

บทที่ 6

การนำ Term Symbols และ Mulliken Symbols มาใช้อธิบายสเปกตรากูดกลืนแสง (Absorption Spectra)

สเปกตรากูดกลืนของสารประกอบ เกิดมาจากการที่สารประกอบดูดกลืน (absorb) แสง ในช่วงความถี่ $10,000-50,000 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงของ Ultraviolet-Visible (ดูตารางที่ 6.1) แล้วเกิดการกระโดดของอิเล็กตรอน (Electronic transition) ข้ามจากชั้นที่มีพลังงานต่ำสุด (ground state) ไปยังชั้นที่มีพลังงานสูงกว่า (excited state) จากขบวนการนี้เองจะเกิดแถบดูดกลืนแสง (Absorption band) เกิดขึ้น

ตารางที่ 6.1 ความยาวคลื่นและพลังงานสำหรับช่วงวิสิเบิล

Spectrum regions	Near UV	True Visible	Near IR
Wavelengths(Å)	2,000	3,800	7,800
Wavenumber(Cm^{-1})	50,000	26,320	12,820
(ergx 10^{12})	9.933	5.228	2.574
Energy (kcal mole $^{-1}$)	143.5	75.37	46.13
(eV)	6.229	3.271	2.001

แถบดูดกลืนแสงนั้นอาจประกอบด้วยแถบหลายแถบ ที่มีความถี่ต่างกันรวมเรียกว่าสเปกตราของสารประกอบนั้น แถบดูดกลืนแสงต่าง ๆ เหล่านี้เป็นแถบดูดกลืนแสงที่เกิดจาก electronic transitions หลายชนิดใดแก

1. Charge Transfer Transition

ชนิดนี้เกิดจากการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่าง

อิเล็กตรอนในออร์บิทัล ของโลหะไอออน ไปยังออร์บิทัล ของลิแกนด์ หรือกลับกัน

2. Transition within ligand molecule

แถบดูดกลืนแสง ชนิดนี้ เกิดจากการกระโดดของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลของลิแกนด์ แถบดูดกลืนแสง ที่ได้มีลักษณะเหมือนกับเมื่อลิแกนด์อยู่เป็นอิสระ

3. d-d transition

แถบดูดกลืนแสง ชนิดนี้ เกิดจากการกระโดดของอิเล็กตรอน ระหว่าง ชั้นพลังงาน t_{2g} ไปยัง ชั้นพลังงาน e_g ของ d-ออร์บิทัล ของโลหะไอออน

ในที่นี้ d-d transition มีความสำคัญใน Crystal Field Theory เนื่องจากใน octahedral complex นั้นจะบอกถึงค่าความแตกต่างระหว่าง พลังงานชั้น t_{2g} และ e_g (นั่นคือ Δ) ได้จาก d-d transition band นั้นเอง และเมื่อใช้ Crystal Field Theory นี้ร่วมกับทฤษฎีอื่นๆ ประกอบกันกับ ผลที่ได้จากการทดลองโดยเทคนิคต่างๆ เช่น การวัดความเป็นแม่เหล็ก, Electron Spin Resonance, Infrared Spectroscopy และ Mossbauer Spectroscopy เหล่านี้ ย่อมสามารถทราบได้ถึงโครงสร้างพันธะ, และการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในสารประกอบโคออร์ดิเนชันของโลหะทรานซิชันได้

อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่โลหะไอออนมีจำนวนอิเล็กตรอนใน d ออร์บิทัลมากกว่าหนึ่งนั้น การอธิบายตีความหมายของ สเปกตรัมที่ได้มานั้น จะยุ่งยากมากขึ้น เพราะต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์อีกหลายชนิด ซึ่งมีผลต่อการเกิด d-d transition แฟกเตอร์ที่สำคัญคือ ผลจากการเกิด คู่ควบ ของ spin-spin coupling และ spin-orbit coupling ในกรณีดังกล่าวนี้ ต้องใช้แผนผังของระดับพลังงาน ซึ่งหาได้จากกฎของ Russell-Saunders ได้เป็นระดับพลังงาน ของ d^n configuration

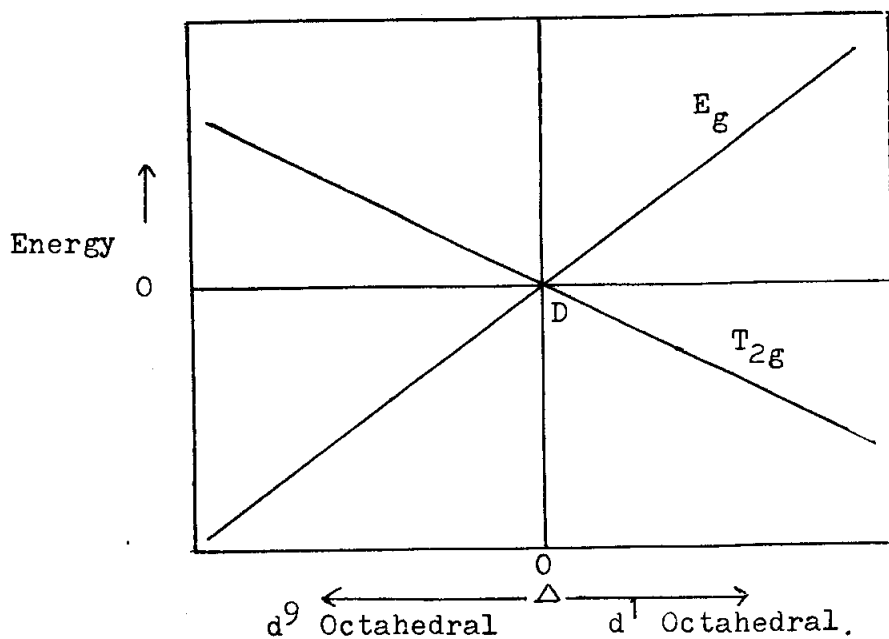
ของไอออนอิสระที่ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 5.7 เมื่อเอาความรู้จาก Crystal Field Theory มาใช้กับไอออนที่ถูกล้อมรอบด้วย โมเลกุลของ ลิแกนด์ ก็จะพบว่า states ต่างๆของไอออนอิสระเมื่ออยู่ใน Octahedral Electrostatic Field หรือ Tetrahedral Field แล้ว จะแตกตัว (splitting) โดยแยก Russell Saunders States ออกเป็นระดับพลังงาน ต่างๆได้อีก เรียกว่า Mulliken Symbols ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.2

ตาราง ที่ 6.2 การแตกตัวของ Russell-Saunders States ของไอออน ใน Octahedral และ Tetrahedral Electrostatic Field

States of free ion	States in the Crystal Field
S	A_1
P	T_1
D	$E+T_2$
F	$A_2+T_1+T_2$
G	$A_1+E+T_1+T_2$
H	$E+2T_1+T_2$

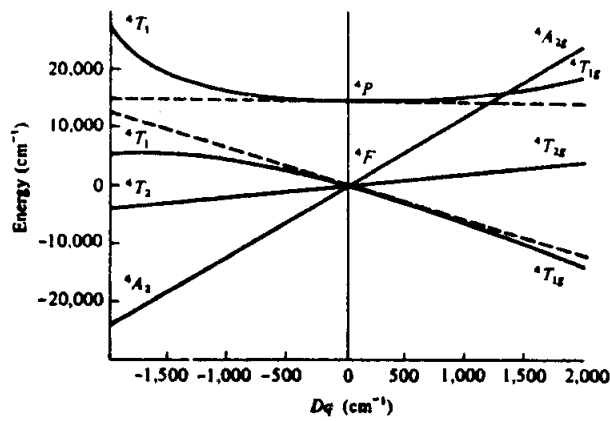
จากตารางที่ 6.2 พบว่าระดับพลังงาน ต่างๆที่เกิดขึ้นมีสัญลักษณ์ A , E , และ T ในที่นี้ A คือระดับพลังงาน ที่มีชั้นพลังงานเดี่ยว (singly degenerate) E คือระดับพลังงาน ที่มีสองชั้นพลังงานซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากัน (doubly degenerate) และ T คือ ระดับพลังงาน ที่มีสามชั้นพลังงานซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากัน (triply degenerate) สำหรับ แผนผังของระดับพลังงาน ที่แยกมาจาก Russell-Saunders States นั้น เรียกว่า Orgel Diagram โดย

มี Energy (E) อยู่ในแกนตั้ง และ Δ อยู่ในแกนนอน Orgel energy level diagram ของ d^n, d^{10-n} configuration เป็นไปตามหลักการของ Hole Formalism ด้วย กล่าวคือ มีจำนวนและชนิดของชั้นพลังงานใน Orgel diagram เช่นเดียวกัน แต่ การเรียงลำดับชั้นพลังงานอยู่กลับกัน ตัวอย่างเช่น d^1 และ d^9 ซึ่ง d^1 Russell-Saunders States เป็น 2D เมื่ออยู่ใน Octahedral Electrostatic Field จะแตกตัวได้เป็น T_{2g} และ E_g โดยมี T_{2g} เป็นพลังงานระดับต่ำสุด ส่วน d^9 ซึ่งมี Russell-Saunders state เช่นเดียวกันนั้น เมื่ออยู่ใน Octahedral Electrostatic Field แตกตัวเป็น T_{2g} และ E_g โดยมี E_g เป็น ระดับพลังงานต่ำสุด ดังแสดง ไว้ในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 Orgel Diagram ของ d^1 และ d^9 ใน Octahedral Electrostatic Field

สำหรับการแตกตัวของ Russell-Saunders States ใน Octahedral Field ของ d^n configuration ใดๆ เหมือนกับ การแตกตัวใน Tetrahedral Field แต่การเรียงลำดับชั้นพลังงานกลับกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็น Orgel Diagram ของ Co^{+2} ion จะเห็นได้ว่า Orgel Diagram ของ d^n configuration ใน Octahedral Field เหมือนกับของ d^{10-n} configuration ใน Tetrahedral Field นั้นเอง

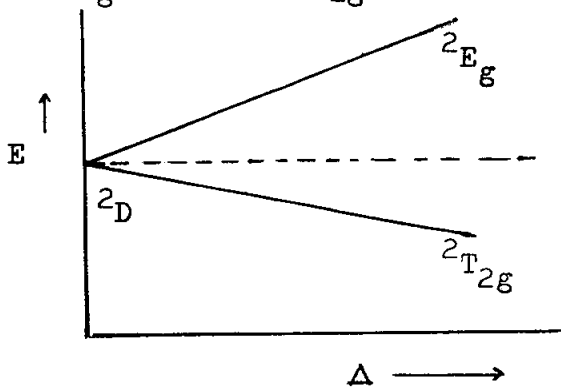


รูปที่ 6.2 Orgel Diagram สำหรับ Co^{+2} ion ใน Tetrahedral Field (ซ้าย) และใน Octahedral Field (ขวา)

จะเห็นได้ว่า การอธิบายถึงสเปกตราคูกกลืน ของสารประกอบโคออดิเนชัน นั้น เริ่มแรกจะคงทราบ ถึง Russell-Saunders ground state ของ d^n configuration เพื่อนำไปสู่ Orgel Diagram จึงจะสามารถ อธิบาย ได้ ตัวอย่างที่จะกล่าวในบทนี้จะเป็นสเปกตรา ของสารประกอบโคออดิเนชันของโลหะ ทรานซิชันที่เป็น d^1, d^2 และ d^3 configuration ใน Octahedral field นอกจากนี้ เมื่อสารประกอบเป็นโคทั้งแบบ high spin และแบบ low spin complex อาจใช้ Tanabe-Sugano Diagram เพื่ออธิบายได้ ซึ่งกรณีนี้จะยกตัวอย่างของสาร ประกอบที่เป็น d^6 configuration กว้าง

6.1 สเปกตราคูกกลืนแสงของสารประกอบ d^1 configuration

เนื่องจาก d^1 configuration มี Russell-Saunders ground state คือ 2D ซึ่งเมื่ออยู่ใน Octahedral field จะแตกตัวออกเป็น 2E_g และ $^2T_{2g}$ โดยมี $^2T_{2g}$ เป็นระดับพลังงานต่ำสุด ดังแสดงใน Orgel Diagram รูปที่ 6.3 จะเห็นว่า ระยะห่างของ 2E_g และ $^2T_{2g}$ นี้เพิ่มขึ้นเมื่อ Δ มากขึ้น



รูปที่ 6.3 Orgel Diagram ของ d^1 ใน Octahedral field

โลหะไอออนที่มี d^1 configuration และมีโครงสร้างเป็น Octahedral complex เช่น hexaaquatitanium(III)ion

$[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$, d อิเล็กตรอน หนึ่งตัวนี้จะอยู่ในชั้นพลังงานของ ${}^2T_{2g}$ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความถี่ ν ดังนี้

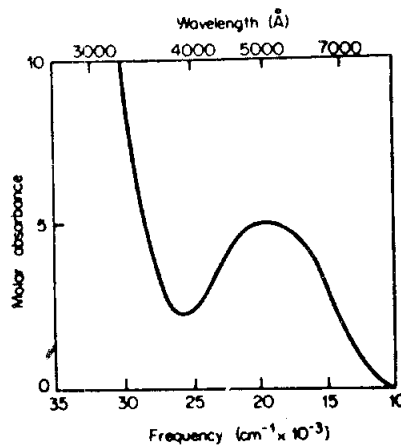
$$\nu = \frac{\Delta_o}{h}$$

ซึ่ง h คือ Planck's constant และ Δ_o คือ ค่าพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างชั้นพลังงานทั้งสอง ไอออนจะเปลี่ยนแสงที่มีความถี่ดังกล่าว เป็นพลังงานกระตุ้นอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงาน ${}^2T_{2g}$ ไปยัง 2E_g



จากขบวนการนี้เองที่เกิดเป็น แถบดูดกลืนแสงในช่วง

Visible spectrum ซึ่งคลื่นแสงสีเขียวถูกดูดกลืนไว้ จึงปล่อยแสงสีแสดและสีน้ำเงิน แล้วกลายเป็นสีม่วงของสารประกอบ $[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ ออกมา



รูปที่ 6.4

สเปกตรากดูดกลืนแสงของ $[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$

จากรูปที่ 6.4 λ_{\max} ของแถบดูดกลืนแสง อยู่ที่ 20300 cm^{-1} นั้นคือ Δ ของ $[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})]^{+3}$ คือ 20300 cm^{-1}

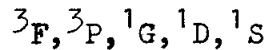
$$\Delta_o = 20300 \text{ cm}^{-1} \frac{1 \text{ kcal/mole}}{349.75 \text{ cm}^{-1}}$$

$$\Delta_o = 58.04 \text{ kcal/mole}$$

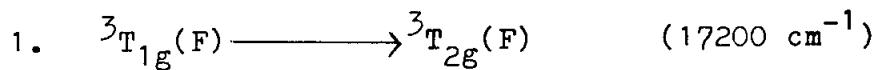
นั่นคือ การกระโดดข้ามชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจาก ${}^2T_{2g} \rightarrow {}^2E_g$ นั้นต้องการพลังงาน 58.04 kcal/mole หรือ 20300 cm^{-1} ซึ่งเป็นที่ที่สเปกตรัมมีความเข้มสูงสุด

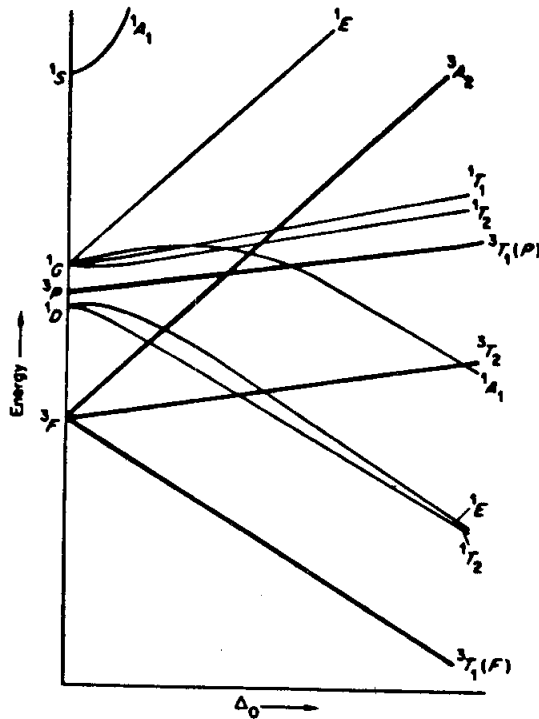
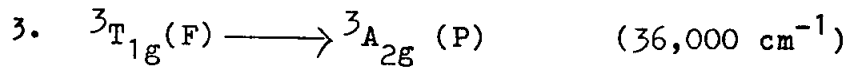
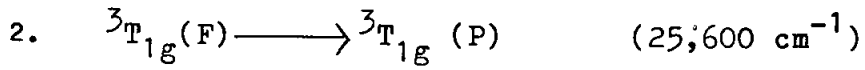
6.2 สเปกตรากดกลืนแสงของสารประกอบ d^2 configuration

อิเล็กตรอนที่มี d^2 configuration จะมี Russell-Saunders ground state ดังนี้



เมื่ออิเล็กตรอนทั้งคู่อุบัติอยู่ใน Octahedral field, 3F ซึ่งเป็น Russell-Saunders ground state จะแตกตัวออกเป็น ${}^3T_{1g}$, ${}^3T_{2g}$ และ ${}^3A_{2g}$ นอกจากนี้เทอม 3P ของอิเล็กตรอนก็แตกตัวออกเป็น ${}^3T_{1g}(P)$ ด้วย รูปที่ 6.5 แสดง Orgel Diagram ของการแตกตัวของเทอมต่างๆใน Octahedral field จาก Orgel Diagram นี้เองจะพบว่าแถบดูดกลืนแสงของ d-d transition ที่เป็น spin allowed transition ของ d^2 ใน Octahedral field เช่น $[\text{V}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ นั้น มีด้วยกันทั้งหมด 3 แถบ ดังนี้

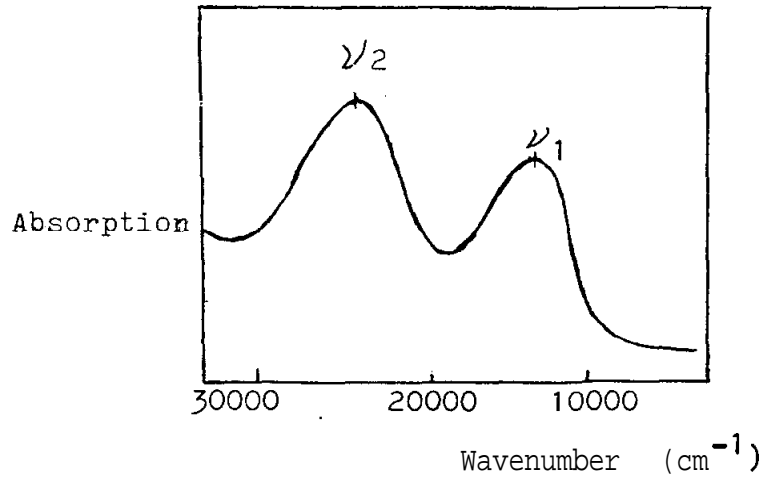




รูปที่ 6.5 Orgel Diagram แสดงระดับพลังงานของเทอมต่างๆ ของ d^2 ใน Octahedral field

สำหรับแถบดูดกลืนแสงอันแรก (17200 cm^{-1}) และแถบดูดกลืนแสงอันที่สอง (25600 cm^{-1}) นั้น เกิดในช่วงคลื่นของ วิสิเบิล จึงปรากฏให้เห็นทั้งสอง แถบ แต่แถบดูดกลืนแสงอัน ที่สาม นั้น เกิดในช่วงคลื่นของ Ultraviolet ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นบริเวณที่เกิดแถบดูดกลืนแสงของพวกที่เรียกว่า Charge Transfer Transition

ที่มีความเข้มสูง และยังมีแถบดูดกลืนแสงอินที่สามได้ จนกระทั่ง ${}^3T_{1g}(F) \longrightarrow {}^3T_{2g}(F)$
 ไม่ปรากฏให้มองเห็นได้ รูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 สเปกตรากดูดกลืนแสง ของ $[V(H_2O)_6]^{+3}$
 จาก Orgel Diagram (ในรูปที่ 6.6) นั้น สามารถนำมาทำนาย
 หาค่าแห่งของแถบดูดกลืนแสงที่ไม่ปรากฏในสเปกตรา ของ $[V(H_2O)_6]^{+3}$
 ได้ โดยนำ ν_1 และ ν_2 มาเข้าอัตราส่วนกันเป็นเลขของตัวจำนวนน้อยๆ แล้วนำอัตรา
 ส่วนนี้ไปเปรียบเทียบกับเส้นตรงในแนวตั้งใน Orgel Diagram
 ดังกล่าว นั่นคือหาเส้นตรงในแนวตั้งที่เหมาะสม (fit) ที่สุดกับอัตราส่วน ν_1 และ ν_2
 ที่คำนวณได้ เมื่อเส้นตรงไปตัดกับ State ${}^3A_{2g}$ ที่ไหนก็จะทราบค่า
 ได้

ในการคำนวณหาค่า และ B (Racah Parameter)
 ของ d^n ใน Octahedral Field นั้น เราสามารถใช้

Semiquantitative Energy Level Diagram

ซึ่งเสนอขึ้นมาโดย Tanabe และ Sugano: มาหาได้ เนื่องจาก
Tanabe-Sugano Diagram เป็นแผนผังแสดงระดับพลังงานที่ใส่ค่า

E/B ในแนวตั้งและ Δ/B ในแนวนอนโดยที่ E คือ พลังงานที่ใช้ในการ
กระโดดข้ามชั้นพลังงาน วิธีการจะคล้ายกับการหาค่าแห่ง ของ $2/3$ ใน Orgel
Diagram คือ หาอัตราส่วนของ ν_1 และ ν_2 แล้วเอาไปหา
เส้นตรง ในแนวตั้งที่เหมาะสม (fit) ที่สุดกับอัตราส่วนทั้ง กล่าว เช่นของ d^2 ใน
Octahedral field นั้น เมื่อหาได้เส้นตรง ในแนวตั้ง ที่เหมาะสม
ที่สุดแล้วก็ลากลง มาตัดกับแกน Δ/B เช่นประมาณที่ 30 จาก Tanabe-Sugano
Diagram สำหรับ $[V(H_2O)_6]^{+3}$ นั้นพบว่า $B = 860 \text{ cm}^{-1}$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{\Delta}{B} = 30 \quad \text{--- (1)}$$

$$\Delta = 30 \times 860 = 25600 \text{ cm}^{-1}$$

หากไม่ทราบค่า B มาก่อน ก็อาจหาค่า B ได้โดยลากเส้นตรง แนวนอนไปตัด
แดนตั้งของ E/B เช่น ลากจาก State ${}^3T_{2g}(F)$ ไปตัดแกน
เช่นประมาณที่ 20

$$\frac{17200}{B} = 20$$

$$B = \frac{17200}{20} = 860 \text{ cm}^{-1}$$

เมื่อทราบค่า B ก็นำไปแทนใน (1) ก็สามารถคำนวณหา ν_3 ได้

6.3 สเปกตราคูกกลืนแสงของสารประกอบ d^3 configuration

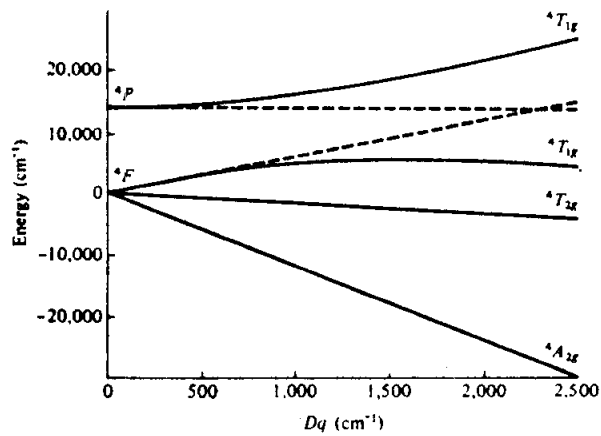
อิออนอิสระที่เป็น d^3 configuration จะมี Russell-Saunders ground state terms ดังนี้

$${}^4F, {}^4P, {}^2H, {}^2G, {}^2F, {}^2D, {}^2D, {}^2P$$

เมื่ออิออนอิสระที่เป็น d^3 configuration อยู่ใน Octahedral field, 4F term ซึ่งเป็น Russell-Saunders ground state จะแตกตัวออกเป็น ${}^4A_{2g}(F)$, ${}^4T_{2g}(F)$, และ ${}^4T_{1g}(F)$, โดยมี ${}^4A_{2g}(F)$ เป็นระดับพลังงานต่ำสุด จะสังเกตเห็นได้ว่า กรณีของ d^3 configuration นี้แตกต่างจากกรณีของ d^2 configuration ซึ่งมี ${}^3T_{1g}(F)$ เป็นระดับพลังงานต่ำสุด ทั้งนี้ เนื่องมาจากความแตกต่างกันในแรงผลักกันของอิเล็กตรอน (electron repulsion effect) ของ การจัดเรียงอิเล็กตรอนทั้งสอง เมื่ออยู่ใน Octahedral field นั้นเอง

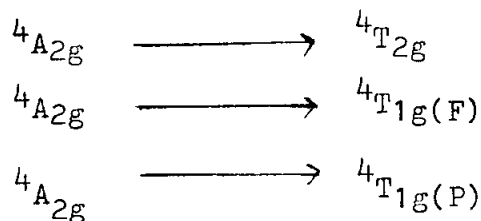
เนื่องจาก 4P term มีพลังงานใกล้เคียงกับ 4F ground state term ดังนั้นเมื่อ 4P อยู่ใน Octahedral field

และแตกตัวเป็น ${}^4T_{1g}(P)$ จึงมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน ระหว่าง ${}^4T_{1g}(P)$ กับ ${}^4T_{1g}(F)$ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการ "mix" กันระหว่างพลังงานสองชั้นนี้ แล้วได้เป็นพลังงานใหม่ 2 ระดับ ได้แก่ ${}^4T_{1g}(F)$ ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าเดิม และ ${}^4T_{1g}(P)$ ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเดิม ดังเห็นได้ใน Orgel Diagram (รูปที่ 6.7)

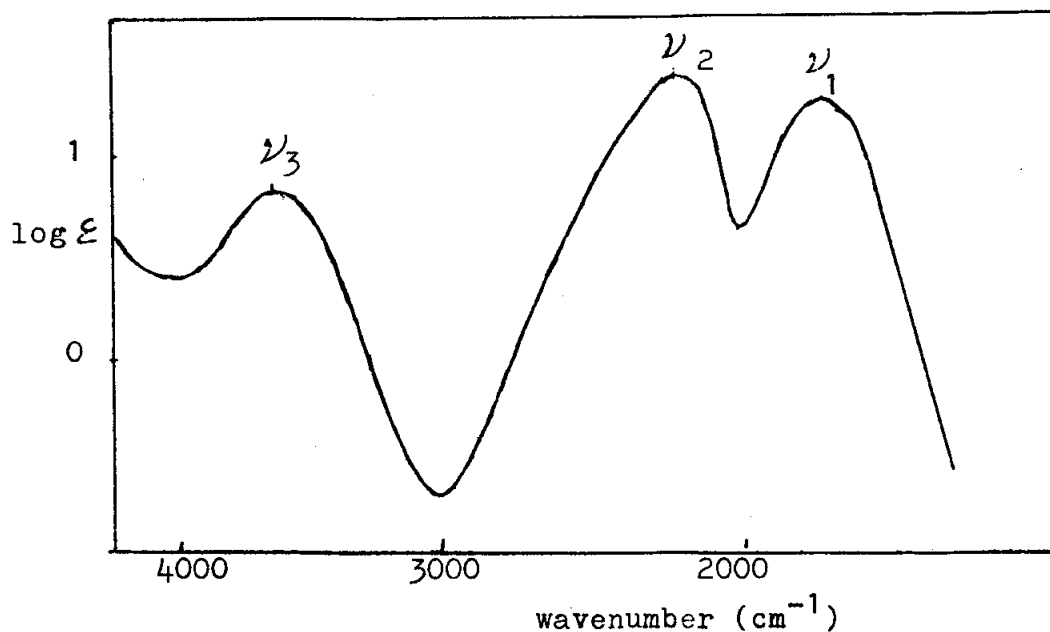


รูปที่ 6.7 Orgel Diagram ของสารประกอบ d^3 ใน octahedral field

จากกฎของ spin allow ก็จะได้เห็นว่าสมมติฐาน ของ d^3 configuration ใน octahedral field ได้แก่



ตัวอย่างของ สเปกตรัม ของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$
 ซึ่งเป็น d^3 configuration จากการทดลองจะเป็นดังรูปข้างล่างนี้ (รูปที่ 6.8)



รูปที่ 6.8 สเปกตรามดูดกลืนแสง ของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$

ซึ่งจะเห็นได้ว่ามี สเปกตรัม ทั้ง, หมก 3 แถบ แต่ แถบ ของ ν_3
 พบว่าจะไม่ชัดเพราะถูกบดบังด้วย Charge Transfer band นั้นเอง

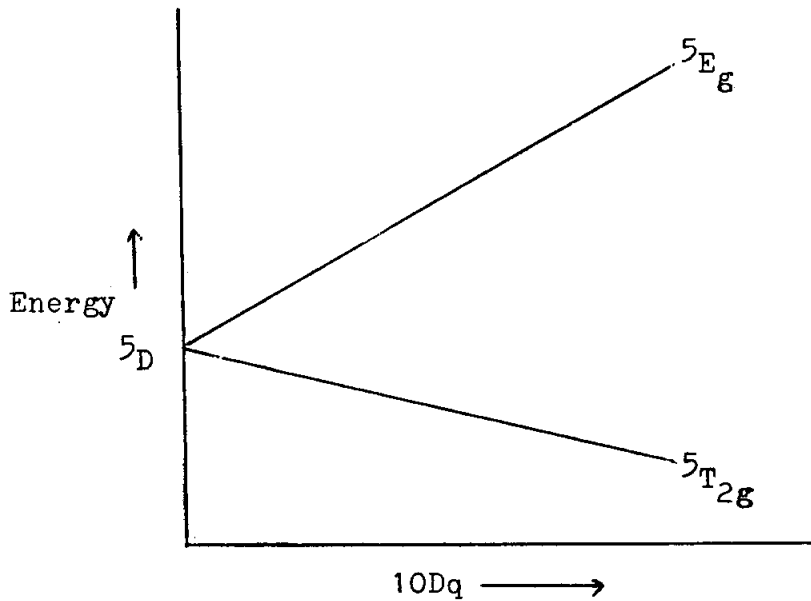
6.4 สเปกตรากักกลืนแสง ของสารประกอบ d^6 configuration

ไอออนอิสระที่เป็น d^6 configuration มี Russell-Saunders

Terms ดังนี้
 $5D, 3H, 3G, 3F, 3F, 3D, 3P, 3P, 1I, 1G, 1G,$
 $1F, 1D, 1D, 1S, 1S$

เมื่อไอออนอิสระที่เป็น d^6 configuration อยู่ใน Octahedral field

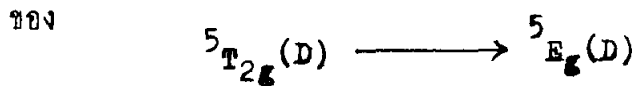
ซึ่งเป็น Russell-Saunders ground state จะแตกตัวออกเป็น
 $5T_{2g}(D)$ และ $5E_g(D)$ state โดยมี $5T_{2g}(D)$ เป็นระดับพลังงาน
 ต่ำสุด ดังแสดงใน Orgel Diagram ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 Orgel Diagram ของสารประกอบ d^6 ใน Oct. field

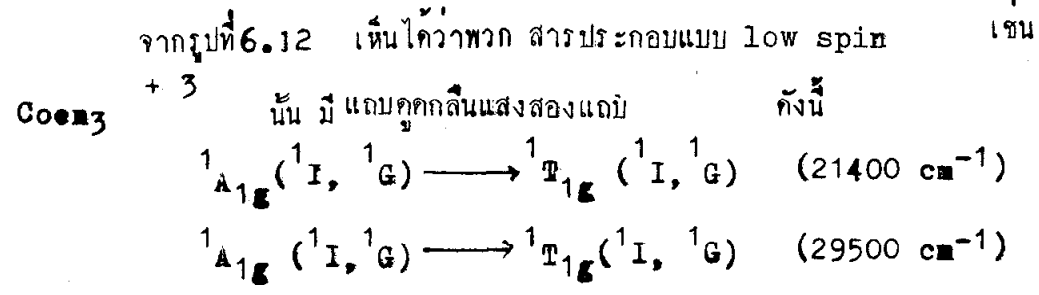
จากกฎของ spin allowed จะเห็นได้ว่า สเปกตรากักกลืนแสง

ของสารประกอบ d^6 ใน Octahedral field นั้นจะเป็นการ Transition

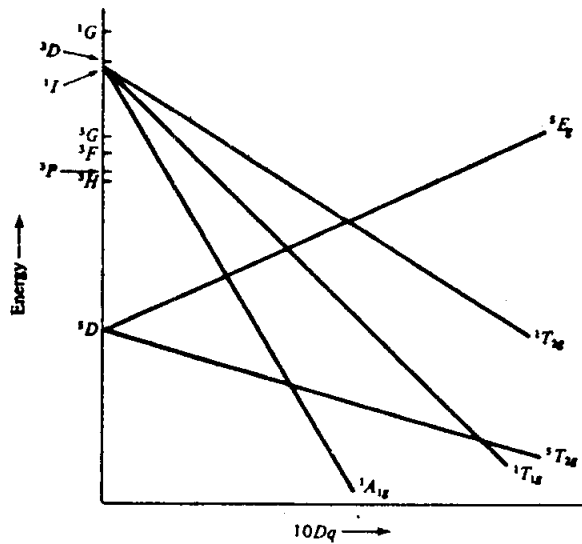


โดยปรากฏเป็น แถบดูดกลืนแสงหนึ่งแถบ สำหรับสารประกอบเช่น สารประกอบ CoF_6^{-3} ซึ่งเป็นสารประกอบโคออดิเนชันแบบ high spin มีความเข้มข้นสูงสุดที่ 13000 cm^{-1} เป็นต้น

แต่สำหรับสารประกอบโคออดิเนชันแบบ low spin ทั้งหมด เช่น $[Coen_3]^+3$ นั้น พบว่ามี แถบดูดกลืนแสงมากกว่าหนึ่งแถบ และพบว่า ระดับพลังงานต่ำสุด เป็น ${}^1A_{1g}$ แทนที่จะเป็น ${}^5T_{2g}(D)$ เหมือนพอสสารประกอบแบบ high spin ดังนั้นจึงเป็นการ Transition ซึ่ง มาจาก เทอม 5D ซึ่งไม่ใช่ 5D และเมื่อเติม เทอมสำหรับสารประกอบแบบ low spin ลงใน Orgel diagram ค่ายนั้น เรียกแผนผังระดับพลังงานที่มีทั้งของสารประกอบแบบ high spin และ low spin ว่า Modified Orgel Diagram ดังรูปที่ 6.10



ในกรณีที่สารประกอบเช่น d^6 ซึ่งมีได้ทั้งสารประกอบแบบ high spin และแบบ low spin เหล่านี้ เพื่อความสะดวกและเห็นได้ชัดเจนถึง ความแตกต่างของสเปกตรัมของ ทั้งสองชนิดนิยมใช้ Tanabe-Sugano Diagram



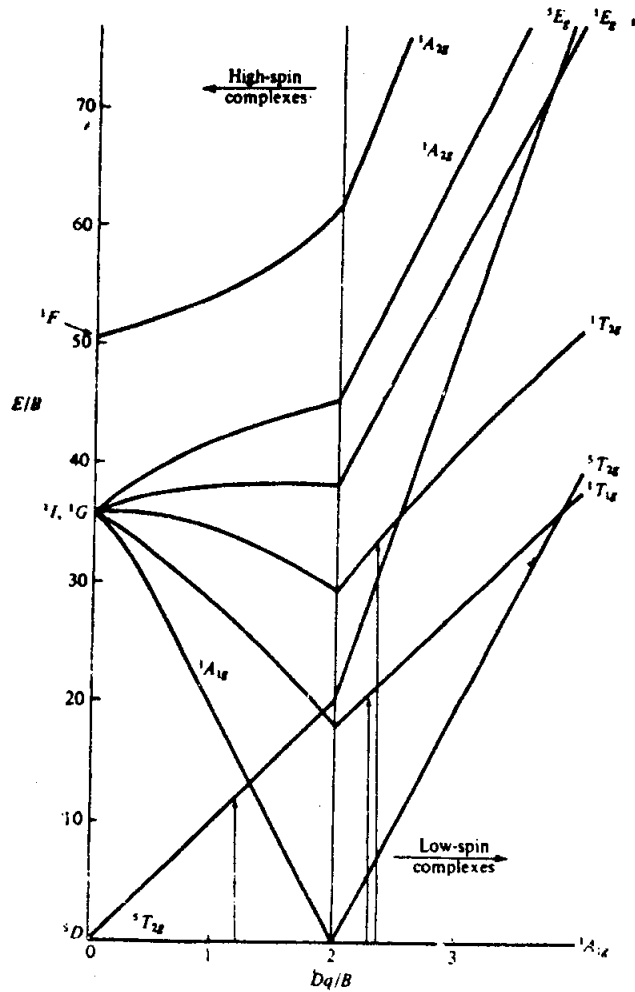
รูปที่ 6.10 Modified Orgel diagram แสดงระดับ

พลังงานทั้ง high spin และ low spin ของ d^6 configuration ใน octahedral field

ซึ่งคล้ายกับ Orgel diagram เว้นแต่

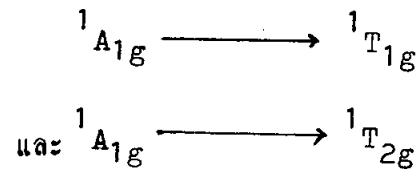
1. แสดงแผนผังระดับพลังงานของสารประกอบ โคออดิเนชันแบบ high spin ไว้ด้านซ้ายมือ ส่วนของสารประกอบแบบ low spin จักไว้ทางด้านขวามือ โดยมีเส้นคั่นฉากแบ่ง ไว้เป็น 2 ด้าน
2. หน่วยของพลังงานค่านแกนตั้งเป็น E/B ส่วนหน่วยของพลังงานค่านแกนนอน เป็น $10 Dq/B$
3. ใส่ค่า เทอมที่มีระดับพลังงานต่ำสุดให้อยู่ในแกนนอน และใส่เทอมอื่นๆสัมพันธ์กับแกนนอนนั้น

ตัวอย่าง Tanabe-Sugano Diagram ของ Co^{+3} complex ซึ่งเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนชันแบบ high spin และแบบ low spin ใดแสดงไว้ในรูปที่ 6.11

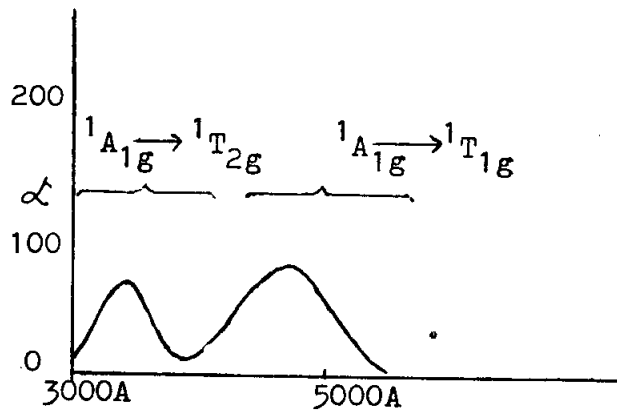


รูปที่ 6.11 Tanabe-Sugano Diagram ของ Co^{+3} complex สำหรับสารประกอบ Co^{+3} complex (d^6) ทั้งแบบ high spin และ low spin จากรูปที่ 6.11 เห็นได้ว่าทางกานานที่มี Transition เกิดขึ้นเพียงเดี๋ยวกคือ ${}^5T_{2g} \rightarrow {}^5E_g$ ซึ่งเป็นกานของสารประกอบแบบ high spin

ส่วนก้านขวามือมี Transition เกิดขึ้นได้ 2 แถบ คือ



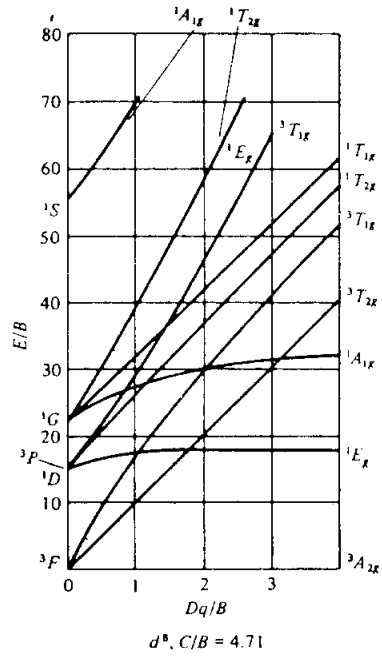
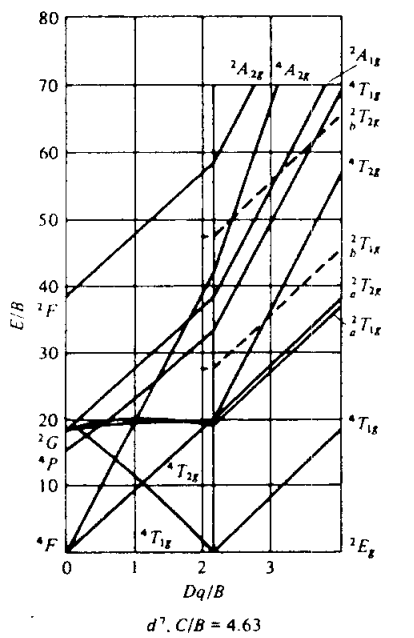
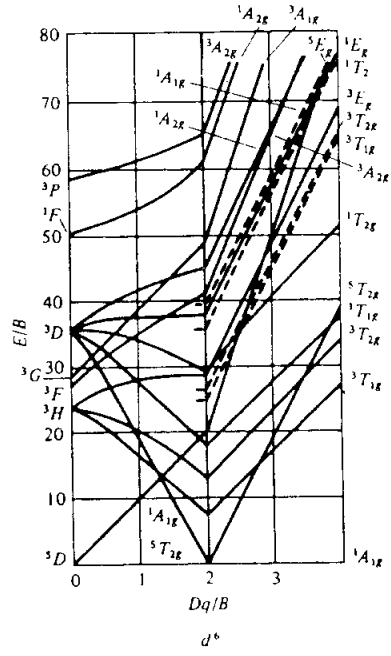
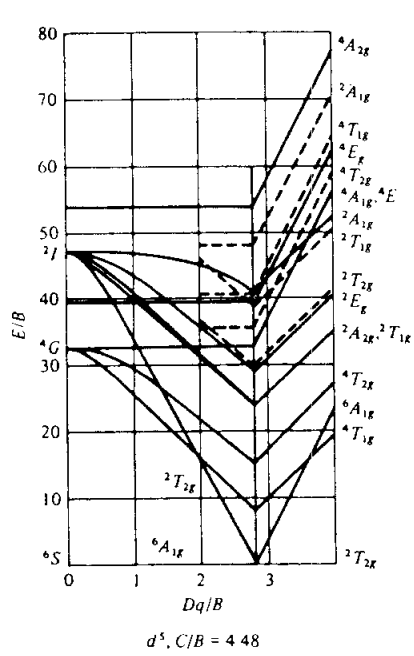
ซึ่งเป็นก้านของสารประกอบ โคบอลต์ในชั้นแบบ low spin ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 สเปกตรัมของสารประกอบแบบ low spin ของ $[Co(en)_3]^{+3}$

สำหรับ Tanabe - Sugano Diagram สำหรับสารประกอบ d^n

อื่น ๆ นั้นมีแสดงไว้ในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 (ต่อ)

