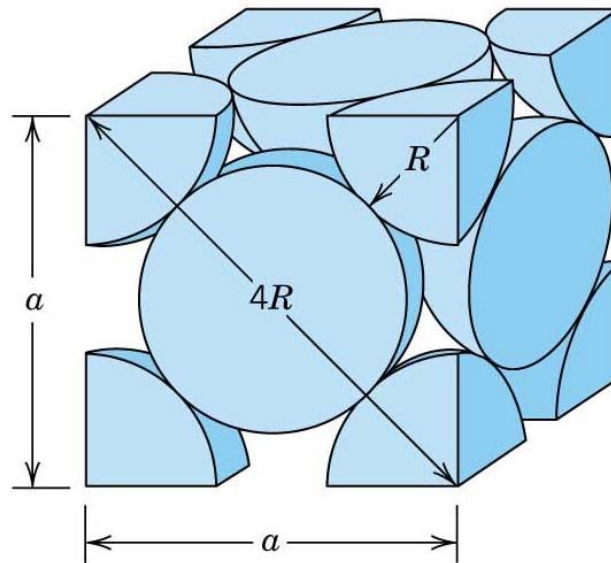


โครงสร้างอะตอม และแรงดึงดูดระหว่างอะตอม (Atomic Structure and Interatomic Bonding)



วัตถุประสงค์

(Learning Objectives)

1. สามารถอธิบายลักษณะของโครงสร้างอะตอม

2. สามารถอธิบายถึงลักษณะของพันธะต่างๆได้ เช่น ionic, covalent, metallic, hydrogen และ Van der Waals

โครงสร้างอะตอม (Atomic Structure)

อะตอมประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆซึ่งเรียกว่า นิวเคลียส (nucleus) ซึ่งประกอบไปด้วย โปรตอน (protons) และ นิวตรอน (neutrons) และรอบๆนิวเคลียสก็จะมีอิเล็กตรอน (electrons) วิ่งอยู่ล้อมรอบ

อนุภาค	มวล (kg)	ประจุไฟฟ้า (Coulomb)
โปรตรอน	1.67×10^{-27}	$+1.60 \times 10^{-19}$
นิวตรอน	1.67×10^{-27}	0
อิเล็กตรอน	9.11×10^{-31}	-1.60×10^{-19}

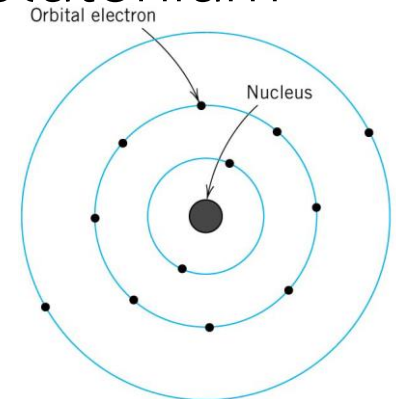
เลขอะตอม (Atomic number) และ มวลอะตอม (Atomic mass)

เลขอะตอม (Atomic number, Z) หมายถึงจำนวนโปรตอนของแต่ละธาตุ

มวลอะตอม (Atomic mass, A) เป็นผลรวมของโปรตอนและนิวตรอนในนิวเคลียส

Nucleus: Z = จำนวน protons
= 1 for hydrogen to 94 for plutonium
 N = จำนวน neutrons

$$\text{Atomic mass } A \approx Z + N$$



เนื่องจากอะตอมมีน้ำหนักน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของ
สิ่งของที่สามารถชั่งได้เป็นกรัมหรือกิโลกรัม เพื่อความสะดวกจึง
บอกน้ำหนักของอะตอมหรือโมเลกุลในหน่วยของ **amu (atomic
mass unit)** ซึ่ง 1 amu มีค่าเท่ากับ $1/12$ เท่าของน้ำหนัก
อะตอมของคาร์บอน 12 (^{12}C) ซึ่งเป็นไอโซโทปของคาร์บอนที่มี
มากที่สุด

**Avogadro's number (N_A) หรือเลขอาโวกาโดร หมายถึง
จำนวนอะตอมของธาตุหนึ่งใน 1 โมล ซึ่งประกอบด้วยจำนวน
อะตอมเท่ากับ 6.023×10^{23} อะตอม**

* ไอโซโทป (isotopes) หมายถึงอะตอมของธาตุชนิดหนึ่งมีมวล
อะตอมที่แตกต่างกันตั้งแต่สองค่าขึ้นไป

พันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง (Atomic Bonding in Solids)

- คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุสามารถอธิบายได้จาก ขนาดของแรงที่กระทำระหว่างอะตอม (interatomic forces) หรือเรียกว่าพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของธาตุต่างๆจะพยายามทำให้ตัวของมันเองมีสภาพที่เสถียรมากที่สุด โดยจะรวมกันเป็นกลุ่มเพื่อจะได้มีพลังงานต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสภาพอะตอมเดี่ยว

พันธะระหว่างอะตอม

Primary Interatomic bond (Chemical bond)

ionic, covalent, metallic

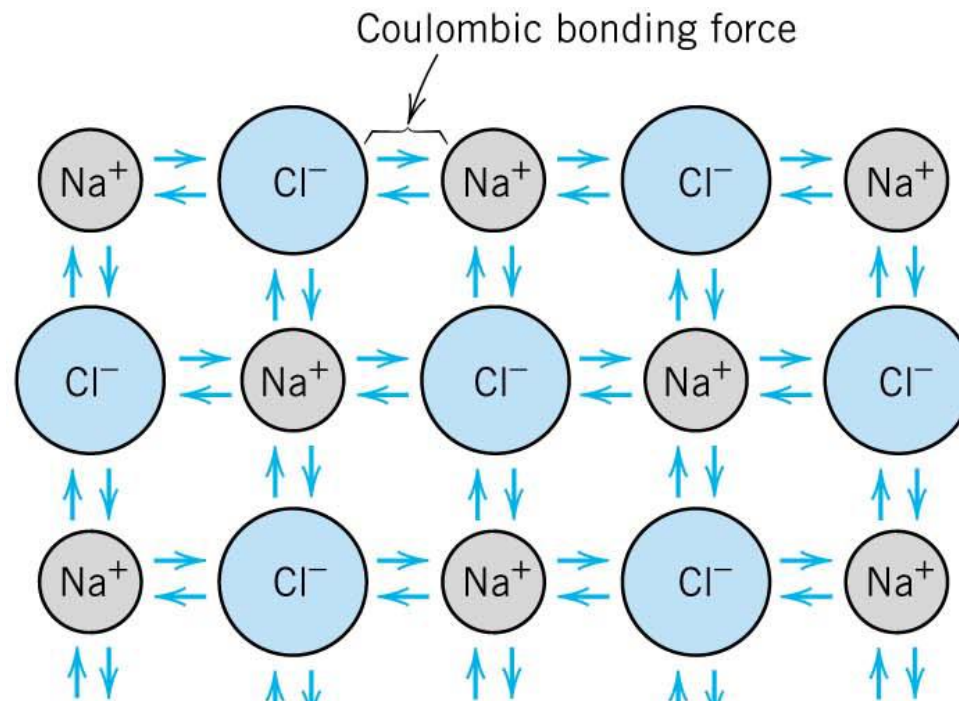


Secondary Bonding (van der Waals bonding)

Fluctuating induced dipole bonds, Polar molecule-induced dipole bonds,
Permanent dipole bond

Ionic bonding

- เกิดจากการให้และรับอิเล็กตรอนกันระหว่างอะตอมของ 2 ธาตุ โดยอะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนไปนั้นทำให้ตัวมันเองมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยลงจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกออกมา ส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายรับอิเล็กตรอนมานั้นจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบออกมา



Covalent bonding

- เป็นพันธะที่ใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันกับอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดเสถียรภาพขึ้น

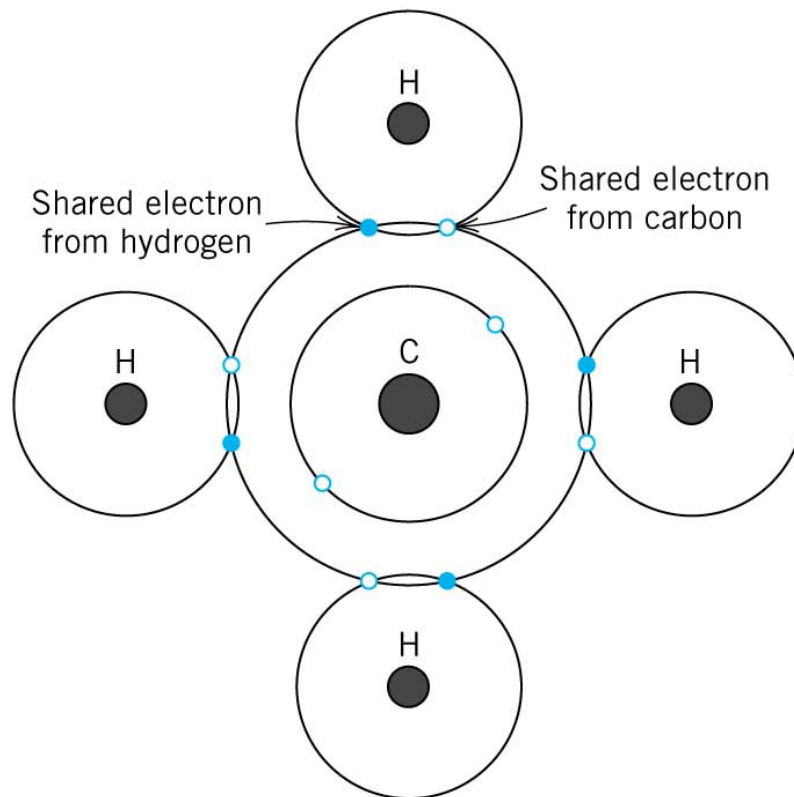


FIGURE 2.10 Schematic representation of covalent bonding in a molecule of methane (CH_4).

Metallic bonding

- เป็นพันธะที่ยึดเหนี่ยวอะตอมโลหะ โดยมีลักษณะคล้ายกับพันธะโควาเลนต์ แต่แตกต่างกันอยู่ที่ลักษณะการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมร่วมกันทั้งหมดและจะเป็นอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ทั่วไปในวัสดุ เรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) หรือ กลุ่มอิเล็กตรอน (electron cloud)

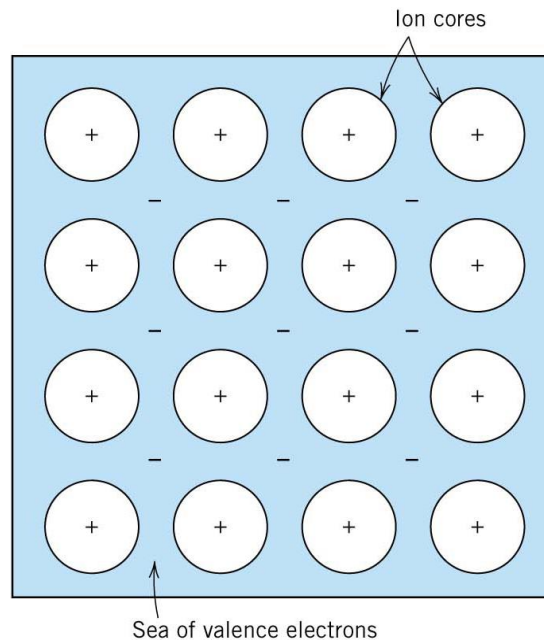


FIGURE 2.11 Schematic illustration of metallic bonding.

พันธะทุติยภูมิ (Secondary bonding)

- หรือ Van der Waals bonding เป็นพันธะที่เกิดจากแรงดึงดูดทางกายภาพ ซึ่งมีแรงดึงดูดน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ primary bond ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางเคมี
- แรงดึงดูดของ secondary bonding เกิดจาก**แรงกระทำระหว่างขั้วของอะตอมหรือโมเลกุล** ซึ่งเกิดจากความไม่สมดุลระหว่างประจุไฟฟ้าบวกและลบ ซึ่งแสดงดังรูป

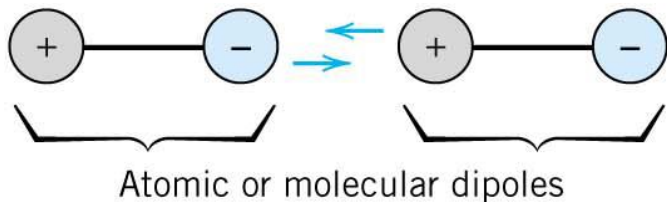


FIGURE 2.12 Schematic illustration of van der Waals bonding between two dipoles.

Fluctuating induced dipole bonds

- สภาพชั่วอาจเกิดขึ้นในอะตอมหรือโมเลกุลที่โดยปกติแล้ว มีความสมดุลทางไฟฟ้า ดังรูป 2.13 (a) แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน อาจจะทำให้ความสมดุลภายในเสียไป ทำให้เกิดสภาพชั่วขึ้นชั่วคราวดังรูปที่ 2.13 (b) ซึ่งอาจจะไปเหนี่ยวนำอะตอมข้างเคียงเกิดสภาพชั่วและเกิดแรงดึงดูดระหว่างทั้งสองอะตอมเป็น van der Waals bond ขึ้น

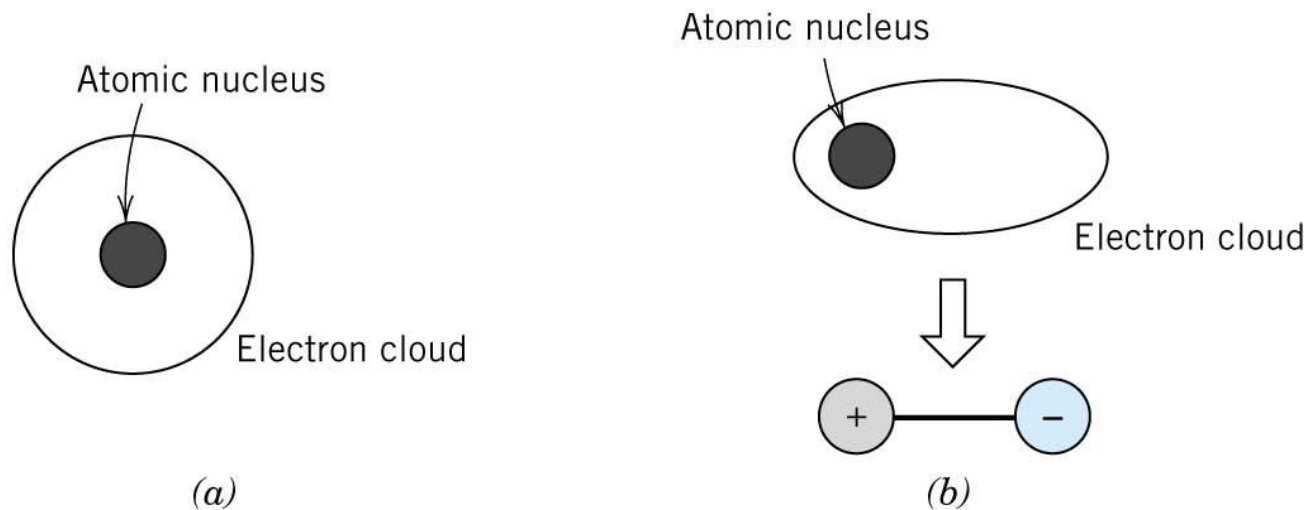


FIGURE 2.13 Schematic representations of (a) an electrically symmetric atom and (b) an induced atomic dipole.

Polar Molecule-induced dipole bonds

- แรงดึงดูดชนิดนี้เกิดจากความไม่สมดุลของการจัดเรียงตัวของอนุภาคบวกและลบในโมเลกุลบางประเภท ซึ่งเรียกว่าโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงถึงความไม่สมดุลกันของ HCl โดย polar molecule สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่อยู่ข้างเคียง ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลทั้งสอง ซึ่งแรงกระทำนี้จะมีขนาดมากกว่าแรงกระทำระหว่าง fluctuating induced dipoles

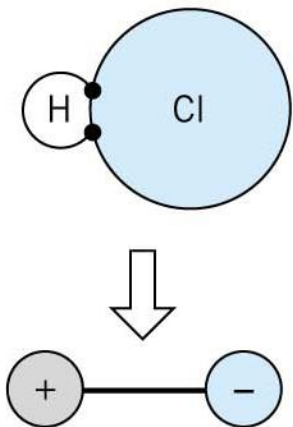


FIGURE 2.14 Schematic representation of a polar hydrogen chloride (HCl) molecule.

Permanent dipole bonds

- จะมีการเหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ที่อยู่ข้างเคียงกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่าง 2 โมเลกุลเกิดเป็นพันธะขั้วถาวร (permanent dipole bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า induced dipole bond ทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้ว

Secondary bonding ชนิดที่มีความแข็งแรงมากที่สุดคือ **polar molecule bonding ชนิดพิเศษ** ที่เรียกว่า **พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)** ซึ่งมักเกิดเมื่อมีพันธะโควาเลนต์ระหว่างของอะตอมไฮโดรเจนกับฟลูออรีน (HF), กับออกซิเจน (H_2O) และกับไนโตรเจน (NH_3) พันธะเหล่านี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอน 1 ตัวของไฮโดรเจนร่วมกับอะตอมของธาตุอื่น ทำให้โมเลกุลด้าน H มีสภาพขั้วเป็นบวกอย่างมาก และสามารถสร้างแรงดึงดูดที่แข็งแรงกับส่วนที่มีประจุลบในโมเลกุลข้างเคียง เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนได้

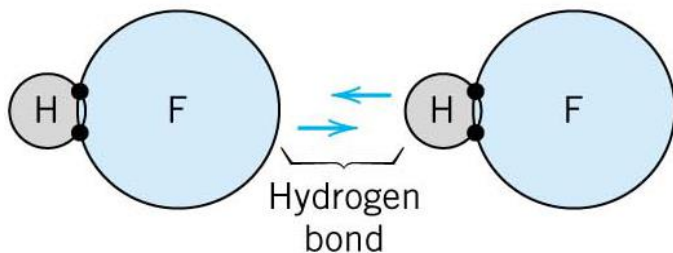


FIGURE 2.15 Schematic representation of hydrogen bonding in hydrogen fluoride (HF).

โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)

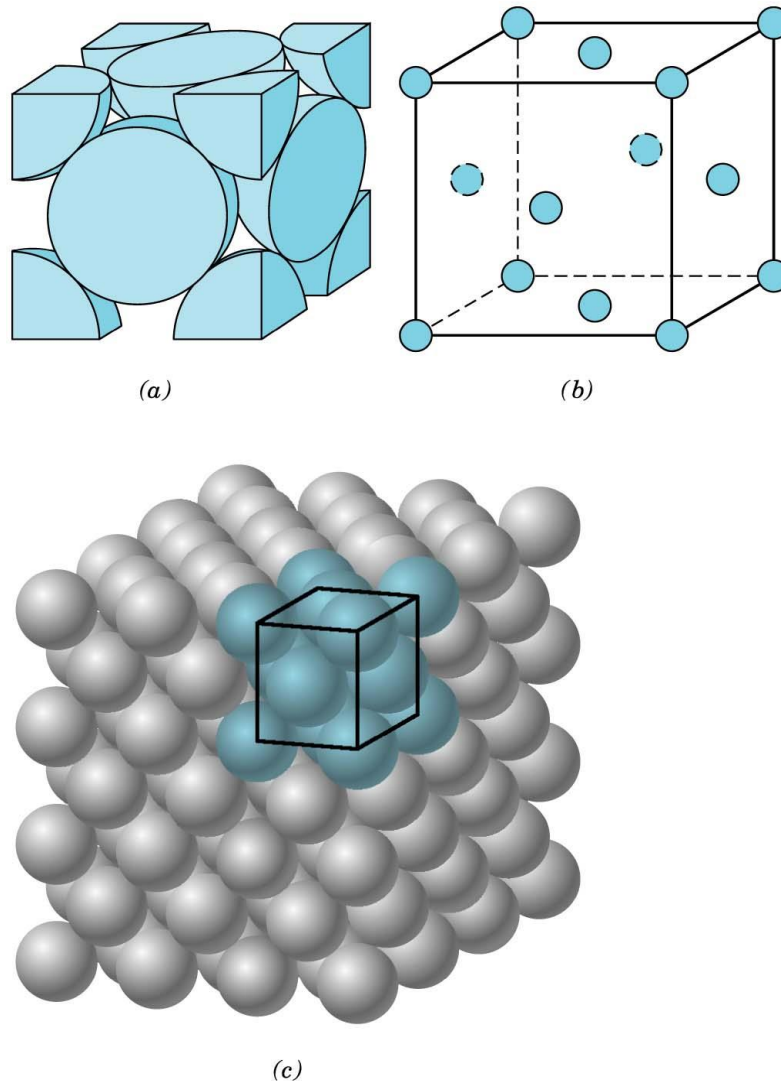


FIGURE 3.1 For the face-centered cubic crystal structure: (a) a hard sphere unit cell representation, (b) a reduced-sphere unit cell, and (c) an aggregate of many atoms. (Figure c adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 51. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Space lattice & Unit cell

Space lattice

ประกอบด้วยจุดต่างๆเรียงกันเป็นแถวใน 3 มิติ แต่ละจุดใน space lattice จะถูกห้อมล้อมด้วยจุดอื่นๆในลักษณะที่เหมือนกัน

Unit cell

Space lattice เป็นการบ่งบอกถึงตำแหน่งของอะตอมในหน่วยเซลล์ (Unit cell) ที่เป็นเส้นทึบและซ้ำๆกัน ขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์กำหนดด้วย lattice vector a , b และ c ซึ่งแสดงถึงความยาวในแต่ละด้านของหน่วยเซลล์ และมุมระหว่าง vector a , b และ c เป็นมุม α , β และ γ ซึ่งรวมเรียกว่า **ค่าคงตัวแลตทิซของหน่วยเซลล์**

Unit cell

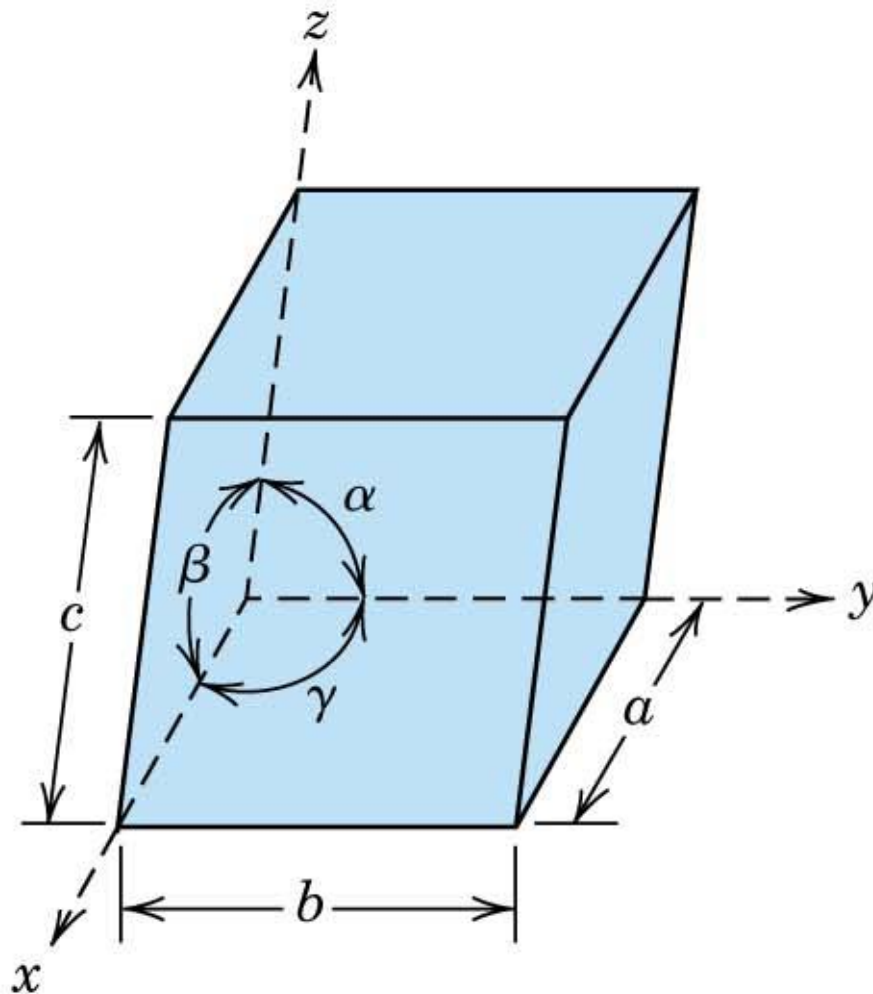
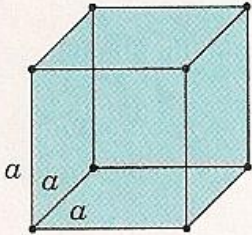
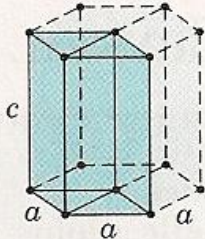
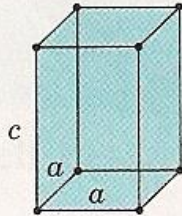


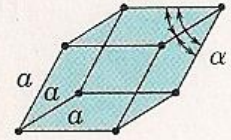
Table 3.2 Lattice Parameter Relationships and Figures Showing Unit Cell Geometries for the Seven Crystal Systems

<i>Crystal System</i>	<i>Axial Relationships</i>	<i>Interaxial Angles</i>	<i>Unit Cell Geometry</i>
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

Rhombohedral

$$a = b = c$$

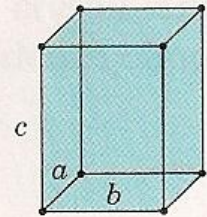
$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$



Orthorhombic

$$a \neq b \neq c$$

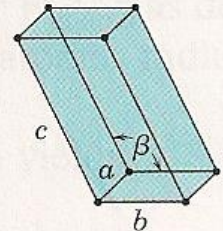
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Monoclinic

$$a \neq b \neq c$$

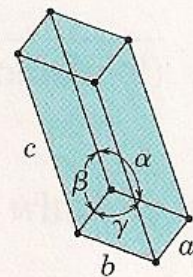
$$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$$



Triclinic

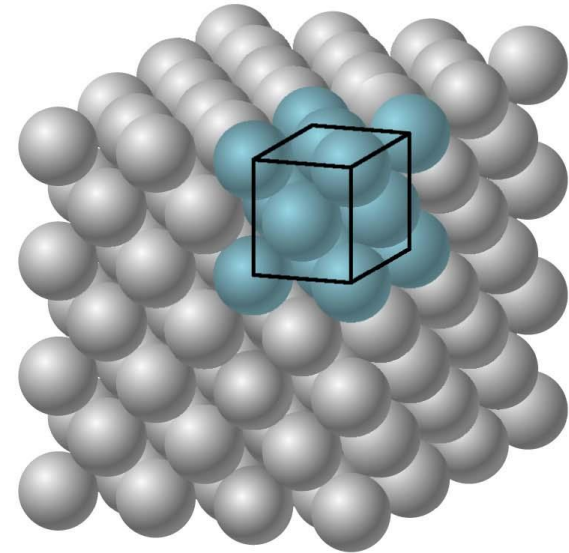
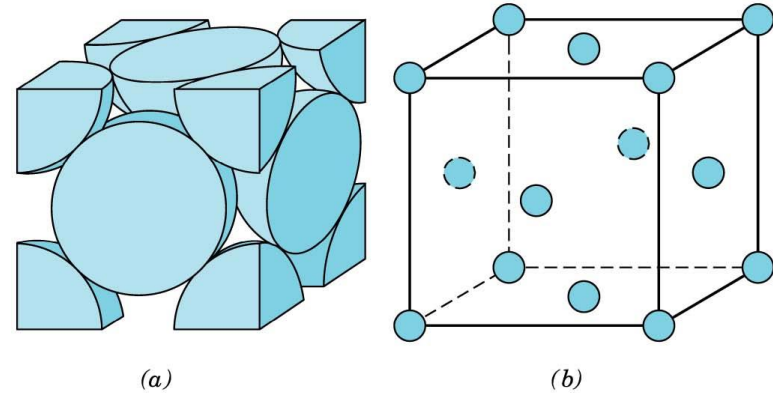
$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



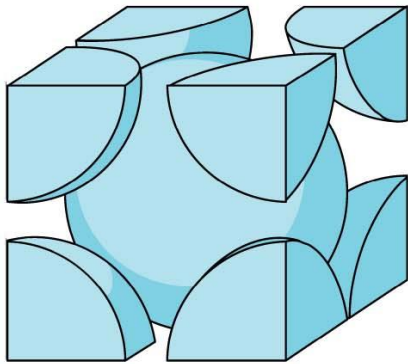
โครงสร้างผลึกและวัสดุประเภทโลหะ

โลหะประมาณ 90% เมื่อเวลา
แข็งตัวจะตกผลึกซึ่งส่วนมากจะเป็น
Face-Centered Cubic (FCC),
Body-Centered Cubic (BCC)
และ Hexagonal Closed Packed
(HCP)

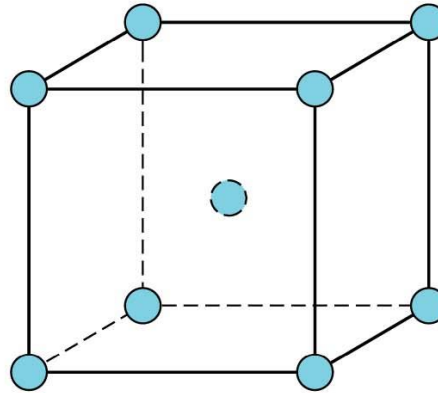


Face-Centered Cubic (FCC)

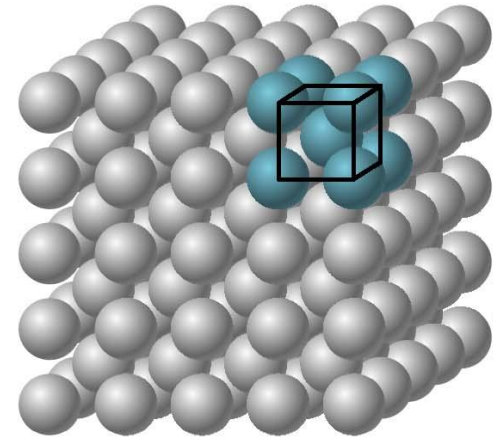
Body-Centered Cubic (BCC)



(a)

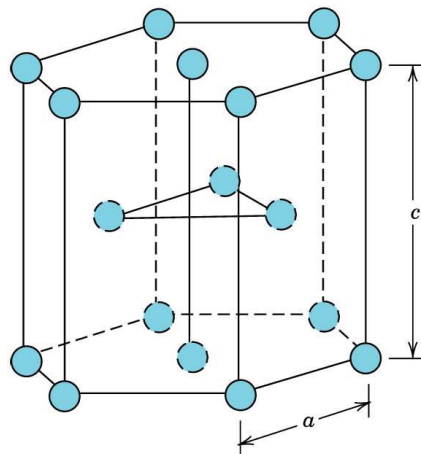


(b)

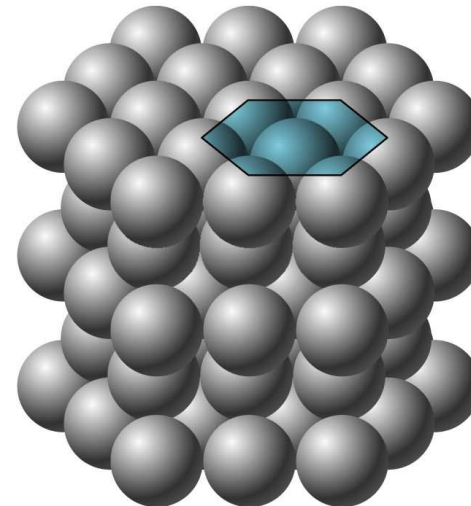


(c)

Hexagonal-Closed Packed (HCP)



(a)



(b)

Coordination Number & Atomic Packing Factor (APF)

- Coordination Number

คือจำนวนอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดที่สุด (หรือมีผิวติดกัน) ใน unit cell

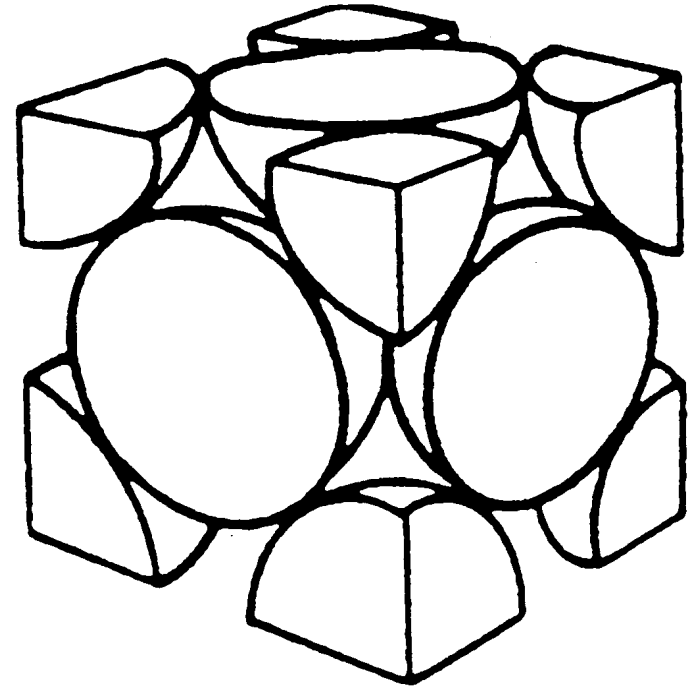
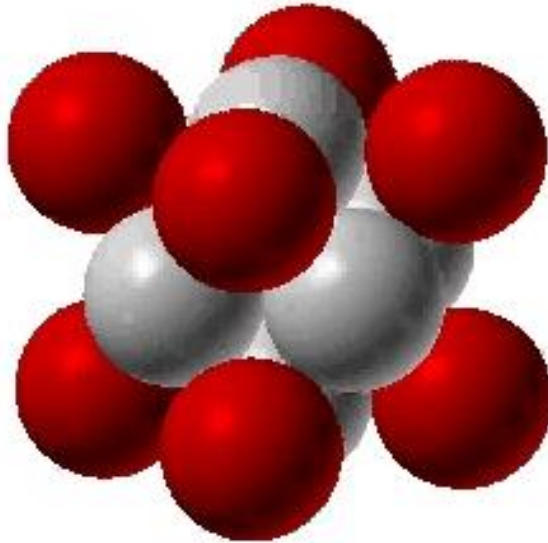
- Atomic Packing Factor (APF)

เป็นการคำนวณหาแฟกเตอร์ของปริมาตรที่อะตอมเข้าไปบรรจุใน unit cell

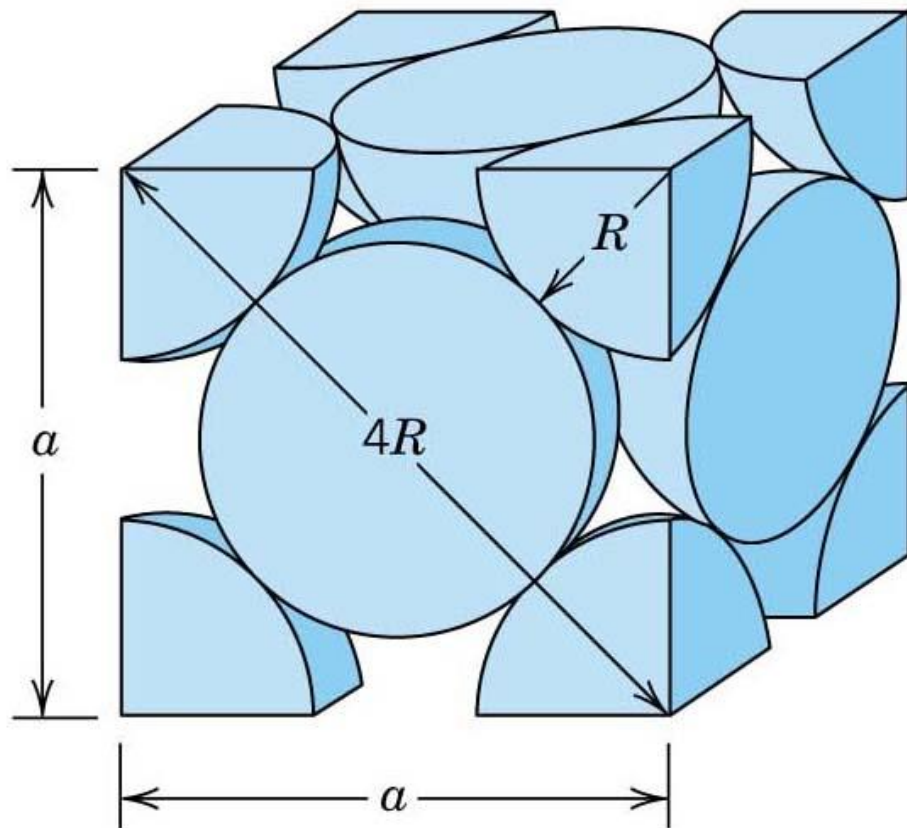
$$\text{APF} = \frac{\text{Volume of atoms in unit cell}^*}{\text{Volume of unit cell}}$$

*assume hard spheres

โครงสร้างผลึกแบบ FACE-CENTERED CUBIC

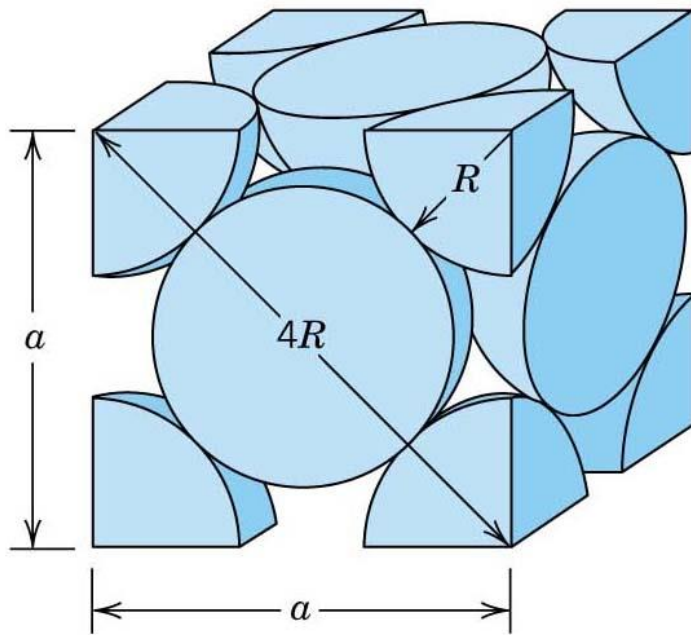


- Coordination # สำหรับ FCC = 12



ATOMIC PACKING FACTOR (APF): FCC

- APF for FCC = 0.74



Close-packed directions:
length = $4R$
 $= \sqrt{2} a$

Unit cell contains:
 $6 \times 1/2 + 8 \times 1/8$
 $= 4 \text{ atoms/unit cell}$

atoms
unit cell

4

$$\frac{4}{3} \pi (\sqrt{2}a/4)^3$$

volume
atom

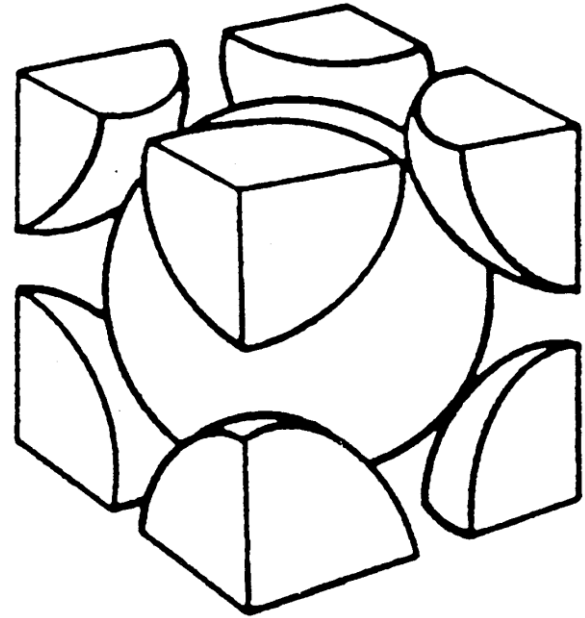
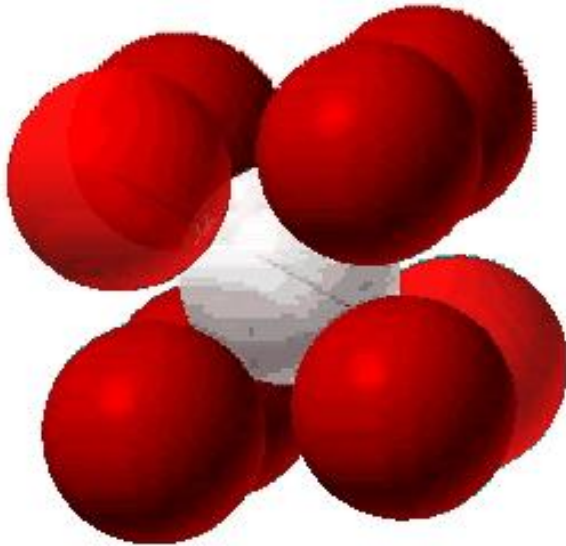
APF =

$$a^3$$

volume
unit cell

BODY CENTERED CUBIC STRUCTURE (BCC)

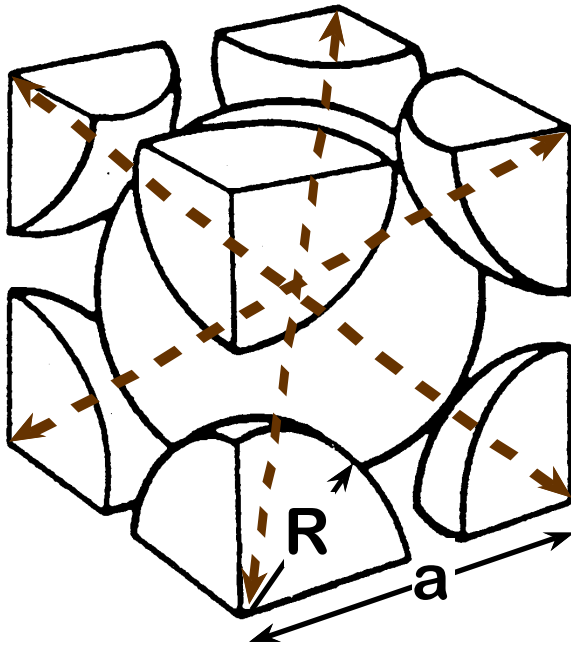
- Close packed directions are cube diagonals.



- Coordination # สำหรับ BCC = 8

ATOMIC PACKING FACTOR: BCC

- APF for BCC= 0.68



Close-packed directions:
length = $4R$
 $= \sqrt{3} a$

Unit cell contains:

$$1 + 8 \times 1/8$$

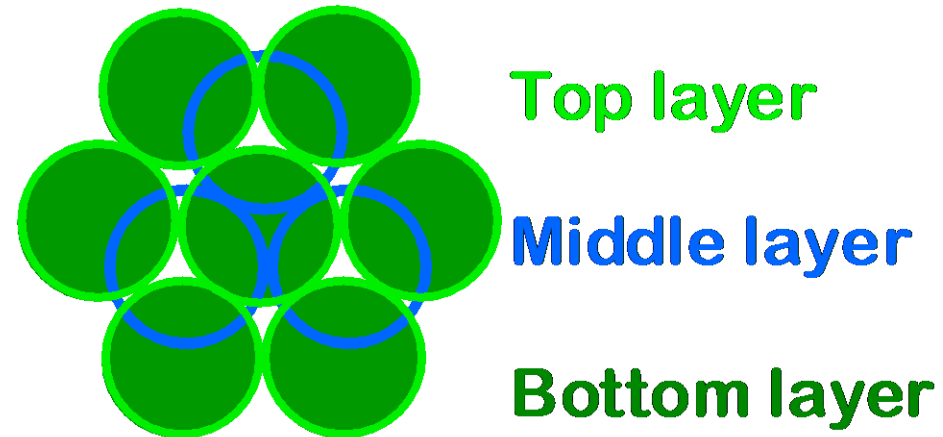
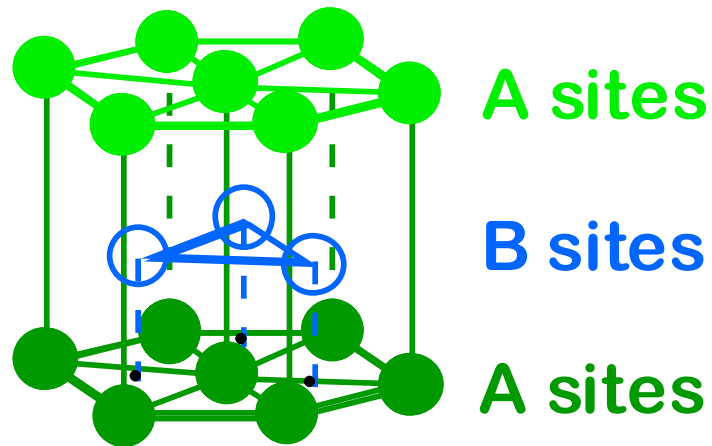
= **2 atoms/unit cell**

$$\text{APF} = \frac{\begin{array}{c} \text{atoms} \\ \text{unit cell} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{volume} \\ \text{atom} \end{array}}{\begin{array}{c} \text{volume} \\ \text{unit cell} \end{array}}$$

The diagram shows the calculation of the Atomic Packing Factor (APF) for BCC. The numerator is the product of the number of atoms per unit cell (2) and the volume of one atom ($\frac{4}{3} \pi (\sqrt{3}a/4)^3$). The denominator is the volume of the unit cell (a^3). Arrows indicate the correspondence between the text labels and the terms in the equation.

HEXAGONAL CLOSE-PACKED STRUCTURE (HCP)

- ABAB... Stacking Sequence
- 3D Projection
- 2D Projection



- Coordination # = 12
- APF = 0.74

- อะตอมที่มุมต่างๆบนระนาบทั้งด้านบนและล่าง
$$= 1/6 \times 6 \times 2 = 2 \text{ อะตอม}$$
- อะตอมที่กึ่งกลางระนาบฐานทั้งด้านบนและล่าง
$$= 1/2 \times 2 = 1 \text{ อะตอม}$$
- อะตอมที่ระนาบกึ่งกลางของ unit cell
$$= 3 \text{ อะตอม}$$
- **จำนวนรวมทั้งหมด = 6 อะตอม**

Hexagonal Close-Packed (HCP)

การกำหนดขนาดมิติของ lattice จะใช้อัตราส่วนระหว่าง c คือความสูง กับ a คือความกว้างในแต่ละด้านของรูป 6 เหลี่ยมด้านเท่า โดยอัตราส่วนที่ถือเป็นค่ามาตรฐาน (Ideal Value) เท่ากับ 1.633

THEORETICAL DENSITY, ρ

$$\rho = \frac{n A}{V_c N_A}$$

atoms/unit cell $\rightarrow$ n Atomic weight (g/mol) $\rightarrow$ A

Volume/unit cell (cm³/unit cell) $\rightarrow$ V_c Avogadro's number (6.023 x 10²³ atoms/mol) $\rightarrow$ N_A

Example: Copper

- crystal structure = FCC: 4 atoms/unit cell
- atomic weight = 63.55 g/mol (1 amu = 1 g/mol)
- atomic radius $R = 0.128$ nm (1 nm = 10⁻⁷cm)
 $V_c = a^3$; For FCC, $a = 4R/\sqrt{2}$; $V_c = 4.75 \times 10^{-23}$ cm³

Result: theoretical $\rho_{Cu} = 8.89$ g/cm³

Compare to actual: $\rho_{Cu} = 8.94$ g/cm³

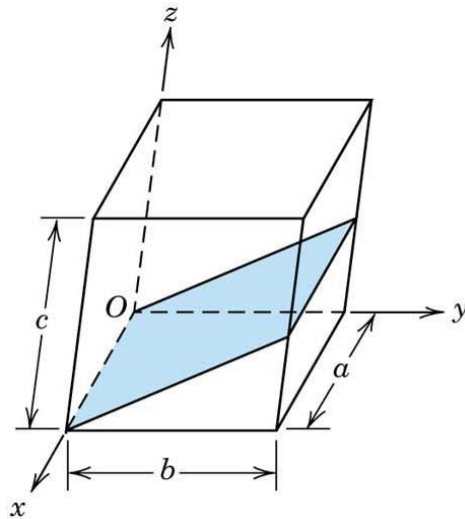
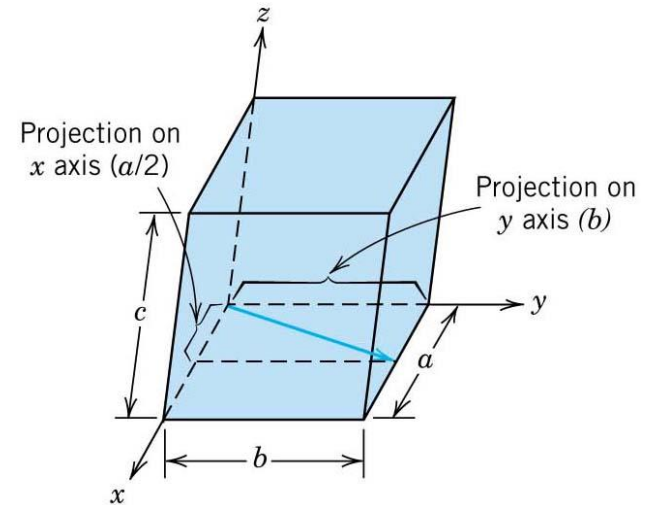
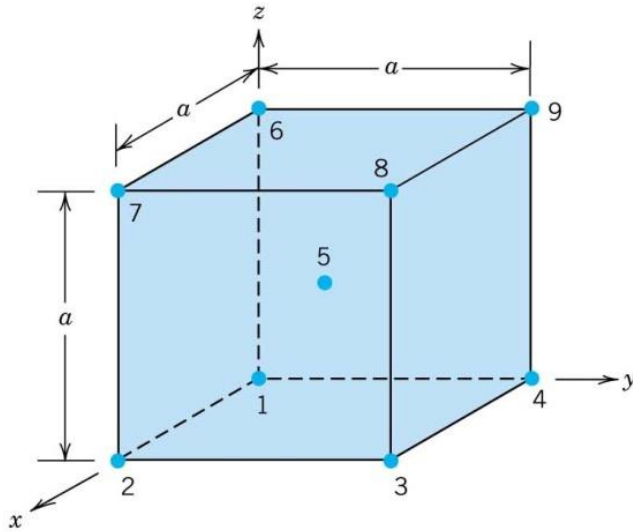
แบบฝึกหัด จงหาความหนาแน่นทางทฤษฎีของโครเมียม ซึ่งมีโครงสร้าง BCC กำหนดให้รัศมีอะตอมเท่ากับ 0.125 nm และน้ำหนักอะตอม 52 g/mol

แบบฝึกหัด จงหาขนาดของรัศมีอะตอมของธาตุชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มีความหนาแน่นเท่ากับ 22.4 g/cm³ และมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 192.2 g/mol

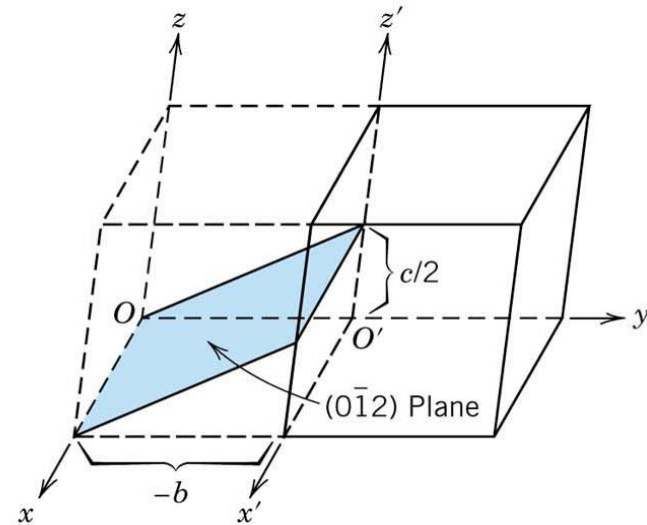
Characteristics of Selected Elements at 20C

Element	Symbol	At. Weight (amu)	Density (g/cm ³)	Crystal Structure	Atomic radius (nm)
Aluminum	Al	26.98	2.71	FCC	0.143
Argon	Ar	39.95	-----	-----	-----
Barium	Ba	137.33	3.5	BCC	0.217
Beryllium	Be	9.012	1.85	HCP	0.114
Boron	B	10.81	2.34	Rhomb	-----
Bromine	Br	79.90	-----	-----	-----
Cadmium	Cd	112.41	8.65	HCP	0.149
Calcium	Ca	40.08	1.55	FCC	0.197
Carbon	C	12.011	2.25	Hex	0.071
Cesium	Cs	132.91	1.87	BCC	0.265
Chlorine	Cl	35.45	-----	-----	-----
Chromium	Cr	52.00	7.19	BCC	0.125
Cobalt	Co	58.93	8.9	HCP	0.125
Copper	Cu	63.55	8.94	FCC	0.128
Flourine	F	19.00	-----	-----	-----
Gallium	Ga	69.72	5.90	Ortho.	0.122
Germanium	Ge	72.59	5.32	Dia. cubic	0.122
Gold	Au	196.97	19.32	FCC	0.144
Helium	He	4.003	-----	-----	-----
Hydrogen	H	1.008	-----	-----	-----

CRYSTALLOGRAPHIC POINT, DIRECTION, AND PLANES

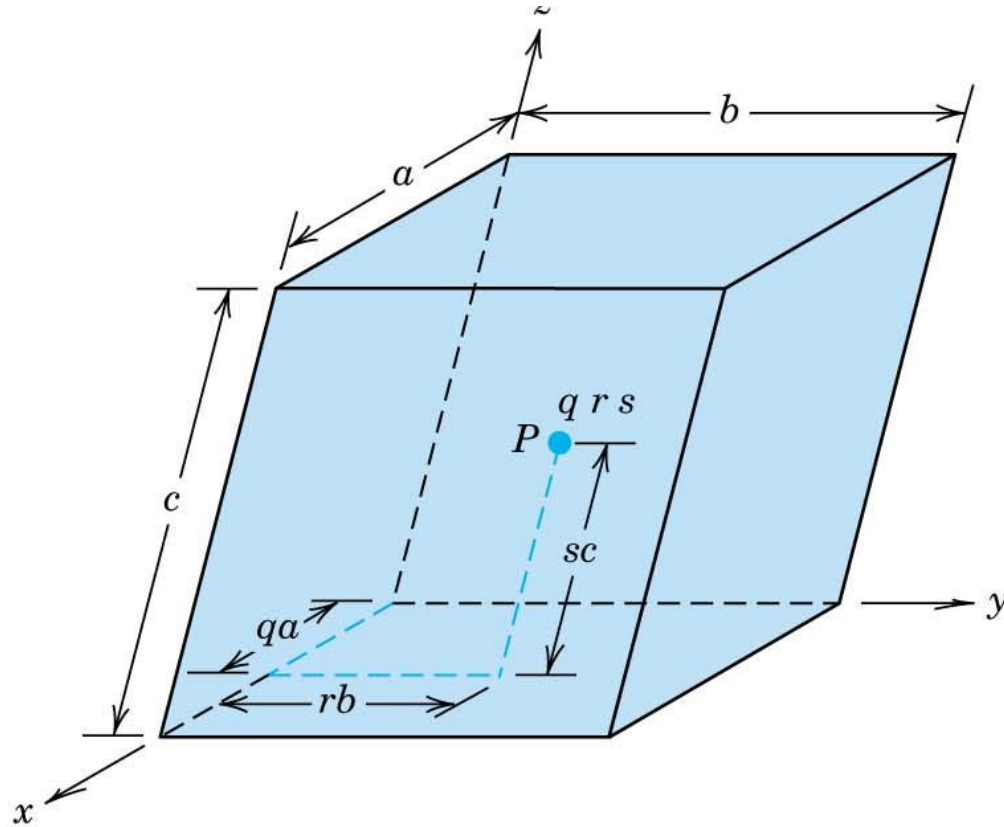


(a)



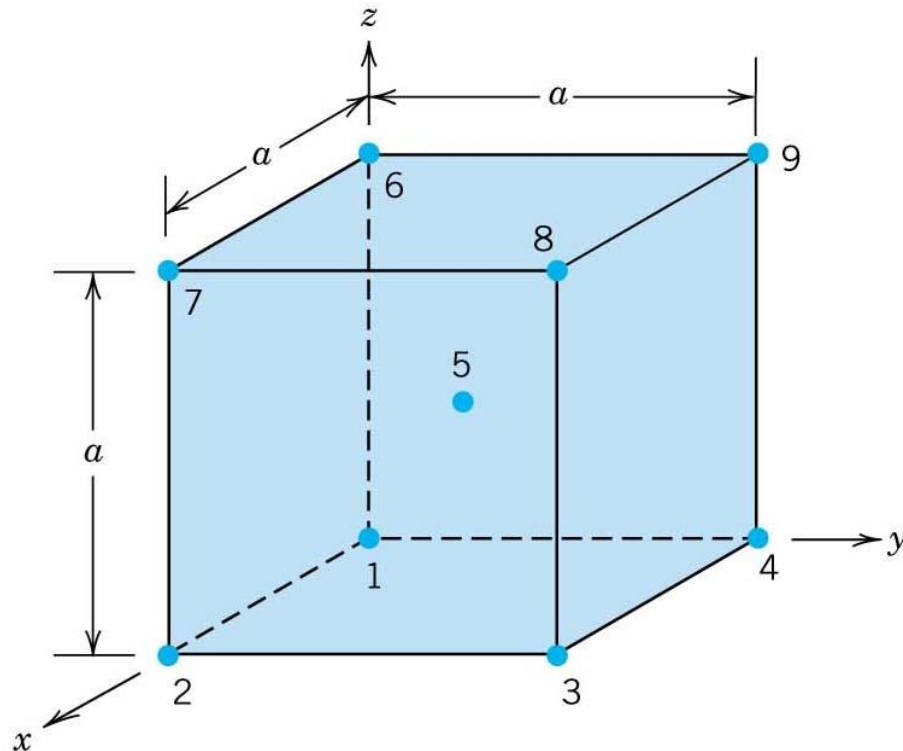
(b)

Crystallographic point



การบอกตำแหน่งของอะตอมใน Cubic Unit Cell

การบอกตำแหน่งของอะตอมต่างๆใน Cubic Unit Cell ให้ใช้แกนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันเป็น x , y และ z (**กฎมือขวา**) โดยแกน x บวกมีทิศทางชี้ออกจากกระดาษ แกน y บวกมีทิศทางไปทางขวา แกน z บวกมีทิศทางไปข้างบน แต่ถ้ามีทิศทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาจะมีทิศทางเป็นลบ



Crystallographic Directions

การหาทิศทางผลึกใน Cubic Unit Cell

ถ้าทิศทางการจัดตัวของอะตอมในผลึกจะมีผลต่อคุณสมบัติ แต่ละทิศทางจะมีสมบัติแตกต่างกัน ทิศทางการจัดตัวของอะตอมแสดงด้วยค่าดัชนีทิศทาง (direction indices) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์ของทิศทาง (vector components of direction) และเป็นจำนวนเต็ม เรียกว่า*ค่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices)* ของทิศทาง เขียนแทนด้วย $[uvw]$ โดยค่าของ u v w จะต้องเป็นจำนวนเต็ม

การหาดัชนีมิลเลอร์ของทิศทาง

หาค่าโคออร์ดิเนตของจุด 2 จุดบนทิศทางนั้น (จุดเริ่มต้นและจุดปลาย)

ให้ใช้ค่าโคออร์ดิเนตของจุดปลาย (หัวลูกศร) ลบด้วยค่าโคออร์ดิเนตของจุดเริ่มต้นจะได้ค่าที่เรียกว่า lattice parameters

ทำให้ตัวเลขที่ได้เป็นจำนวนเต็มเลขลงตัวน้อยๆ

เขียนค่าตัวเลขไว้ในวงเล็บ [] โดยไม่มีเครื่องหมายแยกถ้าตัวเลขที่ได้ติดลบให้ขีดเส้นไว้เหนือตัวเลขนั้นๆ

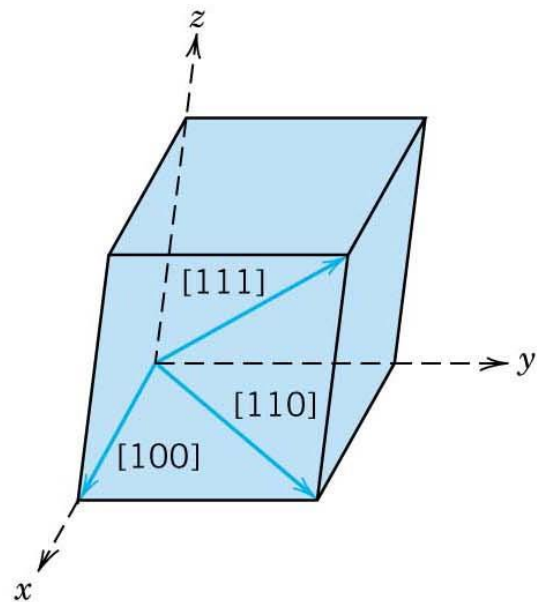
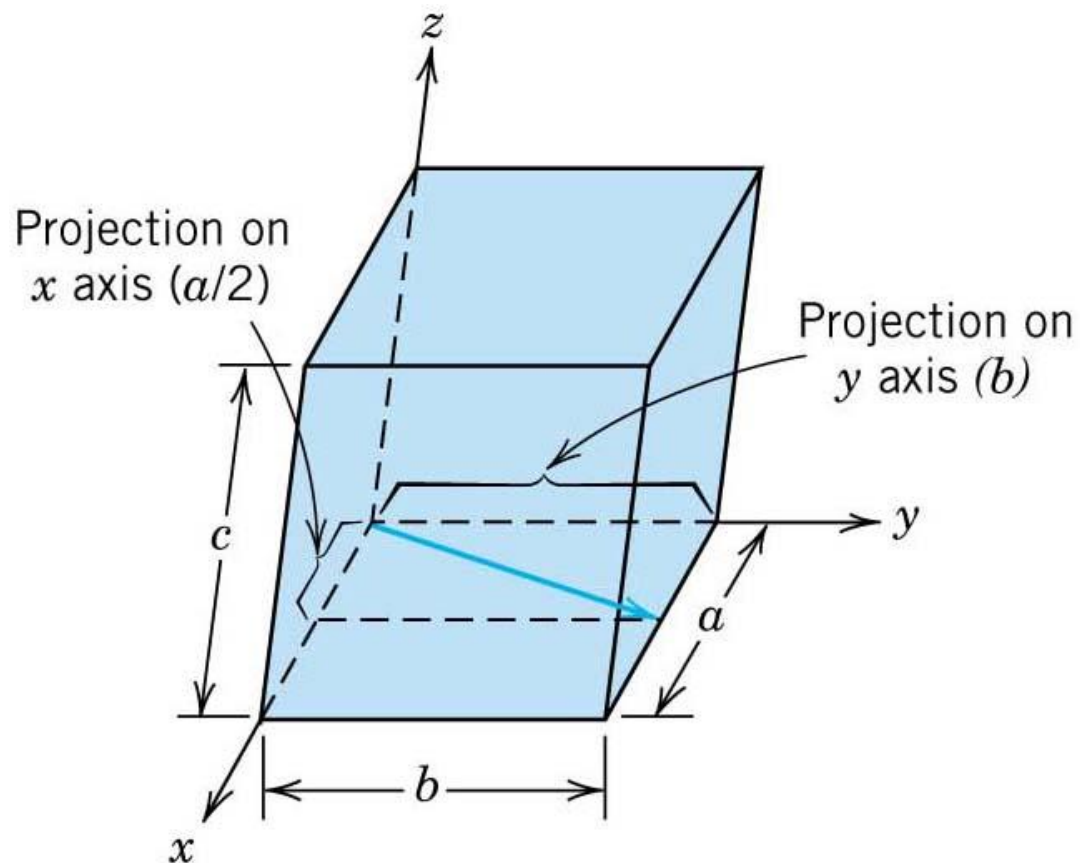
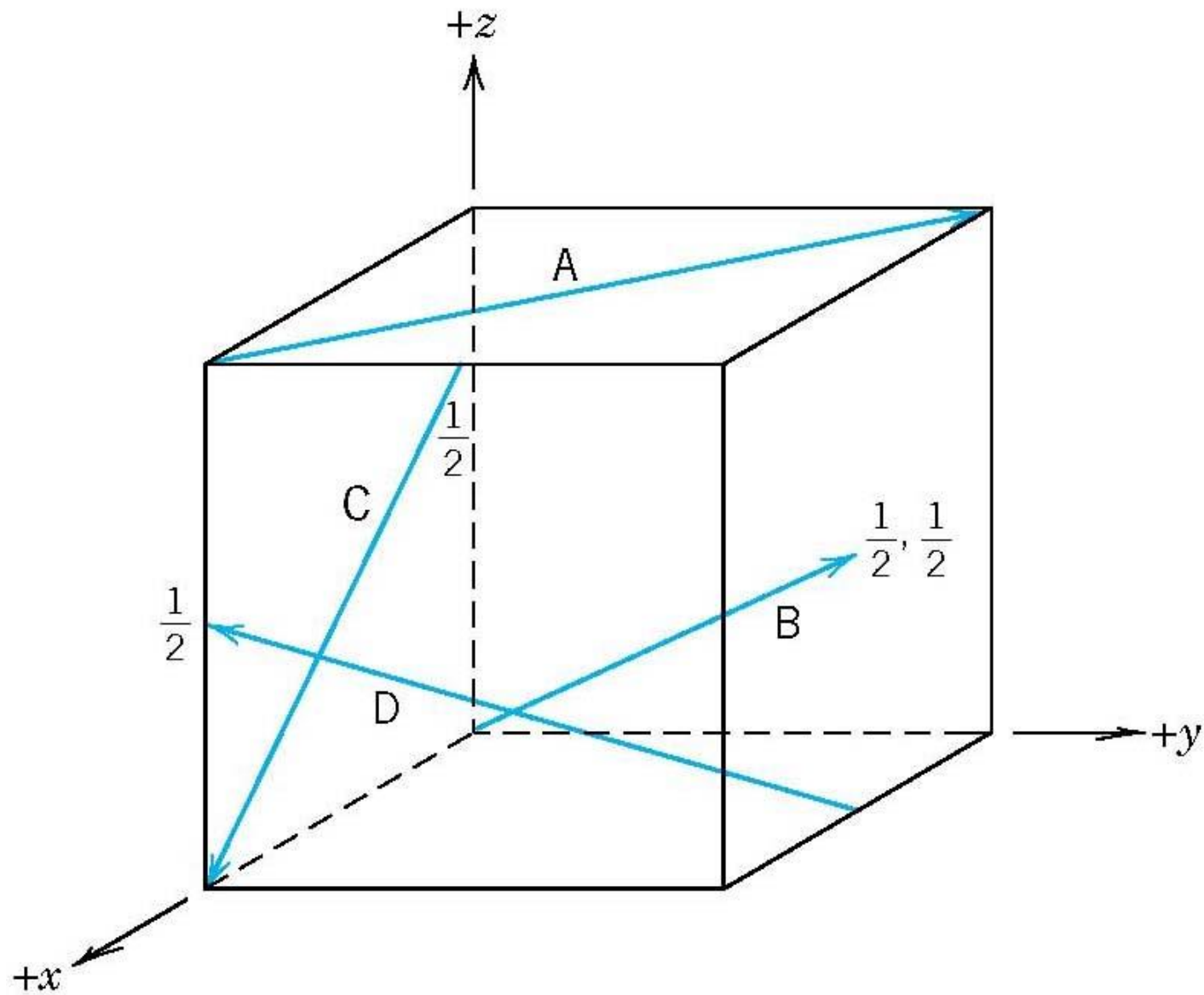
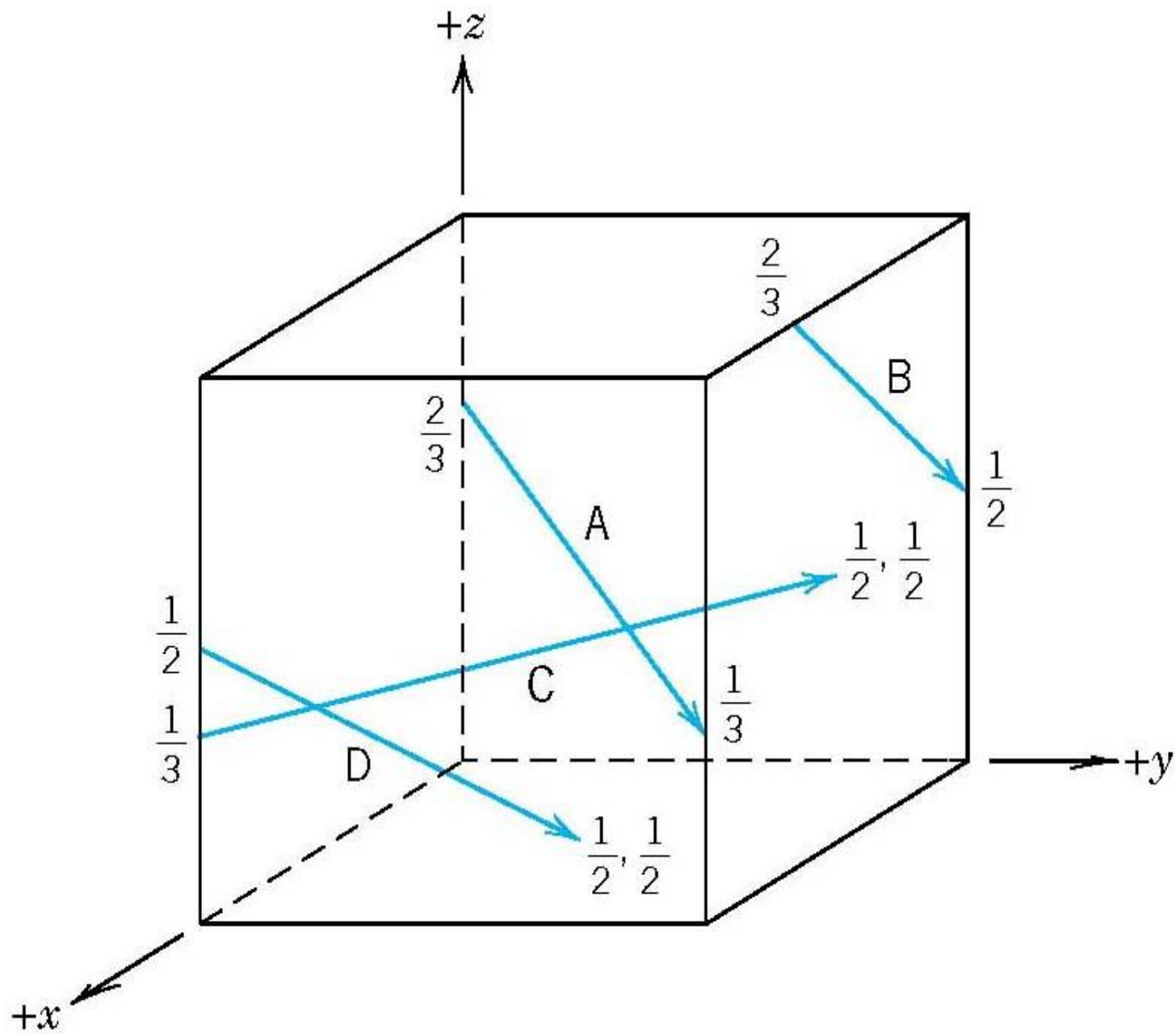
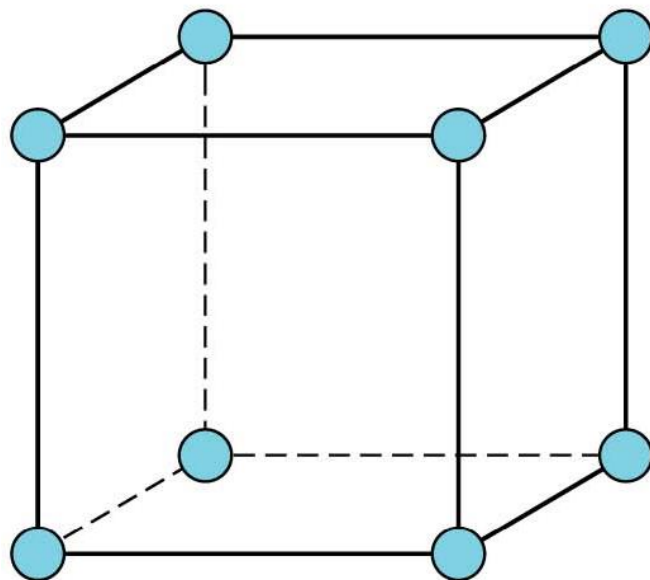
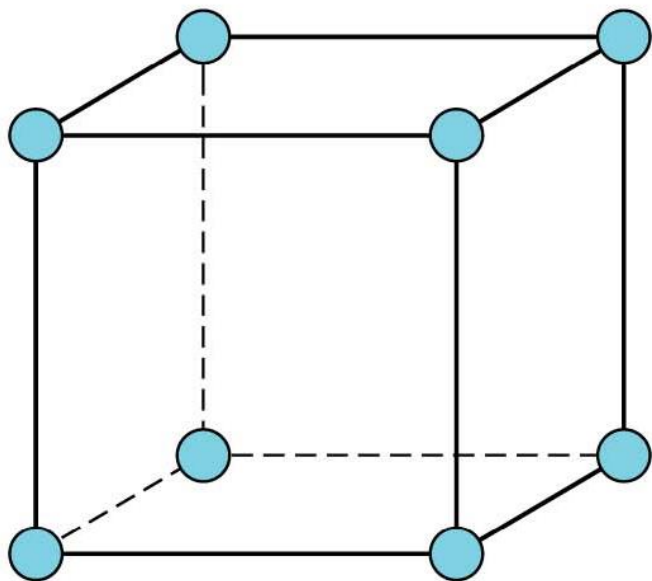
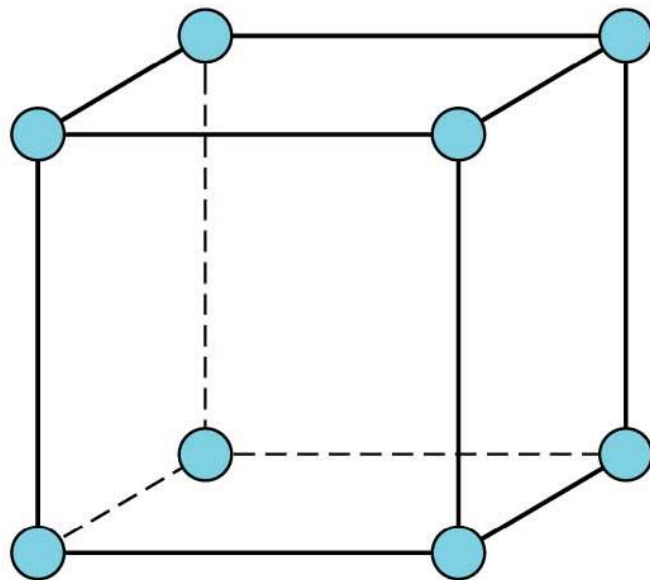
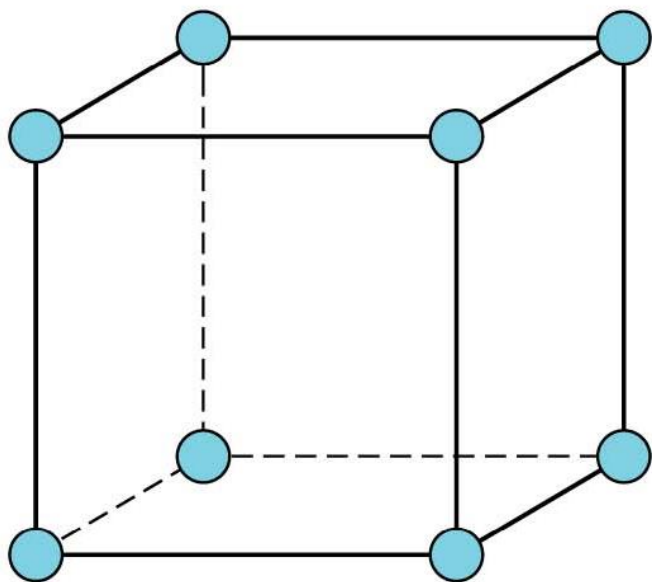


FIGURE 3.6 The $[100]$, $[110]$, and $[111]$ directions within a unit cell.









Crystallographic Planes

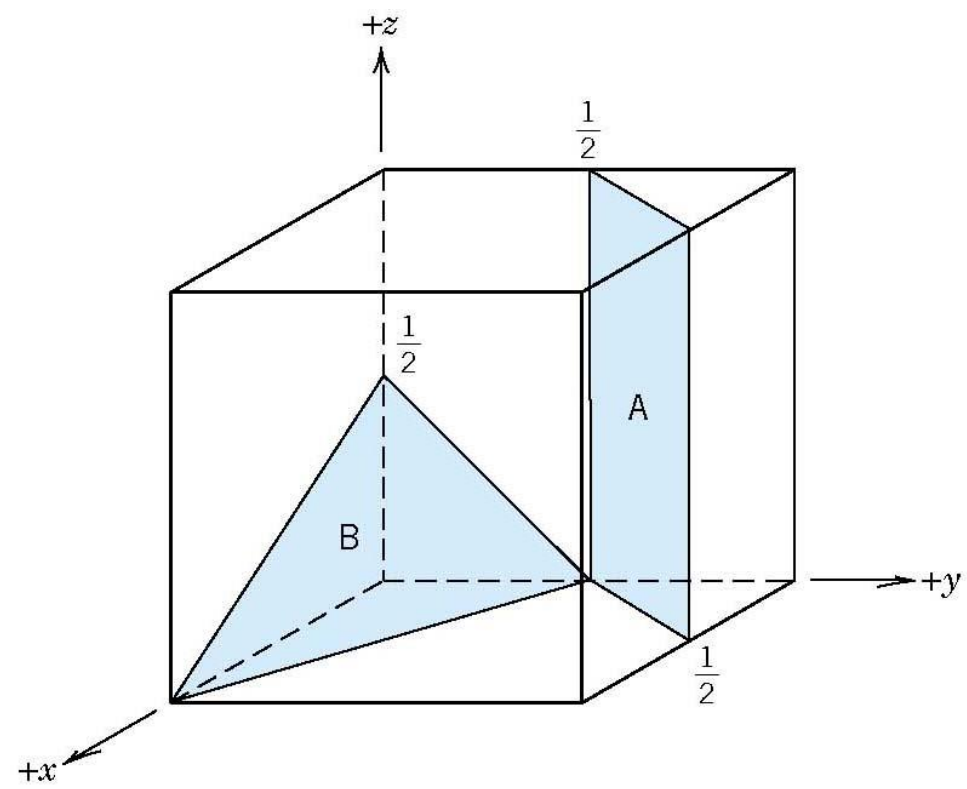
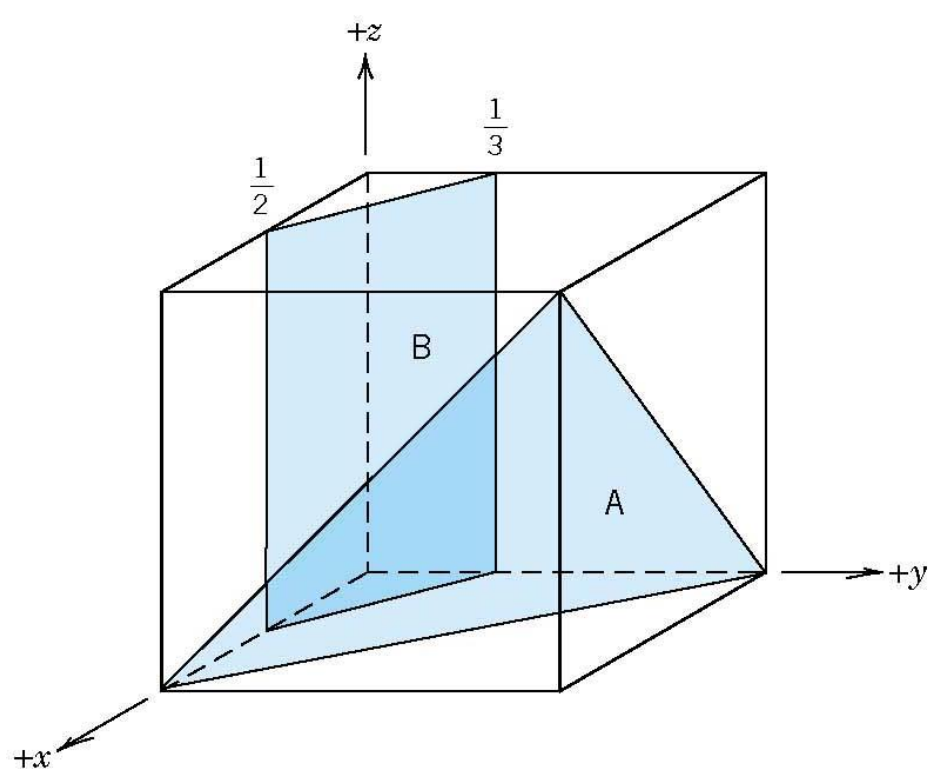
กำหนดแกนอ้างอิง 3 แกน (x,y,z) โดยเลือกจุดกำเนิดของแกนอ้างอิงนั้น
จะต้องไม่ให้จุดกำเนิดอยู่บนระนาบที่ต้องการหา

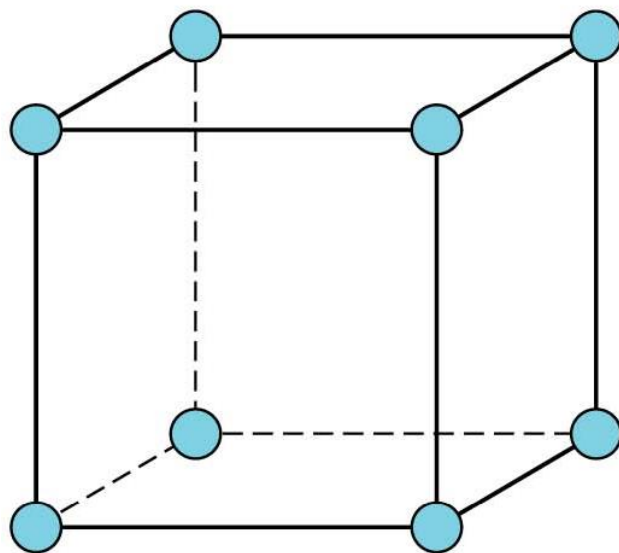
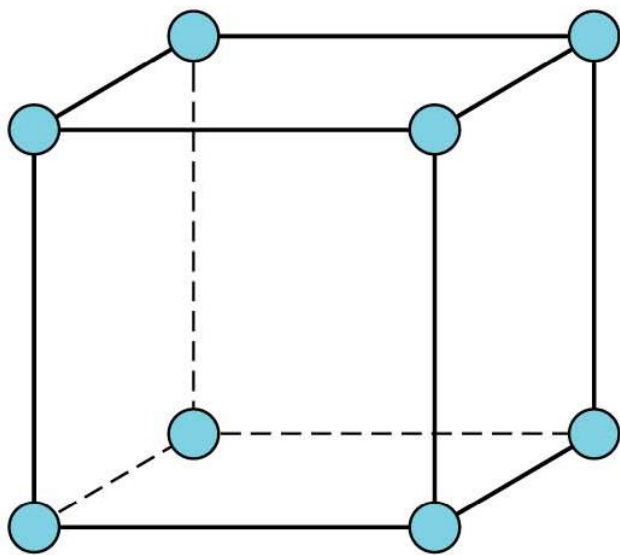
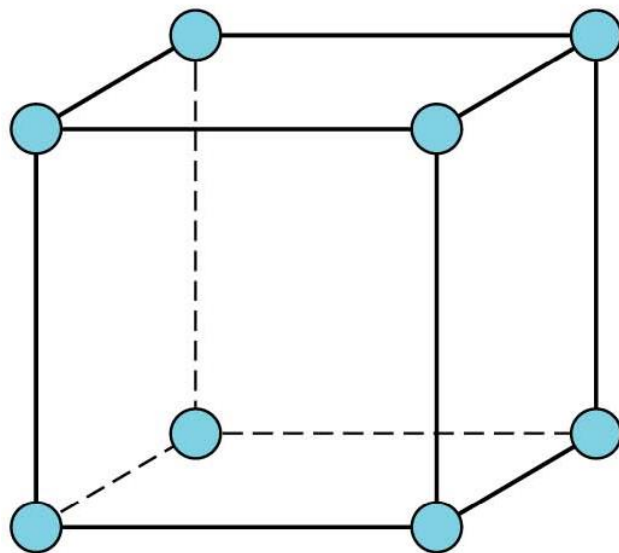
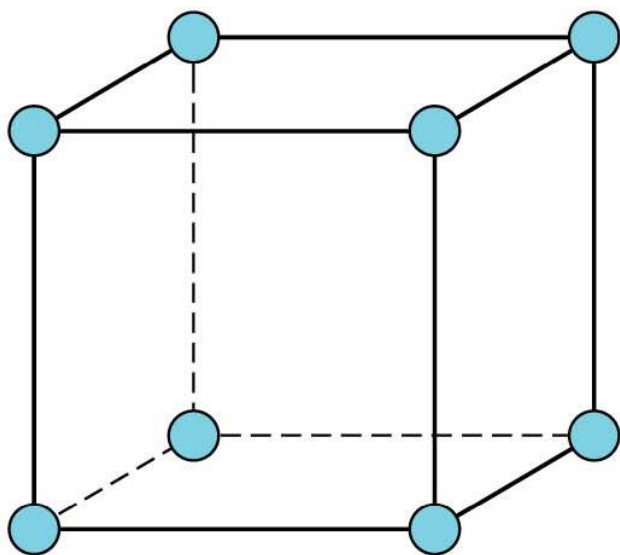
หาจุดตัดของระนาบบนแกนอ้างอิงทั้งสาม (จุดตัดอาจจะเป็นเศษส่วนก็ได้)

หาเศษส่วนกลับของระยะจุดตัดดังกล่าวเป็น $1/x$, $1/y$, $1/z$

ทำให้ผลหารที่ได้เป็นจำนวนเต็มทีลงตัวน้อยๆ

เขียนดัชนีมิลเลอร์ใน ()



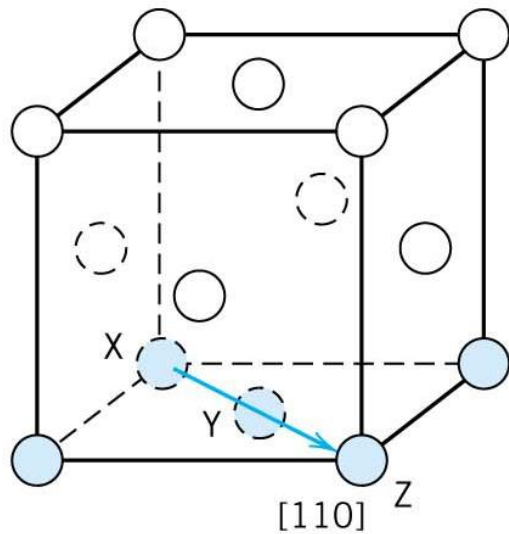


Linear and Plane Densities

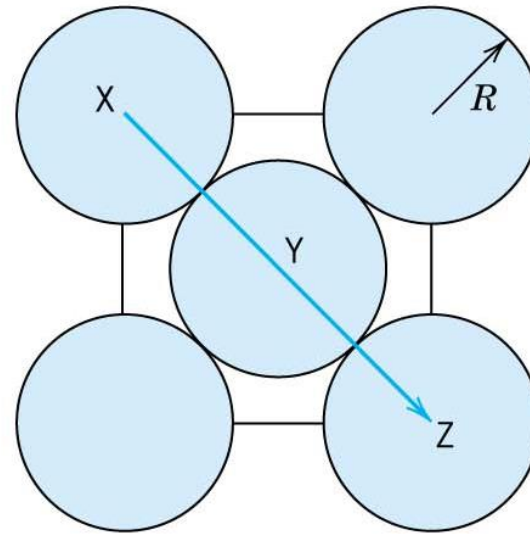
- ความหนาแน่นในแนวเส้นตรง (Linear Density : LD)
สามารถหาได้จากสมการ

$$= \frac{\text{จำนวนอะตอมที่ถูกตัดผ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง}}{\text{ความยาวของเส้นที่ตัดผ่าน}}$$

$$LD = \frac{n_v}{L_v}$$



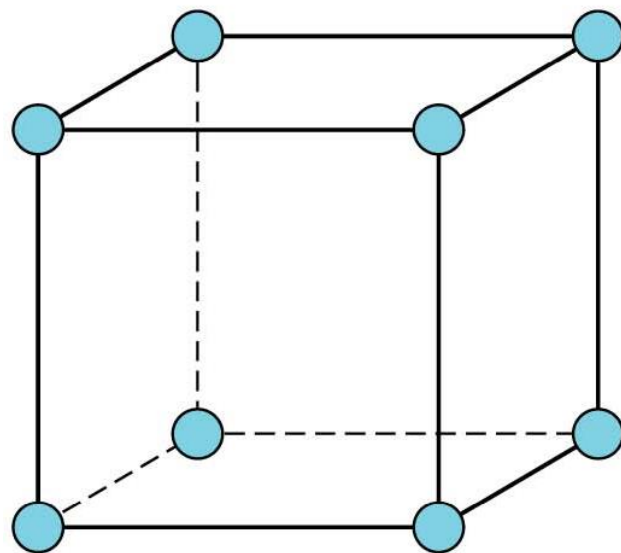
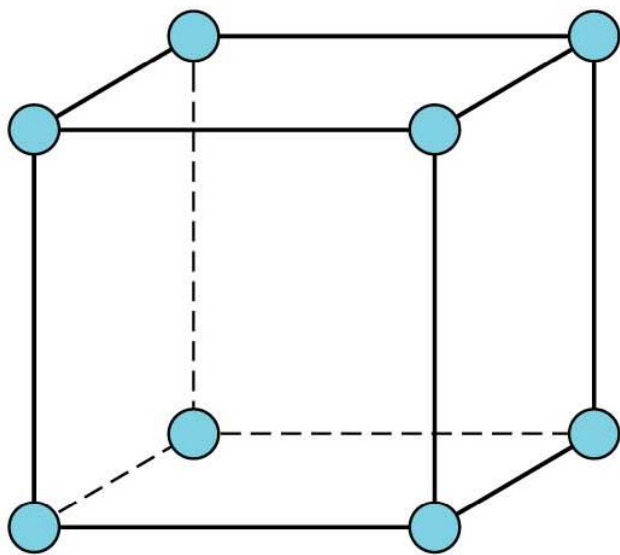
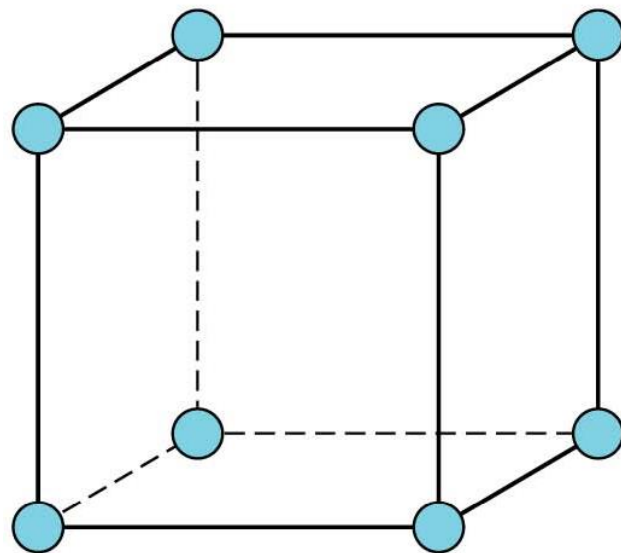
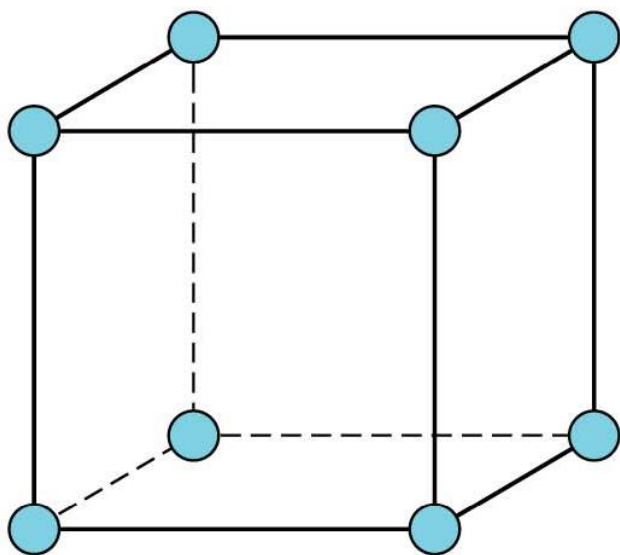
(a)



(b)

The $[110]$ linear density for FCC is

$$LD_{110} = \frac{2 \text{ atoms}}{4R} = \frac{1}{2R}$$



- ความหนาแน่นของอะตอมในแนวระนาบ (Planar Density : PD)

$$= \frac{\text{จำนวนอะตอมที่ถูกระนาบตัดผ่านจุดศูนย์กลาง}}{\text{พื้นที่ของระนาบ}}$$

$$PD = \frac{n_p}{A_p}$$

The (110) planar density for FCC is

$$PD_{100} = \frac{2atoms}{8R^2\sqrt{2}} = \frac{1}{4R^2\sqrt{2}}$$

ระบบผลึกเดี่ยว (Single Crystal)

- เมื่อกระบวนการตกผลึกเกิดขึ้นกับอะตอม และมีการขยายตัวของโครงสร้างออกไปโดยไม่มีการถูกรบกวนจากภายนอก หรืออะตอมอื่นๆที่ตกผลึก ของแข็งที่ได้ก็จะเป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) ซึ่งโครงสร้างภายในจะเป็นโครงข่าย Unit cell ที่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน



FIGURE 3.16 Photograph showing several single crystals of fluorite, CaF_2 . (Smithsonian Institution photograph number 38181P.)

ผลึกรวม (Polycrystalline Materials)

- การตกผลึกโดยส่วนมากของวัสดุนั้นจะประกอบไปด้วยผลึกเล็กๆ หลายๆผลึก (grain) ต่อกันซึ่งเราเรียกว่า polycrystalline

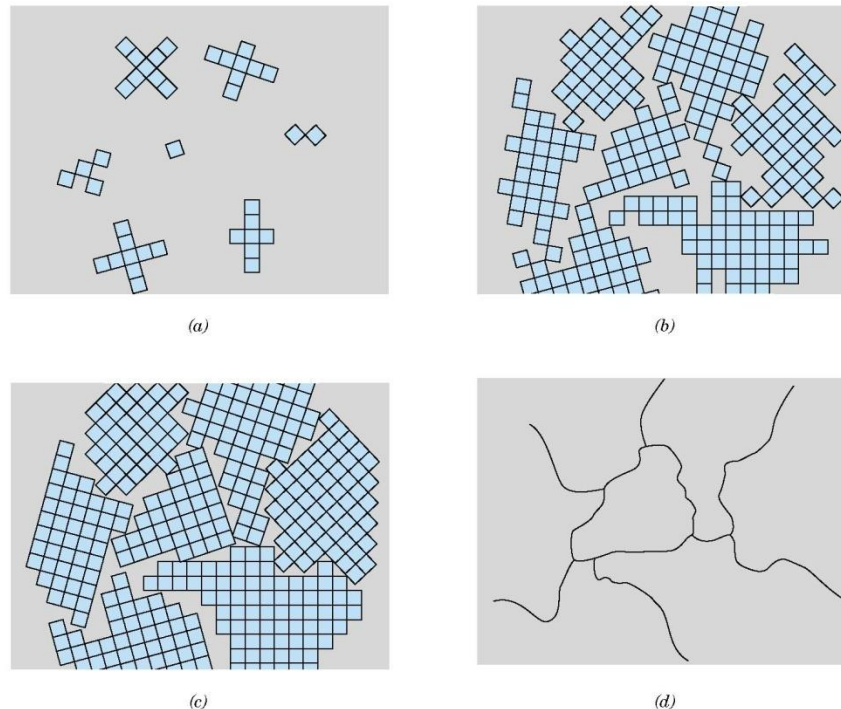


FIGURE 3.17 Schematic diagrams of the various stages in the solidification of a polycrystalline material; the square grids depict unit cells. (a) Small crystallite nuclei. (b) Growth of the crystallites; the obstruction of some grains that are adjacent to one another is also shown. (c) Upon completion of solidification, grains having irregular shapes have formed. (d) The grain structure as it would appear under the microscope; dark lines are the grain boundaries. (Adapted from W. Rosenhain, *An Introduction to the Study of Physical Metallurgy*, 2nd edition, Constable & Company Ltd., London, 1915.)