

FEDERICO BEDARIDA \*

## APPLICAZIONE DEL LASER AI PROBLEMI DELLA MINERALOGIA

RIASSUNTO. — In una rapida sintesi vengono presentati i principali filoni di ricerca aperti dall'ottica laser nelle applicazioni alla mineralogia, insieme con alcuni risultati sperimentali ottenuti sui cristalli con i metodi olografici.

ABSTRACT. — The principal trends in the research in mineralogy with laser light are given along with the results obtained in the study of crystals by holographic techniques.

### Relazione introduttiva

C'erano tanti modi per impostare una relazione introduttiva come questa, tutti altrettanto accettabili e tutti con loro difficoltà peculiari.

Credo che il primo compito del relatore d'introduzione di una tavola rotonda come questa di specialisti che parlano a non specialisti di tecniche laser, sia quello di essere il più possibile chiaro. E allora ho scelto di dare un quadro generale del problema, mantenendo il tempo in limiti ragionevoli, semplificando senza perdere in precisione, cercando di non sovraccaricare l'uditorio con troppe informazioni.

E qui sta quella che ho appena chiamata peculiare difficoltà della scelta: siamo ancora agli inizi delle applicazioni della luce laser agli studi dello stato solido della materia e la produzione scientifica è sparpagliata su una miriade di pubblicazioni scientifiche a volte difficilmente raggiungibili, a loro volta sparpagliate su una miriade di argomenti.

Per mantenere una certa concisione e per fornire un quadro generale, dando risalto a quelle che ho ritenuto le cose principali e anche le meno ovvie, ho pensato di articolare la relazione in brevi paragrafi con un certo ordine logico:

- 1) qualche informazione sulla luce laser in termini del tutto generali per chi si avvicina all'argomento per la prima volta;
- 2) i principali indirizzi nelle applicazioni della luce laser;
- 3) le possibilità nelle ricerche che interessano i mineralisti e i petrografi nei due settori di maggior sviluppo.

\* Istituto di Mineralogia dell'Università di Genova.

Cercando però di non interferire con i relatori che verranno dopo di me i quali, certamente con molta più competenza di quanto non potrei fare io, illustreranno ciascuno il rispettivo settore di ricerca.

Uno dei due settori di maggior sviluppo cui ho accennato è quello delle tecniche olografiche, applicate nell'Istituto di Mineralogia dell'Università di Genova. Sulle applicazioni tecniche dell'olografia verrà fatto vedere un film realizzato nei Royal Physical Laboratories di Teddington in Inghilterra dai dottori Archbald e Ennos, certamente più istruttivo di tanti discorsi. Il film, parlato in inglese, sarà commentato in italiano dal prof. Pontiggia, che fa parte del nostro gruppo laser. Il più giovane dei componenti del gruppo, il dr. Zefiro, fornirà qualche dimostrazione sperimentale di dissoluzione e crescita di cristalli da soluzione fatte ultimamente nel nostro laboratorio e registrate su video cassetta.

La luce laser è una luce del tutto particolare: con una certa grossolanità possiamo anche dire che è una luce più « pulita » della luce normale, questo perchè le sue principali caratteristiche sono:

- un'intensità più forte della luce normale;
- la coerenza spaziale e temporale;
- la direzionalità.

Il materiale contenuto nel laser viene eccitato otticamente (pompato), gli atomi eccitati vengono stimolati a emettere fotoni tutti insieme di stessa fase e stessa lunghezza d'onda, prima che si manifesti l'emissione spontanea individuale.

Il tubo laser, la colonna, è lungo un numero intero di lunghezze d'onda, è cioè una cavità risonante. Il raggio monocromatico di luce coerente diventa sempre più intenso e gli atomi sono stimolati a emettere fotoni di ugual energia e stessa direzione o, se si vuole, un raggio intenso di  $\lambda$  costante.

Se può essere di qualche interesse, la massima potenza raggiunta da un laser è superiore al miliardo di watt per centimetro quadrato.

Per fortuna non è sempre necessaria una grande potenza: per fare un esempio, non essendo quello della potenza il problema più importante nel nostro Istituto, i nostri lasers sono dell'ordine della decina di milliwatt.

Anche se però io penso che per il prossimo avvenire, un laser di potenza sarebbe il benvenuto nel nostro gruppo per lo studio dei fenomeni transitori e per lo studio dei fenomeni non lineari.

Ci sono tanti tipi di laser, ognuno con caratteristiche peculiari:

- laser a solido;
- laser a semiconduttori;
- laser a liquido;
- laser a gas nobili;
- laser a gas molecolari (p.es.:  $\text{CO}_2$ ).

Il fatto che la luce laser sia diversa dalla luce normale è subito controllabile molto semplicemente, illuminando una superficie, per esempio un foglio di carta

bianca. Il foglio di carta apparirà granuloso e scintillante in maniera molto variabile, quasi con l'apparenza di un brulichio. È questa una delle proprietà più evidenti che nota subito un osservatore che veda per la prima volta un oggetto illuminato dalla luce laser. Nel caso del foglio di carta stampata potrà capitare addirittura di avere difficoltà a leggere la parola scritta.

Questo è un fenomeno tipico della luce laser e per fortuna non si verifica con la luce normale, in caso contrario la visione ne sarebbe molto disturbata.

Il fenomeno è dovuto alla coerenza della luce laser, le cui onde, riflesse dai diversi punti della carta, la cui superficie non è in realtà perfettamente liscia, ma è granulosa, interferiscono tra loro in tutti i punti dello spazio circostante per cui dove si ha interferenza positiva, concordanza di fase, si ha luce, mentre si ha buio in caso di interferenza negativa, opposizione di fase.

Il brillare disordinato della superficie visto dai nostri occhi è dovuto proprio ai loro movimenti impercettibili e a quelli della nostra testa. Nella luce normale le onde non sono in fase tra di loro e allora questo fenomeno non si verifica. L'interferenza non è, come nel caso del laser, ordinata nello spazio e nel tempo, ma è caotica e casuale nello spazio e nel tempo.

Quando dico questo non vorrei essere frainteso. L'interferenza è tipica dei fenomeni ondulatori ed è noto che si possono ottenere effetti di interferenza anche con luce comune, basta ricordarsi di estrarre dalla luce comune onde che siano correlate tra di loro per quanto riguarda la fase. Con la luce laser tutto è semplificato perchè la sua emissione è coerente.

Altro grosso vantaggio della luce laser è l'assoluta monocromaticità. Non è possibile ottenere luce veramente monocromatica da una lampada a gas a bassa pressione. Per ben che vada, la luce della migliore lampada a gas sarà sempre sparpagliata su una banda di frequenza della larghezza di circa 1000 megahertz, mentre la luce di un buon laser a gas può avere una banda di frequenza di un megahertz (una fluttuazione cioè di 1 su  $10^6$ ) che può venire mantenuta con alcuni accorgimenti. Ma non entriamo nel dettaglio di queste cose. È chiara però subito l'utilità di questo tipo di luce nelle misure dell'indice di rifrazione.

Dalle proprietà della luce laser che si sono descritte molto sommariamente discendono le applicazioni che si possono fare.

Se si vogliono mandare alte quantità di energia su una superficie molto piccola dell'ordine di  $1 \text{ cm} \cdot 10^{-4}$  basta focalizzare un raggio parallelo. Si può così illuminare, indurre specifiche reazioni chimiche, liquefare e sublimare.

Tecniche di sublimazione sono usate oggi con grande vantaggio nella cura degli ustionati, facendo sublimare i residui della pelle bruciata, con un raggio laser accompagnato da un getto di azoto per evitare un'ulteriore bruciatura.

Il laser si usa poi per saldare, bucare, accendere, studiare oggetti che si muovono a grande velocità. La grande intensità di questa luce (migliaia di volte più forte di quella del sole) permette di fotografare oggetti che velocissimi si trasformano: p. es. fissare l'immagine di sostanze al momento in cui fondono, si sfaldano (questo

potrebbe fornire informazioni sul ruolo che in questo caso hanno le dislocazioni) o si rompono sotto un urto meccanico brevissimo.

La luce laser è poi usata per studiare gli spettri sia di emissione che di assorbimento delle sostanze e i fattori di trasparenza e di riflessione a diverse frequenze.

Un raggio laser è utile e permette alte precisioni se si vogliono misurare distanze di un corpo lontano o le variazioni della distanza di un corpo lontano, problema che può interessare i geologi oltre che gli ingegneri per controlli di leggeri spostamenti di rocce, di pilastri, di dighe, e anche per controlli di direzione, allineamenti, flessioni ecc.

Il laser serve ancora per studiare cambiamenti fisici, modificazioni di forma delle sostanze (uno degli aspetti della ricerca che facciamo noi) e anche per studiare le vibrazioni e per trasmettere segnali e informazioni.

Ha poi impieghi specifici e utili, com'è il caso della determinazione dell'esistenza o no del centro di simmetria in un cristallo, di cui parlerà l'ingegner Pandarese.

Come si può vedere, il campo delle applicazioni è vastissimo e molte discipline possono trarre giovamento dai vantaggi offerti dalla luce laser.

A questo punto, ma senza perdermi nei dettagli, voglio segnalare quali sono i due grandi filoni nelle applicazioni della luce laser alla materia ordinata che si sono negli anni recenti sviluppati maggiormente a quanto mi risulta da una veloce indagine bibliografica.

Un filone è quello che si basa sull'ipotesi di Brillouin. Il primo a pensare a un'interazione nei solidi tra fotoni e fononi fu Leon Brillouin, nato a Parigi nel 1889 in una famiglia di grandi tradizioni scientifiche.

Subito dopo la laurea dalla Scuola Normale, conseguita nel 1913, ottenne una borsa di studio per lavorare a Monaco nell'Istituto di Sommerfeld.

Monaco era allora uno dei maggiori centri per la fisica.

Nel 1912 Max von Laue aveva avuto l'intuizione della diffrazione dei raggi X da parte dei cristalli, e Friedrich e Knipping avevano fatto l'esperimento di conferma nell'Istituto di Sommerfeld. Nello stesso anno Debye pubblicava la sua teoria dei calori specifici dei solidi rappresentando con lo spettro delle onde termoelastiche l'agitazione termica dei solidi.

Più o meno nello stesso periodo Brillouin pensò che il fenomeno di diffusione che si verifica ogniqualvolta la luce attraversa un cristallo dipenda dalle variazioni di densità dovute alle onde longitudinali di compressione e dilatazione. Calcolò l'intensità della luce diffusa e la sua distribuzione angolare in rapporto al fascio luminoso incidente e pubblicò i risultati sui « Comptes Rendus de l'Academie des Sciences » nel 1914.

Brillouin partecipò alla prima guerra mondiale e pare che, tornato a casa in congedo, non fosse più in grado di capire i suoi appunti di prima della guerra, per cui riscrisse di nuovo completamente tutta la teoria.

Dimostrò che misurando l'intensità della luce diffusa da un cristallo in tutte le direzioni si può conoscere l'intensità delle onde sonore di direzioni e frequenze date.

Si può così analizzare l'agitazione termica del mezzo elastico e misurare la distribuzione dell'energia tra le diverse frequenze elastiche a una data temperatura.

Va detto ancora che un grande apporto alla teoria di Brillouin venne dato da Max Born e dai suoi assistenti che nel 1925 dimostrarono come si comportano le vibrazioni di un reticolo cristallino nel libro «Dynamik der Kristalgitter».

Soltanto nel 1932 la teoria ebbe conferma sperimentale da parte di Lucas e Biquard in Francia e di Debye e Sears negli Stati Uniti.

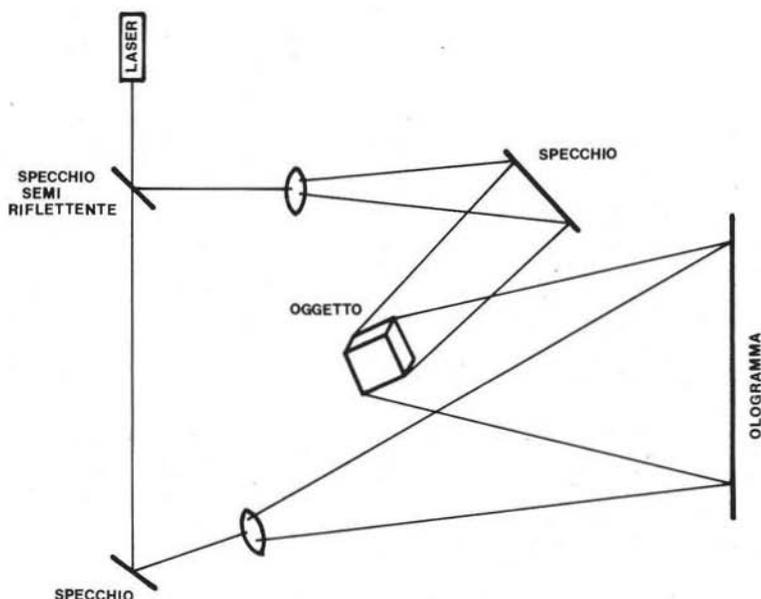


Fig. 1.

Fu notevole anche il contributo dato in questo settore da Raman. Max Born e Raman s'incontrarono in un Congresso a Bordeaux nel 1948, ma dato che le loro idee non collimavano perfettamente, l'incontro si risolse in uno scontro memorabile, tanto che se ne è scritto ancora di recente.

Oggi con il laser s'è aperto un enorme campo di ricerca in questo settore e qui i lavori sono più sistematici, organici e numerosi. Mi spiace di dover dire che questo enorme filone di ricerca, proficuo di risultati e di conoscenze, per esempio per quel che riguarda la distribuzione dei difetti reticolari nei cristalli trasparenti, è quasi del tutto trascurato in Italia.

Seconda grande branca delle tecniche laser che può essere sfruttata da mineralisti e petrografi ed ha avuto uno sviluppo impetuoso è l'olografia.

La teoria dell'ologramma è stata scritta da Dennis Gabor nel 1947. Alcuni anni

fa, per questa ragione ha ricevuto il premio Nobel. All'epoca della sua teoria il laser non c'era ancora. Fu scoperto nel 1959 e portò un grande miglioramento nella applicazione sperimentale della teoria di Gabor.

Emmett N. Leith e Juris Upatnieks dell'Università del Michigan furono i primi a fare ologrammi di oggetti tridimensionali.

L'olografia, nei suoi termini più semplici, è abbastanza facile da capire.

Prendiamo un raggio di luce coerente (di qui la necessità di avere un laser) e dividiamolo in due raggi:

— uno che verrà riflesso soltanto da specchi piani e si chiama raggio di riferimento;

— l'altro che verrà riflesso da specchi piani e diffuso dall'oggetto che si vuole ologrammare, è quello che porta l'informazione (fig. 1).

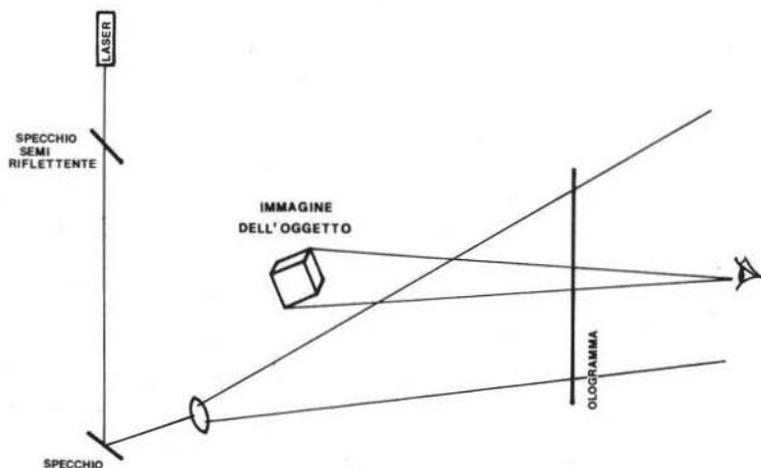


Fig. 2.

Sulla lastra fotografica si ottiene una figura di interferenza e quando la lastra venga sviluppata, si ottengono punti di densità differente: neri dove due onde sono arrivate sulla lastra in fase, chiari dove sono in contrasto di fase.

Quello che si vede sull'ologramma non è un'immagine dell'oggetto nel modo cui siamo soliti pensare, ma è un interferogramma che, guardato così, non ha alcuna rassomiglianza con l'oggetto.

Ma in questo interferogramma è contenuta tutta l'informazione ottenibile otticamente dall'oggetto e anche rompendo la lastra in molti pezzi, ogni pezzo fornisce un'informazione completa dell'oggetto, così come quando si rompe uno specchio, ogni pezzo riflette tutta l'immagine, perchè su ogni pezzo sono arrivate onde da

ogni punto dell'oggetto. Per non creare ambiguità va detto che questo è vero sempre che non esistano sistemi ottici tra oggetto e lastra fotografica, come invece si verifica nelle tecniche che descriverò tra poco e che usiamo nell'Istituto di Mineralogia di Genova.

Illuminando adesso l'ologramma con il raggio di riferimento i fronti d'onda vengono ricostruiti e la luce diffratta sembra provenire dall'oggetto reale (fig. 2). Questa immagine, o meglio queste immagini, perchè ne abbiamo una reale e una virtuale, hanno molti vantaggi: portano una grande quantità d'informazione, possono essere osservate con il microscopio, per esempio il microscopio in contrasto di fase, si può fare dell'interferometria sull'immagine, cosa che nel nostro laboratorio abbiamo largamente applicato.

L'immagine data dall'ologramma può essere osservata in microscopia focalizzando su piani a profondità diverse cosicchè l'osservazione può essere fatta senza gli svantaggi meccanici dell'oggetto reale. In molti casi è addirittura meglio avere l'ologramma invece dell'oggetto.

Tra olografia e interferometria intesa in senso classico non c'è differenza sostanziale, in realtà i due fenomeni sono strettamente vicini: l'olografia è un'interferometria che serve per registrare patterns complesse che permetteranno di ricostruire i fronti d'onda, mentre gli interferometri classici sono utilizzati per analizzare i fronti d'onda.

L'olografia, come ho detto prima, è stata applicata anche all'interferometria nei casi in cui sia necessario misurare piccole distanze, piccoli spessori, dettagli microscopici, piccoli angoli tra facets, e anche per trovare imperfezioni nei mezzi ottici o variazioni di indici di rifrazione, proprietà che stiamo sfruttando per il controllo ottico delle variazioni di concentrazione delle soluzioni.

Un punto importante è che l'olografia non è disturbata dai contenitori di vetro se questi non si modificano nel tempo: è un grosso vantaggio se si vogliono studiare crescite da soluzione o da fase vapore.

In questo momento le nostre ricerche vanno avanti proprio su questo argomento. I risultati ottenuti verranno illustrati dal dr. Zefiro dalle registrazioni su video cassetta dei nostri esperimenti.

Abbiamo applicato per l'interferometria olografica tre tecniche:

- interferometria in tempo reale;
- interferometria a intervallo di tempo;
- interferometria in media temporale;

quest'ultima riguarda soprattutto oggetti che oscillano e l'abbiamo considerata solo di sfuggita.

In tempo reale si possono osservare variazioni di « qualcosa » mentre queste avvengono.

A intervallo di tempo facciamo un primo ologramma e un secondo un po' più tardi sulla stessa lastra dopo un piccolo cambiamento. Se per esempio una superficie

è un poco cambiata si ottengono le frange di interferenza tra i due ologrammi proprio come le frange tra due superfici riflettenti.

Il nostro lavoro sull'argomento è pubblicato sui « Proceedings » della Crystal Growth del 1974.

Abbiamo anche messo a punto un'altra tecnica interferometrica usando le diverse  $\lambda$  di un laser ad argon (tecnica detta del contouring). Per chi fosse interessato, il lavoro uscirà sul prossimo numero del « Journal of Crystal Growth ».

Adesso stiamo lavorando alla registrazione in tempo reale di fenomeni di crescita e dissoluzione in soluzioni acquose.

Nel campo della crescita da soluzioni Berg e Bunn (Imperial Chemical Industry) e Humphrey Owen (Birbek College) in Gran Bretagna, Goldstaub e Kern a Strasburgo nell'Istituto di Mineralogia di quella Università, avevano impiegato tecniche interferometriche classiche a cristalli che crescevano in acqua in condizioni estremamente particolari.

I metodi olografici attuali ampliano il campo delle investigazioni e hanno un carattere molto più generale. Degli Autori citati, soprattutto Goldstaub aveva insistito da un punto di vista teorico sull'importanza che i movimenti convettivi devono avere ai fini della crescita, confermato in questa sua ipotesi dall'identica opinione avanzata da Frank dell'Università di Bristol.

Con le tecniche usate nei nostri esperimenti i movimenti convettivi sono chiaramente resi visibili e l'intero fenomeno è adesso più facilmente descrivibile nei suoi termini reali.

È mia ferma convinzione che i risultati ancora ottenibili nel campo della crescita dei cristalli con queste tecniche siano molto promettenti.