

化學原理(I)——原子

林弘敏 譯

一、前言

“原子是那麼微小，我們甚至無法以顯微鏡看到它的存在，那麼我們如何能測知它的重量呢？”我想世界上每一位化學教師都曾經被問過這個有趣而難以回答的問題。事實上這個問題的答案並不簡單。首先我們必須具有原子的觀念才能對如何測知原子重量的問題提出透徹明確的解釋。

二、原子學說

假如你將一片鋁箔撕成兩半，你將得到兩小片鋁箔，小鋁片再撕成兩半，所得到的鋁片將會更小。假如你再繼續撕下去，每一塊將變成更小，但它們與原來的鋁箔一樣仍然是鋁。我們假設當小鋁片已變成小至無法以肉眼可以看見時，你仍有法子將小鋁片繼續撕成更小。請問你是否可能永遠繼續將鋁片撕下去呢？如果答案是肯定的，那麼這表示物質的本質是具有連續性的。假如撕到某一點，小鋁片不可能再分成更小的單位，那麼你可能已得到最後最小的鋁片，這表示物質是由微粒所構成的。

遠至西元前五世紀古希臘的哲學家已有物質是由微粒構成的概念。Anaxagoras, Leucippus，尤其是Democritus 已經具體提出任何物質是由微小和不可破壞的原子所構成的理論（根據希臘文，原子（atom）一詞是不可分的意思）。Epicurus 更進一步擴展原子的觀念。幾百年後Lucretius 更以美麗的詩詞去闡揚原子的觀念。但是也有許多希臘學者極力排斥原子的觀念，最

具代表者為柏拉圖（Plats）和亞里斯多德（Aristotle）。在中世紀時期，物質是完全均勻而連續的亞里斯多德哲學思想最為一般人所接受。直到文藝復興初期，物質具有微粒的本質才再被人重視。雖然古希臘人的原子觀念主要出自於直覺上的臆測，但到了十七世紀，科學家們已經開始獲得一些實驗的證據而確知原子的存在。

公元1803年，道耳吞（John Dalton）終於提出有系統而且具體的原子學說：

- (1)所有物質皆由微粒所構成，此微粒稱為原子。
- (2)同元素的所有原子都是相同，但與其他元素的原子則不同。
- (3)當原子結合形成化合物，或化合物分解成原子，每一原子仍保持其完整性。
- (4)原子是以小整數比結合形成化合物。

三、化合定律(Law of Chemical Combination)

1. 質量不減性(Conservation of Mass)

原子學說的一強有力的論點為元素以一定的比例結合形成化合物。拉瓦錫（Antoine Lavoisier），世稱為現代化學之父，集合許多科學家的研究證據而於公元1783年提出質量不減定律（Law of Conservation of mass）。他肯定化學反應中質量從不減小亦不增加。事實上蘇俄的化學家Lomonsov 早在拉瓦錫之前23年已發表類似的觀念，但可能由於語言的障礙未能傳入西歐。

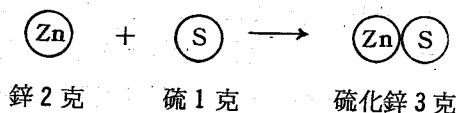
我們用原子學說不難解釋質量不減定律。化學反應所得到的生成物必須含有與反應物完全相同的原子，只不過是在反應的過程中原子經過重

組而已。因此所有生成物的總質量一定等於所有反應物的總質量。

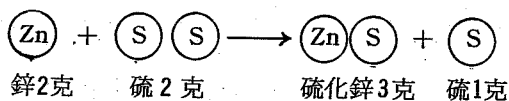
2. 組成(定比)性(Definite Composition)

根據定比定律，一種純化合物一定永遠含有同樣的元素，而且這些元素以一定的重量比率相互結合。例如水的組成永遠含有11%的氫原子和89%的氧原子。定比定律最早可能在公元1792年為Hieronymus Richter所提出，故稱為Richter定則。布勞斯特(Joseph Proust)在公元1799年所發表的有關定比定律的報告更令人信服。布勞斯特廣泛收集來自天然礦和其他化學家以各種不同方法合成出來的碳酸銅，而後自己加以精製和分析，他終於發現所有碳酸銅，雖其來源不同，但皆具有一樣的組成。

定比定律是原子學說最有力的證明。讓我們以硫化鋅為例，其組成含有約三分之二的鋅和約三分之一的硫，假如硫化鋅是由一個鋅原子和一個硫原子化合而成的，則鋅原子大約為硫原子的兩倍重。任何硫化鋅的物質都是由硫和鋅的原子化合而成的，故其重量組成一定永遠是 $\frac{2}{3}$ 鋅和 $\frac{1}{3}$ 硫。

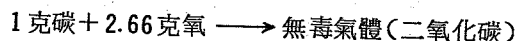


如使等重的鋅與硫作用時，僅部分的硫能與全部的鋅作用而遺留過剩的硫，但是所生成的硫化鋅仍然含有 $\frac{2}{3}$ 的鋅和 $\frac{1}{3}$ 的硫的重量組成。

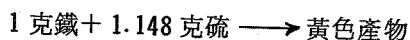
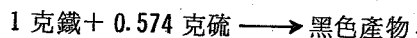


3. 倍比定律(Law of multiple Proportions)

兩種元素常常以各種不同的方法結合形成性質完全不同的化合物。例如碳與氧可結合形成無毒的二氧化碳和有毒的一氧化碳。



在此要注意的是當碳的重量固定為一克時，氧在兩種化合物(一氧化碳與二氧化碳)中的重量比成一簡單的整數比1:2。其次我們再看看鐵與硫的化合：



我們可以發現當鐵的重量固定為一克時，硫在此三種化合物中的重量比亦成一簡單整數比，2:

3:4(顯而易見此比值是以硫的重量各除以

2.87而得)。瑞典的化學家柏傑里爾斯(Jons Jakob Berzelius)作了無數的分析以證明倍比

定律的正確性。他終於了解某一元素的原子可與其他元素的原子以不同的數目化合形成不同的化合物，這就是倍比定律，其要義具體敘述如下：

假如由同一元素生成數種不同化合物，則與一定重量的該元素化合的其他元素在這些化合物中的重量比必成一簡單整數比。但是我們要知道倍比定律如不用原子學說的原子觀念是很難予以解釋的。我們再討論上述的碳與氧的那兩種反應。設以黑球●代表碳原子，以白球○代表氧原子(道耳吞當年即是如此假設)，那麼那兩種反應可以圖示如下：



假如氧原子的重量為碳原子的 $1\frac{1}{2}$ 倍，那麼在第二個反應中氧重必為碳重的 $2\frac{1}{2}$ 倍。在兩種化合物(一氧化碳與二氧化碳)中氧的重量比必為1:2。

四、原子重量

道耳吞的相對原子(重)量標(Dalton's Relative Atomic Weight Scale)

從以上所討論的定比定律和倍比定律中我們

很明顯地發現出元素化合的單純性。這不僅使道耳吞深信物質是由原子所構成的，而且認為不同的原子具有不同的重量。假設 1 克的物質 A 與 2 克的物質 B 化合，而且假設 1 個 A 原子與 1 個 B 原子化合，那麼 1 克的物質 A 與 2 克的物質 B 必含有同數的原子，因此 B 原子的重量必為 A 原子重量的兩倍（打個比喻，一打大小完全相同的橘子的重量為一打大小完全相同的檸檬的重量的兩倍，那麼一個橘子的重量必為一個檸檬的兩倍）。道耳吞根據他所能獲得有關化合量的數據，計算出一些原子的相對重量。

公元 1803 年道耳吞在曼徹斯特文學哲學會（Manchester Literary Philosophical Society）發表他的原子理論，同時提出了世界上最早的元素相對原子（重）量表。這表只列了 14 個元素而所列的原子量值並不是十分準確，因為當時他根據一些錯誤的分析和目前已證明不正確的假設。但是無論如何他的創見仍是很可取的。道耳吞曾作水的分析，發現水含有 $\frac{1}{8}$ 的氫和 $\frac{7}{8}$ 的氧的重量組成。他假設氫與氧是以 1 : 1 化合形成水（這種假設已證明為不正確），故他推定氧原子的重量必為氫原子重量的 7 倍。因為氫顯然是元素中最輕的原子，道耳吞任意設定氫原子重量為 1。根據這個基準，故氧原子重量為 7，氮原子重量為 5，磷原子重量為 9 和硫原子重量由 13 至 22 不等。他所列的原子重量值雖然不很正確，但他對未來原子重量的整理和發展已做了很有意義的開導。

柏傑里爾斯的原子（重）量標（Atomic Weight of Berzelius）

氫原子不能與許多元素化合生成氯化物，因此以它作為原子重量的參考標準並不方便。許多化學家認為氧是一較佳的標準，因為氧可與大多數其他元素作用。氧的原子重量曾設定為 1（Dulong 和 Petit），10（Wollaston）和 100（

Berzelius）。柏傑里爾斯對於原子量標的發展貢獻至大。公元 1826 年他發表了一個相當完整的相對原子重量表，它與我們今日所使用的原子量表非常吻合。柏傑里爾斯同時創用元素的簡筆縮寫符號，化學家至今仍使用這些符號。

柏傑里爾斯仍和道耳吞一樣認為元素與氧是 1 : 1 的比例化合。例如 1 克的氧與 $2\frac{1}{2}$ 克的鈣作用，因鈣與氧以 1 : 1 化合，則鈣原子重量必為氧的原子重量的 $2\frac{1}{2}$ 倍，設氧的原子重量為 100，鈣原子重量一定為 250（實際上柏傑里爾斯的計算值為 250.019）。

一些科學家希望只使用元素簡單的化合重量（即當量），但柏傑里爾斯注意到原子有數種不同的化合能力（即價數）。一個原子可能與其他元素的一個、二個、三個、四個原子化合，或者兩個原子可能與第二元素的三個原子或五個原子化合。在把化合重量轉換成相對原子重量之前我們必須知道化合物中原子的化合比率。水即是很重要的例子，1 克的氧與 $\frac{1}{8}$ 克的氫生成水，如水中氧與氫之化合比為 1 : 1（如道耳吞的理論），那麼氫的原子重量必為氧的原子重量的 $\frac{1}{8}$ 。但是柏傑里爾斯根據給呂薩克定律（Law of Gay-Lussac）（容後敘述）認為水 H_2O 是由兩個氫原子與一個氧原子化合生成的，所以 $\frac{1}{8}$ 克的氫與 1 克的氧作用，我們可想像為兩份 $\frac{1}{16}$ 克的氫與 1 克的氧反應，那麼氫的原子重量必僅為氧的 $\frac{1}{16}$ 。柏傑里爾斯設氧的原子重量為 100，氫的原子重量就只有 6.2398 了。

道耳吞的原子重量標是以 H 之原子重量設為 1 作標準的。柏傑里爾斯修正他本人的原子量值以符合道耳吞先前提出原子量標。他把此兩種原子量標並排而公諸於世。也許由於他使用兩種不同的原子量表造成困擾，柏傑里爾斯的原子量標未能即時被重視。

杜龍—白蒂定律（Dulong-Petit Law）

公元1819年杜龍 (Pierre Dulong) 和白蒂 (Alexis Petit) 向法國研究院提出物質的比熱與其原子重量關係的報告。杜龍—白蒂定律是謂元素的比熱與其原子重量的乘積為一定值 (以現代的原子量標, 此定值約為6)。這表示由6除以元素的比熱可計算出該元素的原子重量。

$$\text{比熱} \times \text{原子(重)量} = 6 \text{ (近似值)}$$

$$\frac{6}{\text{比熱}} = \text{原子(重)量 (近似值)}$$

由此法所得的原子重量為近似值而此法並不適用於一些非金屬元素如碳, 但它仍甚有用處。柏傑里爾斯發現杜龍—白蒂定律在決定某些元素的化合能力 (即價數) 時非常有用。假如他所計算出的化合重量 (即當量) 僅為杜龍—白蒂定律算出的一半, 他就以他所精確測定的當量乘以2而得到原子重量。故由比熱算出的原子重量雖不精確, 但仍為可用。

$$\frac{\text{原子重量 (近似值)}}{\text{精確當量}} = \text{價數 (最接近的整數值)}$$

$$\text{精確當量} \times \text{價數} = \text{精確原子重量}$$

給呂薩克化合體積定律 (Gay-Lussac's Law of Combining Volume)

公元1805年另一位法國化學家給呂薩克 (Joseph Gay-Lussac) 表示在同溫同壓下互相化合的氣體其體積比為一最小整數比。等體積的氫氣和氯氣反應生成氯化氫, 兩體積的氫氣與一體積的氧氣生成水, 而三體積的氫氣與一體積的氮氣生成氨。這些實驗數據表示氯化氫的分子式為HCl, 水的分子式為H₂O而氨的分子式為NH₃。但在給呂薩克提出上述實驗報告後五十年仍有一些科學家堅持水的分子式為HO而非H₂O。

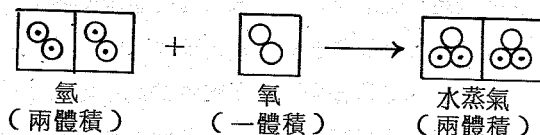
柏傑里爾斯是最早接受給呂薩克化合體積定律的科學家之一, 這使他得到氧、氫和其他一些元素之間的正確關係。一般而言, 柏傑里爾斯仍依賴直覺意識去選用科學的資料和數值。不幸地

, 他也像其他一些科學家一樣不接受日後成為非常重要的亞佛加厥假說。

亞佛加厥假說 (Avogadro's Hypothesis)

公元1811年亞佛加厥 (Amedeo Avogadro) 提出如果我們假設在同溫同壓下, 同體積的氣體含有同數的粒子, 就可以圓滿的解釋給呂薩克化合體積定律。他很謹慎地指出所謂粒子不一定是原子, 可能是一群原子或分子。

兩體積的氫氣與一體積的氧氣化合成兩體積的水蒸氣 (假設此三種氣體的體積都在同樣條件下測得)。亞佛加厥認為假設氫氣與氧氣都是雙原子分子 (diatomic molecule), 則氫、氧和水蒸氣的體積關係可以得到解釋。



假設氫氣與氧氣都是單原子分子, 那麼僅能生成一體積的水蒸氣, 則與實驗事實不合。亞佛加厥的觀念大大增進人們對物質構造的了解, 可是經過了半個世紀之久, 亞佛加厥假說才被廣泛地接受。

凱尼查羅原子重量標 (Atomic Weight of Cannizzaro)

使世人終於接受亞佛加厥假說和柏傑里爾斯的原子重量標的科學家為西西里島人凱尼查羅 (Stanislo Cannizzaro), 他澄清了十九世紀中一些困惑人們的化學問題。公元1850年可謂為化學界的混亂時期, 有機和無機化學家各使用不同的原子重量系統, 而且許多原子重量實際上是當量值, 也有些原子重量根本不正確。

公元1860年第一屆世界化學大會 (First International Chemical Congress) 在西德 Karlosruhe 市舉行。凱尼查羅向大會宣佈亞佛

加厥假說可以作為統一有機與無機化學家不同意見的理論依據。他強調區別原子與分子和原子重量與分子重量的重要性。他也提出柏傑里爾斯相對原子重量標的改良型。此經過改良的原子量標設氧之原子重量為 16.0000，因此氫的原子重量約為 1，其他絕大多數的元素原子量皆接近於整數值。許多原子量值都經重新測定。凱尼查羅促使化學家承認採用一種可靠和標準的相對原子量表的重要性。

五、現代原子重量值

凱尼查羅所提出來的原子重量值大部分是由當時一位比利時分析化學家史塔斯 (Jean Stas) 所測定。史塔斯能以過去未有的準確度測定原子重量。以氧的原子重量設為 16 也是他的主張。

有趣的是過去測定原子重量的發展過程深受 Prout 假說 (1815) 的影響。Prout 認為元素的原子重量皆為氫原子重量的整數倍。大多數的原子重量都非常接近於整數值 (以 $H = 1$ 或 $O = 16$ 的原子量標)。但是史塔斯證實有一些原子重量值並不接近於整數，才使人們摒棄了 Prout 的觀念 (所有原子僅是氫原子的聚合體)。不過後來同位素的發現又復活了 Prout 的觀念。

史塔斯以後的化學家繼續研究欲使所測定的原子量更為精確。以化學方法而言，哈佛大學的教授 T.W. Richards 的原子量測定的精確度可算最高，他也因此得到 1914 年的諾貝爾獎。日後以化學方法對原子量測定所作的改進無法媲美在公元 1919 年新發展出來的儀器的貢獻。這個儀器就是現在我們所說的質譜儀。

質譜儀的發展

假如你曾在刮風的時候玩球，你應該知道風力可改變球的行徑。假設我們在一條馬路上滾動乒乓球，籃球和保齡球，一次滾一球，同時我們假想有一陣穩定的微風，垂直於球滾動的方向從左

邊吹來。我們將會發現球的行徑由於風力的影響均偏向於右邊，但是乒乓球偏向右邊的程度比籃球大，而籃球偏右的程度又較保齡球大。這就是說球愈重，其所受風力的影響愈小。這個簡單的原理與質譜儀所根據的原理極為類似。所不同的是在質譜儀我們所玩的“球”是帶電荷的原子，而且以磁場替代風力而已。

在質譜儀的實驗，首先我們必須將待測物予以氣化和離子化，然後將帶電荷的原子 (即離子) 送進一強磁場。帶等電荷和等速度的粒子由於質量有微小的差異，較輕的粒子被偏轉的程度比較重的粒子為大，最後這兩個粒子在收集板上出現在不同的地方。通常以照相板作為收集板。這兩種粒子的總數可各以其在收集板上個別感光的強度計算出。

質譜儀的原理是 J. J. Thomson 首先發現的。最先他利用一裝有磁場的陰極射線管來測定電子的電荷對質量之比， e/m 。稍後他轉做對陽離子 e/m 的研究。他發現陽離子的 e/m 似乎與放電管中氣體的本質有關，較重的氣體產生較重的離子。公元 1913 年當 Thomson 進行氬氣的實驗，他發現在照相板上有兩條綫，它表示兩個質量稍微不同但極為類似的陽離子。這個發現似乎表示所有氬原子並不是完全相同，有些氬原子較其他氬原子重些。於是 Thomson 證實了同位素的存在。

Thomson 的實驗裝置經他的學生 Francis W. Aston 重新設計和改良。改良後的儀器可用以分開離子化元素而產生一系列細綫，它表示不同質量的離子。Aston 稱此儀器為質譜儀。他從質譜儀的實驗能證明氬含有 91% 的 $Ne-20$ 和 9% $Ne-22$ 。以後他也發現非常微量的 $Ne-21$ 。這些同位素原子具有完全相同的化學性質但會有不同數目的中子，所以他們的質量就不同了。

現代質譜儀的主要部分仍與 Aston 所使用儀器相同，除了前者的精確度較高和照相板以電子

化收集管替代而已。現代質譜儀優越的精確度可以目前Ne的原子量為例說明。

同位素	%天然存在量	原子質量
^{20}Ne	90.92	19.99244
^{21}Ne	0.257	20.99395
^{22}Ne	8.82	21.99138

世界公定的原子重量標準

公元1961年之前幾十年科學家採用兩種稍為不同的原子重量標。化學上的原子重量標使用於一般化學有關的計算，而物理上的原子重量標用於個別原子核的原子質量的表示。此兩種原子量標皆以 $\text{O}=16$ 為標準，但物理上設氧的一種同位素 ^{16}O （其原子核有8個質子和8個中子）的質量為16，而化學上設氧的數種存在於自然界的同位素混合物（ ^{16}O ， ^{17}O ， ^{18}O ）的平均質量為16。物理標原子量值較化學標高1.000275倍，偏差雖不大但足以造成困擾。公元1961年世界純化學與應用化學聯盟宣佈採用統一的新原子量標，它以C-12選作新參考標準，因它較便於質譜儀的使用。世界各國同意 ^{12}C 的原子重量為12.0000

元素	化學標 ($\text{O}=16.0000$)	物理標 ($^{16}\text{O}=16.0000$)	目前的標準 ($^{12}\text{C}=12.0000$)
氫	1.0080	1.00828	1.00797
碳	12.01	12.013	12.01115
氮	14.008	14.01185	14.0067
氧	16.0000	16.0044	15.9994

原子質量單位 (Atomic Mass Unit)

原子質量單位（簡稱為amu或u）定義為1克除以亞佛加厥常數（等於 6.02×10^{23} ），即 1.66×10^{-24} 克的質量。它大約為氫原子，質

子或中子的質量。一元素的原子重量如以原子質量單位表示，即成為該元素的一平均原子的重量。根據公元1961年採用原子重量標準，原子質量單位公定為 ^{12}C 原子的質量的1/12。 ^{12}C 原子含有6個質子和6個中子。

六、原子（重）量的意義

原子重量表所列出的數值均為無因次。它只是表示各種元素原子的相對重量。當原子質量單位聯於這些數值，它們即成元素“平均”原子的重量。例如當克聯於表上那些數值，它們即成為克原子重量（gram-atomic weight）。

1. 化學原子重量 (Chemical Atomic Weight)

週期表上所列的原子重量值和大多數的原子量表都是化學原子重量。這些都是基於每一元素存在於自然界的所有同位素計算出來的平均原子重量。例如氯的化學原子重量為35.453，但是沒有氯原子其真正重量為35.453 amu。存在於自然界的氯為75.53%的 ^{35}Cl （原子質量為34.96885）和24.47%的 ^{37}Cl （原子質量為36.96590）。35.454只是這些天然同位素的重量平均值。

$$[0.7553 \times 34.96885] + [0.2447 \times 36.96590] = 35.453$$

鈉的化學原子重量為22.98977，這是 ^{23}Na 原子的精確質量，因自然界只有此 ^{23}Na 同位素。

2. 正合原子重量 (Exact Atomic Weight) 或質量 (or mass)

正合原子重量是對元素的個別同位素而言。除了那些元素如鈉只有一種天然同位素外，正合原子重量不能從週期表上得到，而一定要從同位素重量表才能得到。大多數的化學工具書都附有同位素重量表。正合原子重量如以原子質量單位表示時，就是該同位素一個原子的精確質量。正

合原子質量永遠接近於一整數值，稱為原子的質量數。

3. 質量數 (Mass Number)

有時候元素的原子重量被指做該元素的質量數。元素的質量數實際上就是其所含核子 (Nucleon) 的數目，即質子與中子之總數。當元素的原子重量四捨五入至最近的整數，它通常與該元素最普遍的同位素的質量數相同。例如氧的原子量為 15.9994，四捨五入至 16，即為其主要同位素的質量數；(但有趣的例外是溴，其原子量為 79.909，四捨五入至 80，但自然界並無 ^{80}Br ，通常的溴原子為 50.5 % 的 ^{79}Br 和 49.5 % ^{81}Br)

4. 克原子重量 (Gram Atomic Weight)

當元素的原子量以克表示時即稱為克原子量或克原子 (Gram Atom)。一元素的克原子量已證明含有 6.02×10^{23} 個原子 (亞佛加厥常數) 或一莫耳原子。克原子量是元素的實用量。在實驗室裏我們不可能操作個別的原子，但克原子的物質就易於操作和測量。為確知你在處理等數的數種元素原子，你只須稱出每一種元素有一克原子重量或等值的克原子。化學家所處理的大部分計算均與克原子重量有關。假如所處理的物質數量很大或很小時，原子量亦可以其他重量單位如磅、噸或微克表示之。一磅原子含有 454 倍的亞佛加厥常數的原子，因為 1 磅等於 454 克。

質量耗損與原子能 (Mass Loss and Atomic Energy)

原子是由質子、中子和電子所構成的。因為這些微粒的質量已可精確測知，而且我們能由原子序和質量數決定原子中每一種微粒的數目，照理我們應可由微粒質量的總和計算出精確的原子量。可是事實上這是行不通的，因為次原子 (subatom) 粒子 (即質子、中子與電子) 的質量總和大於原子實際的質量。

原子的精確質量永遠小於其質子，中子和電子質量的總和。此質量耗損實際上為當質子與中子融合生成原子核時轉變成能量的質量。原子核的結合能即等於元素的質量耗損值。利用愛因斯坦的質量與能量關係，則 $E = mc^2$ ， E 表示原子核結合能 (爾格)， m 為質量耗損 (克) 而 C 為光速 (3×10^{10} 公分/秒)。

質量與重量

前面所述，原子重量與原子質量常常互用，但嚴格來說兩者不是同義字。質量為數量的基本衡量，而重量為對於物體受地心引力時的衡量。完全相同的物體在山頂的重量小於在海面的重量，在赤道的重量小於在兩極的重量。但是位置的改變對物體質量毫無影響。大多數的化學家使用天平和一組已知質量的秤錘而稱量物重。事實上稱量值是質量而非重量。質量與重量以同樣單位表示之，通常我們都不加以區分。對於原子來說，在將來原子質量也許會替代原子重量，但在目前兩者都普遍地被使用。許多化學家對於元素 (所有存在於自然界的同位素混合物) 喜歡用原子重量，而對於某一同位素則使用原子質量。

七、後記

即使到了二十世紀初期仍有一些科學家認為原子是想像中的粒子，這實令人難以置信的。在今日的文明世界裏已沒有人會懷疑原子存在的真實性。科學家曾用高解像力的電子顯微鏡照出原子的形狀。即使如此，原子實在是微小至不可思議的物質份子，我們想實際去稱一個原子的重量的念頭仍然是相當荒謬的。

本譯文原文刊載於美國 J. Chem. Ed., 54, 543 (1977)。作者為 Doris Kolb 博士，現為美國伊利諾州中央學院化學系教授。

本文承蒙國立台灣師範大學化學系助教陸大榮先生和陳翠英小姐校閱，特此致謝。

〔譯者現職：國立臺灣師範大學化學系教授〕