

F. TONANI

MORFOLOGIA FINE DI CRISTALLI DI QUARZO DELLE ALPI APUANE

I - LA FORMA A SELLA DELLE FACCE DEL PRISMA ESAGONALE E DEI ROMBOEDRI

1) Introduzione.

Da tempo mi sto occupando dello studio interferometrico della morfologia fine delle facce dei cristalli.

In questa nota riferisco una parte delle osservazioni sulla forma superficiale dei cristalli di quarzo, e precisamente quelle che riguardano l'interessante aspetto selliforme delle superfici delle facce dei romboedri e del prisma esagonale. Esso sembra un carattere morfologico generale nell'insieme dei cristalli studiati.

Il termine « morfologia fine » è stato adoperato dal Kleber (1) per indicare gli scostamenti delle facce cristalline razionali dalla forma piana ideale, e quindi comprende le facce vicinali, le striature, gli accessorî. In questa nota il termine « morfologia fine » comprenderà tutte le formazioni suddette, ed inoltre ogni forma vicinale indipendentemente dalla sua origine.

Il Padurow (2) chiama « scultura d'accrescimento » tutte quelle formazioni che si originano sulle facce dei cristalli per interruzione dell'accrescimento secondo il meccanismo di Kessel e Stranski. Assumendo questa teoria fra le premesse generali, il Padurow usa questo termine per indicare qualunque scostamento della superficie d'accrescimento, o reale superficie del cristallo, dalla forma piana ideale delle facce.

In questa nota, in cui è stata adottata la terminologia proposta dal Padurow (l. c.), mi discosto peraltro da questa interpretazione del termine « scultura d'accrescimento », che potrebbe, intesa rigidamente, costituire una restrizione *a priori* dei possibili fenomeni di morfologia fine. Conserverò l'uso di quest'ultima espressione (morfologia fine) nel senso più generale già indicato,

e quello del termine « scultura d'accrescimento » nel senso più limitato, datogli dal Padurow. Non si esclude dunque *a priori* che la superficie reale del cristallo si distingua dai piani razionali per aspetti diversi dalla scultura d'accrescimento.

Il presente contributo fa parte di ricerche di cui cercherò di riassumere in breve, e quindi approssimativamente, il filo conduttore.

Le leggi classiche della cristallografia hanno suggerito una spiegazione fisica della loro validità come segue:

1) la forma di equilibrio termodinamico e chimico dei cristalli è determinata dal modo in cui la loro energia libera di superficie dipende dall'orientazione cristallografica della superficie stessa (Curie); 2) la forma dei cristalli a seguito di un processo di accrescimento dipende essenzialmente, in modo analogo, dall'affinità del processo di deposizione di materia *su di un filare*, processo che rappresenta il più favorevole e primo stadio possibile nello sviluppo di una superficie (Kossel, Stranski); 3) l'energia libera di una superficie, e rispettivamente l'affinità dell'accrescimento di un filare su di una faccia, dipendono dalle rispettive orientazioni nel reticolo semplice, e precisamente in modo che le orientazioni più favorevoli sono quelle « razionali ». La teoria di Kossel-Stranski può in particolare giustificare una *legge naturale del predominio delle zone* (Niggli) (3): questa significa, allora, che in natura si realizza generalmente la forma corrispondente al *processo più facile* da iniziare, senza speciale riguardo al raggiungimento dello *stato più stabile*. Le zone in tal caso rivelano i filari cui corrisponde il processo più favorevole, e ciascuna superficie appare allora non per sé, ma in quanto contiene un tale filare, ossia appartiene ad una tale zona.

Riassumendo, dunque, abbiamo ragioni universalmente valide per ritenere che, nel caso di una forma di equilibrio, lo sviluppo delle superfici dipenda dalla loro energia libera per unità di area; ed abbiamo motivi teorici per ritenere, nel caso di forme d'accrescimento, che la frequenza delle facce di una zona, considerate nel loro insieme, dipenda dalla affinità dell'accrescimento per il filare corrispondente. Un risultato indubbiamente degno di nota è quindi il fatto che sul piano fisico l'alternativa fra configurazioni corrispondenti all'equilibrio termodinamico e chimico, e configurazioni corrispondenti allo svolgersi di un processo, fa riscontro

all'alternativa sul piano fenomenologico dell'importanza morfologica delle superfici o delle zone.

Vediamo ora il nesso tra questi fatti ed i problemi della morfologia fine.

Non vi sono, dal punto di vista morfologico, leggi empiriche egualmente ben stabilite per ciò che concerne la morfologia fine se non per quel che riguarda la simmetria, nè è lecito arguire dalle leggi macroscopiche quelle che regolano la morfologia fine stessa.

La morfologia fine dovrebbe anzi offrire, sotto un certo punto di vista, condizioni assai differenti dalla morfologia macroscopica dei cristalli: è assai plausibile che la morfologia fine presenti forme di equilibrio termodinamico e chimico più sovente della morfologia macroscopica. Infatti, al contrario di ciò che avviene per la forma macroscopica, *la forma microscopica superficiale richiede un trasporto di materia relativamente piccolo per raggiungere una configurazione stabile*. Si tratterà in tal caso di *stabilità relativa*, cioè della più stabile fra le configurazioni di un intervallo preso nell'insieme di tutte le configurazioni possibili. Un simile intervallo di configurazioni fisicamente realizzabili dovrà potersi percorrere con continuità; l'immagine di un simile intervallo di configurazioni è offerta dalle configurazioni realizzabili deformando la superficie di un cristallo entro un'area a contorno fisso, in particolare ad esempio nell'area compresa tra gli spigoli che limitano una faccia razionale.

Senza entrare in dettagli di merito riguardo a ciò, si comprende l'esigenza di studiare empiricamente la morfologia fine superficiale, e di cercare nei differenti casi che si presentano se tali fenomeni morfologici seguano anch'essi delle leggi, e quali esse siano.

Il problema di quale sia la natura fisica della « morfologia fine » riguarda però anche i fondamenti della cristallografia classica. Infatti, le leggi fondamentali della cristallografia riguardano facce piane, e sono enunciate in modo che possono riguardare solo facce piane; le facce reali dei cristalli invece non sono idealmente piane, ma, come il Kleber ha messo in luce, l'enunciazione della legge fondamentale della cristallografia mostra che alle superfici reali *si possono sostituire, generalmente senza ambiguità, dei piani ideali ad indici piccoli* (o, come si dice, « razionali ») molto prossimi ad esse. Ciò non risolve ma sposta soltanto il problema posto precedentemente dai cristallografi della validità o meno della legge

di razionalità per le superfici che realmente limitano i cristalli, con il vantaggio però di dividere quel che sappiamo di certo empiricamente, da quello che in sostanza non sappiamo ancora bene cosa sia.

È evidente la situazione dal punto di vista metodologico: introducendo la nozione più generale di faccia cristallina razionale il Kleber ha mostrato che si poteva ben salvare il contenuto strettamente empirico delle leggi cristallografiche macroscopiche, separando il problema della loro validità (risolto su di un certo piano empirico) da quello del loro significato fisico. Quest'ultimo dipende dalla conoscenza della reale natura delle superfici che limitano i cristalli. Si comprende allora bene, come sia privo di significato trattare della morfologia fine *eludendo sul piano empirico il problema della reale natura delle superfici dei cristalli*.

Pur non entrando qui nei dettagli, ricorderò che i dati meno recenti intorno alla morfologia fine sono per lo più inadeguati sotto questo rispetto, perchè ottenuti mediante osservazioni goniometriche o microscopiche: le prime infatti, grossolanamente parlando, non distinguono la mutua disposizione degli elementi di superficie, le seconde nulla dicono sulla loro orientazione cristallografica.

Le osservazioni interferometriche rappresentano un progresso sostanziale in linea di principio, poichè individuano completamente la forma di una superficie; purtroppo sono soggette a limitazioni fisiche che non consentono di ottenere in generale una risposta diretta alla questione principale di cui si è detto: quale sia la reale natura fisica delle superfici dei cristalli. Oltre a ciò si tratta finora solo di osservazioni relative *ad una faccia*, mentre è da ritenere che la loro capacità di dare almeno *informazioni indirette* sulla natura delle superfici sarà molto accresciuta se, come spero, sarà possibile costruire un vero e proprio goniometro interferometrico.

Lo strumento di elezione per l'esame diretto della forma delle superfici alla scala delle celle elementari, secondo risultati recentemente pubblicati, sembra essere il microscopio elettronico; poichè esso non fornisce indicazioni cristallografiche, come del resto quello ottico, è da ritenersi che si debba usarne come di un complemento finale delle ricerche interferometriche, più grossolane ma cristallograficamente qualificate. Poichè mi risulta essere stato usato in

modo relativamente generale soltanto il metodo delle repliche, l'indagine diretta della natura reticolare della porzione di cristallo-adiacente alla superficie appare oggi realizzata solo con i raggi X.

2) Metodo d'osservazione.

Il metodo sperimentale con cui ho eseguito le presenti osservazioni, consiste nell'esaminare al microscopio le frange d'interferenza che si formano in un cuneo d'aria tra due superfici. Questa tecnica presenta alcuni vantaggi di semplicità, accompagnati alla esigenza di un'attrezzatura piuttosto modesta. Essa fu da me proposta (4) come una soluzione pratica al problema di misurare piccoli angoli; in particolare l'uso del microscopio consentiva la misura nel caso di faccette piccole e numerose, nel quale il metodo interferenziale elude le difficoltà legate all'uso del goniometro a riflessione o di disposizioni sperimentali analoghe dal punto di vista ottico. Il metodo sembrava poter offrire dati di natura adeguata per uno studio della morfologia fine.

Avevo allora in mente di fare della *cristallografia fine*, ossia fondamentalmente delle misure di angoli, soltanto sostituendo un metodo adatto in luogo dell'uso del goniometro a riflessione che mi sembrava inadeguato, e non pensavo di fare della topografia superficiale in senso lato. Peraltro, a quanto oggi mi risulta, un interferometro di Fizeau non era stato prima descritto come microinterferometro (1): le prestazioni al microscopio di tale interferometro migliorano in modo sostanziale se la lamina la cui faccia inferiore serve da piano di paragone ha la superficie superiore antiriflettente; infatti allora aumenta grandemente il contrasto delle frange (2).

Ho impiegato per l'osservazione un microscopio Leitz da mineralogia, munito dell'illuminatore per osservazioni con luce riflessa. Un collimatore ed un diaframma permettono di operare con illuminazione parallela quanto occorre per ottenere il voluto

(1) Non ho svolto una particolare ricerca bibliografica riguardo alla storia di questi metodi, al di fuori della letteratura strettamente cristallografica che era, allora, piuttosto scarsa. Mi riferisco perciò a quanto risulta dal libro di M. FRANÇON: *Le microscope interférentiel*, Paris, 1953.

(2) La lamina di paragone con una faccia antiriflettente per il verde mi è stata gentilmente fornita dal prof. G. Giotti delle Officine Galileo di Firenze.

grado di fedeltà nella corrispondenza tra la forma delle frange e la forma della superficie. La sorgente luminosa è una lampada spettrale. Una lampada al sodio serve per le osservazioni quantitative visuali; negli altri casi è più utile una lampada a mercurio, anche perchè il colore delle frange ne caratterizza l'ordine in un certo intervallo, e ciò facilita a volte l'interpretazione. La stessa lampada a mercurio serve per il lavoro fotografico; l'illuminazione si rende allora abbastanza monocromatica mediante filtri. Io ho ottenuto il risultato con un filtro Leitz giallo-verde N° 1, del tipo comune usato per la fotografia, combinato con l'uso di una pellicola strettamente ortocromatica. In queste condizioni resta praticamente efficace soltanto la riga verde a $547 \text{ m}\mu$.

Per ottenere misure particolarmente precise di orientazione di facce piane a partire da interferogrammi, si può raggiungere una notevole esattezza tracciando il profilo fotometrico delle frange rettilinee. Tale scopo, che ha interesse puramente cristallografico, è stato ad esempio ottenuto con un fotometro per righe spettrali (4). La cosa non è praticamente realizzabile se la forma delle frange è più complicata, come nel caso più generale della topografia di superfici. In questo caso perciò, dove si richiedeva una finezza d'osservazione maggiore di quella consentita normalmente dalle frange « a due fasci », ho usato la tecnica consigliata da Krug e Lau (5), (6), che utilizza l'effetto Sabatier.

È stata eseguita anche l'osservazione microscopica diretta della superficie, anzitutto con lo scopo di facilitare l'interpretazione dell'aspetto delle frange. Ciò si realizza ricorrendo alla linea di Becke per riconoscere la parte bassa e la parte alta dei gradini, nello stesso modo in cui si riconosce un mezzo ad indice di rifrazione maggiore accanto ad uno di indice minore. Analogamente si possono distinguere direttamente le parti bruscamente concave da quelle bruscamente convesse (ad esempio gli spigoli rientranti da quelli sporgenti).

Anche l'intensità e l'aspetto della linea di Becke sono utili, poichè permettono di rendersi conto se un gradino è alto più o meno di mezza lunghezza d'onda, eliminando fastidiose ambiguità nel caso di frange monocromatiche. La possibilità di misurare gli spostamenti della linea di Becke dovrebbe consentire una valutazione ancora più spinta.

Oltre al caso in cui è utile per facilitare l'interpretazione di quanto si vede dall'aspetto delle frange, l'osservazione microscopica chiarisce l'aspetto della superficie laddove mancano le informazioni interferometriche: queste infatti si accumulano lungo i bordi delle frange, e perciò in certi casi è accaduto che non fossero adatte a risolvere ambiguità importanti.

L'illuminazione centrale pura e semplice del preparato fornisce un'immagine in cui ai lievissimi rilievi che interessano queste ricerche corrisponde un contrasto eccessivamente basso. Io cionondimeno ne ho fatto uso finchè possibile, poichè in fin dei conti questo tipo di illuminazione offre il minor pericolo di errori d'interpretazione. Per aumentare il contrasto dell'immagine, ho usato di volta in volta artifici differenti, nella misura consentitami dalle circostanze. Così ho osservato correntemente le superfici in quella specie di illuminazione, asimmetrica, che si realizza inclinando la superficie riflettente in modo da schermare l'immagine della sorgente con un bordo netto (nel nostro caso serviva allo scopo lo spigolo del prisma dell'opaco-illuminatore). Questo ha il vantaggio di farsi facilmente.

Una vera e propria illuminazione in campo oscuro si ottiene schermando l'immagine della sorgente, come si può fare con della semplice carta nera. Questo serviva per i dettagli di frequenza più elevata che potevano interessare (l'illuminazione in campo oscuro dei cosiddetti « ultraopaco-illuminatori » fa perdere troppi dettagli di frequenza non molto elevata e che sono importanti).

Se la sorgente viene schermata con un deposito semitrasparente di nerofumo come suggerito dal Gabler (7), si aumenta il contrasto in misura soddisfacente per un gran numero di dettagli di frequenza relativamente bassa.

La sensibilità così ottenuta è sufficiente rispetto al metodo interferometrico adoperato; comunque è quello che ho potuto ottenere, non avendo a disposizione un microscopio a contrasto di fase.

3) I risultati delle osservazioni.

In quasi tutti i cristalli di quarzo da me esaminati è facile mettere in evidenza che le facce, sia di prisma esagonale che di romboedro, presentano due curvature principali di cui l'una corrisponde ad una concavità verso l'esterno, l'altra ad una conves-

sità. Poichè i piani principali di curvatura sono inclinati rispetto all'asse ternario ed a ciascun asse binario, l'effetto d'insieme è di una « torsione » delle superfici, e quindi del poliedro, intorno ad ogni asse cristallografico.

La fig. 1 (Tav. VIII) è un interferogramma (ingrandimento $\times 30$) di una faccia di romboedro inverso, priva di sculture d'accrescimento appariscenti a meno di considerare a priori tale la curvatura a sella. Questa costituisce praticamente l'unico carattere morfologico fine in evidenza. Nella figura 2 è riprodotta la pianta della faccia de-

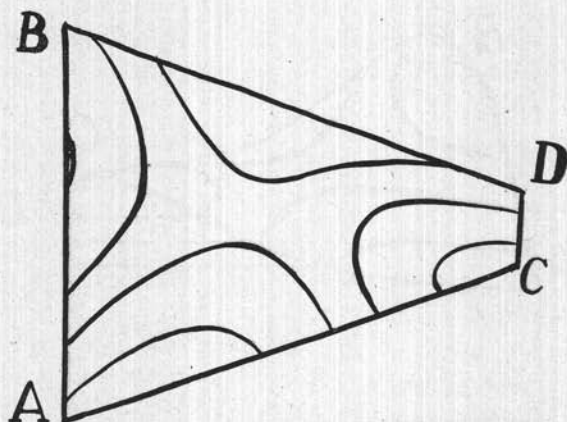


Fig. 2

sunta dall'interferogramma di fig. 1, ed infine la fig. 3 mostra, in una rappresentazione tridimensionale, la forma della superficie che corrisponde alle curve di livello della figura 2. La fisionomia del fenomeno è molto simile a quella delle associazioni elicoidali di cristalli; qui però si tratta di un effetto molto lieve che si sviluppa in un individuo sotto ogni apparenza monocristallino, e che non può venire identificato a priori con gli esempi citati anche dal punto di vista fisico.

Nel nostro caso la torsione della faccia del prisma esagonale è dell'ordine di 10^{-4} fino a 10^{-5} radianti per millimetro, quindi almeno cento volte più piccola di quella misurata dallo Tschermak (8) sulle associazioni elicoidali. Si trova invece descritta nella letteratura una « curvatura strutturale » dei cristalli di quarzo, come pure una rotazione relativa di due subindividui di un monocristallo attorno all'asse ternario (Bond e Andrus) (9), ed osserveremo anzi-

tutto che, contrariamente agli altri più grossolani aspetti della scultura d'accrescimento presente nei cristalli di quarzo, le deformazioni della superficie qui considerate sono di un ordine di grandezza paragonabile a quello delle deformazioni strutturali constatate dal Bond e dall'Andrus (angoli dell'ordine delle diecine di secondi). La curvatura osservata ha dunque diverse interpretazioni possibili, ed *a priori* tutte accettabili.

Può trattarsi di una scultura d'accrescimento, stratificata, oppure di una curvatura della superficie; può, in linea di principio,

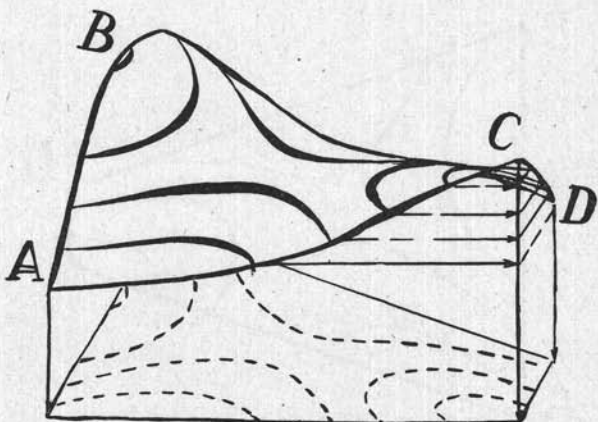


Fig. 3

essere di origine superficiale oppure di origine strutturale. Nel primo caso, essendo già state considerate a parte le sculture d'accrescimento, intenderemo una curvatura della superficie di equilibrio, termodinamico e meccanico. Nel secondo caso la superficie curva sarebbe una vera superficie reticolare come le facce «razionali» di un cristallo ideale; ma nel caso presente si tratterà di un reticolo reale, che contiene difetti strutturali ed eventualmente è orientato in modo diverso da punto a punto: le superfici di questo cristallo reale corrispondentemente potranno contenere «difetti» ed essere curve.

Alternative di questo genere erano state ben formulate come possibili dai cristallografi che si sono occupati di morfologia fine, da Arcangelo Scacchi in poi, ed in maniera così chiara quanto lo permetteva il linguaggio allora disponibile. Esse verranno qui tenute tutte in considerazione, e riferirò ciò che ho potuto osservare

intorno al fenomeno morfologico studiato in quell'ordine che è suggerito non tanto dal desiderio di descriverlo, quanto dal desiderio di comprenderne la natura.

Poichè non avevo attrezzatura per eseguire ricerche roentgenografiche sui difetti strutturali dei monocristalli di quarzo, in mancanza di osservazioni dirette resta sempre aperta l'alternativa di una deformazione strutturale ove non possa venir dimostrato che si tratta di una scultura d'accrescimento; e su questo punto sarà inutile ritornare nel seguito. Ciò posto, i casi possibili si riducono alle possibili combinazioni delle due alternative fondamentali intorno alla natura della superficie, che può risultare da una scultura d'accrescimento edificata a strati, o da una deformazione di tipo più generale.

I mezzi ottici non consentono mai di optare per la seconda alternativa in base all'osservazione diretta, poichè, anche assumendo in ipotesi l'uso delle tecniche interferometriche più progredite, il potere risolutivo « laterale » del microscopio ottico è sempre eccessivamente scadente. La scelta fra queste alternative dovrà, se mai sia possibile, fondarsi su argomenti indiretti; solo nel caso limite di gradini piani, larghi rispetto al potere risolutivo, e di altezza dell'ordine delle dimensioni reticolari, l'argomentazione indiretta si confonde con la semplice osservazione ottica.

Gli argomenti morfologici che indirettamente permettono di rendersi conto della natura fisica della superficie dei cristalli curvi di quarzo si possono considerare separatamente, secondo che si tratta delle proprietà generali di quella che ho indicato grossolanamente come « forma a sella », ovvero dei rapporti intercorrenti tra le linee di curvatura della superficie e la forma e la disposizione delle sculture d'accrescimento già note. E' la seconda categoria di fatti che è maggiormente rilevante per decidere se la superficie curva sia o no dovuta a sculture d'accrescimento.

Tra i caratteri generali, osserveremo anzitutto che l'ordine di grandezza del raggio di curvatura su ciascuna linea di curvatura (curvature principali) non cambia nei diversi casi esaminati; questo risulta semiquantitativamente dalla ispezione visuale delle frange quando siano portate al numero minimo, perchè lo scostamento della superficie dal piano tangente in un punto è sempre dell'ordine di una frangia per millimetro. Si vedano ad esempio gli interferogrammi riportati nelle figg. 1, 4 (Tav. VIII) e 6 (Tav. IX). In questi i

raggi di curvatura calcolati sono dell'ordine del metro; la convessità sembra possa essere più accentuata della corrispondente concavità (interferogramma della figura 6: raggio della curvatura convessa dell'ordine di $\frac{1}{2}$ metro). La figura 4 è l'interferogramma ($\times 30$) di una faccia del prisma esagonale, la figura 6 quello di una faccia di romboedro.

L'esistenza di due curvature principali di segno opposto, i piani di curvatura non essendo in posizione retta rispetto all'asse ternario, è un carattere enantiomorfo, ossia come ho accennato precedentemente, equivale ad una « torsione » del poliedro cristallino. Nel caso di quindici cristalli che consentivano l'accertamento del carattere enantiomorfo, e che presentavano un trapezoedro, è stato riscontrato che per lo più (undici casi) alla presenza del trapezoedro sinistro (destro) corrisponde una torsione antioraria (oraria) della superficie del prisma esagonale attorno all'asse ternario. In alcuni casi è stato possibile verificare la concordanza fra la torsione del romboedro e quella della superficie della faccia corrispondente del prisma (vedi ad es.: figg. 1 e 4). In un caso il carattere della torsione e quello del trapezoedro presente sono opposti senza ambiguità di sorta. In tre casi vi è discordanza fra le torsioni delle differenti facce del prisma esagonale, di cui si è potuto accertare il carattere; ed il confronto con il trapezoedro è allora ambiguo; ovvero i piani di curvatura su una delle facce sono in posizione quasi retta, sicchè non si è potuto determinare il verso della torsione alla semplice ispezione visuale.

La curvatura concavo-convessa a sella è visibile in molti casi, almeno su qualche lembo della superficie del cristallo, ogniquale volta ciò sia compatibile con la scultura d'accrescimento, i confini di geminazione, le dislocazioni, o gradini di altra origine: insomma, con gli altri, più accentuati aspetti della morfologia fine. Si ha da ciò l'impressione che la curvatura in questione sia una proprietà geometrica globale del poliedro cristallino, mascherata ma non soppressa per la presenza di differenti alterazioni della superficie: di entità pressapoco costante, essa rimane anzi tanto più in evidenza quanto più il poliedro cristallino si avvicina per il resto alla sua forma ideale. Mentre l'interferogramma di figura 1 rappresenta un esempio estremo di questo fatto, ho potuto osservare un caso strettamente analogo, in cui « tavolette » dalla caratteristica pianta triangolare alte 100 millimicron o meno (altezza sti-

mata visualmente dalle frange colorate della luce del mercurio) sporgevano qua e là dalla superficie curva: la sella, che anche in questo caso presentava nel suo insieme dislivelli di qualche centinaio di millimicron, non mostrava altre irregolarità apprezzabili. Le tavolette erano in ogni punto parallele alla superficie sottostante, cioè erano orientate come se vi fossero state appoggiate sopra, e quindi ne seguivano la curvatura. Del resto, sebbene meno regolare, la superficie il cui interferogramma è mostrato nella figura 6 offre un esempio analogo di questa additività delle altre sculture d'accrescimento visibili rispetto a quella eventualmente costituita dalla curvatura a sella. E con questo siamo del tutto nel secondo tipo di argomentazioni, cioè quello fondato sui rapporti tra forma a sella e sculture d'accrescimento osservabili con essa, e comunque note.

Per ben comprendere la natura di questi rapporti conviene anzitutto vedere a quali tipi di scultura d'accrescimento potrebbe, se mai, essere ascritta una superficie concavo-convessa.

E' opportuno richiamare l'attenzione sul fatto che il carattere concavo-convesso di una superficie a sella come quella qui descritta, *si riferisce alle due curvature principali in ciascun punto di un intervallo sulla superficie stessa*. Si tratta dunque di una proprietà differenziale della superficie nell'intervallo considerato, e deve venir distinta dal carattere « concavo-convesso » ricordato dal Seager (10) e dal Padurow (2): nell'espone sistematicamente le possibili forme della scultura d'accrescimento, questi Autori descrivono, come possibili forme « concavo-convesse », delle superfici *in parte concave ed in parte convesse*. Queste ultime forme sono dunque da distinguersi, sotto il punto di vista geometrico, dalla forma descritta nel presente lavoro.

Il Padurow assume a base della sua classificazione delle sculture d'accrescimento le proprietà del fronte (d'accrescimento) degli strati (schichtlinie); le forme con linea o fronte di strato regolare (vicinali) sono suddivise in due gruppi, secondo che il fronte degli strati è diritto o curvo. Il fronte curvo degli strati può essere convesso o concavo. Il profilo laterale delle superfici apparenti formate dagli strati (seitenlinie) può essere, se curvo, convesso, concavo, o complesso (concavo-convesso nel senso di « concavo in un punto e convesso in un altro »). Da questo criterio di classificazione nasce subito la possibilità di considerare sculture con pro-

filo laterale concavo (convesso) e fronte degli strati convesso (concavo); la superficie apparente di queste sculture allora è del tipo selliforme qui esaminato.

In un solo caso ho potuto riscontrare una curvatura a sella su di una faccetta (apparente) di una piramide vicinale (cioè I tipo del Padurow, caso b): linea di strato curva, nella fattispecie convessa, tutti gli spigoli della piramide conservati). Questo è l'unico esempio da me trovato dove una curvatura a sella è dovuta a una scultura d'accrescimento. Si tratta di una piramide vicinale che nel suo insieme occupa tutta la faccia del romboedro, del tipo segnalato dal Kalb (11) per il romboedro positivo dei cristalli destri, policentrica; il profilo laterale nella parte più elevata è più ripido; nella parte inferiore il profilo è meno ripido e tende ad appiattirsi, cosicchè nell'insieme è concavo; laddove il fronte degli strati è convesso la superficie laterale apparente della piramide è selliforme. Gli strati hanno spessore nell'ordine di 30 millimicron, ma la parte superiore e quella propriamente concavo-convessa sono ricoperte da piccole escrescenze probabilmente coniche di altezza per lo più dello stesso ordine, in qualche caso fino doppia o tripla. Tali escrescenze sostituiscono, in codeste porzioni di superficie, la forma stratificata.

Ho descritto minutamente questo caso perchè mi sembra da considerarsi relativamente raro, legato com'è al concorso di più condizioni fra loro indipendenti come la forma del profilo laterale e quella del fronte degli strati. Sottolineo con questo la distinzione di questa dalla doppia curvatura che si riscontra generalmente nei cristalli di quarzo da me esaminati. Infatti la doppia curvatura che si origina sulla faccia apparente di una piramide vicinale del tipo I quando il profilo laterale è concavo mentre il fronte degli strati è convesso, in primo luogo ha carattere enantiomorfo opposto rispetto alla doppia curvatura del tipo che si riscontra sempre sulla superficie in assenza di accessori visibili. Nel caso descritto ho detto come il carattere enantiomorfo del cristallo, e quindi della torsione secondo la regola accertata, era desunto dalla forma esteriore della piramide, ma la cosa è maggiormente evidente dall'interferogramma di figura 6. Qui si ha una situazione analoga, con il vantaggio che il confronto tra i due tipi di curvatura è diretto. La piramide vicinale chiaramente riconoscibile al centro corrisponde al tipo riscontrato dal Kalb sul romboedro negativo

dei cristalli destri. Una delle facce presenta il fronte degli strati convesso, e se il profilo laterale fosse concavo come accadeva nel caso precedente si tratterebbe di una faccia selliforme, però con torsione sinistra. È facile verificare che la torsione della superficie evidentemente selliforme su cui si è sviluppata la piramide è invece oraria come è regola per i cristalli destri.

Avevo preso in considerazione le superfici a sella geometricamente possibili nella scultura d'accrescimento del primo tipo del Padurow, che caratterizza generalmente le facce dei romboedri del quarzo: ed anzi, una superficie a sella di questa origine ha potuto venire osservata. Le proprietà di questo tipo di superficie a sella, che è una superficie apparente sviluppata su di un accessorio, non soddisfano alle condizioni che si verificano invece nel caso della doppia curvatura fin qui descritta; i due tipi di superficie a doppia curvatura possibili risultano chiaramente contrapposti nel caso della figura 6. E' dunque escluso che la doppia curvatura delle superfici dei cristalli di quarzo, di cui parlo, sia il risultato secondario di una scultura d'accrescimento del tipo I sulle facce del romboedro. La tipica forma a sella, come del resto risulta dalle illustrazioni precedenti ed ho ripetutamente affermato, si presenta indipendentemente dalla simultanea esistenza di piramidi vicinali.

In quanto si trattasse di una scultura d'accrescimento dovrebbe mai ascriversi, dunque, ad un altro dei possibili tipi. Mi sembra che si possa escludere anzitutto nel modo più evidente che si tratti di una scultura del tipo IV del Padurow (caso ideale: il monocristallo a facce piane) nonostante la somiglianza che potrebbe venir suggerita dall'osservazione che la curvatura sembra essere una proprietà d'insieme del poliedro cristallino. In mancanza di una definizione geometrica precisa sulla base degli elementi fondamentali della scultura, il fronte degli strati ed il profilo laterale, il IV tipo mi sembra doversi ritenere definito dall'unico esempio citato dal Padurow (2), che è quello dei cristalli di diamante a facce convesse, e dalla sua interpretazione offerta dal Bunn e dall'Emmett (12) in termini di scultura d'accrescimento stratificata. Dovrebbe trattarsi di una scultura edificata da strati paralleli alla superficie razionale corrispondente alle facce curve. Ora è evidente che sotto queste condizioni non può mai originarsi una superficie a curvatura concavo-convessa in ogni punto.

E' anzi manifesto che una superficie cristallina può presentare

la forma concavo-convessa per effetto della scultura stratificata di accrescimento soltanto se in ogni suo punto ha orientazione diversa da quella della superficie secondo la quale si sviluppano gli strati d'accrescimento. Cioè, una superficie concavo-convessa può essere costituita da una scultura d'accrescimento anzitutto solo nel caso che si tratti di una superficie apparente.

Una discussione della possibilità che la forma a sella sia dovuta ad una scultura d'accrescimento può dunque limitarsi ai tipi II e III. La distinzione fra questi due tipi non mi sembra essenziale ai fini della presente questione, cosicchè nel seguito si dovrà tenerne conto al più come di una sottigliezza terminologica, che servirebbe a rilevare una certa differenza tra il caso delle facce del romboedro e quello delle facce del prisma: infatti sarebbe da ascrivere al III tipo se mai la scultura del prisma.

La scultura del II e III tipo della classificazione del Padurow può in sostanza essere considerata come un caso limite del I tipo: mentre qui l'origine degli strati si trova ben entro i limiti della faccia «razionale», nel secondo e terzo tipo dobbiamo immaginare che gli strati si originino da un bordo, ed eventualmente da un punto del bordo, che limita la faccia principale. In questo caso si comprende appunto che la questione non differirà sostanzialmente da quella già esaminata per una singola faccia di una piramide vicinale, per ciò che riguarda le relazioni fra la forma della superficie, ed i caratteri della scultura d'accrescimento (forma del fronte degli strati, è profilo laterale). L'unica differenza evidente sta nel fatto che questa volta la *giacitura media* della faccia razionale, nel senso generale di Kleber, non coincide ma è vicinale rispetto alla giacitura della superficie principale (la vera superficie d'accrescimento, chimicamente passiva, che costituisce la faccia superiore degli strati d'accrescimento).

Nel caso delle facce di prisma, sia la forma del contorno degli strati osservata dal Praagh e dal Willis (13), sia una forma diversa da me osservata su uno dei cristalli esaminati, danno conto da un lato della possibilità di formazione di facce apparenti, vicinali o non, del trapezoedro di verso concorde con quello del cristallo, dall'altro lato danno conto della possibilità di formazione di una superficie a doppia curvatura come quella riscontrata, sempre di verso concorde con quello del cristallo. Ciò è schematicamente rappresentato nella figura 8: qui è disegnata una faccia di prisma

esagonale del quarzo destro, costituita da una scultura del II tipo a gradini diritti, con profilo concavo (tratteggiato sulla destra dello stereogramma); sulla sinistra, per semplicità, ho costruita una faccetta di trapezoedro vicinale per mostrare l'origine di uno spigolo convesso, data la forma del fronte degli strati d'accrescimento: si comprende che se viene immaginata una disposizione meno artificialmente regolare dei due tipi di linea di strato (indicati con *(a)* e con *(b)* nella figura) in luogo di uno spigolo ottuso si può originare un secondo profilo convesso.

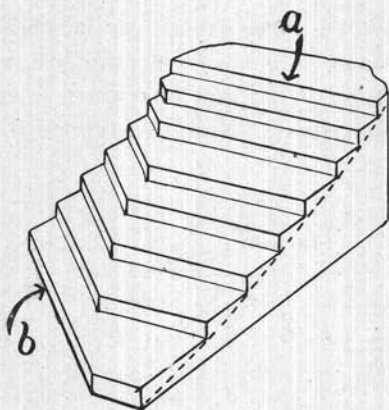


Fig. 8

La fig. 9 (Tav. IX) è una microfotografia a luce riflessa eseguita con illuminazione centrale che mostra una scultura del II tipo, a linee di strato diritte, prevalentemente del tipo *(a)* di fig. 8; si notano fronti di strato del tipo *b* di figura 8, e tavolette triangolari uno dei cui lati può immaginarsi che funga nella scultura di insieme da fronte del tipo *b* (cfr. figg. 8 e 10). In figura 10 per confronto sono riportati sia gli strati con contorno a losanga segnalati dal v. Praagh e dal Willis (13), sia le suddette tavolette triangolari; naturalmente tutte le forme son state ridisegnate nella loro vera forma a partire da microfotografie, del Seager (10) e mie.

La fotografia di figura 9 dà un'idea del tipo di scultura considerato, e specialmente nella sua parte inferiore a carattere vicinaloide è evidente il modo secondo cui è edificata una faccia del prisma esagonale, ed appaiono sculture riferibili a facce di trapezoedro vicinale.

La forma di questa faccia tuttavia, a causa proprio della scultura d'accrescimento, che è relativamente assai grossolana, non mostra una semplice forma a sella paragonabile a quella delle facce di figura 1, 4 e 6. Nella realtà ognuno degli straterelli, che appaiono omogenei e piani nella figura 9, appare evidentemente curvato se esaminato interferometricamente, ed il tipo della curvatura è sostanzialmente lo stesso che ho descritto fin qui come curvatura a sella o torsione.

Ricapitolando ciò che ho fin qui detto sui rapporti tra sculture d'acrescimento e doppia curvatura delle facce, si potrebbe affermare che gli elementi caratteristici della scultura di II tipo del prisma esagonale, linea di strato e profilo laterale, sono *geometricamente compatibili* con la doppia curvatura a sella osservata generalmente sul prisma stesso. Non vi sono però indicazioni dirette

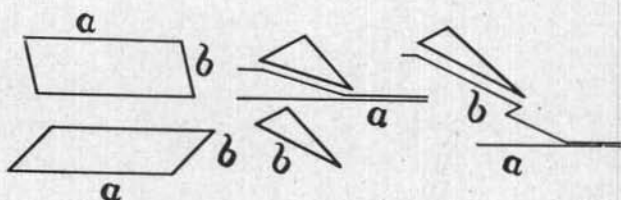


Fig. 10

che questa possibilità puramente geometrica venga realizzata nei casi esaminati da me: si possono osservare superfici di strato apparentemente reali e curvate, come quelle di figura 4 e 5, che non mostrano evidenti i gradini del tipo *b* di fig. 8 sebbene vi appaiano i gradini di tipo *a*, responsabili forse almeno in parte della curvatura concava.

Se passiamo ora a considerare la scultura del romboedro, maggiormente evidente nella fig. 6, si riconosce il fatto già ricordato che gli strati sembrano essi stessi seguire piuttosto che determinare la curvatura della faccia, purchè si intenda parlare della curvatura concavo-convessa che appare dalla forma delle frange di interferenza al numero minimo in figg. 1 e 6; curvatura caratterizzata dalla sua persistenza nei cristalli studiati, dalla correlazione con il carattere enantiomorfo, dalla mancanza di stratificazione evidente. Ben s'intende, ma non è male sottolinearlo ancora una volta, che questa curvatura delle superficie non deve essere iden-

tificata con quella delle facce vicinali apparenti degli accessori stratificati (scultura di I tipo), come ho recentemente mostrato.

Per inciso ricorderò che la curvatura delle facce degli accessori del I tipo era stata segnalata e misurata, per il caso delle piramidi vicinali del romboedro del quarzo, già dal Tolansky (14). Questa curvatura rientra nella classificazione proposta dal Seager, ed è inclusa in quella del Padnrow anche per il caso di una doppia curvatura. La piramide vicinale che appare nelle figure 6 e 7 (rispettivamente interferogramma e fotografia) mostra appunto una faccia curva di questo tipo, e più sopra ho descritto in dettaglio una simile piramide in cui la curvatura era selliforme.

Al contrario, la doppia curvatura che forma oggetto di questa nota si presenta evidente proprio dove non vi sono sculture del I tipo, e dove queste sono presenti è possibile rendersi conto in qualche caso dell'indipendenza dei due fenomeni (come si vede rispettivamente dalla figura 1, e dalla figura 6 e 7). È anche possibile rendersi conto in qualche caso non solo dell'indipendenza tra curvatura e sculture del tipo I, ma anche tra curvatura ed ogni scultura realizzabile con gli strati d'accrescimento visibili. E' geometricamente intuitivo infatti che data una superficie a sella, essa non può mai venir costruita mediante strati paralleli ad un piano tangente alla superficie in un qualunque punto (bordi esclusi): questo è lo stesso argomento che ha servito ad escludere per le facce selliformi il carattere di scultura del tipo IV. Gli interferogrammi dovrebbero essere caratterizzati dal fatto che se in una porzione dell'interferogramma gli strati risultano paralleli alla superficie di paragone essi lo sono in tutte le rimanenti parti allo stesso modo. Invece l'osservazione mostra che le « tavolette » (la formazione che meglio rivela l'orientazione degli strati d'accrescimento) seguono l'orientazione della superficie a sella. Ciò appare nel caso del cristallo della figura 6. Vi appare un confine di geminazione evidentissimo, che divide la faccia in due porzioni diversamente orientate anche quanto agli strati d'accrescimento; il confine è segnato da un gradino dal quale gli strati d'accrescimento partono verso il lato più basso, che per un tratto è rivolto verso la parte a frange fitte, mentre per un altro è rivolto verso la parte a frange larghe di cui ci occupiamo ora. Questi strati d'accrescimento di origine un po' particolare, come le formazioni a tavoletta sulle restanti parti della faccia, hanno l'orientazione che a loro spetta

conforme la curvatura. Si noti come il fatto che gli strati appaiono paralleli alla superficie in una posizione non marginale può escludere che la forma a sella con le sue due curvaturei di segno opposto sia riducibile ad una mera scultura d'accrescimento.

La figura 7, serve a mostrare ulteriormente che le irregolarità delle frange visibili nella figura 6 non risalgono ad una regolare scultura di II tipo eventualmente presente, ma all'esistenza del medesimo tipo di forme a tavoletta sparse qua e là.

Si conclude dunque con la prova certa che il tipo di scultura d'accrescimento visibile in generale sulle facce del romboedro sotto forma di stratificazioni a ritmo multimolecolare (qualche centinaio di celle elementari) non può giustificare in nessun modo la forma a sella che le facce dei cristalli studiati presentano generalmente.

La generalità di questo risultato dipende dalla generalità con cui si può ridurre la scultura d'accrescimento del romboedro a quella descritta fin qui. Per quello che mi risulta il romboedro dei cristalli di quarzo appare essere costituito sempre da strati del tipo mostrato in figura 6, 7, salvo varianti inessenziali. Le tavolette e le corrispondenti piramidi vicinali evidenti nelle citate figure, più o meno diversamente disposte, sono ben note; anche sculture del tipo I *d*) hanno mostrato di essere in relazione ad esse, infatti ho potuto osservare in un caso che i cosiddetti «coni» si elevavano da un rilievo con la caratteristica pianta triangolare delle tavolette e delle piramidi vicinali, alterate soltanto in questo, che il profilo laterale era estremamente appiattito e liscio. Non credo che le alterazioni nell'orientazione del fronte degli strati siano essenziali, purchè gli strati medesimi abbiano sempre orientazione prossima a quella del romboedro. Per esempio in figura 6 e 7 il fronte degli strati che si originano dal confine di geminazione forma con questo un angolo molto piccolo, e solo allontanandosene sembra assumere la sua normale orientazione.

Le osservazioni sperimentali di cui ho fin qui riferito, e che hanno condotto al risultato ora visto con sicurezza per il caso delle facce di romboedro, (che la curvatura a sella non può essere dovuta soltanto a sculture d'accrescimento), hanno avuto per oggetto una indagine sistematica degli aspetti morfologici fini dei cristalli di quarzo, sia per ciò che riguarda il loro carattere cristallografico che per la forma d'insieme a sella assunta dalla superficie, nella speranza di ottenere argomentazioni indirette sulla reale natura

delle superfici dei cristalli. Questa indagine non è stata fatta avendo di mira l'osservazione diretta delle proprietà geometriche della superficie alla scala reticolare, perchè ciò non è possibile *in generale* a causa delle limitazioni ottiche. Nel considerare la generalizzazione dei risultati di questo tipo di osservazioni dirette deve esser tenuto presente che tali limitazioni vengono meno *in casi di natura particolare*.

Come è stato detto, la curvatura a sella si osserva tanto meglio quanto più i cristalli sono regolari. Si può osservarla anche su superfici relativamente tormentate essenzialmente quando si realizzano due condizioni. Il primo caso è che la morfologia fine presenti caratteri regolari: per esempio sulle facce del prisma esagonale dei cristalli di quarzo, anche quando le irregolarità dovute ai confini di geminazione e la striatura stessa sono tali che non si riesce a mettere in evidenza la forma iperbolica delle frange, la torsione risulta con sicurezza dalle misure degli angoli fra le « faccette » della striatura. Il secondo caso è che sulla superficie appaiono dei lembi « piani » su cui la curvatura è rilevabile, sebbene non lo sia per l'insieme della superficie; questo è il caso generalmente utilizzato per le osservazioni qui descritte.

L'argomentazione indiretta sviluppata fin qui era basata sulla incompatibilità geometrica tra le proprietà delle sculture generalmente osservate, e le proprietà della doppia curvatura a sella: la validità di tale argomentazione è così generale quanto lo è il tipo di scultura assunto nel ragionamento. Sebbene la scultura d'accrescimento del romboedro abbia sempre questo carattere, per quanto mi risulta, l'argomentazione intorno alla reale natura delle superfici di cui si discute è rafforzato nel modo seguente: si mostra in un esempio preso a caso fra i cristalli con superficie tormentata che la natura di un lembo di superficie compreso fra sculture del tipo normale, non è quella di un elemento di superficie di accrescimento ma di un elemento della superficie fondamentale. Molte volte in tali casi le osservazioni, sia nel caso di facce del romboedro che del prisma, son state compiute su porzioni della superficie comprese fra sculture d'accrescimento come, rispettivamente, piramidi o striature. Ho voluto verificare almeno in un caso se un lembo di superficie relativamente piano, (compreso fra due piramidi vicinali, ed appartenente ad una faccia di romboedro piuttosto tormentata anche da gruppi complicati di gradini che credo si deb-

bano riferire a dislocazioni) possedeva la natura di una superficie fondamentale o non piuttosto di una scultura stratificata.

La figura 11 mostra un interferogramma su cui son state tracciate le linee isodense con il metodo dell'effetto Sabatier in un solo stadio a contrasto elevato. La parte che interessa è costituita dalla zona triangolare segnata dalle frecce: si tratta di una insenatura a fondo apparentemente piano (talmente piccola che lo scostamento dalla forma piana dovuto alla curvatura è, se mai, irrisorio), compresa fra due piramidi vicinali del tipo classico. Le facce di queste piramidi sono fittamente striate per la presenza di strati che risultano molto sottili (dai cinque ai dieci millimicron, cioè dell'ordine delle irregolarità della superficie di paragone, ma visibili ciononostante per il loro aspetto sul « fondo » costituito dalle imperfezioni disordinate). Tale striatura non sembra del tutto regolare, perchè in alcuni punti è mascherata sia in quanto i gradini assumono carattere vicinale sia in quanto appaiono delle asperità irregolari. Queste ultime erano già state riscontrate sulla piramide vicinale con una faccia selliforme precedentemente descritta, mentre il carattere vicinale dei gradini in alcune zone può essere apparente, ed il « ritmo » di circa 10 millimicron essere in realtà risolto in una stratificazione più sottile, dell'ordine di uno o due millimicron, e più fitta.

La depressione a fondo piano risultante dalla presenza di piramidi vicinali adiacenti appare, come è evidente dalla figura 11, nè realmente piana, nè con una scultura stratificata veramente simile a quella delle piramidi vicinali. Essa sembra solcata da una striatura, la cui descrizione può fondarsi soltanto sulle informazioni fornite dalle frange, che sono limitate ad una porzione piccola della superficie totale. Dalle tre isodense presenti nel campo si può desumere che si tratti di una striatura, pur non potendo decidere se si tratta di strie a bordi paralleli. Ciò che si può riconoscere qui è il profilo della striatura nelle sezioni corrispondenti alle isodense.

In simili sezioni possiamo riconoscere un profilo a solchi e rilievi presumibilmente non continui lungo tutta la porzione di superficie considerata, di cui i più accentuati e nettamente riconoscibili sono dell'ordine della diecina di $m\mu$; in alcuni di simili solchi di figura 11 è nettamente riconoscibile un profilo rettangolare o trapezoidale. Ciò va inteso con qualche avvertenza: un solco il quale appaia nella figura come un rilievo *quadrato* nella isodensa,

possiede in realtà un profilo rettangolare la cui profondità è soltanto qualche decimillesimo della larghezza. Corrispondentemente può apparire « rettangolare » un solco in realtà trapezoidale con le pareti inclinate anche solo di mezzo grado o meno.

Con questa avvertenza ci si guarderà bene dal fare illazioni sul carattere non vicinale delle pareti dei solchi o dei gradini, ma si potrà ancora rilevare che le strie « rettangolari » ora considerate hanno la loro faccia superiore assai larga rispetto all'altezza: siamo molto vicini al caso limite di cui si era parlato in precedenza, in cui la semplice osservazione della superficie consente di rendersi conto della sua natura. Il fondo della depressione in parola è cioè per grandissima parte costituito da una superficie piana che può ritenersi essere la superficie fondamentale: infatti alcune delle differenze di livello fra plaghe contigue corrispondono ad un profilo rettangolare delle isodense di fig. 11, ancora ben rilevabile, dell'ordine di un quarto di millimetro sulla figura; tali dislivelli sono perciò dell'ordine delle dimensioni di poche celle elementari.

Può apparire strana la visibilità di rilievi così piccoli, rispetto alle irregolarità della superficie di paragone precedentemente denunciate dell'ordine di dieci $m\mu$. Effettivamente queste irregolarità, che sono relativamente larghe e rotondeggianti, risultano molto più evidenti negli interferogrammi ottenuti con stadi a basso contrasto; in questo caso la striscia al confine tra le frange che contiene dettagli visibili ha dimensioni tali da comprendere completamente e rendere evidenti i particolari, di frequenza relativamente bassa, corrispondenti a questi difetti di lavorazione. Procedendo in condizioni di contrasto più elevato e minor latitudine di posa, eventualmente in un solo stadio di assottigliamento delle frange, le strisce contenenti informazioni diventano molto più strette; su di esse le irregolarità di lavorazione di bassa frequenza divengono inflessioni relativamente dolci che non coprono l'intero dettaglio: in queste condizioni probabilmente tali irregolarità sono meno capaci di mascherare i dettagli di frequenza più elevata, che inducono brusche discontinuità nelle isodense, specialmente allorchè queste costituiscono figure di aspetto relativamente regolare.

4) Analogie fra morfologia a sella e associazioni elicoidali.

Le associazioni elicoidali di cristalli di quarzo sono note, e riportate su molti testi di mineralogia generale; ne ho in principio richiamata la sostanziale somiglianza di proprietà, e le importanti

differenze, con i cristalli di quarzo del marmo di Carrara su cui ho osservato la forma a sella delle superfici. Si tratta di associazioni di cristalli di quarzo tutti destri, ovvero tutti sinistri, in cui ciascun individuo succede all'altro in una certa direzione non già parallelo, ma ruotato di un piccolo angolo sempre nello stesso verso caratteristico a seconda del verso destro o sinistro dei cristalli.

Per i cristalli del marmo di Carrara l'Aloisi (15) descrive soltanto una tale associazione, del tipo «semichiuso» dello Tschermak; questi, nel suo citato lavoro (8), descrive un'associazione chiusa proveniente da questa medesima località.

Queste associazioni di cristalli presentano superfici selliformi, e non vi è dubbio d'altronde che i reticoli dei diversi individui vi siano diversamente orientati; precisamente si tratta per lo più di una rotazione attorno ad un asse binario, ovvero attorno all'asse ternario. Gli individui si succedono lungo un tale asse che è anche asse di sviluppo dell'associazione secondo una legge unica, sebbene vi siano associazioni regolate da leggi diverse.

Dalle associazioni aperte, costituite da individui isolati, si passa a quelle semichiusure ed a quelle chiuse, che sono le più vicine al tipo del monocristallo: la torsione è però sempre molto più intensa che nei casi da me descritti, i confini fra individui sono macroscopici.

Se l'origine della curvatura delle facce a sella dei cristalli di quarzo è puramente strutturale, cioè dipende soltanto da differenze d'orientazione nel reticolo, vi è una sostanziale analogia con queste associazioni. Questa analogia esteriore allo stato attuale delle conoscenze è un'indizio a favore dell'ipotesi di un'origine strutturale della curvatura osservata; se questa potesse venir dimostrata con certezza, allora resterebbe da spiegare mediante l'osservazione la relazione che corre esattamente tra i due fenomeni.

Stando così le cose, a questo punto è prematura una discussione delle leggi di geminazione proposte dallo Tschermak per interpretare le associazioni elicoidali.

5) Relazioni tra forme delle facce e difetti strutturali di un cristallo quasi-perfetto.

Ciò che segue non vuol dimostrare che la curvatura a sella delle facce dei cristalli di quarzo è dovuta soltanto a difetti strutturali; come ho ripetutamente accennato questa alternativa non può venir decisa sulla base di queste osservazioni puramente mor-

fologiche. Il ragionamento ha un altro significato: nell'ipotesi che la morfologia fine osservata sia dovuta a deformazioni di un cristallo quasi-perfetto, quali probabilmente possono originarsi durante l'accrescimento, si intende mostrare quali esse possono essere, compatibilmente con i dati morfologici.

Un cristallo quasi-perfetto è un cristallo nel quale il reticolo è ideale (eventualmente deformato ma senza difetti), salvo un insieme di misura nulla. In altri termini le zone difettose hanno misura infinitesima almeno in una direzione, sono punti, linee o superfici nel volume del cristallo.

Un cristallo quasi-perfetto può risultare costituito da subindividui diversamente orientati (16); infatti essi possono essere separati da superfici nel modo sopra specificato. Allora queste superfici contengono dislocazioni, anzi si potrebbe dire che sono costituite da linee di dislocazione. Questo permette di fissare le idee anche quanto all'energia associata al disorientamento dei subindividui; Read e Shockley mostrano una dipendenza semplice di questa energia dall'angolo ϑ di disorientamento (17).

Una distribuzione di subindividui lungo un asse, separati da superfici normali all'asse, e ruotati intorno a questo l'uno rispetto all'altro di un piccolo angolo ϑ sempre nello stesso verso procedendo lungo l'asse di rotazione, produce un monocristallo quasi-perfetto con facce selliformi strutturalmente difettose: ogni piano fra subindividui contiene un reticolato di linee di dislocazione di Burgers, le quali emergono sulle superfici selliformi. Del resto l'elemento di superficie intorno al punto di emergenza di una dislocazione di Burgers è selliforme, si può dunque costruire una superficie selliforme giustapponendo opportunamente tali elementi di superficie.

Una opportuna distribuzione di distorsioni è dunque sufficiente a produrre superfici selliformi. Del resto questo è intuitivo, ed in realtà le associazioni elicoidali ne avevano già offerto un esempio.

Una superficie selliforme come quella così costruita è ideale, nel senso che la sua forma dipende solo dalla distorsione. Un circuito di Burgers al perimetro della faccia risulta difettoso per una traslazione che misura la somma dei difetti che hanno prodotto la distorsione; se il contributo della scultura d'accrescimento è trascurabile sul lembo di superficie contornato dal circuito di Burgers, la topografia superficiale della faccia offre in questo caso la misura

del difetto strutturale. Per fissare le idee, l'ordine di grandezza delle torsioni osservate corrisponde a dislivelli di una frangia su aree di qualche mm^2 ; ciò significa l'ordine di 100 traslazioni reticolari per mm^2 . Attribuendo ad ogni dislocazione lo scorrimento di una traslazione fondamentale, i punti di emergenza delle dislocazioni corrispondenti alla torsione di una faccia formano su questa un reticolato di punti distanti in media l'uno dall'altro 0,1 mm.

Inversamente sia data una superficie cristallina con le due curvature principali di segno opposto. Se le sculture d'accrescimento non hanno parte essenziale in questa sua forma, su di essa dovranno terminare limiti fra subindividui disorientati, il cui asse di mutua rotazione non giacerà nel limite stesso; perciò i difetti reticolari localizzati al limite fra tali subindividui saranno almeno in parte del tipo sopra descritto (un reticolato di linee di dislocazione). Così, mentre si possono immaginare distribuzioni di dislocazioni all'interno di un cristallo capaci di dare facce convesse o concave « perfette », una faccia selliforme non può mai essere ottenuta « perfetta » per questa via: vi emergeranno sempre dislocazioni ed un circuito di Burgers al perimetro apparirà difettoso. Si noti che in questo caso più generale la topografia superficiale non offre senz'altro una misura del difetto.

Per rendersi conto in un caso particolare, come questo dei cristalli di quarzo, della distribuzione di difetti in rapporto alla deformazione delle superfici, occorre tener conto degli scorrimenti possibili e della distribuzione dei limiti fra subindividui.

In mancanza di informazioni sperimentali a questo proposito, basterà osservare che, qualunque sia la distribuzione dei limiti fra subindividui, la giustapposizione di subindividui ruotati intorno ad un qualunque asse binario (ed anche all'asse ternario, purchè in verso opposto) conduce sempre alla forma a sella per le facce dei romboedri e del prisma. Per un cristallo destro, o sinistro, noi sappiamo quale debba essere questa rotazione; stabilita questa, la conoscenza dei limiti fra subindividui permetterebbe di farsi un'idea delle possibili corrispondenti distribuzioni di difetti.

Ho fin qui riportate alcune relazioni geometriche fra le deformazioni superficiali sperimentalmente osservate, ed i possibili difetti strutturali che sarebbero capaci di produrle in un cristallo quasi-perfetto. Questi difetti strutturali possono originarsi durante l'accrescimento di un cristallo, ed in particolare, per esempio, possono venir stabilizzati in una determinata regione poichè sono ca-



Fig. 1

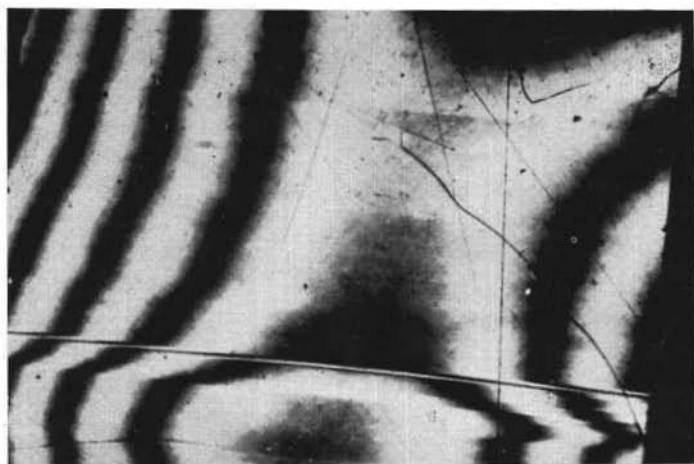


Fig. 4

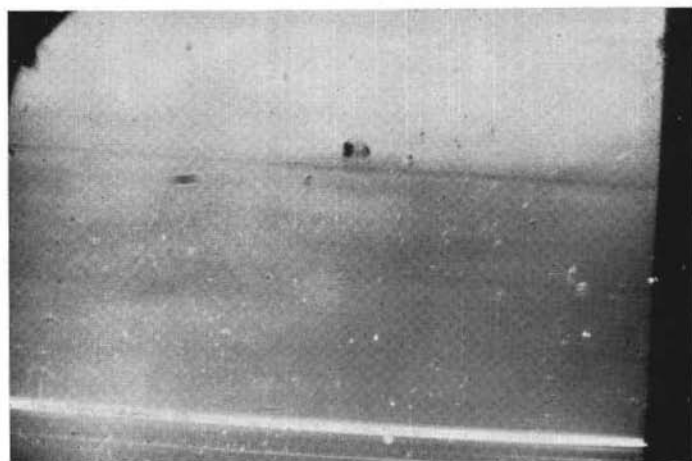


Fig. 5

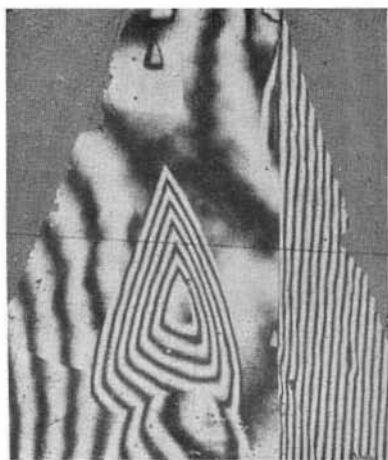


Fig. 6



Fig. 7

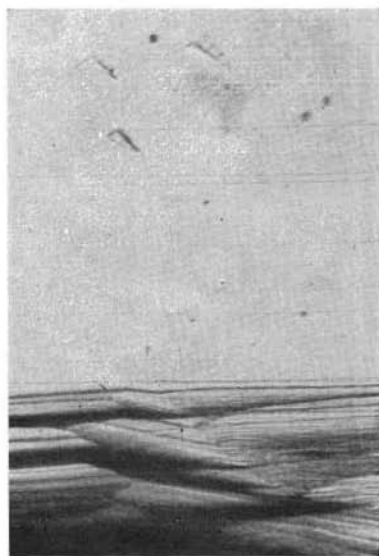


Fig. 9

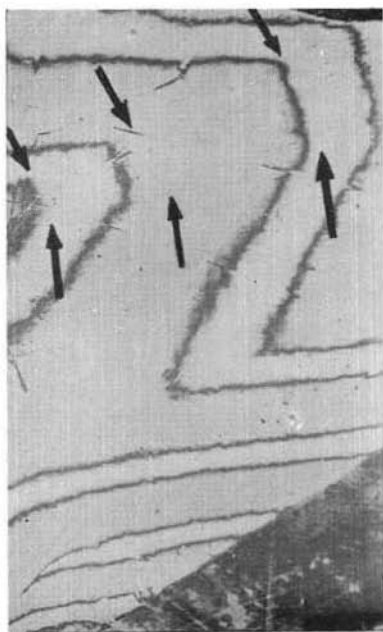


Fig. 11

paaci di compensare l'effetto della sostituzione di un leptone con una particella di dimensioni diverse. È un fatto generalmente riferito che la dolomite assume la notissima forma a sella quando è particolarmente impura; s'intende che anche qui come nel caso delle associazioni elicoidali di cristalli di quarzo si tratta di una analogia puramente indicativa.

Per concludere, ricorderò una circostanza che mostra come una distribuzione di disorientamenti fra subindividui, ovvero dei corrispondenti difetti, come quella capace di dare superfici selliformi di origine puramente strutturale, è anche fisicamente plausibile.

Read e Shockley (17) hanno mostrato che esiste una relazione tra angolo di disorientamento ed energia di disorientamento; Chalmers (18) suggerisce anzi che il disorientamento trattenga una quantità di energia libera di superficie che presenta un massimo relativo per un piccolo angolo di disorientamento corrispondente ad una determinata frequenza delle linee di dislocazione sul limite fra subindividui.

Questi Autori trattano di dislocazioni di Taylor-Orowan e di cristalli metallici; noi potremo mantenere però almeno il risultato che l'energia di disorientamento cresca in maniera piuttosto regolare per piccoli angoli, anche nel caso del quarzo e di dislocazioni di Burgers.

Il fatto che l'energia di disorientamento sia (per piccoli valori dell'angolo e dell'energia) una funzione dell'angolo asimmetrica rispetto all'origine, e con andamento opposto per i cristalli destri e sinistri, potrebbe fornire una spiegazione fisica della formazione di subindividui ruotati in modo da produrre facce selliformi in monocristalli quasi-perfetti.

6) Conclusioni.

Dalla presente ricerca risulta che la curvatura a sella della superficie delle facce è un fenomeno morfologico generale tra i cristalli di quarzo delle Alpi Apuane. Le superfici curve del prisma sono compatibili con la scultura d'accrescimento nota, e cioè concordi con il trapezoedro, ma la osservazione indica che questa non è visibilmente la causa unica e diretta della curvatura.

La doppia curvatura a sella constatata sui lembi della superficie dei cristalli di quarzo segue di regola il carattere destro o sinistro del trapezoedro presente.

Le indagini eseguite non permettono di affermare di più. Una verifica tassativa anzichè statistica della dipendenza del verso della torsione dal carattere destro o sinistro dei cristalli, avrebbe richiesto la distruzione delle superfici, e perciò ho rinunciato ad eseguirla, riservandomi di condurre altre ricerche.

Il risultato principale è dunque che l'aspetto morfologico fine descritto non sembra riducibile ad una scultura d'accrescimento.

E' possibile immaginare diverse combinazioni di fenomeni superficiali, ovvero di fenomeni superficiali e strutturali, capaci in linea di principio di dar conto della morfologia fine osservata.

L'esistenza di associazioni elicoidali di cristalli di quarzo, e le loro analogie con la morfologia fine a sella, può suggerire che anche nel caso studiato di monocristalli con facce a sella la causa del fenomeno sia essenzialmente dovuta a difetti strutturali. La curvatura a sella osservata nei cristalli di quarzo di Carrara è compatibile con la costituzione di un cristallo quasi-perfetto in subindividui diversamente orientati. L'ordine di grandezza delle dimensioni calcolate per i subindividui è molto grande rispetto a quello della struttura a mosaico. Ciò si può interpretare, o come dovuto ad una prevalenza soltanto lieve della disorientazione in un verso preferito nella normale struttura a mosaico, o come dovuto alla reale esistenza di subindividui grandi. In quest'ultimo caso il fenomeno, di cui son stati delineati i caratteri essenziali in rapporto alla morfologia a sella, sarebbe simile alla poligonizzazione, però in questo caso si sarebbe originato durante l'accrescimento. Esso richiamerebbe per il suo carattere ciò che i cristallografi chiamavano « poliedria ».

Qualunque sia l'interpretazione delle osservazioni, purchè si ammetta che la presenza di sculture di accrescimento non giustifica appieno questo carattere morfologico indiscutibilmente persistente nella località studiata, si può infine concludere che questi risultati richiamano alla opportunità di tener in conto che la morfologia fine abbia aspetti più complessi, meno elementari e soprattutto fisicamente più significativi che non quelli di un fenomeno privo di caratteri propri nel quadro dell'accrescimento dei cristalli in forma di poliedri cristallografici macroscopici.

*Firenze, Istituto di Mineralogia, Petrografia e Geochimica dell'Università.
Centro di Studio per la Geochimica e la Mineralogia del C.N.R.*

BIBLIOGRAFIA

- (1) KLEBER W., Fortschr. Min. XXI 1937, 61.
- (2) PADUROW N. N., Neues Jahrb. Min., Abh., LXXX, A, 1949, 209.
- (3) NIGGLI P., Struktur und Materie der Festkörper, Symp. Frankfurt / M^o 1951, Disc.
- (4) TONANI F., Rendiconti Soc. Min. It., V, 1948, 67.
- (5) KRUG W. & LAU E., Feingerätetechnik, I, H. 9, 1952.
- (6) TONANI F., Atti Fond. «Giorgio Ronchi», IX, 1954, 337.
- (7) GABLER F., Abstract to: Florence Meeting on Problems in Contemporary Optics, Firenze 1954.
- (8) TSCHERMAK G., Denkschriften Kaiserliche Ak. d. Wiss., LXI, 1894.
- (9) BOND W. L. & ANDRUS J., Amer. Min. XXXVII 1952, 622.
- (10) SEAGER A. F., Min. Mag. XXX, n° 220, 1953, 1.
- (11) KALB G., Cbl. f. Min., A, 1927, 279; Zsf. f. Kryt. LXXXVI, 1933, 1.
- (12) BUNN C. W. & EMMETT H., Nature, CLVIII, 1946, 164.
- (13) v. PRAAGH G. & WILLIS B. T. M., Nature, CLXIX, 623.
- (14) TOLANSKY S., Proc. Roy. Soc., London, s. A, CLXXXIV, 1945, 41.
- (15) ALOISI P., Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., XXV, 1909, 87.
- (16) GUINIER A., n° 15 in: Imperfections in nearly perfect crystals, N. Y. 1952.
- (17) READ W. T. & SHOCKLEY W. n° 13 ibidem.
- (18) CHALMERS B., Disc. ibidem.