

由化學反應速率的測定來看分子在溶液中運動速率的分配

國中組物理科第三名

花蓮縣立國風國民中學

作者：李祐慈、徐百加、李映萩

指導教師：呂欽裕

一、研究動機

在理化課本18-2的實驗方法，只能測定在不同溫度下化學反應從開始到反應結束所需的時間，也就是只能測出全程化學反應的平均速率，但不能測出在反應過程中各期間的化學反應的瞬時速率，亦就是，在某一時間內到底有多少分子已發生了反應。

在做18-2實驗時，也往往發覺硫代硫酸鈉與鹽酸在反應開始和終結時，其反應的快慢似乎有點異常，因此設計適當的實驗方法來測定反應過程中各期間的化學反應的速率。

二、研究目的

- (一) 測出化學反應進行中，各期間化學反應速率之測定，進而測定溶液中分子運動速率的分佈，最後驗證馬克士威爾的速率分配(maxwell velocity distribution)，當然，我們只能從定性上來證明。
- (二) 改進課本18-2的實驗方法。

三、研究設備

小燒杯(50ml) 量筒 溫度計 照度計 多段記錄馬錶
攝影用入射式測光表 酒精燈組 鹽酸(1.5M) 硫代硫酸鈉(0.0759M)

四、研究過程及方法

(一) 實驗一

實驗目的：測定在不同溫度下化學反應的平均速率。

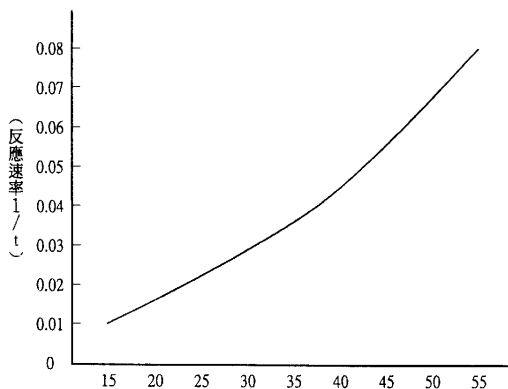
實驗步驟：

1. 在白紙中心，用筆畫十字，然後把錐形瓶放在白紙上，瓶底中心對準十字的中心。

- 2.取硫代硫酸鈉溶液10ml加入錐形瓶裡，並加蒸餾水40ml，以溫度計測定溶液的溫度。
- 3.取鹽酸5ml加入前項溶液中，一面搖動使其均勻，一面開始計時，看看一共要多少時間，錐形瓶內產生的硫固體粒子，把十字遮住。
- 4.按照前面2、3步驟分別在40°C、45°C、50°C做實驗。

實驗結果：

時間 溫度	第一次	第二次	第三次	平均	$\frac{1}{\text{時間}}$
15°C	2'12"85	2'12"29	2'00"74	2'05"29	0.00798
20°C	1'32"59	1'31"40	1'50"10	1'42"31	0.00977
25°C	1'04"	1'06"54	1'03"25	1'04"68	0.01546
30°C	47"63	46"80	46"07	46"83	0.02135
35°C	35"69	34"75	33"36	34"39	0.02907
40°C	29"03	31"00	29"21	29"75	0.03361
45°C	21"57	19"93	20"24	20"38	0.04907
50°C	16"80	17"65	16"45	16"97	0.05893
55°C	13"64	12"75	13"27	13"22	0.05764



圖一、此圖形為開反應到反應完成時，平均速率與溫度之關係圖

討論：

- 1.由圖形之曲線可知，溫度越高反應速率越快，但不成正比。
- 2.此實驗只能看出溫度與反應平均速率的關係，在反應過程中各期間的反應進行速率是看不出來的。

(二) 實驗二

實驗目的：利用照度計和計時器來測定化學反應過程中各期間之平均速率。

步驟與原理：

- 1.取硫代硫酸鈉6g加水到500c.c.（此溶液為0.0759M），取此溶液45cc置入小燒杯(50c.c.)中，以溫度計測其溫度，置於架子上。
- 2.取10M之鹽酸15c.c.，加水到100c.c.（此溶液為1.5M）備用。
- 3.裝置如圖，打開燈光，置照度計於架子下，調整燈泡之高度，使照度計之指針指在1000單位（EV值為11.8）。
- 4.倒入步驟2的鹽酸溶液5c.c.，不需攪拌，同時開始計時，注意指針指向90.0單位時，按一下memory鍵，指針指向800單位時，也按一下memory鍵，一直記錄下去。
- 5.一直到照度計的指針指到100單位（已近完成反應）為止。
- 6.依前項之步驟，分別在不同溫度下操作，並記錄。



7. 利用溶液中反應所產生的生成物「硫」，來阻礙光線，使通過溶液的光線減弱，生成物「硫」的量越多，光線減少的量也越多。當然光線通過溶液的路徑越長，減少的量也會越多。

- $\Delta I \propto nx$ ΔI : 光線減少之量
 N : 硫的莫耳數
 X : 光線通過溶液的距離

8. 本實驗就是利用這樣的原理，來測定反應速率的大小，在反應過程中由光照度的變化，來記錄改變的時間，就像運動學一樣，同時記錄所行的距離和時間，來求出瞬時速度，平均速度等。

9. 本實驗也利用到能一次記錄多次（10次）的馬錶，不然，在反應過程中，照度一直的變化否則是無法去記錄照度變化時的時間。

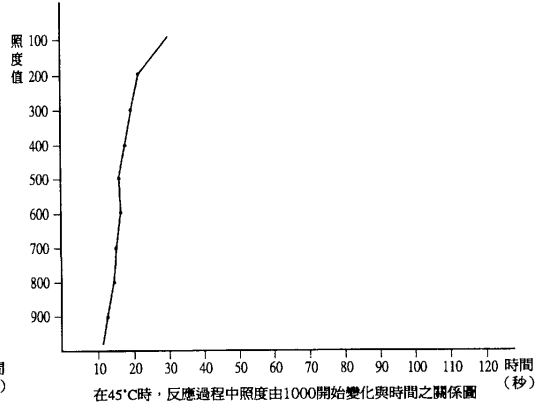
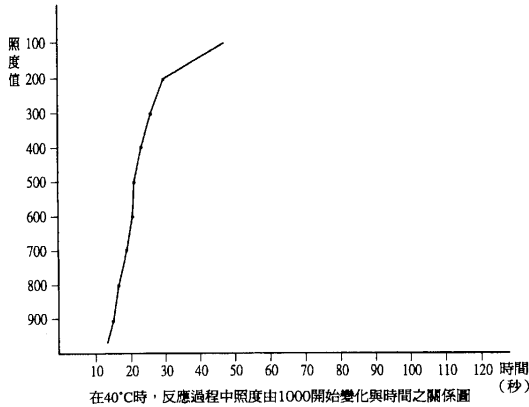
10. 測光錶，它是使用硒或硫化鎘為測光文件，再和一個電流計聯結構成，當光線射到「硒光電體」時，會產生一個微弱的電流，照射的光線越強，所產生的電流越強，當這電流和安培計聯結，既可用安培計指針偏轉的角度來量度入射光線的強弱。

實驗結果：

溫度 溫度	1000 開始	900 10%	800 20%	700 30%	600 40%	500 50%	400 60%	300 70%	200 80%	100 90%	註
15°C 反應時間 值		1'06"85 59"75 1'00"54	1'40"80 1'10"11 1'16"78	1'21"78 1'16"43 1'23"01	1'28"42 1'22"73 1'23"01	1'35"17 1'29"35 1'29"18	1'44"32 1'37"45 1'37"10	1'54"18 1'47"00 1'46"12	2'12"85 2'02"29 2'00"74	4'43"05 4'47"02 4'33"06	
平均	0	1'02"08	1'11"08	1'18"33	1'24"72	1'31"23	1'39"62	1'49"36	2'05"29	4'41"04	
20°C 反應時間 值		49"92 48"92 53"19 33"73	55"98 54"54 1'00"14 1'00"61	1'00"32 58"90 1'04"81 1'06"21	1'04"93 1'03"14 1'10"05 1'11"67	1'09"46 1'07"57 1'15"58 1'18"12	1'15"35 1'13"41 1'23"23 1'26"19	1'22"12 1'20"31 1'32"43 1'35"72	1'32"59 1'31"40 1'50"10 1'55"24	2'16"38 2'32"73 2'11"40 2'33"20	
平均	0	51"18	57"82	1'02"56	1'07"45	1'12"68	1'19"55	1'27"65	1'42"31	2'23"43	
25°C 反應時間 值		34"66 34"10 33"22	38"71 38"64 37"58	41"88 41"91 40"55	44"91 45"09 43"50	48"30 48"63 46"81	52"29 52"87 50"88	57"04 58"00 55"55	1'04"26 1'06"54 1'03"25	1'38"15 1'46"30 1'34"69	
平均	0	33"93	38"31	41"47	44"05	47"91	50"01	56"86	1'04"68	1'39"71	
30°C 反應時間 值		21"59 25"80 24"77	26"07 28"46 27"67	28"63 30"37 29"63	31"04 32"54 31"75	33"37 34"69 33"91	36"67 37"63 36"84	40"43 41"16 40"16	47"63 46"80 46"07	1'27"90 1'16"71 1'18"68	
平均	0	24"05	27"40	29"54	31"78	33"99	37"05	40"58	46"83	1'21"09	
35°C 反應時間 值		21"59 19"72 20"58 19"16	22"97 21"93 21"26 22"18	24"60 23"41 22"61 25"57	26"22 24"93 24"17 24"05	27"84 26"51 25"70 26"39	29"92 28"60 27"62 28"24	32"35 30"92 29"93 30"44	35"69 34"75 33"36 33"75	52"01 54"76 56"85 54"16	
平均	0	20"03	22"09	23"55	25"04	26"61	28"60	30"91	34"39	54"45	
40°C 反應時間 值		13"16 16"15 15"91 15"58	14"44 17"89 18"09 17"43	15"43 19"17 19"56 18"75	16"24 20"41 20"96 20"01	17"39 21"69 22"46 21"49	18"72 23"51 24"39 23"24	20"37 25"49 26"85 25"49	23"27 29"03 31"00 29"21	46"26 46"26 48"72 48"52	第一次 實驗誤 差太大 不平均
平均	0	15"20	17"80	19"16	20"46	21"88	23"71	25"94	29"75	47"83	
45°C 反應時間 值		12"60 12"19 11"80 11"92	13"98 13"28 13"04 13"07	14"95 14"13 14"07 13"85	15"85 14"93 14"91 14"07	16"85 15"78 15"74 15"51	18"03 16"85 16"86 16"53	19"43 18"06 18"18 17"73	21"57 19"93 20"24 19"76	30"28 29"30 28"42 27"62	
平均	0	12"23	13"34	14"25	15"09	15"97	17"07	18"35	20"38	28"92	
50°C 反應時間 值		9"74 10"50 9"60	10"75 11"44 10"55	11"47 12"66 11"32	12"15 12"89 12"01	12"93 13"63 12"30	13"87 14"66 13"90	15"04 15"77 15"61	16"80 17"65 16"45	25"74 25"99 25"71	

平均	0	9°95	10°91	11°82	12°35	12°95	14°14	15°47	16°97	25°68
55°C		8°96	9°63	10°07	10°59	11°08	11°81	12°58	13°64	18°72
反應時間		8'13	8'73	9'48	9'72	10'34	10'94	11'74	12'75	16'97
間值		7'99	8'95	9'47	10'00	10'51	11'17	11'96	13'27	19'31
平均	0	8'36	9'10	9'68	10'10	10'64	11'30	12'09	13'22	18'33

本表之記錄方式為：
未反應前調整光量大小，使照度計之大小值為1000單位後開始反應（加入HCl），並開始計時，照度值變化到900,800,700,.....等時記錄之，最後只記錄到100單位，因為照度值為100以下時，反應已完成了百分之九十五以上，反應已變得非常慢。



溫度 溫度	900 10%	800 20%	700 30%	600 40%	500 50%	400 60%	300 70%	200 80%	100 90%
15°C	1'02"21	1'11"08	1'18"33	1'24"72	1'31"23	1'39"62	1'49"36	2'05"29	4'41"04
平均值	0.0161	0.1117	0.1379	0.1667	0.1449	0.1192	0.1027	0.0628	0.00642
20°C	51"18	57"82	1'02"56	1'07"45	1'12"68	1'19"55	1'27"65	1'42"31	2'23"43
平均值	0.0195	0.1506	0.2109	0.2045	0.1912	0.1456	0.1235	0.0682	0.0243
25°C	33"93	38"31	41"47	44"50	47"91	52"01	56"86	1'04"68	1'39"71
平均值	0.0295	0.2283	0.3165	0.3300	0.2933	0.2439	0.2062	0.1279	0.0285
30°C	24"05	27"40	29"54	31"78	33"99	37"05	40"58	46"83	1'21"09
平均值	0.0416	0.2985	0.4673	0.4464	0.4525	0.3268	0.2833	0.1600	0.0292
35°C	20"03	22"09	23"55	25"04	26"61	28"60	30"91	34"39	54"45
平均值	0.0499	0.4854	0.6849	0.6711	0.6369	0.5025	0.4329	0.2874	0.0499
40°C	15"20	17"80	19"16	20"46	21"88	23"71	25"94	29"75	47"83
平均值	0.0658	0.3846	0.7353	0.7692	0.7042	0.5464	0.4484	0.2625	0.0553
45°C	12"13	13"34	14"25	15"09	15"97	17"07	18"35	20"38	28"92
平均值	0.0824	0.8264	1.0989	1.1905	1.1364	0.9091	0.7813	0.4926	0.11709
50°C	9"54	10"91	11"82	12"35	12"95	14"14	15"47	16"97	25"68
平均值	0.10	0.0849	1.0989	1.8868	1.6667	0.8403	0.7519	0.67	0.1112
55°C	8"36	9"10	9"68	10"10	10"64	11"30	12"09	13"22	18"33
平均值	0.1196	1.3514	1.6329	2.3809	1.8519	1.5152	1.2658	0.8849	0.1756

瞬時反應速率之求法：

1. 續上圖表反應時間，先求出所需時間之平均值，如在15c時Lux值由1000降到900時所需時間值

$$\frac{1'06"85 + 59"75 + 1'00"54}{3} = 1'02"21 = 62.21 \text{ (亦就是62.21秒)}$$

$$\text{速率} \propto \frac{1}{t} = \frac{1}{62.21} = 0.0160952,$$

2. Lux值由900減到800時平均時間為1'11"08-1'02"13=8.95則 $\frac{1}{t} = \frac{1}{8.95} = 0.11173$ ，0.11173之速率記在1'11"08時的速率。

表四

	照度 變化	1000 ↙ 900	1000 ↙ 800	1000 ↙ 700	1000 ↙ 600	1000 ↙ 500	1000 ↙ 400	1000 ↙ 300	1000 ↙ 200	1000 ↙ 100
		15°C	t	62.21	71.08	78.33	84.72	91.23	99.62	109.36
	v	0.01612	0.01407	0.01277	0.01180	0.01096	0.01004	0.009144	0.007981	0.003558
	f(v)	6.2112	50.0000	76.9200	100.0000	119.0000	104.200	111.1000	83.3300	23.2600
20°C	t	51.18	57.82	62.56	67.45	72.68	79.55	87.65	102.31	143.43
	v	0.01954	0.01729	0.01598	0.01483	0.01376	0.01257	0.01141	0.009774	0.006972
	f(v)	5.1180	44.4400	76.3400	86.9600	93.4600	84.0300	86.2100	61.1200	35.9600
25°C	t	33.93	38.31	41.47	44.50	47.91	52.01	56.86	64.86	159.71
	v	0.02947	0.02610	0.02411	0.02247	0.02087	0.01923	0.01759	0.01542	0.006261
	f(v)	3.3930	29.6700	52.2500	60.9800	62.5000	60.9800	60.9800	46.0800	10.9200

30°C	t	24.05	27.40	29.54	31.78	33.99	37.05	40.58	46.83	81.09
	ν	0.04158	0.03649	0.03385	0.03147	0.02942	0.2699	0.02464	0.02135	0.01233
	$f(\nu)$	2.4050	19.6500	37.8800	42.0200	48.7800	41.1500	42.5500	41.8400	11.0900
35°C	t	20.03	22.09	23.55	25.04	26.61	28.60	30.91	34.39	54.45
	ν	0.04993	0.04527	0.04246	0.03994	0.03758	0.03497	0.03240	0.02908	0.01837
	$f(\nu)$	2.0030	21.4600	35.5900	39.6800	42.3700	38.3100	38.9100	30.1200	9.3370
40°C	t	11.52	17.80	19.16	20.46	21.88	23.71	25.94	29.75	47.83
	ν	0.08681	0.05618	0.05219	0.04888	0.04570	0.04218	0.03856	0.03361	0.02091
	$f(\nu)$	1.1520	3.2650	25.0600	32.1500	31.4500	28.4100	27.6200	20.2000	7.8740
45°C	t	12.13	13.34	14.25	15.09	15.97	17.01	18.35	20.38	28.92
	ν	0.08244	0.07496	0.07018	0.06627	0.06260	0.05879	0.05449	0.04907	0.03458
	$f(\nu)$	1.2130	13.3700	20.9200	25.5800	27.2500	26.2500	23.2600	18.4500	6.9010
50°C	t	9.45	10.91	11.82	12.35	12.95	14.14	15.47	16.97	25.68
	ν	0.10580	0.09166	0.08460	0.08097	0.07722	0.07072	0.06464	0.05892	0.03894
	$f(\nu)$	0.9452	7.0720	14.1600	27.5500	26.6600	15.3800	16.4500	17.4800	5.0050
55°C	t	8.36	9.10	9.68	10.10	10.64	11.30	12.09	13.22	18.33
	ν	0.11960	0.10990	0.10330	0.09900	0.09398	0.08849	0.08271	0.07564	0.05455
	$f(\nu)$	0.8361	10.3100	15.1500	23.2600	20.0000	18.2100	17.3000	14.0800	4.7510

表四的求法：

在15°C時，Lux由1000減到900，須時 $t=1'02''21=62.21$ 秒， $1/t=1/62.21=0.01607$ ，此為溶液中分子的平均速率為0.01607單位此時，反應物約為總量之1/10或0.1。

則 $f(\nu) \times \Delta \nu = 0.1$

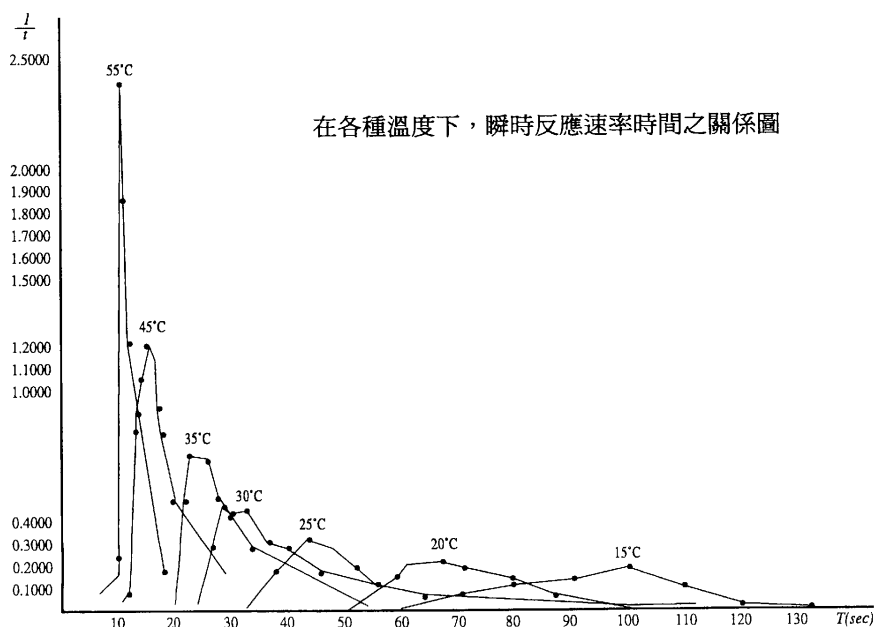
$$f(\nu) = 0.1 / \Delta \nu = 0.1 / 0.01607 = 6.2112$$

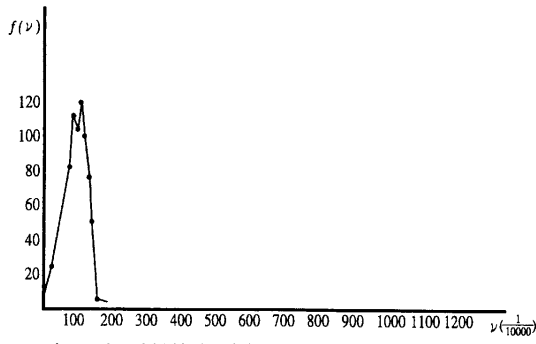
同時在15°C時，Lux 1000 減到800時，須時 $t=71.08$ 秒， $1/t=0.0141$ ，此為溶液中分子的速率，為0.0141到0.0161所完成者，此時，反應物亦為總量的1/10則 $f(\nu) \times \Delta \nu = 0.1$

$$f(\nu) = 0.1 / (0.0161 - 0.0141) = 0.1 / 0.0020 = 50.00$$

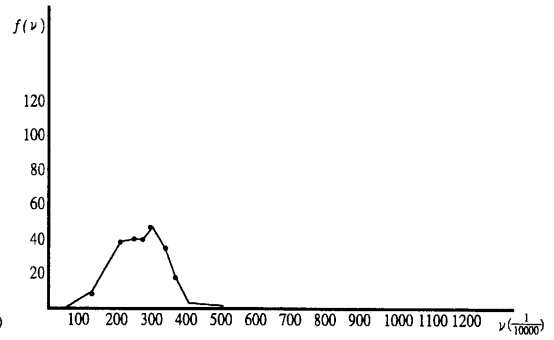
由以上之方法演算下來得下表和圖，但圖形之面積為1

$$\sum_{i=1}^{10} f(\nu_i) \Delta \nu_i = 1$$

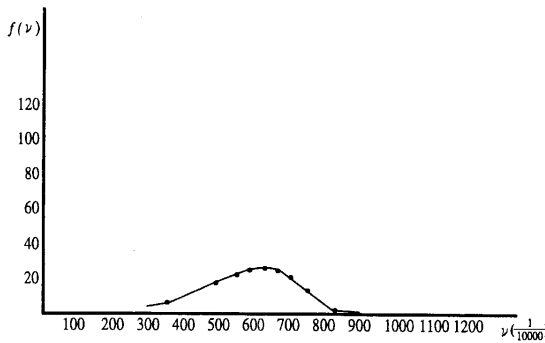




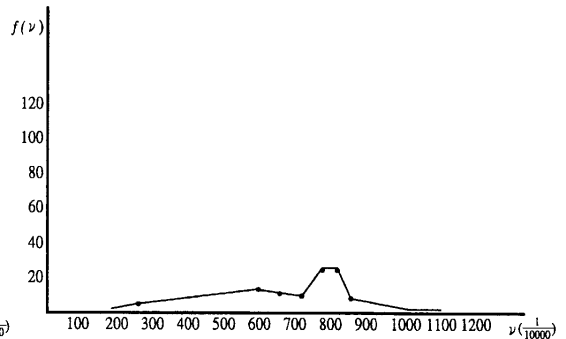
在15°C時，反應過程中照度由1000開始變化與時間之關係圖



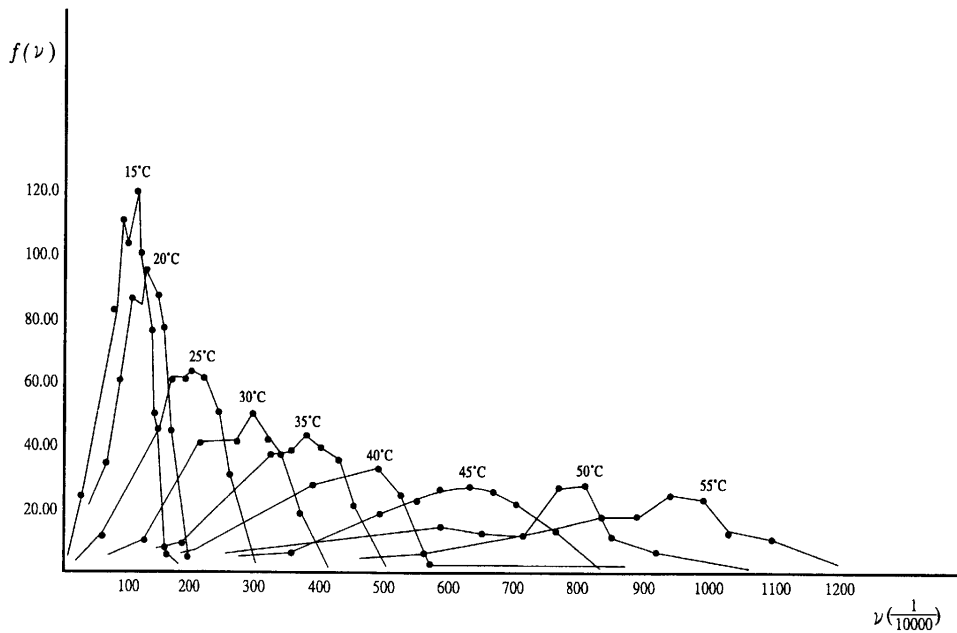
在30°C時，反應過程中照度由1000開始變化與時間之關係圖



在45°C時，反應過程中照度由1000開始變化與時間之關係圖



在50°C時，反應過程中照度由1000開始變化與時間之關係圖



討論：

1. 前述的圖表可知，溫度越高，化學反應的速度越快，由碰撞說和熱運動說，溫度越高分子的運動速度越快，分子間相撞擊的機會越大，因此，化學反應的速度也相對的加快，所以先發生反應者，其運動速率大小較快，後發生反應者，其運動速率較慢，因此，我們由表 II 照度的變化與時間的測定，來計算出溶液中分子運動速度的分配，就是表 IV。
2. X 軸代表分子的速率，Y 軸表示速率在 $\nu = |\nu|$ 和 $\nu = |\nu + \Delta\nu|$ 之間的平均分子的數目或是百分比，本實驗是把反應物「硫」的總數定為 1，再分成 10 等分，每一等分為 0.1，照度由 1000 減到 900 時，最快的 1/10 分子發生反應，照度由 1000 減到 800 時是次快的 1/10 分子發生反應，一直下去，結果劃出圖二十二的分子速率的分布曲線圖，因為實驗時候藥品的濃度一定，只改變反應時的溫度，因此在每一次反應「硫」的生成量為一定，亦就是在圖中各曲線下的面積相等。
3. 把反應過程全部露在空氣中，沒有在恆溫裝置下，而且反應的溶液的體積也只有 50cc（溫度容易發生變化）是有其原因，一是在實驗桌上可把照度計直接置於裝溶液的燒杯下，直接測光方便操作。二是把 HCl 溶液倒入 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液中時，因體積不大幾乎在倒入後，就幾乎完全均勻混合，不必再攪拌（這在以後的實驗可證明），三是在低溫時，如在 15°C 時與室溫相差不大（本實驗是在冬天時做的），不易使溶液的溫度改變。在高溫時，如在 55°C 反應的速率又快，幾乎在 20 秒內就完成了，也沒有多餘的時間來改變溫度。
4. 本實驗只利用溶液反應時所產生的生成物「硫」來阻礙光線的通行，使通過溶液的光線減弱。在實驗的過程中，燒杯內溶液的深度始終不變，故不再做照度的變化與光線通過溶液距離之關係。
5. 不做 60°C 以上實驗的原因是化學反應的速率太快了，用手動的去測時間，誤差太大。
6. 因為要測定光線通過溶液時，光線減弱的照度變化，因此要注意其他光線的干擾，燒杯與照度儀要用遮光板包圍起來。

（三）實驗三

實驗目的：在相同的溫度下，測試有攪拌與無攪拌時對反應速率的影響。

實驗步驟：取與上述實驗一樣體積和濃度的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液，裝在錐形瓶內，瓶底外部貼上有「十」標記的紙片，倒入 HCl 溶液，同時計時，一直到看不到標記為止。第二次同樣作上次的實驗，但是這次是有

攪拌，但注意攪不能太劇烈，以免溫度上升，實驗時錐形瓶放入恆溫槽中間以保持溫度。

實驗結果：

溫度控制在20°C

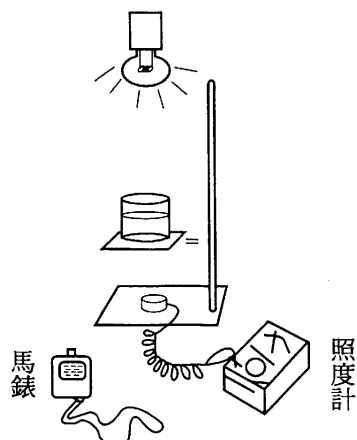
溫度值	900	800	700	600	500	400	300	200	100
有攪拌	1'04"11	1'13"45	1'19"90	1'34"36	34"14	1'43"77	1'55"47	2'16"05	
	1'05"11	1'14"61	1'19"00	1'29"53	1'33"54	1'40"09	1'53"67	2'12"54	
無攪拌	1'08"70	1'19"00	1'26"44	1'26"91	1'42"65	1'53"01	2'07"72	2'31"76	
	1'08"40	1'15"00	1'22"13	1'26"18	1'37"58	1'47"49	2'00"25	2'19"82	

實驗討論：實驗結果是有攪拌的到結束時的時間較短，但與沒有攪拌的相差不大，因此在以上的實驗中為了方便，皆不攪拌。

四、結論

(一) 由圖可看出溫度越高，反應速率越快，因為溫度高時粒子運動較快。按照碰撞學說，單位時間內，反應物粒子碰撞的次數及「能量」會隨著溫度上升而增加，於是反應速率就會增加了，反之，溫度低時反應速率就減少。

(二) 溫度高粒子的能量會上升，粒子的運動較快，此能量指的是分子的動能，因此，由下簡單的計算可知，在HCl溶液中，H⁺離子的運動速率比Na₂S₂O₃分子快得多了，因此，在實驗的反應當中，H⁺離子撞擊Na₂S₂O₃分子的機會大得多了，結果反應產生出「硫」，用本實驗的方法來測定分子的運動速率分配，其實也就是測定H⁺離子在溶液中的運動速率分配，同理也可看出Na₂S₂O₃的速率分配，只是速率的大小不同而已。



評語

本作品是利用化學反應產生的濁度使透射光減弱的程度來求取化學反應的速率。再改變溫度由反應速率求取分子的運動速率。實驗方法尚具創意，結論亦相當合理。