

553287

科學圖書大庫

核儀及輻射度量

編譯者 王永祥 彭賜楨

校閱者 翁寶山

成都科学技术大學圖書館

基本館藏

徐氏基金會出版

553287

3361

1033

3361

1033

科學圖書大庫

核儀及輻射度量

編譯者 王永祥 彭賜楨

校閱者 翁寶山

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有

不許翻印

中華民國六十八年四月七日再版

核儀及輻射度量

基本定價 3.00

編譯者 王永祥 國立清華大學核工系講師
彭賜楨

校閱者 翁寶山 國立清華大學副教授
兼保健物理組主任

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 財團法人 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號
發行者 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 1 5 7 9 5 號
承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

序

本書為聯繫電子學與核輻射度量二者的橋樑，用簡易的電子學術語解釋核輻射度量。清華大學核工系四年級的核輻射度量課程已採用此書為主要的參考書。

前三章為核輻射度量的基礎和使用的設備。第一章為理論基礎，第二、三章為實際應用。其餘九章則討論各種實驗所需的儀器，對於儀器的型式、設計、有關電子學的知識、限制、克服限制等的詳加討論，而各種儀器自成一章，可單獨閱讀，亦可互相印證參考。

王永祥先生執教核輻射度量實驗多年，學識經驗俱佳，彭賜楨先生於研習核輻射度量與電子學，極有心得；是為最適當的編譯者。此書除核工系外，凡與核能有關的科系如保健物理，近代物理、放射化學、輻射生物、核醫學、核能發電、放射同位素的應用等，均可作為參考。

本書之編譯，承蒙李育浩、龍漢泉與寧逢春三位先生協助，謹致謝忱。

翁 寶 山 謹識

民國六十七年三月一日

於國立清華大學

目 錄

序

第一章 核反應基本理論

1.1 概要	1
1.2 原子與原子核	1
1.2.1 原子的構造	
1.2.2 電子雲	
1.2.3 原子核	
1.3 核模型	4
1.4 輻射	4
1.4.1 輻射的來源與形式	
1.4.2 電磁輻射或光子	
1.4.3 粒子輻射	
1.5 核反應與放射性	6
1.5.1 特性	
1.5.2 反應過程	
1.5.3 核反應截面	
1.5.4 分裂	
1.5.5 放射性	
1.5.6 放射性的成長與衰變	
1.6 輻射與物質的互應作用	19
1.6.1 電磁輻射	
1.6.2 粒子輻射	

參考文獻	32
------	----

第二章 核儀系統和用途

2.1 概要	33
2.2 偵檢器	33
2.2.1 游離式偵檢器	
2.2.2 激動式偵檢器	
2.2.3 輸出信號	
2.3 儀器	41
2.3.1 核儀單模系統標準	
2.3.2 靈敏電流計	
2.3.3 前置放大器	
2.3.4 主放大器	
2.3.5 計數器	
2.3.6 計數率器	
2.3.7 定時電路	
2.3.8 單階分析儀	
2.3.9 多階分析儀	
2.3.10 電子計算機	
2.3.11 界面裝置	
2.3.12 高壓電源供應器	

參考文獻	47
------	----

第三章 核儀的應用

3.1 概要	48
--------	----

3.2 中子活化分析法·····	48
3.3 螢光分析法·····	52
3.4 莫士包爾效應·····	56
3.5 示踪劑和分子標誌法···	60
3.5.1 示踪法的必要因素	
3.5.2 分子標誌法	
3.6 放射定年技術·····	62
3.7 絕對活性·····	64
3.7.1 4π 計數	
3.7.2 貝他與伽馬符合計數	
3.8 熱原子化學·····	65
3.9 輻射化學·····	66
3.10 半化期的測量·····	69
參考文獻·····	70

第四章 偵檢器

4.1 概要·····	72
4.2 偵檢器的物理基礎·····	72
4.3 充氣式偵檢器·····	73
4.3.1 工作區域	
4.3.2 應用	
4.4 閃爍偵檢器·····	86
4.5 半導體偵檢器·····	89
4.5.1 形狀	
4.5.2 構造	
4.5.3 性能	
4.6 能譜分析·····	98
4.6.1 通論	
4.6.2 偵檢器吸收	
4.6.3 幾何效應	
4.6.4 理論能譜計算	
4.6.5 主峰比	

4.6.6 能量反應函數	
4.6.7 能譜的分離法	
4.6.8 效率	
4.7 背景·····	112
4.7.1 通論	
4.7.2 環境背景來源	
4.7.3 固有背景來源	
4.7.4 偵檢器屏蔽	
參考文獻·····	116

第五章 核儀單模系統標準

5.1 概要·····	119
5.2 核儀標準化的必要性···	119
5.3 發展史·····	120
5.4 優點·····	121
5.5 分類說明·····	122
5.5.1 一般適用性	
5.5.2 電源箱	
5.5.3 單模	
5.5.4 標準電壓	
5.5.5 邏輯水平	
5.5.6 接頭與匯流	
5.5.7 核儀單模系統的其 他要求	
5.6 電源供應器·····	128
5.7 典型核儀單模系統的儀 器·····	129
5.8 非核儀器·····	130
5.9 單模式界面核儀系統···	130
5.10 核儀單模系統的展望···	132
參考文獻·····	132

第六章 前置放大器

- 7.8.1 重要性
- 7.8.2 輸入
- 7.8.3 輸出
- 7.8.4 增益
- 7.8.5 整形
- 7.8.6 雜波
- 7.8.7 溫度
- 7.8.8 直線性
- 7.8.9 定時準確度
- 7.8.10 超載復原
- 7.8.11 共模式排除

參考文獻..... 190

第八章 單階分析儀

- 8.1 概要..... 191
- 8.2 主要部門和特性..... 191
 - 8.2.1 鑑別器
 - 8.2.2 直線性
 - 8.2.3 操作模式
 - 8.2.4 計數率的考慮
- 8.3 單階分析儀的應用..... 196
 - 8.3.1 分類
 - 8.3.2 脈高分析應用
 - 8.3.3 定時與脈高分析
- 8.4 如何選擇單階分析儀... 200
- 8.5 單階分析儀的典型應用... .. 201

參考文獻..... 204

第九章 多階分析儀

- 9.1 概要..... 206
- 9.2 應用..... 206
 - 9.2.1 伽馬能譜

- 9.2.2 放射性衰變
 - 9.2.3 莫士包爾效應
 - 9.2.4 其他應用
 - 9.3 硬體結構..... 209
 - 9.3.1 主要部門的作用
 - 9.3.2 度量模式
 - 9.4 特性..... 220
 - 9.4.1 類比數值變換器
 - 9.4.2 記憶
 - 9.4.3 顯示與輸入／輸出
 - 9.4.4 多階分析儀整體
 - 9.4.5 最易發生的毛病
 - 9.5 結論與展望..... 224
- 參考文獻..... 225

第十章 統計學

- 10.1 統計考慮的必要..... 227
 - 10.1.1 儀器誤差
 - 10.1.2 統計誤差
 - 10.1.3 統計誤差的出現
 - 10.1.4 減少統計誤差
- 10.2 基礎..... 230
 - 10.2.1 發生機率
 - 10.2.2 統計算術
- 10.3 變數..... 232
 - 10.3.1 基本變數
 - 10.3.2 副變數
- 10.4 條件..... 235
 - 10.4.1 一般
 - 10.4.2 與背景比較，試樣的計數很大
 - 10.4.3 與背景比較，試樣的計數不大

10.4.4 不同情況的摘要	
10.5 標準差、偵檢限制與優數的公式	236
10.5.1 背景為非預知	
10.5.2 預知背景	
10.5.3 高活性	
10.6 公式之應用	246
10.6.1 總論	
10.6.2 計算機程式	
10.6.3 摘要	
參考文獻	249

第十一章 定時電路

11.1 概要	250
11.2 定時電路	251
11.2.1 電子鐘	
11.2.2 符合電路	
11.2.3 時間選截法	
11.2.4 短時距的度量	
11.2.5 時距分布譜	
11.3 定時電路的應用	261
11.3.1 短實驗與長實驗	
11.3.2 長半化期的測定	
11.3.3 符合度量	
11.3.4 短半化期的測定	
11.3.5 定時度量中完整的數據處理	
參考文獻	272

第十二章 電子計算機

12.1 概要	274
12.1.1 線上計算機的定義	
12.1.2 電腦化系統的優點	

12.1.3 電腦化系統的缺點	
12.2 電子計算機的界面	277
12.2.1 通論	
12.2.2 類比—數值變換器	
12.2.3 典型界面特色	
12.3 儀器的校準	280
12.4 數據獲取	281
12.4.1 傳送與處理	
12.4.2 將數據送入計算機	
12.4.3 數據的儲存	
12.5 實驗的控制與監測	286
12.5.1 通論	
12.5.2 常用的輔助設備	
12.5.3 實驗設置	
12.5.4 實驗監測	
12.6 電腦化的多階分析儀	290
12.6.1 數據的暴增	
12.6.2 一般概念	
12.6.3 典型實驗	
12.7 數據精編	293
12.7.1 事件發生時的精編	
12.7.2 實驗完成時的精編	
12.8 數據分析	294
參考文獻	296

中英文名詞對照表

第一章 核反應基本理論

1.1 概 要

原子核參與的過程或為核反應或為核變化（蛻變）。這些過程將分三節描述。第一節討論原子構造、原子核的一般性質以及輻射的形式。第二節討論核反應與放射性。最後一節是核輻射與物質之互應作用。

1.2 原子與原子核

1.2.1 原子的構造 原子由兩部分構成，中央為包含大部分質量的核心或原子核，以及環繞在其四周的電子雲。後者的質量比原子總質量的 0.1% 還少，但佔有大部分的體積。原子在電性上屬於中性系統，原子核帶正電，但由電子雲的等數負電荷所中和。原子的物理及化學性質與其核特性均依其構造而定。本節即提供原子、電子雲與原子核的簡略描述。

1.2.2 電子雲 波爾的氫原子模型有一定的電子軌道圍繞著該系統中心僅佔很小體積的正電荷。若此軌道相當於德布格利波長的整數倍，則電子將處於穩定軌道。

薛丁格的量子力學方法建議，凡於位能會變化的空間中具有恒定總量的粒子可由穩定態系統的波函數描述。這方法解除了一些波爾模型的嚴重限制，例如，單電子原子（ H ， He^+ ， Li^{2+} ，……）的限制與無法預測原子光譜的精細結構。並可了解原子間的相互作用。

即使有了這些結果，仍舊無法解釋某些光譜線的精細結構。高斯密特（Gousmit）與烏倫貝克（Uhlenbeck）提議，因電子對其軸之自轉運動（因而連帶有磁矩）與其在原子中的狀態無關，而應具有固有角動量。這個自轉角動量的方向因自轉量子數而量化，可有 $\pm \frac{1}{2}$ 的值。由泡立提出的不相容原理解決了所觀察的電子組態難題，結果當電子數改變一個時，在化學行為即起根本的變化。其意即原子中沒有兩個電子能以相同的量子數共存。因而，

2 核儀及輻射度量

每個元素單獨由其等於電子數的原子序 Z 所決定。庖立的這個假設是瞭解原子化學性質之鑰，或換言之，容許構成已由經驗列出的元素周期表。具有相同總量子數 n 的電子，構成所謂的原子殼（ $n=1$ 為 K 殼、 $n=2$ 為 L 殼、 $n=3$ 為 M 殼等），其能量隨 n 的增加而增加。副殼裏的電子能量用軌道量子數

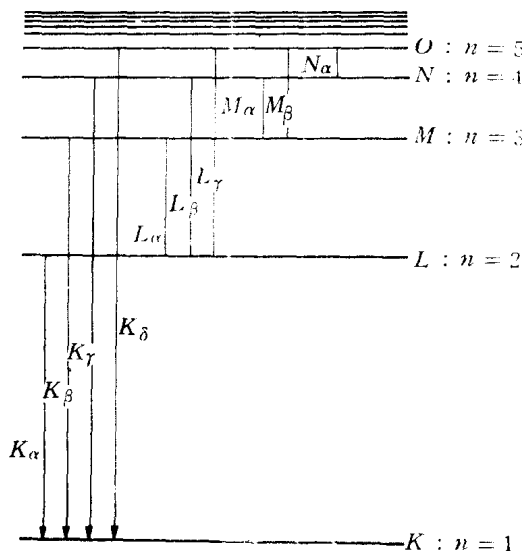


圖 1-1 原子因過渡而產生的 X 射線譜

l 描述（ $l=0$ 為 s ， $l=1$ 為 p ， $l=2$ 為 d ， $l=3$ 為 f ），並隨 l 的增加而增加。當內殼電子經某些獨立過程射出，而另一電子由高能階落下取代時，即產生 X 射線原子光譜。具特性波長的光子隨即射出。因此，當空位落在 K 殼時即有 K 譜線，而空位落在 L 殼時即有 L 譜線等等。每一系列都由電子所落下的能階及因之而定出的各不同譜線所組成，而以 α 、 β 、 γ 等表示（圖 1-1）。

1.2.3 原子核 原子核是拉塞福因解釋由蓋革與馬斯登 (Masden) 所進行的阿爾伐散射實驗

而發現的。大角度的散射，可由阿爾伐粒子與凝集在直徑為 10^{-12} 厘米左右的正電性原子核之間引起的靜電互應作用來解釋。所有原子核的電荷都是正的，且為質子電荷的整數倍。在中性原子裡，原子核有 Z 個正電子單位電荷，而由軌道電子的 Z 個負電子電荷所補償。原子核的質量占有 99.9% 以上的原子總質量。原子核的體積直接正比於其所含的核子數；因此

$$r = r_0 A^{1/3} \quad (1-1)$$

其中 r 代表原子核球體的半徑， r_0 在 1.2 費米左右（1 費米 = 10^{-13} 厘米）而 A 是原子核的質量數（質子與中子的數目和）。 r 與 A 的相關性顯示核物質之一般密度在 10^{14} 克/立方厘米左右，這表示核內的核子非常緊密地集束在一起，元素 X 是由其原子序 Z 與其質量數 A 表示，通常寫成 ${}_Z^AX$ 。

阿爾伐粒子撞擊鈹靶產生穿透物質能力甚強的中性輻射。查兌克假定其為中子，是一種大約與質子同質量的中性粒子。稍後發現，自由中子以大約 1000 秒的平均半化期蛻變成質子，電子與反微中子。原子核即由中子與質

子組成。

將所有已知核種的中子數 N 對其原子核 Z 繪圖(圖 1-2)可顯示核的穩定性趨勢。在低原子序部份,穩定趨勢落在中子數 N 等於 Z 的原子核上,這是對稱效應的特性。當 Z 增加時,穩定核則趨向於 N 比 Z 大的核。因需要多出的中子以補償所增加的質子(庫倫)排斥力。

在穩定帶以上的核種有多出的中子,易經由貝他放射朝向更穩定的組態蛻變(見 1.4.3 節)。而在穩定帶以下的核種則有多出的質子,經由正子放射而蛻變。

原子核的結合能 B 可由比較中性原子質量與其組成粒子的質量,將其質量差轉變成能量而得。假設軌道電子的結合能約等於氫原子之電子結合能。自由的核組成粒子,其總質量將比束縛成核的來得大。簡言之,因有部分質量已變成核的結合「膠」。若將每個核子的結合能(B/A)繪成質量數 A 的函數圖(圖 1.3),則將出現很有趣的結果。在質量數 28 以下,對應於每個核子最大結合能的尖峯都發生在質量數為 4 的倍數的核種。在這種範圍內, N 等於 Z (圖 1-2)提示阿爾伐粒子是由兩個中子加上兩個質子合成的。這條曲線通過質量數為 60 結合能為最大之點,大約為 8.7 百萬電子伏/核子,然後慢慢減少。最穩定的同位素當屬中等質量數的核種,亦即每核子有最大的結合能。由此可知若重原子核可分裂成兩個中等的核,則將釋出能量(分裂過程,見 1.5.4 節)。同樣,若兩個輕核可結合成中等核,則亦將釋出能量(熔合過程)。

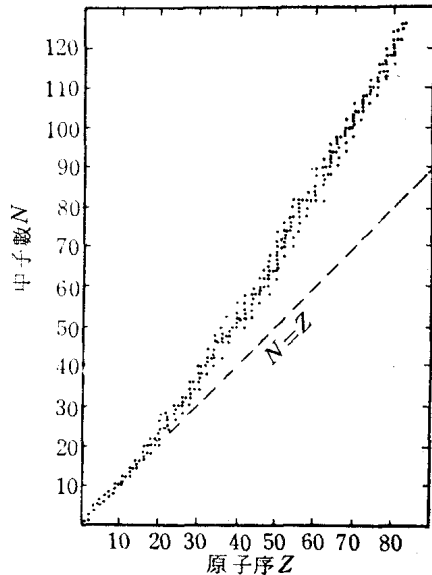


圖 1-2 穩定同位素原子核中子數 N
對原子序 Z 顯示狹窄的穩定帶

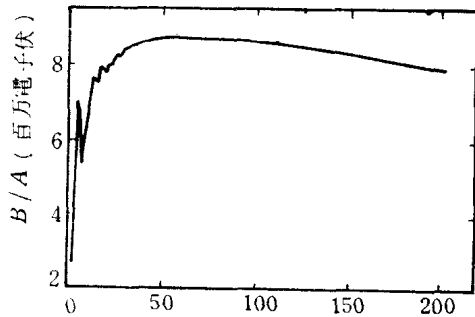


圖 1-3 每核子平均結合能, B/A , 為質量數 A 的函數(見參考文獻 2)

1.3 核模型

沒有一個原子核模型可單獨預測所有可觀測的核性質。雖然有些模型對於某類核現象的描述相當成功。不過，所有模型對於原子核的普遍描述都是一樣的，亦即一堆核子緊密地隔著以致其分布相互重疊而無法完美地確定其表面區域。

在模型譜的一端是波爾的「液滴」模型，把原子核比擬成液滴。此模型不以個別核子的行為來描述原子核，而採用液滴乃由分子形成般的「巨觀」性描述。如同液滴，核形狀的畸變和振動與核的「表面張力」能量有關。但無法因此解釋所觀察到的核狹窄共振階。這個模型已應用於分裂過程。激動的原子核將依其形狀振盪。若激動小，則表面張力平衡排斥力，而以發射光子制激。若有大畸變，亦即大的激動能，則具有分裂性的質子群將因庫侖斥力強過表面張力而使原子核分裂。

核模型譜的另一端是核殼模型，將其中的核子視為單獨粒子，在自己產生的核力場中運動。可以引伸與原子內電子組態的電子殼相似，但因作用在粒子上的力場不同以及兩種不同型式粒子質子與中子的存在，每種均有其能階，所以可預期必不相同。這種描述可解釋巧核（ N 、 Z 或兩者等於 2, 8, 20, 28, 50, 82 或 126）的穩定性以及同質異構物的存在。

各種不同的殼模型，其差別在於單一核子階的組態容許互應或混合的程度上。光學模型即為比較成熟的殼模型例子。此模型對於在共振區域以上粒子的散射及吸引的解釋很有用處，視原子核為以平面波表示的入射粒子的吸收或散射介質。這個模型在預測中子與原子核互應作用的寬廣或巨大的共振上相當成功。

1.4 輻射

1.4.1 輻射的來源與形式 源於原子電子雲的輻射行為與源於原子核本身的輻射行為並沒有差別。前者的特性是通常比後者具有較低的動能。本節將只描述最普遍的輻射形式。表 1-1 列有摘要，其中包括來源、產生過程、電荷及其近似質量與動能範圍。

- 以電子電荷數為單位（1 電子電荷 = 4.83×10^{-10} 靜電單位）
- 原子質量單位（1 原子質量單位 = 1.657×10^{-24} 克）。
- 以電子伏為單位（1 電子伏 = 1.602×10^{-12} 爾格，千電子伏 = 10^3 電子伏，1 百萬電子伏 = 10^6 電子伏）。

表 1-1 主要核輻射特性

形 式	來 源	過 程	電 荷 ^a	靜止質量 ^b	能 量 ^c
γ 射線	原子核	核制激	0	0	分開的 (千電子伏 - 百萬電子伏)
特性 X 射線	電子雲	原子制激	0	0	分開的 (電子伏 - 千電子伏)
制動輻射	原 子 核 外	高速荷電粒 子的阻擋	0	0	連續的
哪惹電子	電子雲	原子制激	1(-1)	$\sim 5 \times 10^{-4}$	分開的 (電子伏 - 千電子伏)
內轉變電子	電子雲	核 制 激	1(-1)	$\sim 5 \times 10^{-4}$	分開的
貝他射線 (β^-)	原子核	核 變 化	1(-1)	$\sim 5 \times 10^{-4}$	連續的 ($T_{\max}$ 在千電子伏 - 百萬電子伏)
正子 (β^+)	原子核	核 變 化	1(+)	$\sim 5 \times 10^{-4}$	連續的 ($T_{\max}$ 在千電子伏 - 百萬電子伏)
阿爾伐粒子 (α)	原子核	核 反 應 或 變 化	2(+)	~ 4	分開的 (百萬電子伏)
質子 (p)	原子核	核 反 應	2(+)	~ 1	連續或分開的 (千電子伏 - 百萬電子伏)
分裂碎片	原子核	分 裂	$\sim 20(+)$	$\sim 80-100$	連續的 (50-130 百萬電子伏)

1.4.2 電磁輻射或光子 伽瑪射線是原子核從高激動過渡到較低態的產物。其能量可明確定出，常伴隨大部分的核反應及核蛻變發射。

特性 X 射線是原子的電子雲制激的結果，為外層電子落至電子空位且以分立能量的光子形式放出其額外能量而發生的。制激也可因電子雲受外在過程的激發而發生。制動輻射（連續 X 射線）是當高速荷電粒子受阻時發出的光子。其產生一般與很輕的荷電粒子有關，例如高能量的電子在高原子序的吸收體中其能譜為連續的，最大值極接近荷電粒子的能量，但平均值却甚低。

1.4.3 粒子輻射 貝他粒子 (β^-)，或負電子（負子）源於原子核，於核變化中伴有反微中子以保持動量。其能量呈現連續能譜，最大能量是對應於此變化可用的能量。於較低動能時，所餘下的能量由反微中子帶走。於此過

程中，核中的一個中子轉化成一個質子、一個負子，與一個反微中子。變成原子序加一而質量數仍同的原子核。

正子(β^+)，或正貝他粒子，也是在核中產生的。於其發射之同時伴有微中子。其能譜特性與發射貝他粒子者相同。在此情況下，核中質子轉化成中子，正子，與微中子。原來的核則變為原子序少一但質量數相同的原子核。正子在物質裡喪失其所有動能後，將與負電子起互應作用。經過互毀過程，有一對0.51百萬電子伏的光子在近乎相反方向上發射出來。與正子發射相競爭的過程是電子捕獲(E.C.)。於此過程中，核中質子捕獲內層軌道電子而與其結合產生中子與微中子，因內殼空位的補充，隨即導致特性X射線的發射。

與經由伽瑪發射制激相競爭的過程稱為內轉變(I.C.)。於此情況中，原子核將其激動能轉移到內層軌道電子。電子即從原子中以等於用在核過渡的激動能減去軌道電子結合能的分立動能發射出來。同樣，與特性X射線發射相競爭的則是釋出另一軌道電子以取代光子，此電子即為鄂惹電子，這些電子也有分立能量。

阿爾伐粒子(${}^4_2\text{He}^{2+}$)與質子(${}^1_1\text{H}^+$)，都可用人工方法經高電壓加速。前者也可由不穩定的高質量數同位素例如 ${}^{210}_{84}\text{Po}$ 以分立的動能發射出來。這些粒子及其他重的荷電粒子如氦(${}^2_1\text{H}^+ \equiv d$)氫(${}^3_1\text{H}^+ \equiv t$)，與較重粒子甚至分裂碎片(如 ${}^{135}_{52}\text{Te}^{30+}$)也可在核反應中產生。其動能依各種不同參數而定(見1.5節)。

一般把核反應表示成 $X(x, y)Y$ 。其中X為靶核， x 為入射粒子，Y為留下的較大核， y 則為所發射的核輻射。中子也可由此種方式產生如 ${}^3_1\text{H}(d, n){}_2^4\text{He}$ 。然而由核反應產生的中子其動能依反應參數而定；源自分裂的中子其連續能譜範圍可達到百萬電子伏。

1.5 核反應與放射性

1.5.1 特性 核反應可定義為任何核子間或核子集合體之間的互應作用。以荷電粒子做入射粒子需充分的動能方可穿透庫倫障壁，雖可經庫倫互應作用產生核激動。另一方面，各種能量的中子均可產生核反應。在反應中放出輻射。可觀察的特性計有：性質、發射率、能量、角度等。有時核反應的生成物具有放射性，經由發射某類型核輻射而蛻變，蛻變過程由放射性同位素的特性時間常數決定。

核反應服從以下的規則：(1)總電荷守恒，(2)於低能反應，反應物的總質子數等於生成物的總質子數，(3)反應前後總核子數相同，(4)質能，或總能量守恒，(5)反應前後線動量總和不變，(6)獨立系統的角動量守恒，(7)於密閉系統內，系統的自轉特性不變，以及(8)系統的對等性守恒（除弱互應作用與某種如貝他蛻變的變化者除外）。

利用這些規則，即可描述核反應的能量。蛻變能(Q)是「釋放」動能，等於反應前後之總質量差。可為正（放熱反應）也可為負（吸熱反應）。由這些原理還可描述射出粒子的動能如何依角度及入射粒子之能量而定。

1.5.2 反應過程 荷電粒子撞擊原子核後，可經由其間電荷庫倫力而發生互應作用，導致被稱為拉塞福散射的彈性散射現象。此時入射粒子的部分動能將變成靶核的動能，非彈性散射也可能發生，即當入射粒子入射時，將其能量轉移給靶核使其處於內在高能狀態，產生所謂的庫倫激動。

在更近的接觸中，由核力所引起的彈性散射此時即取代由長距離庫倫力引起的彈性散射，此種形成的散射稱為核位勢散射。與庫倫激動相似，也可因核力而與表面核子發生非彈性散射，此時入射粒子即遺下處於激動態的原子核而去，稱為核表面散射。

較劇烈的互應作用將引起核轉變。與核表面散射相似的反應，入射粒子不僅可激發表面核子還可轉移足夠的能量將其由核中再排出，此為表面轉換。

與化學反應中活化複合體的形成相似，有實驗證據可證明入射粒子與靶核可結合成激動過渡核。隨後這個激動過渡核蛻變成其他粒子，但與其形成的模式無關。激發過渡的蛻變可因彈性或非彈性（若靶核留在激動態則為非彈性）過程的結果而發生粒子的再發射，或對應於捕獲反應有 γ 射線（電磁輻射）發射以制激，或發射不同於入射粒子的粒子。

1.5.3 核反應截面 當粒子打到靶核時，發生核反應的機率是以一種稱為截面的量描述。假設一束入射粒子射柱打到一很薄的靶；則

$$\sigma_t = \frac{dI}{IDdx} \quad \text{及} \quad D = \rho \frac{N_A v}{A} \quad (1-2)$$

其中 σ_t = 系統常數，代表每個靶核於柱中入射粒子打到靶上將與其作用的總機率（面積單位，每原子平方厘米）

I = 入射強度（粒子/平方厘米·秒）

dI = 因反應而減少的射柱強度 (粒子 / 平方厘米 - 秒)。

dx = 靶的微分厚度 (厘米)

ρ = 靶密度 (克 / 立方厘米)

A = 靶原子之原子量 (克 / 莫耳)

N_{Av} = 亞佛加德羅數 (6.023×10^{23} 原子 / 莫耳)

如 1.5-2 節所述，粒子將與靶核以許多不同方式反應。將每種反應形式以其對應截面表示頗為方便。例如，荷電粒子受到彈性散射即以彈性散射截面 σ_e 描述。這種截面可能是兩種彈性散射，拉塞福散射與核位勢散射的結果，各有其截面描述，其總和即為 σ_e 。同理，中子亦可以各種不同方式起互應作用，例如彈性及非彈性散射、輻射捕獲 (發射 γ 射線)、捕獲而多次發射中子、捕獲而產生分裂等。總截面 (總互應作用機率) 等於各截面的和。原子密度 D 與總截面 σ_t 的乘積稱為總巨觀截面 Σ_t 。同樣，每種互應作用的巨觀截面 Σ_i 亦可如此定義。入射粒子在互應作用間所移動的平均距離，亦即平均自由行程 l ，等於 $(\Sigma_t)^{-1}$ 。

於核反應中發射粒子的角分布以其系統角座標為函數的截面描述，而且由此定出每單位立體角由反應發射出來的粒子數。立體角的微分量可寫為

$$d\Omega(\theta) \equiv 2\pi \sin\theta d\theta \quad (1-3)$$

式中 $d\Omega(\theta)$ 是立體角的微分量， θ 為對應入射方向的發射角。由式 (1-3) 可得

$$dn(\theta) = \sigma_i(\theta) IDV d\Omega(\theta) \quad (1-4)$$

其中 $\sigma_i(\theta) d\Omega(\theta)$ 是微分散射截面 (平方厘米 / 原子)， V 是發生互應作用的薄靶體積 (立方厘米)， $dn(\theta)$ 為每單位時間彈性射入微分立體角的粒子數 (粒子 / 秒)。

若此系統的動能與入射粒子於此過渡核內的結合能之總和等於過渡核激發能階或其附近，則頗有可能形成過渡核。因原子核的激發能階是量子化的，故可在互應作用的截面能譜上觀察到分立的尖峯 (圖 1-4)。截面圖上的這些尖峯通稱為共振尖峯；而均發生於共振區內。過渡核質量數愈大，除巧核外，此區域即愈移至較低能量處。粒子能量愈大，能階間的間隔即將較本身寬度窄，而致尖峯相重疊，或形成所謂之連續區域。總截面，如中子的互應作用，則為較平滑的能量函數，但呈現稱為寬共振的一系列間隔範圍很廣的最大與最小值。經形成過渡核而進行的核反應的例子有