

高等学校教学用书

X 射线学

Я. С. 烏 孟 斯 基
А. К. 特拉别兹尼科夫 著
А. И. 基达衣哥罗德斯基

高等教育出版社

高等学校教学用书



X 射 綫 学

Я. С. 烏孟斯基, А. К. 特拉别兹尼科夫 著
А. И. 基达衣哥罗德斯基
方正知 譯

高等教育出版社

本書系根据苏联机械制造技术科学書籍出版社 (Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы) 出版的烏孟斯基 (Я. С. Уманский)、特拉別茲尼科夫 (А. К. Трапезников) 和基达衣哥罗德斯基 (А. И. Китайгородский) 合著的“X 射綫学” (Рентгенография) 1951 年版譯出的。原書經苏联高等教育部審定作为机械制造学院与冶金学院的教材。

本書由北京鋼鐵学院方正知同志担任翻譯。在校閱过程中, 北京工業学院顏鳴皋、石霖兩同志提出了許多中肯的修正意見。

X 射 綫 学

Я. С. 烏孟斯基等著

方正知譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

三星印刷廠印刷 新華書店總經售

書號 13010·82 開本 850×1168 1/32 印張 10 12/16 抽頁 1 字數 267,000

一九五五年一月上海第一版

一九五六年六月上海第二次印刷

印數 3,501—4,500

定價 (8) ¥ 1.20

目 錄

緒論.....	1
第一章 X射線物理學.....	6
1. X射線的本質.....	6
2. X射線的反射與折射.....	6
3. X被結晶點陣原子面所反射的X射線的干涉現象.....	7
4. X射線譜.....	9
5. 連續X射線譜.....	12
6. 標識X射線譜.....	18
7. X射線通過物質時所伴生的現象.....	27
第二章 X射線工藝學.....	43
1. X射線管.....	43
2. X射線的裝置.....	56
3. X射線的照相效應.....	68
第三章 材料和物件的X射線檢驗(X射線探傷學).....	74
1. 探傷法的基本原理.....	74
2. 檢驗時記錄缺陷的方法,照相法.....	77
3. 缺陷的透視檢驗法(屏上透視).....	90
4. 超短曝光的裝置.....	94
5. 記錄物件缺陷的電離法.....	95
6. 缺陷位置和壁厚的測定.....	96
7. 各類物件的X射線檢驗.....	99
8. X射線的防護.....	107
第四章 晶體學大意.....	109
1. 晶體外形概述.....	109
2. 空間點陣.....	110
3. 點陣的幾何學.....	119
4. 類似小球密排的晶體.....	121
5. 對稱類型.....	125
6. 晶系和平移羣.....	132
7. 晶體的外形.....	135

第五章 晶體結構的分析：X射線由晶體發生衍射的基本方程式 及結構分析法的一般特點	143
1. X射線衍射的基本方程式	144
2. 結構分析的基本方法	150
第六章 結構分析·多晶體的研究方法	158
1. 多晶體X射線相的獲得	158
2. 多晶體X射線相的測量	176
3. 多晶體X射線相上線的強度	181
4. 多晶體X射線相的詮釋	197
5. 結晶點陣常數的精確測定	210
第七章 單晶體的研究	220
1. 勞埃法	220
2. 旋轉晶體法	223
3. 用X射線分析法確定晶體的結構	228
第八章 結構分析在測定晶體的大小，擇尤位向和點陣變形方面 的應用	233
1. 晶粒的數目、大小和形狀的測定	233
2. 金屬中殘留應力的測定	239
3. 擇尤位向(纖維)的X射線分析	252
4. 由於加熱所引起的變形金屬組織變化的X射線分析	263
第九章 合金的X射線分析	271
1. 合金相成份的測定	271
2. 固溶體的X射線分析	277
3. 過飽和固溶體分解時所生現象的X射線分析	297
4. 鋼熱處理的X射線分析	304
附 錄	314
1. 衍射的顯微X射線學	314
2. 電子相學	317
3. X射線譜分析	319
4. 表	323
中俄名詞對照表	331
人名對照表	337

緒 論

在 1895 年被倫琴所發現的不可見的光，由於它本身具有非常大的穿透物質的能力，能穿透可見光所不能穿過的物質，這就立即引起全世界科學家們的注意，當時曾經發現由 Д. И. 門德列也夫週期表的開端的輕元素所構成的物質差不多對 X 射線都是透明的，可是在門德列也夫表結尾的重元素，甚至一薄層，實際上也完全吸收這些射線。

在從人的手所攝得的第一個“X 射線相”上，對 X 射線不透明的骨頭的陰影十分明顯地顯示出來。X 射線容易穿過由氫、氧、碳、氮等輕元素所構成的肌肉組織，因此在這種新發現的射線的應用方面，立即確定了第一個方向，即是人體內部構造中病狀變化的診斷，而這些變化在早先僅僅在解剖的條件下才可以呈現出來。醫學家們首先廣泛地利用了這個新的強有力的研究工具。

醫學的 X 射線學的發展和它所有新提出的要求促使了 X 射線技藝迅速地發展。在 X 射線技藝和 X 射線物理學的發展中俄羅斯科學家們起着最巨大的作用，在 X 射線被發現以後過了一年無線電報發明人 А. С. 波波夫在俄國製得了 X 射線。В. В. 哥利聃院士當時證明了在 X 射線管陽極表面上不大的點，即管的“焦點”就是 X 射線的基本來源，並因而提出根據，斷定 X 射線是由於陰極線在陽極上猝然制止的某些過程而產生。

由於功率小而又不適用的舊式高壓電源即感應器被俄國傑出的電氣工程師烏薩根累衣所發明的新變壓器所代替，X 射線儀的改進成為可能。在 1910 年偉大的俄國物理學家 И. Н. 列別傑夫建議他自己的

同事建造一個以白熾鎢絲作為陰極線來源的X射線管來代替十九世紀的離子式X射線管，在此離子管內係利用在0.01—0.001毫米水銀柱的氣壓下氣體的放電。為了表示對沙皇政府反動法律的抗拒，列別傑夫離開了大學；他的夭折（1912年）使得他沒有可能來實現這個發現，到1913年新的強有力的容易操縱的“電子”X射線管才出現。這種X射線管立即開始建造達到200,000伏的電壓。由於X射線管電壓增大時X射線的穿透力顯著地增加（X射線變得較“硬”），因而發現了用X射線檢驗金屬物件的可能性。在X射線相上可以看出物件的內部組織的缺陷，這些缺陷在早先不把物件打破是不能檢查出來的。例如在圖1的X射線相上可以看出鋼鑄件中的縮孔。從本世紀的20年代起X射線探傷儀（檢查物件的缺陷）更加廣泛地被運用到機械製造工廠和冶金工廠的現場檢驗以促進生產質量的提高和金屬加工的技術操作的改

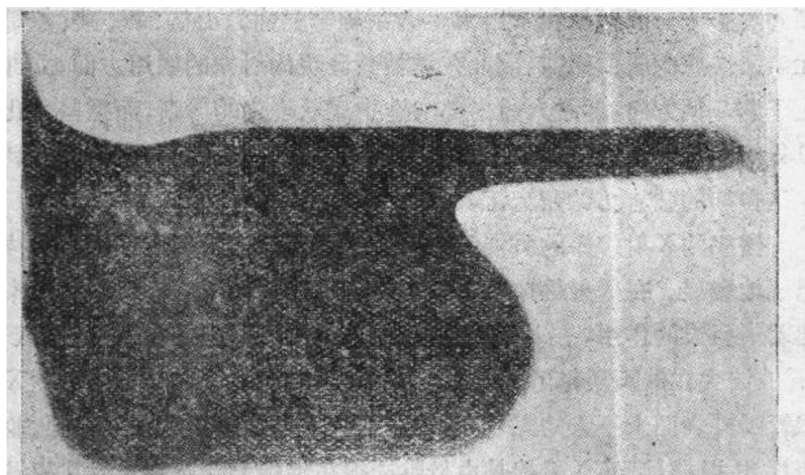


圖1. 有縮孔的鑄件的X射線相

進，銲接縫質量的X射線檢驗在有關的蘇聯國家標準中就明文規定出來。

在蘇聯普遍地用X射線檢驗鑄件，現在的蘇聯X射線儀能夠透過

厚達 150 毫米的鋼質物件和厚達 350—400 毫米的輕合金的物件。

在 1938 年—1940 年斯大林獎金獲得者 Л. В. 阿利特蘇列爾和 В. А. 楚克爾曼研究出“脈衝的 X 射線照相術”的方案。應用這個方案能夠在百萬分之幾秒內獲得 X 射線的照片，這就開闢了廣泛的可能性來研究物質的粗型組織在過程迅速進行時所發生的變化。

必須注意，X 射線在工程中的應用遠不只限於 X 射線檢驗。X 射線的波長與固態晶體中原子之間的距離為同一數量級的大小。因此實現 И. И. 列別傑夫關於利用晶體作為 X 射線的天然“三度”衍射光柵的理想就成為可能。在 1913 年—1914 年 X 射線譜學開始萌芽，它提供了關於原子構造理論的最寶貴的實驗資料。同時 X 射線譜分析成為十分有價值的化學分析方法，特別是微量化學分析的方法。

莫斯科大學教授 Г. В. 吳里弗在 1914 年，即在發現晶體中 X 射線衍射現象一年以後導出敘述衍射過程的極其簡單公式。應用這個公式就能夠利用衍射的 X 射線相來測定固體的結晶點陣中原子的互相位置。X 射線結構分析於是產生。X 射線結構分析的資料供作結晶化學這一新科學的基礎，結晶化學在確定金屬相的本質時顯示出不可估量的功用。應用 X 射線所作的結晶化學的研究適應了蘇聯金屬科學的傳統，這種科學是基於 Л. К. 切爾諾夫關於鋼中轉變的偉大發現和他以後關於強調金屬結晶結構的巨大意義的一些著作，以及基於物理化學分析奠基者 Н. С. 庫爾納科夫學派的著作積累而成的。物理化學分析方法的武庫由於 X 射線衍射的應用而非常堅強地充實起來。在合金的結晶化學的研究當中必須指出，Н. В. 阿格耶夫，А. И. 科馬爾等所進行的有序固溶體的 X 射線研究，Н. Я. 謝立亞科夫，Г. В. 庫久莫夫和 Н. Т. 顧德磋夫的淬火鋼馬氏體結構的測定，科諾別耶夫斯基在“電子化合物”方面的研究，庫久莫夫關於共析體銅合金淬火時所形成的多種介穩定相的發現，以及 В. И. 達尼諾夫所進行的熔化金屬結構的研究。

當研究結晶物質的塑性變形，回復與再結晶等過程時 X 射線分析

起着十分重要的作用。A. Ф. 依奧費院士在 1921 年用 X 射線相測定了由於變形所引起的石鹽單晶體結構中的改變，H. E. 烏斯平斯基教授和 C. T. 科諾別耶夫斯基發現了並闡明了在金屬壓力加工中所發生的“織構”(擇尤位向)，Г. С. 日達諾夫，E. Ф. 巴赫麥傑夫和 Г. B. 庫久莫夫十分深入地並全面地分析了各種金屬和合金的多種變形織構，Г. И. 阿克色諾夫研究出測定金屬中殘留應力的方法，B. M. 羅聞斯基研究了第三種殘留應力，B. И. 意威羅諾娃用 X 射線相研究了固溶體的再結晶，B. И. 意威羅諾娃和 Ю. С. 捷爾米納索夫確定了判斷物質超過疲勞極限的 X 射線分析標準。

在合金熱處理過程的研究方面，X 射線分析的成就是特別巨大的。Г. B. 庫久莫夫和他的同事關於鋼的淬火和回火等過程所作的 X 射線研究成為了這些科學家們所奠定的鋼熱處理理論的基礎(Г. B. 庫久莫夫在馬氏體轉變方面的研究光榮獲得了斯大林獎金)。C. T. 科諾別耶夫斯基與他的同事(М. И. 札哈諾娃等)用 X 射線相研究了有色合金的時效過程，並在這個基礎上創立了現代的時效理論。

儘管在 X 射線被發現後的最初年代裏，俄國科學家們和工程師們在 X 射線的科學中和 X 射線工藝中有了最寶貴的貢獻，但是只有在偉大的十月社會主義革命以後 X 射線在蘇聯工程上的廣泛應用才成為可能。在革命前的俄國未曾製造 X 射線儀，沒有任何大規模的物理-技術的科學研究機構。在斯大林第一個五年計劃的年代裏在莫斯科已經建立起出產 X 射線儀的 X 射線工廠。在列寧格勒“光明”工廠開始生產 X 射線管。在列寧格勒物理-技術研究所，全蘇電工研究所，中央空氣流體力學研究所，蘇聯國家有色金屬研究所中，在電氣工廠，稀有金屬工廠以及其他許多工廠中於同一年代裏建立起 X 射線實驗室，這在蘇聯還是第一次。在冶金工廠和機械製造工廠在創造新的和改進已經實行的金屬加工的技術過程時的生產實踐中以及在現場的檢驗中蘇聯科學家們在金屬 X 射線研究方面的傑出成就得到了廣泛的應用，在建立這

些第一批工廠X射線實驗室之後接着又在其他工廠和科學研究機構開創了幾十所新的X射線實驗室，在高等學校中培養了工藝X射線學的專家。

技術過程的X射線研究與X射線檢驗的方法在與其他方法——顯微鏡法，機械試驗法，熱分析法，膨脹儀分析法以及磁性分析法等等——的配合下顯示出最大的成效。只有與金屬學家和工藝學家緊密地合作，在工廠實驗室中或者在科學研究機構中工作的X射線學家才可以保證獲得成功。這種合作只有在這樣的條件下即當X射線學家很好地通曉金屬學，很好地理解被他所研究的或者被他所檢驗的技術過程的任務與特徵，而工藝學家和金屬學家也熟悉金屬的X射線研究方法的時候才有可能。在機械製造學院金屬學系的“X射線學”課程應當訓練蘇維埃先進機械製造工業的金屬學者去利用擺在他面前的由於X射線的應用所發現的這些可能性。

除去敘述金屬的X射線研究和X射線檢驗的基本篇章以外，在這門課程裏還包括輔助的兩章：X射線物理學與晶體結構學大義，爲了理解基本內容這兩章的研讀是必要的。

第一章 X射線物理學

1. X射線的本質

X射線是電磁波的一種，可見光，鐳的 γ -線以及無線電天線發射出來的波也屬電磁波之列。可是無線電波的波長位於幾十厘米到幾千米的範圍內，可見光具有近於0.5微米的波長，X射線的波長則用埃($\text{\AA}$)來度量，它小到百分之幾 $\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米 $=10^{-4}$ 微米)。只有放射性蛻變的 γ -線具有更短的波長($0.001\text{\AA}$ 數量級)①。

X射線在電磁波的波長標度中所處的部位，就決定了它的奇特性質。

2. X射線的反射與折射

X射線與可見光不同，不能由磨光面產生鏡面的反射——X射線只能漫散地散射，正像可見光被毛玻璃的表面所散射一樣。

X射線的折射與可見光的折射大有不同。當X射線穿過空氣固體的界面時其折射係數 n 小於1，並且 $1-n$ 的差數極其微小；對於穿過玻璃-空氣的界面來說，這個差數是 10^{-6} 的數量級，對於金屬-空氣的界面來說則近於 10^{-5} 。由於X射線的折線係數非常近於1，所以觀察它的折射是很困難的(在1919年X射線的折射係數才第一次被求出來)。當X射線柱以適合於

$$\sin \alpha > n \quad (1)$$

條件的 α 角而射到固體表面時所發生的完全內反射現象常常被利用來研究上述效應。

可是就可見光穿過玻璃進入空氣而言，完全內反射的角度往往小

① 在最近的年代裏在一百萬伏以上的電壓下而操作的X射線管中，以及在特殊的裝置——感應加速器——中獲得了與鐳的 γ -線同一波長的X射線。

於 $50-60^\circ$ ，但對於X射線來說則很近於 90° ，於是入射的X射線應當差不多平行於固體表面而前進。例如具有 $1.279 \text{ \AA}$ ($1-n=2.15 \times 10^{-5}$)波長的X射線，當射到銀的薄片上，而 $\alpha \geq 89^\circ 37' 30''$ 時，也就是當掠射角($90^\circ - \alpha$)不超過 $22' 30''$ 時，產生完全內反射。

3. 被結晶點陣原子面所反射的X射線的干涉現象

X射線穿過物質而對此物質原子的電子發生作用。這種作用的形式之一就是使電子振動。這種“受迫振動”的頻率等於原X射線的電磁場的振動頻率。

振動的電子向各方面放射電磁波，此電磁波的頻率與電子振動的頻率相同，因此與引起這種振動的X射線的頻率也相同，這樣就產生X射線的散射。

被晶體的各個原子的電子所散射的X射線彼此互相干涉。被晶體原子的電子所散射的X射線的干涉遵循着特殊的規律。

讓我們回想一下，晶體的原子在空間規則地排列着，構成所謂“空間點陣”(圖2)(關於空間點陣的細節參看第四章)。因為晶體中的原子間距與X射線的波長是同一數量級的大小，所以晶體對於X射線來說是一種獨特的三度衍射光柵。

偉大的超乎他的許多同代工作者的俄國物理學家И. H. 列別傑夫正確地認為X射線是電磁波，早在1910年就曾考慮利用晶體來作X射線衍射的觀察。然而他所提出的

試驗未曾進行到底，只是在1912年勞埃才實現了И. H. 列別傑夫所不能進行到底的試驗。

X射線被結晶點陣而散射的理論我們以後在第五章來敘述。這裏

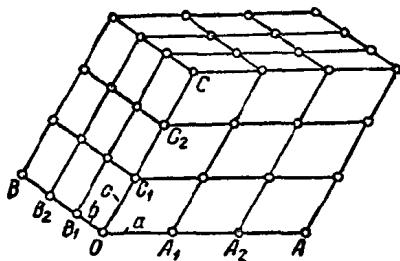


圖2. 晶體的空間點陣

我們只談先進的俄國結晶學家又是晶體物理學家 I. B. 吳里弗^①從散射理論的基本定律所得出的極其重要的結論。

吳里弗證明 X 射線被晶體散射所產生的複雜的干涉相可以解釋為

被彼此平行的為原子所居有的結晶點陣面，例如被 $A_1B_1C_1$ ， $A_2B_2C_2$ 面(圖 3)^②，按照一般鏡面反射的規律而反射的 X 射線互相作用的結果。

設有 X 射線的平面波射到由一系列平行原子面 $P-P'$ ， $Q-Q'$ 等等(圖 4)所構成的晶體上。經過這些面的第一面，

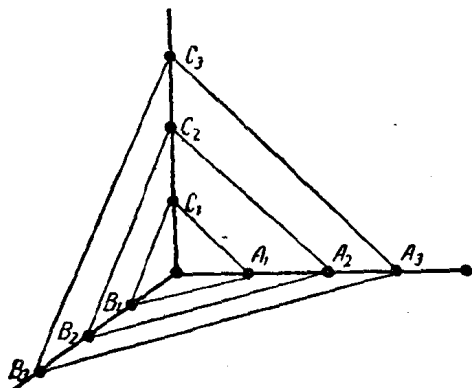


圖 3. 空間點陣的原子面

依照這裏所說明的理由，X 射線按照一般的鏡面反射規律從此面局部地反射；當經過 $Q-Q'$ 面也產生同樣的局部反射。由此兩面反射出來的 X 射線傳播為平面波的形態而彼此發生

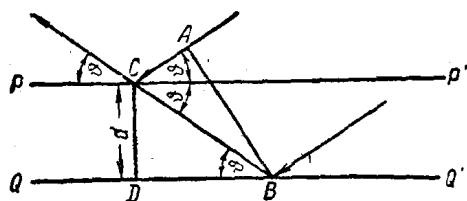


圖 4. 吳里弗-布來格公式的演證

干涉。當由 PP' 和 QQ' 面所反射的 X 射線的光程差等於 X 射線波長的倍數時，反射波的振幅是相加的。因為垂直於 X 射線的 AB 線是波前，很顯光程差等於 $\Delta l = BC - AC$ 。

從直角三角形 CBD 和 ABC 可得：

$$BC = \frac{d}{\sin \theta},$$

$$AC = BC \cos 2\theta = \frac{d}{\sin \theta} \cos 2\theta,$$

① 在同一時候英國物理學家布來格父子得出與吳里弗相同的結論。

② 關於晶體的原子面的詳細情節參考第四章。

由此

$$\Delta l = BC - AC = \frac{d}{\sin \theta} (1 - \cos 2\theta) = \frac{2d \sin^2 \theta}{\sin \theta} = 2d \sin \theta,$$

由所有相互平行的等距離的原子面所反射的 X 射線，當光程差等於波長的整倍數，即

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

時，彼此相互加強。

整數 n 稱之為反射級。

等式(2)稱之為吳里弗—布來格公式。

由於晶體之用作 X 射線的衍射光柵，這就產生了 X 射線譜學。X 射線的波長，根據譜線圖相並利用吳里弗—布來格公式來測定。

4. X射線譜

輻射的波長就是輻射的性特。可見光就是證明這個的最簡單的例子：不同波長的光線具有不同的顏色從 $\lambda \approx 0.75$ 微米的紅色到 $\lambda \approx 0.45$ 微米的紫色。X 射線的穿透力首先是隨着它們的波長而定；波長愈短，X 射線就愈“硬”，被物質所吸收的就愈少，透過物質也就愈容易。

因為實際上差不多任何輻射都是多色的，也就是說由一系列的波長所構成的，所以爲了要研究射線，必須能夠把射線分成譜線。

爲了對複雜的輻射的組成進行定量的鑑定，多半用圖解來表示射線譜，沿橫軸表示波長 λ ，沿縱軸表示所產生的強度 J 對波長的比，即 $\frac{dJ}{d\lambda}$ 。此量稱爲強度的密度，以 I 表示之。射線譜曲線和橫軸所包圍的全部面積等於輻射的總強度。被 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 所相當的縱坐標線所限制的面積，以同樣的尺度，表示着該範圍的波長在射線譜能量中所佔有的部份。假若把相當於同等 $\Delta\lambda$ 間隔的但位於射線譜上不同部段的能量部份彼此比較一下，則可以認爲當 λ 值小時，這些面積（相當於強度

的部份的)與相對應的縱坐標成比例。因此有時沿縱軸不寫 $\frac{dJ}{d\lambda}$ 或 I ，而是寫 J (強度)，嚴格而論，這是不正確的。

X射線譜也像可見光譜一樣，有不同的類型。對於我們來說有兩種光譜是最重要的：連續的，和不連續的。白熾的固體或液體發射出來的可見光具有連續的光譜，熾亮的氣體和蒸汽發射出來的光具有不連續的光譜。具有連續光譜的輻射有時稱為“白的”，具有某一種波長的光線稱為“單色的”。

X射線也可以有連續的和連續的譜線(圖5)(在不連續的X射

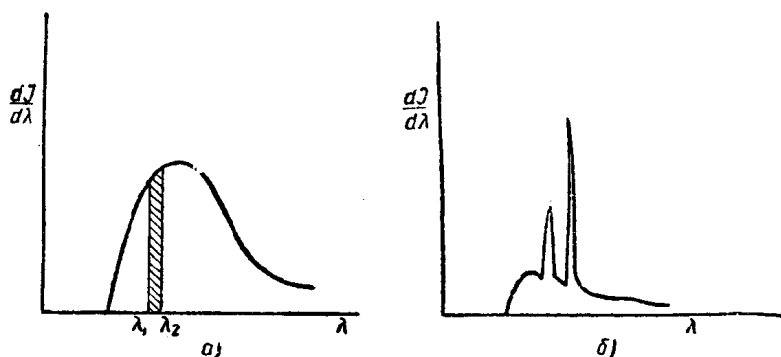


圖5. X射線的射線譜曲線：

a —連續的X射線譜， b —不連續的(標識的)X射線譜。

線譜中總是有連續的底影)。下面將要談到產生不同譜線類型的X射線的條件。

現代的X射線譜學具有在使用中十分精確而又十分簡單的天然的衍射光柵，這就是晶體。

吳里弗—布來格公式是X射線譜學的基本定量的關係。這個公式指出晶體具有分解多色X射線的能力。讓我們只敘述最簡單的X射線攝譜儀之中的一個即是用旋轉晶體的攝譜儀。

X射線穿過鉛屏中兩個狹縫 S_1 和 S_2 ，被截成差不多平行的狹窄射線柱以後(圖6)，射到晶體的表面上。此晶體在試驗時，圍繞垂直於

X射線柱而又位於反射表面的軸，在一定範圍的角度內而緩慢地轉動。假若具有一定波長 λ 的單色X射線射入攝譜儀內，那末在這些時刻，即當對於入射的射線柱來說，就 n 的某一值而言，晶體是處於符合吳里弗—布來格條件的位置的時候，偏折的(反射的)X射線柱就呈現出來；此反射的射線柱作用於感光靈敏的 $F-F$ 膠片的乳膠上，這膠片沿着半徑為 R 的圓柱筒彎曲地安放著。晶體在若干轉以後，在膠片上形成了一系列的窄線條 P 。

這些線條離零線(示意圖中的 P_0)的距離， A_n ，藉下列的關係而與波長 λ 聯系起來：

$$\frac{A_n}{R} = 2\theta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{n\lambda}{2d} \right)。$$

此處 θ 角以弧度來度量， d —平行於晶體表面的晶面的面間距離。

相當於 $\sin \theta = \frac{\lambda}{2d}$ 比例的線條分佈得距零線最近；最後線條的反射級 n 決定於不等式

$$\frac{n\lambda}{2d} < 1 < \frac{(n+1)\lambda}{2d}, \quad (3)$$

因為在任何情況下 $\sin \theta < 1$ 。

假若X射線柱含有分離(即不連續)一系列的波長(不連續的射線譜)那末甚至對於 λ 的某一個值，X射線相上也產生一系列的譜線(圖7, a)。相當於短波長的線接近於零線的位置，知道安置在攝譜儀中的晶體的反射面系的面間距離 d 以後，就可以根據吳里弗—布來格公式來

測定與X射線相上所有各線相對應的波長 $\lambda_i = \frac{2d \sin \left(\frac{A_i}{2R} \right)}{n}$ 。連續X射線的X射線相示於(圖7, b)，這裏沒有單獨分開的線條，膠片連續地

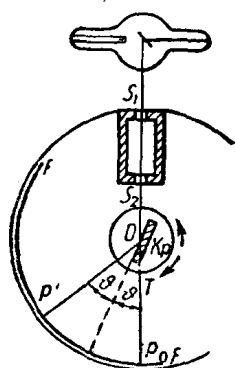


圖6. 應用旋轉晶體的X射線攝譜儀的示意圖



圖 7. X射線譜圖相:

a—不連續的X射線譜, *b*—連續的X射線譜。

發黑,只是發黑程度的不同;發黑區域在小角度的一邊(也就是在短波長的一邊)驟然斷止。

現在讓我們轉過來敘述被X射線譜學所發現的規律,並予以解說①。

5. 連續X射線譜

X射線由於在原子中所進行的過程以及由於構成陰極線柱高速飛行的電子②的速度驟然改變的結果而產生。當電子由X射線管的陰極飛出時,電場的力迫使電子向陽極的方向移動,此時電子的速度不斷地

① 在X射線譜學方面的最初工作中,根據結晶學的考慮和物質的比重數據計算出晶體的面間距離。當時假定誤差為0.2%,這就使波長的值發生錯誤。不久以前此誤差曾被校正:建議在所有表中所列的波長不用 $\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米)而用 κX 所表示的“實用單位”, $1\kappa X=1.002\text{\AA}$ 。以後在所有任何情況下,當波長的值或面間距離的值是以不小於0.2%的精確度而測定出來的時候,我們將指明這些數值是以 $\text{\AA}$ 或是以 κX 單位測量出來。

假若測量的精確度小於上述的數值,我們將處處採用 $\text{\AA}$ 的符號。

② 讓我們回想一下電子的基本特徵。電子是帶有負電荷的,不可分的(最低限度在現在的實驗條件下)單元微粒。電子的電荷 $e=4.8025\times 10^{-10}$ 絕對靜電單位 $=1.6008\times 10^{-19}$ 庫倫(κ),在靜止的狀態下它的質量 $m=9.01\times 10^{-28}$ 克(小到H原子質量的 $\frac{1}{1840}$),電荷對質量的比 $\frac{e}{m}=5.2737\times 10^{17}$ 絕對靜電單位 $\times$ 克 $^{-1}$ 。

根據相對論,運動的電子的質量 m 大於靜止的電子的質量:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$