

Pohjalla on tilaa



Suurin ihmisen koskaan tekemä laite lienee ollut Euroopan hiukkastutkimuskeskuksen CERNin äskettäin käytöstä poistettu LEP-kiihdytin, jonka rengasmaainen suojatunneli on 27 kilometriä pitkä. Kaukaisuuteen katoava hitaasti kaartava tunneli vaikkapa jossain DELPHIn koeasemalla täynnä elektroniikkaa on todella sykähdyttävä näky.

Pienimmät ihmisen tekemät moottorit taas ovat vain millin miljoonasien mittaisia, eikä niiden näkemiseen riitä enää edes hyvä valokopiointi.

molekyylit, josta ihmisenkin perintötekijät eli geenit koostuvat.)

Bellin miesten moottori koostuu pienestä pätkästä DNA:ta, joka saadaan vuoronperään taittamaan hiuspinnan muotoiseksi ja taas avautumaan. Kun tuo pieni vipu liikkuu edestakaisin, sitä voidaan käyttää tekemään pieni määrä mekaanista työtä.

Se on esimerkki bottom-up-nanoteknologiasta (BUN, Bottom-up nanomachines), jossa tuotetaan nanomittakaavaan (1 nm = 1/1 000 000 mm) rakenteita ikään kuin alhaalta ylöspäin, atomi- ja molekyylitaso palikoista käsin.

vihreän massan, jonka varassa on ihmisenkin koko ravintotalous. Se on aivan uskomaton tehdaslaitos: ikkunalla pieni purkki, jossa on kourallinen multaa ja pelargonioita. Lisää vain vettä, niin kasviraasu lykkää biomassaa vuosi vuodelta perään, kilolokilla näköjään aivan tyhjästä niin, ettei edes multa tunnu vähenevän, pikemminkin päinvastoin.

Kun nämä mekanismit saadaan valjastettua teknologiaksi, koko ihmisen talouden ekologia muuttuu.

Kasvit sitovat auringon energiaa valtavia määriä lehtivihreänsä avulla, ja kasvi- ja eläinsolut pystyvät tuottamaan hirmuisen määrän erilaisia kemiallisia yhdisteitä. Kaikki tämä on

Nanopumpun demoni

Tuollaisiin puolibiologisiin nanoautomaatteihin lienee vielä melkoinen matka, mutta hieman pienemmin purjein samoissa vesissä kyntää jo esimerkiksi nanopumppu, jonka VTT:n tutkimusprofessori Hans Söderlund ja tutkija Tarja Nevanen esittelivät Floridan yliopiston Charles Martinin kanssa Science-lehdessä vuosi sitten.

Pumpun ohuessa alumiinikalvossa on kapeita (noin 1/10 000 mm) kanavia, joiden suuta vartioivat geenitekologisesti tuotetut vasta-ainemolekyylit. Ne tunnistavat tiettyjä muita molekyylejä, joita ne kuljettavat kalvon läpi toiselle puolelle. Pumppu ei tarvitse ulkopuolista energiaa, sillä sitä ajavat pumpattavan aineen osapaineet, jotka kalvon eri puolilla ovat erilaiset.

Kun vasta-aineita voidaan valmistaa tunnistamaan hyvin monenlaisia pienmolekyylejä, hormoneita, ympäristömyrkyjä ja lääkkeitä, tällaisille pumpuille löytyy paljon sovelluksia esimerkiksi lääketieteessä ja -teollisuudessa. Ajatellaan vaikkapa sellaista laitetta, joka valikoivasti poistaa verestä jotain tiettyä ainetta tai sitten annostelee sitä sinne.

Se tuo mieleen ajatusleikin, jonka fyysikko James Clerk Maxwell joulukuussa 1867 esitteli kirjeessä ystävänsä Edinburghin yliopiston Peter Taitille (joka tutki muun muassa golfpallon lentoa).

Maxwell kuvitteli pienen olennon, joka istuu kahden kaasustian välisellä reiällä ja lajittelee yhdenlaiset molekyylit yhteen astiaan ja toisenlaiset toiseen. Ilman tällaista Maxwellin demonia aineen itsensä järjestyminen olisi mahdotonta, koska päinvastoin maailman-kaikkeudessa epäjärjestys pyrkii aina lisääntymään eli entropia kasvaa.

Nanobotit ovat hyvin samankaltaisia olentoja. Vähäruokaisina ja vaatimattomina ne saavat kaikessa hiljaisuudessa aikaan paljon, ja kaiken lisäksi ne vielä voivat säädellä itse omaa määräänsä ja toimintaansa tarpeen mukaan.

Pieni askel ihmiselle

Nanoteknologian lähtölaukauksena pidetään usein amerikkalaisen fysiikan nobelistin Richard Feynmanin lounaspuhetta American Physical Society kokouksessa 29.12.1959. Puhe oli otsikoitu "There is Plenty of Room at the Bottom" eli "Pohjalla on paljon tilaa".

Vasta parikymmentä vuotta myöhemmin alkoivat tutkijat saada väli-

Nanoteknologian avulla erilaiset laitteet saadaan käsittämättömän pieniksi ja samalla erittäin suorituskykyisiksi ja kustannustehokkaiksi. Lisäksi biologia tuo nanolaitteisiin ennen kokeilemattomia ominaisuuksia, jotka mahdollistavat täysin uudenlaisia teknologiakonsepteja.

ERKKI KAUFANEN
KIMMO VIRTANEN, avauskuva



Mallia soluista

Jännittäväksi BUN-teknologian tekee etenkin se, että sen esikuvia etsitään elävien solujen biologiasta. Biologia tarjoaa nanolaitteille monia ennen kokeilemattomia ominaisuuksia, jotka mahdollistavat aivan uudenlaisia teknologiakonsepteja.

Esimerkiksi kasvien solukoneisto kierrättää ilman kaasuja ja valmistaa niistä sekä vedestä ja vähäisistä määristä muita aineita kaiken sen

valjastettavissa teknologiaksi.

Solujen salaisuus on siinä, että niistä löytyy pieniä kemiallisia automaatteja kaikkiin mahdollisiin tarpeisiin: pumppuja, jousia, moottoreita, laakereita, akseleita, vajioreita, vipuvarsia, venttiileitä, akkuja, aivan mitä vain.

Ajatelkaa esimerkiksi sitä pientä moottoria, joka siittiösolussa heiluttaa veijarin häntää niin, että se ilman varikkokäyntiä ja tankkausta ui kokonsa nähden hirmuisen pitkän matkan kuljettaen perille ison lastin perintötekijöitä.

Noilla laitteilla on hyötysuhteet, jollaisista makrokoon laitteet eivät pysty edes haaveilemaan.

lomikroskooppi. Moottorit eivät vielä varsinaisesti tee mitään hyödyllistä, mutta osoittavat, että noinkin pieni laite todella on tehtävissä ja toimii.

Tähän joukkoon kuuluu Bellin laboratorioden ja Oxfordin yliopiston tutkijoiden uusi DNA-moottori, josta he raportoivat muutama kuukausi sitten. (DNA on se sama super-



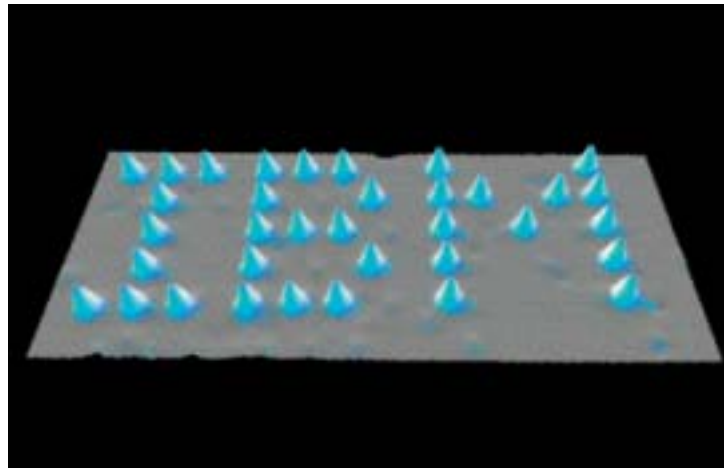
neitä Feynmanin visioiden toteuttamiseen, esimerkiksi tunnelointielektronimikroskoopin 1981 ja atomivoimamikroskoopin 1986.

Tunnelointimikroskooppi (STM, scanning tunneling microscope) kuljettaa näytteen yläpuolella kärkeä, johon syntyy pieni virta, kun elektronit hyppäävät siihen näytteen atomeista. Tuo hyppy, tunneloituminen, on taas yksi kvanttiouto ilmiö, jossa elektroni katoaa yhdestä paikasta ja ilmestyy toiseen paikkaan vaikkapa seinän läpi menemättä välissä olevien paikkojen kautta.

Nanoteknologia on niin pientä, että jokseenkin kaikissa laitteissa on jo otettava huomioon kvanttifysiikan ilmiöt, joita arkielämän makrotasolla emme useimmiten näe. Itse asiassa suuri osa nanolaitteista esimerkiksi elektronikan puolella peräti perustuu näihin kvanttioutoihin ilmiöihin, kuten juuri elektronien tunneloitumiseen.

Tunnelointimikroskoopilla ulotetaan jo näkemään yksittäisiä atomeja, ja sillä voidaan jopa liikutella niitä. Vuonna 1989 IBM:n Don Eigler onnistui ensimmäisenä käyttämään STM:ää siihen tarkoitukseen.

Tunnollisena työntekijänä hän askarteli 35 yksittäisestä xenon-atomista työnantajansa nimikirjaimet IBM. Vaikkei saavutus ehkä olekaan kovin tunnettu suuren yleisön keskuudessa, se oli tekniikan historian kannalta yhtä merkittävä hetki kuin Neil Armstrongin kävely Kuun pinnalla 20.7.1969.



PIENI askel ihmiselle, mutta suuri ihmiskunnalle. IBM:n Don Eiglerin työryhmä onnistui 1989 kirjoittamaan nikkelilevylle kirjaimet IBM käyttämällä 35 yksittäin siirrettyä xenon-atomia. Ihminen oli ensimmäisen kerran rakentanut yksittäisistä atomeista nanokokaisen rakenteen, joka ei ollut molekyyli



SILTA yli myrskyväen meren? Ei, vaan lähikuva Nanoway Oy:n erästä säteilymittaukseen käytettävästä anturista. Meri on anturin pialusta, jonka päällä on piinritidikerros. Sen varassa lepävä metallisilta johtaa sähköä niin, että sähköjohtavuus reagoi ympäristön säteilyyn. Sillan korkeus meren pinnasta on muutamia satoja nanometrejä. Rakenne on tuotettu top-down-nanoteknologialle tyypillisellä elektronisuihkulitografialla ja syövytyksellä

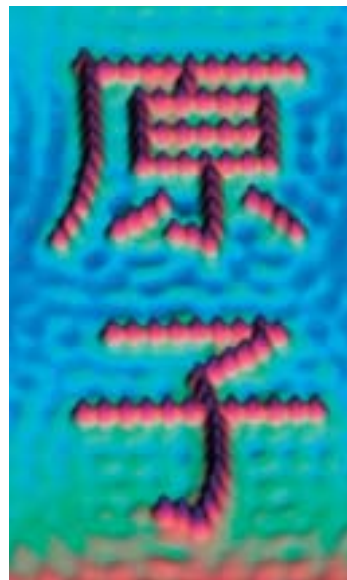
nalla 20.7.1969.

Se oli pieni askel Don Eiglerille, mutta suuri ihmiskunnalle. Ihminen oli ensimmäistä kertaa pala palalta koonnut molekyylikokaisen rakenteen, joka ei ole molekyyli.

Atomivoimamikroskooppi (AFM, atomic force microscope) raapii näytettä niin kuin gramofonineula äänilevyn uraa. Koska AFM tunnustele sähkövirran sijasta mekaanisesti, sitä voidaan käyttää myös sähköisten rakenteiden tutkimiseen.

Pari kuukautta sitten osakalaiset tutkijat raportoivat ensimmäisinä onnistuneensa siirtämään yksittäisiä atomeita AFM:n avulla. He väänivät piiatomin irti levyn pinnasta AFM:n kärjellä kuin sorkkaraudalla. Sitten he siirsivät sen toiseen paikkaan ja junnasivat siihen.

Yksittäisten atomien käsittelyn li-



SANA "atomi" kirjoitettuna kiinaksi yksittäisten atomien avulla.

säksi STM:n ja AFM:n skannerikärkiä voidaan eri tekniikoita hyödyntäen käyttää "piirtelyyn" joko piilevylle tai jollekin sopivasti kerrostetulle alustalle. Vaikkapa syövyttämällä joitain kerroksia pois ja toisia esiin saadaan rajattua eristäviä tai sähköä johtavia alueita, jotka voivat toimia elektronikan komponentteina kuten transistoreina.

Näiden laitteiden kautta lähestytään vähitellen sellaista elektronikan miniatyrisaatiota, joka mahdollistaa esimerkiksi älyominaisuuksien sijoittamisen mihin tahansa esiinisiin tai laitteisiin koosta riippumatta. Joku on visioinut, että lähitulevaisuudessa kengälläkin voi olla oma IP-osoite.

Ja elektronikan pakkaustiheyden kasvun myötä kaikkien laitteiden suorituskyky tietysti tulee taas nousemaan rajusti.

Saituuden huippu

Elektronikan kääpiöittämisessä teoreettinen alaraja lienevät yhdellä elektronilla toimivat laitteet kuten transistorit (SET, Single electron transistor).

Ensimmäisen toimivan SETin valmistsivat Gerald Dolan ja Theodore Fulton Bellin Laboratoriossa jo vuonna 1987. Useimmat SETit ovat kuitenkin vaatineet toimiakseen niin matalia lämpötiloja, että niiden kaupallistaminen on ollut vaikeaa.

Parin viime vuoden aikana on kuitenkin jo päästy huoneenlämpöön, joten ainakin tämä este on väistyvässä tuotteistamisen tieltä.

Kun tavallisessa, vaikkapa tietokoneen transistorissa vilistävät aina miljardit elektronit, yhden elektronin laite on siihen nähden jo melko taloudellinen. Kun sähköä annostellaan tipoitain, tullaan taas noihin kvantti-ilmiöihin, jotka tekevät mahdolliseksi aivan uudenlaisia rakenteita.

Niihin kuuluvat esimerkiksi kvanttikaivot, kvanttilangat ja nanopisteet, jotka ovat kvanttifysiikan ilmiöitä hyödyntäviä nanomittaisia elektroniloukkuja. Niitä käytetään jo muun muassa puolijohdelaserien elektronikassa.

Perinteisen piin lisäksi nanoelektronikkaa tehdään myös nanoputkista, jotka ovat 1991 löydetty hiilen uusi muoto, josta on tulossa yksi nanoteknologian perusmateriaaleista. Ne ovat hyvin vahvoja ja joustavia: nanoputki voi olla 20 kertaa niin vahva kuin vastaavan paksuinen teräslanka, vaikka se painaa siitä vain kuudenneksen.

Lisäksi ne johtavat sähköä. Sopivan ohuesta putkesta elektronit ti-

kuva: IBM/Eigler

kuva: Nanoway

kuvat läpi yksin kappalein.

Toissa vuonna hollantilainen Cees Dekker onnistui mekaanisesti taituttamaan AFM:n kärjellä 20 nm pitkän ja 1 nm paksun nanoputken mutkalle kahdesta kohtaa. Mutkat haittaavat putken sähköjohtavuutta niin, että niiden väliin muodostuu eristetty saareke, jonne tai josta elektroni pääsee vain tunneloitumalla. Kun mutkalle väännetty putki asetetaan sopivalle alustalle kahden elektrodin väliin, se toimii transistorina.

Uusien materiaalien lisäksi nanoteknologian kasvua ruokkivat uudet nanomittakaavassa ilmenevät luonnonilmiöt, kuten 1988 löydetty suuri magnetoresistanssi GMR (giant magnetoresistance). Se tarkoittaa sitä, että tiettyjen aineiden vastus puttaa dramaattisesti magneettikentässä.

Kun vastus vaihtelee magneettikentän mukaan, tulee heti mieleen hyödyntää sitä nanopaksuisissa (ja siis erittäin herkissä) vastuksissa esimerkiksi tietokoneen kovalevyn lukupäissä, RAM-muisteissa sekä monenlaisissa sensoreissa. Niitä on ollut tuotannossa jo jonkin aikaa.

Vaikka tällainen elektroniikan pienentäminen tuokin nanoteknologisia sovelluksia nopeimmin ja varmimmin markkinoille, suurin vaikutus tulee aikanaan olemaan juuri BUN-nanoteknologialla, joka vielä tällä hetkellä hieman hapuillen etsii itseään itse monistuvien systeemien tutkimuksessa.

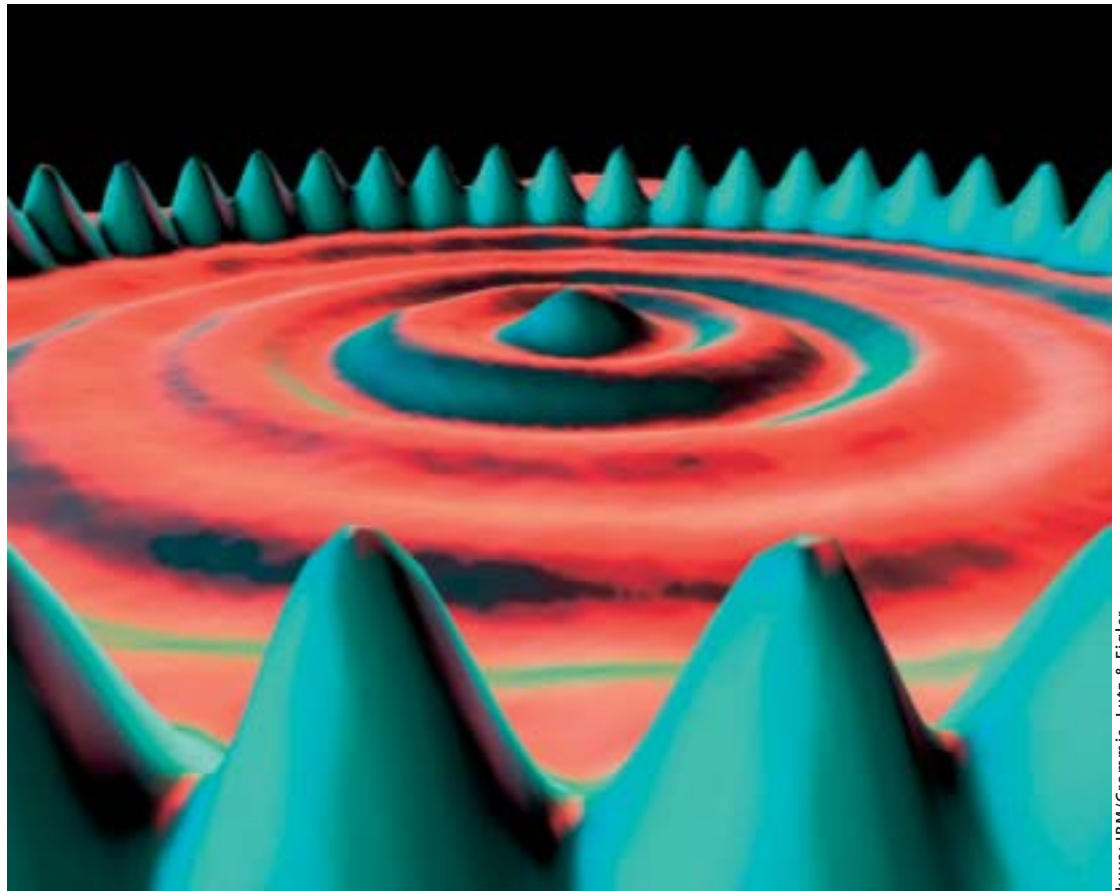
Miksi peruna on halpaa?

Paitsi että nanoteknologian avulla erilaiset laitteet voidaan saada käsittämättömän pieniksi, se lupaa etuja myös kustannuspuolella. Peruna on halvempi kuin saman kokoinen taskukello vain siitä syystä, että peruna monistaa itse itsensä.

Jos perunaa pitäisi ryhtyä tekemällä tekemään, sille vasta hintaa tulisi. Perunan rakenne ei suinkaan ole yksinkertaisempi kuin taskukellon – päinvastoin, se on äärimmäisen monimutkainen, mutta sen monimutkaisuus kätkeytyy vaatimattoman ruskean kuoren alle solu- ja molekyylyitasolle, siis nanomaailmaan.

Ajatus laitteista, jotka monistavat itsensä, ei ole enää aivan uusi. Tuota biologian, tekniikan, kemian ja matematiikan rajamaata katseli ensimmäisenä kukkulalta unkarilaissyntyinen kemian insinööri, matemaatikko ja tietokonemies John von Neumann joskus toisen maailmansodan seutuvilla.

Asiasta on sittemmin ollut vaka-



kuva: IBM/Crommie, Lutz & Eigler

ATOMIJA ja kvanttifysiikkaa. Tämä Scanning-tunnelointielektronimikroskoopilla tehty kuva näyttää 48 rauta-atomista tehdyn aitauksen, jonka sisällä olevat aallot ovat elektronien kvanttitiloja. Pyydyttämällä elektroneja erilaisiin nanomittakaavan loukkuihin ja paimentamalla niitä hallitusti sisään ja ulos voidaan tehdä elektroniikan komponentteja, esimerkiksi yhden elektronin transistoreita.

vasti kiinnostunut muun muassa Yhdysvaltain avaruushallinto NASA, joka 1980 julkaisi asiasta paksun raportin. Se tutki mahdollisuutta rakentaa itseään monistava automaattinen tuotantoyksikkö LMF (Lunar Manufacturing Facility) käytettäväksi Kuussa.

Sen lisäksi että yksikkö monistaisi itseään, se tietysti tekisi jotain muutaakin, esimerkiksi jalostaisi malmeista metalleja. Raportti piti periaatteessa mahdollisena sellaisen laitteen kehittämistä noin 20 vuodessa senaikaisen teknologian pohjalta. Valitettavasti hanketta ei koskaan rahoitettu, joten konsepti jäi kokeilematta.

Sittemmin NASA on pohtinut tällaisen teknologian käyttöä esimerkiksi Marsissa sen ilmaston muuttamiseksi ihmiselle sopivaksi (terraforming).

Raportin mukaan itse monistava teknologia olisi uskomattoman kustannustehokasta, kunhan se kerran saadaan käyttöön. Sinä tavallaan tarjoat vain siemenen, ja laitteen omat prosessit huolehtivat jälkikasvusta aivan niin kuin perunalla.

Aivan samat perustelut ovat houkuttelevat myös nanokokoisten itse

monistavien systeemien suunnittelijoita.

Harmaan mönjän skenaario

Itseään monistaviin kemiallisiin automaatteihin, nanorobotteihin, liitetty monen mielestä uhkiakin. Tunnetuin musta utopisti on K. Eric Drexler, joka takavuosina julkaisi hyvin kiistellyn kirjan Engines of Creation.

Drexler näkee, että tulevaisuudessa nanobotit valmistavat melkein kaiken erilaisista kemikaaleista ja elektroniikan komponenteista elintarvikkeisiin. Samalla ihmisen teknologia saa yhä enemmän biologista elämää muistuttavia piirteitä.

Bioautomaattien varaan rakentava teknologia ei välttämättä olisi yhtä kurinalaista ja virtaviivaista kuin perinteinen teknologia, mutta vastapainoksi se olisi joustavampaa, itseään korjaavaa ja itse monistuvaa.

Jo Drexlerin kuvaamat "toisen sukupolven nanokoneet", joita hän kutsuu assemblereiksi, muistuttavat ominaisuuksiltaan niin paljon viruksia, että ne voivat lisääntyä kuin keinoelolliset organismit.

Niistä alan keskusteluun on jo levinnyt ilmaus "Harmaan mönjän

(Grey Goo) skenaario" kuvaamaan tilannetta, jossa supertehokas kemiallisten automaattien populaatio pääsee karkuun ja luonnollisten vihollisten puutteessa lisääntyy ympäristössä eksponentiaalisesti.

Pahimmissa kauhukuvitelmissa kummittelee karkuun päässeiden nanobottien evoluutio, joka voisi tuottaa aivan uudenlaisen villin puolielämän.

Vaikka nämä Drexlerin kauhuvisiot kuulostavatkin melko fantastisilta, muutamat hyvin arvostetut tutkijat, kuten MIT:n tekoälylaboratorian perustaja Marvin Minsky, suhtautuvat niihin vakavasti.

Minskyn mukaan Drexlerin kuvaama puolibiologinen nanoteknologia saattaa muutamassa vuosikymmenessä aiheuttaa suuremman mullistuksen kuin kaikki muu teknologia yhteensä sitten keskiajan.

Siihen on kuitenkin vielä pitkä matka, ja jo paljon ennen sitä ideoitaa perinteisempi, puolijohhteisiin ja kvanttitasoon elektroniikkaan perustuva nanoteknologia kerkeää tuottaa vaikka mitä, jota on vaikea edes kuvitella etukäteen. Niin kuin juuri sen kengän, johon saa yhteyden internetin kautta.

7/2003