

新時代高中教科書

物 理 學

下 冊

周昌壽編

商務印書館發行



新時代高中教科書

物 理 學

下 冊

周 昌 壽 編

商務印書館發行

新時代高中教科書

物 理 學

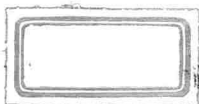
下 冊

此書有著作權翻印必究

中華民國二十五年五月出版

本書實價國幣

外埠酌加運



編 纂 者 周 昌 壽

發 行 人 上海寶山路五〇一號
王 雲 五

印 刷 所 上 海 寶 山 路
商 務 印 書 館

發 行 所 上 海 及 各 埠
商 務 印 書 館

目次

第五篇 光學

第一章 光之直進

309. 光源.....	307	315. 視差.....	311
310. 光之本性.....	308	316. 光強及亮度.....	311
311. 光學.....	309	317. 光度.....	312
312. 光之直進.....	309	318. 光度之單位.....	313
313. 影.....	310	319. 光度計.....	314
314. 蝕.....	310	320. 光之速度.....	316

第二章 反射及屈折

321. 光之反射.....	318	328. 連續數次之屈折...	326
322. 平鏡.....	318	329. 全反射.....	327
323. 連續數次之反射...	319	330. 在平面鏡界面屈折 時之像.....	328
324. 球鏡.....	320	331. 稜鏡.....	329
325. 球行差.....	323	332. 全反射稜鏡.....	331
326. 光之屈折.....	324		
327. 屈折線之作圖法...	325		

第三章 透鏡

333. 透鏡之種類.....	332	335. 光心.....	335
334. 透鏡之屈折.....	332	336. 透鏡之造像.....	335

337. 透鏡造像之誤差... 336

338. 複透鏡 340

第四章 光器

339. 眼之構造 341

346. 顯微鏡 349

340. 眼之調節 342

347. 天體望遠鏡..... 351

341. 眼鏡..... 343

348. 地球望遠鏡..... 353

342. 遠近之識別及立體性 345

349. 反射望遠鏡..... 354

343. 視覺之持久性 347

350. 潛望鏡 355

344. 眼之錯覺 347

351. 測遠器 355

345. 擴大鏡 348

352. 照相器 357

第五章 光之分散

353. 分散..... 360

359. 景之種類 369

354. 景析器 361

360. 日景..... 370

355. 夫牢因和斐線 362

361. 物體之色 371

356. 分散率 363

362. 色之混合 372

357. 無色透鏡 365

363. 色之感覺 373

358. 虹 366

364. 螢光及磷光..... 375

第六章 光之干涉

365. 夫累涅爾之實驗 ... 376368. 牛頓環 379

366. 薄膜之色 377

369. 透過光之色..... 380

367. 反射光之色..... 377

370. 邁克爾遜干涉計 ... 381

第七章 光之遠折

371. 遠折..... 388

374. 反射格子 388

372. 遠折格子 385

375. 階段格子 389

373. 遠折景 386

第八章 光之極化

376. 極化光	390	石	397
377. 由反射而生之極化光	392	383. 檢極器	398
378. 由屈折而生之極化光	393	384. 色極化	399
379. 複屈折	894	385. 圓極化光及橢圓極化光	400
380. 惠更斯之作圖法	395	386. 極化面之轉動	401
381. 光軸	397	387. 法刺第效應, 刻耳效應, 最曼效應	402
382. 尼古爾稜鏡及電氣			

第六篇 電磁學

第一章 磁

388. 磁石	403	400. 偏角之測定	413
389. 磁力及磁量	404	401. 伏角之測定	413
390. 庫隆之磁力定律	405	402. 水平磁力之測定	414
391. 單位強度之磁極	405	403. 磁圖	414
392. 磁場	406	404. 地磁之變化	417
393. 磁力線	407	405. 羅盤	417
394. 磁束	408	406. 磁誘導	418
395. 磁矩	409	407. 磁化強度	419
396. 磁石軸上一點之磁力	410	408. 磁誘導度	419
397. 通過中心之磁軸垂線上一點之磁力	410	409. 磁化率及透磁率	421
398. 場內磁石之振動周期	411	410. 磁化曲線	422
399. 地磁之要素	411	411. 磁化循環	422
		412. 攸英之分子磁石說	423

第二章 靜電

413.	帶電現象	424
414.	導體及非導體	425
415.	驗電器	426
416.	電之理論	427
417.	庫隆定律	429
418.	電量之單位	429
419.	靜電誘導	430
420.	由誘導而起之引力	431

421.	由靜電誘導使驗電器帶電之方法	232
422.	物體上電之分佈	432
423.	表面密度	433
424.	尖端作用	434
425.	起電機	434
426.	焦電	436
427.	壓電	437

第三章 電勢及電容

425.	電場	537
429.	電力線	438
430.	靜電誘導之電力線	439
431.	電勢	441
432.	電勢之計算	442
433.	等勢面	443
434.	導體之等勢面	444
435.	勢差之單位	445
436.	勢降度	446
437.	導體之電容	447
438.	電容之單位	447

439.	蓄電器	448
440.	自由電及束縛電	449
441.	蓄電器之電容	449
442.	誘電常數	451
443.	平結之電容	451
444.	並結之電容	452
445.	蓄電器之能	452
446.	來丁瓶之放電	453
447.	電之極化	454
448.	電勢計	455
449.	空中之電	456

第四章 電流

450.	弗打定律	457
451.	金屬與液體之接觸	458
452.	贊波尼電堆	459
453.	電流	459

454.	電池	460
455.	電池之極化	461
456.	局部作用	461
457.	各種重要之電池	462
458.	蓄電池	465

459. 電流之強度及抵抗	467
460. 抵抗定律	468
461. 抵抗之變化	469
462. 銻及鉍之抵抗	470
463. 歐姆定律	471
464. 結合電池之歐姆定律	471
465. 導體系之抵抗	473

第五章

474. 電流之熱效應	482
475. 溫度之昇高	482
476. 電力	483
477. 電能	483
478. 電流之光效應	484
479. 電鍍	487
480. 電爐	488
481. 熱電流	488

第六章

488. 電解	493
489. 法刺第定律	494
490. 離子之電荷	494
491. 電離說	496

第七章

495. 電流之磁效應	501
496. 俾奧薩發耳定律	501
497. 圓形電流之磁力	502

466. 電池連結法	475
467. 克希荷夫定律	476
468. 威斯吞橋	477
469. 抵抗箱	478
470. 各種之抵抗器	478
471. 枳橋	479
472. 勢差計	480
473. 轉流器及轉路器	480

電熱學

482. 熱電動力之定律	489
483. 熱電動力與溫度之關係	489
484. 拍爾提效應	491
485. 湯姆遜效應	491
486. 熱電堆	492
487. 熱電高溫計	492

電化學

492. 電量計	497
493. 極化	498
494. 電化學之應用	499

電磁學

498. 直線電流之磁力	504
499. 單位磁極進行電流一周之功	504

500.	磁動力	505
501.	鎔環內之磁場	505
502.	圓筒內之磁場	506
503.	電磁石	507
504.	磁路	507
505.	電鈴	509
506.	電報	509
507.	二重電報	511
508.	磁場對於直線電流 之力	512
509.	磁場對於矩形電流 之力	513
510.	荷爾效應	515
511.	電流之動力作用	515
512.	測電器具	516
513.	正切電流計	517

514.	正弦電流計	517
515.	無極電流計	518
516.	鏡電流計	518
517.	達松發爾電流計	518
518.	弦電流計	519
519.	熱電流計	519
520.	彈動電流計	519
521.	軟鐵安計	520
522.	衛斯吞直流安計	520
523.	克爾文安計	520
524.	西門子電流計	521
525.	熱線安計	521
526.	衛斯吞直流弗計	522
527.	衛斯吞直交流弗 計	522
528.	瓦計	522

第八章 誘導電流

529.	法刺第之實驗	523
530.	楞次定律	523
531.	誘導電動力	524
532.	自誘及互誘	525
533.	誘導係數	526
534.	地球誘導體	527
535.	佛科電詩	528
536.	圈在磁場內轉動所 生之誘導電流	529
537.	誘導圈	531
538.	斷續器	532
539.	電話機	533
540.	發電機	535

541.	環形直流發電機	536
542.	鼓形發電機	537
543.	場磁石之勵發	537
544.	交流之性質	539
545.	交流之實效值	540
546.	交流發電機	541
547.	多相交流	541
548.	直流發電機	542
549.	交流電動機	543
550.	三相交流之導線連 結法	545
551.	電力輸送	546
552.	交流變壓器	547

553. 單捲變壓器..... 548
 554. 直流變壓器或電動
 發電機 549

555. 直交流變成器 550
 556. 整流器 550

第九章 電波

557. 來丁瓶之振動放
 電 551
 558. 電磁波 552
 559. 電共振器 554
 560. 檢波器 555
 561. 三極管 556

562. 電波之性質..... 558
 563. 光之電磁說..... 560
 564. 無線電報 561
 565. 光電話 563
 566. 無線電話 563
 567. 短波電報 565

第十章 電磁學上之各種單位

568. 電磁學中之單位之
 種類及其次式 566

569. 實用單位 568

第十一章 真空放電

570. 壓力對於放電之影
 響 569
 571. 陰極線 570
 572. 電子..... 572
 573. 陰極線管 574
 574. 溝渠線或陽極線... 575

575. X線..... 576
 576. X線之特性..... 577
 577. X線之本性..... 578
 578. 氣體之離化..... 579
 579. 離子之電荷..... 580

第十二章 放射性

580. 放射性之發見 581
 581. 放射質發出之放射
 線之性質 581
 582. β 線..... 582

583. α 線..... 583
 584. γ 線..... 585
 585. 放射質之蛻變 586
 586. 放射性元素之系統... 588

第十三章 原子之構造

587. 原子之構造.....	590	究	599
588. 陽核.....	590	598. 示性 X 線	600
589. 陽核及電子之作 用	591	599. 原子序數	600
590. 陽核之電荷及質 量	592	600. 同位素	602
591. 量子論	593	601. 波耳之原子模型 ...	605
592. 光電效應	594	602. 景線系	607
593. 傳真電報	594	603. 原子內電子之排 列	609
594. 遠視.....	596	604. X 線景	609
595. 有聲影片	598	605. 電子軌道之概觀及 各元素原子之構 造	610
596. 螢光及磷光.....	599		
597. 結晶體之 X 線研			

第十四章 相對性原理

606. 邁克爾遜摩黎之實 驗	615	608. 四次宇宙	618
607. 特殊相對性原理 ...	616	609. 普遍相對性原理 ...	619
		610. 統一的場論.....	620

附錄

計算問題	13
漢英索引	21
英漢索引	66

第五篇

光學

第一章 光之直進

§ 309. 光源.

前於熱學及音學章中，曾述及熱及音各有主觀及客觀之意義，^{light}光亦如是。主觀的光，係指神經因受外來戟刺所生之感覺而言。客觀的光，係指引起此項感覺而存在於外界之原因而言。常見之物體中，如太陽，電燈等自能發光者，曰光體，或曰光源。反之，如地球，衛星等，非受外來之光照及，不能認知其存在者，曰暗體。又如玻璃，水等類物質，光經其內，通行無阻者，曰透明體，與此相反，如木石金屬等類物質，為光所絕對不能透過者，曰不透明體。介在透明體與不透明體之間，尚有一種，如油浸之紙及蠶甲等，雖能容一部分之光透過，但不能使人明白察見其後面之狀況者，曰半透明體。

物體之透明與否，純為相對的而非絕對的。例如金屬本屬於不透明體，但若錘之成箔，則可透過少許暗

綠色之光，一變而成透明。反之，如水本屬於透明體，但若積之過深，即呈暗黑色，遂成不透明矣。

§ 310. 光之本性.

關於光之本性，學說頗多，茲舉其大略如下：

(1) 放射說：創自牛頓，以為光乃由物體射出之一種微粒，曰光粒，以極大速度由發光體四向射出，達於眼中，始生光之感覺，是為放射說。光之重要性質，如直進，light corpuscle
emission theory反射及屈折等，均可由此說明。但稍涉複雜之現象，如干涉，透折及極化等，則不能解釋。

(2) 波動說：創自惠根斯及夫累涅爾等，以為宇宙間瀰漫一種稀薄而具彈性之媒質，曰能媒，物體發光，Huyghens Fresnel
ether則其電子振動，經周圍能媒，次第相傳，而達於遠，成爲一種橫波，進入吾人眼中引起光感者，即此橫波，並無所謂光粒，此說曰波動說，用放射說不能解釋之現象，改用此說，均可得簡單之說明。
undulatory theory

能媒中所起之波動，其波長在 0.000,04 糵至 0.000,08 糵之間者，進入眼中均能引起光感，是為光波。超過此項範圍者，雖進入眼中，亦不能引起光感。其中波長在 0.000,08 糵以上者，富於熱之作用，曰熱波，或稱爲紅外線。
light wave
heat wave infra-red ray

波長在0.000,04 種以下者,富於化學作用,曰**化學線**,或曰
actinic ray

紫外線. 又統括之,凡能引起光感之能媒波,曰**可見線**,
ultra-violet ray visible ray

不能引起光感者,曰**不可見線**,總稱之則曰**輻射**.
invisible ray radiation

(3)電磁說: 創自馬克斯維耳,以爲光非能媒自身
Maxwell
之運動,而爲能媒中之電磁變化,次第傳播而來,與電波
無異,故光乃電波中之一種,是爲**電磁說**. 波動說中所
electromagnetic theory
遭遇之困難,至此遂一掃而盡。

§ 311. 光學.

研究光之現象之學科,曰**光學**. 光學中關於透鏡
optics

及各種光器,不涉及光之本性,僅用直進,屈折及反射等
定律,即可說明之部分,曰**幾何光學**. 至於干涉,遠折及
geometrical optics

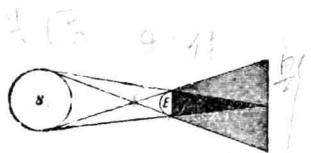
極化等,非用波動假定不能說明之部分,曰**物理光學**.
physical optics

§ 312. 光之直進.

如有一不透明體,介在眼與注視點之間,則注視點
被其遮蔽,不可得見. 由窗孔射入室內之日光,照及塵
埃,現爲一條直線. 凡如此類,光在組織均一之媒質內,
恆沿一直線進行之現象,曰**光之直進**,此直線曰**光線**,即
rectilinear propagation light ray
波動說之波線,非達於兩種媒質之境界處,不改其方向.

§ 313. 影。

光因直進之結果,在不透明體背後,生一暗黑部分,無光可達,是曰影。光源如爲一點,則由此點引一圓錐與不透明體之周圍相切,在不透明體背面,且在此圓錐



內之部分,均成爲影。光源如非一點,則由其各點,各作一圓錐,其理仍同。此時各圓錐之

共通部分,如圖 266 中塗黑之部分,成爲完全暗黑,是曰本影。在本影周圍,如圖中稍淡之部分,可見一部分之光之處,曰半影。

圖 266. 本影及半影。

§ 314. 蝕。

影之實例,如天體之蝕。月運行於太陽與地球之間,地球如進入月之影內,則太陽爲月遮蔽,遂成爲日蝕。地球運行至於日月之間,則月進入地球之影內,太陽之光,不能全達於月上,遂成爲月蝕。

月之半影之長,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,所見

者爲**分蝕**。如月之本影之長，不能達於地球之表面，則
partial eclipse
 在地球上正對此半影錐體之地點上，所見者爲**金環蝕**。
annular eclipse

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，故月蝕僅有全蝕及分蝕兩種。

§ 315. 視差。

人在急行火車中望月，覺月與車同進，而介在其間之山林，均向後退。凡如此類，因觀測者自身之移動而感覺他物體之外觀的變位，曰**視差**。
parallax

圖 267 之 A, B 表兩物體，觀測者初在 O_1 ，見 A 在 B 右，角度爲 α 。次後觀測者移至 O_2 ，見 A 在 B 左，角度爲 β 。換言之，因觀測者之位置，由 O_1 移至 O_2 ，即覺 A 對於 B 移動角度 $\alpha + \beta$ 。且 A 對於 B 之移動方向，恰與觀測者自身移動之方向相反。如 A 與 B 在同一位置，或對於觀測者在同一之距離，則此項視差，即完全消滅。

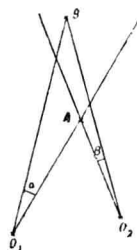


圖 267. 視差。

§ 316. 光強及亮度。

在光路上任取一點，作一單位面積，與光線之方向垂直，在單位時間內傳至此面積上之光量，曰在此一點之**光強**。如光源爲一點，以此點作中心，以任意半徑 r
intensity of light
 作球面。球面上各點，對於光源均作等距離 r ，故光強

均相等，命之爲 I 。在單位時間內，此球面所受到之光之全量，應爲 $4\pi r^2 I$ 。就另一球面言之，則爲 $4\pi r_1^2 I_1$ ，故

$$I = \frac{J}{r^2}.$$

式中之 J 表一常數，其值由光源而定。換言之，即各點之光強，與此點至光源間之距離平方爲反比例。

一物體之表面單位面積上，於單位時間內受到之光量，曰此表面之亮度。如表面恰與光線垂直，則亮度

與在此點之光強相等。如表面不與光線垂直，如圖 268 之 AC ，則引 AB 與光線垂直。命 θ 表角 BAC ，即光線之投射角度。

又命 E 及 E' 表 AB 及 AC 之亮

度， S 及 S' 表兩者之面積。在單位時間內由光源射至此兩面上之光量，應相等，故 $ES = E'S'$ ，又由圖知 $S' = S \cos \theta$ ，

$E' = E \cos \theta$ 。因 AB 與光線垂直，故 $E = I$ 。故得

$$E' = \frac{J}{r^2} \cos \theta,$$

即任意面之亮度與 $\cos \theta$ 爲正比，與 r^2 爲反比例。

§ 317. 光度。

亮度隨距離而異，不足以判斷光源之強弱。通常

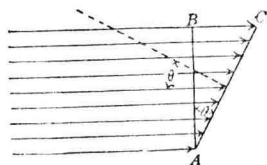


圖 268. 亮度。

論發光體之明暗時，概以其對於單位距離之一點之光強，爲其根據，而稱之曰**光度**。即在前式中，代入 $r=1$ ，及 illuminating power $\theta=0$ 之關係，則 $\cos\theta=1$ 故 $E=J$ 。即 J 表光度。

利用光度以比較各發光體之明暗，曰**測光學**。命 photometry r_1 及 r_2 表受光面與光源 A 及 B 之距離， E_1 及 E_2 表其亮度， J_1 及 J_2 表光度， θ_1 及 θ_2 表光線對受光面之投射角，則得 $E_1 = \frac{J_1 \cos^3 \theta_1}{r_1^2}$ ， $E_2 = \frac{J_2 \cos^3 \theta_2}{r_2^2}$ ，移動受光面之距離，使 $\theta_1 = \theta_2$ ， $E_1 = E_2$ ，則成爲

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

即投射角及亮度相等時，兩光源之光度與受光面至光源之距離平方爲反比例。

§ 313. 光度之單位。

光度之單位，不能由基本單位導出，通常爲便利計，取一定之蠟燭或燈光，以作比較之標準。此種標準，各國並不一律，甚至一國而用數種標準者，舉要述之如次：

(1) 英國標準蠟燭：用鯨蠟製成，徑 2 糲，重 $\frac{1}{6}$ 磅，每時間燃去 120 吩，焰高 45 耗時之光度，用作標準之光度，曰 1 燭光。通常均採用此爲光度之單位。
candle power

(2) 德國標準蠟燭：用熔點等於 55°C . 之石蠟製成，

徑 2 呎,重 83.6 克,以焰高 5 呎時之光度爲其單位。

(3) 卡舍爾燈: 此係法國之標準燈,燈芯爲一圓圈,
Carcel lamp
以菜油爲其燃料。 焰高 4.5 呎時之光度,用作單位。
corza oil

(4) 赫夫涅燈: 此係德國之標準燈,芯亦圓形,徑 8
Hefner-Alteneck lamp
呎,燃料用醋酸戊烷,以焰高 4 呎,寬 8 呎時,爲光度單位。
amylacetate

(5) 浮雷單位: 熔解之鉑將次凝固時,1 平方呎表
Viollet
面垂直射出之光度,爲浮雷單位,因使用不便,故不常見。

茲將各種單位之換算式列表明之如表 42。

此外德國尙有一

表 42. 各種光度之換算式。

種亮度之單位,曰呎燭,
metre candle
即標準蠟燭對於 1 呎
遠處之光強。 通常在

	英 燭	德 燭	赫夫涅	卡舍爾
英 燭	1.	0.999	1.151	0.106
德 燭	1.009	1.	1.162	0.107
赫夫涅	0.869	0.861	1.	0.091
卡舍爾	9.47	9.88	10.9	1.

燈下讀書時,至少須有 10 呎燭之亮度,方適於眼之衛生。

§ 319. 光度計。

測定光度之裝置,曰光度計,簡便者有本生光度計,
photometer Bunsen's photometer

及藍斐德光度計,而最精確者則爲倫麥布洛渾光度計。
Rumford's photometer Lummer-Brodhun's photometer

本生光度計如圖 269,紙屏 A 上有一油點,與標準光源 B ,及欲
測之光點 C ,在同一直線上。沿槽移動 B 及 C ,使油點與紙面,同樣
明亮,不復能得分別。此時兩光源之亮度相等,命 r_1 及 r_2 表其對於
紙屏之距離,則由 $J_1 : J_2 = r_1^2 : r_2^2$,即可算出光點 C 之光度。

藍斐德光度計

計如圖 270. 標準光源 A 及欲測之光源 B , 均在紙屏 C 之同側, 光源

與屏之間, 立一直棒 O , 遮斷光線, 故於屏上現兩影。由 A 所生之影可受 B 來之光照及, 由 B 所生之影, 亦可受 A 來之光照及。移動相互間之位置, 使屏上兩影成爲同一明亮, 此時兩光源對於紙屏之亮度, 彼此相等。由距離 AC 及 BC , 即可算出 B 之光度, 公式仍與前同。

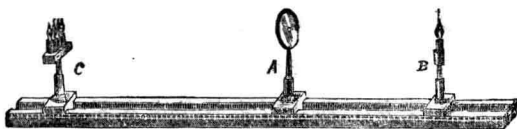


圖 269. 本生光度計。

倫麥布洛渾光度計之原理如圖 271. AB 爲碳酸鎂之薄板, C, D, E 及 F 同爲直角稜鏡。其

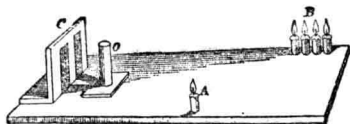


圖 270. 藍斐德光度計。

中 C 之斜面磨成圓形, 與 D 之斜面相接。由 P 傳來之光, 經 AB 反射至 E , 更由全反射至 CD , 由接合部通過, 餘均折回。由 Q 而來者, 亦同樣經 AB 及 F 之反射而達於 CD , 與接合部相遇之部分通過, 餘均由 D 之斜面反射而回。故用望遠鏡 T 正

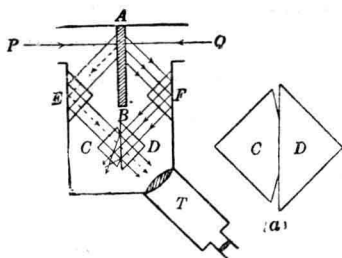


圖 271. 倫麥布洛渾光度計。

對 CD 之接合部分觀測之, 所見者當如圖 272 之狀況。適宜移動左右兩方之光源, 使望遠鏡中所見之內外兩圓, 明暗相同, 不能分別, 則兩者對於 AB 之亮度相等。故由此時光源與 AB 間之距離, 仍用前式, 即可算出所測之光度, 其結果極爲準確, 故一般測光學均使用之。

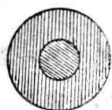


圖 272.

§ 320. 光之速度.

光之傳播必須相當之時間,自古以來,即多設法以觀測者,其法甚多,茲舉其中較為著名者數種,略述於下:

(1) 勒麥法: 此法行之最早,由木星之衛星之觀測,即可求得光之速度. 木星共有 5 個衛星,其第二衛星如圖 273 之 M_1 . 當地球在

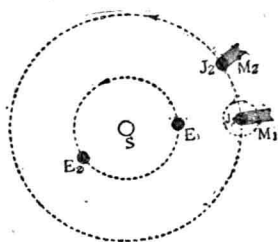


圖 273. 木星之蝕.

E_1 , 木星在 J_1 之位置,即兩者成伏之時, M_1 連續兩次成蝕之間,歷時 $42\frac{1}{2}$ 時間. 此後地球與木星,各沿軌道運行, M_1 之連續兩次成蝕所歷之時間,隨之而增. 至地球達於 E_2 , 木星達於 J_2 之位置,即兩者成衝之時, M_1 亦達於 M_2 之位置,其連續兩次成蝕相隔之時間較前此之 $42\frac{1}{2}$ 時,共增加 $16\frac{1}{2}$ 分. 自此以後,兩

蝕相隔之時間,復行減少. 至再成伏,又恢復 $42\frac{1}{2}$ 時之值. 餘做此,故知此 $16\frac{1}{2}$ 分即 990 秒,為光橫斷地球軌道所需之時間. 地球與太陽間之距離為 $1,495 \times 10^5$ 杆,故軌道直徑為 $2 \times 1,495 \times 10^{10}$ 桿,以時間 99) 除之,即得光

之速度 c 之值如下:

$$c = 3.02 \times 10^{10} \text{ 每秒桿.}$$

(2) 菲左法: 由實驗測定光速,以菲左為最早,其裝置如圖 274. 由光源 S

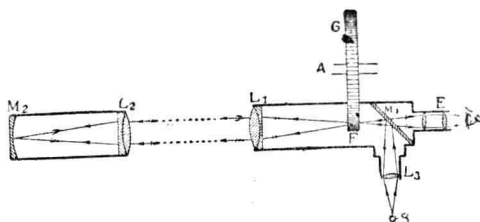


圖 274. 菲左之實驗.

發出之光,經透鏡 L_3 收斂後,再經 M_1 之反射,集合於焦點 F . 另一透鏡 L_1 亦以此 F 點為其焦點,故光通過 L_1 後,成為平行光線. 由此通過 8,633 杆長距離後,始達於透鏡 L_2 . L_2 之前方,有凹鏡 M_2 , 其位置

恰在 L_2 之焦點。故透過 L_2 後之光綫，均集合於凹鏡面上。經凹鏡反射後，各光綫仍沿原路折回，至 M_1 ，有一部分透過 M_1 進入目鏡 E 中。齒輪 GF 以極大速度在其軸 A 之周圍轉動，當其靜止時，光由齒孔中通過，始能入目，如恰與齒相遇，則被阻斷。假定 1 秒中有 10 齒通過 F ，則尚可見連續之光。如速度增大，使光由 F 至 M_2 再由 M_1 返 F ，其間齒輪僅轉過半齒，則去時由 F 通過之光，返時已被阻斷。菲左實驗時其齒數為 720，齒輪每秒轉 1.26 次後，光被完全阻斷，速度加倍，又完全通過。故在 FM_2 間往返之時間為 $1 \div (2 \times 720 \times 12.6)$ 秒，故

$$c = 2 \times 8.633 \times 2 \times 720 \times 12.6 = 3.13 \times 10^{10} \text{ 每秒裡。}$$

(3) 佛科法：再將菲左實驗中距離縮短，有佛科之實驗，其裝置如圖 275。由細隙 S 送入日光，經玻璃板 G 及透鏡 A ，至平鏡 B 上。 B 可轉動，其軸與紙面垂直。由 B 反射之光，集合於凹鏡 C ，鏡面半徑即等於 BC 。

如 B 不動，則由 C 反射而回之光，仍循原路折回，至 G 始有一部分反射至 D ，造成 S 之像，可由目鏡 O

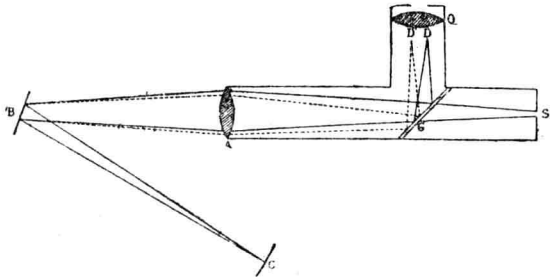


圖 275. 佛科之實驗。

窺之。但實際 B 在軸周圍動甚速，故光由 B 至 C 再返於 B 時，已轉動 α 之角度。故反射而回之光，不循原路，其像生於 D' 。由望遠鏡測得 DD' 之距離為 α ，命 r 表 $BG + GD$ ，則 $\alpha = \frac{\alpha}{2r}$ 。再命 n 表 B 之轉數，則轉動 α 所須之時間為 $\alpha \div 4\pi nr$ ，命 l 表 BC 之距離，代入實值則得

$$c = 2l \div \frac{\alpha}{4\pi nr} = 3 \times 10^{10} \text{ 每秒裡。}$$

第二章 反射及屈折

§ 321. 光之反射.

波動論所述關於波動之一切性質，對於光波，完全適用。光波之波線特稱**光線**，或泛言之曰**射線**。波動所從發出之源點，或波動集合之點，曰**焦點**，一切射線，均必通過之。如波動本不能集合，其射線均作發散形狀，則可向其反對方向延長之，此等延長線所集合之一點，曰**虛焦點**，與此相對，實際集合之點，曰**實焦點**。不問焦點爲虛爲實，與其源點併合稱之，則曰**共軛焦點**。

光波傳至兩種媒質之境界面，有一部分反射而回之現象，曰**光之反射**。其關係與一般之波動同，即(1) 投射面與反射面，在同一之平面內；(2) 投射角等於反射角。

如境界面凸凹不平，則以一定方向投射而來之平行光線，反射後四向分散折回，是曰**亂反射**，其折回之光曰**散光**。從任何方向，均能認識物體之存在，即由於此。

§ 322. 平鏡.

表面成一平面之鏡，曰**平鏡**。由鏡前一點 S 發出

之光波，如圖 276 所示，波面為同心圓，中心在 S 。此波面傳至 C 與平鏡 MN 相遇。假使無平鏡存在，次一瞬之波面應在 APB 處。今既為平鏡所阻，折回成 AQB 。以後之波，亦如是。由波動論，知反射波之中心，為 S_1 ，在鏡後，對鏡為 S 之對稱點。即 $SC = CS_1$ 。

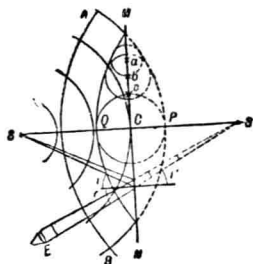


圖 276. 平鏡之反射波。

由射線求此關係，當更易。

因投射角 i 等於反射角 r ，而

r 又等於 i' ，故 $i = i'$ 。由此可以證明 $SC = CS_1$ 。

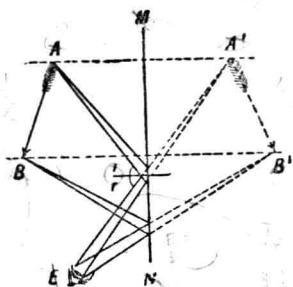


圖 277. 實物及像。

於鏡前放一實物，如圖
object

277 之 AB ，各點之共軛點，連

成與實物相似之 $A'B'$ ，曰像。
image

又因此時之像，由虛焦點集

成，故曰虛像，反之，如透鏡等
virtual image

造成之像，光線確由其處通

過者，曰實像，以相區別。

real image

§ 323. 連續數次之反射。

平鏡不止一面時，在其間之光點或實物發出之光，當在各鏡面上受連續數次之反射，對於各鏡各有其像點。圖 278 之 AB 及 CD 為

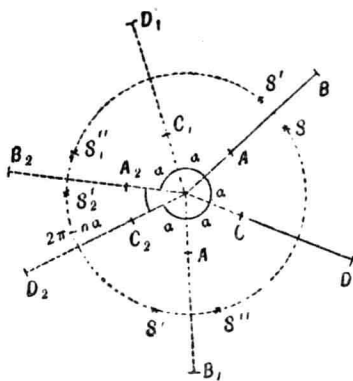
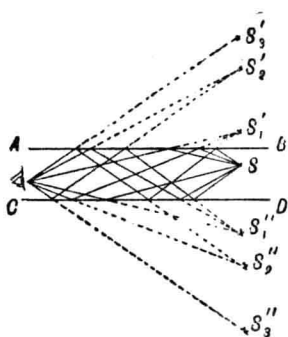


圖 278. 平行鏡之連續反射. 圖 279. 傾斜鏡之連續反射.

兩平鏡,互相平行,在其間之光點 S ,因此兩鏡造成之像點,如圖中所示,可繼續至於無窮。又圖 279 所示之兩平鏡間作 α 之傾斜時,可將全空間分作 $\frac{2\pi}{\alpha}$ 之扇形。各扇形中各有一像,故像之總數,亦等於 $\frac{2\pi}{\alpha}$,不過其中有一實像與實物相重而已。

§ 324. 球鏡.

反射面為球面之一部分者,曰球鏡. 球鏡中以球

spherical mirror

之裏面為反射面者,曰凹鏡,以其表

concave mirror

面為反射面者,曰凸鏡. 圖 280 之

convex mirror

ADB 表球鏡,其球心 C ,曰曲率中心,

center of curvature

鏡面之中點 D ,曰極,或曰頂點,由鏡

pole vertex

緣引至中心之直線間所夾之角度

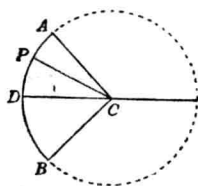


圖 280. 球鏡.

ACB , 曰鏡孔, 連結球心與頂點之直線 DC , 曰主軸. 通過
aperture principal axis

曲率中心之任何直線, 如 CP , 曰副軸, 或曰輔軸.
secondary axis auxiliary axis

由主軸上一點 S , 如圖 281, 而來之光線中, SD 因與鏡面垂直, 故反射後, 仍沿原路折回; SP 與在 P 所作之法線 PC , 成投射角 θ , 依反射定律, 其反射線 PS_1 與 PC 亦作 θ 之角度. 且 $\gamma = \beta + \theta$, $\beta = \alpha + \theta$ 故 $\alpha + \gamma = 2\beta$.

再由 P 引垂線與主軸相交於 P' . 因各角之數值均甚小, 可用其正切代之, 即

$$\frac{PP'}{SP'} + \frac{PP'}{S_1P'} = 2\frac{PP'}{CP'}$$

$$\frac{1}{SP'} + \frac{1}{S_1P'} = \frac{2}{CP'}$$



圖 281. 球鏡之造像.

鏡孔小時, P' 與 D 甚近, 可以看作同一之點, 故可用 CD 代替上式中 CP' , 用 S_1D 代替 S_1P' , 用 SD 代替 SP' . 而 SD , 表光點與鏡面間距離, 通常以 u 代之; S_1D 表像點與鏡面間距離, 通常以 v 代之; CD 為鏡面之曲率半徑, 通常以 r 表之, 即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r}$$

如將光點放在無窮遠處, 則投射光成平行光線, 此時之 v 成爲 ∞ , 由上式得 $\frac{1}{v} = \frac{2}{r}$. 即反射線集合於一點, 此點與鏡面間距離, 等於曲率半徑之半. 如是之點曰主焦點, 其與鏡面間距離 f , 曰焦點距離.
principal focus focal distance

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

是為球鏡反射之一般公式。

球鏡造像之原理如下：(1)由一點發出之光線，反射後復集合於一點。(2)與主軸平行之一切光線，反射後均集合於主焦點 F ；反之，通過主焦點 F 之一切光線，反射後悉成與主軸平行之光線。(3)通過曲率中心 C 之光線，反射後均遵原路而回。

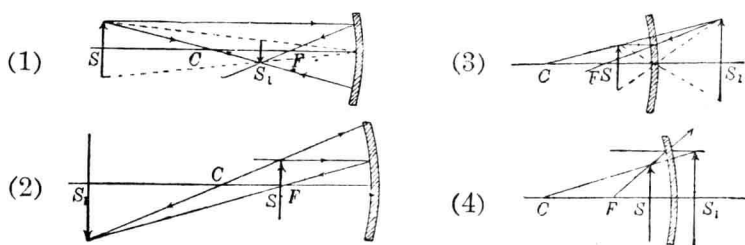


圖 282. 球鏡造像之作圖法。

依照上述原理，由作圖法求光點經球鏡造成之像，極為簡便；如圖 282。實物在 S ，則像生於 S_1 ；反之，實物在 S_1 ，則像生於 S 。圖中之(3)(4)兩種， S_1 如為實物，即成凸鏡，其他仍為凹鏡。又(1)及(2)造成者，為倒立之實像；(3)及(4)造成者，為直立之虛像。

再就球鏡之一般公式而言，凡在鏡前之距離，冠以正號，凡在鏡後之距離，冠以負號，則其關係如下：

- (1) $u = \infty$ 時, $v = f$;
- (2) $u > 2f$ 時, $2f > v > f$;
- (3) $u = 2f$ 時, $v = 2f$;
- (4) $2f > u > f$ 時, $v > 2f$;
- (5) $u = f$ 時, $v = \infty$;
- (6) $u < f$ 時, $v < 0$, 此時成爲虛像;
- (7) $f < 0$ 時, $v < f$, 卽凸鏡造像恆成虛像。

又實物與像之大小之比等於 $u:v$, 亦可由前圖證明之。

§ 32. 球行差.

前得球鏡造像之公式, 係假定鏡孔甚小, 故可用正切代替角之本身, 並將圖 281 中之 P' 與 D , 看作同一之點而得。實際之球

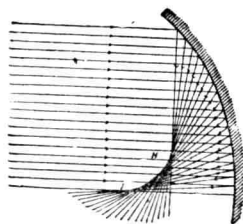


圖 283. 焦線.

鏡, 曲率既大, 鏡孔亦不小, 故由一點發出之光線, 不能復集成爲一點, 此現象曰**球行差**。同時, 與主軸平行之光線, 亦不能聚成一焦點, 各反射線之交點, 連續成一曲線, 如圖 283, 曰**焦線**。以主軸爲軸, 令焦線在其周圍轉動一周而成之曲面, 曰**焦面**。焦面之頂點 F , 卽鏡孔甚小時之焦點。通常於盃底所見之光圈, 卽此現象。

欲避球形差，可用圓錐曲線形之曲面以作反射面。其用橢圓者，曰橢鏡，光點放於其一焦點，則反射後復集合於他一焦點上。其用雙曲線者，曰雙曲鏡，光點放於其一焦點，則反射後在他一焦點上造成虛焦點。其用拋物線者，曰拋物鏡，光點放於其焦點上，則反射後，悉成平行光線，探海燈及燈塔上使用者，均屬此種反射面。

§ 326. 光之屈折。

光波達於兩媒質之境界面，有一部分反射而回原媒質，餘一部分則以不同之速度，進入第二媒質之中，此現象曰光之屈折。其關係亦與一般之波動同，即(1)屈折線與投射線各在波線之一邊，且在同一平面內；(2)投射角之正弦對於屈折角之正弦之比，等於光波在第一媒質內傳播之速度，對於其在第二媒質內傳播之速度之比；此比曰由第一媒質進入第二媒質時之屈折率。

試命 i 表投射角， r 表屈折角， v_1 表光在第一媒質內之速度， v_2 表其在第二媒質內之速度， ${}_1\mu_2$ 表光由第一媒質進入第二媒質時之屈折率，則其關係當為

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = {}_1\mu_2$$

當 ${}_1\mu_2 > 1$ 時， $v_1 > v_2$ ，故 $r < i$ ，即屈折線較諸投射

線更與法線接近。當 ${}_{1}\mu_2 < 1$, 即 $v_1 < v_2$ 時, $r > i$, 即屈折線較投射線, 更與法線離遠。前者第二媒質較第一媒質為**光密**, 後者則為**光疎**。例如光由空氣進入水內, 其屈折率為 $\frac{4}{3}$, 由空氣進入玻璃, 其屈折率為 $\frac{3}{2}$, 均大於 1, 故水及玻璃, 均較空氣為光密。光密與光疎, 完全就光學上之屈折率大小而言, 與媒質本身之密度無關係。例如酒精之屈折率為 1.37, 較水之屈折率大, 但若就水及酒精之密度本身比較之, 則適與此相反。

§ 327. 屈折線之作圖法。

既知屈折率之值, 則對於任何之投射角, 均可由作圖法求得其屈折線。圖 284 之 AB 表兩媒質之境界面, 於投射線 LO 上, 取任意之長 OC , 作長之單

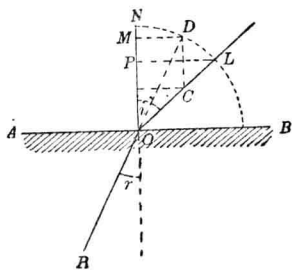


圖 284. 屈折線之作圖法。

位, 取 OL 等於 ${}_{1}\mu_2$ 。以 OL 為半徑畫圓 LDN , 與通過 C 之垂線相交於 D 。連結 DO , 延長之, 得 OR , 即所求之屈折線, 其證明如下:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\frac{LP}{OL}}{\frac{DM}{OD}} = \frac{LP}{DM} = \frac{LP}{CK} = \frac{OL}{OC} = {}_{1}\mu_2.$$

§ 328. 連續數次之屈折.

光由透明之薄板通過時,狀如圖 285 所示,其第一媒質為空氣,第二媒質為平板之物質,故第一次屈折時

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = {}_1\mu_2. \quad \text{第二由板出空氣時, } \frac{\sin r'}{\sin i'} = \frac{v_2}{v_1} = {}_2\mu_1.$$

因 $r = r'$, 故得

$${}_1\mu_2 \times {}_2\mu_1 = 1, \quad \text{或 } {}_1\mu_2 = \frac{1}{{}_2\mu_1}.$$

即第一媒質對於第二媒質之屈折率,等於第二對於第一之屈折率之逆數. 例如水對於

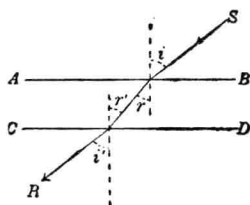


圖 285. 連續之屈折.

空氣之屈折率為 $\frac{4}{3}$, 故知空氣

對於水之屈折率為 $\frac{3}{4}$. 同樣兩平行板相重時,

$${}_1\mu_2 \times {}_2\mu_3 \times {}_3\mu_1 = 1, \quad \text{或 } {}_2\mu_3 = \frac{1}{{}_3\mu_1} \times {}_1\mu_2$$

例如水對空氣之屈折率為 $\frac{4}{3}$, 玻璃對空氣為 $\frac{3}{2}$. 由上式可知玻璃對於水之屈折率為 $\frac{3}{4} \times \frac{3}{2}$ 即 $\frac{9}{8}$.

又各物質對於真空之屈折率曰絕對屈折率. 如以真空為第一媒質, N_2 及 N_3 表第二第三媒質之絕對屈折率, 則上述之關係, 成爲 ${}_2\mu_3 = N_3 \div N_2$, 即第三對第二之屈折率, 等於兩者之絕對屈折率之比. 又如以真空為第一媒質, 空氣為第二媒質, 且命 N_0 表在 0°C . 及 760 耗之空氣之絕對屈折率, 又命 N 表第三媒質之絕對屈折率, μ 表此第三物質對於空氣之屈折率, 則得下列之關係

$$N = \mu N_0; \quad N_0 = 1.000,293.$$

即絕對屈折率等於空氣之絕對屈折率, 及其對空氣之屈折率之積.

§ 329. 全反射.

第一媒質如較第二媒質爲光疎，則對於任何投射角，均可由屈折定律求出其屈折角。反之，如第一媒質較第二媒質爲光密，則此時因 ${}_1\mu_2 < 1$ ，對於圖 286 中之 Ii 及 I_m 等，雖仍相同，但對於 I_n ，即 $\frac{\sin i}{{}_1\mu_2} = 1$ 之投射角時，其屈折角 P_nC 恰爲 $\frac{\pi}{2}$ 。此後 i 再增大，例如 I_oD ，則因 $\sin r > 1$ ，成爲不可能。換言之，此時全部光線，僅能反

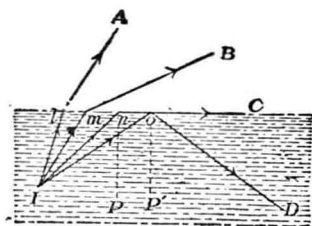


圖 286. 全反射。

射復回第一媒質，不能進入第二媒質之中。如是之現象曰全反射，發生全

total reflection
反射之最小角度，即

$$\sin i = {}_1\mu_2,$$

稱曰第一媒質對於第二媒質之臨界角，
critical angle
反之，由第二進入第一之一切光線，均在以 I_o 爲邊之圓錐內。

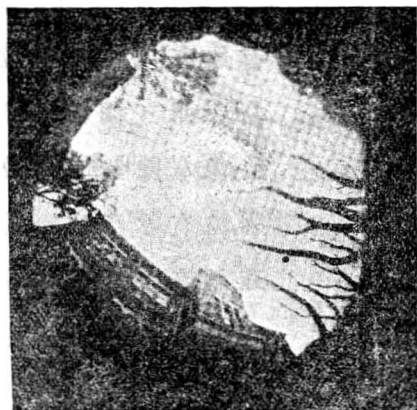


圖 287. 由水中所見岸上之風景。

圖 287 即由水中所

見岸上之風景,宛如水面穿有一圓孔者然,在此圓孔以外,即毫無所見。茲將數種常見物質對於平均 D 線之屈折率及其臨界角之數值,列表示之,如表 43。

表 43. 屈折率及臨界角。

媒質	空氣 至媒質	媒質 至空氣	臨界角	媒質	空氣 至媒質	媒質 至空氣	臨界角
鉀玻璃	1.5	0.66	41.0°	金剛石	2.42	0.41	24.0°
鉛玻璃	1.6	0.62	38.0°	酒精	1.36	0.74	48.0°
重鉛玻璃	1.75	0.57	35.0°	水	1.33	0.75	48.6°
岩鹽	1.54	0.65	40.5°	二硫化碳	1.63	0.62	38.0°

§ 330. 在平面境界面屈折時之像。

兩媒質沿一平面,如圖 288 之 AB , 相接,假定在上之媒質,較在下之媒質為光疎,由上所見在下方之 L 處之像,當較實際略高。如是各點之軌跡,為 $KL'L'M$, 其臨界角為 LMH 。眼在 L 直上時,像 L' 僅有鉛直方向之變位

LL' 。眼在側斜向望去,像 L' 除鉛直變位外,尚有水平之變位。茲就直上時求 LL' 之值,就光線 LEF 而言,

$$CL \tan r = CT \tan i$$

$$\therefore CT = \frac{CL}{\mu} \frac{\cos i}{\cos r}$$

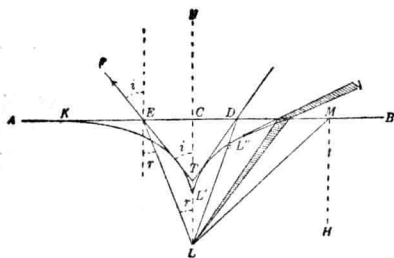


圖 288. 屈折之像。

當眼在直上時, C 與 E 極相接近, i 與 r 之值均甚小, 故 $\cos i = 1, \cos r = 1, CT = CL'$. 代入上式即成 $CL' = \frac{1}{\mu} CL$. 如上方為空氣, 下方為水, 則 $\mu = \frac{4}{3}$, 故由水面上直下望見水內物體之深, 僅其實值之 $\frac{3}{4}$ 而已.

§ 331. 稜鏡.

由水晶玻璃等透明體而成之三角柱, 曰稜鏡. 其兩側面特別磨光, 容光線通過, 此兩面相交之稜, 曰屈折稜, 其間所夾之角, 曰屈折角. 光由空氣進入玻璃之稜鏡時, 屈折線恆偏向稜鏡較厚之一方.

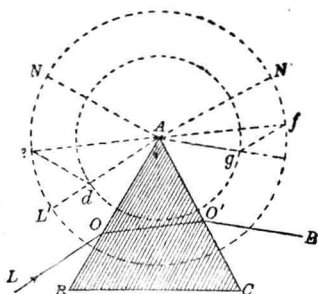


圖 289. 稜鏡之屈折.

求通過稜鏡之光線方向, 可用圖 289 之作圖法. 命 μ 表稜鏡之屈折率, LO 表投射光線. 以 A 為圓心, 以 1 及 μ 為半徑, 各作一圓. 引 $L'A$ 與 LO 平行, 與內圓相交於 d . 引 AN, AN' 各與 AB, AC 垂直. 引 de 與 AN 平行. 連結 eA 延長之, 得 f , 引 fg 與 $N'A$ 平行. 如此 eAf 表光線在稜鏡內部所取之方向; Ag 表光線由稜鏡透出後所取之方向. 故引 $OO', O'R$ 各與 eAf, Ag 平行, 所得之 $OO'R$ 即所求之屈折線.

圖 290 之 $PLMR$ 表通過稜鏡之一光線, 延長 PL 及 MR , 相交於 E , 命 δ 表角 PED , 此角表光線 PL 因通過稜鏡而

生之方向變化，通稱之曰偏向。引法線 LN 及 MN' ，由圖
deviation
 可知 δ 為三角形 ELM 之外角，故應等於 $i - r + i' - r'$ 。

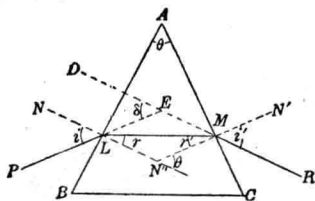


圖 290. 光線之偏向。

再就四邊形 $ALN'M$ 而論，
 兩角 L 及 M 為直角，故 N'
 之外角等於稜鏡之屈折角，
 即 θ 。又 $\theta = r + r'$ ，故

$$\delta = i + i' - \theta.$$

即由一定之屈折角 θ 之稜
 鏡內通過之光線，其偏向 δ 須視投射角而定。就中以
 $i = i'$ 或 $r = r'$ ，即 $AL = AM$ 之時， δ 成爲最小，特稱之曰

最小偏向。

minimum deviation

其證明如下：任意引 AB ，在兩側各
 作一三角形，如 ACB 及 ADB ，如圖 291，其
 底角爲 i, r ，及 i', r' ，命 μ 表屈折率，則

$$\frac{CB}{CA} = \frac{\sin i}{\sin r} = \mu = \frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{DB}{DA}.$$

命 $CA = x$ ， $DA = y$ ，則 $CB = \mu x$ ， $DB = \mu y$ 。再由圖，可知

$$CD^2 = x^2 + y^2 - 2xy \cos(i + i') = \mu^2 x^2 + \mu^2 y^2 - 2\mu^2 xy \cos(r + r').$$

$$\text{故 } \cos(i + i') = \mu^2 \cos \theta - \frac{\mu^2 - 1}{2} \left(\frac{x}{y} + \frac{y}{x} \right).$$

欲 δ 成爲最小，須 $i + i' - \theta$ 爲最小，即須 $i + i'$ 最小，即上式中之
 $\cos(i + i')$ 成爲最大之時。由上式左邊，可知 μ 及 θ 均爲常數，且

$\mu > 1$ ，故須 $\frac{x}{y} + \frac{y}{x}$ 成爲最大時， δ 始成最小。但 $\frac{x}{y} + \frac{y}{x}$ 又可寫作

$\sqrt{\left(\frac{x}{y} - \frac{y}{x}\right)^2 + 4}$ ，即須 $x = y$ 時， δ 方成最小。故結局 $i = i'$ ， $r = r'$ 。

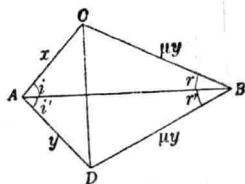


圖 291. 最小偏向。

又當 δ 成最小偏向時, $\delta = 2i - \theta$, $r + r' = \theta$, 故
 $i = \frac{\theta + \delta}{2}$, $r = \frac{\theta}{2}$. 因之, 只須測定稜鏡之屈折角 θ
 及其最小偏向 δ , 即可由下式算出稜鏡物質之屈折率:

$$\mu = \frac{\sin i}{\sin r} = \sin \frac{\theta + \delta}{2} \div \sin \frac{\theta}{2}.$$

§ 332. 全反射稜鏡.

平鏡反射之缺點頗多, 故通常多用直角稜鏡代之
 圖 292 之 ABC 為稜鏡, 其屈折角 C 等於一直角. 投射

線與 AC 垂直, 進入
 稜鏡不起屈折, 但
 對於 AB 之投射角

則為 $\frac{\pi}{4}$, 在玻璃之
 臨界角 42° 之上, 故
 成全反射, 而沿 BC
 之垂直方向射出.

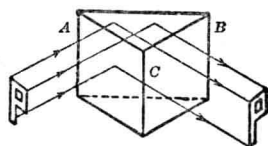
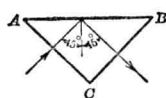


圖 292. 直角稜鏡.

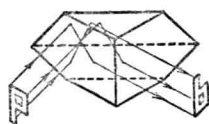
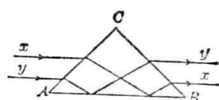


圖 293. 直立稜鏡.

又圖 293 所示者,

曰**直立稜鏡**, 亦與此目的相同. 光線 x 及 y 本為平行,
 erecting prism
 進入稜鏡屈折後達於 AB , 此時之投射角遠在臨界角以
 上, 故在此均成爲全反射, 然後由 BC 射至外方. 用此稜
 鏡造成之像, 上下恰相倒置, 如圖之右方所示

第三章 透鏡

§ 333. 透鏡之種類.

將玻璃水晶等透明體磨成薄片,使其兩面均成球面之一部分,或一面為平面形狀者,曰透鏡。中央部分

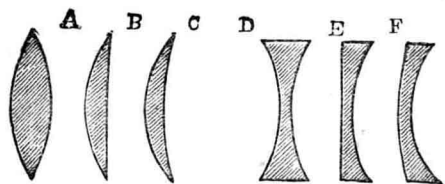


圖 294. 透鏡.

較厚者,曰**凸透鏡**
convex lens

其中如圖 294 之

A, 曰**兩凸透鏡**, B
double convex lens

曰**平凸透鏡**, C 曰
plano-convex lens

凸凹透鏡. 中央
convexo-concave lens

部分較薄者,曰**凹透鏡**,如 D 曰**兩凹透鏡**, E 曰**平凹透鏡**,
concave lens, double concave lens, plano-concave lens

F 曰**凹凸透鏡**. 連結透鏡兩球面中心之線曰**透鏡軸**.
concavo-convex lens axis of lens

如透鏡之屈折率,較外面媒質之屈折率大,則光線經凸透鏡屈折後,有收斂之性質,經凹透鏡屈折後,有發散之

性質,故凸透鏡又曰**收斂透鏡**,凹透鏡又曰**發散透鏡**.
converging lens diverging lens

§ 334. 透鏡之屈折

由圖 295 之透鏡 LM 之軸上一點,發出球面波 BAC . 如鏡孔不大,則透過透鏡後之波,亦集合於一點 P' ,即成

爲以 P' 爲中心之球面波。故經由鏡之中心部分者，其行較遲，而經由鏡之邊緣者，其行較速。透過波之曲率變更，即由於此。波面在空氣中進行 BLE ，在透鏡內僅進行 AA' 。引 BE 與鏡軸平行， BE 之長可看作與 BLE 相等。再引 BG, LI 及 EH 與軸垂直，大致上 BE 之長又與 GH 相等。

命 V_0, V 表波在空氣及透鏡內之速度， μ 表透鏡之屈折率，則得 $\mu = \frac{V_0}{V}$ 。故在空氣中

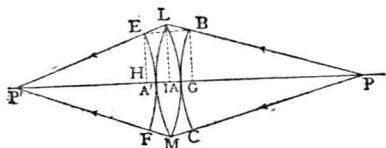


圖 295. 透鏡之屈折。

進行 BE 之時間，爲 $\frac{BE}{V_0}$ ，即 $\frac{GH}{V_0}$ ，即 $\frac{GA + AA' + A'H}{V_0}$ ，在透鏡內進行 AA' 之時間爲 $\frac{AA'}{V}$ 。此兩者既相等，則 $GA + AA' + A'H$ 等於 $AA' \frac{V_0}{V}$ ，即 $\mu AA'$ ，故 $GA + A'H = (\mu - 1)AA'$ 。命 r_1, r_2 表兩透鏡面之曲率半徑； u 及 v 表光點 P 及像點 P' 至透鏡面之長，即 $u = PA, v = A'P'$ ；又命 $BG = LI = EH = y$ ，得 $GA = \frac{y^2}{2u}, AI = \frac{y^2}{2r_1}, IA' = \frac{y^2}{2r_2}, A'H = \frac{y^2}{2v}$ 。故 $GA + A'H$ 等於 $\frac{y^2}{2} \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{v} \right)$ ，而 $AA' = AI + IA' = \frac{y^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ 代入前得之 $GA + A'H = (\mu - 1)AA'$ 之關係中，消去 $\frac{y^2}{2}$ ，即得

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = (\mu - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

依慣例，在各量前冠以適當之正負號，即凡由透鏡向投射光線方向所取之距離冠負號，由透鏡向透過光線方

向所取之距離冠正號，則 v, r_1 爲負； u, r_2 爲正，上式應成

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = (\mu - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

如投射波爲平面波，即 $u = \infty$ ，與此相當之 v ，成一常數，即透過波亦集中於一點，曰透鏡之主焦點，或略稱

焦點，通常以 F 代之。此時 v 所成之常數，即 F 至透鏡

之距離，曰焦點距離，通常以 f 代之。於是上式遂成爲

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f} = (\mu - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

此即透鏡之一般公式。

玻璃製成之透鏡，在空氣中時， $\mu > 1$ ，故 f 之符號，由 $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$ 而定。試就兩凸透鏡而言， r_1 爲負， r_2 爲正，故 f 成爲負數。對於其餘各種透鏡，則如表 44 所示。總

之，凸透鏡之 f 恆負，凹透鏡之 f 恆正。故凸透鏡造成之焦點，恆在投射光線之反對一方，而凹透鏡之焦點，則與投射光線，恆在同一方，故凸透鏡成實像，而凹透鏡則成虛像。

表 44. 焦點之位置。

透鏡種類	r_1	r_2	$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$	f
兩凸	-	+	-	-
平凸	∞	+	-	-
凸凹 ($r_2 < r_1$)	+	+	-	-
兩凹	+	-	+	+
平凹	∞	-	+	+
凹凸 ($r_2 > r_1$)	+	+	+	+

又以平行光線投射至透鏡上時，無論由透鏡任何一方投射，其焦點距離之值均不變。茲試就一凸凹透鏡證之。此時之 r_1 及 r_2 同爲正，但若投射之光線，由透鏡之反對一方而來，則 r_1 一變而成 $-r_2$ ，而原來之 r_2 一變而成 $-r_1$ ，將此兩值代入一般之公式中，則得

$$\frac{1}{f} = (\mu - 1) \left(\frac{1}{-r_2} - \frac{1}{-r_1} \right) = (\mu - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

與前完全一致，故由此求出之 f ，當然亦不變。對於其餘各種透鏡，亦然。

§ 335. 光心.

對於透鏡之投射線，除沿鏡軸而來者外，透過後，均必改變方向。但各透鏡均有一特殊之點，經過此點之光線，在透通透鏡之前後，恆成平行。如圖 296，由透鏡之曲率中心 A 及 B ，任意引平行線 AC 及 BD 。在 C 及 D 各作切平面，則此兩平面，互相平行。故經由 CD 之路而來之光線，與由一平行板中通過者無異，故其

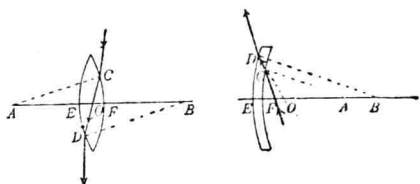


圖 296. 光心.

前後之光線，互成平行。再就 $\triangle ACO$ 及 $\triangle BDO$ 而言，為相似形，故 $\frac{AC}{BD} = \frac{AO}{BO} = \frac{AF}{BE} = \frac{AF - AO}{BE - BO} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{OF}{OE}$ 。但 $\frac{r_1}{r_2}$ 為一常數，故由 $\frac{OF}{OE}$ 所決定之 O 點，為一定點，即上所述之特殊點，曰光心，通過光心之光線，則曰中央光線。
optical center central ray

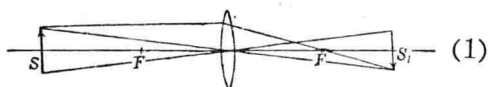
如 r_1 與 r_2 符號相同，則光心在於鏡外；如符號相異，則在鏡內；如有其中之一，等於 ∞ ，則光心在曲面上。

§ 336. 透鏡之造像.

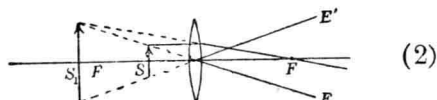
透鏡造像之原理如下：(1) 由一點發出之光線，經透鏡屈折後，重行集中於一點。(2) 與透鏡軸平行之光

線，屈折後，或反對延長之，必通過主焦點；反之，通過主焦點者，屈折後或反對延長時，必與透鏡軸平行。(3)通過光心之光線，投射線與透過線平行。

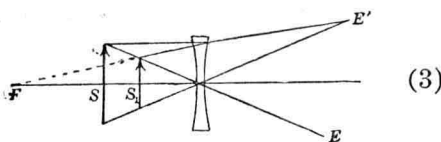
依照上述原理，由作圖法求透鏡對於物體造成之



像，極為簡便，如圖



297. S 與 S_1 兩者之中，一為實物，一



(2) 即為其像。又(1)

為實際光線通過者，成實像。(2)及

(3) 則為反對延長光線所成，故為虛

圖 297. 透鏡造像之作圖法。

像。又由圖可知，

實物與像之大小之比，等於其與鏡面距離之比，即 $u:v$ 。

§ 337. 透鏡造像之誤差。

透鏡之表面，通常均作球形，故造成之像，有種種之誤差。前述透鏡造像之一般公式，僅限於鏡孔極小，且投射光線與鏡軸間所夾之角度不甚大，方能成立。否則實物上之一點，造成之像，不能成爲一點，實物上之一

直線，亦不成一直線。此類誤差，細別之，共有五種之多，

曰造像之五種誤差，或概括之曰透鏡之行差。又通常
five errors in formation of images aberration of lens

之光，由各種波長不等之光波混合而成，屈折率當然亦
 不一致，由此而生之誤差，則曰色行差，詳本篇之第五章。
chromatic aberration

茲專就五種誤差，述其概略如次：

(1) 球行差：試取鏡孔較大而焦點距離較小之透鏡論之。由
 鏡軸附近通過之光線，曰近軸線，由鏡之邊緣通過者，曰邊緣線，由中
paraxial ray marginal ray

間之輪帶通過者，曰輪帶線。
zonal ray

邊緣線之屈折較甚，故其集
 合點，不能與近軸線一致，如

圖 298，平行之邊緣線集合
 於 F_1 ，而近軸線則集合於 F_2 。

又由軸上一點 P 發出之邊

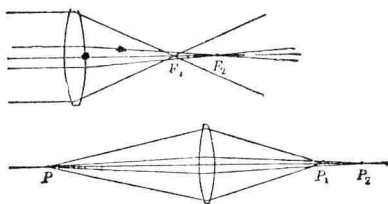


圖 298. 球行差。

緣線，集合於 P_1 ，而近軸線則集於 P_2 。此
 種誤差，曰球行差。
spherical aberration

欲免球行差，須用極薄之透鏡及極
 小之鏡孔。或將透鏡面磨成適宜之曲
 面，使邊緣線恆與近軸線集合於同一之
 點，如是之曲面，曰無球差面，具有此種曲
aplanatic surface
 面之透鏡，曰無球差透鏡。
aplanatic lens

又有一法，示
 可免却球行差，如圖 299 所示，表一透明
 球體，其半徑為 R 。由球體中一點 S 發
 出之光線 SO ，屈折出於球外，反對延長之，

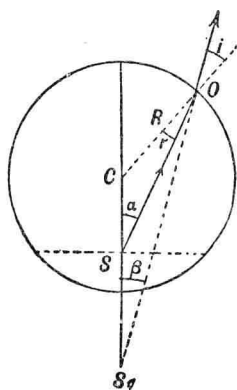


圖 299. 無球差面。

與 CS 相交於 S_1 。如 $CS \mu = R$, 則 $CS_1 = \mu R$ 。即由 S 發出之一切光線, 屈折後均集於 S_1 之一點。因 $\frac{CS}{R} = \frac{\sin r}{\sin a}$; $\frac{CS_1}{R} = \frac{\sin i}{\sin \beta}$, 故知 $a = i$ 。再就 $\triangle COS_1$ 及 $\triangle COS$ 而論, 角 C 共通, 故 $\beta + i = a + r$, 由此得 $\beta = r$ 。故 $CS_1 = R \frac{\sin i}{\sin \beta} = R \frac{\sin i}{\sin r} = \mu R$ 。換言之, 不問 i 之大小如何, 此關係均能成立。且即令將 S 以下之部分截去, 將實物放在 S

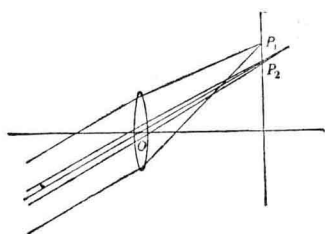


圖 300. 斜向平行光線。

處, 與切開之平面相接, 其間關係, 依然不變, 實際顯微鏡所用之物鏡, 為一半球形, 即應用此理而成。將欲觀察之物體放在半球下, 使其虛像生於平底上與本圖之 S 相當之一點。但此時下面之屈折, 仍不免有少許之球行差而已。

如欲並此少許之球行差, 亦須除盡, 則用 oil immersion 油浸之方法。即將實物放在 S 處, 夾少許油滴於實物及半球之底面間, 並使油之屈折率恰與透鏡之屈折率相等。如此, 不特可以免去下面之屈折, 同時並可免却因反射而虛耗之一部分之光。

(2) 彗狀行差: 斜向投射之平行光線, 其近軸線之焦點 P_2 , 較邊緣線之焦點 P_1 遠, 如圖 300, 試通過 P_1 作一平面, 與鏡軸垂直, 則此平面上所映之像, 當如圖 301 所示。通過各輪帶之光線造成之像, 位置各不相同。如將焦點配在 P_1 , 則 P_1 最為明亮, 成爲一點, 愈向 P_2 進, 光亦愈淡, 同時範圍擴大, 全體宛如一彗星之狀, 故曰彗狀行差。

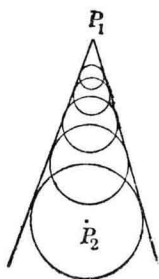


圖 301. 彗狀行差。

(3) 非點行差: 實物如在透鏡軸上, 則只有球行差, 如在軸外, 則除球行差外, 尚有一種誤差。圖 302 之 LL_1 表一球面, M 爲其曲率中心, P 爲軸外之實物上一點。由 P 發出之光線中, 其通過 pNq 者,

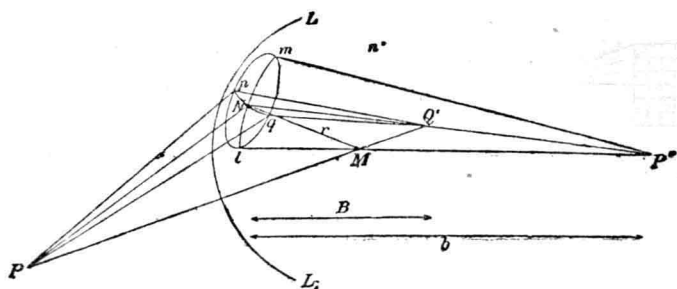


圖 302. 非點行差。

屈折後集合於 Q' ，其通過 LNm 者，屈折後集合於 P' 。即在互相垂直之兩平面內之投射線所造之像，亦各不相同。就全鏡面而言，由一點發出之光，經過透鏡後，其最密集之處，成爲一線而不能成點。如是之誤差，曰非點行差。欲避免非點行差，一枚之透鏡，決不可能，通常照相器之鏡頭，多由若干個透鏡集合而成，其中對於非點誤差，有適當配合，可以免却，如是者，特稱爲返點透鏡。

astigmatism

anastigmatic lens

(4) 像場彎曲：軸上一點之像，對於軸外一點之像之關係，與實物之兩點間之關係，不能完全一致。如圖 303 之 APB 本爲一直線，與鏡軸垂直，但各點造成之像，連成 $A'P'B'$ ，不成其爲直線， P' 之距離最遠。故在 P' 點映出之像，僅有 P' 點本身最爲明顯，周圍

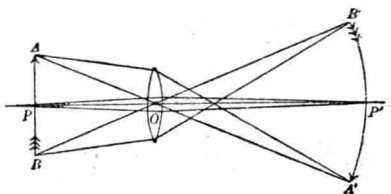


圖 303. 像場彎曲。

逐漸模糊。反之，如在 $A'B'$ 處映出之像，則中心最爲模糊。如是之誤差，曰像場彎曲。

curvature of field

(5) 歪曲：用厚透鏡照畫圖用方眼紙，本爲正方形者，歪斜成爲曲線形狀，其歪斜之程度，隨透鏡之性質，及相對之位置而定。歪斜

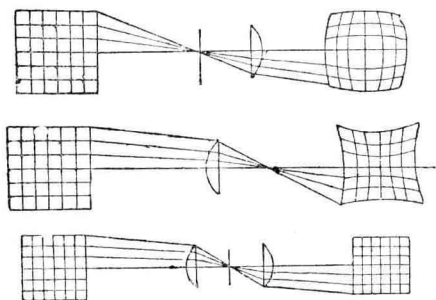


圖 304. 歪曲。

均由於透鏡表面磨成球面而來。欲避免此項誤差，通常使用鉛玻璃及鉀玻璃之透鏡，併合使用之。其用兩個透鏡者，對於色行差，球行差，及彗狀行差，大抵均可除去。如欲再去非點誤差，則非使用三個以上之透鏡不可。照相機之鏡頭，多用若干枚之透鏡集合而成，即由於此。

之狀況，大別之，共有兩種，如圖 304 之上中兩圖所示，如是之誤差，曰歪曲，如將兩個同樣之透鏡，顛倒併合使用，如圖中最下一種，則歪曲作用，彼此恰相抵消，故造成之像，可成爲正方形。

以上所述五種誤差，

§ 338. 複透鏡。

爲避誤差計，通常多結合若干個透鏡使用之，如是者，曰複透鏡，又或稱之曰透鏡系。如圖 305，命 f_1, f_2 表 combination of lenses system of lenses

透鏡 A_1, A_2 之焦點距離， d 表兩者相隔之距離，即 $C_1 C_2$ ， u 表軸上光點 S 與 A_1 之距離， S'' 表複透鏡造成

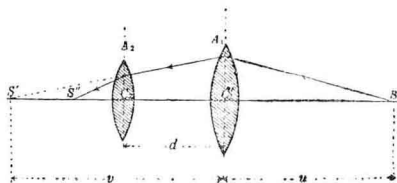


圖 305. 複透鏡。

之像。先假定無 A_2 存在，則由 $\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f_1}$ 可以求出 S' 之位置。但因有 A_2 存在，故像移至 S'' 。命 u' 表 $C_2 S'$ ，因 v, u' 同為負， d 為正，故 $u' = v + d$ 。命 v' 表 $C_2 S''$ ，則由 $\frac{1}{v'} - \frac{1}{u'} = \frac{1}{f_2}$ ，代入前求之 u' ，即得複透鏡之一般公式，為

$$\frac{1}{v'} - \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{u} + \frac{1}{f_1}} + d} = \frac{1}{f_2}$$

如 A_1 與 A_2 緊接，即 $d = 0$ ，則成爲

$$\frac{1}{v'} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F}$$

形式與單透鏡相似， F 表複透鏡之合成焦點距離。更推廣之，如有焦點距離為 f_1, f_2, f_3, \dots 之若干透鏡，緊接而成之複透鏡，則其合成焦點距離 F ，應滿足下列之條件：

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \dots$$

第四章 光器

§ 339. 眼之構造。

眼形如球，前後略長，其斷面如圖 306，共由三層薄膜包裹而成。最外一層曰鞏膜，質極堅牢，用以保持球形，且保護其內部。鞏膜之前面與透明部分相連，彎曲較甚，是曰角膜。中間之一層，曰脈絡膜，含有多量色素，故呈黑色。脈絡膜之前面與毛狀體相連，再前則與

sclerotic

cornea

choroid

ciliary body

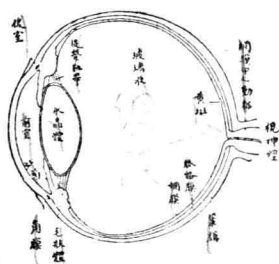


圖 306. 眼球之斷面。

虹彩及提繫韌帶相連。虹彩亦為一
 Iris suspensory ligament
 薄膜，具有伸縮性，中央有一小圓孔，曰
 瞳孔，光則經由此孔進入眼中，其進入
 pupil
 之光量，即由瞳孔之收縮節制之。最
 內一層，曰網膜，其上滿佈視神經，外來
 retina optic nerve
 之光，在此造成顯明之像，經視神經傳
 vision
 入腦內，方生視覺。網膜上當視神經
 入口之一點，對於光完全不起感覺，是

曰盲斑。反之，視覺最為敏銳之一點，曰黃斑。欲得正確之視覺，非
 blind spot yellow spot
 令其像生於黃斑上不可。

其次再述眼球之內部。內膜後之空間，曰前室，其內充滿一種
 anterior chamber
 液體，名曰水液，重約 4 克。虹彩後為一透鏡狀透明體，曰晶體透鏡，
 aqueous humour crys. alline lens
 其屈折率等於 1.347，前面之曲率較後面小，與虹彩外方之毛狀筋相
 ciliary muscle
 連，由筋可以牽動之，使其曲率適宜變化。晶體透鏡後至網膜間之
 空間，曰後室，其內充滿另一種液體，曰玻璃液，屈折率等於 1.3365。
 posterior chamber vitreous humour

§ 340. 眼之調節。

眼之主要部分為晶體透鏡，其彎曲隨提繫韌帶之
 伸縮而變。韌帶收縮，則此透鏡由其本身之彈力成為
 圓形，結果半徑減小，屈折力增大。反之，韌帶伸長，則透
 鏡之焦點距離加長，屈折力減小。故對於遠近之物體，
 均能自由伸縮以應之，使其鮮明之像，恆成於網膜上，引
 起明瞭之視覺。此種作用，曰眼之調節。由調節作用
 accommodation of the eye

所能明瞭察見最遠之點，曰遠點，最近之點曰近點。此兩點間之距離，因人而異，並無一定。視覺健全者，遠點可達於無窮遠，對於平行而來之光線，亦能在網膜上造成鮮明之像，如是之眼，曰正視眼。反之，遠點在於有限之距離者，曰非正視眼。同在調節可能之範圍內，其距眼愈近者，在網膜上造成之像愈大，視覺亦愈明瞭，但同時晶體透鏡之彎曲程度愈甚，故不免有疲勞之感。在調節範圍內，使眼不感疲勞，又能得最明瞭之視覺之距離，如讀書時書與眼間之距離，曰明視距離。

far point

near point

emmetropic eye

ametropic eye

distance of distinct vision

§ 341. 眼鏡。

非正視眼不能收斂平行光線於其網膜上，可用一枚透鏡，以矯正之，是為眼鏡。非正視之性質不同，眼鏡之種類亦異，分別述之如下：

(1) 近視：因眼軸過長或屈折力過強而起之非正視，曰近視眼。此眼

myopic eye

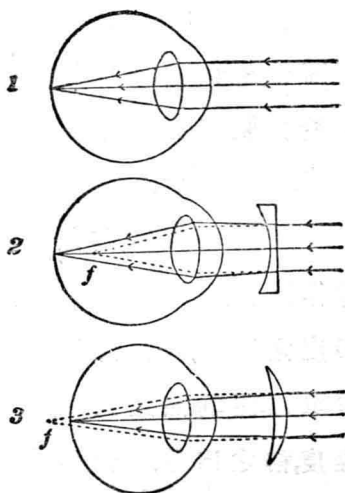


圖 307. 非正視眼及眼鏡。

對於平行光線造成之像，在於網膜之前，如圖 307 之(2)，此時如用一適宜之凹透鏡，使平行光線預行發散，然後進入眼中，則其像即移後，生於網膜之上。

(2) 遠視：因眼軸過短或屈折力不足而起之非正視，曰遠視眼。此眼對於平行光線造成之像，在於網膜 hypermetropic eye 之後，如(3)，此時如用一適宜之凸透鏡，使平行光線預行收斂，然後進入眼中，則其像即移前，生於網膜之上。

(3) 老視：因年齡過高，晶體透鏡失却其伸縮能力而起之非正視，曰老視眼。此眼對於遠點，並無關係，僅 presbyopic eye 對於近點不能造成鮮明之像，故用凸透鏡矯正之。

(4) 亂視：因包含眼之光軸之斷面內，屈折狀況隨斷面位置而異，各方不能一律，是為亂視。其主要原因 astigmatism 由於角膜表面之半徑，各方互異，宜用圓柱面之透鏡為眼鏡，以矯正之。

使用眼鏡時，其焦點距離愈短，作用愈強，舊時概用吋作單位，測其焦點距離，即以此數表眼鏡之度。例如 degree 20度之眼鏡，即焦點距離等於20吋之透鏡。新法用呎作單位，測其焦點距離，而以此數之逆數，表眼鏡之作用程度，稱之曰第。例如2第之眼鏡，即焦點距離等於50 dioptr 呎之透鏡。如將兩副眼鏡重疊使用時，因複透鏡之焦

點距離之逆數，等於各透鏡之焦點距離之逆數之總和，即 $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ ，故使用第時，異常簡單，如一透鏡為 2 第，一透鏡為 4 第，則相重時，即成為 $2 + 4 = 6$ 第。

§ 342. 遠近之識別及立體性。

由瞳孔中心引角膜之法線，晶體透鏡之曲率中心，大致亦在此線上，是曰眼之光軸，簡稱眼軸。optical axis of the eye, axis of the eye 注視物體，使像生於黃斑，此時所注視之點，曰固視點，或曰着視點。point of fixation 連結固視點與眼球之轉動中心之直線，曰固視線，或曰着視線。line of fixation 連結固視點與黃斑之直線，曰視線或曰視軸。visual line, visual axis

眼中所見之物體，其大小通常與實物並不一致，如圖 308 之 PQ 及 pq ，大小本相等，但因遠近不同，故在網膜上造成之像，長短互異。 pq

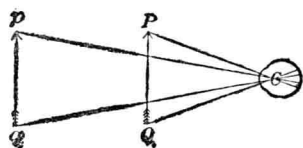


圖 308. 視角。

較遠，遂覺其小， PQ 較近，遂覺其大。一物體對於眼之夾角，如 $\angle PCQ$ ，曰視角。visual angle 即視角大者，外觀上形體亦大。遠處物體，須近傍有其他已知大小之實物存在，方能由此比較，判斷其大小，僅賴視角，決不能得其實際之大小也。

又對於距離遠近之識別，有時全賴左右兩眼。如

圖 309, A 及 B 對於兩眼之視軸間之角度 aAa' 及 bBb' , 各不相同, 此項角度, 曰光角。物體之遠近, 即由光角之 convergence

大小, 及眼之調節作用決定之。如兩物體或同一物體

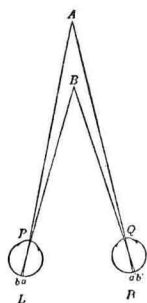


圖 309. 光角。

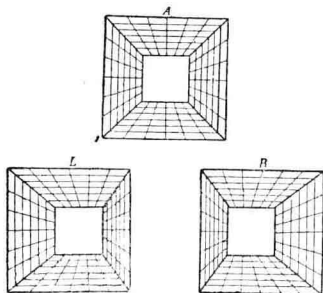


圖 310. 立體視圖。

上之兩點, 與眼之距離, 相差無多, 則其光角大致相同。此時可由下述性質判別之, 同時

可得立體性認識。例如圖 310 之 A , 為截頭四方錐體。 appreciation of solidity

兩眼同時注視之, 在左眼映成之像為 L , 在右眼為 R , 略有不同, 曰

立體視圖。各點間之距離, 及立 stereo-diagrams

體性, 均賴此得以識別。用照相法照此樣式, 對於物體照成其立

體視圖, 然後同時雙眼注視之, 即融合成爲立體, 是曰立體的融合。 stereoscopic fusion

立體的融合, 肉眼雖可辦到, 但終

不若用特殊裝置, 如圖 311, 爲便。

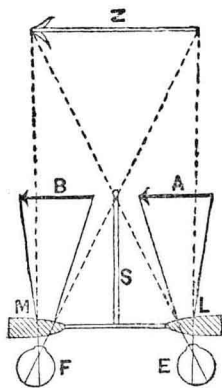


圖 311. 實體鏡。

在立體視圖 A 及 B 之間，放一隔板 S ，隔透鏡 L 及 M 觀察時，左眼僅見左圖，右眼僅見右圖。經透鏡屈折後，在同一位置上，造成重合之像 Z 。左右互相融合之結果，遂覺其浮出紙上，與實物無異。如是之裝置，曰**實體鏡**。
stereoscope

§ 343. 視覺之持久性。

雨自雲中降下，本為滴狀，而映入眼中，則連成一線，但在暗夜用電花等類瞬時之光照之，依然成為滴狀。又電扇急轉時，其葉板亦連成一片，用電光照之，亦能分開。此種現象，由視覺之持久性而來。
persistence of vision
即光感有持久之性質，雖將光源取去，其在網膜上造成之像，並不隨之立時消滅，尚能延長至相當之久，據實測知其持久之時間，為 $\frac{1}{10}$ 秒。利用此理，可得活動影戲。c. cinematograph 對於運動中之物體，約每隔 $\frac{1}{16}$ 秒，為之照一相片，各片連成一條，是為影片。film 將影片裝入圖 312 之影戲機內，自後用強光照及，擴大後在幕上現成其像，仍以同一速度，即每隔 $\frac{1}{16}$ 秒，換一次，則在網膜上映成之像，前者未去，後者已來，遂不覺其間斷，融成一片矣。

§ 344. 眼之錯覺。

肉眼觀察，往往不能得物體之真相。如圖 313 之甲，三者本為同一形狀，但在眼中，總覺由左而右，次第加大。又如乙之各縱線，本為平行線，但在眼中，則覺其

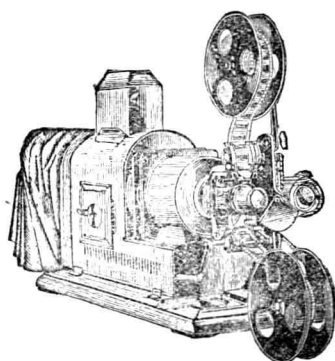


圖 312. 影戲機。

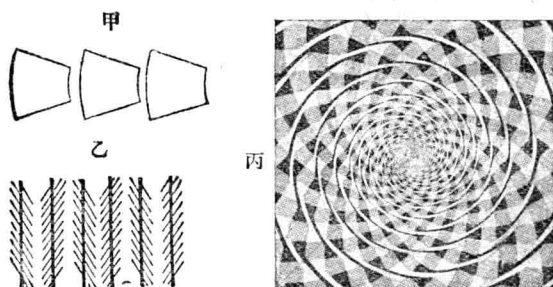


圖 313. 錯覺。

或向右斜，或
向左斜。最
甚者如丙，其
曲線本為圓
而在眼中，則
覺其為螺線。
類此之現象，
真不勝枚舉，
總之，肉眼觀

察，必受其周圍之影響，決不能得正確之真相，是曰眼之錯覺。

optical illusion

與錯覺相近而實非者，尚有一種現象，曰光滲，圖 314 所示，即其

irradiation

一例。全黑背景中之白色正方形，與全白背景中之黑色正方形，本屬同一大小，但在眼中，則覺前者大而後者小。月之盈虛時，此現象尤為顯著。同一之人，著黑色服裝時，必較著白色時略微瘦

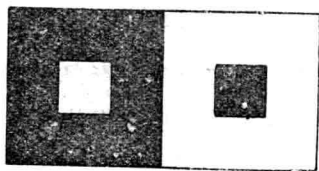


圖 314. 光滲。

削，暗室中所見壁上孔穴，恆較實際寬大，均屬此類現象。

動物之色彩，有仿其環境以欺其敵者，曰保護色。protective coloring 軍事上師之

於軍艦或重要地面，塗以相當色彩，以迷敵軍飛機之目，其法甚多，通稱之曰假裝，或曰迷彩。camouflage 凡此種種，均足以證明肉眼難明事物真相。

§ 315. 擴大鏡。

物體在凸透鏡之焦點距離以內，則成直立虛像，且較實物更大。利用此理，在眼前放一凸透鏡，如圖 315

使實物 PQ 之擴大虛像 pq , 生在明視距離處, 俾便詳加考察, 如是之凸透鏡, 曰擴大鏡, 或曰單顯微鏡。像與實物之大小之比, 曰倍率, 通常以

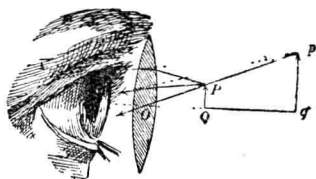


圖 315. 擴大鏡。

$$M = \frac{pq}{PQ} = \frac{Oq}{Op} = \frac{\text{明視距離}}{\text{焦點距離}}$$

表出之。明視距離通常為 25 厘米, 故得

$$M = \frac{25}{f}$$

即焦點距離 f 若在 25 厘米以上, 則 $M < 1$, 不適於擴大之目的。反之, f 若在 25 厘米以下, 其值愈小者, 倍率愈大, 如表 45, 其功效愈著。

表 45. 倍率

f (厘米)	M
166	1.5
125	2.0
83	3.0
62	4.0
50	5.0
42	6.0
31	8.0

§ 346. 顯微鏡。

如圖 316, 用透鏡 L_1 將實物 AB 擴大成爲 $A'B'$, 此時

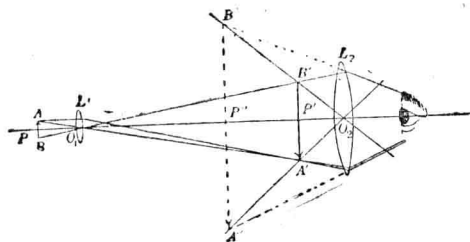


圖 316. 顯微鏡原理。

AB 與焦點愈近, 實像 $A'B'$ 愈大。再經第二透鏡 L_2 放大, 成爲 $A''B''$ 。命 m_1 表 L_1 之倍率, m_2 表 L_2 之倍率, 則因

$m_1 = \frac{O_1 P'}{O_1 P}$, $m_2 = \frac{250(\text{耗})}{\text{焦點距離}(\text{耗})}$, 故若命 M 表合成倍率, 即得

$$M = m_1 m_2 = \frac{O_1 P'}{O_1 P} \times \frac{250}{\text{焦點距離}}$$

其效遠在單獨透鏡之上, 是為顯微鏡, 其面實物之一透

鏡 L_1 , 曰物鏡, 而觀察者之眼之一透鏡, 曰目鏡。故顯微

鏡之倍率, 等於其物鏡之倍率 m_1 及目鏡之倍率 m_2 之相乘積。命 F_1, F_1' 及 F_2, F_2' 表物鏡及目鏡之焦點, 如圖 317,

f_1, f_1' , 及 f_2, f_2' 表其焦點距離, 再命 Δ 表 $F_1' F_2$, 是曰光筒長, optical tube-length

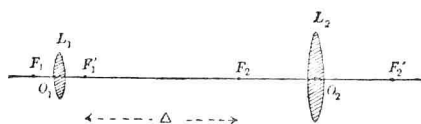


圖 317. 顯微鏡之焦點。

則 $m_1 = \Delta \div f_1'$,

$$\text{故 } M = \frac{\Delta}{f_1'} \cdot \frac{250}{f_2}$$

顯微鏡中最重要之

部分為目鏡及物鏡, 故其

構造特別複雜。茲先述其物鏡。如用焦點距離極長之單透鏡作物鏡, 則不免有各種誤差, 不能造成正確之像。欲避免色行差, 球行差及彗狀行差三種, 非用二個以上之透鏡聯合不可。再欲避免像場彎曲及歪曲, 更非增加透鏡之數不可。故即倍率較低之顯微鏡, 其物鏡亦由五個透鏡合成, 如是之物鏡,

曰無色物鏡。事實上, 白光由無數波長

不等之單光合成, 所謂無色, 亦僅限於景線中之 C 線及 F 線而已, 對於其他之線, 亦不一致。除此兩線而外, 並能對於 D 線, 亦復一致者, 曰全無色物鏡, 其裝置如

圖 318, 其最下之一枚透鏡, 作半球形, 曰前鏡, 實為螢石, 否則不能除盡色行差。

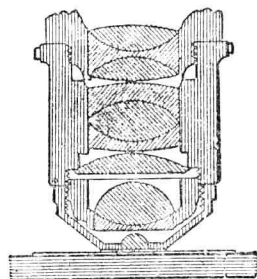


圖 318. 全無色物鏡。

單透鏡之視界異常狹小，對於目鏡，極不相宜，至少亦須用兩枚透鏡合成者。用兩透鏡合成之目鏡，共有兩種。如圖 319，用焦點距離相同之凸透鏡兩面，令其凸面相向，兩者所隔之距離，恰等於其焦點距離，或其三分之二，如此，合成焦點之距離或在透鏡之外，或即在其平面近傍，是曰藍茲登目鏡。如圖 320，用焦點距離不同之兩透鏡合成，命 f_1, f_2 表其焦點距離，兩

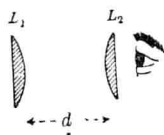


圖 319. 藍茲登目鏡。

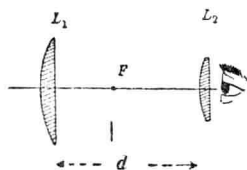


圖 320. 惠更斯目鏡。

凸面均正對物體之一方，且 $f_1 = f_2$ ，又命 d 表兩者相隔之距離，使 $d = 2f_2$ ，命 F 表其合成焦點之位置，則如圖中所示，是為惠更斯目鏡。

Huygenian eyepiece

用上述兩種目鏡，均可免却色行差，

其視界亦甚廣，但其他之誤差依然存在。

故倍率較高之顯微鏡，須將此種目鏡中直接與眼相接之一枚，換用無色透鏡方佳，是曰刻爾涅目鏡。對於倍率在 1,500 或 2,000 以上者，刻爾涅目鏡仍嫌不足，又須使用整像目鏡，始能得鮮明之像。

Kellner eyepiece

orthoscopic eyepiece

§ 347. 天體望遠鏡。

將遠處物體造成擴大之像以供觀察之裝置，稱曰望遠鏡，亦由物鏡及目鏡合成，其構造如圖 321。遠處實物經左方物鏡 O 屈折後，在其焦點近傍造成倒立之像 $A'B'$ ，實物與像對於物鏡所張之角同為 α ，如直接用眼觀測，對眼所張之角亦為 α 。但若眼在 E ，與 $A'B'$ 之距離，恰等於明視距離，則像 $A'B'$ 對於眼所張之角為 β 。

telescope

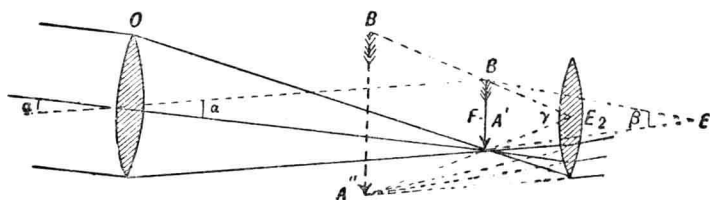


圖 321. 天體望遠鏡。

命 m_1 表物鏡之倍率，則 $m_1 = \frac{\beta}{\alpha}$ 。又 $A'B'$ 經目鏡 E_2 ，再加一度擴大，成爲 $A''B''$ ，對於 E_2 之角度爲 γ 。命 m_2 表目鏡之倍率，則 $m_2 = \frac{\gamma}{\beta}$ 。故合成透鏡之倍率 M 當如下式：

$$M = m_1 m_2 = \frac{\beta}{\alpha} \times \frac{\gamma}{\beta} = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$$

即望遠鏡之倍率，等於物鏡之焦點距離與目鏡之焦點距離之比。 此種望遠鏡中所見者，恆爲倒像，對於天體觀測，並無不便，故天文學上多用之，因名爲天體望遠鏡。
astronomical telescope
 α 爲肉眼觀察時之視角，曰實視界； γ 爲望遠鏡中窺得之視角，曰外觀視界。即令對於天體，倒像有時亦感不
real field of view
apparent field of view

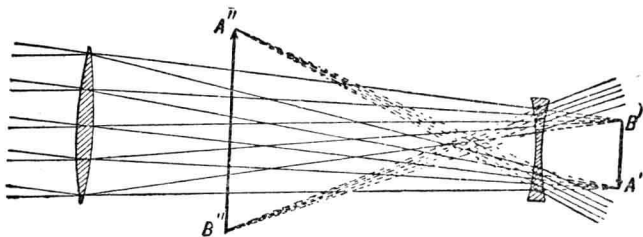


圖 322. 伽利略望遠鏡。

更，故將目鏡換用一凹透鏡，如圖 322，使兩鏡之後方焦點一致，則倒像 $A'B'$ ，經目鏡再行倒轉，成正立之 $A''B''$ 。

如是者曰 **伽利略望遠鏡**。

Galilean telescope

望遠鏡中之物鏡，為最重要之一部分，其鏡孔半徑，通常用吋為單位表出。例如葉耳岐茲天文臺之四十吋望遠鏡，即其物鏡之鏡孔直徑等於 40 吋之謂。

§ 348. 地球望遠鏡。

對於地面物體用望遠鏡觀察之時，更非直立之像不可，如是者曰 **地球望遠鏡**。如圖 323，在物鏡 L_1 及目鏡 L_2 之間，插

一凸透鏡 L_3 ，
或如圖 324，
多用兩枚透

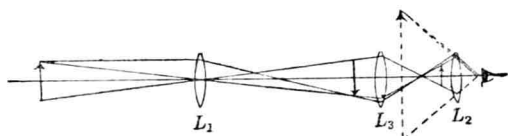


圖 323. 地球望遠鏡。

鏡使物鏡造成之像 $P'Q'$ ，生於 L_3 之焦點，均可。或用一

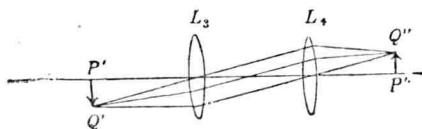


圖 324. 正立透鏡。

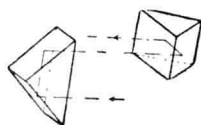


圖 325. 坡耳洛稜鏡。

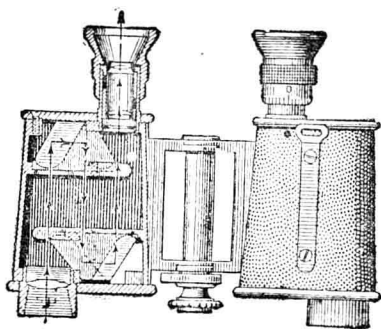


圖 326. 雙眼鏡。

與上下顛倒之關係完全相同，如圖 326 之觀劇鏡，又名 opera glass

稜鏡式雙眼鏡，即由此理製成。
prism binocular

對全反射稜鏡代替 L_3 亦可，此時兩稜鏡之稜，互相垂直，如圖 325，是曰坡耳洛稜鏡。光線進入第一稜鏡時之方向，與由第二稜鏡透出時之方向，共轉 180 度，

§ 349. 反射望遠鏡。

上述之望遠鏡，係利用透鏡之屈折而成，曰屈折望遠鏡。此外尚有利用反射而成者，曰反射望遠鏡。如圖 327，於凹鏡 AB 中央，開一小圓孔 CD ，在焦點內側放凸鏡 GHI ，令其實像生於 F ，然後由目鏡觀察，是為卡舍格稜望遠鏡。如圖 328，不在凹鏡上穿孔，用小平鏡將反射光轉換 90° 之方向後，用目鏡觀察者，曰牛頓反射望遠鏡。美國威爾遜山天文臺之百吋反射望遠鏡，即屬此種。

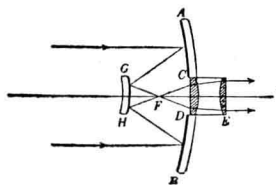


圖 327. 卡舍格稜反射望遠鏡。

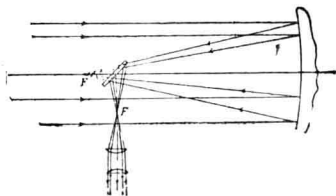


圖 328. 牛頓反射望遠鏡。

§ 350. 潛望鏡.

望遠鏡之一種應用，為在潛水艇內觀察水面情況時所使用之潛望鏡，其構造如圖 329，由前後顛倒之一套望遠鏡 M ，及通常之望遠鏡 N ，聯合而成。如將望遠鏡前後顛倒使用，所見之物體之像，固較實物小，但視界範圍則為之增大。由外而來之光，先經稜鏡 B 全反射後折入筒內，經 C 之作用，造成實像於 D 。此 D 點適為透鏡 E 之主焦點，故由 E 透過之光線，成為平行線，與筒軸平行。經此顛倒之望遠鏡，可將範圍較廣之光線，收羅入於筒內，使其變成與筒軸平行之光。故若在 E 之後面觀察，所見之像，異常微小。由 E 透出之平行光線，沿筒內進行，更受望遠鏡 N 之作用，使其擴大。此兩套望遠鏡合成之倍率，約為 $1\frac{1}{4}$ 。又由 F 透過之光線，尚未集合以前，須經全反射稜鏡 G 之作用，改成水平方向，造成實像 H 。再經目鏡 I 擴大，成為虛像 L ，且係直立，與外界實物之情況完全一樣，極便觀察。又 MN 全體可在軸周自由轉動，以察各方向發來之光。

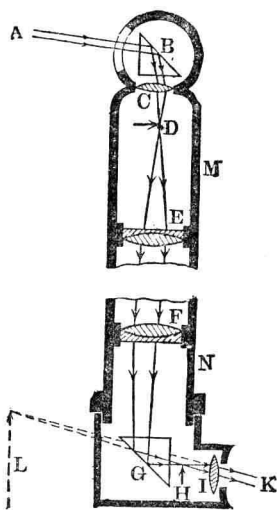


圖 329. 潛望鏡.

§ 351. 測遠器.

測定物體與觀測者之間之距離，亦可使用望遠鏡。為此項目之而設之裝置，曰測遠器。其中最簡單者，將一已知其長之棒，立於觀測物體之傍，由望遠鏡內窺見此棒之長，即可算出距離。其法誠簡便，但有兩重難處：第一，不易得精確之棒以作推算根據；第二，目

的物所在之處，未必隨時均可到達。因此兩層困難，故此法用途頗少。通常爲此目的使用之裝置，如圖 330 及 331 所示。如是者，曰符合測遠器。兩平鏡 B 及 D ，對於水平線各作 45° 之傾斜。中央 E

處亦有兩平鏡 m_1 及 m_2 上下相接，對於水平線 BD ，亦各作 45° 之傾斜，

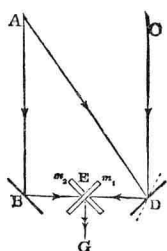


圖 330。

遠距離測遠器。

但與 B 及 D 相反。遠地而來之光線 AB 及 CD ，互相平行，經 B, D, E 等兩度反射後，同沿 G 而進。一將遠處物體之上半截像送來，一將其下半截像送來，彼此相連，若合符節。但若物體在比較近距離時，由 A 點發來之光線 AB 及 AD ，不成平行。此時由 G 望見兩半截之像，不能符合。但如將 D 略爲轉動，使反射光線，左右仍成平行，則 G 處望見之像，又復相連。其相

錯之程度，由 $\angle BAD$ 之大小而定，亦即由 AB 及 BD 之長短而定。但 BD 在器械內，其值一定，結局相錯之程度，由 AB ，即由物體之遠近而定。既能由 D 之轉動，使相錯者和合，則其遠近，亦可由 D 之轉動推知。事實上 AB 之距離遠

大於 BD ，故 D 之轉動甚小，不易得精密結果。因此，實際之器械，並不轉動 D ，而於 D 與 m_1 及 m_2 之間，插一稜鏡 P ，由其左右移

動，使 E 望見之像，互相符合。 P 之移動則由與 P 相連之尺度 S 測出，而 S 之移動，則由 E' 可以望見。此 E' 由上下兩部而成，上部備讀 S 而用，下部與相對之 F 相合，成爲一套伽利略望遠鏡，以備觀測者在極短時間內，配合目的處之用。至於 BD 之距離，亦有一定，在大號者爲 $4\frac{1}{2}$ 呎，在攜帶用者爲 2 呎左右。

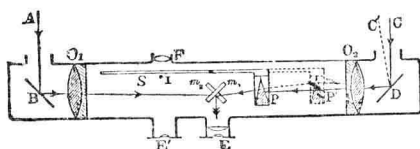


圖 331。近距離測遠器。

§ 352. 照相機。

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，造成實像。如孔穴略大，如圖 332 之 O ，則由物體上一點 A 發來之光線中，其能入室者，為 $A' A''$ 之一部分。同樣，其由 B 而能入室者，為 $B' B''$ 之一部分，故其壁上造成之像為 $A' B'$ 及 $A'' B''$ 。

孔徑愈大， $A' A''$ 等亦隨之而大。故欲得鮮明之像，必須用極小之孔，否則各點相重，輪廓必不清楚。如是

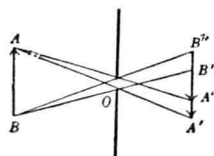


圖 332. 針孔照相。

極小之孔，曰針孔。
pin-hole

利用針孔所造之像，可以照取室外風景之相片，為此而設之裝置，曰針孔暗箱。係於針孔對壁，放一照相用乾板或膠製之軟片，其上塗有氯化銀或溴化銀等藥品，受光照及，發生化學變化，其程度隨光之強弱而異。既受光後，投入特製之藥液內，其受光部分變作黑色，濃淡隨光之強弱而定，是曰顯像。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。如是而成之畫，明暗與所照景物恰相反，故曰陰畫，或曰底片。將陰畫放在塗有感光藥之紙上，露出光中曬之，然後再同樣經顯像定像，即得明暗與原物一致之畫，是曰陽畫，亦即相片。

利用針孔，固可照取相片，但孔大則像模糊，孔小又需時頗久，不適於用。反之，凸透鏡亦同樣可造成實像，且能收斂多量之光，又不致模糊，故通常之照相機，概用

photographic camera

透鏡。同時暗箱之構造亦異，如圖 333，由折疊之軟壁而成，可伸可縮，俾插放乾板處，恰在鮮明之像之位置上。

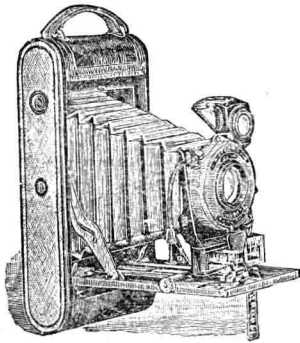


圖 333. 照相器。

乾板上照出像之大小，由照相物鏡之焦點距離而定，其焦點距離愈長者，照出之像亦愈大。照相物鏡之焦點距離，因構造複雜，不及單透鏡簡單，大抵則為節光板與乾板間之距離。通常以此項焦點距離等於 25 厘米時照得之相，其倍率稱為 1。故焦點距離等於 50

厘米之物鏡照得者，其倍率為 2；而 5 厘米照得者其倍率為 $\frac{1}{5}$ ，餘倣此。

又如圖 334， O 表照相器 A 之物鏡， B 表

其乾板位置， P 為所欲照取其相之實物。如透鏡無誤差，則 P 上一點，在像上亦成一鮮明之點。但在 P 前之一點 P_1 或 P 後之一點 P_2 ，在像上均不能成點，而各成一小圓。由明視距離觀之，此項小圓對於眼所張之角，在 1 分以下者，目力不能察見。即圖 332 中之 $A'A''$ 對於在明視距離之眼之張角，若在 1 分以下，即 $A'A''$ 之長，在 0.07 厘米

使用之透鏡曰照相物鏡，俗稱鏡頭，通常均由三個以上之透鏡合成，以求避免種種誤差。又節制光量之裝置，曰節光板，其孔徑之大小，可以任意配合，大都插入透鏡系之中間，一方面避去歪曲，他方面又可避去非點行差。

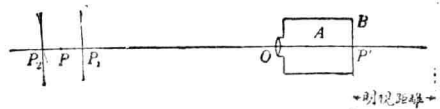


圖 334. 焦點之深度。

以下者，眼中當不覺其模糊。同樣，在乾板上，亦能造成鮮明之像點。假定 P_1 及 P_2 之像，視角均各為 1 分，則在此兩點間之各點，雖遠近不同，而在相上，則同樣鮮明。此範圍 P_1P_2 ，曰照相物鏡之焦點深度。

depth of focus

照相物鏡之露光時間，由其焦點距離對於其有效孔徑之比，為

time of exposure

決定。例如焦點距離等於有效孔徑之四倍半，則以 $f:4.5$ 或 $\frac{f}{4.5}$

表之；如為 6 倍，則以 $f:6$ 或 $\frac{f}{6}$ 表之，餘仿此。如有一照相器，其物鏡之焦點距離為 36 種，當節光板全開時，有效孔徑為 8 種，此時即成為

$f:4.5$ 。如將其節光板收縮至有效孔徑 6 種，即成 $f:6$ 。同樣收縮至 4.5 種及 3 種時，即成為 $f:8$ 及 $f:12$ 矣。此處所用之 $f:4.5, f:6,$

$f:8, f:12$ 等記號，曰孔比。露光時間應與孔徑自乘為比例，與焦點

aperture ratio

距離自乘為反比例，即與孔比之平方為比例。故由孔比，逕直可以

表 46. 露光時間

孔比	$\frac{f}{4.5}$	$\frac{f}{6.3}$	$\frac{f}{9}$	$\frac{f}{12.5}$	$\frac{f}{15}$	$\frac{f}{50}$
露光	1	2	4	8	32	128

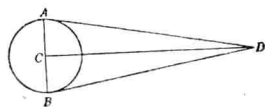


圖 335. 畫角。

推知露光之時間，如用 $f:4.5$ 時之時間為 1，則其他所須之露光時間，如表 46 所示。此等孔比，均於照相物鏡上，一一記有之。

照相物鏡中，又有 $50^\circ, 60^\circ$ 等記號，如圖 335， AB 表相上最鮮明之部分， CD 表焦點距離，則 $\angle ADB$ 曰照相物鏡之畫角，其值愈大者，相中

angle of image

鮮明部分愈廣。通常物鏡畫角約為六七十度，最大亦不能超過八十度。如用特殊之物鏡，可以增高至九十度以上，是為廣角物鏡。

wide-angle objective

又照相物鏡因其特殊之性質，有種種與之相當之名稱，以區別之。例如無色物鏡，係對於 C 線及 F 線施以救正者；全無色目鏡，係

achromatic

apochromat

對於 C, F 及 D 三線，均能一致者；直線物鏡或整像物鏡，係無歪曲誤

rectilinear

orthoscopic

差者；成點物鏡，返點物鏡，同點物鏡及真點物鏡等，均無非點行差者；

stigmat

anastigmat

orthostigmat

verastigmat

無球差物鏡則對於球行差及色行差均無之

aplauatic

第五章 光之分散

§ 353. 分散.

以上各章所論之光,均就其振數一定不變者而言,如是者曰單光,而其波線則曰單線。實際之光,決無如是簡單者,大都由振數不等,即波長不同之若干光波,混合而成,是曰複光。

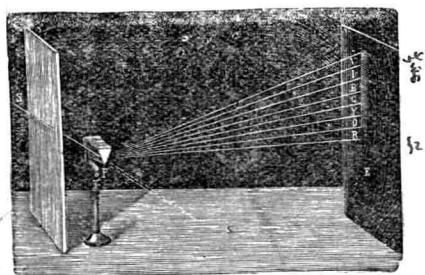


圖 336. 光之分散.

透過細孔之日光,經稜鏡屈折後,在對壁現成一系列彩色,如圖 336,色之次序,由上而下,爲紫,藍,青,綠,黃,橙,紅,中包含一切之色,此七種僅就其大致而言。此種現象,曰光之分散。如用透鏡將此各色之

光收斂成爲一點,仍成白光。由是可知,白光實由屈折率不同之無數單光合成。複光經稜鏡分散後,各按其屈折率次序,排成一系列之彩色,曰景。透過細隙之光,不僅一條,故在對壁造成之景,亦不免有若干單光,重疊在同一之點上。欲免重疊,可將透過稜鏡後之光,用一透

鏡收斂之，則各色之光，各集於不同之點，決不混同，如是而得之景，曰**純景**。或將日光所透過之細孔，極力收縮，成一狹窄細縫，亦可減少各光相重之機會，此縫曰**細隙**。
pure spectrum
slit

§ 354. 景析器。

為便於觀察計，將上述裝置，連成一套，是為**景析器**，亦稱**分光器**，如圖 337。A 曰**視軸儀**，為一圓筒，一端有一凸透鏡，細隙 S 即裝在透鏡之焦點。中央 P 為稜鏡，B 為觀察景之望遠鏡。進入 S 之白光，經透鏡屈折後，平行投射於稜鏡，由此透過之分散光，再透過望遠鏡之物鏡，始結成

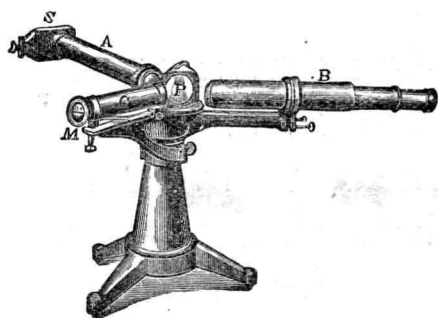


圖 337. 景析器。

純景。器內尚有另一圓筒 C，一端有凸透鏡，在其焦點處裝有精密之刻度，自後用燈光照之，使其射至稜鏡時已變成平行光線，再經稜鏡反射後，成為實像，即生於純景出現之處。在望遠鏡內，可見純景與刻度相並而立，極便於研究各色光之位置。又有略去圓筒 C，而將 B

裝在刻度圓盤上，使其能在垂直軸周轉動，由此可以測定屈折率及稜鏡之屈折角，如是者，曰景計。
spectrometer

§ 355. 夫牢因和斐線。

由日光造成之景，曰日景，由景析器之望遠鏡中觀察，乍見其由紫至紅，連續成爲一片，但細察之，即見其中實含有無數暗線，從其發見者之名稱曰夫牢因和斐線
solar spectrum
dark line Fraunhofer's line
如插圖，其特別顯著者，有 $A, a, B, C, D, E, b, F, G, H$ 等名。其中之 A, a, B, C 等線，在於紅色部內， D 線在黃色部內， E, b 線在綠色部內， F 線在青色部內， G 線在藍色部內， H 線在紫色部內。用此等暗線，表示單光種類，較爲正確，且又便利。例如言 D 線時，即指與日景中的 D 線相當之光。此種暗線，爲數頗衆，夫牢因和斐 所發見者，已有 600 以上，其後更經部盧斯脫，托龍等詳加檢查，知其確數，當在 4,000 以上。各暗線在景中各佔據一定之位置，但有若干條須太陽接近地平線，始能出現，或縱能出現，但非至此時不十分顯明者。此種暗線，大約由於地球周圍之空氣層及水蒸氣等之作用而來，特曰地上線
telluric lines
又投食鹽入本生焰內，則發黃光，爲鹽中之鈉所特有之光，恰與 D 線相當。此光隨時可得，對於視覺極易感受，

故多用之以作測定屈折率之光源。又在稀薄輕氣內放電，則發與 C 線及 F 線相當之光，亦為常用之光源。

§ 356. 分散率.

平行之白光，經稜鏡分散後，成為各色單光，各沿一定方向射去。任取其中之兩單光而論，必作一定之角，即以此角表此兩單光對於稜鏡之分散度。分散度與此在兩單光中央之線所受之偏向之比，曰構成此稜鏡之物質之分散率。

dispersive power

命 θ 表稜鏡之屈折角，假定 θ 之值頗小，則其最小偏向 δ 之值亦小，由 §332，知 $\mu = \sin \frac{\theta + \delta}{2} \div \sin \frac{\theta}{2}$ ，故

$$\mu = \frac{\delta + \theta}{\theta}, \quad \text{或} \quad \delta = (\mu - 1) \theta.$$

命 μ_C, μ_F 及 δ_C, δ_F 表 C, D 兩線之屈折率及最小偏向，則

$$\delta_C = (\mu_C - 1) \theta; \quad \delta_F = (\mu_F - 1) \theta.$$

故 C, F 兩線之分散度，當為

$$\delta_F - \delta_C = (\mu_F - \mu_C) \theta.$$

又在 C, F 兩線之中央，適為 D 線，命 μ_D 及 δ_D 表 D 線之屈折率及最小偏向，則 $\delta_D = (\mu_D - 1) \theta$ ，亦同樣成立，再命 d 表此稜鏡對於 C, F 兩線之分散率，則

$$d = \frac{\delta_C - \delta_F}{\delta_D} = \frac{\mu_C - \mu_F}{\mu_D - 1}.$$

用各種物質造成稜鏡，由同樣實驗，即可算出其分散率，其重要者如表 47。

如用屈折率不同之兩種玻璃各造成一

稜鏡，互相重合，且一倒一正，只須屈折角適宜，即可造成

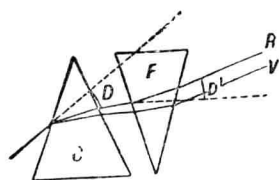


圖 338. 無色稜鏡。

如兩稜鏡之屈折角，磨成 $\theta_C : \theta_F = 0.027,4 : 0.007,3$ ，則如圖 338，前者所起之分散，適與後者相抵消，但對於 D 線之偏向，則一為 $0.516 \theta_C$ ，一為 $0.754 \theta_F$ ，仍不免略有殘餘。結局與一稜鏡之作用相同，僅無分散而已，如是者，

表 47. 分散率

物質	μ_D	$\mu_F - \mu_C$	d
水	1.333,0	0.006,0	0.018,0
二硫化碳	1.633,3	0.034,5	0.054,7
醚	1.356,6	0.005,2	0.014,9
酒精	1.359,7	0.006,2	0.017,4
鈣玻璃	1.516,0	0.007,3	0.014,1
輕鉛玻璃	1.571,8	0.011,3	0.019,7
重鉛玻璃	1.754,5	0.027,4	0.036,3
極重鉛玻璃	1.962,5	0.048,8	0.059,7
水晶	1.544,2	0.007,8	0.012,9
金剛石	2.417,3	0.025,4	0.017,9
溴化銀	2.181,6	0.125,6	0.106,3
空氣 (0°C 76 厘米)	1.000,272,89	0.000,002,95	0.012,1
輕氣	1.000,142,94	0.000,001,95	0.013,6
二氧化碳	1.000,449,22	0.000,004,60	0.010,2

無分散之偏向，或無偏向之分散。例如一用鈣玻璃，一用重鉛玻璃，命 θ_C 及 θ_F 表兩稜鏡之屈折角，則對於 C 線及 F 線之分散度為 $0.007,3 \theta_C$ 及 $0.027,4 \theta_F$ 。



圖 339. 直視稜鏡。

曰無色稜鏡。如兩稜鏡磨成 $\theta_G : \theta_F = 0.754 : 0.516$, 則
 achromatic prism

圖 339, 偏向互相抵消, 僅餘分散, 故在投射光方向上, 可

見其景, 曰直視稜鏡。而用此之景析器, 則曰直視景析器。
 direct-vision prism direct-vision spectrope

§ 357. 無色透鏡。

由 §334, 及透鏡之

焦點距離 f , 與 $n-1$ 成

反比例, 故紅光之 f , 應

較紫光之 f 長。故白

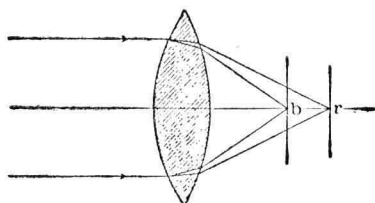


圖 340. 色行差。

光通過透鏡後, 如圖 340, 紫色集合於 b , 紅色集合於 r ,

不相一致, 是曰色行差。透鏡因有此種誤差, 其造成之
 chromatic aberration

像, 不能鮮明。欲避免之, 如圖 341, 再加一凹透鏡, 即將

B 之紫光及 R 之紅光, 同移至 F 矣, 如是者曰無色透鏡。
 achromatic lens

命 f_R, f_V, μ_R, μ_V 表紅紫兩光對於鈣玻璃凸透鏡之焦

點距離及屈折率; $f'_R, f'_V, \mu'_R, \mu'_V$ 表鉛玻璃凹透鏡之各值, 則

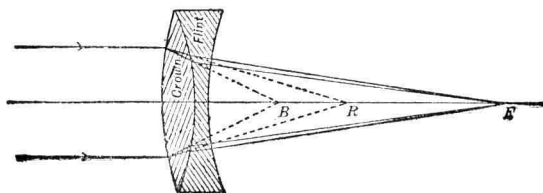


圖 341. 無色透鏡。

$$\frac{1}{f_R} = (\mu_R - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right); \quad \frac{1}{f'} = (\mu'_R - 1) \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right)$$

式中之 r_1, r_2 及 r'_1, r'_2 各表凸透鏡及凹透鏡之曲率半徑。

再命 F_R 表透鏡系之合成焦點距離，則因 $\frac{1}{F_R} = \frac{1}{f_R} + \frac{1}{f'}$ ，故

$$\frac{1}{F_R} = (\mu_R - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (\mu'_R - 1) \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right);$$

$$\frac{1}{F_V} = (\mu_V - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (\mu'_V - 1) \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right).$$

此兩者互相一致之條件，為 $F_R = F_V$ ，即

$$(\mu_V - \mu_R) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (\mu'_V - \mu'_R) \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right) = 0.$$

一方面對於 D 線，應有下列之關係

$$\frac{1}{f_D} = (\mu_D - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right); \quad \frac{1}{f'_D} = (\mu'_D - 1) \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right).$$

再命 d 及 d' 表兩種玻璃 分散率，即

$$d = \frac{\mu_V - \mu_R}{\mu_D - 1}; \quad d' = \frac{\mu'_V - \mu'_R}{\mu'_D - 1},$$

將此兩者，代入上式，即得無透鏡所必須之條件為

$$\frac{d}{f_D} + \frac{d'}{f'_D} = 0, \quad \text{或} \quad \frac{f'_D}{f_D} = -\frac{d'}{d}.$$

§ 358. 虹.

天空中出現之虹，即日光在雨滴內分散之實例。圖 342 之圓 O ，表雨滴， AB 及 $A'B'$ 一束平行日光， B 點之投射角 i ，大於 B' 點之投射角 i' ，故屈折角之 r 亦大於 r' ，結果在滴內相交於 F 。由此反射後，對於 OF 成爲對稱，故出滴外時成爲 DE 及 $D'E'$ 之平行線。命 φ 表角 BOB' ，即 $i - i'$ ，由圖可知其與 $2(r - r')$ 相等。一方面，因

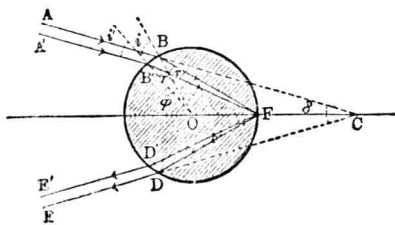


圖342. 雨滴反射。

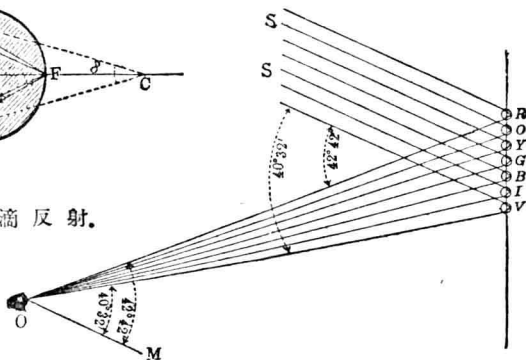


圖 343. 虹之方向。

$$\sin i = \mu \sin r; \quad \sin i' = \mu \sin r',$$

代入 $i' = i - \varphi$ 及 $r' = r - \frac{1}{2} \varphi$, 故得

$$\sin (i - \varphi) = \mu \sin (r - \frac{1}{2} \varphi).$$

因 φ 甚小, 故 $\sin \varphi = \varphi$, $\sin \frac{1}{2} \varphi = \frac{1}{2} \varphi$, $\cos \varphi = 1$, $\cos \frac{1}{2} \varphi = 1$, 將上式展開後代入之, 即成爲

$$\sin i - \varphi \cos i = \mu \sin r - \mu \frac{1}{2} \varphi \cos r.$$

再代入 $\sin i = \mu \sin r$ 之關係, 即可知其最後結果成爲

$$\cos i = \sqrt{\frac{\mu^2 - 1}{3}},$$

凡投射角能滿足此條件者, 再出水滴, 又成爲平行。日光本爲複光, 其屈折率隨色而異, 就紅光及紫光兩種計算之, 其值如下:

$$\mu_R = 1.329, \quad i_R = 59^\circ 39', \quad r_R = 40^\circ 30';$$

$$\mu_V = 1.344, \quad i_V = 58^\circ 46', \quad r_V = 39^\circ 31'.$$

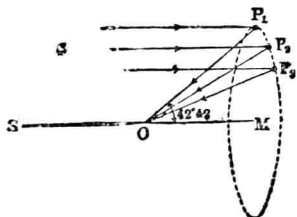


圖 344. 虹之弧形。

再命 δ 表光之偏向，即圖 342 中 AB 與 DE 間之角，則 $\frac{1}{2}\delta = 2r - i$ 。
對於紅光及紫光加以計算，即得

$$\delta_R = 42^\circ 42'; \quad \delta_V = 40^\circ 32'.$$

圖 343 之 O 點表觀測者之位置， SR 表日光， OM 爲其平行線。由上述原理，知與 OM 作 $42^\circ 42'$ 之角度之雨滴 R ，對於 O 送來紅光，而與 OM 作 $40^\circ 32'$ 之 V ，則送來紫光。以 OM 爲軸，使 OR 及 OV 轉動而成之圓錐體，如圖 344，凡在其上之雨滴，如 P_1, P_2, P_3 等，送入眼中之光，均同一偏向，故呈同色。故虹恒現爲圓弧，紅色以 $42^\circ 42'$ 爲半徑，紫色以 $40^\circ 32'$ 爲半徑，其餘各色，按景之順序介在其間。

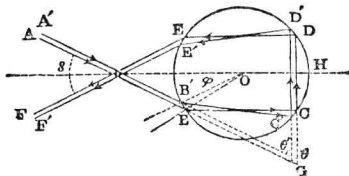


圖 345. 雨滴內二次反射。

光線在雨滴內反射一次所得之結果，曰一次虹。此外尚有反射數次始出滴外者，亦各有與之相當之虹出現，不過反射次數愈多，光愈微弱，不易察見而已。其中以反射兩次者，尙易觀察，特稱曰二次虹，其光線徑路如圖 345。照前次同樣推算，其投射角條件應爲

$$\cos i = \sqrt{\frac{\mu^2 - 1}{8}}.$$

就紅光及紫光計算之，其值各如下：

$$i_R = 71^\circ 59', \quad r_R = 45^\circ 42';$$

$$i_V = 71^\circ 29', \quad r_V = 44^\circ 52'.$$

又其偏向 δ 應等於 $\pi - 2(3r - i)$ ，

同樣就紅光及紫光計算之，其結果如下：

$$\delta_R = 49^\circ 46'; \quad \delta_V = 53^\circ 46'.$$

由此可知，二次虹內各色之順序，恰與一次虹內相反，如圖 346 所示。

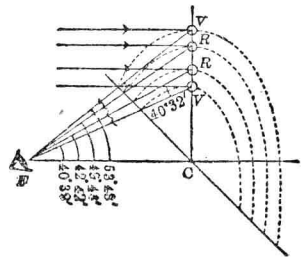


圖 346. 虹之位置。

§359. 景之種類.

由分散造成之景,形狀隨光源性質而異,可為三種:

(1) 固體之景: 耐熱之固體,如大理石金屬等,受熱時,最初僅有熱線放出,而不發光。其溫度升高至 600°C . 時,始有紅光放出,用景析器察之,亦僅見紅色之一部分。溫度再升至 $1,000^{\circ}\text{C}$. 時,黃色部分,相繼出現,至 $1,600^{\circ}\text{C}$. 時,固體達於白熱狀態,景之全部亦同時完成,由紅而紫,連為一片,與日景相似,而無夫牢因和斐線,故曰連續景。continuous spectrum 如燭光,洋燈,電燈等所發出之光,均可造成此類之景。

(2) 氣體之景: 前述食鹽在本生焰內所發黃光,其景現為黃線,位置與 D 線相當。細察之,此黃線實由兩條細線並列而成,係鈉蒸氣之光,通過細隙時造成之像。故知灼熱之鈉蒸氣發出之光,為波長不同之兩種單光,在輕氣中放電時現出之 C 線及 F 線,亦然。凡在景內現出之線,曰景線,因其有光,又曰輝線,其景則曰輝線景, spectral lines bright lines, bright-lines spectrum 或簡稱線景。景中現出之線數及其位置,為各種金屬 line spectrum 之特徵,與使用之鹽類無關。利用此性質;由一種物質之景,可以檢出其所包含之各種金屬,是曰景析術。 spectral analysis 在化學上為強有力之分析法,鎧,鉛,錳,鈷,氮,氣,鏷等之發見,均由此法。

(3)吸收景：在發生連續景之光源；如洋燈弧燈等，與細隙之間，夾入溶液或蒸氣，則其景中即有若干條之暗黑細線或帶狀出現。與此等暗黑處所相當之光，在通過溶液或蒸氣時，被其吸收，故成此狀，是曰吸收景，與此相對，前兩種則曰放射景。各物質所吸收之光，各有一定，故吸收景亦可分析物質。圖 347 之 L 表光源， C

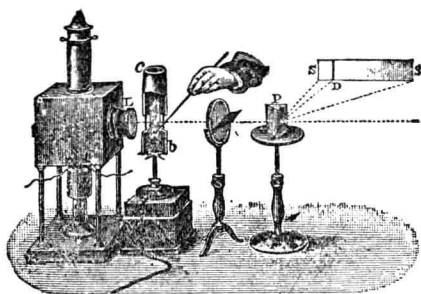


圖 347. 景線逆出之實驗。

表鈉之黃光， SS 表景。熄 C 則 SS 現連續景；燃 C 則於 D 處現一暗線；熄 L 則於同一 D 處現鈉所特有之輝線；再燃 L ，又現暗線。用他種物質之

溶液或蒸氣，代替鈉實驗之，其特徵之線，亦莫不如此，是曰景線之逆出。一切物質在低溫時所選擇而吸收之光，即其自身灼熱時所發之光，此關係曰克希荷夫定律。

Kirchhoff's law

§360. 日景。

太陽為一灼熱之固體，應造連續景，因其周圍有比較低溫之各種物質之蒸氣存在，據克希荷夫定律，應各

由日光中選擇其本身灼熱時所發之光而吸收之，故日景內現出多數之夫牢因和斐線。此等暗線所代表之元素及其波長，如表 48。除表中所列者而

表 48.

外，尚有鎳，鏷，鏷，鉻，鈷，碳，鈳，硅，鉛，銻，銻，銀，氫等，共計有 58 種元素存在，均可由其景線檢出。

對於其他之天體，亦可同樣檢出其含有之元素。月景與日景全同，因月光純由日光反射而來所致。其他之行星恆星等之景，亦大同小異，可知其構成之物質，大致與地球相似。亦有現輝線景者，則為尚未凝固之氣態。

線	元素	波長 $\mu\mu$
A	氧	759.4
B	氧	686.7
C	氫	656.3
D ₁	鈉	589.6
D ₂	鈉	589.0
E	鐵鈣	527.0
b	鎂	518.4
F	氫	486.1
G	鐵鈣	430.8
h	氫	410.2
H	鈣	396.9
K	鈣	393.4

§361. 物體之色。

投射至物體表面之光，一部分在表面上受亂反射，一部分則透入物體內部，進入其中少許距離，始重行反射而出。當其透入之時，受物體之選擇吸收，退出者為殘餘之部分，進入吾人之眼，由此而識其色。物體對於投射白光中之各單光，均以同一之比例射回者，呈白色；全部吸收無餘者，呈黑色。例如玫瑰，除紅光外，全部吸收，故在白光中呈紅色；以其他之單光照之，即呈黑色矣。

有種物質所呈之色，因投射光透進其內之深淺不

同而異。例如葉綠素，透過其薄層者呈綠色，而透過其厚層者，則呈紅色。因此物質對於綠光之吸收率較紅光為強，透入愈深，綠光被吸收之量愈多，其殘餘之部分中，紅光應較強，故呈紅色。如是之現象，曰二色性。有種物質對於某一種單光，絲毫不容其侵入，僅能由其表面全部反射而回。據理論及實驗，知此項全部反射而回者，即此物質自身所吸收之單光。故透過此種物質之光，與由其表面反射之光，色各不同。例如金箔反射之光呈黃色，而透過之光，則呈青綠色，如是之現象，曰表面色。

dichromatism

surface color

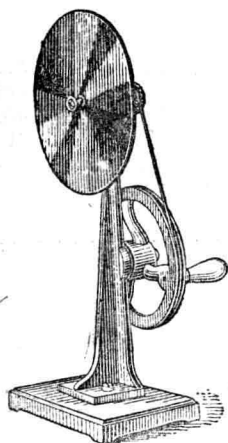


圖 348. 牛頓色板。

§362. 色之混合。

實驗色之混合，以用圖 348

之牛頓色板為便。各扇形塗作景中各色，急轉之，由視覺之持久性，前一扇形在網膜上引起之色感未退，後一扇形已繼之而來，相重結果，與色之混合無異，成為白色。如變更扇形上所塗之色，結果當然亦隨之而異，如表 49。表中紅綠青三色，雖可混成白色，但如將其中各成分之

Newton's color disk

比例分量偏輕偏重，即可成爲自然界內一切色光。換言之，任何色光均可由紅綠青三種單光配成，故此三色曰原色。又白色不限於由三

primary colors

原色合成，例如由黃與青，或紫與綠，均可混成，觀表自明，如是互相混合可成白光之兩色，曰互爲餘色。

complementary color

又著色之溶液或圖畫用顏料等，互相混合之時，其性質又與色光之混合不同。例如黃光與青光混合，應生白色，而黃色顏料與青色顏料混合，則成綠色。用景析器檢查之，即知由顏料反射而出之光，決非單光。例如黃色顏料反射者爲紅、黃及綠色之光，青色顏料反射者，爲青、綠及紫色之光，其餘各色單光，悉被吸收。故此兩色顏料混合後，所能共同反射者，唯綠耳，故現爲綠色。

三色版即由紅黃青三種顏料混成。

three color printing

表 49. 色之混合。

紅+綠=黃
綠+青=孔雀青
青+紅=紫
紅+綠+青=白

§363. 色之感覺。

光色由其波長或振數而定，已詳前述。但使吾人視覺發生一定之色之感覺者，並不限於一定之波長。例如景中全部單光相合，或互爲餘色之兩單光相合，均可發生白色感覺。又其他任何色彩，莫不可由紅綠青三原色適宜配成。光色與音調，同由振數而定，但音調高低，可由聽覺分析成爲單音，光色則不能由視覺析成單光。

color sensation

色之感覺有三要素，一曰種類，二曰飽和度，三曰強度。種類云者，如紅黃等之區分。任何一色，除其本身而外，大都混有白色，如是者，曰不飽和色，或曰不純色；與此相對，毫無白色混入者，曰飽和色，或曰純色。例如在暗室內，於白紙上現出之景，各色均為飽和色，但若再用白光照之，即成不飽和色矣。飽和度云者，即指混入白光之量而言。同一之色光，其引起視覺之強弱，由光能之多寡而定。異色之光，引起視覺之強弱，隨種類而異，不能僅由光量決定之。景中各部分之能，並不一律，由紫到紅，愈進愈增。但在暗室內使景生於書上，則以黃色部分照及之處，最為鮮明，橙及綠次之，愈近兩端愈弱。

關於色感之發生，有楊·赫爾姆霍斯之理論，Young-Helmholtz's theory 假定網膜上對於色光之視神經可分為三種：一種專受紅光之刺戟，一種專受綠光之刺戟，一種專受紫光刺戟。

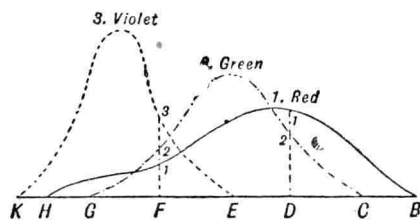


圖 349. 色之感覺。

如圖 349，引直線 KB ，長短恰與景中由紫色部之 K 線起，至紅色部中之 B 線止之距離相等。在各點各設縱坐標表此三種神經個別之刺戟程度，如圖中之三種曲線。由圖可知紅視神經之最大感覺在橙紅，綠者在綠，紫者在青紫，而在 H 與 B 間之各色，均能生紅之感覺，僅強弱程度不同而已。同樣在 G 與 C 間者，均可引起綠色感覺，在 K 與 E 間者，均可引起紫色感覺。例如鈉光之 D ，由紅綠兩種感覺混合而成，其混合比例，則由 D_1 及 D_2 表出之。又氫氣之青線 F ，則由紅綠紫三種感覺合成，其混合之比例，則由 F_1 ， F_2 及 F_3 表出之。通常人之眼內，對於此紅綠紫三種之視神經，莫不全備。如缺去其一種或兩種，即成色盲。色盲中最常見者，大都為缺少感受紅光之神經。在此種

color blind

色盲者之眼中，鈉之黃光，將現為綠色。又互為餘色之兩種單光，如紅與青綠，同時引起之感覺，其比例恰與通常白光中紅綠紫三種配合之比例相同，故感覺其合成結果為白色。

§364. 螢光及磷光。

通常之物體受光線或其他之輻射線照及，將輻射而來之能，吸收於物體之內，變成熟能，使此物體之溫度升高，同時並化為熱線，由此物體向四周放射而出。但亦有若干特殊之物質，吸收波長一定之輻射能後，所放出者並非熱線而為別種波長之光波。例如導一線日光，射入石油內，所到之處，悉呈青藍色，透入葉綠素之酒精溶液內，則呈血色。固體中如螢石，fluorspar亦有同樣性質。故凡具有如是性質者，總稱之曰螢光體，fluorescing body而此等現象，則曰螢光。fluorescence各種輻射之中，以紫外線對於刺戟螢光之作用為最強，此外如陰極線（參照 §573）X線（參照 §624）及鐳之放射（參照 §582）等，亦均有同樣之性質。

又有若干種物質，不特受輻射照及時，放出別種波長之光，即將輻射來源取去以後，在相當長久之時間內，仍可自行發出其所特有之光。例如鹼金屬中之鈣，鋇，鐳等之硫化物，若曝於日光中，暫時之後，移入暗室內，即能發出着色之光，可歷數時間之久，始行消滅。此外如金剛石，方解石，及螢石等，亦均有同樣性質，但不及鹼金屬之硫化物顯著而已。如是之現象，曰磷光，phosphorescence具有此性質之物體曰磷光體。phosphorescing body此外如紫外線，陰極線，X線及鐳之放射等，均可刺戟磷光。又將磷光體研成粉末，裝入蓋斯拉管（參照 §572）內，作真空放電之實驗，全管即發出異常強烈之磷光。又磷光體當其在勵發狀態中，即正在放出磷光之時，如受紅外線或紅線照及，最初之一瞬間，固可使其磷光增強，但為時極暫，一轉瞬間，不但不增強，且反而全部消滅。利用此項性質，可以檢出紅外線或紅外部內吸收線之存在。

第六章 光之干涉

§365. 夫累涅爾之實驗。

音有干涉現象，光波亦然。由兩光源發出之光，波長相同者，互相重合時，兩陵或兩谷相遇，其明增倍，陵谷相遇，無光可見，結果成爲明暗交錯之現象，曰光之干涉。
interference of light

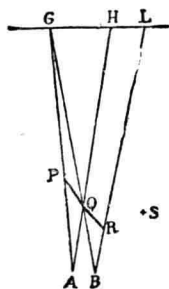


圖 350.

夫累涅爾之鏡實驗。

發生干涉之必要條件，爲由兩光源發出之光，波長須絕對相等。事實上，頗不易得絕對相等之波長之兩光源，通常均用同一光源而以其由反射或屈折造成之兩像代替之。圖 350 之夫累涅爾之鏡實驗，即本此而成，用鈉光照細鉛直隙 S ，作成光源。兩平鏡 PQ 及 QR 相交之稜 Q ，亦成鉛直線，其夾角 PQR 幾等於 π 。 S 經此兩平鏡造成像 A 及 B ，此即實驗所用之兩光源，

由圖知 HQG 爲兩光源共同照及之處，干涉現象應在此處出現。光源爲鉛直線，故干涉結果，成爲明暗交錯之雙曲線柱，若自 GH 用望遠鏡觀察，即見明暗交錯之一列直線，曰干涉條紋。
interference fringe

不用兩平鏡而以複稜鏡。
biprism

代之，如圖 351，亦可。由光源 S 發來之光，經複稜鏡 P 屈折鏡，透過光線，宛如自 A 及 B 發出者然，干涉結果，亦現爲明暗交錯之條紋。

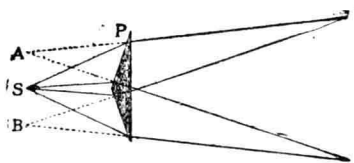
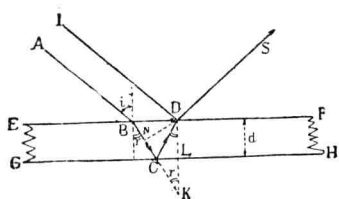


圖 351. 複稜鏡。

作夫累涅爾實驗時,使用光源之波長不同,則干涉條紋中相隣明暗兩線間之距離,亦隨之而變。波長愈長,此項距離愈遠。故若實驗時所用者非單光,而為通常之白光,則其干涉條紋,即成一彩色帶,與景之狀相同。由此亦可證明光色之異,由波長不同而生。又紅線距中央最遠,紫最近,故知七色中,紅之波長最長,紫色最短。

§336. 薄膜之色.

白光射至透明薄板上,其反射光及透過光均呈彩色,且兩者互成餘色。例如水面之油層所呈之色,隨其厚薄而異。如用單光實驗,則反射光及透過光,均現為明暗交錯之條紋。此乃由表面反射之光,與由底面反射者,互相干涉而成。至於透過光,則由直接透過者,與在內部經過內反射後始
internal reflection
行透出者,互相干涉而成。



§367. 反射光之色.

如圖 252, 平行光線

圖 352. 薄膜反射光之干涉.

AB 及 ID 投射至薄膜 $EFHG$ 時,由 B 進入之光,屈折後沿 BC 至 C ,反射而上,自 D 復出空氣中,再沿 DS ,與 ID 之反射

光合而爲一。但兩者所經由之路既異，其相當然不能一致。試引 DN 與 BC 垂直，表投射波達於 D 點時之波面，在 ID 上之 D 點，與在 $ABCD$ 上之 N 點，應屬於同一之相。即兩光線之行差應爲 $NC + CD$ 。但 $DL = LK = d$ ，故知行差 $= 2d \cos r$ 。命 λ 及 λ' 表空氣及透明體內之波長， v 及 v' 表其速度， μ 表由空氣入透明體內之屈折率， n 表光之振數，則 $\mu = \frac{v}{v'} = \frac{n\lambda}{n\lambda'} = \frac{\lambda}{\lambda'}$ ，故得

$$\frac{2d \cos r}{\lambda'} = \frac{2d \mu \cos r}{\lambda}$$

即行差 $2d \cos r$ 中所含有之 λ' 之數，與 $2d \mu \cos r$ 中所含有之 λ 之數相等。故將此路差換算成爲空氣中之路差時，應作 $2d \mu \cos r$ 。就光學而言，如透明體較空氣密，則在 C 點之反射，不生相之變化，而在 D 點之反射，則須受 $\frac{\lambda}{2}$ 之遲滯。反之，如透明體較空氣疎，則在 C 點應受 $\frac{\lambda}{2}$ 之遲滯，在 D 點無變化。總之，此項路差，當如下式：

$$\text{路差} = 2d \mu \cos r \pm \frac{\lambda}{2},$$

密則取正號，疎則取負號。路差成爲 $\frac{\lambda}{2}$ 之奇數倍時， DS 方向之反射光極弱；路差成 $\frac{\lambda}{2}$ 之偶數倍時，此方向之反射光極強。故

$$d \mu \cos r = 2m \frac{\lambda}{4} \quad \text{時極弱；}$$

$$d \mu \cos r = (2m \mp 1) \frac{\lambda}{4} \quad \text{時極強。}$$

又如用一楔形薄板作此實驗時，凡能使

$$d \mu \cos r = 0, 2 \frac{\lambda}{4}, 4 \frac{\lambda}{4}, \dots \quad \text{滿足之點，成爲暗黑；}$$

$$d \mu \cos r = \frac{\lambda}{4}, 3 \frac{\lambda}{4}, 5 \frac{\lambda}{4}, \dots \quad \text{滿足之點，成爲明亮，}$$

即楔之稜應成爲暗黑，由此作等距離之各處，成爲明暗相間之條紋。如用白光實驗，即由明暗一變而成彩色。

§338. 牛頓環。

平板上載凸透鏡，其接觸點周圍成空氣薄層，自上用單光照之，由前節，知接觸點成爲暗黑，周圍則現明暗條紋，作同心圓形，如

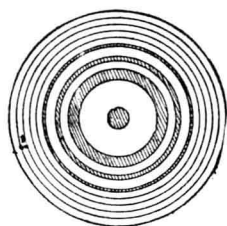


圖 353. 牛頓環。

圖 353, 曰牛頓環。如改用白光照之，則成爲彩色之環。

Newton's ring

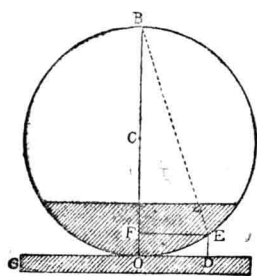


圖 354. 牛頓環與波長。

用單光造成牛頓環後，測出環之半徑，即可求得單光之波長。如圖 354，命 D 表第一暗環發生之處，以 d 表此處空氣層之厚，即 ED ； R 表透鏡之半徑，即 OC ； ρ 表環半徑即 DO 或 EF 。因 $EF^2 = OF \cdot FB = OF(OB - OF)$ 即 $\rho^2 = d(2R - d) = 2Rd - d^2$ 。但 d 遠在 R 之下，略去 d^2 ，得 $\rho^2 = 2Rd$ 。

此時之空氣層與前節所述之透明體相當，即 $\mu = 1$ 。又單光係由上方垂直投射，故 $i = 0, r = 0$ ，因此， $d \mu \cos r = 2m \frac{\lambda}{4}$ 成爲

$$d = 0, \quad 2 \frac{\lambda}{4}, \quad 4 \frac{\lambda}{4}, \quad 6 \frac{\lambda}{4}, \dots, \quad 2m \frac{\lambda}{4}.$$

即第一暗環處空氣層之厚為 $\frac{1}{2} \lambda$, 第二暗環處厚 λ , 第三暗環處厚 $\frac{3}{2} \lambda, \dots$. 如命此等暗環之半徑為 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$ 等, 則因 $\frac{\lambda}{2} = \frac{\rho^2}{2R}$,

$$\therefore \rho_1^2 = R\lambda, \quad \rho_2^2 = 2R\lambda, \dots, \rho_3^2 = 3R\lambda, \dots$$

由實測決定 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$ 等, 即可由上式將波長 λ 算出。

以上係就透明體之薄層而言, 如 d 甚大, 則即不能適用。因 d 過大, 如假定 λ 能滿足光輝極強之條件, 則與 λ 略微相差之光, 又將滿足光輝極弱之條件, 再略差又將滿足其次之光輝極強之條件矣。結局各種波長同時出現, 故不能發生干涉現象。牛頓環以中央最為顯著, 愈遠愈淡, 即屬此理。

§339. 透過光之色。

由薄層透過之光, 其情形亦與反射光同。圖 355 之光線 AB , 進入層內, 迭在 C 及 D 兩度反射後, 始由 J 出沿 JS 方向而進, 與逕由 ID 而來, 經 D 及 J 兩度屈折而出

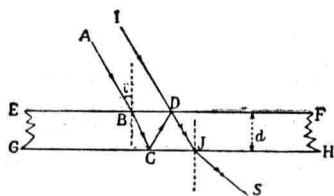


圖 355. 透過光之干涉。

之光, 合而為一。此兩者之路差, 換算成為空氣中數值, 仍為 $2d \mu \cos r$, 與前相同。如在光學上, 薄層之物質較空氣密, 則在 C 及 D 之反射, 其相不變, 或全體進前 $2 \frac{\lambda}{2}$ 。反之, 如較空氣疎, 則應受 $\frac{\lambda}{2}$ 之遲滯, 或全體共受 $2 \frac{\lambda}{2}$ 之遲滯。總之,

其關係成爲 $2d\mu \cos r \pm 2\frac{\lambda}{2} = (2m \pm 1)\frac{\lambda}{2}$ ，即

$$d\mu \cos r = (2m \mp 1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{時，光輝極弱；}$$

$$d\mu \cos r = 2(m \mp 1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{時，光輝極強。}$$

結果恰與反射光相反，故用單光時，兩者之明暗正相反對；用白光時，兩者互成餘色。又若物質之層過厚，亦與前節牛頓環處同一理由，不能發生干涉現象。

§370. 邁克爾遜干涉計。

前節所述之干涉，限於透明體之薄層，始克發生，亦有路差甚大，依然得見者，如邁克爾遜干涉計，即其實例。
 Michelson's interferometer

邁克爾遜干涉計之構造，

如圖 356。兩玻璃平板 G_1 及 G_2 互相平行。 G_1 之右面塗有一層薄銀，使其反射光與透過光之光強相等。由光源 V 而來之光，經稜鏡分析後，僅容一定波長之光，由細隙 S 中通過。再經稜鏡屈折後，變成平行光線至 G_1 。一部分之光，由 G_1 反射向 G_2 而去，透過 G_2 後，遇平鏡 M_2 折回，再透過 G_2 及 G_1 而入於望遠鏡 E 之中。其他一部分透過 G_1 後，遇 M_1 折回，再受 G_1 之反射，亦進入望遠鏡 E 內。命 R 表 M_1 因 G_1 而造成之像（圖中未繪出，但其位置則在 M_2 附近），則由望遠鏡內，可以

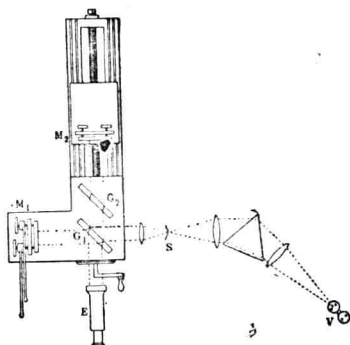


圖 356. 邁克爾遜干涉計。

望見 R 與 M_2 間之空氣層之干涉現象。命 d 表 R 與 M_2 間之距離，最初由 G_1 反射而回之部分，當其反射之時，應受 $\frac{1}{2}\lambda$ 之遲滯，而最初由 G_1 透過之部分，再折回至 G 而行反射時，其相不生變化。故此兩者之路差，可由 $2d\mu \cos r - \frac{1}{2}\lambda = (2m - 1)\frac{1}{2}\lambda$ 表出，即

$$d\mu \cos r = 2m\frac{\lambda}{4} \quad \text{時，光輝極弱；}$$

$$d\mu \cos r = (2m + 1)\frac{\lambda}{4} \quad \text{時，光輝極強。}$$

上式中之 d ，其值恒一定不變，而 r 之值，則愈近 M_1 及 M_2 之邊緣愈大。如以 M_2 之中點為圓心，畫一圓周，其上各點之 r 均相等。故由望遠鏡 E 內望見者，為明暗交錯之環。

如將 M_2 下部附屬之螺旋，略微轉動，使 d 增加，則環徑 r 之值，對於同一之 m ，必隨之增加。假定 M_2 在某一位置時，在某處現出一暗環，今將 M_2 由此位置平行移動 $\frac{\lambda}{4}$ 之距離，則前此出現暗環之處，此時已變成一明環矣。令 M_2 由此新位置，再平行移動 $\frac{\lambda}{4}$ 之距離，此同一地點，又當現為暗環。即在未移動以前，中央部如為暗黑，則將 M_2 平行移動 $\frac{\lambda}{2}$ 之距離後，中央之部分，依然恢復其暗黑狀態，與未將 M_2 移動時同。準此，則 M_2 每平行移動 $\frac{\lambda}{2}$ 之距離，中央必成為暗黑一次，故若命 M_2 所移動之全距離為 x ，其中央出現暗黑狀態之次數為 n ，則此兩者之間，恆成立下列之關係：

$$x = n\frac{\lambda}{2}.$$

故作此實驗時，只須將次數之 n 精確數出，並於 x 及 λ 之中，任知其一，即可由上式算出其他之數值。據邁克爾遜使用此器，測得鎊蒸氣所發之紅綠青三線，在空氣中之波長，如命為 λ_R , λ_G , λ_B ，其值如下：

$$1 \text{ 呎} = 1,553,163.5 \lambda_R;$$

$$1 \text{ 呎} = 1,966,249.7 \lambda_G;$$

$$1 \text{ 呎} = 2,083,072.1 \lambda_B.$$

有此，則柝原器縱令失去，亦不難以此為根據，另行製造之。

第七章 光之遠折

§371. 遠折.

導日光由細隙進入暗室,再經第二細隙,其狹窄更甚於第一細隙。此時對壁上,在通常之細隙之像之左右,各有一列彩色現出,與由稜鏡造成之景相似。如用紅玻璃蓋在第二細隙上,則對壁之中央現一紅線,左右各現明暗交錯之線。據光之直進而論,左右成影,不應有光通過。此項違背直進之現象,曰光之遠折,可由波動說明之。如圖 357,細隙 AB 與對壁 XY 相隔甚遠,平行光線達於細隙時,其上各點,均成爲振動之

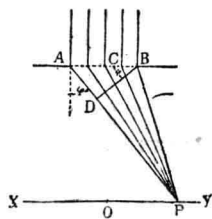


圖 357. 遠折.

新中心,由此各有小波發出。細隙既小,又與對壁所隔甚遠,故其上各點與正對細隙之 O 點之距離,可以看成彼此相等。故由各點發生之波,均以同相達於 O 點,結果使 O 處之光增強。在其傍之 P 點則否,由 A 及 B 傳至 P 之光,其相決不相同。試引 BD 與 AP 垂直,在 BD 上之各點,對 P 始成爲等距離,而 A 及 B 對於 P ,應有 AD 之

路差。命 φ 表法線與 AP 間之角，則 $\angle ABD$ 亦等於 φ ，此角曰對於方向 AP 之透折角。命 d 表細隙之寬，則 AD 應等於 $d \sin \varphi$ 。如 P 之位置不同， φ 及 AD 之值亦隨之而異。

設 $AD = \frac{\lambda}{2}$ ，則由 A 及 B 而來之光，因干涉互相消滅。較此略近中央仍作等距離之兩點，亦有相當路差，但愈近 C ，其值愈小，故結果雖不及 O 點之強，仍能保持相當之亮度。據精密計算，知其約為 O 點之 0.4 倍。

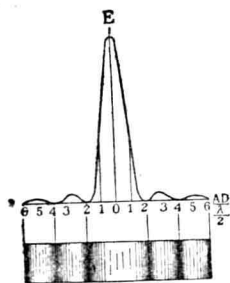


圖 358. 透折像。

設 $AD = \lambda$ ，則由 C 及 A 而來之光，路差恰成為 $\frac{\lambda}{2}$ 。凡與 A 及 C 作等距離之任何兩點，關係均同。結果互相干涉成為暗黑。

設 $AD = \frac{3}{2} \lambda$ ，將 AB 分作三等分，其與 B 接近及中央之部分，關係與前條相同，成為暗黑。結果只餘 $\frac{1}{3}$ 之一部分之光，其亮度不過前此之 $\frac{1}{9}$ 而已。據實測結果，知其約為 O 點之 0.045 倍。

設 $AD = 2 \lambda$ ，將 AB 分作四等分，第一與第三，互相消滅，第二與第四亦然。結果全體仍成暗黑。

綜括之， A 及 B 傳來之光之路差，如成為 $\frac{\lambda}{2}$ 之偶數倍則生暗線；如為奇數倍則生明線，如圖 358。如用白

光實驗，因各色光之 λ 各不相同，相應之各明線及暗線之位置互異，遂成一列彩色。如細隙過寬，則對於圖中之 1, 2, 3, ... 之遠折角，即 $\frac{\lambda}{2d}$, $2\frac{\lambda}{2d}$, $3\frac{\lambda}{2d}$, ... 成爲非常之小，全部之遠折像與直射像混而爲一，不復能辨別之矣。

§372. 遠折格子。

將多數細隙，排成一列，互相緊接且作等距離，是曰遠折格子。其中相鄰兩細隙間之距離，曰格子常數，或 diffraction grating constant of grating 曰格子之寬。用金剛石在玻璃平板上劃密集之平行細線，劃痕不透明，其間與細隙功用相同，遂成遠折格子。

通過遠折格子中央引法線，此方向上之光輝最強，故現爲明處。對於

其他之平行光線，如圖 359，由各細隙之相應位置，如由 A_1, A_2, A_3, \dots 而來者，其路差

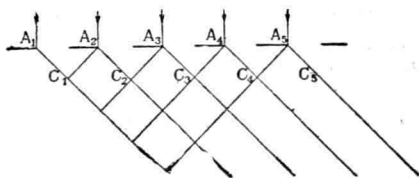


圖 359. 遠折格子。

$A_1C_1, A_2C_2, A_3C_3, \dots$ 如各等於 $\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ 則互相增強而生明亮；如各等於 $\frac{\lambda}{2}$ ，則互相消滅成爲暗黑；如各等於 $\frac{3}{4}\lambda$ ，則第一與第三，或第二與第四，路差各等於 $\frac{3}{2}\lambda$ ，亦成暗黑；又如各等於 $\frac{1}{6}\lambda, \frac{5}{6}\lambda$ ，或 $\frac{1}{8}\lambda, \frac{3}{8}\lambda, \frac{5}{8}\lambda, \frac{7}{8}\lambda$ ，則第一與第四，

第二與第三,或第一與第五,第二與第六,互相消滅。故中央之極大光輝與由遠折而生之第一極大光輝之間,含有多數之暗線。換言之,此兩者之間,成爲暗黑部分,第二極大與第三極大之間亦然。故由遠處用望遠鏡觀察,正對中央時可見其直射像,稍偏成爲暗黑,再偏至第一光輝之處,始見第一遠折像,餘準此。命 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ 表與此等遠折像相應之遠折角, d 表格子常數,則有

$$\lambda = d \sin \varphi_1, \quad 2\lambda = d \sin \varphi_2, \quad 3\lambda = d \sin \varphi_3, \dots$$

關係成立,如能測定 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ 之值,即可由此算出波長。

§373. 遠折景.

用白光照遠折格子前之細隙,各色光造成之遠折像,位置各不相同。中央爲白色直射像,是爲零次極大。左右各生第一次,第二次,第三次,……之景。各景之中,以波長最短之紫光,與中央相隔最近,紅光最遠,其餘各色均介在此兩者之間,次序與景同,是曰遠折景。如命 λ_R 及 λ_V 表紅光及紫光之波長,則各次景之寬如下:

第一次	第二次	第三次	……
$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda_V}{d};$	$\sin \varphi_2 = 2 \frac{\lambda_V}{d};$	$\sin \varphi_3 = 3 \frac{\lambda_V}{d};$	……
$\sin \varphi_1' = \frac{\lambda_R}{d}.$	$\sin \varphi_2' = 2 \frac{\lambda_R}{d};$	$\sin \varphi_3' = 3 \frac{\lambda_R}{d},$	……

由式可知, d 之值愈小, 景亦愈寬; 又次數愈大, 其景愈寬。命 λ 及 λ' 表景中最相接近且能互相分離之兩線之波長, 使 $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$, 則 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ 曰格子之 **分解率**。例如鈉光之兩線 $\lambda = 588.9 \mu\mu$; $\lambda' = 589.5 = 588.9 + 0.6 \mu\mu$ 。故若能在透折景內, 將此兩線析出, 則此格子之分解率, 當為 $\frac{588.9}{0.6}$, 即約等於 1,000。通常之透折格子之分解率, 概用

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{nN}{2}$$

表出, 式中之 n , 表景之次數, N 表格子所有細線之總數。換言之, 分解率與景之次數及細線之總數為正比例。

透折景內各色之排列次序, 與格子之物質無涉, 偏

向之正弦, 與相應之光之波長為正比例, 故極簡單。稜鏡所造之景, 由屈折而

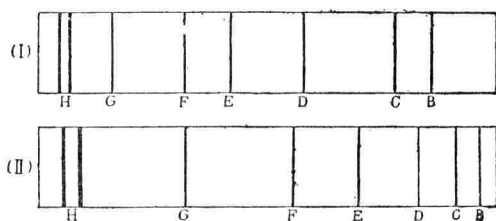


圖 360. 透折景與屈折景之比較。

來, 其各色之排列, 由稜鏡之分散率而定, 分散又隨稜鏡之物質種類而異。即同一物質, 其屈折度增加, 分解率亦增大。故稜鏡之景, 紅色部過狹, 紫色部過寬。因此, 透折景對於稜鏡之景, 又有 **正常景** 之稱。又稜鏡之景,
normal spectrum

以紅光之偏向最小，紫光最大；在遠折景內，恰與此相反，故各色排列之次序，兩者亦正相反對。圖 360 之 I 為正常景，II 為鉛玻璃稜鏡造成之景。前者由紅色端至 C 線之距離，約為後者之三倍；而其 H 線至 F 線之距離，不過後者之一半而已。

§ 374. 反射格子。

前節所述之遠折格子，係應用透過光造景，同樣，應用反射光，亦能造景；如是之格子，曰反射格子，在全屬平面上，劃極密接之平行線而成。投射光達於劃痕上者，成為散光，僅達於其間之平滑處者，作

正反射，與細隙之作用同。圖 361 之 AB，表相鄰兩劃痕間之細隙；命 d 表其距離。平行光線 SA 及 S_1B 之投射角為 φ ，遠折光線 AS' 及 BS_1 之遠折角為 α 。路差成為 $AD - BC$ ，即 $d(\sin \alpha - \sin \varphi)$ 。單光而能滿足

$$d(\sin \alpha - \sin \varphi) = n\lambda$$

之處，成為最強；白光則於此處成景。

以上係就平面之反射格子而言，反射後之平行光線，非經透鏡收斂於其焦面不可。如不用平面，而用凹面，即無須乎再用透鏡以收斂之。圖 362 之羅蘭德凹格子，即本此理而成。凹鏡 PQ 之半徑甚大，鏡面上每 1 耗刻有 1,700 條平行線，格子全體寬 65 耗，總計共有 110,000 線。C 表 PQ 之曲率中心，CO 表其軸，以此為直徑作圓。弧 AB 小而曲率大，故 A 及 B 均可看作圓周上之點。光源 S 亦在圓周上。

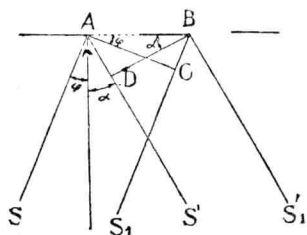


圖 361. 反射格子。

故 S 發出之光線中，對於 A 之透折光線，以 $d(\sin \alpha - \sin \varphi) = n \lambda$ 最強；對 B ， $d(\sin \alpha_1 - \sin \varphi_1) = n \lambda$ 最強。但 A 及 B 同在一圓周上，

$$\text{故 } \varphi = \varphi_1; \quad \alpha = \alpha_1.$$

即兩透折光線，同時均能滿足極大之條件。此 A 及 B ，本為任取之兩點，在 S_1 則成同路差之光線束相交，即 S_1 成為 S 之像。命 M

表 S 對於 C 之對稱點，如用白光，則由 S_1 至 M 之方向，現為紫端之景，而於 M 點，造成非透折之 S 之實像。

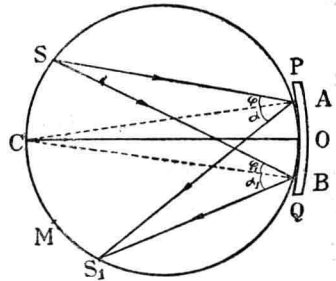


圖 362. 凹格子。

§ 375. 階段格子。

據 § 374，格子之分解率與景之次數亦為正比例，故只須提高景之次數，使用少數細線，亦可達同一目的。邁克爾遜之階段格子，即 echelon grating

本此理製成，如圖 363，將同一厚薄之玻璃平板，重疊相錯，成階段形。自上以平行光線垂直投射，經階段透過，即起透折。 A 及 B 表相鄰兩段之相應點，由此兩點以同一透折角 α 射出之光線為 AA' 及 CC' 。引 CD 與 AA' 垂直，則兩者之路差，換算成為空氣中之

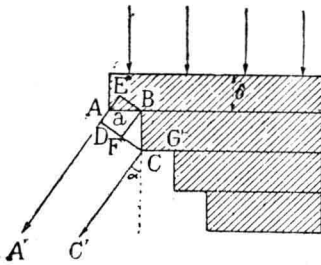


圖 363. 階段格子。

數值時，等於 $\mu BC - AD$ 。其中之 μ ，表光由空氣進入玻璃時之屈折率。再引 BE 與 AA' 垂直，則 $AD = ED - EA = BF - EA$ 。命 δ 表玻璃板之厚， $a = AB$ 表一階段之長，則 $AD = \delta \cos \alpha - a \sin \alpha$ 。故

路差之值,如能滿足

$$\mu \delta - \delta \cos \alpha + \alpha \sin \alpha = n \lambda$$

時,光最強大。又由 AB 及 CG 不受透折即行射出之光,因此時之 α 成爲零,故其路差成爲 $\delta(\mu - 1)$ 。假定 $\delta = 5$ 耗,使用之光爲綠光,即 $\lambda = 0.005$ 耗,由此計算 $n = 5,000$, 即其結果,與第五千次之極大相當。階段格子之分解率之強大,由此一例,可以想見。但對於波長相差略遠之兩光,使用階段格子時,因分解率過大,轉覺不適於用。

第八章 光之極化

§ 376. 極化光。

由干涉及透折等現象,可以證明光爲波動,但此種波動,究爲縱波橫波,則尙未明。結晶體中有電氣石者, tourmaline 屬於六方晶系,作六角柱形,上下兩端,則由三角柱之面切開,此六角柱之軸,稱曰主軸。用與主軸平行之平面, principal axis 將電氣石切開,使其成爲薄板,即通常使用之電氣石板。此種電氣石板,具有特殊之性質,可用圖 364 之方法實驗之。 P_1 及 P_2 表兩枚電氣石板,其主軸方向爲 $A_1A'_1$ 及 $A_2A'_2$ 。導平行光線由小圓孔進入暗室,垂直投射於電氣石板上。如兩軸平行,則對壁 S 上,有小孔之像現出。其次令 P_1 固定不動,使 P_2 以光線爲軸,徐徐轉動,即見 S

上之像,隨之漸次減淡,至 A_2A_2' 與 A_1A_1' 垂直時,像即完全消滅,不可得見。如

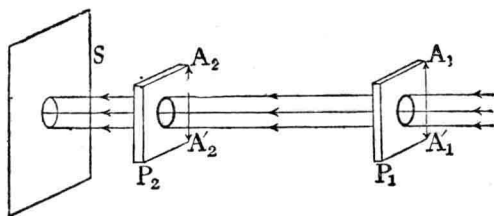


圖 364. 電氣石板之實驗。

再繼續轉動,又次第出現,由淡而明,至 A_2A_2' 與 A_1A_1' 復成平行時,完全恢復故狀。如僅用一枚之電氣石板試之,無論如何轉動, S 上之像,均同樣鮮明,決不稍變。由此可知透過電氣石板之光,已與未透過以前之通常之光不同,此現象曰光之極化。通常光線,其性質不因方向而變,曰自然光,與此相對,一度過通電氣石板者,其性質隨方向而變,是曰極化光。

由上述實驗,兩軸垂直時,通過 P_1 之光,不能再由 P_2 內透過,即電氣石只容與其主軸平行之振動,自由通過,或只容與主軸垂直之振動自由通過,兩者必居其一,對於此唯一方向以外之一切方向之振動,均一律阻斷之。換言之,由電氣石透過之光,其振動必限於一定之平面內,故又曰平面極化光,或稱之為直線極化光。此振動之平面,曰振動面;與之垂直之平面,曰極化面。此種定

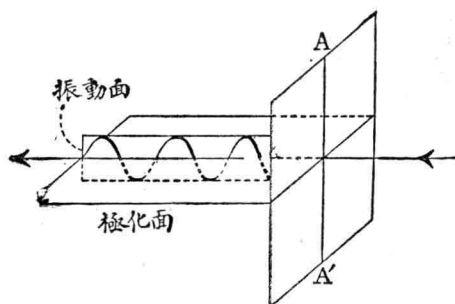


圖365. 振動面及極化面。

義爲夫累涅爾所
下,使用較便,其關
係如圖 365. 此
外尚有謨庫拉夫
M'Cullagh
之定義,恰與此相
反,兩說各有理由,
可由電磁說證之。

總之,由光之極化現象,可知一切光之振動方向,均
必與光之進行方向垂直,即光波應爲一種橫波。

§ 377. 由反射而生之極化光。

自然光投射於等方性體,而生反射之時,其反射光
可分爲兩部分:一部分成爲極化光,振動面與投射面垂
直;其他之一部分,則爲非極化光。凡由極化光及非極
化光混合而成之光,曰分極化光。non-polarized light
又如將反射光,分爲
partially polarized light
兩部分:一以投射面爲振動面;一以與投射面垂直之平
面爲振動面。反射時,後者之成分多,而前者之成分少;
屈折時,則前者之成分多,而後者之成分少。兩成分之
多寡比例,由反射面之物質及投射角之大小而定。就
同一物質而言,投射角 SON , 如圖 366, 達於一定之值 p

之時,反射光 OR 成爲全極化光,此時之 p , 曰極化角. 據
completely polarized light angle of polarization
 實驗,知極化角 p 與屈折率 μ 之間,有下列之關係存在

$$\tan p = \mu.$$

即各種物質之極化角,各有一定之值. 再如圖 367, IO 表投射線, OR

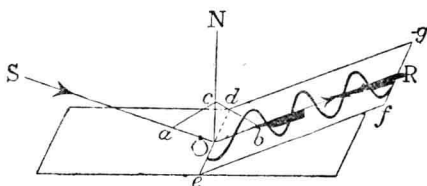


圖 366. 反射光之極化.

表反射線, OG 表屈折線, ON 表法線. 如投射角 ION 等於 p , 其屈折角 r , 應滿足

$$\frac{\sin p}{\sin r} = \mu = \tan p,$$

表 50. 極化角.

$$\text{故 } p + r = \frac{\pi}{2}.$$

物質	p
玻璃	$51^{\circ}35'$
水	$52^{\circ}45'$
金剛石	$68^{\circ}2'$

即反射線與屈

折線,恰相垂直. 又各物質之極化角之值,如表 50.

§ 378. 由屈折而生之極化光.

自然光投射於兩種物質之境界面,除一部分反射外,尚有一部分進入第二媒質之中,成爲屈折光. 屈折光又可分爲兩部分:一以投射面爲振動面,一則與之相

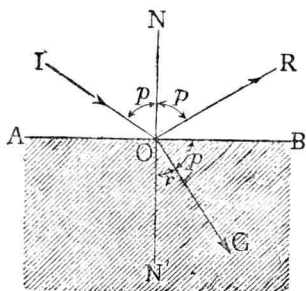


圖 367. 極化角之投射.

垂直。此兩成分之比例，由媒質種類及投射角之大小而定。就同一媒質而論，投射角等於極化角時，反射光中毫無以投射面為振動面之成分，故此成分完全成為屈折光。換言之，投射角等於極化角時，屈折光中之極化光之量最多。設用若干玻璃平板，重疊成玻璃板堆，pile of glass plates自上方以極化角投射之光，其垂直於投射面之振動之成分，經各層玻璃，迭次反射，愈下其量愈少，最後透出堆下之光，即成為以投射面作振動面之極化光。

§ 379. 複屈折。

天然產之方解石，為平行六面體，屬於六方晶系，各方之表面均作平行四邊形，Ice and spar鈍角等於 $101^{\circ}55'$ ，銳角等於 $78^{\circ}5'$ 。沿表面之平行面最易劈開，故可截成斜六面體，各面均作菱形。八隅之中，有兩隅，如圖 368 之 K_1 及 K_2 ，由三鈍角集成，其餘則由一鈍二銳集成。連結 K_1

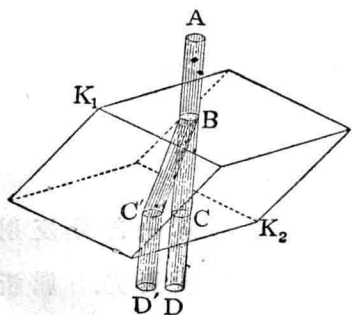


圖 368. 方解石之複屈折。

及 K_2 之直線，曰方解石之主軸，或略稱軸。各面，各稜，各隅，對於主軸，均成對稱形。以包含主軸或與之平行之平面，將方解石截開，所得之切面，曰主截面。

principal section

自然光 AB 垂直投射於方解石之一面，進入其內部之屈折光線，分為 BC 及 BC'

之兩部分,自對面仍以垂直方向 CD 及 $C'D'$ 射出. 透出之光,以紙屏承之,即在屏上現兩光斑 D 及 D' . 使方解石在軸 AB 周圍轉動, D 雖固定不變, D' 則隨之作圓運動. 可知 BCD 為通常屈折定律所規定之屈折線,而 $BC'D'$ 則否. 前者曰常線,後者曰非常線,此種現象,則曰複屈折.

ordinary ray
extra-ordinary ray
double refraction

§ 380. 惠更斯之作圖法.

圖 369 之 K_1K_2 表方解石之主軸,圖面即其主截面. 在此面內一點 O 處發生之振動,可分解成爲兩成分:一在主截面內振動,一在其垂直面內振動. 前者之傳播速度隨方向而異,在軸之方向者最小;與軸之方向垂直者最大. 後者之傳播速度,對於一切方向,均無不同. 故前者之波面,如 $K_1L_2K_2L_1$, 成一橢圓,曰

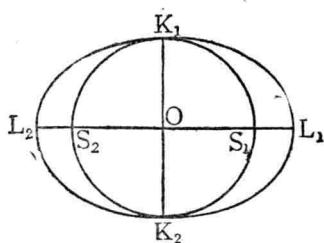


圖 369. 圓波及橢圓波.

橢圓波;後者則如 $K_1S_2K_2S_1$, 成一圓,曰圓波,兩波面相切於 K_1 及 K_2 兩點. 對於任何主截面,關係均同,故以 K_1K_2 爲軸,將圖面旋轉一周,即得方解石內之波面,前者成爲旋轉橢圓體,後者則成爲球.

elliptic wave
circular wave

ellipsoid of revolution

設有平行自然光線，如圖 370 之 A_1B_1 及 A_2B_2 投射於方解石上，假定投射面與主截面一致。照前，將光線分解為兩成分，一在此平面內振動，一在垂直之平面內振動。引 B_2N 與 A_1B_1 垂直，命 B_2K 表主軸之方向。投射光

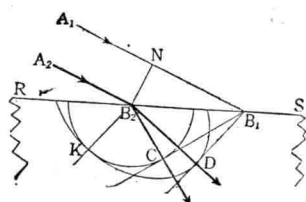


圖 370. 常線及非常線之作圖法。

達於 B_2 時之波面為 B_2N ，以後投射光在空氣中行 NB_1 之距離時，垂直於主截面之振動，傳至以 B_2 為心之圓周 KC 之上，而 NB_1 與半徑 B_2K 之比，等於空氣中之速度與垂直於主截面之振動在方解石內傳播之速度之比。同樣，在 B_1 及 B_2 間之各點，各發出小波。由 B_1 引圓周 KC 之切線 B_1C ，此切線當為各小波之共通切線，亦即垂直於主截面之振動，在方解石內之波面。引 B_2C 與 B_1C 垂直，此 B_2C 即表屈折光線，因小波面均為球面，與通常屈折定律相符，故此屈折線為常線。同樣，在主截面內之振動，其波面成為 KD ，而其屈折光線則為 B_2D ，與屈折定律不符，故為非常線。

總括之，自然光投射於方解石上，其屈折線一般分解成爲常線及非常線，兩種均爲全極化光，常線之振動面與主截面垂直，非常線之振動面，則與主截面相一致。

茲將水晶,方解石兩種結晶體,對於重要之幾種夫牢固和斐線之複屈折之屈折率,列舉之,如表 51.

表 51. 複屈折之屈折率

夫牢固和斐線	B	C	D	E	F	G	H
方解石 { 常線	1.483,91	1.484,55	1.486,35	1.488,68	1.490,75	1.494,53	1.497,80
{ 非常線	1.653,08	1.654,52	1.658,50	1.663,60	1.668,02	1.676,17	1.683,30
水晶 { 常線	1.549,90	1.550,85	1.553,28	1.556,31	1.558,94	1.563,65	1.567,72
{ 非常線	1.540,90	1.541,81	1.544,18	1.547,71	1.549,65	1.554,25	1.558,17

§ 381. 光軸.

用垂直於主軸之平面,將方解石截開,所得之截面,如以垂直光投射其上,既不屈折,亦不分解,仍沿唯一方向垂直透過,無複屈折之現象發生. 不僅方解石如此,其他一切單複屈折性之結晶體,莫不如此,均必有不生複屈折現象之方向存在. 在此特殊之方向上,不問其振動方向如何,均以同一之速度,傳播而去. 此特殊方向,曰單波速軸,或略稱光軸. 在方解石,僅有一方向有此性質,即與主軸一致之方向. 凡正方晶系及六方晶系之結晶體,均各有一光軸,故又稱

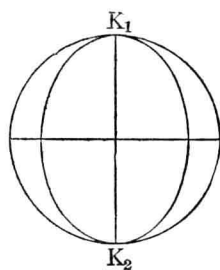


圖 371. 單軸正晶體.

單軸晶體. 斜方晶系如霞玉,黃玉,單斜晶系如石膏,以及三斜晶系等,光軸有二者,曰雙軸晶體. 單軸者又分兩類,如方解石,電氣石等,非常線速度較大,即橢圓體在球外者,曰單軸負晶體;反之,如水晶,非常線速度較小,即橢圓體在球內者,如圖 371,曰單軸正晶體.

§ 382. 尼古爾稜鏡及電氣石.

在複屈折性結晶體內,常線與非常線,固可分開,但透出體外,又混合成爲非極化光. 故欲研究極化光之性質,非將此兩者之中,除

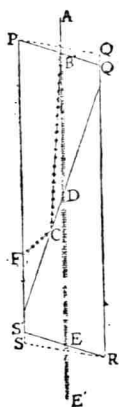


圖 372.
尼古爾稜鏡。

去一種不可。圖 372 之尼古爾稜鏡，即爲此而設之裝置。將長方解石兩端截成菱形，包含此面之短對角線之對角面 $PQRS$ 爲主截面，且 $\angle QPS$ 及 $\angle SRQ$ 均等於 71° 。再將此兩端面磨成主截面之垂直平面，且 $\angle P = \angle R = 68^\circ$ 。故 $PQRS$ 變成 $PQRS'$ ，且 $\angle Q'PS' = \angle S'RQ' = 68^\circ$ 。再用與 $PQRS'$ 及兩端面同時垂直之平面截開之，磨光後，用一種物質，曰加奈大芳香樹液膠合之，即成尼古爾稜鏡。

Canada balsam

投射光 AB 與 PS 平行，入此稜鏡後，分爲常線 BC ，及非常線 BD 。就光學性質而言，對於常線，方解石較芳香樹液疎，故能透過芳香樹液及下面稜鏡，沿 EE' 而出；對於非常線，則方解石較芳香樹液

密，其臨界角爲 68° ，而 BC 之投射角較此爲大，故沿 CF 反射而去。故若將此壁塗黑，吸去反射光，則由稜鏡透出者，僅有非常線一種而已。

電氣石能吸收常線，故由之透過者，僅存非常線。沿其主軸方向截開之，使成平板，使自然光垂直投射於其上，透過光即爲非常線。但由電氣石透過之光，多帶綠色或紅色，故不及用尼古爾稜鏡爲便。

§ 333. 檢極器。

研究透明體之極化性質，以用檢極器爲最便。此器由兩部分合成。一部分係使自然光變爲極化光者，曰極化器；一部分則用以檢查之者，曰分析器。種類如下：

(1) 使用一對之尼古爾稜鏡，以其一作極化器，其他

作分析器，欲檢查之物體即放在此兩稜鏡之間。

(2) 用圖 373 之電氣石鈗，兩端環內，各有一電氣石

tourmaline pincette

板，可以自由轉動，一作極化器，一作分析器。



圖 373.
電氣石鈗。

(3) 用圖 374 之泉稜柏喜檢極器。玻璃

Forrenberg's polariscope

板 AB , 由兩柱支住, 可在水平軸 K 之周, 自由轉動。此外有黑色平鏡二, 一如 EF , 固定於台上, 一如 CD , 與鉛直作 $35^{\circ}25'$ 之角, 能在鉛直線 SL 周圍轉動。日光以 $54^{\circ}35'$ 之投射角, 達於 AB 下方, 反射後, 沿 KL 而去, 因 $\angle BKL = 35^{\circ}25'$, 故成極化光。此光再沿鉛直方向透過 AB 至 CD , 仍以同一角度投射反射。此時 AB 為極化器, CD 為分析器。金屬板 GHI 上有一孔, 可載欲檢查之物, 且能在 AB 及 CD 之間自由轉動。

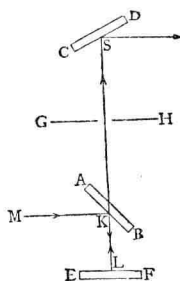


圖 374.

泉稜柏喜檢極器。

§ 331. 色極化.

如將複屈折性物體, 放在檢極器之間, 使白光由其中通過, 就分析器觀察之, 即見有彩色出現, 其色之種類及強弱, 隨物體之厚薄及極化器與分析器間之相對位置而異。如是之現象, 曰色極化, 例如令極化器與分析器作交叉位置, 用白光檢查石膏板, 即可得見。更令石膏板在同一平面內轉動, 即見每歷 $\frac{\pi}{2}$, 視界必暗黑一次。即每轉一周, 共有四次不呈此項作用。但由此等位置, 無論向左向右略轉, 又有色現出矣。如全板厚薄一律, 雖轉其色不變, 僅強度有異耳, 達於前述之四種特殊位置時, 光強成爲極小, 而在其中間之位置, 則成極大。其次再令極化器與分析器作平行位置, 如前試之。前此成爲極小之四位置, 在此則成爲極大, 不呈彩色, 必由此略轉, 始有彩色現出, 其現出之色, 又恰與交叉時現出者, 互爲餘色。同樣, 交叉時光強成爲極大之四位置, 平行時即成爲暗黑。

圖 375 之面, 假定表石膏板面, 光由垂直方向投射而來。命 OP 及 OA 表極化器及分析器之振動方向。先假定兩者在交叉之位置,

即 OP 與 OA 垂直。又假定石膏板所能透過者，為在 OH_1 及 OII_2 方向上振動之光。石膏為複屈折性，故此兩方向之速度不等。如此方向恰與極化器及分析器之振動方向一致，即全部透過，不呈作用，視界應成暗黑。如不相一致，命 Op 表透過極化器之波之振幅，進入板內，成為兩成分：在 OII_1 之上之振幅為 Oh_1 ；在 OII_2 上者為 Oh_2 。兩者之速度不等，故透出時發生相差，其值由板厚而定。就單光而言，命 λ 表波長，如相差恰等於 $\frac{\lambda}{2}$ ，即 OII_2 方向之振動，較 OII_1 方向上之振動遲

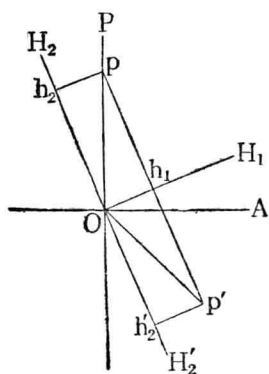


圖 375. 色極化。

半周期，則透出後之合成振動為 Op' ，即 Oh_1 與 Oh_2 之反對之 Oh_2' 所合成者。而此合振動 Op' 又僅有 OA 方向之分振動，能透出分析器。當 OH_1 在 OP 及 OA 之中央時，此項分振動成為極大而等於 Op 。故在四暗黑之中間，有四明亮位置存在。同樣，相差凡為 $\frac{\lambda}{2}$ 之奇數倍均生光亮；凡為 λ 之整數倍均暗黑，如用白光，則因透出各單色光之此兩成分之相差，各不相同，故成彩色，且交叉時與平行時，透過光相反，故成餘色。

§ 385. 圓極化光及橢圓極化光。

前述之極化光，其振動方向均在平行之直線上，故曰直線極化光，或平面極化光。如振動在光線之垂直面內，在平衡位置周圍作圓運動，則曰圓極化光。更從光之進行方向望去，其沿順時針方向運動者，曰右轉圓極化光；其沿逆時針方向運動者，曰左轉圓極化光。

將單軸晶體截成薄板，與軸平行，使光垂直投射，屈折亦取同一之垂直方向，不復分離，但常線之振動與軸垂直，非常線則與軸平行，

各以不同速度傳去。如投射者為極化光，其振動面與主截面之傾斜為 α ，原振幅為 a ，則常線之振幅為 $a \sin \alpha$ ，非常線為 $a \cos \alpha$ 。除 $\alpha = \frac{\pi}{4}$ 外，兩者決不相等。故在結晶內，兩者之相，決不相同，僅周期相同而已。透出結晶體後，兩者復合為一，與 § 96 之情形同，各能媒粒子之運動為橢圓運動，故此時合成之光，曰橢圓極化光。如 α 恰等於 $\frac{\pi}{4}$ ，則兩者之振幅亦相等，故合成振動為圓，遂成圓極化光。
elliptically polarized light

§ 386. 極化面之轉動。

將單軸晶體截成與軸垂直之薄板，插入兩尼古爾稜鏡間，用平行光垂直投射之，因無複屈折性質，故轉動分析器時，視界僅有明暗變化，與未插入時無異。如改用水晶則否，如所用者為白光，則呈彩色，轉動其分析器，即次第變為紅橙黃綠青藍紫等色，不成暗黑。如用單光，開始兩稜鏡交叉，視界成為暗黑，然後插入水晶，視界轉明，必須將分析器轉動若干角度，視界始恢復暗黑。可知透過水晶板者雖仍為極化光，但其極化面之位置，已與前不同，是曰極化面之轉動，rotation of plane of polarization所轉動之角度，與水晶板之厚相比例，又波長愈短者，轉動角度愈大。厚 1 耗之水晶板，對於各種夫牢因和斐線之極化面轉動值，如表 52：又水晶之極化面轉動，有兩種不同方向，其沿順時針方向轉動者，曰右轉水晶；其沿逆時針方向轉動者，曰左轉水晶。
right-handed quartz left-handed quartz

表 52. 極化面轉動。

極化光轉動之物質頗多，除水晶而外，固體如氯化鈉，辰砂；液體如樟腦之酒精溶液，糖水，酒石酸，右轉糖，嗎啡等；均屬之。命 α 表某一物質對於一定波長之光之轉角，溶液之厚為 l 粉，物質密度為 ρ 每立方

$$\alpha = [\alpha] l \rho = [\alpha] \frac{l \rho}{100}.$$

式中之 $[\alpha]$ 表一常數，曰比轉率，其值由物質種類而定。
specific rotatory power

線	轉角
A	12.67°
B	17.75°
C	17.32°
D	21.70°
E	27.54°
F	32.77°
G	42.60°
H	51.19°

實際上,只須將轉角之 α 及盛液體之管長 l 測出,代入上式,即可算得其中溶解之有效物質爲若干。通常測定糖水中所含有之糖量,即用此法,故曰檢糖術,爲此目的特設之裝置,曰檢糖計。

saccharimetry

saccharimeter

§ 387. 法刺第效應,刻耳效應,最曼效應。

在電磁石兩極片上,各開一孔,一方裝極化器,他方裝分析器,中懸一重鉛玻璃,使單光透過。轉動分析器,令視界暗黑,然後導電流入電磁石,則視界由暗而明,非將分析器由此再轉若干角度,不能再成暗黑。由此可知,重鉛玻璃在磁場內時,有使極化面轉動之性質,磁場之方向反轉,則其轉動亦相反,此現象曰法刺第效應。此種轉動與水晶之轉動,性質大不相同。法刺第效應,由磁場方向觀之,爲順時針;如將光之方向倒轉,由磁場方向觀之,轉動仍爲順時針,而由光之進行方向觀之,則成逆時針。故光一旦通過玻璃以後,再由反射折回逆行通過原路時,其極化面之轉角,當爲前此之二倍。如在水晶則否,此時光如逆行,極化面之轉動亦相反,故全體不起轉動。

Faraday effect

直線極化光,投射於強磁石之磨平之極面時,其反射光成爲橢圓極化光,此現象曰刻耳效應。此時投射光之振動面,必須與投射面一致,或與之相垂直。否則橢圓極化光僅由金屬反射,亦可發生。

Kerr effect

將鈉燄等具有一定波長之光源,放在強磁石之兩極間,即見其輝線有顯著之變化,此現象曰最曼效應。此項變化,由發光之方向與磁場方向間之角度而定。兩者在成平行時,單一之輝線,分爲兩條,出現於原位之兩傍,與原位置作等距離,其中波長較長者,爲右轉圓極化光;波長較短者,爲左轉圓極化光。兩者互成垂直時,一線分爲三條,中央之一線出現於原位置上,其餘兩線則與平行時出現者同一位置。此三線均爲直線極化光,中央一線之振動方向,與磁場平行,左右兩線之振動方向,則與磁場垂直。

Zeeman effect

第 六 篇

電 磁 學

第 一 章 磁

§ 388. 磁石.

鑛石中有名磁鐵鑛 (Fe_3O_4) 者,能吸鐵不落,此外如
magnetite
 黃鐵鑛 (Fe_3S_4) 及鈷鎳等之鑛石,亦有同樣性質,凡如是
magnetic pyrite
 者,曰磁石,其出於天然者,曰天然磁石,而由後述鐵之磁
magnet natural magnet
 化性質,以人力造成者,曰人造磁石. 磁石有種種形狀,
artificial magnet
 其名稱亦隨之而異,如圖 376, 長
 如一棒者,曰磁棒;曲作馬蹄鐵狀
bar magnet
 者,曰磁蹄;兩端磨尖,全體成一細
horse-shoe magnet
 針者,曰磁針. 磁針通常以其中
magnetic needle
 點,支於一鉛直軸上,成水平位置,
 且能在水平面內自由轉動.

磁石吸鐵之作用,全體並不
 一致,以近兩端處最著,如圖 377.

其作用最強處,曰磁極,連結兩磁
magnetic pole

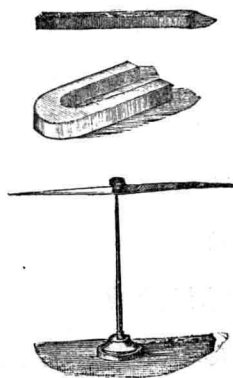


圖 376. 各種人造磁石.



圖 377. 磁石吸鐵。

極之直線，曰磁石之磁軸。
magnetic axis

支在鉛直軸上之磁針，平衡

時，兩極恆指一定之方向。其所

指之方向，雖隨地略異，但大致則與南北方向，相差不遠。

其向北之極，曰指北極，或省略之作北極，通常以 N 表之，
north-seeking pole north pole

故又名 N 極；其向南之極，曰指南極，或省略之作南極，通
 N pole south-seeking pole south pole

常以 S 表之，故又名 S 極。兩極必共同存在，不能獨立。
 S pole

§ 389. 磁力及磁量。

令磁棒之一極與磁針之一極接近，如兩者同為 N 極或 S 極，則互相斥逐；如一為 N 一為 S ，則互相引近，此時所表現之力，曰磁力。即同名之極相斥，異名之極相引。
magnetic force

由磁力之大小，可以判別磁石中所含有之磁量之
quantity of magnetism

多寡。例如 A, C 兩極，隔一定距離時，其作用之磁力為 f ；而 B, C 兩極，隔同一距離時，其磁力為 f' 。如 $f = f'$ ，則 A, B 兩極之磁量，彼此相等。如 $f = mf'$ ，則知 A 之磁量為 B 之 m 倍。用同一磁石之兩極，對於其他一定之磁極，行此實驗，可以證明其作用之力，雖有引斥之分，但無大小之別。即同一磁石之兩極，對外作用之力，性質固相反，而其磁量則相等，頗與代數學上使用之正負號

相類。便宜上，規定 N 極為正極， S 極為負極。
positive pole negative pole
 所含有之磁量，曰極之強度。
strength of pole

§ 390. 庫隆之磁力定律。

用細銀線懸磁針 NS ，使成水平，圖 378，且磁針在磁子午線（參照 § 400）時，銀線不呈扭轉。由外另持來一垂直磁針 $N'S'$ 。命 d 表 N 與 N' 間水平距離。如 NS 可以自由轉動，則因磁力結果，必生偏向。扭轉銀線，

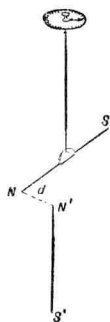


圖 378. 扭秤。

至 NS 恢復原有位置為止。此時銀線之扭力，恰與磁極間之斥力相等，故可由扭轉角度測出之，此裝置曰扭秤。
torsion balance

用扭秤測得兩極間之磁力 f ，與極之強度 m 及 m' 之乘積為正比，與距離平方 d^2 為反比，是曰庫隆定律。
Coulomb's law
 再經比較，知兩極間之媒質，亦有關係，命 μ 表其透磁率（見 § 410），
permeability

r 表兩極之距離， k 表比例常數，則庫隆定律當如下：

$$f = k \frac{mm'}{\mu r^2}$$

§ 391. 單位強度之磁極。

假定有兩磁極，其強度相等，在真空中隔 1 厘，以 1 達之力互相作用，此時之極，定為磁極之單位，而稱之曰

單位強度之極，如爲 N 極，則略稱單位正極。單位正極
pole of unit strength unit positive pole
 所含有之磁量，定爲磁量之單位，曰 1 C. G. S. 單位。如
1 C. G. S. unit

用此項單位，則庫隆定律成爲

$$f = \frac{mm'}{\mu r^2}$$

在真空或空氣中， μ 等於 1，更成爲

$$f = \frac{mm'}{r^2}$$

式中之 μ ，因其性質不明，未能用基礎單位將其次式誘出，但若假定其爲 $[\mu]$ ，則磁量之次式當由下式表出之：

$$[m] = [\mu]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-1}$$

§ 392. 磁場.

由磁石相互作用及對於鐵粉之吸引，知磁石周圍之空間，具有特殊之性質，與無磁石存在時不同。凡有此項特性之空間，曰磁力場，或簡稱之曰磁場。

magnetic field of force magnetic field

單位正極在磁場內一點所受之磁力，曰在此一點之磁場強度，其方向即表磁場之方向。例如磁極所有之磁量爲 m “C. G. S. 單位，”所在一點之磁場強度爲 H ，此時作用之力爲 f 達，則其關係如下：

$$f = mH,$$

$$\therefore [H] = [\mu]^{-\frac{1}{2}} [M]^{-\frac{1}{2}} [L]^{-\frac{1}{2}} [T]^{-1}$$

用 C. G. S. 單位時之磁場強度之單位，曰**皋**，故其次式為

$$[\text{皋}] = [\mu]^{-\frac{1}{2}} [\text{克}]^{-\frac{1}{2}} [\text{厘}]^{-\frac{1}{2}} [\text{秒}]^{-1} \text{gauss}$$

§ 393. 磁力線.

小磁針在磁棒近傍靜止時所取之方向，隨地而異。如在磁棒周圍畫若干連續曲線，令其上各點之切線，恰與小磁針在此點所取之方向一致，是曰**磁力場之力線**，
lines of force of magnetic field of force
 或簡稱之曰**磁力線**。磁力線之形狀，如圖 379。

一小磁針在一磁棒之磁場內時，針之 *N* 須受棒之 *N* 之斥力及棒之 *S* 之引力作用，同樣針之 *S*，受棒之 *N* 之引力及 *S* 之斥力作用。平衡時，此四力對於針

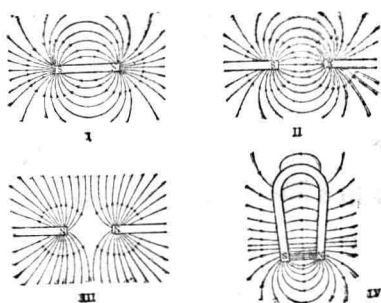


圖 379. 磁力線。

之支點之合成力矩，應等於 0。故針靜止時之方向，與其兩極所受之合力方向一致，即通過任何一點之磁力線方向，可表由磁棒兩極而來之磁力合力之方向。

N 極在磁場內一點所受之作用，在使其沿經過此點之力線，向一方移動；*S* 極在同一點上，則沿同一力線

之反對方向移動。 N 極移動之方向，曰力線之正向； S 極移動之方向，曰力線之負向。故一磁棒之力線，必始於其 N 極而終於其 S 極，如圖中所示。又磁力線成爲平行線處之磁場，曰均磁場。兩磁石同放於一處，其合成磁場之力線，與兩磁石之合成磁力之方向，恆相一致。

§ 394. 磁束.

設想真空中有一單獨之 N 極存在，其強度爲 m ，則由此發出之力線，對於各方，均一律平等。試以此極爲心， r 爲半徑，畫一球面，各力線均必與球面相交。設想球面上有一單位 N 極，據庫隆定律，知其作用力應爲 $\frac{m}{r^2}$ 。再由§ 392，知在球面上任何一點之磁場強度，均必爲 $\frac{m}{r^2}$ ，而其方向，則恆與球面之法線方向一致。

力線可表磁場之方向，但不能表出其磁場之強度，如欲一並表出，則對於磁力線之作圖法，非別有規定不可。就前例而言，如在球面上之單位面積內，引 $\frac{m}{r^2}$ 條之力線，互作等距離，則場之強度即等於通過垂直於力線之單位面積之力線數。全球之面積爲 $4\pi r^2$ ，故力數總計 $4\pi m$ 條。使用此項規定，異常簡便，即由一磁極發出之力線總數，等於其極之強度之 4π 倍。

通過任設之面積之磁力線數，曰磁束。如所設之面積與力線垂直，且等於單位面積，則其磁束曰束密度，即束密度等於磁之強度。單位之束密度，即強度等於 1 皋之磁場強度。

§ 395. 磁矩.

磁石在均磁場內，例如地磁場內，所受之作用，成一偶力，如圖 380。命 H 表磁場強度， XX' 表其方向， NS 表磁石，其強度為 m 。磁石之 N 極，受 $+mH$ 之力， S 極受 $-mH$ 之力。兩力大小相等，方向相反，成一偶力，其效應在使磁石發生轉動。命 $2l$ 表兩磁極間之距離， θ 表磁石與磁場方向間之角度， L 表偶力矩，即 $mH \times$ (偶力臂)。由圖知，偶力臂 $= 2Np = 2NO \sin \theta = 2l \sin \theta$ 。故得

$$L = HM \sin \theta; \quad M = 2ml.$$

如是之 M ，曰磁石之磁矩。即一磁石之磁矩，等於其磁極之強度與其兩磁極間之距離之相乘積。如磁石恰與磁場成垂直，即 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 時，偶力成爲 HM 。由定義，知 $M = 2ml$ ，故磁矩之次式，不難由 $[m]$ 及 $[L]$ 推出之，即

$$[\text{磁矩}] = [\mu]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{5}{2}} [T]^{-1}.$$

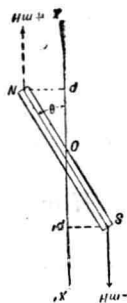


圖 380. 磁石之偶力

§ 396. 磁石軸上一點之磁力。

磁棒造成之磁場中任意一點之磁力，可由庫隆定律求出。其中尤以在磁石軸上之點，最為重要。如圖



圖 381. 軸上一點之磁力。

381，命 m 表磁石 NS 之極之強度， P 表軸上一點， O 表其中心。

N 極對於 P 之力為 $\frac{m}{(OP-ON)^2}$ ；
 S 極對於 P 之力為 $-\frac{m}{(OP+ON)^2}$ 。命其合力為 H ，則得

$$H = \frac{m}{(OP-ON)^2} - \frac{m}{(OP+ON)^2} \doteq 4r^2 \frac{ON}{OP^3}$$

命 M 表磁石之磁矩，則 $M = 2m \cdot ON$ ，故 P 點所受之力，為

$$H = \frac{2M}{r^3}; \quad r = OP.$$

§ 397. 通過中心之磁軸垂線上一點之磁力。

通過磁石 NS 之中心 O ，引磁軸之垂線 OQ ，如圖 382。

設想 Q 點上有一單位磁極，其由 N 所受

之力為 $f_1 = \frac{m}{NQ^2}$ ，由 S 所受者 $f_2 = \frac{m}{SQ^2}$ ，

命 r 表 OQ ， θ 表 $\angle OQN$ ，則其合力 H 應為

$$H = 2f_1 \sin \theta = \frac{M}{NQ^3} \doteq \frac{M}{r^3}$$

如此 Q 點與 O 之距離，恰等於前節

之 P 點與 O 之距離，則 P 點所受之力，等

於 Q 點所受之力之兩倍。

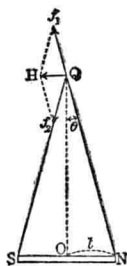


圖 382.

磁軸垂線上一點之力。

§ 338. 磁場內磁石之振動周期。

用線懸磁棒重心 O ，使成水平，如圖 383。如在均磁場 H 之內，則磁軸與場之方向一致，且 N 極向場之正向時，始靜止不動。試用力使其轉動 θ 之角度，則磁石所受之偶力矩為 $MH \sin \theta$ ，使其恢復原位。其結果成為在平衡位置周圍，往返振動。如 θ 甚小，可用 $MH \theta$ 代替其偶力矩，此時所起之振動，與擺受重力作用

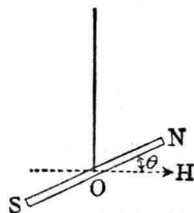
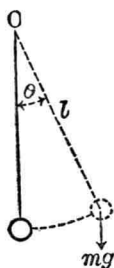


圖 383. 磁石之振動。

而生之振動相同。如圖 384，擺離開 θ 時，受 $mg \sin \theta$ 之

圖 384.
擺之振動。

力作用，對於懸點之力矩，等於 $mgl \sin \theta$ 。

如 θ 甚小，力矩成為 $mgl \theta$ ，故周期 T 為

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}$$

I 表惰矩。磁石亦與此同，故周期 T 為

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

I 表磁石對於鉛直軸之惰矩。

§ 339. 地磁之要素。

地球為一大磁石，其表面近傍成一磁場，對於小範圍之區域內，強度無顯著變化，可以看成均磁場。能在

水平面內轉動之磁針，受地磁力作用，當取一定之方向靜止。通過磁軸之鉛直平面，曰磁子午面，磁子午面與同地之地理子午面間之角度，曰偏角，亦稱方位角。

能在通過重心之水平軸周轉動之磁針，其軸如在磁子午面內，當與水平面作一定傾斜而成靜止。通常在北半球時，磁針之 N 極向下；在南半球時，其 S 極向下。此傾斜角，曰伏角，亦稱傾角。伏角由於磁針正向地磁力而來，故即等於地磁力之方向與水平面間之角度。

各地點之地磁力在水平方向之分力，曰水平分力，或曰水平強度。由偏角，伏角及水平分力之值，可以完全決定地磁力之大小及方向，故曰地磁之三要素。如

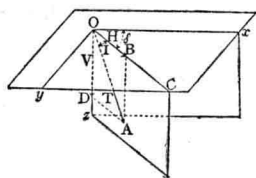


圖 385. 地磁之三要素。

圖 385, xOy 表水平面, Ox 向北, Oy 向東, Oz 鉛直向下。假定在 O 點之地磁力為 OA , 以 T 代之。通過 OA 之鉛直面, 與 xOy 相交於 OC , 則 COz 即此點之磁子午面, 而 xOz 則為地理子午面。兩者間之角 xOC , 即偏角, 以 δ 代之。又 $\angle BOA$, 即此點之伏角, 以 I 代之。自 A 引鉛直線 AB , 得 B , 而 OB 即此點之水平磁力, 以 H 代之, 故

$$T \cos I = H; \quad T = H \sec I.$$

由 H 及 I , 可知 T 之值; 又由 δ 及 I , 可知其方向。

§ 400. 偏角之測定.

先由天文觀測, 求地理子午線之方向, 再由磁針之平衡位置, 求磁子午線方向。此兩

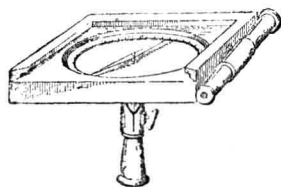


圖 386. 偏角計。

者間之角即偏角, 測定之裝置, 如圖 386, 曰偏角計。磁針在刻度圓板中心, 傍有望遠鏡, 其軸與 0° 及 180° 之直線平行。轉動圓板, 使磁針指 0° , 此時鏡軸正向磁子午線。再轉望遠鏡, 使其與地理子午線一致, 此時磁針指示之角度, 即所求之偏角。

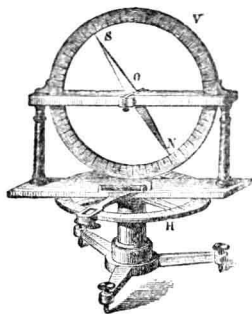


圖 387. 伏角計。

§ 401. 伏角之測定.

測定伏角之裝置, 曰伏角計, *inclinometer or dip circle* 如圖 387, 用極圓滑細軸, 穿過對稱形磁針中心 O , 軸之兩端以瑪瑙平台承之, 此台能在垂直軸周轉動, 轉角可由刻度盤 H 讀出之。

當磁針之鉛直面轉至垂直於地磁力時, 磁針直立, 再轉 $\frac{\pi}{2}$, 即入磁子午面。此時磁針之方向, 即地磁力之方向,

可由垂直刻度盤 V 讀出,其對於水平方向之角,即伏角。

§ 402. 水平磁力之測定。

利用 § 393 之結果,懸磁棒成水平,使作橫振動,則由 $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$ 可以求出 H 。但式中之 M ,其值隨時不同,溫度變化或其他少許之原因,均足以影響之,故每次實驗,均須隨時測定之。法使磁棒 NS 與磁子午面垂直,

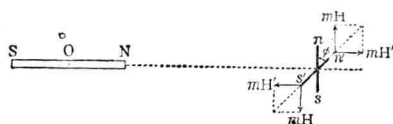


圖388. 水平磁力之測定。

對於偏角計之小磁針 ns 生偏向 φ ,如圖 388 所示。命 m 表磁針之極之強度, H' 表磁棒在 ns

處所生之磁力, l 表磁針之長,由 $mH'l \cos \varphi = mHl \sin \varphi$,

得
$$\frac{H'}{H} = \tan \varphi.$$

命 M 表磁棒之磁矩, r 表由 O 至 ns 中心之距離,由 § 396,

得
$$\frac{M}{H} = \frac{1}{2} r^2 \tan \varphi, \quad \text{及} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}.$$

故可求得 M 及 H 。測定 H 之裝置,曰磁力計。
magnetometer

§ 403. 磁圖。

表示地磁狀況之地圖,曰磁圖。將地面上偏角相等之點連成之曲線,曰等偏線;伏角相等之點連成之曲
magnetic map
isogonic lines

線,曰等伏線;水平磁力相等之點連成者,曰等水平力線;
 isoclinal lines lines of equal horizontal intensity
 全磁力相等之點連成者,曰等磁力線。
 isodynamic lines

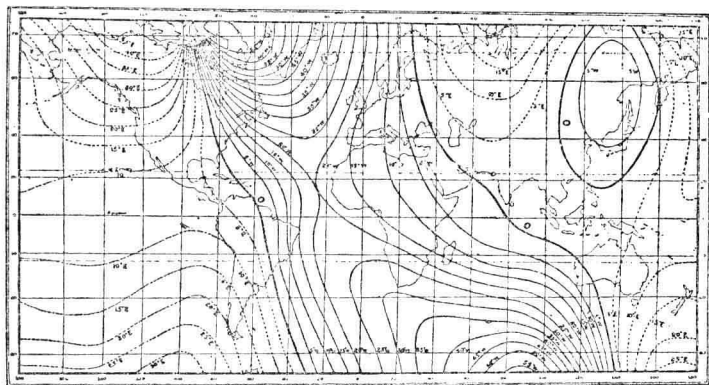


圖 389. 等偏線。

圖 389 表等偏線之配布狀況;實線表西偏角,虛線表東偏角,此兩者交界之處,偏角等於零,其軌跡曰無偏線,即圖中黑線所示之處。無偏線共有兩條,一由磁北極通過美洲東部至南冰洋,再由南極及磁南極通過澳洲西端及波斯灣至北冰洋而返北極。一在亞洲東部,成一橢圓形,故周圍悉為東偏角,但由日本附近至滿州及西比利亞東部,則為西偏角。

圖 390 表等伏線之配布狀況,伏角等於 0 之線,曰磁赤道,其位置即在地球赤道附近,環遶地球一周。但在南美略偏東,在東非及印度洋略偏北。伏角之值,由此或南或北,均逐漸增大,同時等伏線與緯線間之偏向,亦漸增加,直至南北各有一點,其伏角等於 90°,是為地球之磁極。其在北之一點,曰磁北極,位置在 70°5' N, 96°45' W; 其在南之一點,曰磁南極,位置在 73°30' S, 147°30' E。

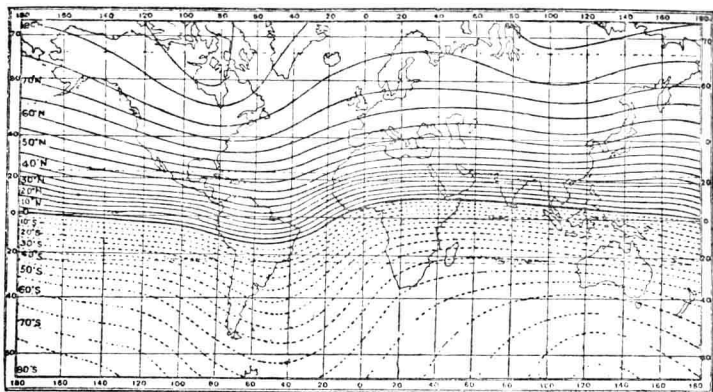


圖 390. 等伏線。

圖 391 表等水平力線之配布狀況。在南北磁極之值等於零，愈近赤道，其值愈大。最後達於極大值者，共有兩處：一在印度之東，約為 0.38 C. G. S. 單位；一在巴拿馬海峽之西，約為 0.36 C. G. S. 單位。

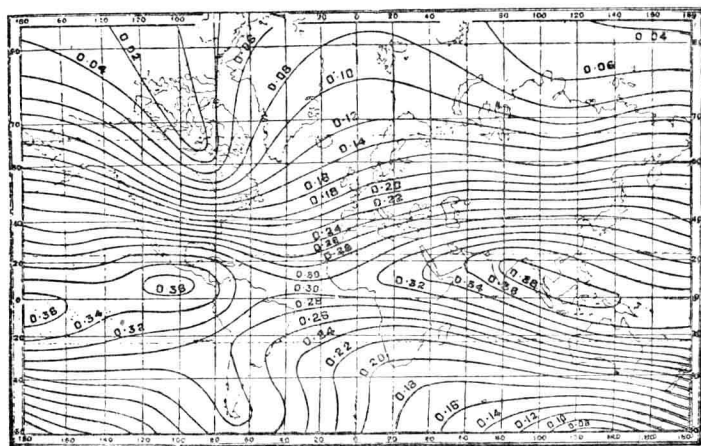


圖 391. 等水平力線。

§ 404. 地磁之變化.

前述地磁之各種數值,均不一定,隨時略有變化。即在一日之中,亦不免有若干之小變化,在長久歲月,又有極遲緩之變化,種種不一其致。大別之,有下列數種:

(1) 一日中之變化: 凡在一日之內所起者,曰一日中之變化,其狀況隨氣節而異,例如在日本東京地方,大體偏角之極大,在正午至午後二時,極小在午前六時至九時;極差不過六分至八分而已。水平磁力之極大極小,一日內各有兩次:極大在早晨及午後二時至四時,極小在午前九時至十一時及午後六時。

(2) 一年中之變化: 在一年內所起之變化,曰一年中之變化,例如在巴黎及倫敦地方,偏角以春分時爲極大,以夏至時爲極小。

(3) 長年變化: 經長久歲月始行顯著之變化,曰長年變化,例如在倫敦地方測來之結果,如表 53。

(4) 磁狂: 上述三種變化,進化頗緩,且有規律。除此而外,尚有臨時突發者,其變動異常劇烈,且無規則可尋,同時地表面大部分,均有同樣之變化發生,如是之現象,曰磁狂。

magnetic storm

§ 405. 羅盤.

在水平面內自由轉動之磁針,恆在磁子午面內,正向磁極而成靜止。利用此事實,由磁圖檢出所在地點之偏角,即可由磁針所指之方向,定輪船之航路,或保持一物體之方向。

爲此目的而設之裝置,曰羅盤,圖 392 所示者,即其一種。中央有 8 個平行小磁針,以兩條絲線連結而成。周圍爲鋁製之環,分作 32 主要區分。全體之質量約 11 克,其磁矩較小,惰矩較大,故振動時之周

表 53. 長年變化.

年	偏角	伏角
1576		71°50'
1580	11°15'E	
1600		72°00'
1622	6°00'E	
1657	0°00'	
1672	2°30'W	
1723	14°17'W	74°42'
1773	21°9'W	72°19'
1820	24°34'W	70°3'
1860	21°40'W	68°19'
1893	17°27'W	67°30'
1900	16°16'W	67°6'
1906	16°3'W	66°55'
1913	15°15'W	66°50'
1916	14°47'W	66°53'

compass

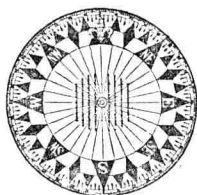


圖 392. 羅盤.

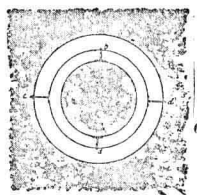


圖 393. 羅盤軸.

期甚大，雖遭風浪，亦可保其平衡。盤軸裝在遊動環上，環有互相垂直之兩軸，又圖 393，使羅盤恆取水平位置。更有補正磁石，免磁針受船鐵之影響。

晚近根據旋轉儀原

GYROSCOPE

理，造成旋轉羅盤，代替磁石。法用電動機使輪轉動，每分可轉 8,600 次，保持其軸在盤內作水平位置。因轉動及地球自轉之影響，軸恆與地軸平行，不稍偏移。故可使盤面之南北線，與地球之真正南北線一致。既不用磁石，故不受船鐵影響，其功效遠在通常用磁石者之上，軍艦及潛艇多用之。但旋轉羅盤之基礎，全在旋轉，故當電動機停止時，此器即完全失其作用，是其缺點而已。

§ 406. 磁誘導.

軟鐵片本無磁性，但在磁場內，即變成磁石，亦能吸引鐵粉，此現象曰磁誘導，使軟鐵化為磁石，則曰磁化，由 magnetic induction magnetization 此而得之磁，曰誘導磁。試將磁棒之 N 極，持近一軟鐵片，則與 N 接近之一端，現出 S 極，他端現出 N 極。兩磁石之異名之極，既相隔甚近，當受引力作用，如軟鐵片可以自由移動，必被磁棒引去。反之，以磁棒近磁片，則與磁石 N 極相近之處現 N 極，他端現 S 極，故磁石與磁之間，有斥力作用。但磁之效應甚微，不易察見而已。

一切物質在磁場內所受之誘導，均不出上述兩種。其與鐵同類者，曰常磁性體；其與鈹同類者，曰反磁性體；常磁性體中，以鐵，鎳，鈷三種之效應最著，特曰強磁性體。常磁性體之例，如鐵，鋼，鎳，鈷，鎂，鉻，鈾，鐳，鉑，及上列各金屬之鹽類，養氣，臭氣等。反磁性體之例，如鈹，磷，銻，鉛，銻，鉛，銀，銅，金，水，酒精，硫，及碲等。

§ 407. 磁化強度.

設想一細長磁棒，命 r 表橫斷面積， l 表長， m 表極之強度。由 § 394，知發出力線應為 $4\pi m$ 條。故貫穿橫斷面之單位面積之力線，為 $\frac{4\pi m}{s}$ 條。此 $\frac{m}{s}$ 可表其磁化之程度，曰磁化強度，通常以 I 代之，即 $I = \frac{m}{s} = \frac{ml}{sl}$ ，式中 ml 為磁石之磁矩，即 M ，而 sl 則為其全體積，即 V 。故

$$I = \frac{M}{V}.$$

即磁石之磁化強度，乃其單位體積所有之磁矩。

§ 408. 磁誘導度.

設想均磁場內有一軟鐵棒，此時產生力線之源有二：一為在軟鐵未進磁場以前，磁場本來應有之力線；一為組成此軟鐵棒之各小磁石所有之力線。

命 s 表軟鐵細棒之橫斷面積, H 表磁場之強度, 其方向與鐵棒一致。如棒不受磁化, 則通過其橫斷面積之磁力線, 應為 sH 條。今棒既由鐵製成, 當受磁化, 故無論棒內棒外, 貫穿單位面積之力線數, 均應相當加增。

棒端因誘導而生磁極, 此極通常在物質內所生之場, 有減少誘導場之效應, 情形頗為複雜。為簡便計, 仍設想一細長棒, 僅着眼於其中央之一段, 則由兩端而來之影響, 彼此互相抵消, 可以略去, 不必計及。命 m 表鐵內誘出之極之強度, 則由誘導而來之磁力線, 為 $4\pi m$ 條。因指示力線正向之一端, 成為 N 極, 故誘導之力線在空氣中之方向, 恰與場之力線方向相反, 而在鐵內, 則兩者相同。故通過鐵之力線數, 共計 $sH + 4\pi m$, 即每單位面積有 $H + 4\pi \frac{m}{s}$ 條, 即 $H + 4\pi I$ 。此量通常以 B 代之, 曰

磁誘導度, 有時省略之逕稱誘導度, 性質極為重要, 即
magnetic induction induction

$$B = H + 4\pi I.$$

通過鐵棒全體之總力線數, 即 Bs , 則曰磁束。magnetic flux 準此, 則 B

又可稱為束密度。flux density

如鐵棒甚短, 則其兩端近傍, 由誘導而生之極, 將生顯著之影響。此時鐵內之磁化場, 可分為兩部: 一由於外面原有之場, 一由於誘導所生之極。假使能將此棒

取去，但誘導所生之極，仍能保持原位，即可見其所生之場，恰與原來之場相反。即誘導所生者，恆與用作磁化之源之場相反，故有反磁化場之稱，其所表現之力，則曰反磁化力。此值雖可計算而得，但通常多用長棒，俾反磁場可以從略，或用曲成環形之棒，俾兩極異常接近，其效應互相抵消，至為便利。

用作磁化之源之外磁場，及由誘導而生之磁場，兩者合成之磁場，曰磁化場，或着眼於其作用，而曰磁化力。

就性質而言，所謂磁誘導度 B ，及磁化力 H ，均與通常之磁場，完全相同，故均用皋作單位以測定之。

§ 409. 磁化率及透磁率。

磁化強度 I 對於其所產生之磁化力 H 之比，曰鐵之磁化率，通常以 κ 代之，即

$$\kappa = \frac{I}{H}.$$

磁誘導度 B 對於磁化力 H 之比，則曰鐵之透磁率，通常以 μ 代之，即

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

將此代入 $B = H + 4\pi I$ 之式中，即得下列之關係：

$$\mu = 1 + 4\pi\kappa.$$

§ 410. 磁化曲線.

鐵在均磁場內時,如磁場變化,則誘導磁亦隨之而變。由實測可以求出磁化力 H 與磁誘導度 B 間之關係,如圖 394 之 (I)。當 H 不甚大時, B 亦不大; H 增加則 B 亦隨之而增,由 O 至 a 之一段,均作如是變化。此後 H 再加, B 之增加甚快,至 b 達其極大值 μ 。此後 B 之增加又復減緩,故 bc 之一部分,對於 H 軸,成爲傾斜甚小之直線。假使對於軸 H 及軸 B 均用同一單位,則 bc 對於軸 H 之傾斜,約等於 $\frac{\pi}{4}$ 。

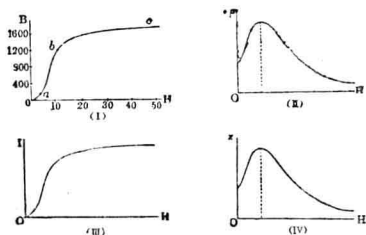


圖394. 磁化曲線.

應用 $B = \mu H$ 之關係,由圖 394 之 (I),可將 μ 與 H 之關係畫出,如 (II)。最後之 μ ,其值小而一定,至與 b 相當之時, μ 成爲極大。以後 H 再增, μ 轉減小,次第與其極限值 1 接近。按 μ 恆取正值,在真空中等於 1,在空氣中,亦與 1 相近,常磁性體之 μ ,恆大於 1。鐵之 μ 在五千至一萬之間,鎳爲三百,銻爲二百。反磁性體之 μ 恆小於 1,鉍之 μ 爲 0.99997。

圖 (III) 表 H 與 I 之關係,由實測,或由 $B-H$ 曲線均可求得。大致與 $B-H$ 相似,僅最後成水平,即 κ 次第與 0 接近,此狀態曰飽和。

圖 (IV) 表 $\kappa-H$ 關係,可由 (III) 求得。常磁性體之 κ 爲正,反磁性體爲負。

§ 411. 磁化循環.

磁性體所受之磁化程度,不僅隨現受之磁化力影響,即以前之磁力,亦有絕大之關係。茲就鐵論之,如圖 395,最初 H 等於零時, I 亦

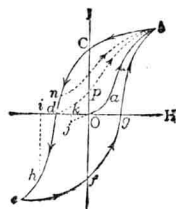


圖395. 磁化循環.

成零，以後 I 隨 H 增加，得 Oab 之一段曲線，而達飽和。此後若將 H 減小，暫時之內， I 仍保持舊狀不變，以後方開始略減，至 H 復成爲 0 時， I 尚留有一定之值，必須 H 減至 $-Od$ 之時， I 始完全成 0。此間之變化，如 bCd 之一段曲線。以後 H 再減，成爲曲線 de ，又達飽和，不復再減。自此使 H 增加，達於前此之最大值，則 I 成爲 $efjb$ 之一段曲線。照此，磁場強度由正而負，復由負而正，完成一循環，則 I 之變化可由曲線 $OabCdefjb$ 爲之表出，此曲線曰磁滯曲線，而此現象，則曰磁滯，如是之一循環，曰磁化循環。curve of magnetic hysteresis 當 H 由極大值減至 0 時， I 所保留之一定值 Oe ，曰殘磁。magnetic hysteresis 殘磁之值，由磁性體之種類及其以前之 I 曾達到之極大值而定。又 Od 所表者，爲使鐵消失其磁性所必需之反對方向之磁力，曰保磁力。magnetizing cycle 保磁力以軟鐵最小，鋼最大。residual magnetism

欲使磁誘導度 I 增加，必須由外供給以功，且磁化力愈大，所須之功亦愈大。每一循環之中，當磁場增加之一部分，對於一定之磁誘導度所需之磁化力，必較磁場減少之一部分所需者爲小。故當變化循 egb 進行時所作之功較多，而循 bde 進行時之功較少。故欲使其完成此曲線所表之一循環，必須供給以與此兩者之差相等之功。由理論可以證明所須之功，可由此曲線內所包含之面積表出，其所耗去之能，表現爲熱，不可得而利用，故曰磁滯損失。coercive force hysteresis loss

§ 412. 攸英之分子磁石說。

說明鐵之磁化現象，有攸英之分子磁石說，以爲鐵之分子，均爲小磁石。Ewing's theory of molecular magnet 在尋常狀態時，此等小磁石之軸，縱橫交錯，至不整齊，其作用互相抵銷，故不呈磁性。但若以磁化作用之，則此等小磁石，次第轉向一定之方向，遂呈磁性。試用玻璃管盛鐵粉，放在磁場內，鐵粉均成小磁石，其軸與管平行，故此玻璃管之全體，成爲一磁石。但若將磁場取去，將管略爲搖動，則鐵粉排列，又復錯雜如初，不呈磁性矣。

鋼之分子，轉動不如鐵分子之易，故最初入磁場時，不易化爲磁石，同時既已排成一定方向以後，非用強大之力打擊，或加以熱，決不易恢復舊態。換言之，即鋼不易磁化，亦不易失去其磁性。

又鐵之磁化，必有一定之限際，亦可由此說爲之說明。即全體分子均已排列成爲磁化力之方向以後，其磁性已達於極限，以後雖再增加磁化力，亦無使磁化強度更行加大之理，恰與上述實驗吻合。

馬克斯維耳^{Maxwell}由光學現象，推知此等排成磁化方向之分子，在其長軸周圍轉動不已。因此引起周圍能媒，亦在磁誘導線周圍轉動，結果在磁誘導線方向上發生張力，其直角方向上發生壓力。同名極相引，異名極相斥之現象，可由此項張力壓力說明之。

第二章 靜電

§ 413. 帶電現象.

用絨布擦火漆棒，或用綢擦玻璃棒，均能吸引輕物，如塵埃紙屑等，如圖 396。凡物體具有此項性質時之狀態，曰電態，使物體表現此態之手續，曰帶電，由通常狀態達電態之變化，曰帶電現象，而其原因，則歸之於電。

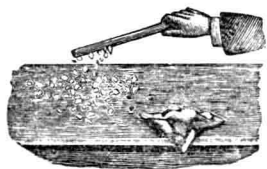


圖 396. 帶電。

而其原因，則歸之於電。
electricity

用絲線懸燈芯球，以帶電後之物體近之，如圖 397，球先被棒吸，如左，既接觸後，一部分

之電傳於球上，
兩者復行分離
如右。如最初
所用之帶電體
為玻璃棒，於球
棒分離後用火
漆棒近之，球又
被其吸引。反

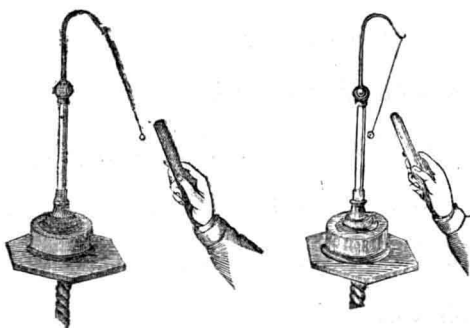


圖 397. 電擺。

之，先用火漆棒後用玻璃棒，亦然。由此可知電有兩種，
性質恰相反。用綢在玻璃上擦出者，曰陽電；
用絨布在火漆上擦出者，曰陰電，即同種之電相斥；異種之電相引。
positive electricity
negative electricity

§ 414. 導體及非導體。

用毛布擦木塊，不能帶電，但若在木塊上裝一玻璃
柄，以手執柄，然後擦木，即可帶電。如在木塊上，結一銅
線，則帶電後，銅線最遠之一端，亦呈電態。即木材金屬
等，一部分若有電發生，立即傳至其他各部分者，曰導體。
反之，如火漆玻璃等，一部分帶電不能移至他部分上者，
曰非導體，或曰誘電體，亦稱電媒。地球為導體，故帶電
conductor
non-conductor dielectric body dielectrics
體與地接觸，電即傳至地球全部；人體亦為導體，故手與

帶電體接觸，其電即經由手而傳至地上。手執木塊，不能使其帶電，即由於此。如用一玻璃棒，隔斷木塊與手之接觸，電無路可傳，故仍留於木上。用此方法隔斷電之連絡，曰絕緣，故非導體又有絕緣體之稱。
to insulate insulator

導體之例，如金屬，木炭，石墨，酸類及鹽基之水溶液，不純粹之水等。非導體之例，如硬橡皮，蟲膠，琥珀，火漆，硫黃，玻璃，綢，毛皮，瓷器，乾紙，油，橡皮，馬來樹膠，松香，乾燥之空氣等。此兩者並非性質上有異，僅傳導之程度有差。故介於此兩者之間，如酒精，乾燥之樹，紙，稻草，潤溼之空氣等，既非良導體，而傳電又不多者，曰半導體。
semi-conductor

§ 415. 驗電器。

檢查物體是否帶電，或所帶之電為陰為陽，可用圖

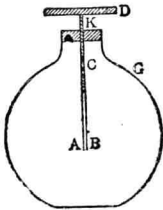


圖 398. 驗電器。

398 之裝置，是曰驗電器。
electroscope 在玻璃瓶 G 之軟木塞 K 中，插入金屬棒 C，下附金箔二枚，如 A, B。塞上塗蠟，使棒絕緣，棒之上端附一金屬板 D。

使欲檢查之物體，與 D 接觸，其電之一部分傳至 D, C 及 A, B。A 與 B 既帶同種電，應受斥力作用，互相分開，

故見金箔張開，即知確係帶電，金箔不動則否。如先令帶電之玻璃與 D 接觸，使金箔得陽電後，再令欲檢之物體與 D 接觸，如金箔角度增加則為陽電，減小則為陰電。

由驗電器可以證明無論由摩擦或其他方法發生之電，陰陽兩種必同時發生，且量亦必相等。例如用絨布套在玻璃棒上，使絨布與火漆摩擦，然後持絨布或火漆，各各單獨與驗電器之頂接觸，均可使金箔張開。故知兩者均各帶電。但若將此兩者同時與驗電器接觸，則金箔閉垂如故。故

表54. 摩擦次序。

1	獸皮
2	絨布
3	蟲膠
4	火漆
5	玻璃
6	紙
7	絹
8	磨砂玻璃
9	手
10	金屬
11	橡皮
12	硫磺
13	硬橡皮
14	塗漆錄齊軟皮

知兩者所帶之電，其量恰相等，而其性質，則恰相反。

凡可由摩擦使其帶電之物質，按其順序，列為一表，如表 54，是曰摩擦次序，或曰帶電列。在表中任取兩種摩擦時，其位置在前者，恆帶陽電，在後者恆帶陰電，兩者相隔之距離愈遠，所帶之電愈多。

§ 416. 電之理論。

關於電之本性，歷來有各種學說，茲分條述之如次：

(1) 流體說：此為 1870 年以前之舊說，中又分兩派：

一派創自辛麥，曰 二流體說，以為陰電及陽電，同為無重

Symmer two fluids theory

量之流體，性質相反，如等量混合，則成中和，不現帶電性質。
neutralization
 一切物體，當其在自然狀態，均含有此兩種流體之等量而成中和。但一經與他物體摩擦，則陽電移至一物體，陰電移至他一物體，兩者互相分離，遂成爲一帶陽電，一帶陰電。且同種流體相斥，異種流體相引。

此外尚有一派，創自佛蘭克林，曰一流體說，以爲流體僅有一種，一切物體均含有其相當之分量，是爲其通常之狀態。如與他物體摩擦，則流體由此移彼，結果一方所餘者較通常少而帶陰電，他方較通常多而帶陽電。

以上兩說，均主張兩帶電體間之作用，可以隔遠距離進行，是爲間隔作用，與介在兩者間之媒質無關。
action at a distance

(2) 媒質說：此說盛行於1870年至1900間，以爲間隔作用不合於理，一切電磁作用，均可歸之於其周圍之媒質中發生之變化，此項媒質，亦即解釋光現象時所假想之能媒。即一切電磁現象，均可用能媒之變形及運動表出。此說最初創自法刺第，後經馬克斯維耳由數學上研究成爲光之電磁說，最後更得赫芝之實驗證實，較流體說確與事實更進一步。
ether
Faraday Maxwell
electromagnetic theory of light Hertz

(3) 電子說：本世紀以來更有電子說，係折衷前兩說而成。以爲一切物質之原子，均由帶陽電之核及若
electron theory
nucleus

于帶陰電之電子,環繞於核周而成。物質種類不同,則其電子數亦異,但電子之總電量,必與其核之自由陽電量相等。假使電子數較通常應有之數略少,則此原子即帶陽電;略多則帶陰電。由此可見其認電為物質之點,與流體說同。但又主張一切電磁現象,由於電子對於周圍能媒之作用而來,故其否認間隔作用,同媒質說。

§ 417. 庫隆定律.

由實驗求得作用於兩帶電體間之引力或斥力,與兩者之電量之乘積為正比例,與其間距離之平方為反比例。此關係,曰庫隆定律。Coulomb's law 更經比較結果,知作用力之大小,與周圍媒質種類,亦有密切關係,與 § 390 相似。命 q, q' 表兩帶電體所有之電量, r 表其距離, f 表作用之力,則得

$$f = c \frac{q q'}{K r^2}.$$

c 由單位選擇而定, K 由媒質種類而定,同屬常數。

§ 418. 電量之單位.

設想真空中有兩球,球心相距 1 呎,球上帶同種且等量之電,此兩者間作用之斥力等於 1 達時,各球上所有之電量,定為電量之靜電單位。故在真空內,電量等

electrostatic unit of quantity of electricity

於 q 及 q' 之兩帶電體作用之力，應為 $f = \frac{qq'}{r^2}$ 達。而在他種媒質中，則為 $f = \frac{qq'}{K r^2}$ 達。即用此種單位時，庫隆定律中之 c 成為 1， K 則由媒質而定，曰電媒常數，或曰比誘容。在尋常壓力下之空氣中， $K=1.000,590$ ，故即看作 1 亦無礙。由 $qq' = K r^2 f$ ，得電量之次式如下：

$$[q] = [K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-1}$$

上定之電量單位過小，不適於用，故又取其 3×10^9 倍，定名曰 1 庫，是為電量之實用單位，與靜電單位相對。又帶電體所具有之電量，曰帶電體之電荷。

§ 419. 靜電誘導.

取一中空之絕緣金屬圓筒或網套，如圖 399 之 A ，與驗電器相連，用絲線懸帶電體 B 入內，觀箔開可知 A 已帶電。如 B 與 A 未接觸，即將 B 取出，則箔隨即垂合，知 A 上之電同時消滅。凡如是一帶電體能使遠隔之

他物體帶電之現象，曰靜電誘導，引起此

現象之本源，即原帶電體 B ，曰誘體；受其

誘導而帶電者，即物體 A ，曰被誘體。又

由實驗可以檢出被誘體上與誘體接近

之一部分，帶異種之電；遠隔之一部分，帶

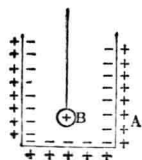


圖 399. 靜電誘導.

同種之電。例如 B 爲陽電，則 A 之內面帶陰電，外面帶陽電。去 B ，箔復合，故知 A 上誘出之兩電，其量恆相等。

如誘體全部，爲被誘體包圍，則被誘體內外兩面所帶之電，均各與誘體之電荷相等，此事仍可用前述實驗證明。先將 B 垂下，則箔張開，使 B 與 A 接觸，箔張如故。取出 B 察之，其上電荷已失，可知非與 A 內面之陰電量相等，不能如是中和。又將 B 垂入 A 內，使 A 與地相連，則 A 之陽電傳入地，金箔因而閉合垂下。此時使 A 與地之連絡斷絕，令 B 與 A 之內部接觸，箔仍不開。因 B 上之電，已與 A 內之電中和使然。但若斷絕 A 與地之連絡，不令 B 與 A 接觸，即將 B 取去，箔又張開。可知 A 內所生之陰電，其量恰與 B 之陽電量相等。

上述實驗創自法刺第，當時使用之中空導體爲一冰桶，故此實驗曰法刺第之冰桶實驗。

Faraday's ice-pail experiment

§ 420. 由誘導而起之引力。

執帶電玻璃棒 A ，引絲線所懸之小金屬球，如圖 400，球上與棒接近之端 B 帶陰電，遠方 C 帶陽電。因 BA 近而 CA 遠，故引力大過斥力，球被棒引去，即由於此。

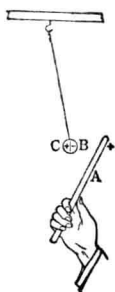


圖400. 誘導之引力。

§ 421. 由靜電誘導使驗電器帶電之方法.

帶電體不必與驗電器之頂直接接觸,只在其近傍,金箔即可張開,此亦靜電誘導之現象。即與帶體相近之頂,由誘導得異種電,遠隔之金箔得同種電。如於此時,使頂與地相連,則遠處變成地球,同種電應移至地面,故箔垂下。再將原帶電體取去,同時斷絕驗電器與地面之連絡,則原在頂上發生之電,傳至箔上,故箔又張開。

§ 422. 物體上電之分布.

非導體上如有一部分有電,應即限於原處,不能任意傳布。在導體則否,一部分有電,立即遍傳各部。由庫隆定律,不難證明導體上之電,均必在其表面上,內部決不能有少許之電存在。茲由實驗證之如下:

取一中空導體,全部閉合,僅留一小穴,放在絕緣臺上,令其帶電。再取一小銅板,上附玻璃柄,名曰驗板,以手執其柄,使銅板與導體內外各部分相接觸,然後檢查之,即知表面上各處均有同樣之電,而其內部則否。

或用圓錐形麻袋放在絕緣臺上,附絲綫兩條於其尖端,曳綫可令麻袋之表裏自由翻轉。如前使袋帶電,用驗板檢查之,無論表裏如何翻轉,電恆在於袋之外面。

§ 423. 表面密度.

導體表面上存在之電量,各部分不必盡同。就表面上任意一點而論,在此點周圍取一小面積,測出此小面積上之電量 q ,以面積 S 除之,即得單位表面積上所有之電量,曰表面密度,通常以 σ 代之,即

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

如電在表面上配布不均,則以此表其平均表面密度,又

$$[\sigma] = [K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{-\frac{1}{2}} [T]^{-1},$$

可由 q 之次式求出。

絕緣球體之近

傍,如無他導體或帶

電體存在,則其表面

上之電,配佈極勻,各

點之 σ 均相等。如在各點引法綫,取其長與 σ 比例,則

各法綫之頂點之軌跡,成一同心球,如圖 401 之 a 。絕

緣圓筒,兩端作圓形者, σ 以曲率大處最大,如 b 。相切

兩球,以切點之 σ 最小,距此愈遠愈大,如 c 。如此兩球

大小不同,則小球上之 σ 較大。橢圓體則以尖端處之

σ 最大,如 d 。平面圓板之平面部分, σ 大致相同,但愈

近其邊緣,其值愈大,如 e 。

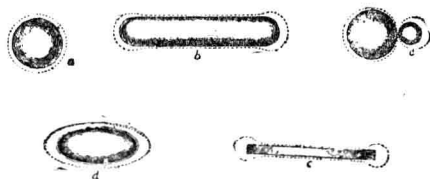


圖 401. 表面密度。

§ 424. 尖端作用.

導體之尖處,聚電最多,故其表現之電力,亦為最大。凡有尖銳部分之導體,因斥力甚大,所帶之電,漸次由此逸散於空中,此作用曰尖端作用。例如圖 402, 在起電機之一極上,裝一屈成直角之針,因電由針端傳至近傍之空氣,空氣與針尖,均帶同種之電,應受斥力作用,空氣

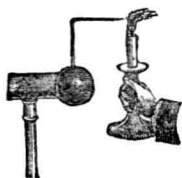


圖 402. 電風。



圖 403. 電風車。

不得不離開尖端流去。繼之而來之新空氣,不久亦受同樣作用流開,以燭火近之,即可見其被吹向一方,是為電風。又如圖 403, 於直立針上支一輕金屬架,其尖端曲成同一方向,並能在支點周圍轉動,則各尖端同受空氣之反動,全體應向箭頭所示之方向轉動,是曰哈密爾頓之電反動風車。導體上之電,受尖端作用,放出空中後,失去其帶電之現象,曰放電。

§ 425. 起電機.

欲得多量之電,須用特殊之裝置,此類裝置,通稱為起電機,種類頗多,茲述其重要者數種如次:

electric machines

(1) 電盆: 電機之最簡單者,當推圖 404 所示之電盆,由兩部分而成.一為硬橡皮圓板,放在木台上,如 *A*,一為略小之金屬圓板 *B*,附玻璃柄 *G*. 用貓皮摩擦或敲打 *A*,將 *B* 蓋上,以手指略觸 *B*,執 *G* 取去之,其

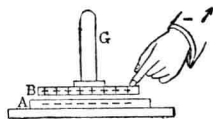


圖 404. 電盆.

上即帶電. 令 *B* 上之電移至其他導體後,再蓋在 *A* 上,仍照前法以手指觸 *B* 隨即取去,又復得電. 如是反覆行之,即可蓄積多量之電. 其理如下: 貓皮與 *A* 摩擦,則 *A* 得陰電,但 *A* 之表面凹凸不平,故 *B* 在其上時,真正接觸處不過三五點而已,其餘部分均由靜電誘導,使 *B* 之下面生陽電,上面生陰電. 觸 *B*,則陰電經手移入地,提起 *B*,陽電即遍佈其上. 且 *A* 上之電,並不因此減少,故可反覆行之.

(2) 誘導起電機: 比電盆更進一步,則有種種之起電機,其中最著名者,為威姆哈斯特誘導起電機. 主要部分為兩圓板,上塗假漆,均可轉動,但轉動方向,一反一正,兩板外面各貼若干枚錫箔,箔前有金屬刷毛各二,由金屬棒相連. 板面轉動,則刷毛次第與各錫箔接觸而過. 連結兩板前之刷之金屬棒,互成垂直. 此外尚有絕緣之

金屬梳,左右各一,齒對圓板,與板相近,但不相連. 用金屬線將兩梳各連結至放電之一極. 為多蓄電起見,在放電部分下各裝來丁瓶(參照 § 443) 一個.

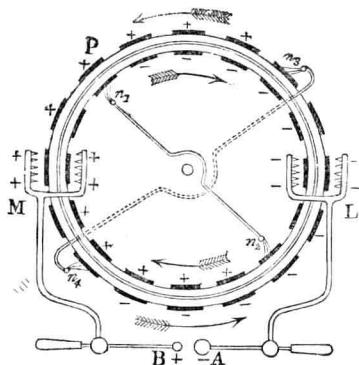


圖 405. 威姆哈斯特起電機.

圖 405 之兩圓,即表兩玻璃板,一內一外,內圓表前面之板,外圓表後面之板. 前板作順時針轉,後板作逆時針轉,毛刷 $n_1 n_2$ 與前板錫箔相觸, $n_3 n_4$

與後板之錫箔相觸。假定後板上方之錫箔，開始時帶有少許陽電，此箔向左轉去，至於 m_1 之位置時，由靜電誘導，在 m_1 及與之相接之前板錫箔上發生陰電，於 m_2 及與之相接之錫箔上發生陽電。又與 m_1 一度接觸後，此帶陰電之箔，轉至 m_3 時，在此處當誘生陽電，於 m_1 誘生陰電。如是，上半段之前板上錫箔，恆生陰電；後板上錫箔，恆生陽電。下半段與此正相反對。即錫箔一方面負有誘導體之職務，他方面又負有輸送電量之任務。板愈轉動，所發之電愈強。梳之位置，在前後兩板有同種電之兩處，左右各一。左邊之梳，齒向陰電，右邊之梳，齒向陽電，均於其他一端，生反對之電。但齒之尖端，有電風發生，故與所對之錫箔之反對電，互相中和。結局只有與左邊之梳相連之一極，帶陽電；與右邊之梳相連之一極，帶陰電。

§ 426. 焦電。

有種結晶體在通常狀態時，不呈電態，但若加熱，則其表面之一部及與之相對之一部分，各發生反對之電。反之，如不加熱，轉而使其冷卻，亦有電發生，且與加熱時相反。此現象曰焦電，其最富於此

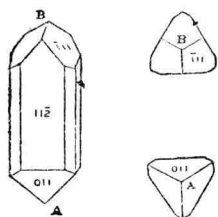


圖 406. 焦電。

性者為電氣石，屬於六方晶系，形如圖 406，兩端 A 及 B 各為三斜面之交點，但 A 處各面之稜，均達於柱體之隅角，而 B 處者則達於柱體長面之中點。故 A 曰焦陽極，而 B 則曰焦陰極。加熱則 A 陽 B 陰；冷卻則 A 陰 B 陽。據克爾文說明，電氣石之各分子，

一端帶陽電，一端帶陰電。此等分子之電

軸，與一方向平行，故全體之電氣石之一端帶陽電，他端帶陰電。但空氣中，通常恆帶有電，與電氣石之兩端，互相中和，故在通常狀態時，不呈電態。但此種分子現象，隨溫度而異，大致與溫度相此例。故

當溫度變化進行中，空氣中所含有之電，不能與電氣石兩端之電相中和，於是發生焦電。且此時所現之極，在溫度升高與降低，正相反。

§ 427. 壓電。

又加壓力於電氣石，使其壓縮，或加張力使其伸長，均能使其兩端發生反對之電。伸長時現出者，與加熱時同；壓縮時出現者與冷卻時同，此現象曰壓電，可由結晶體之分子現象說明之。除電氣石外，水晶亦有同樣之性質，可利用之以測放射質（參照 §581）對於空氣之離化作用。又近時測定壓力之變化，亦有利用之者。

第三章 電勢及電容

§ 428. 電場。

在帶電體之近傍，另放一帶電之小球，即見兩者之間，有引力或斥力作用。由此可知，帶電體周圍之空間，亦具有特殊之性質，與磁場相似，是曰靜電力場，或簡稱之曰電場。field of electrostatic force 帶電小球在電場內任意一點所受之電力，electrical field 由小球上所帶之電而定。如不問小球所帶之電，專比較場內各點之電力時，則設想一質點，帶有單位陽電荷，通稱之曰單位正荷。unit positive charge 單位正荷在場內一點所受之電力，曰電場強度，有時亦稱之曰電強度，如以 E 表之， q 表在場內一點之電荷， f 表作用之力，則其關係如下：

$$f = q E;$$

$$[E] = [K]^{-\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{-\frac{1}{2}} [T]^{-1}.$$

§ 429. 電力線.

在電場內，設想一曲綫，其各點之切綫方向，與單位正荷在同點時所受之電力之方向一致，如是而得之曲綫，曰電力線。即電力綫所向之一方，為帶有小量陽電荷之輕物體能運動時所取之方向。故電力綫恆始於帶陽電之物體而終於帶陰電之物體，頗與磁力綫相類。在電場內，設想一單位面積，與電場垂直，通過其上，如引 $\frac{E}{4\pi}$ 條力綫，即可以此項力綫數，代表其電場強度。用此規定，則帶有陽電量 q 之物體，發出之電力綫總數應為 q 。此規定與磁力綫之規定，略有不同，須注意及之。

又磁石之 N, S 兩極，不能分離，其強度相等，故由一磁石發出之力綫總數，恆與終於其 S 極之力綫數相等。電荷則否，陰陽均可獨立存在，故電力綫或由帶電體向外發出，不復再返；或全數由外部進入帶電體內，決不再出，前者為陽電，後者為陰電。帶電體之表面上任何部分，如有單位電荷存在，即有一條電力綫或由此發出，或由此沒入。故若單位面積上有 s 條電力綫，即知其處

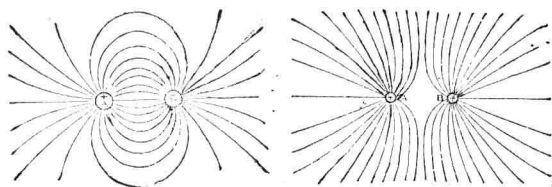


圖 407. 異荷力線.

圖 408. 同荷力線.

存在之電荷，爲 s 單位。故此 s 卽帶電體之表面密度。

如有兩帶電體，一帶陽電，一帶陰電，則其力線，當如圖 407。如兩者均帶同類之電，則其力線如圖 408。

假定沿力線之方向上，有張力作用，其直角方向上有壓力作用，卽可說明同荷相斥及異荷相引之理。物體上之電荷分布狀況，如有變動，則各單位電荷必連同其力線，在物體之表面上移動。但力線方向上，既假定有張力作用，故有愈縮愈短之傾向。如有非導體介在兩導體之間，則力線不能作無限縮短。如兩導體間有一線之連絡，則力線之端，卽沿此連絡線上移動，縮成無限短小，結局遂消歸烏有。

§ 430. 靜電誘導之電力線。

設想一誘體 A ，如圖 408，其上帶陽電，近傍有一絕緣導體 B ，則電力線當如實線所示，由 A 發出之力線之

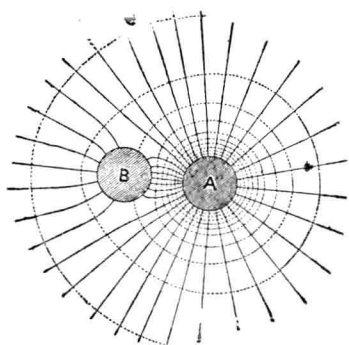


圖409. 誘導之電力線

中,只有一部分終於 B ,故此一部分之 B 上帶陰電,同時亦有一部分之電力線,由 B 發出,終於周圍其他之導體,如牆壁等類之上。故此一部分之 B 上帶陽電,而與之相應之陰電,則出現於牆壁等之上

又 A, B 間之力線,因有張力作用,使 B 上陰電,聚集於與 A 正對之一面,但同時又受斥力作用,故並不集成一點,而由 B 發出之力線,聚集於其他之一端,亦專賴此斥力。

如將 B 連地,則力線當如圖410,由 A 發出者,大部分終於 B ,由 B 並無一條力線發出,故 B 上純為陰電。

電力線與磁力線形式雖極相類,性質則迥不相同。磁力線連續不斷,且必通過磁石本身,電力線則決不能存在於導體之內部。

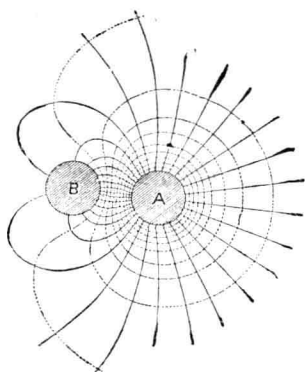


圖410. 連地時誘導之電力線

§ 431. 電勢.

設想一球體，帶陽電 q ，在其場內一點 Q ，如圖 411，放一單位正荷之質點，命此兩者間之距離為 r ，則此質點所受之斥力，應為 $\frac{q}{r^2}$ 。欲反抗此項斥力作用，將質點移近帶電球體，勢必由外供給以相當之功。兩者相隔愈近，斥力愈大，所供給之功亦隨之而增。由 Q 將質點移至 P 所要之功，成為 P 點之勢能，而蓄積於媒質內部。其情形頗與壓縮空氣蓄積由外得來之能相似。由 P 及由 Q 移動相等之距離，所須之功，各不相同，其差即等於在 P 點之勢能。在地面舉高物體，勢能之增加等於舉物時所作之功，其情形亦與此同。

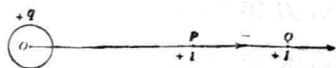


圖 411. 電勢.

如質點與帶電球體之距離，成為無窮大，則斥力成為零，故質點對於球體 O 之電勢，亦等於零。如將此時質點之勢能，定為標準，則當其在 P 時，所有之勢能，即等於從無窮遠處將此質點移至 P 時所須之功。此功曰 P 點之電勢。即電場內任意一點之電勢，為將單位正 electrical potential 荷從無窮遠移至此點時所要之功。又可云：電場內一點之電勢，係單位正荷在此點時所有之勢能，但以單位

正荷在無窮遠時，爲計算勢能之標準。

在帶陽電之物體之場內，單位正荷愈近此帶電體，其電勢愈大，同時受帶電體之斥力作用，有離去帶電體之傾向。故在帶陰電體之場內，陽電荷有由勢高處移向勢低處之傾向。反之，在帶陰電體之場內，單位正荷受引力作用，不必自外得功，亦能自行移向帶電體。故帶陽電體之場內，其電勢如爲正，則帶陰電體之場內其電勢應爲負。此時單位正荷反抗引力作用，由帶電體離去愈遠，所需之功愈大。但同時既受引力作用，陽電仍有由勢高處移向勢低處之傾向。故不問帶電體所帶之電爲陰爲陽，在其場內之陽電荷，恆由勢高處移向勢低處，與水由高向低，熱由高溫移向低溫相同。

命 V 表電場內一點之電勢，將帶有陽電荷 q 之一質點放在此處，則此質點之勢能，應爲 qV ，即 qV 成爲功。故電勢 V 之次式，不難由 q 及功之次式推出之，即

$$[V] = [K]^{-\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}} [T]^{-1}.$$

§ 432. 電勢之計算.

設想一點 O ，如圖 412，有一球體，其上帶有電量 $+q$ 。又一質點，帶有單位正荷，位置在 Q 。求將此質點由 Q

移至 P 時之功。先

將 QP 分作 n 等分,在

Q 點時所受之力為

$\frac{q}{r_0^2}$, 在 r_1 時為 $\frac{q}{r_1^2}$, 故

在此兩點間之平均電力應為 $\frac{q}{r_1 r_0}$. 故由 r_0 移至 r_1 之

功,等於 $q \frac{r_0 - r_1}{r_1 r_0}$, 即 $\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_0}$. 同樣由 r_1 至 r_2 為 $\frac{q}{r_2} - \frac{q}{r_1}$, 餘

做此. 由 Q 移至 P , 為此全體之和, 即 $\frac{q}{r} \times \frac{q}{r_0}$.

如 Q 在無窮遠, 則 r_0 成爲 0, 此時將單位正荷由無窮遠移至 P 點之功, 即 P 點之電勢 V_P , 應成爲

$$V_P = \frac{q}{r}.$$

同樣, 由無窮遠移至 Q 點之功, 即 Q 點之電勢 V_Q , 即

$$V_Q = \frac{q}{r_0},$$

而由 Q 移至 P 之功, 如命之爲 $V_{P,Q}$, 則

$$V_{P,Q} = V_P - V_Q.$$

即完全由前後兩點之電勢之差而定, 此差曰 **勢差**. 又 potential difference

半徑 R 之帶電球面上一點之 V , 爲 $\frac{q}{R}$, 即此球體之電勢.

§ 433. 等勢面.

場內電勢相等之各點之軌跡, 成一曲面, 曰 **等勢面**. equipotential surface

單位正荷沿等勢面移動, 任取何種徑路, 其功均等於零,

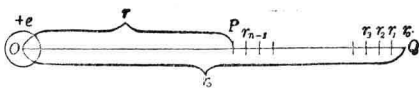


圖 412. 電勢之計算.

作用之電力方向，恆與電力線一致，如將此力分解為兩分力，一在等勢面內，一與之垂直。如帶電體之位置，適在電力線與等勢面交點處，則受平行力作用，必沿等勢面移動，如其移動與平行分力之方向一致，必有功發生。此與等勢面之定義相矛盾，故知與等勢面平行之分力，恆等於零。換言之，力線恆與等勢面垂直相交。

§ 434. 導體之等勢面。

導體帶電，全部均分布於其表面，用導體之線連結其表面上任何兩點，均無電之移動，可知其表面上各點之電勢均相等，即導體表面為等勢面，力線與各點之法線恆一致。導體表面既為等勢面，導體內部又不能有電量存在，故其內部不能有較表面更高或更低之等勢面。即導體內部任何一點之電勢，均與表面上之點之電勢相等。半徑 R 之導體球，其表面上一點之電勢為 $\frac{q}{R}$ ，故其內部任何一點之電勢，亦等於 $\frac{q}{R}$ 。

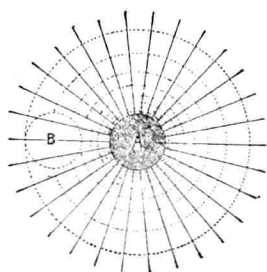


圖 413. 等勢面。

圖 413 表球形導體 A 帶陽電時之等勢面，均作同

心球形，如虛線所示。如其傍有絕緣而未帶電之導體 B ，則由靜電誘導作用， B 亦帶電，假定 A 之力線及等勢面，並不因此變化，則 B 左隔 A 較遠，其勢應略低， B 右之勢略高。一方面在同一導體上，如所帶之電不變，則其表面上，不能容兩種不同之勢，同時存在。由知可知，導體 B 在 A 之電場內時，其情形與尋常不同。實際上之力線及等勢面，如圖 409，因有 B 之存在， A 上之分布應生變化， B 上亦不一律，但均在使兩者之表面，各成爲等勢面。如 B 連地，則如圖 410。

§ 435. 勢差之單位。

如將單位正荷由一點移至他點時所須之功爲 1 厄，則此兩點間之勢差定爲 C. G. S. 靜電制之單位勢差，
C. G. S. electrostatic unit of potential difference

其 $\frac{1}{300}$ 定爲實用單位，曰 1 弗，又 10^{-3} 弗曰毫， 10^{-6} 弗曰微。
practical unit volt millivolt microvolt

$$1 \text{ 弗} = \frac{1}{300} \text{ C. G. S. 靜電單位。}$$

換言之，將帶有 1 C. G. S. 靜電單位之電量，由一點移至他點，如其所須之功，等於 $\frac{1}{300}$ 厄，則此兩點間之勢差，爲 1 弗。故 1 庫之電量，在勢差等於 1 弗之兩點間移動時，所須之功，應爲 $\frac{1}{300} \times 3 \times 10^9 = 10^7 = 1 \text{ 朱}$ 卽

$$\text{弗} \times \text{庫} = \text{朱}$$

1 庫之電量在勢差等於 1 弗之兩點間移動時,所須之功適為 1 朱。 或 1 庫之電量,在兩點間移動時,如其所須之功等於 1 朱,則此兩點間之勢差,適為 1 弗。

§ 436. 勢降度.

設想兩等勢面 V_1 及 V_2 , 如圖 414, 異常接近, 其力線 ab , 與之垂直, 其間之電場強度 F , 可以看成不變。假定 $V_2 > V_1$, 則 F 之方向, 如箭頭所示。再設想一單位正荷, 反抗電力作用, 由 b 移至 a , 則 F 所作之功, 應為 $-F \times ba$,

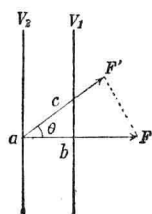


圖 441. 勢降度.

因 F 與變位 ba 之方向相反, 故冠負號。此功應與 a, b 間之勢差 $V_2 - V_1$ 相等,

$$F = - \frac{V_2 - V_1}{ba}.$$

右端表力線方向上每單位長之勢差之減少率, 曰勢降度。即場內一點之 potential gradient

強度等於力線方向上此點之勢降度。

其次命 F' 表任意方向 ac 之電力, 此方向與 ab 間之角度, 命為 θ 。設想將單位正荷由 c 移至 a , 照前辦法, 其關係應為 $F' = - \frac{V_2 - V_1}{ca}$ 。式中之右端, 表 F' 方向上之勢降度。故場內任何一點在任何方向上之電場強度, 均與此方向上之勢降度相等。

§ 437. 導體之電容.

使導體之電勢升高 1 單位所須之電量,曰此導體之電容,通常以 C 代之。如命 q 表導體所有之電量, V electric capacity 表其電勢,則得

$$q = CV,$$

故 $[C] = [K][L]$.

例如半徑 r 之球,如有電量 q ,其 V 應爲 $\frac{q}{r}$,前已述及之,故 C 成爲 $\frac{q}{V} = r$. 即在數值上,球之電容等於其半徑。

§ 438. 電容之單位.

用單位電量可以使其電勢升高 1 單位時,此導體之電容,曰 1 電容之 C. G. S. 靜電單位。實際之電容單位,曰法,即以 1 庫電量,使其其電勢升高 1 弗時之電容 farad 按 1 庫等於 3×10^9 (C. G. S. 靜電單位),1 弗等於 (C. G. S. 靜電單位) 之 $\frac{1}{300}$, 故 $3 \times 10^9 \div \frac{1}{300} = 9 \times 10^{11}$, 即

$$1 \text{ 法} = 9 \times 10^{11} \text{ (電容之 C. G. S. 靜電單位).}$$

據此可知在真空中或空氣中之球形導體,其半徑等於 9×10^{11} 者,電容始成爲 1 法。地球爲一導體,半徑等於 6,367 浬,故其電容不過 0.000,708 法而已。由此可見法之單位過大,不適於用,通常取其百萬分之一,定

爲測定電容之單位，是曰 1 渺，即等於 10^{-6} 法。
microfarad

因 9×10^{11} 糵 = 9×10^6 籽，故半徑爲 9 籽之球形導體，其電容恰等於 1 渺，而地球之電容則爲 708 渺。

§ 439. 蓄電器。

如圖 415，連結一絕緣導體 A 於驗電器上，使其帶陰電，金箔張開。持一連地之導體 B 近之，金箔即垂下。可見 A 上電量雖未減，但近傍有 B ，其勢即降。再加陰電於 A ，使金箔張開角度如前，所須電量當數倍於前。

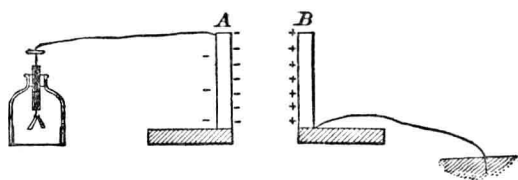


圖 415. 蓄電器之原理。

即凡有
連地導體在
其近傍者，其
電容當較平
時增加頗多。

如使 A 與電勢一定之電源相連，其上即可蓄多量之電，蓄電器即本此理而成，其絕緣導體爲金屬板，曰收集板，
condenser collecting plate
連地者亦爲金屬板，曰蓄集板，即以收集板上之電量 q ，
condenser plate
及其電容 C ，表蓄電器之電量及電容。如收集板與蓄積板間之勢差爲 V ，則得 $C = \frac{q}{V}$ 。又蓄電器之 C ，由板間之絕緣體而定，如其爲空氣，則曰空氣蓄電器。
air condenser

§ 440. 自由電及束縛電.

單獨存在之金屬板帶電時，電當立即遍布於其全表面，此時之力線，如圖 416 左，其電容不大，如有其他之絕緣導體與之接近，其上之電即移一部

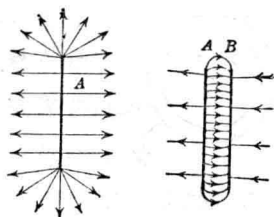


圖 416. 自由電及束縛電.

分至此導體之上。但若同時與一連地之金屬板 B 相對而立，如右，成爲蓄電器時，因陰陽電相引之結果，電力線遂密集於兩板之間，不能自由移動。此時縱令再將其他之絕緣導體持至其近傍， A 上之電，仍不能自由移動，如是者，曰束縛電。與此相對，如右圖之 A 上，可以自由移動之電，曰自由電。

bound electricity

free electricity

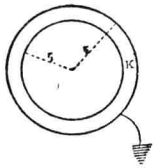
§ 441. 蓄電器之電容.

蓄電器之電容，可由其形狀計算而得。但此項計算，大都極其煩難，此中最簡單而又可爲模範者，當推由若干同心球殼合成之球形蓄電器。此外如日常所見之平行板蓄電器，其電容亦可由球形蓄電器推算出之。又來丁瓶亦常用之一種蓄電器，其計算亦可由球形蓄電器推出。

spherical condenser

parallel plate condenser

Leyden jar



命 r_1 表球形蓄器之內球半徑, r_2 表外球之半徑, $+q$ 表內球上所帶之電, $-q$ 表外球上所帶之電。先單就外球上之 $-q$ 着想, 由 § 434, 知其表面上一點之電勢, 應為 $-\frac{q}{r_2}$ 。即內球面上

一點因外球上所帶之電而得之電勢應為 $-\frac{q}{r_2}$ 。但由內球本身所帶之 $+q$, 亦應生 $+\frac{q}{r_1}$ 之電勢, 其合成之電勢 $\frac{q}{r_1} - \frac{q}{r_2}$, 即 $\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} q$, 為內球上

$$C = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

一點實有之電勢。故得球形蓄電器之電容為

如兩球相隔極近, 命 d 表其距離, 此時兩半徑均可看成 r , 故 $C = \frac{r_2}{d}$ 。命 S 表其面積, 則

$$C = \frac{S}{4\pi d}.$$



圖418. 平行板蓄電器。

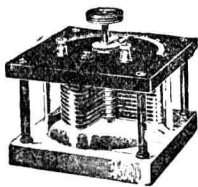


圖 419. 可變蓄電器。

扇形金屬薄板, 裝在軸上, 分為兩組, 一組固定不動, 他一組則可在軸周任意轉動, 其電容隨兩組之相對位置而異, 如圖 419 所示之狀況曰可變蓄電器, 無線電中多用之。

又圖 420 所示之來丁瓶, 係在玻璃瓶壁上, 表裏各貼一層錫箔而成。在內之層曰內套, 在外之層曰外套。由瓶口插入一金屬棒, 下垂銅鏈, 與內套接觸。命 S 表錫箔之面積, d 表瓶壁之厚, K 表玻璃之電媒常數, 如 d 遠小於瓶之半徑, 仍可用下式表其電容, 即

$$C = K \frac{S}{4\pi d}.$$



圖 420. 來丁瓶。

§ 442. 誘電常數.

表 55. 誘電常數.

由上可知蓄電器之電容,隨其絕緣物質之誘電常數 K 而定。如其絕緣物質為空氣或真空,則 K 等於 1, 如為其他物質,則其電容與用空氣或真空時之電容之比,恆等於 K , 故 K 又名比電容,即由於此, 法刺第 利用此理,由實驗測得各種物質之 K , 如表 55. 其對於氣體者,除極稀薄時而外,與壓力為比例,表中所列數字,係在標準壓力時之值.

物質	K
固體蠟	2.29
液體蠟	1.92
硬橡皮	3.15
硫黃	3.84
雲母	6.64
玻璃	6.96
鉛玻璃	6.61-9.096
松香油	2.23
酒精	26.5
蒸餾水	76.0
空氣	1.000,590
輕氣	1.000,264
二氧化碳	1.000,946
一氧化氮	1.000,994

§ 443. 平結之電容.

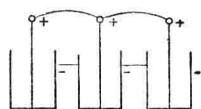


圖 421. 平結之電容.

蓄電器上帶陽電之一套板,曰

陽套,其對陰電之一套板,曰陰套. 將若干個陽套連為 positive coating negative coating

一起,其陰套又連為另一一起,如圖 421, 曰平結. 命 C 及 q 表全體之電容及電量, V 表兩套之勢差,則得 $q = CV$.
connected in parallel

對於各個蓄電器,應成 $q_1 = C_1 V$, $q_2 = C_2 V$, $q_3 = C_3 V$, ... 但

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots = (C_1 + C_2 + C_3 + \dots) V,$$

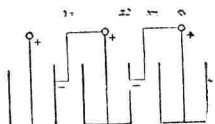
$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots.$$

即平結之電容等於各電容之和.

§ 444. 順結之電容.

將一蓄電器陰套連於第二蓄電器陽套,第二之陰套又與第三之陽套相連,如圖 422,曰順結. 此時每一

connected in series



器之陰套上之電,必與次一器之陽套上之電相等,而各器之陰陽兩套上之電,亦必相等,故結局各器之各

圖 422. 順結之電容. 套上之電均相等. 命 $V_1, V_2, V_3 \dots$ 表

各器之電勢差,則得 $q = C_1 V_1 = C_2 V_2 = C_3 V_3 = \dots$. 再命 V 表第一器之陽套與最後一器之陰套間之勢差,即全體之勢差, C 表全體之電容,應得 $q = CV$, 即

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \right),$$

$$\therefore \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots,$$

即順結之電容之逆數,等於各電容逆數之和,即全體之

電容轉小於各個蓄電器單獨之電容. 如各器之電容

均相等,即 $C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n = \dots = c$, 則得 $\frac{1}{C} = \frac{n}{c}$,

或 $C = \frac{c}{n}$, 即全體之電容,不過各器單獨之電容 $\frac{1}{n}$ 而已.

§ 445. 蓄電器之能.

命 V_1 及 V_2 表一蓄電器之兩板之電勢, q 表其一板上所帶之電量,則此器內所具有之能,應為

$$W = \frac{1}{2} q(V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} C (V_1 - V_2)^2.$$

通常則以其一板連地，故此板之電勢等於零，故其所有之能成爲

$$W = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2.$$

式中之 q , V , C , 等各量，如均用 C. G. S. 靜電單位，則 W 之單位爲厄；如用庫弗，法等實用單位，則 W 之單位爲朱。因 10^7 厄 = $\frac{1}{4.2}$ 克卡，而 1 朱 = 0.24 克卡。故上式用朱作單位時，若以 0.24 乘之，卽得以克卡爲單位表出之能之數值。

如將 n 個蓄電器平結使用時，全體之電量及電容均爲一個蓄電器之 n 倍，故平結時全體所有之能，等於單獨一器之能之 n 倍。

如將 n 個蓄電器順結使用時，其第一器之外套與地相連，勢等於零，命 v 表其內套之勢。第二外套與第一之內套相連，故其勢亦等於 v ，第二內套與其外套之勢差亦等於 v ，故第二內套與第一外套之勢差，應爲 $2v$ ，餘倣此。如命 q 表各板之電量，則全體之能，應爲

$$W = \frac{1}{2} (0 + qv) + \frac{1}{2} (-qv + 2qv) + (-2qv + 3qv) + \dots + \frac{1}{2} [- (n-1)qv + nqv].$$

$$W = \frac{1}{2} nqv.$$

如命 V 表最後一器之外套之電勢，則應有 $V = nv$ 之關係，故得

$$W = \frac{1}{2} qV.$$

如命 w 表一個蓄電器所有之能， q' 表其電量，則 $w = \frac{1}{2} q'V$ ，又順結時之電容，等於單獨一個之電容之 $\frac{1}{n}$ 倍，故 $q = \frac{q'}{n}$ 。因此

$$W = \frac{w}{n}.$$

卽順結時全體所有之能，等於單獨一器之能之 $\frac{1}{n}$ 倍。

§ 446. 來丁瓶之放電.



圖 423 所示之金屬鉗，曰放電叉，鉗用

圖 423. 放電叉。

金屬製成，端作球形，柄爲絕緣質。持柄使一球與來丁

瓶之外套接觸，徐徐放開叉腳，使他一球漸次與來丁瓶頂上之球接近，即見有電，突破其間之空氣而過，以相中和，如是之現象，曰放電，此時飛過之電，則曰電花。

discharge

electric spark

如不用通常之來丁瓶，而用一玻璃瓶，於內外各加一鉛皮筒，造成其內外兩套，放在絕緣臺上，使其帶電，與來丁瓶之功效，完全相同。如用絕緣棒將內面鉛皮筒取出，與外面之鉛筒相接，並不發生電花。再將內鉛皮筒裝入玻璃瓶內，用放電叉試之，電花立即通過。可知來丁瓶中蓄積之電，絕不在於內外套本身之上，而在於其間之玻璃之內。即一切電現象之原因，均不在帶電體本身，而在其周圍之誘電體之內部。法刺第之電媒說，頗得力於此事實。又來丁瓶經過一次放電後，再用放電叉檢之，仍有二次放電發生，但不如第一次之甚耳。更加注意，可知其尚有三次以上者存在，因蓄積之電，一次不能盡，尚有少許殘留所致，此殘留之電，曰餘電。餘電隨誘電體性質而異，如以空氣代替玻璃，即無餘電。

residual charge

§ 447. 電之極化。

據法刺第主張，誘電體受電力作用時，在其作用之方向上，當發生變形。真空亦誘電體，故知此項變形，當存在能媒內。但一方面物質分子周圍，亦有能媒圍繞，故能媒變形時，分子亦不免受其影響，

在其兩端，當呈相反之性質。如是之現象，曰誘電體之極化亦有稱之為電變位者。dielectric polarization 來丁瓶一度放電後，其玻璃內之變形，不能完全恢復，與彈性體取去外力後不能恢復故狀而呈彈性後效之例相同。electric displacement

在電力作用之垂直方向上，取面積 S ，命 q 表通過此面積之電量， P 表極化，或電變位，則 P 之定義如下：

$$P = \frac{q}{S}.$$

由此可知， P 之次式與表面密度 σ 之次式，完全相同，即

$$[P] = [K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{-\frac{1}{2}} [T]^{-1}.$$

再據法刺第之定義，則各點之極化 P ，與此點之電場強度 f ，及誘電常數 K ，成正比例，故如命 A 表比例常數，則其關係當如下：

$$P = A \cdot K \cdot f$$

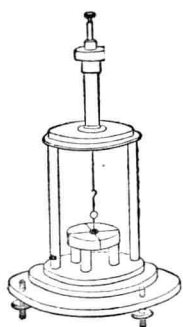
在彈性體有虎克定律，知變形與彈性率為比例，故若將電變位看成與彈性變形相當，則誘電常數 K 應與彈性率為反比例。欲求 A 之數值，可就平板蓄電器計算之。設將平板蓄電器之兩板，各連至一電池之兩極，則一板帶 $+q$ 之電荷，他板帶 $-q$ 之電荷。即由一板有電量 q 流至他一板，同時在兩板間之誘電體中通過與板面平行之任意平面，亦有等量之電變位。命 S 表板面積， d 表距離， V 表兩板之勢差，則通過單位面積之電量，即電變位 P ，應為 $AKf = AK \frac{V}{d}$ 。而通過 S 之全電量 q ，則等於 $P \times S$ 即 $KAS \frac{V}{d}$ 。又電容則為 $\frac{q}{V}$ ，即 $AK \frac{S}{d}$ 。但平板之電容，應為 $C = K \frac{S}{4\pi d}$ 。兩相比較，即得

$$A = \frac{1}{4\pi},$$

$$P = \frac{K}{4\pi} f.$$

§ 448. 電勢計.

測定勢差之裝置，曰電勢計，其構造名稱，均極煩多，最重要者，莫如象限電勢計，如圖 424。electrometer 其指針為一鍍銀紙片，用細金屬線或水 quadrant electrometer needle



· 圖 424. 象限電勢計。

晶絲懸住，周圍有一金屬圓盒包蔽於外。此盒分爲四象限，如圖 424，放在琥珀或硫黃製成之絕緣台上。用導線將相對之兩象限，如 A 與 D，及 B 與 C，各連結爲一組。指針在此盒內，可在水平面內自由轉動。當指針平衡時，其位置正對兩組象限之分界上，如圖中所示。如在細線上貼一小鏡，用燈尺法讀出指針轉動之角度，且將指針連於電池，使其在於高勢，則當兩組象限均在同勢時，針靜止不動。如 A 與 D 之勢，高於 B 與 C，則指針受偶力作用，轉向勢低之一方，直至作用之偶力與線之扭力互成平衡時爲止。如轉動角度不大，則勢差與偏向成比例，故由偏向立可讀出其勢差。

測定千弗以上之高電勢時，以用圖 426 所示之裝置，最爲相宜，是曰靜電弗計。僅有一對直立

electrostatic voltmeter

之象限，及一鋁製之直立指針，由一刃稜支住。指針之端有刻度，可將象限與指針間之勢差讀出。

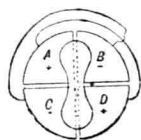


圖 425。

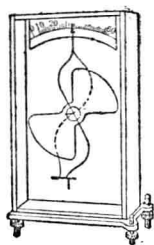


圖 426 靜電弗計。

§ 449. 空中之電。

用一絕緣導線，一端繫一燃燒中之火柴或一絕緣導線，一端連結一絕緣容器，內有水點陸續滴下，則此導線與火柴或水滴周圍之空氣，成同一之電勢。假使水滴與導線之電勢不同，則水滴必由靜電誘導帶電，假使空氣之電勢，高於導線之電勢，則水滴所帶者爲陰電，與之相應之陽電，出現於導線之他一端。當水滴脫離器口時，攜帶陰電同去，陽電殘留導線

之上，故導線之電勢，隨之增高。每一水滴墜下，導線之勢必為增高少許，直至導線之勢，升至與水滴脫離器口處周圍空氣之電勢相等為止。將此導線連結於電勢計之一對象限，其他一對連地，則其指針所示之勢差，即地與導線間之勢差。又因地之電勢恆等於零，故由此讀出之數字，即水滴脫離器口處周圍空氣之電勢。

用上述方法，可以檢出空中各點之帶電狀況，其結果如下：一般快晴之日，大氣之電勢較地面之勢為高，離地面愈遠者，其電勢亦愈大。此項電勢並不一定，隨時皆在變動中，尤以風雨時，變動最烈。

空中之雲通常均帶有相當之電，如所帶之電量過多，則帶陽電之雲，與帶陰電之雲，可突破其間所隔之空氣而行放電，此時表現之光，曰電閃，同時發出之音，則曰雷鳴，如直接落於人畜身體之上，必傷及生命，是曰雷擊。又帶電之雲與地面接近，則由靜電誘導，在地面上發生反對之電，當此兩者放電時，人畜體上所帶之多量之電，驟然消去，因此而遭電擊者，曰反擊。防止雷擊之裝置，曰避雷針，目的在使電量不致蓄積太多，即為之開一放電之路，以免人畜受害。法用一金屬棒，立於屋頂，上端削尖，下部深埋地中。當帶電之雲，行近此棒，由靜電誘導，在其尖端上誘起反對之電，但受尖端作用，隨生隨即逸出，與雲中之反對電相中和，即可避免直接之落雷。

第四章 電流

§ 450. 弗打定律.

銅與鋅在空氣中接觸後，分別檢查之，銅帶陰電，鋅帶陽電，其他金屬亦然。經弗打實驗，其結果如下：

Volta

+ 鋅 鉛 錫 鐵 銅 銀 金 鉑 碳 磷 -

列中任何兩種物質接觸後，位置在前者恆帶陽電；位置在後者恆帶陰電。即兩物質由接觸而生之勢差如下：

(1) 凡在同溫之兩種物質，由接觸而生之勢差，由兩者之性質及表面形狀而定，與接觸面之形狀及其面積無關。

(2) 凡在同溫之多數物質，順次接觸而之生兩端之勢差，與在兩端之物質直接接觸而生之勢差相等。 此關係

曰 弗打定律。例如兩物體 A 與 B 接觸後， A 之勢成爲 V_A ，而 B 之勢成爲 V_B ，則 $V_A - V_B$ 爲一常數，其值由兩物體之性質而定。如在此兩者之間加一物體 C ，即 A 與 C 接觸， C 與 B 接觸，命 V_C 表 C 之勢，則 $V_A - V_C$ 及 $V_C - V_B$ 各一定，故成爲 $V_A - V_B$ 與無 C 之時，完全相同。

§ 451. 金屬與液體之接觸。

上述之弗打定律，係就在空氣中接觸之物體而言，

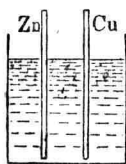


圖 427. 接觸勢差。

如將金屬浸入液內，液與金屬之間，又有化學作用，則兩金屬上之勢差，即不如是簡單。例如將鉛及鋅，插入稀硫酸內，如圖 427。此時鋅對硫酸之溶壓大，故易溶解成爲陽離子(參照 §488)。故鋅帶陰

solution pressure

電,其勢降下,直至陽離子與鋅之間之引力,等於溶壓時,溶解始行停止。一面鋅離子與硫酸離子 SO_4 結合而成 $ZnSO_4$,其過剩之氫,一部分附着於銅上,使銅帶陽電,其勢因之升高。銅對於硫酸,亦未嘗不溶解,但其溶壓遠不及鋅耳。節言之,即鋅銅同在稀硫酸中時,鋅之勢恆高於銅,其勢差遠大於兩者在空氣中接觸時所生之勢差。

§452. 贊波尼電堆

將錫箔Sn及青銅箔K,貼紙上,如圖
copper bronze

428之順序,即Sn P, PK, Sn P, PK, ...重疊

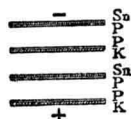


圖 428. 電堆。

之。因紙恆帶濕氣,作用與稀硫酸同,結局Sn恆帶陰電, K帶陽電。在Sn P, PK等各對之上,生相等之勢差,故各個內之陽電被驅至青銅,陰電被驅至錫,結局在一端之Sn帶甚強之陰電,他端之青銅帶甚強之陽電。全體共用 n 對,則其總勢差,等於各對勢差之 n 倍,其值之高可知,如是之裝置,曰 贊波尼電堆
Zamboni's pile

§ 453. 電流。

用金屬之導線連結浸在稀硫酸內之銅板及鋅板,如圖 429, 則銅上陽電經由導線向鋅流去,鋅上陰電亦

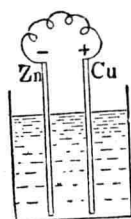


圖 429. 電池。

經導線上向銅流去。原有之電，經此中和，勢差應成爲零。但同時硫酸與鋅，發生反應，使銅再得陽電，鋅得陰電，兩板之間，又有勢差成立，其值略遜於未使用以前，但所差不大。故用導線將浸在稀硫酸內之銅鋅兩板連結，陽電即陸續不絕由銅移至鋅。此項電之移動，曰電流，electric current

常定陽電移動之方向，爲電流之方向。故在導線內，電流之方向係由銅向鋅，而在液內則由鋅向銅。電流所經由之路，曰電路。circuit 用導線連結兩板造成電路，使電流可經由其上通過，曰接合；to close or to make 截斷導線使電流停止，曰切開。to open or to break 電路結合後，電流立即達其定態，此時每秒間通過橫斷面之電量，曰電流強度。strength of current

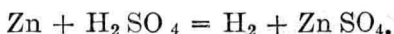
§ 454. 電池。

由上節所述利用化學作用而得陸續不斷之電流之裝置，曰電池，其兩端之板，曰電池之極。cell pole 勢高之一極，如前例之銅，曰陽極，positive pole 勢低之一極，如鋅，曰陰極。negative pole 未結合前兩極之勢差，由兩極之物質種類及液體之種類而定，與極之形狀大小及液體之多寡無涉。此項勢差，即使

電池發生電流之主要原因，故曰電池之電動力，通常用 electromotive force *emf* 或 *E. M. F.* 等記號代之，在電工學上，又有電壓之稱，voltage

§ 455. 電池之極化.

用鋅銅及稀硫酸造成之電池，如鋅質純粹，則未結合前，無化學作用發生，一旦結合，硫酸分解成爲 H_2 及 SO_4 ，其中之 H_2 攜同陽電由鋅移至銅，而 SO_4 則攜同陰電由銅移至鋅，與鋅化合，成爲硫酸鋅，其反應式如下：



所生之輕氣爲非導體，如積在銅上之量過多，足以妨礙電流，與受逆電動力作用，使電流減弱相同。如是之現象，曰電池之極化。counter electromotive force 欲得善良電池，非除去極化不可，其polarization of cells 法有二：一爲化學方法，係添加氧化物，俾其與輕氣化合，以除去之。chemical means 一爲電化學方法，使用兩瓶，使一瓶內生出之輕氣，進入他一瓶內與其液體化合，結果以固體金屬代替輕氣，附着於陽極之上。electro-chemical means

§ 456. 局部作用.

通常之鋅，大都含有雜質，尤以鐵爲最多。在硫酸中，鐵對於周圍之鋅，與銅有同一作用，故有一小電流，由

鐵至鋅，再經液內而返於鐵，是曰局部電流，使鋅受無益之損失。欲免此弊，先用硝酸洗鋅，浸入汞內，成爲汞齊，滿佈鋅上。鐵則不能有此作用，故不生局部電流。

§ 457. 各種重要之電池。

電池之種類極多，大別之，可分爲三種，分述如下：

第一種：使用化學方法除去極化作用者：此種電池概用兩種液體，一爲溶解鋅之稀薄酸類，曰勵發劑，一爲除去極化之強烈氧化物，曰去極劑，其重要者如下：

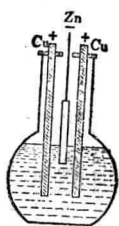
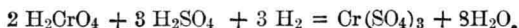
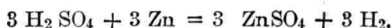


圖 430.
重鉻酸電池。

圖 430 所示者，曰重鉻酸電池，其兩極及液體

爲重鉻酸鉀 12 分，水 100 分，硫酸 25 分，及汞齊之鋅板與炭板。此種電池之反應式如下：

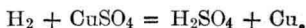
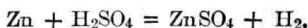


電動力約 2.1 弗，大抵實驗室中及醫學上，使用此種電池。欲得短時間之強電流，用此最便，但去極劑不足，不持久用。

第二種：使用電化學方法除去極化作用者：此種電池概用兩瓶，分盛不同液體，以免極化作用，屬於此類者，爲數頗多，分述之如次：

(1) 丹聶爾電池如圖 431，內瓶爲生瓷器，內盛水 12 分，硫酸 1 分，中插汞齊之鋅板。外瓶爲玻璃或瓷器，內盛稀硫酸銅之飽和溶液，

中插銅板。其反應式如下：



電動力為 1.02 弗，其值定而不變，電局中多用之。

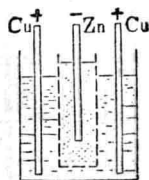


圖431. 丹聶爾電池。

(2) 本生電池如圖 432，外瓶為瓷器，內盛水

Bunsen's cell

12 分，硫酸 1 分，中插錄齊之鋅板。內瓶為生瓷

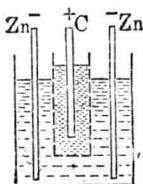
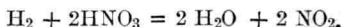
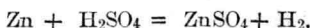


圖 432. 本生電池。

器，內盛濃硝酸，中插炭棒作極，其反應式如下：



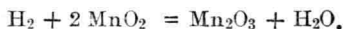
電動力為 1.94 弗，但時有變動，不能如丹聶爾之一定，大抵使用於實驗室內。

(3) 勒克蘭社電池，如圖 433，外瓶為玻璃缸，

Leclanche's cell

內盛氯化銨之飽和溶液，中插錄齊之鋅板作極。

內瓶為生瓷器，內盛二氧化錳及炭粉，中插炭板作極，其反應式如下：



電動力為 1.46 弗，大抵用於電鈴或電報之一部

分。此種電池之去極劑，進行異常緩慢，故若長

時間使用後，內瓶中之輕氣，未能完全氧化，遂由

極化作用，使其電動力減弱。但若將電路暫時

切開，輕氣不久完全氧化，極化亦隨即停止。故

此種電池，可以放置數月之久，不必加以修理，仍可繼續使用。如不

用生瓷圓筒，而用氧化錳及炭粉搓捏而成之圓筒，以代陽極，懸入氯

化銨之飽和溶液內，且與鋅隔開，即成拉克利得電池。

Lacleade's cell

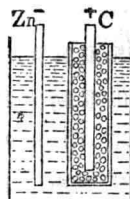


圖433. 勒克蘭社電池。

(4) 乾電池為攜帶用之勒克蘭社電池，如圖 434，炭棒 C 之周圍，

dry cell

如 4，為二氧化錳，炭粉，石墨及氯化銨溶液等混合而成之黑色糊狀

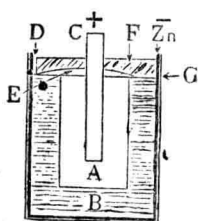
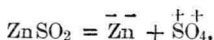


圖 434. 乾電池。

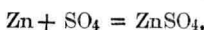
物。在外更有石膏及氯化銻溶液混合而成之白色糊狀物，如 *B*。最外一層為鋅箱，如 *Zn*，作電池之陰極。其餘如 *D*，為放氣孔，*E* 為硅酸綿，*F* 為瀝青，*G* 為厚紙。此種電池之電動力為 1.48 弗，電鈴及局部電池式之電話用之。

(5) 葛拉克標準電池，如圖 434，其勵發劑 Clark's standard cell 用 $ZnSO_4$ ，去極劑用 Hg_2SO_4 。*M* 表水銀，*A* 表

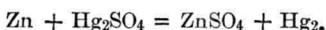
錳齊之鋅，*P* 表硫酸鋅及氧化鋅混合而成之糊狀物；*C* 表硫酸鋅之結晶，*S* 表硫酸鋅之飽和溶液。其反應式如下：



即硫酸鋅分解後，陰離子 SO_4 移向陰極，使 Zn 成



而陽離子 Zn 則移向陽極，成為



因有此 Hg_2 與陽極之鋅合體，故不生極化作用。

溫度變更，硫酸鋅之溶解度變化極小，故電動力之變化亦不大。故用作電動力之標準極適。命 E_t 表溫度 t 時之電動力，則

$$E_t = 1.432,8 - 119 \times 10^{-5} (t - 15) - 0.7 \times 10^{-5} (t - 15)^2 \text{ 弗.}$$

(6) 衛斯吞標準電池之構造，完全與葛拉克標準電池相似，僅用錳及硫酸錳代替鋅及硫酸鋅而已。硫酸錳之溶解度，對於溫度變更而生之變化，較諸硫酸鋅更小，故其電動力之變化亦更小。用作標準電池，更為適宜。命 E_t 表溫度 t 時之電動力，則其關係如下：

$$E_t = 1.018,6 - 3.8 \times 10^{-5} (t - 20) = 0.065 \times 10^{-5} (t - 20)^2 \text{ 弗.}$$

第三種：此種電池之原理，與上述兩種迥不相同，構造亦頗複雜，通稱為蓄電池，其詳如次節。

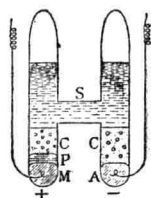
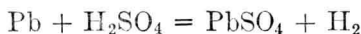


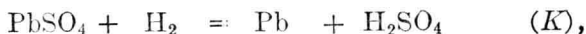
圖 435. 葛拉克標準電池。

§ 458. 蓄電池.

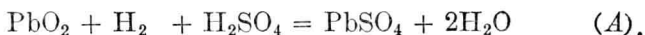
浸鉛板兩枚於稀硫酸中,用一導線在外連結之,於電路中插入電流計,指針不動,知無電流通過。但若於電路中,再加一電池 B ,如圖 436,即見電流自 A 流入稀硫酸中,自 K 流出於外。如是暫時之後,除去 B 再察之,即見有與前相反之電流流過。此項電流,由於連 B 時所生之極化作用而來。鉛在硫酸內,經



生成之硫酸鉛,不溶於水,故佈滿鉛板之表面,並未進入其內部。由 B 送電入內,則其陰極 K 及陽極 A 之變化如下:



即在鉛上成爲海綿狀之鉛,在 A 上生 PbO_2 但 PbO_2 對於 Pb 之關係,與銅對鋅之關係同。故去 B 而連 $A K$, 電流即由 A 流出,經導線至 K 。此時其兩極之變化如下:



進行至 A, K 之上,均爲 PbSO_4 佈滿,變化始停止,電流亦必至此時始停。再將上列四種反應式統括之,得

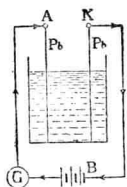
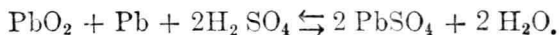


圖 436. 蓄電池.



由左而右之變化，曰蓄電；由右而左曰放電。利用此理而成之電池，曰蓄電池，如圖 437，因其利用極化作用，將第一次通電時之能，儲蓄於內，以供隨時取用，故又稱爲二次電池。一蓄電池所能儲蓄之電，有一定分量，即其

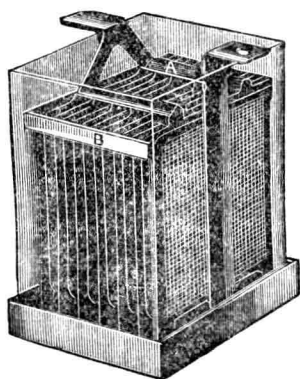


圖 437 實際之蓄電池。

容量有一定制限。上述之鉛板所受變化，止於其表面，不能深入內部，而表面又極平滑，面積不能大，故其容量較小。但若使其連續受蓄電及放電至數十回以上，則因生成之二氧化鉛及海綿狀鉛頗多，板面成爲凹凸不平之狀，無異增加其與酸類

接觸之面積，故其容量亦大，適於實際使用。如是之工作，曰化成，經過化成後之鉛板，曰普隆特基板。其後再經改良，將鉛板開始即造成方格狀，用氧化鉛與稀硫酸混成之糊，填滿格內，用爲極板。此板在稀硫酸內，經電流通過，則陽極之氧化鉛變成多孔性之二氧化鉛，陰極成爲海綿狀鉛。僅經此一度通電即足，是曰浮耳基板。

Faure plate

或曰糊板,便利遠在普隆特基板之上。
paste plate

蓄電池盡量蓄電滿足時,其電動力約為2.5弗。但一行放電,即降至2.05弗,以後即保持此值,不復再降矣。放電過久,始行降下,降至1.8弗,已不堪使用,非重行蓄電不可。又蓄電時,生出硫酸,液體之比重增加;放電時硫酸減少,比重亦減小。故由液體比重,可察其放電程度。

由開始放電至電動力降至1.8弗為止,電池所能供給之電能,曰蓄電池之容量,通常用安時作單位表示之,
capacity of storage battery

1安時即1安之電流連續放電達一時間所供給之能。

§ 459. 電流之強度及抵抗。

每秒間由電路之橫切面有單位電量流過之電流,為電流強度之單位。在實用單位,即每秒間通過1庫時之電流強度,曰1安。其 10^{-3} 倍曰毫。故*i*安之電流,在*t*秒間內由電路之橫切面通過*q*庫之電量時,當為

$$i = \frac{q}{t} \text{ 安,}$$

而 1安 = 3×10^9 C. G. S. 靜電單位,

故得次式為 $[i] = [K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-2}$.

又電流之強度不僅與電動力相關,且隨所用之導線而變,即導線粗者強度大,細者強度小,與水流經粗細

導管流過時，須受管內抵抗之情形相類，故對於電流亦有抵抗，其實用單位曰歐，歐之 10^6 倍曰鬪。1歐即導線兩端受1弗之勢差作用時，其電流強度恰為1安時之抵抗。此值又與橫斷面1平方糎，長106.3糎之水銀柱在 0°C .時對於電流所呈之抵抗相同。

§ 460. 抵抗定律.

導線之抗抵與導線之長為正比例，與其橫斷面積為反比例，此關係曰抵抗定律。如命 l 糎表導線之長， S 平方糎表其橫斷面積， R 歐表其抵抗，則其關係如下：

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ 歐.}$$

式中之 ρ ，表一常數，由導線之物質種類而定，曰各物質之比抗。如 $l = 1$ 糎， $S = 1$ 平方糎，則 $R = \rho$ 歐。故各種物質之比抗，等於其物質長1糎橫斷面積1平方糎之抵抗，或其物質1立方糎所有之抵抗。

又抵抗之逆數 $\frac{1}{R}$ ，曰各物質之形導，或傳導度，而長

1糎橫斷面積1平方糎之導線之形導，則曰比形導，或

比傳導度，亦稱質導。

形導之單位，曰姆，係將抵抗單位之ohm反轉而成，

例如抵抗等於 r 歐之導線，其形導當等於 $\frac{1}{r}$ 姆。

§ 461. 抵抗之變化.

溫度不同,則抵抗亦異,但在溫度變化不甚大時,抵抗之增減,恆與溫度之變化相比例. 如命 R_0 及 R_t 表在 0°C . 及 $t^\circ\text{C}$. 時同一物質之抵抗,則其關係如下:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

α 爲一常數,由物質種類而定,曰抵抗之溫度係數. 各種重要物質之比抗及其抵抗之溫度係數,如表 56:

表 56. 比抗及抵抗之溫度係數.

物質	比抗(歐)	溫度係數(1°C)	物質	比抗(歐)	溫度係數(1°C)
軟銀	1.492	0.004,00	錫	2400-42000	6×10^{10}
硬銀	1.620	0.003,84	石墨		-0.000,82
軟銅	1.570	0.004,28	弧燈用炭棒	約4000	-0.000,314
硬銅	1.603	0.003,20	洋銀(Cu 60, Zn 26, Ni 14)	20.76	0.000,36
金	2.077	0.003,67	鉑銀齊(Pt 33, Ag 67)	31.58	0.000,348
鉛	2.888	0.003,90	假鉑(Cu59, Zn25.5, Ni14, W1.5)	32.5	0.000,20
鉑	8.982	0.002,22	銅錳鎳齊(Cu 84, Mn 12, Ni 4)	46.68	0.000,024
鐵	9.638	0.005,31	銅鎳齊(Cu 61, Ni 40)	59.00	0.000,026
鉛	19.63	0.003,95	SS	100.00	0.000,044
錘	94.34	0.000,833	SS II(鎳鉻)	630.00	0.000,005

據表,知洋銀或其他合金之溫度係數,爲值均甚小,故多利用之以作抵抗圈. 其中尤以錳銅及鎳銅最甚,不及純粹金屬之百分之一,極適於製造標準之抵抗圈. 如 SS, 或 SS II, 其抵抗特大,熔點亦高,故電爐等用之.

抵抗之標準器,曰標準抵抗,如圖 438,用錳銅或鎳銅之導線,捲成來回之圈,如 II 之形狀,以防自誘作用(參照 § 532),兩端各用一銅棒 A, B 連出. 使用時,將 A, B 同

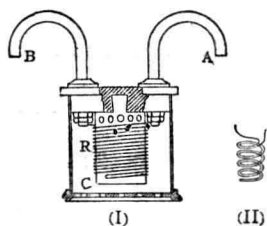


圖 438. 標準抵抗。

時各插入水銀槽內，再與其他連接。全器在蠟槽內，保持一定溫度，以防因溫度變化而起之誤差。

利用鉑之抵抗變化，可以測定高溫，其裝置曰鉑高溫計，狀如 platinum pyrometer 要部為一細鉑線，捲在

石棉堆 B 上，兩端連結較粗之鉑線，如 P_1 及 P_2 ，裝入玻璃或瓷管內。又另裝一與 P_1 及 P_2 相同之鉑線，以測中途之抵抗，由此可以求得在框 B 周圍之細鉑線之純粹變化。

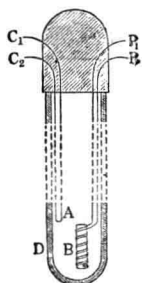


圖 439. 鉑高溫計。

§ 462. 硒及鉍之抵抗。

硒受光照，抵抗銳減，光去立復其 selenium

原狀，**硒電池**即利用此理用硒線製成。 selenium cell

在其中通過之電流，強度須隨照及其上之光而異。其用途頗多，如**光電話**(參照 § 565)及**傳真電報**(參照 § 593)等。 photophone electric telephotography

又**鉍**之抵抗，在磁場內，隨其方向而異，**鉍螺線**係用 bismuth bismuth spiral 細鉍線，盤成圖 440 之形狀，面與場成垂直時，變化極大。



圖 440. 鉍螺線。

利用此器可以測定任意磁場之強度。

§ 463. 歐姆定律.

如電流強度 i 之單位用安, 抵抗 R 用歐, 電動力 E 用弗, 經歐姆實驗結果, 其間之關係如下:

$$i = \frac{E}{R}.$$

即一電路內之電流強度, 與其兩端之電動力為正比, 與其間之抵抗為反比. 此關係曰歐姆定律. 由此可知

$$[R] = [K]^{-1} [L]^{-1} [T].$$

又歐姆定律對於金屬及電解質(參照 § 488)亦完全適用. 但尋常認為絕緣體受特殊高壓有電流通過時, 或在低壓之氣體內有電流通過時, 均不適用.

§ 464. 結合電池之歐姆定律.

電路中如有一電池, 可利用歐姆定律以求其各部分之電勢. 圖 441 之 AD 表鋅板, K 表銅板, F 表電池內之液體. 當電池之兩極, 未用導線接合前, 鋅之勢最低.

沿 AB 之垂直方向上取長, 與各部分之勢, 成一定之比例. 因鋅上各點同勢, 故 AM 與 DN 等長. 即鋅上

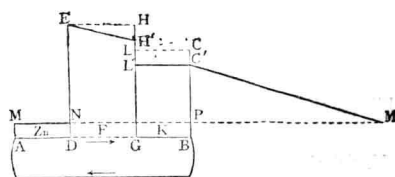


圖 441. 電池各部分中之電勢.

各點之勢，可用直線 MN 表出。液體之勢最高，以 EH 直線表之，銅勢低於液，以 LC 表之，故電池之電動力為 PC 。結合其兩極，則電路上各部分均生勢差，液體亦有抵抗，故 G 之勢須降下 $i r_i$ ，即在液內各部分之勢，已不成為 EH 而成 EH' 。 i 表電路內通過之電流強度， r_i 表液體內之抵抗，且 $HH' = i r_i$ 。不寧惟是，銅鋅內亦有勢差，但為值甚小，可以不計而已。如此，則銅內各部之勢，仍可用直線 $L'C'$ ，鋅內則用 MN 表出，即 $HL = H'L'$ 。即由銅經導線向鋅，電勢次第降低，至鋅即成為 AM 或 DN 。如導線之橫斷面積一定不變，且由同一物質製成，則每單位長之抵抗均相等，故每隔單位長，降下之勢相同，全體可用直線 $C'M$ 表出。命 r_a 表全線抵抗， θ 表 $C'M$ 及 PM 間之角，則得

之關係。試命 V 表結合後兩端之電勢差， E 表未結合前之值，即電動力，兩者之差，當為 $HH' = CC' = i r_i$ 。如是之 V ，曰端電壓。即 $V = i r_a = E - i r_i$ ，由此遂得

$$i = \frac{PC'}{r_a} = \tan \theta$$

$$i = \frac{E}{r_i + r_a}$$

之關係，其中之 r_i ，表電池內部之抵抗，曰內抵抗； r_a 表電池外部之抵抗，曰外抵抗。即結合後之電池，其電流強度為內外抵抗之和除電動力而得之商。

§ 465. 導體系之抵抗.

順次結連若干導線,使電流次第由其中通過,即導體順結時,如圖442,順次命各接合點之勢為 V_0, V_1, V_2, \dots

V_{n-1}, V_n , 各導體之抵

抗為 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{n-1},$

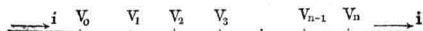


圖 442. 順結之導線系.

命 i 表通過全

線之電流強度,則 i 曰總電流. 就各部分導線言,應為

$$i = \frac{V_0 - V_1}{r_1} = \frac{V_1 - V_2}{r_2} = \frac{V_2 - V_3}{r_3} = \dots = \frac{V_{n-1} - V_n}{r_n}$$

相加得 $i(r_0 + r_1 + r_3 + \dots + r_n) = V_0 - V_n$

但 $V_0 - V_n$ 表兩端間之勢差,即 E , 如命 R 表總抵抗,則由

歐姆定律,知 $i = \frac{E}{R}$, 代入上式,即得

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n.$$

即順結導線系之全抵抗,等於各導體抵抗之和.

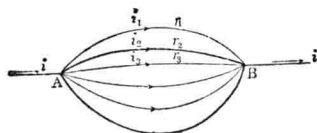


圖 443. 並結導線系.

次論電路之一部分

由若干導線並列而成,如

圖 443. 命 $r_1, r_2, r_3 \dots$ 表

各部分之抵抗, $i_1, i_2, i_3 \dots$

表通過各部分之電流強度; i 表未分開以前,及復合為

一之後之總電流, V_A, V_B 表 AB 兩分合點之勢差,則成爲

$$V_A - V_B = i_1 r_1 = i_2 r_2 = i_3 r_3 = \dots.$$

$$\begin{aligned} \text{但 } i &= i_1 + i_2 + i_3 + \dots \\ &= \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots \right) (V_A - V_B). \end{aligned}$$

命 R 表此一段之全抵抗, 則應成爲 $V_A - V_B = iR$, 故得

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

即並結導線系之全抵抗之逆數, 等於各導線之抵抗之逆數之和。 又通過各部分導線之電流強度, 則有

$$i_1 = \frac{R}{r_1} i; \quad i_2 = \frac{R}{r_2} i; \quad i_3 = \frac{R}{r_3} i; \dots$$

等之關係, 即與各該部分導線之抵抗爲反比例。

其最簡單之例, 如圖 444 所示, 由兩導線並結而成,

$$\begin{aligned} \text{即 } i_1 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) &= \frac{i}{r_1} \quad \therefore i_1 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} i; \\ i_2 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) &= \frac{i}{r_2} \quad \therefore i_2 = \frac{r_1}{r_1 + r_2} i. \end{aligned}$$

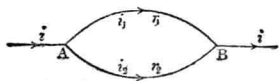


圖 444. 兩條並結之導線。

利用此理, 遇有強電流不便直接測定時, 用抵抗相差頗遠之兩導線, 同時並結插入電

路中, 如圖 445, 在抵抗大之一方加電流計 G , 則由 AGB 中通過之電流, 僅總電流之一部分而已, 故測定之較易。

ACB 曰 AGB 之分路。實際分

路之抵抗爲電流計抵抗之 $\frac{1}{9}$,

$\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ 倍, 故經由電流計中之

電流, 不過 $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1,000}$ 而已。

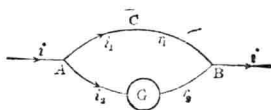


圖 445. 分路。

§ 466. 電池連結法。

若干電池聯合使用時，亦分兩種：

(1) 順結：如有電動力 E 弗，內抵

抗 r_i 歐之電池 n 個，順次將一電池之

鋅與第二電池之銅相連，而第二電池之鋅，又與第三之

銅相連，如圖 446，即順結時，全部之電動力為 nE 弗，全體

之內抵抗為 nr_i 歐。如是連成者，如更用抵抗為 r_a 之導

$$i = \frac{nE}{nr_i + r_a} \text{ 安。}$$

如 r_a 遠在 r_i 之上，則 r_i 可以從略，此時 $i = \frac{nE}{r_a}$ ，即全電

流等於各電池電流之 n 倍。故外抵抗大時，用順結法

可得強電流。反之，如 r_a 遠在 r_i 之下，則 r_a 可以從略，此

時 $i = \frac{nE}{nr_i} = \frac{E}{r_i}$ ，即全電流等於一個電池之電流。故

內抵抗大時，無論如何增加電池之數，亦不能得強電流。

(2) 並結：將各電池之銅極連為一組，鋅極亦另連

為一組，此兩組之電動力，仍與單獨

一個電池之電動力同，但其內抵抗

則成爲 $\frac{r_i}{n}$ ，故此時之電流強度爲

$$i = \frac{nE}{nr_i + r_a} \text{ 安。}$$

如 r_a 遠在 r_i 之下，可以從略，則成爲

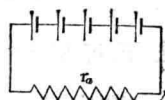


圖446. 順結之電池。

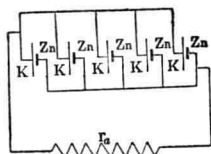


圖447. 並結之電池。

$i = \frac{nE}{r_i}$, 即等於一個電池時之 n 倍. 反之, 如 r_i 遠在 r_a 之下, 可以從略, 則成爲 $i = \frac{E}{r_a}$, 與使用一個電池相同. 總之, 欲得強電流, 遇 r_a 大宜用順結, r_i 小宜用並結.

§ 437. 克希荷夫定律.

若干條導線連接使用時: (1) 如各線同交於一點, 則各線中之電流之代數和等於零; (2) 如各線啣接成閉路, closed circuit

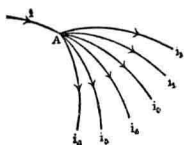


圖 448.

相交之導線.

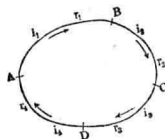


圖 449.

閉路之導線.

則各線中電流與其抵抗之相乘積之代數和, 等於其電動力之代數和. 此關係

曰克希荷夫之定律.
Kirchhoff's law

如圖 448, 向 A 流來之電流 i , 分作 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_6$ 等流去. 若定向 A 而來之方向爲正, 則背 A 流去者爲負, 故 (1) 爲

$$i + (-i_1) + (-i_2) + (-i_3) + \dots + (-i_6) = 0,$$

即
$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_6.$$

如圖 449, 命 V_A, V_B, V_C, V_D 表各接點 A, B, C, D 之勢, 則因

$$i_1 r_1 = V_A - V_B; \quad i_2 r_2 = V_B - V_C; \quad i_3 r_3 = V_C - V_D; \quad i_4 r_4 = V_D - V_A$$

$$\Sigma i r = i_1 r_1 + i_2 r_2 + i_3 r_3 + i_4 r_4 = 0$$

如 AB 之一部分中有電池存在, 其電動力爲 E , 則

$$i_1 r_1 = V_A + E - V_B, \quad \therefore \Sigma i r = E.$$

如其他之部分中亦有電動力存在,則

$$\Sigma i r = \Sigma E.$$

即成爲(2)之關係。

§ 468. 威斯吞橋.

利用導線之結合,可以測定抵抗,如圖 450, 即其一例,曰威斯吞橋. 插有電池之電路,自一點 A 分爲兩路,在另一點 B 復合爲一. 全體共由 AC, CB, BD, DA 四導體而成,各曰橋臂.

因 A 之勢高於 B , 故由 A 或經 C 至 B , 或經 D 至 B , 其勢均次第降低. 故在 ACB 上任取一點 C , 同時必可在 ADB 上求得

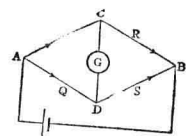


圖 450. 威斯吞橋。

一點 D , 其勢與 C 相等. 用導線連結如是之 C 與 D , 其中插一電流計(參照 §§513—523), 如 C 與 D 同勢, G 之指針不呈偏向. 命 P, Q, R, S 表各臂之抵抗, V_A, V_B, V_C, V_D , 表各接合點 A, B, C, D 之電勢, 則因 $V_C = V_D$, 且

$$\frac{V_A - V_C}{P} = \frac{V_C - V_B}{R}; \quad \frac{V_A - V_D}{Q} = \frac{V_D - V_B}{S};$$

$$\therefore P : Q = R : S$$

如 P, Q, S 爲已知數, 則 R 立可算出.

§ 469. 抵抗箱.

用洋銀或鎳銅,錳銅等,造成各種抵抗圈,使各圈之 resistance coil

抵抗,恰為歐之種種整數倍,且為防自誘(參照 § 532)計,各圈均捲作往返雙線,如圖 451, 兩端各連於黃銅塊 A, B,

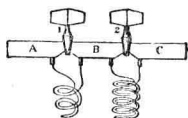


圖 451. 抵抗圈.

C 等上. 各黃銅塊,均在硬橡皮板上固定不動,成為箱蓋. 各塊斷而不連,但如插入黃銅栓,即連成一片, plug

電流逕由黃銅塊上流過. 拔栓,則

電流必經由塊下之抵抗

圈,始能達次一銅塊. 如

是配合種種適宜之抵抗

圈而成之箱,曰抵抗箱,如 resistance box

圖 452. 其上並有特殊

設備,可供威斯吞橋之用,

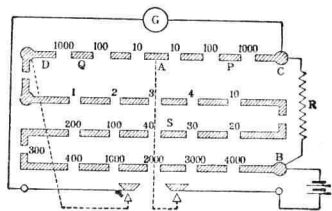


圖 452. 抵抗箱.

通常所配合之抵抗,由 1 歐至 4,000 歐,全體約共有抵抗 13,300 歐之多. 此箱郵局中多用之,故又名郵局橋. post office bridge

§ 470. 各種之抵抗器.

不作精密之測定,專用之以增減電路中之抵抗之

裝置,曰抵抗器. 其種類形式甚多,舉其重要者如下: rheostat

(1) 滑動抵抗器: 用鍍銅線,如圖 453 所示,捲在絕緣圓筒上,相鄰部分各不接觸,兩端各連於結線螺旋上。上部有一金屬棒,與第三之接線螺旋

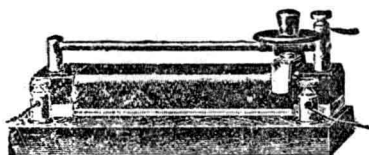


圖 453. 滑動抵抗器。

binding screw
且可左右滑動,故曰滑動抵抗器。用時,將任一接線螺旋及第三之接線螺旋插入一電路中,滑動圓筒上之接觸銅片,即可任意變更其抵抗。

sliding rheostat

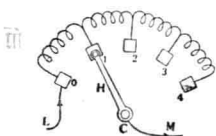


圖 454. 拐臂抵抗器。

1, 2, 3, 4 之間,各插入抵抗圈。以 C 點為支點之拐臂 H,一端在此等銅塊上滑動,是曰拐臂抵抗器。電流由 L 進入器內,由 M 流出。

(2) 拐臂抵抗器: 如圖 454, 在黃銅塊 0, 1, 2, 3, 4 之間,各插入抵抗圈。以 C 點為支點之拐臂 H,一端在此等銅塊上滑動,是曰拐臂抵抗器。電流由 L 進入器內,由 M 流出。

crank rheostat

(3) 電燈抵抗器: 將若干個炭絲電燈,並結插入電路中,如圖 455, 增加其抵抗,是曰電燈抵抗器。如欲減少其抵抗,只須任意拔去數個燈泡即可。

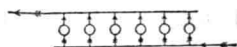
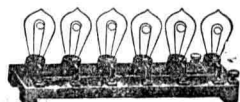


圖 455. 電燈抵抗器。

(4) 液體抵抗器: 將食鹽水等類之電解液盛入一容器內,外裝接線螺旋兩個,用導線各連結一金屬板,將此兩板平行浸入液體之中,使一板之位置固定不動,而移動其他之一板,即能增減此電路中之抵抗。

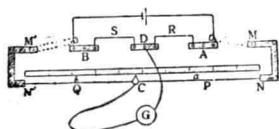


圖 456. 枳橋。

§ 471. 枳橋。

如圖 456, 在 N 及 N' 之間,插入洋銀或其他合金之抵抗線,移動接觸點 C, 使 N'C 及 CN 之抵抗變化。由電流

計 G 可以求出未知之抵抗，與威斯吞橋之原理相同。圖中 S 表已知之抵抗， Q, P 表 $N'C$ 及 CN' 之抵抗，即各與其長成正比例。故若在 $N'N$ 旁加一測長之枳棒，命 $NC = a$, $CN' = b$ ，由此可求 $P : Q$ 之值，即

$$R : S = P : Q = a : b \quad \therefore R = \frac{a}{b} S.$$

只用一枳棒，即可將未知之抵抗 R 求出，故曰枳橋。
meter bridge

§ 472. 勢差計.

一定之電流在粗細一樣之粗導線內流過時，其各點之勢差降度亦復一樣。即兩點間之勢差，與此兩點間之距離為比例。利用此理以測勢差之裝置，曰勢差計。如圖 457，用導線將棒 AB 之兩端連至電池 S ，電流沿箭頭方向由 A 向 B 流過。

另設一電路，其中有電池 E 及電流計 G ，一端與 A 連，他端 D 可沿 AB 滑動。移 D 使 G 不生偏向，表示 AED 中無電流通過。此時由 S 而來之 A 及 D 間之勢差，恰與 E 之電動力相等，其值又與 AD 之長成一定之比例。命 l_1

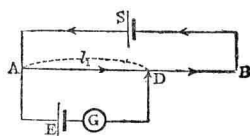


圖 457. 勢差計.

表 AD 之長， E_1 表 E 之電動力。其次另換一電池，以代替 E ，命此新者之電動力為 E_2 。同樣求得 不生偏向時之 D' 點，命 $l_2 = AD'$ 。則得

$$E_1 : E_2 = l_1 : l_2$$

之關係。故由已知電動力之電池，可以算出別一電池之電動力。

§ 473. 轉流器及轉路器.

使電路中之電流轉換其方向之裝置，曰轉流器。圖 458 所示之一種曰魯謨可夫轉流器。其要部為一硬橡皮圓柱 c ，可在水平軸周轉動，軸上有不相連之銅棒兩段如 a, b ，各與接線螺旋 f, g 相連。圓柱上有二銅塊 d, e 固定其上。轉右端螺旋，可使 d 與 a 連，

e 與 d 連，又與彈條 $k l$ 接觸。
 $k l$ 之水平部上有接線螺旋
 $h i$ 。故將電池兩端連結於
 $f g$ ，假定電流由 g 流來，則圖
 中所示之位置，其電流所取之
 方向，應為 $gbelikkaf$ 。由此位

置將圓筒再轉 π 之角度；則電流當取 $gbekhildaf$ 之方向流過，即與前
 此之方向，正相反對。同樣，若圓筒只轉其一半，即僅轉 $\frac{\pi}{2}$ 時，電流不
 通，故又可作斷流器之用。

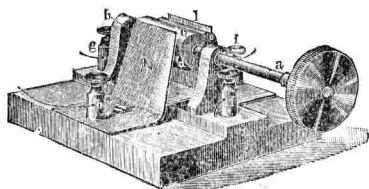


圖 458. 魯謨可夫轉流器。

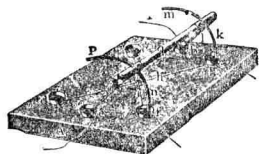


圖 459. 坡爾轉流器。

又圖 459 所示者，曰坡爾轉流器，
 於絕緣平板 A 上，設六盃，如 $b, c, d, e,$
 f 及 g ，各盛水銀。上有一絕緣棒 q ，
 兩端各有一金屬叉，如 mlk 及 pon 等。
 q 倒向右，則 b 與 g 連， e 與 f 連； q 倒
 向左，則 b 與 c 連， e 與 d 連，再用銅線 h 及 i ，連結 c 與 f ，又 d 與 g
 將電池之陽極連 b ，陰極連 e ，電路 r 之兩端與 f 及 g 相連。 q 在
 右時，電流之方向為 grf ；而 q 在左時，電流之方向為 frg 。兩者
 正相反對。如將 q 取去，則成為斷流器。

有時欲使一電路中之電流，改從別一電
 路中流過，為此而設之裝置，曰轉路器，大致如
 圖 460 所示，與坡爾轉流器相似，僅將其中之
 銅線 h 及 i 除去不用而已。電池之兩端，則
 連結至 b 及 e 。第一之電路連於 g 及 f ，第
 二之電路則連於 c 及 d 。將 q 倒向右方，則
 電流由第一電路中流過，如(I)；反之，如將 q 倒向左方，則電流由第
 二電路中流過，如(II)。

interrupter

又圖 459 所示者，曰坡爾轉流器，
 Poles's current converter

於絕緣平板 A 上，設六盃，如 $b, c, d, e,$
 f 及 g ，各盛水銀。上有一絕緣棒 q ，
 兩端各有一金屬叉，如 mlk 及 pon 等。
 q 倒向右，則 b 與 g 連， e 與 f 連； q 倒

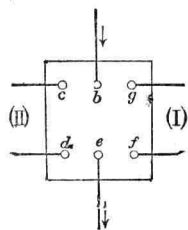


圖 460. 轉路器。

第五章 電熱學

§474. 電流之熱效應.

電流由一電路中流過,必伴之以熱之發生,此時所生之熱量,與電流強度之平方,電路之抵抗及經歷之時間等爲正比例,此關係曰朱爾定律. 設想有一電路 AB ,其抵抗爲 R 歐,電流強度爲 i 安,經歷時間 t 秒,所生之熱量爲 H 克卡,則此數者之間,恆有下列之關係存在:

$$H = 0.24 \times i^2 R t \text{ 克卡.}$$

命 A, B 兩點之勢差爲 $E = iR$ 弗,即將單位電量由 A 移至 B 所作之功。故電流強度爲 i 時,在 t 秒間所作之功,應爲 $E i t = i^2 R t$ 朱 = $i^2 R t \times 10^7$ 厄,其全部成爲熱時,

$$H = \frac{i^2 R t \times 10^7}{J} = \frac{i^2 R t \times 10^7}{4.16 \times 10^7} = 0.24 i^2 R t \text{ 克卡.}$$

檢表 25,知鉛錫齊之熔點頗低,用此製成之細線,曰熔線. 電路中如插有此線,遇過量之電流過,即由其所生之熱,將熔線融化,可防危險.

§475. 溫度之升高.

如導線之質量爲 m 克,比熱爲 C ,其升高之溫度爲

θ , 則 $H = Cm\theta$. 代入前節之式內, 得 $\theta = 0.24 \times \frac{i^2 R t}{Cm}$.

設導線爲圓柱狀, 命 r 表半徑, S 表橫斷面積, l 表長, ρ 表比抗, d 表密度, 則 $R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi r^2}$, $m = d \pi r^2 l$, 故

$$\theta = 0.24 \times \rho \frac{l}{\pi r^2} \times \frac{i^2 t}{C d \pi r^2 l} = \frac{0.24 \rho i^2 t}{C d \pi^2 r^4}$$

卽在一定之時間內通過一定之電流時, 其溫度之升高與比抗爲正比例, 與比熱, 密度及半徑之四乘爲反比例。

§ 476. 電力.

在電路一部分中每秒間所作之功, 曰此一部分之電力. 命此一部分兩端之勢差爲 E 弗, 通過此一部分之電流強度爲 i 安, 以 P 表此一部分之電力, 則

$$P = iE \text{ 每秒朱} = iE \text{ 瓦} = \frac{iE}{746} \text{ 馬力} = \frac{iE}{9.8} \text{ 每秒尅}$$

故 $1 \text{ 弗安} = 1 \text{ 瓦} = \frac{1}{746} \text{ 馬力};$

而 $1 \text{ 尅} = \text{約} \frac{1}{4} \text{ 馬力}.$

§ 477. 電能.

電流在一定時間內所作之功, 曰電能. 例如電路中之一部分其勢差爲 E 弗, 電流爲 i 安, t 秒間所耗之電流爲 iEt 朱. 通常則用瓦時作單位表出之, 卽

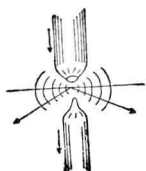
$$1 \text{ 瓦時} = 1,000 \text{ 安弗時} = 3,600,000 \text{ 朱}.$$

§ 478. 電流之光效應.

電流在電路上發生之熱,如爲量過大,即輻射成光

種種之電燈,即利用此理製成,其種類頗多,分述之如次:
electric lamp

(1) 弧燈: 用炭棒兩條使其端相接,電流自其內通過,然後使其略微分離。因分離而生電花,使炭棒發生半導體之碳之蒸氣,電流仍可由間隙處通過。於是兩棒之間,有弧狀火焰現出,如圖 461, 是



曰電弧,其光甚烈,可作光源之用。故又名弧燈。弧
electric arc arc lamp
之溫度約 $3,500^{\circ}\text{C}$,陽極約 $3,000^{\circ}\text{C}$,陰極約 $2,500^{\circ}\text{C}$ 。
炭粒隨同電流由陽極飛至陰極,除一部分氧化外,
餘均附着於陰極表面。故陽極凹下,曰火口,陰極
crater
則凸起。火口之光甚強,尤以對於水平線作 40° 傾

圖 461. 弧燈。

斜角度之方向最甚。弧燈所要之電壓,直流約 50 弗,交流約 35 弗。每 1 燭光所要之電力,在最大燭力約 0.25 瓦,在平均球面燭力,約 0.8 瓦。陽極愈燒愈低,空隙距離隨之增大,終至熄滅,欲其長明,非設法使炭棒間保持一定之距離不可。圖 462 即此項裝置中之一種,曰差動弧燈, T_1, T_2 表電極, S 爲一粗線捲成之圈,與炭
differential arc lamp coil

棒 E, F 順結, C 表一細線捲成之圈,與炭棒並結, GH 表鐵槓,支點爲 O ,左端有金屬棒二,如 I 及 J 。其 J 係由關節與金屬板 A 相連, A 則套在炭棒 E 上。 I 之下端有金屬片 K 。電流未通以前, GH 及 A 均在水平位置, A 即靜止於固定板上,炭棒 E 與固定之炭棒 F 相連接。電流通過時,由 T_1 $SDEF$ 至 T_2 ,故 G 被引上, A 成傾斜,將 E 提高,與 F 分離,而現弧光。又因 EF 間抵抗甚大,故一部分之電流,由 C 通過,提高

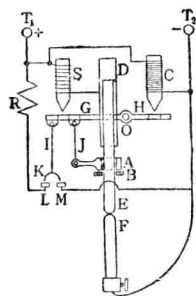


圖 462. 自動調節。

H ,使 E 保持一定之位置。距離 EF 增大後,仍由 C 之力,保持適當之位置。如 C 中之電流過強,則因 H 提高, K 即將 LM 連結,故大部分之電流,由 T_1 逕直經過 RLM ,以至於 T_2 ,可防危險。

(2) 炭絲燈: 電弧之光過強,不及熾熱燈適於實用。最初發明者,係在玻璃泡內,封入炭絲,兩端用鉑線導出泡外,泡內空氣排盡後,通電入內,炭絲因受熾熱發光,是為炭絲燈,其形狀如圖 463。炭不易熔,其抵抗又大,且溫度愈高抵抗愈減,故極便使用。此燈每 1 燭光約需 3.5 瓦之電力,着火時之溫度約 $1,800^{\circ}\text{C}$,壽命約 1,000 時間。



圖 463. 炭絲燈。

(3) 內龍斯特燈: 圖 464 所示,曰內龍斯特燈,原理又不同。 W 表鐵製之抵抗線, E 表電磁石, C 表稀土金屬之氧化物之棒, D 為瓷料螺線,上捲鉑製細線。

電流由 MK 經 DHB 流過。最初 C 為非導體,故 E 上無電流。但由鉑線生出之熱,使 C 之溫度次第升高,抵抗隨之減小,電流經 $MEWCGB$ 流過。 E 引唧鐵,使 K 切開,鉑絲內之電流切斷,全部悉由 C 內通過,使 C 由熾熱而發光輝。為防止 C 內之電流,不至過強起見,加用 W ,因鐵之溫度升高,其抵抗亦增大故也。又鐵在空氣中氧化極速,故通常須封入玻璃管內,始能使用。此燈之 1 燭光,僅需電力 1.5 瓦,壽命則約 300 時間。

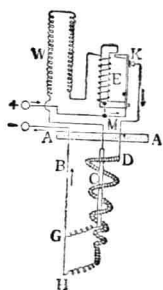


圖 464. 內龍斯特燈。

(4) 金屬絲燈: 熾熱體之溫度愈高,輻射而出之可見線之能愈大,至絕對溫度 $5,880^{\circ}$ 時,而達於極大。但如是之高溫,惟有太陽而已,人力不能達到,炭絲燈之溫度,去此甚遠,不合於用,現今

多改用不易熔化之金屬絲燈,以代替之。最初使用者,為銻燈,實用溫度為 $1,900^{\circ}\text{C}$,每燭光需用電力 1.5 瓦。但銻為稀有金屬,且極脆,故

價昂而壽命短，不合於用。其次發明者為鎢燈，實用溫度為 $2,000^{\circ}\text{C}$ ，
tantalium lamp
 每燭光需電力 2 瓦，壽命約 600 時間。現今使用最廣者為鎢燈，其
tungsten lamp
 形狀如圖 465，實用溫度 $2,300^{\circ}\text{C}$ ，每燭光需電力 1 瓦，壽命 1,000 時間。

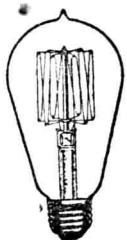


圖 465. 鎢燈。

如泡內不用真空而用高壓之淡氣或氬，則實用溫度可升高至 $3,700^{\circ}\text{C}$ ，每燭光需電力半瓦即足，故此種燈泡又有半瓦燈之稱。
half-watt lamp

(5) 錄蒸氣弧燈：圖 466 之 AB 表一玻璃管，其陽極 A 用鐵，陰極 B 用錄，管內為錄之蒸氣全體充滿。按鑰 K ，使電流暫時由圈 L 通過，立即放開，則

由 L 之自誘(參照 § 532) 發生高壓電流，經 $LKAB$ 通過，發生弧燈。此後只須有 100 弗之電壓，即可維持弧燈。如是之裝置，曰錄蒸氣弧燈。此燈每 1 燭光僅需 0.64 瓦之電力即足，且富於化學線，最適於照相使用。如改用石英管及鎢之陽極，其效率當更大。

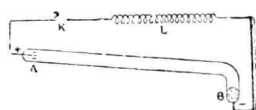
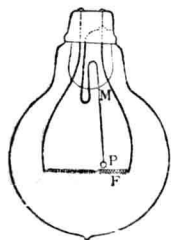


圖 466.

(6) 鎢弧燈：圖 467 所示之裝置，曰

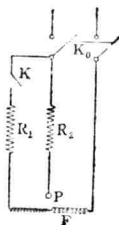
鎢弧燈，其泡內封有淡氣，內裝鎢球 P 作陽極，鎢絲 F 作陰極。 F 之一部分作螺線狀，一部分作直線狀，周圍則用細鎢絲捲作筒形包圍之。支持 P 之 M ，如(I)由兩種膨脹率不同之金屬合成，受熱後， P 移向左，與鎢絲圓筒作一定之距離，如(II)。使用時，先將總鑰 K_0 ，如(III)，結合，次結合 K ，電流即由 KR_1F 流過，使 F 熾熱，至直線部分之熱，則



(I)



(II)



(III)

圖 467. 鎢弧燈。

至直線部分之熱，則

爲周圍細鎢絲奪去，故不發光。此時由 F 發生之電子，及氙氣之陰離子，均驅向 P ，故 P 與 F 之間，亦有電流通過。然後切開 K ，全部之電流，均由 R_2PF 之電路流過，於 P, F 間，發生一定之弧電流， P 因受熱而生白光。光源成爲一點，極便於射影，照相及顯微鏡等之用，其光有達 1,000 燭光以上者，壽命約爲 1,000 時間。

(7) 穆爾氣燈：在玻璃管內封入稀薄氣體，送電流入內，全管發光，其色隨氣體之種類而異。如用二氧化碳，則發白光，極便於使用。如是者曰穆爾氣燈。但二氧化碳消費頗速，須備有補充此氣之裝置。計管每長 1 呎，生 15 燭光，電壓約 70 弗，電流約 $\frac{1}{3}$ 安，壽命 300 時。

Moore gas lamp

(8) 氖燈：近年都市商店用作裝飾招牌之氖管，係用直徑 15 耗之玻璃管，屈成各種文字或圖畫，如圖 468 所示。各字相連處用黑漆塗上，兩端封入金屬極，內用空氣唧筒抽成高度真空後，再導入少許之氖，



圖 468. 氖燈。

兩極上施以 5,000 乃至 10,000 弗之電壓，由放電而發出氖所固有之紅光。此燈之光力既大，又不發熱，故效率極大，約爲通常熾熱燈之 20 倍。如於管內再加少許水銀蒸氣，則放青光。如玻璃管改用黃色者，則青光即變成綠色。最近更有放出白色之氖燈，可供實際照明使用者。

§ 479. 電銲。

使強電流由兩種金屬接觸之處通過，因抵抗而生大量之熱，歷時不久，接觸面均變成柔軟，此時如由外面施以相當壓力，即可接合爲一，如是之方法曰電銲。例如直徑 2 吋之鋼棒，使用此法，不及 1 分間，即可銲畢。electric welding 通常接合電車等之軌道，即用此法。

§ 480. 電爐.

利用電弧所生之熱,可使熔點極高之物體熔化,及作各種高溫度之實驗,如是之裝置曰電爐,其最簡單者如圖 469. 在大理石之

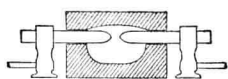


圖 469. 抹散電爐.

槽內插入炭棒,由其電弧所生之熱,使槽內之物質熔化,此爐通稱曰抹散電爐. 較此

略為複雜者,如圖 470 曰誘導爐,鍊鋼時使

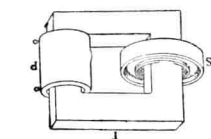


圖 470. 誘導爐.

用之. 其原理與交流變壓器(參照 § 552)完全相同, P 為其一次圈, S 為環狀槽,用非導體之磚造成, T 為其鐵心. 鐵放於槽內,成爲二次圈,故送電流入 P , 即在 S 內發生強大之電流,使鐵熔化.

§ 481. 熱電流.

接合兩種不同類之金屬,使成一閉電路,其相接之處,曰結口. 如兩結口之溫度不同,即有電流在此電路

中流過. 例如圖 471, 接合者爲鉍及銻,左方結口之溫

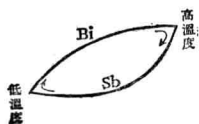


圖 471. 熱電流.

度低於右方之結口時,則在高溫度

電流由鉍入銻,在低溫度,則由銻入

鉍,如箭頭所示,此電流曰熱電流,發

生熱電流之裝置,曰熱電池,亦稱作

熱電偶,其電動力曰熱電動力. 不僅鉍銻而已,凡在

鉍 鎳 洋銀 鉑 鉛 銅 鋅 鐵 銻

上列之金屬中,照此接合,其高溫度之結口,電流均由位置

在前之金屬，向位置在後者流去。兩金屬在上列內之距離愈遠，其熱電動力愈大。此一系列之金屬，曰熱電列

thermo-electric series

§ 482. 熱電動力之定律.

命 t_1 及 t_2 表 AB 兩種金屬之兩結口之溫度，此時之電動力，以 $(A, B)_{t_1}^{t_2}$ 表之。同樣， $(A, B)_{t_1}^{\theta}$ 表結口之溫度一為 t_1 一為 θ 時之電動力； $(A, B)_{\theta}^{t_2}$ 表一為 θ ，一為 t_2 時之電動力。如此，即得

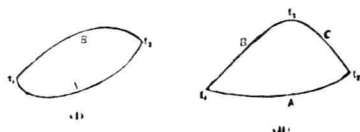


圖 472. 熱電動力。

$$(A, B)_{t_1}^{t_2} = (A, B)_{t_1}^{\theta} + (A, B)_{\theta}^{t_2}.$$

如將 t_2 之一結口分開，插入他一金屬 C ，如圖 472 之 (II)，且命 C 之兩端在同一之溫度 t_2 ，則得

$$(A, B)_{t_1}^{t_2} = (A, C)_{t_1}^{t_2} + (C, B)_{t_1}^{t_2}.$$

上列兩式，為熱電動力之定律。
laws of thermo-electromotive force

§ 483. 熱電動力與溫度之關係.

任取兩金屬接合成一熱電池，使一結口恆保持零度，他一結口之溫度為 $t^\circ\text{C}$ ，其值可任意變化。由實驗求出與 t 相應之電動力 E ，此兩者間之關係如下：

$$E = \alpha t + \frac{1}{2} \beta t^2,$$

$$\text{或} \quad \frac{2}{\beta} \left(E + \frac{\alpha^2}{2\beta} \right) = \left(t + \frac{\alpha}{\beta} \right)^2.$$

式中之 α 及 β 表兩種常數,其值由接合之金屬種類而定。如沿縱軸取 E , 沿橫軸取 t , 則得圖 473 所示之曲

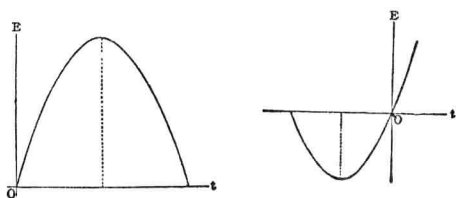


圖 473. 熱電動與溫度之關係。

線,或在 t 軸上方, 或在其下方,隨 α 及 β 而異,但均成拋物線, $t = -\frac{\alpha}{\beta}$, 及 $E = -\frac{\alpha^2}{2\beta}$, 爲其

頂點。由圖可知,如將一結口之溫度,由 0°C . 起,沿一定方向變化,則 E 之絕對值最初加大,至一定溫度而達於極大,與此極大之 E 之絕對值相應之溫度,曰中立溫度,以後溫度再沿同一方向變化, E 反而減小,由是達於又一溫度, E 復等於零。由此再沿同一

方向進行, E 之符號正負相反,表示通過之電流相反。此現象曰熱電逆變。
thermo-electric inversion

例如鉛與其他金屬結合時,如 E 之單位用微,即 10^{-6} 弗,則其結果當如表 57 所示。 α 取正值時,表示在高溫之結口,電流由鉛流向其他之金屬;取負值時,表反對之方向。

線,或在 t 軸上方, 或在其下方,隨 α 及 β 而異,但均成拋物線, $t = -\frac{\alpha}{\beta}$, 及 $E = -\frac{\alpha^2}{2\beta}$, 爲其

表 57. 熱電流常數。

物質	α	β
銅	2.86	0.008,0
錫	2.78	0.013,8
鎢	3.11	0.033,4
鐵	13.20	-0.028,6
鎳	-19.16	-0.029,0
鈷	-15.51	-0.076,0
銻	-3.21	-0.016,8
鉑	-3.10	-0.020,6

§ 484. 拍爾提效應.

用圖 474 之裝置,送電流自鉍入銻,則結口冷卻,反之,送電流自銻入鉍,則結口發熱。一般在熱電列內之金屬,均有相同之性質,即由位置在前者流入後者時冷,由後者流入前者時熱。如是之現象,

曰拍爾提效應。結口發生或所吸收之熱,則曰

Peltier effect

拍爾提熱。一方面電路中遵從朱爾定律發生

Peltier heat

之熱,則曰朱爾熱。按朱爾熱與電流之平方為

Joule heat

比例,故與電流之方向無關。但拍爾提熱,則僅與電流強度之本身為比例,故電流之方向改變

時,所生之拍爾提效應亦相反。

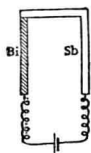


圖 474.

拍爾提效應。

§ 485. 湯姆遜效應.

不必兩種金屬,亦有與上節所述相類之現象發生。即在同一之金屬內,如全體之溫度不同,有電流自其高溫部流向低溫部,或自其低溫部流向高溫部時,均有熱之發生或吸收出現。如是之現象曰湯姆遜效應,或稱克爾汶效應。熱之發生或吸收,隨金屬性質而異,電由高溫部流向低溫部時,在銅則生熱,在鐵則反冷卻。試於任意之導線上,任取 A, B 兩點,命 t_1 及 t_2 表此兩點之溫度,假定 $t_1 > t_2$ 。

如電流自 A 向 B 流過,每單位時間內,在 AB 間發生之熱量 h , 應由下式計算之,即

$$h = \sigma i(t_1 - t_2) \text{ 克卡.}$$

式中之 i 表通過之電流強度,用電磁單位(參照 § 568)測定之, σ 為一常數,其值由導線之種類而定,通稱之曰電比熱。茲將各種金屬之 σ , 用克

specific heat of electricity

卡作單位表出之,如表 58。由表知鉛之湯姆遜效應等於零,鉛之所以被選為標準金屬,即由此。

表 58. 電比熱

物質	σ
鎳(商品)	$+24.5 \times 10^{-6}$
銻(,,)	$+21.6$,,
錳(,,)	$+3.6$,,
銀	$+1.8$,,
銅	$+0.6$,,
鉛	$+0.0$,,
錫	-0.04 ,,
銻	-6.9 ,,
鎳(純)	-7.8 ,,
鉍(純)	-10.2 ,,

§ 486. 熱電堆.

交錯結合 n 對之鉍銻,如圖 475, 加熱於其一方之各結口,而使其他一方之結口保持常溫. 因各對之熱電池,方向相同,故全體之熱電動力,應為一個熱電池之電動力之 n 倍. 將兩端連結於電流計 G , 即可推算出其兩結口之溫度差,此項裝置,曰熱電堆 thermo-pile

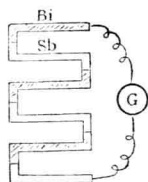


圖 475. 熱電堆. 圖 476 之測微輻射計,即其一例.

radio-micrometer

磁極 NS 間,懸石英絲,上附平鏡 M , 下懸一對鉍銻,以塗煤烟之銅箔接合之. 銅箔受輻射熱,圈內生電流,當偏向與磁場垂直之方向. 由燈尺法讀出 M 之偏向,即可推算輻射之值,雖隔蠟燭 2 哩之遠,亦可由此求得由蠟燭輻射而出之熱.

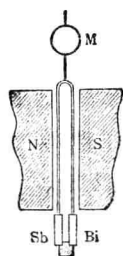


圖 476.

測微輻射計.

§ 487. 熱電高溫計.

電爐等之高溫,亦可應用熱電流以測定之,如

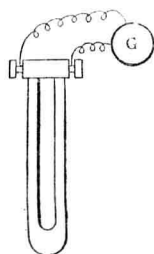


圖 477. 熱電高溫計.

圖 477, 用銻或其合金與鉍,造一熱電池,裝在鐵管或瓷管內. 兩端導出管外,用導線與一電流計 G 連結. 設將此管之一端放入爐內,則管內之熱電池發生熱電流,使 G 之指針偏向,由此可將爐中之溫度推出. 如是之裝置,曰熱電高溫計. 電流計 G 上之刻度,通常不刻作電流之數值,而以與之相等之溫度之數值代替之. 故使用此器,一讀即得,不必計算.

thermo-electric pyrometer

第六章 電化學

§ 498. 電解.

液體可因其對於電流所呈之性質,大別之爲三類: 第一類如各種之油,不能傳電. 第二類如銻,或其他熔化後之金屬,既善傳電,又不爲電流引起分解. 第三類如各種酸類,鹽類及鹽基之水溶液等,亦能傳電,但同時有分解作用,相伴而生. 屬於第三類者,特稱曰電解質, electrolyte 由電流使液體分解之現象,曰電解. electrolysis 電流出入液體處曰電極,其進入之極,曰陽極,其由液內流出之極,曰陰極. electrodes anode cathode

如圖 478, 浸鉑板 A 及 K 入硫酸銅溶液中,自外用導線連結,中插一電池,使電流由 A 流入,由 K 流出,

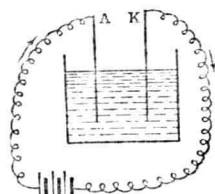


圖 478. 電解.

則 CuSO_4 分解成爲 Cu 及 SO_4 , 其中之 Cu 附着於 K 上,成爲薄層, SO_4 應現於 A , 但此物不能獨立存在,故與水化合成爲硫酸及養氣. 結局有養氣之泡,出現於 A 上,即



電流不斷,附於陰極之銅,亦不絕,液體遂漸呈酸性. 如

不用鉑而用銅作極，則 A 上不生養氣，其銅漸次溶解附於 K 上。凡如此類，液體因受電流作用，分解為二原子或根，附於兩極之現象，曰離化，分成之原子或根，曰離子，
radical ionization ion
 其趨向陽極者，曰陰離子；趨向陰極者，曰陽離子。
anion cation

§ 439. 法刺第定律.

以一物質之原子價除其原子量，所得之商，曰此物
valency atomic weight

質之化學當量。據法刺第之實驗：(1)同一電流通過各種電解質，在同一時間內，各電極析出之離子量，與其化學當量為比例；(2)在一定時間內，各電極析出之離子量，與電流強度為比例。此關係，曰法刺第定律。
chemical equivalent

Faraday's law

又 1 安之電流，在 1 秒間析出之離子量，如用克作單位表出，其數值曰電化當量。故上述之定律，又可改為：由電流析出之離子量，與流過之電量及離子之電化當量之乘積相等。命 z 表電化當量，則電流 i 安在 t 秒內應析出之量 m 克，當由下式決定之，即

$$m = zit \text{ 克.}$$

如有一種元素之電化當量為已知，則其他各元素之電化當量，均可由其化學當量算出。據實測，銀鹽溶液在 1 秒間由 1 安之電流析出之銀為 0.001,188 克，即

銀之電化當量應為 0.001,118 每庫克。銀之原子量為 107.88, 其原子價為 1, 均屬已知者, 由此可以求出他元素之數值。例如氫之原子量為 1.008, 原子價為 1, 故氫之電化當量 = $\frac{0.001,118}{107.88} \times 1.008$ 即 1.0446×10^{-6} 每庫克。同樣, 氫之電化當量 = $1.036,3 \times 10^{-5} \times \frac{16}{2}$ 即 8.290×10^{-5} 每庫克。如元素之原子價不止一種, 則其電化當量亦不止一種。各物質之電化當量, 如表 59。

表 59. 電化當量

元 素	電 化 當 量
+ 氫	0.000,010,446
- 氧	0.000,082,90
- 氯	0.000,367,44
- 氮	0.000,048,38
+ 鋅	0.000,338,7
+ 鐵(二價)	0.000,289,4
+ 鐵(三價)	0.000,192,8
+ 銅(一價)	0.000,658,8
+ 銅(二價)	0.000,329,4
+ 銀	0.001,118,9

§ 490. 離子之電荷。

以克作單位之化學當量, 即以原子價除克原子而得之商, 稱之曰

克當量。 按 1 庫之電量, 可以析出 0.001,118 克之銀, 故 gram equivalent 欲析出 1 克當量之銀, 應須 $\frac{107.88}{0.001,118}$ 即 96,500 庫之電。

此值對於任何種類之離子均不變。故每有 96,500 庫電量通過, 必能析出 1 克當量之離子。此 96,500 之定數, 曰 **法刺第常數**。命 m 表離子之質量, e 表其電荷, M Faraday constant

表其克原子, n 表其原子價, A 表其克當量, 則 $A = \frac{M}{n}$, 而

$\frac{e}{m} = 96,500 \div \frac{M}{n}$ 每克庫 = $96,500 \times 3 \times 10^9 \div \frac{M}{n}$ 每克

靜電單位。故得 $\frac{e}{m} \times \frac{M}{n} = 2.895 \times 10^{14}$ 靜電單位。

但1克原子中含有之原子數為 N ，係一常數，即 $M = Nm$ 。

代入上式，得 $e = 2.895 \times 10^{14} \frac{n}{N}$ 靜電單位。據最近研究，

$N = 6.062 \div 10^{23}$ ，故代入上式，加以計算，即得

$$e = 4.774 \times 10^{-10} \times n \text{ 靜電單位。}$$

對於1價之離子，其電荷即為 4.774×10^{-10} 靜電單位，即

一個電子所有之電荷(參照§572)，為電子學最重要之事實。

對於二價以上之離子之電荷，均可照推。

試命 m_H 表氫原子之質量，則

$$m_H = \frac{1.008}{6.062 \times 10^{23}} = 1.663 \times 10^{-24} \text{ 克}$$

以此除氫離子之 e ，即得

$$\frac{e}{m_H} = \frac{4.774 \times 10^{-10}}{1.663 \times 10^{-24}} = 2.872 \times 10^{14} \text{ 每克靜電單位。}$$

§ 491. 電離說。

電解現象，用電離說解釋之，極為簡便。電解質在

theory of electrolytic dissociation

平衡狀態，即無電流通過之之時，亦不免有若干分子，分

離存在，各帶若干電荷。如是者，曰自由離子，成為如是

free ion

之狀態，曰電離，亦有稱之為離化者。電解質內有電流

electrolytic dissociation

ionization

通過時，此等自由離子，受電力作用，陽離子趨向陰極，陰

離子趨向陽極。既達電極，各失其電荷，遂現成由電解

所析出之物質。據此，則電解質之傳電，完全出於帶電

離子之運動,其他未成離子之分子,與之無關。故離子數愈多,電解質之抵抗愈小。離化之分子數,對於溶液內分子之總數之比,曰溶液之離化度,其值與濃度相關。
degree of dissociation concentration
 濃度減則離化度增,濃度減至無窮小,成爲無限稀薄時,
infinite dilution
 離化度等於 1,此時液內全部之分子,均成爲離子。

命 K 表溶液之質導, x 表 1 立方厘米內溶質之克當量,則 $\frac{K}{x}$ 曰溶液之當量質導。
conductivity equivalent conductivity

又純粹物質因溫度升高,亦有同樣現象發生。例如氯化銨受熱,則起下式之變化,



是曰熱離。如爲電離,則非用水溶液不可,其變化爲
thermal dissociation



分離之離子,各帶電荷,與熱離時迥不相同。

§ 492. 電量計.

應用法拉第定律,在一定之時間內,測定其析出之離子之量,即可算出電流強度,此項裝置曰電量計。
voltameter

(1)水電量計: 電解質用水,內加少許硫酸,讀出由分析而得之輕氣容積,即可算出其質量及電流強度。設觀測時之溫度爲 $t^\circ\text{C}$., 容積爲 v 立方厘米,氣壓高度爲 b 耗,輕氣管內之液柱高 h 耗,輕氣壓力爲 p 耗,液體比重爲 s 。設將 v 換算成爲溫度 0°C ., 壓力 760 耗

時，爲 v_0 立方糎，則

$$p = b - \frac{hs}{13.6}; \quad v_0 = \frac{v}{1 + 0.003,665 t'}$$

又輕氣在 760 耗及 0°C . 時之密度 ρ 爲 0.000,089,6 每立方糎克，故析出輕氣之質量 $m = \rho v_0$ 克，其電化當量如命爲 z ，電流強度爲 i 安，通過之時間爲 t 秒，則得 $\rho v_0 = z i t$ 。故電流強度 i ，可由

$$i = \frac{\rho v_0}{z t} \text{ 安}$$

算出。實際之液體對於氣體或吸收或化合，故不能得精確之結果。

(2) 炸氣電量計：knallgas voltameter 利用輕養兩氣混合體之炸裂，亦可由其質量測定電流之強度。設有 1 安之電流，經歷 1 分間，析出之炸氣，換算作 0°C . 及 76) 耗時之容積，爲 10.44 立方糎，故觀測 n 分間，得容積 v_0 ，

$$i = \frac{v_0}{10.44 \times n} \text{ 安.}$$

(3) 銅電量計：copper voltameter 用硫酸銅溶解作電解質，而以銅板作電極。電流經歷 t 秒間所析出之銅，如命之爲 m 克，則

$$i = \frac{m}{0.000,329,4 \times t} \text{ 安.}$$

(4) 銀電量計：silver voltameter 用硝酸銀溶液作電解質，而以銀棒作陽極，鉑板作陰極。電流經歷 t 秒間，在鉑上析出之銀，命爲 m 克，則

$$i = \frac{m}{0.001,118 \times t} \text{ 安.}$$

§ 493. 極化.

連結水電量計於電池，通電後，輕氣與養氣，各附着於鉑之極板，生極化作用，成爲反對方向之電動力。如將電流切開，僅將此電量計連結於電流計上，即可證明其中確有反對方向之電流通過。設適用於電量計兩極之勢差爲 E 弗，抵抗爲 R 歐，電流強度爲 i 安，電解進

行中每秒所要之功爲 w 朱,則有下列之關係:

$$Ei = i^2R + w; \text{ 或 } i = \left(E - \frac{w}{i} \right) \frac{1}{R}.$$

式中之 $\frac{w}{i}$ 弗,表電解進行中出現之逆電動力。由外部適用之勢差 E ,非較 $\frac{w}{i}$ 爲大,決不能引起電解,實際發生電解所需要之最小勢差,曰分解電壓。decomposition voltage 例如稀硫酸之分解電壓爲 1.76 弗,故欲其電解繼續進行,至少亦非使用 3 個之丹聶爾電池不可。

如選用之電極物質,與析出之金屬相同,即可避免極化。例如在硫酸鋅溶液中,插入鋅作電極,則陽極之鋅溶解後與陰離子 SO_4 結合,成爲硫酸鋅。析出之鋅附在陰極之鋅板上,並無變化,故曰非極化電極。non-polarizable electrodes 但此僅就其大致而言,並非絕對不極化也。

§ 494. 電化學之應用。

工業上應用之電化學,約有四種,即電鍊,電鍍,電鑄電刻,總稱之則曰電冶。electro-metallurgy 茲分條說明之如下:

(1) 電鍊爲由礦物內提鍊金屬之稱。electro-extraction 例如將氧化鋁 (Al_2O_3) 及小炭塊裝於電爐內,插入炭棒兩條,作其電極,用 50 弗及 5,000 安之電流通過其中,使氧化鋁溶解。通常氧與碳化合,故由此可得銅,但恆有二倍於氧化鋁之銅混在其內,故析出者爲鋁與銅合成之鋁銅,aluminium bronze 澤極美,頗類金,對於空氣及酸,抵抗頗大,彈性亦強,可作鋼之代替品。

(2)電鍍爲在各種金屬外面,包蔽一層金或銀,鎳,銅等之稱。先將欲鍍之物品用安息油洗淨,再換用苛性鉀或苛性鈉洗過。如爲銅或黃銅,則用酸浸過,再以水洗之。洗畢,立浸入鍍槽內,通電即得。鍍槽內之電解質則隨所鍍之目的而異,茲舉其重要之數種如下:

(A)鍍金:	氯化金	1.10 克	} 陽極 } } 純金 }	} 陰極 } } 鍍品 }
	精化鉀	10.00 克		
	水	100.00 克		
(B)鍍銀:	精化銀	0.88 克	} 陽極 } } 銀板 }	} 陰極 } } 鍍品 }
	精化鉀	1.50 克		
	水	100.00 克		
(C)鍍鎳:	硫酸銹鎳	15.00 克	} 陽極 } } 純鎳板 }	} 陰極 } } 鍍品 }
	水	180.00 克		
	此中須再加少許硫			
	酸或硼精,使成中性,			
	略帶酸性尙無礙,略帶鹼性則絕對不可。			

(3)電鑄係用金屬鑄成各種物體之模型,如銅版,肖像之類。法先用馬來樹膠或石膏,火漆,蠟等範成模型,如用馬來樹膠,則於其上遍塗石墨,俾成導體。將此模型浸入硫酸銅溶液,此項溶液中含有硫酸銅 278 克,強硫酸 94 克,水 1,800 克。用銅板爲陽極,此模型爲陰極,送電流入內。析出之銅,即附着於模型表面,成爲銅板。如猶嫌其薄,則於內部加鋅錫或鉛字所用之合金等。

(4)電刻係用電流製成之各種彫刻之稱。法在銅板上,先用假漆繪成圖樣文字,然後浸入硫酸銅溶液內,作成陽極,另用一大銅板作陰極。送電流入內,則書畫處凸起如彫刻之形狀。例如市上出售之假銀盾銀屏,即由此法作成後,再加鍍銀即得。

第七章 電磁學

§ 495. 電流之磁效應.

令一導線 AB 由紙 C 穿過, 如圖 479, 導線中如有電流通過, 紙上鐵粉即聚成若干同心圓, 以所穿之一點, 為其共通中心。在直線電流周圍之小磁針, 靜止時所取之方向, 即此等同心圓之切線, 其 N 極所指之方向, 如圖中小箭頭所示。

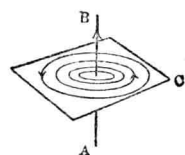


圖 479.

電流之磁力線。

設如圖 480, 使導線 AB 取磁子午線之方向, 且成水平, 電流由 A 向 B , 則在下方之磁針, 當作箭頭所示之偏向, 直至地磁對此小磁石作用之力, 與電流作用於其上之力, 恰成平衡之地位, 始行靜止不動。



圖 480. 電流與磁針。

§ 496. 俾奧·薩發耳定律.

由實驗測得電流所生之磁效應如下: (1) 電流之一小部分作用於 N 極之力之方向, 與包含導線及磁極之平面垂直; 而電流之方向對於磁力之方向之關係, 與右轉螺旋之前進方向對於轉動方向

之關係相同。此關係又名安培定則，如圖 481，大箭頭表電流之方向，小箭頭表電流作用於磁極之力之方向。
Ampere's rule

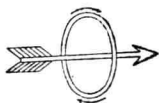


圖 481. 安培定則。

(ii) 作用之力 f ，與磁極之強度 m ，電流之強度 i ，導線小部分之長 ds ，及連結 ds 與磁極之直線與電流方向所夾之角度 α 之正弦等，如圖 482，為正比例，

與磁極 P 至 ds 之距離 a 之平方為反比例。即

$$f = k \frac{i m ds \sin \alpha}{a^2} \text{ 達。}$$

式中之 k 表一常數，其值由單位之選擇而定。此 (i) (ii) 兩條之關係，合稱之，則曰

俾奧薩發耳定律。

Biot-Savart's law

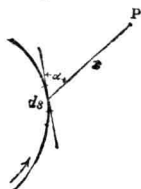


圖 482.

俾奧薩發耳定律。

§ 497. 圓形電流之磁力。

設有圓形導線 AB ，電流沿之流過。由圓心 O 引直線 OD ，與圓垂直，在其上任意一點 P ，有一 N 極，其強度為 m 。

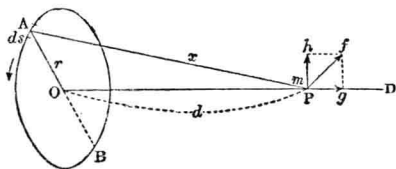


圖 483. 圓形電流之磁力。

在圓上任意一點 A ，取電路之一小部分 ds ，此部分對於 m 作用之力，應為 $\frac{i m ds \sin \alpha}{x^2}$ 。

但此時之 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ，故成

$$f = k \frac{i m ds}{x^2}.$$

其方向則在 ds 及 x 之平面內。今將此力在 f 及 OD 之平面內，分解為二，一與 OD 平行，為 g ；一與其垂直，為 h ，則

$$g = k \frac{i m ds}{x} \cdot \frac{r}{x}; \quad h = k \frac{i m ds}{x} \cdot \frac{d}{x}.$$

與 A 正對之一點 B ，亦同樣有此作用，就 g 之分力而言， A 與 B 相等；就 h 之分力而言， A 與 B 相反。故就全圓周計算之， h 成爲零。故若命 F 表全圓對於 m 之力，則

$$\begin{aligned} F &= \Sigma k \frac{i m ds}{x^3} r = \frac{k i m ds}{x^3} \Sigma ds = \frac{k i m ds}{x^3} 2 \pi r. \\ &= \frac{2 \pi k i m r^2}{x^3} \text{ 達,} \end{aligned}$$

其方向則向 OD 。

如 P 恰在圓心，則 $x = -r$ ，命此時之力為 F_0 ，則

$$F_0 = k \frac{2 \pi i m}{r}.$$

如 $r = 1$ 厘， $m = 1$ C. G. S. 單位，且 $F_0 = 2 \pi$ ，此時之電流強度，如選作電流之單位，則曰電流之電磁單位，使用此種單位時，全圓周對於 m 所作用之力 F ，當成爲

$$F_0 = \frac{2 \pi i m}{r} \text{ 達,} \quad F = \frac{2 \pi i m r^2}{x^3} \text{ 達.}$$

1 安恰與此單位之 $\frac{1}{10}$ 相等，故用安作單位時， F 應成爲

$$F_0 = \frac{2 \pi i m}{10 r} \text{ 達;} \quad F = \frac{2 \pi i m r^2}{10 x^3} \text{ 達.}$$

如通過圓心，引一平面與圓垂直，佈鐵粉於其上，電流由此圓形導線上通過時，鐵粉即排成圖 484 所示之

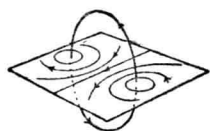


圖 484. 圓電流之力線。

磁力線形狀。如將此圓放在磁子午面內，在其中心放一小磁針，磁針受電流之力及地磁力之作用，當取一定之方向平衡，其與子午面所作

之角度，有一定之值，正切電流計（參照 § 5.3）即由此製成。

由上式可知 $i = \frac{F_0 r}{2 \pi m}$ ，故其次式當為

$$[i] = [\mu]^{-\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}} [T]^{-1}$$

設有 n 個圓形電路相重，或一導線曲成 n 捲之圓

形者，曰圈，其對於軸上一點之力，應為 $F = \frac{2 \pi n i m r^2}{10 x^3}$ 達。

§ 493. 直線電流之磁力。

設電流沿直線 AB 流過時，其方向如圖 485 之箭頭所示，其對於任意一點 P 作用之磁力 F ，如下：

$$F = \frac{2 m i}{10 r}$$

式中 r 表 P 與 AB 之垂直距離。

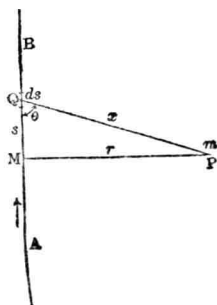


圖 485.

直線電流之磁力。

§ 499. 單位磁極繞行電流一週之功。

欲求導線周圍任意一點之磁場，先通過所設之點，作一平面與導線垂直，在此平面內，以導線通過處為圓

心，畫一圓周，通過所設之點引切線，此切線即此點之磁場之方向。假定在此圓周上，放一單位磁極，則其所受之磁力，應為 $\frac{2i}{10r}$ 。如將此單位磁極沿圓周繞行一周，所作之功應等於 $2\pi r \times \frac{2i}{10r}$ ，即 $\frac{4\pi i}{10}$ ，其正負則由磁極運動之方向而定。此式中未含 r ，可知所畫圓周，不問大小如何，其功均相同。不甯唯是，磁極運動之路徑，亦不必限於圓，只須圍繞導線而成閉曲線，結果仍為 $\frac{4\pi i}{10}$ 。

如有 N 個導體，其中各有電流 i 安通過，或有 M 捲之圈，則單位磁極繞行其一周所作之功，應等於 $\frac{4\pi Ni}{10}$ 。

§ 500. 磁動力。

單位磁極由一點 A 移至他一點 B 時所作之功，曰沿路徑 AB 之磁動力。如路徑為一閉曲線，且包含 N 捲之圈在內，其中有 i 安之電流通過，則磁動力為 $\frac{4\pi Ni}{10}$ 。

§ 501. 錨環內之磁場。

用絕緣導線在環周均勻捲成圖 486 所示之形狀，曰錨環。如環質為非磁性體，則 $\mu = 1$ 。命 l 表環軸之長，則單位磁極繞軸一周所作之功，應

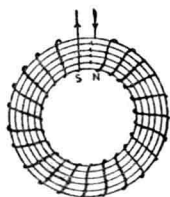


圖 486. 錨環。

爲 $\frac{4\pi Ni}{10}$ 。命 H 表沿軸之磁場，則由對稱形可知對於一切之遠行所作之功，均等於 Hl 。故得

$$H = \frac{4\pi Ni}{10l}$$

命 n 表軸上每 1 厘米中包含之捲數，則上式又可寫作

$$H = \frac{4\pi ni}{10}$$

在環內設想另有一圓，與軸平行，且更與環心接近，圓周長 l' ，則其上各點之磁場強度 $H' = \frac{4\pi Ni}{10l'}$ 。又因 $l' < l$ ，故 $H' > H$ 。可知環之橫斷面內，磁場強度在各點並不相等，即不成爲均磁場。但若環之直徑遠在環厚之上，則環內各點之磁場，即看作均磁場，亦無大礙。

§ 502. 圈筒內之磁場。

錘環之徑，若大至無限，則其內磁場當爲 $\frac{4\pi ni}{10}$ ，取其一小部分而論，成一直立圓筒，此項圓筒之長，如遠在其橫斷面積之上，則即將其餘部分取去，內部及中心附近之磁場，仍無變化。故如用導線照此捲成圖 487 之形

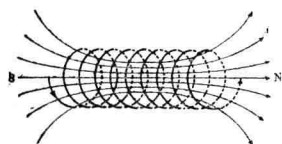


圖 487. 圈筒之磁力線。

狀，曰 **圈筒**。筒內中央部分之 solenoid 磁場等於 $\frac{4\pi ni}{10}$ ，兩端則否，故磁力線之分布，如圖中所示。

凡涉及電流之磁場，必均

有 ni 連帶現出, n 表單位長所包含之捲數, i 表電流之
number of turns
 強度, 通常稱此兩者之乘積 ni , 曰安掙.
ampere turn

§ 503. 電磁石.

圈筒內部, 如實以鐵, 則其磁力
 更強, 此時之鐵, 曰鐵心, 具有鐵心之
iron core

圈筒, 曰電磁石, 如圖 488. 如圈筒
electromagnet

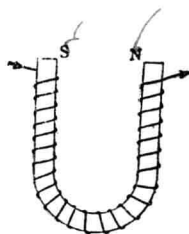


圖 488. 電磁石.

甚長, 而橫斷面積甚小, 則筒內磁場, 仍與前同: $H = \frac{4\pi ni}{10}$.

命 μ 表透磁率, I 表磁化強度, κ 表磁化率, B 表磁誘導度, 則

$$I = \kappa H = \frac{4\pi ni\kappa}{10};$$

$$B = \mu H = \frac{4\pi ni\mu}{10}.$$

§ 504. 磁路.

空間無論為磁性體或非磁性體充滿, 磁誘導線若從此中通過, 恆成為連續的. 換言之, 即誘導度 B 之大小及方向, 均作連續之變化, 並無間斷. 故磁誘導線應成為一連續閉曲線. 由此等曲線若干條環成一管, 如圖 489, 其橫斷面積 S 及其 B 之值, 隨地而異, 但兩者之乘積 BS , 則一定不變. 例如在 P_1, P_2, P_3 各點之磁誘導度, 各為 B_1, B_2, B_3 , 而其橫斷面積, 各為 S_1, S_2, S_3 . 但乘積

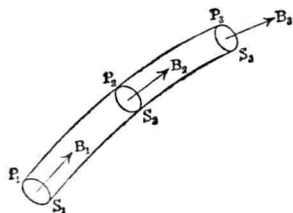


圖 489. 磁路.

則 $B_1S_1 = B_2S_2 = B_3S_3 = BS$, 此值曰此管之磁誘束。一閉合之磁誘束
flux of magnetic induction
則曰磁路,因其與電路頗有類似之處,故名。故電流之流線,與磁誘
magnetic circuit lines of flow of current
導線相當。在電流時,電流之橫斷面積,雖隨地而異,但電流密度,即
current density
橫斷面之單位面積中通過之電流,則與橫斷面積成反比例。故電
流密度與橫斷面積之相乘積,對於全路之任何部分,均成一定之值,
恒與其電流強度相等,與磁路中之磁誘束 BS 相似。

磁誘束 BS 之次式,可由 B 之次式及面積之次式求之,即

$$[BS] = [\mu]^{1/2} [M]^{1/2} [L]^{3/2} [T]^{-1}.$$

磁誘束之 C. G. S. 單位曰馬。
maxwell

就鐵鑄環之磁路而言, $H = \frac{4\pi Ni}{10}$, $B = \frac{4\pi Ni\mu}{10}$. 如命 G 表磁
力線總數, s 表環之橫斷面積,則 $G = \frac{4\pi Ni\mu s}{10l}$. 再命 $M = \frac{4\pi Ni}{10}$, 則

$$G = M \frac{\mu s}{l}.$$

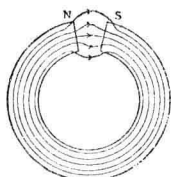


圖 490. 不完全磁路。

設想一電路,長為 l , 橫斷面積為 s , 兩
端電動力為 E , 比抗為 k ; 則其電流 i 應為

$$i = E \frac{k s}{l}.$$

與 G 之式,完全同一形式。故 M 曰磁動力。
magnetomotive force

又 $\frac{k s}{l}$ 表導體對於電流之抵抗,故相對應

之 $\frac{\mu s}{l}$, 曰磁抗。即磁路之總力線數,等於磁抗除磁動力所得之商。
magnetic resistance or reluctance

又透磁率 μ 之逆數,即 $1/\mu$, 曰比磁抗,即構成此磁路之物質每
specific magnetic resistance or specific reluctance

1 立方厘米所具有之磁抗。磁抗之 C. G. S. 單位,曰奧,磁動力之一
oersted

C. G. S. 單位,曰吉。
gilbert

上述之鐵鑄環,其磁誘導線全部均由鐵內通過,無一逸出外面
空氣中,凡如是之磁路,曰完全磁路。反之,將環截去一小段,使留一
perfect magnetic circuit

空隙,如圖 490 所示之形狀,則力線中必有一部分由此空隙通過,如
air gap

是者,曰不完全磁路。磁誘導在此空隙中散開,不復如完全磁路中
imperfect magnetic circuit

時之緊密。如是之現象,曰磁誘導之漏洩。
leakage

§ 505. 電鈴.

圖 491 爲電鈴之構造,由鈴 *G*,槌 *H*,電磁石 *M*,鈕 *D*
electric bell bell hammer push button
 及電池 *C* 而成. 槌柄之中央 *A*,由軟鐵製成,在 *M* 之前,
 爲其唧鐵,後方有彈條 *S* 牽引之,並有一銅片 *B*,與調整
a. mature
 螺釘接觸. 按鈕,則電流通
 過, *M* 成爲磁石,引 *A* 向左,槌
 擊鈴作聲. 同時電路在 *B*
 切斷, *M* 失去磁性, *S* 引 *A* 向
 右,再與螺釘相接,電路又通,
 故鈴又響.

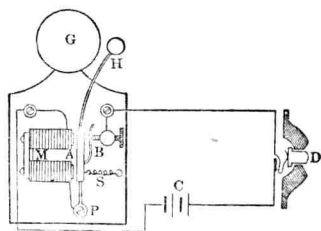


圖 491. 電鈴.

§ 506. 電報.

利用電流之磁性,可供遠處通信之用,曰電報,如圖
telegraph
 492 所示,假定左方之甲局爲發報局,右方乙爲收報局,
transmitting station receiving station

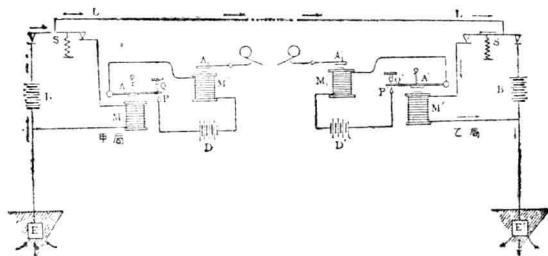


圖 492. 電報之原理.

兩者之間，以電線 LL 連結之。乙之電路內有電磁石 M' ，其上方之唧鐵 A' ，在未通電前， P' 與 Q' 分而不連。 M' 下端連一銅板 E' ，深埋地內，曰地板。甲局有電池 B ，一端連其地板 E ，他端與鍵 S 相連，未通電時， B 與電線不連。

發報時，按 S ，則 B 與 L 連，電流經 L 流過 S' ， M' ， E' 及 E ，完成一閉電路，因此 M' 將 A' 引下。由此運動或使鈴發聲，或使模斯印字機畫出點與線，即可達意。如甲乙相去太遠，通過 M' 之電流過弱，不足以引動之時，則加

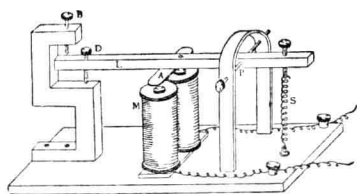


圖 498. 音響器。

一局部電池 D' 及電磁石 M_1' 。當 M' 引 A' 時， P' 與 Q' 接觸，故 D' 之電路通， A_1' 為 M_1' 引下，使其記出所要之符號，此項裝置曰繼電器。

圖 493 所示之裝置，

曰音響器，為模斯印字機之代用品。電流通過電磁石 M ，引動其唧鐵 A ，則螺釘 D 之尖端，即與下端銅塊相擊，當電流停止時，唧鐵受彈條 S 之牽動，復轉向上，其槓桿又與螺釘 B 之尖端相擊。即一上一下，各有一音發出，由此兩音相隔之時間，或長或短，即可代表線與點。又由點線之種種配合，可以代表各種字母，曰模斯電碼。

Morse alphabet

§ 507. 二重電報.

上述之裝置,在同一時間內,只能由一局發報與他局,不能互相收發,故不便於實用。欲同時收發,須用二重電報,外尚有四重電報及多重電報等。茲專就二重者述之,可分為兩種:
duplex system quadruplex system
multiplex system

(1) 差動法: 大都用於陸電,其連結如圖 494。甲局之示差繼電器 M_1 有兩圈。按鍵 K_1 , 由電池 B_1 而來之電流,分為兩路,一由圈經電線 L 而入乙局之繼電器 M_2 , 其中之一部分經 $K_2 r_2$ 入地, 他一部分則經 R_2 入地。又由 B_1 而來之他電流,經 M_1 之他一圈及 R_1 入於地。

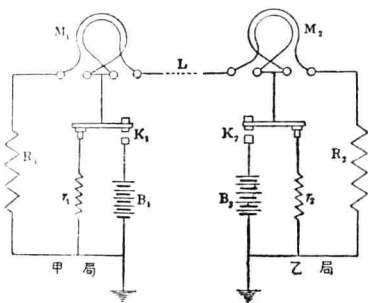


圖 494. 差動式二重電報。

如 M_1 之兩圈抵抗相等,且 R_1 又與線路及乙局全部之總抵抗相等,則由 B_1 而來通過 M_1 兩圈之電流大小相等方向相反,抵消後 M_1 不起作用。但在乙局,則因 M_2 之兩圈內沿同一方向流過,當然有相當作用。同樣在乙按 K_2 , 由 B_2 而來之電流可使 M_2 失效, M_1 生作用。兩局同時按鍵,其電池之電動力相等,方向相反,故乙中之電流互相抵消,電流

由繼電器之一圈向 $R_1 R_2$ 流去,故 $M_1 M_2$ 同時動作,以互相通信。

(2) 橋法: 大都用於水電,如圖 495。 bridge method P_1, Q_1, R_1 及乙局全部成威斯吞橋,使 $P_1:Q_1 = L_1':R_1$, 則按 K_1 可使乙局之 M_2 動作,按 K_2 可使甲局之 M_1 動作。因此可以同時互相通信。

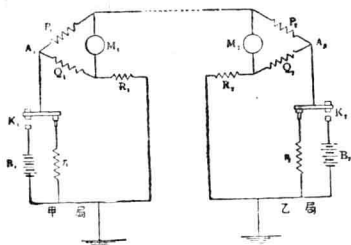


圖 495. 橋式二重電報。

§ 508. 磁場對於直線電流之力。

在直線電流 PH , 如圖 496, 上任意一點 Q , 取其一小部分, 命為 ds . 由俾奧·薩發耳定律, 可知導線內有電流 i 通過時, ds 對於 P 點之磁極 m 所作用之力 f , 應為

$$f = \frac{m i ds \sin \alpha}{10 a^2}.$$

其方向與 P 及 ds 所決定之平面, 即與紙面垂直, 且正下方。由反作用定律, 知在 P 之 m , 對於 $i ds$ 作用之力亦為 f , 但正

向上方。但 m 對於 Q 之磁力, 應為 $H = \frac{m}{x^2}$, 方向在 PQ ,

故 $f = \frac{H i ds \sin \alpha}{10}$.

上式不限於磁極, 凡有 H 存在之處, 均可適用。

試沿電流及其垂直方向, 將 H 分解之, 得 $H \cos \alpha$ 及 $H \sin \alpha$. 其中與 f 有關者僅 $H \sin \alpha$, 故由此可以檢出磁場作用於電流之力之方向。如伸左手三指, 互成垂直, 如圖 497, 以食指向磁場, 中指
向電流, 則拇指即指磁場作用於
導體之力之方向。 如是之方法,

曰佛來銘之左手定則。

Fleming's left hand rule

如導線全體之長為 l , 則磁



圖 497. 左手定則。

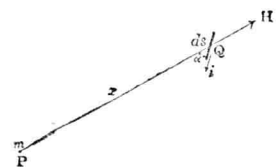


圖 496. 磁場對於電流之力。

場對此導體全體所用之力，應為

$$F = \frac{H i \sin \alpha l}{10}$$

如導體與磁場垂直，即 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ，則成

$$F = \frac{H i l}{10}$$

如在均磁場內之一點 A ，有一

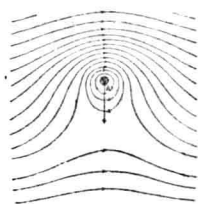


圖 498. 導線與力線。

導線，與紙面垂直，其中之電流係由上而下，磁場則由左向右，其力線當成為圖 498 所示之分布。沿力管方向

有張力作用，其垂直方向有壓力作用。故導體一邊之力管密集，他邊稀疏，結果使導體沿箭頭移動，與左手定則相一致，圖 499 之巴羅輪，可以證明之。

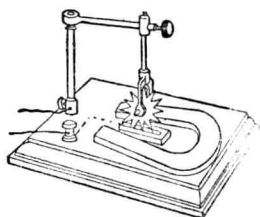


圖 499. 巴羅輪。

輪以水平棒

為軸，下部浸水銀槽內，放在磁蹄間，電流由上向下，則輪之下部即向右轉動。

§ 509. 磁場對於矩形電流之力。

放一矩形電流 $ABCD$ ，如圖 500，於均磁場 H 中，其 BC 及 DA 與 H 垂直， AB 及 CD 則作角度 θ 。如命 $AB = b$ ，

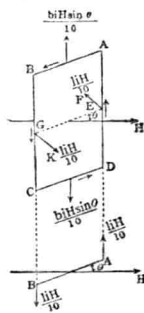


圖 500. 矩形圈所受之力。

$BC=l$, 則磁場對於 AB 之力, 等於 $\frac{biH\sin\theta}{10}$, 向上; 對於 CD 之力, 等於 $\frac{biH\sin\theta}{10}$, 向下. 即兩者互相平衡. 同樣 DA 所受之力為 $EF = \frac{liH}{10}$, 與 H 及 DA 均垂直; 又 BC 所受之力為 $GK = \frac{liH}{10}$, 則與前相反. 故此兩者成爲偶力. 命 L 表此偶力之矩, S 表 lb , 即此矩形之面積, 則得

$$L = \frac{liH}{10} b \cos\theta = \frac{SiH}{10} \cos\theta.$$

如此矩形圈能在 BC 及 DA 平行之中心軸周轉動, 則其效應當使其沿逆時針方向而轉, 至 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 時, $L = 0$, 圈在此處靜止不動, 如圖 501 之 $A'B'C'D'$. 此時電流所生之磁力線之方向, 恰與磁場一致, 且通過此圈之磁力管數, 亦以此

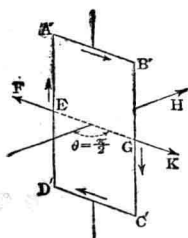


圖 501. 圈之平衡.

時爲最多. 故凡有電流通過之圈,

以由 N 極進入之磁場力管數極大時, 爲其靜止之位置.

以上係就圈可轉動而磁場則固定不變時而言, 其所取之位置如上述之規定. 反之, 如圈之位置固定不變, 而磁場之方向則可轉動時, 其結果亦同.

概括之, 任何之電磁系, 當其平衡時, 所應取之位置,

electromagnetic system

係沿其正方向橫貫此圈而過之力管數, 恰成爲其極大值之時.

§ 510. 荷爾效應.

設有一金屬薄板,方向與磁場垂直,其中有電流通過時,在電流及磁場之垂直方向上,有勢差發生,此現象曰荷爾效應,或曰 Hall effect 磁場之橫效應。例如取一鐵板或銻板,如 transverse galvanomagnetic effect 圖 502,使電流沿 OX 方向流過,則上下兩面

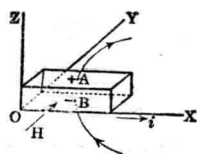


圖 502. 荷爾效應.

之中點,即 A 及 B ,在同一之勢,雖將此兩點連接一電流計,亦不偏向。但如沿 OY 方向,以強磁場作用之,則 A 之勢高於 B ,其勢差可由電流計測定。反之,如改用銻板或鎳板,則 B 之勢高於 A 。各種金屬之中,以銻對於此項效應最為顯著。

據電子說,電子運動而成電流,電子沿 XO 之方向流過,則陽電荷沿 OX 方向流過。由佛來銘定則,知電子應由 B 移向 A ,故在銻板, B 之勢高於 A 。一方面銻對於電勢之關係,與此正相反,故電流之一部分,只能看作陽電荷之粒子運動而成,關於此點,說明尚欠圓滿。

此外尚有磁場之縱效應,即由磁場而生之原電流方向上之勢 longitudinal galvanomagnetic effect 差或其抵抗之變化。各種金屬之中,亦以銻對於此項效應最為顯著。又圖中 A 及 B 兩點所生之溫度差,曰厄亭罕生效應。 Ettinghausen effect

§ 511. 電流之動力作用.

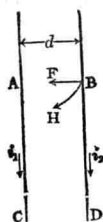


圖 503. 電力作用.

除上述電流與磁石有相互作用而外,一電流對於他一電流亦有作用,曰電力之動力作用。 electrodynamical action

先就兩平行電流論之。如圖 503,命 d 表兩平行電流 AC, BD 間之距離, i_1 安及 i_2 安表其上之電流,直線電流 i_1 對於 B 點之磁力 H 應為 $\frac{2 i_1}{10 d}$,方向則如圖中所示。故 BD 上每單位長所受之力,如命為 F ,則 $F = \frac{H i_2}{10} = \frac{2 i_1 i_2}{10 d}$ 。據佛來銘定則,其方向在於 BA 。

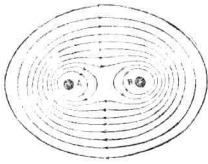


圖 504. 同向電流。

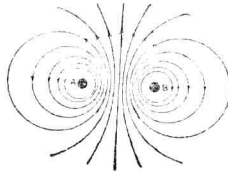


圖 505. 反向電流。

故此時兩導體互相引近。如 AC 上之電流與圖中相反，則 H 及 F 均與上述相反，此時兩導體互相斥逐。與由兩導線之

合成磁場中力線配布狀況一致。如圖 504，表同向電流，此時之力管將導體包住，因張力而生收縮，使兩者互相接近。如圖 505，表反向電流，此時之力管不能包住兩導體，而密集於兩者之間，但在外部則甚稀疏。故由垂直於力管之壓力作用，使兩導體互相遠離。

圓電流之作用與一薄板之磁石同。故如圖 506，將兩圈放在同軸之平行位置上，使電流由其中流過。如兩圈內之電流方向均同，則異名之極相對，故相引近；如電流方向相反，則成同名之極相對，故相斥逐。

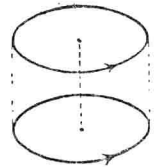


圖 506.

圓電流之力。

§ 512. 測電器具。

電學中所用之測定器具，既多且繁，不勝枚舉，總稱之曰計電器。茲就其大致上分別之，凡應用電流之各項效應以測定其電流強度者，曰電流計。電流計之刻度直接指示其安數者，曰安計；其直接記出其兩點間之勢差者，曰弗計。測定一電路內任何兩點間所消費之電力者，曰瓦計。各種常見之計電器，分條述之如次。

electrical measuring instruments

galvanometer

amperemeter or ammeter

voltmeter

wattmeter

§ 513. 正切電流計.

在鉛直導線圈中心放一磁針，針之轉動可由水平圓盤之刻度讀出。其刻度通常分為兩種，一記角度，一記其角度之正弦。外觀形狀，如圖 507。用時，先將圈面放在磁子午面內，然後送電流入圈，俟磁針靜止，讀其角度。

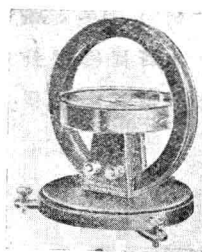


圖 507. 正切電流計.

命 m 表此磁針之極之強度， l 表其長， H 表地磁之水平分力， F 表電流對於中心所生之磁場強度， θ 表磁針之偏向，如圖 508，則 $m H l \sin \theta = F m l \cos \theta$ 。命 R 表圈之半徑， n 表其上之捲數， i 安表電流強度，則由 $F = \frac{2 \pi n i}{10 R}$ ，知

$$i = \frac{10 R H}{2 \pi n} \tan \theta = k H \tan \theta = K \tan \theta.$$

式中之 k 表一常數，即 $\frac{10 R}{2 \pi n}$ ，由器械而定，又 K 等於 kH ，為器械及觀測地點之常數，均可測得。通常使用時，將此器與一電量計順結，先由電量計測出 i ，代入上式，即得 K 。由上式可知電流

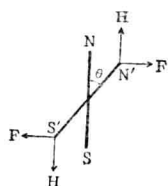


圖 508.

正切電流計之力。

恆與 $\tan \theta$ 為比例。故由 $\tan \theta$ 及 K 之值，即可求得與此 θ 相應之電流強度。故此器曰正切電流計。

tangent galvanometer

§ 514. 正弦電流計.

如將正切電流計之圈，製成能在鉛直軸周轉動，而於其下部加一水平刻度盤，以讀出其偏向，則曰正弦電流計。使用時，仍先令圈面與磁子午面一致，然後通電，磁針當起偏向，此時

sine galvanometer

轉動圈面，使磁針仍在圈面內。命 θ 表圈轉之角，如圖 509，電流對磁針之力 F ，與圈垂直，故 mFl 等於 $mHl \sin \theta$ 即 $i = \frac{10 R}{2 \pi n} H \sin \theta = k H \sin \theta = K \sin \theta$ 。

式中之 k 及 K 與前同，仍為常數。

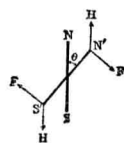


圖 509. 正弦電流計.

§ 515. 無極電流計.

將同樣磁針兩枚，一倒一正裝在支軸上，則成無極磁針。用線懸一無極磁針，使其其中一磁針，在於一電流圈內，如圖 510，則成爲無極電流計。此器因電流而起之偏向，與通過圈內之電流強度成正比例

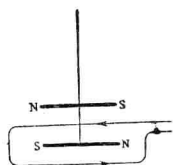


圖 510.
無極電流計。

圈內各有小磁針三個，貼在鏡背，其方向亦相反，成爲無極磁針，自上垂下。並於頂上，備有較大之磁石，曰節制磁石。用此節制磁石，可以抵消一部分之地磁，使其敏度增加。圈內有電流通過，則磁針當呈偏向，由鏡及望遠鏡觀測偏向角度，即可算出電流強度，是爲鏡電流計。

§ 516. 鏡電流計.

圖 511 之 C 及 C' 爲兩固定之圈，其捲法互相反對。

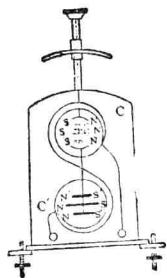


圖 511.
鏡電流計。

§ 517. 達松發爾電流計.

用途最廣之電流計，如圖 512，曰達松發爾電流計。其固定磁石 NS 裝在木板 C 上，或懸於壁，或置棹上均可，

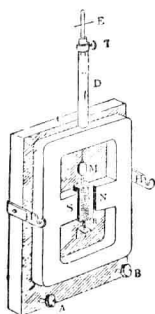


圖 512.
達松發爾電流計。

磁石上部有孔，附一銅管 D ，內有一含磷青銅線，上連軸 E ，下懸鏡 M ， M 之下更懸一圈 R ，再下爲含磷青銅線之螺線，由導線與 B 相連。他一接線螺旋 A ，則逕與磁石相連。由 A 送電入內，經磁石，銅管 D ，管內青銅線，圈，下部青銅線，而達於 B 。未通電前，圈面與磁場平行，過電後則生偏向，經 M 反射後，可用望遠鏡讀出其角度。又因此裝置之偏向者爲圈，故曰動圈電流計。使用

moving coil galvanometer

此器之優點甚多：(1)圈在磁極之間，不受外部磁力影響。(2)圈之振動，極易衰減，觀測時不致多費時間。
damping

§ 518. 弦電流計.

對於迅速變化之電流，須用特殊之裝置，方能感受其偏向，為此而設者，有圖 513 之弦電流計。其要部為一
string galvanometer
鍍銀石英絲 CC ，張於電磁石 NS 之間，在電磁石上穿孔，一方用透鏡 GF 集光，使其正照弦上，一方用顯微鏡觀測

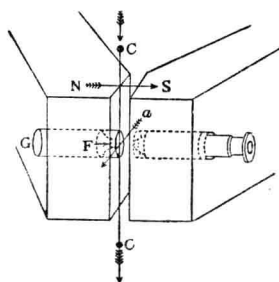


圖 513. 弦電流計.

弦之運動。如電流自上而下，則弦受力 a 作用而生偏向。又此器亦用有強磁石，故不受外磁力影響，且弦甚輕，運動敏捷，受空氣抵抗，又易衰減。變更張力，可得任意敏度。

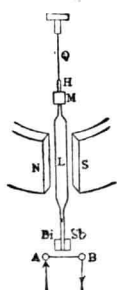


圖 514.

熱電流計。

§ 519. 熱電流計.

前述之微輻射計，如加以適當之改良，即可成為電流計，如圖 514，曰熱電流計。在強磁石 NS 間，用
thermo-galvanometer

石英絲懸銀線之圈 L ，貼一鏡 M 於玻璃軸 H 之上，其下接熱電偶 Bi, Sb 。再下有鍍鉑之玻璃絲 AB ，由此送電流入內，因熱電偶之結口受熱，故 L 內發生電流，即由 L 所生之偏向，可以算出通過 AB 中之電流強度。

§ 520. 彈動電流計.

次章所述之誘導而生之電，或帶電體之放電，均一瞬即過，此類電流通過電流計內，止能使其可動部得瞬間之衝動。故若加重於其指針，使其振動周期增至 6 秒或 10 秒，即便觀測。因衝動而生之

偏向角度，與由其中通過之電量為比例。故使用此種裝置，可以將其電量算出。如是之器具，曰彈動電流計。

ballistic galvanometer

§ 521. 軟鐵安計。

直接由刻度讀出電流之安數之裝置中，以圖 515 之軟鐵安計最為簡單。圈 C 之內有軟鐵棒二，如 A 及 B 。其中之 B ，可在軸 D

soft-iron ammeter

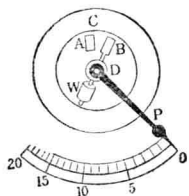


圖 515. 軟鐵安計。

周圍轉動，其上附指針 P 及調整錘 W 。 C 內無電流時， P 指 0 位。 C 內有電流通過時，不問其方向如何， A 與 B 均受同一方向之磁化，成為同名之極，而生互相斥逐之效應。其結果致使指針向左轉動。直至由電流而來之力，與 W 之重力，成為平衡時，始行停止。

§ 522. 衛斯吞直流安計。

圖 516 之衛斯吞直流安計，為最精密之一種電流計，係將達松發爾之可動圈裝於鉛直軸上，並附一細彈簧，以節制其振動。

Weston D. C. ammeter

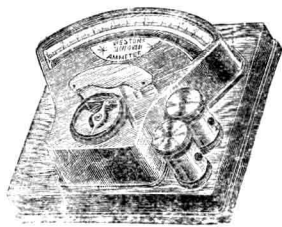


圖 516. 衛斯吞直流安計。

使用小安計測強大電流時，可用抵抗及溫度率較小之合金，造成安計之分路，俾由安計中通過之電流，僅為其一小部分，以便觀測。故一切安計，均附有各種分路，以備選擇使用，即對於各種大小範圍之電流，均可用同一裝置測定之。

§ 523. 克爾文安秤。

如圖 517，在四個固定圈 A, B, C, D 之間，夾有 L 及 M 兩圈，可沿軸 GH 而轉。其轉動由一柄司之，柄上附有刻度及砝碼 W 。如是之

裝置，曰克爾文安秤。Kelvin's ampere balance 其各圈均作順結，當電未通前，柄取水平位置，砝碼亦在零位。如電流經由 $CLMABD$ 順次流過，則 L 受 A 及 B 作用降下， M 受 B 及 D 之作用昇上，柄遂失去其水平位置。移動砝碼，使電流所生之力矩，與重力 W 之力矩相等，則柄復成水平。命 i 表電流， d 表砝碼移動距離，則 $i = k \sqrt{d}$ 。先對於已知之電流，將 k 求出，則以後對於任何未知之電流，均可由此式算出之矣。通常柄上所附之刻度，不記其長，而記其相當之安數，故一讀即知，勿庸再事計算。又砝碼位置可以適宜變動，以傾測定各種範圍之電流。又通過各圈內之電流方向，如與前此相反，其相互作用之力，依然不變，故此器不限於直流，即交流之測定，亦可使用。

§ 524. 西門子電流力計。

圖 518 之 $ABCD$ 為一可動圈，上方由一彈簧 S 繫住，下方之兩端浸在水銀盃中，其轉動角度可由指針 P 讀出。 S 上並備有扭力測定器及指針 G 。在此可動圈之內，又有一固定圈 $abcd$ ，如是之裝置，曰西門子電流力計。Siemens's electro-dynamometer

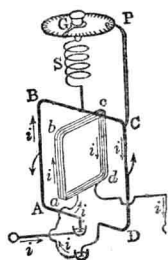


圖 518. 電流力計。

未通電前，兩指針均在零位。兩圈係順結，故通電後， AB 與 ab 之間， CD 與 cd 之間生引力； AB 與 cd 之間， CD 與 ab 之間生斥力。結局使可動圈 $ABCD$ 轉動， P 亦隨之變位。此時由上方如加以反對方向之扭力，使 P 仍復其原位，命 θ 表彈簧因此而轉之角度，則由公式 $i = k \sqrt{\theta}$ ，可以求 i 。式中之 k ，為一常數，可先就一已知之電流求出之。電流方向如與前此相反，作用仍不變，故交流亦可使用此器。

§ 525. 熱線安計。

應用電流之熱效應，亦可測定其強度，其中最敏銳者，如圖 519 之

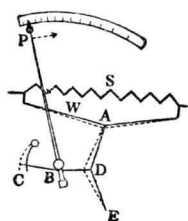


圖 519. 熱線安計。

熱線安計。 W 為鉑鉍細絲, AE 為細含磷青銅絲, B 為滑輪, 上有指針 P , 細線 CD 之 C 端, 固定於彈簧上, 中央繞 B 一周, 他端 D 結在 AE 上。未通電時, P 指零位。通電時, 大部分之電由分路 S 流過, W 上僅一小部分, 膨脹後如虛線, P 移向右, 由此可測其電流。又熱效應與 i^2 比例, 故交流亦可適用。

§ 526. 衛斯吞直流弗計。

弗計與安計, 僅抵抗大小不同而已, 故衛斯吞安計之動圈中, 如加一順結之抵抗圈, 即可測定兩點間之勢差, 是曰衛斯吞直流弗計。其構造如圖 520。在 3 弗以下用 A , 150 弗以內用 B , 加 MP 範圍更大。

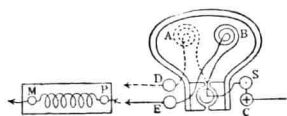


圖 520. 直流弗計。

Weston D. C. voltmeter

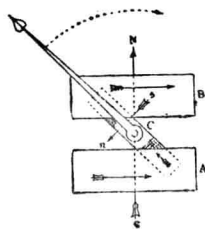


圖 521. 直交流弗計。

§ 527. 衛斯吞直交流弗計。

如圖 521, 動圈 C 與定圈 A, B 作 $\frac{\pi}{4}$ 之傾斜, A, B 中電流方向相同, 故其磁場為 NS , C 之磁場為 ns 。因此, 指針 P 隨 C 移向右。直交流均可使用, 故名衛斯吞直交流弗計。

Weston D. C. A. C. voltmeter

§ 528. 瓦計。

瓦計分兩種。一種測定瞬間電力者, 曰指示瓦計, 上述之電流力計及直交流弗計均可使用, 又克爾文安秤之變相, 曰克爾文瓦秤亦屬之。第二種測定瞬間電力遞加之數者, 曰積算瓦計。實用上則以每 1 時間消費之瓦數為單位計出者, 曰瓦時計; 同樣以 1 時間消費之瓦數為單位計出者, 曰瓦時計。

kilowatt-hour meter

第八章 誘導電流

§ 529. 法刺第之實驗.

設有 AB 兩圈,如圖 522, A 連電池, B 連電流計 G . 按 K , 使 A 內電流通過,即見同時 G 之指針偏向,隨又復返零位. 放 K , A 內電流停止, G 又生反對方向之偏向,仍一瞬即止. 又或任 K 按下而移動兩圈之相對距離,亦見 G 起偏向,且接近時與離開時之方向相反. 再用一磁石代 A , 由相對運動,亦見同種現象. B 中出現之瞬時電流,曰誘導電流;其電動力曰誘導電動力;圈 A 曰一次圈,圈 B 曰二次圈. 此項現象則曰電磁誘導.

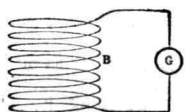
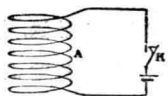


圖 522. 誘導電流.

§ 530. 楞次定律.

由上述法刺第之實驗,知由二次圈內橫貫而過之磁力線數發生變化時,其圈內即有電流通過,如變化停止,即磁力線數成爲一定之時,誘導電流亦即停止. 更由理論及實驗,知磁力線減少時所生之電流方向,對於

力線方向之關係，與右轉螺旋之轉動方向對於前進方向之關係，完全相同。磁力線增多時，與此相反。換言之，誘導電流之方向，在由其電流反作用以阻止引起此項電流之運動。 此關係，曰楞次定律。

Lenz's law

例如圖 522 之 A 內有電流通過時，其磁力線之一部分當橫貫 B 而過。此時如將 A 內電流切斷，磁場隨之消滅，橫貫 B 而過之力線數，爲之減少。按照楞次定律，此時所發生之誘導電流，方向與原在 A 內之電流相同。如此，由誘導電流而生之磁場，與 A 內原有電流造成之磁場方向相同。故由誘導電流發生之磁力線，有一部分由 A 橫貫而過，宛如阻止 A 內之磁力線，使其不得消滅者然。雖實際上 A 內之電流已斷，但賴 B 之誘導電流之力，磁場仍可暫時維持。反之，當 A 內電流初通之時， B 內本無磁力線者，一旦驟增，因此誘導而來之電流方向，與 A 內之電流相反，即兩圈之磁場相反。故 B 之磁力線之一部分穿過 A 內，宛如阻止 A 之磁力線，使其不得發生者然。雖實際上， A 內之電流已通，但賴 B 之誘導電流之力，仍可暫時維持其無磁場之狀態。

§ 531. 誘導電動力。

上述之楞次定律，僅指示出誘導電流發生之方向，更進一步，欲求其誘導電動力之量，則有訥伊曼定律，即 圈內發生之誘導電動力，等於橫貫此圈而過之磁力線之減少率。 如命 B 表誘導電動力， t 表變化之時間， N_1 表開始之磁力線數， N_2 表臨末時之磁力線數，則得

$$E = -K \frac{N_2 - N_1}{t}$$

如 E 之單位用弗，則 $K = 10^{-8}$ 。

設有一直線導體，沿磁場垂直之方向上運動，則其誘導電動力之方向，可用圖 523 之方法決定之，是

為佛來銘之右手定則。即伸右手

Fleming's right hand rule

三指，互成垂直，以食指向磁場，拇指向運動方向，則中指所向者即誘導電流之方向。



圖 523. 右手定則。

設有一強度為 F 之均磁場，在其力線垂直之方向上，每單位面積內，必有 F 條力線橫貫而過。如有導線一條，長為 l ，以速度 v 在場內運動，且運動方向與此直線及場之方向同時垂直，則每單位時間內，由此直線掃過之面積，應為 vl 。故單位時間內經此直線橫貫而過之磁力線數，等於 vlF ，即橫貫此導體而過之力線數之增加率，故在此導體內所誘導而生之電動力，等於 vlF 。

§ 532. 自誘及互誘。

設將一電燈，一電池及一圈並結之，如圖 524。按 K ，使電流通過，因電燈 D 之抵抗，遠大於圈 S 之抵抗，故電流之大部分，由 S 流過，不能使 D 發光。放開 K ，電流

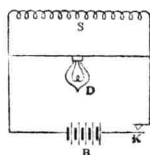


圖 524. 自誘。

切斷, S 內之磁場驟滅, 因此發生同一方向之誘導電流以妨止之, 故在此一瞬間, D 可發光。如以急快之速度, 使 K 斷續不已, D 亦繼續發光不熄。由此可知, 任何電路之電流, 當其初通或初斷之一瞬間,

即其本身亦當受誘導作用, 是曰自誘。與此相對, 前述因其他電路之影響而生誘導作用者, 曰互誘。

self-induction

mutual induction

§ 533. 誘導係數。

設想有一 n 捲之圈, 其中有單位強度之電流通過, 命 N 表其每一捲中之磁力線數, 則全圈之磁力線總數應為 nN , 通常以 L 代之, 其值由圈之形狀, 捲數, 及誘磁體之性質而定, 與通過圈內之電流強弱無關, 為一常數, 曰自誘係數。如電流每秒增加 x , 則橫貫此圈而過之磁力線數, 亦每秒增加 Lx 。故由自誘而生之電動力, 即等於 Lx 。換言之: 由自誘發生之電動力, 等於自誘係數及電流變化率之乘積。又自誘係數, 亦稱自誘應。

同樣, 如有 AB 兩圈, 相距不遠, 在 A 內有單位電流通過, 使 B 內發生 M 條力線橫貫而過, 則 M 亦為一常數, 曰互誘係數, 其值由圈形, 捲數, 誘磁體性質, 及兩圈之相

self-inductance

coefficient of mutual induction

對位置而定，與 A 內之電流強度無關，亦稱互誘應。且 mutual inductance B 內如有單位電流通過時， A 所得之力線數，亦同為 M 。又兩者之中，如有一圈之電流，每秒增加 x ，則對於其餘一圈所生之誘導電動力，即等於 Mx 。換言之，由互誘而生之電動力，等於互誘係數與電流變化率之相乘積。

由上述定義，知 [電動力] = [誘導係數] \times $\frac{[\text{電流}]}{[\text{時}]}$ ，故誘導係數之次式，可由電動力，電流及時之次式推算，其結果為 $[\mu][L]$ 。又誘導係數之實用單位為亨，即電流每秒變化 1 安而生 1 弗之誘導電動力之誘導係數。henry

§ 534. 地球誘導體。

設想一圈，橫貫之而過之磁力線數，在極短時間 t 之間，減少 n 條，則誘導電動力當為 $\frac{n}{t}$ 。此時如將圈之兩端連結，俾電流可由其中通過，命 R 表其全抵抗，則其流過之電流強度當為 $\frac{n}{t}R$ 。換言之，即在短時間 t 內通過圈內之電量等於 $\frac{n}{R}$ ，其值與發生誘導之時間 t 無關，僅由電流之抵抗 R 及變化之磁力線數 n 而定。

將上述之圈裝在架上，使其能在水平及鉛直軸周轉動，曰地球誘導體，如圖 525。命 H 表所在地之地磁 earth inductor 水平分力， V 表鉛直分力， S 表圈面積， R 表圈內之抵抗，

先將圈放在鉛直方向，令圈面與 H 垂直，則橫貫之而過之力線數，應為 HS 。由此在鉛直軸周轉動一直角，其力線即減成零。繼續由此位置再向前轉一直角，力線又由 0 而增加至 HS ，同時其圈面與先前相反，故在圈內誘

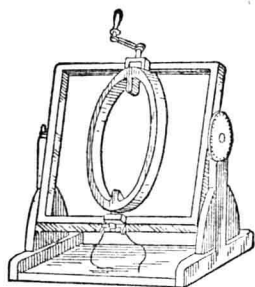


圖 525. 地球誘導器。

導之電流，方向仍與前同。即此圈在鉛直軸周每轉 π ，必生 $2HS$ 之力線數變化，故由圈內流過之總電量為 $\frac{2HS}{R}$ 。如將圈之兩端，連結一彈動電流計，讀其指針最初一次之偏向，即可將此電量算出。同樣將圈

面放在水平，與 V 垂直，照樣在水平軸周轉 π ，則由圈內通過之總電量 $\frac{2VS}{R}$ ，亦可算出。此兩者之比，即 $\frac{V}{H}$ ，為伏角之正切。故用此器立可測出各地點之伏角。

§ 535. 佛科電流。

任何形狀之導體均可發生誘導電流，並不限於圈。例如在均磁場內轉動之銅板，其每一半徑，均可看成一條導線，其上均應有誘導電流發生。如命 r 表銅板之半徑， n 表其每秒之轉數， H 表均磁場之強度，則每一半

徑每秒間橫掃而過之力線數，等於 $\pi r^2 n H$ ，即板心 O 與板緣之間，當發生 $\pi r^2 n H$ 之誘導電動力，但板內並無電流通過。其次設想此鋼板在一磁蹄之兩極間轉動，如圖 526，僅有一部分橫貫力線而過。此時誘導電動力所發生之方向，在使電流由板心向夾在磁石間之板緣，其餘之部分並無電動力發生。故

實際電流之方向，當如圖中虛線所示，成爲渦狀，故名渦狀電流，或因研究者之名，曰佛科電流。

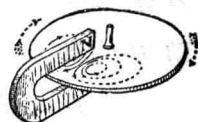


圖 526. 佛科電流。

Foucault current

同樣，磁針在鋼板上振動，亦可引起佛科電流，防止其運動，達松發爾電流計中所用之減衰法，即本此而成。

電流發生，同時必伴以熱效應，取給於鋼板之動能，爲一種虛耗，曰渦狀電流消耗。欲免此弊，可於板上造若干條細孔，成輻射狀，將渦狀電流之電路切斷即得。

§ 536. 圈在磁場內轉動所生之誘導電流。

設想一矩形圈，如圖 527 之 $ABCD$ ，在均磁場 H 內沿水平軸轉動，命 S 表圈面積。當圈面與 H 垂直時，橫貫此圈而過之磁力線數爲 HS 。由此沿箭頭方向，在水平軸周轉 θ 之角度，力線減成 $HS\cos\theta$ 。命 ω 表圈之角

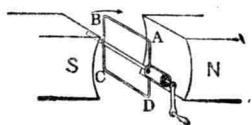


圖 527. 圈內之誘導電流。

速度，則 $\theta = \omega t$ 。由此地位再轉 $\Delta\theta$ ，所歷時間為 Δt ，則其力線數當減成 $HS \cos(\theta + \Delta\theta)$ 。故在 Δt 之間，力線減少為 $HS\{\cos(\theta + \Delta\theta) - \cos\theta\}$ 。

當 $\Delta\theta$ 及 Δt 甚小之時，可用 $\Delta\theta$ 代替 $\sin\Delta\theta$ ，用 1 代替 $\cos\Delta\theta$ ，則力線之減少成爲 $HS \sin\theta \cdot \Delta\theta$ 。以 Δt 除之，應爲誘導電動力 E_θ ，即 $E_\theta = \frac{HS \sin\theta}{10^8} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = HS\omega \sin\theta \times 10^{-8}$ 弗。命

$$D = HS\omega \times 10^{-8}, \quad \text{則} \quad E_\theta = D \sin\theta \text{ 弗。}$$

再命 n 表圈每秒之轉數，則 $\omega = 2\pi n$ ， $\theta = 2\pi nt$ 。故得

$$D = 2\pi n HS \times 10^{-8}, \quad E_\theta = D \sin 2\pi nt \text{ 弗。}$$

沿縱軸取 E_θ ，沿橫軸取 θ ，上式即成爲圖 528 之曲線。圈每轉一周，成一循環。

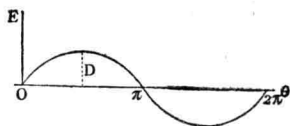
當 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 時， E 最大，等於 D ；

當 $\theta = \frac{3\pi}{2}$ 時， E 在反對方向成最大。又 θ 在 0 及 π 之間， E 取正值；在 π 及 2π 之間取負值，換言之，圈每轉半周，其誘導電流必改變方向一次，如是者曰交流。

與此相對，由電池而得之電流，方向決不改變者，曰直流。

alternating current
direct current or continuous current
commutator

欲改交流爲直流，須用整流子，如圖 529，由兩半環而成，各連於圈之兩端，隨圈轉動。與半環觸接者，有兩

圖 528. E 與 θ 之關係。

金屬片,曰

刷,其位置
brush

固定不動。

每當電流

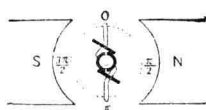


圖 529. 整流子。

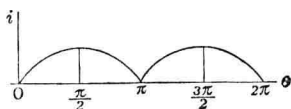


圖 530. 整流後之電流。

改變方向時,與刷接觸之半環,彼此交換,故由刷導出之電流,當如圖 530 所示,方向一定不變。

§ 537. 誘導圈。

利用誘導電流,可得高壓之電流,爲此而設之裝置,

以魯謨科夫之誘導圈最爲著名,其構造如圖 531。

Rhumkorff induction coil

用途假漆之鐵條若干,束作鐵心,如圖中之 TT , 外捲絕緣粗導線,如 PP , 成一次圈。其外套橡皮管,管上再用絕緣細導線,捲成多數之圈,如 SS , 成二次圈。二次圈之兩端連於放電棒 rr 之結口 tt 。放電棒之一端爲硬橡皮柄,他端爲金屬球,兩球間之距離可以自由

增減。鐵心 TT 之端,稍露於外,其所對啣鐵 H 之下,附黃銅彈條, H 前面有鉑點 B , 轉螺旋 d , 使其尖端與 B 之距離合宜。一次圈之一端連 H , 他端連電池之極 T_2 , 又一極 T_1 則連於 h 。彈動 H 使 d 之尖端與 B 接觸,則一次圈內有電流過,使 T 成磁

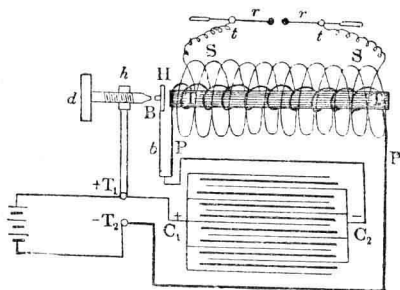


圖 531. 誘導圈之構造。

石，牽動 H ，則 B 與 d 分離，電流被斷，同時 H 受 b 之彈力復回左方，再使 B 與 d 接觸，電流又通。如是， H 以一定之規律，左右振動，則一次圈中之電流，以一定之周期或通或斷，因此在二次圈內發生誘導電流。二次圈係由多數之細導線捲成，故其誘導電動力頗大，結果遂令放電球間之空氣，被其衝破，而呈電花放電之現象。

通常更於誘導圈之座下，裝有蓄電器，用蠟紙或電母片夾錫箔而成，一端連彈條 b ，他端連螺旋 h 。當電路切斷時，空隙 B 之兩端因自誘而生勢差，其值頗大，成爲電花，使鉑受損害。但蓄電器 $C_1 C_2$ 與此兩端相連，故電均蓄積於其內，不致發生電花，因此一次圈內之電流開閉愈速，二次圈內之誘導電動力亦愈大。又當一次圈電路閉合時，此蓄電器之兩板，勢各不同，所帶之電荷各異，由 B 處空隙隔斷其交通，而他一面則由電池及一次圈連而爲一。故此項勢差，不能持久，立即放電。此時之電流方向，係沿 $C_1 T_1$ ，電池， T_2 ， PP 及 C_2 而過，與一次圈內由自誘而生之誘導電流，同爲防止一次圈內電池電流之增加，即其作用，在使電路閉合時之誘導減少。如放電球之距離大，則一次圈閉合時，無電花出現，而當其開放時，則有電花通過，如此可使二次圈之兩端之極，成爲一定性質。



圖 532.

韋涅爾特斷續器。

§ 538. 斷續器。

前節之誘導圈，其一次圈電路之開閉，由於一彈條，作用遲緩，效力不大。如改用圖 532 之韋爾涅特斷續器，每秒可斷續 2,000 次，因其過速，Wehnelt's interrupter 遂使蓄電器失其作用。此器爲一玻璃瓶，內盛稀硫酸，陰極用鉛板，陽極用鉑線，由玻璃管或瓷管導出。此器如與一電池順結入一次圈內，通電則鉑線周圍發生養氣，阻斷電流，養氣散開，電流又通，如是循環，以作電路之開閉。

此外尚有一種，曰錄滴斷續器，其構造如圖 533，用電動機運轉，同時使輪 G 及 D 內之輪轉動。 D 浸在石油內，其下部有水銀。 D 轉動後，水銀經管 N 由孔 F 噴出。 G 下有翼板 H ，下端甚銳，與一次圈相連，故由 F 噴出之錄滴，與 H 衝擊，電流沿 $KFHAT$ 流過。錄滴既已由翼板 H 噴出以後，電流始斷。

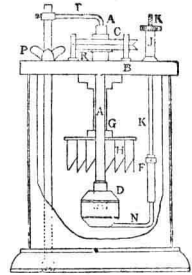


圖 533. 錄滴斷續器。

§ 533. 電話機。

誘導電流之一應用為電話，由發話器，受話器而成
telephone

(1) 受話器之構造，如圖 534，在磁蹄 A 之兩端，附軟鐵片，使成鐵心。
receiver

將捲法相反之兩圈，順結於結線螺旋，

圈傍有薄鐵板，厚 0.25

耗，曰振動板，用導線
diaphragm

由結線螺旋連至受話

器。人向振動板發音，

則應其高低生電流變

化，圈之磁場亦隨之而

變，引起振動板之振動，成爲音波，與原發之音相同。

(2) 發話器亦可用上述之受話器，惜感度不靈敏，故
transmitter

用圖 535 之微音器代之，係利用炭之抵抗隨接觸狀態
microphone

而變之特性製成。在兩水平炭棒 C 及 C' 之間，立一炭

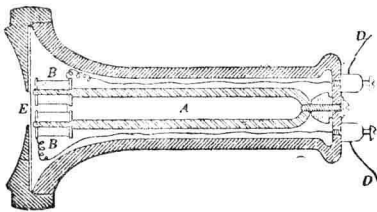


圖 534. 受話器及發話器。

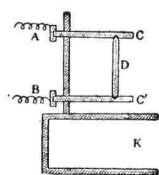


圖 535. 微音器。

棒 D ，與水平兩炭棒略接觸，同裝在共振箱 K 上。設在 K 上放表，將受話器連電池，則由 K 之振動，使炭棒接觸狀態發生變化，故在受話器內，可以明瞭聽見表中機械運動之音。

利用上述微音器而成之發話器，如圖 536，其振動板用鋁質薄板，由螺旋裝在炭板上，炭板則盛在金屬盒內，使成絕緣。更有一炭板，與此相對而立，連於後方。兩板之間及其兩側，充滿炭之細粒，但與金屬盒絕緣。故電流之通路，成爲由外而來，經過振動板前之炭板，炭粒，後方之炭板，復出於外。故

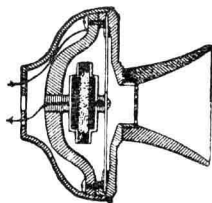


圖 536. 發話器。

若將此兩端連於電池，口向振動板發音，則由振動板之振動引起炭粒接觸變化，發生變化電流傳達於受話器。

電話器之接續，分局部電池式及共電式兩種如下：

(1) 局部電池式之結續法，如圖 537。受話器 R 不用時即掛在鉤 H 之上，使接點 1 及 2 開，而 3 閉，因此將信號器連結於電線 L_1, L_2 。故由對方發來信號，則電鈴 B 發音，或將交流發電機 M 搖動，鈴 B 亦可作音，同時對方之鈴亦鳴，用作通信之信號。當正式通話時，先將 R 由 H 取下，則 H 升起，3 開而 1, 2 閉，使通話裝置與電線相連。圖

中之 P 爲變壓器之一次圈, S 爲二次圈, T 爲發話器, D 爲電池。

(2) 共電式之結續法
common battery system
如圖 538。當受話器 R 掛在鉤 H 上時, 1 與 2 之接觸離開, 又因有蓄電器

C 存在, 電流不能通過鈴 B , 故全部無電通過。但如將發生交流之

電源, 連於兩電極 a 及 b , 則蓄電器之兩板, 交互受陰陽充電, 遂生電振動, 引起鈴聲, 使用戶得知。一方面用戶通知接線生時, 只須將 R 從鉤上取下即得。此時 H 昇上, 1, 2 聯合, 由電池 D 發出電流, 通過繼電器 f , 唧鐵 A 被引

向 f , 使接點 g 閉合, 電燈 L 發光, 接線人由此即知用戶需要接線, 爲之插入 ab , 即可運行通話。

電鈴 B 之抵抗爲 1,000 歐, 故由電池 D , 經受話器流過之直流, 雖極其微弱, 但因通話而在二次圈 S 內誘起之交流, 極易沿 $SRTC$ 之方向通過, 故仍不難聽見。

§ 540. 發電機。

圈在磁場內轉動, 可生電流, 即由機械能一變而成電能, 爲此特設之裝置, 曰發電機, 而用以造成此磁場之
dynamo

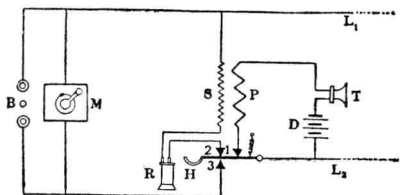


圖 537. 局部電池式。

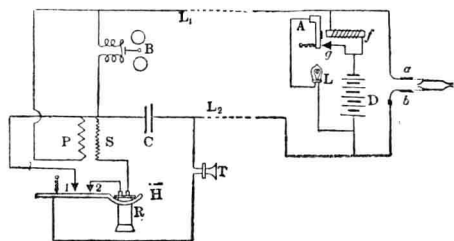


圖 538. 共電式

磁石，曰場磁石，在場內轉動之圈，曰發電子。由發電機
field magnet armature
 導出之電流，具有一定之方向者，曰直流發電機；其方向
direct current dynamo
 迅速變化時反時正者，曰交流發電機。
alternating current dynamo

§ 511. 環形直流發電子。

用整流子將發電機發生之交流改爲直流，然後導出外面，雖可得方向不變之電流，但其強度動搖太大，仍不適用於使用。欲免此弊，須用圖 539 之環形發電子，即
ring-armature
 可得強度一定之直流。先用假漆塗過之鐵線，束爲鐵

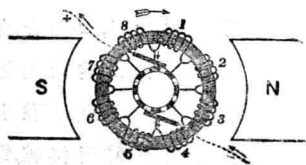


圖 539. 環形發電子。

心，曲成環形，再用絕緣銅線捲於環周，造成順結之圈若干個（在圖中則爲 8 個）。整流子與圈同數。圈與圈相接續之點，必有一導線，連至

整流子之一部。圖中由 1 至 4 之各圈中，電流之方向均同，由 5 至 8 之各圈，則相反。又各圈對於兩刷之關係，則完全相同，故由此引出一定方向之電流。各圈內之電動力，雖各有等差，但由 1 至 4 之電動力之和，則大抵一定，由 5 至 8 之和亦然。各圈位置，隨轉隨變，但半數之圈中，電動力之和，仍無變化，故電流強度，保持定值。

§542. 鼓形發電子。

釘合若干枚薄鐵板，造成一圓柱，將銅線捲在柱上，使成若干個順結之圈，各圈均與柱軸平行，且相鄰兩圈面間之角度一律相等。圈與圈連接之處，用導線一條連接至整流子之一片上，如圖 540，即成爲鼓形發電子。
drum armature

環形發電子在磁極間運轉之時，各圈中僅有環外之一部分，橫貫磁力線而過，其兩端以及環內之部分，均不生關係，僅供引導電流之用而已。鼓形發電子則否，其各圈之兩半部，均同樣能橫貫力線而過。其不生作用專供引導電流者，不過在鐵柱兩端之部分而已。故就同一容量之

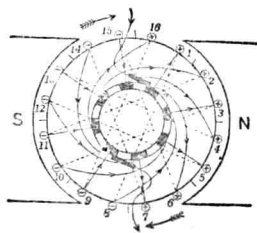


圖 540. 鼓形發電子。

發電子而言，因 i^2R 而生之消耗，環形者恆較鼓形者大。就別一方面言之，環形者各圈之相互絕緣，比較良好，修理亦易。故高壓之直流發電機一般均用環形發電子。

§543. 場磁石之勵發。

發電機之場磁石，多用電磁石，使其磁化，曰勵發，因
excitation
勵發方法不同，遂有種種名稱，茲舉其較爲重要者如次：

(1) 磁石發電機: 使用鋼製之永久磁石作場磁石,亦同樣可以發生電流,如是者,曰磁石發電機。
magnet machine

(2) 分勵發電機: 用特殊裝置,送電流入電磁石內,使其勵發而成場磁石者,曰分勵發電機,此項送電之裝置,曰勵磁器。
separately-excited dynamo exciter

(3) 順捲發電機: 以下所舉三種,既不用永久磁石,亦不用勵磁器,其場磁石之勵發,即由於發電機之本身。當發電子最初在弱磁場內轉動時,應發生誘導電流,即以此項電流勵發其場磁石,轉動愈久,磁性愈強大,最後遂可達到所需要之一定值。根據此理而成之發電機,又因其各圈之捲法不同,可分為三種。
winding

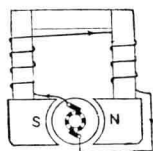


圖 541.

順捲發電機。

如圖 541, 由刷導出之電流,先經場磁石周圍通過,然後始出外部,即其勵磁之電流與導出外部之電流相同者,曰順捲發電機。通常勵磁之一部分,用較粗之導線,捲數較少。當全部電路未結合以前,電流不能通過,此時雖轉動發電子,亦不生效。外部之抵抗增大,則勵磁之電流減弱,結果使發生之電流減衰。欲免此弊,須加一並結之抵抗器,與勵磁圈並立。適宜變更此抵抗器之抵抗,即可保持一定強度之電流,送至外部。

(4) 分捲發電機: 如圖 542, 將勵磁圈與導至外部之導線,並結於刷上者,曰分捲發電機。因電流強度與抵抗成反比例,故勵磁圈用細導線,捲數亦較多,如虛線所示。外部之電路未結合以前,此器之場磁石,亦在勵發狀態,故立可得強大之電流。但俟兩刷之電壓增高後,再結合外部之電路,則通過發電子中之電流大,通過場磁石中之電流小,結果使兩刷之電壓降低。故由外部之載重增減,可影響及於兩刷之電壓。如載
load

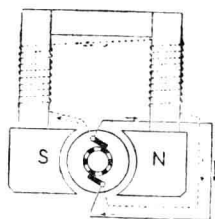


圖 542. 分捲發電機。

重不大，則用一抵抗器與場磁石導線順結，以調整之。如載重變化過大，即無法處理之矣。故此種發電機，只能使用於載重不復變化之處，如使蓄電池充電，及電鍍之類。

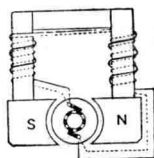


圖 543.
複捲發電機。

(5) 複捲發電機：如聯合上述兩種捲法而用，如圖 543，則曰複捲發電機，虛線處所表者，為 compound dynamo

分捲磁場，粗線所表者為順捲磁場。外部電路

未結合前，由分捲磁場使其勵發，故結合外部電

路時，順捲磁場加入作用，電壓不致降低。如能

適宜配合順捲圈之捲數，雖載重變化，只須調整分捲磁場之抵抗器，即可保持一定之電壓。故都市電燈及電車等，多使用此種發電機。

§ 514. 交流之性質。

發電機上如不用整流子，而用兩完整之環及刷，則導出外部之電流，即成為交流，如圖 544 所示。據 § 536，

知 $E_{\theta} = D \sin \theta$ ；但 $\theta = 2\pi nt$ ， $D = 2\pi nHS \times 10^{-8}$ 。

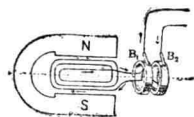


圖 544. 交流之發生

如是之 D ，曰電動力之振幅。如場 amplitude of electromotive force

磁石僅有兩極，此 θ 即表發電子轉

動之角度；如不止兩極，此式依然可

用，此時之 θ ，不成為發電子實際轉

動角度，而為一虛角，其值為 $2\pi nt$ ，曰電動力之相角。再 imaginary angle phase angle of electromotive force

命 T 表電動力之周期，即 1 秒間可完成 $\frac{1}{T} = n$ 次全振

動，此 n 曰電動力之周數。

frequency of electromotive force

命 α 表發電子實際所轉之角度, p 表極之對數, 則得 $\theta = p\alpha$. 故有兩極者, 發電子每轉一周, 完成一循環; 4 極者每一周完成 2 循環; 10 極者 5 循環, 餘類推.

§ 545. 交流之實效值.

交流之方向, 變化頗速, 故其各瞬間之值, 無從測定. 但因 $E_\theta = D \sin \theta$, 故 $E_\theta^2 = \frac{1}{2} D^2 (1 - \cos 2\theta)$. 但在一周期內, $\cos 2\theta$ 之平均值等於零, 故 $E_\theta^2 = \frac{1}{2} D^2$, 或 $E_\theta = 0.707 \times D$. 即 電動力之平方之平均值, 等於其振幅之平方之一半. 電流強度之關係, 亦完全與此相同. 利用電流所生之動力效應或熱效應, 求得之安數及弗數, 均係此項平均之數值, 通稱之曰 根均方值, 或著眼於其實際所生之效應, 而曰 實效值. 故由弗計讀出之弗數曰 實效弗; 由安計讀出之安數, 曰 實效安. 由上計算, 知實效安或實效弗, 各等於其極大值之 0.707 倍.

例如有一交流電路, 假定其電動力在 + 100 弗及 - 100 弗之間變動不已, 則用弗計讀出之結果, 當等於 70.7 弗. 又如有一交流電路, 用安計求得其電流強度為 100 安, 則由上述計算, 知實際上其電流之強度, 應在 + 141.4 安及 - 141.4 安之間, 變動不已.

§ 546. 交流發電機.

供給電流,一般以高壓電流,為最有利,故電燈所用者,其周長大都為 50 至 120, 電壓大都為 1,000 至 5,000 弗之交流,其磁場變化極速,通常多用多極發電機,場磁石之勵發,則另用一小直流發電機司之。如為直流發電機,則使其整流子之各片間,互相絕緣,頗非易事,交流機不用整流子,故不致發生此項問題。場磁石排列作輻形,極向外方,由 N 及 S 相間而成。在其外方者為固定之發電子,場磁石則在發電子內部轉動。亦有場磁石在外不動,極向內方,發電子在內部轉動者。圖 545 即其一例,共有六極。相鄰兩齒上



圖 545.

六極交流發電機。

之圈,捲法相反,全體順結,故在各圈內同時發生同方向之電動力,成為同方向之電流。如將最初一圈之始,最後一圈之末,連於滑環,即可導出交流。每一圈內,一 N 極達於次一 N 極所歷之時間,即此交流之周期。

§ 547. 多相交流。

如在一鐵環周圍捲相等之圈三個,各隔相等距離,

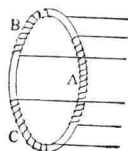


圖 546.

三相交流。

如圖 546 之 A, B, C . 令環在磁場內轉動, 則各圈內均有誘導電流發生, 相各有差. 命 T 表其周期, 則 B 內電流之相, 較 A 內者遲 $\frac{T}{3}$; C 內者又較 B 遲 $\frac{T}{3}$. 如是三組不同之交流,

曰**三相交流**. 同樣僅有兩圈時,
three phase current
電流之相, 互遲 $\frac{T}{2}$ 者, 曰**二相交流**;
two phase current

共用 4 圈時, 電流之相, 互遲 $\frac{T}{4}$ 者,

曰**四相交流**, 餘可類推. 總括之,
four phase current

則曰**多相交流**.
poly-phase current

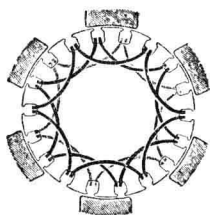


圖 548.

三相式交流發電機。

圖 547 為二相交流發電機之一實例, 其溝數共計 12, 係於單相發電機之六圈之間, 又插入六圈順結而成兩組, 由滑環將此組之首尾兩端, 導出外部即得. 又圖 548 為三相交流發電機之例.

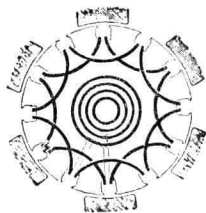


圖 547.

二相式交流發電機。

§ 548. 直流電動機.

將發電機反轉使用之, 即由外送電入內, 可得轉動之機械能, 此種裝置, 曰**電動機**, 其使用直流以發動者, 曰
electric motor

直流電動機。 命 V 表電動子兩端之勢差,其單位用弗, direct current motors

R 表發電子之抵抗,單位用歐。當電動機靜止時,通過其中之電流強度應為 $\frac{V}{R}$ 安。當電動機轉動以後,則有逆電動力發生,命其值為 E 弗,則轉動中之電流強度 i 應等於 $\frac{V-E}{R}$ 。故供給於此電動機之電力為 iV ,等於 $\frac{V-E}{R} V$ 瓦。在發電子上發生之熱,應受 $i^2 R = \frac{(V-E)^2}{R}$

瓦之損失。故如命 P 表可以變成機械功之電力,則得

$$P = \frac{V-E}{R} V - \frac{(V-E)^2}{R} = \frac{E(V-E)}{R} \text{ 瓦。}$$

用供給之全電力除之得電動機之效率為 $\frac{E}{V}$ 。欲 P 成爲極大,須 $V = 2E$,如此, $P = \frac{V^2}{4R}$,而供給於電動機之全電力,成爲 $\frac{V^2}{2R}$ 。故逆電動力不過供給之電動力之半而已。換言之,供給之能中,一半成爲有效之功,一半消耗於電動子發生之熱,此時之 P 始成爲極大。再從一方面觀之, E 與 V 愈接近,效率愈大。但電動子運動加速,至 E 與 V 相近時,效率誠大,同時由外取得之能卻少,故所得電力亦不大。實際上電動子運轉之速度約較 $V = 2E$ 之值略大,此時之效率約爲 90%。

§ 549. 交流電動機。

供給交流發動者,曰交流電動機,大別之爲二種:
alternating current motors

(1) 同期電動機: 其構造與交流電動機全同, 僅反其道而行之而已。試將交流發電機兩具, 順結使用, 以其一為發電機, 其他為電動機, 前者所生之電流, 即用以供給後者之運轉, 使兩者成為同期之動作。此種電動機之缺點有二: (i) 其自身不能起動, 故常未用電流以前, 非使之與電動機作同一之速度轉動不可。 (ii) 其場磁石, 別有方法使其勵發不可。 因有此兩種缺點, 故其用途頗少。

(2) 異期電動機: 此種恰與前述者相對待, 又名誘導電動機, 其原理如圖 549, 水平磁石 N, S 可在鉛直軸周轉動, 其間有一銅圓筒 C , 亦可在鉛直軸周轉動。如磁石沿大箭頭方向轉動, 則 C 上發生渦狀電流, 結果令圓筒亦沿同方向轉動。試專就渦狀電流觀之, 其向上方流過之一部分, 受向左之力作用; 沿水平流過之一部分, 受向上或向下之力作用; 向下方流過

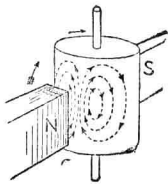


圖 549. 誘導電動機。之一部分, 受向右之力作用。故沿水平方向流過之部分, 作用之力, 與 C 之轉動無涉; 向下流過之部分, 作用之力, 在使 C 作反對方向之轉動, 無益而有害。欲避免之, 須使其在反對極之前通過即可。實際上, 不用整塊之圓筒, 而以薄鐵板重疊若干層造成, 中塗假漆, 於筒周捲導線, 如圖 550, 其外更有三對之極, 遠之而轉。在某一瞬間, N 極通過 12 - 1, 4 - 5, 8 - 9 之前, S 極通過 2 - 3, 6 - 7, 10 - 11 之前, 則各部分通過之電流均使圓筒沿同一方向轉動, 效率最大, 是為轉子。

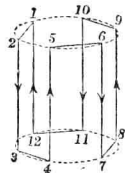


圖 550. 轉子。

異期電動機, 即應用上述之原理而成。在轉動磁場內使轉子轉動, 由此而得所要之機械的功。轉動磁場, 並不必用轉動之磁極, 通常均用多相交流造成之, 如圖 551 之 A, B, C 三圈, 在場磁石內轉動, 則生三相交流, 導入 A', B', C' 內, 其相各差 $\frac{T}{3}$ 。故由此三圈合成

之磁場，在發電機之鐵環完成其一轉動之時間內，同時亦完成其一周；即發生一轉動磁場。故若將轉子放在 A' , B' , C' 內部，即可轉動。如是發生轉動磁場之圈，如 A' , B' , C' ，曰定子，
stator

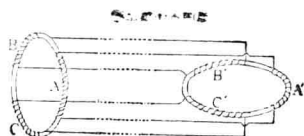


圖 551. 定子。

§ 550. 三相交流之導線連結法。

應用三相交流時，如照圖 551 之連結法，由發電機送至電動機，共須 6 條導線，對於遠道傳送，殊屬不經濟。

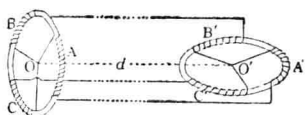


圖 552. 三相交流之連結。

但如圖 552，將各圈之相應端連結後，試用一條導線 Od ，即可將三圈所發之電流送出。命 D 表通過各圈內之

電流強度之極大值，則通過 Od 內者，應成爲下列之關係：

$$D \sin \theta + D \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + D \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) = 0.$$

只須將右邊展開計算，即可證明。由此可知，通過 Od 內之電流恆等於零。故此一條導線可以省略。結局只用導線 3 條，即足敷用。如是之連結法，曰星結法，或因 star-connection 其恰成一英文之 Y 字，又名 Y 結法，簡示之如圖 553。
Y-connection

除上述而外，又可將各圈順結，如 II 結合處各用一條導線引出，彼此相連，曰網結法，形類 Δ ，故又名 Δ 結法。
mesh connection delta-connection

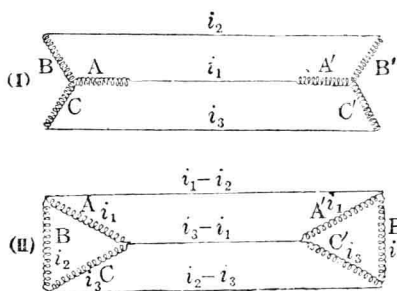


圖 552. 三相交流之兩種連結法。

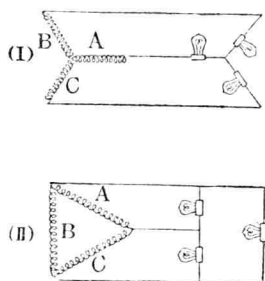


圖 553. 電燈用三相交流之連結法。

以上係就發電機與電動機之連結而言,其他如發電機或變壓器等與電燈等之連結,亦同,如圖 553 所示。

§ 551. 電力輸送.

利用山中水力,發生電流,送至遠處,供給城市電燈及電動機等之用,曰電力輸送。
electric transmission of power
 設有甲乙兩地,與發電所相隔之距離,乙倍於甲,欲得同一強度之電流時,乙之導線橫斷面積,非倍於甲不可,即乙之導線重量非 4 倍於甲不可。換言之,導線之費,與距離平方為反比例,愈遠費用愈大,殊不相宜。從一方面而言,電力為電動力 E 與電流強度 i 之乘積,故 i 雖小,只須 E 大,亦未始不可得同大之電力,無須用粗重之導線。不寧唯是,假定用電壓 E 送出電流為 i ,用 E' 送出者為 i' ,此兩種對於

同一地方,均供給同量之電力,命之爲 W , 即 $W = Ei = E'i'$, 故 $i = \frac{W}{E}$; $i' = \frac{W}{E'}$. 命 r, r' 表兩者之導線之抵抗, e, e' 表中途電壓之降下, 假定兩者途中所受損失, 均同爲 W_0 , 則由 $W_0 = ei = e'i' = i^2r = i'^2r' = \left(\frac{W}{E}\right)^2 r = \left(\frac{W}{E'}\right)^2 r'$, 立可求得 $r : r' = E^2 : E'^2$. 又此時兩種導線同長, 故抵抗與橫斷面積成反比例, 即 $S : S' = E^2 : E'^2$. 即導線重量與電壓之平方爲反比例, 故電壓愈高者, 費用愈少.

交流發電機, 對於高壓電流, 特別適宜, 故電力輸送通常概用交流, 其中尤以三相交流最爲合宜. 又電壓過高, 則電線與電線間, 容易放電損失不少, 故高壓亦自有一定制限. 現今使用之高壓, 以二十萬弗爲最高.

§ 552. 交流變壓器.

使電流之電壓任意升高降低, 或使直流交流互相變轉之裝置, 曰變壓器. 因其使用目的不同, 名稱形狀亦不一樣, 茲先就交流使用者論之, 是爲交流變壓器. transformer
alternating current transformer

電力輸送如前所述, 以高壓爲最經濟. 如發電機發生之電壓不足, 則用變壓器使其升高, 始行送至用戶. 在用戶處如嫌過高, 或防危險, 又再用一變壓器, 使其降低. 爲此目的而設之變壓器, 既無整流子, 又無運動部

分,損失頗小,效率甚大,其用以昇高電壓者曰昇壓器,其
step-up transformer
 用以降低電壓者,曰降壓器。其原理與誘導圈同,重疊
step-down transformer

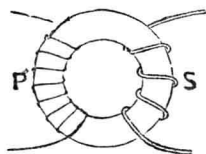


圖 555. 變壓器。

若干層薄鐵板為鐵心,周圍捲獨立之兩圈,如圖 555。一次圈 P 之導線細,捲數多,二次圈 S 粗而少。高壓電流通入 P 內,則 S 內生誘導電流。命 E_1, i_1 及 E_2, i_2 表兩者之電動

力及電流強度,假定變壓進行中不受磁滯及渦狀電流等之損失,則 $E_1 i_1 = E_2 i_2$ 。命 P 之捲數等於 S 之 n 倍,則

$$E_2 = \frac{1}{n} E_1, \text{ 故 } i_2 = n i_1.$$

故一方將弗數增高,同時又將其安數加大,電爐用電流,即用此法供給,如圖 556。

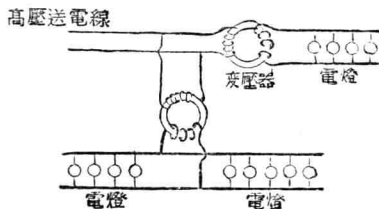


圖 556. 降壓器。

§ 553. 單捲變壓器。

前節所述之變壓器,多用於昇降至 10 倍或 20 倍時,至少亦須 2 倍或一半,方屬相宜,再少則可插入抵抗器,但因此頗蒙損失,不適於用。專為小倍數而設之變壓器,有圖 557 之單捲變壓器,係將一次圈 P 及二次圈 S ,
auto-transformer

合併爲一而成。試加交流之電壓於 P ，則其每一捲上發生之誘導電動力，均與適用之電動力相反。故在兩者之共通部分上誘生之電動力，一方面與一次電動力相反，一方面則引起誘導電流，使由二次圈流過。結局在共通部分上流過者，係此兩種電流相合而成之電流。用此器不特可省銅線，又可隨意昇降其電壓。例

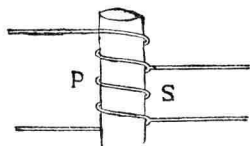


圖 557. 單捲變壓器。

如將此圖之 P 連於高壓，則由 S 即可取用低壓電流；反之，如將 S 連於低壓，即可由 P 取用高壓電流。

§ 554. 直流變壓器或電動發動機。

將電動機及發電機聯合使用時，則成直流變壓器，
continuous current transformer
 亦稱電動發動機。motor-dynamo 例如以 1,000 弗之電壓及 10 安之電流，供給電動機，使其轉動，由此運轉發電機，假定由發電機所得之電壓爲 50 弗，則其電流強度可達於 200 安上下。且此種發電機與電動機，並無互相分離之必要，只用一共同之鐵心，捲兩圈於其周圍，另用整流子兩個，將其一圈連結至電動機之電動子上，其他一圈連結至發電機之發電子上，即成。

§ 555. 直交流變成器.

聯合一直流發電機及一交流發電機使用,以其中之一作電動機其他作發電機,即可變交流為直流,或變直流為交流,如是之裝置,

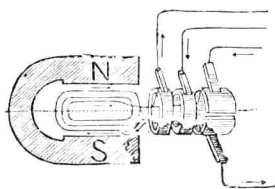


圖 558. 直交流變成器.

曰直交流變成器。通常係將此兩者 continuous-alternating current transformer 接合成為一器,如圖 558,於轉動發電

子上,備有分管整流子以收直流,備有一對滑環以收交流。如自外供給直

流或交流,則此器可作電動機用。如自外供給機械能,使其運轉,則同時可

得直流或交流。此器又名轉動變流機,電車所要電流,可取給於此。
rotary converter

§ 556. 整流器.

變交流為直流之裝置,除前節所述者而外,尚有數種,總名之曰整流器,最常見之數種,如下:
rectifier

(1) 電解質整流器係在電解質內插兩極,使交流僅有一方向可由電解質中通過。
electrolyte rectifier

(2) 鎢極整流器,如圖 559,管內盛稀薄之氫,通電入其鎢絲之陰極,發出電子,使氫離化,遂成為一定方向之電流由管內通過,可得低壓直流。
tungar rectifier

(3) 真空管整流器如圖 560,陽極用鉀圓筒陰極為鎢絲,藏在筒內。兩極連於高壓電源,通

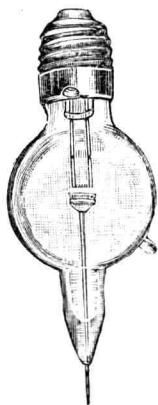


圖 559. 鎢極整流器.

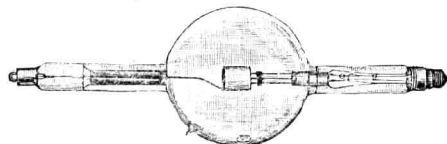


圖 560. 真空管整流器.

直流電點燃鎢絲,即有電子飛向鉀筒,成為整流作用。現今 X 線之高壓變壓器所用之整流器,即此物。

第九章 電波

§ 557. 來丁瓶之振動放電。

如用一導線，連結來丁瓶之內外套，如圖 561 之 A 及 B ，中途插入一自誘圈 L 及金屬球 C, D ，其間距離甚短。使 A 帶陽電， B 帶陰電，至兩套之勢差達於一定值後， CD 間之空氣，已不能容受電變形，遂成爲放電現象。

如此時電流之抵抗甚小，則電流自 A 向 B 流去，而 AB 間之勢差，次第減小，以至於零。但因有自誘作用，故仍繼續減去，直至

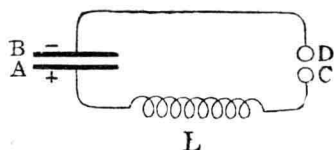


圖 561. 電之振動。

A 及 B 之勢完全與開始時之勢相反，始行停止，不再減小，此時通過之電流，與前此正相反對，同時 A 與 B 之勢差，又復次第減小。同樣通過平均之位置，依然繼續進行，至 A 再成爲正， B 再爲負，幾乎完全恢復故態，始不再減，如是一反一正，繼續不止之放電，曰振動放電。但從一方面而論，電流通過電路中時，在電路上應生朱爾熱，故須消耗去一部分之能，同時又有一部分之能，四向輻

射而出，消耗亦不小。故 AB 上所帶之電，不得不隨之逐漸減少，數次振動放電後， A, B 上之電已完全失去，振動亦即停止。又此時電路之抵抗，如次第增大，朱爾熱 亦加多，振動之減衰更速。故使其抵抗充分增大，即可免去此項電振動矣。此時電流由 A 逕向 B 流去，電荷次第消滅，直至於零，成爲通常之放電，不起振動。

來丁瓶 之放電，周期約在 10^{-4} 秒至 10^{-7} 秒之間，使用轉鏡將電花之相照下，即可研究之。最初抵抗小時，相上現爲若干光輝斷片，互相分離，可知其爲振動的；次增加抵抗，光片逐漸相連成帶，可知其漸成爲非振動的。

§ 558. 電磁波.

電之振動，不限於來丁瓶，如圖 562，將兩金屬棒 C, D ，各連於誘導圈 I 之二次圈之兩端， C 與 D 相對處，各有一金屬球 A 及 B 。通電入一次圈，調整 AB 間距離，

即有電花由其間通過，亦成電振動。

發生電振動之裝置，曰電振器，電花

所通過處曰電花間隙。

假定開始時 CA 帶陽電， BD 帶

陰電，則其電力線當如圖 563，周圍能

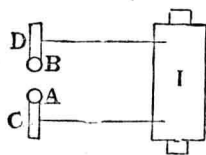


圖 562. 電振器。

媒中,均呈電變形。由此發生迅速之電振動時,最初陽電由 A 向 B 流去,陰電由 B 向 A 流去;其次方向與此相反。故力線之變化狀況,如圖 564, 次第

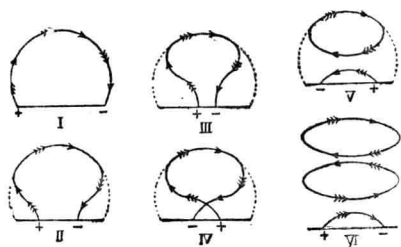


圖 564. 電波。

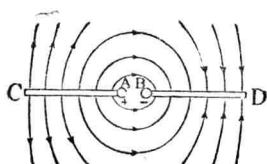


圖 563. 電力線。

成爲個個之閉鎖曲線,在通過 CD 之平面內進行,即電力在通過 CD 之平面內,一面作單振動之變化,一面則由振動器四向傳播而去。由此而成之能媒波,曰電波。
electric wave

以上係就直線電

流而言,其周圍除電力線而外,尚有磁力線,應與此直線電流垂直,即以此直線爲圓心,成爲若干同心圓。故當 CD 上之電流作振動的放電時,其周圍之磁力線之圓,亦交互改變其方向,在 CD 之垂直面內,四向傳播而去,如圖 565。即磁力在 CD 之垂直面內,亦一面作單振動,一面由振動器四向傳播而成一種能媒波,曰磁波。

magnetic wave

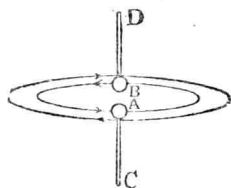


圖 565. 磁波。

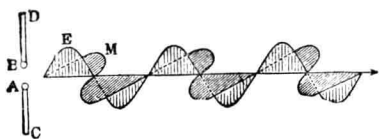


圖 566. 電磁波之狀況。

總括電波及磁波

而言,則曰電磁波,其傳播之狀況,如圖 566,爲

互相垂直之極化波。

§ 559. 電共振器。

接受自遠而來之電磁波,起而與之共振之導體,曰電共振器。圖 567

爲赫芝創作之共振器,係一銅環,切開

其一處,附兩銅球,其距離可用螺旋適宜變更之。使用

時,變更此電路之大小,俾其電振動周期與傳來電波之周期相等,然後放在圖 568 所示之位置,即通過電花間隙中心,引一直線,與電振器軸垂直,是爲基線,環面須與軸及基線之平面一致,環之中心須在基線上,且環之

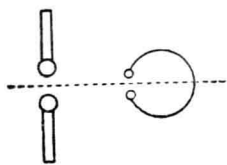


圖 568. 共振器之方向。

兩球連結而成之直線,須與電振器之軸平行,並在其最近處。必如是,共振器出現之電花,始成最強。

除環狀者而外,尚有圖 569 之

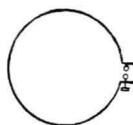


圖 567. 環狀共振器。



圖 569. 錫箔共振器。

錫箔共振器,係將錫箔貼在木
tin foil resonator

板或玻璃板上,用小刀將其中
央劃斷而成。又有圖 570 之



圖 570. 直線共振器。

直線共振器,由在同一直線上之兩直棒而成,其兩球間
linear resonator

之距離,亦可自由變更之。

§ 560. 檢波器。

檢驗電磁波存在與否之裝置,曰檢波器,種類頗多。
wave detector or cymoscope

其最原始者,曰粉末檢波器,為一玻璃管,內盛銀與鎳之
coherer

粉末,兩端各封入一銀棒,如圖 571 之 C, D. 由側管 S

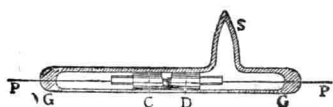


圖 571. 粉末檢波器。

抽去空氣後使用。當粉
末堆積不甚緊密時對於
電流所呈之抵抗極大,但
一遇近傍有電花通過,則

其抵抗銳減。再略敲擊之,傳導性又復失去。利用此
性質,不難察知是否有電流波存在。

粉末檢波器,雖可檢出電波存在,但作用不甚敏捷,
且一旦通通後,非加以敲擊,不能恢復原狀。較此更便

且又準確者,為礦石檢波器,其種類甚多。例如紅鋅礦
zincite

與斑銅礦,或鋼與鋼,由一彈條輕微接觸而成。將此器
bornite

插入電路內，則傳來之波，只有一方向之電流，能由接觸點流過，其反對方向者，被其阻斷，效用與整流器同。試將此器與受話器順結插入電路，則由電振器每發一電花，即有一列電波傳出，達於此電路上，引起電振動，而此種振動之波，又止有一半能由檢波器透過。又因受話器及檢波器之抵抗頗大，非高壓不能引起其振動板之振動。故每發一電花，只能引起一振動，由此可聽其音。

較礦石檢波器更進一步，則有下節之三極管。

§ 561. 三極管。

現今之檢波器以真空瓣檢波器為最便利，此器又

名振動瓣檢波器，其構造名稱，均極繁夥，但均在真空管
vacuum valve detector
oscillation valve detector
 內，封入三極而成，故統名之曰三極真空管，略稱三極管。
three electrode vacuum tube triode
 所謂三極，一為鎢絲，如圖 572 之 f ，曰絲；一為金屬絲編

成之網 g ，一為金屬之板 p 。
grid plate

管內為高度真空，其壓力約等於水銀柱百萬分之一耗至一億分之一耗。電池 A 專供點燃鎢絲之用，電壓約 4 弗或 6 弗。電池 B 之陰極連 f ，陽極連 p ，電壓約 100 弗。通常因管內抵抗甚大，故 B 之電路中並無電流通過。但當 f 既燃以後，由此有

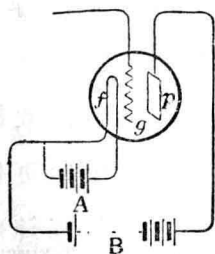


圖 572. 三極管之原理。

電子射出，趨向陽極之 p 。此項電子陸續射出不絕，相連而成電流，曰電子電流，亦名熱離子電流，其方向則沿 $BpfB$ 流去，此電路，即曰板電路，在此電流中流過之電流，曰板電流， p 與 f 之勢差，即電池 B 之電壓，曰板電壓。同樣，對於 Agf 之電路，曰網電路，在其上流過之電流，曰網電流， f 與 g 間之勢差，曰網電壓。

假定 f 之電勢為 0，如 g 之電勢為負，則由 f 射出之電子，受 g 之陰電排斥，一部分折回，故達於 p 之電子數減少，即板電流減弱。且 g 之負勢愈低，板電流愈弱，至 g

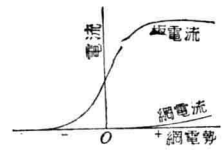


圖 573. 靜電特性曲線。

之負勢達於相當之值時，板電流全部阻斷，不能通過。反之，如 g 之電勢為正，則由 f 射出之電子，受 g 之陽電吸引，較平常到達 p 更易，

結果使板電流加強。且 g 之正勢愈高，板電流愈強。但鎢絲之溫度一定，板電壓亦一定不變時，新由 f 射出之電子，與在網電路及板電路上運去之電子，互成平衡。以後縱令再加高網電壓，板電流亦不隨之增加，且反而減少。何則？此

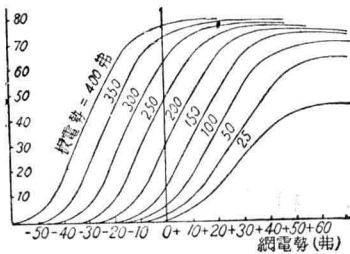


圖 574. 板電壓及特性曲線。

時由 f 射出之電子，多數被網吸去，使網電流加強。但鎢絲之溫度既未變，則單位時間內由其射出之電子數，亦一定不變，網電流加強，當然表示板電流減弱。換言之，板電流對於鎢絲之一定溫度，應有一最大值，達於此值之板電流，曰飽和電流。此項網電流與板電流之關係如圖 573，成爲一條曲線，曰板電流對於一定之板電壓及鎢絲電流之靜電特性曲線。

板電壓不同，則其特性曲線亦異，如圖 574 所示。即板電壓愈高，特性曲線愈移向左方。

electrostatic characteristic curve

saturation current

§ 562. 電波之性質.

用圖 575 之裝置,可實驗電波之各項性質。此裝置分為兩部分,一部分如 A , 為振動器,裝在鋅箱內,箱之一面露出,他一面封密;上下兩端各有一鋅管,向外突出,

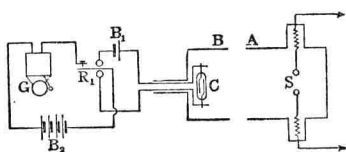


圖 575. 電池實驗之裝置。

管中各插有一棒,棒端之金屬相對,成電花間隙 S 。棒之他端,則連於誘導圈之二次圈,使電花在 S 飛過,電波即由箱口發出。另一部分如 B , 為受波器,亦裝在鋅箱內,內有粉末檢波器 C , 又 B 之後方有鋅管,與電鈴 G_1 , 電池 B_2 , 繼電器 R_1 及附屬電池 B_1 等相連。電波傳來,則粉末檢波器之抵抗減小,繼電器電路發生電流,電鈴發音。敲 B , 則又恢復原狀,用此可行下述各項實驗。

(1) 直進: 使振動器 A 及受波器 B 之口相對而立,兩軸互相一致,如圖 576, 由 A 放出電波,則 B 之鈴發音。如 A, B 不相對,則無音。



圖 576. 電波之直進。

(2) 反射: 使 A 與 B 之位置,如圖 577, 兩口既不相對,由 A 發出

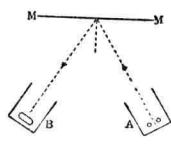


圖 577. 電波之反射。

之電波,當然不能直接使 B 之鈴發音。但若在兩者之前面,於適當之方向上,放一金屬平板,如 MM , 則由 A 發出之波,經 MM 一度反射而後,即可進入 B 內,使其中之鈴發音。此時測得投射角與反射角相等。

(3) 屈折: 將 A, B 放在圖 578 之位置, 而於適宜處所, 放一稜鏡, 其質或用石蠟, 或用硫黃, 或用冰均可。由 A 發出之電波, 經此稜鏡通過後, 即改變其方向, 而入於 B , 使鈴發音。且此時測得電磁波之最小偏向, 即可計算構成稜鏡之物質, 對於電磁波之屈折率。



圖 578. 電波之屈折。

(4) 透明: 使 A, B 對立, 如 (1), 然後在兩者之間, 夾入各種物質, 一一檢查之, 即可分別何者對於電磁波, 可以透過, 何者完全遮斷, 何者可以透過一部分。由其結果, 得知凡絕緣體均可透過電波, 良導體則遮斷之。

(5) 干涉: 在 A 前放一金屬大板 C , 與 A 之口相對。由 A 發出之波行至 C , 反射而回, 於是 A 發出之波, 與由 C 反射而回之波, 互相干涉, 結果現為定波。如將 B 放在定波之腹上, 則鈴聲甚大; 放在節上, 則寂然無聞。由此可以測定電磁波之波長 λ 。一面又由計算求得電磁波之周期 T 。由 $\lambda = VT$ 之關係, 立可算出電波傳播之速度 V , 其結果與光之傳播速度完全相等。

(6) 極化: 前曾述及電波為一種極化波, 茲更就實驗論之。設令 A, B 相對而立, 如 (1) 之位置。



再用若干導線, 平行排列成一平面格子, 如圖 579, 曰 導線格子 (wire grating); 或將若干條錫箔, 平行貼於木板上, 作等距離, 是曰 錫箔格子 (tin-foil grating)。將此物插入 A, B 中間, 則當其方向恰與電花之通路平行時, 即將電磁波完全遮斷, 鈴不發音。由此

圖 579. 導線格子。位置將格子在其原平面內, 轉一直角, 則成完全透明, B 又鳴動。前者因導線或錫箔條發生電振動, 誘導電流對於 B 之作用, 與由 A 放出之電波, 對於 B 之作用, 恰正相反, 故格子將波遮斷。後者因格子不生電振動, 故可自由透過。由此結果, 可見此項格子對於電波之作用, 宛如 尼科爾稜鏡 對於光之作用。即由 A

發出之電波中，能媒振動之方向，與 A 之電花通路平行。

§ 563. 光之電磁說。

由前節所得之電波之種種性質，證明電磁波與光波完全相同。上節所述之實驗，肇自德人赫芝，但在此前 20 年，已有馬克思維耳主張光波為一種波長極短之電磁波，其學說曰光之電磁說。根據其說，如命 K 表電媒常數， μ 表透磁率， V 表電磁波傳播速度，則有

$$V = \frac{1}{\sqrt{K\mu}}$$

之關係。設有兩種電媒，則成爲

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{K_1\mu_1}}; \quad V_2 = \frac{1}{\sqrt{K_2\mu_2}}$$

命 n 表電波由第一媒質進入第二媒質時之屈折率，則

$$n = \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{K_2\mu_2}{K_1\mu_1}}$$

假定第一媒質爲真空，第二媒質爲一透明體，則一切透明體之透磁率 μ_2 ，大致均與真空或空氣之透磁率 μ_1 相等。更假定 $K_1 = 1$ ，則得

$$n = \sqrt{K_2}$$

卽在此種電媒質，其電媒常數，等於其對於電磁波之屈折率之平方。

導體內無電的彈性，故電波不能由導體中通過，金屬之所以對於電磁波及光波，成爲不透明體，卽由於此。絕緣體對於電磁波可以透過，同時對於光亦成爲透明體。但對光透明者，對熱未必亦爲透明。故知各種物質對於電磁波及光波之透明程度，各有不同，並非完全一致。凡此種種現象，亦大可作證明光波與電磁波性質相同之一助。

光波與電磁波，既經上述種種現象證明，其性質相同之一點，已無可容疑，至其差列，不過波長 λ 長短不一而已。可見線之光波中，以紫外線之 λ 最短，等於 28.125×10^{-8} 糎，又熱波之最大者，其 λ 等於 0.343 糎。電波之最小者，其波長等於 0.3815 糎。

§ 564. 無線電報.

三極管除應用作檢波器而外,又可用作發生振動之裝置,茲就一簡單之例說明之。如圖 580,在網電路中,加圈 L_g 使其與電路 LC 互相套聯。送交流入 LC 內,則在 L_g 誘起正負交錯之電動力 e 。此項電動力作用於網與絲之間,其結果與有交錯之電動力作用於板與絲之間者同。如此電動力較電路 LC 上原有之電動力更大,且與之同調,則電路 LC 上之振動振幅,次第加大。因之在 L_g 誘出之正負交錯電壓,亦隨之而大,最後遂成爲一定不變之不衰振動。

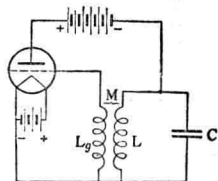


圖 580. 起振作用。

應用上述原理,遂成無線電報,其一例如圖 581, α 日天線,連同導線圈 L_1 及電容 C_1 , 成爲天線電路,其 L_1 之一部分,則與三極管之板電路相套聯,板電路中計有電池 B ,誘導 L_3 及

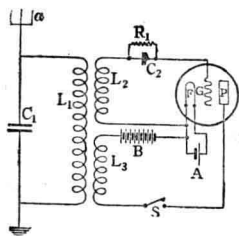


圖 581. 無線電報原理。

板電路中有電振動發生,與此套聯之天線電路中,亦生振動電流。此項振動之能,其一部分則移至與天線電路套聯之網電路,而於網 G 與絲 F 之間,發作正負交換之電動力 e 。結果板電路上受 ke 之正負交換之電動力作用,而生同一周數之電振動。板電路中,既有此項變動出現,勢必又在天線電路中,引起電振動。如是往復循環,可使天線電路之振動電流,達於一定之極限,而成不衰電振動,由此發出者,遂爲不衰電波。

undamped electric waves.

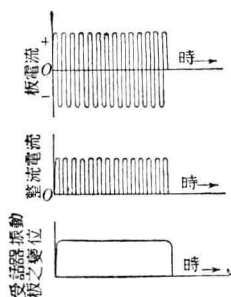


圖 582. 受信原理。

有微音發出而外，則無所聞。

接收此種不哀電波，別有其法，種類甚多，最著名為異力受信法。
heterodyne reception

係由受報器內自行發出一種新振動，其周數與傳來者略有差別，此兩周數之差，即唸之周數，成為可聽周數。
audible frequency

如圖 583，第一曲線表傳

來電波，第二曲線表受信機內自行發出之局部振動，第三曲線表此

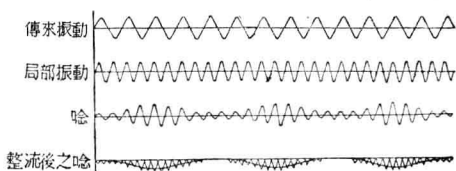


圖 583. 唸信法。

兩者合成之唸，第四曲線表受信機內應用網蓄電器對唸加以整流後之狀況。圖 583 即應用此理而成之受信機之一例。局部振動即發生於 $L_g C$ 之電路中。先變動 $L_1 C_1$ ，使其周數與傳來電波之周數相等。此電路受傳來電波之作用，即開始作強有力之振動。由誘導作用使

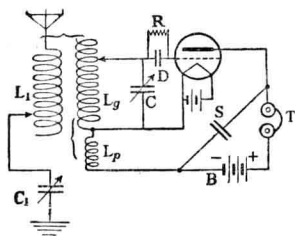


圖 583. 唸信法之接續。

網電壓亦生振動。其次變更電路 L_0C , 使其發生局部振動, 且周數與天線電路之周數相差不遠。此振動對於網電壓, 又自有其振動。如是兩項振動相合成唸, 遂引起受信器之振動板發而為音。圖中插有一蓄電器 S , 目的在吸收局部振動之高周波振動電流, 以防其流入受話器及板電路中。此圖係單管檢波器及發振作用。如增多管數, 其作用更強。

§ 565. 光電話。

利用 § 462 之硒電池, 可以構成一種電話裝置, 其不用電線傳達, 與前節所述之無線電報相同, 如是之裝置, 曰光電話, 其構造大致如圖 585 所示。人向 M 發話, 引起弧燈之電振動, 其光經反射鏡 S_1 及 S_2 反射後, 集中於焦點 Z , 此處有硒電池, 其抵抗隨光之強弱而異。故在受話器 R 處, 得聞同樣之音。

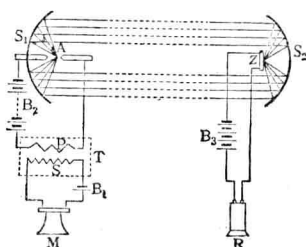


圖 585. 光電話之原理。

§ 566. 無線電話。

前述之無線電報, 當發報局之鍵按而未放, 則有振幅一定不變之高周波, 由其天線傳出。受報局接受此項電波, 經整流後, 有一定方向之直流, 在受話器內流過, 但不能使其振動板發音。但若使天線中交流之振幅發生變化, 則在受報處整流後, 即成為一定方向之變電流, 在受話器內通過。如天線電路內之振幅變化, 適為可聽周數, 即由人對發話器所發出之聲音, 則在受話處之振動板, 亦應之而生同樣變化, 發為同一之音。此原理即為無線電話, 而在發話器處用人聲變更振動之裝置, 則稱之曰

變調裝置。
modulation apparatus

圖 586 爲發振及變調均各用一三極管之裝置。由電池 B 供給之直流，經誘導甚大之圈 K ，即塞流圈，與兩三極管之板相連。故三極管之外部抵抗，雖受可聽周數變化，亦不致影響及於電池 B 流向兩板之電流。換言之， aKb ，形成一電源。 M 及 O 爲完全同樣之三極管，並結於此電路中，故由 B 而來之直流，分流入於其內，經過各管之分流，與各管之內外抵抗成反比例。 M 稱曰變調管，其網電路由變壓器 G 與發話器套聯。

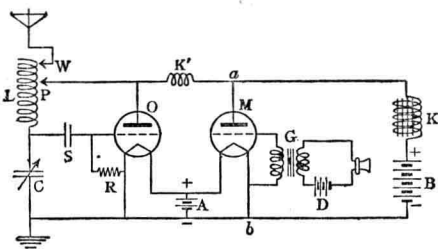


圖 586. 無線電話之裝置。

發音，由電池 D 而來之直流發生變化，引起 M 之網與絲間發生電壓變化。抵抗既變， B 送至 M 及 O 之電流分配亦變。其他之一三極

管 O ，曰振動管，其網電路及板電路由誘導 L 及蓄電器 C 與天線電路套聯。 S 爲網蓄電器， R 爲網漏抵抗， K 爲低抵抗之塞流圈，僅由數個捲線而成，用以防止由 O 發生之高周電波，不致流入變調管 M 之內，俾變調電路得與高周電路互相分離。

由振動管 O 發出之高周不衰波之振幅，與 B 供給於 O 之直流爲比例。人向發話器說話，則變調管之網電勢及內抵抗，均應之而變。故板電流亦不得不變。但由 B 供給至 M 及 O 之總電流，既爲一定，而 M 之板電流又已發生變化，其結果當然使 O 之板電流，亦同時隨之而變。結局在天線電路中之電流，其振幅亦發生變化，成爲電波，四向輻射而出。

受話處應用無線電報之受話機，即可接受。一般因種種原因，使接收之音不清晰，故有各種特殊之受話裝置。

§ 567. 短波電報。

無線電報使用之天線，大都爲一直立導線，下半段深入地下，故由此發出之電波，一半在地表面上，一半在地表面下，沿地表面四向傳播而去，如是者曰地波，同時如全部天線均在地表以上，則由此發出之波，亦與地面無關，在空面中傳播而去，如是者，曰天波。通常通信使用之電波，大都爲沿地表面傳播之地波。此項傳播愈遠受地面吸收之影響愈大，故欲作長距離之通信，必須有巨大之電力，方足濟事。更據實驗證明，波長愈短之電波，此項吸收作用愈大，故用波長較短之電波，作長距離通信，殊不相宜。但此係就地波而言，如改用天波，關係當然不同。按上層空氣中，有所謂赫維賽德層者，其狀態與下層空氣頗異，含有多數之帶電粒子，亦稱離化層，距地面之高在 100 杆至 150 杆之間。短波沿地表雖不能傳播，但其天波，傳至赫維賽德層，因有多數電子存在，遂使電波受屈折作用，結局折回地面，而達於與發波處距離較遠之地。此種傳播，既不依賴地表面，故雖遠亦不受損失，無須巨大之波力，亦能與遠地通信。且在收發兩地間之地帶，對於此種電波，並不感受，即或感受，其強度亦異常微弱。如是之現象，曰跳越，其範圍曰跳越距離。據實驗，波長在 60 呎以下者，愈短其跳越距離愈大。如通信距離在數千哩以內，白晝通信所用之波長愈短，所達之距離愈遠；夜間通信，則以波長愈長者所達之距離愈遠。又夏日所呈之現象，與白晝相近；冬日所呈之現象與夜晚相近。如收發兩局間之距離固定不變，則可選擇最適宜於此距離之波長帶，其值隨晝夜季節及兩地之空間狀態而異。又跳越距離愈遠者，收報局感受之強度愈行增大。凡此種種特異現象，均短波所特有者，現在盛行之遠距離用無線電報，均用此種短波。至於長波，則多用於廣播方面，作宣傳及娛樂之用，其範圍不甚廣，不適於遠地通信。

第十章 電磁學上之各種單位

§ 568. 電磁學中之單位之種類及其次式.

總計以上所用之電單位,共有三種;一曰靜電單位, electrostatic unit 見 § 418; 二曰電磁單位, electromagnetic unit 見 § 497; 三曰實用單位, practical unit 亦見 § 418. 此三者之中,實用單位僅為便於實際使用而設,並無特殊意義. 但其餘兩種,則各為絕對單位,對於長,時間及質量等基本單位,各有其特殊之關係. 此等單位系間之相互關係,至為重要. 例如馬克斯維耳之創立光之電磁說,即由此兩種單位系之比較而得. 各種量之單位及其次式,已散見以上各章,茲再統括之如下:

(1)電量之靜電單位: 靜電單位系之基本量為電量. 命 K 表電媒常數,在此媒質內如有兩小物體,一帶有電量 q , 一帶有電量 q' , 相隔距離 r 禎,互相作用之力為 f 達時,由 § 417, 應為 $f = \frac{qq'}{K r^2}$, 故得

$$[q] = [K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-1}.$$

(2)電流強度之靜電單位: 由 § 459 之定義,知 $i = \frac{q}{t}$, 故得

$$[i] = [K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-2}.$$

(3)磁極強度之電磁單位: 電磁單位系之基本量為磁極之強度. 假定 μ 表媒質之透磁率, m 及 m' 表互相作用之兩磁極之強度, 相隔距離為 r 禎,作用之力為 f 達,由 § 391 應有 $f = \frac{mm'}{\mu r^2}$ 關係,故得

$$[m] = [\mu]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-1}.$$

(4) 電流強度之電磁單位: 設有一圓形導線其中有 i 電磁單位之電流通過, 其圓半徑為 r 厘米, 在圓心造成之磁場強度為 H , 則由 § 497, 應有 $H = \frac{2\pi i}{r}$ 之關係, 即 $i = \frac{r}{2\pi} H$. 故得

$$[i] = [\mu]^{-\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}} [T]^{-1}.$$

(5) 電量之電磁單位: 由 $q = it$ 之定義, 可求得

$$[q] = [\mu]^{-\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}}.$$

其他各量之次式, 均可照此類推。

茲再就電量之兩種單位之次式比較, 一為 $[K]^{\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-1}$, 一為 $[\mu]^{-\frac{1}{2}} [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}}$. 此兩者應完全相同, 故得

$$\left[\frac{1}{\sqrt{K\mu}} \right] = [L]^1 [T]^{-1},$$

即 $\frac{1}{\sqrt{K\mu}}$ 之次式與速度之次式相同。又由此關係可得

$$[K] = [\mu]^{-1} [L]^{-2} [T]^2;$$

$$[\mu] = [K]^{-1} [L]^{-2} [T]^2.$$

故由一單位系之次式, 推算他一單位系之次式時, 使用此項結果, 異常簡便。又欲知兩種單位系之數值上的關係時, 則非先求得 $[K]^{-\frac{1}{2}} [\mu]^{-\frac{1}{2}} \div [L] [T]^{-1}$ 之值不可。法取同量之電學上任何量, 用此兩種單位系測定之, 由其比即可得出此值。例如取一定之電量 Q , 以靜電單位測之, 得 n_s , 再以 C. G. S. 電磁單位測之, 得 n_m . 則由 $n_s [K]^{\frac{1}{2}} [\text{厘米}]^{\frac{3}{2}} [\text{克}]^{\frac{1}{2}} [\text{秒}]^{-1} = n_m [\mu]^{-\frac{1}{2}} [\text{厘米}]^{\frac{1}{2}} [\text{克}]^{\frac{1}{2}}$, 立可將 $\frac{n_s}{n_m}$ 求出, 即 $\frac{n_s}{n_m} [\text{厘米}] [\text{秒}]^{-1} = [K]^{-\frac{1}{2}} [\mu]^{-\frac{1}{2}}$. 即 $\frac{1}{\sqrt{\mu K}}$ 表 $\frac{n_s}{n_m}$ 每秒厘米之速度。據實測結果, 此速度恰等於光之傳播速度 v , 即 $v = 3 \times 10^{10}$ 每秒厘米, 故得

$$[K]^{-\frac{1}{2}} [\mu]^{-\frac{1}{2}} \div [L] [T]^{-1} = v.$$

應用此關係, 由一種單位測得之各種電學上之量之數值, 立可換算成爲其他一種單位之數值。例如有一金屬球, 其半徑為 10 厘米, 欲求其電容。在靜電單位系中, 球之電容 C 即等於其半徑, 用式表之, 爲 $C = 10 [K] [L]$. 茲命 n_m 表用電磁單位測出此電容之數值, 據表 60,

$C = nm [\mu]^{-1} [L]^{-1} [T]^2$ 。此兩者應相同，由此得 $nm = 1.11 \times 10^{-20}$ ，即

$$C = 1.11 \times 10^{-20}$$

表 60. 靜電單位與電磁單位之次式。

茲將用此兩種單位測得各量之次式，列表表示之如表 60。第一行為量名，第二行為慣用符號，第三第四兩行為其用靜電單位及電磁單位時之次式， K, μ, M, L, T 之下之數字，蓋其次數例如電容為 $[K] [L]$ 及 $[\mu]^{-1} [L]^{-1} [T]^2$ 。第四行表兩者之比。

量名	符號	靜電單位				電磁單位				(電磁單位) (靜電單位)
		K	M	L	T	μ	M	L	T	
電媒常數	K	1				-1	-2	2		v^2
電量	Q	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		v
電場強度	E	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-2	v^{-1}
電勢，電動力	V, E	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{2}$	-2	v^{-1}
電容	C	1	1			-1	-1	2		v^2
電流強度	i	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{2}$	-2	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	v
抵抗	R	-1	-1	1		1	1	-1		v^{-2}
磁量	m	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{2}$	-1	v^{-1}
磁矩	M	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{2}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{2}$	-1	v^{-1}
磁化強度	I	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{2}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	v^{-1}
磁場強度	H	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-2	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	v
透磁率	μ	-1	-2	2		1				v^{-2}
磁誘導度	B	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{2}$		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	v^{-1}
自誘係數	L	-1	-1	2		1	1			v^{-2}

§ 569. 實用單位。

C. G. S. 電磁單位，或嫌過大，或嫌過小，取其合於實用者，遂得實用單位，如表 61。又設若干補助單位，如表 62，任便選擇使用。

表 61. 實用單位。

表 62. 補助單位。

量名	單位	電磁單位 相當數	量名	補助單位	實用單位 相當數
電流強度	安	10^{-1}	電流強度	毫(milliampere)	10^{-3} 安
電量	庫	10^{-1}	電流強度	微(microampere)	10^{-6} 安
電動力	歐	10^8	抵抗	歐(megohm)	10^6 歐
抵抗	歐	10^9	抵抗	微(microohm)	10^{-6} 歐
電容	法	10^{-9}	電動力	毫(millivolt)	10^{-3} 弗
誘應	亨	10^9	電動力	微(microvolt)	10^{-6} 弗
			電容	微(microfarad)	10^{-6} 法

第十一章 真空放電

§ 570. 壓力對於放電之影響。

在通常狀態之氣體，幾為完全絕緣體。氣體中任何兩點，如有電勢差，則其間之氣體即生變形，其程度隨電勢差而增，但有一定極限。超過極限後，若再增高其電勢差，氣體不能堪，遂呈放電。

在通常壓力之空氣中，欲其發生長 1 厘米之電花，非有數千弗之電勢作用不可，其確值須視兩極形狀，氣體性質及氣壓大小而定。

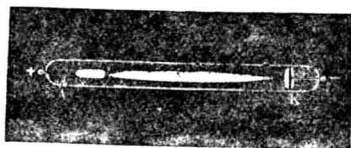


圖 587. 氣壓 8 厘米之放電。

圖 587 為一玻璃管，兩端封閉，一端有鋁板 K ，他端

有鋁絲 A ，用導線連至電池，或誘導圈，起電機等之

陽極及陰極。管內空氣

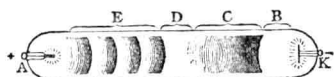


圖 588. 氣壓 $\frac{1}{2}$ 厘米之放電。

如為通常之壓力，則無放電現象。但如抽去空氣，減小氣壓，即生放電。圖中所示者，為氣壓等於 8 厘米時之狀況。若再減至 $\frac{1}{2}$ 厘米，則成圖 588 之狀況。陰極 K 之周圍，為青光包住，頗為美觀。其次為暗黑部，曰**第一暗部**，

first dark space

或曰克魯克斯暗部,如 *B*. 再前則有光芒如 *C*, 曰陰柱,
Crookes' dark space negative column
 或曰陰光. 更前又成暗黑,曰第二暗部,或法刺第暗部.
negative glow second dark space, Faradays' dark space
 又前爲明暗交錯之層,如 *E*, 曰陽柱,或曰陽光,其作帶狀
positive column positive glow
 之部分,曰線條,以其凹面正對陽極.
striation

氣壓降至數厘或數耗之真空管,曰該斯勒管. 此
Geissler's tube
 種真空管放電時所現出之光色,隨其氣壓而異,如用景
 析器檢查,可見此氣體所特有之輝線. 又此種光最易
 引起螢光及磷光,故若用鈾玻璃造成真空管,則放電時
 卽有綠色螢光放出. 或在管外附一玻璃管,內盛硫酸
 雞納或其他放螢光之液體,亦同時呈各種奇異之色彩.

§ 571. 陰極線.

再將該斯勒管內之氣壓減小,陽光漸次收縮,陰光
 隨之膨脹. 氣壓降至千分之一耗時,陽光已消盡,陰極
 近傍之暗部,充滿全管,但此時有物自陰極之板面沿法
 線方向射出,達於對壁,現
 出磷光,如圖 589. 其色
 隨管之玻璃性質而異,遇
 鉛玻璃則青,遇鈉玻璃則
 綠. 此放射物曰陰極線,
cathode ray

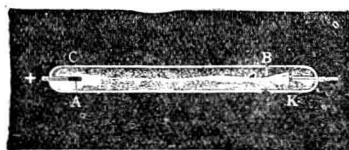


圖 589. 陰極線.

此種程度之真空管，曰克魯克斯管。
Crookes' tube 在此種管內，如預
行封入各種磷光體或螢光體，放電時之光彩，更爲奪目。

陰極線如遇金屬或雲母薄板，則被遮斷，在其對壁，現出與板形相似之陰影，如圖 590，其上無磷光，可見陰極線亦作直進，與通常光線相同。又用

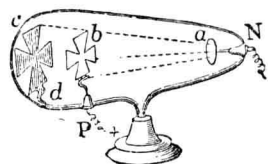


圖 590. 陰極線之直進。



雲母片製成翼片，附於軸周，其軸則架在玻璃軌條上，如圖 591，陰極線射至翼之同一方向之側面

時，輪即開始轉動，由陰極向陽極滾去。此外尚有熱效應，例如用凹面鋁板作陰極，在其球心裝一鉑板，放電時鉑板受陰極線照及，結果成爲白熱。又如圖

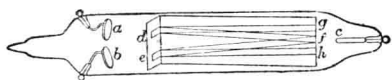


圖 592. 陰極線之相互斥逐。

592，在管內裝兩金屬板 a 及 b ，均可用作陰極，在其前方放一金屬板，上開兩窗，如 d 及 e ，則有陰極線由窗通過。單用 a 作陰極時，陰極線沿 df 而進；單用 b 作陰極時，由 eh 而進； a 及 b 同時使用時，則成爲沿 dg 及 eh 而進之兩條陰極線流。由此可證陰極線有互相斥逐作用。

又在陰極線進行之垂直方向上，適用磁場，則其進路即生偏向，如圖 593。設有導線一條，可以自由運動，其中有電流自陽極流向陰極，如受磁力作用，所起之運動方向，恰與陰極線之偏向一致。陰極線對於強電場亦生偏向，但其方向則與電場之方向，正相反對。

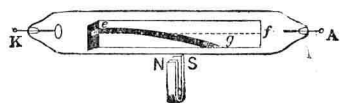


圖 593. 陰極線之磁效應。

如在陰極線管上開一小窗，用厚約 $\frac{1}{400}$ 吋之鋁板蓋住，使管內發生之陰極線，正對此窗口射來，則窗板自成一源，由此向管外各方，亦有陰極線射出。但陰極線在空氣中不易通過，故只能在窗口近傍存在，稍遠即滅。此種出於真空管外面之陰極線，曰勒納爾線，Lenard ray性質與陰極線同，有引起磷光或螢光，使照相乾板感光，及使氣體離化以增加其導電度之作用。

§172. 電子。

由陰極放射而出之陰極線，經上述各種實驗，知其由帶陰電之粒子組成。如命 m 表此項粒子之質量， e 表其電荷， v 表其速度，而 $\frac{e}{m}$ 則曰比荷。specific charge 欲由實驗測定 v 及比荷，可用圖 594 之柏藍管。Braun's tube K 為陰極， A 為陽極，

插入隔板 B 及 C , 上各開一小窗, 容陰極線通過。另有金屬板 D 及 E , 供發生電場之用; 螢光板 F 上畫有縱橫方格。陰極線經由 A, B, C 三小孔通過後, 僅有極細之平行陰極線束, 達於 F , 而生鮮明之斑點。將此管放在強度等於 H 之磁場

內, 命 H 之方向與紙面垂直, 且自上而下,

陰極線粒子受磁場

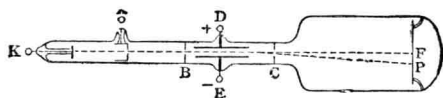


圖 594. 柏籃管。

作用之結果, 應起偏向, 其方向與運動方向及磁場, 同時垂直。故在螢光板生現出之斑點, 將由 F 移至 P 。命 r 表移動之距離, 則有下列之關係:

$$Hr = \frac{mv}{e}.$$

式中之 H 及 r , 均可由實驗直接測定。次將 D 及 E 連於電池兩極, 使其間發生電場, 電場之方向則與磁場垂直, 並命 Y 表電場之強度。陰極線受電場作用結果, 亦應有其偏向。假設由電場而來之偏向, 與由磁場而來者正相反對, 大小恰又相等, 則前次移至 P 之斑點, 又將復返於其原位置 F 。於是得下列之關係:

$$v = \frac{Y}{H}.$$

合併上述兩項實驗, 可以求得陰極線粒子之比荷如下:

$$\frac{e}{m} = 1.769 \times 10^7 \text{ 每克電磁單位.}$$

不問發生方法如何,用作電極之物質種類如何,此值均不變。在電解現象中, $\frac{e}{m}$ 之最大值為氫離子之比荷,即

$$\frac{e}{m_H} = 0.957 \times 10^4 \text{ 每克電磁單位.}$$

兩相比較,可知陰極線粒子之比荷,約等於氫離子之比荷之1,800倍。又據實驗(參照§579)知氫離子之 e ,與陰極線粒子之 e 同,故陰極線粒子之質量,約等於氫離子質量之 $\frac{1}{1,800}$,實為現今所知各種質量中之最小者。此

項質量最小之粒子,曰陰粒子,亦稱電子。negative corpuscle 電子速度 v ,雖亦可由上法推算,但其值並不定,與放電時之電壓 V 有密切關係。如 V 之單位用弗,則其關係應為

$$v = 5.95 \times 10^7 \sqrt{V} \text{ 每秒厘.}$$

例如 $V = 2,000$ 弗時,放出電子之 v ,當為 8.4×10^9 每秒厘。



§ 573. 陰極線管.

研究陰極線之性質,以用圖 595

之韋涅爾特之陰極線管最便。Wehnelt's cathode ray tube 管內氣壓等於0.1托,中央之鉑板為陰極,用兩條堅牢之導線支住,連至勢差等於數弗之電池。板上有一點塗氧化鈣

圖 595. 陰極線管。

或氧化鈮,氧化鋇均可。一邊有陽極 A , 反對一邊則有對陰極 $A. K.$ 電池中之電流通過陰極,使 K 成爲白熱, anticathode
另將 A 及 K 連結別一電池,使其放電,陰極線即由鉑板之垂直方向射出,途中與氣體分子衝突,發爲光芒,而與對陰極衝突,此後四向分散,不復能見。如將此管放入磁場內,即可由實驗證明電子之運動爲圓運動。如使對陰極帶負電勢,則電子即作拋物運動。如將 A 及 K 連於交流電源,則此管即有整流作用。

最近古力琪製成之陰極線管,又與此不同,其陰極 Coolidge
用鎢絲,以數毫之電流使成赤熱,加 35,000 弗之電壓,即有 $v = 2.4 \times 10^{10}$ 每秒裡之電子由對陰極之窗射出管外。

§ 574. 溝渠線或陽極線。

用圖 596 之陰極線管,其陰極板上,穿有若干小孔,放電時,即有微弱之光,自小孔穿出,其進行方向恰與陰極線相反,達於管內對壁,亦能誘發磷光及螢光,但與陰極線誘出者不同,是爲溝渠線, canal ray
或曰陽極線,由帶陽電之粒子 positive ray
而成。實測結果,此種粒子之

v 爲 2×10^8 每秒裡,其比荷爲

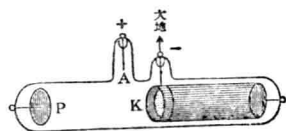


圖 596. 陽極線。

10^4 每克電磁單位，恰與氫離子之比荷相等。由此可知溝渠線粒子之質量，大約與原子之質量相同。

§ 575. X線.

陰極線與玻璃管壁衝突，則發螢光，同時由此另有一種放射線四向射出，其性質與陰極線及通常光線均

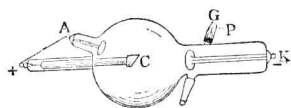


圖 597. X線管.

不同，曰 X線，或稱樂琴線，用
X-ray Röntgen ray
圖 597 之裝置，即可實驗之。
K 為陰極，用鋁製成，作凹球
面形，其軸與對陰極 C 之平

面作 45° 之傾斜。由 K 發生之陰極線，與球面各部分均垂直，故集中於其焦點。C 即裝在焦點位置上，故此種 X線管又有焦點管之稱，為發生 X線之裝置中最簡單者。陰極線集中後，與對陰極板面作猛烈衝突，結果成為 X線，由 C 四向射出。此管用久，因內部氣體逐漸稀薄，不堪使用，故預行封入鈹管 P，而用玻璃管 G 保護之。如管內真空太高，則除去 G，用酒精燈燒熱 P，使輕氣透入管內以補充之。

比焦點管更進一步，則有古力琪管，其構造及形狀如圖 598。用鎢絲捲成螺線，外套鈹管作陰極，如圖中
Coolidge tube

左方。對陰極 T 爲一鎢板，在圖中右方。此外未設陽極。管內真空程度極高，更在焦點管千倍以上。故將 K 及 T 逕連至高壓電源亦不放電。使用時，先連鎢絲於電池，使其中約有 4 安之電流通過，因此成爲白熱，由鎢絲

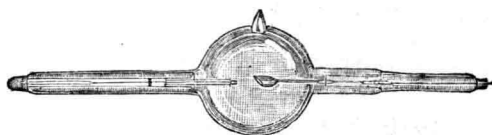


圖 598. 古力琪管。

發射電子，然後方能放電。鎢絲外面所套之鉬管，目的在使電子集中，以高速度向對陰極射去，由此誘發 X 線。管內真空程度愈高，所發生之 X 線之透過物質之力愈強如是者，曰硬線。反之，透過力較弱者，曰軟線。

hard ray

soft ray

§ 576. X 線之特性。

X 線又與陰極線不同，對於玻璃管及大多數不透明之物質，均能透過；對於磁力作用亦不起偏向。此種放射線又與通常光線不同，決不能使用通常方法發見其反射，屈折，干涉及極化等現象。其重要性質如下：

(1) 勵發螢光作用：硫酸鈾鉀或鉑睛化鋇等之結晶，受 X 線照及，即發螢光。故用此種物質塗於板上，以承 X 線，板上即現螢光，是爲螢光板。

(2)透過物質作用: 各種物質對於 X 線之吸收程度各有不同。例如放螢光板於 X 線管之前,使其背面正向 X 線管,以手掌夾於板與管之間察之,因骨較肉,吸收 X 線之量多,故掌之內部,可以明瞭看出。對於鉛板可透過數耗之厚;但對於一般之金屬,吸收力均頗強大。

(3)感光作用: X 線對於紙張,亦能透過,故用黑紙密封之乾板,若以手放於紙上,自上用 X 線照之,即可將手內狀況之相片照成。

(4)氣體離化作用: X 線由空氣中通過,則空氣發生離化,成爲導體。故帶電後之驗電器,一遇 X 線,其張開之金箔,立即垂下。

§ 577. X 線之本性.

關於 X 線之本性,有斯托克斯之學說,以爲 X 線係在極短促之時間內發生之能媒的脈動而非連續的振動。因陰極線與管壁衝突時,以極大速度飛來之電子驟然停止,遂令電磁力發生劇烈變化,成爲電磁波,四向傳播而去。電子形體極小,遠在陰極線中各電子相互距離之下,故一電子與器壁衝突後,須更歷相當長久之時間,次一電子方能到達器壁,造成第二次之新波。此

種各個隔離之電波，陸續發出，即成爲 X 線 更經結晶體研究，得認識 X 線之干涉，屈折及反射等現象。即 X 線與通常光線相異之點，僅波長不同而已。茲將各種電磁波之波長範圍列

表 63. 各種電磁波之波長範圍。

舉之，如表 63. 即 X 線之波長約爲最短之紫外線波長之 $\frac{1}{4}$. 此種短波之波長，通常均用

名稱	波長範圍
赫芝波	$2.4 \times 10^6 - 0.038, 15$ 種
紅外線	$0.034, 3 - 7.5 \times 10^{-5}$,,
可見線	$6.7 \times 10^{-5} - 3.6 \times 10^{-5}$,,
紫外線	$3.6 \times 10^{-5} - 28.125 \times 10^{-8}$,,
X 線	$12.35 \times 10^{-8} - 0.122 \times 10^{-8}$,,
γ 線	$0.071 \times 10^{-8} - 0.02 \times 10^{-8}$,,

繫作單位計之，亦有用繫之千分之一者，曰 1 X 單位。
X unit

§578. 氣體之離化。

在通常狀態之氣體，對於電之傳導，抵抗頗大，但如受 X 線照及，抵抗即銳減，X 線停止後，抵抗又復其故狀。因氣體受 X 線作用，即分離而成陰陽兩種離子，各驅一極而成對流，因是傳電，如是之現象曰氣體之離化。
ionization of gases
受通常壓力作用之離子大小，由其在未離化前在氣體內之擴散速度而定，其擴散速度又由其分子之質量而定。據實測結果，此種通常壓力作用之離子質量，遠在普通氣體分子之上。

X 線停止時，此等離子再行結合，造成中性分子之現象，曰再合。
recombination
再合不限於 X 線停止時，即在未停止以前，亦復有之。當離化與再合互成平衡時，是爲飽和電流。

又由實驗測得知，氣體之壓力減小，則陰陽離子之質量，亦隨之而減，其中尤以陰離子爲最甚，此現象亦可由電子說解釋。按電離係指自氣體原子取去其電子而言，在非常低壓之氣體內，此電子之

本身即為陰離子，而缺乏電子之原子則為陽離子，特稱陽粒子。positive particle 氣壓增加，則有若干中性分子或原子，集合於陽粒子周圍，成一集團，造成與其壓力相當之離子。通常壓力作用中之氣體離子，即屬此種。

又氣體之離化，亦不限於 X 線，其他如白熱體，火焰，以及紫外線等均足以勵發之，僅程度稍差而已。又放射質（參照 § 580）所放射而出之線，亦有勵發氣體離化之作用，現今作氣體離化研究時，均用之。

§ 579. 離子之電荷。

由實驗測定離子之電荷，可用圖 599 密爾根之裝置。Milikan 由噴霧器噴出甘油或其他容易蒸發之液體，送入箱內，成為小滴，受重力作用，緩緩落下。

箱底有兩金屬平板 M, N ，相隔正近，落下小滴由板上小孔通過，自側面用強光照之，自望遠鏡中可見其運動。當其噴出時，受器口之摩擦而帶電，如適用 10,000 弗之勢差於 M, N ，則小滴反而升起。俟其升至 M ，取去勢差，當又降下，達於 N 時，又適用同樣勢差。如是小滴往來於 M, N 之間，落下速度一定不

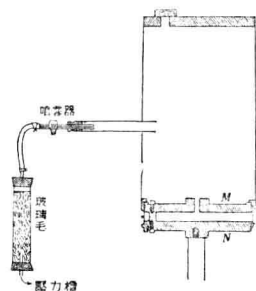


圖 599. 密爾根之實驗。

變，升起時則因捕獲氣體內浮游離子，速度變化頗驟。如離子與小滴之電荷種類相同，則速度增加；相反則減小。就種種液體檢查結果，知小滴之最小電荷之值，恆一定不變，即

$$e = 4.774 \times 10^{10} \text{ 靜電單位} = 1.591 \times 10^{-20} \text{ 電磁單位。}$$

大者必為此數之整數倍，故 e 為獨立存在之電荷之極限值，即一電子所有之電荷。又據實測其比荷 $\frac{e}{m}$ 為 1.769×10^{17} 每克電磁單位，代入上式，立可算出一電子所有之質量如下：

$$m = 8.925 \times 10^{-20} \text{ 克。}$$

第十二章 放射性

§ 580. 放射性之發見。

1899 年柏克勒爾檢查各種磷光體，對於照相乾板之感光作用，證實除鈾之鹽類而外，均無此種作用；且此項感光作用，雖在磷光消滅後，尚可繼續若干時間，與磷光本身無關。因此歸之於一種新放射線，性質頗類 X 線，而稱之曰鈾線，或曰柏克勒爾線。其後經斯密德發見鈾之鹽類，亦有此現象。於是，凡能自然放射類似於 X 線之物質，曰放射質，此項現象則曰放射性。最顯著之物質為鐳，由居利夫婦發見。

§ 581. 放射質發出之放射線之性質。

由放射質發出之放射線，有感光作用，有勵發磷光作用，有使氣體離化之作用等。此外受磁場作用或受電場作用時，放射線不作直進而生偏向，且其偏向種種不一，情形頗複雜。又遇有阻礙之物質時，其透過之能力亦強弱互異。由此種種差別，可知此種放射線並不單純，更經種種檢察，始判明其由三種放射線混合而成。

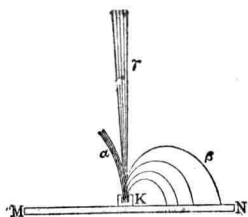


圖 600. 三種放射線.

圖 600 之 K 表盛鐳鹽之器,作用之磁場方向與紙面垂直,自上而之下時,此三種放射線之偏向,各不相同。偏向左方,偏角不甚大者,曰 α 線;偏向右方,角度較大者,曰 β 線,完全不偏者,曰 γ 線。此

三種放射透過物質之能力之比約為 1 : 100 : 10,000, 而其對於氣體之離化作用之強弱,則與此為反比例。

§ 582. β 線.

β 線與陰極線頗相類似,由具有大速度之電子而成,如將其在磁場及電場內所生之偏向測出,即可推算其速度 v 及比荷 $\frac{e}{m}$ 。據考富曼實測結果, β 線之比荷並不一定,速度愈大者其比荷愈小。兩者之關係如下:

$$\frac{e}{m} = \frac{e}{m_0} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 1.769 \times 10^7 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

每克電磁單位中之 c 表光速, m 表此運動中之電子之質量,而 m_0 則表 8.995×10^{-28} 克,即以較 c 略小之速度運動中之電子之質量。故得

$$m = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} m_0.$$

即電子之質量與其速度共同增加,此結果與相對性原

理(參照 § 607)之主張,完全一致。

又由鐳放出之 β 線中之電子,速度亦不一律,其值當在 6×10^9 每秒裡至 2.94×10^{10} 每秒裡之間。此項最大限之速度,出於鐳 C (參照 § 586),約等於 $0.98c$,此粒子之動能,則等於 0.39×10^{-6} 厄。

放射質對於照相乾板之感光作用,大部分出於其 β 線。放射線經由物體中透過時,應受吸收作用,強度次第減弱。如命 I_0 表其最初之強度, x 表通過物體中之厚, I 表通過後之強度,則有下列之關係:

$$I = I_0 e^{-ax}.$$

式中之 a 爲一常數,其值由放射線之速度及物質之密度而定,曰吸收係數。由鈾發出之 β 線,速度大致相同。

其對於各物質之吸收係數及物表 64. 吸收係數與密度。

質之密度之關係,如表 64. 由表可見吸收係數大致與物質之密度成反比例。例如鋁,通過 0.5 耗厚之板,其強度當減去一半。

物質	a	ρ	$\frac{a}{\rho}$
玻璃	14.0	2.45	5.7
硬橡皮	6.5	1.14	5.7
木材	2.16	0.40	5.4
鋁	14.0	2.60	5.4
銅	60	8.6	7.0
銀	75	10.5	7.1
鉛	122	11.5	10.8

§ 583. α 線.

α 線爲放射質以高速度射出之陽粒子,其在電場

及磁場中所起之偏向,不及 β 線爲甚,由此可以測定其

$$\frac{e}{m} = 0.483 \times 10^4 \text{ 每克電磁單位,}$$

恰等於氫離子之半。據最近研究, α 粒子之電荷,等於氫離子電荷之倍。故 α 粒子之質量,等於氫原子之質量之 4 倍。一方面原子量等於氫之原子量之 4 倍者爲氦,更有種種證明,可以斷定 α 粒子爲帶有 4 倍氫離子電荷之氦原子。放射質中有氦陸續發生,即其一證。

α 粒子之速度,在 1.45×10^9 每秒裡至 2.22×10^9 每秒裡之間,故其動能當在 6.99×10^{-6} 厄至 16.4×10^{-6} 厄之間。故與溝渠線比較,比荷雖相等,速度則較大。

三種放射線中,以 α 線之透過物質之能力爲最小,如通過厚 0.000,25 裡之鋁板或厚 0.43 裡之空氣層,其作用即減去一半。又各物質對於 α 線之吸收程度,約與其密度爲比例。 α 線之速度雖小,質量卻大,故動能仍大,其對於氣體之離化作用,亦較 β 線 γ 線爲強。利用 α 粒子之離化作用,不難將其經由之路徑之相片照出。法令鐳鹽射出之 α 線,進入充滿飽和水蒸氣之箱中,然後使箱內空氣,驟然膨脹,則水蒸氣當在 α 運動中所生之離子周圍,凝結成爲霧滴。此時利用電花等瞬間光照之,露滴之線條,即表示 α 粒子之徑路,其狀如圖 601。

因其動能大，故與空氣分子衝突時，其運動之方向並不變化，故徑路悉成直線。但其速度減至一定程度以下，其進行方向即呈驟急之偏向，且不久即失去離化作用，徑路亦隨消滅。

鐳鹽之溫度，恆較其周圍略高數度。雖經空氣之傳導

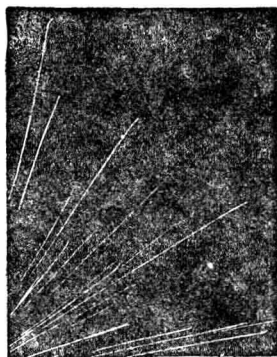


圖 601. α 粒子之徑路。

及輻射等，向外放出相當之熱，仍能保持高溫，由此一點亦可察知其有熱放出。實測結果，每²克之鐳，每 1 時間放出之熱，為 105 克卡；釷亦有熱放出，但不甚多。此熱實由 α 粒子被放射質本身吸收，由動能轉變而成者。

§ 584. γ 線。

三種放射線中，其透過物質之力最強者，首推 γ 線。通過厚 7 厘之鉛，厚 19 厘之鐵，厚 150 厘之水，其作用始減去 1%。任何強力磁場，亦不能使其偏向。各種物體對於 γ 線之吸收程度，大致與物質之密度成比例。

前曾述及陰極線驟停，即生 X 線。同樣 β 線之速度更大，在原子內進行中，如驟然停止，即發 γ 線，故其波

長較 X 線小，而透過能力則較 X 線大，其透過力之大，即由於此。 β 線及 γ 線必同時存在，且成一定比例，足以證明此說。

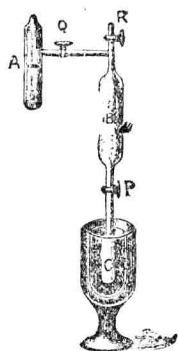


圖 602.
放射性之實驗。

§ 585. 放射質之蛻變。

鐳之原子量為 226，由鐳通常有一種氣體發生，曰鐳射氣，實為一種元素，曰氡，其原子量等於 222，用圖 602

之裝置可證明之。 A 內盛溴化鐳溶液， B 及 C 內盛螢光性物質。轉閉活栓 P 及 R ，放開 Q ，則 B 內即有螢光現出，閉 Q 開 P ，則 C 內現出螢光， B 內之光轉弱。如將 C 浸入液態空氣，使其冷卻，則 B 內之光，即完全消滅，由於 B 內之氣，受冷凝結於 C 內所致。再將 C 由液態空氣內取出， B 內又有螢光可見，即前此凝結之氣，又蒸發成為氣體矣。再開 Q ，又有氣送出， BC 同時復發螢光。將 P 閉塞，螢光減小，約歷 4 日，光之強度減去一半，可知氡又變為他物矣。

同樣，一切放射質均次第變化成為別種物質之現象，曰蛻變。鐳蛻變成氡，氡又蛻變成鐳 A ，鐳 A 又蛻變成鐳 B ，如是遞次蛻變，最後達於非放射質始已。每一

disintegration

radium A

radium B

變化,均有一定不移之期間。不僅鐳如此,其他之放射質,莫不如此。例如鈾 X, 約歷 25 日,必減去一半,即有一半已蛻變成爲他物。一切放射質,其作用減成一半所要之時間,曰其半值周期,其值愈小者,蛻變愈速,同時放出之放射線愈強。如以 0.693,15 除半值周期,即得放射性減成 37 % 所要之時間,是曰平均壽命。如命 P 表其半值周期, L 表其平均壽命,兩者間之關係當如下:

$$P = 0.693,15 L.$$

命 λ 表 L 之逆數,即 $\lambda = \frac{1}{L}$,此 λ 曰蛻變常數,即蛻變常數之值愈大者,其變化之進行愈速。

由鐳變成之氣,歷時愈久,所積愈多,但同時氣又必蛻變成爲鐳 A,故不能無限增多,應有一極大值;超過此數以後,或暫時不變,或轉形減少。凡由甲變成乙之速度,與由乙變丙之速度如恰相等,則乙之量即成爲定值,而甲與乙之比,亦保持定值,如是之狀態,稱曰放射平衡。與鐳 1 克成放射平衡之氣之質量,定爲測鐳之單位,曰 1 居,其 $\frac{1}{1,000}$ 曰氚。鐳之分量極微,不敷用 γ 線測定時,可間接比較氣之分量推出之。通常測定溫泉中所含有之鐳之分量,即用此法。又因氚之單位,仍嫌過大,特取其 2.75×10^{-9} 倍,作補助單位,是曰 1 麻。

mache-unit

§ 506. 放射性元素之系統。

元素中具有放射性者，曰**放射性元素**，其數頗多，且有一定系統，遞變而成。統計獨立系統有三：(1)曰**鈾系**，係由鈾蛻變而成者；(2)曰**錒系**，係由錒蛻變而成者；(3)曰**釷系**，係由釷蛻變而成者。但據最近研究，錒系實為鈾系之一分枝，故嚴格言之，僅有兩系而已，如表 65。

表 65. 放射性元素之系統。

原子序	鈾系	錒系	釷系	元素
92	U			U
91	Ux ₁₁			Ux ₁₁
90	Ux ₁	U ₁₁		
89		Io	Th	Th
88		Ra	Ac	Ac
87		Rn		—
86		RaA		—
85		Po		Po
84	RaE	RaC'	ThC ₂	ThC ₂
83	RaD	RaC	ThC	ThC
82	Pb	RaB	Pb	Pb
81		RaC ₂	ThD	ThD

表中 \Rightarrow 表放射 α 線， \rightarrow 表放射 β 線，同列者為同位素（參照 § 600）。又各種常數之值，如表 66。

表 66. 放射性元素之各種常數。

元 素	原子量	原 子 序 數	同 位 素	放 射 線	半 值 周 期	平 均 壽 命	蛻 變 常 數
UI	238	92	U	α	4.5×10^9 年	6.5×10^9 年	4.8×10^{-18}
UX ₁	234	90	Th	$\beta \gamma$	23.8 日	34.4 日	3.37×10^{-7}
UX ₂	234	91	Pa	$\beta \gamma$	1.17 分	1.69 分	9.9×10^{-3}
UZ	234	91	Pa	β	6.7 時	9.7 時	2.87×10^{-5}
UII	234	92	U	α	0.9×10^6 年	1.3×10^6 年	2.4×10^{-14}
UY	230	90	Th	β	24.6 時	35.5 時	7.81×10^{-6}
Io	230	90	Th	$\alpha \gamma$	9×10^4 年	1.3×10^5 年	2.4×10^{-13}
Ra	226	88	Ra	$\alpha \beta \gamma$	1,580 年	2,280 年	1.39×10^{-11}
Rn	222	86	Rn	α	3.825 日	5.518 日	2.097×10^{-6}
RaA	218	84	Po	α	3.05 分	4.40 分	3.78×10^{-3}
RaB	214	82	Pb	$\beta \gamma$	26.8 分	38.7 分	4.31×10^{-4}
RaC	214	83	Bi	$\alpha \beta \gamma$	19.5 分	28.1 分	5.98×10^{-4}
RaC'	214	84	Po	α	約 10^{-6} 秒	約 10^{-6} 秒	$10^{6(?)}$
RaD	210	82	Pb	$\beta \gamma$	16 年	23 年	1.37×10^{-9}
RaE	210	83	Bi	$\beta \gamma$	4.85 日	7.0 日	1.65×10^{-6}
RaF	210	84	Po	$\alpha \gamma$	136.5 日	197 日	5.88×10^{-8}
RaG'	206	82	Pb	—	—	—	—
RaC''	210	81	Tl	$\beta \gamma$	1.32 分	1.90 分	8.7×10^{-3}
RaG''	206	82	Pb	—	—	—	—
Pa	?	91	Pa	$\alpha \beta \gamma$	2.0×10^4 年	$\times 10^4$ 年	1.08×10^{-12}
Ac	?	89	Ac	β	20 年	29 年	1.08×10^{-9}
RdAc	?	90	Th	$\alpha \beta \gamma$	18.9 日	27.3 日	4.24×10^{-7}
AcX	?	88	Ra	$\alpha \beta \gamma$	11.2 日	16.2 日	7.14×10^{-7}
An	?	86	Rn	α	3.92 秒	5.66 秒	0.177
AcA	?	84	Po	α	1.5×10^{-3} 秒	2.1×10^{-3} 秒	4.7×10^2
AcB	?	82	Pb	$\beta \gamma$	36.0 分	51.9 分	3.21×10^{-4}
AcC	?	83	Bi	$\alpha \beta$	2.16 分	3.12 分	5.35×10^{-3}
AcC'	?	84	Po	α	約 5×10^{-3} 秒	7×10^{-3} 秒	140
AcG'	?	82	Pb	—	—	—	—
AcC''	?	81	Tl	$\beta \gamma$	4.76 分	6.87 分	2.43×10^{-3}
AcG''	?	82	Pb	—	—	—	—
Th	232	90	Th	α	1.65×10^{10} 年	2.4×10^{10} 年	1.3×10^{-18}
MsTh ₁	228	88	Ra	β	6.7 年	9.7 年	3.26×10^{-9}
MsTh ₂	228	89	Ac	$\beta \gamma$	5.95 時	8.47 時	3.28×10^{-5}
RdTh	228	90	Th	$\alpha \beta \gamma$	1.90 年	2.74 年	1.16×10^{-8}
ThX	224	88	Ra	α	3.64 日	5.25 日	2.20×10^{-6}
Tn	220	86	Rh	α	54.5 秒	78.7 秒	1.27×10^{-2}
ThA	216	84	Po	α	0.14 秒	0.20 秒	4.95
ThB	212	82	Pb	$\beta \gamma$	10.6 時	15.3 時	1.82×10^{-5}
ThC	212	83	Bi	$\alpha \beta$	60.5 分	87.3 分	1.91×10^{-4}
ThC'	212	84	Po	α	約 10^{-11} 秒	10^{-11} 秒	10^{11}
ThG'	208	82	Pb	—	—	—	—
ThC''	208	81	Tl	$\beta \gamma$	3.20 分	4.62 分	3.61×10^{-3}
ThG''	208	82	Pb	—	—	—	—
K	39.1	19	K	β	—	—	—
Rb	85.1	37	Rb	β	—	—	—

第十三章 原子之構造

§ 587. 原子之構造.

由真空放電及放射性之研究,知元素陸續射出電子,遞變而成別一元素,其放出之電子,異常渺小,但其質量及電荷,均有一定不變之值。由此可知,物質之終極應為電子而非原子,原子有若干種,電有只有一種而已。

又氣體在高溫,則生線景,但若光源在磁場內,則一輝線分成數條,即所謂最曼效應(參照 § 387)。由此可知其光源應為帶電體,由是推算其 $\frac{e}{m}$,結果與電子之比荷完全相同,且知其為陰電,即由電子振動而成此電磁波。

各元素中之電子,各有一定分布,其景線即由分布狀況而定,受磁力作用而生之景線分解,遂亦各不相同。

§ 588. 陽核.

在通常狀態之原子,不呈電性,故知原子中除電子外,尚有帶陽電之物存在,其電荷之大小與電子之電荷總和相等,符號則相反。利用 α 粒子突然改變其徑路,可以察知原子內某處有電子存在,某處有帶陽電之物

存在,如圖 603. 如用金箔承受此項 α 粒子,即可測出偏向角度,由此不難算出 α 粒子與陽電部分可以接近之最短距離. 實測結果,此項最短距離,較原子直徑遙小. 原子

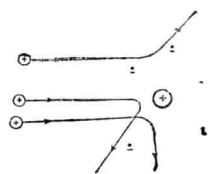


圖 603. 陽核之存在.

直徑為 10^{-8} 階級之數字,而此項最短距離,則在 3×10^{-12} 糵至 3.6×10^{-12} 糵之間. 故知陽電部分之直徑,約為原子直徑之 10^{-4} 倍,成為原子之中心,曰陽核,其電荷亦可由此實驗推算之. 例如氧之陽核為 $+8e$, 碳為 $+6e$.

positive nucleus

§ 589. 陽核及電子之作用.

陽核在於原子中心,電子在其周圍. 陽核之直徑雖小,其質量却甚大. 一原子之質量,大部分均在其陽核上,故將陽核質量,看成原子全部之質量,亦無不可.

由原子射出之光線, X 線,及其他種種輻射線,均由於其電子之作用,而原子與原子之化合,亦其電子使然. 陽核之性質如不同,則其周圍存在之電子數及其分布狀況,均隨之而異,同時化學作用亦有差別. 故陽核對於化學作用,亦有間接之影響. 故欲研究原子之構造,非從其陽核及電子兩方面着手不可.

atom structure

§ 590. 陽核之電荷及質量。

由放射質射出之 α 粒子，帶有陽電荷，故知其出自陽核。又此時放出之 β 線，由其關係亦可斷定其由陽核而來。簡言之，放射作用為陽核所起之現象。陽核上亦有若干之陰電，其陰陽兩種電荷之差，即等於周圍電子電荷之和。準此，則原子放出放射線，及與他種物質化合，均屬於其電荷，與其質量無涉。且陽核之電荷為電子電荷之整數倍，故若依此倍數大小，將原子排列則其特性，即按此順序逐漸變化而去。如是之數字，曰原子序數，其值約等於各原子量之半，用此表示各元素 atomic number 之特性，較之用原子量，更為切當。

據刺德福之研究，氫原子之陽核，與一電子恰相當，
Rutherford
不能再行分割，是曰質子。一切元素之原子，均由質子
proton
與電子合成。質子之質量即氫原子之質量，其電荷則為 $+e$ 。如命 z 表一原子陽核中所含有之質子數， k 表其中之電子數， M 表一質子之質量， m 表電子之質量，則

$$\text{原子之質量} = zM + km,$$

$$\text{原子量} = z,$$

$$\text{電荷} = +ze - ke = (z - k)e,$$

$$\text{原子序數} = \frac{(z - k)e}{e} = z - k.$$

例如 α 粒子之電荷為 $2e$, 其質量為氫原子之 4 倍, 故氦之陽核, 係由 4 質子及 2 電子合成, 周圍有 2 電子環之。

§ 591. 量子論.

洋燈所發之光, 由於在油成分中之原子作用而來; 電燈所放之光, 由於鎢絲受熱, 自其原子中放出; 在稀薄氣體中放電所發出之特殊之光, 亦由其原子而來。凡此種種, 均係在陽核周圍之電子, 因振動而生電波, 傳至能媒中, 表現成光。即原子所發之光, 為電子之動能, 移至能媒中, 轉變而成能媒之振動能時出現之現象。按通常在空氣中之一切振動, 其能之轉移, 均為連續的而非間斷的, 故其振幅之增減, 均按一定之周期, 連續變化而去。例如陰極線本由高速度之電子而成, 與對陰極衝突, 即發生特有之 X 線, 其變化並非連續的。又如用景析器檢查稀薄氣體中放電時所生之光, 各 H 線均各有其一定之波長, 成為巴爾馬列(參照 §602), 又完全黑體之輻射, 其各種波長之分布, 理論與事實, 互相矛盾。凡此種種, 均苦無法說明。

蒲朗克乃根據上述各事實, 推想原子內之動能, 不能與肉眼所能觀察者, 相提並論。假如認電子與能媒間之能之授受, 為非連續的, 即非能之量達於整塊的, 決不能轉移, 則一切現象, 均不難釋明矣。此種理論, 曰量子論, 其所假定之最小之整塊之能, 曰能量子, 通常以 ϵ 代之。如命 ν 表輻射體內之振動體之振數, 則其關係如下:

$$\epsilon = h\nu.$$

$$h = 6.554 \times 10^{-7} \text{ 厄秒.}$$

如是之常數 h , 曰蒲朗克之普遍常數, 對於任何物質, 其值均不變, 又由其單位名稱, 可以推出其次式, 應為功與時間兩者之乘積, 故亦有稱之曰作用量子者。

§ 592. 光電效應。

絕緣之金屬板，如遇有波長適宜之紫外線照及，即有電子自金屬板中逸出，結果使此板帶陽電。氣體如遇波長適宜之輻射線照及，則起離化作用。凡如此類，由光之作用使氣體，金屬板或其他之物質，發生電子分離之現象，曰光電效應，由此逸出之電子，曰光電子。

根據量子說，物體受光照及，其吸收之能，至少亦必等於 $\epsilon = h\nu$ 。此量曰光量子。物體即以此項吸得之能，使其內之電子，脫離原子之範圍，故一電子自原子射出時所要之功，當等於或小於 $h\nu$ 。

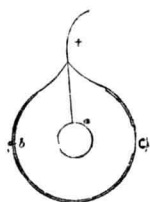


圖 604. 光電池。

各種物質之中以鉀，鈉，鋰，等類之鹼土金屬之光電效應，特別顯著。如於真空球內壁，塗上此種金屬一薄層，如圖 604 之 b ，僅留一小孔 o 不塗，且此處管壁，特用水晶製成，以防吸收紫外線。再於真空球中央懸一金屬輪或板，如 a ，作陽極，塗鉀之層作陰極。使光由 o 進入球內，則鉀層受光電效應，有電子發出。將 a 及 b 連續於乾電池 e 之陽極及陰極，中插入一電流計 G ，即見沿 $abGea$ 之方向，有電流通過。如是之裝置，曰光電池。此種電池，異常敏銳，雖過 3×10^{-9} 每秒每平方厘米之能，亦可感受，故可用作微光之光度計。

§ 593. 傳真電報。

上節所述之光電池，因其對於光之感受極端敏銳，故其應用頗多，例如 § 462 所述之硒電池，其抵抗亦隨所受之光之強弱而變，故可作電相亦稱傳真電報之用。但實際上，硒之感光，異常遲鈍，必俟受光照及數分間後，電流始應之而變，故不適用。光電池則不然，其效應既敏且捷，光強與電流在同一瞬間，共同變化，極合此用。其裝置分發相及收相兩部。發相部如圖 605，將字畫或相片貼在圓筒 A

上,由強光源 B 照相上一點,經相片反射入於 D 內,進入光電池 C 。相上之點暗黑,則進入 C 之光弱;相點明亮,則進入 C 之光強。故經此光電池通過之電流,隨相點明暗而生強弱變化。一方面 A 以一定速度在其軸周轉動,且隨轉隨沿軸之方向略進。因此 B 所照及之點,遍及於相片全部,無一遺漏。結果成爲強弱不同之電流,次第由光電池通過。更用若干個三極管,將此微弱電流擴大,傳至遠地。

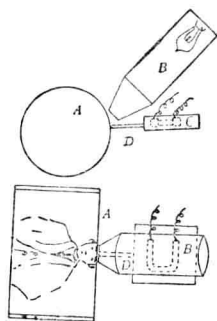


圖 605. 發相裝置。

受相之裝置,如圖 606,由遠地傳來之電流,經由一種感覺極敏之正切電流計,曰振圖器者流過。
oscillograph

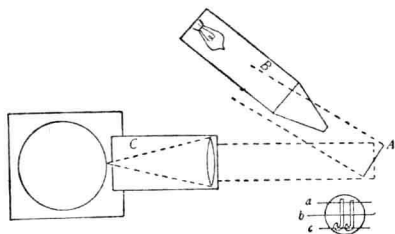


圖 606. 受相裝置。

來電強,則振圖器之偏向大;來電弱,則振圖器之偏向小。器中裝一小反射鏡 A ,另用一強烈之光源 B 照之。如鏡 A 之偏向愈大,反射後之光愈降至下方。此處亦裝有一圓筒 C ,其右端有數條細隙,均作 J 字形,由 A 反射而來之光,即由此細隙中通過。故由 A 反射而來經過細隙之光之強弱,完全由 A 之偏向多寡而定。此項有強弱差別之光,如用一透鏡集中後,射至圓筒上所捲之感光紙上,即應其強弱,現爲濃淡之光點。紙與圓筒,亦與發相處之圓筒,以同一速度隨轉隨進;俾光點遍及於紙上。將受光後之紙取下,顯像後,即成爲與所發之相或字畫完全相同之相片。

以上係就有線電之方法而言,近更擴充之可用無線電傳達,其原理仍大致相同。最近由德國送至南京之傳真電報,如圖 607。

§ 594. 遠視。

前節所用之裝置，於 4 分間僅能完成一六吋大小之照片或字畫。最近更經改良，速度大增，完成一畫，僅須時十六分之一秒即足。再利用 § 343 所述之視覺之持久性，將影片用此方法送出，則在受相處每隔十六分之一秒，必現一畫，陸續出現，與觀影戲相同。又不必影片，即將遠處實物動作，直接送出亦可。於是遠地一舉一動，均歷歷呈於目前，此項方法，是曰遠視 television 最初造成此種裝置者，為貝耳德 Biard，其送相部分，如圖 608。由實物 A 反射而來之光，先經圓板 B 上之小孔通過，各



圖 607.

由德國柏林用無線電送至南京之傳真電報。

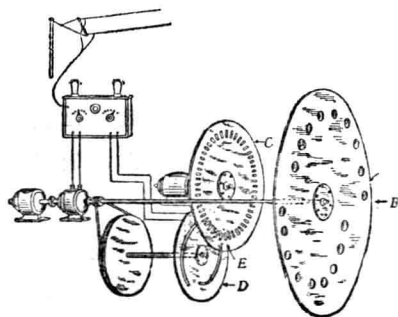


圖 608. 遠視之發相裝置。



孔內各有一小透鏡，總計有18孔，均不在同一圓周上，相列作螺線形。故此等透鏡造成之像，亦不能同在一點。由此通過之光，再經第二圓板C，周緣有多數細孔，將光分割成爲若干小光點，送至第三圓板D，其上又有作螺線形之小孔，且轉動極速，每分鐘可轉4,000周。如D上之孔，恰轉至第一圓板B之後方時，分割後之光點，始能由之通過，而達於光電池。如是共同轉動，則實物或字畫之全面，即被分割成爲無數明暗互異之小光點，陸續向此光電池投射而來，隨其明暗成爲強弱不同之電流。再利用三極管將此種微弱變化之電流，加以擴大，然後或用电線或用無線電送至遠地。受相之裝置，亦與此同，如圖609，僅用白熱燈代通常之光電管，其光度強弱隨其所接收之電流強弱而變。故光點陸續現於幕上，於十六分之一秒完成一畫，在肉眼中與觀影戲完全同感。

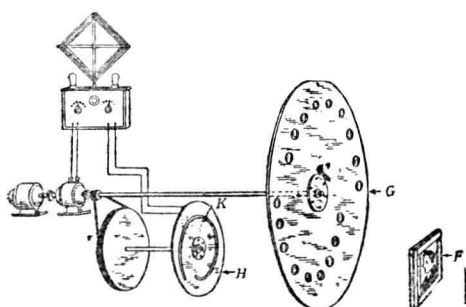


圖609. 遠視之受相裝置。

受相之裝置，亦與此同，如圖609，僅用白熱燈代通常之光電管，其光度強弱隨其所接收之電流強弱而變。故光點陸續現於幕上，於十六分之一秒完成一畫，在肉眼中與觀影戲完全同感。

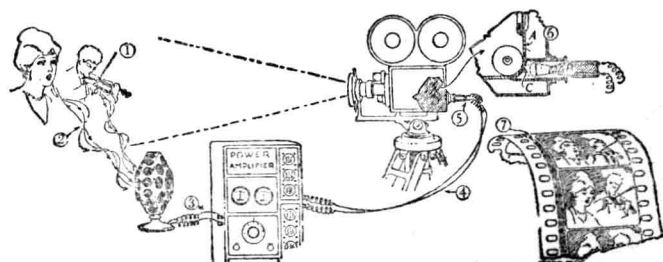


圖610. 有聲影片之攝取法。

§ 595. 有聲影片.

光電池之又一應用，爲有現今盛行之有聲影片，其照取時之裝置，如圖 610。用通常影戲機將實物之動作，如(1)，照下，用微音器將同時所發之音，如(2)，轉變成爲強弱變化之電流，如(3)，再用若干三極管合成之強力擴大器再以擴大，然後用導線(4)送入影戲機後方，使其中裝設之電燈(5)，隨電流強弱而生明暗變化。再將此一部分放大示之，如圖中之(6)，其中之 A 爲影片， B 爲感光異常敏銳之一種光電管， C 爲石英片，所開之細隙，周圍鍍金，由 B 發來強弱變化之燈光，

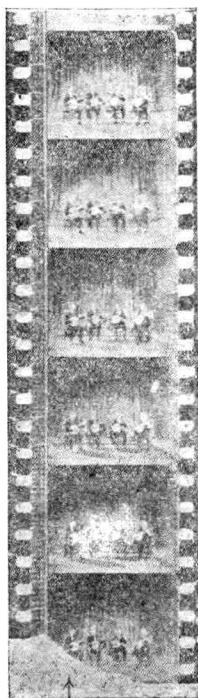


圖 611. 有聲影片

通過 C 後，照在影片左側，隨光之強弱，現爲明暗條痕，如(7)。通常影片中之圖畫，其寬約爲 22 耗，而此種條痕之寬，僅 3 耗而已，由此照成之影片，如圖 611，在其左側，多一列明暗交錯之條痕，夾於圖畫與邊之間。

開演時之理，與前正相反對。於通常影戲應有之裝置外，須加一高聲器 L ，如圖 612，擴大器 A ，光電管 P 及電燈 O 。由 O 發

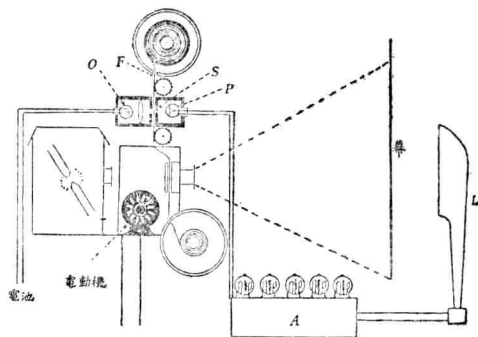


圖 612. 開演有聲影片之裝置。

出之光，強度恒一定不變，經前面透鏡集中後，射至記音之條痕上，使透過之光，隨條痕濃淡而為弱為強。此種強弱變化之光，達於光電管，引起強弱變化之電流，經擴大器擴大後，再由高聲器發出強大之音，與照取時之音相同。故一面觀畫，一面可聞其音。

§ 596. 螢光及磷光。

前於 § 364 所述之螢光及磷光，如用量子論說明之，當極其簡明。如使螢光體或磷光體之原子內之電子逸出，然後再使此電子，仍回其原位置，此時放出之輻射線，即成螢光或磷光。此種一旦由原子內逸出，又復返於原位置之電子，有僅須少許之時間者，有因受某種之抵抗，須經歷若干時間之後，始克歸來者。屬於前者為螢光，屬於後者為磷光。按此電子由投射於螢光體或磷光體上之光中，接受之能，應等於 $\epsilon = h\nu$ ，其中之 ν ，表投射光之振數。命 ν' 表由此螢光體或磷光體發出之輻射線之振數，則其發出之能，應成為 $h\nu'$ 。射出者當然不能超過其接受之分量，故 $h\nu'$ 不能大於 $h\nu$ ，即 ν' 不能大於 ν 。換言之，螢光或磷光之振數，不能超過投射光之振數，此關係曰斯托克斯定律。又 X 線與對陰極板衝突時，發出之輻射線，其振數對於陰極線之振數，亦與此有同樣之關係。

§ 597. 結晶體之 X 線研究。

細束之 X 線投射於小結晶體上，如在結晶體後面，放一照相用乾板，接收此項透過結晶體而來之光，現像後，即成圖 613 所示之圖形。按結晶體，各原子之排列，異常整齊，自成一種空間格子（參照 § 140）。X 線由此間通過，應生邊折現象，於一定之方向

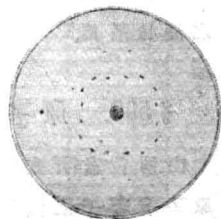


圖 613. 勞厄斑。

上現一像點，而於中央直照處所生之像，特別濃厚。如是而得之像點，隨原子排列狀況，各有一定不移之位置，是曰勞厄斑。Laue spots 反之，由勞厄斑之位置，即可推算此種結晶體之分子中各原子之排列狀況。

§ 598. 示性 X 線。

陰極線與對陰極板衝突時發出之 X 線，加以詳細考察，即見其由兩種性質不同之 X 線合成。一種由於陰極線中之電子，驟然停止而生；一種由於對陰極板中之原子中之電子，因受陰極線衝突，自其原子內飛出而生。前者為通常之 X 線，後者則曰示性 X 線，或曰示性輻射。characteristic X-ray
characteristic radiation

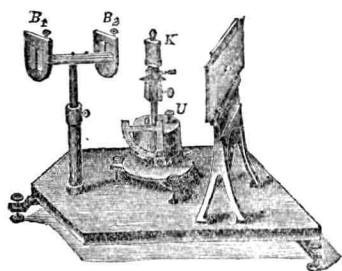


圖 614. 示性 X 線之裝置。

用圖 614 之裝置，使 X 線由細隙 B_1 及 B_2 通過，投射於結晶體 K ，反射後達於乾板 P 。經顯像後，現為圖 615 所示之景線，其各線之波長，均可按圖求出。如用各種不同金屬作對陰極，行此實驗，即可求得各種不同之示性 X 線。示性 X 線，可分為 K , L , M 及 N 之四式，各式各由數條之線合成，以 α , β , γ , 等區別之。此四式之中，以 K 之波長最短， L 次之， M 又次之， N 之波長最長。

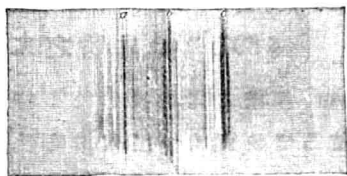


圖 615. 示性 X 線。

§ 599. 原子序數。

由同位素(詳次節)之發見，知一原子有若干之變種，其原子量雖各不相同，然其化學性質及物理性質，則完全無異。舊時用各元素之原子量，作周期表中元素系統
periodic table

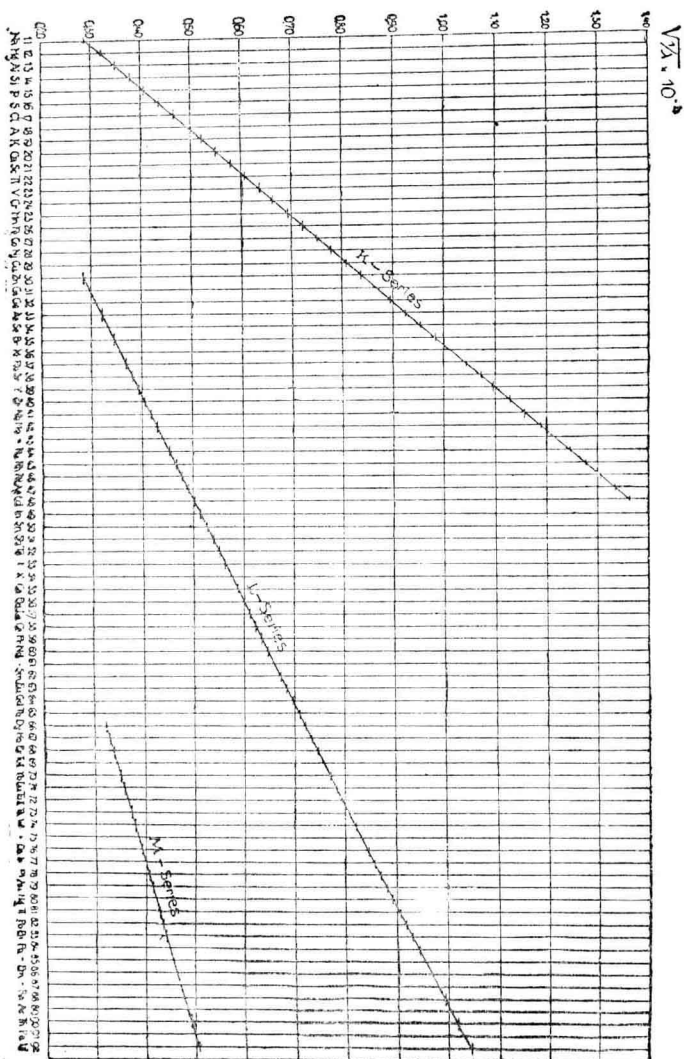


圖 616. $\frac{1}{\lambda}$ 與 原子序數之關係.

之惟一基礎，殊屬不合於理。但若取各元素在周期表中所占之順序，例如氫為1，氦為2，鋰為3等，逐次推至最後之鈾為92，定為各元素之序數，曰原子序數。atomic number 如用原子序數代替原子量，則周期表之意義，依然存在。又關於 K 式及 L 式之示性 X 綫，如命 ν 表其振數， Z 表元素之原子序數，則此兩者之中，恆有下列之關係：

$$\nu = A(Z - b)^2,$$

式中之 A 及 b 均為輻射綫式之常數。例如

$$\text{對於 } K_{\alpha}: A = \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \nu_0, \quad b = 1, \quad \nu_0 = 3.29 \times 10^{15},$$

$$\text{對於 } L_{\alpha}: A = \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \nu_0, \quad b = 7.4, \quad \nu_0 = 3.29 \times 10^{15}.$$

此關係曰，Moseley's law 摩茲力定律。由此亦可證明原子序數可由獨立方法求出，並不必依賴周期表。如沿橫軸取原子序數，沿縱軸取 $\frac{1}{\lambda} \times 10^{-4}$ 則成圖 616 所示之直綫的關係。

茲將各元素之原子量，原子序數及其在化學上所占有之地位，列表表示之，如表 66，即所謂周期表是也。

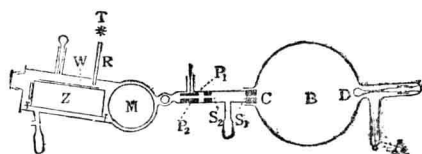


圖 617. 陽綫法。

理性質，均與通常之鉛相同，任任何種化學方法，均不能分離之，如是者，曰同位素。isotopes 不僅放射性元素而已，即其他之元素亦然，均各有其同位素混合存在。周期表內，同位素占同一之位置，而同種類之同位素之全部，則曰羣。group

分離同位素之方法，創自湯姆遜，後經阿斯吞改良，成為陽綫法，J. J. Thomson Aston positive ray method 亦稱溝渠綫法，其裝置如圖 617。B 為真空管，A 為陽極，C 為穿有

§ 600. 同位素。

由鐳，鈾，釷，錒等放射質蛻變而成之最後之物質，其原子量等於 206, 206 及 208，其化學性質及物

表 67. 周 期 表

屬 周 期	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H 1.008 氫							2 He* 4.00 氦
2	Li 6.940 鋰	4 Be 9.02 鈹	5 B 10.82 硼	6 C 12.000 碳	7 N 14.008 氮	8 O 16.000 氧	9 F 19.00 氟	10 Ne* 20.2 氖
3	Na 22.997 鈉	12 Mg 24.32 鎂	13 Al 26.97 鋁	14 Si 28.06 矽	15 P 31.027 磷	16 S 32.064 硫	17 Cl 35.457 氯	18 A* 39.91 氬
4	K 39.096 鉀	20 Ca 40.07 鈣	21 Sc* 45.10 鈾	22 Ti 48.1 鈦	23 V 50.96 釩	24 Cr 52.01 鉻	25 Mn 54.93 錳	26 Fe 55.84 鐵
5	Rb 85.44 鉀	30 Zn 65.38 鋅	31 Ga* 69.72 鎵	32 Ge* 72.60 鍮	33 As 74.96 砒	34 Se 79.2 硒	35 Br 79.916 溴	36 Kr* 82.9 氬
6	Ag 107.88 銀	38 Sr 87.63 銻	39 Yt 88.9 鈦	40 Zr 91. 鈷	41 Nb* 93.1 鈷	42 Mo 96.0 鉬	43 Ma* 96.? 錳	44 Ru 101.7 鈷
7	Au 197.2 金	48 Cd 112.41 鎘	49 In 114.8 銦	50 Sn 118.70 錫	51 Sb 121.77 銻	52 Te 127.5 碲	53 I 126.932 碘	54 Xe* 130.2 氙
		55 Ba 137.37 鋇	56 La 138.90 釷	57-71 釷族	72 Hf* 178.6 鈷	73 Ta 181.5 鈷	74 W 184.0 鈷	75 Re* 187.? 銻
		80 Hg 200.61 銻	81 Tl 204.39 鉛	82 Pb 207.20 錒	83 Bi 209.00 鉍	84 Po* 210. 鏷	85 At 210. 砒	86 Rn* 222. 氡
		87 Ra* 225.95 鐳	88 Ac* 226(?) 錒	89 Th 232.15 釷	90 Pa* 230(?) 釷	91 U 238.17 鈾	92 Np 237. 鈷	93 Pu 244. 鈷

元素符號左右數字表原子序數,下面數字表原子量.
*爲1869年門得雷萊夫發表周律律後發見之元素.

57-71 釷族	La 138.90 釷	58 Ce 140.25 鈷	59 Pr* 140.92 鈷	60 Nd* 144.27 鈷	61 Pm* 147. 鈷	62 Sm* 150.43 鈷	63 Eu* 152.0 鈷
Gd* 157.26 釷	64 Tb 158.93 釷	65 Dy* 162.52 鈷	66 Ho* 164.93 鈷	67 Er* 167.26 鈷	68 Tm* 168.93 鈷	69 Yb* 173.05 鈷	70 Lu* 175.0 鈷

細孔 S_1 之陰極。管內放電，則由 S_1 通過之陽線，或溝渠線，再經細隙 S_2 ，成爲狹束，由帶電金屬板 P_1 及 P_2 之間通過。線束既帶有陽電，故通過 $P_1 P_2$ 間時，偏向帶陰電之一方。命 e 表陽線內粒子之電荷， m 表其質量， v 表其速度，則受電場而生之偏向，與 $\frac{e}{m}$ 爲正比例，與 v^2 爲反比例。故在真空管內， $\frac{e}{m}$ 之值相等之各粒子，各以不同之速度射出時，因偏向不等，故向各方發散而去。如再於 M 處使磁場作用，令其方向與紙面垂直，且自下而上，則陽線通過 M 時所生之偏向，與前正相反對，而偏向則與 $\frac{e}{mv}$ 成比例。故 $\frac{e}{m}$ 相等而 v 不同之粒子，能使之集合於乾板 w 之上，但 $\frac{e}{m}$ 大者，即 $\frac{m}{e}$ 小者，受磁場之偏向大，故現於右端。照此方法將各種稀薄氣體裝入真空管內，即可將同一元素之各同位素，分離而出，如圖 618，曰質量景圖。右端爲元素名稱，景上各數字，表元素之原子量。本圖所用氣體爲化合物，故同時有他種元素出現。

由此法可以檢出氧，氫，碳等爲單純元素，其原子量爲 16.00, 1.008,

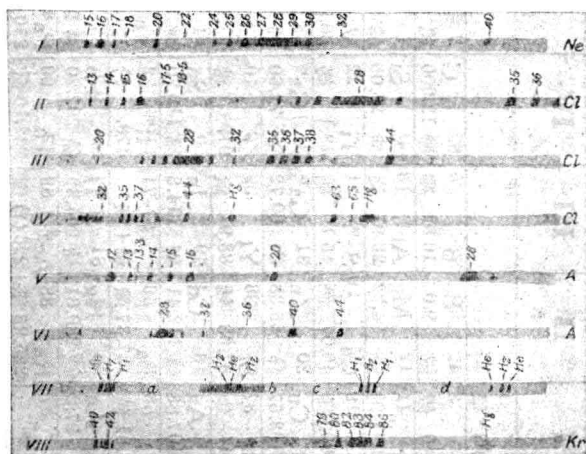


圖 618. 質量景圖。

及12.00,與由尋常之化學方法求得者,完全一致。但氯之原子量,則有35與37兩種,即應由二個之同位素合成,此兩者以33:1之比例混合存在,其結果與由尋常之化學方法求得之35.46,亦復恰能吻合,其餘各種元素之同位素,多寡不等,列舉之,如表68。表中未將放射性元素之同位素列出,故曰非放射性元素之同位素。

表68. 非放射性元素之同位素。

元素	序數	分別原子量	通常原子量
H	1	1.008	—
He	2	4.00	—
Li	3	7; 6	6.94
Be	4	9.0	—
B	5	11.0; 10.0	10.90
C	6	12.00	—
N	7	14.01	—
O	8	16.00	—
F	9	19.0	—
Ne	10	20.00; 22.00	20.2
Na	11	23.00	—
Mg	12	24; 25; 26.	24.32
Al	13	27	—
Si	14	28; 29; (30)	28.8
P	15	31.04	—
S	16	32; (?)	32.06
Cl	17	35; 37	35.46
A	18	40; 36	39.9
K	19	39; 41	39.10
Ca	20	40; 44	40.07
Fe	26	56; (54)	55.84
N	28	58.0; (60.0)	58.68
Zn	30	64; 66; 68; 70	65.37
As	33	74.96	—
Se	34	80; 78; 76; 82; 77; 74.	79.2
Br	35	79; 81	79.92
Kr	36	84; 86; 82; 83; 80; 78.	82.92
Rb	37	85; 87.	85.5
Sn	50	120; 118; 116; 124; 119; 117; 122; (121).	118.7
Sb	51	121; 123.	121.77
I	53	126.92	—
X	54	129; 132; 131; 134; 136; 128; 130.	130.2
Cs	55	132.8	—
Hg	80	197-200; 202; 204.	200.6

§ 601. 波耳之原子模型.

波耳根據量子論,而得各原子模型,其假設可分為三段:

Bohr

第一: 電子運動之定常軌道,恆一定不變,其軌道大小可由電

子論計算而得,其結果如下:

第一軌道之半徑 = 0.55×10^{-8} 浬;

第二軌道之半徑 = 2.20×10^{-8} 浬;

第三軌道之半徑 = 4.95×10^{-8} 浬;

第四軌道之半徑 = 8.80×10^{-8} 浬.

即相互作用 $1^2:2^2:3^2:4^2:\dots$ 之比例。除此而外,其他之軌道,均非常者。其中尤以第一軌道為最穩定,在此軌道上轉動中之電子狀態,特曰氫原子之標準狀態。

第二: 電子在定常軌上運動時,無光可發,換言之,此時電子所有之能,不克移至能媒之內。

欲使標準狀態之氫原子發光,必須供給以相當之能。例如在真空管內放電,係使由陰極逸出之電子,與氫原子衝突,氫原子吸收其能,電子軌道為之增大。但其增大狀況,並非逐漸連續增長,僅能由第一軌道,一躍而成為第二軌道;由第二軌道一躍而成第三軌道,決不至於吸收不足分量之能,使其成為中間之軌道。換言之,其吸收之能,應為整塊的而非連續的。反之,電子軌道縮小時,亦復如是。由第三軌道一躍而成為第二軌道,由第二軌道一躍而成為第一軌道,此時所放出之能,亦必為整塊的而非連續的。此項放出之能,即表現為光。試命 w 表原在第一軌道中之電子完全脫離其原子時所要之能, $\frac{w}{2^2}$ 表原在第二軌道中之電子,完全脫離其原子時所要之能; $\frac{w}{3^2}$ 表原在第三軌道中之電子,完全脫離其原子時所要之能,餘做此。則由第二,第三,第四等軌道,移至第一軌道時放出之能,當為

$$I. \quad 2 \rightarrow 1: w\left(1 - \frac{1}{2^2}\right); \quad 3 \rightarrow 1: w\left(1 - \frac{1}{3^2}\right); \dots$$

其由此等軌道移至第二軌道時，應放出之能，爲

$$\text{II. } 3 \rightarrow 2 : w \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right); \quad 4 \rightarrow 2 : w \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right);$$

其由此等軌道移至第三軌道時，應放出之能，爲

$$\text{III. } 4 \rightarrow 3 : w \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right); \quad 5 \rightarrow 3 : w \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right).$$

第三：由第 n 軌道移至第 s 軌道時，所放出之能，與表現而成之光之振數 ν 之間，恆有下列之關係存在：

$$w_n - w_s = h\nu.$$

故在上舉之三例中，所表現之光之振數，當爲

$$\text{I. } \frac{w}{h} \left(1 - \frac{1}{2^2} \right); \quad \frac{w}{h} \left(1 - \frac{1}{3^2} \right); \quad \frac{w}{h} \left(1 - \frac{1}{4^2} \right);$$

$$\text{II. } \frac{w}{h} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right); \quad \frac{w}{h} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right); \quad \frac{w}{h} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right);$$

$$\text{III. } \frac{w}{h} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right); \quad \frac{w}{h} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right); \quad \frac{w}{h} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{6^2} \right).$$

式中之 $\frac{w}{h}$ ，爲一常數，曰勒德堡常數，通常以 R 代之，其值爲 3.29×10^{15} 。
Rydberg constant

§ 602. 景線系.

應用上節所述波耳之假說，可以造成各種元素之原子模型，用之解釋種種現象，極爲簡便。其所能解釋之各種現象之

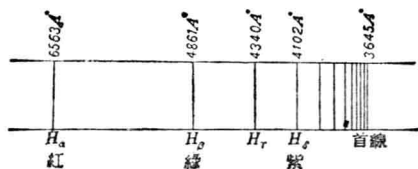


圖 619 氫景線系.

中，以景線系最爲著名，如圖 619 所示，即其一例。此圖所表者，爲氫之輝線景，成一系統，其波長愈小者，集合愈密，至其首線，則在紫外部。關於此一系之輝線，其相當之振數 ν ，可用下式表出之，即

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{s^2} \right), \quad s = 3, 4, 5, 6.$$

是曰巴爾馬系列，與前節所舉之例 II，完全相同。

Balmer series

又氫景中之紫外部，亦有一列之線景，其振數 ν 可用下式表出：

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{s^2} \right), \quad s = 2, 3, 4.$$

是日來曼系列，與此相當之波長，則爲 1216 \AA ， 1026 \AA ， 973 \AA ，與前節
Lyman series
所舉之例 I，完全相符。

又紅外部亦有一列之景線，其振數 ν 可用下式表出，即

$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{s^2} \right), \quad s = 4, 5.$$

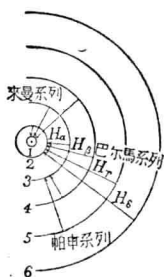
是日帕申系列，與此相當之波長則爲 $18,751 \text{ \AA}$ 及 $12,818 \text{ \AA}$ ，與前節
Paschen series
所舉之例 III，完全相符。

總括上述三種系列，可用同一之公式表出之，即

$$\nu = R \left\{ \frac{1}{n^2} - \frac{1}{s^2} \right\}.$$

如 $n = 1$ ，而 $s = 2, 3, 4$ ，則成來曼系列；如 $n = 2$ ，而 $s = 3, 4, 5, 6$ ，則成
巴爾馬系列，如 $n = 3$ ，而 $s = 4, 5$ ，則成帕申系列。即原在第二、第三

及第四軌道上之電子，復返於第一軌道時，所發出之輻射線爲來曼系列；原在第三、第四、第五及第六軌道上之電子，復返於第二軌道上時，所發出之輻射線爲巴爾馬系列；原在第四及第五軌道上之電子，復返於第三軌道上時，所發出之輻射線，爲帕申系列。其關係如圖 620。



以上係就氫原子而言，其原子序數爲 1，其
圖 620. 系列與軌道。陽核之電荷爲 $+e$ ，周圍有一電子，質量等於 m 。

輕氣之次爲氦，其原子序數爲 2，陽核之電荷爲 $+2e$ ，質量等於氫之陽核之質量之 4 倍，周圍有 2 電子。如此氦原子失去一個電子，成爲單價陽離子時，即有一個電子環繞於電荷爲 $2e$ 之陽核而轉，其狀況與氫原子，完全相似。命 ν 表此時發出之景線之振數，則有

$$\nu = 4R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{s^2} \right)$$

之關係。如 $n = 3$ 而 $s = 4, 5, 6, \dots$ 則成否勒系列。如 $n = 4$ ，而
Fowler series
 $s = 5, 6, 7, \dots$ ，則成爲畢克靈系列。
Pickering series

氦之次爲鋰，其原子失去兩個電子，成爲二價陽離子時，其所發

出之輻射線之振數 ν , 可用下式表出之, 即

$$\nu = 9R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{s^2} \right).$$

餘可類推。

§ 603. 原子內電子之排列。

據波耳之理論, 推得原子內電子之排列, 以表 69 所示者為最穩定, 其括弧中之數字係由內而外順次表出各軌道上之電子數。凡在原子內之電子, 可分為兩種。一種在外者, 結合較鬆, 如受熱, 電及

表 69. 電子之排列。

列 區	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	He (2)	Li (2,1)	Be (2,2)	B (2,3)	C (2,4)	N (2,5)	O (2,6)	F (2,7)	
2	Ne (2,8)	Na (2,8,1)	Mg (2,8,2)	Al (2,8,3)	Si (2,8,4)	P (2,8,5)	S (2,8,6)	Cl (2,8,7)	
3	A (2,8,8)	K (2,8,8,1)	Ca (2,8,8,2)	Sc (2,8,8,3)	Ti (2,8,8,4)	V (2,8,8,5)	Cr (2,8,8,6)	Mn (2,8,8,7)	

化學反應, 時有增減, 因之成為離子。如是而生之電子數變化, 對於原子之基本性質, 不生影響, 僅原子價變更而已。屬於此種之電子, 曰價電子。其他一種在於陽核內部, 結合異常堅牢, 任何物理或化學方法, 均不足以使其脫離原子範圍, 除受放射性作用, 自行崩壞而外, 永遠與其原子團結成為一體。

§ 604. X線景。

X線景通常與元素之化學性質無關, 而為其原子的性質。按X線之振數 ν , 遠在通常光線以上, 由量子論, 其關係應為

$$h\nu = w_s - w_n.$$

可知非有絕大之能之變化時, 不足以勵發之。由此推想, 不難得知引起此項變化者, 應在於原子之最內部。

各式之 X 線中,以 K 式之透徹物質之力,大於 L 。換言之,即 K 較 L 為硬。同樣, L 又較 M 為硬。即同在一 K 式之中, K_{γ} 線又較 K_{β} 為硬, K_{β} 又較 K_{α} 為硬。故放射 K_{γ} 線時,能之變化最大。故知發生 K 式 X 線之電子集團,與陽核之距離最近; L 式者次之, M 式又次之。此等電子集團之軌道,即名曰 K 環, L 環, M 環, 及 N 環等,如圖 621 所示,

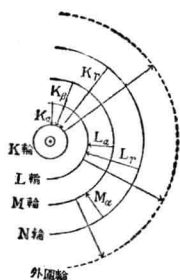


圖 621. X 線景。

更在其外之電子,則曰外圍環。如欲勵發 K 式之 X 線,須有自外而來之電子,或 X 線之投射,使 K 環上之一電子,被逐而出於外圍環上,然後由 L 環, M 環上之其他電子,歸來以補其缺。如係由 L 歸來者,則發生 K_{α} 線;如係由 M 歸來者,則發生 K_{β} 線,同樣由 N 歸來者,則發生 K_{γ} 線。至其硬度,則由能之變化之大小,即按照 K_{γ} , K_{β} , K_{α} 之次序決定之。但與 K 環愈接近者,其歸來之機會愈多,故其強度,則當由 K_{α}

K_{β} 及 K_{γ} 之順序決定,又關於勵發 L 式線時,亦同,如圖 621 所示。

§ 605. 電子軌道之概觀及各元素原子之構造。

設有一橢圓,其長半徑為 a , 通過其焦點引長半徑之垂線與橢圓周相遇命其長為 p , 則 p 恆小於 a , 且 p 愈長,橢圓之形狀愈與圓接近;愈短橢圓愈形細長。故由 p 之值,可以決定橢圓之形狀。

據上述各項研究,可以推知各種元素之原子,其構造狀況及其電子之軌道。茲按照原子序數分別述之如次:

(1) 氫: 陽核周圍有一電子遠之而轉,其所取之定常軌道,可由橢圓之大小決定之。屬於第一羣者,其 $p = a$, 即成為圓形,此時之軌道以 1_1 表之。層於第二羣者,橢圓略大,此時之 p 有二,其一與 a 相等,約為 2.20×10^{-8} 厘米,為圓;其二等於 $\frac{1}{2^2} a$ 即約等於 $\frac{1}{4} \times 2.20 \times 10^{-8}$

即 0.55×10^{-8} 浬，此兩軌道以 2_2 及 2_1 表之；屬於第三羣者更大，其 p 有三，一為 $p = a = 4.95 \times 10^{-8}$ 浬之圓，其餘兩種均為橢圓，一為 $\frac{2^2}{3^2} a$ 即 2.20×10^{-8} 浬，一為 $\frac{1}{3^2} a$ 即 0.55×10^{-8} 浬，順次以 3_3 , 3_2 , 及 3_1 表之。其餘倣此。

此等各軌道之概觀，如圖 622。

(2) 氮(原子序數 2): 陽核周圍有一電子。試先假定其陽核近傍，僅有一個電子存在，此時其定常軌道在標準狀態

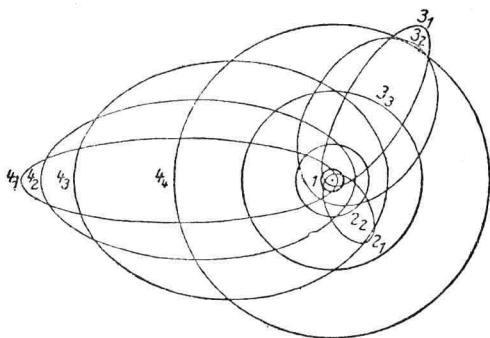


圖 622 電子軌道之概觀。

時，當取 1_1 之軌道，雖與氫相似，但因氮之陽核之電荷，二倍於氫核，故氮之電子軌道半徑，僅氫之電子軌道半徑之半，即約等於 0.28×10^{-8} 浬，與氫之標準狀態之軌道不同。其次再加上第二之電子，據波耳理論，此第二電子之軌道，仍為 1_1 ，不過兩軌道不在同一平面上，而成 120° 之傾斜，如對面插圖。如是構造，異常堅牢，絕不容易破壞，氮元素不易與其他各元素化合，即由於此。

以下次第而及於原子序數較多之元素，周圍電子數，亦隨之次第增加。但其最初之第一及第二兩電子，在任何原子內，均與鋰原子內之構造相同。

(3) 鋰(原子序數 3): 陽核周圍有三電子，其第一及第二之電子，各在一 1_1 軌道，互作 120° 之傾斜。但此時之 1_1 軌道半徑，等於氫之 1_1 軌道半徑之 $\frac{1}{3}$ 。第三電子之軌道為 2_1 ，與原子脫離較易，故鋰頗易將此一電子授與他原子後，其自身化為陽離子，成為陽性之元素。

以下原子序數愈大，所有之 $1_1, 2_1, 3_1$, 等之軌道，愈行縮小，例如鉛

之原子序數爲82,故鉛之 1_1 軌道半徑應等於氫之 1_1 軌道半徑之 $\frac{1}{82}$ 。其餘各軌道,亦復如是,爲簡便計,不再逐條申明。

(4)鉍: 鉍之最初三電子排列同鋰,其第四之電子則在 2_1 之軌道,故此原子之 2_1 軌道上,共有二電子。此兩電子均易脫離其原子,故成爲二價之陽離子,但其脫離不如鋰之容易,故其陽性不及鋰強。

(5)硼: 硼之第四電子爲止之排列與鉍同,其第五電子似在於 2_2 之軌道上。

(6)碳 \rightarrow (9)氮: 準上類推。

(10)氦: 此元素亦與鉍同,不與其他元素化合,卽爲不活潑元素,故其構造異常堅牢。卽 1_1 有二電子, 2_1 有二電子, 2_2 有四電子,在對稱之位置,故其組織極爲穩定。

由是可知,自氫起至氦上,告一段落,其次又自鋰起至氖止,又告一段落。每一段落,是爲一周期,順次稱之曰第一周期及第二周期。

(11)鈉 \rightarrow (18)氬: 鈉之前十個電子之組織,與氖同,其第十一電子,在於 3_1 之軌道上,容易脫離,故此元素帶陽性頗強,與鋰相同。以下遞次經過(12)鎂,(13)鋁等而至於(18)之氬,完成第三周期。氬之構造係在 1_1 有二電子, 2_1 有四電子, 2_2 有四電子, 3_1 有四電子, 3_2 有四電子。但 3_3 上無電子存在,故由此着想,似覺尙有未妥。

(19)鉀 \rightarrow (36)氬: 於氬之構造之上,又加第十九之電子於 4_1 之軌道上,卽成鉀。此新加之一電子,與在鋰及鈉之最外之電子作用相同。由此更經(20)鈣,(21)鎳等而至於(36)氬,完成第四周期。

(27)銣 \rightarrow (54)氙: 成爲第五周期。

(55)鐳 \rightarrow (86)氬: 成爲第六周期。

(87)以下成爲第七周期,如表70所示。又各軌道之大略情形如對面插圖。每一周期完結之原子,構造均極穩定,成爲不活潑氣體。

表 70. 各軌道上之電子數。

周 期	原 子 序 數	元 素	n_k 軌 道 上 電 子 之 數													
			1 ₁	2 ₁ 2 ₂	3 ₁ 3 ₂ 3 ₃	4 ₁ 4 ₂ 4 ₃ 4 ₄	5 ₁ 5 ₂ 5 ₃ 5 ₄ 5 ₅	6 ₁ 6 ₂ 6 ₃ 6 ₄ 6 ₅ 6 ₆	7 ₁ 7 ₂							
第 一 周 期	1	H	1													
	2	He	2													
第 二 周 期	3	Li	2	1												
	4	Be	2	2												
	5	B	2	2(1)												
第 三 周 期	10	Ne	2	4 4												
	11	Na	2	4 4	1											
	12	Mg	2	4 4	2											
	13	Al	2	4 4	2 1											
第 四 周 期	18	A	2	4 4	4 4											
	19	K	2	4 4	4 4	1										
	20	Ca	2	4 4	4 4	2										
	21	Sc	2	4 4	4 4 1	(2)										
	22	Ti	2	4 4	4 4 2	(2)										
	29	Cu	2	4 4	6 6 6	1										
	30	Zn	2	4 4	6 6 6	2										
第 五 周 期	31	Ca	2	4 4	6 6 6	2 1										
	36	Kr	2	4 4	6 6 6	4 4										
	37	Rb	2	4 4	6 6 6	4 4	1									
	38	Sr	2	4 4	6 6 6	4 4	2									
	39	Y	2	4 4	6 6 6	4 4 1	(2)									
	40	Zr	2	4 4	6 6 6	4 4 2	(2)									
第 六 周 期	47	Ag	2	4 4	6 6 6	6 6 6	1									
	48	Cd	2	4 4	6 6 6	6 6 6	2									
	49	In	2	4 4	6 6 6	6 6 6	2 1									
	54	Xe	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4									
	55	Cs	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	1								
第 七 周 期	56	Ba	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4	2								
	57	La	2	4 4	6 6 6	6 6 6	4 4 1	(2)								
	58	Ce	2	4 4	6 6 6	6 6 6 1	4 4 1	(2)								
	59	Pr	2	4 4	6 6 6	6 6 6 2	4 4 1	(2)								
	71	Lu	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	4 4 1	(2)								
	72	Hf	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	4 4 2	(2)								
	79	Au	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	1								
	80	Hg	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2								
第 八 周 期	81	Tl	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	2 1								
	86	Rn	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4								
	87	-	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4	1							
	88	Ra	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4	2							
第 九 周 期	89	Ac	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4 1	(2)							
	90	Th	2	4 4	6 6 6	8 8 8 8	6 6 6	4 4 2	(2)							

綜合以上之研究，歸納之而得一新周期表如表 71。在同一行之各元素，屬於同一之周期，用橫線及斜線連結者，其物理性質或化學性質，均相類似。

表 71. 波耳之周期表。

第一周期	第二周期	第三周期	第四周期	第五周期	第六周期	第七周期
					55 Cs	87 —
					56 Ba	88 Ra
					57 La	89 Ac
					58 Ce	90 Th
					59 Pr	91 Pa
					60 Nd	92 U
					61 —	
					62 Sa	
					63 Eu	
					64 Gd	
					65 Tb	
					66 Dy	
					67 Ho	
					68 Er	
					69 Tu	
					70 Yb	
					71 Lu	
					72 Hf	
					73 Ta	
					74 W	
					75 —	
					76 Os	
					77 Ir	
					78 Pt	
					79 Au	
					80 Hg	
					81 Tl	
					82 Pb	
					83 Bi	
					84 Po	
					85 —	
					86 Rn	
1 H	3 Li	11 Na	19 K	37 Rb		
2 He	4 Be	12 Mg	20 Ca	38 Sr		
	5 B	13 Al	21 Sc	39 Y		
	6 C	14 Si	22 Ti	40 Zr		
	7 N	15 P	23 V	41 Nb		
	8 O	16 S	24 Cr	42 Mo		
	9 F	17 Cl	25 Mn	43 —		
	10 Ne	18 A	26 Fe	44 Ru		
			27 Co	45 Rh		
			28 Ni	46 Pd		
			29 Cu	47 Ag		
			30 Zn	48 Cd		
			31 Ga	49 In		
			32 Ge	50 Sn		
			33 As	51 Sb		
			34 Se	52 Te		
			35 Br	53 I		
			36 Kr	54 Xe		

第十四章 相對性原理

§ 606. 邁克爾遜摩黎之實驗。

歷來對於傳達光波及電波之能媒，均認為絕對靜止，而不移動。果爾，則在能媒中運行之地球，對於沿公轉方向發來之光，及沿其垂直方向發來之光，應有差別存在。如圖 623，命 MQ 表地球公轉之方向， M 表光源， Q 處立一反射之平鏡， l 表 M 與 Q 之距離。當光由 M 發出，向 Q 進行之中， Q 應隨同地球，沿同一方向移動。如命 c 表光速， v 表地球之公轉速度，則光由 M 行至 Q 所須之時間，應為 $\frac{l}{c-v}$ 。再由 Q 反射而回，達於 M ，所須之時間，應為 $\frac{l}{c+v}$ 。如命 t_1 表往返所歷之時間，則得



圖 623.

$$t_1 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2cl}{c^2 - v^2}.$$

再就與公轉垂直之方向而言，如圖 624，命 M 表光源， P 表平鏡 $M'P$ 之方向與公轉方向垂直， l 表 $M'P$ 之距離。當光由 M 射出，向 P 進行之中， P 應隨同地球，沿 $M'P$ 之垂直方向移動。仍命 c 表光速， v 表地球公轉速度， l 表 P 與 M' 之距離。更命光由 M 射出，經 P 反射，復返於 M 時， M 已隨同地球沿 MM'' 之方向進行達於 M'' 點，故得 $PM' : MM' = c : v$ ，即 $PM : l = c : \sqrt{c^2 - v^2}$ ，由此遂得 $PM = \frac{cl}{\sqrt{c^2 - v^2}}$ 。故若命 t_2 表光由 M 射出經 P 反射後，復回至 M'' 為止，其間共歷之時間，則得

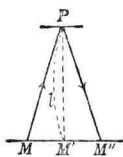


圖 624.

$$t_2 = \frac{2PM}{c} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

由是可知 t_1 及 t_2 ，各不相同。試用圖 625 之裝置檢查之。由

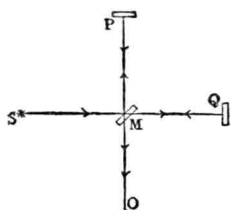


圖 625. 邁克爾遜摩黎之實驗。

同一光源 S 發出之光，經平面玻璃板 M ，分而為二，一部分透過 M 運行射至平鏡 Q ，經 Q 反射復返於 M ，經 M 反射後，沿 MO 方向而入於觀測者之眼。他一部分即在 M 受反射而達於 P ，在 P 又受反射復返於 M ，由 M 透過，直至於 O 。而 MP 之方向，恰與地球公轉方向垂直， MQ 之方向則與公轉之方向平行。此實驗曰邁克爾遜摩黎之實驗，Michelson-Morley's experiment 果如上述，經此兩方向往復一度之光，所歷之時間，應各不相同。如使 $MP = MQ$ ，則此兩光在 O 點復合為一時，應生相當之相差，結果必將成為干涉現象。經邁克爾遜摩黎再三實驗之結果，完全不見干涉現象，換言之，即 t_1 與 t_2 完全相同。此種事實，與能媒絕對靜止之說，顯然衝突。

羅倫徹為避免上述之衝突計，特提出一種假說，以為一切物體當其以速度 v 運動時，恆在其運動之方向上，發生 $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} : 1$ 之收縮，是為羅倫徹收縮。Lorentz contraction 如命 l' 表 PM' ，即靜止時運動方向之長， l 表其運動時之長，則因受羅倫徹收縮之結果，

$$l = l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

將此關係代入上求之 t_1 及 t_2 之式中，其結果即成為

$$t_1 = \frac{2l'}{\sqrt{c^2 - v^2}} = t_2.$$

與邁克爾遜摩黎之實驗，恰相一致。

§ 607. 特殊相對性原理。

上述之羅倫徹收縮，雖可勉圓其說，究不免有牽強之嫌。於是途有愛因斯坦根據兩種前提，發展而成一種新理論，其兩前提如下：Einstein postulate

(I) 在地球上所發見之反作用定律，對於其他恆星界而與地球作相對等速運動者，均可完全適用。且不僅反作用定律一種而已

即其他一切自然現象，莫不皆然。換言之，即凡有相對等速運動之體系，其表同一之物理現象，均可用同一形式之定律。如是之關係，

曰相對性原理之前提。

postulate of relativity

(II) 在地球上觀測光在真空中進行之速度，不問光色如何，均取同一之值，通常以 c 表之。此定律對於其他體系而與地球作相對等速運動者，亦完全適用，可由邁克爾遜摩黎之實驗證明之。即凡有相對等速運動之體系，無論光源在於何者之上，觀測其在真空中傳播之速度，其值均等於 c 。此關係曰光速度不變之前提。

postulate of constancy of velocity of light

根據上述兩種前提發展而成之理論，曰特殊相對性原理。special theory of relativity 茲將其較為重要之結果，略舉數端如下：

(1) 由靜止系觀測運動系上之 1 秒，當較在靜止系上之 1 秒略久，此兩者之比，等於 $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ 。

(2) 由靜止系觀測運動系上之 1 裡，如其方向與運動方向一致，則其結果當較在靜止系上之 1 裡略短，兩者之比為 $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} : 1$ ，即前述之羅倫徹收縮。

(3) 如有甲乙兩系，甲以速度 v ，乙以速度 w 互相接近時，在牛頓力學上，其相對速度 V ，應為 $v + w$ ，但由(1)及(2)之結果推之，則為

$$V = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}$$

如 w 恰等於光速，則成 $V = c$ 。

此即前述之光速度不變之前提。

(4) 同一物體之運動，自靜止系觀測而得之速度，既與自運動系觀測者不同，而能常住定律，又不因體系之動靜發生差別。然則同一物體之質量，當隨其觀測者之體系如何，方能決定之矣，換言之，靜止系之質量與運動系上之質量，各不相同。例如在靜止系上質量等於 m_0 之物體，如移至運動系上，再由靜止系觀測之，其質量當增加

成爲 $m_0 \div \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ 。即在舊力學上，物體所有之質量，原認爲一定不變者，在相對性原理上，則應與其速度共同增大。按通常之物體，其速度之值，均不甚大，故 $\frac{v^2}{c^2}$ 可以從略不計。但由放射質發出之 β 線，其速度在於 6×10^9 每秒厘米至 2.94×10^{10} 每秒厘米之間，與光速頗相近，故其比荷 $\frac{e}{m}$ 之值，決不一定，隨其速度而變。

(5) 物體運動時，其質量及能共同增加，如命 ΔE 表能之增加； Δm 表質量之增加，則此兩者之間，恆成立下列之關係：

$$\Delta E = c^2 \Delta m.$$

當物體靜止時，此項動能及過剩之質量，同時消滅。由能常住定律，知一物體之能，所謂消滅，不過移至他一物體而已，其過剩之質量，亦必同時移至其他之物體。例如運動中之物體 A ，因與靜止物體 B 衝突之結果， A 成爲靜止而 B 則開始運動。前此 A 所有之動能及過剩質量，當然移至 B 上。

據上述結果，所謂物質，所謂能，均屬於同一之基本實體，僅其名稱不同而已。且 1 克之質量與 $c^2 = 9 \times 10^{20}$ 厄之能相等。此項質能當量與表熱單位及能單位間之關係之熱功當量，恰相對應。結果物質常住定律，與能常住定律，亦合而爲一。

§ 608. 四次宇宙。

在一直線上之一點，其位置由此直線上之一定點之距離而定。在一平面內之一點，其位置由平面上互相垂直之兩定直線之距離而定。空間中之一點，其位置由互相垂直相交之三直線之距離而定。按此次序而有一次空間，二次空間及三次空間之稱。但某一時刻之某一點，在次一時刻，已移至他處。故欲確定一點之位置，除上述之三距離而外，尚須加入時間之一座標，共成四個要素。將此第四要素之時間，認爲與長同等，由是構成一四次空間，即可將各時

four dimensional space

刻各點之位置，完全表出，是爲閔可夫斯奇之宇宙。在宇宙之一點，
Minkowski world
 曰宇宙點，其所表示者，爲一事象。宇宙點之軌跡，曰宇宙線。宇宙
world point event world line
 線之一微小部分，表連續兩事象間之間隔，曰事間。利用此法，可由
event interval
 幾何學上之推理，求得特殊相對性原理之各種概念。換言之，即特
 殊相對性原理，均不外閔可夫斯奇之宇宙中，由幾何學性質而成之
 自然的結果而已，其法既簡又極淺明。

§ 609. 普遍相對性原理。

前述之特殊相對性原理，係就互作相對均速運動之兩體系而
 言，照此推廣之，對於相互作加速運動之兩體系，亦有同樣之理論成
 立，是爲普遍相對性原理。此項理論純由數理推演而成，其重要之
general theory of relativity
 結論，略舉數種如下：

(1)水星近日點之移動：根據舊力學，假定太陽周圍僅有一行
 星遠之而轉，則其軌道應爲一橢圓，太陽即在此橢圓之一焦點。事
 實上，行星不止一個，太陽本身亦自有其運動，故行星之軌道，不能不
 受此等影響，略爲移動。若能將此類原因除去，似已別無其他原因，
 可使橢圓軌道變動。但一方面，據實測報告，則水星近日點，每百年
perihelion of mercury
 間，約移動 43 秒之角度。如由普遍相對性原理推論之，此項移動，確
 爲其自然之結果。

(2)重力場內光線之偏向：光線在通常之重力場內，均沿一直
 線進行，並不彎曲。但若重力場之強度頗大，例如在太陽等類質量
 極大之物體近傍通過時，其所起之偏向，極易測見。利用太陽之全
 蝕，將其背面之恆星羣之相片照下，持與太陽原在此位置時之相片，
 互相比較，即可測出光線偏向之程度。據此項實測，知其偏向應爲
 1.75，與由普遍相對性原理推算而得者，恰相吻合。

(3)景線之偏向：原子所吸收之光，或由原子輻射而出之光，其

振數與原子所存在之重力場位置有關。故由太陽或恆星而來之光所生之景線，與地球上同元素所生之景線，位置不能全同。由太陽上而來者，或由恆星而來者，應略微移向紅色之一端。據實測結果，與由普遍相對性原理算出者，亦復相合。

§ 610. 統一的場論。

普遍相對性原理認引力場為四次空間之結構上的性質，而電力場及磁力場則為獨立之結構。此兩者雖有相互之關聯，但其根本則絕不相同。最近經愛因斯坦之研究，竟將此兩者融合為一，是為統一的場論。由一種新體系之幾何學出發，推出引力場與電磁場，根本原為一體，僅表現之方法各不相同而已。

unitary field theory