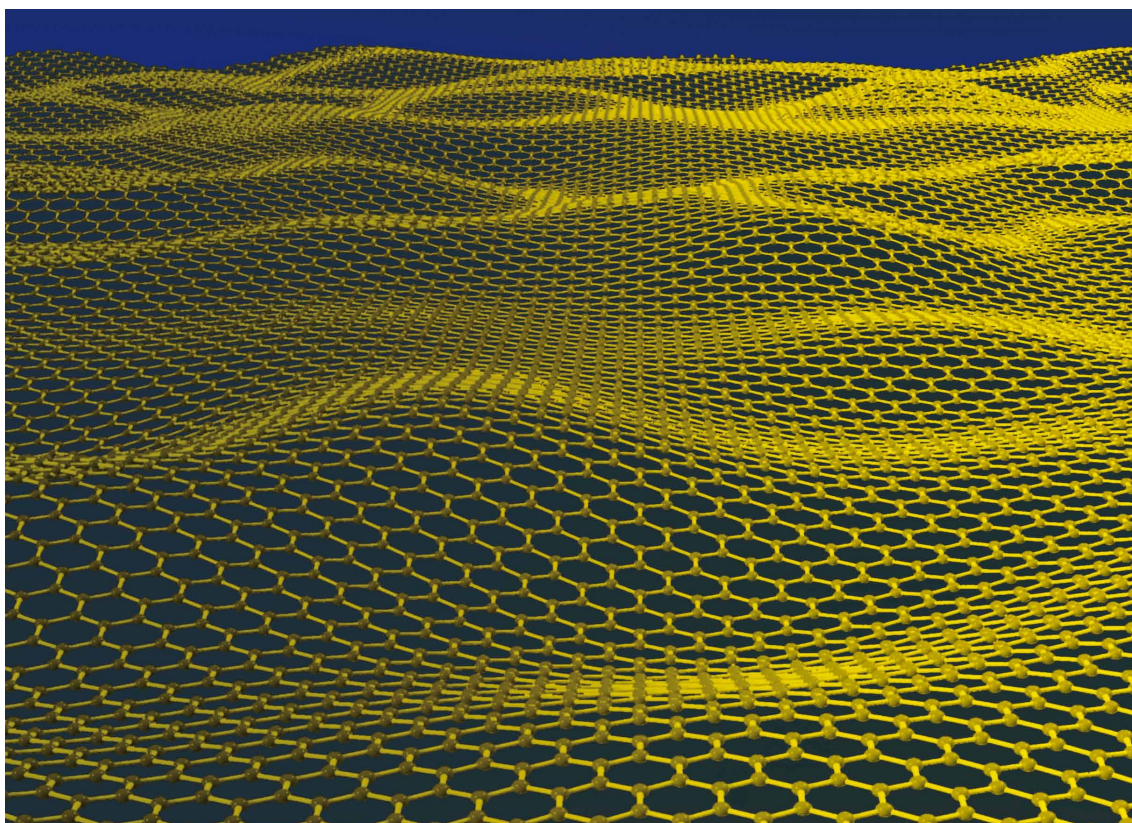




## – den perfekta atomväven

*En tunn flaga vanligt kol, bara en atom tjock, har gjort Andre Geim och Konstantin Novoselov till årets Nobelpristagare i fysik. De har lyckats visa att kolet i denna platta form har exceptionella egenskaper som har sitt ursprung i kvantfysikens märkliga värld.*

Grafen [grafe'n] är en form av kol – det tunnaste och samtidigt det starkaste någonsin. Som material är det helt nytt. Det leder elektricitet lika bra som koppar. Det leder värme mycket bättre än alla andra kända material. Det är nästan helt genomskinligt och samtidigt så tätt att inte ens helium, den minsta gasatomen, kan ta sig igenom.



**Figur 1. Grafen.** Den nästintill perfekta väven är bara en atom tjock. Den består av kolatomer bundna till varandra i ett sexkantigt mönster som i ett hönsnät.

Inte undra på att artikeln om grafen i ett oktobernummer av tidskriften Science 2004 genast framkallade en febril verksamhet världen över. Dels lockar grafenets exotiska egenskaper som tillåter forskarna testa fysikteoriernas fundament. Dels hägrar otaliga praktiska tillämpningar – att skapa såväl en mängd nya material som ny elektronik.

Kol, som bygger upp allt liv vi känner till på jorden, har än en gång överraskat oss.

## Med blyerts, papper och vanlig tejp

Enklare kunde det knappast vara att ur grafit, sådant som sitter i blyertspennorna, få fram mirakelmaterialet grafen. Ofta ligger dock det enklaste och mest uppenbara dolt för våra sinnen.

Grafen består av kolatomer hopbundna i ett plant nät – som ett hönsnät fast bara en atom tjockt. Tre miljoner sådana plana grafenskikt staplade på varandra bygger upp en millimeter grafit. Skikten hålls ihop av en relativt svag kraft – det är lätt att riva loss de olika lagren från varandra, det vet var och en som har skrivit med blyertspenna. Och då har det kanske också hänt att bara ett enda atomskikt, grafenet, råkade hamna på pappret.

Det var vad som hände när Andre Geim och Kostantin Novoselov med en bit tejp metodiskt rev av tunna grafit-flak från en liten grafitklump. De började med flera atomlager tjocka flingor men när de upprepade tejp-tricket 10–20 gånger blev de allt tunnare. Sedan gällde det att hitta de minimala grafenfragmenten bland tjockare grafit-flagor och annat kolskräp. Här kom nästa snilleblix: för att kunna se frukterna av sina mödosamma försök valde manchesterforskarna att fästa flagorna på en oxiderad kiselplatta, halvledarindustrins standardmaterial.

När plattan placeras i ett vanligt optiskt mikroskop syns alla regnbågsfärger skifta, ungefär som olja på en vattenpöl, beroende på hur många grafenlager som flagorna innehöll. Avgörande för att få syn på grafenet visade sig vara tjockleken på det underliggande kisel-dioxidskiktet. Nu dök grafenet upp i mikroskop-bilden – ett äkta tvådimensionellt kristallint material som överlever i rumstemperatur. Grafen är ett perfekt regelbundet kolnät med bara två dimensioner, bredd och längd. Grundenheten i detta mönster är sex kolatomer kemiskt

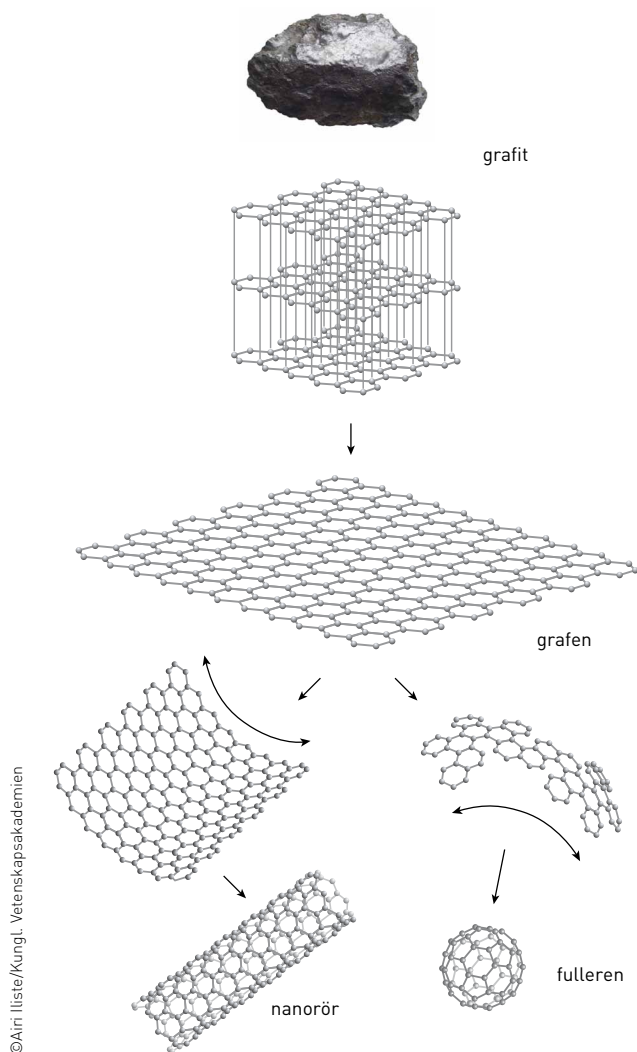
fastbundna till varandra. Miljarder kolatomer sammansatta i sexkanter bildar grafenet och även andra kolformer som vi känner till i dag.

### I väntan på upptäckten

I själva verket har grafen alltid funnits med oss, det gällde bara att få syn på det. På liknande sätt har på senare tid även andra naturliga kolvarianter dykt upp inför forskarnas ögon när de tittade på rätt sätt: först nanoröret och sedan ihåliga kolbollar, så kallade fullerener (Nobelpris i kemi 1996). Infångat i grafiten väntade grafenet på att befrias (se figur 2).

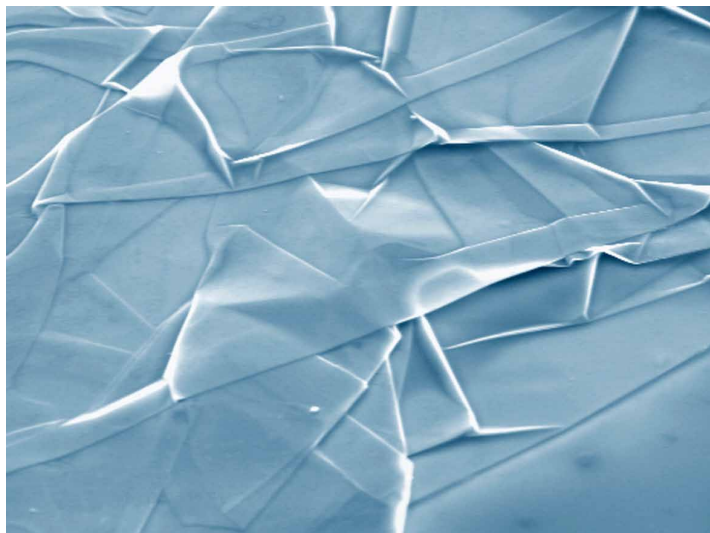
Många tvivlade på att det var möjligt att isolera så tunna skikt – de borde skrynklas, rulla ihop sig eller rent av upplösas helt. Men det fanns de som ändå prövade, även om tidigare försök misslyckats med att få fram just grafenet. Det gick dock att åstadkomma filmer tunnare än 100 atomlager, några blev till och med så tunna att de var genomskinliga.

**Figur 2. Grafen från grafit.** Grafiten är grundmaterialet som förekommer i naturen. Särade blir grafitskikten grafen. Hoprullade grafenskikt bildar nanorör och hopvikta kan de bli små fotbollar, fullerener.



Ett sätt att få loss grafenet är att införa kemiska ämnen mellan grafitens atomlager för att försvaga bindningarna och på olika sätt sedan separera lagren från varandra. En annan metod är att helt rått skrubba bort grafitetiketen. Man har också framgångsrikt prövat att bränna av kisel från kiselkarbidkristaller. Vid mycket höga temperaturer lämnas då tunna kolskikt kvar. Olika tekniker för så kallad epitaxiell tillväxt som används brett för att skapa halvledarmaterial, anses utlova bäst resultat för att grafen ska kunna ta plats inom elektronikindustrin. Störst idag är 70 centimeter breda grafenskikt på rulle.

**Figur 3. Som ett sidenlakan.** Veckade grafenskikt på kiselskiva. Bilden är framtagen med svepelektronmikroskop i cirka 5 000 gångers förstoring.



University of Manchester: Science vol. 324, 15 May 2009

## I världen Annorlunda

Andre Geim och Konstantin Novoselov hade dock bara tillgång till mikroflakor av det nya materialet. Trots ministorleken, på bara ett hårstrå när, kunde de börja utforska de två mest remarkabla dragen hos grafen som båda påverkar dess elektriska egenskaper.

En är grafenets nästintill perfekta uppbyggnad. Den felfria ordningen härstammar från att kolatomerna är starkt bundna till varandra. Samtidigt är bindningarna tillräckligt flexibla för att inte slitas sönder när nätet dras ut med upp till en femtedel av dess längd. Detta perfekta nätverk gör att elektroner kan färdas långväga i grafen utan att störas. I vanliga ledare studsar elektronerna ofta, nästan som i ett flipperspel, när de tar sig fram genom materialet. Och då minskar ledningsförmågan.

Den andra unika egenskapen hos grafenet är att dess elektroner beter sig som om de vore masslösa. På så sätt liknar de ljuspartiklarna, de masslösa fotonerna, som i vakuum orubbligt far fram med världens högsta hastighet, 300 miljoner meter i sekunden. I likhet med dem rör elektronerna sig i grafenet som om de saknade vilomassa och har en hastighet på en miljon meter i sekunden. Detta öppnar för möjligheten att i liten skala studera vissa fenomen som annars kräver stora partikelacceleratorer.

Med grafen får fysikerna också ett tillfälle att pröva några av de mer spöklika kvanteffekterna som tidigare bara diskuterats teoretiskt. Ett sådant fenomen är den så kallade Kleintunnlingen, en variant på en paradox formulerad av den svenske fysikern Oskar Klein år 1929. Den märkliga tunneleffekten inom kvantfysiken innebär att partiklar ibland kan ta sig igenom en barriär som annars borde stoppa dem. För kvantpartiklar gäller att ju större barriär desto mindre chans att slinka igenom. Icke så för elektronerna i grafen – under vissa omständigheter far de fram som om barriären aldrig funnits i deras väg.



## I de drömda världarna

De möjliga tillämpningarna av grafen har väckt stor uppmärksamhet. Än så länge finns de flesta bara i fantasin, men en hel del prövas redan, inte minst av Geim och Novoselov själva.

Främst har grafenets osedvanliga ledningsförmåga väckt intensivt intresse. Grafentransistorer förväntas bli avsevärt snabbare än dagens transistorer som byggs av kisel. För att datorskretsar ska bli snabbare och energisnålare måste de krympas. Där stöter kisel på en gräns där materialet inte längre fungerar. Grafen skulle kunna sänka den gränsen. Då kan komponenterna packas ännu tätare.

En milstolpe har redan passerats när en grafentransistor förevisades häromåret som redan är lika snabb som sin kisel motsvarighet. Kanske står vi inför ytterligare en miniatyrisering av elektroniken som leder till att datorn på sikt kan bli ännu effektivare. Än så länge är dock grafendatorer en avlägsen dröm, även om genomskinliga papperstunna datorskärmar, som går att rulla ihop och stoppa i handväskan, redan skildras i reklamerna för morgondagens bruk.

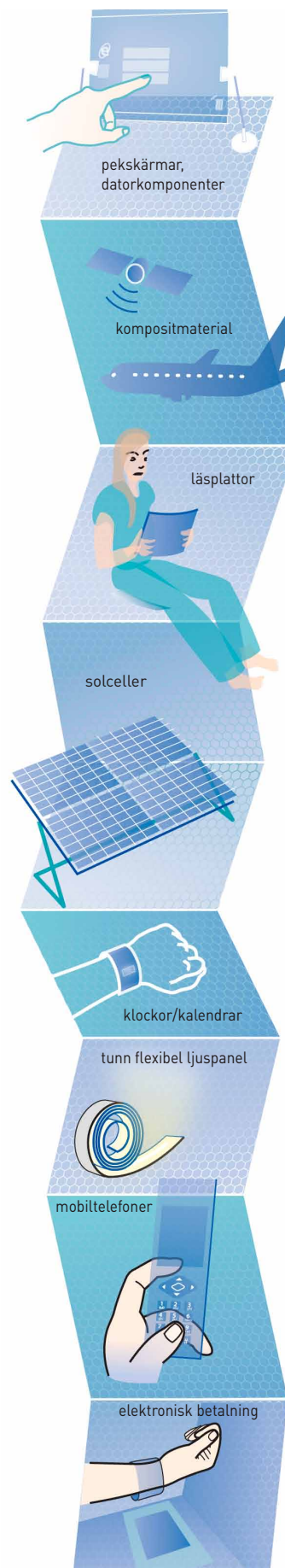
Under tiden kan man fantisera om andra mer eller mindre realistiska tillämpningsområden. Alla kräver de kraftfulla insatser, medan utgången ännu är oviss.

Med sin förmåga att både släppa igenom synligt ljus (närapå 98 procent) och samtidigt leda ström lämpar sig grafenet till att användas i genomskinliga pekskärmar, ljuspaneler och kanske solceller. Även plaster kan göras elektriskt ledande om bara knappt 1 procent grafen blandas in. Och med blott en bråkdel promille grafen inblandat ökar plastens förmåga att tåla värme med 30 grader, dessutom tål den då mekaniska påfrestningar bättre. Stryktåligheten kan utnyttjas i nya superstarka material, som dessutom blir tunna, elastiska och lätta. Satelliter, flygplan eller bilar skulle i framtiden kunna byggas av de nya kompositmaterialen.

Grafenet med sin perfekta struktur lämpar sig också för att få fram extremt känsliga detektorer som kan känna av minsta förorening, till och med en enstaka molekyl av ett ämne som fäster på grafenytan märks då.

## Den allvarsamma leken

Listan på grafenets möjliga användningsområden kan göras lång. Den febrila aktiviteten som följde på upptäckten bär nog så småningom frukter som ingen ännu drömt om. Inte ens årets pristagare.



De lät sig ledas genom slumpens labyrinter och hade turen och kunskapen att ta vara på tillfällena som bjöds – slumpen träffar som bekant bara förberedda hjärnor.

Att forskning ska vara roligt är båda överens om. De har varit parhästar en längre tid nu. Konstantin Novoselov, 36, arbetade med Andre Geim, 51, först som doktorand i Nederländerna, sedan följde han Geim till Storbritannien. Båda fick sin utbildning och startade karriären som fysiker i Ryssland. Idag är de båda professorer och bedriver sin forskning vid University of Manchester.

Lekfullheten är deras kännemärke – att utifrån de byggklossar de har till hands skapa något nytt, att ibland tillåta hjärnan vandra runt fritt och förutsättningslöst. Något lär man sig alltid, ibland blir det full pott. Som när de för sju år sedan skapade en supertejp inspirerad av geckoödlans förmåga att fästa vid de allra slätaste ytorna. Tidigare, år 1997, fick Andre Geim en groda att sväva fritt i ett magnetfält, ett fantasifullt sätt att förevisa fysikens principer. För den leviterande grodan tilldelades han 2000-årets Ig nobelpris, ett pris som ”ska få folk att skratta först och tänka efter sedan”.

Grafen har nu gjort att Andre Geim och Konstantin Novoselov har skrivit in sig i vetenskapshistorien.

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se> och på <http://nobelprize.org>. Där kan man också se presskonferensen som webb-TV. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se).

### Webbplatser

**A. K. Geims Condensed Matter Physics Group**, University of Manchester, [www.graphene.org](http://www.graphene.org)

**Kim Group**, Columbia University, <http://pico.phys.columbia.edu>

**Scientific American**, [www.scientificamerican.com](http://www.scientificamerican.com), sök på ”graphene”

### Föreläsningar (video)

**Geim, A. K.**, *Graphene, Magic of Flat Carbon*, Lancaster University, juni 2010,

[www.viddler.com/explore/lancsuniscitech/videos/21](http://www.viddler.com/explore/lancsuniscitech/videos/21)

**Eriksson, O.**, *Grafen och andra kolföreningar – nya material med märkliga egenskaper*, Lärardag i fysik, Kungl. Vetenskapsakademien, 2009-10-27,

<http://kva.episerverhotell.net/GetVideo.aspx?eventId=157&mediaId=50>

### Populärvetenskapliga artiklar

**Geim, A. K. och Kim P.** (2008) Carbon Wonderland, *Scientific American* 298(4): 90–97,

[www.condmat.physics.manchester.ac.uk/pdf/mesoscopic/news/graphene/SciAm\\_2008.pdf](http://www.condmat.physics.manchester.ac.uk/pdf/mesoscopic/news/graphene/SciAm_2008.pdf)

**Chodos, A. (red.)** (2009) Discovery of Graphene, *APS News* 18(9):2,

[www.aps.org/publications/apsnews/200910/physicshistory.cfm](http://www.aps.org/publications/apsnews/200910/physicshistory.cfm)

**Delin, A., Eriksson, O. och Falk, J.** (2010) Starkast och tunnast. *Det nya supermaterialet grafen*, *Forskning & Framsteg* 1: 21–25.

### Originalartikel

**Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V, Grigorieva, I. V. och Firsov, A. A.** (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science* 306(5696): 666–669.

---

## PRISTAGARE

### **ANDRE GEIM**

School of Physics and Astronomy  
University of Manchester  
Oxford Road  
Manchester M13 9PL  
Storbritannien

[www.condmat.physics.manchester.ac.uk/people/academic/geim](http://www.condmat.physics.manchester.ac.uk/people/academic/geim)

Holländsk medborgare. Född 1958 (51 år) i Sotji, Ryssland. Fil.dr 1987 vid Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Ryssland. Director of Manchester Centre for Mesoscience & Nanotechnology och Langworthy Professor of Physics, samt Royal Society 2010 Anniversary Research Professor, University of Manchester, Storbritannien.

### **KONSTANTIN NOVOSELOV**

School of Physics and Astronomy  
University of Manchester  
Oxford Road  
Manchester M13 9PL  
Storbritannien

[www.condmat.physics.manchester.ac.uk/people/academic/novoselov](http://www.condmat.physics.manchester.ac.uk/people/academic/novoselov)

Brittisk och rysk medborgare. Född 1974 (36 år) i Nizjnij Tagil, Ryssland. Fil.dr 2004 vid Radboud University Nijmegen, Nederländerna. Professor och Royal Society Research Fellow, University of Manchester, Storbritannien.