

大 專 用 書

礦 物 學

上 冊

編著人 張奕華

著作人 國立編譯館
補助機關 國家科學委員會

幼獅書店印行

緒 論

〔1〕礦物學之意義

礦物學為研究地殼產出之元素及化合物之科學也。至太空中之隕石碎片、地層中之岩石亦有時一併列入，且其領域之拓展，在不久之將來，即可達於月球及行星矣。

礦物學為地質學之一分科，地質學為研究地球之歷史及生命之科學，其內容至為廣泛，尤其岩石之記錄，更可提供礦物學研究之線索。故謂岩石為匯合一定元素及礦物之化合物，誠屬不謬。在地質學中，岩相學為對岩石地層以及其成因與風化等多方面之研究，而岩石學則為研究岩石之敘述及分類者。

在地質學之範疇中，礦物學與其他學科之關係至為密切。岩石學家苟無豐富之礦物學知識，則不能勝任；經濟地質學家若對礦物之形態及組成不能瞭解，則對各種型式之礦床將無法判定，更毋論其開採價值矣。質言之，礦物學之研究旨趣，在與其他學科相互之間；而其本身更為研究岩石中礦物之自然性，故較其間之相互關係尤為重要。

礦物學為單獨之學科，在地質學中並無獨佔之性質。而又非如物理學、化學及數學等屹立於地質學之外。但與其他學科間，具有關連性，因若干物理現象如結晶中光之傳播、結晶之電磁性、結晶之熱效應等，均為研究礦物所必需者。反之，基於礦物學之研究，可促使物理學家對某種現象有更進一步之瞭解；同時在學問結合之基礎上，亦可使化學發生相似之改變，且其與數學之間，亦復如是。故礦物學非為與其他學科絕緣之科學，而礦物學之研究，亦隨化學及物理學之發展而更趨於成熟也。

曩時之礦物學僅係數百年間對地殼所累積經驗之記錄殘片，而今日之礦物學則與其他學科以同一步調，並肩齊進，從事深入研究礦物中固體物質之自然性；且人造之類似礦物，更多進入其領域。於是礦

本書經內政部核准登記
登記證內版基業字第〇七五九號

■ 版權所有・翻印必究 ■

中華民國六十年八月出版

礦物學 上册

基本定價：新台幣貳元貳角伍分

編著人：張 奕 華 館

著作人：國立編譯館

補助編：國家科學委員會

印行者：幼獅文化事業公司

地址：台北市延平南路七一號

電話：三三九四

電話：二七五八

製版廠：二七三

尖齒卡號：六〇一〇五〇

物學已由往日之敘述記載邁入今日之研究討論，其未來之前途，當必益趨光明也。

〔2〕礦物學之發達史

數千年前礦物學即肇始於彫石之術，當時之工匠均精於切割及研磨石塊之方法。彼等工作之對象為極堅固之硬玉，其鑑定之術雖頗粗陋，但不久即用以區別不同之礦物，於是礦物學乃自此開始。其後之進步極為緩慢，幾完全停滯於石器時代中。直至人類發現金屬以後，始對地殼之產物發生興趣。茲將礦物學在各時代發展之情形，分別述之於下：

(1)金屬時代：人類在金屬方面首先發現者，為金、銅在自然性質上之類似。利用其硬度與展性之不同，而製成粗劣之裝飾品；又根據其柔性、顏色及抗銹等性質，而將金用為裝飾；但銅因槌之變形及曝之生銹，故用以製造切剪工具及飲食容器。按金屬銅之產於美國密西根州基文諾 (Keeweenaw) 半島之礦體中者，早為印第安人發現。彼等所採者，僅為礦體露頭部之小塊或小片，當地表部份採鑿時，亦有時掘淺溝從事撿取。綠墨西哥之印第安人多用銅製斧以為武器(1066年)，當西班牙人底亞茲 (Bernal Diaz) 遠征墨西哥時，曾在其編年史中記述西班牙人誤認光亮之武器，為劣質之金所製成，而急於設法搜購。此種錯誤觀念嗣因斧頭生銹始為人瞭解。至當時土人所用之銅，究為自然銅抑或取自於礦石，則無法獲知也。

在歐洲地區，銅器時代開始於公元前3500年，鋼鐵時代開始於公元前1000年，而在亞洲地區，則為時均早。究其在時間上之所以有先有後者，可能基於銅與錫之獲得在來源上有取自礦石及低溫可熔自然金屬之不同耳。至鐵之自然元素頗為罕見，且由礦石製煉亦極困難。考古學家咸認在煉銅及錫之技術後，須經歷長久時間始能瞭解製鐵之技術。

金屬之功用隨世界文化之交流而拓展，取自礦物之有用物質亦隨

之相對增加。至有關礦物最早之著述，多側重於應用技術方面，故技術之應用，當遠在著述之前，但其確實時間則無人得知。如有色氧化礦物早已用於製造顏料、油漆或化妝物品，而寶石則遠在公元前數百年即開始分類，且在中國境內為時更早。除此之外，並將某些寶石及非寶石礦物用之於醫藥及符咒，且將石膏與粘土用於醫藥及建築之上。其他如銀、鉛等金屬之發現與提取製煉方法之進展等，更不勝枚舉也。

(2) 古典時代之礦物學：在西歷稱霸地中海時代至羅馬統治時期，即自公元前 500 年至公元後 250 年之間，其有關礦物學之著述僅有少數之抄本，用以維繫學者之研讀與流傳。而在古代希臘之早期著作中，亦多涉及礦物學與地質學，不過歷時甚久，已告遺失。當時之作者以大名鼎鼎之科學家亞里斯多德(Aristotle 384-322 B.C.)及特奧弗拉塔斯(Theophrastus 370-287 B.C.)最為傑出，在亞里斯多德所著之“Meteorologica”中，於討論“石”之範圍內，計包括有礦物、金屬及化石等，同時對礦物之起源，亦加以推測，而引起日後數代礦物學家之注意。至單獨討論“石”之文獻，則以特奧弗拉塔斯之“Concerning Stones”為最早，其文雖短，但具卓見，其論點雖有問題，然經此開場，乃使礦物學逐漸形成實體之學問也。

嗣後希臘學者西古拉斯(Dioscorus Siculus)於公元前 44 年著述“Bibliotheca Historica”，將若干鐵點置於世界各地之礦業及礦物學上。而達奧斯扣里得斯(Pedanius Dioscorides)更於公元後 60 年曾在疾病治療之討論上，擬以礦物及金屬做為醫藥之用，經此臆測，乃開礦物知識順利進展之門。其後相繼問世者，為有名之羅馬科學家埃爾德(Pliny the Elder 23-79 A.D.)所著之“Natural History”，其全部為一完善之概論，而一部則專致力於礦物方面之物質，計金、銀、銅、鉛、石、大理石及寶石等無不具備。惟於公元 79 年當維蘇威火山向那不勒斯海灣爆發時，喪身其中，而成為古代之科學殉難者。

(3) 中古時代之礦物學：在中古時代以前為歐洲歷史上之寂莫與混

亂時期，迨封建制度建立，礦物學仍無顯著之進展。當時古典之科學與藝術均為阿拉伯人所承襲，而免於歐洲地中海地區之變亂與騷擾。有同教世界阿里斯多德之稱的阿維西納(Ibn-Sina或Aricea 980-1037?)，在其著作中闡述若干早期之發現，其中有關礦物及物質方面者，更成為後世歐洲學者研究之準繩。

中古時代之重要著作以範圍淵博為主，其來源多為實事與想像之累積，當時著述與工匠之對象，僅有礦物、礦石、寶石及化石。其所出版之書籍，計1061-1081年有倫內斯(Rennes)主教之"The Lapidary of Morbodus"，1260年有馬格奴斯(Albertus Magnus)之"De Mineralibus"，1502年有列恩那杜斯(Gamillus Leonardus)之"Speculum Lapidum"，而1609年布德(Anselm De Boodt)之"Gemmarum et Lapidum Historica"更類似百科全書，權威學者咸認其為十七世紀最重要之寶石鑑定手冊。至具有科學價值者，則寥寥無幾，恰如1938及1954年阿達姆斯(Frank Dawson Adams)之"Birth & Development of the Geological Science"所稱中古時代之礦物學實非科學，更非學問之堡壘，蓋以其僅憑空中樓閣而成之夢中虛構，雖覺離奇美妙，但因無實驗之基礎，故結果必註定粉碎無疑也。

(4)現代之礦物學：在礦物學之發展上貢獻最大者，首推亞哥里古拉(Georgius Agricola或George Baucer 1494-1555)，彼在學生時代即為一標準之礦物與礦業方面知識之追求者，學成後更一生致力於地球科學工作。其不朽之著作計有"De Re Metallica"(1556)及"De Natura Fossilium"(1546)等，而"Metallica"又於1950年為美國胡佛(H. C. Hoover)總統夫婦譯成英文。除此之外，帕薩古修(Vannoccio Birunguccio 1480-1539?)亦負盛名，其在1540年出版之"Pirotechnia"於1942年為史密斯(C. S. Smith)及葛奴地(M. T. Gnudi)二氏譯成英文。在上列二書中，對各種金屬礦物，均論之極詳。

至"De Natura Fossilium"之內容，則着重於問題之討論，而刪除一般神秘空幻之想像。並將當時所知之礦物詳為敘述，同時對早期之

分類，重新做一極有系統之排列；更在物理性之色、比重及透明等基礎上，逐漸加以解釋與說明，故後人稱之為“First Text-book in Mineralogy”。

以目前之觀點言之，當時之著作雖亦難免有可笑之處，但其設計實不失為一詳盡而有系統之分類，而為後世礦物學家在數百年間均奉為圭臬。迨化學問世，在學問上逐漸劃分為三大部門，即自然歷史之規律、化學之規律及混合之規律是也。於是科學家乃根據第一種規律將礦物、動物及植物共置一爐，此即今日所稱之博物學科，茲將其所包括之範圍，簡述於後。

(A)敘述礦物學：凡為人發現之礦物，均於早期撰成描述式之論文，以供讀者之研究及鑑定。但漫無系統之敘述，欲使讀者瞭解，常感困難。德國地質學家佛那(Abraham Gottlob Werner 1750-1817)有鑑及此，乃於1774年着手統一各項術語及鑑定方法，並基於礦物之外觀，而加以正確之敘述。在1962年迦羅基(Albert V. Carozzi)之譯文中，對其著作之價值倍加讚揚，並謂其中若干術語，迄今尚為吾人沿用。

嗣後在敘述方法及使用術語上，均不斷改進，目前已達於統一狀態。但憑單一種文字，使著者之意見深入讀者之腦海，誠屬困難。故在實際研讀時，不論任何部份，讀者均應一手執書，一手執標本，兩相對照，以印證其與敘述術語之關連性。並由敘述之實際特性，以體認其他同種之礦石。

(B)物理礦物學：發展中之礦物學，並非僅限於繃然之描述，迨在數百年前，即對其內部之性質提出種種疑問。諸如顏色、硬度及形態等之根本原因，均非易於解答者。於是乃引用物理學之知識，從事於礦物物理性質之研究。早期之礦物學家，對各種硬度不同之礦物均以一習慣上之尺度測定，並不從事設計以求深入。德國礦物學家毛司(Friedrich Mohs 1773-1839)乃選用十種礦物，軟自石膏硬至金剛石，訂為衡量礦物硬度之尺度，此即迄今尚在沿用之毛氏硬度計也。

1688年古格里姆米尼(Guglielmini)認為解理方向在礦物中常保持一定；1670年巴托里尼(Erasmus Bartolini)指出方解石有完全解理，並詳述其特點，且由透明解理塊之顯示，而記錄其對光線之複屈折現象。除此之外，荷蘭物理學家海金斯(Christian Huyghens 1629-1695)更進一步研究方解石之性質，擬定光學定理，以解釋所產生之有趣現象，且進而奠定後世研究結晶光學之基礎焉。

(C)結晶學：在礦物學之分門中，其有關結晶之形態者，稱之為結晶學。十七世紀時推動研究工作最力者，為丹麥之解剖學家史帖諾(Nicolaus Steno或Niels Stensen 1638-1686)。彼曾由各不同部位測量石英之結晶，因而發現相同部位晶面之夾角均相等，即今日所稱之面角不變定律。此項發現對結晶學之研究影響極大，且打破早期著述中“結晶僅為自然之畸形”之假定。其後古哥里爾米尼亦曾測量石英之面角，而獲得相同之結果，且進一步更說明方解石二解理面間之交角亦有一定。1780年巴黎大學埃斯勒(Romé de l'Isle)教授之助理迦朗基奧(M. Carangeot)並發明接觸測角器，雖為極簡單之設計，而目前仍用以測量結晶面之夾角。1783年埃斯勒教授發表其結晶學“Cristallographie”之著作，其中列舉用接觸測角器測量各種結晶之記錄，同時倡導“礦物品面互有關係”之原理，更以數學法則說明結晶之基本形態。日後法國在礦物學上之輝煌成就，實奠基於此。繼埃斯勒之後者，為郝伊(Abbé René Just-Haüy 1743-1822)，彼將結晶學納入正軌之研究，在其“Essai d'une Théorie Sur la Structure des Crystaux”中，闡釋“對稱定律直接左右晶面之生成”，同時樹立“結晶形態隨化學成分改變”之觀念。至其最重要之貢獻，則為“礦物結晶之規則性，係由大小及形態相同之小分子互做有秩序之堆積所形成”之發表。此種觀念乃造成結晶研究之革命主流，於是若干附帶之發現接踵而至，最後更確定原子構造之結論。至此礦物學之進步，乃益加快速矣。

(D)礦物之原子構造：在郝伊之後，礦物學家雖確認結晶之外形應另有合理之解釋，但經久未獲具體結論。1895年德國物理學家倫琴

Wilhelm Konard Röntgen 1845-1923)發明 X 線，並將之投射於固體物質。1912年其弟子呂耶(Max Von Laue)使 X 線通過結晶體時，發現其由原子面產生有規則之反射。但對原因之證明、科學儀器之效率與研究方法之有效改進等，均有待英國物理學家布拉哥父子(William Henry Bragg 1862-1942 & William Lawrence Bragg 1890)之努力，彼等確認。位於結晶框架上之原子，因彼此附着而形成其結晶之性質，此與目前咸認之。物質性質均受制於原子，由於其規則性之排列及相互之吸引力而使之聚合者，並無幾許之出入也。

至礦物學發展之詳細過程，均載於阿達姆斯所著之 "Birth & Development of the Geological Science" 中，苟能仔細閱讀，則對地質學及礦物學之歷史，必可瞭如指掌也。

〔3〕礦物及其與人生之關係

(A)礦物之意義：通常所稱之礦物，必須具有下列各項條件：

(1)天然產出：凡礦物均為天然產出，人工製造者不得稱之為礦物。如石膏之成分，原為 $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ 而言人在實驗室內雖可製造相同之物品，但不能以礦物名之。

(2)一定之化學成分：凡礦物均具有一定之化學成分，不論其產地為何？形態及顏色又如何？但其化學成分則毫無二致。如石英在顏色上雖有白、紅、綠、紫、黑等之不同，在形態上更有完面形、半面形及四半面形之別，但其化學成分，均均為二氧化矽 SiO_2 。

(3)均質性：均質性者即質地均一之謂也。設吾人取閃鋅礦一塊，試顯微鏡下察之，見各部之構造完全相同，亦可均由硫化鋅 ZnS 組成者。但花崗岩之結構，則為石英、雲母、長石及角閃石等之集合體，其組合情形，各部亦參差不一。

(4)一定之原子排列：結晶完整之礦物，其內部之原子排列均有一定。而礦物外表形態不具規則之結晶質，其內部之原子排列亦井然有序。如方鉛礦之原子排列呈面中心立方格子狀，外表多呈六面體之結

晶。螢石之鈣原子為面中心立方格子，氟原子為單純立方格子之排列，其外表呈六八面體類之結晶等均是。

(B)礦物與人生之關係：人類在生活上應用礦物，為時甚早。據亞哥里古拉所著之"De Re Metallica"中記載，遠在三萬年以前，歐洲之克羅馬能人(Cromanion)在比利時一帶掘井探採燧石，以為取火之用。威爾斯(H.G. Wells)所著之世界史綱"The Outline of History"中，記述六千年前，北歐民族與蒙古民族均能使用金屬，製成武器用以自衛。其後人類知識逐漸開展，而礦物之利用亦更為廣泛。茲特分為日常生活與國防兩方面述之如下：

(a)日常生活：目前人類生活四大要項，無一不直接或間接仰賴於礦物。茲簡述於下：

(1)食：如鹽為人體中所必需，鐵為造血液之原料，磷與鈣為構成骨骼之主要成分皆是。

(2)衣：如石棉可製消防人員之服裝，鋼鐵可製士兵之鎧甲等。

(3)住：大理石、鉅紋石為高級之建築材料，石灰岩、花崗岩為築牆壁所必需，而鋼筋水泥更為近代高樓大廈之唯一器材。

(4)行：鋼鐵之用於製造軌道與機車船艇等，鋁之用於製造汽車與飛機，以及鋁合金之用於製造太空飛行之太空船等均是。

除上述各項外，在此科學昌明，社會繁榮之今日，人類生活上之消費物品，莫不仰賴於工業生產，而工業上所用之機器及動力，更非礦物不能為功。且吾人之生活程度愈高，則對礦物之依賴亦愈切。故一般對某民族文化高低之判斷，皆視其對礦物之利用程度為依歸，是以稱人類之文明即礦物文明(Mineral Civilization)者，絕非誇張之辭也。

(b)國防方面：礦物用於國防之上，早在有史以前，黃帝造指南車以啟蚩尤，即係用磁鐵礦以判別方向者。史家根據社會之進化，通常將歷史分為上古、中古、近古及現代四階段。若以礦物在國防上應用之演變，亦可分為下列四代：

(1)石器時代：包括舊石器時代與新石器時代，以年代計約為距今六千至三萬年前。當時各部落均將岩石加以琢磨，以為攻敵之武器。

(2)銅器時代：約距今一千年至六千年以前，當時所用之兵器如戈、矛、刀、劍等，均係銅之合金製成。戰國以後秦始皇收天下兵器，鑄為金人，實即指銅而言。又我國古代戰場勇將常使用青銅偃月刀，亦一例證。

(3)鋼鐵時代：距今二十五至一千年以前。我國鋼鐵事業在唐初已極興盛，如河北省灤縣之冶里，即有當時煉鐵之遺物。嗣後工業發達，鑄造武器不斷改進，由刀劍一變而為槍砲，由騎射一變而為戰車，戰艦。第一次大戰以前，德國首相俾士麥高倡鐵血政策；第二次大戰期間，希特勒更率先攻取捷克及斯干的那維亞，以期確保戰時資源。故鐵礦在國防上之重要，於此可見一斑矣。

(4)核子時代：二次大戰以後，戰爭觀念既因原子彈之發明而改變，故國防上最重要之資源，亦為放射性之鈾礦所取代。蓋放射性元素之原子蛻變，可產生 α 、 β 質點及 γ 射線，其殺傷力之強，遠超過億萬噸之黃色炸藥。試觀本年八月間，蘇聯竟不顧全球人士之憤慨，悍然派兵佔領捷克，雖不乏政治因素，但窺其真正意圖，無非掌握世界三大產鈾地之一耳。

[4] 礦物學之應用

(A)學術上之應用：在若干種學科之研究上，非具有礦物學之基本知識，不能做深一步之探討。如前所述之岩石學者必須深切瞭解造岩礦物，經濟地質學者必須深切瞭解其形成礦床之礦物。蓋以根據礦物學之理論，不但可研究礦石之光學性質，並可進一步探求礦石之生成、產狀以及其共生關係等。

(B)工業上之應用：工業上往往遇有多種問題，非賴礦物學之理論不能解決。如研磨材料方面、耐火材料方面以及陶瓷、人造結晶、鋼鐵等工廠，常以礦物學之知識為解決重要問題之工具。

(C) 工程上之應用：礦物學之用於採礦及冶金工程者，自不待言。至於探礦方面之應用，亦復不少。如美國柯利麻克斯 (Climax) 地區，盛產輝鉬礦 (MoS_2)，最初發現於 1890 年，而誤認為方鉛礦 (PbS)，因方鉛礦中常含多量銀之成分，故當時採取鉛礦者，皆供煉銀之用。迨煉銀失敗，乃加以分析推敲，復誤認為石墨 (C)，蓋此三種礦石外觀上頗相類似，遂致混淆不清。直至又五年後，始由礦物學者訂正為輝鉬礦。

又剛石 (Emerald) 原由鋼玉 (Al_2O_3) 及磁鐵礦 (Fe_3O_4) 二種礦物合成，最初開採於希臘群島及土耳其。至美國馬薩諸塞州之柴斯特 (Chester) 地區之礦脈，於 1860 年為魯加斯 (H. S. Lucas) 所發現，脈呈黑色而具磁性，乃誤認為磁鐵礦，但置於熔礦爐中則不起反應。後遊說該州地質學家傑克遜 (Charles T. Jackson) 鑑定，始知該礦石係與綠泥石、珍珠雲母、水鉛石及硬綠泥石等共生，再與土耳其剛石礦床相對照，乃確定為剛石。

(D) 國防上之應用：礦物學之用於國防上者，亦頗廣泛。如第二次大戰期中，日本為挽救戰爭之劣勢，曾於 1944 年十一月至 1945 年四月之六個月中，於北太平洋利用西風帶之氣流，共放九千個氫氣球至加拿大與美國西岸。若氣球上再帶有燃燒彈，隨氣流東行，在夏季之乾燥時期，對美國西北部之森林地帶，足以造成極嚴重之威脅。當時美國地質調查局魯斯博士 (Dr. Clarence S. Ross)，以分析法及物理光學性等方法，充分研究其氣球所攜帶之三十六磅重砂袋，得知其組成為：

紫蘇輝石	52	石英	16	磁鐵礦	10	角閃石	8
輝石	7	斜長石	6	柘榴子石	1	鋇英石	1

彼更將日本出產該砂之地區繪製成圖，送交威爾伯 (Wilbur) 將軍派機偵察，遂將日本之氫氣球工廠全部摧毀，而美國西部地區亦因之幸免於難也。

[5] 礦物學研究上之要旨

(A) 觀念之確定：在研究進行之前，對礦物學、礦物及結晶等要義，應有正確之觀念。按礦物學為研究地殼中之石性物質，其中包括岩石分子及其崩潰後之產物，諸如卵石、砂粒及土壤等均是。目前所知之礦物多達二千餘種，其區別之法，必由原子種類及原子排列之二特性着眼，始克奏效。通常稱內部原子排列有規則性之礦物為結晶質礦物，而稱所有部份均呈規則性之同一形態及式樣者為結晶，凡結晶之原子式樣均呈規則性之重疊，且其尺寸及式樣更重疊無所限制，故結晶小者不為目見，而大者則可供鶴居。又當結晶生長於開鑿之洞穴或液體中時，因其向外發展不受阻礙，常於外表生成光滑之平面，蓋以內部具有一定之排列形式也。否則雖相同之化學成分，亦不能發育成光亮之平面，此即所謂之結晶基本概念，讀者應注意及之。

(B) 採集之重要：欲求對礦物之真正瞭解與精通，非反覆觀察、研究及試驗不為功，由攝影及圖片所得之印像，遠不及由觀察所得者為多，欲收觀察之效，必須使讀者經常握有實體標本，故野外之採集尚焉。在學校之中所舉行之團體採集，固可得預期之效果，但更重要者，則為使讀者瞭解小型採集之方式，以便於課餘之暇隨時行之。至所採集之標本，應以美麗、珍奇及具有科學價值者為貴，其一般之採集，則以化學成分及結晶構造之典型礦物標本為主。故有系統之採集，均能符合其分類標準；至其他有名之礦物及當地所產之礦物，亦應列為採集之對象；而最重要及有價值之採集，更應與修業期間所研習之論題密切配合。苟能事先妥為安排，則遇有疑難必可及時獲得闡釋，其在研究上所遭遇之問題，自可迎刃而解也。

礦物學目次上冊

緒 論	1
第一章 結晶形態學	1
1-1 結晶體之外觀	1
1-2 結晶面角之測定	22
1-3 晶系與晶類	27
1-4 等軸晶系	36
1-5 正方晶系	42
1-6 六方晶系	46
1-7 斜方晶系	53
1-8 單斜晶系	55
1-9 三斜晶系	58
1-10 晶體之集合	59
1-11 結晶之不規則	66
1-12 晶帶	70
1-13 結晶之投影	74
1-14 結晶之計算	79
第二章 結晶構造	88
2-1 空間格子	88
2-2 空間群	99
第三章 X線結晶學	111
3-1 X線之繞射	111



3 - 2	研究之方法.....	118
3 - 3	繞射X線之強度.....	135
3 - 4	電子分布密度之測定.....	145
第四章	礦物物理學.....	150
4 - 1	結晶面之性質與集合.....	150
4 - 2	力學性質.....	159
4 - 3	熱學性質.....	171
4 - 4	礦物之電磁性.....	185
第五章	光性礦物學.....	193
5 - 1	礦物之一般光學性.....	193
5 - 2	結晶之光學性.....	202
5 - 3	偏光顯微鏡.....	207
5 - 4	礦物在偏光顯微鏡下之研究.....	211
5 - 5	反射顯微鏡.....	229
5 - 6	礦物在電子顯微鏡下之觀察.....	231

第一章 結晶形態學

1-1 結晶體之外觀

(1)結晶與結晶學：凡一定化學成分之物質，在適當環境下結成內部為有秩序之正規原子排列，外表為有規則而且光滑之幾何平面所包圍之固體，稱之為結晶體(Crystal)。若內部構造呈有秩序之原子排列，而外表不具規則而光滑之幾何平面；即塊狀礦物其沿互相平行之原子面雖呈相同之排列，而在其交叉之面則呈不相等之內部構造者，稱之為結晶質(Crystalline)。換言之，結晶體為發育完整者。又晶面完整之固體結晶稱為自形(Euhedral)，晶面不完整之固體結晶稱為半自形(Subhedral)，至不具光滑幾何平面者則稱之為他形(Anhedral)。

結晶質之顆粒甚小，非借助顯微鏡難以鑑定者，曰微晶質(Micro-crystalline)，若結晶質集合體之顆粒再小，即使用顯微鏡亦無法觀察，而僅能以X射線攝取繞射斑點時，則曰潛晶質(Cryptocrystalline)。

某些物質之內部既不呈有秩序之原子排列，其外表更不具規則而光滑之幾何平面時，稱之為非晶質(Amorphous)，即無數原子或分子處於漫無規則之位置者也。凡天然產出之非晶質礦物，稱之為膠體礦物(Mineraloids)。非晶質礦物多不安定，經過長久時間後，亦常變為結晶質。

研究結晶之科學曰結晶學(Crystallography)，其專研究結晶之形態者曰形態結晶學(Morphological crystallography)或幾何結晶學(Geometrical crystallography)。

(2)結晶作用：結晶體之成因，由於結晶作用之方式不同，普通可分爲下列三種：

(A)溶液之析出：溶有物質之溶液，因蒸發而增加溶質之濃度，致

其分子接近發生分子引力作用，乃逐漸形成結晶而析出之。如溶有氯化鈉之水，因蒸發作用水份發散，每單位體積內之鹽份逐漸增加，卒致水中無法容納而開始沉澱。換言之，到達此界限以前，氯化鈉均為水溶解而呈液體狀態，在到達此臨界點時則形成固體。若蒸發作用進行甚為緩慢，其固體食鹽之分離亦慢，於是形成定形結晶，因鈉及氯之離子一旦游離，乃自行集合而逐漸組成以正方形之面圍成之六面體。

除此以外，結晶亦可因溶液之溫度或壓力降低而形成，如熱水易於分解食鹽，但溶液冷卻至超飽和狀態時，則食鹽形成結晶。又在高壓狀態時，液體內所溶解之食鹽為量較多，若壓力一旦減低，則必達超飽和狀態而成結晶。又使溶液急驟飽和時，因物質對隅角及稜線部位之供給較多，乃促其凝結快速；反之，因而之成長較緩而形成晶面凹入之結晶，是為骸晶(Skeletal crystal)。

(B)岩漿之凝結：灼熱之岩漿本為甚多元素所合成者，當其冷卻時，各種不同之離子彼此相互吸引，而形成各種不同礦物之結晶核心，然後結晶作用繼續進行，更多之離子以同一比例層層重疊，礦物之粒子於是形成。如結晶質之固體自由成長時，則由正規之多角形平面圍成一多面體，此即所謂之結晶體也。

(C)昇華作用：物體受熱化氣上騰，其所分解之原子或分子，遇冷則又凝聚而成一定之結晶構造，是為昇華作用。以此種方式所生成之結晶，遠較上述兩項為少。如火山地帶噴氣孔之硫黃結晶，即係硫黃蒸氣冷卻而成者。

(3)結晶面與原子面：礦物結晶體之外表既由結晶面所包圍，至其生成之原因，茲以岩鹽為例，簡單說明於後：

凡物質愈分割愈細，最後即為原子，原子直徑之大小約為 1×10^{-8} 埃 (Angstrom)，目不能見。原子之形狀，可視為球狀體，其半徑隨原子之種類及原子價而異。原子如帶有電荷，則稱為離子，其帶正電者為正離子或陽離子，帶負電者為負離子或陰離子。

究諸實際，在結晶體中原子或離子皆呈規則性之集合。如岩鹽中之鈉 (Na) 與氯 (Cl) 之離子，係鈉離子為正 (Na^+) 而氯離子為負 (Cl^-) 所成之規則性排列。圖中所示為其正規集合之一部，亦即岩鹽之結晶構造也。原子或離子因呈規則性之排列而形成正規之原子排列面，其露於外部者即為結晶面。又因原子過小而且不備見，故結晶面之形式，以肉眼觀之，自必平坦無疑也。



(1)



(2)

第 1 圖 岩鹽之結晶

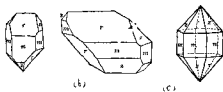
如上圖(2)為岩鹽之結晶構造，當 a_1 、 a_2 、 a_3 等断面外露時，即形成結晶面，恰如圖(1)之結晶形態。若進一步研討 a_1 、 a_2 、 a_3 等面之原子排列時，可知其排列式樣完全相同，即各面之性質常受原子之種類及其排列式樣所支配。至性質相同之面，稱之為同價面，通常在二結晶體中，其相當之晶面，均為性質相同之同價面。

設結晶於溶液中成長，圖(2)之各構造面必為溶液內之離子正規重疊堆積，於是結晶逐漸增大。各面之大小雖生變化，但其原子排列方式則不稍異，即相等面 a_1 、 a_2 及 a_3 之大小，時刻均在改變。如各面之發育速度相等，即原子在各面重疊之速度相等時，其形狀及大小亦必相同。故原為相等之結晶面，在等速之發育下，其形態及大小仍然相等。此雖係結晶之根本原則，但通常並不多見。且實際上結晶成長時

因各種條件不盡相同，即使各面之成長速度符合理想情況，而其形(及大小仍必有少許之差異。是以嚴格言之，結晶面之形狀及大小並無絕對之特有性，乃結晶面之本質受制於結晶之構造，即各面上之原子排列形式也。

(4) 晶癖與品相：結晶在適當之環境中成長時，多發育成完美之理想多面體，其同種類之晶面大小相等，特稱之為理想形 (ideal form)，普通在礦物學中所描繪之結晶圖及實習用之結晶模型，皆屬此類。但實際之天然結晶，其原料之來源不論為溶液、融體抑或氣體，因物

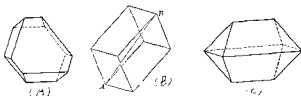
理的條件不同，即同性質之面亦多發育不齊，以致同種結晶在外形上多大小不同而形態各異。如水晶之結晶本為圖中之(C)，然各面發育不同，乃呈(a)及(b)之歪形。



第2圖水晶之晶癖

等軸晶系之晶體，其前(a)後、上下及左右發育均同，

由任何方向觀之，均呈同一之理想形晶體。但有時同性質之面發育不齊，其外形乃隨方向而異，在對稱度低之晶系中，亦復如是。如右圖為八面體之晶形，因結晶之發育不同，乃

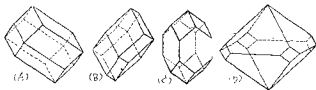


第3圖八面體之歪形結晶

生成各種不同之形態，其中之(A)為八面體之平行面特別發達，向三次對稱軸之方向延展而呈扁平之六角板狀，驟視之，頗似六方晶系之晶體。(B)為斜向伸展，末端不見八面體之面，而呈尖銳之菱面體，由相對稜之中央連線即成二次對稱軸。(C)之外形頗易與斜方晶系之晶形混淆，此在尖晶石、螢石及磁鐵礦中，皆可見之。

在等軸晶系中，其他晶體亦有相同之情形，如六面體沿一品軸伸展而扁平化時，則呈正方柱狀。毛赤銅礦(Chalcotrichite)或針狀黃鐵礦即呈此種現象。且菱形十二面體亦復如是。

如圖所示(A)為沿三次對稱軸之方向延伸，兩端以



第4圖菱形十二面體之歪形結晶

三面圍成之六角柱狀結晶。(B)之伸展方向雖與(A)相同，但因晶體扁平

化，故與六方晶系菱面體類之晶形頗相酷似。若僅沿一軸延伸時，則成(C)形；反之，若沿一軸收縮時，則又成(D)形，皆與正方晶系酷似也。

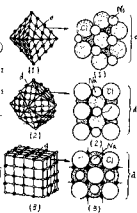
在結晶面發展之過程中，除大小不同外，尚有沿某一方向特別延伸而成柱狀或針狀之外形者。此乃礦物特有之癖，故稱之為晶癖(Crystal habit)。在某些礦物中，不循特定之方向發育者，稱為正常晶癖。例如結晶生成時，可於一定方向發育遲緩，而使垂直於該方向之面特別發達成板狀，雲母薄片之葉狀；亦可於某方向稍稍伸展成短柱狀，或特別延伸成長柱狀；設伸長為柱狀更呈偏平之板狀時，則成為亞狀；又一方尖銳時，即成錐狀；若錐狀過尖，則又成針狀；如向一方延伸成極細長之形態時，可以纖維狀或毛狀稱之。

上述晶癖，並非所有礦物之共通性質，因係二、三種礦物所獨有，故只可以特徵視之。

在上圖所示岩鹽之結晶構造中，其前後、上下及左右均可無限重疊，若剖而視之，則必出現正規之原子排列面，是即所謂之原子面。通常在正規之結晶構造中，其原子排列相同之面，均於同時生成，即圖(2)之與 a 面同時出現者，計有六面之多。

至形成結晶面之原子面，並無嚴格限制。如圖所示為岩鹽之結晶構造，其外表之面計(1)為八面，(2)為十二面，(3)為六面。在(1)圖中 o_1, o_2, o_3 為相同之面，(2)圖中之 d_1, d_2 及(3)圖中之 a_1, a_2 亦復如是，但(1)圖各面之性質，則與(2)圖及(3)圖中者完全不同。

由上可知同種礦物之結晶面，未必相同，通常岩鹽之結晶即有六面體、八面體及十二面體等三種。其外表形態既異，內部原子排列自不相同，究其原因則係結晶時之外界溫度、壓力及溶液性質等不同所以致之。吾人稱此結晶



第5圖 岩鹽之結晶構造

面排列不同所導致結晶外形之變化，特以晶相(Crystal tracht)稱之。

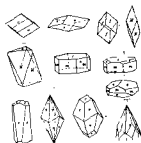
如圖所示為方解石之晶相，其結晶形態之多實居首位。普通礦物之晶相，多隨產地而異。

總括上述，結晶外形之變化可分為晶癖與晶相二種，但亦有時晶癖與晶相不能區分，而混之稱為晶癖者。

觀察同種礦物之結晶時，其面之組成雖同，但各晶面間相對發達之程度亦有顯著之差別，故相等

晶面之結晶體，其形態未必盡然相同。如圖所示為方鉛礦之結晶，在充分發育晶面之垂直方向生長較遲，故在面之發育上必有二種不同之趨勢，即與面平行發育速度 v_1 及與面垂直發育速度 v_2 也。在數值上 $v_1 > v_2$ ，考其原因乃溶液中混入其他物質，當結晶成長時吸着於面上， v_2 遂因之減小，此種現象可由色素辨認之。如明礬之結晶為六面體與八面體合成者，若將青藍色素混入明礬之飽和溶液中，當其結晶之際，六面體因充分發育而帶有顏色，八面體之面較小則不帶顏色。因色素附着於六面體之面上而使 v_2 受阻， v_1 反而增大，於是生成大小不同之面。又在岩鹽之結晶中混入少許鉛離子及錳離子時，雖僅生成六面體之結晶；但其量增多，則產生六面體與八面體組成之聚形；設混入大量之尿素時，更生成八面體之結晶，此乃使晶面發育不均之主要原因。

究諸實際，結晶面在發育上所受之影響，並不一定與混入物質之數量成正比，有將其混入物質雖為量極微，但對晶面之發育亦具甚大



第6圖方解石之晶相



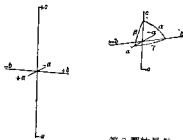
第7圖方鉛礦之結晶

之影響。除此之外，若混入之不純物質在同價面上吸着程度相同時，其結晶在形態上以晶相之變化為主。如同價面上所承取之因素不同時，因其發育各異，故產生特異之晶癖也。

(5)理想晶形：當結晶作用於理想之環境下進行時，根據結晶之本來性質，其相等之面常按相同之速度及方式逐漸發育。但實際上相等之精品面，多因發育情形各異，故所得之晶面在形態及大小上亦不盡相同，但仍以不脫離本質為原則。故描繪結晶體時，皆以形狀相同而大小相等之面為之。至繪不同之晶面時，其形狀及大小之差別，則與實物保持相當之近似程度。如此直接繪製所得之結晶圖形，特稱之為理想晶形。如上述之岩鹽結晶，其理想晶形有正立方體、正八面體及正十二面體等，水晶之理想晶形則如第2圖之(C)所示者。凡理想形之繪製，均避免晶癖之外形不規則性，故其結晶面之組成，即代表礦物之結晶外形。通常之理想晶形中，均以相同之文字表示其相等之面，如石英之柱面均以 m 表示，錐面之大者以 r 表示，而小者則以 s 表示之。又在理想晶形中其大小相等之晶面，均為性質相同之晶面，亦即原子排列完全相同之面也。

(6)結晶軸：觀察結晶模型時，可見其整齊之對稱性。在確定晶面之位置時，必先假定相交於一點之三軸，而以相交之原點至晶面距離之比表示之。特稱其軸為結晶軸 (Crystallographic axis)，至軸之數目通常為三條，在六方晶系之晶體中則有四條。

以觀察者之位置為準，其結晶軸所在之方向為前後、左右及上下，故稱之為前後軸、左右軸及上下軸。前後軸以 a 或 x 表示，其在原點之前方者為正 (+)，後方者為負 (-)；左右軸以 b 或 y 表示，其在原點之右方者為正 (+)，左方者為負 (-)；上下軸以 c 或 z 表示，其在原點之



第8圖結晶軸

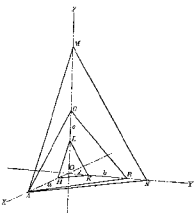
上方者為正(+), 下方者為負(-)。此種表示方法, 係指三軸長短不等者而言。若三軸長短相同時, 均以 a 表示; 如二軸長短相同, 另一軸或長或短時, 則以 a 及 c 表示。在六方晶系中, 三側軸長短相等, 彼此相交成 60° , 且位於同一平面內, 故均以 a 表示, 因上下軸之長度不同, 乃以 c 表示之。

結晶軸有互相直交者, 亦有二軸直交一軸傾斜者, 更有三軸皆呈斜交者。左圖之中三軸互相直交; 若二軸直交一軸傾斜時, 則將直交之二軸置於上下及左右方之位置, 而將斜交之一軸置於前後之方位, 並將前後軸及上下軸之交角以 β 表示之。右圖為三軸均呈斜交之情形, 其 b 軸與 c 軸間之交角為 α , a 軸與 c 軸之交角為 β , a 軸與 b 軸之交角為 γ 。

上述之結晶軸, 乃為便於說明而假定者, 在實際之結晶中並不得見, 恰與地球上經緯度之功用相同也。

(7) 有理數法則: 在確定結晶形態時, 須先確定各晶面之方位。在確定其方位時, 則其結晶須為理想晶形。在理想形中其與幾何學座標之相同方位, 定為結晶軸, 按其與結晶面相交距離之比例, 即可決定該面之方位也。

結晶面與結晶軸相截之長度, 稱之為標軸 (Parameter)。如圖所示, ABC 為一結晶面, OA 、 OB 及 OC 則為其面之標軸, 同理 ANM 面之標軸為 OA 、 ON 及 OM 。普通之標軸多以單位長度表示之, 如圖中 OA 、 OB 及 OC 為 X 、 Y 及 Z 軸之單位長度, 而以 a 、 b 、 c 表示。在 ANM 面中, 因 $OA = a$, $ON = \frac{4}{3}b$, $OM = 2c$, 故其標軸為 a , $\frac{4}{3}b$, $2c$ 。通常將標軸數字



第 9 圖 標軸

以比例形式表示，則稱之為標軸之比 (Parameterratio)，如 $a : \frac{4}{3}b : 2c$ 是也。至其係數 $1, \frac{4}{3}, 2$ 普通以 p, q, r 表示，特稱之為面係數 (Coefficients of Parameter)。

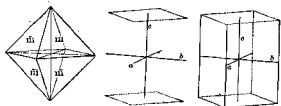
在上圖之中，因 HKL 與 ANM 為二平行之面，其標軸之比與面係數均相等，故可以同一結晶面視之。在結晶學上，其由原點至晶面之絕對距離，並不重要也。

普通以各軸單位長度所截之面，做為其他各面之基準，特稱之為單位面 (Unit face)。各軸單位長度之比，稱為軸率 (Axial ratio)。在軸率中之 b 通常皆為 1，如斜方晶系之硫黃結晶，其軸率 $a : b : c = 0.8131 : 1 : 1.9034$ 。即 a 軸之單位長度為 b 軸單位長度之 0.8131 倍，而 c 軸之單位長度則為 b 軸單位長度之 1.9034 倍。在礦物之結晶中，其軸率均以特有之數值表示之。

面係數之倒數，通常以 hkl 表示，特稱之為面指數 (Indices of face)。若其中有分母時，則於乘以最小公倍數後，將分母刪除之。又結晶面之指數，普通均為簡單整數，而以 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 等數為最多，鮮有超過 10 者。通常稱此簡單整數表示結晶面指數之方法，曰有理數定律 (Law of Rational Indices)。

(8) 結晶形：如圖所示，為八面體之結晶面將空間完面包圍者，稱之為閉形 (Closed

form)。圖之中央僅有上下二晶面，其旁則敞開；而圖之右方僅具前、後左、右四面，其上、下敞開者，則稱之



第 10 圖 開形與閉形

為開形 (Open form)。又以同一種晶面所圍成之閉形，稱為單形 (Simple form)；若一結晶體具有兩種以上之晶面時，則稱為聚形 (Combination)。成為開形者，必須與其他晶面合成為聚形後，始能形

成一結晶體，如上圖中央之二面與右方之四面互相聚合，則成一晶體。聚形並非結晶中之不規則者，其對稱度相同之晶形，始能於同一結晶中出現，至結晶之外形僅不過為內部原子排列之表現而已。

在各晶系中，所具對稱要素最多之晶形，稱之為完面形 (Holo-hedral form)。如與同一晶系之完面形相較，其對稱度低而其面數僅為完面形之一半者，稱之為半面形 (Hemi-hedral form)。又與同一晶系之半面形相較，其對稱度低而其面數僅為完面形之四分之一者，則稱之為四半面形 (Tetra-hedral form)。

如圖所示，為發達於對稱軸一端之晶面，而另一端則無同一晶面可尋者，特稱之為異極形 (Hemimorphic form)。在異極形中，無主對稱面及對稱中心。

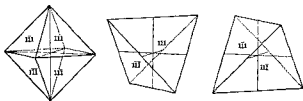


第 11 圖異極形

以上所述之半面形、四半面形及異極形，均較完面形之對稱度低，故統稱之為缺面形 (Mero-hedral form)。

缺面形者，乃由完面形中之面或特別發育或歸於消失而形成。如

圖所示為最簡單之八面體，若(111)面發育則成正四面體，設(111)面拓展便成負四面體。一般之缺面形，雖可認為係完面形晶面之一



第 12 圖八面體及四面體

部消失，另一部拓展而形成者，但究諸實際，此種觀念根本錯誤。蓋以結晶面之發達程度，在同一種礦物之結晶中，純係自由變化，以致特殊之面異常發達。其結晶面之發育良否，總有區別，但結晶之對稱則無絲毫之改變。況完面形與缺面形之間，其所有之對稱在根本上並不相同，實係各具原有獨立完全之對稱，並非由完面形之面消失而形成缺面形者也。

(9) 結晶面之表示法：表示結晶面之符號，稱之為結晶記號，其種類如下：

(A) 魏氏符號 (Weiss's Symbol)：用 a ， b ， c 表示三軸之方向及其單位之長度，即以 $a : b : c$ 表示單位形之面，亦三軸以單位長度所截之面也。一般結晶面之符號，雖可寫為 $pa : qb : rc$ ，但通常多以 b 或 a 之係數為 1，即以 $na : b : mc$ ($n = \frac{q}{p}$ ， $m = \frac{r}{p}$) 表示之。在 $\infty a : b : c$ 中， a 軸之係數為無限大，即該面與 b 及 c 軸以單位之長度相截，而與 a 軸平行。若為 $\infty a : b : \infty c$ 時，則該面僅與 b 軸相交，而與其他二軸平行。

在等軸晶系中，其單位面或基本面之符號為 $a : a : a$ ，若二軸相等一軸不同時，則為 $a : a : c$ 。

(B) 諾氏符號 (Naumann's Symbol)：普通以中項 p 代表 b 軸或 a 軸（等軸晶系則用 a ），左側附以 c 軸之係數，右側附以 a 軸或 b 軸之係數。如魏氏符號之 $na : b : mc$ ，則為 ncp ；設 m 或 n 為 1，即可省略，如 $a : b : mc$ 時，則為 cp 。其 p 所指者，係錐形 (Pyramid) 之意，而 o 所代表者，則為八面體 (Octahedron)。

(C) 密氏符號 (Miller's indices)：乃以面指數表示晶面者，目前應用最廣，為由任意晶面 $pa : qb : rc$ 演化而成，或以 $\frac{a}{h} : \frac{b}{k} : \frac{c}{l}$ 之形態表示之。如 $2a : 3b : 4c$ 之晶面，各以最小公倍數 12 分別除之，則可變為 $\frac{a}{6} : \frac{b}{4} : \frac{c}{3}$ ，此分母之數字即為表示結晶面之指數，亦即 (643) 是也。在指數之中，若有 0 數字以上時，則在各指數之間加一逗點以區別之，如 (32, 1, 0) 者便是。又 $a : 2b : \infty c$ 時，其倒數為 $1, \frac{1}{2}, 0$ ，若以 2 乘之，則為 (210)。普通所用之 (hkl)，即係面指數為 (hkl) 之結晶面也。至將結晶形寫成 $[hkl]$ 者，乃指與此同價之面所形成之結晶形也。至晶面與軸之頂端相截時，則在記號之上方加以“—”，同時相反符號之面，均呈平行狀態，如 (111) 面與 ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) 面平行者是也。

(D) 丹氏符號 (Dana's indices)：較諾氏符號更為簡單，即將諾氏符

號之 P 或 O ，代以一橫“—”，將 ∞ 代以“ i ”，設僅為 O 或 P 時，則以“ 1 ”記之。又僅 c 之標軸有係數時，則只對其數字即可，如 P 對之為 2 ， P_2 對之為 $1-2$ ， $P_{\infty c}$ 為 $1-i$ ， ∞P_{oc} 為 $i-i$ 及 ∞P 對之為 I 等均是。

(E)各種符號之關係，指數乃由係數之倒數演化而來，如 $2a : 3b : 4c$ 可以 $\frac{a}{2} : \frac{b}{3} : \frac{c}{4}$ 表示，若將分母各以 12 乘之，則得 $\frac{a}{6} : \frac{b}{4} : \frac{c}{3}$ 。故指數等於以晶面所截之軸長除以其標軸 a 、 b 、 c 所得之數值，如魏氏符號為 $a : 2b : 2c$ 之面指數，為由 $\frac{a}{a} : \frac{b}{2b} : \frac{c}{2c}$ 而得 $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{2}$ ，即 (211) 是也。同理 $3a : bh : \infty c$ 之面指數，為由 $\frac{a}{3a} : \frac{b}{b} : \frac{c}{\infty}$ 而得之 $\frac{1}{3} : 1 : 0$ ，即 (130) 是也。

在普通情形下，將 $pa : qb : rc$ 之結晶面變為密氏符號時，各項均以 pr 除之，而得 $\frac{a}{h} : \frac{b}{k} : \frac{c}{l}$ ，即由 $pa : qb : rc = \frac{a}{pr} : \frac{b}{pr} : \frac{c}{pr} = \frac{a}{h} : \frac{b}{k} : \frac{c}{l}$ ，而成 (hkl) 也。若 (hkl) 中有分數時，則各項均應以分母之最小公倍數乘之，而使之變為整數。

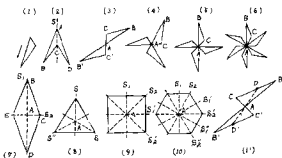
反之，將密氏符號為 (123) 之面改為魏氏符號時，應為 $\frac{1}{1}a : \frac{1}{2}b : \frac{1}{3}c = 6a : 3b : 2c = 2a : b : \frac{2}{3}c$ 。普通由密氏符號之 (hkl) 變換為魏氏符號時，則為 $\frac{a}{h} : \frac{b}{k} : \frac{c}{l} = kla : hlb : hkc = pa : qb : rc = na : b : mc$ 。（ $n = \frac{p}{q}$ ， $m = \frac{r}{q}$ ）。因 $n = \frac{k}{h}$ ， $n = \frac{k}{l}$ ，故知指數為 (hkl) 時，則可求得魏氏符號中之 n 及 m 也。

茲將各種符號之對照關係，述之於下：

魏氏	諾氏	密氏	丹氏
$a : a : a$	O	111	1
$a : a : c$	P	111	1
$a : b : c$	P	111	1
$a : \infty c b : \infty c$	∞P_{oc}	100	$i-i$
$2a : b : c$	P_2	122	1-2
$\infty a : b : \infty c$	∞P_{oc}	010	$i-i$
$\frac{3}{2}a : b : 3c$	$P_{\frac{3}{2}}$	231	$3-\frac{3}{2}$
$a : b : 3c$	P	331	3
$\infty a : \infty b : c$	P	001	0

(10) 結晶之對稱：觀察結晶模型時，可發現其具有幾何學上之若干規律，是為對稱定律 (Law of symmetry)。茲特分述於下：

(A) 圖形之對稱：如圖(1)所示，為一不等邊三角形，不論由任何角度觀察，皆屬不調和之圖形，故稱之為不對稱。在圖(2)中， $AB = AD \neq BC = CD$ ，設垂直紙面沿 AC 取平面 S ，則在 S 之左右，有相同之圖形，而處於相對之位置。 S 面恰與鏡面之作用相同，使 ABC 及 ADC 對鏡成實物與影像之關係，特稱該面為圖形之對稱面。若將紙沿 S 折疊，則二圖形完全重合，即 ACB 與 ACD 因反



第 13 圖 對稱圖形

(3) 之 ABC 及 $A'B'C'$ 為相連之二不等邊三角形，設於 A 點沿垂直紙面之軸將 ABC 旋轉 180° ，則與 $A'B'C'$ 同位。又以 A 軸將全體圖形旋轉 180° 時，該圖形復處於相同之位置，恰呈絲毫未動之狀態，遂稱 A 軸為二次對稱軸。圖(4)為互相連接之三不等邊三角形，將其中之 ABC 於 A 點沿垂直紙面之軸旋轉 120° 時，恰與另一三角形同位，又沿該軸將全體圖形旋轉 120° 時，則復處於相同之位置，且原圖形更有絲毫未動之感，故稱該軸為三次對稱軸。圖(5)為四不等邊三角形置於相距 90° 之位置，設沿 A 軸旋轉時，亦得相同之結果，乃稱其軸為該圖形之四次對稱軸。圖(6)為六不等邊三角形，置於相距 60° 之位置，以 A 點為軸旋轉時，其結果相同，故稱其軸為六次對稱軸。同理如將若干不等邊三角形置於 α 角度之位置，依法處理，則其與紙面垂直者為 $\frac{360}{\alpha}$ 次之對稱軸。

在圖(7)之中，於垂直紙面之 A 點有一二次對稱軸，並於通過相對之頂點位置，有與紙面垂直之二對稱面 S_1 及 S_2 。圖(8)之正三角形中，

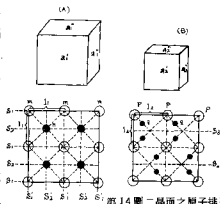
在垂直紙面之A點為三次對稱軸，其與紙面垂直而含有頂角及等分線之S、S'及S''，則為三對稱面。圖(9)之正方形中，其垂直紙面之A點為四次對稱軸，並有與紙面垂直之四對稱面S₁、S₁'、S₂及S₂'。而圖(10)之中，亦復如是。

圖(7)之S₁與S₂均為對稱面，但性質不同。而圖(9)S₁與S₁'雖為性質相同之對稱面，但S₂、S₂'與S₁、S₁'之性質，亦不相同。蓋圖(7)之S₁所分割之半圓形與S₂所分割之半圓形不同，而圖(9)中所分割者亦自各異。故稱性質相同之對稱面為同價對稱面，性質不同之對稱面為異價對稱面也。

在圖(11)中為二不等邊三角形，沿A點旋轉180°，可得原來之形狀，故其與紙面垂直方向為二次對稱軸。又ABC三角形之各邊與ABC'三角形之各邊相互對應，設在一方之圖形上取任意點D，連結D與A並延長之，得DA = D'A'，則D'點必位於與ABC三角形互相對應之另一圖形上，且與D點相對應，此時之A點即為該圖形之對稱中心。

上述之對稱面、對稱軸及對稱心，總稱之為平面圖形之對稱要素，因其與圖形之面垂直，故對稱面在紙上僅呈直線，而對稱軸在紙上則呈一點。又在圖形中，對稱軸之次數最少者為二，最多雖無限定，但普通結晶上之對稱軸，其次數僅有二、三、四及六等四種。

(B)面對稱：當繪製理想形之結晶時，應將形狀及大小相同之晶面繪成相等，意即面上原子之排列方式均完全相同也。如圖所示，正六面體之結晶有(A)、(B)二種，(A)晶體之同性質晶面為a₁'、a₂'及a₃'，(B)晶體之同性質晶面為a₁'、a₂'及a₃'。a₁'與a₂'既分別位於(A)、(B)之不同晶體，其面上原子之種類及



第 14 圖 二晶面之原子排列

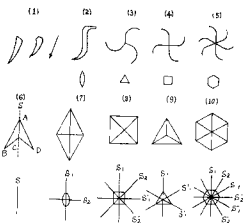
排列方式亦不相同，至 a'_1 與 a'_2 之差別程度，端屬面上所排列之原子樣式而定。如 a'_1 為由 m 及 n 二種原子於互成直交之方向及 l_1 之距離做正規之排列，而(B)晶體則為以 p 及 q 二種原子於互相直交之方向及 l_2 之距離做正規之排列。因 $l_1 \neq l_2$ ，且在(A)晶體中， n 原子位於以 m 原子組成之正方形中心，而(B)結晶中， q 原子則位於以 p 原子所組正方形之邊側，但 q 原子與 p 原子之最小間隔相等，故二面上之原子排列方式完全不同。若就此結晶形態之對稱性言之，則結晶面之代表原子面之排列方式，遂成問題。又同種原子為大小相等之球，而二原子間之距離應由其中心計算，且內部更視為完全相同，因此在垂直 a'_1 面有四次對稱軸，而在垂直 a'_2 面有二次對稱軸。至對稱面 S_1 、 S_2 、 S'_1 、 S'_2 及 S_3 均與正六面體之稜平行，而與正六面體之面垂直。其雖同屬正六面體之面，但因其原子排列方式不同，以致對稱之性質互異。故以理想形所描繪之結晶面，仍有若干之區別。因此吾人在面之對稱上，乃有特別註解之必要，此即所謂之面對稱是也。茲將垂直於晶面之對稱要素及對稱組合之樣式，列舉於下：

(a) 全無對稱者：如圖(1)所示，其無對稱之圖形，僅以箭頭表示之。

(b) 僅具對稱軸者：如圖(2)至圖(5)。

(c) 僅具對稱面者：如圖(6)所示。

(d) 具有對稱面及對稱軸者：圖(7)為具有二直交之對稱面 S_1 及 S_2 與二次對稱軸之菱形。圖(8)為具有二直交對稱面



第 15 圖對稱要素之配置

S_1 、 S'_1 及平分二面交角之另外二對稱面 S_2 、 S'_2 ，以及一四次對稱軸之正方形。圖(9)為具有三對稱面及一三次對稱軸之正三角形。圖(10)為具有六對稱面及一六次對稱軸之正六角形。

上圖所示，純係舉例性質。通常在結晶模型上加繪表示面對稱之圖形者，則稱之為對稱模型。對稱模型均具有上述性質，普通以形態為主，至其大小則不關重要。如圖所示，即使其大小加倍，在本質上並無改變。於是判斷二面對稱是否相等，皆以對稱圖形為依歸，因此對稱圖形應力求相似，而其大小則以互不相等為宜也。



第 16 圖對稱模型

表示面對稱之圖形，應繪於理想形之晶面上，若圖形式樣既經決定，至其大小及面與稜部位，則可任意為之。如其所繪之部位為對稱面，則在對稱面上某方向與稜所成之幾何關係，不論於任何情況下，必須絕對維持，同時面上之圖形方位亦可因之決定矣。

面對稱與面形之對稱有時一致，但未必盡然。因面對稱係表示其面上之原子排列者，故不必與外形之對稱一致。如圖(1)所示為方鉛礦之正六面體結晶，其面對稱呈正方形，有與其垂直之四次對稱軸，及

與其垂直而互成 45° 之四對稱面，在其中包括與正六面體對角線平行之二直交對稱面。但圖(2)所示則為

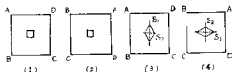


第 17 圖晶面上之面對稱

黃鉄礦之正六面體結晶，其面對稱呈菱形，具有一二次對稱軸，及與之垂直而和互成交之二對稱面。

又圖(3)所示為水晶之理想形，其錐面多呈一等邊三角形，在其上無對稱性。圖(4)所示為方解石之結晶，乃以六相同之菱形面集合而成者，在晶面上之面對稱，有與其垂直之對稱面，並與菱形面相對頂點之連結線平行。圖(5)所示為白雲石之結晶，雖係與方解石相同之理想形，但在其面對稱上則無任何對稱性。

右圖(1)(2)所示為正方形晶面上所呈之正方形面對稱，設將晶面旋轉 90° 其面對稱之形態完全不變。

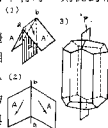


第 18 圖晶面上之面對稱

。但圖(3)及(4)所示為正方形晶面上所呈之菱形面對

稱，當晶面旋轉 90° 時，其面對稱之形態則為之改變也。此種情形乃面對稱形態不與晶面形狀一致之自然結果。蓋以面對稱方位與其在晶面之方位，有不可分之關係。設二面完全重合而平行時，則面對稱在方位上必與晶面一致也。

(C) 晶體之對稱：如圖(1)、(2)所示，在一結晶體中取一面 P，使其所分割之半形體與另一半完全相同。換言之，P 面為結晶體之對稱面，由其分割所得之半形體與另半體，恰與以 P 面為鏡面所得之實物與像者相同。故在對稱面所割之半形體中，必有與 A 面性質相同之 A' 面，且二面與 P 交成相等之傾角



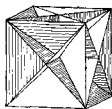
第 19 圖角閃石之對稱

。而其面對稱之配置，必處於以 P 為對稱面之條件下，亦即由 P 所分成之一半與另外一半必居於反射之同位也。此種情形在圖(3)所示角閃石之對稱面中，常可見之。

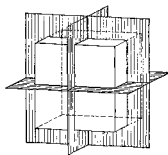
對稱面常與結晶面平行，故常以平行之結晶面稱之，如石膏之結晶，其對稱面為 (010) 者是。

在對稱面中含有二相等之對稱軸時，則稱之為主對稱面(Principal symmetrical plane)，否則為副對稱面(Sub-symmetrical plane)或常對稱面(Ordinary symmetrical plane)。主對稱面又稱軸對稱面(Axial symmetrical plane)，而副對稱面則又分為軸間對稱面(Intermediate symmetrical plane)及對角對稱面(Diagonal symmetrical plane) 一種。其與天然結晶面平行者，如等軸晶系六面體之面、六方晶系第一及第二兩柱面、正方晶系第一及第二兩柱面、斜方晶系之長短兩軸面及底面、單斜晶系之斜軸面等，皆常對稱面也。

將一晶體沿一軸旋轉，而自定方向觀察，當旋轉一週後，有若干次與原形相同，且各面上之面對稱之形態及方位亦完全無異。



第 20 圖對角對稱面

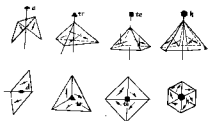


第 21 圖主對稱面

。此即結晶本身之同位，亦結晶有完全未動之感，故稱其旋轉軸為對稱軸。

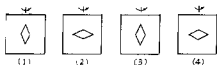
沿一對稱軸旋轉結晶時，其呈同位之次數，即為對稱軸之次數。按其次數之多寡可將對稱軸分為二次、三次、四次及六次四種。但無五次及七次以上之對稱軸，而結晶體以外者則不在此限。蓋以結晶體以外物體之對稱與其內部之構造無關，乃僅係表面形狀之對稱也。反之，結晶形態之對稱，係基於正規結晶構造之對稱而得之對稱形態也。

6. 又各種對稱軸之表示，多以符號爲之，即二次對稱軸 (Binary axis of symmetry) 之符號爲 ∞ ，三次對稱軸 (Trigonal axis of symmetry) 之符號爲 Δ ，四次對稱軸 (Tetragonal axis of symmetry) 之符號爲 \square ，六次對稱軸 (Hexagonal axis of symmetry) 之符號爲 \bigcirc 等是也。



第 22 圖 四種對稱軸

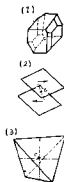
設結晶面之外形與面對稱不一致時，則應就其面對稱仔細推敲之。如圖所示，爲正方形在一轉週間，本有四次與原形相同，然因其面對稱爲菱形，在各面上



第 23 圖 二次對稱軸

之形狀雖完全相同，但相鄰二面上之方位則異，而相間者之方位又復完全一致。故在一轉週間僅有二次同位，此轉軸仍以二次對稱軸名之。

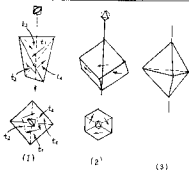
右圖(2)所示，在一結晶體中有二平行面，其形態及大小相等。在性質上雖爲相同之面，但其面對稱則具有相互反轉之關係，故此晶體必具有對稱心。所謂對稱心 (Center of symmetry) 者，乃其對稱之中心點也。在有對稱心之結晶體中，因一面必與另一面相同，故判斷其有無對稱心時，只須檢查一面即可。同時具有對稱心之晶體，其互相平行面之面對稱性質亦必相同，只不過在二者間有反轉之關係耳。又圖(1)所示，C 爲斧石結晶之對稱心，圖(3)爲鋤銅礦之結晶，但不具對稱中心。



第 24 圖 對稱中心

此外，在三次元形狀之對稱中，將晶體沿一軸旋轉，當每轉 90 時，即有一面與垂直其軸之一面呈反射之位置。即下圖所示，

90°後， t_1 而移於 t_2 ；再轉90°，則由 t_2 移於 t_3 ；更轉90°，又移於 t_4 ；復轉90°，乃返回 t_1 原位。亦即 t_1 與 t_2 之關係，為 t_1 轉90°之位置時，其垂直於轉軸之面則居於反射之位置。同時面對稱不與上述之關係相同。故稱此轉軸為四次倒置對稱軸 (Rotoreflexion-axis)。



第25圖倒置對稱軸

在晶體上所見之對稱面、各次對稱軸、對稱中心及倒置對稱軸等，統稱之為對稱要素 (Element of symmetry)。其功用為決定結晶體之對稱度，故晶體所具之對稱要素愈多，則其對稱度亦愈高。又對稱要素之意義恰與元素相同，因不能再行分割，遂可視為表示對稱之單位，且將其間之相互組合，特稱為對稱要素之組合。

倒置對稱軸亦為對稱要素之一，但只限於四次。置一次倒置對稱軸為對稱面，二次倒置對稱軸為對稱中心，三次倒置對稱軸為三次對稱軸及與其垂直對稱面之組合者，而六次倒置對稱軸則為二次對稱軸及對稱心之組合。為便利計，常將六次倒置對稱軸以 $\bar{6}$ 符號表示之。

又特殊關係面 (平行、垂直或二等分) 上之面對稱，其對稱性在對稱要素上亦應注意。普通傾斜面上之面對稱多無對稱性，忽以僅具四次對稱軸之晶體為例，其與四次對稱軸垂直之P面上的面對稱，則以四次對稱性之圖形表示之。即圖(1)所示者是也。若沿四次對稱軸旋轉晶體，當每轉90°後，即處於原形之同位狀態。但圖(2)所示者，為與四次對稱軸斜交之四晶面，且在各面上之面對稱為無對稱性。故通常之對稱要素除垂直或平行第26圖晶面與對稱軸者外，其傾斜之面必與對稱要素性質之數字符合。例如在對稱面之平行或垂直面外，並具有二傾斜面時，則必為二次對稱軸之平行或垂直

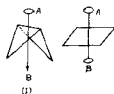


第26圖晶面與對稱軸

面以外之傾斜面也。

普通根據對稱要素尋求其傾斜而時，以表示對稱要素確實性質之配置最為重要。苟能配置得當，即不仔細研討面對稱，亦可由面之配置上充分表示其對稱要素。但對上述之平行或垂直晶面，則屬例外。

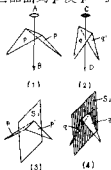
(D) 對稱要素之組合：如上所述，組合對稱要素之種類與晶體之對稱度成正比。如圖所示， AB 為二次對稱軸，設無其他對稱要素，則 \vec{AB} 方向之軸與 \vec{BA} 方向之軸，在性質上不應相同。圖(1)之對稱軸僅是一單向，故稱單向對稱軸，通常以單向箭頭表示之。但圖(2)所示者，因具有與其垂直之對稱面，遂使二次對稱軸重複於反射之位，故對稱軸不論在 \vec{AB} 方向或 \vec{BA} 方向，在性質上完全相同，是為雙向對稱軸，並在兩端均以對稱軸之符號表示之。



第 27 圖對稱軸之方向

又對稱要素與結晶面之種類有關，而結晶面在對稱要素上更與傾斜角度有關。如圖(1)所示由對稱軸 AB 所左右之晶面為 p 及 p' ，且 p 與 p' 為性質相同之面。在圖(2)中之二次對稱軸為 CD ，其所左右之晶面為 q 及 q' 亦為性質相同之面。但在 p 與 q 之間，其性質則異，故 AB 與 CD 亦為性質不同之二次對稱軸。茲為區別計，常於對稱軸之符號中加繪斜線，亦有附加虛線者。圖(3)及圖(4)所示者，為與上述情形相同之對稱面，其在對稱要素之性質上，亦取決於所左右之結晶面。

在同一晶體中，其對稱軸之性質亦不盡相同，如圖(1)所示 AB 與 CD 為互相垂直之二次對稱軸。因 CD 居於中間，



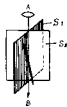
第 28 圖性質不同之對稱要素



第 29 圖對稱軸之組合

，故 \vec{AB} 與 \vec{BA} 二方向，在性質上相同，乃形成雙向對稱軸。且 CD 亦因 AB 居於中間而成爲雙向對稱軸。總之，結晶體既由互相垂直而性質各異之二對稱軸組合而成，在三次元晶體中，自必尚有一第三對稱軸 EF 與 AB 及 CD 垂直且性質各異。於是乃有圖(3)所示之組合，在此組合中計有彼此垂直而互不相同之三條雙向對稱軸。

此外，在二性質不同而互相垂直之對稱面所組合之晶體中，其交線自然形成一二次對稱軸。此單向對稱軸之對稱要素雖足以左右性質相同之結晶面，但在互相組合之下，應以彼此互不矛盾爲原則。如圖所示， AB 爲二次對稱軸，若其所左右之結晶面呈同位狀態時，則其對稱面 S_1 及 S_2 亦須具有二次對稱軸之性質也。

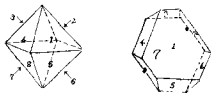


第30圖對稱要素之組合

1-2 結晶面角之測定

(1)面角一定法則：在結晶體中，二相鄰晶面所夾之角曰面角 (Face angle)。凡屬同種礦物之結晶，其形狀及大小雖各不同，但其相當之面角，則常相等。如水晶之六方柱狀結晶雖有各種晶癖，不論其形狀及大小如何，而其柱面與柱面之交角常爲 120° (第2圖)。至其他各面之交角則爲 $r \wedge z = 46^\circ 16'$ ， $r \wedge m = 38^\circ 13'$ ， $m \wedge m = 60^\circ$ (補角)。

又明礬之八面體結晶，若各面均發育成相同之大小時，則如左圖所示，否則即呈右圖之歪形。但不論如何，在八面體上之面角常爲 $109^\circ 28'$ 。而方解石在解理片或菱面體極稜之面角，則常爲 $105^\circ 5'$ 。



第31圖明礬之結晶

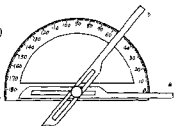
以上所述，同種礦物之結晶，其相當二面之交角常相等，是爲 07

角一定法則或面角不變定律 (Law of constancy of interfacial angle)。此在丹麥博物學家史帖諾於 1669 年製作石英之斷面後，越一世紀始由埃斯勒於 1783 年所確定。徵諸實際，除等軸晶系之晶體外，皆稍具熱學上之異方性。即其面角常隨溫度而改變，且因伸縮量不同，以致面角之變化亦自各異。但普通所改變之數值甚微，且由壓力所改變者更小。故面角不變定律應修正為「凡同種礦物之晶體，其形狀及大小雖各不同，但在同一溫度下，其相同晶體之相當面角恒為相等」。除此之外，在天然之結晶面上常呈凹凸不平之現象，故面角亦因之稍有不同。

(2) 測角器：測量面角之儀器稱之為測角器 (Goniometer)。其種類有二，茲分述於下：

(A) 接觸測角器 (Contact Goniometer)

：如圖所示，為普通使用之接觸測角器，在中空之金屬製半圓板上，刻以 180° 之分度，在半圓板之中心裝以自由轉動之金屬腕，其腕之數目雖有一枝與二枝之不同，但在使用上則無任何差別。



第 32 圖 接觸測角器

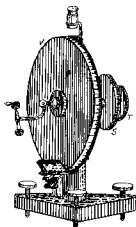
當測定面角時，只須將測角器之二腕置於結晶稜之垂直方向，其腕之轉軸以螺絲固定。使一腕位於 0° ，即其指針為 a ；另一腕即指針 b 在圓周上所指之刻度，即所求面角之度數也。

使用接觸測角器雖頗簡單，但所測結晶之體積，其直徑至少須在 1.5~2.0 公分之間，否則測定困難。又所測之結晶面應以平滑為貴，且結晶與腕脚之接觸應力求緊密。如此反覆測定三次，而取其平均數字。此種測定工作所發生之誤差，通常多在 1 分以下。至微小結晶之面角，則不適於測定也。

(B) 反射測角器 (Reflecting Goniometer)：乃藉結晶面上反射之光線而測定其面角者，使用反射測角器不能測定大型結晶或不生反光之結晶。設結晶面反射之光線微弱，則應於結晶表面塗以薄層油脂，使

其易生反光而利於測定。至反射測角器之種類有三，茲分述於下：

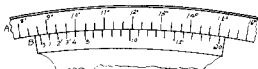
(a) 直立分度圓盤反射測角器：即具有直立分度圓盤之簡單測角器也。如圖所示為克萊因(Klein)測角器，在圓盤V上刻有 360° ，上部裝以游尺及虫眼鏡，以便讀取微細之刻度。圓盤V之中心裝有轉軸，在其前方彎曲鈎狀部之末端有一小台，可用細針或硬橡皮質載礦物結晶。鈎狀部與小台可同時旋轉，即在轉軸之後方，裝以S及T二輪，T用旋轉轉軸，而S則為旋轉圓盤及全部儀器之用。



第33圖 直立分度圓盤反射測角器

至圓盤上之游尺，普通為分度圓盤V刻度之二十分之十九、三十分之二十九或四十五分之四十四，由此可將分秒之正確數值讀出之。

如圖所示，A為圓盤刻度，一度分為三等分，每格相當於20分。B為游尺之刻度，乃將圓盤上之十九格分為二十等分者，故每格相當於19分。於是



第34圖 游尺

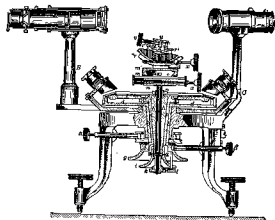
圓盤之刻度與游尺之刻度差恰為1分。設游尺之 0° 位於圓盤刻度之 $8^\circ 40'$ 與 9° 之間，而游尺之刻度4'與圓盤之刻度 10° 一致時，欲使最初圓盤之 0° ，對準游尺之 0° ，則需旋轉之角度為 $8^\circ 44'$ ，此即為所讀之數值也。

使用直立分度圓盤反射測角器時，應先使形成面角之晶稜與轉軸之方向一致，並在前面之窗口懸一細線，使其影像由結晶面反射。再旋轉結晶至相鄰晶面反射相同之影像時為止，則稜與儀器之轉軸復趨一致。若二結晶面反射之影像傾向一方而不甚明瞭時，則應調整結晶

之位置，如兩晶面所反射之影像完全相同，則於反射影像最清晰之位置，使圓盤之 0° 與游尺之 0° 一致。以儀器上十字絲為目標，確定觀察位置，並轉動 S 輪，使與相鄰晶面所得之像相同，則可讀取其刻度。然後逆轉 T 輪，使結晶恢復原來位置，以同法反覆測定三次，其所得之平均數值，即為該結晶面角之補角。

(b)水平分度圓盤反射測角器：較上述之直立分度圓盤反射測角器複雜，適於面角之精密測定，原為1809年烏拉斯頓(W. H. Wollaston)所發明，嗣後並加以改良。

如圖所示為佛斯(Fuess)所設計之儀器， u 為放置結晶之台， x 為可前後移動之螺絲， a 為可左右移動之螺絲，在有刻度圓盤 d 之兩端裝有虫目鏡，用以放大游尺刻度而讀取之。圓盤之下有旋轉螺絲 i ，可結晶台 u 之轉動，而 g 則可 u 及 d 之同



第35圖 水平分度圓盤反射測角器

時轉動。光線自視準儀 O (Collimator)之一端間隙通過，則在目鏡之另一端聚成焦點。上述間隙之形狀由結晶面反射，而映於望遠鏡 L 中接眼鏡之十字絲上，在 L 之前端有一透鏡，俟入後可兼充顯微鏡之用，而從事調整台上結晶之位置。

當測定結晶之面角時，在視準儀之前方置一燈光。先將結晶之位置固定，使所測之面角直立，以望遠鏡觀察由結晶面反射至視準儀間隙之影像。然後將結晶旋轉，至見到相鄰晶面所反射之影像為止。此時若與最初所見之影像完全相同，則結晶之位置端正。設影像向一方

傾斜或不甚清晰時，則應將結晶之位置調整之。當一次結晶之位置固定後，再旋轉 360° ，可同時測出其同一晶帶之面角。至測角之方法與刻度之讀取，與直立分度圓盤反射測角器相同。惟其應注意者，須使間隙之影像與望遠鏡之十字絲完全一致。

(c) 複圓反射測角器：上述兩種測角器，雖其圓盤有直立與水平之不同，但兩者皆為置結晶於刻有 360° 之圓盤中心，將其旋轉而測定投射於結晶面之光線所反射之角。因其所測者為面角，故稱之為單圓反射測角器。至複圓測角器之原理雖與此相同，但以某面為基準，將所測晶面之位置，以水平面上之角 φ 及與北極所成之角 ρ 表示者。

如圖所示為

哥爾德休米特

(Gold Schmidt) 複

圓反射測角器。

測定結晶角時，

應將晶體置於垂

直圓盤之軸上，

而盡量使所測之

晶面與軸平行。

用 h 後方之螺絲

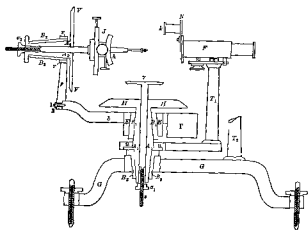
調整，使結晶軸

與置結晶台之軸

完全一致，恰與

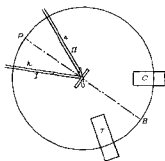
單圓反射測角器

之操作相同。此種調整工作，因對結晶面座標 (φ 及 ρ) 之決定有重大影響，故宜仔細為之。迨調整完成後，再將望遠鏡 T 及視準儀 C 固定於適當之交角位置，而使結晶面反射之像與望遠鏡之十字絲恰好一致。是為極點 (Polar position) 位置，即結晶面位於垂直圓盤軸之直角位置也。至此位置之決定，則按下列程序為之：



第 36 圖複圓反射測角器

自視準儀射來之光線，由裝於 i 之結晶面反射至望遠鏡內。當反射之光線進入望遠鏡後，旋轉垂直圓盤與水平圓盤使其反射像與望遠鏡之十字絲一致。因兩者於 I 之位置重合，故讀取其水平角。然後將垂直圓盤旋轉 180° ，因反射面處於虛線之位置，故影像在十字絲之外。此時應旋轉水平圓盤使兩者再於 II 位置重合，而讀取其水平角。其前後所得二水平角之平均值，即圖中所示之零點 PB 也。



第 37 圖測角程序圖解

水平面上之角 ρ 即以此零點為基準，而 φ 在理論上位於其垂直之底面，如將以北極為基點所觀測之值變為平射投影時，則結晶面可由其位置決定之。

1 3 晶系與晶類

(1) 結晶系：理想晶形為數學上之理想多面體，其通過晶體中心之結晶軸有長短相等者，亦有長短不同者。又二結晶軸所交之軸角有垂直者，亦有斜交者。根據此等關係，吾人可將所有晶體共分為六大系統，特稱之為結晶系 (Crystal system)。茲將各晶系之晶軸相互關係，略述於下。

(A) 等軸晶系 (Isometric system)：三軸等長且互相垂直。

(B) 正方晶系 (Tetragonal system)：二軸等長，一軸或長或短，而彼此互相垂直。

(C) 六方晶系 (Hexagonal system)：三側軸等長，且在同一平面內，彼此相交成 60° ；另一軸或長或短而與此平面垂直。

(D) 斜方晶系 (Orthorhombic system)：三軸長短不等，而彼此垂直。通常稱 a 為短軸 (Brachy-axis)， b 為長軸 (Macro-axis)。

(E)單斜晶系(Monoclinic system)：三軸長短不等， a 軸與 c 軸斜交， b 軸垂直於 a 、 c 二軸。通常稱 a 軸為斜軸(Clino-axis)， b 軸為正性(Ortho-axis)。 a 軸與 c 軸之交角為 β ，而 β 呈鈍角者為前方。

(F)三斜晶系(Triclinic system)：三軸長短各不相等，互成斜交。通常 c 軸直立， a 軸向前傾斜， b 軸呈左右傾斜， a 軸短而 b 軸長。 b 軸與 c 軸之交角為 α ， a 軸與 c 軸之交角為 β ， a 軸與 b 軸之交角則為 γ 。

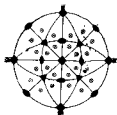
上述之結晶軸，均具有向量之性質，故亦稱軸向量。在各晶系中，六方晶系具有四軸，但實際上亦可謂六方晶系在本質上僅有 a_1 、 a_2 及 c 等三軸。即 $\alpha = \beta = 90^\circ$ ， $\gamma = 120^\circ$ 。其中 γ 之數值似較突出，在求協調之原則下，乃以 a_2 為輔助軸。此外，在對稱度高之晶體中，結晶軸之方向可左右晶體之對稱要素；但在對稱度低之晶體中，因對稱要素少，故結晶軸之方向與對稱要素之關係，則無決定性之影響也。

(2)晶類：上述結晶系之區分，乃以結晶軸之相互關係為基準。設以對稱要素為區分理想形結晶之標準時，則共得三十二類。茲將各類之對稱關係分述於下：

(A)等軸晶系：計可分為五類

(a)六八面體類(Hexoctahedral class)計有九對稱面，其中主對稱面三，副對稱面六。對稱軸十三，其中計四次對稱軸三，三次對稱軸四，二次對稱軸六。並有對稱中心。

如圖所示為對稱要素之平射投影圖，粗線為主對稱面之位置，細線為副對稱面之位置，四角、三角及精圓形之符號，則為上述之對稱軸之位置，觀此圖形，可知本品類面數最多之晶體為八分區中，每區計有六晶面。

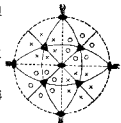


第 38 圖六八面體類
對稱要素之平射投影

(b)六四面體類(Hextetrahedral class)：有副對稱面六，二次對稱軸三，三次對稱軸四，但無對稱中心。如圖所示為對稱要素分布之情

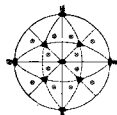
形，其虛線為上述完面形品類之主對稱面位置，但在本類中則付缺如。

(c) 偏方二十四面體類 (Diploidal class)：有主對稱面三，三次對稱軸四，二次對稱軸三，並有一對稱中心。如圖所示，其虛線為完面形品類之對稱面位置，但在本品類則付缺如。



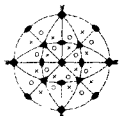
第 39 圖六四面體類對稱要素之平射投影

(d) 偏形半面體類 (Plagihedral hemihedral class)：在對稱要素中，僅有十三條對稱軸，其中計四次對稱軸三，三次對稱軸四，二次對稱軸六。



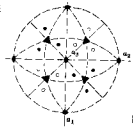
第 40 圖偏方二十四面體類對稱要素之平射投影

(e) 四面式五角十二面體類 (Tetrahedral pentagonal dodecahedral class)：無對稱面，僅有七條對稱軸，其中計三次對稱軸四，二次對稱軸三，亦無對稱中心。



第 41 圖偏形半面體類對稱要素之平射投影

第 42 圖四面式五角十二面體類對稱要素之平射投影

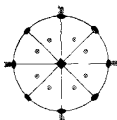


上述五品類之對稱要素，可概括以下表示之。

品類名稱	英文名稱	符號	序數	對稱要素
六四面體類	Hexoctahedral Class	Oh	48	$C+3\sigma+4\phi+6\theta+9P$
六四面體類	Hextetrahedral Class	Td	24	$3\sigma+4\Delta+6P$
偏方二十四面體類	Diploidal Class	Th	24	$C+3\theta+4\phi+3P$
偏形半面體類	Plagihedral hemihedral Class	O	24	$3\sigma+4\Delta+6\theta$
四面式五角十二面體類	Tetrahedral pentagonal dodecahedral C	T	12	$3\theta+4\Delta$

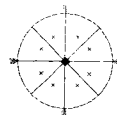
(B) 正方晶系：計可分為七類

(a) 複正方雙錐體類 (Ditetragonal bipyramidal class)：對稱軸有五，其中四次對稱軸一，餘皆二次對稱軸，二軸在 a_1 及 a_2 之方向，另二軸則在 a_1 及 a_2 之間，故又稱為中間軸 (Intermediate axis)。本品類有五對稱面，其中主對稱面一，與四次對稱軸垂直，其他則皆為副對稱面。除此之外，並具有一對稱中心。



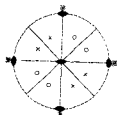
第 43 圖複正方雙錐體類對稱要素之平射投影

(b) 複正方錐異極體類 (Ditetragonal hemimorphic class)：如圖所示，本品類之對稱要素僅有副對稱面四，及四次對稱軸一，而無對稱中心。



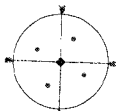
第 44 圖複正方錐異極體類對稱要素之平射投影

(c) 正方偏三角面體類 (Tetragonal scalenohedral class)：有包括中間軸及縱軸之對稱面二，二次對稱軸三，但無對稱中心。



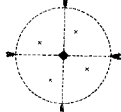
第 45 圖正方偏三角面體類對稱要素之平射投影

(d) 正方雙錐體類 (Tetragonal bipyramidal class)：具有一鉛直之四次對稱軸，以及與其垂直之主對稱面，並有一對稱中心。



第 46 圖正方雙錐體類對稱要素之平射投影

(e) 錐形異極體類 (Pyramidal hemimorphic class)：無主對稱面及對稱中心，僅具有四次對稱軸一。



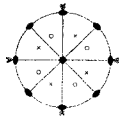
第 47 圖錐形異極體類對稱要素之平射投影

(f) 正方偏方錐體類 (Tetragonal trapezohedral class)：如圖所示，具有四次對稱軸一，又二次對稱軸四，但無對稱面，亦無對

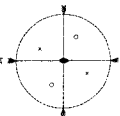
稱中心。

(g) 正方四半面形晶類
(Tetragonal tetartohedral
class): 無對稱面及對稱中
心, 僅有二次對稱軸。

· 上述七晶類之對稱要素
總括之則如下表所示。



第 48 圖 正方四方錐體
類對稱要素之平射投影

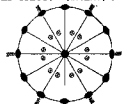


第 49 圖 正方四半面形晶
類對稱要素之平射投影

品類名稱	英文名稱	符號	面數	對稱要素
複正方雙錐體類	Ditetragonal bipyramidal class	D_{4h}	16	$C+1\Box+(20+2\Diamond)+5P$
複正方錐異極體類	Ditetragonal holohedral hemimorphic class	C_{4v}	8	$1\Box+4P$
正方偏三角面體類	Tetragonal scalenohedral class	D_{2d}	8	$1\Box+2\Diamond+2P$
正方雙錐體類	Tetragonal bipyramidal class	C_{4h}	8	$C+1\Box+1P$
錐形異極體類	Pyramidal hemimorphic class	C_4	4	$1\Box$
正方偏方錐體類	Tetragonal trapezohedral class	D_4	8	$1\Box+(2\Diamond+2\Diamond)$
正方四半面體類	Tetragonal tetartohedral class	S_4	4	$1\Box$

(C) 六方晶系: 計包括十二晶類。

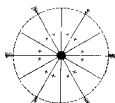
(a) 複六方雙錐體類 (Dihexagonal bipyramidal class): 如圖所示, 本品類之對稱要素計共有七對稱面, 其中之一為主對稱面, 與縱軸垂直, 其他均為副對稱面。對稱軸亦有七, 其中之一為六次對稱軸, 與縱軸相傳, 其他則均為二次對稱軸, 位於側軸之中間或與側軸相傳。除此之外, 並具有一對稱中心。



第 50 圖 複六方雙錐體
類對稱要素之平射投影

(b) 六方完面異極體類 (Hexagonal holohedral hemimorphic class) : 上述之主對稱面、二次對稱軸及對稱中心均付缺如。僅有縱對稱面六及六次對稱軸一。

(c) 六方雙錐體類 (Hexagonal bipyramidal class) : 如圖所示，有一主對稱面，及與其垂直之六次對稱軸一，除此之外，並具有對稱中心。



第 51 圖六方完面異極體類對稱要素之平射投影

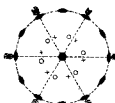


第 52 圖六方雙錐體類對稱要素之平射投影

(d) 錐形異極體類 (Pyramidal hemimorphic class) : 除原有異極形特徵外，頗與錐形半面體類 (六方雙錐體類) 相似。結晶面之發育，在縱軸兩側不同。如圖所示，僅有六次對稱軸一。



第 53 圖錐形異極體類對稱要素之平射投影



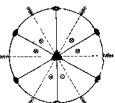
第 54 圖六方偏方體類對稱要素之平射投影

(e) 六方偏方體類 (Hexagonal trapezohedral class) : 如第 54 圖所示，本品類之對稱要素計有六次對稱軸一，及與其垂直之二次對稱軸六，其與側軸相傳者有三，而居於側軸中間位置者亦有三。但無主對稱面及副對稱面，更無對稱中心。又本品類晶體係半面形，故晶面有左右之分。通常所見之石英結晶，則係本品類中之代表礦物也。

(f) 菱形半面體類 (Rhombohedral hemihedral class) : 有包括縱軸及側軸之副對稱面三，鉛直方向之三次對稱軸一，及位於結間之二次對稱軸三，並有一對稱中心。



第 55 圖菱形半面體類對稱要素之平射投影



第 56 圖三角半面體類對稱要素之平射投影

(g)三角半面體類 (Trigonal hemihedral class): 有對稱面四, 其中之一爲主對稱面, 位於水平位置, 其他則爲副對稱面。對稱軸亦有四, 其中之一爲三次對稱軸, 與主對稱面垂直, 其他則爲二次對稱軸, 而與前者呈垂直。除此之外, 並不具對稱中心。



第 57 圖 菱形半面體之異極



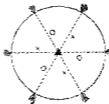
第 58 圖 菱形六面體類

(h)菱形半面體之異極體類 (Rhombic hemihedral hemimorphic class): 有三次對稱軸一, 及副對稱面三, 而無對稱中心。

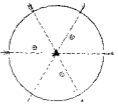
對稱要素之平射投影

對稱要素之平射投影

(i)偏形六面體類 (Trigonal trapezohedral class): 僅有三次對稱軸一, 及二次對稱軸二。



第 59 圖 偏形六面體類



第 60 圖 三角四面體類

(j)菱形四面體類

(Rhombic tetartohedral class): 僅有三次對稱軸一, 及一對稱中心。

對稱要素之平射投影

對稱要素之平射投影

(k)三角四面體類 (Trigonal tetartohedral class): 有主對稱面一, 及三次對稱軸一, 而無對稱中心。

(l)三角四面體之異極體類 (Trigonal tetartohedral hemimorphic class): 可視爲三角四面體之異極形, 如圖所示, 僅有三次對稱軸一。



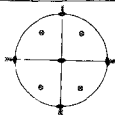
第 61 圖 三角四面體異極體類對稱要素之平射投影

上述十二晶類之對稱要素, 總括之則如下表所示。

晶類名稱	英文名稱	符號	面數	對稱要素
複六方雙錐體類	Dihexagonal bipyramidal class	D_{6h}	24	$C+10+(30+30)+7P$
六方完面異極體類	Hexagonal holohedral hemimorphic class	C_{6v}	12	$10+6P$
六方雙錐體類	Hexagonal bipyramidal class	C_{6h}	12	$C+10+1P$
錐形異極體類	Pyramidal hemimorphic class	C_6	6	10
六方偏方體類	Hexagonal trapezohedral class	D_6	12	$10+30+3$
菱形半面體類	Rhombohedral hemihedral class	D_{3d}	12	$C+10+30+3P$
三角半面體類	Trigonal hemihedral class	D_{3h}	12	$1\Delta+30+4P$
菱形半面異極體類	Rhombic hemihedral hemimorphic C.	C_{3v}	6	$1\Delta+3P$
偏形六面體類	Trigonal trapezohedral class	D_3	6	$1\Delta+30$
菱形四半面體類	Rhombohedral tetartohedral class	C_{3i}	6	$C+10$
三角四半面體類	Trigonal tetartohedral class	C_{3h}	6	$1\Delta+1P$
三角四半面異極體類	Trigonal tetartohedral hemimorphic C.	C_3	3	1Δ

(D)斜方晶系：計包括三晶類。

(a)斜方雙錐體類(Orthorhombic bipyramidal class)：如圖所示，有包括二結晶軸之對稱面三，及垂直於對稱面之二次對稱軸三，並具有一對稱中心。



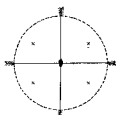
第 62 圖 斜方雙錐體類對稱要素之平射投影

(b)斜方異極體類(Orthorhombic hemimorphic class)：如圖所示，僅具有副對稱面二，及二

次對稱軸一。而無對稱中心。

(c) 斜方柵類 (Orthorhombic sphenoidal class): 僅具二次對稱軸三, 並無對稱面及對稱中心。

以上三類總括之則如下表所示。



第 63 圖斜方異極體類對稱要素之平射投影

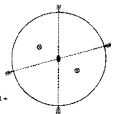


第 64 圖斜方柵類對稱要素之平射投影

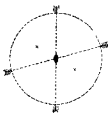
晶類名稱	英文名稱	符號	面數	對稱要素
斜方雙錐體類	Orthorhombic bipyramidal class	D_{2h}	8	$C+10+10+10+3P$
斜方異極體類	Orthorhombic hemimorphic class	C_{2v}	4	$10+2P$
斜方柵類	Orthorhombic sphenoidal class	D_2	4	$10+10+10$

(E) 單斜晶系: 計包括三晶類。

(a) 單斜柱體類 (Monoclinic prismatic class): 如圖所示, 有副對稱面及二次對稱軸各一, 並具有一對稱中心。



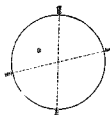
第 65 圖單斜柱體類對稱要素之平射投影



第 66 圖單斜異極體類對稱要素之平射投影

(b) 單斜異極體類 (Monoclinic hemimorphic class): 如圖所示, 僅於正軸之方向有二次對稱軸一, 而無對稱面及對稱中心。

(c) 單斜晶石類 (Monoclinic clinohedral class): 如圖所示, 僅具有對稱面一, 無對稱軸及對稱中心。



第 67 圖單斜晶石類對稱要素之平射投影

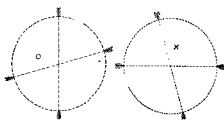
以上三類總括之則如下表所示。

晶類名稱	英文名稱	符號	面數	對稱要素
單斜柱體類	Monoclinic prismatic class	C_{2h}	4	$C+10+1P$
單斜異極類	Monoclinic hemimorphic class	C_2	2	10
單斜晶石類	Monoclinic clinohedral class	C_s	2	1P

(F)三斜晶系：計包括二晶類。

(a)軸面類(Pinacoidal class)
：如圖所示，無對稱面及對稱軸，僅有一對稱中心。

(b)半面體晶類(Hemihedral class)：又稱非對稱晶類(Asymmetric class)。無任何對稱要素。



第 68 圖 軸面類對稱要素之平射投影

第 69 圖 半面體晶類對稱要素之平射投影

以上二晶類總括之則如下表所示。

晶類名稱	英文名稱	符號	面數	對稱要素
軸面類	Pinacoidal class	C_i	2	C
半面體晶類	Hemihedral class	C_1	1	

1-4 等軸晶系

(一)完面形：亦即六八面體類，其主要晶體如下。

【1】單形晶體：其主要晶體有七，茲分述於下：

(1)六面體(Hexahedron)：又稱立方體(Cube)。



第 70 圖 六面體 第 71 圖 八面體 第 72 圖 十二面體
面六，每面僅與一軸相交，與其他二軸平行。面角為 90° ，有隅角八

，稜十二。呈此種結晶之礦物有方鉛礦、黃鐵礦、螢石及白磁等。

(2)八面體(Octahedron)： (111) ，有等邊三角形之面八，每面均與三軸按等距離相交，面角為 $109^{\circ}28'16''$ 。有四面相會之隅角六，稜十二，皆相等。呈此結晶之礦物有金剛石、磁鐵礦、尖晶石及明礬等。

(3)十二面體(Dodecahedron)： (110) ，有菱形之面十二，每面皆以相等之距離與二軸相截，而與另一軸平行。面角為 120° ，有相等之稜二十四，隅角可分兩種，其四面相會者六，三面相會者八。呈此結晶之礦物有石榴子石及磁鐵礦等。

(4)三角三八面體 (Trigonal trisoctahedron)： (221) ，具有等腰三角形之面二十四，每面均以二軸以單位之距離相截，而與另一軸以單位距離之倍數相交。稜有二種



第 73 圖 三角三八面體



第 74 圖 四方三八面體

，與八面體之稜相當者有十二，與十二面體之稜相當者有二十四。八面相會之隅角有六，三面相會之隅角有八。呈此結晶之礦物有方鉛礦及金剛石等。

(5)偏菱三八面體(Tetragonal trisoctahedron)： (211) ，具有相同之不等邊四邊形面二十四，每面與一軸以單位之距離相截，而與其他二軸則按該單位之倍數距離相交。稜有兩種，長者二十四，與八面體之稜相當，短者亦有二十四，與六面體之稜相當。隅角有二種，三面相會者有八，四面相會者有十八。呈此結晶之礦物有石榴子石、白榴石及方沸石等。

(6)四六面體(Tetrahexahedron)： (210) ，有等腰三角形之面二十四，每面與一軸以單位距離相交，與第二軸以該單位距離之倍數相截，而與第三軸平行。稜有兩種，與六面體之稜相當者有十二，與十二



第 75 圖 四六面體



第 76 圖 六八面體

可體之稜相當者有二十四。隅角亦有兩種，六面相會者有八，四面相會者有六。屬此結晶之礦物有螢石及金礦等。

(7)六八面體 (Hexoctahedron) (321)，有不等邊三角形之面四十八，故又稱三角四十八面體。每面與一軸以單位距離相交，而與其他二軸各依該單位距離之不同倍數相截。稜有長、中、短三種，各為二十四。隅角亦有三種，八面相會者有六，六面相會者有八，四面相會者有十二。屬此結晶之礦物為金剛石。

【II】聚形晶體：聚形晶體之形式甚多，茲將常見者例舉於下：

- (1)六面體及八面體之聚形，有三種形式。
- (2)六面體及十二面體之聚形，有二種形式。
- (3)八面體及十二面體之聚形，有二種形式。
- (4)六面體、八面體及十二面體之聚形，有二種形式。
- (5)六面體及四六面體之聚形。
- (6)六面體及偏菱三八面體之聚形。
- (7)十二面體及偏菱三八面體之聚形。
- (8)六面體及偏菱三八面體之聚形。
- (9)八面體及偏菱三八面體之聚形。
- (10)十二面體及六八面體之聚形。



第 77 圖六面體及八面體



第 78 圖六面體及八面體



第 79 圖八面體及六面體



第 80 圖六面體及十二面體



第 81 圖六面體及十二面體



第 82 圖十二面體及八面體



第 83 圖八面體及十二面體



第 84 圖六面體八面體及十二面體



第 85 圖八面體六面體及十二面體



第 86 圖六面體及四六面體



第87圖六面體及偏菱三八面體



第88圖十二面體及偏菱三八面體



第89圖六面體及三角三八面體



第90圖八面體及偏菱三八面體

(二) 半面形：計包括三晶類。

【I】六四面體類：其主要晶體如下：

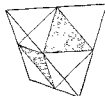
(A) 單形類：其所包括之晶體有四，茲分述於下：

(1) 四面體 (Tetrahedron)：(111) 或 (1 $\bar{1}\bar{1}$)

，有等邊三角形之面四，為八面體之半面晶。各面皆相等，面角為 $70^{\circ}32'$ 。晶體有正負兩種，均有等長之稜六。隅角有四皆為三面相會者。呈此結晶之礦物計有鋁銅礦、閃鋅礦及方硼石等。



第91圖十二面體及六八面體



第92圖正四面體及真四面體

(2) 偏菱三四面體 (Tetragonal tristetrahedron)：(221) 或 (2 $\bar{2}\bar{1}$)

，有二等邊四邊形之面十二，每面均有四角，為三角三八面體之半面晶，亦稱偏菱十二面體 (Del-



第93圖偏菱三四面體



第94圖三角三四面體



第95圖六四面體

toid dodecahedron)，晶體有正負兩種。隅角有三種，四面相會者有六，三面相會者有八，其中鈍隅角及鈍隅角各四。長、短稜各為十二。

(3) 三角三四面體 (Trigonal tristetrahedron)：(211) 或 (2 $\bar{1}\bar{1}$)，

係由三角形之面集合而成，為偏菱三八面體之半面品，亦稱三角十二面體 (Trigonal dodecahedron)。六晶面及三晶面相會之隅角各四。稜有二種，長者六，短者十二。晶體有正負二種。

(4) 六四面體 (Hextetrahedron)：(321) 或 ($\bar{3}2\bar{1}$)，具有不等邊三角形之面二十四，係六八面體之半面品，晶體有三負兩種。六面相會之隅角有八，鈍銳各四，四面相會之隅角有六。稜有長、中及短三種，各為十二。

(B) 聚形：常見者如下：

(1) 六面體及四面體之聚形。



第96圖六面體及正四面體

(2) 四面體及六面體之聚形。



第97圖正四面體及六面體

(3) 四面體及十二面體之聚形。



第98圖正四面體及十二面體

(4) 正四面體及負四面體之聚形。



第99圖正四面體及負四面體

(5) 四面體及三角四面體之聚形。



第100圖正四面體及三角四面體

(6) 六面體、十二面體及正負四面體之聚形。



第101圖六面體十二面體及正負四面體

【II】偏方二十四面體類：其主要品體如下：

(A) 單形：計有下列二種晶體：

(1) 五角十二面體 (Pentagonal dodecahedron)：(210) 或 ($\bar{2}0\bar{1}$)，具有相同五角形之面十二，每面四邊相等，其餘一邊較長。為四六面



第102圖正五角十二面體及負五角十二面體



體之半面品，晶體有正負兩種。隅角有二十，為三面相會者，稜有三十，呈此結晶之礦物為黃鐵礦。

(2) 偏方二十四面體 (Diploid)：(321) 或 (312)，具有相似不等邊四邊形之面二十四，可視為六八面體之半面品。三面相會之隅角八，四面相會之隅角十八。稜有四種，各十二。晶體亦有正負兩種。



第 103 圖 偏方二十四面體

(B) 聚形：常見者有下列數種：

(1) 八面體及五角十二面體之聚形，有三種形式。



第 104 圖 八面體及五角十二面體



第 105 圖 八面體及五角十二面體



第 106 圖 五角十二面體及八面體

(2) 六面體及五角十二面體之聚形。



第 107 圖 六面體及五角十二面體



第 108 圖 六面體及偏方二十四面體



第 109 圖 六面體及偏方二十四面體

(3) 六面體及偏方二十四面體之聚形，有二種形式。

(4) 六面體、五角十二面體及八面體之聚形。



第 110 圖 五角十二面體六面體及八面體



第 111 圖 六面體偏方二十四面體八面體及五角十二面體



第 112 圖 六面體五角十二面體八面體及偏方二十四面體

(5) 六面體、八面體、五角十二面體及偏方二十四面體之聚形，有二種形式。

【Ⅲ】五角偏菱三八面體類 (偏形半面體類)：

(1) 五角偏菱三八面體 (Pentagonal icositetrahedron)：(321) 或 (312)，具有不等邊五邊形之面二



第 113 圖 五角偏菱三八面體

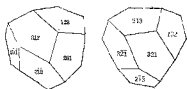
十四，爲六八面體之半面晶，晶體有左右兩種。四面相會之隅角有六，三面相會之隅角有三十二，稜有六十。呈此結晶之礦物有赤銅礦、鉀鹽及氯化鉍等。

(二) 四半面形：

【I】四面式五角十二面體類：

(1) 四面式五角十二面體 (Tetrahedral Pentagonal dodecahedron)

$\chi_{T7}(321) \chi_{T7}(312) \chi_{T7}(3\bar{1}2)$ 或 $\chi_{T7}(3\bar{2}1)$ ，有五邊形之面十二，每面皆有兩對相等邊，推角各不相同。晶形凡四，一右一左，每一又分正負二種。三晶面相會之隅角有二十，長、短稜共三十。屬此結晶之礦物有錫硫錳礦、人造硝酸銀及硝酸錳等。



第 114 圖四面式五角十二面體

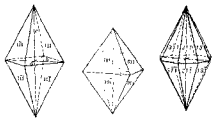
1-5 正方晶系

(一) 完面形：亦即複正方雙錐體類，其主要晶體如下：

【I】單形：其晶體有七，茲分述於下：

(1) 第一正方雙錐體 (Tetragonal bipyramid of the first order)

：(111)，與等軸晶系八面體之形狀極相似，所異者爲縱軸之長短與橫軸不同。有等腰三角形之面八，每面與二橫軸以等單位距離相交，而與縱軸則依不等單位



第 115 圖第一 第 116 圖第二 第 117 圖複
正方雙錐體 正方雙錐體 正方雙錐體

距離相等。上下之隅角有二，側隅角有四。稜有二種，斜稜四，極稜八。呈此結晶之礦物有武銅礦、錳酸鈣礦、符山石、魚眼石、鈉英石及八面石等。

(2) 第二正方雙錐體 (Tetragonal bipyramid of the second order)：

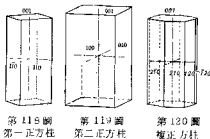
(101)，與第一正方雙錐體之形狀完全相同，惟其每面僅與縱軸及一橫軸相交，而與第三軸平行。

(3) 複正方雙錐體 (Ditetragonal bipyramid) : $\{311\}$ ，具有相似三角形之面十六，每面皆與一橫軸以單位距離相交，而與另一橫軸則依該單位距離之倍數及縱軸相截。兩角有二種，八面相會者有二，四面相會者有八。稜有三種，連結縱結兩端與橫軸各端之四極稜最長，其數有八；在最長兩稜間之四極稜而與橫軸成 45° 方向者，其數亦有八，即中極稜是也；至水平面上呈八角形之八極稜，則為最短者。

(4) 第一正方柱 (Tetragonal prism of the first order) : $\{110\}$ ，具有相等矩形之面四，皆與二橫軸以單位距離相交，而與縱軸平行。

(5) 第二正方柱 (Tetragonal prism of the second order) : $\{100\}$ ，亦有矩形之面四，皆相等。每面僅與一橫軸相交，而與他橫軸及縱軸平行。

(6) 複正方柱 (Ditetragonal prism) : $\{210\}$ ，為相似矩形之面八個集合而成，每面皆與縱軸平行，與一橫軸以單位距離相交，而與另一橫軸則依該單位距離之倍數相截。稜有八，四與水平軸兩端相交，四與水平軸成 45° 之方向。



第 118 圖
第一正方柱

第 119 圖
第二正方柱

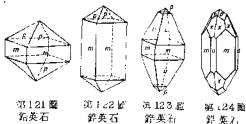
第 120 圖
複正方柱

(7) 底軸面 (Basal pinacoid) : $\{001\}$ ，即上圖所示之上下兩面，每面均與縱軸相交，而與橫軸平行。

【II】聚形：常見者如下：

(1) 鎢英石 : $m = \{110\}$
 $a = \{100\}$, $\beta = \{111\}$, $u = \{331\}$, $x = \{311\}$ 。

(2) 魚眼石 : $a = \{100\}$,
 $c = \{001\}$, $\beta = \{111\}$, $y = \{310\}$ 。



第 121 圖
鎢英石

第 122 圖
鈣英石

第 123 圖
鈣英石

第 124 圖
鈣英石

(3) 符石石 : $\beta = \{111\}$, $m = \{110\}$, $a = \{100\}$, $c = \{001\}$ 。



第 125 圖
魚眼石



第 126 圖
魚眼石



第 127 圖
符山石



第 128 圖
符山石



第 129 圖
符山石

(一) 半面形：

【I】正方偏三角面體類：主要晶體如下：

(A) 單形：計有下列二晶體：

(1) 正方櫛 (Tetragonal bisphenoids)：

(111) 或 $(\bar{1}\bar{1}1)$ ，由四等腰三角形之面合成，為第一正方雙錐體之半面晶。其形狀與等軸晶系之四面體相類似，惟其縱軸與橫軸之長短稍差耳。每面與兩橫軸按等單位距離相交，而與縱軸以不同單位之距離相截。晶體有正負二軸，為此結晶之礦物為黃銅礦。



第 130 圖
正方櫛



第 131 圖正
方偏三角面體

(2) 正方偏三角面體 (Tetragonal scalenohedron)：(hkl) 或 $(h\bar{k}l)$

，有相似不等邊之三角形面八，為複正方雙錐體之半面晶。每面皆與一橫軸以單位距離相交，與另一橫軸依單位距離之倍數相交，而與縱軸則依不同單位距離相截，晶體亦有正負二種。

(B) 聚形：常見者如下：

(1) 正、負正方櫛之聚形。

(2) 正、負正方櫛、第二正方雙錐體及底軸面之聚形。



第 132 圖黃銅礦



第 133 圖黃銅礦

【II】正方雙錐體類：主要晶體

如下：

(A) 單形：計有下列二晶體：

(1) 第三正方雙錐體 (Tetragonal bipyramid of the third order)：

(122)或(212)，其形狀與第一及第二正方雙錐體完全相同，所異者其橫軸非經過四面相會之兩角，亦不通過倒稜之中央，乃係穿過三分之一位置也。每面與一橫軸以單位距離相交，與另一橫軸及縱軸則按不等之距離相截。



第134圖 第三
正方雙錐體



第135圖 第三級正
方雙錐體之橫斷面

(2)第三正方柱體(Tetragonal prism of the third order)： (120) 或 (210) ，與第一及第二正方柱體之形狀完全相同，所異者僅橫軸之位置不同而已。

(B)聚形：常見者如下：

(1)第一及第三正方雙錐體之聚形。

(2)第一、第二正方柱體及第一、第三正方雙錐體之聚形。



第136圖
鉍酸鈣礦



第137圖
矽鈹鈣礦

【Ⅲ】正方偏方錐體類：僅有下列一晶體。

(1)正方偏方錐體(Tetragonal trapezohedron)： (hkl) 或 (khl) ，具有梯形之面八，係複正方雙錐體之半面晶。每面與一橫軸以單位距離相交，與另一橫軸依單位距離之倍數相交，而與縱軸以不等距離相截。晶體有左、右二種。



第138圖 正
方偏方錐體

(2)四半面形：

【I】正方四半面體類：僅有下列一晶體。

(1)第三正方體(Tetragonal bispheoids of the third order)： (hkl) 、 (khl) 、 (hkl) 或 (khl) ，此晶體計分正右、正左、負右及負左四種，但在礦物界中，迄無發現。

同異極形：

【I】複正方體之異極體類：計有上、下複正方錐體，上、下第一及第二正方錐體，複正方柱體，第一及第二正方柱體，與上底及下底

各一，在礦物界中除人造鹽類之氯化銀外，迄無發現。

【II】錐形之異極體類：計有上、下之第一、第二及第三正方錐，第一、第二及第三正方柱體，與上、下底面。在礦物界中，螢彩和鉛礦似屬此種結晶。如圖所示， $n = (111)$ ， $n_1 = (1\bar{1}\bar{1})$ ， $e = (10\bar{1})$ ， $x = (3\bar{1}\bar{1})$ ， $z = (432)$ 。



第139圖
彩鉛錐晶

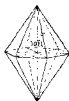
1 - 6 六方晶系

(一) 晶面形：亦即複六方雙錐體類，其主要晶體如下：

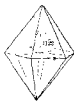
【I】單形：計包括下列七晶體。

(1) 第一六方雙錐體

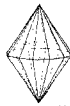
Hexagonal bipyramid of the first order: $(10\bar{1}1)$ ，具有等腰三角形之面十二，每面皆與一橫軸平行，與其他二橫軸以單位距離相交，而與縱軸依不同單位距離相截，故晶形甚多。隅角有二種，四面相會者有六，六面相會者有二。稜亦有二種，長者十二，短者六。



第140圖第一
六方雙錐體



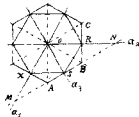
第141圖第二
六方雙錐體



第142圖複
六方雙錐體

(2) 第二六方雙錐體(Hexagonal bipyramid of the second order): $(11\bar{2}1)$ ，與第一六方雙錐體之外形完全相同，所異者第一六方雙錐體之橫軸通過隅角，而第二六方雙錐體之橫軸則位於短稜之中央。

每面與一橫軸以單位距離相交，與其他兩橫軸依該單位距離之二倍相交，而與縱軸以不同單位距離相截。



第143圖第一、第二六
方雙錐體面係數之關係

如圖所示，AB 截 α_1 於單位距離 OS，而截 α_2 、 α_3 於 OM 及 ON，且 $OS \perp AB$ 。因 $OS = 1$ ，在直角三角形 ORB 及 NRB 中為共邊，及 $\angle OBR = \angle NBR$ ，故 $OR = RN$ ，且 $OR = OS$

$= 1$ ，所以 $ON = OR + RN = 2$ ，同理 $OM = 2$ 。

(3) 複六方雙錐體 (Dihexagonal bipyramid)：(khl)，係由第一、第二六方雙錐體集合而成。有近似等腰三角形之面二十四，每面各截四軸於不等之距離。如圖所示，AB 面截 a_1 於 A，截 a_2 於 C，截 a_3 於 B。設其最短距離 $OB = a = 1$ ， $OA = na$ ， $OC = pa$ ，因 $\triangle OBD$ 為正三角形， $OD = BD = OB = a$ ，又 $\triangle OCA \cong \triangle DBC$ ，故 $OA : DB = OC : (OC - OD)$ ，即 $na : a = pa : pa - a$ ， $n : 1 = p : (p - 1)$ ，所以 $p = \frac{n}{n-1}$ 。



第 144 圖複六方雙錐體面係數之關係

(4) 第一六方柱 (Hexagonal prism of the first order)：(10 $\bar{1}0$)，具有矩形之面六，皆相等，面角 120° 。每面各截二橫軸於等單位距離，而與其他二軸平行，且橫軸之端均在各矩形之邊上。



第 145 圖第一六方柱體



第 146 圖第二六方柱體



第 147 圖複六方柱體

(5) 第二六方柱 (Hexagonal prism of the second order)：(11 $\bar{2}0$)，外形與第一六方柱完全相同，惟各橫軸之端均在各矩形面之中央。

(6) 複六方柱 (Dihexagonal prism)：(21 $\bar{3}0$)，有相等矩形之面十二，為第一、第二六方柱集合而成。每面各截橫軸於不等之距離，而與縱軸平行。

(7) 六方底軸面 (Hexagonal basal pinacoid)：(0001)，即上圖中垂直於六方柱之上，下兩面也。每面與縱軸相交，而與橫軸平行。

【II】聚形：常見者如下：

(1) 第一六方雙錐體與第一六方柱之聚形。



第 148 圖第一六方雙錐及第一六方柱



第 149 圖綠柱石



第 150 圖綠柱石

(2) 第一、第二六方雙錐體、第一、二六方柱及底軸面之聚形。

(3)第一、第二六方雙錐體、複六方雙錐體、第一六方柱及底軸面之聚形。

(二)半面形：

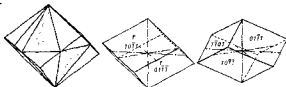
【I】菱形半面體類：主要晶體如下：

(A)單形：計有下列二晶體。

(1)菱面體(Rhombhedron)： $-(10\bar{1}1)$

或 $(01\bar{1}1)$ ，具有菱形之面六，為第一六方雙錐體之半面晶，晶體有正、負兩種。呈

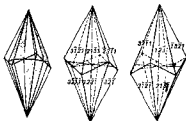
此結晶之礦物為方解石。



第 151 圖 正菱面體及負菱面體

(2)偏三角面體(Scalenohedron)

： $(k\bar{i}\bar{h}l)$ 或 $(i\bar{k}hl)$ ，具有不等邊三角形之面十二，上、下各六。係複六方雙錐體之半面晶，晶體有正、負二種。軸間對稱面有三，稜有長、中、短三種，為數各六。隅角有二種，四面相會者有六，六面相會者有二。呈此結晶之礦物為方解石。



第 152 圖 正、負偏三角面體

(B)聚形：常見者如下：

(1)正菱面體與正偏三角面體之聚形。有二種形式。



第 153 圖
方解石



第 154 圖
方解石



第 155 圖
方解石



第 156 圖
方解石

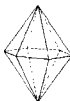
(2)正菱面體、正偏三角面體及第一六方柱之聚形。

(3)負菱面體、負偏三角面體及底軸面之聚形。

【II】六方雙錐體類：主要晶體如下：

(A)單形：計有下列二晶體。

(1)第三六方雙錐體 (Hexagonal bipyramid of the third order): $(ki\bar{h}l)$ 或 $(h\bar{i}kl)$ ，與第一、第二六方雙錐體之外形完全相同。所異者僅橫軸之位置，不通過四晶面相會之隅角，亦不位於側稜之中央，乃界乎二者之間。因係複六方雙錐體之半面品，故晶體有正、負兩種。



第157圖 第三六方雙錐體



第158圖 第三六方雙錐體之橫斷面

(2)第三六方柱 (Hexagonal prism of the third order): $(ki\bar{h}o)$ 或 $(h\bar{i}ko)$ ，其形狀與第一及第二六方柱無異，僅橫軸非通過二矩形相交之稜，亦非通過矩形面之中央，乃位於二者之間。晶體亦分正、負二種。

(B)聚形：常見者有磷灰石及褐鉛礦 (Vanadinite)。 $m = (10\bar{1}0)$ ， $b = (21\bar{3}0)$ ， $y = (20\bar{2}1)$ ， $x = (10\bar{1}1)$ ， $r = (10\bar{1}2)$ ， $s = (11\bar{2}1)$ ， $u = r(11\bar{3}1)$ ， $c = (0001)$ 。



第159圖 磷灰石



第160圖 褐鉛礦

【Ⅲ】六方偏方體類：僅有一晶體。
(1)六方偏方體 (Hexagonal trapezohedron): $(ki\bar{h}l)$ 或 $(h\bar{i}kl)$ ，具有不等邊四邊形之面十二，上、下各六。係複六方雙錐體之半面品，晶體有左、右兩種，呈此種結晶之礦物為石英。

【Ⅳ】複三角錐體類：主要晶體如下：

(A)單形：計包括下列五晶體。

(1)第一三角雙錐體 (Trigonal bipyramid of the first order): $(ho\bar{h}l)$ 或 $(oh\bar{h}l)$ ，有等腰三角形之面六，每面均以兩橫軸以單位距離相交，而與另一橫軸平行。為第一六方雙錐體之半面品，故晶體有正、負兩種。隅角亦有二種，三面相會者有二，四面相會者有三。稜亦有



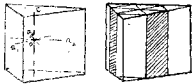
第161圖 六方偏方體



第162圖 第一三角雙錐

兩種，長者有三，短者有六。

(2)第一三角柱 (Trigonal prism of the first order): $(10\bar{1}0)$ 或 $(01\bar{1}0)$ ，有長方形之面三，均相等。每面與兩橫軸以單位距離相交，而與另一橫軸及縱軸平行。為第一六方柱之半面品，故晶形有正、負兩種。三面相會之隅角有六，稜有兩種，長者三，短者六。



第 163 圖第一三角柱

(3)第一複三角雙錐體 (Ditrigonal bipyramid of the first order): $(ki\bar{h}l)$ 或 $(ik\bar{h}l)$ ，有不等邊三角形之面十二，縱軸通過六面相會之隅角，軸間對稱面有三，每面皆含有銳角及鈍角各一，晶形有正、負兩種。

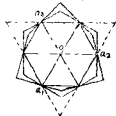


第 164 圖第一複三角雙錐體

(4)第一複三角柱 (Ditrigonal prism of the first order): $(ki\bar{h}o)$ 或 $(ik\bar{h}o)$ ，係由六矩形之面集合而成，有軸間對稱面三，晶形可分正、負二種。



第 165 圖第一複三角柱

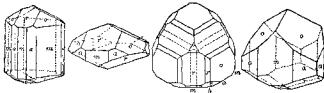


第 166 圖第一三角雙錐及第一複三角雙錐橫断面

(5)底軸面 (Basal pinacoid): (0001) 或 $(000\bar{1})$ ，即晶面僅與縱軸之一端相交者，因他端另成一底軸面，故有上、下之稱。

(B) 聚形：常見者為電氣石。

$m = (10\bar{1}0)$ ， $a = (11\bar{2}0)$ ， $r = (10\bar{1}1)$ ， $o = (02\bar{2}1)$ ， $r_1 = (01\bar{1}1)$ ， $e_1 = (10\bar{1}2)$ ， $v = (21\bar{3}1)$ ， $x = (13\bar{4}1)$ 。

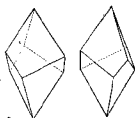


第 167 圖電氣石 第 168 圖電氣石 第 169 圖電氣石 第 170 圖電氣石

曰四半面形：

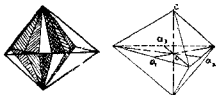
【I】偏形六面體類：主要晶體如下：

(1) 偏形六面體 (Trigonal trapezohedron)：
 $(ki\bar{h}l)$ 、 $(h\bar{i}kl)$ 或 $(h\bar{k}\bar{i}l)$ 、 $(k\bar{h}il)$ ，由六不等邊四邊形之面集合而成，係複六方雙錐體之四分之一面體，或為六方偏方體之半面晶，晶體有左、右兩種，每種又分正、負。呈此種結晶之礦物有水晶及辰砂等。



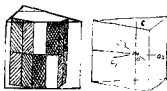
第 171 圖 偏形六面體

(2) 第二三角雙錐體 (Trigonal bipyramid of the second order)：
 $\pi_T(kk\bar{h}l)$ 或 $\pi_T(h\bar{k}\bar{k}l)$ ，由六等腰三角形之面集合而成，其橫軸係通過四面相會之兩角及對邊之中央。



第 172 圖 第二三角雙錐體

(3) 第二三角柱 (Trigonal prism of the second order)：
 $\pi_T(11\bar{2}0)$ 或 $\pi_T(2\bar{1}\bar{1}0)$ ，與第一三角柱之外形完全相同，所異者為晶體之橫軸係通過二矩形晶面相交之稜，及對稜面之中心。晶體有正、負兩種。



第 173 圖 第二三角柱

(4) 第二複三角柱 (Ditrigonal prism of the second order)：
 $\pi_T(ki\bar{h}0)$ 或 $\pi_T(oh\bar{h}l)$ ，有矩形之面六，水平軸係通過一直立之銳稜及對面之鈍稜，晶體有正右、正左及負右、負左等四種。

【B】菱形四半面體類：計包括三晶體。

(1) 第一菱面體

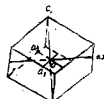
(Rhombhedron of the first order)：
 $\pi_r(hohl)$ 、 $\pi_r(oh\bar{h}l)$ 。與菱形半面體類之菱面體近乎



第 174 圖 第二複三角柱



第 175 圖 第一菱面體



相同。

(2)第二菱面體(Rhombohedron of the second order): $\pi_{\pi}(k\bar{k}hl)$, $\pi_{\pi}(h\bar{k}\bar{k}l)$ 。可視為近似第二六方雙錐體之複六方雙錐體之四半面品。



第176圖第二菱面體

(3)第三菱面體(Rhombohedron of the third order): $\pi_{\pi}(k\bar{i}hl)$, $\pi_{\pi}(h\bar{i}kl)$ 及 $\pi_{\pi}(\bar{i}h\bar{k}l)$, $\pi_{\pi}(i\bar{k}hl)$ 。為複六方雙錐體之四半面品。

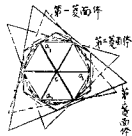


第177圖第三菱面體

【Ⅳ】三角四半面體類：呈此種結晶之礦物，尚未有任何發現。

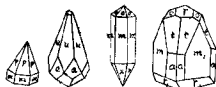
四異極形：

【I】完面異極體類：呈此種結晶之礦物，有紅鋅礦(Zincite)及碘銀礦(Iodryite)。為具有上底面、錐面及柱面等聚形。 $m = (10\bar{1}0)$ ， $p = (10\bar{1}1)$ 。



第178圖三種菱面體

【II】錐形異極體類：呈此種結晶者為酒石酸錳銻。 $m = (10\bar{1}0)$ ， $o = (10\bar{1}1)$ ， $x = (20\bar{2}1)$ 。



第179圖 第180圖 第181圖 第182圖
紅鋅礦 碘銀礦 酒石酸錳銻 電氣石

【Ⅲ】菱形半面體之異極體類：呈此結晶之礦物為電氣石。 $m_1 = (01\bar{1}0)$ ， $a = (11\bar{2}0)$ ， $r = \pi(10\bar{1}1)$ ， $l = \pi(21\bar{3}1)$ ， $o = \pi(02\bar{2}1)$ ， $r_1 = (01\bar{1}1)$ 。

【IV】三角四半面異極體類：呈此結晶者為碘化鈉。正第一三角錐 (r)，負第一三角錐 (e)，第二三角錐 (t)。



第 183 圖 碘化鈉

1-7 斜方晶系

(一) 完面形：即斜方雙錐體類，其主要晶體如下：

【I】單形：計包括四種晶體。

(1) 斜方雙錐體 (Orthorhombic bipyramids)：係由八不等邊三角形之面集合而成，四面相會之隅角有三種，為數各二。稜有三種，為數各四。此種晶體因晶面與各軸所截之距離不同，故變化無窮。其中每面均按一定之單位距離與三軸相截者曰單位雙錐體 (Unit bipyramid)：(111)。若長、短軸不變，僅縱軸延長者曰變形雙錐體 (Modified bipyramid)，(hhl)。如長軸不變，而短軸與縱軸延長者曰短軸雙錐體 (Brachy bipyramid)，(hkl)。又短軸不變，而長軸與縱軸延長者則曰長軸雙錐體 (Macro-bipyramid)，(hkl)。

第 184 圖
單位雙錐第 185 圖
變形雙錐

(2) 斜方柱 (Orthorhombic prisms)：具有相同之矩形面四，因晶面與橫軸所截之距離不同，故可分為三種。其中每面均與二橫軸按一定之單位距離相交，而與縱軸平行者曰單位柱 (Unit prism)，(110)。

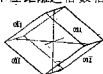


第 186 圖 斜方柱

。若每面與長軸按一定之單位距離相交，與短軸以單位距離之倍數相截，而與縱軸平行者曰短軸柱 (Brachy prism)，(kho)。如每面與短軸按一定之單位距離相交，與長軸以單位距離之倍數相截，而與縱軸平行者則曰長軸柱 (Macroprism)，(hko)。



第 187 圖 長軸柱



第 188 圖 短軸柱

(3) 坡面 (Domes)：即晶面與一橫軸及縱軸相交，而與另一橫

軸平行者。其與短軸平行時，曰短軸坡面 (Brachy dome) (011) 。與長軸平行時，曰長軸坡面 (Macro dome) (101) 。在外形上恰似橫置之柱，故亦稱橫柱 (Horizontal prism)。

(4) 軸面 (Pinacoids): 即相對而平行之晶面，與一軸相交而與二軸平行者。其與長軸相交與短軸及縱軸平行時，曰短軸面或側軸面 (Brachy or side pinacoid) (010) 。如與短軸相交而與長軸及縱軸平行時，曰長軸面或前軸面 (Macro or front pinacoid) (100) 。至與縱軸相交而與長軸及短軸平行時，則曰底軸面 (Basal pinacoid) (001) 。



第 189 圖 軸面

【II】聚形：常見者如下：

硫黃： $p = (111)$ ， $s = (113)$ ， $c = (001)$ ， $n = (011)$ 。

紫蘇輝石： $a = (100)$ ， $b = (010)$ ， $m = (110)$ ， $n = (120)$ ， $h = (014)$ ， $e = (212)$ ， $o = (111)$ ， $u = (232)$ ， $i = (211)$ 。



第 190 圖 硫黃



第 191 圖 硫黃



第 192 圖 紫蘇輝石



第 193 圖 紫蘇輝石

黃玉： $m = (110)$ ， $l = (120)$ ， $u = (111)$ ， $b = (010)$ ， $o = (221)$ ， $i = (223)$ ， $n = (140)$ ， $d = (201)$ ， $p = (401)$ ， $f = (021)$ ， $y = (041)$ 。



第 194 圖 黃玉



第 195 圖 黃玉



第 196 圖 黃玉

重晶石： $c = (001)$ ， $m = (110)$ ， $d = (102)$ ， $o = (011)$ ， $b = (010)$ ， $a = (100)$ ， $y = (121)$ ， $z = (211)$ 。



第 197 圖 重晶石



第 198 圖 重晶石



第 199 圖 重晶石



第 200 圖 重晶石

(二)半面形：即斜方錐類，其中僅包括數種晶體。



第 201 圖
重晶石



第 202 圖
重晶石



第 203 圖
重晶石



第 204 圖
重晶石



第 205 圖
重晶石

【I】單形：其晶體如下：

(1)斜方錐 (Orthorhombic bispeneid)：(111) 或 ($\bar{1}\bar{1}1$)，有三角形之面四，每面按一定之單位距離與三軸相交。係斜方雙錐體之半面晶，晶體有正、負兩種。



【II】聚形：常見者為瀉利鹽 (Epsomite) 之結晶，其晶面為 $m = (110)$ ， $z = + (111)$ 。

第 206 圖斜方錐

(三)異極形：即斜方異極體類，常見者有異極礦 (Calamine) 及黃石 (Struvite) 等。



第 207 圖
瀉利鹽



第 208 圖
異極礦



第 209 圖
黃石

異極礦： $m = (110)$ ， $a = (100)$ ， $b = (010)$ ， $i = (031)$ ， $c = (001)$ ， $t = (301)$ ， $v = (12\bar{1})$ 。

黃石： $c = (001)$ ， $b = (010)$ ， $S = (101)$ ， $S_1 = (10\bar{1})$ ， $q = (011)$ 。

1 - 8 單斜晶系

(一)完面形：即單斜柱體類，主要晶體如下：

【I】單形：包括下列四種晶體。

(1)半雙錐體 (Hemi-bipyramids)：有兩種不等邊三角形，為數各四，其中相對之兩面互相平行，相鄰之兩面互相對稱，頗似柱面之集合，故亦稱第四單斜柱 (Fourth



第 210 圖
單位負半錐



第 211 圖
單位正半錐

order prism)。又含 $+\beta$ 角者，曰正半

錐 (Positive hemi-bipyramid)，含 $-\beta$ 角者，曰負半錐 (Negative hemi-bipyramid)

，二者相合，錐形始成。此種晶體因晶面與各軸所截之距離不同，故變化甚多。其中每面均按一定之單位距離與三軸相交者，曰單位半雙錐體，在單位半雙錐中，又可分正單位雙錐體 ($\bar{1}11$) 及負單位雙錐體 (111) 兩種。

如晶面與正軸及斜軸按一定之單位距離相交，而與縱軸之單位距離倍數相截時，曰變形半雙錐體，在變形半雙錐體中，亦可分為正半錐 ($\bar{h}hl$) 及負半錐 (hhl) 兩種。若晶面與正軸依一定之單位距離相交，而與斜軸及縱軸之單位距離不同倍數相截時，曰斜軸半雙錐體，在斜軸半雙錐體中，亦可分為正半錐 ($\bar{k}hl$) 及負半錐 (khl) 兩種。至晶面與斜軸以一定之單位距離相交，而與正軸及縱軸之單位距離不同倍數相截時，則曰正軸半雙錐體，在正軸半雙錐體中，亦可分為正半錐 ($\bar{h}kl$) 及負半錐 (hkl) 兩種。



第 213 圖 單位正半錐及單位柱底軸面



第 212 圖 單位負半錐與單位柱底軸面

(2) 單斜柱體 (Prisms)：為平行四邊形之四面合成，亦稱第三單斜柱 (Third-order prism)。其晶面與斜軸及正軸按一定之單位距離相交，而與縱軸平行時，曰單位柱體 (110)。如晶面與正軸依單位距離相交，與斜軸依單位距離之倍數相交，而與縱軸平行時，曰斜軸柱體 (kho)。至晶面與斜軸以單位距離相截，與正軸以單位距離之倍數相截，而與縱軸平行時，則曰正軸柱 (hko)。



第 214 圖 單斜柱

(3) 坡面 (Domes)：晶面與縱軸及正軸相交而與斜軸平行者，曰斜軸坡面或第一單斜柱 (Climo-dome or First-order prism)。

(Climo-dome or First-order prism)。



第 215 圖 正軸坡



第 216 圖 斜軸坡



第 217 圖 半正軸坡及單位柱底軸面

晶面與縱軸及斜軸相交而與正軸平行者，曰半正軸坡面或第二軸面 (Hemi-ortho-dome or Second-order pinacoids)。在半正軸坡面中，其含 $+\beta$ 角之二晶面，曰正半坡 (*hol*)，而含 $-\beta$ 角之二晶面，則曰負半坡 (*hol*)。

(4) 軸面 (Pinacoids)：晶面與縱軸相交與其他二軸平行者曰底軸面或 *c* 軸面 (001)。如晶面與正軸相交而與其他二軸平行時，曰斜軸面 (Clino-pinacoid)，亦稱側軸面或 *b* 軸面 (010)。至晶面與斜軸相交而與其餘二軸平行時，曰正軸面 (Ortho-pinacoid)，亦稱前軸面或 *a* 軸面 (100)。



第 218 圖 軸面

【II】衆形：常見者有正長石輝石及石膏等，其晶面如下：

正長石： $m = (110)$ ， $y = (201)$ ， $b = (010)$ ， $x = (\bar{1}01)$ ， $c = (001)$ ， $z = (120)$ ， $o = (\bar{1}11)$ 。

第 219 圖
正長石第 220 圖
正長石第 221 圖
正長石

輝石： $m = (110)$ ， $a = (100)$ ， $b = (010)$ ， $S = (\bar{1}11)$ 。

石膏： $b = (010)$ ， $l = (111)$ ， $m = (110)$ 。



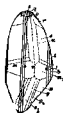
第 222 圖 輝石



第 223 圖 石膏

(二) 半面形：即單斜晶石類，斜晶石 (Clinohedrite) 之結晶，為其代表。

$b = (010)$ ， $m = (110)$ ， $m_1 = (1\bar{1}0)$ ， $h = (320)$ ， $n = (120)$ ， $l = (130)$ ， $e = (101)$ ， $e_1 = (\bar{1}0\bar{1})$ ， $p = (111)$ ， $p_1 = (\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ ， $q = (\bar{1}\bar{1}1)$ ， $r = (\bar{3}21)$ ， $S = (551)$ ， $t = (771)$ ， $u = (\bar{5}31)$ ， $o = (\bar{1}31)$ ， $x = (\bar{1}3\bar{1})$ ， $y = (\bar{1}2\bar{1})$ 。



第 224 圖 斜晶石

(三) 異極形：即單斜異極體類，常見者為酒石酸 (Tartaric acid)，其晶面如下：

$a = (100)$, $c = (001)$, $m = (110)$, $p = (10\bar{1})$, $q = (011)$ 。

除此之外，糖亦呈此種結晶。



第 226 圖酒石酸

1 - 9 三斜晶系

(一)完面形：即軸面類，其主要晶體有下列各種：

【I】單形：計包括下列四種晶體。



第 226 圖
半柱體



第 227 圖四
分之一雙錐體

(1)四分之一雙錐體(Tetarto-bipyramids)：由四組不等邊三角形之面合成，

每組有晶面二，位於同一晶軸之兩端，相對、相等而互相平行，故稱為四分之一雙錐體，亦稱為第四軸面。按其位置可分上左、上右、下左及下右四種。按晶面所截各軸之距離又可分為單位四分之一雙錐體 (111) 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 及 $(1\bar{1}\bar{1})$ ，變形四分之一雙錐體 (hhl) 、 $(k\bar{h}l)$ 、 $(hh\bar{l})$ 及 $(h\bar{h}\bar{l})$ ，短軸四分之一雙錐體 (khl) 、 $(k\bar{h}l)$ 、 $(kh\bar{l})$ 及 $(k\bar{h}\bar{l})$ 、長軸四分之一雙錐體 (hkl) 、 $(h\bar{k}l)$ 、 $(hk\bar{l})$ 及 $(h\bar{k}\bar{l})$ 等四種形式。

(2)半柱體(Hemi-prisms)：由兩組相對、相等而互相平行之四邊形面合成，故稱為半柱體，亦稱為第三軸面。按其位置可分為左、右兩種。按晶面所截二軸之距離又可分為單位半柱體 (110) 、 $(1\bar{1}0)$ ，短軸半柱體 (kho) 、 $(k\bar{h}o)$ ，長軸半柱體 (hko) 、 $(h\bar{k}o)$ 等三種形式。



第 228 圖軸面 第 229 圖短軸坡 第 230 圖長軸坡

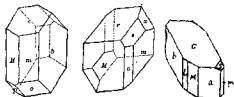
(3)半面坡(Hemi-domes)

：由兩組相對、相等而互相平行之四邊形晶面合成，故稱為半面坡。其與

短軸平行而與長軸及縱軸相交者，稱為短軸半坡面或第一軸面，在短軸半坡面中，可分為右半坡 (ohl) 及左半坡 ($o\bar{h}l$)。至晶面與長軸平行而與短軸及縱軸相交時，則稱為長軸半坡面或第二軸面，在長軸半坡面中，可分為上半坡 (hol) 及下半坡 ($ho\bar{l}$)。

(4) 軸面：為三組相對、相等而互相平行之四邊形晶面，其與縱軸相交而與其他二軸平行時，曰底軸面或C軸面 (001)。如與長軸相交而與其他二軸平行時，曰短軸面或側軸面，亦稱b軸面 (010)。至與短軸相交而與其他二軸平行時，曰長軸面或前軸面，亦稱a軸面 (100)。

【II】聚形：常見者有鈉長石、斧石、膽礬等，其晶面如下：



第 231 圖 鈉長石 第 232 圖 斧石 第 233 圖 膽礬

鈉長石： $c = (001)$ ， $b = (010)$ ， $m = (110)$ ， $M = (1\bar{1}0)$ ， $o = (11\bar{1})$ ， $p = (40\bar{3})$ 。

斧石： $a = (100)$ ， $m = (110)$ ， $M = (1\bar{1}0)$ ， $s = (201)$ ， $x = (111)$ ， $r = (1\bar{1}1)$ 。

膽礬： $c = (001)$ ， $b = (010)$ ， $a = (100)$ ， $M = (1\bar{1}0)$ ， $l = (1\bar{2}0)$ ， $m = (110)$ ， $s = (111)$ 。

(二) 半面形：即半面體晶類，屬此種結晶之礦物，在天然界中尚未發現。人造化合物中之硫代硫酸鈣 (Calcium thiosulphate) ($\text{Ca}_2\text{S}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 即屬此類。



第 234 圖 硫代硫酸鈣

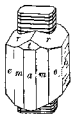
1-10 晶體之集合

(1) 連晶：礦物之結晶成爲一單獨個體時，稱之爲單晶 (Single crystal)

。若多數結晶體互相平行集合時，則曰平行連晶(Parallel growth)。
 如圖所示，為水晶之平行連晶。有時屬於相同晶系而種類不同之礦物，在結晶軸之相互平行狀態下集合時，則稱為平行透入連晶(Parallel inter-growth)如輝石之包於角閃石中及鈣英石之包於磷酸鈣礦中等皆是。除此之外，在偉晶花崗岩中之正長石，其以(110)面與鈉長石為整齊之結合者，亦復不少。

第 235 圖 水晶之平行連晶

(2)雙晶：同種礦物之二結晶體，或一結晶體之兩半往往以共有之結晶面結合之，此時二結晶或一結晶之兩半，具有一不在單晶對稱面位置上之對稱面，而使左右呈對稱關係者，稱之為雙晶(Crystal twin)。



第 236 圖 角閃石及輝石之透入連晶 第 237 圖 磷灰石與鈣英石之透入連晶

當辨認雙晶時，應先留意其凹入角，蓋凹入角者，乃二結晶之集合者也。設無稍凹入之角可尋，則應注意其酷似單晶之外表形態，有時一部解理之方向相差懸殊，驟視之雖似一結晶面，但其光澤或條紋不同，苟能細心觀察，不難發現其為雙晶。除此之外，若用礦物顯微鏡觀察其光學性質時，亦可判定其是否為雙晶。如雙晶係由相同結晶之兩半形成者，吾人以手執其一半，沿一定軸對另一半旋轉180°時，則由兩半所合成之形體與一結晶之外觀完全相同。特稱其軸為雙晶軸(Twinning axis)，而稱與其垂直之面為雙晶面(Twinning plane)。

如圖所示，為石膏之雙晶，其b與b間之線代表雙晶面，與該面垂直之直線即為雙晶軸。若以此軸做為轉軸而將雙晶之前



第 238 圖 石膏之雙晶



第 239 圖 方解石之雙晶

半旋轉180°時，則與石膏之普通結晶外觀相同，其雙晶面與正軸面(

100) 平行。在結晶學上言之，所有平行面均居於同一方位，故在石膏之雙晶中，其雙晶面即 (100) 面。又在尖晶石之雙晶中，其雙晶面即 {111} 面。

當形成雙晶之際，其結合兩半晶體之面，稱之為接面 (Composition plane)。接面通常與雙晶面一致，但亦有不一致者。如雙晶二個體發育不規則而呈貫入之結合時，則其接面不呈平面，設不計其犬牙交錯之接觸，仍可將一方之個體與其另一半重合，故在結晶學上亦認其具有雙軸面及雙晶軸也。



第 240 圖 石膏
晶雙晶之接面

至雙晶之種類，大別之可分為下列四種：

(A) 接觸雙晶 (Contact twin)

：二晶體以雙晶面互相結合者，曰接觸雙晶。如沿雙晶軸將其中之一或半晶體旋轉 180° 時，其結合之形狀與單晶無異。

如圖所示，尖晶石之雙晶面為 (111) 面，石膏之雙晶面為 (100)



第 241 圖 正
反石之雙晶



第 242 圖
文石之雙晶



第 243 圖
輝石之雙晶

) 面，正長石之雙晶面為 (010) 面，文石之雙晶面為 (110) 面，輝石之雙晶面為 (100) 面。又石膏及輝石之雙晶，在形態上稱之為弧口雙晶 (Arc) 或燕尾雙晶 (Swallow tail)。除此之外，磁鐵礦、閃鋅礦、水品及金剛石等雙晶，亦屬接觸雙晶。

(B) 貫通雙晶 (

Penetration twin)：兩晶體互相貫穿而成者，曰貫通雙晶。若沿其雙晶軸將二者之一晶體旋轉 180° 時，則所



第 244 圖 十
字石之雙晶



第 245 圖 十
字石之雙晶

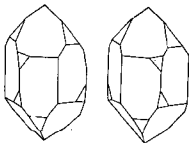


第 246 圖
螢石之雙晶

成之形狀與原來無異。如圖所示，螢石之雙晶為二具六面體互相貫入。

而成，其雙晶軸與六面體之三次對稱軸一致。十字石之雙晶在第 245 圖中，雙晶面為 (032) 面，在第 244 圖中，雙晶面為 (232) 面。

水晶之雙晶除接觸雙晶外，亦有貫通雙晶。水晶之單晶原為六角柱狀，其尖端則為六角錐狀，有時 $r(10\bar{1}1)$ 與 $z(01\bar{1}1)$ 二面發育相等，但通常以其中之一面特別發育者為多。除此之外，在柱面 $m(10\bar{1}0)$ 之左上方或右上方出現 $x(50\bar{1}1)$ 及 $S(11\bar{2}1)$ 等小面。如圖所示，在柱面之左上方有小面者曰左水晶 (Left-handed quartz)，在柱面之右上方有小面者曰右水晶 (Right-handed quartz)。



第 247 圖左水晶及右水晶

除上述之各種礦物外，其呈貫通雙晶者，尚有方鉛礦、黃鐵礦及硫砷鐵礦等。

(C) 補足雙晶 (Supplementary twin)：同種半面形之正、負兩種晶體互相貫穿而成者，曰補足雙晶。因該半面形所缺少之對稱面，能於此種雙晶恢復也。如圖所示，為鋤銅礦之補足雙晶。



第 248 圖鋤銅礦之雙晶

(D) 反覆雙晶 (Repeated-twin)：為三個或三個以上之結晶按同一法則，再三結合者。如圖所示，為鈉長石之接觸雙晶再反覆而成者，稱為聚片雙晶



第 249 圖鈉長石之雙晶



第 250 圖金紅石之雙晶



第 251 圖白鉛礦之雙晶

(Polysynthetic twins)，其雙晶面為 (010) 面。因係結晶質之極薄晶片交互並列，以虫目鏡觀之，則於解理面上呈現無條之平行條紋。又雙晶面不平行，而雙晶軸呈多角形之反覆雙晶，則稱為輪式雙晶 (Cyclic twin)。如金紅石之雙晶即屬此類。在反覆雙晶中，其由三個體結合

者曰三連晶 (Trillings)，由五個體結合者曰五連晶 (Fivelings)，由八個體結合者曰八連晶 (Eightlings)。

除上述者外，尚有貫通雙晶再行反覆而成者，如白鉛礦之反覆貫通雙晶，即屬此類。

三雙晶面、雙晶軸在結晶學上之位置，則隨結晶系之不同，以致各異，茲特分述於下：

(A) 等軸晶系：雙晶面與八面體之面平行，因常見於尖晶石中，故稱為尖晶石式雙晶律 (Spinel law)。



第 252 圖 尖晶石之雙晶面



第 253 圖 螢石之雙晶面



第 254 圖 鐵十字
鐵礦之雙晶面

。在黃鐵礦之貫通雙晶中，為五角十二面體互相貫入而成者，故又稱為鐵十字 (Iron cross)。除此之外，螢石之貫通雙晶，其雙晶面亦與 (111) 面平行。

(B) 正方晶系：雙晶面通常與第二正方雙錐體之面平行，如圖所示，金紅石之輪式雙晶之雙晶面為 (101) 面，特稱之為金紅石律 (Rutile law)。其他如錫石與鈦英石之接觸雙晶，其雙晶面均與 (101) 面平行。



第 255 圖 金紅石之雙晶面



第 256 圖 錫石之雙晶面



第 257 圖 鈦英石之雙晶面

(C) 六方晶系：常見者為方解石與石英兩種礦物。在方解石之雙晶中，其雙晶面多與底軸面平行，但亦有與負菱面體之面平行者。



第 258 圖 方解石之雙晶面



第 259 圖 方解石之雙晶面

至石英之雙晶，其結合方式有下列三種

(a) 道芳式雙晶律 (Dauphine twinning law)：係二左或二右晶體，以縱軸為雙晶軸而將其中之一晶體旋轉 180° 後

，與另一晶體互相透入所成之雙晶也。

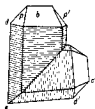
(b)巴西式雙晶律 (Brazilian twinning law): 即一左及一方晶體互相貫穿所成之雙晶也，其雙晶面與第二六方柱體之面平行。



第 260 圖 巴西式雙晶



第 261 圖 日本式雙晶



第 262 圖 日本式雙晶

(c)日本式雙晶律 (Japanese twinning law): 如圖所示

，亦接觸雙晶之一種，其雙晶面與 (1122) 面平行，因日本產出最多而得名。

(d)斜方晶系：如十字石之貫通雙晶，其雙晶面與短軸坡面平行。而文石之接觸雙晶，其雙晶面則與單位柱體之面平行。



第 263 圖 十字石之雙晶面

(e)單斜晶系：常見於石膏及正長石之結晶中。如圖所示，石膏之接觸雙晶，其雙晶面與正軸面平行。而正長石之貫通雙晶，以縱軸為雙晶軸者，稱之為加爾斯拜得雙晶律 (Carlsbad law)。又正長石之接觸雙晶中，其雙晶面與底軸面平行時，稱之為曼諾巴西式雙晶 (Manebach twin)；至雙晶面與斜軸坡面平行時，則又稱之為拜溫諾式雙晶 (Beveno twin)。



第 264 圖 石膏之雙晶面



第 265 圖 正長石之雙晶面

(f)三斜晶系：因無對稱面，故任何晶面均可為雙晶面。如圖所示，在鈉長石之雙晶中，其雙晶面與短軸面平行時，稱之為鈉長石律 (Albite law)。在鈣鈉長石中，其以長軸為雙晶軸者，則稱之為鈣鈉長石律 (Pericline law)。



第 266 圖 曼諾巴西式雙晶



第 267 圖 拜溫諾式雙晶



第 268 圖 鈉長石雙晶面

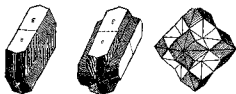


第 269 圖 鈣鈉長石雙晶面

(3)擬晶 (Mimicry)：雙晶者，乃以

雙晶面為對稱面而呈左右之對稱關係者也。考雙晶面並非原來結晶之對稱面，而對稱面更係將結晶體分成互為影、像之二部者，故以其做為雙晶面時，則該雙晶不需修整即與一結晶體相同。徵諸實際，原來結晶之對稱面究非形成雙晶後之對稱面。而對稱度低之結晶，根據雙晶之形態，使之成為對稱度高之單晶時，在外觀上則需添加新對稱要素。於是，其將原來結晶之對稱度提高後之晶體，特稱之為擬晶。

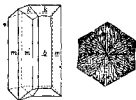
在擬晶之中，形成雙晶之二單晶，其結晶軸互相平行，而雙晶面則係充實對稱面類之對稱面。且擬晶之型式，亦有貫通雙晶及接觸雙晶之別。



第270圖 鈣十字沸石之擬晶

如圖所示，為重十字沸石比擬鈣十字沸石 (Phillipsite) 反覆雙晶之結晶，添加新對稱要素後，即可視為擬晶。上述之二種沸石，雖均屬單斜晶系，但左方係四單晶以 (100) 面為雙晶面而形成十字形之四連雙晶，在外觀上似有斜方晶系之對稱要素。然由晶面上之條紋方向觀之，則知其為雙晶無疑。中央係以 (011) 面為雙晶面所形成之複雙晶，聯視之，頗似正方柱狀之結晶。至右方則係以 (110) 面為雙晶面之複雙晶，而具有十二面體之外觀，苟不注意其出入之角，實易誤認為對稱度高之晶體。但經仔細觀察，不難發現其晶面中具有二或四相同方向之條紋，故可知其必係擬晶無疑也。

霏石原為斜方晶系之結晶，但以 (110) 面為雙晶面而形成接觸雙晶時，因柱面之夾角近於 60° ，故早為六方晶系之結晶，如圖所示，左方為霏石之單一接觸雙晶，右方則為霏石輪式雙晶之橫斷面，而呈六方晶系之假對稱。按霏石之化學成分為 CaCO_3 ，其相同成分之六方晶系結晶則為方解石，故霏石之擬晶常誤認為方解石也。



第271圖 霏石之雙晶

故霏石之擬晶常誤認為方解石也。

除此之外，擬晶在金綠石及水鉍礦中亦可見之。

1-11 結晶之不規則

(1) 歪晶 (Malformed crystal)：礦物常因外力之作用，於結晶時不能生成其理想之完整晶形，往往一部之生長較他部為多，以致成為參差不齊之結晶形態者，謂之歪晶。如螢石原為八面體，常因外力作用，變為殘缺隅角之歪晶。石英本為六方晶系之柱體及錐體之結晶，常因外力作用而變成缺頂部隅角之歪形。上述各節，在晶癖中已討論及之。至歪晶之種類，大別之有二。即完全失去幾何學上之對稱要素者，稱之為不規則歪晶；若晶體雖呈歪形，但仍保持其幾何學上之對稱關係者，則稱之為對稱歪晶。

(2) 假晶 (Pseudomorph)：礦物之內部，原為排列整齊之原子群所形成。當溫度、壓力及化學因素改變時，其原子群之排列方式遂發生變化，因而成為其他礦物；又原子群一部逸散，則產生解離現象；或在作用之溶液及氣體內其他原子群中，有時置換一部，有時置換全部，而形成適合於新礦物之產物。於是不論其本質是否完全改變，而外形上仍保持其原有之形態，以致實質與外形不相符合。故稱之為假晶。如褐鐵礦常呈黃鐵礦之結晶者是也。又此時之褐鐵礦，則以“黃鐵礦後之褐鐵礦”(Limonite pseudomorph after pyrite) 稱之。

歪假晶之種類，按其成因之不同，可以分為下列三類：

(A) 變質假晶 (Pseudomorph by alternation)：大部假晶均屬之。其中所包括之種類甚多，常因化學成分之變易不同，又可區別為下列四種：

(a) 化學成分不變者：即僅改變內部之原子排列方式，在同質多像礦物中，常有此種現象產生。如斜方晶系之霏石及六方晶系之方解石，其化學成分均為碳酸鈣。普通霏石在常壓之下，不論其溫度如何，皆不安定，而常變為方解石。即在其外形上雖仍保持霏石之結晶，但

其實質則已變為方解石之假晶矣。除此之外，如呈金剛石外形之石墨假晶，板鈦礦（斜方晶系）後之金紅石（正方晶系），以及黑辰砂（等軸晶系）後之辰砂（六方晶系）等，亦屢見不鮮。

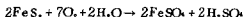
在上述之同質多像礦物中，其由一種結晶變為另一種結晶之趨勢，常按單一方向進行，而不做反向之回轉，即所謂之非可逆者也。但在同類之同質多像礦物中，如高溫石英與低溫石英、輝銀礦（等軸晶系）與硫銀礦（斜方晶系）之間，則與上述之情況不同，其由一種形態變為另一種形態之傾向為可逆式。例如石英之結晶，以 573°C 為界，在此溫度以上為高溫石英，以下則為低溫石英。又向為硫化銀之成分，當溫度在 179°C 以上時，輝銀礦安定；在 179°C 以下時，則硫銀礦安定。若將高於交界溫度中所結晶之礦物，置於遷移點以下之溫度中時，其實質則變為低溫之型態。如高溫石英原為形成火成岩斑晶之六方雙錐體，但在常溫中往往變為低溫石英。又金銀礦脈中之輝銀礦結晶，通常多變為硫銀礦之原子排列方式。同時角閃石經輝石化作用之後，常生成絹布石（Bastite），而另一方面輝石却因角閃石化作用而變為假象纖維角閃石（Uralite）。此完全相反之作用，不外溶媒遭受觸媒之影響所致者也。

除此之外，在化學成分不變之變質假晶中，混晶礦物有時因溫度及壓力之變化，常分離為二種成分，並始終保持其原形。如白榴石分離為叢石及正長石而成偽白榴石（Pseudoleucite），月長石（Moonstone）分離為鈉長石及冰長石而仍保持月長石之外形等者是。

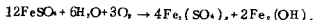
(b) 化學成分減少者：此種假晶常呈多孔質，且表面彎曲者亦復不少。在此種假晶中，因還原作用所導致之赤銅礦（ Cu_2O ）後之自然銅（ Cu ），基於脫水作用所導致之針鐵礦（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）後之赤鐵礦（ Fe_2O_3 ）或石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）後之硬石膏（ CaSO_4 ），及由溶液作用所導致之黃銅礦（ CuFeS_2 ）後之輝銅礦等，其化學成分之分離，均係一部溶失而形成者也。

例如產於礦脈露頭附近之黃鐵礦（ FeS_2 ），遭受天水作用後，即產

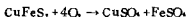
生下列之氧化反應：



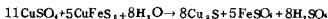
其所產生之硫酸亞鐵再行氧化，則生成硫酸鐵與氫氧化鐵。



硫酸鐵具有強烈之氧化力，常活動於各種硫化礦物中，而促之產生金屬硫酸鹽類。即溶解硫酸鐵之天水與黃銅礦發生作用時，則黃銅礦氧化而生成硫酸銅及硫酸亞鐵。



因硫酸銅易於溶解，通常難溶於天水中隨之降下，但在中途與黃銅礦相遇時，則相互反應而生成輝銅礦。

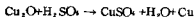
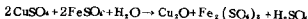


普通黃銅礦後之輝銅礦，可能即係此種作用而形成者。

(c)化學成分增加者：此種假晶較為少見，蓋以成分增加，容積變大，多將原形破壞也。至其生成過程，則恰與上述者相反。如磁鐵礦(Fe_3O_4)後之赤鐵礦(Fe_2O_3)，係因氧化作用而成。硬石膏後之石膏，乃由加水作用而成。赤銅礦(Cu_2O)後之孔雀石($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$)，為碳化作用而成。雞冠石(AsS)後之雄黃(As_2S_3)，則係經加成作用而成者均是。

在氧化鐵礦脈之氧化帶中，常產出具有等軸晶系結晶外形之赤鐵礦假晶，特稱之為假像赤鐵礦(Martite)。其中一部雖可能係黃鐵礦之假晶，但大部則為磁鐵礦後之赤鐵礦。又在日本秋田花岡礦山地帶，常產出具有四角柱狀硬石膏結晶之雪花石膏假晶，當地之石膏由硬石膏變成者，雖不甚多，但其在石膏礦床成因之探討上，則具有極重要之啓示也。

黃鐵礦及黃銅礦於氧化之後，可產生硫酸亞鐵、硫酸及硫酸銅，如再相互作用，則又生成赤銅礦及自然銅。

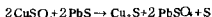


如赤銅礦及自然銅與含碳酸之天水作用時，則生成青綠色之孔雀石，恰與銅之生銹情形相似。因赤銅礦及自然銅均為等軸晶系之八面體結晶，其殘留於假晶之內部者，清晰可見。故原來礦物之種類，不難由之判斷也。

除此之外，將雞冠石置於日光下曝之，則分解為雌黃與砷。基於此種作用，亦可形成雞冠石後之雌黃假晶。

(d) 化學成分一部置換者：在原礦物至新生礦物之變化過程中，均不能脫離化學作用。如黃鐵礦氧化後生成氫氧化鐵，即所謂之褐鐵礦是也。但在自然界中，黃鐵礦於氧化作用後，以變成褐鐵礦假晶者為多。如日本長野武石地區所產者，即係此種假晶，特稱之為武石 (Buseki)，其原來之黃鐵礦，全部變為褐鐵礦。至金武石者，則有一部尚未分解之黃鐵礦殘留於其中也。

黃銅礦分解後常生成硫酸銅，而硫酸銅溶液與方鉛礦 (PbS) 作用時，則生成輝銅礦。



如日本秋田尾去澤礦山所產之假像輝銅礦 (Harrisite)，即係此種作用而成者。

除此之外，如毒重石 (BaCO_3) 後之重晶石 (BaSO_4) 係複分解作用而成，方鉛礦後之白鉛礦 (PbCO_3) 為碳酸化作用而成，正長石 (KAlSi_3O_8) 後之高陵石 ($\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) 乃溶液受氣體之影響而成，均此種型式之假晶也。

(B) 交代假晶 (Pseudomorph by substitution)：上述黃銅礦後之輝銅礦或假像輝銅礦等，均係交代作用下之產物。但普通所謂之交代假晶，則專指原礦物與新生礦物之間，不具任何化學成分類似之假晶而言。如螢石 (CaF_2) 後之石英 (SiO_2)，及正長石 (KAlSi_3O_8) 後之錫石 (SnO_2) 等均是。至方解石 (CaCO_3) 後之赤鐵礦 (Fe_2O_3)，二者之間雖無類似化學成分之關係，但係方解石先變為菱鐵礦 (FeCO_3) 後，再由氧化作用而變成赤鐵礦者。此種經過二段變質之假晶，在區別上殊

感困難。故欲嚴格判別其為交代假晶抑或為變質假晶，誠非易事也。

(C)沉澱假晶 (Pseudomorph by simple deposition)：此種假晶含有包晶 (Incrustation) 與充填 (Filling) 二種作用。如以硝酸銀 (AgNO_3) 之溶液作用於岩塩 (NaCl) 結晶時，則岩塩溶解與硝酸銀溶液因反應而沉澱於岩塩結晶之表面，乃生成不溶性之氯化銀 (AgCl) 皮殼。如硝酸銀之濃度低於氯化鈉時，則通過氯化鈉之薄膜而拓散至其內部，同時 Cl 與 Ag 逐漸反應生成 AgCl ，於是在岩塩之周圍乃形成氯化銀之皮殼。除此之外，在重晶石之表面，亦可生成石英之沉澱。此二者之間，雖無化學成分類似之關係，但在表面上却可生成相同之皮殼。此種結晶因表面掩蔽而生成皮殼狀之假晶，特稱之為包晶假晶 (Perimorph) 或被覆假晶 (Incrustation pseudomorph)。至形成被覆假晶核心之原礦物，若溶解流失，而僅殘留其皮殼時，則稱之為脫殼 (Negative cast)。

在脫殼之內部，若再沉澱其他礦物成分，即由充填作用而形成假晶時，特稱之曰充填假晶 (Pleromorph)。至其皮殼之成分與內部之充填物，有時相同，亦有時各異。

驟視之，假晶雖具有結晶之形態，但非一個體，而係粒狀集合體所成者。此種粒狀排列或纖維狀之集合，可於破裂之面部見之。若將其薄片置於顯微鏡下觀察時，則粒狀或纖維狀之集合體，均清晰可見。又因某種礦物常以固定之假晶出現，故在鑑定時當可據以判斷，如呈黃鐵礦結晶形態之褐色礦物，一見即知其為褐鐵礦也。

1-12 晶帶

(1)晶帶之意義：在晶體中由平行稜所挾成之晶面，皆屬於同一晶帶，故晶帶者，即平行稜之方向也。在與稜平行之方向上而通過結晶體之中心者，曰晶帶軸 (Zone-axis)。同屬於一晶帶之晶面，曰同帶面 (Tautozonal faces)。將晶面平行移動時，其本質不變，故同帶面在平行狀態下移動，仍為共據一直線之晶面。此各晶面共據直線之方向，即晶帶之方向。通常晶體上之晶面為數甚多，而同一晶帶之面亦復不

少。以同帶面整理繁雜晶面時，可得有系統之歸納，特稱為晶帶定律。

設二晶面之指數為 (h_1, k_1, l_1) 及 (h_2, k_2, l_2) 時（若為六方晶系，則將第四指數省却，而仍以三指數為之），則其方程式為



$$\frac{h_1 x}{a} + \frac{k_1 y}{b} + \frac{l_1 z}{c} = 1 \quad \frac{h_2 x}{a} + \frac{k_2 y}{b} + \frac{l_2 z}{c} = 1 \quad \text{第 272 圖 同帶面}$$

至二面之交線，即其所屬之晶帶。此直線之方程式為

$$\frac{X}{k_1 l_2 - k_2 l_1} = \frac{Y}{l_1 h_2 - l_2 h_1} = \frac{Z}{h_1 k_2 - h_2 k_1}$$

(2) 晶帶指數：分母以晶帶指數 (Indices of zone) 表示時，其計算法如下：

$$\begin{array}{c|ccc|c} h_1 & k_1 & l_1 & h_1 & k_1 & l_1 \\ & \times & \times & \times & \times & \times \\ h_2 & k_2 & l_2 & h_2 & k_2 & l_2 \\ \hline & [u & v & w] & & \end{array}$$

即將 (h_1, k_1, l_1) 及 (h_2, k_2, l_2) 重寫二次，兩側之指數除外，並將中間四指數之對角方向者相乘，兩積相減遂得晶帶指數 u 、 v 及 w ，若將之以 $[u \ v \ w]$ 表示時，則稱之為晶帶記號 (Symbol of zone)。如二晶面指數為 (113) 及 $(\bar{1}\bar{2}1)$ 時，其所屬晶帶指數則以下式求之。

$$\begin{array}{c|ccc|c} 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & \bar{2} & 1 & 1 & \bar{2} & 1 \\ \hline & 7 & 2 & \bar{3} & & \end{array}$$

在六方晶系中，以 a_1 、 a_2 及 c 三晶軸所算出之晶帶指數為三，故仍以 $[u \ v \ w]$ 表示之。但亦有用 $[u \ v \ u+\bar{v} \ w]$ 之四晶帶指數者，惟不普遍且多認其為錯誤耳。

又晶帶指數係整數之比，故在表示上應力求簡單，如 (422) 之應書為 (211) 者是也。

至晶面之方程式既如上述，如一晶面同時屬於二晶帶時，則由晶

帶指數可以算出品面指數。其所用之方法，與上述者完全相同。即

$$\begin{array}{c|ccc|c} u_1 & v_1 & w_1 & u_1 & v_1 & w_1 \\ & \times & \times & \times & \times & \times \\ u_2 & v_2 & w_2 & u_2 & v_2 & w_2 \\ \hline & h & k & l & & \end{array}$$

在六方晶系中，其晶面指數以 $(h k \overline{h+k} l)$ 表示之。

上述之晶面方程式與晶帶方向之直線方程式，必須合於下列條件

$$h_1 u + k_1 v + l_1 w = 0$$

此即所謂之晶帶方程式 (Zonal equation)，其功用可測定某一晶面是否屬於某一晶帶。如晶面之指數為 $(10\overline{2})$ ，晶帶之指數為 $(2\overline{4}1)$ ，則

$$(1 \times 2) + (0 \times \overline{4}) + (\overline{2} \times 1) = 2 + 0 - 2 = 0$$

故 $(10\overline{2})$ 之晶面屬於 $(2\overline{4}1)$ 之晶帶。

在六方晶系中，其晶軸以 a_1, a_2, c 表示，而晶帶指數則以 $[uvw]$ 表示之。此時以晶軸之向量乘以晶帶指數各項之和為

$$r = ua_1 + va_2 + wa_3 + wc$$

若僅取 a_1, a_2 及 c 三軸，且以 (mnp) 為晶帶指數時，則得

$$r = ma_1 + na_2 + pc$$

因 $a_1 + a_2 + a_3 = 0$ (三水平軸向量之和)

故 $r = (u-w)a_1 + (v-w)a_2 + wc = ma_1 + ua_2 + pc$

即 $u-w = m, v-w = n, w = p$

今將與 a_1, a_2 及 c 三軸相截之面定為 (hkl) ，並將其晶帶定為 (mnp) 時，則：

$$\text{即 } hu + kv + (h+k)w + lw = 0$$

$$\text{如 } h+k+i=0$$

$$\text{則 } hu + kv + i\omega + lw = 0$$

亦即決定二晶面 $(h_1 k_1 i_1 l_1)$ 及 $(h_2 k_2 i_2 l_2)$ 所屬之晶帶為 $[uvw]$ 時，則：

$$\begin{cases} h_1 u + k_1 v + i_1 \omega + l_1 w = 0 \\ h_2 u + k_2 v + i_2 \omega + l_2 w = 0 \\ u + v + \omega = 0 \end{cases}$$

又決定同屬於二晶帶 (u, v, ω, w_1) 及 (u, v, ω, w_2) 之晶面為 $(hkil)$ 時，則

$$\begin{cases} u_1 h + v_1 k + \omega_1 i + w_1 l = 0 \\ u_2 h + v_2 k + \omega_2 i + w_2 l = 0 \\ h + k + i = 0 \end{cases}$$

根據上式則

$$(h_1 - i_1)u + (k_1 - i_1)v + l_1 w = 0$$

$$(u_1 - \omega_1)h + (v_1 - \omega_1)k + w_1 l = 0$$

$$(h_2 - i_2)u + (k_2 - i_2)v + l_2 w = 0$$

$$(u_2 - \omega_2)h + (v_2 - \omega_2)k + w_2 l = 0$$

例如決定 $(11\bar{2}2)$ 及 $(\bar{2}112)$ 二面所屬之晶帶時，

因 $h_1 - i_1 = 3$ ， $k_1 - i_1 = 3$ ， $l_1 = 2$ ，即 (332) 。

$h_2 - i_2 = 3$ ， $k_2 - i_2 = 3$ ， $l_2 = 2$ ，即 $(\bar{3}02)$ 。

$$\begin{array}{c|ccc|c} \text{故} & 3 & 3 & 2 & 2 \\ \hline & \bar{3} & 0 & 2 & 2 \\ \hline & 6 & \bar{12} & 9 & \\ & 2 & \bar{4} & 3 & \end{array}$$

即晶帶指數為 $(2\bar{4}23)$ 。

又如決定屬於 $(12\bar{3}1)$ 及 $(\bar{3}211)$ 二晶帶之晶面時，

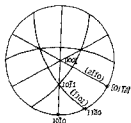
因 $u_1 - \omega_1 = 4$ ， $v_1 - \omega_1 = 5$ ， $w_1 = 1$ ，即 (451) 。

$u_2 - \omega_2 = 4$ ， $v_2 - \omega_2 = 1$ ， $w_2 = 1$ ，即 $(\bar{4}11)$ 。

$$\begin{array}{c|ccc|c} \text{故} & 4 & 5 & 1 & 1 \\ \hline & \bar{4} & 1 & 1 & 1 \\ \hline & 4 & 8 & 24 & \\ & 1 & \bar{2} & 6 & \end{array}$$

即所求之 $(hki l)$ 晶面為 $(1\bar{2}16)$ 。

如圖所示，二晶面 $(11\bar{2}0)$ 及 $(10\bar{1}1)$ 所屬之晶帶為 $(\bar{1}101)$ 。二晶面 (0601) 及 $(01\bar{1}2)$ 所屬之晶帶則為 $(2\bar{1}\bar{1}0)$ 。

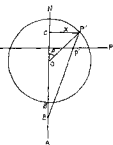


第 273 圖晶面與晶帶之位置

1-13 結晶之投影

(1) 投影之意義：結晶面之大小、形狀及位置，均具有特殊性。茲為易於明瞭計，乃以晶面垂直線與某面相交之點，統一表示所有之面。即由原點起以等長切取其垂直線，而以其終點表示晶面之位置者，稱為結晶之投影 (Projection of crystal)。

如圖所示：為 r 半徑之圓球斷面，北極 N 及投影點 P' 均位於球面之上。其通過 N 及球心之直線為 NA ，直線上任意一點為 E ，垂直於直線之平面為 P 。連結 EP' ，其與 P 面之交點為 p' ，則 p' 為 E 在 P 面上之投影點。而稱 E 為視點， P 為投影面。此乃將球面上投影 P' 變為二次元之一般方式，通常因 E 點及 P 面之位置不同，故可得各種不同之投影方式。



第 274 圖投影圖解

如 E 位於無限遠，而 P' 在橫切 NA 之平面上，則稱為直視投影。此時 N 與 P' 間之直線距離為 x ， $\angle NOP' = \rho$ ，則 $x = r \sin \rho$ 。又使 P 為橫切 NA 之平面，且令視點之位置 $OE = 1.7r$ 時，曰等角投影。若以 E 為球之中心時，則曰球心投影，即 $x = r \tan \rho$ 也。

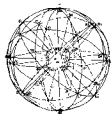
在立體投影中，以通過 O 點而與 NA 垂直之面，曰投影面。同時使 E 位於 N 之反對點 S 時，則稱 N 為北極， S 為南極， P 為赤道面。

且北半球上之球面投影，均發自兩極S，而南半球上之球面投影，則均為自北極N所投射者。

(2) 投影之種類：以投影圖之表示方法分之，可得下列四種：

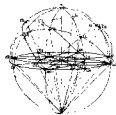
(A) 水平投影 (Horizontal projection)：即由結晶體之上方觀察所得之圖形，普通稱之為頂圖 (Top figure)。其晶面之符號以數字表示之，而其順序則與時針之方向相反。其目的為表示各晶面之對稱及各晶面間之關係者。

(B) 球面投影 (Spherical projection)：即將晶體之晶面投射於球面上者也。如將結晶體置於圓球之中，使結晶體之中心與球心一致，再由球心向晶面引垂線，並延長之，達於球面，則其與球面之交點稱之為投影點 (Pole)。如此其屬於同一晶帶之面，均在同一大圓之上。而同時屬於二晶帶之面，必在兩大圓之交點上。又在球面投影點間所夾成之角，與實際晶體上二晶面間之面角，恰互成補角。故此種投影法之目的，除與水平投影相同者外，尤能表示面角與晶帶上之各種關係。



第 275 圖 球面投影

(C) 平射投影 (Stereographic projection)：此乃由球面投影所導出者，其投影面普通為赤道面，即將球面投影法所得之投影點與南極S相連，此連結線與赤道面之交點，即為平射投影點。故由平面上即可獲得全部晶面。此法之使用，通常限於北半球，其投影點通常以X表示之，若用於南半球時，其投影點則以⊗表示之。



第 276 圖 平射投影
與球面投影之關係

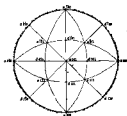
如第 276 圖所示，為球面投影與平射投影之關係，而第 277 圖則為結晶面之平射投影表示法。

觀上圖可知，在球面投影圖上呈圓弧時，在平射投影圖上亦呈圓弧。凡與縱軸平行之結晶面，在球面投影圖上均位於赤道，而在平射投影圖上，亦處於相同之位置。

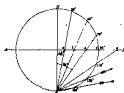
設晶體為等軸、正方、六方或斜方晶系時，其與縱軸垂直之面，則必位於平射投影圖之中心。又球面投影圖上之子午線，在平射投影圖上形成一直線；而其他大圓，則皆成為圓弧。

至各結晶面之極間角度，在平射投影圖中雖清晰可見，但各對應弧度之線距離，自投影圖之中心起，漸至其圓周之方向則逐次增加。如第 278 圖所示，為球面投影之垂直斷面圖。設 AB 為平射投影圖上之赤道面，其在球面上距 N 極 20° 之平射投影點為 a，距 N 極 45° 之平射投影點為 b，如欲知各點之角度，則可以平射投影分度器(Stereographic protractor)測定之。且投影點至中心之線距離與其角度之關係，亦可由圖中查出。即以投影圖之圓半徑為單位時，其自中心至某點間之距離，等於其半角之正切。如中心至 a 點間之距離，等於 10° 之正切，中心至 c 點間之距離，等於 35° 之正切。

(D)球心投影(Gnomonic projection)：此亦由球面投影所導出者，即在球面投影之北極 N 做一切面，連結球心與球面投影點，並延長之



第 277 圖平射投影



第 278 圖晶面之極間角



第 279 圖平射投影分度器

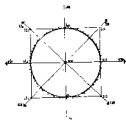
使與水平切面相文，其交點即為球心投影點。由此法所得之投影圖，與上述三種稍有不同。即水平晶面之投影點位於中心，而鉛直晶面及斜度大於 45° 之晶面，其投影點皆不能納於圖內，只可以箭頭表示方向而已。如第 280 圖所示，為球面投影與球心投影之關係。其投影面上之投影點則為等軸晶系之六面體、八面體及十二面體之各晶面。第 281 圖所示者，則為球心投影之描繪方法。其球面投影圖中之大圓，在球心投影圖中成爲一直線；且屬於同一晶帶各面之投影點，皆位於同一直線之上。又六面體上部之 (001) 面，不論為球心投影或平射投影，雖均位於投影圖之中心，但與縱軸平行之 (100) 及 (010) 等面，則位於距中心無限遠之距離，故以箭頭表示之。

自投影中心至某點間之距離，與角距離之關係，亦頗簡單。如圖所示，為球心投影之垂直斷面圖， PP' 為球心投影之投影面。設以半徑為單位，則 Nc' 、 Nb' 及 Nc'' 各等於 20° 、 35° 及 45° 之正切。即在球心投影圖中，自中心至某點間之距離，等於以圓半徑為單位之角之正切值。

(3) 伍爾夫網 (Wulff net) 之應用：在實際上繪製結晶面之投影時，多憑線網以昭準確，特稱之為伍爾夫網。在線網之上，有以 AB 為直



第 280 圖球心投影與球面投影之關係



第 281 圖球心投影



第 282 圖球心投影斷面圖

徑之大圓 Ab, B 及 Ab, B 等，亦有與 AB 垂直之小圓 $c, a, d,$ 及 $c, a, d,$ 等。在二相鄰網線間之角度為測定投影點間之單位，其數值通常為 2° 。

當繪製立體投影時，常以透明紙鋪於線網之上，根據線網所示之度數，將投影點繪於透明紙上。蓋以仔細觀察伍爾夫

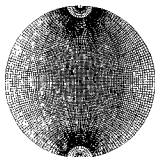


第 283 圖 伍爾夫網之繪製

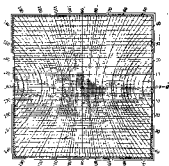
網時，在其基圓之網線上，立可現出實際之角度。其網線之間隙，在基圓上雖然一定，但在基圓之內部，則顯有疏密之差，此乃投影圖上之當然現象，故不足為奇也。又置透明紙於線網之上時，應先描繪與基圓相等之大圓，同時使圓心與線網中心重合，且挿以細針，則覆於上方之透明紙自可任意轉動矣。

至所用之線網型式，亦因投影之種類而各有不同。如第 285 圖所示，為直視投影（乃將球面投影上各投影點垂直投射於切面上者）所用之線網，普通將切

斷置於球之北極 N ，而使切面垂直於 ON ，則子午大圓為由中心發出之直線，其與切面垂直之小圓亦為直線，至其他大圓及小圓變形成橢



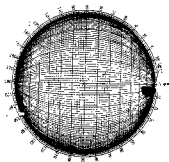
第 284 圖 伍爾夫網



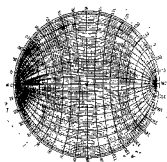
第 285 圖 直視投影線網

圓矣。

又第286圖所示，網線為近似雙曲線之橢圓，乃專供平射投影所



第286圖平射投影線網



第287圖圓心投影線網

用者。至第287圖所示，為表示一群大圓及小圓之線網，特稱之為希爾敦線網 (Hilton net)。其橫平行線表示一群大圓，而雙曲線則係垂直投影面之小圓。此種線網乃供球心投影繪製之用，蓋以 ρ 角過大，則投影點不能納於圖中也。

1-14 結晶之計算

(1)結晶常數：在結晶形態上，稱其軸角、軸率、面角及面指數等之數值為結晶常數。常數之計算手續，在三斜晶系之晶體中，較為複雜。如晶體之對稱度增高，其手續乃趨於簡單。茲按各不同晶系分別述之於下：

(A)軸角：如圖所示，為三斜晶系結晶之球面投影圖。乃將 a 軸面(100)及 b 軸面(010)置於基圓上者，普通置 b 軸面於右，而置 a 軸面於前。在三斜晶系中，通常因前方及右方多向下垂，且 $a \wedge b < 90^\circ$ ，故 c 軸面(001)乃進入第一象限之中矣。



第288圖三斜晶系晶體之球面投影

在投影圖中之軸角，以球面三角形 abc 之外角 α 、 β 、 γ 表示之，因 α 為 B_1 及 C_1 間之球面距離，故其關係如下：

$$\angle bac + \alpha = 180^\circ$$

$$\angle cba + \beta = 180^\circ$$

$$\angle acb + \gamma = 180^\circ$$

在單斜晶系中，因 $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ， $\widehat{ab} = 90^\circ$ ，故 b 與 B_1 一致。在斜方晶系中， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，則 a 、 b 、 c 各與 A_1 、 B_1 、 C_1 一致。

今以 α 、 β 、 γ 表示軸角，以 $A \wedge B$ 表示 A 、 B 二面之面角，以 $(A : B)$ 表示包括 A 、 B 二面之晶帶。同時 $(010) \wedge (001) = a$ ， $(100) \wedge (010) = c$ ， $(100) \wedge (001) = b$ ，且 $2S = a + b + c$ ，則其關係如下：

$$\cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{\sin(s-b) \cdot \sin(s-c)}{\sin b \cdot \sin c}$$

$$\cos^2 \frac{\beta}{2} = \frac{\sin(s-a) \cdot \sin(s-c)}{\sin a \cdot \sin c}$$

$$\cos^2 \frac{\gamma}{2} = \frac{\sin(s-a) \cdot \sin(s-b)}{\sin a \cdot \sin b}$$

(B) 軸率及面指數：如圖所示，為三斜晶各軸面與三晶軸之交會情形。如將三軸與晶面交會之點連結，則得：

$$\angle OC_1A_1 = \mu, \quad \angle OA_1C_1 = \nu$$

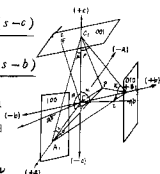
$$\angle OA_1B_1 = \sigma, \quad \angle OB_1A_1 = \tau$$

$$\angle OB_1C_1 = \pi, \quad \angle OC_1B_1 = \rho$$

在具有 $P(111)$ ， $A(100)$ ， $B(010)$ ， $C(001)$ ， $X(hkl)$ 之晶體中，則：

$$(P:B) \wedge (A:B) = \mu (P:C) \wedge (A:C) = \tau (X:C) \wedge (A:C) = \tau x (X:C) \wedge (B:C) = \sigma x$$

$$(P:C) \wedge (B:C) = \sigma (P:A) \wedge (A:C) = \pi (X:A) \wedge (A:C) = \pi x (X:A) \wedge (A:B) = \rho x$$



第 289 圖三斜晶系軸面間之剖視

$$[P:A] \wedge (A:B) = \rho(P:B) \wedge (B:C) = \nu(X:B) \wedge (B:C) = \nu x(X:B) \wedge (A:B) = \mu x$$

在 P (111) 之晶體中，其軸率 $a:b:c$ 則以下式計算之。

$$\frac{a}{b} = a = \frac{\sin \tau}{\sin(\tau - \rho)} \quad \text{當} \begin{cases} \alpha + \pi + \rho = \beta + \nu + \mu = \gamma + \tau + \sigma = 180^\circ \\ \alpha + \alpha' = \beta + \beta' = \gamma + \gamma' = 180^\circ \end{cases}$$

$$\frac{c}{b} = c = \frac{\sin \pi}{\sin(\alpha' - \pi)}$$

$$\frac{c}{a} = \frac{\sin \nu}{\sin(\beta' - \nu)}$$

在任意面 (hkl) 之晶體中時，則

$$\frac{\sin \tau_x}{\sin \sigma_x} = \frac{k}{h} a \quad \text{當} \begin{cases} \alpha + \pi_x + \rho_x = \beta + \nu_x + \mu_x = \gamma + \tau_x + \sigma_x = 180^\circ \\ \alpha + \alpha' = \beta + \beta' = \gamma + \gamma' = 180^\circ \end{cases}$$

$$\frac{\sin \pi_x}{\sin \rho_x} = \frac{k}{l} c$$

$$\frac{\sin \nu_x}{\sin \mu_x} = \frac{h}{l} \cdot \frac{c}{a}$$

在單斜晶系中，因： $(001) \wedge (100) = \beta$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ$$

$$\tau + \sigma = \pi + \rho = 90^\circ$$

$$\begin{cases} \frac{a}{b} = a = \tan \tau \\ \frac{c}{b} = c = \tan \pi \end{cases}$$

若在任意面 (hkl) 之晶體中時，則：

$$\tan \tau_x = \frac{k}{h} \cdot a$$

$$\tan \pi_x = \frac{k}{l} \cdot c$$

在斜方晶系中，因： $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

$$\tau + \sigma = \pi + \rho = \nu + \mu = 90^\circ$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{b} = a = \tan \tau \\ \frac{c}{b} = c = \tan \pi \\ \frac{c}{a} = \tan \nu \end{array} \right.$$

若在任意面 (hkl) 之結晶體中時，則：

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \tau_x = \frac{k}{h} \cdot a \\ \tan \pi_x = \frac{k}{l} \cdot c \\ \tan \nu_x = \frac{h}{l} \cdot \frac{c}{a} \end{array} \right.$$

在正方晶系中，因： $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

$$\tau + \sigma = \pi + \rho = \nu + \mu = 90^\circ$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{c}{b} = c = \tan \pi = \cot \rho \\ \frac{c}{a} = c = \tan \nu = \cot \mu \end{array} \right.$$

在 $P(111)$ 面之晶體中時，則 $\tau = \sigma = \pi = \rho = \nu = \mu = 45^\circ$

而任意面 (hkl) 之晶體中時，則：

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \pi_x = \frac{k}{l} \cdot c \\ \tan \nu_x = \frac{h}{l} \cdot c \end{array} \right.$$

在六方晶系中，如： $\varphi_1 = (0001) \wedge (11\bar{2}2)$ 時，則：

$$\frac{c}{a} = c = \tan \varphi_1$$

如： $\varphi_1 = (11\bar{2}1) \wedge (11\bar{2}0)$ 時，則：

$$\frac{2c}{a} = 2c = \frac{1}{\tan \varphi_1}$$

如： $\varphi_1 = (0001) \wedge (10\bar{1}1)$ 時，則：

$$\frac{c}{\sqrt{3}a} = \frac{c}{\sqrt{3}} = \tan \varphi_1$$

$$\text{或 } \frac{c}{2a} = \frac{c'}{2} = \cos 30^\circ \cdot \tan \varphi_1$$

如： $\varphi_1 = (10\bar{1}1) \wedge (10\bar{1}0)$ 時，則：

$$\frac{c}{\sqrt{3}a} = \cot \varphi_1$$

$$\text{或 } \frac{c}{a} = \frac{\cos 30^\circ}{\tan \varphi_1}$$

(C) 面角：面角之計算，仍以三斜晶系之晶體最為複雜，而以等軸晶系之晶體最為簡單。設以 α' 、 β' 、 r' 為 α 、 β 、 r 之補角，以 a 、 b 、 c 為軸率，則 $(hkl) \wedge (pqr) = \nu$ 之計算，以下列公式為之：

(a) 在三斜晶系中：

$$\cos \nu = \frac{hp \frac{\sin^2 \alpha}{a^2 \sin^2 \beta} + kq \frac{l}{b^2} + lr \frac{\sin^2 r}{c^2 \sin^2 \beta} - (kr + ql) \cdot \cos \alpha' \frac{\sin r}{bc \sin \beta} - (hr + lp) \cdot \cos \beta' \frac{\sin \alpha \cdot \sin r}{ac \sin^2 \beta}}{\sqrt{\left[h^2 \frac{\sin^2 \alpha}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{k^2}{b^2} + l^2 \frac{\sin^2 r}{c^2 \sin^2 \beta} - 2kl \cos \alpha' \frac{\sin r}{bc \sin \beta} - 2hl \cos \beta' \frac{\sin \alpha \cdot \sin r}{ac \sin^2 \beta} - 2hk \frac{\sin \alpha}{ab \sin \beta} \right] \times \left\{ p^2 \frac{\sin^2 \alpha}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{q^2}{b^2} + r^2 \frac{\sin^2 r}{c^2 \sin^2 \beta} - 2qr \cos \alpha' \frac{\sin r}{bc \sin \beta} - 2pr \cos \beta' \frac{\sin \alpha \cdot \sin r}{ac \sin^2 \beta} - 2pq \frac{\sin \alpha}{ab \sin \beta} \right\}}$$

設以 $b = 1$, $\lambda^2 = \sin^2 \alpha / c^2 \sin^2 \beta$, $\nu^2 = \sin^2 \gamma / c^2 \sin^2 \beta$, $L = -\nu \cos \alpha$,
 $M = -\lambda \nu \cos \beta$, $N = -\lambda \cos \gamma$ 時, 代入上式則:

$$\cos V = \frac{\lambda^2 h p + k q + \nu^2 l r + L(k r + q l) + M(h r + l p) + N(p k + q h)}{\sqrt{\{h^2 \lambda^2 + k^2 + \nu^2 l^2 + 2Lkl + 2Mhl + 2Nhk\} \times \{ \lambda^2 p^2 + q^2 + \nu^2 r^2 + 2Lar + 2Mpr + 2Npq \}}}$$

(b) 在單斜晶系中, 則:

$$\cos V = \frac{\lambda^2 h p + k q + \nu^2 l r + M(h r + l p)}{\sqrt{(\lambda^2 h^2 + k^2 + \nu^2 l^2 + 2Mhl)(\lambda^2 p^2 + q^2 + \nu^2 r^2 + 2Mpr)}}$$

(c) 在斜方晶系中, 則:

$$\cos V = \frac{\lambda^2 h p + k q + \nu^2 l r}{\sqrt{(\lambda^2 h^2 + k^2 + \nu^2 l^2)(\lambda^2 p^2 + q^2 + \nu^2 r^2)}}$$

(d) 在正方晶系中, 則:

$$\cos V = \frac{h p + k q + \nu^2 l r}{\sqrt{(h^2 + k^2 + \nu^2 l^2)(p^2 + q^2 + \nu^2 r^2)}}$$

(e) 在等軸晶系中, 則:

$$\cos V = \frac{h p + k q + l r}{\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)(p^2 + q^2 + r^2)}}$$

(f) 在六方晶系中, 因面指數不同, 故 $(hki) \wedge (pqrs) = \nu$, 其公式為:

$$\cos V = \frac{h p + k q + i r + A l s}{\sqrt{(h^2 + k^2 + i^2 + A l^2)(p^2 + q^2 + r^2 + A s^2)}}$$

在上式之中, $A = 3 / (2c^2)$ 。

(D) 結晶面之指數與其方位 (φ, ρ) 之關係: 用複圓反射測角器測得之 (φ, β) 值, 與面指數 (hkl) 之間, 有下列關係:

(a) 在三斜晶系中: 將結晶面 (hkl) 之方位, 在極座標中以 (ψ, ρ) 表示時, 其公式如下:

$$\cos \rho = \frac{lab \sqrt{1 + 2 \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma}}{F}$$

$$\cos \varphi = \frac{gabc}{F \sin \rho \cdot \sin \beta}$$

在上式之中，其 F 、 g 之值，可以下式計算之。

$$F^2 = h^2 b^2 c^2 \sin^2 \alpha + k^2 c^2 a^2 \sin^2 \beta + l^2 a^2 b^2 \sin^2 \gamma - 2kl a^2 bc (\cos \alpha - \cos \beta \cdot \cos \gamma) - 2lk ab^2 c (\cos \beta - \cos \gamma \cos \alpha) - 2hk abc^2 (\cos \gamma - \cos \alpha \cos \beta)$$

$$g = \frac{k}{b} \sin^2 \beta - \frac{h}{a} (\cos \gamma - \cos \alpha \cdot \cos \beta) - \frac{l}{c} (\cos \alpha - \cos \beta \cdot \cos \gamma)$$

在 (010) 方位時， $\rho = 90^\circ$ ， $\varphi = 0^\circ$ ，(100) 方位時， $\rho = 90^\circ$ ， $\varphi = 90^\circ$

(b) 在單斜晶系中，則：

$$\cos \rho = \frac{lab \sin \beta}{F}, \quad \cos \varphi = \frac{kac \sin \beta}{F \sin \rho}$$

$$F^2 = h^2 b^2 c^2 + k^2 c^2 a^2 \sin^2 \beta + l^2 a^2 b^2 - 2lhab^2 c \cos \beta$$

(c) 在斜方晶系中，則：

$$\cos \rho = \frac{lab}{\sqrt{h^2 b^2 c^2 + k^2 c^2 a^2 + l^2 a^2 b^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{ka}{\sqrt{h^2 b^2 + k^2 a^2}} \text{ 或}$$

$$\tan \rho = \frac{c\sqrt{h^2 + k^2 a^2}}{la}, \quad \tan \varphi = \frac{h}{ka}$$

(d) 在正方晶系中，則：

$$\cos \rho = \frac{l}{\sqrt{(h^2 + k^2) c^2 + l^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{k}{\sqrt{h^2 + k^2}} \text{ 或}$$

$$\tan \rho = \frac{c\sqrt{h^2 + k^2}}{l}, \quad \tan \varphi = \frac{h}{k}$$

(e) 在六方晶系中，置於 $(hki l)$ 方位時，則：

$$\cos \rho = \frac{l}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + hk + k^2) c^2 + l^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{\sqrt{3} k}{2\sqrt{h^2 + hk + k^2}}$$

(f) 在等軸晶系中，則：

$$\cos \rho = \frac{l}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{k}{\sqrt{h^2+k^2}} \quad \text{或}$$

$$\tan \rho = \frac{\sqrt{h^2+k^2}}{l}, \quad \tan \varphi = \frac{h}{k}$$

(2) 計算方法：結晶常數之公式，既如上述，至其實際計算時，則應按下列方法爲之。

(A) 面角：表示由 (100)、(010) 及 (001) 三面所成球面三角形外角之方法，已如前述。因外角應由二晶帶所成之角尋求，故以立體投影圖之作圖法爲之。

(B) 軸率：用立體投影圖上之作圖法，可以求得軸率。如圖所示，由原點 O 向單位面 (111) 下引垂線，則得垂足 P

及 $\angle C_1OP$ 、 $\angle B_1OP$ 、 $\angle A_1OP$ 等三角。

$$\text{因} \quad \cos \angle A_1OP = OP/A_1O$$

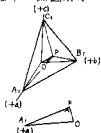
$$\cos \angle B_1OP = OP/B_1O$$

$$\cos \angle C_1OP = OP/C_1O$$

故軸率： $A_1O : B_1O : C_1O = a : b : c =$

$$= \frac{1}{\cos \angle A_1OP} : \frac{1}{\cos \angle B_1OP} : \frac{1}{\cos \angle C_1OP}$$

第 290 圖
軸率之計算



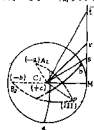
上述三角之數值，可由立體投影圖上讀出。但在三斜晶系中，讀取困難時，則以 P 與 a 軸負向之投影點 PΛ(-a) 或 P 與 b 軸負向之投影點 PΛ(-b) 間之角度爲之。此時在立體投影圖之赤道面上，取一點 M，並於 M 引直線與圓相切，且使

$$\angle MOS = 180^\circ - (\rho \wedge (-a))$$

$$\angle MOt = 180^\circ - (\rho \wedge (-b))$$

$$\angle MOR = P\Lambda C_1$$

則： $Os : Ot : Or = a : b : c$



第 291 圖 軸率之計算

(C) 面指數：如晶面之方位爲 (ρ, φ) ，則由 $\tan \varphi = h/ka$ 可得 h/k

，至 h/k 之計算，可由 $\tan \rho = c\sqrt{h^2+k^2}a^2/la$ 先算出 l 值，再求 $h:k:l$ ，於 (hkl) 遂可固之決定矣。

例：在白鉛礦 ($a:b:c = 0.60997:1:0.72300$) 完美之反射面上，取 $(\rho \cdot \varphi)$ 之數值五次而平均之，得 $\rho = 64^\circ 45'$ ， $\varphi = 28^\circ 50'$ ，則：

$$\tan 28^\circ 50' = h/0.60997k, \quad h/k = 0.3358 \approx 0.3333 \dots = \frac{1}{3}$$

$$\tan 64^\circ 45' = 0.723\sqrt{1+9 \times (0.60997)^2} / 0.60997l,$$

$$l = 1.335 = 1.333 \dots = \frac{4}{3}$$

故面指數 ϵ 爲 (394) 。

第二章 結晶構造

2-1 空間格子

(1)結晶構造之意義：由於結晶形態之研究，乃對各種結晶之外表性質，獲得充分之瞭解。同時由於探討其生成之原因，更連帶產生一種所謂結晶體係由極小之單位按三次元之重疊集合而成之觀念。實際上此種觀念，還在古希臘時代即已萌芽。厥後經郝伊進一步之闡釋，乃有分子按正規之排列而產生結晶之說。如由結晶形態之相對方面言之，恰與結晶之骨幹相當，故稱之曰結晶構造。但當時所指之分子及原子，除具有極小單位之特性外，對其他詳細性質，則毫無所悉。如郝伊之弟子布拉維(Bravais 1811-1863)，物理學家索克(I. Schoncke 1842-1897)、有近世礦物學之父美稱的格洛特(P. H. Von Groth 1843-1927)、舜夫利斯(A. Schönflies)，蘇聯之費得洛夫(E. S. Fedrov 1853-1919)及英國之巴斐(W. Barlow)等均認原子係幾何學上之一點，與空間規則集合之三次元點的數學論據密切配合，而將結晶構造之基本意義，停滯於數學之領域。

按原子之真實性，首推其大小。而結晶構造之真義除由數學上之模型代表其原子之位置外，並由三次元點之含義，暗示原子之排列狀態(包括不同之位置及不同之大小)。考結晶之根本性質，原係表裡一致，互相牽連。諸如外表形態上之晶面、面角、軸率，對稱要素等莫不與內部原子排列之位置、大小等緊密關聯。是以結晶構造為表示結晶根本特性者，或不致有所遺漏也。

(2)正規之結晶構造：結晶中之原子均呈正規之排列。即在同一方向皆按一定間隔排列之謂也。如圖所示，在OA方向之原子間隙為 a ，OB方向之原子間隙為 b ，而OC方向之原子間隙為 c 。普通所稱之原來方向，係指與OA平行之方向而言。如由OB方向上之 B_1 、 B_2 、 B_3 等原

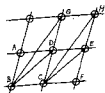
子所形成之 B_1A' 、 B_2A'' 、 B_3A''' 等，均與 OA 之方向相同，故其原子排列仍保持 a 之間隙。而正規排列之原子面 AOB ，遂於是形成矣。又在 OC 方向上之原子 C_1 、 C_2 、 C_3 等所形成之 C_1A' 、 C_2A'' 、 C_3A''' ，其方向亦與 OA 平行，故原子亦按 a 之間隙排列，因而形成原子面 AOC 。至 BOC 原子面之產生，亦復如是。且在其面上之原子，若處於與 OA 平行之方向時，在排列上更不脫 a 之間隙。如此乃形成三次元之正規排列，即所謂之結晶構造也。

以上所述，係指同種原子相互集合而言。至二種以上之原子結時，則如第 293 圖所示，為 A 、 B 、 C 三種不同原子之排列狀態。在相同方向上不論原子之種類如何，皆保持相同之間隙。

即在 AA'' 方向，三種原子均按 a 間隙排列；而在 AA' 方向，則按 b 間隙排列。故三種原子在結合上之相對位置不變，即某一方向之原子間隙永保持一定。此種原子排列方式，乃結晶構造中之根本法則也。

在原子本身方面，目下所注意者均側重於其大小及形狀，至其內部，在本質上咸認為完全相同。即原子形態為幾何學上之理想球形，迨為目前所公認者。

(3) 單位胞 (Unit cell)：正規之結晶構造，可視為無數平行六面體重疊而或者。如圖所示，為接近原點之平行六面體，在其上下、左右及前後均呈重疊之正規構造。至二種以上原子之集合體中，雖係兩個以上大小相同之平行六面體組合者，但其上下、左右及前後仍為互相重疊之構造。當吾人解釋結晶之構造時，所選用之平行六面體，並不以一具為限。若以二次元之圖形說明時，則可選用之平行六面體，計有 $ABCD$ 、 $DBCE$ 、 $BGHC$ 等。此種方式，並不具結晶學上之基本意義，但以三稜代表結晶軸之方向，而以三邊之長代表該方向之原子排列週期時，則可得一平行六面體，



第 294 圖 單位胞

特以單位胞稱之。單位胞在結晶之構造中，實含有特殊之意義，即具有構造根本意義之構造單位也。

單位胞既為一立體之構造單位，並能表示結晶之根本特性，故在研究結晶構造時，常使用之。

(4)構造與形態：結晶之形態與結晶之構造，在性質上本具有互為表裡之關聯性，如結晶面係由原子面形成，且結晶稜更與原子列相當。但二者在研究上所用之尺度，則完全不同。如以尺測定稜之長短，而以埃單位計量結晶之構造。同時結晶面亦非構造模型上之原子面，乃係一群平行之原子面拼合而成，在外觀上雖光滑平坦，但仍不能與幾何學上之平面相比擬。故實際上之結晶形態，乃無數之相同構造模型互相重疊集合之產物也。

在單位胞中，其三邊以結晶軸表示，其夾角以軸角表示之。故其三邊長度之比 $a_0 : b_0 : c_0$ ，亦即結晶體之軸率也。但在形態學上確定軸率時，應選用與晶軸相交之單位面，且所用之面更以特別發育為原則，否則難獲正確之結果。此時若能於晶軸方向之原子排列周期上著眼時，則正確之答案必將於目前出現矣。

(5)空間格子 (Space lattice)：在上述表示結晶構造根本性質之方式中，設為一種原子之集合體時，常以同一大小之球表示之。如有二種以上之原子時，則必係集合體之重疊者無疑。不論在任何情況下，凡其完全同格之原子，均屬正規之立體排列。此以原子周期所表示之構造，必呈一極有規則之格子狀排列，特稱之為空間格子。其格子點即原子所在之位置。在正規之結晶構造中，若係由二種以上原子集合形成之複雜結晶時，則以同一型式之數空間格子互相組合表示之，此即所謂之複格子 (Compound lattice)。

食鹽之結晶原為等軸晶系完面形之立方體，布拉哥父子亦認為其空間格子狀之原子排列必具有等軸晶系完面形之對稱要素。因一格子點為八個平行六面體所共有，故一格子點與一具六面體相當，此即上述之單位胞。在等軸晶系之單位胞中，各有一格子點者，曰單一空間

格子 (Simple space lattice)。在平行六面體中心有一格子點者曰體中心立方格子 (Body-centered cubic lattice)。又在面之中心含有一格子點者，則曰面中心立方格子 (Face-centered cubic lattice)。在上述之三種立方格子中，其 (100)、(110) 及 (111) 面間之距離，有相當密切之關係。即

$$\text{單一空間格子：} \quad \frac{1}{d(100)} : \frac{1}{d(110)} : \frac{1}{d(111)} = 1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}$$

$$\text{面中心立方格子：} \quad \frac{1}{d(100)} : \frac{1}{d(110)} : \frac{1}{d(111)} = 1 : \sqrt{2} : \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{體中心立方格子：} \quad \frac{1}{d(100)} : \frac{1}{d(110)} : \frac{1}{d(111)} = 1 : \frac{1}{\sqrt{2}} : \sqrt{3}$$



第295圖 單一空間格子

第296圖 體中心立方格子

第297圖 面中心立方格子

(註)： $d(100) = OB = a$

$d(110)$ BCFE 面

之間隔為 $OP = \frac{a}{\sqrt{2}}$

$d(111)$ ABC 面之間隔

為 $OQ = \frac{OG}{3} = \frac{a}{\sqrt{3}}$

$d(100) = OB = a$

$d(110) = OP \times 2 = a\sqrt{2}$

(因 BC 面無原子，故以 B'C' 充之。)

$d(111) = OQ = \frac{a}{\sqrt{3}}$

(ABC 面向下延長有原子。)

$d(100) = OB = a$

$d(110) = OP = \frac{a}{\sqrt{2}}$

$d(111) = OQ \times 2 = \frac{2a}{\sqrt{3}}$

(因 ABC 面無原子，故以 A'B'C' 面充之)

布拉哥父子用一定波長之 X 射線，投射於食鹽之 (100)、(110) 及 (111) 面，使之反射，並根據 X 線分光計之公式 $2d \sin \theta = n\lambda$ ，而計算

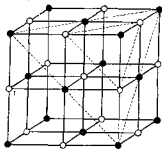
其數值。設 $n=1$ ，則於 (100) 中 $\theta=5^{\circ}9'$ ，(110) 中 $\theta=8^{\circ}25'$ ，(111) 中 $\theta=5^{\circ}1'$ ，由此則得 $2d(100)\sin 5^{\circ}9' = 2d(110)\sin 8^{\circ}25' = 2d(111)\sin 5^{\circ}1' = \lambda$ 。故

$$\frac{1}{d(100)} : \frac{1}{d(110)} : \frac{1}{d(111)} = \sin 5^{\circ}9' : \sin 8^{\circ}25' : \sin 5^{\circ}1' \\ = 0.196 : 0.276 : 0.170 = 1 : \sqrt{2} : \frac{\sqrt{3}}{2}$$

由上列之公式，可以判斷食鹽之空間格子為面中心立方格子。又當 $n=2, 3, 4, \dots$ 順次實驗時，則所得之結果為 $n=1, 2, 3$ 時，其由 (100) 與 (110) 面所反射之 X 射線漸次減弱，而由 (111) 面所反射者，恰好相反。即 $n=1$ 時雖弱，而 $n=2$ 時則強，且適為 $n=1$ 時之二倍。若以上述之 $\frac{1}{d(111)}$ 為 1 論之，則當 $n=2$ 時，其結果為：

$$\frac{1}{d(100)} : \frac{1}{d(110)} : \frac{1}{d(111)} = 1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}$$

故由上式可判定為單一空間格子。又可知 $n=3$ 時雖弱，但 $n=4$ 時則強。此種情形在彼等之想像中，乃係因原子排列面上之原子種類不同所以致之。即鈉之原子排列面與氯之原子排列面交互存在，因氯之原子量較鈉之原子量為大，故自氯原子上所反射之 X 射線，遠較鈉原子上所反射者為強。如圖所示，即為彼等所判定之食鹽



第 298 圖 岩鹽之空間格子

空間格子排列狀態。圖中之黑點代表氯原子，白點代表鈉原子，皆屬面中心立方格子。但將二者合併時，則又形成單一空間格子。又在 (100) 及 (110) 面上，其氯原子與鈉原子雖皆排列有序；而在 (111) 面上，則氯原子面與鈉原子面彼此交互。此種事實，當可由上法推定之。

(6) 布拉維之十四種空間格子：單位胞之三邊長代表結晶軸之方向，若其長度恰為結晶軸上之原子排列周期時，則在結晶構造上，形成重要之基本構造單位。此最短周期之比 $a_0 : b_0 : c_0$ ，即所謂之軸率也

。如在特殊之單位胞中，再加以結晶軸或軸率之因素時，則單位胞可區分之為若干類別。至各部門中所包括種類之多寡，常隨各晶系而異。

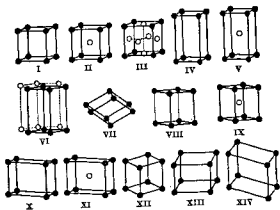
根據布拉維以數學基準研究之結果，單位胞之數目，計有十四種之多，且均係與結晶軸相當者。普通稱晶軸相交者為軸角，其長度按前後、左右、及上下之順序表示，故單位胞之三邊之長為 a_0 、 b_0 、 c_0 。時，則其軸率即為 $a_0 : b_0 : c_0$ 也。

若將按軸角及軸率區分所得之十四種空間格子，分別列入各結晶系中時，則如下表所示者。

至十四種空間格子之型式，則如第 209 圖所示。

晶系	編號	格子種類	記號	備考
等軸晶系	1	單一空間格子	T_c	Simple cubic lattice
等軸晶系	2	面心立方格子	T_c'	Face-centered cubic lattice
等軸晶系	3	體心立方格子	T_c''	Body-centered cubic lattice
正方晶系	4(a)	單一正方格子	$T_t(a)$	Simple tetragonal lattice
正方晶系	4(b)	底面心正方格子	$T_t(b)$	
正方晶系	5(a)	面心正方格子	$T_t'(a)$	Body-centered tetragonal lattice
正方晶系	5(b)	體心正方格子	$T_t'(b)$	
六方晶系	6	單一六方格子	T_h	Hexagonal lattice
六方晶系	7	單一菱面體格子	T_{rh}	Rhombic-hedral lattice
斜方晶系	8	單一斜方格子	T_o	Simple orthorhombic lattice
斜方晶系	9	面心斜方格子	T_o'	Face-centered orthorhombic lattice
斜方晶系	10	體心斜方格子	T_o''	Body-centered orthorhombic lattice
斜方晶系	11(a)	底面心斜方格子	$T_o'(a)$	Base-centered orthorhombic lattice
斜方晶系	11(b)	側面心斜方格子	$T_o'(b)$	
單斜晶系	12	單一單斜格子	T_m	Simple monoclinic lattice
單斜晶系	13	底面心單斜格子	T_m'	Base-centered monoclinic lattice
三斜晶系	14	單一三斜格子	T_r	Triclinic lattice

在六方晶系中之空間格子，其表示之方法甚多。如第 300 圖中之右方，全體雖呈正六角柱，但取其上一部之 IAHKLEBC M 時，則成爲斜方格子。普通之表示法，多爲取六角柱之三分之一，其中 AHGFB CDE 部分之空間格子排列狀態，則如圖中之左方所示者。

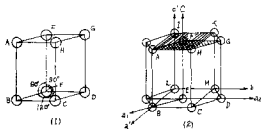


第 299 圖十四種空間格子

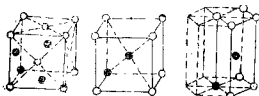
六方晶系之空間格子中，有互成 120° 之前後軸及左右軸，並有與兩軸垂直之上下軸，至第三軸則位於 EC 之方向焉。

通常元素之結晶中，常見之單位胞，多爲下列三種：

(A) 面心立方格子：在正立方體之八隅角及各面中心之位置，各有一原子。故單位胞中所含之原子數，計位於隅角者一，位於鄰接之三面者三，合計之共爲四個。呈此型式之結晶有金、鉑、銀、銅、鐵、鎳及鉛等。



第 300 圖 六方格子



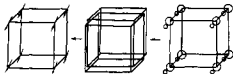
第 301 圖面心立方格子 第 302 圖體心立方格子 第 303 圖六方最密格子

(B)體心立方格子：在正立方體之八隅角及其中心各有一原子，故單位胞中之原子數共有二個。屬此型式之結晶有鐵、鉬、錫、鈉及鉀等。

(C)六方稠密格子：由三個單位胞集成六一六角柱，單位胞中之原子數有二個。呈此型式之結晶有鎢、鎂及鋅等。

又由二種不同原子所集合而成之結晶，不論其原子數之多寡，在同一方向上，皆按一定之周期排列，故可視為三次元之反覆產物。當各原子組成空間格子時，乃集合完全相同之原子形成兩個組合。若將其歸併於一空間格子時，則格子點所代表者為二不同原子之排列位置。

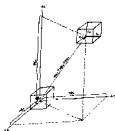
如圖所示，二種原子之排列，因具有規則及對稱性，故格子點亦代表二種原子在排列上之對稱要素。總計由十四種空間格子之相互配合，共可得六十五群，並能闡釋三十二晶類



第304圖 二種原子之空間格子

之一切對稱關係。此乃物理學家索克與礦物學家格洛特之研究貢獻。再由一點共同之對稱要素做出發點，且推而廣之，在純粹數學之觀點上，共可分為二百三十種，特稱之為空間群。此乃蘇俄之費得洛夫所首創，其後更由德國之舜夫利斯、英國之巴賽等繼續發揚光大之。

(7)空間格子及向量：結晶軸在方向上既有正負之分，其位於二方向上之原子，亦應分別表示之。如在 a 軸之正方向上，其距原點為 a_0 之原子位置，應以 a_0 之向量表示，而在同一方向上所排列之原子位置，則以 a_0 、 $2a_0$ 、 \dots 、 na_0 之向量表示之。又在 b 軸之正方向上，距原點為 b_0 、 $2b_0$ 、 \dots 、 nb_0 之原子位置，以 b_0 、 $2b_0$ 、 \dots 、 nb_0 之向量表示，而在 c 軸正方向

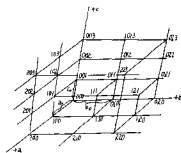


第305圖 格子點位置向量

上之原子表示法，亦復如是。至各軸負方向上所排列之原子位置，其對原點之距離應以向量 r 表示，若以 m, n, p 為整數，則 r 之向量可以 $ma_0 + nb_0 + pc_0$ 表示之。於是在空間格子中，各格子點至原點之距離，均為向量，故稱為格子點之位置向量。如圖所示，其空間格子遂成為各格子點位置向量之集合體。而通常之位置向量均為結晶軸上向量 ma_0, nb_0, pc_0 之合成向量，故稱之為軸向量 (Axial vector)，且稱 a_0, b_0, c_0 等稱為向量之單位，曰單位軸向量 (Unit axial vector)。普通所謂之軸率，即單位軸向量之比也。若以公式表示時，則為 $|a_0| : |b_0| : |c_0| = a_0 : b_0 : c_0$ 。

將單位軸向量之長度刻於結晶軸上時，則各軸之總長，自非以其倍數表示不可，且必須以整數為準則，為避免與密氏符號相混淆，乃以 $\langle m n p \rangle$ 表示之。

由圖可知，結晶形態之表示，又進入另一方式中。此第三種方式之符號，即 $\langle m n p \rangle$ 也。在整數群之準則下，不論軸角及軸率如何，其距原點為 $ma_0 + nb_0 + pc_0$ 位置向量之格子點，必須以 $\langle m n p \rangle$ 表示之。且原子之位置更須在軸上單位向量之整數倍處，而不得以刻度之幾分之一計算之。



第306圖 原子位置之軸向量

正規結晶構造之特性，除可以空間格子表示外，亦可以其格子點之位置向量 $r = ma_0 + nb_0 + pc_0$ 表示之。但向量之加算方式，實際上並不便利，茲將由原點至格子點之長度 r 之計算方式，述之於下：

$$\text{因 } r^2 = u^2 a_0^2 + v^2 b_0^2 + w^2 c_0^2 + 2uv a_0 b_0 \cos \gamma + 2vw b_0 c_0 \cos \alpha + 2wu c_0 a_0 \cos \beta$$

$$\text{設 } a_0^2 = S_{11}, \quad b_0^2 = S_{22}, \quad c_0^2 = S_{33}$$

$$a_0 b_0 \cos \gamma = S_{12} = S_{21}, \quad b_0 c_0 \cos \alpha = S_{23} = S_{32}, \quad c_0 a_0 \cos \beta = S_{31} = S_{13}$$

$$\text{則 } r^2 = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \end{pmatrix}$$

以上所述，係指單一三斜格子而言，至十四種空間格子若按單位胞研究時，均可以上述方式表示。而其中最簡單者，則為等軸晶系中之單一空間格子，設以格子點之最近周期表示時，其公式如下：

$$r^2 = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{11} & S_{11} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2 & a^2 & a^2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (u^2 + v^2 + w^2) a^2$$

(8) 原子列：通過原點之原子列，若其中一點之座標為 $\langle m n \rangle$ 時，則可以下列方程式表示之：

$$\frac{X}{m} = \frac{Y}{n} \quad \text{或} \quad \frac{x}{ma_0} = \frac{y}{nb_0}$$

上式之中， a_0, b_0 為座標軸上之單位同底，且其中 $X = \frac{x}{a_0}$ ， $Y = \frac{y}{b_0}$ 。

一般通過 $\langle m_1, n_1, p_1 \rangle, \langle m_2, n_2, p_2 \rangle$ 格子點之原子列方程式為：

$$\frac{X}{m} \pm \frac{Y}{n} = \frac{Z}{p} \quad \text{即} \quad Y = \frac{n}{m} X, \quad Z = \frac{p}{m} X$$

至與此平行之同格原子列，其方程式如下：

$$Y = \frac{n}{m} X + Y_1, \quad Z = \frac{p}{m} X + Z_1$$

上式之 $\langle Y_1, Z_1 \rangle$ ，乃貫穿 b, c 面格子點之座標也，普通以 $(mn p)_{x_1, z_1}$ 表示之。若與 b 或 c 面平行時，則以貫穿 ca 面之格子點表示之，亦即 $(x_1, z_1)_{(on p)}$ 也。又與 bc 或 ca 之面平行時，更以貫穿 ab 面之格子點表示，即 $(001)_{x_1, z_1}$ 是也。如此，則 X_1, Y_1, Z_1 之座標，皆係以平行之原子列位置表示者。

在結晶形態中，結晶面以平面方程式表示，晶帶以直線方程式表示，實即用以表示晶面及晶帶之指數者。此結晶構造特性之本源，於研究原子列及原子面之方程式時，當可明瞭。考原子列雖以直線方程式表示，而原子面則由平面方程式表示之。且結晶構造中，相互平行

之原子列，不計其數，但其所指示之位置，仍須分別清楚，故在原子列之方程式中，應於平行者間再加以某項整數，則其相互位置，自可因之區別矣。

(9)原子面：在正規之結晶構造中，其原子面可以位於其面上三原子之位置決定之。茲為簡化計，特以二次元之空間格子說明於下：

如圖所示，當BB'面通過 $\langle 20 \rangle$ 及 $\langle 03 \rangle$ 時，其方程式為：
$$\frac{X}{2} + \frac{Y}{3} = 1$$

至與其平行而一格之原子面，必為與 $a_0 = \frac{1}{3}$ ， $b_0 = \frac{1}{2}$ 相切之面。其密氏指數應為(32)而非(23)，若其指數為 (hk) 時，則以下列方程式表示之：

$$hX + kY = 1$$

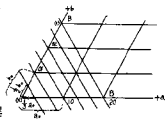
上式中之1，即指至原點距離最短之原子面，若代以 x 、 y 時，則其方程式為：

$$\frac{hx}{a_0} + \frac{ky}{b_0} = d$$

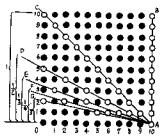
上式中之 d ，即為指示平行原子面之位置者。

00有理數定律：在結晶形態研究上之有理數定律，亦可由結晶構造方面解答之。蓋以原子密集排列之原子面，即為易於出現之結晶面也。

如圖所示，為一構造模型之斷面，驟視之，頗似禮堂之座椅。若自原子A之位置遠觀其全景時，則見原子密集排列之方向，均呈直線。由AB方向開始，然後移目橫視，即發現原子排列最標準之方向為AC，其次逐漸疏遠而為AD、AE……等。設以OC(AC方向之二原子距離)之長為基準，則必形成 $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$ 等面。若整數為 h 時，即為以 $\frac{1}{h}$ 相截之面。當 h 愈大，在其面上之原子



第307圖 平行之原子面



第308圖 各原子面之排列密度

面。若整數為 h 時，即為以 $\frac{1}{h}$ 相截之面。當 h 愈大，在其面上之原子

排列密度則愈小。是以成簡單整數比之晶面，亦即原子排列密度不同之面也。其OC雖非單位胞之邊長，但其作用却與單位胞一邊之長完全相同耳。

(1)對稱軸次數之限制：在結晶體中，對稱軸有二、三、四、六等四種，而在一般圖形中，則漫無限制。蓋以結晶之對稱，乃基於其正規骨幹之根本特性而產生者。如A、A'為正規原子構造中之二相同原子，通過A、A'之中心而成性質相等之對稱軸D及D'。若沿垂直於D之平面（紙面）繞D旋轉 α 角度，使AA''=AA'''時，則在A''之位置上，其原子之性質與A、A'相同。以此類推，AA''=A'A'''，位於 $\angle AA''A''' = \angle \alpha$ 之A'''點，其原子之性質亦與A、A'相同。因A'A''' \neq AA'，故在A'A'''方向上，必係以AA'=p為周期之原子排列。是以A'A'''=np者，乃勢所必然。通常n為整數，故其關係如下：

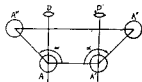
$$A'A''' = np = p + 2p \cos \theta$$

$$\cos \alpha = \frac{n-1}{2}$$

在上式之中，因n為整數，故 $\cos \alpha \leq 1$ ，但以 $n = -1, 0, 1, 2, 3$ 為限。此時 α 之數值，則為 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ 等。但 $\alpha = 0^\circ$ 之情況，不在本文討論之內，於是對稱軸之旋轉，乃限於二、三、四、六等次矣。故結晶對稱性之產生，非僅取決於表面，而更基於內部正規之原子排列也。

2-2 空間群

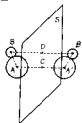
(1)結晶構造之對稱性：結晶構造原係前後、上下、左右以相同形式無限重疊者，當表示於紙面時，多取其構造之一部以利觀察與討論。但應確切默認其為無限重疊構造之一部，同時對其全般之規則性，



第309圖 對稱軸之次數

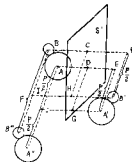
更不能有所忽視。至其與結晶形態情況不同者，則以平行移動為主要之關鍵。蓋以對某方向平行移動時，其所遇之原子與原來相同。故在結晶構造之觀察上，至重且要也。

當研討結晶構造之規則性時，仍以對稱要素表示之。如圖所示，為 S 面左、右兩側之原子排列形式，如以該面做為鏡面時，則得實物與像之關係，普通稱 S 面為構造之反射面。自右側原子群中，試取 A' 及 B' 二原子，其在左側與 A 原子相同者為 A ，而與 B' 原子相同者為 B ，且 AA' 及 BB' 均與 S 面垂直。設 AA' 及 BB' 與 S 面之交點為 C 及 D 時，則 $AC = A'C$ ， $BD = B'D$ ，至 AB 與 $A'B'$ 二方向更處於以 S 為對稱面之對稱位置。



第310圖 原子排列之對稱

如右圖所示，在 S' 面左方之原子排列中，任取一原子 A ，由此向 S' 面引垂線，經過垂足 D ，在 $AD = DE$ 之條件下，必得點 E 。設位於 E 之原子與 A 相同時，則 S' 即成反射面。但此時其原子並不位於 E ，乃自 E 沿 S' 面平行移動 $P/2$ 後，到達於 A' ；再由 A' 向 S' 面引垂線 $A'G$ ，在 $AG = GJ$ 之條件下，並得點 J ，但此時與 A' 相同之原子亦不位於 J ，乃為由 J 沿 S' 面平行移動 $P/2$ 之 A'' 也。即 A'' 係由原子 A 沿 AJ 之方向而移動 P 間隔者。其位於 A 者如是，而位於 B 者亦復如是。如此在 S' 面之左、右雙方之原子排列形成上述之關係時，則稱 S' 面為映像面。此種現象，不能以形態之對稱視之。同時 A' 於 AE 方向上按 P 之間隔無限延長，而 A 、 A' 亦於 AA' 之方向上按 P 之間隔做相同之排列也。



第311圖 映像面

如第 312 圖所示，由原子 A 向一軸引垂線，得垂足 B 。若以 B 為中心，以 BA 為半徑，沿 AB 面旋轉至 180° 時，則得與 A 相同之原子 A' 。



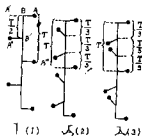
第312圖 旋轉軸

稱此轉軸為二次旋轉軸。實際上A與A'均沿該軸按T之間隔做無限之重疊排列，此處所指者，僅不過其中之一部已耳。至圖中三次、四次、六次旋轉軸之形成亦復如是。

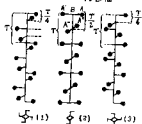
在第313圖所示者，由原子A向一軸引垂線，得垂足B。再以B為中心，以BA為半徑，沿AB平面旋轉 180° 時，其所得之A'點，並無與A相同之原子。而於與軸之平行方向上距A'為 $\frac{T}{2}$ 處，得A''點；更自A'向軸引垂線A'B'，得垂足B'，以B'為中心，以B'A'為半徑，沿A'B'T平面旋轉 180° ，仍不見與A相同之原子，而於軸之平行方向上相隔 $\frac{T}{2}$ 之點得A'''。換言之，即某原子在A A'''方向上按T之周期排列，當其以BA為半徑沿BB'軸旋轉 180° 時，恰於半周期之位置，得相同之原子A''。此BB'軸即稱之為二次轉移軸。

轉移軸有三次、四次及六次之分，其中三次轉移軸在旋轉方向上，更有右轉及左轉之不同。如圖中之(2)及(3)是也。至四次轉移軸亦有右轉及左轉之分，如第314圖所示，由A向一軸引垂線AB，使 $AB=BA'$ ，在其所得之A'點有與A性質相同之原子，且A及A'均在與軸之同一平面內，以T為周期而呈重疊之排列。設將AA'旋轉 90° ，其在距A為 $\frac{T}{2}$ 處所得A''及A'''之位置，亦具有與A性質相同之原子。此種轉移軸則稱之為2-2次轉移軸。因其具備二次對稱軸之性質，故以二次旋轉軸與四次轉移軸之二重記號表示之。至六次轉移軸除右轉及左轉之二種外，並可有第三種軸，

所謂轉移軸者，即當等寬與其原子性



第313圖 轉移軸



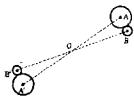
第314圖 四次轉移軸



第315圖 六次轉移軸

質相同之原子列時，在其原子方向中，除按 T 周期排列者外，並在 T 之 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$ 及 $\frac{1}{6}$ 各點旋轉 180° 、 120° 、 90° 及 60° 之位置，亦呈有與其原子相同性質之軸也。若與對稱軸相較時，其含意稍有不同。即與其性質相同之原子，在垂直於該軸之平面內旋轉若干度後，再沿其軸之方向平行移動若干距離，始為其所處之位置者也。

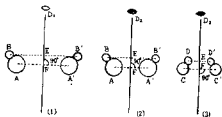
如圖所示，將 A 原子與一點 O 連結，使 $AO=OA'$ ，其所得之 A' 若為與 A 性質相同之原子時，則稱 O 點為原子構造之對稱中心。圖中所選用者，係二種性質不同之原子，故 $AO=OA'$ ， $BO=OB'$ ，而 AB 與 $A'B'$ 並居於反對之方位。



第316圖 對稱中心

以上所述者為構造上之對稱要素，而非形態上之對稱要素。即並進而與轉移軸者，乃於旋轉及反射以外之平行移動下，尋覓相同原子排列時，所假想之部位也。

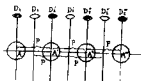
對稱要素既為結晶構造所左右，故其原子之排列方式，遂成為主要之關鍵。如圖所示， D_1 、 D_2 、 D_3 均為二次對稱軸，其所配屬之原子種類雖然相同，但與軸所具之距離則異。即圖(1)中 BE



第317圖 不同性質之二次旋轉軸

($=BE$)及 AF ($=A'F$)之長度與圖(2)中之 BE ($=BE$)及 AF ($=A'F$)不同，故 D_1 及 D_2 雖同屬二次對稱軸，但在性質上各不相同。又圖(3)中所配屬之原子為 C 、 D 時，亦復如是。因此在對稱要素之記號中，應加繪斜線以示區別。

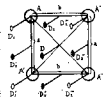
除此之外，在通過以 P 為周期之原子列時，於相鄰原子之間，有與原子列垂直而性質相同之二次對稱軸 D_1 、 D_1' 、 D_1'' ，且通過各原子之中心，更產生與原子列垂直而性質相同之二次對稱軸 D_1 、 D_1' 、 D_1'' 等。



第318圖 不同性質之二次旋轉軸

但 D_1 、 D_2 、 D_3 在性質上，則與 D_4 、 D_5 、 D_6 等不同。

總括言之，以各種對稱要素，可表現正規原子排列之規則性。如圖所示，在二次元之平面上，有同性質之原子 A 、 A' 、 A 、 A 、 A ， AA' 方向之周期為 a ， AA' 方向之周期為 b 。設 $a \neq b$ ，則於平面之垂直方向上，先通過各原子之中心，產生相同之對稱軸 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 ，其次在各原子連結線之中點，更產生 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 等對稱軸，又與上述不同性質之二次對稱軸 D ，則於矩形之中心產生之。於是圖形中對稱面之性質，自可因之瞭然也。



第319圖同一原子面之二次旋轉軸

上述各項，均為表示正規結晶構造之基本要素，但因平行移動之同位操作，乃致其種類隨形態之變化而增多。實際上結晶構造之規則性，雖以對稱要素之組合表示，但組合常因形態而不同，而構造則須在平行移動操作之配合上着眼，於是乃產生無數對稱要素之配列體。又構造屬無限之拓展，而研究處理則以單位胞為基準，故在對稱要素方面，亦應重視單位胞之組合。

普通所謂之平行移動，須具有方向及距離，故常以向量表示之。又其與形態學上相同者，為組合二種對稱要素時，常在適當調節與自然配合下，產生第三及第四對稱要素，最後則以一組合形式統括之。

(2) 對稱要素之組合，對稱要素之符號，計有下列各種：

對稱軸 { Rt }	反射面 { Rf }
轉移軸 { S }	映進面 { G }
倒置軸 { Rf^2 }	對稱心 { C }

在組合中之不同格者，以 $\{Rt_1\}$ 、 $\{Rt_2\}$ 、 \dots 或 $\{C_1\}$ 、 $\{C_2\}$ 表示，並於其間以“+”表示組合，以“ \perp ”表示垂直，以“ \parallel ”表示平行。至平行移動普通以向量 t 、 t' 、 t'' 表示，而長度則以 $|t|$ 、 $|t'|$ 、 $|t''|$ 表示。而組合之結果，其所產生之同格對稱要素，通常以 $\{ \}$ 表示之。

(A) $\{Rt_1\} + t$ ：如圖所示，在 O 點有與紙面垂直之對稱軸，其轉角為 ϕ ，平行移動以 $(t = \overrightarrow{AB})$ 、 $(|t| = \overline{AB})$ 表示。由 B 向 A 移動之

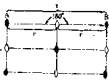
轉角為 ϕ ，若A以 t 之平行移動驅向B時，則B按 $\{Rt_1\} + t$ 之操作而不變位置。但此時所應注意者，為組合操作之順序，因此乃將B以O之同格點表示，故B點與紙面垂直之對稱軸必與O點之對稱軸相同。



第320圖平行移動

設 $OA=OB=r$ 時

則 $t = 2r \sin \frac{\phi}{2}$



第321圖二次對稱軸

上式之中， ϕ 為對稱軸之轉角，但其值則不受下列情況之限制。

當 $\phi = 180^\circ$ 時， $\sin \frac{\phi}{2} = 1$ ， $t = 2r$ ，乃形成二次對稱軸。

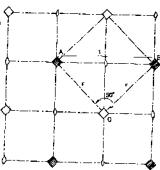
當 $\phi = 90^\circ$ 時， $\sin \frac{\phi}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{2}$ ， $t = r\sqrt{2}$ ，乃形成四次對稱軸。



第323圖三次對稱軸

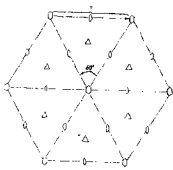
當 $\phi = 120^\circ$ 時， $\sin \frac{\phi}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{3}$ ， $t = r\sqrt{3}$ ，乃形成三次對稱軸。

當 $\phi = 60^\circ$ 時， $\sin \frac{\phi}{2} = \frac{1}{2}$ ， $t = r$ 。乃形成六次、二次及二次對稱軸之組合。



第322圖四次對稱軸

又為表示對稱要素之相互位置，乃於圖中符號之間，添加點線“...”，是為補助線，至實線所代表者，為反射面；虛線所代表者，則為映進面也。



第324圖對稱軸之組合

$$(B) \{Rt_1\} \parallel t = \{S_1\} n$$

$$(C) \{Rt_1\} + t = \{Rt_1\} \perp t + \{Rt_1\} \parallel t$$

(D) $\{Rf_1\} \perp t$: 以 AB 為反射面，其垂直之平行移動普通以 $t = \overline{DC}$ 表示，且為 AB 面所平分。設由 AB 面上一點 O 至 D 之向量為 \overline{OD} ，同時由 AB



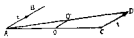
第325圖 映面面

沿 \overline{OC} 移動，則恰與 D 因並進而向 C 移動相當。但因 $Rf \perp t$ ，故 C 點之位置不變。由於此種組合操作，乃形成通過 C 點且與 AB 平行之其他反射面，於是具有 $\frac{1}{2}$ 周期之平行反射面群，遂可因之獲得也。故 $\{Rt_1\} \perp t = \{Rf_1\} n$ 。

$$(E) \{Rf_1\} \parallel t = \{G_1\} n$$

$$(F) \{Rf_1\} + t = \{Rf_1\} \perp t + \{Rf_1\} \parallel t =$$

$$\{Rf_1\} n + \{G_1\} n$$



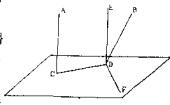
第326圖 對稱心

$$(G) \{C_1\} + t = \{C_1\} n: \text{以 } O \text{ 為對稱心，}$$

且 $AB = t$ ，由 A 向 C 移動，並沿 t 由 C 向 D 移動。此時 A 與 D 因新對稱心 O' 乃得附帶關係，而為 $OO' = \frac{t}{2}$ ，於是具有 $\frac{1}{2}$ 周期排列之對稱心群，遂因之形成也。故其公式為 $\{C_1\} + t = \{C_1\} n$ 。

III. $\{Rt_1, f_1\} + t$: $\{Rt_1, f_1\}$ 可以分成 $\{Rt_1\} + \{Rf_1\}$ 或 $\{Rt_1\} + \{C_1\}$ ，故可寫為 $\{Rt_1, f_1\} + t = \{Rt_1\} + t + \{Rf_1\} + t$ ，而與 (C) 及 (F) 相當。

(I) $\{Rt_1\} + \{Rf_1\}$: 以 A $\{Rt_1\}$ 及 B $\{Rf_1\}$ 為二對稱軸，在與 A 垂直之平面上各交於 C 及 D 二點，設 $\overline{CD} = t$ 時，則 A $\{Rt_1\} = \overline{CD} + E \{Rf_1\}$ 。如以形態學論之，乃形成與 D 之另一對稱軸 F $\{Rf_1\}$ 。因 $\overline{CD} = t$ ，而與 F 相交，故得 $\{Rt_1\} \perp t + \{Rf_1\} \parallel t = \{Rt_1\} n + \{G_1\} n$ 。

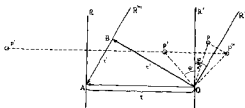


第327圖 二對稱軸

(II) $\{Rf_1\} + \{Rt_1\}$: $\{Rf_1\} + \{Rt_1\}$ 可以分為 $\{Rf_1\} \perp \{Rt_1\}$ 及 $\{Rf_1\} \parallel \{Rt_1\}$ 。其 $\{Rf_1\} \perp \{Rt_1\}$ 時，已如上述。設 $\{Rf_1\} \parallel \{Rt_1\}$ 時，則如圖所示。R 為反射面，與紙面垂直。O 為對稱軸，其

轉角為 ψ 。今點 P 為由 O 移向 P 或由 O 移向 P' ，設通過 O 點形成與 R 平行之反射面 R' ，並形成與 R' 成夾角 $\frac{\psi}{2}$ 之反射面 R'' 時，則

$$A \{ Rf_1 \} \parallel O \{ Rf_2 \} \\ = R'' \{ Rf_2 \} + 2t$$



第 328 圖 反射面與旋轉軸

若自 O 向 A 引垂線，而得垂足 A 時，則 $OA = t$ 。此時乃形成通過 A 及與 R 成夾角 $\frac{\psi}{2}$ 之反射面 R' 。再由 O 向此反射面引垂線，而得垂足 B 。如 $\overline{OB} = t'$ ， $\overline{AB} = t''$ 時，則得 $2t = 2t' + 2t''$

故： $R' \{ Rf_1 \} + 2t = R' \{ Rf_2 \} \perp 2t' + R \{ Rf_2 \} \parallel 2t'' = \{ Rf_2 \}_n + \{ G_1 \}_n$

(K) $\{ Rf_1 \} + \{ Rf_2 \}$ ：當二反射面不平行時，則與形態學之情形相同。若呈平行狀態時，遂產生與該面垂直之並進 t 。於是：

$$\{ Rf_1 \} \parallel \{ Rf_2 \} = t$$

此時二面間之距離，則為 $\frac{t}{2}$ 。

(L) $\{ C_1 \} + \{ Rf_1 \}$ ：若對稱心位於反射面上時，在形態學上則於該面之垂直方位，產生二次對稱軸。

(3) 空間群之表示：空間群者，即上述之對稱要素之組合也，其數目達二百三十種之多。在形態學上，以共通一點之對稱要素所組合之數目，則為三十二，是即所謂之晶類，或稱之為點群。但按平行移動操作所得之組合却多達二百三十，茲因篇幅所限，僅摘其有代表性者，敘述於下：

(S)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_{2n}	$\left\{ \begin{matrix} D_2 \\ V \end{matrix} \right.$	C_{2v}	$\left\{ \begin{matrix} D_{2h} \\ V_s \end{matrix} \right.$	C_s	D_2	C_{3v}
-----	-------	-------	-------	-------	----------	--	----------	---	-------	-------	----------

(H-M)	1	T	2	$\left\{ \frac{2}{m} \right.$	$\left. \frac{2}{m} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 222 \\ 22 \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 2mm \\ 2m \\ mm \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} mmm \\ \frac{2}{m}m \\ \frac{2}{m}\frac{2}{m}\frac{2}{m} \end{matrix} \right\}$	3	$\left\{ \begin{matrix} 322 \\ 32 \end{matrix} \right\}$	3m		
(S)	C_{2v}	D_{2d}	C_2	D_{2d}	C_2	D_2	C_{2v}	C_{2v}	D_2	S_6			
(H-M)	$\left\{ \begin{matrix} \bar{6} \\ 3/m \end{matrix} \right.$	$\left\{ \begin{matrix} 3/m \\ \bar{6}/m^2 \end{matrix} \right.$	3	$\left\{ \begin{matrix} 3/m \\ \bar{3} \frac{2}{m} \end{matrix} \right.$	6	$\left\{ \begin{matrix} 622 \\ 62 \end{matrix} \right.$	$\left\{ \begin{matrix} 6mm \\ 6m \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} 6 \\ 6/m \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 6/m \\ 6 \\ 6/m \\ 6/m \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} 6/m \\ 6 \\ 6/m \\ 6/m \end{matrix} \right\}$	$\bar{4}$		
(S)	$\left\{ \begin{matrix} D_{2d} \\ V_4 \end{matrix} \right.$	C_4	D_4	C_{2v}	C_{2v}	D_{2h}	T	O	T_d	T_h	O_h		
(H-M)	$\bar{4}2m$	4	$\left\{ \begin{matrix} 422 \\ 42 \end{matrix} \right.$	$\left\{ \begin{matrix} 4mm \\ 4m \end{matrix} \right.$	$\left. \frac{4}{m} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 4mm \\ 4 \\ 4 \\ 4 \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} 23 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 432 \\ 43 \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} 432 \\ 43 \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 2/m \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 4/m \\ 4 \\ 4 \\ 4 \end{matrix} \right.$	$\left. \begin{matrix} \bar{3}2 \\ 3m \end{matrix} \right\}$

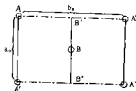
上表之中，(S) 為舜夫利斯符號，適於晶類之表示，而 (H-M) 則為荷曼毛金 (Hermann-Mauguin) 符號，適於空間群之表示。1948 年國際結晶學會通過二者併用。在舜夫利斯符號中，C 為重疊 (Cyclic) 之意，S 為反射 (Spiegelung) 之意，D 為二面體 (Dieder) 之意，T 為四面體 (Tetrad) 之意，O 為八面體 (Oktaeder) 之意，h 為水平 (Horizontal) 之意，V 為垂直 (Vertical) 之意，d 為對角 (Diagonal) 之意，i 為倒置 (Invertieren) 之意。

在荷曼毛金符號中，對稱軸以數字表示之，若為倒置軸（倒置對稱軸）時，則在數字之上加一橫線，並以 m 表示對稱面。設在軸之垂直方位有對稱面時，即在數字之下加以橫線，更在橫線下附寫 m 。如另外尚有對稱面時，則於其右方記以 m 可也。

除此之外，關於對稱要素之位置及方位，另有表示之方式，茲特簡述於後：

普通對稱心多以 1 至 0 間之幾分之一表示之，1 者單位胞之邊長也。如圖所示，設以原點 A 為對稱心時，則其位置為 00，而 B 為 $\frac{1}{2}$

$\frac{1}{2}$ 。此與三次元之情況相同。至反射面與一晶軸相交者，則以交點之位置及面指數表示之。普通將位置綴於面指數之右下方，如圖中 AA' 、 BB' 、 AA'' 為反射面時，則 AA' 以 (010) 表示， BB' 以 $(010)\frac{1}{2}$ 表示，至對稱軸之表示方法，已於結晶構造之對稱性中，詳為敘述，故不再做重複也。



第329圖 對稱心及反射面

又以點之表示為重心時，即指同價點係與對稱要素之間不具簡單關係之點也。對稱要素雖受多方限制，而點則無對稱性。故在同價點之排列中，其對稱要素自可表露無遺也。

(4) 空間群之成立：

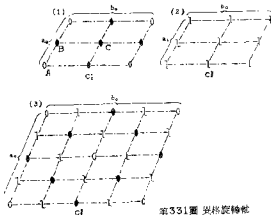
(A) 反射面之組合：在形體學上，普通以點群表示一對稱面，而在空間群之對稱上，則分為反射面



第330圖 反射面之組合

及映進面。若再加平行移動時，更產生下列四種組合型式，即反射面之組合，映進面之組合，及兩者相互之混合型式。如圖所示，通常以 C_m^n 表示之。

(B) 對稱軸之組合：在結晶形態上之對稱軸有 C_2 、 C_3 、 C_4 及 C_6 等種類，在空間群之對稱中，則分為對稱軸與轉移軸二種，若再加平行移動時，更產生下列之組合型式。如圖所示， C_2 可分為 C_2^1 、 C_2^2 、 C_2^3 三種，其中 C_2^2 為指正格之二次對稱軸 A 於 a, b 二



第331圖 異格旋轉軸

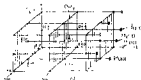
方向按 a 、 b 之周期排列者。結果在其中間產生異格二次對稱軸 B ，並於相鄰四條 A 軸所形成之平行四邊形中心，產生更異格之二次對稱軸 C 。此由 A 、 B 、 C 三種軸所成之組合中，其同一方向上之周期完全相同。

在上圖中之 C_2 亦為相同之轉移軸組合者，而 C_4 則係對稱軸及轉移軸之組合。

至由 C_4 、 C_2 、 C_2 所產生之型式，較為複雜，因受篇幅所限，故予從略。普通對稱軸之組合，以 $C_1^m \cdot C_2^m \cdot C_3^m \cdot C_4^m$ 等表示之。

($C_1 \cdot C_2^m$ 與 C_2^m ($C_2^m \cdot C_2^m \cdot C_2^m$)) 之組合：在結晶形態中，有對稱軸及對稱面之組合。如將對稱軸及與其垂直之對稱面相互組合時，則由 C_2 而得 C_{2v} ，若組合對稱軸及與其平行之對稱面時，則由 C_2 變為 C_{2h} 。此種相同之組合，在空間群中亦可見之。因 $C_{2v} = C_2 + C_2 + C_2$ ，設將 C_2 、 C_2 易為 $C_2^m \cdot C_2^m$ 時，則可產生下列各種型式。

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{2v}^1 = C_2^1 + C_2^1 + C_2^1 \\ C_{2v}^2 = C_2^2 + C_2^2 + C_2^1 \\ C_{2v}^3 = C_2^3 + C_2^2 + C_2^1 \\ C_{2v}^4 = C_2^3 + C_2^1 + C_2^1 \\ C_{2v}^5 = C_2^2 + C_2^2 + C_2^1 \\ C_{2v}^6 = C_2^4 + C_2^2 + C_2^1 \end{array} \right.$$



第332圖 對稱要素之組合

如圖所示，在 C_{2v} 之中，計有

$$\begin{aligned} \text{對稱心：} & 000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, \\ & 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{2} 0 0, \\ & 0 \frac{1}{2} 0, 0 0 \frac{1}{2}, \end{aligned}$$

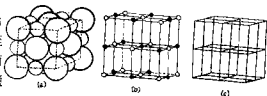
反射面： $(000)_v, (010)_v$

二次對稱軸： $00(010), \frac{1}{2} 0(010), 0\frac{1}{2}(010), \frac{1}{2}\frac{1}{2}(010)$ 。

一般同價點： $xy\bar{z}, \bar{x}\bar{y}z, x\bar{y}\bar{z}, \bar{x}y\bar{z}$ 。

(D)同價點與結晶面：

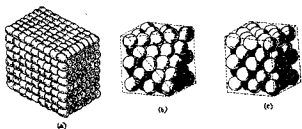
實際上之結晶構造，係由各種離子及原子組成，至其大小則隨礦物之種類而異。如圖所示，(a)為岩鹽之結晶構造，乃由鈉離子及氯離子組成。(b)為其單



第333圖 岩鹽之結晶構造

位胞，與實際狀態相近似。設不問離子之大小而僅計其種類時，則呈(c)之狀態，即形成三次元之格子也。此時在鈉位置之格子點均屬同價，而在氯位置者亦然。今由一種離子所形成之格子觀之，其在鈉位置之格子點則與在氯位置之格子點互為異價。且其差異更與離子種類之差異程度，具有相當之關係。又在空間格子中，同價點係由對稱要素所左右，故其在格子上之排列狀態，自必呈現規則性。如將之易為對稱要素之組合時，則產生二百三十種之空間群。且在空間群中，一般點均係在對稱要素控制下所重疊者，此即所謂之同價點也。設點之位置與對稱要素保持特殊關係時，遂成為特殊之同價點。至其數目則由同價點中減除之。

在結晶構造之特性中，除表示原子之位置，對稱要素及排列為期外，並因原子、離子之正規集合而產生原子面，再次始有結



第334圖 結晶面之形成

晶面之生成，此種論斷，殆為目前所公認者。至原子面與結晶面之關係，咸認結晶面係一羣平行之原子面重疊而成者。如圖所示，即係在岩鹽之結晶面上，描繪所得之標準原子面。

第三章 X 線結晶學

3-1 X 線之繞射

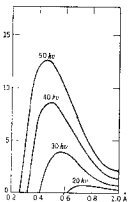
(1) X 線：X 線又稱倫琴射線 (Röntgen ray)，為德國物理學家倫琴於 1895 年所發現，乃波長 $0.01\text{Å} \sim 100\text{Å}$ 之電磁波。設將玻璃管抽成約 $10^{-7}m$ 水銀柱氣壓之真空，一端封入鋁或鎢之絲極 (Filament)，使成陰極，他端封入鎢靶，使成陽極。管之兩端連以 $30 \sim 80$ K.V. 之高壓及 $10 \sim 20$ mA 強度之電源，俟陰極灼熱後，即產生高速之電子流，而射於陽極之鎢靶上，X 線遂即發生。電壓愈高，其 X 線之強度亦愈增加。吾人稱其所用之玻璃管為電子管 (Electron tube) 或古力琪管 (Coolidge tube)，如 X 線僅係因低壓氣體放電而產生者，其所用之玻璃管則稱之為氣體離子管 (Gas ion tube) 或哈丁管 (Hadding tube)。

由各種金屬產生之 X 線中，凡含有各種連續不同之波長者，稱之為連續 X 線 (Continuous x-rays) 或普通 X 線 (General x-rays)。除此之外，尚有各金屬獨具波長之 X 線，則稱之為單波長之 X 線或示性 X 線 (Characteristic x-rays)。其波長之大小，與所用電壓之高低無關，乃隨元素之種類而異者也。普通所用之對陰極，計有鎢、鉬、鐵、鈷、銅及鎳等，而鎢則係專於產生連續波長 X 線時所用者。茲將各種不同金屬之對陰極所產生之示性 X 線波長列表於下：

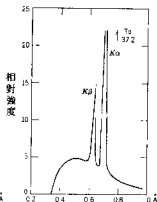
波長系列	Mo	Re	Co	Cu	Cr
$K\alpha_1$	0.7078	1.932	1.785	1.537	2.285
$K\alpha_2$	0.7128	1.936	1.789	1.541	2.289
$K\beta_1$	0.6310	1.753	1.617	1.389	2.081
$K\beta_2$	0.6197	1.741	1.606	1.378	2.067
總 箔	Er	Mn	Fe	Ni	V
厚 度	0.0277 mm	0.0075 mm	0.0077 mm	0.0085 mm	0.0084 mm

觀上表可知，X線之波長隨對陰極之金屬種類而異。全波長之分佈則如第 335 圖所示，乃以鎊為對陰極在極限電壓之下，所得之連續波長 X 線。

若改以鉀為對陰極且所用之電壓在某種程度以上時，則可得四條特殊之波長線，而名之為 $K\alpha_1$ 、 $K\alpha_2$ 、 $K\beta_1$ 、及 $K\beta_2$ 。其中 $K\alpha_1$ 與 $K\alpha_2$ 或 $K\beta_1$ 與 $K\beta_2$ 之間，波長之差度極微，除精密之實驗外，無分開使用之必要。但苟不將 α 及 β 中之一消除，則不能形成單波長之 X 線。



第 335 圖普通 X 線



第 336 圖單波長 X 線

故於 X 線之通過孔隙，裝以濾箔，以收濾除之效。至濾箔之原料，已於表中列入，茲不贅述。

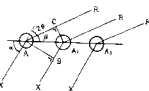
按以銅為對陰極時，其 $K\alpha_1$ 之波長為 1.54050 \AA ， $K\alpha_2$ 之波長為 1.54434 \AA ，普通以 1.5414 \AA 為 $\text{Cu} K\alpha$ 之平均波長。若改用鐵時，其 $K\alpha_1$ 之波長為 1.93597 \AA ， $K\alpha_2$ 之波長為 1.93991 \AA 而以 1.9373 \AA 為 $\text{Fe} K\alpha$ 之平均值。

(2) X 線波長之單位：若以 a_0 為岩鹽之格子常數時，則 $a_0' = \frac{mM}{\rho N_0}$ ，式中之 m 為單位格子中 NaCl 之化學式數， ρ 為密度， M 為分子量， N_0 為阿弗加得羅 (Avogadro) 常數。由此式可以求得 $a_0 = 2.814 \text{ \AA}$ ，且布拉哥父子於 1913 年由 $2a_0 \sin \theta = n\lambda$ ($n=1, 2, \dots$) 首先求出 X 線之波長。其後布坦 (M. Siegbahn) 由於比較岩鹽之格子常數，而求得方解石之格子常數 $a_0 = 3.02904 \text{ \AA}$ ，因此基礎之建立，乃更可求得正確之 X 線波長矣。當時曾將該數定為 1X 單位，即以 $a_0 = 3090.04 X$ 表示，同時使 $1KX = 1 \text{ \AA}$ 。其後隨阿弗加得羅常數之計算而益臻正確。

但因 N_0 之值常稍有出入，致 1KX 與 1\AA 之間亦不一致，乃修正為 $1\text{KX} = 1.00202\text{\AA}$ ，於是 KX 與 \AA 遂成爲不同之單位矣。然其差額究屬甚微，苟非精密測定，大可不予計及。設以 KX 爲單位時，則上述之 $\text{Cu K}\alpha_1 = 1.537395\text{KX}$ ， $\text{Cu K}\alpha_2 = 1.541232\text{KX}$ 。

(3) X線之繞射 (The diffraction of x-rays):

如圖所示，X線沿 $\overline{X\bar{A}_1}$ 之方向投射於 A_1 、 A_2 、 A_3 ……之原子列上，當其抵達各原子時，其原子之核外電子乃與X線發生共振，於是自各原子發出與入射X線波長入相同之X線，此等X線常於某方向強烈集合，而沿 $\overline{A_1R}$ 方向進行，是爲繞射X線。



第 337 圖 X線之繞射

若入射X線與原子列所成之角爲 α ，繞射X線與原子列所成之角爲 β ，且相鄰二原子 A_1 至 A_2 之距離爲 $\overline{A_1A_2}$ 時，因 $\overline{A_1A_2} = a$ ，故發射於 A_1 及 A_2 之X線行程差可以下式計算之。

$$\overline{A_1A_2} \cos \beta - \overline{A_1A_2} \cos \alpha = a (\cos \beta - \cos \alpha)$$

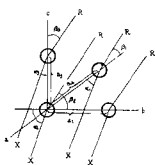
設行程差爲波長之整數倍時，則繞射之X線強烈結合。如爲三次元時，則下列各式同時成立。

$$a_1 (\cos \beta_1 - \cos \alpha_1) = n_1 \lambda \dots\dots(1)$$

$$a_2 (\cos \beta_2 - \cos \alpha_2) = n_2 \lambda \dots\dots(2)$$

$$a_3 (\cos \beta_3 - \cos \alpha_3) = n_3 \lambda \dots\dots(3)$$

上式之中， n_1 、 n_2 、 n_3 均爲整數。如按直交軸研討時，即將上列三式之前旁，各以 a_1 、 a_2 、 a_3 除後而再平方之，然後相加，並使：



第 338 圖 三次元之繞射

$$\sum_1^3 \cos^2 \alpha_i = 1, \quad \sum_1^3 \cos^2 \beta_i = 1, \quad \sum_1^3 \cos \alpha_i \beta_i = \cos \alpha \theta \text{ 時, 則}$$

$$\lambda = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{\left(\frac{n_1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{a_3}\right)^2}}$$

若 $n_1 = nh$, $n_2 = nk$, $n_3 = nl$ 時, 則

$$n\lambda = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{\left(\frac{h}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{k}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{l}{a_3}\right)^2}} \dots\dots\dots(4)$$

在斜方晶系中, 其 (hkl) 原子面之網面間隙 d_{hkl} 可以下式求之

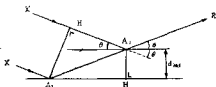
$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2}}$$

在等軸晶系中, 則:

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

通常 $n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \dots\dots\dots(5)$

上式之中, 若 X 線以 θ 角入射於 (hkl) 網面上時, 則在反射角 θ 方向之 X 線呈最強烈之結合, 此時入射於相鄰二原子面上之 XA_1 及 XA_2 二 X 線之行程差以下式表示之。



第 359 圖 X 線之反射

$$\overline{A_1 A_2} - \overline{A_1 H} = \overline{A_1 A_2} (1 - \cos \alpha \theta) = 2d_{hkl} \sin \theta$$

如上式之結果為波長之整數倍時, 則 X 線呈最強烈之結合, 恰與第(5)式之情況相當。即由正規原子構造所產生之 X 線繞射現象, 與由正規原子面之 X 線反射現象, 可按同一方式處理之。又在第(4)式中, 當 $n=1$ 時, 曰第一次反射; $n=2$ 時, 曰第二次反射, 故該式稱為由 (hkl) 面之第 n 次反射式。

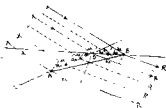
設以一定波長之 X 線投射於固定之結晶體時, 則可決定 α_1 , α_2 , α_3 之數值, 其後因繞射之 X 線互相強烈集合, 故非三方程式不足以表示之。但由三式所得之 β_1 , β_2 , β_3 數值, 並不一定與另外方式算出者相符合。若所得者為一變數, 則對其正確性即有推敲之必要。除此之外, 亦可將 λ 改用變數, 即捨棄波長之 X 線而用連續 X 線也。如呂耶

所用者，即屬此類。

在用X線研究結晶之方法中，以移動膠片法最為複雜，但仍須自上述(5)式始能獲得正確解答，即 $2 \frac{d}{n} \sin \theta = \lambda$ 是也。設原子面具有 $\frac{d}{n}$ 之網面間隙時，則 n 次反射可認為係該面之一次反射，而由 (hkl) 面之二次反射，可認為係 $(2h, 2k, 2l)$ 之一次反射，且三次反射亦可認為係 $(3h, 3k, 3l)$ 之一次反射。於是反射之次數可以其反射原子面之指數表示之。如(001)之二次反射指數為(002)，三次反射指數為(003)等是也。

(4)逆格子(Reciprocal lattice)：在結晶體中，其由異價面所反射之X線，趨向不同之方向，而由同價面所反射之X線，則均以 θ 表示之。設其指數不同但在對稱關係上屬於同價時，由其反射之X線仍以相同之 θ 表示之。然此種反射之X線不能全部達於與結晶同時轉動之膠片上，故不能使所有反射之X線均在膠片之個別位置上映之成像。設欲使各面之反射像均能在膠片上映出時，則非用移動膠片法不可也。

若二次元之結晶原點為O，其 a 軸及 b 軸方向之周期為 a_0 及 b_0 ，在 a 軸上取A點，使 $OA=3a_0$ ；在 b 軸上取B點，使 $OB=2b_0$ ，再將AB連以直線，則此直線所代表之面可以密氏指數(23)表示之。如X線沿XB之方向投入，而循BR之方向繞射，且在投射於 b 軸原子列之入射X線及由其繞射之X線中，若相鄰之X線各相差三波長時，則XB與XO則相差 6λ 。又投射於 a 軸原子列之相鄰原子後，再由其繞射之X線行程差僅為 2λ 時，則XA與XO亦差 6λ 之多。即由AB原子列所繞射之X線，均具有 6λ 之行程差也。概言之，由 (mn) 面所繞射之X線，其位相差為 $mn\lambda$ ，此在三次元之情況下，亦可選用之。



在一次、二次及高次

第340圖由原子列所繞射之X線位相差

反射中，其反射之方向各不相同。當反射 X 線抵達膠片上時，遂一一映之成像。在 X 線之反射像上，通常有三種事項，極應注意。即第一為以 θ 決定產生斑點之 X 線進行方位；二為當產生斑點之原子面指數為 (hkl) 時，則以 $(nh nk nl)$ 表示 n 次之反射面指數；三為斑點之濃度，普通以 I 表示之。因此，凡認 $(nh nk nl)$ 之面為一點時，則用各點以表示 X 線之反射，即以 (hkl) 點表示 (hkl) 面之一次反射，以 $(2h 2k 2l)$ 表示其二次反射。此時 $(2h 2k 2l)$ 格子點之反射，較 (hkl) 僅差一級長之位相；而 $(nh nk nl)$ 格子點亦由 (hkl) 反射，而具有 n 級長之位相差。是以吾人研討 X 線之繞射現象時，若將結晶置於此種點下，則更較便利也。

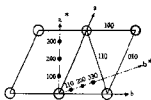
結晶體本係原子面集合而成者，故由 X 線之繞射面觀察所得之集合體，乃係最理想之形態也。通常在 X 線繞射之研究中，多認原子面 (hkl) 、 $(nh nk nl)$ 及 $(2h 2k 2l)$ 等一聯串之面，進而將之易為各點，使成簡單之表示方式，此即所謂之逆格子點也。

自原點向原子面 (hkl) 引垂線，則必與引向 $(nh nk nl)$ 面者一致。新原子面至原點間之距離為 ρ ，舊原子面間隙為 d 時，則

$$\rho d = k^2$$

上式中之 k 為一常數，除此之外並有與 (hkl) 平行之若干面，即 $(2h 2k 2l)$ 、

$(3h 3k 3l)$ ……及 $(nh nk nl)$ 等是也。因 (hkl) 之網面間隙為 d ，故其他則必為 $\frac{1}{2}d$ 、 $\frac{1}{3}d$ 、……及 $\frac{1}{n}d$ 等。於是在由原點引向 (hkl) 面之垂線上，乃形成與原點間以 $\rho = \frac{nk^2}{d_{hkl}}$ 為周期之排列點。若再向所有其他原子面引垂線，並按上述條件取點時，則所取之點仍呈正規之三次元排列，故稱其點為逆格子點，而稱其格子為逆格子。如上圖所示，在 (100) 面之垂直線上，即並列有 (100) 、 (200) 、 (300) ……等逆格子點。特稱其垂直線為逆格子之 a^* 軸，其與 (010) 面垂直者，



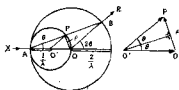
第 341 圖 逆格子點

曰逆格子之 b^+ 軸；與 (001) 面垂直者，曰逆格子之 c^+ 軸。至在 a^+ 、 b^+ 、 c^+ 三軸之上，其逆格子點之周期為：

$$a^+ = \frac{k^2}{d(100)}, \quad b^+ = \frac{k^2}{d(010)}, \quad c^+ = \frac{k^2}{d(001)}$$

以上述周期為單位，可以決定三軸上逆格子點之位置。即 (200) 之逆格子點，其在 a^+ 軸上至原點之距離，恰為 $k^2/d(100)$ 之二倍。普通 (hkl) 面之逆格子點位置，以 ha^+ 、 kb^+ 、 lc^+ 表示之。即以 a^+ 、 b^+ 、 c^+ 三周期為單位時，其所得者均為三周期之整數倍。

如圖所示，為幾何學上所表示之逆格子。



第 342 圖逆格子之幾何圖解

因 $2d \sin \theta = n\lambda$ ，及 $\rho d = k^2 = 1$ 。

則 $\sin \theta = \frac{\lambda \rho}{2} \leq 1$ ， $\rho \leq \frac{2}{\lambda}$ 。

若入射 X 線 \vec{OX} 於一原子面之 O

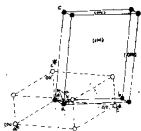
點發生繞射，而沿 \vec{OR} 方向反射時，其以 O 為中心，以 $\frac{2}{\lambda}$ 為半徑所形成之球，與入射 X 線及反射 X 線分別交於 A 點及 B 點。如以 P 為包括 O 點原子面之逆格子點時，因 $\angle BOX = 180^\circ - 2\theta$ ， $\angle PAO = \theta$ ，故 $AB \perp OP$ 。即 P 必須在以 $\frac{2}{\lambda}$ 為半徑之球內，同時在以 $\frac{2}{\lambda}$ 為直徑之球面上。設以 O' 為球之中心時，則 $\vec{O'P}$ 為反射之 X 線，而 $\vec{OO'}$ 為入射之 X 線。故逆格子向量 \vec{OP} 可以下式表示之。

$$\vec{OP} = \vec{O'P} - \vec{OO'}$$

或 $|\vec{OP}| = \frac{2}{\lambda} \sin \theta$

至原格子與逆格子之關係，若用三次元表示時，則如下圖所示，原空間格子單位胞之三稜長為 a 、 b 、 c ，軸角為 α 、 β 、 γ ，則逆格子單位胞之三稜 a^+ 、 b^+ 、 c^+ 之長如下：

$$a^+ = \frac{k^2 bc}{V} \sin \alpha \quad (\text{與 } bc \text{ 面垂直})。$$



第 343 圖原格子與逆格子

$$b^+ = \frac{k^+ ca}{V} \sin \beta \quad (\text{與 } ca \text{ 面垂直})。$$

$$c^+ = \frac{k^+ ab}{V} \sin \gamma \quad (\text{與 } ab \text{ 面垂直})。$$

上式之中， V 為以 a 、 b 、 c 為稜之單位胞體積。代表原格子面之逆格子點座標，則以 a^+ 、 b^+ 、 c^+ 為單位。至其所代表之面，仍與原格子相同。

3-2 研究之方法

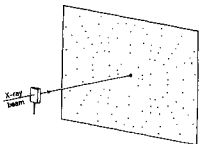
(1) 呂耶斑點 (Laue diffraction pattern)：為德人呂耶首先創導，繼由符立得利 (Fredrich) 及科尼平 (Knipping) 二氏於 1912 年實驗完成者。其法也，先將晶體固定，以連續 X 線投射之，再於距晶體 D 之位置，豎以乾板，使與入射 X 線之方向垂直，則由晶體所繞射之 X 線，即於乾板上映之成像，是為呂耶斑點。

如下圖所示， x 、 y 、 z 為直交軸，X 線沿 z 軸之方向前進，設其波長為 λ ，根據繞射公式，X 線於 β_1 、 β_2 、 β_3 角之方位繞射，其所生之三圓錐處於相互直交之位置，而開始強烈

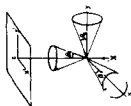
集合。因 $\cos \alpha_1 = \cos \alpha_2 = 0$ ， $\cos \alpha_3 = 1$ ，故可以下式表示之。

$$\begin{cases} a_1 \cos \beta_1 = n_1 \lambda \\ a_2 \cos \beta_2 = n_2 \lambda \\ a_3 (\cos \beta_3 - 1) = n_3 \lambda \end{cases}$$

在上式中， β_1 、 β_2 、 β_3 之值常隨 λ 而變更。當三圓錐交於一直線時，X 線則沿直線方向強烈集合，於是在其與照像乾板之交點



第 344 圖 呂耶法之裝置

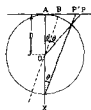


第 345 圖 圓錐繞射

生成呂耶斑點。且 n_1 、 n_2 、 n_3 均為整數，而頂角為 β_1 及 β_2 之圓錐，並於其與乾板面之切口形成雙曲線。當 n_1 、 $n_2 = 1, 2, 3, \dots$ 時，均呈此種現象。又在頂角為 β_3 之圓錐中，當 $n_3 = 1, 2, 3, \dots$ 時，則形成圓。且在圓與雙曲線之交點，產生呂耶斑點。其交點指數，即係圓與雙曲線所具有之 n_1 、 n_2 、 n_3 等整數值。

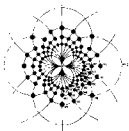
攝取呂耶斑點時，設與入射 X 線方向之對稱面接觸，或與入射 X 線方向之對稱軸接觸，且 X 線由對稱要素所左右之面反射時，則於與其面性質相同之其他面上，亦生成完全相同之呂耶斑點。且因乾板與入射之 X 線垂直，故呂耶斑點之配置，必呈正規之對稱排列，但各斑點之濃度必須相等。若由斑點之濃度與其位置之對稱性言之，則為以入射 X 線方向之對稱性為基準之表達方式。在實際之結晶中，其性質相同之面，在發育上常良莠不齊，僅由外形之觀察，殊難判斷其對稱性。但呂耶斑點則在確定結晶之對稱上，極有助益。惟所遺憾者，只為不能判斷其對稱心之有無耳。

呂耶斑點亦可用立體投影中之球心投影表示之，如圖所示，將 X 線 XO 投射於包括 O 點之結晶面上，則於 P 處生成呂耶斑點。如將 P 點直投於立體投影上，即得投影點 P' 。於是 $AP' = 2D \tan \theta = 2AB$ 。式中之 A 為入射 X 線與乾板之交點， D 為結晶至乾板面之距離。

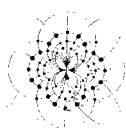


第 346 圖呂耶斑點之投影

設反射面屬於 OB 晶帶時，則由其共同帶面所生成之呂耶斑點均通過含 A 之圓周而排列於乾板上。若入射 X 線趨向 $[001]$ 時，



第 347 圖鉀鹽之呂耶斑點



第 348 圖岩塩之呂耶斑點

則在透過乾板中心之直線上有並列之斑點 ($h0l$)，如 (101)、(201)、(301)、(401)、(501) 等均是。

在球心投影中，設斑點 (101) 至乾板中心之距離為 1 時，則其他各點即為 2、3、4……等。因同一晶帶之面均位於一直線之上，故於投影圖上自可一目瞭然。在等軸晶系中，其方格之間隙即等於 D 。在乾板上取直交軸 x, y ，且以 $x^2 + y^2 = r^2$ 表示斑點之座標時，則得：

$$r = D \tan 2\theta,$$

$$\text{或 } \tan 2\theta = \frac{1}{D} \sqrt{x^2 + y^2}$$

於是各斑點之 θ 角，自可由之求出也。

究諸實際，礦物常因外力而變形。且外力愈強，其變形愈不能挽回。以致呂耶斑點，常呈細長之延展。若變形過甚，則斑點之對稱性亦隨之變更。此在對稱度低之石膏中，亦不乏其例。除此之外，尚有自中心向四周放射之星狀呂耶斑點，但其原因，迄今仍未明瞭耳。

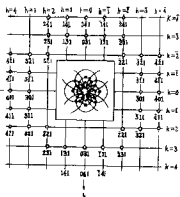


圖 349 呂耶斑點之球心投影

(2) 粉末攝影 (The Powder photograph method)：用乳針將礦物研磨成極細之粉末，做為試料，然後置於玻璃片上，並在其附近滴以黏結液。以雙手緊拉細絲線，先觸及黏結液，使之浸濕，再觸及試料，以便將礦物粉末蘸於其上。最後於絲線之一端吊以重錘，靜置之，俟乾固後，即可將周圍塗敷礦物粉末之絲線切下使用，是為粉末棒。至粉末棒之製作方法甚多，普通以粉末儘量露於表面者為宜。

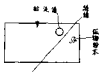


圖 350 粉末棒之製作

試驗時，將粉末棒置於圓筒攝影機中，使與圓筒之軸平行。A 為 X 線之入射孔，裝以具有間隙之鉛板，當 X 線通過後遂成一平行細束

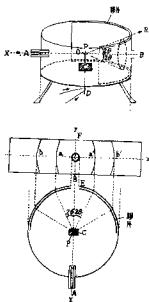
。B 為入射 X 線抵達攝影機之孔，C 為調節裝置。由 A 觀察時，在小孔內之 D 軸雖然轉動，而粉末棒則常固定。此時可以 C 任意調整粉末棒之位置，或使之傾斜。然後將膠片挿於攝影機中，並在 B 處用鋸開孔。若 X 線不經繞射而直達於膠片時，則形成巨大黑點，此即 X 線未射及試料且未遭受干擾之故耳。

在粉末攝影法中，可將試料置於各種不同之方位，故於礦物粉末每轉向一方位時，則與輻及單波長之 X 線相當。故粉末之位置，應對向四面八方，且一遇空間露出，即將 D 軸轉動，以免 X 線之走空也。

設將 X 線投射於粉末之結晶面 O 上，當入射 X 線 XO 沿 OR 方向反射時，則 $\angle ROX = 180^\circ - 2\theta$ 。其由向四面八方之粉末上所反射之 X 線，乃盤互於以 XB 為軸而以 2θ 為頂角之圓錐面上，故膠片上所映之像，遂形成圓錐與圓筒相切之四次曲線。如於乾板上攝取影像時，即得同心圓之繞射像。迨取出膠片觀之，其像呈似圓之曲線，因膠片縱狹橫寬，若將之切開，則呈相對應之二曲線，即圖中之 a 及 a' 是也。又使膠片之下緣與圓筒攝影機之下緣密接，且通過膠片中心引 x 軸及 y 軸，並使之互相垂直，當 x 軸與 a 及 a' 曲線相交時，則

$$\overline{aa'} = 4\theta R \text{ (弧度)}$$

式中之 R 為攝影機之半徑。當繞射角為 θ' 、 θ'' ……時，其所生之粉末線同時出現於膠片以外各點，故形成相對應之二曲線，由膠片中心向上下、左右開展而呈對稱之排列。至繞射角小之粉末線，常映於



第 351 圖粉末攝影之裝置

膠片之上、下邊緣，苟不裁剪，則四次曲線之全部，必可一覽無餘也。

粉末攝影乃相對應之線在膠片中心周圍呈對稱之排列者，故可輾轉求得 2θ ，於是 d 之數值，自可由 $2d \sin \theta = n\lambda$ 獲得矣。換言之，即由各粉末線可以求得結晶面之網面間隙也。同時因各粉末線均附帶一定之 d 值，故通常以 d 表示。又各粉末線之強度（濃度），則常以 I 表示之。所謂 I 者，乃膠片上所映之線條數目也，故可用以比較其相對之濃度。總之，在各粉末線上計有 I, θ, d_{hkl} 及 (hkl) 四項數值，而其中之 d 因與 θ 成反比，故粉末線愈接近中心，其 d 之數值亦愈大。根據繞射公式(5)，可得下列關係。

$$\Delta d \sin \theta + \Delta \theta \cos \theta = 0$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta d} = - \tan \theta$$

d 之數值，既隨 θ 而變易，故 θ 愈小，粉末線愈粗，即粉末線愈近中心，愈難測得 θ 之正確數值，而所得之誤差，亦愈大也。又當 $4\theta = 2\pi$ 時，粉末線為二直線。 $4\theta > 2\pi$ 時，則其曲線呈逆的曲率。設 θ 之值增加，其 $\Delta \theta / \Delta d$ 亦隨之增加，其在測定 θ 時所生之誤差，對 d 之影響甚小。通常稱 $4\theta > 2\pi$ 之粉末線為背向反射像。故由粉末線精測 d 時，宜用兩背相對之粉末線也。

粉末攝影為結晶構造特性之表現，設礦物在結構上不同，其粉末攝影亦異，故比較粉末攝影之形態，可以判斷礦物之異向。又不論晶體是否透明，均可得少量試料，此乃粉末攝影極受重視之主因。當吾人確定礦物之差別後，自可更進一步從事於正確之計算及測定矣。

粉末線有時呈寬大之條帶，考其原因有三，即晶粒過細、結晶構造歪斜及結晶構造呈不規則性也。有時後二者更常連帶發生，當晶粒小至膠狀體之程度時，其現象極為顯著。故詳細研究粉末線時，必須注意其強度之分佈情形，通常在膠片之上，多投之以光。至其所透過之光度，皆以光電管記錄，而各粉末線之特性，則以曲線之尖峰(Peak)表之。言之，粉末線之散亂程度，皆可由尖峰部之粗度及形態顯

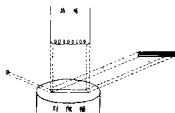
示，普通顆粒愈細，其反射線愈粗，而略呈左右對稱之形態。此時所應注意者，為尖峰部之高度及寬度。通常稱半高處之寬度為半價幅，以 θ 角表示之。若結晶顆粒之大小為 L 時，則其公式如下：

$$L = k\lambda / (b \cos \theta)$$

(3) X 線繞射計 (The x-ray diffractometer) :

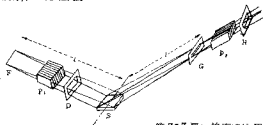
(A)構造原理：乃以計數管收取繞射之 X 線，並將其強度自動記於記錄紙上之裝置也。在攝影法中，係觀察膠片上之斑點，故其測定難望正確。設將繞射 X 線以曲線描繪時，首應確定其尖峰 (Peak)，始能獲得正確之結果，亦即以繞射線之形態 (濃度分佈) 為目標者。上述粉末線之粗細常與晶體顆粒之大小成反比，又結晶為不規則性時，亦出現較粗之粉末線，且在濃度之分佈上更可表露其特性，故濃度分佈之研究在結晶構造上至為重要。但以膠片表示明確之濃度分佈，究屬困難，故近來乃改用具有計數管之 X 線繞射計。

在儀器中之重要部份，首為 X 線管，即古力琪管。其中封以細長之鎳極，使之指向對陰極。當其所發生之電子流觸及對陰極時，則產生形如絲極之 X 線束，恰如圖中之點源所示者。



第 352 圖 X 線管

X 線束之寬度，通常以多數孔隙保持一定，再導入計數管中。至 X 線束通過孔隙系之過程，則如圖所示，先經平行之孔隙 P_1 (0.016 吋之金屬板並列而成) 使成平行線束，再經發散孔隙 D 而向其他方向發散；隨即達於試料面 S ，由此反射之 X 線，更由集光孔隙 G 聚成焦點，然後通過平行孔隙 P_2 ，再經限制孔隙 H 而



第 353 圖 X 線束之行程

進入計數管中。至發散孔隙與限制孔隙之寬度，常隨 X 線束之發散角而異。普通 X 線束之發散角有 4° 、 1° 、 $\frac{1}{2}^\circ$ 、 $\frac{1}{4}^\circ$ 、 $\frac{1}{6}^\circ$ 、 $\frac{1}{12}^\circ$ 、 $\frac{1}{20}^\circ$ 等，故集光孔隙之寬度，多在 0.003 吋至 0.006 吋之間。又各孔隙均係鉍等高原子序數之金屬製成，故可將 X 線之散亂程度壓低。設 X 線之散亂程度顯著時，其原來不生反射之晶體部份，亦普遍發生反射，是即所謂之基本反射 (Background reflection)。通常平行孔隙可將橫向之分散降至 2° 以內。

如圖所示，通常將計數管置於貝克萊圓筒軸心之位置，並以鋁或銅絲繫拉於絕緣體 A 與 A' 之間，且於其中封入氬 (Argon) 之氣體。當



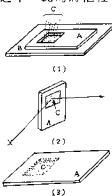
第 354 圖計數管之裝置

通入 X 線時，其由氣體所生之光電子，乃產生離子電流，故預先與電壓 1300 ~ 1400 V. 及電阻 $10 \sim 10^{10} \Omega$ 之電源連接，以便計測其間之電離跳動。至其計測入射光量子之量子數比，常因 X 線之波長而不同，普通在 Cu K α 系列中約為 60% 左右。

至所用之試料，應以乳鉢研成極細粉末，並堆置於鋁框之內，恰如圖中 A 所示者。框之大小，約為 $10 \times 20 \text{ mm}$ 左右。當堆放粉末之前，應先將鋁框置於玻璃片上，即圖中之 B 是也。在置放試料時應採陸續方式，當其堆放之粉末，超過鋁框之高度時，則於上方置一玻璃片，並輕壓之，於是試料粉末乃嚴實堆積於鋁框之中。此時將框輕輕移去，其粉末已受壓成塊，故亦不致墜落焉。

究諸實際，粉末須對向四面八方，若由上方壓縮時，因表面發生磨擦，則呈粉末狀、薄片狀或解理狀之礦物，其上述各面必與玻璃片之面平行，以致形成定向排列。為免此弊，常以圖(1)下方與玻璃片相接之面做為粉末塊之面焉。

若試料甚微，則將其置於玻璃片上，加水後以火柴梗輕輕攪拌之。迫成為糊狀時，即將



第三五圖粉末塊之製作

之鋪攤於玻璃片上，靜以待乾，使在玻璃片上生成粉末薄層，以供X線投射研究之用。如薄膜易於脫落，則改以粘結劑攪拌之，至其塗於薄片上之厚度及粉末之排列方式，均可影響其相對強度。

試料之製作方法，亦為影響相對強度因素之一。故在可能範圍內，宜使用再現性高之試料調整法，尤以薄片狀之礦物，更應儘量設法製作定向排列之薄層。其法也，將試料散佈於水中，使成糊狀，再置於玻璃面上，藉重力或離心力沉澱，曬乾後則膜愈薄，其定向排列愈佳，但過薄則其強度減弱也。又薄膜厚度發生變化時，亦足以影響X線之相對強度。除此之外，使用燒堯板亦可得良好之定向排列。普通製作完全之定向排列體，雖多困難；但將薄片狀之礦物製成全無規則性之排列體，亦屬不易。通常標準以混入 25~50% 之矽酸膠粉末者為多。

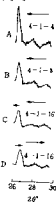
在X線繞射計中，其孔隙系亦可影響X線之相對強度。普通使用低繞射角時，其X線束常及於試料面以外。例如普照於 20mm 寬試料面之線束，當 2θ 之值為 1° 時，則孔隙系為 18.1° ， 2θ 之值為 $\frac{1}{2}^\circ$ 時，孔隙系為 9.0° ，若繞射角為 $\frac{1}{6}^\circ$ 時，其孔隙系之角度僅為 3° 也。

試驗時，先將試料置於儀器上，按旋轉試料速度之二倍轉動計數管，其轉動速度係由齒輪控制，一分鐘內可轉動 $\frac{1^\circ}{8}$ 、 $\frac{1^\circ}{4}$ 、 $\frac{1^\circ}{2}$ 、 1° 、 2° 等，至其轉動範圍多在 $-38^\circ \sim 185^\circ$ 之間。且 2θ 之數值可以遊尺讀至 0.01° 。普通一面旋轉試料，同時以其二倍速度轉動計數管，並在記錄紙上記取其連續反射。至記錄紙之移動速度，通常每分鐘為 $\frac{1}{2}$ 吋、 $\frac{1}{4}$ 吋、 $\frac{1}{8}$ 吋。除此之外，尚有決定計數管行走速度與感度之分度因數 (Scale factor)、乘數 (Multiplier) 以及決定積分回路之時定數等，亦頗重要。

計數管中所生電離跳動之頻度，務須事先測定，其數值可由錄數器或計數率表獲得，實際上用計數遞減回路，亦可表示其跳動之分數，普通在二進法中，為 1 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{16}$ 等之計數。特稱其 1 、 2

、4、8、16 為分度因數。

計數率表 (Rate-meter) 者，乃於計數遞減回路所傳送之一個跳動中，將一定電量送達於一定時定數 (1、2、4、8、16 秒等) 之積分回路，並以充電電壓求其跳動時間之頻度者。在計數率表之電流上，乘以分度因數及乘數時，即與每秒之計數值相當。其中之乘數則為決定每一跳動之感度者。至所謂積分回路之時定數，乃表示真計數率所要之秒數。且將時定數拓大記錄時，更產生記錄之遲延。同時 2θ 由小而大，則尖峰 *Peak* 向角大方向移動；設 2θ 由大而小，其向角大方位移動之尖峰，即發生變化。換言之，倘無輕微變動，尖峰平滑，其基本反射之變動雖小，但尖峰之高度則低也。如圖所示，為同一試料在時定數變化下所記錄者，當時定數大時，尖峰緩慢而曲線平滑。大箭頭代表走查之方向，在 C 及 D 圖中，互成反向。此時尖峰沿走查方向之滑動，頗為觸目，即以小箭頭表示者。普通欲求平滑之曲線，雖以小時定數為宜，但求反射尖峰之正確位置時，則以小時定數為佳。又分度因數及乘數原係決定感度者，故於記錄敏銳之尖峰時，應以大因數為之。但其相反之作用則為曝露極微之變動，且使曲線失去平滑。由此可知，欲求尖峰之正確位置，自以緩慢之走查速度為宜也。除此之外，在計數率表之時定數方面，當降低走查速度時，其影響較小。因此當時定數為 2~4 秒時，其乘數為 1，而分度因數為 2 或 4，故可以 4-1-4、4-1-8、2-1-8 等組合之。至走查速度及時定數與集光孔隙寬度之關係，則如下表所示：



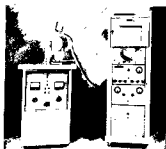
第 356 圖曲線尖峰及走查方向

走查速度	孔隙寬度(吋)	時定數(秒)
2'	0.006	< 1

2°	0.003	< 1
1°	0.006	1.5
1°	0.003	< 1
1/2°	0.006	3
1/3°	0.003	1.5
1/8°	0.006	12
1/8°	0.003	6

(B) X線繞射計之功用：

X線粉末法之研究，在最近十五年中非常進步。即膠片法完全由X線繞射計所取代，而在實驗時，亦須應用高度之技術。因各國爭先研究，故於最短期內已能發揚光大。最初之X線繞射計為美國綜合電器公司 (General Electric Co.) 及飛利浦電子公司 (Philips Electronics Co.) 之出品，其在世上之流傳，迄今不過十五年耳。



第 357 圖飛利浦電子公司出品之 X 線繞射計

但精密度之高，則為任何儀器所不及。蓋以膠片法所得者，除精密度較差外，且攝影需時較長，普通攝取矽酸鹽試料所需之時間常達 10 ~ 20 小時之久。此時雖可以強力 X 線之集中法攝影機或用旋轉對陰極之方式，但強電壓或強力電子線足以損壞對陰極之金屬板。即使以水流冷卻陽極，亦難使強力電子線受射於一點，故在操作上常有困擾發生。

迨 X 線繞射計問世後，凡曾使用之人士，咸認為性能高而便於應

用之儀器，在價格上雖高出極多，但仍能於短期內普遍使用。目前各國均有類似之產品，如日本理學電機公司及島津製作所皆可製造，諒不久之將來，在礦物研究室中之X線繞射計，必能繼偏光顯微鏡之後而成爲常時使用之儀器也。

至儀器之性能對礦物之研究上及學理之應用上所促成之進步，更有下列數端：

X線之粉末反射，原爲判別物質之有效手段。後因儀器之進步，更能做深入之判定。其所用之基準，即爲各粉末線之強度 I 及其網面間隙 d 。在已蒐集公佈之各種化合物粉末反射資料中，以ASTM（American Society for Testing Minerals）之卡片應用最爲廣泛。目前所收集者，已達六千餘種。尤其最強線、次強線及第三強線等之強度，皆須以 d 檢驗搜索之。

天然產出之礦物，多不純粹，其所混入之雜質，在檢查上以X線繞射計最爲簡易。此不但爲學理上之重要一環，而在將來之化學工業上，亦應特別重視之。

在工業製品中，對所含物質之數量，至爲重視。其檢定方法雖有定性及定量二種，然定量僅賴表中粉末線之觀察，仍難達到目的，故須特別之操作。同時產品之含量應爲100%，否則應將雜質之特性立予判明。因此，目前在工廠之中皆設置X線繞射計，從事於每日產品之純度檢查工作。當發現不純之產品時，即行檢討其製造過程，並執行廣泛之品質管制。按品質管制在原料方面極爲重要，但目前尙未普遍施行。蓋以一般金屬資源中，在品質管制上原不需過嚴，普通選目即可。而非金屬資源則應施以極嚴格之品質管制，尤以最近新非金屬資源所形成之問題，更爲迫切。例如在曝露之白色凝灰岩中，多含沸石之長石，其利用方法殊難以目判定。設以X線繞射計檢查時，必可收品質管制之效果也。

物質之化學成分有簡單者，亦有極爲複雜者。而化學成分複雜之物質，在構造上更有大致不差者。此乃係不同之化學元素，分據於同

格之格子點上，是為同形離子置換。雖不致影響構造之全局，但其常數則往往發生少許之變易。且粉末反射之相對強度，亦呈顯著之變化。至粉末反射之特性，首在粉末線之方位及其強度，皆係表示構造之改變者。當同形離子置換時，其置換比雖小，亦可在粉末線之方位上發生微細變化。在強度方面言之，若同形離子置換不影響X線之散亂能時，雖置換比甚大，亦不致有所變更。而在散亂能相差甚大之離子置換中，其置換比遂成為影響X線粉末反射強度之主要關鍵。即使比值甚小，此種現象亦頗顯著。上述之細微變化，往日方法極難判別，常多忽略不計，但在目前則可以X線繞射計完全補救。其X線粉末反射之連鎖意義，於此可見一斑矣。基於上述各點，使用X線繞射計，首先可將最細微之礦物分類標準，予以確定。即由於研究同形置換比不同之礦物，可按其結晶構造確定粉末線之指數，再由粉末線方位之細微差別，進而求其常數之少許變化。因其與同形離子之置換比繁繁相關，在學理上乃形成一實驗式。若由實驗式反向尋求，根據其常數之變易可得同形排列之礦物化學成分也。

同形離子置換過去即認為最敏感之物性，在礦物之研究領域中，由於光學之分析，可以判別其化學之組成。同時將所有造岩礦物，製成化學成分與光學性質相互間之關係圖表。自X線繞射計問世後，更將結晶常數之變化列入焉。除此之外，根據礦物之同形離子置換比與格子常數間之相互變化，用X線繞射計可以求得一相關關係，且多可以公式表示之。若能返轉應用，則由X線所得之化學分析，足可達於詳盡之地步也。

結晶構造之研究，原係以理想形為出發點。但最近已判明重疊構造本係由理想形所歪斜者，因之格子常數乃發生變化。設將過去所擬之公式，再予嚴密檢討時，其自理想構造所得之計算值與實測值之間，遂產生少許之差別矣。

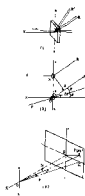
除此之外，在礦物特性之發現上，亦不乏其例。如1950年鮑溫(N. L. Bowen)與屠特爾(O. F. Tuttle)將鈉長石成分之玻璃體置於高

溫下，使之晶化，在其粉末反射上發生極微之變化。此種變化原出現於天然長石中，其後用X線繞射計，得知(131)與(131)二粉末反射之方位差，最易呈現此種變化。同時高溫下之合成物體，其變化幅度稍大，而天然產物中則幅度較小，可能係低溫中所生成者。此雖係微渺之差別，但足以表示實際上礦物之生成，基於環境之不同而產生極重要之變易也。

又X線粉末反射之強度與粒子大小之分布及構造之歪斜有關，使用X線繞射計，在此方面更能加深其瞭解程度。1954年侯斯加(C. R. Houska)與瓦倫(B. E. Warren)二氏認為強度分布之變化原因，則係粒子之大小分布及結晶構造之歪斜。在其區別之方式上，更以石墨解釋之。

若用逆格子為論點時，因粉末片應對向四面八方，故須將逆格子空間亦向四面八方旋轉。因逆格子點切反射圓而發生反射，其繞射角為 θ ，在上述逆格子幾何圖中，逆格子點P為以OP之距離環繞於C點周圍且對向四面八方者。於是點P乃切反射圓而發生繞射，其以OP為半徑所成之球稱之為粉末球。即在粉末法中，當粉末球與反射球相切時，則發生繞射現象。

(4)旋轉攝影 (The rotating-crystal photographs)：將單一結晶置於轉軸 aa' 之上，引X線沿XO之方向射入，並與轉軸垂直。若一面旋轉晶體一面投射X線時，則X線沿OR及OR'方向反射，而在與XO垂直之乾板上生成斑點。至所用之結晶，通常以人目可見者為準。其中將晶體沿轉軸旋轉 360° 之攝影方式，稱為旋轉攝影 (Rotating-crystal method)，若將晶體在一定範圍之角度內往復移動，則稱為振動攝影 (Oscillation method)。普通轉軸應



第356圖
旋轉攝影

與入射 X 線呈垂直狀態，此可以裝於板負結晶台上之調節器調整之。同時在固定位置裝以小型望遠鏡，以供檢查晶體位置之用。又結晶之位置應轉至與十字絲重合時為止。

設 OH 為轉軸 aa' 方向上之原子周期，X 線沿 OR 方向強烈集合，其繞射角為 2θ ，並由 H 向 OR 引垂線，得垂足 K，當 $\angle HOK = \zeta$ 時，則

$$OH \cos \zeta = n\lambda \dots\dots\dots(1)$$

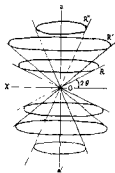
此時 X 線之反射面，則為與 XO 及 OR 形成等角 θ 之 PQ 面。

在入射 X 線之垂直方位，置以乾板，反射 X 線 OR 即於其上生成斑點 P。設以 x、y 為乾板上 P 點之座標軸，並使 y 與 aa' 平行，而與 x 垂直。且原點 D 為入射 X 線與乾板之交點，再由 P 點向 x 軸引垂線，得垂足 G。當 $\angle DOP = 2\theta$ ， $\angle POG = x$ ， $\angle DOG = \phi$ 時，則

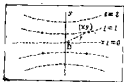
$$\left\{ \begin{array}{l} \tan 2\theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{OD} \\ \tan \phi = \frac{x}{OD} \\ \tan \chi = \frac{y}{OD} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

因 $\zeta = 90^\circ - 2\theta$ ，故由上式可求得 θ 及 OH 之值也。

沿 OR 方向繞射之 X 線，當行程差等於波長 λ 時，其 θ 之值最小。但行程差為 2λ 、 3λ 而強烈集合之繞射 X 線，則形成 θ' 、 θ'' 等大繞射角，即 $n = 1, 2, 3 \dots\dots$ 時，於 $\theta, \theta', \theta'' \dots\dots$ 等方位產生繞射 X 線，而其中間部份則無繞射之 X 線

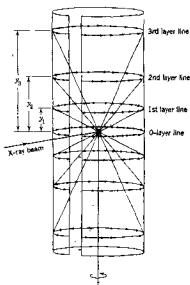


第 35 圖 圓錐形繞射



第 36 圖 屏幕上之雙曲線

發生。且以 $180^\circ - 2\theta$ 為頂角及以 O 為頂點之圓錐繞射，即係因 θ 、 θ' 、 θ'' 角而形成者。如圖所示，並在圓錐與乾板相切之位置產生雙曲線。由 O 點之最近部位開始，沿 y 軸順序計算，稱之為第一層線 (1st. layer line)、第二層線 (2nd. layer line)、第三層線 (3rd. layer line) 等。至 x 軸之本身，則稱為零層線 (0-layer line) 或赤道線 (Equatorial line)，即與 180° 頂角之圓錐相當者。上述之斑點皆位於雙曲線上，且每一斑點均代表一品面。當繞射角為 θ 時，其所生之斑點 P_1 即位於第一層線上。若將結晶旋轉一週，再按 θ 繞射角在另外位置所生之



第361圖層線之排列

斑點 P_2 ，仍位於第一層線上。於是 P_1 及 P_2 遂處於 y 軸兩側之對稱位置矣。設在 aa' 軸之垂直方位有對稱面時，則與 P_1 相對應而產生 P'_1 ，與 P_2 相對應而產生 P'_2 ，且非列於 x 軸兩側之對稱雙曲線上。至 θ' 、 θ'' 繞射角之斑點，各排列於第二、第三層線之上，其情況與上述者相同。又自平行於 aa' 晶面所生之反射 X 線，皆排列於零層線上，恰如第 361 圖所示者。若將乾板更換，改用 X 線粉末攝影機，即將膠片插於圓筒形之攝影機中，則圓錐與圓筒相切而成直線，於是各層線之排列，乃以平行於 x 軸之直線詳表示之。

(5) 移動膠片法 (The moving film method)：在粉末法及旋轉攝影中，其不同原子面之反射多相重合，而相重之反射又無法區別。為免此弊，乃以移動膠片法代之。此不但可得正確之構造解析，且由攝影所得者，亦不若前二法之複雜，實為研究結晶構造之最捷途徑也。茲

將通常使用之方法，分述於下：

(A)威森伯格法(The Weissenberg method)：將晶體固定於與圓筒形膠片轉軸平行之支持棒上，沿其軸旋轉，同時移動膠片，以記取與轉軸成定角之反射X線。設膠片靜止而僅轉動結晶體時，則成旋轉攝影。其自攝影中所取出者，僅為一層線，故應使成順排。此時只須將膠片在轉軸之方向上往復移動，即得所要之影像。如所取出者為零層線時，其入射X線應與轉軸垂直。若取出高次層線時，則須在 $\beta = 90^\circ - \lambda$ 之情況下，呈與圓筒膠片轉軸之傾斜入射。至所得之層線，通常以一螺旋狀之線表示，其反射點乃於線上展開。今以 z 及 x 為膠片上之座標軸時，則 x 軸即為X線入射面與圓筒形膠片相切者。設繞射角為 γ 時，則：

$$\frac{\gamma}{x} = \frac{360}{2\pi r_D} = C_1$$

上式之中， r_D 為圓筒之半徑。又以 ω 為結晶之旋轉角時，則：

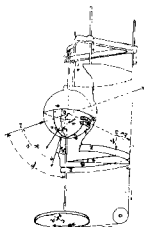
$$\frac{\omega}{z} = \frac{360}{2\pi r_D} = C_2$$

式中之 $2\pi r_D$ 為 $\omega = 360^\circ$ 時之膠片移動距離。設 $C_1 = C_2 = 1$ 時，則可以下式表示之。

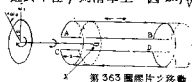
$$\gamma = x, \quad \omega = z$$

當 $\gamma = 10^\circ$ 時，則 $x = 1^{mm}$ ，若 $\omega = 360^\circ$ 時，則 $z = 360^{mm}$ 。為使膠片移動起見，普通將牽引膠片之帶，連於半徑 r_V 為滑車上。因 $2\pi r_V = 360^{mm}$ ，故 $r_V = 57.3^{mm}$ 。

在(010)軸上之赤道線，其斑點之指數以 $h0l$ 表示，且皆位於



第 362 圖威森伯格攝影

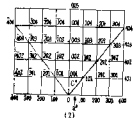
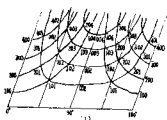


第 363 圖膠片之移動

與 ω 軸成 ϕ 角之直線上。至代表 h 、 l 之曲線則於圖中相交，而其交點即係反射所得之點。

(B)希伯爾德及撒特爾法 (The Schiebold & Sauter method): 乃一面旋轉結晶，一面旋轉乾板者也。若僅攝取一層線之影像時，其斑點即呈二次元之展開。

(C)前行法 (Precession method): 即上述之逆格子而不呈歪斜狀態者。



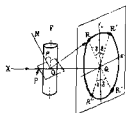
第 364 圖斑點指數之排列

(6)纖維像：將金屬一面引伸，一面壓擠時，其微晶之某面常排列於一定之方向。此種現象，稱為纖維構造，而其方向則稱為纖維軸。如引伸銅線時，其(111)面即排列於延長方向，而金屬線之方向即成為纖維軸。又引伸鋅線時，其C軸與伸長方向呈 72° 之交角。此種現象，特稱為螺旋構造。至引伸鎂線時，其C軸與金屬線之方向垂直，是為環狀構造。若將金屬線置於入射X線之垂直方位，於靜止狀態中以X線照射時，其所得之攝影，稱之為纖維像。

今以X線自金屬絲之垂直方向投射，而由一原子面發生反射時，設ON為法線， ρ 為法線與金屬絲中軸之交角，其所得之結果與旋轉結晶法相同，即所產生之四斑點均位於一粉末反射圓上也。此時 x 、 y 為膠片上之垂直座標軸，入射X線與膠片之交點Q為原點，且引 Qx 與金屬絲之方向平行，引 Qy 與其垂直，並以 R 、 R' 、 R'' 、 R''' 為四斑點，當 $\angle RQy = \angle R'Qy = \dots = \zeta$ 時，則：

$$\cos \rho = \cos \zeta \times \cos \theta$$

此即所謂之波爾綫 (M. Polanyi) 式也。當 $\rho = 90^\circ$ 時， $\zeta = 90^\circ$



第 365 圖纖維像

，反射像排列於 Qx 上。設 $\rho = 0^\circ$ 時， $\xi = 0$ ，此時在 Q 之位置產生斑點。又 $\rho = \theta$ 時，則在 Qy 軸上產生斑點。


3-3 繞射 X 線之強度

(1) 繞射 X 線之強度測定：在 X 線結晶學之研究中，係以繞射像之位置、斑點之指數及斑點之濃度為主題。尤以繞射斑點之濃度，在構造解析上更為重要。茲將其測定之有關事項，述之於下：

膠片上斑點之濃度，隨繞射 X 線之強度而異。所謂強度，除分為相對的與絕對的二種外，更有定性評價與定量測定之別。其中以絕對強度之定量，較為重要。至相對強度定性之判斷，亦有助於研究工作。在使用膠片及乾板時期，其相對強度之評價，較為容易，因而對結晶之構造，可做深入之研究。但 X 線繞射計係以計數管尋求 X 線之強度，其影響繞射 X 線之因素極為複雜，故實際上殊難奏效。至計數管之使用，原以粉末法為主。但最近在旋轉攝影，振盪攝影及移動膠片等法中，均將膠片改用二次元之活動計數管，用以收受繞射像之方位，以便研討其濃度（繞射 X 線之強度）之尋求方式。故使用 X 線繞射計時，其繞射 X 線之強度及尋求程序，乃成為中心課題。茲將測定方法分述於下：

(a) 一面移動計數管，一面記錄其強度，標準誤差 σ 可以求查速度 S （度/分）、時間 t （秒）、及強度 n （發音數/秒）（c.p.s）表示之。即 $\sigma = \sqrt{n/2t}$

在投射者為平行 X 線束時，則如下表所示：

	2°	1°	$\frac{1}{2}^\circ$	$\frac{1}{4}^\circ$	$\frac{1}{8}^\circ$
	1	2	4	8	16
50	71%	50	36	25	18
100	10	5	4	3	2
200	5	3	3	2	1

400	3	3	2	1	0.9
800	3	2	1	0.9	0.6
1000	2	2	1	0.8	0.6
2000	2	1	0.8	0.6	0.5
5000	1	0.7	0.5	0.4	0.3

(B) 將計數管固定於最大強度之位置，而計取一定時間中之計數者。其在執行方式上又可分為定時間法及定計數法二種。定時間法之統計誤差常隨強度而異，但其時間之相對誤差則保持一定。至定計數法乃恰與之相反，即統計誤差保持一定，而時間之相對誤差則常改變。設不計時間上之誤差時，則標準誤差 σ 可以下式表示之。即

$$\sigma = \sqrt{n}$$

茲將二數值之關係，列表如下：

n	100	500	1000	2000	4000	8000
σ	10%	5	3.2	2.3	1.6	1.1
n	16000	32000	64000	128000	256000	
σ	0.8%	0.6	0.4	0.3	0.2	

當測定強度時，其結果常受下列因素之影響：

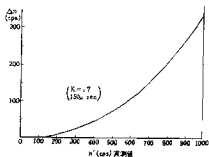
(A) 儀器之安定：為提高測定結果之正確性，在器械上應加以電壓及電流之安全裝置。

(B) 計數低落之補正：在計數管之分解時間內，使用二粒子，並不能產生計數。若用 t 秒分解時間之計數管按每秒 n 次之發音數，計測其控制計數之 X 線時，則因計數低落而生誤差。設其所測者為 n' 時，在定時間法中可以下式表示之。

$$n = \frac{n'}{1 - n'kt}$$

上式之中， K 值隨 X 線管之電壓，整流條件及對陰極之種類而異

。通常多以 $K = 1.7$ 為準，如圖所示，乃分解時間為 $150 \mu\text{.sec}$ 時之補正曲線 ($\Delta n = n - n'$)。其橫軸為 n' 之實測值，縱軸則為補正值。若計數低落在 20% 以內時，普通以 $K = 1$ 為宜。



第 366 圖實測值與與補正值之關係

(C) 粒子之大小：在粉末法中，應儘量使各粒子對向四面八方。設顆粒較粗而數量較少時，其強度之變化必大。故所用之顆粒以愈小愈佳，普通多在 300μ 以下。如以石英之 (10 $\bar{1}1$) 面為反射面時，其顆粒之細度 P 與強度之平均偏差 D 之關係如下：

P	15 ~ 50 μ	5 ~ 50 μ	5 ~ 15 μ	< 5 μ
D	1545	929	256	132

(D) 粒子之定向排列：與上項之關係頗為密切，在薄片狀礦物中，極細之顆粒，亦常發生定向排列。因其計算方式尚不十分明瞭，故應儘量避免之。

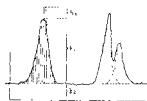
(E) 基本計數之影響：如不計重反射之分離及基本計數之反射強度 (I_0) 時，觀下圖即可瞭解。若以波長極短之 X 線投射於試料元素之 X 線吸收端時，則因吸收而使非干涉性 X 線之散亂增加，而將基本計數之水率提高，致曲線上之顯著尖峰為之消失。此種現象，當銅裝對陰極所產生之 X 線，投射於含鐵 20% ~ 30% 之化合物時，即可見到。故對陰極之製作，應以鈷或鎘為之。

普通之基本計數乃連續 X 線之散亂所產生者，但連續 X 線常與示性 X 線互相羈絆，故應以過濾器將示性 X 線之輻射像濾除之。此外，若能嚴密運用單色 X 線時，更可使輻射像趨於明瞭，即單色 X 線計 (Monochromator) 之使用也。

(F) 孔隙系之選擇：在 X 線繞射計之使用法中，其孔隙之形狀與 X 線之強度有密切關係。如孔隙之發散角小時，X 線束係自試料面發出，其照射之全強度甚弱。又另外發生散亂時，亦能將基本計數之水準提高。於是在可用角度範圍內，應儘量尋求 X 線束最有效之孔隙。例如當投射 X 線於長 20^{mm} 之試料面時，其所開之孔隙與 2θ 之關係，則如下表所示，即孔隙愈狹，其所得之繞射像亦愈弱也。

發散孔隙	4°	1°	$\frac{1}{2}^\circ$	$\frac{1}{4}^\circ$	$\frac{1}{6}^\circ$	$\frac{1}{12}^\circ$	$\frac{1}{30}^\circ$
2θ	76.8°	18.1°	9.0°	4.5°	3.0°	1.5°	0.61°

欲求準確之強度時，應將行走速度由 2° ($2\theta/\text{分}$) 減至 $\frac{1}{4}^\circ$ 或 $\frac{1}{8}^\circ$ ，所得各點之高度並應換算成每秒之計數值，且對各點之計數低落加以補正 (h_1)，更將基本計數 (h_2) 扣除之。



第 367 圖 曲線之突峰

上述之強度變化，與複雜之試驗因素有密切關係。在影響繞射 X 線強度之因素中，首推試料之構造，亦即 X 線之強度與結晶構造之關係至為密切。至其中所包括之

項目，計有構造因子、偏光因子、雜質因子、 h - k - l 因子、吸收因子及同格原子面之重複頻度等。

(2) 構造因子：當 X 線撞觸原子時，因各電子發生共振，故其繞射之 X 線，乃按同一波長互相強烈集合。以振幅之疊點言之，其繞射 X 線之強度，即由結晶中所產生 X 線之振幅與干涉結果所得之合成振幅也。簡言之，各不同 X 線之相互干涉，常與其行程差有關。考繞射 X 線之強度，原係波動之合成問題。其在結晶與其他各體系內之 X 線振幅，由最小單位逐次增大，即最小之單位為核外電子，由比而原子、單位胞，以至於結晶全體。其主原子所繞射之 X 線振幅，稱之為原子散亂能，亦即原子之構造因子也。在數值上常隨 X 線之入射角而異。至由單位胞所得之繞射能，則稱之為單位胞之構造因子或結晶之構造

因子。

研究結晶所生之X線散亂，皆以電子為出發點，其後為電子之母體者為原子，原子再集合而成單位胞，單位胞更集合而成一結晶體。故結晶構造之表示，可以下列方式為之。

設以 a_0 、 b_0 、 c_0 為三晶軸之原子周期，其單位向量即結晶軸上之單位軸向量。今以原點為原子之位置，則其位置向量可以單位軸向量表示之。

$$r = m_1 a_0 + m_2 b_0 + m_3 c_0$$

在以 a_0 、 b_0 、 c_0 所構成之平行六面體，即單位胞長上下、左右、前後之重疊排列而形成之結晶中，若以原點為單位胞之頂點時，則其他單位胞頂點之位置向量可以下式表示之。

$$r_u = m_1 a_0 + m_2 b_0 + m_3 c_0$$

又 r_u 為頂點至單位胞內部原子中心之向量，而 r_e 為原子中心至核外電子之向量時，則由原點至結晶內部電子之位置向量，可以下式表示之。

$$r = r_u + r_e + r_e = r_u + r_e$$

(3) 原子構造因子：如圖所示， E_i 及 E_j 二電子間之距離為 r_{ij} ， r_i 及 r_j 為 E_i 及 E_j 電子之位置向量，則：

$$r_{ij} = r_i - r_j$$

若 XE_i 及 XE_j 為入射 X 線束， E_iR 及 E_jR 為由電子所產生之散射 X 線時， k_1 為 X 線之行程差 Δp 可以下式表示之。

$$\Delta p = \vec{E}_i \vec{B} - \vec{E}_j \vec{A} = r_{ij} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2)$$

式中之 B 為由 E_i 向 XE_i 引垂線，得之垂足， A 為由 E_j 向 E_jR 引垂線所得之垂足， ϕ_1 、 ϕ_2 為 $\angle XE_iE_j$ 及 $\angle E_iE_jR$ 之角度。則其行程差 ϵ 可以下式表示之。

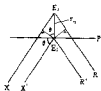
$$\epsilon = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta p) = \frac{2\pi}{\lambda} (E_i B - E_j A)$$



第 368 圖 電子之散射 X 線

若由原子全體言之，其各電子散亂之 X 線互相干涉，所得之合成波即由整個原子所產生之散亂 X 線也。

如圖所示，P 為原子之表面， E_i 為電子之位置，若再自表面引垂線 r_{ij} ，則得另一電子位置 E_j 。設投射於二電子之 X 線束為 $E_j I$ 及 $E_i I'$ ，而繞射 X 線為 $E_j R$ 及 $E_i R'$ 時，其位相差可以下式表示之。



第 369 圖 X 線之散亂

$$e = \frac{2\pi}{\lambda} 2r_{ij} \sin \theta$$

若由原子面及原子中心所繞射 X 線之振幅為 A_0 及 A_n 時，則：

$$A_n = A_0 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2r_{ij} \sin \theta \right)$$

若原子內之電子數為 Z ，入射 X 線之振幅為 A 時，則：

$$A = \bar{A}_n \cdot Z$$

因 $f_a = A/A_0$

故 $f_a = \bar{A}_n \cdot Z/A_0$

上式所代表者，則稱之為原子之構造因子，其數值可用 $\frac{\sin \theta}{\lambda}$ 之函數求之。如 $\frac{\sin \theta}{\lambda}$ 大時，則其數值減小，其減小率常因原子之種類而異。通常在氧、鋁、矽、鎂等原子中，以氧之減小率為最低。

(4) 波動之合成：普通波動之性質，多以振幅 A 及位相差 ΔP 表示，設一波長 (λ) 相隔點之位相差為 2π 時，則可以下式表示之。

$$e = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta \beta)$$

在座標軸上，由原點發出之向量為 f ，若 A 為正向，則其與正座標軸相交成 e 角，此即波動之表示也。至二波動合成波之振幅，可用 f_1 及 f_2 二向量之合成法求得之。其公式如下：

$$F = \sqrt{(f_1 \cos e_1 + f_2 \cos e_2)^2 + (f_1 \sin e_1 + f_2 \sin e_2)^2}$$

上式之中， F 即合成波振幅之大小也。設為二波動以上時則：

$$F = \sqrt{\left(\sum_i f_i \cos \epsilon_i\right)^2 + \left(\sum_i f_i \sin \epsilon_i\right)^2}$$

設波動之座標為 A 、 B 時，則又以下式表示之。

$$F^2 = A^2 + B^2$$

$$\cos \epsilon = A/|F| \quad \sin \epsilon = B/|F|$$

(5) 其他因子：

(A) 偏光因子：乃因繞射 X 線之歪斜所產生之因素也。普通在示性 X 線中，雖不生歪斜。若一旦發生繞射，則歪斜立即產生。通常歪斜之程度與繞射角有關，且與繞射 X 線之全能 $\frac{1 + \cos^2 \theta}{2}$ 成正比。

(B) 羅倫茲因子 (Lorentz factor)：入射 X 線並非一定自結晶單色計 (Crystal monochrometer) 發出，且更非絕對平行之 X 線，普通稱其強度之補正因素為羅倫茲因子。將單色 X 線投射於不規則方位之粉末塊上時，其補正因素為 $\frac{1}{(2 \sin^2 \theta \cdot \cos \theta)}$ 。若所用者為單晶時，在平行轉輪平面上所發生之反射 X 線中，其反射位置之時間補正因子則為

$$\frac{1}{(\sin \theta \cdot \cos \theta)}$$

(C) 溫度因子：原子振動可將反射 X 線之強度減弱，在熔融狀態時，強度最弱，其極點為零。普通熔點高之結晶，在常溫狀態之下，其原子熱振動之影響力較小。設以 e^{-2x} 為熱振動之影響力時，則

$$M = B (\sin^2 \theta) / \lambda^2$$

$$\text{而 } B = \frac{\theta h^2}{m_0 K \theta} \left\{ \frac{\phi(x)}{x^2} + \frac{1}{4} \right\}$$

上式之中， m_0 為原子之質量， h 為普朗克 (Planck) 常數， K 為玻爾茲曼 (Boltzmann) 常數， θ 為以絕對溫度計算之溫度， $x = \frac{\theta}{T}$ ， $\phi(x)$ 為德拜 (Debye) 函數。

(D)吸收因子：乃因X線吸收之強度補正值也。如將平行之X線束投射於半徑為 r 之圓筒狀試料時，則因吸收而影響繞射X線之強度。在粉末法中，設粉末充填物對X線不吸收，則其試料之線吸收係數 u 、粉末之吸收係數 u' 、試料之密度 ρ 、粉末之密度 ρ' 之關係，可以下式表示之。

$$u' = \frac{\rho'}{\rho} u$$

設 I_0 為X線投射於試料粉末單位體積之強度（不吸收狀態下）， I_0' 為X線由試料單位體積繞射後之強度（不吸收狀態下）時，則可以下式表示之。

$$I_0 = I_0' \cdot \frac{\rho}{\rho'}$$

(6)消光：將X線投射於理想之完整結晶，當入射角為 θ 時，因發生全反射，其進入內部之X線，在 θ 角之方位上突然減少，是為一次消光。若使用孪生結晶時，X線在結晶表面之晶塊上發生反射，以致到達於內部之X線仍然減少，是為二次消光。至結晶表面之晶塊，則係位於偶數反射之方位。因非平坦之面，其透於內部之X線常較一次消光時為多。故用孪生者為理想之完整結晶時，因係一次及二次消光同時發生，故對X線射入之影響，大為減少。可知大部晶體，均係孪生結晶也。

茲將一次消光與二次消光之大小，分列於下：

晶塊片大者，其一次消光大，以 a 表示之。

晶塊片小者，其一次消光小，以 b 表示之。

晶塊片傾斜小者，其二次消光大，以 α 表示之。

晶塊片傾斜大者，其二次消光小，以 β 表示之。

如金剛石之消光為 $a\alpha$ ，方解石之消光為 $b\alpha$ ，石英與黃玉之消光為 $a\beta$ ，石膏、雲母、閃鋅礦、閃鋅礦及岩鹽之消光則為 $b\beta$ 等皆足。

(7)相對強度：當X線全部投射於一品面或定向排列之粉末體表面

時，其繞射 X 線之相對強度，可以下式表示之。

$$P = K \frac{I_0 S_0}{2u} |F|^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{\sin 2\theta} \right)$$

上式之中， S_0 為入射 X 線末端之斷面積， I_0 為試料粉末單位體積之繞射 X 線強度， u 為試料之線吸收係數。

若 X 線投射於不定方位之粉末塊時，則繞射 X 線之相對強度，又可以下式表示之。

$$P = K \rho I_0 S_0 |F|^2 \left(\frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin \theta \cos \theta} \right)$$

(8)消光條件：即 X 線強度與結晶構造之關係也。普通 X 線繞射像之性質，以濃度、方位及面指數最為重要。在上述之強度式中，構造因子 F 與構造之格子常數及原子座標之面指數有關。在等軸晶系之面中心立方格子及體中心立方格子中，若僅有一種原子時，其原子之構造因子為 f_0 。在體中心立方格子中，位於頂點之原子有八，其屬於每一單位胞者僅為 $\frac{1}{8}$ ，折實計算，即每一單位胞可獲得一原子，故以 (000) 表示之。除此之外，又在單位胞內有一原子，亦即此單位胞獨有一原子，其座標以 $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ 表示之。

若在指數之間有特定之條件時，則不發生反射，特稱之為消光條件。此在構造之解析上極為重要。且對空間群之推定，更具有功用也。

至面指數與 X 線反射之關係，常隨空間格子之種類而異，即在不同之空間格子中，其原子面之距離 d 不同，故有下列三種情況。

體中心立方格子： $h+k+l =$ 奇數時，不發生反射。

面中心立方格子： $h+k =$ 奇數， $h+l =$ 奇數， $k+l =$ 奇數時，不發生反射。

底面心空間格子： $h+k =$ 奇數時，不發生反射。

(9)同形離子置換：在構造因子中，本含有各原子之散亂能，當發生同形離子置換時，其構造因子是否發生變異，頗成疑問。考同形離

子之本性雖極相似，但散亂能之相差懸殊者，亦復不少。如矽與鋁之間，因其散亂能極相類似，二者間之置換在構造因子上，殆無差別，故普通均以相等之散亂能視之。至鐵之散亂能與矽、鋁及鎂等相較時，則差別甚大。因此，凡含鐵之結晶，其構造因子及 X 線之繞射強度，均大不相同。

今以白雲母為例，其單位胞在 $9 \times 5 \times 10 \text{ \AA}$ 之範圍內為 $K_2 Al_4 (Si_4 Al_2 O_{20} (OH)_2)$ ，其中 Si 之一部常以 Al 置換之。二者合計為 8 即 $Si:Al = 6:2$ 。因二原子構造因子極相類似，故可以 Si 代表，並將 F 分而為三。即：

$$F_1(K_2) + F_2(Al_4) + F_3[(Si \cdot Al)_4 O_{20} (OH)_2]$$

設以 (001) 及 (002) 為例，則：

	(001)	(002)
F_1	17	-120
F_2	-37	34
F_3	45	42

於是 $F(001)$ 為 $17 - 37 + 45 = 25$

又其中之 K 可以 H_2O 置換， Al 可以 Fe 及 Mg 置換。但在 K 與 H_2O 間、 Al 與 Mg 間、 Al 與 Fe 間，因原子構造因子不同，故不能一概而論。且以氧代表 H_2O 時，則產生下列結果。

		10 \AA	5 \AA
F_1		17	-120
F_2	2.0 K	-37	34
	1.5 K, 0.5 H_2O	-32	30
	1.0 K, 1.0 H_2O	-27	25
	0.5 K, 1.5 H_2O	-23	21
	2.0 H_2O	-18	16
F_3	4 Al	45	42
	3 Al, 1 Fe	58	54

2Al, 2Fe	71	66
1Al, 3Fe	85	78
4Fe	98	90
6Mg	68	62
5Mg, 1Fe	81	75
4Mg, 2Fe	94	87
3Mg, 3Fe	107	99
2Mg, 4Fe	120	111
1Mg, 5Fe	133	123
6Fe	146	136

以上數值，均係用 $\text{Cu K}\alpha$ 之波長測得者，當其組成爲

$(\text{K}_{1.5}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}) \cdot [\text{Al}_1\text{Fe}_1](\text{SiAl})_1\text{O}_3(\text{OH})$ 時，則可以

下式表示之。 $F(5\text{\AA}) = -120 + 54 + 30 = -36$

3-4 電子分布密度之測定

(1) 結晶構造之電子分布密度：在結晶構造解析之順序上，係以 X 線繞射像之性質爲依據。即先求原子之位置，然後再求電子分布密度。在構造因子中，其所含之原子散亂與電子分布密度有關，而結晶構造可視爲電子之集合球，且電子之分布密度在構造中頗不平均，其最大處所即爲原子之中心。故求得構造中之電子分布密度時，其構造解析必可達成矣。

由 X 線繞射公式觀之，其中含有結晶構造因子，在結晶構造因子中，更有原子構造因子，此與原子中之電子分佈有關也。反之，由電子分布密度觀察結晶時，普通均係以電子分佈密度爲中心，而形成構造因子之一般表示法。此種方法與弗立爾級數 (Fourier Series) 有密切關係。至構造因子最普通之表示法，多以一點之 X 線散亂物質之密度 $\rho(xyz)$ 爲依據，因此密度係以電子單位表示者，即 $\rho(xyz) dx dy dz$ 者，乃 $dx dy dz$ 體積中之電子密度也。

普通在 X 線之繞射中， (hkl) 面與 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 面之反射相等，而與對稱中心無關。換言之，即由結晶所繞射 X 線之強度上，不論有無對稱中心，皆不能判別其有無極性。亦即由結晶面之反射強度為一總合強度，而不受垂直方向原子排列順序之影響。吾人將各原子繞射之 X 線波，可以合成波函之，是為弗利得爾 (Friedel) 法則。

至結晶中電子分佈密度之公式，可分為三次元方向之分佈密度、二次元方向之分佈密度及一次元方向之分佈密度等三種。由其所計算之電子分佈密度圖，稱之為弗立爾合成圖 (Fourier summation)。究諸實際，因三次元在計算上頗為複雜，故普通均按二次元之情況而以一次元輔助之。

(2) 單位胞中之化學式：結晶中 A、B、C 原子數之比為 $(A_a B_b C_c)$ ，此即普通所謂之化學組成式。將 $a:b:c$ 以最大公約除之，遂成最簡單數字之比。又各原子量以 a, b, c 乘之，然後相加，即得化學式之原子量總和，是為 M。更以 ρ 為比重，V 為單位胞之體積，並以 m_H 為氫原子之質量時，則

$$n = \frac{\rho V}{M m_H}$$

n 為整數，即單位胞中所含 $(A_a B_b C_c)$ 化學組成式之數，特稱之為單位胞之化學式量或化學式數。

在氣體一克分子中之分子數約為 6.06×10^{23} ，是為阿弗加得羅 Avogadro 法則，此與氣體之種類無關，乃以羅西密特 (Loschmidt) 數 L 稱之。雖亦有稱其為阿弗加得羅數者，但因阿弗加得羅數 A 之正確數值，為在 0°C 及一氣壓下之一立方公分氣體中，其分子數為 2.706×10^{19} 。故以下式表示之。

$$n = \frac{\rho V L}{M}$$

上式為表示化學分析、構造解析及比重測定等相互關係之重要公式，設 n 距整數過遠時，則顯示三種結果，皆不正確。

(3)結晶之不規則性：理想形為便於研究上之一種假想，在實際上之結晶並不如此。試觀岩鹽之形態，極易認為正六方體，其由觀察所得之微細差別，率多認係誤差所致。又長石光學性之變化及晶面上之不平等，早為人所熟知。自使用X線以後，乃將構造特性映之成像，故在結晶之研究上，乃呈劃時代之進步。於是礦物之不規則性，遂更為重視矣。

迄目前為止，對於結晶之構造仍多先予假想，然後再判斷假想是否正確。亦即構造之精確性，因測定X線反射強度之程序有欠充分，而尚未臻理想。在另一方面，由於注意X線像之細微變化，而獲得解析之方法，於是結晶之不規則性，乃為之瞭然也。

按結晶面之不規則性，與結晶之成長有關，而構造上之不規則性，則與礦物之生成方式有關。普通所見之長石，即為最佳之例證。又不規則性之結晶，不能視為完全結晶。即在電晶體及粘土礦物中，亦復如是，於是今日之礦物學，實可謂不規則性之礦物學也。

不規則性既為觀察結晶構造之產物，設認構造為所有物性之基點時，則不規則性亦可由其他物性體認之。茲將基點構造之不規則性，分類述之於后：

(A)構造上原子排列之歪斜：目前公認之正六角形排列，應為接近斜三角形之排列形態，如雲母之構造是也。

(B)原子面之歪斜：目前所認之平坦原子面，實係彎曲之面，如板蠟石 (Antigorite) 是也。

(C)原子排列方式之不規則：原子面既係不規則之面，故原子排列周期亦不規則，以致其偏位向量遂發生變化。於是在此種構造上，其原子排列之不同部位，多以斷層視之。在結晶體中，斷層發生之頻度及原子排列周期之凌亂方向，更不相同。

(D)同形離子置換：此在化學成分複雜之礦物中至為普遍，而其置換更可分為有規則及無規則之別，通常在長石中均可見

(E)原子之漂移：在結晶之中，原子及離子常離位而自其他原子及

離子之間隙中逸出，至其原來之位置則形成殘留孔穴。此種情形在金屬礦物中至為普遍。

以上所述之不規則性，均係礦物生成環境之影響所致。故在研究之途徑上，應齊頭並進。至礦物生成環境之研討，乃係歷史事實之重現。若吾人捨却其成因及產狀，而僅向細微之構造變化追尋時，則其所得之結果，豈無再考慮之餘地歟。

(4)結晶構造之決定程序：以上所述為決定結晶構造之基本事項。至其解析程序上所用之方式，種類繁多。茲將一般情況所採取之簡單步驟，述之於下：

(A)試料方面：在構造解析上所用之試料，具有各種不同之性質，其中或已判明種類，或為不知性質之新礦物。普通在操作程序上，均以後者為主。

(B)晶形：用做試料之礦物，應為人目可見之單晶及可供使用之微粉末。單體結晶可供充分解析之用，而粉末體則可產生X線粉末反射，藉以製成構造之豫想模型，進而比較其實測值與計算值，並檢討其是否一致。最近電子線繞射已在微粉末試料之決定上負起更大之任務。至其詳情，容於電子顯微鏡中敘述之。

(C)用單體結晶時，應先行化學分析，但化學分析必須有足夠之試料，苟數量不足，則困難必隨之產生。

(D)單體結晶在形態上之性質，有晶系、軸率及面指數等。此外在物理性質中，如壓電之有無對構造解析上亦有助益。至對稱要素更可由呂耶斑點及映像等確定之。

(E)普通格子常數及直交軸上之數值，均以 a 、 b 、 c 軸之旋轉攝影法求之。但在移動膠片法中，應求格子常數之全部，將所得之軸率與形態學上之數值比較之。

(F)所求單位胞之化學式數須為整數，設與整數相差過遠時，則其常數、化學成分及比重等，必不正確。如透輝石($\text{CaMg}[\text{SiO}_3]_2$)為 $a_0 = 9.71\text{\AA}$ ， $b_0 = 8.89\text{\AA}$ ， $c_0 = 5.24\text{\AA}$ ， $\beta = 74.101^\circ$ ，單位胞之化學

式爲 4 等。

(G) 指數及消光條件以移動膠片法求之。例如在 (OkI) 中， $k =$ 偶數， (hOl) 中， $h =$ 偶數， (hkO) 中，則 $h+k =$ 偶數。又試料爲單斜晶系時，以消光條件可求得適當之空間群。

但先研討 F 之觀測值 F_o 與計算值 F_c 之適合程度。因 F_o 之符號不明，但可以 F_c 求得之。如不求原子之座標，則符號即不明確。若將原子座標一併求得，則可由其求構造因子之符號。至原子之正確位置，可以弗立爾合成直接求得之。

第四章 礦物物理學

4 1 結晶面之性質與集合

(1)均質性與異方性：凡礦物具有完全同一之性質時，通常稱為均質性 (isotropic)。若其性質隨方向而改變者，則稱之為非均質性或異方性 (anisotropic)。如光波在礦物中傳播時，其進行速度常隨方向而異。全影響礦物性質之原因，計有溫度、壓力、張力、電場及磁場等，在類別上則可分為無向量 (Scalar)、向量 (Vector) 及角量 (Tensor) 等三種。

在物理性中，常以二向量之相互關聯者為多，普遍以 V 為因，而以 U 為果，茲舉列如下：

V	U	物理現象
熱流	溫度差	熱傳導 ($\frac{V}{U} = \lambda$ 熱電導率)
電流	電位差	電傳導
電場強度	電能	電感應
磁場強度	磁能	磁感應 ($\frac{U}{V} = K$ 帶磁率)
溫度差	熱起電力	熱電

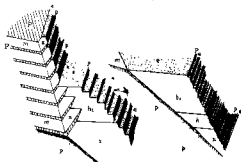
(2)條線面：在理想形中，結晶面多呈平坦狀。而一般之結晶體，驟視之晶面雖現平坦，但詳細觀察時，則非完全平坦者。又在多數結晶中，常有平行條線之面，特稱為條線面 (Striated face)。如水晶之柱面，黃鐵礦之(100)面、角閃石及輝石之柱面等皆是。至條線之方向必與主晶帶⁴⁴行，如水晶柱面之條線與柱面(10 $\bar{1}$ 0)及錐面(10 $\bar{1}$ 1)之晶帶平行，黃鐵礦晶面之條線與[100]之晶帶平行，角閃石與輝石柱面之條線與[001]之晶帶平行等均是。實際上之條線，為晶帶中相鄰之細面緊密重疊出現者。如日本秋田荒川礦山所產之三角黃銅礦，多呈此種條線面。第 371 圖所示，乃其條線面之一部稍加修飾者。

以複圓反射測角器觀察條線面時，其性狀更為明顯。在一光帶中，均由無數面所成。普通在新鮮面上，光帶較淡，無數面連續不絕。其中光像特強者為主面，在極近主面之處，其與另外面間，更伏一淡色光帶。若將接近主面之面均加以指數時，則所得者極為複雜。



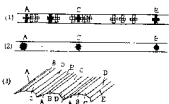
第370圖 晶面條線

造晶面磨污後，光帶條痕趨於顯著。於是多數面消失原形而同化於其光帶之中，至光輝特強之晶面邊緣，則呈殘存之圖像。如圖所示，為以拓大鏡觀察條線面時，所見數次重疊之面，乃同



第371圖 三角黃銅礦之條線面

帶之無數鄰近晶面也。且在此重疊之面中，其較寬之主面有時僅為一種(A)，亦有時在二種以上(A、B……)。



第372圖 光帶與條線面

當仔細觀察時，其同帶面之全部與相互重疊面(括號內者)間之關係，可分為下列各型：

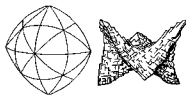
A—B—C—(DEFDEFDEF……)—G—H—K

A—B—C—(CDEF CDEF……)—F—G—H—K

上式之中，DEF 之中央部(E)為主面，其重疊面不在他處出現。在下式之中，重疊面之一部(C、E)則以單獨或重疊之姿態出現。此時C及F兩面均有主面之性質，且在光帶之兩端均呈極燦爛之光像。至C—F之間，其主面則或有(E)或無。上圖所示之模型，難以切實表示條線面之性質。設以E為主面，可繪成A—B—C—E—G—H—K，其重疊之面可以E代表，並於其上繪以條線。除此之外，亦可繪

或 A—B—C—E—F—G—H—K，而將 E 面之全部繪以條線。至 C 及 F 面，僅在接近重疊面之部位繪以條線。若在 C—F 間無主面時，則僅在接近兩面之稜部，繪以條線即可。

(3)彎曲面 (Curved face)：在某些礦物中，其晶面呈明顯之彎曲狀者，稱彎曲面，其結晶體則稱為彎曲結晶 (Curved crystal)。如金剛石八面體之面，剛玉及白雲石之晶面均是。彎曲面在反射測角器中，雖不現明顯之光像，但將焦距縮短，注意搜索時，則可見極朦朧之寬大影像。驟視之，其形態呈橢圓形，且多向某方延展，至其延展方向則與主要之晶帶方向一致。如白雲石之結晶，即其一例。



第373圖 彎曲結晶

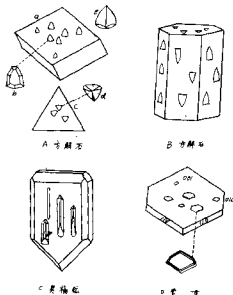
以上所述，均為清晰可見之晶面於初期生成之不平形相。由此可知，當結晶生長時，其生成晶面之力與晶帶周圍之凝集力相互作用，遂產生條線面與彎曲面。

在結晶面之中央部位常有下陷之面，特稱之為骸晶 (Skeleton crystal)。亦清晰可見之不平坦面，且多係結晶初期生成者。因晶面之稜部發育較速，以致晶面之中央部位發育落後而成此種之下陷也。

(4)蝕像面：結晶面受天水之作用，常生成無數之凹窪，是為蝕像 (Etched figure)，其結晶面則稱之為蝕像面。考蝕像之產生，乃結晶生成之初期受溶媒之侵蝕後，以晶面上一點為中心開始溶解，而形成之微小二次元凹像。至凹像之形狀與晶面之溶解速度有關，而溶解速度則又因晶面之對稱、溶劑之性質、溶劑之濃度及作用之溫度等而不同。普通之蝕像皆甚微小，非以顯微鏡則無法辨認，但亦有時長達數公厘而可直接目視之。因蝕像與結晶面之對稱有密切關係，故觀其形狀即可確定晶體之對稱也。

除此之外，蝕像亦可由人工形成，即以試藥溶解結晶者。如圖所示，乃加稀鹽酸於方解石之解理面上所產生之蝕像。因其僅有一對

稱方向，且與解理面之短對角線一致，故與結晶之對稱相符合。若將稀鹽酸加於方解石之底面時，則產生三對稱方向之蝕像，而與打像之對稱相同。又蝕像出現於柱面時，即呈細長之二等邊三角形，且具有與縱軸平行之對稱性。



第374圖 蝕像

又加氫酸於異極礦之短軸面時，其蝕像具有一雙縱對稱線，且其上下之形狀不同。蓋以異極礦之結晶屬於異極形類，故其蝕像亦與之相傳也。

白雲母之外形，頗似大方晶系或斜方晶系，如加氫酸於其底面時，則產生扇形之蝕像。因其僅有一對稱面，故可其屬於單斜晶系無疑。



第375圖 白雲母之蝕像

以熱氫酸鈉腐蝕重晶石之解理面時，其所生之蝕像具有二對稱方向，一在上下之方位，另一則在左右之方位。故知其屬於斜方晶系也。又以熱苛性鉀蝕黃玉之解理面時，其蝕像亦有二對稱方向，一在



第376圖 重晶石

結晶學之方向上與底晶石相同。

如圖所示，在水晶之六方錐面上，浸以氫酸時，其蝕像不呈對稱，而於互隔一面出現。由此可知其晶體係由正、負二種晶面組成者。又因蝕像之不具對稱要素，故知其晶體為四半面形，蓋以完面形之蝕像必具有一定之對稱關係也。在第 90 圖中 F 為右水晶而 H 則為左水晶，故二晶體之晶面蝕像不同。

岩鹽(NaCl)及鉀鹽 KCl 均為等軸晶系六面體之結晶，其對稱度在外觀上完全相同。但觀其晶面上之蝕像時，在岩鹽



第 377 圖 岩鹽之蝕像



第 378 圖 鉀鹽之蝕像

上所產者為平行六面體各稜之正方形蝕像，而鉀鹽上所產生者，其正方形則不與結晶體之稜平行。由此可知前者為完面形晶類，而後者則屬偏形半面形晶類也。

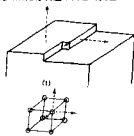


第 379 圖 綠銅鑄之蝕像

蝕像之形狀常因溶劑之性質而異。如圖所示，為綠銅鑄(Spangolite)底面之蝕像。A 及 B 均為以硫酸浸蝕所生者，但用於 A 之溶劑較濃。C 為以各種不同濃度之鹽酸浸蝕而成者。由此可知，蝕像之方向及形狀雖因作用之條件而不同，但其對稱關係則不稍異也。

(5) 螺旋轉位：最近在礦物之結晶面上，發現螺旋狀之台階構造，苟能將其生成原因與結晶之成長合併研究，必將進入新闢境地也。

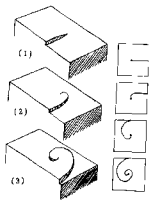
以原子論研討結晶之成長者，以高塞爾(W. Kossel)最有成效。彼認為結晶係先產生一結晶面，繼由與其相當之原子面逐漸重疊。其中之一原子面在發展途中常產生分界台階，當台階向二次元方向拓展之際，設原子列發展不



第 380 圖 台階之產生

均，則在延伸途中產生褶皺。

位於褶皺上之原子，常連成較弱結晶，更易由褶皺逃逸。當其與蒸汽接觸時，原子即附於褶皺之上，以避蒸發。其結晶在成長中之褶皺，乃由是確定。普通在結晶面上之原子結合能，即周圍原子相互結合能之總和。在單原子結晶中，距褶皺上原子最近者有三，今以最近之原子結合能為 ϕ_1 ，次近之原子結合能為 ϕ_2 ，因 $\phi_2 = 0.1\phi_1$ ，故再次之原子結合能可略而不計。又其離子方式結晶之能量為 U 時，則在褶皺上之能量為 $\frac{1}{2}U$ 。



第381圖 螺旋轉位

至結晶之成長速度，普通均較一般預料者為大，可能係結晶面上發生褶皺及台階所以致之。如將拼湊結晶與螺旋狀之台階合併研討時，則如上圖所示，其結晶表面上絡繹不絕者，實係台階之分歧，此種現象特稱之為螺旋轉位。

若結晶於此時開始生長，則必以台階為出發點。且愈接近中心，台階之前進速度亦愈大，故形成螺旋狀。又台階不因結晶之成長而消失，同時更不需生成二次元之核，於是在稍超飽和狀態之下，其結晶之成長仍能不斷進行也。

與晶面相當之原子面上，其原子排列呈對稱性，而形成褶皺及台階之方式更受面對稱之控制，故螺旋途呈對稱多角形。至台階之高度亦有一定規律，通常與結晶構造之單位胞及其整數倍有密切之關係，其數值約為數 \AA 左右，如綠柱石之為 6\AA 是也。

(6)反射影像：設晶面上蝕像及微斜面 (Vicinal) 之凹凸有一定規則時，其表面所反射之燭火，必與晶面之對稱符合，而產生對稱狀態之影像。至反射影像之檢查，應在暗室內以裝有望遠鏡之反射測角器為之。如圖所示，為由白雲母解理面上蝕像所生之反射影像，乃中間

呈對方向之直角線。由方解石解理面上蝕像所生之影像，為具有對稱性之蝶形，但由其底面所生者，則呈三角形，並具有三對稱方向。又水晶柱面蝕像所生者，



第 382 圖 蝕像面之反射影像

為一稍粗之縱線及與其斜交之短線，而不具對稱關係。同時左水晶與右水晶所生者，其方向恰好相反。故其晶形不難由此辨認也。

將普通指數之晶面換以複雜指數之晶面時，稱其所換之面為微斜面。如等軸晶系之六面體或八面體換以傾斜極緩之錐體時，其微面之數目常與置換面之對稱有關。普通六面體之微斜面，其數有四，而八面體之微斜面，其數為三。因微斜面之傾斜極緩，故指數複雜。通常超過 10 者甚多，如將螢石六面體之面換以四六面體之指數時，則為 (32·1·0)。



第 383 圖 水晶之反射影像

由螢石六面體之面所反射之影像雖呈四點，但與六面體稜線平行之微斜面所反射者，則呈十字形之影像。又由明礬八面



第 384 圖 微斜面之反射影像

體之面所反射之影像，為向三方射出之極長線，並與三八面體之面上所現者頗相類似。

上述之反射影像，常因晶面之凹凸而呈各種特別形狀，故可由其判斷晶面之凹凸、正斜及對稱等。

(7) 結晶之集合狀態：結晶之集合有規則及不規則之分，在規則之集合中，又有平行連晶與雙晶之別，在平行連晶中，更有同種與異種之不同。所謂同種結晶之平行連晶，即二同種之結晶沿一定結晶軸平行排列者。有時與晶相或晶癖相同，亦有時與晶相或晶癖相異。除此之外，在一結晶面上，亦有同種微晶以平行連晶之方式群聚者，如勳銅礦及螢石是也。

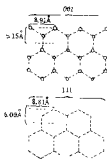
至異種結晶之平行連晶，乃異種結晶沿晶軸之方向在簡單規則之關係下互相結合者。如柱狀鈉英石與板狀磷酸鈣礦 (Xenotime) 之平行連晶及黑雲母之晶面與金紅石結晶之正規結合等皆是。除此之外，用人工方法亦可製成異種結晶之平行連晶。

如白雲母之解理面上滴以濃碘化鉀溶液，再熱之，則碘化鉀即於該面上形成美麗之平行連晶。其晶體之形狀，常呈彼此互相平行之八面體，且與雲母之面平行。左圖中之三角形即碘化鉀之八面體晶面。設將原圖放大，更可見碘化鉀之八面體 (111) 及六面體 $a(100)$ 。



第 355 圖異種結晶之平行連晶

在二異種之結晶間，有類似構造之 A、B 原子面，其種類雖異，但各面上之原子排列狀態，則大略相同。在離子狀態中，其排列於 A 面者，與 B 面之離子電荷恰巧相反。此時 B 面與 A 面之結合即二異種結晶之規則結合。如雲母之解理面 (001) 上，其原子排成正六角形，在碘化鉀之八面體 (111) 面上，亦有相同之原子排列。即在雲母之解理面上之碘化鉀，形成異種結晶間之平行連晶也。



第 356 圖異種結晶之類似構造

上述之一晶面上，供異種結晶正規成長之現象，稱之為外結 (epitaxial)。考其生成原因，不外二晶面相連之原子面，在幾何學上

具有類似之點也。

邇來外結之研究，已成為礦物學上最有興趣之一環。總觀宇宙之間，充滿不可勝數之無機物與有機物。在有機物之研究上，目前已達極複雜之境地。至礦物表面之外結現象，因與結晶之成長有密切關係，故應以生體結晶學上之名詞稱之。

相同之礦物，其形狀之大小或集合之形狀不盡相同，故常以不同之名詞稱之。如水晶及玉髓皆石英也，但水晶為有晶面之巨大結晶；而玉髓則係微細石英之集合體，通常呈葡萄狀，在顯微鏡下察之，其石英微晶之集合狀態清晰可見。若其中含有雜質而呈特別色彩時，則稱之為瑪瑙。在瑪瑙中，有呈一種色澤者，亦有呈縞狀色帶者。除此之外，尚有一種青綠色石英，是為碧玉。其呈青綠色之物質則為微細之礦物，至其性質迄不十分明瞭。

在日本福井縣赤谷礦山所產之自然砷，為似金米糖之集合體，故以金米糖石稱之。接砷之結晶原屬六方晶系，以一點為中心而成多數集合之形態，其酷似金米糖之表面起伏，即各晶體之形態也。

又結晶之第二種集合則為雙晶，其結合方式已於結晶形態中詳為敘述，茲不復贅。

至結晶之不規則集合，為數之多不勝枚舉。茲將常見者述之於下：

(A)針狀 (Acicular)：為針狀結晶集合成一束者，如束沸石。

(B)杏仁狀 (Amygdaloidal)：即杏仁狀之集合體，多產於火山岩之空隙間，如蛋白石、白榴石、沸石及自然銅等。

(C)樹枝狀 (Arborescent)：為細柱狀之結晶分歧如樹枝者，如自然銅及自然金。

(D)絲狀 (Capillary)：細長如絲髮者，如自然銀及赤銅礦。

(E)葡萄狀 (Botryoidal)：由多數圓球集合，狀似葡萄者，如菱錳礦。

(F)柱狀 (Columnar)：柱狀晶相之結晶呈平行或近似平行之集合者，如矽灰石及角閃石。

(G)同心狀 (Concentric)：多數圓層而具有一中心之集合者，如瑪瑙。

(H)結核狀 (Concretionary)：由球狀體凝結而成者，如方解石。

(I)纖維狀 (Fibrous)：為多數細小柱體組成纖維狀者，可分交叉纖維狀、放射纖維狀及平行纖維狀等不同之型式，如石棉。

(J)球狀 (Globular)：近似球形者，如玻璃蛋白石及球狀方解石。

(K)粒狀 (Granular)：許多晶粒集合而成者，如磁鐵礦。

(L)片狀 (Lamellar)：為片狀晶相集合而成者，有彎曲片狀、平坦片狀及葉片狀等型式，如石膏。

(M)扁豆狀 (Lenticular)：呈凸鏡形之集合者，如赤鐵礦。

(N)乳房狀 (Mammillary)：塊狀集合而外表光滑者，如孔雀石。

(O)核狀 (Nodular)：不規則之團塊集合者，如燧石。

(P)鰻狀 (Oolitic)：狀如魚子之集合者，如鱗狀赤鐵礦。

(Q)豆狀 (Pisolitic)：圓粒大小如豆之集合者，如鉛礦。

(R)腎狀 (Reniform)：外表光滑如腎狀之集合者，如硬錳礦。

(S)網狀 (Reticulated)：纖維交錯如網狀者，如網狀金紅石。

(T)鱗狀 (Scaly)：狀似鱗片者，如雲母。

(U)放射狀 (Radiating)：柱狀或針狀晶相之礦物，以一點為中心而呈放射狀之集合者，如電氣石及纖維磷酸鋁鐵礦。

(V)板狀 (Tabular)：板狀晶相並平面闊大者，如重晶石。

4-2 力學性質

(1)解理：凡礦物結晶遇到外力時，常沿一定方向裂開，此種性質稱為解理 (Cleavage)。其裂開之平面稱為解理面。普通在結晶構造中

行原子面間之結合力較弱時，則平行原子面之方向，即易裂開。如圖所示，為石墨之原子排列狀態，其層狀之原子面即為解理面。原子面在構造中，常受對稱性所左右，當一面成為解理面時，其向價面亦成為



第 387 頁石墨之構造

解理面。又解理面多與主要晶面平行，故解理面之表示法，亦與晶面相同。至結晶裂開之程度，極易與困難兼而有之。其種類如下：

(A)極完全 (Highly perfect)：解理面光滑異常，可將光線完全反射者，如雲母之底面 $c(001)$ 是也。

(B)甚完全 (Very perfect)：解理面甚光滑者，如方解石菱面體之面 $r(10\bar{1}1)$ 是也。

(C)完全 (Perfect)：解理面光滑者，如重晶石之底面 $c(001)$ 及柱面 $m(110)$ 是也。

(D)稍完全 (Moderately perfect)：解理面稍呈平滑者，如輝石及角閃石之柱面 $m(110)$ 是也。

(E)不完全 (Imperfect)：解理面不光滑者，如水晶在驟冷驟熱後，其柱面及菱面體之面均呈不完全之解理。

解理面既與主要之晶面平行，故由其生成原因，可以推定結晶構造之性質。即在平行之原子面上，其結合力特弱，遂產生解理。如雲母、石墨、輝鉍礦等礦物，在薄片面間之原子面結合力較其他方向為弱。又在閃鋅礦之 (110) 面解理完全，與該面相當之原子面上，計有 Zn 及 S 二種原子，而 (111) 面則為 Zn 之原子面與 S 之原子面交互排列者。設 Zn 帶正電 S 帶負電時，其 (110) 面之原子面間結合力乃較 (111) 面為弱。至螢石之解理在 (111) 面完全，蓋以負離子氟所形成之面間有間隙存在，結合力弱也。

凡解理完全之礦物，必有與解理面平行之裂紋，觀其裂紋之排列狀態，即可推定其所屬之晶系。如裂紋以 60° 相交時，則形成正三角形，在各角平分線之方位必為三對稱面。故具有此種裂紋之礦物，應為等軸晶系或六方晶系。若裂紋互相直交時，則至少有四對稱面，故應為等軸或正方晶系。如方鉛礦及岩鹽均為等軸晶系，其六面體之面解理完全；而螢石及金剛石八面體之面解理完全。又金紅石及鈣鈉柱石 (Wernerite) 均為正方晶系，其解理面與柱面平行，若由底面觀之，則呈直交之解理裂紋。普通正方晶系之結晶，其底面之解理發達，

而平行於柱面者則較少。

設二解理方向斜交時，因具有一或二對稱面，故必屬單斜或斜方晶系無疑。由底面視之，單斜晶系角閃石或輝石之柱面解理交角為 $124^{\circ}30'$ 或 $91^{\circ}40'$ 。至單方向之解理裂紋，除等軸晶系外，其他任何晶系中皆可見之。如綠柱石或銅玉於底面之平行方向，解理頗為發達，其裂紋多呈同一方向之平行線，皆六方晶系之礦物也。魚眼石之底面解理亦頗發達，且呈同一方向之平行裂紋，正方晶系之礦物也。除此之外，在斜方晶系中，其底面解理顯著者有黃玉；在單斜晶系中，其底面解理發達者有雲母。而石膏在斜軸面 (010) 上，亦有同一方向之平行裂紋。故單方向之解理，不論在對稱性質上或所屬之晶系上，均不能提供任何線索。

(2)斷口：礦物受打擊後，在解理面以外之方向發生不規則之破裂時，稱之為斷口 (Fracture)。解理完全之礦物常難得斷口，而解理不完全或非品質礦物，則易得明顯之斷口。至斷口之種類通常分為下列六種。

(A)貝狀 (Conchoidal)：斷口呈光滑之面，彎如貝殼，且呈同心圓狀，如石英是也。

(B)平坦狀 (Even)：用肉眼觀察時，表面大致平坦，如石灰石是也。

(C)參差狀 (Uneven)：呈不規則之凹凸狀，如電氣石及薔薇輝石。

(D)鋸齒狀 (Hackly)：斷口面有尖棘如針者，如自然銅是也。

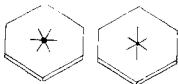
(E)多片狀 (Splintery)：斷口面破碎，或呈細片狀，或呈纖維狀，如蛇紋石是也。

(F)土狀 (Earthy)：為土狀物體所特有之不規則斷口，如高陵土是也。

(3)打像及壓像：用釘或椎之尖端在礦物之晶面上輕輕敲打時，則發生細微之裂紋，是為打像 (Percussion figure)。若垂直擦壓時，其所發生之裂紋，與打像之方向不同，是為壓像 (Pressed figure)。普

透壓像不明，而打像則甚顯著。因其係表示結晶面之對稱者，故觀打像之形態，可以判別結晶之性質。

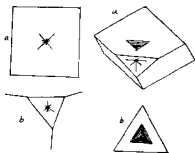
如圖所示，為以稍鈍之釘緩緩擦壓白雲母之薄片時所發生之裂紋。其與結晶稜線垂直之方向者稍長，而與之成 60° 交角者則短。在打像中，其位於斜軸面方向之裂紋稍



第388圖雲母之壓像 第389圖雲母之打像

長，而恰與壓像中者垂直。由此可知，雲母結晶之輪廓雖略呈六角形，但以其具有單斜晶系之對稱關係，而非六方晶系也。除此以外，白雲母之干涉圈出現於打像長裂紋之垂直方向，而黑雲母之干涉圈則出現於長裂紋之方向。故打像不僅與結晶之輪廓有關，且更與其他物理性質具有極密切之關係也。

在岩鹽解理面上之打像，為平行於六面體晶面對角線之裂紋以及稍與稜線平行之裂紋，且具有四對稱方向。又在八面體之面上，發生 120° 交角之裂紋，其對稱方向常與對稱面一致。至方解石解理面上之打像，其裂紋呈具有一對稱方向之二等邊三角形，且對稱方向與對稱面一致。在方解石底面之打像，其裂紋與菱面體之極稜方向平行，且具有三對稱方向。



第390圖岩鹽之打像 第391圖方解石之打像

又方鉛礦解理面上之壓像，為與解理方向平行之裂紋及四角形之凹窪，且具有等軸晶系之對稱關係

。至輝鈉礦之色彩及光澤雖與方鉛礦相似，但絕無此種壓像。

(4) 硬度：結晶中之原子結合力，其大小隨原子之種類而異。當礦物所受之外力達於一定限度時，則其形狀破壞而不能恢復。此時稱受外力大之礦物為硬，而受外力小之礦物為軟。至其硬或軟之程度則稱之為

硬度 (Hardness) 。即礦物抵抗外力損傷之結合力也。

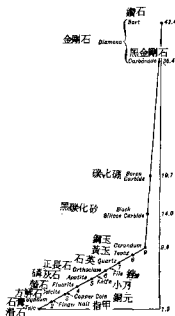
(A) 硬度計 (Hardness' scale) : 乃測定礦物軟硬之尺度或儀器也，其種類有二，茲分述於下：

(a) 毛氏硬度計 (Mohs' Hardness scale) : 乃德國礦物學家毛司 (Friedrich Mohs) 於 1820 年選出十種軟硬不同之礦物，用為測定礦物硬度之標準者。其礦物之名稱及度數如下：

1 度	滑石	Talc
2 度	石膏	Gypsum
3 度	方解石	Calcite
4 度	螢石	Fluorite
5 度	磷灰石	Apatite
6 度	正長石	Orthoclase
7 度	石英	Quartz
8 度	黃玉	Topaz
9 度	鋼玉	Corundum
10 度	金剛石	Diamond

設礦物之硬度介乎二者之間，則以 0.5 計算之，如綠簾石為 6.5，鉛英石為 7.5 是也。

又無硬度計時，以手觸之若脂感者為 1 度。以指甲可以刻傷者為 2 度。以小刀可以刻傷者為 3~4 度。以小刀不易刻傷者為 5 度。可以傷玻璃



第 392 圖毛氏硬度計各礦物硬度比

但又為鏗所傷者，則為 6~7 度。然表示硬度之數字，僅為大小之順序，而絕無倍數上之關係。根據伍德爾 (Wooddell) 之測定，以滑石之硬度為 1 時，則金剛石之絕對硬度為 40.4。

(b) 試硬器 (Sclerometer) : 測定礦物之精密硬度時，須使用試硬器。至其構造，上部為鋼鐵及金剛石所製之針尖，下接載有晶體之移

動台。精測時，先將礦物置於台上固定之，以針尖下壓，在下部滑繩上加重，使台移動，而傷其結晶。此時只須讀出錘之重量，則礦物之硬度即可瞭然也。茲將毛氏硬度計之代表礦物，以試硬器測之，其所得之結果如下：

		波法夫 (1884) (Pfaff)	路西瓦爾 (1896) (Rosiwal)	加格爾 (1897) (Jaggar)
10 度	金剛石	-	140,000	-
9 度	鋼 玉	1000	1000	1000
8 度	黃 玉	459	175	152
7 度	石 英	254	120	40
6 度	正長石	191	37	25
5 度	磷灰石	53.5	6.5	1.23
4 度	螢 石	37.3	5	0.75
3 度	方解石	15.5	4.5	0.26
2 度	石 膏	12.03	1.25	0.04
1 度	滑 石	-	0.33	-

(B) 硬度之差異：由實驗所得之硬度，非但因礦物之種類而不同，即同一種礦物之結晶，亦隨其方向而有不同之硬度。如三斜晶系之藍晶石 (Kyanite Al_2SiO_5)，其平行縱軸之方向，較垂直於縱軸之方向易於刻傷。即藍晶石之硬度，其垂直於 c 軸方向者，較平行於 c 軸方向者為大。普通在礦物之結晶中，其對稱方向之硬度雖同，而不對稱方向之硬度則異。除此之外，礦物結晶之硬度亦常與解理有密切之關係。即平行於解理之方向，較垂直於解理之方向易於刻傷。因解理與結晶之對稱相配合，故礦物之硬度亦必具有相同之對稱關係。

(C) 礦物化學成分與硬度之關係：硬度之大小與礦物之化學成分有密切關係，茲將其重要者分述於下：

(a) 在重金屬中，如水銀、銅、鉛等之化合物，其硬度較低，普通超過 2.5 至 3.0 者甚少。至平常之金屬化合物中之鐵、鎳、鈷等硫化

物及氧化物則較硬。如黃鐵礦之硬度為 6.0 ~ 6.5，赤鐵礦為 6 等是。

(b) 除上述者外，通常含硫化物者，其硬度較低。且碳酸鹽類，硫酸鹽類，磷酸鹽類之大部亦不甚高。

(c) 含水鹽類之礦物，其硬度較低。

(d) 硬度高之礦物，其主要者為氧化物及矽酸鹽類，且大多含有氧化鋁之成分，如鋼玉及金紅石等是也。

(d) 礦物之原子結構與硬度之關係：礦物之硬度除受其化學成分之影響外，更與原子間結合力之大小有密切之關係。考原子之結合力，與結晶構造之型式、化學結合之型式（包括離子結合與共價結合）、原子間之距離、及原子價之高低等有關。當原子價增大時，其結合力亦隨之增加。通常在構造型式、化學結合型式及原子價相等之氧化物中，其硬度 H 與原子間之距離 D 有關，即礦物之硬度與原子之距離成反比也。

	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>SrO</i>	<i>BaO</i>
D	2.10 Å	2.40	2.57	2.76
H	6	4	3 ~ 4	3

若構造型式不同而化學結合型式及原子價相等時，其礦物之硬度並不因 D 之增加而減小。

	<i>NaCl</i>	<i>AgCl</i>
D	2.80 Å	2.77
H	2 ~ 3	1 ~ 2

又 TiC 之構造與 $NaCl$ 同型，雖 $D = 2.23 \text{ Å}$ ，但 $H = 8.5$ ，呈極硬之礦物，蓋其以共價結合為主，且原子價亦較大也。

(5) 粘結性：又稱為韌度 (Tenacity)。即礦物遭受外力時，如刀刃之割割、斧錘之敲擊，或拉扯彎曲等，不同之礦物有不同之反應。亦即因變形而產生新轉位也。至其轉位之性質計有下列六種：

(A) 脆性 (Brittle)：切之易開，壓之易碎而成粉末，但不能成爲

薄片，如石英、方解石等。

(B) 柔性 (Sectile)：切之易斷，可成薄片，擊之易成粉末，如石膏是。

(C) 展性 (Malleable)：切之成片，錘之成箔，如金、銅是也。

(D) 延性 (Ductile)：引伸之可成細絲狀，如銅、銀是也。

(E) 撓性 (Flexible)：撓之則曲，但不能恢復原狀者，如石棉是也。

(F) 彈性 (Elastic)：礦物薄片擊之不碎，屈之則彎，但外力消失立即恢復原狀者，如雲母是也。此時所施之外力稱為應力 (Stress)，其所生之變形則稱之為應變 (Strain)。根據虎克定律應力與應變之比 ϵ ，在彈性界限內可以下式表示之。

$$p = E \epsilon$$

$$E = p / \epsilon = \frac{P}{S} \cdot \frac{l}{\Delta l}$$

上式之中， p 為單位面積所受之力， P 為全壓力， l 為長度， S 為斷面積， E 為彈性係數。

(6) 比重：礦物之密度與 4°C 蒸餾水密度之比，稱為礦物之比重 (Specific gravity)。通常在一氣壓之下 4°C 蒸餾水之密度，其一立方公分為 0.999973 克，故多以一克視之。欲知此相對之密度時，只須求礦物在空氣中之重，與同容積水重之比即可。亦即比重者，乃物體之重為同容積水重所除之數也。

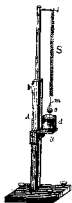
測定礦物比重之方法甚多，茲將主要者述之如下：

(A) 天秤法 (Balance method)：先將礦物以普通方法在空氣中秤之，得其重量為 W ；再將礦物以細若毛髮之絲繫於天秤之一端，並使之垂入水中，測得其重量為 W_1 ，根據阿基米得原理 (Archimede's Principle) $W - W_1$ 即為礦物同容積水之重量，故求比重 G 之公式為：

$$G = \frac{W}{W - W_1}$$

(B) 焦利天秤 (Jolly spring balance) 法：如圖所示，為焦利天秤

之大概。S 為彈簧，其下端有二小盤 *c* 及 *d*，B 為可上下自由移動之台，台上置以盛水之燒杯，A 為方柱，其上裝有刻度之鏡面。測定時，先選擇一標準點 *m*，使觀察者之眼、*m* 及鏡內所映之 *m* 成一直線，並注意其與鏡上刻度所交之位置。再將 *d* 浸入水中，*c* 內不置任何物體，觀察映像 *m* 與刻度尺之交點為 *W*。然後上盤 *c* 內置以礦物，其下降後之 *m*



第393圖 焦利天秤



第394圖 改良焦利天秤

映像與刻度尺相交為 W_1 ，則 $W_1 - W$ 為礦物之重量。最後再將礦物由 *c* 盤移於 *d* 盤內，在水中秤之，所得為 W_2 ，則 $W_1 - W_2$ 為礦物在空氣中與在水中之重量差，故求比重 *G* 之公式為：

$$G = \frac{W_1 - W}{W_1 - W_2}$$

此法用之極為簡便，但不適於精密之測定。

(C) 槓桿法 (

Beam balance)

：此乃天秤法之一種，用之簡單，且甚精密。如圖所示，*b* 為秤桿之支點，在其左端吊以二盤，一置水內，一懸



第395圖 槓桿

空中。桿之右側上置磅錘 d ，嚴密校正使成平衡，此可於左端 c 觀察之。測定時，先將礦物置於上盤，測得其重量為 W_1 ，再將礦物移置下盤，測得重量為 W_2 ，故求礦物比重 G 之公式為：

$$G = \frac{W}{W_1 - W_2}$$

(D) 比重瓶 (Pycnometer) 法：設礦物為粒狀、小片狀或多孔狀時，可以比重瓶測之。其法也，先將空瓶秤之，測得重量為 W ，然後注入相當數量之水，測得重量為 W_1 。再將水倒出將瓶烘乾，放入礦物粉末測之為 W_2 。最後將傾出之水再行倒入，至原來刻度為止，測得重量為 W_3 。故求礦物比重之公式為：

$$G = \frac{W_1 - W}{W_3 + W_2 - W - W_1}$$

使用比重瓶時，最宜注意者，即先將瓶熱之再行冷卻，以便將其中之氣泡放出。又注水入瓶時，其數量務須精密，故應由瓶塞小孔徐徐注入，並以吸水紙將附於瓶塞上者吸乾。設礦物粉末中含有氣泡，其比重之數值即不正確，故應將礦物在水中徹底混合之。若仍含有氣泡時，則在礦物及水注於瓶中後，更置於大型容器內以真空唧筒抽吸。

至可溶於水之礦物粉末，應置於帶有活塞之容器 T 中，在一定之溫度下加以壓力 P_1 時，其容器內之體積（包括試料）為 V_1 。設改用壓力 P_2 時，則容器內之體積為 V_2 。此時試料之體積 V_0 可以下式求之。

$$P_1 (V_1 - V_0) = P_2 (V_2 - V_0)$$

$$V = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{P_2 - P_1}$$

設礦物粉末之重量為 m 克時，則其比重 G 可以下式求之。

$$G = \frac{m (P_2 - P_1)}{P_2 V_2 - P_1 V_1}$$



第396圖 比重瓶

若礦物呈液狀時，使用比重瓶亦較適宜。其法也，先將刻有標尺之玻璃瓶於空氣中秤之，得重為 W ；再注入所欲測之液體礦物，至一定標尺讀數為止，測得重量為 W_1 ；然後將液體傾出，洗淨後並注入等容積之水，測得重量為 W_2 。故求礦物比重之公式為：

$$G = \frac{W_1 - W}{W_2 - W}$$

(E)重液 (Heavy solution) 法：凡細片及粉末狀之礦物，或數種比重不同之礦物互相攙合者，其比重可以此法測定之。先將礦物研碎浸入重液之中，並加水稀之，使該液體之比重減小，當液體之比重介於兩種礦物之間時，則重者下沉，而輕者上浮。然後再測重液之比重，所得者即礦物之比重也。至重液之種類，常用者如下：

(a)吐列特液 (Thoulet solution)：亦稱遜斯塔特液 (Sonstadt)。乃以蒸餾水 80c.c 置於裝有碘化鉀 KI 230 克及碘化汞 HgI_2 270 克之容器內煮之，至表面生出結晶質之膜時為止。冷卻時，可得最大比重 3.196，故由 1~3.196 間可以任意配合。若置電氣石（比重為 3.1）及螢石（比重 3.18）於其中時，則浮於表面。此液色黃有毒，且有侵蝕金屬之性質，故用時宜多注意。

(b)克萊因液 (Klein solution)：為錳之硼錳酸鹽溶液，其化學成分為 $2Cd(OH)_2 \cdot B_2O_3 \cdot 9WO_3 + 16H_2O$ ，最大比重可至 3.6。

(c)隆巴質液 (Rohrbach solution)：係碘化汞及碘化鉍 BaI_2 之混合溶液，其最大比重為 3.85，有毒並具侵蝕金屬之性質，遇水分解，故不能以水稀之。

(d)勃朗液 (Brauns solution)：為二碘化甲烷 CH_2I_2 之溶液，其最大比重為 3.324，稀釋時，以安息油 (Benzol) 為之。

(e)克列利西液 (Clerici solution)：為等量之蟻酸鉍 (Thallium formate) 與丙二酸鉍 (Thallium malonate) 混合溶液，其最大比重可至 4.0。

(f)三溴甲烷液 (Bromoform)：在 $15^\circ C$ 時，其最大比重可至

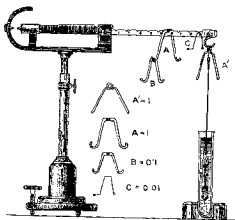
2.89, 但須以丙酮 (Acetone) 稀釋之。

除上述六種重液外, 亦有使用四溴乙炔 (Acetylene tetrabromide) 溶液者。至其最大比重可達 2.96。

(F) 威斯特法爾天秤 (Westphal's balance) : 爲測重液比重之簡單天秤。如圖所示, 秤桿一端吊以裝有溫度計之重錘, 其吊掛處與支點之間分爲十等分, 在每分點之上皆可懸置跨錘。最重之跨錘有二, 即 A 與 A', 另外並有重 $\frac{1}{10}$ 及重 $\frac{1}{100}$ 者各一, 即 B 與 C。天秤之基準爲溫度計懸吊於 15°C 之蒸餾水中, 其最重之跨錘置於基點時, 秤桿便保持平衡。當測定重液之比重時, 只須將重液置於圓筒之內, 然後移動跨錘便達於平衡狀態, 觀其在秤桿上之刻度, 即爲重液之比重。

礦物之比重除用上述各種方法測定外, 若知單位胞之體積與其中各不同之原子數時, 則比重可由計算求得之。

礦物之化學式雖代表各不同原子之比, 但其數值未必正確。在某些礦物中單位胞之公式量皆甚微小, 普通以一 Z 表示之。如霏石 CaCO_3 之原子比爲 1Ca:1C:3O, 每一單位胞之公式量爲 $4\text{Ca}\cdot 4\text{C}\cdot 12\text{O}$, 今 CaCO_3 之分子量 M 爲 100.09, 則每單位胞中之分子量 (Z=4) 爲 $4 \times 100.09 = 400.36$ 。設單位胞之體積爲 V, 在斜方晶系中爲 $a_0 \times b_0 \times c_0 = V$, 在單斜或三斜晶系中, 更應將單位胞各邊之交角一併列入計算。按霏石之結晶屬於斜方晶系, 其單位胞之邊長爲 $a_0 = 4.35 \text{ \AA}$, $b_0 = 7.96 \text{ \AA}$,



第 397 圖 威斯特法爾天秤

$C_0 = 5.73 \text{ \AA}$ ，故 $V = 225.76 \text{ \AA}^3$ 。若將埃單位變換為立方公分時，則 M 、 V 及密度 D 可以下式計算之。

$$D = \frac{Z \times M}{N \times V}$$

上式之中， N 為阿弗加得羅數 6.02338×10^{23} ，如將霰石之各項數值代入式內，則得：

$$D = \frac{4 \times 100.09}{6.02338 \times 10^{23} \times 225.76 \times 10^{-24}} = 2.945 \text{ 克/立方公分}$$

上式所得者，即霰石比重之計算值，與精密之實測值 2.947 ± 0.002 完全吻合。

當計算新礦物之比重時，因 Z 之數值尚未測定，故需做連續之擬定，應用不同數值之 Z 依序計算，直至與實測值符合為止。通常所用之 Z ，其數值均極微小。

4-3 熱學性質

(1) 熱變化：加熱於正規構造之礦物結晶時，則熱於其中傳播而發生熱膨脹。若到達一定溫度時，礦物即行分解，同時在構造上亦生變化。至其變化之型式，可分為下列六種。

(A) 熔融之形成液相，如輝鎂礦。

(B) 昇華後形成氣相，如硫黃。

(C) 水分發散構造不變而成蜂窩狀，如沸石。

(D) 水分發散而成非晶質固體，如高陵土。

(E) 水分及揮發分放散後，其構造暫時不變。

(F) 在一定溫度下構造改變，通常稱構造不同而化學成分相同之礦物為多像，如石英是也。至其構造之變化，有僅發生一次者，亦有發生多次者。

在上述之 (C) 至 (F) 四種型式中，若溫度再高，即開始熔融。普通在加熱變化過程中，多先測定其比熱。即單位質量之物體，溫度升高 1°C

所需之熱量也。當礦物發生遷移、熔融、昇華等熱分解時，均係一面吸收熱量一面進行變化者。至其所需之熱，則稱之為遷移熱、熔融熱、昇華熱等。

將礦物粉末加熱，在未完全熔融之前，首見固結現象，是為燒結。至其發生之原因，目前尚不甚明瞭，可能係粒子表面稍呈熔融狀態所以致之。

礦物之熔點常因種類而異，普通金屬礦物均低，而含矽多者則高，鋼玉之熔點最高(2050°C)。又在低溫放出水分子及揮發分後，其熔融即因而延緩，非至極高溫度，熔融難以開始。通常稱熔點高者為耐火礦物，即無機化學工業上之重要原料也。

(2)熱傳導：將礦物之一端加熱時，其熱常向四方傳播，是為熱傳導 (Conduction of heat)。在單位溫度梯度時，其單位時間內通過單位面積之熱量曰導熱係數 (Coefficient of thermal conductivity)。又在一定條件下，可容多量熱通過之礦物曰良導體；反之，其僅容少量熱通過者，則稱為非良導體。至熱傳導之原因，乃係熱振動加諸於原子後，更將能依序傳送於相鄰之原子，因而促成熱之傳導。普通原子之結合力愈強，其熱傳導愈弱。構成此種性質之因素有三：一為溫度升高時各原子之熱振動加大，二為不同原子結合時其熱振動較為複雜，三為結晶構造混亂時熱傳導常受阻礙。故石英之熱傳導即較非晶質之石英玻璃為佳，以接觸之而有冷感也。又因電子移動而傳送之熱能，較通常者為大，其所形成之熱良導體，亦可視為電之良導體。至電絕緣體之熱傳導，乃純以原子熱振動而達成能之傳送為主者。

在礦物中，其熱之不良導體常用為保溫劑，如蛭石 (Vermiculite)，為與雲母相似之礦物，解理面完全，加熱時水分發散，而常沿解理面裂開，致全體呈蜿蜒之蠕蟲狀。於是結構疏鬆，解理面間形成空隙。即使將之壓緊，其全體仍呈祖塊而保留其中間之空隙。此即性能良好之保溫劑也。

沿晶軸之方向將結晶切成棒形，其長度為 l ，斷面積為 A 。使一

端與 θ_0 溫度之恆溫槽相連，他端與熱之良導體銅球相接。設在 t 秒內銅球之平均溫度為 θ' 時，則通過長棒之熱量 q 可以下式求之。

$$q = K \frac{\theta_0 - \theta'}{l} At$$

設晶棒表面包以保護劑時，則熱之傳播不在表面進行。如銅之比熱為 c ，質量為 m ，在 t 秒內銅球上昇溫度為 τ 時，則：

$$q = mc\tau$$

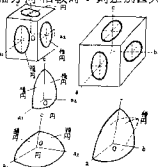
$$K = \tau mc \frac{l}{At(\theta_0 - \theta')}$$

上式之 K 為導熱係數，以 Cal/cm^2 表示。除等軸晶系之晶體外，其熱傳導均係熱流強度與溫度差之合成現象。若與電傳導比擬時，則相當於電流之強度與電位差之合成也。

在晶面上塗一層薄蠟，並以銅絲尖端觸之，其由銅絲傳入之熱，必達於晶面之上。經一定時間後，熔蠟之外緣遂形成一曲線，是為等溫線。當曲線呈圓形時，則晶面上各方向之熱傳導完全相同。

等軸晶系之結晶，其由一點向各方之熱傳導完全相同，故等溫線呈一球面。在正方及六方晶系之晶體中，底面之等溫線為圓形，而平行 c 軸之面上則呈橢圓形，且橢圓形之長軸或短軸必與 c 軸平行。即垂直 c 軸方向之導熱係數相同，但其與 c 軸方向相較時，則差別甚大。斜方晶系之結晶，各軸面上之等溫線均呈橢圓形，其橢圓之軸與各晶軸平行；因三晶軸方向之導熱係數不同，故等溫面而形成橢圓體。如圖所示，為石膏 $b(010)$ 面之試驗結果，其等溫線即呈橢圓之形態也。

以上所述，為各晶系晶體之導熱情形。至導熱係數常因礦物之種類而異。即同一礦物亦隨結晶之方向而各不相同，茲特舉例如下：



第398圖 正方晶系結晶之等溫線 第399圖 斜方晶系結晶之等溫線

溫度	銀	白金	花崗岩	石英(//c)	石英(c)	石英玻璃
0°C	1.0	0.17	0.008	8.2×10^{-3}	17×10^{-3}	3.4×10^{-3}
100°C				2.1×10^{-5}	18×10^{-3}	4.5×10^{-3}

(3)膨脹與收縮：礦物受熱後，除其溫度上昇外，同時原子之結合能亦發生變化，而改變其相互吸引之領域，故其間之距離，乃相對變更，此種現象稱之為膨脹或收縮。設溫度上昇 Δt ，礦物之長度改變 Δl 時，則其長度 l 之膨脹係數 α 可以下式表示之。

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

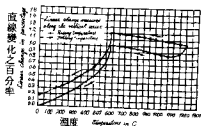
若礦物之體積改變 ΔV 時，則其體積 V 之體膨脹係數 β 可以下式求之。

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

設礦物之質量為 m ，密度為 ρ 時，因 $m = \rho V$ ， $\rho \Delta V + V \Delta \rho = 0$ ，故：

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta t}$$

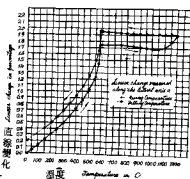
礦物之膨脹為無向量與角量之合成現象，其比例常數稱之為膨脹係數。等軸晶系結晶之膨脹係數，各方向完全相同。而其他各晶系結晶之膨脹係數，則隨結晶之方向而異。如在常溫時將石英加熱，其縱軸 c 與水平軸 a 之變化，則如圖中所示者。其在 573°C 以內變化劇烈，膨脹顯著；在 573°C 至 1000°C 之間，則變化緩慢，僅發生微弱之改變而已。又輝石類之結晶當溫度上昇時，各結晶軸方向之膨脹情形與 α 石英相同，



第400圖石英 c 軸方向之熱變化

普通沿 (100) 及 (010) 之直交方向及平行於 c 軸之方向膨脹。若測定透輝石時，在 (100) 之直交方向與平行 c 軸之方向上，其膨脹雖大略相同；而 (010) 面之直交方向上，其膨脹率則較前者為大。

礦物既因加熱而發生膨脹或收縮之現象，故其結晶與物理上之性質，亦多隨之改變。其中較為顯著者計有結晶角、比重、屈折率、光軸角等四項，茲特分述於下：



第401圖石英 a 軸方向之熱變化

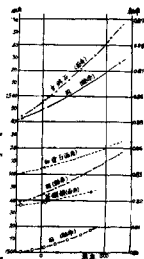
(A) 結晶角：加熱於水晶之六方柱狀晶體時，則隨溫度之上升，其水平軸方向之膨脹，較縱軸方向為大。故晶形由長而變粗，結果晶體之錐面傾斜變緩，以致錐面與底面之交角，因溫度不同而發生變化。

溫度	0°	100°	200°	300°	400°	500°	550°	573°
實測	51°47.4'	51°46.4'	51°45.1'	51°43.8'	51°42.1'	51°39.8'	51°38.0'	51°36.0
計算	47.7'	46.3'	45.1'	43.8'	42.2'	39.8'	37.9'	36.7'

若將長石加熱，其解理面之交角亦生變化，茲以 (010) 與 (001) 面之交角為例，在鈉長石與鈣長石之間，其變化數值不同，茲分列於下。

溫度	鈉長石	鈉鈣長石	鈣長石
-170°C	93°40'54"	—	94°02'07"
-70°C	—	93°32'46"	—
-64°C	—	—	02'56"
-60°C	40'24"	—	—
+18°C	—	31'06"	—
20°	38'50"	—	03'19"
44°C	—	93°30'30"	—

55°	93° 37' 52"	—	—
104°	—	—	94° 03' 27"
106°	36' 30"	—	—
119°	—	28' 46"	—
206°	—	—	02' 56"
207°	32' 32"	—	—
213°	—	26' 36"	—
305°	27' 38"	—	—
309°	—	241' 7"	—
317°	—	—	93° 59' 56"
410°	—	—	57' 14"
412°	21' 11"	221' 7"	—
427°	—	21' 03"	—
505°	—	1823"	—
517°	13' 45"	—	—
518°	—	—	53' 22"
597°	—	1513"	—
602°	06' 58"	—	—
605°	—	—	50' 30"



第 402 圖方解石及白雲石軸率及面角之變化

普通石英與長石之縱軸以及側軸方向，因溫度上升而膨脹，以致面角逐漸減小。但在方解石則為縱軸方向加長，其水平軸之方向反而縮短，故菱面體之傾斜度增加，其間之面角因而減小。除此之外，白雲石及菱鐵礦等亦具有此種性質，其變化情形則如第 402 圖所示。

(B) 比重：礦物因溫度不同，原子排列改變，除影響其晶形外，同時物理性亦隨之變化。尤以比重一項常因容積增加而減少。今以方解石為例，由攝氏溫度二十五度開始試驗，至溫度八百度之間，其變化情形分列如下：

溫度	25°	100°	200°	300°	400°	500°	600°	700°	800°
----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

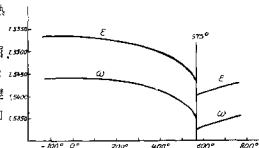
比重 2,710 2,707 2,702 2,696 2,690 2,673 2,675 2,664 2,656

又以鈣長石爲例，其變化情形如下：

溫度	20°	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°
比重	2,758	2,757	2,754	2,752	2,750	2,748	2,747	2,745
溫度	400°	450°	500°	550°	600°	650°	700°	750°
比重	2,743	2,742	2,739	2,738	2,735	2,733	2,731	2,729
溫度	800°	850°	900°	950°	1000°			
比重	2,726	2,723	2,721	2,718	2,716			

(C) 屈折率：將礦物加熱

，其複屈折率亦因之變更，如圖所示，爲石英常光線屈折率 ω 與非常光線屈折率 ϵ 之變化情形。在 573°C 其變化甚烈，恰相當於 α 石英向 β 石英之遷移點。



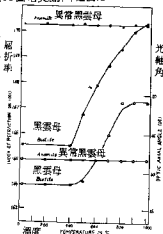
第 403 圖 石英屈折率之變化

又黑雲母 (Biotite) 之屈折率，在 400°C ~ 450°C

之間，開始變化，至 1000°C 時幾與異常黑雲母 (Anomite) 之屈折率一致。而異常黑雲母則無絲毫之改變。

溫度	20°	200°	400°	500°	600°
黑雲母	1,685	—	1,686	1,688	1,679
異常黑雲母	1,703	1,703	1,702	1,703	1,703
溫度	700°	800°	900°	1000°	
黑雲母	1,687	1,684	1,700	1,703	
異常黑雲母	1,702	1,702	1,703	1,703	

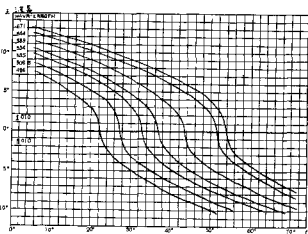
(D) 光軸角：若將二軸性之礦物加熱，不但其屈折率發生變化，且其光軸角亦隨



第 404 圖 黑雲母及異常黑雲母之屈折率及光軸角之變化

之改變。如玻璃長石在各種不同之溫度下，其光軸角之變化與所用之波長，則如第405圖所示者。

將礦物加熱後，其在屈折率之變化上相差甚大者，以黑雲母及異常黑雲母之間最為顯著。至



第405圖玻璃長石光軸角之變化

二者光軸角之變化亦復如是。即黑雲母之光軸角在 $500^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 之間，發生劇烈變化；而異常黑雲母當熱至 1000°C ，亦無絲毫之變易。

溫度	20°C	200°	400°	500°	600°	700°	800°	900°	1000°
黑雲母	38.4°	38.4°	38.4°	38.4°	41.7°	45.1°	48.5°	48.5°	48.5°
異常黑雲母	41.7°	41.7°	41.7°	41.7°	41.7°	41.7°	41.7°	41.7°	41.7°

又角閃石之光軸角變化情形，大致與黑雲母相同。即綠色角閃石在 $700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 之間，發生劇烈變化，而褐色角閃石在任何溫度，亦不為絲毫之改變也。

(4)研究方法：加熱於礦物後，其結晶構造及化學成分均發生顯著之變化。普通所用之方法有示差熱分析及熱天秤二種，茲分述於下：

(A)示差熱分析：乃將礦物粉末連以複熱電對，在一定溫度之範圍內加熱，而觀察記錄其變化過程者。其所用之熱絲電爐多為圓筒形，熱絲用鉑一鎳製成者，溫度可達 1000°C ，用白金絲者可達 1300°C ，用

白金銻 (Rhodium) 絲者則可達 1500°C 。普通將電熱絲捲於磁管之周圍，而挿於爐之中心，在其外側則裝以保溫劑。若在減壓下試驗時，則不用保溫劑，而在爐之外側改裝彎管，並以水流冷卻之。

試料支持器為白金、鎳、鉻鎳等製成，亦有用高鉛質之耐火材料者。其金屬製品導熱良，成形易，溫度一定且甚少破壞；但耐蝕性低及促成試料之反應不夠敏銳，故在 1200°C 以上之高溫不能使用。至耐火材料製品恰與上述者相反，即耐蝕性強，促成試料之反應敏銳（因導熱不良），可用於 1200°C 以上之高溫；但質地多孔，成形難而破壞易，且中間之溫度分佈不勻等是其缺點。

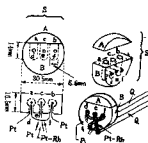
至容器之結構通常有三室及二室兩種，如圖所示，在半圓板B之切面有a、b、c三穴，而與平面之e、f、g三小穴相通，其每穴之容積為 0.48ml ，A為其上蓋。

熱電對者乃以不同金屬導線結合而成之環狀回路也。所用之原料為白金一鉑銻(18%)，當二連接點產生溫度差時，則電流即流於回路之上，故以熱電流稱之。至電流之強度常隨導線之阻力而不同，在二連接點之溫度差為 1°C 時，其電壓P可以下式表示之。

$$P = \frac{dE}{d\theta}$$

上式之中，dE 為溫度差為 $d\theta$ 時之電壓。

至熱電對之連接為以小電弧將兩線熔接成小接點，並挿於測定溫度之試料中。另外一端則挿於圓瓶中，瓶內盛以水與冰，使溫度保持零度，而由微伏計讀出電壓之數值。瓶口位置有四連接點，其中兩兩相連，且每組中均有一線與瓶內之白金絲相接，至他端則與圓瓶之鉑銻絲相連。即將熱電對之白金絲連於圓瓶中之白金絲，鉑銻絲連於圓



第406圖試料支持器

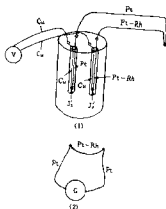
瓶中之鉑銻絲，而白金絲及鉑銻絲則與銅絲連成接點 J_1 及 J_2 。其他二接點均為銅絲接成，並連於微伏計上。

複熱電對具有 (白金) - (鉑銻) - (白金) 三條細絲所成之接合點，二對接合點產生熱電流之溫度，可不必相同。至因溫度差所產生之熱電流，則以檢流計 G (Galvanometer) 檢查之。普通熱電流非常微弱，故連接點之接觸應力求確實，且熱電對之全體更應裝以絕緣性強之高鉻質緻密瓷管。細絲之直徑為 0.5mm ，其長度在熱電對者為 $2 \times 1000\text{mm}$ ，在複熱電對者則為 $2 \times 500\text{mm}$ 。除此之外，與檢流計之連接，多以補償銅絲為之。

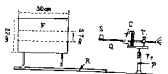
至儀器之配置情形，則如第 408 圖所示。F 為水平式之圓筒電爐，可在軌道 R 上移動。Q 為裝於台上之二水平磁管，並通過 C 之耐火裝置。台之高度可以 T_1 調整，而 Q 之位置更可以 T_2 調整之。試料支持器 S 則位於 Q 之上方。

電爐之容量為 30 A，電壓為 100 V，變壓器為 3KW，電阻器為 $1 \sim 5000\Omega$ ，高溫計內部電阻為 789Ω ，檢流計與線圈電阻為 46Ω ，外部臨界制動電阻為 52Ω ，感度為 $4.1 \times 10^{-8}\text{A}$ ， $4.0 \times 10^{-7}\text{V}$ ，頻率為 9.5 秒，複熱電對與補償銅線之電阻，合計為 0.98Ω 。

在操作時，先以螺絲 T_1 調整 Q 之高度及方向，再移動電爐使 Q 及 S 挿於 F 中，並於 C 處堵塞之。此時 S 圓板之面與 Q 垂直，其平分線與圓筒之軸線均在同一鉛直面內，最後則應使二線重合。在圓瓶之中



第 407 圖熱電對之連接



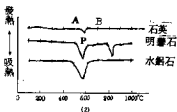
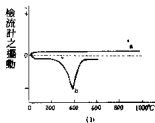
第 408 圖儀器之配置

堆以冰塊，並以高溫計測定爐內溫度之分佈情形。

鋁在 $0^{\circ}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之範圍內，不生熱變化。用其微粉末將 a 、 b 、 c 三室填實，加蓋封閉，置於爐中。再於變壓器調整，使溫度上昇，每一分鐘觀察溫度計與檢流計各一次，且溫度每昇 10°C ，更將台之高度酌予改變。因複熱電對不生溫度差，故檢流計上亦無任何顯示。如以溫度為橫座標，而以檢流計之反應為縱座標時，所得結果應為水平直線。

其次將礦物試料在乳鉢內研細，並填於 a 室中，其他孔穴則填以鋁粉。因試料與鋁粉之填積方式與數量均不相同，故其熱容量亦自各異。最初在檢流計上常顯示細微之變化，但不久即行消失，於是在座標線上遂呈現尖峰Peak。

在礦物之加熱變化中，以吸熱及散熱之反應為主。當水分放出時，呈放熱反應。普通單粒子間所吸附之水分，在 $100^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 之間，其示差熱分析曲線上出現吸熱之尖峰Peak，而含(OH)離子形態者，在高溫始呈現吸熱之尖峰Peak，如方解石及碳酸礦物或明礬石等皆是。又硫化物放出硫黃時，常與空氣中之氧結合而產生亞硫酸氣，並於 $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 之間呈現散熱之尖峰Peak。除此之外，當礦物發生變態時，其熱反應亦可以示差熱分析表示之。如石英於 573°C 由低溫型變為高溫型時，則發生吸熱之微弱尖峰。由於曲線上之顯示，當礦物進行化學分解、變態、及趨向熔融之變化過程中，其構造雖然崩潰，但仍能保持其固體狀態，且在更高之溫度下再行結晶。此時所產生或



第409圖示差熱分析曲線

釋出之熱，形成曲線上顯著之尖峰。

除以上所述者外，礦物亦有在脫水後，其構造大體不變者。以一般而論，當礦物發生變態時，因固相依序改變，故構造亦隨之變更，接踵而至者，則為其物理上之變化也。

示差熱分析之本質，可分為下列四點：

(a)影響試驗最大者，為試驗之設備與操作之程序。其中儀器結構一項，尤能使示差熱分析之曲線產生差異。目前各國所用者種類雖繁，但在結果上之差異尚屬甚小，苟能在儀器結構上儘量劃一，則所得結果更於符合理想也。

(b)示差熱分析為按一定加熱速度使溫度上昇者，普通多為一分鐘上昇 10° 。因不用完全斷熱式，故曲線之尖峰形狀與溫度之上昇速度無關，但與儀器精密度之關係則頗密切。示差熱分析之主旨既為尖峰，實際上尖峰直接表示者，並非吸熱反應發生之溫度，乃熱反應開始點與終了點間之溫度也。故應以“進行比較”稱之。

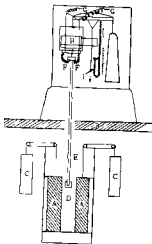
(c)以往均為應用相對比較之功能，在低溫（ 0°C 以下）、高溫（ $1000^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ）、減壓、真空、及高溫高壓下進行者。此後則更仰賴於儀器之精度，並以自動方式記錄之。故改良試驗條件及製造高等儀器，為目前主要之課題。如先進國之日本，即係循此方向邁進。除示差熱分析外，在礦物熱學之其他方面亦嶄露頭角，其高精度自動記錄式儀器不久當可完成矣。

(d)利用示差熱分析之曲線，可得定量分析之效果。普通尖峰之大小，與試料之數量有關。若因試料減少而穴孔中有空隙時，則以鉛粉補充之。只須將曲線之尖峰大小與標準試料所得者加以比較，即可得其所含之數量。但標準試料與試驗試料之間，其結晶與物理性質相差懸殊時，則結果即不正確。故試驗時應注意及之。

(B)熱天秤：在礦物加熱變化之過程中，常產生化學分解。根據放出水份及揮發分而做之減量研究，稱之為加熱減量分析。其設計始於1915年日本之本多光太郎博士，彼將試料掛於爐中，並與天秤之一端

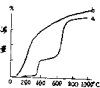
相連接，而秤其加熱所生之減量狀態，且以連續方法記錄之。嗣後迭加改良，其中以早稻田大學齋藤平吉氏之研究，貢獻最大。

如圖所示，為東京工業試驗所之熱天秤結構，將電爐 A 置於實驗台之下，其升降以垂錘及滑輪司之。再將石英管插於坩堝 D 中，更在石英管內裝入熱電對，並與真瓶連結。在天杆上裝以空氣制動器及鏈狀分制調節器 I。其操作方法與示差熱分析相同，只須將變壓器予以增減，即可使爐內溫度上昇至一定限度。此種方式係在試料之變化下測定溫度之昇降者，故溫度計中所指示之數字，必與減量所顯示者極為接近，兩者相映自無遺漏之虞也。



第410圖 熱天秤之結構

在操作時，一面使溫度等速上昇，同時觀察其減量變化。如411圖所示，橫軸表示溫度，縱軸表示減量。當無減量時，則線呈水平，至傾斜線之形狀更隨加熱速率及試料之數量而異。因係觀察曲線而做判斷者，故仍為相對之比較。然根據曲線之形狀，究能推定礦物加熱變化之特性。圖中所示，曲線 a 表示結晶水在構造中係由不向之力結合，故呈階段式之放出，而曲線 b 則呈非階段式之連續放出。如滑石中之結晶水，即係在 $0^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 間呈連續放出狀態也。



第411圖 熱天秤曲線

(5) 比熱 (Specific heat)：加熱於 T 溫度之物體，使其上昇 Δt 度，所需之熱量為 Q ，則稱 $Q/\Delta t$ 為該物體在 T 溫度時之熱容量，而稱一克物質之熱容量為比熱。又當體積一定時，其數值隨溫度之高低而異是為容積比熱。至壓力一定時，則又稱之為定壓比熱。因比熱係原

子振動能之數值，故與熱能及其他能量間有下列關係。

$$1 \text{ 卡} = 4.1842 \text{ 焦耳}$$

$$1 \text{ 焦耳} = 0.239 \text{ 卡}$$

比熱既與溫度之高低有關，故試料發生熱變化時，其比熱之數值亦顯著改變。至其測定方法通常有連續直接加熱與不連續加熱二種方式。前者為裝保溫劑於電爐中，使溫度定速上昇，並將試料之溫度與預定者比較，同時調整電爐之溫度，使溫度差與預定者一致。此種方式因電爐之熱容量大，即使調整電流強度，仍能產生溫度改變之時間脫節。又測定溫度時之誤差，直接受操作誤差之影響，故不可謀求急驟之變化也。

(6) 熔融及熔融點 (Melt & Melting point)：加熱於礦物時，其原子間之距離增加，若溫度之變化劇烈，其原子之動搖亦烈，致其井然秩序難以維持。於是其中之一部，僅能結合成分子，互相吸引互變方位，以防止彼此之脫離，此種狀態則稱之為熔融。

礦物開始熔融時，結晶體與熔體共存，而保持均衡狀態。設再加熱，晶體即告消失；若再冷卻，則液體消失。通常稱此晶體與液體保持均衡時之溫度為熔融點。所謂熔融者，即晶體變成液體時之物理性質也。其硬度、比重、凝膠力等皆發生不連續之變化，且其變化為可逆式。但非晶質之玻璃體在變化上則呈連續式，即呈固態與否，皆以凝膠力為依歸。故可視為內部抵抗力大之過冷流動體，而無一定之熔融點也。

設壓力不變，單一結晶之礦物，其熔融點均有一定。茲將其主要者，例舉於下。

綠矽石 (Al_2SiO_5).....	1816°C	透輝石 ($CaMgSiO_3$).....	1319°C
β 黝輝石 ($LiAl(SiO_3)_2$).....	1380°C	鎂橄欖石 (Mg_2SiO_4).....	1890 \pm 20°C
人造霞石 ($NaAlSi_3O_8$).....	1256°C	鐵橄欖石 (Fe_2SiO_4).....	1100°C
鉀霞石 ($KAlSi_3O_8$).....	1800°C	英輝正長石 ($Ca_2MgSi_2O_7$).....	1438°C
β 白榴石 ($KAlSi_3O_8$).....	1755°C	黝長石 ($Ca_2Al_2Si_2O_7$).....	1590°C

鈉長石($NaAlSi_3O_8$).....	1100°C	剛玉(Al_2O_3)	2050°C
鈣矽石($CaSiO_3$).....	1540°C	冰晶石($AlF_3 \cdot Na_3F_6$).....	1000°C

(7)解離 (Dissociation)：礦物在熔解之際，有時原子之一部改爲新整然之排列，於熔體中生成更細微之另一種礦物。如在大氣中將純粹之正長石加熱時，大部在1170°C時成爲熔融體，而其中之一部則形成微晶之白榴石。俟溫度昇高，再徐徐熔融。

有時當礦物於應成熔融體之際，其原子結合成分子而飛散於大氣中，是爲揮發 (Volatilization)，或稱昇華 (Sublimation)。如置樟腦球於囊中，其體積可逐漸減小。又礦物加熱後其殘存之原子有呈新整然之排列者，亦有以雜然姿態出現而形成另一種礦物者。如赤鐵礦於高溫之下，一部氧氣揮發而成磁鐵礦，及方解石散失一部份碳酸氣而成石灰等皆是。此種現象特稱之爲解離。

(8)溫度下降與礦物之復原：設上述各種現象，恢復原來環境，即將溫度徐徐下降，其已熔融之礦物原子亦漸欲復原有排列而行結晶。且已解離之成分，重行結合而復原。若周圍環境變化劇烈，原子不能及時活動，或溫度過低原子運動不活潑時，則礦物隨環境之復原作用，常有落後之感。

如石英於急驟加熱時，雖至可變成鱗石英之溫度，但亦不爲之遷移，直至熔融而後已。又將熔融體急劇冷卻時，雖達可以結晶之溫度，亦不爲之結晶，終於凝結成玻璃體而後止。

除此之外，在一定之環境下，同種原子群常形成二種以上之排列方式，即所謂之同質多像是也。考其共生原因即基於此。在某種環境中除一種安定外，其他則對現存環境不甚適合，常較其環境之變化略爲遲緩，但仍以他環境之結合狀態繼續演變之。

4 -- 4 礦物之電磁性

(1)礦物之電學性：所有之物質按其導電與否，可分爲良導體、絕緣體、及半導體三種。當電在物質中流動時，其擔任運送任務者有電

子及離子。礦物本為原子構成，設原子中之電子過剩或不足時，均產生離子。此乃各種礦物之主要成員，其顯示電學性之關鍵，即基於此。設點電荷 e 及 $-e$ 間之距離為 r ，單位體積中之誘電分極為 I ，電場之強度為 E ，則帶電現象為 E 及 I 二向量之合成結果，其比例常數稱之為電帶率。

$$\chi = I / E$$

普通金屬多為導體，非金屬礦物多為絕緣體，至其與半導體之間，並無顯然之區別。

電子及離子既負導電任務，在金屬中之電子自由移動，極易導電。當離子形成安定之結合體時，則呈不游離狀態，故不易導電。如岩鹽為正負之離子組成，苟不游離便不易導電。且共用電子按共價結合所形成之構造，在一般狀態下亦不導電，金剛石即屬此類。至用為絕緣體之雲母呈層狀構造，在層與層之間因受離子共價結合之影響，在一般情況下不易發生游離現象，故不導電。

除上述之帶電率外，尚有電變位或電感應向量 D ，其公式為：

$$D = E + 4\pi I$$

至 E 與 D 二向量之合成結果，稱其比例常數為誘電率。

$$d = D / E$$

某些礦物具有甚大之誘電率。如人造金紅石、鈣金紅石 $CaTiO_3$ 、鈦酸鋇 $BaTiO_3$ 、及鎊鹽等，特稱之為強誘電體。在此種礦物之結晶中，多分成若干小領域，每一領域均有不同方向之自發分極，乃係於一定溫度下產生者。至其溫度界限則稱為呆滯點 (Curie point)，如鈦酸鋇為 $120^\circ C$ 左右，洛瑟爾 (Rochelle) 鹽為 $23^\circ C$ 及 $-18^\circ C$ 左右，即在兩種溫度範圍內均可形成強誘電體也。普通強誘電體之特性，與強磁性體相同，前者屬於強電子學 (Ferro-electronics) 之範圍，而後者則屬於強磁學 (Ferro-magnetics) 之領域也。

普通之金屬均為導體，如溫度上昇空間格子發生振動，因而妨碍電子之移動，以致電流通過困難。又矽及鍺 (Germanium) 等在常溫雖

不導電，但溫度上昇時，則有電流發生，此種物質特稱之為半導體。在金屬之中如含有雜質時，因電阻增加常變為不導電之物體。此乃金屬礦物導電率不同之主要原因也。至於非金屬礦物皆為不良導體。若溫度發生變化，礦物之導電率亦隨之變化。如錒銀礦於溫度上昇時，其導電率增加。矽酸礦物於高溫中，亦常變為導電之物體。但將方鉛礦加熱時，其導電率反而減小。茲將各種主要礦物之電阻，按歐姆之單位列表於下：

方解石	$5.0 \times 10^{14} \Omega$	石英	$3.3 \times 10^{11} \Omega$
雲母	1.5×10^{10}	閃鋅礦	1×10^8
蛇紋石	2.0×10^4	菱鐵礦	7.1×10^6
白鐵礦	10.0	黃銅礦	1.0
磁鐵礦	0.6	鏡鐵礦	0.4 ~ 0.8
石墨	0.03	黃鐵礦	0.02
磁硫鐵礦	0.01	方鉛礦	0.003

在結晶構造中，空間格子點即為原子或離子之位置，亦即原子或離子能之最低準位。但實際結晶中之空間格子點，並非全部由原子或離子佔據，而常留有空閒。同時位於格子點之原子或離子，亦常向中間之空隙漫步。且雜質更向其間填充。於是純粹結晶本來之原子或離子遂發生過剩或不足之現象，又含有雜質之結晶亦復如是。例如 Cu_2O 及 ZnO 之構造係屬前者。在 Cu_2O 中，當其化學式為 $\text{Cu}_2\text{O}_{1.001}$ 時，則係 O 之原子或離子過剩，而 ZnO 恰與之相反，即普通均係 Zn 之原子或離子過剩也。若將氧之壓力增加時， Cu_2O 之導電性提高， ZnO 之導電性反而減低。

半導體為化學工業上之重要原料，若以結晶不規則性之觀點言之，其有雜質存在至為明顯。至由不規則性所產生之偏差，雖屬微至 $\text{Cu}_2\text{O}_{1.001}$ 左右，但在目前之精益求精時代，已達極應重視之程度也。

至礦物帶電之種類，則有下列五種：

(A) 摩擦電 (Frictional Electricity)：礦物遭受摩擦，即產生帶電

現象。如琥珀之生電，已於紀元前六百年為人所共知。若摩擦不同之礦物，其所生之電有正電與負電之別。即使同一礦物亦因狀態不同，其所產生之電亦迥然而異。如摩擦寶石之原狀時，常生負電，而摩擦其已研磨者，則生正電。但金剛石不論研磨與否，皆生正電。上述各種現象，統稱之為摩擦生電。

(B) 焦電 (Pyro-electricity)：將不帶電性之結晶，加熱至適當溫度時，其晶面之上往往產生正電及負電，是為焦電。至正、負電之分佈，常隨結晶之性質而異。普通同一結晶之礦物，多呈同一現象。且加熱時所生之兩極與減熱時所生者，其位置相同而性質恰相反。若結晶之對稱顯明時，則所生焦電之兩極分佈，可由其為完面、半面、四半面形等判定之。設為雙晶時，亦可由之加以區別。

產生焦電之礦物最著者為方硼石、電氣石及水晶等，其他如異極礦、石膏、黃玉、霞石、方解石、透輝石、斧石等亦可產生焦電。

如圖所示，為方硼石之結晶，若將其加熱並於晶面上撒以硫黃及鉛丹之粉末時，則等軸晶系四面體之晶面產生正極且吸引硫黃粉末，而其他方位却形成負極並吸引鉛丹粉末。



第412圖 方硼石之焦電



第413圖 水晶之焦電

又石英之結晶為六方晶系之偏形六面體類，如將其加熱時，則見三相附柱面之稜產生正電，其他三稜則生負電。

(C) 熱電 (Thermo-electricity)：當二種不同之金屬互相接觸時，一帶正電，另一則帶負電。設將兩者之接觸點加熱或冷卻，他端以導線連接並保持一定溫度，此時必生向一定方向流動之電流，此種現象稱為熱電。其電流之方向在加熱時所生者，與冷卻時所生者恰巧相反。

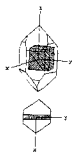
在銻、鐵、鋅、銀、錫、銅、鋁之中，任取二種使之接觸，當熱至 50°C 左右時，其在前者之端末帶負電，後者之端末則帶正電。此種表示熱電流方向之金屬，稱之為熱電序列 (Thermo-electric series)。今將鐵與銅之一端互相接觸，隨之加熱，即由鐵線之熱端而向冷卻端產生電流現象。若將冷卻端保持相當之溫度，並將加熱端之溫度再行升高，其所生之電流亦隨之加強。如此依序進行，可使電流達於最大之點，此即所謂之中和點 (Neutral point)。設超過中和點後，仍在其接觸點繼續加熱，則電流乃逐漸減弱。至所加溫度與中和點之差，等於中和點與最初溫度之差時，其電流遂完全消失。但超過此溫度再繼續加熱，則電流又隨溫度之上昇而漸次增加。

普通硫化金屬礦物之熱電，遠較純粹金屬為大，其數值常達銻與鋁接觸時之數百倍。茲將各種主要礦物之熱電列表於下：

礦物	熱端溫度	冷端溫度	電動力 (u.V)
黃鐵礦	25°C	0.2°C	13000
矽酸	"	0.5°C	12850
斑銅礦	"	0.3°C	10000
自然碲	"	0.5°C	6650
方鉛礦	"	1.0°C	5250
碲鉍礦	"	0.3°C	-1000
黃鐵礦	"	0.1°C	-5400
方鉛礦	"	0.2°C	-5700
方鉛礦	"	0.4°C	-6500
黃鐵礦	"	0.3°C	-8500
黃銅礦	"	0.3°C	-10500
紅鋅礦	"	0.3°C	-16000
輝鉍礦	"	0.3°C	-34500
硬錳礦	"	0.3°C	-79000

(D) 壓電 (Piezo-electricity)：加壓力於礦物之結晶時，可使之帶

電，是為壓電，如電氣石及水晶是也。將電氣石製成與 c 軸垂直之板，由表面加以壓力，則一面帶正電，另一面帶負電。其帶電之強弱與壓力之大小成正比。設改用張力時，所得之結果恰巧相反。若由其他各方向加以相同之壓力時，亦僅係垂直 c 軸之面帶電。即加靜水壓力於電氣石之結晶，常在極性軸上產生壓電，通常稱其產生壓電之軸為帶電軸。如圖所示，水晶之帶電軸為二次對稱軸。 c 軸、 x 軸及 y 軸彼此互相垂直，恰與平行六面體之三邊相當。當沿 c 軸方向加壓時雖不帶電，但於 x 軸或 y 軸之垂直面加壓時，則在垂直 x 軸之二面上，各帶強弱相同之正電及負電。設改用張力時，其帶電之性質恰巧相反。若二力相等，在各面上產生大小相等而性質相反之電，故由全體觀之，呈不帶電現象。但加靜水壓力於水晶時，則不帶電。以上各項，均與電氣石不同。



第 414 圖水晶之壓電

壓電係加壓於晶面而生者，因其本身產生分極作用，故壓電之分佈與結晶之對稱性有關。如以對稱性之觀點言之，結晶雖受壓而帶電當其本身為導體時，則不易察覺之。

壓電常應用於重要工業之上，水晶之化學成份極為簡單，苟不含雜質，其單晶之用途至為廣泛。但普通之水晶多為雙晶，因晶體混雜一團，故應先使單晶分離方可利用。設其混雜型式無法辨認，則須將結晶切成板狀，浸於氫氟酸中，觀其表面磨蝕與晶體所受之蝕度，即可瞭然。

普通壓電之強弱因與壓力之大小成正比，故可用以測定壓力。其中最重要者，為水晶發振器。因水晶板之振動極微，可以測定急驟變化之壓力。如魚雷在水中爆炸時，其壓力甚大，但作用時間頗暫，故惟有以礦物壓電測知之。

壓電與壓力之間無滯後現象 (Hysteresis)，水晶本身更具有極大之附着力。根據水晶振子原理，若於晶板兩面加以交流電壓時，則在

c 軸方向產生壓力與張力，且與水晶板之固有振動發生共振。設將水晶板之厚度減至 1~2 公厘時，則其振動頻率可達數十萬次之多。

(E) 光電 (Actino-electricity or Photo-electricity)：置礦物於光線下曝之，其表面所生之電曰光電。螢石最易產生此種現象。

(2) 礦物之磁學性：在磁場中帶有磁性之物體，稱之為磁性體。磁性本為礦物物理性之一，茲將其主要者列舉於下：

(A) 磁性礦物與天然磁石 (Magnetic mineral and Nature magnet)：在礦物中之磁鐵礦、磁硫鐵礦、錳鐵礦等具有強磁性，黑錳鐵錳礦 (Jacobsite) 具有磁性，錳鐵尖晶石具有弱磁性，統稱之為磁性礦物。在磁性礦物中之某種磁鐵礦不但可被磁石吸引，且可如磁石之吸引鐵粉者，稱之為天然磁石。普通礦物之磁力強度，隨其結晶之方向各有不同，即等軸晶系之礦物，各晶軸方向之磁力彼此相等。一軸性礦物中，其縱軸方向之磁力與水平軸方向則不相同。至二軸性之礦物，其三晶軸方向之磁力更彼此各異。

(B) 順磁性與逆磁性 (Paramagnetic and Diamagnetic)：礦物在強磁場間，均有一定之透磁率 μ ， μ 之數值為正時曰順磁性，如鐵、鈷、鎳、錳、白金等之由磁極吸引者是也。設 μ 之數值為負時則曰逆磁性，如銀、銅、鋅、鉍等之被磁極排斥者皆是。

礦物中之菱鐵礦，其所含之鐵份為順磁性，且透輝石、綠柱石、翠銅等亦具有順磁性。至方解石、鈣英石等則具有逆磁性。在順磁性之礦物中，因受磁極吸引力之大小，可以分為數級。如純鐵為 1,000,000 時，則磁鐵礦為 40227，結晶質之赤鐵礦為 523，塊狀赤鐵礦為 134，黃鐵礦為 150，褐鐵礦為 71。

(C) 磁力之變化：礦物之磁性常隨其環境而異。如以鐵為例，其磁力隨磁場強度之減低與壓力之增高而逐漸增大。設壓力一定，其磁力之大小則與磁場之強度成反比。若所吸引者為鎳時，當磁場一定，其磁力之大小與壓力成正比。又壓力固定且在一定條件下，其磁力之大小則與磁場之強度成正比。

除此之外，礦物之磁力亦因溫度之變化而行增減。如鐵之磁力在弱磁場時，常因溫度之升高而增大；在強磁場中，則因溫度之增加而減小。設溫度達 790°C 時，不論磁場之強弱，其磁力均變為零。

(3)礦物之機械分離：自岩石中提取礦物，為目前研究工作中之重要一環。其所用之方法雖多，但以比重及磁性之利用最為重要。

普通先將岩石破碎篩之，使其粒度均勻，並用水沖洗以清除其微粉末，再置於溫室之內乾燥，然後以磁選器提取其礦物之最濃集部分。磁選器之圓周上裝有五具磁力不同之磁石，在其下方為五具船形槽，依序轉動。每當試料流入槽內少許，其下方之電磁石即發揮功能，而吸引船形槽，於是遂將礦物自試料中吸出。稍頃船形槽再轉，當另一槽尚未達電磁石下方之前，電流一度中斷，其所吸附之礦物遂墜於下方之杯中。迨第一槽轉至第二電磁石之下方時，又產生電磁作用，設槽內試料中仍有尚未吸出之礦物時，則必為電磁石再度吸附，於是試料之磁選工作乃由五具磁石完成之。至不為磁石吸引之礦物，則均墜於最後之杯中。一次操作雖不能將礦物徹底分離，但其分離者確已達於最高數量。設再置以磁選器時，更可將礦物再度濃集。使用此種器械，其分離對象究竟有限，如磁性差別較小礦物，在分離上常感困難。但一次作業可以處理多量試料，故用者仍眾。

除此之外，在處理濃集礦物之試料時，常以磁力選別器為之。選別器上裝有二強大之電磁石，中間置以小槽，槽之下方又分為二。每次由槽之上端置以少許試料，沿槽落下。因電磁石之方位可以任意變更，以便使磁性差別極小之礦物在槽之下方分離，而落於另外之杯中。使用此種選別器，既可於短時間內處理大量試料，且對磁性差別極小之礦物，若能再以克列利西重液法輔助時，其分離工作更必能更臻圓滿。但礦物中含有鉍之成分者，則應特別注意。如褐水金雲母 (Stilpnomelane) $2(\text{Fe} \cdot \text{Mg})\text{O}(\text{Fe} : \text{Al})_3\text{O}_4 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 可使克列利西重液改變顏色，乃係與礦物發生反應之明證。

第五章 光性礦物學

5-1 礦物之一般光學性

(1)透明度 (Transparency)：礦物對光量之通過有多有寡，因而顯示各種不同之明暗程度，是為透明度。其種類如下：

(A)透明 (Transparent)：透過礦物可明確辨認物體之輪廓者，亦即光線能完全透過之謂也。如水晶及冰晶石等。

(B)半透明 (Semi-transparent or Subtransparent)：物體透過礦物時，其輪廓不甚明瞭者。

(C)亞透明 (Translucent)：或稱玲瓏光線雖可透過礦物，但其物體不能辨認者。

(D)微透明 (Subtranslucent)：僅一部份光線能透過礦物者，曰微透明。

(E)不透明 (Opaque)：光線完全不能透過者。但將礦物磨成極薄之片時，除石墨及磁鐵礦外，仍可為一部份光線透過之。

(2)色 (Color)：色者光之反射現象也。當光線投射於礦物時，一部色光為其吸收，另一部色光則被反射，故呈種種不同之顏色。如孔雀石之呈綠色者，即係其吸收綠色以外之色光，而獨將綠色反射而出者也。若礦物將全部色光吸收時，則呈暗淡。至礦物色之種類，常因其化學成分及物理性質等而不同，茲分述於下：

(A)自色 (Idiochromatic colour)：乃礦物基於其本身之化學成分及結晶構造等性質，在白色光線下所呈現之顏色也。如磁鐵礦為黑，黃銅礦顯黃，以及螢石之紫、綠、水晶之紫、黑，黃玉之黃等均是。然礦物之色彩千變萬化，僅黃色一種即可分為若干不同之色序；而所謂紅者，亦可得許多不同之色澤；故表示礦物顏色之方式，實有推敲之必要。在目前之方法中，多以色澤相似物體之名稱冠於前方，如稱黃

玉之黃爲草黃，方鉛礦爲鉛灰，磁硫鐵礦爲黃銅黃，黃銅礦爲青銅黃，
 皆是。除此之外，亦有用色紙之顏色表示者。至礦物色之形成原因，
 有下列二種。

(a)化學成分：礦物之色常隨化學成分而不同，如柘榴子石中之鐵
 鉍柘榴子石呈赤褐色，鈣鉍柘榴子石呈灰至綠色，鈣鎂柘榴子石呈翠
 綠色。又電氣中，含鐵成分多者呈黑色，含其他成分者則呈紅色。此
 皆係礦物之化學成分不同，以致有各種不同之顏色也。

(b)結晶構造：礦物之顏色與結晶之空間格子有關，通常礦物皆吸
 收一定波長之光線而呈現各種不同之顏色，吾人肉眼所見者，乃可見
 光線之吸收所以致之。至其吸收之原因，乃係構造中結合鬆弛之電子
 ，稍受刺激即跳於高準位能之地帶，而形成對一定波長選擇吸收之習
 性。在金屬之中因自由移動之電子較多，故可吸收各種不同波長之光
 。且金屬之反射能大，而其吸收係數亦大。普通透過金屬薄膜之色光
 ，即係反射光之餘色。如透過金箔之光呈青色者是也。設以 α 線或電
 子線投射於岩鹽或鉀鹽時，則前者之著色爲黃，而後者之著色爲紫。
 此乃係負離子游離所餘之孔穴，爲電子佔據；且電子之結合又極鬆弛
 ，故選擇吸收可見光線而呈現某種顏色。基於此種作用，在原子中遂
 產生吸收一定波長之中心，特稱爲着色中心 (Colorimetric center)。
 通常之著色多因溫度上昇而消失。又投射 X 線於綠柱石時，其色常變
 ；投射 X 線於石英時，亦逐漸變成褐色；而電氣石之紅、青等色，更
 隨溫度之昇高而消失。除此之外，以 α 線照射金剛石時，亦發生著色
 現象，但非着色中心所生者。至紫水晶及煙水晶之因熱失色，黃玉之
 因晒脫色以及螢石之受 X 線照射而生著色等現象，均爲有待進一步研
 究之問題也。

(B)假色 (Allochroatic color)：乃礦物中含有微量雜質所呈現之
 顏色也。如鐵石英之紅色爲含細微赤鐵礦之雜質，砂金石 (Aventurine)
)爲含黑雲母、金雲母片或赤鐵礦結晶片之石英，虎眼石 (Tiger's
 eye)爲含青石棉 (Crocidolite) 之石英等皆是。茲將其包括之種類，分

述於下。

(a)彩色 (Play of color)：旋轉礦物時，則見有光譜狀之色序依次出現，是為彩色。如金剛石及貴蛋白石是也。貴蛋白石之色乃係置蛋白石於燒杯中，因自然脫水作用而產生之干涉色光。

(b)變色 (Change of color)：旋轉礦物時，其色徐徐改變而呈虹之色彩者，曰變色。此乃係晶面上之極微裂紋或平行位置上含有細微雜質，所產生之干涉色光，此種現象常於鈉鈣長石之結晶面上見之。

(c)暈色 (Iridescence)：礦物之內部或表面常呈現虹之色彩者曰暈色。乃係結晶體中含有極微之雜質，或表面覆以一層極薄之氧化膜與晶面互相干涉而成者。此外當礦物遭受打擊時，在解理面上產生平行裂紋，因其彼此相互干涉亦可生成暈色，如褐鐵礦表面所生之含鐵氧化膜，方解石解理面上之干涉色光，以及雲母及石膏等晶面上所見者，皆屬此類。

(d)錆色 (Tarnish)：礦物曝露於大氣中，經久則表面氧化，而變成一種與其本來顏色不同之另外物質，是為錆色。如黃銅礦及斑銅礦之表面常變為青、紫等色之斑紋皆是。

(e)乳色 (Opalescence)：乃礦物內部反射而呈現之乳白色。此種現象以蛋白石最為顯著，故亦稱蛋白色。除此之外，在貓眼石 (Cat's eye) 上亦可見之。

(f)星彩 (Asterism)：礦物由反射作用而生之星狀色彩，謂之星彩。如藍寶石及綠寶石等是。有時由透光觀察，亦有此種狀態出現，如白雲母是。

除上述六種外，如貓眼石之綠、虎眼石之褐、鷹眼石 (Hawk's eye or Falcon's eye) 之青色纖維狀等，皆礦物之美麗色澤也。究其生成原因乃係細石英塊，大部為角閃石之細纖維集合體所置換，即貓眼石為透綠閃石所氧化之綠色，虎眼石為青石棉之鐵氧化所成之褐色，而鷹眼石則因鐵之氧化較少，故呈青色。

(3)條痕 (Streak)：以上所述者，均係指大形礦物表面之色而言。

若將礦物破碎，使其體積逐漸減小時，則其色亦隨之改變。如赤鐵礦之大形結晶為銅灰色，板狀結晶為鋼灰色。若將其置於乳鉢中研碎，則成帶紅色細粉，再研之終成紅色粉末。且鱗片狀礦物將之剝落時，其鱗片亦漸帶紅，最後變為鋼灰與紅赤混合之紫色鱗片。除此之外，黃銅礦之顏色亦復如是。即大形結晶之表面雖呈黃色，但用乳鉢研碎時，其黃色逐漸消失而成黑粉，再研之終成為黑綠色粉末。普通為便於觀察計，常將礦物在粗磁板上磨劃，使粉末附於板上，而稱其顏色為條痕。設礦物之硬度過高，可將其擊成粉末，置於白紙上以察其顏色。蓋以礦物粉末之顏色常保持一定，而晶面或結晶集合體之顏色，則因錯色而改變，或因表面不平整致色彩發生變化，故觀察條痕為鑑定礦物之重要法則也。

普通礦物之顏色常與條痕不同，茲將主要者列表於下：

礦物名稱	顏色	條痕	礦物名稱	顏色	條痕
自然銀	銀白	錫白	黃鐵礦	淡黃	微黑
鵝冠石	紅	淺紅	砷鈷礦	錫白	灰黑
雄黃	黃	淡黃	硫砷鐵礦	銀白	灰黑
輝銻礦	鉛灰	鋼灰	白鐵礦	淡青銅黃	灰黑
輝錳礦	鉛灰	鋼灰	硫砷鐵礦	銀白	灰黑
輝銅礦	帶黑鉛灰	灰黑	濃紅銀礦	灰黑	紅紫
閃鋅礦	黑至黃	淡黃至白	硫砷銅礦	鐵黑	灰黑
辰砂	紅	紅	磁鐵礦	黑	黑
黝銅礦	灰至黑	褐至紅	鉻鐵礦	鐵黑	褐
黃銅礦	黃銅黃	黑帶綠	鈦鐵礦	鐵黑	褐

(4) 光澤 (Luster)：當光線投射於礦物表面時，由於性質不同，故其反射光線之強度亦自各異。因而生成種種之光澤，茲特分述如下：

(A) 種類：可分為下列三種：

(a) 金屬光澤 (Metallic luster)：乃係金屬化合物表面固有之光澤也，普通多為比重大而不透明之礦物，如金、銀及方鉛礦等屬之。

(b)半金屬光澤 (Sub-metallic luster)：凡深色礦物而無充足之金屬光澤者，曰半金屬光澤。如閃錳礦、褐鐵礦及鐵錳重石等屬之。

(c)非金屬光澤 (Non-metallic luster)：即礦物表面絕無金屬光澤者，其種類有六，分列於下：

(甲)金剛光澤 (Adamantine luster)：礦物閃閃放光如金剛石者，屈折率高比重大有時透明，如錫石及白鉛礦等是。

(乙)玻璃光澤 (Vitreous luster)：即礦物具有玻璃斷面之光澤也，如石英是。

(丙)樹脂光澤 (Resinous luster)：即礦物具有樹脂狀之光澤也，如蛋白石、閃鋅礦等皆是。

(丁)脂肪光澤 (Greasy luster)：礦物表面恰似塗有一層油皮者，如重晶石是也。

(戊)珍珠光澤 (Pearly luster)：即礦物表面顯珍珠狀之光澤者，如滑石、石膏等是。凡具有珍珠光澤之礦物，必有完全之解理面。

(己)絹絲光澤 (Silky luster)：狀如絹絲，凡有纖維組織之礦物，皆呈此種光澤。如纖維石膏及石棉等是。

又礦物之光澤常因結晶面不同而呈現各種異樣，如魚眼石之底面為珍珠光澤，而其柱面則呈玻璃光澤。

(B)程度：即礦物表面反射光之強度，普通因屈折率之高低，反射面之性質，以及結晶體之透明度等之不同，而有強弱之分。茲將各種不同之程度分述於下：

(a)燦光 (Splendent)：礦物晶面燦爛若鏡，放射光輝，能將物體影像顯然映出者。如鏡鐵礦、錫石等是。

(b)耀光 (Glistening)：礦物之晶面稍燦爛，亦能映像，但不甚明顯者。如天青石及雲母等是。

(c)閃光 (Shining)：礦物之晶面，對光之反射較弱，不能映出物體之影像者。如滑石、石膏等是。

(d)微光 (Glimmering)：光輝微弱，而少反射者，如玉髓是也。

(e) 暗淡 (Dull)：礦物之完全無光澤者，如高陵土、白堊土等是。

(5) 螢光 (Fluorescence)：礦物受熱、光、X 線、放射線等刺激時，則產生發光現象，螢光即係其中之一。由於近年來之多方研究，對其發光之原理已有相當之瞭解。而所確定之螢光性礦物，更多達百餘種。茲將其主要各點，分述於下：

(A) 螢光之意義：凡光線均具有二種特性，即光波 (Wave) 與光量子 (Quanta)：是也。光量子不似光波流，乃非連續及非牢固者，但仍呈波之性質。螢光亦光線之一種，故其性質亦不例外。普通稱礦物受光線刺激後，而放出與入射光波長不同之光線，此種性質以螢石最為顯著，故名之曰螢光。至刺激礦物螢光之射線，計有紫外線 (Ultra-violet ray)、陰極射線 (Cathode ray) 及 X 線 (Röntgen ray) 三種。其中以紫外線製取簡單，用途廣泛，故目前最爲人所樂用。

凡礦物均由原子組成，而原子又包括一原子核及一或更多之電子群。電子經常繞原子核運行，其型式恰如微小之太陽系 (Solar system)。普通電子之大小約爲氫原子之 $\frac{1}{1847}$ ，帶負電。原子核即中子，乃由較重之質點組成，顯正電。當紫外線之光量子進入原子中時，往往發生衝撞作用，而爲獨立之電子所吸取；其吸引光量子之電子，因總能增加，乃跳出正常軌道。通常經過百億分之一秒後，即放出其過剩之吸取能而恢復原位。

吾人稱電子之吸取光量子活動爲刺激，其刺激物即紫外線，反之放出光量子之活動，則謂之發光。當吸取作用開始後，光之發射隨即進行，此即所謂之螢光是也。至其發光時間之長短，普通與紫外線照射礦物之時間相同。一旦紫外線停止照射，則螢光之發射亦隨即停止。

(B) 螢光發生之原因：礦物發生螢光之原因可能甚多，據目前所能瞭解者，厥有下列數端：

(a) 礦物本身由螢光質組成：如重石之成分爲鎢酸鈣 $CaWO_4$ ，原具有發生螢光之性質，即所謂之螢光質是也。

(b) 礦物為螢光質所包裹，或其中含有螢光質者，亦復如是。

(c) 礦物具有特殊之結晶構造，或不同之分子排列者。

(d) 礦物中含有催化劑者：設礦物組成不純，其所含之雜質能為催化作用而使反應趨於活潑者，特稱之為催化劑 (Activator)。如一般方解石本不發生螢光，但其中含有少量之錳時，即因催化作用而產生紅色螢光。且其紅色螢光之色彩、種類及光度，皆以含錳之百分率為依歸。如美國新澤西州 (New Jersey) 之富蘭克林 (Franklin) 所產之方解石中，錳之含量常在 1% 至 5% 之間，而以含錳 3.5% 之礦石，所發之螢光最為燦爛。設再多或較少均不能充為催化劑，故亦不顯螢光。又鉍鹽在各種岩石中，皆可發揮催化功能，故亦可使之發生綠色或黃綠色之螢光。

以上各端，僅係指以紫外線所刺發者。至礦物顯發螢光之所有因素及通盤理論，目下雖在積極探索，但尙未獲其全貌。有時屬於同一種礦物，產於甲地者可發螢光，而產於乙地者則否。即同地所產者，其螢光性質亦不盡相同。此種問題之正確解答，尙有待吾人之努力焉。

(c) 螢光之應用價值：近年來由於螢光化學及螢光生物學之不斷研究，以致螢光之應用範圍，益為廣泛。諸如工業產品，植物組成以及罪犯遺跡之鑑定，莫不利賴之。至螢光之應用於礦業方面者，更屬不勝枚舉。茲將主要各項，分述於下：

(a) 重石之探採：通常重石多呈小晶體，其散佈於岩石中者，小若針尖，大如銀元。亦有時見於礦脈或礦塊之中，而呈零星散在之分布。光澤暗淡，色灰黃、褐灰，有時白、綠、紅或橘黃，不易與石英、碳酸鹽類或矽酸鈣等脈石區別。但置於短波長之紫外線燈下，所有重石均顯螢光，而成為吾人辨認之依據。至其顯示之螢光色澤，計有藍、藍白、乳白及黃金色等。

純粹之鎢酸鈣礦 (重石) 結晶堅硬，邊稜清晰，在日光之下呈白至橘黃色，置紫外線燈下顯亮藍白色螢光。若其中含有微量之鉍時，

則螢光呈白色，礦石質硬，多具有經濟價值。如結晶質軟，可為指甲搔傷，乃鈣分高而鎢分低之劣礦也。如重石之螢光呈金黃色時，則其中必含雜質無疑。至雜質種類普通有鉬、鈾、鐵及錳等。一般常見者多為鎢酸鈣及鉬酸鈣之混合成分，特稱之為鉛灰石(Powellite)。其經濟價值或有或無。如鎢酸鈣之成分過多，其品質硬而濃稜顯明，足為上礦。但發螢光部份可以指甲搔傷，或包於晶體之表面時，其中含鎢必低而成下礦。故當礦石顯黃色螢光時，則須以化學分析方法以檢定其所含之成分也。

目前美國各礦所採取之金黃色重石，其中所含之雜質雖不甚多，但在開採之前，早已經過分析與檢定。地質調查所先將採得之標本置於紫外線燈下，以檢查其螢光色澤；然後再以化學分析法以檢定其含鉬成分，最後將二者關係記錄於卡片之上。礦方只須將採得之重石，以紫外線燈刺發螢光，則其中鉬之含量，自可一目瞭然也。

執行螢光分析法時，苟不特別注意，則往往因類似現象造成誤差。其最常見者，計有下列二端：

(甲)碳酸鈣螢光頗酷似重石。又當其顯藍白色螢光時，礦石色灰而無光澤。若螢光質包於表面時，則礦石粒細而不具晶質。

(乙)紫外線燈之濾波器有時透出少量藍光，當投射於岩石時，必生類似螢光之反射無疑。考岩石反射之光線，抑呈暗紫或顯藍色，多以岩石之天然顏色為依歸。普通白色岩石反射藍光，而暗淡之岩石則反射紫光。且其反射之色光，決不因螢光之發生而陷於混亂狀態。即在任何情況下重石之螢光永不呈綠、紅或淡紅之顏色也。

(丙)一般礦石之檢定與檢查：

(1)水鉍礦：常與菱鉍礦共生，其包裹物亦往往顯柔和之藍色螢光。但礦石質軟而輕，故可與重石區別之。

(2)鈷英石：常含於重砂中，色橘黃，較重石尤深，呈小粒狀之螢光顯著，為亮橘黃色，頗易辨認。但其化學成分及經濟價值，則須賴化學分析決定之。

同玻璃蛋白石；在金、銀或其他礦床中，其有用礦物常與螢光性之玻璃蛋白石共生。玻璃蛋白石本身雖無經濟價值，但因其與有用礦物相伴，故亦為探礦家尋覓與鑑定之對象。

(丁)螢石：為螢光性最顯著之礦物，對長短波長之紫外線均可發生作用。故在螢石之探查工作上，紫外線燈最能發揮其功效也。

(戊)有用礦物之拾選：在選礦場中，使皮帶運送機通過暗室，懸紫外線燈於其上，藉螢光之指示，可將有用礦石順利選出。凡在廢石堆中，往往乘有高量雜質而具有經濟價值之礦石，吾人藉紫外線燈之助，常可回收若干高價之螢光性礦物。如矽鋅礦、鉛英石、水鋅礦、透閃石及滑石等皆是。

除上述之螢光性礦物外，尚有若干種礦石亦偶顯螢光而將之回收應用。如瑪瑙、霏石、鈣鋁雲母、重晶石、矽酸鉍鈉礦 (Benitoite)、方解石、天青石、石髓、硬硼酸鈣石 (Colemanite)、碳氫石 (Curtisite)、螢石、岩鹽、蛋白石、鋁鎂鈣礦 (相灰石)、透石膏 (Selenite)、閃鋅礦及鈣鈉柱石 (Wernerite) 等。

(6) 磷光 (Phosphorescence)：當礦物遭受光線之照射時，光子常為礦物中原子之獨立電子所吸取。設電子吸取光子過多，乃跳出正常軌道而完全脫離其母體，遂呈徬徨失所之流浪狀態。因本身不能復位，必藉諸其他影響始能回至原有軌道，故發光時間往往於光線停止照射後，尚能延續甚久。此種性質以磷最為顯著，乃以磷光稱之。至磷光之種類有四，茲分述於下：

(A) 光磷光 (Photoluminescence)：因吸收光線之作用而放磷光者，如金剛石、方解石、重晶石及纖維石膏等是。

(B) 熱磷光 (Thermoluminescence)：乃礦物因熱而生磷光者，如將螢石碎片在暗室中散佈於高熱之金屬板上，當溫度到達 150°C 時，則產生紅、藍、綠等色之磷光。

(C) 電磷光 (Electroluminescence)：即礦物因電流之通過而生磷光者，如重晶石並過電流後，即有此現象。

(D) 摩擦熾光 (Triboluminescence)：礦物受摩擦、打擊而破碎時，所發生之熾光也。如螢石、雲母、石英、白雲石及閃鋅礦等於暗室中摩擦或打擊時，皆能放射熾光。

(7) 紅外線吸收：上述之礦物顏色變化，皆以選擇吸收可見光譜為主。除此之外，尚有紫外線及紅外線 (Infra-red ray) 之吸收。近年來對紅外線吸收之研究頗盛，其所用之儀器為紅外線吸收分光計，以自動記錄之方式可於礦物之光譜中，觀察出其吸收帶。普通將礦物粉末塗以努若爾 (Nujol) 油，置於岩鹽之薄板間，因岩鹽吸收紅外線極微，故可使之通過。按紅外線之吸收乃係基於原子、離子間之振動，以及其結合型式等因素，而與礦物結晶構造中之原子、離子排列及電子跳動等稍有不同耳。

紅外線吸收之主要研究對象，為區別礦物中結晶水之賦存狀態，即 H_2O 或 (OH) 之類型也。究諸實察， H_2O 之分子中， O 為負而 H 為正。因電雙極之作用，乃使 $O-H$ 間之振動，顯示於紅外線之吸收。設為 (OH) 離子狀態時，其情況亦與此相同。

石英、白矽石及石英玻璃原為極相類似之礦物，其在紅外線吸收上所顯示者，則為 $Si-O$ 間之振動位於不同之頻率範圍也。

5-2 結晶之光學性

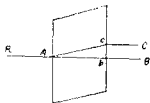
(1) 屈折率 (Index of refraction)：光波由第一種媒介物進入第二種媒介物，當其觸於第二種媒介物之表面時，即有一部光波屈折射入，另有一部光波由二種媒介物之接觸面向反路返動。後者稱為反射 (Reflection)，其波長週期與原光無異，惟光之強度減低，且入射角與反射角相等。前者稱為折射 (Refraction)，若第二種媒介物之密度大於第一種時，則光波之傳播必感困難，因振幅與速度較前減小，故光之進行方向乃發生曲折，以致折射角小於入射角。設 V 為空氣內之光波速度， V_1 為第二種媒介物內之光波速度，其二速度之比為一常數，名之曰屈折率。若入射角為 i ，折射角為 r 時，則屈折率可以下式表示之。

$$n = \frac{V}{V_1} = \frac{\text{Sin } i}{\text{Sin } r}$$

屈折率為礦物主要性質之一，其高低與礦物之化學成分有關。如鋁土矽酸礦物之屈折率較缺乏鋁土之矽酸鹽類者為低，且含鈦之礦物，其屈折率亦較高。在碳酸鹽類中，鈣鹽、鎂鹽、鐵鹽等依次增高。其他如斜長石之化學成分，亦可由屈折率做精密之判定。

(2) 複屈折 (Double refraction)：當光線在等軸晶系以外之結晶體內傳播時，常發生二速度不同之光波，是為複屈折。如圖所示，取方解石之劈開片，蓋於一黑點A之上，自上方視之，見有二像B及C。若將方解石轉動時，則見B點不動，而C點環繞B點移轉。

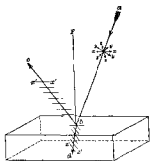
B、C二像之光度相等，但其位置不在同一平面之內。此種現象，顯係光線自A射入之後，在晶體內具有兩個折屈方向，具有不等速度所



第415圖方解石之複屈折

以致之。其固定不動之光線B稱之為常光線 (Ordinary ray)，其屈折率以 ω 表示；其隨礦物移轉之光線C曰非常光線 (Extra-ordinary ray)，其屈折率則以 ϵ 表示之。

(3) 偏光及旋光 (Polarization & Optical activity)：當光線斜射於第二種媒介物時，一部份由表面反射，另一部份則射入其媒介物內，並按屈折定律進行。光線經此作用後，光波振動之方向遂受影響。在反射光線內，其光波之振動與入射面垂直；在屈折光線內，其光波擺動則與入射面平行，而與屈折光線進行之方向垂直。此種現象，稱之為



第416圖平面偏光

平面偏光 (Plane polarized light)。其包括光波振動之面曰偏光面。設二偏光面彼此垂直時，其所生之偏光曰折屈偏光 (Polarization by refraction)。此乃非均質性礦物之普遍性質，凡一軸晶非常光線之偏光面，永與縱軸平行；而常光線之偏光面則永與縱軸垂直。

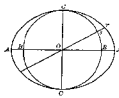
當偏光透過礦物薄片時，偏光面之方向常發生少許之旋轉。即在透過礦物表面之後，其偏光面之方向已與以前不同。礦物薄片愈厚，其旋轉之角度愈大，此種現象稱之為旋光性。如偏光面向右旋轉，名曰右旋晶；反之，偏光面向左旋轉，則曰左旋晶。石英有右旋者 (

Right-handed quartz)。亦有左旋者 (Left-handed quartz)。其旋角之大小，常隨波長而異，即波長愈大，旋角愈小也。

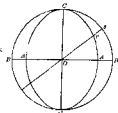
(4) 光學之方向：在均質性礦物中傳播之光線，各方之速度相等，折射率相同，屈折率唯一，等軸晶系未受壓力變形者屬之。當光線在異方性礦物中傳播時，其速度常隨方向而異。通常稱其中之不發生複屈折方向為光軸 (Optic axis)，而稱具有一光軸之礦物為一軸性 (Optically uniaxial)，正方及六方晶系礦物屬之，其光軸與 C 軸一致。若礦物具有二光軸者，則曰二軸性 (Optically biaxial)，斜方、單斜及三斜晶系礦物屬之。在二光軸之間有一交角，特稱之為光軸角 (Optic-axial angle)。其光學對稱面內包括兩個光軸者，曰光軸面 (Optic-axial plane)。垂直光軸面之線，曰軸面法線 (Optic normal)。又在二軸性礦物中，除有一常光線外，並因複屈折而產生二非常光線。

至一軸性礦物與二軸性礦物之區別，敘述於下：

(A) 一軸晶：在一軸性礦物中因複屈折之關係，有正常光線與非常光線之別，故光波面常分為二。正常光線所成之光波面雖呈球面，但非常光線所成者則係橢圓體，且二者互相重疊。方解石正常光線之光波面為非常光線之光波面所包圍，而二面



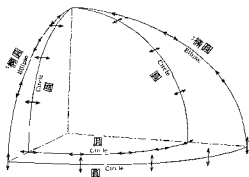
第 417 圖 負晶 $e < o$



第 418 圖 正晶 $e > o$

於 CC 相交， CC 為光軸之方向， $0 \sim \epsilon$ 在 CC 之垂直方向最大。至石英之光波面，恰與之相反。

在一軸性礦物中，其非常光線之速度所以不同者，蓋以其具有彈性軸之方向也。彈性軸者，乃光之振動方向。假定在一軸性礦物中，有互相垂直之大小兩種彈性軸， x 方向振動最易，故與此軸之垂

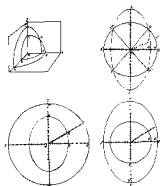


第 419 圖 彈性軸與光波面

直方向光波傳播最快。而最小彈性軸 Z 之方向振動最難，於是其直角方向之光線傳播最慢。如方解石為光學之負晶，其最大彈性軸與 CC 平行，而許多小彈性軸則與之垂直。因此非常光線之光波面，乃成一橢圓體，其常光線之光波面則成一球形，且為橢圓體所包圍。但石英為光學之正晶，其最小彈性軸與 CC 一致，而許多大彈性軸則與之垂直。故前者之光波面呈一橢圓體，後者之光波面反呈一球形，且將橢圓體包圍之。又沿 r 方向進行之非常光線，其振動之方向與 or 垂直，而不與任何彈性軸平行，故其速度恰好介於兩彈性軸之平行方向光線中間。

(B) 二軸晶：在二軸性礦物中，光學之彈性軸有三，即 X 、 Y 、 Z （大、中、小）是也。三者互相垂直，其平行於 X 振動之光速最大，平行 Z 者最小，而平行於 Y 者恰居於二者之中間。故其屈折率亦因之有三，即 N_x 、 N_y 、 N_z （屬於 X 、 Y 、 Z ）是也。設二軸性礦物內部一點 M 為光源時，於一定時間內，光所到達之光波面，即為以 X 、 Y 、 Z 為軸之二重橢圓體。如圖所示，即為三彈性軸與光波面之關係，其在 X 方向為最小與中間之光速， Y 方向為最大及最小，而 Z 方向則為最

大與中間，此皆非常光線也。又在 X、Z 面上沿 Mr 方向進行之非常光線中，有一與 Y 平行振動，而不與 X 及 Z 平行，故保持中間之速度。且在另外方向進行之光線，亦具有同樣振動狀態。若連結二光波面相切之點 P 及 M，其所成之直線即為光軸，二直線之交角即為光軸角。通常 MX 及 MZ 為平分光軸角之直線，是為等分線。其平分銳角者曰銳角等分線 (Acute bisectrix)，平分鈍角者曰鈍角等分線 (Obtuse



第 420 圖 彈性軸與光軸面

bisectrix)。在光軸角中，其為 Z 平分者為正，為 X 平分者為負。設正光軸角為 0° 時，則二光軸合而為一，遂成一軸晶，其負光軸角亦復如是。

在二軸晶中，X、Y、Z 有與晶軸一致者，亦有不一致者。斜方晶系中之 a、b、c 三軸與 X、Y、Z 一致，但有下列六種情形：

$\begin{cases} a = X \\ b = Y \\ c = Z \end{cases}$	$\begin{cases} a = X \\ b = Z \\ c = Y \end{cases}$	$\begin{cases} a = Y \\ b = X \\ c = Z \end{cases}$	$\begin{cases} a = Y \\ b = Z \\ c = X \end{cases}$	$\begin{cases} a = Z \\ b = X \\ c = Y \end{cases}$	$\begin{cases} a = Z \\ b = Y \\ c = X \end{cases}$
光軸面	光軸面	光軸面	光軸面	光軸面	光軸面
$\parallel(010)$	$\parallel(001)$	$\parallel(100)$	$\parallel(\bar{1}00)$	$\parallel(001)$	$\parallel(010)$

在單斜晶系中，b 軸與 X、Y、Z 中之一相傳，其他二彈性軸則均不與晶軸一致，故僅有下列三種情況：

- b = Y 光軸面 $\parallel(010)$
- b = Z 光軸面 $\perp(010)$
- b = X 光軸面 $\perp(010)$

在三斜晶系中，光學之彈性軸與結晶軸均不一致，即在雙方之間

不具任何簡單關係。

除此之外，在二軸晶中，其銳角等分線為 MZ 者，曰正光性或正晶 (Positive character)，銳角等分線為 MX 者，曰負光性或負晶 (Negative character)。如二光軸彼此垂直，則結晶無正負之分。

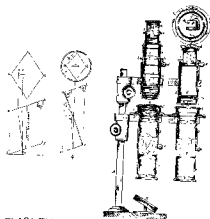
5-3 偏光顯微鏡

(1) 偏光鏡 (Nicol prism)

：又稱蘇氏三稜鏡，為礦物岩石顯微鏡之主要部份，可將普通光線變為偏光，藉以研究各種礦物之光學性，故稱其為偏光顯微鏡 (Polarizing microscope)。偏光鏡為蘇古爾 (William Nicol) 於 1828 年所發明，故又稱蘇古爾。

取一方解石劈片，厚約三倍其寬，成一斜方柱體，頂端成斜方形，對角線之長短不等，平行於對角線作一平面，斜切柱體，使與長稜相交為 22° ，將方解石柱體分為兩部，再將兩頂部磨去少許，使頂端平面與長稜 ac 相交成 112° ，而與 bf 相交成 68° 為止，於是 $\angle baf = 90^\circ$ 。此方解石之切開面磨光後

，再以加拿大膠 (Canada balsam) 黏合之，然後納於軟木孔內，遂成一偏光鏡。如圖所示，當光線進入方解石中時，常光線 o 之折射角略大，至加拿大膠層因全反射而消滅；其非常光線 e 因折射角略小，乃通過膠層而透於頂部，遂成爲偏光，其光波擺動之方向與 ab 同。凡岩石、礦物顯微鏡內必有此偏光鏡二枚，一置於物台之下，另一則裝於對物鏡之上，兩偏光面交成 90° ，如圖所示， q 爲上偏光鏡或解析蘇古爾 (Analyser)， p 爲下偏光鏡或偏光蘇古爾 (Polarizer)。上偏光

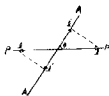


第 421 圖 偏光鏡

第 422 圖 偏光顯微鏡之解剖

鏡可以插入，可以抽出。在新式顯微鏡內二者之偏光面，均可任意轉動。在偏光鏡內之偏光面，普通皆與頂端斜方形之短軸平行。

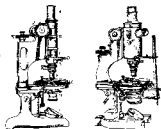
至偏光面之檢查方法，亦頗容易，即用一偏光鏡觀視由鏡面反射而來之光線時，轉動偏光鏡則視野必有明暗之分。因反射之光線已具偏光之性質，其大部光波皆與入射面或垂直擺動。當現明亮時，偏光鏡之偏光面必與入射面垂直；現黑暗時，其偏光面必與入射面平行。如圖所示， pp



第 423 圖偏光面之檢查
為下偏光鏡之振動方向， AA 為上偏光鏡之振動方向。若由下偏光鏡而來且振幅為 ll 之偏光，進入上偏光鏡時，即成 $l'l'$ 振幅之偏光，此時 $l'l' < ll$ 。因振幅之大小常與光度之強弱有關，故 ll 小時，必呈現黑暗。如上、下偏光鏡之振動方向相交為 θ 角時，則 $l'l' = ll \cos \theta$ ，即 $l'l'$ 隨 θ 角之值而變。當 $\theta = 0^\circ$ 時，因上、下偏光鏡之振動方向互相平行， $l'l' = ll$ ，其光線最明。設 $\theta = 90^\circ$ 時，則偏光鏡之振動方向彼此垂直， $l'l' = 0$ ，光線不能通過上偏光鏡，故呈黑暗。普通稱前者為直視偏光鏡 (Parallel nicols)，而稱後者為垂直偏光鏡 (Crossed nicols)

(2) 接眼鏡 (Eye-piece): 即圍

中之 A，普通所用者，為賀金氏接眼鏡 (Huygen's eye-piece)，由兩個單平凸鏡而成，在下者曰集光透鏡 (Collective lens)，在上者曰眼透鏡 (Eye-lens)。眼透鏡之焦距相當於集光透鏡之 $\frac{1}{2}$ ，彼此相距為眼透鏡之二倍。因透鏡之凸面皆向下，故接眼鏡之焦點，恰居於二透鏡之間。此種接目鏡不能用為擴大鏡，故又名負性接目鏡 (Negative eye-piece)。如圖所示，由兩個單平凸鏡合成，其凸面相對者，為瑞姆新頓接目鏡 (Ramsden eye-piece)。兩透鏡之焦點距離大略相同



第 424 圖偏光顯微鏡之外觀

。此種接目鏡不能用為擴大鏡，故又名負性接目鏡 (Negative eye-piece)。如圖所示，由兩個單平凸鏡合成，其凸面相對者，為瑞姆新頓接目鏡 (Ramsden eye-piece)。兩透鏡之焦點距離大略相同

，而兩透鏡之距離則相當焦距和之半。至其焦點平面，因在集光透鏡之下，乃適與對物鏡所結之像 O_1 相同。此種接目鏡可作為擴大鏡之用，故又名正性接目鏡 (Positive eye-piece)。

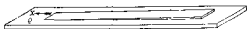


(3) 對物鏡 (Objective)：對物 第 425 圖負性接目鏡 第 426 圖正性接目鏡

鏡由數個透鏡合成，倍數愈高者，透鏡愈多，如第 422 圖中之 O 是也。其安裝之方式有二，如第 422 圖之 f 為以彈簧卡連接於顯微鏡筒之下方；除此之外，更有以螺絲接合者。對物鏡有兩個焦點平面，在前者曰前焦平面，在後者曰後焦平面。自前鏡透鏡至蓋玻璃上之距離，曰工作距離 (Working distance)。前焦距離工作距離為大，非此則不能透過蓋玻璃而見到物體也。普通蓋玻璃片之厚度約為 0.17 公厘，故所有對物鏡之前焦距必須在 0.17 公厘以上。

(4) 反光鏡與聚光鏡 (Reflector & Condenser)：反光鏡在顯微鏡之最下部，如第 424 圖之 I 是也。其鏡面普通有平面及凹面之分，可以任意翻轉。聚光鏡常由二個透鏡合成，以活動方式裝於下偏光鏡之上方，即第 422 圖 n 之部份。用時可以轉進，不用時可以轉出。如不須強烈之照明，則聚光鏡可以不必使用。聚光鏡不但為增強光線之用，並可由其產生聚斂光線，俾用於特別檢查之工作。

(5) 石英楔 (Quartz wedge)：高級礦物顯微鏡皆附有此光性試驗之零件。如圖所示，為一兩端



第 427 圖石英楔

厚薄不同之長方形石英，表面與柱面平行，並粘於玻璃片上。普通石英楔之長邊與結晶之縱軸垂直時，以 X 箭頭表示，意即光綫在石英楔中之二振動方向，其平行於此方向者，為速度大之光綫振動方向（在 c 軸垂直方向振動較易）。如石英楔之長邊與結晶之縱晶一致時，則

則以 Z 箭頭表示之。今將 X 方向之石英楔以 45° 之斜角插於直交攝古爾之閥，則顯極鮮豔之色列。如將石英楔由 45° 斜角漸次轉動，當接近消光位時，妍色遂行消失。

(6) 準焦 (Focusing)：顯微鏡筒可以其旁之迴轉輪上下移動之，迨至物體清晰可見時，則物體居於對物鏡之前焦點矣。普通迴轉輪有二，一為粗大裝置，即第 424 圖中之 J ，一為細微裝置，第 424 圖中之 K 是也。對物鏡擴大倍數較低者，前焦距甚長，常以粗大裝置之迴轉輪準焦之。對物鏡之較高倍數者，前焦距甚短，須以粗大迴轉輪移動至焦點位置時，則應改用微動迴轉輪移動之，以防鏡頭觸於物體，而傷及透鏡也。微細迴轉輪上刻有尺度，每刻度為 0.001 公厘 ~ 0.002 公厘之距離。

(7) 中心校正 (Centering)：載物台可以轉動，其轉軸必與鏡筒之中軸在一直線內，然後將礦物薄片置於中央時，載物台 (第 424 圖中之 G) 轉動，方不致變更位置。若載物台之轉軸不與鏡筒中軸一致時，薄片內之晶體影像，必然變更位置，甚而遁出視野之外，而不能察見。如圖所示，十字為接目鏡內之十字絲 (第 428 圖中心校正 Cross hair)，其 o 點代表中軸。當載物台 (Stage) 轉動時，則見晶體之在 o 點者，常沿 oab 圖周移動。 $\angle aob = 90^\circ$ ，故 ab 為其直徑。今將 ab 平分所得之 o' 點，即載物台之迴轉軸也。校正時，應將載物台向左右移動，使 o' 與 o 重合為止。但普通顯微鏡之載物台，皆為固定不可移動者，則校正對物鏡之位置，亦可使顯微鏡之中軸與載物台之轉軸一致。至對物鏡之移動，可用四角中空之轉桿將裝於顯微鏡筒下方管嘴 (Nose piece, 第 424 圖中之 E) 上之四角螺釘稍予轉動之。在新式顯微鏡中，其對物鏡與管嘴多為螺絲接合，故在中心校正上更為簡易，即將對物鏡向左或右稍加轉動，目可使其中軸與載物台之轉軸重合也。



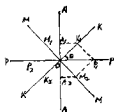
(8) 擴大倍數：普通晶體之擴大倍數，乃為對物鏡與接眼鏡之擴大倍數相乘而得者，由顯微鏡內附帶之表中可以查出。若欲驗示，可將

一繪圖反像器(Camera lucida)裝於接目鏡上，並將顯微鏡準焦於測微刻度尺(Micrometer)上，繪出其擴大之像，再與刻度尺比較，即得擴大之倍數。

5-4 礦物在偏光顯微鏡下之觀察

(1)明暗度與路徑差(Brightness & Path difference): 均質性礦物用垂直錫古爾觀察時，視野雖然黑暗；但在錫古爾之間置以異方性礦物薄片，則出現單色光而視野明亮，若旋轉薄片，則其光度即行變化。又使用白光時，薄片遂帶有美麗之顏色，其明暗度之變色，亦隨薄片之旋轉而產生。此乃以顯微鏡檢查礦物之基本要件，茲就明暗度之變化方面，簡單說明於後。

如圖所示，由下偏光鏡所發出 OP_1 振幅之偏光，上行進入薄片，經複屈折分而為二，即圖中之 KK_1 與 MM_1 。其由下偏光鏡發出之光波，自 O 向 P 轉瞬即進入薄片，一由 O 向 K_1 ，另一則由 O 向 M_1 ，即 OK_1 及 OM_1 二振幅之光線也。至其由薄片射出後，轉瞬之間，二光線之振動狀態又發生複雜之變化。其最應注意者，計有下列二種狀態。



第 429 圖 明暗度之變化

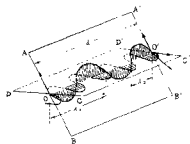
(甲)一光波由 O 向 K_1 振動，同時另一光波則由 O 向 M_1 振動。

(乙)一光波由 O 向 K_2 振動，同時另一光波則由 O 向 M_2 振動。

無論為何種狀態，當其由薄片發出後，均保持原形而進入上偏光鏡。為甲狀態時，其進入上偏光鏡之振動，由 O 至 K_1 變為自 O 至 A_1 ，而由 O 至 M_1 亦變為自 O 至 A_2 。即二振動方向相反，振幅 $OA_1 \neq OA_2$ ，故因互相干涉以致消滅，視野遂呈黑暗。如為乙狀態時，進入上偏光鏡之振動，其自 O 至 K_2 變為自 O 至 A_1 ，由 O 至 M_2 亦變為由 O 至 A_1 ，乃由干涉之結果，以致二重強化，故視野最明。上述之變化與薄片之厚度有關，設其厚度為一光波之波長三倍，而為另一光波之波長五倍時，

因係整數，故呈甲種狀態，此時二振幅之位相相反。如其厚度為一光波波長之整數倍，而為另一波長一半之奇數倍時，則呈乙種狀態，此時二振幅之位相相同。普通甲乙兩狀態均不常見，而以其中間之情況為多。設薄片之厚度為 d ，二光波之長為 λ_1 、 λ_2 ，整數為 m_1 、 m_2 時，則 $d = m_1 \lambda_1$ ， $d = m_2 \lambda_2$ 。又偏光在空氣中之波長為 λ ，薄片內二光波之屈折率為 n_1 、 n_2 時，因 $\lambda_1 = \frac{\lambda}{n_1}$ ， $\lambda_2 = \frac{\lambda}{n_2}$ ($\lambda_1 > \lambda_2$, $n_1 < n_2$)，故 $d = m_1 \frac{\lambda}{n_1}$ ， $d = m_2 \frac{\lambda}{n_2}$ ， $d(n_2 - n_1) = (m_2 - m_1) \lambda$ 。設 $m_2 - m_1$ 為整數 P 時，則 $d(n_2 - n_1)$ 為 λ 之整數倍，而呈甲狀態。又 $(m_2 - m_1)$ 為奇數，即 $(2P+1)$ ，且將 λ 改為 $\frac{\lambda}{2}$ 時，於是 $d(n_2 - n_1) = (2P+1) \frac{\lambda}{2}$ ，而呈乙狀態。簡言之， $d(n_2 - n_1)$ 為空氣中偏光波長之整數倍時，在上偏光鏡中二光波因干涉而消失，視野遂呈黑暗。 $d(n_2 - n_1)$ 為空氣中偏光半波長之奇數倍時，因二重強化視野最明。在二者中間時，則視野不明不暗。故稱 $d(n_2 - n_1)$ 為路徑差者，乃表示偏光由薄片射出時，二光波之狀態也，普通由視野之明暗度可以決定之。故視野之明暗與薄片之厚度、複屈折之強度 ($n_2 - n_1$)，及其光線所通過之方向等有密切之關係。

(2)干涉色(Interference color): 以上所述，用垂直赫古鏡觀察異方性之礦物薄片時，將薄片轉動則視野有明暗之分。如圖所示，當波長為 λ_0 之單色光進入薄片後，乃分為互相垂直之 \vec{OC} 及 \vec{OA} 二振動方向之偏光。設薄片之厚度為 d ，薄片內二偏光之波長為 λ_1 及 λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$)，則光線由薄片射出時，其路徑差或位相差即為 $p = d \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$ ，設為整數，其光線離開薄片後仍按 \vec{OA} 及 \vec{OC} 之方向振動。至通過上偏光鏡之光線，則沿 \vec{ON}_2 及 \vec{ON}_1 方向振動，因 N_2 及 N_1 之振動方向相反，故光線不能通過。若 $d \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$ 為半波長之奇數

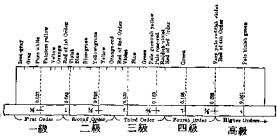


第430圖 光線之干涉

註： ON_2 為向左， ON_1 為向右之振動。

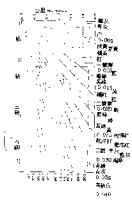
倍時，因 N_x 及 N_y 之振動方向相同，故視野最明。如所用者為白光，當 $d(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})$ 雖為一波長之整數倍，但與另一波長相較而並不為半波長之奇數倍時，其波長與 $d(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})$ 成整數倍關係之光線，雖然消失，但其他波長之光線仍可達於眼內，故呈顯美麗之色光，即所謂之干涉色也。干涉色與薄片之厚度，複屈折之強弱，及通過薄片之方向有密切之關係。即使薄片之厚度相等，而方解石 ($n_x - n_y = 0.172$) 比石英 ($n_x - n_y = 0.009$) 為強，且薄片愈厚，色愈強。反之礦物切片愈薄，則其色愈暗也。下圖所示，為所見干涉色之性質與路徑差 $R = d(n_x - n_y)$ 之關係。

普通薄片之厚度約為 $0.01 \sim 0.02$ 公厘，當 $n_x - n_y \div 0.01$ 時，所生之干涉色為灰色，是為低干涉色。若 $n_x - n_y = 0.04 \sim 0.05$ 時，在干涉色中含有 600 $m\mu$ 之單色光甚多，故呈現較為接近單色光之鮮艷色澤。設其 $n_x - n_y$ 之值極大時，則干涉色全體帶有白色，中含各種色光，是為高次干涉色。蓋以 $n_x - n_y$ 之值大者，亦即複屈折較高者也。



第 431 圖用石英板所見之干涉色

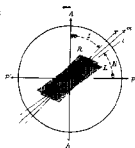
(3)消光 (Extinction)：上圖之中，係薄片之振動方向與蘇古爾之振動方向相交為 θ 角者。如將薄片旋轉，自 0° 至 360° ，其間之明暗度即生變化，因 $OA_1 = \frac{1}{2} \sin 2\theta \times OP_1$ 也 ($OK_1 = OP_1 \cos \theta, OA_1 = OK_1 \sin \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta OP_1$)。在 θ 為 $0^\circ, 90^\circ,$



第 432 圖干涉色之色級

180° 、 270° 時， $OA=0$ ，此時薄片之振動方向，與下偏光鏡一致，視野變為黑暗。此種現象，特稱之為消光。其位置稱之為消光位置(Position of extinction)。結晶之方向稱之為消光位(Extinction direction)。消光位之表示法，普通以消光角(Extinction angle)為之。消光角者，乃結晶體中之振動方向與結晶體中定方向所成之交角也。

測定消光位時，應先使十字絲之方向與垂直偏光鏡之振動方向一致，其次置入結晶薄片，使劈紋(一軸晶薄片之劈紋與C軸平行)之方向與十字絲之縱線相傳。然後轉動載物台，至視野最暗時為止，其載物台所旋轉之角度，即為消光角。普通為求精密起見，多反覆測定數次，而取其平均值。



第 433 圖消光角之測定

普通為六方、正方及斜方晶系之結晶，其振動方向與結晶軸之方向一致，故在結晶軸之方向與莫古爾之振動方向一致時，即發生消光，吾人稱此為平行消光(Parallel extinction)或直消光(Straight extinction)。而單斜晶系及三斜晶系之結晶，其振動方向與結晶軸成一定交角時，始發生消光，特稱之為斜消光(Oblique extinction)。但單斜晶系中， b 軸之晶帶面則為直消光。

(4)一軸晶：即具有一光軸之礦物也。當光線進入其薄片時，其振動情形如下：

(A)平行偏光鏡之觀察。

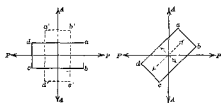
(a)垂直光軸之切片：沿縱軸垂直方向切開之薄片，使光線垂直通過時，一概不生複屈折。用垂直偏光鏡觀察時，與均質性礦物相同。即載物台無論如何旋轉，視野皆呈黑暗。

(b)平行光軸之切片：設礦物薄片沿縱軸平行方向切開，使光線垂直通過時，則分為二振動方向互相垂直之常光線與非常光線。其通路雖同，然二者之中，必有一速度較為遲緩者。若將其置於垂直偏光鏡

之間，其振動方向恰與二碇古爾平行時，則成平行消光。

如圖所示， $abcd$ 為平行縱軸之薄片，縱軸之方向與下偏光鏡之振動方向 PP 平行。故進入薄

片之光線，其振動方向必與結晶之縱軸平行，於是可知通過礦物薄片者殆為非常光線。此時在常光線之振動方向內，則不起振動。亦即光線僅通過與其相同振動方向之薄片，且此光線抵達上偏光鏡時，因不能通過，乃全部消失，故視野遂呈黑暗。



第 434 圖 平行光軸之切片

若將載物台旋轉 90° ，視野之黑暗程度雖未稍改變，而在薄片發生振動之光線，已易為常光線，即圖中之 $a'b'c'd'$ 是也。

設再旋轉薄片，使 $abcd$ 與碇古爾之振動方向斜交，則薄片變明。此乃通過下偏光鏡 PP 之平行振動，在薄片各振動方向發生分振動，而分振動更沿上偏光鏡之振動方向 AA 發生分解。二光線雖在相同之振動面通過上偏光鏡，但因其中之一進行遲緩而發生干涉現象。故用白光觀察相當厚度之礦物薄片時，常見其呈現某種顏色。若薄片之厚度相同，則其所呈現之顏色亦同。

(c) 旋光性礦物之切片：當偏光通過旋光性之礦物切片時，其偏光之方向常發生少許之旋轉。這光線透出礦物表面之後，則偏光之方向已與前不同，薄片愈厚，其旋轉之角度愈大。故垂直光軸之切片，用垂直偏光鏡觀察時，其視野不呈黑暗。若欲將消光現象，必須將上偏光鏡或下偏光鏡旋轉。如上偏光鏡右旋，始呈消光時，名曰右旋晶；反之，上偏光鏡左旋，方得消光者，則曰左旋晶。至旋角之大小，常因所用光線之波長而異，波長愈大，其旋角愈小，即用紅光時之旋角小於紫光。設改用太陽光，當上偏光鏡旋轉時，可見各種顏色依次遞變。若向右旋轉，色級依次降低時，則為右旋晶，反之為左旋晶。如

旋轉下偏光鏡，其方向恰與此相反。

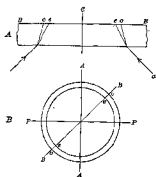
(B)聚斂偏光鏡下之觀察：以上所述，將一軸晶沿縱軸之垂直方向切開，其進入薄片之平行偏光，不生複屈折，故亦無干涉現象。若將自下偏光鏡射出之平行偏光，改為聚斂光線時，則呈現干涉圖(Interference figure)。欲得聚斂偏光，只須將聚光鏡(第423圖之*n*)及勃特朗透鏡(Bertrand lens)第424圖之*B*)加入即可。即所謂聚斂偏光鏡(Conoscope)是也。至干涉圖之種類，常隨礦物切片之方向而異，茲分述於下：

(a)垂直光軸切片之干涉圖：垂直於光軸之切片，在聚斂偏光垂直曩古爾間，現有干涉圖。中心為黑色，愈外其色級愈高。平行於偏光鏡之方向，更有黑十字，清晰可辨。薄片無論如何旋轉，色圈與十字之位置不變。茲將其理由，說明於後：



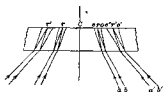
第435圖垂直光軸切片之干涉圖

如圖所示，*BB* 為垂直 *C* 軸薄片之縱斷面 *a* 為由聚光鏡射出之聚斂偏光(Convergent light)，當其斜射進入薄片後，即因複屈折而分成 *o* 及 *e* 二光線。設薄片為方解石之負晶時，其非常光線之速度大，故屈折率較常光線為小。因光線進行之方向呈圓錐形，故由薄片射出之常光線與非常光線，其路徑斷面則如下方圖 *B* 所示之同心圓。



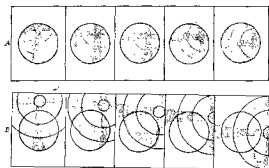
如第437圖所示，*a* 為斜射入於薄片之聚斂光線，經複屈折後，所得常光線及非常光線之偏光為 *e* 及 *r*；而 *b* 亦為斜射入於薄片之聚斂光線，經複屈折後得二偏光 *r* 及 *o*。即 *a* 之常光線與 *b* 第436圖聚斂偏光在薄片中之複屈折

之非常光線交會於同一點，但二光線之速度不同，故於進入上偏光鏡之際，因行程差 (Retardation 即路徑差) 之關係乃互相干涉而消失，或二重強化而出現單色光。此時中央之光線為垂直射入，平行於光軸不生複屈折，故干涉圖之中心黑暗。在偏光鏡之振動方向光線不能透過，乃形成黑十字。至其他方位之光線，因傾斜不同，強度各異，遂產生明暗相間之向心圓。



第 437 圖聚斂偏光之干涉

如礦物切片不與光軸垂直，則干涉圖之中央，不在顯微鏡之中軸內。若轉動薄片，其黑十字亦隨之旋轉。有時切片與光軸交角略大時，則干涉圖之中心，落於視野之外，其黑十字只可見一臂，色圈只可見半。



第 438 圖不垂直光軸之干涉圖

(b) 平行光軸切片之干涉圖：
平行於光軸之切片，在聚斂垂直偏光鏡間，當光軸轉至與偏光鏡平行時，所見之黑十字其形寬大，往往遮掩視野之全部。若薄片微轉，則黑十字立即消滅，極為

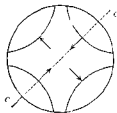


第 439 圖平行光軸之干涉圖

迅速，故稱之為迅變干涉圖 (Flash figure)。當黑十字消失後，即現有帶色之曲形線條四部，在相對象限內之顏色，色序相同，且皆突向中

心。當光軸轉至與偏光鏡成 45° 之交角時，其曲形線條帶最為清晰。

(c)旋光性礦物切片之干涉圈：凡具有旋光性之礦物，其垂直光軸之切片在聚斂垂直偏光鏡間，干涉圈之中心不呈黑暗，而顯現某種顏色。且黑十字之位置及色圈之形狀，與不具旋光性者，均略有不同。以干涉圈決定其為右旋晶或左旋晶時，須視其中央色彩之變化，至其變化普通與在平行偏光鏡下者相同。除此之外



，觀察其色圈之變化，亦可運做決定，即當上第 440 圖旋光性礦物干涉圈偏光鏡右旋時，色圈擴張，是為右旋晶。收縮時，則為左旋晶。

(d)干涉圈之用途：干涉圈在光學之研究上計有四種功用，茲特分述於下：

(1)用以區別晶系：屬於一軸性之礦物，只有正方晶系及六方晶系兩大類別。

(2)用以鑑定縱軸之位置：因一軸晶之光軸永與縱軸平行，故其面角及劈紋角均可由之測定。

(3)用以決定光學性之正負：方法詳後。

(4)用以測驗屈折率。

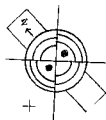
(c)一軸性礦物正負之決定：使用干涉圈，可以決定一軸晶之正負，至其方法計有下列三種：

(a)雲母板之應用：將雲母製成光波四分之一遲延板，特稱之為四分之一雲母板 (Quarter undulation mica plate)。並夾於二玻璃板中，其長邊為小速度光線振動之方向，通常以 Z 或 C 表示之。短邊為大速度光線振動之方向，而以 X 或 a 表示之。試驗時，只須將雲母板插入二蘇古爾之間，使 Z 之方向與蘇古爾之振動方向成 45° 之交角。如圖所

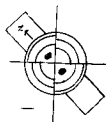


第 441 圖四分之一雲母板

示，PP為下偏光鏡之振動面，AA為上偏光鏡之振動面， o 為正一軸性礦物之光軸在薄片上呈現之點。設圓錐形之光線進入薄片時，即分為 o 及 e 二光線，而沿圓弧自薄片發出，普通常光線在非常光線之內側。即薄片為正晶時， o 之速度較快，屈折率亦較非常光線為小。在R及R'點之二光線振動方向，則以複箭頭表示之。當此等光線到達上偏光鏡時，常分解為平行AA之分振動。而在各光線分解之際，必相互干涉。設用單色光觀察時，即生干涉圈之第一暗色環。如將雲母板插入，使與聶占爾之振動方向成 45° 之交角，則於干涉圈上出現毛刺形十字絲。設礦物為正結晶，其干涉圈之變化，在雲母板Z之方向，亦即光線速度最小之振動方向，干涉圈接近中心，且與二黑點之聯結線成爲直角。如爲負晶，則恰與之相反。



第 442 圖正晶

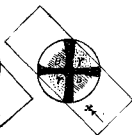


第 443 圖負晶

(b)石膏板之應用：試驗極薄之切片時，則應用石膏板。其切製之方法，普通長邊爲高速度光線之振動方向，以X或 a 表示，短邊爲低速度光線之振動方向，以Z或C表示之。若將石膏板薄片置於垂直聶占爾之間，使成 45° 之交角，其干涉圈即發生顏色上之變化。如圖所示



第 444 圖正晶



第 445 圖負晶

，石膏板X之方向與二藍色區之連線交叉時，其結晶爲正。反之，若二藍色區之連線與X之方向一致時，則結晶爲負。

設改用Z方向之石膏板，則其所得之現象，恰與上述者相反。

(c) 石英楔之應用：上述試驗，若改用石英楔時，常將薄邊向前徐徐插入。與石英楔方向一致之二象限，色圈移向中心，而與石英楔方向交叉之二象限，色圈遠離中心者，其結晶為正。反之，則結晶為負。



第 446 圖正晶



第 447 圖負晶

(d) 二色性 (Dichroism)：當白色光通過有色礦物時，其中某種波長之光線為礦物吸收，故由礦物反射而出之光線，常呈異色。如取褐色電氣石之柱狀切片，僅以下偏光鏡觀察時，旋轉載物台，則薄片由暗

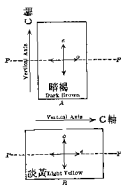


第 448 圖正晶



第 449 圖負晶

褐色變為淡黃。載物台旋轉 90° ，其色差最大，亦即結晶學之方向與下偏光鏡之振動方向，有時呈平行或有時呈直交者也。換言之，即此等顏色之極端，乃係薄片中之常光線及非常光線之振動方向，與進入薄片光線之振動面平行或垂直時所產生者。如圖所示，PP 為透過下偏光鏡進入薄片中之光線振動方向。至礦物薄片之放置，使縱軸與 PP 成直角，以致進入薄片內之光線在水平軸之面內振動。即常光線 e 能發生振動，在此位置之電氣石呈暗褐色，乃係礦物中振動之常光線因通過較難，大部已被吸收故也。



第 450 圖二色性

設將載物台旋轉 90° ，則在薄片內發生振動者，全部為非常光線，其色呈淡黃。此時所被吸收者，僅為非常光線已耳。故其吸收公式，以 $o > e$ 表示之。又此不同晶軸方向之變色

，特稱之爲二色性。即 o = 暗褐， e = 淡黃是也。至二色性之檢查，普通多以海丁格爾 (Haidinger) 製造之二色鏡 (Dichroscope) 爲之。

(5) 二軸晶：卽具有二光軸之礦物也。當光線進入其薄片時，其振動情形如下：

(A) 平行偏光鏡下之觀察：

(a) 干涉色：二軸性礦物之薄片，以垂直聶古爾觀察時，多呈現干涉色。薄片愈厚，複屈折愈強，色級愈高，且與光軸面近乎平行之薄片，色級亦高。

(b) 消光角：精測消光角時，普通多使用勃特朗接眼鏡 (Bertrand occular)。如圖所示，切右水晶及左水晶，使與底面平行，交叉放置，製成薄片，以附於接眼鏡之下。使用時，須將上偏光鏡裝於勃特朗接眼鏡之上，以垂直偏光鏡觀察時，四區皆現蒼白色。改將複屈折之薄片置於載物台上，當不在消光位置，四分區中之兩相對者，顏色相同；相鄰者顏色各異。若將薄片恰轉至消光位置時，則四區色光一致。故吾人可以測定其精確之消光位置。



第 451 圖勃特朗接眼鏡

(B) 聚斂偏光鏡下之觀察：置二軸性礦物薄片於聚斂偏光鏡下觀察時，則呈現干涉圈，其種類如下：

(a) 垂直銳角等分線切片之干涉圈：將白雲母切片之光軸面，置於偏光鏡振動方向之平行方位時，可見一黑十字帶，與偏光鏡之方向平行，寬狹不一。其垂直光軸面者較寬，平行於光軸面者較狹。除此之外，光軸面內有二點，卽光軸所在之位置。由二點距離之遠近，可知其光軸角之大小。在二點之外，更有兩形色圈環繞之。如將薄片旋轉，則黑十字帶分裂，而呈雙曲線形。在光軸之處



第 452 圖垂直銳角等分線切片之干涉圈

狹而清晰，兩端則行擴散。當轉至 45° 時，黑十字彎度最大。

(b)垂直鈍角等分線切片之干涉圖：因二光軸之距離甚遠，故其位置不易察見，但色極頗高。當光軸面與偏光鏡之方向平行時，黑十字帶寬泛而不清晰，如轉動薄片，黑十字帶即行分裂。



第 453 圖垂直鈍角等分線切片之干涉圖

(c)垂直一光軸切片之干涉圖：干涉圖不完全，當光軸面與偏光鏡之方向平行時，則黑帶成一條直形。近光軸處狹而清晰，四周為色圈環繞。將薄片旋轉 45° ，黑帶呈拋物線形，若旋轉 90° ，則又呈直形。



第 454 圖垂直一光軸切片之干涉圖

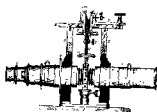
(d)平行光軸面切片之干涉圖：無光軸位置，干涉圖頗不清晰。當等分線與偏光鏡之方向平行時，則視野黑暗。稍轉動薄片，即呈現彎曲色帶。但變化迅速，不易察見，故又稱迅變干涉圖。



第 455 圖迅變干涉圖

(e)其他干涉圖：除上述者外，如光軸不在中心，或銳角等分線不在視野之內，或切片與光軸斜交等，皆可見一部之色圈。因其變化複雜，故不贅述。

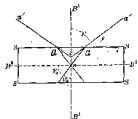
(c)光軸角之測定：應用干涉圖可以測定光軸角，即將垂直於銳角等分線之薄片，以光



第 456 圖光軸角測定器

軸角測定器 (Optic axial angle apparatus) 之 P 板之，置干涉圈之光軸面與偏光鏡之振動方向或 45° 交角，而使十字絲之交點與一光軸點一致；然後旋轉分度盤，至十字絲之交點與另一光軸點重合，由分度盤 K 所示之度數，可知光軸角之大小。

用上法所測者，為假光軸角 (Apparent axial angle)，如欲求真光軸角 (True axial angle) 時，尚須加以換算。如圖所示，為垂直銳角等分線之薄片， B^1B^1 為銳角等分線， B^2B^2 為鈍角等分線，在 O 點交叉直線之方向為光軸， oa 為光線在結晶體中進行之方向， aa' 為光線自晶體射出時之屈折方向，則 $\angle a'c'a'$ 即所謂之假光軸角。但實際之真光軸角為 $\angle aoa$ ，吾人不能直接測定，必須經過換算方可。設 E 為假光軸角之半， β 為光線在 oa 方向之屈折率，則真光軸角 $2Va$ 可以下式計算之。



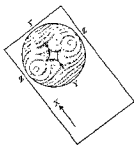
第 457 圖 真假光軸角

$$\sin E = \beta \sin Va$$

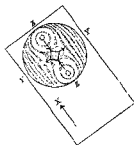
如光軸角過大時，為防止全反射計，須將晶體浸於屈折率較高之油類液體中測定之。

(D) 二軸性礦物正負之測定：

(a) 石英楔之應用：將垂直銳角等分線之礦物薄片旋轉，使干涉圈位於 45° 之位置，然後插入石英楔，使與偏光鏡之方向成 45° 之交角，則薄片之直線振動常通過干涉圈之中心，而與二光軸之連結線垂直，且此振動方向更與石英楔之振動方向平行。若在石



第 458 圖 負晶



第 459 圖 藍色干涉圈

英楔中速度大及速度小之光線振動方向，與在薄片中之二相同光線振動方向一致時，其複屈折加強。又將石英楔在薄片上滑動，則色圈沿箭頭方向移動。反之，如將石英楔反向插入，即其光學方向與薄片之振動方向相反時，其光軸周圍之色圈擴張。

如結晶為正光性，則在對稱之干涉圖中，垂直薄片方向之銳角等分線為Z之方向，或鈍角等分線為X之方向。故Y之方向，在薄片上與二光軸點之聯線垂直。

設結晶為負光性，其X之方向為銳角等分線之方向，且與薄片垂直。而Z之方向，則與薄片上二光軸點之聯線一致，恰如第458圖所示者。至其光軸面之振動方向為遲光速之振動方向。

(b)雲母板或石膏板之應用：設光軸角甚大之結晶，則應以雲母板檢定之。雲母板常與偏光鏡之方向成 45° 之交角，若切片與光軸面平行時，其試驗方法與一軸晶同。如切片與光軸面垂直，



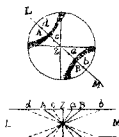
第460圖負晶



第461圖正晶

光軸面與尼古爾一致，雲母板長邊Z方向之二象限出現黑點者，是為負晶。而黑點出現於其他二象限者，則為正晶。

如將垂直銳角等分線之切片轉至 45° 時，則黑十字分為二彎曲條帶。設為正光性，其彎曲黑帶向中心移動，而成二黑點。即在光軸面方向二象限之色序，軸間者低，軸外者高；其他二象限之干涉圖則向外移動。如圖所示，A、B為二光軸之所在點。如切片係垂直於鈍角等分線者，其現象恰與上述者相反。



第462圖 45° 之干涉圖

設將雲母板改用石膏板，為正性礦物時，干涉圖之中心部位呈黃色，光軸之外呈紫色。

為負性礦物時，其現象恰與之相反。

(E)多色性(Pleochroism): 二軸晶之礦物，既有互成直角之三個振動方向，其對光線之吸收，各方均不相同。設對平行於X方向振動之光線，吸收最多，而對平面於Z方向振動之光線，吸收最少時，則以 $X > Y > Z$ 之記號書之，是為吸收公式(Absorption formula)。除此之外，亦常有以 $X > Y = Z$ 或 $Z > X > Y$ 表示者。至二軸晶對光線種類吸收之選擇，亦隨振動方向而異。故其所呈現之顏色，頗為複雜，如鈉閃石(Riebeckite)為 $X =$ 深青， $Y =$ 淡藍、 $Z =$ 黃綠，此即所謂之多色性公式(Pleochroic formula)。

(6)屈折率之測定：測定礦物屈折率之方法甚多，茲將其最簡單而易行者，述之於下：

(A)貝克線法：用直視偏光鏡觀察礦物薄片時，其邊緣部份常出現於視野之內，此乃礦物與加拿大膠之接觸部位也。調整下偏光鏡之位置，則可見甚多明顯之線條，是為貝克線(Becke line)。因其位於二屈折率不同之物質間，設將顯微鏡筒稍稍上提，貝克線即移向屈折率高之方位，如稍將顯微鏡筒下等，則又見其向屈折率低之方位移動。故由貝克線之移動方向，可以比較相鄰二物質屈折率之高低。至加拿大膠之屈折率常隨其加熱之方式而不同，普通約為1.54左右。因此，不但可用薄片之邊緣比較礦物與加拿大膠之屈折率，同時亦可用二礦物境界之貝克線比較其二者間屈折率之高低也。在屈折率相差懸殊之礦物間，貝克線變頗明顯；但二屈折率相差極微時，則甚隱晦。此時調整下偏光鏡即可得準焦位置，而使貝克線清晰奪目。如黑雲母之屈折率遠較加拿大膠為高，其在接近膠層部位貝克線極為明顯；而石英之屈折率較加拿大膠稍高，故須將線條準焦後，始可見清晰貝克線也。

在顯微鏡下觀察高屈折率之礦物薄片時，設為單一結晶，因面積頗大，故其面平滑可見，如石英及長石是也。但屈折率極高之礦物，其面常有裂紋，而其面甚平滑，如矽鹼石及獨玉即呈此種現象，蓋

以光線自屈折率極高之礦物薄片射出後，當進入膠糊中時，多生屈折而致表面極不平坦也。此時應將蓋玻璃揭開，拭去薄片上之加拿大膠，並將薄片在松脂板上研磨，使其表面較普通薄片更為平坦。

(B)浸液法：亦為觀察貝克線之移動情形，而測定礦物之屈折率者。通常將礦物浸於不具侵蝕作用之油類中，因油類在一定溫度之下均有固定之屈折率。如杉油為 1.530，丁字油為 1.503，桂皮油為 1.602， α -1 臭樟腦油為 1.622，碘化甲烷為 1.74 等，若再以不同之比例配合時，則可得更多之屈折率。將調配之油類分別盛於瓶中，按屈折率之大小順序排列於箱內，然後將礦物粉末浸於各油類中，進而觀察貝克線之移動情形，且以礦物之屈折率與油類比較之。如較 1.560 之油類高而比 1.565 之油類低時，其屈折率則居於二者之間。

當光線通過均質性礦物時，其光波速度及屈折率均能保持一定。但在異方性之礦物中，一軸晶之屈折率為 ω 及 ϵ ；二軸晶之最大屈折率為 r ，最小之屈折率為 α ，而中間者則為 β 。

設礦物之化學成分相異，其屈折率即發生顯著之變化。故在光學性質之鑑定上，以屈折率最為可靠。但其他如光軸角等，雖亦因礦物遭受外力而臨於歪斜，並使屈折率發生顯著之變易，若推究其原因，則非化學成分所影響者。

基於上述理由，在同形離子置換明顯之造岩礦物中，先將其化學成分按精密之分析法求出，同時測出其正確之屈折率，然後按兩者之關係製成圖表。此時如能將不知化學成礦物之屈折率測出，並與圖表做詳細之比較，則其礦物之化學成分，即可由之推定矣。

普通測定大型結晶之屈折率時，多以全反射屈折計為之。即將結晶體之一面在松脂板上磨平後，置於已知屈折率之玻璃半球上，當通過孔隙之光線投射後，即發生全反射，其反射之光線可由望遠鏡觀測之，而其方位則由刻度圓盤讀出。於是其面上入射光線之屈折率，即可因之測定矣。

若在光源插入稜管，則可得各種不同之單色光，而用以測定同一

礦物之屈折率分光。

(7) 礦物之分光性 (Dispersion) :

(A) 屈折率之分光 (Dispersion of refringence) : 凡光線射入礦物之結晶體時，其屈折率隨入射光線之波長而略有變更者，稱為屈折率之分光。如螢石對紫色光之屈折率為 1.437，而對紅色光之屈折率為 1.431，二者之差為 0.006。此種性質在均質性及異方性之礦物中，有顯著者，亦有不顯著者。如一軸晶之銅鈾雲母 (Torbernite)，其分光性如下：

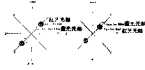
	紅光 (650 μ . μ)	綠色 (515 μ . μ)	藍光 (425 μ . μ)
n_o	1.618	1.634	1.651
n_e	1.622	1.634	1.647

(B) 光軸之分光

(Dispersion of the optic axes) : 凡光線射入晶體內時，其光軸角之大小



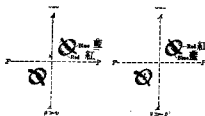
第 463 圖 斜方晶系之分光



第 464 圖 斜方晶系之分光

因色光不同而發生變化者，曰光軸之分光。此種性質為二軸性礦物所特有者，且每種晶系之光軸分光，各不相同，茲分述於下：

(a) 斜方晶系：其光軸角之變化，可由垂直於銳角等分線切片之干涉圈觀察之。如圖所示， ρ 為紅光之光軸角， v 為紫光之光軸角，通常以 $\rho > v$ 或 $v > \rho$ 表示之。



第 465 圖 斜方晶系之分光

(b) 單斜晶系：單斜晶系礦物之分光性，通常可分為下列三種：

(i) 傾斜分光 (Inclined dispersion) : 光軸面平行於 (010) 者，

其光軸角因紅、紫光而不同，且銳角等分線之位置，亦略有變化。即紫光之銳角等分線與 c 軸之交角，大於紅光之銳角等分線與 c 軸之交角，通常以 $v > p$ 及 $Bav \wedge C > Bap \wedge C$ 表示之。故 (010) 面上之消光角，紫光大於紅光。

(乙) 水平分光 (Horizontal dispersion) : 光軸面垂直於 (010) 面，而銳角等分線在 (010) 面內者，不但光軸角因紅、紫光而不同，其銳角等分線之位置，亦發生變化。但僅限於 (010) 面內，通常以 $v > p$ 及 $Bav \wedge C > Bap \wedge C$ 表示之。

(丙) 交叉分光 (Crossed dispersion) : 光軸面垂直於 (010) 面，而銳角等分線在 (010) 面內者，其光軸之分光性與水平面光同。惟垂直於銳角等分線切片之干涉圈，其色邊成交叉之狀。圖中之對稱點即為銳角等分線之位置。

(c) 三斜晶系：不但光軸之交角大小不同且其位置亦相對變更。而干涉圈之分光現象，更無對稱可尋，故稱之為不對稱分光 (Asymmetrical dispersion)。

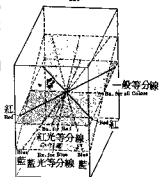
(8) 雙晶之光學性：置等軸晶系以外之雙晶薄片，以垂直偏光鏡觀察時，因其消光位不同，故旋轉載物台時，其視野之一部黑暗，另一部則現光明。如圖所示，為斜長石之聚片雙晶及叢石之輪式雙



第 466 圖 傾斜分光



第 467 圖 傾斜分光
831



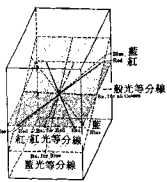
第 468 圖 水平分光

晶，如以聚斂偏光觀察時，其銳角等分線雖與c軸一致，而干涉圖之位置，則各不相同。除此之外，雙晶之光學性，與普通礦物尚有甚多之出入，特稱之為光性異常 (Optical anomaly)。如方沸石 (Analcite)、柘榴子石、明礬等之等軸晶系結晶，常生複屈折。在正方晶系或六方晶系之結晶中，如符山石、鋯英石、綠柱石、磷灰石、鋼玉及斜方沸石 (Chabasite) 等，常現類似二軸晶之干涉圖。考其原因不外張力，壓力及同質二像等所以致之。

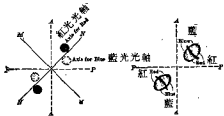


第469圖 水平分光

石 (Analcite)、柘榴子石、明礬等之等軸晶系結晶，常生複屈折。在正方晶系或六方晶系之結晶中，如符山石、鋯英石、綠柱石、磷灰石、鋼玉及斜方沸石 (Chabasite) 等，常現類似二軸晶之干涉圖。考其原因不外張力，壓力及同質二像等所以致之。



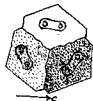
第470圖 交叉分光



第471圖 交叉分光



第472圖 斜長石之雙晶



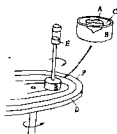
第473圖 寶石之雙晶

5-5 反射顯微鏡

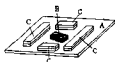
(1) 使用方法：觀察不透明礦物研磨面所生反射光線之偏光顯微鏡，稱之為反射顯微鏡。光線由前方射入，經前羣古爾變成偏光後，再由稜鏡向下反射，透過對物鏡而達於礦物之研磨面。然後由載物台上之礦物研磨面反射向上，通過上羣古爾及接眼鏡而達於眼內。此時前羣古爾與上羣古爾之振動方向互相垂直。若將前羣古爾取下，而僅用上羣古爾時，可以觀察反射色及多色性，使用直交羣古爾時，則可觀

察礦物之均質性及異方性等。普通研磨面之放置，必須與顯微鏡筒垂直。但研磨面與薄片不同，因其露於外部，故可用針刺之，藉以測知其硬度之高低。若滴以試藥，更可使其發生蝕像。

(2)礦物之研磨：礦物之光澤強弱不同，一經研磨均可使其光度增加，目前所用之研磨法，皆為自動式。即將大型岩石以金鋼鋸切成板狀，再將一面磨平。如圖所示，將欲研磨之岩石 A 置於圓框 B 中，使平面露於框外，在框與研磨片間，敷以油脂，然後置於圓銅板 D 上，此時在框上加置重錘 E，且於 D 上撒以鋁、鎂等研磨劑，並塗之以油，俾使溶解。待一切就緒後，即使研磨片與銅板同時做反向之旋轉，繼則改用細研磨粉，並將銅板改換為鉛板，繼續研磨。於是在銅板及鉛板之上，遂產生同心圓狀之溝紋 F，以便與研磨面相互砥礪。迨研磨至相當程度時，即應改用細研磨粉在無溝紋之較軟平板上磨至極端平滑為止。



第 474 圖 研磨機



第 475 圖 手研磨具

至用手研磨小型結晶時，如圖所示，常將小結晶（圖中之 B）以加拿大膠粘於玻璃片（圖中之 A）之中心部位。在其周圍以同法粘合若干小玻璃片（圖中之 C），俾做包圍晶體之用。其小玻璃片之厚度常較中心之晶體稍高，然後在鐵板上加粗研磨粉磨之，旋改用細研磨粉在玻璃板上繼續研磨，再後則於瀝青板上加氧化鋁粉磨之。至所用之瀝青板乃係將瀝青熔於青銅圓板（圖中之 D）上再行凝固者。稍後浸於熱水中使之軟化，復以細網並用平面玻璃壓之，將網揭開後，則見瀝青板上生成細紋（圖中之 E）。最後在其上繼續研磨，直至磨得平滑之面後，研磨工作始告完成。

5-6 礦物在電子顯微鏡下之觀察

吾人通常所見光線之波長，皆在 $890\mu.u$ 至 $760\mu.u$ 之間。 μ 者波長之單位，約為一公厘之千分之一， $u.u$ 者為 μ 之千分之一，乃所謂之 mu 是也。 $m\mu$ 之長度，為埃斯通單位 (Angstrom unit) 之十倍，即 $1\mu u = 1m\mu = 10A\mu = 10^{-7}cm$ 。設欲將物體外形觀察清楚，非應用其波長小於物體之光線不為功。蓋以波長大於物體時，則物體之輪廓即不能看清也。如露於海面上之岩礁，小於其掠過浪濤之波長時，岩礁遂為波浪所吞沒。若由來波之反對方向觀之，其輪廓不甚清晰。當岩礁之直徑較波長為大時，則由波浪行進之反對方向，可以清晰見之。至利用光線觀察物體時，其理亦與此相同。

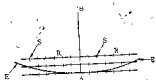
如以肉眼觀察二點，其可明視時之二點間距離，約為 0.1 公厘，即視角為 $1'$ 左右也。普通光學顯微鏡之最大倍率，均不超過 1500 倍。若再將倍率放大，其形雖可察見，但二點之位置則不甚清晰，即所呈之像，亦難臻明瞭。故所用之光線，其波長有再縮減之必要。

電子線之為物，原係電子之流動，亦係電磁波之一種。其波長約在 $0.1\mu u \sim 0.002\mu u$ 之間，遠較普通之光波為小。且可以電場或磁場自由變更其方向，恰與用反光鏡控制光波之方向，及用透鏡使其交會於某焦點者無異。

至電子線之產生，普通自真空長筒之一端通以高壓電，則由熱絲極之陰極對向陽極放出陰極射線 (Cathode ray)，而投射於膠膜之上。因筒上撒布有礦物粉末，故電子線必在磁場或電場之控制下會集於圓筒一端，而映之成像。然後將所攝取之照片，置於光學顯微鏡下觀察時，自可瞭然其明確之形態矣。例如在粘土之中，常有 0.1μ 大小完整結晶之礦物，如應用電子顯微鏡時，則不難察見。其雖極微渺之礦物世界，已能為吾人深入焉。

使用電子顯微鏡不但可將物體影像放大，且可進而研討其所得之繞射像，即所謂電子繞射是也。普通先將小礦物晶片以外部份遮蔽，

再以電子線照射之，其結晶之逆格子 R 則如右圖所示者。在格子點中，其反射可能之點必位於反射球 E 之上，因電子線之波長較 X 線尤短，故反射球之半徑應儘量接近平行，而電子線之入射方向即為 B A 之方向。



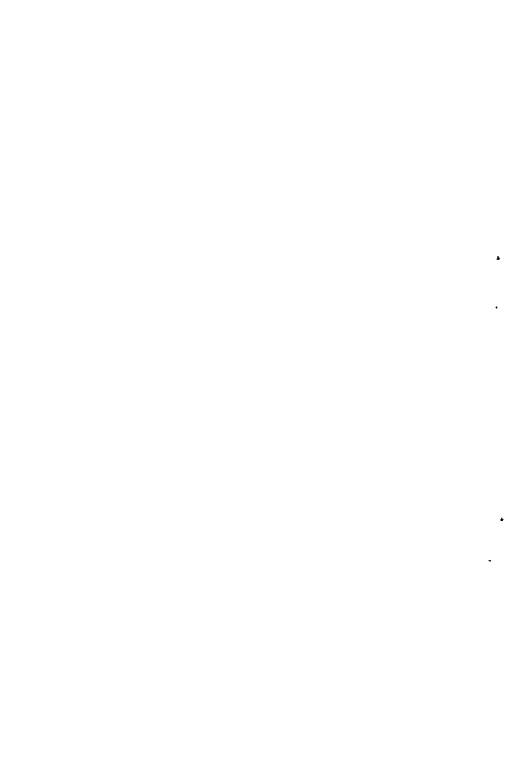
第 476 圖 電子線之繞射像

普通結晶顆粒愈小，其所得之繞射像則愈粗大，此乃係逆格子點之分散所致。即在極薄之結晶中，其垂直薄片方向之格子點，於重新組合時多呈分散狀態。究諸實際，凡以電子顯微鏡所觀察者，均係極薄之晶片，故格子點常沿該面之垂直方向拓張，由點成棒 S。於是在棒與反射球相切之位置發生繞射作用，而產生許多斑點。若所用之試料為粉末集合體時，則所產生之繞射像常與 X 線粉末像相同。簡言之，電子線之繞射像雖呈現逆格子狀態，但與膠膜表面平行之晶面，則不顯反射像。應用試料與乾板間之距離，可由電子線之繞射像中求得其格子常數。

此外，將試料散布於膠膜面後，再於真空中將重金屬鎘或鈾吹附於晶面之上，然後置於電子顯微鏡下觀察之，則因重金屬之有無而呈現不同之濃淡。若再由乾板反映於印劃紙上時，凡光線自測面照射則產生立體感。此時根據重金屬之照射角度及影之長短，可以求出結晶之厚度，設將粉末體之表面製成複寫 (Replica)，再按上法處理時即可見其表面構造矣。

普通常用之電子顯微鏡，計有日本島津 (Shimadzu electron mic-

roscope)之SM-U6及SM-C2型；荷蘭飛立普(Phillips)公司出品之EM-100型；美國RCA之EMU及EMT型及法蘭得光學儀器公司(Farrand optical Co.)之出品等。因附有顯微繞射裝置，使用新式對物鏡及中間透鏡，其解像度為 30\AA ，繞射分解為 $\frac{1}{1000}$ ，最小顯微繞射視野在 1μ 角以下，電子光學倍率為 $600\sim 20000$ ，觀察倍率可達 $1080\sim 200000$ ，通常加速電壓在 $30\text{KV}\sim 100\text{KV}$ 之間。使用時，只順置標本於儀器之中央，不必更換透鏡，即可進行觀察。至其操作手續，亦頗便利，試料之取換僅需時一分鐘，照像時所用之乾板，在二分鐘內即可更換。而全部儀器之使用方法，更為簡單，只須經過一、二小時之練習，即可完全勝任也。



礦物學上冊

索 引

一畫	
一軸性	Optically uniaxial..... 204
二畫	
八面體	Octahedron..... 11; 37; 107
八連晶	Sightlings..... 63
二次對稱	Binary axis of symmetry..... 19
二面體	Dieder..... 107
二軸性	Optically biaxial..... 204
二色性	Dichroism..... 220
二色鏡	Dichroscope..... 221
十二面體	Dodecahedron..... 37
十字沸石	Phillipsite..... 65
十字絲	Cross hair..... 210
X線之繞射	The diffraction of x-rays..... 113
X線繞射計	The x-ray diffractometer..... 123
X線	Röntgen ray..... 102
三畫	
三次對稱軸	Trigonal axis of symmetry..... 19
三斜晶系	Triclinic system..... 28
三角半面體類	
四半面體	
類	Trigonal tetartohedral class..... 33
三角四半面體	
之異極體類	Trigonal tetartohedral hemimorphic class..... 33

三角三八面體	Trigonal trisoctahedron.....	37
三角三四面體	Trigonal tristetrahedron.....	39
三連晶	Trillingo.....	68
三溴甲烷液	Bromoform.....	169
土狀	Earthy.....	161
工作距離	Working distance.....	209
干涉圈	Interference figure.....	216
干涉色	Interference color.....	212
三角十二面體	Trigonal dodecahedron.....	40
四重		
毛赤銅礦	Chalcotrichite.....	4
毛氏硬度計	Moh's Hardness scale.....	168
丹氏符號	Dana's indices.....	11
六次對稱軸	Hexagonal axis of symmetry.....	19
六方晶系	Hexagonal system.....	27
六八面體類	Hexoctahedral class.....	28
六四面體類	Hextetrahedral class.....	28
六方完面異極體類	Hexagonal holohedral hemimorphic class.....	32
六方雙錐體類	Hexagonal bipyramidal class.....	32
六方偏方體類	Hexagonal trapezohedral class.....	32
六面體	Hexahedron.....	36
六八面體	Hexoctahedron.....	38
六四面體	Hextetrahedron.....	40
六方底軸面	Hexagonal basal pinacoid.....	47
六方偏方體	Hexagonal trapezohedron.....	49
五角十二面體	Pyritohedron.....	40
五角偏菱三八面體	Pentagonal icositetrahedron.....	41
反覆雙晶	Repeated twin.....	62
反射	Spiegelung.....	107; 202
巴西式雙晶律	Brazillian twining law.....	64

日本式雙晶律	Japanese twinning law	64
月長石	Moonstone	67
水平投影	Horizontal projection	75
水平	Horizontal	107
水平分光	Horizontal dispersion	228
中和點	Neutral point	189
片狀	Lamellar	159
方解石	Calcite	163
方沸石	Analcite	229
比重	Specific gravity	166
比重瓶	Pycnometer	168
比熱	Specific heat	188
分度因數	Scale factor	125
分光性	Dispersion	227
天秤法	Balance method	166
天然磁石	Nature magnets	191
不透明	Opaque	193
不對稱分光	Asymmetrical dispersion	228
太陽系	Solar system	198
中心校正	Centering	210
毛司	Friedrich Mohs	163
世界史綱	The Outline of History	8

五畫

半白形	Subhedral	1
半面形	Hemi-hedral form	10
半面體晶類	Hemihedral class	36
半雙錐體	Hemi-bipyramids	55
半正軸坡面	Hemi-ortho-dome	57
半柱體	Hemi-prisms	58
半面坡	Hemi-domes	58
半透明	Semi-transparent	192

半金屬光澤	Sub-metallic	197
四半面形	Tetrahedral form	10
四次對稱軸	Tetragonal axis of symmetry	19
四次倒置對稱 軸	Rotoreflexion axis	20
四面式五角十 二面體類	Tetrahedral pentagonal dodecahedral class	29
四六面體	Tetrahexahedron	37
四面體	Tetrahedron	39
四面式五角十 二面體	Tetrahedral pentagonal dodecahedron	42
四分之一雙錐 體	Tetrato-bipyramide	58
四溴乙炔	Acetylene tetrabromide	170
四分之一雲母 板	Quarterundulation mica plate	218
主對稱面	Principal symmetrical plane	18
他形	Anhedral	1
正方晶系	Tetragonal system	27
正軸	Ortho-axis	28
正方偏三角面 體類	Tetragonal scalenohedral class	30
正方雙錐體類	Tetragonal bipyramidal class	30
正方偏方錐體 類	Tetragonal trapezohedral class	30
正方四半面形 晶類	Tetragonal tetartohedral class	30
正方柵	Tetragonal bisphenoids	44
正方偏三角面體	Tetragonal scalenohedron	44
正方偏方錐體	Tetragonal trapezohedron	45
正半錐	Positive hemi-bipyramid	56
正軸面	Ortho-pinacoid	57

正長石	Orthoclase.....	163
正晶	Positive character.....	207
正性接目鏡	Positive eye-piece.....	209
平行連晶	Parallel growth.....	60
平行透入連晶	Parallel intergrowth.....	60
平射投影	Stereographic projection.....	75
平射投影分度 器	Stereographic protractor.....	76
平板狀	Even.....	161
平面偏光	Plane polarized light.....	204
平行消光	Parallel extinction.....	214
左水晶	Left-handed quartz.....	62
右水晶	Right-handed quartz.....	62
加爾斯拜得雙 晶律	Carlsbad law.....	64
加拿大膠	Canada balsam.....	207
包晶假晶	Perimorph.....	70
包晶	Incrustation.....	70
古力琪管	Coolidge tube.....	111
弗立爾級數	Fourier series.....	145
弗利得爾法則	Friedel's method.....	146
弗利爾合成圖	Fourier summation.....	146
外結	Epitaxi.....	157
打像	Percussion figure.....	161
石膏	Gypsum.....	163
石英	Quartz.....	163
石英楔	Quartz wedge.....	209
丙二酸鉍	Thallium malonate.....	169
丙酮	Acetone.....	170
白金鉍	Rhodium.....	179

六畫

自形	Euhedral.....	1
自色	Idiochromatic color.....	193
有理數定理	Law of Rational Indices.....	9
尖晶石式雙晶		
律	Spinel law.....	63
交代假晶	Pseudomorph by substitution.....	69
交叉分光	Crossed dispersion.....	228
充填	Filling.....	70
充填假晶	Pleromorph.....	70
同帶面	Tautozonal faces.....	70
同心狀	Concentric.....	159
向量	Vector.....	150
多片狀	Splintery.....	161
多色性	Pleochroism.....	225
多色性公式	Pleochroic formula.....	225
吐列特液	Thoulet solution.....	169
安息油	Benzol.....	169
光電	Actino-electricity or Photo-electricity.....	191
光澤	Luster.....	196
光波	Wave.....	198
光量子	Quanta.....	198
光熾光	Photoluminescence.....	201
光軸	Optic axis.....	204
光軸角	Optic-axial angle.....	204
光軸面	Optic-axial plane.....	204
光軸角測定器	Optic axial angle apparatus.....	223
光軸之分光	Dispersion of the optic axis.....	227
光性異常	Optical anomaly.....	229
行程差	Retardation.....	217

七畫

形態結晶學	Morphological crystallography.....	1
完面形	Holoedral form	10
完全	Perfect	160
沉澱假晶	Pseudomorph by simple deposition	70
投影點	Pole.....	75
希爾敦線網	Hilton net.....	79
希伯爾德及撒 特爾法	The Schiebold & Sauter method.....	134
呂耶斑點	Laue diffraction pattern	118
赤道線	Equatorial line.....	132
角量	Tensor.....	150
杏仁狀	Amygdaloidal	158
豆狀	Pisolitic.....	159
貝狀	Conchoidal.....	161
貝克線	F. Becke line.....	225
克萊因液	Klein solution	169
呆滯點	Culy point	186
努若爾油	Nujol oil	202
折屈偏光	Polarization by refraction	204
閃變干涉圈	Flash figure	217
吸收公式	Absorption formula.....	225

八畫

非晶質	Amorphous	1
非對稱晶類	Asymmetric class.....	36
非均質性	Unisotropic.....	150
非常光線	Extra-ordinary ray	208
長軸	Macro-axis.....	27
長軸雙錐體	Macro-bipyramid	53
長軸柱	Macro-prism.....	53

長軸坡面	Macro-dome.....	54
長軸面	Macro or Front pinacoid.....	54
底軸面	Basal pinacoid.....	48; 50; 54
底面心正方格子	Simple tetragonal lattice.....	93
底面心斜方格子	Base-centered lattice.....	93
底面心單斜格子	Base-centered monoclinic lattice.....	93
坡面	Domes.....	53; 56
金紅石律	Rutile law.....	62
金剛石	Diamond.....	163
金屬光澤	Metallic luster.....	196
金剛光澤	Adamantive luster.....	197
武石	Buseki.....	69
空間格子	Space lattice.....	90
阿弗加得羅常數	Avogadro constant.....	112
阿基米得原理	Archimede's principle.....	166
波爾茲曼常數	Boltzmann constant.....	141
板滯石	Antigorite.....	147
板狀磷酸鈹礦	Xenotime.....	157
板狀	Tabular.....	159
乳房狀	Mammillary.....	159
乳色	Opalescence.....	195
放射狀	Radiating.....	159
延性	Ductile.....	166
昇華	Sublimation.....	185
亞透明	Translucent.....	193
虎眼石	Tiger's eye.....	194
青石綿	Crocidolite.....	194

矽酸鋇鈦礦	Benitoite.....	201
屈折率	Index of refraction.....	202
屈折率之分光	Dispersion of refringence.....	227
直視偏光鏡	Parallel nicols.....	208
直消光	Straight extinction.....	214
明暗度與路徑差	Brightness & path difference.....	211
九 畫		
面係數	Coefficients of parameter.....	9
面指數	Indices of face.....	9
面角	Face angle.....	22
面角不變定律	Law of constancy of interfacial angle.....	23
面中心立方格子	Face-centered cubic lattice.....	91; 93
面心正方格子	Body-centered tetragonal lattice.....	98
面心斜方格子	Face-centered orthorhombic lattice.....	98
紅鋅礦	Zincite.....	52
紅外線	Infra-red ray.....	202
負半錐	Negative hemi-bipyramid.....	56
負晶	Negative character.....	207
負性接目鏡	Negative eye-piece.....	208
拜溫諾式雙晶	Beveno twin.....	64
歪晶	Malformed crystal.....	66
重疊	Cyclish.....	107
重液	Heavy solution.....	169
垂直	Vertical.....	107
垂直偏光鏡	Crossed nicols.....	208
哈丁管	Hadding tube.....	111
計數率表	Rate-meter.....	126
威森伯格法	The Weissenberg method.....	183

威斯特法爾天	Westphal's balance	170
秤		
前行法	Precession method	134
柱狀	Columnar	158
扁豆狀	Lenticular	159
甚完全	Very perfect	160
柔性	Sectile	166
勃朗液	Brauns solution	169
勃特朗透鏡	Bertrand lens	216
勃特朗接目鏡	Bertrand ocular	221
砂金石	Aventurine	194
星彩	Asterism	195
玻璃光澤	Vitreous luster	197
珍珠光澤	Pearly luster	197
十畫		
剛石	Emery	10
缺面形	Mero-hedral form	10
酒石酸	Tartaric acid	57
被覆假晶	Incrustation pseudomorph	70
倒置	Invertieren	107
倫琴射線	Röntgen ray	111
氣體離子管	Gas in tube	111
逆格子	Reciprocal lattice	115
逆磁性	Diamagnetic	191
粉末攝影	The Powder Photograph	120
乘數	Multiplier	125
振動攝影	Oscillation method	130
針狀	Acicular	158
核狀	Nodular	159

脆性	Brittle	165
展性	Malleable	166
脂肪光澤	Greasy luster	197
消光	Extinction	213
消光位置	Position of extinction	214
消光位	Extinction direction	214
消光角	Extinction angle	214
埃斯通單位	Angstrom unit	231

十一畫

參差狀	Uneven	161
理想形	Ideal form	3
密氏符號	Miller's indices	11
副對稱面	Sub-symmetrical plane	18
常對稱面	Ordinary symmetrical plane	18
常光線	Ordinary ray	203
接觸測角器	Contact Goniometer	33
接觸面	Composition plane	61
接觸雙晶	Contact twin	61
接眼鏡	Eye-piece	308
視準儀	Collimator	25
斜方晶系	Orthorhombic system	27
斜軸	Clino-axis	28
斜方雙錐體類	Orthorhombic bipyramidal class	34
斜方異極體類	Orthorhombic hemimorphic class	34
斜方類	Orthorhombic sphenoidal class	35
斜方雙錐體	Orthorhombic bipyramids	53
斜方柱	Orthorhombic prisms	53
斜方櫛	Orthorhombic bisphenoid	55
斜軸面	Clino-pinacoid	57
斜晶石	Clinohedrite	57
斜消光	Oblique extinction	214

斜方沸石	Chabasite	229
偏方二十四面體類	Diploidal class.....	29
偏形半面體類	Plagihedral hemihedral class.....	29
偏形六面體類	Trigonal trapegohedral class.....	33
偏菱三八面體	Tetragonal trisoctahedron.....	37
偏菱三四面體	Tetragonal tristetrahedron.....	39
偏菱十二面體	Deltoid dodecahedron	39
偏方二十四面體	Diploid.....	41
偏三角面體	Scalenhedron	48
偏形六面體	Trigonal trapezohedron.....	51
偏光	Polarization.....	208
偏光鏡	Nicol prism.....	207
偏光顯微鏡	Polarizing microscope.....	207
偏光彝古爾	Polarizar.....	207
第一正方雙錐體	Tetragonal bipyramid of the first order.....	42
第二正方雙錐體	Tetragonal bipyramid of the second order.....	42
第一正方柱	Tetragonal prism of the first order.....	43
第二正方柱	Tetragonal prism of the second order.....	43
第三正方雙錐體	Tetragonal bipyramid of the third order.....	44
第三正方柱體	Tetragonal prism of the third order:.....	45
第三正方櫛	Tetragonal bisphenoids of the third order.....	45
第一六方雙錐體	Hexagonal bipyramid of the first order.....	46
第二六方雙錐體	Hexagonal bipyramid of the second order.....	46
第一六方柱	Hexagonal prism of the first order.....	47
第二六方柱	Hexagonal prism of the second order.....	47

第三六方雙錐體	Hexagonal bipyramid of the third order.....	49
第三六方柱	Hexagonal prism of the third order.....	49
第一三角雙錐體	Trigonal bipyramid of the first order.....	49
第一三角柱	Trigonal prism of the first order.....	50
第一複三角雙錐體	Ditrigonal bipyramid of the first order.....	50
第一複三角柱	Ditrigonal prism of the first order.....	50
第二三角雙錐體	Trigonal bipyramid of the second order.....	51
第二三角柱	Trigonal prism of the second order.....	51
第二複三角柱	Ditrigonal prism of the second order.....	51
第一菱面體	Rhombohedron of the first order.....	51
第二菱面體	Rhombohedron of the second order.....	52
第三菱面體	Rhombohedron of the third order.....	52
第四單斜柱	Fourth-order prism.....	55
第三單斜柱	Third-order prism.....	56
第一單斜柱	First-order prism.....	56..
第一層線	First layer line.....	132
第二層線	Second layer line.....	132
第三層線	Third layer line.....	132
異極礦	Calamine.....	55
異常黑雲母	Anomite.....	177
曼勞巴西式雙晶	Manebach twin.....	64
假晶	Pseudomorph.....	66
假像纖維角閃石	Uralite.....	67
假像赤鐵礦	Martite.....	68
假像輝銅礦	Harrisite.....	69
假色	Allochromatic color.....	194

假光軸角	Apparent axial angle	223
偽白榴石	Pseudoleucite	67
脫殼	Negative cast	70
頂圖	Top figure	75
球面投影	Spherical projection	75
球心投影	Gnomonic projection	76
球狀	Globular	159
側面心斜方格 子	Face-centered	93
基本反射	Background reflection	124
旋轉射影	The rotating-crystal photographs	130
旋光	Optical activity	203
移動膠片法	The moving film method	132
條線面	Striated face	150
條痕	Streak	195
粒狀	Granular	159
陸巴賀液	Rohrbach solution	169
透明度	Transparency	193
透明	Transparent	193
透石膏	Selenite	201
強電子學	Fero-electronics	186
強磁學	Fero-magnetics	186
彩色	Play of color	195
陰極射線	Cathode ray	198; 231
眼透鏡	Eye-lens	208
閉形	Closed form	9
 十二畫		
結晶體	Crystal	1
結晶質	Crystalline	1
結晶學	Crystallography	1
結晶軸	Crystallographic axis	7

結晶系	Crystal system	27
結晶之投影	Projection of crystal.....	74
結晶單色計	Crystal monochrometer.....	141
結核狀	Concretionary.....	159
幾何結晶學	Geometrical crystallography.....	1
晶癖	Crystal habit	5
晶相	Crystal tracht.....	6
晶帶軸	Zone-axis.....	70
晶帶指數	Indices of zone.....	71
晶帶記號	Symbol of zone.....	71
晶帶方程式	Zonal equation.....	72
單位面	Unit face.....	9
單斜晶系	Monoclinic system.....	28
單斜柱體類	Monoclinic prismatic class.....	35
單斜異極體類	Monoclinic hemimorphic class.....	35
單斜晶石類	Monoclinic clinohedral class.....	35
單位雙錐體	Modified bipyramid	53
單位柱	Unit prism.....	53
單斜柱體	Prisms.....	56
單晶	Single crystal.....	59
單位胞	Unit cell	89
單一空間格子	Simple space lattice	90
單一正方格子	Simple tetragonal lattice	93
單一六方格子	Hexagonal lattice	93
單一斜方格子	Simple orthorhombic lattice	93
單一菱面體格子	Rhombo-hedral lattice	93
單一單斜格子	Simple monoclinic lattice	93
單一三斜格子	Triclinic lattice	93
單位軸向量	Unit axial vector	96
單波長 X 線	Characteristic x-rays.....	111
單色 X 線計	Monochromator.....	137

軸率	Axial ratio.....	9
軸對稱面	Axial symmetrical plane.....	18
軸間對稱面	Intermediate symmetrical plane.....	18
軸面類	Pinacoidal class.....	36
軸面	Pinacoids.....	54; 57
軸向量	Axial vector.....	96
軸面法線	Optic normal.....	204
開形	Open form.....	9
測角器	Goniometer.....	23
測微刻度尺	Micrometer.....	211
等軸晶系	Isometric system.....	27
短軸	Brachy-axis.....	27
短軸雙錐體	Brachy bipyramid.....	53
短軸柱	Brachy prism.....	53
短軸坡面	Brachy dome.....	54
短軸面	Side pinacoid.....	54
菱形半面體類	Rhombohedral hemihedral class.....	32
菱形半面體之 異極體類	Rhombic hemihedral hemimorphic class.....	33
菱形四半面體 類	Rhombohedral tetartohedral class.....	33
菱面體	Rhombohedron.....	48
硫代硫酸鈣	Calcium thiosulphate.....	59
貫通雙晶	Penetration twin.....	61
補足雙晶	Supplementary twin.....	62
鈉長石律	Albite law.....	64
鈉閃石	Riebeckite.....	225
鈣鈉長石律	Pericline law.....	64
鈣鈉柱石	Wernerite.....	160; 201
黃鐵礦後之褐 鐵礦	Limonite pseudomorph after pyrite.....	66
黃玉	Topaz.....	163

絲極	Filament	111
絲狀	Capillary	158
絲絹光澤	Silky luster	197
普通 X 線	General x-rays	111
普蘭克常數	Plank constant	141
氬	Argon	124
無向量	Scalar	150
腎狀	Reniform	159
稍完全	Moderately perfect	160
硬度	Hardness	163
硬度計	Hardness' scale	163
硬硼酸鈣石	Colemanite	201
韌度	Tenacity	165
焦利天秤	Jolly spring balance	166
焦電	Pyro-electricity	188
蛭石	Vermiculite	172
黑雲母	Biotite	177
黑鈦鐵錳礦	Jacobsite	191
揮發	Volatilization	185
順磁性	Paramagnetic	191
著色中心	Colorimetric center	194
紫外線	Ultra-violet ray	198
鈍角等分線	Obtuse bisectrix	206
賀金氏接眼鏡	Huygen's eye-piece	208
集光透鏡	Collective lens	208

十三畫

微晶質	Microcrystalline	1
微斜面	Vicinal	155
微透明	Subtranslucent	193
微光	Glimmering	197

極點	Polar position	26
極完全	Highly perfect	100
碘銀礦	Iodryite	52
道芳式雙晶律	Douphine twining law	63
絹布石	Bastite	67
電子管	Electron tube	111
電熾光	Electroluminescence	201
零層線	0-layer line	132
葡萄狀	Botryoidal	158
解理	Cleavage	159
解離	Dissociation	185
解析鼻古爾	Analysers	207
滑石	Talc	163
試硬器	Sclerometer	163
疊色	Iridescence	195
暗淡	Dull	198
催化劑	Activator	199
鉛灰石	Powellite	200
瑞姆斯頓接目鏡	Ramsden eye-piece	208
準焦	Focusing	210
載物臺	Stage	210
傾斜分光	Inclined dispersion	227

十四畫

聚形	Combination	9
聚片雙晶	Polysynthetic twins	62
聚光鏡	Condenser	209
聚斂偏光鏡	Conoscope	216
聚斂偏光	Convergent light	216
銅細雲母	Torbernite	227

對稱定律	Law of symmetry	18
對角對稱面	Diagonal symmetrical plane	18
對稱心	Center of symmetry	19
對角	Diagonal	107
對物鏡	Objective	209
複正方雙錐體類	Ditetragonal bipyramidal class	30
複正方錐異極體類	Ditetragonal holohedral hemimorphic class	30
複六方雙錐體類	Dihexagonal bipyramidal class	31
複正方雙錐體	Ditetragonal bipyramid	43
複正方柱	Ditetragonal prism	43
複六方雙錐體	Dihexagonal bipyramid	47
複六方柱	Dihexagonal prism	47
複格子	Compound lattice	90
複屈折	Double refraction	203
複寫	Replica	232
褐鉛礦	Vanadinite	49
褐水金雲母	Stilpnomelane	192
蝕像	Etched figure	152
綠銅礬	Spangolite	154
網狀	Reticulated	159
槓桿法	Beam balance	167
遜斯塔特液	Sonstadt	169
熔融點	Melting point	184
滯後現象	Hysteresis	190
磁性礦物	Magnetic mineral	191
碳氫石	Curtisite	201
管嘴	Nosepiece	210

十五畫

潛晶質	Cryptocrystalline	1
膠體礦物	Mineraloids	1
標軸	Parameter	8
標軸之比	Parameter-ratio	9
輪式雙晶	Cyclic twin	62
撓性	Flexible	166
彈性	Elastic	166
熱傳導	Conduction of heat	172
熱電	Thermo-electricity	188
熱電列序	Thermo-electric series	89
熱熾光	Thermoluminescence	201
摩擦電	Frictional electricity	187
摩擦熾光	Tridaluminescence	202
銳角等分線	Acute bisectrix	206

十六畫

剛玉	Corundum	168
骸晶	Skeletal crystal	2, 152
諾氏符號	Naumann's symbol	11
錐形	Pyramid	11
錐形異極體類	Pyramidal hemimorphic class	30; 32
橫柱	Horizontal prism	54
燕尾雙晶	Swallow tail	61
樹枝狀	Arborescent	158
樹脂光澤	Resinous luster	197
鋸齒狀	Hackly	161
螢石	Fluorite	163
螢光	Fluorescence	198
導熱係數	Coefficient of thermal conductivity	172
銻	Germanium	186
銹色	Tarnish	195

十七畫

黃石	Struvite.....	55
擬晶	Mimicry.....	64
錘狀	Obolitic.....	159
壓像	Pressed figure	161
壓電	Piezo-electricity.....	189
應力	Stress.....	166
應變	Strain	166
檢流計 G.	Galvanometer	180

十八畫

魏氏符號	Weiss's symbol	11
瀉利鹽	Epsomite	55
雙晶	Crystal twin.....	60
雙晶軸	Twinning axis.....	60
雙晶面	Twinning plane	60
雙晶律	Spinal law	63
斷口	Fracture.....	161
磷灰石	Apatite	168
藍晶石	Kyanite	164

十九畫

羅倫茲因子	Lorentz factor	141
蟻酸鉍	Thallium formate	169
繪圖反像器	Camera bucida.....	211

二十畫

礦物文明	Mineral Civilization.....	8
耀光	Glistening.....	197

二十一畫	
鐵十字	Iron cross..... 63
二十二畫	
彎曲面	Curved face..... 152
彎曲結晶	Curved crystal..... 152
二十三畫	
變形雙錐體	Modified bipyramids..... 53
變質假晶	Pseudomorph by alternation..... 66
變色	Change of color..... 195
體中心立方格子	Body-centered cubic lattice..... 91; 93
體心正方格子	Body-centered tetragonal lattice..... 93
體心斜方格子	Body-centered orthorhombic lattice..... 93
纖維狀	Fibrous..... 159
二十四畫	
鱗狀	Scaly..... 159
鷹眼石	Hawk's eye or Falcon's eye..... 195