

There's Plenty of Room at the Bottom – In fondo c'è ancora un sacco di spazio *Un invito a esplorare nuovi campi della fisica* *di Richard P. Feynman*

Discorso tenuto il 29 dicembre 1959, all'Annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology (Caltech), pubblicato il febbraio 1960 su Caltech's Engineering and Science.

Quello di cui voglio parlare è il problema di manipolare e controllare le cose su piccola scala. Appena dico questo, la gente mi parla della miniaturizzazione e dei suoi progressi odierni. Mi parla dispositivi con i quali si può scrivere l'intera Bibbia sulla testa di uno spillo. Ma questo è nulla, questo è solo un primo timido passo verso la direzione che intendo discutere. E' il mondo incredibilmente piccolo che ci sta sotto. Nel 2000, quando guarderanno indietro, si chiederanno perché fino all'anno 1960 nessuno si è mosso seriamente in questa direzione.

E' possibile scrivere tutti i 24 volumi della Enciclopedia Britannica sulla testa di uno spillo?

Vediamo come sarebbe possibile. La testa di uno spillo ha un diametro di un sedicesimo di pollice (pari a 1 mm). Se la si ingrandisce di 25.000 volte, l'area della testa sarà pari alla superficie di tutte le pagine dell'Enciclopedia Britannica. Pertanto, quello che è necessario fare è ridurre di 25.000 volte la dimensione di tutta la scrittura dell'Enciclopedia. È possibile? Il potere di risoluzione dell'occhio è di circa 1/120 di pollice - che è circa il diametro di uno dei puntini che vanno a comporre le immagini dell'Enciclopedia. Questo diametro, quando viene rimpicciolito di 25.000 volte, misura ancora 80 angstrom di diametro (1 angstrom = 10^{-10} pari a .0000000001 metri oppure -10 miliardi di angstroms = 1 metro) - pari a 32 atomi di un metallo normale. In altre parole, uno di questi punti conterrebbe nella sua area circa 1.000 atomi. Quindi, non c'è dubbio che ci sia abbastanza spazio sulla testa di uno spillo per mettervi tutta l'Enciclopedia Britannica. Ora, per rendere fattibile il processo sopra descritto, mi pongo tre domande:

- come è possibile ridurre i punti? Grazie al processo di fotocopia ogni punto può essere facilmente ridotto nelle dimensioni volute;
- come facciamo leggere quello che è stato scritto in quella maniera? Possiamo leggerla utilizzando tecniche oggi in uso. Immaginate che ad ogni lettera dell'Enciclopedia corrisponda una lettera di metallo in rilievo della dimensione di 1/25.000 di quella ordinaria. Tali lettere possono essere ridotte, con appositi procedimenti, in pellicole leggibili con il microscopio elettronico. Con le stesse pellicole posso riprodurre quanto voglio l'opera originale;
- è possibile nano-scrivere? Oggi non abbiamo alcuna tecnica per farlo; ma concettualmente non è così difficile come sembra a prima vista, grazie a sistemi di microscopi ottici e di cellule fotoelettriche possiamo impressionare la superficie del metallo creando le nano-lettere.

Quanto spazio occupano tutti i libri del mondo?

Oltre all'Enciclopedia Britannica sulla capocchia di uno spillo, possiamo prendere in considerazione tutti i libri del mondo. La Libreria del Congresso ha circa 9 milioni di volumi, la British Library Museum dispone di 5 milioni di volumi, ci sono anche i 5 milioni di volumi della Biblioteca Nazionale di Francia. Possiamo ipotizzare esistano circa 24 milioni di volumi fondamentali per il mondo.

Cosa succederebbe se potessimo stampare tutto questo alla scala che abbiamo discusso? Quanto spazio ci vorrebbe? Ci vorrebbe, naturalmente, l'area di circa un milione di punte di spillo, perché, invece di esserci solo il 24 volumi dell'Enciclopedia, ci sono 24 milioni di volumi. Il milione di punte di spillo può essere messo su una superficie di circa 3 metri quadrati. Vale a dire, tutti i volumi in questione si trovano su una superficie della dimensione di 35 pagine dell'Enciclopedia. Tutte le informazioni che l'umanità ha mai registrato nei libri possono essere contenute in un opuscolo, non scritto in codice, ma come semplice riproduzione a piccola scala, senza perdita di risoluzione, delle immagini originali, incisioni e tutto il resto.

Dalla manipolazione fisica alla manipolazione degli atomi, alla manipolazione del sistema biologico

Supponiamo ora, invece di cercare di riprodurre le immagini e tutte le informazioni nella loro forma attuale, di rappresentare le varie lettere attraverso un codice di punti e linee. Ogni lettera è rappresentata da sei o sette "bit" di informazione, cioè, sono necessari solo circa sei o sette punti o trattini per ogni lettera. Ora, invece di scrivere solo *sulla superficie* della testa di uno spillo, come ho fatto prima, cerco di utilizzare

l'interno del materiale.

Supponiamo che ogni punto e ogni trattino occupino una parte di metallo pari a un piccolo cubo di atomi di $5 \times 5 \times 5$ pari a 125 atomi.

Ho stimato quante lettere ci sono nei miei 24 milioni di libri fondamentali, ipotizzando che ciascun volume sia pari a un volume dell'Enciclopedia, e ho calcolato, poi, quanti bit di informazioni ci sono (10^{15}), ed ogni bit occupa circa 100 atomi. Si scopre che tutte le informazioni che l'uomo ha accumulato in tutti i libri fondamentali del mondo possono essere contenute in un cubo di materia del volume di un duecentesimo di pollice.

Questo fatto - che enormi quantità di informazioni possono essere stoccate in uno spazio estremamente piccolo - è, naturalmente, ben noto ai biologi, e spiega il mistero di come nella più piccola delle cellule possano essere memorizzate tutte le informazioni per l'organizzazione della vita di una creatura complessa. Ma per leggere gli atomi occorrono microscopi 100 volte più potenti di quelli di cui disponiamo oggi; quando li avremo la biologia farà passi da gigante: potremo ricostruire la sequenza di base del DNA, spiegare cosa succede quando si ha una mutazione, ricostruire l'ordine di base nel DNA collegato all'ordine degli aminoacidi nelle proteine, ricostruire la struttura dell'RNA,

Le potenzialità delle tecnologie biologiche

L'esempio della biologia per scrivere informazioni su piccola scala mi ha ispirato qualcosa che si potrebbe realizzare.

Infatti, date le caratteristiche di un sistema biologico:

- essere infinitamente piccolo;
- essere attivo, molte delle cellule fabbricano sostanze diverse, si muovono, fanno ogni genere di cosa;
- essere in grado di memorizzare le informazioni;

possiamo prendere in considerazione la possibilità di produrre oggetti biologici con quelle caratteristiche, ossia produrre cose infinitamente piccole che fanno quello che vogliamo!

Ci sono anche aspetti economici legati alla produzione di cose molto piccole attraverso processi biologici. Permettetemi di ricordarvi alcuni problemi delle macchine da calcolo. Nei computer dobbiamo memorizzare una quantità enorme di informazioni. Il tipo di scrittura cui ho accennato prima, "sulla capocchia di uno spillo", è permanente, in quanto utilizza una base di metallo; molto più interessante, per un computer, sarebbe disporre di una modalità che permetta di scrivere, cancellare e riscrivere.

Miniaturizzazione del computer

Oggi le macchine da calcolo sono molto grandi, tali da riempire intere stanze, perché non farle molto piccole, utilizzando cavi di 10 o 100 atomi di diametro e circuiti di alcune migliaia di angstrom? Inoltre, chi ha studiato la teoria dei computer ha concluso che questi potrebbero avere alcune caratteristiche molto interessanti se fossero più potenti: potrebbero operare scelte, dare giudizi e gestire processi di ottimizzazione, grazie alla capacità di memorizzare esperienze.

Se guardo il tuo volto riconosco subito che l'ho visto prima. Non c'è nessuna macchina che, con la stessa velocità, possa memorizzare l'immagine di un volto e dire se si tratta di un uomo, e, tanto meno, se sia lo stesso uomo che ha memorizzato - a meno che non sia esattamente la stessa immagine. Se il viso è cambiato, se la ripresa è più vicina o più lontana, se la luce cambia - lo riconosco grazie alla mia mente. I computer d'oggi non sono in grado di farlo. Il numero di elementi contenuto nella mia mente è enormemente maggiore del numero di elementi del nostro "meraviglioso" computer.

Se volessimo produrre un computer con queste abilità avrebbe, forse, la dimensione del Pentagono, e diversi svantaggi: la sua produzione richiederebbe troppo materiale, non ci sarebbe sufficiente germanio al mondo per tutti i transistor, avrebbe i problemi della generazione di calore e del consumo energetico. Ma comunque la sua velocità sarebbe limitata a causa della lentezza dei circuiti e della sua dimensione. Per cui se vogliamo avere computer sempre più veloci e complessi dobbiamo miniaturizzare i circuiti. Quindi la loro evoluzione è legata alla miniaturizzazione.

Ma c'è molto spazio per renderli più piccoli. Si potrebbe usare la tecnologia per evaporazione per ottenere un blocco di materiale che ha gli elementi - bobine e condensatori, transistor e così via - di dimensioni estremamente fini.

Verso dispositivi intelligenti

Mi piacerebbe discutere di altre possibilità. Perché non possiamo produrre questi piccoli computer come facciamo con quelli di grande dimensione? Perché non possiamo fare buchi, tagliare, saldare, stampare, modellare forme, tutto a un livello infinitesimale? Quali sono i limiti per produrre piccoli oggetti? Quante volte quando si è frustrati dal lavorare su qualcosa di estremamente piccolo, della dimensione di un orologio da polso da donna, ci si è detti: "Se solo potessi istruire una formica per farlo!" Quello che vorrei suggerire è la possibilità di istruire una formica ad addestrare un acaro per fare l'orologio. Quali sono le possibilità di realizzare piccole macchine, ma mobili?

Consideriamo una qualsiasi macchina - per esempio un'automobile - e interrogiamoci sui problemi che si incontrerebbero per realizzare una macchina simile ma infinitesimale. Il primo problema è la definizione della soglia di miniaturizzazione, tenendo conto che maneggiamo atomi e che occorre mantenere le forme. Ad esempio nel cilindro il numero e la dimensione degli atomi devono essere tali da comporre un cerchio. In generale, se fisso il limite di tolleranza a 4/10.000 di pollice, pari a 10 atomi, la riduzione massima possibile sarà di 4000 volte. Naturalmente cambiando la forma dei componenti della macchina, o ampliando i limiti di tolleranza, più possono mutare tali rapporti, e, di conseguenza, ottenere livelli di miniaturizzazione più spinti.

E' interessante considerare quali sono i problemi legati alla miniaturizzazione delle macchine.

In primo luogo, con parti che sviluppano lo stesso lavoro, le forze sono proporzionali al saggio di riduzione dell'area, per cui elementi come peso e inerzia sono di poca importanza.

Il lavoro e l'ampiezza della forza centrifuga, per esempio, vengono mantenuti a condizione che la velocità di rotazione venga aumentata nella stessa proporzione della diminuzione delle dimensioni.

In proporzione, le proprietà dei materiali rivestono un'importanza molto maggiore, perché i metalli che usiamo hanno una struttura granulare, quindi non omogenea, e questo è un problema sulla piccola scala.

Plastica, vetro e materiali amorfi sono molto più omogenei, e quindi più adatti per le nostre macchine.

Ci sono problemi associati alla parte elettrica del sistema - come i fili di rame e le parti magnetiche. Le proprietà magnetiche a scala molto piccola, non sono le stesse della grande scala, per cui le apparecchiature elettriche non devono essere semplicemente ridotte, ma devono essere ridisegnate.

Quale sarebbe l'utilità di tali macchine? Chi lo sa? Naturalmente, una piccola automobile sarebbe utile solo agli acari. Tuttavia, ricordo la possibilità di produzione di piccoli elementi per i computer in fabbriche completamente automatiche.

Le macchine incorporate

Un mio amico suggerisce una possibilità molto interessante per le macchine miniaturizzate. Egli sostiene che, anche se l'idea è molto selvaggia, in chirurgia sarebbe interessante poter inghiottire il chirurgo. Si mette il chirurgo meccanico all'interno del vaso sanguigno, va al cuore e "guarda" intorno. Scopre che la valvola è difettosa, prende un bisturi e opera. Altre piccole macchine potrebbero essere incorporate permanentemente nel corpo umano per sopperire all'inadeguato funzionamento degli organi.

Ma come possiamo realizzare un meccanismo così piccolo? Ci si può ispirare agli strumenti di manutenzione degli impianti di energia atomica, che hanno materiali e macchine che non possono essere gestiti direttamente, perché sono diventati radioattivi. Per svitare i dadi e avvitare i bulloni e così via, hanno una serie di "mani" che comandano e ubbidiscono, in modo che, operando con una serie di leve qui, è possibile controllare le "mani" là.

La maggior parte di questi dispositivi sono in realtà piuttosto semplici, in quanto vi è un cavo, come la corda di una marionetta, che collega direttamente gli strumenti di controllo alle "mani". Naturalmente, gli strumenti sono attivati da servomotori, in modo che la connessione tra le parti sia elettrica e non meccanica.

Ora propongo questo dispositivo: realizzare un sistema di "mani manipolatrici" che funzionano elettricamente, i cui elementi sono in scala 1:4, che obbediscono alle mani dell'operatore, per costruire attrezzi in scala sempre 1:4, così da ottenere mani meccaniche con la dimensione di un sedicesimo.

Questo set di minuscoli attrezzi verrebbe poi usato per costruire una serie di 10 mani e attrezzi in scala 1:16, connessi grazie a cavi in modo che ognuno faccia esattamente la stessa cosa nello stesso momento in parallelo. Ora, ripeto il processo in modo da avere centinaia di "mani" a scala sempre più piccola, fino ad ottenere le dimensioni di 1/4.000.

Il loro volume totale delle macchine così realizzate sarà molto inferiore a quello di un solo originale. Per

esempio, se realizzo alcuni miliardi di macchine, ad una scala di 1/4000, impiegherò meno del 2% dei materiali contenuti in una sola macchina originale, con un enorme risparmio di materiali, spazio e costi. Come si vede, il processo non costa nulla per i materiali. Quindi, posso ripetere il processo all'infinito a condizione di risolvere i problemi tecnologici legati alla miniaturizzazione rilevati in precedenza (gestione delle forze, qualità dei materiali, apparati elettrici....).

Manipolare gli atomi

Ed ora il quesito finale: cosa accadrebbe se potessimo organizzare gli atomi uno ad uno nel modo in cui vogliamo (entro limiti ragionevoli, ovviamente, per esempio non si può metterli in modo che siano chimicamente instabili).

Fino ad oggi siamo stati costretti a scavare nel terreno per trovare i minerali ed abbiamo dovuto accettare la disposizione atomica che la natura ci ha dato.

Quali sarebbero le proprietà dei materiali se potessimo davvero organizzare gli atomi nel modo in cui noi vogliamo? Sarebbe molto interessante indagare teoricamente. Non riesco a vedere esattamente cosa potrebbe succedere, ma non ho dubbi sul fatto che avendo un certo controllo della disposizione degli atomi avremo una gamma enormemente più grande di possibili proprietà che le sostanze possono avere, e di cose diverse che possiamo fare.

Quando accediamo al mondo molto, molto piccolo – intendiamo circuiti di sette atomi – si aprono molti scenari di cose nuove che potrebbero accadere, che rappresentano opportunità completamente nuove per la progettazione. Gli atomi su piccola scala non si comportano come su larga scala, soddisfano le leggi della meccanica quantistica. Così, mentre si scende di scala con gli atomi, lavoriamo con leggi diverse, e possiamo aspettarci di fare cose diverse. Siamo in grado di produrre in modo diverso. Possiamo usare, non solo i circuiti, ma un qualche sistema che coinvolge i livelli di energia quantizzata, o le interazioni di spin quantizzate, ecc.....

Un'altra cosa che si nota è che, al diminuire della scala, tutti i dispositivi possono essere prodotti in serie in modo che le copie siano assolutamente perfette, mentre non possiamo costruire due macchine di grandi dimensioni in modo che le dimensioni sono esattamente le stesse. Ma se la macchina contiene solo 100 atomi, il margine di errore si riduce allo 0,5%.

A livello atomico, abbiamo nuovi tipi di forze e di nuovi tipi di possibilità, nuovi tipi di effetti. I problemi di produzione e riproduzione di materiali saranno molto diversi. Io sono, come ho detto, ispirato dai fenomeni biologici in cui le reazioni chimiche sono utilizzate in modo ripetitivo e continuo per produrre degli effetti sorprendenti.

I principi della fisica, in teoria, per quanto possa vedere, non escludono la possibilità di manipolare la materia atomo per atomo.

Oggi usiamo fare sintesi chimiche, ma sarebbe interessante che un fisico potesse sintetizzare qualsiasi sostanza sulla base della formula chimica. I problemi della biologia e della chimica si possono notevolmente evolvere se la nostra capacità di lavorare a livello atomico si svilupperà adeguatamente - uno sviluppo che penso non possa essere evitato.

Come può realizzarsi tutto ciò?

A questo punto ci si può chiedere: "Chi deve fare questo e perché dovrebbero farlo?".

Bene, stimolando l'integrazione in rete delle scuole si potrebbe accelerare il processo di innovazione.

Feynman a questo proposito conclude il suo discorso lanciando due concorsi aperti a tutti i ricercatori, con un premio di 1.000 \$ ciascuno. I temi dei concorsi sono:

1_ riduzione su scala lineare 1/25.000 di un testo, rileggibile poi con un microscopio elettronico;

2_ progetto per un motore del volume di 1/64 di pollice, controllabile in remoto senza fili.

La sfida del motore fu vinta rapidamente da un meticoloso artigiano utilizzando strumenti convenzionali; il motore soddisfaceva le condizioni di scala menzionate da Feynman nella sua conferenza.

L'altra sfida fu vinta venticinque anni dopo, nel 1985, da Tom Newman, specializzando a Stanford, che riuscì a ridurre il primo paragrafo di *A Tale of Two Cities* di 1/25,000.

Successivamente K. Eric Drexler raccolse il concetto di Feynman per la produzione di miliardi di minuscole fabbriche, aggiungendo l'idea che si potessero fare molte copie delle stesse sotto il controllo di un computer invece che di un operatore. Idea contenuta nel suo libro del 1986 *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*.