

化學教材與教法：軌域能階與電子組態

葉之翔* 徐允中** 陳健安*** 鍾崇燊***

*新竹縣國立科學工業園區實驗高級中學

**國立臺灣師範大學附屬高級中學

***國立清華大學 化學研究所

壹、前言

清華大學「高中理化成績優異學生輔導計劃」，除了講述課與實驗課之外，還安排討論課。約有八位教授參與，每位教授進行討論的方式各有不同。有的教授在討論之前兩個星期，先指定範圍，並且發相關資料讓學生自行閱讀，上課時，討論所發的資料內容以及有關的疑難問題。有的教授不限定範圍，上課時鼓勵學生自由發問，所提問題經過詳細討論之後，再由教授做總結。也有教授在早上「講述課程」中教到較為艱深或是較為有趣的內容，由於時間限制，無法充分說明時，延到下午「討論課」時再詳細討論。

貳、本文

有一年，筆者（鍾崇燊）在「講述課程」教高中化學第九章原子結構與週期表，學生們對軌域能階與電子組態極感興趣，由於「講述課」時間有限，無法詳細講解這些問題，因此決定在兩週之後的「討論課」中，討論這兩個題目－「軌域能階」與「電子組態」。

筆者要求學生在討論課之前，自行前往圖書館查閱有關這兩個題目的詳細資料。討論課分成兩個部分，先由學生們講解他們所收集到的資料：

資料一 軌域能階：

學生們收集到三份資料。第一部份為現行高中課本第三冊 4 至 6 頁，主要內容為氫原子的軌域能階及電子躍遷所引起的發射譜線，影響能階的因素為主量子數 n （參考資料一）：

$$E_n = -(2.179 \times 10^{-18} \text{J})/n^2$$

第二部分為單電子原子之軌域能階（參考資料二），影響這些能階的因素為主量子數 n 與原子之核電荷 Z ：

$$E_n = -Z^2(2.179 \times 10^{-18} \text{J})/n^2$$

第三部分為多電子原子之軌域能階（圖一），除了主量子數 n 與核電荷 Z 之外，角量子數 l 也會影響軌域能階：

$$\begin{matrix} ns & < & np & < & nd & < & nf \\ (l=0) & & (l=1) & & (l=2) & & (l=3) \end{matrix}$$

如圖二(a)所示，各種軌域中之電子在原子核附近分布的情形各不相同，因此每個軌域中之電子受到其他電子的遮蔽效果也各不相同。如用 σ 表示將其他電子的遮蔽效果，有效核電荷可定義為

$$Z_{eff} = Z - \sigma$$

其中 Z 為原子的核電荷。

如圖二(b)所示， ns 軌域電子分布在原子核附近的或然率較 np 高，因此它所感受到的有效核電荷(Z_{eff})較大(表一)，所以 ns 的能階比 np 低。用類似的方式，可知 np 的能階比 nd 低， nd 的能階比 nf 低。

資料二 電子組態：

圖一表示電子依照能量高低 $1s < 2s < 2p < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < \dots$ ，填充於各軌域的順序為 $1s \rightarrow 2s \rightarrow 2p \rightarrow 3s \rightarrow 3p \rightarrow 4s \rightarrow 3d \rightarrow 4p \rightarrow \dots$ ，與高中化學第三冊第 10 頁的順序相同。依照這順序，將較低能階的軌域填入 2 個電子後，再填充較高能階的軌域，所得到的電子組態與高中化學第三冊 13 頁的組態比較，除了 Cr 與 Cu 之外，其餘元素的電子組態完全一致。

接著討論學生們提出的問題，每個問題筆者都先請幾位學生發表意見，再由筆者講解答案。

問題一：為何 Cr 的電子組態為 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$ ，Cu 的電子組態為 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ ？

解答：當一個軌域內有兩個電子時，這兩個電子間的互斥力相當大。R. L. Rich (參考資料三) 將這現象稱為軌域內互斥(intraorbital repulsion)。Rich 將軌域內互斥能列入考慮，如圖三所示，把每個軌域分成兩個能階(參考資料四)，每個能階最多只能填入一個電子，如圖三(a)所示，所得到的元素電子組態如下：

元素符號	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s
Sc	2	2	6	2	6	1	2
Ti	2	2	6	2	6	2	2
V	2	2	6	2	6	3	2
Cr	2	2	6	2	6	5	1
Mn	2	2	6	2	6	5	2
Fe	2	2	6	2	6	6	2
Co	2	2	6	2	6	7	2
Ni	2	2	6	2	6	8	2
Cu	2	2	6	2	6	10	1
Zn	2	2	6	2	6	10	2

請注意 Cr 的電子組態為 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$ ，Cu 的電子組態為 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ 。

問題二：過渡金屬中，正一價離子由 Sc^+ 至 Zn^+ 的電子組態各是什麼？

解 答：從元素的原子中，移去一個電子，成為正一價離子。此離子中之電子所感受到的有效核電荷比原子中之電子所感受到的有效核電荷大；而且離子中電子間的互斥力比原子中的來得小。因此正一價離子的軌域能階比原子的能階低。 $3d$ 軌域中之電子的平均距離遠小於 $4s$ 中之電子的平均距離，因此正一價離子 $3d$ 的能階下降比 $4s$ 的大。如圖三(b)所示，將電子填入較低的能階， $(4s, s = -1/2)$ 最多只能填入 1 個電子， $(3d, s = -1/2)$ 最多只能填入 5 個電子， $(4s, s = +1/2)$ 最多只能填入 1 個電子， $(3d, s = +1/2)$ 最多只能填入 5 個電子，由此圖三(b)可知它們的電子組態如下：

離子符號	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s
Sc^+	2	2	6	2	6	1	1
Ti^+	2	2	6	2	6	2	1
V^+	2	2	6	2	6	4	0
Cr^+	2	2	6	2	6	5	0
Mn^+	2	2	6	2	6	5	1
Fe^+	2	2	6	2	6	6	1
Co^+	2	2	6	2	6	8	0
Ni^+	2	2	6	2	6	9	0
Cu^+	2	2	6	2	6	10	0
Zn^+	2	2	6	2	6	10	1

問題三：過渡金屬中，正二價離子由 Sc^{2+} 至 Zn^{2+} 的電子組態各是什麼？

解 答：由於正二價離子中 $3d$ 電子間的互斥力比原子中 $3d$ 電子間的互斥力小很多，因此正二價離子中， $3d$ 軌域的能階比 $4s$ 的能階低，所以由 Sc^{2+} 至 Zn^{2+} 的價電子先填入 $3d$ 軌域，他們的電子組態如下：

離子符號	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s
Sc^{2+}	2	2	6	2	6	1	0
Ti^{2+}	2	2	6	2	6	2	0
V^{2+}	2	2	6	2	6	3	0
Cr^{2+}	2	2	6	2	6	4	0
Mn^{2+}	2	2	6	2	6	5	0
Fe^{2+}	2	2	6	2	6	6	0
Co^{2+}	2	2	6	2	6	7	0

Ni ²⁺	2	2	6	2	6	8	0
Cu ²⁺	2	2	6	2	6	9	0
Zn ²⁺	2	2	6	2	6	10	0

問題四：影響軌域能階的重要因素為何？

解答：影響軌域能階的重要因素包括：主量子數，核電荷或有效核電荷，角量子數，軌域內互斥能，以及離子的價數。

參、結語

目前化學教學最普遍的方式是「講述式教學法」：教師照課本內容作單向的口頭闡述，學生被動地接受知識。教師講述的主要目的是希望將課本中的知識像影印機一樣，灌入學生腦中；學生聽課的態度是全盤接受教師的意見，以應付考試。

與「講述式教學法」比較，「討論式教學法」有下列八項優點：

- 一、學生態度方面：在講述式教學法中，學生被動地接受知識，態度比較消極。而在討論式教學法中，學生主動地參與討論，態度比較積極。
- 二、人際互動方面：在講述式教學法中，教師做單向的口頭闡述，比較缺乏人際互動。在討論式教學法中，學生全體互相討論，人際互動效果極佳。
- 三、學習內容方面：在講述式教學法中，學生只能接受教師所講的知識，內容比較狹窄，而且偏向教師個人觀點。討論式教學法中，學生能從各個不同的角度觀察問題，並且能自由發表各種不同的看法和意見，內容比較豐富且多樣化。
- 四、發問技巧方面：在講述式教學法中，學生發問的對象是授課教師，必須注意禮貌及適當的態度和語氣，因此學生比較不愛提出問題。在討論式教學法中，主持人不斷鼓勵學生發問，在發問技巧方面，練習的機會比較多，而且學生之間互相提出問題，心態方面也比较輕鬆自然，因此發問技巧自然會比較好。
- 五、慎思明辨方面：在講述式教學法中，教師扮演主導的角色，將課本中的內容作單向的口頭闡述，學生只是被動地接受知識，比較不需要做深入思考。在討論式教學法中，學生主導討論的內容，為了提出自己的意見，學生必須作深入的思考，因此能培養出較佳的思考能力。當遇到有爭議性的問題，在講述式教學法中，教師必須明辨是非並且做出適當的判斷；而在討論式教學法中，將分辨和判斷的責任交給學生，如有錯誤，教師事後再做修正。
- 六、主導能力方面：主導能力包括主持會議的能力、決定進程的能力、維持秩序的能力、引導發問的能力，以及處理各種突發狀況的能力。在講述式教學法中，上課的主導人是教

師；在討論式教學法中，上課的主導人是學生，因此能培養學生的主導能力。

七、創作能力方面：在講述式教學法中，學生只能被動地接受教師所講述的知識，因此無法培養創作能力。在討論式教學法中，學生必須提出自己獨特的意見，因此必須時常要獨自做創作性思考，因此能增強學生的創作能力。

八、學習興趣方面：在講述式教學法中，由於上課方式固定，缺少變化，上課氣氛單調嚴肅，學生態度消極被動，因此學生們的學習興趣比較低落。在討論式教學法中，由於上課方式靈活，較多變化，上課氣氛輕鬆活潑，學生態度積極主動，因此學生們的學習興趣大都比較高昂。

討論式教學法的缺點是需要有足夠的時間。在這十多年來，清大資優班討論課常因時間不夠而草草結束。另一個缺點是遇到學生們不感興趣的題目，討論課會顯得冷場。除此之外，討論問題的難易度必須配合學生的化學程度：太困難的問題會使學生焦慮；太容易的問題會使學生厭煩。這兩種情況都無法引發激烈的討論。

肆、誌謝

非常感謝行政院國家科學委員會高中理化學習成就優異學生輔導實驗計畫（NSC89-2514-S007-001）；由衷懷念大家一起努力學習、認真討論化學疑難問題的美好時光。

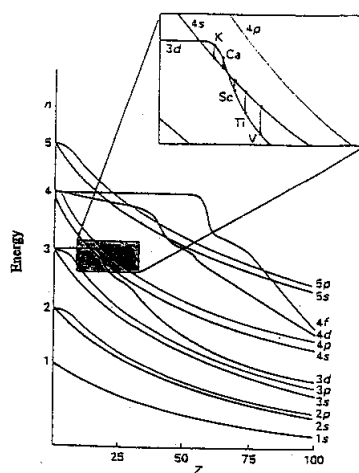
伍、參考資料

- 1.高級中學化學編輯小組，高級中學化學第三冊，台北，國立編譯館，第四至六頁，民 87 年。
- 2.D. F. Shriver, P. W. Atkins and C.H. Langford, *Inorganic Chemistry*, 2nd ed., Oxford, Oxford University Press, p.18-20, 1994.
- 3.R. L. Rich, *Periodic Correlation*, Benjamin, Menlo Park, Calif, 1965, pp.9-11
- 4.G. L. Miessler and Donald A. Tarr, *Inorganic Chemistry*, 2nd ed., New Jersey, Prentice-Hall Inc., p41, 1999.

表一 有效核電荷 Z_{eff}

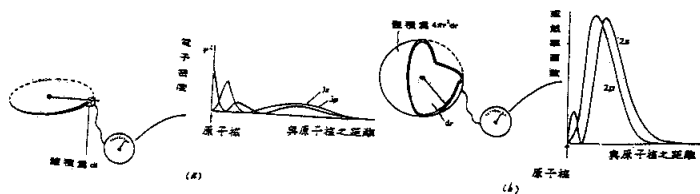
	H								He
Z	1								2
1s	1.00								1.69
	Li		Be	B	C	N	O	F	Ne
Z	3	4	5	6	7	8	9	10	10
1s	2.69	3.68	4.68	5.67	6.66	7.66	8.65	9.64	9.64
2s	1.28	1.91	2.58	3.22	3.85	4.49	5.13	5.76	5.76
2p			2.42	3.14	3.83	4.45	5.10	5.76	
	Na		Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
Z	11	12	13	14	15	16	17	18	18
1s	10.63	11.61	12.59	13.57	14.56	15.54	16.52	17.51	17.51
2s	6.57	7.39	8.21	9.02	9.82	10.63	11.43	12.23	12.23
2p	6.80	7.83	8.96	9.94	10.96	11.98	12.99	14.01	14.01
3s	2.51	3.31	4.12	4.90	5.64	6.37	7.07	7.76	7.76
3p			4.07	4.29	4.89	5.48	6.12	6.76	6.76

(From D. F. Shriver, P. W. Atkins and C.H. Langford, *Inorganic Chemistry*, 2nd ed., Oxford, Oxford University Press, pp.27, 1994)



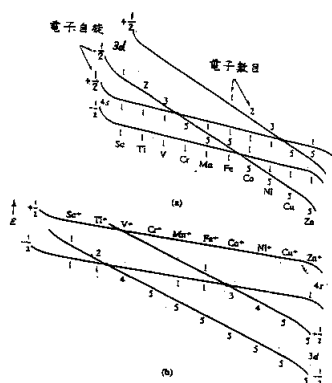
圖一 多電子原子的軌域能階

(From D. F. Shriver, P. W. Atkins and C.H. Langford, *Inorganic Chemistry*, 2nd ed., Oxford, Oxford University Press, p.30, 1994)



圖二(a) 3s 與 3p 軌域之電子密度。電子密度是表示電子在非常小的體積($d\tau$)中出現的機率。
 (b) 2s 與 2p 軌域之或然率函數。或然率函數是表示電子在一非常薄的(厚度為 dr)球形層殼中出現的機率。

(From P. W. Atkins, *Physical Chemistry*, 4th ed., Oxford, Oxford University Press, p.360, 1990)



圖三(a) 過渡元素之能階。
 (b) 過渡元素正一價離子之能階。

(From G. L. Miessler and D. A. Tarr, *Inorganic chemistry*, 2nd ed., New Jersey, Prentice Hall, p40, 1999)