歷時頗短, 每一原子連續二次發射之間

恆須休息頗久。故自一個原子一次所發出之一串波列長度輒為有限 (干涉長度)。波列之長度既為有限,則自光源上同一處發出之二光線尙不足以保證其必能相遇於空間同一之點。故空間之某點處應有干涉作用發生;但一波列離此之距離較遠於另一波列離此之距離,且此二距離之差較任一波列之長度為大者,其作用決不能於此點同時發生,故不能彼此干涉,第 415 圖 a 所示。

僅當二距離差較波列長度(與波長有關)為小時干涉作用方得發生;距離差與波列長度相差愈小,則干涉愈烈。

二相干光線自其公共光源至發生干涉之一點間所經路程之差稱為該二光線之光程差。

光程差等於波長之整數倍者,二波互助最烈。光程差等於半波長之奇數倍者,二波互滅最烈。故得

$$\delta = z\lambda \text{ 時互助最烈,}$$

$$\delta = \frac{2z+1}{2} \lambda \text{ 時互滅最烈.}$$

(δ = 光程差, z = 整數)。

此處之所謂光程差者,並非為幾何的路程差。二波列

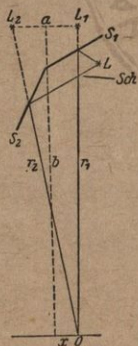


第 415 圖 波列干涉之說明

行經折射率 n 不同之二物質時，其幾何路程雖相等，然卒因其速度之不同而其一波列到達二光線之交點較他一波列為早(第 415 圖 b)。故相干光線之能否干涉，並不取決於幾何路程之差，而須以光程 (§ 409) 之差為斷。

干涉現象可分為 Fresnel 氏式及 Fraunhofer 氏式二種。前者光源係在有限距離之處，自其各點發出之光線皆向各方發散。Fraunhofer 氏式干涉現象者，光源係在光學的無限遠之處，換言之，自光源各點發出之光線業經設法使之平行者。

438. Fresnel 氏干涉實驗。欲產生相干之光線，可用 Fresnel 氏 (1823) 法，以同一光源造成空間相離少許之二像，

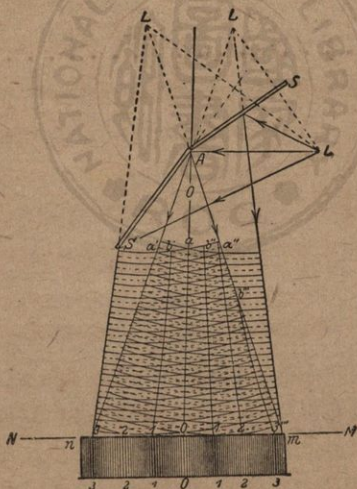


第 416 圖 Fresnel 氏
雙鏡實驗之說明

而視之為相干光線之光源。Fresnel 所用以達此目的者，為二適宜之反射鏡 S_1 與 S_2 ，互相傾斜一極小之角(第 416 圖)。若此則由光源 L 可得二反射像 L_1 與 L_2 ，此即在本實驗中作為光源，而原來之光源則以光屏 Sch 遮去之。命 L_1 與 L_2 間之距離為 a ，此可由反射定律計算而得。欲求現象最為簡單，須用一種光源，在可能範圍內祇發出單獨一種波長之光線者(單色光)。最適宜可用 Bunsen 氏燈或酒

精燈，於其燄中置以少許之鈉（食鹽）使燄成黃色。試於離雙鏡稍遠之處置一放大鏡於自二反射像射來光線之路程中，即見視場中有明暗相間之條紋。此即為自二光源發出之光線互相干涉所致。

命 r_1 與 r_2 （第 416 圖）為自空間一點 O 至二反射像之距離（亦即為沿光路計算自該點至光源本身之距離）， b 為該點至 a 之垂直距離， x 為其與 $L_1 L_2$ 之對稱線間之距離。於是



第 417 圖 Fresnel 氏雙鏡實驗之說明

$$r_1^2 = b^2 + \left(\frac{a}{2} - x\right)^2,$$

$$r_2^2 = b^2 + \left(\frac{a}{2} + x\right)^2,$$

故得

$$r_2^2 - r_1^2 = 2ax$$

或

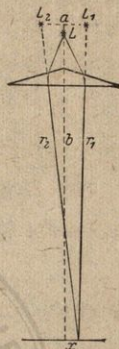
$$r_2 - r_1 = \frac{2ax}{r_2 + r_1}.$$

因 b 亦即 r_1 與 r_2 皆遠較 a 與 x 為大故若以 $2b$ 代 $r_2 + r_1$, 可不致有顯著之錯誤, 於是二光程之差為 $r_2 - r_1 = ax/b$. 前已於 § 437 中述過光程差為半波長之整數奇數倍者, 二波必因干涉而相滅. 故 $\frac{ax}{b} = \frac{2z+1}{2} \lambda$ 時, 二光同時消滅, 式中 z 或為零, 或為任意整數. 諸黑暗條紋之位置 x 即由此式示出. 相鄰二條紋間之距離為 $\delta = \lambda \cdot \frac{b}{a}$, 從此可計算 λ 之值. 第 417 圖示一光屏於光路中時, 屏上所現明暗條紋之情形.

若所用之光非為單色光, 則光線中所含之各種光譜色不在同處因干涉而消滅. 於是空間內各點處所見之光色為由光源而來之一切光譜色減去在該點處因干涉而消滅之一色所餘之色. 故此時即有彩色條紋出現(混合色 § 432). 若用白光, 則所見者為頗狹之連續光譜. 但此項光譜並非

由純光譜色所成，如用稜鏡時然，而乃為混合色所成，此混合色者係為白色中減去該處因干涉而消滅之一色所餘之色，換言之，吾人在各點所見者乃為各該點處消滅之一色之互補色。

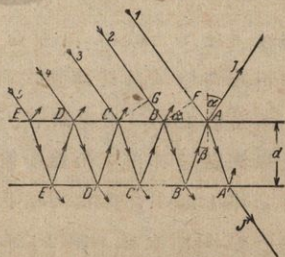
Fresnel 氏除用雙反射鏡外，又用雙稜鏡，其形式如第 418 圖所示。自光源 L 發出之光線經稜鏡後似自 L_1 與 L_2 二點射來，故即為二相干光線之光源，其作用與雙鏡相同，不再贅述。



第 418 圖 Fresnel 氏雙稜鏡

439. 平行平板內之 Fraunhofer 氏式干涉。下述之例頗足啓迪思想，故特詳加討論之。第 419 圖示一薄層平行平面之物質，折射率為 n ，

一束平行之相干光線自外方（空氣或真空）射於其上。此平行光線者，可視為由一無限遠之光源上一點射來。實驗時，可置光源於一會聚透鏡之焦面內，則自光源上各點發出之光線自必悉成



第 419 圖 平行平板內干涉之說明

平行。故此處所遇者爲 Fraunhofer 氏式干涉現象 (§ 437)。命此層薄板之厚度爲 d 。

光線射於板面上時，必有其某部份遇之而反射。其餘之一部份則折射入板中。此部份之光線遇板中之另一面時，復有一部份反射，折回薄板之內，其餘之部份又折射而出板外。在板內反射之一部份將繼續在板內一再上下反射，惟每遇一次反射恆有一部份之能量因折射向外流出而消失。

試觀察自 A 點反射而出之光線 J 。其中之能量係由數部份併合而成。第一部份爲光線 1 在板之表面上單向反射而來。此外尚須加入 2, 3, 4 等各光線在板內經過數次反射方到達 A 點時而由該處折射而出板外之部份。在 J 光線方向內所見之光強度應視 1, 2, 3 等各光線自 A 點折射外出時各該部份彼此間相常數之關係而定。吾人茲先觀察其由於 1 與 2 二光線而來者之關係，此處姑不問其強度。此二光線在 BF 平面 (第 419 圖) 內之相常數係相同。但由此到達 A 點時所歷之光程則不等，故在 A 點處，亦即在 J 光線中，此二光線間有一光程差出現，此差值之大小即足以決定二者在 J 光線中彼此究應相助抑或相減。其來自光線 1 之一部份由 BF 平面以迄 A 點之光程即直接等於直線 FA ，而來自光線 2 之一部份則應等於直線 $BB' + B'A$ ，乘以該薄板物質之折射率 n (§ 409)。不特此也，尚有一事又

當注意：一光線遇一光性較密之媒質而反射時，其相常數恆突增 π ，即相當於多經一 $\lambda/2$ 長之路程時相常數之變遷值。故來自光線 1 之一部份在 A 點反射時與在 F 點時相較，其相常數之變遷，猶如該光線所經之路程為 $FA + \lambda/2$ ，而非僅為 FA 者。遇一光性較稀之媒質而反射時，並無此種相常數突增之作用。

自第 419 圖，不難察見 $AB = 2d \operatorname{tg} \beta$ 與 $FA = AB \sin \alpha$ ，故來自光線 1 之一部分進行 FA 一段路程時之光程（包括相常數之突變）等於 $s_1 = 2d \sin \alpha \operatorname{tg} \beta + \frac{\lambda}{2}$ ，或更按照折射定律 $\sin \alpha = n \sin \beta$ ，

$$s_1 = \frac{2nd \sin^2 \beta}{\cos \beta} + \frac{\lambda}{2}$$

茲再討論 J 中由於光線 2 而來之一部份。其幾何的路程為 $BB' + B'A = 2d/\cos \beta$ ，故自 B 至 A 之光程等於

$$s_2 = \frac{2nd}{\cos \beta}$$

按簡單之計算，且引用 $\sin \alpha = n \sin \beta$ 之關係，即得此二部份之光程差為

$$\delta = s_2 - s_1 = 2nd \cos \beta - \frac{\lambda}{2}$$

按 § 437，且依據折射定律以 $n \cos \beta = \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$ 代入，得

$$\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = \begin{cases} \left(z + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2d} & \text{時互助最烈} \\ z \frac{\lambda}{2d} & \text{時互滅最烈} \end{cases} \quad (3)$$

$$(z = 0, 1, 2, \dots)$$

由此可計算上列任一極限情形出現時入射角 α 之值。入射角介乎此二 α 值之間者，相當於此二極限間之過渡情形。

今當討論來自光線 3 之一部份。關於在 A 點處此部份與來自光線 2 之一部份二者間之光程差者，前述關於來自光線 1 與 2 二部份之思索在此處仍為合理。此二情形中，幾何的路程之差確為完全相等，惟此處二光線反射時均不遇光性較密之媒質，相當數並不突增 π ，故其光程差不與 1, 2 兩光線至 A 點時之光程差相等。吾人不難察見入射角為 α 時，苟 1 與 2 二光線互助而增強最烈者，2 與 3 二部份必互滅而減弱最烈；反之亦然。但 J 中所含由於光線 2 而來之能量實際上恆遠較由於 3 而來者為多，故光線 2 之為光線 3 所減弱（或增強）者恆為值甚微，對於前述之情形，不足以發生顯著之影響。試再討論其餘光線 4, 5 等等之作用，稍加思索，即可推知當光線 2 之一部份將光線 1 之一部份增強最烈時，光線 3 之一部份將光線 2 之一部份減弱，亦即減弱 1；其時 4 之減弱 3 亦如 3 之減弱 2。但 3 既減弱 1，則 4 之直接減弱 3，即等於簡接增強 1；以此類推，4, 6, 8 等皆將 J 中之 1 增強，3, 5, 7 等則將其減弱。反之，當入射

角 α 爲另一值,適使 J 中光線 2 之一部份將光線 1 之一部份減弱最烈時, 3 增強 2, 亦即減弱 1, 其時 4 又增強 3, 仍將 1 減弱;以此類推, 3, 4, 5 等各部份均輔助光線 2 而齊將光線 1 之部份減弱. 但其主要之作用仍在光線 2 之一部份, 蓋其他部份之強度, 均遠不如 2 也. 關於強度之詳情, 見 § 440.

介於 1, 2, 3 等各光線之間而與之平行之一切光線, 未在第 419 圖中示出者, 於平行平面薄板表面上其他之點亦產生相同之現象. 故自板面上各處或射出平行於 J 之光線, 其各光線中所包含之各部份或相助而增強或相滅而減弱, 其多寡各有不同, 視入射角 α 之值而定. 若置一透鏡於此種平行光線之路程中, 俾全部光線悉行會聚於透鏡之焦點, 則該處或爲明亮, 或爲黑暗, 一視光線合於互助抑或互滅之條件而異. 即以目直接觀察之, 亦見相同之現象. 若光線係自一廣大之光源射出, 當其尙未射至板面以前, 先令其通過一透鏡而變成平行, 則自光源上各點射出之各組平行光線將各以不同之入射角而達於板面. 其由第二稜鏡所成光源之像中遂見有明暗相間之條紋. 每一條紋相當於以同一入射角到達板面之一束平行光線. 吾人稱此項現象爲等傾干涉.

若由光源射來之光線中含有各種不同波長之光線而非爲單色光, 則互助或互滅最烈之入射角對於各種之色亦

各有不同。例如吾人若用白光，其中包含波長連續無一之各色，則在某一定之方向內咸各僅有某數種一定波長之光互助或互滅最烈。在同一方向內所以能有數種之波長出現者，係因 z 之值可為任意之整數，單獨 α 一值尚不足以決定互助或互滅最烈之 λ 應為何值，而須視 $(z + \frac{1}{2})\lambda/d$ (互助最烈) 或 $z\lambda/d$ (互滅最烈) 之值以為斷。 z 之值 (干涉級數) 不同，而 λ 之值即隨之而異。由 (3) 式可知 z 決不能小於某定值，在實際所遇之一切情形中，其數量級至少須與 d/λ 相埒。故若板之厚度遠較所用光線之波長為大，則 z 亦頗大，而在某一指定之入射角 α 下互滅最烈之諸波長相離頗近。例如有時 z 之最小值當為 1000，於是對於指定之 d 及 α 試以 $z = 1000, 1001, 1002$ 等值代入 (3) 式，則所得諸 λ 之值相差極微。即以相同之波長言之，相當於互滅最烈之諸入射角彼此將僅有極微之相差，此種頗小之角度差在眼中每不能辨出 (§ 422)。遇此種情形時，吾人之眼已不能鑑別干涉之條紋，故表面均勻光亮之光源就其反射光中觀之，輒仍覺其均勻明亮。是以尋常之玻璃板等物，其厚度遠較光之波長為大者，輒不見有干涉條紋出現；僅遇極薄之薄層，其厚度堪與光之波長相比擬者時，方得見之。

此種極薄一層之物質，若以白光照之，則在各方內必有某種之波長 (色) 因干涉而消滅。試觀察此種薄層表面上之任意一點，則在其反射光中必缺少在該點處業經消滅之

色 故吾人所見者爲白光中減去此部份後其餘諸色之混合色，卽爲該業經消滅部份之互補色。吾人觀察此種薄層表面上之各點時必以各種不同之角度，故各處消滅之色之波長亦各不同，而到達吾人眼中之光線之色亦隨處而異。薄層因現一切可能之色（薄層色）。肥皂泡之色彩卽爲其最顯著之一例。薄層之油以及金屬面上極薄之氧化層輒見燦爛之色，其原因正復相同。

薄層之厚度過小時現象又異。厚度 d 若遠較波長 λ 爲小，則互相干涉二光線之光程差 δ 可視爲僅由於其直接反射之一光線相常數突增 π （見前）而來，而與入射角之大小實際上無甚關係。此時光程差恆爲 $\lambda/2$ ，不問入射之方向與所用之光色，恆彼此干涉而互相消滅。故薄層之厚度遠較光線波長爲小者，干涉現象亦卽薄層色又不能出現。

此項現象可由肥皂薄膜觀察之。試於線框上蔽以一層肥皂薄膜，直立之，任其由重力之作用而上部逐漸變薄。初時見該處之各彩色條紋距離逐漸增加。最後彩色消滅，而薄膜似爲無色；自反射光中觀之，薄膜作黑色（所謂黑斑）。

以上所討論者僅爲由薄層上反射之光所生之干涉現象。今當轉而討論 1, 2, 3 等諸光線自 A' 點（第 419 圖）射出板外之部份。基於上述之思索，不必另行計算卽可發見

光線 J 中之情形。光線 J 係由 1, 2, 3 等一切之光線在板內各多寡反射若干次後到達 A' 點而射出之部份併合而成。來自相鄰二光線之部份到達 A' 點之光程差恰與反射光線 J 中之相鄰二光線者完全相同，惟 1 與 2 二部份須除外。蓋光線 1 反射時所遇者係為光性較密之媒質。在透過薄板之諸部份中，無一若此。故透射光線 J 中各部份間之關係與反射光線 J 中除去光線 1 後之情形完全相同。前已述過在反射光線中增強最烈時，2, 3, 4 等諸光線成對對順次互相減弱，是即 J 中偶數光線之部份互相增強，奇數光線之部份亦然，——光線 1 之部份除外——而此二羣之光線又彼此減弱。光線透過薄板而向外折射時，自必亦與此相同。故反射光中互相增強最烈時，透射光中互相減弱亦必最烈。反之，反射光線 J 中減弱最烈時，其中 2, 3, 4 等一切光線全體一致將光線 1 之部份減弱。在透射光線 J 中，此時一切部份作用亦屬一致，而增強最烈。從此可知當某一入射角，反射光之作用最強時，透射光之作用最弱，反之亦然。光能量在板中決無一處自行消滅，入射之能量咸必仍行悉數流出板外；故上述之事實可從此推知之。反射之一部份中含光愈少者，透射之一部份中必含光愈多。關於透射光中各部份強度之分配亦見 § 440。

不用單色光而用白光時，在透射光線中亦見有彩色出現，其理論與反射光中所見者完全相同；板之厚薄對於透射

光線干涉之作用亦復與關於反射光者無異。尤可注意者，用白光以產生彩色之現象，均僅當板為極薄時方能見之。

以上所述者均假設薄板之折射率，較大於其周圍之媒質。一平行平面薄層之物質裹埋於一折射率較大之媒質中時，原理上初無相異。例如一薄層之空氣夾於互相平行之二平面玻璃片間，即屬此種情形。此時(3)式中之 n 當以其倒數 $1/n$ 代之，此 n 者即為夾住空氣層之玻璃之折射率。第 419 圖亦當略加修改，光線射入空氣層中時，將離法線而彎折，射出時將向法線而彎折。一切之理論皆仍舊。

440. 平行平板上干涉光線強度之關係。 吾人今當計算 J 與 J' 二光線之強度，其值姑即以 J 與 J' 二字母表之。命 1, 2, 3 等一切入射光線之強度皆等於 J_0 。又命光線每遇界面一次，其反射而出之光量在原光量中所佔之分數為 ρ 。此項分數對於二界面皆為相等。於是透過薄板後所剩之光量為 $1 - \rho$ 。試以光線 2 為例。其原來之強度為 J_0 。到達 B 點時其因依短箭矢（第 419 圖）所示之方向而反射所損失之能量為 $J_0\rho$ 。進入板中一部份光線之強度於是僅為 $J_0(1 - \rho)$ 。至 B' 點又行反射，其強度又減弱至所餘值之 ρ ，故在 $B'A$ 路程中之強度僅為 $J_0(1 - \rho)\rho$ 。至 A 點向外射出，更行減弱至此時所餘值之 $1 - \rho$ 。故 J 中所含來自光線 2 之一部份僅為原來強度 J_0 中所剩餘之 $J_0(1 - \rho)^2\rho$ 。同理，可算出 J 與 J' 二光線中所含來自 1, 2, 3

等各光線之部份之強度。此可以 J_1, J_2, J_3 及 $J_1 J_2 J_3$ 等表之。於是得：

$$\begin{aligned} J_1 &= J_0 \rho, J_2 = J_0(1-\rho)^2 \rho, J_3 = J_0(1-\rho)^2 \rho^3, J_4 = J_0(1-\rho)^2 \rho^5, \\ J_1 J_2 J_3 &= J_0(1-\rho)^2, J_2 J_3 J_4 = J_0(1-\rho)^2 \rho^2, J_3 J_4 J_5 = J_0(1-\rho)^2 \rho^4, J_4 J_5 J_6 = J_0(1-\rho)^2 \rho^6, \end{aligned} \quad (4)$$

按諸光之電磁說，在此處所述光有相干性之情形中， J 與 J' 二光線之強度不應以來自 1, 2, 3 等各光線之部份之強度相加而得，而應取各強度之方根，且須注意方根之正負，其能增強該光線中所含之最強一部份者為正，減弱之者為負。將各方根之和平方之，即得該光線之總強度。（此蓋因光之強度正比於光振動振幅之平方。欲求不同之光振動強度之和須先將其振幅相加。總強度仍正比於總振幅之平方。）從此可得 J 與 J' 二光線之強度如下。（此處可視為有無限數之光線入射板中。）

I. 反射光線中增強最烈時之情形。前於 § 439 中曾述 J 光線中來自 2, 4, 6 等各光線之部份將光線 1 之部份增強，3, 5, 7 等部份將 1 減弱。故

$$\begin{aligned} J &= (\sqrt{J_1} + \sqrt{J_2} - \sqrt{J_3} + \sqrt{J_4} - \sqrt{J_5} + \dots)^2 \\ &= J_0 \rho [1 + (1 + \rho)(1 - \rho + \rho^2 - \rho^3 + \dots)]^2 \\ &= J_0 \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \end{aligned}$$

在 J' 光線中來自 1, 3, 5 等各光線之部份彼此增強，來自 2, 4, 6 等者亦彼此增強，而此二羣則互相減弱，故

$$\begin{aligned}
 J' &= (\sqrt{J_1} - \sqrt{J_2} + \sqrt{J_3} - \sqrt{J_4} + \dots)^2 \\
 &= J_0(1 - \rho)^2(1 - \rho + \rho^2 - \rho^3 + \dots)^2 \\
 &= J_0 \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2
 \end{aligned}$$

吾人不難從此證明 $J + J' = J_0$, 此自屬意中之事, 蓋能量決不自行消滅, 就全體自薄板射出之光線視之, 每一入射之光線皆各分裂爲一反射及一透射之光線。

II. 反射光線中減弱最烈時之情形 按 § 439 所述, J 光線中來自 2, 3, 4 等部份一致將 1 之部份減弱。故

$$\begin{aligned}
 J &= (\sqrt{J_1} - \sqrt{J_2} - \sqrt{J_3} - \sqrt{J_4} - \dots)^2 \\
 &= J_0 \rho [1 - (1 - \rho)(1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots)]^2 \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

在 J 光線中來自一切光線之部份作用悉同, 故

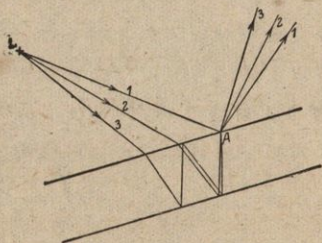
$$\begin{aligned}
 J &= (\sqrt{J_1} + \sqrt{J_2} + \sqrt{J_3} + \sqrt{J_4} + \dots)^2 \\
 &= J_0(1 - \rho)^2(1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots)^2 \\
 &= J_0.
 \end{aligned}$$

此時反射光線完全消滅, 而入射光線全部之強度悉遺於透射光線中。自以上諸式可見反射光之強度視入射角之大小而異, 其值可自入射強度 J_0 之 $4\rho/(1 + \rho)^2$ 變至 0。其相對的強度差可爲極大, 或竟可謂爲達於無限大。就透射光言之, 其強度最小與最大二極限情形之比爲 $\left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho}\right)^2$ 。在大多數實際所遇之情形中, ρ 輒爲一頗小之數, 例如關於玻璃

者其值約等於0,025. 故 J 之變化約在 0 與 $0,1 \cdot J_0$ 之間, 而 J' 則在 $0,9 \cdot J_0$ 與 J_0 之間. 對於反射光線最明亮與完全黑暗之變化而言, 在上例中透射光線明暗最大之變化僅約及其 10%. 故反射光線之干涉現象遠較透射光線者為明顯. 例如觀察肥皂之薄膜即可以知之. 僅於反射光中方得見其干涉之彩色. 於透射光中觀之, 則幾為無色.

ρ 之值恆為頗小, 自 (4) 式可見僅有 J_2 之強度數量級與 J_1 相若. 干涉現象之發生也, J_1 所受於 J_2 之作用者獨多. 基於此事, 通常觀察此項現象時, 僅取用此二光線已足, 縱尚有其他遠較此為微弱之部份, 亦可略去不計.

441. 平行平板內之 Fresnel 氏式干涉現象. 吾人今當另行討論一種情形, 光源在一有限距離, 自其各點射出之光線向各方發散, 而以不同之入射角達於薄板. 此處所遇之現象與光線平行入射時原理上根本不同. 命 L 為一點狀光源, 或一廣大之光源表面上之一點 (第 420 圖). 試觀察



第 420 圖 平行平板中之 Fresnel 氏式干涉現象

來自 L 而由薄板上表面一點 A 射出之光線。吾人可見自 A 點發出之光線中恆包含來自一定不易之 1, 2, 3 等諸光線之部份, 此等之光線自 L 而來, 遇薄板而反射或折射以達 A 點, 其所歷之光程長短不等, 故亦有光程差, 一如前在平行光線中所述者。但此等之部份並不合成單獨一條之光線, 而組成一有限開角之光線束。吾人注視 A 點時, 此等光線即相交於眼中之網膜上而成 A 點之像, 其像或為明亮或為黑暗, 視 1, 2, 3 等各光線部份由 A 點出發時相常數 (光程差) 之關係而定。此諸光線相交之 A 點處事實上已有干涉現象發生, 其情形恰與 Fresnel 氏雙鏡實驗中相交之光線無異 (§ 438)。按 § 440 之結論, 吾人祇須注意 1 與 2 二光線之作用已足。光源之距離遠較板之厚度為大者, A 點處出現干涉現象之條件與平行入射時在反射光中所見者完全相同 (§ 439, 3 式)。

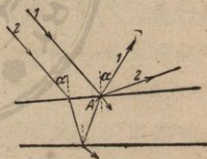
若遇廣大之光源而眼之位置維持一定, 則自光源面上各點發出之諸光線各以不同之入射角 α 射於板上。試觀察板面, 則板面上入射光線因干涉而互滅之位置與互助之位置更迭變換, 某處應為互助, 某處應為互滅, 隨光源與吾人之眼以及板面三者間之相對位置所定出之 α 角而異。

此種干涉現象所引起之印象係由二方向而來。一方面吾人所注視者為光源本身在板中之鏡像, 其位置在板面之下方, 可以反射定律定出之。第二方面吾人所見者為若

干之干涉條紋；若用單色光，則見明亮之光源像上蔽有黑暗之條紋。但此種條紋位置係在板面上而非在光源中，蓋干涉發生之處確係在板之表面，干涉之光線係由此向各方發散而達於吾人之眼也。試移近眼之位置，則終將不再能調節吾人之眼以察見板面上之現象，然遠處光源在板下之像仍見清晰如故，是知干涉現象事實上確生於板面本身之上。

光源不為單色光時，復見彩色現象，尤以遇白色光時為然，其情形完全與 § 439 所述者相同。

442. 尖劈形薄層物質內之干涉現象。Newton 氏干涉圈。設有平行光線照射於一略作尖劈形之薄層折射性物質上，其二界面均為平面（第 421 圖）。試觀察此層表面上之一點 A 。除在薄層中反射二次以上之光線不計外（參閱 § 440 末段）離 A 點而出之光線中僅包含來自入射光線束中一定不易之 1 與 2 二光線之部份，即光線 1 直接反射之



第 421 圖 尖劈形薄層物質中干涉現象之說明

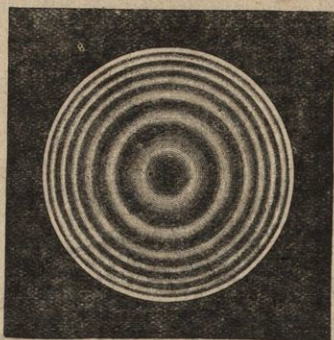
部份，與光線 2 二次折射及在層內一次反射之部份是。因薄層作尖劈形，故此二部份不以同方向自 A 點出發，如平行光線射於平行平面之薄層時，然而自該點向各方發散。在反射光中所見之現象，與有限距離之光源對於平行平板之情形相同 (§ 441)。吾人可見此二光線在 A 點處發生干

涉，或互助，或互滅，一視其相常數之關係（光程差）而定。干涉現象發生之處亦在薄層之表面上。

尖劈之厚度與頂角若均為頗小，則 A 點處究為明亮抑為黑暗之條件亦與平板同（§ 439, 3 式）。此時薄層之厚度 d 隨處而異，故互相干涉之二光線之光程差亦隨處而異。入射之光線若為平行之單色光，則吾人可見一組明暗相間之條紋。尖劈之頂角愈小者，此種條紋彼此間之距離，亦即其闊度愈大。同一條紋經過之處，尖劈之厚度必相等。故此項現象稱為等厚干涉。

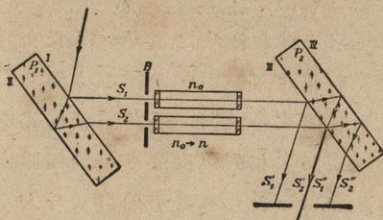
有所謂 Newton 氏彩色圈者（實為 Boyle 氏所發見，後經 Hooke 與 Newton 二氏詳加研究之）為此項干涉現象之一種特例。一平面玻璃板上置有一彎曲頗微之透鏡，光線經過其間之空氣層時，即現此象。此空氣層之各扇形段均可視作尖劈形。故用單色光時所見者為明暗相間之一組同心環，其公共圓心為板與透鏡之接觸點。接觸頗密時，接觸點最近之一圈空氣層厚度最小，故在反射光中所見者為一『黑斑』（§ 439）。空氣層之厚度愈向外而愈增，明暗環之闊度因之愈向外而愈減（第 422 圖）。

若用白光，則有彩色之干涉圈出現。此彩色之來係由於各處各有一定之波長因干涉而消滅，白光中既缺該色，其互補色即於各該處出現所致，正與肥皂泡上所見之彩色相同。



第 422 圖 反射光中所見之 Newton 氏干涉圖

443. 干涉儀. 干涉儀係基於相干性光線之干涉作用而製. 茲以 Jamin 氏之干涉儀為例而說明之. 二物質之折射率有極微之差別, 或同物質之折射率有極微之變化, 均可藉以測量之; 此即為干涉儀用途之一. 其構造之主要部份為二磨琢極精之平行平面玻璃板 P_1 與 P_2 , 二板互相傾斜一非常微小之角度, 在第 423 圖中不能示出. 射於 P_1 之 I 面上之光線分裂為反射與折射之二部份 S_1 與 S_2 , 其後按圖中所示之方向到達 P_2 之 III 面時, 又復分裂如前. 故自一入射之光線可得相干性光線四, 其 S_1 與 S'_2 二者以光闌遮蔽之. 其自光闌之孔射出之二光線 S_2 與 S'_1 會合於一處; 苟二板絕對互相平行, 則自第一次分裂後以迄此處二光線所經之光程相等 (儀器之其餘部份茲暫略不計). 但



第 423 圖 Jamin 氏 干涉 儀

二板略有傾斜，故該二光線所經之光程長短略有不同，且其進行之方向亦彼此略相傾斜，猶如在 Fresnel 氏雙鏡實驗中自二虛光源發出之二光線然。故光闌中即見一組干涉之條紋，恰與該實驗中所見者相同。干涉條紋之位置視光程差而異。設於 S_1 與 S_2 二光線之路程中各置一等長之管，管中滿儲以相同之物質（折射率 n_0 ），例如空氣，則因管為等長而光程差以及干涉現象均不因此稍變。一管中之折射率設以任何原因，例如由於壓力之改變而逐漸由 n_0 變為 n ，則光程差亦隨之改變，其結果干涉條紋遂因之而遷。自移過距離之多寡可算出折射率之變遷值。

用任何其他方法以變更其一管中之光速時，其作用恰與變更其折射率亦即變更其光程無異。例如二管中儲以相同之液體，一管中之液體靜止，而令他管中之液體流動。吾人自可預料液流之方向與光之前進向相同時，光速將增，反之則減。故前者之情形等於縮短其光程，後者之情形等

於延長其光程。此所謂光之隨進值(Mitführung des Lichts)者之大小即可以干涉儀測量之。Fresnel 氏由實測所得所謂隨進係數之數量的意義在相對論中方得其說明，而即為相對論最重要基礎之一 (§ 536)。此處祇能述其結果，即光線對於其周圍空間之相對速度並不等於液體之流速與光速二者之代數和，但恆較此和為小，殊出於吾人意料之外。

茲於其他干涉儀中再述一種，稱為 Lummer 與 Gehrcke 二氏式者(第 424 圖)。欲研究之光線自左方穿過直角玻璃稜鏡而射入一精確平行平面之玻璃板，光線遇其界面時，一



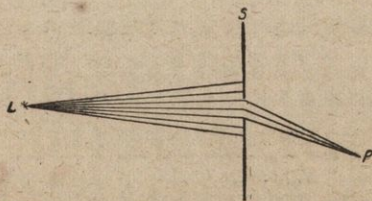
第 424 圖 Lummer 與 Gehrcke 二氏干涉儀

部份向外折射，一部份仍在板內反射(參閱 § 439)。若此則自一光線可分成一束平行而相干之光線，此種光線彼此間之光程差且為頗大，吾人不難於圖中察見之。離板射出之角度視波長而異。此等平行光線穿過透鏡後悉相交於其焦面。此種干涉儀最要之用途在光譜線精細構造之研究。

444. 光學中之 Huygens 原理。光之繞射。前於 § 136 中所述之 Huygens 氏原理，在光學中之應用，恰與其對於其他之波動同。在光學中，其意謂空間內凡為光線所遇之各點

皆可視作新出發點，光線由此向其周圍之空間發射。光線前進時苟不遇任何物體，即或遇一物體，或穿過一孔隙，而物體或孔隙之大小遠較光之波長為大者，光線恆以直線進行，蓋自空間一點所發出其他一切方向上之光線悉被自空間他點所發出之光線所消滅，而餘剩者僅為此直線前進方向上之光線。欲使光線產生繞射現象 (§ 137)，則所用物體或孔隙之大小須與光之波長相埒。按光源位置之遠近，繞射現象亦可分為 Fresnel 氏式與 Fraunhofer 氏式二種 (§ 437)。

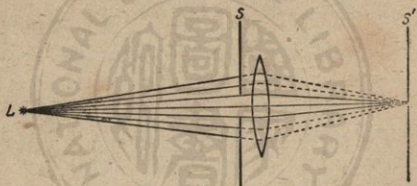
445. Fresnel 氏式繞射現象。設有一理想的點狀光源 L 與光屏 S 相隔一某距離，光屏之上有一頗小之圓孔（第 425 圖），其直徑與自 L 發出之光線之波長不甚懸殊者。按 Huygens 氏原理，此小孔可視作光源，由此向各方發射光線。但此光源與真正之發光體有別，蓋自小孔中各點發出之光線皆係來自同一之點狀光源 L ，彼此有相干性；而能發生干涉。試觀察小孔後方空間內任意一點 P 。自小孔中各點所發出之一切光線皆相交於該處，此等之光線咸自 L 而來，



第 425 圖 小孔中之 Fresnel 氏式繞射現象

穿過小孔而達於 P 點,其所歷之光程長短各有不同,故 P 點處光之作用須視各光線由於其光程之差以致平均的互助抑或互滅而定。此項作用到處不盡相同,隨 P 點之位置而異。在小孔後方之空間內某一指定之方向上,例如在一平行於 S 之平面上,其亮度每作週期的變化。

最佳者可先用一透鏡將光源射一清晰之實像於光屏 S' 之上,然後將繞射小孔插入光源與透鏡之間(第 426 圖)俾此項現象得為吾人所目觀。實驗時輒以一弧光燈或他



第 426 圖 Fresnel 氏繞射現象之產生

種之燈照射一狹縫,作為光源,而以與此平行之另一狹縫作為繞射小孔。插入此第二狹縫以後,光屏 S' 上所見者不再為第一狹縫清晰之像,而為多寡稍帶模糊之若干條紋彼此平行,其亮度自中央向兩方逐漸減弱。若自光源發出之光為單色光,則繞射像明暗相間。若光源發出白光,則所見者為各種彩色之條紋,此亦由於各處各有某種一定之光色部份因干涉而消滅,以致其互補色在各該處出現所致,與薄層物質表面上所見之彩色 (§ 439) 同。

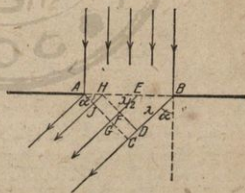
若不用狹縫而易以一極狹之障礙物，聳峙於光路之中，則亦得相應之現象。此時障礙物並無清晰之影，而仍為稍帶模糊之若干明暗（或彩色）條紋（第 427 圖）。光線遇一障礙物時所生之繞射現象恆與穿過一形狀大小與之完全相同之孔隙時所生之現象相同（Babinet 氏定理）。



第 427 圖 毛髮周圍之繞射

446. Fraunhofer 氏式繞射現象。照射於繞射物體之相干性光線若彼此平行，且用一透鏡使自繞射物體出發之平行光線重行相交於一光屏之上，則繞射之情形遠較前者為簡單而易於觀測（Fraunhofer 氏式繞射現象，第 428 圖）。

平行光線垂直射於狹縫之平面上時，該面上到處光線之相常數皆為相等。試於狹縫 AB 之後方取出一束光線而觀之，其與入射之方向成一



第 428 圖 Fraunhofer 氏式繞射現象之產生

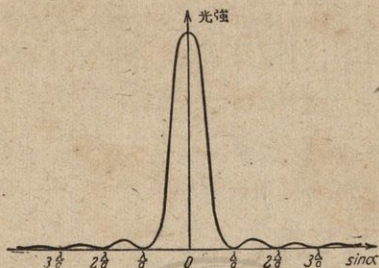
α 之交角。作垂直平面 AC ，則光束中各光線在此平面上之相常數不再相等。此蓋因光線自狹縫平面至 AC 平面所歷之光程不等，故當有相常數之差出現。例如命 BD 等於光線之波長 λ ， EF 等於 $\lambda/2$ ，則經過 C 與 G 之二光線

間即有一光程差等於 $\lambda/2$; 吾人若以任何方法使此二光線相交於空間之一點, 則此二者即互相減弱而消滅。同理, 在 BC 與 EG 二直線之間每有一光線, 恆可於 EG 與 HJ 二直線之間覓得一相應之光線, 合於上述之情形。若於光路中置一透鏡使此等平行光線會聚於一點, 則此二理想區域中之一切光線彼此皆因干涉而消滅, 其留存者, 僅為 A 點與 HJ 直線間一區域內光線之作用而已。傾斜愈大者, 光線互相消滅之區域愈廣。故在某方向內, 其經過 A 與 B 之邊緣光線之光程差凡等於波長之整數倍者, 光線必悉因干涉而消滅。蓋此時不再有光線尚未消滅之區域 (AH); 此方向內任一光線咸有一相應之第二光線, 其到達 AC 平面時光程相差 $\lambda/2$ 者為之伴。自第 428 圖可見此種方向當以下列之條件決定之:

$$\sin \alpha = \frac{z\lambda}{a} \quad (5)$$

式中 $x = AB$, 即隙縫之闊, 而 z 為任意之整數。在光線入射之方向 ($\alpha = 0$) 內, 各光線自必互助最烈, 蓋光線之沿此方向前進者, 在與之垂直之一切平面上, 其相常數皆為相等也。故光線穿過狹縫時亦以直線前進, 其光且較其他任何方向上者為強。第 429 圖示一狹縫繞射像中亮度之分配狀況。

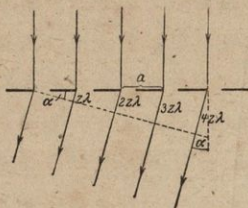
自(5)式可見波長愈長者, 偏向角 α 亦愈大。故在可見光之範圍中, 紅光偏向最大, 紫光偏向最小。 z, α 與 a 三值均易量出, 故可從狹縫中繞射之現象以測定所用光線之波



第 429 圖 單色光在狹縫中繞射時亮度之分配狀況

長 λ 。用白色時，各色之光皆生繞射像，彼此重疊而成彩色之帶，與 Fresnel 氏雙鏡實驗中所見者同。吾人輒按(5)式中 z 之數值而別之為第一第二等等各級干涉。

447. 光柵中之繞射。光線之經過一狹縫而發生干涉者恆為同一光束中之若干相干性光線。用繞射光柵(Fraunhofer 氏, 1817) 時則不然，此時所見者乃為許多極狹之光束間之干涉，其一切之光束彼此皆有相干性者。通常之繞射光柵皆為一平行平面之玻璃板所製，其一面以金剛鑽刻成無數精細之平行裂痕，每[毫米]內可達 2000 條。每二刻痕間或留存一條絕狹之玻璃面，光線僅可由此通行無阻，遇裂痕時即被分散而向各方漫射。故此種之光柵有似無數絕狹而平行密列之隙縫(第 430 圖 a)。〔此種光柵亦可用簡單之照相法以複印，或用膠棉(Kollodium)薄膜以重摹，但均不若原刻光柵之精美。〕光柵亦可刻於金屬凹面反射鏡之上，



第 430 圖 a 光柵中繞射之說明

光線射於刻痕間之狹條金屬面上時即起單向反射，其作用與玻璃光柵之平面部份同。光柵之作凹面形者，更有一特具之優點，即以光柵攝取光譜之像時可免用透鏡。

光柵之繞射現象，最重要者當推 Fraunhofer 氏式；以平行之相干光線照射於光柵之上，而自其後方觀察由此射出之平行光線；為易於觀察其干涉現象計，須以透鏡令其會聚於一點。自入射之諸光束中試各提出一對應之光線觀之，例如第 430 圖 a 中靠各狹縫左邊之諸光線。按 Huygen 氏之原理，各光線穿過玻璃板後，向各方傳播，如穿過一單獨之狹縫然。吾人可觀察自各狹縫向任一指定方向射出之光線。由光柵上相鄰二狹縫射出之光線在指定方向上之光程差苟為其波長之整數倍 (z 倍)，則二光線互相增強最烈。此二光線若能合於此項條件，則自各狹縫——假設各狹縫之闊度皆為相等，且光柵距離 a 亦皆相等——在同方向內射出之其他一切光線亦必合於此項條件。自第 430 圖 a 可見互助最烈之方向當以下式為條件

$$\sin \alpha = z \frac{\lambda}{a} \quad (6)$$

式中 a 爲相鄰二狹縫中二對應點間之距離，即所謂光柵常數者是，而 z 爲任意之整數。按 z 之數值而干涉有第一第二各級之分。關於繞射光柵嚴密之理論此處不及備述，由其結論可知光柵中刻痕爲數愈多者，穿過之光線強度愈能按(6)式所示之方向集中。故若用單色光，而以透鏡將各光線會聚之，即可得清晰之光譜線。用白光，則得純光譜色之光譜。

吾人應注意由光柵發生之干涉現象完全與用一單獨狹縫時不同。(5)(6)二式形式雖同，然由單獨狹縫之(5)式所定出之方向相當於互滅最烈，而由光柵之(6)式所定出之方向則相當於互助最烈，且 a 在(5)式中爲狹縫之闊度而在(6)式中則爲光柵常數。

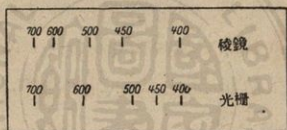
光柵之後，若有一種折射率爲 n 之物質存在，則因(6)式中之 λ 示真空內之波長，故 λ 應以該物質內之波長 λ/n 代之 (§ 436)，於是其條件應爲

$$\sin \alpha = \frac{1}{n} \frac{z\lambda}{a} \quad (7)$$

自細網性之物質觀察近似點狀之光源，例如由雨傘中遙望遠處之路燈，輒見有光譜色出現，蓋亦以光線經過雨傘布孔時之繞射故也。有所謂格子光柵者，於玻璃板上刻有二組互相垂直之裂痕而成；雨傘布孔之作用，與此無異。

用一繞射光柵亦可攝取一光源之光譜照相，如用稜鏡

然。光譜之級數愈高者，色之分散愈甚，即對於指定波長差之二光譜線相離愈遠。實際上偏向 α 之值恆為頗小，故(6)式可代以 $\alpha = z\lambda/a$ 。是知光線穿過光柵時之偏向正比於波長，而稜鏡光譜則不然(第430圖b)。故光柵光譜亦稱勻排光譜。若光柵常數 a 為已知，則自一光線偏向 α 之值即可計算光線之波長。自(6)式可知 λ 愈大者，其穿過光柵時偏向亦愈大，適與稜鏡光譜相反。在可見光之區域中，紅色偏向最大，紫色最小。



第430圖b. 稜鏡光譜與光柵光譜之比較。波長之單位為 $[m\mu]$ 。兩種光譜400及700 $[m\mu]$ 之二譜線在圖中互相重合

用刻痕光柵時，光之強度恆頗微弱，故第三級以上之光譜幾已隱滅不見，且級數愈高者，彼此重疊亦愈甚。若用階級光柵與 Lummer-Gehrcke 二氏干涉儀 (§443)，則可得級數頗高之干涉現象。此二者皆有一公共之點，即一束光線中之各部份在玻璃中所歷之路程長短大不相同，藉此可得頗大之光程差。

光柵之色散率與鑑別率須加以區別。對於任意二波長之 α 角相差愈大者，吾人謂其色散率愈大。所謂鑑別率

者，係指光柵究能將相差若干之二鄰近光譜線分散後仍可辨認者而言。故其值隨色散率而異。不特此也，鑑別率且與光譜線之清晰與否有關。蓋二鄰近之光譜線苟均為頗闊，則色散率雖同，而該二線仍可重疊。光柵之刻痕為數愈多者，光譜線愈為清晰。故光柵之鑑別率又以此數之大小為斷。

光柵光譜之強度通常隨其級數之遞增而減弱頗速。但吾人可選擇光柵刻痕適宜之橫截形狀（溝渠形）以使某級光譜之強度特見顯。

448. 微粒物質上之繞射與散射。光線遇有微細之障礙物，其大小堪與光之波長相匹者，輒亦發生繞射現象，固不僅於穿過小孔時為然也，前已於§ 445中言之矣。煙霧迷漫中所見之物體每不能清晰，大抵皆可以此說明之，而有時所見日月之『暈』亦係由於高層大氣中精細之冰針上所起之繞射現象所致。任何微小之物體能引起繞射作用者，輒現一所謂繞射影（繞射小圓片），蓋謂其所射之影邊緣不能清晰。於其影所在之處恆見一組不清晰而明暗相間之小圈。

光線遇大小約與光波波長相仿之微粒物質時發生繞射，若遇更小之微粒，則生散射；二者當加區別，蓋散射者，光線離其原來之方向而偏折，其各偏折光線彼此之相常數間無一定之關係，而不能激起干涉之現象。

氣體之分子亦足使光線散射，波長愈短者，散射愈甚。

天色蔚藍，即以此故。大氣之中，陽光普照，藍光之波長最短，其偏向最甚，遠非波長最長之紅光所能及。故大氣中為陽光所照射之各分子皆可視作藍光之出發點，而彼穹窿者遂覺蒼蒼無際矣。太陽接近地平線時，其光線在大氣中所經之路程特長，其藍色之成份因散射而消失大半。故太陽出沒時，似覺其色較紅，大氣中繞射微粒（塵埃煙霧）愈多者，其色愈紅。

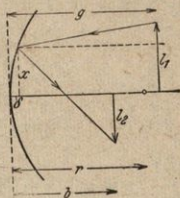
試以透鏡射一明亮圓形光闌之像於光屏之上，而於光闌與透鏡之間插入一噓氣於其上之玻璃板，或更佳者，插入一滿佈石松粉之玻璃板，則像中所見者與日月之暈無異。

許多之物質視之似覺朦朧翳隱，蓋亦因有足以引起繞射或散射之微粒存在其中故也。

449. 光像之波動說，顯微鏡中之繞射，超顯微鏡。欲物體上之一點在空中之另一點處造成一像，須使自第一點發出之相干性波列同時相交於該點。此外復因波列之長度有限 (§ 437)，故諸波列以不同之路徑到達此第二點時所歷之光程亦須相等。前在 § 414 中，曾以此為透鏡作用之主要特點。至此，始能根據波動說以說明之。茲僅述一最簡單之例，即凹鏡成像之情形。此例中並無折射性之物質存在，光程即等於幾何路程，故特見簡單。

第 431 圖示一凹鏡將實物 l_1 造成 l_2 之像。試觀察箭頭尖端一點成像之情形，任意取一自此尖端發出遇鏡面反

射而到達像之尖端之光線。命 b 與 g 各為實物與像之足點至鏡面頂點間之距離， r 為鏡面之曲率半徑。命鏡面上之反射點至鏡軸之垂直距離為 x ，其與鏡面頂點之切面間之垂直距離為 δ 。按前於 § 407 中所述之限制， x 較之 g ， b 與 r 當為頗小，而 δ 則更較此為小。於是自圓之幾何特性，按簡單之計算，知 δ 與 $x^2/2r$ 幾屬相等，頗為近似。



第 431 圖 以波動說解釋凹鏡成像之理

自第 431 圖可得下述之事實。自箭頭尖端發出之一切光線經過相等之光程而達於另一點之條件，在球面鏡中決難覓得。基於橢圓之已知特性，僅當鏡之截面為一橢圓而二箭頭尖端適位於其二焦點時，此項條件方能滿足。但此時仍有困難發生，蓋鏡面之頂點自必固於定位，實物與像之二點位置每有變易，則橢圓之形狀與其軸向均須隨之而變。故球面鏡之成像必不能完善。鏡面為球面上愈小之一部份者，所成之像愈可完善，蓋此時愈與一旋轉橢圓面相近似也。物體在鏡軸上無限遠，或在鏡面之焦點時，若欲求完善之像，則鏡之截面須為拋物線。

今試計算第 431 圖中所示光程 s 之值。此為

$$s = \sqrt{(g - \delta)^2 + (l_1 - c)^2} + \sqrt{(b - \delta)^2 + (l_2 + x)^2}$$

按上述之假設， $l_1 - x$ 與 $l_2 + x$ 均遠較 g 與 b 為小。展開之

使成一級數，僅取二次以下之項，其他諸項凡與極小之 δ^2 相乘者均略去不計，則得

$$s = g - \delta + \frac{(l_1 - x)^2}{2g} + b - \delta + \frac{(l_2 + x)^2}{2b}$$

以 $\delta = x^2/2r$ 代入，則

$$s = g + b + \frac{l_1^2}{2g} + \frac{l_2^2}{2b} - x \left(\frac{l_1}{g} - \frac{l_2}{b} \right) + \frac{x^2}{2} \left(\frac{1}{g} + \frac{1}{b} - \frac{2}{r} \right).$$

但自實物尖端發出之一切光線遇鏡面而反射再到達像之尖端時所歷之光程均應相等。其意蓋謂 s 應與 x 無關。是則上式中括弧內之二式各與 x 及 x^2 相乘者均應為零。於是

$$(1) \quad \frac{l_1}{g} = \frac{l_2}{b}, \quad (2) \quad \frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f}.$$

此(1)式示凹鏡之放大率〔§ 407, (9)式〕，而(2)式示物距與像距之關係〔§ 407, (7)式〕。故凹鏡成像之定律，完全可以波動說證明之。透鏡成像之定律亦然。

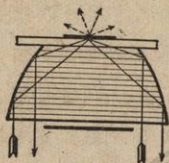
像之生成，不僅光程須為精密相等時方為可能，普遍言之，祇須相干性之波列能在像點處同時相遇，即光程雖稍相差，而其差值小於一波列之長者，亦能成像。但除光程差適為波長整數倍之情形以外，通常各光線輒以相常數之相差而發生干涉，以致光強之一部份或竟全部因之互相消滅。故物體表面上一點之像實際上不僅限於空間內之一點，而

該點之周圍恆密接的繞以一羣同心之干涉圈，此種干涉圈之亮度隨距離而遞降，且遞降極速。此即爲繞射影。前於望遠鏡中恆星成像之一節中已提及之 (§ 425)。

以光學儀器觀察物體之結構時，其尙能爲吾人所鑑別之最精細結構之大小恆以其繞射影（繞射小圓片）之大小爲極限。其詳情不能於此處備述，茲僅述一較爲簡單之思想已足。假設將 § 447 所歷之一種繞射光柵置於一顯微鏡之下。欲使此物體之結構在鏡筒中生一實像，則除穿過光柵未經繞射之中心光線以外，至少尙須有第一級繞射之光線進入顯微鏡之物鏡中。若光柵常數頗小，則光線之偏向必頗大，而此已爲不可能。此時顯微鏡中將不見光柵結構之像，換言之，吾人已不能鑑別其結構。以顯微鏡觀察其他物體之結構時，其理亦同 § 426 所述顯微鏡鑑別率之極限即以此事爲斷。若於物體與物鏡之間置以一種折射率 n 頗大之物質（浸漬液體），則按 § 447, (7) 式，偏向角可因之減小，而更精細之結構猶得藉以鑑別。§ 426 中關於數字孔徑之式今以 (7) 式比較之，當可瞭然矣。

遇有極小之物體，如某種之微生物，膠體金溶液中之金粒等，作 Brown 氏運動 (§ 159) 時，其形狀體態雖不能在顯微鏡中有實像出現，但至少可設法察見其位置。照射物體之光線在尋常情形中原係直立向上者，今使之由下方斜向強烈照射於物體即可。第 432 圖所示者即爲此種之裝置，光

線由下方傾斜頗甚而達於物體。若此，則進入顯微鏡中者非爲中心光線及低級繞射之光線，而爲高級繞射之光線，此等之光線相靠較密，遠非前者所能及。尋常之顯微鏡中已



第 432 圖 暗視場照
亮法所用之聚光器

不能察見之物體——其最低限度約爲 $4 \cdot 16^{-6}$ [毫米]——此時猶可見其爲暗地 (暗視場) 中明亮之圓形繞射影，視物體大小之不同而現不同之彩色。顯微鏡之有此種裝置者稱爲超度顯微鏡。

450. 光之駐波. Wiener 氏嘗設法產生光之駐波，如聲之駐波 (§ 143) 然。氏所用者爲一透明而和有溴化銀之膠片，置於一水銀表面之上，以平行光線照射之，使光波遇水銀面而反射。入射波與出射波互相干涉而成節與腹；溴化銀膠片經過顯像手續後，試取其橫截面之一片而置於顯微鏡下以窺之，即見明暗相間之條紋。

451. 光之 Doppler 氏效應. 光波亦有 Doppler 氏效應，與其他之振動同；光源對於觀察者運動時，光線之頻率即因之而變 (§ 129)。此項效應由光源之光譜線向紅或紫一端之移動以顯示之，其強弱視光源運動之速度 v 與光線傳播之速度 c 二者之比 v/c 而定 (參閱 § 534)。故光源運動之速度若每秒不及數 [仟米]，則其效應不能爲吾人所目覩。地面上廣大之光源決不能達到若此之巨速。但陽射

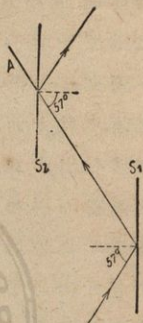
線 (§ 292) 中發光之原子速度極大，故其光譜線之移動可以察見。Stark 氏且發見發光原子之熱運動可使其光譜線變為模糊，此亦為 Doppler 氏之效應。質量最小而運動最速之氫原子所示之此項效應最為清晰。

天文學中，恆星光線之 Doppler 氏效應極屬重要。恆星之速度特大而在天空中位置之遷移能在一較長之時間內直接量出者，為數極鮮。但在許多情形中，因恆星對於地球之運動而引起光譜線之遷移則皆不難測出。惟有效者僅為恆星與地球連線之分速度（沿輻分速度）。恆星光譜中各元素光譜線之位置與地面上靜止光源之光譜中同元素光譜線之位置相較，輒見其或向紫色一方，或向紅色一方而移動；此係視恆星之運動究係向地球抑或背地球而定。利用此法，吾人因見有許多恆星光譜線之移動作週期變化而知其必為互相旋繞之雙星。

藉 Doppler 氏效應之助，最近嘗發見一極有趣味之事實，即銀河以外有所謂河外星雲者，其本身亦皆為銀河系，悉背吾人而運動，其離吾人愈遠者速度愈大（Hubble 氏效應）。自地面上測之，其速度竟有達每秒 10000 [仟米] 以上者。

452. 由反射而生之偏極。今當討論光波究為縱振動抑或為橫振動之問題。前於 § 137 中嘗述此項問題應取決於振動之能否偏極。下述之現象首為 Malus 氏 (1808) 所發見。因知光為橫波。

設有光線以入射角 57° 照射於一平面玻璃板 (冕牌玻璃) S_1 上, 自此反射至另一玻璃板 S_2 ; 此第二板可繞 A 軸而轉動, A 軸之方向與該板上入射光線之方向相同. 自第一板反射而來之光線不問第二板轉至何處, 始終恆以 57° 之入射角射於其上 (第 433 圖). 自第二板反射之光線可用光屏以承之. 將第二板繞 A 軸而轉動, 光線之入射角始終維持 57° , 其反射光線因之沿一錐面而移動, 但光屏上所見之光斑明暗時有不同, 二玻璃板互相平行, 或第二板自



第 433 圖 反射偏極之證明

此平行位置轉過 180° 時, 光斑最亮. 若將第二板自其平行位置向任何一方轉過 90° , 則光斑消滅, 此時射於第二板上之光線已不復能為其所反射. 由此可知光線在第一玻璃板上反射後必已發生變化. 不特此也, 此種光線之變化必為僅有橫振動所能發生之變化, 一如前在 § 125 中所述關於力學之例然. 蓋此實驗中之第二玻璃板相當於一裂縫狀之紋型, 其對於光線入射向之方位雖始終不變, 但當其繞此方向而轉動時, 其影響於光線之傳播者可大不相同. 入射光線遇玻璃面而反射之一部份蓋已發生直線偏極, 換言之, 反射後其振動僅限於某一定平面以內. 第一玻璃板之入

射面(任 的)稱爲偏極面。故自第一玻璃板反射之光線,僅爲入射光線中之一部份,其偏極面與入射面相合者。未爲第一板所反射之光線即透板而過。此部份之光線中除振動方向垂直於入射面之一部份外,尙含有其他之部份,惟爲量甚微。此種之光線稱爲部份偏極。若用許多之玻璃板一一疊置成堆(玻璃堆),則透射(折射)之光線亦可使之逐漸變爲直線偏極。

上述之實驗中,二板互相平行或由此轉過 180° 時,投射於第二板光線之偏極面與其入射面相合,故能反射;但在與此垂直之二位置時,入射光線中毫無偏極面與入射面相同之部份,故不能反射。第一玻璃板稱爲起偏鏡,第二玻璃板稱爲檢偏鏡。

由此實驗可知光爲橫振動。

57° 之角度稱爲玻璃之偏極角。光線以其他之角度入射時,僅起部份偏極,或稱橢圓偏極。偏極角隨折射率 n 而異。Brewster 氏曾證明在完全直線偏極時,反射光與物質中之折射光恆互相垂直。故(第 434 圖) $\alpha + \beta = 90^\circ$, $\sin \beta$

$= \cos \alpha$, 又按 § 409, $\sin \beta = \frac{1}{n} \sin \alpha$, 得

$$\operatorname{tga} = n. \quad (8)$$

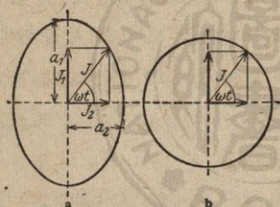
453. 橢圓,正圓及直線三種偏極光線。按 § 452 所述,光線可視作一向量——光向量——,垂直於光線前進之方向。



第 434 圖 Brewster 氏
定律之說明

自然光之強度常定不變者，此種向量之時間的平均值恆為相等，但其在空中所指之方向則時時變易，漫無一定，且純屬偶然。

關於橢圓及正圓偏極之觀念前已於 §125 中說明之。橢圓偏極光係為一種之光，其光向量 J 在每次振動中適轉過 360° 一次，其強度即因之週期的增減。橢圓偏極光可視為由二直線偏極光所合成，二者



第 435 圖 a. 橢圓偏極光 b. 正圓偏極光

互相垂直，振幅各不相同，而其相常數之差為 90° ，可以 $J_1 = a_1 \sin \omega t$ 及 $J_2 = a_2 \sin(\omega t + \pi/2) = a_2 \cos \omega t$ 二式表出之(第 435 圖 a)。 a_1 或 a_2 若等於零，則光向量方向不變。是即直線

偏極。二振幅 a_1 與 a_2 若為相等，則成正圓偏極(第 435 圖 b)。故二者均可視為橢圓偏極之特例。關於若何產生直線，橢圓，以及正圓三種偏極光線之法，見 § 455 與 457。

僅在同一平面內之振動，方能互相干涉而完全消滅。故互相垂直之二直線偏極光雖有相干性，即雖係由於自然光中同一之光線而來，然彼此不能干涉。此事亦可視為光波橫振動性之一證。

爲微粒物質所散射之光線多寡亦略帶偏極性(Tyndall 氏現象)。前已於 § 448 中述及天色之所以蔚藍係由地球大氣中太陽光之散射。按此,則天光亦應遭遇此種之偏極現象。天球之上僅有二點,天光不生偏極(Arago 與 Babinet 二氏點),其位置隨太陽之位置而異。氣象學中,天光之偏極亦頗佔重要。

(有時直線偏極即簡稱爲偏極光,此種浮泛之名稱須避免勿用;各種不同之偏極現象自須加以區別)。

按諸光之電磁說,光線初未可僅以單獨之一向量表之;苟不在雙折射之媒質中,光線實係由於互相垂直且亦同時垂直於其前進向之二向量而成,即電場向量與磁場向量是。因反射而起偏極時,電場向量垂直於偏極面,磁場向量則在偏極面之內。故通常以磁場向量之方向爲光向量之方向。

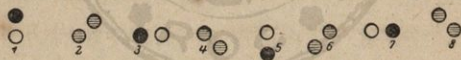
454. 雙折射。試由方解石之裂片中觀察物體或文字,則輒見其成雙。自物體上各點發出之光線透過方解石時,恆分裂爲二,其折射各不相同(第 436 圖)。此項現象首爲 Huygens 氏(1690)所發見,稱爲雙折射。雙折射之本性可以



第 436 圖 解石中之雙折射

下述之實驗說明之。

於光屏之前置一圓形光闌而由對方照亮之，俾藉一透鏡之助，而射其像於光屏之上。若於透鏡及光屏間之光程中置一方解石，則原為單像者，今變為雙像，苟方解石之晶面垂直於光線之方向，則其一像仍留原位，而他一像位於其側。試以光線之方向為軸而轉動晶體，其第一像將始終固於定位而第二像繞之轉動。若用直線偏極之光線，例如於光線路程之中再插入一玻璃板，其與光線方向之傾斜角等於玻璃之偏極角，則通常二像之亮度不同。晶體在相隔 180° 之二位置時，僅有一像出現；自此向兩方轉過 90° ，則僅有他像出現；在其他一切位置時，二像之明暗示一切可能之變化(第437圖)。

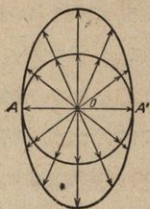


第 437 圖 方解石中雙折射之說明

由此實驗，可知藉方解石而生之二像係來自二直線偏極之光線，二者之偏極面適相垂直。由光源射出之自然光線，經過方解石時，即分裂為此二部份，其折射之情形各不相同。

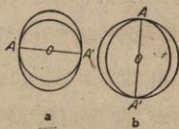
455. 雙折射現象之說明。各向同性之非晶體，如玻璃等，以及等軸晶系之晶體，如岩鹽等，均無雙折射性。其他一

切之晶體皆有之。所以然者，係因光線在各向異性物體中前進之速度，一方面視光線在晶體中之方向，而他方面尚須視入射光線之偏極平面而異。命 O (第 438 圖) 爲雙折射性晶體中之一點，光線由此射出。此項光線即分裂爲偏極面互相垂直之二直線偏極光。在所謂單軸晶體(三角晶系，正方晶系，六角晶系)中，分裂後之一部份光線以等速向各方進行，



第 438 圖 雙折射現象之說明

故在晶體中成一球面波。其他一部份之光線在不同方向上傳播之速度不等。其波面爲一旋轉橢圓面。球面與橢圓面相切之處或在橢圓面長軸之二端(正單軸晶體)或在其短軸之二端(負單軸晶體)(第 439 圖 a 及 b)。 AA' 直線之方向稱爲晶體之光軸，二部份之光線在此方向上速度相同。(吾人須注意光軸非爲晶體中某一定之直線，而僅爲晶體中某一定之方向)各向等速進行之光線稱爲尋常光線，其他一部份光線稱爲非常光線。因光速與折射率($\S 409$)有關，故雙折射性晶體對於尋常與非常光線之折射率 n_o 與 n_a 亦各不同。前者爲一常數，後者隨其在晶體中之方向而異。在光軸之方向上， $n_o = n_a$ 。 Snellius 氏折



第 439 圖 單軸晶體中之波面

射定律對於尋常光線係屬合理，但對於非常光線則否。折射後之非常光線通常且不落於入射面之內，僅在某種例外情形中方與尋常光線相同。光線在晶體中沿光軸方向前進時，二部份之速度相等。若將晶體琢成一片，使其界面垂直於光軸，則入射光線垂直射於晶面時，不起雙折射現象，蓋以二部份之光線在晶體中等速進行故也。晶片之二界面若平行於光軸，則光線垂直入射時雖仍不起雙折射現象，但二部份光線在晶體中進行之速度不同，故二者間將生光程差。蓋因 n_o 與 n_e 二值不等，而此二光線在晶體中之光程 (§ 409) 遂隨之而異。

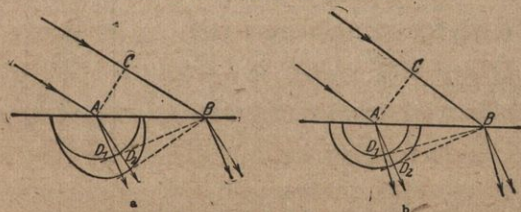
利用此事，可自直線偏極光以產生正圓偏極光。吾人祇須用界面平行於光軸之雙折射晶片即可。片之厚度須選擇得宜，務使尋常光線與非常光線垂直穿過片中所需之時間相差適為光波振動週期之四分之一。以直線偏極光線垂直射於片面，其偏極面與晶體中尋常與非常二光線之偏極面各成 45° 之交角。此時入射光線即分成強度相等之二部份，其在入射時之相常數相等。出射時，二者重復合併，但此時相常數已不相同。其一部份較他部份落後四分之一週期，二者之相常數因之相差 $\pi/2$ 。二部份之振幅相等，故出射後即成正圓偏極波。入射光線之偏極面在其他方位者，其二部份之振幅不等，故出射後為橢圓偏極波。通常吾人輒採用厚度適宜之晶片，以迎合此項用途(所謂四分

之一波長晶片)。

斜方晶系,單斜晶系,以及三斜晶系之晶體中偏極面互相垂直之兩部份光線之速度均隨方向而異。但其中有二特別之方向,此二部份速度相等。此種之晶體具有光軸二;吾人因稱之爲雙軸晶體。

許多雙折射物體皆有一種特性,其對於此二直線偏極光線中之一吸收特甚。此種現象稱爲兩色性。例如熱電石(Turmalin)最爲顯著。在不過薄之熱電石片中一種偏極光幾完全不能通過,而他一種則減弱甚微。故平行於光軸而琢磨之熱電石片可用以產生直線偏極光,亦可作爲檢偏鏡,在礦物學及結晶學中用之最多。

456. **Fresnel 氏雙折射作圖法**。雙折射現象中折射線之作圖法,按諸 Fresnel 氏與尋常折射時所用者完全相同,惟由入射光線分成之二部份須分別處理之。吾人茲僅以單軸晶體爲限,而取其二種最簡單之例,即非常光線皆在入射面之內者。關於作圖法之基本思想,已見於 § 13²

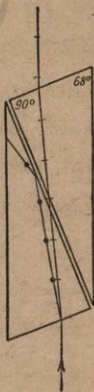


第 440 圖 Fresnel 氏雙折射作圖法

1. 光軸在入射面以內 (即在圖面以內, 第 440 圖 a), 波面之截面一為正圓, 一為橢圓, 二者相切於光軸之二端, 自 B 作正圓及橢圓之切線 BD_1 及 BD_2 . AD_1 為尋常光線, AD_2 為非常光線. 自第 440 圖 a 可見非常光線之折射較之尋常光線或弱或強, 視橢圓究在正圓之外抑在其內而異.

2. 光軸垂直於入射面 (即垂直於圖面, 第 440 圖 b) 此時二波面之截面皆為圓. 作法見圖自明, 不贅述.

457. Nicol 氏稜晶. Nicol 氏稜晶之用途在其能產生直線偏極光. 將方解石晶體按某一定之角度, 截成相等之二部份 (第 441 圖), 再以加拿大樹膠黏合之. 琢磨兩端之面, 使其與側面成 68° 之交角. 自然光線以第 441 圖所示之方向射入稜晶時, 即分為尋常與非常二部份光線, 在此例中, 前者之折射較後者為甚. 此二部份均與加拿大樹膠層相遇. 方解石對於尋常光線之折射率 ($n = 1.66$) 較大於加拿大樹膠 ($n = 1.54$), 今入射角較全反射限角為大, 尋常光線即向側方反射而出, 不能穿稜晶而過. 方解石對於非常光線之折射率 ($n = 1.49$) 較加拿大樹膠為小, 故全反射不能發



第 441 圖 Nicol 氏稜晶

生，而非常光線自稜晶彼端射出，成直線偏極光。故 Nicol 氏稜晶之作用猶如傾斜 57° 之玻璃板，可作為起偏鏡之用。

此種稜晶亦可作為檢偏鏡，以檢驗光線之是否直線偏極。光線若連續穿過二個 Nicol 氏稜晶，則僅當二稜晶在空間內之方位相同，或自此位置轉過 180° 時（平行稜晶），由起偏鏡而來之光線方得通過檢偏鏡而並不減弱。二者若由此相對的轉過 90° （正交稜晶），則光線不能穿第二稜晶而過。在其間之位置時，穿過第一稜晶之光線恆多寡被第二稜晶所減弱。

458. Nicol 氏稜晶正交時所見之彩色。前在 § 455 中嘗述直線偏極光穿過雙折射性之晶體後，通常已變為橢圓偏極光。若以此種之晶體插入二正交之 Nicol 氏稜晶間，則原為黑暗者，今又變為明亮，蓋此時進入檢偏鏡中之光線已不復為直線偏極。若所用之光係白光，則因晶體對於各光譜色之折射率不同，而各色之亮度亦有異。於是有彩色出現。置於正交二稜晶間之晶片可藉一透鏡之助而射其像於一光屏之上，其像通常每現各種不同之色，而蔽有黑暗之條紋。此種現象隨光軸對於偏極面之位置而異，故將晶片繞一與光線方向相同之軸而轉動時，其現象即隨之而變，關於此項現象精確之理論，此處不及詳述。

利用此項現象可測定晶體光軸之位置。玻璃因驟冷或單方之壓力而其內部發生張力，以致其中各向不復同性

時，每亦發生雙折射現象，此亦可用同法示明之。

欲直接觀察上述之種種現象可用 Nörrenberg 氏之偏極光鏡；在結晶學之研究中，此鏡頗屬重要。光線先射於傾斜 57° 之玻璃板，使成直線偏極。然後任其穿過欲研究之晶體，再進入一 Nicol 氏稜晶，而吾人即由此觀察之。

459. 液態晶體。電場中之雙折射。晶體之所以有雙折射現象，純係由於晶體中各原子狀之組織在空間同方向內有相同之排列所致，在不同之方向內，其排列不盡相同 (§ 528)。液體與氣體中分子之排列全無定序，故通常無雙折射現象發生。但某種之有機性液體，其分子有極複雜之結構，而吾人可認其為排列成長鏈形，或其分子集團排列成長鏈形者，乃為例外。此種液體儲於相接極近之二界面（例如在顯微鏡中所用之載物玻片及蓋玻片）間時，恆有自行置其長鏈垂直於界面之傾向，而取相同之空間排列。此種液體亦示雙折射現象（所謂液態晶體）。

分子之為電偶者，每遇有電場作用時恆亦在空間內作相同之排列，各分子之電軸皆轉至與電場同向。故此種物質示所謂電場中之雙折射現象（Kerr 氏效應）。今日之藉電波以遠播圖像（電視）即有賴乎是；此項效應在該方面工程上頗佔重要（Karolus 氏電管）。

460. 偏極面之轉移。許多之物質，例如糖溶液，水晶等，或具有一種特性，遇有直線偏極光線透過時，其偏極面恆

因之而轉移(轉偏性物質). 試將此種物質置於正交之二稜晶間,則視場恆變為明亮. 欲使其恢復黑暗,須將檢偏鏡轉過某一定之 α 角. 但吾人尙不能逕行斷定此角即為光線偏極面在物質中轉過之角度,蓋不問偏極面轉過之角度為 $n \cdot 180^\circ + \alpha$, 或為 $-(n \cdot 180^\circ - \alpha)$, 抑或即為 α , 將檢偏鏡轉過 α 角,均可用此抵消也. 欲決定真正轉過之角度,須變更物質層之厚度以圖之.

設直線偏極之入射波在 x 方向內振動,其振幅在入射處者以 $x = a \sin \omega t$ 表之. 吾人可設想此波係由一右轉及一左轉之正圓偏極光所合成:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{a}{2} \sin \omega t, & y_1 &= \frac{a}{2} \cos \omega t \\ x_2 &= \frac{a}{2} \sin \omega t, & y_2 &= -\frac{a}{2} \cos \omega t \end{aligned}$$

二者相加,則 x 方向上之振動適合成原值,而 y 方向上者彼此相消. 故若此設想之二波可視為直線偏極波 $x = a \sin \omega t$ 之另一種表示法. 於是偏極面之轉移可視為由於左轉右轉二正圓偏極波在轉偏性物質中傳播速度之不同所致. 命此二速度為 c_1 與 c_2 . 若二波所穿過物質層之厚度為 d , 則按 §123 所述,經過 t 時間後二波離物質而出時之振動當以下式表示之:

$$\begin{aligned} x'_1 &= \frac{a}{2} \sin \omega \left(t - \frac{d}{c_1} \right), & y'_1 &= \frac{a}{2} \cos \omega \left(t - \frac{d}{c_1} \right), \\ x'_2 &= \frac{a}{2} \sin \omega \left(t - \frac{d}{c_2} \right), & y'_2 &= -\frac{a}{2} \cos \omega \left(t - \frac{d}{c_2} \right). \end{aligned}$$

總振動之分量可將各振動相加而得，

$$x' = x'_1 + x'_2 = a \sin \omega \left[t - \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) \right] \cdot \cos \omega \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right),$$

$$y' = y'_1 + y'_2 = -a \sin \omega \left[t - \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) \right] \cdot \sin \omega \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right).$$

此仍爲一直線偏極之振動，其式如下：

$$z = \sqrt{x'^2 + y'^2} = a \sin \omega \left[t - \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) \right].$$

此時之偏極面較其原來之方位已轉過 δ 角，其值可由下式而得，

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{y'}{x'} = \operatorname{tg} \omega \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1} \right), \quad \text{或} \quad \delta = \omega \frac{d}{2} \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1} \right). \quad (9)$$

轉移之方向，視不同之物質而異，以 $1/c_2 - 1/c_1$ 之正負爲斷（右轉或左轉）。許多物體有右轉與左轉之二種形式，例如水晶與糖是。

轉過之度數隨 $\omega = 2\pi\nu$ 而異；又因 $\nu = c/\lambda$ ，故亦隨光之波長 λ 而異（轉偏色散）。通常波長愈短者其值愈增。故欲以二 Nicol 氏稜晶完全使光消滅，僅於用單色光時方爲可能。若用白光，則將檢偏鏡不論轉至任何位置，輒有某種之波長完全或一部份消滅，而有不同之彩色出現，惟決不完全變爲黑暗。

欲檢查溶液中所含之糖量，以及其他之許多化學分析，皆須有賴於偏極面轉移之測量。此種之儀器稱爲量糖計。

物體之不能將光線偏極面轉移者，若以之置於強烈之磁場中，其磁力線之方向與光線之方向相同，則亦輒示轉偏性（磁轉偏極面性，Faraday 氏效應）。一物質置於強度為 1 [高斯] 之磁場中，以鈉之黃色光譜線（D 線）照射之，光線穿過該物質 1 [厘米] 厚之一層後，偏極面轉過之角度稱為該物質之 Verdet 氏常數。

461. 光之電磁說. Maxwell 氏 (1871) 倡光為電磁振動之說，前已屢述之，氏以為光現象之說明必當以電磁場定律 (§ 397) 為基礎。H. Hertz 氏推廣其說，且以實驗 (1888) 證明電波之一切主要性質均與光波同 (§§ 388 與 474)。按 Maxwell 氏之說，在真空中進行之直線偏極光係由一週期變化之電場 \mathbf{E} 及一與之垂直而亦為週期變化之磁場 \mathbf{H} 二者所成，此二場可以下列二式表示之。

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin 2\pi\nu t, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \sin 2\pi\nu t. \quad (10)$$

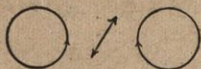
光線在物質性物體中傳播時，物質之導電係數、介電係數 (§ 234) 以及導磁係數 (§ 337) 亦均與之有重要之關係。基於此說，上述之種種現象均不難以數量說明之。

光之所以為電磁作用者係因光之發生即由於電子運動之變化，電子者即圍繞發光體之原子而運動者也（詳情見 §493 以下）。

462. 磁光學. Zeeman 氏效應. 磁場對於任何運動之電荷子輒施一作用力 (§ 306)，故對於原子核中旋繞之電子

亦然。反磁性現象 (§ 338) 之說明亦基乎此。此外如磁轉偏極之現象 (§ 460) 前尚未加以詳述，亦當以此說明之。

Zeeman 式效應 (Zeeman 氏, 1896) 爲磁光現象中極重要之一種。此處僅以 H. A. Lorentz 所建關於此項效應初步



第 442 圖 關於 Zeeman 氏效應
理論之說明 (磁場與中間之分振
動均垂直於圖面)。

之理論一述之。氏之假設雖不能完全與今日對於發光原子舉動之觀念相合，但在較爲簡單之情形中仍可得一與觀察相符之結果。

吾人試設想一原子及一與之相連結之電子，位於一磁場 \mathbf{H} 之中。Lorentz 氏以爲電子受一彈性力 (即向一定點而正比於定點及電子間之距離之力) 之作用，而與一靜止位置相連結，電子即對之發生一直線振動。此種振動可設想將其分成二直線分振動，其一平行於磁場之力線，其二則與之垂直。平行之部份不受磁場之影響 [§ 306, (13) 式, $\sin(\nu, \mathbf{H}) = 0$]，垂直於磁場之部份又可分爲二正圓偏極振動 (第 442 圖)，恰與 § 460 所述關於直線偏極之光振動同。此二種圓運動均受垂直於其軌道平面之磁場之作用；按 § 306, (13) 式，此旋繞之電子必受一沿輻之力，其值爲 $\pm e v \mathbf{H}$ (此處 $\sin(\nu, \mathbf{H}) = 1$) 或正或負，即或沿輻向外，或沿輻向內，視電子旋繞之方向而異。

命 r 爲電子不在磁場中時其圓形軌道之半徑， ω_0 爲此

時運動之角速度。則電子所受沿輻向內之彈性引力(向心力)爲 $k = \mu r \omega_0^2$ (§ 37)。電子在磁場中時因受磁場之作用而又新受一沿輻之力,故其軌道之半徑自 r 變爲 r' , 角速度自 ω_0 變爲 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ 。於是彈性力亦因軌道半徑之改變而變爲 $\mu r' \omega^2$ 。此時沿輻作用於電子上之總力,以 $v = r' \omega$ 之關係代入後,應爲

$$k' = \mu r' \omega^2 \pm \epsilon r' \omega \mathbf{H}.$$

此爲是時電子所受之向心力。此必與是時之離心力 $\mu r' \omega^2$ 相平衡,故得

$$\mu r' \omega^2 = \mu r' \omega_0^2 \pm \epsilon r' \omega \mathbf{H}.$$

試以 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ 代入,且假設磁場頗弱,即 $\Delta\omega$ 遠較 ω_0 爲小。此式中即以 ω_0 代 ω ,亦不致有顯著之錯誤,而 $\Delta\omega$ 之高次幂諸值更較 ω_0 爲小,可略去不計,於是得

$$(\omega_0 + \Delta\omega)^2 = \omega_0^2 + 2\omega_0 \Delta\omega = \omega_0^2 \pm \frac{\epsilon}{\mu} \omega_0 \mathbf{H} \text{ 或 } \Delta\omega = \pm \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{\mu} \mathbf{H}.$$

再以頻率 $\nu = \omega/2\pi$ 代去 ω ,則得電子圓周運動頻率 ν 之變遷值 $\Delta\nu$,亦即所發光波頻率之變遷值爲

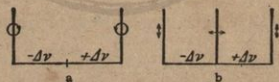
$$\Delta\nu = \pm \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\epsilon}{\mu} \cdot \mathbf{H} \quad (11)$$

其值之爲正爲負,一視電子對於磁力線旋繞之方向而定。

故磁場之作用可將一頻率爲 ν_0 之光譜線分裂爲三成份,其頻率各爲 $\nu_0 - \Delta\nu$, ν_0 , 與 $\nu_0 + \Delta\nu$ 。其一成份(來自直線振動者)與該光譜線不在磁場中時之頻率相等,其他二成

份(來自二圓運動者)則分別向紅與紫兩方移動。

電子在一直線上來回振動時,沿此直線之方向上並無光線發出。在其他一切方向內發出之光線皆為直線偏極光。電子在圓周上運動時,沿其軌道平面之垂直方向發出之光線為正圓偏極,而沿其軌道平面之平行方向者則為直線偏極。基於此理,吾人觀察磁場中之光源時,其自磁場之平行方向(縱向)所見之 Zeeman 氏效應必與自磁場之垂直方向(橫向)所見者不同。在縱向 Zeeman 氏效應中留於原位之一成份不可得見。在此原位之左右兩方各現一線,略自原位向兩方移過少許,其一為右轉正圓偏極,另一為左轉正圓偏極。在橫向 Zeeman 氏效應中三成份並現。其一留於原位未動,而為平行於場向之直線偏極。其他二者仍略向紅與紫兩方各移過少許,均為直線偏極,但其偏極面與第一成份垂直(第 443 圖)。



第 443 圖 正常 Zeeman 氏效應 a 縱向 b 橫向

與上述理論相合之效應(正常 Zeeman 氏效應),即有所謂正常之 Lorentz 氏三線出現者,事實上確已於許多元素之原子中察見之。但尚有極多數元素所示光譜線之分裂情形與此不同,而較此複雜。故用 Lorentz 氏之理論僅

在簡單之情形中方可得適當之結果。Zeeman 氏效應之理論能與吾人觀察所得全部之現象相合者，僅可以量子論說明之。

自 $\Delta\nu$ 與 H 之值按上式可求得因運動而發光之電荷荷質比 e/μ (§ 307)。其值恰等於電子之荷質比。故知光之來源必係由於原子中電子之運動，此實為第一個明確之證據。

上述之種種思索與關於反磁性現象之理論 (§ 338) 頗有密切之關係。

Hale 氏嘗發見由太陽黑斑射來之光線亦示 Zeeman 氏效應，是知黑斑中必有強烈之磁場存在。磁場之來源係因太陽黑斑為物質之渦流所成，強烈之電荷恆隨之而流動（圓周電流）。

463. 電光學。Stark 氏效應。所謂電光現象者係指電場對於光現象之作用而言。前述之 Kerr 氏效應 (§ 459) 即屬此類現象。

原子在一電場中發光時，其光譜線亦因之分裂，與 Zeeman 效應相似。此所謂 Stark 氏效應 (J. Stark 氏, 1913, 與 Lo Surdo 氏) 者，可於溝渠射線 (§ 292) 穿過強烈之電場時觀察之。關於此項現象之理論僅能藉助於量子論而加以解釋。電子週繞原子之軌道因電場之作用力而變形，此處所能述者祇此而已。吾人在理想上仍可分電子之運動為數

成份,各成份之頻率取受之影響各有不同,如受磁場之作用然。

464. 輻射壓力. 光線照射一面上時,恆施一力於其上,即所謂光壓力或稱輻射壓力者是. 此項效應可用一懸掛而可以轉動之輕微物體以證明之. 光線在面上作單向反射時所施之力較之完全為該面所吸收時適大二倍. 物體之表面本身發光時,輒亦因之感受一種壓力,苟物體不受牽制,則即行開始運動,如槍礮之反坐然 (§33, 并參閱 § 490).

Lebedew 氏嘗示明氣體之分子亦感受光壓力之作用. 按 Saha 與 Milne 二氏之意,此種作用對於太陽大氣中各元素之分佈頗關重要,蓋以各元素之原子皆受太陽輻射極大之壓力故也. 基於此事及其他理論,可說明太陽大氣之最外層中何以尚有鈣元素存在之故.

恆星中輻射壓力亦佔一非常重要之地位. 恆星內部之溫度輒達數百萬度,故每有非常強烈之輻射能量自內部向外流出,恆星之物質即受有極強之輻射壓力,其作用與重力相反. 此項事實為 Eddington 氏恆星理論最重要之基礎.

彗星之尾背太陽而彎曲,亦以其物質受太陽之輻射壓力所致 (Arrhenius 氏).

第三十一章 全光譜

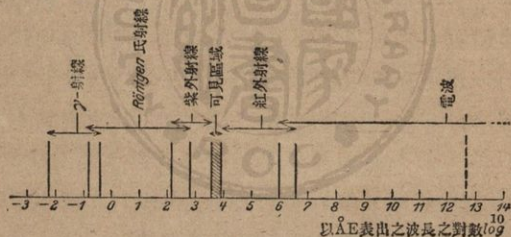
465. 全光譜概要. 前已述過光線之能爲人目所感覺者僅爲全光譜中之一小段,此小段爲人目極狹之靈敏範圍所限制. 但若利用適宜之儀器,則光譜中眼所不能見之區域亦不難探發之,在可見區域紅與紫二端以外尙綫延頗遠,精密言之,直擴展至無限遠. 按諸波動說,在理論上初無根據可斷言自然界中頻率在 $\nu=0$ ($\lambda=\infty$)與 $\nu=\infty$ ($\lambda=0$)二極限間之一切光振動不能全體出現之理. 長波之區域接連可見光譜紅色之一端者,稱爲紅外光譜. 此部份向波長遞增之一方擴展,直至與以電學方法產生之電磁波相接. 紫色一端之外爲紫外光譜,更外爲 Röntgen 氏射線與放射質之 γ 射線. 波長更短於此者,或即爲所謂宇宙射線 (Hess 氏射線,超度短波射線),關於此種射線之研究現方開始. 其性質究係電磁波與否,今日尙有學者懷疑未決. 第31表示各光譜區域擴展情形之概要. 第444圖爲一與此相應之圖形的表示. 橫坐標不用波長,而取以 Ångström 氏單位表出之波長之對數 \log . 將光譜按若此分段,相當於將音階按均 (Oktave) 分段.

兩種射線名稱不同之區域互相重疊之處,在物理學上之性質初無區別,僅示以不同之方法可產生同類之射線而

已。自第 444 圖可見人目作用範圍之狹隘。

第 31 表 全光譜

射線種類	波長單位爲 ÅE.
(宇宙射線?)	$(10^{-3}-10^{-5})$
最短之 γ 射線	$0,57 \cdot 10^{-2}$
Röntgen 氏射線	$1,58 \cdot 10^{-1}-6,6 \cdot 10^2$
紫外射線	$1,36 \cdot 10^2-3,6 \cdot 10^3$
可見光線	$3,6 \cdot 10^3-7,8 \cdot 10^3$
紅外射線	$7,8 \cdot 10^3-3,4 \cdot 10^6$
電波	$2 \cdot 10^6-\infty$



第 444 圖 全光譜

就基本上言之，以前所述光學之定律均可應用之於光譜之全部區域。但此種定律之應用常與在可見區域內者有異，蓋在可見區域中物體之某種光學特性（反射率，折射率，透明度等）已隨波長而異，在全光譜中，波長之變遷既大，其影響必非常強烈也。故欲研究可見區域以外之輻射現

象時，透鏡稜鏡等物通常均須另擇他種之物質以代玻璃。射線之離可見區域愈遠者，欲研究其光譜時所用之儀器種類愈屬相異。但測量波長所根據之原理則一。其法恆直接或間接的藉助於干涉之作用。

可見光譜之界限純係由生理方面而來，在物理方面初無甚意義；為欲表明全部電磁光譜之一致性起見，吾人輒不問任何輻射（電波除外）之是否能為吾人所目觀，而統稱之曰光，如紅外光，紫外光，Röntgen 氏光等等。

466. 全光譜中之色散，吸收及反射諸現象。在可見光譜區域以內，通常波長遞降（由紅而紫）時，物質之折射率 n 遞增，前已於 § 432 中述及之。但在所謂反常色散之情形中，此項規則即不復合理。任何物質性之物體至少必各有一光譜區域示反常色散作用，大概各物體且皆有數區域；但因可見光譜區域之狹隘，故在大多數情形中，此種反常色散之區域多落於可見區域以外，通常在紅外或紫外區域之中。基於往日之學說，此項事實可歸之於原子或分子中之共振現象。凡任何可以振動之物體遇有一種振動自外襲來，其頻率與物體之固有頻率相等，或相去不遠者，恆與之發生共振（§ 121，并參閱該節中所述關於阻尼之影響）。故反常色散發生時所涉之區域即為各該物質原子或分子固有振動所在之區域。若略去物體之阻尼，則以 Maxwell 氏之學說為基礎，可由理論推得一結論，即物質之導磁係數 μ 與 1

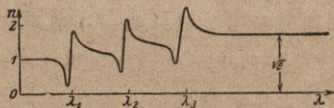
相等或相去不遠者，其對於一切波長 λ 之折射率 n 可以 Ketteler-Helmholtz 二式之公式表出之，即

$$n^2 = \varepsilon + \frac{M_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{M_2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{M_3}{\lambda^2 - \lambda_3^2} + \dots \quad (1)$$

此式中 ε 為物質之介電係數， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 等為相當於物質之原子或分子固有振動之波長， M_1, M_2 等各為物質獨具之常數，其值與每立方厘米中能發生振動之個體之多寡有關。

自(1)式可得一重要之結論，即當 $\lambda = \infty$ 時，有所謂 Maxwell 氏關係式 $n^2 = \varepsilon$ 者必為合理。此項關係在長波區域中已屢得事實上之證明，而為光之電磁說主要立足點之一。

按(1)式 $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 之時，每次之折射率 n 恆必降至 $-\infty$ ，迨一過此值，立即昇至 $+\infty$ ，其後復下降頗速；波長漸增，其下降漸緩，直至鄰接之第二共振波長，復立即降至 $-\infty$ 。但因物質中有阻尼，故 n 之變化有如第 445 圖所示。 λ_1, λ_2 與 λ_3 諸共振區域為反常色散之區域，介於其間之區域，波長增而 n 減者，為正常色散之區域。



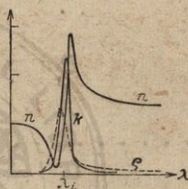
第 445 圖 有三個固有振動 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 時折射率對於波長之關係

若遇波長極短之射線，則一切物體之折射率均漸近於

1. 故自(1)式得 $\lambda=0$ 時, 介電係數 $\varepsilon = 1 + M_1/\lambda_1^2 + M_2/\lambda_2^2 + M_3/\lambda_3^2 + \dots$.

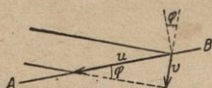
在各共振區域中, 物質之吸收率與反射率皆達其最大值(第 446 圖). 阻尼頗小時, 原為透明之物質在此區域內反射率特強, 直與金屬相似(金屬反射), 而在共振區域貼鄰之區域內, 透明物質之反射率仍非常微弱(參閱 § 468 剩餘射線).

一物質在有顯著吸收率之區域內光線不能透過. 凡為白光, 即可見區域內之光線, 所能通過之物體, 如玻璃水以及大多數之氣體等, 在此區域內咸無顯著之吸收作用.



第 446 圖 共振區域中折射率 n , 吸收率 K 與反射率 ρ 三者對於波長 λ 之關係

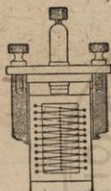
在反常色散區域內折射率 n 之值輒降至 1 以下. 按 § 409 所述, 則光線在物質中之速度將較在真空中者為大. 但此並非謂光能量之傳播可較每秒 $3 \cdot 10^{10}$ [厘米] 之速度為大. 按相對論之說, 不論為物質性之物體, 抑或為能量, 其傳播決不能超過光之速度. 此處所謂速度較大者, 係指光振動之位相而言. 一振動之位相沿一直線上可以任何速度前進, 此不難以下述力學之例比擬之. 試觀察水波; 設波以速度 v 而前進, 遇河岸成一交角 φ . 於是某一位相, 例如波峯, 沿河岸 AB (第 447 圖) 前進之速度 u 為 $u = v / \sin \varphi$. 此



第 447 圖 位相速度之說明

自可爲任何大小之值，
能量決不能沿河岸而
僅能依波速 v 之方向
以傳播。

467. 輻射測量儀器。 測量輻射強度(能量)所用最重要之儀器厥爲熱電堆(第 448 圖)。 其構造基於熱電效應

第 448 圖 測量輻射線
能量所用之熱電堆

(§ 263), 以許多細線狀之熱電偶一一
連合而成, 其 1, 3, 5 等奇數之接頭任
其曝於輻射線中, 而 2, 4, 6 等偶數之
接頭則深藏不使受光。 曝光之接頭
上咸塗以煤煙, 使成黑色; 光線照射其
上時, 恆受熱而有熱電流發生, 電流之
強度可以一電流計測之, 其值即作爲

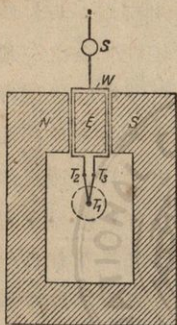
判別輻射強度之用。

尚有一種儀器爲電阻輻射計。 此爲一極薄之金屬箔，
將其一面塗黑; 欲測之輻射即任其照於此塗黑之面上。 面
內之金屬線即因之加熱, 其電阻遂因之增加 (§ 255)。 此項
電阻之變遷值可用 Wheatstone 氏電橋法 (§ 252) 測量之。

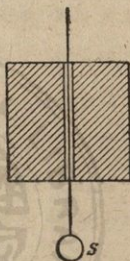
輻射之強度不爲太大時, 電阻之變遷值正比於輻射之強度。

熱電偶之最簡便而於測量輻射時最常用之形式爲顯
微輻射計(第 449 圖)。 此爲一轉動線圈式之電流計, 其線
圈僅爲單獨之一圈 W , 其中接有一熱電偶, 偶由二不同之

鉍合金線所成。其一個接頭 T_1 上塗以黑色，曝於欲測之輻射中，其他二個接頭 T_2 與 T_3 ，則保護不使受光。因接頭間溫度之差而在線圈中產生之電流使線圈轉動，其轉過角度之大小，可作為測量照於其上之輻射強度之用。



第 449 圖 顯微輻射計之略圖
 N, S 電磁體之二極, E 鐵心,
 W 線圈, S 小鏡, T_1, T_2, T_3 接頭。



第 450 圖 輻射計
 S 小鏡

輻射計 (第 450 圖) 亦可用以測量輻射之強度。計由二極薄之金屬翼所成，以水晶絲或繭絲懸之，翼之一面塗以黑色，欲測之光線即射於其上。將此全部之物件密閉於一玻璃器中，其中之空氣壓力約為自 $1/10$ 至 $1/100$ [厘米] 水銀柱。射線照於塗黑之一面時，即將其加熱，翼面與氣體間溫度之平衡因之擾亂，而翼遂轉動，其轉過之角度可自所附之小鏡計出之（在太陽光中可繼續轉動之所謂光磨輪，如有時陳列於光學儀器商店之市窗中者，其原理亦基於此，與輻射

計有相同之作用。關於此項現象之理論，頗爲龐雜。

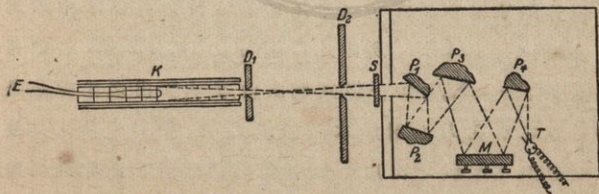
在頗強之光線中，一靈敏之溫度計亦已可作爲測量之儀器，惟須塗黑其球，俾易受光。

468. 光譜中之紅外區域。試將一弧光燈之光譜射於一光屏之上，若用太陽之光譜則更佳，而以一與電流計相連之熱電堆置於光譜之中。將熱電堆自紫色之一端逐漸在光譜中移至紅色之一端，則見在紫色一端時，電流計之示度頗小，愈近紅色一端，示度愈增。由此可知射於熱電堆上之能量在紅色區域中者較紫色區域中者爲大（所以然者，其一部份之原因係由於用稜鏡後光譜在紅色區域中密擠，而在紫色區域中分散，參閱 § 447）。移熱電堆至紅色一端以外，電流計之示度非但不見減小，且初時更行增加，迨至紅色一端某距離以外，方漸消滅。此項實驗可證明光譜確係擴展至紅色一端以外，因知確有紅外區域存在。波長愈長，作用所以愈減者，決非由於真正能量之愈見減少；最要者端因在射線路程中所遇之玻璃透鏡稜鏡等物能阻制波長更長之紅外射線不使透過所致。故研究光譜之紅外區域時所用之透鏡與稜鏡須以他種物質製造，例如波長至 4μ 者用水晶，至 $8,5\mu$ 者用螢石，至 14μ 者用岩鹽，至 20μ ，最高至 23μ 者用鉀鹽。直至此值之波長，尙可用特製之分光計以分析紅外光譜。其中波長最短之部份尙可用感光性特銳之照相片以攝取其像，波長較長之部份則僅能以上述之儀器辨

察之。

紅外射線常又稱爲熱射線。受熱之物體不僅發出紅外線，且同時亦發出可見光線及紫外線。僅當物體溫度頗低，尙未見其作紅熾之時，其發出之射線幾全爲紅外線。所謂熱輻射（或稱溫度輻射）者係指任何之射線發源於物體之溫度者而言。

欲將 23μ 以外緊接之光譜區域分開而研究之，輒用 Rubens 氏之剩餘射線法。其法卽利用許多物質在紅外區域中有所謂金屬反射之現象，換言之，此種物質可將光譜中某數絕狹之區域反射特強而對其相鄰之區域則遠較此爲弱 (§ 466)。設將一所謂黑體 (§ 481) 者作爲光源，命自其發出之射線多次與此種物質之表面相遇而反射，如第 451 圖所示。設有一種光線，每遇一面時有 95% 反射，則經四次反射後所剩者僅爲 0.95^4 或 82%。設更有另一種光線每遇一



第 451 圖 Rubens 氏之剩餘射線法

T ，熱電堆。 M ，金屬凹面反射鏡， P_1-P_4 ，分出剩餘射線之板， S 光屏， D_1, D_2 ，光闌， K ，黑體，作爲輻射源， E ，熱電偶用以測量黑體之溫度。

面時僅有 50% 反射,則四次反射後僅剩 6.25%。此二種光線原來之比約為 2:1,經過四次反射後已降至 13:1。故每遇一次反射,自原輻射線中分出之光譜區域即減狹一次;若此連續經過數次反射後遂得逐漸近似絕狹之一條光譜線。由此法分出之射線可用以研究在此光譜區域內物體之光學特性,如透明性等。第 32 表示關於產生剩餘射線所用數種主要物質之概況。

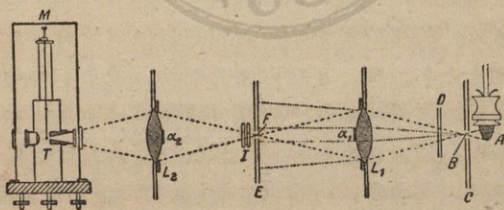
欲測量長波紅外射線之波長,可用特製之干涉儀 (§ 443)。

愈深入波長較長之區域,吾人欲將其分成絕狹之光譜線而研究之也愈難,蓋因在可以供用之光源中,長波輻射之能量已頗微弱。Rubens 氏嘗用下述水晶之特性以分開紅外射線中之長波與短波。水晶對於波長最短之紅外光為透明,波長漸增,即繼之以廣闊之非常色散 (§ 466) 區域,其中吸收頗烈,而最後對於波長頗長之光線復成透明。在此長波紅外區域中,水晶之折射率遠較在短波紅外區域中者為大 (參閱第 445 圖)。所謂水晶透鏡法 (第 452 圖) 者即基乎是。自一光源,例如一煤氣燈之紗罩 A ,發出之光線經過一光闌之小孔 B 而射於水晶透鏡 L_1 上,折射頗強之長波射線即因此透鏡之作用而集中於第二光闌 F ,遂穿此而過;但折射較弱之短波射線大部份即止於光闌之面而不能通過。若欲使短波射線之射於光闌小孔上者亦須一併除去,則可於透鏡之面上貼以小塊之黑紙 α ,長波幾可完全穿過

無阻而短波則爲其所吸收。第二透鏡 L_2 再度將射線漂淨之,使留存者純爲長波之射線。波長變遷頗大時,物質之光學特性(折射,吸收)恆隨之而變;此事可以上法示明之,至爲顯著。

第 32 表 最重要之剩餘射線(最強能量之位置)

大理石	CaCO_3	6,65 μ
螢石	CaF_2	22 及 32 μ
霰石	CaCO_3	39 μ
岩鹽	NaCl	52,8 μ
鉀鹽	KCl	63 μ
溴化鉀	KBr	83 μ
氯化銻	TlCl	92 μ
碘化鉀	KI	94 μ
溴化銻	TlBr	117 μ
碘化銻	TlI	152 μ



第 452 圖 Rubens 與 Wood 二氏之水晶透鏡法

A , 煤氣燈紗罩, B, F , 二光闌 C 與 E 之孔, L_1, L_2 , 水晶透鏡, D, J , 光屏, 以掩蔽光線, α_1, α_2 紙片, M 顯微輻射計, 用作測量儀器。

歷來觀察所能得見波長最長之紅外射線係由 Rubens 與 von Baeyer 二氏於石英水銀燈 (§ 293) 之光線中發見之。此項輻射包含一頗闊之光譜區域，其中 218μ 與 343μ 二線能量最大。故此種射線已與最短之電波相重。事實上此種長波之射線已示電波之一切特性。例如吾人可用精細之導線光柵以使之直線偏極，與 Hertz 氏用以證明電波之法同。

469. 光譜中之紫外區域。試於一弧光燈之光譜中置一塗有硫化鋅之光屏，而將其移至紫色一端以外，則雖經一距離，而光屏上尙見發亮作淺綠色(磷光，§ 487)。此係由於人目所不能見之紫外光之作用。由此法觀察所得之紫外區域似不能再行推廣，且通常所見者其中似僅含有一二稀少之光譜線，其所以然者，實因光線路程中置有玻璃之稜鏡透鏡等物，而直接靠近光譜紫色一端以外之光線已不能穿此而過所致。故欲研究紫外光譜，須用以他種物質製成之稜鏡透鏡等光學儀器。通常輒用岩鹽，水晶或螢石等物質。大多數之物質對於短波之紫外射線皆不透明，氣體亦然，氣體之非常色散區域即係在此。故欲研究最短波之紫外射線，全部所用之儀器中均須將空氣排除淨盡(真空攝譜儀)。攝取光譜之像可用照相片。紫外光對於照相之作用，頗為強烈，一如其化學作用 (§510)。

太陽光線中含有多量之紫外線。但因於其經過地球

大氣時大部份爲大氣所吸收，故在高空中紫外線之成份雖頗爲豐富，然射到地面後恆已非常微弱。高山上對於生物之作用，以及該處人體皮膚之劇烈被炙，其一部份之原因皆由於此。太陽光譜可見區域二端以外之光線，即短波之紫外光與長波之紅外光，在地球大氣中皆被吸收，故觀察所見之光譜輒爲此所限制。以此之故，太陽光譜中 2900 [ÅE] 以外之紫外光線終不得見。在紅外區域中，Langley 氏嘗察見 53000 [ÅE] (約爲 1/200 [毫米]) 之波長。紫外線所以被吸收之主要原因係由存在於大氣中之臭氧，紅外線則係由於大氣中之水汽 (參閱 § 204)。

石英水銀燈 (§ 293) 能發射強烈之紫外光線。另有一特種之玻璃稱爲紫外玻璃 (Uviolglas) 者，紫外光可通行無阻，以之製成水銀燈，亦可得強烈之紫外光。鋅以及其他許多金屬所製電極間之電花中，紫外光亦頗豐富。許多動物視器官之感覺可深入紫外區域中，迥非人目所能及，而以蜜蜂爲尤甚。

對於光譜之紫外區域中波長最短部份之研究以 Schumann 與 Millikan 二氏之力爲最多。紫外射線與 Röntgen 氏射線二區域間原有一空隙尙未經探發，二氏竟能覓得 50 [ÅE] 之波。以填補此項空隙。

470. Röntgen 氏射線。Röntgen 氏於 1895 年作 Lenard 氏管 (§ 291) 之實驗時偶然所發見一種射線，當時氏即以 X

射線稱之，後人爲紀念氏功起見，因名之爲 Röntgen 氏射線。此實爲物理學上最重要之發見之一。十九世紀以前之物理學吾人輒目之爲所謂經典物理學，以別於今日之所謂近代物理學，其轉變卽始於此。

Röntgen 氏射線以能貫穿一切之物質著聞；惟其難易則各有不同，通常物質之密度愈小者貫穿愈易。一言以蔽之，此種射線之波長愈短者，其貫穿本領愈強。但一切物質對於 Röntgen 氏射線光譜中之某數區域輒示選擇之特性，尤如在某數區域內，其吸收作用特強。

此種射線之穿透力既極強，而對於不同之物質（骨骼，肌肉組織等），其強度又復各異，故人體內部得藉以『透視』，此時體內之各成份因射線之穿透力不同而一一分別顯露作影狀，尤以骨骼及某種內器官特見清晰（Röntgen 氏射線診斷）。欲使其影能爲吾人所目覩；可於射線穿過人體後，使之照於一面上塗有鉑氰化鋇或其他類似物質之光屏（螢光屏）之上。此種物質受 Röntgen 氏射線之作用後卽發螢光。若使射線貫穿人體後照於一照相片，則其影像可久留片上（Röntgen 氏射線照像）。Röntgen 氏射線有強烈之化學作用。氣體爲 Röntgen 氏射線照射時，恆起強烈之游離。

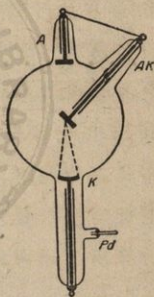
Röntgen 氏射線對於生物之作用遠較紫外射線爲強烈。其作用可深入人體之內臟，用以治療各種之疾病，如

惡性腫瘍等，功效頗著；其他之應用實不勝枚舉（Röntgen 氏射線治療）但另一方面，若處置不當，則對於人體為害匪淺，在嚴重之情形中，直可有致命之危，即所謂 Röntgen 氏射線燃燒者是。

一切物質對於 Röntgen 氏射線之折射率幾皆為 $n = 1$ ，其折射時之偏向恆為頗小，故直至不久以前，吾人方能證實之。

陰極射線，即運動極速之電子，遇障礙物時，恆即發生 Röntgen 氏射線。運動之電荷等於一電流，故其運動之突然停止相當於電流強度之突然變化。於是即有一非週期性之電磁波（可比之爆聲）隨之發生，此即 Röntgen 氏射線（受阻射線）但此外尚有一週期性之射線伴同發生，其波長視運動電子向之衝擊之物質而異，對於各種物質各有一特別之值（§ 504）。

原來所用之管以產生 Röntgen 氏射線者，其形式如第 453 圖所示。管為一玻璃之容器，其中留有少許空氣，俾陰極射線能在器中因自激放電而發生陰極 K 彎曲作凹鏡形，故由此發出之陰極射線咸集中於對陰極 AK 之上，此所謂對陰極者，即作為障礙物之用，今日恆



第 453 圖 舊式(充滿氣體)之 Röntgen 氏管(採自 Pohl: Elektrizitätslehre).

以鎢爲之。此與陽極 A 相連。Pd 爲一鈹製之管，融於玻璃壁中，作爲調節器內空氣之用。Röntgen 氏射線自對陰極發出。大部份貫穿玻璃壁而向外射出。此種之管產生射線時係由於管中空氣之游離，故亦稱游離管，其調節每不能完全，且缺點頗多。今日所用之 Röntgen 氏管大多已將管中空氣儘量排除，使成真空，而陰極亦改用鎢絲，通以電流，使之熾熱，Röntgen 氏射線藉以產生之陰極射線（電子）卽由此射出（§ 284），第 454 圖示此種管之略圖，其構造係仿 Coolidge 氏式。若用此管，則所發陰極射線量之多寡，可由調節加熱陰極之電流以變更之，而其速度則可由調節二極間之電壓以增減之；調節之法既較前精確，則由此產生之 Röntgen 氏射線自可隨吾人之欲而得不同之種類與強度。此非特在物理學之研究方面，抑且在醫學之應用方面均有無上重要之意義。自此種新式管發明以後，應用 Röntgen 氏射線以治療與診斷疾病，方能對症施方，不致使病者受害。

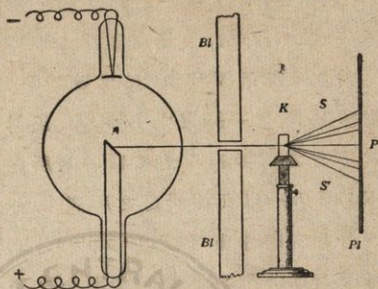
運用時所需之高電壓大多取一電花感應圈，今日尙有用其他之裝置者。

Röntgen 氏射線之貫穿本領或強或弱，視射線中所含之主要成分或爲短波或爲長波而異，吾人稱前者爲『硬性』射線，後者爲『軟性』射線。

471. Röntgen 氏射線之波動性。吾人久已臆想 Röntgen 氏射線或爲波長較紫外射線更短之光線。至 1912 年之時



第 454 圖 Coolidge 氏式之 Röntgen 氏管略圖。
K, 陰極, A, 對陰極, 與陽極合併, E, 加熱陰極所用之電池組。



第 455 圖 V. Laue 氏之實驗裝置以證明 Röntgen 氏射線在一晶體中之繞射。

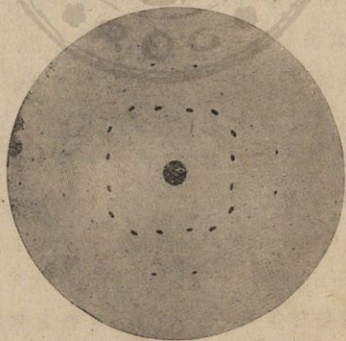
A, Röntgen 氏管之對陰極, Bl, 光闕, K, 晶體, P, 未繞射之射線, S, 繞射之射線, Pl, 照相片。

V. Laue 氏方證明 Röntgen 氏射線亦能發生干涉。由此非特可證明其為波動性,且可測量其波長。惟 Röntgen 氏射線之波長頗短,故當時雖欲將其分散成為光柵光譜 (§ 447),而苦無機械製造之光柵以資應用。於是 V. Laue 氏即發一奇想,思以晶體作為繞射光柵。晶體自成一所謂空間格子,換言之,其原子狀組織在體內之排列極有一定之秩序(詳情見 § 528)。Röntgen 氏射線貫穿此種晶體時,每遇原子狀之成份(原子,游子)即發生繞射。繞射之光線互相干涉。故 Röntgen 氏射線僅能沿一定不易之某數方向自晶體射出,猶如可見之光線穿過一刻痕之光柵時然。吾人隔棉毛織

物(格子光柵),而觀察一幾近點狀之光源時,輒見彩色之繞射圖形 (§ 447),此爲上述現象在二度空間內之一種類例。

第 455 圖示 V. Laue 氏用以證明 Röntgen 氏射線繞射之實驗裝置。一細束之 Röntgen 氏射線透過一晶體而射於其後方之一照相片上;凡爲射線所遇之處,片上皆現黑色。第 456 圖示一以此法所得之所謂 Laue 氏圖形。

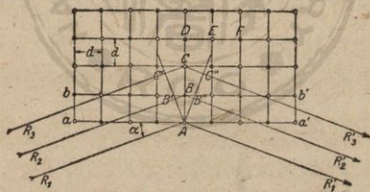
由此實驗,非僅可證明 Röntgen 氏射線之爲波動性,且亦可證明吾人對於晶體構造觀念之合理。其後 Laue 氏之思想益行發展,一方面 W. L. Bragg 及 W. H. Bragg 二氏即藉以致力於 Röntgen 氏射線之光譜學 (§ 472),另一方面結晶學以及吾人對於物質結構之知識均得賴以有非常之進步



第 456 圖 碲化鋅之 Laue 氏圖形

472. Röntgen 氏射線光譜學。晶體結構分析。苟吾人已知所用晶體之結構，則藉 Laue 氏法可測出 Röntgen 氏射線之波長，而從此以研究其光譜。但其中所遇之繞射現象恆頗為複雜。W. L. 與 W. G. Bragg 二氏設想之法可應用於光線遇晶體中格子面而反射時所起之干涉現象者，述較簡單。

吾人試取一最簡單之例，即食鹽 NaCl 之立方空間格子，其 Na 陽游子與 Cl 陰游子各按一定之秩序，輪流交換，各佔立方之一角（關於空間格子之詳情，見 § 528）。第 457 圖示此種晶體一截面之略圖。命各立方體元每邊之長為 d ，黑點代表 Na 游子，白圈代表氯游子 (D, E, F)。aa' bb' 等平



第 457 圖 Röntgen 氏射線在一晶體中之反射

面稱為網面。設 aa' 網面即為晶體之表面，一束平行而有相干性 (§ 437) 之 Röntgen 氏射線 R_1, R_2 等射於此表面之上，表面與射線間之交角為 α 。吾人試於此一束光線中提出直接射於 A 與 B 二游子上之二射線 R_1 與 R_2 而觀之。二

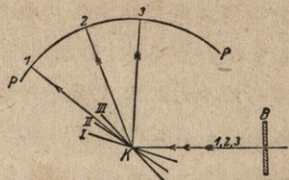
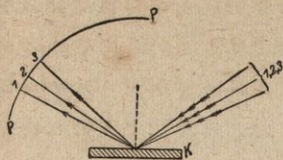
射線遇二游子後將向一切方向繞射。由此種繞射光線中，吾人試又提出 R'_1 與 R'_2 二線，其方向與 R_1, R_2 二線遇晶面後作單向反射時之方向相同。入射線既有相干性，故在 A 與 B' 二點處之位相相同，但在 A 與 B'' 二點處則僅當 $B'B + BB''$ 之路程等於波長 λ 或其整數倍時方為同相。吾人不難證明此項條件為

$$2d \sin \alpha = z\lambda, \quad (2)$$

式中之 z 為任意一整數（比較 § 446 與 447 中完全與此相似之關係式）。合於此項條件時，射線方不致因干涉而減弱或消滅。關於 R_2 與 R_3 二射線者，亦有相同之條件。

射線遇其他一切空間格點時，亦同樣發生繞射。就全體格點及一切由此繞射之射線言之，僅有入射角與繞射方向合於(2)式之射線離晶體而出時強度最大。按 $z = 1, 2, 3, \dots$ 而吾人分別稱之為第一、二、三等各級之反射。

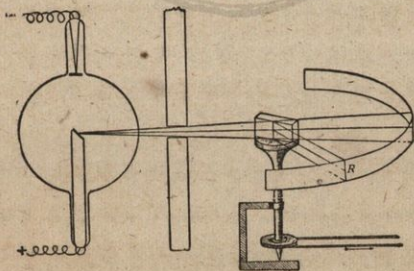
設有一束之 Röntgen 氏射線，其中包含各種波長不同之成份，射於一晶體 K 之表面上（第 458 圖）。吾人姑取一簡單之例，命其中含有三種不同之波長（第 458 圖中，以箭頭之多寡別之）。反射僅能在合於(2)式之方向上發生，故 Röntgen 氏射線中波長不同之各成份各以不同之方向而反射。若以彎曲作圓弧形之照相片 PP 置於反射光線之路程中，則吾人可得一 Röntgen 氏射線之光譜，其光譜線按波長之順序而排列。



第 458 圖 Röntgen 氏射線在一晶體上反射之說明

第 459 圖 轉動晶體法之說明

欲達此目的,今日已有許多不同之法,茲姑以轉動晶體法爲例而一述之(第 459 圖)。一束極細之 Röntgen 氏射線經過一鉛製之光闌 B 而射於一晶體 K 之上,晶體可繞光線之入射點而轉動。僅當晶體位置對於入射光線中所含任一成份合於(2)式之條件時,反射方能發生。例如晶體在位置 I 時其一成份沿方向 1 而反射,在位置 II 時,另一成份沿方向 2 而反射。晶體徐徐轉動,圓弧形照相片 PP 上即現一光譜,苟光闌 B 上之孔爲一絕狹之縫,垂直於圖面,則



第 460 圖 Bragg 氏之 Röntgen 氏射線分光法

光譜係爲精細之線所成，恰與尋常可見區域之光譜無異例如 § 475, 第 462 圖所示)。

第 460 圖示 Bragg 氏裝置之略圖。測量 Röntgen 氏射線波長時之精密度雖不及可見光之光譜，但亦已相當精確。

若用波長已知之 Röntgen 氏射線，則可藉其在晶體中發生之干涉現象以研究晶體之空間格子結構。即遇非晶體，亦可由此得某種關於分子構造之結論。欲作此種之研究，除 Laue 氏法外，尙有 Debye 與 Scherrer 二氏法；此法中欲研究之物質不必爲整塊之大晶體，而僅用其粉末即可。此法之原理與轉動晶體法同。粉末狀之晶體面在 Röntgen 氏射線中呈一切可能之方向，故種種之反射同時舉行；而在前法中，較大之晶體面逐漸呈不同之方向，故各種之反射先後舉行。將粉末置於一小管中，以 Röntgen 氏射線照之，即發生干涉現象，如第 461 圖所示者即其一例，由此可推算粉末中所含小晶體之結構。藉 Röntgen 氏射線以研究各種物質之結構，實爲今日工業上一重要之方法。



第 461 圖 固態 N_2O_4 之 Debye-Scherrer 二氏圖形

即用尋常可見光之光柵 (§ 447) 以測量 Röntgen 氏射線之波長，在今日亦已可能。惟應用時須賴一種機巧即射線

之入射角須爲頗大，幾掠光柵面而過。此時繞射作用與射線垂直射於一理想之光柵，其光柵常數等於此真正光柵常數在射線波面上之投影者，強弱相同。因入射之方向幾掠面而過，故此項投影之值頗小，其數量級可與 Röntgen 氏射線之波長相仿。吾人所觀察者爲自光柵反射之射線。由此測量所得之結果與用品體時所得者，頗能相符。

473. γ 射線與宇宙射線 自放射性物質 (§519) 發出之射線中，有一種射線，其一切特性均與 Röntgen 氏射線相同，惟通常其貫穿本領更較此爲大，即所謂 γ 射線者是。按 §472 所述之法以研究之，知此種射線之波長更較 Röntgen 氏射線爲短 (§465, 第31表)。

近日發現之宇宙射線 (Hess 氏射線) 貫穿本領又遠較最短之 γ 射線爲大，故此種射線若亦爲電磁波，則其波長必更較 γ 射線爲短 (第31表)。但今日亦有理由可認之爲速度非常大之微粒 (電子、質子或中子, §518, 524) 所成。 γ 射線可於自由之自然界中觀察見之，離海面愈高者，其強度愈強。由於此項情形，故有人認宇宙射線係自太空中射來，或竟自其他星體射來，經過地球周圍之大氣時已逐漸被其吸收者。此種射線之存在，可由其在一密閉容器中之游離作用而知之，容器周圍一切可以發生游離之來源已預行儘量遠移。假設宇宙射線果爲一種電磁波，則由其貫穿本領可估計其波長約自 10^{-8} 至 10^{-6} [ÅE]。

474. 電波之光學。以電學方法產生之電波在光學方面所示之性質根本均與全光譜中其他區域同，電波波長最短之一端逕與紅外光波波長最長之一端相銜接。凡反射，折射，全反射，色散，吸收，干涉，偏極以及繞射諸現象，電波無不具備。電波之波長既遠較尋常可見光爲長，則欲證明其有此種現象時所用之儀器自當與尋常所用者大不相同。Heinrich Hertz 氏嘗用石蠟或瀝青所製之大型稜鏡與透鏡以示明波長較短之電波之折射現象，而用導線所製之光柵以示明其繞射與偏極諸現象。關於電波之詳情，見 § 385 以下各節。

在完全自由之空間中，電波亦以直線進行，如尋常之光線然。無線電話與電報之所以能通達全球者，係因波長不爲太短之電波可沿地面而彎曲，即可周繞地球而前進；此項重要之事實乃係由於電波中之電磁場與導電性之地面間之交互作用所致。此外在大氣中有所謂 Heavyside 氏層者，對於上項之事實亦頗屬重要。此層似係在大氣中約 300 [仟米] 高度之處，其中有顯著之電荷存在。電波遇此種之電荷層時，自必由此反射。以此之故，電波不能傳至太空之中，而恆反覆折回地面。示向電報者，係利用電波之干涉作用而成，以特殊形式之天線置於適當之位置，可使電波在一方向上者因干涉而消滅，在地方向上者增強。

475. 發射光譜與吸收光譜。發光體之光譜稱爲其發

射光譜。因發光體種類之不同，而光譜可有各種大不相同之形貌。

熾熱之固體與液體發射之光譜爲連續光譜，其中包含一切之波長，凡可見區域中自紅而紫，以及紅外與紫外二區域中無一波長或缺。但因受他種射線照射於其上而發螢光或磷光等之固體與液體 (§ 487) 所生之光譜則或爲單獨數線，或爲線羣，或爲多寡向兩方擴展而模糊之波長區域。

發光之氣體，例如輝光放電時所遇者，所發射之光譜可分爲不同之二類，即線狀光譜與帶狀光譜是。線狀光譜(例如第 462 圖中間之一列)通常係由許多精細之單線而成，彼此隔離，但亦有多線擠聚於光譜中之某數處者。帶狀光譜亦由單線而成。但此種之單線恆擠聚特密，自行分成清晰之羣落，即所謂光帶者是。每一帶中包含無數之單線，帶之一端，即所謂帶頭者，各線尤相密擠。線狀光譜係自發光之原子所發射，而帶狀光譜則係自發光之分子所發射。故亦有稱之爲原子光譜與分子光譜者。關於光譜之規律當於第三十三章中詳述之。該章中尙示有數種標識光譜之照相 (§ 496 與 499)。

由一能生連續光譜之光源——例如弧光燈——發出之光線經過一物質時，光線即因之改變，其改變之狀況隨物質而異，對於各物質各有一特別之情形。光線經過物質時，某種波長之光線爲物質所吸收而不能通過，以致連續光譜

中即於該數波長處有暗線出現。此種光譜稱為該物質之吸收光譜。遇固體時，吸收區域通常頗為遼闊而模糊，遇氣體時，則為精細之單線（第 462 圖上下二列）。物質在可見區域中僅有絕狹之吸收區域或竟無之者，對於可見光線為透明，如玻璃與水是。



第 462 圖 太陽光譜及 Fraunhofer 氏譜線之一段。
中間一列為在同一光譜區域中鐵之發射光譜。

太陽光線之光譜原本為連續光譜，但其中有許多精細之暗線（最先於 1802 年時為 Wollaston 氏所發見），即所謂 Fraunhofer 氏譜線 者是（第 462 圖）。其最強者以 *A, B* 等字母稱之，而通常輒以之作爲指示光譜中位置之用。Fraunhofer 氏譜線之成因係由於熾熱之太陽核心（光球）發出之光線經過太陽之大氣（色球）時被其吸收所致，其中有數線則係由於地球大氣中之吸收（地球譜線）。故太陽光譜中所包括之 Fraunhofer 氏譜線實為色球中所含物質之吸收光譜。第 462 圖以鐵之發射光譜爲比較而示明太陽光譜中含有鐵之吸收光譜。

476. 光譜分析。一元素之光譜——不論發射光譜或吸收光譜——對於此元素恆有絕對的標識性。故可用之以察驗某一元素之存在與否。Bunsen 與 Kirchhoff 二氏

(1859) 之光譜分析法即以此為基礎，在化學與金屬學之研究中，此實為一重要之方法。Röntgen 氏射線之光譜分析法在今日尤屬重要。元素中原子序數為43(鐳)，72(鉛)與75(銻)三者即賴此法而發見，其在礦中所含之量太微，故迄未能以化學方法檢出。

以光譜分析法應用之於自恆星射來之光，亦頗屬重要。根據恆星光譜研究之結果，知恆星上所見之化學元素到處與地面上所見者相同。且由恆星之光譜尚可推得關於恆星狀態重要之解釋。

477. 純光譜色與混合色。光線為稜鏡或光柵分散成光譜後所呈之色為純光譜色。但有一事可加注意，即任一光譜色之色調 (Farbton) 恆可以許多不同之純光譜色按無數不同之方法混合而成。Helmholtz 氏嘗按分光計之原理製造一種混色器，藉此可比較二種混合光之色覺，或比較一混合光與一純光譜色之色覺。試以二不同之純光譜色按不同之比混合之，即可得一組之色調，相當於該二色間一段之光譜，連續而無間。但此二純光譜色在光譜中之位置或相靠近，或相遠離，而所得之結果每隨之大異。例如將純粹之紅色與黃色混合時，其混合色可完全與此二色間純粹火黃色一段之光譜相吻合。此種混合色亦有同樣特性之飽和度，與吾人觀察純光譜色時在美感方面可得同樣之滿足。但若將光譜中相離較遠之二純色混合，則此二色間連續無

斷之各色固仍存在，但其中間部份之混合色則略帶白色，較同一色調純光譜色之飽和度略減。對於每一純光譜色——約自 492 [$m\mu$] 至 570 [$m\mu$] (嫩綠色至青綠色) 間之區域除外——恆可覓得一定之另一純光譜色，將其強度按一定之比混合時，可得純粹之白色。此種一雙之色稱為互補色。二互補色並列時，每可引起色彩特見和諧之感覺，此為互補色之特點。此事在圖畫中頗屬重要（例如 Leonardo da Vinci 氏所繪之名畫，岩石下聖母 Madonna 像所御外套上之藍色與黃色）。對於上述嫩綠色至青綠色區域中之各色無一純光譜色可為其互補色；所可作為互補色者，皆為由純光譜色混合而成之混合色。此區域中各色之互補色稱為紅紫色，不見於光譜之中，而為純粹紅紫二色之混合色。

按紅紫二色不同之混合比而成各種不同之紅紫色調 (Purpurton) 亦自成一組連續之色，自純粹之紅色以迄純粹之紫色，絲毫無間。故自光譜之一端可沿二組不同之色而達其他端，或沿純光譜色：紅，黃，綠，藍，紫，或沿各種之紅紫色調：紅，紅紫，紫。由此可見光譜在物理方面為紅與紫二色所截斷者，在生理方面可經由各種深淺不同之紅紫色而成一色調之循環。

除紅紫色外，全組之純光譜色中似尚缺少某種之色，其最要者，如褐色與橄欖青。但事實上此處所遇者非為如紅紫色之真正新色調。以混色器研究一褐色物體之光譜，知

其色實爲火黃色。火黃色之物體所以能使吾人生特種之色覺而作褐色者，蓋以投射於該物體上之光線僅有一小部份反射所致。此種反射光線除其本色外，尚有黑色程度之特性，於不知不覺之中，同入吾人之色覺。試取一褐色及一火黃色之小板，以較強之白色照射褐色小板，則見二板之色似完全相同。吾人斷定一色爲褐色時，恆於不知不覺之中已將其與周圍亮度相同之物體之黑色程度相比較，而色覺即取決於此種周圍物體之亮度。試以火黃色之玻璃射一火黃色之視場於一白牆之上，若周圍黑暗，則場現火黃色，但若周圍較白，則視場作褐色。其他帶黑之色當推橄欖青與灰色，灰色者白色中略帶黑色者也。故一切色覺均取決於三項條件：即色調飽和度與亮度是。

關於光色學研究最有供獻之人在近日當推 Ostwald 氏。吾人咸知 Goethe 氏對於光色學亦有豐富之研究，嘗竭力駁斥 Newton 氏關於折射現象有彩色出現之理論。其後 Schopenhauer 氏亦從而附和之，惟附帶某種之條件。Goethe 氏之觀察大致雖完全無誤，但——因受美術的內中主旨過強之影響——其在物理學上之意義，則有不合。故就物理學之觀點視之，氏之光色學須遭擯棄。但由此可得許多重要而新鮮之生理的知識。

478. Young-Helmholtz 二氏之三色說。上述各種現象在生理學上之解釋當以視覺之三色說說明之，首倡斯說者

爲 Young 與 Helmholtz 二氏。按此理論，色覺乃由人目網膜上三種不同之獨立作用而起，通常吾人可假定眼中有三種不同之感色器官（錐狀纖維 § 430），每種對於某一定之純光譜色感覺最強，對於其鄰近之區域雖亦有感覺，惟已逐漸減弱，猶如一強烈減幅之振動體然 (§ 121)。任意一種之色覺通常輒同時刺激此三種錐狀纖維，但強度不同，而腦中對於該色之色調，飽和度，以及亮度三方面之感覺，即取決於此三種強度之比。

此項學說由色盲之研究而得一重要之立足點。色盲之人所見之光譜並非爲一組連續無間之色。其所見者，猶如一健康之人所見黃色與其互補色藍色混合後所成一組之色。光譜之二端爲黃與藍，而在 $500 [m\mu]$ 附近之區域，則見爲純白。健康之人僅患色盲者可分爲二類，即紅色盲與綠色盲是。後者見某種之紅紫色時，認作白色。二者有一相同之點，即紅色皆認作綠色，綠色皆認作紅色。尙有因某種疾病之後而變爲紫色盲或藍色盲者。色盲之原因係爲三種錐狀纖維中缺少任一種所致。

479. 體色。光線射於物體面上時物體所現之色係因光線中一切之色並不等量反射而生。物體之僅能反射紅色光者，若以白光照之，即現紅色。若照射之光線中並未含有能爲其所反射之色，例如純紅之物體以藍光照之，則現黑色。若照射之光線中僅含物體所能反射色之一部份，則物

體即呈該部份之色。尋常吾人所謂物體之色者，咸指其在日光中時所見之色而言，故在人工燈光下輒覺物體之色有變——通常吾人不能自知——，蓋人工燈光光譜中之短波區域恆較太陽光譜中之該區域為弱也。燈光之下，難於選擇有色之衣料等物，固夫人而知之矣。

顏料之色亦為體色，在實用情形中極屬重要。畫師欲配某種之色調時，輒將數種之顏料混合而成，其定律完全與純光譜色之混合亦稱光之相加者不同。吾人咸知藍與黃二顏料混合後恆得綠色，決非白色。此蓋因無論就反射或吸收各方面言之，混合物之特性恆為其二成份之公共特性。

光線透過物體時輒有某一定之光色區域為物體所吸收，而物體在透射光中所呈之色即取決於此。同一之色亦可將純光譜色以無限數不同之方法混合而成，如表面色然

第三十二章 溫度輻射與冷光現象

480. 溫度輻射. 所謂溫度輻射或稱熱輻射者,係指任何輻射由於物體之溫度而產生者而言,其強度以及光譜中能量之分佈皆與此溫度有關.

溫度不同之二物體互相對立,不使其間有熱之傳導 (§ 198) 發生,經過某時間後,二物體必將因熱之輻射而溫度逐漸平均. 此項作用進行時,不僅自高溫之物體輻射至低溫之物體,即後者亦輻射至前者. 惟二物體之溫度若相差愈大,則第一作用超過第二作用者愈甚 (Prevost 氏定理).

物體受射線照射後所以能加熱者,係因射線之被吸收於物體之中而變為分子運動,亦即變為熱能所致. 反之,物體輒因向外輻射而冷卻,蓋一部份之分子能量已於此時變為輻射能量.

481. Kirchhoff 氏定律. 黑體. Kirchhoff 氏之定律 (1859) 謂一物體輻射發射率 E 與輻射吸收率 A 二者間恆有完全一定不變之比. 即

$$\frac{E}{A} = C \quad (1)$$

C 之值僅隨溫度與波長二者而異,在其他方面對於一切物體皆為同值. 所謂輻射發射率 E 者係指每秒鐘內自物體

表面每 1 [厘米]² 之面積上發出之輻射能量而言。所謂輻射吸收率 A 者，係指照於物體上之射線為物體所吸收，既不透射，亦不反射之分數而言。若物體將射於其上之射線全部吸收，則 $A = 1$ 。若被吸收之射線均為光譜中之可見區域，則按日常生活中之意義，可稱此種物體為黑色物體。在物理學中所謂『黑體』者，則指物體之能完全吸收任何波長之射線者而言。但世間迄無一種物質能完全滿足此項條件。一密閉空匣之壁上開一小孔匣之內壁均塗黑色，若孔不為太大，則此孔在物理學上已頗近似一黑體。射線進入此孔時，實際上皆被吸收於空匣之內部，絕難經若干次反射後，仍偶由此孔而出。例如空匣內壁塗以煤煙，不難使射線每遇器壁一次，僅有 5% 反射，則二次反射後僅剩 $0,25\%$ ，三次反射後僅剩 $0,0125\%$ ，以此類推。此種之孔蓋確已為一完全之黑體。試於空匣小孔周圍之外壁上亦塗以煤煙，光線照於其上時，雖已有 95% 為其所吸收，但尚不及小孔之黑。

按 (1) 式，可知物體之吸收率 A 最大者，其發射率亦較其他任何物體在相同條件下之發射率為大。故黑體加熱後所發之射線，即所謂『黑體輻射』者，在光譜各區域中，皆較其他任何物體在同一溫度下所發之射線為強。此為自然界中所有一切輻射體之極限。其他物體之輻射恆不及黑體之強——在不同之光譜區域中，其不及之程度亦各異。

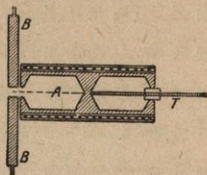


a



b

第 463 圖 黑白之物體, *a*, 低溫時反射光中所見者, *b*, 高溫時自行發光。



第 464 圖 Rubens 氏黑體測量輻射法之例。

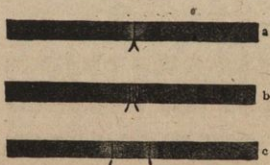
物體之外觀愈黑者, 輻射愈強, 此可以下述之實驗示明之。於一塊白金片上塗以數點墨汁, 冷時其色 (A 之值大) 較其周圍之反射面 (A 之值小) 為黑, 但若將白金片投於火燄中, 使之熾熱, 則墨斑顯著的較其周圍為明亮 (第 463 圖)。

空匣之內部加熱後, 其壁上之小孔實為在同溫度下一切可以想像之輻射體中輻射最強之物體 (黑輻射體)。因黑體之輻射為其他一切輻射體之理想的極限, 故其研究在理論上及實用上均屬重要。第 464 圖示一『黑體』之例, 用以測量輻射約可達 600° 。此為一銅塊, 於其中鑽成二空穴, 外繞以導線圈, 俾得以電流加熱之。其中 A 之一部份作為輻射之空穴, 前端備有光闌, 再前更置一水冷之光闌 B , 俾僅有自空穴內部發出之射線可供觀察。其第二空穴主要之用途端在可於其中納入一溫度計 T , 以備測量輻射空穴圍壁之溫度 (高溫度之產生法, 見 § 468, 第 451 圖)。就其產生之方法言之, 黑體輻射, 通常亦稱空穴輻射, 蓋初時密閉之

空穴中充滿一種能量任意分佈之射線，其後屢經與匣壁發生交互作用，而黑體射線即因此自行發出。

一物體輻射時，苟其一切光譜區域中所含之能量均較黑體之各區域中者為弱，且均為黑體輻射各區域同一之分數者，該物體稱為灰色體。因此種物體在反射光中觀之，恆作灰色，故名。按諸 Kirchoff 氏之定律，此種物體必將一切光譜色同一之分數吸收，灰色之成，即由於此。白光照射於其上時，一切之光譜區域均因之減弱至相等程度，而反射光中遂不見有特異之色。

482. 光譜線之自行轉變。光譜線之自行轉變(Foucault 氏, 1849) 亦為 Kirchoff 氏定律當然之結果。試將一弧光燈之光譜射於一光屏之上。於狹縫之前置一 Bunsen 燈，以白金匙盛金屬鈉少許，置於中，則鈉即燃燒作黃色之焰，自弧光燈射來之光線於穿過狹縫後使經過此鈉焰。於是光譜之黃色區域中即現一暗線，光譜若開展頗大，則現雙暗線(第 465 圖 b)。試將弧光燈熄滅，而仍留鈉焰，則光譜中相同



第 465 圖 光譜線在銦(a), 鈉(b), 鉀(c)三種元素蒸汽中之自行轉變(主線系中之第一對線偶, 波長尺相同)

之處立現二黃色線，此二線係來自鈉燄，弧光燈未熄以前原係微弱萬分，幾不可辨。

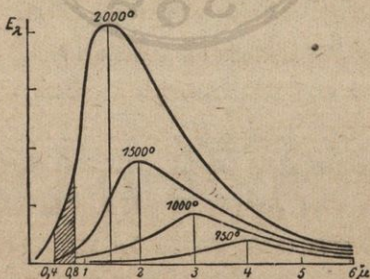
此種自行轉變之現象可以下述之理說明之。按諸 Kirchhoff 氏之定律，知鈉汽原子所能吸收之光線在光譜中所佔之位置當與其所能發射之光線之位置相同，蓋發射與吸收二作用恆相並而行者也（此種說法僅對於原子在其各瞬間狀態時所能發射之光譜線方為合理。故蒸汽並不能完全吸收原子一般所能發射之一切光譜線，其所吸收者，僅為相當於原子在其所謂正常狀態時所能發射之線而已，參閱 § 495）。故火燄中之鈉汽僅吸收與其本身所能發射同一波長之光線。鈉燄本身確亦發光，但其強度較之弧光燈光譜中為蒸汽所吸收之一部份光線相差甚遠，決不足以補償之。故光譜中相關之處，雖亦微弱作亮，然較之其極亮之周圍，則覺黑暗矣。作此實驗時，鈉蒸汽本身初不必自行發光，即以鈉汽儲於一玻璃器中，亦可得相同之結果。其他之氣體，如鋰汽與鉀汽（第 465 圖 *a* 及 *c*）等亦示相同之現象。

483. Planck 氏黑體輻射定律。Planck 氏 (1900) 嘗以理論方法推得一定律，關於黑體發射之光譜各區域內能量分佈之情形，完全與經驗相符。試將光譜按其波長 λ 或頻率 ν 區分之，而以 $E_\lambda d\lambda$ 或 $K_\nu d\nu$ 表直線偏極之黑體射線在波長 λ 與 $\lambda + d\lambda$ 間即頻率 ν 與 $\nu + d\nu$ 間一段光譜區域內所含之能量，惟該射線係指一頂角為 $\omega = 1$ 之錐體而言，而

此項能量乃爲每秒鐘內流過該射線錐體各截面之值。於是 Planck 氏推論所得之結果爲

$$E_{\lambda} = \frac{c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1}, \quad \text{或 } K_{\nu} = \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (2a)$$

(此二式中之任一式均可由他一式導出之。若 $d\lambda$ 或 $d\nu$ 示相等之光譜區域，則因 $\lambda\nu = c$ 而 $|d\lambda| = c|d\nu/\nu^2|$ 。又 $K_{\nu}d\nu = E_{\lambda}d\lambda$ 之關係必爲合理。以上列 E_{λ} 之值代入，且所有之 λ 均以 ν 代之，即得 K_{ν} 之式)。(2a) 式中之 T 爲絕對溫度， k 爲 Boltzmann 氏常數，已於熱之動力說一節 (§156) 中述及之， c 爲光在真空中之速度， h 亦爲一常數，稱爲 Planck 氏之作用量子。 $k = 1,37_2 \cdot 10^{-16}$ [爾格]/[度] 而 $h = 6,54_4 \cdot 10^{-27}$ [爾格]·[秒]。第 466 圖示數種溫度時 E_{λ} 之分佈，以波長之函數表出之。



第 466 圖 Planck 氏輻射定律之圖形表示法 (有平行斜線之部份爲可見區域)。

自一黑體每 1 [厘米]² 之表面上於 1 秒鐘內發射之射線，在波長區域 $d\lambda$ 或頻率區域 $d\nu$ 內者，按 (2a) 式應為

$$\epsilon_{\lambda} d\lambda = 2\pi E_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1} d\lambda, \quad (2b)$$

$$\kappa_{\nu} d\nu = 2\pi K_{\nu} d\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu.$$

Planck 氏輻射定律之導出係基於前嘗屢經提及之量子論，此實為物理學近代發展之出發點（詳情見第三十三章）。此處僅先述一事，即於導出此定律時最新奇之點端在 h 一值之引用，而此且為某一定之有限值。在舊時所謂經典物理學中導出之輻射定律亦必應與 (2) 式相仿，惟其中之常數 h 必向零收斂，蓋 h 為有限值之一事，在 Planck 氏學說中為一重要之特點者，在當時尚未被採用。若 $ch/k\lambda T$ 為值頗小，可略去不計，則用級數展開法可得

$$E_{\lambda} = \frac{ckT}{\lambda^4} \quad (3)$$

此式中常數 h 已消去。此由 (3) 式表出之定律事實上確早已由 Rayleigh 與 Jeans 二氏按經典物理學之基礎——尤如能量均分定律 (§ 156) ——而導出之。但此與實際情形不能相合，蓋按 (3) 式波長為有限值時， E_{λ} 之函數並無最大值，而按諸經驗，則確應有之。但在 Planck 氏定律範圍以

內, Rayleigh-Jeans 二氏定律可視為 λT 相乘積為值頗大時 ($\lambda T \gg ch/k$) 之一種極限。故在高溫度時, 對於波長頗長之區域 (紅外射線) 此定律當近似合理。事實上確係如此。

基於某種之假說, W. Wien 氏於 1896 年時亦嘗導出一輻射定律, 惟此種假說今日已不能成立, 即在經典物理學中亦早已放棄。此定律為

$$E_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (4)$$

式中 c_1 與 c_2 為二常數。吾人不難察見此定律亦為 Planck 氏定律之特例, 即當 $c_1 = c^2 h$, $c_2 = ch/k$ 而 (2) 式分母中之 1 較之 $e^{\frac{ch}{k\lambda T}}$ 一值可略去不計時之情形。此時必 $e^{\frac{ch}{k\lambda T}} \gg 1$, 即 $\lambda T \ll ch/k$, 與 Rayleigh-Jeans 二氏定律合理時之條件適屬相反。事實上 Wien 氏之輻射定律在低溫度時對於波長頗短之區域確在某極限情形以內尚稱相當合理。此項定律在上述情形中既能成立, 遂成為普遍之 Planck 氏定律之又一極限。

前在 §4 中所述之理遇此機會而又得一證。普遍之 Planck 氏定律確立以後, Rayleigh-Jeans 二氏定律與 Wiens 氏定律初未因之而即被推翻。僅其有效範圍則因之而受限制, 在此有效範圍以內, 吾人仍認之為十分近似之極限定律

484. Wien 氏位移定律. Stefan-Boltzmann 二氏定律. Planck 氏輻射定律尙未確立以前許多已知之其他定律亦可由氏之定律導出之. 例如在第 466 圖中所見能量分佈之各曲線在一定之溫度下各有一最大值,其值各隨波長而異;溫度愈昇,此最大值愈向波長較短之一方遷移. 按諸吾人之經驗,物體在低溫度時所發之光初作紅色,所謂紅色者,乃爲在吾人視覺中最超越之波長;溫度漸高,物體漸變爲波長較短之色. 此最大值之位置可將(2a)式中之 E_λ 對 λ 微分而得. 以 x 代 $ch/kT\lambda_m$ (λ_m = 最大值之波長),而令 $dE_\lambda/d\lambda = 0$, 則得 x 之方程式

$$x + 5e^{-x} = 5,$$

解之,得 $x = 4,9651$. 故 E_λ 爲最大值時之波長應由下式決定之:

$$\lambda_m T = \frac{ch}{kx} = b. \quad (5)$$

此卽爲 Wien 氏之位移定律(1893). 常數 b 之數值爲 $b=0,288$ [厘米]·[度],其精密度約爲 1/2% (吾人此處有一點不可忽略,卽 Wien 氏位移定律之合理性與量子論無關).

以(2b)式之 $\epsilon_\lambda d\lambda$ 對於一切之波長,或 $\kappa_\nu d\nu$ 對於一切之頻率,自 0 至 ∞ 積分之,卽得黑體每 1 [厘米]² 之表面上所發射能量之總值 E . 於是得黑體每秒鐘內自其表面之單位面積上發出之總輻射量爲

$$E = \sigma T^4 \text{ 其中之 } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} [\text{爾格}] [\text{厘米}]^{-2} [\text{度}]^{-4} [\text{秒}]^{-1}. (6)$$

故黑體輻射之能量隨絕對溫度之 4 次幂而遞增，此即為 Stefan (1879) 與 Boltzmann (1884) 二氏之定律。常數 σ 之值按最精密之測量為 $\sigma = 5.73 \cdot 10^{-12}$ [瓦特]/[厘米]² [度]⁴，其精密度約為 1%。

485. 利用輻射之溫度測量。一黑體之溫度與其發射之輻射量間既有一定規律之關係，故黑體之溫度可由其發出之輻射量之多寡以推知之，其法或探求其 λ_m ，即用 Wien 氏之位移定律，或測定其輻射之總量，即用 Stefan-Boltzmann 二氏定律。若遇非黑體，例如恆星，則此法不能直接應用。若亦視之為黑體而按 Stefan-Boltzmann 二氏定律以測其溫度，則所得之結果必較該物體真正之溫度為低，蓋其輻射恆較一同溫度之黑體為弱也。同理，應用 Wien 氏之位移定律時，通常亦有錯誤發生。許多之物體在高溫度時與一黑體無十分顯著之差別，尤以多數之恆星為然，故藉助於此種定律以測量其溫度，雖不能絕對準確，但輒亦不甚懸殊。任何物體之輻射恆較弱於黑體，決不能較之為強，故應用 Stefan-Boltzmann 二氏之定律必可測得一物體溫度之最低極限值。此種溫度稱為有效溫度或稱輻射溫度，以別於以分子動能 (§ 156) 為定義之真正溫度。

藉輻射以測量溫度之法稱為光測高溫法。下述者為

一比較簡單之法，在實驗室中與工業上尤稱合用。將欲測其溫度之表面造成一像於一小望遠鏡之物鏡光闌面上，其中置有一小電燈，其發光之強度可以任意調節。調節燈絲之溫度，使其表面亮度與欲測之面同。於是燈絲不復獨自灼爍發光，二者之輻射溫度必已相等。預將燈絲發熱所需之電流與一已知溫度之黑體校核之，由此即可測得輻射面之溫度。惟此法中亦須假設輻射面至少必與一黑體相近似，庶測出之溫度方能近似真確。

436. 發光效率 前於§261中嘗述光源之溫度愈高者，其發光效率亦愈大，換言之，即自物體發射之射線中屬於可見區域之部份，隨溫度而遞增。尋常之光源例如電燈中之燈絲，雖非完全黑體，但與之初無過甚之差別。吾人即視之為黑體，亦無不可。溫度愈昇，光源之輻射能量亦按 Stefan-Boltzmann 二氏定律而愈增。但同時能量分佈曲線之最大值則按 Wien 氏位移定律而向波長較短之一方遷移。在第 466 圖中，可見之光譜區域以平行斜線顯示之。低溫時此區域與最大值相離頗遠，此時之最大值位於紅外區域中，故輻射總能中僅有一小部份分佈於可見區域。溫度漸昇，最大值與可見區域漸近，而此項分佈於可見區域中之部份遂隨之漸增。但此項情形亦僅能以某溫度為限。蓋自第 466 圖，可見溫度更行上昇時，若能量分佈曲線之最大值已移至可見區域之彼端，則發光效率復將下降。發光效率最

大時之溫度約在 5500° 。此頗與太陽之溫度相仿。故人類之眼適對於太陽輻射中強度最大之光譜區域最爲靈敏。惜人工之光源決不能到達若此之高溫。近數十年來電燈工業之發展皆着眼於此點，務欲改善光源之經濟，其法端在提高光源之溫度。昔日炭絲燈之改成近代之鎢絲燈，實爲關於此方面之一大進步，自無疑義，蓋鎢絲融點頗高，可耐強烈之熾熱也。但一切人工光源之發光效率，即輸入之能量中於輸出時作可見光之部份，在一切重要之實際情形中，咸非常微小。例如石油燈與煤氣燈之發光效率僅爲 $0,2\%$ 。炭絲燈爲 $0,5\%$ ，真空之鎢絲燈爲 $1,6\%$ ，而燈泡內滿注氣體之鎢絲燈可達 4% ，即此微值已爲一切條件最適宜時之最高限度。

487. 冷光現象。 本章中以上所述之輻射現象均爲溫度輻射，即輻射之起源係由於輻射體之溫度者。在其他一切情形中所遇之光線輻射均稱爲冷光。前述稀薄氣體中放電時 (§ 290) 所見之輝光即爲電冷光，亦屬此項現象。下列之數種效應皆屬於冷光現象：

螢光。許多物質咸有一特性，能將射於其上之光線吸收一部份而重行發射波長相等或較長之光線。僅當有外來之光線照射於其上之時，此種物質方克連續發射光線，彼停而此亦隨之而停（與下述之磷光現象有別）。此項現象最初於螢石察見之，故名螢光。其他能在光譜可見區域內發

生螢光之物質有 Fluoreszein 溶液，與 Askulin 等。碘蒸汽在一儘量除去其他氣體之容器中亦能發生螢光，作黃綠色。凡物體表面爲外來光線射到之處皆發螢光。故光線在一螢光性物質中穿過時，其所經之路程顯然可睹，有如穿過一渾濁之媒質中然。但二者之原因完全相異。在渾濁之媒質中係由於光線遇微粒時之散射，而在螢光性物質中則係由於該物質原子或分子之被激而發生之特殊光振動。故螢光光譜亦能表示物質之特性。

除某種有理論基礎之特例外，關於螢光之激發有一 Stokes 定律 允稱合理。螢光之波長通常輒較外來激發之射線爲長。此定律及其例外須待下章基於量子論以說明之 (§ 508)。

前已述過物質受 Röntgen 氏射線之作用時亦能發生螢光現象。陰極射線與放射質之射線亦均能引起螢光。

磷光。磷光者，亦爲物質受外來光線照射後所激發之現象，自此方面觀之，與螢光同。人目所見之不同，乃在外來之光作用停止後，磷光現象尙能持續，惟久暫則容有不一。有時此持續之時間頗爲短促，須用特製之儀器（磷光鏡）以辨認之。硫化鋅以及所謂 Balmain 氏之發光色素（CaS 和以 Bi）皆爲磷光性物質之例。

Lenard 氏嘗示明物質之所以能發磷光者，其原因之一係由於物質中雜有些許之『有效』金屬。例如氏所研究之

【磷】中，其一種係由 1 [克] 之 ZnS , 0,0001 [克] 之 Cu , 及 0,01 [克] 之 $NaCl$ 所成，此最後一成份之主要用途乃在促進其他二成份之融合。

磷光現象與光電效應 (§ 489) 有關，其機構頗為複雜，此處不能詳述。

摩擦光。將二糖塊相擦或將其搗碎時，若在黑暗之中，輒見有微弱之光，稱為摩擦光。許多其他之晶體亦示相同之現象。

化學光。 生物光。在許多化學作用中，二物質化合時亦能發光（化學光）。除夏秋之間吾人常見之螢外，尚有許多海產動物亦能發光（海光）；此種動物發光之現象（生物光）亦屬於化學光範圍以內。動物發光之原因純係由於某種之微生物。凡能發光之較大動物之體中恆有此種微生物匿居其內而與之營共同生活。微生物之發光須有賴於氧之供給。體內有此種微生物寄生之較高等動物對於其旅客所需氧之供給有權節制，可任意使之發光或使之停止。



第八編 量子論與物質論

第三十三章 量子論 原子與分子之構造

488. Planck 氏定律與量子論. Planck 氏(1900)於導出黑體輻射定律 (§ 483) 時以爲必須採取一種斷然之假設始能求其與實測之結果相合,但此種假設絕不容於所謂經典物理學之觀念. 按往日之觀念,任何輻射皆必爲一種連續之步驟,輻射能量可以任何之有限值出現,即可將其任意剖分者;自物質原子輻射之光線亦屬如此. 但吾人已示明若採用此項觀念,則勢必將導至 Rayleigh-Jeans 二氏之輻射定律,而事實上此律僅爲 Planck 氏定律對於長波及高溫度時之一種極限,初未能普遍合理,已如 § 483 所述. Planck 氏定律中之常數 h , 即作用量子,無限接近於零時,氏之定律即變爲 Rayleigh-Jeans 二氏定律,但事實上經各種不同之測量所得之結果均爲 $h=6,54_4 \cdot 10^{-27}$ [爾格]·[秒]. 故作用量子 h 爲一有限值,此實爲新舊理論不同之處,而爲新理論最顯著之特點.

Planck 氏所創之假設謂由原子發出之輻射中所含之能量初非可爲任意多寡之值,而恆以僅與下式相合者爲限

$$E = h\nu \text{ [爾格]}, \quad (1)$$

式中 E 爲射線之能量, ν 爲頻率. 故任何射線中所含之能量可謂爲亦有一種原子性之組織. 惟其意並非謂世有不變之輻射原子存在. 射線被物質吸收時, 可變成他種形式之能量, 例如可變成熱能, 亦即分子能, 而同時其原子狀之特性即因之消失, 亦可變成他值之能量量子. 祇須能量尙作輻射之形式, 其頻率爲 ν , 則能量恆具有量子性, 其各量子之值恆爲 $h\nu$, 決無或異於此者.

以此爲基礎之理論因即稱爲量子論. 當此項理論之初建也, 原冀於熱輻射一方面理論與實驗從此可以符合而已, 孰知其應用日廣, 竟使物理學之發展獲得非常圓滿之結果, 實非始料所及. 自二十世紀初葉以來, 此項理論實握物理學之權威. Einstein 氏首由此種量子之假設而作一結論曰: 凡原子與射線間之一切交互作用皆應受量子定律之支配. 根據此項思想方知全部原子性作用中此 h 常數之重要; 即遇有與輻射初無直接關係之情形, 如一切作用之有任何週期性者, 此常數亦莫不佔有重要之地位. 故量子論在今日已能統轄全部關於物質之理論, 而尤以自 Bohr 氏創立原子構造說後, 其權威更有增無已. 凡遇任何形式之原子性作用, 量子論之證明到處皆是, 幾無窮竭, 故量子論對於物理學之研究確已肇造一突飛猛進之階, 在科學史中, 實絕無而僅見者也.

489. 光電效應. 光電效應可視作光線有量子性最顯著之明證. 光線射於一光潔之金屬面時,其周圍之空氣即變爲有導電性. 據詳細之研究知光線可使金屬中之電子脫離金屬面而出,浮游於其周圍之空中,而作爲電荷子之用. 但照射光波之波長不可超過某一極限,此極限之值則隨金屬之種類而異. 此種現象稱爲光電效應,或簡稱光效應.

Röntgen 氏射線亦示強烈之光電作用. 此項效應係基於光線中之電磁場與物質中之電子發生交互作用而成.

按量子論之說,光線僅可以能量爲 $h\nu$ 之量子出現,故吾人根據能量原理,不難預料一頻率等於 ν 之光線射於金屬面時,因光電效應而釋出之電子之動能,最高嘗不逾 $h\nu$. 事實上確係如此. 但電子離金屬面而躍出時,須反抗使其仍留體中之分子力而作工,故能量 $h\nu$ 之一部份必因之而消失,於是在通常之情形中

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - A \quad (2a)$$

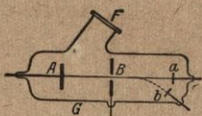
(A = 電子躍出時所作之工.) 照射之光線頻率 ν 愈大者,其各光量子之能量亦愈大,而電子躍出金屬體時所作之工愈屬無關輕重. Röntgen 氏射線之頻率極大,躍出工作之值更不足道,故躍出之電子所具之動能事實上即爲

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu \quad (2b)$$

但此處又與經典物理學發生一新衝突。按舊日之觀念，吾人勢必認定自一原子發出之各個光量子成各自均勻的由原子向各方傳播而各成一球面波。在此種之觀念下，吾人不難從已知之實驗條件估計使一電子得有能量 $h\nu$ 所需之時間。由此可得一結論，即光線照射金屬面後光電效應不能立即發生，在第一個電子吸收足夠之能量，因得躍出金屬體以前，須經過某一相當之時間，此時間且並不過促，頗足供吾人之觀察者。是即光線開始照射後須歷某時間而光電效應方得發生。但實際上則不然，恆立刻出現。至此，吾人遂又不得不放棄各個光量子各成一球面波之觀念。吾人須假定各光量子之進行必限於一極狹之立體角以內，即由原子各向單方前進。蓋非作若是之假設，即不足以解釋光線初達金屬面之一瞬間，金屬面上何以到處已有單個光量子全部之能量 $h\nu$ 出現，可以供用之故。此為 Einstein 氏所創立之光量子根本理論，其他可以助其成立之理由甚多，今日物理學之進步頗受其影響焉。

光電效應中，電子自金屬面躍出而成光電流；在照射光線波長相同時，光電流之強度正比於光線之強度。故由被照射之金屬面上躍出之電子電流之強度可用以測量光源之強度（光度學 §402）。此所謂光電光度學者，今日已有頗廣之應用，例如在天文物理學中每用之以測量恆星之亮度，尤多用以觀察變星亮度之變化。

第 467 圖示一簡單之儀器,可
用以示明光電作用. 將一玻璃器
G(光電管)中之空氣儘量排除,其旁
裝一水晶窗 F(使紫外射線可以透
過),光線由此射於一光潔之金屬



第 467 圖 示明表面光電作
用之儀器.

電極 A 上. 電子即由此躍出. 電極 B 上鑽有一小孔,其電
壓較 A 電極為高,故電子之初速本為頗小者,即因此而加速,
得達 a 電極;此與一靜電計相連,由此可證明電子之陰電荷.
若以一適當強度之磁場使電子進行時偏轉而達於 b 電極
(§ 307),則其荷質比 e/μ 之值可藉以測定,由此可證明自金
屬面躍出者確為電子.

作為光度測量之用者,電極 A 通常多用鹼金屬(鉀,鈷)製
之表面,蓋此種金屬中電子躍出時所需之工作(2a 式)為最
小,其光電作用可深入可見區域而猶頗靈敏,不若其他金屬
之主要靈敏性僅在紫外區域中也.

試以二純潔之鋅球作為一感應圈之電花隙,使二球相
離頗遠,僅或偶有一二電花得以越過. 今若以石英水銀燈
之紫外光照於球上,則電花放電立即猛烈發生,蓋此時電子
自鋅球躍出而使電花易於通過. H. Hertz 氏首先發見光
電效應(1887),即基於此項作用.

近日之電視術,即藉電波播送圖像於遠方,以及有聲電
影等,均須應用光電管.

除限於表面上之表面光電效應外，某種晶體之內部遇有光線透入時亦可發生相似之作用（體內光電效應）。此時光線能使晶體內部作空間格子排列之原子釋放其電子。此種被釋後自由之電子可徘徊於晶體結構之間。若於此種被照射晶體之二界面上鋪以二金屬之箔，而於二箔間施以足夠之高電壓，則原為絕緣最佳之晶體中亦有電流流過。此種現象可於金剛石，硫化鋅，以及其他許多晶體中察見之。

體內光電效應之最為顯著者當推硒元素。光線照射其上時，其電阻即大見減小；故亦可用以測量光源之強度，與表面光電效應同。但硒光電管較之表面光電效應之光電管有一缺點，即光線停止照射後，光電效應不能立即消滅，如有慣性然。

體內光電效應與熾光現象有一密切之關係。

490. 光子之動量與質量。前在 § 464 中曾述光線照射之表面上恆受有壓力，而自行發光之物體則恆感覺一反坐作用。故光線自一物體射至他一物體時，吾人可視之為由第一物體施一作用力於第二物體。此時必有動量自第一物體轉授於第二物體。射線由第一物體到達第二物體，恆須歷一相當之時間，而第二物體亦須經此時間後方克接受此動量；但第一物體則在發出射線後因反坐作用而立即感受一動量。此似與衝量定理 (§ 33) 不合，蓋第二物體感受之衝量恆當與第一物體感受者相等而相反，但當其尚未接受

此衡量以前，第一物體動量之變化迄未有其他之變化以抵償之。吾人若能視任何輻射能量亦各具有動量，則動量不滅之定理仍得完全維持，而仍不失為一普遍之自然定律。若是則由一物體發出之輻射皆應有一動量，其值與發射體因輻射之反坐作用而感受之動量相等，而方向則與之相反。此項射線到達第二物體時，即傳授其動量與之。若射線完全為其所吸收，則第二物體之動量與第一物體之動量等值而反向。若射線完全為其所反射，則其作用猶如完全先被吸收，然後立即重行由此發射。此時第二物體又因反坐作用而又得一動量，射線則因其方向之轉變而得一與前相反之動量。

按諸理論，知射線之能量為 E [爾格] 而以光速度 c 前進者，其動量當為 $p = E/c$ [克][厘米]/[秒]。在相對論中，對於任何形式之能量，普遍的亦均有此項關係。於是一個光量子之能量為 $h\nu$ 者，其動量當為

$$p = \frac{h\nu}{c} \quad (3)$$

射線所照射之面所以感受輻射壓力者，可以光量子之與之猛撞以說明之，其情形正復與用以說明氣體壓力 (§ 97) 者完全相同，其壓力由光量子與之碰撞時動量之變化而來。發光體發出光量子時輒感受反坐作用，猶如大礮之放射礮彈。

在力學中吾人嘗以 $p = mv$ 為動量之定義，故 $m = p/v$ 。

同理,光量子 $h\nu$ 以光速度 c 運動時,其質量爲 $m=p/c$, 或

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (4)$$

在相對論 (§ 538) 中普遍的亦有此項關係。

近日習慣上光量子皆稱爲光子。光子之地位猶如構成物質之質子與電子,由此可知其微粒性。蓋光子有質量,有一定方向之速度(與球面波之說相背),有動量,凡爲微粒所有之特性,光子莫不有之。前有 Maxwell 氏建立光之電磁說,今又有 Planck 與 Einstein 二氏建立光之量子說,二說大相逕庭,而又同時皆屬合理,其矛盾無有出其右者矣。

吾人所遇之光學可分爲三種不同之形式,即幾何光學或稱射線光學,波動光學與量子光學是。幾何光學之定律可完全歸納於波動光學及光之電磁說之定律中;凡遇光線所與發生交互作用之物體遠較光線之波長爲大者,不論任何情形幾何光學之定律恆可應用。波動光學不特遇有此種情形,即遇有物體大小與光之波長相埒時亦均可應用。波動光學中恆以光波在空間內之傳播以解釋各種之現象,尤如遇干涉現象時,此實爲唯一可以想像之說明。但凡遇涉及光之基元作用,如光電效應,Compton 氏效應 (§ 491) 等,波動光學之定律即遭失敗;概括言之,凡遇光線與物體原子組織間發生任何基元交互作用,尤如於計算其能量之關係時,波動定律均不能應用。此種情形僅可訴之於量子光學,

即視光之本性爲微粒，方得解決。故此處吾人實遇一驚奇之事，即吾人所觀察之光現象，須按其形式之不同而以根本不同之本性歸之。

491. Compton 氏效應。在光電效應中，各光子之能量咸悉數變爲他種形式之能量，尤以變爲電子動能之部份爲最多。但有時亦可有某種之現象發生，其光子與電子或原子發生交互作用時，光子僅傳授其能量 $h\nu$ 或衝量 $h\nu/c$ 之一部份於電子或原子。電子若自光子取得 ε 之能量，則光子之能量即減至 $h\nu - \varepsilon$ 。按 Planck 氏定律 (§ 488, 1 式)，此時射線之頻率必將減小，其新頻率 ν' 當以下式表之：

$$h\nu' = h\nu - \varepsilon. \quad (3)$$

同時衝量定理亦須滿足。此項現象即爲光線遇物質中原子或電子時之散射。僅當光子之質量與光線所遇之原子狀組織之質量相埒，即光線之頻率頗大，物質微粒之質量頗小時，方可冀其頻率或有可以測出之變遷。故欲證明此項現象，僅能利用自由（或幾近自由）電子與 Röntgen 氏射線間之交互作用。A. H. Compton 氏 (1922) 以 Röntgen 氏射線照射電子結合不甚牢固，即電子頗能自由行動之物質，以冀證實此項重要之效應，而卒底於成，因即名之爲氏之效應。Röntgen 氏射線遇此種電子後，必將減低其頻率而散射，而電子既自 Röntgen 氏射線奪得其一部份之能量與衝量，即自物質中向外衝出。此項交互作用之外觀頗似二物體之彈性

碰撞,其理論亦可根據相同之基礎,即動量與能量之不滅定理是(§ 33 與 42)。

用 Compton 氏效應以示明光子之微粒性,或較用任何其他之作用者為顯明,故此處當一述其計算之法。命入射光子之頻率為 ν_0 , 即其能量為 $h\nu_0$, 散射光子之頻率為 ν , 而其能量為 $h\nu$ 。為簡單計,姑命光子所遇之電子初係靜止。散射作用發生後,命電子之速度為 v , 動能為 $\mu v^2/2$, 動量為 μv 。散射光子之運動向與入射光子之原方向所成之交角為 θ_1 , 被撞而運動之電子之運動向與原方向所成之交角則為 θ_2 。按能量原理,下述之條件必須滿足。

$$h\nu_0 = h\nu + \frac{1}{2}\mu v^2$$

按動量不滅定理可得二條件方程式。一方面,電子與散射光子二者在入射光子原來運動方向上之動量分量之和應等於入射光子動量之原值 $h\nu_0/c$, 另一方面垂直於此方向上動量分量之和應等於零。於是得

$$\frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu}{c} \cos \theta_1 + \mu v \cos \theta_2 \quad \text{與} \quad 0 = \frac{h\nu}{c} \sin \theta_1 + \mu v \sin \theta_2.$$

以上三式中有未知數四,即 ν , v , θ , 與 t_2 是。故此項現象尙不能由此三式以完全決定之。吾人須已知其一數,例如散射光子之方向 θ_1 , 則其他三數即可由此計算。此處將各步之計算略去,而僅取其結果如下:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + \frac{\nu_0}{N}(1 - \cos \theta_1)}, \quad \operatorname{tg} \theta_2 = -\frac{\cotg \frac{\theta_1}{2}}{1 + \frac{\nu_0}{N}},$$

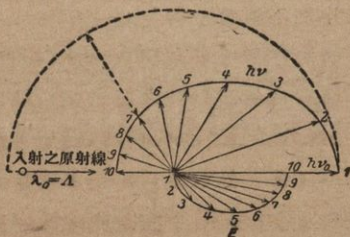
$$\frac{1}{2} \mu \nu^2 = E = h \nu_0 \frac{\frac{\nu_0}{N}(1 - \cos \theta_1)}{1 + \frac{\nu_0}{N}(1 - \cos \theta_1)}.$$

此三式中 $\mu c^2/h = 1,23 \cdot 10^{-23}$ [秒] $^{-1}$ 一值均以 N 代之。

今若以 $\lambda = c/\nu$ 之關係代入上式，則得光子散射時波長之變遷值為

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{c}{N}(1 - \cos \theta_1). \quad (5)$$

在此式中所可注意者，即 $\Delta \lambda$ 與 λ_0 無關，而僅隨散射角 θ_1 而變；此不難以實驗證明之。 N 之因次與頻率同，其值相當於 $\Lambda = 0,0244 [\text{\AA}]$ 之波長，此種波長已在 Röntgen 氏射線區域以外。第 468 圖示 $\lambda_0 = \Lambda$ 即入射之原射線波長為 $0,0244 [\text{\AA}]$



第 468 圖 Compton 氏效應。

時 Compton 氏效應對於散射角之關係。圖中各箭矢之出發點爲電子所在之處，入射之光子 $h\nu_0$ 即遇之而散射。在上半圖中各箭矢之長示光子彎折至各該方向後所剩之能量 $h\nu$ ，在下半圖中者爲電子彎折至各該方向後所得之動能。兩半圖中以同一數字標示之兩箭矢示相應之量。實測之結果與理論恰相一致，故此項效應可視爲 Planck 氏定律最顯著之立足點之一。

492. 電子與電量子。吾人已知電子爲電流之運輸者，故分子內之圓周電流亦必以電子爲憑藉，此即爲物質所以有磁性之原因；吾人亦嘗述過光線之發射係源於原子或分子中電子之運動。一切電子皆完全相同，均荷有相等之陰電荷，即吾人所稱爲電量子者是，按最精密之測量，其值爲

$$\varepsilon = 4,77_0 \cdot 10^{-10} \text{ [靜電單位]} = 1,59_1 \cdot 10^{-19} \text{ [庫侖]}.$$

此電量子最可靠之值係爲 Millikan 氏所測定，氏所用之法係根據 Ehrenhaft 氏法而加以改良者。氏所用之儀器爲一水平導片之小型容電器。以一噴霧器將微小之油滴噴入二導片間之空氣中，任其因重力之作用而徐徐下降，其運動可用一備有目鏡測微計之顯微鏡以觀察之。若以 Röntgen 氏射線等方法使空氣游離，則游子可附於油滴之上，而油滴因得一電荷，其值或僅爲單個之電量子 ε ，或爲其簡單之倍數。設油滴之電荷爲 $n\varepsilon$ 。此時於容電器間若施以一電場 E ，則油滴將受一力 $k = n\varepsilon E$ [達因] 之作用。電場

可任意處理之，務使此力與重力 mg 方向相反 ($m =$ 油滴之質量)。於是油滴所受作用力之總值為 $mg - n\varepsilon E$ [達因] $n\varepsilon E$ 或較 mg 為大，或較之為小，而油滴因之或徐徐上昇，或徐徐下降。根據 Stokes 氏之落體定律 (§ 116) 可由其速度以計算 $n\varepsilon E$ 之力，而從此算出電荷 $n\varepsilon$ 之值。油滴之質量則由其密度與其體積(以顯微鏡測量其直徑)以計算之。

按此測得之電荷恆為某一定值電荷 ε 之簡單整數倍，此定值之電荷者，即電量子是；不論陽荷與陰荷均係若此。故電量子者不特為陰電之原子，亦且為陽電之原子。

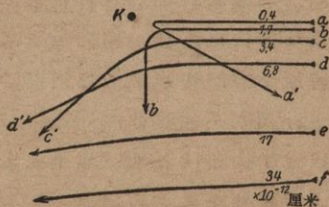
493. 原子構造。數十年以前關於原子之研究純係屬諸化學之範圍。但以化學方法作此方面之研究其可能性似有限制。另一方面物理學家久已深信原子與分子活動狀況之祕密以在光譜中洩露者最為直接，故自光譜之結構以探求原子與分子之構造，在原理上必屬可能。但在量子論尚未成立，尚未能應用於原子以前，雖欲探求，而苦於無從着手。迨此定理既已確立，復加以放射現象之發見，物理學方克視光譜為重要方法之一，賴以研究原子之構造。

吾人恆能將原子游離，換言之，即恆能設法由原子分出電子，是知原子必非根本不能再分之單體。是則電子必為原子之成份。但電子決不能靜止於原子核之周圍而與之平衡，以成一靜的模型，此不難證實之。

Rutherford 氏根據 Lenard 與 J. J. Thomson 二氏之觀念，

首倡一種理想，謂原子中當有一原子核，原子之全部質量幾悉集中於此，而荷有陽電。原子核之旁有電子旋繞之，因其荷有陰電，故得為原子所牽住而不致失散。原子實為一太陽及一行星系之雛型。正常原子即電中和原子中週繞原子核之電子個數多寡不一，但其陰電荷之總值恆與原子核之陽電荷相等，而對外恆為中和。各電子各荷一個陰電量子，故原子核恆荷有整數之若干陽電量子，其數與電子之個數同。

Rutherford 氏此項觀念係為 Geiger 與 Marsden 二氏(1909)之實驗所引起，二氏嘗以 α 射線，即運動極速而陽荷之氦原子 (§ 519)，使之穿過極薄之金屬箔， α 射線質點之運動方向即有因之偏轉者。此必係 α 質點偶或衝至與原子核相離極近之處，以其亦荷陽電，故受擯斥所致；捨此實無他法可以說明。第 469 圖示其大略之情形， K 為一原子核。 a 至 f 各曲線為 α 質點衝入原子核作用範圍以內時所歷之軌道。



第 469 圖 α 質點之前進方向因原子核之作用而偏轉略圖。

質點經過原子核旁時，在未遭撞斥以前得與之相離愈近者，其運動向之偏轉愈烈（第 469 圖中所示之各數為 α 質點所能趨近原子核而尚未遭撞斥以前之最小距離，其單位為 10^{-12} [厘米]）。 α 質點向一極薄之金箔衝射而穿過後偏向諸質點在各方向上之分佈可用 Coulomb 氏定律及簡單之或然率以計算之。實驗與計算頗能符合。由此更可算出 α 質點穿過金箔時其與原子中心間距離之數量級最小可達 10^{-12} [厘米]。此項距離遠較原子直徑之數量級 10^{-8} [厘米] 為小。由此可知原子初非為整個不能穿越之單體， α 質點竟能橫貫其組織而過。由此實驗更可得一結果，即原子核與 α 質點間互相推斥之作用力至少在相距 10^{-12} [厘米] 時尚遵守 Coulomb 氏定律 (§ 211)（吾人近日已知距離更遠較此為小時，此定律已不復合理）。

以 Coulomb 氏定律應用於一單獨電子旋繞原子核之運動，則因該定律與 Newton 氏萬有引力定律 (§ 63) 數學上形式之相同而電子之運動乃亦遵守行星運動之定律。故 Kepler 氏定律 (§ 66) 在此處亦為合理，其第三定律亦然，蓋一切電子之荷質比 e/m 皆為相等也（參閱 § 211）。該定律中僅須將『太陽』二字易以『原子核』，『行星』二字易以『電子』即可但旋繞於原子核周圍之電子個數一經加多，則彼此即互生影響，亦猶行星之互相擾亂，而不復與 Kepler 氏定律相符。此種電子之互相擾亂，較行星之擾亂尤為顯著，故電子軌道

之形式常頗爲複雜，無從精密計算之。此蓋因太陽系中太陽之質量非常巨大，遠非行星之質量所可比擬，而原子核之電荷與電子之電荷則幾屬同一數量級也。

圍繞原子核之電子之個數等於其所屬之元素在週期系 (§ 501) 中之原子序數，自氫 1 起至鈾 92 止。原子核所荷陽電量子之個數亦與此數同。

按上述之實驗，知原子核直徑之大小決不能大於 10^{-12} [厘米]，或且遠小於此，而整個之原子，包括圍繞之電子在內，其直徑之數量級爲 10^{-8} [厘米]，約較原子核大 10000 倍。

494. 量子論對於原子構造之應用。Bohr 氏理論。上節所述之觀念尙不足以單獨建立與實際相符，即合於實驗根據之原子構造理論。按諸經典的理論，電子圍繞原子核而轉動時，因其帶有電荷，故應產生一連續變化之電磁場於空中，如電振動然，而同時應有電波即光線由此發出 (§ 385)。轉動之電子勢必以能量給予其所發射之光線，而此項光能量則須取給於電子本身。於是電子勢必繼續趨近原子核；此時其動能確因之增加，然其位能則因之減小，其減小之值且二倍於增加之值，故電子終必將落於核上。但事實上則不然，蓋上節末段所述關於整個原子（包括其附屬之電子）及一原子核二者大小數量級之比，相差懸殊，因知電子決不趨近原子核，而此項結論在實驗上確屬完全可靠。此外尙有一困難之點，即按諸經典的理論，此種週繞不息之電子能

量既繼續減小，則其轉動週期，亦即其振動週期，應連續改變，而應有連續光譜發出；但事實上就氣體觀之，其原子間互相擾亂之作用最微，即電子之運動顯於現象中最為單純者，而其所生之光譜乃為線狀或帶狀而非連續。

Niels Bohr 氏(1913)以量子論之基本思想應用於原子中電子之運動，而上述兩種困難同時悉得解除。惟經典物理學中某種之觀念與量子論不能相容者，自須擯棄。蓋原子內部之作用實遵守量子論之定律，經典物理學已無權管轄之也。

Bohr 氏之基本思想可述之於下。以 Coulomb 氏定律及經典的理論為基礎，一個電子之能量雖為定值，然其週繞一原子核時可有無限數偏心度不同之軌道，惟其中僅有少數之軌道特屬優異，電子沿之運動時可歷一長久之時間而狀態不變，即所謂不輻射軌道者是。電子在此軌道中時，並不發射能量。若原子中僅有一個電子，則此種不輻射軌道或為正圓，或為橢圓。此種之軌道由所謂量子條件者以決定之；若軌道為正圓，則其條件謂僅有電子角動量 (§ 46) 為

$$J \cdot \omega = \mu r^2 \omega = \frac{n\hbar}{2\pi} \quad (6)$$

($n =$ 整數， $\hbar =$ Planck 氏作用量子)，即其值等於 $\hbar/2\pi$ 一值之整數倍者之軌道方能存在。此式中 μ 為電子之質量， J 為其在軌道中時之轉動慣量， r 為軌道半徑， ω 為電子之角速

度。此外尚有一條件，即原子核與電子間之引力恆必為使電子軌道彎曲之向心力 $\mu r \omega^2$ (參閱關於月球運動與此相應之思索, § 65)。故電子之軌道半徑 r 與角速 ω 不難由此計算之。對於一組數值不同之整數 n ($n=1,2,3$ 等等), 可得一組所謂量子軌道。整數為 $n=1$ 時之軌道稱為正常軌道或最內軌道。此為能量最小之軌道。

電子可自一量子軌道躍入他一量子軌道。當其自一離原子核較遠之軌道躍入一較近之軌道時, 其能量必因之減小, 此相差之能量即自原子輻射而出。命 E_1 為電子未躍以前之能量, E_2 為既躍以後之能量。於是 $E_1 - E_2$ 之能量即因輻射而放出。按 Planck 氏定律 (§ 488, (1) 式), 由此發出之射線之頻率 ν 應以下式

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (7)$$

決定之。此式即稱為頻率條件。

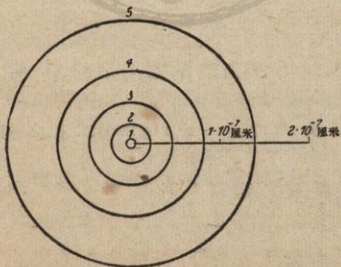
若此, 則電子僅可具有某種一定之穩定能量階級, 故僅有某種一定而不相連續之能量差值 $E_m - E_n$ 可以輻射之形式出現。由此可知發出之輻射僅可有某數種不相連續之頻率。線狀光譜之成因, 原理上可以此說明之。

吾人須注意按諸原子理論最近之發展, 如在所謂『波動力學』 (§ 514) 中所涉及者, 知以下所述明晰之觀念, 雖其成功至大, 然僅在絕狹之條件下方與實際情形相合。此不過為一種極為近似之譬喻。但此種明晰之觀念即以其原來

簡單之形式已可解釋許多之現象，故嗣後吾人常須引用之。以下諸章中，通常輒用電子之能量階級而不用電子軌道，蓋原子內能量之關係可由 Bohr 氏之理論得準確之說明也。

495. 氫原子。原子核之周圍若有二個以上之電子繞之運動，則因各電子間亦皆有作用力而涉及所謂多體問題 (§ 66)，其解答在一切情形中皆極複雜之至，通常僅能求得其近似之狀態。此外尙有其他之影響，此處不及備述。故欲精密計算其能量與夫其軌道形式，僅在最簡單之情形中方為可能。

氫原子之情形最為簡單。其原子序數為 1。其原子核僅荷一個陽電量子 ε ，而其旁僅有一個電子旋繞之。此處所述者以圓形軌道為限，由此已可得種種重要之知識。仍命 μ 為電子之質量， r 為其軌道半徑， ω 為其角速度。於



第 470 圖 氫原子中最內數層之量子軌道

是向心力之條件爲

$$\mu r \omega^2 = \frac{\varepsilon^2}{r^2} \quad (8)$$

再加以量子條件(6式)

$$\mu r^2 \omega = \frac{n h}{2 \pi} \quad (9)$$

即得

$$r = \frac{n^2 h^2}{4 \pi^2 \mu \varepsilon^2} \quad (10)$$

與

$$\omega = \frac{8 \pi^3 \mu \varepsilon^4}{n^3 h^3} \quad (11)$$

最內一層之量子軌道(正常軌道),即相當於原子在其正常狀態時能量最小之軌道,可以 $n=1$ 代入而得. 以 μ, ε 及 h 等值代入上式,即得 $r_1=0,525 \cdot 10^{-8}$ [厘米],此與原子直徑之數量級相合. 第470圖示氫原子 $n=1$ 至 $n=5$ 之最內數層量子軌道

電子在其第 n 層量子軌道上之能量 E_n 等於其動能

$\frac{1}{2} \mu v^2 = \frac{1}{2} \omega r^2 \omega^2$ 與其位能 $-\varepsilon^2/r$ (§223)二者之和. 以(10)與

(11)二式中 r 與 ω 之值代入,則得

$$E_n = -\frac{2 \pi^2 \mu \varepsilon^4}{n^2 h^2} \quad (12)$$

496. 氫光譜. 藉以上導得之條件,吾人茲可根據頻率

條件(7式)爲基礎而計算氫光譜中各光譜線之頻率。放電管中有氫氣存在者，頗易得此種之光譜，又在恆星之光譜中，氫光譜亦常以吸收光譜之形式出現。關於此種之光譜，吾人久已知有一種純粹根據經驗所得之公式，式爲 Balmer 氏 (1885) 所建立。Balmer 氏之公式爲：

$$\nu = c \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (m = 3, 4, 5, \dots, \infty). \quad (13)$$

c 爲一常數，其值爲 $3,2093 \cdot 10^{15}$ [秒] $^{-1}$ 。若不用頻率 $\nu = c/\lambda$ 而易以波數 $N = 1/\lambda = \nu/c$ (§ 436) 則(13)式變爲：

$$N = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (14)$$

此式中 $R = c/\lambda$ 一值稱爲 Rydberg 氏常數。就氫氣測量之，其值爲 $R = 109677,691$ [厘米] $^{-1}$ (吾人試注意其有效數字之位數，可知光譜法之精密無比)。於(13)或(14)式中以 $m = 3$ 以上之一組整數逐一代入，即得可見區域中氫光譜之各光譜線 (Balmer 氏線系)。其後又發見紫外區域中氫光譜之各線 (Lyman 氏線系)，亦可以一相似之公式表出之，祇須將(13)或(14)式中之 $4 = 2^2$ 一值易以 $1^2 = 1$ 而 m 易以 2 以上之各整數。紅外區域中之氫光譜 (Paschen 氏線系) 亦有相同之公式，惟 $4 = 2^2$ 今當易以 $3^2 = 9$ ，而 m 則易以 4 以上之整數。此外尚有 Brackett 氏線系，亦與此相似。普遍言之，此種純粹根據實驗而得之關係可以一式表之如下：

$$N = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \left. \begin{array}{l} n=1, m=2,3,4,\dots \text{ (Lyman 氏線系)} \\ n=2, m=3,4,5,\dots \text{ (Balmer 氏線系)} \\ n=3, m=4,5,6,\dots \text{ (Paschen 氏線系)} \\ n=4, m=5,6,7,\dots \text{ (Brackett 氏線系)} \end{array} \right\} (15)$$

由 Bohr 氏之理論可直接導出 Balmer 氏之公式，且其常數之值亦能相符，此實為 Bohr 氏最大之成功。一個電子自第 m 量子軌道躍入第 n 量子軌道 ($m > n$) 時，因之發出之射線之頻率可由(7)式及(12)式計得

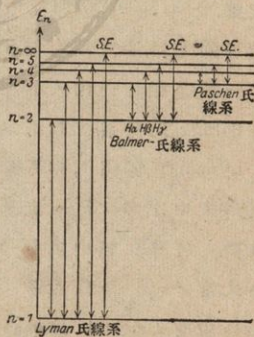
$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{2\pi^2\mu\varepsilon^4}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (16)$$

或以波數表之，則為

$$N = \frac{2\pi^2\mu\varepsilon^4}{ch^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (17)$$

此式與普遍之 Balmer 氏公式，即(15)式完全相同，其常數以 c , h , μ 以及 ε 各值代入後頗能與 R 相符合(參閱 § 498)。

第 471 圖示 Lyman, Balmer, 及 Paschen 三氏三種線系中起首數線若何生成之略圖。各水平線示相當於各量子數 n 之各能量階級 E_n 。三線系中各系之起首數線及最末一



第 471 圖 氫原子能量階級略圖。

線均以連結二能量階級之箭矢表示之，其長度等於二階級間能量之差，故應與發射光譜線之頻率成正比。Balmer 氏線系中之各線仍按慣例以 H_α , H_β , H_γ 等稱之。第 472 圖示此系之概況。第 473 圖示 Balmer 氏線系之照相。吾



第 472 圖 Balmer 氏線系略圖



第 473 圖 氫之 Balmer 氏線系

人不難清晰察見在線系極限處 ($n=\infty$; 在第 471 圖及第 472 圖中 m 與 n 無從加以區別; 一切量子數均以 n 表之) 各光譜線密集之狀。

故 Lyman 氏線系為電子自任一外量子軌道 ($n=2,3,4 \dots$) 躍入正常軌道 ($n=1$) 時所成。Balmer 氏線系者，電子躍入第二軌道 ($n=2$) 而止，Paschen 氏線系者，電子躍入第三軌道 ($n=3$) 而止，餘以此類推。

氫原子之光譜已足示明一切線系光譜全部之特性。遞變之量子數 (在 16 及 17 二式中以 m 表之) 愈大者，各相鄰之

頻率相差愈小。遞變之量子數爲 ∞ ，頻率爲 ν_{∞} ，即在線系極限(第471及472圖中之 S. E.)處，各線互相堆積。此極限者相當於電子自一極遠之量子軌道(實際上 $r=\infty$ ，參閱10式)而來之突躍。各線系中屬於線系極限之頻率 ν_{∞} 可自(16)式而得。

$$\nu_{\infty} = \frac{2\pi^2\mu\epsilon^4}{h^3} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (18)$$

(n = 電子跳躍終止之階級之量子數)。就氫言之，在 $n=1$ (最內線系)之線系中，極限階級與正常(最內)階級間能量之差爲

$$E_{\infty} = h\nu_{\infty} = \frac{2\pi^2\mu\epsilon^4}{h^2} \quad (19)$$

此項重要之關係，以後當再述之。

以上所述者僅爲 Bohr 氏定理原來之大意。按更精密之定理，知原子中電子之狀態不能僅以一個量子數決定之，而須取決於四個量子數，惟其意義此處不能詳述。由此方可說明氫光譜之各線何以又均分裂作若干複線之故。光譜線出現時參加之量子數爲值愈高者，其分裂愈甚。但在正常之條件下，任何二能量階級間可以想像之一切跳躍，初未克完全實現；基於某種理論上之思索，其可能性輒爲所謂選擇定則者所限制，惜此種定則在此處亦不能詳述。

原子中電子旋繞原子核之頻率設以 ν_u 表之，其值每與電子自該軌道作量子跳躍時因而發出之光線之頻率 ν 不

爲相等 此後者之值應合於(16)式,而前者之值可自(11)式計得

$$\nu_u = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{4\pi^2\mu\varepsilon^4}{n^3h^3}. \quad (20)$$

吾人今試觀察電子自一量子數頗大 ($n \gg 1$) 之軌道躍入一量子數爲 $n-1$ 之較小相鄰軌道時之情形。在此例中利用一簡單之級數展開法,其中之 1 遠較 n 爲小,可略去不計,即可證明(16)式與關於 ν_u 之上式完全相同。此結果固可爲經典光學理論中預料所及者。此項情形實爲所謂 Bohr 氏相當原理 之一例,其意謂量子數頗大時,自量子論應導出與經典光學理論同一之結果,故經典光學理論可視爲量子數頗大時之極限。

497. 氫之連續光譜。以上所述者僅爲氫原子之電子自一量子軌道躍入另一量子軌道時之情形。各線系之極限 ν_∞ 者爲電子自一無限遠之量子軌道躍至一量子數較小之軌道時所發出之射線之頻率。按(11)式, $r = \infty$ 即 $n = \infty$ 時,則 $\omega = 0$,換言之,電子在一量子數極大之軌道上時實際上已爲靜止。每有原來不歸屬於任何原子而漂泊無依之自由電子偶或爲已失其電子之氫原子核所捕獲,而偶或躍入其量子軌道;此種之事,頗爲常見。電子在尙未被捕以前,其動能 $\mu v^2/2$ 可爲任何之值。但當其一經躍入第 n 層軌道之中,則按(12)式,其能量立即變爲 $-2\pi^2\mu\varepsilon^4/n^2h^2$ 。故在被捕作

用進行之中,電子即失去 $\mu v^2/2 + 2\pi^2\mu\epsilon^4/n^2h^2$ 之能量,而此即應以輻射之形式出現;關於此輻射者,下式必為合理:

$$h\nu = \frac{\mu v^2}{2} + \frac{2\pi^2\mu\epsilon^4}{n^2h^2} = \frac{\mu v^2}{2} + h\nu_\infty \quad (21)$$

由此算出之頻率皆大於線系極限之頻率 ν_∞ (18式),而其較大於 ν_∞ 之值可為自 0 以上之一切任意值,一隨 $\mu v^2/2$ 之值而異. 從此可知線系極限之外有一連續光譜與之密接,在原理上必為可能,而在事實上亦確已察見之. 第 472 圖 Balmer 氏線系中為平行斜線所蔽之區域即係此項連續光譜. 其他原子線系極限以外密接之連續光譜與此相類者亦已為吾人所發見.

498. 類似氫光譜 他種之原子中,凡亦僅有一個電子為原子核所吸引,而並不引起原子中其他電子顯著之擾亂作用者,其所生之光譜均應與氫原子之光譜相類似. 若原子核之電荷不僅為單個之電量子,而為 z 個,則仍按以前之計算法,不難推知(12)與(16)二式當易以下列之二式:

$$E_n = -\frac{2\pi^2\mu z^2\epsilon^4}{n^2h^2} \quad (22)$$

與
$$\nu = \frac{2\pi^2\mu z^2\epsilon^4}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (23)$$

故核電荷之增加使光譜全部移向頻率較大即波長較短之一方.

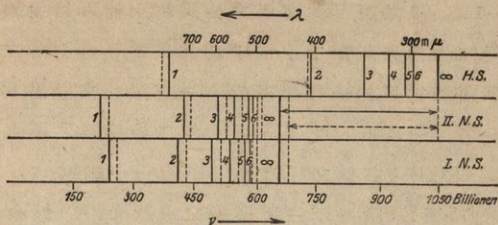
與氫類似最爲酷肖者莫過於游離之氦原子(原子序數 2),即氦原子之二個電子已失其一,而僅剩一個者。此時之情形與氫相異之處僅在原子核(荷有 2 個電量子)吸引電子之力二倍於前而已。故(23)式中之 z 在此處應爲 $z=2$ 。合於此項情形之氦光譜線系事實上不僅在放電管中可以察見,即在許多恆星之光譜中亦常見之,與前述之氫光譜線系同。

前在 § 495 與 § 496 內導出之公式中吾人尙忽略一點,與在太陽系中以太陽爲完全靜止而不以全太陽系之公共重心爲靜止者同。事實上電子與原子核二者同繞其公共重心而轉動(參閱地球與月球對於二者公共重心之運動 § 67)。故精密言之,(23)式中電子之質量 μ 應易以 $M\mu/(M+\mu)$ 一值(M =原子核之質量),但因 $M \gg \mu$, 故與 μ 相差極微。然光譜法精密萬分,以此引起之纖微之差竟不能逃出吾人之洞察。由此差值不難逕行推知氦之 Rydberg 氏常數 R 必稍大於氫。事實上測量所得者,氦之 $R=109722,144$ [厘米] $^{-1}$ 而氫則爲 109677,691。由此二常數之差可算出氫原子核與電子二者質量之比 M_H/μ 。所得之結果與由其他方法測定者非常一致,皆爲 1846。原子核之質量極大者,其 Rydberg 氏常數之極限值爲 $R=109737,1$ [厘米] $^{-1}$ 。此適與(17)式中以 ϵ, μ, c , 及 h 諸值代入後所得之數值相符合。

499. 光譜線系概論。對於其他之原子亦欲以一種模

型式之表示法以精密計算其電子之能量階級，通常恆為不可能，已如前述。但一切線狀光譜之起源皆由於量子性之變化則毫無疑義。(16)式之特點端為氫之各光譜線之頻率皆以二數量——即初末二階級之能量各以 h 除之——之差表出。此種之數量稱為光譜項。在同一線系中，第一項為常定，第二項則由以一組連續之整數，自某定數起逐一代入一簡單之分數式而成。Rydberg 與 Ritz 二氏先後根據經驗而得一結論，謂凡對於氫光譜為合理者，對於其他較為複雜之光譜亦皆合理。將任何元素之線狀光譜分成若干線系，其已見成功者日漸增多；同一線系中各線之頻率均可以二項——其一項為常定，他一項則隨一組連續之整數逐一代入而變——之差表示之。此處 Rydberg 氏常數亦為其一因數，但各項之分母則較氫光譜公式中者為複雜。然此亦可以理論說明之。各光譜項與 h 之相乘積恆等於電子在各量子軌道上之能量。電子在一線系正常階級上之能量等於其基線系之極限頻率 ν_{∞} 與 h 之相乘積。故雖遇複雜之原子，此項能量仍可由純粹之光譜方法以測定之，由此吾人對於原子之構造更可得一深邃之認識。吾人初僅希冀由光譜之性質可推測原子之構造，而結果非特非常圓滿，且有意外之發展焉。

· 原子之光譜線系可按 Kayser, Runge 與 Rydberg 三氏 (1889) 而分為主線系，第一與第二輔線系，Bergmann 氏



第 474 圖 鉀之主線系與輔線系略圖。

線系,以及其他之線系。大多數原子光譜項之精密的分數式,就吾人已能自其光譜中定出者言之,皆頗為複雜。其最簡單者為鹼金屬。此種金屬光譜線系波數之公式列示如下:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{主線系: } N &= \frac{R}{(1+s)^2} - \frac{R}{(m+p)^2}, \quad m = 2, 3, \dots \\
 \text{第一輔線系: } N &= \frac{R}{(2+p)^2} - \frac{R}{(m+d)^2}, \quad m = 3, 4, \dots \\
 \text{第二輔線系: } N &= \frac{R}{(2+p)^2} - \frac{R}{(m+s)^2}, \quad m = (1), 2, \dots \\
 \text{Bergmann 氏線系: } N &= \frac{R}{(3+d)^2} - \frac{R}{(m+f)^2}, \quad m = 4, 5, \dots
 \end{aligned} \right\} (24)$$

第 474 圖示鉀之主線系(H. S)與第一第二兩輔線系(N. S)之略圖。各線皆係成雙(所謂複譜線)。此種之線系公式別於氫之公式者,乃在量子數上有 s, p, d, f 等數值之加入。此所謂 Rydberg 氏改正因數者,隨原子之種類而異。其值咸

介乎 -1 與 $+1$ 之間。試與氫之公式相比較，可知主線系之第一項係相當於氫原子中電子在其正常軌道上時之能量。有一事頗屬重要，即一切線系皆有一有限值之極限，其值可由常定之第一項計出之 ($m = \infty$)。故二輔線系之極限互相重合(第 474 圖)。其他之詳情此處不能一一細述。

第 475 至 477 諸圖示三種標識之線狀光譜。鹼金屬 K 與 Na 之光譜多寡與氫相似，尚屬簡單，鐵之光譜則由非常衆多之線所成，而非常複雜。鉀與鐵之光譜皆為發射光譜，而中間一圖則示鈉蒸汽之吸收光譜，該圖中所見者僅為主線系，蓋一切原子初皆在其正常狀態中(量子數最低)，殆吸收光線後，方昇至較高之能量階級。



第 475 圖 鉀之發射光譜(約在 5000 與 3000 [ÅE] 之間)。



第 476 圖：鈉蒸汽之吸收光譜(主線系，約在 2860 與 2400 [ÅE] 之間)。



第 477 圖 鐵之發射光譜(約在 5000 與 2200 [ÅE] 之間)。

Ritz 氏根據經驗嘗發見一事，即在許多情形中一線系內二線頻率之差可等於同原子他線系內一線之頻率 (Ritz

氏并合原則。此事可逕以量子論說明之。命 E_1, E_2, E_3 爲電子在任意三層量子軌道上之能量，且 $E_1 < E_2 < E_3$ 。在此三軌道之間，電子可有三種不同之跳躍方法，即按 § 495, (7) 式，其發出之射線頻率應爲 $\nu = (E_3 - E_1)/h$, $\nu' = (E_2 - E_1)/h$ 與 $\nu'' = (E_3 - E_2)/h$ 者之三種。吾人可見 $\nu - \nu' = \nu''$ ，故并合原則實爲量子論當然之結果（ ν 與 ν' 均相當於同一末態 E_1 ，故應屬於同一線系）。但按此計出之一切可能的并合線通常並不完全出現；所以然者，蓋其中某數線因上述之選擇定則而被擯（所謂干禁跳躍）。但在電場之中，此種干禁跳躍亦可發生。

在複雜之原子中，因有許多之量子數存在，故其作用乃遠較氫爲顯著。光譜線之分裂以是亦較氫爲甚。按一條光譜線分裂所成條數之多寡而分別稱之爲雙譜線，三譜線，或統稱爲複譜線，有時亦簡稱爲雙線，三線，或複線。

電子作量子性跳躍時能激起光譜線之發射者，吾人輒稱之爲發光電子。

有 Preston 氏定則者，吾人用以認辨光譜線之若何分別歸列於各不同之線系，最爲有助，其內容謂：同一元素同一線系中之一切光譜線，及不同元素之光譜中相應之光譜線皆有同類之 Zeeman 氏效應，換言之，其在 Zeeman 氏效應中分裂之狀 (§ 462) 與正常 Zeeman 氏效應相差之情形皆完全相同。

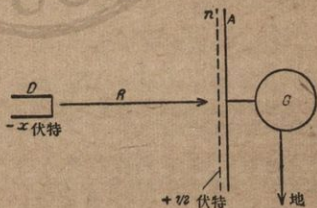
500. 原子之激發與游離。原子在正常狀態，即不受外來之作用時，其各電子皆位於最低之能量階級，稱為正常階級（量子數最小）。蓋電子於發出輻射後，最終恆自行回至此處。電子在此正常狀態中，不能發出任何光線。欲使其輻射，先須有能量輸入，將其提昇至一較高之能量階級，然後電子於重行返回較低之階級時，射線即因以發出。此種能量之輸入（激發）可純以力學方法舉行之，例如二原子互撞，原子動能之一部份可因之遺授於一電子，而將電子提昇至一較高之能量階級。此撞之動作僅在極高之溫度，原子之動能極大時，方得大量進行，故熾熱之物體恆以此而發光。此外若以電力使一自由電子得有頗高之速度，而向原子衝撞，則亦可給予原子以所需之能量，俾激發作用得藉以發生。最後尚有一種激發之方法，與輻射之步驟適係相反者，即由於入射光線之吸收是。此即為螢光（§ 508）之現象。此時電子自較低之能量階級躍昇至較高之能量階級。

電子自最高之能量階級（ $n=\infty$ ）躍回正常階級（ $n=1$ ）時，恆有與其所涉之線系極限 ν_∞ 相應之能量 $h\nu_\infty$ 因之放出，故欲使一電子自其正常狀態躍出原子之範圍而與之脫離，即欲使原子游離，至少須有同樣能量 $h\nu_\infty$ 之輸入。由吾人所知關於光譜項亦即關於電子能量階級之知識，可自一屬於正常階級之線系中之極限 ν_∞ 以計算能量 $h\nu_\infty$ 之值，此乃為使電子自其正常階級躍出原子核引力範圍以外所

需最小之能量，即為所謂游離工作者是。此種之能量亦可藉電子之碰撞而輸入，一如激發時然。溫度極高時，每因原子之互相碰撞而有游離作用發生(溫度游離，§ 285)。

設電子之電荷為 e ，使之加速之電壓為 U ，則電子之動能等於 Ue 。若使以此法加速之電子穿過一氣體，而逐漸增加電子之速度，則至十分確定之某一瞬間，氣體即可發光，蓋此時電子之動能已逐漸增加至一頗大之值，足使氣體原子中之一個電子自其正常狀態躍昇至一相鄰之能量階級，當其重返正常狀態時，即有光線射出。若更行增加電子之速度，則氣體更可發射其他之光譜線，蓋此時氣體原子中之電子可被擡升至更高之各能量階級，而由此自必重返其正常階級。若電子之速度極大，至其動能足以使原子中之電子完全脫離原子時，則氣體中將有游子與自由電子出現，而氣體變為有導電性。

此事首由 Franck 與 G. Hertz 二氏 (1914) 於汞汽中證明之；此實為一種基本之工作。電子衝撞時給予汞原子以使其游離所需之能量之值可自汞之光譜項計算之，二氏

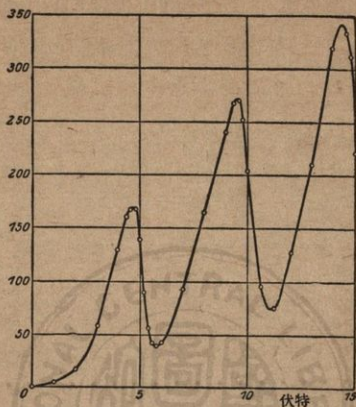


第 478 圖 Franck 與 Hertz 二氏證明激發電壓與游離電壓所用之儀器略圖。

由實驗證明汞原子之激發恰於其能獲得此項能量之一瞬

間開始。

第 478 圖示 Franck 與 Hertz 二氏原來所用之儀器，後經改良者。D 爲一熾熱之陰極；對於地面有一電壓 $-x$ [伏特]，惟其值可任意變更，電子即由此沿 R 方向而發射，達於一導線網 n ，此網與地面間恆維持一電壓 $1/2$ [伏特]。D 與 n 之間有電場，故電子即因之加速。電子穿過導線網之網眼後更行前進而達於金屬電極 A ，此電極經一電流計 G 而與地面相連，故 n 與 A 之間有一電壓 $1/2$ [伏特] 存在，使電子之運動減緩。祇須 D 與 n 間之電壓較大於 n 與 A 間之電壓，則電子恆有足夠之能量，可反抗 n 與 A 間使之減緩之電壓而前進，以達於 A 電極。D 與 n 間之電壓逐漸增高時，電流計所示之電流強度亦逐漸增高，蓋電子之速度愈高者，其得能穿過 n 之網眼之個數自必愈多。此時電子與分子之碰撞尙屬完全彈性，換言之，動能尙未有變爲他種形式之能量者。但一至某瞬間，電子衝撞 D 與 n 間之氣體分子時，其能量足以使氣體原子中之電子自其正常階級躍入一相鄰較高之能量階級者，則原來電子之能量即因此損失，而不復能反抗使之減緩之電壓；此時電流計 G 之示度將見減小。電子與分子之碰撞，此時已變爲非彈性矣。若將 D 與 n 間之電壓更行增高，則電子之能量亦隨之增高，直至其可以給予原子以激發或游離之新工作而止。此時 G 中之電流又見下降，其後此種相同之情形輪流出現，如第 479 圖所示，汞汽中電



第479圖 汞汽中激發電壓之測量。

流強度與電壓二者間相關之狀。每隔 5 [伏特]，電流強度即昇至最高值一次；此即相當於汞汽之激發電壓。

習慣上吾人輒不用激發與游離所需之工作以記錄此項作用，而常用施於電子之電壓 U 使其得有足夠之能量，俾得於其與一原子碰撞時能作此項工作者以代之。吾人即就此義而稱之為激發電壓與游離電壓。此值以電子之電荷 ϵ 乘之，即得相應之能量。蓋 $U\epsilon$ 為一自由電子經過電壓 U 後所得之能量。（若 U 以[伏特]為單位， ϵ 以[庫侖]為單位，則所得能量之單位為 1 [瓦特]·[秒]，或[焦耳] = 10^7 [爾格]）自下列之第 33 表可得一關於游離電壓數量級之概念。

(習慣上非特電子之動能以[伏特]表示,即其速度亦輒以[伏特]表出之。電子之有『 U [伏特]速度』者,係指電子受 U [伏特]之電壓作用後所得之速度而言。但吾人須注意真正之速度乃正比於電壓之平方根。1[伏特]之『伏特速度』相當於 $5,93_6 \times 10^7$ [厘米]/[秒]。欲將此速度加快一倍,須用4[伏特]之電壓。)

第33表 數種原子之游離電壓

氦(He).....	24,5 [伏特]
氖(Ne).....	21,5 [伏特]
氫(A).....	15,4 [伏特]
氬(Kr).....	13,3 [伏特]
氙(Xe).....	11,5 [伏特]
氫(H).....	13,5 [伏特]
汞(Hg).....	10,39 [伏特]
鈉(Na).....	5,13 [伏特]
鉀(K).....	4,13 [伏特]
銻(Cs).....	3,96 [伏特]

501. 元素之週期系。當1869年之時, Mendelejeff 與 Lothar Meyer 二氏同時各自獨立指出元素化學性質之週期性,而建立此著聞之週期系,其中各元素按原子量之遞昇而排成若干橫列,使在同一直行中之各元素適有相似之化學性質(鹼金屬,鹼土金屬,鹵素族,稀有氣體等,見第34表) 此系最初純由經驗得來,而以 Bohr 氏理論解釋之,可得下述之物理意義。

最簡單之元素爲氫，原子序數爲 1，僅具有一個電子，繼之者爲氦，具有二個電子，各電子與原子核間之距離相差並不極大。其次之元素爲鋰，具有三個電子，餘以此類推。各種原子之陽核電荷若亦以電量子爲單位表出之，則其值各皆等於各該原子中此種電子之個數，亦即等於各該元素之原子序數，換言之，即等於自氫 $=1$ 起，包括週期系中之空隙，順次連續點計各元素應得之序數。關於原子中電子系之結構，Bohr 氏已採用下述之觀念，稱爲結構原理。氏假設原子核之荷有陽電荷 ze ($z =$ 原子序數) 者與電子初係各自獨立，分別存在，原子即由此種狀態出發，逐漸結合而成。因其間有相引之電力，故原子核將電子一一捕獲，直至其核電荷 $+ze$ 適能爲 z 個電子之陰電荷 $-ze$ 所抵消，始完成一電中和之原子而止。此種捕獲過程自必在自然界中大規模的繼續進行不已。恆星之內，溫度極高（數百萬度），物質大都分裂作原子核與電子（所謂剝淨原子）。恆星之物質在進化過程中每遇冷卻，輒必有原子如上述之情形而構成，故任何原子當其逐漸結合而成時，必經歷各種之狀態，此種狀態若就其電子之個數言之，應與週期系中在其前業已構造完成之原子相同。原子核已捕獲一個電子者，就其電子個數言之，等於一完備之氫原子，其後按其電子數之遞增而次第與氦(2) 鋰(3)，鈹(4)等一一相等。惟原子核荷電愈高，則其引力愈大，此爲其稍異之處。以此之故，在相應狀態

中電子之排列與週期系中前列之原子相同，惟此時電子之離原子核當較前為近。吾人此處可承認至少在週期系中起首三橫列內已成之原子遇有新電子加入時，其原有之排列決不因之而改變。但在所謂長週期中，其情形稍較此複雜，而尤以稀有土族中為甚。惟亦可以理論說明之。

第34表 元素之週期系

週期表

期→	I	II	III	IV	VB	VI-B	VII-B	變遷元素	I-B	II-B	III-B	IV-B	V	VI	VII	VIII					
週期 1	H 1															He 2					
短 2	Li 3	Be 4	B 5	C 6											N 7	O 8	F 9	Ne 10			
短 3	Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14											P 15	S 16	Cl 17	Ar 18			
長 4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36			
長 5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54			
長 6	Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86			
不完全 7	- 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92															

*57至71為稀土族元素，見前表。

按 Kossel 與 Lewis 二氏先後所發表之理想，一原子中之電子咸依層次而排列。此即為所謂電子層，各層各與原子核間有不相等之平均距離。按諸結構原理，原子在其逐漸構成之過程中，每達一狀態，相當於一稀有氣體 ($z=2, 10, 18,$

36, 54, 86),則其次爲原子核所捕獲而新加入之一個電子與原子核間之距離恆顯著的較先此已在原子中者爲大,其後陸續添入之電子則又均與此電子相同,直至又到達一類似稀有氣體之狀態,此電子層又告滿座而止. 其後再有電子加入時,另一新層又於此開始. 原子中電子之個數每達此等之數時,其電子之排列有如下表.

第一電子層	K	2 個電子	(氦)
第二電子層	L	8 個電子	(氖)
第三電子層	M	8 個電子	(氬)
第四電子層	N	18 個電子	(氙)
第五電子層	O	18 個電子	(氫)
第六電子層	P	32 個電子	(射氣)

第七層在尙未到達一稀有氣體以前,已於最重之原子鈾 (92) 處截止. 各電子層分別稱爲 K 層, L 層, M 層等等,如表中所示. 表中尙載有原子結合演進中各層每次滿座時所到達之稀有氣體. 電子之所以聚成羣落層次井然者,可由 Pauli 氏原理 (§ 515) 說明其意義,由此原理更可計算各層中最多當有若干電子,其數與吾人之經驗完全符合.

各層中全數之電子階級皆遵守量子定律. 惟在第二層中出現之最低量子數爲 $n=2$, 在第三層中者爲 $n=3$, 餘以此類推,此亦可自 Pauli 氏原理推知之.

自以上所述之情形,可知化學性質所以有週期性之物理的基礎當與各電子層之構成,有連帶關係. 週期系中每

一橫列之首與尾相當於一新電子層之開始與完成。

502. 原子價之物理意義. 分子構造. 吾人已知由元素之週期系可得關於各種元素之原子價之說明. 第一直行內之元素(氫與鹼金屬)皆爲一價,第二直行內者(鹼土金屬)皆爲二價,餘類推. 第八直行內之稀有氣體無尋常之化合作用,故吾人稱之爲零價. 第七直行內之元素(鹵素族)有時可爲七價,但通常輒爲一價,第六直行者可爲六價,但通常多爲二價(例如 H_2O 中之 O). 故元素之在第幾直行內者,其原子價卽爲幾,或爲八減幾. 此二種之原子價有相反之性質(正價與負價). 關於此方面者,自 Bohr 氏之理論可得明顯之解釋.

原子價者,由於原子化合成爲分子時呈顯之. 分子可區別爲二種:卽游子分子與原子分子是.

游子分子係由陰陽二種之游子所合成,游子者卽爲原子之業已失去或獲得一個或多個之電子者. 游子之電荷陰陽相反,故互相吸引. 其所成之分子爲電偶(§ 214),通常輒有顯著之電矩. 試取蒸汽狀態中之食鹽 $NaCl$, 作爲一簡單之例. (在固態之晶體狀態中,吾人不能以分子之本意論之,參閱 § 528.) 自 Na 之電化當量 (§ 269),知 Na 爲荷有一個陽電量子之游子. 同理知 Cl 荷有一個陰電量子. 此二種游子間之引力卽爲使二者化合成爲 $NaCl$ 分子之作用力.

在此化合物中, Na 原子荷有一個陽電量子;此僅當 Na

原子已放棄其一個電子，即放棄其最外層唯一之電子方可。同理 Cl 原子必已新得一電子，補充於其最外之電子層中，而因之荷有陰電。此項作用使二原子得相似之結果。Na 之最外電子層原僅有一個電子，今則以此折毀。此時其所餘留之最外層中有八個電子。故 Na 已變為與稀有氣體氦相類似。Cl 之最外一層有七個電子，今則加添一個而完成一『八電子層』。故 Cl 已變為與稀有氣體氫相類似。

游子分子之由二價原子所合成者，此種原子必或已放棄二個電子，或已獲得二個電子，而使其最外之電子層，或因之而折毀，或因之而完成，終達於一類似稀有氣體之狀態。高價原子之作用亦可以同理說明之。

此項情形可歸之於自然界之喜於選取類似稀有氣體之狀態。Pauli 氏原理 (§ 515) 可與以一種解釋。稀有氣體之化學的惰性亦可以自然界中此項特性說明之。蓋在原子構造之過程中，每達一類似稀有氣體之狀態，恆必另有一新電子層隨之開始建立 (§ 501)。稀有氣體對於電中和之正常狀態已屬最為可取，通常初無使之更行取捨電子，即使之荷電之原因。故各原子因缺乏對外作用之電力而不能結成游子分子。

關於化學之原子價者，吾人至此已得一最簡單之說明。原子價或等於原子最外層電子之個數或等於此數與其次一稀有氣體最外層電子個數之差。

與稀有氣體類似之狀態若是其優越，故原子或游子既達此態後，恆欲久留於此而不思他遷。電解現象中出現之游子——例如 NaCl 溶液中之 Na 陽游子與 Cl 陰游子——須待到達電極時，或被奪去其一個電子，或補充一個新電子，而仍舊回復一電中和之原子後，方能有化學作用發生；若遇多價之游子，則自必有多個之電子被奪或補充。鈉游子在在水中時恆與稀有氣體之狀態相似，故並不與水發生作用。

游子分子之構成也，其互相化合之二原子互換其電子，即一個或多個之電子脫離其一成份之羈絆而趨與他一成份結合。原子分子之構成則不然，其各原子之外層諸電子合組成一層或二層對於分子中諸原子公共之電子層。此種外層電子排列之狀亦與原子之外層電子同。例如一氧化碳分子(CO)之二成份共有十個外電子。此十個電子大概亦分列作二層，八個居內層，二個居外層，此二層之電子共同圍繞二原子之本身，而成一種組織，考其外部之構造，有似鹼土金屬之原子(第二直行，有二個外層電子)。其二種之光譜所以相似者以此。通常此種分子亦為一電偶，與游子分子同，蓋其中各原子剩餘之電荷不為相等也。例如在 CO 分子中，吾人不難計算 C 原子所剩餘之電荷為 $6-2=4$ 個電量子，O 原子所剩餘者為 $8-2=6$ 個電量子。H₂, N₂, O₂ 等元素氣體之分子皆為原子分子，惟其情形與此稍異。其各原子之剩餘電荷彼此相等，而其公共電子層對於原子為

對稱。故此種之分子皆無電矩，蓋其陽荷中心與陰荷中心適相重合。但其結構原理則仍與他種之原子分子同。氮分子 N_2 之原子(第五直行)各有五個電子在外層，故共有十個外層電子，與上述之CO分子同，而其外部之構造或亦與CO分子無異。 N_2 分子與CO分子之一切常數，例如關於其光譜之結構等，皆十分相似，由是知上述之觀念當屬合理。關於原子分子中各成份互相結合之力，則須用波動力學(§ 514)方得解釋之。在此方面者，對於氫分子已有特佳之結果。

任何分子構成時，其各成份欲求達到特優之類似稀有氣體狀態，恆有二途焉，即或由於其外電子層之毀滅，或由於此種電子層之完成。二者之中，自以最簡便之一途能達目的者為上選，故週期系中靠左邊諸直行內之元素取毀滅，靠右邊諸直行內者取完成，而中間諸直行內之元素，其二途若無過甚之相差者，確有或取此路或取彼路之傾向(即有或正或負之原子價)。

游子分子中二成份之電荷恆係相反，而原子分子中者則恆為相同。(各原子本身剩餘之陽電荷由其周圍公共電子層之陰電荷以抵消之)故吾人亦稱游子分子為異極分子，原子分子為同極分子。

503. 線狀光譜與週期系。吾人至此益可解釋線狀光譜之其他種種特性。在波長較短之紅外光，可見光，以及紫外光等諸區域中之線狀光譜，皆係由於外電子層中電子之

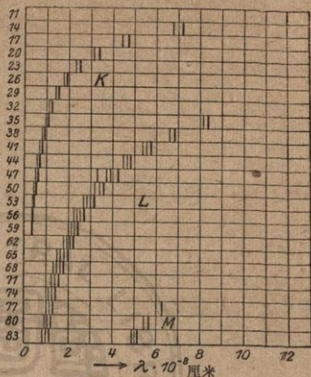
量子性跳躍而成。內層之電子並未參加其間。此種外層之電子不僅單獨受原子核吸引之作用，且亦受內層電子排斥之作用，蓋內層之電子荷有陰電，至少足以抵消陽核電荷之一份部。是故在某方面觀之，鹼金屬與氫類似 (§ 498 與 499)，其外層唯一之電子受原子核之作用；原子核荷有 z 個陽電量子，惟其作用已為 $z-1$ 個電子所減弱至某一定之程度。但原子核與內層諸電子所成之集團作用不能恰與單電荷之氫原子核相等，即鹼金屬之光譜不能恰與氫光譜相同，其所以然者，蓋按 Bohr 等諸氏原來之觀念，外層電子之軌道有時可侵入內電子層中故也。然鹼金屬光譜之構造比較的尙稱簡單，此亦不無與氫光譜略有相似 (第 474, 475, 476 三圖)。外電子層中電子之個數愈增，則光譜愈見複雜，而其譜線亦愈多 (複譜線 § 499)。週期系中每一橫列右端之稀有氣體——除構造簡單之氦外——皆有頗為複雜之光譜。

除電中和之原子所發之光譜——因其可由電弧產生，故稱電弧光譜——外，原子尙可發出其他之光譜，稱爲電花光譜，由電花放電時產生。此爲游離原子之光譜。吾人又可按原子失卻一個或二個之電子，而分別稱之爲第一或第二電花光譜，餘以此類推。原子失卻一個電子者，其構造有似在週期系中直接列於其前之元素，惟核之吸引則較強。例如單游離之鎂 $Mg^+(12)$ 有似電中和之鈉(11)。雙游離之鎂 Mg^{++} 則與氦(10)相似。此種情形亦已於單游離之氦 He^+

述及之，謂其與氫類似。由於此種結構之相似，故任一元素之第一電花光譜恆與直接列於其前一元素之電弧光譜相類似，雖不能維妙維肖，但其大概之性質，尤如光譜線之分裂為複線之狀，則大致相同；惟因其原子核之吸引較強，故各線均略移向短波之一方。第二電花光譜則與前列一元素之第一電花光譜及前二位一元素之電弧光譜相類似，餘以此類推（光譜位移定律）

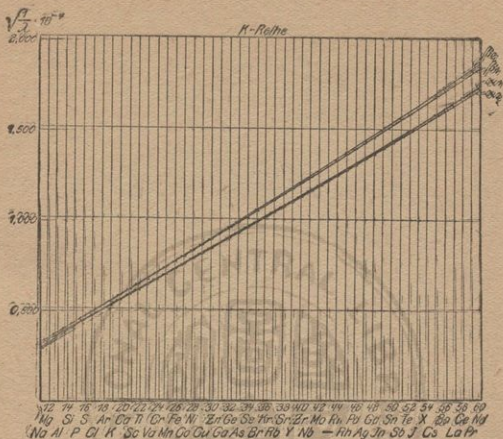
504. Röntgen 氏光譜。在上述可見光之光譜中，吾人所遇者恆為隸屬於外電子層中之一電子之自一能量階級跳躍至另一能量階級。Röntgen 氏光譜則不然，係由於電子在各內電子層間之量子性跳躍。屬於一內層，例如 K 層之一個電子設因受任何之外來作用，例如因有一個自外方極速飛來之電子與原子之碰撞，而被迫離開其原層，且竟因之完全衝出原子之範圍，則 Röntgen 氏射線即可因之產生。蓋此時原子之平衡立受擾亂。此可由各種不同之方法以恢復其原狀。或即由被擲出之電子於其將本身新增之能量化為 Röntgen 氏射線之形式而放出時重返其原來之位置，或先由另一電子層，例如 L 層中之一個電子填補此空位，而被擲出之電子或更外一電子層中之一個電子，又填補此新空位，餘以此類推。所涉之原子電子層數愈多者，其恢復電平衡之種種可能方法亦愈多，而由此種作用引起之光譜線之條數亦愈多。蓋一切不同之跳躍相應於不同之能量差，而

頻率不同之射線即隨之發出。電子跳躍時凡終止於 K 階級者，其全部頻率不同之光譜線稱為 K 線系；他若 L 線系， M 線系等等之定義亦均可依同理得之。 K 線系各線之頻率最大（最硬射線），某一定之線系自必僅有該層中之電子業經滿座之原子方能產生。故週期系中在同一橫列內之諸元素所能發射之線系總數皆相同，橫列之序數每增一，其系線之總數亦增一。



第480圖 K, L 及 M 譜線系與原子序數之關係略圖。

Mosley 氏首先以實驗根據示明 Röntgen 氏光譜與普通線狀光譜不同之點，在普通光譜恆相應於各原子，在週期系中之位置而示週期性，而 Röntgen 氏光譜則無之。但原子序數遞增，Röntgen 氏光譜中之譜線亦按一定之規律而遞向波長較短即頻率較高之一方遷移（第480圖）。Mosley 氏嘗發見一系中各線之頻率 ν 或波數 $N=1/\lambda$ 之平方根皆正比於各種原子之序數 z 。在 K 線系中，此規律尤見準確。此種測量所得之結果示於第481圖中。由此可見 Mosley 氏

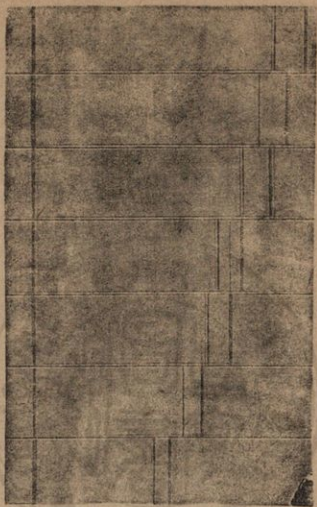


第481圖 K線系中之 $\sqrt{\lambda}$ 作為 Z 之函數(Mosley氏定律)。

定律與事實相符合之精妙。第481圖示K線系中以 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 標出之四線。

第482及483二圖示週期系中連續數元素之K線系及L線系數種光譜關於上述之情況。

Mosley氏定律可以Bohr氏之原子理論說明之，此亦為Bohr氏理論最大成就之一。按Röntgen氏光譜——尤如K線系——乃係由於最內電子層中之電子所發出，此種之電子幾專受該電荷之吸引，外層電子之作用絕微，或竟完全不受其影響。故Röntgen氏光譜頗與氫光譜相類似(§498)。



第482圖 K 線系。



第483圖 L 線系。

因之電子之能量以及 Röntgen 氏光譜項之數值，在 K 線系中者，幾僅與核電荷 ze 有關，而按 § 498(22) 式，與 z^2 成正比。故頻率亦隨原子序數以俱增。

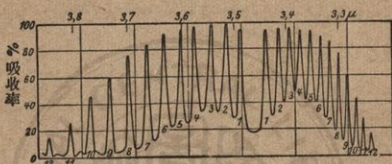
由 Röntgen 氏光譜簡單之規律可預算一未知元素之 Röntgen 氏光譜；在普通之光譜中，則大抵為不可能。當時有數種尙未發見之元素（鉛、鐳、錒）即由此法根據其預算之 Röntgen 氏光譜而覓得。法將有關之礦物作系統的研究，詳察其是否有吾人所希望之光譜出現。及既已見有此種光譜出現，則即可用化學方法以分出之。

隸屬於同一內電子層中各電子之能量彼此並不恰為相等，故 Röntgen 氏光譜線亦分裂成複線（第 482 與 483 二圖，參閱 § 499）。關於 Röntgen 氏光譜其他之情形，大致均與前述之普通光譜相仿，其頻率亦以二項之差表示之，蓋光譜之來源亦係由於量子跳躍也。由此種之光譜項即可探出關於能量階級之消息，從此更可推測原子內電子層之構造。

505. 轉動振動光譜。 祇須分子有電矩，即祇須其為游子分子 (§ 502)，則其轉動狀態之量子性的變更恆必引起射線之發出，即轉動光譜是。但此時所遇能量之差值，亦即 $h\nu$ 之值恆為甚微，故所生之光譜輒為最外之紅外區域，僅在極少數之情形中，例如用水蒸汽時方得直接為吾人所察見。且所察見者尙非在其發射之光線中，而僅顯於其相反之步驟內，即外來射線穿過該物質時於連續光譜中相同之處出

現之吸收光譜(參閱 Kirchoff 氏定律 § 481).

有電矩之分子中各原子對於其自然之靜止位置發生振動時,亦有光線射出,此種之射線亦在長波紅外區域中,惟已較前者為短,吾人已不難用實驗方法察見之。在許多情形中,此種之振動在光譜內相當之處出現為吸收譜線。原



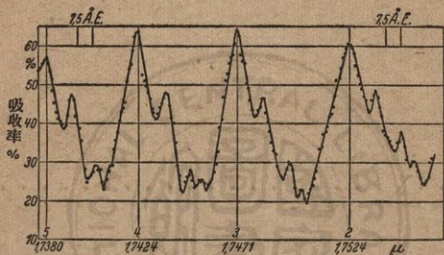
第 484 圖 HCl 在 3,2 及 3,9 [μ] 波長間之轉動振動光譜。

Imes 氏原作。

子振動狀態每有量子性的突變,分子之轉動狀態亦恆必隨之有量子性的突變發生。故遇有所謂轉動振動光譜時,分子內部變化之量子性恆牽涉此二方面,其可能之能量階級數恆為頗多,而量子性突變亦即光譜線頻率因之可有無數不同之值。以是此種光譜恆極複雜。不特原子振動以及其能量階級可由此探出,即分子之轉動狀況與乎其轉動慣量等亦均可由此測定之。關於分子之構造,吾人可藉以得明顯之認識。

第 484 圖為氯化氫之轉動振動光譜,以其吸收率之百分比示明之。此光譜係用一反射光柵及一熱電堆所得。曲線之每一尖頂相當於 HCl 之一條吸收譜線。每一吸收

譜線表示原子振動狀態同一次之突變,但在每一次此種之突變中恆有一轉動狀態之突變隨之發生。以 1 表示之二線間有一空缺,殊堪注意。所以然者,係因分子不轉動之狀態實際上通常不能存在。第 485 圖示 HCl 另一帶之一部份,特加放大者,關於此圖之詳情將於 § 517 中述之。



第 485 圖 HCl 在 1,738 與 1,755 [μ] 間之轉動振動光譜。

Hettner 與 Böhme 二氏原作。

506. 帶狀光譜。線狀光譜之來源,恆係由於單獨之原子(即單原子之分子或游子),而多原子之分子則恆發射帶狀光譜。故帶狀光譜亦稱分子光譜。帶狀光譜自有其特具之形式,如第 486 圖所示者即為其一例,所以然者,係因多原子之分子在任何時間之狀態不僅由其發光電子 (§ 499) 之量子狀態單獨所能決定,而尚須視其量子性之轉動能量



第 486 圖 碘之帶狀光譜之一段。

及原子振動能量 (§ 505) 二者以爲斷。故卽在最簡單之雙原子分子中，於發光電子之量子數之外尚須加以其他之二種量子數，其一關於分子繞其慣量主軸之轉動，其一關於分子中二原子相互間之振動。在發射或吸收之過程中，通常分子狀態之一切量子數同時悉變。故其種種可能之狀態爲數極夥，而此種狀態變化之方法亦不勝枚舉。原子光譜中本爲單獨之一條光譜線者今已易以若干單獨光帶所成之一整組。此諸單獨光帶之全體相當於電子所作同一次之量子性跳躍，其各單獨光帶則相當於原子振動狀態各種不同之量子性突變。（所謂單獨光帶者，例如 486 圖中，共有九個單獨光帶）同一單獨光帶中之各單獨譜線相當於同一次電子跳躍及原子振動狀態突變中分子轉動狀態各種不同之量子性突變。

異極分子 (§ 502) 中之發光電子位於其正常狀態(量子數最小)者，於發射或吸收光線時伴同舉行之分子轉動狀態與原子振動狀態二者之變化可單獨發生，其電子可不必同時跳躍。此卽相當於 § 505 所述之轉動振動光譜。同極分子則不然，當其發射或吸收光線時，此種狀態之變化不能單獨舉行。此種分子僅當其發光電子同時有量子性跳躍時，轉動與振動狀態之變化對於光線之發射或吸收方亦奮力參加。故帶狀光譜中各線之頻率 ν 應以同時舉行之三種能量突變之代數和表之。命在一吸收作用中 E_0 與 E'_0 爲

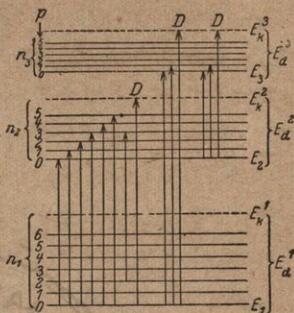
電子跳躍前後之能量, E_e 與 E_e' 爲原子振動狀態突變前後之能量, 同理, E_r 與 E_r' 爲相應之分子轉動能量. 則在該分子光譜中各線之頻率 ν 當以下式表之.

$$h\nu = (E_e' - E_e) + (E_r' - E_r) + (E_r' - E_r) \quad (25)$$

(參閱 § 494, (7) 式). 其一切之能量階級可爲種種不同之值, 帶狀光譜中譜線之豐富卽以此故. 電子能量階級之差遠較關於分子轉動及原子振動者爲大. 能量 $h\nu$ 中由於電子之跳躍(25式第一括弧)者佔其大部, 故帶狀光譜亦分佈於紅外區域內之短波部份, 可見區域以及紫外區域三區之內, 如原子光譜然. 原子振動狀態突變時所生能量之差又較轉動狀態突變時爲大. 故光譜中各單獨光帶之出現可歸之於原子振動之變化(25式, 第二括弧); 若無轉動狀態之突變, 則各帶僅含一線. 轉動能量極微之突變(25式, 第三括弧)又使各帶分裂作無數之細線.

507. 帶狀光譜與化學. 由帶狀光譜以及其他之知識可得化學上極重要之結果. 帶狀光譜易於處理, 且可作精確之測量, 而由此亦可計算發光分子轉動慣量之值, 與用實驗上難於處理之轉動振動光譜 (§ 505) 同. 吾人已知各原子之質量, 則至少對於雙原子之分子可逕由此轉動慣量之值計算分子內二原子間之距離. [根據 § 34 與 36, 吾人不難求得此項關係爲 $J = m_1 m_2 a^2 / (m_1 + m_2)$, 其中 J 爲分子對於一與兩原子連接線相垂直而通過二者公共重心之直線軸

之轉動慣量, m_1 與 m_2 爲二原子之質量, a 爲其間之距離。] 尙有一事關於化學方面更屬重要。吾人若將單獨光帶中由於分子之轉動而呈顯之精細構造略去不計, 則可仿 471 圖 (§ 496) 關於氫原子之例, 而作一可以表示分子光譜項之略圖, 如第 487 圖所示。 E_1 爲正常狀態, E_2, E_3 等爲發光電子受激後之狀態 ($n_1 < n_2 < n_3$)。其上各有許多關於原子振動之



第 487 圖 略去轉動後分子光譜項之略圖, n_1, n_2 等等爲電子之量子數, p_1, p_2 等等爲原子振動之量子數。

能量階級層層堆積, 每一此種之能量階級相當於一單獨光帶。在原子組織尙未破裂以前, 此種階級之多寡有一極限。原子中之電子到達某一定值之能量階級, 得有游離所需之能量時, 電子即與原子分裂而原子游離。游離工作與線系極限位置二者間有密切之關係, 已見 § 500 所述。一原子中電子之游離工作者, 在此處相當於使一分子中原子彼此分裂所需之工作, 即分子之分離工作是。游離工作之值既可自原子光譜中線系極限之光譜項計出, 則同理, 按諸 Franck 氏, 分子之分離工作亦可自帶狀光譜中計出。在分子光譜項之略圖中, 原子振動諸能量階級向之收斂之位置即相當於一極限。一經越過此極限能量階級, 分子即分裂成爲原

子,而分子不復存在. 在第487圖中以 E_k^1, E_k^2, E_k^3 等標示之能量階級即為振動量子數向之收斂之位置. 故箭矢上凡標以 D 字者,皆用以表示分子分離時之量子性突變.

若分子之量子狀態突由正常階級 E_1 變至 E_k^2 之階級,則在能量差值 $E_k^2 - E_1$ 之中, $E_2 - E_1$ 一部份係屬於電子之跳躍. 其餘之部份 $E_k^2 - E_2$ 為分離工作. 此值在各階級中各有不同. 吾人視 $E_d^1 = E_k^1 - E_1$ 之能量差為真正之分離工作,若分子光譜之略圖已全部知悉,則其值不難計算之.

分子之分離工作自必等於分子構成時放出之能量,故若將計算所得各分子此項工作之值乘以 1 [克分子] 中所有之分子總數,即 Loschmidt 氏常數 (§ 96),則可得構成 1 [克分子] 該物質時所出現之熱調 (§ 203). 故化學作用中所遇之熱調頗難以他法精密計算之者,可由帶狀光譜中測定之,其精密度且極高,唯光譜測量法所能到達. 第35表中並列數種分子每 1 [克分子] 之分離工作之值,其一行係由光譜法測得,另一行則係由熱量法測得.

第35表 由光譜法及熱量法測定之分離工作

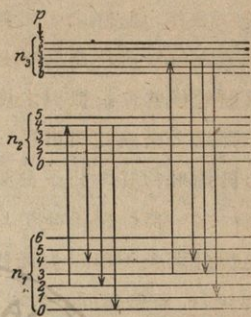
分 子	分 離 工 作	
	光 譜 法, 單 位 為 [仟 卡]	熱 量 法, 單 位 為 [仟 卡]
H ₂	100,5	70-100
S ₂	113	90
Cl ₂	57,0	57
Br ₂	45,2	46
I ₂	35,2	34,5
NO	182	191
CO	254	250
KCl	105	103

508. 螢光. 在螢光現象 (§ 487) 中, 一個光子之能量 $h\nu$ 爲物質中一個分子所吸收, 其發光電子即因之昇至一較高之能量階級, 其後由此或直接回至正常狀態, 或於中途停留於其間之任一能量階級, 而射線即於此時發出. 若某分子所得之能量 $h\nu$ 僅足以使其發光電子自其正常狀態躍至一最低之被激狀態, 則當其由此歸來時, 僅可直接回至其正常狀態, 中途不得停留, 而此時必將其所得之能量盡行放出, 故所生螢光之波長與激發光相同. 例如汞汽爲其光譜中任何譜線之光所照射時, 即生此種現象. 因其外觀與機械性之共振相似, 故亦稱爲共振輻射.

有 Stokes 氏定律者, 謂螢光射線之波長恆較激發射線之波長爲長, 此可以量子論簡單說明之. 其實此亦爲能量原理之一種推論. 設激發射線之頻率爲 ν , 即各個光子之能量爲 $h\nu$, 則被激射線之能量 $h\nu'$, 祇須純係來自激發射線中者, 決不能較大於此, 因得 $\nu' \leq \nu$, 即 $\lambda' \geq \lambda$, 此與 Stokes 氏定律相合.

此項定律亦有例外 (所謂反 Stokes 氏線), 即被激射線之波長可較激發射線之波長爲短 ($\nu' > \nu$), 然此亦可以量子論說明之. 遇此種情形時, 螢光之能量必尙取諸其他之來源, 方足以彌補此加添之能量 $h\nu' > h\nu$. 吾人前已 (§ 505 與 506) 述過分子之轉動狀態與原子之振動狀態通常必隨電子之跳躍而同時發生量子性之突變. 第 488 圖所示之分子光

譜項略圖與第 487 圖同。設分子吸收一個光子 $h\nu$ 後，其突增之能量在第 488 圖中以向上之箭矢表示之。命分子尙未吸收此光子以前，其狀態之電子量子數為 n_1 ，振動量子數為 $p=2$ 。吸收光子後其狀態即因之而變，設 n_1 變為 n_2 ，而 p 則變至 $p=4$ 。於是由此新



第 488 圖 螢光理論之說明。

狀態出發而回至 n_1 區域內各階級時，可有許多不同之過程（向下箭矢）。若仍回至原位，則其發射之能量仍無入射光子授予分子之量子相等。若於發射射線後，原子振動之量子數較大於其吸收以前之數，則發射之射線可以取用之能量較入射之射線為小，而螢光之頻率較激發射線之頻率為低。但若末態之振動量子數較小於初態，例如在圖中所示之 $p=0$ ，則發射之射線可以取用之能量較入射射線為大，故螢光之波長可較激發射線之波長為短。由是可知僅當分子中已有振動能量儲藏者（上例中 $p=2$ ），上述之反 Stokes 氏線方能出現。

509. Raman 氏效應。 印度物理學家 Raman 氏所發見之效應（1923, Mandelstam 與 Landsberg 二氏亦幾於同時發見之）與轉動及振動之光譜頗有密切關係。光線透過一物

質時，恆有一部份之光線與物質之分子發生交互作用而偏折其方向，即前所謂散射是。Raman 氏發見單色光每遇此種散射後，其波長輒因之變化。除入射光之譜線外，輒尙有其鄰近之譜線隨同出現。此項現象可說明之如下。入射光與透射物質之分子發生交互作用時，入射光子可將其能量 $h\nu$ 之一部份授予分子，以激發其原子振動狀態之突變。故散射之光子即損失此部份之能量。散射後，其能量遂不復為 $h\nu$ ，而僅為 $h\nu - \varepsilon$ ，其 ε 為授予分子之能量，於是散射光之頻率不再為 ν 而為 $\nu' = \nu - \varepsilon/h$ 。由散射前後頻率之差 $\nu - \nu'$ 即可計算光子所放棄之能量 ε 。因此為使分子中之原子振動狀態發生突變所需之能量，故 ε/h 相當於此項突變時所發出之射線之頻率。物質之振動光譜恆在紅外區域中，而今則可改在便於處理之可見區域或紫外區域中以光學測量法測定之。此外，相反之步驟亦可出現，散射之分子因量子性之突變而自一較高之量子狀態躍至一較低之狀態，將其所餘之能量授予散射之光子，而光子之頻率遂因之而增。

Raman 氏效應與螢光現象自必有某種之關係。螢光現象中，入射光線激發其所遇之原子，而使其電子作量子性之跳躍。其後當此種之跳躍反向進行，即躍回原位時，因原子振動狀態與分子轉動狀態亦參加突變，而發射之量子可以較小，亦可（在少數情形中）較大於入射量子之能量。故在

此項情形中所涉者爲振動與轉動二種狀態量子性突變之由於電子跳躍所引起者。在 Raman 氏效應中，振動與轉動二種狀態之量子性突變係直接受入射量子之催逼，而不涉電子之量子性跳躍。

510. 光之化學作用(光化學)。光線對於化學作用之發生常有重要之影響。例如等量之氯與氫混合後，在黑暗處並無作用，但若照以陽光，則生炸裂性之現象而成氯化氫(HCl)。氧(O₂)遇有短波射線作用後即成臭氧(O₃)。

最重要者當推光線化學作用在照相術中之應用，蓋像之得以固定於片上，非此不爲功。照相片之膠膜中和有溴化銀(AgBr)。感光後即有一小部份分解，光線之作用愈強者，分解愈多。在顯像液中，顯像作用在片上被照之處繼續進行，該處膠膜中即有金屬之銀粒析出，因其分佈極細，故顯黑色。膠膜中感光愈強之處愈黑。在定像液中，尙未分解之溴化銀咸脫離膠膜而出。此時之片稱爲『底片』，像之明暗與真正之景物相反。試以照相片膠膜之一面置於一塗有感光性銀鹽之紙面上，令光線透過底片而射於紙面(覆印)，則紙面上可現一像(正片)，其明暗又與底片上者相反，即與景物真正之明暗相同。

在光化學之作用中，光線之能量被分子所吸收而變爲促使化學作用發生所需之能量。光化學之基本定律謂各分子所吸收之能量皆爲整個之光子 $h\nu$ 。於是按能量原理，

知僅當 $h\nu$ 之能量等於或大於在光化學作用中各分子所需之熱調 (§ 203) 時,此種作用方能發生。故欲使某一定之光化學作用發生,其所用之光線不可超過某一定之波長,蓋否則能量將感不足。短波射線(紫外射線, Röntgen 氏射線)之光化學作用所以遠較可見光為強者,即以此故。但上述氫氣炸氣之作用則不能以若此簡單之法說明之。 Cl_2 分子吸收一個光子,因而分離為其二成份後,即有一組相繼之化學作用隨之發生,此時或須賴有些許水汽之參加,而其收獲之能量可遠較基本定律中所規定者為豐。

自然界中最重要之光化學作用厥為植物中二氧化碳之同化,一切生物——除少數之元始微生物外——生存所必需之能量皆取給乎是(肉食之動物亦然,蓋因其捕食之較低等動物仍復以植物為食料也)。葉綠質 (Chlorophyll) 吸收陽光之能量,而二氧化碳與水即藉此能量而化為糖與氧;在此種收熱作用中,每[克分子]之糖所需之熱調約在 600 [卡] 以上,即由陽光能量供給之。在生物體內之各器官中,糖仍還元為二氧化碳與水,此時重行放出之能量即為促進各部份生活作用所需能量之用。

511. 比熱之量子論。前在 § 170 中嘗述低溫度時比熱之情形稍見奇特。此項奇特情形之意義及其最初之理論嘗由 Mødelung 與 Einstein 二氏根據量子論以示明之。其以後之發展則當歸功於 Nernst, Debye, Born, 與 K. r mán 諸

氏。

在 § 156 及 505 中,已述過分子或分子中之原子之轉動與振動。此種之運動亦遵守量子定律,與其他一切週期運動同。其意蓋謂一個轉動之分子或分子中各個對於其平衡位置振動之原子皆僅能在十分確定之某種能量階級上舉行之,猶如原子中之電子然。在轉動之情形中,各階級之能量與分子之轉動慣量爲反比,即轉動慣量愈小者,其值愈大。蓋轉動能量等於 $J\omega^2/2$, 而 § 494, (6) 式,在此處應仍爲合理,即角速度 ω 應等於 $nh/2\pi J$, 故在某一指定之量子數下,轉動能量應等於 $n^2h^2/8\pi^2$ 。

前述 (§ 171) 比熱之經典的理論係以均分定律爲根據,此定律者,謂在溫度 T 時,一分子之動能分佈於各個自由度之值,平均言之,皆等於 $\frac{1}{2}kT$ (§ 156)。當溫度 T 頗高時,此種之值遠較在分子週期運動(轉動或振動)中與其最低量子性突變相應之能量差爲大者,始得應用均分定律。此時各分子之平均狀態相當於頗大之量子數(頗大之能量),其量子性之不連續性實際上業已消滅。經典理論在此極限情形之下方爲合理。(吾人可以一事比擬之,巨量之金錢分爲最小之幣制單位後,即不能再分爲更小之單位,其一單位之值實際上自屬無足輕重;但在小宗款項中,則此不能再分之單位已覺無數不小矣。或另以一事比擬之,吾人設循石級以登高山之巔,某時或站立於第 n 級,或站立於第 $n+1$ 級,二者初

無顯著之差異,但於綠梯登樓時,則二者將大有不同。但當 $\frac{1}{2}kT$ 之能量與最低之量子性跳躍之能量差相去不遠,或竟較之爲小時,則上述之定律不復合理。此時可以供用之熱能量不能再均勻分佈於一切之分子(猶如10個銅元之不能均勻分給100個人)。一部份之分子確能接得相當於最低量子性跳躍之全部能量,但其他一部份之分子則空無所獲,而溫度愈降時,此空無所獲之分子所佔之成份愈增。吾人輒謂其相關之運動或其相關之自由度已受遏制。分子作最低之量子性跳躍時所需之能量愈大者,此種情形顯著的出現時 $\frac{1}{2}kT$ 之值愈大,即溫度愈高,故對於轉動言之,分子之轉動慣量愈小者,此種情形出現時之溫度愈高。

單原子分子之轉動對於比熱毫無關係 (§ 156 及 171),即可以此事說明之。此種之原子繞一通過其重心之自由軸而轉動,而重心則位於原子核中(電子之質量無足輕重)。原子核渺小萬分,故原子對於此種之軸之轉動慣量亦非常微小(均勻之球體,質量爲 μ , 半徑爲 r 者,轉動慣量爲 $J = \frac{2}{5}\mu r^2$), 因而其量子論中之轉動能量必爲非常大。以此之故,單原子分子之轉動對於所涉之一切溫度均已完全受遏。

同理,雙原子分子對於一通過兩原子重心之軸實際上亦無轉動。此項自由度對於比熱亦無影響,故此種之原子僅有二個轉動自由度,而非爲三度。但若溫度極低,則此二個自由度亦將受遏,而所餘者僅爲分子之移動動能。此時

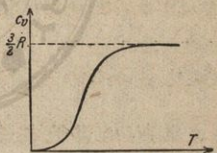
雙原子氣體關於其比熱之情形必當與單元子氣體同；多原子氣體亦然。事實上確已證明，溫度愈降，一切氣體之克分子熱愈趨近單原子氣體之理論值 $c_v = \frac{3}{2}R$ (§ 171)。氫分子之轉動慣量極小，直已到達此值。

關於分子中原子振動之狀況 (§ 505)，亦完全與此相仿。其所需之能量極大，即在尋常溫度下其振動實際上已完全受遏，故對於比熱並未有任何貢獻。原子與分子中電子之激發能量 (§ 500) 更較此為大。故在尋常溫度下，其對於比熱亦未參加。物體須待溫度頗高時方發可見之光，亦即以此。

原子或游子在晶體之空間格子 (§ 528) 中之振動亦合於上述之理論。此種之晶體通常須在較低之溫度時，其振動方受遏制，蓋以其在尋常溫度時，許多結晶物質之原子熱至少已與經典學說中之理論值相去不遠，而尤以金屬之值相差更近 (§ 170，并參閱 § 515)

但尚有許多物質在室內溫度時已見顯著之差異，例如此時金剛石之原子熱僅為 1.4。

溫度極低時，一切物質之比熱均迅速下降(第 489 圖)。Debye 氏嘗導得一定理，謂在某一定之範圍以內，比熱應正比於絕對溫度之三次冪 (T^3 定律)



第 489 圖 低溫度時比熱變化之略圖。

$$C = aT^3, \quad (26)$$

此所謂一定之範圍者，須視各物質之種類而異。上列之關係式頗能與實驗相符合。

512. 磁子 Weiss 氏嘗根據實驗結果之數值而得一結論，謂按照 Ampère 氏定理 (§ 338) 計得原子中由於電子圓周運動而生之磁矩亦恆為一種單位之整數倍，因仿電子之例，而稱之為磁子 (Weiss 氏磁子)。由 Bohr 氏之原子理論，亦可導得相同之結果，即磁子應等於氫原子中之電子在其正常軌道 ($n=1$) 上時之磁矩 (Bohr 氏磁子)。按 § 310，一電子以角速度 ω 沿一半徑為 r 之圓周上運動時，其磁矩為 $M = \varepsilon \omega r^2 / 2$ 。自另一方面觀之，電子在其軌道上時之轉動慣量為 $J = \mu r^2$ ，而按 § 494, (6) 式， $\omega r^2 = nh / 2\pi\mu$ ，故當 $n=1$ 時，此值應等於 $h / 2\pi\mu$ 。

於是

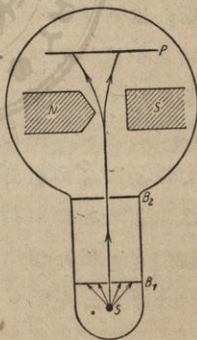
$$M = \frac{\varepsilon h}{4\pi\mu} \quad (27)$$

(ε 電荷， μ ，電子之質量， h ，Planck 氏作用量子) 此值較 Weiss 氏磁子為大，事實上理論及觀察確能相符。Uhlenbeck 與 Goudsmit 二氏且發見各電子本身亦已具有一磁矩，其值與 Bohr 氏磁子相等。此種之磁矩可視為由於電子繞其本身之慣量主軸轉動而來 (自轉電子)。其角動量之值為 $h/4\pi$ 。

513. 方向之量子性。 在欲證明磁子存在之種種測量中，最要者當推 Gerlach 與 Stern 二氏之實驗，由此且可證明量子論之其他結果。設將一單原子之分子置於一磁場之

中,若此分子具有磁矩,而爲一磁偶,則其磁軸將繞磁場之方向而發生錐動(參閱迴轉子之錐動, §48)。換言之,磁軸將以磁場之方向爲軸而沿一錐面上運動,錐面之頂角爲一定值。此種錐動亦遵守量子論之定律,與其他之週期運動同;由此可知錐面之頂角僅能爲十分確定之值,在各種情形中各可由計算而得。吾人稱此事爲方向之量子性。例如就銀原子言之,情形最爲簡單,其磁軸僅有二個可能之位置,即與磁場方向或爲同向平行,或爲反向平行。故在此例中,通常無錐動現象發生。在其他之例中,尙可有其他之位置。

Gerlach 與 Stern 二氏置一金屬於真空中,任其蒸發,而令金屬之汽穿過一狹縫,俾成一絕狹之金屬原子射線(第 490 圖)。此項射線經過一垂直於射線方向而極不均勻之強磁場,該磁場中每隔一極短之距離,強度已大變。設有一銀原子,其磁性北極正指磁場力線之方向;若磁場之強度沿此方遞減,則原子之磁性南極將受一較強之力之作用,而原子將向磁場之反方向偏轉。若原子之位置與上述者相反,得將向磁場之同方偏轉。故原子射線將分裂爲二射線,對於其不受磁場作用時之直線軌



第 490 圖 Gerlach 與 Stern 二氏實驗略圖。S 受熱之銀球, B_1 , B_2 光閘, N, S 磁體, F 接收銀原子氣體之板。

道一偏向左，一偏向右。此項實驗之結果事實上確屬若是，吾人若知各處磁場強度之變化，則可自射線偏轉之多寡以計算原子磁矩之值。其結果亦完全與理論相符合。尤可貴者，理論上無磁矩之原子確無此項效應。

514. 波動力學。關於量子論最近之發展，即僅欲作一簡明無漏之陳述，在此處亦有所不能，蓋在此方面必需之物理與數學知識此處尙嫌不足。下述者僅欲使讀者稍知此新理論之數種基本思想而已。

前在 §490 中嘗述光有二種不同之本性。欲解釋一部份之光學現象時，非用爲波動性之觀念不可，而在另一部份之光學現象圍範以內則須假設有光子存在，然光子對於波動理論則殊屬不可思議。光之二種不相容之本性各有實驗之根據，勢難加以否認，但吾人須設法調和之。茲更將其情況簡述之如下：凡頻率爲 ν 之輻射皆有 $h\nu$ 之能量量子，及 $h\nu/c^2$ 之質量。吾人處此艱難不易解決之境遇，誠感進退維谷，窮於應付矣，但由此反足以打開一全新而包括範圍至廣之思想，就物理學研究之意義言之，此則實爲其獨到之點。物理學之基礎非僅建於已知之事實，即如從光學中所得之經驗亦可推廣至於其他現象之範圍，如關於物質之理論等；上所謂全新之思想者即着眼於此。按所謂經典物理學之觀念，自然界中一方面爲由原子核與電子所構成之微粒性物質所佔據，而另一方面則其中充滿電場與磁場，尤如光之

電磁振動，而以光爲一種振動之現象。量子論以新實驗之經驗爲根據，而示吾人以光之另一種與前不相容之本性。故光除波動特性外，尚有量子之特性，即光亦有微粒狀物質之特性。於是 De Broglie 氏起而假定物質亦應有與前不相容之雙重本性，一如光然。吾人已知對於一切光子 $h\nu$ ，有一關係式

$$h\nu = mc^2 \quad (28)$$

恆爲合理，此式之意蓋謂凡頻率爲 ν 之各光子咸可以一質量 m 歸之 (§ 490)；氏則一反此項關係，而確言凡質量爲 m 之各物質亦應恆與一波動之步驟相關連，頻率亦應按(28)式計算，爲 $\nu = mc^2/h$ 。於是一個電子之頻率應爲 $\nu = 1,24 \cdot 10^{20} [\text{秒}]^{-1}$ ，氫原子核(質子)之頻率應爲 $\nu = 2,29 \cdot 10^{23} [\text{秒}]^{-1}$ 。

此種所謂物質波或稱 De Broglie 氏波者，自非爲光波，即非爲電磁波，而其性質爲前此吾人所未知者。就運動物體言之，此波之速度 u 與物體之速度 v 有關，按諸理論，二者間應有 $u = c^2/v$ 之關係。在相對論中，任何物體之速度 c 決不能超過光之速度 (§ 537)，故 u 必恆較光速爲大。運動體之速度 v 可視作與物體相關連之物質波之所謂羣速度。羣速度者，意謂在通常之波動現象中一羣頻率與位相相差極微之波羣內之能量傳播之速度。

物質波之波速 u ，頻率 ν 及波長 λ 三者間亦有

$$u = \lambda\nu \quad (29)$$

之關係，與在其他各種波動步驟中者同 (§ 124)。因 $u=c^2/v$ ，及 $v=mc^2/h$ ，故得

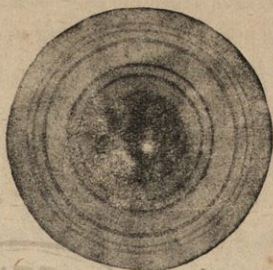
$$\lambda = h/mv \quad (30)$$

若命 $h=0$ ，則光之量子論即變為經典的輻射論，已見 § 483 所述。光之波長若遠較其在途中所遇之障礙物為小，則光之波動論又可變為經典的幾何光學。同理，物質之波動論亦然。或由於作用量子趨近 $h=0$ ，或由於物質之質量 m 為極大，而 h/mv 一值為極小幾近於零時，則物質波之波長 λ 亦為極小。換言之，若遇廣大之物體，由許多之原子所構成者，則波動力學即化為經典的力學。物體軌道之曲率半徑較之波長 λ 為小時，波動論之應用尤為急切。

電子 h/m 之值為 7,28。若施以一[伏特]之電壓，使電子加速，則其所得之速度為 $v=5,94 \cdot 10^7$ [厘米]/[秒]。與此種電子相關連之物質波波長之數量級為 10^{-7} [厘米]，或 19 [Å·E]，約與 Röntgen 氏射線相仿。故吾人可希望將此種電子射於一品體時，當亦有與 Röntgen 氏射線所示相同之繞射現象。Röntgen 氏射線僅能按與其波長有關而十分確定之方向自晶體反射而出 (§472)，故吾人必可預測物質波以及與之相關連之電子亦當若是。此項效應事實上確已首由 Davisson 與 Germer 二氏，其後復經他人證實之，且數值方面亦能與理論相符合。

將電子射線穿過薄層之結晶性物質而求得一與 Rönt-

gen 氏射線穿過晶體時相同之繞射現象，在今日已達成功。第 491 圖示一絕狹之電子射線穿過一金屬箔而射於一照相片時所現之繞射環紋。惟金屬箔非為簡單之晶體，而係由許多極微晶體所構成，故此例中所見者



第 491 圖 金屬箔中電子之繞射。

並非如 Röntgen 氏射線穿過純晶體時之若干繞射點 (Laue 氏圖形, § 471, 第 456 圖), 而如在 Debye-Scherrer 二氏法 (§ 472, 第 461 圖) 中所得之繞射環紋, 其各環之直徑視電子之速度及金屬箔之空間格子組織而異。是則物體之組織亦可用電子射線以分析之, 如用 Röntgen 氏射線然。首倡物質波亦應有繞射作用之思想者, 當推 Einstein 氏。

De Broglie 氏之思想經 Schrödinger 氏而得完成其內部之理論, 其後復經 Heisenberg, Born, 與 Jordan 諸氏之研究而另得一外表全異之形式。但吾人可證明其不同之點, 僅在形式上而已。關於此新波動力學或稱量子力學之詳情此處不能述及。此處僅可申明 Bohr 氏之原子理論竟藉此而得一較新較穩之基礎。以前原子世界中許多可疑之事, 尤如分子構造問題等, 均可藉此新理論而得其解釋。在

原子與分子構造問題中最屬重要者，莫若欲將關於電子之多體問題，藉波動力學以解決之願望，在原理上已見其可能性。前此吾人欲精密計算氫原子與氫分子而屢歸失敗者，今在此方面已可謂告一大成功矣。Schrödinger 氏之方程式實爲此新波動力學之基礎。

按 Heisenberg 與 Born 二氏之說，一個電子之位置與其速度決不能同時絕對精密測定之，蓋用任何理想上可能之方法以精密測定此二值中之一後，其另一值仍可任意變遷，完全捉摸不定。此事已在 Heisenberg 氏之所謂測不準原理中表出之。Schrödinger 氏方程式之解答爲一關於電子在某一指定區域內出現之或然率之式。前在 §2 中所述之因果律卽以此項觀念而發生動搖。原子中之各種基元作用不能嚴格的爲因果律所決定，而僅可用統計法以觀測之。卽能量原理亦已失卻其絕對之精密性，而亦遵守統計學之定律。參加一物理作用之原子或電子爲數愈多者，愈爲合理。

命一個電子之位置以坐標 x 表之，其動量以 q 表之。任何物理測量法之精密度實際上每有極限，故欲將此二值作數學上精密之測定，恆屬決不可能。測量任一值時，恆不免有不精密度，今卽以 Δx 與 Δq 表之。所謂測不準原理者其意謂凡測量此種之值時，恆有一原理上之極限，初非由於測量儀器或方法之不完善所致；其關係式爲

$$\Delta x \cdot \Delta q \cong h \quad (31)$$

故若能將一個電子之位置 x 以最精密方法 ($\Delta x=0$) 測定之, 則 $\Delta q=\infty$, 即 q 將完全不定; 反之亦然。同理測量一電子之能量及其相關之時間時, 彼此亦有一與此相同之關係。

515. Pauli 氏原理及 Fermi 與 Bose 二氏統計。Pauli 氏嘗創立一原理, 通常輒稱爲 Pauli 氏禁約原理者, 可用以說明關於原子構造某種之事實, 其內容謂兩個或兩個以上周繞同一原子核之電子根本上不能同處於同一之狀態。按照量子論, 一個電子之狀態, 換言之, 即其軌道, 其能量, 以及其在空間內之方向, 應共由四個量子數以決定之。更精確言之, Pauli 氏原理之意, 蓋謂同一原子核周圍任意二電子之四個量子數決不能完全相同。此項原理用以說明原子之構造, 尤如關於各電子層中電子之個數以及其他事實時優美異常, 故吾人可視其爲已由經驗所證實。

Fermi 氏復將 Pauli 氏原理推廣至一羣不拘多寡電子之全體。在一密閉容積中之電子輒稱爲『電子氣體』, 氏之原理謂此容積中決無二個電子同時狀態相同(所謂 Fermi 氏統計)。但按照波動力學知一密閉容積中電子之能量應有量子之特性。其動能係由某種定值之能量量子聚合而成。此種之量子與電子之質量成反比; 因電子之質量極小, 故其值頗大。電子具有三個自由度 (§ 156), 故吾人須認定其動能 ε 應由三個量子數 n_1, n_2, n_3 決定之。於是得

$$\varepsilon = h\nu_0(n_1 + n_2 + n_3), \quad (32)$$

其中之 ν_0 爲一某種之基本頻率，惟此與以(1)式爲定義之 ν 不同，而自有其特別之前定條件。但與溫度無關。 n_1, n_2, n_3 均爲整正數，亦可爲零。設以 n 表 $n_1 + n_2 + n_3$ 之和。按數學中組合之計算法， ε 任一指定之可能值可按 n 中 n_1, n_2, n_3 三數之不同而共有 $(n+1)(n+2)/2$ 種不同之組合法。故由 Fermi 氏統計法知一密閉容積中能量等於 ε 之電子之個數並非可爲任意的，最多祇能有

1 個電子，其能量爲 0

3 個電子，其能量爲 $h\nu_0$

6 個電子，其能量爲 $2h\nu_0$

10 個電子，其能量爲 $3h\nu_0$

15 個電子，其能量爲 $4h\nu_0$ ，餘以此類推。

由此可知均分定律對於電子氣體不能合理，而在某一溫度之下，理想氣體之定律亦不能應用於電子氣體，蓋以原理上已根本不同也。

溫度頗高時，能量之量子性已不甚顯著，蓋此時各單獨原子所有之能量已遠較各可能的能量階級之差爲大。此時一電子能量之變遷究爲連續抑或不連續，實已無甚區別。但溫度頗低時則不然。此處因能量之有量子性以及 Fermi 氏之統計而電子氣體與經典理論中之理想氣體情形不合，即所謂氣體退化 (Gasentartung) 是。當溫度爲絕對零

度之時，其狀態尤堪注意。按經典的氣體理論，各電子在絕對溫度 T 時之能量當為 $3kT/2$ (§ 156)。故在絕對零度時，電子當已盡失其能量。但按諸 Fermi 氏之統計，在一密閉之氣體容積中，無論何時至多僅有單獨一個電子，其能量為零。其次，三個電子必已各有一個能量量子，再其次六個電子各有二個量子，餘以此類推。故電子氣體即當絕對零度之時，尚有能量存在，其值且不為過小，即所謂零度能量者是。此值之大，若按經典理論計算之，須當溫度在數千度時方有之。此可以經濟統計中一假設之例加以解釋。設 Fermi 氏統計法對於德國七千萬人民之財產亦為合理，但財產之分配僅為一單獨之條件所決定，而非如氣體之須取決於三個量子數，則其人民在通常可能範圍以內即降至最貧之時，亦決不致入於全體人民絕對赤貧如洗，同時不名一文之境況。真正貧無立錐之地者僅可有一人，其次者必已有銀 1 分，又次者有銀 2 分，以此類推，而最富者，按諸上述之條件，應有銀 $70 \cdot 10^6$ 分。若 Fermi 氏統計確為合理，則德國人民之財產總額決不致降至 $2,450 \cdot 10^{15}$ 分或 $2,45 \cdot 10^{13}$ [馬克] 以下。若以之應用於氣體，則此最低之總額相當於零度能量。

吾人可根據光子微粒性之觀念而視一空洞中之射線為由於光子所成之氣體。對於光子氣體，Fermi 氏統計已不能應用，而須另用一種 Bose-Einstein 二氏之統計，此與前者及經典的統計均有許多重要相異之點。應用此項統計

可導出 Planck 氏之輻射定律。

516. 金屬之新電子論。本書中前嘗屢述以金屬之電子論說明金屬導電與導熱之機構，以及其他關於金屬之現象，均頗稱適宜。但若取其原來之形式，則僅可將此種現象作性質方面的（且亦不能及於一切之情形）而不能作數量方面的說明。Sommerfeld 氏以波動力學與 Fermi 氏統計為基礎，而創立金屬之新電子論，於是此不相一致之弊方得解除。電子之質量頗小，其能量量子頗大，已於 § 515 中述及之，以是之故，電子氣體雖在數千度溫度之時，亦已完全退化。電子氣體因有一非常大之零度能量。

關於此新理論數量方面之結論，此處僅能述其最重要之二種。自新理論亦可推知金屬之導電係數與導熱係數恆為正比，與由舊理論所得之結論同（Wiedemann 與 Franz 二氏定律，§ 248）。但由舊理論所得二種傳導係數之比值與由實測所得者不合，而由新理論計出者，則與實驗符合一致。

第二種重要之結果可述之如下。前在 § 170 中嘗述及金屬之原子熱均約等於 6 一事（Dulong 與 Petit 二氏定律）此定律在該節中亦有理論的根據，即按經典的熱學理論，每一金屬原子之動能對於其三個自由度之值各為 $kT/2$ ，而其總動能應為 $3kT/2$ ，其位能亦應為此值，故其能量之總值為 $3kT$ 。但金屬中之電子並未計算在內。吾人若視電子為密閉於金屬以內之氣體，則於計算原子熱時，熱運動中藏

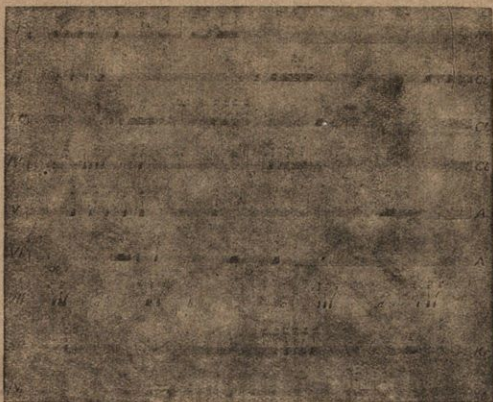
於電子以內之能量，即各電子各有 $3kT/2$ 之能量，亦當併算在內；若此則原子熱之值當較事實上者為大，例如各個金屬原子中各有一個電子時，其值將為 9，而非為 6。一方面吾人認定金屬之導熱係由於電子之熱運動，而另一方面於計算原子熱時，又須假設其不應有熱能量，其矛盾孰有甚於此者。此項矛盾今可解釋之如下。電子確有熱能量，但其值與溫度之關係頗鮮，不若在經典理論中所稱者。原子熱者初非指熱能量之本身，而不過為溫度上昇時能量增加之值。金屬原子確有此種之增加值，但電子之增加值則絕微。在一切常遇之溫度下，電子氣體幾已完全退化。按諸理論，氣體之已退化頗甚者，其比熱應正比於分子之質量，在此例中，即應正比於電子之質量。電子之質量極小，故對於金屬之比熱影響甚微。吾人不難計算電子在室內溫度時之『克分子熱』（§171）僅約為 $R/100$ ，而在經典理論中，則其值應為 $3R/2$ 。

第三十四章 原子核

517. 眞原子量. 同位元素. 元素之原子量 (§ 96) 卽化學中之所謂化合物量, 以氧之原子量 16 爲標準. 其測定之法自必先取一易於處理之量而稱其重, 其中蓋含有無數之原子, 於是由此以計算其 1 [克原子] 之重, 而其值卽爲欲測之原子量. 以前吾人恆有一不言而喻之假設, 卽同元素之原子皆屬完全相同, 於是原子量之值應嚴格正比於各原子眞正之重量或質量, 蓋一切物質每 [克原子] 中原子之個數皆係相等者也 (Loschmidt 氏常數, § 96).

試細察元素之週期系, 對於氧 = 16 而言, 較輕諸元素之原子量間大都皆有簡單整數之關係. 較重之元素則不然.

今日已另有全新之法可用以測定原子量, 此法有一大優點, 卽可測出單個原子之質量. Aston 氏以真空管中陽射線(溝渠射線或陽極射線)受電場及磁場作用後之偏轉作爲此項測量之用. 因偏轉之多寡與質量有關, 故質量不同之原子卽可藉此法以使之彼此分離. Aston 氏以適當之電場偏轉與磁場偏轉聯合之作用, 使荷電之原子(游子)質量相等者羣集於一置於射線路程中之照相片上之同一點, 猶如光線之集於一焦點然. 照相片上該點處卽變黑色. 在許多情形中雖管內僅儲有單獨之一種原子, 然照相片上所



第492圖 Aston 氏之質譜。

現者不僅一黑點而有二點或二點以上，是知必有質量不同之原子存在無疑。第492圖所示者為數種所謂Aston氏之質譜。

由射線偏轉之多寡可計算原子之質量，即真原子量。由此所得之值——除些微之相差（見後）不計外——對於氧 $=16$ 而言，皆極與整數相接近。例如在氪（Kr）元素原子之射線中所得之整數原子量為78, 80, 82, 83, 84與86數種，而用尋常方法所得氪之原子量則為82, 92，其值介乎上述諸值之間，而可以各種氪原子不同之混合比解釋之。其他大多數原子量不為整數之元素亦示相同之情形。氫為最著之例外，其原子量不為1,0000而為1,0078（此項相差不能以

新近發見原子量爲 2 之氫原子說明之)。其他元素與整數之相差皆遠較此爲小，通常其差值之數量級大抵皆在小數點後之第四位。最優異之元素當推氧，習慣上咸以其原子量恰等於 16,000。各元素真原子量與整數相差之值稱爲『質量缺陷』(Massendefekt)，藉此可得一重要之法以研究原子核之結構(參閱 § 538)。

由於此項發見可得下述之結論。世有質量不同而化學性質完全相同之原子。吾人前已述及物質之化學性質純視原子外層電子之組態而異，尤與此外層電子之個數(原子價)有關，而此數則又隨核電荷之多寡而變。故化學性質相同之原子必有相等之核電荷，可無疑義。但按 Aston 氏之實驗，其質量可大有不同。此種核電荷相等而質量不相等之原子，因其化學性質之相同，在週期系中應列於相同之地位。吾人稱此種元素爲同位元素。原子核之質量相等，即真原子量相等，而核電荷不等者，稱爲同量元素。

化學的原子量或化合量之所以不爲整數者，係因許多情形中，外觀似屬化學單純之元素，而實爲同位元素之混合物所致。其原子量乃爲按其各真原子量成份之混合比所計得之平均值。吾人須注意各元素之來源儘可大不相同，但其化學的原子量恆各相等，由此可知地球上同位元素之混合比到處皆必相同。因大多數之化學的原子量皆不過爲一種平均值，故週期系中有四處(A-K, Co-Ni, Te-I, Th

-Pa)之元素不按其原子量大小之順序而排列一事,即可以此說明之。蓋此四處之元素,列於前者,較重之同位元素所佔之成份特多,而列於後者,則較輕之同位元素成份特多故也。

以化學方法自不能分析同位元素,僅有以其不同之質量為根據之方法可資應用。最重要者係根據同位元素不同之蒸發或擴散速度,利用此種處理方法以分析同位元素時,其最有效者係為 G. Hertz 氏所發明,首以之應用於氖,而得二種同位元素, Ne^{20} 與 Ne^{22} , 其混合之比約為 10 : 1, 吾人且已能按 1 : 1 之比而將其配合,即增加其較為稀有之 Ne^{22} 一成份,同時尙有其他之同位元素 Ne^{28} 亦經發見。

最近發見尋常之氫 H^1 亦有一同位元素 H^2 , 此在原理上頗屬重要。(其存在之量絕微,而氫之原子量與 1 相差之原因並不以此。) H^2 之原子核必由二個質子及一個電子而成。

某種物質中有同位元素之存在亦可由其轉動振動光譜及帶狀光譜證實之。振動原子之質量對於分子之轉動頻率及其內部之振動頻率自必有影響。一元素中有 n 種同位元素者,其轉動振動光譜及帶狀光譜中之各譜線皆非為單線而為 n 倍之複線。最近由此發見氧 O^{16} 之外尙有二種同位元素 O^{16} 及 O^{17} , 惟其量甚微。第 485 圖 (§ 505) 示此項同位元素效應,頗是清晰。曲線之主峯屬於 Cl^{39} , 其旁

較高之副峯屬於 Cl^{37} , 較低者屬於 Cl^{39} .

518. Prout 氏假說 原子核構造. 自上節所述之內容, 可知電荷相等之原子核可有不同之質量, 且此種之質量恆幾為氫原子質量之整數倍. 其實 William Prout 氏早已於 1815 年時, 嘗提出一種假說, 謂一切元素皆由氫元素而成, 惟當時咸認為不確, 故早已淡然忘之; 今日舊案重提, 自覺倍增興趣. 自然現象之簡單一致性, 吾人方努力從事探求; 就此方面觀之, 則上述之假說正非常適合, 其真確性今日已無復或疑. 按此, 吾可視陽荷之氫原子核為構成一切物質之基本組織成份; 此外尚有一種基本成份則為陰荷之電子. 故氫原子核稱為質子. 是則一切之原子核皆為質子與電子所構成. 因電子之質量極小, 故其存在與否對於原子量之整數性實際上毫無影響(參閱 § 538).

以化學方法測定之鋰原子量為 6.94. 用 Aston 氏之質譜分析法知尚有二種同位元素存在. 其真原子量為 6 與 7. 鋰之原子序數為 3, 其原子核應荷有三個電量子之陽荷. 根據此事, 吾人可得下述之結論. 鋰同位元素之原子量為 6 者, 其原子核係由 6 個質子及 3 個電子所組成, 而原子量為 7 者, 則由 7 個質子及 4 個電子所組成. 在尋常之鋰元素中, 因其化學的原子量與 7 相近, 故後者之成份必遠較前者為多. 吾人不難計算尋常之鋰元素當為 94% 之 Li^7 與 6% 之 Li^6 所合成.

同位元素原子核之組織彼此或不相同，亦殊屬可能，但今日關於此方面者尚毫無所知，¹⁴自放射現象可推知原子核之內，質子與電子似輒組成氦原子核（4質子+2電子）而混跡其間。

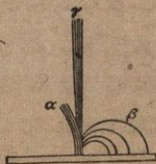
519. 放射現象 α, β, γ 三種射線。於1896年時，A. H. Becquerel 氏發見有射線自含鈾之礦物中放出，而尤以自鈾錳瀝青（Pechblende）所發出者為強，且此種射線可強烈的穿過極多之物體，儼如 Röntgen 氏射線然。Curie 氏夫婦（1898）亦從事研究之而卒能於鈾錳瀝青中析出一種前此未知之新元素，即鐳是，因知此即為上述之射線之來源。自此以後經吾人發見之物質同有此放射現象者為數甚夥。此項現象即稱為放射現象。有放射性之物質可放射三種不同之射線，吾人以 α, β, γ 名之。

α 射線為赤身之氦原子核，荷有二個量子之陽電荷。其自放射質射出之速度極大，可達 $2 \cdot 10^9$ [厘米]/[秒]，或約為光速度之 7%。

β 射線為運動非常迅速之電子。其速度約為光速度之 99%。

γ 射線前已於 § 473 中述過。此為波長極短之光線，更較 Röntgen 氏射線為短。

α 與 β 二種射線皆為運動之電

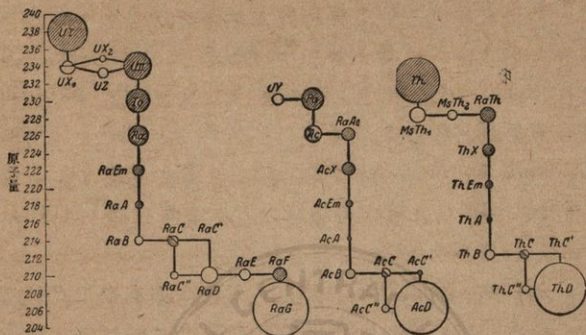


第 493 圖 磁場中之 α, β, γ 三種射線。

荷子，故在磁場中其前進向均因之偏轉，後者速度雖大而質量特小，故其偏轉較前者為烈（第 493 圖）。因其荷質比 ε/μ 均為已知，故由此偏轉之多寡可計算其運動之速度。γ 射線不受磁場之影響，與光線同。

Elster 與 Geitel 二氏早有一種揣想，以為放射現象之原因當係由於放射質原子自然發生爆炸狀之崩潰所致。此項理論為 Rutherford 氏所發展而完成之。按此，知放射性原子之原子核組織並不穩定，常有突然改變其內部之成份而擲出其一部份成份之傾向。惟何以僅有氦原子核與電子射出，而從未有氫原子核射出，則吾人至今尙未能說明其故（參閱 § 524）。至於 γ 射線之發生，在今日可以 Ellis 與 Meitner 二氏之說為基礎而歸之於原子核內部電子之量子性跳躍。原子核中電子之結合極堅，故其量子性跳躍必相當於頗大之能量差，而 γ 射線頻率之高，自可以此說明之。

520. 放射元素族。諸放射元素中，有為量極微者，然仍可由其射線以辨認之。此種之元素彼此間有一原始關係存在。各放射元素悉可歸納之於三系，或稱三族之中：即鈾系，釷系，與錒系是。鈾系之首為鈾 I (UI)，崩潰極緩。當其崩潰時，即由此產生一新物質鈾 X₁。此物質又可按二種不同之形式而崩潰。嗣由此再逐步繼續崩潰，有如第 494 圖所示，其詳情當於以下說明之。鈾系中之一物質為鐳 (Ra)，鐳於崩潰時產生一稀有氣體，稱為鐳射氣 (Ra Em) 此氣



第494圖 放射元素族。

體又崩潰而成 Ra A, 其後復經分支而達於一穩定之原質 (Ra G), 此為鈾系之末, 不再示放射性, 其化學性質與尋常之鉛相同, 但原子量稍異 (206, 而不為 207, 2; 此為尋常之鉛所由組成之一種同位元素), 吾人即稱之為鈾鉛。Ra F 為最早發見之放射質之一, 亦稱為鈾。

鈾系各元素崩潰之經過情形完全與此相同, 全系之首為鈾 (或為另一迄今尙未知之物質, 鈾即由此崩潰而成者), 亦經過一種射氣 (稀有氣體, 與 Ra 射氣共為同位元素) 而止於鉛之另一種同位元素 Th D, 原子量為 208。錒系起自一稱為鈾 Y 之物質, 亦包括一種射氣, 而終於鉛之另一同位元素錒 D, 其原子量為 206。自第 494 圖可見此三系之平行性, 殊為醒目。

在一此種之系中，各階段物質之崩潰速度通常皆大有不同。其平均之壽命（生成與崩潰間之時期約自一秒之若干分數起（ $\text{Th C}'$ 約為 10^{-11} 秒）以至若干萬萬年（ U I 為 $6,5 \cdot 10^9$ 年）。自純粹之鐳元素製品放射之射線歷 1580 年而降至其半，換言之，在此時期內，其中所含之 Ra 原子已有半數崩潰（所謂半壽期）。塗於夜光錶面上者通常為新釷 $\text{I} (\text{Ms Th I})$ ，其半壽期僅為 6,7 年。

放射原子於崩潰時，有發出 α 射線者，亦有發出 β 射線者。僅在分支處（第 494 圖）之物質可發出二種射線，其原子一部份放射 α 射線，一部份放射 β 射線。凡放射 β 射線者通常皆有 γ 射線隨同出現，但並非恆係如此。 γ 射線決不與 α 射線同時出現。第 494 圖中，放射 α 射線之物質以黑圈表之，放射 β 射線者以白圈表之。（各系末端之物質 Ra G ， Ra D 與 Th D 三者自皆不放射任何射線）。物質之壽命愈長者，圖中表示之圓形愈大。但其面積並不與其壽命成正比，吾人不難自上述關於 $\text{Th C}'$ 與 U I 二者之時期而知之。

自純粹之放射質發出之 β 射線並不純粹，而常由不同之射線羣所合成，各羣內之速度各自相等。此外且尚有速度在某範圍內連續分佈之 β 射線參與其間。僅此後者之射線方為自原子核發出之原射線。前者為副 β 射線，乃由於 γ 射線隨 β 射線同時自原子核射出時，侵入核外之內電子層而將其中之電子逐出原子之外而來。故有數種物質

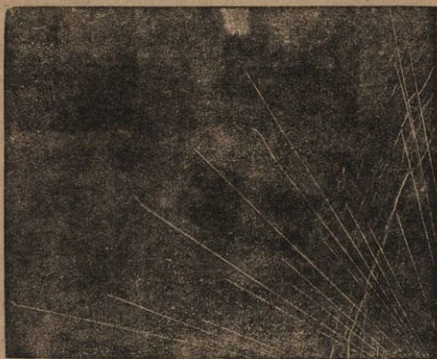
(例如 Ra E), 並無 γ 射線隨 β 射線一同射出者, 每無副射線。副 β 射線之能量係仰給於 γ 射線之能量 $h\nu$; 遇有此種作用發生後, γ 射線之頻率必因之減小。故副 β 射線之速度光譜可於 γ 射線之波長光譜中覓得其對象。

一放射原子之平均壽命與其放射之 α 射線之速度二者間有一有規律之關係存在。原子之壽命愈長, 即愈為穩定者, 此項速度愈小。 α 射線之速度愈大者, 其穿過物質時於完全失卻其速度以前所能前進之距離(射程)愈遠。故於記載時, 吾人不用其速度而輒以其在空氣中之射程代之; 按 Geiger 與 Nuttall 二氏, 射程應正比於速度之立方。

鉀與銣亦示極微弱之放射性; 而放射 β 射線。按諸放射性位移定理 (§ 522), 必有鈣之同位元素因之自鉀中產生, 而鐳之同位元素自銣中產生。但其所生之量過少, 故迄今尙未能證明其存在。今日又已發見有微弱之 γ 射線自鉀射出。

521. Wilson 氏之凝霧法。H. A. Wilson 氏嘗發明一極妙之方法, 使 α 與 β 射線之軌道能為吾人所目睹。此種射線穿過氣體時, 例如空氣, 即使其游離, 沿其軌道二旁皆有游子產生。吾人已知任何電荷子皆有促進水汽凝結之作用, 故此種之游子亦然。試取一滿儲空氣之容器, 其中有幾將飽和之水汽存在, 而令 α 或 β 射線在器中穿過。於是設法使空氣突然絕熱膨脹至某一定之容積, 俾空氣自行冷卻至

某程度適足以使水汽凝結於游子之上，而全部空間內尙未開始作普遍之凝結。此時游子上皆荷水滴，凡射線軌道所經之處，皆有游子產生，而到處皆留有霧之痕跡。第 495 及 496 二圖示 α 射線此種軌道之照相。自第 496 圖可見由



第 495 圖 用凝霧法所得射線之軌道。



第 496 圖 鈷 C 之 α 射線(實體像)。

同一物質放射之 α 射線射程皆係相等，頗為清晰（其中有一射線示特長之射程）。 α 射線之軌道皆為直線，此為其特徵。第 495 圖中有一 α 射線軌道之末端突然彎折，此蓋因 α 質點偶或衝至與一原子核相離極近，而由此偏轉所致 (§ 493)。第 497 圖示 β 射線由 Wilson 氏照相法所得之圖。此種射線所受空氣分子之作用遠較 α 射線所受者為強，故在空氣中之軌道彎曲不作直線。



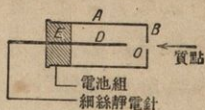
第 497 圖 由凝露法所見之 β 射線軌道。

522. 放射元素之位理定理。一原子之原子核射出一 α 微粒，即荷有二個陽電量子之氦原子核(原子序數 2, 原子量 4)後，其核質量即減少 4 個單位，而核電荷減少 2 個電量子。原子價恆單獨隨核電荷之數而異，故因該原子核電荷之減少，而其原子價亦必因之改變。例如該原子屬於週期系中之第 5 直行者，此時必退至第 3 直行，而其化學性質因亦變為與該行中之元素相似。同時，其原子量減小 4 個單

位 (例如第 494 圖中, Ra-Ra Em). 但若原子核射出一 β 質點, 即射出一電子, 則其陽核電荷增加, 而核質量實際上並無增減, 即原子量不變而陽核電荷增加一個電量子 (例如第 494 圖中, Ra D-Ra E). 此時原子在週期系中將進至相鄰之後一直行. 故 α 射線之放射, 使原子序數由 z 減小至 $z-2$, 而 β 射線之放射則使原子序數由 z 增加至 $z+1$. 此為 Fajans 與 Soddy 二氏之放射性位移定理, 與經驗完全相符. 吾人對於化學原子價之物理性質之認識 (§ 502) 藉此而得一最可靠之立足點.

523. α 射線之計數. α 射線落於一硫化鋅晶體或金剛石上時, 各粒之 α 質點皆與之猛撞而各發一閃光. 此項現象稱為閃爍現象. 若 α 質點之粒數不多, 則吾人可於一顯微鏡下觀察各次之閃光, 而計數某一定時間內猛撞之 α 質點之多寡. 由此可計算一秒鐘內自一放射質製品射出之 α 質點總數. 另一方面可藉一靜電計之助以測量此種質點在一秒鐘內所運輸之電荷. 各單獨質點之電荷為值太小, 吾人無法直接測量之, 但若有一大羣質點之粒數與電荷均為已知, 則各質點之電荷即可由此計算. 藉此法測得之結果為每一 α 質點荷有二個電量子. 吾人已知其電荷比 e/μ 之值, 由此二數即可證明 α 質點之原子量為 4, 故必為氦原子而荷有二個電量子者, 換言之, α 質點必為赤身之氦原子核.

尚有一種計數之方法可將 α 質點射於一游離室之中；所謂游離室者，即為一容器中儲有一種氣體而以 α 射線使之游離者。測量游離室中之游離電流，若射入室中之 α 質點不多，則此種電流係由於各個單獨質點之突然越過而成，此種電流出現次數之多寡即等於質點之個數。此項



第 498 圖 Geiger 氏計數室略圖。

方法曾經 Geiger 氏大加改善。Geiger 氏式尖端室(第 498 圖)者，為一金屬空匣 A ，中有一極細之尖端 D ，藉絕緣體 E 之助而完全與空匣隔離，二者間施以適宜之電壓，恰使尖端放電尚不足發生 (§ 288)。若遇有少數之游子趨近尖端，則立可引起尖端放電。此時原頗微弱之游離電流即因之突然非常增強。故每有單獨之 α 質點自匣之前壁 B 上之小孔 O 闖入室內時，即可自靜電計之示度而察覺，或以照相法記錄之。此種之計算器亦可應用之於他種之射線。

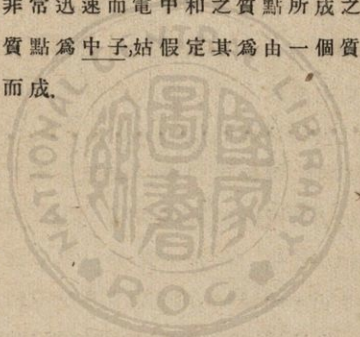
524. 原子之人工分裂法。吾人已證明放射作用之進行決不能以任何外來之襲擊，如高溫度等以改變其絲毫。但另一方面吾人確已能利用數種穩定之元素將原子核作部份的擊破。Rutherford 氏首以 α 射線轟擊欲將其原子核破壞之物質。設有一 α 質點偶或恰與一原子核相撞，則原子核之一部份可因之脫落。此可自該原子之發射一新射線而知之，此新射線者，係由陽荷之氫原子即質子，所成 (H 射

線)。吾人可自能量原理及衝量定理計算此 H 射線之能量並不單獨由 α 質點擊撞時之力學的作用而來。於是吾人須假定原子核被 α 質點猛撞時，核之內部必因之發生變化，而氫質點被射出時所需之能量即仰給於此，有如爆裂然。此項實驗可作為 Prout 氏假說 (§ 518) 強有力之證據。在此種以 α 射線引起之所謂原子核之人工分裂法中，恆僅有氫原子核射出，而並無如在自然放射作用中所見之氦原子核出現；此事彌足驚異。原子分裂時苟僅有一個質子自其核中射出，則按 § 522 所述，因損失一個 H 原子核後，原子之陽核電荷亦減少一個單位，故該原子當變為週期系中左鄰一直行內之一同位元素（原子序數由 z 降至 $z-1$ ）。但因此種變化後之原子為數極鮮——約在一百萬粒 α 質點之中，僅有一 H 射線——，故迄無法證明之。今日除『原子之分裂』外，原子之綜合似亦可以發生，即一 α 質點，亦即氦原子核將一氫原子核自某物質之原子核中轟出後，立即嵌入其中，而補其缺。此種情形或屬當然。遇此種情形時，上述之思索當稍加改變，即原子之核電荷必將增加一個電量子，而原子量增加 3 個單位。原子之人工分裂法僅對於有限之數種物質方為可能。

Cockroft 與 Walton 二氏以質子射線轟擊鋰元素，卒亦能使其原子經人工而分裂；惟所用之電壓約須達數十萬 [伏特]。此時出現者為氦原子核所成之射線即人工之 α 射

線,而未見 H 射線. 其能量亦爲極大,決非僅自質子射線中得來,而必係取自所涉之原子核中之內能.

不久以前, Bothe 與 Becker 二氏發見以 α 射線轟擊某種之輕元素時,每有貫穿本領極強之射線自該元素射出,而尤以轟擊鈹時所見者爲最甚. 此射線初時尚以爲係人工之 γ 射線. 但其後屢經觀察,始發見此種射線中至少有一部份必爲運動非常迅速而電中和之質點所成之微粒射線. 吾人稱此種之質點爲中子,姑假定其爲由一個質子及一個電子密切結合而成.



第三十五章 物質之構造

525. 概論. 若吾人已知一較大複體中各單體之特性與乎其舉動之一切詳情,則根本上恆必可由此以推測其所組成之較大複體之特性. 根據吾人對於原子與分子特性已知之知識以推測物質之若何構成,在許多方面已達於成功. 最要者自必為原子與分子間之作用力之問題;此力存在於物質基本組織成份之間,使物質團結而不致渙散,其強度可有不同,視物質之狀態而異,即所謂內聚力者是也.

526. 氣體. 氣體之能合於理想氣體之條件者,其分子間之作用力恆為極微,幾可視為無力. (僅當分子互撞時,其間方有作用力發生. 故吾人對於理想氣體狀態之假設可精確述之,如下: 此種之力之作用,隨分子間相互之距離而遞減頗速.) 前於導出理想氣體之簡單定律時,即以此項假設為基礎,換言之,即認定分子間無相互之位能. 此項狀態之條件為分子須互相分離頗遠,即密度須為頗小,或壓力須為頗低. 事實上此種之氣體可不認為一團結之物體,而僅視之為空間中一羣不相維繫之分子.

真正氣體之分子間事實上確恆有作用力存在,即所謂 Van der Waals 氏力是 (§ 164). 在異極之游子分子 (§ 502) 中,此力即為分子電偶間之電力. 在同極分子中則無電力.

此種分子間之 Van der Waals 氏力須以波動力學說明之。

游子分子間之 Van der Waals 氏力恆較同極分子間者爲強。故前者每較後者易於液化。

527 液體 非晶體。關於液體之結構因缺乏適宜之研究方法，故迄今尙茫無所知。惟最近之工作頗有藉 Röntgen 氏分析法之助 (§ 472, Debye 與 Scherrer 二氏法) 以探求關於液體結構消息之希望。吾人今日只知液體分子之團結僅堅強至一某程度，其運動可不受妨礙爲止。此項團結力且未即終止，尙可不斷的隨熱運動之作用而變換。吾人可以一匣中滿儲螞蟻，以比擬液體，尙無不合。

在某種液體中，分子已有一種傾向，欲自行列成有規則之較大複體，至少在小範圍以內欲組成近似晶體之狀態。Lehmann 氏發見之所謂液態晶體 (§ 459) 卽屬此類。吾人已知此種物質之光學特性與真正之晶體同。

液體之溫度下降時，可按其舉止之不同而分爲二類。第一類到達某一定之溫度，卽凝固點(融點)時，卽突然變爲固體，而成結晶之狀態(水、金屬等物)。其有秩序之程度因之增高。另一類自液態逐漸變爲固態，其變化連續無間。溫度愈降，液體愈變爲黏滯，終遂化爲固體，成非晶質之狀態。此類物質無明確之凝固點。故由液態變爲非晶質狀態時，其有秩序之程度並不因之增高。非晶體在固態中分子排列之漫無秩序，一同液態，故吾人謂其於分子無秩序之狀態下

凝成固體。在某方面觀之，直可視之為過度冷卻之液體。松香、火漆、石臘以及玻璃等物，皆為此類之例。此類物質且常示有特別之受範性。置一錢幣於火漆之上，歷久而火漆上可壓成幣面之圖形。

528. 晶體。吾人稱為固體者，按其本義言之，皆應為晶體，其原子狀之結構在今日可用 Röntgen 氏射線之物質構造分析法 (§ 472) 以推究之。液體凝固為晶體時，所謂其有秩序之程度增高者，蓋由其基元組織按一定之規律排列成一空間格子而表顯之。換言之，此種之基本成份在體內固住於一定之靜止位置。其惟一可能的運動為對於此靜止位置之振動。

在液態 \rightleftharpoons 固態之變化中，分子之組織輒亦連帶隨之變化。有許多物質之分子即逕以前在液體中時之位置列成空間格子之格點 (分子格子)，但一切物質並非均係如此，亦有在許多情形中晶體成一原子格子者，其各原子對於電均為中和，全體列作格點。尚有第三種稱為游子格子者，例如岩鹽晶體是。此種晶體中，各格點上各有一游子佔據。例如岩鹽之游子為陽荷之 Na 游子與陰荷之 Cl 游子，與岩鹽在液體中分離所成之游子相同。在一切情形中，使晶體格子各基本成份團結之力即為前述使分子團結之力。晶體格子各基本成份之幾何的排列可非常不同。其形狀自必受各單獨情形中此種基本成份之特性所支配。晶體幾

何排列之外形迄至某程度爲止卽爲分子之結晶形。

前述之岩鹽晶體 NaCl 具有立方體之空間格子 (§ 472, 第 457 圖), 爲一最簡單之例。在此晶體中, Na 陽游子與 Cl 陰游子交錯排列, 頗有一定之規則。由 Röntgen 氏射線分析法測得各游子間之距離, 卽各『立方體元』每邊之長, 爲 $2,83 \cdot 10^{-8}$ [厘米]。此爲原子直徑之數量級 (§ 493)。假定岩鹽之構造確如上述, 此值亦可以他法計得之, 頗相符合。岩鹽每 [厘米]³ 之質量爲 2,16 [克]。一個 Na 原子 (原子量 23) 之質量 23 倍於一個氫原子, 故爲 $23 \cdot 1,65 \cdot 10^{-24}$ [克] = $3,80 \cdot 10^{-23}$ [克], 而一個 Cl 原子 (原子量 35,5) 之質量爲 $35,5 \cdot 1,65 \cdot 10^{-24}$ [克] = $5,86 \cdot 10^{-23}$ [克]。因得晶體二成份之平均質量爲 $4,83 \cdot 10^{-23}$ [克]。命各立方體元每邊之長爲 d [厘米], 於是每一立方體元之質量爲 $2,16d^3$ [克]。立方體八個角頂各有一個游子佔據。但每一個游子亦同時屬於八個立方體元。故晶體內游子之個數卽等於其中立方體元之個數, 而分配於每個立方體元內之質量應等於游子之平均質量。於是 $2,16d^3 = 4,83 \cdot 10^{-23}$, 或 $d = 2,83 \cdot 10^{-8}$ [厘米]。此項計算須假設氫原子之質量爲已知。此值可由 Loschmidt 氏常數 (§ 96) 求得。故反之, 亦可由 Röntgen 氏射線分析法所測得各立方體元之值以計算氫原子之值, 而從此更算出 Loschmidt 氏常數。

原子格子與游子格子中, 吾人皆不能謂若者爲單獨之分子, 蓋例如在 NaCl 晶體中, Na 游子與 Cl 游子之排列頗有

一定之規則，吾人實不能指出孰二者相互間之排列特優，可視為組成一分子者。每一Na游子與八個Cl游子相鄰，其排



第499圖 銳鈦礦 TiO_2 空間格子之模型，Ti白球，O黑球。

列之關係完全相同；反之，每一Cl游子亦與八個Na游子相鄰，其關係亦仍相同。故即謂一純粹之晶體組成單獨之一個大分子，亦無不可。

第499圖示銳鈦礦(Anatas) TiO_2 較為複雜之空間格子之模型。

置晶體於一電場中，則作用於晶體基本組織間使各固定於靜止位置之原子力與由電場而來之電力二者連合發生作用，以致晶體中之陽成份順電場方向而移動，陰成份逆

電場方向而移動。其結果將使物體之二界面上各有陰陽相反之電荷過剩，而成介電極化之現象。





第九編 相對論

相對論係屬於力學之範圍，本應於力學中討論之，但以其所需之物理知識不僅以力學為限，在力學中難以了解，故本書特於最後一編述之。但吾人決不可因若此之編制順序而誤以為相對論之在今日為全部物理學最重要之基礎。相對論中之二原理，即相對原理與慣性重性等價原理（等價原理），實與力學中其他之原理以及質量、電量、能量、動量諸物理量之不滅定理相對峙，無分輕重。

第三十六章 狹義相對論

529. 力學之相對原理. 在經典物理學中,欲將任何力學現象作一精確之物理的陳述,恆取一物質性物體內各點之三個空間坐標 x, y, z 與時間 t 之關係而表成一函數. 以前對於此種坐標系之選擇視為無足輕重. 尤如於陳述地面上之力學現象時,咸默認坐標系必在地面上某一不變之位置,即『相對』於地球為靜止,而從未有思及此種之坐標系恆因地球之自轉與公轉而不免於複雜之運動者. 僅於討論地球自轉所引起之慣性作用時,吾人方注意坐標系之運動所生之影響. 在其他一切情形中,吾人直未顧及地球之運動,即由各種單獨現象之記載導出之定律是否對於地球在宇宙中之運動,至少如繞日之公轉,受有影響. 此種問題吾人從未加以考慮,全太陽系整個尙有運動,更無論矣.

在吾人所作力學實驗所歷之時間以內,地球繞日之公轉可視作與直線定速運動非常近似. 地球運動之方向在一日以內所變者幾等於 1° ,在一分鐘以內者,僅約 $2,5''$. 在力學中,吾人已知任何力學現象所藉以表出之諸坐標系,即所謂參考坐標系者,作直線等速運動時,諸觀察者在各系中觀察同一之單獨現象所得之記載雖或各不同,而由此推得之規律則均屬一致. 此為力學之相對原理. 此實為自古

以來科學上始終認為可靠而未生爭辯之原理。故設有一物理學家在一直線定速運動而與外界完全隔絕之實驗室中以實驗定出之力學定律，必與另一觀察者在對於第一實驗室作另一種直線定速運動之另一實驗室內以實驗定出之定律完全相同。參考坐標系之自行以直線定速運動前進者稱為慣性系。故就力學現象之經過情形言之，一切慣性系之物理的價值彼此完全相同。

試舉一例言之，設有一實驗室建於一火車之上，姑認地面為一完全平面，火車在水平鐵軌上依直線定速前進，絲毫不受振盪。吾人若於此實驗室中舉行物體在重力作用下之自由拋射及自由下落實驗，而以隨車運動之慣性系為參考坐標系，記錄各步之經過情形，則吾人各時所記錄者，必與另一觀察者以固定於地球之慣性系為參考坐標系而將此同一經過情形記錄者，完全不同。例如在車內令一物體自由下落，則吾人之記錄為一自由鉛直下落。蓋對於吾人而言，物體在未落以前並無水平向之初速度。但對於固立於地面上之觀察者而言，則物體確有一水平向之初速度，即車之前進速度是。故此觀察者以其坐標系為參考系而記錄之經過情形為一初速度水平向之拋射運動，而物體之軌道為拋物線之一段。但二人從此求出拋射與下落運動之普遍定律時，仍得完全相同之結果。其相差僅在各步經過情形之記錄，此蓋由於二者所見之初速度不同，有以致之。

參考坐標系之直線定速運動對於其中任何力學性之經過情形既毫無影響，故吾人可反之而得一結論曰：欲藉力學實驗之助而稍得關於其參考坐標系直線定速運動之任何消息，根本上恆無可能性。惟參考坐標系之加速運動則可以察知之，例如由在地面上舉行之力學實驗（Foucault 氏擺動實驗等，§ 49）可直接察覺地球之自轉。（吾人須注意轉動恆為一種加速運動。）

在知識論中，『絕對運動』之觀念頗屬重要。此種觀念係以空無一物之空間確能存在之思想為基礎，即在某一空間內雖毫無物體存在，以致無從將坐標系固定於其上，然吾人仍可舉出一坐標系，靜止於此『絕對空間』之中。即認此為合理，但若僅就力學現象論之，吾人根本上已無法將此靜止之坐標系與對之作直線定速運動之其他坐標系加以區別。此外若根據電學與光學之實驗而亦發見『絕對』之觀念為不可能，則『絕對』運動狀況之知識根本上吾人已不能領略。吾人所能確定者僅為『相對』運動，即一坐標系對於另一坐標系之速度，例如火車之對於地面是。

自力學之觀點言之，任何慣性系均可視作靜止，不致使物理定律發生錯誤。一坐標系 S' 以速度 $+v$ 向另一坐標系 S 運動時，吾人可視後者為靜止，前者為運動。但反之吾人亦可視 S' 為靜止，而謂 S 對之以速度 $-v$ 運動，亦同屬合理。

530. Galilei 氏變換式. 設有二坐標系 S 與 S' , 彼此以速度 v 相對而運動. 一點在此二系中之坐標以後恆將以 x, y, z , 與 x', y', z' 分別表示之. 此處吾人可設想此二系之 x 軸與 x' 軸恆指同向, 且在同一直線上, 其方向與 S' 對於 S 之速度 v 同, 而 y 與 y' 軸以及 z 與 z' 軸皆各平行. 且於選擇時間之起點時, 以二坐標系恰相重疊, 即 $x=x'$ 之時間為 $t=0$.

吾人試觀察 S' 系中之一點, 其坐標為 x', y', z' , 此全系對於另一坐標系 S 以速度 v 沿 x 軸之方向而運動. 於是 S' 系中之各點皆將以同一速度對 S 而運動, 而按諸經典力學之基礎, 其在 S 系中之坐標當為

$$x=x'+vt, \quad y=y', \quad z=z' \quad (1a)$$

假定二系中時間之測量皆用同一單位, 所取時間之起點亦為相同, 而以 t 與 t' 分別表示 S 與 S' 中之時間, 則

$$t=t' \quad (1b)$$

若不用(1a)與(1b)二式, 則反之亦可書作

$$x'=x-vt, \quad y'=y, \quad z=z', \quad t'=t \quad (2)$$

(1a), (1b) 與 (2) 諸式即係所謂 Galilei 氏變換式. 互換二系之坐標而以 $-v$ 代 $+v$, 則(1)式即變為(2)式. 在(1)式中吾人可視 S 系為靜止, S' 系對之以速度 $+v$ 而運動; 在(2)式中則反是, S' 系為靜止, S 系對之以速度 $-v$ 而運動.

任意採用一系, 吾人所得力學定律之形式均屬相同.

故力學定律，對於 Galilei 氏變換式恆為不變量。

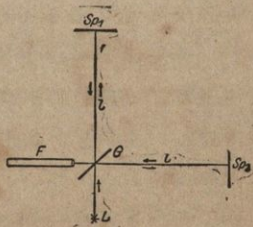
531. Michelson 氏實驗。所謂經典物理學者，其所根據之觀點，以為一切物理現象，窮根究源，皆須歸納於力學性。因欲貫徹此項基本原理，於是遂不得不捏造以太之說，以為電場磁場皆須賴以太為其物質性之憑藉者，而電場，磁場以及光學諸現象方得由此以力學說明之；然以太者須為極輕而不能稱量之物質，充滿於全宇宙之間，且一切物體內部亦皆為其所侵入。此種假設的以太既分佈於整個宇宙以內，到處皆有其蹤跡，則視之為絕對空間適當之代表，或即視為絕對靜止之坐標系所維繫之物，自無不可。

於是有一問題起焉，即以太中之運動是否可以電學或光學之實驗以示明之。吾人若以 Galilei 氏之變換式為基礎，則事實上此似應屬可能。茲假定 S 系為一靜止於以太中之坐標系。光線在真空中對於此坐標系，必向一切方向均以速度 c 等速傳播。設另有一坐標系 S' ，例如地球，以速度 v 沿 x 軸之方向而運動。今試觀察自靜止系之原點 ($x=y=z=0$) 發出之二光線，其一沿 x 軸之正方向 ($+c$)，其一沿 x 軸之負方向 ($-c$) 而傳播。其在 S 系中之速度為 $dx/dt = +c$ 及 $dx/dt = -c$ 。按(2)式計算此二光線在 S' 系中之速度當為

$$c' = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v = c - v \quad \text{及} \quad c' = -c - v = -(c + v)$$

故在 S' 系中觀察時，沿此二方向之光速度當不相等。光線之與 x 軸成其他任何交角者，其值亦不難計算之，當介乎上列二極限值之間。換言之，自 S' 系中判斷光之速度，當見其值隨空間內不同之方向而異。吾人誠能測得各方向內光之速度而比較之，則由此自不難計算以太中『絕對速度』 v 之量與向。

Michelson 氏實驗(1881)即根據此項思想而作。氏之假設以為地球並不靜止於以太之中(對於其自轉而言亦然)。蓋地面上各點之運動複雜萬分，吾人自不能認其為靜止也。(地面上之以太被地球帶同運動之思想已為在高空中舉行之特種實驗所否認)。Michelson 氏所用之儀器為一干涉儀，其構造與 §443 所述者不同，其原理如第 500 圖之略圖所示。單色光自光源 L 發出，遇半透明(微塗以銀)玻璃板 G 而分成強度相等且有相干性之二光束，互相垂直，而向等距離 l (約數米)處之反射鏡 Sp_1 與 Sp_2 前進。二光線自此二鏡重行反射，仍相遇於 G ，一部份透射，一部份直角反射，而同入於望遠鏡 F 中。(一切之附帶裝置，例如光線自 L 發出後在 G 與 Sp_1 或 Sp_2 之間若何使之平行等等，在第 500 圖中均已略去) 同入望遠鏡中之二光線束有相干性 (§ 437)，故



第 500 圖 Michelson 氏實驗略圖。

在望遠鏡目鏡之焦面上現有一組干涉條紋，即明暗相間之線。此蓋因儀器二臂之長雖為相等，而各光線到達視場平面上各點之路程除該面中心區域外，仍不為相等也。其光程差隨各點與視場中心間之距離而異（參閱 Fresnel 氏雙鏡實驗，§ 438）。今若縮短 $G-Sp_2$ 間之距離，則此項光程差將因之變更，而干涉條紋將因之遷移少許。若於其一光線之路程中置一折射性之物質，則因此光線之速度以及其光程 (§ 409) 均因之而變，故其情形亦將與上相同。總之二光線沿其前進方向上速度之比，不問以任何原因而有改變時，其干涉條紋之位置恆必隨之變更。此蓋因光線速度之改變，不拘由於任何原因，均足以使其光程改變也。

若 Galilei 氏變換式可應用於此項實驗，則必當有吾人所希望之結果出現。將儀器置於某一適當之位置，務使向 Sp_2 前進之光線適與儀器（地球）絕對運動之方向相符合，則隨同儀器運動之觀察者所測得此方向上之光速度，當較其在此其他任何方向上者為小，故自必較與此垂直之方向上者為小。若將儀器連同望遠鏡轉過 90° ，則他一光線將落於地球運動之方向上，而其情形適成相反。無論何時光線前進之方向與運動之方向相同者，其光程必較長。若儀器之二臂各與運動方向成 45° 之交角，則光程相等。故儀器轉動時，二光線之速度週期的增減，而干涉條紋之位置相應的隨之示週期的變更。按計算所得之結果，此項效應當頗明

晰,且當可由實驗測出.

茲取向 Sp_2 前進之光線與地球運動方向相同時之情形觀察之. 在靜止系(以太)中,光之速度沿一切方向皆為 c . 光線前進 $G-Sp_1=a$ (第 501 圖 a)之路程而重返時所需之時間非為 $2l/c$. 蓋此時 G 已移過少許($2b$ 一段距離),當該光線回至 G 上之同一點時,其方向已與 Sp_1 之面稍作傾斜(圖中 G 與 G' 示光線出發及重返時各瞬間玻璃板之位置,以下



第 501 圖 Michelson 氏實驗之說明.

所述者亦均仿此). 命 t_1 為光線來回所需之時間,亦即 G 鏡自 G 移至 G' 所需之時間. 於是 $t_1 = 2a/c = 2b/v$, 故得

$$b = a \frac{v}{c}, \text{ 或因 } a^2 = l^2 + b^2$$

故

$$S_1 = 2a = \frac{2l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

試再觀察另一光線. Sp_2 (第 501 圖 b)示光線由 G 出發時反射鏡之位置, Sp'_2 示光線遇之而反射時鏡之位置. 命自 G

至 Sp'_2 間之距離等於 a ，而 G 所移過之距離等於 $2b$ ，即光線所行之路程等於 $2a-2b$ 。又命反射鏡由 Sp_2 移至 Sp'_2 之距離等於 d 。茲僅就光線前進時之情形觀之，其所需之時間為 $t'_2 = a/c = d/v$ ，故 $d = a \cdot v/c$ 。又因 $a = l + d$ ，故得 $a = l(1 + v/c)$ 。光線一往一返所需之總時間為 $t_2 = 2(a-b)/c = 2b/v$ ，故得 $b = (av/c)/(1+v/c)$ 。從此可得光線之路程為

$$S_2 = 2(a-b) = \frac{2l}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (4)$$

將(3),(4)二式比較之，得

$$S_2 : S_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ 或 } S_2 = S_1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5)$$

假定上述之基礎為合理，則將儀器轉過 90° 後，二光線光程之比當適與上式相反。若儀器為靜止，而將其原在運動方向上之一臂較他臂增長 $1 : \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 倍，則其作用當與吾人前所希望者相同。

此所謂 Michelson 氏實驗者，已經多次反覆舉行，最近 Joos 氏復特加謹慎，從事觀測，而自來之結果，迄未能絲毫察見此種由於地球運動而生之影響。吾人須視地球為靜止於以太之中，即 $v=0$ ，則吾人所希望之結果方能與此實驗相符合。但此結果顯與以前之種種基本觀念發生衝突，故以前之觀念中必有與實際相背之處。

532. 狹義相對論之基礎。按 Michelson 氏實驗之結果，知光線對於運動之地球，亦即對於任何其他之參考坐標系，不論依任何方向傳播時，其速度均屬相等，與吾人之一切希望相反。於是吾人遂猜想其所以不合之原因，當由於在 Michelson 氏實驗中，隨同地球運動之光源之速度與光之傳播速度二者不應相加所致。在某種天文物理學之觀察中，確亦見有與速度若此相加不合之現象。故彼此作定速直線相對運動之諸觀察者皆有同樣充分理由，謂在其本人之坐標系中所見同一光源所發之光皆以球面波向各方傳播，但按吾人尋常對於空間與時間之觀念，如在 Michelson 氏實驗中之思索所根據者，此實屬全不可能。從此可知歷久未得解釋之空間與時間的舊觀念顯與實驗上之經驗發生衝突。

此項難題直至 1904 年遇 Einstein 氏而始獲解決，蓋由 Michelson 氏實驗所得之事實既屬無可置辯，氏即以之為基礎而對空間與時間之觀念重新作一評論。氏之意見以為是項矛盾之癥結必在以舊觀念為根據之 Galilei 氏變換式，故當另以他式代之。氏因基於 Michelson 氏之實驗而建立光速常定之原理，然後由其十分嚴格之結論而求得一新變換式。光速常定原理之內容謂：真空中光之傳播速度，不問對於任何慣性系，恆與此種慣性系之運動無關。氏又由此推得一普遍之結論謂：無論如何，決無一種物理現象，吾人可

藉其經過之情形以探出關於其坐標系直線定速運動之任何消息者。絕對之運動，根本上不能察出，故不屬於物理學真實範圍以內。所能觀察者僅為慣性系之相對運動。以上所述者即為 Einstein 氏之相對原理。

是則空間有以太存在之觀念自必因之推翻。但有時亦間或仍用以太二字，然其意義已與往日之物質性的物質完全無關。今日所謂以太者，純指物理學中之空間而言，即謂電場與磁場所憑藉之空間，以別於幾何學中之空間。

533. Lorentz 氏變換式。 下述者為 Born 氏所導出之變換式，以後當用以代替 Galilei 氏變換式者。設有二坐標系 S 與 S' ，以速度 v 彼此作相對運動，其坐標軸與相對速度等等之方向均與 § 530 中所述者同。二系中各點之二坐標 y, z 與 y', z' 垂直於運動之方向，皆必互為相等，惟 x 與 x' 則不等。吾人似可假設二系中以完全相同之時鐘量出之時間皆應相等，且與地位無關。但此種假設毫無根據，故吾人須視 x' 與 t' 皆為 x 與 t 之函數，反之， x 與 t 亦皆應為 x' 與 t' 之函數。於是新變換式之形式當為

$$x' = x'(x, t), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t'(x, t), \quad (6a)$$

與
$$x = x(x', t'), \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t(x', t'). \quad (6b)$$

吾人試觀察 S 與 S' 二系中之坐標原點 ($x=0$ ，與 $x'=0$)。若 S' 對於 S 以速度 v 沿 x 方向運動，則 $x'=0$ 一點對於 $x=0$ 一點亦有相同之運動。故謂 $x'=0$ 者，其意義與 $x-vt=0$ 相

等。反之，若視 S' 爲靜止，則此時 S 對於 S' 以速度 $-v$ 而運動。於是謂 $x=0$ 者，其意義與 $x'+vt'=0$ 相等。每瞬間此二種意義相同之說法同時恆爲合理，故普遍言之，應有下列之關係：

$$ax' = x - vt \quad (7a)$$

$$ax = x' - vt' \quad (7b)$$

a 爲一未知之因數，其在二式中必爲同值，蓋按相對原理，此二式除交換坐標及 v 之符號外，餘無不同處也。欲定出 a 之值，可將(7a)與(7b)二式中之 x' 消去，即得

$$at' = \frac{a^2 - 1}{v}x + t \quad (8)$$

沿 x 方向之定速直線運動，在 S 系中者以 $u = x/t$ 表之，在 S' 系中者以 $u' = x'/t'$ 表之。但此不過爲自二系中觀察同一運動時所用之表示法。若以(8)式除(7a)式，則得

$$u' = \frac{x}{t'} = \frac{x - vt}{(a^2 - 1)\frac{x}{v} + t} = \frac{u - v}{(a^2 - 1)\frac{u}{v} + 1} \quad (9)$$

今設吾人所討論之運動爲一沿 x 方向前進之光線。按諸光速常定之原理，此在二系中均應相同，即 $u' = u = c$ 。於是(9)式可得

$$a = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (10)$$

以此式代入(7a)與(7b)二式，則得下列之新變換式

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (11a)$$

與

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (11b)$$

此種之變換式係絕對嚴格根據 Michelson 氏之實驗而得者，早已爲 H. A. Lorentz 氏(1891)所建立，用以作爲此項實驗形式上之說明。故稱爲 Lorentz 氏變換式。

速度 v 頗小，即 $v/c \ll 1$ 時，Lorentz 氏式即變爲 Galilei 氏式之(1)，(2)二式，故此二式可視爲相對速度頗小時之極限。在日常經驗之範圍以內，就物質性之物體言之，此 $v/c \ll 1$ 之條件，恆屬合理。

534. 時間之相對性。自 Lorentz 氏變換式可得關於運動系中長度與時間諸值極重要之推論。設在 S 系中 x 軸上二點 x_1 與 x_2 處有二事件同時舉行，即 $t_1 = t_2 = t$ 。於是按(11a)式，在 S' 系中，

$$t'_1 = \frac{t - \frac{vx_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t'_2 = \frac{t - \frac{vx_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \text{故得} \quad t'_1 - t'_2 = \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (12a)$$

是則在 S' 系中所見此二事件舉行之時間差不等於 0，而與

二事件舉行之二位置間之距離 $x_2 - x_1$ 有關,不若在 S 系中所見者之爲同時。故二事件在 S 系中不同之處同時出現者,在 S' 系中不覺其爲同時;反之,吾人亦可證明在 S' 系中爲同時者,在 S 系中亦不爲同時。

吾人試更取二事件,在 S 系中同處 ($x_1 = x_2$) 先後相隔 $t_2 - t_1$ 之時間而舉行,例如一擺在振動中連續二次經過其靜止位置。於是按(11a)式,此相同之二事件在 S' 系中先後舉行相隔之時間爲

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (12b)$$

故二事件相隔之時間,在隨同運動之 S 系中者較在 S' 系中者爲短。若 S' 系中有二事件在同處($x'_1 = x'_2$)先後相隔 $t'_2 - t'_1$ 之時間而舉行,則可按相同之計算法由(11b)式得 S 系中相隔之時間爲

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (12c)$$

是知在一隨同運動之坐標系中所判斷之時間恆較在任何其他坐標系中所判斷者爲短。擺之振動,時鐘之進行,皆不能例外。設有構造完全相同之二時鐘,在彼此作相對運動之二坐標系中,則各觀察者所見其手中對於其爲靜止之時

鐘恆應較他系中對之為運動之時鐘為速 此項關係對於任何物理作用均應合理。故時間之觀念為相對的，而非絕對的。一切物理作用所經歷之時間須視察者之運動狀況而異。

吾人若回憶 § 129 所述關於 Doppler 氏效應導出之方程式，則必將發生一疑問，即觀察者靜止而光源對之運動，與光源靜止而觀察者對之運動，在上項效應中原理上是否係屬相異。蓋否則何以在此二種情形中所得之式結果不同。其所以然者，僅以前於計算時忽略時間之相對性，且該處所涉者初非假定其為光振動。若以 Lorentz 氏變換式為基礎而將上述之二種情形重行計算之，且以光源為振動體，則在此項情形中，不問觀察者靜止，光源運動，抑或反是，其所得之方程式恆為相同。其式恆為

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

若 $v/c \ll 1$ ，則此式仍可寫作 $\nu' = \nu(1 - v/c)$ ，與 § 129 中所得者相同。

上式僅對於光振動方為合理。對於其他之波動，凡吾人假設其憑藉於物質者，則 § 129 中之方程式(相對性之改正為值甚微，故略去不計)皆為合理。而觀察者與波源二者究係何者對於物質性之媒質作相對運動，吾人自可加以區別，

故自亦無背於相對原理，此物質性之媒質者，即波動賴以傳至觀察者所憑藉之物質是也。

535. 長度之相對性. 今試觀察 S' 系中 x' 軸上之二點 x'_1 與 x'_2 ，例如在 S' 系中一靜止之尺桿之二端。在 S' 系中此尺桿之長度為 $x'_2 - x'_1$ 。吾人今欲在 S 系中測量此尺桿之長度。此項測量可按下述之理想實驗以舉行之。於 S 系中沿 x 軸置一極長之刻度尺，靜止於系中不動，而於此長尺之旁站立許多之觀察者，各人各持一遲速完全（在 S 系中）相同之時鐘。在預行約定之某瞬間，例如 $t=0$ 時，適站立於欲測之運動尺桿兩端處之觀察者立即將其各端在靜止之長尺上所指之位置記出。蓋欲在 S 系中測量 S' 系中之長度須將其兩端（在 S 系中）同時記出，方有意義也。此項測量之結果，吾人可自 Lorentz 氏變換式（11 a 式）導出之。

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{或} \quad x_2 - x_1 = (x'_2 - x'_1) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (13)$$

換言之，在 S 系中測得該尺桿之長度較在隨同運動之 S' 系中所測得者為短，其比率為 $\sqrt{1 - v^2/c^2} : 1$ 。吾人直可謂其在 S 系中確係較在 S' 系中者為短。蓋除上述之理想實驗外，其他亦實絕無較有意義之法以作 S 系中該項長度之定義與測量也。

反之， S 系中一靜止之尺桿由 S' 系中之觀察者測量其長度時，吾人亦立可證明其有相同之情形。由 S' 系中判斷

時，其長度亦似以 $\sqrt{1-v^2/c^2} : 1$ 之比而縮短。故一線段在一隨同運動之坐標系中量之恆為最長。自 Lorentz 氏變換式又可推知凡與運動方向垂直之長度皆無變化。是則物體在其運動之方向上似被壓扁

長度之相對性係由於 S 與 S' 系中對於同時間之判斷不同而來。蓋在上述之理想實驗中，吾人雖特加申明 S 系中之測量須同時舉行，然其由 S' 系中所判斷者，仍見其不為同時，而略有先後，其前端之側量略較早於其後端之測量，故見其縮短耳。

Lorentz 氏所以建立其變換式者，以氏深知此種之式在事實上確可用以解釋 Michelson 氏之實驗。此項實驗之所以無結果者，吾人今已不難了解之。吾人前已以舊觀念之思想 (§ 531) 為基礎而斷言運動之作用能使在運動方向上儀器之一臂較之靜止時增長 $1 : \sqrt{1-v^2/c^2}$ 倍，而該實驗中乃假設其長度 l 事實上 保持不變。吾人所希望之作用並不出現者，蓋可逕以上述之事實說明之，即在運動時吾人所希望之作用適為一相反之效應所抵消，此效應者，謂儀器之臂應以 $\sqrt{1-v^2/c^2} : 1$ 之比而縮短是也。在運動系中長度之縮短稱為 Lorentz 氏收縮。

536. 速度相加定理。設有一物體沿 S' 系中之 x 方向以定速 $x'/t' = u'$ 而運動。若自 S 系觀察之，其速度 $x/t = u$ 當為若干乎？按(11 b)式，吾人可得下列之式：

$$u = \frac{x}{t} = \frac{x' + vt'}{t' + \frac{vx'}{c^2}}$$

此式右邊之分子與分母各以 t' 除之,且以 $x'/t' = u'$ 之關係代入,即得

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \quad \text{或} \quad u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}} \quad (14)$$

故根據相對論可知同向速度之簡單加法 $u = u' + v$ 為不合理。此不過為(14)式當 $v/c \ll 1$ 時之極限情形。祇須 u' 與 v 均較光速度 c 為小,吾人不難示明 u 亦必較 c 為小。但若 $u' = c$, 則 $u = (c+v)/(1+v/c) = c$ 。故光之速度在二系中均為相等,與相對論之基礎相符合。

光學中之測量法恆靈敏非常,而尤以用干涉儀者為更佳,故(14)式可藉此法以實驗證明之。前在 § 443 中,嘗述 Fresnel 氏流動液體中之光速測定法。命 c_0 為真空中之光速, $c = c_0/n$ 為液體靜止或觀察者隨之運動時其中之光速, n 為其折射率 (§ 409), c' 為液體以速度 v 順光之前進向或逆此而流動時其中之光速。Fresnel 氏由實驗得

$$c' = c \pm v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad (15)$$

(+ 或 -, 按液體流動之方向對於光線前進之方向或為順或為逆而定。)

若以(14)式應用於此例,吾人祇須將 $u = c'$ (自一靜止之

觀察者所見流動液體中之光速)與 $u'=c$ 二值代入,即得

$$c' = \frac{c \pm v}{1 \pm \frac{cv}{c_0^2}}$$

將此式展成級數,略去二次幕以上諸項,則

$$c' = (c \pm v) \left(1 \mp \frac{cv}{c_0^2} \right) = c \pm v \mp v \frac{c^2}{c_0^2} - \frac{cv^2}{c_0^2}$$

右邊之第四項為值極小,亦可略去,且以 $c/c_0=1/n$ 之關係代入,則即可得一與(15)式完全相同之式。故液體流動速度 v 中僅有 $v(1-1/n^2)$ 之一部份與光之速度 c 相加減。 $(1-1/n^2)$ 一值稱為 Fresnel 氏之隨進係數(Mitführungskoeffizient)。

最近尚有許多實驗,測量運動媒質中光線之速度,其結果亦皆與相對論相吻合。

537. 質量與速度。 由相對論所得其他數種重要之結論僅可以關於電動力學之方法以導出之。茲僅述其一種於下。

按理論上可推知物體之慣性質量非為常定,其值當隨速度而變。命 m_0 為一靜止物體之質量,即所謂原質量,則該物體以速度 v 而運動時,其質量 m 應為

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16)$$

此項關係可由運動極速之電子證明之。

關於(16)式之推論頗有足述者。例如 $v=c$ 時, $m=\infty$

換言之，物體之速度到達光速時，其慣性，即其對於加速度之抵抗，當為無限大。僅當所施之工作為無限大時，方能使一物質性物體之速度增加至光速相等，或竟過之。故真空內之光速為一切物質性物體通常可能到達之速度之最高極限。事實上吾人確未見有速度能超過此限者，而在另一方面，雖以放射質 β 射線速度之大，其去光速尚不及 1%。

$v=c/2$ 時，物體之質量已較 $v=0$ 時之原質量增加約 15%。速度愈增，則質量之增加更速。 $v=\frac{3}{4}c$ 時，質量之增加已達 50%。物體之速度逐漸趨近光速，其質量即趨近 ∞ 。

538. 能量之慣性與質量。前於 § 490 中，嘗述及能量為 $E=h\nu$ 之光子可視之為具有動量 $h\nu/c=E/c$ 及質量 $m=h\nu/c^2=E/c^2$ 。按相對論之說，此項關係

$$m = \frac{E}{c^2} \quad (17)$$

對於任何種類之能量 E 皆為合理，初不僅以輻射量為限；換言之，各種能量 E 皆可視為具有質量 E/c^2 。

例如一物體在高溫度時之質量應較在低溫度時其他性質完全相同者之質量為大。蓋第一方面各分子因熱運動速度愈大而其質量亦愈大，而第二方面欲使物體加熱，須有射線射入體中，而射線本身亦有質量也。故吾人須假設恆星因向外輻射而逐漸冷卻時，其質量亦必逐漸減小——所減小者非為恆星中所含之質量，而僅為其慣性，不可誤會。

恆星因輻射而減小之質量自地球上觀之其值固已驚人，而在吾人觀察所能及之時間以內，其值較之恆星質量之本身，則仍為非常渺小。但在宇宙之經歷過程中，此亦佔一重要之位置。

質量與其中所含之能量二者間之關係在原子之範圍中能為吾人所察見。前在§517中，嘗述一切原子之真原子量——對於氧=16或氦=4而言——幾皆為整數。數值上相差最大之例外為氫，其原子量為 1.0078 。按Prout氏之假說 (§518)，一切原子皆由氫與電子所構成——電子之質量極小，對於原子之質量影響絕微——；由此吾人即可推知氫原子核(質子)在其自由狀態時之質量較其在構合成一其他原子核時之質量為大。此可以質量與能量間之關係說明之。試就一氫原子核(原子量4，原子序數2)觀之，核為四個質子及二個電子構成。吾人頗有理由可假定氫原子核之構成係為一種極強烈之放熱作用 (§203)，換言之，其構合時必有極大之能量放出，此種能量皆必取給於此四個氫原子核，而在此作用中，氫原子核之位能將因之損失。氫原子核互相構合而成一切之原子核時，其質量之減小或當以其位能若此之損失為其根本之原因。吾人不難計算由單獨之質子與電子構成1 [克原子] 之氫原子核時，將有非常大之熱量 $6.4 \cdot 10^{11}$ [卡] 因之放出。此項「熱調」之數量級遠過尋常化學作用中所遇者。其他之原子量與整數之相差，即所

謂質量缺陷者，皆遠較氫之值爲小，其致此之由亦必以原子核中能量之關係無疑。故吾人可藉此以說明上述之情形。

一組物體於其構合時其各單體之位能因之劇烈減小者，其狀態爲穩定平衡。自然界中其他一切之狀態皆有變爲此種狀態之趨勢。故吾人可假設原子核中之質子在可能範圍以內咸儘量與電子構合而成氦原子。放射質崩潰時，僅有 α 射線，即 He 原子核射出，而並無氫原子核射出者，亦即以此。

539. 物質之化成輻射。任何能量 E 既皆具有質量 $m = E/c^2$ ，則反之，任何物質性之質量 m 亦可視之爲含有能量，其值爲

$$E = mc^2 \quad (18)$$

吾人至此必將猜想電子及質子之質量中所含之能量，亦猶其他之能量然，在適宜之環境下必能完全化爲他種形式，如輻射等之能量。吾人以爲在某種條件之下一個質子與一個電子可完全互相融合，而其物質之特性遂因此變爲光子之特性。此項猜想之動機，蓋原期有以解釋天文物理學中之一難題。吾人不難證明太陽與恆星輻射之能量，若須單獨取給於此種天體中其他已知之能源，則其因輻射而冷卻之速度應遠較事實上者爲速。太陽與恆星之中，自必另有頗爲顯著之能源存在。放射作用爲能源之說尙嫌不足。但因自質子與電子之質量可產生輻射能量，於是上項問題

遂得一解答。此實爲一十分富饒之能源。此種之作用在實驗室中固不可得而見，但吾人自不難想像在恆星之內部，其出現當屬可能。恆星中輒有電子與質子自行互相融合，而其質量遂因之逐漸化成輻射。此種輻射之大部份爲恆星內部所吸收，而變爲熱能，一小部份則自星體表面射出。此種射線之波長吾人亦不難計算之。按 Planck 氏定律

(§ 488), $E = mc^2 = h\nu$, 或因 $\nu = c/\lambda$, 而 $\lambda = \frac{h}{mc}$. 將 h, c 以及質

子之質量 m 諸值代入，則得波長爲 $\lambda = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}$. 與 § 473 相較，又若吾人亦認宇宙射線爲波動性，則此二類射線之波長數量級相仿。但宇宙射線現尙不能確定其究竟是否爲波動性，故今日雖已知有宇宙射線存在，而不能以此作爲物質化成射線之證明。此外如由較輕之元素構成較重之元素，尤如質子與電子之構成氦原子核，吾人亦可視之爲星體中豐富之能源，蓋按 § 538, 此種作用之熱調爲值頗大也。

第三十七章 廣義相對論

540. 等價原理。以上所述者，皆僅以慣性系，即直線定速運動之坐標系為限，其理論因稱為狹義相對論。Einstein氏(1917)繼復以一種新思想而推廣之於加速坐標系，因成廣義相對論。

吾人以前認為僅在力學性一切經過情形中為合理之某種規律，今將其推廣之於全部物理現象，遂成廣義相對論之基礎，與狹義相對論無異。吾人迄未知有任何力學現象可藉以將重性與慣性之作用加以根本上之區別者。蓋一切物體咸同速下落，由此已可知一切物體之慣性質量與重性質量恆彼此相等 (§ 54)。吾人尙可述一簡單之例以示明重性作用與慣性作用之相等性。在一昇降機中設有一彈簧秤，如尋常用以稱體重者。當昇降機靜止時，人立於機中秤之踏板上，則該秤即示準確之重量。昇降機以常定之速度上昇或下降時，秤之示度亦無變化。此自可簡單的由力學中之相對原理而知之。但當開始運動及將近停止，即有或正或負之加速度時則不然。昇降機原為靜止而開始由下向上運動時，站立於彈簧秤踏板上之人將因其有慣性而受加速度工作。彈簧秤中壓縮之彈簧原僅與人體之重力維持平衡者，此時尙須抵消慣性阻力，故壓縮更甚。由秤上

之示度觀之，似覺人體之重量增加。此項情形直至昇降機恢復常定速度後而止。於是秤上復示『準確』之示度。昇降機將至頂上時逐漸減速，然機中之人則因其慣性而有繼續向上運動之趨勢。此時慣性作用與重性作用方向相反，故其結果，在此減速時期以內，人體之重量似覺減輕。同理亦可示明昇降機下降時，在初動之一瞬間，重量亦似減輕，而在將停之一瞬間，似覺增重。此種作用，在昇降機中頗易觀察之。

若命昇降機向下之加速度為正，向上者為負，則昇降機將到頂上時之減速與由頂上初降時之加速皆為正，將到地面時之減速與由地面初昇時之加速皆為負。前者重量似覺減小，後者重量似覺增加。換言之，加速度之方向與重力方向相同者重量減小，與之相反者重量增加。故在加速運動中，慣性之作用完全與重力之作用同。向上加速時所見重量之增加亦可於昇降機靜止時突於其下方增加一相等之重性質量以產生之。吾人當尚能記憶在急速啓行或急速停止之火車中亦有慣性作用，此時人坐火車中，似突然受有一力，使其向座位之後方或前方突然傾側，實則此力即由於吾人本身之慣性阻力而來。

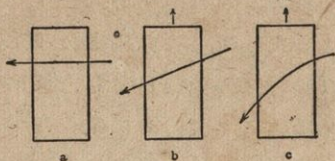
自力學之定律知根本上決無一種力學現象可從以區別某一作用究為坐標系中之重力作用抑或為坐標系之加速作用，該坐標系者，或所涉之現象在其中發生，或吾人由以

判斷該項現象。在大多數情形中，吾人自不難一望而即知其爲重性抑爲加速之作用，但決非根據力學之實驗。任何重力作用恆可以純粹之慣性作用呈獻之；反之亦然。就一切物理作用言之，慣性與重性二者之價值恆屬相等。

於是 Einstein 氏又卽以此爲根據而得一新思想，其經過之情形正復與狹義相對論相同。氏所提出之等價原理謂：任何物理現象發生時，究係在重力場內一靜止或直線定速運動之坐標系中進行，抑或在無重力作用之空間內一加速之坐標系中進行，吾人決不能由現象本身加以區別。慣性與重性對於一切物理現象之作用價值完全相等。

欲深入此項理論須具許多特殊之數學知識。故以下所述者，僅略及其重要之結果。

541. 光之偏轉。 按理論可導得一結果，卽光線在重力場中不應依直線前進，其方向當不免偏轉。此項事實於等價原理中可以基本之理由說明之。吾人試設想一升降機，其側壁上有一小孔，一光線由此垂直於壁面而射入機中。當升降機靜止時，該光線之方向爲水平（第502圖 a）。升降機若以常定速度向上運動，則該光線原係垂直射入者，今將對於升降機向下傾斜，升降機之速度愈大，則傾斜愈甚（第502圖 b），惟圖中爲易於明瞭計，特將其速度過量放大，幾與光之速度相埒。但若升降機向上加速，則當光線在機廂內前進時，機之速度已變，而光線對於機壁之傾斜度亦遂因之而



第 502 圖 說明光之偏轉。

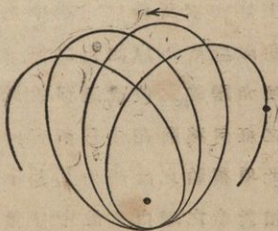
變(第 502 圖 c)。故光線在加速之昇降機中發生彎折。前已述過,向上之加速應與向下作用之重力效用相等。加速度使光線向下彎曲者,其效應必與在一靜止昇降機中向下作用之重力相同。因知光線在重力場中亦必彎曲。

地面上之重力太小,且地面上所能引用之光線路程亦屬太短,故光線彎曲之作用尚不能測出。但太陽表面附近之重力約 28 倍於地面上,而當吾人所見恆星之位置密接於太陽之時,自恆星射來之光線衝入太陽引力範圍以內,其光線之路程自遠較地面上所能引用者為長,此時光線彎曲之作用當不難察見。一恆星之光線傍近太陽表面而射過時,其方向當稍離其直線軌道而向太陽彎曲。其後該光線射至地球上一觀察者之眼中時,觀察者將見該恆星似已由其正常之位置背日面而移過少許。按理論計算直接沿日面上掠過之光線所引起之偏轉度,即恆星位置移過之角距離,當為 $1,75''$, 此值在天文學之測量上尚可測出之。惟此種之觀察僅當太陽全蝕時方為可能,蓋否則星光將全為日光

所奪。第一次觀察之結果，數量上與理論頗能相符，但由最近之測量，且將首次測量復加檢驗，俱已證明光線經過太陽邊緣之偏轉度最高可達 $2,2''$ 。故光線偏轉之事實雖已確立不移，但其值是否能與理論一致，則尚屬疑問。

慣性重性等價之原理，不僅對於物質性之物體為合理，且亦可應用之於能量。能量既有慣性，故亦應有重性，而上述光之偏轉亦可以能量之重性作用說明之。光子趨近太陽表面時，為太陽所吸引，其軌道因以彎曲，有如以光之速度拋射之物體然。光能量在重力場中亦作下落運動。

542. Einstein 氏之萬有引力定律。水星近日點之移動由廣義相對論可導得一關於二質量相引之作用力之定律，即萬有引力定律(§ 63)。但此僅為一按 $1/r$ (r = 兩體間之距離) 之冪次而迅速遞降之級數，不及 Newton 氏定律形式之簡單。此級數之第一項在一切情形中恆為數值最大之一項，與 Newton 氏定律完全相同，故 Newton 氏定律可視為其一種極限情形。僅當一行星所在之處受有頗大之重力，且其軌道之偏心率不為太小者，在最適宜之情形中該級數之第二項對於行星運動之影響方見顯著。太陽系一切行星中能合於此項條件者僅有



第 503 圖 近日點移動略圖。

距日最近之水星。級數第二項之作用在使有所謂近日點之移動者出現，即橢圓軌道遲緩之轉動(第503圖)。事實上水星確有此現象發生。由理論計算在一百年中，其總值應為 $43''$ 。此確與吾人之經驗相符合。但天文學家之爭辯尙未能因此而休也。(蓋行星之互擾亦足以引起近日點之移動，而此處所涉者僅為於計算時除去此項作用後所餘剩之近日點極小的移動而已。)

543. 光譜線之紅向移動。由廣義相對論所導得在吾人經驗中可以證明之第三種預言，在今日亦視為最後一種，即物質發光時所在之處重力作用愈強者，其光譜線當愈移向紅之一端。其實普遍言之，重力恆有使週期現象減緩之作用，此不過為其一特例，蓋物質發光之原因，係由於原子中電子之運動故也。地面上之重力十分微弱，故吾人在實驗室中測得光譜線之位置(壓力等之影響除外)可視為正常位置。日面上之重力遠較地面上為強，吾人自可希望由日面上之元素所發射光譜中之各譜線對於其正常位置移過之距離應有可以測出之值。惟太陽面上尙有其他影響足以使光譜線之位置遷移，故此項研究非常困難。太陽光譜線之紅向移動在往日確有一時已認為毫無疑惑，然今日關於此項實驗之證明力又覺不甚可靠。但此並不能作為反對相對論之理由。故今日光譜線之紅向移動尙須有待於實驗之證明。

今日關於廣義相對論之能證明者，已盡於此矣。

544. 相對論與幾何學。自廣義相對論可得一結論，即宇宙中因有物質存在，亦即因有引力場存在，而尋常之 Euklid 氏幾何學不能嚴格合理。宇宙中真正可靠之幾何學當爲非 Euklid 氏幾何學。

非 Euklid 氏幾何學中二度空間之例，如通常吾人所知者，爲球面上之幾何學。其中平行公理不復認爲合理，而三角形三角之和亦不等於 180° 。

最初有 Lobatschewski 氏(1829)，幾與同時者有 Bolyai 氏，其後復有 Helmholtz, Riemann, 以及其他諸氏，先後示明空間內嚴密合理之幾何學亦可以其他之公理爲基礎，不必與 Euklid 氏所用者同。蓋 Euklid 氏幾何學所根據之公理初非定律，無從加以證明，但似無背於吾人在地面上之經驗者。惟就整個宇宙中真正幾何學言之，此種公理是否仍屬合理，則未經證實。吾人直接感覺之幾何學的經驗所能達到之空間範圍蓋僅以地球之表面爲限。昔日人類之生活僅限於其居處四周極小之範圍以內，認地球爲一平面而不之或疑，是故咸視 Euklid 氏幾何學爲合理。其後人類逐漸征服地球之表面，而發見其爲球形，因生一種觀念，以爲平面之 Euklid 氏幾何學不能應用於地面之上。但吾人所討論之曲面面積若爲頗小者，其彎曲仍可略去不計。吾人作一花園之平面設計時，自可不必顧及地面之彎曲。

以上所述對於二度幾何學爲合理者，推之至於空間幾何學亦莫不然。空間之幾何學確亦可爲非 Euklid 氏的，在吾人直接經驗之極小範圍以內，特不自覺耳。蓋在此極小範圍以內，其與 Euklid 氏幾何學相差者絕微，儘可略去不計。欲證明三角形三角之和不等於 180° ，其所用之面積須遠較平常吾人所能遇及者爲大。蓋三角形之面積愈小者——在球面上時亦然——，其三角之和愈近此值。

一空間內以非 Euklid 氏幾何學爲合理者，仿曲面之例，稱爲曲空間。但吾人對於此種空間之觀念已不能想像。吾人對於曲面之觀念祇可在三度之 Euklid 氏空間以內想像之；同理，彎曲之三度空間僅可在四度之 Euklid 氏空間以內想像之。

曲面之閉合者，例如球面，有一定之大小，而無邊際。自相對論知非 Euklid 氏之宇宙亦然。宇宙到處不着邊際，但其體積則爲有限，若已知其中所包涵物質質量之總值，則吾人可精確計算此積之值；質量總值者，亦爲某一有限之定值。

光線在宇宙中前進之軌道恆爲『最直軌道』。對於空間而言，此軌道相當於球面上之大圓。根據此事，吾人可斷言自任一恆星發射之光經過一非常長久之一定時間以後，終將仍行返至其出發點。蓋環航地球者，若恆以『最直之軌道』前進，即沿地球之一大圓而前進，則終必重返其所自出發之海口。

附 錄 一

微積分大要

設有一 x 之函數

$$y=f(x). \quad (1)$$

當 x 爲一任意值 x_0 時,其相應函數之值爲 y_0 ,即

$$y_0=f(x_0). \quad (2)$$

命 x 增加(或減小)一極微之值 Δx ;換言之,即命 x 變爲一新值 x' ,其變遷值 $x'-x_0$ 等於 Δx :

$$x'-x_0=\Delta x, \quad \text{或} \quad x'=x_0+\Delta x.$$

此時 y 之值必隨之變爲

$$y'=f(x'), \quad (3)$$

即 y 亦已增加(或減小)一極微之值 Δy ,

$$y'-y_0=\Delta y, \quad \text{或} \quad y'=y_0+\Delta y.$$

於是(3)式亦可書作

$$y_0+\Delta y=f(x_0+\Delta x). \quad (4)$$

自(4)式減去(2)式,得

$$\Delta y=f(x_0+\Delta x)-f(x_0),$$

而

$$\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0)}{\Delta x}. \quad (5)$$

當 Δx 趨近於零時(5)式中之比 $\Delta y/\Delta x$ 之極限值

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{或} \quad \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

稱為 y 對於 x 之微分商, 而以

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}.$$

表之。所謂將一函數微分者, 係指求出微分商而言。

例: 試求 $y=x^3$ 之微分商 dy/dx 。

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x_0 + \Delta x)^3 - x_0^3}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{3x_0^2 \Delta x + 3x_0(\Delta x)^2 + (\Delta x)^3}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [3x_0^2 + 3x_0 \Delta x + (\Delta x)^2] = 3x_0^2 \end{aligned}$$

因 x_0 為 x 之一任意值, 在運算時僅用以示明其不隨 Δx 而變, 故至此仍可書作 x , 於是

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} (x^3) = 3x^2.$$

dy/dx 通常仍為一 x 之函數, 可將其更行微分之, 其意義與上相同。命

$$\frac{dy}{dx} = y' = f'(x),$$

第二次微分時, 其微分商 dy'/dx 以

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = y'' = f''(x)$$

表之。

例: 試求 $y=x^3$ 之第二次微分商 d^2y/dx^2 。

$$\begin{aligned} \text{已知 } y' = 3x^2, \text{ 故 } \frac{d^2y}{dx^2} &= \frac{dy'}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{3(x_0 + \Delta x)^2 - 3x_0^2}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{6x_0 \Delta x + 3(\Delta x)^2}{\Delta x} = 6x_0 = 6x. \end{aligned}$$

以此類推,更可求出第三,四等等高次之微分商。

下列之公式皆可用上述之法導得之(c 表常數, u, v 與 w 表 x 之任意三函數):

$$\frac{dc}{dx} = 0.$$

$$\frac{dx}{dx} = 1.$$

$$\frac{d}{dx}(u+v-w) = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx} - \frac{dw}{dx}. \quad \frac{d}{dx}(cv) = c \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(v^n) = nv^{n-1} \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1}.$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx}}{v^2}.$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{u}{c}\right) = \frac{1}{c} \cdot \frac{du}{dx}.$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{du}{dv} \cdot \frac{dv}{dx} \quad (u \text{ 爲 } v \text{ 之函數}).$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{\frac{dx}{du}}.$$

$$\frac{d}{dx}(\log v) = \frac{1}{v} \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(c^v) = c^v \log c \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(e^v) = e^v \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\sin v) = \cos v \cdot \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\cos v) = -\sin v \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} v) = \sec^2 v \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{cotg} v) = -\operatorname{csc} v \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\sec v) = \sec v \operatorname{tg} v \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{csc} v) = -\operatorname{csc} v \operatorname{cotg} v \frac{dv}{dx}.$$

$$\frac{d}{dx}(\sin^{-1}v) = \frac{\frac{dv}{dx}}{\sqrt{1-v^2}}.$$

$$\frac{d}{dx}(\cos^{-1}v) = -\frac{\frac{dv}{dx}}{\sqrt{1-v^2}}.$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg}^{-1}v) = \frac{\frac{dv}{dx}}{1+v^2}.$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{cotg}^{-1}v) = -\frac{\frac{dv}{dx}}{1+v^2}.$$

$$\frac{d}{dx}(\sec^{-1}v) = \frac{\frac{dv}{dx}}{v\sqrt{v^2-1}}.$$

$$\frac{d}{dx}(\csc^{-1}v) = -\frac{\frac{dv}{dx}}{v\sqrt{v^2-1}}.$$

設已知某函數之微分，吾人即可由此以反求某函數之本身。此種運算方法稱曰積分。例如某函數之微分為 $3x^2$ 者，某函數必為 x^3 但此不過其一種解答。蓋若於 x^3 上加一任意常數 C 而微分之，仍可得 $3x^2$ 。故 x^3+C 為一普遍之解答。

命 $\frac{dV}{dx} = v$ ，或 $dV = vdx$ 。

設 v 為已知，今欲由此求出 V ，即欲將 v 積分，常用 \int 之符號表之，即

$$V = \int vdx$$

函數 V 稱為 v 對於 x 之積分。

例：試求 $v=x^5$ 之積分。

$$\int x^5 dx = \frac{x^6}{6} + C.$$

蓋若命 $V = \frac{x^6}{6} + C$ ，而將其對於 x 微分之，則得 $dV/dx = v = x^5$ ，與題相合。

微分與積分適為二種相反之手續。在代數與三角術中亦不乏其例，如

$$\sqrt[n]{x^n} = x, \text{ 或 } \log e^x = x, \text{ 或 } \sin(\sin^{-1}x) = x,$$

故

$$\frac{d}{dx} \left(\int v dx \right) = x.$$

下列者爲最簡單之積分公式：

$$\int odv = C, \quad \int dv = v + C.$$

$$\int (du + dv - dw) = \int du + \int dv - \int dw.$$

$$\int adv = a \int dv, \quad \int v^n dv = \frac{v^{n+1}}{n+1} + C. (n \neq -1)$$

$$\int \frac{dv}{v} = \log v + C, \quad \int a^v dv = \frac{a^v}{\log a} + C.$$

$$\int e^v dv = e^v + C, \quad \int \sin v dv = -\cos v + C.$$

$$\int \cos v dv = \sin v + C, \quad \int \sec^2 v dv = \operatorname{tg} v + C.$$

$$\int \csc^2 v dv = -\operatorname{cotg} v + C, \quad \int \sec v \operatorname{tg} v dv = \sec v + C.$$

$$\int \csc v \operatorname{cotg} v dv = -\csc v + C, \quad \int \operatorname{tg} v dv = \log \sec v + C.$$

$$\int \operatorname{cotg} v dv = \log \sin v + C, \quad \int \sec v dv = \log(\sec v + \operatorname{tg} v) + C.$$

$$\int \csc v dv = \log(\csc v - \operatorname{cotg} v) + C.$$

$$\int \frac{dv}{v^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{tg}^{-1} \frac{v}{a} + C, \quad \int \frac{dv}{v^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \log \frac{v-a}{v+a} + C.$$

$$\int \frac{dv}{\sqrt{v^2 \pm a^2}} = \log(v + \sqrt{v^2 \pm a^2}) + C.$$

$$\int \frac{dv}{\sqrt{a^2 - v^2}} = \sin^{-1} \frac{v}{a} + C.$$

$$\int \sqrt{a^2 - v^2} dv = \frac{v}{2} \sqrt{a^2 - v^2} + \frac{a^2}{2} \sin^{-1} \frac{v}{a} + C.$$

$$\int \sqrt{v^2 \pm a^2} dv = \frac{v}{2} \sqrt{v^2 \pm a^2} \pm \frac{a^2}{2} \log(v + \sqrt{v^2 \pm a^2}) + C.$$



附 錄 二

本書中所見微分方程式之解法

$$\S 47. (34) \text{式. } J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -D\varphi.$$

命 $\varphi = Ae^{mt}$, A 與 m 爲任意二常數, 則 $d\varphi/dt = Ame^{mt}$, $d^2\varphi/dt^2 = Am^2e^{mt}$. 以此代入(34)式, 得

$$JAm^2e^{mt} = -DAe^{mt},$$

或

$$Jm^2 = -D.$$

解之, 得 $m = \pm\sqrt{-D/J} = \pm i\sqrt{D/J}$. 故(34)式之解答爲

$$\varphi = A_1e^{+i\sqrt{D/J}t}, \quad \text{或 } \varphi = A_2e^{-i\sqrt{D/J}t},$$

$$\text{或 } \varphi = A_1e^{+i\sqrt{D/J}t} + A_2e^{-i\sqrt{D/J}t},$$

其 A_1 與 A_2 皆爲任意常數, 視運動開始時之已知條件而定.

此第三式中包含二個任意常數, 而(34)式中最高之微分級數亦爲二(即 $d^2\varphi/dt^2$), 故該式爲一普遍之解答.

$$\text{命 } A_1 = \frac{1}{2}(B - iC), \quad A_2 = \frac{1}{2}(B + iC), \quad \sqrt{D/J} = \omega, \text{ 其 } B \text{ 與 } C$$

仍爲二任意常數, 則

$$\varphi = B \frac{e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}}{2} - iC \frac{e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}}{2}$$

$$= B \cos \omega t + c \sin \omega t = E \sin(\omega t + \delta),$$

式中 $E \sin \delta = B$, $E \cos \delta = C$. 設 $t=0$ 時 $\varphi=0$, 則 $0 = E \sin \delta$, 而 $\delta=0$.

又設 $t = \pi/2 \omega$ 時 $\varphi = \varphi_0$, 則 $\varphi_0 = E \sin \pi/2$, 而 $E = \varphi_0$. 於是得

$$\varphi = \varphi_0 \sin \omega t = \varphi_0 \sin \sqrt{\frac{D}{J}} t.$$

因 $\sin \sqrt{D/J} \cdot t = \sin \sqrt{D/J} (t + 2\pi \sqrt{J/D})$, 即歷 $2\pi \sqrt{J/D}$ 時間後, φ 復回至其原值, 故 $\tau = 2\pi \sqrt{J/D}$ 爲其週期.

§ 102. $dp = -\rho_0 g p / p_0 \cdot dx.$

此式中 ρ_0, g , 與 p_0 均爲常數. 將 p 與 x 二變數分開, 則

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0 g}{p_0} \cdot dx.$$

積分之得

$$\log p = -\frac{\rho_0 g}{p_0} \cdot x + C.$$

命 $C = -\log c$, 則 $\log(p/c) = -(\rho_0 g / p_0) \cdot x$, 或

$$\frac{p}{c} = e^{-\frac{\rho_0 g}{p_0} \cdot x}.$$

因已知在 $x=0$ 處, $p=p_0$, 故 $c=p_0$, 而

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g}{p_0} x}.$$

§ 118. (5b) 式 $m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = -a \xi - \rho \frac{d \xi}{dt}.$

此式之解法與 § 47, (34) 式相同. 命 $\xi = A e^{m't}$, 則 $d \xi / dt = A m' e^{m't}$, $d^2 \xi / dt^2 = A m'^2 e^{m't}$. 以此二值代入 (5b) 式得

$$m A m'^2 e^{m't} = -a A e^{m't} - \rho A m' e^{m't},$$

或

$$m m'^2 = -a - \rho m'.$$

解之，得 $m' = \frac{1}{2m}(-\rho \pm \sqrt{\rho^2 - 4ma}) = -\frac{\rho}{2m} \pm \sqrt{-\frac{a}{m} + \left(\frac{\rho}{2m}\right)^2}$
 $= -\beta \pm i\omega$ ，其中 $\beta = \rho/2m$ ， $\omega = \sqrt{a/m - (\rho/2m)^2}$ 。因 (5b) 式亦
 爲二級，故其解答爲

$$\xi = A_1 e^{(-\beta+i\omega)t} + A_2 e^{(-\beta-i\omega)t} = e^{-\beta t} (A_1 e^{+i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t}).$$

若 ω 爲虛數，則 $i\omega$ 爲實數，上式不能再行化簡。若 ω 爲實數，
 則可用 § 47, (34) 式之法，命 $A_1 = \frac{1}{2}(B - iC)$ ， $A_2 = \frac{1}{2}(B + iC)$ ，而化
 成

$$\xi = e^{-\beta t} (B \cos \omega t + C \sin \omega t).$$

欲定出 B 與 C 二常數之值，須知運動開始時之情形。設 $t=0$
 時， $\xi = \xi_0$ ，則 $\xi_0 = B$ 。又知此時運動之速度 $d\xi/dt$ 亦必爲零。
 將上式微分得

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= -\beta e^{-\beta t} (B \cos \omega t + C \sin \omega t) + e^{-\beta t} (-B\omega \sin \omega t + C\omega \cos \omega t) \\ &= e^{-\beta t} [(C\omega - B\beta) \cos \omega t - (B\omega + C\beta) \sin \omega t]. \end{aligned}$$

因 $t=0$ 時， $d\xi/dt=0$ ，故 $0 = C\omega - B\beta$ ，或 $C = B \cdot \beta / \omega$ 。於是 (5b) 式
 之解答爲

$$\xi = \xi_0 e^{-\beta t} \left(\cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right).$$

§ 333. (37) 式. $E - L \frac{di}{dt} = iR.$

此式中 E, L 與 R 均爲常數。由此可見 $i = E/R$ 必爲此
 式之一解，蓋以 E/R 爲常數，而 di/dt 爲零也。但此項解答中

不含任意常數，稱爲特殊積分。命 $i = E/R + v$ ，則 $di/dt = dv/dt$ ，而(37)式變爲

$$E - L \frac{dv}{dt} = \left(\frac{E}{R} + v \right) R, \quad \text{或} \quad L \frac{dv}{dt} + Rv = 0.$$

將此式中 v 與 t 二變數分開，則

$$L \frac{dv}{v} + Rdt = 0.$$

積分之，得

$$L \log v + Rt + C = 0,$$

C 爲任意常數，今爲求解式簡單計，可任意命之等於 $-L \log e$ 。於是

$$v = -ce^{-\frac{R}{L}t}.$$

此項中含有任意常數 c ，稱爲補函數。(37)式之解爲二項之和，即

$$i = \frac{E}{R} - ce^{-\frac{R}{L}t}.$$

設 $t=0$ 時， $i=0$ ，則 $0 = E/R - c$ ，或 $c = E/R$ ，而

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

§ 383. (32)式 $\frac{d^2i}{dt^2} + 2\beta \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0.$

此式中 β 與 ω_0 皆爲常數,其解法與§118,(5b)式同。



附錄三

§ 20. 簡諧運動之定義.

凡任何運動之合於 § 20, (25) 式, 即

$$x = r \cos \omega t, \quad y = r \sin \omega t$$

者, 皆稱為簡諧運動. 此二式中之 ω 為圓周運動之角速度; 但僅就 x 軸或 y 軸上之直線運動而言, ω 之意義殊不明顯. 其實此項圓周運動可視為一種理想的運動, 用以作為說明簡諧運動時之輔助者. $\tau = 2\pi/\omega$ 為圓周運動之週期, 亦即為其相關之簡諧運動之週期, 二者自應相等. 以 $\omega = 2\pi/\tau$ 之關係代入 (27) 式, 得

$$\gamma_x = -(2\pi/\tau)^2 x, \quad \gamma_y = -(2\pi/\tau)^2 y, \quad (27 a)$$

或
$$\gamma_x = -(\text{常數})x, \quad \gamma_y = -(\text{常數})y, \quad (29)$$

而
$$\tau = 2\pi\sqrt{-x/\gamma_x}, \quad \tau = 2\pi\sqrt{-y/\gamma_y}. \quad (30)$$

(29) 式可視為簡諧運動之定義, (30) 式為其週期. 因 γ_x 與 x 恆係相反, 故 $-x/\gamma_x$ 恆為正值; $-y/\gamma_y$ 亦然. 茲更以文字述之如下: 凡物體作直線運動時, 其加速度之絕對值始終正比於一坐標之絕對值, 且二者之方向恆係相反者, 皆為簡諧運動. 以任何一瞬間物體之坐標與其同時間之加速度二者絕對值之商開方而乘以 2π , 即得簡諧運動之週期

附 錄 四

§ 82. (2), (3) 二式之證明.

圖甲中 $AA'BB'$ 爲一矩形截面之棒, AA' 一端固定, BB' 一端受 k 力作用, 而棒即因之彎曲, 如圖所示. OO' 爲中立層, 其上諸層均因彎曲而伸長, 以最上一層 AB 爲最, 其下諸層均因彎曲而縮短, 以最下一層 $A'B'$ 爲最. 各層皆因有彈性而仍欲恢復原狀, 故中立層以上諸層皆有自行縮短之傾向, 而中立層以下諸層則欲自行伸長.

試於棒上任取一橫截面 QQ' , 其與自由端間之距離設爲 x . QQ' 左右兩方之物質各以等值反向之力互相作用; 此種之

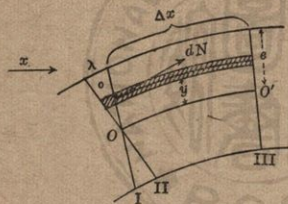


圖甲. 彎曲之棒, 示其中立層.
(縱截面)

力即爲 QQ' 截面上出現之彈性應力. 今試觀察 QQ' 左方之物質所受之力. 在此截面之上半部份, 應力皆爲張力, 命之爲 F ; 作用於 QQ' 左方之物質者, 其方向係指棒之固定端. 在此截面之下半部份, 應力皆爲壓力, 命之爲 F' ; 作用於同方之物質者, 其方向係指棒之自由端. F 與 F' 之值各隨其與中

立層間之距離而遞增。此種作用於 QQ' 截面上全組之力 F 與 F' 成一組力偶；當棒身平衡時，其力矩之總和必與棒之自由端上擔負之 k 力對於 QQ' 截面上一點之力矩等值而反向。

欲計算 QQ' 截面上此種作用於其左方物質之力（應力）時，吾人須注意此種之力皆來自密接 QQ' 右方一部份之物質。故祇須於 QQ' 之右截取極小一段已足，而計算作用於其上之力。



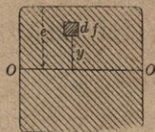
圖乙。彎曲棒之縱截面。

圖乙所示者，即為若此之一小段，命其長為 Δx 。I 為未彎曲以前此段一端截面之位置，II 為既彎曲以後之位置，皆相對於其相鄰之他一端截面 III 而言。未彎曲以前，I 與 III 平行，既彎曲以後，I 即繞一通過中立層 OO' 之軸而轉至 II；此時 Δx 一段中在 OO' 以上者皆伸長，在 OO' 以下者皆縮短。命最外一層，即棒之表面，伸長或縮短之值為 λ 。於棒內任取一層，與中立層相距 y ，命其伸長或縮短之值為 σ 。圖中所示者，此所取之任意層在中立層之上，故 σ 為該層伸長之值。設棒之表面與中立層相距 e 。按幾何學得

曲以後，I 即繞一通過中立層 OO' 之軸而轉至 II；此時 Δx 一段中在 OO' 以上者皆伸長，在 OO' 以下者皆縮短。命最外一層，即棒之表面，伸長或縮短之值為 λ 。於棒內任取一層，與中立層相距 y ，命其伸長或縮短之值為 σ 。圖中所示者，此所取之任意層在中立層之上，故 σ 為該層伸長之值。設棒之表面與中立層相距 e 。按幾何學得

$$\sigma : \lambda = y : e.$$

今再於該任意層中取出絕狹之一條，其橫截面為 df (圖丙，示棒之全部橫截面)。此條之原長為 Δx ，今因棒之彎曲而伸長 σ 。命 dN 為此項伸長所需之力，亦即因伸長而在棒內產生之應力。按 Hooke 氏定律，應力 dN ，截面 df ，棒長 Δx ，長變 σ ，以及長變係數 E 諸值間應有下列之關係：



圖丙。棒之橫截面。

$$dN = \frac{E \sigma df}{\Delta x}$$

將前列比例式中 σ 之值代入此式，則

$$dN = \frac{E \lambda y df}{e \Delta x} = \frac{E \lambda}{e \Delta x} y df$$

長變係數為使一 1 [毫米]² 截面之細條伸長至其原長之二倍所需之力。以 $\lambda/\Delta x$ 乘之，即得使一單位截面原長 Δx 之細條伸長 λ 所需之力。 λ 即為與中立層相距 e 之一層伸長之值。故 $E \lambda/\Delta x$ 為該層中之應力，今以 κ 表之。於是

$$\kappa = \frac{E \lambda}{\Delta x}$$

而上式遂變為

$$dN = \frac{\kappa}{e} y df$$

欲得作用於此面上全部之力，須將此式積分，遍及截面之全部。故

$$N = \int \frac{\kappa}{e} y df.$$

κ/e 爲常定值,可移置積分符號之外,

$$N = \frac{\kappa}{e} \int y df.$$

若作用於棒上之力僅使棒彎曲,其中立層之長度不變,則此種使各層伸縮之力之總和必等於零,即

$$\int y df = 0.$$

此式與 § 34, (14 b) 式 $\int y dm = 0$ 形式相同,故知圖乙中之 0 點爲棒之橫截面之面積中心;棒質均勻者,面積中心即爲重心。彎曲棒之中立層通過棒中各橫截面之重心。

欲計算使截面自位置 I (圖乙) 轉至 II 之力,須先求各力 dN 之力矩,然後將其相加而得 單獨一力之力矩爲

$$dM = y dN = \frac{\kappa}{e} y^2 df.$$

故在各截面內由於彈性力所引起之力矩爲

$$M = \frac{\kappa}{e} \int y^2 df.$$

此項積分 $\int y^2 df$ 形式上與 § 36 關於轉動慣量定義之式相同,惟此處所遇者非爲物體而爲面積。今亦以 J 表之。於是在任一截面內由於彈性力而產生之力矩爲

$$M = \frac{\kappa}{e} J.$$

此項應力之力矩爲棒內在所涉之截面上彈性抗力之力矩,

應與該截面上之彎曲力矩相平衡；彎曲力矩者，係指棒上截面一方擔負力之力矩而言。

由此可知棒中之細條與中立層相距 e 者，其長變之應力為

$$\kappa = \frac{Me}{J}.$$

若棒之彎曲係由於其自由端上之擔負 k ，如圖甲所示者，則在一與此自由端相距 x 之截面上之彎曲力矩為 kx ，故得

$$M = kx.$$

M 若用此值，則

$$\kappa = \frac{kxe}{J}.$$

命 I 與 II 二截面位置之交角為 $d\varphi$ (圖丁)，則 $d\varphi = \lambda/e$ 。於棒上此二位置處作二切線，延長之，使各達棒之自由端，即使各等於 x 。此二切線之交角亦必為 $d\varphi$ 。棒身彎曲後，其自由端必因之下降；此二切線末端間之距離 ds 即為棒之自由端下降總值中由於所涉截面處彎曲而來之一部份。自圖中可見

$$ds = x d\varphi = x \lambda / e.$$

λ 之值可由 $\kappa = E\lambda/\Delta x$ 一式中求得，即

$$\lambda = \kappa \Delta x / E.$$

以之代入上式，則

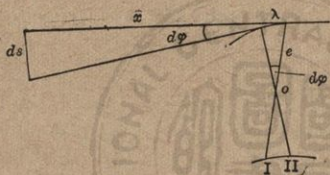
$$ds = x \cdot \kappa dx / (Ee).$$

將此式積分之,即得棒之自由端下降之總值

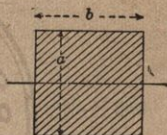
$$s = \frac{1}{E} \int \frac{\kappa}{e} x dx.$$

又因 $\kappa/e = M/J$, 故

$$S = \frac{1}{E} \int \frac{M}{J} x dx.$$



圖丁. 棒之彎曲.



圖戊. 棒之截面.

設棒之全長為 l , 橫截面為矩形, 高為 a , 闊為 b , 其自由端之擔負為 k . 此處之彎曲力矩為 $M = kx$. 矩形面積對於一通過其重心之水平軸(圖戊)之轉動慣量為 $J = a^3 b / 12$; 故

$$S = \frac{1}{E} \int_0^l \frac{kx^2 dx}{\frac{1}{12} a^3 b} = \frac{12k}{E a^3 b} \int_0^l x^2 dx = 4 \cdot \frac{l^3}{a^3 b} \cdot \frac{k}{E}.$$

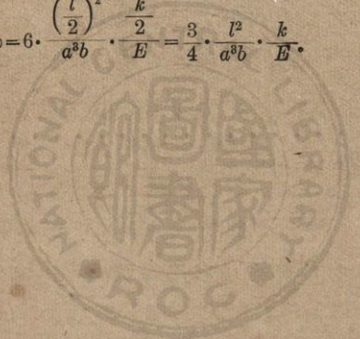
此為棒之自由端因有擔負而下降之值. 從此可計算此時自由端之橫截面轉過之角度 φ ; 因 $\text{tg}(d\varphi) = ds/x = kx dx / (EJ)$, 故得

$$\text{tg } \varphi = \frac{12k}{E a^3 b} \int_0^l x dx = 6 \cdot \frac{l^2}{a^3 b} \cdot \frac{k}{E}.$$

若支持棒之二端,而加擔負 k 於棒之中央,則其作用等於二條自由端受力之棒,其長各爲 $l/2$, 擔負力各爲 $k/2$. 此時

$$s = 4 \cdot \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^3}{a^3 b} \cdot \frac{k}{E} = \frac{1}{4} \cdot \frac{l^3}{a^3 b} \cdot \frac{k}{E},$$

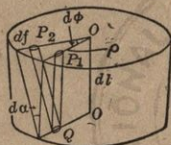
而

$$\operatorname{tg} \varphi = 6 \cdot \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^2}{a^3 b} \cdot \frac{k}{E} = \frac{3}{4} \cdot \frac{l^2}{a^3 b} \cdot \frac{k}{E}.$$


附錄五

§ 83. (5)式之證明.

設圓柱體之長為 l , 半徑為 r , 扭轉係數為 G . 今試取其極短之一段觀之, 長為 dl , 其二界面垂直於柱軸. 柱體扭轉時, 此小段之頂面對於其底面轉過 $d\phi$ 之角度.



圖柱體之一段

因柱體為對稱體, 故以柱軸為轉動軸. 今於該段柱體中任意取出絕細之一條 P_1Q , 其橫截面積為 df ; 未扭轉以前, P_1Q 原與柱軸平行, 既扭轉以後, 即轉至 P_2Q 之位置. 此細條與柱軸間之距離設為 ρ , 則此時頂面上之 df 自原位移過之路程為 $\rho d\phi$. 未扭轉前 P_1Q 之原長為 dl , 故該細條轉過之角度 $d\alpha$ 等於 $\rho d\phi/dl$.

命 dk 為作用於 df 上之力, 其方向垂直於自 df 至柱軸之連線. 此即等於因扭轉而生之應力. 於是按 § 83, (4) 式, $da = dk/(G \cdot df)$, 或

$$dk = G \cdot \rho \frac{d\phi}{dl} \cdot df,$$

而此力對於柱軸之力矩為

$$dN = \rho dk = G \rho^2 \frac{d\phi}{dl} \cdot df.$$

將此式積分之, 即得該截面上一切應力力矩之和, 其值必與

作用於此小段頂面上外力之矩，惟二者方向則相反故

$$N = G \int \frac{d\varphi}{dl} \rho^2 df.$$

但 $d\varphi/dl$ 對於此小段頂面上之一切面積元 df 爲一定值，故

$$N = G \frac{d\varphi}{dl} \int \rho^2 df.$$

$\int \rho^2 df$ 爲頂面積對於柱軸之轉動慣量，其值爲 $\pi r^4/2$ 。於是

$$N = \frac{1}{2} \pi r^4 G \cdot \frac{d\varphi}{dl}.$$

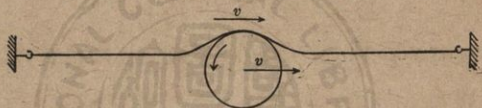
若全柱體係均勻，則 $d\varphi/dl = \varphi/l$ ，其 φ 爲全柱體頂面轉過之角度。因得

$$\varphi = \frac{2l}{\pi r^4 G} N.$$

附錄六

§ 119. (8)式之證明.

弦線上橫振動之傳播可視為由『峯』與『谷』二部份在弦上向一方移動而生。今設有一峯向右移動，如圖甲所示。另設想有一圓環，時時與弦線彎曲之部份相切，環之半徑恰

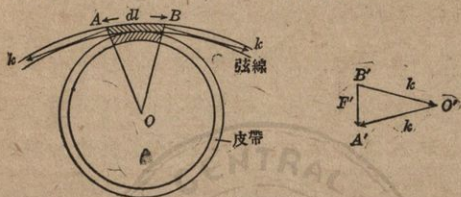


圖甲. 理想圓環與峯頂相切，而同以等速向右移動。

與峯頂之曲率半徑相等。振動向右以速度 v 前進時，此理想圓環亦隨之向右以同速度移動。同時弦線必沿環周而以同速度向左移動。吾人若視圓環為靜止，而弦線被拉向左，則弦與環二者間之相對關係仍復不變。

若弦線無振動，則圓環將受壓力。但在上述之理想情形中，弦線始終僅與圓環相切，毫無任何之力存乎二者之間。此與將皮帶繞於輪之周緣，輪轉極速，恰使皮帶無一處與輪緣相觸時之情形完全相同。皮帶中之張力原可產生一向輪心之力，使皮帶各部緊壓輪緣，但輪轉極速，故此種之向心力已作為使皮帶各部隨輪轉動之用；當轉動達某一適宜之速度時，皮帶可僅與輪緣相切，既無壓迫輪緣之力，亦無背輪

緣而欲自行向外脫離之力。若 dl 爲皮帶一小段之長， m 爲其每[厘米]長之質量， v 爲其切線速度， r 爲輪之半徑，則此向心力之值爲 $F = v^2 m dl / r$ 。圖乙中 k, k 爲弦線 dl 一段兩端之



圖乙. 弦線中之張力.

張力。由此可算出此小段皮帶作用於輪緣上之壓力 F' ，其值當與向心力 F 相等。自圖中可見 $dl/r = F'/k$ ，或 $F' = kdl/r$ 。因得

$$\frac{v^2 m dl}{r} = \frac{k dl}{r}, \quad \text{或} \quad v = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

此爲輪緣上一點之速度，亦即橫振動在弦線上傳播之速度。

凡相鄰二振節間距離之二倍稱爲波長 (§ 127)，振動傳播速度 v 與波長 λ 二者之比則爲振動之頻率 (§ 124)，即每秒鐘內振動之次數。弦線基振(不作倍振)時， $\lambda = 2l$ ，其 l 爲弦線振動部份之長。於是

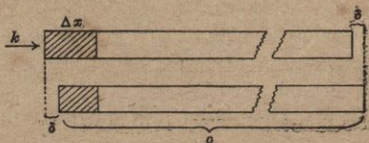
$$\begin{aligned} v &= \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\sqrt{m}} \cdot \frac{\sqrt{k}}{l} \\ &= (\text{常數}) \cdot \frac{\sqrt{k}}{l}. \end{aligned}$$

附錄七

§ 125. (17), (18) 二式之證明.

設有一極長之棒，吾人急擊其一端，則即有衝力發生，茲命其時間的平均值為 k ；一秒鐘後，此 k 力之作用恰傳至棒之他端。故若該衝力在棒中傳播之速度為 c ，則棒之長度亦為 c 。命棒之橫截面積為 q ，密度為 ρ ，因得棒之總質量為 $m = cq\rho$ 。設 k 力作用之時間 Δt 極短，此時棒中某一小段 Δx 即因之縮短 δ 。作用力停止時， Δx 之長已縮成如圖中下部所示。

此小段之彈性形變復原時，即施一壓力於其相鄰之小段，該段即因之縮短；此段復原時，又傳至相鄰之他段。若此展轉傳遞，於 1 秒鐘後，（因棒長恰等於 c ）達於棒之他端。故



衝力之傳播。

在 1 秒鐘內，棒之全部向右移過 δ 之距離。換言之，因在 Δt 時間內有 k 力作用於棒之一端，而全棒遂於 1 秒鐘內向前移過 δ 之距離；故棒之移動速度為 δ 。按 Newton 氏第二公理，

$$k \Delta t = m \delta,$$

k 力既使棒之 Δx 一小段縮短 δ , 則按 § 82, (1) 式,

$$\frac{\delta}{\Delta x} = \frac{k}{qE}, \quad \text{或} \quad k = \frac{qE\delta}{\Delta x},$$

式中 E 爲棒之長變係數. 今已知 $k \Delta t = m \delta$, 而 $m = cq\rho$, 故

$$\frac{qE\delta\Delta t}{\Delta x} = cq\rho\delta, \quad \text{或} \quad \frac{E}{\rho} = c \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

因衝力之作用在 Δt 時間內遍歷 Δx 之一小段, 故 $\Delta x/\Delta t$ 爲衝力在該小段內傳播之速度. 此項速度必與衝力在全棒中傳播之速度 c 相等. 即 $\Delta x/\Delta t = c$. 於是

$$\frac{E}{\rho} = c^2, \quad \text{或} \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

固體中縱波之傳播卽爲衝力之傳播, 故其速度如上式. 若在液體中, 則 E 應易以壓縮係數 X , 證法相同.

理想氣體遇等溫變遷時, 其容積之壓縮係數與其壓力 p 數值相等 (§ 100). 是則縱波在理想氣體中傳播之速度似亦應爲 $c = \sqrt{p/\rho}$. 但理想氣體中有縱波發生時, 其容積之變遷非爲等溫而爲絕熱 (§ 172), Boyle-Mariotte 二氏定律已不能應用, 當易以 $pV^\kappa = (\text{常數})$ 之式 (§ 172), 其 κ 爲氣體定壓比熱與定容比熱二值之比 (§ 171). 將此式微分之, 得

$$V^\kappa dp + \kappa p V^{\kappa-1} dV = 0, \quad \text{或} \quad -\frac{dV}{V} = \frac{dp}{(\kappa p)} = \frac{dk}{q(\kappa p)}.$$

與 § 100, (13) 式相較, 知絕熱變遷時理想氣體之壓縮係數非

爲 p 而爲 κp . 故

$$c = \sqrt{\frac{p \cdot \kappa}{\rho}}.$$

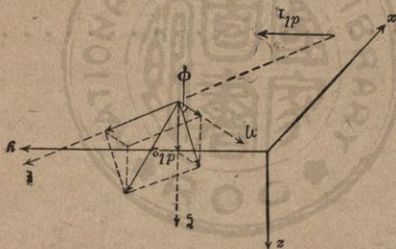
此式稱爲 Laplace 氏式.



附 錄 八

§ 312. (21)式之證明.

設 dl_1 與 r 所成之平面為 xy 平面. 將 dl_2 分成三部份, $dl_2 \cos(dl_2, r)$ 與 r 同向, $dl_2 \sin(dl_2, r) \cos \varphi$ 在 xy 平面內, 與 r 垂直, 及 $dl_2 \sin(dl_2, r) \sin \varphi$ 與 z 軸同向. $i_1 dl_1$ 所生之磁場在 dl_2 處者為 $H = \frac{i_1 dl_1}{r^2} \sin(dl_1, r)$ 其方向亦與 z 軸同向. 故 $dl_2 \sin(dl_2, r) \sin \varphi$



dl_2 之分解為三部份.

一部份中雖有電流, 而不受力之作用. $dl_2 \sin(dl_2, r) \sin \varphi$ 一部份所受之力與 r 垂直, 今不計. $dl_2 \sin(dl_2, r) \cos \varphi$ 一部份中有電流 i_2 流過時所受之作用力為 $k = H i_2 dl_2 \sin(dl_2, r) \cos \varphi$ (因此部份與 H 垂直) $= \frac{i_1 dl_1 i_2 dl_2}{r^2} \sin(dl_1, r) \sin(dl_2, r) \cos \varphi$; 此力之方向與 r 平行.

更以 r 爲 ξ 軸, 在 xy 平面內與 r 垂直之方向爲 η 軸, 而 ζ 軸與 z 軸平行. 則 dl_1 對於此新坐標系之方向餘弦爲

$$\cos(dl_1, \xi) = \cos(dl_1, r), \quad \cos(dl_1, \eta) = \sin(dl_1, r)$$

及 $\cos(dl_1, \zeta) = 0,$

而 dl_2 之方向餘弦爲

$$\cos(dl_2, \xi) = \cos(dl_2, r), \quad \cos(dl_2, \eta) = \sin(dl_2, r) \cos \varphi,$$

及 $\cos(dl_2, \zeta).$

於是得 dl_1 與 dl_2 二者間交角之餘弦爲

$$\cos(dl_1, dl_2) = \cos(dl_1, r) \cos(dl_2, r) + \sin(dl_1, r) \sin(dl_2, r) \cos \varphi,$$

或 $\cos(dl_1, dl_2) - \cos(dl_1, r) \cos(dl_2, r) = \sin(dl_1, r) \sin(dl_2, r) \cos \varphi.$

以此代入前式, 得

$$\begin{aligned} k &= \frac{i_1 dl_1 i_2 dl_2}{r^2} \sin(dl_1, r) \sin(dl_2, r) \cos \varphi \\ &= \frac{i_1 dl_1 i_2 dl_2}{r^2} [\cos(dl_1, dl_2) - \cos(dl_1, r) \cos(dl_2, r)] \\ &= \frac{i_1 dl_1 i_2 dl_2}{r^2} [\cos(i_1, i_2) - \cos(i_1, r) \cos(i_2, r)]. \end{aligned}$$

習題

第四章

(4,1) 一物體以常定之加速度由靜而動,在第一秒鐘之末,其速度為 $10[\text{厘米}]/[\text{秒}]$. (a)求第十秒鐘末之速度. (b)在此第十秒鐘內物體前進之距離若干? (c)若至第十秒鐘之末時加速度停止,求第十一秒鐘內物體進行之路程.

(4,2) 有石塊 5 塊落續自一懸岩之頂落下,每隔 1 秒鐘落下一塊. 已知地面上之加速度為 $980[\text{厘米}]/[\text{秒}]^2$. 問最後一塊下落後再歷 2 秒鐘之一瞬間,各石塊在空中各相距若干?

(4,3) 二車在二平行直線軌道上同向前進,在某瞬間,二車適並駕齊趨此時,甲車之速度為 $20[\text{呎米}]/[\text{小時}]$,加速度為 $10[\text{厘米}]/[\text{秒}]^2$,乙車之速度為 $15[\text{呎米}]/[\text{小時}]$,加速度為 $20[\text{厘米}]/[\text{秒}]^2$. 一秒鐘後,此二車將相距若干? 若干時間後,二車復得相並? 二次相並間二車各前進若干路程?

(4,4) 一人向東而行,其速度為 $40[\text{厘米}]/[\text{秒}]$,覺風自南方吹來. 若其速度增至 $60[\text{厘米}]/[\text{秒}]$,則覺風自東南方吹來. 求風之速度.

(4,5) 一年為 $365\frac{1}{4}$ 日. 吾人已知太陽與地球間之距離

爲 $1.5 \cdot 10^8$ [仟米]. 假定地球之軌道爲一正圓,試求地球對於太陽之加速度.

(4,6) 設地面上沿一緯度 λ 有一東西向之鐵道. 火車須以若干速度,向何方行駛,方能到處恆見太陽,而永不覺太陽之西下!

(4,7) 車輪在地面上滾動前進時,其輪緣上各點究繞何軸而轉動! 設輪之半徑爲 r ,其前進之速度爲 v ,試計算輪緣上各點之速度. 何點之速度最大,何點最小!

(4,8) 一物體作簡諧運動,其振幅爲4[厘米],週期爲1[秒],試證其速度與加速度之最大值各爲 8π [厘米]/[秒]與 $16\pi^2$ [厘米]/[秒]².

(4,9) 一質點在 P 點處原爲靜止,今向 O 點而運動, O, P 二點相距10[厘米]. 當其經過 O 點時,其速度爲20[厘米]/[秒]. 設(a)加速度爲常定,(b)該質點之運動爲對於 O 點之簡諧運動;試各作一圖,示明距離與速度之關係. 在此二種情形中質點由 P 至 O 所歷之時間各爲(a)1[秒],(b) $\pi/4$ [秒],試證之.

第五章

(5,1) 風何以有力! 一帆船之總質量爲 20000 [仟克], 忽遇大風, 在 1 分鐘內因之進行 10 [米] 之遙. 若略去水中之阻力不計, 試求風力若干!

(5,2) 一物體質量爲 m , 以常定速度 v 而運動, 於中途遇一反向之阻力 k 後, 歷路程 s 而物體遂因之靜止. 假定阻力之量與向均常定不變, 試計算其值應爲若干.

(5,3) 以卵擊石, 喻其必碎也; 但卵若落於棉絮之中, 則不碎, 試詳言其何以碎, 何以不碎之故.

(5,4) 一槍彈之質量爲 30 [克], 速度爲 300 [米]/[秒], 射入一木板之中, 板之厚爲 1 [厘米], 其離板而出後之速度爲 260 [米]/[秒]. 試計算木板中平均阻力之值爲若干 [達因], 及彈留板中之時間爲若干 [秒]. 此後該槍彈若復射入同質之木塊中, 則能深入若干 [厘米]!

(5,5) 三力 k_1, k_2, k_3 作用於一點, 每二力方向間所夾之角爲 $\theta_1 = (k_2, k_3), \theta_2 = (k_3, k_1), \theta_3 = (k_1, k_2)$. 試證三力平衡時,

$$k_1/\sin \theta_1 = k_2/\sin \theta_2 = k_3/\sin \theta_3.$$

此爲 Lami 氏之定理.

(5,6) 水平之光滑桌面上有一質點受三力作用, 其一爲 100 [達因], 方向爲東北偏北 15° , 其二爲 60 [達因], 方向爲西北,

其三爲40 [達因],方向爲正北. 今另加一新力,方向爲東南,欲使四力之合力恰在東西向之直線上. 試求此新力之量與向.

(5,7) 一物體之質量爲100[克],以等長而相同之三線懸之,三線之一端同繫於物體之同一點,其他端則分繫於三鉤,三鉤適成一水平正三角形之角頂,三角形之邊與各懸線之長相等. 試求各線中之張力.

(5,8) 按Newton氏第三公理,作用力恆與反作用力等量而反向. 然則馬何以能拉車前進乎! 試詳說其理.

(5,9) 有均勻球體二,質量各爲 m ,半徑各爲 r ,靜止於一光滑之半球形碗中,碗之半徑爲 R . 試計算二球間之壓力 P_1 ,與各球與碗壁間之壓力 P_2 . (凡接觸面光滑者,其間之作用力與反作用力恆皆垂直於接觸面.)

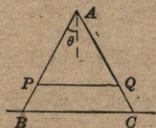
(5,10) 欲稱一極長之木材時,先縛其甲端而以秤稱之,此時乙端即支於地上,然後縛其乙端,復稱之,此時甲端支於地上. 將二次稱得之重量相加,即得木材之總重,試證之.

(5,11) 一桌面爲一等邊三角形 ABC ,各頂上各有一足. 一重物置於桌面上,其與 BC 邊之距離爲 p_a ,與 CA 邊爲 p_b ,與 AB 邊爲 p_c . 若其重量爲三足所負擔之部份各爲 R_a, R_b, R_c , 試證

$$R_a : R_b : R_c = p_a : p_b : p_c,$$

并各求其值.

(5,12)有二相同之均勻板 AB 與 AC , 其一端 A , A 以鉸鏈相結連, 其自由端 B, C 則立於一水平之光滑面上; 在各板同高之處 P, Q 連之以繩, 以防傾倒. 若 G 為各板之重, 2θ 為二板間之交角, k 為繩中之張力, R 為鉸鏈 A 所受之作用力, 試證



$$k = R = \frac{1}{2} \frac{AB}{AP} G \operatorname{tg} \theta,$$

k 與 R 方向相反.

(5,13) 試詳述火箭之原理, 并設計其構造. 與飛機氣球相較, 其優點何在? 火箭遠離地球後祇能向前直進, 不能自行轉向, 故若欲駕之以遊月球, 將有不能生還之懼. 試設計若何可使火箭在太空中自行轉向.

(5,14) 一柔順之繩繞過一滑車, 其一端懸有一猴, 他端懸一與猴等重之物體, 二者互相平衡而靜止. 某瞬間, 猴忽靜極思動, 突然緣繩向上爬昇, 試研究此時二者之運動. 假設滑車中毫無摩擦阻力, 猴與物體上昇孰速?

(5,15) 一昇降機懸於繩之一端, 其他端則繞過一滑車而懸一等重之物, 二者適相平衡. 昇降機中有一人, 其重量僅為機身總重之 $1/n$; 當昇降機靜止時, 人以常定速度 v 緣繩向上運動. 假設繩極柔順, 且滑車中無摩擦阻力, 試證人之上昇速度實為 $(1 - 1/2n)v$.

(5,16) $ABCD$ 為一正方形, E 與 F 各為 AD 與 DC 二邊之中

點。今於此正方形中割去 DEF 三角形，試求所餘部之重心。

(5,17) 試求半球體之重心。

(5,18) 二物體 m_1 與 m_2 間之距離為 a 。試證此物體組對於其公共重心之轉動慣量為 $J = m_1 m_2 a^2 / (m_1 + m_2)$ 。

(5,19) 一均勻之棒，長為 l ，橫截面為矩形，其闊為 b ，厚為 a 。試計算其轉動慣量，(a) 以垂直於棒長而通過棒之中點之直線為軸，(b) 以垂直於棒長而通過棒之一端之直線為軸，(c) 以平行於棒長而通過棒之中心之直線為軸。

(5,20) 繩之一端繫一桶，桶中儲水，而繩之他端則固結於一定點。桶在鉛直平面內對定點旋繞極速，達一極限速度時，桶內之水恰可不致溢出。試計算此極限速度之值。桶在最高處時，水何以不致下落？此時繩中之張力為若干？水所受之向心力若干？此力何自而來？定點受力之作用否？其值若干？何自而來？桶在最低處時若何？桶之旋繞速度較大或較小於極限速度時又若何？

(5,21) 甲乙二人同坐於一水平圓板之上，甲坐於中心，乙坐於邊緣，以一繩連結之。設二人對於板面之摩擦阻力均與體重成正比，則圓板繞其中心軸而轉動時之情形若何？甲或重於乙，或輕於乙，或二人等重，試分別詳加研究之。

(5,22) 物體作簡諧運動時，其能量正比於 (a) 振幅之平方，(b) 頻率之平方。試證之。

(5,23)一槍彈之質量為30[克],以速度300[米]/[秒]水平向射入一大木塊中,木塊之質量為5[仟克],以2[米]長而無重之細繩懸於空中. 若槍彈留於木塊之中,則木塊之懸線將因之轉過若干角度?

(5,24)設鞦韆之二繩極硬,可視之為二棒,運動時毫不彎曲,同繞一水平軸而擺動. 人立於踏板之上,應作若何運動,方能使鞦韆之擺動加強? 此時動能之增加自必由於人之運動,試計算每次擺動中新增之能量.

(5,25)貓自高樓失足跌下時,恆能以四足平穩着地,試言其故.

(5,26)一人雙手各持一鐵球,坐於水平圓檯之中央,檯可繞其中心軸而轉動,毫無摩擦阻力. 初時圓檯以 ω_0 之常定角速度而轉動,人以握球之兩手疊置胸前,使二球均在軸上. 命人與圓檯對於該軸之轉動慣量總值為 J_0 ,人之雙臂各長 l ,二鐵球之重各為 m . 若人忽伸直其二臂,則將有若何變化發生?

(5,27)一金屬圓板之質量為6[仟克],半徑為50[厘米],直立於地面上滾動,每分鐘滾動15轉. 求(a)圓心對於地面之直線速度,(b)周緣上最高一點對於地面之速度,(c)周緣上最低一點對於地面之速度,(d)動能之總值.

(5,28)一圓柱形之礮彈半徑為15[厘米],質量為10[仟克],順其柱軸之方向而射至空中,其直線前進速度為500

[米]/[秒],同時於每秒鐘內繞其柱軸轉動 $20/\pi$ 次. 試求其動能.

(5,29)一圓柱體半徑為20[厘米],質量為40[仟克],橫臥於光滑之地上,有一繩繞於其中央. 今以3[仟克]之力拉繩,圓柱體即在地面上滾動. 試求圓柱體之角加速度. 3[秒]鐘後,其角速度若何?

(5,30)二球 m_1 與 m_2 為一繩所連結,繩長為 l ;手握 m_1 而使 m_2 繞之轉動. 當 m_2 之速度為 v 時,將 m_1 釋放,任此物體組自由在空中揮舞. 試研究其運動,并計算二球互相旋繞之角速度,及繩中之張力.

(5,31)有一頗重之厚圓板,一柱通過其中心而直立於一光滑之平面上,旋轉不已,圓板之面適為水平. 若於圓板邊緣之一點上施一向下之壓力,則其運動將起若何變化?

第六章

(6,1) 一燈塔高出水面 2 [米], 一槍彈由此水平射出, 其速度為 400 [米]/[秒]. 若略去空氣之阻力不計, 彈將落於水面上離塔若干 [米] 之外?

(6,2) 山坡之傾斜角為 30° . 一彈自山足以 300 [米]/[秒] 之速度向山上射出, 其方向與地平面成 45° 之交角. 問彈將擊於山坡上之何處, 且所歷之時間為若干?

(6,3) 一鳥翱翔空中, 其質量為 2 [仟克], 在某瞬間離地面 19,6 [米], 方以 5 [米]/[秒] 之速度水平向前進, 忽為一 30 [克] 之槍彈所擊中, 此時彈之速度為 300 [米]/[秒], 亦沿水平向射來, 且與鳥之前進向同向. 試計算該鳥經若干時間而落地, 又着地之點與被擊之點二者間水平距離為若干?

(6,4) 一砲彈之質量為 M , 以速度 V 射於空中, 忽於中途爆裂成二部份, 其一部份之質量為他部份之 k 倍. 若由彈中炸藥所產生之能量為 E , 且假設爆後二部份仍各循原路進行, 不受空氣阻力之影響, 試證其速度各為

$$V + \sqrt{2kE/M}, \quad \text{與} \quad V - \sqrt{2E/kM}.$$

(6,5) 一玩技者將三球以一手輪流向上拋射, 時時恆有二球在空中, 一球留手內. 若每球上昇之高皆達 122,5 [厘米], 試證各球留於手內之時間皆為 $1/2$ 秒. ($g = 980$ [厘米]/

[秒]².

(6,6) 甲物體以 $58,8$ [米]/[秒] 之初速鉛直向上拋射後, 歷 4 秒鐘而又有乙物體仍以同速度自同處向上拋射. 二者相遇之點離出發點之高度若干?

(6,7) 一列車自山坡上滑下, 其初速爲零, 歷 1 [仟米] 而至山足, 其後即在平地上順勢繼續前進. 設山坡之傾度爲 $1:100$, 車輪與鐵軌間之摩擦阻力恆正比於車身之垂直壓力, 每[仟克]之重量相當於 10 [克] 之阻力, 試計算車在平地上可前進若干距離, 方始停止. 又何時之速度爲最大, 且其值若干?

(6,8) 二物體 m_1 與 m_2 各止於一斜面上, 斜面之傾斜角各爲 θ_1 與 θ_2 , 二面之交線爲一水平線, 在此交線上置一滑車, 一繩誇過此滑車而將 m_1 與 m_2 二物體結連. 設到處均無摩擦阻力, 試求 m_1 與 m_2 之加速度, 并研究下列各種之特例: (a) $\theta_1=0$, (b) $\theta_1=0$ 而 $\theta_2=90^\circ$, (c) $\theta_1=\theta_2=90^\circ$.

(6,9) 上題繩中之張力若干? 若將 m_1 握住使之靜止, 則繩中之張力又爲若干? 設 m_1 沿斜面向上運動, 若於開始運動後第三秒鐘之末忽將繩燒斷, 則二物體之運動將若何? m_1 昇至何處方再滑下? 歷時若干?

(6,10) 一圓球與一圓柱體, 半徑相等, 在同一斜面上自由滾下, 圓柱體之軸始終維持水平; 歷某時間後, 設圓球滾過之路程爲 S , 同時圓柱體滾過之路程爲 S' . 試證 $14S=15S'$.

(6,11)一鏈長4,8[米],自由懸於其一端. 某定點在懸點下19,6[米]之處,若任該鏈自由下落,試計算鏈之全長經過該點共須歷時若干秒.

(6,12)單擺懸線之長為2[米],擺幅為2[厘米]. 試計算擺體離其靜止位置1[厘米]時之速度及加速度,并證明其自靜止位置至此所歷之時間,恰為全週期之 $1/12$ (單擺之運動可視為直線上之簡諧運動).

(6,13)一圓環之直徑為50[厘米],懸於一水平刀口上而在其本身平面內擺動. 試求其等值單擺長.

(6,14)設將可倒擺懸於二刀口時之週期 τ_1 與 τ_2 不為絕對相等,命各刀口至重心之距離各為 a_1 與 a_2 ,則

$$\frac{4\pi^2}{g} = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{2(a_1 + a_2)} = \frac{\tau_1^2 - \tau_2^2}{2(a_1 - a_2)},$$

試證之.

(6,15) $ABCD$ 為一正方形,每邊之長為 a . A, B, C 三角頂上各置一質點,其質量皆為 m ,試計算 D 點處1[克]物質所受引力之總值.

(6,16)一大球之密度為 ρ ,一極小之小球掠過大球之表面而繞之沿其一大圓周運動,不即不離,繞行不息. 試計算小球繞行之週期.

第八章

(8,1) 一物體之質量為 10 [克], 懸於一螺簧之下端, 平衡時, 螺簧即因之伸長 $9,8$ [厘米]. 平衡受擾亂後, 物體即作簡諧運動, 試證之, 並求其週期. (假設螺簧本身無重量.) 若振動開始時純由於此 10 [克] 物體之突然懸於其下, 此外未加其他任何之力, 則振幅若何? 試寫出其振動方程式.

(8,2) 上題中螺簧之質量在事實上不能略去, 故亦當計算在內, 但其對於振動有關者, 自必非為其全部之質量, 蓋其上半部之運動遠較微弱也. 為簡單計, 吾人可設想有一理想的質量 m_s 加於懸體之上, 使其作用恰等於螺簧本身質量之作用; 若此則仍可視螺簧為無重量, 而以 m_s 代之. m_s 對於同一螺簧為一常定值, 不隨懸體質量之大小而異; 吾人稱之曰螺簧之「重當量」. 試設計用何法以測其值.

(8,3) 一繩之原長為 1 [米], 截面之面積為 $1/2$ [毫米]², 長變彈性係數為 1000000 [達因]/[毫米]², 其下端懸一 10 [克] 之物體, 試計算其伸長之值. 若有一 1000 [達因] 之力依水平向作用於此物體, 則該繩又伸長若干?

(8,4) 一金屬線之長為 1 [米], 截面面積為 $1/2$ [毫米]², 下端懸一 1 [克] 之物體而擺動時, 其週期為若干 [秒]? 設若易以 500 [仟克] 之懸體, 其週期因之延長 $0,0001$ [秒], 問懸體為

1000[仟克]時之週期爲若干[秒]? 又金屬線之長變係數爲若干!

(8,5) 一圓板之質量爲100[克],半徑爲10[厘米],以一線懸於其中心而在水平面內作扭轉振動,其週期爲1[秒]. 今於圓板之上復置一厚壁之圓筒,其軸與懸線之軸相合;此時作扭轉振動時,其週期增至2[秒]. 設懸線之長爲100[厘米],半徑爲1[毫米],試求懸線之扭轉係數及厚壁圓筒之轉動慣量.



第九章

(9,1) 天平之一盤中置有一杯之水,平衡時,以手指浸入水中,手指不觸杯壁及底,且無水溢出,問此時之平衡將受影響否? 試言其故。

(9,2) 設有一三角形之平面直立浸於水中,其水平一邊 AB 最低,且與容器之底平行,則面上各點皆受液體靜壓力之作用,此諸力之方向悉為鉛直向下。試求其合力之作用點(稱為液體靜壓力中心)。又若其頂點 C 向下,而 AB 一邊仍為水平,則壓力中心又在何處?

(9,3) 一稜柱體之高為 10 [厘米],底面為一直角三角形,其直角二邊之長為 6 與 9 [厘米]。若以其 6×10 [厘米]² 之一直立側面抵住 6 [厘米] 深之水,則其比重須為若干,方可不致為水所衝倒?

(9,4) 一水槽在一斜面上自由滑下,斜面之傾角為 α ,槽底與斜面間無摩擦阻力。槽中半儲以水,問水面應若何? 水槽若在平面上以加速度 γ 而滑動,則水面又若何? 水槽若以定速運動,則又若何?

(9,5) 一物在空中重 33 [克*],在水中重 30 [克*],縛於一木塊之上而同在水中重 20 [克*]。若木塊單獨在空氣中時原重 10 [克*],則其比重應為若干?

(9,6) 一圓柱形之木棍,長爲1[米],半徑爲1[厘米],密度爲0,8[克]/[厘米]³,其一端鑲有一段粗細與木棍相同之銅柱體,銅之密度爲8[克]/[厘米]³. 木棍直立而浮於水中. 若木棍僅有10[厘米]浮出水面,問銅柱之長幾何? 又若木棍浮於另一液體中,其頂上載有60[克]之重物,而仍有10[厘米]之長浮出液面,則該液體之密度若何?

(9,7) 一均勻之圓柱體,長爲1[米],比重爲0,8,浮於水中. 水面上輕注以油,油之比重爲0,75. 若圓柱體露出油面上之長爲10[厘米],則所注之油層厚度若干?

(9,8) ABC 爲一均勻之棒, A 端固定, 棒可繞之自由轉動, BC 部份浸於水中而適成平衡. 試證棒之比重爲 $1 - (AB/AC)^2$.

(9,9) 有一極薄之物體,密度爲 ρ , 由一液體之面逐漸自行下沉, 液體之密度爲 ρ' ($\rho' < \rho$), 其深爲 h . 試證該物體自液面沉至液底所歷之時間爲 $\sqrt{2h\rho/g(\rho-\rho')}$. (粘滯係數略去不計.)

(9,10) 一立方體之木塊,每邊之長爲50[厘米],質量爲75[仟克],浮於水中,其頂面適爲水平. 水之深爲1[米]. 若欲將此木塊壓至水底,則需工作若干?

(9,11) 一圓柱體之半徑爲 a , 長爲 l , 浮於液體中. 已知圓柱體之密度爲 ρ , 液體之密度爲 ρ_0 , 且 $\rho < \rho_0$. 柱軸爲 (a) 直立與 (b) 水平時, 若爲穩定平衡, 則 $a:l$ 之極限比值應各爲若

何?

(9,12) U形管中儲有水銀,其彎曲液體柱之長爲 l . 管受擾動後,水銀即對於原來之靜止位置發生簡諧振動. 試證之,并計算其週期爲 $\tau = 2\pi\sqrt{l/2g}$. 若不用水銀而用水,則何如?

(9,13) 松節油之密度爲 $0,86$ [克]/[厘米]³, 表面張力爲 $28,8$ [達因]/[厘米], 於一半徑爲 $0,1$ [毫米]之玻璃毛細管中能上昇 $6,52$ [厘米]. 試求松節油與玻璃間之毛細角.

(9,14) 油脂之表面張力較揮發油爲大. 欲除去衣服上之油漬時,揮發油須施於油漬之中央抑邊緣,庶可不使油漬之面積擴大!

(9,15) 有一鐵質之圓柱狀浮筒,其外直徑爲 1 [米],長爲 2 [米],其下爲錨與鍊所連,而全部沒入水中. 若筒壁之厚爲 $0,5$ [厘米],試計算鏈中之張力. (鐵之比重= $7,8$.)

第十章

(10,1) 試計算標準狀態下氧與氮二種氣體分子速度自乘方平均值之方根(稱爲均方根值)。

(10,2) 有 0.2[克]之某氣體, 在 0°C 時之壓力爲 50 [厘米] 水銀柱, 其所佔之容積爲 3000 [厘米]³。若將其容積增至 6000 [厘米]³, 則其分子速度之均方根值將有若何變化?

(10,3) 1000 [厘米]³ 中有甲氣體 0.01 [克], 乙氣體 0.02 [克], 丙氣體 0.03 [克], 互相混合。設此混合氣體之壓力爲 76 [厘米] 水銀柱, 試計算各氣體分子之速度。

(10,4) 一玻璃管長 1 [米], 二端均開, 將其一端直立插入水銀槽中, 使其 90 [厘米] 長之一段沒入水銀內。此時以手指閉其上端, 將管提起, 使有 90 [厘米] 之長露出水銀面上。若大氣之壓力爲 75 [厘米] 水銀柱, 則管內之水銀面當留於何處?

(10,5) 一圓筒形之潛水鐘, 高 2 [米], 橫截面積 4 [方米], 沉入水中, 直至其頂在水面下 6 [米] 之處。海面上之大氣壓爲 76 [厘米]。試計算須有若干空氣自海面上壓入鐘中, 方可使鐘內無水侵入! 此時鐘內氣壓計之示度若何?

(10,6) 一氣泡自湖底上昇至水面時, 其體積增加 10 倍。設湖面上之大氣壓力爲 760 [毫米], 試計算湖水之深度。

(10,7) 氮分子之直徑爲 $3,36 \cdot 10^{-8}$ [厘米]。試計算標準狀態下氮分子之平均自由路程。壓力爲 50 [厘米] 水銀柱時，其值又爲若干？

(10,8) 唧筒式抽氣機鐘罩內之容積爲 R ，唧筒以及其連通管之容積爲 B ，空氣原來之密度爲 D ，試證已抽 n 次後其密度爲

$$D_n = \left(\frac{R}{R+B} \right)^n \cdot D.$$

(10,9) 一氣球之容積爲 1000 [米]³，載重 1000 [仟克*]，中儲氮氣。某日地面上之氣壓爲 76 [厘米] 水銀柱，溫度爲 0°C ，問該艇能昇至若干高度？（假設空氣之溫度不因高度而異，到處相等，且氣球之囊壁頗堅，氮之容積始終維持常定。）

(10,10) 不透氣之玻璃瓶中有一蠅止息於玻壁之上；瓶置於天平之一盤中，而爲他盤中之砝碼所平衡。蠅忽離玻壁而飛舞於空中，則平衡將受擾亂否？若於飛舞時觸及玻壁，則又何如？

(10,11) 上題中瓶若無蓋，與外界之空氣相通，則又如何？此時若另有一蠅在瓶口之上飛過，亦有影響否？鳥類及飛機等飛過時又如何？

第十一章

(11,1) 水槽之側開有許多小孔,水即由此噴出. 假設水面之高度維持常定,則由 $h/2$ 高度處一孔噴出之水可射至最遠,試證之.

(11,2) Mariotte 氏瓶之旁接有一細管,水自管中源源流出. 設此管之長為 30[厘米],半徑為 5[毫米],管口在水面下之距離為 $1/2$ [米],試求一小時內由此管流出之水量. 已知水之粘滯係數為 $0,01$ [達因]·[厘米]⁻²·[秒].

(11,3) 一小圓球之半徑為 r , 密度為 σ , 在一氣體中下落, 氣體之密度為 ρ , 粘滯係數為 η , 則小球下落之速度為 $2gr^2(\sigma - \rho)/9\eta$, 試證之.

第十二章

(12,1) § 123, (12)式可書作下列諸式:

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_0 \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \\ &= \eta_0 \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(t - \frac{r}{c} \right) \\ &= \eta_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{r}{\lambda} \right) \\ &= \eta_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x),\end{aligned}$$

試證之，今有一波，其在距原點 x 處一質點之振動式為 $\eta = a \cos(bt + ex)$ ，試計算其振幅，週期，波速，波長，頻率與圓周頻率之值。

(12,2) 深水面上有水面波發生時，若水之深度遠較波長為大時，其傳播之速度為 $c = \sqrt{g\lambda/2\pi}$ (此式在此處不必證明)。設有一水面波，其波長為 6 [米]，波幅為 1 [米]，在某瞬時，其一波峯適經過一完全靜止之浮筒。離筒後 25 [米] 之處，此時之水面究在其原來靜止位置之上，抑在其下，且相離若干 [米]！

(12,3) 銅之密度為 8,9 [克]/[厘米]³，長變彈性係數為 10000 [仟克*]/[毫米]²。今有一銅絲，橫截面積為 1 [毫米]²，則縱波

在其中傳播之速度爲 350 [仟米]/[秒];若固定其一端,而懸 90 [克]之物體於其他端,則橫波在其中傳播之速度爲 1 [仟米]/[秒],試證之.

(12,4) 試計算 0°C 及 74 [厘米] 氣壓下空氣及二氧化碳兩種氣體中聲音傳播之速度.

(12,5) A, B 二點爲同一媒質中之二波源,其振幅皆爲 5 [厘米],頻率皆爲每秒 100 次,惟 A 處爲波峯時, B 處適爲波谷. 媒質傳播之速度爲 10 [米]/[秒]. 設 A, B 二點相距 20 [米], 試計算 AB 連線上因干涉而靜止之各點之位置. 經過 A 點作一直線垂直於 AB , 在該直線上取一 P 點,使 $AP=20$ [米]. 試分別寫出 P 點單獨由於波源 A 及波源 B 而生之振動方程式. 又二波干涉後,其振動方程式應若何?

(12,6) 一人手執一發音體,向一高牆以 5 [米]/[秒]之速度而運動. 設發音體之頻率爲每秒 500 次,音之傳播速度爲 $1/3$ [仟米]/[秒],試計算此人所聞之音每秒鐘內有振拍幾次.

(12,7) 一飛艇上設有一號笛,其振動之頻率爲每秒 100 次. 地面上甲乙二處相距 400 [米],同時聞此號笛之聲,惟甲處所聞之頻率爲 90 [秒] $^{-1}$,乙處所聞者爲 110 [秒] $^{-1}$;若此時飛艇離地面 200 [米],試求其位置,及飛行之速度.

(12,8) A, B 二處有二完全相同之振動體,惟 A 之振幅二倍於 B . 一人立於 AB 連線上之 C 點, $BC = \frac{1}{3} AB$. 試證此人所聞之音強度相同.

(12,9) 試以 Fermat 氏原理證明波動遇界面而反射之公式。

(12,10) 波動傳播時若不遇任何阻礙,則其波面任爲何種曲面或平面,其形狀始終不變,試用 Huygens 氏原理作圖以示明之。



第十三章

(13,1) 某要隘口雙峯聳峙,石壁直立千仞,二壁相距 1 [仟米],一守兵在隘口放一槍,聞最初之二回聲相隔 3 [秒]. 試計算第一回聲與槍聲相隔之時間,及守兵離二壁之距離.

(聲速 = $\frac{1}{3}$ [仟米]/[秒].)

(13,2) 將一均勻之棒夾住於其中間而以松香布擦之,棒將作何種振動! 若夾住其全長之 $\frac{1}{4}$ 及 $\frac{3}{4}$ 二處,則又何如! 試詳述之. 設棒長為 1 [米],密度為 7 [克]/[厘米]³,長變彈性係數為 10^{12} C. G. S.,試分別計算該棒所發最低及次低之音調.

(13,3) Kundt 氏管之銅棒長 1 [米],於其中點處夾住之;管中為空氣,振動發生後,其各粉末堆間之距離為 99 [毫米]. 銅之密度為 8,9 [克]/[厘米]³,試計算銅之長變彈性係數.

(13,4) 氣體中之聲速,輒用 Kundt 氏管以測量之. 設管中為甲氣體時,各粉末堆間之距離為 l , 易以乙氣體後,其距離為 l' . 則甲乙二氣體中聲速之比等於 $l : l'$. 試證之.

(13,5) 將一音叉繫於一 60 [厘米] 長之線之一端,手執其他端而令音叉在空中繞一圓周運動,每秒鐘內繞行 2 週. 一觀察者之耳亦在此圓周平面以內,試計算其所聞最高與最低二音頻率之比.

(13,6) 音叉之一端附有一筆尖, 旁置一鉛直之玻璃板, 板上塗有煤煙. 音叉自由下落時, 其筆尖恰在此板上畫一波狀曲線. 設在 d 距離 (自靜止位置下落) 中共有 n 個波, 試證音叉之頻率為 $n/\sqrt{2d/g}$.

(13,7) 今有一兩端均開之竹管, 欲於其旁開七個小孔, 俾成一笛, 用 c 大音譜, 其基音之頻率為 $256[\text{秒}]^{-1}$. 試計算各孔間之距離.



第十五章

(15,1) 甲乙二金屬線皆以同質製成, 在 0°C 時各長 10 [米], 截面積 $0,01$ [厘米]², 長變彈性係數 2000 [仟克*]/[毫米]², 線脹係數 $12 \cdot 10^{-6}$ [度]⁻¹. 甲線以 1 [仟克*] 之力拉之, 問乙線之溫度須增至若干度, 方得與甲線仍為同長!

(15,2) 一固體之質量為 1 [仟克], 浸於冰水中以秤稱之, 其重量為 500 [克*], 浸於 50° 之水中稱之, 得 450 [克*]. 試求該固體之線脹係數.

(15,3) 敷設鐵路之鋼軌時, 若堅釘於枕木之上, 二軌銜接處不留餘地, 則嚴寒酷暑時將有何種危險發生! 敷設時之溫度為 20° , 夏季最熱時之溫度為 40° , 冬季最嚴寒時之溫度為 -5° , 則鋼軌中所生最大之應力當為若干!

(15,4) 第 156 圖所示補償擺之週期為 1 [秒]. 鐵之線脹係數為 $0,000012$, 鋅為 $0,000029$. 試計算 0° 時其各部份之長度.

(15,5) 有甲乙兩種不相作用之理想氣體, 其物態方程式各為 $p \cdot V_1 = R_1 T$, 及 $p \cdot V_2 = R_2 T$, 其中之 $R_1 = k/\mu_1$, $R_2 = k/\mu_2$. 若將甲氣體 m_1 [克] 與乙氣體 m_2 [克] 混合, 而此混合氣體之壓力為 p , 則其物態方程式為

$$p \cdot V = \frac{m_1 R_1 + m_2 R_2}{m_1 + m_2} T,$$

而各氣體之分壓爲

$$p_1 = \frac{m_1 R_1}{m_1 R_1 + m_2 R_2} \cdot p, \quad p_2 = \frac{m_2 R_2}{m_1 R_1 + m_2 R_2} \cdot p.$$

試證之。

(15,6) 將 n 種彼此不相作用之理想氣體混合, 其各氣體之分子量各爲 M_1, M_2, M_3, \dots , 混合量各爲 m_1, m_2, m_3, \dots [克].

試證各氣體分壓之比爲

$$p_1 : p_2 : p_3 : \dots = \frac{m_1}{M_1} : \frac{m_2}{M_2} : \frac{m_3}{M_3} : \dots$$

又混合氣體之[分子量]爲

$$M = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{M_i}}$$

(15,7) 空氣之成份以容積計之, 爲 21% 之氧與 79% 之氮. 試計算此二氣體質量之百分比.

(15,8) 設已知固體與氣體在 0°C 時之密度爲 ρ_0 , 試計算溫度爲 t° 時聲在其中傳播之速度.

(15,9) 1[克]之空氣自 15°C 熱至 60°C , 其壓力爲 75 [厘米], 始終維持常定. 試計算此時空氣所作之外工. 若其容積維持常定, 則應佔若干[厘米]³, 溫度增高後, 其壓力增加若干! 此時有外工作否!

(15,10) 氣壓計水銀柱上之空間內設有少許空氣存在 (其量不知), 則其示度必不可靠. 今僅知玻璃管之內徑到處均勻, 此外僅有一精確之溫度計可資應用, 試設計若何可讀得氣壓之真值!

第十六章

(16,1) 1 [仟克] 之沸水逐漸冷卻,若其放出之熱量悉散佈於 1000 [米]³ 之乾燥空氣中,空氣之初溫為 0°, 壓力為 76 [厘米] 水銀柱,其比熱為 0,237. 假設空氣之容積常定不變,試計算空氣與水最後之溫度與壓力.

(16,2) 有某金屬 100 [克], 溫度為 100°, 以之投入 100 [克] 之冷水中,水之初溫為 0°, 最後之溫度為 5°. 試計算該金屬之原子量.

(16,3) 試計算 H_2 , O_2 , CO_2 , 三種氣體之定容與定壓比熱.

(16,4) 設有一物體,將其加熱自 0° 至 t° 時所需之熱量為 $Q = at + bt^2 + ct^3$, 其值隨 t 而變,故其比熱亦不為一常定值. 試證該物質在 t_1° 與 t_2° 二溫度間之平均比熱 $a + b(t_1 + t_2) + c(t_1^2 + t_1t_2 + t_2^2)$ 而在 t° 時,其比熱為 $a + 2bt + 3ct^2$.

(16,5) 將 10° 之乾燥空氣絕熱壓縮至其原容積之 1/10, 其溫度將昇至若干度? 又若其原來之壓力為 76 [厘米], 問壓縮後,其壓力若何?

(16,6) 量熱器之質量為 m_1 , 比熱為 C_1 , 攪動器之質量為 m_2 , 比熱為 C_2 , 溫度計玻璃管浸在水內部份之質量為 m_3 , 比熱為 C_3 , 其中水銀柱之質量為 m_4 , 比熱為 C_4 , 若尚有其他器械, 命其質量為 m_5, m_6, \dots , 比熱為 C_5, C_6, \dots . 問水當量為若

干! 實測物體之比熱時,若欲將此諸值一一預行測定,非特手續過煩,且無法精確測出。試設計若何可測出量熱器中上述一切部份之水當量,以手續簡單且又相當精確為尙。



第十七,十八章

(17,1) 地面上積雪10[厘米],設其平均密度爲0,2[克]/[厘米]³,溫度爲0°,問須下若干[厘米]之雨,方足以將雪完全融解! 雨之溫度爲10°.

(17,2) 有16[克]之鐵塊,溫度爲112,5°,投入一冰塊之空隙中,冰因之融解2,5[克]. 試計算鐵之原子熱.

(17,3) 池水之深爲20[厘米],溫度爲8°,其上有連續不斷之寒風吹過,風之溫度爲0°. 設池水之熱量源源爲此寒風所帶去之速度常定不變,池面上開始結冰之時間爲 t_1 ,面上結成1/2[厘米]一層薄冰之時間爲 t_2 ,則 $t_1:t_2=40:61$,試證之.

(17,4) 將25[克]15°之水注入 Bunsen 氏冰卡計中,其水銀柱即因之移過29[厘米]. 其後又將15[克]100°之金屬塊投入水中,水銀柱復移過12[厘米]. 試求金屬之比熱.

(17,5) 上題中毛細管之橫截面積設爲2[毫米]²,試計算共有若干[厘米]³之冰融解.

(17,6) 儲水於一密閉之卡計中,而連續將熱量均勻輸入,每有水汽發生,即設法除去之,務使水溫常定不變. 若輸入之熱量可精密測出,試示明若何可從此求得水之蒸發熱.

(17,7) 一容器中有空氣與飽和水汽混合存在,其氣壓爲780[毫米],水汽之分壓爲20[毫米]. 若將其容積縮至原來

之半，溫度仍常定不變，則其氣壓將為若干？

(17,8) 一圓筒形之容器中有空氣及少許之水，以活塞密閉之，活塞與筒壁間毫無摩擦阻力。當其溫度自 7° 昇至 47° 時，活塞即向外移動，而其容積因之增加原來之四分之一，活塞外之大氣壓為 76 [厘米]，始終維持常定。假設 7° 時之飽和汽壓為 1 [厘米]，試計算 47° 時之汽壓。

(17,9) 有甲乙二氣壓計，並置一處，溫度相等，甲計之水銀柱頂上略有少許空氣混入，故其示度略較乙計為低。今以二種液體分別導入此二氣壓計中，其水銀柱頂上均留有少許液體，歷久未見蒸發，二計之示度遂降至同值。問何種液體沸點較高？并言其故。

(17,10) 自 Van der Waals 氏物態方程式，試證其臨界值為

$$t_k = \frac{8a}{27Rb}, \quad p_k = \frac{a}{27b^2}, \quad V_k = 3b,$$

而氏之方程式以此諸值表之，可寫作

$$\left(\frac{p}{p_k} + 3 \frac{V_k^2}{V^2} \right) \left(\frac{V}{V_k} - \frac{1}{3} \right) = \frac{8t}{3t_k}.$$

(17,11) 二氧化碳之臨界溫度為 31.3° ，臨界壓力為 73 [大氣壓]。今以之密閉於一管中，其初溫為 20° ，加熱之，使適能通過其臨界狀態。試證初時管中汽液二態之比約為 $4\frac{1}{2}$ 份之汽與 1 份之液體。

(17,12) 蔗糖之分子量為 342。今以 10 [克] 之糖溶於 1000

[厘米]³之水中,其所示之滲透壓爲 50,5 [厘米] 水銀柱. 試
計算糖溶液之溫度.



第十九章

(19,1) 有瀑布高 50 [米], 試計算其頂部與底部溫度之差.

(19,2) 一鉛質槍彈之溫度為 50° , 射入一障礙物中, 此時必有大量之熱發生. 設所生之熱量毫不在他方面消失, 適足以使鉛彈本身全部融化, 試計算槍彈之速度.

(19,3) 一人在 10 [分] 鐘內食盡 $1/2$ [仟克] 之冰, 其體溫為 37° . 試計算其所費之工率.

(19,4) 一鉛球之半徑為 10 [厘米], 在一光滑之斜面上自由滾下, 斜面之傾角為 30° . 斜面之足伸入一水槽中, 內儲 10 [米]³ 之水, 其溫度為 0° , 水面與鉛球出發點相距 10 [米]. 若鉛球之初溫為 30° , 問當其落入水中後, 水之溫度若何! (假設鉛球之熱能在途中並不損失, 而斜面與水槽壁之比熱均極小, 可略去不計.)

(19,5) 50 [克] 之水汽在 100° 時凝為同溫度之水, 試計算其熵之變遷值.

(19,6) 1 [克分子] 之理想氣體自容度 V_0 膨脹至 V_1 時, 若無熱能自外輸入, 則其熵之變遷值為

$$\int_{V_0}^{V_1} dS = S - S_0 = R \log \frac{V_1}{V_0},$$

試證之. (提示: 理想氣體之內能 U 不隨 V 而變.)

(19,7) 有分子量為 M_1 與 M_2 之二種理想氣體, 各以質量

m_1 與 m_2 互相擴散,其溫度 0° 與壓力 76[厘米]均維持常定.

試證其熵之變遷值爲

$$\int_{S_0}^{S_1} dS = S - S_0 = -R \left(\frac{m_1}{M_1} \log \frac{m_1 M_1}{m_1 M_2 + m_2 M_1} + \frac{m_2}{M_2} \log \frac{m_2 M_2}{m_1 M_2 + m_2 M_1} \right).$$

(提示:因 p 與 T 均不變,故擴散後之總容積爲二氣體容積之和.)

(19,8) 有一長 7[米],闊 6[米],高 5[米]之室,其屋頂與四壁之厚均爲 20[厘米],各壁與門窗之平均導熱係數爲 $0,0008$ [卡]·[度] $^{-1}$ ·[厘米] $^{-1}$ ·[秒] $^{-1}$. 室外之溫度爲 -10° , 室內燃煤以取暖,使溫度維持 20° . 若煤之燃燒熱爲每[克]8500[卡],惟僅有 20% 足供加熱室內空氣之用,問每小時應燃煤若干?

(19,9) 一水蒸汽機汽鍋中之壓力爲 11665[毫米],而其廢汽從機中排出時之溫度爲 40° . 試計算此機效率之最高理論值.

(19,10) 有一機械,能產生 $A = 10^{12}$ [爾格]之能量,作爲溫暖臥室之用. (a) 若任其等溫變熱,則可得熱量若干? (b) 若以之輸入一溫度 $t_2 = 100^\circ$ 之熱氣禦寒管組,而令其在此溫池及另一溫度 $t_1 = 0^\circ$ 之溫池間作 Carnot 氏循環過程,則可得熱量若干?

(19,11) 高溫池之溫度爲 100° , 低溫池之溫度爲 0° , 一機械

每循環自此高溫池取用1000 [卡] 之熱量。試計算於每循環中輸入低溫池之熱量,機械之工作,效率及熵之變遷值。



第二十一章

(21,1) 二固定之質點,相距 $2b$,各荷有陽電荷 $+e$. 通過 $2b$ 之中點作一平面,即以此中點為圓心, a 為半徑,在此平面上作一圓;另有二質點,質量各為 m ,各荷陰電 $-e$,在此圓周上運動,其角度皆為 ω ,常定不變,且始終在同一直徑之二端. 試證 $a = b\sqrt{3}$, 及 $\omega^2 = (3\sqrt{3}-1)e^2/4ma^3$.

(21,2) 有小球二,質量各為 1 [克], 荷有等量之電,各以 1 [米] 長之絲線懸於同一點上. 平衡而靜止時,設二球相距 10 [厘米], 試計算各球所荷之電量. 若二球於每秒鐘內互相旋繞 5 次,仍得平衡,則二球相距幾何?

(21,3) 一質點荷有電量 $+e$, 在空間內對於其自然靜止位置作簡諧運動,其所受之作用力可以 $k = -ar$ 表之, r 為其與靜止位置間之距離, a 為常數. 若空間內有均勻電場襲來,則振動之中心將順場向移過 $\delta = eE/a$ 之距離,其中 E 為電場之強度,試證之.

(21,4) 有四電荷 $+1, +2, +3, -4$ [靜電單位] 順次各據一正方形之一角,正方形每邊長 10 [厘米]. 試計算正方形中心及各邊中點之電位及電場強度.

(21,5) 一陰電荷 $-e$ 繞一固定之陽電荷 $+e$ 以定角速轉動,其圓周軌道之半徑為 r_1 . 此時陰電荷之總能(動能與位

能之和)爲若干[爾格]! 今若欲將 r_1 增至 r_2 ,則需工作若干!

(21,6)二電子各荷電 $-\varepsilon$,同繞一陽核 $+2\varepsilon$ 而在一半徑爲 a 之圓周上運行不息;不論何時,二電子恆在同一直徑之二端,其繞行之角速適使全組質點維持平衡. 試計算將三電荷分離至無限遠所需之工作. 若二電子原爲靜止,則又如何!

(21,7)秒擺之錘重10[克],荷有30[靜電單位]之陽電量,在一強烈之均勻電場中,其強度爲10000[伏特]/[厘米],方向向上. 試計算其週期. 若電場強度增加98倍,則何如! 增加100倍又何如! 地面上之加速度 $=980$ [厘米]/[秒]².

(21,8)在一均勻電場中有一正三角形 ABC ,每邊之長爲1[米], BC 一邊與場向平行. 設場之強度爲100[伏特]/[厘米],試計算每二頂角間之電壓. 在三角形外作一外切圓. 將一電荷自 B 點出發經圓周而移至 C 點所需之工作應等於自 B 點經 BA 及 AC 二直線而至 C 點所需之工作,又等於自 B 點直接經 BC 直線而至 C 點所需之工作. 試以(工作) $=$ (力) \times (路程)之關係證明之.

(21,9)在一均勻電場中取 A, B 二點,相距2[米],其連線與場向成 60° 之交角. 已知將一電量等於10[靜電單位]之陽電荷自 A 移至 B 時所需之工作爲 $\frac{1}{10}$ [焦耳],試計算電場之強度爲若干[伏特]/[厘米],及 A, B 二點間之電壓爲若干[伏特].

(21,10)試計算一電偶 M 之電軸延長線上任意一點 P

處之電位。由此計算該點處之電場強度。另用一法，亦可計得其值，即先分別計算電偶中各電荷在該點處之電場，再以向量法相加而得。

(21,11) 電偶在均勻電場中，其電軸與場向之交角不大時，荷不受其他之影響，則恆能作簡諧運動，試證之，并計算其週期。

(21,12) 一玻璃棒質量為 10 [克]，長為 2 [厘米]，二端荷有等量而異號之電荷，其值各為 10 [靜電單位]，在一不均勻之電場中，順其軸向而以等加速作直線運動，在 10 [秒] 鐘內前進 500 [厘米]。試計算在場向上每 [厘米] 內強度變化之值。

(21,13) 甲球之半徑為 10 [厘米]，乙球為 5 [厘米]，甲球荷電 +20 [靜電單位]，乙球荷電 -30 [靜電單位]，二球相隔某距離，而各自獨立絕緣。今將二球相觸，而仍攜歸原位。試計算相觸前後二球間引力之比。

(21,14) 有甲乙丙三球，其電容量順次為 100, 200, 300 [厘米]，所荷之電量順次為 300, 200, 100 [靜電單位]。今以金屬線連結之。試計算其公共之電位，及金屬線中流過之電量。

(21,15) 甲乙二球之半徑不等，甲球荷電，而乙球則否。今以一導線將二球連結之，試證二球此時電荷之表面密度反比於其半徑。

(21,16) 若干絕緣之小球分列於一圓周上，大小參差不等，各荷有多寡不同之電量，而其電位亦各不相等。若以極

細之導線將諸球一一連結之,其圓心處之電位不變,試證之,該點處之電場強度變否?

(21,17)一球之半徑為 r ,荷有電量 $+e$,試計算球內,球面上及球外一點之電位.若於此球外包一未荷電之同心球,半徑為 r' ,彼此各自絕緣,則二球應發生若何變化!球心處之電位因之改變否?若以一線將外球之表面與地連通,則應有何種變化發生?球心之電位若何?試一一計算其值.

(21,18)試證二同心球之電容量為 $4\pi r r' / (r' - r)$, r 為內球之半徑, r' 為外球之半徑;其內球絕緣,外球之表面與地接連.

(21,19)試證上題二球面間任意一點之電位為 $e/d - e/r'$,其 e 為內球所荷之電量, d 為該點與公共球心間之距離.

(21,20)有一球形之水滴,直徑為 2[毫米],荷有電量,其電位為 100[靜電單位].其電量若干?若將相同之二水滴合併而成一較大之水滴,假設其電量毫不消失,則其電位若干?又若將相同之三水滴合併,則電位若干?

(21,21)二水平金屬平面片之面積各為 F ,其間之距離為 d ,下片與地面相連,而上片則荷電至 $+V$ [伏特].一小球之半徑為 r ,比重為 ρ ,荷有 $-e$ [靜電單位]之電量,止息於下片之上;若任其自由,則小球將作若何運動?若小球以初速 v 自外方沿水平方向射入二片之間,則其運動又若何?

(21,22)上題之二金屬片各具一小孔,上下相對,小球適能在孔中通過.小球自上片之上 h 高度處自由下落,通過

小孔而入此容電器中,試詳細討論其運動。

(21,23)轉動容電器(如第200圖所示)共有導片10片,每片均作半圓形,半徑為5[厘米],每二片間之距離為0,4[毫米],中為空氣。試計算其最大之電容量。由此轉過 30° 後其電容量為若干?

(21,24)一容電器之電容量為 c_1 ,先使荷電,隨即將其放電。其後復使其荷電至與前相同之電位,而與另一未荷電之容電器相連,俾有一部份之電量放入此新容電器中,新容電器之電容量為 c_2 。最後,仍將此二器分離,而任其各自放電。試證此四次放電時能量之比為 $(c_1+c_2)^2 : c_2(c_1+c_2) : c_1^2 : c_1c_2$ 。

(21,25)甲球荷電,其半徑為 r ;乙球未荷電其半徑為 r' 。今以一導線連接之;當其在將連未連之時,每見有一極微之火花。試證火花中消費之能量為原來能量之 $\frac{r'}{r+r'}$ 。

(21,26)有一導片容電器,共有15片,每片之面積為60[厘米]²,每二片相距1[毫米],中為空氣;另有一器,共有10片,每片之面積亦為60[厘米]²,每二片之間夾以0,5[毫米]厚之雲母片,雲母之介電係數為8。試計算將二者並聯及串聯時之電容量。

(21,27)二導片之面積均為1000[厘米]²相距1[厘米],中為雲母。使其荷電時共費100[爾格]之工作。試計算二片間之電壓及其相引之力。

(21,28) 肥皂泡荷電後,其表面之各面積元均將因之感受一沿輻向外之力. 設其半徑為 r , 荷電後之電位為 U , 試計算此時泡中氣體之壓力, 肥皂膜之表面張力為 θ .

(21,29) 有若干電容量不同之導體, 以某定量之電量分配於其間, 使各導體荷電. 各導體之電位相等時, 其能量之和為最小, 試證之



第二十二章

(22,1) 有一均勻之導體片，厚為 d ，自此挖取一扁平之圓環，其內半徑為 r ，外半徑為 r' 。(a) 以其二平面接至電極，及 (b) 將環緣之一處沿幅正截之，而以其二截面接至電極時，電阻各為若干？

(22,2) 均勻圓錐體底面之半徑為 3 [毫米]，高為 3 [米]，於其自頂點算起 $1/3$ 高度處正截之，俾成二段。設電阻係數為 $0,5 \cdot 10^4$ [歐姆]·[厘米]，試計算此二段之電阻。

(22,3) 某電路中之電阻增加 3 [歐姆] 時，其電流即降至原值之 $5/6$ 。試計算其原來之電阻。若欲將電流降至原值之半，須更加電阻若干 [歐姆]？

(22,4) 有一均勻之導線，電阻為 12 [歐姆]，彎作圓形，於其相距一象限之二點處以另一導線及一電流源連結之，該導線之電阻為 1 [歐姆]，電流源之電動勢為 3 [伏特]。試計算各部份電路中之電流。

(22,5) 有電流源三，電動勢各為 E_1, E_2, E_3 ，以三導線將其陽極同連於一點，另以三導線將其陰極同連於另一點。若此，則電路分成三支，各支之電阻設順次為 R_1, R_2, R_3 。試證三支中之電流為 $i_1 = \frac{E_1(R_2 + R_3) - E_2R_3 - E_3R_1}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}$ ，餘類推。

(22,6) 有相同之導線 12 條，每條之電阻為 6 [歐姆]，組成

一立方體之稜。今於其對角之二角頂間施以 30 [伏特] 之電壓，試計算該組導線之總電阻，各導線兩端之電壓及電流。

(22,7) 相同之導線 9 條，每條之電阻為 6 [歐姆]，組成一六面體，各面為一正三角形。試計算以其任意二角頂接至電極時之總電阻。

(22,8) 在 § 250, 第 220 圖中，於 R_1 之二端另以一電阻 R_3 與之並聯，試比較未聯以前及既聯以後該二點間之電壓。

(22,9) 電報線之電桿絕緣不佳，設導線每一支點與地面間之電阻為 r' ，而連續二電桿間一段導線之電阻為 r ，地面可視為一良導體。試證

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r + \frac{1}{\frac{1}{r'} + \frac{1}{r + \frac{1}{\frac{1}{r'} + \dots}}}}$$

其 R 為自第一電桿起至最終之地桿止，全部電報線網之總電阻。

(22,10) 有一 110 [伏特] 之電燈泡，電阻為 200 [歐姆]，今欲以 220 [伏特] 之電壓使用之，試設計應若何處理。

(22,11) Thomson 氏電橋 (§ 252, 第 224 圖) 中，若撤消 R_3 ： $R_3' = R_4$ ； R_4' 之條件，則普遍言之，電流計支路中無電流流過時， $(R_3' + R_4') (R_1 R_4 - R_3 R_2) + R_0 \{ R_4 (R_1 + R_3') - R_3 (R_2 + R_4') \} = 0$ ，其 R_0 為 b, c 二點間極小之電阻，試證之。

(22,12) $A-BCD$ 爲一四面體, AB 間有一電阻 R_1 , BC 間有一電阻 R_2 , CD 間有一電阻 R_3 , DA 間有一電阻 R_4 , AC 間爲一電流源, 其電動勢爲 E , 電阻爲 R_E , BD 間有一電流計, 其電阻爲 R_g . 試計算各路中之電流. R_g 中之電流爲零時, 有何種簡單之關係成立!

(22,13) 有相同之二電池, 串聯而接至一導線時, 其電流爲 $0,28$ [安培], 並聯而接至此同線時, 其電流爲 $0,2$ [安培]. 試證導線之電阻 3 倍於各電池之內電阻.

(22,14) 一電池之電動勢爲 2 [伏特], 內電阻爲 $0,1$ [歐姆]. 以此種電池不論多寡串聯時, 其最強之電流不逾 20 [安培], 試證之.

(22,15) 將 n 個電池或用串聯法, 或用並聯法, 或二法並用, 連成一電池組, 其內電阻等於電路中之外電阻時, 電流爲最強, 試證之.

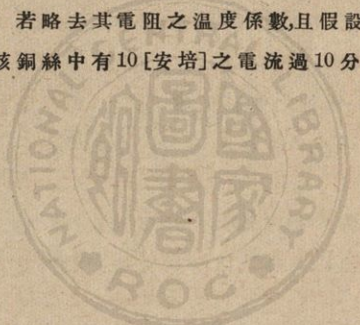
(22,16) 試以 § 259 [內電阻] 法計算 (22,4) 及 (22,5) 二題.

(22,17) 二導體相並聯, 遇有某定值之電流經過時, 二導體中電流強弱之比恆按 Ohm 氏定律而分配. 若不按此律而分配, 則二導體中所生之熱量將較依據 Ohm 氏定律時爲增, 試證之.

(22,18) 二導體相串聯, 接至電流源之二極. 若電流源之內電阻適爲二導體電阻之比例中數, 則同時間內二導體中所生之熱量相等, 試證之.

(22,19) 一圈導線之電阻爲 10[歐姆], 浸於一量熱計之水中, 水之質量爲 100[克], 量熱計之水當量爲 20[克]. 將線圈接至一電池組之二極, 其電動勢爲 6[伏特], 內電阻爲 1[歐姆]; 半小時後, 量熱計中水之溫度增高若干?

(22,20) 一銅絲, 長 1[米], 截面之半徑爲 1[毫米], 上端固定, 下端連於一指針之尾端(絕緣), 指針之支點與其尾端相距 1[厘米]. 若略去其電阻之溫度係數, 且假設熱能毫不消失, 試計算該銅絲中有 10[安培]之電流過 10 分鐘後, 指針轉過之度數.



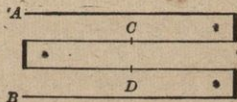
第二十三,二十四章

(23,1) Daniell 氏電池以銅與鋅二電極分浸於硫酸銅及硫酸鋅溶液而成。設以三電池及一銀解電量計串聯,歷一小時後電量計中有 50[克]之銀析出,試計算此時三電池中共有若干[克]之銅澱積於銅極之上,若干[克]之鋅溶入液中。

(23,2) 水解電量計之二管在水面上露出之部份各長 1 [米]橫截面積為 1 [厘米]², 未通電流以前滿儲以水,而倒立水槽中。通以 1[安培]之電流歷 1[小時]後,試計算二管中水面之高度。室內溫度為 20°,氣壓為 76[厘米],均常定不變。20° 時之水汽壓為 17,5[毫米]水銀柱。

(23,3) 電池之電動勢為 1,5[伏特],內電阻為 1[歐姆],與一可變電阻 R 相連接。試作一圖,示明 R 之值變更時,電池二極間之電壓隨之變更之關係。

(23,4) 相同之均勻導線 4 條,各長 1[米],串聯如右圖所示;連接之處極闊大,可視為無電阻。以導線(亦視為無電阻)將 A 端



連至一蓄電池組之陽極, B 端至陰極。更以導線將 A 端經過一電流計而連至一 Weston 氏電池之陽極,第二導線之中點 C 則連至其陰極,此時電流計中適無電流。若 Weston 氏

電池易以一未知之新電池，則其陰極之連線須自 C 點移至第三導線之中點 D ，電流計中方無電流。試計算此新電池之電動勢。



第二十五章

(25,1) 一極小之磁針，水平懸於一絲線之下端。在此子午面內同一高度處另置一磁棒，其長為 $2l$ ，磁矩為 M ，磁軸東西向，其中點與磁針之懸點相距為 d 。設地磁場之水平分量為 H ，磁針因之轉過之角度為 α ，則 $M/H = (d^2 + l^2)^{3/2} \operatorname{tg} \alpha$ ，試證之。

(25,2) 磁棒之磁矩為 M ，支於其中點，對於一通過此中點而垂直於其磁軸之直線之轉動慣量為 J ，靜止於一磁場 H 之中時，稍受擾動後，若不遇任何機械阻力，則恆能作簡諧運動而不息，試證之，并證其週期為 $\tau = 2\pi\sqrt{J/(MH)}$ 。

(25,3) 磁棒之磁極僅為一理想之點，且單磁極之強度亦無法實測，試設計若何可測定一磁棒之磁矩 $M = 2ml$ 之值。

(25,4) 甲處之磁傾角為 60° ，乙處為 45° 。今將一磁針置甲處，任其自由擺動，每分鐘內擺動 50 次；置乙處，則擺動 55 次。試比較甲乙二處地磁場之強度。

(25,5) 設磁針在其子午面內之磁傾角為 θ ，將其自此面向側轉過 α 角後，其磁傾角變為 θ' ，試證

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \theta' \cos \alpha.$$

(25,6) 有二磁棒，其一棒之磁矩適二倍於他棒；二者互相固結，一棒之中心及磁軸適鉛直在他棒之中心及磁軸之上，

而此全部物體懸於一細金屬絲之下端，二棒水平。二棒之南北極反向時，欲使其自子午面向側轉過 30° 之角，須將懸絲之頂轉過 75° 。若二棒之南北極同向，而欲使其轉至與子午面垂直，則須將懸絲之頂轉過 360° ，試證之。

(25,7) 一磁針之磁矩為 300 c. g. s. 單位，水平支於其中點，毫無摩擦阻力。地磁場之水平強度為 $0,18 \text{ c. g. s.}$ 單位，今將其子午面向側轉過 60° ，試計算當其回至原位時所能作之工為若干[爾格]

(25,8) 甲乙二磁棒，磁矩相等，互相垂直而相距甚遠，甲棒磁軸之延長線通過乙棒之中心。略去地磁場不計，試計算二棒彼此作用之力矩之比。若二棒固定於一板上，而板浮水中，則板將因之轉動否！何故！

(25,9) 一圓形線圈之半徑為 r ，通過其圓心作一直線，垂直於圓面，在直線上取一點 P ，與圓心相距為 d 。試計算線圈中有電流 i 流過時 P 點之磁場。

(25,10) 試證明 § 304, (9), (10), (11) 三式。

(25,11) 有一圓形線圈，其平面與地磁子午線垂直，在其中心處置一磁針。線圈中無電流時，磁針每分鐘內能擺動40次，有電流 i_1 流過時，擺動30次，電流為 i_2 時，20次。試計算 i_1 與 i_2 之比。

(25,12) 一金屬圓板之半徑為 r ，均勻荷電，其表面密度為 ρ ，繞一通過其中心而垂直於板面之軸而轉動，每秒鐘內

之頻率為 n 次。在軸上取一點 P ，與圓心相距為 d 。試計算 P 點之磁場強度。

(25,13) 一極大極長之螺線管，每[厘米]內各有線圈 5 圈，斜置於空中，其管軸與鉛直線間之交角為 30° 。假設有二質點在管外空中自由下落，質量皆為 10 [克]，一荷陽電量 +10 [靜電單位]，一為單獨之陽磁極，其強度為 +10；二質點同時自螺線管之側落入管中，二者在管外均自離此 4.9 [米] 高度處落下。線圈中有 5 [安培] 之電流流過，略去地球之磁場，試計算此二質點之運動。

(25,14) 一電場，強度為 E [伏特]/[厘米]，及一磁場，強度為 H [高斯]，相重於一處，二場之力線適互相垂直。一電荷子垂直於此二向，而以速度 v [厘米]/[秒] 在場中運動。若欲使其運動方向始終不變，則二場之強度間須有 $10^8 E = vH$ 之關係存在，試證之。

(25,15) 一質點之質量為 m ，荷電 e ，在真空中能對於一靜止位置發生振動，其頻率為 ν 。真空中有一磁場 H 時，若場向與振動之方向垂直，則其頻率將為 $\sqrt{\nu + \left(\frac{1}{2} e/m \cdot H\right)^2} \pm \frac{1}{2} e/m \cdot H$ ，場向若與之平行，則頻率不變，試證之。

(25,16) 天平一臂之長為 l ，其端懸有一盤，以備納入砝碼之用；其他臂極長，有一小螺線管固結於其端，管軸鉛直，由 N 圈之線圈繞成，每圈之半徑為 r 。此臂伸入一極長而固

定之水平大螺線管中，該管每[厘米]內有線圈 n 圈，小螺線管在大管內部，互不相觸，二管軸互相垂直，且以一導線連通之，使成串聯。電流未通以前，天平之二臂平衡。通以電流 i 後，懸盤內所加之砝碼為 m 。試證

$$i = \frac{1}{4\pi r} \cdot \sqrt{\frac{lmg}{nN}} = (\text{常數}) \cdot \sqrt{m}$$

(25,17) 一矩形線圈以 n 圈之導線繞成，矩形之長為 a ，闊為 b ；於 b 之中點處以一金屬絲懸之， a 邊鉛直， b 邊水平。金屬絲之長為 l ，截面為圓形，半徑為 r ，扭轉彈性係數為 G 。此線圈在一均勻磁場 H 之中，場向與線圈面平行。線圈內有電流 i 流過時，矩形之平面即因之自其靜止位置轉過 φ 角。試證

$$i = \frac{\pi r^4 G}{2 n a b l H} \cdot \varphi = (\text{常數}) \cdot \varphi$$

(25,18) 汽車前部之金屬槓長 l [米]。車在平地上以常定速度 25 [米]/[秒] 向北疾馳，該處地磁場之強度為 0.6 [高斯]，磁傾角為 60° 。試計算金屬槓兩端間所生之應電動勢為若干[伏特]，並定出其方向。

(25,19) 將一均勻之導線彎成 V 形，另一相同之導線橫臥於其上，成一等腰三角形，以定速 v 向角頂時時平行於該段導線之本身而運動，滑動接觸處無電阻。導線每[厘米]長之電阻為 ρ 。磁場之強度為 H ，方向與 V 形之面以 α 角相交。試計算在任意一瞬間該導線圈中之電流為若干[安

培].

(25,20) 一水平金屬圓片之直徑為 60[厘米],繞一通過圓心之鉛直線而轉動,每秒鐘內轉過 20 次. 地磁場之強度與磁傾角均與(25,18)同. 試計算導線兩端間之電壓.

(25,21) 一圓形導線圈之半徑為 r [厘米],電阻為 ω [歐姆],繞其一直徑於每秒鐘內均勻轉動 n 次,該直徑與地磁場之方向垂直. 圓心處置一磁針,可任意轉動. 試計算任意一瞬間磁針自其子午面偏過之角度.

(25,22) 上題中之導線圈面初若與場向垂直,問轉過 180° 後線圈中流過之總電量若干[庫侖]? 場之強度為 H [高斯].

(25,23) 上題中線圈之轉動軸若不與地磁場之方向垂直,而為鉛直,線圈之面正對南北,轉過 180° 後,設其中流過之總電量為 e_1 . 其後將其轉動軸改為水平,線圈面仍正對南北,轉過 180° 後,流過之總電量為 e_2 . 試由此計算該處地磁場之強度及磁傾角.

(25,24) 設上題中導線圈之質量為 m ,試計算鉛直軸及水平軸二種情形中線圈初轉時之角加速度.

(25,25) 螺線管每[厘米]長中各有線圈 n 圈,其外繞一副線圈,二者互相絕緣. 副線圈共有 N 圈,各圈之面積為 F ,試計算原線圈中電流變化時對於副線圈之互感係數.

第二十六章

(26,1)一圓柱狀磁鐵之長為 1 [米], 截面之直徑為 2 [毫米], 其磁矩為 616 c. g. s. 單位. 試計算其磁極強度, 磁化強度, 及磁鐵內部磁力線之總數.

(26,2)一螺線管之長為 L , 共有線圈 N 圈, 管軸水平而南北向. 管之中央有一小磁針, 可在水平面內擺動自如. 線圈內有電流 i 流過. 管中為真空時, 磁針之擺動週期為 τ_1 , 管中為某種氣體時, 其週期為 τ_2 . 試計算該氣體之磁化係數. 已知地磁場之水平強度為 H .

(26,3)有一錨環狀之螺線管, 管之半徑為 2 [厘米], 環軸之半徑為 10 [厘米], 共有線圈 100 匝. 管中為空氣. 試計算有電流 1 [安培] 流過時管中之磁場強度及力線總數. 又該線圈之自感係數為若干 [亨利]?

(26,4)上題之螺線管若係繞於一鐵環之上, 而該螺線管之外又繞一螺線管, 彼此絕緣, 亦有線圈 100 匝. 鐵之導磁係數為 200. 試計算此二線圈之互感係數為若干 [亨利]. 又若一螺線管中有常定電流 1 [安培] 流過時, 鐵環中之靜磁感應強度為若干 [高斯], 管中共有磁力線若干條?

(26,5)有一鐵絲, 長為 50 [厘米], 橫截面積為 $0,02$ [厘米]², 鉛直置於空中. 自其上端水平向東 10 [厘米] 之處, 懸有小

磁針,其北極向東偏轉 $14^{\circ}2'$ 。(假設此僅由於鐵絲上端之作用,鐵絲之下端相距頗遠,可視為毫無影響。)已知地磁場之水平強度為 $0,18$ [高斯],磁傾角為 67° 。試計算鐵絲之靜磁感應強度,磁化強度,導磁係數,磁化係數及磁距。

(26,6)一鐵環之平均半徑為 10 [厘米],橫截面之面積為 12 [厘米]²,其外均勻繞有 1200 匝之絕緣導線。環有一隙,闊為 1 [毫米];導線中有電流 1 [安培]。鐵之導磁係數為 700 。試計算空氣隙中之磁通。

(26,7)有鐵條三條,甲長 $l_1=10$ [厘米],橫截面積為 $q_1=3$ [厘米]²,導磁係數 $\mu_1=2000$,乙之 $l_2=20$ [厘米], $q_2=2$ [厘米]², $\mu_2=2500$,丙之 $l_3=30$ [厘米], $q_3=1$ [厘米]², $\mu_3=3000$ 。試計算(a)三者串聯,(b)三者並聯,(c)甲乙串聯而與丙並聯,三種情形中之磁阻總值。

(26,8)設上題磁路二端之磁壓為 100000 [高斯][厘米],試計算三種情形中各鐵條內之磁力線各有若干。

第二十七章

(27,1)今欲作一正切電流計,使磁針所示之角度之正切值即直接等於電流之[安培]數;線圈共用10匝,地磁場之水平強度為0,19[高斯]. 問線圈之半徑須為若干[厘米]!

(27,2)一電池,一電阻及一正切電流計三者串聯成一電路. 電阻為 R_1 時,電流計之示度為 α_1 ,電阻為 R_2 時,示度為 α_2 . 已知電流計線圈之內電阻為 R_g ,試證電池之內電阻為 $(R_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - R_2 \operatorname{tg} \alpha_2) / (\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1) - R_g$.

(27,3)設有電阻自1[歐姆]起至1000[歐姆]止,其兩端間之電壓相同. 今欲以同一伏特計測量之,務使其所示之值相差不逾1/1000,問該伏特計中至少須有串聯電阻若干!

(27,4)有一「毫安培計」,其面上共有刻度50度,每度為5[毫安培],其中線圈之電阻為40[歐姆]. 今欲以之改作一伏特計,最高可測至300[伏特],試設計處理之.

(27,5)若欲將上題中之毫安培計改作安培計,使每度恰為1[安培],問應若何處理之!

第二十八章

(28,1)一線圈之電阻頗小,可略去不計,與一電阻 15 [歐姆]相串聯,其兩端接至一 50 [伏特]之交流電源,其頻率為每秒 25 次. 電阻部份之交流電壓為 30 [伏特]. 試證線圈之自感係數為 $2/5\pi$ [亨利].

(28,2)試計算上題電路中電壓與電流位相之差,何者趨前? 又電工率為若干 [瓦特]?

(28,3)一 100 [伏特]之電燈與一 4 [微法拉]之容電器相串聯,電路中有一 $1/4$ [安培]之交流電流流過,其頻率為每秒 50 次. 試計算交流之電壓.

(28,4)一容電器由 11 片之導片所成,每片之面積為 50 [厘米],其間以 0,2 [毫米]厚之雲母片一一隔離之. 荷電後,放電於一 5 [厘米]長之螺線管中,管由 100 匝之線圈繞成,管之直徑為 2 [厘米],電阻極小,可略去不計. 試計算此時發射電磁波之波長.

第二十九章

(29,1) 試計算地面上能見日全蝕之區域之面積。(假定該區域內之地面爲一平面。)

(29,2) 月蝕時,自初蝕至復明歷時若干?(地球之自轉與公轉略去不計。)

(29,3) 有一點狀光源,其強度爲100[燭光],位於一空圓球之中心,球之半徑爲10[厘米]。球之內壁爲純黑色,光線遇之,悉被吸收無遺。球殼上有一圓形小孔,其直徑爲1[厘米]。試計算自小孔射出之光通量,及球殼一小時內所吸收之能量。設有一球面之光屏置於小孔之外,其曲率半徑爲30[厘米],曲率中心與球殼中心相合,試計算該光屏上之照度。

(29,4) 有甲乙二路燈相距10[米],離地面5[米],甲燈之強度爲100[燭光],乙燈爲90[燭光]。一人行於二燈之間,其與甲燈在地面上之垂線足相距4[米]。假設二燈皆爲點狀光源,問人影將在何方? 試計算人影之長,以及其足部附近影內與影外照度之比。

(29,5) 有平面鏡二,各繞鉛直之軸而轉動,每秒鐘內甲繞10次,乙繞15次。10[米]之外置一平面之鉛直光屏。一水平光線連續爲甲乙二鏡反射後,即射至光屏之上。設二鏡(a)同向,(b)反向,轉動,試計算光屏上光點移動之速度。

(29,6)設有二鏡相交,其交角爲常定,可繞其交線而轉動.在垂直於此交線之平面內,設有一光線連續爲二鏡所反射.試證不問此相交之平面鏡組轉動與否,其反射光線之方向常恆定不變.

(29,7)月明之夜,海面輕波,每見一道銀光,直向月之方向延展,試繪圖詳釋其理.

以下自(29,8)起至(29,23)止,解題時均須作圖!

(29,8)凹鏡之前50[厘米]處,倒懸一束鮮花,100[厘米]處置一花瓶.人在鏡前注視花瓶時,適見鮮花插於瓶中,問凹鏡之曲率半徑若干!

(29,9)凹鏡之曲率半徑爲10[厘米].一正方形之紙片,每邊長1[厘米],置於鏡前,鏡軸與正方形之二邊平行,且通過紙之中心.正方形最近之一邊與鏡面中心相距25[厘米].試計算鏡中所見該紙片每邊之長.

(29,10)一圓片狀之光源,直徑爲1[厘米],置於一凹鏡之前,作爲探照燈之用.凹鏡之曲率半徑爲20[厘米].設空中有一飛機,其翼之長爲20[米],恰爲此燈射出之光全部照耀,清晰異常.試計算飛機之高及光源之位置.

(29,11)有凹凸二鏡,鏡面相向,鏡軸相合,其鏡面中心相距10[厘米],各鏡之曲率半徑均爲10[厘米].一實物之長爲1[厘米],置於二鏡間之公共鏡軸上,離凹鏡7[厘米].試計算像之位置與大小.爲虛像,抑爲實像!

(29,12) 試以反射定律證明凹鏡之焦散曲線爲一外擺線

(29,13) 光線對稱穿過稜鏡,即入射角等於出射角時,其偏向角爲最小. 試證之.

(29,14) 一槽中滿儲以水,深10[厘米],槽底置一點狀光源. 水之折射率爲1,33. 今欲於水面上浮一紙片,俾人自水面上無論何處望之,均不見光線,問該紙片應作何形,其大小如何!

(29,15) 一玻璃透鏡之兩面均爲凸球面,曲率半徑均爲10[厘米]. 一物體在鏡軸上離鏡面20[厘米],問像在何處! 若將透鏡與物體同浸水中,二者間之距離仍舊,則此時像又在何處! 玻璃之折射率爲1,5,水之折射率爲1,3.

(29,16) 實物與光屏間之距離爲 l ,一透鏡適將實物之像清晰投於屏上. 將透鏡移過 d 距離後,屏上復現一清晰之像. 試計算二次之像大小之比,并證透鏡之焦距爲 $(l^2 - d^2) / 4l$. 透鏡尙有其他適當之位置可將實物投射清晰之像否! 何故!

(29,17) 凡光線穿過透鏡後僅向側移過少許而不變其原向者,其在透鏡內部所經之路線與鏡軸之交點 C 稱爲透鏡之鏡心. 設 O_1 與 O_2 爲透鏡二界面之曲率中心, r_1 與 r_2 爲曲率半徑,則 $O_1C : O_2C = r_1 : r_2$. 試證之.

(29,18) 有一會聚透鏡,其焦距爲10[厘米],一發散透鏡,

其焦距爲4[厘米],二者相距7[厘米],其鏡軸在同一直線上。一實物在鏡軸上會聚透鏡之前100[米]處,以定速向鏡面移動,於2秒鐘內移過10[米],試計算其像移動之平均速度。若實物之長爲2[米],試計算像之大小變化之平均速度。

(29,19)二薄透鏡之焦距各爲 f_1 與 f_2 ,其鏡軸在同一直線上。設二者相距爲 d ,此透鏡組之焦距爲 F ,則 $1/F=1/f_1+1/f_2-d/f_1f_2$,試證之。若二者相接,則如何?由此并證明任意個透鏡相接時,其透鏡組之焦距爲 $1/\Sigma(1/f)$ 。

(29,20)凸透鏡成像時,實物與其像間之距離決不小於透鏡焦距之4倍,試證之。

(29,21)一照相機攝遠景時,其毛玻璃片與鏡頭相距10[厘米]。若欲攝近物,應將其暗箱拉長抑縮短?設暗箱拉至最長時,其毛玻璃片與鏡頭間之距離爲12[厘米]。試計算該機所能照相之景物至少須在鏡頭前若干[厘米]以外。又所得之像最大不過原物之幾倍?物與像能同大否?若不能,應用何法補救之?

(29,22)自一望遠鏡觀察星體時,其物鏡與目鏡間之距離爲50[厘米]。用以觀察地面上之遠物時,須將目鏡拉出0,2[厘米],方見清晰之像。設目鏡之焦距爲1[厘米],實物之長爲3[米],試計算實物離觀察者之遠近,及鏡中所見像之視角。

(29,23)白光透過稜鏡時,恆因色散作用而有光譜出現,

其二邊之色爲紅與紫，中部爲黃。設紅色光線(例如 A 線)之最小偏向角爲 δ_A ，稜鏡物質之折射率爲 n_A ，紫色光線(例如 F 線)者爲 δ_F 與 n_F ，黃色光線(例如 D 線)者爲 δ_D 與 n_D 。命紅紫二光線經過稜鏡後以 δ 角相交，則 $d = \delta / \delta_D$ 稱爲稜鏡之色散率。試證其值爲 $d = (n_F - n_C) / (n_D - 1)$ 。

(29,24) 冕牌玻璃之 $n_D = 1.51, n_F = 1.52$; 火石玻璃之 $n_D = 1.64, n_F = 1.66$ 。今欲以一冕牌玻璃之雙凸透鏡及一火石玻璃之平凹透鏡合成一消色差之透鏡組，凸面適與凹面相貼合，而透鏡組之焦距爲 50[厘米]。試證雙凸面及凹面之曲率半徑均應爲 19[厘米]。

第三十章

(30,1) 白光自一狹縫射至互相平行之他二狹縫,此後者二狹縫間之距離為0.2[毫米]. 在100[厘米]以外,置一光屏,則屏上即有自紅而紫之光譜出現. 試計算第一級與第二級光譜之闊,及二光譜相隔之距離. (光譜二邊紅紫二色之波長為0,00004與0,00008[厘米].)

(30,2) 設 Fresnel 氏雙鏡之交角為 α , 光源至雙鏡交線之距離為 d , 交線至光屏之距離為 l , 屏上相鄰二明紋間之距離為 x , 則光源所發光線之波長為 $\lambda = 2dax / (d+l)$, 試證之. (α 角頗小.)

(30,3) 設 Fresnel 氏雙稜鏡之尖角為 α , 光源 L 至稜鏡之距離為 d , 稜鏡至光屏之距離為 l , 稜鏡物質之折射率為 n , 屏上相鄰二明紋間之距離為 x , 則光源所發光線之波長為 $\lambda = 2dax(n-1) / (d+l)$, 試證之. (此處所涉之角皆為頗小, 其 \sin 與 \tan 之值均可以角度本身代之. L, L_1 與 L_2 可視為在同一直線上.)

(30,4) 置一平凸透鏡於一平面玻璃板上, 而以單色光垂直照之, 即見 Newton 氏干涉圈. 設透鏡之曲率半徑為 r , 單色光之波長為 λ , 則在反射光中所見自中心算起第 n 個暗圈之半徑為 $\sqrt{n\lambda r}$, 試證之.

(30,5) 設平凸透鏡凸面之曲率半徑爲 5[米], 以其凸面置於一平面玻璃板之上, 而此板又支於一金屬棒之上端, 棒長 50[厘米], 其下端固定。全部裝置在一暗室中, 而以黃色之光垂直照於透鏡平面之上, 黃色光之波長爲 0,00005 [厘米]。人自上方觀之, 見有明暗相間之 Newton 氏圈出現; 設將顯微鏡中之叉絲準對其第 25 圈。金屬棒之溫度增加 5° 時, 顯微鏡中即見有 10 個干涉圈經過叉絲而向外移動。何故? 試計算金屬棒之膨脹係數。透鏡與顯微鏡之位置均固定不動, 透鏡物質之折射率爲 1,5。

(30,6) 設有平面玻璃板二, 其交角及距離均可任意改變。若何可得 (a) 直線 (b) 圓形之干涉紋? 試詳述其裝置之法, 并說明若何測量其交角及距離。

(30,7) Jamin 氏干涉儀之二管中儲有相同之氣體, 折射率爲 n_0 , 管長爲 l 。一管中氣體之壓力變遷時, 即見有 z 條之干涉紋經過觀測顯微鏡之叉絲而向一方移動。試計算此時氣體折射率變遷之值。

(30,8) 鈉光譜中 D_1 與 D_2 二譜線之波長爲 5896,15 與 5890,18[ÅE]。繞射光柵每 [厘米] 內共有 500 條之刻紋。試計算 10[米] 以外光屏上第二級光譜中該二譜線間之距離。

(30,9) 白光光譜二邊紅紫二色之波長設爲 7000 與 4000 [ÅE]。若用繞射光柵, 則僅第一級之光譜可與其他諸級分開, 自第二級以上, 皆彼此重疊, 試證之。

(30,10) 有所謂 Rowland 氏凹面光柵者，於凹面反射鏡上刻成等距之裂痕而成。設凹鏡之曲率半徑為 R ，以 R 為直徑作圓，而置狹縫於圓周上之一點，以平行光線照之，則各級之光譜皆分列於此圓周之上，且皆極清晰，生需透鏡之助，試證之。命 α 為自凹鏡至狹縫及至第 z 級光譜二連線間之夾角， a 為光柵常數， λ 為平行光線之波長，試證 § 447 (6) 式在此處亦為合理。

(30,11) 設有一 Rowland 氏凹面光柵，曲率半徑為 4 [米]，以黃色光照之，其波長為 0.00005 [厘米]。第二級光譜與狹縫相距 300 [厘米]，試計算凹面鏡上各裂痕間之距離。

(30,12) 氫光譜中 F 線之波長為 4861 [Å]。某恆星光譜之 F 線向紫色一端移過 0.1 [Å]，問該星在吾人視線中運動之方向若何？并計算該星在此方向內之速度。

(30,13) 方解石之 $n_o=1.66$ ， $n_e=1.49$ 。設有一平行平面之方解石片，厚為 1 [毫米]，其光軸與片面平行。今以平面偏極光照射之，光之振動平面與光軸成 30° 之交角。試計算由此透射而出之尋常與非常二光線強度之比，及二者位相之差。

(30,14) 上題中之方解石片設為一光線所照射，其入射角為 60° ，光軸且在入射面以內。試計算尋常與非常二光線此片中之折射角。

人名索引

A

Abbe § 426.
L' Alembert §§ 26, 42
Ampère §§ 302, 312
Arago §§ 334, 453.
Archimedes § 89.
Arrhenius §§ 189, 464.
D'Arsonval § 365.
Aston § 517.
Avogadro §§ 95, 156.

B

Babinet §§ 445, 453.
Bacon § 156.
von Baeyer § 468.
Balmer § 496.
Barkhausen § 352.
Bequerel, A. H. § 519.
Bernoulli, Daniel §§ 94, 109, 211.
Biot § 304.
Bohr §§ 494, 501, 512.
Du Bois § 364.
Boltzmann §§ 156, 195, 484.
Bolyai § 544.
Born §§ 511, 514, 533.
Bose § 515.
Bothe § 524.
Boyle §§ 98, 162, 442.
Brackett § 496.
Bradley § 399.
Bragg, W. H. and W. L. §§ 471, 472.
Braun § 307.
Brewster § 452.
De Broglie § 514.
Brown § 159.
Bunsen §§ 110, 115, 175, 402, 476.

C

Carnot § 200.
Cavendish § 211.
Celsius § 155.
Clapeyron § 177.
Clausius §§ 156, 177, 195.

Cockroft § 524.
Coehn § 262.
Compton § 491.
Coolidge § 470.
Coriolis § 49.
Corti § 152.
Coulomb §§ 211, 295
Crookes § 290.
Curie §§ 353, 519.

D

Dalton § 97.
Daniell § 270.
Davisson § 514.
Davy § 156.
Debye §§ 472, 511.
Deprez § 365.
Descartes § 435.
Donders § 153.
Doppler §§ 129, 146, 451.
Draper § 396.
Dufay § 209.
Dulong § 170.

E

Eddington § 404.
Ehrenhaft §§ 159, 492.
Eichenwald § 311.
Einstein §§ 159, 352, 488, 489, 511, 515,
532, 540.
Ellis § 519.
Elster § 519.

F

Fajans § 522.
Faraday §§ 224, 269, 290, 317, 460.
Fechner § 401.
Fermat §§ 134, 403.
Fermi § 515.
Foucault §§ 49, 399, 482.
Franck §§ 500, 507.
Franklin § 226.

Franz § 248.
 Fraunhofer §§ 437, 439, 446, 447, 475.
 Fresnel §§ 132, 438, 445, 456, 536.

G

Gaede § 106.
 Galilei §§ 1, 22, 53, 57, 58, 60, 530.
 Galvani § 274.
 Gauss §§ 299, 371.
 Gay Lussac § 162.
 Gehrke § 443.
 Geiger §§ 493, 520, 523.
 Geitel § 519.
 Gerlach § 513.
 Germer § 514.
 Gilbert §§ 209, 262.
 Goldstein § 292.
 Goethe § 477.
 Goudsmit § 512.
 Grimaldi § 435.
 von Guericke §§ 105, 108.

H

De Haas § 352.
 Hagen § 114.
 Hale § 462.
 Hall § 360.
 Heisenberg § 514.
 Helmholtz §§ 42, 145, 152, 153, 192,
 426, 466, 478, 544.
 Henry § 191.
 Hertz, G. §§ 500, 517.
 Hertz, H. §§ 385, 388, 474, 489.
 Hess §§ 465, 473.
 Hettner § 505.
 Hittorff § 290.
 van't Hoff § 189.
 Hooke §§ 82, 442.
 Hubble § 451.
 von Humboldt, A. § 1.
 Huygens, §§ 57, 80, 136, 435, 444, 454.

I

Imes § 505.

J

Jamin § 443.
 Jeans § 483.
 Jordan § 514.
 Joule §§ 42, 172, 185, 193, 260.

K

Kamerlingh Onnes §§ 184, 255.
 Kármán § 511.
 Kayser § 499.
 Kelvin 見 Thomson, W.
 Kepler §§ 63, 66, 411.
 Kerr § 459.
 Ketteler § 466.
 Kirchhoff §§ 249, 476, 477.
 Kossel § 501.
 Krönig § 156.
 Kundt §§ 143, 171.

L

Lambert §§ 400, 401.
 Landsberg § 509.
 Langley § 469.
 Laplace § 304.
 von Lane § 471.
 Löbedew § 464.
 Lecher § 389.
 Lenard §§ 291, 360, 493.
 Lewis § 502.
 Lichtenberg §§ 209, 294.
 Linde § 185.
 Lobatschewski § 544.
 Lorentz, H. A. §§ 462, 533, 535.
 Loschmidt § 96.
 Lo Surdo § 463.
 Lummer §§ 402, 443.
 Lyman § 496.

M

Madelung § 511.
 Magnus § 110.
 Mandelstam § 509.
 Mariotte §§ 98, 110, 162.
 Marsden § 493.
 Maxwell §§ 156, 157, 253, 325, 326, 359,
 388, 435, 461, 466.
 Mayer, Jul. Rob. §§ 42, 192, 193.
 Meitner § 519.
 Mendelejeff § 501.
 Meyer, Lothar § 501.
 Meyer, Victor § 182.
 Michelson §§ 399, 531, 535
 Millikan §§ 469, 492.
 Milne § 464.
 Moseley § 504.

N

Natterer § 184.
 Nernst §§ 149, 173, 199, 256, 274, 360,
 364, 384, 511.
 Newton §§ 22, 23, 27, 29, 63, 65, 66, 67,
 125, 435, 442.
 Nicol § 457.
 Nörrenberg § 458.
 Nuttall § 520.

O

Ohm § 246.
 Oerstedt § 302.
 Ostwald § 477.

P

Papin § 18.
 Pascal § 87.
 Paschen §§ 364, 496.
 Pauli §§ 502, 515.
 Peltier § 263.
 Perrin § 93.
 Petit § 170.
 Planck §§ 195, 435, 483, 488.
 Plücker § 290.
 Poggendorff §§ 276, 364.
 Poiseuille § 114.
 Poisson § 286.
 Poulsen § 391.
 Prandtl § 110.
 Preston § 499.
 Prevost § 480.
 Prout § 518.
 Pythagoras § 147.

Q

Quincke § 142.

R

Raman § 509.
 Raoult § 188.
 Rayleigh §§ 93, 483.
 Richardson § 284.
 Riemann § 544.
 Ritz § 499.
 Rogowski § 331.

Römer § 399.
 Röntgen §§ 311, 470, 519.
 Rowland § 311.
 Rubens §§ 364, 468, 481.
 Rumford § 156.
 Runge § 499.
 Rutherford §§ 519, 524.
 Rydberg §§ 490, 498, 499.

S

Saha § 464.
 Savart § 304.
 Scherrer § 472.
 Schopenhauer § 477.
 Schrödinger § 514.
 Schumann § 469.
 Schweigger § 364.
 Seebeck § 263.
 von Siemens § 373.
 Snellius § 409.
 Soddy § 522.
 Sommerfeld § 516.
 Stark §§ 451, 463.
 Stefan § 484.
 Steiner § 36.
 Stern §§ 156, 513.
 Stiefel § 147.
 Stokes §§ 116, 487, 503.

T

Tesla § 384.
 Thomson, J. J. § 493.
 Thomson, W. (Lord Kelvin) §§ 155,
 172, 234, 252.
 Torricelli §§ 103, 110.
 Townley § 98.
 Townsend § 287.
 Tyndall § 453.

U

Uhlenbeck § 512.

V

Da Vinci, Leonardo § 435.
 Viviani 49.
 Volta §§ 262, 274.

W

- van der Waals §§ 164, 184.
 Walton § 524.
 Warburg §§ 256, 344.
 Watt § 202.
 Weber, Wilh. §§ 313, 371, 401.
 Wegener § 50.
 Wehnelt §§ 290, 372.
 Weiss §§ 351, 512.
 Werkmeister § 147.
 Wheatstone § 252.
 Weidemann § 248.
 Wien §§ 483, 484.
 Wiener § 450.
 Wilke § 168.
 Wilson § 521.
 Wollaston § 475.
 Wood § 458.

Y

- Young §§ 42, 435, 478.

Z

- Zeeman § 462.

A

- D'Alembert 氏原理 § 26.
 Ampère 氏定律 § 312.
 Angström 氏單位 §§ 7, 436.
 Arago 氏點 § 453.
 Archimedes 氏原理 § 89.
 Avogadro 氏定律 § 95.
 Avogadro 常數 § 95.

B

- Babinet 氏點 § 453.
 Babinet 定律 § 445.
 Balmer 氏線系 § 496.
 Barkhausen 氏效應 § 352.
 Behn 氏管 § 104.
 Bernouilli 氏方程式 § 109.
 Biot-Savart 二氏定律 § 304.
 Bohr 氏原子理論 § 494.
 Boltzmann 氏常數 §§ 156, 195, 483.

- Boyle-Mariotte 二氏定律 §§ 98, 164.
 Boyle-Mariotte-Gay Lussac 三氏定律 § 162.
 Brackett 氏線系 § 496.
 Braun 氏管 § 307.
 Brequet 氏螺線 § 160.
 Brewster 氏定律 § 452.
 Bunsen 氏燈 § 115.

C

- Carnot 氏循環過程 § 200.
 Celsius 氏溫標 § 155.
 Clausius-Clapeyron 二氏方程式 § 177.
 Compton 氏效應 § 491.
 Coolidge 氏管 § 470.
 Coriolis 氏力 § 49.
 Corti 氏器官 § 152.
 Coulomb 氏定律, 靜電學 §§ 211, 236.
 Coulomb 磁學 §§ 298, 356.
 Curie 氏點 § 353.

D

- Dalton 氏定律 § 97.
 Debye-Scherrer 二氏法 § 372.
 Dewar 氏瓶 § 198.
 Doppler 氏效應, 概論 § 129.
 Doppler 氏效應, 聲之 § 146.
 Doppler 氏效應, 光之 §§ 451, 534.
 Draper 氏定律 § 396.
 Dulong-Petit 二氏定律 §§ 170, 516.

E

- Einstein 氏相對原理 § 532.
 Einstein 萬有引力定律 § 542.
 Ettingshausen 氏效應 § 360.
 Ettingshausen-Nernst 二氏效應 § 300.

F

- Faraday 氏效應 § 460.
 Faraday 籠 § 224.
 Faraday 定律 § 269.
 Faraday 常數 § 269.
 Fechner 氏定律 § 401.
 Fermat 氏原理 §§ 134, 403.
 Fermi 氏統計 § 515.
 Flettner 氏轉動機 § 110.
 Foucault 氏擺動實驗 § 49.
 Fraunhofer 氏譜線 § 475.
 Fresnel 氏作圖法 §§ 132, 133, 456.
 Fresnel 雙鏡及雙稜鏡 § 438.

G

- Gaede 氏抽氣機 § 106.
Galilei 氏變換式 § 530.
Goethe 氏光色理論 § 477.

H

- Hall 氏效應 § 360.
Heaviside 氏層 § 474.
Helmholtz 氏共鳴器 § 145.
Henry 氏定律 § 191.
Hertz 氏波 § 385.
Hess 氏射線 §§ 465, 473.
Heusler 氏合金 § 342.
Hooke 氏定律 § 82.
Hubble 氏效應 § 451.
Huygens 氏原理, 概論 § 136.
Huygens 光學 § 444.

J

- Johnsen-Rahbek 二氏效應 § 254.
Joule 氏定律 § 260.
Joule 熱 § 260.
Joule 效應, 磁伸縮現象中之, § 342.
Joule-Thomson 二氏效應 §§ 172, 185.

K

- Karlous 氏電管 § 459.
Kelvin 氏溫標 § 155.
Kepler 氏定律 § 66.
Kepler 運動 § 66.
Kerr 氏效應 § 459.
Ketteler-Helmholtz 二氏方程式 § 466.
Kirchhoff 氏定律 § 481.
Kirchhoff 定理 (定則) § 249.
Kleist 氏瓶 § 234.
Kundt 氏管 § 143.
Kundt 粉末圖形 § 143.

L

- Lambert 氏定律 §§ 400, 401.
Laplace 氏定律 § 304.
Laue 氏圖形 § 471.
Lecher 氏導線系 § 389.
Leidenfrost 氏現象 § 198.
Lenard 氏射線 § 291.
Lenz 氏定律 § 329.
Lichtenberg 氏電圖 § 294.

- Linde 氏氣體液化法 § 185.
Lorentz 氏收縮 § 535.
Lorentz 變換式 § 535.
Lorentz 三線 § 462.
Loschmidt 氏常數 § 96.
Lummer-Gehrke 二氏干涉儀 § 443.
Lyman 氏線系 § 496.

M

- MacLeod 氏壓力計 § 105.
Magdeburg 半球 § 106.
Magnus 氏效應 § 110.
Mariotte 氏瓶 § 110.
Maxwell 氏定律 § 157.
Maxwell 方程式 § 359.
Maxwell 折射率關係式 § 468.
Michelson 氏實驗 § 531.
Michelson 干涉儀 § 531.
Mohr 氏秤 § 89.
Moseley 氏定律 § 504.

N

- Natterer 氏管 § 184.
Nernst 氏效應 § 360.
Nernst 熱學理論 § 199.
Nernst-Bechstein 二氏翅形大鋼琴 § 149.
Newton 氏公理 §§ 22, 23, 29.
Newton 萬有引力定律 § 63.
Newton 方程式 (縱波速度) § 125.
Newton 干涉圈 § 442.
Nicol 氏稜晶 § 457.

O

- Ohm 氏定律 § 246.

P

- Papin 氏罐 § 181.
Paschen 氏線系 § 496.
Pauli 氏原理 § 515.
Peltier 氏效應 § 263.
Pitot 氏管 § 110.
Planck-Einstein 二氏定律 § 488.
Planck 氏輻射定律 § 483.
Poiseuille 氏定律 § 114.
Poisson 氏比 § 81.
Poisson 方程式 § 286.
Poulsen 氏振動 § 391.
Preston 氏定則 § 499.
Prevost 氏定理 § 480.
Prony 氏工率計 § 45.
Prout 氏假說 § 518.

Q

Quincke 氏管 § 142.

R

Raman 氏效應 § 509.
 Raoult 氏定律 § 188.
 Rayleigh-Jeans 二氏輻射定律 § 483.
 Richardson 氏定律 § 284.
 Righi-Leduc 二氏效應 § 360.
 Röntgen 氏射線 §§ 465, 470, 504.
 Röntgen 光譜 §§ 472, 504.
 Rowland 氏實驗 § 311.
 Rydberg 氏常數 §§ 496, 498.
 Rydberg 改正因數 § 499.

S

Stark 氏效應 § 463.
 Stefan-Boltzmann 二氏定律 § 484.
 Steiner 氏定理 § 36.
 Stokes 氏落體定律 § 116.
 Stokes 螢光定律 §§ 487, 508.

T

Tesla 氏振動 § 384.
 Thomson 氏電橋接線法 § 252.

Torricelli 氏定理 § 110.
 Torricelli 實驗 § 103.
 Townsend 氏電流 § 287.
 Tyndall 氏現象 § 453.

V

Verdet 氏常數 § 460.
 Volta 氏效應 § 262.

W

van der Waals 氏物態方程式 §§ 164, 195.
 van der Waals 力 § 526.
 Waltenhofen 氏擺 § 334.
 Wehnelt 氏陰極 §§ 284, 290.
 Wehnelt 斷續器 § 372.
 Weinhold 氏瓶 § 198.
 Wheatstone 氏電橋接線法 §§ 252, 380.
 Wiedemann-Franz 二氏定律 §§ 248, 516.
 Wien 氏輻射定律 § 483.
 Wien 位移定律 § 484.

Z

Zeeman 氏效應 § 462.

節 目 索 引

A

Aberration der Fixsterne 恆星光行差 § 399.
Aberration chromatische 色像差 § 419.
Aberration sphärische 球面像差 § 419.
Abscheidungen bei der Elektrolyse 電解析出之物質 § 266.
Absorption von Gasen 氣體之吸收 § 191.
Absorption von Wellen 波之吸收 § 135.
Absorption im gesamten Spektrum 全光譜中之吸收 § 466.
Absorptionsspektren 吸收光譜 §§ 476, 499.
Absorptionsvermögen 吸收率 § 481.
Achromate 消色差透鏡 § 432.
Achse, optische, von Kristallen 晶體之光軸 § 455.
Actio und reactio 作用與反作用 § 29.
Addition von Vektoren 向量之合併 § 11.
Additionstheorem der Geschwindigkeiten 速度相加定理 § 536.
Adhäsion 附着 § 93.
Adsorption 吸附 § 191.
Aerodynamik 氣體動力學 § 108.
Aggregatzustände 物態 § 13.
Akkommodation 調節 § 428.
Akkorde 和音 § 139.
Akkumulatoren 蓄電池 § 277.
Akustik 聲學 § 138; 音響學 § 141.
Alpha-Strahlen α 射線 § 519.
Amorphe Körper 非晶體 § 527.
Ampere 安培 § 244.
Amperemeter 安培計 § 368.
Amperesekunde 安培秒, §§ 211, 244.
Amperewindungen 安培匝 § 362.
Amperewindungszahl 安培匝 § 362.
Amplitude 振幅 § 117.
Analysator 檢偏鏡 § 452.
Aneroidbarometer 無液氣壓計 § 105.
Anfangspermeabilität 初導磁係數 § 343.
Anionen 陽向游子 § 268.
Anodenstrahlen 陽極射線 § 292.
Anomalie des Wassers 水之反常 § 161.
Anregung von Atomen 原子之激發 § 500.

Anregungsspannung 激發電壓 § 500.
Antenne 天線 § 387.
Apertur, numerische 數字孔徑 §§ 426, 449.
Äquipartitionsgesetz 均分定律 § 156.
Äquipotentialflächen, elektrische 電之等位面 § 222.
Äquivalent, elektrochemisches 電化當量 § 269.
Äquivalenzhypothese 等價假說 § 540.
Aräometer 比重計 § 89.
Arbeit 工作 § 40.
Arbeitsmaschinen 工作機械 § 70.
Astigmatismus 像散現象 § 419.
Astigmatismus beim Auge 眼之像散性 § 429.
Ätherhypothese 以太假說 §§ 218, 435.
Atmosphäre 大氣壓 § 103.
Atombau 原子構造 §§ 213, 493.
Atomdimensionen 原子之大小 § 493.
Atomgewicht 原子量 § 109.
Atomgewicht wahres 眞原子量 § 517.
Atomkerne 原子核 §§ 493, 517.
Atomwärme 原子熱 §§ 170, 511, 516.
Atomzertrümmerung 原子之分裂 § 524.
Aufbauprinzip 結構原理 § 501.
Auflösungsvermögen des Gitters 光柵之鑑別率 § 447.
Auflösungsvermögen des Mikroskops 顯微鏡之鑑別率 § 426.
Aufspaltung der Spektrallinien 光譜線之分裂 § 499.
Auftrieb in Flüssigkeiten 液體中之浮力 § 89.
Auftrieb in Gasen 氣體中之浮力 § 107.
Auge 眼 § 428.
Augenfehler 眼之缺點 § 429.
Ausdehnung durch die Wärme 受熱後之膨脹 § 160.
Ausdehnungskoeffizient 膨脹係數 § 160.
Ausdehnungskoeffizient der idealen Gase 理想氣體之膨脹係數 § 163.
Ausströmung 流體之射流 § 110.
Auswahlregeln 選擇定則 § 496.

B

Ballistisches Galvanometer 衝擊電流計 § 365.
 Ballistische Kurve 彈道 § 57.
 Bandenspektren 帶狀光譜 §§ 475, 506.
 Bar 巴 § 103.
 Barometer 氣壓計 § 105.
 Bausteine der Materie 物質之基本組織成份 § 518.
 Beleuchtungsstärke 照度 § 400.
 Benetzung 濡濕 § 93.
 Berührungsspannung 接觸電壓 § 26.
 Beryllium-Strahlung 鈹之射線 § 524.
 Beschleunigung 加速度 § 17.
 Beschleunigungsarbeit 加速工作 § 41.
 Beta-Strahlen β 射線 § 519.
 Beugung, allg. 普通之繞射 § 137.
 Beugung des Lichtes 光之繞射 § 444.
 Beugung des an kleinen Teilchen 微粒物質上之繞射 § 448.
 Beugung im Mikroskop 顯微鏡中之繞射 § 449.
 Beugung am Spalt 狹縫中之繞射 §§ 445, 446.
 Beugung von Materiewellen 物質波之繞射 § 514.
 Beugungsgitter 繞射光柵 § 447.
 Beugungserscheinungen, 繞射現象
 Fraunhofer 氏式 §§ 444, 446.
 Fresnel 氏式 §§ 444, 445.
 Beugungsscheibchen 繞射影 § 448.
 Beweglichkeit der Elektronen in Metallen 金屬中電子之遷移率 § 245.
 Beweglichkeit von Ionen in Elektrolyten 電解液中游子之遷移率 § 268.
 Bewegung 運動 § 16.
 Bewegung harmonische 簡諧運動 § 20.
 Bewegung relative und absolute 相對運動與絕對運動 § 529.
 Bewegungsgröße 動量 § 25.
 Bewegungsgröße der Lichtquanten 光子之動量 § 490.
 Bezugssysteme 參考坐標系 § 529.
 Biegung 彎曲 § 82.
 Bilder, optische, allg. 鏡像概論 § 404.
 Bilder, am ebenen Spiegel 平面反射鏡所生之像 § 406.
 Bilder, an gekrümmten Spiegeln 曲面反射鏡所生之像 §§ 407, 408.
 Bilder, von Sammellinsen 會聚透鏡所生之像 § 415.
 Bilder, von Zerstreuungslinsen 發散透鏡所生之像 § 416.
 Bilder, elektrische 電像 § 228.
 Bildkraft 電像力 § 228.

Bildwölbung 像場彎曲 § 419.
 Binäre Systeme 二元系 § 186.
 Biolumineszenz 生物光 § 487.
 Blasinstrumente 吹奏樂器 § 151.
 Blenden 光闌 § 427.
 Blindleistung 無工部份 § 379.
 Blindwiderstand 電抗 § 376.
 Blitz 電閃 § 289.
 Blitzableiter 避雷針 § 226.
 Bodendruck 底面壓力 § 87.
 Bogenlampen 弧光燈 § 293.
 Bogenspektren 電弧光譜 § 503.
 Bolometer 電阻輻射計 § 467.
 Brechkraft 折射度 § 414.
 Brechung, allg. 普通之折射 § 133.
 Brechung, des Lichtes 光之折射 § 409.
 Brechung, des in Linsen 透鏡中之折射 § 414.
 Brechung, magnetischer Kraftlinien 磁力線之折射 § 347.
 Brechungsgesetz 折射定律 § 133.
 Brechungsindex, -koeffizient 折射率, 折射係數 §§ 133, 409.
 Brennpunkt und Brennweite eines Hohlspiegels 凹鏡之焦點與焦距 § 407.
 Brennpunkt und einer Linse 透鏡之焦點與焦距 § 414.

C

CGS-System (厘米)(克)(秒)制 § 24.
 Charakteristik von Leitern 導體之特性曲線 § 257.
 Charakteristik von Elektronenröhren 真空管之特性曲線 § 394.
 Charakteristik einer Gasentladung 氣體放電之特性曲線 § 236.
 Chemische Wirkungen des Lichtes 光之化學作用 § 510.
 Chemolumineszenz 化學光 § 487.
 Coulomb, 庫侖 § 211.

D

Dampf, gesättigter 飽和汽 § 180.
 Dampfdichte 汽密度 § 182.
 Dampfdruck 汽壓 § 180.
 Dampfmaschine 蒸汽機 § 202.
 Dämpfung von Galvanometern 電流計之阻尼 § 366.
 Dämpfung von Schwingungen 振動之阻尼 § 118.
 Dampfturbine 蒸汽透平機 § 202.
 Deklination 磁偏角 § 301.

Dekrement, logarithmisches 對數減縮 § 118, 366.
 Destillation 蒸餾 § 181.
 Detektor 檢波器 § 393.
 Determinismus 定運論 § 2.
 Diamagnetismus 反磁性 §§ 336, 338.
 Dichroismus 兩色性 § 455.
 Dichte 密度 § 56.
 Dichte des Wassers 水之密度 § 161.
 Dichte kritische 臨界密度 § 184.
 Dichte optische 光性之稀密 § 409.
 Dielektrika 介電體 § 215.
 Dielektrizitätskonstante 介電係數 §§ 234, 466.
 Dielektrizitätskonstante absolute 絕對介電係數 § 240.
 Differenztöne 差音 § 144.
 Diffusion 擴散 § 158.
 Dimensionen, mechanische 力學諸量之因次 § 52.
 Dimensionen, im elektromagnetischen Masssystem 電磁單位制中之因次 § 313.
 Dimensionen, im elektrostatischen Masssystem 靜電單位制中之因次 § 241.
 Dimensionen, der magnetischen Größen 磁學諸量之因次 § 361.
 Dioptrie 焦度 § 414.
 Dipol 極偶 § 214.
 Dipol, elektrischer 電偶 §§ 214, 223, 228.
 Dipol, magnetischer 磁偶 § 297.
 Direktionsmoment 復位力矩 § 47.
 Dispersion 色散 §§ 432, 466.
 Dispersion anomale 反常色散 § 466.
 Dispersion beim Gitter 光線穿過光柵後之色散 § 447.
 Dissonanz 不諧和 § 148.
 Dissoziation 電解分離 § 267.
 Dissoziationsarbeit 分離工作 § 507.
 Doppelbrechung 雙折射 § 454.
 Doppelbrechung elektrische 電場中之雙折射 § 459.
 Doppelschicht, magnetische 磁偶層 § 303.
 Doppelsterne 雙星 § 66.
 Drahtwellen, stehende 二導線間電之駐波 § 389.
 Drall 角動量 § 46.
 Drehfeld 轉動磁場 § 381.
 Drehkristallmethode 轉動晶體法 § 472.
 Drehimpuls 角動量 § 46.
 Drehimpuls der Molekularströme 分子電流之角動量 § 352.
 Drehmoment 力矩 § 31.

Drehspulinstrumente 圓轉儀器 § 365.
 Drehstrom 多相交流 § 381.
 Drehung der Polarisationssebene 偏極面之轉移 § 460.
 Dreieckschaltung 三角形接線法 § 381.
 Dreifarbenetheorie des Sehens 視覺之三色說 § 478.
 Drosselspulen 抗流線圈 § 376.
 Druck 壓力 § 84.
 Druck der Gase 氣體之壓力 § 97.
 Druck hydrodynamischer 流體動壓力 § 109.
 Druck hydrostatischer 流體靜壓力 § 86.
 Druck kritischer 臨界壓力 § 184.
 Druck osmotischer 滲透壓 § 189.
 Druckhöhe 壓力高 § 109.
 Druckkoeffizient der Gase 氣體之壓力係數 § 163.
 Druckmessung 壓力之測量 § 105.
 Dunkelfeldbeleuchtung 暗地照亮法 § 449.
 Dunkelraum der Glimmentladung 輝光放電中之暗區 § 290.
 Durchschlag, elektrischer 電花之穿越 § 289.
 dyn 達因 § 23.
 Dynamoelektrisches Prinzip 發電機原理 § 373.
 Dynamomaschine 發電機 § 373.
 Dynamometer 工率計 § 369.

E

Ebbe und Flut 潮汐之漲落 § 67.
 Echo 回聲 § 141.
 Echolot 回聲垂線 § 141.
 Edelgasähnlichkeit 類似稀有氣體性 § 502.
 Effektivwerte von Strom und Spannung 電流與電壓之有效值 § 379.
 Eigenfrequenz, allg. 普遍之固有頻率 § 118.
 Eigenfrequenz, elektrische 電振動固有頻率 § 378.
 Einheiten, absolute und internationale elektrische 電學諸量之絕對單位與國際單位 § 314.
 Einheiten, elektromagnetische 電磁單位 § 313.
 Einheiten, elektrostatische 靜電單位 § 240.
 Einheiten, magnetische 磁學諸量之單位 § 361.
 Einheiten, mechanische 力學諸量之單位 § 52.

- Einheiten photometrische 光度單位 § 400.
- Einkristalle 單晶 § 81.
- Eisenkerne 鐵心 § 354.
- Eisen-Wasserstoff-Widerstand 鐵氫電阻 § 255.
- Eiskalorimeter 冰卡計 § 175.
- Elastizität der festen Körper 固體之彈性 § 81.
- Elastizität der Flüssigkeiten 液體之彈性 § 91.
- Elastizität der Gase 氣體之彈性 § 100.
- Elastizitätsgrenze 彈性限度 § 81.
- Elastizitätsmodul 彈性係數 § 82.
- Elektret 電體 § 234.
- Elektrische Figuren 電圖 § 294.
- Elektrizität, atmosphärische 大氣電 § 295.
- Elektrizität, positive und negative 陽電與陰電 § 209.
- Elektrizität, Wesen der 電之本性 § 213.
- Elektrizitätsleitung in Elektrolyten 電解液之導電 § 268.
- Elektrizitätsleitung in Gasen 氣體之導電 § 281.
- Elektrizitätsleitung in Metallen 金屬之導電 §§ 216, 245.
- Elektrizitätsmenge 電量 § 210.
- Elektrochemisches Äquivalent 電化當量 § 269.
- Elektroden 電極 § 265.
- Elektrokinetik 動電學 § 280.
- Elektrolumineszenz 電冷光 § 487.
- Elektrolyse 電解 § 265.
- Elektrolyseisen 電解鐵 § 272.
- Elektrolytische Leitung in festen Körpern 固體中之電解傳導 § 256.
- Elektromagnete 電磁體 § 354.
- Elektrometer 靜電計 § 217.
- Elektrometer absolutes 絕對靜電計 § 233.
- Elektromotoren 電動機 § 374.
- Elektromotorische Kraft 電動勢 §§ 242, 249.
- Elektromotorische Kraft von Elementen 電池之電動勢 § 274.
- Elektromotorische Kraft induzierte 應電動勢 § 317.
- Elektronen 電子 §§ 213, 492.
- Elektronenbeugung 電子之繞射 § 514.
- Elektronendrall 電子之自轉 § 512.
- Elektronengas 電子氣體 § 515.
- Elektronenmikroskop 電子顯微鏡 § 307.
- Elektronenröhre 真空管 (熱游子管) § 394.
- Elektronenschalen 電子層 § 501.
- Elektronenspin 電子之自轉 § 512.
- Elektronentheorie der Metalle 金屬之電子論 § 516.
- Elektrooptik 電光學 § 463.
- Elektrophor 起電盤 § 239.
- Elektrophorese 電之對流 § 280.
- Elektroskop 驗電器 § 217.
- Elektrosrose 電滲 § 280.
- Elektrostatik 靜電學 § 209.
- Elektrostriktion 電伸縮 § 238.
- Elementarbezirke, magnetische 磁性基本區域 § 351.
- Elementarquantum, elektrisches 電之基本量子 (電量子) §§ 213, 492.
- Elemente, galvanische 電池 § 276.
- Emanation 射氣 § 520.
- Emanationstheorie des Lichtes 光之微粒說 § 435.
- Emissionsspektren 發射光譜 §§ 475, 499.
- Emissionsvermögen 發射率 § 481.
- Endotherme Prozesse 收熱作用 § 203.
- Energie 能量 § 42.
- Energie elastische 彈性能量 § 85.
- Energie des elektrischen Feldes 電場之能量 § 233.
- Energie elektrische und chemische 電能量及化學能量 § 278.
- Energie des elektromagnetischen Feldes 電磁場之能量 § 358.
- Energie Lichtquanten 光子之能量 § 489.
- Energie des magnetischen Feldes 磁場之能量 § 358.
- Energie kinetische 動能 § 43.
- Energie potentielle 位能 § 44.
- Energiedichte, elektrische 電場能量密度 § 233.
- Energiedichte, magnetische 磁場能量密度 § 358.
- Energieniveaus, Energiestufen 能量階級 § 494.
- Energieprinzip 能量原理 §§ 42, 192.
- Ernungsgesetz, allg. 普遍之距離定律 § 130.
- Ernungsgesetz, photometrisches 光度距離定律 § 401.
- Entladung, selbständige 自激放電 §§ 282, 287.
- Entladung, stille 無聲放電 § 288.
- Entladung, unselbständige 被激放電 §§ 282, 283.
- Entmagnetisierung 消磁 § 345.
- Entropie 熵 § 195.
- Erdatmosphäre 地球之大氣 § 103.
- Erdbeschleunigung 重力加速度 § 53.
- Erdrotation 地球之自轉 § 49.
- Erdmagnetismus 地磁 § 301.
- Erg 爾格 § 40.

Erhaltungssatz der Bewegungsgrösse
 動量不滅定理 § 33.
 Erhaltungssatz des Drehimpulses 角動
 量不滅定理 § 46.
 Erhaltungssatz der Elektrizität 電量不
 滅定理 § 212.
 Erhaltungssatz der Energie 能量不滅定
 理 § 42.
 Erhaltungssatz der Materie 物質不滅定
 理 § 12.
 Exotherme Prozesse 放熱作用 § 203.
 Experimente 實驗 § 3.
 Explosionsmotore 內燃機 § 202.

F

Fadenkreuze 叉絲 § 427.
 Fall, freier 自由下落 § 57.
 Fallrinne 下落傾槽 § 58.
 Farad 法拉 § 229.
 Farben dünner Blättchen 薄層物質之色
 § 439.
 Farbenblindheit 色盲 § 478.
 Farbenkreis 色調之循環 § 477.
 Farbsehen 色覺 § 430.
 Farbstoffe 顏料 § 479.
 Farbton 色調 § 477.
 Federwage 簧秤 § 89.
 Feld, elektrisches 電場 § 218.
 Feld, elektrisches einer Punktladung
 點電荷之電場 § 223.
 Feld, elektromagnetisches 電磁場
 § 325.
 Feld, magnetisches 磁場 § 299.
 Feld, magnetisches eines Stroms 電流
 之磁場 §§ 302, 303, 304.
 Feld, magnetisches Messung 磁場之測
 量 § 330.
 Feldlinien, elektrische 電力線 § 221.
 Feldlinien, magnetische 磁力線 §§ 299,
 347.
 Feldstärke, elektrische 電場強度 § 218.
 Feldstärke, elektrische in Leitern 導體
 中之電場強度 § 224.
 Feldstärke, der Gravitation 引力場強度
 § 69.
 Feldstärke, magnetische 磁場強度
 § 299.
 Feldtheorie 場說 § 68.
 Fernrohr 望遠鏡 § 425.
 Fernwirkung und Nahewirkung 超距
 作用與媒遞作用 § 68.
 Ferromagnetismus 鐵磁性 §§ 336 342,
 351.
 Fixpunkte, thermometrische 溫度計之
 定點 § 166.

Flächendichte, elektrische 電荷表面密
 度 § 210.
 Flächenhelligkeit 表面亮度 § 400.
 Flächensatz 面積定理 § 66.
 Flamme, empfindliche 靈敏 § 143.
 Flammenleitung 火燄之導電 § 285.
 Flaschenzug 滑車組 § 72.
 Fließgrenze 延展限度 § 81.
 Fluoreszenz 螢光 §§ 487, 508.
 Flüssigkeiten, ideale 理想液體 § 108.
 Flüssigkeiten, zähe 粘滯液體 §§ 108,
 113.
 Flüssigkeiten, Aufbau 液體結構 § 527.
 Flüssigkeitsdruck 液體壓力 § 86.
 Flüssigkeitsoberflächen, freie 液體之自
 由表面 § 88.
 Flüssigkeitsstrahlen 液體射線 § 115.
 Flüssigkeitsthermometer 液體溫度計
 § 166.
 Föhn 乾熱風 § 207.
 Formanten 母基音 § 153.
 Fortpflanzung elektromagnetischer
 Störungen 電磁擾動之傳播 § 327.
 Fortpflanzung des Lichtes 光之傳播
 § 398.
 Fortpflanzung des Schalles 聲之傳播
 § 138.
 Fortpflanzung von Störungen, allg. 擾
 動之傳播 § 122.
 Fortpflanzung von Wellen 波動之傳播
 § 123.
 Freiheitsgrade der Moleküle 分子之自
 由度 § 156.
 Freie Weglänge 自由路程 §§ 99, 113.
 Frequenz 頻率 § 117.
 Frequenzbedingungen 頻率條件 § 494.
 Friktionsrad 摩擦輪 § 194.
 Fundamentalpunkte 基點 § 155.
 Funkenentladung 火花放電 § 289.
 Funkeninduktor 電花感應圈 § 372.
 Funkenspektren 電花光譜 § 503.
 Funkenstrecke 電花隙 § 289.

G

g -Bestimmung, g 值之測定 § 61.
 Galvanomagnetische Erscheinungen 電
 流磁性現象 § 360.
 Galvanometer 電流計 §§ 364, 365.
 Galvanometer ballistisches 衝擊電流計
 § 365.
 Galvanoplastik 鍍金術 § 272.
 Gamma-Strahlen γ 射線 §§ 473, 519.
 Gangunterschied 光程差 § 437.
 Gase ideale und wirkliche 理想氣體與
 真正氣體 § 101.

Gase Aufbau 氣體結構 § 526.
 Gasdruck 氣體壓力 § 97.
 Gasdruck Messung 氣體壓力之測量 § 105.
 Gasartartung 氣體退化 § 515.
 Gasentladungen 氣體放電 § 281.
 Gaskonstante, allg. 普遍氣體常數 § 162.
 Gasstrahlen 氣體射線 § 115.
 Gastheorie, kinetische 氣體動力論 § 94.
 Gasthermometer 氣體溫度計 § 167.
 Gefrierpunkt 凍點(冰點) § 174.
 Gefrierpunkt von Lösungen 溶液之凍點 § 188.
 Gegeninduktivität 互感係數 § 332.
 Generatoren 發電機 § 373.
 Geometrie, nichteuklidische 非歐氏幾何學 § 544.
 Geometrische Optik 幾何光學 § 408.
 Geräusche 噪聲 § 139.
 Geschossabweichung 拋射體之歧離 § 49.
 Geschwindigkeit 速度 § 16.
 Geschwindigkeit kritische 臨界速度 § 313.
 Geschwindigkeitshöhe 速度高 § 109.
 Gesetze, physikalische 物理學定律 § 4.
 Gewicht 重量 § 55.
 Gewicht spezifisches 比重 § 56.
 Gezeiten 潮汐 § 67.
 Gitterbeugung 光柵中之繞射 § 447.
 Gittercharakteristik 柵極特性曲線 § 394.
 Gitterstruktur der Kristalle 晶體之格子性結構 § 528.
 Gleichgewicht 平衡, § 30.
 Gleichgewicht dynamisches 動力平衡 § 94.
 Gleichgewichtsbedingungen 平衡之條件 § 62.
 Gleichrichtung von Schwingungen 振動之整流 §§ 392, 393, 394.
 Gleichverteilungssatz 均分定律 § 156.
 Gleichzeitigkeit 同時性 § 534.
 Gletscher 冰山 § 177.
 Glimmentladung 輝光放電 § 290.
 Glühelctronen 熾熱電子 § 284.
 Glühlampen 白熾電燈 § 261.
 Grammatom 克原子 § 96.
 Grammmolekül 克分子 § 96.
 Grauer Körper 灰色體 § 481.
 Grauglut 灰白熾 § 396.
 Granpeln 霰 § 206.
 Gravitation 萬有引力 §§ 53, 63.
 Gravitationspotential 引力位 § 69.
 Grenzfall, aperiodischer 無週期極限情形 § 366.
 Grenzwiderstand 極限電阻 § 366.
 Grenzwinkel der Totalreflexion 全反射

限角 § 411.
 Grundbahn 正常軌道 § 494.
 Grundserie 基線系 § 496.
 Grundzustand 正常狀態 § 495.
 Gruppengeschwindigkeit 羣速度 § 514.
 Gütezziffer von Magneten 磁體之品質指數 § 344.

H

H-Strahlen, H 射線 § 524.
 Hagel 雹 § 206.
 Halbleiter 半導體 § 215.
 Halbwertszeit 半壽期 § 520.
 Harmonische Bewegung 簡諧運動 § 20.
 Härte 硬度 § 81.
 Hauptebenen 主平面 § 418.
 Hauptlagen 主位 § 223.
 Hauptpunkte 主點 § 418.
 Hauptsätze der Wärmelehre, erster 熱學第一主要定理 § 192.
 Hauptsätze der Wärmelehre, zweiter 熱學第二主要定理 § 195.
 Hauptsätze der Wärmelehre, dritter 熱學第三主要定理 § 199.
 Hauptserie 主線系 § 499.
 Hauptstrahl 主光線 § 407.
 Hauptträgheitsachsen 慣量主軸 § 36.
 Hauptträgheitsmomente 轉動主慣量 § 36.
 Hauteffekt 表皮作用 § 335.
 Hebel 槓桿 §§ 32, 71.
 Heber 虹吸管 § 67.
 Heferkerze 燭光 § 400.
 Heliumspektrum 氦光譜 § 498.
 Henry 亨利 §§ 332, 333.
 Hertz 赫茲 § 117.
 Himmelsfarbe 天色 § 448.
 Hitzdrahtinstrumente 熱線儀器 § 261.
 Höfe um Sonne und Mond 日月之暈 § 448.
 Höhenformel, barometrische 氣壓高度公式 § 102.
 Höhenmessung 高度之測量 §§ 103, 181.
 Höhenstrahlung 宇宙射線 § 473.
 Hohlraumstrahlung 空穴輻射 § 481.
 Hohlspiegel 凹鏡 §§ 407, 449.
 Hörbarkeitsgrenzen 可聞限度 § 140.
 Horizontalintensität, erdmagnetische 地磁水平強度 §§ 301, 363.
 Hörsamkeit 音響 § 141.
 Hydraulik 應用流體力學 § 108.
 Hydraulische Presse 水壓機 § 86.
 Hydrodynamik 液體動力學 § 108.
 Hydrostatik 液體靜力學 § 86.
 Hygrometer 濕度計 § 203.

Hypothesen 假說 § 4.
Hysteresis 磁滯 § 343.

I

Immersion 油浸法 § 426.
Impedanz 阻抗 (交流電阻) § 376.
Impuls 衝量 § 25.
Impulssatz 衝量定理 § 33.
Induktion, elektromagnetische 電磁感應 § 317.
Induktion, gegenseitige 互感應 § 332.
Induktion, im offenen Kreis 斷路中之感應 § 323.
Induktion, magnetische 靜磁感應強度 §§ 337, 339.
Induktion, unipolare 單極感應 §§ 320, 334.
Induktionsgesetz 感應定律 §§ 318, 357.
Induktivität 自感係數 § 333.
Induktivität Messung 自感係數之測量 § 330.
Induktor 電化感應圈 § 372.
Inertialsysteme 慣性系 § 529.
Influenz 靜電感應 § 227.
Influenzmaschine 靜電感應起電機 § 239.
Inklination 磁傾角 § 301.
Interferenz, allg. 普遍之干涉現象 § 126.
Interferenz, des Lichtes 光之干涉 § 437.
Interferenz, des Schalles 聲之干涉 § 142.
Interferenzen 干涉現象
Fraunhofer 氏式, §§ 437, 439.
Fresnel 氏式 §§ 437, 438.
Interferenzen, gleicher Dicke 等厚干涉 § 442.
Interferenzen, gleicher Neigung 等傾干涉 § 439.
Interferenzlänge 干涉長度 § 437.
Interferometer 干涉儀 § 443.
Intervalle, musikalische 音程 § 147.
Invarianz 不變量 § 530.
Inversionspunkt 轉變點 § 172.
Ionen 游子 § 264.
Ionenmoleküle 游子分子 § 502.
Ionisation 游離 § 281.
Ionisierung von Atomen 原子之游離 § 500.
Ionisierungsarbeit 游離工作 § 500.
Ionisierungsspannung 游離電壓 § 500.
Irreversible Prozesse 不可逆過程 § 196.
Isobare 同量元素 § 517.
Isobaren 等壓線 § 208.
Isolatoren 絕緣體 § 215.
Isotherme Prozesse 等溫過程 §§ 98, 100.
Isothermen der idealen Gase 理想氣體

之等溫線 § 162.
Isothermen der wirklichen Gase 真正氣體之等溫線 § 184.
Isotopeneffekt 同位元素效應 § 517.
Isotopentrennung 同位元素之分析 § 517.
Isotope 同位元素 § 517.

K

Kalorie 卡 § 168.
Kalorimeter 量熱學 (卡計) § 173.
Kalorimetrie 量熱學 § 168.
Kältemaschinen 冷凝機 § 202.
Kältemischungen 冷劑 § 190.
Kamera, photographische 照相機 § 421.
Kammerton 國際基音 § 147.
Kanalstrahlen 溝渠射線 §§ 290, 292.
Kapazität 電容 § 229.
Kapazitätsmessung 電容之測量 §§ 253, 380.
Kapillarität 毛細作用 § 93.
Kapillarwellen 表面張力波 § 123.
Katakaustik 焦散面 § 407.
Kathodenfall 陰極位降 § 260.
Kathodenstrahlen 陰極射線 § 290.
Kathodenstrahlen elektrische und magnetische Ablenkung 電場及磁場中陰極射線之偏轉 § 307.
Kationen 陰向游子 § 268.
Kausalität 因果說 § 2.
Kehlkopf 喉頭 § 152.
Keil 尖劈 § 74.
Kernaufbau 原子核構造 § 518.
Kilobar 仟巴 § 103.
Kilowatt 仟瓦 § 260.
Klanganalyse 複音之分析 § 145.
Klänge 複音 § 139.
Klebkraft, elektrische 電附着力 § 254.
Koerzitivkraft 矯頑力 § 344.
Kohärenz 相干性 § 437.
Kohäsion 內聚力 § 525.
Kohlensäure-Assimilation 二氧化碳之同化 § 510.
Kolloide 膠體 § 187.
Kombinationsprinzip 併合原則 § 499.
Kombinationstöne 合音 § 144.
Kommunizierende Röhren 連通管 § 87.
Kompass 羅盤 § 301.
Kompensationsmethode 補償法 § 276.
Komplementärfarben 互補色 §§ 432, 477.
Komplexionen 格局 § 195.
Komponenten eines Vektors 向量之分量 § 11.
Kompressibilität der Flüssigkeiten 液體之壓縮係數 § 91.

Kompressibilität isotherme, der Gase 氣體之等溫壓縮係數 § 100.
 Kondensation 凝結 §§ 174, 180.
 Kondensationserscheinungen in der Atmosphäre 大氣中之凝結現象 § 206.
 Kondensatoren 容電器 § 230.
 Kondensatoren mit Dielektrikum 介電體容電器 § 234.
 Kondensatoren Energie 容電器之能量 § 233.
 Kondensatoren Anziehung der Platten, 容電器薄片之吸引 § 233.
 Konkavspiegel 凹鏡 §§ 407, 449.
 Konsonanz 諧和 § 148.
 Kontaktpotential 接觸電壓 § 262.
 Kontinuitätsbedingung 連續條件 § 108.
 Konvektion 對流 § 197.
 Konvektionsströme 對流電流 § 311.
 Konvexspiegel 凸鏡 § 408.
 Koppelung, induktive 互感耦合 § 332.
 Körperfarben 體色 § 479.
 Korpuskularstrahlen 微粒射線 § 290.
 Korrespondenzprinzip 相當原理 § 490.
 Kovolumen 分子體積 § 164.
 Kraft, Definition 力之定義 § 21.
 Kräfte, innere 內力 § 33.
 Kräfteinheit 力之單位 § 23.
 Kräftepaar 力偶 § 31.
 Krafffluss, magnetischer 磁通量(磁通) §§ 318, 350.
 Kraftlinien, elektrische 電力線 § 221.
 Kraftlinien, magnetische 磁力線 §§ 299, 349.
 Kraftmaschinen 發動機械 § 70.
 Kraftwirkungen elektrischer Felder auf bewegte Magnete 電場對於運動磁極之力的作用 § 308.
 Kraftwirkungen Magnetischer Felder auf bewegte elektrische Ladungen 磁場對於運動電荷之力的作用 § 306.
 Kraftwirkungen Magnetischen Felder auf para-, dia-, und ferromagnetische Körper 磁場對於順磁性, 反磁性及鐵磁性三種物體之力的作用 § 355.
 Kraftwirkungen zwischen Strömen 電流與電流間之力的作用 § 312.
 Kreisbewegung 圓周運動 § 37.
 Kreisel 迴轉子(旋子) § 48.
 Kreiselektronen 自轉電子 § 512.
 Kreiselkompass 迴轉羅盤 § 48.
 Kreisfrequenz 圓周頻率 § 117.
 Kreisfrequenz eines Wechselstroms 交流電流之圓周頻率 § 376.
 Kreisprozess, Carnot'scher, Carnot 氏循環過程 § 200.
 Kreuzgitter 格子光柵 § 447.
 Kristalle 晶體 § 528.

Kristalle einachsige und zweiachsige 單軸晶體與雙軸晶體 § 455.
 Kristalle flüssige 液態晶體 §§ 459, 527.
 Kritischer Punkt 臨界點 § 184.
 Kryohydrate 混凝體 § 190.
 Kryophor 汽化凝冰器 § 178.
 Kugellager 鋼球軸承 § 194.
 Kurbeltrieb 曲柄推動 § 77.

L

Ladung, elektrische 電荷 § 210.
 Ladung, spezifische, der Elektronen 電子之荷質比 §§ 291, 307.
 Ladungsträger, bewegte, im magnetischen Feld 磁場中之運動電荷子 § 306.
 Längeneinheiten 長度單位 § 7.
 Längenmessung 長度之測量 § 7.
 Längs dilatation 長度形變 § 82.
 Leidener Flasche 萊頓瓶 § 234.
 Leistung 工率 § 45.
 Leistungsmessung, elektrische 電工率之測量 § 369.
 Leiter 導體 § 215.
 Leitfähigkeit, elektrolytische 電解傳導 §§ 256, 265.
 Leitvermögen, elektrisches 導電係數 § 246.
 Lenchelektron 發光電子 § 499.
 Leuchtfarbe 發光色素 § 487.
 Licht, natürliches 自然光 § 453.
 Lichtablenkung, relativistische 相對論中之光的偏轉 § 541.
 Lichtäther 以太 § 435.
 Lichtbogen 電弧 § 298.
 Lichtdruck 光壓力 §§ 464, 490.
 Lichtelektrischer Effekt 光電效應 § 489.
 Lichtgeschwindigkeit 光速 §§ 313, 327, 399.
 Lichtgeschwindigkeit elektrische Messung 光速在電學中之測量 § 315.
 Lichtgeschwindigkeit, Konstanz der 光速之常定 § 532.
 Lichtjahr 光年 § 7.
 Lichtmenge 光量 § 400.
 Lichtquanten 光子 § 488.
 Lichtquantengas 光子氣體 § 515.
 Lichtquantentheorie 光子理論 § 489.
 Lichtquellen 光源 § 396.
 Lichtstärke 光源強度 § 400.
 Lichtstrahlen 光線 §§ 397, 403.
 Lichtstrahlen krumme 曲光 § 410.
 Lichtstrom 光通量 § 400.
 Lichttheorie, elektromagnetische 光之電磁說 § 388, 435, 461.

Lichttheorie, Historisches 光性理論之歷史 § 435.

Lichtvektor 光向量 § 453.

Lichtwellen, stehende 光之駐波 § 450.

Lichtzeiger 光線指標 § 405.

Linienpektren 線狀光譜 §§ 475, 499, 503.

Linke-Hand-Regel 左手定則 § 305.

Linsen 透鏡 § 413.

Linsen, dicke 厚透鏡 § 418.

Linsenfehler 透鏡之缺點 § 419.

Linsenformel, Diskussion 透鏡公式之討論 § 417.

Linsensysteme 透鏡組 § 420.

Lochkamera 針孔照相機 § 398.

Lokalströme 局部電流 § 279.

Lösungen 溶液 § 186.

Lösungen kolloidale 膠體溶液 § 187.

Lösungsdruck 溶解壓力 § 274.

Lösungswärme 溶解熱 § 186.

Luft, atmosphärische, Zusammensetzung 大氣之成份 § 204.

Luftdruck 大氣壓力 §§ 103, 204.

Luftlektrizität 大氣電 § 295.

Luftfeuchtigkeit 空氣中之濕度 § 206.

Luftpumpen 抽氣機 § 106.

Luftsäulen, schwingende 振動氣柱 §§ 120, 145.

Lufttemperatur 空氣之溫度 § 205.

Luftverflüssigung 空氣之液化 § 185.

Lumen 流明 § 400.

Lumineszenzerscheinungen 冷光現象 § 487.

Lupe 放大鏡 § 423.

Lux 勒克斯 § 400.

M

Magnete 磁體 § 296.

Magnete, permanente 永久磁體 §§ 342, 344.

Magnetisierung 磁化強度 § 340.

Magnetismus 磁性 § 296.

Magneton 磁子 § 512.

Magnetooptik 磁光學 § 462.

Magnetostriktion 磁伸縮 § 342.

Magnetpole 磁極 § 296.

Magnetpole bewegte, im elektrischen Feld 電場中之運量磁極 § 308.

Manometer 液體壓力計 § 105.

Maschinen 機械 § 70.

Maschinen einfache 簡單機械 § 70.

Maschinen elektrische 電機 § 373.

Maschinensender 機械發送器 § 391.

Masse, schwere 重性質量(重質) § 54.

Masse, träge 慣性質量(慣質) § 23.

Masse der Energie 能量之質量 § 588.

Masse der Lichtquanten 光子之質量 § 490.

Masse und Geschwindigkeit 質量與速度 § 537.

Massenausgleich 質量之平衡 § 77.

Massendefekte 質量缺陷 § 517.

Masseneinheit 質量單位 § 23.

Massenmittelpunkt 質量中心 § 34.

Massenpunkt 質點 § 15.

Massenspektrogramme 質譜 § 517.

Massenszeptibilität 質量磁化係數 § 341.

Masssystem, elektromagnetisches 電磁單位制 §§ 304, 313.

Masssystem, elektrostatisches 靜電單位制 §§ 211, 241.

Masssystem, praktisches elektrisches 實用單位制 §§ 211, 240.

Masssystem, magnetisches 磁學諸量之單位制 § 361.

Masssystem, technisches mechanisches 工業度量衡制 § 24.

Materie 物質 § 12.

Materiewellen 物質波 § 514.

Mechanik deformierbarer Körper 柔體力學 § 81.

Mechanik starrer Körper 剛體力學 § 15.

Megabar 百萬巴 § 103.

Messungen, Wesen und Zweck 測量之本性與目的 § 6.

Messinstrumente elektrische 電學測量計 § 363.

Metazentrum 定傾中心 § 90.

Meter 米 § 7.

Meterkilogramm 米公斤* § 40.

Mikrofarad 微法拉 § 229.

Mikron 微米 § 7.

Mikrophon 微音器 § 371.

Mikroradiometer 顯微放射計 § 463.

Mikroskop 顯微鏡 § 426.

Millibar 毫巴 § 103.

Mischfarben 混合色 § 477.

Missweisung 錯向 § 301.

Mitbewegung des Kerns 原子核之連帶運動 § 498.

Mitführungskoeffizient 隨進係數 §§ 443, 536.

Mittelpunkt von Kräften 力之中心 § 27.

Modulation 調幅 §§ 371, 392.

Mol 克分子 § 96.

Molekularenergie 分子能量 § 156.

Molekulargewicht 分子量 §§ 96, 182, 188.

Molekularsezeptibilität 分子磁化係數 § 341.

Molekülbau 分子構造 § 502.
 Molekülspektren 分子光譜 §§ 475, 506.
 Molenbruch 克分子比 § 188.
 Molvolumen 克分子容積 §§ 96, 162.
 Molwärme der Gase 氣體之克分子熱 § 171.
 Moment eines elektrischen Dipols 電偶之電矩 § 214.
 Moment eines magnetischen Dipols 磁偶之磁矩 § 297.
 Moment magnetisches, der Atome 原子之磁矩 § 513.
 Moment magnetisches, von Kreisströmen 導線環電流之磁矩 § 310.
 Moment statisches 靜矩 § 31.
 Mondbewegung 月球之運動 § 65.
 Monsun 季候風 § 207.
 Multiplizität von Spektrallinien 光譜線之複合性 § 496.
 Musikinstrumente 樂器 §§ 149, 150, 151.

N

Nachwirkung, elastische 彈性後效 § 81.
 Nachwirkung, thermische 熱脹後效 § 166.
 Nadelgalvanometer 磁轉電流計 § 364.
 Nahepunkt 最近點 § 429.
 Nahwirkung 鄰近作用 § 68.
 Naturwissenschaften 自然科學 § 1.
 Nebelbildung 霧之凝成 § 206.
 Nebenserien 輔線系 § 499.
 Neutronen 中子 § 524.
 Nichtleiter 非導體 § 215.
 Niederschläge 露霜霧雪霰雷雨等之下降 § 206.
 Niveauflächen 等位面 § 222.
 Nonius 游標 § 7.
 Normalelemente 標準電池 § 276.
 Normalspektrum 勻排光譜 § 447.
 Nullkurve, magnetische 磁化零線 § 343.
 Nullmethoden 消盡法 (零點法) § 6.
 Nullpunktsenergie 零度能量 § 515.
 Nutzeffekt, optischer 發光效率 §§ 261, 486.

O

Oberflächenionisation 表面游離 § 283.
 Oberflächenladung, elektrische 表面電荷 § 225.
 Oberflächenspannung 表面張力 § 92.
 Oberschwingung 倍振 §§ 117, 119.

Objektiv 物鏡 § 424.
 Objektmikrometer 物鏡測微計 § 427.
 Ohm 歐姆 § 246.
 Ohr 耳 § 152.
 Okklusion 吸留 § 191.
 Okular 目鏡 § 424.
 Okularmikrometer 目鏡測微計 § 427.
 Ölhäute 油膜 § 93.
 Optik 光學 § 396.
 Ordnungszahl 原子序數 § 501.
 Orgel 風琴 § 150.
 Ortshöhe 地位高 § 109.
 Osmose 滲透 § 189.
 Oszillator, elektrischer 電振子 § 385.
 Oxydkathoden 氧化面陰極 §§ 284, 290.

P

Panzergalvanometer 鐵甲電流計 § 364.
 Parallelogramm der Kräfte 力之平行四邊形 § 27.
 Parallelogrammkonstruktion 平行四邊形作圖法 § 11.
 Parallelschaltung von Stromquellen 電流源之並聯 § 258.
 Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen 交流電阻之並聯 § 377.
 Parallelschaltung von Widerständen 電阻之並聯 § 250.
 Paramagnetismus 順磁性 §§ 336, 338.
 Parsec 秒差距 § 7.
 Partialdruck 分壓力 § 97.
 Passate 貿易風 § 207.
 Pendel 擺 § 60.
 Perihelbewegung 近日點之移動 § 542.
 Periode eines Wechselstroms 交流電流之週期 § 375.
 Periodisches System der Elemente 元素之週期系 § 501.
 Permeabilität 導磁係數 § 337.
 Permeabilität absolute 絕對導磁係數 § 362.
 Perpetuum mobile 1. Art 第一種永久運動 §§ 42, 195.
 Perpetuum mobile 2. Art 第二種永久運動 § 195.
 Pfeifen 樂管 § 150.
 Pferdstärke 馬力 § 45.
 Phase eines Wechselstroms 交流之位相 (相當數) § 375.
 Phasendifferenz 位相之差 §§ 123, 375.
 Phasengeschwindigkeit 位相速度 § 466.
 Phosphoreszenz 熾光 § 487.
 Phot 輻透 § 400.
 Photochemie 光化學 § 513.

Photochemisches Grundgesetz 光化學基本定律 § 510.

Photoeffekt 光效應 § 489.

Photographie 照相術 § 510.

Photometrie 光度學 § 402.

Photometrie, lichtelektrische 光電光度學 § 489.

Photonen 光子 § 490.

Photozelle 光電管 § 489.

Piezelektrizität 壓電 § 238.

Piezometer 壓力計 § 91.

Pigmente 顏料 § 479.

Pipette 移液管 § 104.

Planetenbewegung 行星運動 § 66.

Plastizität 受縮性 § 81.

Polarisation, dielektrische 介電極化 §§ 234, 528.

Polarisation, elektrolytische 電解極化 §§ 273, 275.

Polarisation, von Wellen, allg. 普通波動之偏極 § 125.

Polarisation, des Lichtes 光之偏極 § 452.

Polarisationsebene 偏極面 § 452.

Polarisationswinkel 偏極角 § 452.

Polarisator 起偏鏡 §§ 452, 457.

Positive Strahlen 陽射線 § 292.

Polflucht der Kontinente 大陸之背極性 § 50.

Potential, elektrisches 電位 § 220.

Potential, elektrisches in nicht wirbelfreien Feldern 旋渦電場中之電位 § 328.

Potential, elektrisches in Leitern 導體中之電位 § 224.

Potential, im Gravitationsfelde 引力位 § 69.

Potential, magnetisches 磁位 § 316.

Potentialgradient, elektrischer 電位遞降度 § 220.

Potentialwaage 電位天平 § 233.

Potentiometerschaltung 電位計接線法 § 250.

Präzession 錐動 § 48.

Prismen 稜鏡 § 412.

Prismen achromatische 消色差稜鏡 § 432.

Prismen geradsichtige 直視稜鏡 § 433.

Prismen totalreflektierende 全反射稜鏡 § 412.

Projektionsapparat 映畫器 § 421.

Proportionalitätsgrenze 正比限度 § 81.

Protonen 質子 § 518.

Psychrometer 乾濕泡溫度計 § 206.

Purpurton 紅紫色調 § 477.

Pyroelektrizität 焦熱電 § 238.

Pyrometrie, optische 光測高溫法 § 485.

Q

Quantenbahnen 量子軌道 § 494.

Quantenbedingung 量子條件 § 494.

Quantenmechanik 量子力學 § 514.

Quantenoptik 量子光學 § 490.

Quantentheorie 量子論 §§ 435, 488.

Quarzlinsenmethode 水晶透鏡法 § 468.

Quecksilberlampe 水銀燈 § 293.

Querkontraktion 截面之縮小 § 81.

R

Radfahren 腳踏車之駕駛 § 79.

Radioaktive Familien 放射元素族 § 520.

Radioaktivität 放射現象 § 519.

Radiometer 輻射計 § 467.

Radium 鐳 § 519.

Randwinkel 毛細角 § 93.

Raumakustik 室內音響學 § 141.

Raumlichte, elektrische 電荷空間密度 § 210.

Raumladungen, elektrische 空間電荷 § 283.

Rechte-Hand-Regel 右手定則 § 302.

Reflexion, allg. 普通之反射 § 132.

Reflexion, des Lichtes 光之反射 §§ 405, 466.

Reflexion, des metallische 金屬反射 § 466.

Reflexion, des Schalles 聲之反射 § 142.

Refraktometer 折射計 § 411.

Regelation 復凝現象 § 177.

Regenbogen 虹霓 § 434.

Reibung, innere 內摩擦 § 118.

Reibung, zwischen festen Flächen 固體面間之摩擦 § 194.

Reibungselektrizität 摩擦電 § 262.

Reichweite der Alpha-Strahlen α 射線之射程 § 521.

Reifbildung 霜之凝成 § 206.

Reihenschaltung von Stromquellen 電流源之串聯 § 258.

Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen 交流電阻之串聯 § 377.

Reihenschaltung von Widerständen 電阻之串聯 § 250.

Rekombination 復合作用 § 283.

Relais, elektromagnetische 電磁替續器 § 370.

Relativität von Längen 長度之相對性 § 535.

Relativität der Zeit 時間之相對性 § 534.

Relativitätsprinzip der Mechanik 力學之相對原理 § 529.

Relativitätstheorie, allgemeine 廣義相對論 § 540.
 Relativitätstheorie, spezielle 狹義相對論 § 529.
 Remanenz 剩磁 § 344.
 Resonanz, allg. 普遍之共振 § 121.
 Resonanz, akustische 共鳴 § 145.
 Resonanz, elektrische 電之共振 § 378.
 Resonanzstrahlung 共振射線 § 508.
 Resonanztheorie des Hörens 聽覺之共振理論 § 152.
 Resonator, elektrischer 電波共振器 § 388.
 Reststrahlen 剩餘射線 § 468.
 Resultierende 向量和 § 11.
 Reversible Prozesse 可逆過程 § 196.
 Reversionspendel 可倒擺 § 61.
 Rheostaten 變阻器 § 251.
 Richtungsquantelung 方向量子性 § 513.
 Richtverstärkung 整流放大法 § 394.
 Rollen 滑車 § 72.
 Rostpendel 補償擺 § 160.
 Rotation 轉動 § 20.
 Rotation um freie Achsen 對於自由軸之轉動 § 48.
 Rotationsdispersion 轉偏色散 § 460.
 Rotationsenergie 轉動能量 § 46.
 Rotationsmagnetismus 轉動磁性 § 334.
 Rotationschwingungsspektrum 轉動振動光譜 § 505.
 Rotverschiebung der Spektrallinien 光譜線之紅向移動 § 543.
 Rückstoss 反坐作用 § 33.
 Rückstoss bei Lichtaussendung 發光時之反坐作用 § 490.
 Ruhmasse 原質量 § 537.

S

Saccharimeter 量糖計 § 469.
 Saitenelektrometer 絃線靜電計 § 231.
 Saiteninstrumente 絃絃樂器 § 149.
 Saitenschwingungen 絃絃振動 § 119.
 Sammellinsen 會聚透鏡 § 415.
 Sättigung von Farben 色之飽和 § 477.
 Sättigung magnetische 磁性飽和 §§ 342-343.
 Sättigungsdefizit 飽和差 § 206.
 Sättigungsdruck 飽和汽壓 § 180.
 Sättigungsstrom 飽和電流 § 283.
 Schall 聲 § 138.
 Schallgeschwindigkeit 聲速 § 138.
 Schallwellen, stehende 聲之駐波 § 143.
 Schatten 影 § 398.
 Scheinwiderstand 視電阻 § 376.

Scheitelwert eines Wechselstromes 交流電流之巔值 § 375.
 Scherung 切變 § 83.
 Scherungsmodul 切變係數 § 83.
 Schiefe Ebene 斜面 § 58.
 Schleifenfahrt 倒行飛車 § 79.
 Schlieren 釐光 § 410.
 Schmelzen 融解 § 174.
 Schmelzpunkt 融點 § 174.
 Schmelzpunkt Abhängigkeit vom Druck 融點與壓力之關係 § 177.
 Schmelzpunkt Abhängigkeit von gelösten Stoffen 融點與溶質之關係 § 188.
 Schmelzwärme 融解熱 § 175.
 Schraube 螺旋 § 74.
 Schub 切變 § 83.
 Schubmodul 切變係數 § 83.
 Schwankungserscheinungen 起落現象 § 159.
 Schwarzer Fleck 黑斑 § 439.
 Schwarzer Körper 黑體 § 481.
 Schwärzlichkeit von Farben 色之黑色程度 § 477.
 Schwebungen 振拍 § 128.
 Schwebungen, akustische 拍音 § 144.
 Schwerkraft 重力 § 53.
 Schwerpunkt 重心 §§ 34, 59.
 Schwerpunkt elektrischer Ladungen 電荷中心 § 214.
 Schwerpunktssatz 重心定理 § 35.
 Schwimmen 浮拍 § 90.
 Schwimmerregel 游泳定則 §§ 302, 305.
 Schwingungen, allg. 普遍之振動 § 117.
 Schwingungen, elastische 彈性振動 § 118.
 Schwingungen, elektrische 電振動 §§ 375, 383.
 Schwingungen, erzwungene 強迫振動 § 121.
 Schwingungen, gedämpfte 減幅振動 (阻尼振動) §§ 117, 118.
 Schwingungen, harmonische 簡諧振動 § 117.
 Schwingungsbauch 振腹 § 119.
 Schwingungserzeugung, elektrische 電振動之產生 § 395.
 Schwingungsgleichung 振動方程式 § 118.
 Schwingungsknoten 振節 § 119.
 Schwingungskreis, elektrischer 振動電路 § 383.
 Schwingungskreis, elektrischer offen und geschlossener 斷路及通路之振電路 § 386.
 Schwingungsverstärkung 振動之益 § 394.

Schwingungszahl 振數頻率 § 117.
 Schwingungszahl des Lichtes 光之頻率 § 436.
 Schwingungszahl des Schalles 聲之頻率 § 140.
 Schwingungszeit 振動週期 § 117.
 Sehen im Hellen und im Dunklen 明暗中之視覺 § 430.
 Sehen räumliches 視覺之空間性 § 431.
 Sehpurpur 紫色素 § 430.
 Sehweite, deutliche 明視距離 § 428.
 Seifenblasen 肥皂泡 § 439.
 Sekundäre Prozesse bei der Elektrolyse 電解中之副作用 § 270.
 Sekunde 秒 § 9.
 Sekundenpendel 秒擺 § 60.
 Selbstinduktion 自感應 § 333.
 Selbstumkehr der Spektrallinien 光譜線之自行轉變 § 482.
 Selenzelle 硒光電管 § 489.
 Sendeschaltung 電波發送接線法 § 395.
 Seriengrenze 線系極限 § 496.
 Shunt 分路 § 368.
 Siedebarenometer 沸點氣壓計 § 181.
 Sieden 沸騰 § 181.
 Siedepunkt 沸點 § 174.
 Siedepunkt von Lösungen 溶液之沸點 § 188.
 Siedepunkt Abhängigkeit vom Druck 沸點與壓力之關係 § 181.
 Siedeverzug 過度加熱 § 174.
 Silbervoltmeter 銀解電量計 § 269.
 Sirene 驗音鼓 § 140.
 Skalare 純量 § 10.
 Skin-Effekt 表皮作用 § 335.
 Solarkonstante 太陽常數 § 203.
 Sonnenspektrum 太陽光譜 § 475.
 Sonnentag 太陽日 § 9.
 Spalt, Beugung 繞射狹縫 §§ 445, 446.
 Spannung, effektive 有效電壓 § 379.
 Spannung, elektrische 電壓 § 219.
 Spannung, magnetische 磁壓 §§ 316, 331.
 Spannungskoeffizient der Gase 氣體之壓力係數 § 163.
 Spannungsmesser, elektrischer 電壓計 § 368.
 Spannungsmesser, magnetischer 磁壓計 § 331.
 Spannungsreihe 電勢順序 § 262.
 Spannungsteilung 電壓分段法 § 250.
 Spektralanalyse 光譜分析 § 476.
 Spektralfarben, reine 純光譜色 § 477.
 Spektralserien 光譜線系 § 499.
 Spektraltermine 光譜項 § 499.
 Spektren 光譜 §§ 482, 475, 496.
 Spektren wasserstoffähnliche 類似氫光譜 § 498.

Spektrometer 分光計 § 433.
 Spektroskop 分光鏡 § 433.
 Spektrum, gesamtes 全光譜 § 465.
 Spezifisches Gewicht 比重 § 56.
 Spezifische Wärme 比熱 §§ 169, 511.
 Spezifische Wärme der Gase 氣體之比熱 § 171.
 Spiegel, ebene 平面反射鏡 § 406.
 Spiegel, sphärische 球面反射鏡 § 407.
 Spiegelablesung 鏡尺讀數法 § 405.
 Spiegelteleskop 反射望遠鏡 § 425.
 Spitzenladung 尖端放電 § 288.
 Spitzenwirkung 尖端作用 § 226.
 Sprache 語言 § 153.
 Sprungtemperatur 飛躍溫度 § 255.
 Spulen 螺線管 § 303.
 Stäbchen 桿狀纖維 § 430.
 Starrer Körper 剛體 § 15.
 Stationäre Bahnen 不輻射軌道 § 494.
 Statisches Moment 靜矩 § 31.
 Statistik 統計法 § 94.
 Staudruck 被擋壓力 § 110.
 Stechheber 移液管 § 104.
 Steighöhe, kapillare 毛細上昇高 § 98.
 Steighöhenmethode 磁性液體上昇法 § 355.
 Stereoskop 實體鏡 § 431.
 Sternschaltung 星形接線法 § 381.
 Sterntag 恆星日 § 9.
 Sternweite 秒差距 § 7.
 Stilk 皮蒂勃 § 400.
 Stimmgabel 音叉 § 147.
 Stimmung, reine und temperierte 純粹調音與等程調音 § 147.
 Stoss, elastischer und unelastischer 彈性與非彈性二種碰撞 § 51.
 Stossionisation 碰撞游離 §§ 282, 500.
 Stosszahl der Gasmoleküle 氣體分子之碰撞頻率 § 99.
 Strahl, ordentlicher und ausserordentlicher 尋常光線與非常光線 § 455.
 Strahlen, allg. 普遍之射線 §§ 115, 122.
 Strahlung, schwarze 黑體輻射 § 481.
 Strahlungsdämpfung 輻射阻尼 § 385.
 Strahlungsdruck 輻射壓力 § 464.
 Strahlungslehre 輻射學 § 396.
 Strahlungsmessinstrumente 輻射測量儀器 § 467.
 Strahlungstemperatur 輻射溫度 § 485.
 Stratosphäre 同溫層 § 205.
 Streckgrenze 延展限度 § 81.
 Streuung von Alpha-Strahlen, α 射線之散射 § 493.
 Strom, elektrischer 電流 § 244.
 Strom, elektrischer wattloser 無工電流 § 379.
 Stromarbeit 電流工作 § 260.

Stromdichte, elektrische 電流密度 § 244.
 Stromfaden 流莖 § 108.
 Stromleistung 電流工率 § 260.
 Stromlinien 流線 § 108.
 Strommesser, elektrische 電流計 § 368.
 Stromquellen 電流源 § 242.
 Stromquellen Schaltungsweisen 電流源之串聯與並聯 § 258.
 Stromröhren 流管 § 108.
 Stromstärke, elektrische 電流強度 § 244.
 Stromstärke, elektrische effektive 有效電流強度 § 379.
 Strömung, laminare und turbulente 平流與亂流 § 114.
 Strömungsfelder 流場 § 108.
 Strömungsgeschwindigkeit der Elektrizität 電荷流動之速度 § 247.
 Strömungsströme 對流電流 § 280.
 Stromverzweigungen 電流分支 §§ 249, 259.
 Stromwärme 電流熱 § 260.
 Strukturanalyse mit Röntgenstrahlen 晶體結構分析 (用 Röntgen 氏射線) § 472.
 Stufengitter 階級光柵 § 447.
 Sublimation 昇華 §§ 174, 183.
 Sublimationswärme 昇華熱 § 183.
 Summationstöne 疊合音 § 144.
 Supraleitfähigkeit 超導性 § 255.
 Suszeptibilität 磁化係數 § 337.
 Szintillation 閃爍現象 § 523.

T

Tangentenbusssole 正切電流計 § 363.
 Taubildung 露之凝成 §§ 180, 206.
 Taupunkt 露點 §§ 180, 206.
 Telegraphie 電報 § 371.
 Telegraphie drahtlose 無線電報 § 390.
 Telephonie 電話 § 371.
 Telephonie drahtlose 無線電話 § 392.
 Temperatur 溫度 § 154.
 Temperatur absolute 絕對溫度 § 155.
 Temperatur effektive 有效溫度 § 485.
 Temperatur kritische 臨界溫度 § 184.
 Temperatur sehr tiefe 極低溫度 § 185.
 Temperaturausgleich 溫度之調勻 § 197.
 Temperaturionisation 溫度游離 § 285.
 Temperaturkoeffizient des Widerstandes 電阻之溫度係數 § 255.
 Temperaturmessung 溫度之測量 § 166.
 Temperaturmessung durch Strahlung 溫度之測量 (利用輻射) § 485.
 Temperaturskala 溫標 § 155.

Temperaturstrahlung 溫度輻射 § 480.
 Temperierte Stimmung 等程音階 § 147.
 Terme 光譜項 § 499.
 Teufelsrad 魔盤 § 79.
 Thermionen 熱游子 § 284.
 Thermochemie 熱化學 § 203.
 Thermoelktrizität 熱電 § 263.
 Thermolemente 熱電偶 § 263.
 Thermomagnetische Erscheinungen 熱流磁性現象 § 360.
 Thermometer 溫度計 § 166.
 Thermosäule 熱電堆 § 467.
 Töne 純音 § 139.
 Tonhöhe 音調 § 140.
 Tonleiter 音階 § 147.
 Topfmagnet 罐狀磁鐵 § 354.
 Torsion 扭轉 § 83.
 Torsionsmodul 扭轉係數 § 83.
 Totalreflexion des Lichtes 光之全反射 § 411.
 Tragflächen 翼 § 112.
 Trägheit 慣性 § 22.
 Trägheit der Energie 能量之慣性 § 538.
 Trägheitsellipsoid 慣量橢圓球 § 36.
 Trägheitskräfte 慣性力 § 26.
 Trägheitsmoment 轉動慣量 § 36.
 Trägheitsmoment der Moleküle 分子之轉動慣量 §§ 156, 507.
 Trägheitssatz 慣性定理 § 22.
 Trägheitswiderstand 慣性阻力 § 26.
 Transformatoren 變壓器 § 382.
 Transversalität der Lichtschwingungen 光振動之橫向性 § 452.
 Trennungsfächen 分界面 § 111.
 Tribolumineszenz 摩擦光 § 487.
 Tripelpunkt 三態點 § 174.
 Troposphäre 亂溫層 § 205.

U

Übersetzungsverhältnis eines Transformators 變壓器之變壓率 § 382.
 Uhren 時鐘 § 80.
 Ultramikroskop 超度顯微鏡 § 449.
 Ultrarot 紅外線 §§ 465, 468.
 Ultrastrahlung 超度短波射線 §§ 465, 473.
 Ultraviolett 紫外線 §§ 465, 469.
 Umkehrbarkeit des Strahlenganges 光路可逆性 § 403.
 Umwandlungspunkt, magnetischer 磁性轉換點 § 353.
 Unabhängigkeitsprinzip 獨立原理 § 27.
 Undulationstheorie des Lichtes 光之波動說 § 435.

Ungenanigkeitsrelation 測不準原理 § 514.
 Unordnung, ideale 理想的無秩序 § 195.
 Unruhe 擺輪 §§ 80, 160.
 Unterbrecher 斷續器 § 372.
 Unterkühlung 過度冷卻 § 174.

V

Vakuum 真空 § 106.
 Vektoraddition 向量之合併 § 11
 Vektoren 向量 § 10.
 Ventile, elektrische 整流器 § 392.
 Verdampfen 汽化 § 178.
 Verdampfungswärme 汽化熱 § 179.
 Verflüssigung der Gase 氣體之液化 § 184.
 Vergrößerung beim Konkavspiegel 凹鏡之放大率 § 407.
 Vergrößerung bei Konvexspiegel 凸鏡之放大率 § 408.
 Vergrößerung bei Sammellinsen 會聚透鏡之放大率 § 415.
 Vergrößerung bei Zerstreuungslinsen 發散透鏡之放大率 § 416.
 Vergrößerung optischer Instrumente, Allgemeines 光學儀器放大率概論 § 422.
 Verschiebung, dielektrische 電的位移 § 235.
 Verschiebungsgesetz, radioaktives 放射元素之位移 § 522.
 Verschiebungsgesetz, spektroskopisches 光譜之位移 § 503.
 Verschiebungsströme 位移電流 § 326.
 Verstärkerröhre 放大管 § 394.
 Viertelwellenlängenblättchen 四份之一波長晶片 § 455.
 Viskosität 粘滯性 § 113.
 Vokale 母音 § 153.
 Voltmeter 電量計 § 269.
 Voltgeschwindigkeit 伏特速度 § 500.
 Voltmeter 伏特計 § 368.
 Voltsekunden 伏特秒 § 362.
 Volumänderung beim Schmelzen 融解時體積之變遷 § 176.
 Volumen, kritisches 臨界容積 § 184.
 Volumen, spezifisches 容度 § 56.
 Volumionisation 體內游離 § 283.
 Vorschaltwiderstand 串聯電阻 § 368.

W

Wage 天平 § 75.
 Wagenräder 車輪 § 78.

Wägung, absolute 絕對稱物法 §§ 76, 107
 Wahrscheinlichkeit, thermodynamische 熱力或然率 § 195
 Wärme, spezifische 比熱 § 69.
 Wärme, spezifische der Gase 氣體之比熱 § 171.
 Wärmeäquivalent, elektrisches 熱之電當量 § 260.
 Wärmeäquivalent, mechanisches 熱之工當量 § 193.
 Wärmekapazität 熱容量 § 169.
 Wärmekraftmaschinen 熱力機械 § 202.
 Wärmelehre 熱學 § 154.
 Wärmeleitung 熱之傳導 § 198.
 Wärmemenge 熱量 § 168.
 Wärmequellen 熱源 § 203.
 Wärmestrahlung 熱之輻射 §§ 197, 480.
 Wärmetheorie, mechanische 熱之動力論 § 156.
 Wärmetod 宇宙老死 § 196.
 Wärmetönung 熱調 § 203.
 Wasserfallelektrizität 瀑布電 § 262.
 Wasserstoffatom 氫原子 § 495.
 Wasserstoffspektrum 氫光譜 § 496.
 Wasserstoffspektrum kontinuierliches 氫之連續光譜 § 497.
 Wasserstrahlpumpe 水流抽氣機 § 106.
 Wasserwellen 水波 § 123.
 Wasserwert 水當量 § 173.
 Watt 瓦特 § 260.
 Wattsekunde 瓦特秒 § 260.
 Wechselstrom 交流電流 § 375.
 Wechselstromleistung 交流工率 § 379.
 Wechselstrom-Messinstrumente 交流測量儀器 § 369.
 Wechselstromwiderstand 交流電阻 § 376.
 Wechselzahl eines Wechselstromes 交流電流之來週頻率 § 375.
 Weglänge, freie 自由路程 §§ 99, 113.
 Weglänge, optische 光程 § 409.
 Weicheninstrumente 軟鐵儀器 § 367.
 Wellen, allg. 普遍之波動 § 122.
 Wellen, elektrische 電波 §§ 385, 474.
 Wellen, elektrische an Drähten 導線間之電波 § 389.
 Wellen, elektrische Empfang 電波之接收 § 387.
 Wellen, longitudinale und transversale 縱波與橫波 § 125.
 Wellen, periodische 週期波 § 123.
 Wellen, stehende 駐波 § 127.
 Wellenflächen 波面 § 123.
 Wellenflächen in Kristallen 晶體中之波面 § 455.
 Wellengeschwindigkeit 波速 § 123.

Wellenlänge 波長 § 124.
 Wellenlänge des Lichts 光之波長 §§ 436, 465.
 Wellenlänge des Schalls 聲之波長 § 140.
 Wellenlängennormal 波長標準 § 7.
 Wellenmechanik 波動力學 § 514.
 Wellentheorie des Lichts 光之波動說 § 435.
 Wellentheorie der Materie 物質波動說 § 514.
 Wellentheorie der optischen Abbildung 波動說對於光學成像之說明 § 449.
 Wellenzahl 波數 436.
 Wellenzug 波列 § 437.
 Weltäther 宇宙以太 § 435.
 Wertigkeit, chemische 原子價 § 502.
 Wetter 氣候 § 208.
 Wetterkarten 氣候圖 § 208.
 Wettervorhersage 氣候之預測 § 208.
 Widerstand, elektrischer 電阻 § 246.
 Widerstand, von Elektrolyten 電解液之電阻 § 273.
 Widerstand, bei der Gasentladung 氣體放電中之電阻 § 286.
 Widerstand, innerer, von Stromquellen 電流源之內電阻 § 258.
 Widerstand, magnetischer 磁阻 § 350.
 Widerstandsmessung 電阻之測量 §§ 246, 252.
 Widerstandsthermometer 電阻溫度計 § 255.
 Wind 風 § 207.
 Windungsfläche 匝面 § 303.
 Winkelgeschwindigkeit 角速度 § 20.
 Winkelbeschleunigung 角加速度 § 20.
 Winkelmessung 角度之測量 § 8.
 Winkelspiegel 角度鏡 § 406.
 Wirbelbildung 渦旋之生成 § 111.
 Wirbelfelder 旋渦流場 § 108.
 Wirbelströme 渦電流 § 334.
 Wirkleistung 有效工率 § 379.
 Wirkung und Gegenwirkung 作用與反作用 § 29.
 Wirkungsgrad 效率 § 45.

Wirkungsgrad von elektrischen Maschinen 電機之效率 § 374.
 Wirkungsgrad von thermischen Maschinen 熱力機械之效率 § 201.
 Wirkungsquantum, Plancksches 作用量子 (Planck 氏) §§ 483, 489.
 Wirkwiderstand 真電阻 § 376.
 Wismutspirale 鉍螺旋線 § 360.
 Wolken 雲 § 206.
 Wurf 拋射 § 57.

X

X-Einheit X 單位 § 7.

Z

Zähigkeit 粘滯性 § 113.
 Zählkammer, Geigersche 計數室 (Geiger 氏) § 523.
 Zählung der Alpha-Strahlen α 射線之計數 § 523.
 Zahnräder 齒輪 § 73.
 Zäpfchen 錐狀纖維 § 430.
 Zeitmessung 時間之測量 § 9.
 Zentimeter 厘米 § 7.
 Zentrifugalkraft 離心力 §§ 37, 79.
 Zentrifugalregulator 離心節速器 § 39.
 Zentripetalkraft 向心力 § 37.
 Zerstreuung des Lichtes 光之散射 § 448.
 Zerstreuungslinsen 發散透鏡 § 418.
 Zustandsänderungen, adiabatische 物態之絕熱變 §§ 165, 172.
 Zustandsänderungen, isobare 物態之等壓變 § 165.
 Zustandsänderungen, isopykne 物態之等容變 § 165.
 Zustandsänderungen, isotherme 物態之等溫變 § 165.
 Zustandsgleichung der idealen Gase 理想氣體之物態方程式 § 162.
 Zwangskräfte 逼力 § 29.

四角號碼索引

說明

- (1) 本單名表本各四
 (2) 索字詞外詞書字
 (3) 引注除第第係碼
 (4) 按四第二三面上檢
 (5) 四角第一字上單字
 (6) 號碼四上依首字
 碼及角二號尾
 檢附號角碼所
 字角碼之順注
 法之已號序號
 排號見碼排碼
 列碼該於列係
 於名本但本
 本詞條上注碼
 字上之號碼
 之面上號碼
 上單字用~記號代
 用~記號代
 起訖中間所注

第二次改訂四角號碼檢字法

第一條 筆畫分為十種，各以號碼代表之如下：

號碼	筆名	筆形	舉例	說明	注意
0	頭	一	言 空 尸 尸	獨立之點與獨立之橫相結合	0456789各
1	橫	一	天 土 地 江 元 風	包括橫勾與右鉤	橫均由數筆合為一
2	垂	丨	山 月 千 則	包括直撇與左鈎	後筆，檢査時過筆
3	點	丶	小 禿 一 么 之 衣	包括點與捺	筆與後筆並列，應
4	叉	十	草 杏 皮 刈 大 狩	兩筆相交	儘量取後筆；如小
5	插	才	牙 戈 申 吏	一筆通過兩筆以上	作0不作3，才作
6	方	口	國 鳴 圓 四 甲 由	四邊齊整之形	4不作2，厂作7
7	角	ㄗ ㄥ ㄟ ㄨ	相 門 辰 陰 倉 衣 學 字	橫與垂相接之處	不作2，ㄨ作8不
8	八	八 ㄨ ㄥ ㄟ	分 頁 羊 余 矣 采 亞 年	八字形與其變形	作32，小作9不
9	小	小 ㄨ ㄥ ㄟ ㄨ	突 玄 薛 景 隹	小字形與其變形	作33

第二條 每字祇取四角之筆，其順序：

(一)左上角 (二)右上角 (三)左下角 (四)右下角

(例) (一)左上角……端 (二)右上角
 (三)左下角…… (四)右下角

檢査時按四角之筆形及順序，每字得四碼：

(例) 頭—0123 截—4320 驟—0123

第三條 字之上部或下部，祇有一筆或一複筆時，無論在何地位，均作左角，其右角作0。

(例) 宣 直 首 冬 巢 宗 毋

每筆用過後，如再克他角，亦作0。

(例) 干 之 持 掛 大 斗 巢 時

第四條 由整個口門門所成之字，其下角取內部之筆，但上下左右有他筆時，不在此例。

(例) 國—0013 閉—7724 關—7712

蘭—4403 淵—7712

0010₄ 主

- 10~平面, *Hauptebene, Principal Plane*, § 418.
 20~位, *Hauptlagen, Principal Position*, § 223.
 26~線系, *Hauptserie, Principal Series*, § 490.
 61~點, *Hauptpunkt, Principal Point*, § 418.
 90~光線, *Hauptstrahl, Principal Ray*, § 407.
 97~慣量(轉動), *Hauptträgheitsmomente, Principal Moment of Inertia*, § 36.

0020₇ 亨

- 22~利, *Henry, Henry*, §§ 332, 333.

0022₇ 方

- 27~向量子性, *Richtungsquantelung, Directional Quantization*, § 513.

高

- 00~度之測量, *Höhenmessung, Height Measurement*, §§ 103, 181.

0023₁ 應

- 10~電動勢, *Induzierte Elektromotorische Kraft, Induced Electromotive Force*, § 317.
 77~用水力學, *Hydraulik, Hydraulics*, § 108.

0024₂ 底

- 10~面壓力, *Bodendruck, Pressure on the Bottom*, § 87.

0025₂ 摩

- 53~擦, *Reibung, Friction*, § 194.
 ~擦電, *Reibungselektrigkeit, Frictional Electricity*, § 262.
 ~擦, 內, *Innere Reibung, Internal Friction*, § 113.
 ~擦輪, *Friktions ad, Friction Wheel*, § 194.
 ~擦光, *Tribolumineszenz, Triboluminescence*, § 487.

0025₀ 庫

- 80~倫, *Coulomb, Coulomb*, § 211.

0040₈ 交

- 30~流工率, *Wechselstromleistung Alternating Current Power*, § 379.
 ~流電流, *Wechselstrom, Alternating Current*, § 375.
 ~流電阻, *Wechselstromwiderstand, Alternating Current Resistance*, § 376.
 ~流測量儀器, *Strommessinstrumente, Current Measuring Instrument*, § 369.

0041₄ 離

- 33~心力, *Zentrifugalkraft, Centrifugal Force*, §§ 37, 79.
 ~心節速器, *Zentrifugalregulator, Centrifugal Regulator*, § 39.

0060₁ 音

- 07~調, *Tonhöhe, Pitch*, § 140.
 26~程, *Musikalische Intervalle, Musical Interval*, § 147.
 40~叉, *Stimmgabel, Tuning Fork*, § 147.
 71~階, *Tonleiter, Musical Scale*, § 147.

0128₆ 顏

- 94~料, *Pigmente, Farbstoff, Pigment*, § 479.

0166₂ 諧

- 26~和, *Konsonanz, Consonance*, § 148.

0710₄ 望

- 34~遠鏡, *Fernrohr, Telescope*, § 425.

0762₀ 調

- 41~幅, *Modulation, Modulation*, §§ 371, 392.
 88~節, *Akkomodation, Accomodation*, § 428.

0824₀ 放

- 10~電, *Entladung, Discharge*, § 281.
 ~電, 電花, *Funkenentladung Spark Discharge*, § 289.
 ~電, 自激, *Selbständige Entladung, Self-excited Discharge*, §§ 282, 287.
 ~電, 被激, *Unselbständige Entladung, Not Self-excited Discharge*, §§ 282, 283.
 ~電, 無聲, *Stille Entladung, Silent Discharge*, § 288.

- ~電, 尖端, Spitzentladung, *Point Discharge*, § 288.
 24~射元素族, Radioaktive Familien, *Radioactive Families*, § 520.
 ~射元素之位移, Radioaktives Verschiebung, *Radioactive Displacement*, § 522.
 ~射現象, Radioaktivität, *Radioactivity*, § 519.
 40~大率, Vergrößerung, *Magnifying Power*.
 ~大率, 發散透鏡, § 416.
 ~大率, 凹鏡, § 407.
 ~大率, 凸鏡, § 408.
 ~大率, 會聚透鏡, § 415.
 ~大率光學儀器概論, § 422.
 ~大鏡, Lupe, *Magnifying Glass*, § 423.
 ~大管, Verstärkerröhre, *Amplifying Tube (or Valve)*, § 394.
 44~熱作用, Exotherme Prozesse, *Exothermal Process*, § 203.

0828₁ 旋

- 37~渦電場, § 328.
 ~渦流場, Wirbelfeld, *Vortex Field*, § 108.

0844₀ 效

- 00~率, Wirkungsgrad, *Efficiency*, § 45.
 ~率, 電機之, § 374.
 ~率, 熱力機械之, § 201.
 ~率, 光, § 486.

1010₀ 二

- 10~元系, Binäre Systeme, *Binary System*, § 186.

工

- 00~率, Leistung, *Power*, § 45.
 ~率計, Dynamometer, *Dynamometer*, § 369.
 28~作, Arbeit, *Work* § 40.
 ~作機械, Arbeitsmaschinen, *Work Machine*, § 70.

1010₁ 三

- 21~態點, Tripelpunkt, *Triple Point*, § 174.
 27~角形接線法, Dreieckschaltung, *Delta Connection*, § 381.

正

- 21~比限度, Proportionalitätsgrenz, *Proportionality, Limit*, § 81.
 47~切電流計, Tangentenbussole, *Tangent Galvanometer*, § 363.
 90~常狀態, Grundzustand, *Normal State*, § 495.
 ~常軌道, Grundbahn, *Normal Orbit*, § 494.

1010₇ 互

- 33~補色, Komplementärfarben, *Complementary Colors*, §§ 432, 477.
 53~感應, Gegenseitige Induktion, *Mutual Induction*, § 332.
 ~感係數, Gegeninduktivität, *Mutual Inductance*, § 332.

1010₈ 靈

- 29~韻, Empfindliche Flamme, *Sensitive Flame*, § 143.

1016₄ 霧

- *~Tau, *Dew*, §§ 180, 206.
 10~霜霧雪霰電雨等之下降, Niederschläge, *Precipitations (of the Atmosphere)*, § 206.
 61~點, Taupunkt, *Dew Point*, §§ 180, 206.

1022₇ 兩

- 27~色性, Dichroismus, *Dichroism*, § 455.

爾

- 47~格, Erg, *Erg*, § 40.

霧

- ~Nebel, *Fog*, § 206.

1024₈ 霰

- ~Graupeln, *Sleet*, § 206.

1030₇ 零

- 00~度能量, Nullpunktenergie, *Zero-point Energy*, § 515.

1040₀ 干

- 31~涉, Interferenz, *Interference*, § 126.
 ~Fresnel 氏式, §§ 437, 438.
 ~Fraunhofer 氏式, §§ 437, 439.

- ~ 涉儀, Interferometer, *Interferometer*, § 443.
 ~ 涉長度, Interferenzlänge, *Interference Length*, § 437.
 ~ 涉, 擊之, § 142.
 ~ 涉, 等傾, § 439.
 ~ 涉, 等厚, § 442.
 ~ 涉, 光之, § 437.

耳

- ~ Ohr, *Ear*, § 152.

1040, 平

- 21 ~ 行四邊形作圖法, Parallelogrammkonstruktion, *Parallelogram Construction*, § 11.
 ~ 衡, Gleichgewicht, *Equilibrium*, § 30.
 ~ 衡, 穩定, Stabiles, *Stable*, § 62.
 ~ 衡, 不穩, Labiles, *Unstable*, § 62.
 ~ 衡, 隨遇, Indifferentes, *Neutral (or Indifferent)*, § 62.
 ~ 衡, 介穩, Metastabiles, *Metastable*, § 62.
 ~ 衡之條件, Bedingung, *Condition*, § 62.
 30 ~ 流, Laminare Strömung, *Laminary Flow*, § 114.

1043₀ 天

- 10 ~ 平, Wage, *Balance*, § 75.
 26 ~ 線, Antenne, *Antenna*, § 387.
 27 ~ 色, Himmelsfarbe, *Sky Color*, § 448.

1062₀ 可

- 22 ~ 倒擺, Reversionspendel, *Reversible Pendulum*, § 61.
 38 ~ 逆過程, Reversible Prozesse, *Reversible Process*, § 196.
 77 ~ 聞限度, Hörbarkeitsgrenze, *Limit of Audibility*, § 140.

1060₀ 面

- 25 ~ 積定理, Flächensatz, *Law of Equal Areal Velocity*, § 66.

1071₂ 電

- ~ Hagel, *Hail*, § 206.

1071₀ 電

- 02 ~ 話, Telephonie, *Telephony*, § 371.
 ~ 話, 無線, § 392.
 10 ~ 工率, Elektrische Leistung, *Electric Power*, § 369.
 12 ~ 弧, Lichtbogen, *Electric Arc*, § 293.
 ~ 弧光譜, Bogenspektrum, *Arc Spectrum*, § 503.
 17 ~ 子, Elektron, *Electron*, § 213, 492.
 ~ 子論, Elektronentheorie, *Electron Theory*, § 213.
 ~ 子論, 金屬物質之, § 516.
 ~ 子之繞射, Elektronenbeugung, *Diffraction of Electrons*, § 514.
 ~ 子之自轉, Elektronendrall (oder Elektron-spin), *Electron-Spin*, § 512.
 ~ 子顯像鏡, Elektronenmikroskop, *Electron-Microscope*, § 307.
 ~ 子層, Elektronenschalen, *Electron Shells*, § 501.
 ~ 子氣體, Elektronengas, *Electron-gas*, § 515.
 18 ~ 磁波, Elektromagnetische Welle, *Electromagnetic Wave*, §§ 385, 474.
 ~ 磁場, Elektromagnetisches Feld, *Electromagnetic Field*, § 325.
 ~ 磁感應, Elektromagnetische Induktion, *Electromagnetic Induction*, § 317.
 ~ 磁, 斷路中之, § 323.
 ~ 磁管繼器, Elektromagnetische Relais, *Electromagnetic Relay*, § 370.
 ~ 磁體, Elektromagnete, *Electromagnet*, § 354.
 20 ~ 位 Elektrisches Potential, *Electric Potential*, § 220.
 ~ 位, 旋渦電場中之, § 328.
 ~ 位, 導體中之, § 224.
 ~ 位遞降度, Potentialgradient, *Potential Gradient*, § 220.
 ~ 位計, Potentiometer, *Potentiometer*, § 276.
 23 ~ 偏轉, Elektrische Ablenkung, *Electric Deflection*, § 307.
 24 ~ 化當量, Elektrochemisches Äquivalent, *Electrochemical Equivalent*, § 269.
 ~ 動機, Elektromotor, *Electric Motor*, § 374.
 ~ 動勢, Elektromotorische Kraft, *Electromotive Force*, §§ 242, 249.
 ~ 電動勢, 電池之, § 274.
 25 ~ 伸縮, Elektrostriktion, *Electrostriction*, § 238.

- 26~偶, Elektrischer Dipol, *Electric Dipole*, §§ 214, 223, 228.
- 27~像, Elektrische Bild, *Electric Image*, § 228.
- ~像力, Bildkraft, *Force of Electric Image*, § 228.
- ~解, Elektrolyse, *Electrolysis*, § 265.
- ~解傳導, Elektrolytische Leitung, Elektrolytische Leitfähigkeit, *Electrolytic Conduction*, §§ 256, 265.
- ~解傳導, 固體中之, § 256.
- ~解極化, Elektrolytische Polarisation, *Electrolytic Polarization*, §§ 273, 275.
- ~解中之副作用, § 270.
- ~解分離, Elektrolytische Dissoziation, *Electrolytic Dissociation*, § 267
- ~解鐵, Elektrolytisen, *Electrolytic Iron*, § 272.
- ~的位移, Dielektrische Verschiebung, *Electric Displacement*, § 235.
- 30~之傳導, Elektrizitätsleitung, *Conduction of Electricity*.
- ~之傳導, 電解液中, § 268.
- ~之傳導, 金屬中, §§ 216, 245.
- ~之傳導, 氣體中, § 281.
- ~之本性, Wesen der Elektrizität, *Nature of Electricity*, § 213.
- ~流, Elektrischer Strom, *Electric Current*, § 244.
- ~流, 交流, Wechselstrom, *Alternating Current*, § 375.
- ~流, 無工, Wattloser Strom, *Idle Current*, § 379.
- ~流計, Galvanometer, *Galvanometer*, §§ 364, 365.
- ~流計, 磁轉, Nadelgalvanometer, *Moving-Magnet Galv.*, § 364.
- ~流計, 衝擊, Ballistisches Galv. *Ballistic Galv.* § 365.
- ~流計, 圓轉, Drehspul Galv. *Moving Coil Galv.*, § 365.
- ~流工率, Stromleistung, *Electric Power*, § 260.
- ~流工作, Stromarbeit, *Current Work*, § 260.
- ~流強度, Stromstärke, *Current Strength*, § 244.
- ~流強度, 有效, § 379.
- ~流磁性現象, Galvanomagnetische Erscheinung, *Galvanomagnetic Phenomenon*, § 360.
- ~流密度, Stromdichte, *Current Density*, § 244.
- ~流源, Stromquelle, *Current Source*, § 242.
- ~流源之串聯與並聯, Reihenschaltung und Parallelschaltung, *Series and Parallel Connections*, § 258.
- ~流, 對流, Strömungsstrom, *Streaming (or Convection) Current*, § 280.
- ~流熱, Stromwärme, *Current Heat*, § 260.
- ~流分支, Stromverzweigung, *Current Branches*, §§ 249, 259.
- ~容, Kapazität, *Capacity*, § 229.
- ~容之測量, §§ 253, 380.
- 33~滲, Elektrophores (oder Kataphorese), *Cataphoresis*, § 280.
- 34~池, Galvanische Element, *Galvanic Cell*, § 276.
- ~ Elektrische Welle, *Electric Wave*, §§ 385, 474.
- ~波共振器, Elektrischer Resonator, *Electric Resonator*, § 388.
- 38~冷光, Elektrolumineszenz, *Electric Luminescence*, § 487.
- 40~力線, Elektrische Feldlinien, Elektrische Kraftlinien, *Electric Line of Force, Lines of Electric Force*, § 221.
- ~內滲 Elektromose, *Electric Osmosis (or Electric Endosmose)* § 280.
- 41~極, Elektrode, *Electrode*, § 265.
- 42~機, Elektrische Maschine, *Electric Machine*, § 373.
- 44~花, Funken, *Spark*, § 289.
- ~花放電, Funkenentladung, *Spark Discharge*, § 289.
- ~花感應圈, Funkeninduktor, *Induction Coil*, § 372.
- ~花隙, Funkenstrecke, *Spark Gap*, § 289.
- ~花光譜, Funkenpektren, *Spark Spectrum*, § 503.
- ~荷, Elektrische Ladung, *Electric Charge*, § 210.
- ~荷子, Ladungsträger, *Charge Carrier*, § 306.
- ~荷之空間密度, Elektrische Raumdichte, *Space Density of Electric Charges*, § 210.
- ~荷流動之速度, § 247.
- ~荷中心, Schwerpunkt elektrischer Ladungen, *Center of Electric Charges*, § 214.
- ~荷表面密度, Elektrische Flächen-dichte, *Surface Density of Electric Charges*, § 210.
- ~勢順序, Spannungsreihe, *Electromotive Force Series*, § 262.

- 46~場, Elektrisches Feld, *Electric Field*, § 218.
 ~場強度, Elektrische Feldstärke *Strength of Electric Field*, § 218.
 ~場強度, 導體中之, § 224.
 ~場, 電偶之, § 223.
 ~場, 點電荷之, § 223.
- 47~報, Telegraphie, *Telegraphy*, § 371.
 ~報, 無線, Drahtlose Telegraphie, *Wireless Telegraphy*, § 390.
- 50~抗, Blindwiderstand, *Reactance*, § 376.
- 51~振子, Elektrischer Oszillator, *Electric Oscillator*, § 385.
- 60~量, Elektrizitätsmenge, *Electric Quantity*, § 210.
 ~量計, Voltameter, *Voltmeter*, § 269.
 ~量子, Elektrisches Elementarquantum, *Elementary Quantum of Electricity*, §§ 213, 492.
 ~圖, Elektrische Figur, *Electric Figure*, § 294.
- 71~壓, Elektrische Spannung, *Voltage (or Electric Pressure)*, § 219.
 ~壓計, Elektrischer Spannungsmesser, *Voltmeter*, § 368.
 ~壓, 有效, § 379.
 ~壓分段法, Spannungsteilung, *Voltage Dividing*, § 250.
- 74~附着力, Elektrische Klebkraft, *Electric Adhesive Force*, 254.
- 75~體, Elektret, *Electret*, § 234.
- 77~阻, Elektrischer Widerstand, *Electric Resistance*, § 246.
 ~阻, 交流, § 376.
 ~阻, 電解液之, § 273.
 ~阻之測量, §§ 246, 252.
 ~阻之溫度係數, § 255.
 ~阻溫度計, Widerstandthermometer, *Resistance Thermometer*, § 255.
 ~阻, 內, Innerer Widerstand, *Internal Resistance*, § 258.
 ~阻, 氣體放電中之, § 286.
 ~阻輻射計, Bolometer, *Bolometer*, § 467.
 ~學測量計, Elektrische Messinstrumente, *Electric Measuring Instrument*, § 363.
 ~閃, Blitz, *Lightning*, § 286.
- 80~鍍術, 電冶術, Galvanoplastik, *Galvanoplasty*, § 272.
- 81~矩, Elektrisches Moment, *Electric Moment*, § 214.
- 90~光學, Elektrooptik, *Electrooptics*, § 463.

1071₇ 瓦

- 24~特, Watt, *Watt*, § 260.

1073₁ 雲

- ~ Wolke, *Cloud*, § 206.

1090₀ 不

- 01~諧和, Dissonanz, *Dissonance*, § 148.
 10~可逆過程, Irreversible Prozesse, *Irreversible Process*, § 196.
 22~變量, Invariant, *Invariant*, § 530.
 33~滅定律, Erhaltungssatz, *Conservation Law*.
 ~滅定律, 電量, § 212.
 ~滅定律, 能量, § 42.
 ~滅定律, 動量, § 33.
 ~滅定律, 角動量, § 46.
 ~滅定律, 物質, § 12.
- 51~輻射軌道, Stationäre Bahnen, *Stationary Orbit*, § 494.

1096₃ 霜

- ~ Reif, *Frost*, § 206.

1111₁ 非

- ~ Euclid 氏幾何學, § 514.
- 18~頑磁性 (或剩磁), Remanenz, *Remanence (or Residual Magnetism)*, § 344.
- 38~導體, Nichtleiter, *Non-conductor*, § 215.
- 60~晶體, Amorphe Körper, *Amorphous Body*, § 527.
- 90~常光線, Ausserordentlicher Strahl, *Extra-ordinary Ray*, § 455.

1164₀ 硬

- 00~度, Härte, *Hardness*, § 81.

1166₀ 硒

- 90~光電管, Selenzelle, *Selenium Cell*, § 489.

1220₀ 引

- 40~力位, Potential im Gravitationsfeld, *Gravitationspotential, Gravitational Potential*, § 69.
 ~力場強度, Feldstärke der Gravitation, *Strength of Gravitational Field*, § 69.

1223₀ 弧

- 90~光, Bogenlicht, *Arc Light*, § 293.
~光燈, Bogenlampe, *Arc Lamp*, § 293.

水

- 11~頭, Ortshöhe, *Head*, § 109.
30~流抽氣機, Wasserstrahlpumpe, *Water-jet Pump*, § 106.
34~波, Wasserwellen, *Water Waves*, § 123.
60~晶透鏡法, Quarzlinzenmethode, *Quartz-Lens Method*, § 468.
71~壓機, Hydraulische Presse, *Hydraulic Press*, § 86.
87~銀燈, Quecksilberlampe, *Mercury Lamp*, § 293.

1224₇ 發

- 10~電機, Dynamomaschine, *Dynamo (electric Machine)*, § 373.
24~動機械, Kraftmaschine, *Power Machine*, § 70.
~射率, Emissionsvermögen, *Emissive Power*, § 481.
~射光譜, Emissionsspektren, *Emission Spectrum*, §§ 475, 499.
48~散透鏡, Zerstreungslinsen, *Divergent Lens*, § 416.
90~光效率, Optischer Nutzeffek, *Luminous Efficiency*, §§ 261, 486.
~光電子, Leuchtelektron, *Luminous Electron*, 499.
~光色素, Leuchtfarbe, *Luminous Paint*, § 487.

1241₀ 孔

- 21~徑, Apertur, *Aperture*.
~徑, 數字, Numerische Apertur, *Numerical Aperture*, §§ 426, 429.

1240₁ 延

- 77~展限度, Fließgrenze (oder Streckgrenze), *Extension Limit*, § 81.

1241₃ 飛

- 67~躍溫度, Sprungtemperatur, *Spring-temperature*, § 256.

1413₁ 聽

- 77~覺共振理論, Resonanztheorie des Hörens, *Resonance Theory of Hearing*, § 152.

1523₀ 融

- 27~解, Schmelzen, *Melting (or Fusion)*, § 174.
~解熱, Schmelzwärme, *Heat of Fusion*, § 175.
~解時體積之變遷, § 176.
61~點, Schmelzpunkt, *Melting Point (or Fusion Point)*, § 174.
~點與溶質之關係, § 188.
~點與壓力之關係, § 177.

1625₀ 彈

- 38~道, Ballistische Kurve, *Ballistic Curve*, § 57.
95~性, Elastizität, *Elasticity*.
~性係數, Elastizitätsmodul, *Modulus of Elasticity*, § 82.
~性後效, Elastische Nachwirkung, *Elastic After-Effect*, § 81.
~性限度, Elastizitätsgrenze, *Elastic Limit*, § 81.
~性, 液體之, Flüssigkeit, *Liquid*, § 91.
~性, 氣體之, Gas, *Gas*, § 100.
~性, 固體之, Feste Körper, *Solid*, § 81.

1734₁ 尋

- 90~常光線, Ordentlicher Strahl, *Ordinary Ray*, § 455.

1750₁ 羣

- 35~速度, Gruppengeschwindigkeit, *Group Velocity*, § 514.

1790₄ 柔

- 75~體, Deformierbarer Körper, *Deformable Body*, § 81.

1861₇ 碰

- 50~撞, Stoss, *Impact*, § 51.
~撞頻率(氣體分子之), Stosszahl, *Frequency of Collision*, § 99.
~撞游離, Stossionisation, *Ionization by Collision*, §§ 282, 500.

1863₂ 磁

- 17~子, Magnetron, *Magnetron*, § 512.
20~位, Magnetisches Potential, *Magnetic Potential*, § 316.

- 21~傾角, *Inklination, Inclination*, § 301.
- 23~偏轉, *Magnetische Ablenkung, Magnetic Deflection*, § 307.
~偏角, *Deklination, Declination*, § 301.
- 24~化零(曲)線, *Magnetische Nullkurve, Magnetization Curve*, § 343.
~化強度, *Magnetisierung, Intensity of Magnetization*, § 340.
~化係數, *Suszeptibilität, Susceptibility*, § 337.
- 25~伸縮, *Magnetostraktion, Magnetostriction*, § 342.
- 26~偶, *Magnetischer Dipol, Magnetic Dipole*, § 297.
~偶層, *Magnetische Doppelschicht, Magnetic Double Layer*, § 303.
- 34~滯, *Hysteresis, Hysteresis*, § 343.
- 37~通(或磁通量), *Magnetischer Kraftfluss, Magnetic Flux*, §§ 318, 350.
- 40~力線, *Magnetische Kraftlinien, Magnetische Feldlinien, Magnetic Line of Force, Lines of Magnetic Force*, §§ 299, 347, 349.
- 41~極, *Magnetpol, Magnetic Pole*, § 296.
- 46~場, *Magnetisches Feld, Magnetic Field*, § 290.
~場, 電流之, §§ 302, 303, 304.
~場強度, *Magnetische Feldstärke, Strength of Magnetic Field*, § 299.
~場強度之測量, § 330.
- 55~轉電流計, *Nadelgalvanometer, Moving Magnet Galvanometer*, § 364.
- 71~壓, *Magnetische Spannung, Magnetic Pressure*, § 331.
~壓計, *Magnetischer Spannungsmesser, Magnetic Potentiometer*, § 331.
- 75~體, *Magnet, Magnet*, § 266.
~體, 永久, *Permanente Magnete, Permanent Magnet*, §§ 342, 344.
~體之品質指數, *Gütezziffer von Magneten, Quality Figure of Magnets*, § 344.
- 77~阻, *Magnetischer Widerstand, Magnetic Reluctance*, § 350.
- 81~矩, *Magnetisches Moment, Magnetic Moment*, § 297.
~矩, 導線環電流之, § 310.
~矩, 原子之, § 513.
- 90~光學, *Magnetooptik, Magneto-optics*, § 462.
- 15~性, *Magnetismus, Magnetism*, § 296.
~性基元區域, *Magnetische Ele-*

mentarbezirke, Magnetic Elementary Regions, § 351.

2010₄ 重

- 33~心, *Schwerpunkt, Center of gravity*, §§ 34, 59.
~心定理, § 35.
- 40~力, *Schwerkraft, Gravity*, § 53.
~力波, *Schwerwellen, Gravitational Waves*, § 123.
~力加速度, *Erdbeschleunigung, Acceleration of Gravity*, § 53.
~力加速度 g 之測定, § 61.
- 60~量, *Gewicht, Weight*, § 55.
~量, 光子之, § 400.
- 95~性質量(重質), *Schwere Masse, Gravitational Mass*, § 54.

2021₅ 位

- 21~能, *Potentielle Energie, Potential Energy*, § 44.
- 27~移電流, *Verschiebungsstrom, Displacement Current*, § 326.
~移定律(Wien 氏), *Verschiebungsgesetz, Displacement Law*, § 484.
- 46~相(或相常數), *Phase, Phase*, §§ 117, 375.
~相之差, *Phasendifferenz, Phase Difference*, §§ 123, 375.
~相速度, *Phasengeschwindigkeit, Phase Velocity*, § 466.

2033₁ 焦

- 00~度, *Dioptrie, Dioptre*, § 414.
- 44~熱電, *Pyroelektrizität, Pyroelectricity*, § 238.
- 48~散面, *Katakaustik, Caustic Surface*, § 407.
- 61~距, *Brennweite, Focal Length (or Distance)*, § 407.
~點, *Brennpunkt, Focus*.
~點, 透鏡之, § 414.
~點, 凹鏡之, § 407

2040₇ 受

- 88~範性, *Plastizität, Plasticity*, § 81.

季

- 27~候風, *Monsun, Monsoon*, § 207.

雙

- 52~折射, Doppelbrechung, *Double Refraction*, § 454.
 ~折射, 電場中之, § 459.
 60~星, Doppelsterne, *Double Star*, § 66.

2071₄ 毛

- 26~細上昇高, Kapillare Steighöhe, *Height of Capillary Elevation*, § 93.
 ~細角, Randwinkel, *Angle of Capicity*, § 93.
 ~細作用, Kapillarität, *Capillarity*, § 93.

2091₃ 統

- 04~計法, Statistik, *Statistics*, § 94.
 46~觀, Markroskopisch, *Macroscopic*, § 94.

2093₂ 絃

- 23~線振動, Seitenschwingung, *String Vibration*, § 119.
 ~線靜電計, Seitenelektrometer, *String Electrometer*, § 231.

2108₀ 順

- 18~磁性, Paramagnetismus, *Paramagnetism*, §§ 336, 338.

2121₁ 能

- 60~量, Energie, *Energy*, § 42.
 ~量密度, Energiedichte, *Energy Density*.
 ~量密度, 電場, § 233.
 ~量密度, 磁場, § 358.
 ~量, 電磁場之, § 358.
 ~量, 電場之, § 233.
 ~量, 彈性, § 85.
 ~量, 磁場之, § 358.
 ~量, 光子之, § 489.
 ~量階級, Energieniveaus (oder Energiestufen), *Energy Level*, § 494.
 ~量原理, Energieprinzip, *Principle of Conservation of Energy*, §§ 42, 192.
 ~量, 電及化學, § 278.

2122₁ 行

- 60~星運動, Planetenbewegung, *Planetary Motion*, § 66.

衝

- 57~擊電流計, Ballistisches Galvanometer, *Ballistic Galvanometer*, § 365.
 60~量, Impuls, *Impulse*, § 25.
 ~量定理, Impulssatz, *Theorem of Conservation of Momentum*, § 33.

2123₁ 水

- 30~之反常, Anomalie des Wassers, *Anomaly of Water*, § 161.
 90~當量, Wasserwert, *Water Equivalent*, § 173.

卡

- ~Kalorie, *Caloric*, § 168.
 04~計(量熱器), Kalorimeter, *Calorimeter*, § 173.

2128₀ 頻

- 00~率, Frequenz, *Frequency*, § 117.
 ~率條件, Frequenzbedingungen, *Frequency Condition*, § 494.
 ~率, 固有, Eigenfrequenz, *Natural Frequency*, § 118.

2171₀ 比

- 20~重, Spezifisches Gewicht, *Specific Gravity*, § 56.
 ~量計, Aräometer, *Areometer*, § 89.
 44~熱, Spezifische Wärme, *Specific Heat*, §§ 169, 511.
 ~熱, 氣體之, § 171.

2177₂ 齒

- 58~輪, Zahnrad, *Toothed Wheel*, § 73.

2190₃ 紫

- 23~外線, Ultraviolett, *Ultraviolet Ray*, §§ 465, 469.
 27~色素, Sehpurpur, *Visual Purple*, § 430.

2191₀ 紅

- 21~紫色調, Purpurton, *Purple Tone*, § 477.
 23~外線, Ultrarot, *Infra red Rays*, §§ 465, 468.

27~向移動, Rotverschiebung, *Red Shift*, § 543.

2210₀ 剝

32~淨原子, Stripped Atom, § 501.

2220₀ 倒

21~行飛車, Schleifenfahrt, *Looping the Loop*, § 79.

2220₇ 彎

55~曲, Biegung, *Bending*, § 82.

2221₀ 亂

30~流, Turbulente Strömung, *Turbulent Flow*, § 114.

36~溫層, Troposphäre, *Troposphere*, § 205.

2224₀ 仟

10~瓦, Kilowatt, *Kilowatt*, § 260.

77~巴, Kilobar, *Kilobar*, § 103.

2224₇ 變

71~壓率, (變壓器之), Übersetzungsverhältnis, *Transformation Ratio*, § 382.

~壓器, Transformator, *Transformer*, § 382.

77~阻器, Rheostat, *Rheostat*, § 251.

2226₄ 循

16~環過程, (Carnot 氏), Kreisprozess, *Cyclic Process*, § 200.

2245₃ 幾

21~何光學, Geometrische Optik, *Geometrical Optics*, § 403.

2272₁ 斷

24~攔器, Unterbrecher, *Interrupter*, § 372.

67~路, Offener Kreis, *Open Circuit*, § 386.

2288₆ 巔

24~值, (交流電流), Scheitelwert, *Peak Value*, § 375.

2290₀ 剩

88~餘射線, Reststrahlen, *Residual Ray*, § 468.

2290₄ 樂

66~器, Musikinstrumente, *Musical Instruments*, §§ 149, 150, 151.

88~管, Pfeife, *Pipe*, § 150.

2299₃ 絲

20~絃樂器, Seiteninstrumente, *String Instruments*, § 149.

2320₂ 參

44~考坐標系, Bezugssysteme, *Frame of Reference*, § 529.

2322₇ 偏

25~傳, 電場中陰極射線之, § 307.

41~極, Polarisation, *Polarization*, § 125.

~極, 正圓, Zirkulare Polarisation, *Circular Polarization*, § 125.

~極面, Polarisationssebene, *Plane of Polarization*, § 452.

~極面之轉移, § 460.

~極角, § 452.

~極, 波動之, § 125.

~極, 直線, Lineare Polarisation, *Linear Polarization*, § 125.

~極, 橢圓, Elliptische Polarisation, *Elliptic Polarization*, § 125.

~極, 光之, § 452.

~極光, 直線, § 453.

~極光, 橢圓, §§ 453, 455.

~極光, 正圓, §§ 453, 455.

55~轉, Ablenkung, *Deflection*.

2323₄ 伏

24~特, Volt, *Volt*, § 220.

~特計, Voltmeter, *Voltmeter*, § 368.

~特秒, Voltsekund, *Volt Second*, § 362.

2412₇ 動

10~電學, Elektrokinetik, *Electrokinetics*, § 280.

21~能, Kinetische Energie, *Kinetic Energy*, § 43.

40~力平衡, Dynamisches Gleichgewicht, *Dynamic Equilibrium*, § 94.

60~量, Bewegungsgrösse, *Momentum*, § 490.

~量, 光子之, § 490.

2420₀ 射

26~線, Strahlen, *Ray*, §§ 473, 519.

~線, α , § 519.

~線, α , (計數), § 523.

~線, β , § 519.

~線, H, § 524.

~程, (拋射體之), *Wurfweite*, *Range*, § 57.

~程, (α 射線之), *Reichweite* (oder *Range*), *Range*, § 521.

~流, *Ausströmung*, *Efflux*, § 110.

~氣, *Emanation*, *Emanation*, § 520.

2421₀ 化

77~學光, *Chemolumineszenz*, *Chemiluminescence*, § 487.

2444₇ 皺

90~光, *Schliere*, *Streak*, § 410.

2454₁ 特

05~性曲線, *Charakteristik*, *Characteristics*.

~性曲線, 導體之, § 257.

~性曲線, 真空管之, § 304.

~性曲線, 氣體放電之, § 286.

2491₁ 繞

24~射, *Beugung*, *Diffraction*, § 137.

~射, *Fraunhofer* 氏式, §§ 444, 446.

~射, *Fresnel* 氏式, §§ 444, 445.

~射現象, *Beugungserscheinungen*, *Diffraction Phenomena*, § 137.

~射, 物質波之, § 514.

~射, 微粒物質上之, § 448.

~射, 狹縫中之, § 445, 446.

~射, 顯微鏡中之, § 449.

~射影, *Beugungsscheiben*, *Diffraction Disc*, § 443.

~射, 光之, § 444.

~射光柵, *Beugungsgitter*, *Diffraction Grating*, § 447.

2494₇ 稜

80~鏡, *Prisma*, *Prism*, § 413.

~鏡消色差, *Achromatisches Prisma*, *Achromatic Prism* (or *Achromat*), § 132.

~鏡, 直視, *Geradsichtiges Prisma*, *Direct Vision Prism*, § 433.

~鏡, 全反射, *Totalreflektierendes Prisma*, *Total Reflection Prism*, § 412,

2496₁ 結

45~構原理, *Aufbauprinzip*, *Structure Principle*, § 501.

2510₀ 生

27~物光, *Biolumineszenz*, *Bioluminescence*, § 487.

2524₃ 傳

52~播, *Fortpflanzung*, *Propogation*.

~播, 電磁擾動之, § 327.

~播, 波動之, § 123.

~播, 聲之, § 138.

~播, 擾動之, § 122.

~播, 光之, § 398.

2591₇ 純

00~音 *Ton*, *Tone* (or *Note*), § 139.

60~量, *Skalare*, *Scalar*, § 10.

90~光譜色, *Reine Spektralfarbe*, *Pure Spectral Color*, § 477.

2600₀ 白

93~熾電燈, *Glühlampe*, *Incandescent Lamp*, § 261.

自

23~然科學, *Naturwissenschaften*, *Natural Science*, § 1.

~然光, *Natürliches Licht*, *Natural Light*, § 453.

38~激放電, *Selbständige Entladung*, §§ 282, 287.

50~由度, *Freiheitsgrade*, *Degree of Freedom*, § 156.

~由下落, *Freier Fall*, *Free Falling*, § 57.

~由路程, *Freie Weglänge*, *Free Path*, §§ 99, 113.

53~感應, *Selbstinduktion*, *Self Induction*, § 333.

~感係數, *Selbstinduktionskoeffizient* (oder *Induktivität*), *Coefficient of Self-induction* (or *Self Inductance*), § 333.

~感係數之測量, § 330.

2690₀ 和

00~音, *Akkorde*, *Accord*, § 139.

2693₂ 線

20~系極限, *Seriengrenze*, *Series Limit*, § 496.

23~狀光譜, Linienspektrum, *Line Spectrum*, §§ 475, 499, 503.

2712₀ 勻

51~排光譜, Normalspektrum, *Normal Spectrum*, § 447.

2720₀ 多

46~相交流, Drehstrom, *Polyphase Current*, § 381.

2722₀ 向

33~心力, Zentripetalkraft, *Centripetal Force*, § 37.

60~量, Vektor, *Vector*, §§ 10, 11.

~量和, Resultierende, *Resultant*, § 11.

~量之合併, Vektor addition, *Vector addition*, § 11.

2722₇ 角

00~度之測量, § 8.

~度鏡, Winkelspiegel, *Angular Mirror*, § 406.

24~動力, 分子電流之, § 352.

~動量, Drehimpulse, (oder Drall), *Angular Momentum*, § 46.

35~速度, Winkelgeschwindigkeit, *Angular Velocity*, § 20.

46~加速度, Winkelbeschleunigung, *Angular Acceleration*, § 20.

2723₂ 象

77~限靜電計, Quadrantelektrometer, *Quadrant Electrometer*, § 231.

像

~見鏡像。

46~場彎曲, Bildwölbung, *Curvature of the Field*, § 419.

48~散現象, Astigmatismus, *Astigmatism*, § 419.

~散性, 眼之, § 429.

80~差, 球面, Spärische Aberration, *Spherical Aberration*, § 419.

~差, 色, Chromatische Aberration, *Chromatic Aberration*, § 419.

2724₇ 假

08~說, Hypothese, *Hypothesis*, § 4.

2752₀ 物

16~理學定律, Physikalische Gesetz, *Physical Law*, § 4.

21~態, Aggregatzustände, *State of Aggregation (Matter)*, § 13.

72~質, Materie, *Matter*, § 12.

~質之基本成份, Bausteine der Materie, *Fundamental Buildingstone of Matter*, § 518.

~質波, Materiewellen, *Material Wave*, § 514.

80~鏡, Objektiv, *Objective*, § 424.

~鏡測微計, Objektmikrometer, *Objective Micrometer*, § 427.

2760₄ 各

27~向異性物體, Anisotrope Körper, *Anisotropic Body* §§ 82, 455.

2771₇ 色

00~盲, Farbenblindheit, *Color Blind*, § 478.

07~調, Farbton, *Color Tone*, § 477.

~調之循環, Farbenkreis, *Color Cycle*, § 477.

13~球, Chromosphäre, *Chromosphere*, § 475.

48~散, Dispersion, *Dispersion*, §§ 432, 447, 466.

~散, 反常, Anomale Dispersion, *Anomalous Dispersion*, § 466.

~散, 光線穿過稜鏡後之, § 432.

~散, 光線穿過光柵後之, § 447.

77~覺, Farbensehen, *Color Vision*, § 430.

2791₇ 絕

27~緣體, Isolatoren, *Insulator*, § 215.

34~對稱物法, Absolute, Wägung, *Absolute Weighing*, §§ 76, 107.

~對溫度, Absolute Temperatur, *Absolute Temperature*, § 155.

44~熱變, Adiabatische Änderung, *Adiabatic Change*, §§ 165, 172.

2792₇ 移

30~液管, Pipette, Stechheber, *Pipette*, § 104.

2810₀ 以

40~大假說, Ätherhypothese, *Ether Hypothesis*, §§ 218, 435.

2821₁ 作

- 77~用量子, Wirkungsquantum, *Quantum of Action*, §§ 483, 489.
~用與反作用, *Actio und Reactio*, Wirkung und Gegenwirkung, *action and reaction*, § 29.

2824₀ 微

- 00~音器, Mikrophon, *Microphone*, § 371.
30~察, Mikroskopisch, *Microscopic*, § 94.
90~粒射線, Korpularstrahlen, *Corpuscular Ray*, § 290.

2824₇ 復

- 37~凝現象, Regelation, *Regelation*, § 177.
80~合作用, Rekombination, *Recombination*, § 283.

2874₀ 收

- 44~熱作用, Endotherme Prozesse, *Endothermal Process*, § 203.

2898₁ 縱

- 34~波, Longitudinale Welle, *Longitudinal Wave*, § 125.

2992₀ 秒

- ~Sekunde, *Second*, § 9.
56~擺, Sekundenpendel, *Seconds Pendulum*, § 60.
80~差距, Parsec (oder Sternweite), *Parsec*, § 7.

3010₁ 空

- 30~穴輻射, Hohlraumstrahlung, *Cavity Radiation*, § 481.
77~間電荷, Elektrische Raumladung, *Electric Space Charge*, § 283.
80~氣之液化, § 185.
~氣之溫度, § 205.

3011₃ 流

- 26~線, Stromlinien, *Stream Lines*, § 108.
44~莖, Stromfaden, *Filaments of Flow*, § 108.
46~場, Strömungsfeld, *Field of Flow*, § 108.
67~明, Lumen, *Lumen*, § 400.

- 75~體壓力計, Manometer, *Manometer*, § 105.
88~管, Stromröhren, *Tubes of Flow*, § 108.

3014₇ 液

- 24~化, Verflüssigung, *Liquefaction*, § 184.
75~體, Flüssigkeit, *Liquid*.
~體, 理想, Ideale Flüssigkeit, *Perfect Liquid*, § 108.
~體動力學, Hydrodynamik, *Hydrodynamics*, § 108.
~體射線, Flüssigkeitsstrahlen, *Liquid Jet*, § 115.
~體結構, Aufbau der Flüssigkeiten, *Structure of Liquid*, § 527.
~體自由表面, Freie Flüssigkeitsoberflächen, *Free Surface of Liquid*, § 88.
~體溫度計, Flüssigkeitsthermometer, *Liquid Thermometer*, § 166.
~體靜力學, Hydrostatik, *Hydrostatics*, § 86.
~體壓力, Flüssigkeitsdruck, *Liquid Pressure*, § 86.
~體, 粘滯, Zähle Flüssigkeit, *Viscous Liquid*, §§ 108, 113.

3023₂ 永

- 27~久運動, Perpetuum Mobile, *Perpetual Motion*, §§ 42, 195.
~久運動, 第一種, §§ 42, 195.
~久運動, 第二種, § 195.

3030₄ 避

- 10~雷針, Blitzableiter, *Lightning Rod*, § 226.

3040₁ 宇

- 30~宙射線, Höhenstrahlung (oder Ultrastrahlung), *Cosmic Rays*, § 473.

準

- 40~直管, Kollimatorrohr, *Collimator*, § 433.

3040₄ 安

- 40~培, Ampere, *Ampere*, § 244.
~培計, Amperemeter, *Ammeter*, § 368.
~培秒, Ampere Sekunde, *Ampere second*, §§ 211, 244.
~培匝, Amperewindungen oder Amperewindungszahl, *Ampere-turns*, § 362.

3060₃ 容

- 00~度, Spezifisches Volumen, *Specific Volume*, § 56.
 10~電器, Kondensator, *Condenser*, § 230.
 ~電器之能量, § 233.
 ~電器導片之吸引, § 233.
 ~電器, 介電體, § 234.

3077₂ 密

- 00~度, Dichte, *Density*, § 56.
 ~度, 臨界, § 184.
 ~度, 水之, § 161.

3080₁ 定

- 21~傾中心, Metazentrum, *Metacenter*, § 90.
 37~運論, Determinismus, *Determinism*, § 2.
 61~點 (溫度計之), Fixpunkte, *Fixed Point*, § 166.

3080₆ 實

- 75~體鏡, Stereoskop, *Stereoscope*, § 431.
 78~驗, Experimente, *Experiment*, § 3.

3130₁ 遷

- 27~移率, Beweglichkeit, *Mobility*.
 ~移率, 電解液中游子之, § 268.
 ~移率, 金屬中電子之, § 245.

3130₆ 逼

- 40~力, Zwangskraft, *Constraining Force*, § 29.

3210₀ 測

- 10~不準原理, Ungenauigkeitsrelation, *Principle of Indeterminism*, § 514.

3213₀ 冰

- 21~卡計, Eiskalorimeter, *Ice Calorimeter*, § 175.
 22~山, Gletscher, *Glacier*, § 177

3214₇ 浮

- 36~泊, Schwimmen, *Floating*, § 90.
 40~力, Auftrieb, *Buoyancy*.
 ~力, 液體中之, § 89.
 ~力, 氣體中之, § 107.

3230₂ 近

- 60~日點, Perihel, *Perihelion*, § 66.
 ~日點之移動, § 542.

透

- 80~鏡, Linsen, *Lens*, § 413.
 ~鏡, 發散, Zerstreuungslinsen, *Divergent Lens*, § 438.
 ~鏡組, Linsensysteme, *Lens System*, § 420.
 ~鏡之缺點, § 419.
 ~鏡, 厚, Dicke Linsen, *Thick Lens*, § 418.
 ~鏡, 會聚, Sammellinsen, *Convergent Lens*, § 415.
 ~鏡公式之討論, § 417.

3312₂ 滲

- 32~透, Osmose, *Osmosis*, § 189.
 ~透壓, Osmotischer Druck, *Osmotic Pressure*, § 189.

3316₃ 溶

- 27~解熱, Lösungswärme, *Heat of Solution*, § 186.
 ~解壓力, Lösungsdruck, *Solution Pressure*, § 274.
 30~液, Lösung, *Solution*, § 186.
 ~液, 膠體, Kolloidale Lösung, *Colloidal Solution*, § 187.

3322₇ 補

- 29~償法, Kompensationsmethode, *Compensation Method*, § 276.
 ~償擺, Rostpendel, *Compensated Pendulum*, § 160.

3410₀ 對

- 30~流, Konvektion, *Convection*, § 197.
 ~流電流, Konvektionsstrom, *Convection Current*, § 311.
 58~數減縮, Logarithmisches Dekrement, *Logarithmic Decrement*, §§ 118, 366.

3413₁ 法

- 50~拉, Farad, *Farad*, § 229.

3414₇ 波

- 10~面, Wellenfläche, *Wave Surface*, § 123.
 ~面, 晶體中之, § 455.

12~列, Wellenzug, *Wave Train*, § 437.

24~動, Welle, *Wave*, § 122.

~動說, Wellentheorie, *Wave Theory*.

~動說, 物質, § 514.

~動說, 光之, § 435.

~動力學, Wellenmechanik, *Wave Mechanics*, § 514.

35~速, Wellengeschwindigkeit, *Wave Velocity*, § 123.

58~數, Wellenzahl, *Wave Number*, § 436.

71~長, Wellenlänge, *Wave Length*, § 124.

~長, 聲之, § 140.

~長, 光之, §§ 436, 465.

~長標準, Wellenlängen-Normal, *Wave Length Standard*, § 7.

3424₇ 被

38~激放電, Unselbständige Entladung, *Separately-sustained Discharge*, §§ 282, 283.

3430₃ 遠

60~日點, Aphel, *Aphelion*, § 66.

3430₅ 達

60~因, Dyn, *Dyne*, § 23.

3512₇ 沸

61~點, Siedepunkt, *Boiling Point*, § 174.

~點, 溶液之, § 188.

~點與壓力之關係, § 181.

~點氣壓計, Siedebrometer, *Boiling-Point Barometer*, § 181.

79~騰, Sieden, *Boiling*, § 181.

3514₇ 溝

31~渠射線(陽射線), Kanalstrahlen, *Canal Ray*, §§ 290, 292.

3516₀ 油

37~浸法, Immersion, *Oil Immersion*, § 426.

3519₀ 凍

61~點, Gefrierpunkt, *Freezing Point*, § 174.

~點, 溶液之, § 188.

3630₀ 連

24~續條件, Kontinuitätsbedingung, *Condition of Continuity*, § 103.

37~通管, Kommunizierende Röhren, *Communicating Tubes*, § 87.

3530₉ 速

00~度, Geschwindigkeit, *Velocity*, § 16.

~度相加定理, § 536.

~度, 臨界, kritische, *Critical*, § 313.

11~頭, Geschwindigkeitshöhe, *Velocity Head*, § 109.

3611₁ 混

37~凝體, Kryohydrate, *Cryohydrate*, § 190.

80~合色, Mischfarben, *Mixed Colors*, § 477.

3611₇ 溫

00~度, Temperatur, *Temperature*, § 154.

~度計, Thermometer, *Thermometer*, § 166.

~度, 絕對, § 155.

~度之調勻, Temperatenausgleich, *Equalization of Temperature*, § 197.

~度之測量, §§ 166, 485.

~度游離, Temperaturionisation, *Temperature Ionisation*, § 285.

~度, 有效, § 485.

~度, 極低, § 185.

~度輻射, Temperaturstrahlung, *Temperature Radiation*, § 485.

~度, 臨界, § 184.

41~標, Temperaturskala, *Temperature Scale*, § 155.

3613₂ 瀑

40~布電, Wasserfallelektrizität, *Water Fall Electricity*, § 262.

3613₃ 濕

00~度, Feuchtigkeit, *Humidity*, § 206.

~度計, Hygrometer, *Hygrometer*, § 206.

3621₀ 視

10~電阻, Scheinwiderstand, *Apparent Resistance*, § 376.

77~覺, Sehen, *Vision*, § 430.

~覺之三色說, Dreifarbentheorie, *des Sehens, Three-Color Theory of Vision*, § 478.

~覺之空間性, § 431.

3630₀ 廻

- 55~轉子(旋子), *Kreisel, Top*, § 48.
~轉羅盤, *Kreiselkompass, Gyro-Compass*, § 48.

3712₀ 潮

- 37~汐, *Gezeiten, Tide*, § 67.
~汐之漲落, *Ebbe und Flut, Ebbing and Flowing Tide*, § 67.

3712₇ 渦

- 08~旋, *Wirbel, Vortex*, § 111.
10~電流, *Wirbelstrom, Eddy Current*, § 334.

滑

- 50~車, *Rolle, Pulley*, § 72.
~車組, *Flaschenzug, Block and Tackle*, § 72.

3718₁ 凝

- 24~結, *Kondensation, Condensation*, §§ 174, 180.
~結, 大氣中之, § 205.

3722₀ 初

- 38~導磁係數, *Anfangspermeabilität, Initial Permeability*, § 343.

3730₂ 通

- 67~路, *Geschlossener Kreis, Closed Circuit*, § 386.

過

- 00~度冷却, *Unterkühlung, Super-Cooling*, § 174.
~度加熱, *Siedeverzug, Superheating*, § 174.

週

- 47~期系, *Periodisches System, Periodic System*, § 501.

~期波, *Periodische Welle, Periodical Wave*, § 123.

3730₀ 運

- 24~動, *Bewegung, Motion*, § 16.
~動, 簡諧, *Harmonische, Harmonic*, § 20.
~動, 相對與絕對, § 529.

3730₈ 選

- 56~擇定則, *Auswahlregeln, Selection Rule*, § 496.

3811₇ 汽

- 24~化, *Verdampfen, Vaporization*, § 178.
~化凝冰器, *Kryophor, Cryophorus*, § 178.
~化熱, *Verdampfungswärme, Heat of Vaporization*, § 179.
30~密度, *Dampfdichte, Vapor Density*, § 182.
71~壓, *Dampfdruck, Vapor Pressure*, § 180.
87~飽和, *Gesättigter Dampf, Saturated Vapor*, § 180.

3813₇ 冷

- 02~劑, *Kältemischung, Freezing Mixture*, § 190.
37~凝機, *Kaltmaschine, Freezing Machine*, § 202.
90~光現象, *Lumineszengerscheinung, Luminescence*, § 487.

3814₀ 激

- 12~發電壓, *Anregungsspannung, Excitation Potential*, § 500.

3814₇ 游

- 00~離, *Ionisation, Ionization*, § 281.
~離工作, *Ionisierungsarbeit, Ionization Work*, § 500.
~離電壓, *Ionisierungsspannung, Ionization Potential*, § 500.
~離, 原子之, § 500.
17~子, *Ion, Ion*, § 264.
~子分子, *Ionenmoleküle, Ionmolecule*, § 502.
41~標, *Nonius, Vernier*, § 7.

3824₇ 複

- 00~音, *Klänge, Compound Tone*, § 139.

~音之分析, § 145.

3834₃ 導

10~電係數, Elektrisches Leitvermögen *Electric Conductivity*, § 246.

18~磁係數, Permeabilität, *Permeability*, § 337.

~磁係數, 絕對, § 362.

22~片容電器, Plattenkondensator, *Plate Condenser*, §§ 230, 232.

75~體, Leiter, *Conductor*, § 215.

3912₇ 消

18~磁, Entmagnetisierung, *Demagnetisation*, § 345.

27~色差透鏡, Achromate, *Achromat*, § 432.

50~零法, Nullmethode, *Zero Method*, § 6.

4000₀ 叉

22~絲, Fadénkreuze, *Cross hairs*, § 427.

4001₁ 左

20~手定則, Linke-Hand-Regel, *Left-Hand Rule*, § 305.

4002₇ 力

~ Kraft, *Force*, § 21.

26~偶, Kräftepaar, *Couple*, § 31.

30~之平行四邊形, Parallelogramm der Kräfte, *Parallelogram of Forces*, § 27.

~之中心, Mittelpunkt von Kräften, *Center of Forces*, § 27.

~之單位, § 23.

81~矩, Drehmoment, *Moment of Force*, § 31.

4003₀ 大

80~氣電, Luftelektrizität, Atmosphärische Elektrizität, *Atmospheric Electricity*, § 295.

~氣之成份, § 204.

~氣壓, Atmosphäre, *Atmosphere*, § 103.

~氣壓力, Luftdruck, *Atmospheric Pressure*, §§ 103, 204.

太

76~陽日, Sonntag, *Solar Day*, § 9.

~陽光譜, Sonnenspektrum, *Solar Spectrum*, § 475.

~陽常數, Solar konstante, *Solar Constant*, § 203.

4010₇ 直

36~視稜鏡, Geradsichtige Prismen, *Direct-Vision Prism*, § 433.

4021₆ 克

~Gramm, *Gram*, § 23.

71~原子, Grammatom, *Gram Atom*, § 96.

80~分子, Grammolekül, Mol, *Gram Molecule, Mole*, § 96.

~分子比, Molenbruch, *Mole Fraction*, § 188.

~分子容積, Molvolumen, *Molar Volume*, §§ 96, 162.

~分子熱, Molwärme, *Molecular Heat*, § 171.

4022₇ 內

17~聚力, Kohäsion, *Cohesion*, § 525.

40~力, Innere Kräfte, *Internal Forces*, § 33.

93~燃機, Explosionsmotor, *Internal Combustion Engine*, § 202.

有

08~效工率, Wirkleistung, *Effective Power*, § 379.

~效值, Effektivwerte, *Effective Value*, § 379.

4060₀ 右

20~手定則, Rechte-Hand-Regel, *Right-Hand Rule*, § 302.

4080₁ 真

30~空, Vakuum, *Vacuum*, § 106.

~空管, Elektronenröhre, *Vacuum (or Thermionic) Tube*, § 394.

71~原子量, Wahres Atomgewicht, *Net Atomic Weight*, § 517.

4090₃ 來

51~頓瓶, Leidener Flasche, *Leyden Jar*, § 234.

4191₄ 極

26~偶, Dipol, *Dipole*, § 214.

77~限電阻, Grenzwiderstand, *Limiting Resistance*, § 366.

4198₀ 槓46~桿, Hebel, *Lever*, §§ 32, 71.4199₁ 標30~標準電池, Normalelemente, *Standard Cell*, § 276.4295₃ 機43~械, Maschine, *Machine*, § 70.
~械簡單, Einfache Maschine, *Simple Machine*, § 70.4410₀ 封

89~鎖面, Sperrfläche, § 316.

4410₄ 基61~點(溫度計上之), Fundamentalpunkte, *Fundamental Point*, § 155.4411₂ 地13~球之大氣, Erdatmosphäre, *Atmosphere of the Earth*, § 103.~球之自轉, Erddrehung, *Rotation of the Earth*, § 49.18~磁, Erdmagnetismus, *Terrestrial Magnetism*, § 301.~磁水平強度, Erdmagnetische Horizontalintensität, *Horizontal Component of Earth's Magnetic Field*, §§ 301, 363.4414₂ 薄

77~層物質之色, § 439.

4422₁ 荷72~質比(電子之), Spezifische Ladung, *Specific Charge*, §§ 291, 307.4422₇ 帶23~狀光譜, Bandspektren, *Band Spectrum*, §§ 475, 506.4428₈ 狹27~縫, Spalt, *Slit*, §§ 445, 448.4433₁ 赫4i~芝, Hertz, *Hertz*, § 117.

蒸

35~汽透平機, Dampfturbine, *Steam Turbine*, § 202.~汽機, Dampfmaschine, *Steam Engine*, § 202.87~餾, Destillation, *Distillation*, § 181.

熱

07~調, Wärmetönung, *Heat Tone*, § 203.10~電, Thermoelektrizität, *Thermoelectricity*, § 263.~電偶, Thermoelement, *Thermocouple*, § 263.~電堆, Thermosäule, *Thermopile*, § 487.24~化學, Thermochemie, *Thermochemistry*, § 203.26~線儀器, Hitzdrahtinstrumente, *Hot-Wire Instrument*, § 261.

30~流磁性現象, § 360.

~之工當量, Mechanisches Wärmeäquivalent, *Mechanical Equivalent of Heat*, § 193.~之電當量, Elektrisches Wärmeäquivalent, *Electric Equivalent of Heat*, § 260.~之動力論, Mechanische Wärmetheorie, *Mechanical Theory of Heat*, § 156.~之傳導, Wärmeleitung, *Conduction of Heat*, § 198.~之對流, Konvektion, *Convection*, § 197.~之輻射, Wärmestrahlung, *Radiation of Heat*, §§ 197, 480.~容量, Wärmekapazität, *Heat Capacity*, § 169.31~源, Wärmequelle, *Source of Heat*, § 203.38~游子, Thermion, *Thermion*, § 284.

~游子管, 見真空管.

40~力機械, Wärmekraftmaschine, *Heat Engine*, § 202.~力或燃率, Thermodynamische Wahrscheinlichkeit, *Thermodynamic Probability*, § 195.60~量, Wärmemenge, *Quantity of Heat*, § 168.71~脹後效, Thermische Nachwirkung, *Thermal After-Effect*, § 166.77~學第一主要定理, Erster Hauptsatz der Wärmelehre, *First Law of Thermodynamics*, § 192.

~學第二主要定理, § 195.

~學第三主要定理, § 199.

4442₇ 萬

10~有引力, Gravitation, *Gravitation*, §§ 53, 63.

4449₁ 媒

32~遞作用, Nebewirkung, *Action through the Medium*, § 68.

4452₇ 勒

40~克斯, Lux, *Lux*, § 400.

4460₃ 蓄

10~電池, Akkumulatoren, *Accumulator*, § 277.

4480₁ 共

51~振, Resonanz, *Resonance*, § 131.

~振, 電之, § 378.

~振射線, Resonanzstrahlung, *Resonant Ray*, § 508.

~振, 聲之, § 145.

67~鳴, Akustische Resonanz, *Acoustic Resonance*, § 145.

4498₀ 橫

34~波, Transversale Welle, *Transversal Wave*, § 125.

4500₀ 加

35~速度, Beschleunigung, *Acceleration*, § 17.

~速工作, Beschleunigungsarbeit, *Work due to Acceleration*, § 41.

4612₇ 場

08~說, Feldtheorie, *Field Theory*, § 68.

4690₀ 相

10~干性, Kohärenz, *Coherence*, § 437.

34~對論, 廣義, Allgemeine Relativitätstheorie, *General Theory of Relativity*, § 540.

~對論, 狹義, Spezielle Relativitätstheorie, *Special Theory of Relativity*, § 520.

~對性, Relativität, *Relativity*.

~對性, 時間之, § 534.

~對性, 長度之, § 535.

90~常數 (或位相), Phase, *Phase*, §§ 117, 375.

~當原理, Korrespondenzprinzip, *Correspondence Principle*, § 496.

4694₁ 桿

23~狀纖維, Stäbchen, *Rods*, § 430.

4712₀ 均

80~分定律, Äquipartitionsgesetz, (*Gleichverteilungsgesetz*), *Law of Equipartition*, § 156.

4740₁ 聲

~Schall, *Sound*, § 138.

30~之駐波, Stehende Schallwellen, *Stationary Sound Wave*, § 143.

35~速, Schallgeschwindigkeit, *Sound Velocity*, § 138.

77~學, Akustik, *Acoustics*, § 138.

4772₀ 切

22~變, Scherung, (oder Scher!), *Shear*, § 83.

~變係數, Scherungsmodul (oder Schubmodul), *Shear Modulus*, § 83.

4780₁ 起

10~電盤, Elektrophor, *Electrophorus*, § 239.

23~偏鏡, Polarisator, *Polarizer*, §§ 452, 457.

44~落起象, Schwankungserscheinungen, *Fluctuations*, § 159.

4780₀ 超

00~度顯微鏡, Ultramikroskop, *Ultramicroscope*, § 449.

38~導性, Supraleitfähigkeit, *Superconductivity*, § 255.

61~距作用, Fernwirkung, *Action at a Distance*, § 68.

4794₃ 柵

41~極, Gitter, *Grid*, § 447.

~極特性曲線, Gittercharakteristik, *Grid Characteristics*, § 394.

4796₁ 格

17~子性結構 (晶體), Gitterstruktur, *Lattice Structure*, § 528.

~局, Komplexion, *Complexion*, § 195.

4824₀ 散

- 24~射, Strenung, *Scattering*.
 ~射, 可見光之, § 448.
 ~射, Röntgen 氏射線之, § 491.
 ~射, α 線之, § 493.

4841₁ 乾

- 36~濕泡濕度計, Psychrometer, *Wet and Dry Bulb Hygrometer*, § 206.
 44~熱風, Föhn, *Foehn*, § 207.

4898₀ 檢

- 23~偏鏡, Analysator, *Analyser*, § 452.
 34~波器, Detektor, *Detector*, § 393.

5000₀ 中

- 17~子, Neutron, *Neutron*, § 524.

史

- 44~蒂勃, Still, *Stilb*, § 400.

串

- 12~聯, Reihenschaltung, *Series Connection*.
 ~聯, 交流電阻之, § 377.
 ~聯, 電流源之, § 258.
 ~聯, 電容之, § 230.
 ~聯電阻, Vorschaltwiderstand, *Series Resistance*, § 368.
 ~聯, 電阻之, § 250.

車

- 58~輪, Wagenrad, *Carriage Wheel*, § 78.

5001₁ 抗

- 80~流線圈, Drosselspulen, *Choke Coil*, § 376.

5004₁ 接

- 26~觸電壓, Berührungsspannung, *Contactpotential, Contact Potential Difference, Contact Potential*, § 262.

5008₀ 擴

- 48~散, Diffusion, *Diffusion*, § 158.

5023₀ 本

- 62~影, Kernschatten, *Umbra*, § 398.

5073₂ 表

- 18~面亮度, Flächenhelligkeit, *Surface Brightness*, § 400.
 10~面電荷, Oberflächenladung, *Surface Charge*, § 225.
 ~面張力, Oberflächenspannung, *Surface Tension*, § 92.
 ~面張力波, Kapillarwellen, *Capillary Waves*, § 123.
 ~面游離, Oberflächenionisation, *Surface Ionization*, § 283.
 40~皮作用, Hanteffekt, *Skin Effect*, § 335.

5103₂ 振

- 24~動, Schwingung, *Vibration (or Oscillation)*, § 117.
 ~動方程式, § 118.
 ~動, 電, Elektrische, *Electric*, §§ 375, 383.
 ~動, 電路, Elektrischer Schwingungskreis, *Oscillatory Circuit*, § 383.
 ~動, 斷路及通路之, Offener und Geschlossener, *Open and Closed*, § 386.
 ~動, 強迫, Erzwungene, *Force*, § 118.
 ~動, 彈性, Elastische, *Elastic*, § 118.
 ~動之放大, § 394.
 ~動週期, Schwingungszeit, *Vibration Period*, § 117.
 ~動, 阻尼 (或減幅), Gedämpfte, *Damped*, §§ 117, 118.
 ~動, 氣柱, Schwingende Luftsäule, *Vibrating Air Column*, §§ 120, 145.
 ~動, 簡諧, Harmonische, *Harmonic*, § 117.
 41~幅, Amplitud, *Amplitude*, § 117.
 56~拍, Schwebung, *Beat*, § 128.
 58~數 (或頻率), Schwingungszahl, *Number of Vibrations*, § 117.
 ~數, 聲之, § 140.
 ~數, 光之, § 436.
 78~腹, Schwingungsbauch, *Loop of Vibration*, § 119.
 88~節, Schwingungsknoten, *Node of Vibration*, § 119.
- 5104₁ 攝
- 08~譜儀, Spektrograph, *Spectrograph*, § 433.
- 5106₀ 幅
- 24~射, Strahlung, *Radiation*, § 596.
 ~射計, Radiometer, *Radiometer*, § 467.

~射測量儀器, Strahlungsmessinstrumente, *Radiation Measuring Instrument*, § 467.

~射溫度, Strahlungstemperatur, *Radiation Temperature*, § 485.

~射壓力, Strahlungsdruck, *Radiation Pressure*, § 464.

~射阻尼, Strahlungsdämpfung, *Radiation Damping*, § 385.

32~透, Phot, *Phot*, § 400.

5111₀ 虹

10~霓, Regenbogen, *Rainbow*, § 434.

67~吸管, Heber, *Siphon*, § 87.

5202₁ 折

24~射, Brechung, *Refraction*, § 133.

~射度, Brechkraft, *Dioptric Strength*, § 414.

~射率, Brechungsindex, *Index of Refraction*, §§ 133, 409.

~射計, Refraktometer, *Refractometer*, § 411.

~射, 磁力線之, § 347.

~射係數, Brechungskoeffizient, *Coefficient of Refraction*, §§ 133, 409.

~射定律, Brechungsgesetz, *Law of Refraction*, § 133.

~射, 透鏡中之, § 414.

~射, 光之, § 409.

5225₇ 靜

10~電計, Elektrometer, *Electrometer*, § 217.

~電計, 絕對, § 233.

~電感應, Influenz, *Electrostatic Induction*, § 227.

~電感應起電機, Influenzmaschine, *Influence Machine*, § 239.

~電學, Elektrostatik, *Electrostatics*, § 209.

18~磁感應強度, Magnetische Induktion, *Magnetic Induction*, §§ 337, 339.

81~矩, Statisches Moment, *Static Moment*, § 31.

5302₇ 輔

26~線系, Nebenserie, *Subordinate Series*, § 499.

5320₀ 感

00~應定律, Induktionsgesetz, *Law of Induction*, §§ 318, 357.

5401₂ 拋

24~射, Wurf, *Projection*, § 57.

5504₃ 轉

22~變點, Inversionspunkt, *Point of Inversion*, § 172.

23~偏色散, Rotationsdispersion, *Rotatory Dispersion*, § 460.

24~動, Rotation, *Rotation*, § 20.

~動主慣量, Hauptträgheitsmomente, *Principal Moment of Inertia*, § 36.

~動磁場, Magnetischer Drehfeld, *Rotating Magnetic Field*, § 381.

~動磁性, Rotationsmagnetismus, *Rotational Magnetism*, § 334.

~動能量, Rotationsenergie, *Rotational Energy*, § 46.

~動振動光譜, Rotations-schwingungsspektren, *Rotation-Vibration Spectra*, § 505.

~動晶體法, Drehkristallmethode, *Rotating-Crystal Method*, § 472.

~動慣量, Trägheitsmoment, *Moment of Inertia*, § 36.

~動慣量, 分子之, §§ 156, 507.

5506₀ 抽

80~氣機, Luftpumpe, *Air Pump*, § 106.

5560₀ 曲

41~柄推動, Kurbeltrieb, *Crank Driving*, § 77.

5600₀ 拍

00~音, Akustische Schwebung, *Acoustic Beat*, § 144.

5601₁ 擺

~Pendel, *Pendulum*, § 60.

58~輪, Unruh, *Balance Wheel*, §§ 80, 160.

5619₃ 螺

08~旋, Schraube, *Screw*, § 74.

26~線管, Spulen, *Solenoid*, § 303.

5692₇ 耦

80~合, Koppelung, *Coupling*, § 332.

5701₀ 扭

- 55~轉, *Torsion, Torsion*, § 83.
~轉係數, *Torsionsmodul, Torsion Modulus*, § 83.

5708₂ 軟

- 83~鐵儀器, *Weicheiseninstrumente, Soft-iron Instrument*, § 367.

5810₁ 整

- 30~流, *Gleichrichtung, Rectification*, §§ 392, 393, 394.
~流放大法, *Richtverstärkung, Rectifying Amplification*, § 394.
~流器, *Elektrische Ventile, Rectifying Valve (or Tube)*, § 392.

5821₄ 釐

- 90[~米][克][秒]制, *CGS-System, CGS-System*, § 24.

5844₀ 數

- 30~字孔径, *Numerische Apertur, Numerical Aperture*, §§ 426, 449.

6006₁ 暗

- 44~地照亮法, *Dunkelfeldbeleuchtung, Dark-Field Illumination*, § 449.
71~區, 輝光放電中之, *Dunkelraum der Glimmentladung, Dark Space in a Glow Discharge*, § 290.

6010₁ 目

- 80~鏡, *Okular, Ocular*, § 424.
~鏡測微計, *Okularmikrometer, Ocular Micrometer*, § 427.

6010₄ 星

- 12~形接線法, *Sternschaltung, Star Connection*, § 381

量

- 17~子, *Quantum, Quantum*, § 488.
~子論, *Quantentheorie, Quantum Theory*, §§ 435, 488.
~子, 電, *Elektrische Elementarquantum, Elementary Quantum of Electricity*, § 213.
~子, 作用, *Wirkungsquantum, Quantum of Action*, § 488.
~子條件, *Quantenbedingung, Quantum Condition*, § 494.

~子力學, *Quantenmechanik, Quantum Mechanics*, § 514.

~子軌道, *Quantenbahn, Quantum Orbit*, § 494.

~子光學, *Quantenoptik, Quantum Optics*, § 490.

44~熱器(卡計), *Kalorimeter, Calorimeter*, § 173.

~熱學, *Kalorimetrie, Calorimetry*, § 168.

90~糖計, *Saccharimeter, Saccharimeter*, § 460.

6010₇ 疊

80~合音, *Summationstöne, Summation Tone*, § 144.

6014₇ 最

32~近點, *Nahepunkt, Near Point*, § 428.

40~內線系, *Grundserie, Ground Series*, § 496.

6015₃ 國

77~際基音, *Kammerton (oder Normalton), Normal Tone*, § 147.

6021₀ 四

28~份之一波長晶片, *Viertelwellengeblätchen, Quarter Wave Plate*, § 455.

6033₁ 黑

75~體, *Schwarzer, Körper, Black Body*, § 481.

~體輻射, *Schwarze Strahlung, Black Radiation*, § 481.

6041₀ 冕

26~牌玻璃, *Kronglas, Crown glass*, § 432.

6043₀ 因

37~次, *Dimensionen, Dimensions*.

~次, 磁學諸量之, § 361.

~次, 電磁單位制中之, § 313.

~次, 力學諸量之, § 52.

~次, 靜電單位制中之, § 241.

60~果說, *Kausalität, Causality*, § 2.

6044₀ 昇

44~華, *Sublimation, Sublimation*, §§ 174, 183.

~華熱, § 183.

6050₆ 暈

~ Hof, Halo, § 448.

6060₀ 回

47~聲, Echo, Echo, § 141.

~聲垂線, Echolot, Echo-sounder, § 141.

6060₄ 固

40~有頻率, Eigenfrequenz, Natural Frequency, § 118.

~有頻率, 電振動之, § 378.

6066₀ 晶

75~體, Kristalle, Crystal, § 528.

~體, 正, § 455.

~體, 負, § 455.

~體, 單軸, § 455.

~體, 雙軸, § 455.

~體, 液態, §§ 459, 527.

~體結構分析 (用 Röntgen 氏射線), § 472.

6071₂ 圈

55~轉儀器, Drehspulinstrumente, Moving-Coil Instrument, § 365.

6080₆ 圓

77~周頻率, Kreisfrequenz, Angular Frequency, §§ 117, 375.

~周運動, Kreisbewegung, Circular Motion, § 37.

6091₄ 羅

27~盤, Kompass, Compass, § 301.

6111₇ 距

00~離定律, Entfernungsgesetz, Law of Distance, § 130.

~離定律, 光度之, § 401.

6138₆ 顯

28~微輻射計, Mikroradiometer, Micro-radiometer, § 468.

~微鏡, Mikroskop, Microscope, § 426.

~微鏡, 超度, Ultramikroskop, Ultra-Microscope, § 449.

6292₂ 影

~Schatten, Shadow, § 368.

6404₁ 時

77~間之測量, § 9.

80~鐘, Uhr, Clock, § 80.

6503₀ 映

50~畫器, Projektionsapparat, Projection, § 421.

6609₄ 噪

47~聲, Geräusch, Noise, § 139.

6650₆ 單

20~位, Einheit, Unit.

~位, 力學諸量之, § 52.

~位, 靜電, § 240.

~位, 電磁, § 313.

~位, 磁學諸量之, § 361.

~位, 電學諸量之絕對, § 314.

~位, 電學諸量之國際, § 314.

~位制, Massystem, Measuring System.

~位, 光度, § 400.

~位, X, § 7.

~位制, [厘米], [克], [秒], § 24.

~位制, 工業度量衡, § 24.

~位制, 電磁, §§ 304, 313.

~位制, 實用, §§ 211, 240.

~位制, 靜電, §§ 211, 241.

~位視角力矩, Direktions moment (oder kraft), Torque per unit Twist, § 47.

41~極感應, Unipolare Induktion, Unipolar Induction, §§ 320, 334.

6702₀ 明

36~視距離, Deutliche Sehweite, Distance of Distinct Vision, § 428.

6703₂ 眼

~, Auge, Eye, § 428.

30~之缺點, Augenfehler, Eye-Defects, § 429.

6703₄ 喉

11~頭, Kehlkopf, Larynx, § 152.

6704₇ 吸

28~收, Absorption, absorption.

~收率, Absorptionsvermögen, Absorbing Power, § 481.

~收, 波之, § 135.

~收, 全光譜中之, § 466.

~收, 氣體之, § 191.

- ~收光譜, Absorptionsspektren, *Absorption Spectrum*, §§ 476, 499.
74~附, Adsorption, *Adsorption*, § 191.
77~留, Akklusion, *Occlusion*, § 191.

6708₂ 吹

- 50~奏樂器, Blasinstrumente, *Wind Instrument*, § 151.

6733₀ 照

- 00~度, Beleuchtungsstärke, *Intensity of Illumination*, § 400.
46~相機, Photographische Kamera, *Photographic Camera*, § 421.

7110₇ 壓

- 10~電, Piezoelektrizität, *Piezoelectricity*, § 238.
11~頭, Druckhöhe, *Pressure Head*, § 109.
23~縮係數, Kompressibilität, *Compressibility*.
~縮係數, 液體之, § 91.
~縮係數, 氣體之等溫, § 100.
40~力, Druck, *Pressure*, § 84.
~力, 流體動, § 109.
~力, 流體靜, § 86.
~之測量, § 105.
~力, 臨界, § 184.
~力, 氣體之, § 97.
~力計, Piezometer, *Piezometer*, § 91.
~力係數 (氣體之), Spannungskoeffizient, *Pressure Coefficient*, § 163.
~力係數, 氣體之, § 163.

7122₇ 唇

- 88~管, Lippenpfeife, *Lip Pipe*, § 150.

7124₇ 反

- 18~磁性, Diamagnetismus, *Diamagnetism*, §§ 336, 338.
24~射, Reflexion, *Reflection*, § 132.
~射望遠鏡, Spiegelteleskop, *Reflecting Telescope*, § 425.
~射, 聲之, § 142.
~射, 金屬, Metallische Reflexion, *Metallic Reflection*, § 466.
~射鏡, Spiegel, *Mirror*, §§ 406, 407.
~射鏡, 平面, § 406.
~射鏡, 球面, § 407.
~射, 光之, §§ 405, 406.

- 88~坐作用, Rückstoss, *Recoil*, § 33.

~坐作用, 發光時之, § 490.

- 90~帶色散, Anomale Dispersion, *Anomalous Dispersion*, § 466.

7126₂ 階

- 27~透光柵, Stufengitter, *Echelon Grating*, § 447.

7128₃ 灰

- 26~白熾, Grauglut, *Gray Glow*, § 396.
27~色體, Grauer Körper, *Gray Body*, § 481.

7129₆ 原

- 17~子序數, Ordnungszahl, *Atomic Number*, § 501.
~子磁化係數, Atomsuszeptibilität, *Atomic Susceptibility*, § 341.
~子價, Chemische Wertigkeit, *Chemical Valance*, § 203.
~子之激發, Anregung von Atomen, *Excitation of Atoms*, § 500.
~子之大小, Atomdimensionen, *Dimensions of Atoms*, § 493.
~子之分裂, Atomzertrümmerung, *Disintegration of Atoms*, § 524.
~子核, Atomkerne, *Atom-Nucleus*, §§ 493, 517.
~子核構造, Kernaufbau, *Structure of the Nucleus*, § 518.
~子熱, Atomwärme, *Atomic Heat*, §§ 170, 511, 516.
~子構造, Atombau, *Atomic Structure*, §§ 213, 493.
~子量, Atomgewicht, *Atomic Weight*, § 109.
~子分子, Atommoleküle, *Atom-Molecule*, § 502.
~子光譜, Atomspektren, *Atom-Spectrum*, § 475.
72~質量, Ruhmasse, *Rest Mass* (or *Proper Mass*), § 537.
- 7031₄ 駐
- 34~波, Stehende Wellen, *Stationary Wave*, § 127.
~波, 二導線間電之, § 389.
~波, 聲之, § 143.
~波, 光之, § 450.

7132₇ 馬

40~力, Pferdstärke, *Horse Power*, § 45.

7171₂ 匝

10~面, Windungsfläche, *Turn Face*, § 303.

7173₂ 長

00~度形變, Längsdilatation, *Dilatation in Length*, § 82.

~度之測量, § 7.

~度單位, Längeneinheit, *Unit of Length*, § 7.

7220₀ 剛

75~體, Starrer Körper, *Rigid Body*, § 15.

7222₂ 膨

71~脹, Ausdehnung, *Expansion*.

~脹, 理想氣體之, § 163.

~脹, 受熱後之, Ausdehnung durch die Wärme, *Expansion through Heat*, § 160.

~脹係數, Ausdehnungskoeffizient, *Coefficient of Expansion*, § 160.

7280₀ 質

08~譜, Massenspektrogramme, *Mass Spectra*, § 517.

17~子, Proton, *Proton*, § 518.

60~量, Masse, *Mass*, § 23.

~量磁化係數, Massenszeptibilität, *Mass Susceptibility*, § 341.

~量, 重性, Schwere Masse, *Gravitational Mass*, § 54.

~量, 能量之, § 538.

~量之平衡, Massenausgleich, *Balance of Masses*, § 77.

~量中心, Massenmittelpunkt, *Center of Mass*, § 34.

~量單位, § 23.

~量與速度, § 537.

~量, 慣性, Träge Masse, *Inertial Mass*, § 23.

61~點, Massenpunkt, *Material Point (Particle)*, § 15.

7420₀ 附

80~着, Adhäsion, *Adhesion*, § 93.

7423₂ 隨

30~進係數, Mitführungskoeffizient, *Dragging Coefficient*, §§ 443, 535.

7521₃ 體

27~色, Körperfarben, *Body Color*, § 479.

40~內游離, Volumionisation, *Volume Ionization*, § 283.

7622₇ 陽

10~電, Positive Elektrizität, *Positive Electricity*, § 209.

24~射線, Positive Strahlen, *Positive Rays*, § 282.

27~向游子, Anionen, *Anions*, § 268.

41~極射線, Anodenstrahlen, *Anode Ray*, § 292.

7721₀ 阻

50~抗, Impedanz, *Impedance*, § 376.

77~尼, Dämpfung, *Damping*.

~尼, 電流計之, § 366.

~尼振動, Gedämpfte Schwingung, *Damped Vibration (or Oscillation)*, § 118.

~尼, 振動之, § 118.

風

~Wind, *Wind*, § 207.

11~琴, Orgel, *Organ*, § 150.

7721₇ 肥

26~皂泡, Seifenblasen, *Soap Bubbles*, § 439.

7722₀ 月

13~球之運動, § 65.

同

20~位元素, Isotope, *Isotope*, § 517.

~位元素效應, Isotopeneffekt, *Isotopic Effect*, § 517.

~位元素之分析, § 517.

21~步電動機, Synchromotor, *Synchromotor*, § 374.

24~化(二氧化碳), Assimilation, *Assimilation*, § 510.

36~溫層, Stratosphäre, *Stratosphere*, § 205.

60~量元素, Isobare, *Isobar*, § 517.

64~時性, Gleichzeitigkeit, *Simultaneity*, § 534.

7722₂ 膠

- 75~體, Kolloide, *Colloid*, § 187.
 ~體溶液, Kolloidale Lösung, *Colloidal Solution*, § 187.

7722₇ 局

- 07~部電流, Lokalströme, *Local Current*, § 279.

7750₆ 母

- 00~音, Vokale, *Vowel*, § 153.
 44~基音, Formanten, § 153.

7771₇ 巴

- ~(壓力單位), Bar, *Bar*, § 103.

7777₆ 凹

- 80~鏡, Hohlspiegel (oder Konkavspiegel), *Concave Mirror*, §§ 407, 449.

7777₇ 凸

- 80~鏡, Konvexspiegel, *Convex Mirror*, § 408.

7778₂ 歐

- 47~姆, Ohm, *Ohm*, § 246.

7780₆ 質

- 60~易風, Passat, *Trade-Wind*, § 207.

7780₇ 閃

- 82~蹠現象, Szintilation, *Scintillation*, § 523.

7823₁ 陰

- 10~電, Negative Elektrizität, *Negative Electricity*, § 209.
 27~向游子, Kationen, *Cation*, § 268.
 41~極位降, Kathodenfall, *Cathode Fall*, § 290.
 ~極射線, Kathodenstrahlen, *Cathode Rays*, § 290.

7838₆ 驗

- 00~音盤, Sirene, *Siren*, § 140.
 10~電器, Elektroskop, *Electroscope*, *Point* § 217.

7876₆ 臨

- 30~界點, Kritischer Punkt, *Critical Point*, § 184.
 ~界容度, § 184.

- ~界密度, § 184.
 ~界速度, § 313.
 ~界溫度, § 184.
 ~界壓力, § 184.

8010₄ 全

- 71~反射, Totalreflexion, *Total Reflection*, § 411.
 ~反射限角, Grenzwinkel der Totalreflexion, *Limiting Angle of Total Reflection*, § 411.
 90~光譜, Gesamtes Spektrum, *Complete Spectrum*, § 465.

8010₇ 並

- 12~聯, Parallelschaltung, *Parallel Connection*,
 ~聯, 交流電阻之, § 377.
 ~聯, 電流源之, § 258.
 ~聯, 電容之, § 230.
 ~聯, 電阻之, § 250.

8011₄ 錐

- 23~狀纖維, Zäpfchen, *Cones*, § 430.
 24~動, Präzession, *Precession*, § 48.

8011₆ 鏡

- 27~像, Bild, *Image*, § 404.
 ~像, 平面反射鏡所生之, § 406.
 ~像, 會聚透鏡所生之, § 415.
 ~像, 發散透鏡所生之, § 416.
 ~像, 曲面反射鏡所生之, §§ 407, 408.
 ~尺讀數法, Spiegelablesung, *Mirror-and-Scale Method*, § 405.

8011₇ 氫

- 30~之連續光譜, Wasserstoffspektrum, *Hydrogen Spectrum*, § 497.
 71~原子, Wasserstoffatom, *Hydrogen Atom*, § 495.
 90~光譜, § 496.

8021₁ 差

- 00~音, Differenzöne, *Difference Tone*, § 144.

8021₇ 氦

- 90~光譜, Heliumspektrum, *Helium Spectrum*, § 498.

8022₀ 介

- 10~電係數, Dielektrizitätskonstante, *Dielectric Constant*, §§ 234, 466.
 ~電係數, 絕對, § 240.

~電極化, Dielektrische Polarisat-ion, *Dielectric Polarization*, §§ 234, 528.

~電體, Dielektrika, *Dielectric*, § 215.

8022₇ 分

00~離工作, Dissoziationsarbeit, *Work of Dissociation*, § 507.

17~子磁化係數, Molekularsuszeptibili-tät, *Molecular Susceptibility*, § 341.

~子能量, Molekularenergie, *Molecular Energy*, § 156.

~子構造, Molekülbau, *Structure of Molecule*, § 502.

~子量, Molekulargewicht, *Molecular Weight*, §§ 96, 182, 188.

~子光譜, Molekülspektren, *Molecular Spectra*, §§ 475, 506.

60~量(向量之), Komponenten, *Component*, § 11.

67~路, Shunt, *Shunt*, § 368.

71~壓力, Partialdruck, *Partial Pressure*, § 97.

90~光計, Spektrometer, *Spectrometer*, § 433.

~光鏡, Spektroskop, *Spectroscope*, § 433.

8033₁ 無

10~工部份, Blindleistung, *Wattless Component*, § 379.

26~線電話, Drahtlose Telephonie, *Wireless Telephony*, § 392.

~線電報, Drahtlose Telegraphie, *Wireless Telegraphy*, § 390.

30~液氣壓計, Aneroidbarometer, *Aneroid Barometer*, § 105.

37~渦電場, § 219.

~渦流場, Wirbelfreies Strömungsfeld, *Irrational Field of Flow*, § 108.

~週期極限情形, Aperiodischer Grenzfall, *Aperiodic Limiting Case*, § 366.

8044₁ 并

80~合原則, Kombinationsprinzip, *Combination Principle*, § 499.

8051₇ 氧

24~化面陰極, Oxydkathoden, *Oxide Coated Cathode*, §§ 284, 290.

8060₁ 合

00~音, Kombinationstöne, *Combination Tones*, § 144.

普

33~通氣體常數, Allgemeine Gaskonstante, *Universal Gas Constant*, § 162.

8060₆ 會

17~聚透鏡, Sammellinse, *Convergent Lens*, § 415.

8091₇ 氣

27~候, Wetter, *Wether*, § 208.

~候圖, Wetterkarten, *Wether Charts*, § 208.

71~壓高度公式, Barometrische Höhenformel, *Barometric Height Formula*, § 102.

~壓計, Barometer, *Barometer*, § 105.

75~體, Gase, *Gas*.

~體放電, Gasentladung, *Discharge through Gas*, § 281.

~體, 理想, Ideale Gase, *Perfect Gas*, § 101.

~體動力論, Kinetische Gastheorie, *Kinetic Theory of Gases*, § 94.

~體動力學, Aerodynamik, *Aerodynamics*, § 108.

~體射線, Gasstrahlen, *Gas Jet*, § 115.

~體結構, Aufbau der Gase, *Structure of Gas*, § 526.

~體溫度計, Gasthermometer, *Gas Thermometer*, § 167.

~體退化, Gasentartung, *Gas Degeneration*, § 515.

~體, 真正, Wirkliche Gase, *Real Gas*, § 101.

~體壓力, Gasdruck, *Gas Pressure*, § 97.

~體壓力之測量, § 105.

8116₃ 鐳

~Radium, *Eadium*, § 519.

8242₇ 矯

11~頑力, Koerzitiwkraft, *Coercive Force*, § 344.

8310₆ 鉍

56~螺線, Wismutspirale, *Bismuth Spiral*, § 360.

8315₀ 鐵

- 18~磁性, Ferromagnetismus, *Ferromagnetism*, §§ 336, 342, 351.
33~心, Eisenkerne, *Iron Core*, § 354.

8410₀ 針

- 12~孔照相機, Lochkamera, *Pin-hole Camera*, § 398.

8414₇ 鉸

- 30~之射線, Beryllium-Strahlung, *Beryllium Ray*, § 524.

8490₀ 斜

- 10~面, Schiefe Ebene, *Inclined Plane*, § 58.

8712₀ 鋼

- 15~球承軸, Kugellager, *Ball-Bearing*, § 194.

8713₂ 銀

- 27~解電量計, Silbervoltmeter, *Silver Voltmeter*, § 269.

8771₂ 飽

- 26~和, Sättigung, *Saturation*.
~和電流, § 283.
~和, 磁性, §§ 342, 343.
~和, 色之, § 477.
~和汽壓, § 180.

8811₇ 鏗

- 62~別率, Auflösungsvermögen, *Resolving Power*.
~別率, 光柵之, § 447.
~別率, 顯微鏡之, § 425.

8822₇ 簡

- 01~諧運動, Harmonische Bewegung, *Harmonic Motion*, § 20.

8834₁ 等

- 20~位而, Äquipotentialflächen (Flächen Gleichen Potentials, oder Niveauflächen), *Equipotential Surface*, § 222.
21~價原理, Äquivalenzhypothese, *Principle of Equivalence*, § 540.
26~程音階, Temperierte Stimmung, *Equitempered Scale*, § 147.

- 30~容變, Isopykne Änderung, *Isopyknic Change*, § 165.

- 36~溫變, Isotherme Änderung, *Isothermal Change*, § 165.

~溫線, Isothermen, *Isothermal*.

~溫線, 理想氣體之, § 162.

~溫線, 真正氣體之, § 184.

~溫過程, Isotherme Prozesse, *Isothermal Process*, §§ 98, 100.

- 71~壓變, Isobare Änderung, *Isobar*, § 165.

~壓線, Isobaren, *Isobar*, § 208.

8879₄ 餘

- 75~體積, Kovolumen, *Co-volume*, § 164.

8880₀ 簧

- 21~秤, Federwage, *Spring Balance*, § 89.

- 88~管, Zungenpfeife, *Reed Pipe*, § 150.

9021₁ 光

~, §§ 487, 508.

- 00~度學, Photometrie, *Photometry*, § 402.

~度學, 光量, Lichtelektrische Photometrie, *Photoelectric Photometry*, § 489.

- 08~效應 (即光電效應), Photoeffekt, *Photoeffect*, § 489.

~譜, Spektrum, *Spectrum*.

~譜, Röntgen 氏, §§ 472, 564.

~譜, 電弧, § 503.

~譜, 電花, § 503.

~譜項, Spektraltermine (Terme), *Spectral Terms*, § 499.

~譜, 發射, §§ 475, 499.

~譜線系, Spektralserie, *Spectral Series*, § 499.

~譜, 線狀, §§ 475, 499, 503.

~譜, 帶狀, §§ 475, 506.

~譜線之分裂, Aufspaltung der Spektrallinien, *Split of Spectral Lines*, § 499.

~譜, 勻排, Normalspektrum, *Normal Spectrum*, § 447.

~譜之位移, Spektroskopisches Verschiebung, *Spectroscopic Displacement*, § 503.

~譜, 連續, § 475.

~譜, 轉動振動, § 505.

~譜, 吸收, § 475.

~譜, 原子, § 475.

~譜, 全, § 465.

- ~譜, 氫, § 496.
 ~譜, 氮, § 498.
 ~譜, 分子, §§ 475, 506.
 ~譜分析, Spektralanalyse, *Spectrum Analysis*, § 476.
 ~譜, 類似氫, § 498.
 10~電效應, Lichtelektrischer Effekt, *Photo-electric Effect*, § 489.
 ~電管, Photozelle, *Photo-cell*, § 489.
 13~球, Photosphäre, *Photosphere*, § 475.
 17~子, Photon, *Photon*, § 490.
 ~子理論, Lichtquantentheorie, *Theory of Photon*, § 489.
 ~子氣體, Lichtquantengas, *Photon Gas*, § 515.
 21~行差, Aberration, *Aberration*, § 399.
 24~化學, Photochemie, *Photo-chemistry*, § 510.
 ~化學基本定律, § 510.
 26~程, Optische Weglänge, *Optical Path*, § 409.
 ~程差, Gangunterschied, *Difference of Optical Path*, § 437.
 ~線, Lichtstrahlen, *Light Ray*, §§ 397, 403.
 ~線指標, Lichtzeiger, *Light-Ray Index*, § 405.
 27~向量, Lichtvektor, *Light Vector*, § 453.
 28~以太, Lichtäther, *Luminiferous Ether*, § 435.
 30~之電磁說, Elektromagnetische Lichttheorie, *Electromagnetic Theory of Light*, §§ 388, 435, 461.
 ~之化學作用, Chemische Wirkung des Lichtes, *Chemical Action of Light*, § 510.
 ~之微粒說, Emanationstheorie des Lichtes, *Emission (or Corpuscular) Theory of Light*, § 435.
 ~之波動說, Undulationstheorie des Lichtes, *Undulatory (or Wave) Theory of Light*, § 435.
 ~之駐波, Stehende Lichtwelle, *Stationary Light Wave*, § 450.
 31~源, Lichtquellen, *Light Source*, § 396.
 ~源強度, Lichtstärke, *Intensity of Light Source*, § 400.
 32~測高溫法, Optische Pyrometrie, *Optical Pyrometry*, § 485.
 35~速, Lichtgeschwindigkeit, *Velocity of Light*, §§ 313, 327, 399.
 ~速之常定, Konstanz der Lichtgesch-

- windigkeit, *Constance of Light-Velocity*, § 532.
 ~速在電學中之測量, § 315.
 37~通量, Lichtstrom, *Luminous Flux*, § 400.
 47~柵中之繞射, Gitterbeugung, *Diffraction by the Grating*, § 447.
 55~軸, Optische Achse, *Optical Axis*, § 455.
 60~量, Lichtmenge, *Quantity of Light*, § 400.
 ~量子, Lichtquantum, *Light Quantum*, § 488.
 71~壓力, Lichtdruck, *Light Pressure*, §§ 464, 490.
 77~閘, Blende, *Diaphragm*, § 427.
 80~年, Lichtjahr, *Light Year*, § 7.
 95~性理論之歷史, § 435.
 ~性之稀密, Optische Dichte, *Optical Density*, § 409.

9043₀ 尖

- 02~端放電, Spitzenentladung, *Point Discharge*, § 238.
 ~端作用, Spitzenwirkung, *Action of Points*, § 226.
 70~劈, Keil, *Wedge*, § 74.

9050₀ 半

- 38~導體, Halbleiter, *Semi-conductor*, § 215.
 40~壽期, Halbwertzeit, *Half-value Period*, § 520.
 62~影, Halbschatten, *Penumbra*, § 398.

9080₀ 火

- 10~石玻璃, Flintglas, *Flint Glass*, § 432.
 29~燄之導電, Flammenleitung, *Conduction of Electricity by Flame*, § 285.
 88~箭, Rakete, *Rocket*, § 33.

9082₇ 燄

- ~熵, Entropie, *Entropy*, § 195.

9090₁ 米

- ~Meter, *Meter*, § 7.

9101₆ 恆

- 60~星日, Sterntag, *Sidereal Day*, § 9.

9148₆ 類

28~似稀有氣體性, Edelgasähnlichkeit, *Analogy to Rare Gases*, § 502.

9196₆ 粘

34~滯性, Viskosität, *Viscosity*, § 113.

9385₆ 燬

44~熱電子, Glühelctronen, *Thermal-emitted Electrons*, § 284.

9682₇ 燭

90~光, Hefnerkerze, *Candle Power*, § 400.

9708₆ 慣

60~量主軸, Hauptträgheitsachse, *Principal Axis of Inertia*, § 36.

~量橢圓球, Trägheitsellipsoid, *Ellipsoid of Inertia*, § 36.

95~性, Trägheit, *Inertia*, § 22.

~性系, Inertiasysteme, *Inertial System*, § 529.

~性, 能量之, § 538.

~性定理, § 22.

~性力, Trägheitskraft, *Inertial Force*, § 26.

~性質量(慣質), Träge Masse, *Inertial Mass*, § 23.

~性阻力, Trägheitswiderstand, *Inertial Resistance*, § 26.

9725₆ 輝

90~光, ~光放電, Glimmentladung, *Glow Discharge*, § 230.

9913₆ 螢

~光, Fluoreszenz, *Fluorescence*.

9985₉ 燐

90~光, Phosphoreszenz, *Phosphorescence*, § 487.

三民書局總信

台北新街四十二號
電話二四四五



A3
入
144

書號 5082