

銀奈米粒子的微量合成和鑑定

Microscale Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles

■ 實驗簡介

本實驗的目的是透過化學還原法來微量合成銀奈米粒子 (silver nanoparticles)，利用氫硼化鈉 (sodium borohydride) 當作還原劑，還原銀離子 (Ag^+) 成為金屬銀 (Ag)。氫硼離子 (borohydride ions) 也當作穩定劑用於分散銀奈米粒子，並使用 PVP 當作穩定劑。本實驗的微量鑑定方式有廷得耳效應、繞射、聚集、穩定和光譜分析等。為節省藥品用量和保護生態環境，本實驗採用一鍋合成法 (one-pot synthesis)；為避免用過的器材造成的污染，本實驗直接使用未用過的樣品瓶和 PE 滴管。

■ 實驗原理

一、奈米材料及其特徵

奈米 (Nanometer) 為表示長度的單位或尺度，1 奈米 (nm) 等於 1 微米 (μm) 的 1/1000，也等於 10^{-9} m。通常，奈米用於表示原子或分子等級的粒子大小或電磁波的波長，例如：銀原子的直徑為 0.288 nm；能引起尿結石的細菌最小直徑為 50 nm；病毒的大小範圍為 20-250 nm；可見光範圍約為 380~750 nm，紫外光的波長為 200-380 nm。奈米等級的物體肉眼和光學顯微鏡看不到，需要用電子顯微鏡才能觀察到。**奈米材料**就是指是在三維度中至少有一維度處於奈米尺度 (介於 1~100 nm) 或由奈米尺度的物質為基本單元所構成的材料總稱。銀的原子半徑為 0.28 nm，假設銀奈米顆粒球形的直徑範圍為 1-100 nm，銀原子的數量從 30 至 3.0×10^7 個原子。

奈米材料出現兩項重要的特徵。其一為**表面原子數激增**：與相同質量的巨觀材料相比，奈米等級材料的表面積對體積的比例激增。在 1947 年，第一代電晶體的尺寸在 1 cm 以上，在 iPhone 11 的 Apple A13 中擁有 85 億個電晶體。現今，一個電晶體長度不到 5 nm，縮小程度超過第一代約 200 萬倍。曾經是世界第一高樓的臺北 101 大樓，相當於其高度 509 米縮小到 0.25 mm。通常較小的奈米粒子具有較高比例的表面金屬原子，導致較高的催化活性和更具化學反應性。其二為**量子效應** (Quantum effect)：不同於巨觀世界，量子效應中能量是連續的。當材料由巨觀縮小至接近於原子或分子層次大小時，奈米的能量分布由連續轉變為量化的狀態，從而影響奈米材料的一些性質。**量子尺寸效應** (Quantum size effect) 是由“限制”

的現象所引起的，在小於 10 nm 的奈米物體中發生更為普遍。在塊狀材料中，電子的移動被視為波狀，可以在原子之間“自由”移動。當粒子縮小到奈米等級時，電子波的移動範圍與粒子大小相當，電子開始對應地調整能量。透過這種調整方式，電子由連續的能量分布被“限制”在量子化的不連續能階中。奈米材料出現量子尺寸效應有極為不同的特性，例如：鋁等金屬材料變為可燃，矽等絕緣體變成導體。

以光學特性為例，當奈米粒子足夠小時，其光譜的吸收能量與奈米粒子的表面有很強的耦合，尺寸在 2-10 nm 的奈米粒子會出現離子化的共振效應。這是由於奈米粒子的價電子 (valence electrons) 當照射光時會激發至能量較高的導帶 (conduction band)，然後該價電子的能量以光的形式自發性釋放而回到穩定的價帶 (valence band)。這種共振效應通常稱為**表面電漿子共振** (surface plasmon resonance, SPR) 或**局域表面等離體共振** (localized surface plasmon resonance, LSPR)，如圖 1 所示。不同粒徑的奈米粒子具有不同的能隙大小，表面電漿子共振的能量也會不同。(註：開啟圖 1 的圖片來源網址，雙擊綠色圖示，即可觀察到表面電漿子是否發生共振現象。)

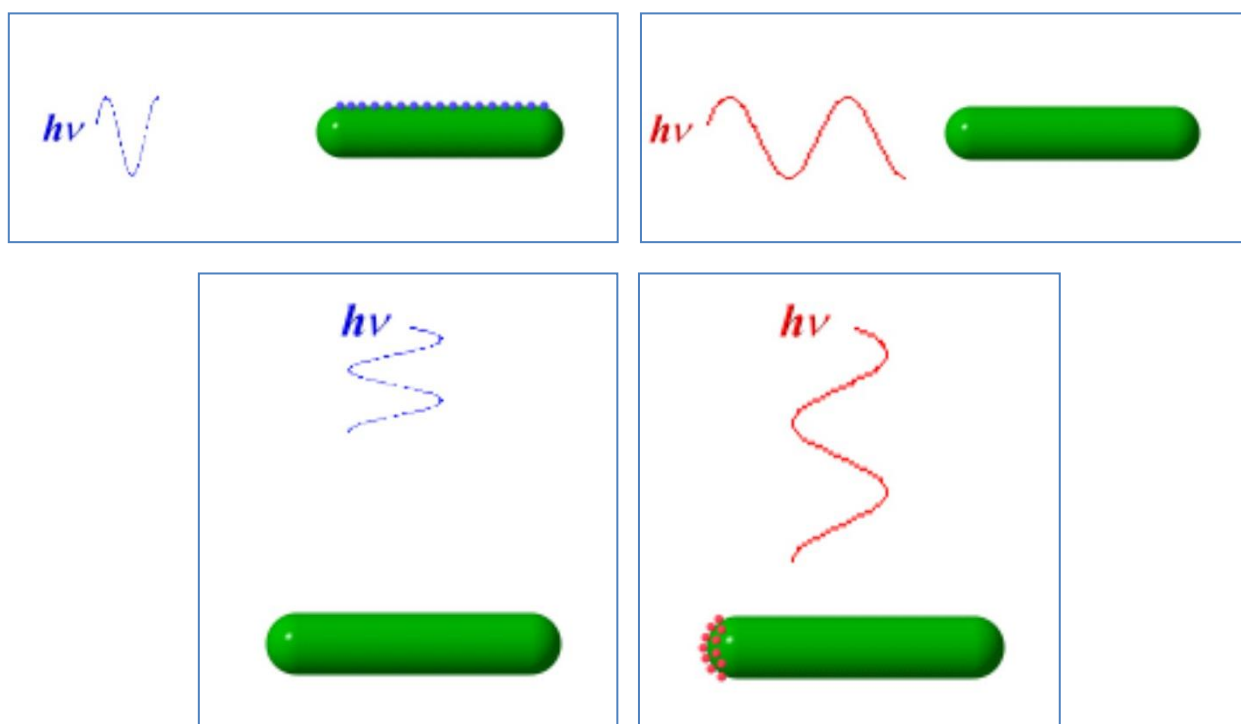


圖 1：表面電漿子共振的示意圖，左上圖為面極化入射光：波長 520 nm，極化方向與短軸平行，吸收能量與粒子表面引起耦合而發生共振效應；左下圖為面極化入射光：波長 520 nm，極化方向與短軸垂直，吸收能量與粒子表面不引起耦合而不發生共振效應；右上圖為面極化入射光：波長 1000 nm，極化方向與長軸垂直，不發生共振效應；右下圖為面極化入射光：波長 1000 nm，極化方向與長軸平行，發生共振效應。

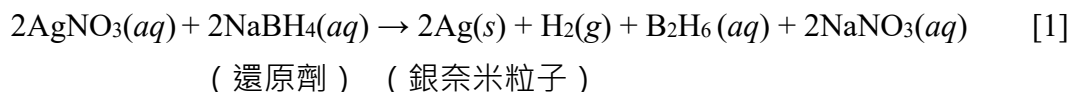
(圖片來源：圖解表面電漿共振，國立中正大學，<https://bit.ly/3R7txGo>.)

以銀奈米粒子的光學特性為例，當金屬銀研磨成為奈米級的大小後，用肉眼可見到其顏色由原來的銀白色轉變成為黃色。銀奈米粒子變為黃色是因為此粒子吸收可見光（380~750 nm）中的 410 nm 波長（藍光），而見到其互補色（黃色），而且吸收藍光的能量與銀奈米粒子表面引起耦合而發生共振效應，使得銀奈米粒子表面的自由移動的電子雲（electron cloud）被極化，亦稱**表面電漿子**（surface plasmon）或稱**表面電漿極化子**（surface plasmon polariton）被極化，隨著光波的吸收波長而來回震盪，而發生奈米粒子的共振效應。

銀奈米粒子已廣泛應用於家用器具、醫療保健行業以及食品、環境和生物醫學，例如：在生物和生物醫學的應用有抗菌、抗病毒、抗發炎、抗癌症等。此外，銀奈米粒子有良好抗菌能力，成為使用最廣泛的殺菌奈米材料，例如：紡織品、冰箱表面及個人護理的產品。一般而言，銀奈米粒子大多與二氧化鈦一起作為化學反應的催化劑。

二、銀奈米粒子的合成

銀奈米粒子合成方法有物理和化學方法，化學方法包括：沉澱法、微乳液法、化學還原法及電化學還原法。以化學還原法的合成最為廣泛，此反應是正一價的銀離子還原成為零價的金屬銀，例如：硝酸銀（silver nitrate, AgNO_3 ）當作氧化劑，使用適量的硼氫化鈉（sodium borohydride, NaBH_4 ）當作還原劑，並且使用過量當作銀奈米粒子的穩定劑。其反應如式[1]所示。



為節省藥品用量和保護生態環境，本實驗採取微量實驗和一鍋合成法（one-pot synthesis）；為避免用過的器材造成的污染而難以合成徑粒較小的銀奈米粒子，本實驗直接使用未用過的樣品瓶和 PE 滴管。此外，裝在小樣品瓶內在實驗畢後，學生可以帶回家永久保存。

三、銀奈米粒子的鑑定

（一）廷得耳效應（Tyndall effect）

廷得耳效應（Tyndall effect）是指當一條光束透過膠體（如銀奈米粒子溶液），面向入射光的垂直方向，肉眼可觀察到膠體裡出現一條明亮光束的散射現象。若光束照射到物體的尺寸大於入射光的波長，則光線發生**反射**，如圖 2 的「反射」示意圖所示；若照射到物體的尺寸小於入射光的波長，則光線發生**散射**，如圖 2 的「散射」示意圖所示。

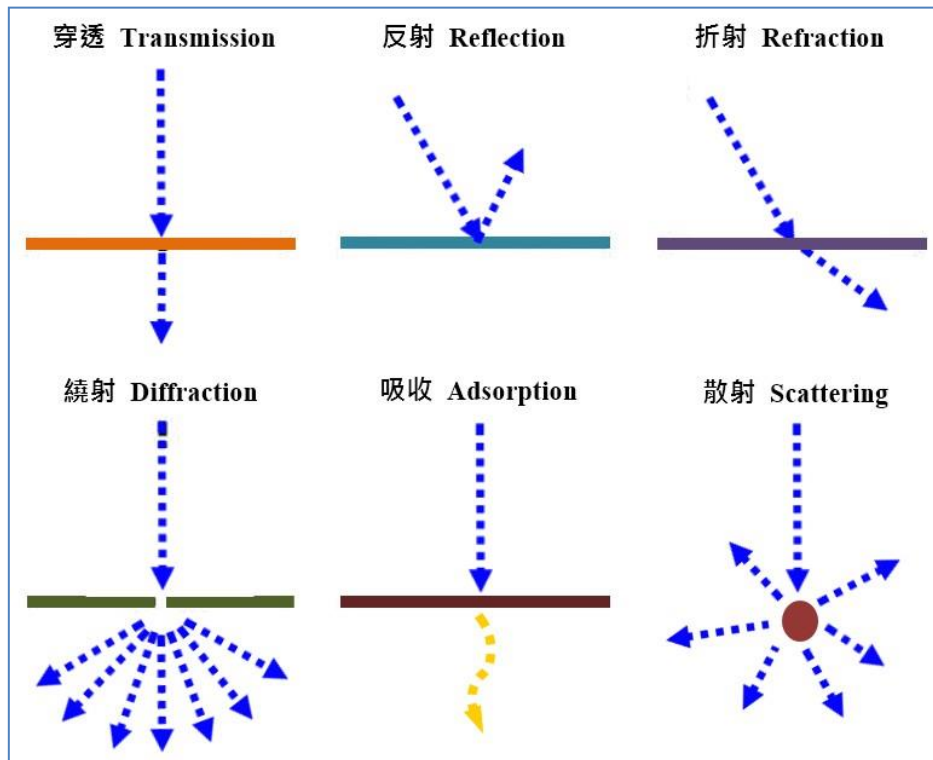


圖 2：光照射到物體的交互作用：穿透、反射、折射、繞射、吸收及散射的示意圖
(圖片來源：金奈米粒子的微量合成和鑑定，臺灣化學教育，<http://chemed.chemistry.org.tw/?p=42346>。)

在化學上，膠體的粒子大小(1-100 nm)介於溶質粒子(< 1 nm)與懸浮液粒子(500-10000 nm)之間。當可見光(波長 380-750 nm)照射到膠體(或溶膠)時，可觀察到光波環繞微粒而產生明顯的**散射**，如圖 2 的「**散射**」示意圖所示。由於真溶液(true solution)的粒子小於 1 nm，以致光線的強度隨粒子體積的減小而明顯減弱，而導致對光線的**散射**作用很微弱，光線幾乎直接**穿透**，如圖 2 的「**穿透**」示意圖所示。懸浮液的粒子較膠體的粒子為大，是一種可以沉降的非均相流體，當可見光照射到懸浮液時，光線大多呈現**反射**，如圖 2 的「**反射**」示意圖所示，只有少部分粒子具有廷得耳效應。使用雷射筆的紅光照射銀奈米粒子溶液和硝酸銀溶液，如圖 3 所示。藉由廷得耳效應，可以區分真溶液、膠體或懸浮液。



圖 3：銀奈米粒子(左瓶)有廷得耳效應，而硝酸銀溶液(右瓶)則無。

(二) 繞射 (Diffraction)

繞射 (Diffraction) 是指光束遇到障礙物 (如光碟片) 或小開口 (如光柵) 時發生不同程度彎曲散開的傳播現象，形成有規則的幾何光亮區和陰影區的干涉或彎曲，如圖 2 的「繞射」示意圖所示。若一個障礙物的小開口放置在光源和觀察屏之間，則於觀察屏上會出現光亮區與陰暗區，形成明暗相間的繞射現象，如圖 4 所示。

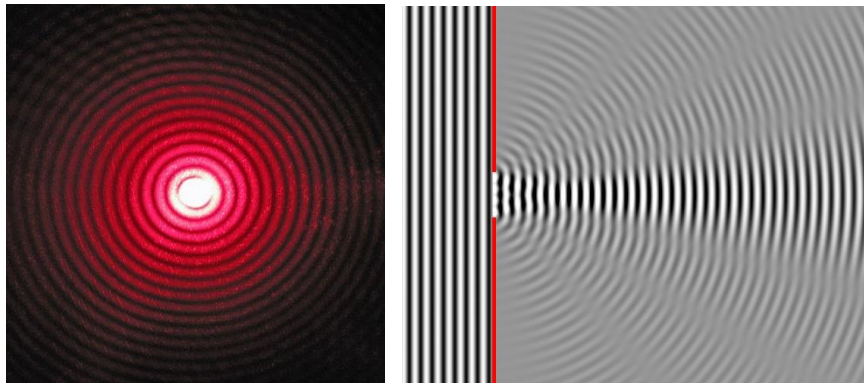


圖 4：雷射紅色光束穿過微小圓孔後射到觀察屏上的繞射圖案 (左)，寬度為四個波長的狹縫與入射波的繞射圖案 (右)

(圖片來源：Diffraction, <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction>.)

本實驗滴加銀奈米粒子溶液在透明玻璃上，乾燥後形成銀奈米粒子固體堆積物。利用雷射光照射，在暗室中的觀察屏上可觀察到繞射的圓形圖案，如圖 5 左所示。

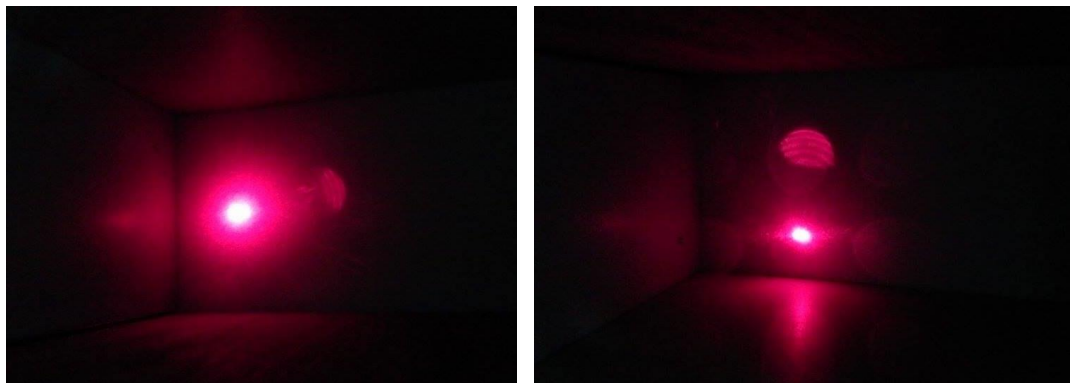


圖 5：雷射光束照射到有銀奈米粒子固體堆積物時，呈現較大的圓形圖案 (左)；而沒有銀奈米粒子堆積物時，呈現較小圖案 (右)。

(三) 聚集 (Aggregation)

膠體和懸浮液分散在連續介質中，其顆粒的大小範圍在 1~1000 nm 之間。超過這尺寸的粒子可能從懸浮液中發生沉澱。奈米材料的尺寸範圍 (1-100 nm) 是在膠體和懸浮液顆粒的尺寸範圍之內，這樣的粒子具有極小的尺寸而導致高表面能。為降低表面能，此樣的粒子傾向發生**聚集** (aggregation) 現象。科學家應用銀奈米粒子與重金屬離子溶液混合會發生聚集

現象，透過簡單快速的比色法可檢測重金屬離子的濃度，如 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 及 Pd^{2+} 的濃度。

本實驗使用食鹽當作聚集物，當銀奈米粒子溶液加入食鹽時，食鹽在水中解離的鈉離子與氫硼離子發生作用，因而造成銀奈米粒子的負電荷層遭受破壞，導致溶液中的銀奈米粒子發生聚集現象，顆粒變大而沉澱析出，如圖 6 所示。



圖 6：銀奈米粒子溶液在蠟層上形成兩顆圓球狀的液滴，左側未加顆粒狀食鹽（黃色），右側有加入顆粒狀食鹽（暗黃色）。

(四) 穩定 (Stabilization)

本實驗合成銀奈米粒子，使用過量的氫硼化鈉 (NaBH_4) 當作還原劑，剩餘的氫硼化鈉在水中會解離出氫硼離子 (BH_4^-) 當作穩定劑，使銀奈米粒子均勻地分散在水溶液中。這分散的可能原因是銀奈米粒子表面的銀原子有空軌域 (缺電子)，氫硼離子帶負電 (有多餘電子)，兩者之間在銀奈米粒子的表面以靜電力相互吸引而包覆一層負電荷層；抑或氫硼離子解離成三氫化硼 (BH_3) 和氫負離子 ($:\text{H}^-$)， $:\text{H}^-$ 有孤電子對與銀奈米粒子之間以路易斯酸鹼相互吸引而包覆一層負電荷層，形成銀奈米粒子溶液，如圖 7 所示。

本實驗銀奈米粒子的合成，使用適量的氫硼化鈉 (NaBH_4) 當作還原劑，過量的氫硼化鈉在水中會解離出氫硼離子 (BH_4^-) 當作穩定劑，導致銀奈米粒子均勻地分散在水溶液中。這分散的可能原因是銀奈米粒子表面的銀原子有空軌域 (缺電子)，氫硼離子帶負電 (有多餘電子)，兩者之間在銀奈米粒子的表面以靜電力相互吸引而包覆一層負電荷層；抑或氫硼離子解離成三氫化硼 (BH_3) 和氫負離子 ($:\text{H}^-$)， $:\text{H}^-$ 有孤電子對與銀奈米粒子之間以路易斯酸鹼相互吸引而包覆一層負電荷層，形成穩定的銀奈米粒子溶液，如圖 7 所示。

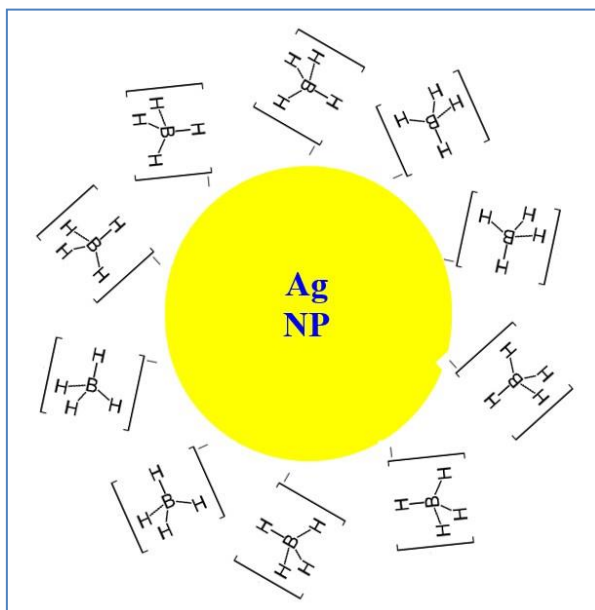


圖 7：氫硼離子與銀奈米粒子表面銀原子之間的作用，上圖為示意圖，僅表示銀奈米粒子與穩定劑之間的作用，而不表示銀奈米粒子的大小與穩定劑的數量之間的關聯

本實驗也使用聚乙烯吡咯烷酮 (Polyvinylpyrrolidone, PVP) 當作穩定劑。PVP 分散銀奈米粒子的可能原因是銀奈米粒子表面的銀原子有空軌域，PVP 的氧原子帶有部分負電荷 (有孤電子對)，兩者之間在銀奈米粒子的表面以路易斯酸鹼相互吸引而包覆一層負電荷層，形成更穩定的銀奈米粒子溶液，如圖 5 所示。

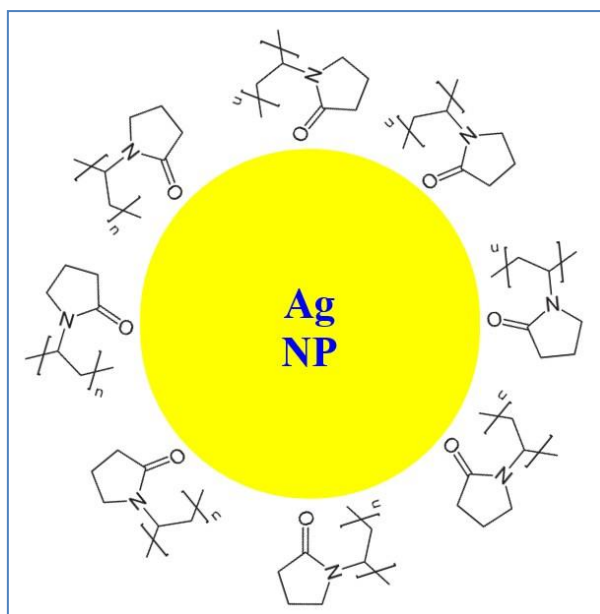


圖 8：PVP 穩定銀奈米粒子的結構圖，此圖為示意圖，如圖 7 的說明

除了使用硼氫化鈉和 PVP 當作金奈米粒子的穩定劑之外，硼氫化鈉和聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 合併使用，還有牛血清白蛋白 (bovine serum albumin, BSA)、檸檬酸根 (citrate)

或纖維素 (cellulose) 也作為穩定劑。在還原的過程中，牛血清白蛋白中含硫、氧和氮的官能基能夠降低銀奈米粒子的高表面能。在纖維素上的羥基能夠幫助穩定銀奈米粒子。

(五) 可見光光譜分析 (Visible Spectroscopic Analysis)

透過紫外-可見光光譜儀 (UV-Visible spectrometer)，可測得銀奈米粒子的可見吸收光譜 (Absorption spectrum)，如圖 9 所示。進而光譜圖找到最大吸收度的波長，並且推知合成銀奈米粒子的粒徑大小。可見光照射到銀奈米粒子溶液的吸收光譜，如圖 2 的「吸收」示意圖所示。

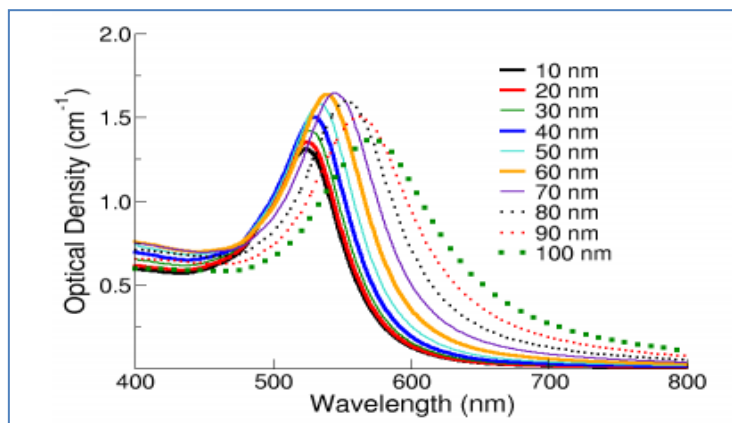


圖 9：銀奈米粒子隨著粒徑越大，其最大吸收度的波長越往紅端移動

(圖片來源：Silver Nanoparticles: Optical Properties, <https://bit.ly/3QXDwxy>)

藉由文獻資料 (見參考資料 3) 提供的銀奈米粒子不同粒徑大小的最大吸收度波長的光譜，可以轉化為最大吸收度波長與顆粒大小的關係之趨勢線，如圖 10 所示。根據圖 10 的趨勢線，銀奈米粒子的顆粒越小，其最大吸收度的波長越短。若銀奈米粒子最大吸收度的波長為 410 nm，則可透過趨勢線推知其顆粒大小為 23 nm。抑或，藉由趨勢線的二元方程式 $y = 0.0108x^2 + 0.173x + 400.67$ ，若最大吸收度的波長 $y = 410$ nm 時，則其顆粒的大小 $x = 22.5$ nm。

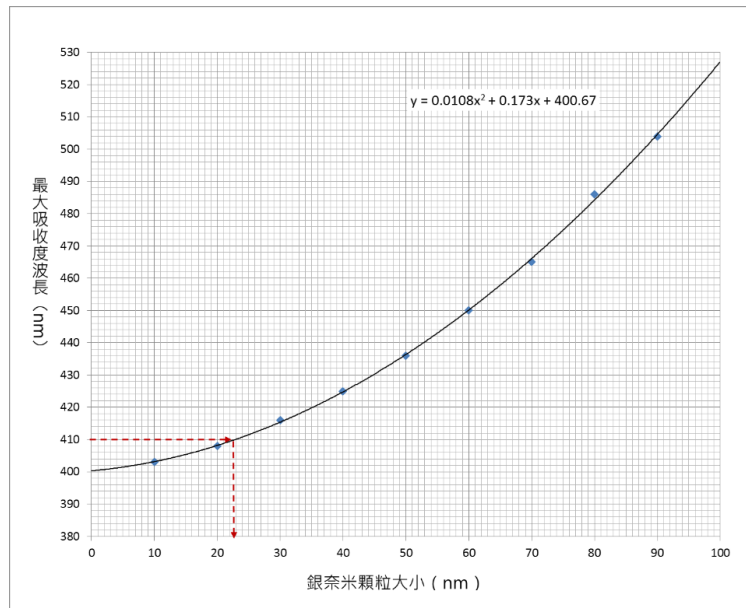


圖 10：銀奈米粒子的最大吸收波長與顆粒大小的關係

此外，藉由光譜圖的吸收度最大一半的波峰寬度（The peak width at half the absorption maximum, PWHM），可以判定銀奈米粒子大小的均一程度，PWHM 越小表示奈米粒子的大小越均一。圖 11 為銀奈米粒子溶液的吸收光譜圖，其最大吸收度為 1.57，其最大吸收度的一半為 0.785（ $1.57/2$ ），此光譜圖的吸收度與波峰有兩個交叉點，高波長與低波長之差即為 PWHM。低波長之處在 375 nm，高波長之處在 436 nm，此 PWHM 為 $436 \text{ nm} - 375 \text{ nm} = 61 \text{ nm}$ 。

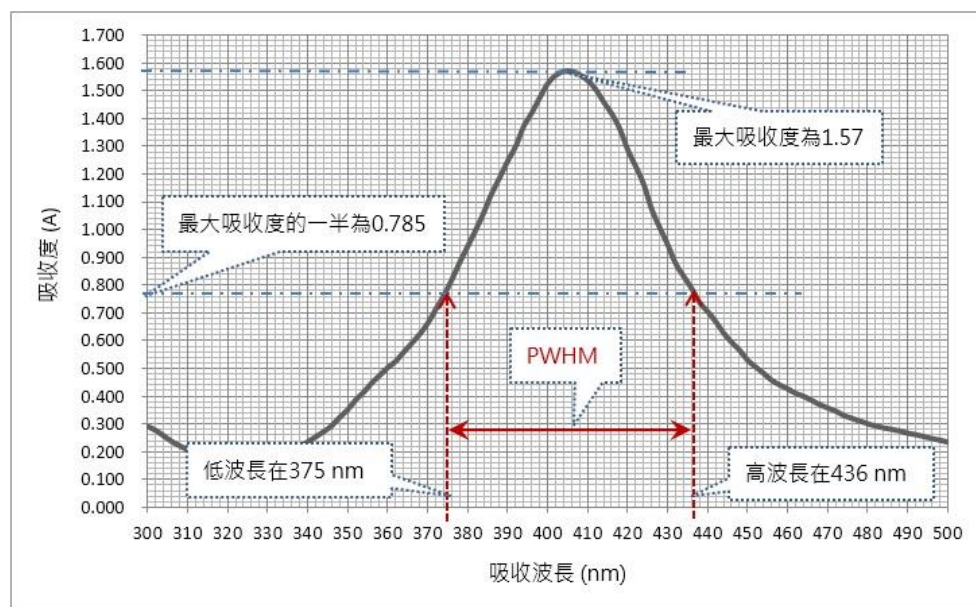


圖 11：銀奈米粒子的吸收光譜 PWHM

(六) 電子顯微鏡圖像 (Electron Microscope Image)

藉由電子顯微鏡 (Electron microscope) 的圖像，可觀察到銀奈米粒子的粒徑大小和形狀。

圖 12 左顯示由銀離子在腐殖酸 (humic acid) 溶液中形成的銀奈米粒子的穿透電子顯微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM) 圖像 (添加顏色是便於清楚觀察) , 比例尺代表 50 nm , 此圖像中的銀奈米粒子的大小並非均一 , 其粒子形狀非全部圓形。腐殖酸傾向於吸附在奈米顆粒上 (此處可見到淡淡的雲層) , 使之分散在膠體中。圖 12 右顯示銀奈米粒子的掃描電子顯微鏡圖像 (Scanning Electron Microscope, SEM) , 比例尺代表 2 μm (有 10 格 , 每格 200 nm) , 此圖像中的銀奈米粒子的粒徑大小並非均一 , 其粒子形狀也有很大的差異。

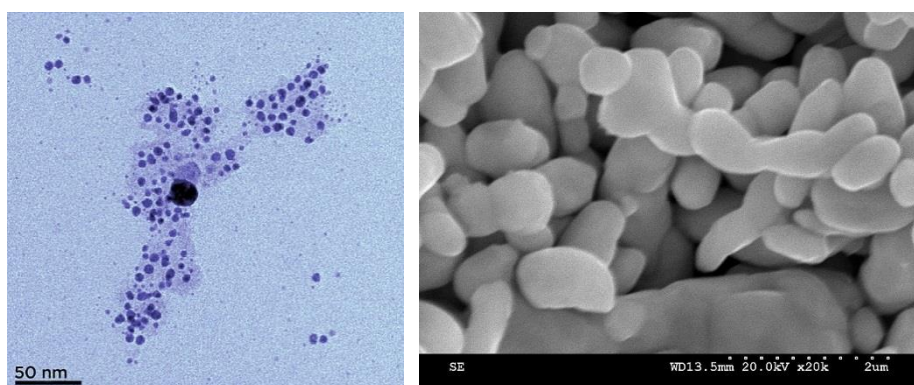


圖 12 : 銀奈米粒子的穿透電子顯微鏡 (左) 和掃描電子顯微鏡 (右) 的圖像
(圖片來源 : Silver Nanoparticles, <https://bit.ly/3BzCdZQ>; Scanning Electron Microscope Image of Silver Nanoparticles, <https://bit.ly/3d6Cb9n> .)

■ 實驗步驟

一、藥品和器材

每位學生或小組需要以下化學品和設備來進行此微量實驗。

1. 0.0010 M 硝酸銀 (silver nitrate, AgNO_3) / 0.5 mL (10 drops)
2. 0.0020 M 硼氫化鈉 (sodium borohydride, NaBH_4) / 1.5 mL (30 drops)
3. 0.3% 聚乙基吡咯烷酮 (poly(vinylpyrrolidone, PVP) / 0.1 mL (2 drops)
4. PE 滴管 (PE pipettes , 未使用過的) / 4 支
5. 玻璃樣品瓶附特氟龍蓋 (3-mL glass vial with Teflon cap , 未用過的) / 1 個
6. 玻璃樣品瓶附特氟龍蓋 (100-mL glass vial with Teflon cap , 未用過的) / 3 個
7. 燒杯 (50 mL 或 100 mL) / 1 個
8. 冰水 (50 mL) / 少量
9. 白蠟 (小塊) / 1 個
10. 白紙 (1/4 張 A4 大小) / 1 張
11. 顆粒狀氯化鈉 (sodium chloride (NaCl)) / 少許
12. 可丟棄塑膠比色管 (disposable plastic cuvette, 1.5 mL , 管內下方扁平狀) / 1 個

13. 洗瓶 (裝蒸餾水) / 1 瓶
14. 紅光雷射筆 (red light laser pointer) / 1 支
15. 透明玻璃片或載玻片 / 1 片
16. 容量瓶 (100.0 mL) / 2 支 (每班)
17. 紫外-可見光譜儀 (UV-Visible spectrometer) / 1-2 台 (每班)
18. 電子顯微鏡 (Electron microscope) / 1 台 (每班, 可選用)

二、配製溶液

1. 0.0010 M 硝酸銀 (100.0 mL) : 使用塑膠製稱量盤或稱量紙, 稱取 0.017 g 硝酸銀 (silver nitrate, AgNO_3 , 莫耳質量為 411.85 g/mol), 放入 100.0 mL 容量瓶中。然後, 使用洗瓶加入蒸餾水到容量瓶中, 直至液位達到刻度線並且徹底混合。此溶液儲存在未使用過的 100 mL 玻璃樣品瓶附特氟龍蓋中。【註: 100 mL 此溶液足以進行 200 次實驗或 200 名學生或小組的實驗。】
2. 0.0020 M 硼氫化鈉 (100.0 mL) : 稱取 0.0076 g 硼氫化鈉 (sodium borohydride, NaBH_4 , 摩爾質量為 37.83 g/mol), 置入 100.0 mL 容量瓶中。使用洗瓶加蒸餾水到容量瓶中, 直至液位達到刻度線並且徹底混合。此溶液儲存在未使用過的 100 mL 玻璃樣品瓶附特氟龍蓋中。【註: 硼氫化鈉易潮解和氧化, 配製其溶液必須新鮮配製, 且儲存時避免樣品瓶內有空氣, 以冷藏為佳。】
3. 約 0.3% PVP (100 mL) : 稱取約 0.3 g 聚乙烯基吡咯烷酮 (poly(vinylpyrrolidone), PVP, 平均摩爾質量為 40,000 g/mol), 放入在 100 mL 的未使用過的玻璃樣品瓶中, 用在 100 mL 蒸餾水溶解, 用特氟龍蓋蓋緊並徹底混合均勻。

三、銀奈米粒子的合成

使用未用過乾淨的 PE 滴管, 滴加 1.5 mL (30 滴) 新鮮製備的 0.0020 M NaBH_4 (硼氫化鈉) 到一個 3 mL 的玻璃樣品瓶中, 此瓶無需清潔直接使用。用附特氟龍蓋, 緊緊地轉緊瓶蓋。放置此樣品瓶在一個 50 mL 燒杯的冰水浴中, 使其冷卻。取出此樣品瓶, 立即打開瓶蓋。使用 PE 滴管, 立即滴加 10 滴 (0.5 mL) 0.0010 M AgNO_3 (硝酸銀) 到此樣品瓶中, 滴加速率約 1 秒 1 滴, 並且在滴加時需要搖晃。在滴加完畢後, 緊緊地轉緊瓶蓋, 立即放入冰水浴中, 直到溶液變成鮮黃色, 如圖 13 所示。(Yang, 2013) 【註: (1)硝酸銀溶液不可連續滴加, 否則銀奈米粒子溶液會發生聚集而變黑; (2)燒杯的選用不宜過大且冰水浴水位不宜超過樣品瓶的高度, 否則樣品瓶難以直立。】

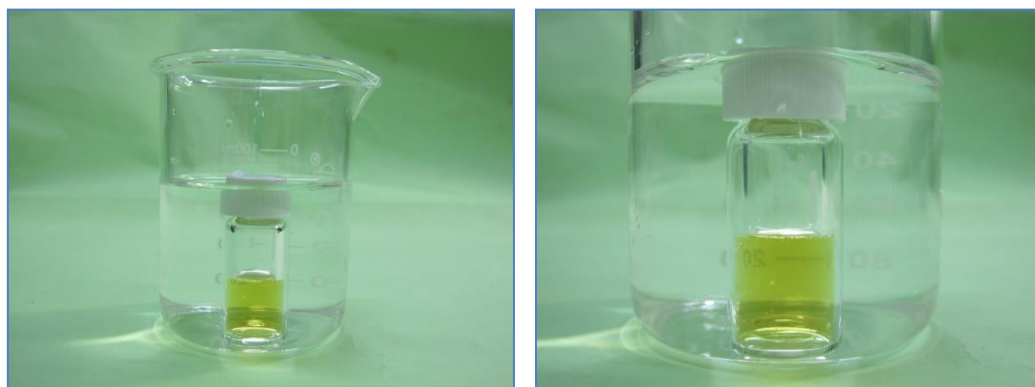


圖 13：冷卻樣品瓶並滴加硼氫化鈉溶液直至溶液呈現鮮黃色，右圖為左圖的局部放大。

四、銀奈米粒子的鑑定

(一) 廷得耳效應 (Tyndall effect)

使用紅光雷射筆，直接照射含有合成銀奈米粒子溶液和硝酸銀溶液的兩個樣品瓶，觀察兩種溶液是否出現一道紅光的光束。其操作方式，詳見圖 3。

(二) 繞射 (Diffraction)

取一片乾淨的玻璃片或載玻片，在此片上面於相距約 1.5 cm 處分別滴加 2-3 滴銀奈米粒子溶液。使用電磁加熱攪拌器，設定微熱狀態，放置此片在加熱板的邊緣位置，緩慢地加熱直到溶液變乾。在暗室中，用雷射筆紅光對準並照射銀奈米粒子形成固體堆積的區域，在屏幕上觀察是否出現紅光圓點擴大的現象。以相同方式，照射光線到沒有銀奈米粒子堆積的區域，觀察是否出現紅光擴大的現象。其操作方式，詳見圖 5。

(三) 聚集 (Aggregation)

取 1/4 張 A4 大小的白色紙(或影印紙)，使用一小塊白蠟用力地塗抹上一厚厚的蠟層(蠟層不可有未塗抹之處而導致銀奈米粒子溶液滲透到紙張)。在蠟層上相距約 1-2 cm 的兩處，用乾淨的 PE 滴管，分別滴加 2 滴的銀奈米粒子溶液，而形成兩個圓球狀的液滴。在其中一顆液滴，加入少量的顆粒狀氫化鈉，觀察其顏色變化，並比較與另一顆液滴的顏色。其操作方式，詳見圖 6 和圖 14。【註：進行聚集之前，不可加入 PVP 穩定劑。否則，聚集現象不易發生。】



圖 14：進行銀奈米粒子聚集試驗的兩顆圓球狀的液滴

(四) 穩定 (Stabilization)

為了穩定並保存銀奈米粒子溶液，在樣品瓶中加入 5 滴約 3% 聚乙炔吡咯烷酮 (Polyvinylpyrrolidone, PVP) 當作穩定劑，轉緊瓶蓋並搖動混合均勻。

(五) 可見光光譜分析 (Visible Spectroscopic Analysis)

取一支 1.5 mL 乾淨的塑膠比色管，用乾淨的 PE 滴管，加入 10 滴 (約 0.5 mL) 銀奈米粒子溶液到該管中，並用蒸餾水進行等量稀釋。利用紫外-可見光光譜儀，測定銀奈米粒子的吸收光譜。透過吸收光譜圖，找到最大吸收度的波長。然後，藉由最大吸收度的波長，推知銀奈米粒子的粒徑大小，詳見圖 10。然後，透過製作 PWHM，推知自己合成的銀奈米粒子的均一程度，並與別人或他組比較，詳見圖 11。【註：(1)若已加入 PVP 穩定劑，則不必加入太多的蒸餾水稀釋；(2)在測量吸收光譜後，銀奈米粒子溶液可倒入樣品瓶中。】

(六) 電子顯微鏡圖像 (Electron Microscope Image)

依照穿透或掃描電子顯微鏡的操作手冊，自己實際操作或由熟悉儀器操作者操作電子顯微鏡。在取得圖像後，觀察到銀奈米粒子的粒徑大小和形狀。【註：這實驗是可選的，視學校的設備而定。】

■ 實驗結果與討論

一、金奈米粒子的合成

以文字詳細描述並插入照片加以說明。在合成銀奈米粒子的過程，有些許的顏色變化，盡可能以多張照片呈現，並討論其顏色變化原因。

二、金奈米粒子的鑑定

(一) 廷得耳效應 (Tyndall effect)

以圖文並茂展現實驗結果，並加以討論。

(二) 繞射 (Diffraction)

以圖文並茂展現實驗結果，並加以討論。

(三) 聚集 (Aggregation)

以圖文並茂展現實驗結果，並加以討論。

(四) 穩定 (Stabilization)

以圖文並茂展現實驗結果，並加以討論。

(五) 可見光光譜分析 (Visible Spectroscopic Analysis)

分為三方面描述：吸收光譜、推知奈米粒子大小以及 PWHM。以圖文並茂展現實驗結果，並加以討論。

(六) 電子顯微鏡圖像 (Electron Microscope Image)

透過電子顯微鏡的圖像，觀察到銀奈米粒子的粒徑大小和形狀。以圖文並茂展現實驗結果，並加以討論。

■ 問題

1. 透過文獻資料的搜尋，描述傳統大量的合成銀奈米粒子的實驗方式。
2. 本微量實驗未使用超純水且器材未使用王水洗淨，為何此方式仍然可合成銀奈米粒子？
3. 為何利用廷得耳效應可作為鑑定銀奈米粒子溶液的方式之一？
4. 為何利用繞射作用可作為鑑定銀奈米粒子溶液的方式之一？
5. 為何加入食鹽到銀奈米粒子溶液會出現黑色沉澱物？
6. 本實驗使用哪兩種穩定劑？為何這兩種穩定劑可以穩定銀奈米粒子溶液？
7. 你合成的銀奈米粒子溶液的最大吸收度和吸收度最大一半的波峰寬度 (PWHM) 分別為多少？與別人或他組作比較，討論你的實驗結果。

教材設計：楊水平，國立彰化師範大學化學系

資料來源：《臺灣化學教育》(<http://chemed.chemistry.org.tw/>)，第四十八期。