

第八屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA8-088

作品名稱：藉由溶液與氣體的光路現象探討各種因素對
粒子大小的影響

姓名：林宇軒

關鍵字：廷得耳效應、水合離子、氣體碰撞

摘要

廷得耳效應被認定為膠體溶液與真溶液的區分方法，但是卻觀察到真溶液也出現了與廷得耳效應，便設計實驗討論相關因素。這次實驗主要分為兩部分：

第一部分，以濃度、溶質種類、溫度作為操縱變因討論水溶液在不同光源時的廷得耳效應強弱。其中，可發現以綠光來照射水溶液的廷得耳效應會比紅光來的明顯，亦觀察到含有一價或二價陽離子的水溶液在特定濃度下，會有較明顯的光路，即透光度與濃度作圖會呈現 U 型趨勢。水溶液加熱時，透光度會下降，當到達 60°C，透光度又反向上升。

第二部分，以氣體種類(分子間作用力)、氣體濃度、加熱方式作為操縱變因探討氣體加熱後的光路現象和光路持續的時間長短。實驗結果可以說明氣體中光路現象產生的原因是由於快速給與氣體能量，造成加熱位置之壓力上升，氣體液化成小水滴狀的液珠，液珠再互相碰撞而暫時結合成分子團。

光源強度會影響到光路的明顯度，甚至是影響到光路是否會被看見。光源的強度越強，廷得耳效應也就越強越明顯。可利用不同波長產生散射光的差異以及光源強度差區分出粒子的相對大小：不均勻加熱後的有機溶劑蒸氣 > 離子化合物水溶液中的水合離子 > 純水 > 結構簡單的氣體分子。

課本上介紹廷得耳效應：膠體溶液因為粒子較大，會使光線散射而顯現一條光路，而真溶液沒有廷得耳效應，這樣的說法是有待商榷的。真溶液與特定情況下的氣體，仍然能夠觀察到光路，並不是只有膠體溶液才有廷得耳效應。

壹、研究動機：

當在老師在化學課教到真溶液、膠體溶液及懸浮液的界定时，講到了可以利用廷得耳效應來區分，但當我們拿老師上課講解投影片的雷射光筆照射到氯化鈉水溶液，以及預製好的蒸餾水，也出現了與廷得耳效應相符合的光路。然而，普遍認為正三價之陽離子化合物屬溶液屬於膠體溶液，在溶液中會形成電雙層的膠體，因此粒子半徑較大，在強光照射下會形成光帶。但為什麼在原先膠體溶液定義之外的真溶液亦會出現光路？是否是受到其他因素影響？除此之外，我們也想看看雷射光射入氣體時會產生什麼現象。當我們在真空試管中打入氣體，在室溫下用雷射筆照都不會有光路，但當我們加熱有機溶劑的蒸氣時，卻發現它會產生一條明顯的光路。於是我們便開始探討這些現象產生的原因。

貳、研究目的：

- 一、觀察大多數化合物之水溶液的廷得耳效應。
- 二、探討影響液態溶液廷得耳效應的因素。
 - (一) 不同濃度下，各種溶液廷得耳效應。
 - (二) 不同光波長下，各種溶液廷得耳效應。
 - (三) 不同陽離子下，各種溶液廷得耳效應。
 - (四) 不同溫度下，各種溶液廷得耳效應。

三、觀察氣體中的廷得耳效應並歸納和探討其現象。

(一) 觀察與分析雷射光打入無色氣體所產生的現象。

(二) 觀察與分析雷射光打入易揮發之有機溶劑的蒸氣所產生的現象。

四、重新思考高中課本給的知識是否完全正確。

參、研究設備及器材：

(一) 器材				
試管(新)	試管塞(新)	刮勺	鐵架	鐵製試管夾
試管刷	滴管(新)	手套	注射針筒	針頭
酒精燈	微量吸取器	丁烷槍		
(二) 藥品				
氯化鋁	氯化鐵	硫酸銅	氯化鈉	氯化鉀
氯化鋇	氯化鈣	氯化銨	超純水	甲苯
丙酮	正己烷	氫氣	氧氣	氮氣
氬氣	乙醇(絕對酒精)		空氣(80% N ₂ +20% O ₂)	
(三) 設備				
氬氬雷射光源	綠光雷射筆	電子天平	分光光度計	單眼相機
超音波洗淨儀	烘箱	真空抽氣機	腳架	恆溫水浴槽
油浴設備	石英製方形容器			
(四) 空間				
暗室				

分光光度計



超音波洗淨儀



綠光雷射筆($\lambda=532\text{nm}$)



氬氫雷射光源($\lambda=632.8\text{nm}$)



暗室



超純水層析儀



真空馬達



微量吸取器($20\mu\text{L}\sim 200\mu\text{L}$)



石英製方形容器



本次實驗所使用之超純水與氣體係國立宜蘭大學「空汙固廢·噪音實驗室」所提供，特此感謝宜蘭大學張章堂教授提供協助。根據該款超純水層析儀(UPS-100IVS)廠商提供之資料，該款儀器可生成總溶解固體 $\text{TDS}<0.03(\text{ppm})$ 的水。據此可判定該儀器

所製之超純水為無雜質。

肆、研究過程或方法：

一、文獻探討：

廷得耳效應(Tyndall effect)是一種判定膠體的方法。以一光束照射膠體溶液，其光束通過膠體溶液時會產生一條光路，產生此光路之現象便稱為廷得耳效應。由愛爾蘭科學家 John Tyndall 在 1871 年所發現，此效應是由光的散射作用所引起。根據瑞利散射，若粒子半徑小於入射光波長的十分之一時就會發生散射，而其散射光強度與入射光波長成 4 次方反比。因此，若膠體溶液的粒徑小於入射光波長，即可在入射光的垂直方向能看到一條發亮的光路，觀察到廷得耳效應。

$$I(\lambda)_{\text{scattering}} \propto \frac{I(\lambda)_{\text{incident}}}{\lambda^4}$$

膠體的定義除了上述提到有廷得耳效應之外，膠體溶液還必須是一個穩定的狀態，不會因為長時間的靜置而產生沉澱。

在大多數的書上並沒有探討水溶液是否為膠體，只有部分資料提到正三價的化合物屬於電雙層的膠體。那麼一、二價的離子水溶液是否屬於膠體溶液？書中大多歸類為真溶液，但卻能觀察到廷得耳效應，令人匪夷所思。

現今觀察廷得耳效應時，大多使用雷射光源。然而，根據英文版維基百科上的資料，雷射光是在 1960 年代問世，可知廷得耳當時並無雷射光的設備，因此當時所使用的光源之強度與現今所用應該有所差異，所以我們認為廷得耳效應應有再討論的空間。

在書上也看到有關於微粒在氣體中的凝滯現象，稱為「熱凝滯」，講的是當我們對氣體中的微粒加熱，這些微粒有可能因碰撞而結合，所以，我們也猜測，氣體分子在某種狀態下，應也會因這種熱凝滯的現象而形成分子團，當我們打入雷射光時，就可能產生光路。

二、初步觀察與提出假說：

是什麼原因使一價和二價化合物的水溶液會產生廷得耳效應？勢必有某種因素使離子變大了，以下是我們的猜想：以氯化鈉為例子，若要形成膠體，不可能是溶質間互相吸引聚集，最可能的原因是除了鈉離子原本周圍的數個水，外圍還有以較弱的吸引力吸引而來其他的水分子，形成較大的水合離子。

在同濃度不同陽離子的水溶液中，二價陽離子相對於一價陽離子有較多電荷，可能會吸引到較多水分子，所以我們推測二價陽離子溶液的透光度會比一價陽離子來的低。

在溶液中，濃度所代表的是溶質與溶劑的比例，低濃度平均每一單位的溶質所能分到的水分子較多，高濃度溶液的溶質分到的水分子較少，所以我們推測當濃度較低時，水合離子會比較大，透光度較低；當濃度較高時，水合離子會比較小，透光度會較高。

如果將水溶液提高溫度，使溶質粒子外之水分子脫離，水合離子就會變小，廷得耳效應就有可能會變弱，所以溶液從溫度低上升到溫度高，透光度可能會越來越高。

另外，在實驗進行時，若將光源改為綠光雷射，水以及所有水溶液均產生光路。根據瑞利散射公式：入射光波長與散射光強度成 4 次方反比。依此，我們將改變波長作為一操縱變因，並加入實驗之中。

在氣體的部分，考慮打入有機溶劑後經靜置一段時間後的試管，因試管內為真空，對試管加熱時，氣體的溫度升高，動能增加，碰撞的機會也增加，碰撞可能使數個分子形成分子團，而此時的動能仍足以支持這團分子團運動，故分子團不會散開。當我們打入雷射光，雷射光就被分子團散射而被我們看到。

三、實驗過程：

第一部分： 水溶液	固定溫度			改變溫度
	超純水	固定濃度、不同溶質	固定溶質、不同濃度	固定溶質、濃度
紅光、綠光雷射照射樣品並拍照	實驗一			
		實驗二		
			實驗三	
分光光度計測量透光度	以 20°C 超純水作為背景樣液	實驗四		實驗五

第二部分： 氣體	固定加熱方式與時間			改變加熱方式
	無色氣體	有機溶劑之蒸氣		
		改變種類	改變濃度	
紅光、綠光雷射照射樣品並拍照	實驗六	實驗七 (定性觀察)		
測量光路的持續時間		實驗八 (定量測量)	實驗九	實驗十

(一) **實驗一**：以不同光源觀察超純水是否會有廷得耳效應

1. 實驗目的：檢驗超純水是否無廷得耳效應，以確定後續實驗之溶劑亦不具有廷得耳效應。
2. 實驗設備：
 - (1). 氦氖雷射光源與綠光雷射筆
 - (2). 石英製方形容器

(3). 相機與腳架

3. 實驗步驟：

(1). 以超音波洗淨儀清洗石英製方形容器。

(2). 再用超純水清洗。

(3). 將超純水裝入已洗淨之水槽。

(4). 置入暗室之中，分別用氬氙雷射光源和綠光雷射筆照射。

(5). 將單眼相機固定在腳架上，在固定點拍攝數張照片。(註 1)

(二) **實驗二：以紅、綠雷射光觀察相同濃度下不同的化合物水溶液的廷得耳效應**

1. 實驗目的：觀察是否大部分水溶液中均有光路，以及廷得耳效應與陽離子價數的關係。

2. 實驗設備：同實驗一之設備與器材。

3. 實驗步驟：

(1). 同實驗一之方法洗淨器器材。

(2). 使用已洗淨之容量瓶，配製濃度 1M 之離子化合物（氯化鈉、氯化鉀、氯化鈣、氯化鋇、氯化鋁）水溶液。

(3). 將配置好之水溶液裝入已洗淨之石英製方形容器。

(4). 同實驗一之方法拍攝照片。

(三) **實驗三：以紅、綠雷射光照射不同濃度下化合物水溶液的廷得耳效應**

1. 實驗目的：觀察廷得耳效應光路與溶液濃度的關係，以及是否會因不同價數而對不同濃度之光路現象有所差異。

2. 實驗設備：同實驗一之設備與器材。

3. 實驗步驟：

(1). 同實驗一之方法洗淨器器材。

(2). 使用已洗淨之容量瓶，配製不同濃度之離子化合物（氯化鈉、氯化鉀、氯化鈣、氯化鋇、氯化鋁、氯化鐵 III）水溶液。

(3). 將配置好之水溶液裝入已洗淨之石英製方形水槽。

(4). 同實驗一之方法拍攝照片。

(四) **實驗四：以分光光度計測量在紅光與綠光波長下化合物水溶液的透光度**

1. 實驗目的：測量不同濃度與不同種類水溶液在紅光及綠光雷射波長下之透光度與廷得耳效應明顯程度之關係。

2. 實驗設備：分光光度計(註 2)、石英試管

3. 實驗步驟：

(1). 將預先配好之溶液，裝入洗淨之石英試管中

(2). 將另一裝有超純水之石英試管放入分光光度計中，並將光度計歸零。

(3). 再放入裝有待測液之石英試管，靜置一段時間待數值穩定後記錄。

(4). 此一動作連同歸零，重複三次。

(五) **實驗五：以分光光度計測量不同種溶液在不同溫度下的透光度**

1. 實驗目的：測量溫度變化對各種溶質的水溶液透光度的影響。
2. 實驗設備：恆溫水浴槽、分光光度計(註 2)、石英試管
3. 實驗步驟：
 - (1). 將配置完成的 1M 溶液（氯化鈉、氯化鉀、氯化鈣、氯化鋇）裝入洗淨之大試管中，再將試管放入恆溫水浴槽內。
 - (2). 調整溫度至 30°C，待其溫度平衡後再將溶液迅速取出，置入石英試管，並放進分光光度計測量透光度。
 - (3). 將溶液倒回大試管，等到溫度再次平衡，便取出同種溶液測量透光度。
 - (4). 將溶液倒回試管，洗淨石英試管後再測量下一種溶液。
 - (5). 依序調整溫度至 40°C、50°C、60°C、70°C、80°C，每一個溫度每一種溶液都測量三次。

(六) **實驗六：觀察與了解雷射光打入無色氣體所產生的現象**

1. 實驗目的：觀察不同無色氣體的光路現象。
2. 實驗設備：酒精燈、針頭、針筒、氬氦雷射、綠光雷射。
3. 實驗步驟：
 - (1). 將試管和試管塞洗淨並放入超音波震盪機，取出放入烘箱烘乾，烘乾後立即放入防潮箱。
 - (2). 將試管放到真空抽氣機的裝置上，一邊抽真空一邊用酒精燈加熱(去除試管內多餘水蒸氣)。
 - (3). 將試管抽真空後，用針筒將無色氣體（氫氣、氮氣、氧氣、氬氣、空氣 80%N₂+20%O₂）打入試管內。
 - (4). 在暗室中以雷射光照並觀察。
 - (5). 用丁烷槍加熱試管後，在暗室中以雷射光照並觀察。

(七) **實驗七：不同加熱後的有機溶劑的蒸氣和光路持續時間的關係**

1. 實驗目的：觀察不同有機溶劑的蒸氣的光路現象。
2. 實驗設備：同實驗六。
3. 實驗步驟：
 - (1). 同實驗五之方法洗淨器器材。用針筒將溶劑打入試管裡（打入試管後完全揮發，沒有溶劑殘留，即試管內的壓力小於飽和蒸氣壓）。
 - (2). 用丁烷槍加熱試管後，在暗室中以雷射光照並觀察。
 - (3). 同實驗六之方法記錄。

(八) **實驗八：不同溶液和光路持續時間的關係**

1. 實驗目的：探討分子作用力大小對光路的影響
2. 實驗器材：同實驗六。
3. 實驗步驟：

- (1). 使用微量吸取器吸取 0.1ml 的不同溶劑並用針筒打入已抽真空的試管中。
- (2). 用丁烷槍均勻加熱試管並固定加熱時間為 5 秒，加熱後靜置並記錄光路消失的時間(每十分鐘觀察一次)。

(九) **實驗九：試管中氣體濃度和光路持續時間的關係**

1. 實驗目的：探討試管中氣體濃度對光路的影響。
2. 實驗器材：同實驗五。
3. 實驗步驟：
 - (1). 使用微量吸取器吸取定量的溶劑並用針筒打入已抽真空的試管中。
 - (2). 用火焰槍均勻加熱試管並固定加熱時間為 5 秒，加熱後靜置並記錄光路消失的時間。

(十) **實驗十：加熱方式和光路產生的關係**

1. 實驗目的：探討氣體接收能量的方式對光路的影響。
2. 實驗器材：同實驗五。
3. 實驗步驟：
 - (1). 使用微量吸取器吸取定量的溶劑並用針筒打入已抽真空的試管中。
 - (2). 分別以水浴、油浴、丁烷槍加熱試管底部以及丁烷槍均勻加熱試管。

(十一) **實驗十一：探討光源強度與光路的關係**

1. 實驗目的：探討不同光源強度與光路的顯現是否有關。
2. 實驗器材：5mW、20mW 的綠光雷射筆。
3. 實驗步驟：
 - (1). 用丁烷槍加熱試管。
 - (2). 在試管中的氣體混合均勻後，以兩種強度的雷射光照並拍照。

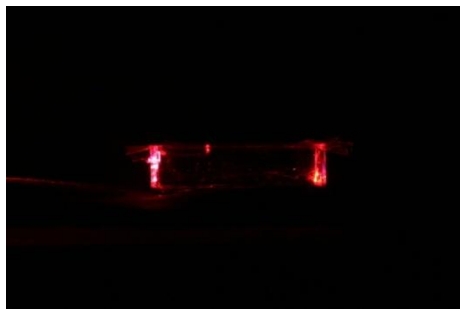
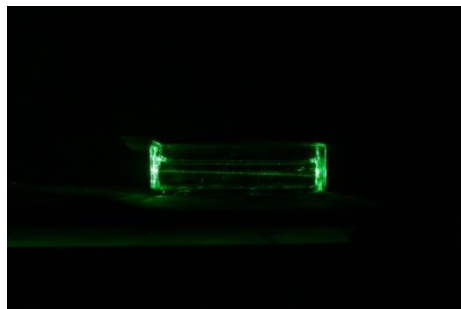
註 1：水溶液部分的照片均以單眼相機拍攝，光圈值 F/4 快門 2 秒 ISO 值 400。

註 2：受限於分光光度計機型之限制，該款分光光度計僅可測得溶劑與溶液之相對吸光度，我們所測量出來的結果是溶液與 20°C 超純水透光度的比值。

伍、研究結果：

一、實驗一：觀察超純水是否會有廷得耳效應出現

- (一) 實際照片與觀察：由圖可知，超純水在紅光照射下無廷得耳效應，綠光則會有微弱光路。

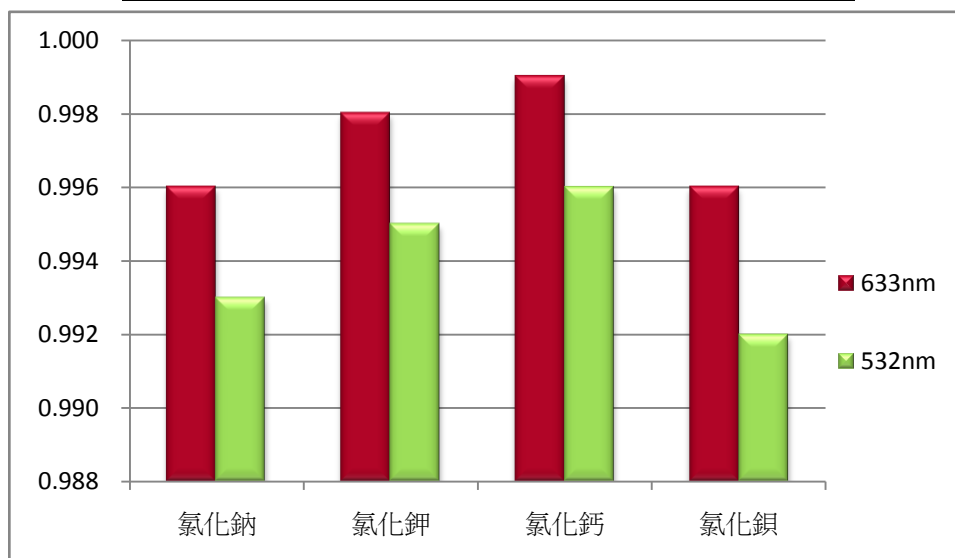
	紅光雷射	綠光雷射
超純水		

二、實驗二：以雷射光觀察相同濃度下不同的化合物水溶液的廷得耳效應
實驗結果以照片呈現，請見附錄。

三、實驗三：以雷射光照射不同濃度下化合物水溶液的廷得耳效應
實驗結果以照片呈現，請見附錄。

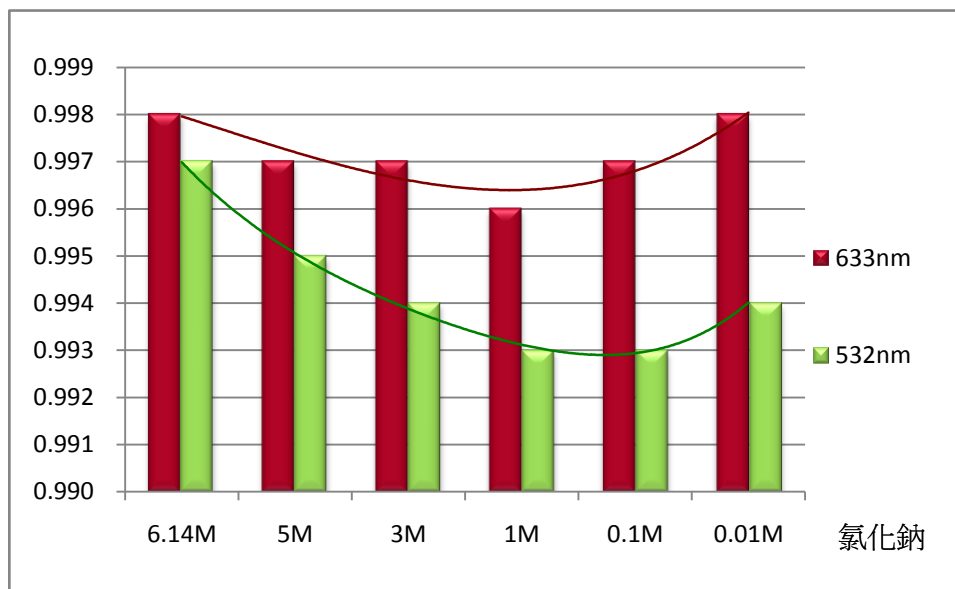
四、實驗四：以分光光度計觀察在紅光與綠光波長下化合物水溶液

1M	氯化鈉	氯化鉀	氯化鈣	氯化鋇
633nm	0.996	0.998	0.999	0.996
532nm	0.993	0.995	0.996	0.992



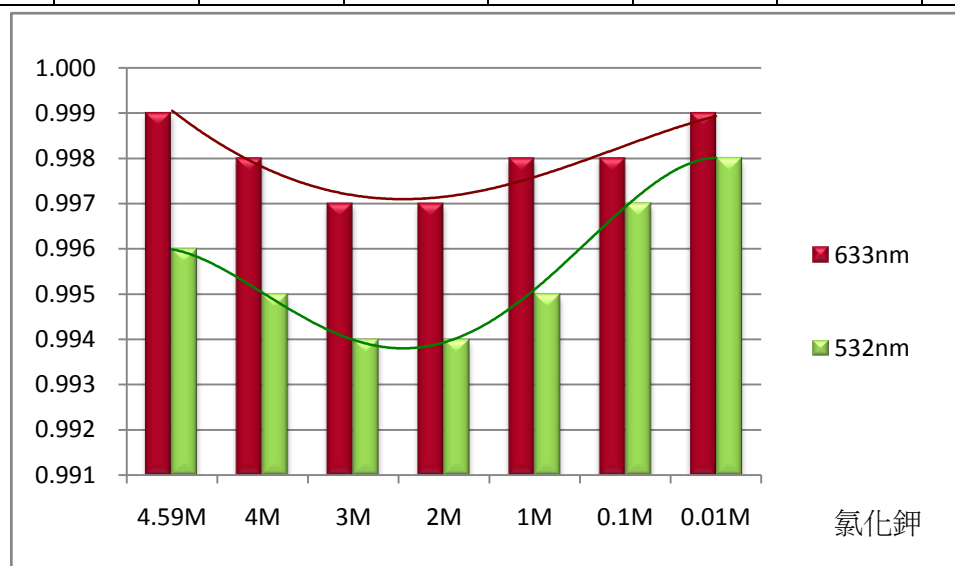
1M 各種溶液的透光度，無法由此圖看出明確的規律。

氯化鈉	飽和(約 6.14M)	5M	3M	1M	0.1M	0.01M
633nm	0.998	0.997	0.997	0.994	0.997	0.998
532nm	0.997	0.995	0.994	0.993	0.993	0.994



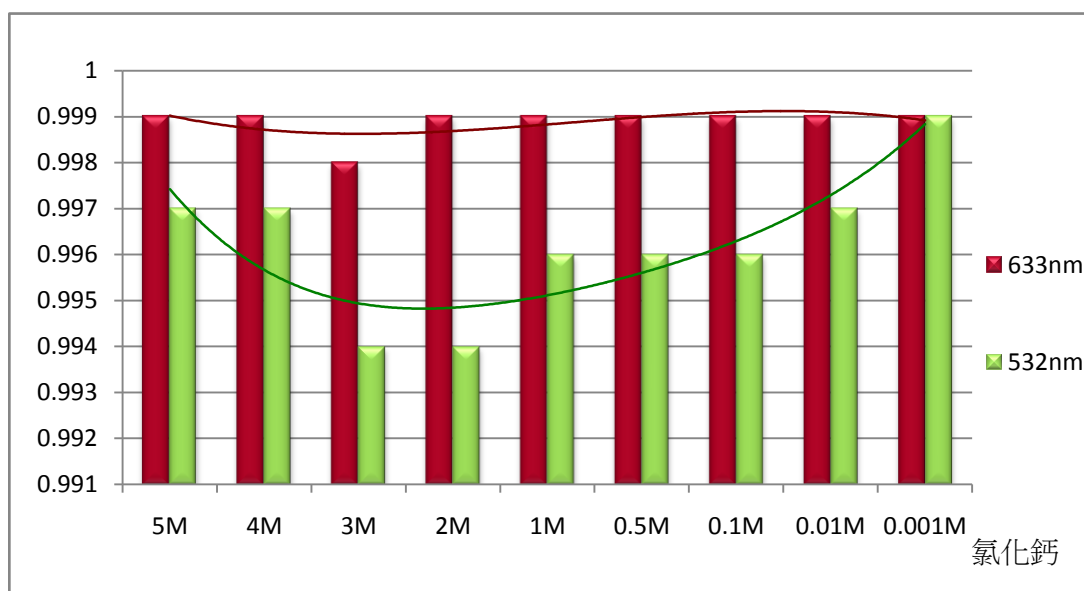
各種濃度的氯化鈉水溶液的透光度，約在 1M 與 0.1M 之間最低。

氯化鉀	飽和(約 4.59M)	4M	3M	2M	1M	0.1M	0.01M
633nm	0.999	0.998	0.997	0.997	0.998	0.998	0.999
532nm	0.996	0.995	0.994	0.994	0.995	0.997	0.998



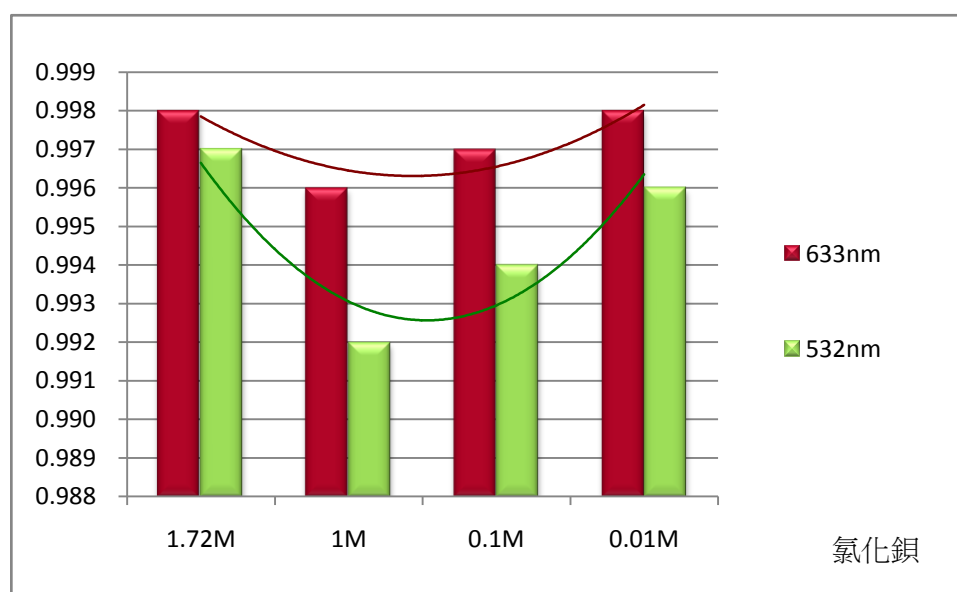
各種濃度的氯化鉀水溶液的透光度，約在 3M 與 2M 之間最低。

氯化鈣	飽和約 6.712M	5M	4M	3M	2M	1M	0.5M	0.1M	0.01M	0.001M
633nm	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
532nm	0.993	0.997	0.997	0.994	0.994	0.996	0.996	0.996	0.997	0.999



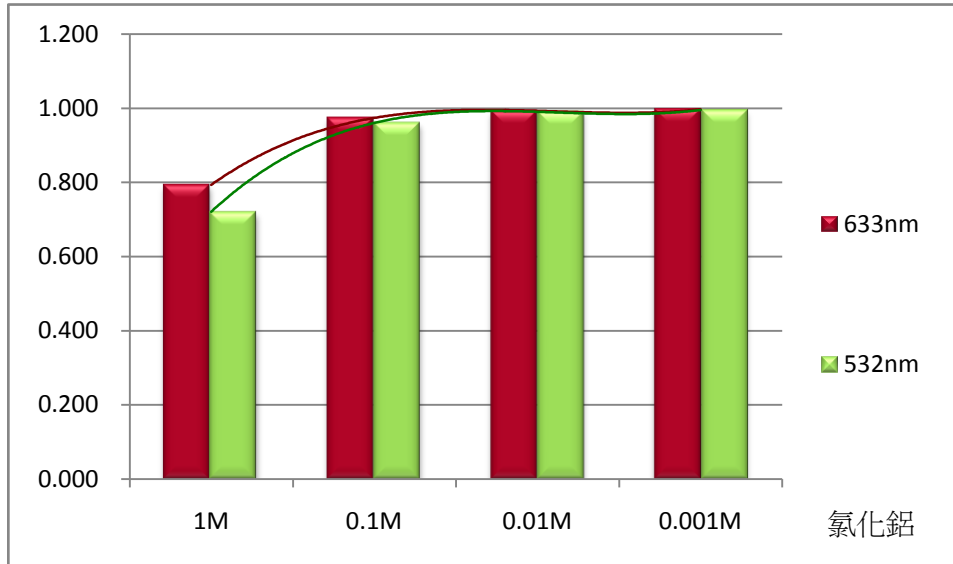
各種濃度的氯化鈣水溶液的透光度，約在 3M 與 2M 之間最低。

氯化鋇	飽和(約 1.72M)	1M	0.1M	0.01M
633nm	0.998	0.996	0.997	0.998
532nm	0.997	0.992	0.994	0.996



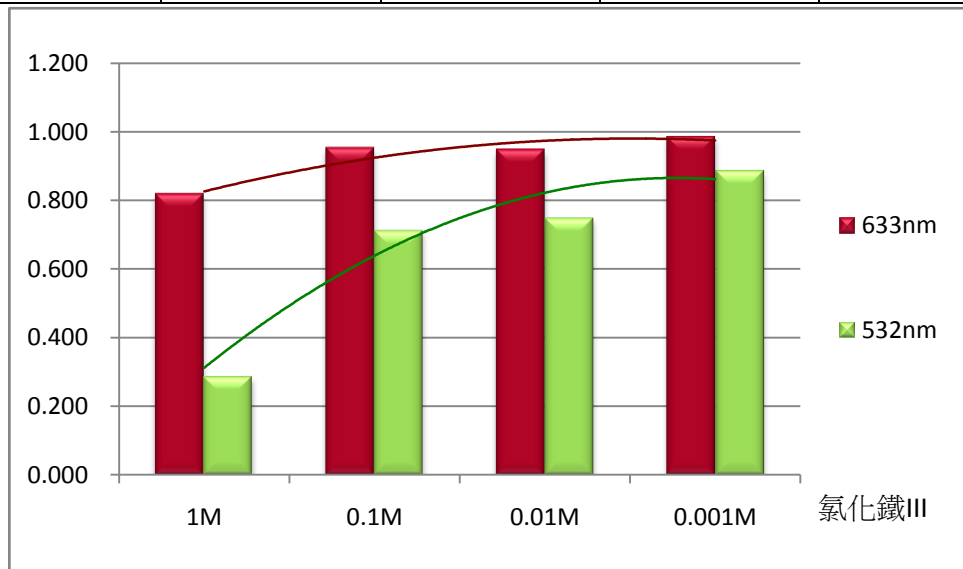
各種濃度的氯化鋇水溶液的透光度，約在 1M 最低。

氯化鋁	1M	0.1M	0.01M	0.001M
633nm	0.794	0.974	0.993	0.997
532nm	0.721	0.961	0.991	0.996



各種濃度的氯化鋁水溶液的透光度，濃度越高透光度越低。

氯化鐵	1M	0.1M	0.01M	0.001M
633nm	0.818	0.952	0.947	0.984
532nm	0.288	0.713	0.749	0.887

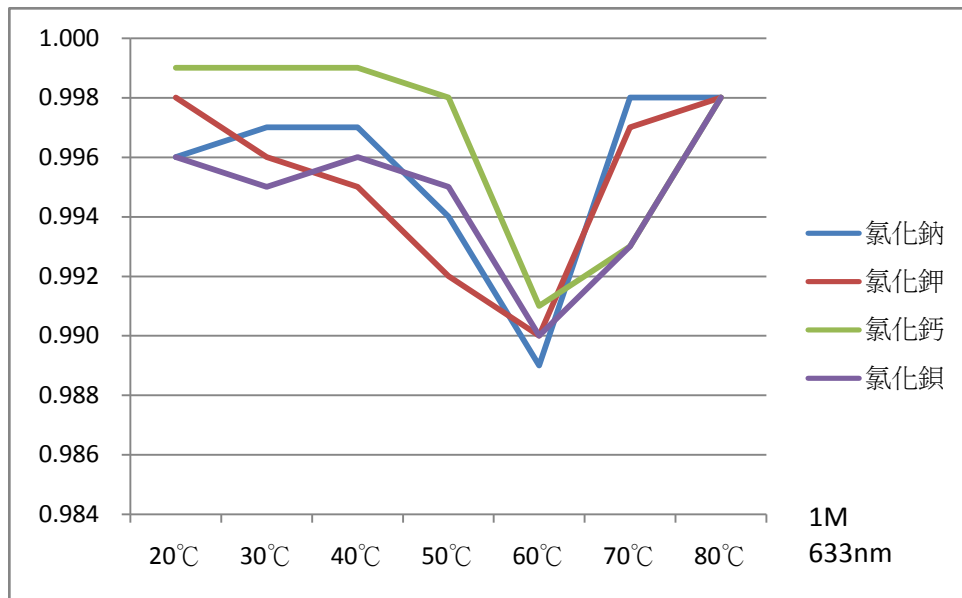


各種濃度的氯化鐵水溶液的透光度，濃度越高透光度越低。

五、實驗五：以分光光度計測量不同種溶液在不同溫度下的透光度

(一) 1M, $\lambda=633\text{nm}$

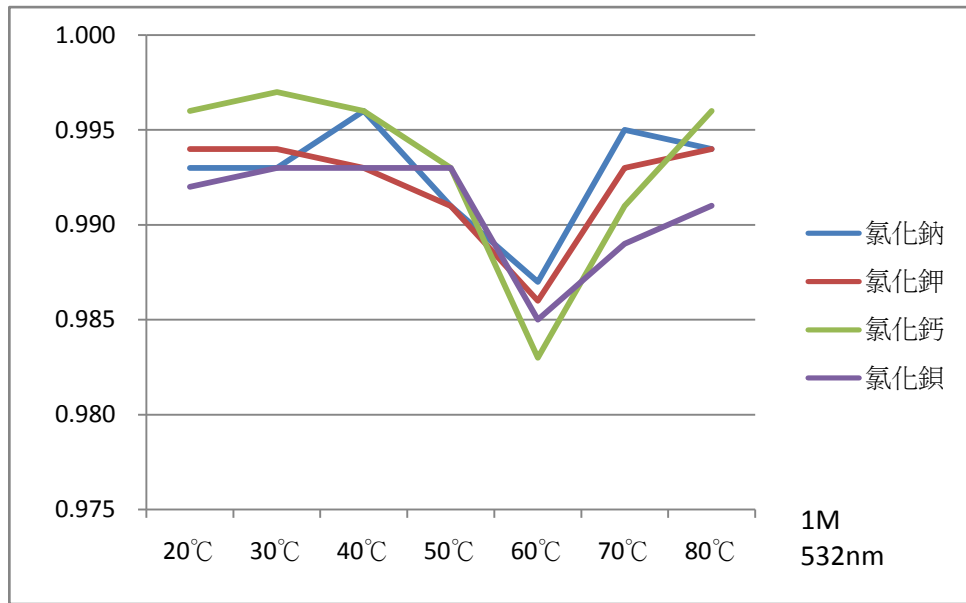
	氯化鈉	氯化鉀	氯化鈣	氯化鋇
20°C	0.996	0.998	0.999	0.996
30°C	0.997	0.996	0.999	0.995
40°C	0.997	0.995	0.999	0.996
50°C	0.994	0.992	0.998	0.995
60°C	0.989	0.990	0.991	0.990
70°C	0.998	0.997	0.993	0.993
80°C	0.998	0.998	0.998	0.998



由實驗結果，各溫度對透光度作圖，可發現在 20°C 至 50°C 的透光度較高；加熱至 60°C 時，透光度驟降，延得耳效應變強；溫度再往上提升，透光度也向上提升，延得耳效應變弱。與先前的推測不同。

(二) 1M, $\lambda=532\text{nm}$

	氯化鈉	氯化鉀	氯化鈣	氯化鋇
20°C	0.993	0.994	0.996	0.992
30°C	0.993	0.994	0.997	0.993
40°C	0.996	0.993	0.996	0.993
50°C	0.991	0.991	0.993	0.993
60°C	0.987	0.986	0.983	0.985
70°C	0.995	0.993	0.991	0.989
80°C	0.994	0.994	0.996	0.991



以綠光波長進行測量仍可得到紅光波長的類似結果：在 20°C 至 50°C 的透光度較高；加熱至 60°C，透光度最低；溫度再往上提升，透光度亦往上提升。


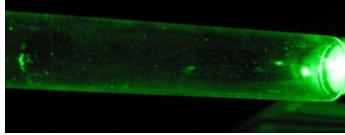
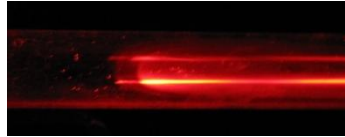
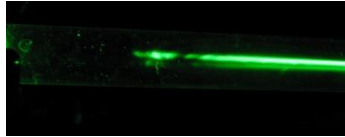
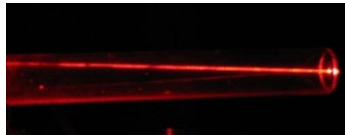
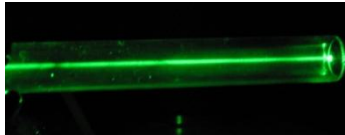
六、實驗六：觀察與了解雷射光打入無色氣體所產生的現象

無色氣體：



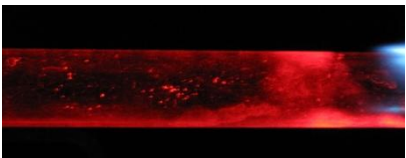
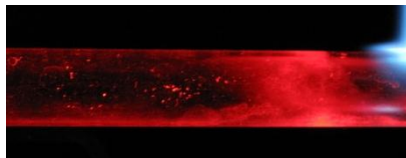
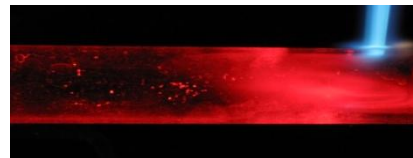

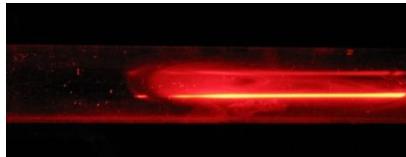

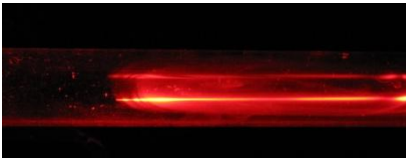
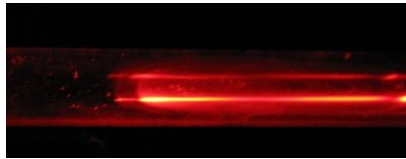
七、實驗七：觀察與了解雷射光打入易揮發之有機溶劑的蒸氣中所產生的現象

	氬氣雷射	綠光雷射
正己烷 加熱前		
加熱產生 白煙		
靜置後		

甲苯 加熱前		
加熱產生 白煙		
靜置後		

- (一) 將有機溶劑打入試管裡，此時用雷射筆照即可看到一條淡淡的光路，但靜置一陣子後即消失。
- (二) 在室溫下用雷射筆照是看不見光路的。
- (三) 用丁烷槍加熱試管，一開始可見試管中有一陣白煙由加熱處往上飄，此時用雷射筆照，只有有煙的地方看的見光路。
- (四) 再靜置一段時間，用雷射筆照可發現已可看見整條均勻光路，且整條光路沒有斷點。
- (五) 再靜置許久試管中的光路才會消失
- (六) 若再以同一試管重複實驗二步驟，會得到相同結果。

加熱過程連續圖：

第 1 秒	第 2.5 秒	第 4 秒
		
第 5.5 秒	第 7 秒	第 8.5 秒
		
第 10 秒	第 11.5 秒	
		

- (七) 上面八張連續照片，是以丁烷槍加熱甲苯所產生的光路。若將另外三種物質（乙醇、丙酮、正己烷）的蒸氣以同樣的方式加熱後，都會有類似

現象。

(八) 圖中藍色的部分是丁烷槍的火焰，固定加熱試管的右端大約 4~5 秒的時間即可看到白煙（註 3），光源是波長 632.8nm 的氦氖雷射光由右向左射入。加熱結束後，在加熱位置附近的白煙慢慢的向左邊擴散。

註 3：溫度提高，壓力變大，故本實驗操作時，加熱時間不超過十秒，以免壓力過大造成危險。

八、實驗八：不同有機溶劑蒸氣和光路持續時間的關係

光源	正己烷 0.1mL		甲苯 0.1mL		丙酮 0.1mL		乙醇 0.1 mL	
	綠光	紅光	綠光	紅光	綠光	紅光	綠光	紅光
10 分鐘	光路	光路	光路	光路	光路	光路	淡光路	淡光路
40 分鐘	光路	光路	淡光路	淡光路	光路	光路	接近消失	接近消失
60 分鐘	淡光路	淡光路	淡光路	接近消失	光路	淡光路	光路消失	光路消失
80 分鐘	淡光路	接近消失	接近消失	接近消失	光路	淡光路		
100 分鐘	接近消失	接近消失	接近消失	接近消失	光路	接近消失		
145 分鐘	接近消失	接近消失	光路消失	光路消失	淡光路	接近消失		
175 分鐘	接近消失	光路消失			淡光路	接近消失		
240 分鐘	接近消失				接近消失	接近消失		
310 分鐘	光路消失				接近消失	光路消失		
360 分鐘					接近消失			
410 分鐘					光路消失			
時間長度	5 時 10 分	2 時 55 分	2 時 25 分	≈2 小時	6 時 50 分	≈4 時 30 分	1 小時	<1 小時

光路持續時間：乙醇 < 甲苯 < 正己烷 < 丙酮。

九、實驗九：試管中溶劑蒸氣濃度和光路持續時間的關係

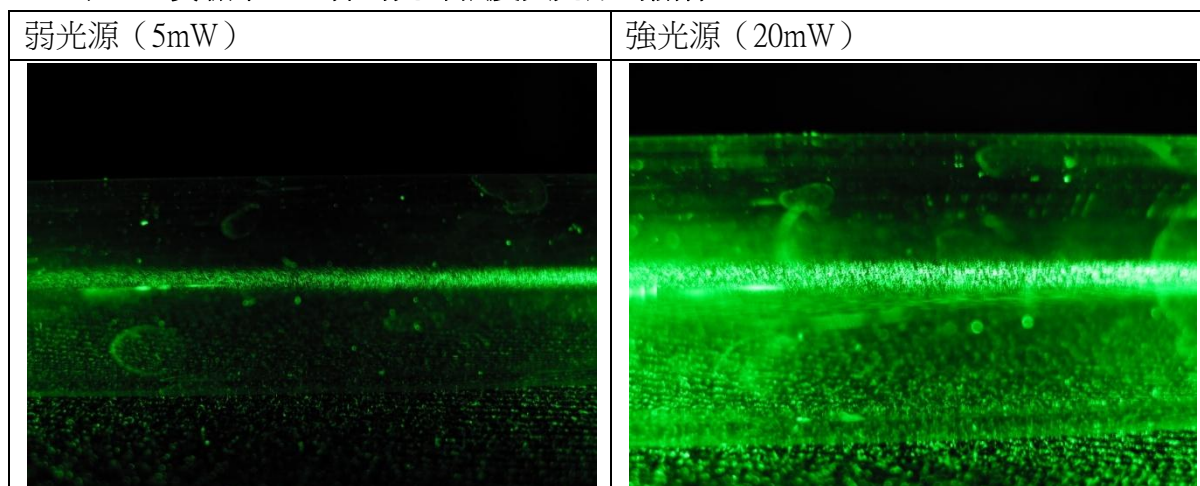
	丙酮 0.1mL	丙酮 0.05mL	丙酮 0.02mL
40 分鐘	光路	光路	光路
65 分鐘	光路	光路	光路
85 分鐘	光路	光路	光路
100 分鐘	光路	光路	光路
150 分鐘	淡光路	淡光路	光路
190 分鐘	淡光路	淡光路	淡光路
250 分鐘	接近消失	接近消失	淡光路
310 分鐘	接近消失	接近消失	淡光路
365 分鐘	接近消失	接近消失	接近消失

由上面的結果可以知道，試管中蒸氣濃度越小，光路持續時間越長。

十、實驗十：加熱方式和光路產生的關係

- (一) 水浴：溫度 95°C，無法產生光路
- (二) 油浴：溫度 150°C，無法產生光路
- (三) 用丁烷槍加熱底部：白煙由底部產生，光路由底部出現
- (四) 用丁烷槍均勻加熱：整支試管都有光路

十一、實驗十一：探討光源強度與光路的關係



陸、討論：

一、液體部分：

- (一) 就溶劑而言，用來做為溶劑的超純水在紅光雷射照射下並不會有廷得耳效應。可確定以下幾點：
 1. 後續實驗使用之溶劑在紅光下不具有廷得耳效應。
 2. 光源照射的波長與強度可能與光路的產生有關，所以廷得耳效應應該加上在特定的光源照射下為前提較為嚴謹。
- (二) 改變不同陽離子，並觀察相同濃度(1M)下之光路。
 1. 發現三價離子(Al^{3+} 、 Fe^{3+})水溶液之光路較其他一、二價之離子明顯。
 2. 比較相同濃度之一價與二價金屬離子水溶液的廷得耳效應強弱，可發現鉀離子的透光度高於鈉離子，。
 3. 鉀離子與鈉離子的關係可用電荷密度來說明，陽離子的電荷密度越大，該種陽離子所能吸引到的水分子越多，水合離子就會較大，透光度就可能會較低。而鈣離子與鋇離子可能因為和二氧化碳溶於水中形成的碳酸根沉澱，所以對實驗結果造成誤差。

$$\text{電荷密度} \propto \frac{\text{電荷}}{\text{離子半徑}}$$

	半徑	電荷密度		半徑	電荷密度
鈉離子	102pm	$\frac{1}{102}$	鈣離子	100pm	$\frac{2}{100} = \frac{1}{50}$
鉀離子	138pm	$\frac{1}{138}$	鉍離子	135pm	$\frac{2}{135} = \frac{1}{57.5}$

(三) 比較相同溶質不同濃度的趨勢。

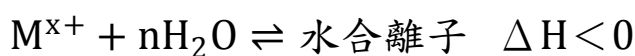
1. 由溶液的透光度和攝影結果可以看出：不管是氦氖雷射還是綠光雷射筆照射，當溶液的透光度越低，則該溶液之光路越明顯，其趨勢大致相同。
2. 比較相同溶質不同濃度的趨勢，可以看出一價與二價的陽離子水溶液有其廷得耳效應較強的濃度。就趨勢來看，各種溶質廷得耳效應較強的濃度落點不盡相同，如：氯化鈉在 1M 到 0.1M 較強、氯化鉀在 3M 到 2M 較強、氯化鈣約在 3M 到 2M 較強、氯化鉍在 1M 較強，透光度與濃度作圖會得到 U 型趨勢；而氯化鋁及氯化鐵 III 因為在水溶液狀態下會形成看起來濁濁的膠體，所以濃度越高透光度越低。
3. 這項結果與預期的想法不同，所以我們修正了推測，含一價與二價的陽離子的水溶液會有 U 型趨勢的原因可能是：
 - (1). 溶液在低濃度時，每一個離子所能吸引到的水分子都達到最大量，但是離子形成的水合離子很少，對入射光線的影響較小，透光度較高。
 - (2). 當溶液濃度到達某一個程度時，離子的數目剛好使得每個離子吸引到的水分子也是最大量，而且水合離子數量比低濃度還多，對入射光線的影響較大，透光度因而降低。
 - (3). 若溶液濃度再高一些，由於離子數目非常多，每個離子所分到能吸引的水分子變少，水合離子較小，影響透光度的程度較小，故透光度上升。

(四) 比較不同波長的光源。

1. 在同一溶質、同一濃度的情況下，氦氖雷射的廷得耳效應強度均比綠光雷射還要弱。如此的現象符合瑞利散射：入射光的波長越短，其散射光強度就會越強。也印證了攝影的結果，以綠光照射的溶液看起來廷得耳效應越顯著。

(五) 比較同樣濃度下各種溶液在不同溫度下的透光度。

1. 由熱混凝、水合放熱與勒莎特列原理來推測。



透光度在 60°C 驟降的可能原因：水溶液的溫度由 20°C 上升至 50°C，動能上升產生類似氣體的熱混凝現象，水合離子會聚集越來越多水分子，使透光度降低。60°C 時熱混凝現象達到最大量。溫度再上

升，促使水合離子邊的水分子漸漸地脫離離子的吸引力，水合離子變小，透光度上升。

2. 另由水合離子通過光束的頻率、水合放熱與勒莎特列原理來看，要形成水合離子必是放熱反應（水合能），但是由上式看出，溫度上升平衡向左，水合離子會變小，但運動速度變快。於是推測：20°C 上升至 50°C，水合離子變小，移動速率變快，但此時的水合離子仍會散射入射光束，故水合離子經過入射光束的頻率提高，透光度下降；60°C 時，由於水合離子持續變小與其通過光束的頻率持續升高的交互作用使透光度達最低；超過 60°C 時，因溫度上升使水合離子變得太小，即使頻率增高仍無法產生散射，透光度因而上升。

二、氣體部分：

（一） 加熱有機溶劑的蒸氣。

1. 剛將溶劑打入試管產生光路，原因可能是較先打入的溶劑揮發成蒸氣，而較後打入的溶劑小液滴漂浮在溶劑蒸氣中所造成。
2. 將雷射光打入靜置後的試管無法產生光路，可知有機溶劑的蒸氣分子在室溫下用雷射筆照無法產生散射。
3. 在加熱初期產生白煙可能是因為氣體的熱導率很小，加熱使得該處之蒸氣分子溫度較高、壓力較大，在一短時間中分子間的距離變小，而凝結成小液滴（即我們所見之白煙）。
4. 加熱經靜置後，用雷射光打入試管可看見一明顯的光路，可推測此現象應和加熱擾動試管中的氣體有關，且此現象有時效性。
5. 重複操作實驗都會有一樣結果，可知此現象有可重複性。

（二） 不同有機溶劑蒸氣和光路持續時間的關係。

分子團的大小受到分子間作用力影響，例如乙醇有氫鍵，分子間吸引力較大，產生的分子團應較大，需較大之動能才能支持分子團運動，故光路持續時間較短。不過也因分子團較大，散射的光也比較明顯。

（三） 試管中溶劑蒸氣濃度和光路持續時間的關係。

在同樣的溶劑中，打入溶劑的濃度 \propto 莫耳數 \propto 分子數，所以分子數越少，給予相同的能量能支持分子團運動越久，故光路持續時間較長。

（四） 加熱方式和光路產生的關係。

不同的加熱方法也會影響是否產生光路，造成此現象的原因可能是：若我們緩慢、均勻的給予氣體能量，氣體受熱均勻，分子動能也均勻增加。且因各自具有的動能相近，當分子相互碰撞時會彈開而無法形成分子團。但若我們快速的給予氣體能量，氣體受熱不均勻，分子相互碰撞時，動能較大之分子碰撞動能較小的分子，會帶動其一起運動而形成分子團。

（五） 由以上五個實驗，似乎能串連起來以下幾點：

1. 快速的給予試管中氣體能量，在氣體分子還來不及做整管的熱對流前，受熱處附近的壓力突然大幅上升，使得附近的氣體分子凝結成

小水滴狀的液珠，即我們所見之白煙，而加熱後降至室溫，液珠又將揮發為蒸氣（原本試管中的蒸汽壓低於飽和蒸汽壓），但因分子間作用力，液珠不會全部分散而形成較小之分子團，而其他未加熱的區域，則和這些小分子團碰撞，但分子團的質量較大，能量也較大，故碰撞後氣體分子會和小分子團暫時結合。

2. 由實驗六和七，無色氣體（氮氣等）和有機溶劑蒸氣最大的差別就在於分子間作用力，無色氣體的分子間作用力極小，故加熱時連白煙都不會產生，更不用提產生光路了，而有機溶劑蒸氣分子間作用力大，的確較有可能形成分子團。
3. 延續實驗七的概念，在實驗八中測得光路持續的時間（分子團結合的時間）和試管內蒸氣濃度成負相關，我們給予氣體相同的能量，濃度越高每個分子團所接受能量就越小，當然持續時間就下降。

三、比較不同光源強度與光路的顯現是否有關

由上面的十個實驗，知道以我們所用之光源（紅光、綠光）可以區分出各種狀態下的相對粒子大小，然而我們使用的光源強度不同，分別為紅光 2mW 與綠光 20mW，因此藉由實驗十一比較不同光源強度與光路的顯現是否有關。

- （一）由實驗結果得知，使用 5mW 的綠光雷射產生的光路較 20mW 的綠光雷射的弱。由此可知，相同波長的光源，發光功率越大，廷得耳效應越明顯。
- （二）光源強度確實是會影響到光路的明顯度，甚至會影響到光路是否會被看見。就我們先前所使用的光源來說：紅光散射比綠光弱且紅光強度也比綠光弱，比實驗十一使用不同強度的綠光雷射歧異度更大，因此使用不同強度的紅光和綠光光源能夠區分出相對粒子大小就更為合理了。

柒、結論：

- 一、水溶液中的溶質離子形成水合離子，水合離子會因為溶液濃度與溫度的不同而影響到廷得耳效應。由濃度的實驗得知，廷得耳效應的強弱受(1)水合離子大小與(2)水合離子數這兩項因素共同影響。各種含 IA^+ 、 IIA^{2+} 陽離子水溶液濃度和溫度對透光度作圖皆呈 U 型趨勢。
- 二、就氣體中的光路現象，可視之為氣體在試管中的熱凝現象所造成，光路持續時間與給予能量呈正相關，與氣體濃度及分子間作用力呈反相關。即此時氣體分子越容易持久在試管中形成可散射光線的小分子團。
- 三、光源強度會影響到光路的明顯度，甚至是影響到光路是否會被看見。強度越強，廷得耳效應也就越強。可利用不同波長產生散射光的差異以及光源強度差區分出粒子的相對大小。
- 四、從實驗結果得知，我們可以利用弱紅光雷射的廷得耳效應，區隔離子化合物水溶液及超純水的粒子大小，即在弱紅光照射下純水無廷得耳效應，離子化合物水溶液則存在廷得耳效應。使用較強的綠光雷射則能鑑別純水水合離子與無色氣體的粒子，即在強的綠光照射下無色氣體無廷得耳效應，純水則存

在廷得耳效應。

五、原則上每個定律都有其歷史及科學背景。廷得耳提出理論的年代，在雷射光發明之前，而實驗結果發現只要一般光源就可以區隔真溶液及膠體溶液，故課本以廷得耳效應區別真溶液及膠體溶液時使用之光源應該說明清楚波長及發光功率，可見廷得耳效應還需有更嚴謹的定義。

捌、參考資料及其他：

一、參考資料：

- (一) 第四十六屆中小學科學展覽會高中組化學科，少年廷得耳的煩惱……真溶液的廷得耳效應，管皓
- (二) 物理化學（初版），杜逸虹著，民 89，台北市，三民書局
- (三) 化學（上），楊寶旺等著，民 90，台北縣，龍騰文化
- (四) 微粒導論，Parcker C. Reist 著，鄭福田、劉希平譯，2001 年初版，台北市，國立編譯館
- (五) 實用儀器分析，王明光等著，2003 年 6 月 10 日初版，台北市，合記書局
- (六) 維基百科，<http://zh.wikipedia.org/wiki/廷得耳效應>，2009/4/2，
http://en.wikipedia.org/wiki/Tyndall_effect，2009/4/2，
http://en.wikipedia.org/wiki/John_Tyndall，2009/4/2，
http://en.wikipedia.org/wiki/ionic_radius，2009/4/16。
- (七) Silver Lighting，<http://silver-lightning.com/tyndall/>，2009/4/2。
- (八) Blue Sky and Rayleigh Scattering，
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>，2009/9/30。

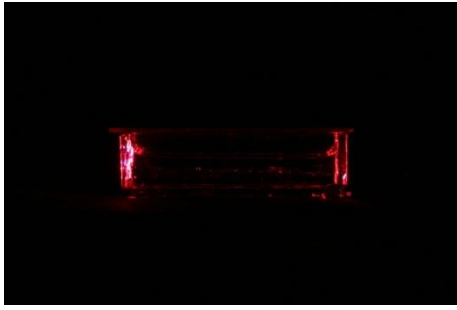
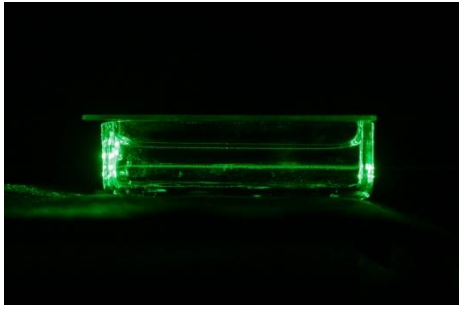
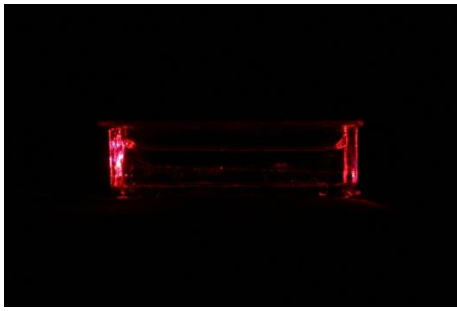
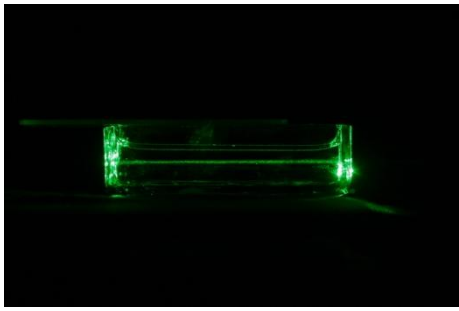
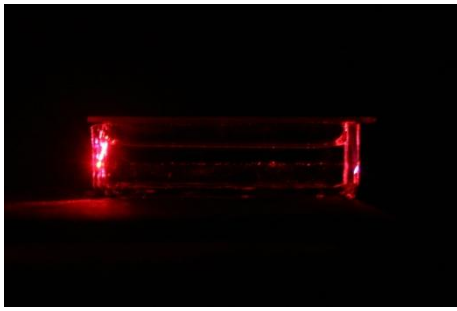
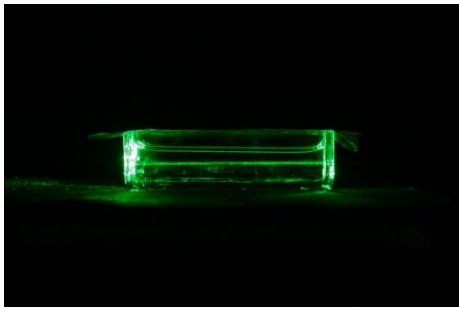
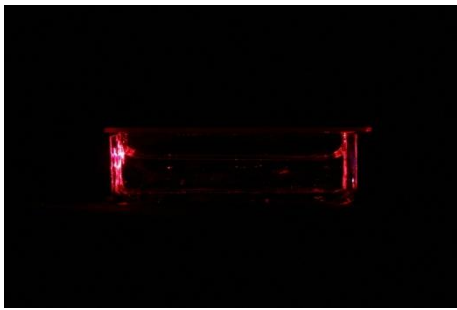
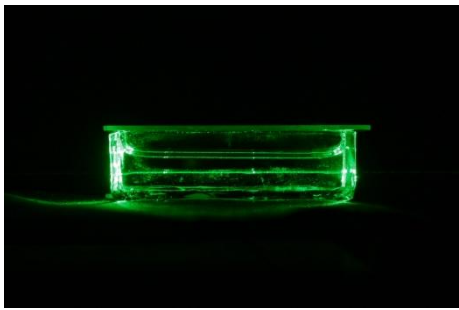
二、未來展望：

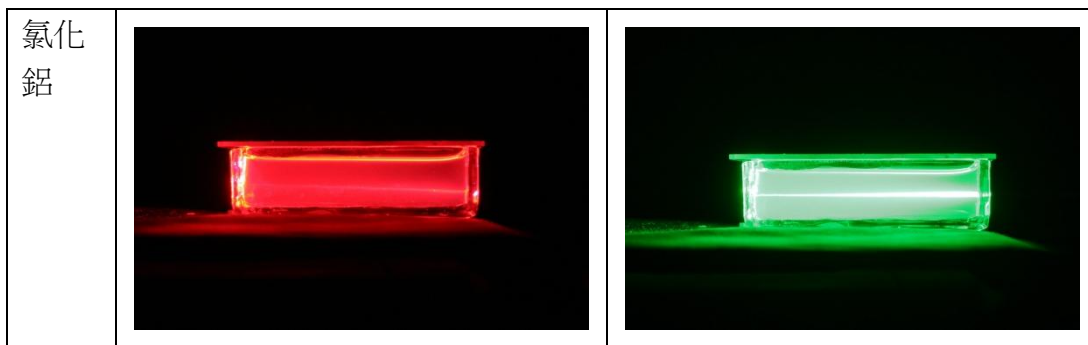
這一系列的實驗說明了廷得耳效應的顯現其實是與入射光的強度有關係，希望能夠開啟後續的相關研究，更進一步分析光路和粒子實際大小的關係，而使廷得耳效應可以做為一種偵測流體中粒子大小的簡單方法。

附錄

實驗二：以雷射光觀察相同濃度下不同的化合物水溶液的廷得耳效應


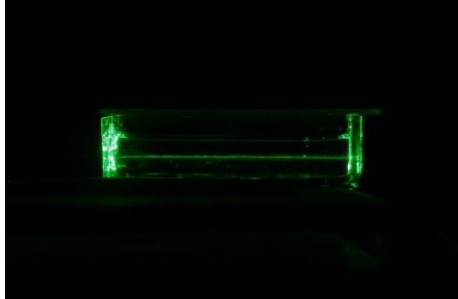

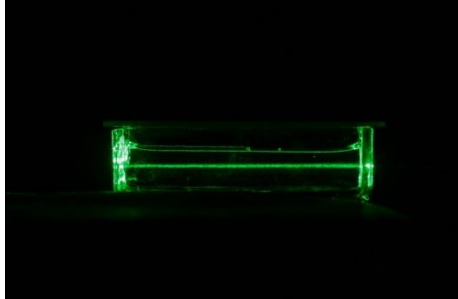
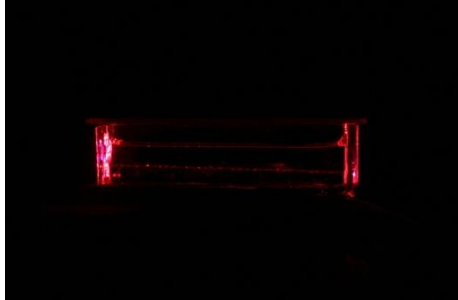
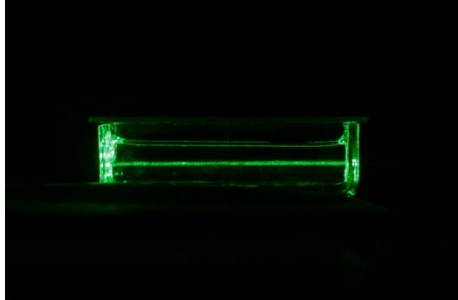
濃度為1M時，不同溶質的透光度：由圖可知，鈉離子的廷得耳效應比鉀離子明顯；而鋇離子的廷得耳效應比鈣離子明顯；氯化鋁則是有非常明顯的光路。

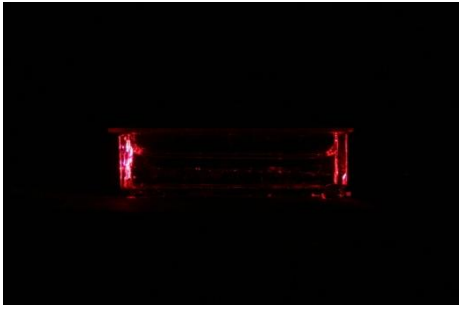
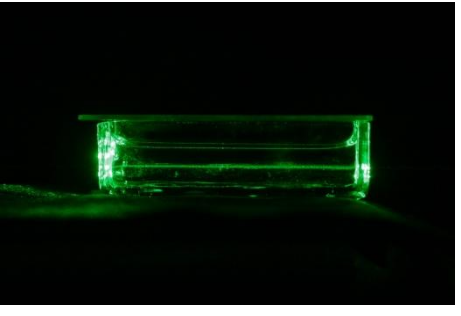
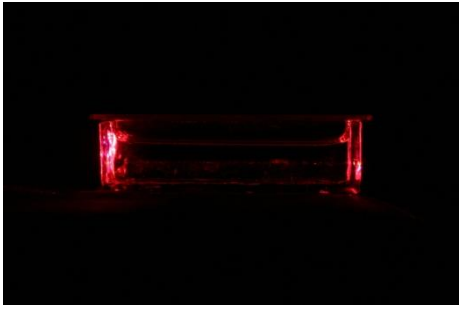
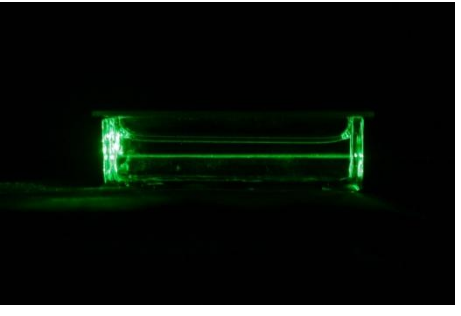

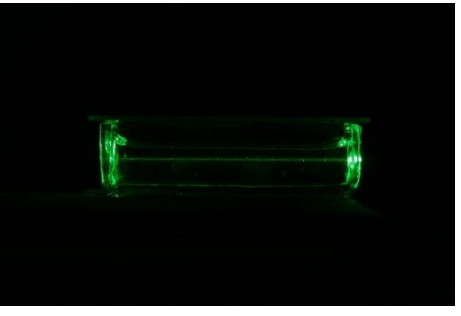
溶質	紅光雷射	綠光雷射
氯化鈉		
氯化鉀		
氯化鈣		
氯化鋇		



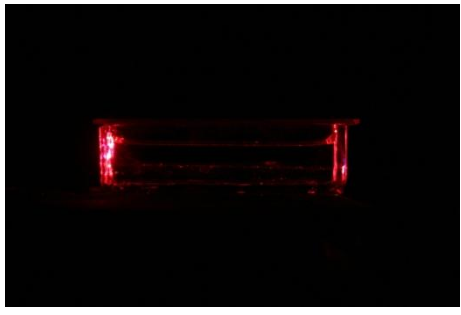
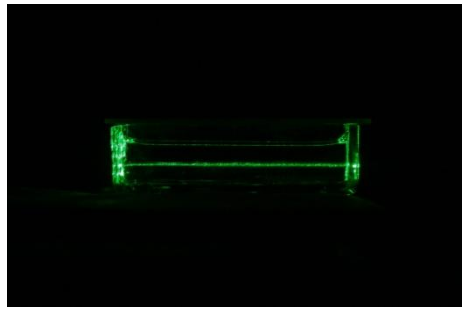
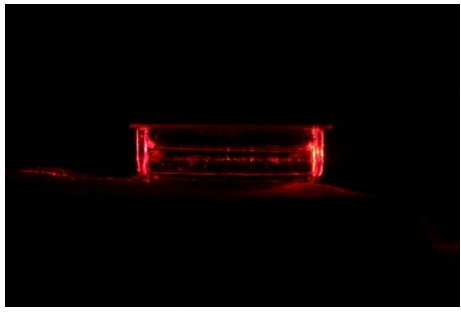
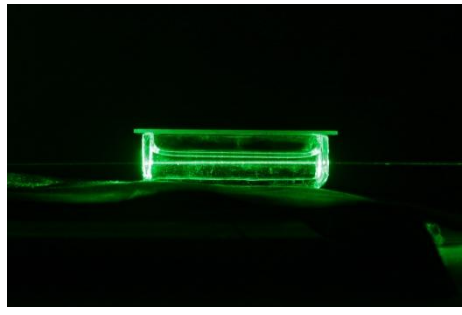
實驗三：以雷射光照射不同濃度下化合物水溶液的廷得耳效應

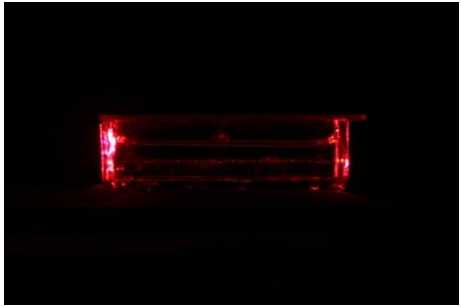
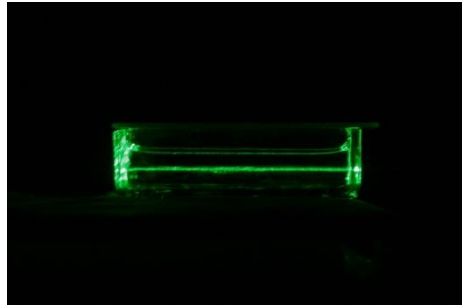
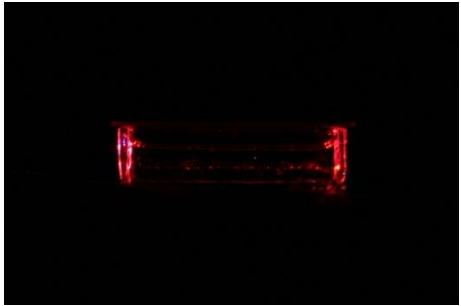
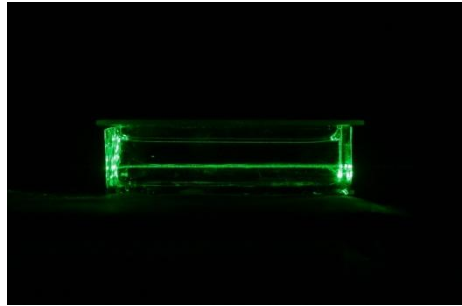
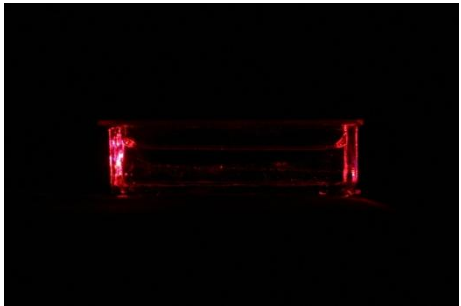
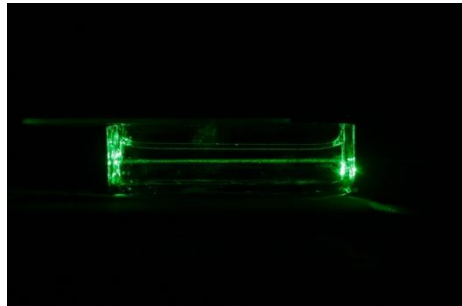
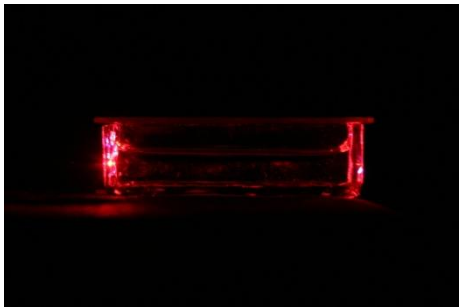
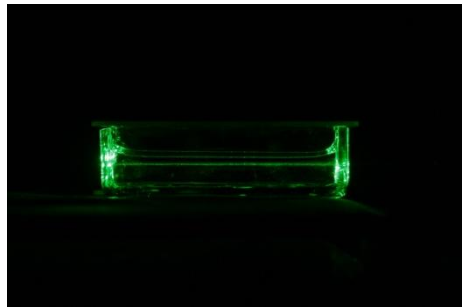
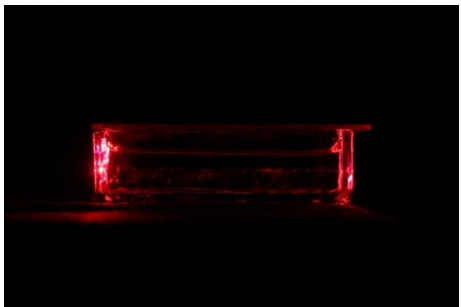
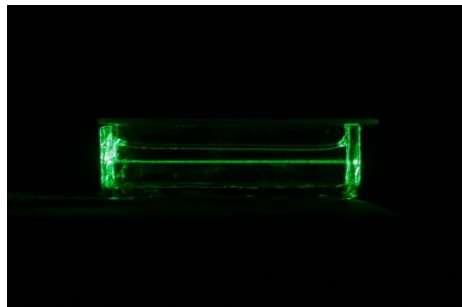
(一) 氯化鈉：由圖可知，紅光照射時 3M 水溶液較為明顯，綠光照射時 1M 與 0.1M 水溶液較為明顯。

	紅光	綠光
飽和		
5M		
3M		

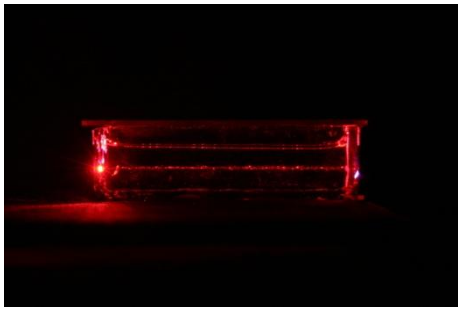
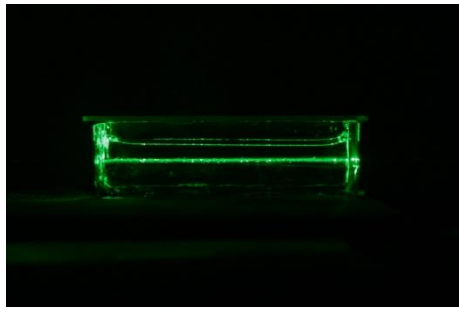
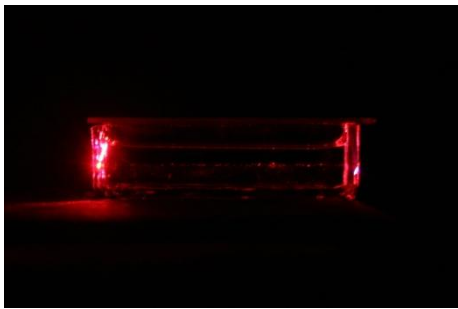
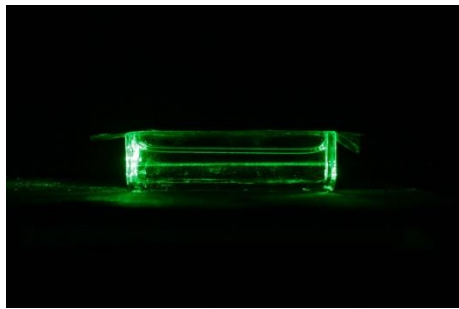
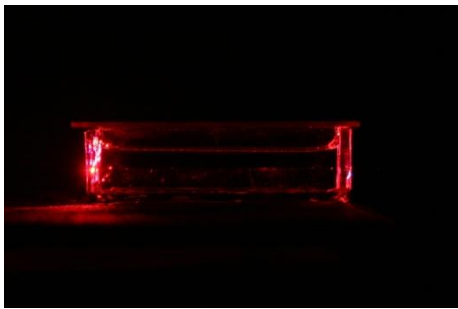
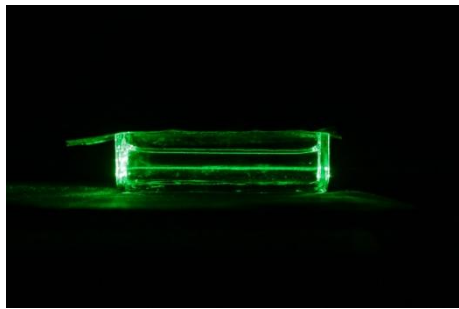
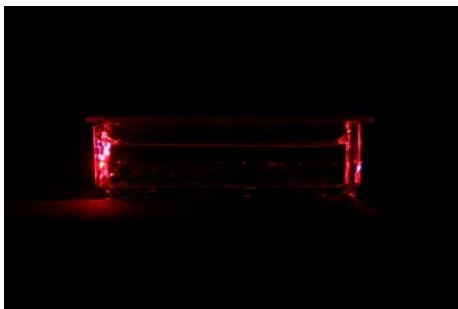
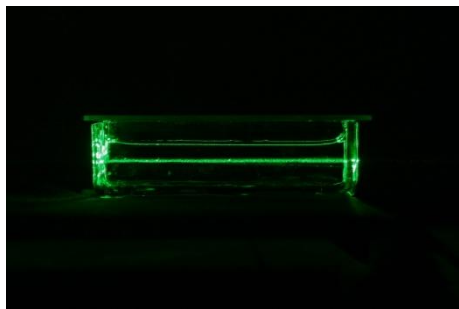

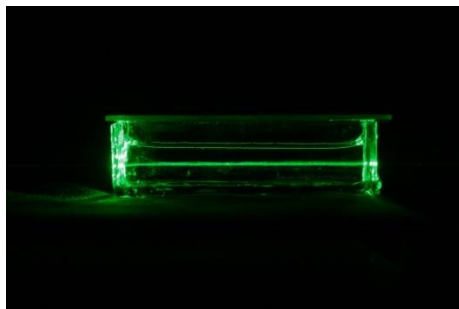
1M		
0.1M		
0.01M		

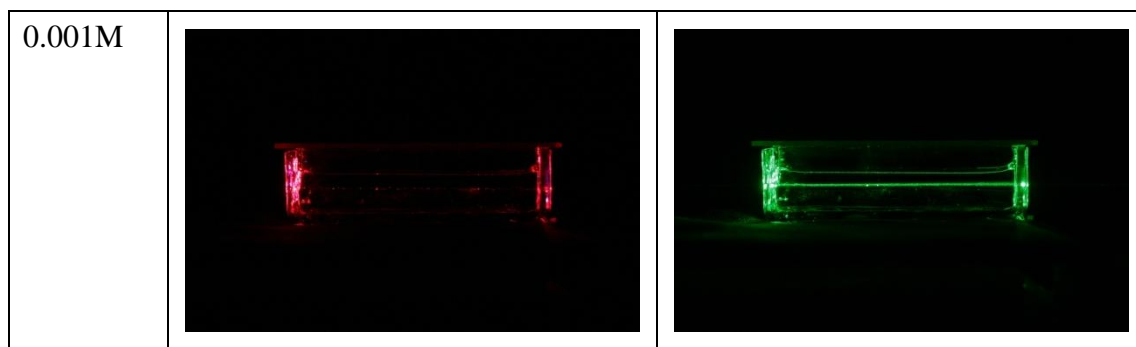
(二) 氯化鉀：由圖可知，紅光照射時 3M 水溶液較為明顯，綠光照射時 3M 與 4M 水溶液較為明顯

	紅光	綠光
飽和		
4M		

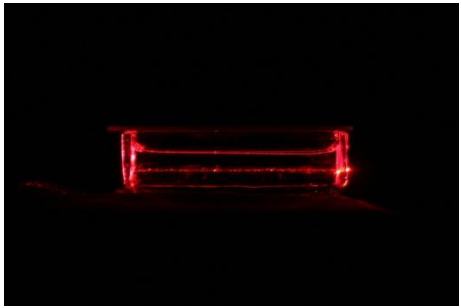
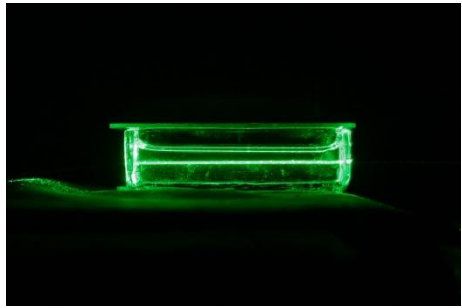
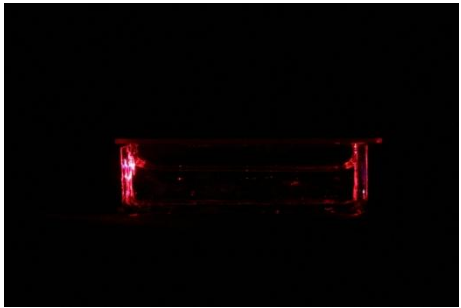
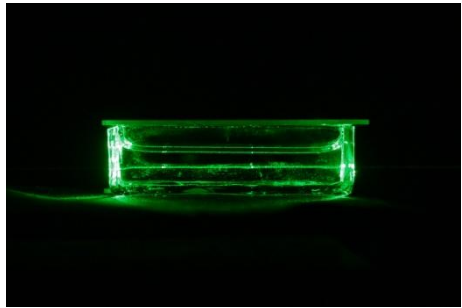
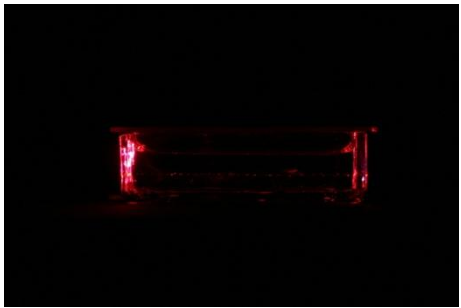
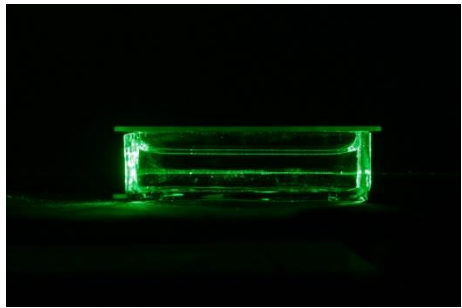
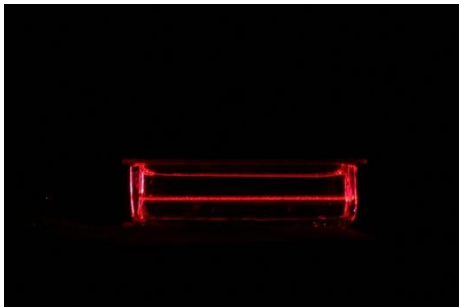
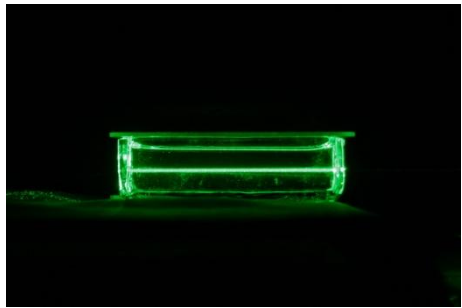
3M		
2M		
1M		
0.1M		
0.01M		

(三) 氯化鈣：由圖可知，紅光照射時飽和水溶液較為明顯，綠光照射時 0.1M 水溶液較為明顯。

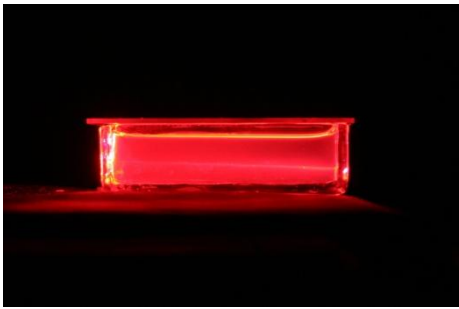
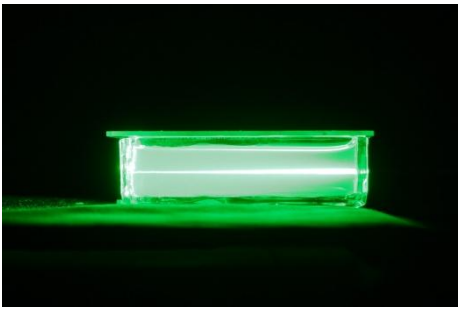
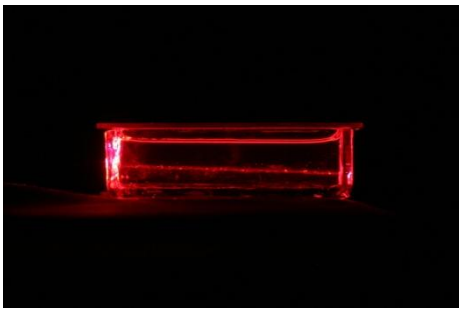
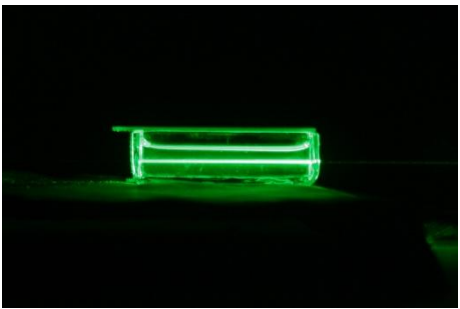
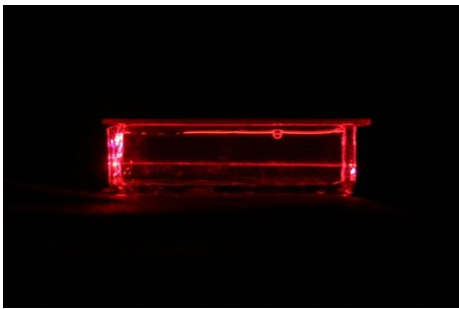
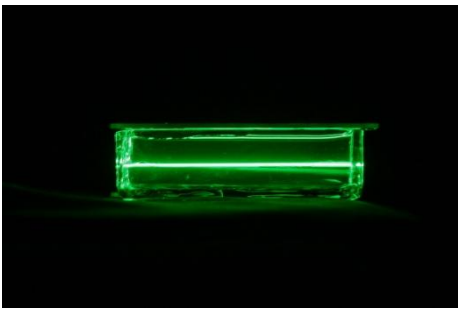
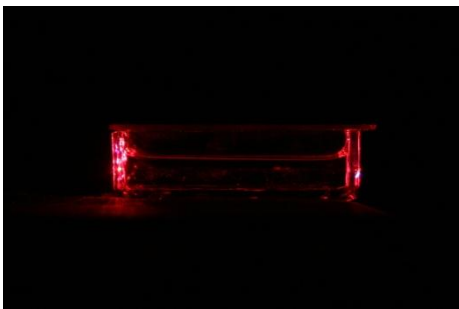
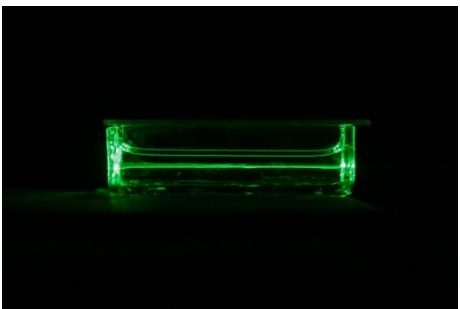
	紅光	綠光
飽和		
1M		
0.5M		
0.1M		
0.01M		



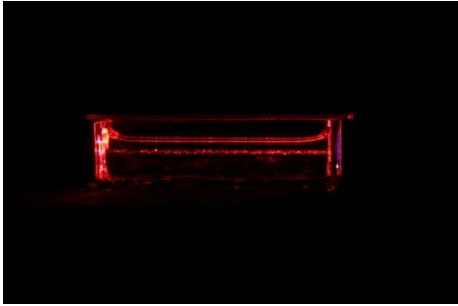
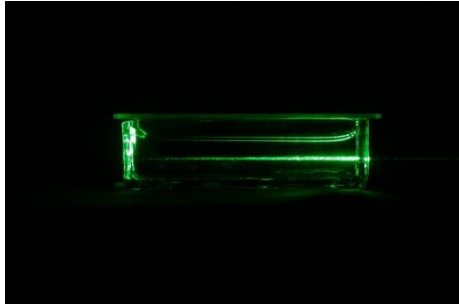
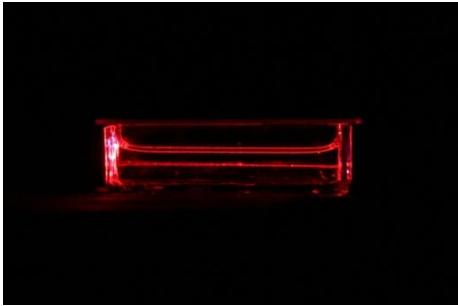
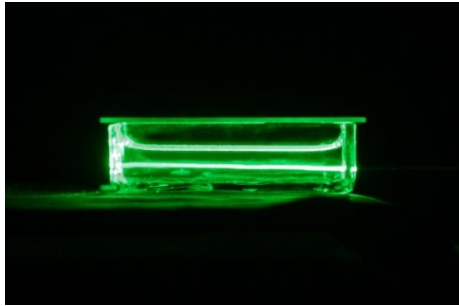
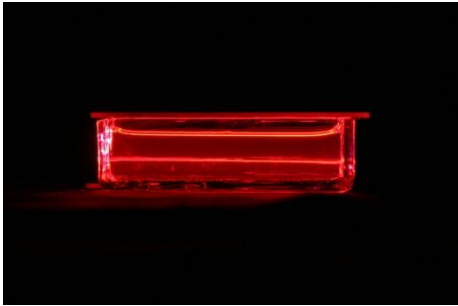
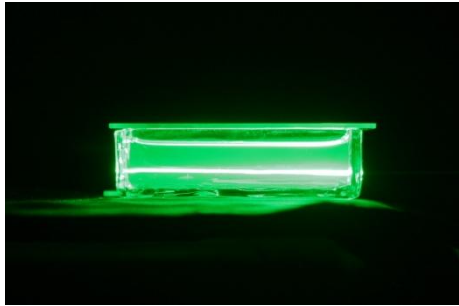
(四) 氯化鋇：由圖可知，紅光照射時 0.01M 水溶液較為明顯，綠光照射時飽和與 0.01M 水溶液較為明顯。

	紅光	綠光
飽和		
1M		
0.1M		
0.01M		

(五) 氯化鋁：由圖可知，紅光照射時 1M 水溶液較為明顯，綠光照射時 1M 水溶液較為明顯。

	紅光	綠光
1M		
0.1M		
0.01M		
0.001M		

(六) 氯化鐵：由圖可知，紅光照射時 0.01M 水溶液較為明顯，綠光照射時 0.01M 水溶液較為明顯。

	紅光	綠光
1M		
0.1M		
0.01M		
0.001M	