

MICROSCOPI TATTILI

Un modo evoluto di “guardarsi intorno”

L'uomo è da sempre affascinato dal microcosmo – il mondo delle cose invisibili ad occhio nudo. E' impossibile sopravvalutare le ricerche svolte in questo campo: hanno scongiurato molte malattie, permesso la costruzione di dispositivi elettronici microscopici, e hanno aiutato gli scienziati a spiegare molti fenomeni che accadevano nel mondo visibile.

Ma per capire la struttura del microcosmo, per prima cosa bisogna vederlo. E' con questa idea in mente che, nel 1674, il ricercatore olandese Antonie van Leeuwenhoek inventò il microscopio ottico, che probabilmente avete avuto modo di usare nel laboratorio di biologia. E' costituito da un sistema di lenti a rifrazione che ingrandiscono l'immagine di un oggetto. Da allora, sono trascorsi secoli, e il microscopio si è rivelato talmente funzionale da diventare il simbolo della ricerca scientifica. Tuttavia, le sue possibilità sono limitate – può raggiungere grandezze nell'ordine del micron. Gli scienziati però sono interessati alla dimensione submicronica, in cui le grandezze si misurano in nanometri. Eppure i microscopi ottici di oggi differiscono poco da quello di Leeuwenhoek. Lui riusciva ad ingrandire un'immagine di 200 volte, e le controparti moderne possono gestire un fattore d'ingrandimento non superiore a 1000 volte. Che sta succedendo?

La barriera di Abbe

Oltre 100 anni fa, il fisico e ottico tedesco Ernst Abbe provò l'esistenza di limiti per ogni microscopio che funzioni con la luce (o altra radiazione) focalizzata da lenti. Il più importante è dato dalla diffrazione – la capacità della radiazione di “avvolgere” l'oggetto, “nascondendo” i dettagli che misurano meno della metà della lunghezza d'onda della radiazione stessa. Poiché la lunghezza d'onda della luce visibile è di circa mezzo micron, non è possibile vedere un oggetto più piccolo di 0.1 micron con un microscopio ottico. Per entrare nel mondo submicronico, logicamente, servono lunghezze d'onda inferiori – per esempio, i raggi X o un flusso di elettroni (come tutte le particelle elementari, anche l'elettrone è un'onda). Ed ecco che negli anni Trenta, fa la sua comparsa la microscopia elettronica.

“Particelle” di qualsiasi radiazione, indipendentemente dall'origine, hanno una caratteristica universale: la loro energia. Maggiore è l'energia, più breve risulta la

lunghezza d'onda. C'è uno strumento costruito con i principi del microscopio ottico, ma che funziona con un fascio di elettroni riflesso da speciali lenti magnetiche: il microscopio elettronico. Le onde elettroniche sono più brevi di quelle luminose di circa 1000 volte, quindi la capacità d'ingrandimento con il miglior microscopio elettronico può arrivare a 1.000.000x. Ma arrivare a questi risultati non era semplice. Un microscopio elettronico è immensamente più voluminoso, costoso e complesso di un microscopio ottico. Risente anche del fatto, non secondario, che generalmente distrugge l'oggetto esaminato. Elettroni con l'energia di decine di elettronvolt uccidono qualsiasi essere vivente. Causano difetti nei cristalli, alterando la struttura molecolare degli atomi. Nondimeno, il microscopio elettronico ha permesso alla ricerca di compiere importanti progressi nel mondo submicronico. Ma c'era forse qualche altro modo di indagare nelle profondità dell'universo in miniatura.

Come si superò la barriera di Abbe

A metà degli anni '80, lo sviluppo dei microscopi cambiò bruscamente direzione. I progressi precedenti erano stati raggiunti nell'ambito della barriera di Abbe, semplicemente diminuendo la lunghezza d'onda della radiazione che va a formare l'immagine nel microscopio. Ora, questo limite viene semplicemente aggirato. Appaiono infatti una nuova generazione di strumenti: i microscopi a scansione a sonda. Con questi dispositivi è possibile osservare una superficie a distanza ravvicinata. I microscopi, prima, si basavano sulla vista; questi nuovi apparecchi invece, sul tatto. Non solo mostrano la forma e la posizione dei minimi dettagli di un oggetto, ma ne forniscono anche altre caratteristiche. Ad esempio, il microscopio a sonda magnetica "sente" l'eterogeneità della magnetizzazione di un oggetto; quello a sonda elettrica percepisce la microdistribuzione dei campi elettrici, il microscopio a sonda termica individua le differenze di temperatura, e così via. In pratica, ad ogni parametro fisico di base corrisponde un microscopio a sonda. I microscopi a sonda basati sull'effetto tunnel elettronico e sulle forze d'interazione interatomiche ci consentono addirittura di vedere i singoli atomi. Ma stiamo correndo troppo, quindi diamo un'occhiata da vicino al microscopio a sonda ottica.

Sentire con la luce

Immaginiamo un foglio opaco a forma di cono con un forellino in punta, dal diametro inferiore alla metà della lunghezza d'onda della luce (fig. 1).

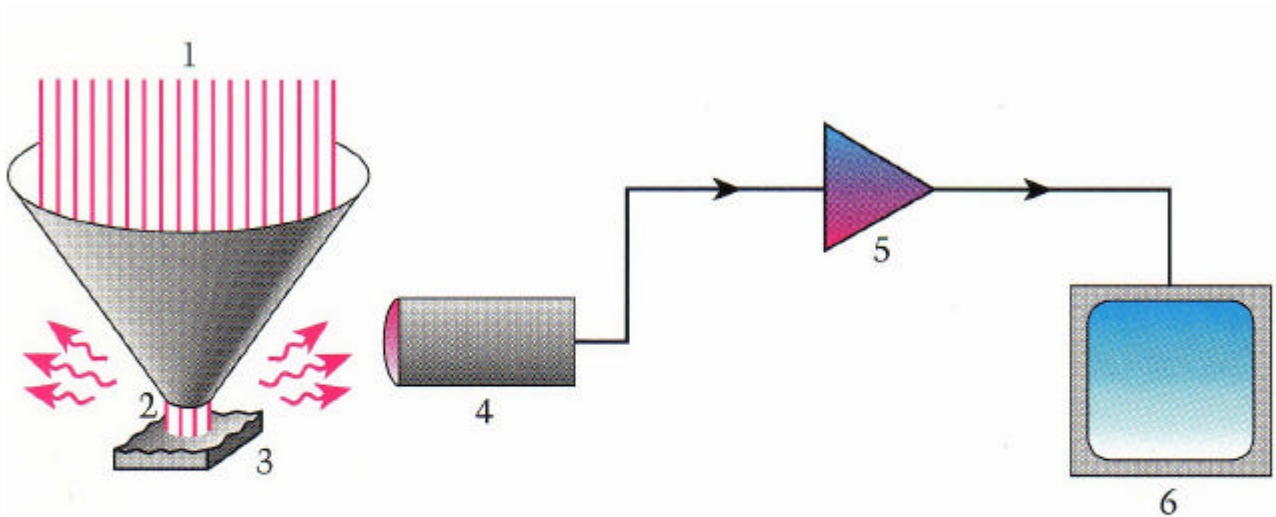


Figure 1

The near-field optical scanning microscope. 1—incident light; 2—“sagging” light; 3—object under investigation; 4—photoconverter; 5—amplifier; 6—monitor.

Il fascio di luce, trasmesso attraverso un cono come questo, non andrà molto lontano – l'onda non “striscia” attraverso il foro, ma viene riflessa. Ci sarà della luce dall'altra parte del foro, ma solo nelle immediate vicinanze – metà della lunghezza d'onda. La nuova generazione di microscopi ottici fa uso di questa luce “attenuata”. Questo fenomeno (di natura quantistico-meccanica) è caratteristico di ogni onda o particella ed è chiamato “effetto tunnel”.

Ora, poniamo l'oggetto da esaminare vicino al forellino, a una distanza inferiore al diametro del forellino stesso. Sulla superficie dell'oggetto si vedrà un alone di luce grande quanto il diametro del forellino. La luce riflessa dall'oggetto può essere captata da un fotoconvertitore – uno strumento che converte deboli segnali luminosi in segnale elettrico. Quest'ultimo può essere amplificato e di nuovo riconvertito in segnale luminoso su un monitor. La luminosità del punto sullo schermo corrisponderà all'intensità della luce catturata.

Muovendo il forellino-sonda sulla superficie dell'oggetto riga per riga, eseguiamo la “scansione” della superficie. Se i punti lungo il percorso hanno diversa luminosità, sul monitor si forma l'immagine della superficie. La risoluzione corrisponde al diametro dell'alone luminoso che dal forellino si forma sull'oggetto – inferiore a $\lambda / 2$ (la risoluzione non è altro che la misura del più piccolo dettaglio visibile di un oggetto).

La barriera di Abbe, dunque, è stata superata. Il nuovo strumento che ha reso possibile tutto ciò si chiama microscopio ottico a scansione in campo prossimo (o di prossimità). Per

quanto possa sembrare paradossale, questo microscopio ottico ci consente di vedere dettagli molto più piccoli della lunghezza d'onda della luce.

Dita piezoelettriche

Com'è possibile scandire la superficie di un oggetto in modo così dettagliato? Qui entrano in gioco i microposizionatori piezoelettrici. Un modello semplice è mostrato nella figura 2:

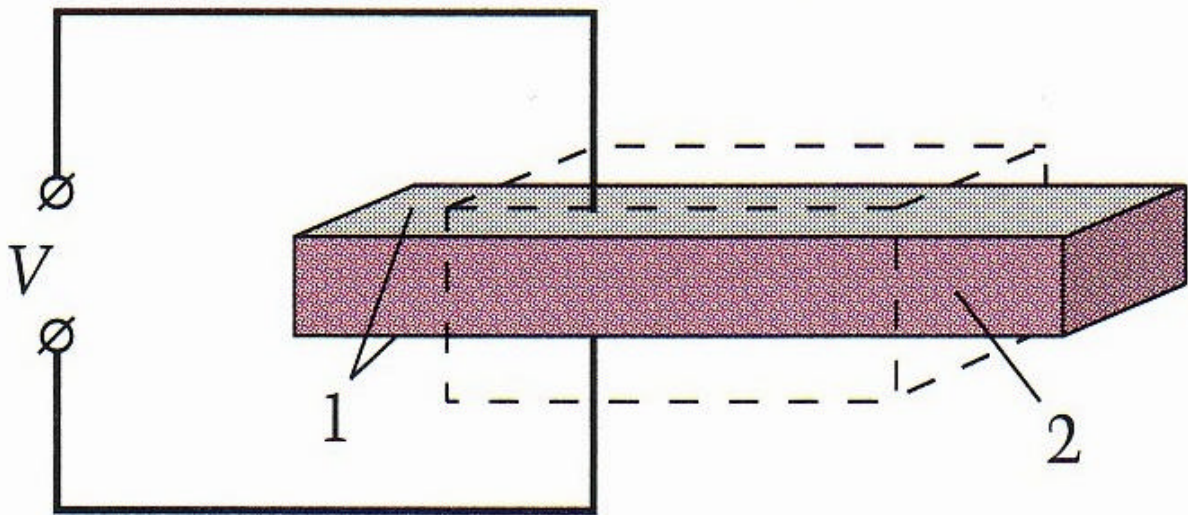


Figure 2

Piezoelectric manipulator. 1—electrodes; 2—piezoceramics.

è fatto di una ceramica speciale le cui dimensioni cambiano leggermente con il variare del campo elettrico. Il posizionatore è posto tra due condensatori che spesso sono semplici elettrodi a forma di sottile piastra metallica. Variando la tensione tra gli elettrodi di 0.1V, aumenta la lunghezza della barra di 0.1 nm, cioè il diametro di un atomo (le piastre metalliche sono abbastanza sottili da non interferire con il fenomeno). Un dispositivo semplice composto di tre posizionatori connessi perpendicolarmente può muovere la sonda, situata nel punto d'intersezione, in tutte le direzioni. Tre tensioni di comando, V_x, V_y, V_z determinano le coordinate x, y e z della sonda. Variando le tensioni V_x e V_y possiamo muovere la sonda sulla superficie dell'oggetto lungo linee parallele a una certa distanza l'una dall'altra (come il pennello elettronico del tubo catodico di un normale

televisore). La tensione V_z , d'altro canto, muove la sonda verticalmente; se rimanesse costante, la superficie esaminata si avvicinerebbe o allontanerebbe dalla sonda a seconda delle asperità che presenta. Questo sarebbe un problema per il sistema di registrazione: il segnale varierebbe bruscamente e la sonda potrebbe urtare l'oggetto. Per risolverlo è stato introdotto un elemento di "autogestione", o di controreazione: fa sì che la sonda si alzi e si abbassi a seconda della superficie dell'oggetto.

Toccare gli atomi

Andiamo a guardare più da vicino il meccanismo di controreazione, per esempio di un microscopio a scansione effetto tunnel, che è stato il primo microscopio a sonda. E' stato inventato nei laboratori della IBM di Zurigo, in Svizzera, da G. Binnig e G. Rover, che per questo sono stati insigniti del Premio Nobel. Il questo strumento, la sonda era costituita da un ago molto acuminato. La punta dell'ago svolgeva la funzione del forellino della sonda nel microscopio ottico, lasciando passare (analogamente a quanto accadeva per la luce) onde quantistico-meccaniche di elettroni (fig. 4).

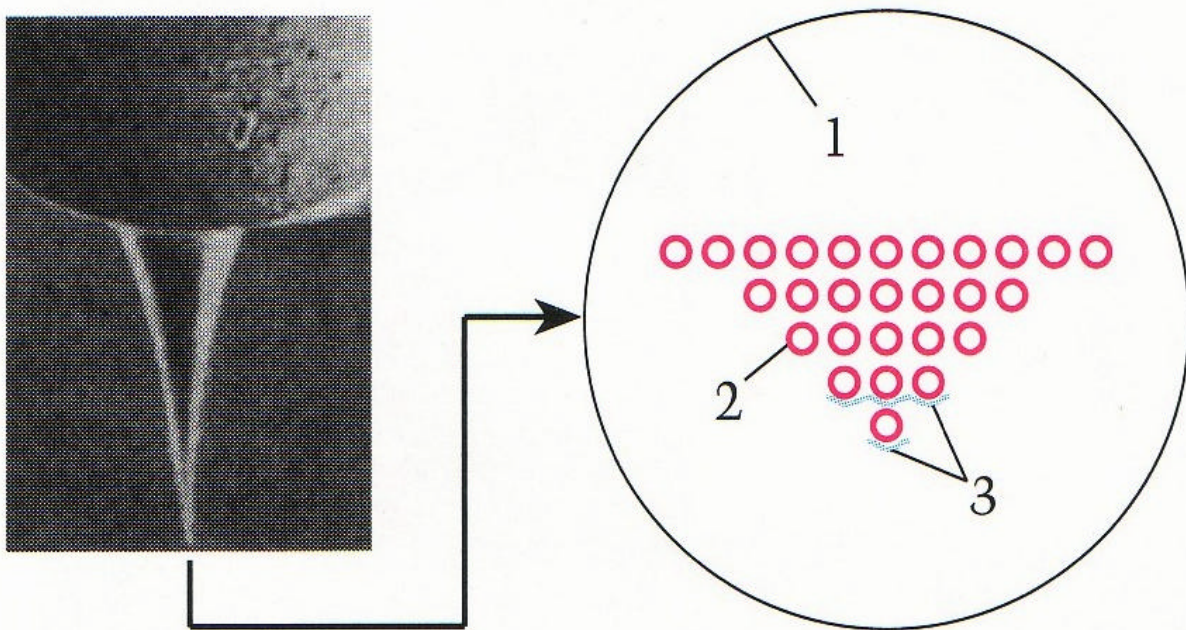


Figure 4

*Probe of tunneling scanning microscope. 1—
“enlarged” point; 2—atoms; 3—electron clouds.
At left: the point (electron-microscopic photo).*

La lunghezza dell'onda elettronica è inferiore a quella della luce di circa 1000 volte, e può, quindi, "illuminare" un'area proporzionalmente più piccola rispetto a quella raggiungibile con le sonde ottiche. Quando un'onda del genere tocca la superficie dell'oggetto sotto esame (con la sonda distante circa 1 nm dalla superficie), succede che un elettrone dalla punta passa alla superficie – cioè "attraversa un tunnel". Il "tunnel" è una corrente che si forma nel circuito composto dalla superficie dell'oggetto e dalla punta della sonda – una corrente molto debole (diversi miliardesimi di Ampere). Non è difficile, per i moderni apparecchi, amplificare segnali così deboli. È importante il fatto che questa corrente sia in stretta relazione con la distanza tra la sonda e la superficie: se questa diminuisce di 0.1 – 0.2 nm (cioè la misura di un atomo), la corrente di tunnel aumenta di un migliaio di volte. Questa relazione è descritta da una funzione esponenziale con base $e = 2.718...$

Ora, torniamo al meccanismo di controreazione, che assicura il corretto funzionamento di qualsiasi microscopio a sonda. Si tratta di un circuito elettronico abbastanza complesso e sensibile, che registra i cambiamenti di corrente del tunnel e le variazioni di tensione V_z applicata al posizionatore verticale, il quale sposta la sonda in modo da mantenere costante la corrente di tunnel. Questo è possibile solo mantenendo invariata la distanza tra la sonda e la superficie dell'oggetto. Il meccanismo di controreazione fa sì che la sonda non si discosti troppo dall'oggetto e nemmeno lo tocchi. Data l'estrema sensibilità della corrente di tunnel alla distanza dalla superficie, la precisione del sistema di controreazione è altissima – 0.01-0.001 nm. Quindi, la punta della sonda si muove lungo una traiettoria che simula minuziosamente il rilievo dell'oggetto esaminato. Essendo la tensione V_z proporzionale all'altezza della punta sulla superficie in un dato momento, fornisce una valutazione accurata del rilievo. Le informazioni relative alla superficie vengono poi inviate a un computer, e, dopo l'elaborazione (cioè ripulite da rumore e segnali parrassiti), sono visualizzate su un monitor in forma di "mappa topografica" (fig. 5).

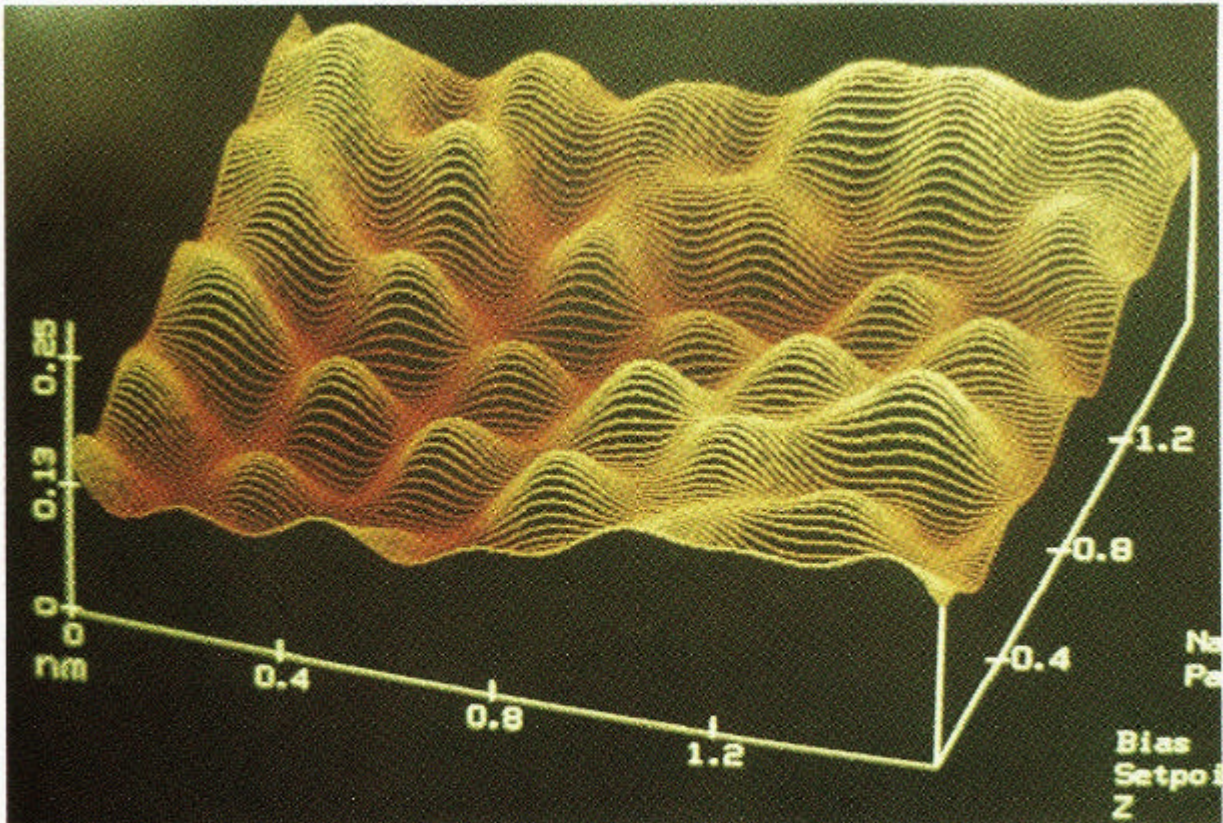


Figure 5

“Topographic map” of the surface of a molybdenum disulfide crystal. This image was taken in a student lab at Montana State University by H. David Sheets and Darryl L. Steinert.

Spesso è riprodotta in mezzetinte, per identificare le diverse altezze del rilievo tramite una diversa intensità del colore. Gli scienziati hanno usato microscopi a scansione per effetto tunnel per ottenere immagini dettagliate della superficie di molti cristalli e materiali plastici ad un livello di risoluzione prossimo all'atomo. Microscopi del genere consentono ingrandimenti senza precedenti, nell'ordine dei 100.000.000 di volte.

I ricercatori sono ormai abituati ai posizionatori piezoelettrici, in grado di spostare la sonda con precisione atomica. Hanno imparato ad usare la punta come un vero strumento nel microcosmo nanometrico. Grande quanto un atomo, può essere posizionata esattamente nel punto voluto all'interno di una molecola e dividerla in due. Un atomo si può afferrare e portare dove si desidera. In un laboratorio IBM, alcuni scienziati sono riusciti addirittura a scrivere con le catene di atomi. Hanno composto il logo IBM con atomi sciolti di xenon sulla superficie di un cristallo di nichelio. Gli atomi sciolti di xenon, che aderivano al nichelio, sono stati radunati dalla sonda del microscopio a effetto tunnel. Per prevenire lo spostamento degli atomi dovuto al moto termico, l'esperimento è stato condotto a

bassissime temperature (-269°C). Era solo una trovata pubblicitaria, s'intende, ma dimostra il livello raggiunto dalla nanotecnologia, base di partenza per dispositivi elettronici incredibilmente piccoli.

Sentire la repulsione atomica

Il microscopio ad effetto tunnel, nonostante le sue varie potenzialità, risente di una grave mancanza: funziona solo con materiali conduttori di elettricità. Ma la maggior parte dei materiali è coperta da uno strato isolante di ossidi. D'altra parte, oggetti d'origine biologica che interessano gli scienziati, sono spesso pessimi conduttori. Come può il microscopio a effetto tunnel "catturare" atomi non conduttori? Basta piazzare un frammento di diamante su una sottile lamina metallica tra la punta della sonda e l'oggetto da esaminare (fig. 6).

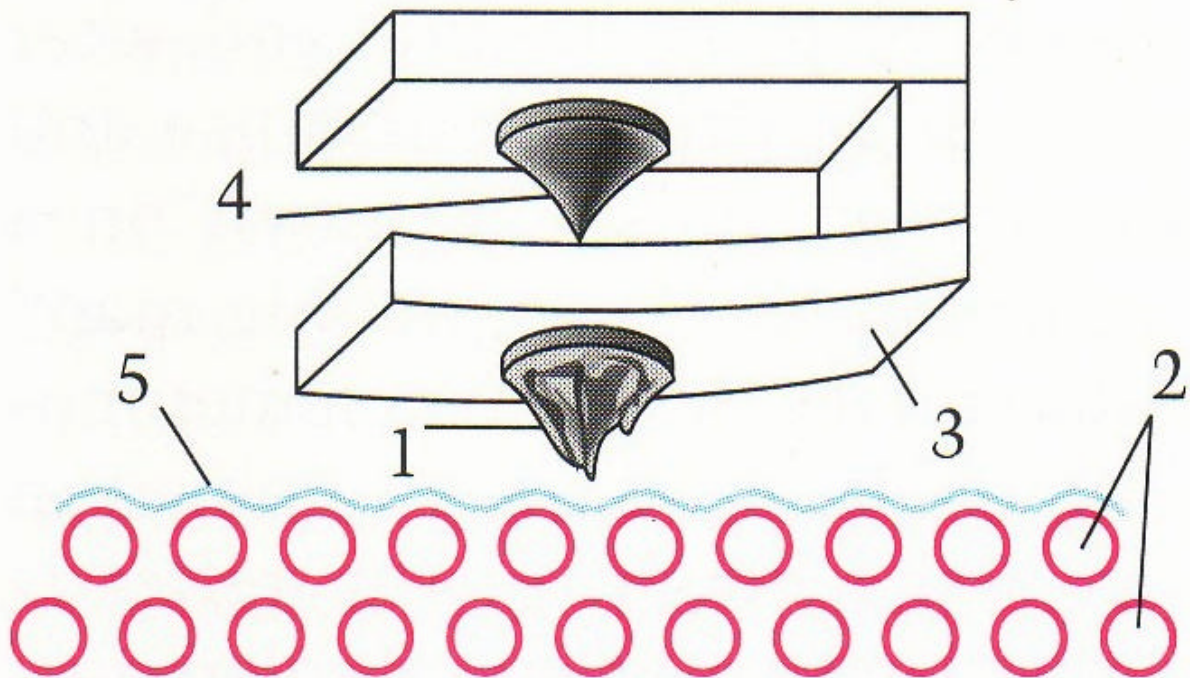
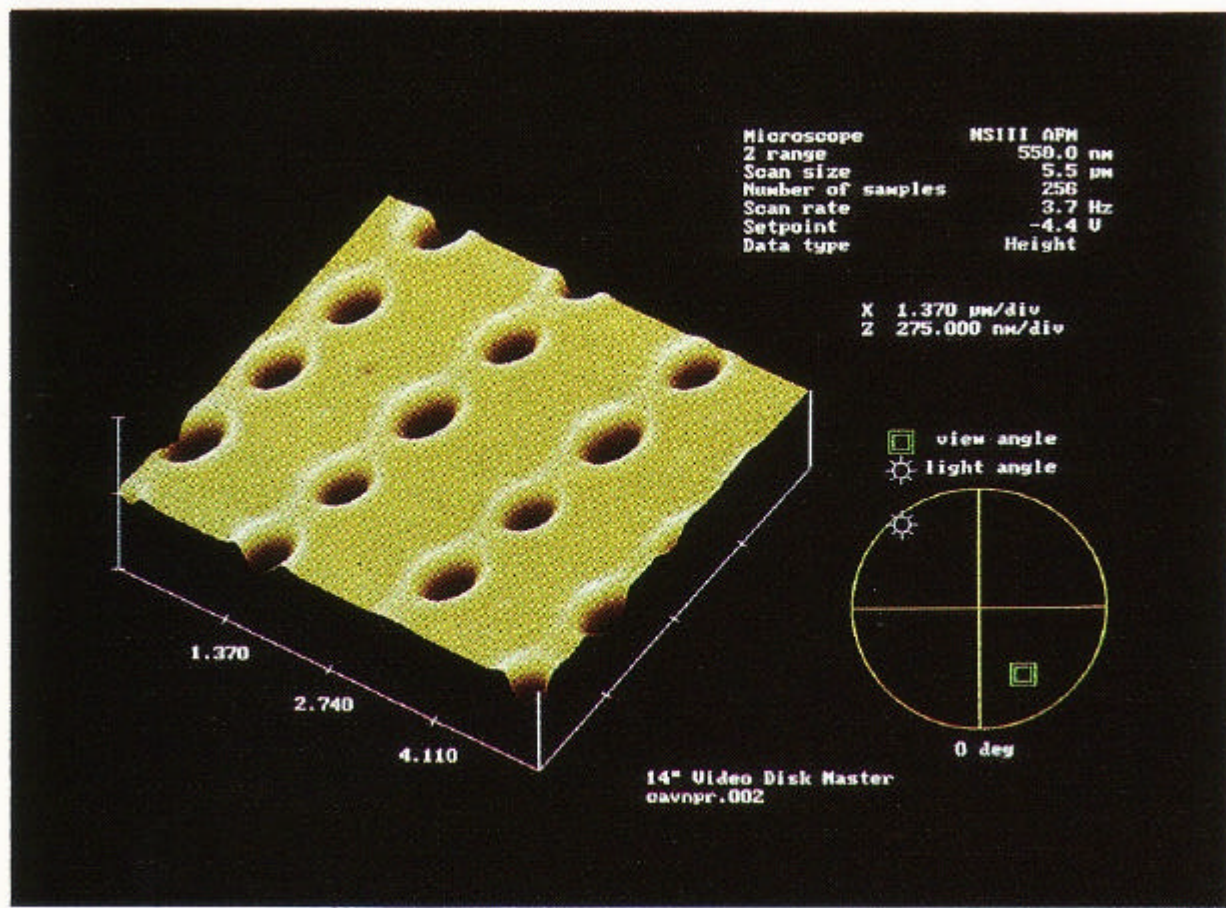


Figure 6

*Probe of the atomic force microscope.
1—diamond grain; 2—atoms; 3—
spring strip; 4—point; 5—electron
clouds.*

Naturalmente, il frammento dev'essere il più possibile accostato, in modo che le nubi elettroniche sull'estremità e quelle sulla superficie dell'oggetto si sovrappongano. La striscia metallica agisce da molla, spingendo il frammento verso la superficie. Ora, proviamo a scandire la superficie con questa sonda "combinata": il frammento si muoverà in su o in giù per seguire il rilievo dell'oggetto. Il suo movimento verrà registrato dalle variazioni nella corrente di tunnel che scorre dalla punta sulla striscia metallica. Questo strumento si chiama microscopio a interazione atomica (AFM) e possiede un meccanismo di controreazione molto simile a quello del microscopio a effetto tunnel. Muovendo la sonda verticalmente, il sistema mantiene costante la separazione tra la lamina metallica e il frammento (e quindi mantiene costante anche la forza repulsiva). Anche il microscopio a interazione atomica ha una risoluzione altissima, a livello atomico. Prendiamo un videodisco (fig. 7), un mezzo molto comune per immagazzinare informazioni. I dati digitali sono registrati sul videodisco (come su un CD audio) mediante dei piccoli fori sulla superficie.



Courtesy of Digital Instruments, Inc.

Figure 7
AFM image of a video disk master.

Bit al microscopio

Sapete senz'altro cos'è un "bit" d'informazione. Quando il computer registra su disco, lo strato superficiale del disco contiene zone magnetizzate (e non) di misura nell'ordine del micron e submicron. Ma non si riesce a vederle, indipendentemente dal microscopio usato. Ora però c'è un nuovo strumento, il microscopio di gradiente magnetico, che può "toccare" le zone magnetizzate del disco. Convertire un microscopio a interazione atomica in uno di gradiente magnetico è semplice – basta sostituire il frammento di diamante con uno di materiale magnetico (ferro o nichelio). Il frammento magnetico sentirà l'influsso dei campi nelle zone magnetizzate. Quando si scandisce la superficie del disco si può così ottenere una mappa della distribuzione delle forze magnetiche – byte e bit d'informazione diventano visibili (fig. 8).

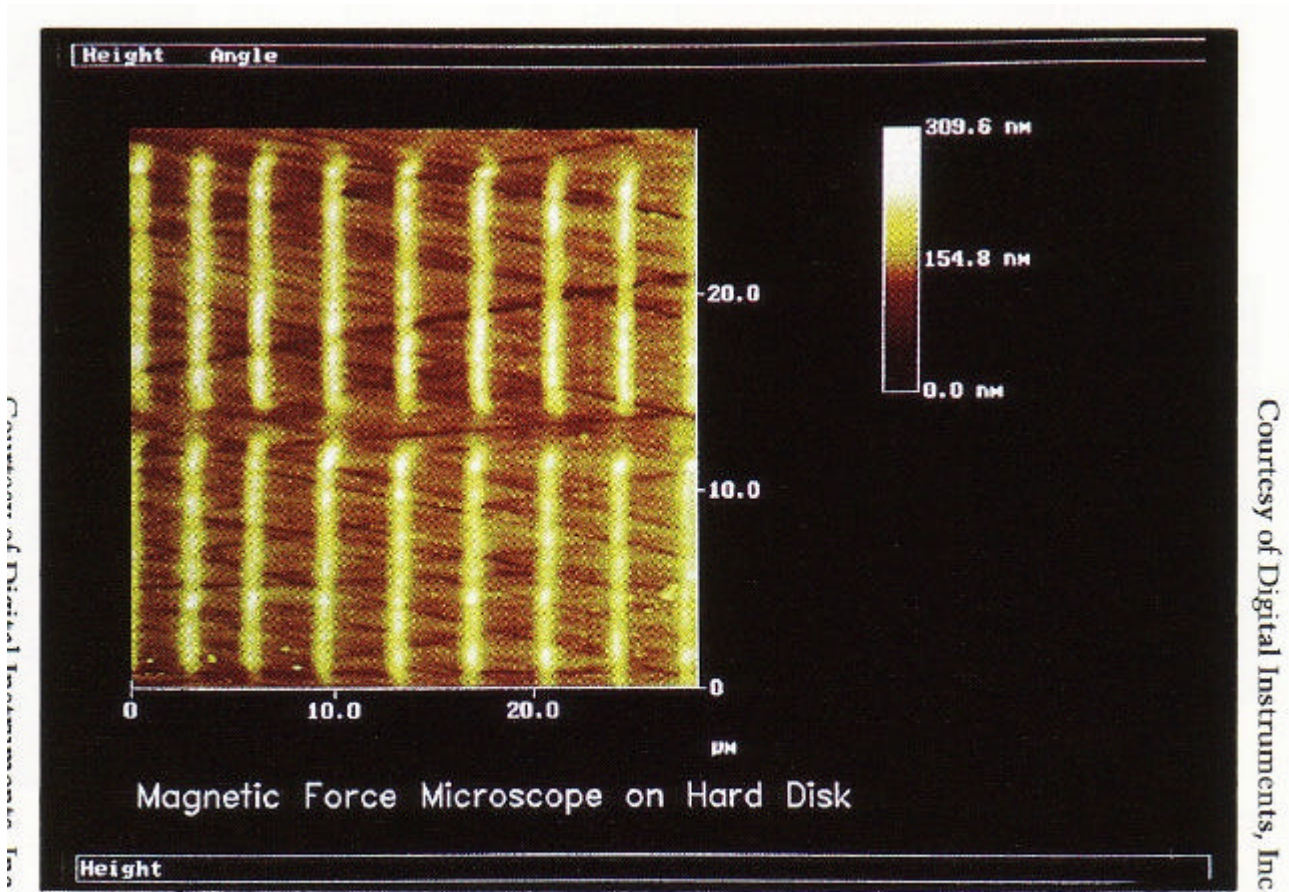


Figure 8
Image of a hard disk taken by a magnetic force microscope.

Termina qui il nostro excursus sulla vasta e potente famiglia dei microscopi a scansione a sonda. Nonostante la loro giovane età sono capaci di straordinarie "prodezze". Senza dubbio, quando "cresceranno" potranno rivelarci il microcosmo degli atomi e delle molecole. Ma ci consentiranno anche di intervenire in quel mondo in miniatura – per modificarlo e utilizzarlo in una vasta gamma di applicazioni.