

中央人民政府高等教育部推薦

高等學校教材試用本

結晶學原理

Е. Е. ФЛИНТ 著
楊朝樑等譯



商務印書館

中央人民政府高等教育部推薦
高等學校教材試用本



結 晶 學 原 理

E. E. 弗林特著
楊朝樑等譯

商 務 印 書 館

本書係根據蘇聯國立地質書籍出版社（Государственное издательство геологической литературы）出版的弗林特（Е. Е. Флинт）著“結晶學原理”（Начала кристаллографии）1952年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等礦業學校地質專業教科書。

本書由北京地質學院結晶礦物教研室楊朝樑、彭志忠、蘇明迪和李文達等譯；校訂者為該教研室主任王炳章及關廣岳、彭志忠。

結 晶 學 原 理

楊 朝 樑 等 譯

★ 版權所有 ★

商 務 印 書 館 出 版

上海河南中路二一號

新華書店華東總分店 總經售

上海南京西路一號

商 務 印 書 館 上 海 廠 印 刷

（52674）

1954年1月初版 版面字數173,000

印數1—6,000 定價¥11,500

上海市書刊出版業營業許可證出〇二五號

原 序

我在編寫這本書的時候是想把它作為一本非常簡短、扼要的教科書，希望在這本書裏包括高等地質探勘學校或大學地質系的教學大綱中的所有材料。

近幾年來我在以奧爾忠尼啓則命名的莫斯科地質探勘學院的講演是本書的主要材料，其中也加進了我或我的助手們在實習課程中所敘述過的部份。

有些講演是為我的同事們所審閱過的。我要對 C. Д. 切特維尼可夫教授和 B. И. 切列維克教授表示感謝，由於他們在各方面作了一些修改和指示。我並且要向 K. H. 秋略也夫表示特別的謝意，由於他在本書準備付印之前作了許多精細的工作。

目 錄

原序

第一章	結晶學的內容及其與他種科學的關係	1
第二章	晶體的發生和成長	13
第三章	面角恆等定律及晶體測量	32
第四章	晶體的對稱原理	49
第五章	晶體所有可能對稱型的推導	57
第六章	整數定律・對稱型按晶系的分類・晶體的定向	64
第七章	晶帶定律・晶面符號和晶稜符號間的關係	80
第八章	晶體有限定律及結晶化學分析	92
第九章	晶體的生長形・實際形及理想形・各晶系單形概述・ 聚形	99
第十章	單形在各晶類中的分佈	117
第十一章	真實晶體的形狀和特徵・雙晶	140
第十二章	晶體構造	147
第十三章	晶體構造的變態射線研究	154
第十四章	構造分析原理・典型構造・結晶化學的基本概念	162
第十五章	晶體最主要的光學性質	175
第十六章	顯微鏡下晶體最主要光學性質的研究	190
第十七章	晶體的力學熱學及電學性質	202

結晶學原理

第一章 結晶學的內容及其與他種科學的關係

結晶學——是研究晶體的發生和生長，外部形狀，內部構造以及物理性質的科學。

“кристалл”來自希臘文，係由 κρυος—冷與 στελλεσθαι—凝結兩字所組成，所以全字的意義就是“因冷而凝結的”。希臘人把水晶叫做 κρυζταλλος 他們認為水晶是由水經冷凝而成的晶體。根據一些希臘思想家的意見，假如冰是在事前受過極低溫度的影響的，也即是說，假若它是因冷而凝結的，那麼冰就應當是已經轉變成為一種特殊的，在普通溫度穩定的形態了。

結晶學在很長的時間裏是礦物學的一部份，而僅佔緒論中的一章。但自十九世紀末葉以來，結晶學才因為如次的幾種主要原因得開拓成一門獨立的科學。

1. 由於化學，特別是有機化學的發展，開始明確了大多數與礦物毫無共同點的物質也具有結晶的形態。

2. 結晶體，精確些——說結晶物質，分佈極為廣泛。環繞在我們周圍的極大多數物體都具有結晶構造，我們腳下的土壤和岩石，我們住房的牆壁和屋頂，甚至樹木^①等都全部地和部份地具有結晶構造。而且通常極複雜。

3. 晶體具有許多差異極大的特性。

結晶物質的最主要的特性

1. 在成套的礦物標本裏，我們常看見美麗而巨大的晶體標本。這

^① 樹木的基質由細胞質構成，其中的伸長的分子排列成結晶構造。

些晶體有時具有像鏡子一樣平滑的晶面。那些平滑的面並沒有經過人工的琢磨，而是在自然條件下生成的。只能用放大鏡或是顯微鏡才能看到的小晶體也常具有同樣的清晰的界面。

包圍晶體的要素是平的晶面，直的晶稜及隅角頂點。他們之間有下列的關係：

$$i + e = p + 2$$

其中 i — 晶面數；

e — 頂點數；

p — 晶稜數。

晶體的晶面是按照晶帶排列的。相交成平行晶稜的晶面的組合稱為晶帶。平行於晶稜的方向線就叫做晶帶軸。

這些晶面究竟如何排列的呢？是偶然的還是具有一定的規律性呢？事實證明，它們的出現和排列是有規律的：

(a) 同一化合物的不同晶體其對應的面間的角度是恆等的；

(b) 如把各個晶面放到空間裏的三個已經確定的坐標軸上，則任何一個晶面的位置都能用三個簡單整數表示出來。

2. 就晶體的物理性質的研究，證明了在一般情況下，在不同方向內具有不同的性質，也就是說，晶體是異向性的。例如晶體硬度，導熱性，彈性和其他性質的數值都因測定的方向而異其值。

3. 晶體在某一些方向內的性質卻是相同的，同時也可以在相同的方向裏發現各式各樣的而且常常是很複雜的對稱。

4. 對光線來說大多數晶體所顯示的性質是很特別的：射入晶體裏的簡單光線能分解成具有不同折射率的兩組平面極化光，也就是分解成為振向不同並速度不同的兩組光。

如果不管排列在晶體中的物質點是什麼，也不管它具有什麼樣的形狀，只把結晶質當作具有規律的格子（網狀的）構造的物質，那麼我們所觀察到的晶體的許多特性就很容易解釋了。晶體構造可以用空間格

子的圖形(圖 1)表示出來。我們也可以把空間格子看作無數相等的平行六面體的組合。他們按照平行位置而毫無間隙地排列在一起。平行六面體的角頂,或是位於平行六面體各角頂上的點也可以組成空間格子。這些點叫做結點。經過結點所作的直線叫做平行列;由三個不在同一行列裏的結點所決定的平面叫做面網。假如平行六面體的每一角頂上都有一個結點,這樣的平行六面體叫作格子單位或晶胞。這種圖形可以使晶體的大多數的即不是全部的特性,易於得到解釋。

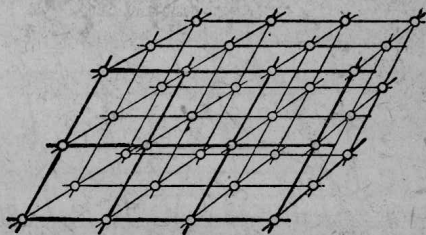


圖 1. 空間格子。

既然結晶構造的基礎是網狀的架子(即空間格子),那麼晶體的平的晶平面和直的晶稜的形成便是很自然的了。每一個晶稜都應該和內部格架的某一行列相符合。行列的數目及方向是無窮無盡的,每一方向為兩個點——格子結點所決定。晶面與面網相符合;而每一面網的位置又為不屬於同一行列的三個點——結點所決定。

由此可以知道:同一物質的所有晶體在壓力和溫度相同的情況下,都有相同的格子構造,因而,我們可以得出相當晶面間的角度是恆等的結論。假如把兩個相同的格子平行地放置在一起,我們又容易看出在任何情況下的二相當面網間的夾角仍然是相同的,這就等於說晶體的相當面間角的恆等是和晶體的大小無關的。

如果把構造格架裏的三個行列當作座標軸,再把各該行列內的結點之間的距離當作各該標軸上的度量單位,則任一面網的位置——也就是晶體上任一品面在空間中的位置總可以用三個整數表示出來。就圖 2 可見晶面 ABC 的位置可以用它在座標軸—— I, II, III 或 OX, OY, OZ 上所切截的截段 OA, OB, OC 經按各該座標軸上的度量單位 a, b, c 度量過後所得的三個整數表示出來,即 $OA:OB:OC=$

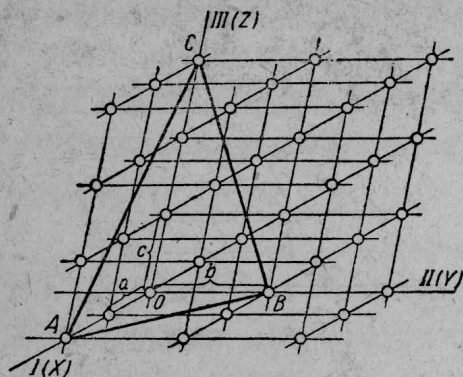


圖 2. ABC 晶面在坐標軸上的截段的整數間距。

$2a:b:3c$ 或 $2:1:3$

根據網狀格子構造便可以了解晶體的異向性了，這因為在格子裏的平行方向內的情況都相同，而不平行方向內的則相異。

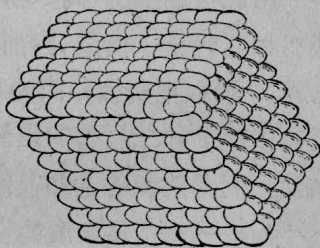
只要我們把具有不同角度和具有相同或相異晶稜的平行六面體看成是一個原始構造單位，我們所觀察到的各樣晶體

的外形，對稱以及相應的多樣性物理性質也就都可以解釋了。

這裏所講的連同許多其他的事實都使學者們在很久以前就深信規律的，斷續的或網狀的構造是結晶物質的基本特點。

結晶學的發展概況

大約在260年前1690荷蘭學者X.惠更司在研究方解石(CaCO_3)晶體的光學性質時，他認為他所觀察到的晶體性質可能以結晶物質有規律的內部構造的這一特點來解釋，他認為晶體是由具有一定形狀的（對每一種物質都有它的特殊形狀）物質質點堆砌形成（圖3）。



比上述時間還早一些（在1669年），H.斯丹遜（譯者註，即斯丹諾）發現了結晶學的第一個基本定律——面角恆等定律；大約在同時， Θ .巴爾托林在冰洲石晶體中發現了有雙折射性而開創了結晶光學的基礎。數年以後，X.惠更司才又仔細地研究了晶體的光學性質。

M. B. 羅蒙諾索夫（1711—1765年）創立了物質構造的微分子說。

圖 3. 方解石構造（按惠更司）

他把微分子看成是球狀的，他假想晶體是由一些微分子堆砌而成的，所以 M. B. 羅蒙諾索夫解釋了“結晶圖形”的正方形斷面（食鹽）及六角形斷面（硝石），他又根據這種方法解釋了在直徑兩端對蹠晶面間的平行性。有了 M. B. 羅蒙諾索夫的理論才使面角恆等定律的合理的解釋：因為晶體發育時的微分子是順序地堆積的，所以晶面是平行地向前推移的。

可惜的是到現在為止 M. B. 羅蒙諾索夫所留下來的實驗記錄太少了。從他所制訂的精細的晶體研究大綱中可以看出，無論是晶體的形態或是物理性質他都會研究過，如：角度的測量，光線的折射，比重的確定，黏合力和硬度，發光的電學性質（近代叫做摩擦光）以及電性對輕質點的吸引能力等。

M. B. 羅蒙諾索夫對於結晶作用的過程亦很注意，從他那裏我們可以找到這樣的記載：結晶作用應當用迅速或是緩慢冷卻的方法，放在平淺的或是高深的容器中加熱的方法，溶液中有空氣或沒有空氣方法。他還提出了在帶電溶液中結晶作用速度問題；這個問題到今還沒有得到完滿的解決。

1774 年，P. Ж. 阿羽依（不是哈依）發現了結晶學裏的第二個基本定

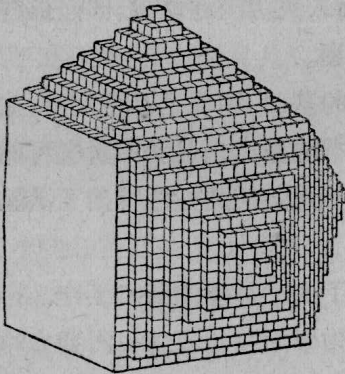


圖 4. 由於構造單位一立方體的數目的減少而產生了新的晶面。

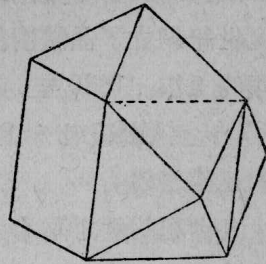


圖 5. 從圖 4 中可以看出新的晶面，它是階梯狀構造的切面。

律——“阿羽依定律”，即有理指數定律。這個定律的發現是因為他觀察到方解石受打擊而解裂開的式樣總有一定，並且解開的平面總是平而滑的（解理現象）。阿羽依把構成晶體的分子的形狀假定為平行六面體，所以由這樣分子所壘積成的晶體（圖 4 及 5）的每一個面在空間裏的位置都可以用三個整數表示出來。

在十九世紀開頭的十年以內，對天然晶體礦物的兩面角的系統的測量工作就已經開始了。這時的結晶學與礦物學的關係極為密切，並且為礦物學的一部分，所以很多礦物學者（韋斯、列曼、勞曼、密勒等）都是從事於晶體測量工作。主要的是量天然的礦物。密勒氏更把解析幾何的方法應用到結晶學裏來，並從而創造了利用晶面的指數來充作晶面的合理的符號。

測量晶體的工具，最初是使用測角器，嗣後才應用反射測角器。第一種儀器是卡蘭若在 1782 年設計的，第二種是韋勒斯頓在 1809 年設計的。

在俄羅斯從事於晶體測量工作的有 H. II 柯克沙羅夫，II. B. 葉連免也夫，M. B. 葉洛費也夫等。H. II 柯克沙羅夫的測量工作最仔細，他所測得的數值也最精確。他研究了許多採自俄羅斯各礦產地的礦物。直到現在為止，經他所測得的結果尚未失去少許價值，因而這些數值還被採用在近代的礦物學指南及手冊裏。

十九世紀創立了晶體對稱學說的基礎，發現了晶帶定律，並進行了晶體分類的工作。1830 年，赫塞爾首先推導出晶體中所有可能的對稱型。1867 年，俄國學者 A. B. 加多林用幾何的方法得出了晶體三十二對稱型的正確推導。

從十九世紀的後半葉起即開始了人工晶體的研究工作。自從結晶學逐漸地接近物理、化學，離開了礦物學而開始成為一門獨立的科學以後，研究結晶學的人就迅速地增加了。晶體化學的規律性、異質同像、及同質異像也確定了，晶體的光學性質也有精確的研究了。在十九世

紀末葉對晶體構造的幾何原理，也進行了研究。

結晶學發展歷史的最近階段，開始於 1912 年。

在很長一段時間裏沒有人能用試驗的方法來證實晶體的格架狀構造的理論，某些學者甚至懷疑物質是由分子構成的，因而許多學者都避免提到晶體格架狀構造。一直到 1912 年，物理學家 M. 勞埃才用試驗證明了格架狀構造的理論的正確性。

在 1895 年樂琴發現了新型射線。這種射線(樂琴稱為 X -射線)的不尋常的性質，在長時間內沒有找到完滿的解釋。一些物理學家認為 X 射線是波長極短的電磁波，另一些人卻以 X 射線是由於物質極細小的質點消失的結果而生成的光線(消失性射線)，不能用實驗的方法引起反射、折射及干涉現象。在以前可以用人工做出的最細小的繞射光柵也不能與 X 線發生作用。

勞埃認為人工做的繞射光柵對於想像中的波長極短的樂琴射線來說是未免太粗糙了，所以他決定用天然的繞射光柵晶體。如果結晶質的格架構造的理論是正確的，則晶體的質點格架應當是非常細微的，三度空間的，因而應當引起想像中的波長極短的樂琴射線的干涉現象。那麼，這個實驗的目的就在於同時解決兩個問題：(1)闡明樂琴射線的本性；(2)驗明晶體的格架構造的理論是否正確。實驗的結果不僅完全解決了這兩個問題，而且為結晶學、物理及化學的發展開闢了新的途徑。

從這個發現以後，許多偉大的物理學家及結晶學家就開始用樂琴射線來研究晶體的構造，並創造了許多的新穎的研究方法。蘇聯的 Г. Б. 吳里弗和英國的 B. П. 及 B. Л. 布拉格父子各自獨立地推導出了測定晶體格架中面網間距離的公式，所以也就可以測定晶體構造單位的實際大小。

在十九世紀的後半葉，俄羅斯出現了兩個最偉大的結晶學家—E. C. 費多洛夫和 Г. Б. 吳里弗。費多洛夫的工作極為卓越而且是

多方面的；他的事業使他聞名全球。Г. В. 吳里弗在俄羅斯是用鑲琴射線來分析晶體構造的先導者。他又是籍圖解法以計算晶體時所用的吳氏網的發明人（這種網已被各處所採用）。

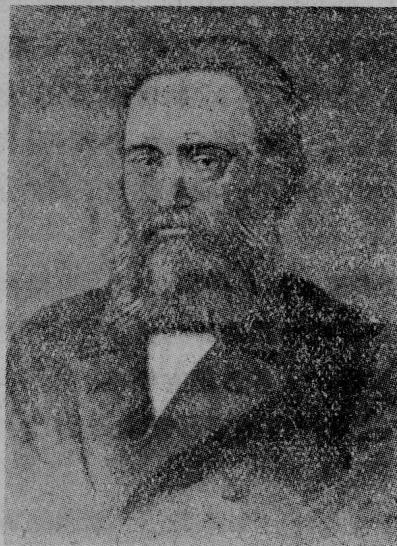


A. B. 加多林

E. C. 費多洛夫(1853—1919年)在幾何結晶學及晶體構造的理論方面有很卓越的成就。他創立了平行六面體的理論，推導出了 230 種空間羣並發現了結晶有限定律。

1889 年 E. C. 費多洛夫發明了雙圈反射測角器，這種測角器在結晶學中具有極重大的意義。

研究晶體光性的費氏旋轉台，



E. C. 費多洛夫



Г. В. 吳里弗

已應用得更爲普遍，現在，各處的每一個岩石實驗室裏，沒有一個不應用費氏旋轉台的。

E. C. 費多洛夫在晚年完成了作爲晶體鑑定表的巨著——“結晶界”。在這部巨大的著作中，E. C. 費多洛夫指出可以根據晶體的外形來確定晶體成分。他發明了新的鑑定晶體的方法——俄國科學引以爲榮的晶體化學分析法。E. C. 費多洛夫建立了列寧格勒結晶學派；由他直接教導出學生有：A. K. 保爾德列夫，B. II. 索可羅夫，B. II. 鄂列爾金，O. M. 安舍勒斯；他們的學生有：B. B. 多尼聖—多布羅聖勒斯基，Г. B. 保基，И. И. 沙弗蘭諾夫斯基，Д. К. 莫查克等等許多人。牛津大學的教授 T. B. 巴克爾曾就學於 E. C. 費多洛夫，並曾在彼得堡住了兩年左右。

Г. B. 吳里弗 (1863—1925 年) 是結晶學家兼物理學家。他對結晶體生長的理論，液態晶體等進行極有價值的研究。他又研究出了計算晶體常數及晶面符號最簡易的方法；在圖解計算方面所應用的赤式網就是他設計的。如有充分經驗，應用這種網使圖解計算的精確度可至十五分。因爲他是最合理而又最方便的，所以在今天吳氏網各處都得到，它不僅應用在結晶學中，也應用於其他科學部門中如天文學，航海術，甚至採礦事業中用它確定地層及礦脈露頭的走向和傾角。

在勞埃發現用繞射射線研究晶體構造的方法不久，Г. B. 吳里弗和英國的 B. Г. 與 B. Л. 布萊格同時地各自獨立地推導出了繞射射線分析晶體構造的基本公式。這個公式現今稱爲吳里弗—布萊格公式。

Г. B. 吳里弗的學生 A. B. 舒布里可夫對結晶學的很多方面都有研究。他在晶體對稱，晶體生長過程，結晶光學及壓電性質等方面，都有很優秀的成績。A. B. 舒布里可夫又是把結晶學應用到工業技術上的第一人，全世界獨一無二的蘇聯科學院結晶學研究所，就是他創立的。

著者也是 Г. B. 吳里弗的學生，主要的研究工作在測角器方面。他設計了新型的反射測角器，蘇聯莫斯科地質勘探學院的工廠首先製出了這種儀器的成品。

Г. Б. 吳里弗的學生 А. Н. 利亞敏娜及 К. В. 瓦西里列夫是在鑲琴射線方面進行工作。

蘇聯最偉大的晶體化學家是 H. B. 貝洛夫，他推導出了許多符合於各種不同配位數的多面體。H. B. 貝洛夫對最緊密配置原理的精湛的研究，大大地幫助了對離子鍵晶體構造的研究，並對國外這方面的一些研究工作提供了很多的修正意見。

所以，最切近的晶體的定義可以這樣說：晶體是具有網狀構造的固體。當這種構造不存在時物體是非晶質的。非晶質物體的性質與結晶質物體有顯著的差別。這種差別，在初度研究的時候似乎比較明顯，也就對於某種物質應屬於那一類的，不會引起任何懷疑的。但是隨着研究方法的發展，發現了有許多被認為非晶質的物體卻全部或部分地是結晶質的。因而兩者間的明顯界限也就消失了。

非晶質按希臘文的定義是“無定形的”，但應用到固態物質上，則這個名詞所指的是外部不具天然的幾何形態而內部無規律構造的物體，固態的非晶質可以看作一種過冷卻液體。非晶質的最主要特徵是（1）沒有確定的熔點，（2）同向性的，即性質不隨方向的改變而改變。

按冷卻曲線的不同狀況可以區別非晶質與結晶質。如果用已熔化的物質來觀察它的冷卻過程，則用記錄下來的時間與溫度，我們可以畫出如圖 6 及圖 7 所示的曲線。該兩圖的直坐標是表示溫度（以度為單位）的，橫坐標是表示時間（以分為單位）的。

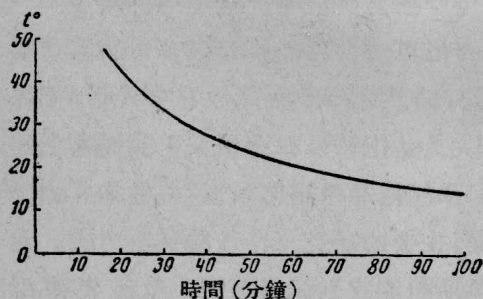


圖 6. 非晶質的冷卻曲線。

非晶質的冷卻曲線是平滑而連續的（參看圖 6），結晶質的冷卻曲線（參看圖 7）却有折屈的地方（*a* 及 *b*），該折屈的部份就是該熔體的結晶開始到終了的時間和溫度。

從圖 7 的曲線可以看出：熔融物質逐漸冷卻到 20 度 (a 點) 時，需要 40 分鐘左右；在這時的這個溫度上開始了結晶作用；又在大約三十分鐘的時間內，曲線平行地沿着橫坐標移動——即溫度不降低而保持着 20°；直到

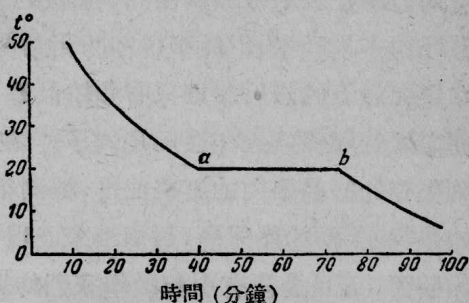


圖 7. 結晶質的冷卻曲線

第 73 分鐘時 (b 點) 結晶作用終了，而開始了均勻的冷卻。雖然物體經常地向它周圍的空間放置熱量，但當結晶的全段時間裏的溫度却保持不變。這種現象發生的原因是什麼呢？這是因為在結晶過程中要放出一部份能量，所放出的這一部份能量恰好補償了失去的熱能，因而溫度能保持不變。

以上所述關於晶體的概念是在十九世紀的後半葉裏建立起來的。在科學發展的早期裏人們只把晶體看成是天然的或是人工製造的具有神奇美麗晶面的而這些晶體大多數又都是礦物，所以該時的結晶學才只佔礦物學的一部分。

結晶學和礦物學的這樣的關係保持了很久的時間；礦物學家研究

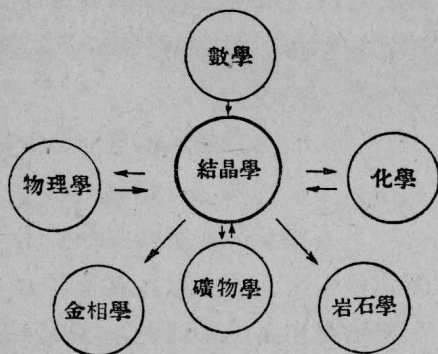


圖 8. 結晶學及其與他種科學間的關係圖。

結晶學是為了礦物學的需要。待至學者闡明了，固體的物理性關係着內部構造，而內部的構造格架又關係着化學成份以後，結晶學才開始為物理學家、化學家及金相學家們所注意了。

圖 8 提供了結晶學和一些科學之間的相互關係。圖內的

單向箭頭是表示依賴關係的，來復的箭頭是表示互相利用的。例如結晶學內多用數學，但數學內卻少用結晶學；又如研究金屬構造的金相學和研究岩石的岩石學則只有賴結晶學；至於結晶學與物理、化學、礦物學之間的關係就是相互利用的了。在結晶學中雖早已使用數學，但直到現在的結晶學內的某些部份，特別很重要的幾部份（例如多面體外形的學說，對稱的幾何學，用圖形來表現平面和主體的學說），還缺乏詳盡的研究，而且還沒有引起數學家們特別的重視，因此，結晶學家們應當從數學方面對於這些部份進行研究。在這種工作上取得了卓越成績的是我國的——也是世界上最偉大的結晶學家，E. C. 費多洛夫教授。