

萬 有 文 庫

第一集一千種

王 雲 五 主 編

放 射

程 瀛 章 著

商 務 印 書 館 發 行

射 放

著章瀛程

書 叢 小 科 百

射 放

著 章 瀛 程

上海寶山路
商務印書館 發行兼印刷者

上海及各地
商務印書館 發行所

中華民國十九年四月初版

此書有著作權標記必究

The Complete Library

Edited by

Y. W. WONG

RADIOACTIVITY

By

CHENG YING CHANG

THE COMMERCIAL PRESS, LTD.

Shanghai, China

1930

All Rights Reserved

放射

目錄 附插圖六

第一章	總論	一
第二章	放射元素	一三
第三章	氣體的電性	二二
第四章	放射性測驗法	三一
第五章	三種放射線	三四
第六章	銦的性質	四〇
第七章	放射的原理	四四
第八章	鉛的問題	四七

第九章	放射的能力	五三
第十章	結論	五五
附錄	放射元素及其常數表	五九

放射

第一章 總論

前世紀的末葉，因為有了輻射現象的發見；科學史也就大放光采。這三十幾年內很可驚的科學成績，多半是直接或間接和輻射相關的。我們不但對於尋常日光輻射的智識增加了許多；就是從來沒有見過的奇怪射線，也被科學家發見了。這幾種射線發生了許多新的問題給我們研究。從前認為無法可想的科學問題，現在覺得沒有什麼價值了。並且還可以用實驗方法來證明他們是很簡單的。至於本來所有的基礎呢（就是近代複雜科學的祖宗）也並沒有受什麼結構的損傷；但是已經換了一個更深切的更重大的。當初那個過渡時代，各方面同時並進，很平安的經過了。除了幾個真正研究的學者以外；一般人們到了現在，纔知道輻射學在這二十多年內的供獻哩。

後來添了叫作銽的那個新元素。等到他的應用之處漸漸發明了，這個像夜明珠的一件寶貝，就受了全世界的注意。化學家的原子從此不算物之最小質點了。至於原子內部的組織，也入了實驗科學的範圍。我們這本小冊子裏的記載，是由一八九六年法國物理學家柏克勒爾（Becquerel）的放射發見起的。柏氏報告說，有幾種物質可以放射一種特殊光線。這種放射，是自然發生的，是永久不變的。能夠發生這種放射的物質叫作放射性物質。這個發見，和從前克魯克司（Crookes）樂琴（Curie）輩所發見的放射現象也是相關的。所以我們也得把這類相關問題照發見的先後，大略講講那末對於放射學過去的歷史和他現在的地位，才能清楚了。

輻射兩個字終究怎樣講呢？物質自身的動靜，能夠於極短的時間內，影響他遠近的四周，叫作輻射。輻射能經過真空以後並不改變。有時經過別的物质後還可以照常進行。這條輻射的界說早就有了。當時專指日光輻射而言。輻射的原因和結果差不多全知道了。但是他的關鍵卻沒有人知道。也沒有人想到這個問題。牛頓是看出這個問題的難處的第一人。他覺得光浪傳播是很奇怪的。甲體和乙體並不接觸，怎麼甲的動靜，可以影響到乙呢？後來牛頓免強解釋這層難關道：光自己是

很小的質點。這個質點論，在當時實在是唯一的妙解，後來卻並沒有佔什麼勢力。又因為不能解釋光之干涉現象，所以不久就拋棄了。但是對於我們現在所要講的，卻很有關係。照牛頓的意思，光的傳播由於光源擺動時發出一種極小質點。這種質點行動有無窮高的速度，向四周成直線出發。後來科學家覺得物質之外，還有別的東西也可以運動。他們就假設了這個普遍以太，充滿萬物，作傳播輻射的媒介。這就叫做波浪說的光學，代替了質點論的光學。照波浪說講去，光波的傳播，有以太作介紹物；因為以太只有橫的擺動，所以無論什麼光的速度總是一樣。但是波的長短和每分鐘的擺動次數不必盡同。長波的擺動慢，短波的擺動快，相互成比。從極長的紅外線，到我們能看見的顏色分光鏡，再到極短的紫外線，都很容易被吸收的；所以他們都可以當實驗的資料。

幾十年前，這個波浪說在馬克斯維耳（4）手裏擴充了好些。原來波浪說的結果，給了以太一個運動能力；所以物理學家就研究以太運動終究服從那條運動的定律。有一派，內中最著名的代表是克爾文（5）爵士，想拿尋常力學來解釋以太的運動。照他們的意思，以太就應該有物的性質，像彈性和壓縮性之類。同時用在以太上的力，就是尋常的牽引罷了。新派的法拉第的電磁感應

當個總關鍵。從那裏找出以太裏面的牽引和發生光波的狀況。這派的鍵將就是馬克斯維耳。他宣布他的電磁波傳光論道：一根光線的由來，因為一些電的橫列擺動於以太裏面，發生了電磁感應的波然後起的。這個見解後來證實了。因為電磁感應波，在空間的速度，果然同尋常光的速度一樣。但是一般科學家直等到一八八八年，才算馬氏的見解是一個可以講得過去的學說。在那一年內，德國赫芝反復放來頓瓶所感的電，發明一種電磁波。這種波有好幾尺長的。他們雖然比尋常光波長幾千萬倍，但是他們的速度還是一樣。並且還服從同樣的屈折，反射，分極等各種定律。波的長短不過因為所用儀器的長短大小不同罷了。若我們要製造像尋常光波那樣短的波呢，我們須得用物質的分子原子來當我們的儀器。所以我們到了這個地步，可以說：光波的起源，就是原子或分子裏邊電的顫動或擺動。這擺動須得有一定的速度，去配那所發生的光波的長短。

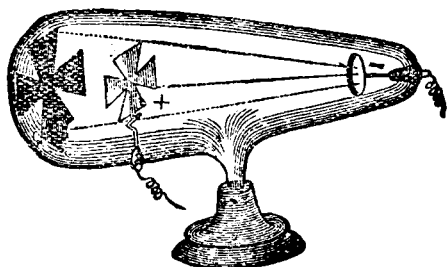
到了一八九五年的時候，我們的輻射智識有了波浪說作根基，再加上了馬克斯維耳的電磁論，就覺得很能夠應用於當時所曉得的各種輻射，從很短的紫外波到很長的赫芝波（現在用於無線電的。）不過我們應該認明波浪說固然理由充足；但是波浪輻射，斷不是世間唯一的輻射。牛

頓所講的質點論在尋常光學也許不及波浪說講得圓通；但是克魯克司所發見的陰極射，當然是

第

一

圖



陰極射儀器

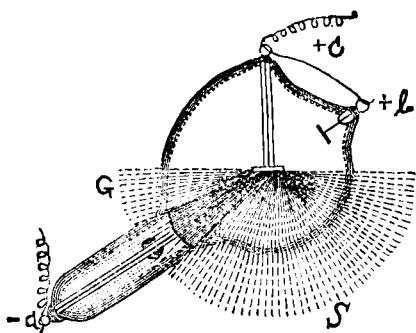
風車也能旋轉。這種光線碰着磁場就被磁場屈折。折向的度數與磁場的強弱成比例。在電場裏也是如此。並且向陽極方面屈折。因為陰極射自己是陰的。克魯克司叫這種光線第四種物體。意思就

質點輻射。所以我們至少有兩種不同的輻射：（一）「以太」類動傳遞的。（二）由質點連成的。我們現在要注意的，就是這第二類的輻射。克魯克司在四十年前已經發見稀薄氣體可以傳電的現象。他用金屬電極鑲入兩端的玻筒一個。兩極接到電源，再把裏面的空氣漸漸抽出。將近抽完的時候，玻筒裏面就傳起電來了。有光線從陰極方面直射出來，玻筒全體也都亮了。這種陰極射有特殊的性質。我們現在祇能大略講講。陰極射撞着的地方，發生高熱。若聚在一點，那末薄片的金子也可以融解。中間若有物件擋住（看圖），那末對面就有影子。若裝置一個小風車，那

是固體液體氣體之外加了輻射體。他說陰極射的質點，恐怕就是帶電的原子。他們在電場裏有極高的速度和極大的動能。克氏的見解，當初很少人注意，現在差不多大家都以為對的。別的暫且不講，我們知道陰極射是一種質點式輻射，是初次發見的。

在一八九五年德國物理家 欒琴發見了愛克司射線。因為尊崇學者起見，有時也叫作欒琴射線。克魯克司玻筒已經用了二十多年了。不過沒有人找出什麼新的現象。一直到了欒琴手裏，才有這種新輻射發見。愛克司線和陰極射不同，可以穿過玻筒到外面來；不過在外面是看不見的。在裏面可以注射到幾種特殊物體如精酸白金鉬，使他間接放光。如此就變成看得見的光線了。欒琴射線也能使照相片顯影像日光一般。他的第三個特性，就是經過氣體時，這部分氣體即刻能傳少許電流；因為已經被欒琴線感成遊電（遊子）了。這個特性叫作電離。有幫助氣體暫時變成導電體的能力。我們利用這三種特性，就可以研究看不見的愛克司輻射了。愛克司輻射怎樣發生的呢？陰極射轟擊路上阻礙的東西；那被攻擊的物體，就會發生愛克司線。若是中間沒有什麼去阻止陰極射的大道，那末，玻筒受了狙擊，也會發生愛克司光線的。但是最堅硬的愛克司輻射，須用重金屬做成

第 二 圖



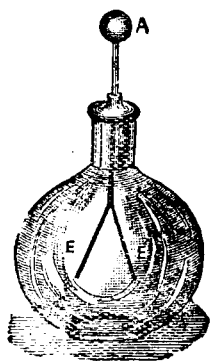
倫 得 根 輻 射

小圓片受陰極射的攻擊而後發生的。白金融點很高，用他最合宜。若陰極是凹的，可把陰極射聚成一個焦點注射在一個斜置的『對陰極』(S)上。那末，愛克司線反射過來，半球都照到了。『對陰極』就是愛克司輻射的泉源。有時連做在陽極上；不過『對陰極』和陽極卻沒有關係的。請看第

二圖，有一個凹的陰極。陰極射的焦點在F，切『對陰極』。愛克司輻射成半球形，GS都受着了。愛克司輻射像光線一樣是以太波的一種。但是這種波太短；所以到了現在還不能看出他屈折反射幾種性質。愛克司光線比陰極射更堅固，注射性更加利害。若筒中空氣抽得愈淨，那末所發的輻射愈堅。若不抽淨，則所發的輻射很軟，很容易被吸收的。在空氣抽淨的筒內，陰陽極兩端相差的電壓一定要很高。電壓高則陰極射的速度也高。陰極射速度高，則間接所發生的愛克司線速度也高。並且同時也就很堅固了。

講到穿透物體的能力，愛克司輻射和陰極射並無什麼根本不同處；不過有些大小輕重罷了。陰極射的穿透力是是有限的。尋常所謂透光不透光是根據我們天天經驗的淺近事實。這種名詞和他們的界說，在放射方面是不適用的。新輻射對於重量相等的物體穿透也相等的。反過來說，重量相等的物質，對於新輻射穿透性是相同的。若用厚薄相等的物質來比較，那末輕的容易穿過。密度和穿透性就成了反比例。至於別的性质完全沒有關係。這海居已經被勒拿（N）氏實驗證明了。對於尋常光線，卻大不相同。玻璃，石鹽，大多數的液體氣體，和種種結晶體，都算透光的。其餘物體像金屬之類，雖用薄片還是不透光。這種透光體卻都不是導電體；但是不透光的金屬，倒是很好的導電體。這個現象很應該注意的。還有一種東西長的光波可以透過；但是短的光波就不能過去了。美國伍德（W）教授用一種安尼林顏料來試驗他的透光性。這種顏料對於尋常光波不透。紫外波卻可以透過了。還有幾樣化合物如硒和碘化汞銅等有透光和不透光兩種不同物質的存在。不透光的那一種，比較的是導電體。這些事實，表明傳光和傳電彷彿是相關的。但是我們的新輻射對於固體，液體，氣體，導電體，和阻電體一概沒有什麼區別。陰極射是質點射。愛克司線是電磁顫動。但是他

第三圖



金葉電器

們的穿透性差不多是一樣的。他們對於氣體，都有電離性。對於照相片，都能顯影。陰極射在電場磁場內要屈折；但是愛克司線並不如此。陰極射是愛克司線的導火線；對陰極才是愛克司線的泉源。下一年是一八九六。除了勒拿，樂琴幾個人的研究之外，我們又有一個新發見。這就是柏克勒爾的放射現象。當初磅卡累（II）以為愛克司線是無論什麼螢光現象的結果；所以柏氏就拿了許多鈾的化合物來研究他們的螢光性。

柏氏的法子，就把少許鈾化物放在照相片上。照相片已經用不透光的東西包好。鈾化物則攤開向太陽光曬着。因為要使他曬了之後發生螢光。這樣試驗，柏氏果然發見他的照相片受了影響。

若用一塊薄的銅片或鋁片隔在中間，那照相片還是顯影。但是後來柏氏查出在太陽光裏曬的一番手續，完全可以省卻。在黑暗之中，這個現象照樣可以證明。不論什麼鈾化物都是一樣。所以柏氏就覺得他所研究的是一個元素的性質，和螢光沒有什麼關係的。這個新的性質

就叫作放射性。放射和愛克司輻射是差不多的。放射也能感應氣體成遊電。這一層可以用金葉驗電器來證明。驗電器是物理學裏很古的儀器。在放射沒有發見以前，這件儀器看得不甚重要，失寵已經很久了。現在呢，倒又大受歡迎。研究放射的時候，非他老人家出來幫忙不行。

鈾和別的放射元素所發的輻射，將來要在第五章裏報告。我們不妨先把他們來大略講講。這種輻射已經分析開來，知道內中有三樣不同的射線。歐美各國通用三個希臘字母去稱呼這三種光線。就是「阿爾發」「培塔」和「格馬」。但是我們要譯成漢文怎樣說呢？我想那阿爾發輻射是帶陽電的質點，又因為他從原子裏面出來，我們就可以叫他陽原射。根據同樣的理由，培塔輻射可以叫作陰原射。但是格馬輻射並不是質點，又不帶或陰或陽的電，所以叫他中原射。意思就是原子裏面爆出來的中性輻射。陽原射的穿透力極弱，碰着一張薄紙或幾公分的空氣，就不能進行了。陰原射的穿透力比較強一些。他若要穿過薄片的金質或玻璃是很容易的。中原射的穿透力最利害。五六塊銀圓壘起來，還不能完全阻止他的去路。三種輻射的穿透力，都一般和物質的密度成比例。和物質別的性狀卻沒有什麼關係。在放射學裏的位置，要算陽原射最要緊。中原射最不要緊。陰

原射和陰極射相仿。不過陰原射的速度大得多罷了。他影響照像片的能力也最大。但是他只佔全部放射的一小分。刺得福德 (12) 發見陽原射在磁場電場裏也稍被屈折。屈折的方向和陰原射相反。因為所帶的電有正負的不同。陽原射是質點，剛才已經說過。這種質點並不很小，和一個氫氣原子差不多。他的重量比氫氣原子還重。他的速度大約每秒鐘六萬里光景。試驗電離的時候，差不多盡是陽原射的效力。我們有了陰陽兩種質點之後，牛頓的質點論，就實實在在的證明了。這兩種幅射，初發見的時候有人以為波浪式的幅射。後來才知道錯的。真正的波浪幅射，起初以為質點。真正的質點幅射，起初以為波浪。不對的論調，漸漸矯正，這是科學史上常有的事。也是科學進化的常軌呀。

我們既然有了兩種不同的幅射，我們還是不能清清楚楚區別什麼叫作以太波浪什麼叫作質點幅射。恐怕最重要的一點，就是質點幅射帶些陰電或陽電。我們可以用磁場或電場去屈折他們。但是還有一層已經提起過的。就是透光體比較的是阻電體。那末，愛克司幅射和中原射若是像光線一樣，就應該被導電體所吸收，被幾種絕緣體所放過了。但是這却和事實相反。所以愛克司幅

射和中原射還比較的。近於質點輻射。因為有了這許多困難的地方，有幾位科學家就想完全拋棄波浪說。一概認作質點輻射。這樣見解未免太激烈，因為波浪說，在光學裏的優點並沒有完全消滅。況且我們也許有別的方法去解決這個問題。

- ~~~~~
- (1) Becquerel, (2) Crookes, (3) Röntgen, (4) Maxwell, (5) Lord Kelvin, (6) Hertz,
(7) ionization, (8) anticathode, (9) Lenard, (10) Wood, (11) Poincaré, (12) Rutherford,

第二章 放射元素

柏克勒爾發見鈾的放射現象之後，居禮夫人就細細的研究一般元素的放射性。鈾之外，他只驗出一個元素也帶放射性的。這就是釷。居禮夫人把他研究的結果，編作論文提出於巴黎大學的理學院。（斯密特〔1〕）於一八九八年也獨自發見釷的放射性）

鈾釷兩個元素的化合物，若根據電離性（用驗電器去測驗）差不多有相等的放射。若用照相片的顯影法呢，那末鈾就比釷強好幾倍了。這一點不同處，我們現在知道是因為他們的陽原射的密度是很近的。但是釷的陰原射却弱得多哩。

居禮夫人雖然報告當時所知道的元素，除了鈾和釷之外，沒有別的放射性元素；但是他驗得幾種鈾釷的礦石，他們的放射性比鈾釷還強。內中要算瀝青鈾礦〔2〕最利害。這種鈾礦，在當時的奧地利匈牙利出產最多。

居禮夫人用驗電器來測驗放射性，後來還要細講他的結果，用安培（電流單位）去表明。就是打一層六十四平方公分磨細的物質的放射，經過空氣成遊電的結果。夫人再用很精密的定量法子，考驗各種鈾的純粹化合物。這一次的結果，證明鈾化物的放射性和鈾的成分成正比例；但是打約翰喬治省（3）來的礦石雖祇含百分之七十的鈾，他的放射強度却四倍於最強的鈾化物。放射性已經證明是原子的性質，那末，這個例外的強度，恐怕礦石裏含有一種新的放射性元素。居禮夫人抱了這個發見新元素的大希望，就去分解那些瀝青鈾，照尋常分析化學的方法，一步一步的把各種元素的化合物沉澱出來。每一次沉澱後，他就去驗放射性。若真有新元素的存在，那末分析出來的，一定有幾份較強，有幾份較弱了。果然如此，這樣所得的鋇和錒，就帶着放射性。他叫他們『放射性的鋇』和『放射性的錒』。後來才知道內中有兩個新元素，叫作銑和鍇。

銑——發見銑的人物，尋常祇提起居禮夫人一個人。其實畢蒙（4）居禮二人和夫人共同研究這個問題的。這是一八九八年的事。但是當時只有銑的化合物，却没有純粹的銑。試驗所用的都是銑化物，因為放射性是原子的性質，化合物是一樣的。至於純粹的銑，直到了一九一〇年纔用電

解法製成。銑和鋇在週期表內是同族的元素；所以當初打瀝青鈾裏分析出來的釷化鋇，放射很利害的。若把這些帶銑的釷化鋇循序結晶。到末了的時候，剩下來最難溶解的，現極大的放射性。居禮夫人拿了這部分的鋇去交給得馬賽(5)作分光研究。後來漸漸加濃，等到三條鋇線完全不見了，再拿來測驗放射性。唉！打這次的測驗計算，這新元素的放射性至少要比鈾或釷強一百萬倍。若拿一些銑化物來顯影，須費一秒鐘。用同樣重的鈾化物，非好幾個星期不能給同樣的結果。

放射性既然是原子的性質，那末，測驗放射性，就是鑑定放射元素重量的間接妙法。若用狹義的界說，物質除了放射性，祇有重量是原子的性質。別的性質雖也有原子的，但是混合了之後，却没有完全的相加性。不過放射性是幾樣物質的特性，和重量不同，重量是物質的公性。

銑的來源——在礦石裏銑和鈾總不分離的。後來我們會知道鈾是銑的祖父。所以他們的成分比例，也還是一定不易的。尋常鈾礦所含的鈾銑成分太輕。拿來練銑，是很不合算的。有幾種瀝青鈾還好，像約喜姆什太(6)所產的，差不多供給當時所出的銑。後來美國發見很好的礦。所以美國出的銑，也最多了。居禮夫人當時報告說兩噸約喜姆什太礦，祇能給一公分的百分之幾的釷化銑。

提取的方法——這個方法是得皮恩(7)和居禮夫人研究出來的。提取鈾的時候，先把礦石和碳酸鈉烘炙用水浸過。再拿淡硫酸來溶解鈾化物。在不溶解的一部分裏，差不多什麼硫酸化合物都有。這些硫酸化合的東西的放射，要比鈾強四五倍。我們的銦也在裏頭。若把這些和濃的硫酸鈉溶液同煮，那末容易溶解的硫酸鈉就慢慢的洗掉了。不溶解的部分，加入了鹽酸也就溶解了許多。連鍍和鉍都在裏頭；但是硫酸銦和硫酸鉍還是沒有溶解。這樣鍊法，打一噸礦裏可以提出十公斤到二十公斤的硫酸銦和硫酸鉍。大部份自然是硫酸鉍。這些硫酸化合物的放射性，比鈾強六十倍。再拿鹽酸加入使他變成氫化物。再用硫化氫加入，濾過，用氫氣來氫化，然後再用氫氟化銦來使他沉澱；所沉澱的氫氟化化合物的放射性，全是鉍的作用。把溶液加入碳酸鈉，洗過之後，加入鹽酸，鹽酸鈣就沉澱了。剩下的氫化鉍和氫化銦的放射性大約有六十多倍強度。一噸之中可得八公斤。到了這個地步，鍊好的氫化物就離開工廠，搬進實驗室裏去再鍊。在實驗室裏差不多完全用結晶法，一次一次的使氫化銦漸漸濃厚起來，手續是很麻煩的。祁實(8)氏略為更動，他不用氫化物而用溴化物結晶，手續簡單一些。據說八次結晶就可以得到很純粹的溴化銦。銦的化合物，像他同族的

幾個元素一樣，有很好看的火焰。

原子量——居禮夫人用已知重量的釷化銑，加入了硝酸銀，沉澱釷化銀。把釷化銀的重量和釷化銑的重量相比，算出銑的原子量。起初得一三七，和釷的原子量一樣。後來用經過幾次結晶的，有三千五百倍的放射強度的，得一四〇。漸漸精鍊起來。有七千五百倍強度的，得一四五·八。有一百萬倍的放射強度的，得二二五；所以二百二十五在當時就算銑的原子量了。到了一九〇七年，夫人再去鑑定。這一次得二二六·四。後來在一九一一年奧國的罕尼斯密(9)鑑定得二二五·九五。這是再精密的。所以國際原子量委員會就採用二二六·〇作銑的原子量。

銑的放射——銑的放射性質，我們將來還得比較詳細的報告一番。現在先大略講講。他的放射只要幾個公絲的銑，(公絲等於千分之一公分)已經就很利害了，三樣原子輻射，樣樣都有。陽原射穿透力不很強。幾寸空氣就可以阻止他的去路，陽射有燐光，暗中可以看見，一點一點像星球一般。星閃鏡(10)內的現象就是陽原射狙擊硫化鋅沙紙的時候所發生的。銑的高熱度，也是因為爆發陽原射的緣故。陽原射也能分解化合物。含一公分銑的溶液，每天有十立方公分的水被他分

解。銑所發生的陰原射，可以通過一張明信片厚的銅或別的金屬。他也可以把照像片顯影。也可使蜻酸白金發生螢光。至於中原射呢？也有陰原射所帶的那幾樣性質；不過他的穿透力更加利害，十幾塊的銀圓還是不能阻止他的進行。除了這三種輻射以外，還有一些放射氣，容量雖然很小，不過他有很大的能力，他的存在，也極容易驗出來的。總結一句話，銑的放射性質和鈾的放射性質都是一樣，不過有強弱的不同罷了。

鍍——瀝青鈾裏除了銑之外，還有兩個別的新元素叫作鍍和鉸。鍍的名詞是居禮夫人紀念他祖國波蘭而取的。鍍的化學性質和鉍差不多；但是尋常並不在一處的。鍍的放射，只有陽原射，而全體的放射性消滅很快，過了一百四十天，放射強度就減去一半。所以元素的鍍預備好了之後，不到幾年就失去了大部份的放射。鍍雖然不很重要，但是比銑還少。在鈾礦中，鍍和銑的比例，不過五分之一罷了；所以要預備充分的鍍去鑑定他的原子量，就十分困難了。到了後來，纔知道鍍還是銑放射的附產物哩。

鉸——鉸是得皮恩在一八九九年發見的。他在當時研究一番，後來也漸不提起了。到了近來，

人家又漸漸注意釷的來源和性質。發見的時候，得皮恩在瀝青鈾的氫氟化銦沉澱裏得到的。釷像銑一般，也有陰原射和陽原射。因為放射太快，所以還不知道他有沒有中原射。他的放射氣的強度，不久就消滅了。

到了這個地步，我們已經有了五個放射元素。就是鈾，釷，銑，釷，釷和釷。釷和釷的生命是極短的，恐怕不到幾年連痕跡都難找了。但是其餘三個元素都很耐久的，經過幾百年沒有什麼大變動的。不過他們的生命，和動物的生命不同。動物差不多有一定的壽限；但是這種元素是不死的。不過平均起來時時刻刻總有原子放射。因為放射，就變了別的東西。剩下的原子是放不完的，諸君一定覺得很奇怪。但是要證明這層意思，須得實驗。實驗的結果，還要用一些算學來表明他。元素的放射是依指數律的。比方 λ 是本來的原子總數。 $\lambda - x$ 是隔了 x 時間的放射後的總數。那末，
$$\lambda - x = \lambda e^{-\lambda x}$$
$$\ln(\lambda - x) = \ln \lambda - \lambda x$$
$$\ln(\lambda - x) - \ln \lambda = -\lambda x$$
$$\ln \frac{\lambda - x}{\lambda} = -\lambda x$$
$$\ln \left(1 - \frac{x}{\lambda} \right) = -\lambda x$$
$$\ln \left(1 - \frac{x}{\lambda} \right) \approx -\frac{x}{\lambda}$$
$$-\frac{x}{\lambda} = -\lambda x$$
$$\frac{1}{\lambda} = x$$
是箇常數，不同的元素有不同的 λ 。 λ 是訥白爾對數的根。這條實驗出來的定律，將來我們還得提起，暫且放開。

放射能力的來源——原子放射了之後，就變別的元素。銑自己也是間接打鈾來的。現在已經

發見的放射元素有三十多個了。不過無論什麼放射元素的基礎問題是相同的。不管他是很強的像銦一般，或是很弱的像鈾一般。最要緊的問題，就是能力的問題。螢光啦，電離啦，顯影啦，都要用能力。陰極射或變琴幅射的原動力呢，我們知道是電力。但是放射元素所需的能力，打那裏來呢？元素放射不受外界的影響而變更的。他們放射時所發的熱，有時候很大的。比方銦，兩天以內所放的能力比同樣重的最利害的炸藥所有的能力還多。一公絲（千分之公分）銦的能力，若能隨便讓我們收取。那末就等於一噸炸藥的光景。講到能力的來源，只有兩個解釋。若不是有什麼奇怪的能力吸收空中能力然後放出呢；那末就是打原子裏面出來。因為複雜的內部構造預先儲蓄的能力爆發出來了。第一說有點講不過去。因為放射元素的溫度總比他四周的溫度高。高溫度的東西不能往低溫度的東西那裏去收熱。第二說還講得通。但是只說能力的來源，却不能解釋能力的出路為什麼有三種放射呢？第一說若能成立，那末，放射元素的能力是永久不滅的了。這却和事實相反。因為放射元素是變動的。他們放射的時候，一個原子就變成別的原子。有時候層出不窮變個不了。雖然覺得很複雜，我們要找出幾條很簡的原則去解釋這些現象。

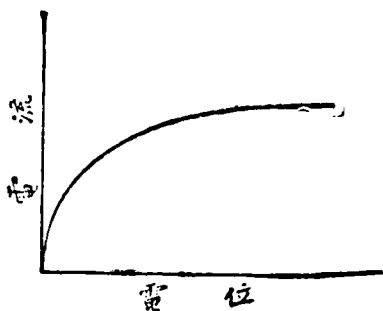
- (1) G. C. Schmidt, (2) pitchblend, (3) Johanngeorgenstadt, (4) Remont, (5) Demargay,
(6) Joachimsthal, (7) Debierno, (8) Giessel, (9) Hönigschmid (10) spirithariscopæ,

第三章 氣體的電性

要很精密的去測驗放射，全在利用各種放射對於氣體的電離性。氣體被放射線經過之後，能够傳導少許電流。柏克勒爾早於鈾的放射證明了。但是利用這個性質來精密鑑定放射量呢，却自刺得福德始。放射的能力被氣體吸收之後，纔能成遊子。所以遊子的多少和放射的強弱成正比例的。氣體導電的難易，和遊電的多少也成正比例的。所以放射性的強弱，間接可以用電學的儀器來測驗了。現在我們先講遊電的性質。至於測驗的方法，要留在第四章裏講了。

氣體傳電，因為他有遊子。遊子的原因，是因為氣體受了幾種特別輻射的影響。愛克司線啦，陰極射啦，原子放射啦，都能這樣影響。但是這幾種輻射，不過是主要的幾種。因為極短的紫外波也有感成遊子的可能性。

尋常空氣，可以導極少的電流。若經過幾次濾過之後，乾燥的空氣幾乎不能傳電。所以我們相



信又清潔又乾燥的空氣是絕好的阻電體。若受了特殊輻射的影響之後而感成遊子，那末，他就傳起電來了。但是等到這種特殊輻射取消之後，空氣不即刻還元。並且若吹到別的地方，還免強可以感應別部份的氣體。若吹過液體，電場，棉花濾紙等東西，地就即刻失掉他的導電性。這一層和放射氣（ γ ）不同。放射氣打幾種放射元素裏來的。銑，鉸，鈾都有放射氣。這也是傳電的氣體。也可以吹來

吹去，保存遊子。並且經過液體或棉花等物之後，性質還是不改變。因為空氣的導電性是得來的，放射氣的導電性是固有的。

氣體導電之電流電位之比較
 金屬導電或溶液導電，都服從歐姆定律。電流和電位成正比例的。但是氣體導電的現象，稍微不同。在電位低的時候，和電流也成正比例。但是到了一點叫作飽和點之後，電位無論怎樣高，電流總是不再增加了。這個電流叫作飽和電流。測驗電離性的時候，飽和電流是很重要的。

用測電法子研究放射性的時候，應該注意兩點：（一）所量的是飽和電流（二）若不是飽和電流，電位和電流的比例須絕對的服從歐姆定律才行。第一個法子是常用的，比較第二個妥當些。遊子受電場的影響，在氣體中向兩極運動，他們服從尋常物體經過黏性液的定律。他們的速度和電場的強度成正比例。所以每秒鐘遊子達到電極的數目（一）視氣體中間遊子的總數；（二）視他們的速度而定。電位低的時候，正遊子和負遊子互相合併，復成分子；所以電位要高。那末有了飽和電流，就沒有枝節問題了。比方每秒鐘有 ρ 陽遊子和 ρ 陰遊子（陰陽一定相等所以都用 ρ ）發生出來。他們每個所帶的電是 e ，氣體全部的電流是 i 。那末 $i = e\rho$ 是在陽極那裏放棄的陽遊子數目。同時 $i = e\rho$ 也是陰極那裏收集的陰遊子的數目。這個數目還是 ρ 。所以 ρ 等於 $\frac{i}{e}$ ，而 i 等於 $e\rho$ 。若 b 代表每秒鐘由每立方公分所發生的遊子， λ 代表電極的面積， l 代表兩極的距離。那末 $q = b \cdot \lambda \cdot l$ 而 $i = q \cdot \lambda \cdot v$ 這幾個公式只能適用於飽和電流。若電流不飽和，那末有許多遊子沒有到電極以前，陰陽已經合併了。陰陽遊子的速度，並不一樣。陰遊子走得快一些。不過陰陽速度的比例，也不是個常數。這和所經過的氣體的性質有關係的。比方在水汽裏面陰陽遊子的速度很相近。

的。遊子所帶的電量雖不全同，但都和電解時氫氣遊子所帶的電量相等或整的倍數。這證明電的最小單位，就是一個氫氣原子成了遊子所帶的電量。這是陽遊子。那陰遊子的電量，當然也是一樣。不過有正負的分別罷了。電不能獨立存在，總得附在什麼物體上面。陰遊子所附的物體，比較起來輕得多哩。

遊子或遊電這個名詞，用處極廣。恐怕誤會，所以要申明幾句。在溶液理論裏，我們有遊子。電解的時候也說有遊子。氣體感了電，也叫遊子。放射元素放射出來的陽原射和陰原射，實在也是遊子。陽射是陽遊子，陰射是陰遊子。溶液裏的一個遊子能帶的電量，一定也等於一個氣體遊子能帶的電量。試驗出來的結果，竟是一樣。但溶液導電的測驗很精密，所以比較更靠得住。既然是一個最小遊電所帶的電，那末， N_e 就是一個公分分子(2)所帶的電。實驗出來的 N_e 等於 96500 庫隆(3) 這就等於 2.695×10^{14} 的靜電單位。但是有了 N_e ，我們還不知道 N_e 是多少， e 是多少。把一個公分分子來數他分子的總數，是斷乎做不到的事情。所以祇能研究測量 e 的方法，才能解決這個問題。

威爾遜(4)發見了一個現象，對於這個問題很緊要的。若空氣飽和了水汽之後忽然使他膨脹或使他驟然冷卻，應該有雲凝結。但是不帶塵土的空氣並沒有雲。若裏邊本來有遊子的，那末，這種遊子就供給凝結的胚胎我們就有雲看見了。不過膨脹不能太大或太小。若太大那末沒有遊子的時候，也許有雲。若太小(膨脹先後比例在一·二五之下)那末有了遊子恐怕還是沒有雲。在一·二五和一·三之間只有陰遊子可以發生效力。在一·三以上，陰陽遊子都行了。雲是很小的水點，所以沉澱下來的時候，並不很短。由他們的速度可以定水點之大小。若雲的總量是已知數，水點的總數也就知道了。電量的總數呢，可以用精密的法子來測驗。這樣就可以算出每個遊子的電量了。湯姆生(5)用愛克司線，紫外線，和放射三種法子去感成遊子所得的。是一樣的。他的報告說 e 是 3.4×10^{-10} 的靜電單位。後來美國密爾根(6)教授不用水點而用油點試驗。儀器手術，都非常精密。他的 e 是 4.77×10^{-10} 靜電單位。這是最可靠的。現在有了，每個公分分子的分子總數 N ，也好算出來了。 $N_e = 2.895 \times 10^{14}$ $e = 4.77 \times 10^{-10}$ 所以 $N = 6.06 \times 10^{23}$ 。比方我們有十八公分的水，裏邊就有這麼許多的分子。因為十八是水的分子量。兩個公分的氫氣，也有這麼許多分

子。

氣體導電，第一因為電位高。第二因為氣壓低。氣壓低的時候，氣體的內摩擦力也減少許多，所以遊子就容易過去了。他們並不服從大氣壓裏的定律。他們的速度和主動力成比例。但是主動力和加速度又成比例，所以遊子是越走越快的。

高速度遊子最重要的性質，就是他們在電場磁場內的屈折。由這個屈折的現象，我們可以得 e/m 的比。 e 還是遊子所帶的電， m 是他的質量。這個比在放射學裏是很重要的，因為我們往往要知道放射質點的重量和速度。

比方一個遊子有不變的速度，垂直的對了磁線運動而沒有旁的影響，那末，他的軌道受了磁力的影響，變成弧形。弧的半徑是 r 。那末，
$$r = \frac{mv}{eH}$$
 H 是磁力， v 是遊子的速度。 e 和 m 的意義還是照舊。由這個公式，我們可以算出 e/mv 。若同時有電力加入，使電力、磁力和遊子運動方向互相垂直。再使電力和磁力互相抵觸。結果使遊子運動方向不屈折。在那一點的時候， $F_e = Hev$ 。 F_e 是電力，別的字母還是代表本來的意思。那末， $v = F_e/H$ 。所以遊子的速度，求出來了，有了 v 之後，

e^- 、 H^+ 也知道了。

湯姆生就用這個法子鑑定了陰極射的速度和 e^- 、 H^+ 他所得的速度是每秒鐘 2.8×10^9 公分，而 e^- 、 H^+ 等於 7.7×10^9 。光的速度我們都知道的，是 3×10^{10} 公分。所以陰極射的速度，差不多是光速的十分之一了。後來勒拿氏再定這兩個數目。他的結果和湯氏的沒有什麼大出入。

各爾斯坦 (7) 發見真空筒裏放電的時候，除了陰極射和陰遊子之外，還有陽極射。陽極射也被磁場或電場屈折；屈折的方向和陰極射相反，不過屈折率是極小的。維恩 (8) 測驗陽極射的 e^- 、 H^+ 得 3×10^9 。他們的速度，每秒鐘不過 3.6×10^7 公分。後來湯姆生研究這個問題，發見了許多原理。他又研究由熱體上發出來的陽遊子。他們的 e^- 、 H^+ 也和各爾斯坦陽遊子一樣。那末，陽遊子的 e^- 、 H^+ 比陰遊子的小了好幾千倍。但是和溶液電解的重遊子的 e^- 、 H^+ 倒差不多。總言之，陽遊子或陽極射的 e^- 、 H^+ 從來沒有比氫氣遊子的 e^- 、 H^+ 更大的。這一點證明陽電和原子總不分離的。湯氏就宣布他的質點電論說道，陰電是最小質點。物質的原子或分子缺少一個或數個這種質點的時候，就變成陽遊子。這種質點，現在我們通稱陰電子或簡稱電子。陰極射和陰原射都是這種電子。因為他

們的速度不一樣，所以他們的能力也不一樣。

若有電聚在很小一點上的時候，那一點就有例外的惰性。因為有電磁場在點外發生而影響四周的以太。既然有了惰性，就抵抗運動，像物質一樣。所以在這種情形之下，電有了物質最緊要的公性。那末，電子的質量和他的速度成了密切的關係；但是他的速度，斷乎不能等於或勝過光的速度（每秒 3×10^{10} 公分。）因為電子若有了光的速度，他的質量要變作無窮大了。在等於光速一半大的電子質量，差不多是個常數。若過了這個速度，質量的增加就很快了。洛治（9）已經算出電子的真重 M_0 和他有高速度的時候所帶的重量 M 的比。電速等於半光速的時候， $M = 1.12M_0$ 。電速等於四分之三光速的時候， $M = 1.5M_0$ 。等於光速十分之九的時候， $M = 1.6M_0$ 。等於百分之九十九的時候， $M = 3.28M_0$ 。等於千分之九百九十九的時候， $M = 7M_0$ 。以後增加更快。若電速和光速相等，電質就無窮大了。若這些理論是對的，那末，從放射元素出來的陰射，因為速度不同就應該有不同的質量。高夫孟（10）試驗銨放射得的結果，果然如此。

這種理論和實驗，無非要研究物質和電的關係。物性的原由是否根據電性？我們若除了萬有

引力太微不算他（因為我們在極大的地球上）。那末，物質最重要的公性就是他的惰性。電子既然也有了惰性，那末恐怕電子就是物質最小之質點了。這不過是我們現在的猜測，將來終究怎麼樣，一時還談不到哩。但是我們研究無論什麼學問，總得要有些理論作根基地。然後一步一步的用歸納法來證明這種學理。

- (1) emanation, (2) gram molecule, (3) coulomb, (4) C. T. R. Wilson, (5) Thomson,
(6) Millikan, (7) Goldstein, (8) Wien, (9) Lodge, (10) Kaufmann.

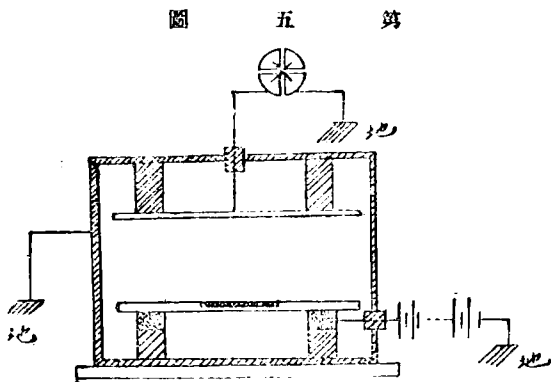
第四章 放射性測驗法

測驗放射性的普通法子有三個。這三個法子的原理，在（一）放射對於照像片的影響。（二）對於氣體感成遊電的作用。（三）螢光作用，就是放射對於精酸白金鉬，硫化鋅或相類的東西所發生的光。

照像片顯影法子在放射學幼稚時代，用的人很多。他的長處在簡便易行。試驗陰陽射屈折率的時候，這個法子尤爲合宜。但是很慢。試驗薄弱的放射，至少一天的工夫才能顯影，並且結果不很精密；所以漸漸被第二個電氣法頂替了。因爲這個法子的結果，是定量的而也很精密的。但是他也有他的短處。比方陽原射容易吸收，所以容易測驗。陰原射就不然。第三個法子有時候雖也可以給定量的結果，但是要看所用的是什麼東西。若用的是硫化鋅，那末，對於陽原射很敏捷的；對於陰原射却不甚敏捷。精酸白金鉬就有相反的性質。金剛石對於陽射亦發光的。總之三個法子對於三種

放射各有長處與短處。比較的論去，電氣法最好；所以我們要提出來多講幾句。

第三章裏我們已經說明放射電流之不服從歐姆定律。若測量的不是飽和電流，不能計算每



測 驗 放 射 儀 器

秒鐘所發生的遊子的數目。而遊子的數目和放射的強弱成比例的。經刺得福德一番研究，證明放射被空氣所吸收的一部分和氣壓相比的。除了氫氣是例外，無論什麼氣體都是一樣。意思就是感成一個氣體遊子所需的能力，是個常數。上面的圖表明刺氏所用儀器的大概裝置。兩塊電極的面積大約有三十六平方公分。試驗的時候，先把少許已知重量的放射性物質均平的鋪在底下一塊上。這塊電極連接到一個三百弗打丁的電源，還有那一塊穿過靜電計(2)之二象限而接地。兩塊電極的距離，大約有五公分。電極和儀器的各部，都用絕緣體隔開。打靜電計的針的移

動，就可以得兩對象限電壓的差。這樣就好間接算出氣體的電流。但是靜電計的靈敏，因電量之不同，日有變更；所以最好做比較的試驗，用已知的放射體作標準，那末，結果就格外精密了。

別種靜電計很多。不過他們應用的原理，都是一樣。最簡單的，只要用金葉驗電器。金葉放開的角度，可以用附帶量角度格子的望遠鏡量出，並且對於很弱的放射，驗電器比靜電計靈使得多哩。不過用驗電器測驗放射的時候，也得用比較法。把已知重量的物質，鋪在相當盆子上面，放在驗電器中間；若遇很強的放射質，那末，須得放在外邊；再靠不住的地方，就是在試驗中間，金葉忽然漏電，結果就沒有用了。所以沒有試驗之前，須得查出驗電器每秒鐘所漏的電。這叫作當然漏。每次試驗的結果，須得把當然漏計算在內。

陽原射是很容易被吸收的。所以很厚的物體，他就不能穿過。測驗的時候，只要用很薄的一層就夠了。但是測驗放射對於時間的變更，厚薄也沒有什麼關係。只要原來的盆子，在試驗時候，情形不變而不移動就得了。

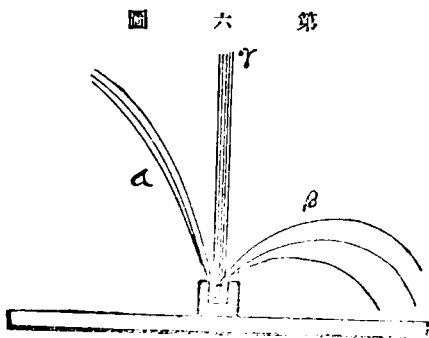
(1) volt, (2) electrometer.

第五章 三種放射線

從放射性物體出來的放射線是很複雜的。大概有三種不同的輻射，叫作陽原射，陰原射和中原射。研究這幾種放射最早的人，要推刺得福德。他先研究鈾的放射，用驗電器量鈾化物的感成遊電的能力，再把金屬葉一層一層的去遮沒鈾化物，然後再量。這樣試驗，可以查出放射體的穿透力。他用的金質薄葉是鋁製的。每張的厚薄，不過萬分之一公分。用了這種金屬葉遮沒之後，放射強度驟然減少了許多。用了十五張之後穿過的放射祇剩很小的一部分。若再加鋁葉，倒也不再有什麼影響了。這個結果，表明放射的複雜。內中一定有一種很容易被吸收的與一種穿透力很大的。容易被吸收的那一種我們現在知道是陽原射，佔全部放射的百分之九十五。隔了十五層至二十層的鋁葉就穿不過去了。那一種堅強的放射是陰原射。他們可以穿過五十多層鋁葉而一些不受什麼影響。比陽原射差不多強一百餘倍。除了這兩種放射之外，維勒（W）在銻裏又發見第三種更利害

的放射叫作中原射。後來刺氏在鈾鈷裏也找到中原射。這種放射比陰原射要強一百倍。穿過了七公分的玻璃或鋁，他們還可以保存一半的放射性。

這三種放射的強弱固然不同；但是他們在磁場或電場的情狀也不一樣。陰射是很容易被屈折的，和陰極射屈折方向一樣。陽原射起初以為不能屈折的，後來刺氏也把他的可能性發見了。不



過陽射的屈折沒有陰射那麼容易，方向也和陰射相反。中原射却真的不能屈折。因為他們是不帶電的放射。居禮夫人所繪的圖就是表明三種放射的屈折特性。陽原射的屈折是故意加大的，因為看的時候，清楚一些。

中原射——三射的穿透力要算中原射最強。他們可以穿過七公分的鉛或十九公分的鐵或一百五十公分的水之後才受百分之九十九的損失。他們在磁場電場裏，像愛克司線一樣，不會屈折；但是他們被物體所吸收的現象倒和陰原射差不多。

物體吸收放射的難易和物體自身的密度成比例。這個定律早已講過了。三種放射的吸收，也勉強符合這個定律；但是有幾種重氣體如四氫化炭等對於愛克司線之吸收，却太大了。

對於吸收的不同，人家恐怕要疑惑中原射和愛克司線絕然不同了。其實應該知道愛克司線自己也有軟硬強弱的分別。軟弱的和強硬的有時差得很遠。所以刺得福德把放射出來的中原射和最硬的愛克司線比較，他覺得一些也沒有分別。平均而論，放射體的中原射要比普通的愛克司線堅硬些；因為中射和陰射總是相關的。陰射是因，中射是果。放射體的陰射比克魯克司筒內的陰極射強；所以結果出來的中射，也比較強些了。中原射除了他們的穿透力已經研究得很清楚了，其餘的性質却很薄弱，遠不如陰陽兩射哩。

陰原射——因為他們對於照像片顯影的敏捷，陰原射起初認作最重要的放射。二十幾年前放射學的照像成績可以說全屬陰原射的。當時所謂放射的強弱也就是陰原射的強弱。現在才知道這些著作都是偏的。鈾有這類放射，鈾也有這類放射。不過鈾的陰射比較的少些。所以鈾鈾兩種元素的放射性若用電氣法子去測驗呢，差的不甚多；但是用照像法去測驗呢，鈾就強些。因為陰射

對於照像片的反應，格外敏捷。

陰原射被磁場屈折的現象，同時被幾個人所發見。柏克勒爾測驗陰原射的屈折，用一只金質小杯盛着放射物質放在乾片上面，包好之後把包關在真空器皿裏，然後一邊加上磁場，隔了幾小時把乾片取出，用藥水洗過之後，陰射屈折的軌道，就清清楚楚的刻好了。由屈折的角度和磁場的強度，我們可以算出陰射的速度。計算的公式在第三章裏已經有過，不必再寫出來了。據柏氏說銦的陰射很複雜，有些跑的很快，有些跑的很慢。平均起來每秒鐘可以行十萬英里。頂光速一半的光景。他們電量和質量的比 (e/m) 和陰極射相同。他們屈折的方向也和陰極射相同。所以陰原射和陰極射都是高速度的陰電子。他們的質量不過一個氫氣原子的二千分之一。

高夫孟後來研究好些銦素最堅硬的陰射而推算他們的速度和 e/m 。他們的速度，有時候頂光速的百分之九十餘，而 α 同時就比較的小了。這一層又證明物質和電的關係。所以陰極射啦，陰原射啦，都是運動很快的電子；而表演的質量，因為他們速度的增減，也隨時可輕可重的。

陽原射——大多數的放射體有陽射。所以三射之中要推陽射最平常。他們佔大部分的放射

能力。若用電氣法來測驗放射性的時候，全是陽射的效力。陰射和中射好像沒有存在一般。陽射的穿透力是很薄弱的；但是也有好幾個等級。鈾的陽射最軟弱。銦的稍硬。鈾的陽射更硬。然而也穿不過二十層的薄鋁葉，就被吸收了。

陽原射和陰原射不同。在磁場電場裏並不甚容易屈折。所以起初以為陽射是不能屈折的。到了一九〇三年刺得福德才證明陽射屈折的可能。柏克勒爾同時用照像法也得了幾張屈折陽射的照片。陽射屈折的方向和陰射相反。因為他們的電有正負之不同。刺氏同時用電場磁場試驗屈折而推算陽射的速度。他的結果差不多是光速的十分之一。至於電量和質量的比呢，是等於六千。假定他的電量和氫遊子一樣，那末，他的質量就要比氫氣原子加倍大。若是他的電量比氫遊子大一倍呢，那末，他的質量就比氫氣原子大四倍了。這第二個假定和別的證據符合。陽原射是很重的質點，比氫氣原子大四倍。他帶兩個陽電子，所以頂氫遊子電量的兩倍。後來我們要知道陽原射是氫遊子。

陽射是質點，很容易用克魯克司星閃鏡來證明的。鏡內有硫化鋅製成的簾一個。中間置一些

放射物體。那末，每個陽射狙擊簾子的時候，放光一次，暗中可以看見。並且可以計算陽射的數目，這個試驗在放射學裏是很緊要的。

(1) Villard.

第六章 銑的性質

鈾是最重的元素。是一個放射元素。照我們現在所知道的，鈾的放射程序如下：

鈾 \downarrow 鈾X \downarrow 鏷 \downarrow 銑 \downarrow ……所以鏷銑都是鈾的後類，而鏷是銑直接的父親。鈾很複雜。尋常的

鈾包括兩種在內，就是鈾¹和鈾²。鈾²從鈾放射才發生鈾X的。鈾的放射很弱而他的壽限很長。實驗的結果，說他的半壽或稱半期常數是五十萬萬年。銑的半壽只有二千年。鈾生鏷，鏷生銑，既然是一定的；那末，在年久的礦石裏，鈾銑的比例，應該是個常數。實驗的結果算出這個常數（鈾和銑之比）等於三千四百萬和一之比。若知道礦石裏鈾的成分，就可以知道銑的成分了。

銑的價值在他的放射性濃厚而耐久。照一般放射體的普通性質，耐久的東西，放射一定淡薄；而放射濃厚的東西，生命一定很短。但是銑呢，佔了很適中的地位。他的放射是够濃了。放射的時候，發生許多能力可以使他本身的溫度常常高於他環繞空氣的溫度。同時他的壽限還是很長。經過

幾十年，不受什麼大影響的。

銦的放射是很堅硬而很有化學作用的。他們可以觸動好些反應。最緊要的是變氮氣爲臭氮氣，變黃磷爲紅磷，分解水爲氫氮二氣，變淺紫色玻璃爲深黃色等。分解水汽和氯化臭氮都需能力的；那末，這能力自然由銦放射來的無疑了。一公分的銦溶於水中之後，每天可以發出十個立方公分的氫氣和氮氣。尋常分解水而得這些氫氮氣要用二十個加路里（熱單位）。銦却就這樣放熱。風雨無阻，日夜不息的。氮氣在尋常溫度裏，本來沒有什麼大反應力。但是有了銦在一處，氮氣就非常活動。水銀也可以氮化了。含炭物質可以氮化而發生二氮化炭了。放射對於照像片的顯影，當然也是一種化學反應。還有幾種東西像蜻酸白金銀等，可以受放射而生螢光，也應該提起的。

除了化學作用之外，銦的放射線還有許多生理病理作用。若把放射注在皮膚上太多太久了，皮膚就受一種特別燒痕很不容易醫治的。這層原理還不十分清楚。恐怕是陰原射所致的。但是陽射也許更壞；不過陽射容易吸收，沒有到得皮膚，半路已經停止進行了。因爲放射有殺菌性，所以醫師常用來治皮膚外症。最有趣味的生理作用，就是放射對於眼球的現象。若把兩眼緊閉，在暗室之

中，用裝置好的銦化物一小瓶放在額角前面；就覺得眼球背後發生散光。

放射氣——銦像鈦一樣。放射體分解的時候，附產一種氣體放射質通稱放射氣；爲尋常物體所不能吸收的。低溫度可以使他凝結。放射氣變化得不很快，隔了幾個星期還可以測驗他的存在。並且原來的銦化物發生了放射氣之後，可以保留他不出去。等到放射氣飽和了銦化物，那末，每分鐘出來的放射氣等於裏邊因原子分解而發生的放射氣。這就叫作放射平衡。像物理化學裏的平衡一樣。若 λ 是每秒分解的一部分， γ 是平衡時的放射氣重量， ρ 是每秒出來的放射氣重量，那末， $\rho = \lambda N$ 。也可寫作 $\rho = \lambda N$ 。叫作分解常數。

放射氣既然照分解常數，時時刻刻發生的；但是乾的銦化物可以把氣積聚在裏頭不揮發出來，直到溶解的時候才一起放出。若用玻璃筒把放射氣收了，暗中可以放光。不過這並不是氣體放的光，這是玻璃筒間接受了所發生的螢光。銦的放射氣自收集之日起隔三天又十分之八（不到四天）強度就減少了一半。這個時間叫作半期常數。

刺氏用分光鏡去研究放射氣的時候，覺得有氫氣的存在。儀器之中並沒有這樣東西。起初很

疑惑。後來別人也證實了。才知道陽原射就是氦氣遊子。既然如此，那末，放射氣的原子量，除了氦氣應該等於二百二十二了。因為銾的原子量是二百二十六，而氦的原子量是四，這一層也證實了。所以放射氣是個新元素。週期表中第八十六元素叫作釷的就是他（niton 或稱 radon）但是放射氣自己還要放射。他的放射也是陽射。放射之後變成一個新元素叫作銻 A，銻 A 再變銻 B，都是陽射變化。每一個陽射放出之後，原子量須減去四。所以放射元素的原子量，只要知道他的歷史，就很容易推算出來。由銻 B 到銻 C 是陰原射變化。原子量是仍舊的。到了銻 C 就三射齊備。由陽射變化而生銻 D。由陰射變化而生銻 C。從銻 D 再生銻 E，銻 E 生銻 F。銻 F 再放一個陽射，就變鉛了。他們的平均壽限以及一切常數，可於附在末後的表中一查即得。

第七章 放射的原理

放射的事實，在前幾章裏已經敘了許多。但是放射終究是怎麼一回事？原子爆裂而發生新的原子；那末，新原子和舊原子有什麼關係？我們總得略為解釋才好。對於這個問題，陽原射和陰原射很可以幫助我們的；因為我們已經知道陽原射是帶陽電的質點；也就是氦氣的原子。陰原射和陰極射一樣，是帶陰電的電子，沒有什麼重量的。所以放射現象至少可以分作兩步講：（一）有高速度的陰陽電子由放射體出來。（二）放射之後，舊元素變成新元素。這種新元素也許還是放射元素。這兩層事實，互相成因果的。假使沒有（一），那末就沒有（二）了。若有了（二），那末一定有（一）了。所以陰陽放射和新元素都是由原來物體的一個變化上發生的。譬如鏷放射而同時銻就產生。銻B放射而同時就有銻C的發生。至於我們所謂放射的強弱，無非就是每秒鐘原子變化的多寡而已。強的放射固然容易測驗；但是弱的放射，也可以測驗的；因為我們的驗電器是敏捷不過的。

放射的衰敗根據一定不二的公式叫作指數律。譬如 N_0 是本來原子的總數。 N_t 是隔了 t 時間放射而剩下來的原子。是對數根。那末， $\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$ 。 λ 是個常數，叫作原子分解常數。若把這個公式寫作微分式，那末 $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ 。意思就是每秒鐘所變化的原子和本來原子總數成比例的。而等於分解常數和總數之積。這是很簡單的。

新元素和舊元素的關係也是一定的。舊元素若是放了一個陽原射，那末，新元素的原子量要比舊元素輕四；同時因為他原子核上少了兩個陽電單位，他的原子數也降低兩個；而他在週期表裏的位置也降低兩位。假使放射出來的是個陰射，那末，新元素的原子量沒有什麼變動，因為陰射可以說沒有重量的。但是原子裏邊少了一個陰電，他的陽電就多了一個，所以原子數也升上一個，而他在週期表裏的位置也升上一位。這樣看來，放射元素在週期表裏有一定的位置，和別的元素一些兒分別都沒有。

放射元素強弱的不同，是因為他們各有各的分解常數，這是已經講過了；但是還有幾個常數也很通用的；不過都是由分解常數來的。譬如 $1/\lambda$ 叫作平均壽限。銽放射氣的平均壽限是五天

又十分之三。釷放射氣的平均壽限是八十七秒。爲什麼叫作平均壽限呢？因爲一種原子的壽限不一定的，有些只活一秒鐘，有些是長生不老的；但是他們的平均壽限，就是原子總數隔了幾多時才變化了規定的一部分，是一定的。還有一個常數叫作半期數 P ，等於原子總數變化了一半所須的時間。銑的半期是一千七百餘年，鈾的半期是五十萬萬年，別的放射元素的半期，都可以在表中查得。

第八章 鉛的問題

放射性元素經幾次放射之後，結果似乎變成一種鉛。第六章關於銑的放射已經提起過了。有時候放射元素經過鉛的位置，當時所成的元素性質也和鉛一樣，不過還要往前放射。這種像鉛一樣的東西，在週期表上和鉛同佔一個位置；所以叫作鉛的同位元素，或簡稱同位體。別的元素無論放射不放射也許有同位體，已經發見的也就不少了；但是鉛的同位體最多，並且因為他們和放射學有關係，所以我們要特地講一講。

鈾經過八次陽原放射而到鉛。這種鉛的原子量就應該是 $(238.18 - 8 \times 4 = 206.18)$ 二百零六又百分之十八。釷經過六次陽原放射而到鉛。這種鉛的原子量應該是 $(232 - 6 \times 4 = 208)$ 二百零八。所以美國哈佛大學理查咨 (Richard A. Fisher) 教授搜羅各種的鉛來鑑定他們的原子量。理氏 是世界著名的分析化學家。他所鑑定的原子量是頂精確的；所以我們要引用他的著作來研究這個問題。

在歐戰發生的前一年，奧國化學家法揚（2）的助手，名字叫作累姆板（3）的，帶了一大塊的放射鉛到哈佛大學，在理查咨的實驗室裏分析。他們所得的原子量是二百零六又百分之三十四。尋常鉛的原子量是二百零七又百分之十九。那末，這種奧國放射鉛差不多五分之四是鈾系鉛，五分之一是尋常鉛了。罕尼斯密得了一種更純粹的鈾鉛。他所得的原子量是二百零六又百分之五。這個數目很可以證明這種鉛是純粹的鈾鉛。巴克斯忒（4）分析了好幾種尋常鉛，由世界各國來的，他所得的原子量全一樣，都是二百零七又十分之二。索台（5）和罕尼斯密鑑定了一種有二百零八的原子量的鉛。這種鉛恐怕是釷系的鉛了。這些鉛，照索台的意思，是放射元素的末尾，不再變化的了。但是鈾鉛常帶放射性的。那末，一定因為分析的時候沒有把放射元素去淨的緣故。現在一般的科學家都和索台表同情的，都以爲鉛是放射元素的末路。我們所有的幾種鉛，由放射元素來的，倒容易明白他們的歷史。但是尋常鉛怎樣來歷呢？有人說道尋常鉛是最初由簡單元素合成的。放射鉛是因放射而化簡來的。所以尋常鉛的歷史古而放射鉛的歷史近。同位體的鉛，除了原子量不同外，別的性能都同。若混在一處的時候，就沒有什麼化學方法可以分解他們。現在我們要把幾

樣重要的性質稍爲比較。

原子容是原子量被密度所除的得數。索台說同位體的原子容應該相等的。理查咨實驗的結果，果然和索台的揣測相符，把表一看就清楚了。密度雖然不同，但是密度和原子量却成反比例，使原子容成個常數。

同位體	原子量	密度	原子容
純粹鈾系鉛	206.08	11.273	18.281
奧國鈾鉛	206.34	11.289	18.278
尋常鉛	207.19	11.337	18.277

他們的融點也一樣，都是攝氏三百二十七度。各種硝酸鉛的溶解度和鉛的原子量成比例的。但是這一些區別，不夠利用去分析兩種同位體。各種硝酸鉛的屈折率，被哈佛大學許姆(6)試驗過了。他的結果，沒有什麼分別。但是分子屈折率的公式都有密度在裏頭。若許姆的結果是對的，那末，密度在分子屈折率公式裏，就不應該再佔重要的位置了。

至於分光鏡內的現象呢？理先生也研究了一番。結果沒有什麼分別。但是芝加哥大學的阿倫堡（7）和後來英國的牟敦（8）覆驗兩種鉛在波長 4038×10^{-8} 公分的那根線，有 0.0043×10^{-8} 公分的相差。照波耳（9）和巴爾麥（10）的理論，光系之不同是應該的。

據鑾琴輻射研究的報告，尋常鉛和銦G是沒有分別的。至於同位體的磁性呢，邁爾（11）曾經研究過一番，他報告說道尋常鉛和很純粹的銦G至多不過差百分之一。這個試驗表明原子磁性是和原子浮面電子相關的多，和原子內部相關的少。

鉛和銦D的比較——銦D是由銦放射的時候所發生的。但是銦的半期為一千七百幾十年。銦A，銦B，和銦C雖然不很耐久，也總得費十六年的工夫，才能由十分之一公分的銦，收集二萬分之一公分的銦D。這是很不爽快的。所以赫夫塞（12）向維也納銦學研究社借了大宗銦化物預備了二萬分之一公分的銦D。他們就研究這銦D的化學性質和電化性質，去和尋常鉛比較。他們先試驗下列兩個半節電池的電位：

(1) 氟化銦D / 硝酸銦D

(2) 氟化鉛 / 硝酸鉛

結果沒有分別。若用硝酸銅或硝酸鉀去使硝酸銦D沉澱，那末，沉澱出來的硝酸銦D在顏色和結晶構造上看去和尋常硝酸鉛一點兒分別都沒有。這幾個試驗，證明銦D除了原子量和放射性之外竟是鉛了。

鈷的末代——鈷礦所含鉛質，大概不很多，所以他們的年代也不容易由鉛量上計算出來。有人說鈷的末代並不是鉛。但是索台主張鈷的末尾有兩個元素，由兩支放射上來的，都是鉛的同位體。鈷放射到了鈷C（鈷的同位體）分作兩支放射：（一）先陽原次陰原的放射，佔全部百分之三十五（二）先陰原次陽原的放射，佔全部百分之六十五。第二條路所放的能力較大。所以這兩個同位體的穩度恐怕也不一樣。若祇有百分之三十五的鈷E是穩固的，那末，我們若根據這點計算鈷的年紀，果然就相符了。

鉛的同位元素，大略已經講了幾個。關於一般的同位體，我們應該注意三點：（一）原子量，（二）安定度，（三）原子內部的能力。尋常元素的性質，多半因為原子的電量而起的；少半由於原子的質量而起的。所以同位體的質量雖然不同，電量却是一樣。因之一般性質全同。若有幾種同位體混在

一起的時候，我們要分離他們或鑑定他們的存在，照現在的情形看起來，只有兩個法子。第一就是陽極射法。第二就是擴散法，使元素或化合物蒸發之後再分離之。美國哈根斯 (13) 教授用這個法子去擴散氫化氫。他就把尋常氫氣分作兩種。甲種氫的原子量是三十五光景。乙種氫的原子量三十七光景。擴散氣體是很麻煩的事，哈氏費了十多年的工夫，祇得了一點兒氫化氫。英國的阿斯登 (14) 研究陽極射，發見了許多同位體。不過這個法子，不能分解混在一處的同位體。

- (1) Richards, (2) Fajans, (3) Lambert, (4) Buxter, (5) Soddy, (6) Schumm, (7) Aronberg,
(8) Merton, (9) Bohr, (10) Balmer, (11) Meyer, (12) Hevesy, (13) Harkins, (14) Aston.

第九章 放射的能力

最初想到放射能力的人是刺得福德和麥克倫。(1) 他們先鑑定在空氣中發生一個遊子所需的能力。再計算一公分氯化鈾可以感成的遊電。照他們的結果，每一公分的氯化鈾每年至少發生百分之三加路里的熱。若銦的放射比鈾強一百萬倍，那末，一公分的銦可於十五分鐘之內發生一個加路里。這個計算後來被居禮和拉波得(2) 證明不對。他們用兩個法則測驗銦的放射能力。第一法用一些已知重量的銦化物盛於一個冰點量熱器內。隔了規定時間之後，銦所發生的熱可以因融冰的重量而鑑定之。第二法把銦化物放在金屬匣子裏。匣子的溫度和四周空氣溫度的差，先行測驗了。再把銦化物取出，換進一個電熱體，使溫度和先前相等。所用的電力，可於電表上得之。這些電力就等於銦所發生的能力。由這兩法試驗的結果，他們報告說：每一公分的銦，在每一小時裏，可以發生一百個加路里的熱。不到四十小時可以分解等量的水變成氮氣和氫氣。分解水所需

的能力在熱化學反應之中要算最大了。現在銑既然可以分解等量的水，那末，銑放射所發生的熱，無論什麼化學反應沒有比得過他了。

居禮量的熱，其實不是狹義的銑放射所發生的熱。因為居氏沒有把放射氣，銑A，銑B等提出。他量的是幾步放射的總熱。刺氏後來推算出每立方公分的放射氣於平均壽限期內可以供給七百萬個加路里。我們知道一立方公分的氫氣和氯氣反應時，發生兩個加路里。那末，放射氣的放射熱比氫氯的反應熱強三百幾十萬倍哩。這許多能力，由那裏來呢？除銑的原子熱外，還有什麼地方？

剛才說一公分的銑，每點鐘可以發生一百個加路里。但是銑的半期數是一千七百幾十年，那末，一公分的銑若是完全分解，就有三十多萬萬的加路里了。半噸煤所含的燃燒熱，也不過如此。銑既然有這許多能力，鈾鈷等元素自然不必說了。恐怕非放射元素，也有可驚的能力蓄在原子裏頭；不過我們沒有法子去利用罷了。英國洛治說過天下能力最充足的東西，不是水力，不是煤炭，却是物質的原子。

第十章 結論

化學所講的，不過是原子和原子的反應。至於原子自身的變化，到了放射學誕生以後，才講究的。我們利用各種放射去研究原子的分解。但是我們不能說非放射原子就絕對穩固而不分解的。他們也許有很慢的變端為我們所不能測驗的。關於物質的天演，我們現在的智識還是很淺。放射現象是物質的公性呢？還是物質的特性呢？誰都不能爽爽快快的回答。無論如何，有幾條定律是已經成立無疑的了。譬如放射性的代謝是根據指數律的，與單分子反應的定律一樣。但是尋常單分子反應總是收熱的。放射變化却是放熱的。並且溫度的增減和放射的進行不相干的。這一層已經和化學反應不同了。照道爾頓的原子說：同一元素的原子是相同的，那末，怎麼放射元素的原子所含的能力有許多等級呢？他們的壽限從極短到極長呢？但是他們的平均壽限又是很可鑑定的一個常數。這是原子總數所呈的一個統計現象。原子個體的能力，却不受溫度與氣壓的影響。裏邊的

組織一定很複雜的。原子可以說是一個小宇宙。各部分的運動像天空中的行星一樣。有運動的快慢，然後有能力的多寡。這種能力多分是電。但是電量和質量又有密切的關係。所以物理學裏的質量不變律，恐怕也難於解釋原子的變化了。照愛因斯坦的學說，質量和能力可以互相通融的。讀者如要研究這些道理，須得參考原子構造論的專書。我們這裏限於篇幅，不能詳細多講了。

因為放射元素的變化，我們不由得就想到一般物質的變化和地球的由來了。幾十年前，人們對於地球的年紀，起了許多疑問。最可注意的有兩派。甲派的代表是物理學家。乙派的代表是生物學家。來伊爾和達爾文這班天演家說地球至少有三萬萬年了。而克爾文爵士用三個方法鑑定有生活的地球，不過一千萬年而已。他的第一個方法根據地球的內熱與地下溫度的增加率。大約每百尺增高一度。一千萬年以前地球全部是高溫度的液體。他假定地球是自冷的。但是現在我們知道地球也是自熱的。若地質的一小部分是放射元素，那末，就很容易推測向裏溫度的增高是因為放射的緣故，並非地球表面自冷所致的。他的第二個方法根據地球的旋轉和月球的繞地時間相比較。第三個方法根據太陽的熱能輻射。但是他推算時所用的假定，都沒有想到放射物質的存在。

我們現在既然發見了放射，簡直就可以用來推測地球的年紀了。瀝青鈾或別的鈾化物的存在，照鈾的半期算去，至少在一萬萬年以上。這樣推算出來的地球年紀比克爾文的高得多哩。就是比可靠的由地質研究直接得來的結果也高些。無論如何，即使當初地球的成分完全是鈾，那末，他的年紀也不過幾十萬萬年而已。

我們還有一個問題比地球的年歲更重大的。現在要提出來討論討論。這個問題是什麼呢？就是世界能力的問題。有一派抱悲觀的人，迷信了所謂熱力學的第二律，寫世界末日的小說去恫嚇婦孺。對於這些無稽之談，我們本來沒有辯駁的必要；但是能力問題，在常識範圍之內，人人應該知道一些。熱力學第二律說道，可用熱能去變機械能，但是所作的工，祇代表熱能損失的一部分。若這樣講去，由小而大，世間的溫度，漸漸平衡。到後來無論什麼物體都不能作工了。其實這條定律在工程學裏是適用的。若要推論世間一切的能力，恐怕有些靠不住罷。馬克斯維爾已經證明氣體的平均動能，是溫度的函數；但是每個氣體分子的動能，並不全同。他們雖在一處，溫度也未必盡同；有許多很高的；有許多很低的；不過我們所測的溫度是平均溫度罷了。照熱力學第二律，溫度不同的

東西，怎麼可以在一處呢？所以第二律不適用於分子世界。那末在放射元素裏，這條定律也受同樣的排斥了。

世間能力的消耗，却是事實。就說放射，也是由高能的元素而至低能的元素。但是因為第二律的不適用於分子原子世界，我們很信能力的變化未必全是由高而低。返向的變化，一定也有。放射元素因放射可以供給我們許多能力（不過我們現在還不能應用）一方面產出來的輕元素，也許可以漸漸收集空間的廢能而成複雜的元素。如是循環不息，世界的能力，就不發生什麼問題了。宇宙間能力照熱力學第一律，本來是個常數。第二律所說的高低上下的分別，不過在我們有限的應用一方面而已。世界是個不生不滅的世界，無所謂始，無所謂終。演繹的科學是有限制的。我們更不可盲從片面的觀察，推到宇宙的大問題。一個時代的限制，隔了幾時，也許漸漸消滅。所以我們希望自然科學的定律，不應該像已往專講空間的宇宙；最好也和時間的宇宙，融會而貫通之。

附 錄

放射元素及其常數

符號：—

A = 原子量

P = 半期 (註明年, 月, 日, 時, 分, 秒等單位)

L = 平均壽限 = 1.443 P (單位與 P 同)

$\lambda = \frac{1}{L} = 0.6931 \div P =$ 分解常數 (單位與 P, L 相當)

R = 陽原射在空氣中之靶路, 用公分為單位

μ = 陰原射吸收係數, 用鋁之公分厚薄為單位

μ_1 = 中原射吸收係數, 用鉛之公分厚薄為單位

元素次第依放射之程序, 若遇支路亦用相當符號, 以

標明之

鈾-銑系

鈾	$\left\{ \begin{array}{l} \text{鈾}_1 \\ \downarrow \\ \text{鈾}_2 \\ \downarrow \\ \text{鈾}_y \\ \downarrow \\ \text{鈾}_X \end{array} \right.$	$A 238.5; P 5 \times 10^9 \text{年}; L 7.2 \times 10^9 \text{年};$ $\lambda 1.4 \times 10^{-10}; \text{放陽原射}; R 2.50$	放射
		$A 234.5; P 10^6(?) \text{年}; \text{放陽原射}; R 2.90$	
		$A 230.5; P 1.5 \text{日}; L 2.16 \text{日}; \lambda = 0.46;$ 放陰原射; M300	
		$A 230.5; P 24.6 \text{日}; L 35.5 \text{日}; \lambda = 0.0282;$ 放陰原射及中原射; $\mu 510; \mu_1 0.72$	
釷		$A 230.5 ?; P 2 \times 10^5 \text{年} ?; L 3.5 \times 10^5 \text{年} ?;$ 放陽原射; R 3.00	
銑		$A 226; P 2000 \text{年}; L 2880 \text{年}; \lambda 0.000346;$ 放陽射及陰射; R 3.30; $\mu 200$	
釷		$A 222; P 3.85 \text{日}; L 5.55 \text{日}; \lambda = .18;$ 放陽射; R 4.16	
銑 _A		$A 218; P 3.0 \text{分}; L 4.32 \text{分}; \lambda = 0.231;$ 放陽射; R 4.75	
銑 _B		$A 214; P 26.8 \text{分}; L 38.7 \text{分}; \lambda = 0.0258;$ 放陰射及中射; $\mu 13.1; \mu_1 4$	

- 銑_C A 214; P 19.5分; L 28.1分; $\lambda 0.0355$;
 三射齊備; R 6.94; $\mu 13.2$; $\mu_1 0.50$
- 銑_{C₂} A 210?; P 1.4分; L 2.0分; $\lambda 0.495$; 放陰
 射; $\mu 13$
- 銑_D A 210; P 16.5年; L 23.8年; $\lambda 0.042$;
 放弱陰射; M 130
- 銑_E A 210; P 5.0日; L 7.2日; $\lambda 0.139$; 放陰
 射及中射; M 43
- 銑_F A 210; P 136日; L 196日; $\lambda 0.0051$;
 放陽射; R 3.77

銍系

銍 無放射變化; 半期未詳; 人有疑其為鈾
 系支路來者

放射銍 P 19.5日; L = 28.1日; $\lambda 0.0355$; 陽射
 及陰射; R 4.60; $\mu 140$

銍_X P 10.2日; L 14.7日; $\lambda 0.068$; 陽射;
 R 4.40

放射氣 P 3.9秒; L 5.6秒; $\lambda 0.175$; 陽射;
 R 5.70

- 鉍_A P 0.002秒; L 0.0029秒; λ 350; 陽射;
 R 6.50 放
 鉍_B P 30分; L 52分; λ 0.0193; 弱陰射 射
 鉍_C P 2.1分; L 3.0分; λ 0.33; 陽射; R 5.40
 鉍_D P 4.71分; L 6.8分; λ 0.147; 陰射及中射;
 μ 28.5(鋁); μ_1 0.217(鋁)

鈷 系

- 鈷 A 232; P 1.3×10^{10} 年; L 1.9×10^{10} 年;
 λ 5.3×10^{-11} ; 陽射; R 2.72
 鈷₁ A 228; P 5.5年; L 7.9年; λ 0.126; 無放
 射變化
 鈷₂ A 228; P 6.2時; L 8.95時; λ 0.112; 陰
 射及中射; μ 30; μ_1 .53
 放射鈷 A 228; P 2.0年; L 2.88年; λ 0.347;
 陽射; R 3.87
 鈷_X A 224; P 3.65日; L 5.27日; λ 0.190;
 陽射; R 4.30
 鈷放射氣 A 220; P 54秒; L 78秒; λ 0.0128;
 陽射; R 5.00

- 鈷_A A 216; P 0.14秒; L 0.20秒; λ 4.95; 陽射; R 5.70
- 鈷_B A 212; P 10.6時; L 15.3時; λ 0.0654; 陰射; μ 110
- 鈷_C { 鈷_{C₁} A 212; P 60分; L 84.6分; λ 0.0118; 陽射及陰射; R 4.80; M 15.6
鈷_{C₂} A 212; P 極短; 陽射; R 8.60
- 鈷_D A 208; P 3.1分; L 4.47分; λ 0.224; 陰射及中射; μ 24.8; μ_1 0.46

