

105年至108年北部地區輻射災害檢
驗分析實驗室建置委託研究計畫勞
務採購案
(「106年」年度計畫、案號：
AEC10506020L)

期末報告

委託單位
行政院原子能委員會

國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

中華民國106年12月

105年至108年北部地區輻射災害檢
驗分析實驗室建置委託研究計畫勞
務採購案
(「106年」年度計畫、案號：
AEC10506020L)

期末報告

委託單位
行政院原子能委員會

國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

中華民國106年12月

105年至108年北部地區輻射災害檢驗分析實驗室建置委託研究計畫勞務採購案（「106年」年度計畫）

摘要

台灣北部具有兩座核能發電廠，一但發生核子事故或輻射相關意外事件時，可能造成環境的放射性物質汙染，導致民生相關的食品、飲水、動植物的汙染，進而對首都生活圈造成嚴重的影響，因此建立台灣北部區域的輻射災害檢驗分析實驗室是相當急迫的。本計畫預計於陽明大學醫放系建立放射性核種檢驗分析實驗室，將分年完成純銻偵檢器、碘化鈉偵檢器、比例計數系統與液態閃爍計數器之建置，並完成實驗室TAF認證，建立分析與檢測方法之公信力，最後提升北部地區緊急應變的能量。本計畫於106年1月開始已完成採購純銻偵檢器能譜分析系統一套、碘化鈉加馬能譜分析系統一套、暨資料擷取與分析軟體及相關核儀模組各一套、建立碘化鈉能譜分析系統操作程序書、建立碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練程序書、實驗室TAF認證相關文件編寫、建立對民生消費食品的檢測能力與流程。

關鍵字：核子事故、輻射災害檢驗分析、純銻偵檢器

目錄

頁次

1. 前言	1-5
1.1.計畫目標	1-5
1.2.計畫時程	1-6
1.3.報告內容	1-7
2. 計畫進度	2-9
2.1.儀器採購	2-9
2.2.實驗室TAF認證	2-13
2.3.民生消費食品的輻射檢測能力	2-18
2.4.人員訓練	2-24
3. 計畫經費	3-35
3.1.經費申請與報告提交	3-35
3.2.經費統計	3-36
4. 計畫時程	4-40
5. 結論	5-42

圖目錄

	頁次
圖 2-1：純鍍偵檢器二號機與能譜分析系統安裝完成圖	2-11
圖 2-2：碘化鈉能譜分析系統安裝完成圖	2-12
圖 2-3：原能會相關單位驗收議程與工作報告	2-13
圖 2-4：實驗室申請TAF認證文件.....	2-15
圖 2-5：申請TAF認證實驗室實景.....	2-15
圖 2-6：10/31實驗室TAF研討會議程.....	2-16
圖 2-7：11/07實驗室TAF研討會議程.....	2-17
圖 2-8：檢測說明流程圖	2-19
圖 2-9：檢測試樣秤重	2-20
圖 2-10：檢測試樣置入儀器.....	2-20
圖 2-11：游離輻射防護講習班結業證書.....	2-26
圖 2-12：黃員輻安證書	2-27
圖 2-13：TAF人員訓練課程及格證明	2-31
圖 2-14：TAF主管訓練課程及格證明	2-32
圖 2-15：赴核能研究所參訪行程表.....	2-34
圖 2-16：核能研究所實驗室參觀	2-34

表目錄

	頁次
表 2-1：民生消費食品檢驗分析結果.....	2-21
表 2-2：實驗室間比對試樣分析數據(茶葉).....	2-22
表 2-3：實驗室間比對試樣分析數據(土壤).....	2-23
表 2-4：TAF ISO/IEC 17025訓練課程.....	2-28
表 2-5：TAF測試實驗室主管訓練課程.....	2-29
表 3-1：106年度人事費.....	3-37
表 3-2：106年度設備費.....	3-38
表 3-3：106年度其他費用.....	3-39
表 4-1：106年度進度甘特圖.....	4-41

1. 前言

本計畫因應行政院原子能委員會之需求，於陽明大學醫放系建立北部地區輻射災害檢驗分析實驗室，預計提供核子事故或輻射相關意外事件發生時，民生相關的食品、商品、環境樣品、飲用水及土壤等樣品的檢測能量，以強化核災緊急應變的能力。本實驗室位於台北市北投區與附近核電廠的距離僅有一小時的車程，對於緊急應變的時效性有相當大的優勢，屬建立北部地區輻射災害檢驗分析實驗室的最佳地點。

本計畫預計將分年進行採購純鍮偵檢器兩套、碘化鈉偵檢器、比例計數系統一套與液態閃爍計數器一套，以量測碘-131、銫-134與銫-137等人工核種為主，並符合國家法規建立兩階段檢測分析方法，包括快速篩檢定性與準確定量。實驗室預計通過TAF認證，得以執行食品、環境樣品之核種度量。此外本計畫所建置的北部地區輻射災害檢驗分析實驗室，將可搭配學程規劃，以達到人才培育與推廣教育之成效。

目前為計畫執行第二年，106年度的計畫目標皆如期完成，並於計畫進度中進行簡要說明。

1.1. 計畫目標

本(106)年度的計畫目標如下：

- (1) 完成採購純鍮偵檢器能譜分析系統一套、碘化鈉加馬能譜分析系統一套及相關核儀模組一套，並完成設備點交、裝置、測試與驗收等工作。已按照政府採購法完成儀器設備之招標，並已順利點交、裝置、測試與驗收。

- (2) 完成建立碘化鈉加馬能譜分析系統操作程序書。
- (3) 完成建立碘化鈉加馬能譜分析系統操作人員訓練程序書。
- (4) 培育操作人員取得輻安證書及操作許可，至少一名。黃員已完成輻射防護36小時課程，並通過106年輻安證書考試成績合格。
- (5) 建立對民生消費食品的輻射檢測能力，包括兩階段檢測分析方法，第一階段為快速篩檢直接計測法，第二階段為定量分析方法。檢測能力至少包括重要關鍵核種，如碘-131、銫-134、以及銫-137等。已赴核能研究所與輻射偵測中心學習，並完成兩階段檢測分析方法SOP程序書的編寫如附件一。
- (6) 完成期中報告1篇、期末報告1篇。

1.2. 計畫時程

本計畫[105年至108年北部輻射災害放射性分析備援實驗室建置案]，106年度已達成各項重要里程碑，如下所述：

106年02月21日：期初報告

106年03月09日：簽署106年合作備忘錄

106年03月09日：第一期請款

106年03月31日：儀器設備採購案開標

106年04月12日：儀器設備採購案結標

106年04月29日：黃員參加輻射安全證書考試成績合格

106年05月10日：核能研究參訪學習儀器操作及實驗流程

106年05月18日：例行工作報告

106年06月09日：HPGe 2號機、碘化鈉與鉛屏蔽安裝
106年07月13日：期中會議
106年07月15日：期中報告
106年07月31日：第二期請款
106年08月10日：高雄輻射偵測中心研討會
106年08月10日：取得實驗室間比對土壤與茶葉試樣
106年08月20日：建立碘化鈉能譜分析系統作業程序書
106年09月10日：建立碘化鈉能譜分析系統人員訓練程序書
106年09月11日：完成兩階段檢測分析方法SOP程序書編寫
106年09月20日：實驗室認證TAF品質文件編寫完成
106年10月05日：原能會人員儀器設備現場驗收
106年10月05日：例行工作報告
106年10月15日：資本門經費提交請款
106年10月31日：實驗室認證TAF內部稽核
106年11月15日：實驗室認證TAF認證申請書送出
106年11月25日：實驗室核研所能力試驗報名表送出
106年11月28日：實驗室間比對分析數據送出
106年12月06日：期末報告
106年12月11日：期末會議
106年12月15日：第三期款請款
106年12月20日：環境試樣放射性分析比較試驗研討會

1.3. 報告內容

本期末報告章節內容包含：1.前言，2.計畫進度，3.計畫經費，4.計畫時程以及5.結論；其中計畫進度又分別說明：2.1

儀器採購、2.2實驗室TAF認證、2.3民生消費食品的輻射檢測能力、2.4人員訓練。如以下各節內容說明。

2. 計畫進度

2.1. 儀器採購

食品分析量測所需之儀器規格如下：

- (1) 高純鍺偵檢器：規格為能量範圍40 keV~10 MeV、相對效率大於40%、能量解析度在122 keV下小於1 keV、在1.33 MeV下小於1.9 keV，Peak/Compton Ratio大於64:1。
- (2) 多頻道分析儀之規格如下：16K 頻道轉換增益、16K 能譜計測頻道、具數位能譜穩定器、Auto Pole Zero、Auto BLR等自動調整功能、具備零無感時間(ZDT)計測功能，支援無耗損計測修正模式、HPGe 偵檢器高壓供應及信號介面模組、輸出0~+5 kV、前置放大器電源為±12 V，±24 V。
- (3) 低背景計測鉛屏蔽之規格如下：各方向鉛厚度為10公分、內附0.5 mm厚之錫板及1.6 mm厚之銅板內襯、可向兩側對開之兩片式上蓋、多環式底部鉛塞，可搭配各種效率偵檢器使用、計測腔內直徑28公分以上、高度40公分以上、附可支撐本屏蔽系統之專用腳架與液態氮桶(Dewar)之指針式檯秤。
- (4) 數位式碘化鈉多頻道能譜分析儀 (ORTEC digi BASE)：採用數位信號處理器DSP為核心處理單元，為PMT管座型MCA能與GammaVision分析程式相容，擁有1024能譜計測頻道其信號處理速度>50K。CPS數位能譜穩定器由電腦自動控制，可穩定增益及零點誤差。偵檢器高壓供應：0~+1200V由電腦自動控制，電源<500mA 直接由PC之USB介面提供，無須外接電源供應器。

- (5) 碘化鈉偵檢器 (ORTEC 905-3)，2吋之碘化鈉偵檢器，適用能量範圍：50 keV到2 MeV以上，解析度： $\text{FWHM} \leq 8\% @ 662 \text{ keV}$ 。
- (6) 碘化鈉偵檢器用計測屏蔽之規格如下：低背景鉛屏蔽，各方向之鉛厚度為5公分，計測腔內直徑12公分以上，高度14公分以上，單向開啟的單片式上蓋。
- (7) 加馬能譜計測與分析軟體：ORTEC Connections、Maestro軟體，具有加馬偵檢器量測、分析與能譜分解力校正功能，可進行定性分析、核種資料庫編輯、計測結果繪圖與報表產生等。

本實驗室委由校方依政府採購法於106/03/31進行開標作業，並在106/4/12順利結標完成，本次儀器採購由克馬企業有限公司得標，並於106/06/01順利完成裝機作業，儀器設備安裝如圖2-1、圖2-2，於106/08/15由校方事務組完成驗收程序，106/10/05由原能會相關單位至現場進行驗收與實地訪視，並由實驗室進行工作報告，程序如圖2-3。



圖 2-1：純鍺偵檢器二號機與能譜分析系統安裝完成圖



圖 2-2：碘化鈉能譜分析系統安裝完成圖

工作報告與驗收議程單

日期：106 年 10 月 05 日

時間：下午兩點整 至 下午四點半

地點：陽明大學 輻射度量中心食品檢驗分析實驗室

106 年 10 月 5 日 工作報告與驗收 議程表	
時間	會議內容
14：00 ~ 15：30	進行儀器驗收確認
15：40 ~ 16：30	工作報告會議
16：30 ~	散會

圖 2-3：原能會相關單位驗收議程與工作報告

2.2. 實驗室TAF認證

本實驗室已完成TAF認證相關品質文件與程序書編寫，如圖2-4，並完成認證實驗室所需之環境建置，如圖2-5。邀請國立陽明大學醫學工程研發中心游離輻射檢驗實驗室-品質經理趙穗婷小姐，蒞臨實驗室對TAF認證相關需求及申請

辦法課程進行兩天共10小時的討論，研討會議程如圖2-6、圖2-7。本實驗室已於106年11月完成實驗室認證所需之內部稽核，11/15日正式送出申請財團法人全國認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation, TAF)認證文件，申請項目為游離輻射領域中的加馬核種分析，子項目為食品與環境保護中的土壤與生物試樣。

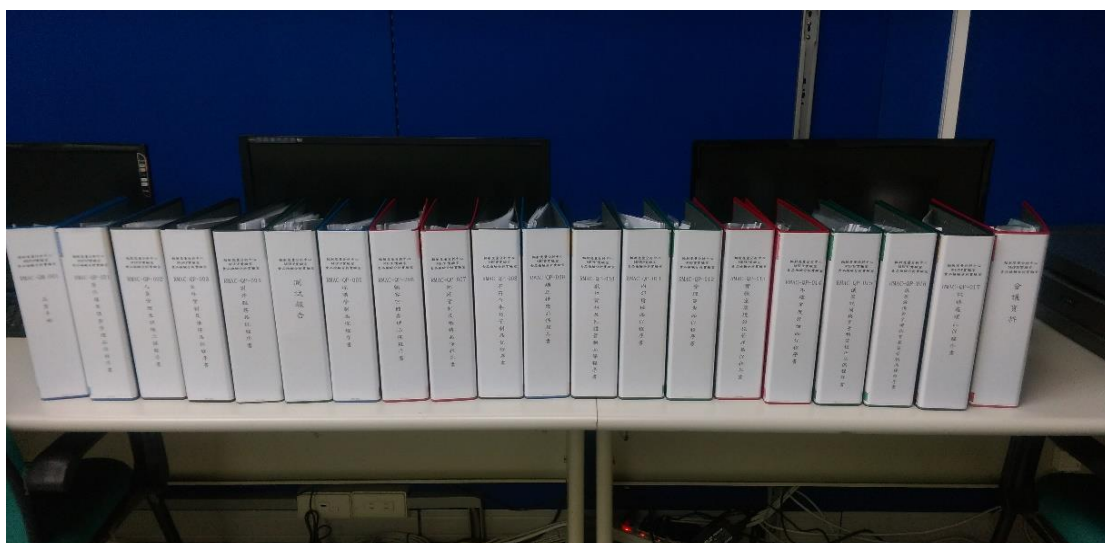


圖 2-4：實驗室申請TAF認證文件



圖 2-5：申請TAF認證實驗室實景

輻射度量分析中心-食品檢驗分析實驗室	
日期	106 年 10 月 31 日 13 點至 17 點
地點	食品檢驗分析實驗室-會議室
出席人員	實驗室人員：吳杰、黃上容、林芳蕙 專家人員：品質經理趙穗婷
會議名稱	20171031-實驗室 TAF 認證事項說明、內部稽核研討會。

一、研討會流程

項目	內容	時間	人員
一、RMAC 實驗室報告	實驗室認證狀況報告	13:00~13:30	黃上容
二、TAF 認證與內部稽核事項介紹說明	TAF 認證須注意細節與文件內容討論、內部稽核注意事項。	14:00~16:00	吳杰、黃上容、林芳蕙、趙穗婷
三、人員自由提案討論	人員各自提出認證相關問題與專家進行討論	16:00~17:00	吳杰、黃上容、林芳蕙、趙穗婷
四、散會	會議結束		

圖 2-6：10/31實驗室TAF研討會議程

輻射度量分析中心-食品檢驗分析實驗室	
日期	106 年 11 月 07 日 13 點至 17 點
地點	食品檢驗分析實驗室-會議室
出席人員	實驗室人員：吳杰、黃上容、林芳蕙 專家人員：品質經理趙穗婷
會議名稱	20171107-實驗室 TAF 認證申請注意事項說明、內部稽核結案研討會。

一、研討會流程

項目	內容	時間	人員
一、RMAC 實驗室報告	實驗室認證狀況報告與內部稽核狀況。	13:00~13:30	黃上容
二、TAF 認證與內部稽核事項介紹說明	實驗室 TAF 認證申請注意事項說明網路申請事項、內部稽核結案文件編寫教學	14:00~16:00	吳杰、黃上容、林芳蕙、趙穗婷
三、人員自由提案討論	人員各自提出認證相關問題與專家進行討論	16:00~17:00	吳杰、黃上容、林芳蕙、趙穗婷
四、散會	會議結束		

圖 2-7：11/07實驗室TAF研討會議程

2.3. 民生消費食品的輻射檢測能力

本實驗室於106年11月開始進行實驗室民生消費食品的輻射檢測能力建立，測試鑑驗項目包含台灣、美國、澳洲、日本等類各民生消費食品，檢驗分析的目標核種為碘-131、銫-134、銫-137、鉀-40，MDA分別為碘131-0.4Bq/kg、銫134-0.5Bq/kg、銫137-0.6Bq/kg、鉀40-18Bq/kg，數值皆符合FDA之標準，MDA為分析系統運算後產出，會因分析時間與機器效率而有所不同。檢驗分析流程依FDA之標準方法執行如圖2-8，圖2-9為國產高麗菜之測重，圖2-10為國產青江菜之量測，表2-1為11月起所量測之民生消費食品檢驗分析結果，其中我們亦取得日本福島、京都、鎌倉與北海道之糕餅與洋蔥、澳洲、美國之牛肉，均未檢出人工放射性核種，在台灣食品中僅檢出天然存在之K-40，包括：低鈉鹽、香蕉與天然海鹽，然而由於實驗室尚未通過TAF認證，檢驗結果僅供參考。

本實驗室於08月10日跟高雄輻射偵測中心取得實驗室間比對的土壤與茶葉試樣，11月28日將實驗室間比對之分析數據送出，所檢驗出的放射性同位素含量分析數據，於12月20日參加106年環境試樣放射性分析比較試驗討論暨技術研討會，其比對狀況相當良好分析數據皆符合比對要求，其結果如表2-2、表2-3。實驗室亦於11月25日報名參加核研所舉辦之能力試驗，預計107年7月進行能力試驗活動。

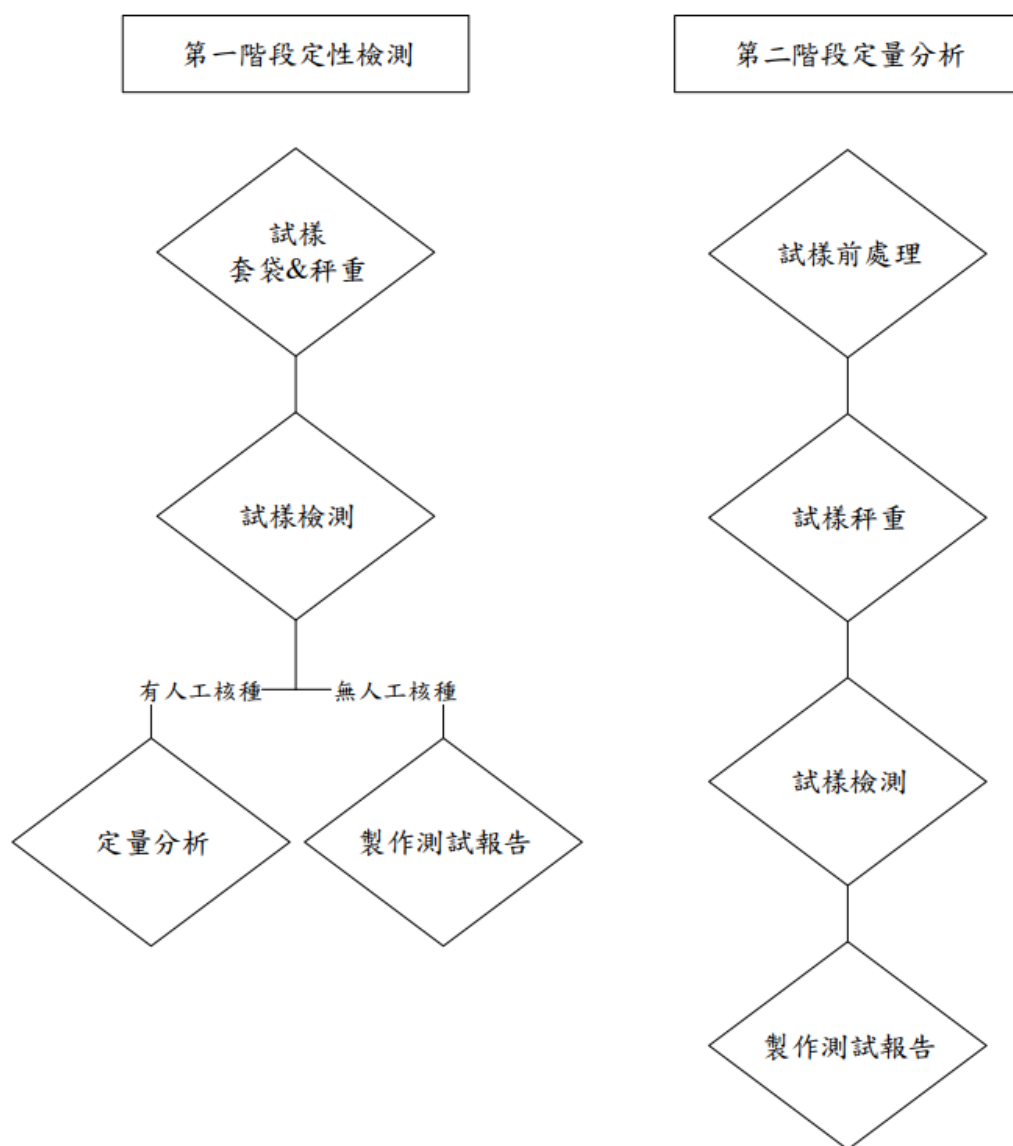


圖 2-8：檢測說明流程圖



圖 2-9：檢測試樣秤重



圖 2-10：檢測試樣置入儀器

表 2-1：民生消費食品檢驗分析結果

11/20民生消費食品檢驗分析			
編號	項目	產地	檢驗狀況
1	栗子羊羹	日本-京都	■未檢出 □檢出
2	玉米筍	台灣	■未檢出 □檢出
3	高麗菜	台灣	■未檢出 □檢出
4	低鈉鹽	台灣	□未檢出 ■檢出 K-40
5	酪王カフェオレ	日本-福島縣	■未檢出 □檢出
6	花椰菜	台灣	■未檢出 □檢出
7	美國牛肉	美國	■未檢出 □檢出
8	豬肉片	台灣	■未檢出 □檢出
9	火鍋嫩豆腐	台灣	■未檢出 □檢出
10	香蕉	台灣	□未檢出 ■檢出 K-40
11	北海道洋蔥	日本-北海道	■未檢出 □檢出
12	甜不辣	台灣	■未檢出 □檢出
13	澳洲牛肉	澳洲	■未檢出 □檢出
14	無調味核桃	台灣	■未檢出 □檢出
15	小白菜	台灣	■未檢出 □檢出
16	天然海鹽	台灣	□未檢出 ■檢出 K-40
17	雞蛋拉麵	台灣	■未檢出 □檢出
18	溫泉蛋	台灣	■未檢出 □檢出
19	鎌倉半月燒	日本-鎌倉	■未檢出 □檢出
1.本檢驗分析為第一階段初步檢測時間為1000秒，故檢測結果不具任何效力。			
2.本次檢驗分析目標核種為碘-131、鉈-134、鉈-137、鉀-40。			
3.MDA值：碘131 為0.4Bq/kg、鉈134為0.5Bq/kg、鉈137 為0.6Bq/kg、鉀40為18Bq/kg。			

表 2-2：實驗室間比對試樣分析數據(茶葉)

參加單位	加 馬 能					
	鍍-7		鉀-40		銨-137	
JCAC	— —		6060.0 ± 710.0		33.8 ± 4.5	
RMC	6874.5 ± 858.6		7018.0 ± 854.1		34.8 ± 4.6	
INHP	7131 ± 536		6524 ± 685		36.7 ± 4.5	
TPRL	7424.0 ± 545.0		6514.0 ± 609.0		36.4 ± 3.7	
TPRIII	7141.0 ± 502.8		5987.0 ± 623.8		35.7 ± 3.6	
THNS	6337.0 ± 575.0		6580.0 ± 501.0		35.1 ± 5.8	
NPUST	— —		— —		37.6 ± 4.9	
NYMU	6261.1 ± 563.5		6909.4 ± 690.9		34.3 ± 3.4	
En _(RMC)			0.86		0.16	
En _(INHP)		0.25	0.47	0.45	0.46	0.30
En _(TPRL)		0.54	0.49	0.48	0.45	0.27
En _(TPRIII)		0.27	0.08	0.97	0.33	0.15
En _(THNS)		0.52	0.60	0.44	0.18	0.04
En _(NPUST)					0.57	0.42
En _(NYMU)		0.60	0.86	0.10	0.09	0.09

表 2-3：實驗室間比對試樣分析數據(土壤)

參 加 單 位	加 馬 龍 譜 分					
	鉀-40		銨-137		銻-208	
JCAC	144.0 ± 21.0		45.5 ± 5.3		13.0 ± 1.8	
RMC	156.7 ± 31.3		46.6 ± 8.6		12.3 ± 2.4	
INHP	159.1 ± 27.0		47.5 ± 4.0		13.7 ± 1.6	
TPRL	145.8 ± 24.0		48.2 ± 5.5		12.8 ± 1.8	
TPR III	147.3 ± 20.9		48.5 ± 4.3		13.8 ± 1.8	
THNS	150.0 ± 21.0		45.9 ± 3.4		13.6 ± 1.8	
NPUST	— —		50.3 ± 5.3		— —	
NYMU	157.5 ± 15.8		45.64 ± 4.1		— —	
En _(RMC)	0.34		0.11		0.23	
En _(INHP)	0.44	0.06	0.30	0.09	0.29	0.49
En _(TPRL)	0.06	0.28	0.35	0.16	0.08	0.17
En _(TPR III)	0.11	0.25	0.44	0.20	0.32	0.50
En _(THNS)	0.20	0.18	0.06	0.08	0.24	0.43
En _(NPUST)			0.64	0.37		
En _(NYMU)	0.51	0.02	0.02	0.10		

2.4. 人員訓練

黃員於106年01月19日參加國立陽明大學舉辦，游離輻射輻射防護講習班36小時課程，考試成績合格如圖2-11，並於106年04月29日參加輻射安全證書考試成績合格如圖2-12。

TAF人員訓練之課程規劃包括：ISO/IEC17025訓練課程與TAF測試實驗室主管訓練課程，分述如下：

(1) ISO/IEC 17025訓練課程介紹：

為TAF配合國內實驗室在過去運作及評鑑的經驗，及ISO/IEC 17025在國際間的最新發展情勢，邀請具有實驗室運作及評鑑經驗的專家，以流程思考的邏輯，完整介紹TAF對ISO/IEC 17025之要求及應用，全程參加且經測驗合格者，可獲頒本會ISO/IEC 17025訓練合格證書。ISO/IEC 17025課程分為三天共分為十個單元，完整介紹TAF對ISO/IEC 17025之要求及應用：認證規範、組織管理、文件管理、能力管理、失效管理、儀具管理、樣品管理、樣品管理、顧客管理、綜合測驗(筆試)-考試內容以教材為主，課程流程內容如表2-4。

(2) 測試實驗室主管訓練課程介紹：

測試實驗室主管訓練課程共分兩天實施，第一天介紹制度性之要求，如TAF認證流程、如何建立符合TAF認證準備計畫，及實驗室評鑑實務經驗等。第二天介紹技術性之要求，包括如何推動實驗室內部稽核與管理審查、能力試驗、不確定度及報告管理等，以使實驗室主管瞭解認證相

關要求及準備計畫。全程參加且經測驗合格者，可獲頒 TAF 測試實驗室主管訓練合格證書，課程流程內容如表 2-5。



圖 2-11：游離輻射防護講習班結業證書



輻射安全證書

輻安證字第15054號

姓名：黃上容

身分證字號：

出生日期：078年05月17日

頒證依據：依游離輻射防護法第三十一條之規定發給證書

原發照日期：106年09月01日

有效期限：112年08月31日

附註：操作之物質、設備或作業涉及醫用者，應符合中央衛生法規之規定。

主任委員 謝曉星

中華民國106年09月22日

圖 2-12：黃員輻安證書

表 2-4：TAF ISO/IEC 17025訓練課程

TAF ISO/IEC 17025訓練課程			
	時間	單元	內容
第 一 天	09:30-10:30	認證規範	介紹實驗室認證標準之架構及發展
	10:30-12:00	組織管理	組織設計與人員管理、管理系統文件化作法及如何召開管理審查會議
	13:00-16:30	文件管理	實驗室文件、品質/技術紀錄及校正/試驗報告之管理
第 二 天	09:30-12:00 13:00-14:30	能力管理	如何選用方法、評估量測不確定度，及量測品質保證方案
	14:30-16:30	失效管理	不符合事項確認、改進、矯正措施、預防措施及內部稽核
第 三 天	09:30-12:00	儀具管理	儀器及耗材之採購與評估、設備維護與管理及量測追溯性
	13:00-15:30	樣品管理	設施與環境條件、抽樣、校正/試驗樣品處理
	15:30-16:30	顧客管理	合約審查、外包、顧客服務與抱怨處理
	16:30-17:30	綜合測驗(筆試)—考試內容以教材為主	通過測試者將由TAF頒發訓練合格證書

表 2-5：TAF測試實驗室主管訓練課程

測試實驗室主管訓練課程			
	時間	單元	內容
第 一 天	09:30-10:30	認證要求	TAF對測試實驗室之認證要求及評鑑流程各階段之作法,及認可實驗室之權利與義務
	10:30-12:00	認證準備	實驗室導入認證之重要性及準備工作,及組織人力規劃
	13:00-16:30	能力試驗	介紹能力試驗之國際標準 ISO/IEC 17043,及如何應用參與能力試驗之結果
第 二 天	09:30-10:30	量測不確定度	介紹TAF測試實驗室量測不確定度評估指引
	10:30-12:00	共通性規範	實驗室人員與追溯性要求
	13:00-16:30	評鑑實務	實驗室評鑑常見缺失及因應對策
	16:30-17:30	綜合測驗(筆試)—考試內容以教材為主	通過測試者將由TAF頒發訓練合格證書

(3) 實驗室人員於TAF相關課程訓練狀況：

本實驗室TAF認證相關人員皆已完成ISO/IEC17025人員訓練課程且考試成績及格，實驗室主管也順利完成TAF主管訓練課程且考試成績及格，及格證書如圖2-13、圖2-14。



財團法人全國認證基金會
Taiwan Accreditation Foundation

訓練合格證書
Training Certificate

證書號碼：TAF-QM106010-C-36



茲證明 黃上容 君於中華民國 106 年
3 月 20 日至 106 年 3 月 22 日參加
「實驗室認證規範 ISO/IEC 17025 訓練」
並經測驗合格，特發此證以資證明。

This is to certify that Huang Shang Rong has successfully completed
「ISO/IEC 17025 Laboratory Accreditation Requirements Training」 on
March 20 to 22, 2017 and has passed the final examination.

王聰麟

財團法人全國認證基金會 董事長
President of Taiwan Accreditation Foundation

中 華 民 國 一 〇 六 年 三 月 二 十 三 日

March 23, 2017

圖 2-13：TAF人員訓練課程及格證明



財團法人全國認證基金會
Taiwan Accreditation Foundation

訓練合格證書

Training Certificate

證書號碼：TAF-TH106010-C-24



茲證明 吳杰 君於中華民國 106 年 9 月 18 日和 106 年 9 月 19 日參加「測試實驗室主管訓練」並經測驗合格，特發此證以資證明。

This is to certify that Jay Wu has successfully completed " Training for Head of Testing Laboratory " on September 18 to 19, 2017 and has passed the final examination.

王聰麟

財團法人全國認證基金會 董事長

President of Taiwan Accreditation Foundation

中 華 民 國 一 〇 六 年 九 月 二 十 八 日

September 28, 2017

圖 2-14：TAF主管訓練課程及格證明

(4) 碘化鈉能譜分析系統人員操作訓練：

實驗室今年完成採購碘化鈉偵檢器能譜分析系統、資料擷取與分析軟體以及核儀模組一套，計畫主持人與TAF認證實驗室人員於106/05/10至原子能委員會核能研究所進行參觀與學習，並了解儀器操作及實驗流程規劃之要點，如圖2-15、圖2-16。除此之外完成建立，碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練程序書一份如附件二、碘化鈉能譜分析系統操作程序書一份，如附件三。



國立陽明大學生醫影像與放射科學系 吳杰副教授及師生 參訪行程表

中華民國 106 年 5 月 10 日 (星期三)

時間	內 容	地點	主持人	陪同人員
09:30 12:00	自由空氣游離腔	035 館	朱健豪	保物組、綜計組相關人員
	核災食品檢驗	010 館	武及蘭	保物組、綜計組相關人員
	游離腔校正	035 館	朱健豪	保物組、綜計組相關人員
12:00	離 所			

圖 2-15：赴核能研究所參訪行程表



圖 2-16：核能研究所實驗室參觀

3. 計畫經費

3.1. 經費申請與報告提交

106年度計畫經費共計新台幣4,098,210元之撥付，原能會應依下列方式撥付：

(1) 第1期款：於106年3月15日前，廠商與本會簽署106年合作備忘錄及提出106年度期初報告，並經機關審查同意後，由廠商憑收據或發票向機關申請撥付總計畫之經常門經費30%(即新臺幣389,463元整)。

(2) 第2期款：於106年7月15日前，廠商提送106年度期中報告並經機關審查完成認可後，由廠商憑收據或發票向機關申請撥付總計畫之經常門經費50%(即新臺幣649,105元整)。其中因契約規範人員學歷不符狀況已於106年1月1日將其要求補正，並執行部分採減價收受，違約罰款共79,488元已於第二期款中扣除，故第二期款撥付總額為(新臺幣569,617元整)。

(3) 第3期款：於106年12月6日前，廠商提送106年度期末成果報告，經機關審查驗收合格且無待解決事項後，由廠商憑收據或發票向機關申請撥付總計畫之經常門經費20%(即新臺幣259,642元整)。

(4) 資本門經費(研究儀器設備費)(即新臺幣2,800,000元整)於106年12月15日前由廠商檢附相關採購、驗收文件(公告稿、招標記錄、合約、驗收證明單及收據或發票影本等)向機關申請付款，經機關審查及實地驗收後，撥付廠商，採購賸餘款不予撥付。本校已於106/03/31完成儀器設備開標作業，並在106/4/12順利結標完成，結標金額為新臺幣

2786,800元整，於106/08/15由學校事務組完成驗收程序；
106/10/05由原能會相關單位至現場進行驗收。

3.2. 經費統計

本計畫之全程計畫經費為17,000,000元，共分三年五個月執行，第一年(105年8月起始)經費為2,705,370元、第二年經費為4,098,210元、第三年經費為5,098,210元、第四年經費為5,098,210元。第二年之人事費如表 3-1，總金額為844,200元，設備費如表 3-2，總金額為2,800,000元，其他研究費用如，總金額為454,010元。

表 3-1：106年度人事費

(一) 人事費用：				
姓 名	每週工作時數	本計畫內工作月數	月支工作酬金 (元)	小 計 (元)
第二年				
研究主持人費	20	12	9,600	115,200
碩士專任研究助理費	40	13.5	28,800	388,800
學士專任研究助理費	40	13.5	25,200	340,200
			小計	844,200

表 3-2：106年度設備費

(二) 設備費 (含資訊設備費)：			
項 目 名 稱	用 途	金 額 (元)	備 註
第二年			
效率40%以上純鍺偵檢器加10cm厚低背景鉛屏蔽內含銅錫等低回散射層	提供執行環境試樣與食品檢測之加馬能譜分析	1,300,000	
核儀模組:模組電源供應器(NIM/BIN power)、資料收集器可接兩台偵檢器	包含前置放大器、多頻道分析儀(MCA)與電源供應器	450,000	
資料擷取與分析軟體含電腦系統	包含軟硬體設備	250,000	
2吋x2吋以上碘化鈉加馬能譜分析系統，含5公分以上鉛屏蔽、資料擷取與能譜分析系統，能譜可存檔	提供執行環境試樣加馬核種定性分析	800,000	
		小計	2,800,000

表 3-3：106年度其他費用

(四) 其他研究有關費用：			
項 目 名 稱	用 途	金額(元)	備註
第二年			
座談會出席費	與學者專家討論，一次1630元/五次	8,150	
報告印刷費	印製期中、期末與相關報告	16,260	
差旅費	至輻射偵測中心學習，高鐵來回 1200*2、日支費350、共4人次	11,000	
設備購置、使用與維護費	設備金額5%~10%估算	162,600	
其他經費	規費、試管、器皿、五金等耗材	81,500	
雜支費	投稿費、刊登費、英文編修費(百分之五)	56,500	
行政管理費	百分之十	118,000	
		小計	454,010

4. 計畫時程

本年度之計畫於106年1月份起始，時程如表 4-1，[設備採購]項目於106年03月進行開標作業，並順利結標完成，結標金額為(新臺幣2786,800元整)。[人才招募與技術學習，培育人員]項目於106年4月黃員已完成輻射防護36小時課程，並通過106年輻安證書考試，106年9月實驗室相關人員皆完成 ISO/IEC17025人員訓練課程及TAF主管訓練課程。

[設備點交、裝置、測試與驗收]項目，106年6月已順利完成裝機作業，儀器設備安裝完成，106年8月完成校方進行的驗收程序，原能會相關單位至現場驗收完成。[民生消費食品的輻射檢測能力]項目，106年11月進行了實驗室民生消費食品的輻射檢測能力建立，測試檢驗項目包含台灣、美國、澳洲、日本等類各民生消費食品，檢驗分析目標核種為碘-131、銫-134、銫-137、鉀-40，並參與高雄輻射偵測中心進行實驗室間比對，且已經報名參加核研所舉辦能力試驗。

[建立碘化鈉加馬能譜分析系統操作程序書]、[建立碘化鈉加馬能譜分析系統操作人員訓練程序書]項目，實驗室已於106年10月編寫完成碘化鈉能譜分析系統作業程序書與碘化鈉能譜分析系統人員訓練程序書。[撰寫研究成果報告]項目，已於106年7月完成期中報告一篇、106年12月完成期末報告一篇，今年度之計畫進度皆如期完成，且上述之所有項目成果均能符合招標與契約規範之要求。

表 4-1：106年度進度甘特圖

六、預定進度：第二年(106年)														
工作項目 \ 106年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註	
1. 設備採購														
2. 人才招聘與技術學習，培育人員														
3. 設備點交、裝置、測試與驗收														
4. 民生消費食品的輻射檢測能力														
5. 建立碘化鈉加馬能譜分析系統操作程序書														
6. 建立碘化鈉加馬能譜分析系統操作人員訓練程序書														
7. 撰寫研究成果報告														
預定查核點	第1季： 第2季：提出設備採購之購案 第3季：完成碘化鈉加馬能譜分析系統操作程序書 第4季：完成碘化鈉加馬能譜分析系統操作人員訓練程序書、研究成果報告													
說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：（1）工作天數，（2）經費之分配，（3）工作量之比重，（4）擬達成目標之具體數字。 3.每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。														

5. 結論

本計畫為四年期計畫，至今為止已順利執行本計畫第二年的工作項目，計畫內各項目均按照時程規劃如期完成。儀器採購部分已完成一套純鍍偵檢器能譜分析系統與碘化鈉分析系統的建置，程序書編寫部分完成碘化鈉加馬能譜分析系統操作程序書與碘化鈉加馬能譜分析系統操作人員訓練程序書兩本，人員訓練部份，黃員順利通過輻防考試，取得輻射安全證書並接受檢驗分析作業相關訓練，於民生消費食品的輻射檢測能力上，完成了兩階段檢測分析方法SOP的制定，實驗室更積極參與高雄輻射偵測中心研討會及比對試驗活動，並報名參加107年度核能研究所所舉辦的能力試驗活動，以上都是為了提升本實驗室民生消費食品與環境試樣的輻射檢測能力。

雖然在檢驗分析能力的建立過程中，遭遇部分困難，其中為了因應能力試驗與比對試驗之需求，須使用符合比對試樣特定規格之標準參考物質，因此在檢驗分析能力建立與TAF認證過程中遭遇些許困難與時程之延宕，幸經原能會協助與輻射偵測中心、核能研究所之支援，目前已順利建立所需的檢驗分析相關專業技術、程序與能力。

在TAF實驗室認證進程上，已順利完成品質文件、程序書與SOP的撰寫，並於106年11月完成實驗室認證所需之內部稽核，並正式送出申請財團法人全國認證基金會認證文件，在12月11日已由TAF相關人員完成初步訪視，預定於107年初進行正式評鑑與認證相關作業。

明年度將持續努力完成儀器採購、儀器使用、TAF認證與技術服務準備。在儀器採購方面，預計採購低背景阿伐/貝他比例計數器計測系統一套、手提式輻射偵檢器一套，並完成設備點交、裝置、測試與驗收等工作。在儀器使用方面，將妥善規劃儀器設備之使用，除了例行服務外，更需維持其檢驗分析能量，根據儀器之特性進行相關學術研究，並發揮其教育功能，在輻射防護、保健物理、放射物理實驗等課程中增加現場實務操作的機會。在TAF認證方面，預計於明年初進行正式實驗室評鑑，也報名參加核能研究所所舉辦的，「107年度環境試樣放射性核種分析能力試驗」，參加項目包含水樣、土壤、植物與牛奶等項目。在技術服務的準備方面，預計明年初提出技術服務的收支經費預算表，以分析未來可能收入來源，以訂定未來技術服務收費標準。最後，期望順利達成本計畫所訂定的時程與目標，完成輻射災害檢驗分析實驗室之建置，以提昇國內核子事故之應變能力。

附件一

輻射度量分析中心 Radiation Measurement and Analysis Center

食品檢驗分析實驗室

放射性檢驗分析作業程序書

國立陽明大學
輻射度量分析中心

目錄

頁次

1. 目的	3
2. 適用範圍	3
3. 參考文件	3
4. 職責	3
5. 儀器設備	3
6. 作業程序	3
7. 其他事項	5
8. 檔案管理	5
9. 作業流程圖	5
10. 附錄	6

名稱	放射性檢驗分析作業程序書	編號	RMAC-SO-001
		版次	1
		頁數	3/6

1. 目的

建立食品中放射性核種檢驗分析作業的標準作業程序。

2. 適用範圍

本實驗室食品檢驗分析作業。

3. 參考文件

4. 職責

- (1) 技術人員：負責執行食品檢驗分析。
- (2) 文書管理員：負責接收試樣。

5. 儀器設備

- (1) 純鍺偵檢器(High-Purity Germanium detector，HPGe)。
- (2) 多頻道脈高分析儀(Multi-Channel pulse-height Analyzer，MCA)。
- (3) 手提式表面污染偵檢器。
- (4) 夾鏈袋或塑膠袋。
- (5) 試樣罐(60 mm(D)×62 mm(H)，PP材質)或馬林杯(1L，PP材質)。
- (6) 電子磅秤(可量測範圍：0.5 g~1510 g)。
- (7) 刀具、砧板、濾網等前處理工具。

6. 作業程序

- (1) 電子秤、純鍺偵檢器及多頻道脈高分析儀等重要儀器設備之品保與校正依「儀器設備與參考物質校正品保程序書」(RMAC-QP-015)與「儀器設備與參考物質品質管制品保程序書」(RMAC-QP-016)執行。
- (2) 試樣接收
 - (A) 檢測試樣由申請單位自行送至本實驗室，並由文書管理員負責接收。

名稱	放射性檢驗分析作業程序書	編號	RMAC-SO-001
		版次	1
		頁數	4/6

- (B) 核對試樣數量是否與申請單上相同，若發現不符合時通知申請單位進行補正。
- (C) 收到試樣後須以手提式表面污染偵檢器，距外包裝約5公分處量測確認有無污染，若有污染須分別量測試樣及外包裝，如確認試樣本身含放射性，則直接進入定量分析階段。
- (3) 定性檢測階段
- (A) 試樣進行秤重，且至少須100克。
- (B) 試樣含包裝以夾鏈袋進行裝袋，若為冷藏/冷凍試樣可置入保溫材質盒內。
- (C) 試樣置於純鍺偵檢器頂端的檢測平台上，並依「純鍺偵檢器能譜分析系統作業程序書」(RMAC-SO-003)執行。
- (D) 檢驗分析時間須至少符合最小可測量(Minimum Detectable Amount, MDA)之要求。
- (E) 檢測完畢後，試樣若含有人工核種如 ^{131}I 、 ^{134}Cs 及 ^{137}Cs 時，須進行定量分析階段。
- (F) 若未量測到上述人工核種，則於測試報告上勾選“未檢出”。
- (G) 飲料及包裝水之最小可測量MDA須小於5貝克/公斤，乳及乳製品、嬰兒食品及其他食品須小於10貝克/公斤。
- (4) 定量分析階段
- (A) 試樣罐或馬林杯(含蓋子)進行秤重後設定“扣重”備用。
- (B) 試樣依「食品試樣前處理作業程序書」(RMAC-SO-002)執行前處理後，固態試樣取約100~600 g，液態試樣取約900~1000 g，精確秤重後放入適當容器中。
- (C) 試樣置於HPGe加馬偵檢器頂端的檢測平台上，並依「純鍺偵檢器能譜分析系統作業程序書」(RMAC-SO-003)執行。
- (D) 檢驗分析時間須至少符合最小可測量MDA之要求。
- (E) 分析完畢後紀錄人工核種如 ^{131}I 、 ^{134}Cs 及 ^{137}Cs 等的比活度，並填寫於測試報告。
- (F) 定量分析之最小可測量MDA需小於1貝克/公斤或1貝克/升。

名稱	放射性檢驗分析作業程序書	編號	RMAC-SO-001
		版次	1
		頁數	5/6

(5) 試樣量測之最小可測量MDA的計算公式如下：

$$MDA = \frac{1.645 \times \sqrt{B}}{60 \times E \times V \times T}$$

B ：適當之空白試樣的計數值(化學處理程序、計測方法、計測時間及幾何形狀均與待測試樣相同)

E ：待測核種的計數效率

V ：試樣量(kg或L)

T ：適當之空白試樣計數時間(min)

(6) 試樣的比活度

試樣中人工核種之比活度(Specific Activity, SA)的計算公式如下：

$$SA = \frac{A}{M}$$

A ：檢體計測之放射性活度(貝克)

M ：分析試樣量(kg或L)

7. 其他事項

無。

8. 檔案管理

(1) 本程序書內容如有修訂或更新，須依「文件管制及維持品保程序書」(RMAC-QP-003)辦理。

9. 作業流程圖

無。

名稱	放射性檢驗分析作業程序書	編號	RMAC-SO-001
		版次	1
		頁數	6/6

10. 附錄

無。

附件二

輻射度量分析中心
Radiation Measurement and
Analysis Center

食品檢驗分析實驗室

碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練作業程序書

國立陽明大學
輻射度量分析中心

名稱	碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練作業程序書	編號	RMAC-SO-007
		版次	1
		頁數	2/5

目錄

頁次

1. 目的.....	3
2. 適用範圍.....	3
3. 參考文件.....	3
4. 職責.....	3
5. 儀器設備.....	3
6. 作業程序.....	3
7. 其他事項.....	4
8. 檔案管理.....	4
9. 作業流程圖	4
10. 附錄.....	4
附錄1：「測驗紀錄單」(RMAC-SO-006-1)	5

名稱	碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練作業程序書	編號	RMAC-SO-007
		版次	1
		頁數	3/5

1. 目的

建立本實驗室碘化鈉人員訓練標準作業程序。

2. 適用範圍

本實驗室人員。

3. 參考文件

無。

4. 職責

- (1) 實驗室主任：負責核定碘化鈉人員訓練計畫與評估人員訓練之有效性。
- (2) 技術經理：負責執行碘化鈉人員訓練相關訓練與訓練計畫制定。

5. 儀器設備

- (1) 碘化鈉能譜分析系統。

6. 作業程序

- (1) 碘化鈉操作人員訓練計畫由技術經理負責規劃與檢定。
- (2) 人員專業知識與相關文件閱讀訓練共12小時
 - (A) 5小時輻射安全相關文件如附件：課程一 Scintillation Detector Principles、課程二 Photomultiplier Tubes and Photodiodes的研讀與說明，由技術人員與相關人員負責。
 - (B) 5小時操作手冊與相關程序書研讀與說明，由技術人員負責。
 - (C) 2小時碘化鈉操作人員口試測驗，由技術經理負責，考題須包含上述訓練項目。
- (3) 檢驗分析作業訓練12小時
 - (A) 5小時檢驗分析作業實務訓練，包括操作、品保、校正、保養，由技術經理負責。

名稱	碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練作業程序書	編號	RMAC-SO-007
		版次	1
		頁數	4/5

(B) 5小時實務操作訓練與操作測驗。

(C) 2小時碘化鈉操作人員操作測驗由技術經理執行，考題須包含上述訓練項目。

- (4) 所有測驗需由主測人於「測驗紀錄單」(RMAC-SO-007-1)，填寫測驗分數及簽章。
- (5) 實務操作測驗，包含試樣處理、檢驗分析操作流程、測試報告製作等共3部分。
- (6) 口試測驗，包含操作手冊10題、品保程序5題、作業程序書5題，共20題。

7. 其他事項

無。

8. 檔案管理

- (1) 本程序書內容如有修訂或更新，應依「文件管制及維持品保程序書」(RMAC-QP-003)辦理。
- (2) 測驗紀錄單須妥善保存，保存期限依「紀錄管制及維持品保程序書」(RMAC-QP-007)之規定辦理。

9. 作業流程圖

無。

10. 附錄

附錄1：測驗紀錄單(RMAC-SO-006-1)

名稱	碘化鈉能譜分析系統操作人員訓練作業程序書	編號	RMAC-SO-007
		版次	1
		頁數	5/5

附錄1：「測驗紀錄單」(RMAC-SO-007-1)

[illegible]

(RMAC-SO-007-1)



Scintillation Detector Principles

吳杰
國立陽明大學
生物醫學影像暨放射科學系

OUTLINE

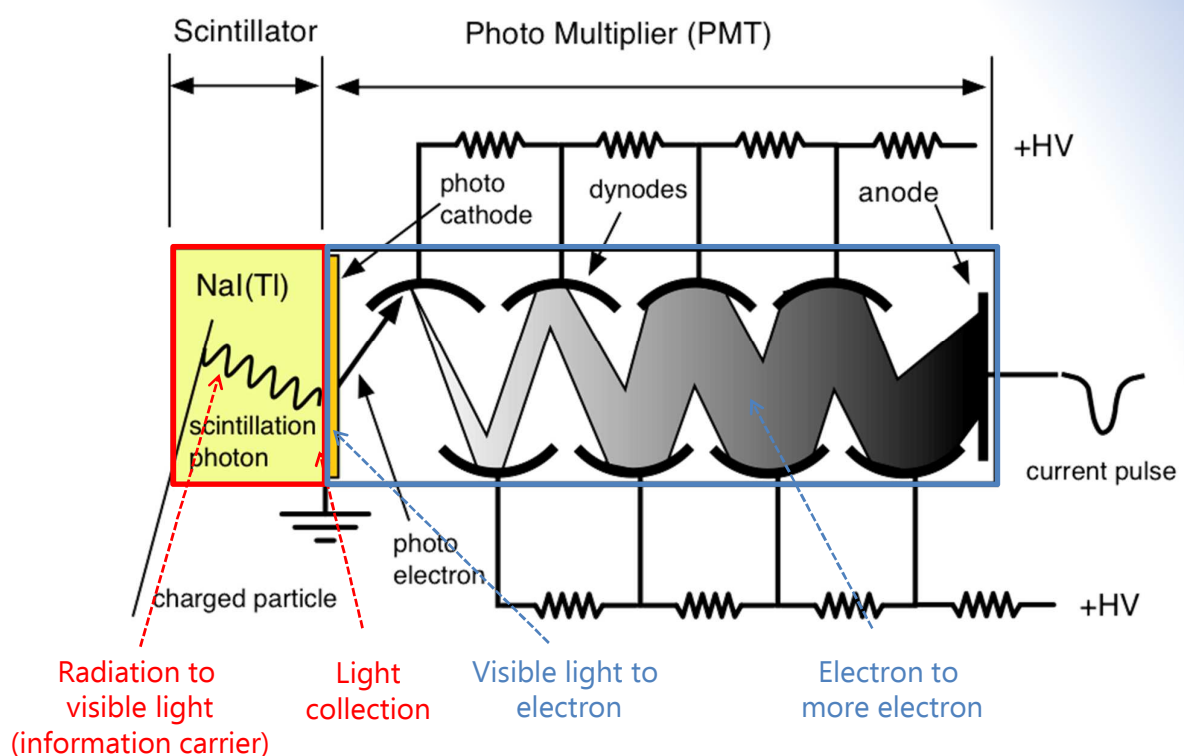
- SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES
- ORGANIC SCINTILLATORS
- INORGANIC SCINTILLATORS
- LIGHT COLLECTION

OUTLINE

- SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES
- ORGANIC SCINTILLATORS
- INORGANIC SCINTILLATORS
- LIGHT COLLECTION

3/46

SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES



4/46

SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES

- The scintillation process is one of the most useful methods for the **detection** of radiation.
- The ideal scintillation material requires these properties:
 - Convert the kinetic energy of charged particles into light with **high efficiency**.
 - Conversion should be **linear**.
 - Materials should be **transparent** to its own emission.
 - Decay time of luminescence should be **short**.
 - Material should be of good optical quality in **large sizes**.
 - Refraction index should be near that of **glass** (~1.5).

5/46

SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES

- The most widely applied scintillators include the **inorganic alkali halide crystals** (_____) and **organic-based** liquids and plastics.
 - Inorganics
 - » The best light output and linearity
 - » Choice for **gamma-ray** spectroscopy
 - » Relatively slow in response time
 - Organics
 - » Less light
 - » Preferred for **beta spectroscopy** and fast **neutron** detection
 - » Faster response

6/46

SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES

- Three kinds of visible light can be emitted.
 - Fluorescence - **prompt emission** of visible light with shorter wavelength.
 - Phosphorescence – delayed emission of _____ **wavelength** light.
 - Delayed fluorescence - _____ **emission** following excitation.
- Fluorescence should be maximized, while minimizing the phosphorescence and delayed fluorescence.
- Pulse mode operation is favored with the **time constant** much **smaller** than the decay time of phosphorescence.

7/46

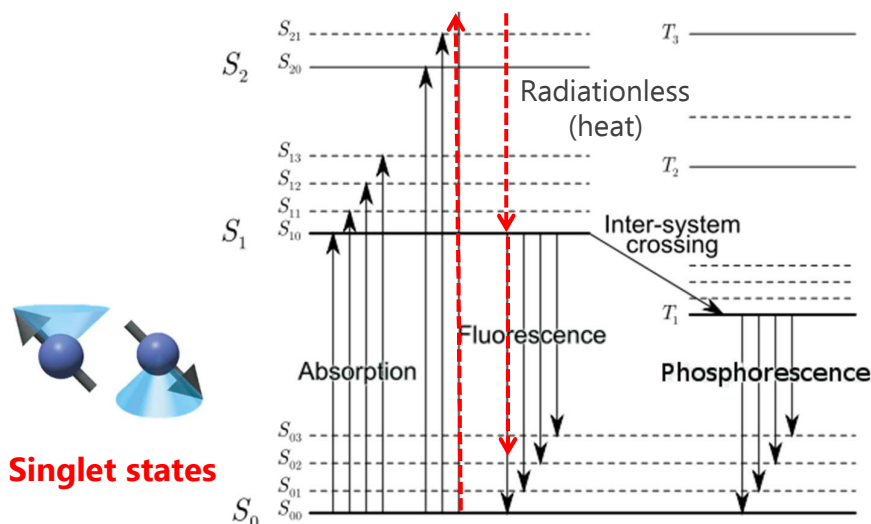
OUTLINE

- SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES
- **ORGANIC SCINTILLATORS**
- INORGANIC SCINTILLATORS
- LIGHT COLLECTION

8/46

ORGANIC SCINTILLATORS

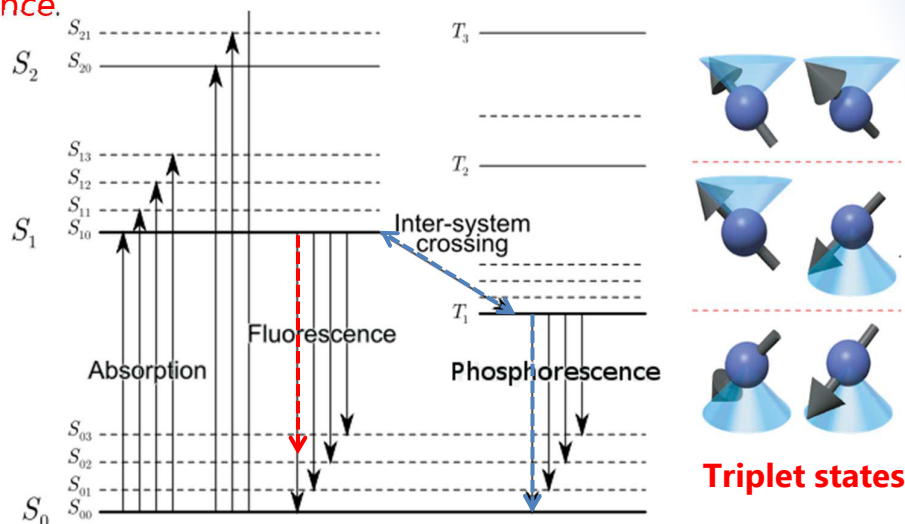
- The fluorescence process in organics arises from transitions in the **energy level** structure of **a single molecule**.
 - Independent of its physical state.
 - Not require a regular crystalline lattice.
 - Fluorescence is emitted between S_{10} to S_{0x} within a few **nsec**.



9/46

Scintillation Mechanism in Organics

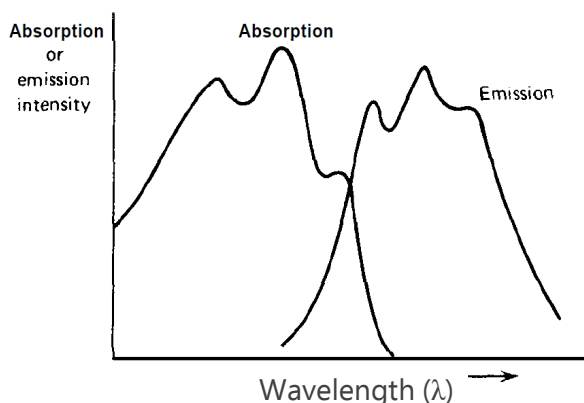
- Some excited singlet states are converted into triplet states through _____.
 - De-excitation from T_1 to S_{0x} emits a **delayed phosphorescence** with longer wavelength.
 - T_1 state may be excited back to S_{10} and decay a **delayed fluorescence**.



10/46

Scintillation Mechanism in Organics

- Organic scintillators must **transparent** to their own emission.
 - Upward arrows are **longer** than the downward arrows.
 - Very little overlap between the absorption and emission spectra
- Scintillation efficiency is defined as
$$= \frac{\text{light output}}{\text{total energy absorbed}}$$
 - **Impurity** is not we want.



11/46

Types of Organic Scintillators

- Liquid organic solutions
 - A small amount of scintillator is added to a **bulk solvent**.
 - The energy transfers to the scintillator and cause light emission.
 - **Dissolved oxygen** can serve as a **quenching agent**.
 - More resistant to radiation damage effects
 - Widely applied to count radioactive material for _____.
 - Counting efficiency can be almost 100%.
- A third component is sometimes added as a "**waveshifter**."
 - Increase the wavelength
 - Minimize self-absorption
 - Closer match to the sensitivity of the photomultiplier tube

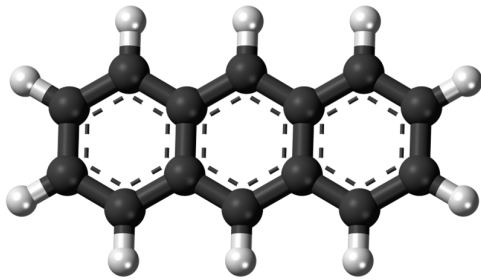


12/46

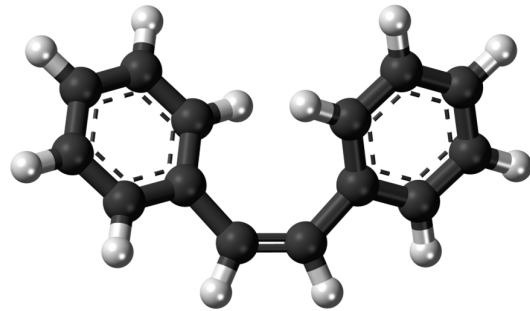
Types of Organic Scintillators

■ Pure organic crystals

- ❑ Anthracene → highest scintillation efficiency
- ❑ Stilbene → distinguish between charged particles
- ❑ Both materials are **fragile** and difficult to obtain in large sizes.
- ❑ Efficiency depends on the orientation of an ionizing particle.



蒽



二苯乙烯

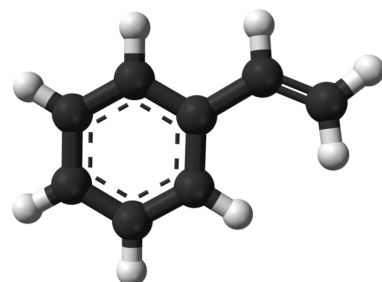
Types of Organic Scintillators

■ Plastic scintillators

- ❑ Solvent consists of **styrene** monomers.
- ❑ Liquid organic scintillator can be polymerized to plastic
- ❑ Shaped and fabricated in different ways
- ❑ Relatively inexpensive and large size
- ❑ Degradation in the scintillation output due to **radiation damage**.
- ❑ Creation of **optical absorption centers**.

■ Thin film scintillators

- ❑ A thickness of 10 μm
- ❑ Serve as _____ for charge particles
- ❑ Decay time of only several nsec



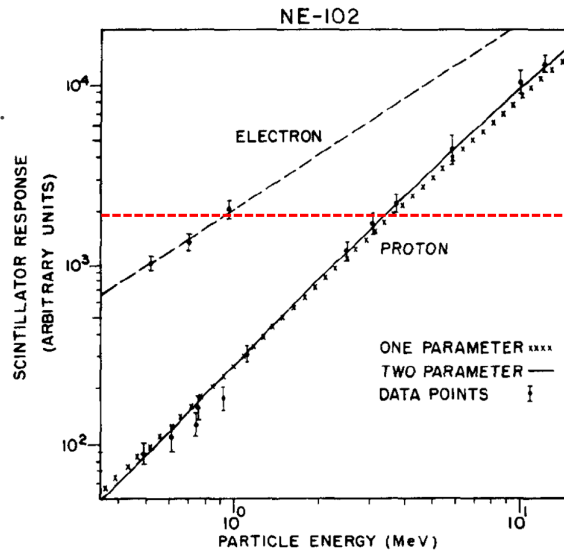
苯乙烯

Response of Organic Scintillators

■ LIGHT OUTPUT

- ❑ A **small fraction** of the kinetic energy is converted into light.
- ❑ The remainder is dissipated nonradiatively.
- ❑ Light output depends on the **particle type** and **energy**.

The response to electrons is **linear**.



MeVee

The response to heavy charged particles is less and **nonlinear**

15/46

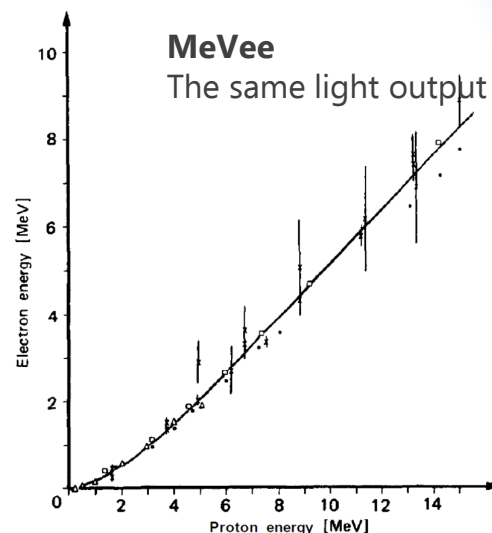
Response of Organic Scintillators

- The term MeV electron equivalent (**MeVee**) is introduced to place the light yield on an absolute basis.

- ❑ 1 MeV $e^- \rightarrow 1$ MeVee
- ❑ 4 MeV $p^+ \rightarrow 1$ MeVee

- **Alpha-to-beta ratio** is widely used to describe the difference of light output.

- ❑ $\alpha/\beta < 1$
- ❑ proportional to $E^{1.5}$



16/46

Response of Organic Scintillators

■ Birks' formula

- dL/dx - light emitted per unit length
 - dE/dx - energy loss per length (_____)
 - S - _____
- $$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx}$$

- High ionization density (linear energy transfer, _____) leads to **quenching from damaged molecules** and a lowering of the scintillation efficiency.

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \times \frac{dE}{dx}$$

17/46

Response of Organic Scintillators

■ For fast electrons

- dE/dx is small.
- Linearly related to the energy E

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad \frac{dL}{dx} \Big|_e = S \frac{dE}{dx}, \quad \frac{dL}{dE} \Big|_e = S$$

■ For alpha particles

- dE/dx very large.
- Nonlinear with energy E

$$\frac{dL}{dx} \Big|_\alpha = \frac{S}{kB}$$

18/46

Response of Organic Scintillators

■ TIME RESPONSE

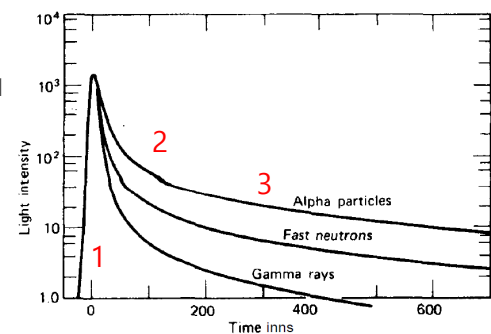
- The time profile of the pulse has a **fast leading** edge followed by a simple **exponential decay**.
- _____ is a major advantage.
- The model must consider: (1) **populate luminescent states**, (2) **prompt scintillation**, and the (3) **delayed scintillation**.

■ The pulse model assumes:

- Population is **exponential growth** - τ_1
- Prompt scintillation is **exponential decay** - τ

$$I = I_0(e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_1})$$

- Small $\tau \rightarrow$ _____ decay



19/46

Response of Organic Scintillators

■ Another approach assumes

- Population is represented by a Gaussian function $I = I_0 G(\sigma) e^{-t/\tau}$

■ Other effects can affect the observed time response particularly in **large scintillators**.

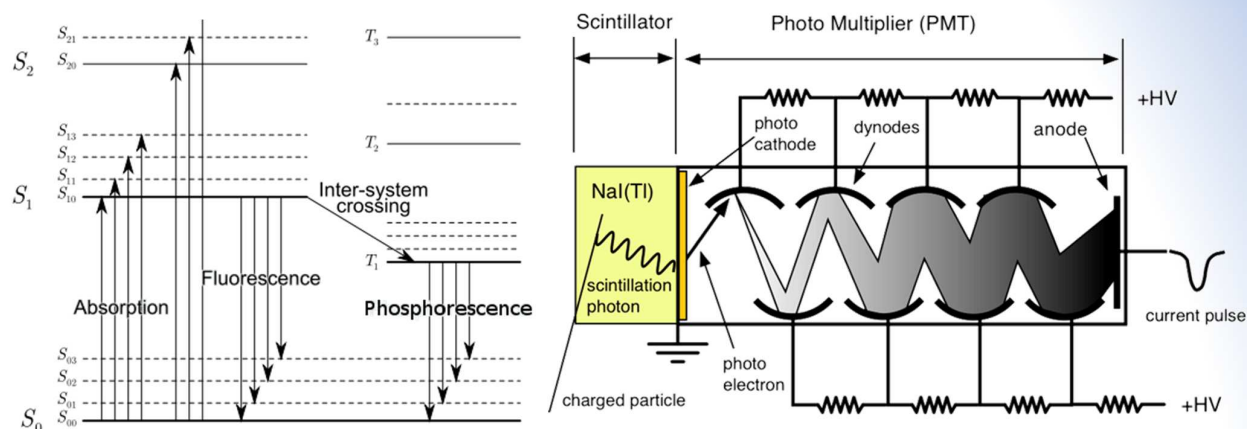
- Flight time of photons to the PMT tube
- Transit time fluctuation due to **multiple light reflections**
- Self-absorption and **reemission** of fluorescence

Table 8.2 Some Timing Properties of Fast Plastic Scintillators

	Parameters for Eq. (8.10)		Parameters for Eq. (8.11)		Measured FWHM
	τ_1 (rise)	τ (decay)	σ_{ET}	τ	
NE 111	0.2 ns	1.7 ns	0.2 ns	1.7 ns	1.54 ns
Naton 136	0.4 ns	1.6 ns	0.5 ns	1.87 ns	2.3 ns
NE 102A	0.6 ns	2.4 ns	0.7 ns	2.4 ns	3.3 ns

20/46

Response of Organic Scintillators



21/46

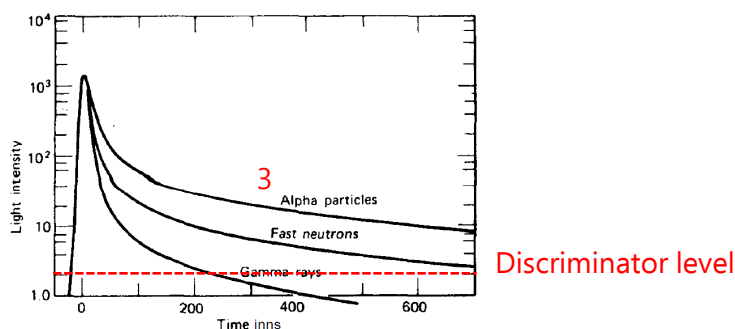
Response of Organic Scintillators

■ PULSE SHAPE

- A longer-lived component is also observed.
- Represented by **another exponential curve** ($\tau \sim 500$ ns)

■ Slow component depends on the type of radiation.

- High LET $\rightarrow$ high density of triplet states $\rightarrow$ **high tail**
- **Pulse shape discrimination** can be used to eliminate gamma ray from neutron and alpha particles.



22/46

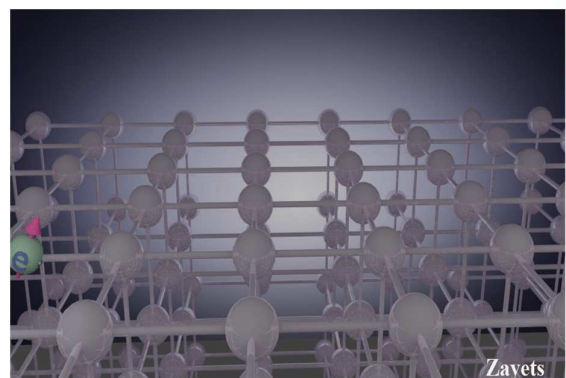
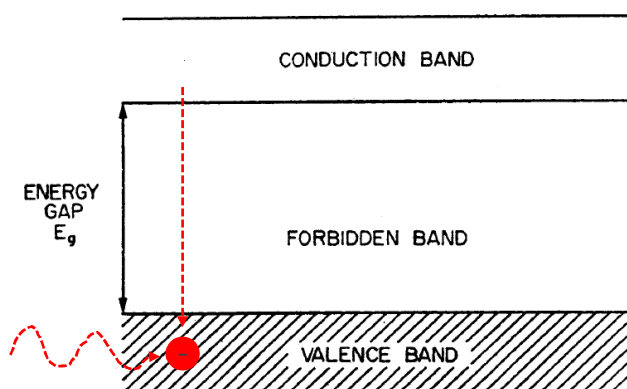
OUTLINE

- SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES
- ORGANIC SCINTILLATORS
- **INORGANIC SCINTILLATORS**
- LIGHT COLLECTION

23/46

INORGANIC SCINTILLATORS

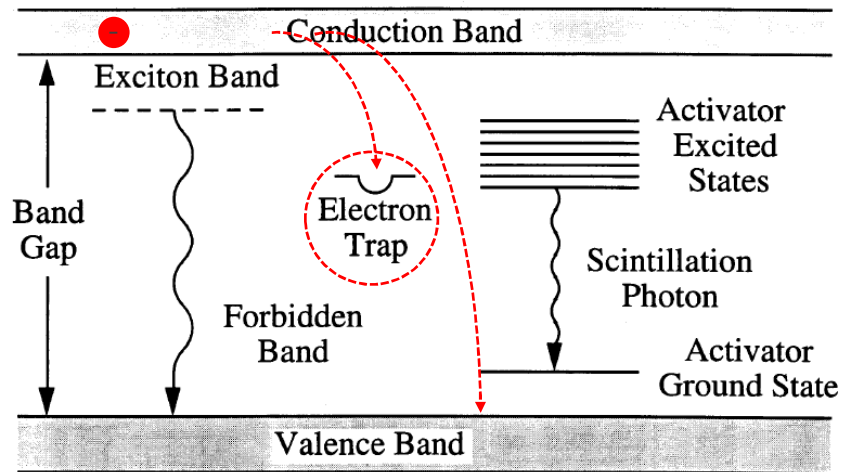
- Inorganic crystals are insulators: _____.
 - The forbidden band is large.
 - No electrons in conduction band.
- Radiation **excites** electron from valence into conduction band, forming an **electron-hole pair (EHP)**.
 - Electrons in conduction band and holes in valence band can **move freely** throughout crystal.



24/46

Scintillation Mechanism

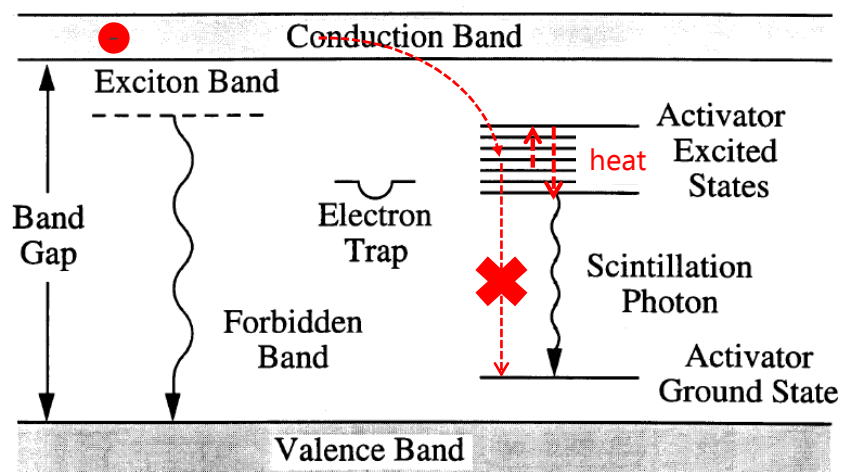
- One must introduce **energy states** into **the forbidden band**.
- Two mechanisms are used:
 - Defects → for example induced by heat treatment
 - Activators → **luminescence** or **recombination** center



25/46

Scintillation Mechanism

- After glow
 - Sometimes, transition from the **excited state of activator** to ground state is forbidden. Thermal excitation is needed.
 - Certain radiationless transitions are possible.
 - Phosphorescence is emitted.



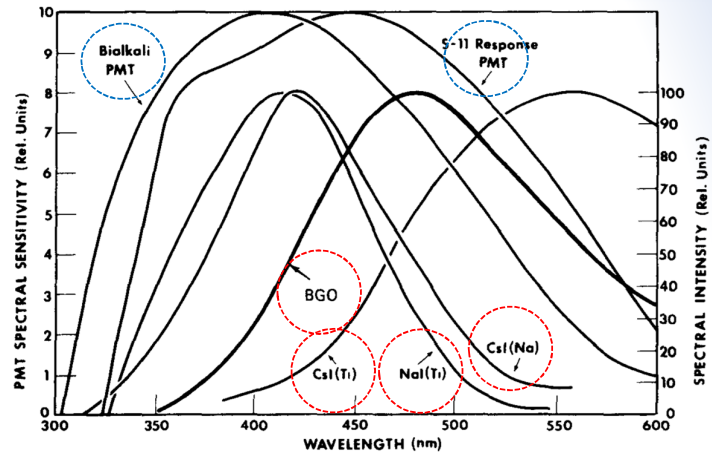
26/46

Scintillation Mechanism

- For 1 MeV energy, how many lights will be produced?
 - 20 eV to produce an EHP → 5×10^4 EHP → 4×10^4 lights
 - Scintillation efficiency = 12% → 1.2×10^5 eV to lights
 - 3 eV for each light

- Emission and absorption spectra will overlap if **no activator** is added. There will be **self-absorption**.

- Emission wavelength should match the sensitivity of the **PMT**.



27/46

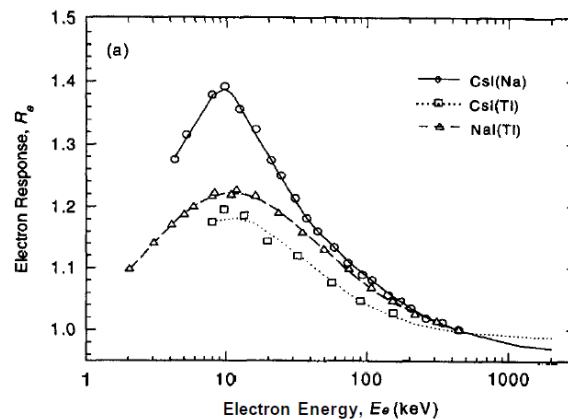
	Specific Gravity	Wavelength of Max. Emission	Refractive Index	Decay Time (μ s)	Abs. Light Yield in Photons/MeV	Relative Pulse Height Using Bi-alk. PM tube
Alkali Halides						
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38 000	1.00
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68 (64%), 3.34 (36%)	65 000	0.49
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.46, 4.18	39 000	1.10
Li(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11 000	0.23
Other Slow Inorganics						
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200	0.13
CdWO ₄	7.90	470	2.3	1.1 (40%), 14.5 (60%)	15 000	0.4
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2		1.3"
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.47	0.9	24 000	0.5
Unactivated Fast Inorganics						
BaF ₂ (fast component)	4.89	220		0.0006	1400	na
BaF ₂ (slow component)	4.89	310	1.56	0.63	9500	0.2
CsI (fast component)	4.51	305		0.002 (35%), 0.02 (65%)	2000	0.05
CsI (slow component)	4.51	450	1.80	multiple, up to several μ s	varies	varies
CeF ₃	6.16	310,340	1.68	0.005, 0.027	4400	0.04 to 0.05
Cerium-Activated Fast Inorganics						
GSO	6.71	440	1.85	0.056 (90%), 0.4 (10%)	9000	0.2
YAP	5.37	370	1.95	0.027	18 000	0.45
YAG	4.56	550	1.82	0.088 (72%), 0.302 (28%)	17 000	0.5
LSO	7.4	420	1.82	0.047	25 000	0.75
LuAP	8.4	365	1.94	0.017	17 000	0.3

28/46

Alkali Halide Scintillators

■ NaI (Tl)

- ❑ 10^{-3} mole of _____ is added.
- ❑ Hygroscopic and will deteriorate due to water absorption
- ❑ Excellent light yield
- ❑ **Energy dependence** of the response with **electrons**
- ❑ Standard material for routine **gamma-ray spectroscopy**

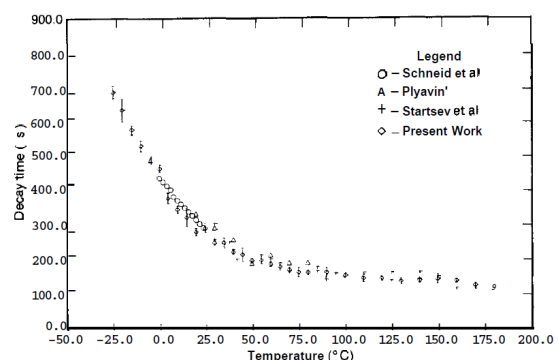
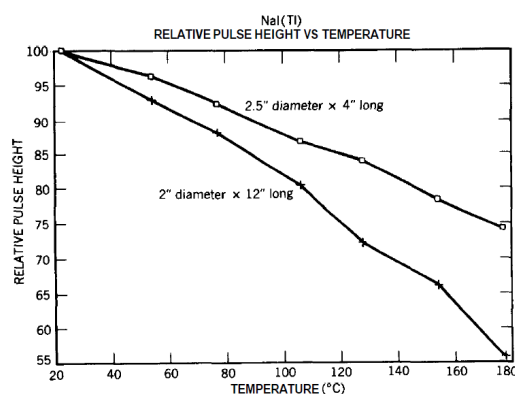


29/46

Alkali Halide Scintillators

■ NaI (Tl)

- ❑ Decay times are $0.23 \mu\text{s}$ and 0.15 s (9%)
- ❑ Phosphorescence is resolved individually.
- ❑ Dependence of the total light yield as a function of **temperature**.
- ❑ Decay time is a function of **temperature**.
- ❑ Frequently used for **gamma camera**.



30/46

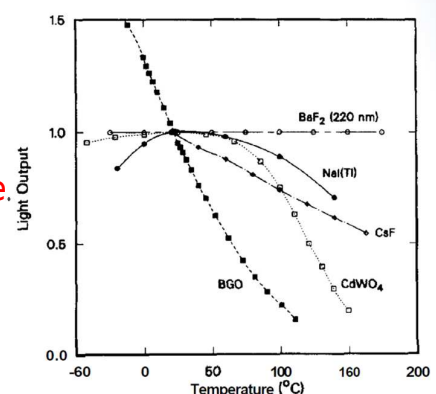
Alkali Halide Scintillators

- CsI (Tl) and CsI (Na)
 - ❑ Cesium iodide has a larger gamma-ray **absorption**.
 - ❑ It is less brittle and hygroscopic.
 - ❑ May be bend into various shapes
- CsI (Tl)
 - ❑ Has variable decay time for various particles.
 - ❑ Decay times of 0.68 μs (64%) and 3.34 μs (36%).
 - ❑ Pulse shape discrimination can be used.
 - ❑ Has much **longer wavelength** and is **poorly matched** to the response of PMT.
 - ❑ The scintillation yield is higher, when using _____.

31/46

Other Slow Inorganic Crystals

- BGO
 - ❑ $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ is commercially available for PET.
 - ❑ BGO is a "**pure**" inorganic scintillator.
 - ❑ Luminescence is associated with the transition of the **Bi^{3+} ion**.
 - ❑ High density (7.13 g/cm^3)
 - ❑ Large Z (83) of the bismuth for **annihilation gamma**.
 - ❑ Little self-absorption
 - ❑ Light yield is relatively low.
 - ❑ Relatively high refractive index (2.15)
 - ❑ Principal decay time of 300 ns
 - ❑ Light output is a function of **temperature**.



32/46

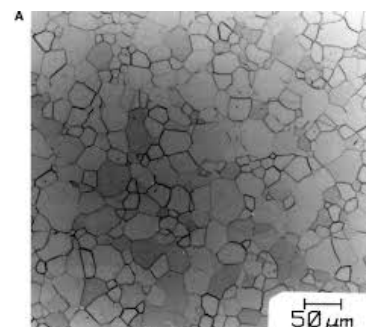
Inorganic Crystals for Nuclear Medicine

	NaI	BGO	GSO	LSO
Purpose	Gamma Camera	PET	PET	PET
Density	3.67 g/cm ³	7.13	6.71	7.4
Wavelength	415 nm	480	440	420
Light yield	38000	8200	9000	25000
Decay time	0.23 μ s	0.3	0.056	0.047
Refractive index	1.85	2.15	1.85	1.82

33/46

Radiation Damage

- All scintillation materials are subject to radiation damage.
 - Reduction in the transparency of the scintillator
 - Creation of **color centers**
 - Induction of long-lived phosphorescence
- The damage in the **alkali halides** was observed to be coupled with the **oxygen contamination** leading to the **hydroxyl species**.
- In the **oxide scintillators**, the damage was found to be related to **structural defects**, such as **oxygen vacancies** in the lattice.



34/46

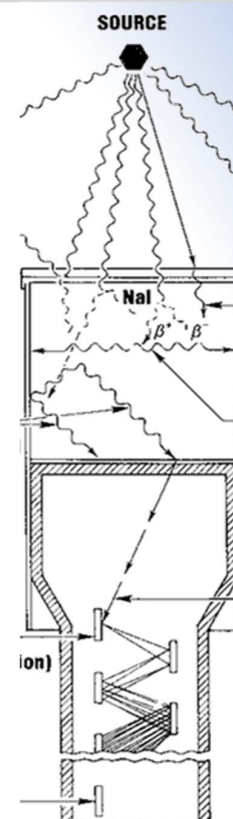
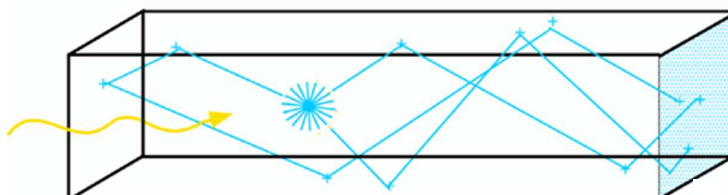
OUTLINE

- SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES
- ORGANIC SCINTILLATORS
- INORGANIC SCINTILLATORS
- **LIGHT COLLECTION**

35/46

LIGHT COLLECTION

- Perfect light collection ensure that **the same energy** produces **the same light**.
- Two effects lead to imperfect light collection.
 - Optical **self-absorption**
 - Loss at the scintillator **surfaces**
- Light collection is varied throughout the scintillator.



36/46

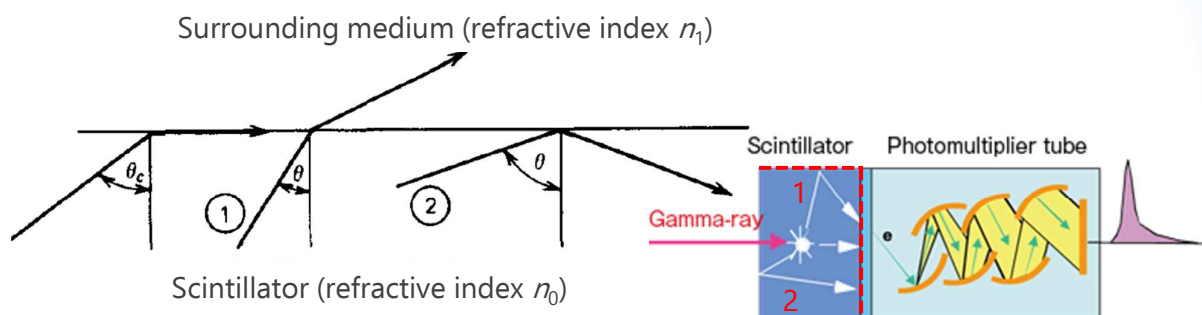
Uniformity of Light Collection

- Scintillation lights must be **reflected** more times to reach the PMT.

- The critical angle θ_c is determined: $\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_1}{n_0}$

- Two situations may occur.

- θ is less than $\theta_c \rightarrow$ partial reflection (called **Fresnel reflection**)
 - θ is greater than $\theta_c \rightarrow$ total **internal reflection**

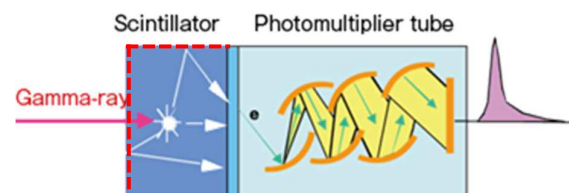
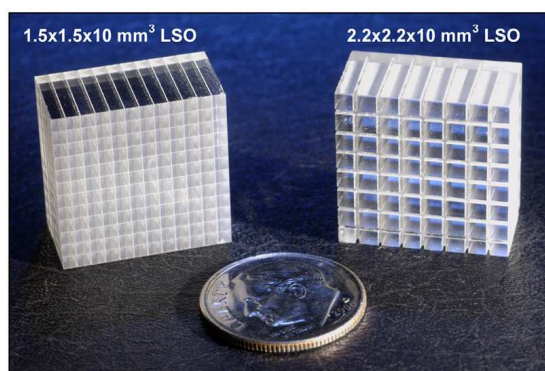


37/46

Uniformity of Light Collection

- Scintillator is surrounded by a **reflector to increase** _____.

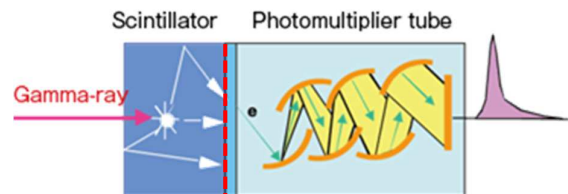
- Specular reflector
 - » Polished metallic surface
 - » Angle of reflection equals the angle of incidence
 - Diffuse reflector
 - » Magnesium oxide or white **Teflon tape**
 - » Angle of reflection is independent of the angle of incidence



38/46

Uniformity of Light Collection

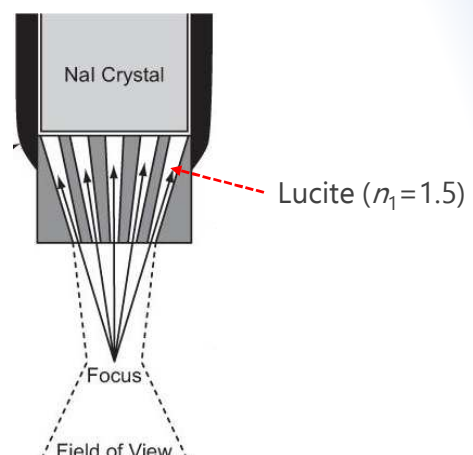
- Total internal reflection must be minimized at the surface to the PMT to prevent internal trapping.
- Optically coupling the scintillator to PMT through a medium of the same index of refraction (____) is required.
 - Coupling fluid → silicone oil
 - Care must be taken to avoid the air bubbles.
 - Scintillation counters must be shielded from _____.



39/46

Light Pipes

- If the size or shape of the scintillator can not couple a PMT directly, a light pipe is used to guide the scintillation light.
 - Light pipes operate on the _____.
 - With a relatively high refraction index
 - Lucite is the most used.



40/46

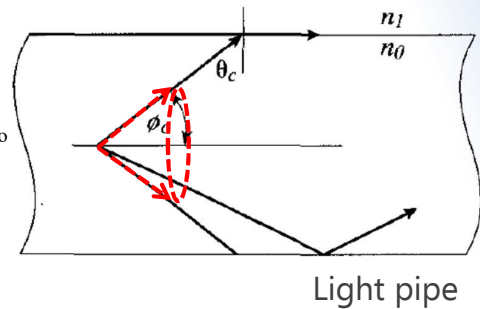
Light Pipes

■ Estimating the fraction of internal reflections

- Lights emit within the **cone angle** ϕ_c will be incident on the surface at the **critical angle** $\theta_c \rightarrow$ total internal reflection
- Reflected lights with **cone angle** $< \phi_c$ are piped along the rod length.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=\phi_c} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\phi_c} 2\pi \sin \phi d\phi \\
 &= \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_c) = \frac{1}{2} (1 - \sin \theta_c) \\
 &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_1}{n_0} \right)
 \end{aligned}$$

$$\phi_c + \theta_c = 90^\circ$$



- $n_0 = 1.5$, $n_1 = 1$ (air)
- 16.7% of the light is internal reflected.

41/46

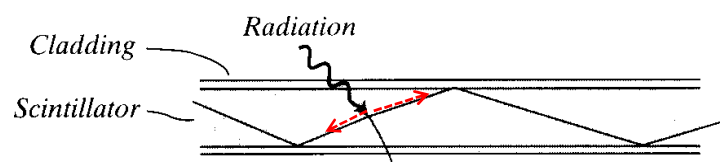
Fiber Scintillators

■ Some scintillators can be fabricated as small diameter **fibers** consisting of

- Core $\rightarrow$ scintillation light is generated.
- Cladding material $\rightarrow$ to protect the core surface

■ The refractive index the core is _____ than that of cladding.

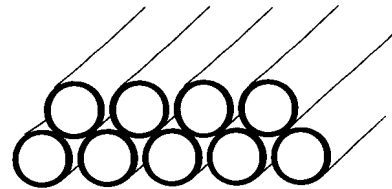
- When a cladding material is added $\rightarrow$ 10% light trapped.
- **Multiccladding** fibers $\rightarrow$ 40% more light trapped.
- PMT can be used at **both ends** to produce coincident pulses.



42/46

Fiber Scintillators

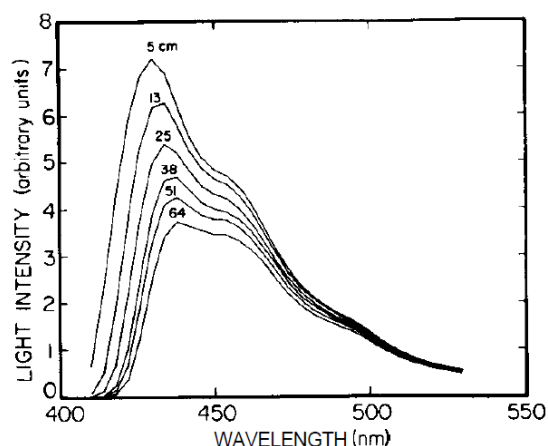
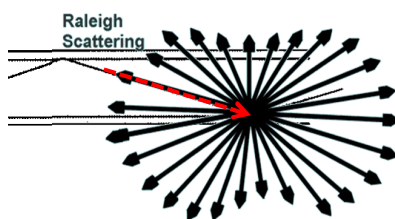
- Plastic scintillators are based on a core of **polystyrene** ($n=1.58$)
 - Cladding material is polymethylmethacrylate, PMMA ($n=1.49$)
- A glass capillary tube filled with **liquid organic scintillator** can also function the same way as a fiber scintillator.
 - Good light yield
 - Fast decay time
 - Less radiation damage
- Scintillating fibers are sometimes grouped together to form ribbons or bundles.



43/46

Light Yield and Propagation

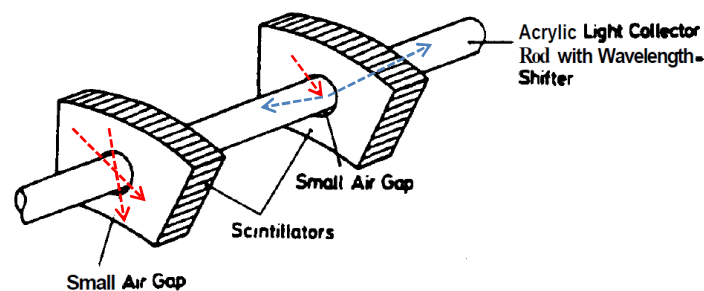
- The intensity of the scintillation light along the length of the fiber is **attenuated** due to several effects:
 - Reabsorbed in the fiber
 - Imperfections at the core-cladding interface
 - **Rayleigh scattering** deflects the light so that it is no longer totally internally reflected.



44/46

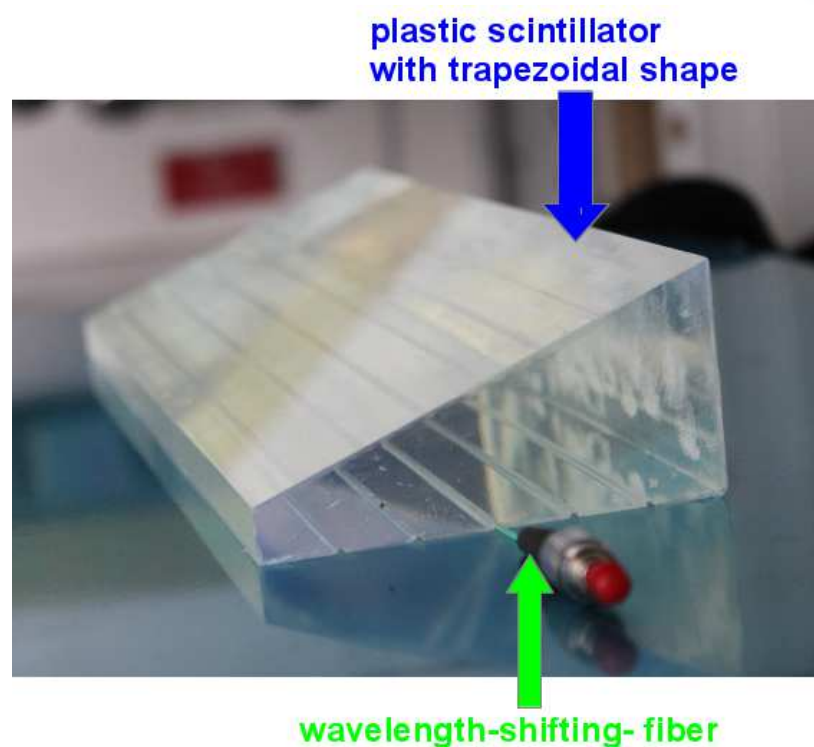
Wavelength Shifters

- The objective of wavelength shifting is to better match the absorption spectrum of the **PMT**.
- The light pipe is doped with a wavelength shifter.
 - Reradiated light is emitted **isotropically**.
 - Allows the light to "**turn corners**"



45/46

Wavelength Shifters



46/46

OUTLINE

- SCINTILLATION DETECTOR PRINCIPLES
- ORGANIC SCINTILLATORS
- INORGANIC SCINTILLATORS
- LIGHT COLLECTION

47/46



Scintillation Detector Principles

吳杰
國立陽明大學
生物醫學影像暨放射科學系



Photomultiplier Tubes and Photodiodes

吳杰
國立陽明大學
生物醫學影像暨放射科學系

OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

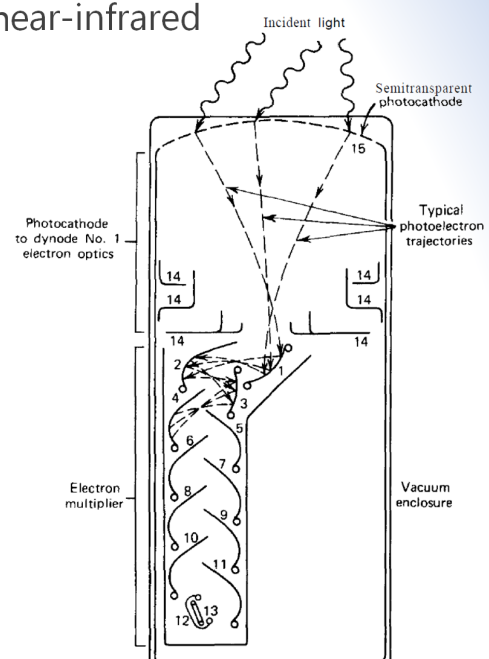
OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

3/46

INTRODUCTION

- The photomultiplier tube (PMT) converts light signals into a **current** pulse.
 - Sensitive to ultraviolet, visible, and near-infrared
- The structure of a PMT consists of
 - A photosensitive layer, called the **photocathode**
 - An electron multiplier structure, called the **dynodes**
 - Outer envelope to sustain **vacuum** conditions



4/46

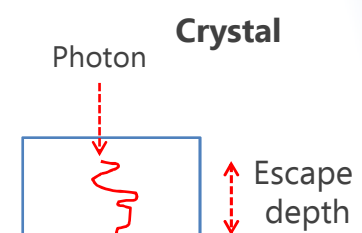
OUTLINE

- INTRODUCTION
- **PHOTOCATHODE**
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

5/46

PHOTOCATHODE

- Conversion of incident lights into electrons is divided into **three stages**.
 - Absorption of photons and transfer of energy to an electron
 - » _____eV each photon
 - » Electron moves to the **conduction band**.
 - Migration of the electron to the surface
 - » Electron-electron collisions
 - » Maximum electron range is called **escape depth**.
 - » Energy loss should be small in order to maximize the escape depth
 - Escape of the electron
 - » Overcome the **potential barrier** of the surface
 - » Called **work function** ~ _____ eV
 - » Surface barrier should be as low as possible.



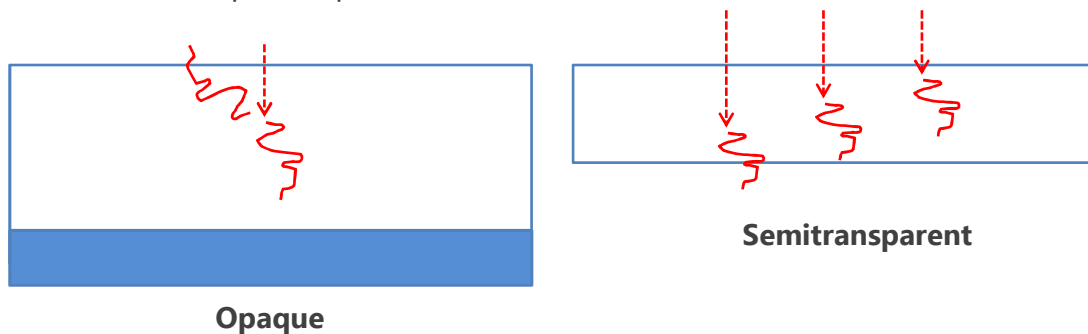
PMT

Photoelectron

6/46

Photocathode Types

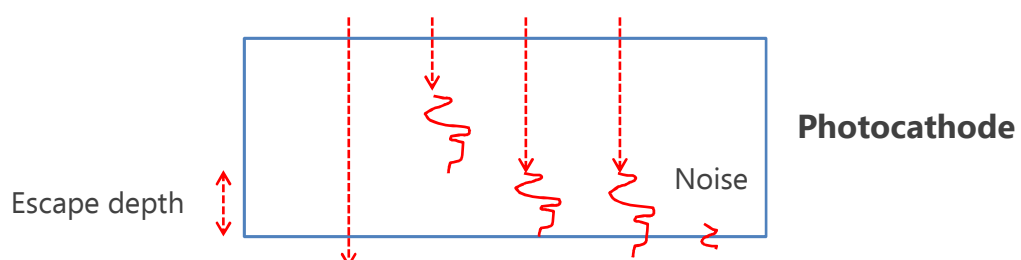
- Photocathodes have two types.
 - Opaque type
 - » Thickness greater than the maximum escape depth.
 - » Photoelectrons are collected from the same surface.
 - Semitransparent type
 - » Thickness less than the escape depth.
 - » Photoelectrons are collected from the opposite surface.
 - » Semitransparent photocathodes are more common.



7/46

Photoemission Process

- The thickness of the photocathode should be **suitable**.
 - To absorb the photons, it should be _____ enough.
 - To escape the electrons, it should be _____ enough.
- At room temperature, electrons have an average thermal energy about _____.
 - Occasionally the energy may exceed the potential barrier.
 - Spontaneous signal may rise, called **thermal noise**.
 - Low potential barrier → high photosensitivity → high noise



8/46

Quantum Efficiency

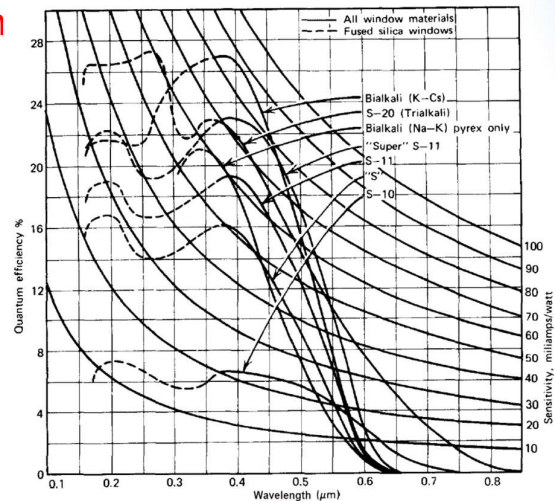
- The sensitivity of photocathodes can be stated as **quantum efficiency** (QE).

- Maximum QE of 20-30%

$$QE = \frac{\text{No of photoelectrons emitted}}{\text{No of incident photons}}$$

- A strong function of **wavelength**

- High $\lambda \rightarrow$
photoelectron energy ____ $\rightarrow$
QE _____
 - Low $\lambda \rightarrow$
photoelectron energy ____ $\rightarrow$
QE _____



9/46

Quantum Efficiency

- An alternative measure of quantum efficiency is the **number of photoelectrons** produced per **unit energy lost** in a scintillator.

- For NaI (TI) detector, 1 keV produces 8 - 10 photoelectrons
 - 100-120 eV per photoelectron (PE)

- The energy required to produce one **information carrier**:

- Gas filled chamber $\rightarrow$ _____ eV/IP
 - Semiconductor $\rightarrow$ 3 eV/EHP

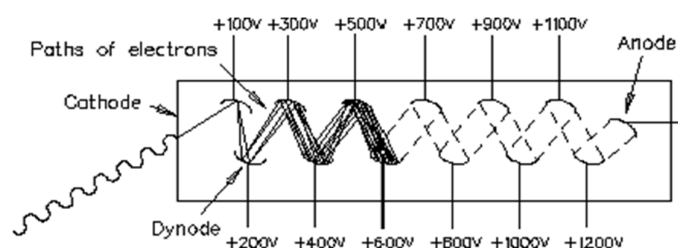
OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- **ELECTRON MULTIPLICATION**
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

11/46

ELECTRON MULTIPLICATION

- Electrons from the photocathode are **accelerated** and strike to **dynode**, and then emit more than one **secondary electrons**.
 - Electrons leaving the photocathode have ~ 1 eV.
 - The first dynode is held at **+100 V**.
 - The kinetic energy of electrons at the dynode is _____ eV.
 - **3 eV** can excite an secondary electrons.
 - _____ **excited electrons** are created.
 - A fraction is reached **dynode surface** $\sim 1/3$.
 - Multiplication factor (secondary electron yield) $\delta \cong 10$

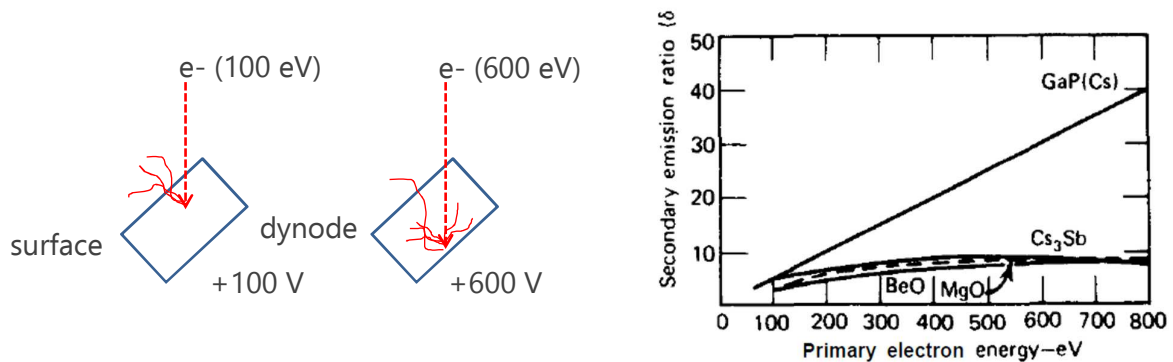


$$\delta = \frac{\text{No of secondary electrons emitted}}{\text{No of incident electrons}}$$

12/46

Secondary Electron Yield

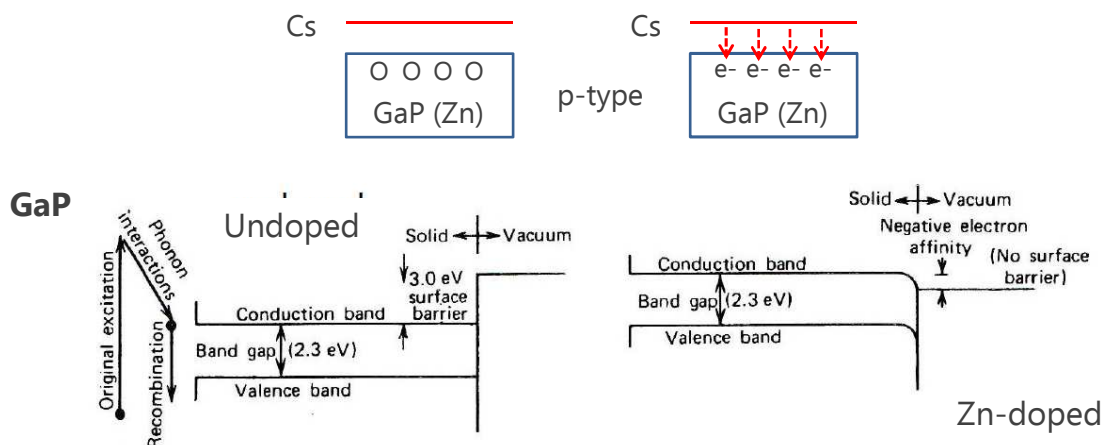
- Secondary electron yield is a function of **electron energy**.
 - Low-energy electron strikes the dynode
 - » **Few** secondary electrons will be excited ~33.
 - » The distance to dynode surface is _____.
 - » Most of these excited electrons will be formed near the surface.
 - High-energy electron strikes the dynode
 - » **More** excited electrons will be created ~ 200, but **at greater depth**
 - » The probability of escape will decrease.



13/46

Negative Electron Affinity Materials

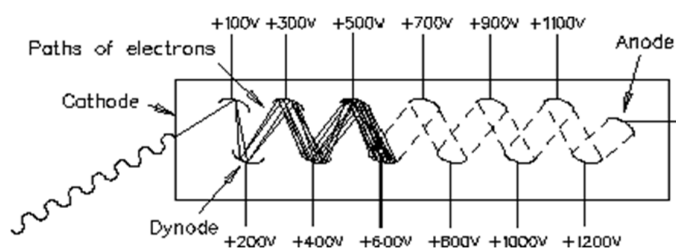
- The secondary emission yield (δ) of dynodes can be increased through the use of **negative electron affinity (NEA)** materials.
 - Gallium phosphide (GaP) + p-type zinc
 - Cesium is applied to the surface.
 - The acceptors at the surface attract an electron from the cesium.



14/46

Negative Electron Affinity Materials

- Electrons that have reached the bottom of the conduction band are still candidates for escape.
 - The average **escape depth** tends to be much greater.
 - Secondary electron yields (δ) of ~ 50 .
- An advantage of NEA is for **ultrafast timing** applications.
 - Higher gain per stage permits a **reduction** in the **stage number**.
 - Reducing the overall time spread.



$$\delta = \frac{\text{No of secondary electrons emitted}}{\text{No of incident electrons}}$$

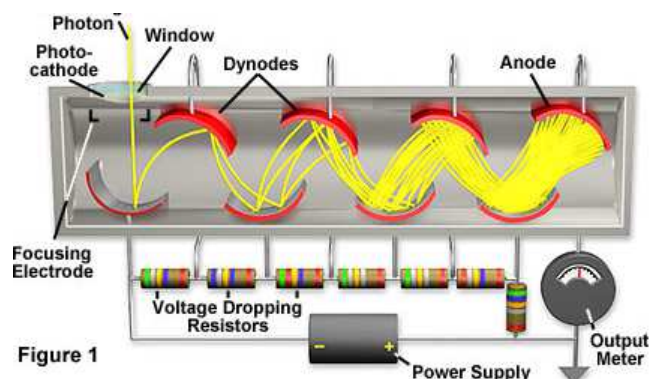
15/46

Multiple Stage Multiplication

- All PMTs use **multiple stages**. The overall gain is given by
 - N – stage number

$$\text{Overall gain} = \delta^N$$

- To achieve electron gains of 10^6 , for conventional dynode
 - $\delta = 5$
 - $N = 10$
 - Gain $\approx 10^7$
- For NEA dynode
 - $\delta = 55$
 - $N = 4$
 - Gain $\approx 10^7$



16/46

Statistics of Electron Multiplication

- The emission of secondary electrons is a **statistical process**. δ is suffered from **fluctuation**.
 - Secondary electrons at a dynode follow a _____ distribution.
 - Relative variance defined as $(\sigma/\bar{x})^2 \rightarrow 1/\delta$
 - Relative variance over N identical stages is

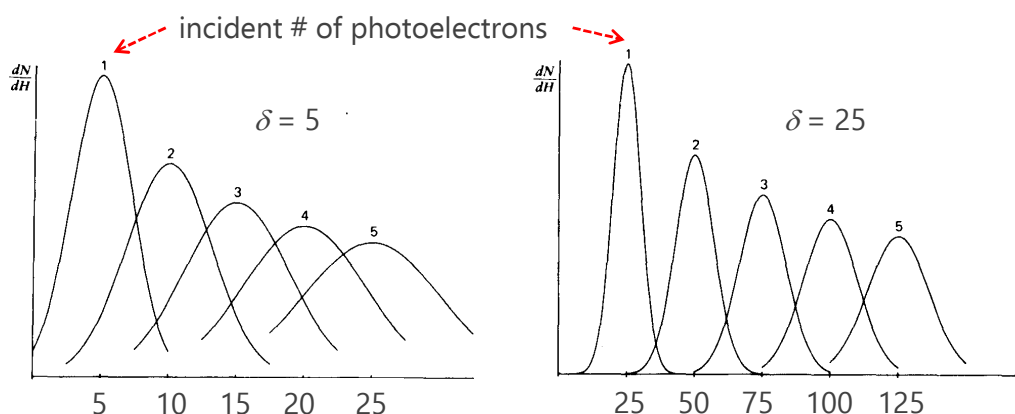
$$\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta^2} + \frac{1}{\delta^3} + \dots + \frac{1}{\delta^N} \cong \frac{1}{\delta - 1}$$

- The relative variance is dominated by fluctuations in the yield from **the _____ dynode**.

17/46

Statistics of Electron Multiplication

- If δ is small, it is impossible to separate the events caused by one photoelectron from those from more photoelectrons.
- If δ is larger, the separation is much more distinct. **Energy resolution** can be improved.



18/46

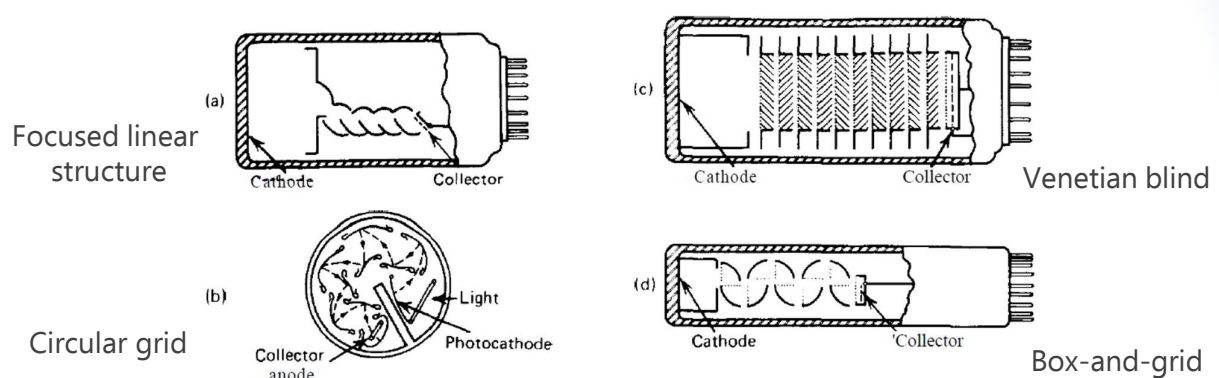
OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- **PMT CHARACTERISTICS**
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

19/46

PMT CHARACTERISTICS

- PMT also consist of a
 - Photoelectron collection region
 - Multistage electron multiplier section and an anode.
 - Focused linear and circular grid structures speed up the **electron transit time** and have the **fastest response time**.
 - Venetian blind suffers from a slow response time
 - Box-and-grid structure is old and slow.



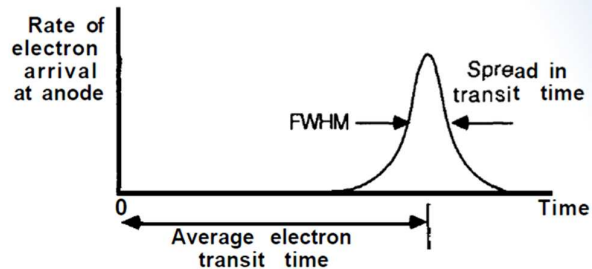
20/46

Pulse Timing Properties

- The electron transit time is defined as the time between the **photoelectron from photocathode** and the collection of the electrons at **the anode**.

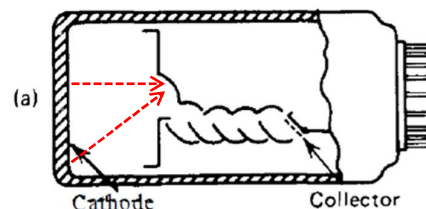
- Range from 20-80 ns

- Spread in transit time is determines the **time width** of the pulse.



- Factors in the spread in transit time:

- The difference in **paths** from photocathode **to the first dynode**.
 - A **plano-concave** photocathode is used.

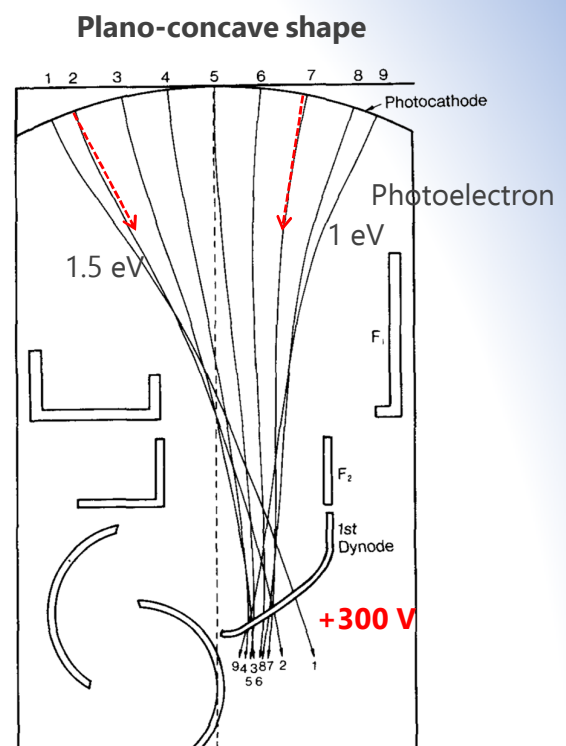


21/46

Pulse Timing Properties

- Another source of transit time spread is due to

- Initial **velocities of photoelectrons** leaving the photocathode.
 - Minimized by using a **voltage** difference in first dynode

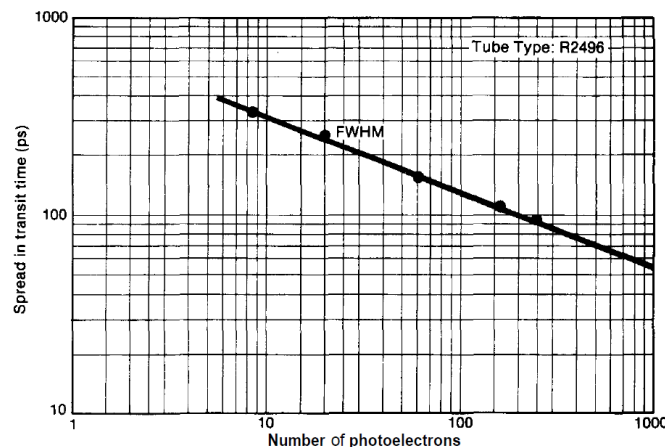


22/46

Pulse Timing Properties

- The transit time spread depends on the **number** of **photoelectrons**.

- _____ model
- Fractional standard deviation varies with $1/\sqrt{N_{pe}}$
 - » Higher **light yield** from a scintillator
 - » Higher **QE** of photocathode



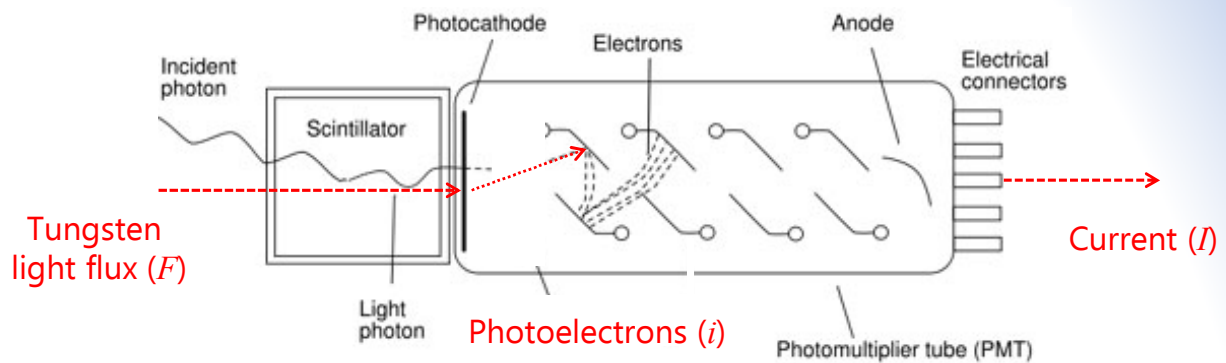
23/46

PMT Specifications

- Manufacturers will quote the performance of PMT.
 - Overall Luminous Sensitivity
 - » Ratio of the **anode current** to the luminous flux from a **tungsten light** source incident on the photocathode
 - Photocathode Luminous Sensitivity
 - » Ratio of the **photoelectrons** to the luminous flux from a **tungsten light** source incident on the photocathode
 - Dark Current
 - » Anode current measured without photocathode illumination
 - Anode Pulse Width
 - » Time width of the output pulse measured at **FWHM**
 - Anode Pulse Rise Time
 - » Time taken for the output pulse to rise from **10% to 90%** of the peak.

24/46

PMT Specifications



$$\text{Overall Luminous Sensitivity} = I/F$$

$$\text{Photocathode Luminous Sensitivity} = i/F$$

25/46

OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- **PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS**
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

26/46

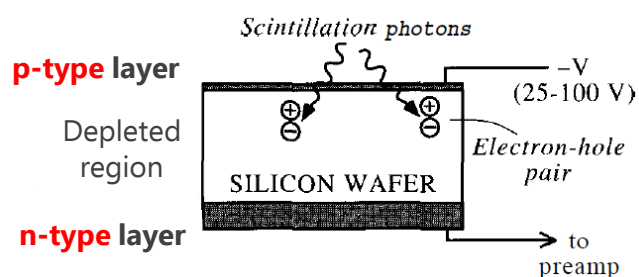
PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS

- Advances of **semiconductor photodiodes** have led to the substitution for PM tubes.
 - Higher quantum efficiency (QE)
 - Better energy resolution
 - Lower power consumption
 - More compact size
 - Insensitive to magnetic fields
- There are two general designs of photodiodes
 - Conventional photodiodes - have no internal gain
 - Avalanche photodiodes - incorporate internal gain

27/46

Conventional Photodiodes

- For a silicon photodiode, **Si(Li)**, light is incident on a **p-layer** entrance window. Electron hole pairs (EHPs) are produced at the **depleted region** and driven by the electric field resulting from the **applied voltage**.
 - EHPs with a bandgap of 1-2 eV.
 - No need for charge carriers to escape from a surface
 - Quantum efficiency as high as 60-80%
 - No subsequent amplification
 - Output signal is small.

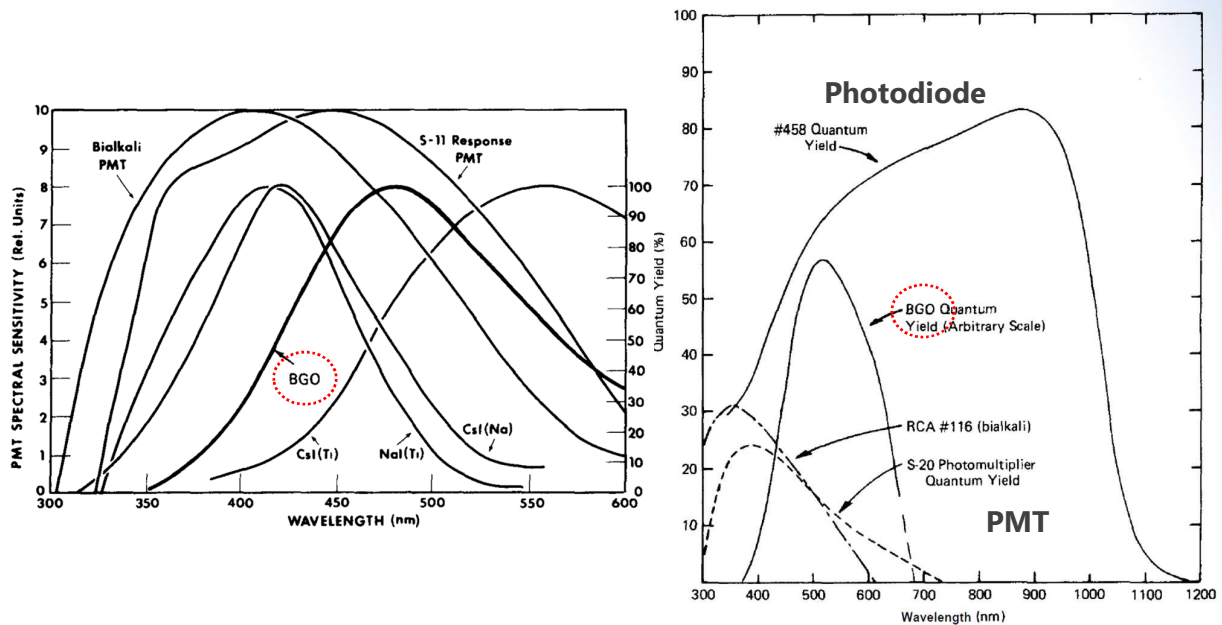


28/46

Conventional Photodiodes

- The quantum efficiency reaches higher values and extends much farther into the **long wavelength** region.

□ Important for _____ and _____

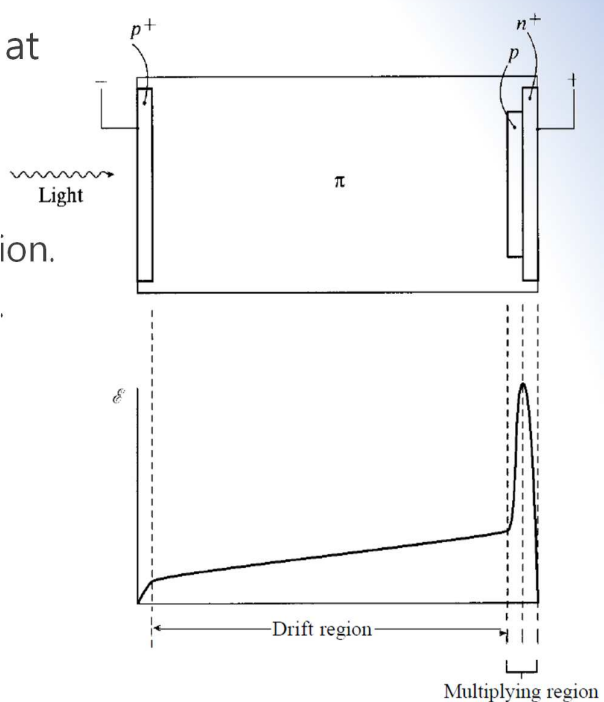


29/46

Avalanche Photodiodes

- Charges can be increased through an **avalanche** process at high values of the **applied voltage** to create additional EHPs.

- Photon interacts within π region.
- Electron is drawn to the right.
- EHPs are created in the multiplying region



30/46

PMT Versus Photodiodes

	PMT	Photodiodes
Quantum efficiency	30%	80%
Carrier energy	100 eV/PE	3 eV/EHP
Carrier number	10,000	333,333
Energy resolution*	1%	0.17%
Power consumption	1200 V	100 V
Size	5 cm - 20 cm	1 mm – 1 cm
Dark current	10^{-10} A	10^{-10} A

*1 MeV energy deposition

31/46

OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- **SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS**
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

32/46

SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS

- Time constant is large compared with the decay time
 - pulse rates are not excessively high → pile up
 - A voltage pulse is equal to Q/C .
- Time constant to be much smaller than the decay time
 - a much faster pulse results, good for fast timing applications.
 - Pulse amplitude is small.
- The current flowing in anode, $i(t)$, influences the shape of the anode voltage pulse.
 - represented as a simple exponential decay

$$i(t) = i_0 e^{-\lambda t}$$

33/46

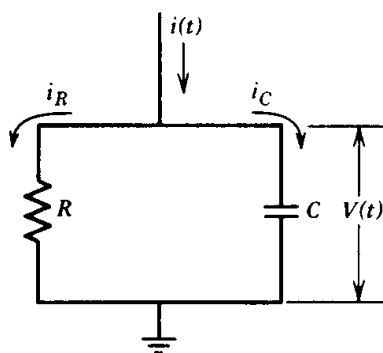
SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS

- Total charge Q collected over the entire pulse

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt = i_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{i_0}{\lambda}$$

$$i(t) = \lambda Q e^{-\lambda t}$$

- To derive the voltage pulse $V(t)$ for the parallel RC circuit



$$i(t) = i_C + i_R$$

$$i(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R}$$

34/46

SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS

$$V(t) = \frac{1}{\lambda - \theta} \cdot \frac{\lambda Q}{C} (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}) \quad \theta \equiv \frac{1}{RC}$$

■ Large time constant

□ $\theta \ll \lambda$

$$V(t) \cong \frac{Q}{C} (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t})$$

□ For a short time

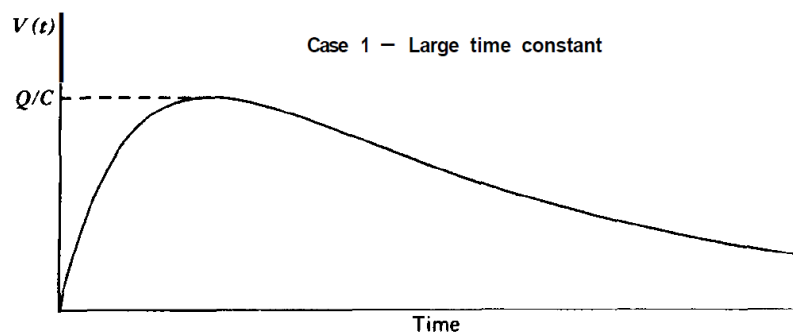
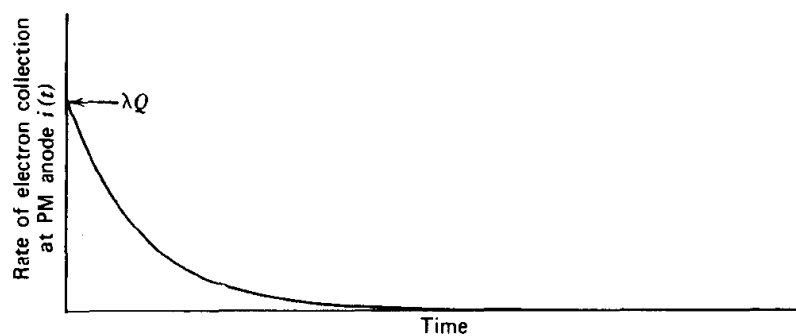
$$V(t) \cong \frac{Q}{C} (1 - e^{-\lambda t}) \quad \left(t \ll \frac{1}{\theta} \right)$$

□ For a long time

$$V(t) \cong \frac{Q}{C} e^{-\theta t} \quad \left(t \gg \frac{1}{\lambda} \right)$$

35/46

SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS



36/46

SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS

$$V(t) = \frac{1}{\lambda - \theta} \cdot \frac{\lambda Q}{C} (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}) \quad \theta \equiv \frac{1}{RC}$$

■ Small time constant

□ $\theta \gg \lambda$

$$V(t) = \frac{\lambda}{\theta} \cdot \frac{Q}{C} (e^{-\lambda t} - e^{-\theta t})$$

□ For a short time

$$V(t) = \frac{\lambda}{\theta} \cdot \frac{Q}{C} (1 - e^{-\theta t}) \quad \left(t \ll \frac{1}{\lambda} \right)$$

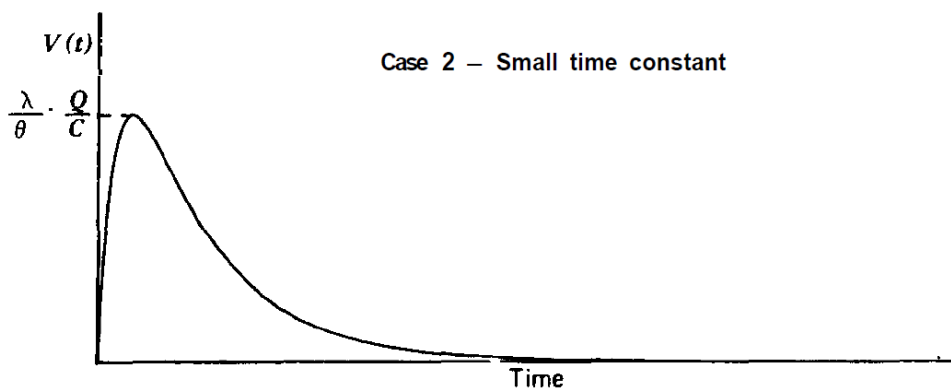
□ For a long time

$$V(t) \equiv \frac{Q}{C} e^{-\theta t} \quad \left(t \gg \frac{1}{\lambda} \right)$$

37/46

SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS

- Pulse amplitude still is a linear measure of the charge Q, but subject to fluctuations due to noise.
- In order to have 95% of the signal, an effective integration time, three times the decay constant, is required.



38/46

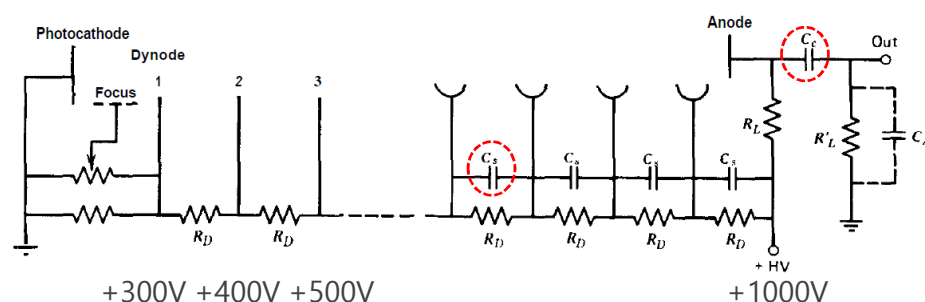
OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

39/46

ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

- An **external voltage source** must be connected to PMTs.
 - First dynode must have a positive voltage to the photocathode.
 - Each succeeding dynode must have a **positive voltage difference**.
 - First dynode voltage must be larger than other dynode voltage.
- Voltage differences are provided by a **resistive voltage divider**.
 - **Divider string** supplies successively increasing positive voltages to each dynode.



40/46

Anode Current

■ Pulse current calculation

- ❑ 1000 photoelectrons per pulse from the photocathode
- ❑ Overall gain of 10^6
- ❑ 10^5 pulses per second

$$I_{avg} = 10^9 \frac{\text{electrons}}{\text{pulse}} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{coulomb}}{\text{electrons}} \times 10^5 \frac{\text{pulses}}{\text{second}}$$
$$= 1.6 \times 10^{-5} \text{ A} = 0.016 \text{ mA}$$

- ❑ Peak current during a pulse is substantially higher
- ❑ 5-ns pulse width

$$I_{peak} = 10^9 \frac{\text{electrons}}{\text{pulse}} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{coulomb}}{\text{electrons}} \times \frac{1}{5 \times 10^{-9} \text{ s}}$$
$$= 0.032 \text{ A} = 32 \text{ mA}$$

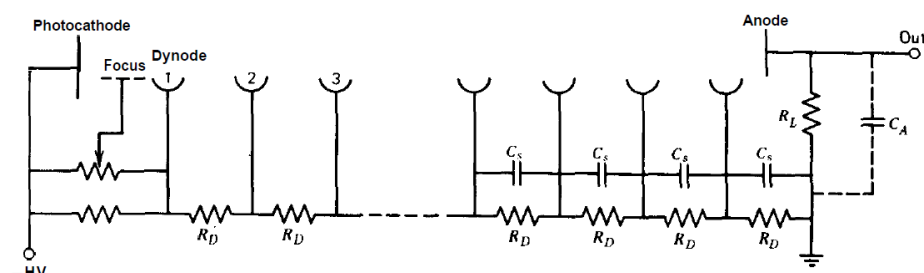
- ❑ Stabilizing capacitors should be added in the late stages.

41/46

High-Voltage Supply and Voltage Divider

■ Polarity is in some sense an arbitrary choice.

- ❑ Photocathode (ground) and anode (high voltage) → +HV
 - » Photocathode is simple to contact with a scintillation crystal.
- ❑ Photocathode (negative voltage) and anode (ground) → -HV
 - » Elimination of the **coupling capacitor** in anode end.
 - » Signal pulses are fast due to **directly couple** measuring circuits.
 - » Spurious pulses due to high-voltage leakage from photocathode damage the crystal. → **Electroluminescence**



42/46

Noise and Spurious Pulses

- Thermal electrons are randomly emitted by photocathode.
 - The pulse amplitude is low.
 - **Discriminator** is sufficient to eliminate all the thermal noise.
- The rate of thermal noise is proportional to the area of the photocathode.
 - The _____ **diameter** of photocathode to minimize dark current.
 - Emission rates at room temperature are about 10^3 e/cm².s

$$I_{\text{dark}} = (10^3 \text{ elec/s})(10^6)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C/elec}) = 160 \text{ pA}$$



43/46

Noise and Spurious Pulses

- Photomultiplier tubes should be **stored in the dark**.
 - While voltage is supplied, exposure to room light causes **anode currents** exceed the maximum ratings.
- Another source of dark pulses is the natural radioactivity in the glass envelope.
 - ⁴⁰K and thorium
 - A beta decay gives rise to a flash of **Cherenkov radiation**.
- Cosmic radiation generally results in dark pulses.
 - Operating _____ so that the end window has minimum cross section to the cosmic radiation.

44/46

Noise and Spurious Pulses

- Afterpulses are satellite pulses that follow a true signal pulse after a short delay.
 - **Emission of light** from the dynode finds its way back to the photocathode.
 - » Delayed by a time roughly 20-50 ns
 - » Amplitude is usually quite small
 - **Imperfect vacuum** within the tube
 - » Residual gas is ionized by the electrons.
 - » Positive ions drift back to the photocathode
 - » The time spacing is therefore relatively large

45/46

OUTLINE

- INTRODUCTION
- PHOTOCATHODE
- ELECTRON MULTIPLICATION
- PMT CHARACTERISTICS
- PHOTODIODES AS SUBSTITUTES FOR PMTS
- SCINTILLATION PULSE SHAPE ANALYSIS
- ANCILLARY EQUIPMENT FOR PMT

46/46



Photomultiplier Tubes and Photodiodes

吳杰
國立陽明大學
生物醫學影像暨放射科學系

附件三

輻射度量分析中心
Radiation Measurement and
Analysis Center

食品檢驗分析實驗室

碘化鈉能譜分析系統作業程序書

國立陽明大學
輻射度量分析中心

名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	2/22

1. 目的

提供本實驗室之技術人員作為操作碘化鈉能譜分析系統所建置之標準作業流程。

2. 適用範圍

適用於進行檢測試樣之加馬能譜分析。

3. 參考文件

4. 職責

(1) 技術人員：負責執行碘化鈉之操作。

5. 儀器設備

- (1) 2吋×2吋以上碘化鈉偵檢器。
- (2) 低背景計測鉛屏蔽之規格如下：各方向鉛厚度為5公分與可單向開啟上蓋、計測腔內直徑15公分以上、高度20公分以上。

6. 作業程序

(1) 基本功能介紹

(A) 在電腦桌面上可以看見Gamma Vision的
滑鼠左鍵兩下，即可開啟Gamma Vision。



圖像，點擊

名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	3/22



(B) 工具列之功能鍵：

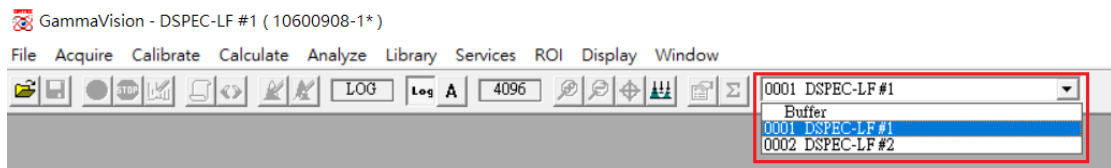
圖示	名稱	作用
	Recall Spectrum (開啟舊能譜)	可開啟過去儲存的能譜。
	Save Spectrum As (儲存新能譜)	存取能譜。
	Start Acquisition (開始收取數據)	設定收取數據時間及開始收取數據。
	Stop Acquisition (停止收取數據)	停止收取數據。
	Clear Detector/Buffer (清除數據)	清除能譜。
	Zoom In (放大)	可將能譜視窗放大。此外，可按鍵盤中的「+」符號調整。
	Zoom out (縮小)	可將能譜視窗縮小。此外，可按鍵盤中的「-」符號調整。

(2) 檢測試樣執行步驟

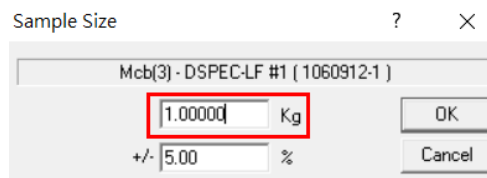
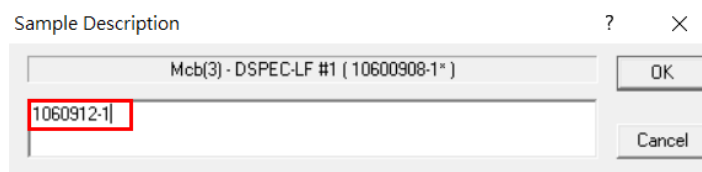
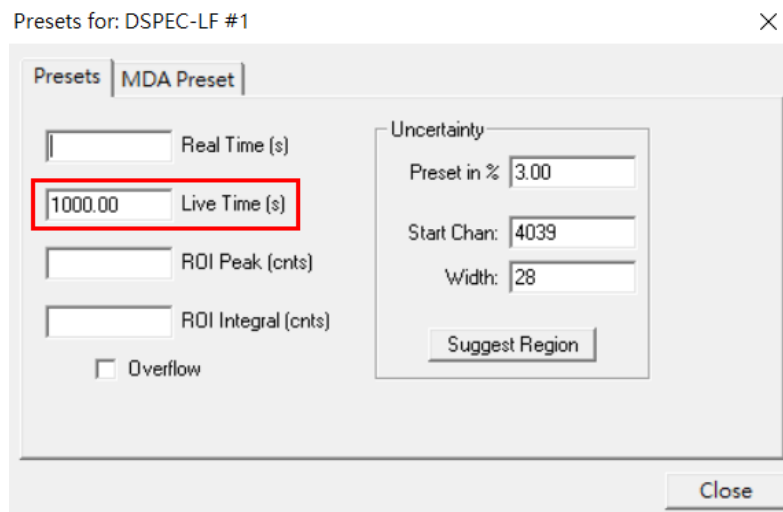
(A) 將試樣置入加馬偵檢器頂端之固定量測位置。

(B) 開啟 Gamma Vision，在工具列選擇欲執行檢測的碘化鈉能譜分析系統。

名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	4/22

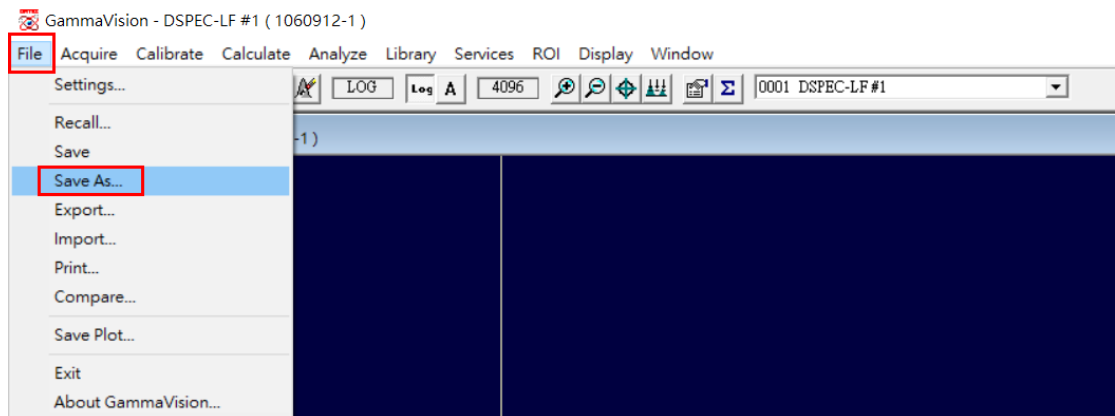


- (C) 確認能譜視窗是否有數據，如果有的話，點工具列的 Clear Detector/Buffer，以清除數據。
- (D) 點工具列的 Start Acquisition，會依序出現下列視窗，分別於視窗中填入時間(Live Time)、試樣編號(依照當天檢測年月日及檢測順序進行編號，例如：*****-*)及試樣重量，即可開始計測。

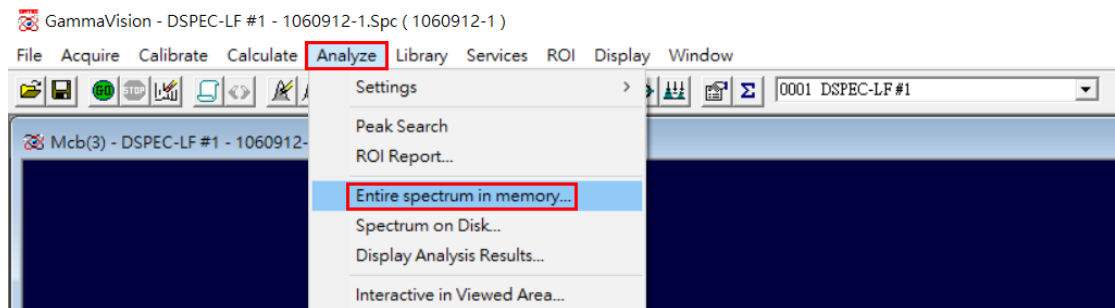


- (E) 計測完畢後，點標題列的 File→ Save As 或工具列的 Save Spectrum As，然後會出現下列視窗，選擇當年月之資料夾，檔名依試樣編號(依照當天檢測年月日及檢測順序進行編號，例如：*****-*)命名。

名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	5/22



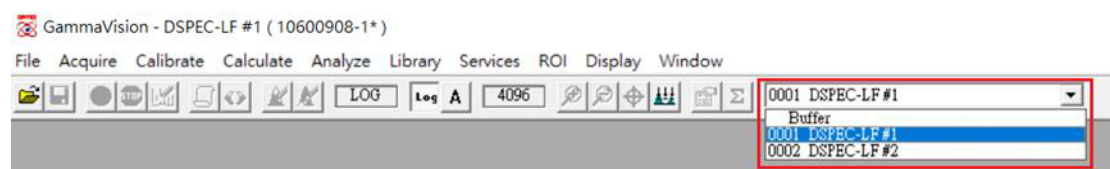
(F) 最後，點標題列的 Analyze→Entire spectrum in memory...，即會出現分析結果與報告。



(3) 能量校正

執行頻率為每年一次，在兩次校正期間須不定期進行查驗，當發現鉀-40能峰(1460.8 keV)偏離 $\pm 1\text{keV}$ 時，即須對加馬能譜分析系統進行能量校正，每次須記錄於「碘化鈉能譜分析校正紀錄表」(RMAC-SO-003-1)。

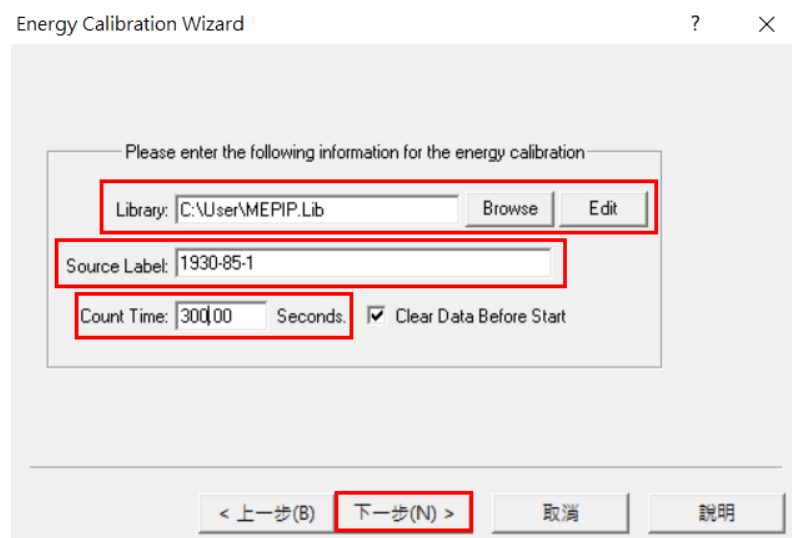
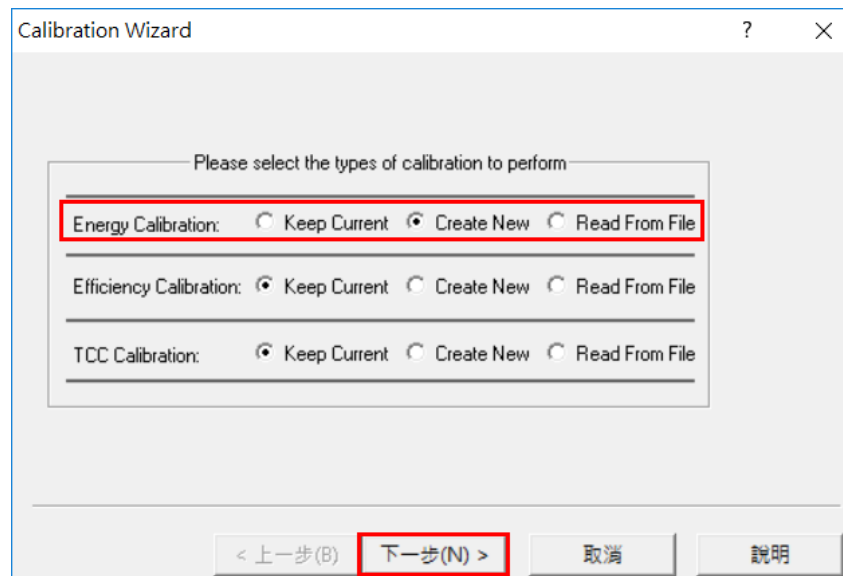
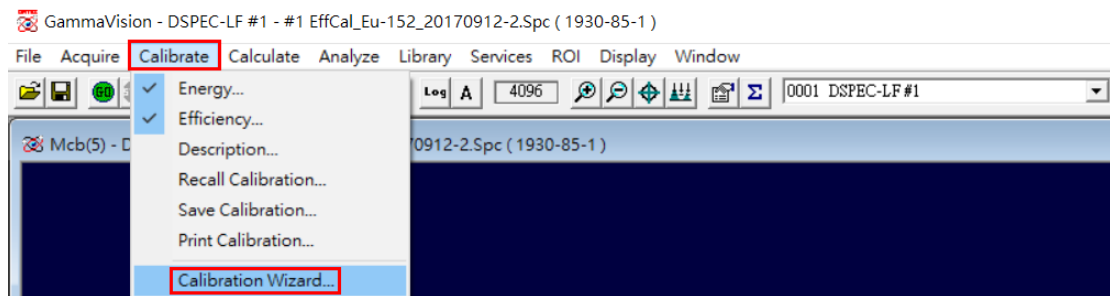
- (a) 將校正射源放入欲校正之碘化鈉能譜分析系統內。
- (b) 開啟Gamma Vision，在工具列選擇欲校正的碘化鈉能譜分析系統。



- (c) 確認能譜視窗是否有數據，如果有的話，點工具列的 Clear Detector/Buffer，以清除數據。

名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	6/22

- (d) 點標題列的 Calibrate→Calibration Wizard，依序出現下列視窗，在 Energy Calibration處選擇 Create New，接著於 Source Label處輸入校正射源證書上的射源編號，於 Count Time處隨意輸入時間，最後點確定。



名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	7/22

Energy Calibration

×



Place the '1930-85-1' in the calibration position and select OK.

確定

取消

- (e) 接著會依序出現下列視窗，分別於視窗中填入時間1000秒(Live Time)、試樣編號(射源編號)及試樣重量，即可開始計測。

Presets for: DSPEC-LF #1

×

Presets | MDA Preset

Real Time (s)

1000.00 Live Time (s)

ROI Peak (cnts)

ROI Integral (cnts)

☐ Overflow

Uncertainty

Preset in % 3.00

Start Chan: 4039

Width: 28

Suggest Region

Close

Sample Description

?

×

Mcb(5) - DSPEC-LF #1 - #1 EffCal_Eu-152_20170912-2.Spc (1930-85-1)

1930-85-1

OK

Cancel

Sample Size

?

×

(5) - DSPEC-LF #1 - #1 EffCal_Eu-152_20170912-2.Spc (1930-85-1)

1.00000 Kg

+/- 5.00 %

OK

Cancel

- (f) 計測完畢後，會依序出現下列視窗，點是(Y)後選擇能量校正之資料夾，檔名依#儀器編號EngCal_射源名稱_當年月日形式輸入，範例如同下面圖示。

名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	8/22

Energy Calibration



Energy calibration complete. Would you like to save the spectrum?

是(Y)

否(N)



Save Spectrum File



儲存於(I): Spectra

名稱	修改日期	類型
An1948A.An1	4/7/2017 1:41 PM	ORTEC:
An13214.An1	5/24/2017 10:25 AM	ORTEC:
An15050.An1	8/9/2017 10:34 AM	ORTEC:
An17204.An1	3/31/2017 5:08 PM	ORTEC:
An18375.An1	8/9/2017 10:12 AM	ORTEC:
Co-60_20170728A.Spc	7/28/2017 11:51 AM	ORTEC:
EngCal-20170721A.Spc	7/21/2017 3:28 PM	ORTEC:
EngCal-20170721B.Spc	7/21/2017 3:55 PM	ORTEC:
test-0308.An1	5/1/2017 8:18 AM	ORTEC:
test-0308.Spc	3/8/2017 4:41 PM	ORTEC:

檔案名稱(N): #1EngCal-20170912.Spc

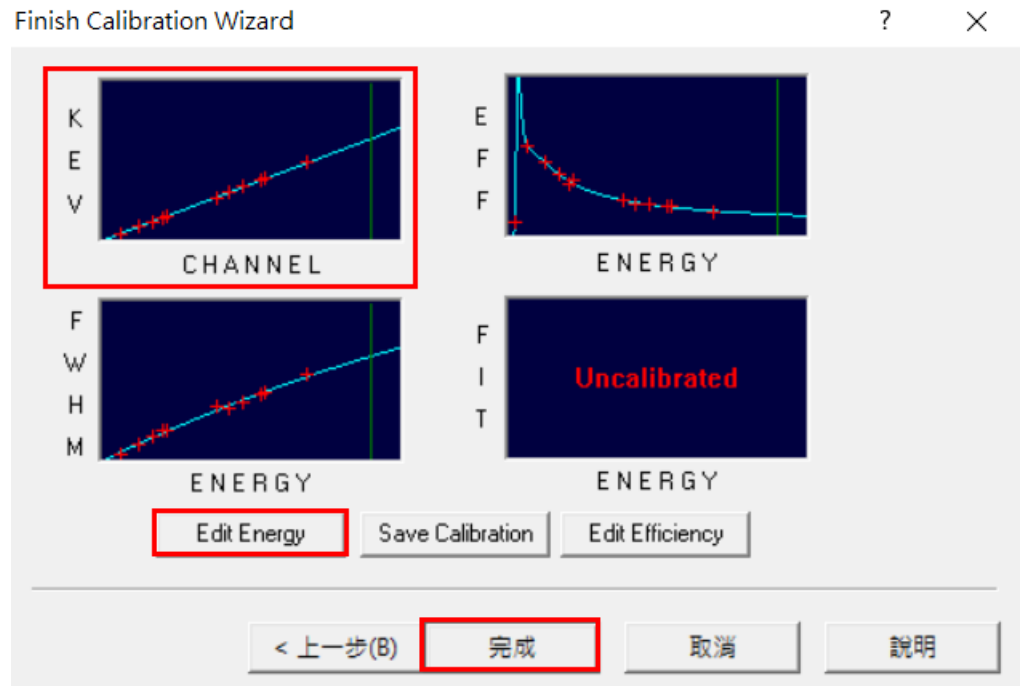
儲存類型(T): Integer SPC

儲存(S)

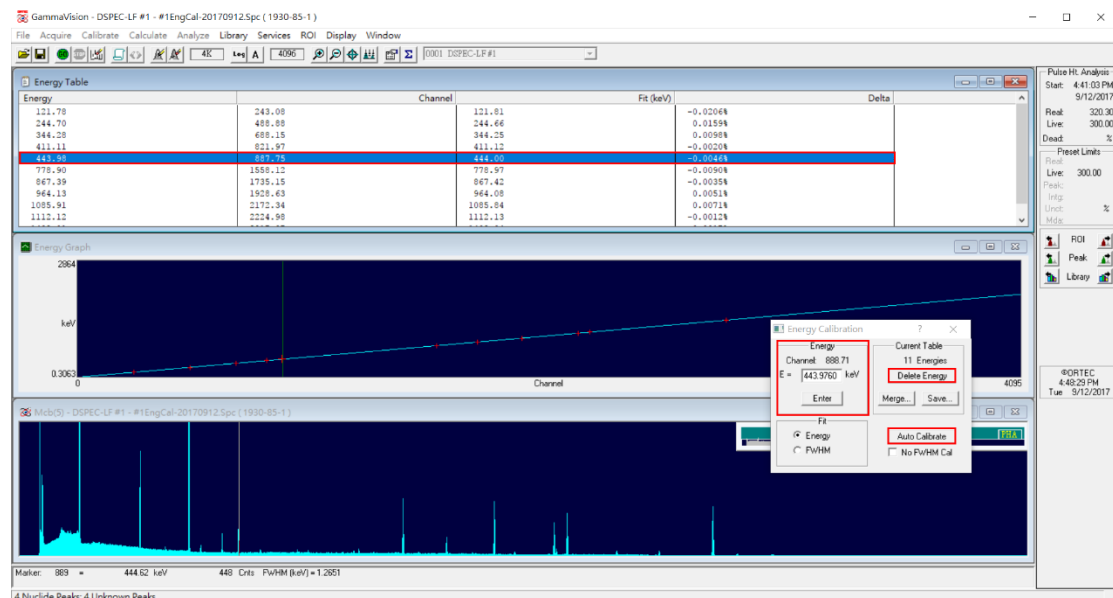
取消

- (g) 最後出現下列視窗，可於左上方看見能量校正結果，點完成即代表完成整個能量校正過程。但如果想要進行修正，點Edit Energy。

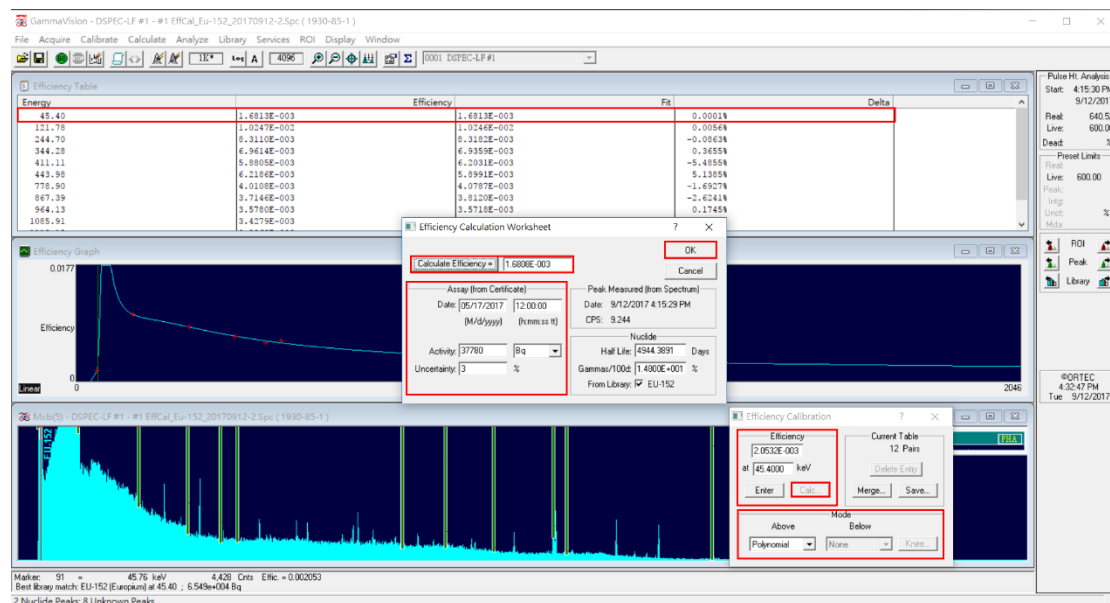
名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	9/22



- (h) 點Edit Energy後出現下列畫面，點Energy Table中預修正的值進行能量修正(Energy)或删除>Delete Energy)，最後點Auto Calibrate，以形成新的Energy Graph。



名稱	碘化鈉能譜分析系統作業程序書	編號	RMAC-SO-003
		版次	1
		頁數	10/22



7. 其他事項

- (1) 技術人員須按標準作業流程作業且定期確實執行系統之校正工作，以確保測試結果正確。
- (2) 分析結果若不符合可接受之範圍，須依「不符合事項管制品保程序書」(RMAC-QP-008)辦理。

8. 檔案管理

- (1) 本程序書內容如有修訂或更新，須依「文件管制及維持品保程序書」(RMAC-QP-003)辦理。
- (2) 碘化鈉能譜分析校正紀錄表須妥善保存，保存期限依「紀錄管制及維持品保程序書」(RMAC-QP-007)之規定辦理。

9. 作業流程圖

無。

10. 附錄

無。