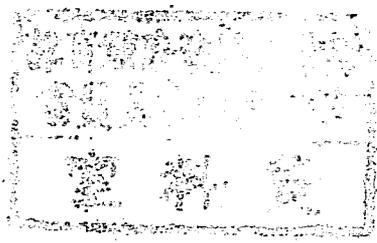


乙  
書 科 學 教 科 書  
中 國 科 學 教 科 書  
高 中 物 理 學

下 冊

嚴 濟 慈 編 著



館 總 政 正  
藏 署 府 中  
書 圖 科 學 圖 書 儀 器 公 司  
章 書 書 印 行

M9  
G634.7  
89

中國科學教科書

# 高中物理學

下 冊

嚴濟慈編著



3 1773 9943 7

中國科學圖書儀器公司

印 行

44542

# 目次

第四十五章 聲之產生及其傳播之速度	299
226. 聲從何來。 227. 振動之記錄。 228. 何物傳聲。 229. 聲之感覺。	
第四十六章 聲波	306
230. 聲爲波動。 231. 水波。 232. 駐波。 233. 傳播速度與波長及頻率之關係。 234. 橫波與縱波。 235. 固體中之縱波。 236. 聲波。 237. 聲之反射——回聲。	
第四十七章 樂音	314
238. 噪聲與樂音。 239. 音強。 240. 音調。 241. 聽覺之限度。 242. 音品。 243. 共鳴。 244. 音之干涉。 245. 拍音。 246. 音之諧和。 247. 音階。	
第四十八章 樂器	325
248. 樂器之種類。 249. 絃之振動定律。 250. 氣柱之振動——吹奏樂器。 251. 板之振動。	
第四十九章 光之直線進行	329
252. 發光體。 253. 透明體。 254. 光線。 255. 影。 256. 月之盈虧。 257. 日月之蝕。 258. 小孔成像。 259. 光之速度。	
第五十章 光之強度	336
260. 光度。 261. 照度。 262. 亮度。 263. 本生光度計。	
第五十一章 光之反射	341
264. 平面鏡。 265. 反射定律。 266. 平面鏡之成像。 267. 鏡之旋轉。	
第五十二章 球面鏡	348
268. 球面鏡。 269. 焦點。 270. 球面鏡之成像。 271. 球面鏡公式。 272. 球面鏡成像之作圖法。	
第五十三章 光之折射	357
273. 日常現象之折射現象。 274. 折射定律。 275. 折射率。 276. 光線何以折射。 277. 折射線之作圖法。 278. 全反射。 279. 水中	



物體之像。	
第五十四章 平行片與三稜鏡	367
280. 平行片。 281. 光在平行片中之折射。 282. 平行片所成之像。	
283. 三稜鏡。	
第五十五章 透鏡	371
284. 透鏡。 285. 焦點。 286. 焦距。 287. 透鏡之公式。 288. 凸透鏡之成像。 289. 凹透鏡之成像。 290. 透鏡成像之作圖法。	
第五十六章 視覺	382
291. 眼之構造。 292. 眼之作用。 293. 眼之調節。 294. 眼鏡。	
295. 視角。 296. 眼之鑿別率。 297. 視覺暫留。 298. 雙眼視。	
299. 錯覺。	
第五十七章 放大鏡與顯微鏡	391
300. 放大鏡之用途。 301. 放大鏡之放大率。 302. 顯微鏡。 303. 顯微鏡之成像。 304. 顯微鏡之放大率。	
第五十八章 望遠鏡	395
305. 望遠鏡之種類。 306. 望遠鏡之成像。 307. 望遠鏡之放大率。	
308. 望遠鏡之要點。 309. 地面望遠鏡。 310. 雙筒望遠鏡。 311. 伽利略望遠鏡。 312. 潛望鏡。 313. 讀數望遠鏡。	
第五十九章 照相與映射	403
314. 照相機。 315. 照相。 316. 照相鏡頭。 317. 映射器。 318. 電影。	
第六十章 光之色散	407
319. 光之色散。 320. 稜鏡何以能將光分解。 321. 光之波長。 322. 分光鏡。 323. 分光鏡之應用。 324. 光譜之種類。 325. 太陽光譜。 326. 紫外光與紅外光。	
第六十一章 色	414
327. 色。 328. 物體之色。 329. 色光之混和。 330. 顏色之混合。	
331. 有色照相與電影。 342. 色覺。	
第六十二章 大氣之光之現象	420
333. 大氣之折射。 334. 海市蜃樓。 335. 虹霓。	

第六十三章 光之干涉	425
336. 波之干涉. 337. 光之干涉——楊牛實驗. 338. 光之波長測定. 339. 薄膜之色.	
第六十四章 光之偏極化與雙折射	430
340. 光波與聲波之比較. 341. 偏極化. 342. 光之偏極化. 343. 雙折射.	
第六十五章 磁體	433
344. 天然磁石. 345. 磁鐵. 346. 磁極. 347. 磁力與磁量. 348. 庫倫定律——單位磁量. 349. 磁場. 350. 磁力線. 351. 磁之感應. 352. 磁之分子說.	
第六十六章 地磁	442
353. 地球為一大磁石. 354. 磁偏角. 355. 磁傾角. 356. 水平強度. 357. 羅盤.	
第六十七章 電為能之一種表現	447
358. 電的世紀. 359. 電能. 360. 人類最早所遭遇之電災.	
第六十八章 摩擦起電	450
361. 摩擦起電. 362. 電有兩種. 363. 電量——庫倫定律. 364. 電量不滅原理. 365. 導電體與絕緣體. 366. 電之本性.	
第六十九章 靜電感應	457
367. 電之感應. 368. 金箔驗電器. 369. 感應器. 370. 導體上電之分布. 371. 感應起電機. 372. 大氣電. 373. 避雷針.	
第七十章 電位與電容	465
374. 電位. 375. 電位之單位. 376. 電容. 377. 容電器.	
第七十一章 電流	472
378. 靜電與動電. 379. 簡單電池. 380. 電流之方向. 381. 電流之單位. 382. 電路. 383. 電功與電功率.	
第七十二章 電動勢與電阻	475
384. 電動勢. 385. 電池之聯結法. 386. 電阻. 387. 電阻器.	
第七十三章 電路	481

388. 歐姆定律。 389. 串聯電路。 390. 歐姆定律得應用於局部電路。 391. 電池之端電壓與其電動勢之區別。 397. 導線上電壓之降落。 393. 並聯電路。 394. 電燈之裝置。 395. 電流與電壓之量度。	
<b>第七十四章 電流之熱效應</b> . . . . .	492
396. 電流之效應。 397. 用電生熱。 398. 焦耳定律。 399. 保險絲。 400. 電燈。 401. 電弧。 402. 電爐及電熨。	
<b>第七十五章 電流之化學效應</b> . . . . .	498
403. 溶液導電。 404. 水之電解。 405. 電解之學說。 406. 電解在工業上之應用。 407. 法拉第電解定律。 408. 國際安培與庫侖 409. 離子之電荷。	
<b>第七十六章 電池</b> . . . . .	505
410. 電池。 411. 乾電池。 412. 蓄電池。	
<b>第七十七章 電流之磁效應</b> . . . . .	510
413. 奧斯特之發見。 414. 電流四周之磁場。 415. 線卷之磁場。 416. 電磁鐵。 417. 電鈴。 418. 電報。 419. 磁場對於電流之作用。	
<b>第七十八章 電流計</b> . . . . .	519
420. 電學測量。 421. 達松發爾電流計。 422. 安培計。 423. 伏特計。 424. 電阻之測量 425 惠斯登電橋。	
<b>第七十九章 電磁感應</b> . . . . .	525
426. 法拉第之發見。 427. 磁鐵感應電流。 428. 楞次定律。 429. 由電流產生之感應電流。 430. 應電動勢。 431. 感應圈。 432. 電話。	
<b>第八十章 發電機</b> . . . . .	525
433. 發電機之右手法則。 434. 發電機之基本原理。 435. 交流與直流。 436. 發電機。 437. 發電機中能之來源。 438. 變壓器。 439. 變壓器之用途。 440. 電之長距離輸送。 441. 整流器。	
<b>第八十一章 電動機</b> . . . . .	546
442. 電動機如一發電機。 443. 電動機中之反電動勢。 444. 電動機之開動。 445. 電動機之效率。 446. 電車。 447. 電表。	

第八十二章 電波	552
448. 來頓瓶之放電具振盪性。 449. 電之共振。 450. 電波。 451. 無線電波之速度及波長。	
第八十三章 無線電通訊	557
452. 無線電廣播與無線電報。 453. 接收電路。 454. 收報機內之電流。 455. 晶體檢波器。 456. 三極真空管。 457. 真空管之作用。 458. 真空管檢波器。 459. 真空管之放大作用。 460. 真空管振動器。 461. 無線電話。 462. 無線電話接收器。	
第八十四章 電子之產生及其應用	570
463. 物理學上之新紀元。 464. 未盡真空中之放電。 465. 氣體之電離。 466. 陰極射線。 467. 陰極射線為何。 468. 電子。 469. X射線。 470. 光電效應。 471. 有聲電影。	
第八十五章 放射性	579
472. 放射質。 473. 鐳之發見。 474. $\alpha, \beta, \gamma$ 三種射線。 475. 放射質之蛻變。 476. 鐳之能。 477. 鐳之用途。	
第八十六章 原子之結構	584
478. 原子與分子。 479. 原子量與分子量。 480. 氫原子。 481. 原子外層之電子。 482. 原子核之組成。 483. 同位元素。 484. 放射性為原子核內之自然變化。 485. 原子核之人工改造。 486. 人工放射性。	
第八十七章 原子能	594
487. 物質與能量之關係。 488. 化學反應中之質量變化。 489. 原子核反應中之質量變化——原子能。 490. 原子能實用之條件。 491. 鈾之分裂。 492. 鈾堆。 493. 現在製造原子彈之原料。 494. 原子能時代之展望。	
附錄 下冊習題答數	601
索引	604

## 第四十五章

### 聲之產生及其傳播之速度

§226. 聲從何來。以槌擊鐘，即聞其聲。細加觀察，如以鉛筆按在剛才被擊之鐘緣上，可知其正在作甚快之往復振動。琴上之弦，以弓拉之，即可成聲。細察此時之琴弦，在作上下振動，振動之速，人目無法追隨，但覺其較不發聲時為粗。若以手觸琴弦，振動立止，而聲遂息。又如敲擊音叉後，放在耳邊，能聞其聲，若以之與唇接觸，即感覺其振動。欲知音叉兩股端之張合振動，可用懸在線上之木髓球，與之接觸，球即跳躍不已(圖 255)。若以叉股之端與水面接觸，將見水花四濺。

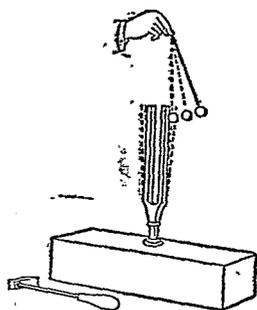


圖 25：音叉之振動。

至若汽笛之所以能鳴，因汽之衝出，激動簧舌；喇叭，簫，笛之所以能響，人力激動管中之空氣柱使然；他若夏蟬之鳴，秋蟲之吟，乃其雙翅作甚速之振動故也。由此可知各種聲音之成因，皆為物體之振動所致。或為物體落下，或敲鑼，或打鼓，或有人叫喊，總之在各例中，皆有物體振動，此即聲之所由起，所謂“不平則鳴”也。

§227. 振動之記錄。有聲必有振動。振動之方式，可藉機械以表出之，故聲音得以記錄。

音叉振動之記錄 一金屬圓筒可以繞軸旋轉，於其面上貼煙臭紙。音叉之一端裝一小針，針尖適與煙臭紙面輕輕接觸(圖 256)。當音叉發聲時，針尖隨作來回之移動；針尖過處，煙臭紙

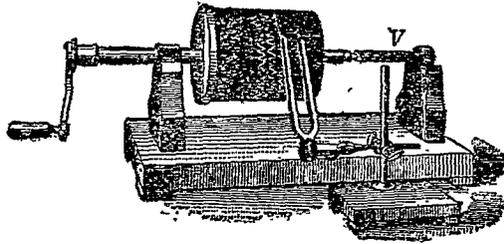


圖 256. 音叉振動之記錄。

上留有波形之曲線。吾人由圓筒轉動之速度與曲線上波形之個數，且可測知音叉振動之頻率。

氣壓鼓 鼓  $P$  之一面張以橡皮膜  $ab$ ，中有空氣，與另一鼓  $T$ ，以橡皮管相連(圖 257)。鼓  $T$  之一面亦為緊張之橡皮膜，但其中央黏有小圓鋁片  $D$ 。  $D$  之中央有一細桿與長針  $S$  銲接於  $E$ 。長針  $S$  能繞定點  $O$  而轉動。假使  $DE$  有一微小之橫移動，則經此槓桿之放大，在  $S$  之尖端，可得一較大之左右移

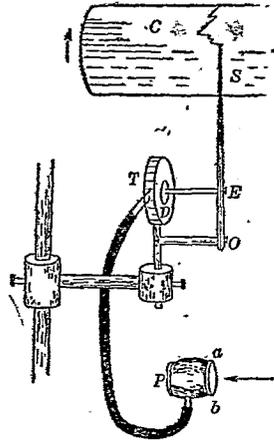


圖 257. 氣壓鼓。

動。

吾人對鼓  $P$  說話，鼓動薄膜  $ab$ ，於是鼓內之空氣亦得同樣之振動，並行傳遞以至於鼓  $T$ ，使黏着於其薄膜上之鋁片  $D$ ，亦起振動。於是  $DE$  有橫移動， $S$  即在旋轉之圓柱  $C$  之煙灰紙上，明顯畫出人語之振動波形。

留聲機 留聲機(phonograph)能將記錄下來之聲音，重行放出。留聲機記錄聲音之原理與上述氣壓鼓相似，惟聲音不記錄於煙灰紙而刻畫於蠟片之上，以成所謂唱片。記錄下來之聲音，有為深淺不同之溝槽，有為曲折線紋。

欲重行放出原音之時，將唱片置於一旋轉之盤上(圖 258)，盤之旋轉，由匣中之彈簧司之。放聲筒之一端口上，張以有彈性



圖 258. 留聲機。

之金屬薄片，中央與槓桿之一端相連，桿之他端附針。置針尖於唱片之線紋中，則針隨線紋之曲折而左右振動。此振動經槓桿放大而傳達於薄片上，因之鼓動放聲筒內之空氣，則此空氣之振動，將與原初收入聲音之振動相同，於是吾人得聞原聲。

§228. 何物傳聲。 在吾人四周之空氣，將聲傳至人耳，欲明此理，可作下述實驗：

置時鐘於抽氣機之玻璃罩內(圖 259)，滴答之聲，頗為清晰；若將罩內空氣逐漸抽去，則鐘聲變弱，終不能聞。如放入空氣，

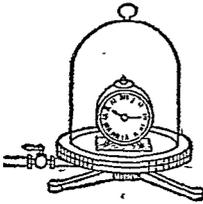


圖 259.

則鐘聲又響亮如初。可知發聲體之周圍，如無空氣存在時，則發聲體無論如何強烈振動，亦聽不見聲；換言之，聲之傳達，須藉空氣為媒介。介乎發聲體與收聲器(如人耳)之間，而為傳聲媒介之物質，稱為介質(medium)。

除空氣外，其他氣體亦能傳聲。液體及固體之傳聲，較之氣體尤佳。例如耳在水中，可聞水面外之聲格外清晰。魚之聽覺甚敏，水面外略有細微之擾動，魚即驚散。又貼耳於鐵軌上，能聞遠處之火車聲，此亦為熟知之事。蓋由於固體之彈性大於液體，液體之彈性大於氣體也。固體中之彈性弱者，不善於傳聲。吾人皆知棉花，毛織物，及地毯等，皆能阻塞聲音，不讓外傳。

聲之傳播速度。 在平常室內，聲之達於耳中，似不覺其需要時間，但在大廳或戶外，則在聞聲之後，每聞有回聲，由此可知聲至反射面而回到耳中，多少費些時間。在大雷雨時，聞雷聲必在閃光之後，距離愈遠，光與聲相隔之時間愈長。遠處汽笛發聲時，亦必先見汽而後聞聲。故知聲傳播之速度，必遠較光速為慢，可無疑問。

測量聲之傳播速度之直接方法，即在遠處山上放砲，吾人可測量發現火光與聞到砲聲相隔之時間。在1832年，法國科學院 (French Academy of Sciences) 第二次組織委員會，以測定聲之速度。將二砲放在相距18.6〔仟米〕之山上，先在一山放砲，測驗光與聲相隔之時間，然後由他山放砲而測之，以消除因風而起之誤差。所用儀器，雖甚粗陋，光行時間，亦未計及，但所得結果，已甚為精確，此在我國清道光十二年事也，豈吾人無此種觀念哉？流水高山，徒知欣賞，不作研討而已！

此後測定聲之傳播速度，實驗甚多。由此等實驗，知在 $0^{\circ}\text{C}$ 及76〔厘米〕水銀柱高之大氣壓力時，在乾燥之空氣中，聲之速度為 $331.36 \pm 0.08$ 〔米/秒〕。聲在水中之速度，約為空氣中之4.3倍，在鋼中則為空氣中之15倍強。且知在空氣中，溫度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，聲之速度增量約為0.6〔米/秒〕。實用上，聲之速度作為343〔米/秒〕，蓋取其溫度在 $20^{\circ}\text{C}$ 時也。

聲之速度，不以其頻率或振幅而殊。已知聲速，吾人每可藉以測定聲源所在之地，此即用聲來作測量之理也。

§229. 聲之感覺。吾人知氣體，液體，固體中所傳遞之聲，實係振動之傳遞；且知聲與耳有連帶之關係。例如在地球上人類或獸跡不到之處，雖有瀑布，誰為知音。故聲有兩事；即振動 (vibration) 及對於鼓膜所生之感覺 (sensation)。關於耳及腦中所生感覺之研究，為生理學與心理學上之事。在物理學上所研究者，祇為空氣或其他介質之振動而已。故在此意義上，

不論有耳聽聞與否，瀑布恆在作聲。耳得之而爲聲，目遇之而成色。吾人將見色與聲，各爲一種波動。

盲者亦能辨別聲所從來之方向，則以吾人有左右兩耳之故。其唯一之例外，爲直接由前面，上面，及後面傳來之聲，每易互相混淆。在此種情形下，聲自來處同時達於兩耳。由其他方向而來之聲，則因與一耳成較短之距離，故有先後。由此可知使人起聲音方向之感覺，由於聲達於兩耳時間不同之故。

### 習題四十五

- (1) 拍桌何以成聲？
- (2) 人何以能發聲？
- (3) 已知電燈泡內爲真空，熱與光能在真空中傳播否？
- (4) 夜半鐘聲，隔 2.5 [秒] 鐘，始到客船。已知當時之氣溫爲  $0^{\circ}\text{C}$ ，求船與寺之距離。
- (5) 在圖 256 記錄音叉振動之儀器中，圓筒之半徑爲 10 [厘米]，每 [分] 鐘轉 45 次。測得煙痕紙上 20 全波間之距離爲 5.89 [厘米]。求音叉之頻率。
- (6) 有人見電閃後，歷 8 [秒] 鐘，始聞雷聲，求閃電處與人之距離。
- (7) 側耳於火車之鐵軌上，另由一人在遠處打擊鐵軌時，可聞得響聲三次，何故？設此二響聲相隔 0.8 [秒]，求鐵軌被擊處之距離。
- (8) 用 600 [米/秒] 之速度，將鎗彈打至 420 [米] 遠之靶上，聲及鎗彈何者先到？快多少 [秒]？
- (9) 一人打靶，標的離人 280 [米]。自鎗彈離鎗口 1.3 [秒] 後，即聞中的之聲，求鎗彈之速度。

(10) 鐘上之鐘，於正午敲 1 下，報告時間。鐘外 2 [千米] 處之人，依此鐘聲，校準其錶，應有若干相差？撥快或撥慢？

(11) 一木匠在屋頂上敲釘，每 [秒] 4 下。一觀察者恰巧在槌舉起最高之時聞槌之聲，此人與木匠相距約若干 [米]？

(12) 一具有科學頭腦之小孩，欲求空氣之溫度，將一來復鎗在半 [千米] 遠之絕壁前開放，用停錶測得回聲之時間為 3 [秒]。求此時空氣之溫度。在此實驗中，何者為使結果不甚精確之最主要原因？

## 第四十六章

### 聲 波

§230. 聲爲波動。聲由發聲體傳至人耳，顯然並無物質(可稱者)從發聲體發出，射至吾人之耳中；否則密閉於玻璃罩內(圖259)之時鐘聲，如何能透過玻璃？由此種事實，可斷定聲之所傳遞者，祇爲振動而已。此種運動，謂之波動(wave motion)，將於下列數節中詳言之。

§231. 水波。因聲波每不易見，故先研究水波。投小石於平靜之水面，則於落下處起上下之運動。此種運動，漸次傳至其周圍之各部分，生成圓形之波紋。此種波紋，雖向四方進行，廣被水面；但水面之各部分，仍留於原來位置，並未流動。故水面上前進之波，僅爲波形而非水之質點。此種事實由浮在水面之樹葉，見其僅依上下運動，而不遷移位置可知。

§232. 駐波。於盛水之圓盆中，用木棒之一端，按一定之頻率，上下攪動，即可生連續之駐波(stationary waves)。此種波動之面，可用圖260中之曲線表示，定點A, B, C, D等謂之波節(node)。

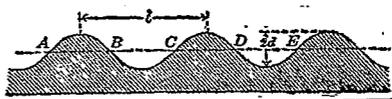


圖260. 水波之截面圖。

在相鄰二波節間之部分，謂之波腹(loop)。在波節間之水作上下擺動；當上升時成一波峰(crest)，下降時成一波谷(trough)。一波峯與一波谷，合成一波，如  $A$  至  $C$ ，或  $B$  至  $D$ 。相鄰兩波上任意兩對應點之距離，謂之波長(wave length)，如圖中之  $l$ ；對應之點，謂之同相(phase)，例如  $A$  與  $C$  與  $E$  為同相。波振動之振幅(amplitude)  $d$ ，為波谷與波峯間垂直距離之半。

§233. 傳播速度與波長及頻率之關係。投石於靜水面時所生之波，逐漸擴大，向外傳播，至達池邊而消滅。在 1 [秒] 鐘內，波峯(或波谷)所經之距離，即為傳播速度。每 [秒] 鐘經過某一點之波峯之數，謂之頻率(frequency)。於是速度，頻率，波長三者之間，有下列關係：

$$\text{速度} = \text{頻率} \times \text{波長}$$

即 
$$v = fl.$$

此一關係，對於一切之波，皆為精確。傳播速度  $v$ ，波長  $l$ ，與頻率  $f$  或週期  $T (= 1/f)$  三者之中，測定其二，即可由上式計算其第三者。

若波源為繼續不斷之振動體，每振動一次，即生一波。如是在介質中經過任意一點，每 [秒] 鐘之波數，等於振動體之振動次數，即振動體之頻率也。頻率繫乎振動體之本身，視其構成之物質與幾何之形狀而定。例如頻率為 256 之音叉，置之真空中，空氣中，或水中，每 [秒] 鐘莫不振動 256 次也。至於波動傳播之速度，則視介質之性質而有一定。故就某一介質而言，振

動之頻率大者其波短，頻率小者其波長。

§234. 橫波與縱波。為顯示波動之形狀，取長約3〔米〕之繩，一端固定於牆上，執他端而急速上下搖動一次，則沿繩成一波動，向前傳進（圖 261）。此繩所生之波與前所述之水波，在



圖 261. 繩之橫波。

波動依水平方向前進時，繩與水之質點，均作上下振動。換言之，振動之方向，與傳播之方向，互相正交，如是之波，謂之橫波 (transverse wave)。

另有一種波動，起於有彈性及壓縮性之物質，如氣體及鋼線彈簧等。此種波動可用錄卷以代傳波之物質而研究之。圖 262

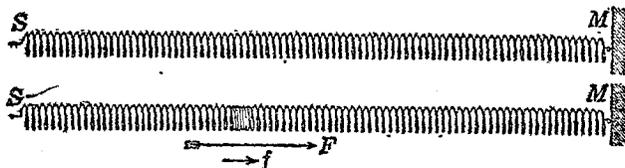


圖 262. 彈簧之縱波。

表一彈簧，有甚多之錄卷，右端固定於牆上。將彈簧之左端用力急速向右一推，即行放鬆，則被推之端先行緊縮而密集，由其彈性作用，壓迫前方部分，使之收縮緊湊，自己則反比原來不動時更稀疏。而此密集之前部，又壓縮其更前方部分。如是一密一疏之狀態，前後跟隨，成爲一種波動，依一定之速度，沿彈簧之方向而前進。

若將彈簧左端急速一拉，又行放鬆，則鄰近之各錄卷伸長片刻，繼即壓縮，而將前方鄰接之錄卷拉稀。如是成爲一種前疏後密之波動，向右傳播。可知在彈簧之一端，若加以推或拉，則推拉之結果，即可傳至彈簧之他端。

在此種波動中，介質之質點，依波動進行之方向，而前後移動；換言之，振動之方向與傳播之方向一致，是爲縱波(longitudinal wave)。

縱波與橫波，其振動與傳播之方向，有如圖 263 所示。

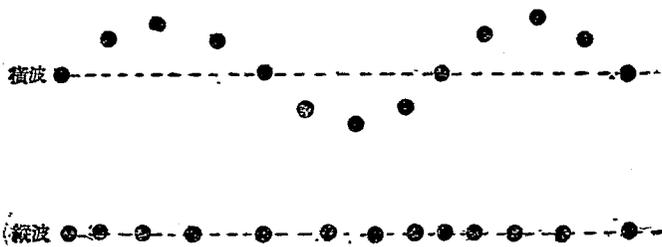


圖 263. 橫波與縱波。

§235. 固體中的縱波。 不僅彈簧，即固體如鋼棒，與氣體及液體，皆能傳遞縱波。將一鋼棒中部夾住(圖 264)，於其一端用塗有松脂之布，沿棒一擦，可聞清晰而尖銳之聲，棒起縱振動矣。用一小象牙球懸在線上，攏近棒

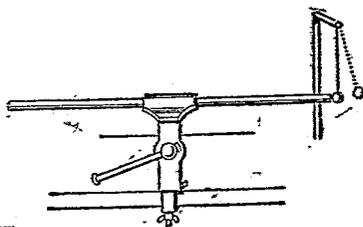


圖 264. 棒之縱振動使球跳躍。

之他端，即可知之。當棒振動時，球即起劇烈之跳躍。

在固體中，質點運動之距離當然極微，但仍能將振動之狀態，傳至遠方。此種情形，可以下述實驗說明之。

將數個鋼球，用線懸掛，列成一行（圖 265），使其互相接觸。

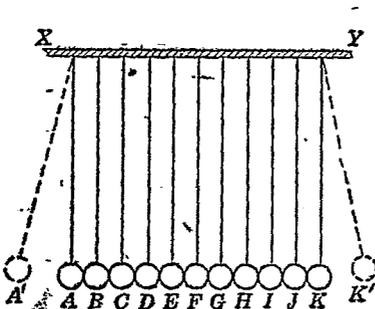


圖 265.

若將左邊第一球提起，再令落下，回擊其餘排列之球上；被擊之球，似乎不動，次一球亦無運動。事實上，除他端之球外，皆無可見之運動。惟末一球向外躍起之距離，與第一球落下之距離相同。

因鋼之彈性甚大，第一球之衝擊，由各球受授，依次傳遞至末一球，此與令學生排列成行，互相靠攏，推動第一人，即在行列上傳至末一學生，而將其推出相同。

**§236. 聲波。** 聲波所經過之空氣，依波動進行之方向，往返振動，如彈簧卷然。換言之，即聲為縱波，由交互之密部 (condensation) 與疏部 (rarefaction) 組成。

如圖 266 所示，音叉振動之又端向外開張時，則外方與其鄰接之空氣，被壓縮而變稠密。此稠密空氣，因壓力之增加，又壓迫其外方空氣，故空氣之稠密狀態漸次向外傳播。不久音叉又端向內合攏，外方與其鄰接之空氣變為稀疏，壓力減少，隨之其更

外方空氣，向內流動，此處之空氣又變稀疏。故此稀疏狀態，亦復漸次向外傳播。可知音叉向內外振動時，空氣分層，疏密相間，而成波動，以音叉為中心而傳播於四方。耳得之而成聲者，以此等空氣之疏密波，傳至耳中之鼓膜，鼓膜即受強迫而隨之振動故也。

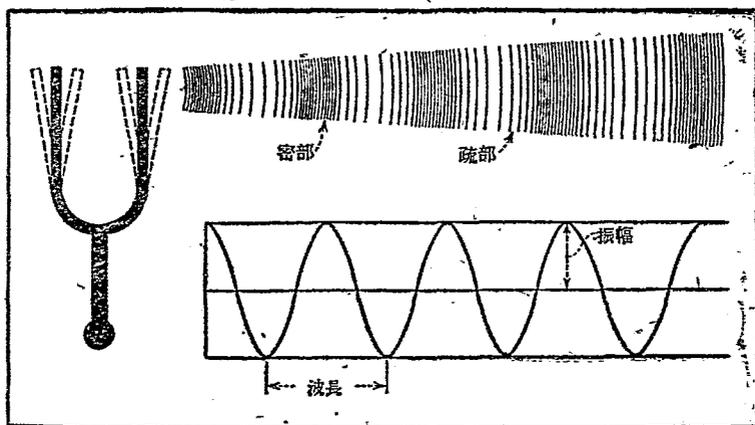


圖 266. 聲波。

就圖 266 觀之，當知其所代表者，為某一瞬刻之空間的情形。空氣中之各層，此疏而彼密。疏密兩層之間，有一定之距離，即波長是也。故波長為波動之空間的週期。若就空氣中之某一層而論之，則時疏而時密，相隔之時間，亦有一定，即音叉之振動週期也。此層中之空氣質點，隨音叉之振動，而搖擺於其平衡位置之左右，其最大之距離，曰振幅。

由此觀之，聲波之所傳遞者，非為此等空氣質點之本身，而為波動之稀疏與稠密狀態耳。與音叉接觸之空氣質點，並未有一

顯真正到達人耳之鼓膜，敲擊鼓膜者乃原來與耳膜接觸之空氣質點也。

至若音叉本身之振動，顯然與其長度之方向爲正交，而爲橫振動(transverse vibration)；其在音叉身內傳播者，則爲橫波。故固體能傳橫波，亦能傳縱波；但氣體祇能傳縱波。

§237. 聲之反射——回聲。任何彈性物體，如橡皮球等投在牆上，必能躍回。水波遇堤岸而彈回，聲波亦然，有反射之現象。例如立於廣場之大壁前，或俯臨深邃之井上，而發聲時，則經短時間後復聞原聲一次，此種現象，謂之回聲(echo)。回聲之發生，由於吾人所發出之聲波，觸於牆壁或水面後，經反射而再行入於耳內之故。若反射面甚近，則反射之聲波立時傳來，與原聲波相合而助其作用。室內談話，較之野外更爲嘹亮者，即此理也。

在廣大之場所中，如寺廟與大廳，其四周有平滑之牆壁者，恒覺回聲頗強；聲波來回之路程既遙，回聲與原聲相隔之時間自久，因成不悅耳之囂聲。現代建築家，對此非常注意。

在山谷中，懸崖絕壁，森林水面，皆爲反射之物，聲波可由各處經數次之反射，先後回到耳中，因聞數次之回聲。雷聲隆隆不絕，即由此故。

聲波傳入海中，至海底而反射，若測得聲波往返所需之時間，即可用以計算海底之深度。同理，由爆炸時所發之巨聲，在地層分界面上之反射，可計算礦脈之所在。凡此皆爲回聲之應用。

## 習 題 四 十 六

- (1) 聲自唱者傳至聽者之耳，如何由空氣傳遞？此作用與熱之傳導，對流，及輻射，何者相似？
- (2) 夏日南風送暖時，麥壠間常生成所謂“麥浪”者，此時麥穗之運動如何？
- (3) 以一空瓶之口按於耳上，則聞瓶中有聲蟲蟲，何故？
- (4) 已知聲在空氣及水中之速度，各為  $343$  [米/秒] 及  $1437$  [米/秒]，求頻率為  $512$  之音叉，所發聲波 (a) 在空氣中及 (b) 在水中之波長。
- (5) 鋼琴發出之聲波長為由  $8.3$  [米] 至  $8$  [厘米]，問其相當之頻率為何？
- (6) 從船底發出之聲波，直射海底，於  $2.4$  [秒] 後收到回聲，求海底之深。
- (7) 空中飛機所發之聲，似不由機身發出，有如在機後數百[呎]之處，試解釋之。

## 第四十七章

### 樂 音

§238. 噪聲與樂音。物體之振動，有漫無紀律與秩序井然之分，因此所發生之聲，亦可大別爲二。例如雷鳴，礮響，以及車輪輾轉之聲，屬於前者，令人聞之，感覺厭惡，是曰噪聲。反之，如



圖 267. (A)噪聲;(B)樂音。

琴，瑟，簫，笛之聲，屬於後者，令人聞之，感覺爽快，是曰樂音。噪聲之振動(圖 267 A)，既極雜亂，遠不若樂音之有規律(圖 267 B)，又無其他任何重要性，故聲學所研究者，概限於樂音。

樂音之特性有三，曰音強(loudness)，音調(pitch)，及音品(tin.bre)。吾人將以物理之解釋，研究聲之此等生理性質。

§239. 音強。音強亦稱響度。擊鼓，彈琴，用力愈猛，則聲愈大，吾人見鼓與琴之振動亦愈甚。擊一音叉之初，見叉端之振幅頗大，而音亦強；其後振幅漸小，音亦隨之而弱。於是吾人知音強之有變化者無他，振幅之有大小耳。振幅大則音強，振

幅小則音弱。故耳中所感覺之響度，視聲波之能而定，隨聲源之距離的平方而遞減：

欲將聲遠播，或欲收聽遠處之聲，均宜增加聲之響度，其法有三，即：(1)增加聲源振動之能；(2)集中聲波向一方傳播；(3)在接收處將多量之聲波會聚，是也。如傳話筒與喇叭筒，乃因限制聲波向一方發射而得收效；凹反射器，耳之外殼，以及將手做成杯形，放在耳旁，皆可使聲波會聚。

§240. 音調。音之高低，曰音調。自鋼琴左方之鍵，依次向右彈之，初聞之聲為粗鈍之低音，繼而聞尖銳之高音。又陀螺之發聲，為其有週期性之擾動空氣，陀螺旋轉速度變緩，則每〔秒〕鐘內，擾動空氣之次數減少，吾人聞其聲為粗鈍；若旋轉加快，則其聲尖銳。由此可知音調之高低，由其振動之頻率而定。頻率大者音高，頻率小者音低。

此理可用測音盤(siren)研究之。如圖 268 所示，金屬盤上有等距之小孔數圈，可繞其中心之軸而轉動，氣流由管中吹出，生成連續之樂音。管口對向內邊數圈之小孔時，所發之音低；對向外邊數圈之小孔時，所發之音高。又將盤之旋轉

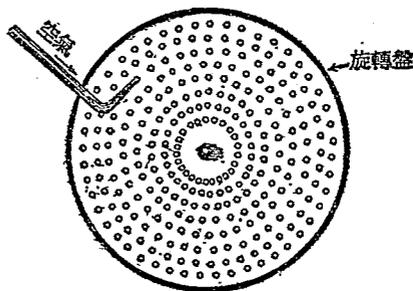


圖 268. 測音盤。

速度增加，則音調升高。

用此種轉動之圓盤，即可測定樂音之頻率。設盤上某圈有 48 小孔，接連於每〔分〕鐘有 1800 轉之電動機上。因盤每〔秒〕作 30 轉，故每〔秒〕吹氣  $30 \times 48 = 1440$  次，此即所發之音之頻率也。此音頗高，因標準 A 音音叉，每〔秒〕振動祇有 440 次。又若手執管口而亂動，使其對距離不等之孔而吹之，即得噪聲。

頻率小而振幅大者，音粗鈍而宏亮，如牛鳴。頻率大而振幅小者，音尖銳而細弱，如鶯囀。通常女子與小孩之聲音，皆較成年男子為高者，即因其聲帶短而且薄，頻率較大之故。

我國之平上去入四聲，即由頻率之不同，如“夫撫父福”。又說話時音調改變，或先升而後降，或先降而後升，則意義攸分。如“那兒？”與“那兒”之分別，可以聽得出來。又如“是”，可以表示“對的”，“對的嗎？”，與“不對的”各種意義。

**§241. 聽覺之限度。** 人耳所能聽聞之聲，其頻率最低約為每〔秒〕 20 次，若聲之頻率太高，耳亦不能聽覺。此聽覺之最高限度，因人而異，每〔秒〕約為 18,000 至 22,000 次。年老之人，難聞高聲。故在空氣中，吾人所能聽聞之聲，其波長約為自 1.6〔厘米〕至 17〔米〕。

**§242. 音品。** 兩種發音體發出之音，有時高低相同，強弱相等，但仍能為吾人所辨別者，如簫笛之音與胡琴之音不同，與琵琶之音亦不同，則以其音品有異也。任何樂音，倘加精密觀察。

即可見其頻率，不止一種。如其主要頻率為  $f$ ，則同時可有頻率

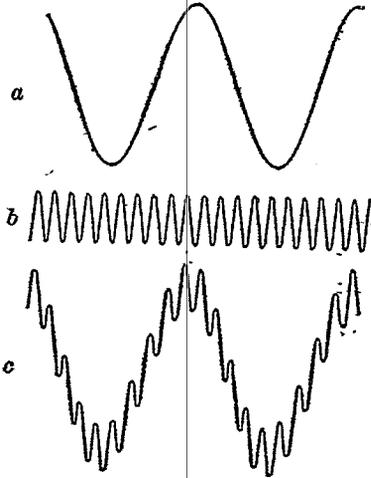


圖 269. (a)基音 (b)倍音  
(c)由(a)與(b)合成之複音。

為  $2f, 3f, 4f \dots$  等之音混合其中。 $f$  之音，曰基音 (fundamental tone)， $2f, 3f, 4f \dots$  等之音，則曰倍音 (overtone)。僅有基音而不帶倍音時，其振動可用正弦曲線表出，音亦特別清朗，是曰單音 (simple tone, 圖 269a)；反之，有倍音混合者曰複音 (compound tone, 圖 269c)。發音體所發之音，概為複音。倍音之個數可有不同，

其與基音強度之比，又可各異。音品有別，即由於此。

圖 270 示三種樂器發同一音強，同一音調之音時，所作之振動。A 為音叉所發者，B 為提琴所發，C 為開管所發。此等複音，可分解成若干單音，各成分單音之音強與音調，各不相同。

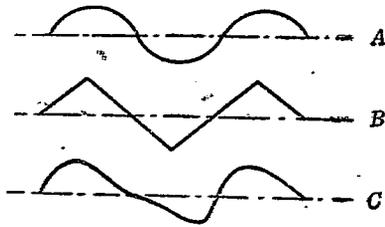


圖 270.

其中以基音之振幅最大，遠在其他倍音之上，複音之音調，即基音之音調。

大凡富於倍音之音，多宏朗悅耳，反之者清單。音叉之單純

音，清淡無奇，僅供實驗與樂器調音時作標準之用。笛之倍音貧乏，不宜獨奏。又人聲之所以為美者，以其饒有最初數個之倍音也。

§243. 共鳴。由經驗，知每隔適當時間，將鞞韃連續輕推，甚易使之作強烈之振盪 (§ 154)；無規則之亂推，反將促其停止運動。同理，聲波或其他之小衝力，週期的加於物體上時，若恰與物體本身之頻率相同，則能使振動加強，凡物體受與其頻率相同之聲波之感應，而生發音之現象者，謂之共鳴(resonance)。

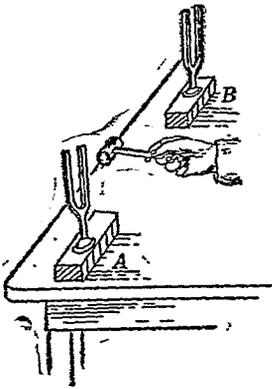


圖 271. 音叉之共鳴。

欲表示共鳴現象，可用頻率相同之二音叉，放在相距數[呎]之處(圖 271)。將軟木槌重擊第一音叉 A，則瞬時後第二音叉 B 亦開始振動。如以手按 A 使其停止振動，則可聞得 B 之鳴聲甚晰。B 之振動，乃由 A 處傳來之聲波所激發。若將一小“滑鍵”裝在第二音叉上，以改變其頻率，則第二音叉即不能因感應而發聲。

由上述實驗，知兩音叉須有相同之頻率，方能共鳴。吾人常用共鳴現象，以增強發音體之響度。通常音叉皆附有臺箱者，即在由其箱內空氣之共鳴，以增強其所發聲音之故。若將音叉由共鳴箱上取下而鳴之，則其音甚為低微，非置近耳旁，幾不能

聞。又胡弓，月琴等樂器，亦皆附有箱或盒者，其理皆與此同。

共鳴現象又常作為聲波之檢收，或測定波長之用。如圖 272 之裝置；可將管 A 在一缸水 B 中升高或降低，同時將一振動之

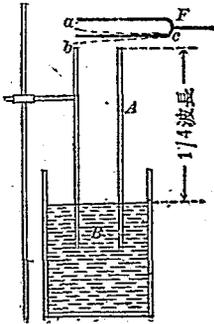


圖 272.

空氣柱與音叉之共鳴。

音叉放在管口上。由此可得適當之管高，使音叉之聲為管中空氣柱之聲所加強，而聲亦較響。此時管中之空氣柱，實音叉之共鳴器也；由於音叉直接發出與由水面反射之波，互相輔助而成；管中空氣柱之長度，即等於波長之  $\frac{1}{4}$ 。

音叉之一股由平衡位置而開始向下振動時，管上端與其接觸之空氣層，即成密部而向下傳播，達於水面，輒被反射，回向上方管口之時，經行管身二次，即半波長之路程，適遇音叉之股完成半個振動，正將由平衡位置而向上移動，遂得密部空氣之輔助，聲勢頓形浩大，振動益為強烈。據此實驗，可直接測定聲波之波長；又知聲波在空氣中之速度，因可計得音叉之頻率。

§244. 音之干涉。空氣中某部分，同時接受頻率相同之二聲波時，如一波之密部與他波之密部，或一波之疏部與他波之疏部，同時到達，謂之同相(in phase)，則合成之波振幅倍大，其

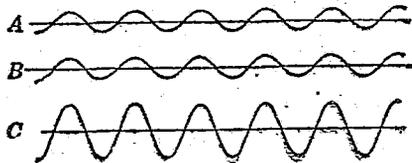
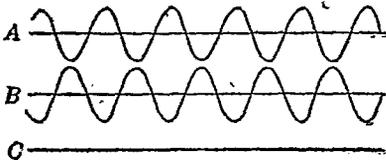


圖 273. 同相兩波 A 與 B 加總成 C。

波加強(圖 273)。反之,如一波之密部與他波之疏部同時到達,



謂之反相 (opposite in phase), 則疏密相消, 振幅減小或竟為零, 其合成之音變弱或竟寂然(圖 274)。

圖 274. 反相兩波 A 與 B 抵消成 C。 此種現象, 謂之音之干涉 (interference of sound)。干涉為波動之特徵。凡任何現象之能發生干涉者, 吾人即可斷定其必為週期振動。

§245. 拍音。 音調相同之兩音叉, 放在附近, 用軟木槌輪流擊之, 可聞調和合一之音。若於一音叉之兩臂各加滑鍵, 使其頻率稍改, 再行試之(圖 275), 則生忽強忽弱之聲, 時升時沉, 謂之拍音 (beats), 即因兩音叉互相干涉, 有時加強有時減弱而成者。

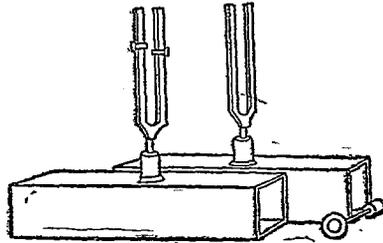


圖 275. 兩不同頻率之音叉生出拍音。

如圖 276 中, A, B 兩曲線各表兩音叉所發之聲波, 頻率略有差別, 重疊後, 在 R 等處增強, I 等處減弱, 結果成為如 C 所示之拍音。設兩音之振動, 各為每[秒] 4 次及 5 次, 每[秒]相差 1 次, 則每[秒]有一增強與減弱, 即一拍音。總而言之, 每[秒]鐘內之拍數, 等於兩音之頻率之差。

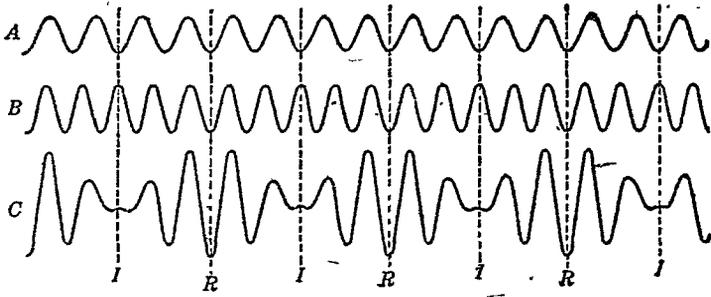


圖 276. 拍之成因。

吾人常用拍音以校準樂器。如樂師旋緊琵琶之絃，使與音叉所生拍音之頻率逐漸減小。當拍音消逝時，絃之頻率與音叉之頻率相等。

§246. 音之諧和。由實驗，知不諧和，祇為拍音而已。若每〔秒〕有 7 個或更多個拍音，其結果極不悅耳，若有 30 個拍音為最不悅耳之音，此寺廟中普通祇有一鐘，即有二鐘亦決不同時敲撞之理也。但當頻率相差至 70 之時，如律音中部之 C 音與 E 音，則又諧和。故欲兩音諧和，必須使其頻率成簡單之整數比，以免除其倍音成拍。

§247. 音階。音樂所用之音，其頻率之不同，雖有自數十至數千之廣，但此音與彼音之間，皆有一定之關係。

試觀鋼琴上共有音鍵 85 個，每一音鍵得發一定頻率之音（圖 277）、其中 84 個音鍵，可分成七個音組（octave），每一音組有

十二音，而每組十二音間之組織相同。每一音組中某音之頻率，為前一音組對應之音的頻率之 2 倍，謂之高一音組。

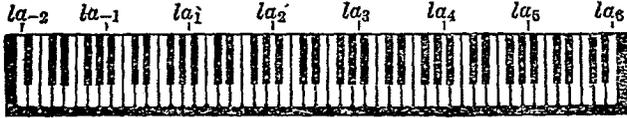


圖 277. 鋼琴之鍵盤。

茲就其中部之一組而研究之，例如自  $la_3$  之左  $do_3$  起至  $la_3$  之右  $do_4$  止，為一音組(圖 278)。其中八個白鍵所代表之音名及頻率如下：

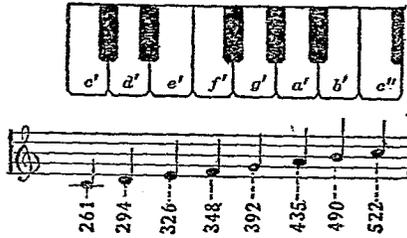


圖 278.

記號	$c$	$d'$	$e'$	$f'$	$g'$	$a'$	$b'$	$c''$
音名	$do_3$	$re_3$	$mi_3$	$fa_3$	$sol_3$	$la_3$	$si_3$	$do_4$
頻率	261	294	326	348	392	435	490	522

若每一音之頻率皆以 261 除之，則各得簡單之分數，故能互相諧和，有如下表：

$$1, \frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8}, 2.$$

此等分數，代表自某一音至  $do$  之音程(interval)。吾人依音

程之大小，名之如下：

$\frac{1}{1}$  一度音，或同音，

$\frac{3}{2}$  五度音，

$\frac{9}{8}$  二度音，

$\frac{5}{3}$  六度音，

$\frac{5}{4}$  三度音，

$\frac{15}{8}$  七度音，

$\frac{4}{3}$  四度音，

$\frac{2}{1}$  八度音(即高一音組)。

全鋼琴上各音組間之音程，皆如上述。

已知耳中所聞之譜音，祇為音之頻率成為簡單之整數比者，如 1:2 或 2:3 或 3:4 等。更須注意者，吾人之聽覺對於三音頻率之比為 4:5:6 時，特感諧和。此種組合，謂之長三和音(major triad)，如 *c, e*，與 *g*；及 *f, a'*，與 *c'*；及 *g, b* 與 *d''* 是。

音樂家以每秒 435 次振動為“標準 A 音”，此使中 C 音(即三倍音部中之低音 C)之振動數為 261。但在物理實驗室中，C 音又之頻率，常為 256 次，以使計算簡單。

嬰與變 上之所云八音 do, re, … 等，相當於鋼琴上一音階中之八個白鍵；此外尚有黑鍵，作何用途？

在音樂上，有時需要介於二音頻率之間之音。例如需要高於 do 而低於 re 之音，於是有黑鍵之添設。黑鍵代表之音名，為在所鄰二音上加一‘嬰’(sharp)字或‘變’(flat)字，例在 do 與 re 間者，謂之嬰 do 或變 re，音樂中記之為 #do 或 re (♯表‘高於’，♭表‘低於’之意)，實則此二音名所代表之音則一，#do 或 re 去 do 之音程與去 re 之音程相等，即：

$$\frac{\#do \text{ 或 } \flat re \text{ 之頻率}}{do \text{ 之頻率}} = \frac{re \text{ 之頻率}}{\#uo \text{ 或 } \flat re \text{ 之頻率}}$$

故 $\#do$ 或 $\flat re$ 之頻率為 $\sqrt{261 \times 294} = 277$ 。餘如 $re$ 與 $mi$ 間， $fa$ 與 $sol$ 間， $sol$ 與 $la$ 間，及 $la$ 與 $si$ 間之黑鍵，意義相仿。

### 習 題 四 十 七

- (1) 醫師所用之聽診器，其作用如何，試說明之。
- (2) 搖手何以不聞聲音？
- (3) 寺內大鐘，何以能聲聞數[里]？
- (4) 餘音繞梁，作何解釋？
- (5) 舉出幾種樂器，(a)單發一音及其倍音者；(b)可發各種複音者。
- (6) 在隔壁往往能分辨說話者為誰，何故？
- (7) 有一音，與每[秒]256次之音叉，成每[秒]28次之拍音，又與每[秒]326次之音叉，成每[秒]42次之拍音。問此音之頻率為何？
- (8) 圓鋸片之緣有96齒，每[分]鐘轉動150[次]。以一金屬片與鋸齒相觸，求其所發之聲之頻率。
- (9) 二人各距汽笛300[米]及500[米]，比較二人所聞聲音之響度。
- (10) 在圖272之實驗中，空氣柱長22[厘米]時，音叉發音最響。求音叉之頻率及其所發音波之波長。
- (11) 若在圖272之實驗中，空氣柱之長為33[厘米]時，可加強每[秒]256次之音叉所發之音。求(a)聲之速度，及(b)空氣之溫度。
- (12) 試述測定頻率之三種方法。
- (13) 留聲機之轉動速度增加時，音調升高，演奏鋼琴時，加快速度，可得同樣之結果否？試解釋之。
- (14) 提琴之本身，何故中空，且由極薄之板造成？
- (15) 高速開行汽車喇叭之聲，當經過時音調突然降低。試解釋之。

## 第四十八章

### 樂器

§248. 樂器之種類。樂器種類繁多，大別之可分為絃樂器，管樂器，膜樂器三種。

§249. 絃之振動定律。絃之振動，可於一長木匣上，張二琴絃(圖 279)，即成所謂絃音計(sonometer)者而研究之。絃

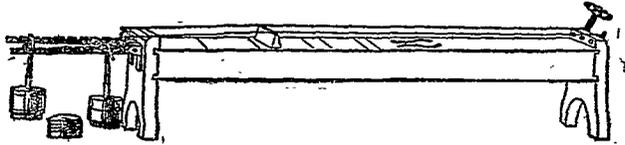


圖 279. 絃音計。

之頻率(即音調)，隨其緊張程度而定。若一絃之張力，為他絃之四倍，則第一絃之音較第二絃者高一組。若加一可移動之絃柱，於兩支端之中點或離一端三分之一處，則音調升高，此由於其波長成為原來之 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 之故也(圖 280)。若一絃較粗，或二絃之質料不同，則所發之音調亦異。

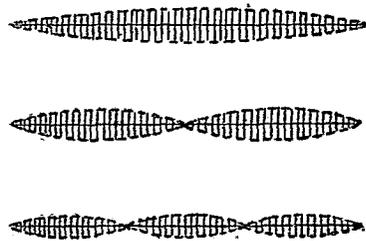


圖 280.

由此等實驗，可知絃之頻率，(1)與絃之長度  $l$  成反比，(2)與絃之張力  $T$  之平方根成正比，(3)與絃之單位長度的質量  $m$  之平方根成反比，即：

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

此種基音之外，自然同時可帶各種倍音。

鋼琴為絃樂器中之常見者，揭開琴蓋，鍵盤之下，可見粗細及長短不同之金屬絃，各生一定之音調。其他提琴，胡琴，琵琶等，皆用絃線數根，以發高低不同之音，其木箱即用以使響度加強。此等樂器與鋼琴不同之點，為祇有少數之絃，且絃之振動不用錘擊，而用弓拉或手指撥之。每一絃可用手指壓在各處，以變更其長度，而使之能發各種基音，用弓或手指彈在絃之某部，以決定其倍音與音品。

### §250. 氣柱之振動——吹奏樂器。

最簡單之管樂器為管風琴 (pipe organ)。其管，有時上端開口者，謂之開管 (open pipe, 圖 281 甲)；有時上端關閉者，謂之閉管 (closed pipe, 圖 281 乙)。

吹氣入開管時，氣流沖擊尖緣，使之振動，管即如共鳴器。開管所生最低

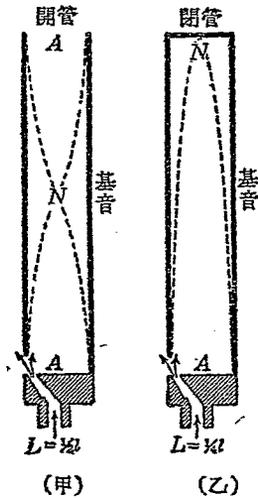


圖 281. 開口及閉口之風琴管

之基音，波長  $l$  爲管長  $L$  之 2 倍，蓋管之兩端皆成波腹故也。用手將管之一端封閉，卽成閉管。閉管所生之基音，波長爲管長之 4 倍，蓋管之開口爲波腹，而管之閉端爲波節也。

總之，開管之長度爲其基音波長之  $\frac{1}{2}$ ，閉管之長度爲其基音波長之  $\frac{1}{4}$ 。閉管之基音，較之同長開管之基音，低一音組。

在圖 272 實驗中之共鳴管，爲一倒立之閉管，發聲之音叉，相當於風琴管之唇。

簫，笛，喇叭等皆爲吹奏樂器。管側之開孔，等於在是處將管截斷，用手指啓閉，以改變其所發之音之波長。管中空氣柱之振動，通常由吹者之唇所激動而發生，亦有用振動笛膜者。

§251. 板之振動。固定金屬板或玻璃板之一點，而以胡弓摩擦板邊時，則板起複雜之振動。其面上有爲振動之腹而強烈振動處，亦有爲振動之節而靜止不動處。其靜止不動之點，銜聯成線，謂之節線(nodal line)。

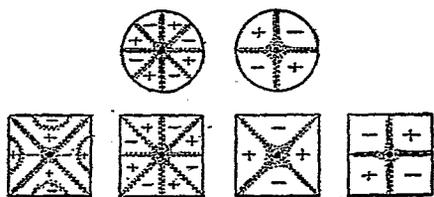


圖 282. 板之振動。

如圖 282 取圓形或方形之板依水平而固定其中央，撒細砂於其上，以指按板邊之一點，而以胡弓擦另一點時，則板盛行振動，

細砂集聚於振動較弱或靜止不動之處，以示節線之位置。板之振動與絃之振動相似，其在節線二側部分常向反對方向運動，即一方往上時，他方則往下，圖中用(+)及(-)表別之。

鑼爲板之振動。鐘亦可視爲一種板之振動，通常有四條或六

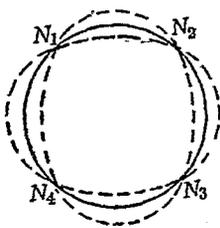


圖 283. 鐘之振動

條縱節線，如圖 283 所示。周圍張緊之膜，如用槌擊其中央，亦起振動。膜之振動狀況與板同，但其周圍恆成節線而已。撒砂於膜上，照前實驗，亦可現出種種節線。膜樂器中之音，即利用膜之振動而定。電話機與留聲機內，皆有振

動之薄膜。

### 習題四十八

- (1) 彈月琴等弦樂器時，皆於弦之一端近處彈之，何故？
- (2) 通常提琴四弦長度相等，其基音各爲  $sol_2$ ,  $re_3$ ,  $la_3$ ,  $mi_4$ ，問此四音之頻率爲何？若此四弦張力相等，且屬同一質料，求其直徑之比。
- (3) 有均勻之金屬線，長 50 [厘米]，質量共計 1.2 [克]，以 62 [克] 重之力拉緊，求其所發基音及最初三個倍音之頻率。
- (4) 欲以開口風琴管，發生頻率爲 256 之基音，問管長須若干？
- (5) 開管長 68 [厘米]，求其基音及最初三個倍音之頻率。
- (6) 閉管長 96 [厘米]，求其基音及最初三個倍音之頻率。問閉管倍音之頻率，恆爲其基音頻率之何種倍數？

## 第四十九章

### 光之直線進行

§252. 發光體。 太陽與燈火，能自行發光之物體，稱爲發光體(luminous body)。 有些物體，本身不能自行發光，但受外來之光照射，能爲吾人所見，確亦有光從之而來，廣義言之，亦可稱爲發光體，用作光源；如天空之月，室之四壁，與燈之白罩等是。 以是而言，物體之不發光者皆黑暗。

§253. 透明體。 人目與物體之間，雖有空氣之阻隔，而吾人視物明明。 室內與室外隔一玻璃窗，而室內之人，得見窗外之物。 吾人又俯臨清溪，溪底卵石，歷歷可數。 空氣也，玻璃也，清溪之水也，光經其內，通行無阻，是爲透明體(transparent body)。

電燈之光，能穿透乳白色之燈泡而照耀於室中。 窗上敷以白紙，或毛玻璃片，或白漆玻璃，不能阻止日光之透入室中。 但吾人在電燈下，不能窺見乳白色燈泡中燈絲之形狀；不能隔白紙之窗，而窺見窗外之景物。 白紙也，毛玻璃片也，乳白色或白漆之玻璃也，吾人俱名之曰半透明體(translucent body)。

若以鐵片，黑紙，木板易窗上之玻璃，則一室昏黑，換言之，室外之陽光不能透過鐵片等而入。 吾人謂鐵片，黑紙，木板等物爲不透明體(opaque body)。

§254. 光線。發光體所發出之光，向四周依直線而進行，

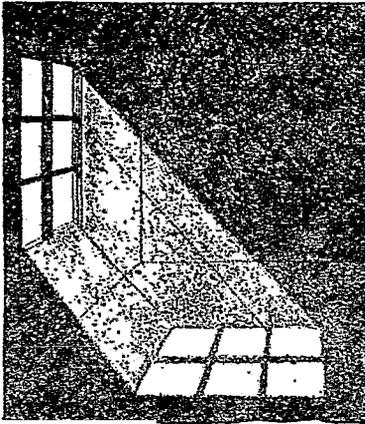


圖 284.

即所謂光線(light rays)是也。舉例如次：

(1) 爲日光所照之空中塵埃。日光穿窗入室，吾人見室中塵埃之受光部分適在窗與日之直線上(圖 284)。

(2) 測量者在一直線上排列標竿。列標竿於地上  $A, B, C, D, E$  等處(圖 285)。

測量者自  $A$  望去，如祇見  $A$ ，其餘  $B, C, D, E$  悉爲  $A$  所蔽時，則知  $A, B, C, D, E$  諸竿在同一直線上。吾人可以一繩緊緊繫於  $A, E$  兩竿間，則見  $B, C, D$  等

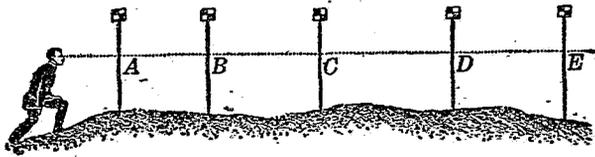


圖 285.

皆與此繩接觸而證明之。換言之，測量者先已承認光之依照直線進行也。且光線之爲直線，其正確程度，有過於緊緊之繩。

§255. 影。因光循直線進行之故，在不透明體背後，往往

生一黑暗部分，無光可達，是白影 (shadow)。立燭  $B$  於一不透明之球  $S$  前 (圖 286)，其上  $CD$  曲線之右面部分  $S'$  為在陰影中； $CD$  乃為球  $S$  與以  $B$  為頂之圓錐相切之點而成。球上不受光照之部分，曰正影。

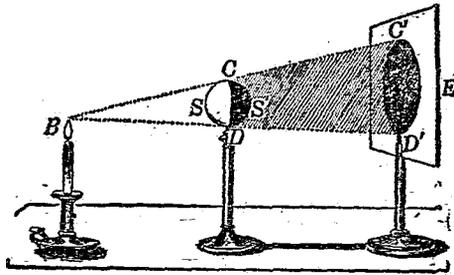


圖 286. 影。

圓錐中在球之右面之各點，皆在陰影中。若以一白色屏  $E$  立於其中，則屏上現一黑影  $C'D'$ ，名曰投影。

但燭燄非真為一點，其面積約為若干 (平方厘米)。故燭燄全身之各點，皆光源也，各為光線圓錐之頂點。同時，球上及屏上影之界限，將有若干之移動。仔細觀察，則見受光部分與影之交界處，其間有若干寬之半明半暗部分，此蓋受燭燄一部分之光而然，吾人名之曰半影 (penumbra)。

在球上者曰正半影 (proper penumbra)，在屏上者曰投半影 (projected penumbra)。

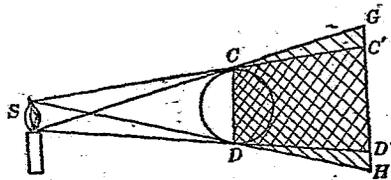


圖 287. 本影與半影。

如圖 287 中之  $GC'$  與  $D'H$  部分是，影中完全

暗黑之處，稱為本影(umbra)，在球上者曰正本影，在屏上者曰投本影，如圖中之  $C'D'$  部分是。影與半影範圍之大小，則視發光體之大小，及其與不透明體間之距離而定。

§256. 月之盈虧。 月球為日光所照，僅半面受光。 其他半面之不受光者，吾人不得而見之。 又月繞地球而旋轉，即其受光之半球面，吾人有時全不能見之，有時能全見之，有時僅見其中的一部分，因是有朔，望，上弦，下弦之分(圖 288)。

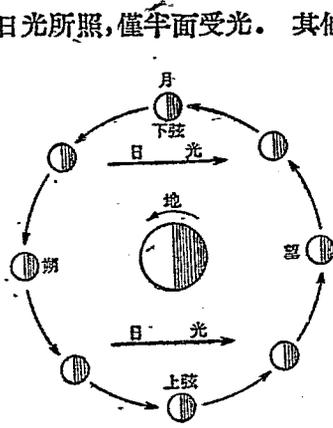


圖 288. 月之盈虧

§257. 日月之蝕。 影之實例，如天體之蝕(eclipse)。

朔望之時，若又適逢月道與黃道相交，日月地球，成一直線，互相遮蔽，使人不獲見之。 在望則地球在日月之間，地影投射月上，以成月蝕(圖 289)。 在朔則月行地日之間，月體蔽日，以成日蝕(圖 290)。



圖 289. 月蝕。

月之本影在空間所達之長，等於地球半徑之 57 倍乃至 59 倍，而地球與月之距離，則在地球半徑之 55 倍至 62 倍之間，故月之

本影，有時能達於地球，有時則否。地球上進入月之本影之地點，所見者爲全蝕；進入其半影之部分，則所見者爲偏蝕(圖 290 甲)。如月之本影之長，即其頂點，不能達於地球之表面，則在地球上正對此本影錐體之處，可以窺見太陽之周圍，而不能見其中央部分，以成日之環蝕(圖 290 乙)。

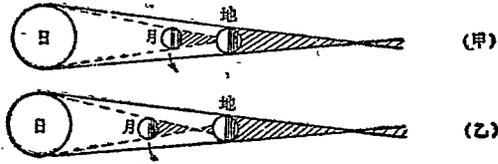


圖 290. 日蝕:(甲)全蝕與偏蝕;(乙)環蝕。

又地球本影之長，等於地球半徑之 216 倍，遠在地球與月之距離以上，故月蝕僅有全蝕及偏蝕兩種，而無環蝕。

若月道與黃道相交時而非朔望，或朔望而不相交，皆不能蝕。綜十八年計之，日蝕四十一一次，月蝕二十九次，故每年日蝕次數，多於月蝕。惟日蝕僅見於地球之一區域內，月蝕則全球共睹耳。

§258. 小孔成像。在暗室壁上開一小孔，室外物體發出之光，經小孔入室，在其對壁，造成與室外物體完全相似之圖形，僅上下倒置而已(圖 291)。此種圖形，通稱爲像(image)。小孔可以成像，亦爲光之直線進行的結果。如孔穴略大，則像中各點所得之光線，非來自物體上之一點，而來自物體上之一小部分，互相重疊，像遂模糊。若孔過小，則又光弱而像欠鮮明。

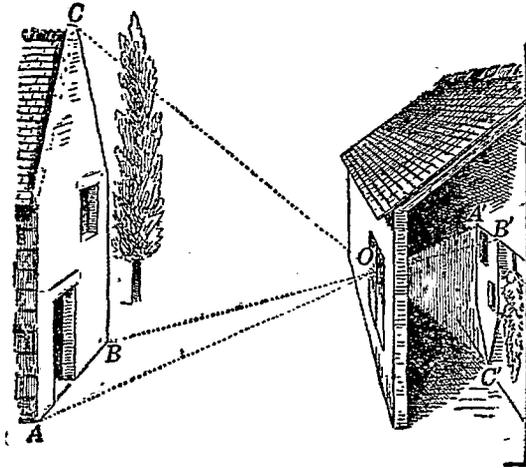


圖 291. 小孔成像。

§259. 光之速度。光之傳播甚快，在地面上普通距離以內，隨發隨至，但並非不費時間者。自太陽而來之光，抵達地球，費時 8 [分] 20 [秒]。倘光而能繞地球也，則在 1 [秒] 鐘之內，可繞地球七匝有半。如是巨大之速度，自非普通之觀察所能測定。

初由天文觀察，知光行地球軌道之直徑，所需之時間。後經科學家精巧之設計，得在地面上，甚至實驗室內，於相距數十[仟米]，甚至數[米]之兩點間，來測定光往返所費之時間。由實測結果，知光在真空中之速度，為每[秒] 299,794 [仟米]，即每[秒]約  $3 \times 10^{10}$  [厘米]之大也！

真空不但能傳光；且光之速度，以在真空中為最大。各種顏色之光，在真空中，速度相同。光在空氣中之速度，與在真空中

者，相差極微。由實驗直接測知光在水中之速度，約為空氣中之 $\frac{3}{4}$ 。至於在玻璃中之速度，約為空氣中之 $\frac{2}{3}$ 。

### 習 題 四 十 九

(1) 取大而厚之紙一塊，戳一方形小孔，置太陽下。問地上陽光所及之處，成何形狀？

(2) 日中電桿射黑影於地面，而電線則否，何故？

(3) 太陽與地面成  $45^\circ$  角時，一大樹之影在地上長 10 [米]。求樹高。

(4) 地球之各處，可同時見太陽之全蝕否？可同時見月之全蝕否？可同時見日之環蝕否？何故？

(5) 全透明之物體可見否？

(6) 用雪茄煙盒造成之針孔鏡箱中，底片距針孔 6 [吋]。一高 4 [呎] 之小孩，距針孔 8 [呎]，問所成之影高若干？

(7) 已知光之速度為  $3 \times 10^{10}$  [厘米/秒]，太陽光到達地面所需之時間為 8 [分] 20 [秒]。求太陽與地球間之距離。

(8) 天狼星距地球約為  $35 \times 10^{10}$  [哩]。若其光突然消滅，則地球上之天文學家，經過多少時間後，方能知道？

(9) 求光行一[年]之距離。

(10) 寫字時，光線最好由人之左方而來。何故？

## 第五十章

# 光之強度

§260. 光強 光源之發光強度，簡稱光度 (luminous intensity)。光度之單位為燭光 (candle power)。原取一定之蠟燭，作為比較之標準。此種標準，各國並不一律。現在所謂國際燭光 (international candle)，係用戊烷 (pentane,  $C_5H_{12}$ ) 燈所發光度之  $\frac{1}{55}$  為標準。此種標準燭光之使用與調準，極不便利。故普通實驗室，多採用電燈，其光度之燭光數已經與國際燭光比較測定者，作為標準光源，用以確定其他光源之光度。家用 50 [瓦特] 電燈泡之光度，約為 40 [燭光]，意即其所發之光強，等於聚集 40 枝燭所發之光也。

§261. 照度。 與 1 [燭光] 之光源  $P$ ，相距 1 [米] 處，垂直於光線而置屏  $A$ 。吾人稱此屏受光照耀之程度，曰有一單位之照度 (intensity of illumination)。照度之單位，稱為 [燭米] (candle metre)，即離 1 [燭光] 1 [米] 處之照度也。

試就光源  $P$  為頂點，屏上 1 [平方厘米] 之正方形為底之錐形 (圖 292) 而觀之。此錐形中所含之光線，為自  $P$  發出而射於屏上者，若將此屏向後移遠 1 [米] 至  $B$  處 (即離  $P$  為 2 [米])，則屏之受此錐形中光線之部分，其面積將四倍大於前，而所受得光線

之總量與前相同。故後者屏上每單位面積中所受之光線，與前者相較為  $1:4$ ；即後者屏上之照度為  $\frac{1}{4}$  [燭米]。換言之，與一屏置於  $\frac{1}{2}$  [燭光] 的光源之前 1 [米] 處，所得之結果相同。

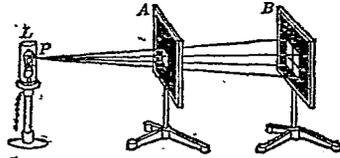


圖 292.

同理，在距  $P$  為 3 [米] 處置一

屏，則其上之照度將為  $\frac{1}{9}$  [燭米]，在 4 [米] 處將為  $\frac{1}{16}$  [燭米]。

普遍言之，照度與距離之平方成反比。

照度既與光度成正比，又與離光源之距離之平方成反比，故吾人得光度學 (photometry) 之基本公式為：

$$e \text{ [燭米]} = \frac{I \text{ [燭光]}}{d^2 \text{ [米}^2\text{]}}$$

§262. 亮度。每單位面積所發之光度，稱為光源之亮度 (brightness)。光源之光度愈大，發光之面積愈小者，其本身愈亮。蠟燭之亮度約為 0.5 [燭光/厘米<sup>2</sup>]，而 50 [燭光] 之電燈絲，若其面積為 0.5 [厘米<sup>2</sup>]，則其亮度為 100 [燭光/厘米<sup>2</sup>]，大於蠟燭者 200 倍。過大之亮度，令人目眩，不宜直視，此所以電燈泡每用毛玻璃也；若其面積為 100 [厘米<sup>2</sup>]，則亮度與蠟燭同。

若以被照之物體，作為光源，則其亮度，依其所受之照度與其反光之本領而定。過弱之照度，甚費眼力。通常燈下讀書，須有 50 [燭米] 之照度，方合於眼之衛生。正午陽光之照度，約為十萬 [燭米]。

§263. 本生光度計。由前節所述，得知光源之光度，可從其在屏上所生之照度量得之。通常光度計 (potometer) 即應用此理而成。兩光源在同一屏上所生之照度，即明暗，是否相等，人目每易判別。至於明多少或暗多少，則非人目所能鑑定。

取一白紙屏，滴一油點於其上；油斑成半透明體，透光較其周圍之白紙為多，而反光與散光，則不及白紙。持此紙屏，隔燈而視(圖 293 甲)，則見油斑較其周圍為明亮；照燈而視(圖 293 乙)，

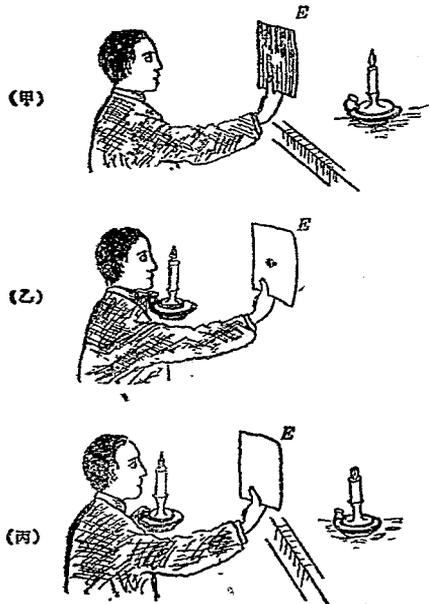


圖 293.

則見油斑反較其周圍為黑暗。若於屏之前後各置一燈(圖 293 丙)則油斑之明亮，可與其周圍相同，而不復顯其存在，此時紙屏

兩面之照度實相等也。本生光度計(Bunsen photometer)即本此理而成，亦稱油斑光度計。

如圖 294 所示，油斑紙屏  $D$  與標準光源  $S$ ，及欲測之光源  $X$ ，同置於光座上。  $D$  在  $S$  與  $X$  之間，沿槽移動，使油斑與紙面，

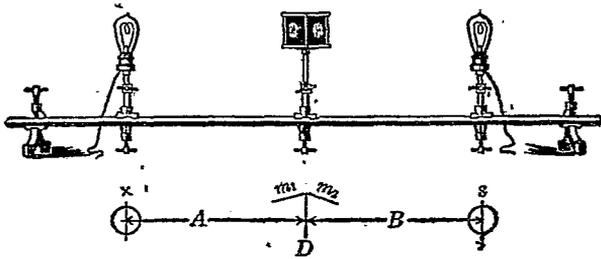


圖 294. 本生光度計。

同樣明亮，不復能分別時，則紙屏上由兩光源而生之照度相等。命  $A$  及  $B$  表兩光源對於紙屏  $D$  之距離，則由

$$X : S = A^2 : B^2$$

即可算出光源  $X$  之光度。

為欲精確比較兩方之照度，特將紙屏  $D$  裝在盒內，如圖 295 所示。在盒之左右各開一孔，以容  $S$  及  $X$  之光射入，吾人從  $E$  觀測之。在屏兩側，

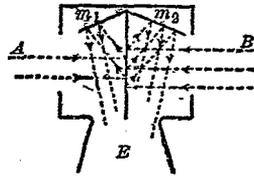


圖 295.

各立一平面鏡如  $m_1$  及  $m_2$ ，俾紙屏上左右雙方之明暗，可以同時看見。

## 習 題 五 十

(1) 月光照射於地面之照度, 約與 1 支蠟燭照耀於相距 5 [米] 處之照度相等, 求月光在地面之照度。

(2) 眉月與月圓時, 亮度是否相等? 其在地面上之照度是否相等? 何故?

(3) 若入射光線以  $\theta$  角射於屏上, 而非正射時, 則所得之照度爲

$$e' = e \cos \theta,$$

式中  $e$  爲正射時之照度。試證明之。

(4) 今有一屏與入射光線構成  $30^\circ$  角之傾斜, 屏之中點距光源 35 [厘米], 光源之面積爲 5 [平方厘米], 光度爲 50 [燭光]。求 (a) 屏上之照度, (b) 光源之亮度, (c) 試述光度與亮度之分別。

(5) 本生光度計之標準燈爲 200 [燭光]; 當其距屏 62 [厘米] 時, 與距屏 38 [厘米] 之另一燈, 使屏上之油斑不見。問另一燈之 [燭光] 爲若干?

(6) 晨間不若正午之熱, 是否因太陽與地球之距離, 在晨間與正午有不同之故? 太陽高  $45^\circ$  時, 地面上所受之照度, 爲太陽在天頂時所受者之若干倍?

## 第五十一章

# 光之反射

§264. 平面鏡。室中之懸鏡，磨光之金屬面，窗上之玻璃，及靜止之液體自由面(圖 296)等，皆平面鏡也。有物立於此等平面鏡之前，鏡中即現一像，此吾人之所熟知者。研究物與像之關係，乃得反射定律。



圖 296.

在平面鏡  $M$  之前後，各立一燭  $AB$  與  $A'B'$ ，且居於互相對稱之地位(圖 297)。此鏡爲一玻璃片而未塗銀者，吾人在鏡之前面，可透視後面之燭  $A'B'$ 。若將燭  $AB$  燃着，則見  $AB$  火燄之像，適在  $A'B'$  之上，宛如燭  $A'B'$  亦已燃着。若熄滅燭燄  $A$ ，則

見兩燭皆滅。

蓋燭燄  $A$  發射之光線中，有沿  $AI$  而來者，為鏡所反射，而入

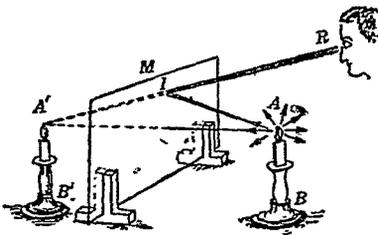


圖 297.

人目。此反射光線束  $IR$  之方向，與直接從  $A'$  所發射而入人目之光線束之方向相同，故吾人感覺光線  $IR$  一若真從  $A'$  而來。又兩燭燄之地位，必在垂直於鏡面  $M$  之直線  $A'A'$  上，

距鏡相等；換言之， $A$  與  $A'$ ，關於  $M$ ，為對稱也。事實上，欲置  $A'B'$  於  $AB$  之對稱處，最簡便之方法，為使  $A'B'$  與  $AB$  之像合一。故據光學方法以定對稱，實最便捷而最精確也。

§265. 反射定律。  $IO$  為入射光線束(圖 298)，射於鏡面上之  $O$  點。設此入射線束為極狹之一條，則成一入射線 (incident ray)。同理， $OR$  為反射線 (reflected ray)。

入射線與反射線之位置，可以其與鏡面  $O$  點之垂直線  $OP$  所成之角表之。 $OP$  稱為法線 (normal)；

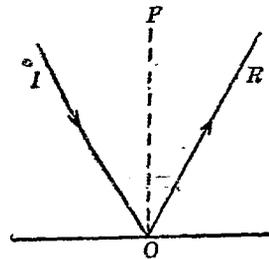


圖 298. 光之反射。

入射線與法線所成之角  $IOP$ ，稱為入射角 (angle of incidence)；反射線與法線所成之角  $ROP$ ，稱為反射角 (angle of re-

flection)。

由實驗結果,得光之反射定律(laws of reflection of light)如下:

- (1) 反射線與入射線在法線之兩側,且與法線在同一平面內。
- (2) 反射角等於入射角。

由光之反射定律,可知互相平行之一束光線,射在平滑面上,則反射後之一束光線,亦必互相平行,如圖 299 甲。此種正常

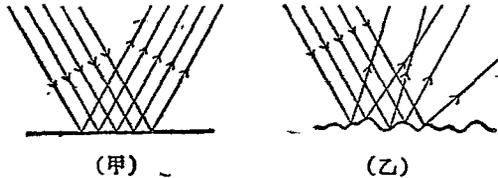


圖 299. (甲)單向反射; (乙)漫反射。

的反射,稱為單向反射(regular reflection)。若入射光線遇粗糙之面,則因面上凹凸不平,雖入射線互相平行,但反射光線之方向各不相同,如圖 299 (乙)中所示,此種反射,稱為漫反射(diffuse reflection)。吾人對於地上物體,可由任何方向認識其存在,即因其表面發生漫射之故。

### §266. 平面鏡之像

置光點  $S$  於平面鏡  $M$  之前(圖 300),則由  $S$  所發出投射於平面鏡  $M$  之光

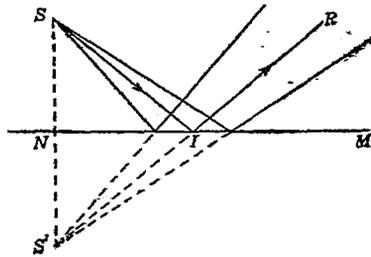


圖 300.

線，輒為鏡所反射。任取其中之一線  $SI$  而論之，將其反射光線依反對方向延長之，設其與由光點向鏡面所引垂線  $SN$  之交點為  $S'$ ；則在直角三角形  $SIN$  及  $S'IN$  中， $IN$  為公邊，又由反射定律及幾何定理， $\angle SIN = \angle S'IN$ ，及  $\angle SNI = \angle S'NI = \angle R$ ，故兩三角形全等。

$$\therefore SN = NS'$$

即延長反射線  $RI$ ，必通過以鏡面為對稱面，與光點  $S$  成對稱之一定點  $S'$ 。如將光點所有光線之反射線，均依方向反對延長之，則亦皆通過  $S'$  點。故以目承受此等反射線時，感覺光點宛在  $S'$  處。此  $S'$  點，謂之光點  $S$  之像 (image)。求光點  $S$  對於平面鏡之像時，祇須由  $S$  向鏡面引垂線  $SNS'$ ，並於他側取  $NS' = SN$ ，而求得  $S'$  即是。

若於平面鏡前置一物體  $AB$  (圖 301)，則物體各點之像，即相

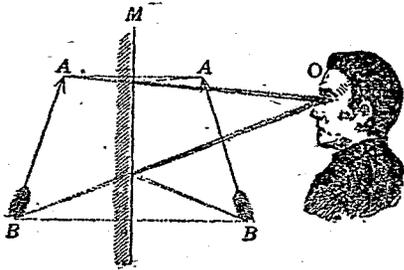


圖 301. 平面鏡之成像。

集而成物體之像，現於鏡後。像之大小與物體相同，像與鏡面之距離，亦與物體與鏡面之距離等。但在鏡後，與物體對稱之處立一屏，屏上並不現像，蓋此像

並非實有，乃為虛像 (virtual image)。鏡花水月，即其例也。故平面鏡所成實物之像，皆為虛像。

§267. 鏡之旋轉。一平面鏡繞垂直於入射平面(即包含入射線,反射線,法線三者之平面)之軸而旋轉時,則反射線隨之旋轉,且兩倍於鏡面所旋轉者。

如圖 302 所示,入射線  $SO$  投射於平面鏡  $M$  上,依  $OR$  而反射;

$ON$  為垂直於  $M$  之法線。於是,入射線與反射線間所成之角  $SOR$  兩倍於入射角  $i$ ,即為  $2i$ 。若  $M$  繞通過  $O$  點且垂直於  $SOR$  平面之軸旋轉  $\theta$  角,則此時入射角  $SON'$  等於  $i - \theta$ ,而新反射線  $OR'$  與  $OS$  所成之角等於  $2(i - \theta)$ ,於是  $\angle ROR'$  為  $2\theta$ 。

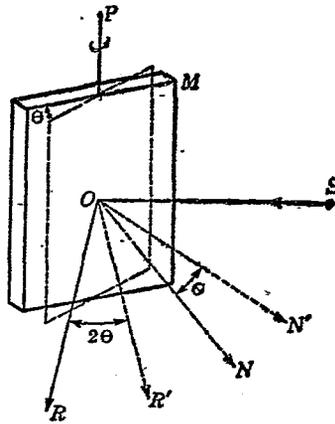


圖 302. 鏡之旋轉。

由反射線上  $R$  點在遠處標尺上移動之長度  $RR'$ , 及  $OR$  之距離,即可計算鏡面旋轉之角  $\theta$ 。吾人常用此種裝置於物理儀器或實驗中,以測定微小之角度。

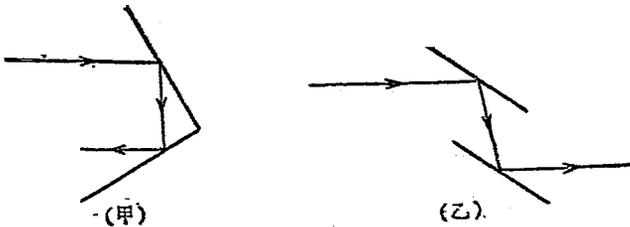


圖 303.

同理，光線經兩平面鏡連續反射之後，則出射線與入射線所成之角，等於兩鏡間所成之角之二倍。如兩鏡成正交者，則射入光線與射出者平行，而方向相反(圖 303 甲)，如兩鏡互相平行，

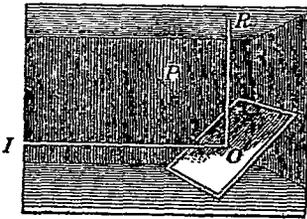


圖 304.

則射入光線與射出者平行，而方向相同(圖 303 乙)。

又光線之投射於平面鏡也，若其入射角為  $45^\circ$ ，則反射線與入射線互相正交。水平之光線可藉一平面鏡之助，而成鉛直(圖

304)；或鉛直之光線，變成水平。

### 習題 五十一

- (1) 玻璃平面鏡，通常於其後面鍍銀，何故？
- (2) 在漫反射中，就反射點說，反射定律是否真確？
- (3) 置物體於鏡前，則見像在鏡後，但吾人走向鏡後觀之，像又不見了。何故？
- (4) 何謂虛像？
- (5) 以指觸鏡面，可大約測知玻璃之厚薄，何故？試繪圖述明之。
- (6) 一人在鏡前，以速度  $v$  向鏡走近，則其像亦以速度  $v$  向鏡面走近。若人不動，鏡以速度  $v$  向人移近，則像以速度  $2v$  向人走近；其理安在？
- (7) 一人高 4 [呎]，立鏡前 2 [呎] 處；問像之大小及位置若何？
- (8) 在鏡中見鐘指示之時刻，似為六點一刻；問實在為幾點幾分？
- (9) 婦人高 1.3 [米]，立穿衣鏡前，欲見全身之像。(a) 鏡長至少應為幾 [米]？宜如何懸掛？(b) 人與鏡之距離不同，是否有關係？試各繪圖說

明之。

(10) 在西服店內，兩平面鏡應如何排立，可使試衣之人能見背後？試繪圖說明之。

(11) 吾人從鏡中窺視他人時，亦必為他人所窺見。何故？

(12) 人立於河畔，看對岸河邊之樹木，向後退 18 [呎] 時，適不復能看見樹木映於水中之全影。設人高 5 [呎]，堤高出水面 2.5 [呎]，河闊 36 [呎]，求樹之高。

(13) 兩平面鏡互成直角，於其角之平分線上置一物，問能生幾個像？試繪圖說明之。

(14) 兩平行的平面鏡，相距 120 [厘米]。於其中某處置一物體，問可生若干個像？並求其最近之二像間之距離。

(15) 入射線與平面鏡成  $30^\circ$  角，問反射線與入射線成幾度角？又鏡若繞與入射平面垂直之軸轉動  $5^\circ$  角，則入射角為幾度？又反射線與入射線所成之角，增加若干度？

(16) 兩廊成直角，應將一平面鏡如何放置，使在此廊之人，可見他廊之人？

## 第五十二章

### 球面鏡

§268. 球面鏡。鏡之反射面爲球面之一部分者，曰球面鏡 (spherical mirror)。球面鏡中，以球之裏面爲反射面者，曰凹鏡 (concave mirror)，以其表面爲反射面者，曰凸鏡 (convex mirror)。圖 305 之  $ADB$  表球面鏡，其球心  $C$ ，曰鏡之曲率中心 (center of curvature)。鏡面之中點  $D$ ，曰頂點 (pole 或

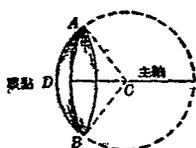


圖 305. 球面鏡。

vertex)。通過球心與頂點之直線  $DC$ ，曰主軸 (principal axis)。主軸乃鏡之對稱軸。由鏡緣  $A$  與  $B$  引至球心  $C$  之直線間，所夾之角度  $ACB$ ，曰孔徑 (aperture)。

通常鏡之孔徑皆甚小。如云某鏡之孔徑爲  $\frac{1}{16}$ ，意即在鏡面上經過頂點之大圓弧，爲此球半徑之  $\frac{1}{16}$  也。

§269. 焦點。若將太陽光沿鏡之主軸方向，射於凹鏡上，則因光源之距離甚遠，入射光線可視作平行，此等平行光線達凹鏡面反射後，會集於主軸上之一點，如圖 306 之  $F$  點。倘將容易着火之物質，放在此處，即起燃燒，因稱爲鏡之焦點 (focus)。凹鏡之焦點，爲反射光線實際會集而成，特稱之爲實焦點 (real focus)。如將太陽光線沿主軸射於凸鏡面上，則反射後光線擴

散，不能在鏡前會集，但將反射線延長至鏡面後，在主軸上亦能會集於一點，如圖 307 中之  $F'$  點，稱為凸鏡之虛焦點 (virtual focus)。

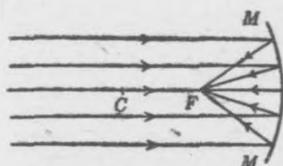


圖 306. 凹鏡之實焦點。

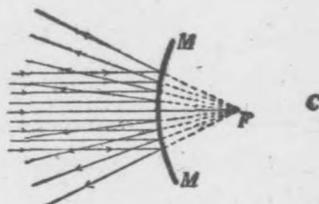


圖 307. 凸鏡之虛焦點。

焦點與鏡之頂點間之距離，稱為焦距 (focal length)。球面鏡無論為凹或為凸，其焦距恰為球面曲率半徑長度之一半(見 §271)。

§270. 球面鏡之成像。先將一凹鏡向太陽光，用紙屏探測其焦點之位置，並約計其焦距之長度，然後在暗室內，將一燭燄放在凹鏡之前面(圖 308)，因燭燄位置之不同，而所成之像就有虛實，大小，正倒之分。若放在凸鏡前，則祇能得虛像耳。

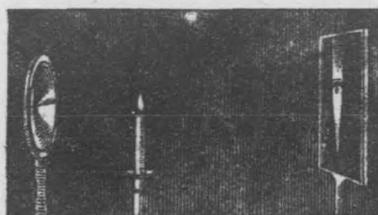


圖 308.

由實驗結果，知凹鏡成像時，凡物體放在焦點之外，常得實像，在焦點之內，則成虛像。實像常為倒立，可由紙屏承受；而虛像常為正立，在鏡之後方，且

較實物爲大。凸鏡所成之像，不論實物之位置如何，常爲虛像，且較實物爲小，祇能目見。

又鏡前實物與像之位置，可互相交換。例如實物在凹鏡球心外之某點，其像在球心與焦點之間，若在此成像之地位，放置實物，則所成之像，又必在原放物體之地位。如是之兩點，其一點如爲光點，則他一點恰爲像點，可互相交換者，稱爲共軛點(conjugate foci)。

故置光源於凹鏡之焦點，則經反射後，成爲平行光束，可以照遠，如

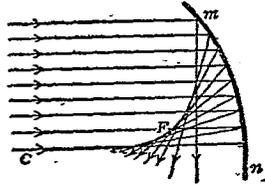


圖 309. 球面像差。

汽車所用之照射燈，與飛機場或軍艦上所用之探照燈皆是。爲

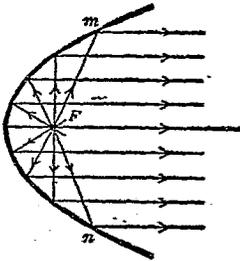


圖 310. 拋物面鏡。

乃爲拋物面鏡(圖 310)。

此等用途，鏡之孔徑，當然愈大愈好，惟孔徑稍大，則球面鏡不復能將平行光線會聚於一點(圖 309)，而現球面像差(spherical aberration)；反之，光源在焦點上所發射之光線，經反射後亦不復成爲互相平行者，因此難以照遠。爲免此弊，探照燈上所用者，

§271. 球面鏡公式。命  $p$  及  $q$  分別爲物體及像在主軸上與球面鏡頂點間之距離，則其間之關係，由上節之實驗結果，知爲：

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f},$$

$f$  爲球面鏡之焦距。是爲球面鏡公式，對於凹鏡，凸鏡，均可適用。但應用時，對於鏡前之距離均取作正值，而在鏡後之距離，則取作負值。所謂鏡前鏡後，乃依光之進行方向。故凹鏡之焦距爲正，凸鏡之焦距爲負。像之距離  $q$  如爲正值，即表示實像，如爲負值，即表示虛像。

球面鏡公式，亦可由反射定律求之。如圖 311， $MM$  爲一球面鏡， $S$  爲頂點， $C$  爲其曲率中心， $CM$  爲曲率半徑，以  $R$  表之。設  $P$  爲在主軸上之光點，發射光線  $PM$ ，在鏡之  $M$  點反射後，

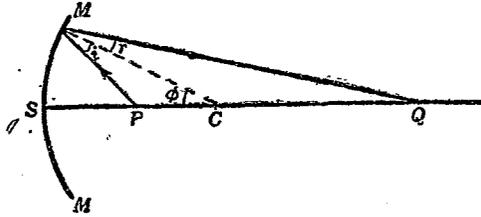


圖 311.

交主軸於像點  $Q$ ；命  $\phi$  爲  $MC$  與主軸所成之角，在  $\triangle PMC$  與  $\triangle QMC$  中，依正弦定律，有

$$\frac{PM}{PC} = \frac{\sin \phi}{\sin i},$$

及

$$\frac{QM}{QC} = \frac{\sin \phi}{\sin r}.$$

又依光之反射定律，有

$$\angle i = \angle r,$$

於是

$$\frac{PM}{PC} = \frac{QM}{QC}.$$

因鏡之孔徑甚小，即  $\phi$  角甚小，故可認為

$$PM = PS = p,$$

$$QM = QS = q,$$

又

$$PC = R - p,$$

$$QC = q - R,$$

以之代入上式，即得

$$\frac{p}{R - p} = \frac{q}{q - R},$$

可寫成

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}.$$

若將光點放在無窮遠處，則  $p = \infty$ ，由上式，即得  $\frac{1}{q} = \frac{2}{R}$ 。

但此時之  $q$  即等於鏡之焦距  $f$ ，故

$$f = \frac{R}{2},$$

即球面鏡之焦距，等於曲率半徑之半長。於是得球面鏡公式：

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}.$$

§272. 球面鏡造像之作圖法。球面鏡所成之像，亦可由作

圖法以求之。球面鏡之焦點，即球心與鏡頂之距離之中點，恆為已知，可就實物上之任一光點，(1)先作一與主軸平行之光線，遇鏡反射後，必通過焦點；(2)

更作一通過球心之光線，則以其正射於鏡面故，必沿原路射回。此兩光線如在鏡前相交，則交點即為光點之實像。若兩光線在鏡前不能相交，則將兩反射線向鏡後延長而得交點，即為光點之虛像。

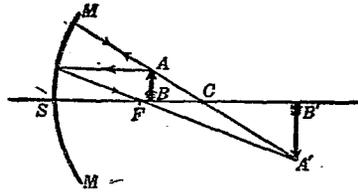


圖 312. 凹鏡所成之實像。

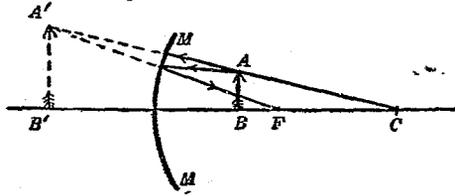


圖 313. 凹鏡所成之虛像。

依此類推，則物體上各點均可求得其像點，而集成物體之像。若物體與主軸正交，則像亦必如是，祇須求物體上一點之像已足，

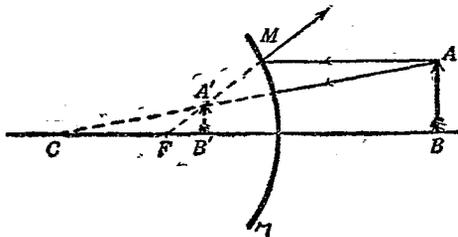


圖 314 凸鏡所成之虛像。

事更簡單。如圖 312 至圖 314; 即表示球面鏡造像之作圖法,  $AB$  表物體,  $A'B'$  表像, 觀圖自明。

命  $L_o$  表物之長,  $L_i$  表像之長, 則由圖中兩相似三角形  $CAB$  與  $CA'B'$ , 立可證明:

$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{p}{q},$$

即像與實物大小之比, 等於兩者與鏡之距離之比。

【例題 1】有物體高 4 [厘米], 置於焦距為 50 [厘米] 之凹鏡前。若此物與鏡相距 250 [厘米], 試求像之位置, 及大小。

據公式: 
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f},$$

得 
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{50} - \frac{1}{250} = \frac{4}{250},$$

故 
$$q = \frac{250}{4} = 62.5 \text{ [厘米]},$$

再由 
$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{p}{q} = \frac{250}{62.5},$$

求得 
$$L_i = 4 \times \frac{62.5}{250} = 1 \text{ [厘米]}.$$

故所成之像為實像, 倒立, 在鏡前 62.5 [厘米] 處, 像高 1 [厘米]。

【例題 2】凸鏡之曲率半徑為 10 [厘米], 設有高 5 [厘米] 之物體, 放在鏡前 12 [厘米] 處, 求像之位置及大小。

因凸鏡之曲率半徑為負值, 由公式

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{-R},$$

得 
$$\frac{1}{12} + \frac{1}{q} = -\frac{2}{10},$$

$$\therefore q = -3\frac{9}{17} \text{ [厘米].}$$

再由

$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{p}{q},$$

即得

$$L_i = -\frac{3\frac{9}{17} \times 5}{.12} = -1\frac{8}{17} \text{ [厘米]} \\ = -1.47 \text{ [厘米].}$$

故所成之像爲虛像。在鏡後  $3\frac{9}{17}$  [厘米] 處，像高 1.47 [厘米]。

## 習 題 五 十 二

(1) 蠟燭所發之光，可用平面鏡，凹面鏡，凸面鏡三者中何者將其反射，而成像於屏上？

(2) 一人立球面鏡前，伸手指天，則見鏡中之手反指地。問 (a) 此鏡爲凹鏡抑凸鏡，(b) 像爲虛像抑實像？

(3) 物體置於凹面鏡之球心，問像在何處？此一事實，有何用途？

(4) 太陽光射在曲率半徑爲 10 [厘米] 之凹鏡上，求像之位置。若爲凸鏡，又如何？

(5) 凹鏡之曲率半徑爲 10 [厘米]，高 1 [厘米] 之物體，在鏡前 (a) 15 [厘米] 處，及 (b) 10 [厘米] 處，試分求像之位置，大小，虛實，與正倒。

(6) 上題中，若物體距鏡 (a) 8 [厘米]，(b) 5 [厘米]，及 (c) 3 [厘米]，試分求像之位置，大小，虛實，與正倒。

(7) 試將 (4)，(5)，(6) 各題中，所得之結果，列成一表以比較之。

(8) 物體放在凹鏡前 4 [呎] 處，則像生於鏡前 2 [呎] 處，求鏡之曲率半徑。

(9) 一燭火與牆壁相距 120 [厘米]，欲使其成像於牆上，像長爲實物之

3 倍，問應用何種球面鏡？曲率半徑爲若干？且應放在何處？

(10) 長 5 [呎] 之人，立於凸鏡前 10 [呎] 遠處。如鏡之焦距爲 1.2 [呎]，求像之位置，大小，虛實，與正倒。

(11) 用焦距爲 40 [厘米] 之凹鏡，欲造成比實物長 8 倍之虛像，求物體與鏡間之距離。

(12) 有一物體放在凸鏡前，其距離等於鏡之焦距，求像之大小。

(13) 以曲率半徑 3 [米] 之大凹面鏡，對太陽光，並於其前 1.45 [米] 處放一凸面鏡，其曲率半徑爲 20 [厘米]。求此兩鏡所成太陽的像之位置。就凸面鏡言，物與像之虛實若何？

## 第五十三章

# 光 之 折 射

§273. 日常所見之折射現象。光在均勻透明之物質中，皆作直線進行，如光之在水中，在空氣中，在玻璃中是。但光自一物質走入另一種物質時，則其進行之方向驟改；此種現象，稱為光之折射(refraction)。

一箸  $ABC$  斜插水中 (圖 315)，則自觀者  $O$  視之，此箸之形，折為  $ABC'$ ，所見之  $BC'$  部分，較箸之實在位置  $BC$ ，近於水面。吾人為之解釋曰， $C'$  乃  $C$  之虛像；光束  $CI$  至水面  $I$  而屈折，沿  $C'I$  之延長線方向而入於人目  $O$ ，故吾人以爲  $C$  物在  $C'$  處也。

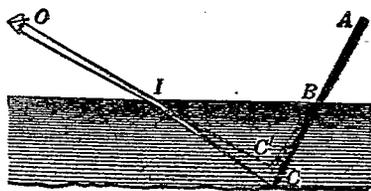


圖 315.

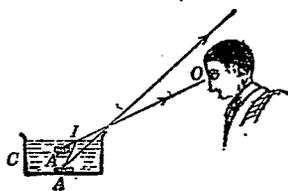
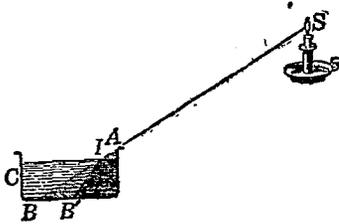


圖 316.

置銅幣  $A$  於洗臉盆中，人身後退至目在  $O$  處，其視線為盆邊所阻，適不足以見此銅幣而止。若盆中注水若干，則似見盆底上升，銅幣  $A$  現於目前。觀圖 3.6，則知此事之解釋，與上例相似。

一中空容器  $C$ ，以燭火自  $S$  照之（圖 317），於器壁上畫出其



影線  $AB$ 。注水入器後，則見此影線在水面  $I$  點，突然屈折向下，成  $IB'$ 。在空氣中依  $SI$  進行之光線，入水後乃依  $IB'$  而進行，是則光已行折射矣。

圖 317。

§274. 折射定律。光在兩介質，如空氣與水，之境界面  $SS'$  上折射時（圖 318），就光線之入射點  $I$  作法線  $NN'$ ，則光之入射線在第一介質中，與法線所成之角  $i$ ，即為入射角。其射入第二介質中之光線，稱為折射線 (refracted ray)。此折射線與法線所成之角  $r$ ，稱為折射角 (angle of refraction)。

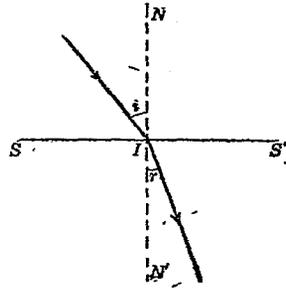


圖 318. 光之折射。

由實驗結果，知：

- (1) 入射線與折射線，各在法線之兩側，且與法線在同一平面內。
- (2) 在兩介質中，入射角之正弦，與折射角之正弦之比為一常數，而與入射角之大小無關，即

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \approx \text{常數。}$$

是為光之折射定律 (law of refraction). 常數  $n$  稱為光由第一介質射入第二介質時之折射率 (index of refraction).

§275. 折射率. 光由真空中射入某介質時, 其折射率稱為此介質之絕對折射率. 如在任意兩介質中, 光由第一介質射入第二介質時, 則其折射率, 為第二介質對於第一介質之折射率, 即稱為相對折射率.

空氣之絕對折射率, 恆與 1 相差甚微, 在標準溫度與壓力下, 為 1.00024. 故通常各種介質之折射率, 均指對於空氣而言, 與對於真空者之差別, 可以略而不計; 經此規定, 既無需標明相對, 更不必空叫絕對, 簡稱折射率. 例如光由空氣射入水內時, 有  $\sin i / \sin r = \frac{4}{3}$ , 則水之折射率為  $\frac{4}{3}$ ; 又由空氣射入玻璃時, 有  $\sin i / \sin r = \frac{3}{2}$ , 則玻璃之折射率為  $\frac{3}{2}$ .

§276. 光線何以折射. 吾人由實測, 知光在空氣中之速度 (§259), 大於在水中者  $\frac{3}{4}$  倍, 大於在玻璃中者  $\frac{2}{3}$  倍, 此  $\frac{3}{4}$  與  $\frac{2}{3}$  適又為水與玻璃之折射率, 其間必有密切關係. 折射現象, 確由光在各種物質中傳播速度不同而成, 蓋光為一種波動也.

如圖 319,  $AC$  為兩介質

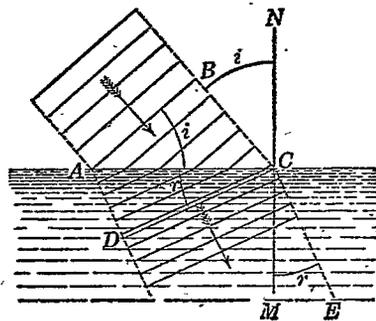


圖 319.

間之境界面, 平面光波  $AB$  在第一介質中依矢之方向前進, 速度爲  $v_1$ , 矢即代表光線。'A 點先達界面, 進入第二介質中後, 傳播之速度爲  $v_2$ 。故當  $t = BC/v_1$  時,  $B$  點亦達界面, 而  $A$  點則已在第二介質中前進至  $D$ , 且有  $AD = v_2 t$ 。自後光波  $CD$  即沿其正交方向, 亦即矢在第二介質中所指示之方向繼續前進。

因得 
$$t = \frac{BC}{v_1} = \frac{AD}{v_2},$$

但 
$$BC = AC \sin i, \quad AD = AC \sin r,$$

於是 
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n.$$

故第二介質對於第一介質之折射率  $n$ , 即光在第一介質之速度與在第二介質之速度之比, 此二速度皆有一定, 宜乎折射率  $n$  之爲常數也。

由此可知所謂某介質之絕對折射率者, 即光在真空中與在此介質中速度之比。命  $n_1$  與  $n_2$  各爲第一與第二介質之折射率, 則第二介質對於第一介質之折射率  $n$  爲

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{v}{n_2}}{\frac{v}{n_1}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (v \text{ 表光在空中之速度。})$$

於是折射定律之關係式, 又可寫成:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r.$$

若  $n_2 > n_1$ , 則  $r < i$ , 即光由折射率小之介質折入折射率大者時, 光線折向法線, 如由空氣折射入水中是; 反之, 則光線折離法

線，如由水中折射入空氣是。

此與一隊士兵，由坦途斜向而走入崎嶇不平之地，因而進行遲緩，以致改向之情形相似。在 A 處之人，先到達不平之地，故 B 邊之人繼續進行 BC 距離時；A 處之人僅行較小之 AD 距離。結果 A 處之人不能急進，而 B 處之人不將速度減低，則全隊進行之方向，當折至近於法線 NM 之方向。

【例】 玻璃浸在水中，有光線以  $60^\circ$  角入射於玻璃面上，求在玻璃中之折射角。

$$\text{玻璃對於水之折射率爲 } \frac{\frac{3}{2}}{\frac{4}{3}} = \frac{9}{8}.$$

由公式

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{9}{8},$$

$$\text{得 } \sin r = \frac{8}{9} \sin 60^\circ = \frac{8}{9} \times 0.866 = 0.770$$

$$\therefore r = 50.4^\circ$$

§277. 折 射 線 之 作 圖 法。 以入射點 I 爲心，以單位長爲半徑，在垂直於境界面  $SS'$  之平面中作圓(圖 320 甲)。延長入射線 AI 交圓於 A' 點，自 A' 作  $SS'$  之垂直線 A'H，則有：

$$\sin i = \overline{IH}.$$

再於  $SS'$  上取

$$\overline{IK} = \frac{\overline{IH}}{n},$$

得 K 點。 從 K 點引  $SS'$  之垂直線，交圓於 B 點，則 IB 爲折

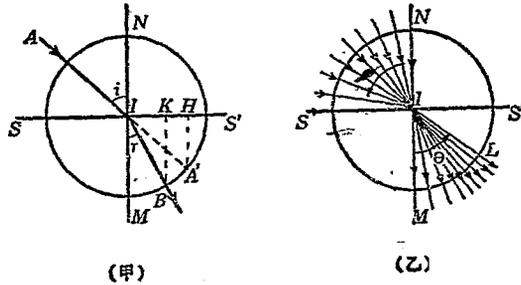


圖 320.

射線。蓋由此作圖法中，吾人有

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{IH}{IK} = n$$

之關係也。

若入射線  $IA$  自  $IN$  轉至  $IS$ ，即入射角自  $0^\circ$  增至  $90^\circ$  時(圖 320 乙)，則折射線  $BI$  自  $IM$  轉至  $IL$ 。當入射線在  $SI$  之方向時( $\sin 90^\circ = 1$ )，則  $r$  有其最大值  $\theta$ ，為

$$\sin \theta = \frac{1}{n},$$

此  $\theta$  角稱為臨界角(critical angle)。在上面為空氣之水中，臨界角約為  $48.5^\circ$ 。

由此吾人知一光源在水面之上無論何處，其入水中之折射線與垂直線所成之角，不能超過  $48.5^\circ$ 。

以管窺天，言其所見有限；如圖 321 所示，限於  $AOB$  角之內。若管內盛水，而管之半徑又大於  $l \tan 48.5^\circ$ ， $l$  表管長，則普天

萬物，無所隱遁，吾人當不以坐井為苦。水中之魚，倘有欣賞日出日沉之雅興，則其視線當與鉛直線成  $48.5^\circ$  之角。

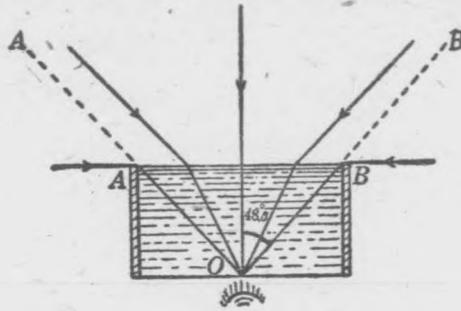


圖 321.

§278. 全反射。 反之，光線由水或玻璃中射入空氣時，常離法線而折出，如圖 322 中之  $oaa'$ ， $obb'$ ...等是，故入射角增大至一定限度時，則折射線將沿境界面進行，如  $odd'$  是。可知入射線  $od$  為最後射出空氣之光線。若入射角再增大，則光線完全由境界面反射，而不能透入空氣中，如  $oe'e'$ 。

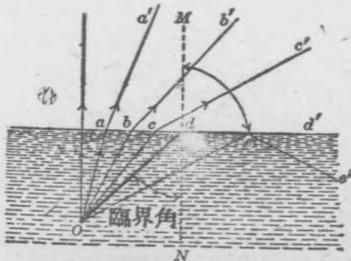


圖 322. 全反射。

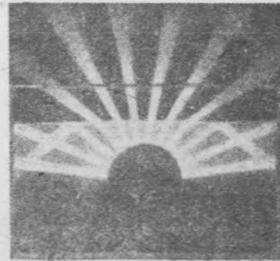


圖 323.

凡光線由一光密介質中射入另一光疏介質時，其入射角若超過一定之限度，則在兩介質之境界面上，不起折射，而成完全反射現象(圖 323)，稱為光之全反射(total reflection of light)。全反射開始時之入射角，即上節所述之臨界角，相當於折射角成  $90^\circ$  者，如圖 322 中之  $\angle odN$ 。水對於空氣之臨界角約為  $48.5^\circ$ ，玻璃對於空氣之臨界角約為  $41.5^\circ$ ，金剛石對於空氣之臨界角約為  $24.5^\circ$ ，故金剛石之全反射現象最易察見，面上光澤輝煌。

§279. 水中物體之像。 設  $A$  為發光點(圖 324)，位於折

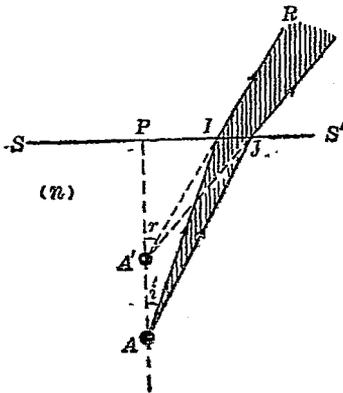


圖 324.

射率為  $n$  之透明物質中。  $SS'$  為折射平面，其上為空氣。試就鄰近於正射之細光線束而論之，其入射角與折射角分別為  $i$  與  $r$ ，均甚小，在光線束內，其值之變化極微。 延長  $RI$  與  $AP$  交於  $A'$ ，即為  $A$  點之像。今定像之位置如下：

由折射定律 (§ 276)，得

$$n \sin i = \sin r.$$

但因  $IP$  與  $AP$  相較為甚短，故  $i$  與  $r$  兩角皆甚小，於是兩角正弦之值與正切之值無異，故有

$$n \tan i = \tan r.$$

$$\text{但} \quad \tan i = \frac{IP}{AP}, \quad \tan r = \frac{IP}{A'P}$$

以之代入上式，得

$$n \frac{IP}{AP} = \frac{IP}{A'P},$$

$$\text{即} \quad A'P = \frac{AP}{n}.$$

水之折射率  $n = \frac{4}{3}$ ，則  $\overline{A'P} = \frac{3}{4} \overline{AP}$ ，故物體在水中之像，離水面之距離，僅及物體在水中之深之  $\frac{3}{4}$ 。例如溪水深 1 [米]，吾人俯視溪底，似覺其離水面僅 75 [厘米] 也。

### 習 題 五 十 三

- (1) 池中水清見底，用鎗打魚，瞄準一如打鳥，能否打中？何故？
- (2) (a) 作人目所見水中魚之位置之圖解。(b) 再作水中魚所見人之位置之圖解。
- (3) 設以  $45^\circ$  入射角而入射之光線，依  $30^\circ$  之折射角而折射時，求後物質對於前物質之折射率。
- (4) 夏日游泳，吾人在岸上見池中之水很淺，大約僅及人之胸際，入水以後，始覺水深可沒頂。何故？試繪圖說明之。
- (5) 光線由空氣射入玻璃中，入射角為  $65^\circ$ ，玻璃之折射率為 1.5，求其折射角。
- (6) 在水中，以  $30^\circ$  之入射角投射於水面之光線，當其射出水面後，在空氣中之方向如何？
- (7) 光在空氣中之速度為  $3 \times 10^{10}$  [厘米/秒]，已知玻璃之折射率為 1.5，求光在玻璃中之速度。

- (8) 荷葉上之水滴，何以光耀奪目，而池中之水則否？
- (9) 金剛石之臨界角為  $25^\circ$ ，求其折射率。
- (10) 有相接之甲乙兩種透明物質，今以  $60^\circ$  入射角之光線，由甲物質而投射於乙物質時，輒有一部分反射，一部分折射，其反射線與折射線計成  $90^\circ$  之夾角。求乙物質對於甲物質之折射率。
- (11) 知光由空氣進入於水中之折射率為  $\frac{4}{3}$ ，及由空氣進入於冕牌玻璃之折射率為  $\frac{3}{2}$ ，求光由水進入於冕牌玻璃之折射率。
- (12) 河寬 4 [米]，堤高於河面 80 [厘米]，有人高 1.2 [米]，離河岸 4.8 [米] 處，恰能見對岸有蛇由洞口爬出，問洞在水面下多深？
- (13) 荷葉浮於水面，其半徑為 35 [厘米]，見有金魚遊於荷梗之旁，問金魚離水面至少多深？

## 第五十四章

### 平行片與三稜鏡

§280. 平行片。一片玻璃，盛水之平底器，皆平行片 (parallel plates) 也。在兩平行面間之物為玻璃或水，平行片之上與下，則均為空氣。吾人又可以一平行片，分離兩不同性質之物質；如水面上置一玻璃片，則玻璃片上為空氣，玻璃片下為水。

§281. 光在平行片中之折射。設  $L$  為一玻璃片，其兩面平行，在其上與下為相同之物質，譬如空氣(圖 325)。光線  $AB$  依入射角  $i$ ，斜射於平行玻璃片之上面，自空氣透入玻璃中，傾向於法線而屈折，得折射角  $r$ 。再自玻璃片中在其下面透出空氣時，光線即離法線而偏向成  $CD$ ，與法線成出射角  $i'$ 。命  $n$  為玻璃對於空氣之折射率，則  $1/n$  為空氣對於玻璃之折射率，於是由折射定律，得

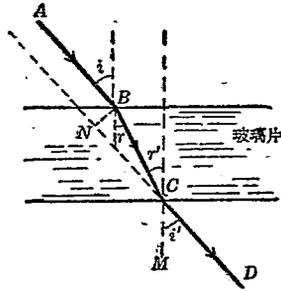


圖 325. 光線透過平行片之路徑。

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n,$$

及 
$$\frac{\sin r'}{\sin i'} = \frac{1}{n}.$$

因玻片平行，即  $r = r'$ ，由上二式得

$$i = i'.$$

故光線透過一平行片後，其出射線必與入射線平行，即方向不改，而得一側移，為

$$BN = \frac{t \sin(i - r)}{\cos r},$$

式中  $t$  表平行片之厚。

### 282. 平行片所成之像。

平行片之厚度為  $t$ ，折射率為  $n$ ，所成光點  $A$  之像  $A'$ ，為法線  $AN$  與光線  $CD$  之延長線之交點（圖 326）。

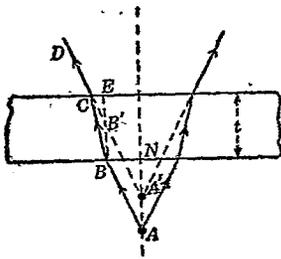


圖 326.

試計算物與像間之距離，有  $AA' = BB' = BE - B'E$ ，  
但  $BE = t$ ， $B'E = t/n$  (§ 279)，  
因得  $AA' = t(1 - 1/n)$ 。

例如隔窗而望，窗玻璃之厚 3 [毫米]，折射率為  $\frac{3}{2}$ ，所見物體，宛如移近 1 [毫米]，宜乎吾人不加注意也。

§283. 三稜鏡。凡透明體之成三角柱狀者，均謂之三稜鏡 (prism)。光線射入與射出之二面之夾角，謂之稜鏡角。此二面之交線，謂之稜鏡之折射稜 (refracting edge)：通常所用之

三稜鏡，多以玻璃製作而成，其直截面常成正三角形。

如圖 327,  $ABC$  爲三稜鏡之直截面。光線在稜鏡中透過時，入射線  $OP$  由稜鏡之一側面  $AB$  射入，因折折而成  $PQ$ ，至  $Q$  再折折而成出射線  $QR$ 。出

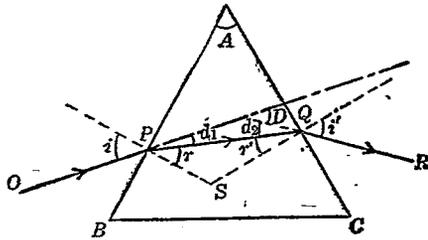


圖 327.

射線  $QR$  與入射線  $OP$  間所成之角  $D$ ，表示光線經三稜鏡後偏向之程度，稱爲偏向角 (angle of deviation)。由圖中三角形  $PQW$ ，可知

$$D = d_1 + d_2,$$

$d_1$  與  $d_2$  各表光線在稜鏡兩側面折折時之偏向也。

因光線在稜鏡中經兩次之折折，均離稜鏡角而偏折，故出射線

恆折向稜鏡之底。如稜鏡角向上，隔稜鏡而望物體時，所見像之位置，常比實物爲高 (圖 328)。

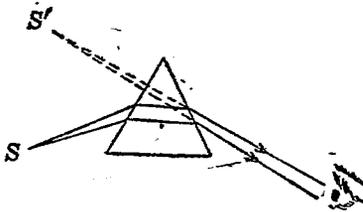


圖 328.

三稜鏡之稜鏡角爲直角者，稱爲直角三稜鏡

(right-angled prism)。如光線垂直投射於此種稜鏡之一側面，如圖 329 之  $AB$ ，若  $AB = AC$ ，則光線透入稜鏡後，因投射於  $AC$  面之入射角爲  $45^\circ$ ，大於玻璃之臨界角  $41.5^\circ$ ，光線遂成

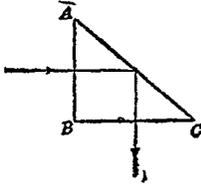


圖 329.

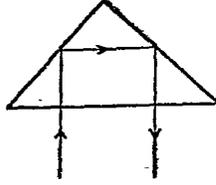


圖 330.

全反射，得變更一直角之方向。又如圖 330，光線如由斜面垂直透入，則由兩側面經兩次之全反射，可將光線變更  $180^\circ$  之方向，即出射線與入射線方向相反，而路線則不相重合。

### 習題五十四

- (1) 何故所見瓶中之椀，較傾出後為大？
- (2) 光線以  $40^\circ$  之角射入厚 4 [厘米] 之平行玻璃片，若其折射率為 1.5，求光線經此玻璃片後所生之側移。
- (3) 稜鏡之折射率為 1.5，稜鏡角為  $60^\circ$ ，若光線以  $30^\circ$  之角入射，求其出射角。
- (4) 一稜鏡之稜鏡角為  $A$ ，射入光線與射出光線之偏向角為  $D$ 。試證：  

$$A + D = i + i'$$
 式中  $i$  與  $i'$  各為入射角與出射角。
- (5) 稜鏡之折射率為 1.5，設光線之入射角大於  $45^\circ$  時，則無光線射出，求其稜鏡角。

## 第五十五章

### 透 鏡

§284. 透鏡。吾人習見之眼鏡片與放大鏡等，皆玻璃質之透鏡(lens)也。透鏡之兩頰，通常俱為球面之一部分；亦有一頰為球面而他頰為平面者。構成透鏡之兩圓球中心之聯結線，稱為透鏡軸線(axis of lens)。

透鏡兩頰相距甚近，其中心厚度不過數〔毫米〕，比之兩頰之球面曲率半徑之為數十〔厘米〕或數〔米〕者，甚為微小時，稱為薄透鏡(thin lens)。通常所遇，皆薄透鏡也。

透鏡之邊緣較其中心部分為薄者，稱為凸透鏡(convex lens)。如圖

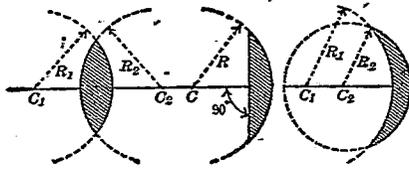


圖 331. 凸透鏡。

331 示凸透鏡之三種式樣，分別稱為雙凸，平凸，凹凸透鏡。反之，其邊緣較中心部分為厚者，稱為凹透鏡(concave lens)。

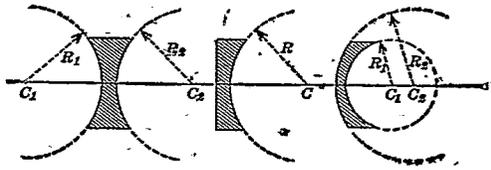


圖 332. 凹透鏡。

亦有雙凹，平凹，凸凹之別，如圖 332 所示。

玻璃透鏡之質料，亦各有不同；常用者一為冕牌玻璃(crown glass)，折射率在 1.52 左右，一為燧石玻璃(flint glass)，折射率在 1.6 左右。

光線通過透鏡，在其兩頰面上先後折射。透鏡可視折射稜角相異之多數稜鏡集合而成(圖 333)。透鏡之中央部分為稜角

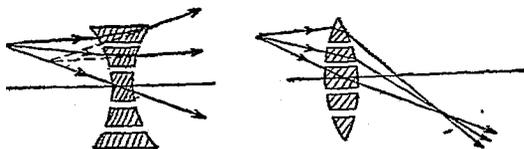


圖 333. 透鏡之會聚與發散作用。

為零之稜鏡，即平行片 (§ 280)，以其厚度又薄，光線透過其間，方向不改，側移為零，蓋即通過透鏡之光心(optical centre)也。距透鏡之邊緣愈近者，其折射稜角愈大，光線折向稜鏡之底亦愈甚。故光線經過透鏡後，出射線愈近透鏡之邊緣者，其偏向角愈大。因之，凸透鏡對於光線有會聚作用，凹透鏡對於光線有發散作用。故凸透鏡亦稱會聚透鏡(convergent lens)，凹透鏡亦稱發散透鏡(divergent lens)。

§285. 焦點。以一凸透鏡垂直置於平行光束中，則見經過透鏡之光束，會聚於鏡軸之一點，如圖 334 之  $F$  點，稱為焦點。將太陽光經過凸透鏡，集合起來，射於紙上(圖 335)；如紙之地位，恰在透鏡之焦點處，可起燃燒。

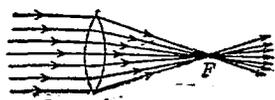


圖 334. 凸透鏡之實焦點。

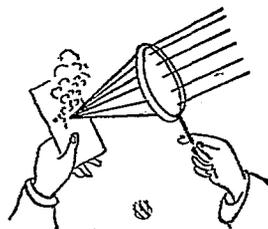


圖 335. 太陽光會聚而起燃燒。

平行光束遇一凹透鏡時，則光線折射後成為發散光線(圖 336); 向後延長，亦可相交於一點  $F$ 。在人目視之，所有經過透鏡之出射線，宛似全由此點發出; 惟置紙其處，既不顯像，更不燃燒。故凸透鏡之焦點為實，凹透鏡之焦點為虛。

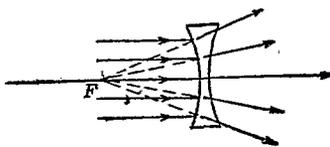


圖 336. 凹透鏡之虛焦點。

§286. 焦距。自透鏡至焦點之距離，稱為焦距。順光線進行之方向者為正; 逆光線進行之方向者為負。故凸透鏡之焦距(圖 334)為正，凹透鏡之焦距(圖 336)為負。

透鏡之焦距  $f$ ，繫乎透鏡玻璃之折射率  $n$ ，及其兩頰球面之曲率半徑  $R_1$  與  $R_2$ ，其間之關係為

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

$R_1$  與  $R_2$  之值為正或負，亦視自球面至球心之方向，與光線進行之方向相同或相反而定。透鏡之兩頰面，前後互換，焦距之值

不改。

【例 1】有雙凸透鏡之兩頰球面曲率半徑各為 40〔厘米〕與 60〔厘米〕，由冕牌玻璃製成，折射率為 1.54。求其焦距。

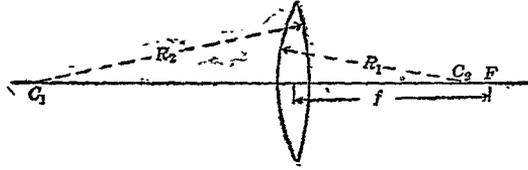


圖 337.

如圖 337，以  $R_1 = 40$ ， $R_2 = -60$ ，代入公式，得

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (1.54 - 1) \left( \frac{1}{40} + \frac{1}{60} \right)$$

即  $f = \frac{24}{0.54} = 44.4$ 〔厘米〕。

【例 2】有燧石玻璃之平凹透鏡，凹面之曲率半徑為 50〔厘米〕，折射率為 1.65。求其焦距。

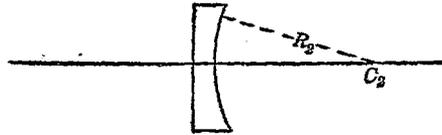


圖 338.

如圖 338，以  $R_1 = \infty$ ，

$R_2 = 50$ ，代入公式，得

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = -\frac{1.65 - 1}{50}$$

即  $f = -\frac{50}{0.65} = -77$ 〔厘米〕。

§287. 透鏡之公式。凸透鏡成像之情形，與球面凹鏡相似。

由於物體距透鏡遠近之不同，可成實像或虛像。凹透鏡則與球面凸鏡情形相似，對於實物，常成虛像。

命  $p$  及  $q$  各表物及像與透鏡之距離， $f$  表透鏡之焦距，其間之關係為

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

是為透鏡之公式，與球面鏡公式完全相同。至於  $p$  之符號，如為實物，常取正號，若為虛物，則用負號； $q$  之符號為正號時，即為實像，為負號時，則為虛像。又  $f$  之符號，對於凸透鏡常取正號，而於凹透鏡則取負號，已於上節言之。

【例】有凸透鏡，其焦距為 5 [厘米]。置物體於距透鏡 5 [米] 之處，則  $f = 5$ ,  $p = 500$ ，代入公式，得

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{5} - \frac{1}{500} = \frac{99}{506}, \text{ 即 } q = 5.05 \text{ [厘米]}$$

故像之所在與焦點相距 5.05 [厘米]。若  $p = 10$  [米]，則

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{5} - \frac{1}{1000} = \frac{199}{1000}, \text{ 即 } q = 5.03 \text{ [厘米]},$$

像與焦點更為接近，相距 0.03 [厘米] 耳。通常物在焦點之外，百倍於焦距者，即可作為在無窮遠看待。

§288. 凸透鏡之成像。當物體在距透鏡極遠處，即  $p = \infty$ ，則  $q = f$ ，像成於透鏡之焦點  $F$  上（圖 339 甲）。物體移近，則像離遠；當  $p = 2f$  時，則  $q = 2f$ ，物與像，關於透鏡，成為對稱（圖 339 乙）。物更移近以至於後焦點  $F'$  時（圖 339 丙），則

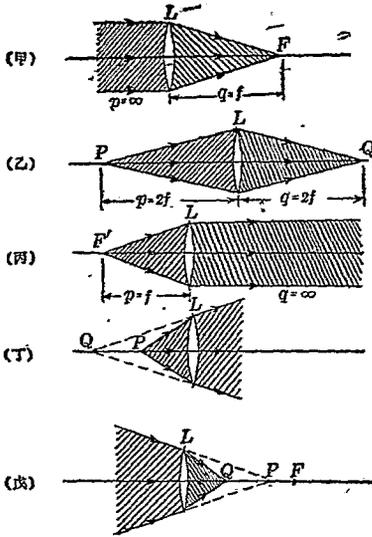


圖 339.

$p = f$ , 而  $q = \infty$ , 出射光線成爲平行, 像在無窮遠矣。若物在後焦點與透鏡之間, 則  $p < f$ , 而  $q < 0$ , 像在鏡之後方, 成爲虛像(圖 339 丁)。又若物爲虛物, 則  $p < 0$ , 而  $0 < q < f$ , 實像現於透鏡與前焦點  $F$  之間(圖 339 戊)。

光源之發出光線也, 恆向四周發射, 成爲發散光線; 賴凸透鏡之助, 可變

成平行光束(圖 339 丙)或會聚光束(圖 339 甲及乙)。凸透鏡之作用, 在於會聚光線。光線之原爲會聚者, 更加會聚(圖 339 戊), 原爲發散者, 減少發散(圖 339 丙及丁), 或竟變成會聚(圖 339 甲及乙); 要視光線原來之發散程度與凸透鏡之會聚本領而定。

§289. 凹透鏡之成像。凹透鏡之焦距爲負。物體在無窮遠時, 生成虛像於其焦點  $F$  (圖 340 甲)。物體由無窮遠漸次移近於透鏡時, 其虛像亦隨之移近透鏡。但物體移至焦點上, 其虛像亦不去至無窮遠, 而位於透鏡與焦點之中途(圖 340 乙)。如物體再行接近於透鏡時, 虛像隨之亦更接近, 若物體爲虛物

而位於透鏡與前焦點  $F'$  之間，則成實像於透鏡之前，而在虛物之外(圖 340 丙)。若虛物適在前焦點  $F'$  上，則成平行光束，像在無窮遠矣(圖 340 丁)。

又若虛物在前焦點之外，則像為虛像，在鏡後焦點之外(圖 340 戊)。此等關係，皆可由透鏡公式推論得之。

故凹透鏡之作用，在於發散。光線之原為平行或發散者(圖 340 甲及乙)，更加發散，而成虛像。原為會聚者，減少會聚，或仍為會聚光線，而得實像(圖 340 丙)；或變成平行(圖 340 丁)，或竟成發散(圖 340 戊)，而為無像或虛像；要視光線原來之會聚程度與凹透鏡之發散本領而定。

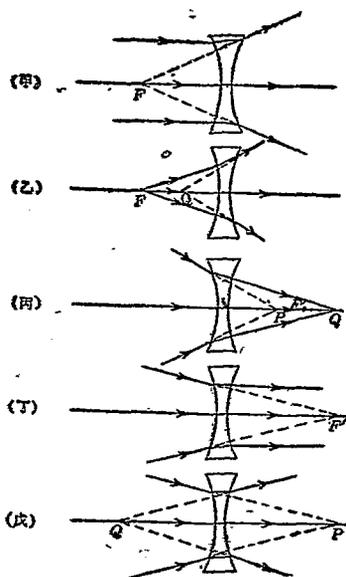


圖 340.

【例】設有焦距 12 [厘米] 之凸透鏡與焦距 3 [厘米] 之凹透鏡配合，兩鏡相距 8.6 [厘米](圖 341)。

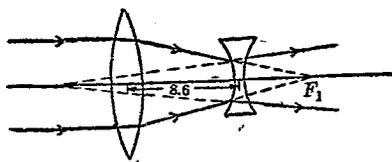


圖 341.

求平行光線投入凸透鏡，再由凹透鏡射出，所成之像之位置。

平行光線經凸透鏡，成像

於其焦點  $F_1$ 。此像在凹透鏡前  $12 - 8.6 = 3.4$  [厘米]，即為凹透鏡之虛物，而有  $p = -3.4$ ，以之代入透鏡公式，得

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3.4} = -\frac{0.4}{10.2},$$

即  $q = -25.5$  [厘米]。

故此兩透鏡組所成平行光線之像為虛像，在凹透鏡之後方 25.5 [厘米] 處。此即伽利略式觀劇望遠鏡之構造原理也(見後 §311)。

§290. 透鏡成像之作圖法。像之位置，為光點發出光線中任意二線折射後相會之點，故作圖時，可就其中取特別簡便之二線，求其交點即得。通常皆取(1)通過透鏡中心，及(2)與鏡軸

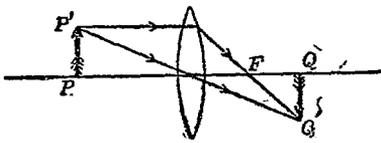


圖 342.

平行之二光線；因前者直行通過透鏡而不改變其方向，後者通過透鏡後，必經過焦點。

由實物上各光點，經透鏡所成諸像點之集合，即為物體之像。物體若垂直於鏡軸，則像亦必與鏡軸垂直。如圖 342， $QQ'$  即為  $PP'$  之實像。若所取

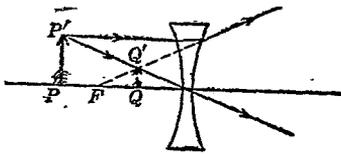


圖 343.

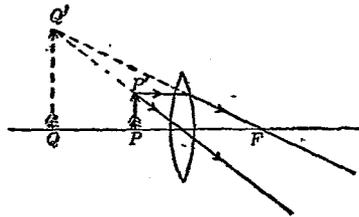


圖 344.

之兩光線不能在其進行之前方相交，則將光線向後延長，相交而成虛像，如圖 343 與圖 344 之情形。

經透鏡後，無論為凸或凹，實物而成實像，像恆倒立(圖 342)，虛物而成虛像，亦復如是。反之，實物而成虛像(圖 343 及 344)或虛物而成實像，則像恆正立。

像之大小 物與像，大小之比，可由本節各圖中，根據相似三角形定理，亦得與球面鏡相同之公式。命  $L_o$  與  $L_i$  各表物與像之長度，則有

$$\frac{L_i}{L_o} = \frac{q}{p},$$

即像與物長度之比，等於兩者與透鏡之距離之比。可見透鏡成像之放大倍數，隨物體所在之位置而異。欲其放大甚多，物體恆置於透鏡焦點之附近(見後 § 300)。

【例】有會聚光束投射於雙凹透鏡上。苟無透鏡，將成像  $AB$  於距透鏡 3 [厘米] 之處(圖 345)，像長 1.5 [厘米]，透鏡之焦距為 4 [厘米]。求此會聚光束，經過透鏡後，所成像之位置及其大小。

$AB$  對於透鏡言，為虛物。以  $p = -3$ ,  $f = -4$ ，代入透鏡公式，得

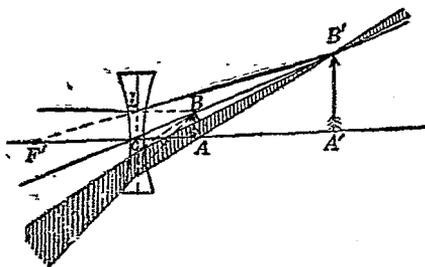


圖 345.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{4} + \frac{1}{3} = \frac{1}{12},$$

即  $q = 12$  [厘米].

故得實像  $A'B'$  正立, 位於透鏡之前 12 [厘米].

$$\text{又} \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{q}{p} = \frac{12}{4} = 3,$$

即像放大 3 倍,  $A'B'$  之長為  $3 \times \overline{AB} = 3 \times 1.5 = 4.5$  [厘米].

### 習 題 五 十 五

(1) 平行玻璃片之焦距為何?

(2) 一凹凸透鏡之折射率為 1.62, 其凹面與凸面之曲率半徑各為 40 [厘米] 及 20 [厘米], 求其焦距. 若凹面之曲率半徑為 20 [厘米], 凸面之曲率半徑為 40 [厘米], 則其焦距若何? 何者為會聚透鏡? 何者為發散透鏡? 各繪圖以明之.

(3) 一平凸透鏡之折射率為 1.54, 凸面之曲率半徑為 30 [厘米], 求其焦距.

(4) 有一透鏡, 折射率為 1.52, 焦距為 70 [厘米]. 將其浸入水中, 而對太陽光時, 則見焦距增長, 何故? 增長多少? 若將此透鏡平置於距水面 20 [厘米] 處, 其焦點約在水面下多深?

(5) 凹透鏡之焦距為 8 [厘米], 有物體高 2 [厘米], 放在距鏡 20 [厘米], 16 [厘米], 或 5 [厘米] 處, 試各求其像之位置, 大小, 虛實, 及正倒.

(6) 凹透鏡之焦距為 10 [厘米], 物高 3 [厘米], 放在距鏡 15 [厘米], 10 [厘米], 或 4 [厘米] 處, 試各求其所成像之位置, 大小, 虛實, 及正倒.

(7) 試就(5)與(6)兩題之名答案, 列表以比較之.

(8) 凹透鏡亦能成虛像否? 凹透鏡亦能成實像否? 試繪圖表明之.

(9) 用雙凸透鏡時，應將物體放在何處，以得 (a) 實像，(b) 放大之像，(c) 直立之像，(d) 虛像，(e) 倒立之像，(f) 縮小之像，(g) 像在  $f$  與  $2f$  之間，或 (h) 像在焦點之內側？

(10) 照相機鏡頭已對準遠處之風景，今欲照較近之人物，應如何變動其暗箱之長度？何故？

(11) 有燭一支與牆壁相距 4 [米]，其間放一透鏡，距燈 3 [米]，像生於牆上。若在燭與牆之間，移動透鏡，至另一地位，亦能在牆上成像。求此第二位置，並比較前後二像之大小。

(12) 兩凸透鏡之焦距各為  $f_1$  與  $f_2$ 。當兩鏡緊接時，求證其合成之焦距為  $F$ ，合於下列之關係：

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}.$$

(13) 一凸透鏡  $L$  與凹透鏡  $L'$ ，焦距各為 20 [厘米] 與 30 [厘米]，兩者相距 10 [厘米]，一支燭長 2 [厘米]，放在  $L$  之前 100 [厘米] 處，求其經過此二透鏡所成之像之位置，大小，虛實，及正倒。

(14) 有一平凸透鏡與一平凹透鏡，其曲面之曲率半徑相同，互相重疊時之焦距若何？

(15) 透鏡之焦距愈大者，會聚或發散之本領愈大抑愈小。

## 第五十六章

### 視 覺

§291. 眼之構造。眼爲五官之一，實一光學儀器也。通常使用光學儀器，仍藉眼以觀察，故於述光學儀器之先，不能不明眼之功用。

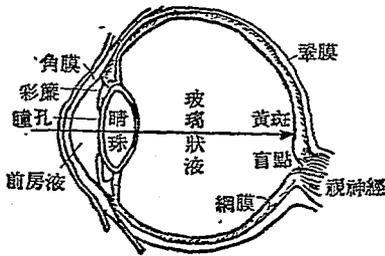


圖 345. 眼之構造

眼之構造如圖 346 所示。形圓如球，與視神經相連結，外層爲強厚之膜，在前方透明之部分，稱爲角膜 (cornea)，後方白色而不透明者爲鞏膜 (sclerotic)。角膜

較其他部分，突出外方。

角膜後面，有著色之彩簾 (iris)；彩簾之中央，有一圓孔，名曰瞳孔 (pupil)，光線即由瞳孔射入眼球。瞳孔之大小，可由彩簾之平滑肌纖維，應光線之強弱而張縮；平均約爲 5 [毫米] 直徑。在彩簾與瞳孔之後，而與之緊接者爲暗珠 (crystalline lens)，有凸透鏡之聚光作用。在角膜與暗珠之間，充滿透明之前房液 (aqueous humor)；在暗珠後方，則充滿透明之膠質，稱爲玻璃狀液 (vitreous humor)。

暗珠經由毛狀肌 (ciliary muscles)，而與鞏膜內面之黑衣

(choroidea)相連。毛狀肌,可使睛珠之兩面,變更其彎曲程度,尤使前面之彎度變更特多。黑衣布於眼球之內部,其色黑;因其色黑,故可消除眼球內部光之反射,俾免造成模糊之像。黑衣內面有視神經末梢,散布成網,稱為網膜(retina)。外物之像,即生於其上。睛珠軸線與網膜相交處,四周略呈黃色,稱為黃斑(yellow spot),感光特別銳敏。又視神經由腦進入眼球處,特別粗大,對於光之感覺,反不靈敏,因稱盲點(blind spot)。

§292. 眼之作用。由外物  $AB$  發出之光線,進入瞳孔(圖 347),經睛珠折射後,集中於網膜上,成為倒立之實像  $ab$ 。視神經受其刺激,傳達於腦,而起視覺,吾人因知有直立之物體  $AB$  存在。

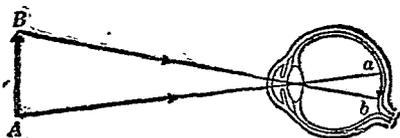


圖 347. 眼之作用。

如上所述,眼底所生之像,既係倒立,而吾人仍能

認知其物體為直立者,其故何在? 欲明此理,可以警鐘報警以譬喻之。例如聞得鐘聲為二次時,判定火警在東方;聞得鐘聲三次時,判定火警在南方。吾人判定火警方位之方法,完全由於一種約定,而非東方定與二次鐘聲,南方定與三次鐘聲,有何物理的關係也。吾人認識物體之正倒,其理亦然。因吾人之認識物體,並非直接認識眼中所生之像,而為由物體之像,刺激視神經,使起一種感覺後,視神經再將此感覺傳達於腦中,因而始行認知其物體。眼中生成倒像,為物理學上之事,腦中感知直

物，乃生理學上之事，兩者並不相悖。倒像方爲直物，吾人自瓜瓠墮地，卽由視覺與觸覺之聯繫作用，習慣成自然也。

又吾人常用兩眼同時觀看物體，而所見者僅爲一物，而非二物，其理亦可以視神經轉輾傳達之作用以說明之。因物體之像，係生於兩眼眼底之相當部分，兩眼之視神經，傳送同一報告於腦中，乃得認知僅一物體之存在。若物體之像，生於兩眼眼底之不相當部分，則腦中接受相異之報告，卽得誤認爲二物。例如以兩眼注視一物體時，以手指壓擠一眼，使眼球變更位置，則像生於眼底之不相當部分，物體卽現雙重之地位是。

§293. 眼之調節。睛珠兩面之彎度，可隨毛狀肌之伸縮，而略有變更。當注視近物時，毛狀肌收縮，睛珠兩面之曲率增加，焦距減短。若看遠物，毛狀肌放鬆，睛珠稍趨扁平，以減小其兩面之曲率，焦點適在黃斑上。故睛珠與網膜間之距離，雖常不變，但由睛珠曲率之變更，對於遠近物體，都可成像於網膜之上，而得顯明之視覺，如是之作用，稱爲眼之調節(accomodation of the eye)。

正常之眼，在休息中，可以看到無窮遠，看遠毫不費力。注視近物，則須調節。由調節作用，所能明晰察見最近之點，曰近點(near point)，通常約爲 12〔厘米〕；蓋調節亦有其限度，在 12〔厘米〕內之物，無法可以清晰見之矣。人眼所能明晰察見最遠之點，曰遠點(far point)；視覺健全者，遠點可達於無窮遠。

在調節可見之範圍內，距眼愈近之物體，在網膜上造成之像愈

大，視覺辨別愈為精細，但同時睛珠之彎曲愈甚，故不免有疲勞之感，此可暫而不可久者也。使眼不感吃力，所能得最明晰之視覺之距離，如讀書時書與眼間之距離，曰明視距離 (distance of distinct vision)，通常約為 25 [厘米]。

§294. 眼鏡。 正常之眼，可使平行光線會聚於網膜上，如圖 348 (甲)；不正常者，則不能使平行光線會覆於其網膜上，可用一枚透鏡以矯正之，是為眼鏡。非正常之性質不同，眼鏡之種類亦異，分別述之如下：

(1) 近視 因眼之軸線過長，或睛珠之彎度過大，而起之非正常情形，曰近視眼。對於平行光線所成之像，位於網膜之前，如圖 348 (乙)；故近視眼之遠點不為無窮遠，對於遠物，看不清楚，必須將物移近，則像後退，方落於網膜之上。故近視者視物，常使眼與物之距離甚為接近，其近點有少於 10 [厘米] 者。補救之法戴凹透鏡，使平行光線預行發散，然後進入眼

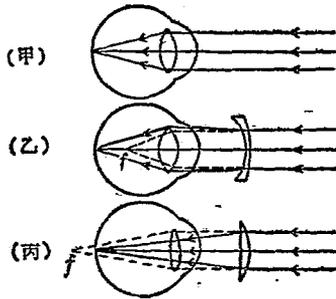


圖 348. 眼鏡之功用。

中，則像後移，成於網膜之上，即所以增長睛珠之焦距也。

(2) 遠視 遠視眼之情形，適與近視眼相反，因眼之軸線過短，或睛珠之彎度過小所致。對於平行光線造成之像，落於網膜之後，如圖 348 (丙)，故遠視眼看遠物，即賴毛狀肌之調節，使睛珠

彎度增大，像向前移，方落於網膜之上。若物體太近，則雖調節亦不為功。故遠視眼之近點頗遠。補救之法，戴凸透鏡，使平行光線預行會聚，然後進入眼中，則像前移，生於網膜之上，即所以減短眼珠之焦距也。

(3)老視 眼之調節能力，隨年齡以俱衰，年老之人，毛狀肌使睛珠縮短其焦距之機能衰退，近點與日俱遠，終至與遠點相差無幾，是為老視眼。正常之眼，近四十五歲時，即感老視現象，書卷在手，恆置於距目四五十〔厘米〕之處；到六十歲時，一〔米〕以內之物，視之不能清晰；及七十歲時，極遠之物方能見之。補救之法，亦戴凸透鏡，與遠視眼同，所以使近點移近耳。至於調節能力，徒歎回天無術。

近視者至年老時，亦成老視眼，僅能在距目約五十〔厘米〕處見物；遠視眼之成為老視者，目前之物，非戴眼鏡，不能看見。

使用眼鏡時，其焦距愈短者，作用愈強。取〔米〕為單位，量其焦距，而以所得之值之倒數，表眼鏡之作用程度，稱之曰度 (diopter)。例如 2 度之眼鏡，即其焦距等於 0.5 〔米〕。

295. 視角。由物體之兩端，引於一目之二直線間所夾之角，稱為視角 (visual angle)，如圖 349 中之角  $AOB$  是。

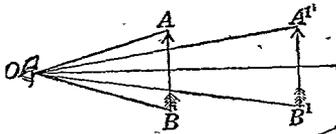


圖 349. 視角。

視角之大小，雖與物體之大小有關，但亦因物體之遠近而異。

同一物體，近則視角大，遠則視角小。太陽與月球，實際之大

小迥異，惟其與吾人相距之遠近亦大不同，竟成相等之視角，同爲 32'，望之宛如日月同大也。

吾人觀察物體，輒成視角。但視角爲以物體所在之距離，除物體之大小之商，故單由人眼觀察，既不能決定物體之大小，亦不能決定其所在之遠近。雖然，吾人仍能分別估計物體之大小與距離者，皆藉長時期之經驗，或與附近物體比較而知也。見人自遠方來，知其高約五〔尺〕，蓋由經驗，知普通之人，身長約爲五〔尺〕之故。此人扶杖行於樹下，見杖僅及其身之半，而樹高出頭上兩倍，則知杖長約二〔尺〕五〔寸〕，樹高約一〔丈〕五〔尺〕，此與人身比較而得。

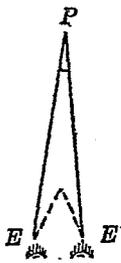
物體之視角大時，其網膜所成之像亦大，精細組織，方能察覺。吾人用光學儀器以觀察物體，即在增加其視角，宛如物體移近或加大若干倍也。

§296. 眼之鑑別率。物體之視角小於 1〔分〕時，吾人即作爲一點看待，如天上之星是。遠處之兩點，對於人目，所成之視角小於 1〔分〕時，吾人亦不復能分辨，混爲一點矣。如置尺於 3〔米〕之外，吾人即不能看清〔毫米〕刻度，但見一片模糊耳。故眼之鑑別率，即俗所謂視力，通常約爲 1〔分〕。

§297. 視覺暫留。兩點下降，常成線狀。夜間點香揮之，則火頭成條形。此等現象，由視覺暫留 (persistence of vision) 而成。即眼之感光，有暫時保留之性質，雖將光源取去，

其網膜上速成之像，並不隨之立時消滅，尙能延長相當之久。  
據實測，知其暫留之時間，約為  $\frac{1}{10}$  [秒]。活動影戲(又稱電影)  
即應用此理而成。

§298. 雙眼視。 雙耳所以定聲源之方向，雙眼所以定光點  
之遠近。吾人注視一點  $P$  時，兩眼之軸線即相交於此點上(圖



350),其間所成之交角,稱爲此點之眼角,如  $EPE'$  角是。點距眼近,則眼角大;距眼遠,則眼角小。吾人所以能判斷物體之凹凸,與距離之遠近者,即因眼角有大小之故。試閉一目,單眼觀察,則物體遠近之分別不著。望遠鏡與顯微鏡有時用雙筒者,即所以顯視場內景物之立體情形也。

圖 350. 眼角。 人類兩眼瞳孔間之距離,約爲 6 [厘米],故在 180 [米] 外之物體,其眼角均小於 1 [分],小於眼之鑑別率,吾人一視同平同遠矣。實際上一望而知山下之樹近於山腰之樹,山腰之樹近於山峯之樹者,非目睹所得,乃經驗之所示也。

§299. 錯覺。 眼之判斷,常有不正確之處。例如圖351 (甲)所示,白紙上所畫之黑方形,與黑紙上所畫之白方形,大小相等,視之宛若有別。又圖(乙)之兩扇形,其大小亦相等;

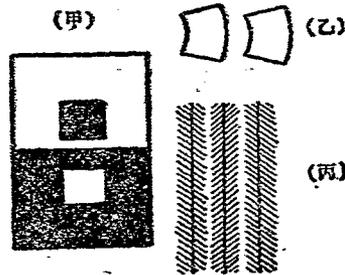


圖 351. 錯覺。

然視之常覺右形較左形爲小。再，圖(丙)之三縱線，俱屬平行者，而望之則互相傾斜。

童子辨日，難倒孔子。太陽位於天頂與接近地平時，實測視角，大小相等，同爲  $32'$ 。然在吾人望之，覺位於天頂時，似較接近地平時爲小者，以在前者情形，廣漠天空，無所烘託，非若後者之情形中，與地面上實物相比擬，不知不覺間顯其大矣，亦一種錯覺耳。

### 習 題 五 十 六

(1) 從太陽光下，走進室內，何故覺其黑暗？夜間電燈復明，每覺眼花潦亂，睜不開眼，何故？

(2) 戴眼鏡者能看見自己眼鏡片上之小黑污點否？何故？

(3) 眼球所生之像，爲實像抑爲虛像？爲正像抑爲倒像？其大小是否完全與實物一樣？

(4) 看 100 [碼] 外之汽車，當汽車漸近時，眼如何調節？

(5) 近視眼，遠視鏡，與老視眼，各由何種缺點而成，其矯正之法各如何？試詳述之。

(6) 甲之明視距離爲 10 [厘米]，乙之明視距離爲 70 [厘米]。問甲乙二人各應配何種眼鏡，其焦距各爲若干，方能正常？

(7) 遠視眼鏡之焦距爲 40 [厘米]，將書放在眼鏡前 30 [厘米] 處，恰能明視，求此人不戴眼鏡時之明視距離。

(8) 一近視者書本放在 15 [厘米] 處，方能看見，問其遠點爲何，並所配之眼鏡，其焦距應短於若干 [厘米]？

(9) 某人之近點與遠點，各爲 9 [厘米] 與 86 [厘米]，備有二副眼鏡，以

爲看近與看遠之用。問其焦距各爲若干？此人是近視抑遠視，少年抑老年？

(10) 夜間見天空之流星，常成一線而墮落，何故？

(11) 天空之星，有比地球大者，吾人見之，僅爲一點，何故？

(12) 半身人像，映射於銀幕之上，何以能使你感覺他向你走來？

(13) 立於鐵軌上，向前觀察鐵軌，愈遠愈狹，何故？

(14) 2 [呎]之童，在距 50 [呎]處所成之視角爲何？在距 100 [呎]處，所成之視角爲何？

(15) 左右二瞳孔間之距離爲 6 [厘米]，問在距 4 [米]與距 10 [米]處之點之眼角各爲若干？在距 10 [米]處，凹凸相差多少，吾人方能分辨出來？

## 第五十七章

### 放大鏡與顯微鏡

300. 放大鏡之用途。吾人如欲明細觀察物體時，必須將眼接近物體，以增大其視角，然後網膜上方能結成較大之像。但眼之調節作用，有一定限度，如物體太近，比眼之近點更近時，則網膜上所成之像，反不清晰，此吾人之所以用放大鏡也。老視眼者，讀書看報，放大鏡更難離手。

放大鏡爲一會聚透鏡，焦距頗短，通常數〔厘米〕以至 1〔厘米〕而已。用時，以放大鏡置眼前甚近(圖 352)，而欲觀察之物  $AB$ ，則置於透鏡  $C$  與其焦點  $F$  之間，於是  $AB$  在此鏡中得一直立放大之虛像，如  $A'B'$ ，此像即吾人所目睹者也。

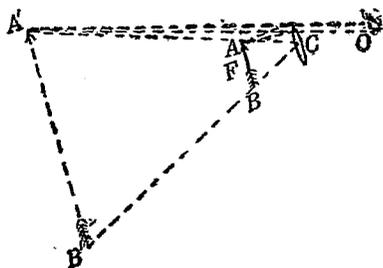


圖 352. 放大鏡。

然則，放大鏡之利益究若何？設物體  $AB$  經放大鏡所成之像  $A'B'$ ，距吾人之眼爲明視距離  $D$  ( $= 25$ 〔厘米〕)，於是吾人視  $A'B'$  之視角爲  $A'B'/D$ ；若不用放大鏡，而在同一距離，直接觀察物體  $AB$ ，則其視角當爲  $AB/D$ 。

因  $A'B' > AB$ ,

故 
$$\frac{A'B'}{D} > \frac{AB}{D};$$

換言之，吾人在放大鏡中視物之視角，大於不用放大鏡而直接觀察者；亦即在網膜上所成之像，前者大於後者。設  $A'B' = 3 \cdot AB$ ，則吾人用放大鏡後所能觀察之物體，可較不用放大鏡時小 3 倍。或說物體放大 3 倍，或說將其移近 3 倍，其效果相同。

§301. 放大鏡之放大率。像與物大小之比，曰放大率，即  $A'B'/AB$ ；亦即用放大鏡時像之視角，與不用放大鏡時物之視角，兩者之比也，通常以  $M$  表之。

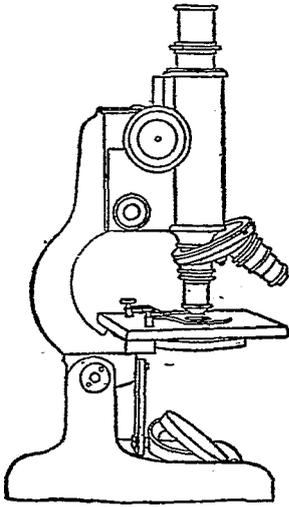
物體  $AB$  與焦點  $F$  極相接近，故其與透鏡之距離，即為焦距  $f$ 。又眼與放大鏡極相接近，故像  $A'B'$  與透鏡之距離，即等於明視距離  $D$ 。因有

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{D}{f} = \frac{\text{明視距離}}{\text{焦距}}$$

放大鏡之焦距愈短者，放大率愈大。一焦距 5 [厘米] 之透鏡，放大 5 倍。

§302. 顯微鏡。顯微鏡與放大鏡，同為觀察微細物體之用。前者之放大率，遠較後者為大。一良好之放大鏡，其放大率至多不過 25 而已；顯微鏡之放大率，可達 1500。兩者之構造亦異。放大鏡僅為光之一度會聚；而顯微鏡則有兩主要部分焉：

- (1) 物鏡(objective)。物體先由物鏡放大，而得實像。
- (2) 目鏡(eyepiece)。用以觀察物鏡所成之實像，而再加以



放大，即上述放大鏡之作用也。  
目鏡通常由二片透鏡組成。

物鏡與目鏡裝於一圓筒之兩端，圓筒之長，例有一定(圖 353)。

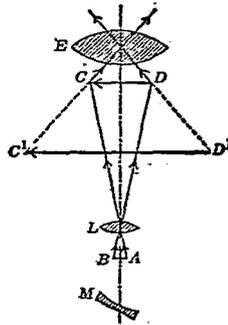


圖 353. 顯微鏡及其光學部分之圖解。

§303. 顯微鏡之成像。如圖 353 所示， $L$  為物鏡， $E$  為目鏡。所欲觀察之物體  $AB$ ，置於物鏡焦點之附近而稍外，於是  $AB$  在物鏡  $L$  中，成一放大之實像  $CD$ 。 $CD$  在目鏡  $E$  之焦點附近而稍內，於是生成更大之虛像  $C'D'$ ，而  $C'D'$  入於眼中，成像於網膜上。

欲使網膜上之像清晰，宜配準  $C'D'$  之位置，使其在明視距離。配準之法，為由螺旋之作用，使裝置物目兩鏡之圓筒上下移動。變更物體  $AB$  對於物鏡  $L$  之位置。圓筒之移動極微，而  $C'D'$  之變動可甚大，特別是高倍顯微鏡為然。顯微鏡之配準與否，圓筒之移動，往往僅差千分之幾[毫米]耳。

§304. 顯微鏡之放大率。由圖 353 所示顯微鏡成像之可知顯微鏡之放大率，等於物鏡放大率，與目鏡放大率相乘積。顯微鏡物鏡之放大率為自 10 至 100，由三個或四個之鏡組成。故物鏡之焦距，有短至 2 [毫米]者，宜其透鏡片子甚製造遠較目鏡為難，價值亦高。以此等物鏡與數個目鏡配合用，可得各種不同之倍數，此一架顯微鏡之所以常備數個物鏡數個目鏡也。

應用顯微鏡，吾人得察見動植物之組織與其細胞之構造，極之微生物，以及明瞭各種致病之原因。

### 習題五十七

- (1) 無人用焦距大於 25 [厘米]之透鏡，作為放大鏡，何故？
- (2) 放大鏡之焦距為 4 [厘米]，求其放大率。
- (3) 有一雙凸透鏡，兩頰之曲率半徑同為 6 [厘米]，折射率為 1.63。求其用作放大鏡時之放大率。
- (4) 顯微鏡之物鏡與目鏡，其焦距各為 1 [厘米]與 5 [厘米]。物體在物鏡前 1.05 [厘米]處，像生於目鏡焦點附近，再由目鏡放大，而最終像，適在明視距離。求此顯微鏡之放大率。
- (5) 國立北平研究院物理研究所所造之顯微鏡，物鏡有 3 倍，10 倍，50 倍，100 倍五種，目鏡有 6 倍，10 倍，14 倍三種。以此等物鏡目鏡配合，可得那些倍數？
- (6) 白紙上有一黑點，置顯微鏡下觀之，光對準後甚為清晰。若黑點蓋一平玻璃片，厚 0.4 [毫米]，則黑點之像變為模糊；將顯微鏡頭升高某處，又可看得清楚。此玻璃片之折射率為 1.5，問顯微鏡頭應升高多少。

## 第五十八章

### 望 遠 鏡

§305. 望遠鏡之種類。 放大鏡與顯微鏡俱為放大甚近之物體的儀器，而望遠鏡為使遠方物體移近而擴大之，俾便於觀察之裝置。吾人得依觀察物體之不同而類分之：

觀測天上之星辰所用者，曰天文望遠鏡(astronomical telescope)。地面上之偵察與觀測，如高山，砲臺，海面輪船，舞臺優伶等，須得正像者，則用地面望遠鏡(terrestrial telescope)。實驗室中觀測各種長度或角度之精細刻度，則用讀數望遠鏡(reading telescope)。

由光學言之，此數種望遠鏡之不同，僅為其目鏡之略有差別，而其物鏡則等耳。物鏡在望遠鏡中為最主要之部分。

§306. 望遠鏡之成像。 將望遠鏡鏡軸，正對所欲觀察之遠處物體。物體  $AB$  離鏡甚遠，圖中無法表示。其上各點發出之光線，皆成平行光束，而入射於望遠鏡之物鏡  $C_1$  (圖 354)。設物體下端所發出之光線，與望遠鏡軸成  $\alpha$  角，則將會聚於物鏡焦面上之一點  $B'$ 。所謂焦面(focal plane)為通過焦點，垂直於鏡軸之平面。 $A'B'$  即為物鏡造成之物體的倒立實像。此實像自較物體小得很多，但其地位則與觀察者相距甚近，因得以目鏡

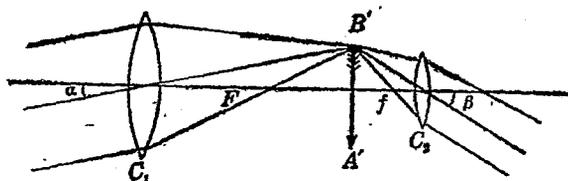


圖 354. 望遠鏡.

放大，極便觀察。通常  $A'B'$  即在目鏡之焦點上，如是由目鏡透出，而入於人目之光線皆為平行光束，此實無妨，因人目慣於觀察無窮遠也。故望遠鏡筒之長，即物鏡兩鏡間之距離，等於兩者焦距之和。若必欲望遠鏡所成之虛像，適落於人目前之明視距離，則將目鏡略在鏡筒內縮進，即得。

§307. 望遠鏡之放大率。人目對望遠鏡所成之像之視角  $2\beta$ ，與人目對物體之視角  $2\alpha$  之比，為望遠鏡之放大率。以式表之，為

$$M = \frac{\beta}{\alpha}.$$

命  $F$  及  $f$  為物鏡與目鏡之焦距，則由圖 354，有  $\alpha = \frac{A'B'}{2F}$ ， $\beta = \frac{A'B'}{2f}$ ，因得

$$M = \frac{F}{f},$$

故望遠鏡之放大率，等於物鏡與目鏡之焦距之比。

§308. 望遠物鏡之要點。望遠鏡中之物鏡，為一會聚透鏡，

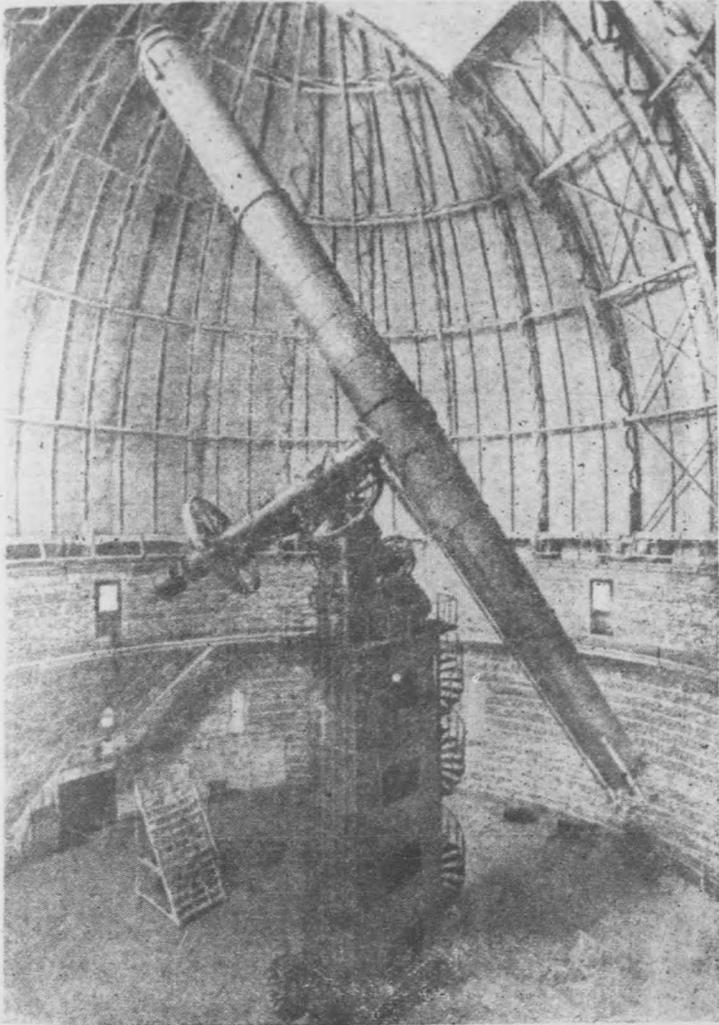


圖 355. 天文望遠鏡。

欲將遠處之物體，得一清晰之像，一須無球面像差 (§270)，二須無色差 (參閱習題六十第 5 題)。既得清晰之像矣，尚有下列應行注意之兩點：

(1) 像宜大。物鏡所成之像  $A'B' = 2\alpha F$ ，可見焦距愈長，成像愈大，爲此目的，物鏡須有一長焦距；而望遠鏡之放大率，亦即同時隨之增大，蓋其目鏡之焦距變化甚微，常在一、二〔厘米〕左右也。故倍數甚大之望遠鏡恆甚長 (圖 355)，甚有超過 20〔米〕者。

(2) 像宜明。像  $A'B'$  之亮度大，則眼中網膜上所成之像對於視覺神經之刺激強烈。然則，物鏡合何條件，方能使像之亮度增加？

設將物鏡之直徑  $d$  增加一倍 (圖 356)，則其面積增加四倍，於是像之亮度隨物鏡受光之面積而增強四倍，故曰，像之亮度正比於物鏡直徑之平方。

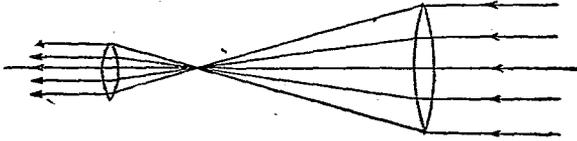


圖 356. 望遠鏡之聚集光線而增加亮度。

將焦距  $F$  增長一倍，則像  $A'B'$  之長度亦增加一倍，而其全面積增加四倍，因之  $A'B'$  之亮度減弱四倍。換言之，像之亮度，又反比例於  $F^2$ 。

總之，欲像明亮，物鏡之直徑須大，焦距須小。以式表之，像

之亮度，比例於 $\left(\frac{d}{F}\right)^2$ ，即物鏡孔徑之平方也。僅憑肉眼，在最佳之情形下，祇能見 5 等或 6 等以上之星，用最強之望遠鏡可窺見 18 等之星。美國巴羅瑪山 (Mt. Palomar) 天文臺所用最近製成之世界最大望遠鏡，直徑達 200 [吋]。我國南京紫金山天文臺，望遠鏡之直徑為 24 [吋]。

§309. 地面望遠鏡。由上述之望遠鏡中所見者恆為倒像，此在天文學中，對於天體觀測，並無妨礙，因有天文望遠鏡之名；但用以觀察地面上之物體，有時殊不便利。矯正倒像之弊，方法甚多，下列所舉，其最普通者也。

如圖 357 所示，於物鏡及目鏡之間，另加一個或數個會聚透鏡  $E$ 。此透鏡之功用，在將物鏡所成之倒像  $i_1 m_1$ ，再行倒立一次，

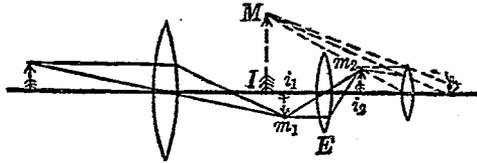


圖 357. 地面望遠鏡。

而成正立之實像  $i_2 m_2$ ，因名豎正透鏡 (inverting lens)。此直立之像  $i_2 m_2$ ，再為目鏡放大，成一正立放大之虛像  $IM$ ，而為吾人所見者。因加豎正透鏡，致其管身，常較同倍數之天文望遠鏡為長。

此種望遠鏡常用於鎗械之瞄準。普通之經緯儀與水平儀，亦

皆具有此種望遠鏡，管內裝一十字細線，與實像  $i_1m_2$  在同一平面，以資識別與測量之用。

§310. 雙筒望遠鏡。於物鏡及目鏡之間，裝入兩個全反射稜鏡，而成雙筒望遠鏡(prism binocular)。光線在兩個稜鏡

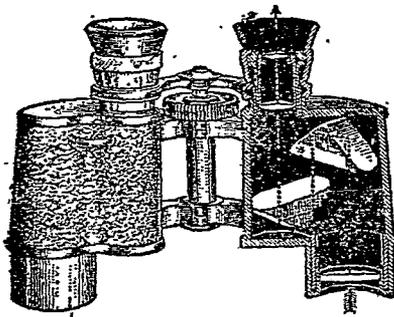


圖 358. 雙筒望遠鏡。

間往復通過；如圖 358 所示。此種裝置所能容之物鏡，其焦距較平常管長相同之望遠鏡約大 3 倍。故其放大率亦因之增加。再兩個稜鏡之全反射，能使倒像正立，無須另裝豎正透鏡。第一稜鏡之二次

反射，使像左右易位，第二稜鏡之二次反射，使像上下改正，因得見實物原來之位置。又以其有雙筒，兩目並用，一如肉眼直接觀察，而得立體感覺 (§ 298)。

軍隊用以觀察地形與敵情之雙筒望遠鏡，其放大率約為 6 至 15。

§311. 伽利略望遠鏡。望遠鏡之目鏡，若用凹透鏡，即可將物鏡所成之倒像，再行倒轉一次，而成直立放大之虛像，如圖 359 所示(參閱 § 289 之例)。物目兩鏡間之距離，等於兩者焦距之差。

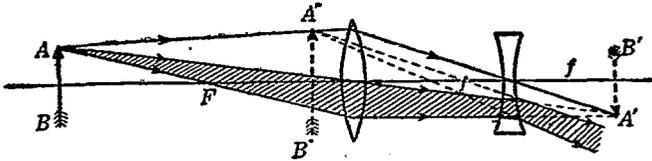


圖 359. 觀劇鏡。

伽利略(Galileo)應用此理,首造一望遠鏡,能放大約 30 倍,乃得使其完成若干極重要之發見。惟其成像不佳,殊難滿意,現除製成雙筒,用以觀劇外,無復他用矣。觀劇鏡(opera glass)之放大率,約為 2 至 4 倍。

§312. 潛望鏡。 有時窺察外界遠處,而不願暴露自身,如在戰壕或潛水艦中,則用潛望鏡(periscope)。於物鏡之上(圖 360),置一全反射稜鏡  $P_1$ ,使壕外或水面上沿水平而來之光線,得折入直立之潛望鏡管中;目鏡前之稜鏡  $P_2$ ,又將垂直之光線折成水平,再出目鏡,以免觀察者仰天而視之苦,同時將像變成正立。

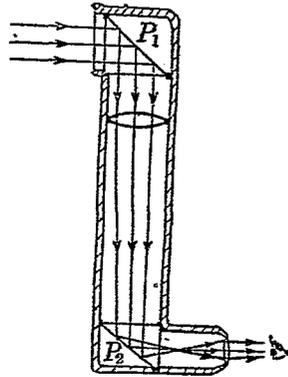


圖 360. 潛望鏡。

§313. 讀數望遠鏡。 觀測之物,既非甚遠,則物鏡所成之像,在其焦點之外。物之愈近者,其像離焦點亦愈多;故讀數望遠鏡物目兩鏡間之距離,恆可隨需

要而改變，即將目鏡在望遠鏡管中抽出或縮進些許。

### 習題五十八

- (1) 望遠鏡之目鏡所成之像，較鏡筒為大，吾人何以能見全像？
- (2) 若以物鏡作目鏡，倒看望遠鏡，結果如何？
- (3) 取凸透鏡二片，焦距各為 10 [厘米] 與 1.5 [厘米]，欲製成顯微鏡應如何配裝？欲製成望遠鏡，又應如何配裝？
- (4) 一望遠鏡由焦距 128 [厘米] 與 4 [厘米] 之兩凸透鏡組成，求其管身之長與放大率。
- (5) 雙筒望遠鏡所成之像，是正抑倒？試繪圖說明之。
- (6) 有望遠鏡，其物鏡之焦距為 24 [厘米]。調整其目鏡，使能明視距物鏡 2.1 [米] 處之物體後，移以觀察另一物體。為使第二物體明視起見，又不得不將目鏡移近物鏡 5 [毫米]，求第二物體與物鏡之距離。若以此望遠鏡觀察 2 [千米] 外之物體，再須將目鏡移近物鏡多少？

## 第五十九章

### 照相與映射

§314. 照相機。照相機爲一不漏光之盒(圖 361),前端有一會聚透鏡組,即俗所謂照相鏡頭,使外面之物體,可在後端之毛玻璃片上,成倒立之實像。盒側爲摺疊之軟壁,可伸可縮,毛玻璃片隨之進退,使不論遠近之景物皆可於毛玻璃片上,成清晰之像,是爲對光。

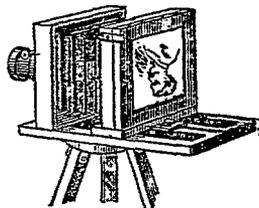


圖 361. 照相機。

§315. 照相。對光既畢,以一照相片,或膠製之軟片,代替毛玻璃片,照相片上塗有氯化銀或溴化銀等藥品,受光照射後,發生化學變化,其程度隨片上各點受光之強弱而異。既受光後,投入特製之藥液內,其受光部分變作黑色,濃淡隨所受光之強弱而定,是曰顯像(developing)。再投入另一種藥液內,將殘餘之感光藥品溶去,其已變黑者,仍留其上,後雖再受光照及,亦無變化發生,是曰定像(fixing)。如是而成之畫,各點明暗與所照景物恰相反,故曰底片(negative)。將底片放在塗有感光藥之照相紙上,曝露光中片刻,然後再同樣將紙經歷顯像,定像,即得明暗與原物一致之畫,是爲相片(photograph)。

§316: 照相鏡頭。照相鏡頭之種類頗多,通常由三片或四片透鏡組合而成。所成實像之亮度,與照相之快慢,一如望遠物鏡,繫乎孔徑之大小,即正比於 $\left(\frac{d}{f}\right)^2$ 。用同一之照相片,照同一之景物,孔徑大二倍者,照相之時間可以減短四倍。各種鏡頭所標之 $\frac{f}{16}$ ,  $\frac{f}{3.8}$ , ...等,即指鏡頭之直徑  $d$  而言。如  $\frac{f}{16}$  表示鏡頭之直徑為其焦距之十六分之一。以  $\frac{f}{3.8}$  照相,可比  $\frac{f}{16}$  快 16 倍多,自然前者較後者為好,價錢更高。

§317. 映射器。映射器(projecting lantern)亦稱幻燈,其主要部分為一照相鏡頭,實照相機之反用耳。在照相機係將遠處物體之縮小倒立實像,造成於照相片之上,照相片之位置,較透鏡之焦距略遠。在映射器則反是,其構造如圖 362 所示,

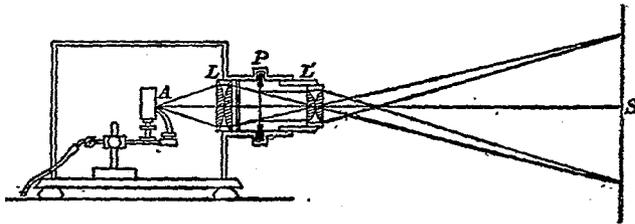


圖 362. 映射器。

倒立之實物  $P$  與鏡頭  $L'$  間之距離,較鏡頭之焦距略遠,即得放大之正像,生於遠處白幕  $S$  上。

映射器中之實物,通常用透明畫片,以極強烈之光  $A$  照之,在

幕上呈現之像，恆大於畫片若干倍，其放大率即為  $L'S/PL'$ 。  
 光源  $A$  與畫片  $P$  之間，通常更用一套會聚透鏡  $L$ ，將多量之光集中於  $P$  之上，俾其倍加明亮，此  $L$  稱為聚光器 (condenser)。聚光器祇是聚光而不成像，故從光學言，遠不若鏡頭  $L'$  之精緻。

§318. 電影。對於運動中之物體，用影片照相機，每隔  $\frac{1}{16}$  [秒]，為之照一相片。此等相片，連成影片，裝入放映器中，映射幕上，現出其像，仍以同一速度，即每隔  $\frac{1}{16}$  [秒]，更換一次；則在吾人網膜上造成之像，以視覺暫留關係，前者未去，後者已來，遂不覺其間斷，宛如真實物體之活動，無稍差異。至於“慢動作”之影片，攝影時之速度 (即每 [秒] 次數) 甚高，放映時則依正常之速度。

### 習 題 五 十 九

- (1) 攝影時遇陰天則將鏡頭內之光闌 (diaphragm) 開得大些，照相時間久些；晴天太陽光下則恰相反，何故？
- (2) 照相機所成之像，何以較小孔成像 (§258) 為明亮而清晰？
- (3) 試述眼與照相機異同之點。
- (4) 一小鏡箱，鏡頭與照相片之距離為固定者，為何三、四 [米] 外之物體，皆可將其攝影，而無須加以調整？
- (5) 攝影者由下列事實，得知樹之高度：彼知其所用鏡頭之焦距為 12 [吋]，照相片距鏡頭 12.2 [吋]，底片上樹像之高 6 [吋]。問樹高若干？
- (6) 人高 5 [呎]，立於照相機前 10 [呎] 處欲拍全身照片，則照相片距

鏡頭應為  $1\frac{1}{2}$  [呎]。若此人在 15 [呎] 遠處，片與鏡頭間之距離應如何調節，伸長抑縮短？須用多長之底片？

(7) 用  $1/25$  [秒] 照相恰好。若將光闌縮小到原來直徑的  $\frac{2}{3}$ ，問用須多少時間？

(8) 若電影軟片之闊為 1 [吋]，幕上之像闊 10 [呎]，問片上與幕上照度之比若何？

(9) 映畫器所生之像，如果太小，應如何調整，使其擴大？何故？

(10) 映畫器鏡頭之焦距為 28 [厘米]，銀幕距鏡頭 8.4 [米]，問畫片距鏡頭多遠？

(11) 活動電影表演連續之動作，其應用之原理若何？

(12) 在某底片上印像，用 2 [米] 遠 60 [燭光] 之燈光，適宜之曝光時間為 32 [秒]。若用 3 [米] 遠 25 [燭光] 之燈光，需時若干？

## 第六十章

# 光 之 色 散

§319. 光之色散。· 經一狹縫，導太陽光線入於暗室中，使之通過稜鏡時，則光線折射後，在白屏上散布，成一美麗有色光帶(圖 363)。帶中各色之鄰接處，雖無明顯界限，但其主要各

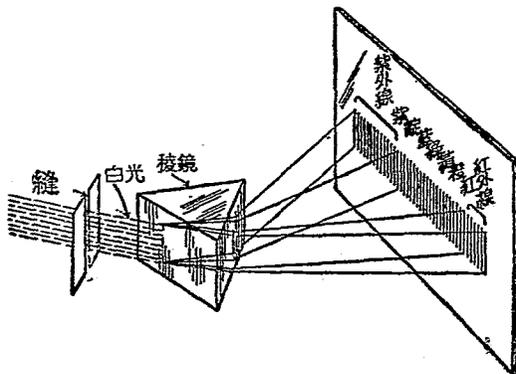


圖 363. 太陽光之色散。

色之次序，必為紅(red)，橙(orange)，黃(yellow)，綠(green)，藍(blue)，靛(indigo)，紫(violet)等七色，無有錯亂。此種現象，稱為光之色散(dispersion of light)。由色散而成一有次序之各色光帶，稱為光譜(spectrum)。

首先作光之色散實驗者為牛頓氏。各色之光，並非由稜鏡而

發生。牛頓取另一稜鏡置於光譜之紫色或紅色部分(圖 364), 則見光線再起折射, 但紫者仍紫, 或紅者仍紅, 其色不再變化。

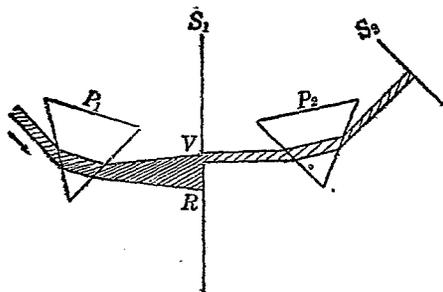


圖 364.

此足以證明各色之光, 非稜鏡所能產生, 而為太陽白光本身之所原有, 稜鏡僅將其分解而已。氏又用一相似稜鏡倒置, 如圖 365 情形, 將第一稜鏡分解而成之各色光, 重行聚合, 終成為白光。故太陽白光實為各種色光之混合。

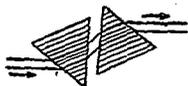


圖 365.

§320. 稜鏡何以能將光分解。上述實驗, 非常重要, 因不僅可知光之色散事實, 且可知其發生之原因。由太陽射出之各種色光, 在空中雖有同樣之速度, 但在玻璃, 水或其他透明物體內, 各色光之速度不同, 紫色光較紅者為慢。又折射率視光之速度而定 (§ 276), 因之紫色光之折射率較紅者為大, 故各色之光在透明物體內折射而偏轉之量不同, 由此可解釋光被稜鏡分解而成光譜之理。

§321. 光之波長。 各色之光，波長不同，有如下列：

紫色	0.42 [微米]	黃色	0.58 [微米]
藍色	0.46 [微米]	紅色	0.62 [微米]
綠色	0.53 [微米]		

故光之波長甚短，約略言之，僅半[微米](micron)耳，即萬分之五[毫米] ( $1 [微米] = \frac{1}{1000} [毫米]$ )。

§322. 分光鏡。 在 § 319 所述之裝置中，稜鏡所生之光譜，各色不免有重疊者，為免此弊，乃有分光鏡(spectroscope) 之出現。在分光鏡(圖 366)中，有四主要部分：(1) 平行光管(collimator)，為一端有狹縫  $S$ ，他端有會聚透鏡之管，管之長適等於透鏡之焦距，如是由狹縫射入，經透鏡而出管外之光線，即成

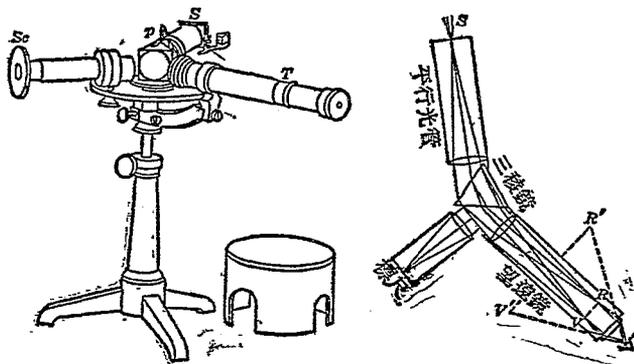


圖 366. 分光鏡。

平行光束。(2) 稜鏡  $P$ ，通常等邊，為矽石玻璃製成，以其色散較冕牌玻璃為大。平行光束經三稜鏡折射而被分解，各色之光

將各依其自身之方向，從三稜鏡出射，而成若干之平行光束。

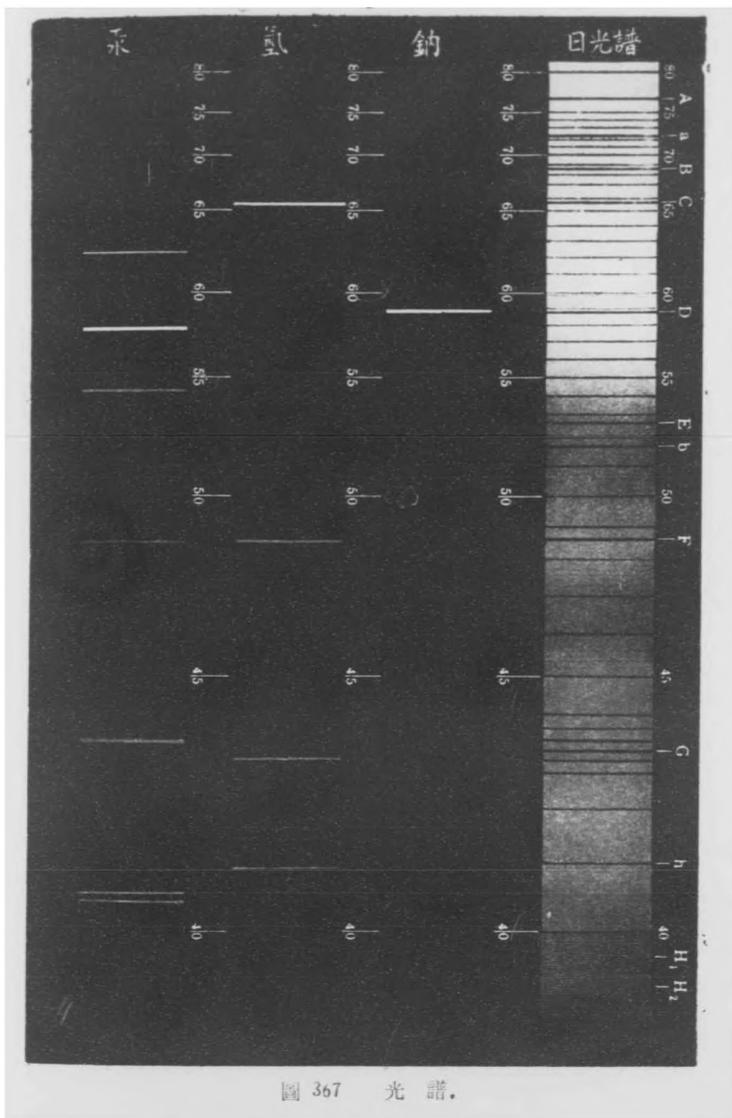
(3) 望遠鏡  $T$ ，將此等方向不同之平行光束，會聚於其焦面上，而得狹縫之若干鮮明之像，即成光譜，可由目鏡觀察，或攝影於照相片上。使用時，將平行光管旋緊固定，望遠鏡可繞垂直之軸旋轉，在刻度圓盤上測定各色光之偏向角。

(4) 標度管 (scale tube)  $S_0$ ，管內近外端處，置一透明之標尺，他端有一會聚透鏡。使照明標尺之光線，可由稜鏡向望遠鏡之一側面反射，以射入望遠鏡中，於是吾人在望遠鏡中，除光譜外，同時可見標尺之像，用以比較光譜各部分之位置。

**§323. 分光鏡之應用。** 此儀器之發明與改良，實為使近代科學進步最有價值之工具之一。研究各種光譜，使化學家檢查微量或稀有元素時，得一比較精良天平更優之工具。此儀器使天文學家不僅能研究太陽之組成，並得研究太陽及星球之情況與運動；物理學家則用以研究原子及分子之結構。欲知此項儀器何以能適用於許多目的，須先明光譜之種類。

**§324. 光譜之種類。** 光譜之形式，依光源而異。例如太陽，白熱鎢絲之電燈，或普通含有許多白熱固態之碳質點之煤氣燈，即能發出各種色光，所見之光譜中，含有由紫至紅之各種波長，此等萬紫千紅，各色全備，而無間斷之光譜，謂之連續光譜 (continuous spectrum)。

若以少許食鹽(氯化鈉)置於本生燈之藍色火燄中，則因有鈉



化合物存在，立變為黃橙色。此種火燄若用分光鏡察之，則見有二狹黃色線，甚為接近，有如一線（圖 367）。同樣，以鋰之化合物，則見二條紅色線。若用鉀化合物，則見兩條與鉀地位不同之紅色線外，尚有一條紫色線。此種不能發出全部之色，但在紫，藍，綠，黃及紅各部分發生若干明亮之線，謂之明線光譜 (bright line spectrum)。許多物質，常發生一條或多條明線，其地位各有一定，經精細測量之指示，知此種明線，各有一定之波長。如鈉之二條黃色線，波長各為 0.5896 及 0.5890 [微米]。其他元素，皆不能有此同樣波長之線，因有特性譜線之稱。

若在發生連續光譜之光束中，插入一鈷藍玻璃，則所見之光譜中無橙，黃，綠三色；若光束中置一綠玻璃，則祇見綠光。凡白光經過有色物體，其中有若干部分即被吸收者，所成之光譜，謂之吸收光譜 (absorption spectrum)。若吸收物質為固體或液體時，分光鏡內生暗色之吸收帶，但由氣體或蒸氣所起之吸收作用，則現甚狹之帶或線。例如將電燈之白光送入分光鏡，則見一連續光譜。但於電燈與分光鏡之間，插入一本生燈以燒熱浸漬食鹽水之石棉，使電燈光經過鈉之蒸氣，即生暗色之線，位於鈉之明線處。由此可見物體之吸收譜線，與其所發生者相同。此種結果，對於太陽光譜之解釋，甚為重要。

§325. 太陽光譜。太陽甚熱，所生者為連續光譜（圖 367 甲），但其中有甚多之暗線，即世所稱夫牢因和斐線 (Fraunho-

fer's lines)也。克希荷夫 (Kirchhoff)氏斷定其爲太陽周圍之蒸氣吸收所成，由此等暗線之波長，推知太陽之蒸氣中，必有鈉，鐵，鎂，銅，鋅，及鎳等存在。經詳細之研究，知地球上各種元素之明線光譜，與夫牢因和斐線之位置相當，故知地球上之物質，太陽蒸氣中幾皆有之，以地球爲自太陽分裂而來，不爲無據。在克氏之時，少數之夫牢因和斐線，與地球上已知元素之譜線，皆不符合，因而發見新元素，氦卽其一也。

克氏對於夫牢因和斐線之解釋，實一創舉，能使吾人洞察向所視爲不可捉摸之境界，其足激發吾人之欽佩與鼓勵人類之理想爲何如者！

§326. 紫外線與紅外線。人目所能感覺之光波，其波長限於0.4〔微米〕至0.8〔微米〕之間，較長或較短之光波，皆非人目所能見，但非宇宙間卽無此等光線也。

於太陽光譜紅端之外，置一靈敏之吸熱儀器（如溫度計，輻射計等），可知太陽不但發出對於人目能起視覺之光波，且發出人目所不能見，而有強熱效應之較長光波，是稱爲紅外線（infra-red rays）。此種紅外線，頗爲重要，因現已發明對於此種長波有特殊感應之照相片，而得在黑暗中攝影。卽在雨天，照相機裝以此種紅外線之照相片，亦可從飛機上透過雲霧，而攝取地面上物體之像。

攝取太陽光譜之時，又知太陽在紫端之外，發出不能目見，但能作用於尋常照相片之短波光線，是稱爲紫外線（ultra-violet

rays)。紫外線之化學作用特強，對於生物體內所起之變化，似有重大關係。人造紫外線，常用來消毒，醫生用以治病，但極短之紫外光波，則不能透過玻璃。

## 習 題 六 十

- (1) 光之折射與分散，有何不同？
- (2) 白光透過稜鏡時，何色之光偏向最大？何色偏向最小？
- (3) 白光垂直進入玻璃片時，何色之光最先通過？
- (4) 由上二題之答案，如何將“冕牌玻璃之折射率為 1.52”一語之敘述加以修改？
- (5) 雙凸透鏡之折射率，於紅光為 1.624，於紫光為 1.718，其兩頰面之曲率半徑各為 36.08 [厘米] 及 40.84 [厘米]。求其對於紅光及紫光之焦距。如是，此透鏡對於白光之焦點，不復成爲一點，此種情形，稱爲‘色像差’(chromatic aberration)。
- (6) 光之速度為  $3 \times 10^{10}$  [厘米/秒]，紅光之波長為 0.62 [微米]，求紅光之頻率，即每[秒]鐘內進入人目之波數。
- (7) 在 1 [毫米]之內，約有多少之藍色光波？
- (8) 洗相片暗室內，何故用紅色之燈？
- (9) 用石棉浸鈉鹽，或鉀鹽後，放在本生燈中燒之，你能分別何者爲鈉，何者爲鉀否？
- (10) 將電燈光通過稜鏡，得何種光譜？
- (11) 元宵煙火，何以發出紅綠各種好看的光？

## 第六十一章

### 色

§327. 色。色之差別，在物理學上言之，係由於光波波長之不同。就一連續光譜而論，每一譜線之地位，即代表一種特別之色，萬紫千紅，正如一直線上之有無窮數之點，幸人目之分辨能力有限，故俗以紫，靛，藍，綠，黃，橙，紅七色概括之；紅指波長在 0.63 至 0.78 [微米] 間之光，復分淺紅，大紅，深紅等；然藍與綠，綠與黃之間，又皆無明確之界限，要皆粗淺之論也。

§328. 物體之色。吾人觀看物體，或由反光，或藉透光。所見物體之色，視(1)照射於物體之光，及(2)物體對於光之反射或透射性能而定。物體對於入射之太陽白光中之各色之光，均以同一之比例射回或讓其透過者，呈現白色；全部吸收無餘者，則為黑色。

在日間所見白色之紙，因其反射各種波長之光之故，而日間所見之紅布，則因其祇能反射長波紅色之光之故。若白紙上祇受紅光照射，則呈紅色；若紅布上所受之光波中無紅色者，則呈暗黑色。故不透明體所呈之色，視其反射光之波長而定。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；蓋人工燈光光譜中之短波區域，恆

較太陽光譜中之對應區域爲弱也。燈光之下，難於選擇有色之衣料；舞臺上燈光一改，景物全非；此等事實固夫人而知之矣。

將一紅玻璃放在白光之光路中，則透過之光成爲紅色，此表明除紅色之光波外，其餘皆被吸收。同樣，綠玻璃能使綠色光通過，但光譜中之其他部分，則均被吸收，若將紅綠玻璃同時插入光路中，則光譜之各色，幾全消滅。故知透明體之色，依通過此物體之光之波長而定：

§329. 色光之混和。 若以吾人日常所見之色，除白光外，皆有一定之波長，則事又非盡然矣。如圖 328，圓板上之各扇形，塗以七色，並依太陽光譜中各色之比例而定扇形之大小。將此圓板急轉，則由視覺暫留，前一扇形在網膜上引起之色感未退，後一扇形已接踵而來，彼此相重，結果與色之混合無異，成爲白色。若就分光鏡而分析之，則未必爲一連續無間之光譜也。

再如減少扇形之數目，以至於 2 或 3，並變更扇形上所塗之色，結果當然隨之而異，有如下列：

紅 + 綠 = 黃，  
 綠 + 藍 = 孔雀藍，  
 藍 + 紅 = 紫，  
 紅 + 綠 + 紫 = 白。

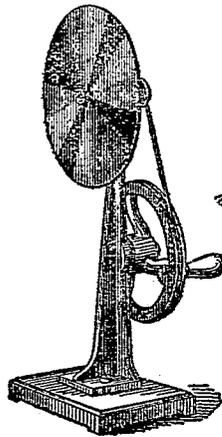


圖 368. 牛頓色板。

有可注意者，僅用紅，綠，紫三色混和，即可成白色是也。又如將此三色之混合比例變更，可得日常所見之一切色光，換言之，任何色光皆可由此三色配合而成，因而名紅，綠，紫三色為原色 (primary colors)。舞臺兩側用不同之燈光，同時照射於優伶之身，即係應用色光之混和。

又白色不限於由三原色合成，例如由黃與藍，或紫與綠，均可混成白色，觀上列結果而自明。如是互相混合，可成白光之兩色，曰互補色 (complementary color)。二互補色並列時，每可引起色彩特見和諧之感覺；此事在繪畫中頗屬重要。例如文契 (Leonardo da Vinci) 所繪之名畫，巖石下聖母 Madonna 像所御外套上之藍色與黃色。

**§330. 顏色之混合。** 各種顏料或染料之互相混合，其性質與色光之混和不同。例如黃光與藍光混和，應生白色，而黃色顏料與藍色顏料混合，則成綠色。此因黃色顏料能吸收或消除白光中除橙，黃，綠三色外之色，藍色顏料則能消除藍，綠，紫三色以外之其餘諸色，故此二色顏料混合後，所能共同反射者，唯綠耳，即現綠色。換言之，混合顏料之色，為其各成分所同不吸收之色。由此理，如將紅，黃，藍三色顏料適當混合，則可配成種種之色彩，三色版即為應用此理，重合印刷此三種顏色而成。

**三色版之製法。** 三色版 (three color printing) 係用照相機，分析紅，黃，藍三原色，製成三種銅版，以次印刷。

其法為將欲製版之原畫，先使其透過紫綠色之濾光片，以攝取

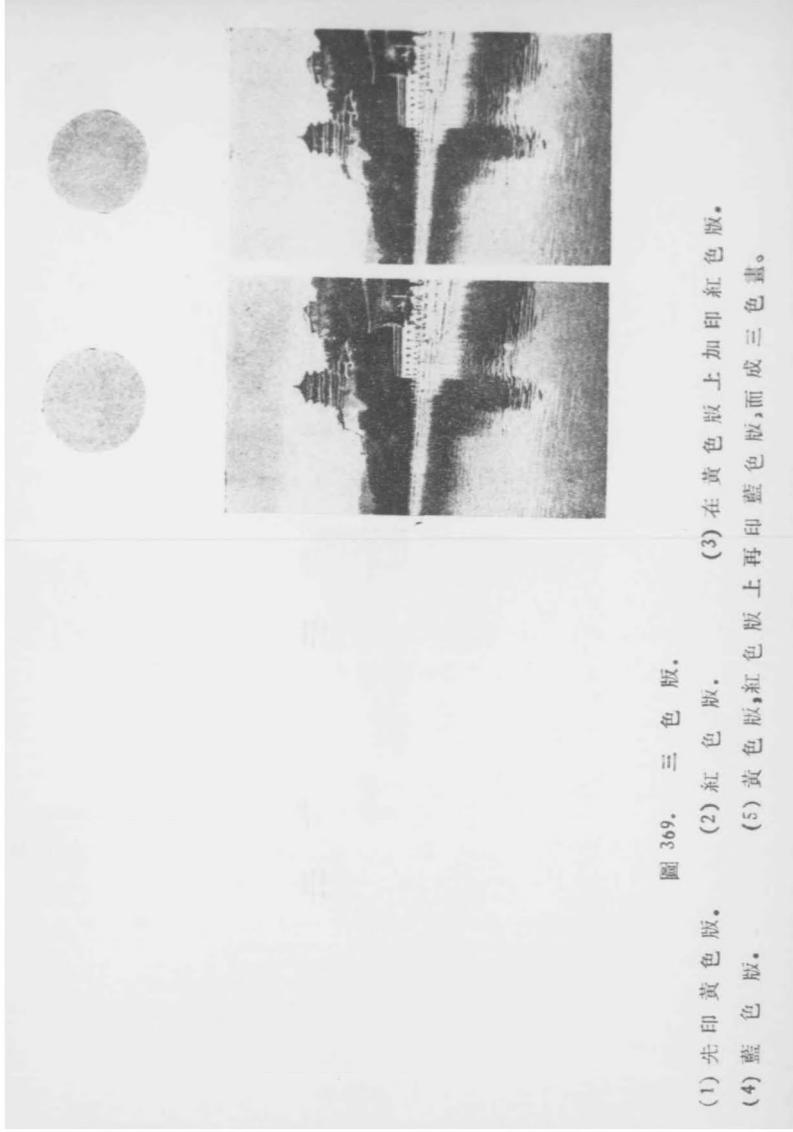


圖 369. 三色版.

(1) 先印黃色版.

(2) 紅色版.

(3) 在黃色版上加印紅色版.

(4) 藍色版.

(5) 黃色版, 紅色版上再印藍色版, 而成三色畫.

其影像，製成第一張陰畫；次又使此原畫，再透過黃綠色之濾光片，攝成第二張陰畫；並又使其透過紅黃色之濾光片，攝成第三張陰畫。以第一張陰畫為基礎，製出黃色版一塊，以第二張陰畫為基礎，製成紅色版，又以第三張陰畫為基礎，製成藍色版。凡在陰畫上不感光的部分，即為版之着色部分。例如原畫上紅色部分，在黃色版則略着黃色，紅色版則着紅色，藍色版則不着色，若白色部分，則任何色版，都現白色；黑色部分，則任何色版，即着何色，如是三色相重，即現黑色：因黃色印墨最不透明，所以於印刷時先印黃色版，次印紅色版，再次印藍色版，即成三色之畫（圖 369）。

§331. 有色照相與電影。 攝取有色照片，所用之照相機及攝法，與攝普通之黑白片相同，自然當在強烈之日光下，用極快之鏡頭行之，所不同者為特製之照相片耳。 有色照相片，可用各種方法製造，茲述其一種之原理如下：

以澱粉或樹膠細粒，染成紅，綠，藍色而混合之，塗於感光片之背面，使其分布均勻，且無重疊壓榨等事。 攝影時，以澱粉面向鏡頭，藉作色簾，以過濾由鏡頭而進入之光線。 設由物體發來之某種色光，經過鏡頭後達於澱粉薄層時，其與光色成互補色之粒子，即將此種色光吸收，而互補色以外之細粒，則讓其通過。（例如紅光射於澱粉層上，祇有染紅的粒子部分讓紅通過；綠色藍色粒子，與紅色為互補色，即能吸收紅光，而不讓其通過。）光線經過澱粉層過濾後，進至於照相片面，作用於溴化銀上，其

受有光之作用之溴化銀，由顯像作用，還原成爲銀之細粒而呈黑色。次用高錳酸鉀之酸性溶液，將此還原後之銀粒溶解而除去之。再使殘餘之溴化銀感光後，顯光使之還原而成爲黑色之銀粒。經過此等手續後，彼曾經透過色光之澱粉細粒，即成透明，而其他澱粉細粒，則爲照片之另一面的黑色銀粒所遮掩，而不透明。故透視此種底片，則該種色光之原色，即呈現於眼前。因各種色光均能多少透過二種或三種澱粉細粒，而有各種混合比例之不同，通過後之細粒，皆成透明，故其色調能融和而將原色顯出。

§332, 色覺。吾人言色之作用，並不簡單，科學家中仍有甚多之討論。由實驗示知，眼對於黃綠色之感覺，最爲靈敏。眼能見色之解釋，有多種之理論。依照楊午(Young)學說，眼有三種不同之視神經，雖對紅，綠，藍各原色，都能感應，但每種各對此三原色之一反應特強。此說可用以解釋色盲之若干事實。色盲似由一種或數種視神經缺乏或不完全所致。例如，設對於綠色反應特強之一種視神經，不能正常工作，則見白色之光，似爲綠色之餘色，即紅色，而綠色光則反認爲黑色。故色盲之人，在有紅綠信號之公路上駕駛汽車，頗爲危險。

### 習題六十一

- (1) 在紅燈光下，(a)白花，(b)綠葉，(c)紅果，各呈何色？
- (2) 用紅色光照時，能見白紙上所書之紅字否？黑紙上所寫之紅字，

則又如何？試解釋之。

- (3) 戴藍眼鏡看雪，亦作藍色，何故？
- (4) 試將藍色粉筆在黑板上畫一畫，然後將黃色粉筆於藍色上再畫，再用手指揩去，在手指上可得亮綠色，試解釋之。問其中有无綠筆粉？
- (5) 照相機所用之各種濾光片(filters)，用意何在？

## 第六十二章

### 大氣之光的現象

§333. 大氣之折射。 圍繞於地球之大氣，自上而下，密度遞增，因而折射率亦愈低愈大。 所謂愈低愈大者，乃自 1 增至 1.000029 耳。 惟大氣層甚厚，即此微小之變化，已足引起顯著之現象。

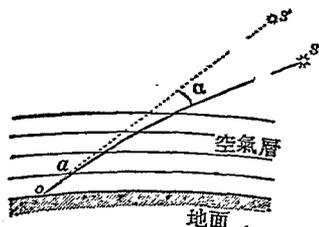


圖 370. 大氣之折射。

如圖 370 所示，由天體  $S$  而來之光線，進入於大氣中後，在各氣層順次逐漸折向法線，故吾人在地面上所見天體之位置  $S'$ ，較其實在之位置  $S$  為高，高一  $\alpha$  之角度。位於天頂之天體，其  $\alpha = 0$ ；天體愈近地平線時，其  $\alpha$  之值愈大；當天體正在地平線時，其  $\alpha = 30'$ 。故日出時太陽雖尚未升至地平線上，及日沒後太陽雖已降至地平線下，吾人仍能暫時望見。

§334. 海市蜃樓。 天氣溫和，太氣靜穩時，每見海面上有島嶼，船舶等倒映於空中，此種現象，謂之海市蜃樓。其成因由於接近海面之空氣層中，折射率隨高度變化，愈上而愈小。如圖 371 所示，由船舶發射於上方之光線，因折射結果，初則逐漸

與法線離遠而向上，終至成全反射情形，再折而向下，以進入人目，因在空中見成倒像。

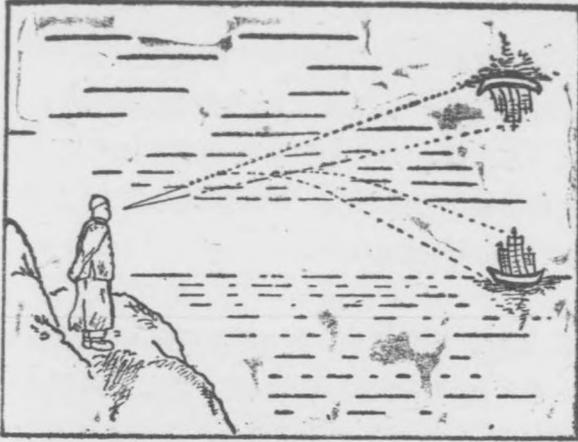


圖 371.

又熱帶地方之沙漠中，亦常有如圖 372 所示，宛如映於水面之倒影出現，以為湖水在望，可以解渴矣。其成因為接近於地面

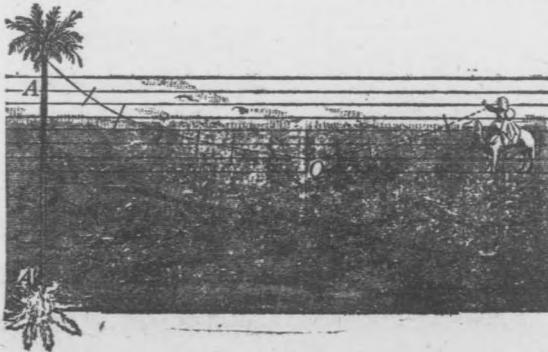


圖 372.

之空氣，受劇熱作用，減小其密度，隨之愈低而折射率愈小，故由樹梢發出進入於下方之光線，折射復折射，遂致如圖所示，行全反射而達於人目，因成倒像。

隔炭火而觀看物體時，常覺物體呈動搖之象。其原因由於受熱而異其密度之空氣層，亂雜上升，使光線在其中折射，而又隨時改變其方向之故。秋夜納涼，常見星光閃爍不定者，亦因大氣上層之氣流變化甚烈，空氣之分布紛亂靡定，致光線進行之方向，因折射而時行變更之故。

§335. 虹霓。雨初霽時，空中浮游無數水滴，受日光照及，太陽又不甚高，祇須背太陽，每見虹霓。若注意觀察，即見其同時有兩條出現，一濃一淡，濃者曰虹(primary rainbow)，淡者曰霓(secondary rainbow)。虹之仰角約為 41 度，霓之仰角約為 52 度。虹為內紫外紅，霓則與之相反。

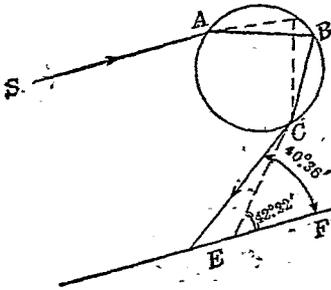


圖 373. 日光在水滴中一度反射。

如圖 373，SA 表由太陽而來之光線，遇水滴 ABC，在滴內當受反射，而出入水滴，又須各受折射。光線在滴內，亦可作兩次反射，如圖 374 所示之情形。光線折射而入水滴，輒呈色散現象 (§ 319)，及其由水滴折射而出，色散益甚。圖中

實線表紫色光之路徑，虛線表紅色光之路徑，偏向程度紫色光較

紅色光爲大。此僅就水滴面上之一點如  $A$  而言也。太陽光線雖爲平行，入射於水滴有一定方向，但水滴爲一球面，在其上各點之入射角不同，因而

自水滴射出之光線，通常多行發散，惟有一小部分近乎平行，方爲遠處之人目所見。圖中  $E$  表觀察者之眼，直線  $EF$  與太陽光線  $SA$  平行。此近乎

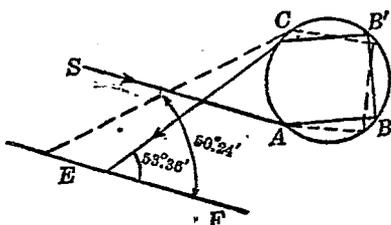


圖 374. 日光在水滴中兩次反射。

平行之一小部分，在水滴中曾作一度反射者，與  $EF$  所成之角  $CEF$ ，就紫光言爲  $40^{\circ}36'$ ，就紅光言爲  $42^{\circ}22'$ ；在水滴內連續兩次反射者，角  $CEF$  就紫光言爲  $53^{\circ}36'$ ，就紅光言爲  $50^{\circ}24'$ 。

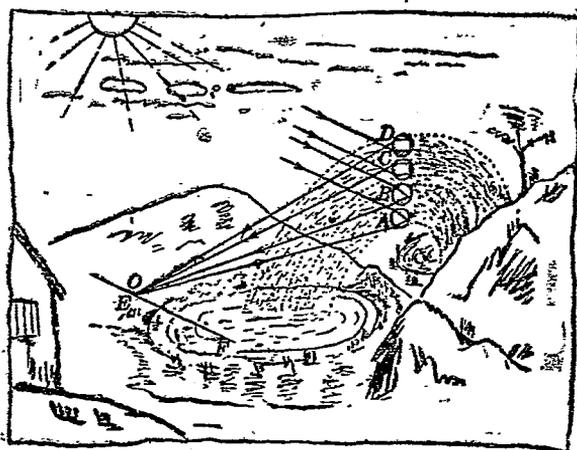


圖 375. 虹霓之成因。

實際上，空中有無數水滴，如圖 375 所示之  $A, B, C, D$ ，等。如角  $AEF$  恰等於  $40^{\circ}36'$ ，則在  $EA$  方向上水滴，可將紫色光反射進入眼中，如角  $BEF$  恰等於  $42^{\circ}22'$ ，則在  $EB$  方向上水滴，可將紅色光反射進入眼中。此兩者間之各水滴，則將其他各色之光反射入目。故從  $E$  向  $A$  及  $B$  望去，得見各色排列成光譜形狀，上紅而下紫，此即虹之一段。同理，由  $C, D$  等水滴，成爲霓之一段，上紫而下紅。凡光線每經一次反射，其強度即多少隨之減小，故霓之色光強度，較虹爲弱。

太陽距吾人甚遠，直線  $FE$  可看成通過觀察者之眼引至太陽之直線。以  $EF$  爲軸，則位於迴轉  $OA, OB, OC, OD$  等所生圓錐面上之水滴，均能將光線送入  $E$  處觀察者之眼中，此虹霓之所以皆成半圓弧，其視半徑各爲  $41$  度與  $52$  度也。

## 習題六十二

- (1) 朝日映於露珠，能否現出虹之色彩，宜如何觀察之？
- (2) 虹現於晨，當在何方？薄暮又在何方？
- (3) 吾人見太陽西沒時，實際上，已於幾〔分〕鐘前，落到地平線下？

## 第六十三章

### 光 之 干 涉

§336. 波之干涉。波長及振幅均同之兩波，同時傳達於介質中之一點。如兩波同相，則合成結果，可使振動加強；如兩波相反，則合成結果，可因抵消而使振動為零。波雖前進不已，而此等合成結果等於零之各點，恆靜止不動。凡如此類，由兩波相遇而使一點靜止或加強其運動之現象，曰干涉(interference)。試以水波說明之。

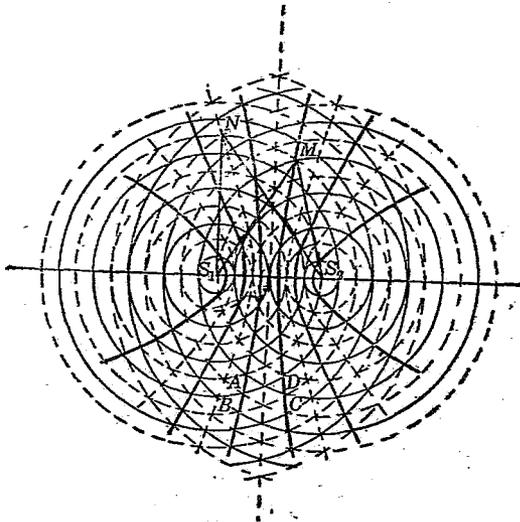


圖 376. 水波之干涉。

於靜止水面上之兩點  $S_1$  及  $S_2$ ，同時且每隔  $T$  [秒] 各投一小石，石之大小相等，則水波不斷由  $S_1$  及  $S_2$  發出。如用實線表波峯，虛線表波谷，其情形有如圖 376 所示。谷與谷相合之點如  $A$  等，峯與峯相合之點如  $B$  等，振動同屬增強。至於  $C$  及  $D$  等，則為峯谷相合之點，寂然不動。由此歷  $T/2$  [秒] 時， $A$  成為兩峯相合，而  $B$  則成為兩谷相合之點， $C, D$  依然為峯谷相合處。將此等寂然不動之點聯結而得節線，如圖中實線所示；與此等相對，如  $A, B$  等點振動加強之處，聯結而得腹線，如圖中虛線所示。此等節線與腹線，即吾人所見水面波紋也。

就任意一節線上之一點  $M$  而論，其與振源  $S_1$  及  $S_2$  距離之差，等於半波長，或半波長之奇數倍，即

$$|MS_1 - MS_2| = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

至任意一腹線上之點  $N$ ，與  $S_1$  及  $S_2$  距離之差，或等於零，或等於波長之整數倍，即

$$|NS_1 - NS_2| = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

數波相處，輒起干涉。干涉乃為波動之特徵。音為一種波動，故兩音相遇，每起干涉現象，致音忽強忽弱，沈鬱不定 (§§ 244-245)。吾人之所以認光為一種波動者，以其亦能起干涉現象也。光與光合，有時不加強，反而互相抵消。光之波動與音之波動，自然不必盡同。

§337. 光之干涉——楊午實驗。於屏上鑿兩平行狹縫  $S_1$

及  $S_2$ ，相距甚近(圖 377)，在屏後  $S_1$  與  $S_2$  對稱處，置極細光源  $S$ ，則光線通過  $S_1$  及  $S_2$  而照耀於屏之前方。就白幕  $E$  上之一點  $M$  而言，將見有光自  $S_1$  而來，同時有光自  $S_2$  而來，但若  $MS_1$  與  $MS_2$  之差，適等於光之半波長，則兩光相消， $M$  成爲暗點，反不若單有  $S_1$ ，或單有  $S_2$  時之明亮也。又若  $NS_1$  與  $NS_2$  之差，適等於光之波長，則兩光相助， $N$  點倍加明亮，約四倍於單有  $S_1$  或  $S_2$  時也。於是在白幕上可見明暗相間之條紋，此即楊午氏光之干涉實驗 (Young's experiment) 也。

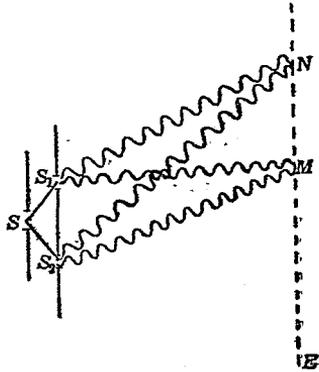


圖 377. 楊午實驗。

若遮蓋  $S_1$  及  $S_2$  兩狹縫之一，則光之干涉條紋，立即消滅，幕上各點呈均勻之亮度。設此時單狹縫在幕上各點所生之亮度爲 1，則兩狹縫所生之亮度，似應爲 2。其實不然。各點之亮度不同，暗者爲 0，明者爲 4，固無悖於不生不滅之理也。

§338. 光之波長測定。在上述楊午實驗中，設  $S_1$  與  $S_2$  間之距離  $a$  爲 2 [毫米]，白幕與  $S_1$  及  $S_2$  之距離  $d$  爲 1.8 [米]，在白幕上測得自中央明條至其上之第五明條之距離，爲 2.2 [毫米]。此種結果，有何意義否？

曰：有，且極重要。命  $O$  爲中央明條所在之處， $N_5$  爲第五明條所在之處(圖 378)，則

$$N_5S_2 - N_5S_1 = S_2N' = 5\lambda;$$

又命  $A$  爲  $S_1S_2$  之中點，則因  $\angle S_2S_1N'$  與  $\angle N_5AO$  可視作相等，有

$$\frac{S_2N'}{a} = \frac{ON_5}{d}.$$

由上兩式，並以  $a$ 、 $d$  及  $ON_5$  之值代入，得光之波長

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{a \times ON_5}{5d} = \frac{2 \times 2.2}{5 \times 1800} = 0.0005 \text{ [毫米]} \\ &= 0.5 \text{ [微米]} \end{aligned}$$

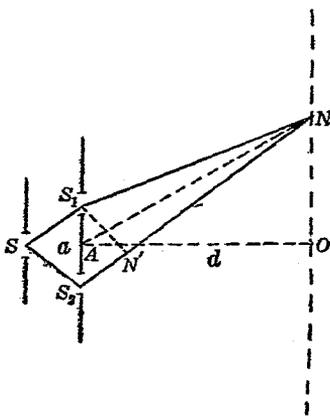


圖 378.

故由光之干涉實驗，不但可斷言光爲波動，且可從而測定其極小之波長。光波之波長，以今日之實驗技術且可測到〔微米〕小數點下 6 位以至 8 位。

光色之不同，由於波長之有異。在本實驗中，白幕上所見之明條，除中央之一條外（何故？），各條皆帶色彩，藍色在靠中央之一邊，紅色在向另一邊，

是以知紅色之波長，大於藍色之波長也。

§339. 薄膜之色。白光射於透明薄膜，如肥皂液泡或浮在水面之油層上，輒現彩色，此由薄膜上面反射之光與由其底面反

射之光，互相干涉之結果。光入薄膜，由其底面反射再升而出者，較之直接由薄膜上面反射而來者，所多走之距離，即等於薄膜厚度之 2 倍。此距離適等於光之半波長之奇數倍或偶數倍時，則上述兩光相助加明，或相消成暗。同一距離，為某色光之半波長之奇數倍，而同時又為另一色光之半波長之偶數倍，則結果如何？曰：呈現彩色是也。白色之太陽光，由連續的不同波長之光組成。紅光在薄膜某厚度時干涉而相消，而綠光則在薄膜另一厚度時干涉而相消。在紅光干涉相消之處，殘留餘色，即藍綠色。又綠光干涉相消之處，則生綠色之餘色，即紅黃色。故薄膜之色，隨其厚薄而異。同一薄膜呈現各種不同之色，即因其各處厚薄之有別。吾人常觀察此種之色，以估計薄膜之厚度。膜之現色者，其厚常在  $4$ 〔微米〕之下。

剝落之雲母薄層，及厚玻璃龜裂處之空氣層等，亦常起光之干涉現象。又加熱於研磨後之金屬面時，亦常現色彩者，即因金屬面上由加熱而生成氧化物之薄層故也。

### 習 題 六 十 三

- (1) 在楊午實驗中，若  $S_1$  與  $S_2$  兩狹縫間之距離為  $1$ 〔厘米〕，問在白幕上能現明晰之干涉條紋否？何故？
- (2) 一片窗玻璃，何以不能如肥皂泡之現色彩？
- (3) 用單色光如鈉燄者做光之干涉實驗，則干涉條紋是否呈現色彩？

## 第六十四章

### 光之偏極化與雙折射

§340. 光波與聲波之比較。已知光波能通過真空，聲波祇能在固體、液體，及氣體中傳遞。光之速度極大，每〔秒〕299,900〔仟米〕；聲則每〔秒〕343〔米〕耳。譬如月球上有大爆裂，在1.3〔秒〕後，吾人即得而見之；但欲聞其聲，假定月地之間皆有空氣，則須在兩星期之後。此外，聲與光尚有不同之點，即聲為縱波，而光為橫波是也。光之振動方向，與其波之進行方向正交，非如聲之振動與進行方向為一致也。

§341. 偏極化。固定繩之一端於牆上，執其他端而上下左右四方搖動之，則繩各段移動之方向，與繩長方向成正交，而其所成之波則沿繩前進，故為橫波。設繩穿過一柵，如圖 379 中之  $P$  係直立者，則繩之振動須在鉛直平面內，即手祇限於上下搖動，在其他方向均不能成波矣，是為偏極化(polarization)，即波限於某一定平面之謂也。

然則，波之是否已起偏極化，吾人將從何而知之？令繩再穿過一同樣之柵  $Q$ ，若  $Q$  直立，如圖 379 (甲)，則  $Q$  後之繩可以成波；將  $Q$  轉過  $90^\circ$ ，使其柵子橫臥，如圖 379 (乙)，則  $Q$  後之繩不復能成波矣；如是情形，則曰射入於  $Q$  之波為偏極化者。

苟無  $P$  柵之存在，則射入於  $Q$  之波非偏極化，蓋無論  $Q$  柵直立或橫臥， $Q$  後之繩，仍能成波，惟所成之波自將為  $Q$  偏極化耳。

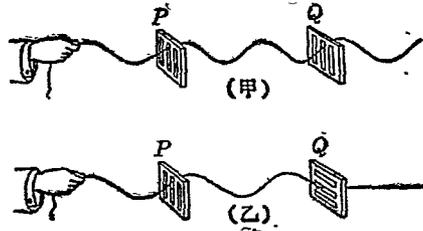


圖 379. 橫波之偏極化。

倘繩之波為縱波，如將繩拉緊放鬆而成者 (§234)，則繩之穿過一

柵或數柵與否，毫無關係，換言之，縱波不能起偏極化。故波之能起偏極化者，其為橫波無疑。

§342. 光之偏極化。取碧瑯 (tourmaline)，依其晶軸而截剖之，作成二枚薄片。先將一片放在光源與眼之間，則見此礦石特有之一種青綠色光 (此因其吸收紅黃色光之故)，並不因其繞光線旋轉而有絲毫變化。再將第二晶片  $T_2$  放在第一晶片  $T_1$  之後 (圖 380)，將  $T_1$  固定不動，而將  $T_2$  繞光線旋轉而視之，從

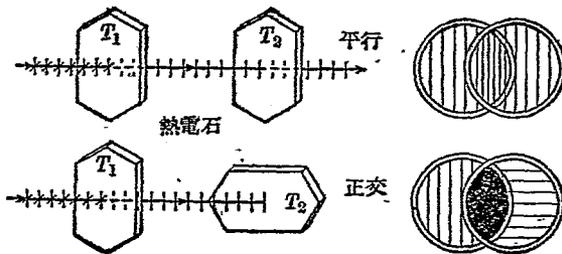


圖 380. 光之偏極化。

$T_2$  與  $T_1$  兩晶軸互相平行時起，透過  $T_2$  之光之強度即行漸次減

弱，至兩軸成正交時，竟被完全遮斷，致視野全成黑暗。將  $T_2$  再行繼續迴轉時，則光之強度又復漸次增加，至兩軸再相平行時，視野亦即恢復以前之亮度。

由此實驗，可知通過碧瑯片後之光，與尋常之光，完全異其性質，因通過第一晶片之光，須視第二晶片之位置如何，或得完全通過，或得通過其一部分，或竟被完全遮斷故也，是乃光波能起偏極化現象之明證。由於光之偏極化，可知光波為橫波，而非縱波。

§343. 雙折射。透過方解石 (calcite) 等晶體而窺視物體時，則如圖 381 所示，通常皆可見其有像二重。其原因蓋由於光

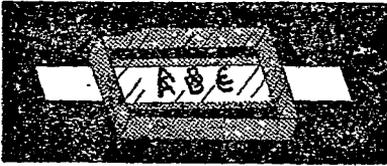


圖 381. 方解石之雙折射。

線進入此等晶體內時，經折射後分成兩線之故。

此種現象，謂之雙折射 (double refraction)。

此兩折射線中，其一遵循尋常之折射定律，稱為尋常光線 (ordinary rays)；其他不遵從折射定律者，則稱之為非常光線 (extra-ordinary rays)。如用碧瑯晶片，以檢由方解石所生之兩種折射光線時，當知此兩種光線，皆已偏極化，且其振動方向互相正交。

#### 習題六十四

- (1) 何以知光為橫波？
- (2) 試舉兩種能使光偏極化之晶體。

## 第六十五章

### 磁 體

§344. 天然磁石。我國古代早知有一種礦石，即所謂磁石能吸引鐵屑(圖 382)，又磁石可以自由轉動時，則在地面上恒指

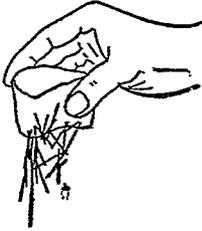


圖 382. 磁石之吸鐵。



圖 383.

磁石置皿中浮於水面指向南北。

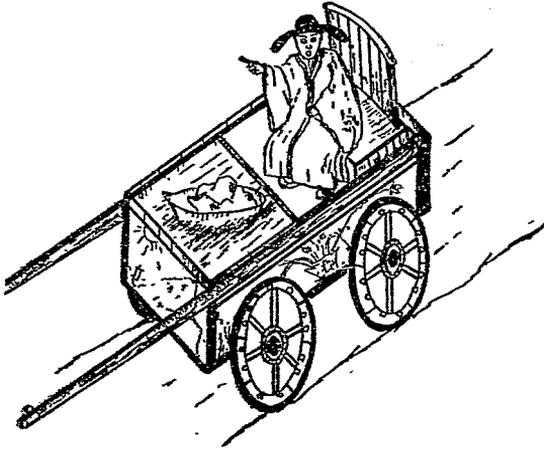


圖 384. 指南車。

一定之方向。如圖 383 所示，將磁石置一皿中，浮於水上，則恆指南北，此即最早之羅盤也。相傳黃帝因之而造指南車(圖 384)。羅盤於十二世紀之末，始由中國傳入歐洲。

磁石多係鐵礦，以磁鐵礦(magnetite,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )為最著。

§345. 磁鐵。如磁鐵礦等天然具有磁性之磁體，謂之天然磁鐵(natural magnet)。如鋼鐵棒等，用天然磁鐵磨擦，由人工方法而造成之磁體，謂之人造磁鐵(artificial magnet)。

人造磁鐵有各種形狀，名稱亦隨之而異，如圖 385，製成條狀者，曰條形磁鐵；曲作馬蹄鐵狀者，曰蹄形磁鐵；兩端磨尖，全體

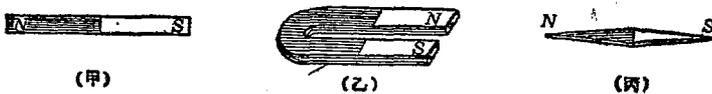


圖 385. 各種人造磁鐵。

成一細針者，曰磁針。磁針通常於其中點，以線懸掛，或支於一鉛直軸上，使成水平位置。因能在水平面內自由轉動，其靜止位置，恆沿南北方向。

§346. 磁極。磁鐵吸引鐵屑之作用，體上各部並不一致，以近兩端處為最著，如圖 386。其作用最強處，曰磁極(magnetic pole)。



圖 386. 磁極。

一磁體之內，恆有兩極，不能分離。

聯結兩磁極之直線，曰磁軸(magnetic axis)。

支在鉛直軸上之磁針，平衡靜止時，兩極恆指一定之南北方向。其向北之極，曰指北極(north-seeking pole)，或簡稱北極；其向南之極，曰指南極(south-seeking pole)，或簡稱南極。

§347. 磁力與磁量。令條形磁鐵之一極，與磁針之一極接近，如兩者同為北極(圖 387)，或同為南極，則互相推斥；如一為南極，一為北極，則互相吸引。故同名之極相斥，異名之極相引。此種兩極間相斥或相引之力，稱為磁力(magnetic force)。磁力為力之一種，其單位在 C.G.S. 絕對制中為〔達因〕。

由磁力之大小，可以判別磁鐵中所含磁量(quantity of magnetism)之多寡。例如  $A, C$  兩極，隔某距離時，其間作用之力為  $f$ ；而  $B, C$  兩極，隔同一距離時，其磁力為  $f'$ 。若  $f = f''$ ，則  $A, B$  兩極之磁量，彼此相等。但若  $f = mf'$ ，則示  $A$  之磁量為  $B$  之磁量的  $m$  倍。

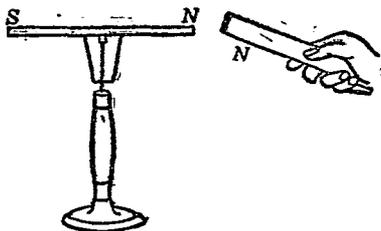


圖 387. 同名磁極相斥。

用同一磁鐵之兩極，對於另一磁極，先後行此實驗，則可證明作用之力雖有引斥之分，但無大小之別。即一磁鐵之兩極，對外作用之力，性質固相反，而其磁量則相等，可以代數學上使用之正負號區別之。通常以北極為正極，南極為負極。一磁極所含有之磁量，稱為磁極強度(strength of pole)。

§348. 庫倫定律——單位磁量。由實驗考知：兩磁極相斥或相吸之力，與其磁極強度之積成正比，而與其間距離之平方成反比。以式表之，在空中爲

$$f = \frac{mm'}{d^2},$$

是爲庫倫定律(Coulomb's law)。

由庫倫定律，可作單位磁量之規定。強度相等之兩磁極，於空中相距 1 [厘米] 處，其相互之作用力爲 1 [達因] 時之磁極強度，吾人取作磁量之單位，是爲 C.G.S. 制磁量之絕對單位。

例如有兩磁極，各含 +8 及 -7 單位磁量，相距 2 [厘米]，則其間相互作用之力爲  $-\frac{8 \times 7}{2^2} = -14$  [達因]，負號表示相引。

一良好之鋼質磁鐵，其磁極強度比例於其截面面積，每一 [平方厘米] 約有數百單位磁量。

§349. 磁場。置磁針於另一磁鐵之附近，即覺感受磁力之作用，此磁力作用所及之處所，謂之磁場(magnetic field)。

單位正極在磁場內一點，所受到之磁力，曰在此點之磁場強度(magnetic field intensity)，其方向即表磁場之方向。如磁極之磁量爲  $m$  單位，所在點之磁場強度爲  $H$ ，則所受之力爲  $f$  [達因]，而有

$$f = mH,$$

磁場強度之單位，在 C.G.S. 絕對制，稱爲 [高斯] (gauss)。

§350. 磁力線。小磁針在條形磁鐵之磁場內，靜止時所取之方向，隨地而異，非如單獨存在時之必取南北方向也。磁針既小，所占之地位，宛如磁鐵磁場內之一點，其兩極之磁量又相等而異號，故其兩極所受之磁力乃等量而反向，通常成一力偶，將使磁針旋轉，至其磁軸沿所在點之磁場方向時方得平衡，如圖 388 所示。用鉛筆將此時小磁針之北極所在處  $C$  誌於紙上，然後移動小磁針，使其南極與前誌之點相重，再將北極所在處誌下，如是陸續誌下之點，聯結成爲一條連續曲線  $ACB$ ，其上各點之切線，恰與小磁針在此點所取之方向一致，如是之曲線，曰磁力線 (magnetic lines of force)。

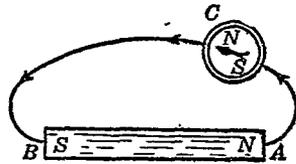


圖 388. 磁力線。

實際上，欲求磁力線時，可將紙片或玻璃板放在磁鐵上，撒鐵屑後，略加敲擊，則鐵屑即因其振動而整列，成如圖 389 所示之無數曲線，即條形磁鐵所生磁場之磁力線也。

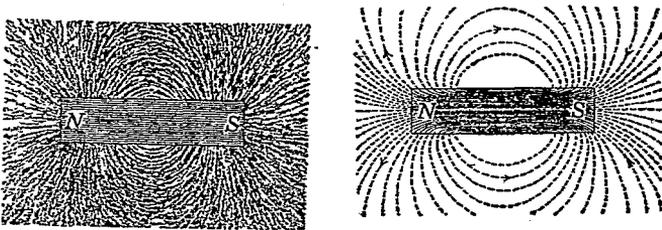
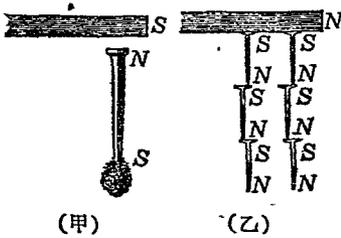


圖 389. 條形磁鐵之磁力線。

§351. 磁之感應。軟鐵棒之本無磁性者，插入鐵屑中，不

能吸鐵；但若將其移近磁鐵之一端，則軟鐵亦能吸引鐵屑，如圖 390 甲所示，是為磁之感應 (magnetic induction)。鐵棒由感應而成磁鐵之現象，謂之磁化 (magnetization)。細加考究，將



(甲) (乙)  
圖 390. 磁之感應。

見鐵棒接近磁鐵南極之一端，成為異名之北極，遠離磁鐵南極之一端，成為同名之南極。

磁體吸引鐵片之理，可依磁之感應與庫倫定律以說明之。

即如置鐵釘於磁極  $N$  之下(圖

390 乙)，則由感應作用，鐵釘所生異名之極  $S$ ，較之同名之極  $N$  距磁極為近；且兩極  $N$ ， $S$  之磁量相等，故作用於  $S$  極之引力，勝於作用於  $N$  極之斥力，隨之鐵釘即被磁體所吸引。此鐵釘磁化之後，又可吸引第二鐵釘，第二鐵釘又可吸引第三鐵釘。又鐵屑之所以能蝟集於磁鐵之兩極，與繪出磁鐵之磁力線者，亦以各個鐵屑，皆因感應作用，變成無數之小磁針故也。

用軟鐵棒以行上述實驗，磁體接近於棒之上端時，棒之下端雖能吸引鐵屑；但一旦將磁體移去，則鐵棒之磁性即行消失。此實驗若用鋼鐵棒行之，則其磁性雖不如軟鐵棒之強烈，然經感應作用而磁化後，則雖撤去磁體，並不立刻完全失卻磁性。即軟鐵由感應而獲得之磁性，較之鋼鐵所獲得者為強，然磁化力撤去後，則其大部分之磁性亦即立行消失；反之，鋼鐵雖較難於獲得磁性，但一旦獲得後，亦不易消失；此吾人之所以製造永久磁鐵，多用鋼而不用軟鐵也。

§352. 磁之分子說。 試取一細條磁鐵，折為兩段，即見折斷處有新磁極出現，亦能吸引鐵屑，兩段各成爲一完全之磁鐵，再折爲四，亦然，如圖 391 所示。



圖 391. 折斷之磁鐵

磁鐵可以折斷而成若干之小磁鐵。 滿盛鐵屑之玻璃管，可使其磁化，但經搖動，即失磁性。 任何磁鐵，將其燒至紅熱，撲滅之，鎚擊之，或扭轉之，皆可使其失去一部分或全部分之磁性。 此等事實，令人想知物質之磁性，與其分子之排列有



(甲) 磁化前分子排列之情形。



(乙) 磁化後分子排列之情形。

圖 392.

關，鐵之每一分子，皆可作爲小磁鐵看待。 在平時，此等小磁鐵之軸線，縱橫交錯，至不整齊，如圖 392 (甲) 所示，其作用互相抵消，故不顯磁性於外方。

但若置之於磁場之內，依其長度之方向，而使磁化力作用於其上時，則分子磁鐵依此方向而平行排列，圖 392 (乙)，如兵士然，皆向一面。 在棒之中央處，一列之極爲後列異名之極所中和；但在棒之兩端，則各爲未被中和之極，一端爲南極，一端爲北極。 此種自由之極，即爲磁鐵之兩極。

由此理論，甚易了解磁鐵折斷爲二，而不擾動其排列時，所得之結果。 即新成之兩極，實爲原存於此處之極，惟因折斷而得

獨立，明顯於外耳。又鋼之分子，較之軟鐵者，難以使其整齊排列，惟既排列整齊後，自然亦較難以擾亂，故鋼之磁化較難，功能保持磁性較久。

若此理論正確，則鐵中之磁量，當有一定之限度，因此等小磁鐵完全平行排列後，無論磁化力如何強大，將不再能增加其磁量，此吾人事實上所遇之磁化飽和現象也。

### 習 題 六 十 五

- (1) 磁鐵可會 (a) 祇有一極，(b) 有二北極，(c) 有二個以上之極否？
- (2) 磁鐵能吸引銀角，銅幣，或錫罐否？
- (3) 若將一金屬棒  $AB$ ，接近磁鐵。(a)  $A$  端與磁鐵北極不相吸，亦不相拒。(b)  $A$  端與北極相吸。(c)  $B$  端亦與北極相吸。(d)  $B$  端與北極相拒。將上列數語中之不正確者劃去。
- (4) 以鐵棒之一端置近於磁針之一極時，此極即為棒所吸引。此磁針之運動，究因鐵棒固有之磁，抑因置近後，由感應而得之磁？應如何檢定？
- (5) 用一條形磁鐵，如何可使鋼針成為永久磁針？
- (6) 求磁量 50 絕對單位與 84 絕對單位之二極，相距 8 [厘米] 時之作用力。
- (7) 數縫衣針用線穿好排列而懸之，若其下置一強磁鐵之極，將見有何作用？何故？
- (8) 試就  $f = \frac{mm'}{d^2}$  與  $f = mH$  兩公式，比較其意義。某磁極之磁量為 16 絕對單位，與其相距 2 [厘米]，磁場強度若何？
- (9) 一磁極之磁強為 5 單位，如放在磁場之一點上，所受之力為 80 [達因]，求此點之磁場強度。

- (10) 試就蹄形磁鐵之磁場，作一磁力綫圖。
- (11) 將小縫針燒紅，放在蹄形磁鐵之兩極間，使針沿着聯結兩極之直綫上待冷，是否可以磁化？何故？
- (12) 兩條形磁鐵，不用時放在一處，宜如何放法，庶磁性不致消失？
- (13) 磁棒熱至高溫度時，何故失去磁性？

## 第六十六章

### 地 磁

§353. 地球爲一大磁石。懸置磁針於地面上各處，皆有指向南北之特性，可知地面上各部皆屬磁場，而地球實爲一大磁石，亦有“指北極”與“指南極”，與其他磁鐵相同。但由磁極斥引之定律，知地球之“指南極”必在北半球，“指北極”則在南半

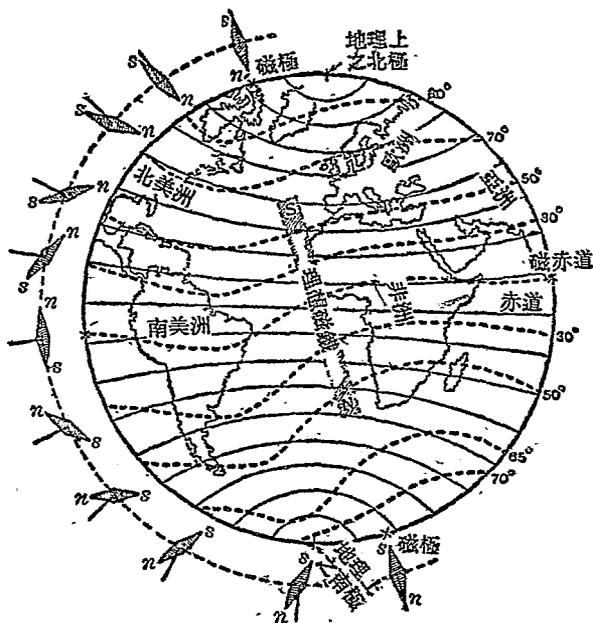


圖 393. 地球爲一大磁石。

球。此種磁極與地理之兩極，根本不同。地磁之南極，在北美洲哈德遜灣(Hudson Bay)附近偏西，地磁之北極，近乎相對，在南美洲南維多利亞地方(South Victoria Land)(圖 393)。

雖然，地磁之由來，必須於地球之外尋之。因地球內部甚熱，如火山之所昭示，而磁性物體在高溫度時，必失去磁性故也。再則地球磁極之位置，年有移動，但為何如此改變，及地球為何帶磁性，則至今尚未完全明瞭。

§354. 磁偏角。地球磁極既與其地理上之兩極，不相一致，

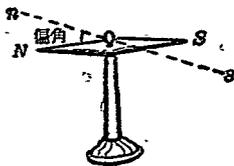


圖 394. 磁偏角。

因之地面上之磁針，多不正指南北。

通過磁針之鉛直平面，曰磁子午面(magnetic meridian)，磁子午面與同地之地球子午面(geographical meridian)間所成之角，曰磁偏角

(declination)，如圖 394 所示。磁偏角之大小，隨地而異。

§355. 磁傾角。在磁子午面內，設有磁針，能繞通過其重心之水平軸線旋轉，磁針之北極，於靜止後，常稍傾向於下方，此就在北半球而言也。若在南半球，則磁針之南極向下。此傾斜角，曰磁傾角(inclination)，可用

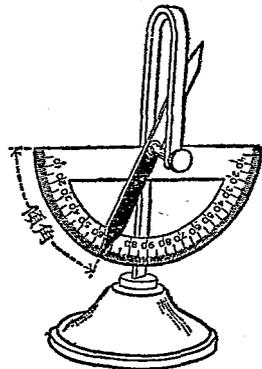


圖 395. 磁傾儀。

圖 395 所示磁傾儀(dip circle)測定之。傾角由於磁針沿地磁力靜止而來，故即等於地磁力之方向與水平面間所成之角度。

傾角在赤道附近爲零，其大小隨緯度而俱增(見圖 393)。在地球之兩極圈內，且有成直角處，此處即地球之磁極也。

通常所見之磁針，其靜止時之位置，皆成水平者，因製造磁針時，預使其重心位於支點外方，令其能靜止於支點上而成水平故也。

表 13. 我國各大城市地磁情形。

(1936 年)

城市	北 緯	東 經	偏 角 (偏西)	傾 角	水平強度 [高斯]
南京	32° 03'	118° 46'	2° 50'	46° 42'	0.332
北平	40° 00'	116° 20'	4° 48'	57° 23'	0.289
上海	31° 11'	121° 26'	3° 13'	45° 25'	0.333
杭州	30° 19'	120° 08'	3° 08'	43° 13'	0.339
青島	36° 04'	120° 19'	4° 37'	52° 07'	0.309
大連	38° 55'	121° 39'	5° 46'	55° 33'	0.295
瀋陽	41° 50'	123° 28'	6° 49'	58° 43'	0.277
西安	34° 16'	108° 57'	1° 49'	50° 29'	0.324
蘭州	36° 04'	103° 53'	1° 15'	53° 24'	0.312
成都	30° 38'	104° 03'	0° 58'	45° 06'	0.346
重慶	29° 33'	106° 33'	1° 19'	43° 12'	0.353
武昌	30° 36'	114° 20'	2° 23'	44° 34'	0.343
長沙	28° 13'	112° 53'	1° 47'	40° 47'	0.356
廣州	23° 06'	113° 18'	0° 47'	31° 41'	0.375
昆明	25° 04'	102° 43'	0° 45'	35° 00'	0.376

§356. 水平強度。 地磁場之強度甚弱，例如在北平，約爲0.5〔高斯〕，各地不同。其在水平方向之分力，謂之水平強度 (horizontal intensity)。

由磁偏角，磁傾角，及水平強度之值，可以完全決定地磁力之大小及其方向，故此三者稱爲地磁之三要項。此三要項之數值，常不絕的略有變化。地磁之變更，不但各處不同，且亦各時有異，除長週期之變動外，尙有歲變與日變等，前者表示地磁之情形，各季不同，後者表示其與晝夜有關。太陽面上黑子最多之時，地磁之日變亦較劇烈，由此可知太陽與地磁有相當之關係。除有週期之變動外，地磁強度有時呈劇烈之偶然變更，名爲磁巔。

§357. 羅盤。 水平而能自由轉動之磁針，恆在磁子午面內，正向地磁磁極，而成靜止。利用此種事實，如已知所在地之磁偏角，即可由磁針所指之方向，定陸上旅行者所應走之途徑，或定輪船與飛機之航路。爲此目的而設者，爲羅盤 (compass)，如圖 396 所示，卽爲普通兵士或旅行家所攜帶之一種。輪船與飛機上所用者，盤之外殼，構造較爲複雜，使其盤面常能保持水平，不受船身或機身搖動之影響。

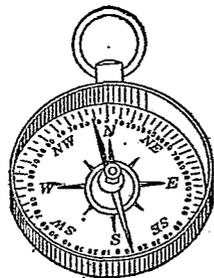


圖 396. 羅盤。

## 習 題 六 十 六

- (1) 試舉事實，以說明地球為一大磁石。
- (2) 磁針下落是否由於地磁吸引之故？磁體與非磁體自由下落之加速度，是否相同？
- (3) 粗細均勻之鋼針，使其磁化後，以線懸其中點，能成水平否？何故？
- (4) 欲造一成水平之磁針，宜將針磁化後平衡之，抑平衡後磁化之？
- (5) 有一磁針長 6 [厘米]，兩極之磁量各為 18 單位，沿東西方向而成水平時，所受地磁作用力偶之矩為何？但已知所在地之地磁水平強度為 0.3 [高斯]。
- (6) 在貴處，磁針所指之方向與真正之之南北方向，相差多少？
- (7) 如何決定你所在地之地理子午線？
- (8) 在南京地磁之水平強度為 0.332 [高斯]，傾角為  $46^{\circ}42'$ ，求其地磁磁場強度。
- (9) 在北平地磁之水平強度為 0.289 [高斯]，傾角為  $57^{\circ}23'$ ，求其地磁之鉛直強度。
- (10) 想一方法，使羅盤匣於船轉動時，得以保持水平。
- (11) 何以知道某處為地球之磁極？在地球之磁極處，磁針能否指示東西南北？
- (12) 小磁棒放在木栓上，浮在水面，指何方向？若在北半球上作此實驗，此棒是否將向北移動？說出理由。
- (13) 在磁子午線上，磁偏角等於多少？在磁赤道上，磁傾角等於多少？

## 第六十七章

### 電爲能之一種表現

§358. 電的世紀。 吾人皆知現代爲電的世紀，如電燈，電鈴，電扇，成爲居家日常之用品，出門則有電車，娛樂則有電影。他若叉匙等之鍍銀，用具之鍍鎳，以及機器各部分之銲接，皆有賴於電。尤可驚奇者爲利用電以傳達有線及無線電報與電話，電或做功，或供給能，其於人類生活之改善，貢獻極大。但吾人當不忘裝置於室中或街上之電燈，祇有七十年之歷史。

欲明電之重要，吾人重述做功與能之轉變兩事。

人類發明機械，以爲做功之具。工業上之機械，可分爲原動機械與工作機械兩種。原動機械乃將自然界中原有之任何形式的能量，變爲一種合乎吾人所需形式之能量，如風車，汽機，水力發電機，及電動機等皆屬之，人與馬亦爲原動機械。工作機械則將原動機械所供給之能量，變爲吾人所需完成之工作，如車床，鑽床，刨床等，以及縫衣機，織布機，打字機，運輸機，起重機，壓力機等皆屬之。惟人能提物，亦能寫字繡花，故又爲工作機械。

流動之空氣與水，蓄有機械能也；轉動之飛輪，能做機械功也；火藥之爆炸，化學能之表現也；煤之燃燒煮水，化學能而變爲熱能者也；汽機之發明，乃將熱能變成機械功也。吾人研究物理

之最大目的，在於利用天然之能，變成機械之功，以代替人力，而增進人類幸福。化學能，熱能，以及機械能，宜乎就地取用，欲輸送於他方，端賴皮帶，其不能及遠也明矣，電則不然。

§359. 電能。日常所見供電之源，有電池與發電機。從電池上連導線至電鈴，吾人手按電鈕，電池開始工作，電鈴隨之響動，是電將電池中之化學能變爲機械功之居間者。

工業上所用大量之電，多以汽機，內燃機，或水輪機使發電機轉動而發電；是發電機所生之電能，均由熱能或機械能轉變而來。於是從電機上，引大電纜，載電至數〔仟米〕，數十〔仟米〕，或數百〔仟米〕之遠處，而入工廠與住家，作種種之用途。此等電流可以使金屬絲白熱而發光，可使兩碳精間燃燒得弧光，凡此所生之能，爲熱能與光能。用此電流，若用特殊之器具以接受之，能生化學反應。例如電流能分解水以得氫與氧，分解食鹽以得氯與鈉，從金屬鹽類中分解出銅，鎳，銀等純金屬來，凡此皆爲電流供給化學能之例也。又用此電流，可使之挽車起重；入於工廠，可以轉動各種之龐大機器，此又電流供給機械能之例也。至用電波發送電能，竟無需電線矣。

§360. 人類最早所遭遇之電災。雲放電時，火光閃爍，照耀天空，吼吼之聲，震撼天地，此即所謂電閃雷鳴，爲吾人所熟見者也。往往折樹，焚林，倒屋，傷人，此電爲能之明證。在電學未昌明前，吾人於電未能了解而加以利用，所受者惟雷擊之災耳。

習 題 六 十 七

- (1) 試舉一實例，以說明能之轉變。
- (2) 試舉一實例，以說明能之傳遞。
- (3) 試舉一實例，以說明能之變為機械工作。
- (4) 試列舉自然界之能源，而為人類所利用者。

## 第六十八章

### 摩 擦 起 電

§361. 摩擦起電。 將琥珀與毛織物摩擦，即能吸引紙屑，乾草，或其他輕物。除琥珀外，如橡皮，玻璃，及硫黃等物，亦有同樣之性質，是為帶電(electrified)。帶電之物體，具有電荷(electric charge)。此現象不論何人，在乾燥之日，用自來水筆管或火漆，在衣服上摩擦後，即可吸取紙屑，累累如鏈。是物體之帶電，由於摩擦之功而成；帶電後，紙屑為之牽引，是電能做機械功也。

冬日解脫皮袍，皮毛與內衣牽連，不易脫離，每聞嘶嘶之聲，在黑暗中觀之，有時可見火星，此實與空中之雷電無異。

§362. 電有兩種。用絲線懸通草球，以帶電後之物體移近，

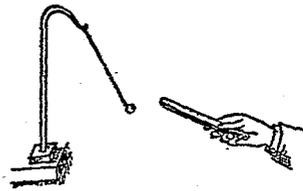


圖 397.

如圖 397，球先被棒吸引，既接觸後，棒上一部分之電傳於球上，兩者復行分離。如最初所用之帶電體，為以綢摩擦後之玻璃棒，於球棒兩者分離後，再用絨布擦過之火漆棒近之，則球又被吸引。

反之，先用火漆棒，後用玻璃棒，結果完全相同。由此可知電有

兩種，性質相反。科學家公認玻璃棒被綢摩擦而生之電爲陽電或正電(positive electricity)，火漆或硬橡皮棒被絨布摩擦而生之電爲陰電或負電(negative electricity)。

凡帶同種電荷之物體相拒，帶異種電荷之物體相吸，即同類之電荷相拒，異類之電荷相吸。由本實驗，且知帶電之物體，不論爲正電或負電，皆能吸引不帶電之物體，如通草球。懸掛之通草球，即可作驗電器用。

若摩擦其他物質，而作與上述相同之實驗，則其出現之電，或似摩擦玻璃棒時所得者，或似摩擦火漆棒時所得者。故電有兩種，亦祇有兩種。一切之電，非陰即陽，非陽即陰，永未見有第三種之電也。依實驗結果，如將貓皮，玻璃，綢，橡皮，琥珀，火漆，硫黃等物質中之兩種，互相摩擦，則位於上列次序中之前者常帶陽電，位於後者常帶陰電。

§363. 電量——庫倫定律。測量兩帶電物體相拒或相吸之力，即可定其所帶電量(quantity of electricity)之多寡。比較甲乙兩帶電體之電量，可取第三帶電體丙以爲標準。如甲與丙於某距離之作用力，等於乙與丙於此同距離之作用力，則甲乙兩體所帶之電量，謂之相等；若甲之作用力，等於乙之作用力之 $n$ 倍時，則甲之電量爲乙之 $n$ 倍。又陰陽兩電合併，而消失其作用時，則曰兩電之符號相反，而電量相等，此時物體呈中和狀態。

由實驗結果，吾人知作用於帶電二質點間之電力，與二質點上

電量之相乘積成正比，而與其距離之平方成反比，是為庫倫定律 (Coulomb's law)。物理學中初即以二等量之電，於相距 1 [厘米] 處之作用力為 1 [達因] 時，每一電之電量為電量之單位，稱為靜電絕對單位。設二質點之電量，各為  $e$  及  $e'$  [靜電絕對單位]，在空中相距  $d$  [厘米] 時，則其相互作用力  $f$  [達因] 之值，有如下式：

$$f = \frac{e \cdot e'}{d^2}.$$

在上節所述摩擦起電之實驗中，所吸引或斥拒者如紙屑通草球，皆為甚輕之物，足見此種電力極為微小，不過數十或數千 [達因] 耳 (1 [達因] 約等於 1 [毫克] 之重)。故玻璃棒或火漆棒上所帶之電量，以 [靜電絕對單位] 表之，數字不至太大或太小，固極相宜。但從電池或發電機發明後，所得之電量，遠非摩擦起電所可比擬，因覺靜電絕對單位，過於微小，而取其  $3 \times 10^9$  倍為電量之實用單位 (practical unit of quantity of electricity)，稱為 [庫倫] (coulomb)。

就靜電之觀點言之，1 [庫倫] 已為極大之電量。試代入庫倫定律而計算之，二電荷各為 1 [庫倫] 者，相距 10 [米] 時，彼此即有一力約等於  $10^{18}$  [達因]，相當於 10000 [噸] 重量之作用，此在事實上永未實現者，何哉？吾人不妨夜以繼日，從事摩擦，決非不肯出力之故；蓋電為極不宜於囤積之物也。吾人將見電極利於流通，故其效用方宏。

§364. 電量不滅原理。吾人將兩物體如綢與玻璃棒摩擦，則綢帶陰電，玻璃棒帶陽電，兩者之電，符號不同，而量相等。火漆與絨布摩擦，火漆所帶陰電之量，亦與絨布所帶陽電之量相等。無論何處，原無些許陽電或陰電可資識別者，苟或偶然出現其一種，則必有等值而異號之電量，亦於同時出現，此在任何情形，恆可證明者也。一切物體中，恆含有非常巨值而符號相反之兩種電量，彼此相消，對外不顯作用。所謂起電(electrification)云者，乃將等量之陰陽兩電分離而已。惟綢與玻璃棒，火漆與絨布，可以拆開，各自獨立保存其陰電或陽電，非如南北磁極之必同時並存於一體上也。又見若干之某種電量消失時，則必與等量之異種電量相中和。故宇宙內所蘊藏陽電與陰電之總量，終古不變。

§365. 導電體與絕緣體。玻璃棒或火漆棒，在其摩擦處，帶電而不失。以手持金屬棒，而以貓皮等物擦之，不能起電。但若在金屬棒上裝一玻璃柄，以手執柄，然後擦之，即可帶電。如金屬等物，其一部分上有電發生，立即傳至其他各部分者，曰導電體(conductor)。反之，如火漆玻璃等，其一部分帶電，而不能移至他部分者，曰非導體(non-conductor)。地球為導電體，故帶電體與地接觸，電即傳至地球全部；人體亦可導電，故手與帶電體接觸，電即經手傳至地上。手執金屬棒，不能使其帶電，即由摩擦所生之電，立時經由人身而移到地上之故。如用玻璃柄，隔斷手與金屬棒之接觸，電因無路可傳，故仍停留於金屬棒

上。用此方法，以隔斷電之聯絡，曰絕緣，故非導體又有絕緣體 (insulator) 之稱。電燈，電話，及電報線，皆用玻璃或瓷架支持之，求絕緣也。

金屬爲極佳之導體，次爲木炭，石墨，酸類及鹽類之水溶液等。絕緣體之例，如硬橡膠 (ebonite)，蟲膠 (shellac)，琥珀，火漆，硫黃，玻璃，松香，瓷，油，及乾燥之空氣等。導體與絕緣體之間，實無絕對之界線。大多數物體皆可傳導少許之電；即極良好導體之導電程度，亦大有差異。介於此兩者之間，如酒精，乾燥木材，紙，稻草，溼潤空氣，純潔之水等，既非絕緣體，而導電又不多者，曰半導體 (semi-conductor)，或稱不良導體 (poor conductor)。

**§366. 電之本性。** 數十年前，吾人常以電爲不可權衡，不屬物質之流體，可分爲兩種，即相當於陽電與陰電者是。此兩種之流體，除符號不同外，其他之性質則完全相同 (電之兩流體說)。時至今日，吾人已知電者實非不可權衡之某物，而乃爲物質之基本特性。世未有不涉物質之電。反之，無電之物質，亦未之見也。物質每一基元成分，皆有電荷與之結合，而不能分離。通常物質未見帶電者，乃因其所含陰陽兩電之電量相等，就體外觀之，其作用適彼此相消耳。

吾人知物體皆由無數之微小原子所組成。組成此物質之原子，與組成彼物質之原子，性質各異，例如銅之原子與鐵之原子不同，與氫之原子亦不同。吾人近又承認電亦成微小之粒子，

其帶負電者曰電子(electron)。不論其來源如何,凡電子皆屬相同。電子能在導電體內自由行動,但在絕緣體內則不能。吾人能將電子從物體中分出,而單獨研究之。其帶正電之質點,則常繫於原子,可說是原子之主要成分,質量較電子大得多,故雖在固體之良導電體中,亦不能自由行動。

原子之內有負電之電子與正電之質點,其正電與負電之總量相等,而成中和。在若干情形下,原子失去一個或數個電子,因而顯出陽電性質,而成陽離子;反之,原子攫獲一個或數個本身外之電子,因而顯出帶有陰電,成爲陰離子。

帶負電荷之物體,含有比在正常時較多之電子;帶正電荷之物體,含有比在正常時較少之電子。在導體中,電子不絕由某部分原子脫離,而進入他部分原子內。當其已脫離舊原子,而尚未進入新原子時,即成爲自由電子,得在導體內移動。物體中自由電子愈多,則此物體之導電性愈大。絕緣體爲含自由電子甚少之物體。

二物體互相摩擦時,一物體失去電子,而他物體獲得電子,因之一帶正電,一帶負電,且二者之電量相等,此即玻璃棒與綢摩擦後帶電之解釋也。

### 習 題 六 十 八

- (1) 紙屑能附着於帶電之玻璃棒上,片時後即躍開,何故?
- (2) 乾冷之冬日,頭髮經梳過後,每即豎起,何故?
- (3) 下列各物,何者爲導電體,何者爲不良導體,何者爲絕緣體?

乾絲，濕絲，棉布，玻璃，水銀，酒精，鹽水，  
純水，紙，金屬，火油，乾木，礫。

(4) 帶電荷之鋼棒，用金屬線連於地球，則失去電荷；若此棒磁化後，亦能因同法而失去磁性否？

(5) 能自由轉動之帶電體，在地面上取一定之方向否？

(6) 將貓放在玻璃桌面上，令其打滾，即能將桌上香煙屑吸引於其身上，何故？

(7) 由原子學說，若一物(a)帶負電荷，(b)帶正電荷，則其含電子之狀況如何？

(8) 二小球間之距離為 10 [厘米]，一小球帶 45 絕對單位之正電量，如與他一球相吸之力等於 5 [毫克]重，問他一球帶負電多少？

(9) 一尙未帶電之金屬小球，與一大小相等而已帶電之同樣小球相接觸後，放至相距 6 [厘米]之位置，測得相斥之力為 4 [達因]，求帶電小球原有之電量。如欲使此兩球間之作用力減至 1 [達因]，則兩者之距離應為若干？

## 第六十九章

### 靜電感應

§367. 電之感應。置絕緣之導體  $B$  於帶電體  $A$  之近旁時 (圖 398), 則  $B$  受  $A$  體之電場作用, 而生異號之電於近  $A$  之端, 同號之電於另一端。此種事實, 可以驗電板觸於導體之各部分, 而移其電於懸掛之通草球, 由其斥引之作用以知之。此種導體因位於電場內而帶電之現象, 謂之靜電感應 (electrostatic induction)。其由感應作用所生電量之多寡, 則視帶電體與導體之距離而定。距離愈遠, 則感應電量愈少; 如導體置於相當遠處, 則感應作用, 殆可全不發生。此與磁之感應情形 (§ 351) 相似。

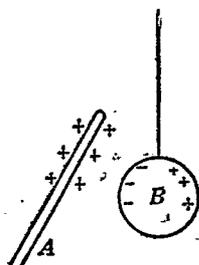


圖 398. 電之感應。

吾人於此當恍然於不帶電之物體, 如通草球等 (§ 362) 之所以能為帶電之玻璃棒或火漆棒所吸引者, 實以其上已因感應而得電也。

又將帶電體  $A$  移遠, 則  $B$  即不顯有電如故, 此可知由感應而生之兩種電, 其量恆相等也。

若有兩導體  $B$  及  $C$  互相接觸, 同時置於帶電體  $A$  之附近, 如圖 399 所示, 則由感應作用,  $B$  得正電,  $C$  得負電。此時將  $\bar{B}$ ,

$C$  分開之後，再將帶電體  $A$  移去，則  $B$  仍帶正電， $C$  仍帶負電，

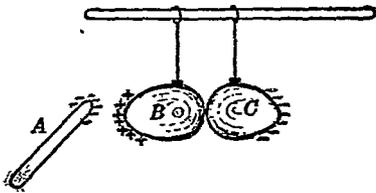


圖 399.

且其電量亦不因之而減少。由此方法，以使導體得電，謂之感應起電。

依 § 366 所述，凡負電移動皆為電子之移動；又正電之移動，亦非正電質點之移

動，而為依反對方向流動之電子移動。因地球為一大導體，故如圖 400 所示，聯通導體  $B$  於地球以代  $C$  時，則  $B$  與地球成一導體。設  $A, B$  之距離，較之  $A$  與地面之距離為小時，則  $B$  之負電流至地面，又由  $A$  之感應生於地面之正電，集於  $B$  體。於是  $B$  體之正電，較之未與地面聯通以前，為顯著的增加。此正電之量，由  $A, B$  兩導體之愈相接近而愈多。故欲由感應起電，獲得多量之電時，必須將導體與帶電體置之甚近，且與地面相聯通也。

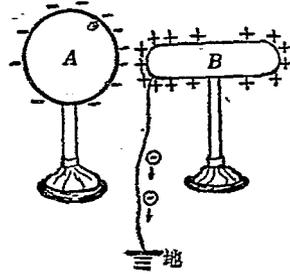


圖 400.

§368. 金箔驗電器。檢驗物體是否帶電之儀器，較懸掛之通草球為進步者，有金箔驗電器(gold-leaf electroscope)。如圖 401 所示，由插於玻璃瓶中之金屬棒上端，固定一金屬球或圓板，而於其下端懸垂二枚金屬箔而成。若以帶電物體置近於

此金屬球旁或與之接觸，則金屬球與金屬箔，即同時帶電，隨之二金屬箔即互斥而張開。如以不帶電之物體置近或接觸於其球部時，金屬箔自無張開之事。故由此金屬箔之張開與否，即可決定物體是否帶電。又由金屬箔張開之大小，並可推知其所帶電量之多寡。又若先使驗電器帶電，並知所帶為正電或負電，再將帶電物體移近，以備檢查，即可由金屬箔張開程度之增大或減小，而決定物體所帶者為負電，抑為正電。

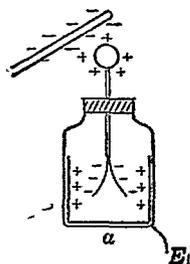


圖 401.  
金箔驗電器。

§369. 感應盤。感應盤(electrophorus)為利用感應起電，便於獲得少量之電之器械。其構造如圖 402 所示，由填充火漆

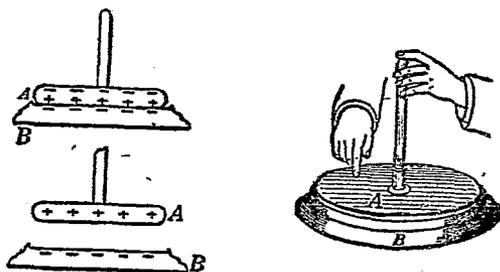


圖 402. 感應盤。

或硬橡皮於金屬圓盤 B 內，及一鑲有絕緣柄之金屬圓板 A 而成。當起電時，先以貓皮摩擦盤面，則盤帶陰電，能留於盤上達數〔小時〕之久；次以金屬圓板蓋覆其上，則因金屬板與盤面實

際上僅於數點相接觸，故由感應作用，生陽電於金屬板下面，陰電於金屬板上面；再以手指觸金屬板，使與地聯通，則金屬板上面之電子，即經人體而入地中；故去指而舉起金屬板時，惟有陽電分布於板之全部，可供吾人使用矣。且圓盤  $B$  上之電，並不因此而減少，故可反覆行之，但吾人當不忘舉起圓板時，吾人在不斷做功也。

§370. 導體上電之分布。因電在導體內部能自由移動，故授電於導體時，則電荷即由互相排斥之作用，以期相隔甚遠，結果分布於導體之表面，而成平衡狀態。以驗電板觸於帶電之

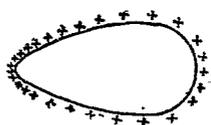


圖 403. 電在導體面上之分布。

金屬圓筒內部後，而置於金箔驗電器上以驗之，可見其毫無電之表現。故靜電僅分布於導體之表面。如導體表面之形狀相同時，則其內部無論中空與否，對於靜電皆具同樣之作用。例如貼錫箔於木球上，亦

可用之以代金屬球是。

又導體表面上各處電量之分布，並不均勻。渾圓處所聚之電少，尖銳處所聚之電多(圖 403)。故導體之角或尖端上，電之密度最大，每可使電子甚易逸入空氣中，是為尖端作用。

§371. 感應起電機。欲連續而得比較多量之電，則有感應起電機。如圖 404 所示，為威姆胡斯特感應起電機 (Wimshurst's influence machine)。其主要部分為兩玻璃或硬橡

膠圓板，可同繞一軸而轉動，但轉動方向，一反一正。兩板外面各貼若干枚錫箔，箔前有金屬刷各二，由弓形金屬棒相連。此兩棒各在一板之前，互成正交。板面轉動，則刷次第與各枚錫箔接觸而過。此外尚有絕緣之金屬梳，左右各一，齒對圓板，與板相近，但不接觸。因此兩梳由金屬棒與兩球，即兩極，相連通，故搖柄而轉動圓板時，則所生陰陽兩電分別聚集於兩極上。爲多蓄電起見，在極下各裝萊頓瓶(見後 § 377)一個。

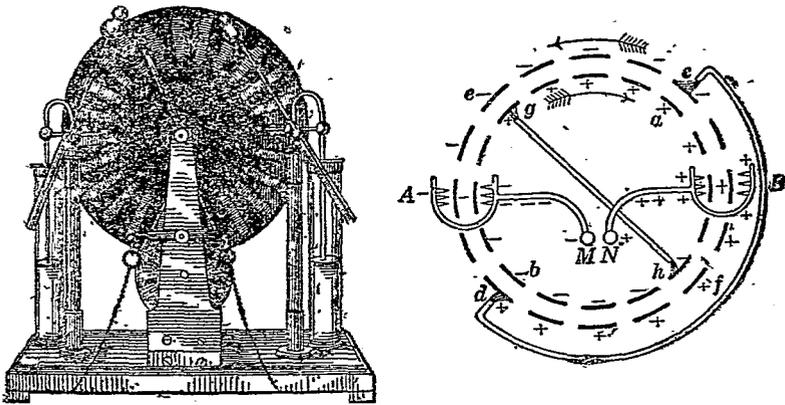


圖 404. 感應起電機。

起電之情形，可依圖 404 右部說明之。內圓代表前面之板，外圓代表後面之板。前板作順時針轉動，後板同時作逆時針轉動，刷  $g, h$  與前板錫箔相觸，刷  $c, d$  與後板錫箔相觸。假定後板上方之錫箔，開始時帶有少許陰電，此箔向左轉去，至於  $e$  之位置時，由靜電感應作用，在  $g$  及與之相接之前板錫箔上發生陽電，於  $h$  及與之相接之錫箔上發生陰電。又與  $g$  一度接觸後，

此帶陽電之箔，轉至  $a$  處時，由感應作用而生陰電於  $c$ ，陽電於  $d$ 。如是，上半段之前板上錫箔，恆生陽電，後板上錫箔，恆生陰電。下半段之情形，與此正相反對。即錫箔一方面有感應生電之職務，他方面又有輸送電量之任務。板轉愈速，所生之電愈多。梳之位置，恰在前後板有同種電之處，左右各一。右邊之梳，齒向陽電，左邊之梳，齒向陰電，藉尖端作用，各將其附近之電荷，傳至於其相連之電極。如兩極間之距離不大時，則陰陽兩電發爆聲與火光，互相中和。此種現象，謂之**火花放電**。此時如置厚紙於兩極間，每被火花穿成小孔。

§372. **大氣電**。考大氣中常帶有多量之電。雨天所帶者，為陰為陽，雖不一定；而晴天所帶者，通常皆為陽電。

若帶有多量異號的電之二雲互相接近時，可突破其間所隔之空氣而放電；此時表現之光，曰**電閃**，同時發出之聲，則曰**雷**。又若帶電之雲，降近地面，則地面亦由感應而生異號之電，往往通過中間之空氣而放電，致成所謂**雷擊**之現象。樹木聳立地面，致由感應而生之電密集其上，處於易於放電之狀態，故遭遇雷擊之機會較多。遇雷雨時，趨避樹下，反為危險，不可不注意焉。

373. **避雷針**。防止雷擊之設備，曰**避雷針**，目的在使電量不致蓄積太多，即為之開一方便之路，以免人畜受害。法用一金屬棒立於屋頂或建築物之最高處（圖 405），上端削尖，下端用

粗導線，銲接於金屬板，而深埋地中。帶電之密雲下降時，則地面由感應作用而生之電，即經由尖端而徐徐逸散，藉以減除雷擊現象之形成。

### 習題六十九

(1) 一物體若能吸收一帶正電荷之通草球，此物體之帶電狀況若何，即帶正電或負電，或無電荷？若能將帶正電荷之球拒斥，則又如何？

(2) 由上題之答案，問吸引之現象，為檢驗電荷之正確之法，抑可疑之法？拒斥現象，是否更為確定？

(3) 如何可使驗電器帶有一定符號之正電或負電？

(4) 將帶電之棒，移近帶有負電之驗電器，則金箔之張開加大，問棒上所帶為正電抑負電？又金箔之張開減小時，棒上所帶何電？

(5) 由靜電感應，使金箔驗電器帶電時，應先移去手指，抑先撤去帶電之感體？金箔驗電器所帶之電，與感體為同號抑異號？

(6) 祇有一金箔驗電器，一玻璃棒，一綢巾，如何能驗出其他物體上所帶之電為陰為陽？

(7) 若一絕緣之金屬球上帶負電荷，如何使另一絕緣之金屬球，可由之得正電荷？第一球將失去電荷否？若欲使另一球，由之得負電荷，當如何辦法？此時，第一球失去電荷否？

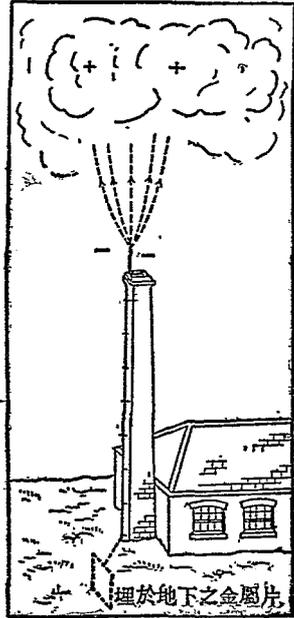


圖 405. 避雷針。

(8) 起電實驗表演，何以在冬季比在夏季容易？如在潮濕天氣施行實驗時，須將所用儀器先行曝曬，或用火烘乾，何故？

(9) 佛蘭克林氏 (Franklin) 在雷雨中，曾作有名之實驗，將風箏用金屬線放入雲中，即見金屬線之下端與地面間，有火花發生。此實驗之意義為何？佛蘭克林氏是否用手握住金屬線？用手握住，有何危險？

(10) 靜電器械，普通皆免除尖端，何故？

(11) 雷擊可將高樹之樹皮完全剝盡，而不及樹身，為何如此？

## 第七十章

### 電位與電容

374. 電位。盛水於容器中，水量愈多，則器中之水位亦愈高。又加熱於物體，熱量愈多，則物體之溫度亦愈高。同理，授電於導體，電量愈多，則密集於導體之表面者亦愈甚。此種導體帶電之狀態，通常皆用電位(potential)以表之。

一容器內水位之高低，雖由水之多寡而定；若兩容器內之水位高低，則不能單由水量之多寡以定之。如圖 406，盛同量之水於截面面積不同之二器中，則截面較小之容器中之水位，高於截面較廣之器中者。此時而欲決定二器內水位之高低，必須採用其他方法始可。例如圖中所示開啓連通此二器底部之活門 V 時，則水必自水位較高之器中，流向水位較低之器中，吾人由此水流之方向，即可判定此二器中水位之高低是。

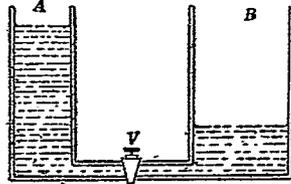


圖 406.

比較溫度之高低，原理亦然。一物體之溫度，固由其熱量之多寡而定。若欲比較二物體溫度之高低，則非專事測量熱量所能決定。然若使二物體相接觸，則熱當由溫度較高之物體，傳至溫度較低之物體。故由熱之傳導方向，即可判斷此二物體溫

度之高低。

同理，一導體電位之高低，固由其電量之多寡而定，然若比較二導體電位之高低時，則亦不能僅視電量之多寡而決定之，必須應用比較二容器內之水位，或二物體之溫度之同樣方法始可，即以導線連通帶電之  $A, B$  二導體時，設其間毫無電之移動，則兩



圖 407.

者之電位，謂之相等。若正電由  $A$  移於  $B$  時，實際上即電子由  $B$  移於  $A$  時（圖 407），則  $A$  之電位，高於  $B$  之電位；若電移動之方向與

此相反，則  $A$  之電位低於  $B$ 。由此可知正電量與電位之關係，恰與水量與水位之關係，或熱量與溫度之關係，完全相似。

在導體上二點間之電位，如有差別，則電即將移動。故導體上之電平衡靜止時，則其各部分之電位，自必相同，此時之電位，謂之導體之電位。導體帶正電時，其電量愈多，則電位亦愈高；帶負電時，其電量愈多，則電位反愈低。二導體間電位之差，稱為電位差 (potential difference)，或稱電壓。

§375. 電位之單位。水之自上向下流動也，所能做功之量，以上下兩點間水位之差，與流過之水量之相乘積決定之。同理，電由較高電位流於較低電位時，亦能作一定量之功，其所作之功，亦係由兩點間之電位差與流過之電量之相乘積以定之。因之由功與電量之測定，可以量出兩點間之電位差。通常皆以

1 [庫侖]之正電，流於電位相異之兩點間，所做之功為 1 [焦耳]時，此兩點間之電位差為電位之單位，稱為[伏特](volt)。[伏特]由實用之電量單位[庫侖]，與實用之功的單位[焦耳]導出，故為電位之實用單位。

摩擦起電或感應起電，所得之電量雖微，而其電位頗高。一普通之感應起電機，兩極間之電位差極易達到數萬[伏特]，但每[秒]鐘所能供給之電量，不過千分或萬分之幾[庫侖]，故其功率僅數百分之一[馬力]耳，自不能作工業上之應用。電池與發電機則反是，所能供給之電量多，而電位不高。

§376. 電容。盛水於容器，水位之高低，視其截面面積而定。加熱於物體，溫度之升高，視其熱容量而定。同理，授電於導體時，其電位之上升，亦視導體之形狀及大小而定。

使導體電位升高一單位時所需之電量，謂之此導體之電容 (electric capacity)。設授某導體以 1 [庫侖]之電，致其電位增高 1 [伏特]，則此導體之電容，謂之 1 [法拉](farad)。是[法拉]為電容之實用單位也。

今授  $Q$  [庫侖]之電，於有  $C$  [法拉]電容之導體，其電位因之升高  $V$  [伏特]時，則其間關係當如下式：

$$Q \text{ [庫侖]} = C \text{ [法拉]} \times V \text{ [伏特]}.$$

地球為一大導體，電容非常之大，故任給多少之電，其電位殆不稍變。因之地球之電位，可視作永無變更者，吾人即以地球之電位為零，而用作比較電位之標準，其理由與以海面高度為零。

而用作測量之基點相同。導體之電位，高於地球者為正，低於地球者為負。因此，帶正電導體之電位為正，帶負電者電位為負。

〔法拉〕之單位甚大。以地球而論，其電容亦不過萬分之七〔法拉〕而已。通常取〔法拉〕之百萬分之一，以作電容之單位，曰〔微法拉〕(microfarad)，萬億分之一，曰〔微微法拉〕(micro-microfarad)。

§377. 容電器。導體之以容電為目的，而能蓄積多量之電者，曰容電器(condenser)。將一絕緣之金屬板  $A$  與驗電器相連(圖 408)，若使  $A$  板帶電，則見金箔張開，帶電愈多，張開愈甚，故驗電器亦可用以測量  $A$  板之電位。用另一與  $A$  相似之

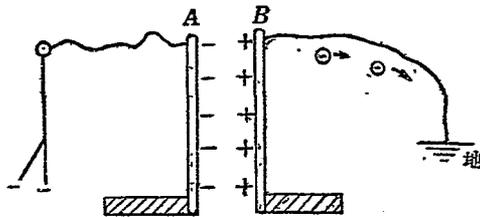


圖 408。

金屬板  $B$ ，與地相連，將  $B$  平行移近於  $A$  時，則見金箔之張開減小，將  $B$  再行移去，金箔又復張開如前。可見  $B$  板移近  $A$  時， $A$  板之電位降低，但其電量未變，是  $A, B$  間之電容增大矣。

欲明示此點，可將  $B$  板再行移近  $A$  板，必須在  $A$  板添加電荷，方能使金箔張開至原來之位置，即  $A$  板恢復其原有之電位，

是可知  $A$  板之電容量，因有通地之板  $B$  與之接近而增大矣。  
其理由可解釋如次：

設  $A$  板帶負電荷，即較尋常時有過多之電子，若將通地之  $B$  板移近之，則由感應作用， $B$  板後面之電子順導線而流入地中，故使  $B$  板帶正電荷。 $B$  板上之正電荷，將吸引驗電器金箔之一部分電子上移，以致金箔之張開減小；即帶正電荷之  $B$  板，使  $A$  板電子之容量增加。

如是  $A, B$  兩板，即成平常所謂平行板容電器 (parallel plate condenser)，一帶正電，一帶負電，謂之容電器之兩極。兩板之面積愈大，距離愈小，則電容愈大。

如兩板間之絕緣體係屬玻璃，其電容約等於其間為空氣時之四倍。又其間為硫黃時，電容約等於為空氣時之三倍。普遍言之，容電器中為某介質時之電容，等於為空氣時之  $k$  倍，此  $k$  之值，稱為介質常數 (dielectric constant, 或 specific inductive capacity)。

來頓瓶 最早於荷蘭來頓大學，有人於廣口瓶之內外壁敷以錫箔，作為兩極，而成容電器，此即現今尚通用之來頓瓶 (Leyden jar) 也，往往數個並聯，電容相加而更大(圖 409)。欲將此種來頓瓶蓄電，可將其

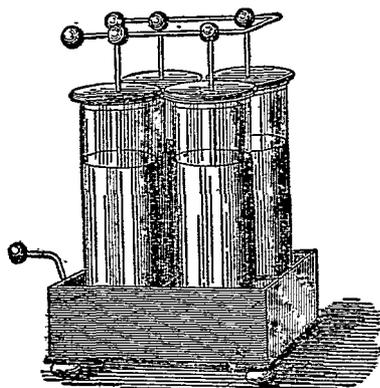


圖 409. 來頓瓶。

頂上之球聯接於起電機之一極，而外面之錫箔則與地連通。蓄電後，以鑲有玻璃柄之金屬叉(圖 410)，一端觸於外箔，他端接近球頭，則生火花而放電，以相中和。

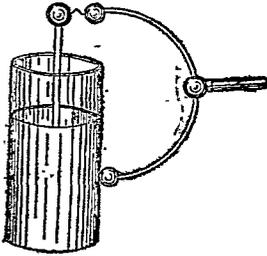


圖 410. 萊頓瓶之放電。

工業上所用之容電器，有時輒以兩長條之錫箔爲之，中間夾以長條之蠟紙以爲絕緣，更捲緊之，庶使便於處理。如是可得巨大之面積與極小之距離，所成之電容量，因之頗大；惟紙薄而弱，極易爲放電火花

所穿破，故此種紙容電器之電位，不能甚高。

可變電容器(variable condenser)通常用於無線電收音機，如圖 411 所示。其中有許多半圓形金屬片，分成兩組平行排列，互相交錯。一組固定不動，一組裝於中央可旋轉之軸上。動片完全在定片之間時，電容最大；若將動片漸漸轉出，以減小兩組間片與片相對之面積，則電容隨之減小。無線電收音機之調諧(對準頻率，見後 § 453)，即在改變可變容電器之電容。

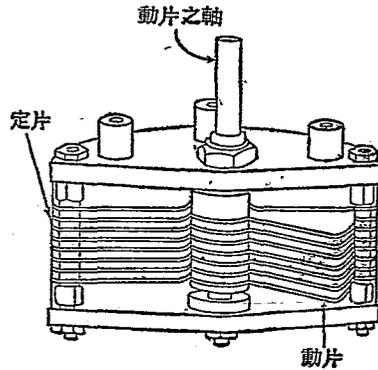


圖 411. 可變容電器。

## 習 題 七 十

- (1) 將一個帶電體，與一個絕緣而不帶電的金屬體，以導線相聯，有何變化，結果如何？是否相連後，兩者所帶之電量相等？
- (2) 容電器之功用為何？其電容量，由何而決定？
- (3) 將來頓瓶放在掌上，使其蓄電，雖容電極多，而手上並不感覺，且亦不致由手將其上所帶之電傳導他去，何故？
- (4) 一容電器之電容為  $0.002$  [微法拉]；其兩極間之電位差不能超過  $15,000$  [伏特]，否則即將放電，電花在其介質中穿過以致破碎。問此容電器所能容之最大電量若何？
- (5) 帶有電荷之驗電器，其金屬棒之上端為一圓板。在此圓板上面移近另一與地相連之圓板，問驗電器之電容有無改變？此時金箔之開張，即見減小，何故？

## 第七十一章

### 電 流

§378. 靜電與動電。在十九世紀之前，吾人所知之電，皆為靜止者（靜電），有如在前面數章所述。偶或提及電在導體上之移動與火花放電，然皆為時甚暫，不過數百萬分之一〔秒〕耳。迨後電池發明，始有運動之電，可以川流不息，足供吾人之研究。發電機出世，電流之應用日廣。

§379: 簡單電池。公元1800年，意大利科學家伏爾塔氏 (Volta) 發見藉化學作用，使生電位差，而得電流之法，製成電池

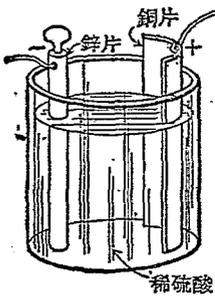


圖 412. 簡單電池。

(electric cell)。將銅片及鋅片，放在玻璃缸中，各不相連，將稀硫酸傾入(圖412)，則見銅片不為酸所作用，但鋅片即為氣泡(氫)所包圍，且逐漸消蝕，溶化於酸中。即鋅原子變成能溶於水之鋅離子 ( $Zn^{++}$ )，電子留於金屬之鋅片上，使之帶負電荷。

用靈敏之驗電器可知銅片帶正電荷，鋅片帶負電荷，意即鋅片上有多餘之電子，銅片上欠缺電子。將一導線聯結電鈴及掣鈕於電池之兩片上(圖413)，則鈴發聲，

即知有電流 (electric current) 由一片流至他片。

任何兩導體，皆可以用以代銅及鋅，但兩板則必須為不同之物質。同樣，其他之液體，亦可用之以代硫酸，但所用之液體，即所謂電解質 (electrolyte)，必須與其中之一片能起化學作用。較難消蝕之片如銅，謂之正極 (positive electrode)，另一片如鋅，謂之負極 (negative electrode)。

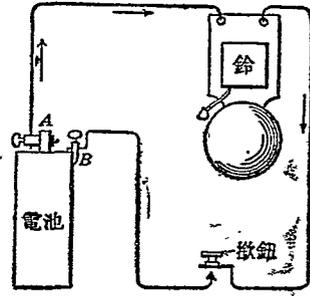


圖 413.

**380. 電流之方向。** 電池正極之電位，較負極者為高，習慣上即以自正極至負極，為電流之方向。實則電子由負極經過導線流向正極，恰與所謂電流之方向相反，此則不可不注意者也。

**§381. 電流之單位。** 電流可比之水管中之水流。導線中每一單位時間內，所流過之電量，稱為電流之強度。每〔秒〕間通過 1〔庫侖〕之電量之電流強度，曰 1〔安培〕(ampere)，此〔安培〕為電流之實用單位也。千分之一〔安培〕，曰〔毫安培〕(milliampere)。

通過電燈絲之電流，約為十分之幾〔安培〕；通過電車之馬達，乃有數百〔安培〕；通過電話耳機，則不到 0.1〔安培〕。

§382. 電路。電流之繼續不斷而流動也，必須有一完全之循環路線，謂之電路 (electric circuit)。在圖 413 中，電池外之電路包括電鈴、揷鈕、及導線，謂之外電路；在電池中之部分——兩金屬片及液體——稱為內電路。外電路中，電流由銅片 (正極) 經過導線流至鋅片 (負極)，而內電路中，則由鋅片經過液體流至銅片，以成一完全之循環。若截斷電路，即將外電路割斷，則電流中止，但電池兩極上之電位差依然存在；故若將兩極再接聯之，即接通電路，則電流又循環流動。

§383. 電功與電功率。有電量  $Q$ ，由電位高處流至電位低處，設  $V$  為此兩點之電位差，則所成之功為

$$W \text{ [焦耳]} = Q \text{ [庫侖]} \times V \text{ [伏特]}.$$

若此工作於  $t$  [秒] 鐘內完成，則電流之強度為  $I = Q/t$ ，於是得電功率

$$P \text{ [瓦特]} = I \text{ [安培]} \times V \text{ [伏特]}.$$

### 習 題 七 十 一

- (1) 在電池之液體中，電子由正極移動至負極，抑由負極移動至正極？
- (2) 在 2 [分] 鐘內，有 80 [庫侖] 之電流過導線。求電流之平均強度。
- (3) 某電路中之電流強度為 0.5 [安培]，問每 [小時] 內流過之電量有多少？
- (4) 將鹽水放入家用之鉛桶內，再用銅絲懸一碳塊，浸入鹽水中，即可造成一電池。試自行實驗之。

## 第七十二章

### 電動勢與電阻

§384. 電動勢。電池何以能使電路中之電流繼續不斷？此與用一唧筒，使水在管中流通之情形相似。電池可想像為推動電荷，即推動電子，之機械。

如圖 414 中之兩水箱 A 及 B，A 之水面較 B 為高，另以裝有唧筒之管，自 B 之底部連於 A 之底部。

兩箱貯水不滿，將唧筒開動，水由 B 箱壓入 A 箱，則 A 中之水面升高，

由溢水管流回 B 箱，祇要唧筒不停，水流不止；故此處唧筒之作用，在使兩箱及管中之水，成一完全循環也。此與電池在電路中之情形相同。

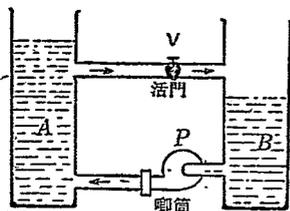


圖 414.

若溢水管頭裝活門 V，以司啓閉。當其關時，B 中之水不久即被抽空，唧筒雖可繼續動作，但已無水可抽，則管中將無水可流。此與電流之外電路被截斷時情形相同。電池之兩極，仍保有電位差，但無電流。此時電池兩極之電位差，且較電流通時為大（見後 § 391）；亦猶 A 箱之水面，以 B 箱水盡時為最高也，稱為電池之電動勢 (electromotive force)。

苟無唧筒之動作，則管中水流，待 A, B 兩箱水面相平時，即行

停止。此與兩帶電導體，以導線相聯，雖有電荷移動，但瞬息即止之情形相同。

電池之電動勢，有一定之值，由於兩極之金屬性質及電解質之種類而定，與其極之形狀，大小，或液體之多少無關。用鋅片，銅片，與稀硫酸所製成之電池的電動勢，約為 1 [伏特]；通常之乾電池，約為 1.5 [伏特]，鉛蓄電池 (§ 412) 約為 2 [伏特]。至於供給電燈用電之發電機的電動勢，通常為 110 [伏特] 或 220 [伏特]。

§385. 電池之聯結法。 各個電池之電動勢，既屬一定，且僅一，二[伏特]而已，故吾人每將若干電池聯合使用，以成電池組 (battery of cells)。

串聯 順次將第一電池之正極，與第二電池之負極相聯，第二電池之正極，又與第三電池之負極相聯，如圖 415，成為串聯 (connected in series)。電流由第三電池之正極，流經外電路，回至第一電池之負極，再陸續在各個電池中流過。若每個

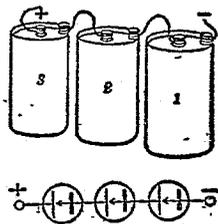


圖 415. 電池之串聯。

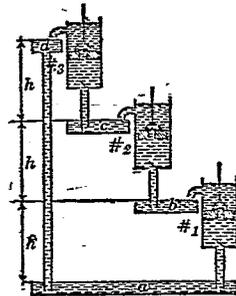


圖 416. 串聯電池之水的鬱壘。

電池之電動勢為 1.5 [伏特]，則此電池組之電動勢，即第三電池之正極與第一電池之負極間之電壓，等於 4.5 [伏特]，此仍可由水之譬喻，以唧筒代電池(圖 416)而知之。

並聯 有時需要之電流強度頗大，非單個電池所能負擔，則用並聯(connection in parallel)。如圖 417，將各電池之正

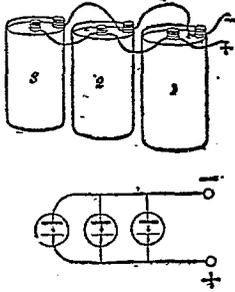


圖 417. 電池之並聯。

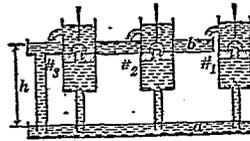


圖 418.

並聯電池之水的譬喻。

極互相聯結，成爲電池組之正極，各電池之負極互相聯結，成爲電池組之負極。此時電池組之電動勢，可由水之譬喻(圖 418)，知其與單獨一個電池之電動勢相同；但外電路之電流則由各個電池分別負擔，大家不至過於吃力。

§386. 電阻。 電流之強度，不僅繫乎電動勢之大小，且隨所用之導線而異，即同一種類金屬之導線，在同一電動勢之下，線粗者電流強度大，細者強度小，與水流經由粗細不同之導管流過時，恆受管內阻礙之情形相似。導線對於電流之阻礙，稱爲電阻(electric resistance)，其實用單位，曰[歐姆](ohm)。1 [歐姆] 即導線兩端受 1 [伏特] 之電壓作用，其電流恰爲 1 [安

培]時之電阻。此值又與截面面積 1 [平方毫米], 長 103.3 [厘米] 之水銀柱, 在 0°C. 時, 對於電流所呈之電阻相同。

命  $l$  [厘米] 表導線之長,  $S$  [平方厘米] 表其截面面積, 則導線之電阻  $R$  為

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ [歐姆]},$$

式中之  $\rho$ , 表一常數, 由導線之物質之種類而定, 稱為電阻係數 (specific resistance)。在普通金屬中, 銅之電阻係數特小, 僅較銀略大, 故導電用之電線, 多以銅線為之。

例如 1000 [呎] 之 10 號粗銅線, 其電阻約為 1 [歐姆]。通常用以接電鈴之 18 號細銅線, 長 160 [呎], 或同號之鐵線, 長 26 [呎], 均有 1 [歐姆] 之電阻。電鈴上線卷之電阻, 約為 1.5 至 3 [歐姆]; 電話耳機約有 60 [歐姆]; 40 [瓦特] 之電燈鎢絲, 白熱時約有 300 [歐姆]。

§387. 電阻器。凡儀器之構造, 其主要部分在於電阻, 而其應用即在電阻者, 統稱為電阻器。其電阻每可任意變換, 變換之值, 不難估出, 如滑動變阻器是; 有時且將電阻之值, 逐部標明於器上, 俾可直接讀出, 如插頭電阻箱是。此等電阻器主要之應用, 大致如下:

(1) 接於電路中, 逐漸變換其電阻之值, 務使電流達於或不超過所需之強度, 故可為調節電流之用。

(2) 測量未知電阻時, 用以作為比較之標準, 且可作其他電的

測量之用。

調節電流所用者，通常以滑動變阻器(rheostat)為多。用鎳銅線或錳銅線，如圖 419 所示，繞在瓷管上，相鄰部分，各不接觸，兩端各聯於接線頭上。上部有一金屬棒，與第三之接線頭相聯，棒上套一銅片，由彈條將其壓緊，使其與筒上之鎳銅線接觸，且可左右滑動。用時，將線端任一接線頭及第三接線頭，接入電路中，滑動圓筒上之接觸銅片，因之鎳銅線接入電路中之部分可多可少，而電阻即隨之增減。

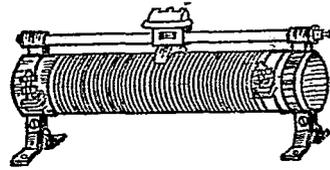


圖 419. 滑動變阻器。

作為比較未知電阻之標準者，吾人常用插頭電阻箱(resistance box)。用錳銅線繞成各種電阻線卷，使各線卷之電阻，恰為〔歐姆〕之個，十，百，千之整數倍，兩端各連於黃銅塊 A, B, C 等上(圖 420)。此等黃銅塊固定於硬橡膠板之箱蓋上，各塊斷而不連，但如插入黃銅插頭，即連成一片，電流經由插頭流過。

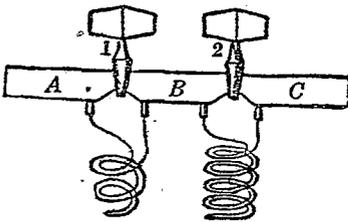


圖 420. 電阻線卷。

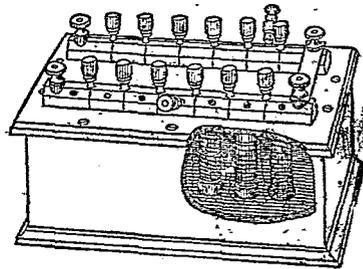


圖 421. 插頭電阻箱。

拔出插頭，則電流經由兩銅塊間之電阻線卷中流過，此一線卷即加入於電路之中，而顯其電阻作用矣(圖 421)。

## 習 題 七 十 二

(1) 有乾電池 8 個，每個之電動勢為 1.5 [伏特]，每 4 個電池串聯，成爲二組，再將此二組電池並聯，問其二端之電動勢若何？

(2) 有電阻 880 [歐姆]，爲長 1 [哩]，重 1 [磅] 之銅線，另一段銅線亦重 1 [磅]，但僅有一半之長，求其電阻。

(3) 有銅絲一段長 1 [米]，直徑 0.2 [毫米]，其電阻爲 0.41 [歐姆]。求銅之電阻係數。若同長之銅棒，直徑爲 2 [厘米]，則其電阻多少？

(4) 已知銀、銅、鐵、鉛之電阻係數，各爲  $1.49 \times 10^{-6}$ ， $1.57 \times 10^{-6}$ ， $9.64 \times 10^{-6}$ ，及  $19.63 \times 10^{-6}$ ，求長 1 [呎]，直徑 0.001 [吋] 之銀、銅、鐵、或鉛線之電阻。

(5) 以直徑 0.04 [毫米] 之錳銅線，繞成 1000 [歐姆] 之電阻線卷，問須線長多少？已知錳銅之電阻係數爲  $46.7 \times 10^{-6}$ 。

(6) 手電筒中所用二個或三個乾電池，係串聯抑或並聯？

## 第七十三章

### 電 路

§388. 歐姆定律。由上章所述，可知若無電動勢，則閉合之電路中亦不能有電流之流動，又知電流之強度，為電路之電阻所節制。然則，在一電路中(圖 422)，電動勢，電阻，電流三者間之關係如何？

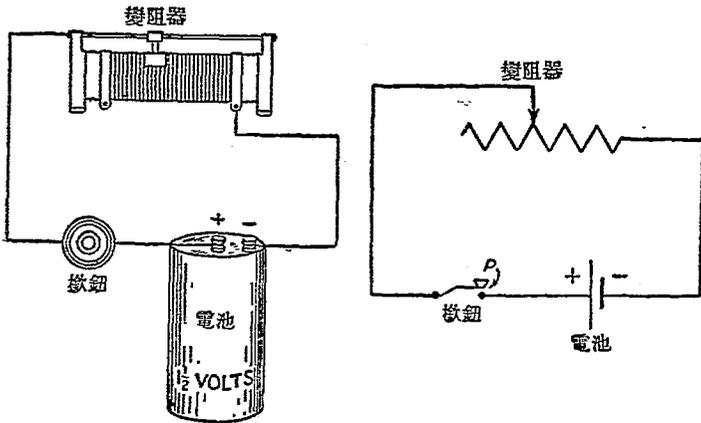


圖 422.

由實驗結果，知電流與電池或發電機之電動勢成正比，而與電路之電阻成反比，是為歐姆定律(Ohm's law)，即

$$\text{電流} = \frac{\text{電動勢}}{\text{電阻}},$$

或以符號表之，為

$$I[\text{安培}] = \frac{E[\text{伏特}]}{R[\text{歐姆}]}$$

即  $E[\text{伏特}] = I[\text{安培}] \times R[\text{歐姆}]$ 。

【例】有一電池，其電動勢為 1.5 [伏特]，聯於電路中。若外電路之電阻為 3.63 [歐姆]，電池之內電阻為 0.12 [歐姆]，則電路之電阻共為  $3.63 + 0.12 = 3.75$  [歐姆]。由歐姆定律，得電路中之電流為  $1.5/3.75 = 0.4$  [安培]。

由此可見歐姆定律中之電阻，係指全電路中之總電阻而言。

§389. 串聯電路。 於一電池組  $E$  與電珠 (手電筒內用之

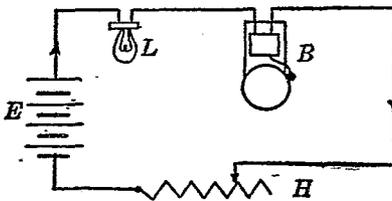


圖 423. 串聯電路。

小燈泡)  $L$  所成之電路中，先後添入電鈴  $B$  與變阻器  $H$ ，如圖 423 所示，則燈光變暗，電鈴雖鳴而聲微。

數個用電之器，如電珠，電鈴，及變阻器等，前後聯結，

即在單線路逐個聯結，謂之串聯，以成單一之完全電路。在此電路之各部分中，電流相等，各部分電阻之和，為電路之總電阻，以總電阻除總電動勢，即得電路中之電流強度。

【例】電池組為四個電池串聯而成，每個之電動勢為 1.5 [伏特]，內電阻為 0.12 [歐姆]，則電池組之總電動勢為  $E = 4 \times 1.5 = 6$  [伏特]，總內電阻為  $r = 4 \times 0.12 = 0.48$  [歐姆]。又設電珠之電阻為  $R_L = 8.5$  [歐姆]，電鈴之電阻為  $R_B = 2.12$  [歐姆]，變阻器之電阻為  $R_H = 13.9$

[歐姆]，則電路之總電阻，為

$$R = r + R_L + R_B + R_H \\ = 0.48 + 8.5 + 2.12 + 13.9 = 25 \text{ [歐姆]}.$$

於是由歐姆定律得電流之強度，為

$$I = \frac{E}{r + R_L + R_B + R_H} = \frac{6}{25} = 0.24 \text{ [安培]}.$$

§390. 歐姆定律得應用於局部電路。歐姆定律不僅可應用於完全電路，且得應用於電路之各段，即各段兩端間之電位差，等於各該段之電阻與電流之相乘積(圖 424)。此等電位差，謂之沿電路各段之電位降落 (potential drop)。

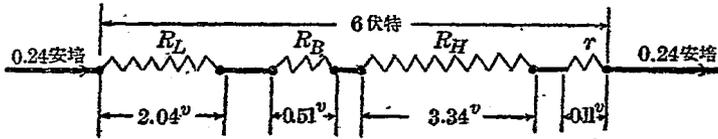


圖 424. 串聯電阻。

在上節之例中，因電流為 0.24 [安培]，得電珠兩極間之電位降落為

$$E_L = IR_L = 0.24 \times 8.5 = 2.04 \text{ [伏特]};$$

電鈴兩端間之電位降落，為

$$E_B = IR_B = 0.24 \times 2.12 = 0.5088 \text{ [伏特]};$$

變阻器兩端間之電位降落，為

$$E_H = IR_H = 0.24 \times 13.9 = 3.336 \text{ [伏特]};$$

電池組內兩極間之電位降落，為

$$E_C = Ir = 0.24 \times 0.48 = 0.1152 \text{ [伏特]}.$$

各段電位降落之和，適等於電池組之電動勢，即

$$\begin{aligned} E &= E_L + E_B + E_H + E_C \\ &= 2.04 + 0.5088 + 3.336 + 0.1152 = 6 \text{ [伏特]}. \end{aligned}$$

故在串聯電路中，各部分之電流相同；串聯電阻之總電阻，等於各電阻之和；各段之電位降落，等於電流與其電阻之積，因之與各段之電阻成比例。

**§391. 電池之端電壓與其電動勢之區別。** 由上兩節之例，知電池發生電流時，其兩極間之電位差  $V$ ，即所謂端電壓 (terminal voltage)，恆較其電動勢  $E$ ，即開路電壓 (open-circuit voltage) 為小，而有  $V = E - Ir$  之關係， $r$  表電池之內電阻。此種事實，若知電動勢為用以使電流通過電池之內電阻，同樣亦用以使電流通過外電路之其他電阻者，則可明矣。

因電池之一部分電動勢，須用以克服內電阻，故內電阻必須儘可能使之減至最小，此於使用大電流時為益然。

**§392. 導線上電壓之降落。** 已知電池之端電壓，常較其電動勢為小。同樣，若電流從發電廠流經頗遠之距離，則在接受處之電壓，常較發電機上之端電壓為小。此導線上之電壓降落等於電流與導線電阻之積。此雖為不可避免之事實，通常用戶中電線上電壓之降落，不應大於所規定者之 2%。

**§393. 並聯電路。** 若將 §389 所舉例中之電珠與電鈴，平

行聯結於電池之兩極，如圖 425 所示，則通過電珠與電鈴二者之電流，必不相等，兩者之和等於通過電池之電流。

二個或多個用電器，平行聯結，使電流分開，謂之並聯。

圖 426，示兩導線各有 2 [歐姆] 及 8 [歐姆] 之電阻，用並聯法聯結之，其 A 及 B 兩端間之電壓為 6 [伏特]。應用歐姆定律，即得在 8 [歐姆] 電阻上之電流，為  $\frac{6}{8} = 0.75$

[安培]，2 [歐姆] 電阻上之電流為  $\frac{6}{2} = 3$  [安培]。可知較大之電流 3 [安培]，流過較小之電阻 2 [歐姆]，較小之電流 0.75 [安培]，流過較大之電阻 8 [歐姆]。而兩電阻並聯時，電路中之總電流為  $3 + 0.75 = 3.75$  [安培]。

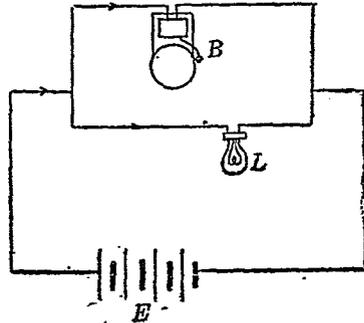


圖 425. 並聯電路

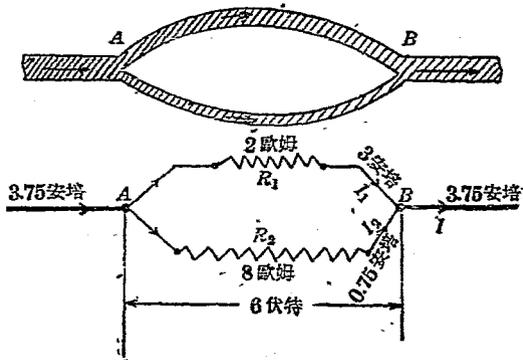


圖 426. 並聯電阻。

至於兩電阻之聯合電阻，即  $A$  與  $B$  間電路中之總電阻，可再用歐姆定律以求之。 $A$  與  $B$  間之電壓為 6 [伏特]，電流為 3.75 [安培]，則其電阻必為

$$\frac{E}{I} = \frac{6}{3.75} = 1.6 \text{ [歐姆]}.$$

由此知在並聯電路中，兩電阻之聯合電阻，較各個電阻為小，此無足異者。蓋  $A$  與  $B$  之間既有數個路線，可讓電流通過，自較單獨路線時更為暢行，電阻即形減小也。若三線並聯，則聯合電阻必更小。

總之，各並聯電阻上之電流與其電阻成反比，即：

$$R_1 : R_2 = I_2 : I_1;$$

而聯合電阻  $R$  為

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

此與兩水箱有數管連通時之情形相同，其理至為明顯。二管中所流過之水，必較一管中者為多；有三管之時，必將更多。故若兩箱中之水管加多，支配總流量之阻礙，反形減小。

故在並聯電路中，各並聯電阻之電壓皆相等；並聯組合上之總電流，為各支路電流之和；並聯組合上之聯合電阻之倒數，等於各電阻之倒數之和。

【例 1】將兩相同之電池，陽極與陽極相聯，陰極與陰極相聯，而成一全電路（圖 427）。在此電路中，自無電流發生，



圖 427.

其理至顯。因左邊電池所發生之電流及右邊電池所發生之電流，強度相等而方向相反，結果電路中無電流，或云此電路中之電動勢之和為零也。

【例2】若將上例之並聯電池之兩極間，接一電阻  $R$ ，如圖 428 所示，則此兩電池部分成為並聯電路。設  $r$  為每個電池之內電阻，則兩電池之聯合內電阻為  $r/2$ 。又設  $E$  為每個電池之電動勢，則外電路中之電流為。

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{2}}$$

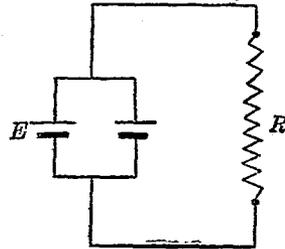


圖 428.

若  $R$  遠較  $r$  為大，此時之電流與單用一個電池聯接於  $R$  者相差甚微，但每個電池僅各供給一半之電流也。若  $R$  遠較  $r$  為小，此時之電流較之單用一個電池者，幾大一倍，而每個電池所供給者則未加多。須知電池所能負擔之電流，恒有其不宜超越之限度，此所以需要大電流時，每將數個電池並聯而用也。

捷路 在任何複雜之電路中，若於電池之兩極間，直接一段導線，則此段導線與其他之外電路成為並聯，一段導線電阻甚小，而並聯電阻較之此段導線之電阻尤小，以致通過電池之電流，突然增大甚多，幾全經此段導線流過，遂成捷路 (short circuit) 而決流。捷路不可成，決流宜避免，以免電池負擔過重而燒壞也。

§394. 電燈之裝置。家用電燈均並聯於兩輸電幹線之間，如圖 429 所示。如是一電燈之熄滅，不致截斷其他電燈之電路；又一電燈之添加，

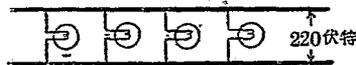


圖 429. 電燈之裝置

亦不影響通過其他電燈之電流強度。

電燈幹線間之電壓，常為 220 [伏特] 或 110 [伏特]，各種電燈即依此等電壓而製成，電燈絲之電阻，隨其長短粗細而有一定。若以 220 [伏特] 之電燈泡，裝於 110 [伏特] 之電燈線上，則以其電阻過大，流過之電流過小，電燈欠明；反之，若以 110 [伏特] 之電燈泡，裝於 220 [伏特] 之電燈線上，則以其電阻過小，流過之電流過大，燈絲燒斷。

【例 1】 有 50 [瓦特]，用於 220 [伏特] 之電燈泡，求其電阻。

電功率為電壓與電流之積 (§ 383)，電燈泡之電壓，既為 220 [伏特]，所費之電功率為 50 [瓦特]，可知流過之電流為  $50/220 = 0.227$  [安培]。又由歐姆定律，電燈泡之電阻，為  $220/0.227 = 968$  [歐姆]。

【例 2】 某家裝有 50 [瓦特]，220 [伏特] 之電燈 12 盞，求流入此家輸電幹線中之電流。

每一電燈之電阻，由上例知為 968 [歐姆]。12 盞電燈並聯之聯合電阻當為  $968/12 = 80.67$  [歐姆]。由歐姆定律，得輸電幹線中之電流為  $220/80.67 = 2.727$  [安培]，適為上例中流過一盞電燈內者之 12 倍。可見每盞電燈內之電流，不因電燈盞數之增多而減小。但吾人所費之電能，與所付之電費，自然以輸電幹線中流入之電流為準，電表即裝在幹線上。若用此 12 盞電燈，歷 5 [小時]，則所費電能為  $12 \times 50 \times 5 = 3000$  [瓦特·時] = 3 [仟瓦·時]，即俗稱 3 [度] 也。

§395. 電流與電壓之量度。工業用之電學儀器，可在刻度盤上，直接讀出電流強度之 [安培] 數者，曰安培計 (ammeter)，讀出電位差之 [伏特] 數者，曰伏特計 (voltmeter)。

用安培計，以測量某電路中之電流，須使此電流通過安培計；即將安培計串聯於電路之中，如圖 430 所示之插入電燈電路中是。但電路之電流，決不可因安培計之插入，而大減其強度，此必安培計本身之電阻甚小而後可。故精確之安培計，其電阻皆甚小，愈小愈好。

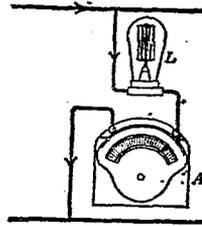


圖 430. 安培計測量電燈電流。

測量使電流流過用電器之電位差，無須將電路拆斷，祇須將伏特計之兩端，並聯於用電器之兩端即可。由此可知流過用電器之電流，將有一小部分分流於伏特計中，因而使用電器兩端之電壓降低。欲使因此而降低之電壓，儘可能的減小，必須並聯之聯合電阻，幾等於用電器之電阻，即伏特計之電阻，對於用電器而言，為無窮大。

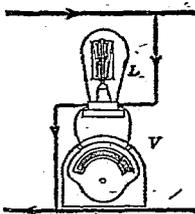


圖 431. 伏特計測量電燈之電位差。

圖 431 示伏特計與電燈並聯，以測定電燈兩端之電位差。

將伏特計聯接於電源如電池之兩極，所指示者為電源之端電壓，伏特計之電阻愈大，則與電動勢相差愈微。故一精確之伏特計，電阻極大，愈大愈好。

明瞭安培計及伏特計之正確用法，十分重要。安培計串聯於電路之中，而伏特計則與電路並聯。若誤將安培計與電路並聯，將因流過之電流太強，而致燒毀，不可不注意焉。

## 習 題 七 十 三

(1) 欲使電路中之電流加倍，下列各種辦法中，何者是對的？(a)加倍電動勢；(b)加倍電阻；(c)同時加倍電阻與電動勢；(d)減半電阻；(e)減半電阻同時加倍電動勢。

(2) 已知電路中之電動勢為 50 [伏特]，電阻為 10 [歐姆]，求其電流。若電阻增至 180 [歐姆]，則電流將為若干？

(3) 電鈴之電阻為 3.2 [歐姆]，欲使其動作，至少須有 1.6 [安培]之電流流過，問須用幾個乾電池串聯？

(4) 一住宅內，要裝數個電鈴，應將其串聯抑或並聯？

(5) 試繪圖以說明電燈線路中床頭開關之裝法。

(6) 一人修理電線插頭，當 0.005 [安培]電流通過時，使之發生無害之震動；但在浴盆內接通電流時，因有 1.15 安培之電流而致死。在二次中電壓同為 110 [伏特]，求每次之電阻。

(7) 有 100 [安培]之電流通過 4 [呎米]長之銅線，此線之直徑為 1.8 [厘米]，銅之電阻係數為  $1.57 \times 10^{-6}$ 。求在此線上電壓之降落。

(8) 三導線各有電阻 6, 15, 及 34 [歐姆]，求其串聯時之聯合電阻。

(9) 三電阻一為 30 [歐姆]，一為 40 [歐姆]，第三者不知，與一安培計串聯，安培計上之指示為 2.5 [安培]，線上之總電壓為 220 [伏特]。求 (a) 未知之第三電阻；(b) 30 [歐姆]電阻兩端之電壓；及 (c) 40 [歐姆]電阻兩端之電壓。

(10) 12 個蓄電池，各有 2.2 [伏特]及 0.006 [歐姆]，接連而成電池組。問電池聯接以生 (a) 最大之電動勢，或 (b) 最小之內電阻時，全電池組之電動勢及電阻各為若干？

(11) 將上題之 12 個蓄電池，分成 3 組，每組 4 個互相串聯，再將 3 組

並聯，與  $22$  [歐姆] 之外電阻相連，問通過每個電池之電流多少？

(12) 火車之電池組，由  $18$  個  $2.2$  [伏特] 之蓄電池串聯而成，每一蓄電池有內電阻  $0.008$  [歐姆]。車上有  $30$  盞  $60$  [歐姆] 之燈並聯，總線上有電阻  $0.5$  [歐姆]。問電燈皆亮時，(a) 由蓄電池流出，及 (b) 每一燈上流過之電流各為若干？

(13) 三用電器並聯於  $112$  [伏特] 之電路上，其總電流為  $20.8$  [安培]，若第一器之電阻為  $10$  [歐姆]，第二器為  $20$  [歐姆]，第三器之電阻多少？又通過此三用電器之電流各為若干？

(14) 安培計與伏特計外表相同，若一學生誤將伏特計代安培計，與燈串聯，將得何結果。又若誤將安培計代伏特計，與燈並聯，將得何結果？

(15) 用伏特計與安培計，求電鈴之電阻，兩者各應放在下列何位置，方為正確？(a) 與電鈴串聯；(b) 與電池串聯；(c) 與電鈴之兩端並聯；(d) 與電池之兩端並聯。

若伏特計之指示為  $5.6$  [伏特]，安培計之指示為  $1.8$  [安培]，問電鈴之電阻多少？

(16) 有  $4$  個蓄電池串聯，而成電池組，每一電池之電動勢，為  $2.1$  [伏特]，內電阻為  $0.008$  [歐姆]。一用電器所可通過之電流規定為  $2.4$  [安培]，其電阻為  $1.8$  [歐姆]，與一變阻器，串聯於電池組之兩極。利用變阻器，使用電器中之電流，合於規定之值，問變阻器之電阻若何？此時用電器兩端與電池組兩極之端電壓各為若干？用電器每[小時]所耗之電能多少？電池組每[小時]所供給者多少？

## 第七十四章

### 電流之熱效應

§396. 電流之效應。已知電流僅為電子之移動。電子雖非人目所得見，但由其移動所成之電流，而從電流效應之研究，所知亦已不少。例如，吾人皆熟知電燈泡中之燈絲白熱發光，

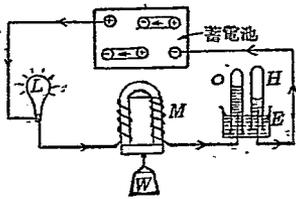


圖 432. 電流之效應。

是電流之熱效應也；電鈴之錘，敲鈴作聲，是電流之磁效應也；水中加酸後之分解為氫與氧，是電流之化學效應也。

將一 6 [伏特] 之蓄電池，與小電燈  $L$ ，電磁鐵  $M$ ，及一簡單電

解器  $E$  相串聯(圖 432)，而成一完全電路，將見此三種效應，同時進行。反之，在任何電路中，見一種或數種效應正在進行，如電燈在亮或電鈴在鳴，即可斷定電路中電流之存在。由此三種效應，皆可測知電流之強度；但熱效應不能指示電流之方向，此與磁效應及化學效應不同耳。

§397. 用電生熱。電流經過導線，則導線發熱，其細者可成白熱，甚至燒斷，如電燈絲是。在電鈴，電報，或電話之線中，生熱甚慢，且即傳遞而散失，故每不覺察其溫度之升高，但非不

生熱也。反之，專門利用電流之生熱，以供給熱量者，則有各種電熱器(圖 433)。電熱器之發熱部分，多為電阻係數甚大，熔點

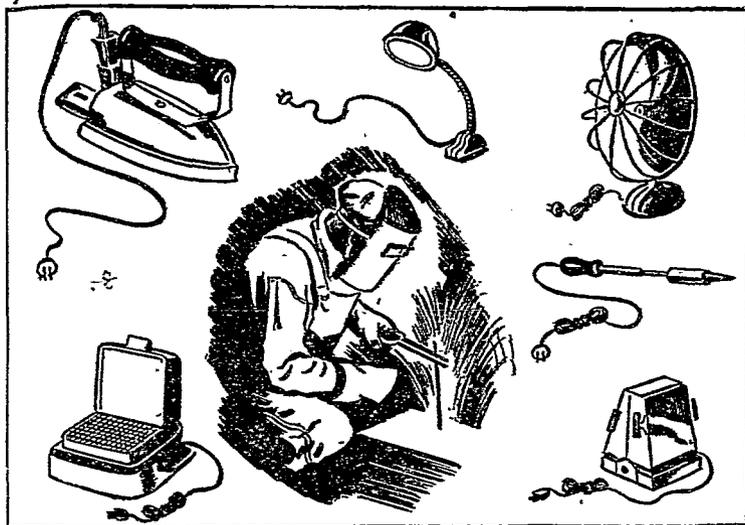


圖 433. 電流生熱之應用。

甚高之金屬線，如鎳鉻齊(nichrome)等，卷於耐火性而絕緣之物體上而成。故通以電流時，金屬線即成赤紅而發大熱，以供吾人之使用。電熨斗，電爐，電烹飪器等，皆為家常電熱器之最普通者。

§398. 焦耳定律。試就電路中之一部分而論之，其兩端之電壓為  $E$ ，其間之電阻為  $R$ ；在此部分內，既無電源如電池與發電機，亦無做工之電動機等存在，則其所有之電能，將全變為熱

量。

設  $I$  為流過此部分電路中之電流強度，在  $t$  [秒] 鐘內，流過之電量為  $It$ ，所費之電能 (§383) 為  $W = EIt$ 。又由歐姆定律，知

$$E = IR, \text{於是得}$$

$$W = I^2 R t \text{ [焦耳]。}$$

此部電能，變為熱量。由熱功當量 (§219)  $W = JH$ ，知 1 [焦耳] 等於 0.24 [卡]，故得

$$H = 0.24 I^2 R t \text{ [卡]，}$$

是為焦耳定律 (Joule's law)。式中  $H$  表熱量之 [卡] 數， $I$  表電流之 [安培] 數， $R$  表電阻之 [歐姆] 數， $t$  表時間之 [秒] 數。凡由電流而生之熱量，與電流強度之平方，電路之電阻，及經歷之時間等為正比例，此可將此部分電路納入量熱器中 (圖 434) 而證明之也。

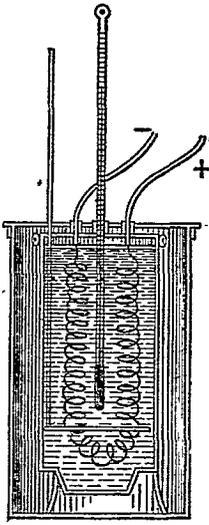


圖 434. 電量熱器。

【例】設有一段導線，浸於量熱器之水中，電流為 4 [安培]，歷 520 [秒] 後，水之溫度升高  $12.5^\circ\text{C}$ 。已知量熱器之水及水當量，共為 1480 [克]，求此段導線之電阻。

電流所發生之熱量為  $1480 \times 12.5$  [卡]。由焦耳定律，得導線之電阻

$$R = \frac{H}{0.24 I^2 t} = \frac{1480 \times 12.5}{0.24 \times 4^2 \times 520} = 9.39 \text{ [歐姆]。}$$

一切之情形中，吾人之目的不在利用電流之發熱作用時，熱仍不斷發生，恆使能量消損，非特不合吾人之願望，且覺可厭，但此

乃電流之本性使然，爲無可如何之事也。輸電導線中電壓之降落 (§ 392)，所消損之電能，即因其變爲熱量，而逸散空中。

電流發熱之現象，應用頗多。

§399. 保險絲。 欲預防過量電流，而燒毀電線與機件等，必須裝有安全設備，使其能自動截斷電路。在家庭中之電燈線路上，都用保險絲 (fuse wire)，即係一段鉛錫合金絲，熔點頗低，裝在瓷盒內，遇導線上電流過量時，即先被熔解，而使電路中斷，以免危險。電路中，偶或不慎而成捷路 (§ 393)，亦可因保險絲之燒斷，俾機件得免於難。

§400. 電燈。 現代電燈 (圖 435) 之燈絲，多爲純粹之鎢絲。以鎢之電阻係數甚大，線又極細，通常粗約 0.003 [吋] 耳，故每單位長度之燈絲電阻極大。在其他部分導線之溫度並不甚高時，燈絲已因電流通過而白熾發光，約達  $2300^{\circ}\text{C}$ ，但鎢之熔點極高，在  $3000^{\circ}\text{C}$  以上。燈絲之一端，由插頭之底，他端由其側面導出外方。鎢絲電燈之發光效率，爲每 [燭光] 約需 1.2 [瓦特]，即 50 [瓦特] 之電燈泡所發之光度，約爲 40 [燭光] 也。



圖 435.  
電燈泡。

§401. 電弧。 用碳棒兩條，使其兩端相接，電流自其內通過，然後將兩端稍行離開，則白色火燄即成弧形，而飛躍於此兩極間，如圖 436，是曰電弧 (electric arc)。弧之溫度約在  $3000^{\circ}$

C 上下，其光甚烈，可作強光源，如探照燈等之用，因又名弧光燈(arc lamp)。

§402. 電爐及電煨。 利用電弧所生之熱，可使熔點極高之物體熔化，及作各種高溫之實驗，如是者曰電爐(electric furnace)。電爐在冶金工業上，應用甚大。

兒童常喜觀察鐵匠將鐵棒燒至紅熱，以錘擊之，使其煨合一起。今日則又可用電，使其煨合較易。當兩端接觸時，通以極強之電流，因接觸處之電阻甚大，所生之熱不久即可使其達到可以煨合之溫度。此種方法，現在通用於修理電車軌道及鋼廠中。最近橋梁及各種建築中之鋼架，漸多不用鉚釘接合，而用電煨合者，以其更為堅固也。



圖 436. 電弧。

#### 習題七十四

- (1) 保險絲何以多用鉛絲而不用銅絲？試就鉛與銅之熔點及其電阻係數比較之。
- (2) 祇許有 15 [安培] 之電流通過處，若使用 30 [安培] 之保險絲，有無危險？
- (3) 通過 20 [安培] 之保險絲與通過 10 [安培] 之保險絲，孰粗孰細？其理由安在？
- (4) 一 110 [伏特] 之小電熱器中之電流為 6.2 [安培]，求其電功率。

問每[小時]能放出熱量多少?

(5) 一  $10$  [歐姆]之電阻線,在  $10$  [分]鐘內,將  $1000$  [克]之水由  $15^{\circ}\text{C}$  熱至  $70^{\circ}\text{C}$ ,須用若干電流?

(6) 在同時間內,何者能發較多之熱量,一  $600$  [瓦特] 電熨斗,一  $600$  [瓦特]烘麵包器,或一  $600$  [瓦特]電燈?

(7)  $50$  [瓦特]之電燈,並聯在  $110$  [伏特] 之幹線上,至多能裝幾盞電燈,可使  $15$  [安培]之保險絲不致燒毀? 若幹線上之合法限制為  $1320$  [瓦特],可用此燈若干盞?

(8) 比較一  $50$  [瓦特]  $110$  [伏特],與一  $25$  [瓦特]  $110$  [伏特]之燈之電流,電阻,及燈絲之截面積,假設兩燈絲之長度相等。

(9) 設每  $1$  [燭光]需  $1.05$  [瓦特],問  $60$  [瓦特]之鎢絲燈,能發出若干燭光?

(10) 某探照燈須  $100$  [安培]之電流,電位差  $60$  [伏特],在  $110$  [伏特]之線上,必須有電阻若干與之串聯? 設此弧光之強度為  $128,000$  [燭光],問每[燭光]須多少[瓦特]?

(11) 通常金屬之電阻係數,因溫度而增加。鎢在  $20^{\circ}\text{C}$  時,電阻係數為  $5.5 \times 10^{-6}$ ,電阻之溫度係數為  $0.0045$ 。一  $50$  [瓦特]  $110$  [伏特]鎢絲電燈,用一乾電池,一伏特計,與一安培計,測得其電阻為  $40$  [歐姆]。問此燈接在  $110$  [伏特]之線上而點着時,其溫度約為若干? 又鎢絲長  $12$  [厘米],求其直徑。

## 第七十五章

### 電流之化學效應

§403. 溶液導電。液體可依其傳導電流之情形，大別之為三類：第一類如各種之油，不能導電。第二類如水銀或其他熔化後之金屬，既善導電，又不為電流引起分解。第三類如各種

酸類，鹽類，及鹼類之水溶液等，亦能導電，但同時有分解作用相伴而生。屬於第三類者，特稱之曰電解質(electrolytes)。由電流使液體分解之現象，曰電解(electrolysis)，即電流之化學效應也。

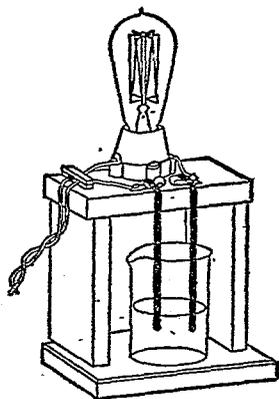


圖 437. 液體導電之試驗。

(圖 437)，並用一電燈泡與之串聯，然後聯於電燈線路或蓄電池上。若電燈亮時，則知插有導線之液體為導體，否則為非導體。

§404. 水之電解。用數滴硫酸，使水略帶酸性後，極易在圖 438 所示之裝置中，用電流分解之。管中之兩鉑片，即為電

解器之兩極，聯於至少有 10 [伏特] 之電池組上。A 管中之電

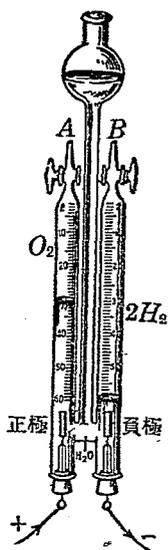


圖 438. 水之分析.

極聯至電池之正極，B 管中之電極聯至電池之負極。電流在溶液中，由正極流至負極。兩極發出小氣泡，而 B 管中收集之氣體，就體積言，為 A 管中之二倍。B 管充滿時，將電流停止，而檢驗兩管中之氣體。用火柴試驗，B 管中氣體能燃燒而發淡藍色之火燄，故知為氫。若將燃餘之松木移近 A 管，又能使之復燃，故知為氧。

由此知硫酸之水溶液，可用電流分解成氫及氧。所以加入硫酸之故，乃因純水為電之不良導體；若將實驗後之溶液加以分析，可由其濃度，而知硫酸仍完全存在。茲再研究其作用發生之理。

§405. 電解之學說。 電解作用可解釋如下：

當少量之硫酸( $H_2SO_4$ )加入水中後(圖 439)，硫酸分子即分離而成二個氫離子( $2H^+$ )及一個硫酸根離子( $SO_4^-$ )，是為電離(ionization)。電流通過溶液時，帶正電之氫離子稱為陽離子，以其移向負極又稱陰

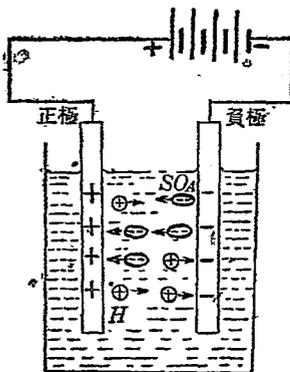
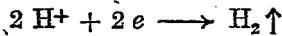
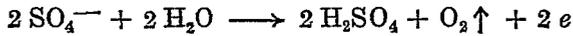


圖 439.

向離子(cation);而帶負電之硫酸根離子,稱為陰離子,以其移向正極,因又稱陽向離子(anion)。在負極上,氫離子獲得電子( $e$ ),成氫分子之氣泡而升至水面,即



在正極上,硫酸根離子失去電子後,與水( $\text{H}_2\text{O}$ )作用,再成硫酸,而放出氧氣( $\text{O}_2$ ),即



在此過程中,用以導電而加入之硫酸,並未用去;而水則被分解,成氫與氧。

同理,置兩銅板於硫酸銅( $\text{CuSO}_4$ )溶液中,通以電流之後,則銅之陽離子,移向負極,而沈積於其上,硫酸根之陰離子,移向正極,與正極之銅化合,復成硫酸銅,而使溶液之濃度不變。於是負極銅板之質量漸增,而正極銅板之質量則漸減;且正極所減之重,適等於負極所增者。

**§406. 電解在工業上之應用。** 在工業方面,電解應用極廣,可用以製造化學品,例如大量之氧與氫,通常即由水之電解而製得,此外則常應用於下列三途:(1)金屬品外面,鍍一層較悅目而且耐性較大之另一種貴重金屬;(2)印刷術中之電鑄;與(3)精煉金屬。

(1) 電鍍(electroplating) 以欲鍍之物體為負極,而以鍍於他物之金屬為正極(圖 440),溶液中並須含同金屬之離子。如鍍金時,用金氰化鉀(potassium auri-cyanide)溶液,而以

金爲正極；鍍銀時用銀氰化鉀溶液，而以銀爲正極；鍍鎳時用硫酸鎳鉍溶液，而以鎳爲正極等是。

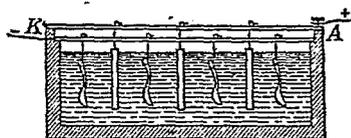


圖 440. 電鍍槽。

(2) 電鑄(electrotyping) 讀者或以爲書籍，係用鉛字排印，其實並不盡然。銷行極廣之書，通常用電鑄板印刷之。將鉛字排好後，用蠟製成印模，使筆畫明晰留於模上，而陰陽適與原型相反。但蠟爲非導體，故須於模面上塗以石墨之粉末，以賦予導電性後，聯接於電鍍器之負極，而以銅板作爲正極，以行鍍銅手續。待銅層積聚至相當厚度，將其剝落，於其反面，用熔鉛澆填平滿，使成堅定之印版，可備隨時印刷，而無重排之煩。

(3) 電煉(electrorefining) 由熔煉廠所得之金屬如銅，每不夠純淨，不能供製造傳電之導線及電纜之用。故電機中所用之銅，須先用電解法精煉之。以粗銅爲正極，純銅之薄片爲負極，溶液爲硫酸銅。爲電流所沈積於負極上之銅，則甚爲純淨，商業上稱之爲電解銅。正極之粗銅，漸漸溶解，不潔之雜物沈至電解器底，而成渣泥。此渣泥中，又常含少量之金與銀，每可抵償電解之所費也。

其他鋁，鎂等純粹金屬，亦多由電解精煉而成。

§407. 法拉第電解定律。 法拉第氏(Faraday)由實驗研究之結果，得下列關於電解之兩定律：

I. 電解所得物質之質量，與電流之強度，及時間之相乘積。

即電之總量，成正比例。

II. 以同一電量；電解各種物質，所得之質量，與各物質之化學當量成正比例。

上律中所謂化學當量(chemical combining equivalent)云者，為以物質之原子價(valence)，除其原子量(atomic weight)，所得之商之謂。例如氫之原子價為1，原子量為1.008；氧之原子價為2，原子量為16；銀之原子價為1，原子量為107.9；故氫，氧，及銀之化學當量，分別為1.008，8，及107.9。

又以1[庫侖]之電量，通過電解質而析出之物質之質量，謂之此物質之電化當量(electro-chemical equivalent)。設通於電解質之電流為*I*[安培]，時間為*t*[秒]，所析出之物質為*m*[克]，其電化當量為*k*時，則由法拉第之兩定律，得

$$m = kIt.$$

如有一種元素之電化當量為已知，則其他各種元素之電化當量，即皆可由其化學當量算出。根據實測，已知氫之電化當量為0.00001045[克/庫侖]，則原子量為*W*，原子價為*n*之元素之電化當量*k*，為

$$k = 0.00001045 \times \frac{W}{n}.$$

以之代入上式，得，

$$m = 0.00001045 \times \frac{W}{n} \times It.$$

於是利用電解現象，藉一天平與時鐘之助，可為電流強度之測定

矣。

§408. 國際安培及庫侖。事實上，科學界皆同意用化學效應來規定〔安培〕。關於電解，於銀知之最為詳確。國際間乃公認沈積 0.001118 [克] 之銀之電量，謂之 1 [庫侖]，而每〔秒〕沈積銀 0.001118 [克] 之電流，謂之 1 [安培]。如是銀之電化當量，依定義為 0.001118 [克/庫侖]。

§409. 離子之電荷。由前節法拉第定律，可知電解一價物質，而得一〔克原子〕時，所需之電量為一定，不因離子之種類而異，且與外界任何環境無關。此一定電量之值，為一價物質之原子量，除以電化當量。根據最有把握之用銀測量，其值為

$$\frac{107.9}{0.001118} = 96500 \text{ [庫侖]};$$

二價物質，則二倍之；三價物質，則三倍之，餘類推。

但一〔克原子〕或一〔克分子〕之物質，所含原子或分子之數，皆屬相等，同為  $6.06 \times 10^{23}$  個，即所謂阿佛加特羅數 (Avogadro's number) 也。因之，每個一價離子之電荷，必為

$$\frac{96500}{6.06 \times 10^{23}} = 1.59 \times 10^{-19} \text{ [庫侖]};$$

二價離子之電荷，二倍於此；三價離子之電荷，三倍於此。吾人將見此即為電子之電荷；由此可知，一價之陰離子多一電子；一價之陽離子少一電子，或說帶一陽電荷；二價之陰離子多二電

子；二價陽離子少二電子，或說帶二陽電荷也。

### 習題七十五

(1) 在硫酸銅溶液中，通過 5 [安培] 之電流，歷 3 [小時]，問能沈積若干[克]之銅？

(2) 2 [小時]內，用 2.5 [安培] 之電流，沈積 6.09 [克] 之鋅，求鋅之電化當量。

(3) 用 300 [安培] 之電流，提煉 1 [噸] 之銅，須若干[小時]？

(4) 二電鍍器串聯，一鍍金，一鍍銀。當沈積 1 [克] 之銀時，金沈積多少？

(5) 一鐵片須先鍍銅，再鍍鎳。若每一情形下，均用電流 10 [安培]，且須沈積銅與鎳同為 180 [克]，問每次須若干時間？

(6) 電解水時，用 4.5 [安培] 之電流，析出 15 [克] 之氧，問須時若干，並得氫多少？

(7) 用銀電解器以校準安培計，電流流過 2 [小時]，使負極得 43.8 [克] 之銀，而安培計之指示，恒為 5.98 [安培]，問安培計之誤差如何？

(8) 導線中有 0.001 [微安培] 時，每[秒]鐘有多少電子走過導線之截面？

## 第七十六章

### 電池

§410. 電池。簡單電池之構造，已如 §379 所述，與電解池不同。電池將化學能變為電能，而成電流之源；電解池則藉電流作用，而起化學分解，實一用電器也。電池之兩極，必須為不同之兩金屬體，而電解器之兩極則可同，可不同。

十九世紀時，電池在物理實驗及當年之電工業上曾占重要之位置，有丹聶爾電池 (Daniell cell)，本生電池 (Bunsen cell)，勒克蘭社電池 (Leclanché cell) 等各種，然在今日視之，均已成為陳迹，僅屬歷史的資料而已。今日電池之堪供應用者，事實上祇有乾電池之一種。

411. 乾電池 (dry cell)。其構造如圖 441 所示。負極為鋅筒，用作容器；正極為圓形之碳棒，直立中間。鋅筒之內，襯以吸飽氯化銨及氯化鋅之木屑，或吸水紙；碳棒及紙之間，充滿磨細之碳，二氧化錳與銨鹽水溶液之糊狀物。此混合物充滿筒中，離口約 1 厘米，用瀝青固封之。

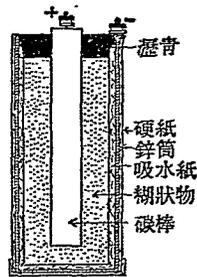
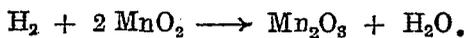
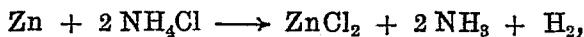


圖 441. 乾電池。

鋅筒之外常塗以漆，或加硬紙板之套。銨鹽溶液之作用，與簡單電池之硫酸相同。其中之化學反應，約如下列：



當一簡單電池，用一導線，將兩極聯接，而成一完全電路時，不久電流減弱，不能保持不變。此為正極板上生成氣體——通常為氫——所致；此種氣體層包圍正極，增加電池之內電阻，並生出一種方向相反之電動勢。此種情形，謂之電池之極化 (polarization)。乾電池中之二氧化錳，與氫化合，即為消去極化之用。因極化之故，使用乾電池時，不宜閉合電路太久，故乾電池宜於不連續之工作，如電鈴，電話，信號，及手電筒等。此種電池之電動勢為 1.48 [伏特]。

§412. 蓄電池。有人以為蓄電池 (storage battery) 為能儲電之一種容電器 (§ 377)，此種觀念，完全錯誤。蓄電池與其他電池相同，其電能亦由化學能而來，惟供給蓄電池化學能之物質，則在充電 (charging) 時電解而成。放電 (discharging) 則又將充電時所成之物質起化學作用而生電流。故藉充電與放電之手續，可由蓄電池，將目前多餘之電流儲蓄起來，以備不時之需。

將兩鉛板 *A* 及 *B* 放入盛稀硫酸溶液之玻璃缸中，即可成一鉛蓄電池 (圖 442)。欲使其迅速充電或“成”板時，可與約有 6 [伏特] 之發電機或電池 *C* 相串聯，按下電鍵 *K*<sub>1</sub>，而使充電電路

閉合，則在正極  $A$  板上放出氧氣，而在  $B$  板上放出氫氣。若干時後，將  $K_1$  開啓，而按下電鍵  $K_2$ ，則見電珠  $L$  發光，此即指示有電流發生，而此“電解池”已成電源而放電矣。並可知  $A$  板之電位約高於

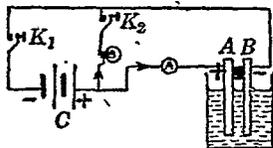


圖 442. 蓄電池之原理。

$B$  板者 2 (伏特)，故  $A$  板為蓄電池之正極， $B$  板為蓄電池之負極。放電時電流之方向，與充電時之方向相反。充電時，電源如發電機或電池之正極，須與蓄電池之正極相聯，負極與負極相聯。

充電後，將鉛板由硫酸中取出而審視之，將見正極  $A$  板變成褐色，因外包二氧化鉛 ( $PbO_2$ ) 之故也；負極即  $B$  板，通常呈純鉛 ( $Pb$ ) 之灰色。

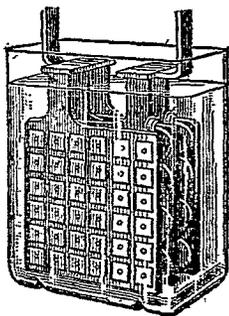
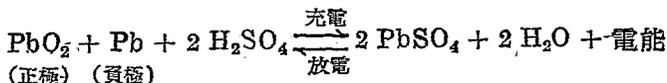


圖 443. 蓄電池。

實際上，商用之蓄電池（圖 443），負極為海綿狀之純鉛，正極為二氧化鉛，電解液則為稀硫酸。在充電時，深褐色之正板上加被二氧化鉛，灰色之負板上，則漸成海綿狀之鉛。在放電時，兩板外面皆逐漸為硫酸鉛所包被。其中之化學變化，可用下列方程式說明之：



又知充電之時，酸液變濃。故蓄電池之狀況，充電是否已飽，或放電是否快完，可由酸液之比重而測知之（圖 444）。蓄電池

之電動勢約為 2 [伏特]；若已降至 1.8 [伏特] 時，即須停止放

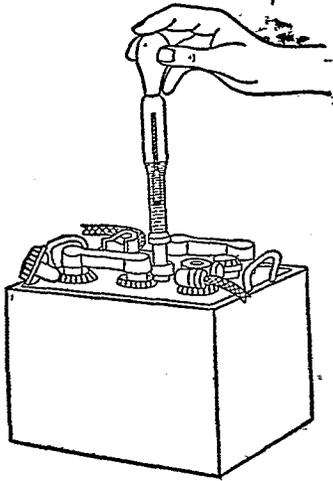


圖 444. 用比重計檢驗蓄電池。

電，待充電後再行使用。蓄電池之量容，依其 [安培·時] (ampere hours) 之容量而定，而放電之標準，通常為 8 [小時]，故 80 [安培·時] 之電池，使用時最適宜之電流，強度為 10 [安培]，可歷 8 [小時] 之久。倘不得已而用到 16 [安培]，則可放電 5 [小時]，或不到 5 [小時] 即宜停止。

最熟知者，為汽車中用以發動，發光及點火之蓄電池，往往

三個電池，串聯組合，因有 6 [伏特] 之電壓。此等電池之容量，約為 60 至 110 [安培·時]。電廠供電，係由發電機發電，但亦常備容量極大之蓄電池組，以節制負荷，及協助“巔負荷”，且用作意外時之預備電力。蓄電池亦用在火車上點燈，此電池由火車轉軸上之發電機充電。實驗室中需要極為固定之電壓時，亦多用蓄電池，而不用電廠供給之電。

### 習題七十六

- (1) 乾電池是否完全乾燥？果真乾燥以後，又將如何？
- (2) 指出乾電池中之各種物質，並說明其作用。其電動勢由何物得

來，電阻因何物而生？

(3) 一乾電池之電動勢為 1.5 [伏特]，其內電阻為 0.14 [歐姆]。若外電阻為 0.25 [歐姆]，求此時電池之端電壓，及在其內部之電壓降落。

(4) 若用六個乾電池為小電鍍器之電源，應將其串聯抑或並聯？何故？

(5) 一新乾電池，用一伏特計量之，得 1.5 [伏特]；用一電阻極小之安培計量之得 30 [安培]，求乾電池之內電阻。在手電筒內，使用二[星期]後，似乎壞了，同樣以伏特計量之，仍得 1 [伏特]，但以 [安培] 計量之，只有 5 [安培]，問其內電阻已增至何值？

(6) 蓄電池之電動勢與鉛片之形狀，大小，及遠近有無關係？其容量（即 [安培·時]）與內電阻由何而定？一蓄電池，有若干鉛片，聯成兩組，以為正負兩極，其理由何在？

(7) 蓄電池充電時，何端須接至電源之正極？加硫酸使充滿電之蓄電池比重增加，有無益處？

(8) 初充滿電之蓄電池，其電動勢每達 2.4 [伏特]，內電阻為 0.01 [歐姆]。欲以 20 [安培] 之電流，充 3 蓄電池所成之電池組，所用之電源，其電動勢至少應為若干？

(9) 90 [安培·時] 之蓄電池組，放電電流 15 [安培]，問使用時間不宜超過幾 [小時]？

(10) 蓄電池之電動勢為 2 [伏特]，內電阻為 0.008 [歐姆]，誤以一粗銅線聯接其兩極，而成捷路，則通過之電流將達何值？

(11) 若外電阻甚小，則串聯電池組之電流，不比一個電池大得多；又外電阻甚大，則並聯電池組之電流，不比一個電池大得多，試解釋之。兩者是否合於實用情形？

## 第七十七章

### 電流之磁效應

413. 奧斯特之發見。在1819年有一驚動世界之發見，因其為最先溝通磁與電之關鍵也。丹麥物理學家奧斯特(Oersted)氏發見導線聯結於

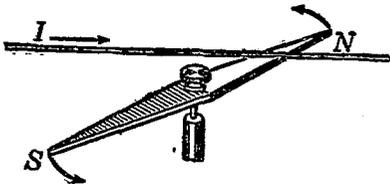


圖 445. 電流使磁針偏轉。

電池之兩極，而放在磁針之上，有電流由南至北通過時，磁針之北極即行向西偏轉(圖 445)。若更

改電流之方向，則磁針偏轉之方向亦隨之變更。由此可知，凡電流經過之處，必有磁之作用存在於其附近。又由磁針偏轉之方向，即可知導線內電流之方向。

§414. 電流四周之磁場。已知磁針指示磁力線之方向(§350)，故由奧斯特實驗，可知

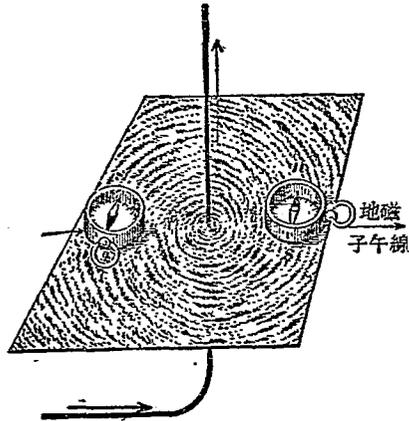


圖 446. 電流四周之磁力線

電流所造成之磁場，與導線成直角。

欲明此點，可在短時間內，使電池之強電流，自下而上，流經穿過水平板之鉛直導線。又欲表明其磁力線，可將鐵屑灑在板上，而於電流通過時輕擊之，則見鐵屑圍繞導線，而成同心環，此即直線電流之磁力線也，如圖 446 所示。

**右手法則** 電流經過導線時，所生磁力線之方向，與電流之方向，有一定之關係，此種關係可藉右手法則表之，以便記憶。若以右手握導線(圖 447)，大拇指指示電流之方向，則彎曲之各指，即示磁力線之方向。反之，若知導體附近磁力線之方向，則應用此右手法則，即可知導體內電流之方向。

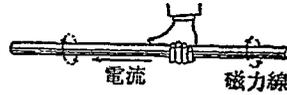


圖 447. 右手法則。

**§415. 線卷之磁場。** 若電流經過一彎曲成環(loop)之導線，則磁力線由一面進環，而由另一面出環(圖 448 乙)。若絕緣之導線，捲成螺旋形之圓筒，所謂線卷(coil)者，

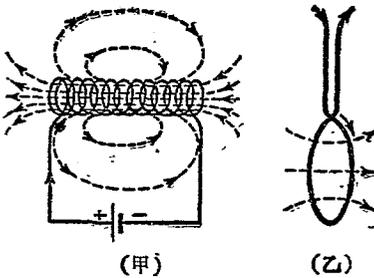


圖 448. 線卷之磁力線。

通以電流時，則線卷內部之磁力線，由各卷之磁力線併合而成，除線卷兩端之近處外，餘皆與線卷之軸相平行(圖 448 甲)，由

一端發出，而由線卷外回至另一端，與條形磁鐵之磁力線情形完

全相同。可知線卷之作用，與磁體之作用完全相等。此種事實可以磁針置近於線卷之兩端，實驗以證明之。在圖 448 (甲) 中，左端為北極，右端為南極。若電流反向，則線卷之兩極，亦南北對調。若電流截斷，則磁場立即隨之消滅。

§416. 電磁鐵。螺旋形之線卷內，當有電流通過時，其作用與一條形磁鐵無異，已詳上節所述。若再於線卷中插入一軟鐵棒，則其磁力更強，而成電磁鐵 (electromagnet)。圖 449 所示，

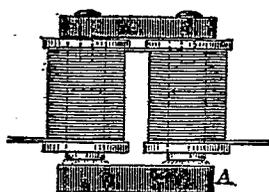


圖 449. 馬蹄形電磁鐵。

即為一種馬蹄形電磁鐵。通電流於其線卷中，即變為磁鐵，將下面之軟鐵塊 A 吸住。停止電流，磁性立失；A 亦自行降落。如是之鐵塊 A，稱為電磁鐵之銜鐵 (armature)。電磁鐵作用之力，與電流

之強度〔安培〕，及導線之環數〔匝數〕之相乘積成比例，即視其〔安培·匝〕(ampere turns)數而定。電磁鐵之每〔平方吋〕面上，每可舉重 100〔磅〕至 200〔磅〕之鐵。

電磁鐵有甚大之力，且其磁性可隨意節制，用途極廣。電磁鐵常為各種機械之主要部分，如電鈴，電報，電話，發電機，及電動機等。

§417. 電鈴。其主要部分，為一馬蹄形之小電磁鐵，以二個或數個電池所成之電池組，使之作用，電路如圖 450 所示。

將揷鈕按住使成通路時，電流即通過電磁鐵之線卷，而吸引銜鐵 A 向左，隨之附着於 A 下端之小錘 H，即擊鈴 G，同時 A 即拉動彈簧 C，使鐘螺旋接觸點 B，而成斷路。此時電流中斷，致電磁鐵失卻磁性，釋放銜鐵，彈簧 S 拉之使回原位，隨之電流復行流通，使錘再行擊鈴。故在按鈕時間內，此種動作，反復不息，鈴聲亦即因以繼續不斷。

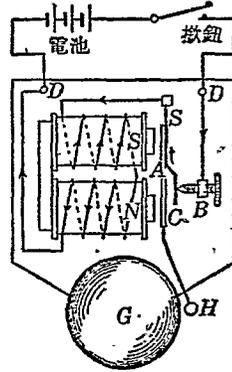


圖 450. 電鈴。

§418. 電報。 利用電流之磁性，可供遠處通信之用。在 1844 年，模斯 (Morse) 氏最早發明之電報，係於紙條上作點線符號以代字母。現時之接收裝置，稱為發聲器 (sounder)，藉發聲間隔之長短，以代點線。故接收電報時，以耳代目。

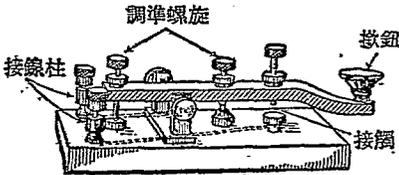


圖 451. 電報用電鑰。

電報發報機之主要部分為一電鑰 (key)，如圖 451 所示，係一精細之揷鈕，以供迅速開閉電路之用，使輸出之電流，時斷時續，或短或長，一依

發送之電文。

聯結發報機與收報機之導線，在理應為二條，然其中一條常以地球代之，作為電流之回路，故在兩站間只有電報線一條 L (圖

454), 裝設費用減省不少。

發聲器(圖 452) 為收報機之主要部分, 由電磁鐵及附於金屬

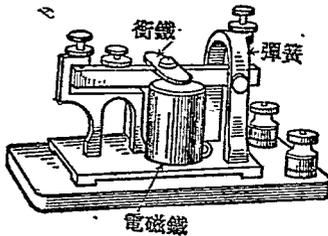


圖 452. 發聲器。

棒之軟銜鐵組成。棒之一點釘牢, 兩端可上下移動。當電流通過電磁鐵時, 棒之一端即隨銜鐵而被拉下; 電流中斷時, 彈簧復將其拉上。金屬棒他端之上下, 有兩固定螺旋, 限制其運動, 並使之發聲。發聲

間隔之長短, 一隨發報站電鑰下按時之情形, 因得辨別其為點為線, 而可譯出電文。

發報與收報兩站相距甚遠時, 由導線  $L$  傳去之電流太弱, 每不足以使發聲器動作。因此乃用一替續器(relay), 以司開閉本地電池組(local battery)

之電路, 此電路中之電流, 可由增加本地電池而加強, 以使發聲器作用。此替續器(圖 453) 為一繞有許多卷細銅絲之電磁鐵, 在磁鐵之前, 則為一輕銜鐵;

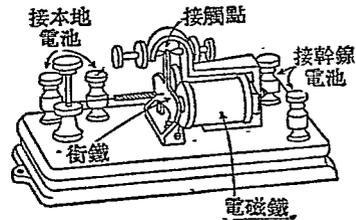


圖 453. 替續器。

用精小之彈簧, 使與電磁鐵分離。接連之法, 見圖 454 所示,  $R$  與  $R'$  為替續器,  $S$  與  $S'$  為發聲器。當發報站之電鑰  $K$  關閉時, 幹路中傳來之微弱電流, 使替續器  $R'$  之電磁鐵吸引銜鐵, 以與固定螺旋接觸, 乃閉合本地電路, 而以較強電流送入發

聲器  $S'$ 。

在圖 454 中,左右兩站裝置所以完全相同者,乃在求其可同為收發之用也。

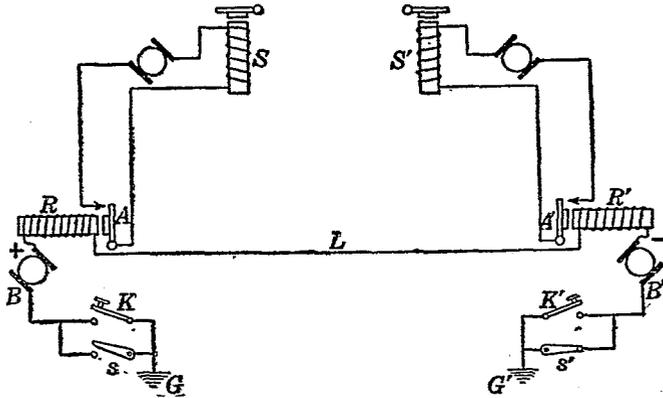


圖 454. 簡單電報電路。

§419. 磁場對於電流之作用。 已知一固定之電路,當電流通過時,可使能自由活動之磁鐵移轉;反之,一固定之磁鐵,亦可使能活動之電路移轉。吾人倘不忘一通過電流之線圈或線卷猶一磁鐵也,則此種現象不難預想而知之。故一導線圓環,如圖 455 (甲)所示之裝置;而以絲線懸掛之一端

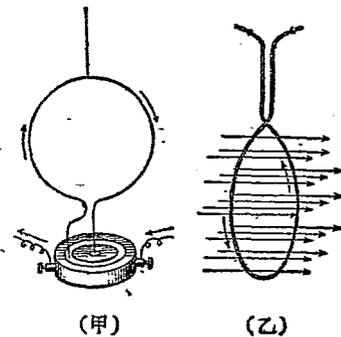


圖 455.

固定，一端可沿水銀溝移動，通以電流時，將轉動而靜止於東西向之鉛直平面內，即其環面與地磁場之方向成正交也(圖 455 乙)。

凡通過電流之導線，置入磁場中，即受一種力之作用。此種之力，名曰電磁力 (electromagnetic force)，乃所以表明磁場對於電流而起者也。

設將電路之導線彎成 U 形，懸掛如鞦韆，以其水平部分置於馬蹄形磁鐵兩極之中間(圖 456)。電流通過導線時，水平線段

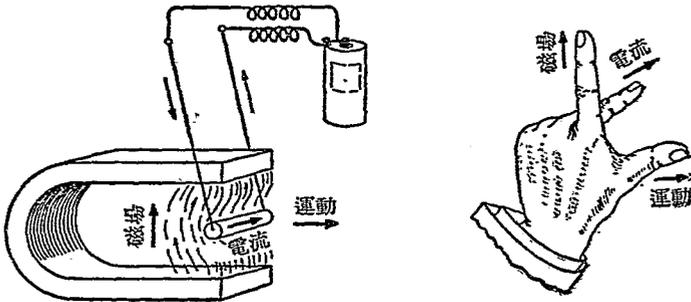


圖 456. 磁場對於電流之作用。

即被推出；若改變電流之方向，則又被吸入。可見電磁力，電流，磁場三者互相正交，且有一定之方向關係。如在圖中，磁場鉛直自下而上，若電流水平自前而後，則電磁力之方向自左而右。此可以左手法則表明之，食指表磁場之方向，中指表電流之方向，則大拇指表電磁力或運動之方向，亦即所謂電動機之三指法則 (motor rule of three fingers) 也。

磁場中對於有電流之導線，所以有力向旁推移者，倘能回憶 §

414 所述電流產生之磁場，其磁力線皆為同心環，即易明瞭。圖 457B 示導線內電流所生之磁場。電流離吾人而直入圖面，故

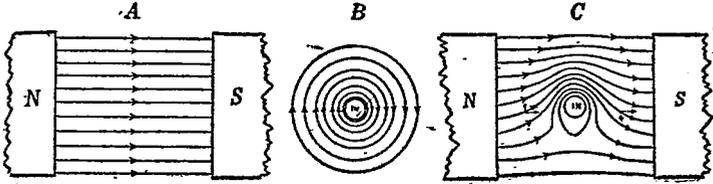


圖 457.

A. 磁鐵之均勻磁場；B. 電流所生之磁場；C. 磁鐵與電流之合成磁場。

其四周之磁力線依順時針之方向。若將此導線放在磁鐵 N 及 S 兩極間之均勻磁場(圖 457A)內，則在導線上方之磁力線，較在下方者密集(圖 457C)。、磁力線宛如有彈性之橡皮帶，在此情形中，能將導線向下推動。若改變導線中之電流方向，則磁力線密集在下，而將導線往上推動。

又若將銅輪用水平軸支住，下緣浸於水銀槽內，放在蹄形磁鐵之兩極間(圖 458)，使電流從下向上通過時，則輪之下部受電磁力作用，按照左手法則所示之

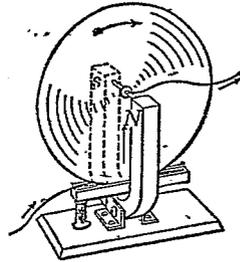


圖 458. 巴羅輪。

方向，將使輪轉動不已，此即所謂巴羅輪(Barlow's wheel)，實一電動機之雛形也。

### 習題七十七

- (1) 置於南北向之電車線下之磁針，N 極指東，問線中之電流方向如

何?

(2) 有一圓形線圈，懸掛於鉛直之南北平面內，若有電流順時針方向通過，則將如何轉動？若掛於東西平面內，又將如何？

(3) 欲在前門及後門各裝一鈴，而只用一電鈴與電池，當如何聯結？

(4) 試繪一圖，表出一蹄形電磁鐵，從其兩端望去，線卷中電流之方向在  $N$  極及  $S$  極兩方面，各應如何？試用箭頭表示之。

(5) 電磁鐵內之鐵心，概用軟鐵，何以不用鋼？

(6) 有二平行之鉛直導線，於其中點懸一小磁針，磁針之靜止位置在此二導線所成之平面內。當二導線中流過強度相等，方向相同之電流時，磁針起何變化？若二導線中電流之方向相反，則又如何？倘磁針之靜止位置，垂直於二導線所成之平面，則情形又將如何？

(7) 二等長之螺線管，一有 70 [匝]，其中之電流為 3 [安培]，一有 50 [匝]，其中之電流為 8 [安培]。此二者之磁力，孰強孰弱？

## 第七十八章

### 電 流 計

§420. 電學測量。 電路中，關於電的各種量如電流，電壓，電阻等之測定，莫不從測量電流入手。至於電流之測定，則可利用其熱，化學，或磁三效應中之任一種。如銀之電解池 (§408)，且用作測定電流或電量之標準；而一根細金屬絲，通過電流發熱伸長，即可以其所伸之長，來決定電流之強度。故電學儀器種類繁多。但為方便與靈敏計，現今以利用電流之磁效應者為多。

§421. 達松發爾電流計。 計量或探測微弱電流之儀器，謂之電流計 (galvanometer)。近代電流計，常由動線卷及定磁鐵構成，是為達松發爾式 (d'Arsonval type)。

圖 459 為電流計之簡單形式。多匝之線卷，由極細之導線繞於甚輕之長方形金屬架上而成，即以導線之一端，懸掛線卷於永久蹄形磁鐵之兩極  $N$  及  $S$  間，他端聯於線卷下之接線柱。在輕架之內，又有一固定之軟鐵柱，其用意在於增強軟鐵柱與永久磁鐵空隙間之磁場。當電流通過線卷時，其鉛直兩邊即受電磁力作用，而使線卷轉動。轉動之多少，與電流之強度成比例，由指針在標尺前表示之。

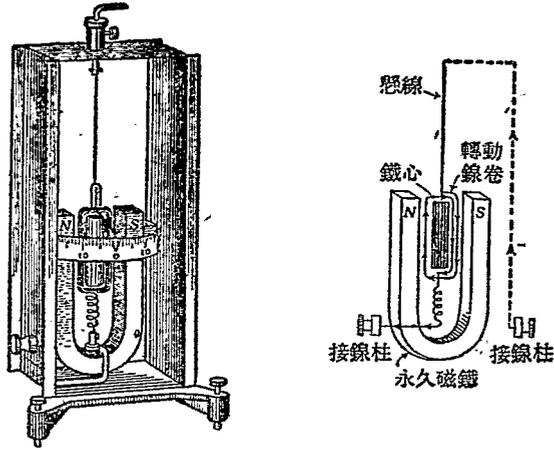


圖 459. 達松發爾電流計。

§422. 安培計。精細之手提安培計，即為轉動線卷電流計，惟線卷不用線懸，而支持在寶石軸承上。線卷上之電流，即由控制轉動之上下游絲彈簧引之出入(圖 460)。由裝於轉動線

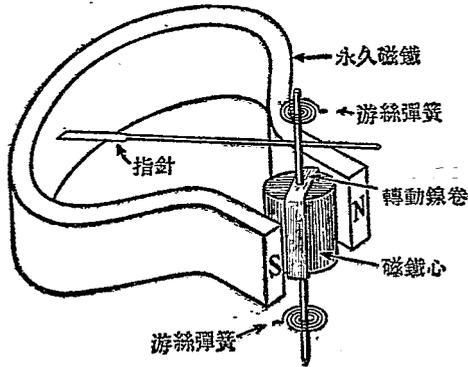


圖 460. 安培計之構造。

卷上之指針，即可在刻度盤上，直接讀出電流之〔安培〕數。錄卷轉動之方向，隨電流之方向而改，故此種安培計祇適用於直流電流。電流應自安培計之正(+)接線頭流入，由負(-)接線頭流出(圖 461)。

安培計之錄卷，僅能負擔甚弱之電流，最大為  $1/20$ 〔安培〕。故量強大電流者，常於其兩接線頭間聯一金屬片，或粗導線(圖 461)，使大部分之電流即由金屬片通過，而成所謂分流錄路(shunt)簡稱分路。因錄卷中經過之電流，為全電流中不變之分數，仍可由刻度盤上，讀出全電流之〔安培〕數。

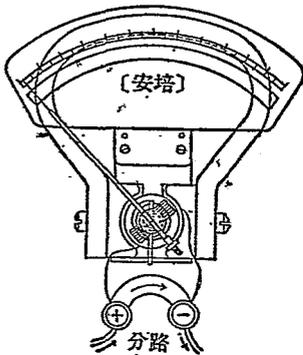


圖 461. 安培計。

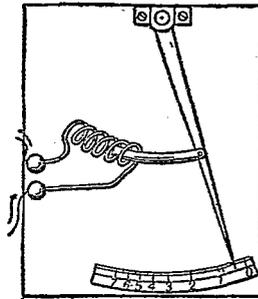


圖 462. 鐵心安培計。

轉動錄卷之電學儀器，價值昂貴，工業上測量之不需十分精密者，輒以軟鐵儀器代之。如圖 462 所示，欲測之電流在固定之錄卷中流過，軟鐵條即被吸引，一端進入錄卷之內，電流愈強，則吸入愈深，隨之聯結於鐵條之指針，即在刻度盤上轉動，指出電流之〔安培〕數。軟鐵條運動之方向，與電流之方向無涉，故此

種軟鐵儀器，不僅可用以測直流，即交流亦可用之。

§423. 伏特計。此實為一高電阻之電流計耳。通常即於安培計內，加一電阻線卷，與轉動線卷串聯，如圖 463 所示。所進入之電流，與兩接線頭間之電位差成正比，故由刻度盤上即可直接讀出電壓。由此可見伏特計，所示者雖為〔伏特〕，所量者實為電流也。

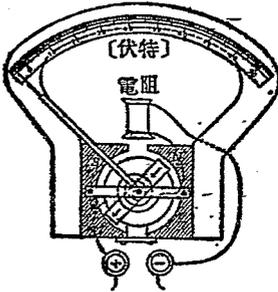


圖 463. 伏特計。

伏特計與安培計，在電路中之聯接法，已於 §395 言之。

§424. 電阻之測量。若不須十分精確，測量電阻之最簡單方法，為應用安培計與伏特計。欲測之電阻  $R$ ，須與安培計串聯，而與伏特計並聯，如圖 464 所示。應用歐姆定律，電阻等於電壓除以電流。

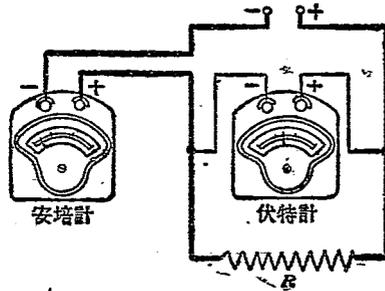


圖 464. 用伏特計及安培計測量電阻。

§425. 惠斯登電橋。測量電阻，更精確之方法，為用惠斯登電橋 (Wheatstone bridge)。在電池之電路中 (圖 465)，自一點  $A$  分為兩路，在另一點  $B$  復合為一。每路上各有二個電

阻為  $R$  與  $X$ , 及  $m$  與  $n$ 。因  $A$  之電位高於  $B$ , 故由  $A$  或經  $C$  至  $B$ , 或經  $D$  至  $B$ , 電位均次第降落。在  $ACB$  上任取一點  $C$ ,

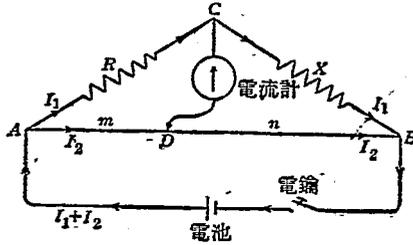


圖 465.

同時必可在  $ADB$  上求得一點  $D$ , 其電位與  $C$  相等。用導線聯結如是之  $C$  與  $D$ , 其中插一電流計, 將不呈偏轉。'  $A$  與  $C$  間之電位降落為  $I_1 R$ , '  $A$  與  $D$  間之電位降落為  $I_2 m$ , 兩者相等, 即  $I_1 R = I_2 m$ 。同理有  $I_1 X = I_2 n$ , 於是得

$$\frac{X}{R} = \frac{n}{m}$$

如  $R, m, n$  三電阻為已知, 則電阻  $X$  立可算出。實際上, 祇須知  $n$  與  $m$  之比, 而不必知其值, 故  $ADB$  通常為一根拉直之銅絲, 如圖 466 所示,  $m$  與  $n$  各代表  $AD$  與  $DB$  兩部分之長。  $R$  為一電阻箱,  $X$  為欲測之電阻。

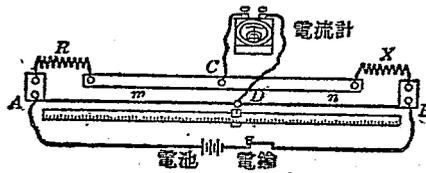


圖 466. 惠斯登電橋。

## 習題七十八

(1) 如何可將一安培計用作伏特計? 一伏特計之指針, 指出 1 [伏特] 時, 實際上祇有 0.002 [安培] 流過, 其轉動線卷之電阻為 75 [歐姆]。問伏特計內之串聯電阻若何?

(2) 多數安培計上, 常有二種刻度, 如由 0 至 10 [安培] 或由 0 至 100 [安培], 何以同一儀器, 可有二種刻度?

(3) 將一分流器與一安培計並用, 使其讀數均當以 100 乘之。問安培計內部之電阻, 為分流器電阻之若干倍?

(4) 用惠斯登電橋 (圖 466) 測量未知電阻  $X$ , 當  $D$  點離  $A$  端 35 [厘米] 時, 電流計中無電流通過。已知  $AB$  銅線之長為 100 [厘米],  $R$  電阻為 438 [歐姆], 求  $X$  之值

## 第七十九章

### 電 磁 感 應

§426. 法拉第之發見。若以電池為電之唯一來源，則吾人不能用電燈使街中及室內照耀如白晝，或乘電車以代步。蓋普通電池之電能，取給於鋅之消蝕，鋅價頗昂，吾人當無力負擔以鋅為“燃料”，而取用大量之電能也。

在百年前，法拉第(Faraday)發見移動磁鐵以發生電流之法，是可將機械之功，直接變成電能，為發電機之基本原理，而成今日之電的世紀。

§427. 磁鐵感應電流。吾人知電流附近，既可生成磁場，反之，由磁場之作用，是否亦能生成電流，為一極有價值之疑問也。

將絕緣導線之細線卷之兩端，聯於靈敏之電流計上(圖467)，以條形強磁鐵之一端，急速插入線卷中，則見電流計之指針，起暫時之偏轉。又將磁鐵，從線卷中，急速抽出

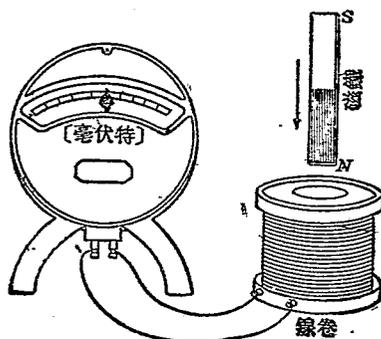


圖 467. 由磁鐵之移動發生電流。

時，則指針復向他方偏轉。繼續實驗，將磁鐵慢慢上下移動，則向此方或彼方之偏轉，皆較前為小。可見磁鐵每一移動時，錄卷內皆有電流發生，電流之強弱，且繫乎磁鐵移動之快慢。不特此也，若磁鐵固定，將錄卷套入或抽出於磁鐵之一端，情形完全相同。由此可知電磁感應之現象，在乎磁體與錄卷之相對運動。

上述實驗，係用磁鐵之  $N$  極，今若改用  $S$  極，以出入錄卷，則電流計之各種偏轉，又恰與上述者相反。

§428. 楞次定律。錄卷中所生感應電流之方向，可由電流計偏轉之方向而知之。實驗時略加注意，即知磁鐵之  $N$  極插入錄卷時，錄卷中感應電流所生之磁場，使錄卷之上端成為  $N$  極；同樣，當  $S$  極插入時，感應電流則使錄卷之上端成為  $S$  極。又當磁鐵之  $N$  極拔出錄卷時，錄卷中感應電流所生之磁場，則使錄卷之上端成為  $S$  極；同樣，當  $S$  極拔出時，感應電流使錄卷之上端成為  $N$  極。在前兩情形中，錄卷上端成為與動極相拒之極；在後兩情形中，錄卷上端成為與動極相吸之極。故磁鐵之來也，錄卷拒之，磁鐵之去也，錄卷留之。無論來去，皆需吾人做功，可見錄卷中之感應電流，並非憑空而來，天下事固無不勞而獲者。

感應電流之方向，可總述如下：由磁鐵與錄卷之相對運動，而生感應電流，感應電流所成之磁場，恆有阻止兩者運動之趨勢，此即所謂楞次定律(Lenz's law)，乃功能不滅原理之一特徵耳。

§429. 由電流產生之感應電流。錄卷中有電流通過時，吾人知其猶一磁鐵也。以此種錄卷  $P$  代替磁鐵，而作前節之實驗，插入或拔出於錄卷  $S$  (圖 468)；則  $S$  錄卷亦有感應電流發生，電流計之指針即向一方或他方偏轉。如  $P$  不動，則無論在  $S$  內或在其外，指針均指零位，並不偏轉。此等情形，完全與移動磁鐵相同。

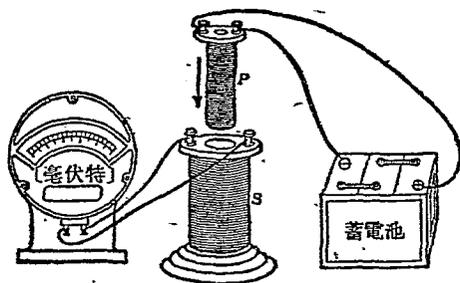


圖 468. 移動電磁鐵  $P$ ，使在錄卷  $S$  中發生電流。

又如在  $P$  這電路中，加一電鑰，令  $P$  在  $S$  內，不必移動，但將電鑰按下，使  $P$  內有電流突然通過，指針亦起偏轉；再將電鑰開啓，使  $P$  內電流驟斷，指針即向反對之一方偏轉。

在此種實驗中，原有電流流過之錄卷  $P$ ，曰原錄卷(primary coil)，其中之電流，曰感電流(inducing current)；與此相對，錄卷  $S$  曰副錄卷(secondary coil)，其中所生之電流，曰應電流(induced current)。應電流之方向，恆依楞次定律而決定。由磁鐵與錄卷，或原錄卷與副錄卷，此種發生電流之現象，則曰電磁感應(electromagnetic induction)。

此種兩個線卷之互相感應，稱為互感(mutual induction)。又一線卷中之每匝，當電流變化時，對於其他各匝，亦生電磁感應作用，是為自感(self-induction)。互感與自感之量，可以數字表出，稱為電感(electric inductance)。

§430. 應電動勢。試就 §427 及 §429 關於產生感應現象之諸動作而細考之。線卷中所受之變化，惟貫穿線卷而過之磁力線之增減而已。應電流之發生，自必導源於此項之變化。

線卷中有應電流發生時，必有與之相當之電動勢存在，發生應電流之電動勢，曰應電動勢(induced electromotive force)。應電動勢，一如應電流，繫乎兩因數：一為貫穿線卷之磁力線變化之多寡；一為變化時間之久暫。換言之，即磁力線之時間的變化率也。於是得平均應電動勢， $E$  為

$$E = 10^{-8} \times \frac{N_1 - N_2}{t} \text{ [伏特]},$$

式中  $t$  表變化之時間， $N_1$  表開始時之磁力線數， $N_2$  表臨末時之磁力線數。可不問此等磁力線之由何而來，及因何而變，上式恆為真確。

應電動勢  $E$  與應電流  $I$ ，當然合乎歐姆定律，即

$$E = RI,$$

式中  $R$  為線卷電路之電阻。由此可知感應所生之電量

$$Q = It = \frac{Et}{R} = 10^{-8} \times \frac{N_1 - N_2}{R} \text{ [庫侖]},$$

與感應動作時間之久暫無關。

【例】有 20 [匝] 之錄卷，於  $\frac{1}{100}$  [秒] 鐘內，從垂直於地磁磁力線之位置 A，轉動至平行於磁力線之位置 B (圖 469)。已知地磁強度為 0.6 [高斯]，錄卷之半徑為 15 [厘米]，錄卷之電阻為 1.2 [歐姆]，求其應電動勢，應電流，及應電量。

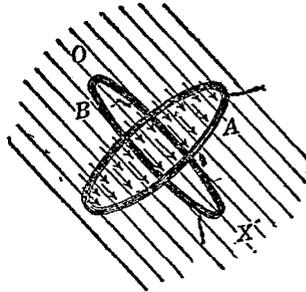


圖 469.

在 A 之位置，

$$N_1 = 20 \times 0.6 \times \pi(15)^2 = 8.48 \times 10^3,$$

在 B 之位置，

$$N_2 = 0.$$

當開始起與臨末時，應電動勢與應電流皆為零；故在  $\frac{1}{100}$  [秒] 內，平均言之，有應電動勢

$$E = 10^{-8} \times \frac{8.48 \times 10^3}{0.01} = 8.48 \times 10^{-3} \text{ [伏特]} = 8.48 \text{ [毫伏特]},$$

及應電流

$$I = \frac{8.48}{1.2} = 7.07 \text{ [毫安培]}.$$

至於應電量，則為

$$Q \doteq It = 7.07 \times 10^{-3} \times 10^{-2} = 7.07 \times 10^{-5} \text{ [庫倫]}.$$

§431. 感應錄卷。由上節所述，可知欲得高大之應電動勢，必須磁力線多而變化快。加強原錄卷中之感電流，與將鐵心放於原錄卷中，皆所以增大其磁場；磁場加強，即增加原錄卷所發之磁力線數。又將原錄卷套入副錄卷中，與增多副錄卷之匝

數，則磁力線數之貫穿副線卷而過者必多。用線卷，鐵心，及開關，作如是之裝置（圖 470），可得高大之感應電壓，而成感應線卷 (induction coil)。

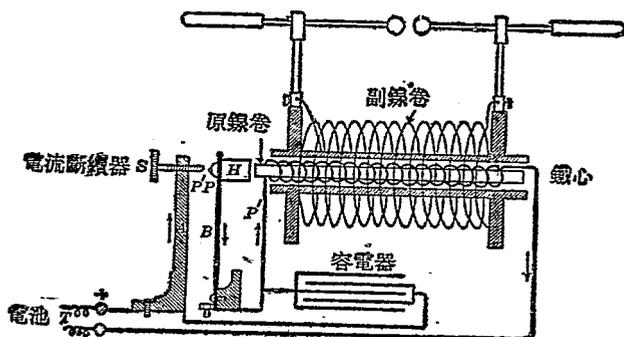


圖 470. 感應線卷之圖解。

感應線卷之鐵心用軟鐵條或片製成。原線卷之銅絲較粗，以其須擔負頗大之電流；副線卷之銅絲甚細而匝數甚多，以感應線卷之目的在得高大電壓，其應電流通常甚微。原副兩線卷間，有良好之絕緣。欲使原線卷中之感電流，迅速接通與切斷，在線卷之一端，常用一斷續器 (interrupter)。此斷續器自動工作之情形，與 §417 所述振動之電鈴相似，每〔秒〕可使電流或斷或續，達數百次以上。

當原線卷之電路斷絕時，其電流宛如有惰性作用，仍欲繼續通過，常見火花躍過斷續器之間隙  $PP'$ 。故在此間隙中，常接一容電器以減少火花，而使電流之斷絕，得以特別迅速。因之，副線卷中之應電動勢，在原線卷斷絕時較在連續時為大。如其兩

端之放電球距離稍大，則原線卷之電路通時，無電花出現，而當其斷時則有電花通過；因此副線卷兩端之極性，成爲正負一定（圖 471）。

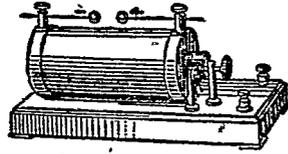


圖 471. 感應線卷。

§432. 電話。用電流傳導人聲，謂之電話(telephone)，亦電磁感應之一種應用也。其主要部分爲話機與耳機。

耳機(telephone receiver)之構造，如圖 472。在蹄形磁鐵

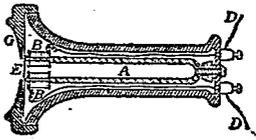


圖 472. 耳機。

之兩端，套繞法相反之兩甚細線卷，串聯於接線柱  $D$ 。線卷之前，有薄鐵片  $E$ ，其中心幾與磁鐵兩極相觸。外爲中有小孔之硬橡皮蓋  $G$ ，使鐵片不致脫落。

欲明耳機之作用，可將耳機與電燈（電燈作電阻用，無此電阻將使耳機內之線卷燒毀），串聯於交流電燈路線上，立聞嗡嗡之聲。若將耳機向上，將一鉛筆放在薄鐵片上，即見鉛筆上下跳動。蓋通過線卷之交流電，使磁鐵忽強忽弱，其吸引鐵片之力亦忽大忽小，使之振動；傳於空氣而成聲。

話機(telephone transmitter)之主要部分(圖 473)，爲一精巧之小盒，內滿盛碳粒  $C$ ，盒之前後兩面，爲磨光之碳板，盒之邊爲絕緣體。前碳板  $B$  聯於薄膜  $D$  之中央，當薄膜振動時，可略向盒內移進移出。後碳板則固定在盒之後面。電流由  $T$  端流

至前板，經過碳粒，再從後板流出，以至於接收處之耳機。

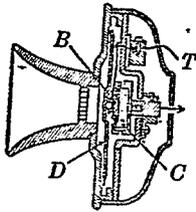


圖 473. 話機。

話機之薄膜向內移動時，將碳粒壓緊，電阻減小，電流加強，使耳機之薄片亦向內移動；反之，話機之薄膜向外移動時，碳粒電阻加大，電流減弱，耳機之薄片亦向外移動。故對話機而發話時，薄膜即行振動，電流強度隨之變化，耳機之薄片，亦起同類

之振動，在四周之空氣中，發生如發言者所造成之同類聲波(圖 474)。

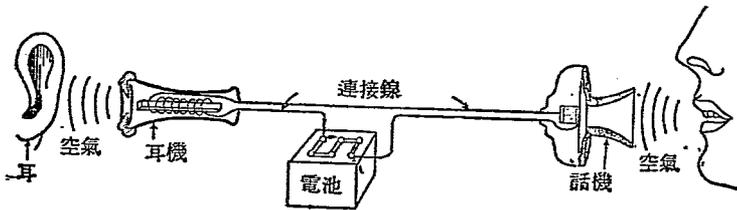


圖 474. 單向電話電路之圖解。

每架電話機，都裝有話機與耳機，以便一面說一面聽，宛如晤談於一室。上述之裝置，為各大都市中所常用者。電話局從事接線與管理電源。電源為一大電池組或發電機，無論何時各線路上皆可同用此一電源。

鄉間電話多用所謂局部電池式(local-battery system)者，因其設備與維持費用，較為低廉。即在都市中之長途電話，間亦有用此式。在局部電池式，各用戶之電話機上(圖 475)，有少數之乾電池，與話機串聯，惟所發生之變動電流，不直接流入發

錄，而流至小感應錄卷之原錄卷，再回到電池。同時感應錄卷之副錄卷中，出現同樣變動之感應電流。以其電壓較高，在電錄上傳導之損失減少，結果通過遠處耳機之電能，可較以原來電流直接發送者為多。故就電學而言，此種裝置，實較中央電池式(central-battery system)為佳，但在大都市中多不採用者，其最大原因，為管理許多局部電池之麻煩。

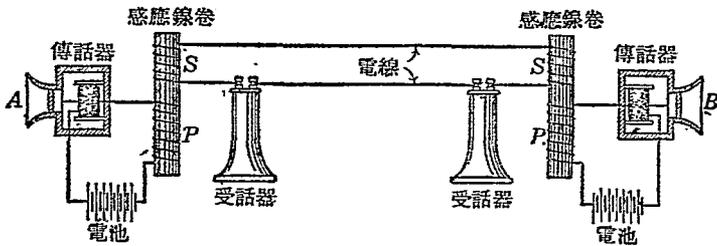


圖 475. 局部電池式電話之電路。

### 習 題 七 十 九

(1) 設將一錄卷平放在桌面上，由上方將一條形磁鐵之  $N$  極，驟然插入錄卷中，此時在錄卷內發生電流之方向如何？試繪圖表出之。

(2) 左手執錄卷，右手執磁鐵，一同移動，能於錄卷中得感應電流否？何故？

(3) 手執無端之錄卷，從南到北走動，錄卷中能因地磁場而生感應電流否？何故？在地磁場中，錄卷之何種運動，可得感應電流？

(4) 有懸掛而可以自由轉動之二平行錄卷，將第一錄卷之二端自相聯接，於第二錄卷中通以電流時，則二錄卷轉動之方向如何？

(5) 如電話錄與交流之電燈錄，彼此平行，且極相近，則在電話機中，時

瑚噲噲之聲 試言其故。

(6) 將電鈴放在室內暗處，當電流斷時，可見斷續器之接觸點發生火花，但電流連接時則無，試解釋之。

(7) 6 [伏特]之蓄電池，可使感應線卷生 100,000 [伏特]之火花，解釋電壓巨大增加之故。

(8) 不慎而觸及感應線卷副線卷之兩端，何以頗為危險？副線卷中之電能，是否較原線卷中為大？

## 第八十章

### 發電機

§433. 發電機之右手法則。將電路中一段水平導線， $AB$ ，從蹄形磁鐵之鉛直磁場中拉出(圖 476)，則貫穿電路而過之磁

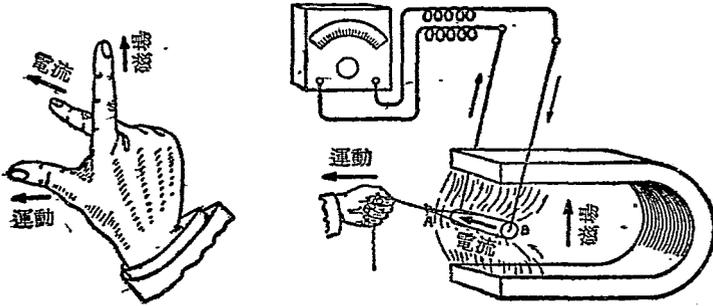


圖 476 發電機之右手法則。

力線數有變，即有應電流發生。由楞次定律，可知應電流之方向為自  $B$  至  $A$ 。在此情形中，磁場，運動，電流三者互相正交，其方向可以右手之三指表之。以拇指向運動方向，食指向磁場，則中指所向者，即為電流之方向，是為發電機之右手法則。

蓋吾人拉動  $AB$  導線，即有應電流發生，在  $AB$  中流過。 $AB$  在磁場中，又必因磁場之作用，而受電磁力 (§ 419)。在圖 476 中，電磁力之方向為自左向右，與吾人使  $AB$  導線運動之方向相反；吾人在磁場中拉動  $AB$  導線，所以特別感覺費力者，即須克

服此種之電磁力也。宜乎在電動機所遵循者為左手法則，而發電機所遵循者則為右手法則。

§434. 發電機之基本原理。 將機械功變成電能之機械，謂

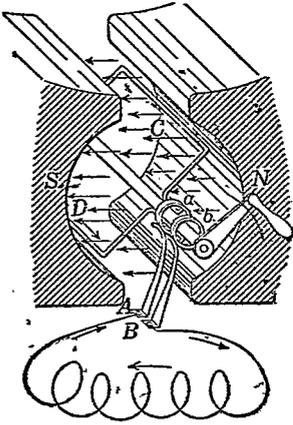


圖 477. 發電機之原理。

之發電機(electric generator)。就原理言，其主要部分為一在磁場中轉動之線卷耳。磁場或由永久磁鐵，或由電磁鐵所供給。發生電流之轉動線卷，在電機上稱為電樞(armature)。

有一矩形導線環，繞水平軸，在兩磁極間轉動。設環從鉛直之位置開始，以順時針方向轉動，則在前半

轉中，電流之方向，如圖 477 所示；在後半轉中，電流之方向，與此相反。電流之方向，每轉改變一次。

§435. 交流與直流。 用伏特計，可知上述實驗中，在前半轉時，線環兩端  $a, b$  間之應電動勢，由零增至一最大值，再回至零值，如圖 478 中之曲線所示；然後再漸漸至相反方向，以達最大之值，最後又回至零值，此後半轉之情形也。電動勢最大時，線環居於水平位置。

線環每轉  $180^\circ$ ，其中所激發之應電動勢，改變方向一次，如是

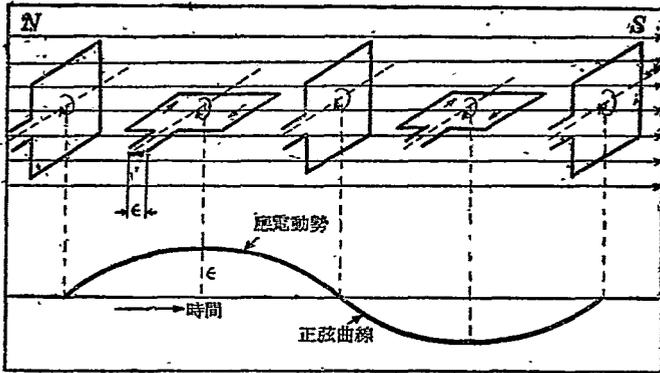


圖 478. 應電動勢與線環位置之關係。

之電動勢，曰交變電動勢 (alternating electromotive force)，由交變電動勢而生之電流，曰交變電流 (alternating current) 簡稱交流。線環旋轉一周，即  $360^\circ$ ，所成之交流，稱為交流之一循環 (cycle)，或一週。都市中所用之電流，通常為每 [秒] 50 或 60 循環之交流。與此相對，由電池而得之電流，其方向不變者，曰直流 (direct current)。

如欲改上述之交流，使其成為直流，祇須將圖 477 中收集電流之  $a, b$  兩銅環，換成一個銅環，而縱剖為二，用絕緣質隔開，如圖 479 所示，此種裝置稱為換向器 (commutator)。A, B 兩刷在環之相對兩方，每刷先與環之一半相接，然後與環之另一半相接。接觸之對調，適在電

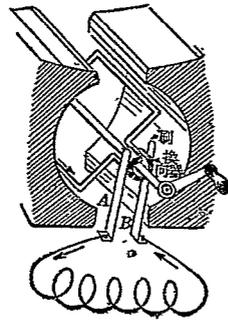


圖 479. 換向器。

流改變方向之時。如是電樞線卷中所生之電流，雖每轉變換方向一次，但在外電路中電流之方向，則常直流而不改，如圖 480 中所示之情形。

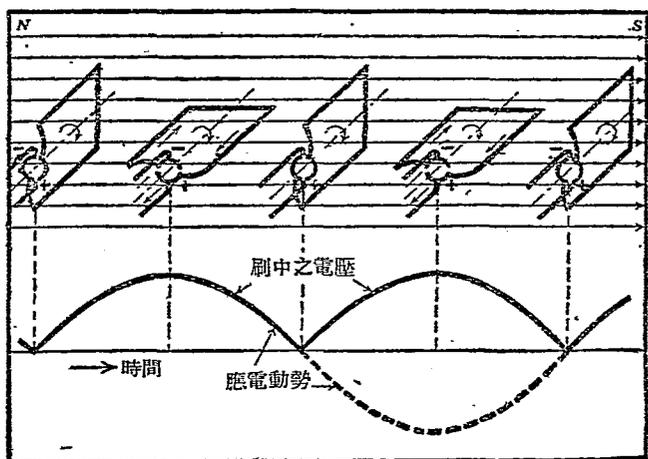


圖 480. 經換向器後之電動勢情形。

交流電流對於發光及發熱，與直流相同。今日雖有交流電動機，但在昔時電車中多用直流電動機。惟交流電流不能應用於化學上之目的，如蓄電池充電，電解，及電鍍等。

§436. 發電機。欲得 110 或 220 [伏特] 或更高之應電動勢，而成工業上用之發動機，一須磁場極強，二須線卷匝數加多，三須轉動甚快。

通常電樞，由若干個之線卷，串聯而圍繞於軟鐵製成之鐵環上，以成所謂環形電樞 (ring armature)。線卷與線卷相接之

點，皆有一導線連至換向器之一部；換向器之分部，與線卷之數目相同(圖 481)。圖中右邊近  $N$  極之各線卷中，電流之方向均

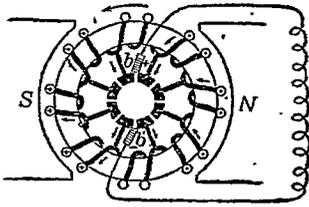


圖 481. 直流發電機。

同，左邊近  $S$  極各線卷中之電流，則與右邊者相反。又各線卷對於  $b, b'$  兩刷之關係，完全相同，故由此引出一定方向之直流。各線卷內之電動勢，雖各有等差，但右邊諸線卷中電動勢之和，則大致一

定，左邊諸線卷中之和亦然。因之  $b, b'$  兩刷間之電壓，頗能保持一定之值，圖 480 所示之搏動情形，大為減除。

電機內之磁鐵，通常多為電磁鐵，稱場磁鐵(field magnet)。激發場磁鐵所需之電流，或取諸發電機本身所發之電流，或由另外電源供給。又發電機發電之主要原因，為電樞線卷與場磁鐵

之相對運動，並非一定要磁鐵固定，而電樞轉動也。反之，為經濟起見，現代之大交流發電機，常用固定電樞與轉動磁場。圖 482 所示之轉動突出磁極  $N, S$  等，掃過裝在固定架上

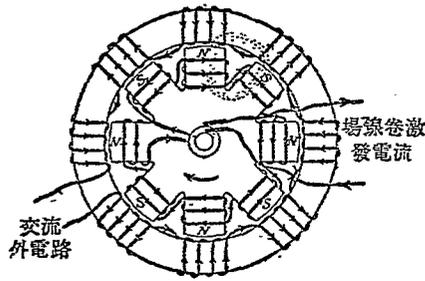


圖 482. 固定電樞之交流發電機。

之電樞線卷時，即在其中發生電流，用電纜傳出，以為種種之用。

§437. 發電機中能之來源。 必須注意者，發電機自身不能憑空產生電流，而僅能使機械能變為電能。 例如若欲使鄉村有電燈，僅購發電機不能濟事，而須另購一汽油機，或燃氣機，或水輪機，使發電機轉動(圖 483)。 因感應電流之方向，常欲阻止錄

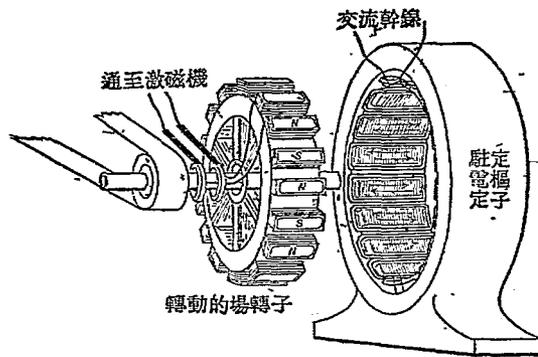


圖 483. 多極交流發電機。

卷之轉動，故外電路之負荷愈重，如電燈盞數裝得愈多，則電流愈大，使其轉動之功率亦須愈大。 大發電機之用在電車之電力廠及城市之電燈廠者，每有 20,000 至 70,000 [馬力] 之汽機與之配合。 若外電路之負荷太重，例如電燈裝得太多，超過發電機之功率時，則轉動變緩，電壓減低，電燈不亮矣。

§438. 變壓器。 吾人利用電磁感應作用，可使高壓電流變為低壓，或低壓電流變為高壓，此於交流電流，更為簡便，蓋無需如感應錄卷中 (§ 431) 之斷續器也。 此種使交流電壓改變之裝置，稱為變壓器(transformer)。

在任何變壓器(圖 484)內,均有二線卷繞於同一之鐵心上,一為原線卷,一為副線卷。

原線卷之導線粗而匝數少,副線卷之導線細而匝數多。將交流電流通過原線卷時,即有應電流發生於副線卷中。在此裝置中,由原線卷所發生之磁力線,多由鐵心內部繞行,無有散逸於空中者。

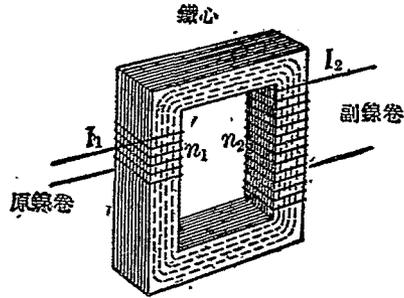


圖 484. 變壓器。

二線卷每匝中所穿過之磁力線數相等,因之二線卷中每匝之電壓降落相同。故在原線卷中所加之電壓  $E_1$  與副線卷中所生之電壓  $E_2$  之比,等於原線卷匝數  $n_1$  與副線卷匝數  $n_2$  之比,即:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

命  $I_1$  及  $I_2$  表原線卷與副線卷中之電流強度,則原線卷之電功率  $E_1 I_1$ , 藉鐵心之作用,整個的傳於副線卷中,而成  $E_2 I_2$ , 即

$$E_1 I_1 = E_2 I_2.$$

於是得

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

故變成之電壓較原電壓高,變成之電流較原電流弱。變壓器之作如是用法者,曰升壓器(step-up transformer)。

反之,若將待變之交流,通入副線卷中,則在原線卷中變成之

電壓較原電壓為低，變成之電流較原電流為強。變壓器之作如是用者，曰降壓器(step-down transformer)。例如普通之電鈴，不能直接裝在電燈線上，以其電磁鐵之線卷不能勝任由 110 或 220 [伏特] 而得之電流。通常用一降壓器，將 110 或 220 [伏特]，變成 10 [伏特] 左右，再行通入其電磁鐵之線卷中。

#### §439. 變壓器之用途——配電。 城市中用戶離電廠可有

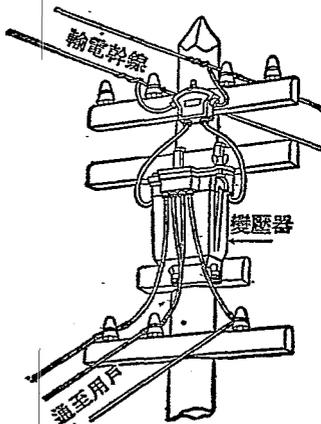


圖 485. 配電用之變壓器。

數[里]之遠，若直接由電廠發送 110 或 220 [伏特] 之電，則在輸電幹線上，電壓之降落 (§ 392)，頗為可觀，將不合各種電器之用。故街中輸電幹線上通常有 2,400 或 6,600 [伏特]，在各區裝降壓器 (圖 485)，將其降低至 120 或 230 [伏特]，再行分配於區內各用戶，使電壓之變化，離規定者不至超過 3%。

§440. 電之長距離輸送。 用變壓器，吾人可將交流之電壓任意變更，而能量幾無損失；對於直流電流，則決無此項可能性，此交流電流在工業上之可貴也。在強電流工業中，直流電流幾已全部為交流電流取而代代之矣。不特此也，今日已逐漸將發電

廠，建築於煤礦或水力附近之區，俾其產生電能之成本，最為低廉，蓋若此可省燃料運輸之費；於是上述交流之利益，與變壓器之用處，更大見顯著。

電藉導線而輸送，有不可避免之損失，即在電線中之發熱是也。若可以供用之電功率為  $EI$ ，自發電區至消費區輸電幹線之電阻為  $R$ ，於是在此電阻中，因發熱而消失之電功率，由焦耳定律 (§ 398)，知為  $I^2R$ 。吾人當儘量使其減小。減小之法，不外減小  $R$  與減小  $I$  之兩途。若減小  $R$  一半，則電線之截面積須加大一倍，電線之裝置費倍增，故非設法減小  $I$  不可。況  $I$  減小一半，則損失之電功率，即可減小四倍；祇須電壓  $E$  加倍，又即能保持同量之可供利用的電功率。故以長途導線輸送電能時，電壓愈高，導線中之電流愈小者，愈為經濟。

吾人輒於發電區，將發電機之電能，用升壓器變成高壓，甚至達 220,000 [伏特]，再將電能由電纜輸送至數百 [里] 外之城市。在此等城外設分電站，用降壓器將電壓降至 6,600 或 2,400 [伏特]，而後分布於各區，在各區電壓再行降低至 220 或 110 [伏特]，方行送入用戶。

§441. 整流器。有時為某種目的，如蓄電池之充電，必須有單方向之直流。大規模之電力工程中，欲將交流變成直流，可用電動發動機 (motor-generator)；此為一交流電動機聯接於直流發電機上，亦可謂之旋轉變流機 (rotory convertor)。但若為 6 [伏特] 蓄電池之充電起見，常用氧化亞銅整流器 (cup-

rous-oxide rectifier)。其構造中之主要部分為數個氧化亞

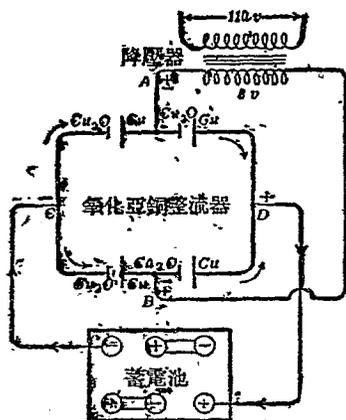


圖 486. 氧化亞銅整流器。

銅整流鈕，聯接如圖 486。每一鈕為一銅片(Cu)，上塗一層氧化亞銅( $\text{Cu}_2\text{O}$ )。如此之鈕，常使電流，甚易由氧化亞銅流至銅；但對於相反方向之電流則呈極大之電阻。故當 A 為正極之半循環中，電流依環內之箭頭所示之方向流動；又當 B 為正極之次半循環中，電流之流動方向，如環外之箭頭所示；恆有兩鈕作用，兩鈕休息。

如此方法，由 D 至 C 經過蓄電池之電流，方向一定，而使蓄電池充電矣。

### 習 題 八 十

- (1) 發電機之電壓，由何三因素而決定？
- (2) 說出直流電流之三種用途，不能以交流電流代替者，並解釋之。
- (3) “60 循環交流電流”何意？何故電燈接在 25 循環之交流上，覺其閃光？
- (4) 八極發電機，使生 60 循環之交流電流，每〔分〕鐘當旋轉若干矣？
- (5) 多用燈時，電燈廠發電機之端電壓，何以降低？
- (6) 有發電機，其電功率為 2500 [仟瓦]，電動勢為 3600 [伏特]，問能輸出多大之電流？

(7) 從發電機輸到某工廠之電力線上有 40 [安培] 及 500 [伏特]，線上有電阻 1.5 [歐姆]。求 (a) 發電機輸往工廠之功率；(b) 到工廠中線之電壓；及 (c) 工廠中受到可以利用之功率。

(8) 若水輪機及發電機之聯合效率為 75%。一瀑布高 25 [呎]，每 [分鐘] 可有 550 [立方呎] 之水下流，問可發多少 [仟瓦] 之電功率？

(9) 將 1100 [伏特] 之電壓，降至 220 [伏特]，變壓器上原線卷與副線卷之匝數之比如何？

(10) 一變壓器之原線卷為 60 [匝]，副線卷為 1200 [匝]，若原線卷上之電壓為 500 [伏特]，問副線卷上之電壓若何？又若副線卷中之電流為 2 [安培]，問原線卷中之電流多少？

(11) 發電機之端電壓為 2300 [伏特]，輸出電流 1000 [安培]。(a) 若由有 6.2 [歐姆] 之導線傳至遠處，問在導線上損失若干 [仟瓦]？(b) 若用變壓器將電壓升至 32000 [伏特]，再由導線傳至遠處，則導線上損失多少 [仟瓦]？(c) 在此二情形下，線之他端各有若干 [仟瓦] 可用之電功率？

(12) 利用 110 [伏特] 之電燈線，以作用電鈴。電鈴之端電壓為 5 [伏特]。問所用變壓器原副線卷 [匝] 數之比，應為若干？

## 第八十一章

### 電 動 機

§442. 電動機如一發電機。已知發電機，用蒸汽引擎，燃氣引擎，或水輪機拖動時，可生電流；反之，將電流通入與發電機完全相同之第二種機器，稱為電動機(electric motor)上，即可用以拖動電車，碾米機，鋸木機，或其他做功之機械。簡言之，發電機與電動機乃為一種可逆機械。發電機將機械功變作電能，電動機將電能變作機械功。就電學言，電動機乃一用電器也。

在構造上，直流電動機與發電機可說完全相同，有一電磁鐵，電樞，及有刷之換向器。電動機之電樞概用鼓形，導線嵌入鼓

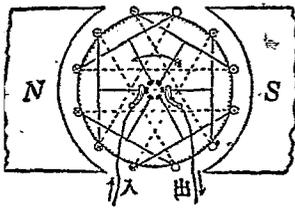


圖 487. 電動機鼓形電樞之聯結法。

緣槽內，串聯而成無端之閉路。

如圖 487 所示，從外方引電流，由兩刷而入電樞內，則左半各導線同引電流自前往後，右邊各導線，同引電流自後向前。故圖中左邊各導線內之電流，受磁場作用，按照左手法則 (§419)，即被推向

下方而運動。同理，右邊各導線，則被推向上方而運動。結果電樞受此電磁力偶作用，遂起反時針轉動，而能做功。

§443. 電動機中之反動電勢。 將一安培計及電燈與小電動機串聯如圖 488 所示。設法使電樞不動，而使電流由輸電幹

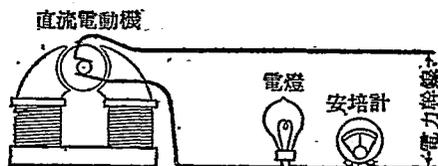


圖 488.

線或電池流入，則燈光放明；但電樞轉動時，燈即變暗。由此可知電動機之電樞轉動時，較之固定之時，通過之電流反而為小，此似可奇怪之事也。其實不然。輸電幹線上或電池之電動勢，與電路中之電阻，並不因電動機轉動而發生變化。當其不動時，電路中之電能，幾全為電燈所吸收；及其轉動也，是在做功，勢必分去一部分電能，以致電燈變暗。換言之，電路中之電流，因電樞轉動而生之反電動勢(back electromotive force)，作用於拖動之電動勢，而致減少。

何謂反電動勢？因電動機之電樞導線在磁場中轉動，必生應電動勢，即每一電動機同時為發電機；此應電動勢之方向，又必與流過電動機之電流相反(楞次定律, §428)。當電樞轉動較快時，反電動勢增大，故外加電動勢與反電動勢之差必將較小，此差數即為通過電樞電阻之電壓。所以電動機固定或轉動較慢時，比快時流過更多之電流；而於開始轉動時，較已達穩定速度時為更多。

【例】 電動機之外來電壓為 110 [伏特]，反電動勢為 105 [伏特]，則使

電流通過電樞之淨電壓為  $110 - 105 = 5$  [伏特]。設電樞電阻為  $0.5$  [歐姆]，轉動時之電樞電流即為  $5/0.5 = 10$  [安培]。但若全電壓  $110$  [伏特] 加於靜止時之電樞，則電流將達  $110/0.5 = 220$  [安培] 之大！其不燒毀者幾希。

§444. 電動機之開動。 電動機由靜止而開動時，最初必無反電動勢。倘將輸電幹線直接其上，將有過量之電流，以致電樞燒毀。欲免除此種危險，通常於電路中，先放入發動電阻 (starting resistance)，以為發動時之用，待電動機轉動後，逐漸減去之(圖 489)。

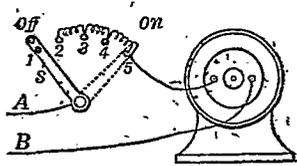


圖 489. 電動機之開動。

§445. 電動機之效率。 電動機之應用極廣，除工廠中用作原動機械外，家庭中亦多用之，如夏日電扇之送風，與新式留聲機之轉動，以及理髮店之吹風機等皆是。其所以能應用如今日之普遍者，一以其方便，二以其效率甚高，有時高至  $90\%$ 。

電動機之效率，一如其他機械，為輸出與輸入之比。供給電動機之 [安培] 及 [伏特] 數，甚易測量，由此即可計算輸入電功率之 [瓦特] 數。欲測輸出之機械功，工程師常作“輪掣”試驗。簡單之輪掣 (brake) 為聯接於二彈簧秤，而繞過電動機軸上滑輪之皮帶，如圖 490 所示。當滑輪轉動時，因皮帶與滑輪間摩擦力之故，一彈簧秤，常較另一彈簧秤，施較大之力，兩者之差即等

於摩擦力。所作之機械功率，等於摩擦力與其作用點每〔秒〕鐘移動距離之積。至於作用點，每〔秒〕之移動距離，又即等於滑輪之圓周與其每〔秒〕旋轉次數之相乘積。

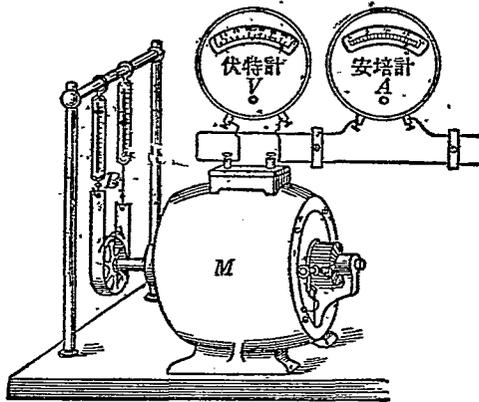


圖 490. 電動機效率之測定。

§446. 電車。電車即藉電動機而駛行，大都為直流電動機，其電壓約為 550〔伏特〕。由發電廠送出之電流，經輸電幹線而達於電車線，輸電幹線為粗電纜，電阻甚小，與電車線平行敷設

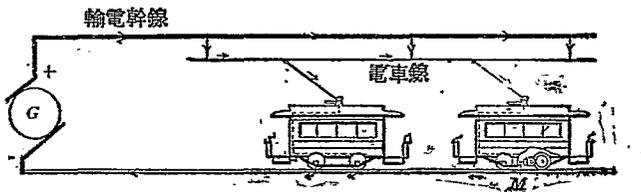
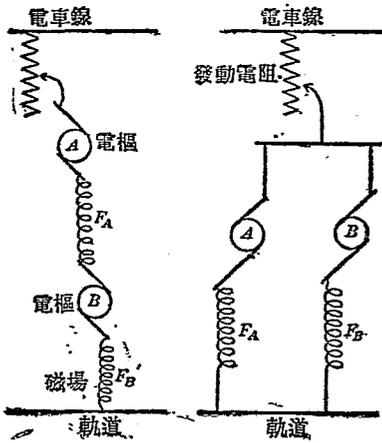


圖 591. 電車電流之路徑。

(圖 491), 每隔若干距離有短導線聯結, 如是數電車同時開行, 即離廠頗遠時, 亦不致受電壓降低之影響。 電流由電車線而來, 從車頂進入車內之控制器(controller), 再經下方之車輪入



(甲)電車開動時 (乙)電車行駛中  
圖 492. 控制器之作用。

於軌道, 由此復回廠中。

控制器為開關板與發動電阻 (§444) 而成。 車初開動時, 車中之兩個電動機成為串聯(圖 492 甲), 如是每個電動機所受之電壓, 不及平時之半數, 而電流不至過量。 既已開動以後, 司機逐漸減去發動電阻, 最後且將兩個電動機成為並聯(圖 492 乙), 各受全部電壓, 車以一定之速度前進。

§447. 電表。 現今自動記錄電功所用瓦特小時計(watt-hour meter) 簡稱瓦時計, 俗稱電表, 即一無鐵心之小電動機耳。 用戶根據此記錄而付電費, 其單位為[仟瓦·時](kilowatt hour), 俗稱 1 [度]。

瓦時計之構造, 如圖 493 所示。  $A$  為轉動之電樞, 並聯於幹線之  $P$  及  $N$  點, 通入其內之電流與幹線間之電壓成正比例。 線卷  $F$  為發生磁場之用, 串聯於幹線之  $P$  及  $Q$  間, 其中流過之

電流即為用戶實際所用之電流(例如電燈電扇等所用)。故使  $A$  發生轉動之力,即作用於  $A$  與  $F$  間之電磁力,與通過之電流之〔安培〕數及電壓之〔伏特〕數之相乘積為正比例,亦即與所消費電功率之〔瓦特〕數為正比例。 $A$  之下端有一鋁圓盤  $D$ 。在  $D$  之上下,裝有強磁鐵  $MM$ 。 $D$  在此磁極間轉動時,即由感應而生渦電流 (eddy current)。由此項渦電流與兩磁極間之作用,使  $A$  之轉動,不致過快。故瓦時計上指針進行之速度,與消費之電功率成正比,而其全體之轉動次數,表示在此時期內所消費之電能總量,即〔瓦特·時〕數也。

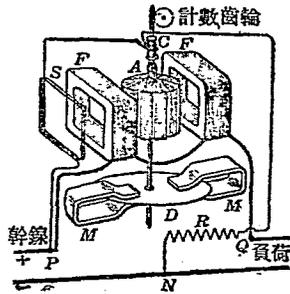


圖 493. 瓦時計。

## 習 題 八 十 一

(1) 某工廠中之原動力由電動機供給,當動作之機器增加時,電動機電路中安培計之指針在刻度前將向下移,抑向上移? 何故?

(2) 當 110 [伏特] 電動機開始轉動時,電路中安培計之讀數為 25 [安培],但立即降至 2.5 [安培],且停留不動。(a) 求電動機之電阻。(b) 當轉動速度穩定時,反電動勢為若干?

(3) 發動電阻匣之作用如何? 何故小電動機上多不裝置發動匣?

(4) 一 4 [馬力] 電動機接於 115 [伏特] 之電線上,當其有全負荷時,須 32 [安培],求其效率。

## 第八十二章

### 電 波

§448. 來頓瓶之放電具振盪性。以粗而且短之管連通於盛水半滿之兩容器間，兩者之水面相平，此乃平衡靜止時之情狀也。若將右容器之上端提起（圖 494），使水幾乎全部傾入左容器中，而復放平之，則左容器之水位高於右容器，水即自左向右流動。雖至兩容器之水面已達同一高度，然因慣性作用，水流並不立時停止，仍將繼續向前流去。隨之右容器之水面一時又較左容器為高，故復行逆流。如是水乃往復盪動於兩容器間，若干次後，始歸於靜

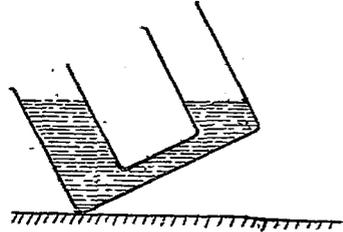


圖 494. 水在連通管中之振盪。

止。

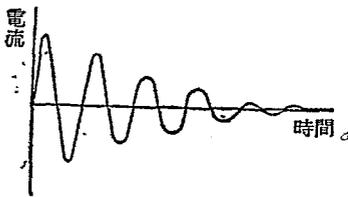


圖 495. 來頓瓶放電之振盪電流。

來頓瓶之正負兩極，以一導線圈連之而放電時，情形完全與上述之譬喻相同，導線中之電流，有如圖 495 所示。此種電之振動 (electric oscillations) 並非理論

或想像，科學家曾用轉動甚速之鏡，以攝取放電火花之像，從而

計得振動之週期，約在千分之一至千萬分之一〔秒〕之間。故吾人肉眼所認為一個火花者，實為一串往返之小火花也。此種振動，每次之振幅，較上一次為小，謂之阻尼振動(damped oscillation)。

§449. 電之共振。在力學與聲學中，已知二物體若有相同之振動頻率，可生共振。例如以一軟橡皮管張於二支柱之間，在管上用等長之二線懸二重量  $x$  及  $y$  (圖 496)，而成二擺。令  $x$  擺動，則  $y$  亦將隨之擺動，愈擺愈強，而  $x$  反愈擺愈弱。當  $x$  之能量，完全傳至  $y$  時， $x$  即停止擺動。自此時起， $y$  又將能量逐漸回傳於  $x$ ，此種情形，祇在二線同長之時，即二擺頻率相等，方能起共振之現象。由此亦可見共振為能之傳遞的一種方法。

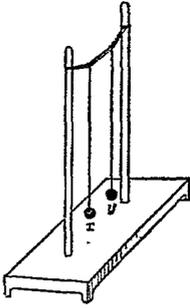


圖 496. 擺之共振。

容電器放電時所發生之振動電流，其頻率視容電器之電容，與電路之電阻及電感而定。故二來頓瓶之電路，有相同之電容，相同之自感，及相同之電阻，則有相同之頻率，且能互相呼應而成共振。

取二相同之來頓瓶  $A$  及  $B$  (圖 497)。瓶  $B$  聯於  $U$  形之粗導

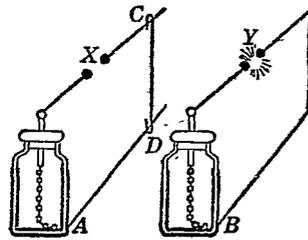


圖 497. 電之共振。

錄，一端聯於瓶之外面，他端聯於瓶之球上，電路之中有甚小之火花間隙  $Y$ 。瓶  $A$  聯至同樣之電路上，但一邊  $CD$  可以滑動，又間隙  $X$  較  $Y$  更小。將二電路置於相距約一〔呎〕之處，互相平行。用感應錄卷使間隙  $Y$  處有火花飛躍，同時滑動  $CD$  到適宜之位置，則  $X$  處亦見火花，此時二電路共振。若將  $CD$  向左或向右滑動，而變更其位置，則火花消滅。

現代無線電之輸送與接收，全賴此種電之共振 (electric resonance) 現象。二電路共振時，第一電路之能，即可傳遞於第二電路；兩者之間，雖無電錄或其他之聯接，亦無礙也。蓋當來頓瓶  $B$  放電時，其電路上有振動電流，此種振動電流，與普通家用之交流電流，不同之處，即在其有甚高之頻率，因每〔秒〕內振動電流變向之次數，恆以數百萬計也。隨之附近電路，因感應而得頗高之應電動勢，可使來頓瓶  $A$  儲電而又放電，亦生振動電流。

§450. 電波。當有高頻率之電流，不論其為由來頓瓶放電而生之阻尼振動電流，或為由特種高速度轉動之發電機之穩定交流電流，在振動中，結果均能在其四周發生電波 (electric waves)。此種電波由一來頓瓶，將能傳至另一來頓瓶，與用橡皮管作擺之實驗情形相似。在 1888 年赫芝 (Hertz) 首先檢討而研究之，因亦稱赫芝波 (hertzian waves)，惟通常謂之無線電波 (radio waves)。

若以天線 (antenna，為水平張於直立之絕緣支柱上之金屬

錄)代來頓瓶,並裝一地線(圖 498),則同強度之振動電流,能發出較強之電波。此種裝置,即被採為發送電波之用。此時天線與地線之作用,猶如巨大容電器之兩板,空氣為兩者間之介質。通常又用多匝錄卷,作為電感,以代單匝線卷。

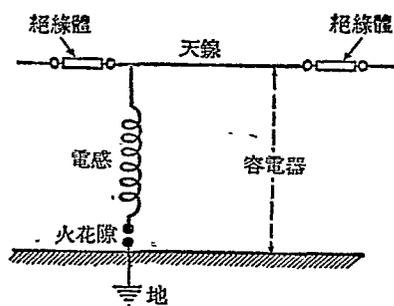


圖 498. 天地線之作用如容電器。

§451. 無線電波之速度及波長。無線電波在空中傳播,與光波有相同之速度,即每秒  $3 \times 10^{10}$  [厘米]。無線電波與光波完全相同,惟頻率較低耳;精確言之,光波實係電波也。故適用於一切波動之簡單公式

$$\text{速度} = \text{頻率} \times \text{波長},$$

自亦適用於無線電波,而成

$$\text{頻率 [仟週/秒]} = \frac{300000 \text{ [仟米/秒]}}{\text{波長 [米]}}.$$

例如一廣播電臺所用之波長為 300 [米],即其頻率為  $300000/300 = 1000$  [仟週/秒]。尋常用以通訊之無線電波,波長自數[米](短波)以至數萬[米]不等。廣播電臺所用之波長,多在 00 [米]與 600 [米]之間。

## 習 題 八 十 二

- (1) 無線電波之(a)速度, (b)頻率, 及(c)波長, 與光波者有何不同?
- (2) 無線電波之(a)速度, (b)頻率, 及 c)波長, 與聲波者有何不同?
- (3) 某廣播電臺之波長為 520 [米], 問其頻率為每[秒]若干[仟週]?
- (4) 無線電波, 何以不能直接目見或耳聞?

## 第八十三章

# 無 錄 電 通 訊

§452. 無錄電廣播與無錄電報。 在1920年以後，無錄電廣播有極大之進展，無錄電收音機，成爲家庭中之普通物件，提及收音機時，吾人輒想到由揚聲器發出之演說及音樂，但必須記憶者，在有廣播之前，海洋中之船舶，早已應用無錄電報以傳遞消息矣，即在今日仍普遍使用，在收音機中有時間嗒嗒或嗡嗡之聲，卽爲傳遞消息之符號也。我人欲瞭解音樂及演說的傳播與接收之前，須先瞭解無錄電報之原理。

最初之無錄電報機，用一感應錄卷及火花間隙，使生阻尼振動電流。其後考知等幅振動電流，能生較佳之無錄電波。然由普通電廠所用之發電機以發生高頻率之交流，實屬非易；故最初此種電信，在應用上，頗受限制。

現時知用特種真空管，以發生任何頻率之等幅交流電，效用甚佳，已奪取無錄電信中其他機件之位置而代之。其應用之原理，當在後 §§ 456-460 詳述之。

§453. 接收電路。 在用二來頓瓶之實驗中 (§449)，第二電路中極短之火花間隙，可作探驗無錄電波之用，此當然爲極早最粗陋之方法，實際上並未用之，因祇能適用於咫尺之間也。現代

無線電收音機中，有四主要部分，為調諧電路(tuned circuit)，天線，檢波器(detector)，及聽筒是。

首言調諧電路。此由感應線卷與一容電器串聯而成。此種電路之頻率，視電感量與電容量之積而定。故改變電路中之電感或電容以調諧之，可使其與外來之電波共振。

在來頓瓶實驗中，電感為單匝線卷，電容則由來頓瓶供給，吾人滑動  $CD$  線段改變環之大小，以調諧之，此即將電路中之電感改變，使生共振。故當二電路諧調時，方生火花。

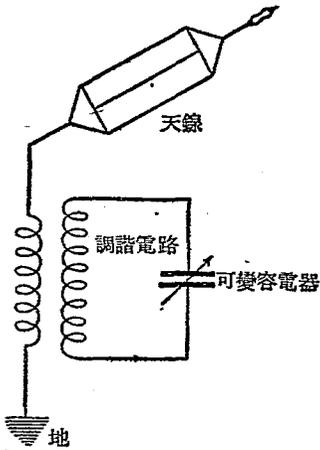


圖 499. 調諧電路與天線。

現在實用方面，概用多匝線卷之固定電感量，而改變容電器之電容量，以調諧電路，故須用可變容電器(圖 411)，以代來頓瓶。

天地線之設置，在於網羅空中電波，一如巨大容電器之二板，以線卷聯結之。線卷之作用，如空心變壓器之原線卷。調諧電路中之線卷，即為副線卷(圖 499)。此等線卷之用空氣以代普通變壓器鐵心者，因鐵心內磁性之反覆，絕不能與高頻率之振動電流如無線電上所用者相應也和。

§454. 收報機內之電流。空中傳來之無線電波，恆可在調諧電路中發生振動電流。故其次即為用何方法，以探檢此種電

流。欲產生可聽見之音，固無需甚大之能，在調諧電路中之能，即可使聽筒內之薄膜振動。但聽筒不可與調諧電路直接串聯，因電流之振動甚速，薄膜之慣性頗大，決不能隨電流而振動，即能成聲，聲亦甚高，不在吾人聽覺範圍之內。

用感應錄卷發放電波時，容電器之每次放電，與感應錄卷上斷續器之動作相應，為一系列高頻率之減幅振動電流。電波之頻率雖高，然以一系列電波計之，則每〔秒〕約為數百至一千次耳。此種頻率在聽覺範圍之內，並能使聽筒薄膜隨之振動。故此問題可於電路中加入一種儀器，使薄膜之振動，與一系列電波，而非與單一電波相應，即得解決。

§455. 晶體檢波器。 檢波器之最簡單者，如圖 500 所示，曰晶體檢波器(crystal detector)。由一塊矽石(silica)或方鉛礦(galena)之晶體，一端包在軟金屬鍍中，一端與錄之尖端接觸而成。振動電流如經由此種晶體，則僅讓一方向之電流流過，其相反方向者，幾全被阻斷，故可為微量電流之整流器。

將晶體檢波器與調諧電路聯接，

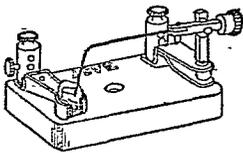


圖 500. 晶體檢波器。

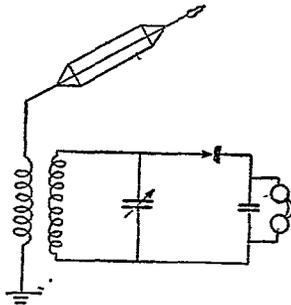


圖 501. 晶體接收電路。

如圖 501 所示，而成接收電路，即一種無線電收音機也。調諧電路中由共振而生之波列，本如圖 502 中 *a* 之形狀，但經晶體整

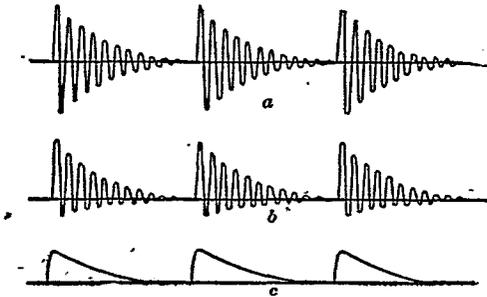


圖 502.

(*a*)減幅振動電流；(*b*)檢波器整流後之電流；(*c*)作用於聽筒之電流。

流後，即成爲 *b* 所示之形狀，而每一波列對於聽筒中之薄膜所發生之整個作用，有如 *c* 所示，即引起薄膜一次振動，以成聲音。傳來之波列，爲數若多，則聽筒所生之聲長，波列數少，則其聲短。按照電碼規則，拼合此項長短聲音，即可傳達消息。

§456. 三極真空管。真空管(vacuum tube, 或稱熱離子管(thermionic valve)之發明及進步，使無線電之播送與接收方面，大起改革。真空管之外形爲一玻璃泡或金屬泡，底

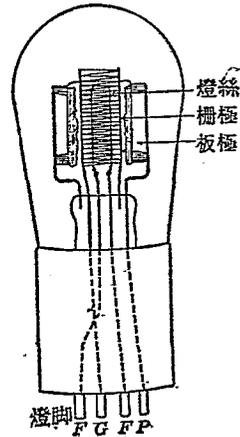


圖 503. 三極真空管。

部通常有四個之燈足(圖 503)。泡內有鎢製燈絲(filament),絲之二端接至座下之粗足  $F$  上。燈絲之外,圍以金屬製成之柵狀物,曰柵極(grid),與燈絲在泡中絕緣,一端聯於一細燈足  $G$  上。在燈絲及柵極之外,又圍以一金屬板,與前二者皆絕緣,聯於座下之另一細燈足  $P$ ,即所謂板極(plate)。泡內又為高度之真空,故有此名。

§457. 真空管之作用。 當真空管作用時,燈絲之兩極聯於電源即所謂 A 電池組上(圖 504),電流使燈絲熱至紅熱。燈絲中之分子受熱而作劇烈振動,將其電子“搖落”;電子之被逐出絲外者,密集於其四周,有如羣蜂之密集於蜂巢四周然。板極聯至有 40 或較多〔伏特〕之電位差之電池組(或其他電源)之正極上,負極則聯於燈絲之一足。此電池組即所謂 B 電池組,使板極帶有正電荷。燈絲所放出之電子,具負電荷,為帶正電荷之板極所吸引,穿過柵極中之縫隙,而至於板極,並繼續經 B 電池組而返於燈絲。如是構成電流,稱為板極電流(plate current)。

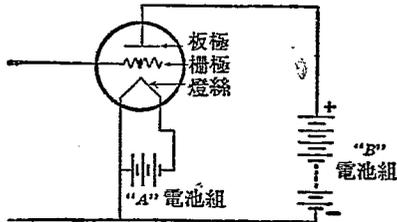


圖 504. 三極管之聯結。

柵極之功用,為控制此電子流,與用活塞以控制水管中之水流相似。設柵極之電位與燈絲相較為負,則能拒斥燈絲發出之負電子,使其仍逗留於燈絲之附近,而阻止其通過柵極以至板

極，故板極電流即將減弱。反之，若柵極帶正電荷，則能助電子通至板極，而使板極電流增強。如圖 505 所示，橫坐標表示柵極之電壓，縱坐標表示板極電流，各條曲線之不同，則由所加於板極上電位之高低而定。

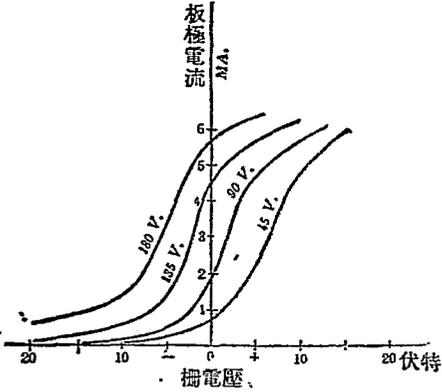


圖 505：三極管之特性曲線。

§458. 真空管檢波器。由上所述，可知真空管之板極電流，恆有一定之方向，故可用作整流器及檢波器。圖 506 示收音機

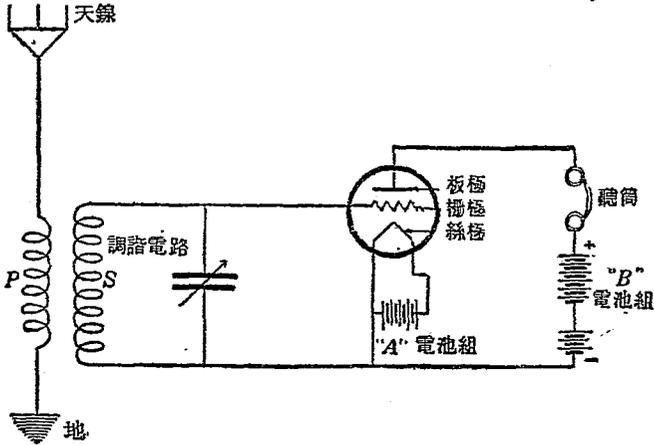


圖 06. 用真空管檢波器之簡單收音機。

中代替礦石檢波器之真空管之線路，其天地線及調諧電路之聯接，與礦石收音機完全相同。

當無線電波射於收報機之天線時，在調諧電路內即生振動電流，此電流使真空管柵極之電位，交替變化，忽正忽負。因而板極電流遂成搏動，聽筒之薄膜，即受每一列波之影響而起振動，其效用與礦石檢波器同，故能檢出是否有電波傳到。

由上述之原理，知真空管可用作檢波器，不特較時需校準其接觸點之礦石檢波器為可靠，抑且更為靈敏。因實際引起聽筒發聲所需之能，取給於 *A* 電池組及 *B* 電池組，而自天線導入調諧電路之電能，僅用以節制板極電流。天線上微量之電能，即可節制板極電路中巨大之電流，猶如在水力電廠內，由一人司水閘之啓閉，以節制數千〔馬力〕也。在礦石檢波器中，則直接用外來之電能以打動聽筒之薄膜。

§459. 真空管之放大作用。有時須增加電流之電能，而不改變其頻率與波形，即須加以放大是也。放大之法，不僅用於收報機，凡廣播，長途電話，公共演講之揚聲器，製造電刻之留聲機片等，莫不用之。真空管用適當之聯接法，即可使之有放大作用。試觀圖 505 所示真空管之特性曲線，即見其大部分為直線形狀。就板極電壓為 180〔伏特〕之曲線而論之，當柵極電壓由 -10〔伏特〕變為 0 時，板極電流由 1.5 變為 5.7〔毫安培〕。柵極電壓在此範圍內之任何漲落，能使板極電流發生與之相當而成比例之漲落。因板極電壓頗高，板極電路中電能之變化，

將遠大於柵極電路中者；換言之，柵極電路中之微弱電流，在板極電路中放大若干倍矣。利用此項性質，將數個三極管聯接使用，即經數次放大，可將微弱電流放大至所需要程度。

單個真空管作放大用時之聯接法，如圖 507 所示。在“*A*”及“*B*”電池組之外，又加一“*C*”電池組，其作用將柵極電位固定於

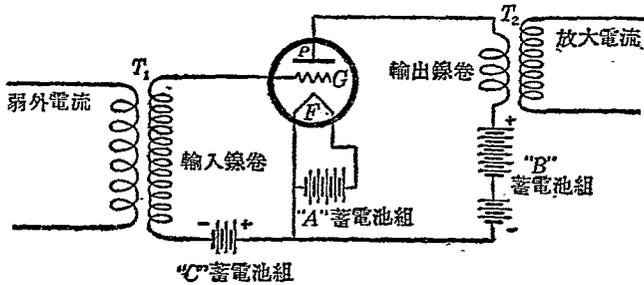


圖 507. 真空管放大器。

特性曲線之直線部分上。當微弱之振動電流，由輸入線卷(input coil)導入柵極電路時，柵極電位即在此定點之左右漲落，而此漲落使板極電流亦起相應之變化。放大之電能，乃由輸出線卷(output coil)輸出，以供吾人之用。

§460. 真空管振動器。三極真空管，既有放大之本能，今如將板極電路所生電能之一部分，輸入於柵極電路中(圖 508，即由兩線卷之感應作用)，則此小部分電能被放大後，可使板極電路中之電能大為增加。例如真空管之放大倍數為  $A$ ，則當輸入柵極之電能為 1 單位時，板極所可輸出者即為  $A$  單位。今若由此輸出之電能內，取出百分之  $r$ ，用適當方法輸入柵極電路中，則

板極電路又有  $rA^2/100$  單位之電能可以取用；換言之，在板極電路中，此時共有  $A\left(1 + \frac{rA}{100}\right)$  單位之電能。惟自此電能中，再用前此適當之方法，仍可將百分之  $r$  送入柵極電路，如是經  $n$  次“反哺”或“再生”作用，在板極電路中，所得之電能，將為  $A\left(1 + \frac{rA}{100}\right)^n$ 。

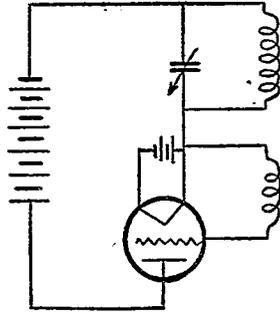


圖 508. 真空管振動器。

因此，三極真空管如聯接得當，縱使板極電路中，本無任何外來之電能，然因此種反哺作用，在板極電路中，亦可有振動電流發生，其頻率則由電路中之電感與電容之積而定。此種電流，且漸次增大，至其振幅被真空管之飽和電流之值所限制而後止，是成真空管振動器(vacuum tube oscillator)矣。據此用三極真空管作振動器時，所生之振動，與來頓瓶放電時所生者不同；蓋來頓瓶放電時所生之振動，為振幅遞減之阻尼振動，而三極真空管所生之振動，為振幅不變之持續振動也。

振動器所生之電波，求其能達到遠處，功率須大。故用作振動器之真空管，有達 150 [仟瓦特]者，板極用水冷卻，其電壓高至 2000 [伏特]。現代之無線電報及廣播電臺，無不採用真空管振動器。

§461. 無線電話。以上所述，限於無線電報之發送與接收。

自廣播盛行，演說與音樂之播送及接收，更爲一般人所注意。廣播所用之器械，有二主要部分：一爲振動器，一爲調幅器(modulator)。

真空管振動器之原理，已如上節所述。通常用數個大真空管，使在調諧電路內，產生強大之高頻率等幅振動電流。每一電臺有一定之頻率，用以廣播。此項頻率，由中央廣播事業管理處所指定，使相鄰之電臺不致發生干涉作用。

在討論調幅器之前，必須復習電話之作用。聲波傳入話機，其內之薄膜即起振動，以致小盒內碳粒之壓力改變，因而改變碳粒對於電流通過之電阻。此使經過碳粒之電流強度，發生漲落，與空氣中之壓縮聲波相似。例如將中 C 音之音叉放於話機之前，則能使之生每〔秒〕256〔週〕之漲落電流。此漲落之電流即使聽筒之薄膜振動，放出之聲波，與話機所受者相同。言語與音樂所生之漲落電流，雖較複雜，但仍能使聽筒薄膜之振動，與話機之振動相同，而發出與話機所受者相同之音。

廣播電臺播音室所發出之聲波，首先送入微音器(microphone)。微音器之外觀，雖與電話話機有別，而其作用之原理，則完全相同。聲波作用於微音器，使生漲落之電流，稱爲發音電流(voice current)。發音電流經真空管放大器放大後，用以調整振動器所生電流之振幅，即強度，是爲調幅(modulation)。

調幅器爲數個真空管之複雜電路。發音電流之振動(圖 509 b)，比之振動器所生者(圖 506 a)，甚爲遲緩。故單一發音電

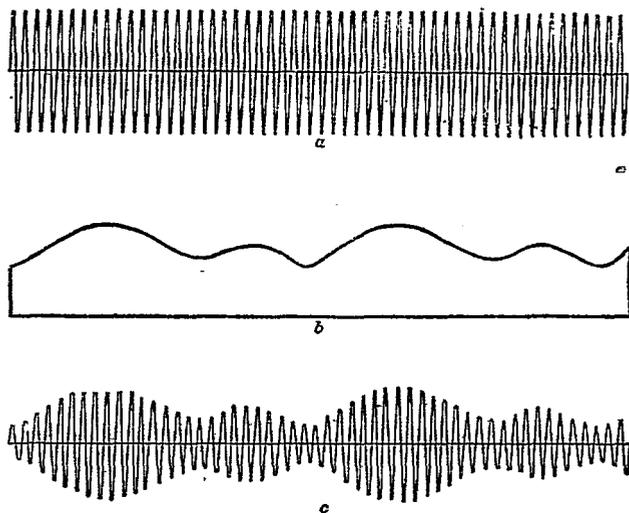


圖 509. (a)未經調幅之電流；(b)發音電流；  
(c)經發音電流調幅後之載聲電流。

流之漲落，相當於多數振動器電流之週波。當發音電流增大時，調幅器增強振動器之電流；反之，發音電流減小時，調幅器即減弱振動器之電流。振動電流之頻率，不為調幅器所改變，所改變者祇其強度而已。振動器所生之載聲電流(carrier current)，經發音電流調幅後之情狀，如圖 509c 所示；調幅後之振動電流，導入天線內，使成無線電波，發放於空中。

§462. 無線電話接收器。可接收無線電報消息之器械，亦可接收無線電話之聲音。調幅後之載聲電波，射至接收天線，在收音機之調諧電路中，倘其頻率相同，即生共振。各電臺用

不同頻率廣播，吾人祇須調節可變容電器，使收音機頻率與欲接收之電臺所用之頻率相同，即可選擇而得收聽所要之節目。

在調諧電路中之振動電流，用檢波器使之整流後，即成發音電流，與廣播電臺播音室中；微音器上所發者相同，此發音電流鼓動收音機上聽筒之薄膜，即生與原來相同之聲。

近來用以接收廣播之收音機，大都皆較上述一燈機為複雜。在真空管檢波器之外，尚有數個真空管作放大用，用以放大接收信號之強度。或在信號未入檢波器之前，預行放大，是為射頻放大器(radio-frequency amplifier)；或用以放大檢波器所成之發音電流，是為音頻放大器(audio-frequency amplifier)。尤以不用聽筒，而用揚聲器時，音頻放大，更為需要。

都市電流通常概用交流，而真空管接收機，非有直流電流不可。最近盛行之交流電收音機，即係利用供給電燈之交流，以接收無線電話，不必使用各種電池。其附加要件為整流器，濾波器(filter)，及降壓器等。整流器與濾波器亦用真空管，其作用在將交流，變為合用之直流，以供板極電路與柵極電路之需。降壓器則將通常電燈所用之電壓，降至數〔伏特〕，以供燈絲之用。如是省去電池，更為精巧，極便於普通家庭之用。

### 習 題 八 十 三

- (1) 檢波器之作用如何？
- (2) 何故在晶體檢波器之簡單收音機中，不能用揚聲器以代聽筒？
- (3) 三極真空管中為高度之真空，電流如何通過？

(4) 真空管中有燈絲與板極，而無柵極者，稱為雙極真空管，可否作為整流器用？試繪圖以說明由雙極真空管與降壓器，利用電燈線之交流電，以使蓄電池充電之情形。

(5) 近代最簡單之收音機中，其主要部分為何？

(6) 三極真空管使用之  $A, B$  兩電池組，其功用如何？

(7) 在無線電收音機中，為何須用可變容電器？

(8) 在發送電臺，將聲波變成電波，在接收電臺又將電波復原成爲聲波，其主要之步驟如何？

## 第八十四章

### 電子之產生及其應用

§463. 物理學上之新紀元。 在十九世紀末葉，物理學家從事玻璃管中氣體放電之研究，而得證實電子爲“電之原子”，實爲物理學上新紀元之開始。 1895年，德國符茲堡大學(University of Würzburg)倫琴(Roentgen)教授，由此等研究，而發現所謂 X 射線，因不知其爲何物也。 世人即以發見者之名，而名之曰倫琴射線(Roentgen rays)。

巴黎之柏克勒爾(Becquerel)因此發見某種礦石亦能放出與 X 射線相似之特種輻射線，即今之所謂放射性(radioactivity)也。 居禮夫婦(Curie)繼續研究之，從而發見鐳(radium)，乃知若干原子不斷在蛻變中。 此種發見，使科學家對於原子及原子核之結構，更作廣博之研究，而得深刻之瞭解，以進於今日之原子能時代。

§464. 未盡真空中之放電。 使起電機二球間發生火花時，所需之電壓，繫乎數種因素而定：球之大小，其間之距離，及大氣之壓力等。 在二尖端間發生火花時，所需之電壓，較在二球間者爲小。 例如，相距 1〔厘米〕之二尖端間之火花電壓爲 8400〔伏特〕；而相距 1〔厘米〕，直徑爲 1〔厘米〕之二球間之火花電

壓，約為 30000 [伏特]。電機工程師每用火花間隙，以測量高電壓。

欲明大氣壓力之影響，可於 2 或 3 [呎]長之玻璃管兩端，焊入兩段鉛絲，以便聯接於感應線卷之兩極（圖 510）；更由一支管 C，聯至良好之唧筒上。感應線卷作用時，初則火花飛躍於相距數 [毫米] 之  $x, y$  二線端間，而不通過玻璃管內。迨管中空氣抽去，其氣壓為 10 [毫米] 水銀柱高時，則在管中放電，而不在  $x, y$

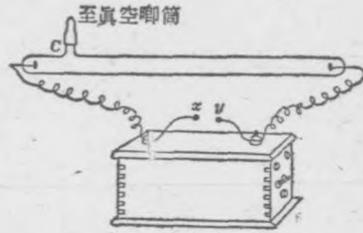


圖 510. 未盡真空中之放電。

間。由此可知氣體壓力減低時，放電火花所需之電壓減少。氣體壓力減低時，可使放電容易，但在抽氣達到某程度後，放電又難。空氣抽至將盡之時，又不復能放電矣。

在抽去空氣之時，管內放電現象之變化，甚有趣味。最先者為狹長閃動之光線；氣壓逐漸減低，光線變粗而充滿全管；再將空氣繼續抽去，則見陰極之面上，滿布紫色之光，同時管中充滿所謂陽電光柱 (positive column)，向陽極進行（圖 511）。

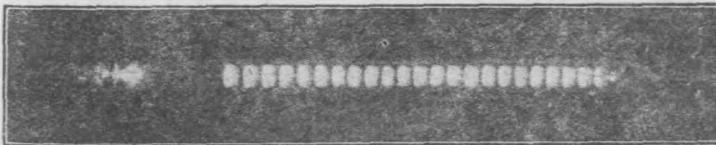


圖 511. 真空管內放電時之發光情形。

此種放電管，內裝各種不同之氣體，如氫或氦等，封閉後(圖 512)，即可作為光源，以研究光譜之用。普通廣告所用之氖管

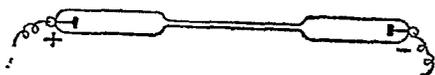


圖 512. 放電管。

(neon tube)，即係長放電管曲成各種文字或圖畫，內裝氖氣者，其色深紅。

所需小量之電功率，可用一小型升壓器供給。其他各種之色，可用不同之氣體與不同顏色之玻璃得之。

§465. 氣體之電離。欲解釋此種管中之放電現象，必須知剩餘氣體之分子，可獲得或失去電子，而成離子，即氣體已電離也。抽去多量之氣體分子，使成半真空時，離子即能在較大之空間中運動，又受電場之加速作用，結果得甚大之速度，與其他分子碰撞時，又可擊出其中之電子，生成更多之離子。但最後抽出分子過多，致無足夠之離子，由一極而至他極，以傳電流，放電現象遂告停止。

§466. 陰極射線。管中之空氣抽至約 0.01 [毫米]水銀柱高之壓力時，陽極光柱漸漸收縮以至消滅，而陰極四周之黑暗部分，反行擴展於全管。正在此黑暗之時，有一不可見之輻射，從陰極與陰極面成直角而射出，謂之陰極射線(cathode rays)。陰極射線雖不可見，但可由下列現象，而知其產生與存在：(1)射於玻璃管

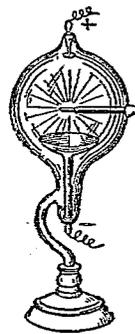


圖 513. 陰極射線之會聚生熱。

壁，而生黃綠色之熒光；(2)可集聚於一點，而生強熱；及(3)以金屬薄片，遮斷此射線進行之路，則在對壁上成清晰之射影。

如圖 513 所示之放電管，以凹面鉛板作陰極，並在其球心處裝一鉛片，可示陰極射線之會聚生熱。感應錄卷使管中放電時，陰極射線聚集碰撞於中間之鉛片上，可使之成紅熱。圖 514 示另一陰極射線管，射線為鉛片遮斷，而鉛片在管底成影。

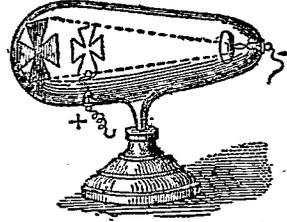


圖 514. 陰極射線在管壁成影。

§467. 陰極射線為何。如圖 515 中之放電管，發出一狹窄之陰極射線，經過鉛片  $mr$  上之狹縫，將直射於熒光屏  $sf$  上之

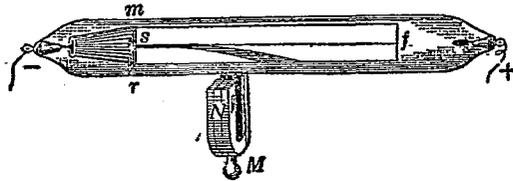


圖 515. 用蹄形磁鐵使陰極射線屈曲。

$f$  點。此屏為玻璃片，上塗硫化鋅，斜置於管內。將一蹄形強磁鐵  $M$ ，插入管之兩側，使其磁場與陰極射線成正交。若假定此陰極射線，為由帶負電之質點所成，一如電流之流動，當然即起偏向 (§419)，或向上或向下，視磁場之方向而定。此射線亦可用二板造成之靜電場使之偏向，此時若陰極射線為帶負電之

質點，必向陽極板而偏折。由此等及其他之實驗，可知陰極射線為由陰極面上，以極大之速度射出之電子流。

§468. 電子。英國物理學家湯姆森(J. J. Thomson)由各種實驗，知陰極射線之電子，其質量約為氫原子之  $1/1835$ ，其速度為光之  $\frac{1}{10}$  至  $\frac{3}{5}$ 。陰極射線之每一電子，所帶電荷之量，與電解時氫離子所帶之電荷相等，即  $1.591 \times 10^{-19}$  [庫侖] 也。又從氫原子之質量，可知電子之質量為  $9.107 \times 10^{-28}$  [克]。

無論由何物質與用何方法產生，所有電子之電荷及其質量莫不皆同。又吾人從未見一電量，小於一電子之電荷者，亦未見一質量，小於電子之質量者，故電子為“電之原子”。

§469. X 射線。陰極射線之電子，射於鉑板時(圖 516)，則

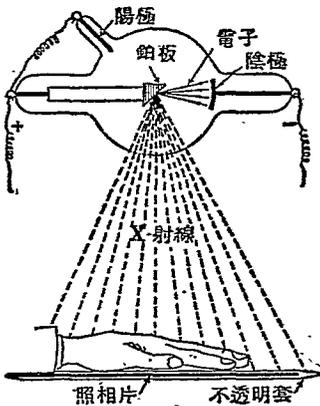


圖 516. 用 X 射線攝手之影。

鉑板發出 X 射線，亦為人目所不能見。其對於照相片之作用，與日光同，且能透過尋常光線所不能透過之物質，如木材，厚紙，及人體等。X 射線一如陰極射線，能使硫化鋅屏發生熒光，其與陰極射線不同之處，即不因磁場或電場而起偏向，可知其非帶電之質點也。

將照相片用厚黑紙包裹，手

覆其上。曝於X射線中約數(秒)鐘後,再經顯影,定影,則片上即現與熒光屏上所見相同之影(圖 517)。此種照片由於X射線透過各種物質(如骨與肉)程度之不同而成,其在醫學上之價值,不言而喻。

X射線由陰極射線之電子,射於固體,被其阻止,失去動能而生。現時知此種射線亦為波動,與光波同,故亦稱X光。但其波長甚短,遠較紫外線為短。X射線之貫穿本領(penetrating power),即所謂硬度,隨管內氣壓降低及電極電壓增高而加強。



圖 517. 手之光攝影。

現在所用之柯立芝(Coolidge)式X射線管(圖 518),為完全抽去空氣之管。必要之電子,乃由一螺旋形之鎢絲陰極,用約

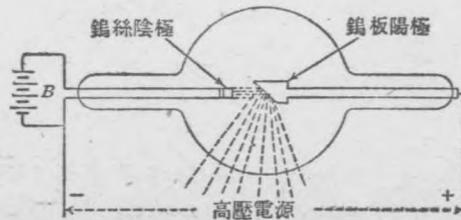


圖 518. 柯立芝成X射線管。

12 [伏特]之蓄電池  $B$  之電流,使其熾熱發生而來。此等電子投射於鎢板陽極,即得 X 射線。X 射線之強度隨電子之數目而定,可調節陰極鎢絲之溫度而管理之。至 X 射線之硬度,與電子之速度有關,可變更管上兩極間之電壓,而加以管理。

X 射線不但可助診斷,且可作治療各種疾病之用。

§470. 光電效應。已知 X 光由於電子之射擊而成;反之, X 光或即尋常可見之光與紫外光,照耀於金屬板上時,每可產生電子,是為光電效應(photo-electric effect)。

各種物質之中,以鉀,鈉,銻等鹼金屬之光電效應,特為顯著。於真空管之後內壁,塗以鉀,鈉,或銻一薄層,使成負極;再於管中置一金屬網或柵,使成正極;與一電池組相聯,如圖 519 所示。

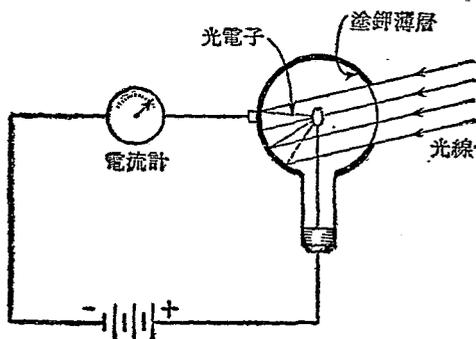


圖 519. 光電管。

光射於鉀上時,即因光電效應,射出電子,而達於正極,使外電路中有電流流過,此可由電流計之指示而知之。此電流之強度,與光之強度成正比。此電流當然甚弱,但可用三極真空管放大

(§459)。故此種光電管(photo-electric cell)為極靈敏之儀器，可視為一種電眼。在光學上可用作光度計。在商業上，不僅藉以製成有聲電影，且亦可用之於電視(television)，其應用日見廣大。

§471. 有聲電影。最初之有聲電影，係將電影放映機與留聲機配合而成。兩機用同一電動機轉動，使留聲機發出之聲與影片上之動作，同一步驟，而有言行一致之妙。留聲機上唱針之振動，可使磁場內之小錄卷中，發生與聲同頻率之感應電流，後將電流放大，而使之作用於揚聲器。

另一方法，即現在通用者，係同時將聲音紀錄於影片上，而成聲跡(sound track)，介乎像片與齒眼之間(圖 520)。用電影攝影機將景物之動作攝下，用微音器將同時所發之音，轉變成為強弱變化之電流，再經三極管放大，然後用導線送入攝影機後方，使其中裝設之電燈，隨電流強弱而生明暗變化，照在像片之旁，遂成長短或濃淡條痕，即聲跡也。

放演時之情形，正相反對，即須將聲跡變成聲音。可用強度一定之光，射於聲跡上，透過之後，即起強弱變化。此種強弱變化之光，達於

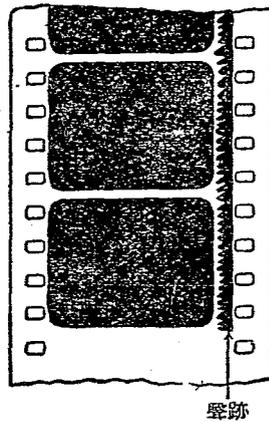


圖 520. 有聲影片。

光電管，隨生強弱變化之電流，經放大後，再由揚聲器發出強大之音，自與攝取時之音相同。故一面觀影，一面可聞其聲。

### 習題八十四

- (1) 何以知陰極射線為電子之流動？
- (2) 用何法以檢查 X 射線之有無發生？
- (3) 試述 X 射線之應用。
- (4) 試述在真空中產生電子之二種方法。
- (5) 電燈亮時，燈絲是否放發電子？此等電子在燈泡內，何以不成電子流？
- (6) 如何可以使電子加速？

## 第八十五章

# 放 射 性

§472. 放射質。自倫琴發見 X 射線後，未及數月，柏克勒爾 (Becquerel) 由含鈾 (uranium) 之瀝青礦及其他礦物，發見亦能發射與 X 射線類似之放射事實。將照相片包以黑紙，置一銅幣於其上；銅幣之上，再放鈾礦石。數日之後，取出照片，經過顯影，定影，即見銅幣清晰之影。此種現象，謂之放射性。具有放射性之物質，謂之放射質 (radio-active substance)。

此種奇異之放射性，可用與檢查 X 射線相同之法而檢出之。除對於照相片之作用外，或生熒光，或使空氣電離而能傳電。此電離之效應，可藉金箔驗電器中金箔降落之速度而測定之。

§473. 鐳之發見。不久以後，居禮夫婦發見鈾 (thorium)，為僅次於鈾之已知的最重元素，亦具有同樣之性質。氏又知與地利某處之瀝青礦，較同重量之純鈾或純鈾，有更强之放射性，此為極可驚奇之事實。是必此種瀝青礦中含有較鈾或鈾放射性更强之物質，因而發見一新元素，而稱之為鐳 (radium)，經長時期之艱苦工作，居禮夫人得由許多〔噸〕瀝青鈾礦內分出極微量之溴化鐳，以測定鐳之原子量為 226。鐳之放射性，較同重量之瀝青鈾礦強百萬倍，較純粹之鈾且強四百萬倍。

§474.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  三種射線。由鐳發射之射線，共有三種，分別以  $\alpha$ ,  $\beta$ , 及  $\gamma$  射線名之。前二者為帶電之質點，後者為波動，可用磁場或電場將其分開而知之。

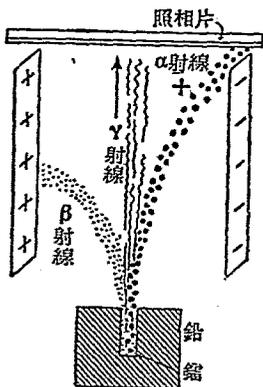


圖 521. 鐳之三種射線。

以少許之鐳鹽，置於鉛塊之槽內，用靜電電場，可使三種射線分開，如圖 521 所示。 $\alpha$  射線有甚小之貫穿本領，為帶正電之氦原子； $\beta$  射線有較大之貫穿本領，實係一電子流，與放電管內之陰極射線相同； $\gamma$  射線不為靜電場所影響，而致偏向，與 X 射線同，亦為一種光波，其波長且較 X 射線為短。

由放射質放射之  $\alpha$ - 與  $\beta$ - 質點，速度極大，特別是  $\beta$  質點，有達光速之百分之九十九以上者。惟  $\beta$  質點為電子，其質量遠不及  $\alpha$  質點之為氦原子者之大。

因  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  三種射線貫穿本領之不同，吾人又可用吸收方法而將其分開。將一放射質用數層紙包之，則  $\alpha$  射線即被吸收；若用 1 或 2 [毫米] 厚之鉛片包之，則  $\beta$  射線亦被吸收；但  $\gamma$  射線能透過數 [吋] 厚之鉛。鐳之所以能使照相片感光，大部分即由於  $\gamma$  射線之作用。

吾人又常藉在空氣中之電離作用，由驗電器之放電速度，以研究放射質之放射性。 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  三種射線之電離作用，亦大不同。 $\alpha$  射線之電離作用，較  $\beta$  射線為強， $\beta$  射線又較  $\gamma$  射線為強；此因

$\alpha$  質點之質量遠較  $\beta$  質點為大，因之動能特大，與其他原子或分子相碰撞時，極易將其電子擊出之故也。吾人且常用  $\alpha$  質點以為射擊原子之用（見後 §§ 485, 486）。

§475. 放射質之蛻變。放射質不絕的發放射線，同時即自行變為他種物質。例如鐳之原子量為 226，鐳放射  $\alpha$  質點，而成為另一種元素曰氡(radon)，其原子量等於 222。同樣，一切放射質，均次第變化，成為別種物質之現象，曰蛻變(radioactive transformation)，蓋原子在自然發生爆炸狀之崩潰(disintegration)中也。鐳蛻變成氡，氡又蛻變成鐳 A，鐳 A 又蛻變成鉛 B，如是遞次蛻變，最後達於非放射質之鉛而後已，大有“子而孫，孫而曾”之情形。

在放射質之蛻變中，各階段物質之崩潰速度，大有不同。其平均之壽命，即自生成至崩潰之平均時間，有短至萬萬萬分之幾〔秒〕者，有長至若干萬萬〔年〕者。自純粹之鐳鹽放射之射線，歷 1580〔年〕而降至其半，換言之，在此時期內，其中所含之鐳原子，已有半數崩潰，即所謂半衰期也。鈾與釷之半衰期各為  $4.5 \times 10^9$ 〔年〕及  $1.65 \times 10^{10}$ 〔年〕，崩潰極緩，此所以能大量存於礦物中，而為吾人所最先發見其為放射質也。

放射原子，於崩潰時，有發射  $\alpha$  質點者，亦有發射  $\beta$  質點者。發射  $\alpha$  質點後所成之新原子，其原子量較母體少 4，因氦之原子量為 4 也。發射  $\beta$  質點後所成之新原子，其原子量與母體相同，化學性質則有異，即所謂同重元素(isobars)也。亦有物質

可同時發射兩種質點者，必其一部分原子放射  $\alpha$  質點，一部分放射  $\beta$  質點，各成爲一新原子，而得兄弟兩元素，是在此一代而分支矣。凡放射  $\beta$  質點者，通常皆有  $\gamma$  射線隨同出現，但並非恆係如此。 $\gamma$  射線決不與  $\alpha$  質點同時出現。由此可知吾人所云鐳之放射三種射線者，實包括其子其孫其後裔而言也。

**§476. 鐳之能。** 鐳與鐳鹽之另一顯著性質，爲不絕的發生熱量是也，較其四周之溫度，每高攝氏 3 至 5 [度]。居禮夫人實驗測知 1 [克] 之鐳，在 1 [小時] 內，能生 135 [卡] 之熱，而鐳之本身，可說全無減少，因其半衰期爲 1580 [年]，即 1580 [年] 之後，1 [克] 之鐳尙剩半 [克] 也。此種熱之發生，進行雖慢，但繼續不斷，至 1 [克] 之鐳完全蛻變時，所放出之總熱量，比之 1 [克] 之煤燃燒時所生者，約爲四十萬倍。

此種事實之本身，就工商業上所需能之觀點言之，並不重要，因鐳產量極少，而價極昂也。但由此事實，可知各種物質，連煤在內，其原子內部所蘊藏能量之巨大！倘能知其如何取用，自屬非常重要之事；故自居禮以後，從本世紀始，即預知原子能時代之將到來。

**§477. 鐳之用途。** 鐳之放射性甚強，故亦可用 X 射線同樣之法，以攝取影片。鐳射線對於生物，有極強之作用，常用以治癌與瘤。或將鐳鹽封閉於鉛針中，或每日從鐳鹽溶液，萃取其氦，而收集於小玻璃管中。用時將此種針或管，插入癌疾附近

之肌肉內。其治療之力，由於此種射線，對於有病組織之破壞，更甚於健全組織。

某種不純淨之放射元素，常用以製造熒光漆，將此種物質與硫化鋅混合，則與由鐳放射之質點接觸，即生熒光。用熒光漆塗寫，即可在黑暗中發光，如夜明錶是。塗於小電鈕及門柄上，可在夜中易於覓得開關及門柄。其在地下道與夜間防空，應用漸廣。

### 習題八十五

- (1) 有何簡易法，鑑別某物質是否具放射性？
- (2) 除鐳外，有何其他放射性物質？
- (3)  $\alpha$  射線與  $\beta$  射線之分別何在？
- (4)  $\beta$  射線與陰極射線之分別何在？
- (5) 何以說放射性是原子內部的現象？
- (6) 1 [克]之鐳，到 3160 [年]後，尚剩多少 [克]？

## 第八十六章

### 原子之結構

§478. 原子與分子。 試就單純而均勻之固體，液體，或氣體剖分之，惟見其大小形狀與原來者有別，其物理性質與化學性質，固未有絲毫變更也。今以人羣比擬之，將一大羣之人，分爲若干團體，再由各團體分爲若干小團體。則各團體及小團體之一般情形，與原來之人羣，亦初無區別也。 但若按此更行繼續剖分，終必至每一小團體中僅剩一人而止，蓋此時已達最後之限度，無可再往下分者矣。 物質之剖分亦然，終必至一極限，若欲原來物質之本性不生變化，則至此極限，卽爲剖分終點，而不能再進。 此極限在人羣爲個人，在物質爲分子及原子，卽吾人認爲組成物質之基礎者也。

物質種類之不同，卽由於分子種類之有異，如水有水的分子，酒精有酒精的分子。 由化學之研究，知所有物質皆由少數之元素而成。 此等元素，在天地間，一共祇有九十餘種。 吾人且於不知不覺間默認同種元素之原子，皆屬相同，如銅有銅的原子，金有金的原子；依是而言，原子之種類，亦將不過九十餘種而已。

§479. 原子量與分子量。 兩不同元素之原子，自然不同。 由化學之研究，得定各種不同原子之重量，與其中某一種原子

(例如氫原子)之重量之比;此比值稱原子量(atomic weight),  
例如:

原子	原子量
氫	1 (1.0078)
氦	4 (4.003)
鋰	7 (6.940)
氮	14 (14.008)
氧	16 (16.0000)

等等。此等數字表示氫,鋰,氮,氧諸原子之重量,大於氫原子者各約4, 7, 14, 16 倍。實際上,以氧原子為比較原子量之標準,其原子量即取作恰等於16,從此實測其他各元素所得之原子量,有如上表中括弧內所列,可見皆與整數相差甚微。

原子量僅為比值,並非真為原子之質量,已如上述。但吾人今日已能定出此等原子之真實質量矣。例如吾人知1[克]之氫,含有原子之個數為  $N = 6.02 \times 10^{23}$ 。此為亞佛加德羅數(Avogadro's number),經許多方法而決定者。於是一氫原子之質量當為

$$\frac{1}{6.02 \times 10^{23}} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ [克]},$$

一氧原子之質量為

$$16 \times 1.66 \times 10^{-24} \text{ [克]}.$$

等。普徧言之,以亞佛加德羅數除原子量,即得該原子之質量。數種不同之原子,結合而成分子。如水之分子為二個氫原子與一個氧原子所組成,寫成  $H_2O$ 。硫酸之分子  $H_2SO_4$  中,含有1

原子硫，4 原子氧，與 2 原子氫。同一元素之原子，亦能集合而成分子，如氧分子  $O_2$  為 2 原子氧所組成，臭氧分子  $O_3$  為 3 原子氧所組成。

一分子之重量，為其所含各原子之重量之和，與一原子氧之重量作為 16 之比，稱為分子量(molecular weight)。例如水之分子量為 18，硫酸之分子量為 98 等。

§480. 氫原子。元素中以氫為最輕，氫原子為原子中之最簡單者。由電解現象，吾人知氫離子所帶之正電荷 (§409) 與電子之負電荷，電量相等；而氫離子之質量，則與氫原子之質量相同。又從陰極射線 (§468) 之研究，吾人知電子之電荷與其質量之比  $e/m$ ，即所謂質荷比(specific charge)者，僅為氫離子質荷比之  $1/1837$ 。由此可知電子之質量，要比氫原子小 1837 倍，約為  $9.1 \times 10^{-28}$  [克]耳。故電子之質量，對氫原子而言，亦且微不足道，其他更無論矣。

因此吾人設想氫原子中有一個電子，當其失去此唯一之電子時，即成為氫離子；而氫離子實為氫原子之主要部分，特名為質子(proton)，蓋質子之質量，幾占氫原子質量之全部也。故氫原子由一個質子與一個電子組合而成，質子帶正電荷，電子帶負電荷，兩者電量相等，因是對外顯電之中性。質子居於原子之中心，電子圍繞質子而旋轉(圖 522)，一如地球之圍繞太陽然。原子雖小，但質子與電子更小，故在原子之內，電子與質子之間，仍有相當大之距離，一如地球與太陽間之天空也。

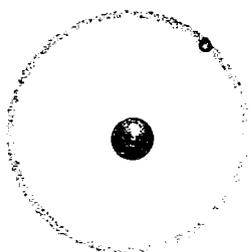


圖 522

氫 原 子

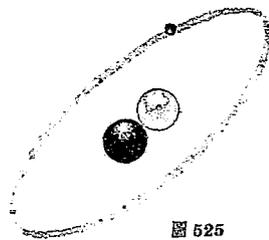


圖 525

氟 原 子

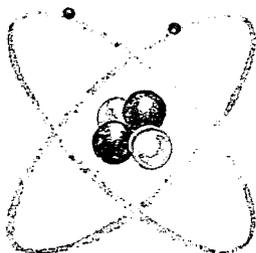
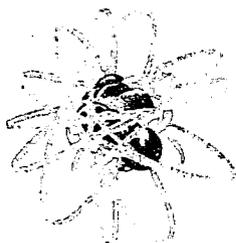


圖 523

氮 原 子



(插 586 後)

圖 524

氧 原 子

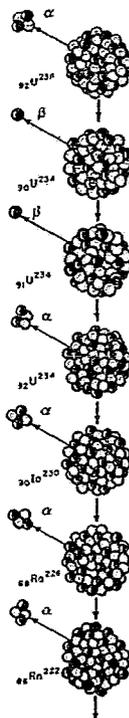


圖 526

鈾 之 蛻 變

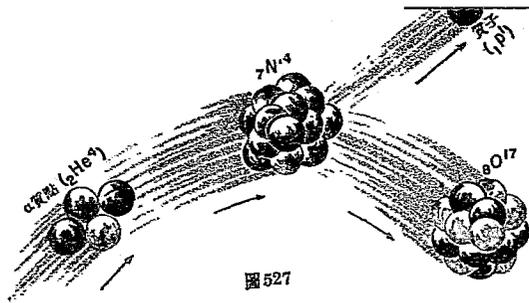


圖 527

氮原子核之人工改造

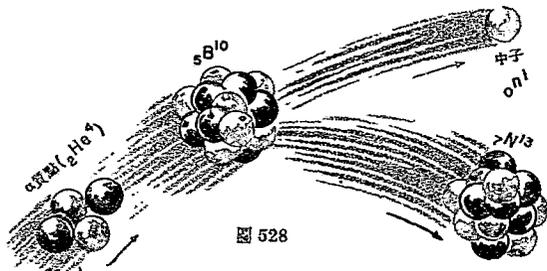


圖 528

人工放射性

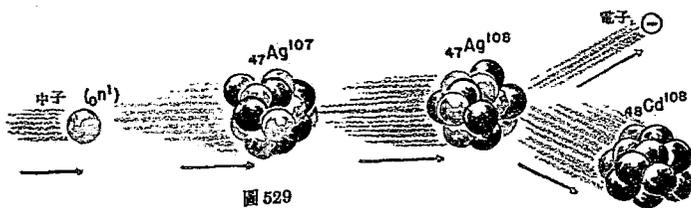


圖 529

中子之射擊銀原子核

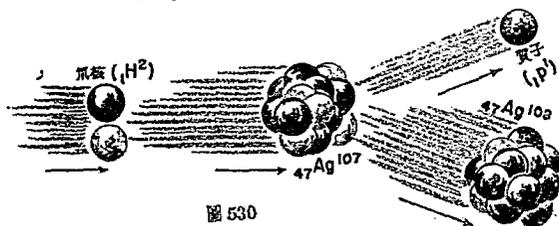


圖 530

氘核之射擊銀原子核

§481. 原子外層之電子。最簡單之元素爲氫，其原子僅具有一個電子，其次爲氦，其原子具有二個電子（圖 523）。在週期表中，第三元素爲鋰，具有三個電子，第四元素爲鈹，具有四個電子，餘以此類推。原子量愈大者，電子個數愈多。此等電子，距質子所在之處，即所謂原子核（atomic nucleus）者頗遠，分層排列，圍繞原子核而運轉。其最近原子核之第一層上，含有至多二個電子，而最外面之一層，則可含電子自一個至八個。

最外面一層，所含電子之數目，乃決定此原子之化學性質者。當其含有八個電子時，此最外面一層已告滿座，此時原子組織非常穩固，絲毫不呈化學上之活動，即空氣中之鈍性氣體，氦，氖，氬等是。

氯原子之最外一層，含有七個電子，極願從外方攫獲一個電子，以成滿堂團圓。又鈉原子之最外一層，祇有一個電子，比較樂於放棄。故若一鈉原子與一氯原子靠近，則鈉原子將失去一電子而成陽離子，氯原子則得此一電子而成陰離子。此異性離子，互相勾引，而組成一分子之氯化鈉。可見化學反應云者，不過原子最外層電子間之相互作用而已。宜乎在氯化鈉之分子中，氯還是氯，鈉還是鈉。

各種元素之化學性質，所以有週期性者，即由於原子之分層排列，其最外層之電子爲自一個至八個，即週期表所以有八直行之理。週期表中每一橫列之首尾，相當於一新電子層之開始與完成。第一直行內之元素（氫與鹼金屬），其原子最外層祇有一個電子，故其價爲一；第二直行內者（鹼土金屬），其原子最外層

有二個電子，故爲二價，餘類推。第八直行內之稀有氣體，無尋常之化合作用，吾人稱之爲零價。第七直行內之元素（鹵素），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。故元素之在第幾直行內者，其價卽爲幾，或爲八減幾；此二種之價，有相反之性質，卽正價與負價。

§482. 原子核之組成。如上節所述，倘一原子外殼之各層上，共有  $Z$  個電子，卽爲週期表中之第  $Z$  位元素， $Z$  稱爲原子序數 (atomic number)。爲保持原子之中和性，此等電子所帶負電荷之總量，必等於原子核所帶正電荷之電量，故原子核內必有  $Z$  個質子。例如氫原子核有 1 個質子，氦原子核有 2 個質子，以至週期表中最後之第 92 位元素鈾，有 92 個質子。

原子序數爲  $Z$  之原子核中，除  $Z$  個質子外，尚有  $A-Z$  個中子 (neutron)。中子爲不顯電性，而呈中和之質點，其質量幾與質子相等。 $Z$  個質子與  $A-Z$  個中子相加，其質量卽約爲氫原子之  $A$  倍， $A$  爲與該元素原子量極相接近之整數，特稱原子質數 (mass number)，此各種原子量之所以恆近於整數也。

吾人常於化學符號之左下方，標明其原子序數，右上方標明其原子質數。例如氦有 2 個質子，2 個中子，其原子序數爲 2，原子質數爲 4，寫成  ${}^4_2\text{He}$ ；氧有 8 個質子，8 個中子（圖 524），其原子序數爲 8，原子質數爲 16，寫成  ${}^{16}_8\text{O}$ ；鈾有 92 個質子，146 個中子，其原子序數爲 92，原子質數爲 238，寫成  ${}^{238}_{92}\text{U}$ 。故原子核內之質子與中子，爲構成一切物質之基本組織成分。至於外殼

之電子，質量極小，其存在與否或數目多寡，對於原子量之整數性，實際上毫無影響。

中子祇有在原子核內存在，亦惟有原子核被打破時，才會出現，所以在本書中，前未提及。

§483. 同位元素。元素之化學性質，完全由於原子外殼各層所含之電子數，或原子核內之質子數，即原子序數  $Z$  而決定。至於原子量，則由原子核內所含之質子數，與中子數之和  $A$  而定。故世有原子量不同，而化學性質完全相同之元素，在週期表中，應列於相同之地位，是為同位元素(isotopes)。

普通之氫原子，其原子核單由一質子而成；亦有含一質子與一中子者(圖 525)，其原子量為 2，是為重氫(heavy hydrogen)，即氘(deuterium)。氘與氧化合而成重水，其化學性質自然與普通之水無異。在尋常之氫氣中，氘僅佔萬分之二耳。

氧有三種同位元素，其原子量各為 16, 17, 及 18；在自然界中，後二者遠不若前者之多。鈾亦有三種同位元素，其原子量各為 234, 235, 及 238。在純鈾中，第二種 U-235 僅占百分之 0.7，第一種 U-234 更少。化學上測定原子量之值，其所以不為整數者，係因在許多情形中，外觀似屬化學單純之元素，而實為幾種同位元素之混合物所致。

§484. 放射性為原子核內之自然變化。在週期表開始之前二十種元素中，除氫外，其原子質數  $A$  為原子序數  $Z$  之二倍

或二倍多一；可見此等原子核中，所含中子之數，與質子同，或比質子多一。此種結合，極為穩固，大有牢不可破之勢。略加思索，當知在原子核內，質子與質子之間，因同帶正電，自然互相拒斥，幸有中子羈雜其間，中子與中子間，及中子與質子間，吸引之力，足以勝過質子與質子間拒斥之力而有餘，所以仍能結成一團。從週期表再往下看，每種元素增一質子，同時即添一個或幾個中子，到最後之鈾時，92個質子竟有146個中子相伴。雖然如此，仍難免“分子多”而不出問題，不復能相安共處；鈾原子核遂在自然崩潰中矣，是為放射性現象。自然界中，不能有比鈾更複雜之原子存在，亦成不言而喻之事實。

放射性物質多為複雜原子，即週期表中之最後近十種元素。鈾原子核開始崩潰後，不斷繼續崩潰。在崩潰過程中，有時放射 $\alpha$ 質點，有時放射 $\beta$ 質點與 $\gamma$ 射線（圖526），而變成鐳，鐳再崩潰，終至於鉛，始告平靜。放射質不放射質子與中子，而放射 $\alpha$ 質點，確為足以驚奇之事。實驗證明 $\alpha$ 質點為氦原子核，由二個質子與二個中子組合而成。由此可設想此種二個質子與二個中子之組合，必也堅固異乎尋常，成為原子核中之“小組織”。原子核中之質子與中子，若盡成“ $\alpha$ 小組織”，即有偶數之質子與同數之中子者，如氦，碳，氧，錳等是，宜其結合特別堅強。

放射質所放射之 $\beta$ 質點，為高速度之電子。原子放射 $\beta$ 質點後，即成為原子序數增一之新元素，換言之，原子內添一質子矣。此一質子，從何而來？<sup>24</sup>最簡單之說明，為原子核內之某一個中子，忽然“發怒”，拋出電子，其本身遂變成為帶正電荷之質子。

此被拋出之電子，即 $\beta$ 質點，故 $\beta$ 質點來自原子核中，非原子外殼上之電子也。當中子“發怒”時，每有 $\gamma$ 射線與 $\beta$ 質點同時發放，其波長甚短，頻率甚高，即其能量頗大，遠非普通光線或X射線（由於原子外殼上電子之變化而生）所可比擬。

又放射質所放射之 $\alpha$ 與 $\beta$ 質點，速度皆甚高，特別是 $\beta$ 質點，竟有達光速之百分之九十九者。此等小小質點動能之大，幾難想像。總而言之，放射性為原子核內部之現象，其所涉及之能量，遠非一切化學反應所能望其項背。

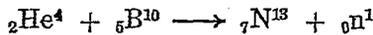
**485. 原子核之人工改造。** 放射質既不斷由原子核中放射 $\alpha$ 與 $\beta$ 質點及 $\gamma$ 射線，此類射線，可否用以射擊其他原子核，而覘其有無變化？若可應用，自然以 $\alpha$ 質點為宜，因其動能較大，而又原為原子核內之“小組織”也。

1919年羅德福(Rutherford)用 $\alpha$ 質點射擊氮，而得氧與質子。氮原子核原有7個質子與7個中子，加入2個質子與2個中子之 $\alpha$ 質點，放去1個質子之後，結果成為8個質子與9個中子之氧(圖527)。如是將氮原子改造而成氧原子，此在科學上為何等新奇而重要之事實！有如氮之家中，來到四個土匪，二個紅臉，二個黑臉，擒住三個，逃去一個黑臉。擒住的三個，卻能改過從良，一同安居，撑起氧的門第。

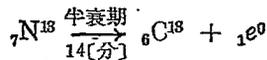
**§486. 人工放射性。** 闖進之土匪，很少能安分的，向來平安家庭，從此不免多事。結果或是家中之人，幾個出外逃避，或

是再將土匪趕走幾個。這就是居禮長女與其丈夫，常里沃夫婦 (Joliot-Curie)，在 1933 年發見的人工放射性 (artificial radioactivity) 之情形。

常里沃夫婦用  $\alpha$  質點 ( ${}_2\text{He}^4$ ) 以射擊鈹 ( ${}_6\text{B}^{10}$ )，放出中子 ( ${}_0\text{n}^1$ )，並得到氮 (氮之同位元素  ${}_7\text{N}^{13}$ )，有如圖 528 所示。此不但為人工可以產生中子之一實例，且與羅德福實驗有根本不同之點。在羅德福實驗中，所得之氧為安定者；而在常里沃夫婦實驗中，所得之氮，乃不安定者，祇是“事變”之開始耳。此等氮原子核不斷在自然崩潰中，一如普通之放射質然，蛻變而成為碳。其變化有如下列二式所示：



及



於是吾人能以人工造放射質矣。碳所放射者為正(電)子 (positron) 以  ${}_1e^0$  表之。正子之質量與電子同，但帶正電荷，在常利沃夫婦做本實驗前數個月，為安德遜 (Anderson) 在宇宙線照片中發見。此地之正子，當由氮原子核中之某一個質子，變成中子前所放出者。

從常利沃夫婦發見人工放射性後，各方工作，風起雲湧，不數年間得人工放射質逾五百種。放射質非但不限於重元素，即最普通之元素，幾莫不有一種或數種之同位放射元素。此等同位放射元素，在理化，生物，以及醫藥上之應用，方興未艾，前途無量。事至今日，即金之少數質點，亦已可得，此由於鉛之蛻變

而成，當然不合商業原則，這又何妨？但古代點石成金之夢想，終成事實；況金之爲用，在人生遠不如銅與鐵之廣乎！

從被擊中的原子核，而射出之中子，乃是射擊原子核之最良武器。如圖 529，用中子射到銀( $_{47}\text{Ag}^{107}$ )原子核內，即成爲銀之同位元素  $_{47}\text{Ag}^{108}$ ，因其較普通之銀多一中子而不安定，乃又放射  $\beta$  質點以蛻變，而成鎘( $_{48}\text{Cd}^{108}$ )。

除  $\alpha$  質點與中子外，自然亦可用質子或氘核(deuteron)，即氫或氘之離子，以作射擊原子核之工具。因其質量較輕，往往先使此等離子加速，而後射進原子核內，方爲有效。所謂原子衝擊器，即係使此等離子加速之儀器，一如槍砲之使子彈加速然。圖 530 示用氘核( $_{1}\text{H}^2$ )射擊銀原子之情形。氘之質子，挾中子以俱走，將中子送進“銀宮”內，本身則以帶正電故，而遭拒斥，根本未曾進門，徬徨然而去之，其功用有如“伴郎”而已。

## 第八十七章

### 原 子 能

§487. 物質與能量之關係。物質不滅與能量不滅，爲自然界之二大定律。此一物質，與他一物質化合，可以變成另一物質。此一能量，經人設法，可以變成另一能量。其間各有數量關係，不增不減，是爲不滅。但物質自物質，能量自能量，判然兩途，毫不相關，自有科學以來，迄乎本世紀初葉，吾人公認此爲真理者也。

愛因斯坦(Einstein)於其相對論之研討中，想到物質與能量並非不相關聯，二者之間且有一定的數量關係如次：

$$E = Mc^2,$$

式中之質量  $M$  以〔克〕計，能量  $E$  以〔爾格〕計， $c$  代表光之速度，即每〔秒〕 $3 \times 10^{10}$ 〔厘米〕也。故1〔克〕之質量，等於  $9 \times 10^{20}$ 〔爾格〕之能量。此  $c^2$ ，即爲物質與能量之“兌換率”。

如此簡單而基本之物質與能量的關係，從拉發錫(Lavoisier)牛頓(Newton)諸氏而來，湮沒數百年，不爲人所發見者何哉？問題即在“兌換率” $c^2$ 之大乎尋常，難以捉摸。就物質言，1〔克〕之物質，彈丸耳，竹屑耳，在吾人日常生活中，小不足道。但就能量言， $9 \times 10^{20}$ 〔爾格〕之能量，約合  $25 \times 10^6$ 〔仟瓦·時〕，不但從未爲任何私人一時所擁有，且未爲任何人所曾一眼看見；

約等於我國男女老幼全體同胞一〔小時〕之工作。

事之奇妙者，此 1〔克〕之物質，無論其為黃金或糞土，皆有同樣巨大之能量。故愛因斯坦之理論，在當年被認為或有哲學的意義，決無實用之價值，一如其相對論然。但科學家如居禮夫人等，輒覺原子核內之變化，恆涉及巨大之能量，愛因斯坦之理論，將來或可於此中由實驗證明。至於此種巨大能量之利用，自須先知如何能將物質變成能量。

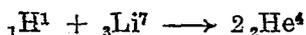
§488. 化學反應中之質量變化。現在工業上所用之能量，多由燒煤而來。碳與氧化合，燃燒而放出熱量，其反應如下：



一〔噸〕之煤，或更精確言之，一〔噸〕之碳，燃燒後共放出熱量 70 萬萬〔卡〕，約等於 8200〔仟瓦·時〕，此即吾人所謂化學能也。此化學能量，由愛因斯坦之關係式，可知其約等於萬分之 3〔克〕之質量。故 1〔噸〕之碳與 2 $\frac{3}{8}$ 〔噸〕之氧化合，依愛因斯坦學說，應得 3 $\frac{3}{8}$ 〔噸〕減萬分之 3〔克〕之二氧化碳。天下安有論〔噸〕的秤，能準到〔克〕以下之小數？若在試驗管內，用 12〔克〕之碳，與 32〔克〕之氧化合，應得(44 - 0.0000000036)〔克〕之二氧化碳。用人類製造之任何靈敏天秤測量，安有不作為 44〔克〕之理？結果 12〔克〕之碳，與 32〔克〕之氧化合，得 44〔克〕之二氧化碳，物質不滅定律，“千真萬確”！

§489. 原子核反應中之質量變化——原子能。在 §485 所

述原子核之人工改造，與 §486 所述人工放射質之產生諸例，皆為原子核反應，與尋常之化學反應不同。茲再就將加速之氫離子，射擊鋰而得氦之一反應，即：



而論之。反應前為氫與鋰，反應後為氦，元素無一相同。非若碳與氧化合而成二氧化碳，二氧化碳分子之內，仍為反應前之碳與氧也。

質子之質量為 1.0076 質量單位(mass unit)，鋰為 7.0164 質量單位，在反應前，二者之和為 8.0240 質量單位。反應而得氦二個，氦之質量為 4.0028 單位，二個共計 8.0056 質量單位。故經反應後，實減小 0.0184 質量單位。此減小之質量，即依  $E = mc^2$  之關係，變成能量而放出，是為原子能(atomic energy)，在本例中即為所得氦原子之動能與入射之氫原子之動能之差。

最可注意者，此減小之質量 0.0184 質量單位雖小，實占鋰之原來質量 7.0164 質量單位的百分之 0.3 弱，吾人倘不忘一〔噸〕碳燃燒所失去之質量時，當知此為一甚大之百分數也。一〔噸〕碳與氧化合時，所減小之質量，為萬分之 3〔克〕，僅占碳之原來質量的百分之 0.00000003 耳。前者較後者大一千萬倍。故 1〔克〕鋰在原子核反應中，所放出之原子能，乃一千萬倍於 1〔克〕碳在化學反應中所放出之化學能。此原子能之所以巨大，化學能對之，直小巫之見大巫也！

§490. 原子能實用之條件。 鋰與氫之原子核反應，發見於

1932年，何以不能立即施諸實用？此仍可以碳之燃燒喻之。碳之可供實用者，以其一經點着，即自行繼續延燒，倘燒一〔斤〕之碳，而需數十盒之火柴，豈非燃燒火柴之更為直捷了當？在1939年發見鈾之分裂以前，所知之原子核反應，皆屬如是情形。

欲使氫原子核之與鋰原子核起反應也，先須將氫原子游離，再須使其加速，在在費功，而此等加速後之氫原子核，射擊鋰原子時，百萬個之中，祇有一、二個射中，吾人對於其餘氫原子核加速之功，都成白費。被射中之鋰原子，改造為氦原子，此氦原子又非再能射擊鋰原子而使其續起反應。故在1932至1939年之期間中，科學家雖在實驗室內，能將原子能解放，但所得皆屬不償所失。

**491. 鈾之分裂。** 1939年春德國漢午(Hahn)與司屈拉斯曼(Strassmann)發見鈾之分裂，局勢為之改觀。消息傳來，舉世震動，皆認知此一發見，為開啓原子能實用之門之鎖鑰也。大量解放，即在目前。

以速度適當之中子(圖 531)，射擊鈾，鈾之原子核即被分裂而

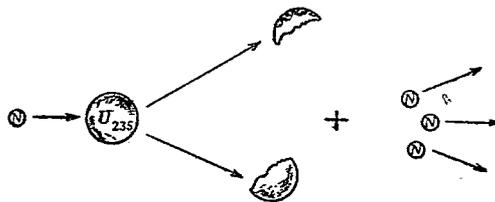


圖 531. 鈾之分裂。

成二塊質量之和。此二塊小於原來之鈾原子，所失去之質量，即依愛因斯坦公式，變成原子能而放出。關於鈾之分裂，最主要之點，除裂成二塊外，同時射出數個中子，此數個中子又可使其他鈾原子分裂，如是“一而十，十而百”，為等比級數的增加，以成所謂鏈式反應(chain reaction)，而能自動“燃燒”矣。

§492. 鈾堆。然則，有鈾於此，難免不從外間闖進一個中子，何以未見燃燒？細考鈾之分裂者為鈾-235，而非鈾-238。在純鈾中，所含鈾-235，僅及鈾-238 之  $1/140$  (§ 483)。鈾-235 分裂時所射出之數個中子，極可能遇到鈾-238，而無一射中鈾-235者，分裂現象，遽告中止。

又鈾-235 分裂時，所射出之數個中子，速度亦各不同。速度大者每與鈾原子相碰而不被擒；速度小者極易為鈾-238所擒獲而起反應。惟有速度中等者方能鑽入鈾-235 之原子核，而將其分裂；故不快不慢之中子，於鈾之分裂，始為有效。故以普通之純鈾，欲其鏈式反應之得實現也，將鈾分成若干小堆，裝排於石墨之上，而成格子狀以成所謂鈾堆(pile)。如是速度過大之中子，將由鈾跑入石墨，在其間優游徘徊，消磨一部分之動能，再能跑入任一鈾堆時，將可為更有效之射擊，使鈾-235 之分裂，作“複利”之增加，愈演愈烈，頓成爆炸，是即原子彈也。即或進行遲緩，亦必不久將鈾堆熔解，故不能不有方法以控制之。控制之方，於鈾堆內留若干過道，備置含鎳與硼之鋼棒之用。此等鋼棒之功用，在於吸收中子，當其塞進時，大部分之中子全被

吸收，鏈式反應即行停止。將其漸行抽出，到一地位，鏈式反應又可開始，繼續堆出，則作用之進行加強，如是可隨吾人之意而控制之，鈾池成爲原子能之“鍋爐”矣！

美國於 1942 年十二月二日，製成第一個鈾堆，因定此日爲原子能紀念日，象徵原子時代之開始。

§493. 現在製造原子彈之原料。鈾堆爲可供實用之原子能源，已如上述。欲其成爲爆炸性之原子彈，最好從純鈾中提取鈾-235 以爲原料，但鈾-235 與鈾-238 爲同位元素，化學性質完全相同，欲其分開，自非化學分析所能奏效，可用物理方法，雖繁重而並不困難。

在上節所述鈾堆中，吾人曾言及  ${}_{92}\text{U}^{238}$  能擒獲中子，而不被分裂，當即放射  $\gamma$  射線，而成  ${}_{92}\text{U}^{239}$ 。此  ${}_{92}\text{U}^{239}$  非安定者，放射高速之電子，因此其原子核中增一質子，而成新元素，稱爲鏷 (neptunium)，寫成  ${}_{93}\text{Np}^{239}$ 。鏷亦爲放射質，再放射高速電子，原子核中之質子又增加一個，遂成另一種新元素，稱爲鐳 (plutonium)，寫成  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ 。鐳亦可被中子射擊而分裂，爲製造原子彈之第二種原料。鐳並不自然存在，由鈾改造而來；現在之鈾池，通常即作爲製造鐳之器械。鐳與鈾爲二種不同之元素，故可用化學方法分開。

依理言之，一切可以分裂之原子核，皆可爲原子彈或原子能之材料。現在關於鈾之分裂研究，似乎已有相當成就。在地球上，鈾礦較鈾礦更爲豐富。

美國首先製成原子彈，於1945年八月六日，八日，在日本廣島長崎上空，先後投下兩顆原子彈，不一週而日本投降，第二次世界大戰，於以結束，中國抗戰，最後勝利！

§494. 原子能時代之展望。 原子能是偉大的，於人類之貢獻，將駕乎電與汽而上之，很可能引起工業革命，從而改變人類生活方式。原子能同火一樣，為禍為福，全在吾人之如何利用。第一件應用不幸在於軍事，此亦不必失望。 燎原之火，曾為人類最大之威脅，在電學昌明之前，人類所受電之賜者，亦惟雷擊之災耳。

鈾堆即為原子能源，一如汽機，可以行船，可以發電。其於和平建設之用途，就技術言，即在今日，已無不可解決之問題。 廣徧使用，可較熱能電能，便宜得多。至於能否早日付諸實用，為整個人類謀幸福，責在政治家，外交家，與軍事家，已非科學家與技術家所能為力。 倘為軍事目的，保守原子能之一切秘密，則決不能同時應用於日常生活上，可斷言也。至少要在各國均已發展到相當地步，甚至要在大家一相比敵之後，則將造成慘局矣！ 人類總不至於蠢到用自己聰明的創造，來毀滅自己吧？

回顧中華，當汽機時代之開始，當電的時代之開始，一隱獅也。 原子能時代之開始，適逢我國抗戰勝利光榮之日，情形似乎大不相同。在此新時代中，宜如何急起直追，再不為落伍之民族，是所望於青年讀者。

## 附 錄

### 下冊習題答數

習題四十五 (4) 828 [米]. (5) 256. (6) 2,744 [米]. (7) 294 [米]. (8) 0.5 [秒]. (9) 578 [米]. (10) 5.8 [秒]. (11) 43 [米]. (12) 3.3°C.

習題四十六 (4)(a) 0.67 [米]. (b) 2.81 [米]. (5) 41.3 至 4288. (6) 1,724 [米].

習題四十七 (7) 284. (8) 240. (9) 25:9. (10) 390; 88 [厘米]. (11) 338 [米/秒]; 11°C.

習題四十八 (2) 196, 294, 435, 652;  $\frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{3}{2} : \frac{2}{3}$ . (3) 15.8; 31.6. 47.4, 63.2. (4) 67 [厘米]. (5) 252; 504, 756, 1008. (6) 89.3, 267.9, 446.5, 625; 奇數倍.

習題四十九 (3) 10 米. (6) 3 吋. (7) 1.5 萬萬 [仟米]. (8) 4.25 年. (9)  $9.46 \times 10^{12}$  [仟米].

習題五十 (1)  $\frac{1}{25}$  [燭·米]. (4) 204 [燭米]; 10 [燭光/厘米<sup>2</sup>]. (5) 123 [燭光]. (6) 0.707.

習題五十一 (7) 4 [呎], 在鏡後 2 [呎] 處. (8) 五點三刻. (9) 0.65 [米]. (10) 7.5 [呎]. (13) 3. (14) 最近像相距 240 [厘米]. (15) 120°; 65°; 10°.

習題五十二 (4) 凹鏡前 5 [厘米] 虛像在凹鏡後 5 [厘米] 處. (5) (a) 鏡前 7.5 [厘米], 高 0.5 [厘米]; (b) 鏡前 10 [厘米] 處, 高 1 [厘米]. (6) (a) 13.3 [厘米], 高 1.67 [厘米]; (b)  $\infty$ ; (c) 鏡後 7.5 [厘米] 處, 2.5 [厘米]. (8) 2.67 [呎]. (9) 半徑為 90 [厘米] 之凹球面鏡, 放在壁前 180 [厘米] 處. (10) 鏡後 1.07 [呎]; 高 0.54 [呎]. (11) 35 [厘米]. (12) 為物體之半長. (13) 在大凹面鏡 1.35 [米] 處.

**習題五十三** (3) 1.414. (5)  $37^{\circ}10'$ . (6)  $41^{\circ}48'$ . (7)  $2 \times 10^{10}$  [厘米/秒]. (9) 2.37. (10) 1.732. (11)  $\frac{8}{9}$ . (12) 0.75 [米]. (13) 31 [厘米].

**習題五十四** (2) 1.12 [厘米]. (3)  $77^{\circ}$ . (5)  $70^{\circ}$ .

**習題五十五** (1)  $\infty$ . (2) +64.5 [厘米]; -64.5 [厘米]. (3) 55.0 [厘米]. (4) 185 [厘米]; 66.6 [厘米]. (5)(a)鏡後 13.3 [厘米], 高 1.3 [厘米]; (b)鏡後 16 [厘米], 高 2 [厘米]; (c)鏡前 13.3 [厘米], 高 5.3 [厘米]. (6)(a)鏡前 6 [厘米], 高 1.2 [厘米]; (b)鏡前 5 [厘米], 高 1.5 [厘米]. (c)鏡前 2.86 [厘米], 高 2.15 [厘米]. (11)距燈 1 [米]; 後像大於前像 9 倍. (13)  $L'$  後 30 [厘米] 高 1 [厘米]. (14) 8.

**習題五十六** (6) 甲用焦距 16.6 [厘米] 之凹透鏡; 乙用焦距 38.9 [厘米] 之凸透鏡. (7) 120 [厘米]. (8) 15 [厘米]; 37.5 [厘米]. (9) 12 [厘米]; 86 [厘米]. (14) 0.04 [徑]; 0.02 [徑]. (15) 0.015 [徑], 0.006 [徑]; 52 [厘米].

**習題五十七** (2) 6.25. (3) 5.3. (4) 100. (5) 18, 30, 42, 60, 110, 120, 150, 300, 280, 300, 500, 600, 700, 1000, 1400. (6) 0.13 [毫米].

**習題五十八** (4) 132 [厘米]; 32. (6) 2.45 [米]; 2.6 [厘米].

**習題五十九** (5) 30 [呎]. (6) 4.3 [吋]. (7)  $9/25$  [秒]. (8) 14400: 1. (10) 29 [厘米]. (12) 2 [分] 53 [秒].

**習題六十** (5) 30.7 [厘米]; 26.7 [厘米]. (6)  $4.8 \times 10^{14}$ . (7) 2260.

**習題六十二** (3) 2 [分鐘].

**習題六十五** (6) 65.5 [達因]. (8) 4 [高斯]. (9) 16 [高斯].

**習題六十六** (5) 32.4 [達因·厘米]. (8) 0.484 [高斯]. (9) 0.452 [高斯].

**習題六十八** (8) 10.9 絕對單位. (9) 24 絕對單位; 12 [厘米].

**習題七十** (4)  $3 \times 10^{-5}$  [庫侖].

**習題七十一** (2) 0.67 [安培]. (3) 1800 [庫侖].

**習題七十二** (1) 6 [伏特]。 (2) 220 [歐姆]。 (3)  $1.29 \times 10^{-6}$  [歐姆-厘米]；  $41 \times 10^{-6}$  [歐姆]。 (4) 銀 8.9 [歐姆]； 銅 9.4 [歐姆]； 鐵 58 [歐姆]； 鉛 117 [歐姆]。 (5) 269 [厘米]。

**習題七十三** (2) 5 [安培]； 0.278 [安培]。 (3) 4。 (6) 22,000 [歐姆]； 95.7 [歐姆]。 (7) 24.6 [伏特]。 (8) 55 [歐姆]。 (9) (a) 18 [歐姆]； (b) 75 [伏特]； (c) 100 [伏特]。 (10) (a) 26.4 [伏特]， 0.072 [歐姆]； (b) 2.2 [伏特]， 0.0005 [歐姆]。 (11) 0.133 [安培]。 (12) 15 [安培]； 0.5 [安培]。 (13) 28 [歐姆]； 11.2 [安培]， 5.6 [安培]， 4 [安培]。 (15) 3.11 [歐姆]。 (16) 1.67 [歐姆]； 4.32 [伏特]， 8.32 [伏特]； 10.4 [瓦特·時]， 20 [瓦特·時]。

**習題七十四** (4) 682 [瓦特]；  $5.83 \times 10^5$  [卡]。 (5) 6.16 [安培]。 (7) 3<sup>3</sup> 盞； 26 盞。 (8) 電流 2:1； 電阻 1:2； 燈絲截面積 2:1。 (9) 57 [燭光]。 (10) 0.5 [歐姆]； 0.047 [瓦/燭光]。 (11)  $1142^{\circ}\text{C}$ ； 0.014 [毫米]。

**習題七十五** (1) 17.7 [克]。 (2) 0.000338 [克/庫倫]。 (3) 2,810 [小時]。 (4) 0.609 [克]。 (5) 銅 15.2 [小時]， 鎳 17.2 [小時]。 (6) 11.2 [小時]， 1.88 [克]。 (7) 大 0.23 [安培]。 (8)  $6.3 \times 10^9$ 。

**習題七十六** (3) 0.96 [伏特]； 0.54 [伏特]。 (5) 0.05 [歐姆]； 0.3 [歐姆]。 (8) 7.8 [伏特]。 (9) 6 [小時]。 (10) 250 [安培]。

**習題七十八** (1) 425 [歐姆]。 (3) 99 倍。 (4) 813 [歐姆]。

**習題八十** (4) 900 次。 (6) 694 [安培]。 (7) (a) 20 [仟瓦]； (b) 440 [伏特]； (c) 17.6 [仟瓦]。 (8) 14.6 [仟瓦]。 (6) 1:5。 (10) 10,000 [伏特]； 40 [安培]。 (11) (a) 200 [仟瓦]； (b) 1.034 [仟瓦]； (c) 2,100 [仟瓦]； 2,299 [仟瓦]。 (12) 1:22。

**習題八十一** (2) 4.4 [歐姆]； 99 [伏特]。 (4) 81%。

**習題八十二** (3) 577 [仟週]。

**習題八十六** (6)  $\frac{1}{2}$  [克]。

# 索 引

## 二 畫

- 力 25
- (方向) 25
- (定義) 24,141
- (存在) 24
- (強度) 26
- (分子~) 202
- (內聚~) 202
- (向心~) 185
- (附着~) 202
- (摩擦~) 176
- (離心~) 187
- (表面張~) 205
- (絕對單位) 27
- (絕對單位) 153
- 力矩 48
- 力之分解 38
- 力之合成
- (共點力) 35
- (平行力) 44,47
- 力之平衡
- (共點之二力) 32
- (共點之三力) 33
- (共點之諸力) 37
- (平行力) 44-47
- 力之傳遞
- (固體) 29
- (液體) 97
- 力偶之臂 49
- 力之平行四邊形法則 33
- 入射角 342,358
- 入射線 342,358
- 人造磁鐵 434
- 人工放射性 591

## 三 畫

- [大卡] 217
- 大氣 118
- [大氣壓] 123,134
- 大氣壓力 118
- (實驗) 119
- (數值) 120

- (應用) 127
- 大氣電 462
- 大氣內之折射 420
- 三色板 416
- 三原色 416
- 三稜鏡 368,408
- 三極真空管 560
- [小時] 4
- 小孔成像 333
- 工作 62
- 工作機械 447
- 干涉
- (水波) 425
- (光) 426
- (音) 320
- 上舉力(飛機) 116
- 子午面 443

## 四 畫

- 水車 175
- 水波 306
- (干涉) 425
- 水準 92
- 水平面 92
- 水平舵(飛機) 117
- 水平儀 93
- 水當量 219
- 水輪機 175
- 水壓機 97
- 水蒸氣(汽) 257
- 水之比熱 222
- 水之電解 499
- 水平強度(地磁) 445
- 水蒸氣壓力(汽壓) 261
- 水能之利用 175
- 水之反常膨脹 232
- 水中物體之像 364
- [分] 2,4
- 分力 33
- 分子 201,384
- 分路 521
- 分齒 270
- 分子力 202
- (~之作用圈) 202

- 分子量 385
- 分光鏡 409
- 分子運動 203
- 分流線路 521
- 比重-12,94
- (氣體) 240
- 比重表 14
- 比重瓶 13
- 比重計 106
- (百分酒精~) 107
- (牛乳~) 107
- (檢驗蓄電池) 508
- 比熱 221
- (測定法) 221
- 比重測定法
- (液體) 13,121
- (固體) 14
- (U形連通管) 94
- (據阿基米得原理) 107
- 比薩斜塔 144
- 反相(聲波) 320
- 反射
- (聲) 312
- (光) 311
- (全~) 363
- 反射線 342
- 反射角 342
- 反作用(力) 160
- 反射定律 342
- 反電動勢 547
- 牛頓氏 144,407,594
- 牛頓色板 415
- 牛乳比重計 107
- 牛頓第一運動定律 141
- 牛頓第二運動定律 152
- 牛頓第三運動定律 160
- 天平 10
- (正確性) 11
- (用法) 11
- (靈敏度) 11
- 天線 554
- 天然磁石 433
- 天然磁鐵 434
- 天文望遠鏡 395,397

市用制 5  
 [市尺] 5  
 [市升] 5  
 [市斤] 5  
 [公里] 2  
 [公斤] 3  
 [公升] 5  
 不透明體 329  
 不良導體 243,454  
 不穩定平衡 59  
 月蝕 332  
 月之盈虧 332  
 月球之運動 192  
 [太陽日] 4  
 太陽光譜 411  
 太陽光之色散 407  
 勻速直線運動 138  
 (公式) 140  
 勻速圓周運動 184  
 勻加速直線運動 144-149  
 (公式) 147  
 [巴] 155  
 巴羅輪 517  
 巴斯噶原理  
 (液體) 96  
 (氣體) 112  
 內聚力 202  
 內燃機 290  
 (效率) 292  
 火箭 163  
 火車頭 288  
 介質 302  
 介質常數 469  
 毛狀肌 382  
 毛細現象 208  
 支點 70  
 孔径  
 (鏡) 348  
 (照相鏡頭) 404  
 互感 528  
 [日] 4  
 日蝕 332  
 升壓器 241  
 化學當量 502  
 六十分法(角之單位) 2  
 中央電池式(電話) 533  
 夫牢因和斐鏡 411  
 方解石之雙折射 430

**五 畫**

平衡(力) 32-37,44-47

(槓桿) 71  
 (浮體) 105  
 (固體) 56-60  
 (穩定~) 58  
 (隨遇~) 59  
 (不穩定~) 59  
 平行力 44  
 (同向二力) 44  
 (異向二力) 46  
 (諸力) 47  
 (~之中心) 47  
 平行片 367  
 平面鏡 343  
 平衡力 37  
 平行光管 409  
 [平均太陽日] 4  
 [平均卡路里] 217  
 平行板容電器 469  
 功 61,171  
 (單位) 63,155  
 (實用單位) 156  
 (正~) 64  
 (負~) 64  
 (動力之~) 64  
 (抗力之~) 64  
 功與能 171  
 功率 64  
 (單位) 65,156  
 功能定理 171  
 功之不滅原理 67  
 [仟米] 2  
 [仟克] 3  
 [仟克·米] 63  
 [仟瓦特] 156  
 [仟瓦·時] 550  
 仟克標準原器 3  
 正電 451  
 正(電)子 592  
 正極 473  
 正影 331  
 正半影 331  
 正直壓力 177  
 半影 331  
 半導體 454  
 半透明體 329  
 半衰期 581  
 加速度 147  
 (重力~) 149  
 (力,質量,與~) 152  
 加速運動 144-149  
 [瓦特] 156

[瓦特·時] 551  
 瓦特小時計 550  
 [卡] 217,284,494  
 [卡路里] 217  
 [平均~] 217  
 [15°C之~] 218  
 凹鏡 348  
 凹透鏡 371  
 (成像) 376  
 凸輪 291  
 凸鏡 348  
 凸透鏡 371  
 (成像) 375  
 本生光度計 339  
 本地電池組 514  
 永久運動 68  
 永久氣體 278  
 皮帶傳動 182  
 皮相膨脹 229  
 [立徑] 3  
 矢號 28  
 北極 435  
 主軸(鏡) 348  
 目鏡 392  
 四步衝程(內燃機) 291  
 左手法則 516  
 右手法則 511  
 (發電機之~) 535  
 可變容電器 470

**六 畫**

光心 372  
 光度 336  
 光線 330  
 光譜 407  
 (太陽~) 411  
 (連續~) 410  
 (明線~) 411  
 (吸收~) 411  
 光波 430  
 光度計 338  
 光度學 337  
 光電管 517  
 光之干涉 425  
 (實驗) 427  
 光之反射 341  
 光之色散 407  
 光之折射 357  
 光之速度 334  
 光之強度 336  
 光之傳播 334

光之波長 409  
 (測定) 427  
 光電效應 576  
 光之偏極化 431  
 色 414  
 (薄膜之~) 429  
 色盲 418  
 色覺 418  
 色散 407  
 色像差 413  
 色光之混和 414  
 地線 555  
 地磁 442  
 (三要項) 445  
 地球為磁石 442  
 地球子午面 443  
 地球之質量 192  
 地面望遠鏡 395,399  
 交流 537  
 交變電流 537  
 交變電動勢 537  
 交流發電機 539  
 共振 197  
 (擺) 553  
 (電) 553  
 共鳴 318  
 共軌點 350  
 共點力 33  
 (平衡) 32-37  
 [安培] 473  
 (國際~) 503  
 [安培·時] 508  
 [安培·厘] 512  
 安培計 488,520  
 有色照相 417  
 有色電影 417  
 有聲電影 577  
 有效數字 7  
 自感 528  
 自來水 131  
 自由電子 455  
 自由表面(液體) 57.92  
 自由體 144,248  
 同相(聲波) 319  
 同位元素 589  
 同重元素 581  
 [米] 2  
 米制 1  
 向量 28  
 向心力 185  
 氫 589

氫核 593  
 [伏特] 467  
 伏特計 488,522  
 曲柄 291  
 曲率中心(鏡) 348  
 合力 33  
 冰點 212  
 回聲 312  
 老視 386  
 老虎鉗 78  
 耳機 531  
 氣管 572  
 充電(蓄電池) 506  
 休止角 129  
 安全燈 244  
 全蝕(日,月) 333  
 全反射 363  
 收報機(無線電) 558  
 尖端作用 460  
 帆船所受之力 41  
 托里拆利實驗 120  
 百分酒精比重計 107  
 多極交流發電機 540

## 七 畫

折射 357  
 (平行片) 367  
 (大氣) 420  
 折射角 358  
 折射率 359  
 (玻璃) 372  
 折射線 358  
 (作圖法) 362  
 折射稜 368  
 折射定律 358  
 汽 257,287  
 汽車 292  
 汽鍋 93  
 汽壓 261  
 汽機 262,287  
 汽鑿室 268  
 汽消毒器 265  
 角膜 382  
 角速度 184  
 角之單位 2  
 (六十分法) 2  
 (弧度法) 2  
 拋物線 167  
 拋物面鏡 350  
 拋體運動 167  
 (下拋~) 166

(上拋~) 166  
 (斜拋~) 166

吸收 201  
 吸收光譜 411  
 吸取唧筒 129  
 [呎·磅] 63  
 呎磅秒單位制 6  
 位移 61  
 位能 173  
 投影 331  
 投半影 331  
 抗力點 71  
 抗力之功 64  
 局部電路 483  
 局部電池式電話 532  
 伽利略望遠鏡 401  
 伽利略墮體實驗 143  
 作用(力) 160  
 串聯(電池) 476  
 (電路) 552  
 冷劑 255  
 良導體(熱) 243  
 吹奏樂器 326

## 八 畫

定像 403  
 定滑輪 68  
 定律  
 (反射~) 342  
 (折射~) 358  
 (焦耳~) 493  
 (虎克~) 21  
 (庫倫~) 436,452  
 (查理~) 238  
 (楞次~) 526  
 (摩擦~) 177  
 (歐姆~) 481  
 (波義耳~) 134,236  
 (馬略特~) 134  
 (絃之振動~) 325  
 (給呂薩克~) 236  
 (萬有引力~) 191  
 (法拉第電解~) 501  
 (牛頓第一運動~) 141  
 (牛頓第二運動~) 152  
 (牛頓第三運動~) 160  
 (力之平行四邊形~) 33  
 波水~ 306  
 (光~) 409,427  
 (駐~) 306  
 (聲~) 310

(橫~) :08  
 (縱~) 308,309  
 (電~) 554  
 (無線電~) 555  
 波谷 307  
 波長(光) 406,427  
 (無線電波) 555  
 波峯 307  
 波節 306  
 波腹 307  
 波動 306~312  
 波義耳定律 134  
 放電(蓄電池) 506  
 (未盡真空中之~) 570  
 放大率(放大鏡) 492  
 (顯微鏡) 394  
 (望遠鏡) 396  
 放大器(真空管) 564  
 (音頻~) 568  
 (射頻~) 568  
 放大鏡 391  
 放電管 572  
 放射性 570,590  
 放射質 579  
 (蛻變) 581  
 物理量 1  
 物鏡(顯微鏡) 392  
 (望遠鏡) 396  
 (雙筒望遠鏡) 400  
 物質之組成 201  
 物質之狀態 16  
 物態之變化 23  
 物質不滅原理 16  
 板極 561  
 板極電流 561  
 板之振動 327  
 法線 342  
 [法拉] 467  
 法拉第電解定律 501  
 [度] 2  
 度(眼鏡) 386  
 度量衡 5  
 沸點 212,264  
 沸騰 263  
 直流 537  
 直流發電機 539  
 直角三稜鏡 369  
 近點(眼) 384  
 近視眼 385  
 空氣 17,118  
 (密度) 241

空氣唧筒 130  
 抽氣筒 130  
 抽水唧筒 128  
 明線光譜 411  
 明視距離 385  
 阿基米得原理 99-101  
 (應用) 103  
 阿佛加特羅數 503  
 非導體 453  
 非常光線 432  
 金屬壓力計 136  
 金箔驗電器 458  
 固體 21  
 (膨脹) 224  
 雨 276  
 昇華 257  
 拍音 320  
 盲點 383  
 底片(照相) 403  
 來頓瓶 461,469,552,557  
 弧光燈 460  
 附着力 202  
 表面張力 205  
 屠禮夫婦 570,579  
 虎克定律 21  
 阻尼振動 553

九 畫

音 299  
 (拍~) 320  
 (基~) 317  
 (單~) 317  
 (倍~) 317  
 (複~) 317  
 (長三和~) 323  
 音叉 300,318  
 音品 314,316  
 音強 314  
 音組 321  
 音程 321  
 音調 314,315  
 音階 321  
 音之干涉 319  
 音之諧和 121  
 音頻放大器 568  
 重力 24  
 (方向) 51  
 (強度) 53  
 (作用點) 53  
 重水 589  
 重心 53,56

重度 13  
 重氫 589  
 重點 71  
 重量 53,154  
 (達因數) 154  
 重力單位 27  
 重力加速度 149,195  
 相(波動) 307  
 (聲波) 319  
 相片 403  
 相對濕度 273  
 相對折射率 359  
 [馬力] 65,156  
 馬略特定律 134  
 馬德堡半球實驗 119  
 指南車 433  
 指南極 435  
 指北極 435  
 [厘米] 2  
 厘米·克·秒單位制 5  
 厘米·克·秒絕對單位制 155  
 飛艇 115  
 飛機 115  
 (發動機) 293  
 負電 451  
 負極 473  
 並聯(電池) 477  
 (電路) 484  
 (電阻) 485  
 倫琴氏 570  
 倫琴射線 570  
 風 246  
 氛 581  
 [秒] 2,4  
 虹 422  
 虹吸 127  
 (閘歇~) 128  
 南極 435  
 亮度 337  
 配電 542  
 柵極 561  
 紅外線 412  
 保溫瓶 246  
 保險絲 495  
 映射器 404  
 弧度法 2  
 施力點 71  
 垂直線 51  
 後阻力(飛機) 116  
 前房液 382

查理定律 238  
 玻璃狀液 382  
 活動影戲 368  
 英制單位 6  
 柯立芝式 X射線管 575

十 畫

氣體 17  
 (性質) 18-20  
 (密度) 239  
 (壓力) 111,132,203  
 (體積與壓力之關係) 133  
 氣化 257  
 氣球 113  
 氣缸(內燃機) 291  
 氣化熱 267  
 氣壓計 124  
 (無液~) 124  
 (福廷~) 124  
 (自記無液~) 125  
 (溫度的改正) 231  
 氣壓鼓 300  
 氣化潛熱 267  
 氣泡水準 92  
 氣體之浮力 111  
 氣體之液化 278  
 氣體之電離 572  
 氣體之彈性 18  
 氣體之膨脹 19,235  
 氣體之壓縮 133  
 氣體方程式 236  
 氣壓記錄器 125  
 原子 201,584  
 原色 416  
 原功 67  
 原理  
 (慣性~) 141  
 (巴斯噶~) 96,112  
 (功之不滅~) 67  
 (能之不滅~) 173  
 (物質不滅~) 16  
 (動量不滅~) 162  
 (電量不滅~) 453  
 (阿基米得~) 99,101  
 原子核 587,591  
 原子能 596  
 原子彈 598  
 原子量 585  
 原位移 67  
 原動力 67

原子序發 588  
 原子質數 588  
 原動機械 447  
 原子能時代 570,600  
 能 173  
 (單位) 173  
 (位~) 173  
 (電~) 448  
 (熱~) 283,287  
 (機械~) 173  
 (鐘之~) 582  
 能之傳遞 448  
 能之變換 174,448  
 能之不滅原理 173  
 真空 16  
 真空管 560  
 (放大作用) 563  
 真實膨脹 229  
 真空管檢波器 582  
 真空管振動器 565  
 浮力  
 (液體) 99  
 (氣體) 112  
 浮沈(物體) 103  
 浮沈子 104  
 浮力中心 199  
 浮體之平衡 105  
 振動 299  
 (絃) 325  
 (板) 327  
 (膜) 328  
 (鐘) 328  
 (氣柱) 326  
 振動器(真空管) 568  
 振幅  
 (單擺) 194  
 (波動) 307  
 振動之記錄 300  
 唧筒  
 (抽水~) 128  
 (抽氣~) 131  
 (空氣~) 131  
 (吸取~) 129  
 (消防~) 130  
 (壓迫~) 129  
 (壓氣~) 132  
 效率  
 (機械~) 79  
 (熱機之~) 289  
 (內燃機之~) 292  
 (發動機之~) 548

容電器 468  
 (來頓瓶) 469  
 (可變~) 470  
 容脹係數 223  
 容量之單位 5  
 起電 450,453  
 (感應~) 458  
 起寒劑 254,280  
 [庫倫] 452  
 [國際~] 503  
 庫倫定律 436,452  
 [高斯] 436  
 高度計 125  
 降落傘 114  
 降壓器 542  
 速度 139  
 (聲) 302  
 (光) 334  
 [克] 3  
 [磅] 2  
 帶電 450  
 海市 421  
 射程 167  
 閉管 326  
 純量 28  
 倍音 317  
 留聲機 301  
 消防唧筒 130  
 砲之反坐 163  
 特性曲線(真空管) 562  
 射頻放大器 563  
 時間之單位 3  
 酒精溫度計 213  
 氧化亞銅整流器 543

十一 畫

動電 472  
 動量 156  
 動滑輪 70  
 動力之功 64  
 動測力法 153  
 動測重量法 154  
 動量不滅原理 162  
 透鏡 331  
 (像) 375  
 (公式) 375  
 (凸~) 331  
 (凹~) 331  
 (會聚~) 331  
 (發散~) 332  
 (豎正~) 399

透明體 329  
 透鏡軸線 321  
 眼 382  
 (作用) 383  
 (調節) 384  
 (老視) 386  
 (近視) 385  
 (遠視) 385  
 (鑒別率) 387  
 眼角 388  
 眼鏡 385  
 (度) 386  
 眼之錯覺 388  
 [國際安培] 503  
 [國際庫倫] 503  
 [國際燭光] 336  
 國際米原器 2  
 國際仟克原器 3  
 陰電 451  
 陰離子 455,500  
 陰向離子 500  
 陰極射線 572  
 球面鏡 348  
 (公式) 352  
 (像) 353  
 球軸承 181  
 球面像差 350  
 液化 257,278  
 液體 17,20  
 (浮力) 99  
 (壓力) 83  
 偏蝕 333  
 偏心輪 289  
 偏向角 369  
 偏極化(光) 430  
 [毫米] 2  
 [毫克] 3  
 [毫安培] 473  
 密度 11  
 (液體) 231  
 (氣體) 240  
 密部(縱部) 310  
 絃樂器 325  
 絃音計 325  
 絃之振動定律 325  
 基音 317  
 基本量 5  
 基本單位 5  
 斜面 75  
 斜面墮體 145,168  
 副位移 67

副線卷 527  
 船塢 105  
 船艇平衡之穩定 106  
 閉管 326  
 閉管壓力計 135  
 排氣閥 292  
 排氣衝程 292  
 乾電池 505  
 乾濕泡溫度計 275  
 連通器 92  
 (應用) 93  
 連續光譜 410  
 旋轉分離器 187  
 旋轉變流機 543  
 針 107  
 零 276  
 魚 104  
 唱片 301  
 捷路 487  
 彩簾 382  
 頂點(鏡) 348  
 崩潰(放射質) 581  
 救火機 130  
 控制器(電車) 550  
 望遠鏡 395  
 理想氣體 238  
 接收電路 557  
 冕牌玻璃 372  
 當里沃夫婦 592  
 混合量熱法 218

十二畫

單位 1  
 (力) 27  
 (功) 63,155  
 (角) 2  
 (能) 173  
 (功率) 65,156  
 (光度) 336  
 (長度) 2  
 (時間) 4  
 (容量) 5  
 (質量) 3  
 (米制) 1  
 (英制) 6  
 (速度) 139,147  
 (照度) 336  
 (磁力) 435  
 (磁量) 436  
 (熱量) 217  
 (電位) 467

(電容) 467  
 (電流) 473  
 (電阻) 477  
 (壓力) 123,155  
 (加速度) 147  
 (市用制) 5  
 (~制) 5  
 (重力) 27  
 (輔助) 1  
 (基本) 5  
 (導出) 5  
 (磁場強度) 436  
 (力之絕對) 153  
 (電量實用) 452  
 (靜電量絕對) 452  
 (英制與米制之換算) 6  
 單音 317  
 單擺 194  
 單稱法(天平) 11  
 單位磁量 436  
 單向反射 343  
 溫度 211  
 (冰點) 112  
 (沸點) 212,262  
 (熔點) 250  
 (凝固點) 250  
 (絕對) 239  
 溫度計 213  
 (刻度) 212  
 (體溫計) 212  
 (水銀) 211  
 (華氏) 212  
 (酒精) 213  
 (攝氏) 212  
 (最高及最低) 214  
 發條(鐘) 199  
 發光體 329  
 發聲體 2 4  
 發聲器(電報) 513  
 發電機 536,538  
 發音電流 566  
 發散透鏡 372  
 發動電阻 548  
 發電機之右手法則 535  
 焦點  
 (球面鏡) 348  
 (透鏡) 372  
 焦距 349,373,404  
 焦面 395  
 [焦耳] 156,284,494  
 焦耳定律 493

絕緣體 454  
 絕對零度 239  
 絕對溫度 239,272  
 絕對折射率 359  
 量 1  
 量度 1  
 (長度) 2  
 (角) 2  
 (質量) 3,10  
 (時間) 4  
 (容量) 5  
 量熱器 218  
 無線電波 554  
 無線電話 566  
 無線電報 557  
 無線電廣播 557  
 無線電收報機 558  
 陽電 451  
 陽離子 455,499  
 陽向離子 500  
 陽電光柱 571  
 閉管 326  
 閉路電壓 484  
 閉管壓力計 134  
 週(交流電) 537  
 週期  
 (單擺) 195  
 (勻速圓運動) 185  
 週期運動 185  
 測力計 26  
 測音盤 315  
 測量之誤差 6  
 視角 386  
 視覺 382  
 視覺暫留 387  
 虛像 344,377  
 虛焦點 349,373,379  
 晶體檢波器 559  
 晶體接收電路 559  
 間歇泉 128  
 間歇虹吸 128  
 進氣閥 291  
 進氣衝程 291  
 疏部(縱波) 310  
 疏密波 311  
 最大摩擦力 177  
 最高及最低溫度計 214  
 雲 279  
 軋承 181  
 絞盤 75  
 通風 245

黃斑 383  
 循環(交流電) 537  
 硬度(X射線) 575  
 極化(電池) 506  
 渦電流 551  
 替續器 514  
 紫外線 412  
 握力計 79  
 雄螺旋 78  
 等時性(單擺) 195  
 揚磁鐵 539  
 換向器 537  
 貫穿本領 575  
 尋常光線 432  
 插頭電阻箱 479  
 華氏溫度計 212  
 惠斯登電橋 522  
 給呂薩克定律 235

十三畫

電 447,450  
 電子 455,574,587  
 電位 465  
 (單位) 467  
 電池 472,476,505  
 (聯結法) 476  
 (串聯) 476  
 (並聯) 477  
 (極化) 504  
 (乾~) 505  
 (蓄~) 506  
 (端電壓) 484  
 電功 474  
 電車 549  
 電表 550  
 電弧 495  
 電阻 477  
 (單位) 477  
 (並聯~) 485  
 (串聯~) 482  
 電流 473  
 (方向) 473  
 (單位) 437  
 (強度) 473  
 (量度) 488 520  
 (載聲~) 567  
 (發音~) 566  
 (板極~) 561  
 (磁效應) 510  
 (熱效應) 492  
 (化學效應) 498

電路 474  
 (捷路) 487  
 (串聯~) 482  
 (局部~) 483  
 (並聯~) 484  
 (電報~) 514  
 (調諧~) 558  
 (單向電話~) 532  
 (晶體接收~) 559  
 (電車電流之~) 549  
 (無線電接收~) 557  
 (局部電池式電話~) 533  
 電容 467  
 (單位) 467  
 電波 552,554  
 電災 448  
 電荷 450  
 電閃 462  
 電荷 450  
 電能 448  
 電視 577  
 電量 451  
 (實用單位) 452  
 (靜電絕對單位) 452  
 電鈴 514  
 電話 531  
 電感 528  
 電報 513  
 電鍍 500  
 電鍊 501  
 電解 498  
 (水之~) 499  
 (學說) 499  
 (應用) 500  
 電鑄 501  
 電繪 514  
 電燈 496  
 電離 499,572  
 電爐 492  
 電櫃 536  
 (環形~) 538  
 (固定~) 539  
 電影 388,405  
 (有色~) 417  
 (有聲~) 577  
 電功率 474  
 電位差 466  
 電池組 476,561  
 電燈泡 495  
 電磁力 516

電流計 519  
 電解質 473,498  
 電動勢 475  
 電動機 546  
 (效率) 548  
 (左手三指法則) 516  
 電阻器 478  
 電阻箱 478  
 電熱器 493  
 電磁鐵 512  
 電之共振 553  
 電之振動 552  
 電之本性 454  
 電化當量 502  
 電阻係數 478  
 電位降落 483  
 電解定律 501  
 電磁感應 525,527  
 電燈之裝置 487  
 電動發動機 543  
 電量不滅原理 453  
 電之長距離輸送 542  
 電在導體上之分布 460  
 運動 138  
 (力與~) 151  
 (加速~) 151  
 (勻速直線~) 138  
 (勻速圓周~) 184  
 (勻加速直線~) 146  
 (拋體~) 165  
 (隨體~) 143  
 (週期~) 185  
 (減速~) 151  
 (滑動~) 168  
 運動定律  
 (第一~) 141  
 (第二~) 152  
 (第三~) 160  
 感應  
 (磁之) 437  
 (靜電~) 457  
 (電磁~) 525  
 感應盤 459  
 感應電流 527  
 感應線卷 529  
 感應起電 458  
 感應起電機 460  
 滑動 168  
 滑輪 68  
 滑輪組 70

滑動摩擦 181  
 滑動變阻器 479  
 照度 336  
 照相 403  
 (紅外線~) 412  
 (有色~) 417  
 照相機 403  
 照相鏡頭 404  
 鈾 579  
 鈾堆 598  
 鈾之分裂 597  
 微音器 566  
 [微法拉] 468  
 [微微法拉] 468  
 楊氏模數 31  
 楊午學說 418  
 楊午實驗 427  
 鉛直線 51  
 鉛直鉤 117  
 [達因] 153,435  
 達格發爾式電流計 519  
 飽和蒸氣 257  
 飽和蒸氣壓 259  
 雹 276  
 雷擊 462  
 稜鏡 368,408  
 晷儀 420  
 駐波 306  
 視覺 382  
 明珠 382  
 溶解 254  
 蛻變 581  
 鉚釘 227  
 傳導(熱) 243  
 節線(板之振動) 327  
 雌螺旋 79  
 補償擺 225  
 圓周運動 184  
 萬有引力 191  
 (定律) 191  
 (常數) 191  
 會聚透鏡 372  
 楞次定律 526,547  
 載聲電流 567  
 煙囪之通風 245

十四畫

像 333  
 (虛~) 344,353  
 (實~) 353  
 (凹鏡) 353

(凸鏡) 353  
 (平行片) 368  
 (平面鏡) 343  
 (球面鏡) 349  
 (凸透鏡) 375,377  
 (凹透鏡) 376,378  
 (放大鏡) 392  
 (望遠鏡) 395  
 (照相機) 403  
 (顯微鏡) 393  
 (水中物體之~) 364  
 蒸餾 269  
 蒸發 272  
 蒸氣 257  
 (水蒸氣, 汽) 257  
 蒸氣壓 259  
 蒸汽機 262,287  
 槓桿 70  
 (臂) 71  
 (平衡) 71  
 (組合) 74  
 (種類與實例) 72,74  
 熔解 249  
 熔點 250  
 熔解熱 253  
 溶解潛熱 253  
 對流 244  
 對光(照相) 403  
 遠點(眼) 384  
 遠視眼 385  
 滾子 184  
 滾動摩擦 181  
 滲透 204  
 誤差 6  
 [爾格] 155,173  
 臺秤 74  
 鞣皮 382  
 網膜 383  
 碧瑯 431  
 銜鐵 512  
 話機 531  
 漫反射 343  
 蓄電池 506  
 管風琴 326  
 赫芝波 554  
 製冷設備 281  
 福廷氣壓計 124

十五畫

磁力 435  
 磁化 438

磁石 433  
 磁針 434,510  
 磁軸 434  
 磁極 434  
 磁量 435  
 磁場 436,510  
 磁鐵 434  
 (電~) 512  
 磁體 433  
 磁力線 437,511  
 磁偏角 443  
 磁傾角 443  
 磁傾儀 444  
 磁鐵鑽 434  
 磁子午面 443  
 磁之感應 437  
 磁極程度 435  
 磁場強度 436  
 磁之分子說 439  
 熱能 287  
 熱機 287  
 (效率) 289,292  
 熱量 216  
 (單位) 217  
 熱水瓶 246  
 熱容量 221  
 熱之本性 285  
 熱之傳遞 243-247  
 熱功當量 283  
 熱離子管 560  
 摩擦 176  
 摩擦力 176  
 (滾動~) 181  
 (滑動~) 181  
 (最大~) 177  
 摩擦定律 177  
 摩擦起電 450  
 摩擦係數 177  
 質量 11  
 (單位) 3  
 (量度) 11  
 (~與加速度,力) 152  
 質子 586  
 質荷比 586  
 質量變化  
 (化學反應) 595  
 (原子核反應) 596  
 影 30  
 (正~) 331  
 (半~) 331  
 (投~) 331

(正半~) 331  
 (投半~) 331  
 彈性  
 (氣體) 18  
 (固體) 21  
 彈簧 196  
 彈簧秤 26  
 調幅 565  
 調幅器 566  
 調諧電路 558  
 輪犁 548  
 輪軸 74  
 輪箍 227  
 潛水艇 105  
 潛水罩 131  
 潛望鏡 401  
 衝力 157  
 衝量 157  
 樂音 314  
 樂器 325  
 墮體運動 143  
 (自由~) 144  
 (斜面~) 145  
 實像 353  
 實焦點 348,373  
 導出量 5  
 導出單位 5  
 磅 77  
 銻 599  
 齒輪 75  
 複音 317  
 複稱法(天平) 11  
 整流器 543  
 端電壓 484  
 標度管 410  
 膜之振動 28  
 線脹係數 224  
 餘弦曲線 196  
 慣性原理 141  
 十六畫  
 膨脹 224  
 (氣體) 19,235  
 (液體) 20,229  
 (固體) 21,224  
 (線~) 224  
 (體積~) 225  
 (真實~) 229  
 (皮相~) 229  
 (水之反常~) 232  
 膨脹係數

(容~) 226  
 (真實~) 230  
 (皮相~) 230  
 (液體之~) 230  
 (固體之線~) 224  
 膨脹衝程 291  
 機械力 67  
 機械功 67  
 機械利益 68  
 機械效率 79  
 靜止 138  
 靜電 472  
 靜電感應 457  
 靜電絕對單位 452  
 頻率  
 (週期運動) 185  
 (波動) 337  
 (聲音) 315,316  
 (無線電波) 555  
 凝固 249  
 凝結 257  
 凝固點 250  
 導體(熱) 243  
 導電體 453  
 (電之分布) 460  
 橫波 309  
 (偏極化) 431  
 橫振動 312  
 (歐姆) 477  
 歐姆定律 481  
 輸入線卷 564  
 輸出線卷 564  
 銻 599  
 寬 422  
 鏡 199  
 燈絲 561  
 錯覺 388  
 輻射(熱) 246  
 噪聲 314  
 燃燒熱 219  
 擒縱裝置  
 (鐘) 198  
 (錶) 200  
 隨遇平衡 59  
 修正透鏡 399  
 鋼琴之鍵盤 322  
 十七畫  
 壓力 29,136  
 (量度) 123,134-137  
 (液體之~) 83

(~強度) 184  
 (蒸氣~) 259  
 (液體~之傳遞) 96  
 (~與沸點之關係) 265  
 (~對於熔點之影響) 252  
 (氣體~與體積,溫度之關係) 133  
 壓力計 134  
 (開管~) 134  
 (閉管~) 134  
 (金屬~) 136  
 壓氣筒 131  
 壓迫唧筒 129  
 壓縮衝程 291  
 聲 299  
 (傳播) 302  
 (感覺) 303  
 (回~) 312  
 (噪~) 314  
 聲波 306,310,430  
 聲跡(有聲影片) 577  
 聲之反射 312  
 螺紋 77  
 螺旋 77  
 螺距 77  
 螺旋壓榨器 78  
 螺旋起重器 78  
 螺旋測微器 80  
 檢波器  
 (晶體) 559  
 (真空管) 562  
 [燭光] 336  
 [攝米] 336  
 臂(力偶之~) 49  
 (槓桿之~) 71  
 濕度 272  
 (絕對~) 272  
 (相對~) 273  
 應電流 527  
 應電動勢 528  
 霜 276  
 環(電線) 511  
 環(音) 323  
 縱波 309  
 環蝕 333  
 點火(內燃機) 291  
 錄卷 511  
 瞳孔 382  
 鍵盤(鋼琴) 322  
 黏滯性 208

滷雷針 463  
 滷膜之色 429  
 磁石玻璃 372

十八畫

擺 194  
 (單~) 191  
 (補償~) 225  
 (共振) 553  
 擺長 194  
 擺錘 194  
 擺輪(錶) 200  
 擺之等時性 195  
 臨界角 362  
 臨界溫度 278  
 臨界壓力 278  
 簡單電池 472  
 簡諧運動 195  
 霧 276  
 轉矩 49  
 擴散 203  
 懸鐘 75  
 鏢鎔齊 493  
 斷續器 530  
 顏色之混合 416

十九畫

鏡(凸~) 348  
 (凹~) 348  
 (目~) 392  
 (透~) 371  
 (物~) 392,396  
 (凸透~) 371  
 (凹透~) 371  
 (三稜~) 368,408  
 (分光~) 409  
 (平面~) 344  
 (球面~) 348  
 (消望~) 401  
 (望遠~) 395-402  
 (顯微~) 392  
 (觀劇~) 401  
 鏡之旋轉 345  
 離子 455,499  
 (電荷) 503  
 離心力 187  
 羅盤 434,445  
 鏈式反應 598  
 穩定平衡 59

二十畫

雙折射 432  
 雙眼視 432  
 雙筒望遠鏡 400  
 鐘 198  
 鐘之振動 328

二十一畫

鐘 579  
 (用途) 582  
 鐘之能 582  
 露 276  
 露點 274  
 鐵心安培計 521  
 攝氏溫度計 212

二十二畫

彎曲路面 189  
 聽覺之限度 316  
 讀數望遠鏡 395,401

二十三畫

顯像 403  
 顯微鏡 392  
 鏡(音) 323  
 變壓器 540  
 (配電用~) 542  
 體溫計 213  
 鑲別率(眼) 387

二十五畫

觀劇鏡 401

外來字

A電池組 561  
 Achimedes 原理 97  
 Anderson 氏 592  
 Avogadro 數 503,585  
 B電池組 561  
 Becquerel 氏 570,579  
 Boyle 定律 134  
 Bunsen 光度計 339  
 Celsius 溫度計 212  
 C.G.S. 制 5  
 Charles 定律 238  
 Coolidge 式X射線管 575  
 Coulomb 定律 436,457  
 Curie 夫婦 570,579  
 d'Arsonval 式電流計 519  
 instein 氏 594  
 Fahrenheit 溫度計 212

- Faraday 氏 501,525  
 Faraday 電解定律 501  
 Fortin 氣壓計 124  
 F.P.S. 制 6  
 Fraunhofer 線 412  
 Galileo 望遠鏡 401  
 Galileo 墮體實驗 143  
 Gay-Lussac 定律 235  
 Hahn 氏 597  
 Hertz 波 554  
 Hooke 定律 22  
 Joliot-Curie 夫婦 592  
 Joule 氏 283  
 Joule 定律 493  
 Kirchhoff 氏 412  
 Lavoisier 氏 594  
 Leyden 瓶 461  
 Magdeburg 半球 119  
 Mariottes 定律 134  
 Morse 氏 513  
 Newton 氏 144,407,594  
 Newton 色板 415  
 Newton  
   第一運動定律 141  
   第二運動定律 152  
   第三運動定律 160  
 Qersted 氏 510  
 Ohm 定律 481  
 Pascal 原理 96  
 Pisa 斜塔 144  
 Roertgen 射線 570  
 Rutherford 氏 591  
 Strassmann 氏 597  
 Thomson 氏 574  
 Toricelli 實驗 120  
 U 形連通管 94  
 Volta 氏 472  
 Wheatstone 電橋 522  
 Wimshurst 感應起電  
   機 460  
 X-射線 574  
   (硬度) 575  
 X 光 575  
 Young 氏模數 31  
 Young 氏學說(色覺) 418  
 Young 氏光之干涉實驗  
   427  
 $\alpha$ -射線 580  
 $\alpha$ -質點 580,590  
 $\beta$ -射線 580  
 $\beta$ -質點 580,591  
 $\gamma$ -射線 580  
 [ampere] 473  
 [bar] 155  
 [calorie] 217  
 [dyne] 153,435  
 [erg] 155  
 [farad] 407  
 [gauss] 436  
 [joule] 156,474  
 [ohm] 477  
 [volt] 467  
 [watt] 156,474

中國科學教科書

高中物理學

下冊

版權所有 翻印必究

中華民國三十七年十二月初版

編著者 嚴濟慈

發行人 楊孝述

發行所 中國科學圖書儀器公司  
上海(18)中正中路537號

分發行所 中國科學圖書儀器公司  
南京 廣州 重慶 北平 漢口

3  
662434

