

第 2 章 物質的組成

2-1 原子與物質的三態

2-2 原子與原子核的組成

本章教學理念

簡介物質的組成，原子的組成，質子、中子的組成，並簡單描述發現的過程及應用。

物質到底是由什麼組成？兩千多年來，一直是人們所欲了解的課題，今天科學家均已接受物質是由原子所組成，並且還可「看」到單一顆原子，甚至有效地控制移動它。對原子的深刻認識與實驗技術的高度發展，提升了人類對物質探索的能力，也改善了我們的生活形態。

2-1 教學理念

說明原子的大小以及從原子觀點解釋固態、液態及氣態之間的差異。當我們對於原子與分子的理解加深，便使得奈米科技有很大的發展空間。

2-1 原子與物質的三態

一、原子、元素及其存在性

早在兩千多年前，希臘人德謨克利特（Democritus，西元前 406 ~ 357 年）認為萬物皆由極小的、不可再分的「原子」(atom) 構成。但是亞里斯多德反對原子觀點，認為物質是由四種少數的基本「元素」(element) —— 水、土、火、氣，以不同比例組合而成。直到十六世紀前，化學家仍然沿用元素組成物質的觀念，不過當時所認為的基本元素為汞、硫、鹽三種。那麼物質到底是由原子、還是元素組成？

西元 1803 年英國化學家道耳頓（John Dalton，1766 ~ 1844）提出：

1. 元素皆由不可分割的原子所組成。
2. 每一種元素的原子有各自特定的重量（或質量）。同種元素的原子重量相同；不同元素的原子重量不同。

他是第一位將元素、原子與重量三種概念結合在一起的科學家，在他心中，原子就是元素，元素就是原子，原子與元素不分。

但由於沒有人曾親眼看見一顆顆的原子，到十九世紀末「原子是否存在」一直是個爭論激烈的問題。因此「原子」對大多數人而言，仍只是幻想中的微小粒子。

原子存在第一次有力的證據是與一位植物學家布朗（Robert Brown，1773 ~ 1858，英國人）有關。他在 1827 年觀察各種植物的花粉懸浮在水中時，發現這些懸浮在水中的花粉會作奇異、連續、不規則的移動，此種移動後來稱為布朗運動（Brownian motion）(圖 2-1)。

圖 2-1 法國物理學家佩蘭於 1912 年所繪的布朗運動結果

起初他還以為這些花粉是活的，後來才發現很多無生命的灰塵微粒也都有類似的運動！有些科學家認為布朗運動發生，是因為花粉受到周圍水粒子撞擊的結果，但這種定性解釋，

西元 1905 年愛因斯坦利用數學方法，開始處理水粒子對花粉所造成的碰撞效應，除了計算出花粉粒子隨意運動時，任兩次轉折點間的平均距離，還算出化學家所假定的亞佛加厥數。1908 年，法國物理學家佩蘭 (Jean Perrin, 1870 ~ 1942) 用實驗證實愛因斯坦的計算與觀測吻合。這個出色成功的理論詮釋與實驗證據，讓大多數科學家接受了原子論。

二、原子大小與奈米

原子若與平常我們生活中所遇到的尺寸比較起來，它是非常的小，原子大小的尺度，必須以微米的一萬分之一為單位， $1 \mu\text{m} / 10,000 = 10^{-10} \text{m}$ ，這個長度單位記作 \AA ，讀作「埃」，亦即

$$1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{m} = 0.1 \text{nm} \quad (2.1)$$

或是用現在普遍使用的 SI 單位：奈米 (nm) 來表示的話，原子尺度大約在 0.1 nm (圖 2-2)。

隨著科技的進步，1982 年在瑞士實驗室設計出特殊的顯微鏡，提供了一項卓越的物體表面成像技術，人們可以獲得較從前明顯的原子圖像，從而第一次看到了原子 (圖 2-3)。利用這些技術與工具，甚至可以移動單獨的原子，把它們排列成我們想要的形狀，而不再只是幻想 (圖 2-4)。奈米-穿隧式顯微鏡

圖 2-2 原子與其他物體相對大小的示意圖

圖 2-3 顯微鏡下石墨表面高度排列規則的碳原子圖像 (3 奈米x3 奈米)

圖 2-4 (A) 1990 年，科學家首次利用新型顯微鏡，逐步移動吸附在鎳表面上的氬原子，把它們排成「IBM」字樣。(B) 圖中是對 12 個溴原子的近距離觀察，這 12 個溴原子通過分子組裝技術排列成環形。

三、原子與物質三態 物質的狀態

所有物質已證實都是由微小的原子所組成，那麼原子之間的何種行為可決定物質會呈現出固體、液體與氣體三種不同的外形？

原子通常無法單獨存在，由原子組成可單獨存在的最小穩定粒子，稱為分子。為方便起見，若將原子與分子均簡單的以粒子 (particle) 來表示，由於粒子和粒子間會有靜電力的作用，通常其量值會隨著距離而改變。氬分子的形成

固態的物體裡粒子間的平均距離較短，接近其平衡距離，稍微偏離平衡的位置就會產生很強的吸引力或排斥力，可將粒子拉回或推回平衡位置，彷彿粒子緊緊的被綁在某個固定點附近，只能有小幅度的來回振盪，所以粒子間的相對位置及距離不易改變。造成有固定的形狀及大小，因此被稱為固體 (圖 2-5)。

圖 2-5 固體內部的結構規則有序：(A) 石墨。(B) 食鹽。(C) 金屬。(D) 冰。

隨著溫度升高，粒子在固定點附近的振盪會變得愈來愈劇烈，粒子間的平均距離也會逐漸拉大，距離愈遠則產生的吸引力就逐漸變弱，當距離大到某個程度時，粒子間的作用力已

不足以維持粒子彼此之間的相對位置，從物體的外觀來看形狀無法保持固定，這個時候表示物體已經變成液體，但因粒子間的吸引力還足以維持粒子間距不會使粒子彼此遠離，所以物體還有固定的體積。

若溫度再升高，平均距離變得更大，則粒子間彼此相互束縛的力量更小，幾乎可以完全忽略，粒子可以各自單獨行動，因此這時物體已經變成氣體，既沒有固定形狀，也沒有固定體積。(圖 2-6)

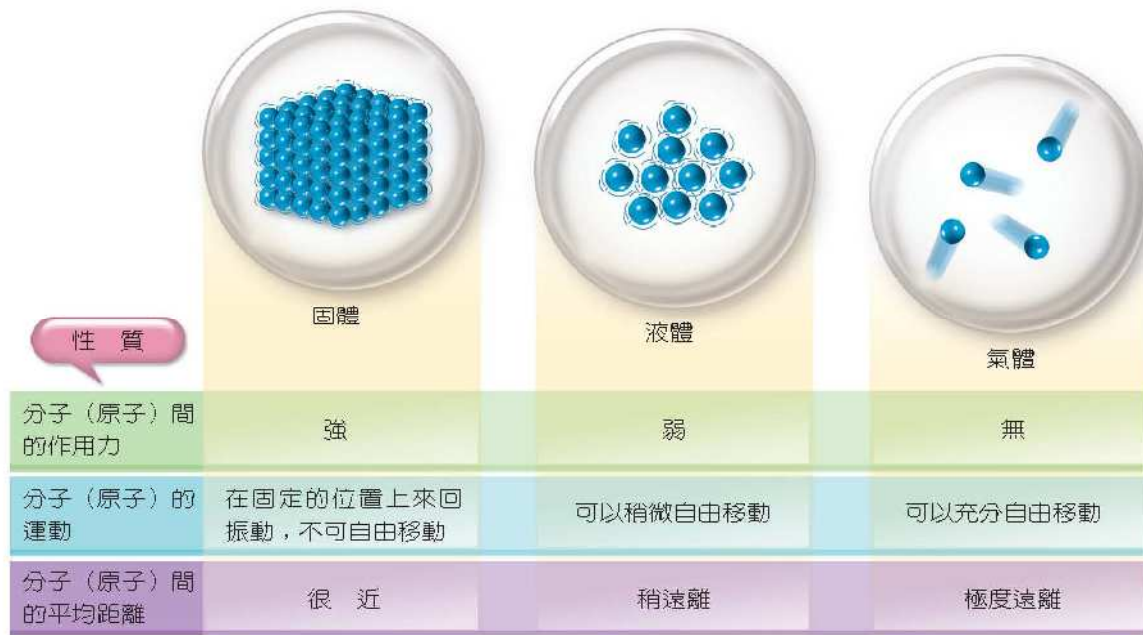


圖 2-6 物質三態中粒子關係示意圖與分子(原子)間性質對照表

2-2 教學理念

原子內部有帶正電的原子核，原子核外有電子環繞；原子核內有質子與中子；質子、中子是由夸克所組成。電子及夸克是至目前為止，我們所發現最基本的東西。

2-2 原子與原子核的組成

一、原子的組成

西元 1897 年英國物理學家湯姆森 (Joseph Thomson, 1856 ~ 1940) 改良了當時的氣體放電管 (圖 2-7)，他發現不論放電管中是填入空氣、氫或二氧化碳等不同的稀薄氣體，都會有相同的負電荷，且質量與電量比固定的粒子被釋放出來，他因此推斷所有原子內部皆有此種帶負電荷的粒子，也就是現在我們所稱的電子 (electron)。

圖 2-7 湯姆森發現電子的實驗中所使用的氣體放電管

湯姆森認為原子內的結構是非常均勻的，電子則分散於其中。紐西蘭出生的科學家拉塞福 (Ernest Rutherford, 1871 ~ 1937) (圖 2-8) 卻對此提出了質疑，他的助手及另一位學生於西元 1909 年設計了以帶正電的高速 α 粒子 (或氦原子核) 撞擊金屬薄片的實驗，按湯姆森的模式，這就有如子彈射入西瓜，大部分粒子應會穿過原子，但是實驗結果顯示，不但

有少數的粒子不可穿透，且其中有完全被反彈回來的情形發生。經過拉塞福的苦思及數學推算，在 1911 年他推論：

圖 2-8 原子核的發現者 —— 拉塞福

原子內部大部分是空無一物的，所有的質量幾乎全集中在中心點上。

他稱此中心為核 (nucleus)，好比桃子裡的核仁，此核並帶有正電。由於原子為電中性，等量等量負電子分布在核外規律的環繞運轉，而最外圈電子的圓周半徑即為原子的半徑 (圖 2-9)。一個原子核的半徑約為 1 費米^(註1) (1 fm)

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \quad (2.2)$$

大約是氫原子半徑的十萬分之一，而不同原子核大小會略有不同 (圖 2-10)。

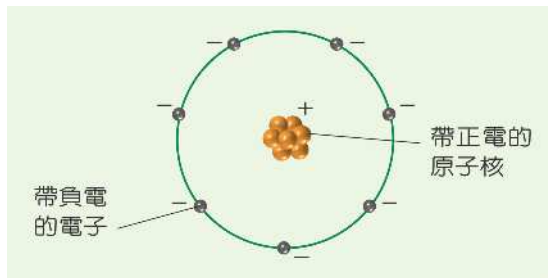


圖 2-9 拉塞福原子模型 —— 有核心的存在

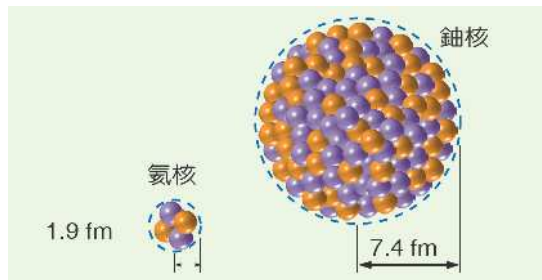


圖 2-10 氫與鈷原子核大小示意圖，大小約為費米尺度。

二、原子核的組成

西元 1919 年拉塞福再以帶電的粒子撞擊各種原子核時，發現都有帶正電且與氫原子質量相同的粒子產生。於是他推斷各種原子核內皆有一種粒子 —— 他稱之為質子 (proton) 的存在。

假若原子核都是由質子構成，例如鈹原子核，其質量約為質子的 9 倍，因而應含有 9 個質子，核內電荷也應為 +9 個單位；但鈹原子的電子總數只有 4 個，所以正電荷數明顯過多，而無法維持電中性。對於此疑問，拉塞福推論在原子核內應有質量和質子相近的中性粒子存在。1932 年英國科學家查兌克 (James Chadwick, 1891 ~ 1974) (圖 2-11) 在實驗中發現，以 α 粒子撞擊原子核，產生了一種質量與質子幾乎一樣，但不帶電的中性粒子 —— 中子 (neutron) (圖 2-12)，而證實原子核內 (除氫原子核以外) 皆有中子存在。

圖 2-11 中子的發現者 —— 查兌克

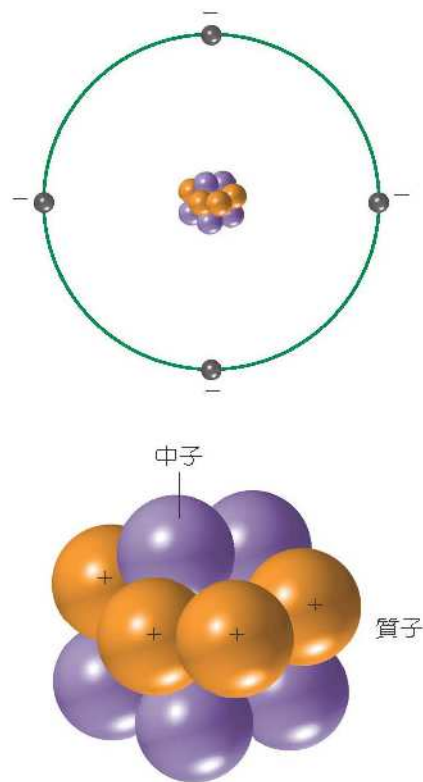
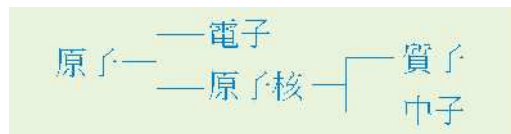


圖 2-12 查兌克的原子核模型 —— 原子核內皆含有質子與中子（氫原子核中僅含一質子，不含中子）。

註 1 在 SI 制 10^{-15} m 稱為飛米 (femtometer, 符號 fm), 在原子核物理領域常稱為費米 (fermi), 以紀念物理學家費米。

以鈹原子為例，電子總數為 4 個，則核內應含 4 個質子，以維持原子的電中性，核內也應含 5 個中子，以維持質量為質子的 9 倍。

所以，從道耳頓開始的物質結構又發生了一次改變，原來不可分的原子，可被分為電子與原子核；而原子核又由質子與中子組成。



所以，質子、中子與電子為組成原子的基本成分（表 2-1）。因為中子不帶電，所以一個電中性原子的質子數必等於電子數。此外，對於同一種元素其原子核內的質子數必相同。於是科學家便以質子數來區別元素的種類，並藉它作為原子排列順序的參考，故也稱它為原子序（圖 2-13），即：



圖 2-13 元素符號的記法 (符號的左下角為原子序 Z , 左上角為質量數 A)

表 2-1 電子、質子與中子之質量與電荷對照表

粒 子	電 子	質 子	中 子
質量 (kg)	9.1×10^{-31}	1.673×10^{-27}	1.675×10^{-27}
電荷 (基本單位電荷)	-1	+1	0
相對質量	0.00054	1	1.001

$$\text{原子序} = \text{質子數} = \text{電子數}$$

另外，由於電子質量非常輕，約為質子質量的 1840 分之一，故整個原子的質量幾乎全集中於原子核上，原子質量約等於原子核內質子與中子的質量和，因此質子個數 (Z) 與中子個數 (N) 的和，稱為此原子核的質量數 (A)，即：

$$\text{質量數} = \text{質子數} + \text{中子數} \quad \text{或} \quad A = Z + N$$

範例 2-1

下列原子核(1) ${}^3_1\text{H}$; (2) ${}^{54}_{26}\text{Fe}$ ，分別含有多少質子與中子？

【相關練習：習題 7.~9.】

分析 原子序 = 質子數，質量數 = 質子數 + 中子數。

解 (1) H 之原子序為 1，故質子數為 1，中子數 = 質量數 - 質子數 = $3 - 1 = 2$

(2) Fe 之原子序為 26，故質子數為 26，中子數 = $54 - 26 = 28$

三、質子、中子與夸克

就當大家接受質子與中子為組成原子核內的最小粒子時，1970 年左右在美國 史丹福加速器中心 (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC) (圖 2-14) 以高速電子撞擊質子的實驗中，預期如果質子內部為均勻分布的正電荷物質所組成，則電子大部分會穿透它，且電子受偏轉的角度會很小，但實驗數據卻顯示，電子被偏轉的角度，超乎預期地大 (圖 2-15)，非常類似當初拉塞福發現原子內部有點狀的原子核結構，這個結果證實了質子內部不是分布均

勻的物質，而是有「點狀」結構的更緊密的、微小的粒子存在，這個粒子被稱為夸克 (quark)，(在德文中最初的原意為一種鬆軟的白乾酪點心)，並且質子內部含有三個夸克(圖 2-16(A)，可參考補充資料)。

圖 2-14 位於美國 加州的史丹福加速器中心鳥瞰及示意圖(紅色與黃色分別代表在地底下電子與正電子被加速時的軌跡)

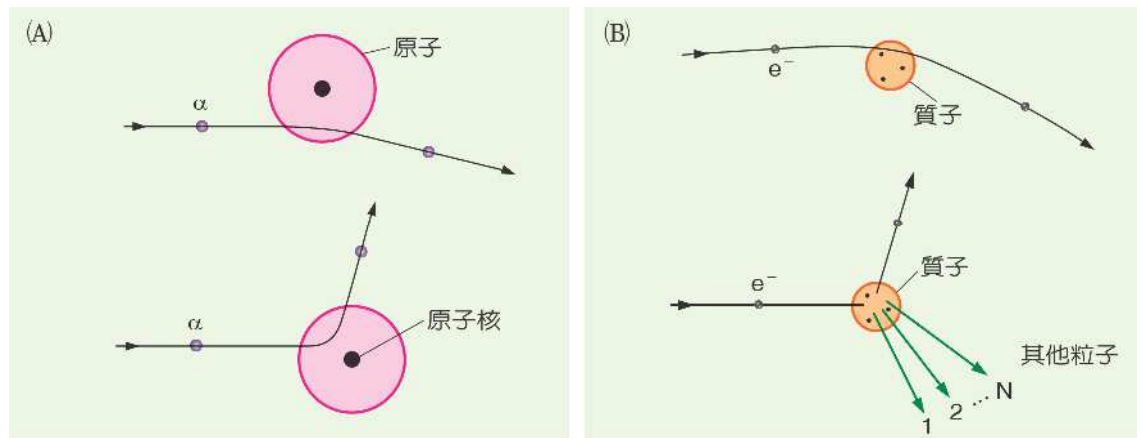


圖 2-15 (A)拉塞福散射實驗，大部分 α 粒子可穿透原子，不被偏折，僅少部分粒子非常靠近原子核時，會受到強烈偏轉。(B)以電子撞擊質子時，大部分電子不被偏折，僅少部分電子非常靠近夸克時，會受到強烈偏轉(由於電子能量非常高，可進入質子內部，讓其內部的組成成分散開，而形成其他粒子)。

若以高速電子撞擊中子，也會得到類似結果，並且發現中子內部是由三個夸克所組成(圖 2-16(B))。直至今日，在實驗上我們還未發現夸克及電子是由更基本的部分所組成，故稱夸克與電子為基本粒子 (elementary particles) (圖 2-17)。

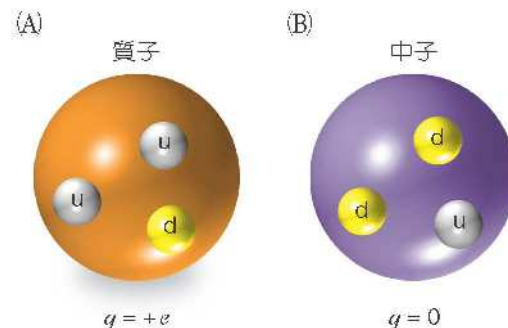


圖 2-16 (A)質子內部質量與電荷分配不均勻，有點狀結構，分別由三個夸克所形成，其大小約為質子大小的千分之一。(B)中子內部也是由三個夸克(組成略有不同)所形成。

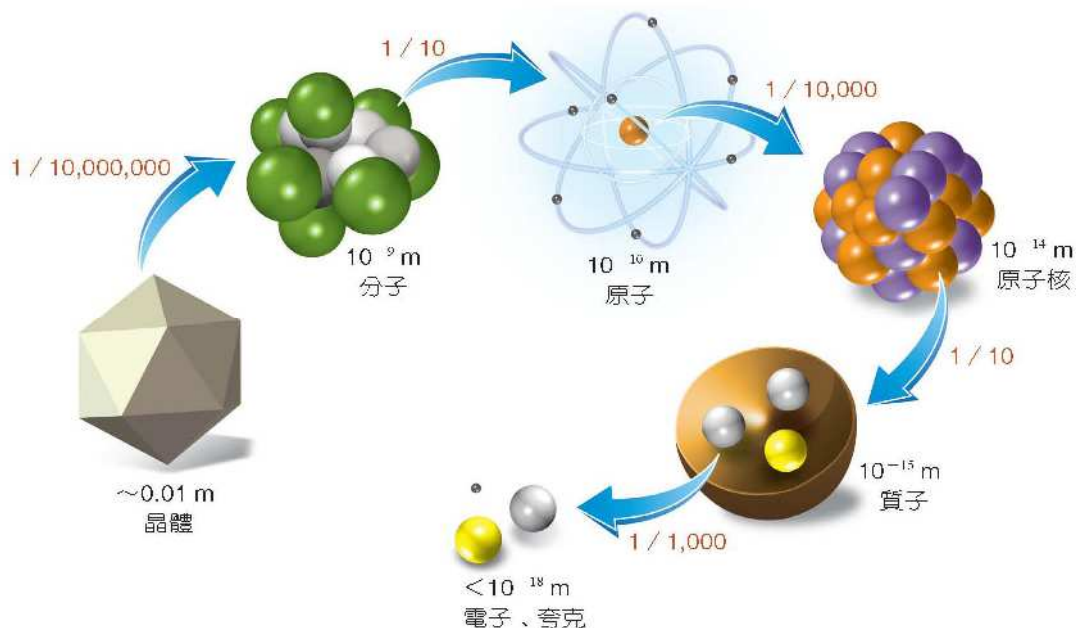


圖 2-17 自固體經原子至夸克之結構與大小示意圖

夸克的發現與確認，讓物理學家對各種微小粒子內部的基本結構，有了更深一層的了解與掌握，並促使物理學家朝向尋找自微小的原子世界至廣闊的無垠宇宙之所有結構的統合邁進。

補充資料 夸克的種類

概念延伸

經過理論的探討與實驗的發現，目前夸克共可分成六種。

種類	第一代		第二代		第三代	
中文名稱	上	下	魅	奇	頂	底
英文名稱	up	down	charm	strange	top	bottom
符號	u	d	c	s	t	b
電荷 (e)	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
質量 (質子質量)	0.003	0.005	1.3	0.15	172	4.2
實驗發現時間	1970	1970	1974	1970	1995	1977

要點整理

重要概念

- 基本粒子：在實驗上，我們還未發現夸克及電子是由更基本的粒子所組成，故稱夸克與電子為基本粒子。
- 原子與分子：原子通常無法單獨存在，由原子組成可單獨存在的最小穩定粒子，稱為分子。

■原子與原子核：原子內部大部分是空無一物的，所有的質量幾乎全集中在中心點的原子核上，原子核並帶有正電。原子核的半徑約為 1 費米 (1 fm)

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \quad (2.2)$$

大約是原子大小的十萬分之一。

■質子、中子與核：原子中含有電子與原子核；而原子核又由質子與中子組成。

■夸克：質子內部不是分布均勻的物質，而是有「點狀」結構之更緊密、更微小的粒子存在，這些粒子稱為夸克。

基本原理

■物質三態與粒子距離：固體原子間的距離較短，原子間的相對位置及距離不易改變。在液體內，粒子吸引力較弱，雖然仍是緊靠的，但沒有固定的位置。在氣體中，粒子間幾乎無吸引力存在。

■布朗運動：花粉、微塵等微小顆粒懸浮在水中會做奇異、連續、不規則的移動，這種運動稱為布朗運動。佩蘭對布朗運動的實驗證據與愛因斯坦出色成功的理論詮釋，讓大多數科學家接受了原子論，原子不再是一種方便的虛構。

分析應用

■原子尺度：原子大小的尺度單位記作 \AA

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm} \quad (2.1)$$

名詞術語

原子、分子、電子、原子核、質子、中子、夸克、基本粒子、布朗運動

迷思概念辨析



概念錯誤

道耳頓提出其原子說之後，物質是由原子所組成及原子的存在性，就被科學家普遍接受。

原子或元素的名稱由原子內所含的原子核數目所決定。

質子、中子與電子是組成物質的最基本粒子。



概念正確

道耳頓提出其原子說之後約一百年內，由於無人能以實驗真正證實原子的存在性，故很多科學家並不相信原子的存在。

原子的名稱由原子核內所含的質子數目所決定。

夸克與電子是組成物質的最基本粒子。

習題

2-1 原子與物質的三態

- () 1. 有關物質的基本組成，道耳頓提出原子論闡明元素與原子的關係。有關道耳頓的原子說之內容，下列敘述何者正確？
 (A) 元素皆由原子組成，原子可再分割
 (B) 每一種元素的原子有各自特定的質量（即原子量）
 (C) 原子由電子及原子核所組成
 (D) 原子由元素所組成
 (E) 數個原子可組成一個分子。
- () 2. 西元 1773 年美國著名科學家富蘭克林，寫給朋友的一封信中曾提及，他將一茶匙的油倒在湖面上，發現油會迅速擴張，直到蓋住約半畝的湖面就不再擴張了，由此他可估計出一個分子的大小。因為若油分子的形狀為正立方體，實驗中一茶匙油的體積約為 6.0 立方公分，半畝湖面的面積約為 3.0×10^7 平方公分，油的密度約為 0.95 克/立方公分。假設覆蓋在湖面的油層只有一個分子厚，則一個油分子大小可估計得知約為多少奈米？
 (A) 10^{-2} (B) 10^{-1} (C) 10^0 (D) 10^1 (E) 10^2 。
- () 3 承第 2 題，湖面上約有多少個油分子？
 (A) 10^{19} (B) 10^{21} (C) 10^{23} (D) 10^{25} (E) 10^{27} 。
- () 4. 原子的大小大約為多少？

(A) 10^{-2} 奈米 (B) 10^{-1} 奈米 (C) 10^2 奈米 (D) 10^4 奈米 (E) 10^6 奈米。

() 5. 下列有關物質三態的敘述，何者錯誤？

- (A) 固體與液體的體積固定
- (B) 液體的形狀可隨容器而改變
- (C) 氣體的形狀與體積固定
- (D) 三態變化的原因之一來自於溫度的變化
- (E) 固態分子堆積通常較緊密，且分子位置不能任意移動。




() 6. 下列何者可以描述液體的特徵或性質？（應選三項）

- (A) 形狀隨容器改變，沒有固定形狀
- (B) 定溫定壓下有恆定的體積
- (C) 粒子在固定位置上振動
- (D) 具有流動性
- (E) 與任何接觸面間皆有很大的摩擦力。

2-2 原子與原子核的組成

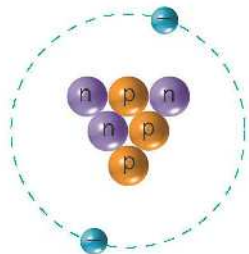
() 7. ${}^{13}_{6}\text{C}^{++}$ 含有多少組成粒子，下列敘述何者正確？

- (A) 符號所代表的是一個中性碳原子
- (B) 其內有 6 個中子
- (C) 有 7 個電子
- (D) 有 13 個質子
- (E) 其原子量比一般碳原子大。

() 8. 若原子結構如右圖所示，其中  為質子、 為中子、 為電子，則此原子的

原子符號為下列何者？

- (A) ${}^3\text{He}^+$ (B) ${}^3\text{Li}$ (C) ${}^6\text{Li}^+$ (D) ${}^3\text{Be}$ (E) ${}^6\text{Be}^+$ 。



() 9. ${}^{183}_{76}\text{Os}$ 與 ${}^{193}_{76}\text{Os}$ 兩原子核結構差異在哪？

- (A) 後者比前者多 10 個電子
- (B) 後者比前者多 10 個質子
- (C) 後者比前者多 10 個夸克
- (D) 後者比前者多 10 個中子
- (E) 後者比前者半徑大 10 \AA 。

- () 10. 有關基本粒子的敘述，下列何者錯誤？
- (A) 依目前的研究，夸克與電子都是基本粒子
 - (B) 夸克的發現是藉由高速電子對質子的散射實驗而發現
 - (C) 電子能量非常高時，可進入質子內部使其組成分開，形成其他粒子
 - (D) 以高速電子撞擊中子，也可發現中子內有點狀結構
 - (E) 中子是由兩個夸克所構成。