

亞佛加厥分子理論

——高中化學基本六定律之四

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

一、前言

道耳吞的原子學說，看來似乎釋明了整個物質結構之謎。然而，原子學說經歷的路程並不平坦。原子學說本身還有缺失。同時，反對的科學家也不少。

1811年，亞佛加厥發覺，就多種氣體而言，只要假設2個原子來結成1個「分子」，給呂薩克的氣體反應定律就可以順利說明清楚。原子學說與分子理論的組合，才是物質結構理論的關鍵。然而，當時幾乎沒有人注意亞佛加厥的假設。到了1860年代，經過坎尼扎羅的努力，亞佛加厥假設的長處始得承認，科學家首次發覺，區別原子量與分子量的重要性。

另一方面，十九世紀末葉的科學家，認為人類知識與認識能力有一定限度，原子與分子的存在無法承認的，為數不少。尤其是著名的物理學家及哲學家馬赫，與影響力頗大的化學家及思想家奧斯托惠

耳特，極力攻擊原子學說。

可是，本世紀初葉，愛因斯坦的布朗運動理論與伯蘭的實驗，下定最後結論，原子的存在再也沒有懷疑的餘地了。

二、亞佛加厥假設

道耳吞原子學說與給呂薩克氣體反應定律，本來應該互相彌補起來成為原子學說。分子理論體系，未闡明物質的結構。可是，由於道耳吞不願意承認氣體反應定律，於是由義大利化學家擔任橋樑的角色，來溝通英國與法國的兩位化學家。

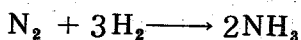
義大利物理學家及化學家亞佛加厥（Conte di Quaregna di Cerreto Amedeo Avogadro, 1776~1856）基於道耳吞原子學說，把給呂薩克氣體反應定律說明成功了。

亞佛加厥認為，氣體的構成單元是由2個以上原子所組成的分子，而且氣體分

子之間的距離頗大，互相之間沒有引力的作用。這樣一來，同溫同壓之下，不論何種氣體，同體積內應該會有相同數目的分子。亞佛加厥的這種想法，叫做「亞佛加厥假設 (Avogadro's hypothesis)」。

一旦承認亞佛加厥假設，氣體反應定律就可以說明得很自然。

氮是氮 1 原子與氫 3 原子所組成的，而氫 3 分子與氮 1 分子應該可以生成氮 2 分子，用現在的化學式表示如下：



氮 氫 氮

事實上，氮 1 體積與氫 3 體積也可以生成氮 2 體積。

至於其他氣體的反應，也同樣可以說明。

承認亞佛加厥假設的另外一個好處是，能夠決定原子的相對質量（即原子量）。

例如，設空氣密度為 1.00000，則氧與氫的密度分別為 1.10359 與 0.07321。因為同一體積的氣體含有同一數目的分子，所以密度比等於氣體分子質量比。以這比值為基準，可以求出氧分子與氫分子的質量比為 15.074 : 1.000。

注意，今天我們是設氫原子 $\text{H} = 1$ ，而亞佛加厥卻是設氫分子 $\text{H}_2 = 1$ 來進行討論的。現在我們所用的氧分子 $\text{O}_2 = 32$ ，但若依照亞佛加厥的基準 $\text{H}_2 = 1$ ，則氧分子 = 16。亞佛加厥的數值 15.074 稍微偏小，可能是因為氣體密度的測定不夠正

確的緣故。

同理，由於氮對空氣的密度是 0.96913，氮對氫的質量比是

$$0.96913 \div 0.07321 = 13.238$$

所以氮分子 = 13.238。以現在的數值（氮分子 $\text{N}_2 = 28$ ）來看，應該是氮分子 = 14。

根據氣體反應定律，氧 1 體積與氫 2 體積可以生成水蒸氣 2 體積，而水分子的相對質量是

$$\frac{15.074 + 1 \times 2}{2} = 8.537$$

這數值也可以利用水蒸氣對空氣的密度 0.625 來直接求出如下：

$$0.625 \div 0.07321 = 8.537$$

用現在的數值（水分子 $\text{H}_2\text{O} = 18$ ）來計算，可得水分子 = 9。以前的數值 8.537 稍微偏小。

另一方面，道耳吞使用錯誤的化學式 HO （而不是 H_2O ）來計算，求得水原子（我們的所謂分子）的相對質量為 6.5。

至於氮，依照亞佛加厥的想法，認為 NH_3 是由氮原子 1 個與氫原子 3 個所組成的，抑或依照道耳吞的想法，認為氮與氫原子各 1 個所組成的，其計算結果相差甚大。

依照亞佛加厥的想法，氮分子的相對質量是

$$\frac{13.238 + 1 \times 3}{2} = 8.119$$

這數值與得自氮密度者完全一致。以我們現在使用的數值 ($\text{NH}_3 = 17$) 來計算，可得氮 = 8.5。

另一方面，道耳吞得到的數值是 5.2，顯然太小。不過，後來道耳吞重新計算水原子與氮原子的相對質量，發表其值分別為 8 與 6，比較接近亞佛加厥的數值。

至於氮的一群氧化物，亞佛加厥也能夠同樣地順利說明。

三、仲馬的蒸氣密度法

亞佛加厥的想法，其要點是「氣體是以分子而不是以原子而存在。」這種主張，當時的化學家完全不能接受。不承認「氣體反應定律」的道耳吞不必說，承認氣體反應定律的瑞典化學家柏濟力阿斯 (Jons Jakob Berzelius, 1779 ~ 1848) 也不贊成分子理論。

柏濟力阿斯主張「電的二元論」，認為化學鍵都是因為相反電荷的吸引而發生的。由同種的 2 個原子，亦即具有相同電荷的 2 個原子來造成化學鍵，這種想法他無法理解。

此外，也有一些化學家，像英國化學家德維 (Sir Humphry Davy, 1778 ~ 1829) 一樣，對原子的存在保持懷疑的

態度，認為只要知道與一定量的氧化合的物質質量 (亦即「當量」) 即可。

以電學研究而聞名的法國物理學家安培 (André Marie Ampere, 1775 ~ 1836)，他也發表與亞佛加厥同樣的想法，也同樣未被接受。

另一方面，對分子理論不利的事實也被發現了。亞佛加厥證明，氣體分子的相對質量，可由其密度求出。法國化學家仲馬 (Jean Baptiste André Dumas, 1800 ~ 1884) 想把這方法應用在常溫時是液態或固態的物質，把試樣加熱成為蒸氣，確立了測定密度的實驗法。

然而，以一些元素的蒸氣密度所得的相對質量 (或所得的原子量)，與氧化物的分析所得的原子量不一致，又其數值本身也無法理解。

例如，利用仲馬的方法來求磷與硫的原子量時，其數值分別等於氧化物的分析所得的數值的 2 倍與 3 倍。磷與硫的氧化物已被徹底研究，從這些氧化物求出來的原子量，不可能有錯誤。

仲馬以為一切氣體 (包含常溫時不是氣態的在內) 都是 2 原子分子。就碘而言，這是對的，可是，就磷與硫而言，這就錯了。例如，磷是 4 原子分子，所以如果假定它是 2 原子分子，其原子量就變成正確值的 2 倍。

總而言之，由一種元素所成的原子與分子，當時的化學家不知如何加以區別。

因此，不能正確地決定原子量與分子量。各人採用的原子量，其數值各異，因而對同一種物質的化學式也各異。

例如，水的化學式有 HO 、 H_2O 、 H_2O_2 等。混亂的狀態，隨著化學的發展而變成更加麻煩的問題。這種狀態，自從亞佛加厥發表分子理論之後，持續了大約 50 年。

四、卡路斯路赫國際化學會議

這種事態必須設法改善，深深這樣感覺的化學家之一，是德國有機化學家刻克烈（Friedrich August Kekulé von Stradonitz, 1829 ~ 1896）。1858 年，刻克烈已經發表「原子價」的理論。

根據刻克烈的原子價理論，碳的原子價最大，等於 4，可以與原子價 1 的原子 4 個結合（例如，甲烷 CH_4 ，四氯化碳 CCl_4 ）。爲了推進這種原子價理論，必須了解清楚原子量，分子量與當量的關係。

甲烷的化學式，當時的化學家有人寫成 CH_2 ，有人寫成 CH_4 。這樣怎能期許原子價理論的發展？

刻克烈與法國有機化學家孚茲（Charles Adolphe Wurtz, 1817 ~ 1884）商量，爲了解決混亂的狀態，希望把全世界的化學家聚集在一堂來好好討論。結果，贊同他的意見的大約 120 位化學家，1860 年 9 月聚集在德國卡路斯路赫（Karlsruhe）。

熱烈的討論不斷地進行。雖然如此，這次會議未能獲得明確的結論。可是，義大利化學家坎尼扎羅（Stanislao Cannizzaro, 1826 ~ 1910）能夠利用這次機會來向全世界的化學家傳達他自己的想法，這件事對化學的發展來說，實在是莫大的幸運。這次會議的兩年前，亦即 1858 年，坎尼扎羅已經發表論文指出，當時化學面臨的問題，只要採納亞佛加厥假設即可解決。

坎尼扎羅把自己的想法整理成爲一篇論文「化學哲學概論」，宣揚根據原子學說與分子理論的化學。他的主張如下。首先，以最輕的氣態氫之蒸氣密度爲基準，來決定能氣化的單體與化合物之化學式量。設氫（分子）的蒸氣密度爲 2，或設其數值的一半爲 1，一共有兩種表示法（見表 1）。可見以氫 = 1 與 2 的基準，分別代表原子量與分子量。

坎尼扎羅的原子量與分子量與現在我們使用的數值，幾乎完全一致。換言之，到了坎尼扎羅的時代，化學家的描述方法才開始和我們一樣。

坎尼扎羅又指出，仲馬發明的蒸氣密度法之困難，只要認爲某些分子是由 2 個以上的原子所組成，就一切可以解決了。

硫分子 1 個含有 6 個硫原子，即硫分子是 6 原子分子。後來化學家知道，其實不是 6 原子分子，而是 2 原子分子與 8 原子分子的混合物。水銀分子是只有 1 個水

表1 坎尼扎羅的蒸氣密度表

物 質	以氫密度為1時的密度 (設氫分子為1)	以氫密度為2時的密度 (設氫分子之半為1)
氫	1	2
氧(通常的)	16	32
氧(電解的)	64	128
硫(1000°C以下)	96	192
硫(1000°C以上)	32	64
氯	35.5	71
溴	80	160
砷	150	300
汞	100	200
水	9	18
鹽酸	18.25	36.50
醋酸	30	60

銀原子組成的1原子分子。另一方面，磷與砷是4個原子組成1個分子的4原子分子。至於氧、氫、氮等，當然依舊認為2原子分子即可。

坎尼扎羅的主張，雖然未能立即被接受，但其清楚明瞭的觀念使許多人受到深刻的印象。德國物理學家及化學家麥耶(Julius Lothar Meyer, 1830~1895)是國際化學會議出席人之一，他極力支持坎尼扎羅的想法，根據這想法來編寫教科書。這教科書普獲採用，幫助了亞佛加厥假設的普及。

※ ※ ※ ※ ※ ※

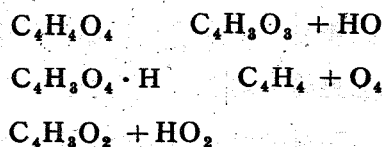
【卡路斯路赫國際化學會議的意義】

一到晚夏初秋的學會季，每天世界上到處舉辦科學家的國際研討會。規模較大的學會，與會者甚至包括來自數十國家的

1000位學者。因為現在是噴氣機與電報交換機(Telex)的時代，所以這是辦得到的。

人員與信件都要依靠鐵路來運輸的1860年，國際會議的召開，其困難程度一定比我們現在所想像的還要厲害。雖然如此，參加會議的化學家多達120位，可見當時的化學家多麼重視這次會議。氧的原子量，有人採用8，有人採用16，這樣太不像話了。

刻克烈在他編寫的教科書(1861年出版)上，介紹了其混乳情形。他指出，關於醋酸 CH_3COOH ，化學家提議16種寫法，其中的幾種寫法如下：



五、能量理論的抬頭

如此，原子學說與分子理論在化學家之間逐漸傳開。同時，德國的克勞修斯（Rudolf Julius Emmanusl Clausius, 1822 ~ 1888）與英國的馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831 ~ 1879）等優秀的物理學家，鞏固了氣體動力論的基礎。這是對原子學說與分子理論的強力支持。

氣體動力論更由奧地利理論物理學家波子曼（Ludwig Boltzmann, 1844 ~ 1906）作進一步的研究，人類這才慢慢開始理解大自然的結構。至少，相信原子學說的人有這種感覺。

然而，到了十九世紀末葉，原子學說遭到嚴重的攻擊。攻擊者的說詞是，「不錯，爲了理解大自然，原子與分子確實是很方便的假設。可是，原子與分子真正存在，這種實驗證據不是一點也沒有嗎？以未被證實真正存在的東西來當作前提的原子學說與分子理論，不是不能成爲學問的基礎嗎？」

對原子學說與分子理論提出這種問題來否定的科學家，在十九世紀末葉的德國與法國出現不少。其中，開拓化學的新分野——物理化學——而贏得1909年諾貝爾化學獎的德國化學家奧斯托惠耳特（Friedrich Wilhelm Ostwald, 1853 ~ 1932）是原子學說的最強烈批判者，他極力攻擊波子曼。

把名字留下來當聲速單位的奧地利著名物理學家及哲學家馬赫（Ernst Mach, 1838 ~ 1916）也是不亞於奧斯托惠耳特的原子學說反對論者。他們倆對當時的學術界都有深遠的影響力。

據說1906年波子曼自殺的原因之一是，與他們倆爭論得疲憊不堪，而且明知自己是對的，卻是得不到承認而感到焦躁的緣故。

由道耳吞給與明確的化學基礎，後來又經過許多研究而看來似乎更加健全的原子學說，爲何再度陷入危機？

奧斯托惠耳特能夠攻擊原子學說的原因是，因爲十九世紀中葉，研究熱與能的所謂「熱力學」這門新學問急速生長，確立了完整的學問體系。

本來熱力學是以研究蒸氣機的效率而發展的。然而，熱力學第1定律（能量守恒定律）與熱力學第2定律獲得承認之後，熱力學再也不是僅僅研究蒸氣機效率的學問，而是發展成爲另外一種學問，專門研究自然界一切現象中的能量之變換情形。

奧斯托惠耳特等人深信，「我們能夠測量，能夠感覺的能量，這才是造成大自然的基本構成要素。」依靠不能直接看見不能直接碰到的原子與分子的原子學說與分子理論，其情勢愈來愈不妙。

六、布朗運動與愛因斯坦理論

1827年，英國植物學家布朗（Robert Brown, 1773～1858）用顯微鏡觀察浮在水上的花粉微粒時，發覺花粉在作毫無規則的運動，就是所謂「布朗運動（Brownian motion）」。這運動並不是顯微鏡或桌子的振動所引起的。此外，布朗又確認，任何物質的微粒浮在水面時，都是激烈抖動。

十九世紀後半葉，科學家已經認為，這布朗運動是水分子毫無規則地碰撞微粒的後果。1905年，德裔美國理論物理學家愛因斯坦（Albert Einstein, 1879～1955）得到理論上的結果，宣稱浮在液體上的微粒，因為液體分子的熱運動而發生無規運動，並且這運動應該可用顯微鏡觀察出來。其次，愛因斯坦嘗試的是，這理論是否也能適用在布朗運動？

液體表面的微粒，1秒鐘移動多少距離，愛因斯坦依其理論來計算了。他認為根據微粒因滲透壓而擴展的趨勢，及液體對這趨勢的抗力，這距離應該得以計算。前者根據氣體與稀薄溶液理論，後者根據液體的黏性，分別求出來了。

愛因斯坦推導的公式是

$$D = \frac{RT}{N} \times \frac{1}{6\pi a \eta}$$

式中，D是微粒因布朗運動而移動的距離

，可用顯微鏡觀察求出。R是氣體常數，T是絕對溫度，a是微粒的半徑，而 η 是黏性係數。這些數值，不是常數，就是可以做實驗來決定的。

這樣一來，剩下來的N也可以算出來了。假設水是由分子所組成的，那麼，N就是水1莫耳（18.0g）中所含的分子數。換言之，只要觀測布朗運動，就能數一數分子的數目。

世界上的物質，凡是能數的東西，無論是如大如星球或小如豆粒，不是不得不認為它是以粒子的形態而存在的嗎？

愛因斯坦非常清楚，就原子與分子的真正存在之證明，這項研究具有決定性的意義。可惜愛因斯坦不是實驗家，他必須等待優秀的實驗家來證實布朗運動的理論，因而證明原子與分子確實存在。

七、伯蘭的實驗

1908年，法國物理化學家伯蘭（Jean Baptiste Perrin, 1870～1942）獨力發現，膠體微粒溶液的沉積平衡，是要數算分子數目的良好方法。

直徑大約 10^{-5} cm到 10^{-7} cm的微粒，叫做「膠體微粒（colloidal particles）」。一個膠體微粒中，含有大約 10^3 到 10^9 個（即1000個到10億個）原子。膠體微粒用肉眼看不見，但遠較普通分子為大，所以其性質與普通分子不同。布朗運動

就是其中之一。此外，化學家熟知的膠體微粒性質還要包括，「廷德耳現象 (Tyndall phenomenon)」的發生，不能通過半透膜等。

把膠體溶液置放於圓筒形容器，膠體微粒就因布朗運動而作無規運動。可是由於重力的作用，微粒逐漸被拉向下方。長期置諸不顧，膠體微粒的分布就愈往下方愈密，卻並不完全沉澱，形成一種平衡狀態，叫做「沉積平衡 (sedimentation equilibrium)」的狀態。

距離圓筒底部的高度為 h_1 處之膠體微粒數 n_1 ，與高度 h_2 處的膠體微粒數 n_2 ，其間的關係由伯蘭推導的結果如下：

$$2.303 \log \frac{n_1}{n_2}$$

$$= \frac{N}{RT} mg \left(h_2 - h_1 \right) \left(1 - \frac{d}{D} \right)$$

式中， m 是微粒質量， D 是微粒密度， d 是液體密度， g 是重力加速度 ($980 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$)， R 是氣體常數，而 T 是絕對溫度。因此，只要能夠正確估計 n_1 與 n_2 ， 1 莫耳所含的微粒數就能夠算出來。如此，伯蘭實際嘗試「數算分子」。

伯蘭以植物樹脂得到名叫藤黃 (gamboge) 的乳膠，利用離心分離機，獲得微粒大小整齊的部分。微粒的大小則用顯微鏡來測定。微粒的密度，可以沿用通常的密度測定法。

這樣製造的膠體微粒乳膠，把其中 1

滴放入凹陷 0.1 mm 的玻璃片，用蓋片蓋住，用顯微鏡來觀察。物鏡採用放大率較大的透鏡，焦點深度就變得很淺，清晰可見的是，厚度頂多數毫米 ($1 \text{ 微米} = 10^{-3} \text{ mm}$) 左右的一層乳膠中的微粒而已。

上下移動顯微鏡的鏡頭，試樣乳膠任意高度處的微粒就可以數算清楚。同時，由測微計螺旋的刻度，可以正確讀出顯微鏡鏡頭上下移動的距離 (即上式中的 h)。

半徑 0.212 微米 的微粒在深度 0.1 mm ($= 100 \text{ 微米}$) 的容器時，距離底部 5 微米 ， 35 微米 ， 65 微米 ， 95 微米 處的平面內之微粒數，反覆再三地數算清楚。起初，微粒數幾乎不隨高度而改變，但是隨着時間的經過，低處微粒數逐漸增加，數目比慢慢固定成為下列的一定值。

100 47 22.6 12

這些數值酷似下列數列

100 48 23 11 1

這數列是，假設乳膠的布朗運動是液體分子碰到膠體微粒所引起，而根據理論計算所得的。

伯蘭在各種條件之下進行實驗。雖然改變微粒的大小，液體的種類與溫度等，但是所得的 N 始終在一定值 $6.5 \times 10^{23} \sim 7.2 \times 10^{23}$ (個 / 莫耳) 附近。伯蘭以為，物質由原子或分子組成的事實，再不容置疑了。

伯蘭發表研究結果後始知，愛因斯坦與波蘭物理化學家史摩可夫斯基 (Marian

表2 伯蘭的亞佛加厥數

所觀測的現象		N / 10 ²³
氣體黏性係數 (范得瓦耳斯方程式)		6.2
布朗運動	粒子分布	6.83
	位移	6.88
	轉動	6.5
	擴散	6.9
分子的不規則分布	臨界乳光 (critical opalescence)	7.5
	天空的藍色	6.0
黑體光譜		6.4
球體電荷 (氣體中)		6.8
輻射能	輻射體的電荷	6.25
	所產生的氬	6.4
	所失去的鐳	7.1
	所放出的能	6.0

von Smoluchowski, 1872 ~ 1917) 也在進行布朗運動的研究, 使得伯蘭感到精神百倍。於是, 從1908年開始, 花了大約3年的時間, 把愛因斯坦根據理論所預測的布朗運動中微粒之位移, 仔細加以測定。

伯蘭所得的結果, 與根據原子學說與分子理論的數據, 完全一致。1莫耳物質所含的分子數, 無論用什麼方法去數算, 總是得到一定值。

用各種方法所得的1莫耳物質中之粒子數——叫做「亞佛加厥數 (Avogadro's number)」——非常一致, 伯蘭特別強調這件事實 (見表2)。用原理上毫無關係的各種方法數算出來的結果相當一致, 這就完全可以保證原子學說與分子理論的正確性。由於實驗難免發生誤差, 表2的數值比現在我們使用的數值稍大。

亞佛加厥發表其假設後100年以上, 原子學說與分子理論終於獲得最後的勝利。一直強烈反對的奧斯托惠耳特, 他也不得不承認原子與分子是真正存在的。亞佛加厥的「假設」再也不是假設, 是經過證明的事實。從此以後, 我們也必須稱它為「亞佛加厥定律 (Avogadro's law)」。

八、簡易驗證實驗

利用單分子膜法來測定亞佛加厥數。

要測定分子大小的實驗, 單分子膜法比較簡單, 值得一試。

分子只排一行的一層, 換言之, 厚度相當於1個分子的大小之一層, 叫做「單分子層 (monolayer 或 monomolecular layer)」。如果這一層在界面 (例如水

的表面)，則這一層就叫做「單分子膜 (monomolecular film)」。

1899年，英國物理學家雷來 (Lord Rayleigh, 亦即 John William Strutt, 1842 ~ 1919) 指出，擴展在十分廣大水面上的油，其薄層的厚度是 10^{-7} cm 左右，大約等於分子的大小。

單分子膜要如何製造？比較容易製成單分子膜的物質，包括高級脂肪酸與高級酒精。多數碳原子形成長鏈來結合而生成的碳氫化合物（碳鏈較長的物質，叫做比碳鏈較短的物質為「高級」），把其末端的一個氫用羧基—COOH來置換的，叫做高級脂肪酸，而用氫氧基—OH來置換的，則叫做高級酒精。

碳數較少的羧酸 (carboxylic acid) 或酒精容易溶於水，最好的例子是醋酸 CH_3COOH 與乙醇 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 。這是因為羧基與氫氧基容易與水混合的緣故。這種基叫做「親水基 (hydrophilic radicals)」。

反之，僅由碳與氫所組成的碳氫化合物（例如汽油與燈油），不容易溶於水。因此，碳氫化合物的鏈會形成「疏水基 (hydrophobic radicals)」，亦即不親水的部分。

高級脂肪酸與高級酒精都是由親水基與疏水基所組成，但因碳鏈較長，疏水基佔優勢，所以不溶於水。可是，由於親水基溶於水，如圖1所示，親水基朝向水面，疏水基遠離水面而排列，容易製成單分

子膜。

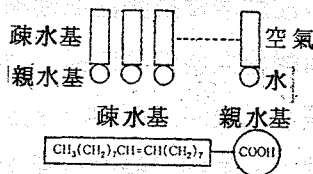


圖 1

實驗器材：

淺盤 (5 × 35 cm 左右，下面有螺旋可以調整水平者，盤底塗成黑色)

固態石臘

量瓶 (儘量小的)

有刻度的吸量管

天平

油酸 (oleic acid)

戊烷 (pentane)

實驗步驟：

(1) 先求油酸的密度 d —— 求密度的簡單方法是，用量瓶來測定一定體積油酸的質量 (0.87 g/cm^3 左右)。

(2) 用有刻度的吸量管正確量取大約 0.05 g 的油酸，再用量瓶來製成 500 ml 的戊烷溶液。

(3) 淺盤塗以固態石臘，充滿以清水。

(4) 水面蓋以活塞油後，撒上石松子粉末 (能使單分子膜易見。滑石細粉末也可以)。高純度潤滑油在 300°C 加熱 8 小時就可以獲得活塞油。把細玻璃棒的一端浸在活塞油中後，觸及水面，則水面變成綠色，容易觀察。

(5) 用有刻度的吸量管量取油酸戊烷

溶液 0.10ml，滴在水面，等待戊烷氯化。

(6) 因為油酸層會推開活塞油與石松子層，所以油酸層擴展部分的顏色消失，非常容易觀察。把這略成圓形的單分子層描在透明玻璃上，再把這輪廓移到 1mm 方格紙上。

討論：

由單分子膜中的油酸質量 m ($\approx 10^{-5}$ g) 與油酸密度 d ，求出油酸總體積 v ，再利用單分子膜的面積 s ($\approx 75\text{cm}^2$) 來估計單分子膜的厚度 h 。應該得到 10^{-7} cm 左右才對。

$$h = \frac{v}{s} = \frac{m}{ds}$$

據此數據求出油酸 1 分子的體積 v_0 。
 v_0 與亞佛加厥數 N 的關係是

$$v_0 N = \frac{M}{d}$$

M 是油酸的分子量 ($= 282$)。

假設油酸是立方體，則可得亞佛加厥數 $N \approx 1 \times 10^{23}$ 。假設油酸是長度為寬度之 2 倍 ($= 2h$) 之長方體，則 $N \approx 5 \times 10^{23}$ 。又假設油酸是長度為直徑的 4 倍之圓筒，則可得 $N \approx 6 \times 10^{23}$ 。

九、從亞佛加厥類數到亞佛加厥常數

依照亞佛加厥假設，同溫同壓同體積的氣體所含有的分子數相同。另一方面，

1 莫耳氣體在標準狀況占 22.4 ℓ。因此，在同一條件之下，22.4 ℓ 的氣體所含有的分子數，不論何種氣體，都是一定。這是根據道耳吞原子學說與阿弗加厥分子理論導出來的結論。

然則，22.4 ℓ 的氣體中，究竟含有幾個分子？如果能夠估計原子的大小，原子學說與分子理論的地位就可以大幅度提高。

在這種意圖之下，想去數一數分子數的是，奧地利物理學家及化學家羅須密 (Joseph Loschmidt, 1821 ~ 1895)。羅須密想利用氣體動力論來分析氣體的熱傳導，繼而決定標準狀況下 1 cm³ 氣體所含有的分子數。這數值叫做「羅須密數 (Loschmidt's number)」。

然而，當時以來，羅須密數並不常用。化學家認為，與其數一數 1 cm³ 氣體中的分子數，不如去數 22.4 ℓ (即 1 莫耳) 中的分子數比較有意義。這數值叫做「亞佛加厥數 (Avogadro's number)」。

伯蘭的實驗以後，化學家與物理學家曾經利用各種方法來測定亞佛加厥數，其中比較精確的是，1917 年美國物理學家密立坎 (Robert Andrew Millikan, 1868 ~ 1953) 所用的方法。

首先，密立坎準確測定 1 個電子的電量 e ，1 個電子的電量 e ，其亞佛加厥數倍顯然等於電量的 1 莫耳，亦即 1 法拉第的電量 (1 法拉第 = 96500 庫侖)。

$$eN = F$$

這樣求出來的數值，比伯蘭的數值稍小。

今天，求亞佛加厥數的最精確方法是，利用 X 射線晶體分析來求出金剛石中 1 個碳原子的體積 v 之方法， v 與金剛石密度 d 及原子量 M 之間的關係是

$$\frac{M}{d} = vN$$

這樣求得的亞佛加厥數是 $N \simeq 6.02 \times 10^{23}$ (個/莫耳)。

分子的真正存在既已證實，科學家一致認為，亞佛加厥數不是因實驗方法而改變的數值，而是一種普遍常數。在國際單位系 (法文 Systeme International d'Unites，英文 International System of Units，簡稱 SI) 中，亞佛加厥「常數」(不是數)的定義是，質量數 12 的碳

12.0000g 所含有的碳原子數，其數值是 6.0229×10^{23} (個/莫耳)。

此外，1 莫耳的定義是，含有與亞佛加厥常數同數的基本實體 (即物質的構成單位，例如分子、原子、離子等) 的物質之量。

國際單位系的基本 7 單位是，公尺、公斤、秒、安培，絕對溫度、燭光與莫耳。

參考資料

1. 安田德太郎編譯：「大自然科學史」，共 12 卷，(三省堂)。
2. 鎌谷親善等譯：「現代化學史」，(みすず書房)。
3. 久保昌二：「化學史」，(白水社)。