



Tessiture esotiche della materia ed il premio Nobel per la chimica 2011: storia ed analisi di un cambiamento di paradigma.

[Articolo apparso su “Prometeo”, Mondadori Editore, anno 30, numero 117, p. 74-85]

Tutto nasce da un fiocco di neve nella storia che qui richiamo, anche se è un inizio lontano che serve solo a chiarire l'ambiente. Quel fiocco a cui mi riferisco apparve nel 1611, nel titolo di un saggio dell'allora quarantenne Johannes Kepler (1571 – 1630): *Strena sue de nive sexangula* (“Sul fiocco di neve a sei angoli”). L'idea di Keplero era che la struttura del fiocco fosse riconducibile alla collocazione, l'una accanto all'altra, di sfere di ghiaccio uguali tra loro, fino alla costruzione di pile che avessero la stessa simmetria che osservava. Per estensione seguiva il problema di costruire pile di sfere, secondo varie disposizioni che dessero luogo a simmetrie differenti. Keplero valutò il modo di porre in un dato spazio il maggior numero possibile di sfere in modo che la distribuzione risultante avesse le simmetrie del cubo e fosse la più densa tra quelle possibili in quella classe di simmetria. Discusse inoltre di due tipi di impacchettamento tridimensionale meno densi: quello dotato delle simmetrie dell'icosaedro, che collegò quindi al fiocco di neve, ed un'altra versione di quello cubico. Non si accorse, però, della possibilità di un impacchettamento icosaedrico ottimale (cioè quello a più alta densità nella sua classe di simmetria). Keplero riuscì ad individuare tre classi di poliedri convessi, ciascuno dei quali può essere usato per la decorazione dello spazio tridimensionale. Nella sua analisi della decorazione dello spazio, Keplero omise solo un impacchettamento basato sulle simmetrie del cubo e dell'ottaedro.

Nello scritto di Keplero ci sono reminiscenze, forse anche indirette. Già Platone (428/427 a. C. – 348/347 a. C.) aveva suggerito che i mattoni della realtà fossero poliedri convessi regolari corrispondenti agli elementi di Empedocle (490 a. C. – 430 a. C.): aria, acqua, terra, fuoco. A ciò era giunto nel terzo viaggio in Sicilia, che anticipò la composizione del *Timeo* ove discusse questi problemi, incontrando il medico Filistione (... a. C. – ... a. C.) e risentendo delle convinzioni pitagoree di Filolao (470 a. C. – 390 a. C.) che suggeriva che la generazione dei

corpi fisici fosse ascrivibile alla combinazione di sequenze punto-segmento che costituissero figure regolari piane e poliedri. Lo sforzo di Platone di ricondurre l'esperienza empirica alle forme astratte, lo aveva inoltre portato a considerare dei poliedri le sole figure piane che li delimitavano. Anche di questo una suggestione (anche se solo indiretta) si può immaginare in Keplero quando affrontò qualche anno dopo (era il 1619) il problema dei ricoprimenti periodici del piano nel libro II dell'

Harmonices Mundi (Libri Cinque)

dove presentava la sua terza legge sul moto dei pianeti: il rapporto tra il quadrato del periodo di rivoluzione intorno al sole ed il cubo del semiasse maggiore dell'orbita è costante. Di ricoprimenti si era già occupato Aristotele (384/383 a. C. – 322 a. C.) ma il suo pensiero era riferito allo spazio intorno ad un punto. L'idea platonica che i corpi fossero costituiti da poliedri regolari poneva il problema di riempire appunto con poliedri di tal fatta proprio lo spazio che un qualsiasi corpo potesse occupare. Nell'ultimo libro dei suoi

Elementi

, aveva mostrato che i poliedri convessi regolari (le facce sono poligoni regolari convessi sovrapponibili esattamente, nessuna delle facce interseca le altre se non negli spigoli ed in ogni vertice si incontrano lo stesso numero di facce) sono esattamente cinque: il tetraedro (la piramide le cui facce sono triangoli equilateri uguali), il cubo, l'ottaedro (composto da due piramidi a base quadrata sovrapposte sulle basi), il dodecaedro (pentagoni per facce), l'icosaedro (venti facce costituite da triangoli equilateri). Era il cubo ad essere attribuito alla terra come elemento costituente, quindi ai corpi solidi. Dato un punto qualsiasi in un corpo, otto cubi che abbiano vertice in tale punto riempiono completamente lo spazio

intorno

al punto. Aristotele, riprendendo le idee di Platone, sostenne che non solo il cubo avesse tale proprietà, ma così fosse anche per il tetraedro. Se si pensa però solo a tetraedri regolari, l'affermazione di Aristotele è errata. Per riempire lo spazio servono tetraedri retti, quelli ottenuti sezionando una costruzione di otto cubi raggruppati intorno ad un punto che venga fatto coincidere con un vertice comune. In realtà Aristotele non aveva affermato esplicitamente di pensare a tetraedri regolari, sebbene si possa perfino supporre che potesse subire l'influenza dell'enfasi data da Euclide a questi solidi sostenendo che l'intera opera sua principale, gli

Elementi

, avesse il solo fine di discutere e classificare i poliedri convessi regolari. Se Aristotele avesse preso in considerazione tetraedri regolari avrebbe dovuto combinarli con ottaedri regolari (sei di questi ultimi, otto dei primi). Sapere quale fosse il reale intendimento di Aristotele non è essenziale per le considerazioni raccolte in queste righe, sebbene la discussione intorno all'affermazione aristotelica abbia dato luogo ad un insieme di risultati in geometria (si veda Senechal, 1981). Nonostante questo retroterra, vi era rispetto al passato un elemento essenziale nuovo nelle riflessioni di Keplero del 1611: la

simmetria

della disposizione di unità fondamentali che costituiscano la materia. E successivamente, nell'*Harmonices Mundi*

di otto anni dopo, l'idea di riempire lo spazio (quella che aveva portato Aristotele a riflettere, sulla base dei convincimenti di Platone), in contrasto con il tentativo aristotelico di riempire l'intorno di un generico punto, si estendeva a tutto lo spazio ambiente che, nelle note di Keplero, era il piano. Simmetrie nella disposizione di unità fondamentali che diano luogo ad una cella e ricoprimenti dello spazio ambiente per mezzo di essa, queste sono le due idee

essenziali che la conoscenza costituitasi nei secoli successivi a Keplero permette di enucleare – la loro combinazione implica la periodicità del ricoprimento (vi è un'unica cella generatrice della decorazione, infatti). Anche senza avere il bagaglio dei contemporanei, già nel 1661 Robert Hooke (1635 – 1703) aveva sostenuto, fornendo essenzialmente esempi, che tutte le forme cristalline potessero essere descritte in termini di pochi aggregati di atomi sferici. Nel seguire questa idea, però, una difficoltà pareva emergere: se si pongono l'una accanto all'altra sfere uguali è inevitabile la presenza di spazi tra di esse – in altri termini, non si può ottenere un impacchettamento compatto, circostanza che pareva contraddire ciò che l'osservazione dei cristalli naturali faceva emergere. Così si cominciò a ripensare a poliedri nella tradizione prima platonica e poi aristotelica. Non avevano i ricercatori del tempo nozioni di teoria dei campi che avrebbero suggerito loro che ciò a cui pensavano era semplicemente un

modello

, una rappresentazione parziale della realtà. La questione essenziale – possiamo dire con il senno di poi – non era se i costituenti ultimi della materia fossero sfere o poliedri (meglio se regolari), semmai che (1) ci fossero dei costituenti elementari delle strutture cristalline (gli atomi, qualunque fossero i convincimenti nelle varie epoche sulla loro natura) e (2) che le simmetrie nella loro disposizione fossero gli elementi che caratterizzassero famiglie di cristalli permettendo di esse una classificazione. Di questo parvero rendersene conto più tardi, almeno in maniera embrionale, Jean-Baptiste Louis Romé de L'Isle (1736 – 1790) e Rene Just Haüy (1743 – 1822). Il primo sostenne nel 1783 che, in un dato bagno termico, cristalli morfologicamente simili di un singolo minerale possono pensarsi circoscritti da facce piane che formano a coppie angoli diedri (cioè le porzioni di spazio tra le coppie di piani convergenti allo stesso spigolo) identici. È questa quella che è considerata la prima legge della cristallografia e che Romé de L'Isle formulò sulla base delle osservazioni precedenti e della versione preliminare del 1669 di Niels Stensens (1638 – 1686), chiamato anche nella maniera latina Nicolaus Steno, o Nicola Stenone, dopo la conversione al cattolicesimo e l'ordinazione sacerdotale, lungo un percorso che lo avrebbe portato ad essere consacrato Beato. Le conclusioni di Romé de L'Isle e prima di lui di Stensens e anche di Michail Vasil'ievič Lomonosov (1711 – 1765), queste ultime del 1749 (a lui è intitolata l'Università statale di Mosca), ed ulteriori valutazioni di dati sperimentali portarono Haüy, un belga che fu abate onorario di Notre Dame, a pubblicare nel 1784 il suo “

Essai d'une théorie sur la structure des cristaux

” (“Saggio su di una teoria sulla struttura dei cristalli”) dove evidenziava che le giaciture dei piani cristallini possono essere messe in relazione a rapporti di numeri interi (la versione precisa della vaga affermazione precedente è la seconda legge fondamentale della cristallografia). Nel cercare di dare ragione delle due leggi della cristallografia, e interpretando come indicatrice di un ordine nella struttura interna la peculiarità dei cristalli di sfaldarsi lungo piani peculiari di ‘debolezza’, ogni qualvolta venga superata la resistenza del materiale all'azione di agenti esterni, Haüy sosteneva che l'architettura cristallina fosse generata dal ripetersi di un parallelepipedo (delle dimensioni minuscole opportune). L'idea della sovrapposizione di parallelepipedi, però, non sembrava una via agevole a trovare motivi per l'espansione termica dei cristalli. Nel 1824, Ludwig Seeber (1793 – 1855), all'epoca da due anni professore a Friburgo dove era stato chiamato ventisette anni prima a ricoprire la cattedra di fisica, suggerì che ai mattoncini a forma di parallelepipedo, una sorta di Lego, si dovesse sostituire un reticolo di punti che coincidessero con i loro centri di massa. Il concetto fu precisato dall'ultimo allievo di Haüy, Gabriel Delafosse (1796 – 1878). “

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20

De la structure des cristaux, considérés comme base de la distinction et de la classification des systèmes cristallins. Sur l'importance de l'étude de la symétrie dans les différentes branches de l'Histoire naturelle, et en particulier dans la morphologie végétale et animale

” (“Sulla struttura dei cristalli, considerata come base della distinzione e della classificazione dei sistemi cristallini. Sull'importanza dello studio della simmetria nelle branche differenti della Storia naturale, ed in particolare della morfologia vegetale e animale”) era il titolo della tesi che presentò a Parigi nel 1840. Delafosse elaborava l'idea di Haüy sostituendo al parallelepipedo una

cella elementare

che potesse variare da caso a caso ma che, per ogni singola famiglia, generasse il materiale cristallino per traslazione nello spazio. Per di più, la cella elementare di Delafosse non era un oggetto compatto ma solo un elemento geometrico che potesse generare, con il suo ripetersi, un reticolo di atomi. Se, ad esempio, si considera un quadrato su cui sono disposti quattro atomi nei vertici, la traslazione nel piano del quadrato lungo due direzioni ortogonali tra loro, compiendo di volta in volta passi che siano pari al lato del quadrato stesso, e immaginando di lasciare ad ogni passo gli atomi nei punti occupati dai vertici del quadrato, disponendo nuovi atomi sul quadrato che trasla, genera un reticolo atomico piano che ha la simmetria del quadrato. Con la procedura appena indicata, il quadrato, ripetendosi, è in grado di ricoprire il piano senza sovrapporsi alla propria immagine lasciata nei passi precedenti a quello che affronta in un dato momento e, soprattutto, senza lasciare spazi non ricoperti. Si può operare allo stesso modo nello spazio tridimensionale, pensando a cubi o a celle di natura differente, così come nel piano si possono fare scelte diverse dal quadrato nel piano. In realtà vi è una maniera piuttosto generale per costruire un reticolo del tipo appena descritto in un dato spazio. Si immagini che lo spazio ambiente sia di dimensione finita

d

(ad esempio

d

= 3 nel caso tridimensionale che immediatamente si propone all'immaginazione) e si prendano in tale spazio esattamente

d

vettori linearmente indipendenti (ciascuno di essi non può quindi essere ottenuto sommando gli altri, eventualmente anche dopo che siano stati allungati o accorciati moltiplicandoli per qualche numero reale). Si moltiplichino i vettori per

numeri interi

e li si sommi tra loro. Al variare dei numeri interi si costruisce quindi un reticolo in cui ciascun punto è individuato dal vettore somma che di volta in volta si ottiene. Nel caso particolare dello spazio tridimensionale, se si indicano con

e

1

,

e

2

ed

e

3

i vettori linearmente indipendenti appena richiesti e con

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20

a

,

b

e

c

numeri interi, la somma

a

e

1

+

b

e

2

+

c

e

3

determina i punti di un reticolo tridimensionale al variare dei numeri interi

a

,

b

e

c

. Una volta che un reticolo sia stato costruito in tal modo, si definisce cella caratteristica, o cella primitiva unitaria, quella porzione di spazio che traslata riesce a ricoprire tutto il reticolo senza sovrapposizioni e senza lasciare spazi vuoti (si è già discusso di questo tipo di ricoprimenti nelle righe precedenti). Ciò che caratterizza una cella primitiva è il fatto di contenere un solo atomo del reticolo e di avere le stesse proprietà di simmetria del reticolo stesso. Questa circostanza fa sì che i reticoli ottenuti nella maniera appena descritta possano essere classificati tramite le proprietà delle celle primitive che li caratterizzano. Si può dare una definizione più generale di reticolo che occupi un dato spazio ambiente, intendendo che esso sia un insieme di punti – indichiamolo con G – che sia caratterizzato da due numeri positivi, diciamo

r

ed

R

, il primo più piccolo del secondo, tali che la distanza tra due qualsiasi punti di G sia almeno pari ad

r

e ogni sfera di raggio

R

nello spazio ambiente contenga almeno un punto di G – in questo senso G si estende su tutto lo spazio. Le operazioni di roto-traslazione e riflessione che lascino invariato G sono il cosiddetto

gruppo di simmetria di

G . Nel 1845, Auguste Bravais (1811 – 1863) elencò i possibili quattordici reticoli nello spazio tridimensionale che possono essere ottenuti per traslazioni di celle elementari, hanno la

struttura ricavata da relazioni del tipo

a

e

1

+

b

e

2

+

c

e

3

e che da allora vengono chiamati opportunamente

reticoli di Bravais

. Sono questi ultimi che sembravano essenziali per descrivere la struttura dei cristalli. L'idea era quindi che la cristallografia potesse essere espressa, o meglio basata, sulla conoscenza dei reticoli di Bravais. Sulla base dell'idea di Bravais, Yevgraf Stepanovich Fyodorov (1853 – 1919), Arthur Moritz Schönflies (1853 – 1928) e William Barlow (1845 – 1934), i primi due tra il 1890 ed il 1891, il terzo nel 1894, indipendentemente l'uno dall'altro classificarono 230 possibili strutture cristalline ottenute per roto-traslazione o riflessione di reticoli. Questo era il frutto di speculazioni. Ancora, però, non vi era un'adeguata corroborazione sperimentale di queste idee, non per mancanza di investigazioni ma per l'inadeguatezza degli strumenti per dare informazioni sulla struttura della materia a scale spaziali tali da valutare gli eventuali reticoli atomici costituenti i cristalli. In tal senso fu decisiva la scoperta dei raggi X da parte di Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923): 8 novembre 1895 è la data. Si stava occupando di alcuni effetti nei tubi dove si creava il vuoto spinto in presenza di cariche elettriche che li attraversassero. Nello sviluppare gli esperimenti si era reso conto di un'anomala (perché inaspettata per lui) fluorescenza su di uno schermo di cartone ricoperto da una certa vernice contenente bario e titanio, ogni qualvolta quest'ultimo veniva posto davanti ad un componente in alluminio dell'apparato sperimentale. Röntgen attribuì questo fenomeno ad una radiazione che gli era ignota e che chiamò, quindi, X, con la fantasia che si può attribuire ad un cinquantenne professore ottocentesco (era nato proprio l'anno della scoperta di Bravais) che allora insegnava a Würzburg. Fu Max von Laue (1879 – 1960) a mostrare che i raggi X erano una forma di radiazione elettromagnetica ed a misurare la loro lunghezza d'onda attraverso esperimenti di diffrazione in cristalli. Il risultato di von Laue indicava anche come la struttura cristallina fosse dotata di un ordine strutturale ripetuto nello spazio. Le indicazioni sperimentali sono del 1912 e furono raggiunte qualche mese dopo una discussione che von Laue ebbe nel gennaio di quell'anno con Paul Peter Ewald (1888 – 1985) che chiudeva la sua tesi di dottorato sulla propagazione dei raggi X all'Università Ludwig Maximilian di Monaco, dove era stato studente di Arnold Sommerfeld (1868 – 1951) e di lui fu poi assistente. L'idea di von Laue, anch'egli in quel periodo a Monaco come

privatdozent

(l'equivalente del nostro libero docente di un tempo), nella fase iniziale di una carriera che lo avrebbe portato al Nobel, era quella di esporre un cristallo stabile ai raggi X e poi fare "fotografie" della diffrazione dei raggi da parte del reticolo cristallino con tempi di esposizione che andavano da secondi ai millisecondi. I risultati di von Laue indirizzarono all'uso dei raggi X

per investigare la struttura dei cristalli. Uno strumento per questi esperimenti era lo spettroscopio ai raggi X, costruito da sir William Henry Bragg (1862 – 1942) con l'aiuto del figlio, sir William Lawrence (1890 – 1971). I due osservarono interferenza delle onde riflesse da piani cristallini paralleli. Le loro osservazioni mettevano in evidenza quella che viene detta *legge di Bragg*

(è del 1912 e ad essa più spesso si lega William): il prodotto tra l'ordine della diffrazione e la lunghezza d'onda è pari al doppio della distanza tra due piani cristallini paralleli adiacenti moltiplicato per il seno dell'angolo dell'onda incidente. Le osservazioni inoltre fornivano immagini che possiamo visualizzare pensando ad un fondo nero su cui sono distribuiti 'punti di luce', quelli che vengono detti picchi di Bragg e dove v'è alta probabilità che vi siano gli atomi. Le osservazioni mostravano l'ordine ripetitivo della distribuzione dei picchi nello spazio, la periodicità delle strutture cristalline, quindi. Vi erano quindi strumenti adeguati ad investigare la struttura atomica dei cristalli e concetti che permettessero di interpretare i dati acquisiti, estraendo da essi informazioni che fossero collegabili direttamente con le idee classificatorie che derivavano dai risultati di Bravais. Si era quindi formato un paradigma per la cristallografia: la classificazione delle classi cristalline veniva associata alle proprietà di simmetria dei reticoli di Bravais, cioè alle loro proprietà di invarianza rispetto ad alcuni insiemi di trasformazioni che sono sottoclassi speciali del gruppo delle roto-traslazioni e delle riflessioni. Sono speciali perché un gruppo di simmetria per un dato reticolo di Bravais (che possiamo qui chiamare cristallo nei termini astratti verso cui si è indirizzato lo studio dei cristalli) è un sottogruppo di quello delle roto-traslazioni e delle riflessioni, ma un qualsiasi sottogruppo di quest'ultimo gruppo non è necessariamente un gruppo di simmetria di un reticolo di Bravais. La classificazione dei gruppi di simmetria cristallografici è quella di Fyodorov, Schönflies e Brown. La sua esistenza poneva immediate questioni teoriche in geometria di più ampia portata: già nel 1892, infatti, nell'incipit di un suo articolo sui

Mathematische Annalen

, Otto Hölder (1859 – 1937) richiamava l'attenzione sull'interesse teorico che poteva avere la classificazione di una classe di gruppi più ampia di quella cristallografica: la classe dei cosiddetti gruppi finiti semplici la cui discussione va al di là di ciò che racconto in queste righe (il lettore interessato alla storia delle modalità con cui si è affrontata la questione, si può riferire ad un articolo di Ronald Solomon del 2001).

L'affidarsi ai reticoli di Bravais per la descrizione dei cristalli vuol anche dire accettare strutture geometriche che siano infinitamente estese nello spazio e che lo ricoprano tramite la ripetizione di una cella fondamentale.

Questo era il paradigma che si affermava, ripeto. Ma, come Thomas Kuhn (1922 – 1996) ha suggerito – insegnato, direi – i paradigmi spesso sono fatti per essere mutati. Così è avvenuto per la visione tradizionale della cristallografia, non senza una stagione di conflitti.

Chi ha essenzialmente determinato (e lo ha fatto con caparbietà) il cambiamento di paradigma è stato Daniel Shechtman, un uomo di Tel Aviv, ora professore (più precisamente Philip Tobias Professor in Materials Science) nell'Università Technion di Haifa, dopo essere stato lì studente ed aver conseguito il dottorato in ingegneria dei materiali nel 1972. La storia oramai è nota e mi limito a ripeterla, aggiungendo alcune esperienze personali connesse con le conseguenze che il cambiamento del paradigma della cristallografia, determinato dai risultati di Shechtman, ha provocato in vari campi della ricerca scientifica. L'anno cruciale è stato il 1982. L'allora quarantunenne Shechtman era dall'anno precedente professore ospite per un periodo di tre anni nei laboratori del *National Bureau of Standards* (ora *National Institute of Standards and Technology*) in Maryland – la sede centrale è nella cittadina di Gaithersburg – invitato da John W. Cahn che lo aveva incontrato durante una sua visita due anni prima alla Technion (è il modo naturale con cui ricercatori nelle fasi iniziali della loro carriera entrano in contatto con eminenti figure del loro campo, come era Cahn al momento dell'incontro con Shechtman). Il progetto in cui era coinvolto Shechtman riguardava lo sviluppo di certe leghe di alluminio ottenute per rapida solidificazione in un programma di ricerca finanziato dalla

Defence Advanced Research Project Agency

. Le proprietà dell'alluminio erano tra i suoi interessi di ricerca da quando, dopo il dottorato, aveva avuto una borsa di studio per un periodo di tre anni speso in Ohio nei laboratori di ricerca della base Wright Patterson dell'aeronautica militare americana. Le analisi al microscopio elettronico di Shechtman (relative ad ingrandimenti di 28000 unità) evidenziavano, in leghe ottenute dalla rapida solidificazione di alluminio in cui era stata inclusa una piccola quantità di manganese, la presenza di distribuzioni di picchi di Bragg con simmetria di tipo icosaedrico. E con l'icosaedro non si riesce a tassellare lo spazio tridimensionale in maniera periodica, senza lasciare spazi vuoti ed evitare sovrapposizioni. Se si ripetevano gli stessi esperimenti su strati molto sottili delle stesse leghe, in una maniera che cercasse di ricreare un ambiente bidimensionale, si potevano osservare i picchi di Bragg distribuiti secondo pentagoni. E, ancora, con il pentagono che abbia lati uguali non si riesce a tassellare il piano in maniera periodica, incontrando lo stesso problema che presenta nello spazio l'icosaedro. In altri termini vi erano assi di simmetria (direzioni attorno alle quali, se si ruota un dato aggregato atomico di un qualche grado, esso non cambia) che non erano previste nella cristallografia classica.

L'immediata conclusione poteva essere che il materiale che veniva osservato non fosse cristallino (o almeno non lo fosse per quello che si credeva fosse allora un materiale cristallino), tuttavia, però, le immagini sperimentali evidenziavano picchi di Bragg molto ben localizzati e, soprattutto, ordinati, tutte proprietà tipiche delle strutture cristalline e di null'altro. Informato di questa evidenza sperimentale, John Cahn, che ospitava Shechtman in quel laboratorio, gli suggerì di lasciar perdere perché gli sembrava che il risultato poteva essere attribuito alla presenza di strutture cristalline gemelle (si pensi ad una coppia di strutture che siano l'una l'immagine speculare dell'altra e che abbiano in comune un'interfaccia rispetto alla quale non scorrono reciprocamente, soddisfacendo, in caso di deformazione, una certa condizione che è arduo rappresentare qui senza ricorrere a simboli: questi sono i gemelli cristallini).

L'osservazione di Cahn si basava sulla consapevolezza della frequenza con cui, durante un processo di solidificazione, un cristallo in formazione possa cambiare direzione di crescita per ragioni varie, dando luce ad una struttura gemella. Nasceva quindi il problema di verificare se di questo si trattasse. Shechtman cominciò allora a compiere osservazioni a scale spaziali sempre più piccole per cercare di dividere gli eventuali gemelli, fino a distanze di dieci manometri.

Trovava sempre la stessa cosa: la presenza di assi di simmetria proibiti dalla cristallografia tradizionale.

Per altri versi Shechtman aveva anche ottenuto un alto grado di purezza nei provini e non pareva quindi che i risultati potessero essere interpretati in termini di possibili difetti tra quelli che di solito vengono classificati nei reticoli atomici periodici. Sia chiaro: *l'aver un difetto* è un concetto relativo. L'affermare che un certo corpo (una certa struttura materiale se volete) in una certa condizione sia difettoso implica l'aver definito (o comunque avere l'idea di) uno stato che si consideri

privo di difetti

. Si può quindi affermare che un corpo è dotato di un difetto se esso si trova in uno stato che ha subito una mutazione rispetto ad un altro che si definisce privo di difetti – perfetto, se si vuole. Nel caso delle strutture cristalline, lo stato di riferimento pareva naturalmente essere quello delle strutture cristalline periodiche. Vi era altresì un'altra questione: non sembrava neanche che i risultati di Shechtman potessero essere interpretati in termini di modulazione di reticoli periodici standard, come lo sono due famiglie di aggregati atomici, cioè i cristalli composti e le strutture modulate in maniera incommensurabile (al lettore non sono necessari ulteriori dettagli per seguire la storia). La simmetria icosaedrica della distribuzione dei picchi di Bragg, testimone di una distribuzione di atomi sui vertici di un icosaedro, e quella pentagonale nel piano suggerivano al massimo un ricoprimento

quasi periodico

dello spazio ambiente, in contrasto con quello che era il paradigma accettato della cristallografia. La quasi periodicità era apparsa in quel periodo a due ricercatori dell'Università della Pennsylvania (Penn-State, come si usa chiamarla): Paul Joseph Steinhardt (ora professore a Princeton) e Dov Levine (attualmente anch'egli, come Shechtman, professore alla Technion di Haifa), che in quegli anni era studente di dottorato. Steinhardt cercava di simulare tramite schemi numerici la formazione per rapido raffreddamento di liquidi. Lo schema che aveva in mente era quello di un fluido costituito da sferette identiche connesse l'una all'altra. Lo scopo delle simulazioni numeriche era quello di ricreare delle immagini che fossero del tipo dei picchi di Bragg e descrivessero le configurazioni di equilibrio 'raffreddate' di quello che era inizialmente un fluido con sferette distribuite in maniera isotropa nello spazio, ma con legami che tenessero conto di una qualche direzione privilegiata. Qualche anno prima, lavorando con David R. Nelson, professore ad Harvard, e Mario Ronchetti, che allora era all'Università di Torino, Steinhardt aveva ottenuto simulazioni che mostravano un ordine di tipo icosaedrico esteso in liquidi raffreddati rapidamente ad una temperatura dieci volte inferiore a quella di solidificazione. Il risultato suggeriva la possibilità che ci potesse essere uno stato d'equilibrio tridimensionale in cui ci fosse un ordine con la simmetria dell'icosaedro a lungo raggio tale, però, da avere simmetria rispetto alla traslazione a corto raggio, questo perché non si può traslare un icosaedro riempiendo senza sovrapposizioni tutto lo spazio. Per ottenere appropriate simulazioni, però, era necessario avere anche un'idea della geometria di un ricoprimento dello spazio, che mostrasse le proprietà di regolarità che ho richiamato qualche riga fa, e di una qualche informazione di come la possibilità di tale geometria potesse essere inserita nei programmi che utilizzavano nel loro computer. Una rappresentazione di come dovesse essere realmente fatta questa decorazione dello spazio esisteva già, almeno nel

piano. Era il cosiddetto

reticolo di Penrose

, una costruzione geometrica suggestiva con cui sir Roger Penrose, fisico cantabrigense, rispondeva alla domanda che si era posto circa le modalità di tassellare il piano con due soli elementi in modo da ottenere un ricoprimento aperiodico, quasi periodico nello specifico. Steinhardt e Levine si resero conto della correlazione con il reticolo di Penrose. Le indicazioni algoritmiche vennero da Robert Ammann che lavorava a Boston come programmatore. Sulla base di queste informazioni, Steinhardt e Levine cominciarono una serie di simulazioni che mostravano che il reticolo di Penrose (si pensi alle piastrelle che ornano l'esterno di alcune moschee islamiche per avere un'idea di una decorazione quasi periodica di una superficie) è solo uno dei molteplici esempi di reticoli che avessero una struttura quasi periodica sia nel piano che nello spazio tridimensionale. Nel titolo dell'articolo stringato che pubblicarono nel 1984 su

Physical Review Letters

(la rivista impone di non superare le quattro pagine del suo formato), per informare dei loro risultati, appare per la prima volta la parola

quasicristalli

, un termine che non pare entusiasmare Shechtman che invece preferisce parlare di *strutture cristalline quasi periodiche*

. Levine e Steinhardt erano al corrente delle osservazioni che Shechtman aveva fatto, sebbene avessero sviluppato le loro simulazioni di idee teoriche indipendentemente. Alla fine del loro primo articolo sull'argomento (si veda Levine e Steinhardt, 1984) ringraziano Cahn per i suoi consigli, ma già nel sommario dell'articolo stesso affermano che le loro simulazioni numeriche mostrano una struttura di picchi di Bragg "strettamente correlata" a quella valutata nelle osservazioni sulle leghe di alluminio e manganese, il risultato di Shechtman. Questo articolo, però, arrivava alla fine di un'altra porzione della storia che cerco qui di raccontare.

Nel frattempo, infatti, all'iniziale scetticismo di Cahn per le osservazioni di Shechtman non era seguito per il momento il plauso. I colleghi di laboratorio gli chiedevano che cosa gli avessero insegnato ad Haifa per non rendersi conto che la cristallografia non prevedeva una simmetria come quella che osservava. L'affermazione ricorrente era che ciò di cui Shechtman parlava non ci poteva essere. Chi coordinava il gruppo di ricerca di cui faceva parte (le cronache ne omettono giustamente il nome) gli chiese di trasferirsi da qualche altra parte perché la sua presenza 'imbarazzava' il gruppo stesso. Shechtman fu quindi costretto a completare il suo periodo americano in un altro gruppo.

Eppure, quello che vedeva al microscopio elettronico appariva dotato della simmetria dell'icosaedro e le sue analisi parevano escludere la presenza di strutture cristalline gemelle.

Shechtman si poneva il problema di far vedere che le sue osservazioni potevano essere

riprodotte da simulazioni numeriche ottenute da un qualche modello teorico molto semplice, che permettesse di generare un ricoprimento dello spazio basato sulla ripetizione senza sovrapposizioni di icosaedri ed un numero limitato di strutture aggiuntive, visto che è nota a priori l'impossibilità (ripeto) di tassellare lo spazio solo con icosaedri. Tornato ad Haifa nel 1983, Shechtman fece partecipe dei suoi risultati e delle sue riflessioni Ilan Blech, un cristallografo della Technion, che riuscì a dedicarsi agli aspetti computazionali solo l'anno successivo. Quello che Blech intendeva fare era simulare il riempimento dello spazio con una distribuzione di atomi con la simmetria dell'icosaedro prevalente (atomi collocati ai vertici di icosaedri che, a coppie, avevano in comune solo uno spigolo in un primo insieme di simulazioni ed in seguito solo vertici) e poi di valutare il diagramma di diffrazione relativo alla struttura considerata.

Shechtman e Blech scrissero quindi un articolo che conteneva il materiale raccolto e lo sottoposero per essere valutato per un'eventuale pubblicazione al *Journal of Applied Physics*, una rivista che gli sperimentatori apprezzano non poco. Un recensore anonimo (l'anonimato della valutazione è la prassi nelle riviste scientifiche) si espresse in maniera negativa nei riguardi della pubblicazione, senza ragioni definitive, ma consigliando l'invio del manoscritto ad un giornale strettamente interessato alla metallurgia. La lettera editoriale motivava ulteriormente il rifiuto sostenendo che il contenuto del manoscritto

non avrebbe interessato la comunità dei fisici

. Shechtman e Blech inviarono il loro scritto a

Metallurgical Transactions

, accettando il consiglio ed ottenendo che venisse infine stampato nel 1985. Nel frattempo, però, John Cahn s'era convinto che le osservazioni di Shechtman non erano dovute alla presenza di strutture cristalline gemelle ed aveva parlato di quei risultati con Denis Gratias, un ricercatore del CNRS francese, un metallurgista che in quel periodo era all'istituto di fisica teorica della sede di Santa Barbara dell'Università della California, non trovando nel suo interlocutore forti obiezioni alla presenza della simmetria di tipo icosaedrico. Cahn quindi suggerì che Shechtman, Blech, Gratias ed egli stesso scrivessero una sintesi del materiale che avevano a disposizione e lo inviassero a

Physical Review Letters

, la rivista su cui i fisici generalmente aspirano di pubblicare e che limita a quattro pagine di un formato piuttosto fitto (due colonne per pagina) i contributi degli autori, chiunque essi siano. Il lavoro fu accettato ed apparve il 12 novembre 1984. Gli autori precisavano che i risultati di diffrazione che presentavano erano relativi ad una fase con simmetria icosaedrica che non poteva essere fatta corrispondere a nessun reticolo di Bravais, quindi a nessuna forma cristallina accettata nella classificazione standard. Queste sono le loro parole: "An X-ray diffraction pattern (Cu Ka source) was taken from a single-phase sample of the material containing many grains of various orientations. Had the phase consisted of a multiply twinned crystalline structure, it should have been possible to index the powder pattern regardless of the twins. The pattern obtained from the icosahedral phase could not be indexed to any Bravais lattice" (Shechtman et al., 1984). Stampato, l'articolo riempì solo tre delle quattro pagine ammesse. Forse non è del tutto irragionevole – viste anche le polemiche che ne seguirono – congetturare che, se non ci fosse stato Cahn tra gli autori, il manoscritto avrebbe trovato non poche difficoltà per apparire su quella rivista: il principio di autorità permea nella gestione della pubblicistica scientifica più di quanto un osservatore esterno agli aspetti tecnici della ricerca possa immaginare. Comunque sia, con quel risultato cominciò un processo di cambiamento del paradigma tradizionale della cristallografia. Nel concludere il loro articolo, Shechtman ed i suoi

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20

co-autori ricordavano che la possibilità di una fase solida a struttura microscopica icosaedrica era stata prevista come conseguenza delle simulazioni numeriche di Steinhardt, Nelson e Ronchetti ma non menzionavano (credo perché non ne fossero semplicemente a conoscenza o perché in realtà non era un risultato pertinente ai metalli) una previsione teorica di Hagen Kleinert e Kazumi Maki che mostravano la possibilità di una fase d'ordine icosaedrale nella materia che poteva verificarsi, per i due studiosi della Freie Universität di Berlino, nei cristalli liquidi (Kleinert e Maki, 1981). Levine e Steinhardt comunicarono i loro risultati sulla stessa rivista poco dopo: il loro articolo che ho già citato apparve il 24 dicembre 1984. Mantennero distinto il concetto generale di ordine quasi periodico dalla questione sperimentale specifica evidenziata dal lavoro di Shechtman. Posso pensare che Steinhardt e Levine ritenessero le loro speculazioni numerico-teoriche più generali della specifica situazione sperimentale che coinvolgeva le leghe di alluminio e manganese.

Si avevano quindi tutti gli elementi per parlare di ordine quasi periodico in alcune tipologie di materia.

Un interludio può essere opportuno per fare uno sforzo per spiegare cosa sia la quasi periodicità così ricorrente nei paragrafi precedenti. A tal proposito è utile innanzitutto ricordare che una funzione di una qualche variabile x , il cui valore calcolato in x indichiamo con $f(x)$, è periodica di periodo

$t >$

0 quando

f

(

$x+t$

) è pari ad

f

(

x

). La stessa funzione si dice

quasi periodica

di periodo t quando

f

(

$x+t$

) non è proprio pari ad

f

(

x

) ma a quel valore magnificato da una qualche costante. Un esempio è la funzione

f

(

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20

x
) = $\sin(A$

x
) + $\sin(B$

x
) con A e B due costanti il cui rapporto A/B sia un numero irrazionale. Il concetto di funzione quasi periodica fu introdotto nel 1925 da Harald Bohr (1887 – 1951), fratello di Niels (1885 – 1962) che propose la visione dell'atomo come costituito da un nucleo con una nuvola di elettroni intorno, quella visione che, almeno in termini qualitativi, è ormai un comune e diffuso bagaglio culturale. Matematico il primo, fisico il secondo, che molte discussioni ebbe con Albert Einstein (1879 – 1955) riguardo alla meccanica quantistica, facendo poi prevalere la sua idea, quella che viene indicata come l'*interpretazione di Copenhagen*

, furono entrambi calciatori in gioventù. Harald, rispetto al fratello che giocava in porta, aveva un apprezzabile talento da mediano che lo portò nella formazione della nazionale danese nelle Olimpiadi del 1908, dove segnò due goal alla Francia, nel 17-1 che la Danimarca inferse ai francesi, allora di valore diverso da quello attuale, e giunse alla medaglia d'argento: la Danimarca perse la finale con l'Inghilterra. Cito la circostanza calcistica perché mi pare sia un esempio di come piedi e testa possano entrambi funzionare bene. Basta allenarli entrambi, sempre che se ne abbia la voglia. Ma questo è un altro discorso che poco ha a che fare con le questioni quasi cristalline che si affrontano qui e per le quali importa solo ricordare che un reticolo di punti nello spazio si può dire quasi periodico quando la sua distribuzione è descritta da una funzione quasi periodica.

L'esistenza di un ordine quasi periodico negli aggregati atomici poteva essere naturalmente accettata da fisici e matematici: c'erano gli strumenti concettuali per descrivere ed interpretare la circostanza. Non così era per i chimici, in particolare per i cristallografi, sebbene molti contattassero Shechtman per informarlo di aver osservato simmetrie di tipo icosaedrico in appropriate circostanze. Nessuno, però, aveva pensato che quei dati fossero l'indicazione che ci poteva essere un ordine nella distribuzione degli atomi nei metalli che fosse intrinsecamente quasi periodico e non fosse dovuto alla presenza di difetti rispetto alla regolarità periodica comunemente attribuita alle strutture cristalline. Nel frattempo, tra l'altro, ci si rendeva conto con il passare del tempo che l'ordine quasi periodico, sebbene non particolarmente comune, non era solamente ascrivibile al caso in cui fosse dominante la simmetria dell'icosaedro. Ora sappiamo che vi sono strutture materiali anche più esotiche: esistono leghe che mostrano strutture a simmetria decagonale che si organizzano in modo quasi periodico in due direzioni differenti e sono invece periodiche in una terza direzione. Le osservazioni di Shechtman, però, non vennero immediatamente accolte da comprensione e successivo plauso, semmai l'idea che metalli – quindi in materiali a cui veniva usualmente associato il concetto di cristallo – potessero essere costituiti da aggregati atomici di tipo quasi periodico non pareva facilmente accettabile a chi aveva una visione tradizionale della cristallografia. Shechtman ebbe un fiero oppositore in Linus Pauling (1901 – 1994) "Shetchaman afferma cose che non hanno senso. Non ci sono cose come i quasicristalli – ci sono solo quasi scienziati." Questa è quanto Pauling pare abbia affermato in un congresso scientifico di fronte ad un pubblico che comprendeva Shechtman

stesso – ammirevole franchezza, almeno. E Pauling era una montagna onusta di gloria, ardua da scalare. Aveva sviscerato aspetti cruciali della natura dei legami molecolari, ricevendo nel 1954 il Premio Nobel per queste sue ricerche, ma non si era fermato lì, diventando il padre della biologia molecolare con i suoi studi sulle proteine. Più avanti negli anni, nel 1962, aveva poi ricevuto un altro Premio Nobel, questa volta per la pace per il suo attivismo antimilitarista – operò perché fosse fermato il programma di test nucleari e denunciò i pericoli del decadimento radioattivo sulla possibile formazione di mutazioni genetiche negli esseri viventi. Questo era l'oppositore, o meglio, il più rilevante di una pattuglia che però si sarebbe progressivamente ridotta. Per di più Pauling, nello studiare nel 1952 i composti intermetallici che egli stesso aveva contribuito a creare nel 1922, aveva già lì individuato un aggregato atomico icosaedrico in essi immerso. Non credeva però che ci fossero leghe costituite da quelle disposizioni quasi periodiche di atomi che le osservazioni di Shechtman suggerivano. Semmai riteneva che l'iniziale osservazione di Cahn fosse sensata e che si trattasse dell'evidente presenza di strutture cristalline ordinarie gemelle. Nell'ottobre del 1985 riassunse le sue osservazioni in un breve articolo apparso su *Nature* in cui suggeriva che la compartecipazione di venti tetraedri nel formare strutture gemelle potesse dare ragione delle osservazioni di Shechtman. Nonostante le obiezioni di Pauling, però, gli studi sulle strutture quasi periodiche continuavano e si ampliavano (un agile resoconto di questa attività nei primi anni susseguenti alla scoperta dei quasicristalli si può trovare in un bell'articolo di Mort La Bracque, 1987/8, che mi è stato utile in alcuni passaggi di queste brevi note), e, progressivamente, venivano evidenziate nei quasicristalli inusuali proprietà elettromeccaniche quali un coefficiente di attrito molto basso, elevata durezza, resistenza all'ossidazione ed allo sfregamento, alta capacità termica, bassa conducibilità termica, alta resistività elettrica, bassa duttilità e comportamento fragile a temperatura ambiente, incrudimento trascurabile oltre una certa temperatura ove il comportamento meccanico appare elastico-perfettamente-plastico, lasciando presagire possibili applicazioni industriali. Il dibattito sulla natura dei quasicristalli, però, aveva un interesse che prescindeva dal possibile utilizzo tecnologico di tali materiali perché riguardava i fondamenti della cristallografia. Pauling difendeva con vigore il paradigma tradizionale della cristallografia. La sua proposta d'interpretazione delle osservazioni di Shechtman in termini di strutture cristalline tradizionali gemelle non era sicuramente banale, ma alcune conseguenze del modello che proponeva erano falsificate da dati sperimentali ottenuti da analisi di laboratorio che sfruttavano i raggi X. Peraltro, indipendentemente da ciò, le idee di Pauling erano quelle della cristallografia classica: i picchi di Bragg osservati in laboratorio erano l'evidenza di un reticolo atomico di Bravais ed un reticolo di tal guisa non poteva essere invariante rispetto a trasformazioni che rispettassero le simmetrie dell'icosaedro (un matematico, un fisico, un cristallografo direbbero che un reticolo di Bravais tridimensionale – si ricordi che occupa l'intero spazio ambiente – non può essere invariante a seguito dell'azione del gruppo icosaedrale). Questo era quanto animava Pauling e coloro che aderivano al paradigma tradizionale della cristallografia. Dimenticavano, però, che, in realtà, un reticolo quasi periodico in ambiente tridimensionale può essere visto come una particolare proiezione di un reticolo periodico in uno spazio esadimensionale. E su quest'ultimo reticolo le simmetrie cristallografiche classiche sono naturali. Si pensi ad esempio ad un reticolo bidimensionale di punti a simmetria quadrata – il piano è riempito da un foglio a quadretti infinito e su ogni angolo di ciascun quadretto c'è un atomo e la simmetria del reticolo risultante rientra nel novero della cristallografia tradizionale. Si selezioni su tale piano una retta inclinata di un angolo irrazionale (il valore numerico dell'angolo è un numero irrazionale) e si prenda una striscia in modo che le due rette che la delimitano

siano parallele alla retta che si è inizialmente scelta e siano equidistanti da essa (siano quindi una da una parte e l'altra dall'altra) ad una distanza tale da comprendere nella striscia un bel po' di atomi. Si proiettino quindi tutti questi atomi sulla retta a cui si è dato un ruolo privilegiato lungo direzioni ad essa ortogonali. In tal modo si dipinge sulla retta scelta un reticolo quasi periodico, un quasicristallo monodimensionale, quindi. Il risultato generale che correlava simmetrie non cristallografiche (quella icosaedrica è un esempio) nello spazio tridimensionale con quelle cristallografiche in uno spazio a dimensione più alta era stato ottenuto per via teorica da Carl Hermann (1898 – 1961) che lo aveva descritto in un suo articolo apparso nel 1949 (Shechtman aveva appena otto anni e non s'immaginava certo di combattere per ciò che avrebbe visto nelle leghe di alluminio) negli *Acta*

Crystallographica

una delle riviste di riferimento nel settore richiamato nel nome. In quel tempo Hermann era da due anni professore a Marburg, dove era giunto dopo essere stato rinchiuso in carcere e condannato a morte perché con la moglie Ewa aveva aiutato un certo numero di ebrei a sottrarsi al delirio nazista. La ventura di essere uno scienziato eminente aveva in qualche modo impedito che la condanna venisse eseguita (qualcuno aveva trovato i modi di un intervento salvifico). Hermann, pur non essendoci più, aiutava indirettamente anche Shechtman. Il poter pensare ad un quasicristallo come all'immagine in un dato ambiente di un reticolo periodico (quello che rappresenta un cristallo tradizionale, quindi) che vive in uno spazio a dimensione più alta ha influenzato anche la descrizione della meccanica di queste classi di materiali – per essa il problema è quello di stabilire come si comporti un corpo quasi cristallino a seguito dell'azione termomeccanica dell'ambiente esterno. L'idea che è sembrata subito naturale è che, se si immagina di deformare il reticolo periodico nello spazio a dimensione più ampia, vi è una componente della deformazione nel sottospazio appropriato dove si genera il quasicristallo, che è lo spazio ambiente, per cui tale componente rappresenta la deformazione macroscopica comunemente osservata. Vi è inoltre una componente nella parte rimanente di spazio (il complemento ortogonale allo spazio fisico rispetto all'ambiente più ampio che si considera). Per ciascun punto materiale, un gergo comune attribuisce i termini

fononi

a

fasoni

ai gradi di libertà (cioè alle possibilità di movimento) associati rispettivamente alle due componenti della deformazione del reticolo regolare nello spazio a dimensione più ampia. Il termine

fononi

è suggerito dal fatto che sono le onde elastiche associate ad una deformazione macroscopica lungo un qualsiasi moto a generare effetti acustici. Credo si debba interpretare l'uso della parola fasoni come l'indicatore di un cambiamento locale di fase (quindi di struttura, in un qualche senso) nel quasicristallo. Analisi sperimentali sviluppate da un certo numero di ricercatori facendo uso dell'esposizione ai raggi X – la precisione è migliore di quella che si ottiene negli esperimenti basati sulla diffrazione elettronica, la strada seguita da Shechtman – mostrano nel caso di quasicristalli picchi di Bragg non particolarmente definiti. Tale mancanza di definitezza – analoga all'alone intorno all'immagine della luna piena che si vede in campagna in alcune notti estive che precludono alla nebbia o alla pioggia del giorno dopo – è indicatrice di un disordine locale dovuto ad alterazioni della disposizione degli atomi, un meccanismo che avviene ad una scala spaziale più piccola rispetto a quella che è pertinente alla descrizione standard della

deformazione macroscopica, che è ciò che si osserva ad occhio nudo. È quindi naturale considerare i gradi di libertà fasonici come i testimoni di tali meccanismi microscopici. In quest'ottica è stata sviluppata la meccanica dei quasicristalli. All'inizio, coloro che erano coinvolti nell'impresa focalizzavano la loro attenzione al caso delle deformazioni infinitesime, un ambito in cui si proponeva spesso semplicemente di estendere i risultati classici dell'elasticità lineare tradizionale (una disciplina antica). Era questo il contesto quando mi capitò qualche anno fa di incontrare per caso la parola

quasicristalli

nel titolo di un articolo che non ricordo ma che era apparso in una qualche sezione di *Physical Review*

. Lo lessi solo per la curiosità di sapere a cosa corrispondesse quel nome e, andando avanti riga dopo riga, mi resi conto che il punto di vista che ho appena esposto sulla meccanica dei quasicristalli poteva essere visto come un'espressione naturale dello schema generale della meccanica dei corpi complessi (un modo naturale e generale per costruire modelli matematici che descrivano l'influenza di eventi microstrutturali sul comportamento macroscopico di materiali esotici rinvenibili in natura o ottenuti per sintesi), che era ciò di cui mi occupavo da anni. Cercai, quindi, di avere informazioni su quale fosse lo stato della meccanica dei quasicristalli e m'imbattei in un gran numero di scritti in merito. Tra gli altri, un articolo di Chengzheng Hu, Renhui Wang e Di-Hua Ding, tutti e tre della cinese Wuhan University, era una rassegna piuttosto completa dello stato dei lavori. L'attenzione era sempre principalmente sulla teoria lineare (l'ambito delle deformazioni infinitesime) con qualche tentativo preliminare verso l'ambito delle deformazioni finite (quelle ampie, per così dire). Comunque sia, già la lettura delle equazioni integrali di bilancio (le equazioni integrali della dinamica) lasciava qualche dubbio relativo a quelle coinvolgenti le azioni dovute agli eventi microscopici, quelli correlati ai gradi di libertà fasonici. Ripresi quindi la questione dall'inizio: con gli strumenti concettuali dello schema generale della meccanica dei corpi complessi veniva naturale sviluppare la descrizione della meccanica non lineare dei quasicristalli. Gli sviluppi mostravano l'esistenza di un particolare tipo di azione nel materiale. Si trattava di un'auto-azione che appariva come conseguenza della richiesta di invarianza rispetto a cambiamenti di osservatore della potenza delle azioni esterne su di una qualsiasi parte del corpo in questione. Non vi era menzione di ciò in altri scritti sulla meccanica dei quasicristalli. Nell'articolo in cui raccoglievo queste analisi (Mariano, 2006), annotai quindi, e soltanto, che, sebbene l'invarianza della potenza esterna rispetto a cambiamenti di osservatore (in realtà è necessaria una nozione estesa rispetto a quella che è naturale in assenza di gradi di libertà fasonici) prevedesse l'esistenza di un'auto-azione, nella letteratura disponibile essa veniva comunemente omessa, e ciò sembrava poter essere una possibile scelta (costitutiva). Non ritornai sul problema immediatamente. L'attenzione s'era spostata sulla determinazione delle condizioni che assicurassero l'esistenza di stati di equilibrio di corpi elastici complessi generici che fossero sottoposti a deformazioni ampie. Era una questione che discutevo con Giuseppe Modica (andando dallo studio dell'uno a quello dell'altro lungo lo stesso corridoio) e che risolvemmo utilizzando strumenti che negli anni precedenti egli stesso, Mariano Giaquinta e Jiri Souček avevano creato, sviluppando quella branca dell'analisi matematica che viene chiamata 'calcolo delle variazioni'. Una conseguenza immediata dal punto di vista analitico furono le condizioni per l'esistenza di stati stazionari di quasicristalli, in accordo con le indicazioni sperimentali che ne indicano la stabilità in appropriate circostanze. L'estensione al caso degli stati stazionari di quasicristalli che ammettano ordine magnetico e che avevano richiamato l'attenzione di molti – ricordo tra gli altri Ron Lifshitz di Tel Aviv

(Lifshitz, 1998) e Taku J. Sato di Tokio (Sato, 2005) – fu più tardi anch'essa immediata, giusto un commento a margine. Nel frattempo s'andava sempre più sviluppando la teoria lineare dell'elasticità quasi cristallina che era intesa, ripeto ancora, come elasticità lineare tradizionale (ottocentesca, direi) in uno spazio a dimensione più ampia di quella dello spazio ambiente (una sintesi dei risultati della scuola cinese, quella più attiva nel campo, in verità, è raccolta nel libro di Tian You Fan, 2011, un professore di Pechino). Discutendo con Furio Stazi e Massimiliano Gioffré si fece qualche semplice passo anche in questa direzione. Su una strada più lunga portarono i ragionamenti sviluppati con Enrico Radi (ora nell'Università di Modena e Reggio Emilia). Rimaneva però nella mente la questione dell'auto-azione. Una questione minuscola, in verità, se comparata alla miriade di problemi fondamentali – uno per tutti la crescita di strutture quasi cristalline – che la scoperta di Shechtman proponeva. Eppure era lì. Ad un tratto fu quasi per caso che con Sergia Colli, la quale chiedeva le indicazioni scientifiche che una qualsiasi dottoranda che voglia fare un percorso di crescita serio cerca di trovare, si affrontò un problema classico di cui si poteva trovare la soluzione in maniera esatta, ma coinvolgendo i quasicristalli: si trattava di considerare un materiale quasi cristallino che occupa tutto un semipiano ed è soggetto all'azione di una forza applicata in un punto della frontiera. Il problema era formulato in termini della teoria standard dell'elasticità lineare quasi cristallina: l'auto-azione che ho menzionato in precedenza nello scrivere queste righe era considerata nulla come viene fatto di solito. Gli sviluppi, però, implicarono inaspettatamente la

propagazione istantanea all'infinito

dei gradi di libertà fasonici. La conclusione era quindi che lo schema comunemente usato per descrivere l'elasticità lineare dei quasicristalli

può

dar luogo a risultati non fisici e quindi deve essere modificato (Colli e Mariano, 2011). Ci sono forti motivi che spingono a pensare che sia proprio un valore non nullo dell'auto-azione di cui ho parlato che aggiusti le cose. La questione non fa altro che generare ulteriori curiosità perché se vi è un'auto-azione non nulla non si può più pensare per i quasicristalli ad un'elasticità lineare standard riprodotta tale e quale in uno spazio a dimensione più alta.

Vi erano alcuni che guardavano con scetticismo questo interesse – sebbene decisamente non esclusivo, anzi, quasi incidentale, direi, almeno per come lo vedevo personalmente – per la meccanica dei quasicristalli. Niente di rilevante, ovviamente. Nulla di paragonabile a quello che affrontò Shechtman quando Pauling s'erse dinanzi a lui. D'altra parte le questioni erano abbastanza minuscole e nessuno era paragonabile, neanche in momenti di distrazione e di colpevole leggerezza da parte dell'eventuale osservatore esterno, al gigante che era Pauling, il quale, sebbene nella circostanza quasi cristallina sbagliasse, fu sempre almeno in grado di formulare un discorso culturale pertinente. Purtroppo Pauling non ebbe tempo di vedere gli sviluppi degli studi sui quasicristalli, come ad esempio quelli connessi alle suggestioni che i risultati sperimentali hanno dato alla geometria, portando all'introduzione dei gruppi quasi cristallografici (di simmetria) nel senso di Sergei Novikov e Alexander Veselov, anche sulla base di risultati di Arnol'd (Vladimir Igorevič Arnol'd, 1937 – 2010), e a quella delle algebre di Lie quasi cristalline ad opera di Jiri Patera e Reidun Twarok, o la classificazione dei quasicristalli in termini di spettro di Fourier proposta da David Mermin e da suoi collaboratori. Non seppe della scoperta di quasicristalli naturali annunciata in un articolo su *Nature* (2009) da

Luca Bindi, un mineralogo del Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze, Paul Steinhardt, Nan Jau di Princeton e Peter J. Lu di Harvard (si tratta di una lega di alluminio, di rame e di ferro, associata a cristalli di khatirkyte e cupalite, rinvenuta in Russia sui monti Koryak) – d'altra parte, come diceva Mermin, “come potrebbe la natura privarci di una struttura così bella?”. Soprattutto, gli sfuggì la notizia dell'assegnazione del Premio Nobel per la chimica a David Shechtman nel 2011, in quello che è stato l'anno internazionale della chimica.

La vicende che Shechtman ha attraversato prima che le conseguenze delle sue osservazioni si affermassero ricordano che, nell'esprimere un qualsiasi giudizio di valore, è necessario che il giudicante disponga di *sensibilità* (che è un istinto naturale affinabile ma non acquistabile e si coniuga con la capacità di visione delle direzioni lungo cui si possa sviluppare il sapere),
competenza

(che s'acquiesce con serio e silenzioso lavoro, cercando i maestri e non altri), ed
onestà

intellettuale

(quest'ultima intesa soprattutto nel senso che egli sia così solido nella percezione di sé da dominare l'impulso al personale interesse, sia esso materiale che psicologico – il secondo anche più incisivo del primo, perfino più frequente da incontrare nelle circostanze che si possono manifestare ogni giorno). Trovare tutti questi tre ingredienti nella stessa persona giudicante, soprattutto di questioni culturali, tenendo conto che egli stesso possa anche sbagliare in buona fede, è sovente un'impresa per la quale un finale lieto viene scritto con frequenza decisamente inferiore a valori di rassicurante ed apprezzabile ragionevolezza.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bindi L., Steinhardt P. J., Yao N., Lu P. J. (2009), Natural quasicrystals, *Science*, **324**, 1306-1309.

Colli S., Mariano P. M. (2011), The standard description of quasicrystal linear elasticity may produce non-physical results, *Physics Letters A*, **375**, 3335-3339.

Fan T. Y. (2011), *Mathematical theory of elasticity of quasicrystals and its applications*, Science Press Beijing, Beijing; Springer Verlag, Heidelberg.

Hu C., Wang R., Ding D.-H. (2000), Symmetry groups, physical property tensors, elasticity and dislocations in quasicrystals, *Reports on Progress in Physics.*, **63**, 1-39.

Kleinert H., Maki K. (1981), Lattice textures in cholesteric liquid crystals, *Fortschritte der Physik*, **29**, 219-259.

La Brecque M. (1987/8), Opening the door to forbidden symmetries, *Mosaic*, **18**, 2-23.

Levine D., Steinhardt P. J. (1984), Quasicrystals: a new class of ordered structures, *Physical Review Letters*

,
53
, 2477-2480.

Lifshitz, R. (1998), Symmetry of magnetically ordered quasicrystals, *Physical Review Letters*, **80**,
2717-2720.

Mariano P. M. (2006), Mechanics of quasi-periodic alloys, *Journal of Nonlinear Science*, **16**,
45-77.

Sato T. J. (2005), Short-range order and spin-glass-like freezing in A-Mg-R (A = Zn or Cd; R = rare-earth elements) magnetic quasicrystals, *Acta Crystallographica A*, **61**, 39-50.

Senechal M. (1981), Which tetrahedra fill space?, *Mathematics Magazine*, **54**, 227-243.

Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W. (1984) Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry, *Physical Review Letters*, **53**, 1951-1953.

Solomon R. (2001), A brief history of the classification of finite simple groups, *Bulletin of the American Mathematical Society*

,
38
, 315-352.

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20

Quasicristalli

Scritto da Paolo Maria Mariano
Giovedì 29 Marzo 2012 19:20
