

科技部科普活動計畫 站上巨人的肩膀

偉大科學家傳記讀本輔助講義

第四部：拉瓦錫的故事



作者：陳竹亭

美國愛荷華州立大學化學博士

國立臺灣大學化學系 名譽教授

遠哲科學教育基金會 董事長

拉瓦節

開啟化學與週期表的「萬應室之鑰」

《週期表的故事：元素的奇妙生活，人類與元素相遇的歷史》(*Periodic Table: The Curious Lives of the Elements*) 可以說是一本化學元素的百科軼事大全。作者休·愛德賽·威廉斯(Hugh Adersy Williams) 是英國的科普作家，他將各種化學元素相關的歷史、地理、自然、人文、藝術、工技...無所不包，以文化素材一網打盡。這從全書分成權力、火、技藝、美感、土地似乎不相干的五個主題，就可見端倪。文字形式用敘事體說家常，娓娓道來，更可見其使文化滲入科學，以生活親近知識的企圖。但是博學雜引能否真正增添讀者在科學、人文之間的遊興，而驅除艱澀科學淤塞胸中的塊壘，享受徜徉遨遊於發現或發明新知識的趣味，應是如人飲水，尚屬未知之天。

威廉斯本人有許多第一手的化學或實做的經驗，從原文的書名就可看出他對化學元素的確擁有一股近乎專業的熱誠在他的血液中翻騰，也流露在文章的字裡行間。廣意的元素觀念和其在文明中的經驗從史前就已開始，浩浩湯湯，在東西方都綿續數千年。威廉斯蒐羅的故事幾乎鉅細靡遺。我們生活在一個物質的世界中，如他所說，進實驗室遇見元素不如在大街上、文化中遇見他們！但

是身為化學家，在此序文中，筆者還是願意提出兩個觀點，使元素週期表的故事更加圓滿。

在近代化學中，元素概念由拉瓦節在 1780 年間引上正途之前，是一條曲折蜿蜒的長路。煉金術昌行的時代，術士們口說元素，卻不知何為真元素！本書第二章提到瑞典的席勒和英國的普里斯力都較法國的拉瓦節更早發現，而且分離了「氧氣」，卻都沒能正確述說其科學意義。17-18 世紀，絕大部分的化學家都相信「燃素論」，甚至有的還沒放棄煉金術。

所謂燃素就是可燃物在燃燒時釋出的物質，而週邊的物質就吸收燃素。這似是而非的道理碰到了精於會計和稅務平衡的拉瓦節，偏偏他又是對實驗的質量變化極為謹慎，錙銖必較。金屬礦燃燒時，礦渣變輕；碳或硫燃燒時，產物變重。所以燃素該有多重呢？拉瓦節不僅懷疑歷時逾百年之燃素論的正確性，更重要的是他認為需要新的燃燒概念，好比牛頓在運動、力學、數學中一樣的發現和發明：**要用簡單、合理的邏輯，有系統且一致、連貫的理論，涵蓋、說明所有物質組成及變化的發現或發明。**

拉瓦節在 1789 年出版的第一本近代化學教科書——《化學基本原理》中，根據當代能重複實驗之具體可靠的結果，整理出 55 個「元素」，就是不能再由化學反應分解出新物質的純物質，也包括替氧氣(oxygen)命名。還依照貝齊琉斯建議的英文元素符號，有系統命名了化合物，就是由兩種以上的元素結合的純物質。從此，要稱一個東西為純物質，就必須提出固定不變，且經得起檢驗的成

分組成。(這就打斷了一群實驗混混的後路！)更重要的是他說明了「燃燒」——這從古至今迷幻、眩惑、震懾、驚恐...了多少人的神奇現象，就是物質和氧氣的化學反應，而且一切化學反應皆遵守質量守恆定律。

拉瓦節成為率先捨棄煉金術和燃素論，將化學整理在一個正確理論下的化學革命第一人，正是第一位企圖以系統科學了解化學的先知。他雖未正式提出「原子」，但自 17 世紀波以耳以降，化學家大多承襲世界是由微粒集合而成的機械哲學觀點。拉瓦節雖未能如願的成為公認的氧氣發現者，事實上拉瓦節從未曾發現任何的新元素，但是拉瓦節追隨牛頓的腳步，終究是有集大成的化學洞見！他離世後未滿十年，道耳吞就發表了「原子說」。

今天的週期表是依「原子序」的正整數排列，週期表的終篇若是沒有莫斯利發現原子序的故事就不夠完美。莫斯利曾經在英國曼徹斯特大學任教，由教齡略深的拉賽福督導。1912 年，波爾也進入拉賽福的研究室擔任博士後研究員。拉賽福根據他指導的蓋格-馬斯登實驗，就是用高速 α -粒子撞擊金屬箔。從大量的 α -粒子穿透直行，而極少量的 α -粒子以大角度的模式散射，他歸納提出了一個不同於湯木生梅果布丁模型的行星繞日原子模型。就是原子的構造是又小又重、帶正電的原子核在中心，更小且帶負電的電子在核外，猶如行星繞日。

1913 年波爾在曼徹斯特開始了獨立的研究。28 歲的波爾提出電子能量「量子化」的假設，用簡單漂亮的理論導出了「波爾氫原子模型」，証明了 1888 年發現的氫原子放射線光譜的雷德堡數學關係式。又是數學！方程式中光譜的頻

率可對應到原子核外電子能階之間的能量差，恰與原子序的平方成正比。只是氫原子的原子序剛好是 1。

原子序是原子中的第一個上帝數字，代表各種元素原子其原子核中的質子數目。質子帶正電荷，當然電中性的原子中，原子核外就有同樣數目帶負電的電子。換句話說，原子核中的質子數等於核外的電子總數，決定了該原子屬於何種元素。所以原子序就是上帝決定的原子身分證明！

1913 年，27 歲的莫斯利進行高速電子撞擊金屬靶的實驗，測量金屬放出的 X 光。他發現了週期表中同列的金屬，測得其放出的 X 光頻率神奇的與特定「正整數」數列的平方值之間有簡單的正比關係。為什麼實驗觀察到 X 光的物理現象會與自然整數有數學關係呢？莫斯利究竟洞悉了上帝的何種奧密呢？莫斯利正是第一個用實驗證明了波爾的氫原子能階理論在過渡金屬中也適用。他發現的數學方程式現在稱為「莫斯利定律」，而各金屬靶對應到的正整數正是該金屬的原子序。莫斯利的英年早逝與諾貝爾獎擦身而過，莫非洞燭上帝機先的真會折損天年？

早在 1871 年，門德烈夫發表第一個週期表時，依當時公認的原子量共列出了 70 個元素，其中的順序有鐵(Fe)、鈷(Co)、鎳(Ni)、銅(Cu)。有趣的它們的原子量是： $\text{Fe} = 56$ $\text{Co} = 59$ $\text{Ni} = 59$ $\text{Cu} = 63$ 。為什麼門德烈夫會把鈷置於鎳之前呢？而莫斯利定律獲得的原子序是： $\text{Fe}/26$ 、 $\text{Co}/27$ 、 $\text{Ni}/28$ 、 $\text{Cu}/29$ ，恰恰再次證明了門德烈夫週期表排序的先知灼見。

原子序才是週期表中元素有序的真正原因！今年(2016)最熱門的科學消息之一，就是發現的新元素剛好填滿了週期表第七列的週期。國際純粹與應用化學聯合會(IUPAC)為四個新的元素命名，就是原子序 113、115、117、118 的元素分別命名為 nihonium (Nh)、moscovium (Mc)、tennessine (Ts)及 oganesson (Og)。Og 應該是目前所知最重的氣體。

概念有時似乎很簡單，證明卻不容易！資訊不會自動的累積變成知識，因為知識總是有結構和序理，需要洞見問題和答案之間的系統性關聯，才能掌握知識的萬應室(the room of requirement)之鑰。這正是當今世界、媒體中資訊橫流，知識卻淺薄的原因所在。

在科學上，科學家不願屈就於五感直覺認識的世界與理性的矛盾或衝突，堅持找到方法看透萬物繽紛表象背後一致的道理。文化何嘗不應如此？能發明或發現革命性的創見，或是集大成的知識，才算得是大智大慧，可長可久。

拉瓦節因曾擁有稅收公司，1794 年法國大革命時期遭人構陷，命喪斷頭台，得年 51。莫斯利在 1915 年參加第一次世界大戰，在土耳其的加里波里戰役中遭遇狙擊手身亡，得年僅 29。

哈利波特的魔法石，其道何難測？踪跡何難尋？

賽凱爾蘇士，是煉金術士中的狂徒？還是騙子？

牛頓和波以耳，竟也踟躕於隱晦的霍格華茲？

誰能數落亞里斯多德天縱英明中的誤謬或荒誕？

瞎子領瞎子？又是誰將蘇菲亞引入闇黑的淵藪？

誰又能否定先賢的睿智，竟是在玄學抑是哲學？

伽利略沿文藝復興尋覓柏拉圖，卻遇見阿基米德，

牛頓站穩在培根與笛卡爾樹立的磐石上，

吹響了物理與數學連理的科學革命號角。

科學一旦離開了數學與理性的根基，

是否注定要迷失在真理國度的邊際？

拉瓦節揭開那編織成大自然神祕繽紛的帷幔，

終得一親孕育萬物大地之母蓋婭彩衣的芳澤，

還是邂逅了雅典娜那兼具知識與智慧的靈魂？

大戰的英魂以 X 光瞥見了整數的原子序，

波爾竟在原子光譜參透量子的秘室之鑰。

莫非數學的解讀竟是開啟科學天啟的宿命？

科學、人文、數學、慈愛，

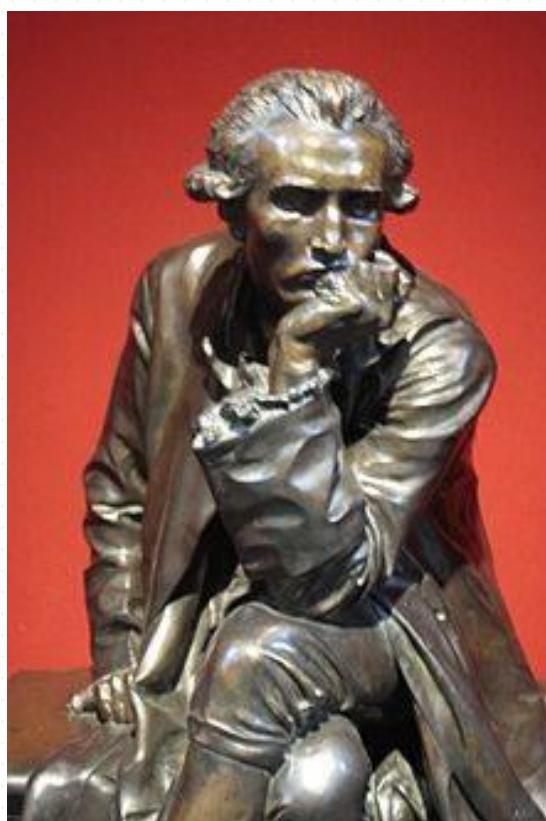
何者是人類自豪的文明精萃？

何者才是上帝賜予的終極語彙？

Reference : 拉瓦節(Antoine Lavoisier, 1743-1794)；席勒(Carl Wilhelm Scheele, 1742-1786)；普利斯力(Joseph Priestley, 1733-1804)；燃素論(phlogiston theory)；《化學基本原理》(*Traité élémentaire de chimie*)；貝齊琉斯(Jöns Jacob Berzelius, 1779-1848)；微粒說(Corpuscularianism)；機械哲學(mechanical philosophy)；原子說(Atomic theory)；原子序(atomic number)；莫斯利(Henry Gwyn Jeffreys Moseley, 1886-1915)；拉賽福(Ernest Rutherford, 1871-1937)；波爾(Niel Bohr, 1885-1962)；蓋格-馬斯登實驗(Geiger-Marsden experiment)；湯木生(Joseph John Thomson, 1856-1940)；量子化(quantized)；放射線光譜(emission line spectrum)；雷德堡方程式(Rydberg equation)；過渡金屬(transition metal)；萬應室(the room of requirement)；門德烈夫(Dmitri Ivanovich Mendeleev, 1834-1907)；加里波里(Gallipoli)；魔法石(philosopher stone)；賽凱爾蘇士(Paracelsus, 1493-1541)；霍格華茲(Hogwarts)；蘇菲亞(Sophia)；阿基米德(Archimedes of Syracuse, ~287-~212 BC)；培根(Francis Bacon, 1561-1626)；笛卡爾(René Descartes, 1596-1650)；蓋婭(Gaia)；雅典娜(Athena)

科學在簡單和複雜之間(一)：化學合成的誕生

自從法國的拉瓦節在十八世紀的後葉，提出燃燒是物質與氧元素的反應，確立了元素的概念，和化學反應質量守恆定律，就奠定了化學的房角石。



Antoine-Laurent Lavoisier by Jules Dalou 1866

十九世紀化學起飛

十九世紀的化學與浪漫派音樂同時展開了劃時代的旅程。1803 年，貝多芬在奧地利演出了第三號英雄交響曲。從此，音樂不再只為貴族服務。英國的道耳吞則是在英國為他的「原子說」發表了第一篇關於原子與原子量的論文，他

向世界宣告，我們的世界是由不同元素(element)的原子(atom)組成，原子不斷地排列組合造就了我們多樣多變的世界。

1809 年，歌德完成了他的小說--「選擇的親和力」(Elective Affinity)。他用化學家認識自然界中物質的觀點來描述聚散離合：「親和力只有在離異時才顯得有趣。難道這個在今日社會裡經常聽到的悲傷字眼也發生在自然科學中嗎？的確，愛都爾回答，甚至把化學家稱為使一物和另一物離異的藝術家。對他們也算是一種恭維吧。但是如今已非如此，夏綠蒂說：現在合成才是好事。因為使事物結合才算更偉大的藝術和功勞，能夠將任何主題統合的藝術家，將會受到世人的歡迎。」

莫非歌德筆下的夏綠蒂是位化學先知？1911 年，亞弗加厥根據給呂薩克的氣體反應實驗中各種氣體顯示的質量定比關係，提出氣體是以原子集結的「分子」(molecule)形式存在的假說(hypothesis)。原子為什麼要靠在一塊呢？哪些原子傾向靠在一塊呢？原子們又是如何的集結呢？懷疑原子說的科學家還少嗎？為什麼還要相信分子呢？

拉瓦節於 1794 年在混亂的法國大革命中不幸淪為仇恨的受害者，死於斷頭台上。其後的二十年中，當時許多歐洲的重量級化學家如英國的戴維、沃勒斯登，法國的安培，瑞典的伯齊理斯等，都忙著從自然界分離純元素，或發現新元素。年輕的沃勒 1823 年在海德堡修完藥學學位，北上斯德哥爾摩隨貝吉理斯從事化學研究。



Woehler synthesis

沃勒跟著貝吉理斯工作的機會的確讓他參與了鈹(beryllium)、矽(silicon)元素的發現。更重要的是成功單離出當今最重要的民生建材之一的金屬鋁(aluminum)，還有鈹、鈦(titanium)等元素。但是沃勒的傳世成就卻是有機化學的先驅，因為他在 1828 年成為世界上第一位從無機物質異氰酸銨(ammonium isocyanate, NH_4OCN)合成出尿素(urea, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$)的人。事實上，化學史公認這是世界上第一次成功的「化學合成」(chemical synthesis)，也是第一個「有機合成」(organic synthesis)反應。

有機化學與生機論

貝吉理斯在 1806 年才提出有機化學(organic chemistry)的名稱。在十九世紀之前，阿拉伯的煉金術士早就單離了酒精，就是乙醇(ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)。蟻酸(甲酸)、醋酸、苯甲酸、琥珀酸(丁二酸)也是早先發現的有機物質。十八世紀一位品學兼優的實驗天才，瑞典的席勒還單離了草酸、酒石酸、檸檬酸、乳酸、甘油、氰酸和一些芳香的酯類。當時世人都相信這些物質皆源自有生命的動植物，而且也只能來自於生命的器官(organism)，無法從非生命的物質，譬如礦物中取得，這就是生機論(Vitalism)。

生命器官怎麼能與機械相提並論呢？類似生機論的想法或相關的哲學在東西方都可綿溯千年，又與鍊金術、煉丹術或各種宗教結合，深植人心。在十八世紀之前另一個困擾科學逾百年的學說是燃素論(Phlogistonism)。席勒和普里斯力都發現了氧氣，但是都深陷於燃素論的泥淖中，認為燃燒現象是一種從來沒弄清楚是蝦米碗稜的「燃素」在物質間進進出出。這些思想都難免古希臘的玄學思維，放眼今天坊間媒體似是而非的想像，譬如有機食療、另類療法、奈米水、善念烹調、特異功能...，又何曾少過？



Prometheus

化學革命

遐想、玄思、哲思、夢想、幻想...，哪一種更簡單？哪一種更合理？哪一種更簡單？哪一種更人性？生命值得投注在一個具有一致性、連貫性、歷史性、智人性的信念上嗎？科學究竟傾向選擇普羅米修斯(Prometheus)前瞻的深思遠慮，寧可獻上永遠的命運，也要為世人取得焉知禍福的火種；抑是薛西弗斯(Sisyfus)的後裔，昧於自以為是的智慧，驕傲的挑戰那無休無止的使命？雖然兩者都可能淺嚐瞬間成就的喜悅！

拉瓦節對科學的信念是伽利略、迪卡爾與牛頓的跟隨者，洞悉了物質與氧氣的化學反應(chemical reaction)不僅可以捨棄燃素論，解釋燃燒現象。也符合牛頓建立的力學系統下的物質世界。最重要的是經過他仔細研究的化學反應，皆能符合物質守恆的邏輯證據，擺脫糾纏逾千年，人各一把號的鍊金術的困惑。新的化學必須遵從理性、邏輯的推理，更要符膺有證據的實驗法則。而元素(element)正是無法再分解為其他物質的基本成分！如果還可以分解的純物質(substance)就是化合物(compound)。



Sisyfus

人類可以複製或甚至創造物質嗎？十九世紀初，貝吉理斯眼中的有機化學是有機反應背後必然有些未知的，和生命有關的調控力量。所以他把純物質分成有機化合物(organic compound)和無機化合物(inorganic compound)。沃勒任教於柏林技術學校時，在異氰酸鹽和氯化銨的反應中獲得了一些無色的結晶。經過分析，他發現竟然和尿液中分離的尿素結晶是同一種物質。沃勒在驚訝之餘，立刻寫信給貝吉理斯，並且強調這個尿素合成反應沒有使用任何動物的腎臟器官、組織、或生命成分！不論伯齊理斯當時是否完全信服，他的回信卻是樂觀與鼓勵兼具，肯定沃勒發現的重要性與前瞻性。

尿素是在 18 世紀從尿液中發現的物質。今天我們知道它含有兩個醯胺基(H_2NCO)，其實是兩個胺基($-\text{NH}_2$)接在同一個醯基($\text{C}=\text{O}$)的碳原子上。在哺乳類的肝、腎中的尿素循環(urea cycle)，淨反應就是將多餘的氨(NH_3)與二氧化碳結合形成尿素，以尿液排出，以維持身體中氮素穩定的含量。

沃勒的發現無可避免的引起了科學界意識形態的戰爭。沃勒落在與生機論者抗爭的漩渦中心，在往後的研究中也的確用心的尋找更多將無機物轉變成有機物的例子。但是面對當時仍然十分原始的分析及鑑定有機化合物之技術，他也慨歎：「有機化學真是令人抓狂，就像一個沒有邊界卻充滿怪獸或驚人事物的原始林，惟恐一踏進去就無路可逃了。」又說：「我或許可以自誇在這新領域有些貢獻，但是複雜的化學式真是不得其門而入！」

簡單和複雜之間

複雜的事物較諸簡單的更具有挑戰性，科學研究更是如此。從蘇格拉底以降，分析方法正是化繁為簡，一旦能認清、掌控簡單的對象，求知的挑戰心和成就感就可能吸引有志者更上層樓。反之，面對過於複雜的現象，嚴謹求證者可能不得其門而入，穿鑿附會的想像卻敢夸夸而談。

所以科學在簡單與複雜之間是如何蘊育與成長呢？黑格爾曾說：「存在的就是真實；真實的就是存在。」卓姆斯基認為無知有兩種，如果面對不解的事物仍然提出合理的問題，即便沒有立刻獲得解答，常常可在探究的過程中獲得洞見與知識，和繼續尋找的線索。但是貿然訴諸神秘，就會侷限於愕然與困惑，不知所措的窘境。科學正是要尋找真實的存有，但是必須問對問題，才能踏上正途。

沃勒的挑戰不僅是化學。生機論的對手認為他用的起始物的根源仍然是生命。1981年諾貝爾化學獎得主霍夫曼描述沃勒合成反應的意義，不僅是在化學反應上，而是推倒了時代的高牆。生機論的信念不容混淆，生命與非生命的物質涇渭分明。面對根生蒂固的思想高牆，沃勒的工作好比薛西弗斯的巨石。1948年。他在哥廷根大學的學生柯耳伯從無機化合物合成了醋酸(acetic acid, $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$)，再度重擊生機論。

生命是如此複雜與神秘，生機論在今天的社會中，甚至科學界未必全然消失。偉大睿智的法國醫生路易巴斯德曾以無氧發酵的過程，在1858年堅持細胞具有的生命素質並非如萊比錫主張的化學催化劑所能取代。萊比錫常被譽為是

另一位有機化學的創始者。他創立了學校教育中有機化學實驗室教學的傳統，萊比錫發明的凝結裝置(Liebig kaliapparat)至今仍然是美國化學學會的標誌。

卡爾士魯赫大會(Karlsruhe Congress)

1860 年 9 月 3-5 日，決定苯的環形結構的凱庫勒聯合了伍爾茨、威爾欽在卡爾士魯赫(Karlsruhe)召開了世界上第一個國際化學會議。會中，年方 34 的卡尼札諾在一百多位國際最顯赫的化學家面前討論眾說紛紜的原子量與分子量的問題。他從定比、倍比定律結合拉瓦節的元素論、道耳吞的原子論、亞弗加厥的分子論，將氫視為雙原子分子，優雅的推論出碳原子的原子量為 12，氮原子為 14，氧原子為 16。在有機化學方面，碳原子是所有有機化合物的骨架。碳原子量的塵埃落定促成有機化合物化學結構式的共識。終於在十九世紀結束前迫使生機論的爭論從此雲淡風輕，有機化學及化學合成的進展遂得以展翅高飛。

卡爾士魯赫大會成功的簡化了化學家面對複雜世界的複雜爭論。這些爭論可能多少都影響到生物學與醫學的發展，他們都是在化學成為成熟的科學之後，在二十世紀才迎頭趕上。值得一提的是與會者中有一位二十幾許的小伙子。從聖彼得堡來的年輕的門德列夫在會議中大受啟發與激勵。他在 1869 年發表了第一個化學元素週期表，為拉瓦節歷史性的文明啟蒙立下美麗的新里程碑。這份成就未能在他 1907 年離世前獲得諾貝爾獎，應該是諾貝爾獎最大的損失之一！

嚴格來說，生機論的魂魄仍然糾纏在世間。從人文的角度看來，科學仍然不能確定是普羅米修斯或是薛西弗斯的後裔。

Reference : 拉瓦節 (Antoine Lavoisier, 1743–1794) ; 貝多芬 (Ludwig van Beethoven, 1770–1827) ; 道耳吞 (John Dalton FRS, 1766–1844) ; 歌德 (Johann Wolfgang Goethe 1749–1832) ; 亞弗加厥 (Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e di Cerreto, 1776–1856) ; 給呂薩克 (Joseph Louis Gay-Lussac, 1778–1850) ; 戴維 (Sir Humphry Davy, 1778–1829) ; 沃勒斯登 (William Hyde Wollaston PRS, 1766–1828) ; 安培 (André-Marie Ampère, 1775–1836) ; 貝吉理斯 (Baron Jöns Jacob Berzelius, 1779–1848) ; 沃勒 (Friedrich Wöhler, 1800–1882) ; 席勒 (Carl Wilhelm Scheele, 1742–1786) ; 普里斯力 (Joseph Priestley FRS, 1733–1804) ; 黑格爾 (Georg Wilhelm Friedrich Hegel, 1770–1831) ; 卓姆斯基 (Avram Noam Chomsky, 1928~) ; 霍夫曼 (Roald Hoffmann, 1937~) ; 柯耳伯 (Hermann Kolbe, 1818–1884) ; 巴斯德 (Louis Pasteur, 1822–1895) ; 萊比錫 (Justus Freiherr von Liebig, 1803–1873) ; 凱庫勒 (Friedrich August Kekulé, 1829–1896) ; 伍爾茨 (Charles Adolphe Wurtz, 1817–1884) ; 威爾欽 (Karl Weltzien, 1813–1870) ; 卡尼札諾 (Stanislao Cannizzaro FRS, 1826–1910) ; 門德列夫 (Dmitri Ivanovich Mendeleev, 1834–1907)

https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_chemical_element_discoveries#Recorded_discoveries

<http://science.howstuffworks.com/life/27866-100-greatest-discoveries-synthesis-of-urea-video.htm>

Copyright © 2016 陳竹亭 All rights reserved.

2016/12/15 修訂