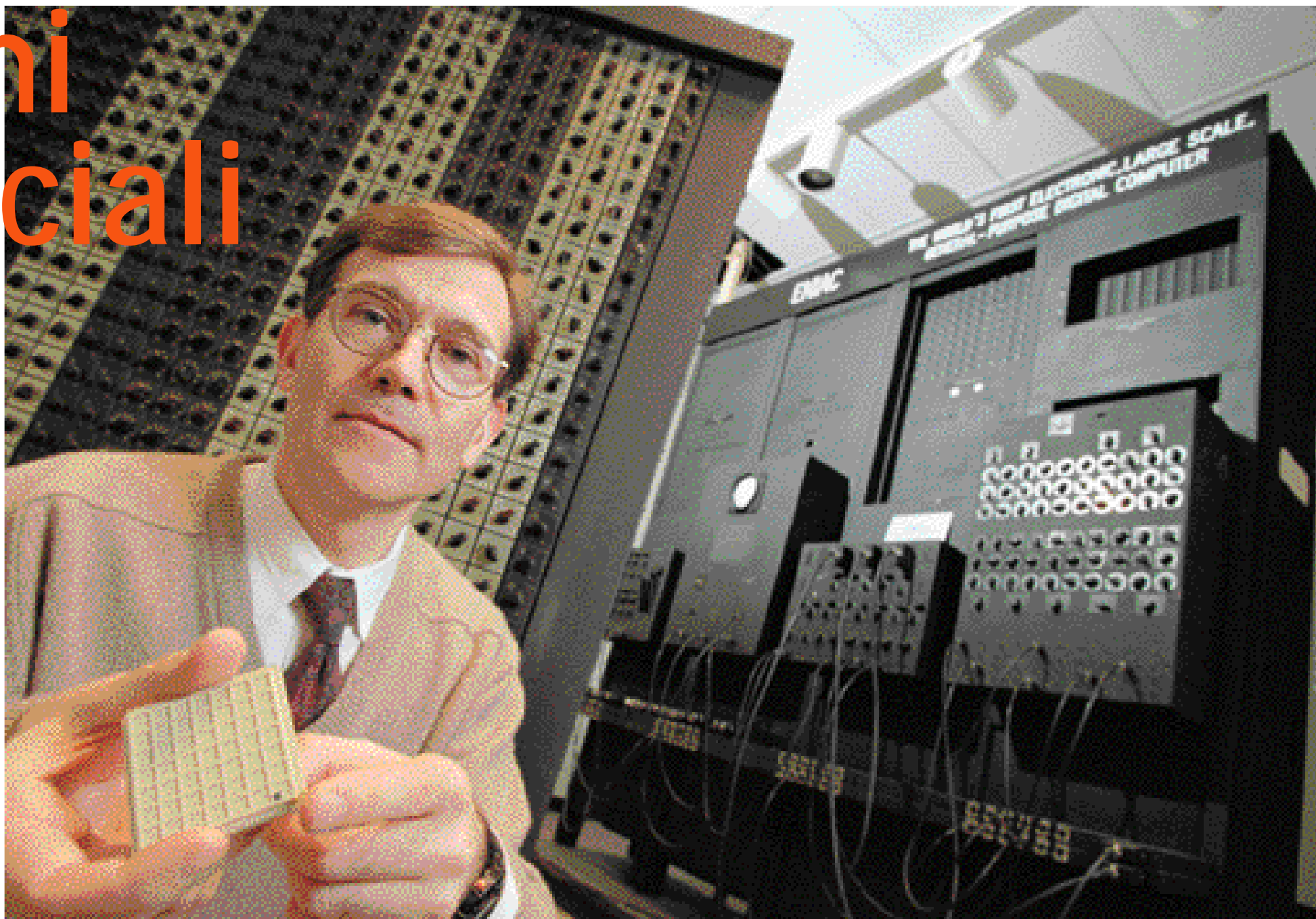


Atomi artificiali

Insieme di elettroni confinati in piccole regioni di spazio costituiscono i cosiddetti «punti quantistici», piccoli laboratori in cui si rivelano sia le proprietà quantizzate degli atomi naturali sia quelle dei solidi, con una prospettiva rivoluzionaria per l'elettronica del futuro

di Leonardo Colletti



Che interesse può mai essere legato allo studio di piccole comunità di elettroni, costretti a muoversi in uno spazio ridotto? «Zeig mir dein Handy» [«Mostrami il tuo telefonino»] è la risposta data a un giornalista tedesco da Horst Störmer, premio Nobel per la fisica nel 1998. Störmer è l'autore, insieme con Daniel Tsui e Robert Laughlin, della scoperta dell'effetto Hall quantistico frazionario, un fenomeno che si manifesta nei materiali semiconduttori trattati in modo che le cariche in essi presenti, responsabili della conduzione dell'elettricità,

siano costrette a vivere in uno strato talmente sottile da poter essere considerato bidimensionale.

La ricchezza della nuova fisica scoperta in queste strutture ha spinto i fisici a costruire e studiare sistemi di dimensionalità ancora più ridotta: i fili quantistici e i punti quantistici. Negli ultimi anni è stata condotta su queste strutture un' esplorazione che per certi versi assomiglia un po' a quella del signor Quadrato di Flatlandia, il romanzo di E. A. Abbott, alle prese con le bizzarrie della vita quando è ristretta a una linea o a un punto. Tuttavia que-

sta indagine scientifica coinvolge materiali e concetti basilari della tecnologia moderna, e lascia intravedere, oltre alla possibilità di sperimentare il quadro concettuale della meccanica quantistica in un nuovo ambito, uno scenario di concreta applicazione, con risvolti rivoluzionari per il settore dei dispositivi elettronici.

L'elettronica ha contribuito, negli ultimi decenni, allo sviluppo di molti dispositivi ormai diffusissimi. I primi transistor sono stati creati negli anni quaranta. Da allora «progresso» ha significato soprattutto «miniaturizzazio-

ne», cioè ridotto consumo di materia prima, trasmissione più rapida del segnale, risparmio di energia. La tecnologia si è spinta tanto avanti che si parla di microelettronica, poiché l'elettronica moderna si basa sulle proprietà degli elettroni presenti in strutture delle dimensioni del micrometro. Di recente però in vari laboratori sono stati prodotti e studiati sistemi ulteriormente ridotti di un fattore cento, tanto che oggi, davanti a prototipi di transistor con dimensioni inferiori ai 10 nanometri, già si parla di «nanoelettronica».

Questa scala costituisce per il fisico

teorico un limite per la descrizione classica del moto degli elettroni: da qui in giù è necessario ricorrere ai concetti quantistici, con conseguenze drastiche nelle proprietà ottiche ed elettroniche dei materiali. Per il tecnologo questi studi potrebbero concretizzarsi in transistor nanoscopici, in porte logiche per computer capaci di cambiare stato al passaggio di un solo elettrone.

Un concetto sfuggente

I protagonisti di questa storia sono, appunto, gli elettroni. Essi sono le più

La «macchia» nera sulla scheda quadrata è un microprocessore che ha un ventesimo della potenza del primo computer programmabile, l'ENIAC (di cui si vede una parte sullo sfondo), che pesava ben 50 tonnellate. Strutture come i punti quantistici potrebbero consentire in futuro un'ulteriore riduzione delle dimensioni dei chip.

piccole cariche elettriche presenti in natura e, costituendo la parte più esterna degli atomi, sono i responsabili dei legami chimici e quindi delle proprietà della materia.

In un campione di materiale semiconduttore sono presenti numerosissimi elettroni liberi di muoversi in ogni direzione, analogamente a quanto succede per le particelle di un gas che riempie una stanza. In questa condizione ogni particella può assumere un qualunque valore di energia. Però se limitiamo lo spazio a disposizione del gas di elettroni a pochi nanometri in ogni direzione, otteniamo un sistema completamente confinato (un «punto», agli effetti pratici) in cui gli elettroni possono assumere solo determinati valori di energia («quantizzazione» dello spettro). Queste strutture hanno dimensioni intermedie tra quelle del mondo macroscopico e quelle del mondo microscopico, e rappresentano quindi una specie di piccolo laboratorio per l'indagine degli effetti quantistici nelle interazioni a molti corpi.

Il confinamento si realizza chiudendo un sottilissimo strato di materiale in cui gli elettroni sono liberi di muoversi tra due strati di materiale isolante. Gli elettroni liberi presenti nel materiale confinato sono in numero variabile da poche unità a più di duecento. Oltre a questi, sono presenti nella struttura anche gli elettroni legati agli ioni nei gusci atomici più profondi, che non vengono considerati perché impossibilitati a muoversi. Ogni elettrone libero è quindi sottoposto all'attrazione degli ioni e alla repulsione, entrambe di natura elettrica, degli altri elettroni, sia quelli liberi sia quelli legati.

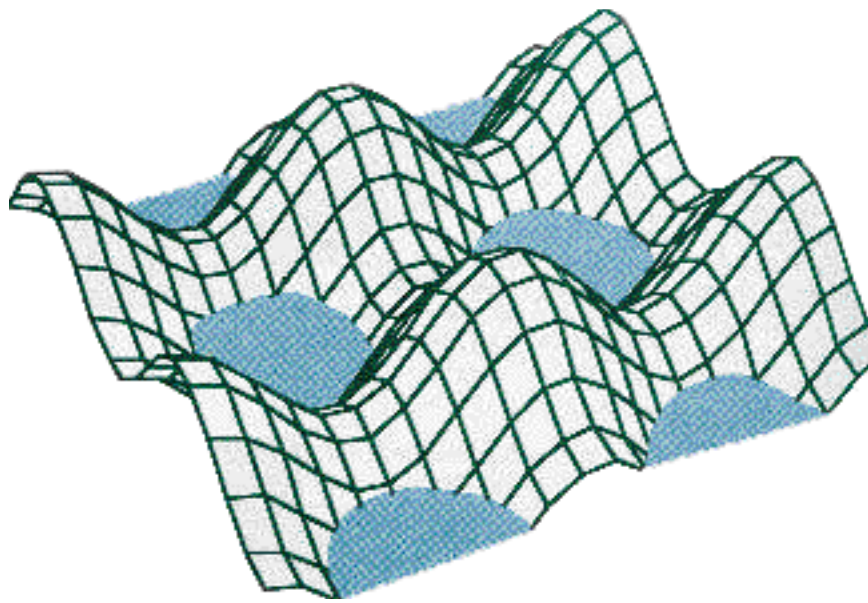
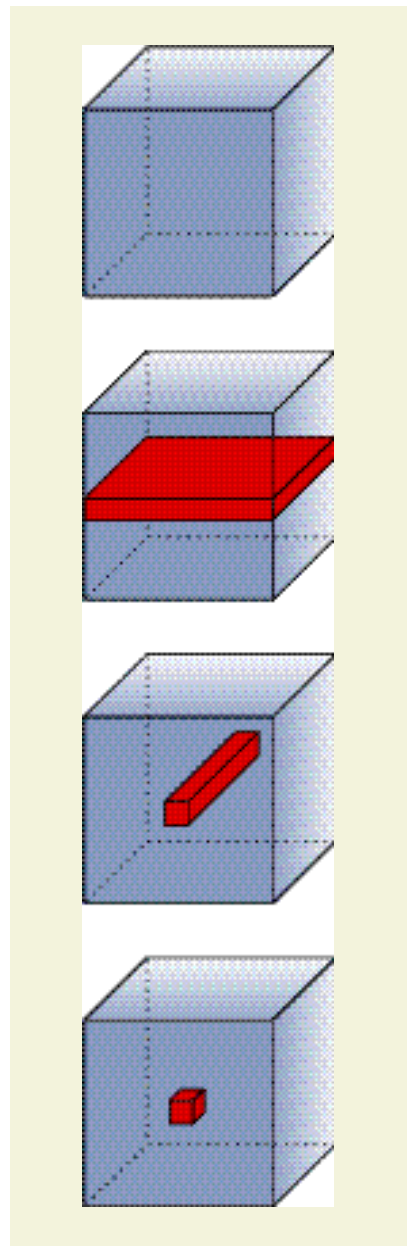
Le unità di misura che rispecchiano gli ordini di grandezza in gioco sono il raggio di Bohr efficace (pari a 9,79 nanometri) e lo Hartree efficace (un'unità di energia pari a 11,86 millielettronvolt). Volendo fare un riferimento approssimativo a quantità più vicine alla vita quotidiana, possiamo dire che il primo equivale un milionesimo di centimetro, mentre il secondo è un millesimo dell'energia trasportata da un fotone di luce visibile. Entrambe queste grandezze sono riferite alle tradizionali

unità in vigore nella fisica atomica: il raggio di Bohr rappresenta la dimensione caratteristica dell'atomo di idrogeno; lo Hartree corrisponde alla quantità di energia necessaria per ionizzare tale atomo, ovvero per liberare l'unico elettrone dalla sua orbita.

L'analogia con il mondo atomico, corroborata da un'accentuata somiglianza di caratteri tra punti quantistici e atomi, giustifica inoltre il nome alternativo di «atomi artificiali» con cui alcuni ricercatori si riferiscono a queste nanostrutture. Per esempio, misurando la corrente che attraversa un punto quantistico si può osservare che essa può cambiare di molti ordini di grandezza quando il numero di elettroni nel confinamento varia anche di una sola unità; questo fatto è rivelato dall'andamento a picchi della differenza di potenziale necessaria per aggiungere un elettrone al confinamento e fa pensare che aumentare questa tensione sull'atomo artificiale sia analogo a muoversi attraverso la tavola periodica aumentando la carica nucleare. Vi sono, naturalmente, anche fondamentali differenze: questi «atomi artificiali» hanno diametri circa 100 volte maggiori degli atomi naturali ed energie tipiche 100 volte inferiori. Inoltre vedremo che, accanto a caratteristiche atomiche, il punto quantistico presenta proprietà analoghe a quelle dei solidi.

Questo scenario rende necessario nella trattazione teorica il riferimento allo schema della meccanica quantistica, e non solo per spiegare la quantizzazione dei livelli energetici dovuta al confinamento. Su ogni elettrone agisce una «correlazione statistica», ovvero un potenziale che riproduce le richieste del principio di Pauli, che afferma che non è concesso a due elettroni di occupare la stessa orbita, a meno che non abbiano spin opposti. Altri termini vanno aggiunti all'equazione del moto di ciascun elettrone nel caso in cui tutto il sistema venga immerso in un campo magnetico, e questo perché lo spin

Partendo da un metallo esteso (*in alto*), in cui gli elettroni di conduzione sono liberi di muoversi e possono per questo assumere un qualsiasi valore di energia, si generano sistemi confinati di elettroni, riducendo a due, una o nessuna le direzioni in cui le particelle sono libere di muoversi. La conseguenza è che questi sistemi presentano uno spettro energetico discreto dovuto al fatto che l'onda di De Broglie associata all'elettrone (come a qualunque particella in meccanica quantistica) ha lunghezza d'onda paragonabile alle dimensioni dello spazio confinato.

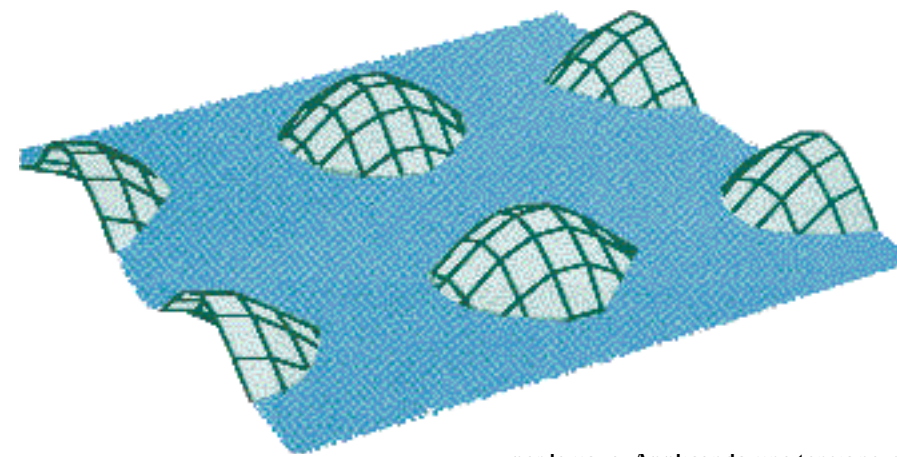


tende ad allinearsi a esso, come l'ago di una bussola.

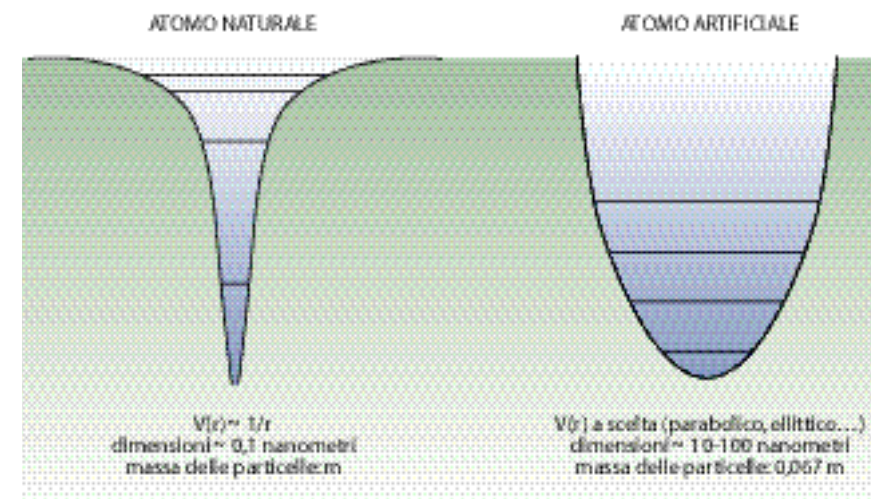
La presenza del reticolo ionico è mediata tramite il concetto di «massa efficace» dell'elettrone che in esso si muove. Questo significa che si tratta la particella come dotata di una massa diversa da quella reale, ma in moto in uno spazio libero dall'ingombro della struttura ionica. Per esempio, nell'arseniuro di gallio tale massa è meno del 7 per cento di quella reale, cioè l'elettrone che si muove in questo materiale è come se avesse una massa di molto inferiore a quella di un elettrone libero. Tutto ciò può apparire complicato, e in effetti lo è. Non tanto per la varietà dei termini che descrivono il singolo elettrone, ma perché siamo in presenza di un sistema di molti elettroni, ognuno dei quali interagisce contemporaneamente con tutti gli altri: si tratta di un problema di dinamica a molti corpi, per la cui risoluzione, impossibile in maniera analitica, è necessario ricorrere ad approssimazioni che mettono in risalto caratteristiche anomale del punto quantistico, come per esempio un comportamento «collettivo» degli elettroni confinati.

Pratica di laboratorio

Come si «costruisce» un punto quantistico? Innanzitutto bisogna ottenere un sistema bidimensionale di elettroni. La natura non offre spontaneamente queste particolari strutture, tuttavia già nel 1957 J. R. Schrieffer dimostrò che si poteva in linea di principio realizzarle ottenendo un opportuno strato di interfaccia tra un metallo e un semiconduttore: gli elettroni avrebbero potuto muoversi liberamente su tale strato, ma non nella direzione a es-



per le uova. Applicando una tensione, si iniettano gli elettroni nelle vallate del potenziale di confinamento. In questo modo si ottiene una serie di punti quantistici identici (*a sinistra*). Se il numero di elettroni immessi è molto alto, essi fuoriescono dalle «vasche», dando luogo a una struttura a isole che emergono dal mare bidimensionale di elettroni. Queste «isole di Coulomb» o «anti-punti quantistici» sono topologicamente complementari ai punti quantistici.



La figura illustra l'analogia tra atomo naturale e atomo artificiale. In entrambi i casi gli elettroni sono confinati in una «buca di potenziale», il cui profilo è iperbolico nel primo caso e a parabola o ellittico nel secondo. In entrambi i casi gli elettroni si dispongono su livelli discreti di energia ϵ , in presenza di una sollecitazione esterna, saltano da un livello all'altro. Il modello atomico risale a Niels Bohr, che lo formulò nel 1913; l'atomo artificiale o «punto quantistico» è stato sviluppato recentemente grazie a tecnologie avanzate.

so perpendicolare. La previsione di Schrieffer trovò conferma undici anni più tardi, quando un gruppo di ricerca dell'IBM realizzò il primo gas bidimensionale di elettroni.

Bisogna poi generare un campo che attragga elettrostaticamente gli elettroni verso un particolare punto. Per produrre la concentrazione di ioni desiderata, si stende un ulteriore strato di materiale costituito da una struttura periodica di punti fotoresistenti che viene depositata con una tecnica litografica. Questo reticolo funge da maschera selettiva per il trattamento di scavo eseguito per mezzo di un plasma. L'operazione elimina lo strato di materiale non protetto dalla maschera,

lasciando un insieme ordinato di punti quantistici (diversi milioni su un campione di pochi millimetri quadrati!) pronti per essere sottoposti a esperimenti. I materiali più frequentemente usati sono l'arseniuro di gallio, in cui gli elettroni godono di una grande mobilità, e l'arseniuro di gallio e alluminio come isolante.

Applicando una tensione alle estremità del campione si può variare con straordinaria precisione il numero di elettroni liberi presente nel singolo punto quantistico. In questo modo si riesce a confinare un numero fissato di elettroni in un campo elettrico che li attrae centralmente: e questa è proprio una possibile descrizione dell'atomo,

con in più la possibilità di variarne a piacere geometria e numero di cariche!

Anche lo studio dei punti quantistici affonda le radici nel gas bidimensionale. Come detto, tale struttura ha fruttato una serie di interessanti studi teorici e sperimentali, con immediate ricadute di interesse tecnologico e di scienza fondamentale. Nel 1980 Klaus von Klitzing e collaboratori misurarono l'effetto Hall quantistico intero.

Essi trovarono che la conduttività di Hall, un parametro che ci dice quanto sia facile per le particelle cariche muoversi nel conduttore, è costante, a tratti, al variare del campo magnetico a cui il conduttore è sottoposto. La cosa sorprendente è che tali costanti sono multipli interi di una quantità ottenuta con due sole costanti fondamentali della fisica, la carica dell'elettrone e la costante h di Planck. Questa quantizzazione è misurata, indipendentemente dalle caratteristiche del campione, con una precisione altissima, di una parte per milione.

Qualche anno più tardi Störmer, Tsui e Laughlin spiegarono un'altro strano effetto presentato dal gas bidimensionale, l'effetto Hall quantistico frazionario, in cui gli elettroni confinati danno origine a un nuovo tipo di fluido quantistico. Questa ricerca ha già fruttato l'utile ricaduta tecnologica del transistor ad alta mobilità elettronica, un componente largamente usato nella telefonia cellulare.

La fisica dei punti quantistici

Per tornare ai punti quantistici, è possibile ottenere valide indicazioni sulla dinamica degli elettroni in questi atomi artificiali eseguendo studi delle transizioni elettroniche tra i livelli quantizzati nella banda di valenza e gli stati nella banda di conduzione, come nel caso degli atomi ordinari, con radiazione nella regione del lontano infrarosso. L'uso di radiazione a così bassa energia è giustificato dal fatto che i livelli energetici dei punti quantistici hanno una quantizzazione più fine di quelli degli atomi.

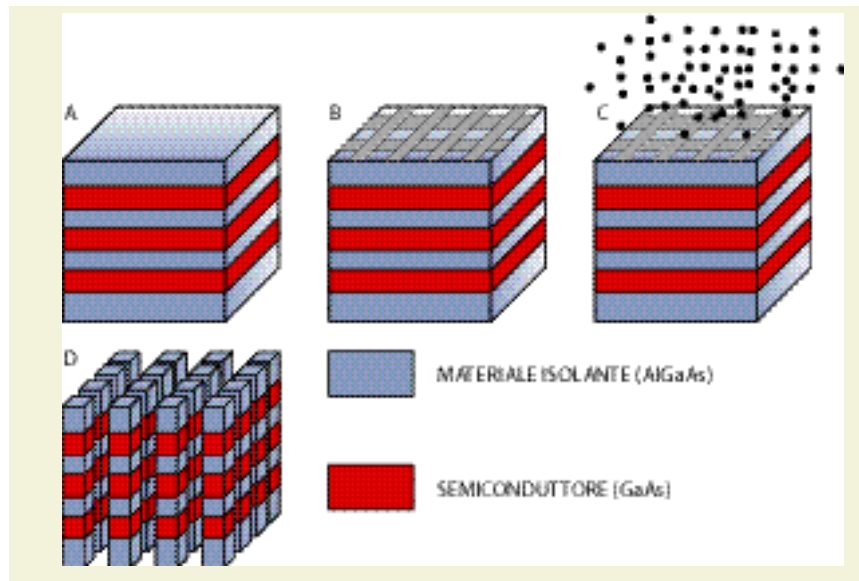
Quello che si fa è misurare la quantità di luce trasmessa attraverso la struttura indagata: la radiazione che manca è quella assorbita a causa dell'eccitazione degli elettroni. La radiazione del lontano infrarosso induce transizioni ottiche direttamente tra i livelli energetici confinati nel punto quantistico, che differiscono di pochi millielectronvolt. Dalle frequenze della radiazione assorbita si risale ai livelli

coinvolti nelle transizioni; dall'intensità si risale al numero di occupazione del punto. La misurazione va effettuata alla temperatura dell'elio liquido (circa 4 Kelvin), in modo da eliminare i disturbi provenienti dalle oscillazioni termiche. Per ottenere un segnale rivelabile occorre inoltre che la misurazione coinvolga un gran numero di punti quantistici (cento milioni circa, che corrisponde a un campione di pochi millimetri quadrati), il che costituisce un'impresa tecnologica. Queste misure di diffusione anelastica della luce dovrebbero dare diretta evidenza dello spettro discreto e degli effetti di interazione tra gli elettroni. Eppure i primi risultati ottenuti in questo modo sono stati sorprendenti.

S'è scoperto infatti che l'assorbimento di energia avviene a una sola frequenza, due se il campione è immerso in un campo magnetico, e indipendentemente dal numero di particelle contenute nel punto. La frequenza è proprio quella caratteristica del campo di confinamento, che ha profilo parabolico, e fu prevista da Vladimir Fock già nel 1928 per le eccitazioni di un elettrone in una buca parabolica. Tuttavia qui siamo in presenza non di un solo elettrone, ma di molti, la cui reciproca interazione dovrebbe portare a un drastico cambiamento dei livelli energetici.

Il risultato si spiega ricorrendo a un famoso teorema dovuto a Walter Kohn: un sistema che gode di invarianza traslazionale (ovvero che abbia ogni punto uguale a ogni altro), immerso in un campo esterno caratterizzato da lunghezza d'onda molto più grandi delle sue dimensioni, reagisce alla sollecitazione esterna come un tutt'uno. Questo vuol dire che è il centro di massa del sistema a entrare in oscillazione, mentre gli elettroni non risentono individualmente del campo esterno. Ed è proprio quanto accade nel nostro caso: la radiazione del lontano infrarosso ha una lunghezza d'onda di 300 micrometri, circa 1000 volte maggiore del diametro del punto. Per sollecitare i gradi di libertà interni del sistema e rivelare la dinamica dei singoli elettroni è necessario rimpicciolire i punti quantistici o spingere l'indagine a frequenze più alte. O ancora cambiare il profilo di confinamento del punto.

L'oscillazione collettiva individuata può essere spiegata in termini classici. In assenza di campo magnetico, essa rappresenta il movimento rigido di tutti gli elettroni rispetto alle cariche positive del reticolo. In presenza del campo le frequenze sono due, una superiore e una inferiore a quella originaria. Quella superiore può essere descritta come



Produzione di una matrice di punti quantistici. Partendo da una successione regolare di strati (dello spessore di pochi nanometri) di arseniuro di gallio e alluminio - isolante - e di arseniuro di gallio, che contiene gli elettroni liberi (a), si deposita mediante tecnica olografica una matrice di ricoprimento metallica (b). Il campione viene successivamente sottoposto a trattamento di scavo profondo a secco tramite plasma (c). Il risultato è un reticolo di punti quantistici (molti milioni per millimetro cubo). Una tecnologia alternativa per la produzione di atomi artificiali si avvale invece della deposizione controllata mediante fascio molecolare.

il moto coerente degli elettroni sulle loro orbite curvate dal campo magnetico, mentre quella inferiore come il moto coerente dei centri di queste orbite rispetto al reticolo ionico. A questo tipo di eccitazione del sistema si dà il nome di «plasmoni» e per certi aspetti può essere visto come un'unica particella. Le particelle di questo tipo sono state chiamate «quasiparticelle» da Lev Landau, che per primo le utilizzò per spiegare alcuni fenomeni che si verificano nell'elio liquido.

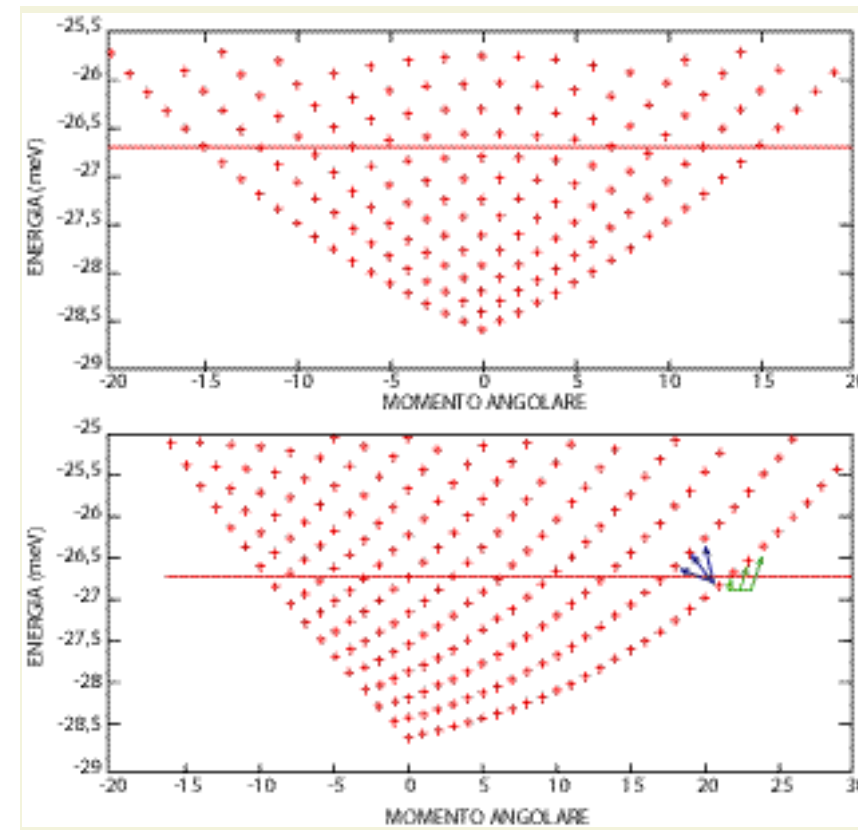
T. Demel, D. Heitmann e collaboratori nel 1989 a Stoccarda hanno trovato per primi una seconda frequenza di eccitazione, anch'essa sdoppiata in presenza di un campo magnetico. Ma anche questo spettro è sintomatico, più che dell'attesa struttura livelli discreti, dell'oscillazione collettiva delle cariche, poiché la radiazione utilizzata continuava a rimanere a lunghezza d'onda grande rispetto alla nanostruttura.

Livelli energetici di tipo atomico

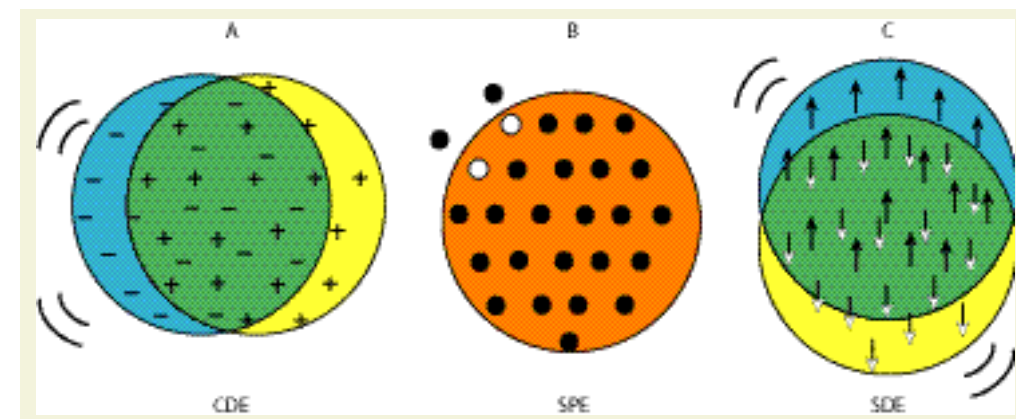
Con l'intenzione di rivelare l'ipotizzata analogia con l'atomo, il passo successivo è stato quello di indagare i punti a confinamento non parabolico. Nel 1994 il gruppo di R. Stenz a Monaco di Baviera, e l'anno successivo il

gruppo di D. J. Lockwood a Ottawa, hanno sondato i punti quantistici con luce di frequenza più alta. In questo modo si poteva evitare di cadere nelle limitazioni descritte dal teorema di Kohn. Dalla ricchezza dello spettro ottenuto, si ebbe finalmente la prima conferma di una disposizione a dei livelli energetici all'interno del punto, proprio come i «gusci» elettronici di un atomo. Le misure mostrano un buon accordo con calcoli in cui ciascun elettrone è considerato indipendente ma immerso in un campo esterno che riproduce la presenza di tutti gli altri elettroni; da questi calcoli si vede che gli elettroni nel punto quantistico si sistemano in stati discreti di energia e in strette bande, analoghe a quelle di Landau del gas bidimensionale, se si è in presenza di un campo magnetico.

Un anno più tardi C. Schüller e collaboratori dell'Università di Amburgo individuarono, accanto alle strutture a particella singola, varie eccitazioni del sistema di carattere collettivo, tanto delle cariche quanto degli spin degli elettroni. Questa varietà di modi collettivi del punto quantistico non può essere spiegata con la semplicità «classica» del teorema di Kohn, ma è necessario fare ricorso agli effetti quantistici legati alle interazioni reciproche degli elettroni, effetti ignorati dai calcoli di singola particella.



Schema della struttura a gusci per un atomo artificiale di 200 elettroni. Sull'asse orizzontale c'è il momento angolare (in unità \hbar), su quello verticale l'energia in millielectronvolt. Ogni stato - rappresentato da una lineetta - può essere occupato da due soli elettroni, con spin opposti. La disposizione degli stati energetici è ben descritta dall'individuazione di «bande»: tutti gli elettroni appartenenti a una stessa banda sono accomunati da un identico numero quantico. Aumentando il campo magnetico le bande tendono a orizzontarsi e il profilo energetico del punto a somigliare a quello di un sistema bidimensionale di elettroni (in cui le bande sono orizzontali). Il grafico in alto mostra la situazione in assenza di campo magnetico; quello in basso, in presenza di un campo di 2 tesla. Per l'atomo artificiale questo è un valore piuttosto alto, che permette l'osservazione delle proprietà quantistiche degli elettroni interagenti. La linea rossa indica l'energia di Fermi, ossia l'energia dell'elettrone più esterno dell'atomo artificiale. Gli elettroni nelle vicinanze del livello di Fermi sono i candidati per le transizioni in presenza di sollecitazioni esterne. In verde sono indicate le transizioni intrabanda, in rosso quelle interbanda.



Per elettroni confinati in un profilo parabolico, si può indurre con radiazione del lontano infrarosso solo un'eccitazione collettiva: tale lunghezza d'onda non coglie la struttura interna del punto (la dinamica dei singoli elettroni). In questo caso, gli elettroni oscillano come un tutt'uno rispetto alle cariche positive (A). Con frequenze maggiori e in un confinamento non parabolico, è rivelabile l'eccitazione dei singoli elettroni, che mostra la struttura a «shell» dell'atomo artificiale. Questo stato eccitato (SPE) consiste nel salto di pochi elettroni oltre l'energia di Fermi (la circonferenza; B). I contributi quantistici di «correlazione» nell'energia del sistema danno anche stati eccitati collettivi, come i modi di spin (SDE; C) e di carica (CDE).

La spettroscopia Raman è uno strumento ideale per studiare i fenomeni a molti corpi perché - con regole di selezione dipendenti dalla polarizzazione relativa dei fasci di luce incidente e trasmessa - si possono far risaltare i diversi stati di eccitazione, variamente associati ai moti relativi degli elettroni. Con polarizzazione parallela si risolvono gli stati dovuti all'oscillazione della densità di carica (CDE). Questi sono gli unici stati che, come abbiamo visto, si ottengono nel caso di confinamento armonico, ovvero di strutture altamente simmetriche. Con polarizzazioni relative perpendicolari si evidenziano stati di oscillazione della densità di spin (SDE). Le transizioni di singola

particella (SPE) sono rivelate in entrambe le configurazioni.

Le misure ottenute da questo gruppo dimostrano chiaramente che le SPE vengono esaltate rispetto alle transizioni collettive quando il fascio luminoso cede quantità di energia vicine all'energia del salto tra le bande. Le oscillazioni collettive, invece, continuano a sussistere anche quando l'energia

ceduta al campione è superiore a quella dell'intervallo tra le bande. Inoltre si ipotizza che a contribuire a queste oscillazioni siano chiamati non tutti gli elettroni del sistema, ma solo quei sottogruppi che hanno lo stesso numero quantico di banda.

Che cosa succede al variare dell'impulso luminoso trasferito? Le frequenze di eccitazione restano le stesse, e questo è un chiaro indice del comportamento adimensionale della struttura (cioè la luce utilizzata ha sempre una lunghezza d'onda superiore alle dimensioni del punto quantistico), mentre l'intensità delle eccitazioni aumenta. Inoltre le eccitazioni collettive si discostano da quelle di singola particella, a seconda

che ne siano responsabili le correlazioni tra gli spin o quelle tra le cariche degli elettroni. Il distacco in energia delle CDE dalle SPE è circa otto volte tanto, e in direzione opposta, rispetto a quello delle SDE, ed è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza tra le bande coinvolte nell'eccitazione.

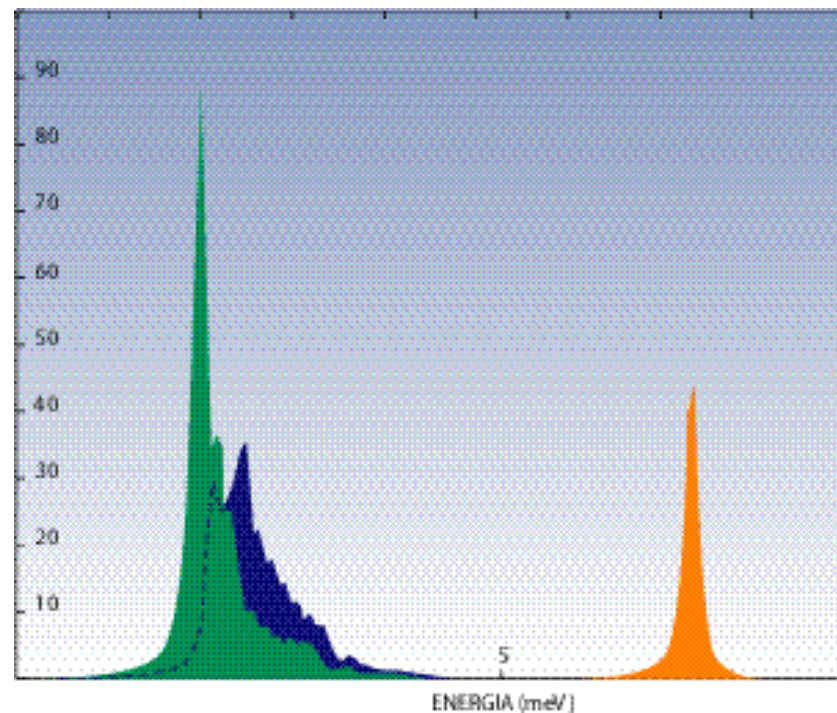
Le indagini sperimentali, insomma, replicavano ciò che si osserva da una parte nell'atomo e dall'altra nel gas di elettroni dei metalli macroscopici. A questo punto era necessario un calcolo che rendesse meglio sia le caratteristiche di singola particella sia le oscillazioni collettive rilevate negli esperimenti e legate agli effetti quantistici dell'interazione tra elettrone e elettrone.

Una teoria da costruire

Un modo semplice per iniziare è di assumere gli elettroni in moto in orbitali indipendenti determinati dal campo esterno e da un campo medio dovuto ai restanti elettroni. La funzione d'onda che descrive il sistema è allora il prodotto degli orbitali di particella singola e l'equazione di Schrödinger si separa in tante equazioni indipendenti quanti sono gli elettroni. Con le soluzioni si calcola l'interazione elettrostatica reciproca e si passa a risolvere nuovamente l'insieme di equazioni, ottenendo un nuovo insieme di orbitali di particella singola. L'iterazione del procedimento conduce alla soluzione finale. Questo metodo è stato sviluppato negli anni trenta da Fock e da Douglas Hartree e ha conosciuto successivi affinamenti.

Un nuovo approccio al problema è dovuto ancora a Kohn. In un paio di articoli pubblicati a metà degli anni sessanta egli aveva mostrato, unitamente a Pierre Hohenberg e Lu Sham, come fosse possibile mettere in relazione l'energia di un sistema quantistico con la sua densità elettronica. In questo modo si ottiene una descrizione del sistema in funzione di un'unica variabile, la posizione nello spazio, anziché ricorrere esplicitamente alla funzione d'onda, che dipende dalla posizione nello spazio di ogni singolo elettrone. Una volta scritta l'energia in questo modo, si può costruire un insieme di equazioni analoghe alle equazioni del metodo Hartree-Fock, con in più la presenza di un termine di «correlazione», che rappresenta un campo di forze addizionale sugli elettroni. Questa teoria, detta del funzionale densità, è particolarmente versatile. In questi trent'anni è stata applicata a numerosi sistemi, dai nuclei alle molecole complesse, dando sempre ottimi risultati. A

Il calcolo delle transizioni possibili tra gli stati all'interno di un punto quantistico ha permesso di scoprire le energie a cui sono favoriti i diversi tipi di eccitazione. Sul'asse orizzontale è riportata l'energia in millielettronvolt, su quello verticale l'intensità espressa in unità arbitrarie. La figura mostra come l'aver incluso nel calcolo i contributi quantistici di correlazione, dovuti all'interazione tra le particelle, genera una riduzione dell'intensità delle transizioni di singola particella a favore dei modi collettivi. Il picco blu mostra lo spettro SPE, quello rosso lo spettro CDE, quello verde lo spettro SDE.



confirma di ciò, è stato assegnato lo scorso anno al suo autore, oggi all'Università della California a Santa Barbara, il premio Nobel per la chimica.

La teoria di Kohn richiede che all'inizio del procedimento si faccia una scelta ben precisa proprio per il termine di correlazione, che riveste un ruolo fondamentale per la corretta interpretazione del sistema a molti corpi. Generalmente la correlazione è trattata come se la densità fosse localmente costante dentro ogni piccola regione del sistema. Inoltre, se il sistema è sottoposto all'influenza di un campo esterno, gli elettroni ne risentiranno e si disporranno in una configurazione di equilibrio leggermente diversa da quella imperturbata di partenza, ma sufficiente a far sì che ciascun elettrone si trovi sottoposto a un campo di forze diverso. Trascurando gli effetti più piccoli dell'influenza che ciascun elettrone subisce come conseguenza della redistribuzione di tutti gli altri elettroni, si ottiene che le equazioni ottenute col metodo di Kohn sono lineari, ovvero facilmente risolubili. La teoria del funzionale densità è stata di recente adattata al caso dei punti quantistici da M. Ferconi e G.

Vignale, sempre all'Università della California a Santa Barbara.

Partendo dal loro studio, Enrico Lipparini a Trento con Manuel Barranco e collaboratori di Barcellona e Llorens Serra hanno ottenuto di recente lo stato fondamentale di un punto quantistico immerso in un campo magnetico. I calcoli, elaborati al computer grazie a un codice preparato da Marti Pi, evidenziano la formazione di livelli discreti di energia nel punto, e un andamento di altre grandezze tipico delle strutture a gusci. Il passo successivo è consistito nello studio degli stati eccitati e, in particolare, nel cercare di riprodurre i risultati ottenuti sperimentalmente dal gruppo di Schüller. In questo caso il codice computazionale è stato predisposto in modo da analizzare separatamente le transizioni che avvengono con diversa variazione di momento angolare. I primi risultati, ottenuti alla fine del 1998, confermano la presenza contemporanea, nel punto quantistico, di caratteri di singola particella analoghi a quelli atomici e di stati collettivi generati dalle correlazioni quantistiche tra gli elettroni.

Per la prima volta siamo riusciti a



Una formica ha «catturato» un microchip delle dimensioni di un millimetro quadrato. Il dispositivo è stato prodotto dal laboratorio di nanotecnologie dell'Università di Huddersfield, e il più piccolo circuito in esso contenuto misura appena 300 nanome-

tri. Per il momento, le proprietà degli atomi artificiali restano perlopiù confinate alla fisica teorica, ma c'è chi giura che entro i prossimi vent'anni le dimensioni dei microchip si ridurranno fino a occupare tanto spazio quanto ne occupa una cellula.

svelare il meccanismo di formazione dei livelli energetici su cui si dispongono gli elettroni quando viene applicato un campo magnetico. Inoltre anche i nostri calcoli confermano il fatto, già rivelato a livello sperimentale, che le frequenze di eccitazione rimangono costanti al crescere del momento trasferito e predicano che è l'intensità di questi stati eccitati a variare e a trasferirsi dai modi a bassa variazione di momento angolare ai modi con variazione più alta. Attualmente

stiamo approfondendo questa analisi.

In conclusione, la nanoelettronica è un'impresa tecnologica per il futuro, ma oggi l'interesse è tutto rivolto a questioni di fisica fondamentale, dove hanno fatto il loro ingresso queste nuove strutture su cui mettere alla prova la meccanica quantistica. Viene spontaneo, ripercorrendo la storia della fisica moderna, pensare a diversi atomi artificiali «legati» in modo da formare molecole artificiali, o a tanti atomi artificiali legati a dare solidi artificiali.

La riduzione delle dimensioni dei sistemi elettronici, unitamente al comportamento collettivo delle particelle, costituisce un affascinante traino nell'esplorazione delle comunità quantistiche. Le ricadute tecnologiche di questa ricerca potranno favorire la produzione di laser particolarmente efficienti e di transistor a potenza talmente bassa da poter essere compatibili con la materia biologica, aprendo una porta a quelle che già oggi qualcuno chiama «tecnologie umanoidi».

LEONARDO COLLETTI si è laureato con lode in fisica all'Università di Trento, dove attualmente è al secondo anno del dottorato di ricerca. Ho svolto attività di divulgazione scientifica nell'ambito della «Mostra del giocattolo scientifico» in diverse sedi e della mostra «100 anni di raggi X» presso il Dipartimento di fisica di Trento. Nel 1999 ha svolto parte dell'attività di ricerca presso la Scuola Normale Superiore di Pisa grazie a una borsa finanziata dall'INFN.

BARRANCO M., COLLETTI L., EMPERADOR A., LIPPARINI E., PI M. e SERRA LL., *Wave-vector Dependence of Spin and Density Multipole Excitations in Quantum Dots*, preprint 1999

LIPPARINI E., COLLETTI L., ORLANDINI G. e SERRA LL., *Collective Spin States in the Electron Gas in Different Dimensions and Geometries* in «Journal of Physics», Czech., 48, 6/7, 1998.

FERCONI M. e VIGNALE G., *Current-density-functional Theory of Quantum Dots in A Magnetic Field* in «Physical Review B», 50 (14722), 1994.

CINGOLANI R. e RINALDIRI., *Electronic States and Optical Transitions in Low-Dimensional Semiconductors* in «Rivista del Nuovo Cimento», 16, 9, 1993.

KASTNER M. A., *Artificial Atoms*, in «Physics Today», gennaio 1993

KOHN W. e SHAM L. J., *Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects* in «Physical Review», 140, 1133, 1965.