

超重原子

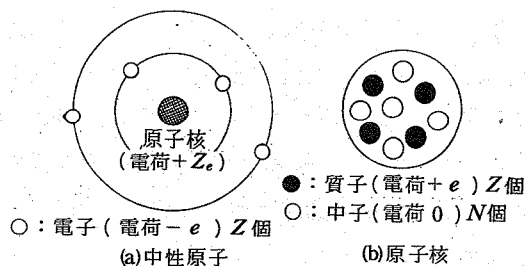


圖 1

氫) 等的電子數屬於幻數 (magic number)，在週期表上組成所謂稀有氣體的穩定氣體群。這些元素不容易和別的元素發生反應。比幻數多一個電子的 $Z = 3$ (鋰)， $Z = 11$ (鈉)， $Z = 19$ (鉀) 是富於反應性的金屬，很容易放出一個電子而變成帶正電荷的離子。

另一方面，原子核中有 Z 個擁有電荷 $+e$ 的質子 (圖 1(b))。因此， Z 也可以叫做質子數。氫原子以外的原子核，除了質子而外，還有電荷 0 的中子。中子數 N 對元素的化學性質毫無影響。

質子與中子的質量幾乎相同，大約等於電子的 1840 倍。因此，原子的質量大概可以 $Z + N$ 來決定。通常 Z 較大的原子核， N 比 Z 大時始穩定，所以 Z 增加時，大多數原子的質量 $Z + N$ 也增加。

自然界所見的重元素是鈾 ($Z = 92$)，其質量大約等於氫原子的 240 倍。 $Z = 93$ 以上是陸續做出來的人工放射性元素，可以說已經確認到 $Z = 107$ 。這樣，質量到達氫原子的大約 260 倍。

下面所要介紹的超重元素，其原子的 Z 值更大。但是，首先要聲明的是，超重原子的質量並不具有重要性，而是其大的 Z 值在物理上饒有興趣。

§ 2. 應該有穩定的超重元素

原子核不至於七零八落分散掉，這是因為所謂核力的引力在束縛質子和中子的緣故。然而，

蘇錫賢

國立臺灣師範大學物理系

天然元素中，最重的是原子序 $Z = 92$ 的鈾。在人工放射性元素方面，直到 $Z = 107$ ，全部已經確認。理論方面預測，可能做出 $Z = 110 \sim 114$ 的穩定原子核。為了尋找這種原子核，物理學家曾經做過各種實驗，却是全告失敗。然而，最近有人發表，令原子與原子互相碰撞而獲得「準原子」，幾乎相同於 $Z = 184$ 的重原子，而不能根據傳統物理學常識來想像的奇妙現象，可能發生在「準原子」中。

§ 1. 超重原子是什麼？

門得列夫 (Mendeleev) 創造的元素週期表中，從 $Z = 1$ 的氫開始，每一個元素都有原子序 Z 。原子序除了表明元素次序的號碼以外，還有更深遠的意義。原子中有帶負電荷 $-e$ 的電子 Z 個，繞正電荷 $+Ze$ 的原子核而運行 (圖 1(a))。原子核與電子的電荷正好抵消，整個原子成為中性。

元素的化學性質大致上由電子的數目 Z 來決定。 $Z = 2$ (氦)， $Z = 10$ (氖)， $Z = 18$ (

帶電荷的質子與質子之間有庫倫的排斥力在作用，有讓質子互相分離的趨勢。質子數 Z 較小時，這排斥力也較弱，核力可以克服排斥力而使原子核保持穩定。 Z 較大時，庫倫排斥力較強，原子核容易崩潰。因此，天然元素的 Z 值有一定的限制。

往昔地球形成時，一定有各種的重元素。但是 Z 較大的不穩定元素大概立即崩潰變成 Z 較小的元素，而只有壽命較長的才留存到今天。 $Z = 92$ ， $N = 146$ 的鈾在 45 億年（亦即地球的年齡）中，其量減半（換言之，其半衰期為 45 億年）。因此，依然在自然界能夠找到的人工放射性元素 $Z = 107$ ， $N = 154$ 的壽命短得更多，半衰期只有 1~2 毫秒。

根據預測，若 Z 再增加，其原子核的壽命可能更短。然而，十五年前有人發表理論，認為可能有 Z 更大而且穩定的超原子核。後來經過計算得知， $Z = 114$ （有人說是 110）和 126， $N = 184$ ，正如元素週期表上的稀有氣體的電子數，屬於幻數之一。這種超重原子會產生足夠大的引力來克服質子與質子之間的庫倫排斥力，使原子核保持較長的壽命。

§ 3. 尋找天然超重元素

超重原子核的半衰期，其估計值因研究人員而異。比較樂觀的估計是， $Z = 114$ 時，半衰期為 10 億年。但是根據最近的理論，最長的半衰期是 $Z = 110$ 的 10 萬年左右。而且這種計算非常困難，誤差可能達到 10 位數字。如果壽命夠長，在自然界應該能夠找到天然的超重元素來當地球形成時的遺跡。同時，宇宙射線所含的重粒子也可能成為超重原子核。果真如此，即使半衰期不很長，也可能降落積存於地球表面上而留下來的，於是，美國、蘇俄、西德等國家的研究小

組競相尋找超重元素。

首先，根據超重元素的電子數，在週期表上尋找化學性質類似於超重元素的元素，因為性質相似的元素被包含在同一礦石內的可能性極大。例如， $Z = 110$ 的元素，其性質應該類似於 $Z = 78$ （鉑），所以要在白金礦石中尋找 $Z = 110$ 的元素。年齡一億年以上的古代礦石和月球表面的岩石也都調查過了。可是，結果是白費心機。

雖然如此，五年前有人發表論文說，在馬達加斯加島（Madagascar）的古代礦脈得到的黑雲母中發現超重元素。同時，報章雜誌也予以報導。從前這黑雲母大概含有放射性元素，該處放出的 α 射線，其所通過的痕跡清晰地遺留在黑雲母。這叫做巨大暈圈（halo），由其大小推定出來的 α 射線之能量極高，縱然這 α 射線通過的地方變成異常物質而留下來，也並不為奇。美國研究小組用質子束射照這巨大暈圈，調查產生出來的 X 射線。果然不錯，能量分析的結果顯示，這些 X 射線的來源是 $Z = 126$ 或 116 的超重原子。於是這消息轟動一時。

用質子束來照射巨大暈圈所含的獨居石（monazite Ce PO_4 ）的 Ce （鈾），就生成鏷（Pr， $Z = 59$ ）。事實上，不久以後證實，這鏷所放出的 γ 射線，其能量與美國研究小組所觀測的完全相同。因此，大家開始懷疑，超重元素發現的報導可能是錯誤的。

§ 4. 藉原子核反應來嘗試合成

令 $Z = Z_1$ 的原子核和 $Z = Z_2$ 的原子核碰撞而引起原子核反應，就可以得到 $Z = Z_1 + Z_2$ 的聯合原子核。事實上，截至 $Z = 107$ 的人工放射性元素都是這樣合成的。既然如此，讓一些比過去實驗所用的原子核還要重的原子核來發生碰撞，一定會形成超重原子核才對。

Z_1 和 Z_2 發生碰撞，形成 $Z = Z_1 + Z_2$ 的聯合原子核，設其形成機率為 P_A 。為了碰撞而一開始就加速原子核，所以這項高能量被帶進聯合原子核 Z 中而儲存起來。如果就此不去管它，這項能量就會被用來引發核分裂，而原子核 Z 隨即崩潰。因此，必須有某種東西來把能量帶走，使原子核 Z 保持穩定才可以。從聯合原子核放出來的中子，可能是適當的人選。縱使中子減少， Z 也不會改變。有時候能量會透過 α 衰變或 β 衰變的過程而被帶走。這時，反應產物的原子核，其質子數多多少少與 Z 有出入。無論如何，設聯合原子核 Z 發生核分裂以前，某種粒子帶走能量的機率為 P_B ，則穩定聯合原子核合成的機率為 $P_A P_B$ 。

只要 $P_A P_B$ 不至於過小，應該能夠造出壽命較長的超重原子核才對。截至目前，在 $Z_1 + Z_2 = 110 \sim 126$ 的範圍，試過各種組合，做過許多實驗，但是統統失敗了。現在，原子核物理學家正在處於反省的時期。他們重新估計 $P_A P_B$ 值，檢討各種重要因素，設計未來的適當實驗。

§ 5. 原子的碰撞造成超重準原子

電子繞原子核運行的軌道半徑 a ，遠比原子核的大小為大。令 $Z = Z_1$ 的原子與 $Z = Z_2$ 的原子發生碰撞。即使不能形成聯合原子核，如果能夠使雙方原子核接近，使其間的距離 R 遠比 a 為小，則在遠方眺望兩個原子核的電子，可能以為聯合原子核位於中心（圖 2）。除非 R 完全等於零，否則這「假」聯合原子核多多少少有點扁形。因此，縱使有電子在運行，也和普通原子有點不同。而且 R 時時刻刻在改變。於是，這種「類似」聯合原子，暫且叫做準原子。

雖然如此，假如兩個原子核很快就再度離開，那就不能叫做準原子。若電子誤以為兩個原子核是聯合原子核時，也就是 R 很小時，電子必須

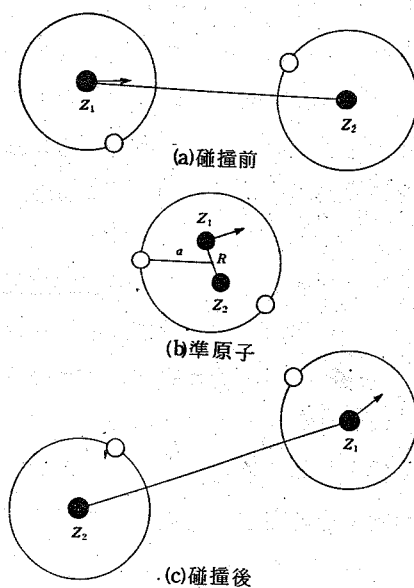


圖 2

能夠繞兩個原子核來運行好幾次才行。電子也有好幾種，在外側運行的電子（所謂外殼電子）緩慢運動，但是相當內側的軌道電子（所謂內殼電子），其運行速率很快。原子核的質子數大時，這速率特別快。因此超重準原子的壽命本身雖然較短，內殼電子在幾乎穩定的軌道上能夠運行好幾次。這軌道幾乎相同於 $R = 0$ 的真正聯合原子內的內殼電子所運行者。

正如普通原子的內殼電子會放出 X 射線，準原子的內殼電子或許也會放出 X 射線。假如能夠觀測 X 射線，就可以證實準原子確實形成了。

準原子的 X 射線，大約十年前首次觀測成功。目前正在日本九州大學的荷蘭研究小組，讓氫（ $Z = 18$ ）附著在固體裏面，再用氫來照射，則所放出的 X 射線譜中有莫名其妙的部分。經過仔細研究的結果，他們下了結論說，這是準原子氫（ $Z = 36 = 18 + 18$ ）所放出的。當時半信半疑的人，為數不少，但是後來的研究確認了這項說明。

讓更重的原子互相碰撞，是否能夠形成超重準原子？這種想法立即付諸實施。例如，用 $Z =$

53的碘來照射金 ($Z=79$)，鈷 ($Z=90$) 或鈾 ($Z=92$) 時，確實觀測到來自 $Z=132, 143, 145$ 的超重準原子之 X 射線。

§ 6. 電子在超重原子內運行的運動狀態

目前衆已週知，超重原子核還沒有製造成功，但是酷似超重原子的超重準原子，雖然是暫時性的，却是能夠製造。現在必須考慮電子在超重原子中的運動。

超重原子的內殼電子以近乎光速 c 的速率運動，需要使用相對論量子力學的狄拉克 (Dirac) 方程式來計算。正如愛因斯坦所說，靜態質量為 m 的電子，具有靜質量能 mc^2 。原子內的電子，在自己以外的電子和原子核所構成的力場中運動，這些作用力將影響到總能 E 。 E 所代表的物理意義，可依圖(3)來說明。

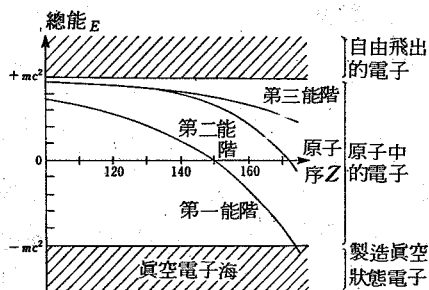


圖 3

若 $E > mc^2$ ，則 E 減去 mc^2 的能量不是原子中的電子之運動能量，而是表示脫離原子的束縛而自由自在運動的電子之運動能量。原子內電子的能量，永遠是 $E < mc^2$ 。在圖 3 的斜線部分，即 $E > +mc^2$ 與 $E < -mc^2$ ， E 可以為任何值，但在其間 $-mc^2 < E < +mc^2$ ， E 只能等於某個特定的數值。這些特定的數值叫做能階。圖 3 表示能階隨超重原子的 Z 值變化的情形。

例如， $Z=145$ 時，在 $-mc^2$ 上方的最低能

階（叫做第一能階）是 $0.14 mc^2$ ，其次（第二能階）是 $0.76 mc^2$ ，第三能階是 $0.79 mc^2$ 。事實上，有更多的能階擠在 $+mc^2$ 下方，但是因為太多而畫不完，故此從略。

電子並不是高興在那個能階就可以在那個能階上。各能階最多能夠容納幾個電子，都有限制。換言之，各能階都有指定坐位數。例如，圖 3 的三個能階，各有兩個坐位。由於能量愈低，運動狀態愈穩定，所以只要有空位，電子就從低能階依序往上佔據位子。

如果電子從外來的粒子或電磁波得到額外的能量，就跳到較高的能階，有時候甚至跳到 $+mc^2$ 的上方。結果，低能階（例如能量 E_1 ）出現空位。在上面 E_2 能階的其他電子看到這空位時，為了儘量求穩定，而掉到 E_1 能階的空位上（圖 4(a)）。這時，把多餘的能量 $E_2 - E_1$ ，以 X 射線的形式放出去。這 X 射線的特徵就是，能量一定。普通原子的內殼電子所放出的 X 射線或巨大暈圈所放出的 X 射線，都是屬於這一種類。

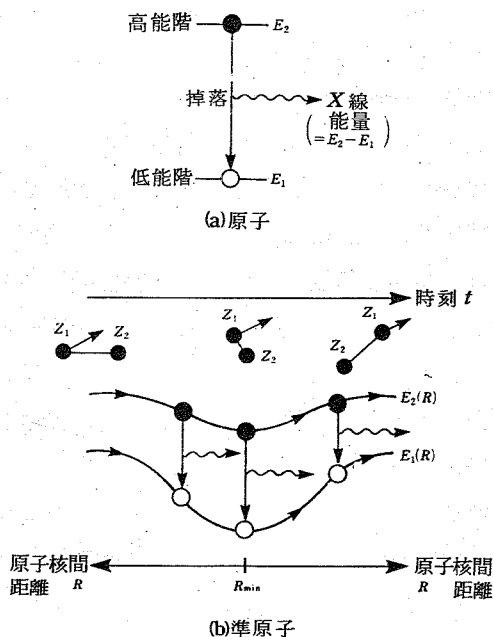


圖 4

§ 7. 超重準原子能階的測定

原子與原子的碰撞所形成的準原子，其情況有點不同（圖4(b)）。前面已經說過，兩個原子核之間的距離 R ，碰撞途中時時刻刻在改變。 R 一改變， E_1 和 E_2 也就隨著改變。但是，碰撞實驗所使用的射束、氣體、或固體，包括很多原子在內，所以應該一下子發生很多碰撞才對。各個準原子放出X射線的時間都不一定。因為放出的時刻不同，其能量 $E_2(R) - E_1(R)$ 也稍微不同。由於一齊測定不同能量的X射線，準原子的X射線顯示範圍頗寬的能譜。因此，能夠清晰地與原子的X射線加以區別。

超重準原子中的電子怎樣運動？這是饒有興趣的問題。為了研究這個問題，首先必須測定能階隨 R 改變的情形。例如， $E_1(R)$ 在各個 R 的數值如何，是不是可以依靠實驗來決定？前面所說的範圍較寬的X射線譜，將各個 R 所發生的現象混合在一起，所以對這目的毫無用處。

原子碰撞的途中，準原子的低能階出現空位時，準原子放出X射線的機率，其實很小。大部分的空位，一直保留到碰撞結束時。後來，兩個原子之一才放出X射線。同時測定該X射線的和碰撞後原子碰回來的方向 Ω 。從X射線的量，可知準原子出現空位的機率 $P(\Omega)$ 。另一方面，知道 Ω 之後，就可以推定兩個原子接近的距離——最接近距離 R_{min} 。當 $R = R_{min}$ 時的準原子能階 $E(R_{min})$ 與出現空位的機率 P 之間，有簡單的關係。於是，只要利用這個關係，就能夠從 $P(\Omega)$ 的數值求出 $E(R_{min})$ 。

使用這個方法，就鉛（ $Z=82$ ）與銅（ $Z=96$ ）所成的超重準原子 $Z=178$ ，已經求出其第一能階 $E(R)$ 。結果大致上與理論計算值一致。

§ 8. 中性真空與狄拉克正電子理論

前面已經說過，圖3的 $-mc^2$ 以下，電子的能量可以等於任何值，而且電子為了求穩定，儘量佔據低能階。既然如此，電子是不是應該都掉落在 $-mc^2$ 以下之海——圖3下方的斜線部分？為什麼佔據第一、第二、第三能階這種海面上方的能階？對於這個問題，狄拉克的說明如下：

$-mc^2$ 以下的連續能階永遠被無限多個電子所佔滿。因此，原子內的電子只好從第一能階開始佔據。然則， $-mc^2$ 以下的海中之電子，究竟從哪裏來的？它們一開始就在真空中。海中不必預先放入電子，永遠保持客滿，因此，我們不知道海中有無限多個電子。故此叫做真空。我們沒有發覺海中有電荷，因而叫做中性。

製造一種與真空不同的狀態，就會感覺那裏有某種東西。把一個原子帶進來，就是一個例子。但是，把海中的一個電子拿掉也可以。例如，利用 γ 射線來給予 $2mc^2$ 的能量，則逼近海面的電子可以到達圖3上方的斜線部分，變成自由電子而飛出去。結果海中出現一個空位。海中的電子和普通電子一樣，電荷是一 e ，但是質量和普通電子不一樣，是一 m 。海中電子少一個的狀態，觀測起來的效果等於有一個質量 $+m$ ，電荷 $+e$ 的粒子。這種粒子叫做正電子。結果是，利用 γ 射線的能量，在真空中產生了一對電子和正電子。

研究宇宙射線雲室照片的安徒生（C. D. Anderson），在狄拉克預言的五年之後，發現了正電子。

§ 9. 負電荷的真空與自然產生的正電子

如圖 3 所示， Z 超過 173，第一能階就跳入真空電子海。這種「超」超重原子究竟受到什麼物理定律的支配？

與普通真空相較，第一能階的兩個位子多兩個電子，這就是 $Z > 173$ 的真空。因此，假如普通真空是中性，則新的真空有 $-2e$ 的電荷。如果想在 $Z > 173$ 的情形之下製造中性真空，那就因為海中出現兩個空位，自然而然產生兩對電子和正電子。兩個正電子跑到外面去，被觀測出來，而兩個電子佔滿空位，造成穩定而負電荷的真空狀態。

$Z > 173$ 的超重準原子，其具體的例子是，兩個鈾原子發生碰撞而形成 $Z = 184$ 的準原子。當原子核間距離 R 等於零時，第一能階 $E(R)$ 潛入真空電子海，因此，在 $R > 0$ 的某處，一定會和海面 $-mc^2$ 相交（圖 5）。設其 R 值為 R_0 。詳細計算顯示 $R_0 = 2.6 \times 10^{-12}$ cm。

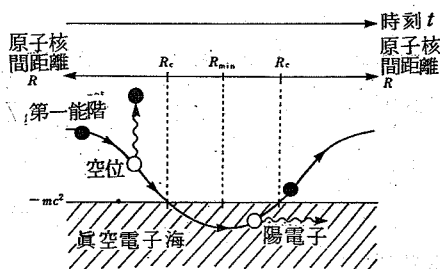


圖 5

假如碰撞途中，還沒有跳入真空電子海之前，第一能階的一個電子或兩個電子跳到高能階，而第一能階出現空位（圖 5）。兩個鈾接近到 $R < R_0$ 時，這空位就被移到海中。結果，依照某種機率，一對對的電子和正電子自然而然地產生，而電子佔滿空位，正電子跑到外面去。然後，兩個鈾原子再度離開，當 $R > R_0$ 時，第一能階載著電子從海中跳出來。

§ 10. 愚人節的高速鈾射束

由於鈾原子核有很大的電荷，想要讓兩個鈾原子核接近到 $R < R_0 = 2.6 \times 10^{-12}$ cm，通常由於強烈的庫倫排斥力而受到阻礙。為了克服排斥力，必須利用高速鈾射束來撞擊鈾。1976 年 4 月 1 日，西德達木斯塔特（Darmstadt）研究所首次加速成功，獲得高速鈾射束。後來西德研究小組讓兩個鈾原子核接近到 1.7×10^{-12} cm，觀測同時出現的正電子。

然而，利用鈾的碰撞來獲得正電子的過程，除了前面所說的，還有幾種方法。而且，其他的方法似乎可以得到更多的正電子。要在 $R < R_0$ 的情形之下，確認「自然而然地」出現的正電子，這種實驗好像極其困難。

因此，§ 9 所說的理論性預言是不是正確，現在仍然無法斷定。有人諷刺著說：「沒有方法可以查證，反而好，因為死刑的判決可以延期」。然而，理論物理學家和實驗物理學家都不去理睬這種噪音，同心協力，共同認真地研究今後發展的方向。

（取材自「數理科學」No. 222, December 1981）