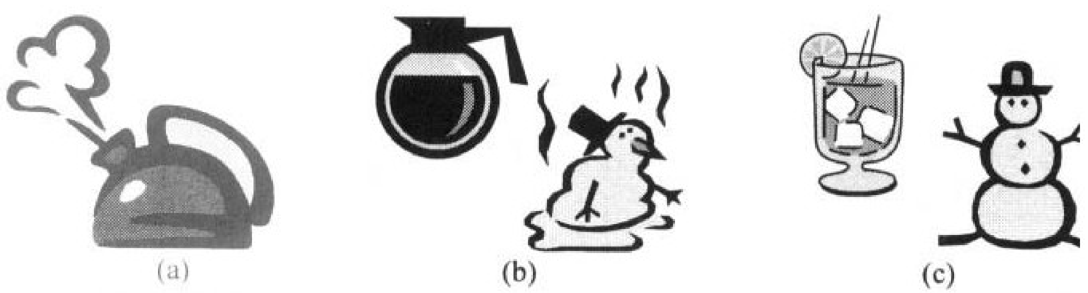
# الفصل الاول: التركيب البلوري

مقدمة عامة:

ان دراسة فيزياء الحالة الصلبة وهذا يعني ان الدراسة تشمل الخواص الفيزياوية للمادة الصلبة بصورة عامة حيث تتكون المادة في حالاتها الثلاث المعروفة، الغازية والسائلة والصلبة، من ذرات أو جزيئات دائمة الحركة . ويعزي وجود المادة في إحدى هذه الحالات إلى طبيعة وحدود التأثيرات المتبادلة بين ذراتها وجزيئاتها . ويمكن تمييز كل حالة عن الأخرى فيزيائيا بالنظر الى الطاقة الحركية والتي تساوي طاقة الجذب بين الجزيئات أو الذرات المادة، حيث تتحرك جزيئات أو ذرات المادة في حالتها الغازية بكل حرية في الفضاء للامتلاكها طاقة حركية عالية. اما طاقة الجذب فتهمل كليا اذا ما قورنت بالطاقة الحركية. اما في الحالة السائلة (عند انخفاض درجة حرارة الغاز) فان الطاقة الحركية تنخفض للجزيئات او الذرات وعند الوصول الى درجة الغليان فان الطاقة الحركية ستكون مساوية لطاقة الانجذب بين الجزيئات او الذرات، بينما تفقد المادة الغازية أو السائلة قدرتها على الحركة تماما عندما تتحول إلى الحالة الصلبة بعد تبريدها، وتتخذ شكلاً وحجماً ثابتين.




الشكل (1-1) يوضح الحالات الطبيعية للماء a : الغاز والمعروف ببخار الماء، b : السائل والمعروف بالماء الشائع، c : الصلب والمعروف بالجليد او مكعبات الثلج.

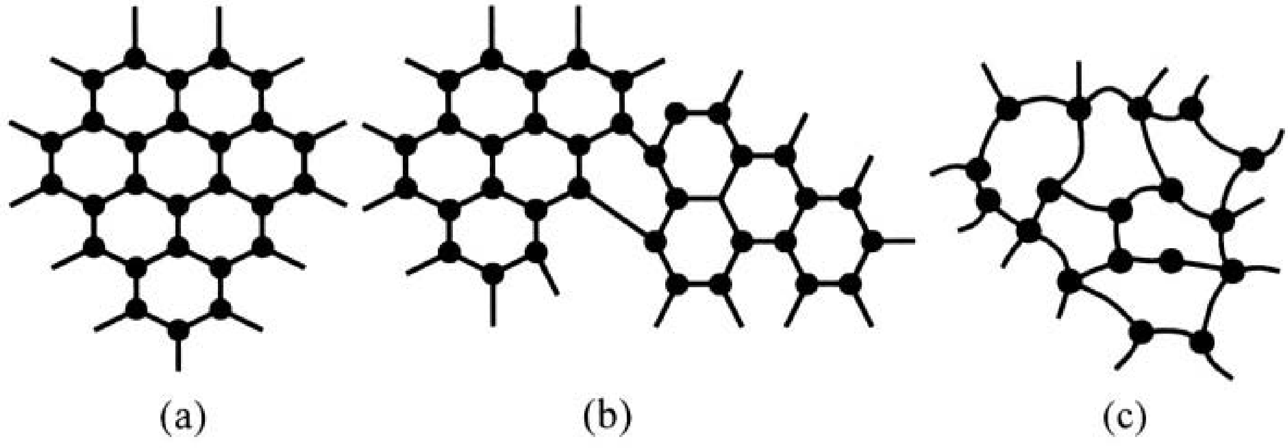
**ويمكن تصنيف المواد الصلبة إلى نوعين رئيسيين هما:**

**أ-** المواد الصلبة البلورية: **Crystalline Solids**

وفيها ينتظم ترتيب الذرات في الفراغ بحيث تشكل نمطاً هندسياً دورياً . وعندما ينتشر هذا النمط ليشغل كل أجزاء المادة، فإن هذا يعني أن لدينا" بلورة وحيدة Single Crystal أما إذا توقف أطراد دورية النمط الهندسي عندما يسمى بتخوم، أو حدود فإن المادة حينئذ تكون" متعددة Grain Boundaries –الحسيبات أي تتكون من مجموعات صغيرة جداً من " Poly- crystalline البلورات المتعددة، أو البلورات الأحادية الصغيرة في اتجاهات مختلفة.

ب-المواد الصلبة الغير بلورية: **Non-Crystalline Solids**

التي تتخذ ذراتها أو جزيئاتها توزيعاً عشوائياً، حيثما يتسنى لها، عندما تتحول من الحالة المائعة (الغازية أو السائلة) إلى الحالة الصلبة وتوصف Amorphous هذه المواد الصلبة اللابلورية أيضاً توصف بأنها" لا شكلية "أو" عشوائية Vitreous Glassy بمعنى أنها لا تتخذ شكلاً مميزاً كما توصف بأنها" زجاجية نظراً لأنها تتشابه مع الزجاج في عشوائية ترتيب الذرات انظر الشكل (2-1)



الشكل 2-1: ترتيب الذرات في مادة:أ- بلورية و ب-متعددة التبلور و جـ العشوائية.

وهناك من المواد الصلبة مواد لا تنتمي تماماً لأي من النوعين المذكورين، حيث أنها تقع بدرجات متفاوتة بين الحالتين :الكاملة التبلور وغير البلورية، ويمكن وصف الترتيب الجزئي للذرات فيها بتعيين ما يسمى " بدرجة البلورة Degree of Crystallinity ويمتد الترتيب المنتظم في بعض هذه المواد الصلبة شبه البلورية إلى مسافات قصيرة، فيوصف بأنه ذو مدى قصير Short–Range Order مقارنة بالترتيب ذي المدى الطويل Long–Range order في المواد الصلبة كاملة التبلور. ومن الجدير بالذكر أن الحالة البلورية هي الحالة الطبيعة لغالبية المواد الصلبة، نظراً لأن طاقة الترتيب المنتظم للذرات تكون أقل من طاقة التوزيع العشوائي لها . وعموماً إذا لم تتح لذرات المادة فرصة ترتيب نفسها كما ينبغي، كأن تكبح حركتها فإنه يمكن أن تتكون مادة غير بلورية . مثال ذلك الكربون"الزجاجي" الناتج من عملية التحلل عند درجات حرارة منخفضة، وبعض البوليمرات التي تتكون من عدد كبير جداً من الجزيئات غير المتناسقة. وفي حالات أخرى لا تتاح الفرصة لنمو بلورات من سوائل عالية اللزوجة عند تبريدها بسرعة، حيث يؤدي التبريد الفائق Super cooling إلى تجميد السائل بنفس النمط غير الدوري لترتيب جزيئاته .لكن مثل هذه المواد" الزجاجية" يمكنها اكتساب الحالة البلورية بصورة كلية أو جزئية، عن طريق معالجتها حرارياً بعملية تسمى" التلدين " أو" التخمير Annealing وهي عملية تسخين، يعقبه تبريد بمعدلات بطيئة منتظمة.

اما في هذا الفصل سيتناول دراسة صنف خاص من المواد الصلبة وهي المواد الصلبة البلورية – Crystalline solid وتصنف المواد الصلبة البلورية الى الاصناف التالية:

1- تصنف البلورات بالنسبة للشبيكة البلورية الى نوعين:

أ- البلورات ذات الشبيكة البرافيزية Bravais lattice

ب-البلورات ذات الشبيكة غير البرافيزية Non Bravais lattice

2- تصنف المواد الصلبة البلورية بالنسبة لتوصيلها الكهربائي الى:

أ- المعادن Metals

ب-اشباه الموصلات Semiconductors

ت-العوازل Insulators

3- تصنف المواد الصلبة البلورية بالنسبة الى خواصها المغناطيسية الى:

أ- المواد الدايا مغناطيسية Diamagnetic materials

ب-المواد البارا المغناطيسية Paramagnetic materials

ت-المواد الفيرومغناطيسية Ferromagnetic materials

4- تصنف المواد الصلبة بالنسبة لطاقة الربط بين ذراتها او جزيئاتها الى:

أ- البلورات الايونية Ionic crystal

ب-البلورات التساهمية Covalent crystal

ت-البلورات الجزيئية Molecular crystal

ث-البلورات المعدنية Metallic crystal

2- الحالة البلورية:

ان كل جسم صلب بلوري ترتب ذراته بشكل هندسي بحيث تكون مواقعها دورية ومنتظمة بحيث تاخذ الشكل (1-2a) وهذه الدورية تسمى بترتيب المدى الطويل Long range order اما في البلورة فيكون هذا الترتيب في ثلاثة ابعاد فيعني تكوين عنصر منتظم ومحدد بصورة جيدة. وان اقرب مسافة بين ذرتين في اتجاه المحور x-axis هي المسافة $\vec{a}$ وباتجاه المحور y-axis هي

المسافة $\vec{b}$ وليس بالضرورة ان تكون هذان المحوران متعامدين مع البعض. وتحتفظ البلورة التامة perfect crystal بهذه الدورية في ابعادها الثلاثة والى ما لا نهاية لكل من المحاور.

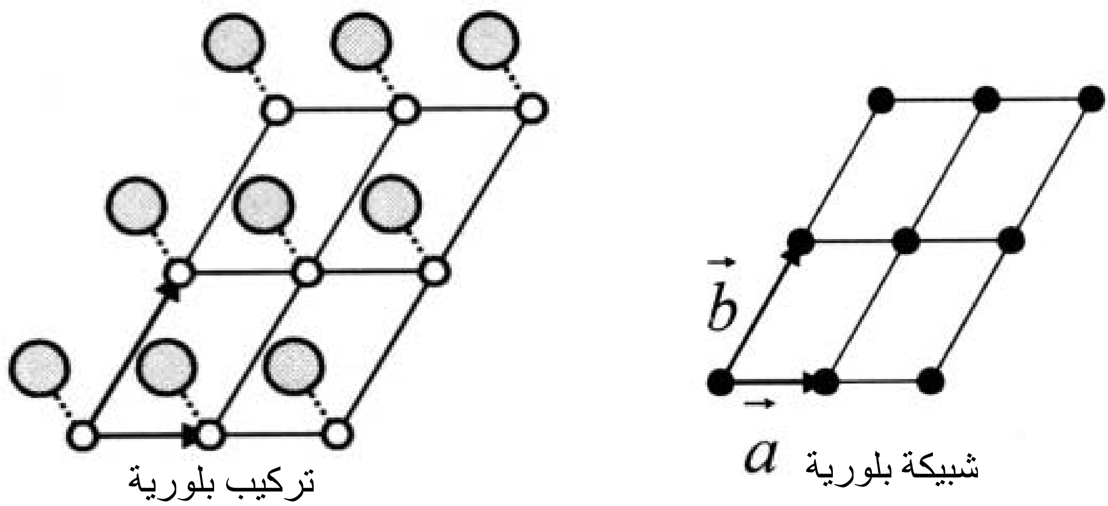
**التركيب البلوري: Crystal Structure**

يستخدم في لغة علم البلورات عدد من المفاهيم والمصطلحات التي تساعد على وصف وتحليل التركيب البلوري الداخلي للماد ة. وسنقدم هنا بعض التعريفات الأساسية لأهم المفاهيم والمصطلحات البلورية.

**الشبيكة البلورية: Crystal Lattice**

هي نوع من التمثيل الرياضي لنمط ترتيب الوحدة البنائية الأساسية للمادة البلورية . ويتم هذا التمثيل بعدد لا نهائي من النقاط الهندسية المرتبة ترتيباً شبيكيا متوازياً يتميز بالتماثل والتكرار المنتظم (الدورية) في الفراغ . ويتكون التركيب البلوري بإضافة الوحدة البنائية الأساسية (أو الاساس) لكل نقطة من نقاط الشبيكة وكما في الشكل (3-1)، فتكون العلاقة المنطقية هي:

الشبيكة الفراغية + الوحدات الأساسية (الاساس) = التركيب البلوري




تركيب بلورية

شبيكة بلورية

الشكل (3-1) ترتيب نقاط الشبيكة في بعد ين.

وفي أبسط التركيبات البلورية توجد ذرة واحدة لكل نقطة شبيكية، كما هو الحال في بلورات النحاس والذهب والفضة، وقد تكون الوحدة البنائية الأساسية (أو الاساس) مجموعة من الذرات ، ويشترط حينئذ أن تكون الوحدات البنائية متطابقة في تركيبها وترتيبها وتوجيهها، كما يجب أن يكون لها نفس الميل والاتجاه. وتتركب البلورة المثالية من وحدات بنائية أساسية مرتبة على شبيكة بلورية فراغية (ثلاثية الأبعاد) بحيث يبدو هذا الترتيب عند النظر إليه من نقطة شبيكية ذات متجه موضع $\vec{r}$ هو نفسه عند النظر إليه من نقطة أخرى $\vec{r}^{/}$ طبقاً للمعادلة:

$$\overrightarrow{r^{/}} = \vec{r} + \vec{T} \qquad (1\text{-}1)$$

ويعرف المتجه الانتقالي $\vec{T}$ لذي يصل بين أي نقطتين في الشبيكة بالمعادلة:

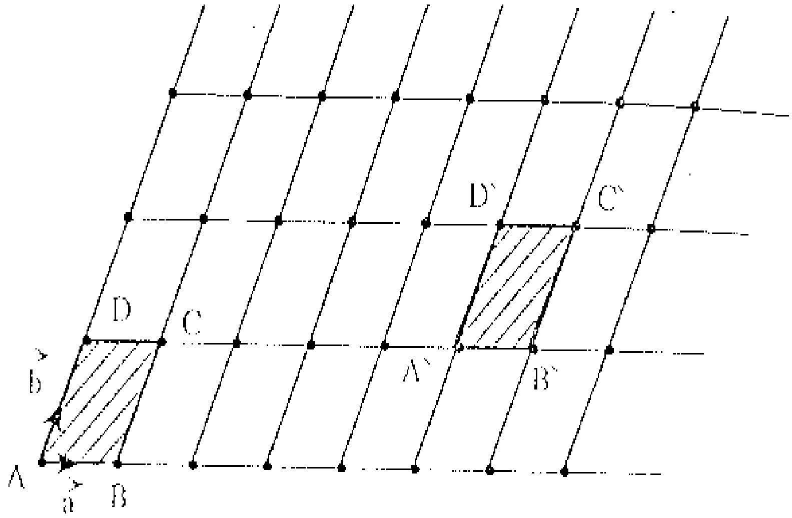
$$\vec{T} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c} \qquad (1\text{-}2)$$

حيث $\vec{a}$، $\vec{b}$ و $\vec{c}$ تسمى" المتجهات الانتقالية الأساسية " وهي محددة وثابتة في أية شبيكة بلورية، وتمثل $n_1$،$n_2$ و $n_3$ أعداداً صحيحة اختيارية تعتمد على موضع النقطة الشبيكية.

**وحدة الخلية (الخلية الأولية): Unit Cell**

يفيد مفهوم الشبيكة البلورية كثيراً في دراسة الاحتمالات المختلفة لتنظيم الذرات داخل البلورات وفق ما يعرف بقوانين الهندسة البلورية.وقد يكون مناسباً في بعض الأحيان على سبيل التبسيط أن تكون الأمثلة التوضيحية أقرب إلى الفهم والاستيعاب في حالة شبيكة أحادية البعد، أو شبيكة في بعدين، ثم يجرى التعميم بسهولة لحالة الشبيكة البلورية الفراغية (ثلاثية الأبعاد).

لنعتبر الآن جزءا من شبيكة بلورية في بعدين كما في الشكل (1-4) يتضح من الرسم أن نقاط الشبيكة A ,B ,C ,D تكون رءوس متوازي الأضلاع ABCD الذي يؤدي انتقاله المتكرر باستعمال المتجهين $\vec{a}$ و $\vec{b}$ إلى تكوين النموذج الكلي للشبيكة البلورية ويطلق عليه," وحدة الخلية."




الشكل (4-1) جزء من شبيكة بلورية

في بعدين

المتجه الانتقالي $\vec{T} = 5\vec{a} + \vec{b}$ يربط بين اي نقطة شبيكية في خلية الوحدة ABCD و النقطة المكافئة لها في خلية اخرى $A^{/}B^{/}C^{/}D^{/}$.

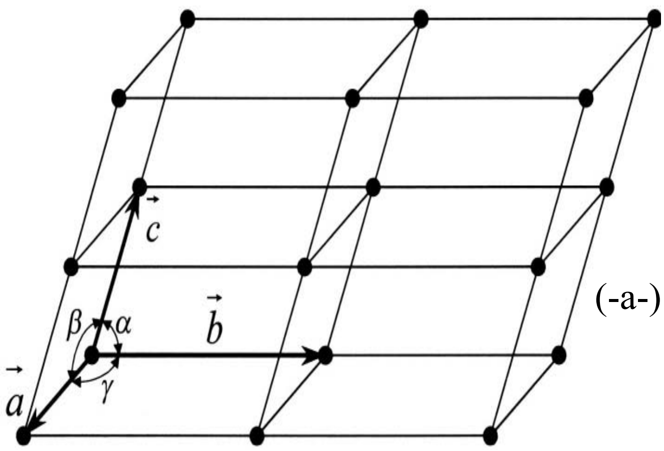
وفي حالة البلورات الحقيقية الممثلة بشبيكة فراغية (ثلاثة الأبعاد) تحدد وحدة الخلية بمتوازي السطوح المجسم ذي المحاور الثلاثة a, b, c والزوايا المقابلة لها α , β , γ كما في الشكل(1-5)

ولقد أمكن تصنيف البلورات على أساس الأشكال المحتملة لوحدة الخلية وعناصر تماثلها التي تحقق شروط الشبيكة البلورية. يمكن ايجاد حجم وحدة الخلية الابتدائية من المتجهات الاساسية للشبيكة:

$$V = \left|\vec{a}.(\vec{b} \times \vec{c})\right|$$

ان عدد وحدة الخلايا البدائية في البلورة، N وهو مساوي لعدد الذرات في البلورة،

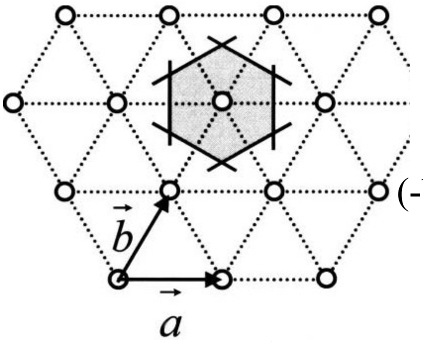
$$\text{حجم وحدة الخلية} = \frac{\text{حجم البلورة}}{N}$$




الشكل(1-5a) ) يحدد وحدة الخلية بمتوازي السطوح المجسم ذي المحاور الثلاثة a, b, c والزوايا المقابلة لها α , β , γ

**وحدة خلية ويكنر – سيتز:**

هي وحدة خلية بدائية ذات تناظر تام في الشبيكة البلورية وكما في الشكل (1-5b) وتحدد برسم خطوط من النقاط الشبيكية البرافيزية الى كل النقاط الشبيكة القريبة، ثم تنصف هذه الخطوط بمستويات متعامدة وسيكون الحجم المحصور بين المستويات المتعامدة هو خلية بدائية وتحتوي على نقطة شبيكية واحدة.

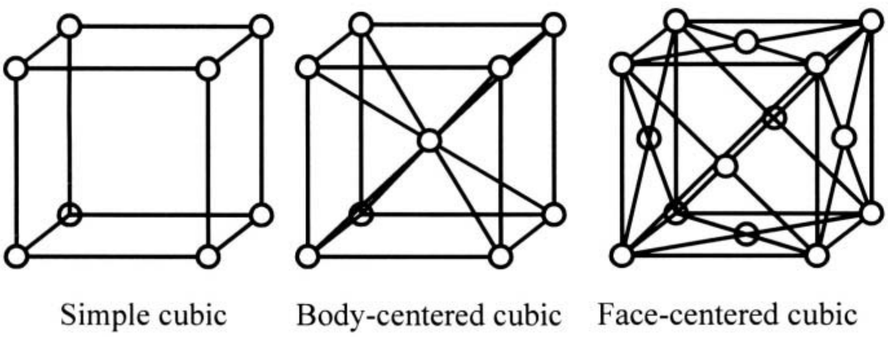


(-b-)

ومن المحتمل للخلية المكافئة ان تحتوي على اكثر من نقطة شبيكية واحدة ولتوضيح كيفية حساب عدد النقاط الشبيكية في وحد الخلية سوف نستخدم الشكل (1-5c) الذي يعرض ثلاث وحدات خلية للنظام المكعبي.

$$n_u = n_i + \frac{n_f}{2} + \frac{n_c}{8}$$

حيث $n_u$ عدد نقاط الكلية للخلية، $n_i$ عدد النقاط داخل جسم الخلية، $n_f$ عدد النقاط المتوسطة على سطوح الخلية، $n_c$ عدد النقاط الركنية في الخلية. وعلى سبيل المثال فان عدد الذرات الموجودة في وحدة الخلية للشبيكة المتمركزة الوجه هي $n_i = 0$ ،$n_f = 6$ ،$n_c = 8$، عند تطبيق القانون اعلاه فان $n_u = 4\,\frac{atoms}{unit\ cell}$



(-c-)

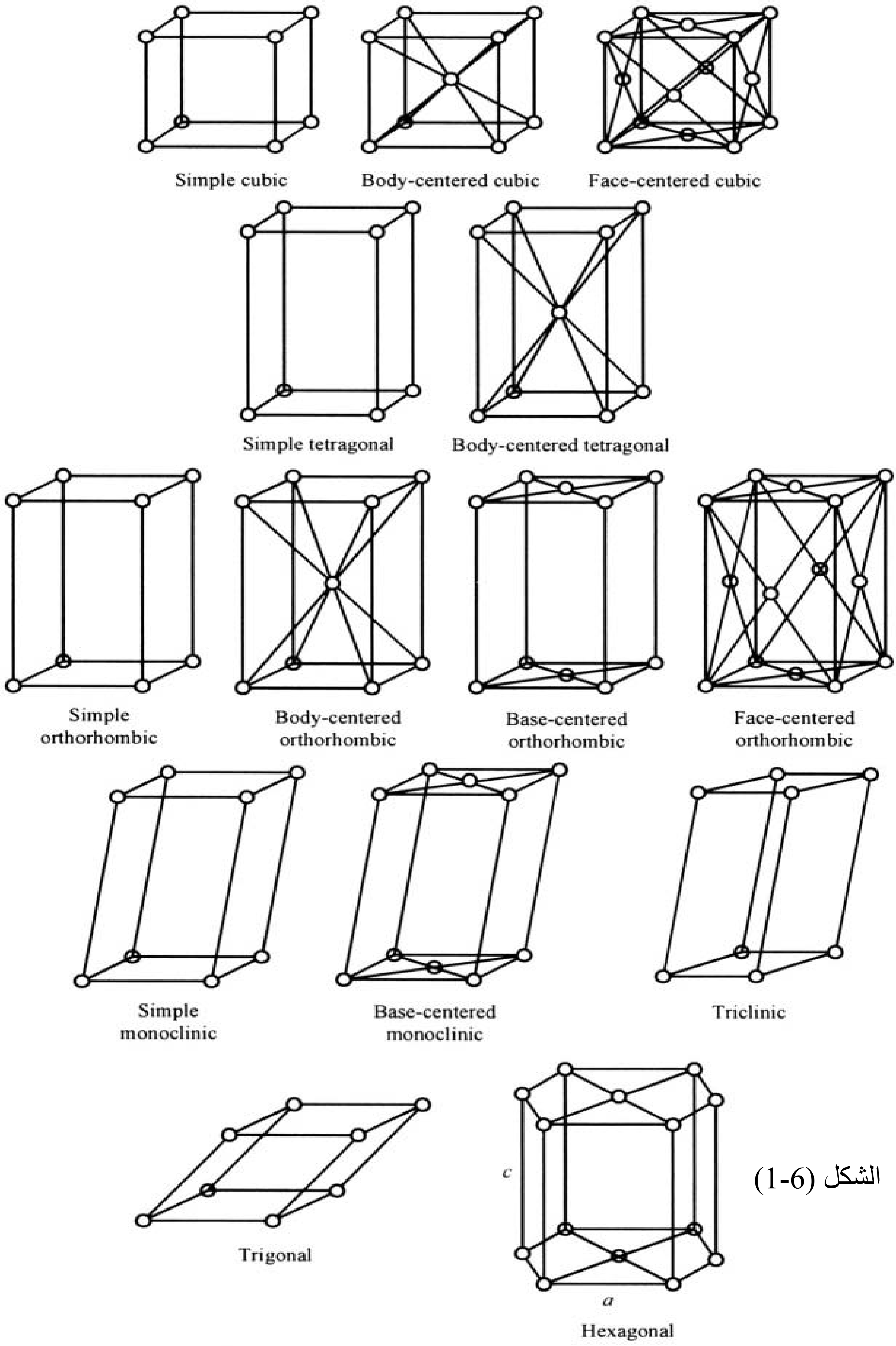
الشكل (1-5c) الذي يعرض ثلاث وحدات خلية للنظام المكعبي.

**الانظمة البلورية وشبيكات برافيزية:**

ينسب إلى عالم البلورات الفرنسي" برافيز Bravais تصنيف الشبيكات البلورية إلى أربع عشرة شبيكة موزعة على سبعة أنظمة بلورية Crystal Systems و يوضحها الجدول (1-1) و الشكل (6-1) و عدد شبيكات برافيزية الأربع عشرة والنظم البلورية السبعة محدود بعدد الطرق الممكنة لترتيب النقاط الشبيكية بحيث تكون البيئة المحيطة بأي نقطة منها مماثلة للبيئة تماما للبيئة المحيطة بأية نقطة أخرى، وتكون شبيكة برافيزية بسيطة إذا كانت نقاطها عند الأركان فقط ويرمز لها بالحرف P وعندما تشتمل على نقاط إضافية في مواضع خاصة فإنها تكون ممركزة الأوجه (F)أو ممركزة الجسم (I) أو ممركزة القاعد (C). على سبيل المثال، في حالة النظام البلوري التكعيبي توجد ثلاث شبيكات فراغية هي: شبيكة المكعب البسيط (P) وشبيكة المكعب متمركز الجسم (I) وشبيكة المكعب متمركز الأوجه (F) ويلخص الجدول (2-1) أهم خصائص هذه الشبيكات الثلاث.

الجدول (1-1) يبين الشبيكات البرافيزية الاربعة عشر في سبع انظمة بلورية.

| التسلسل | النظام البلوري | شبيكات برافيزية | الوحدة خلية خصائص |
|---|---|---|---|
| 1 | ثلاثي الميل Triclinic | P | $a \neq b \neq c$ <br> $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$ |
| 2 | أحادي الميل Monoclinic | P,C | $a \neq b \neq c$ <br> $\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$ |
| 3 | مستطيلي متعامد Orthorhombic | P, C, I, F | $a \neq b \neq c$ <br> $\alpha = \gamma = 90° = \beta$ |
| 4 | رباعي Tetragonal | P , I | $a = b \neq c$ <br> $\alpha = \beta = \gamma = 90°$ |
| 5 | مكعب Cubic | P, I, F | $a = b = c$ <br> $\alpha = \beta = \gamma = 90°$ |
| 6 | ثلاثي التماثل Trigonal | P | $a = b = c$ <br> $\alpha = \beta = \gamma < 120°, \neq 90°$ |
| 7 | السداسي Hexagonal | P | $a = b \neq c$ <br> $\alpha = \beta = 90°\ , \gamma = 120°$ |


Simple cubic
Body-centered cubic
Face-centered cubic
Simple tetragonal
Body-centered tetragonal
Simple orthorhombic
Body-centered orthorhombic
Base-centered orthorhombic
Face-centered orthorhombic
Simple monoclinic
Base-centered monoclinic
Triclinic
Trigonal
c
a
Hexagonal

الشكل (1-6)

الجدول (2-1) يبين أهم خصائص الشبيكات المكعبة الثلاث.

| الخاصية | المكعب البسيط Sc | المكعب متمركز الجسم bcc | المكعب متمركز الأوجه fcc |
|---|---|---|---|
| حجم خلية الوحدة طول الضلع a | $a^3$ | $a^3$ | $a^3$ |
| عدد نقط الشبيكة لكل وحدة خلية | 1 | 2 | 4 |
| عدد نقط الشبيكة لكل وحدة حجم3 | $1/a^3$ | $2/a^3$ | $4/a^3$ |
| عدد أقرب الجيران (النقط المحيطة) ويعرف بعدد لتناسق أو الجوار | 6 | 8 | 12 |
| المسافة لأقرب الجيران (النقط المحيطة) | $a$ | $a\sqrt{3}/2$ | $a\sqrt{2}$ |
| عدد الجيران التالية | 12 | 6 | 6 |
| المسافة لأقرب النقط التالية | $a\sqrt{2}$ | $a$ | $a$ |

## مثال: 1-1

يتبلور الحديد بترتيب ذري تكعيبي متمركز الجسم bcc احسب مقدار ثابت الشبيكة Lattice Constant (طول ضلع خلية الوحدة a) علما بان: كثافة الحديد $\rho = 7.94\ g/cm^3$ ووزنه الذري (w) = 55.85 وعدد أفوجادرو $N_A = 6.02 \times 10^{23}$.

الحل:

$$\text{الكثافة} = \text{كتلة وحدة الحجوم} = \frac{\text{كتلة وحدة الخلية}}{\text{حجم وحدة الخلية}}$$

وبما أن عدد الذرات الحقيقية لكل خلية وحدة في بلورة الحديد $n_u=2$

$$\rho = \frac{nw}{a^3 N_A}$$

$$a^3 = \frac{nw}{\rho N_A}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{nw}{\rho N_A}} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 55.85}{7.94 \times 6.02 \ \times 1023}} = 2.86 \times 10^{-8} \text{ cm} = 2.86 \text{ Å}$$

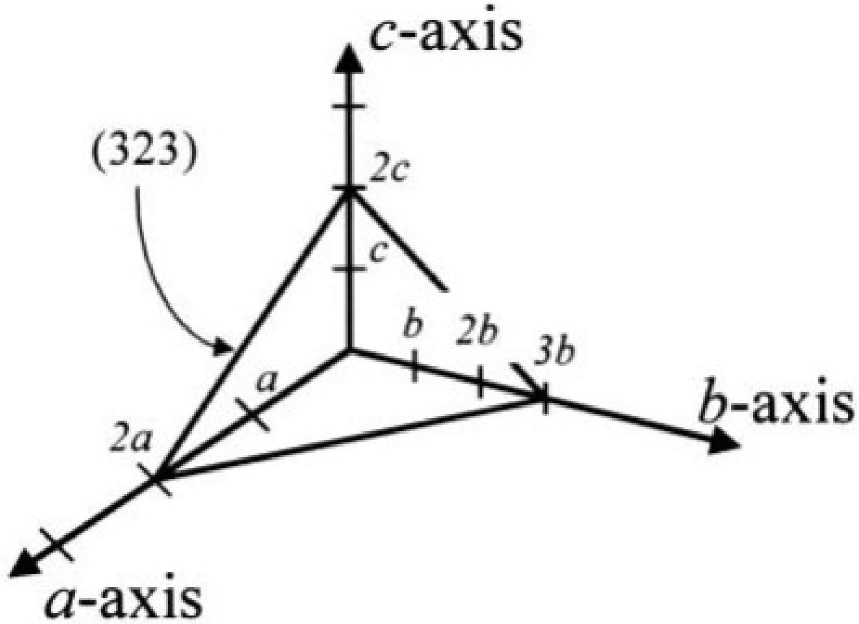
**إحداثيات ميللر: Miller Indices**

**اصطلح على تحديد المستويات البلورية بإحداثيات ميللر طبقا للخطوات التالية:**

اولا: امسك البلورة في وضع ثابت وعين الأطوال التي يقطعها المستوى من المحاور الأساسية Z , Y, X بدلالة ثوابت الشبيكة c , b, a.

ثانيا: خذ مقلوب هذه الأطوال و اختزلها إلى أعداد صحيحة، بشرط ألا يكون بينها أي قاسم مشترك سوى الواحد الصحيح، فيكون الناتج حينئذ هي إحداثيات ميللر للمستوى المطلوب وصفه أو تحديده، وتوضع هذه المعاملات بين قوسين عاديين وتكتب على الصورة (hkl) وإذا قطع المستوى أحد المحاور في لناحية السالبة، فإن الطول المقطوع يكون سالبا وتو ضع علامة (–) فوق المعامل المناظر .وإذا كان أحد الأطوال المقطوعة لا نهائيا في طوله، اي ان المستوى يوازي أحد المحاور، فإن معامل ميللر المناظر يساوي صفرا. على سبيل المثال المستوى ABC في الشكل التالي يقطع المحاور Z,Y,X بنسب 2c:3b:2a على الترتيب. نوجد مقلوبات هذه الأعداد: $\frac{1}{2},\frac{1}{3},\frac{1}{2}$ ثم نختزلها حسب القاعدة إلى أعداد صحيحة فتحصل على إحداثيات ميللر(323) وتنطق ثلاثة اثنان ثلاثة. وبديهي أن أي مستويات موازية لهذا المستوى في الشبيكة وتقطع المحاور الثلاثة في مضاعفات

أجزاء المستوى الأول يكون لها نفس الإحداثيات يوضح شكل (1-7) إحداثيات ميللر لبعض المستويات المهمة في بلورة مكعبة.




الشكل (1-7) يوضح إحداثيات ميللر

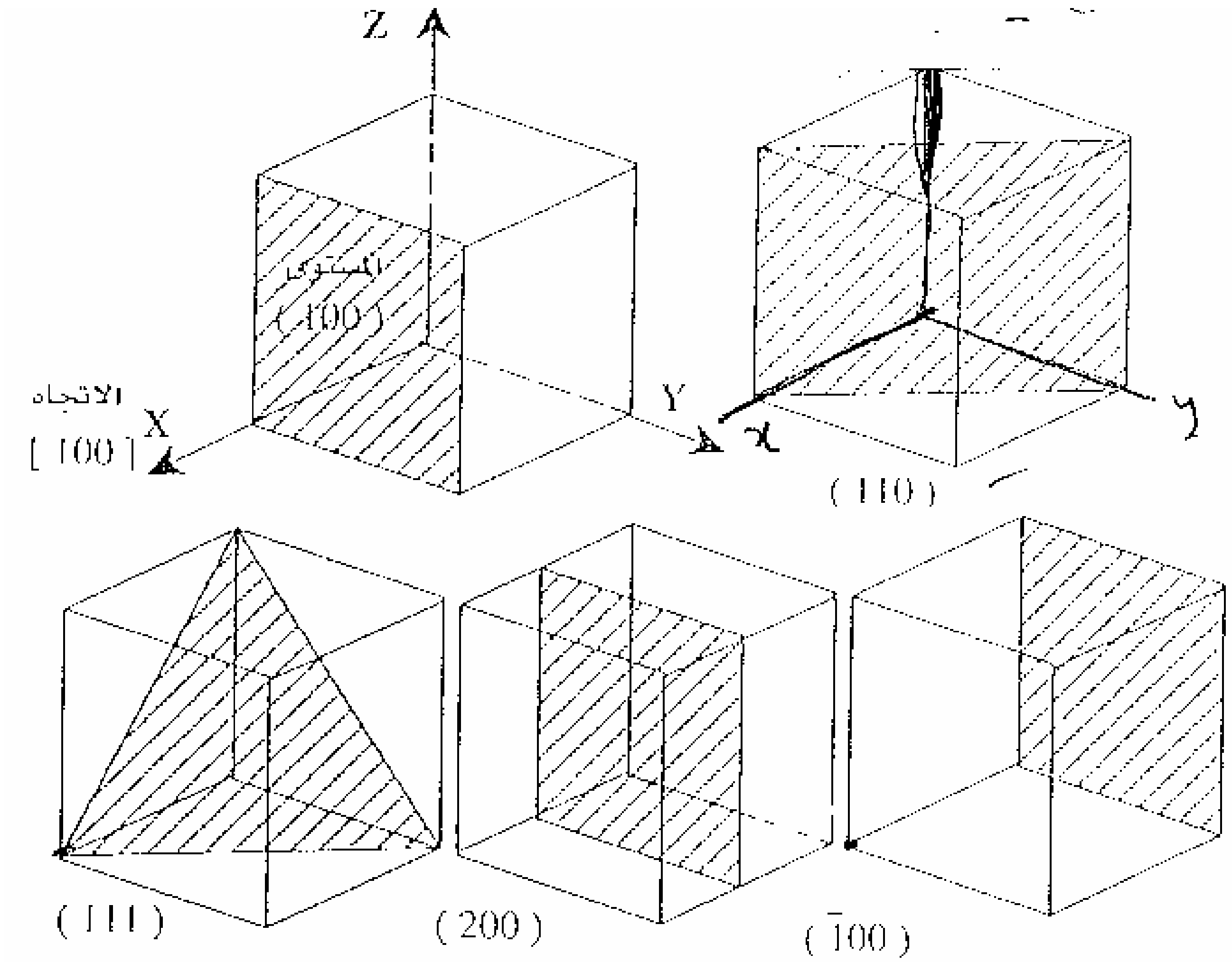
ويرمز لعائلة مجموعة المستويات المتكافئة بالتماثل، على سبيل الاختصار هكذا {hkl} ففي البلورة المكعبة تضم عائلة المستويا ت {001} كل أوجه المكعب (001)، (010)، (100)، (00$\bar{1}$)، (0$\bar{1}$0)، ($\bar{1}$00) اي انها جميعا تحمل نفس احداثيات ميللر بترتيب مختلف.

من ناحية أخرى، تستخدم إحداثيات مماثلة لإحداثيات ميللر لتحديد الاتجاهات داخل البلورة، وهي ايضا أعداداً صحيحة لا يوجد بينها قاسم مشترك، وتتناسب مع المركبات الأ ساسية لمتجه له الاتجاه المطلوب، وتكتب بين قوسين مربعين على الصورة [u v w] فالاتجاه الموجب للمحور X هو [100] والاتجاه Y هو [010] ويرمز لمجموعة الاتجاهات المتكافئة على الصورة <u v w>.

فعائلة الاتجاهات المتكافئة < 110 > تضم الاتجاهات:

, [110], [110], [101], [101], [101], [101], [011], [011], [011], [011], [011]

.[110], [110]



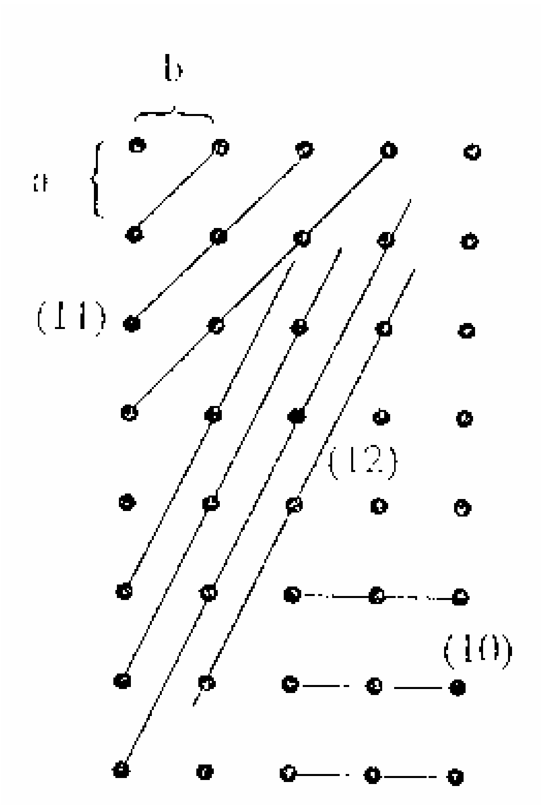

شكل (1 - 9): إحداثيات ميلر لبعض المستويات والاتجاهات المهمة في بلورة مكعبة

يكون w = l , v = k , h = u فالمستوى (100) عمودي على الاتجاه [ 100 ] والمستوى (110) عمودي على الاتجاه [110] انظر شكل (8-1) اعلاه.

أما مواضع النقاط داخل وحدة الخلية فيتم تحديدها بدلالة إحداثيات الشبيكة، وتؤخذ نقطة الأصل عند ركن وحدة الخلية، ويعبر عن الموضع بالاحداثيات xyz بإحداثيات النقطة التي تتوسط جسم خلية الوحدة هي: $\frac{1}{2},\frac{1}{2},\frac{1}{2}$ ، وإحداثيات مراكز الأوجه هي: $0,\frac{1}{2},\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{2},0,\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{2},\frac{1}{2},0$ .

**مثال (1-3):** احسب المسافة العمودية (البينية) الفاصلة بين مجموعة مستويات متعاقبة لها نفس إحداثيات ميللر (hkl) في بلورة من النظام المستطيلي القائم.

**الحل:** يوضح الشكل (1-9) أن المسافة العمودية $d_{hkl}$ بين كل مستويين متتاليين في مجموعات مختلفة من المستويات المتوازية في بلورة معينة تعتمد على إحداثيات ميللر. مجموعات مختلفة من المستويات المتوازية في شبيكة ثنائية البعد، وإحداثيات ميللر الخاصة بها (hkl)




وبالرجوع إلى هندسة الشكل (1-10) حيث `α` β` , γ هي الزوايا التي يصنعها العمود $\overline{ON}$ المقام من نقطة الأصل على المستوى الأول (hkl) مع الاتجاهات Z, Y, X على الترتيب، ونسب تقاطع المستوى الأول مع المحاور الرئيسية هي $\frac{a}{h}, \frac{b}{k}, \frac{c}{l}$ نجد أن جيوب التمام الاتجاهية هي:

$$cos\alpha^{/} = \frac{\overline{ON}}{a/h}, \qquad cos\beta^{/} = \frac{\overline{ON}}{b/k}, \qquad cos\gamma^{/} = \frac{\overline{ON}}{c/l}$$

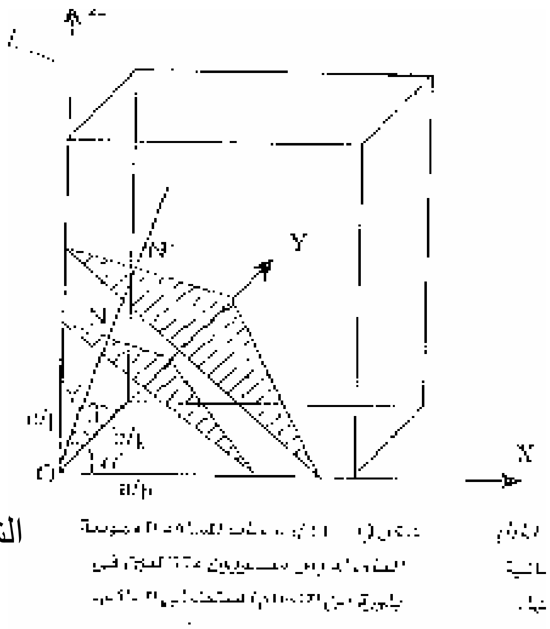
$$\cos^2\alpha' + \cos^2\beta' + \cos^2\gamma' = \frac{\overline{ON^2}}{(a/h)^2} + \frac{\overline{ON^2}}{(b/k)^2} + \frac{\overline{ON^2}}{(c/l)^2} = 1$$

$$\overline{ON^2}\left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}\right) = 1$$

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2}+\frac{k^2}{b^2}+\frac{l^2}{c^2}}}$$

وفي حالة النظام المكعب، حيث a = b = c يكون:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$$




الشكل (1-10)

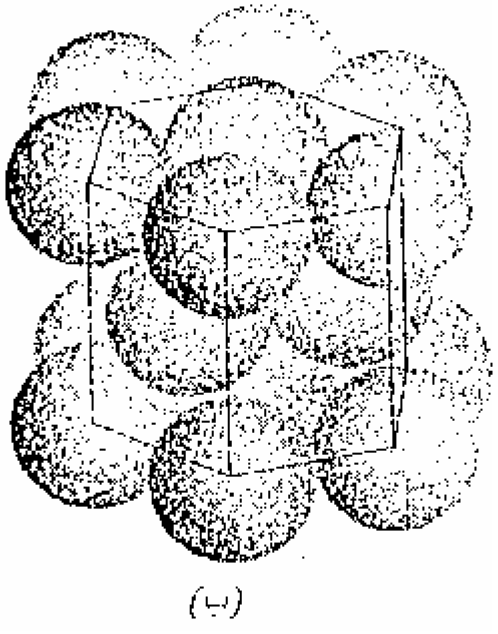
## متلاصق الرص: Close Packing

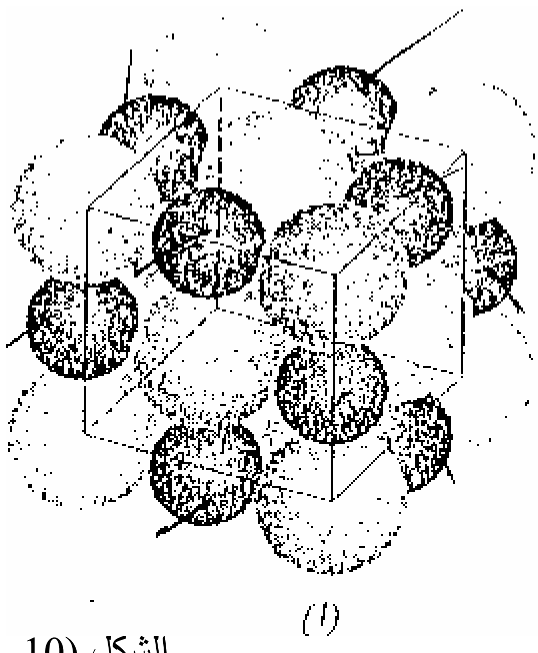
إذا اعتبرنا الذرات كرات صلبة متماثلة ومتمركزة حول نقطة الشبيكة، فإنه توجد طريقتان لتنضيدها بحيث يكون حجم الفراغات المحصورة بينها أقل ما يمكن. وفي كلتا الطريقتين نبدأ برص الطبقة الأولى A بحيث تلامس كل ذرة (كرة) ست ذرات أخرى تحيط بها، ثم توضع الطبقة الثانية B فوق الاولى بنفس الكيفية، بشرط أن تلامس أي ذرة فيها ثلاث ذرات في الطبقة الأولى، أ ي تكون كل ذرة في الطبقة B فوق أحد الفجوات في الطبقة A . **والآن، لإضافة الطبقة الثالثة C نجد أن هناك احتمالين كما في شكل (1-10): اولا:** توضع ذرات الطبقة C فوق الفجوات الموجودة في

كل من الطبقتين A,B فتكون الطبقة الرابعة فوق الطبقة A تماما ونحصل على الترتيب الفراغي ....ABC ABC وهذا يؤدي إلى التركيب المكعب متمركز الوجوه FCC وهو متلاصق الرص بعدد تناسق= 12 ، ومن أمثلته :النحاس والفضة والذهب و النيكل.

ثانيا: توضع ذرات الطبقة الثالثة فوق ذرات الطبقة الأولى تماماً، فيكون الترتيب الذري في الطبقات على هيئة ...ABAB وهذا يعطي التركيب السداسي متلاصق الرص (التعبئة) (hcp) ويتميز بالنسبة $\frac{c}{a}=\sqrt{\frac{8}{3}}$ =1.633 وعدد التناسق 12 ومن أمثلته :الزنك والكادميوم والمغنسيوم.

ويعزي لخاصية الرص المتلاصق أن معظم الفلزات تميل إلى أن تتبلور بتنضيد ذري تكعيبي أو سداسي.


(ب)


(أ)

الشكل (1-10) التركيب المتلاصق الرص

**مثال (1-2):**

يعرف عامل التعبئة (الرص) Packing Factor بأنه أكبر نسبة من الحجم الذي يمكن أن تشغله الذرات الموجودة في وحدة الخلية .احسب عامل التعبئة لكل من شبيكات النظام البلوري المكعب.

**الحل:**

نفترض أن الذرات عبارة عن كرات صلبة متساوية القطر ومتماسكة، أي متلاصقة الرص

عامل التعبئة $(F) = \frac{\text{حجم الذرات الموجودة في وحدة الخلية}}{\text{الحجم الكلي للخلية الواحدة}}$

ويسمى ايضا نسبة الرص أو التنضيد Packing Fraction فإذا كان عدد الذرات في وحدة الخلية n وحجم كل ذرة V ونصف قطرها r وطول ضلع المكعب a فان:

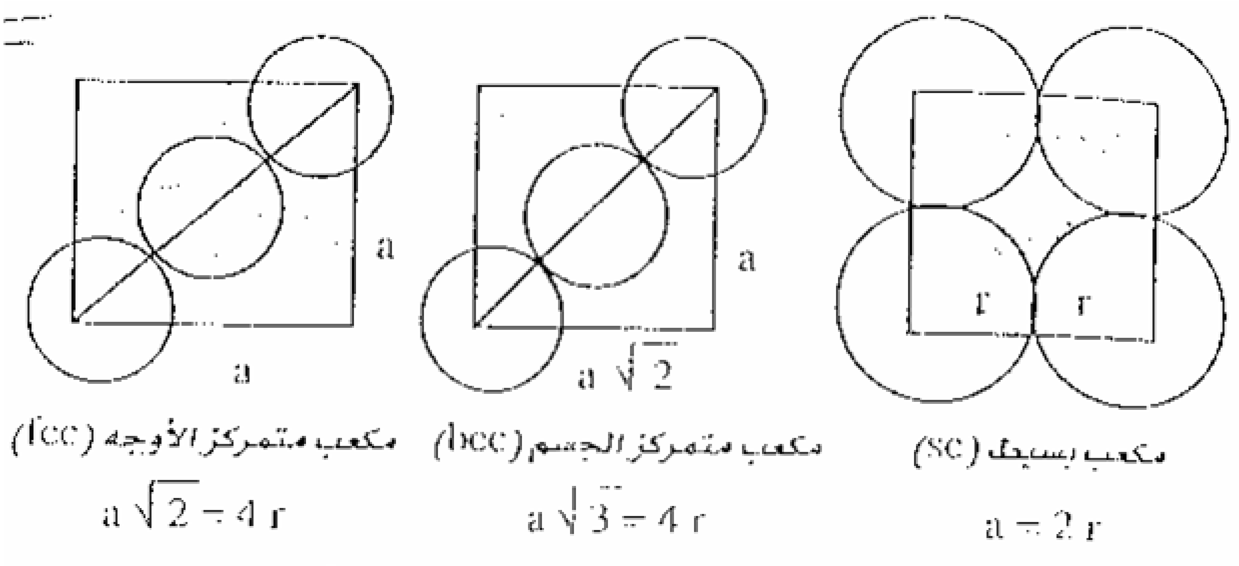
$$F = \frac{n \times V}{a^3}$$

وبالرجوع إلى شكل (11-1) في ادناه يمكن إيجاد:

$$F_{Sc} = \frac{1 \times 4\pi r^3}{3 \times 8r^3} = \frac{\pi}{6} = 0.52$$

$$F_{bcc} = \frac{2 \times 4\pi r^3}{3(4r/\sqrt{3})^3} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} = 0.68$$

$$F_{fcc} = \frac{4 \times 4\pi r^3}{3(2\sqrt{2}r)^3} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0.74$$

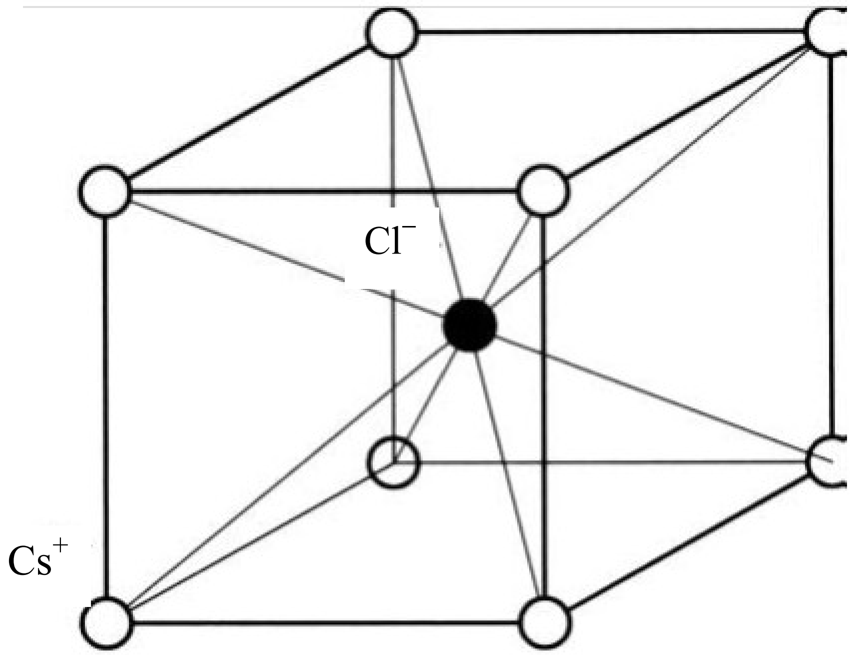



الشكل (11-1) عدد الذرات n في وحدة الخلية وحجم كل ذرة V ونصف قطرها r وطول ضلع المكعب a.

## أمثلة لبعض التركيبات البلورية

### أ- كلوريد السيزيوم CsCl:

تنتمي الشبيكة البلورية لكلوريد السيزيوم إلى النظام البلوري المكعب متمركز الجسم (bcc)، تشغل أيونات السيزيوم $Cs^+$ أركان وحدة الخلية، أي النقاط 000، بينما يشغل أيون الكلور $Cl^-$ مركز جسم المكعب $\frac{1}{2},\frac{1}{2},\frac{1}{2}$ وبهذا تحوي وحدة الخلية جزيئا ايونا واحدا من كلوريد السيزيوم CsCl. يمكن اعتبار الشبيكة البلورية لكلوريد السيزيوم مكونة من شبكتين فرعيتين من نوع المكعب البسيط لكل من أيونات السيزيوم وأيونات الكلور، ثم أزيحت هاتان الشبيكتان بالنسبة لبعضهما البعض على طول قطر المكعب بمقدار نصف ذلك القطر .انظر شكل (12-1).




الشكل (12-1) الشبيكة البلورية لكلوريد السيزيوم.

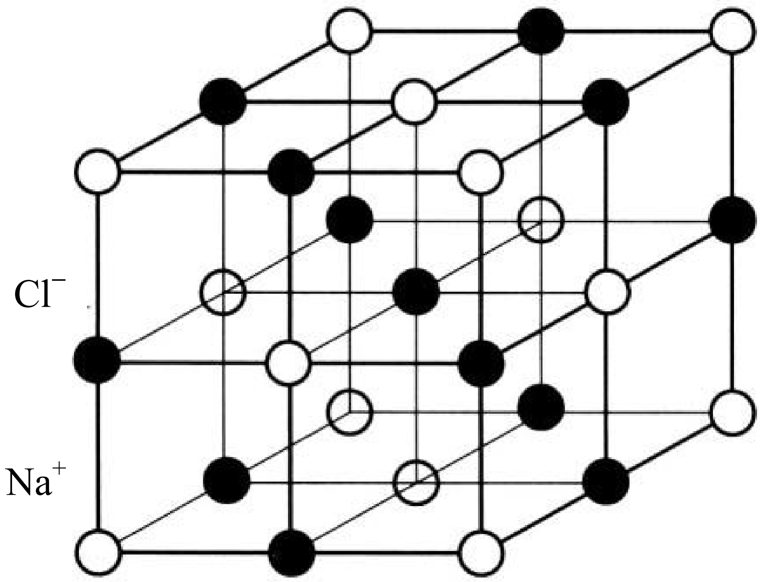
**ب- كلوريد الصوديوم: NaCl**

تنتمي الشبيكة البلورية لكلوريد الصوديوم إلى النظام البلوري المكعب المتمركز الوجوه وتحوي وحدة الخلية أربعة جزيئات حقيقية NaCl إحداثيات أيوناتها هي :

○ $Na^{+}$ : $000, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$

● $Cl^{-}$: $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}, 00\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}0, \frac{1}{2}00$

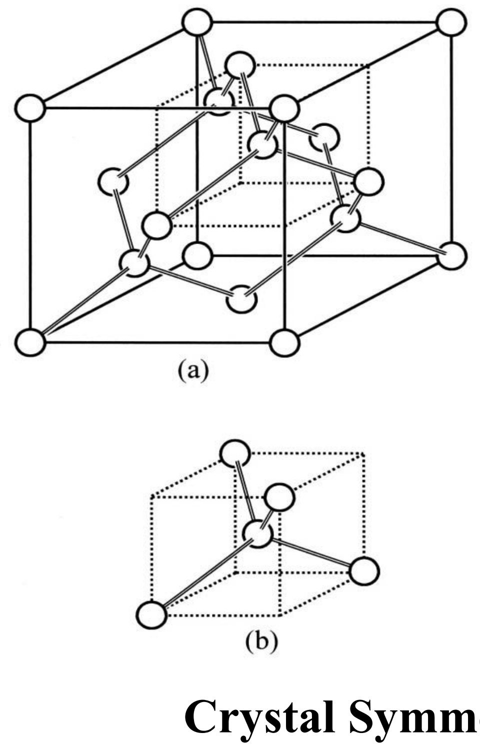
وعدد التناسق لكل أيون يساوي ستة أيونات مخالفة. الوحدة البنائية الأساسية (الاساس) تتكون من أيون صوديوم $Na^{+}$ وأيون كلور $Cl^{-}$ يفصلها نصف طول قطر خلية الوحدة المكعبة في الشبكية البلورية الفراغية. ويمكن اعتبار التركيب البلوري لكلوريد الصوديوم مكونا من شبيكتين فرعيتين متداخلتين من نوع المكعب متمركز الوجوه، إحداهما لأيونات الصوديوم والأخرى لأيونات الكلور، ثم أزيحت هاتان الشبيكتان الفرعيتان بالنسبة لبعضهما البعض بمقدار نصف طول ضلع المكعب . انظر شكل (1-13).




الشكل (1-13) الشبيكة البلورية لكلوريد الصوديوم.

## جـ- التركيب البلوري للألماس:

تنتمي الشبيكة البلورية للماس إلى النظام المكعب متمركز الأوجه والوحدة البنائية الأساسية (الاساس) المرافقة لكل نقطة شبيكية تتكون من ذرتي كربون إحداثياتهما هي: 000 و $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ ويحيط بكل ذرة أربع ذرات هي أقرب جيرانها (عدد التناسق=4)، وتحوي وحدة الخلية ثماني ذرات حقيقية. ويعتبر تركيب الماس فارغا نسبيا، حيث إن عامل التعبئة يقدر بنسبة 34 % فقط ويمكن اعتبار تركيب الماس مكونا من شكبيتن فرعيتين من نوع المكعب متمركز الأوجه، ثم تداخلت هاتان الشبيكتان الفرعيتان بإزاحة مقدارها $\frac{1}{4}$ طول قطر المكعب . انظر شكل (14-1) ادناه.



## التماثل البلوري: Crystal Symmetry

إن أهم ما يميز الشبيكة البلورية هي عمليات التماثل التي بإجرائها يعود البناء البلوري لوضعه الأصلي . وتعتبر عملية الإزاحة البلورية بمقدار المتجه الانتقالي $\vec{T}$ المعادلة (2-1) إحدى عمليات التماثل البلوري.

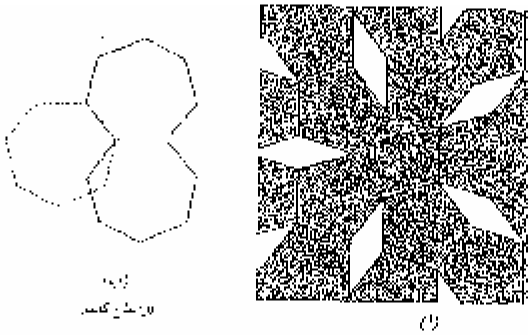
**عمليات التماثل النقطية:**

هناك عمليات تماثل أخرى يمكن تطبيقها عند نقطة معينة في الشبيكة البلورية ولهذا يطلق عليها اسم "عمليات التماثل النقطية "ومن أمثلتها:

أ- عملية الانقلاب: Inversion Operation وتتم حول نقطة شبيكية تسمى "مركز الانقلاب" بحيث تحول المتجه $\vec{T}$ الى $\vec{T}$ ويرمز لهذه العملية بالرمز $\bar{1}$.

ب- عمليات الانعكاس: Mirror Reflections ويرمز لها بالحرف m وتحقق صورة مماثلة لنصفي الشبيكة على جانبي مستوى تماثل يمر بنقطة من نقاطها.

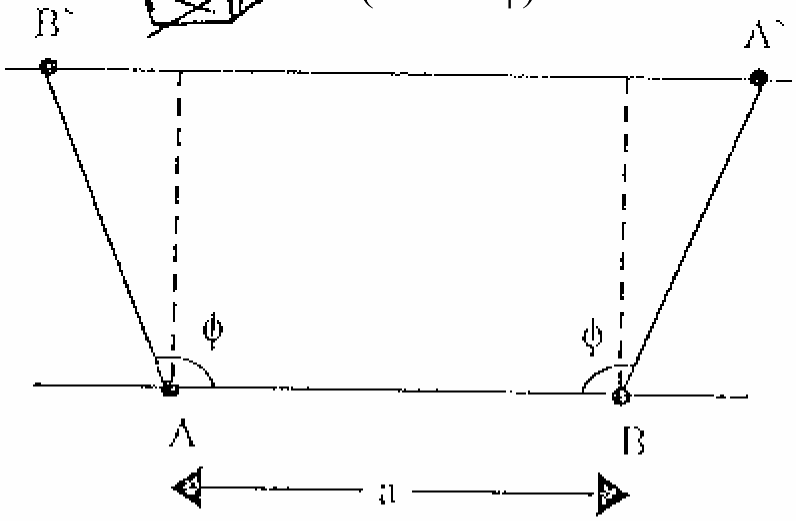
جـ- عمليات الدوران: Rotation حول محور تماثل يمر بإحدى نقاط الشبيكة ويحقق عودة البلورة إلى وضعها الأصلي بعد دوران زاوية معينة $\varphi = \frac{2\pi}{n}$ أو مضاعفاتها، حيث n عدد صحيح يصف محور التماثل بعدد طياته، ويأخذ قيما حقيقية هي: 2، 3، 4، 6 تناظر زوايا دوران , 180° , 120°، 90°، 60° على الترتيب، ولا توجد أية شبيكة يمكنها أن تعود إلى وضعها الأصلي بأي عملية دوران أخرى، فلا يوجد مثلا محور خماسي أو سباعي التماثل للشبيكة البلورية وكما في الشكل (1-15).



ويمكن بالطرق الرياضية البحتة إثبات أن محاور التماثل الدورانية لا يمكن إلا أن تكون أحادية أو ثنائية أو ثلاثية أو رباعية أو سداسية . فإذا اعتبرنا الشكل (16-1) الشبكية مستوية في بعدين ثابتها الدوري $a$ في الاتجاه الأفقي، وبفرض وجود محور تماثل عدد طياته n يمر بنقطة الشبكية B، ووجود أقرب محور مناظر له يمر بالنقطة A فإن الدوران بزاوية $\varphi$ حول B ينقل النقطة A إلى A' والدوران المماثل حول المحور A ينقل النقطة الشبيكية B إلى B' واضح أن النقطتين A' وB' تنتميان لأحد صفوف الشبيكة البلورية، ويتضح من هندسة الشكل أن:

$$A'B' = AB\,(1+2\cos\varphi)$$

$$= a\,(1+2\cos\varphi)$$




شكل (1 - 16):

الإثبات الهندسي لوجود عدد محدود من محاور التماثل

ونظرا لان A' B' يوازي AB فإن طول A' B' يجب أن يكون مضاعفات صحيحة لثابت الشبيكة $a$، ومن ثم فإن المقدار $2\cos\varphi$ يجب أن يساوي اعدادا صحيحة محددة 0، 1، 2،وتكون الزوايا المناظرة $\varphi$ هي فقط: °0،°60، °90 ,°120 ,°180 ,°360 · وباستخدام مفهوم عملية التماثل،

حيث $\varphi = \frac{360}{n}$ تكون مجاور التماثل الدورانية أحادية وثنائية وثلاثية ورباعية وسداسية، وتكون هي نفسها في حالة الشبيكة ثلاثية الأبعاد.

د- عمليات دوران انقلابية: Roto – Inversion تتم بالدوران حول محور بزاوية $\varphi = \frac{2\pi}{n}$ حيث $(n = 1, 2, 3, 4, 6)$ ثم يتبعها انقلاب حول نقطة شبيكية يمر بها المحور ويعبر عن محاور الدوران الانقلابية بالأرقام: $\bar{1}$، $\bar{2}$، $\bar{3}$، $\bar{4}$، $\bar{6}$. ويوضح الشكل (1-17) أن عملية الانعكاس m تكافئ عملية الدوران 180°*متبوعة بعملية انقلاب 1 عند نقطة تلاقي مستوى التماثل m بمحور التماثل 2 أي أن نقطة الشبيكة $P_o$ تكافئ النقطة P بمستوى التماثل m وتكافئها أيضا بالدوران 180°*حول المحور AA' لتصبح عند P' ثم بالانقلاب حول المركز I. وهكذا يتضح أن لدينا عشرة عناصر فقط لتحديد التماثل البلوري هي:

محاور الدوران: $\bar{1}$، $\bar{2}$، $\bar{3}$، $\bar{4}$، $\bar{6}$.

ومحاور الدوران الانقلابية: $\bar{1}$، $\bar{2}$، $\bar{3}$، $\bar{4}$، $\bar{6}$.

وتتميز كل من خلايا الوحدة في شبيكات برافيزية الأربع عشرة بوجود واحد أو أكثر من هذه العناصر.