

# Nobelpriset i fysik 2001

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat att utdela Nobelpriset i fysik år 2001 gemensamt till

**ERIC A. CORNELL**

JILA och National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, Colorado, USA,

**WOLFGANG KETTERLE**

Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, och

**CARL E. WIEMAN**

JILA och University of Colorado, Boulder, Colorado, USA,

*"för uppnående av Bose-Einsteinkondensation i förtunnade gaser av alkaliatomer, samt för tidiga fundamentala studier av kondensatens egenskaper".*

## Nytt materietillstånd avslöjat: Bose-Einsteinkondensat

En laserstråle skiljer sig från vanligt ficklampsljus på flera sätt. I lasern har dels ljuspartiklarna samma energi, dels svänger de i takt. Att också få materia att uppföra sig på detta kontrollerade sätt har länge varit en utmaning för forskarna. Årets Nobelpristagare i fysik har lyckats; de har fått atomer att "sjunga unisont" och därmed upptäckt ett nytt materietillstånd kallat *Bose-Einsteinkondensat (BEC)*.

År 1924 gjorde den indiske fysikern Bose viktiga teoretiska beräkningar på ljuspartiklar. Han skickade sina resultat till Einstein, som utvidgade teorin till en viss typ av atomer. Einstein förutspådde att om man kylar ner en gas av sådana atomer till mycket låg temperatur skulle alla atomer plötsligt samlas i det lägsta möjliga energitillståndet. Processen liknar den när vätskedroppar bildas ur en gas och kallas därför kondensation.

Det skulle dröja 70 år innan årets Nobelpristagare år 1995 lyckades åstadkomma detta extrema materietillstånd. Cornell och Wieman fick då fram ett renodlat kondensat av ca 2 000 rubidiumatomer vid 20 nK (nanokelvin), dvs. 0,000 000 02 grader högre än den absoluta nollpunkten.

Oberoende av Cornells och Wiemans arbeten, gjorde Ketterle motsvarande experiment på natriumatomer. De kondensat han lyckades framställa innehöll fler atomer och kunde därför användas för att undersöka fenomenet närmare. Med hjälp av två separata BEC som fick expandera in i varandra kunde han få fram mycket tydliga interferensmönster, dvs. sådana mönster som bildas på en vattenyta då man kastar två stenar samti-

digt. Detta experiment visade alltså att kondensaten innehöll helt koordinerade atomer. Ketterle kunde också alstra en stråle av små "BEC-droppar" som föll på grund av tyngdkraften. Detta kan ses som en början till en "laserstråle" med materia i stället för ljus.

Användningsområden för BEC är intressanta att spekulera kring. Den nya "kontroll" av materien som denna teknik innebär kommer att medföra omvälvande tillämpningar inom bland annat precisionsmätningar och nanoteknologi.

.....  
**ERIC A. CORNELL**, 39 år, född 1961 i Palo Alto, Kalifornien (amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1990 vid MIT (Massachusetts Institute of Technology), Cambridge, Massachusetts. Forskare vid NIST (National Institute of Standards and Technology), adjungerad professor vid University of Colorado, Boulder, Colorado. <http://jilawww.colorado.edu/bec>

**WOLFGANG KETTERLE**, 43 år, född 1957 i Heidelberg, Tyskland (tysk medborgare, bor i USA). Doktorsgrad i fysik 1986 vid Ludwig-Maximilians-Universität München och Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching. Professor vid MIT (Massachusetts Institute of Technology), Cambridge, Massachusetts. [http://cua.mit.edu/ketterle\\_group](http://cua.mit.edu/ketterle_group)

**CARL E. WIEMAN**, 50 år, född 1951 i Corvallis, Oregon (amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik vid Stanford University 1977. Professor i fysik vid University of Colorado, Boulder, Colorado. <http://jilawww.colorado.edu/bec>

**Prissumma:** 10 miljoner svenska kronor, delas lika mellan pristagarna

**Mer information:** [www.nobel.se](http://www.nobel.se)

**Pressansvarig:** Eva Krutmeijer, tel. 08-673 95 95, 0709-84 66 38, [evak@kva.se](mailto:evak@kva.se)





# Nobelpriset i fysik 2001

Årets Nobelpris i fysik handlar om ett extremt materietillstånd kallat Bose-Einsteinkondensat (BEC). De tre forskare som gemensamt får priset är **ERIC A. CORNELL**, JILA och National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, Colorado, USA, **WOLFGANG KETTERLE**, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, och **CARL E. WIEMAN**, JILA och University of Colorado, Boulder, Colorado, USA. Kungl. Vetenskapsakademiens motivering är: "för uppnående av Bose-Einsteinkondensation i förtunnade gaser av alkaliatomer, samt för tidiga fundamentala studier av kondensatens egenskaper". Här ges en bakgrund och beskrivning av pristagarnas insatser.

## Nytt materietillstånd avslöjat

Materien runt omkring oss består av atomer som lyder kvantmekanikens lagar. Dessa överensstämmer vid normala temperaturer ofta med klassiska föreställningar och en gas uppför sig då ganska likt en svärm biljardbollar, som studsar mot varandra och kärlets väggar. Då temperaturen sänks och atomernas hastigheter minskar kommer dock egenskaperna att alltmer domineras av kvantmekanikens principer. Atomer roterar runt sina axlar, de har spinn, och denna rörelse beskrivs av ett spinn-kvanttal, som måste vara hel- eller halvtaligt. Partiklar som har heltaligt spinn kallas *bosoner*, medan man talar om *fermioner* om spinnet är halvtaligt. Bosoner har ett starkt "socialt" beteende och har vid låga temperaturer en gemensam strävan att samlas i ett och samma kvanttillstånd, nämligen det som har den lägsta energin. Fermionerna undviker dock varandra. De kan inte uppträda i exakt samma tillstånd, vilket leder till att även mera energirika tillstånd måste utnyttjas. Uppbyggnaden av ämnena i det periodiska systemet kan förstås utifrån att elektronerna i atomhöljerna är fermioner.

Redan år 1924 gjorde den indiske fysikern S. N. Bose en statistisk beräkning på partiklar av det slag, som sedan fått bära hans namn, bosoner, och mera specifikt ljuspartiklar, som senare fått namnet fotoner. Han kunde presentera en alternativ härledning för den av Planck tidigare funna strålningslagen. Bose sände sitt arbete till A. Einstein, som insåg dess vikt. Han översatte det till tyska och såg till att det blev publicerat. Einstein utvidgade snabbt teorin till materiella Bose-partiklar och publicerade själv inom en kort tid två arbeten, i vilka han förutsade, att då ett bestämt antal partiklar kommer tillräckligt nära varandra och rör sig tillräckligt långsamt så kommer de tillsammans alla att övergå i det lägsta energitillståndet; det vi nu kallar *Bose-Einsteinkondensation (BEC)* inträder.

Allt sedan dessa pionjärarbeten publicerades har det funnits en önskan hos fysiker att kunna åstadkomma detta nya fundamentala tillstånd av materia, som förväntats ha många intressanta och användbara egenskaper. Det tog 70 år innan årets pristagare, **E. A. Cornell**, **W. Ketterle** och **C. E. Wieman** med mycket avancerade metoder slutligen lyckades med uppgiften 1995. Detta ägde rum i gaser av alkaliatomer, där fenomenet kan studeras på ett mycket renodlat sätt. Ingenstans i universum återfinns de extrema förhållanden som BEC i förtunnade gaser representerar. Manifestationer av Bose-Einstein-kondensation har tidigare observerats i mer komplicerade system: kondensation av parade elektroner i supraledare (bortfall av allt elektriskt motstånd) och suprafluiditet (bortfall av inre friktion i vätskor). Även här erfordras låga temperaturer. Forskning inom dessa områden har belönats med flera Nobelpris. I motsats till gaser av alkaliatomer är dessa kvantmekaniska system inte enkla, eftersom kondensationsfenomenet rör blott en del av systemen, och de starka växelverknningar som är inblandade leder till att BEC-fenomenen fördunklas.



## Vågor eller partiklar?

Enligt kvantmekanikens lagar, som reglerar förhållandena i mikrokosmos, kan det som vi vanligen benämner en partikel, ibland uppträda som en våg. Detta är välkänt och utnyttjas t. ex. i elektronmikroskopet. L. de Broglie postulerade redan 1924 materievågornas existens och angav deras våglängd  $\lambda$  uttryckt i partiklarnas rörelsemängd  $p$ :

$$\lambda = h/p$$

där  $h$  är Plancks konstant. Ju långsammare partikeln rör sig desto mindre är dess rörelsemängd och desto längre de Broglie-våglängden. Enligt den kinetiska gasteorin svarar låga partikelhastigheter mot låga temperaturer. Om man kan producera en tillräckligt tät gas av kalla atomer kommer partiklarnas materievåglängder att vara av samma storleksordning som partikelavståndet. Det är just då som de olika materievågorna kan känna av varandra och samordna sina tillstånd, vilket är just Bose-Einsteinkondensation. Man säger ibland att en "superatom" uppkommer, eftersom hela komplexet beskrives av en enda vågfunktion, precis som i en enstaka atom. Man kan också tala om *koherent materia* på samma sätt som man talar om *koherent ljus* i fallet av en laser.

Gaser som kyls kondenserar i allmänhet till en vätska. Detta måste undvikas, vilket, som årets pristagare visat, låter sig göras med just alkaliatomer. För rubidium med masstalet 87,  $^{87}\text{Rb}$ , och natrium, med den enda stabila isotopen  $^{23}\text{Na}$ , vilka båda har heltaligt atomspinn, uppträder i vartdera fallet svagt repulsiva krafter mellan atomerna. Man kan visa att BEC inträder om tätheten, uttryckt som antalet atomer inom en kub med sidan  $\lambda$  överskrider 2,6. Man kan då räkna ut att atomerna för realistiska tätheter måste röra sig mycket långsamt, med hastigheter av några millimeter per sekund. Detta svarar mot temperaturer på ca 100 nK (nanokelvin), dvs. en tiondels miljontedels grad över absoluta nollpunkten. Årets pristagare lyckades med detta genom att på ett avgörande sätt utnyttja de metoder för kylning och infångning av neutrala atomer, som prisbelöntes år 1997 (S. Chu, C. Cohen-Tannoudji och W. D. Phillips).

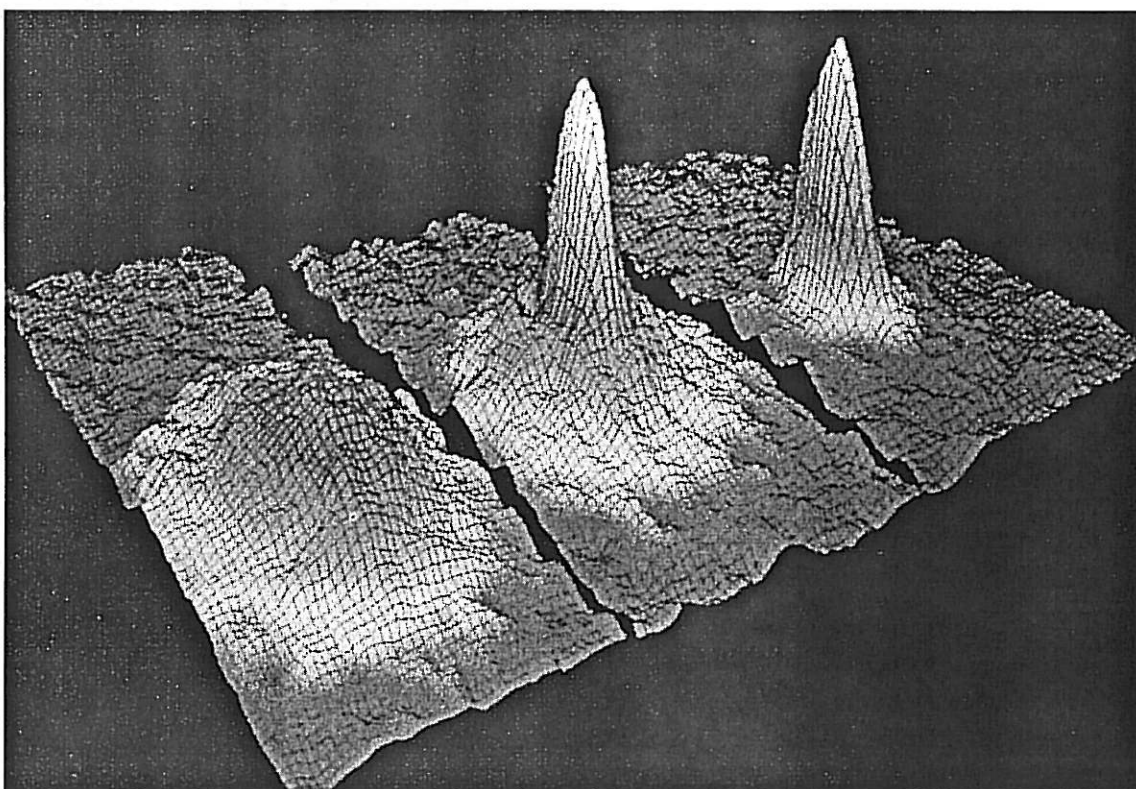
## Laser- och förångningskylning leder till BEC

Laserkylning av neutrala atomer föreslogs 1975 av T. W. Hänsch och A. L. Schawlow. Grundprincipen är att utväxla rörelsemängd mellan fotoner och atomer. Kylning erhålles om man tillser att fotonen endast kan absorberas om den träffar atomen framifrån i dess flykt. Då kommer hastigheten att nedbringas, primärt till den gräns, som sätts av den spontana emissionens slumpartade förlopp. 1997 års pristagare visade att man genom förfinade processer kan passera denna s.k. Dopplergräns och nå väsentligt lägre temperaturer. Man måste dock även hålla samman molnet av kyllda atomer, och detta kan ske i atomfällor, som oftast arbetar med en kombination av laserstrålar och magnetfält. Särskilt viktig har den s.k. magneto-optiska fällan (MOT; Magneto Optical Trap) blivit. Flera grupper har utnyttjat tekniken för att närma sig BEC-förhållanden. Det visade sig dock nödvändigt att applicera ytterligare en kylningsteknik, förångningskylning, som utnyttjats i D. Kleppners och T. J. Greytaks grupp vid MIT. Härvid kyls mediet genom att man ser till att de snabbaste atomerna ger sig iväg ur gemenskapen. Då blir medeltemperaturen bland de kvarvarande lägre. På liknande sätt kyls även innehållet i en kaffekopp! I en atomfälla hålls atomerna på plats av magnetiska dipolkrafter. Den attraktiva kraften kan vändas i repulsion om de atomära magnetpolerna kastas om. Detta kan åstadkommas genom ett radiofrekvent fält, en effektiv metod som föreslagits av D. E. Pritchard vid MIT. De snabbaste atomerna i fällan rör sig högt upp på potentialgropens kant, där magnetfältet och därmed övergångsfrekvensen för polomkastning är hög. Genom att börja med att lägga på en hög frekvens och sedan gradvis sänka den kan man

successivt skumma av de "varma" atomerna. På detta sätt lyckades JILA\*-gruppen, ledd av Cornell och Wieman, att i juni 1995 för första gången nå kondensationsgränsen i  $^{87}\text{Rb}$ . En sista svårighet att övervinna var att undvika atomförlusten i fällans centrum, där magnetfältet är noll och spontana polomkastningar kan ske. Genom att tillräckligt snabbt rotera ett magnetfält över provet kunde man förhindra atomerna att rinna ur fällan.

Det var Wieman som omkring år 1990 drog upp riktlinjerna för hur BEC i alkaliatomer skulle kunna uppnås. Viktiga aspekter var laserkyllning i en MOT och överföring till en rent magnetisk fälla där förångningskyllning sedan kunde ske. Cornell anställdes av Wieman för att arbeta på projektet först som "postdoc", men snart med fast anställning vid NIST. I JILA-experimenten, vars spektakulära resultat illustreras i figur 1, inleddes processen vid en temperatur av ca 170 nK och genom att effektivisera förångningskyllningen ytterligare kunde man nå ett renodlat kondensat med en temperatur av 20 nK. Ca 2 000 atomer fanns då kvar i provet. Bilderna i figuren kunde åstadkommas genom att de sammanhållande krafterna i fällan plötsligt kopplades bort, varvid molnet expanderar, långsammare och långsammare ju kallare atomerna är. En skuggavbildning av molnet utnyttjande resonant laserljus gjordes efter en bestämd fördröjningstid och ur storleken som molnet hunnit uppnå på denna tid beräknades temperaturen. Figuren visar atomfördelningar framräknade ur skuggbilder.

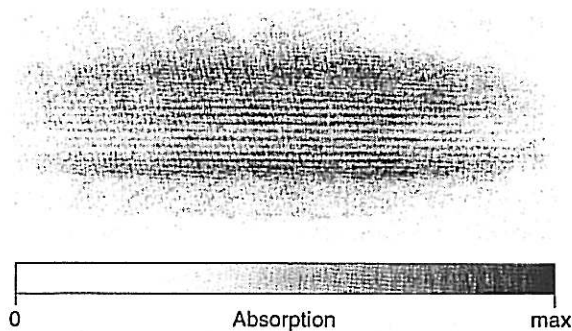
Ketterle arbetade oberoende av Colorado-gruppen och använde natriumatomer, som absorberar och utsänder gult ljus. Han kom 1990 från Tyskland som postdoc till D. Pritchards



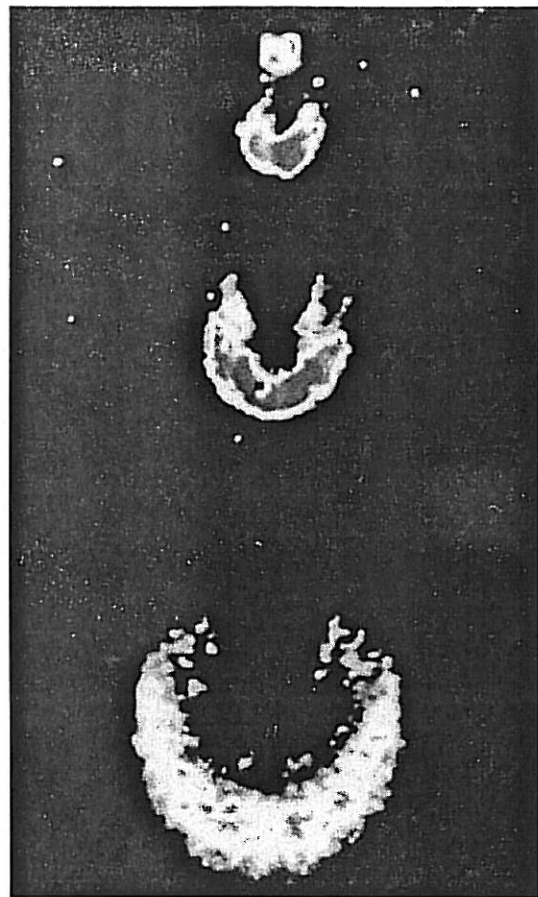
Figur 1. Successivt inträdande av Bose-Einsteinkondensation i rubidium. Bilden visar, från vänster till höger, fördelningen av atomer i molnen just före kondensation, vid kondensationens början och efter full kondensation. Höga toppar motsvarar många atomer. Skuggbilder av det expanderande atommolnet har registrerats 6 ms efter det att atomfällans sammanhållande krafter kopplats bort.

\* JILA är ett gemensamt forskningsinstitut för NIST (National Institute of Standards and Technology) och University of Colorado, som tidigare benämndes Joint Institute for Laboratory Astrophysics. Numera används endast förkortningen JILA.

grupp vid MIT och blev 1993 huvudansvarig för BEC-projektet. Ketterle löste problemet med atomförluster i fällans mitt genom att där fokusera en stark laserstråle, som höll atomerna borta från förluströmdet. Bara fyra månader efter JILA-gruppens första artikel kunde Ketterle publicera sina BEC-resultat för natrium. Han kunde uppvisa registreringar liknande de som visas i figur 1, men nu med några hundra gånger fler atomer i kondensatet. Därigenom kunde man snabbt utföra även mycket spektakulära mätningar av kondensatets egenskaper. Man visade t.ex. att två separata kondensat, som får expandera in i varandra, uppvisar mycket tydliga interferenseffekter (figur 2), vilka visade materievågornas koherens och korrelationer över större avstånd. Ketterle kunde även demonstrera hur delar av kondensatet genom radiofrekvenspulser successivt kunde kopplas ut i "BEC-droppar", som faller i tyngdkraftsfältet (figur 3). Fenomenet har beskrivits som en atomlaser av koherent materia.



Figur 2. Interferensmönster mellan två överlappande Bose-Einsteinkondensat av natriumatomer. Avbildningen är gjord i absorption. Materievågsinterferensen har en periodicitet av 15 mikrometer. Registreringen visar att atomerna i de två kondensaten är helt koordinerade.



Figur 3. Upprepad losskoppling ur fällan av delar av ett Bose-Einsteinkondensat bestående av natriumatomer. Pulser av koherent materia faller i tyngdkraftsfältet - fenomenet kan ses som atomlaserverkan. Bildens verkliga storlek är 2,5 mm X 5 mm.

### BEC-fältet utvecklas explosionsartat

Efter de mycket spektakulära demonstrationerna av BEC i rubidium och natrium utförda av JILA- och MIT-grupperna har en explosionsartad utveckling av fältet skett, och över 20 grupper utför nu experiment med BEC. Speciellt skall forskningen i R.G. Hulets grupp vid Rice University nämnas. Man har där arbetat med litiumisotopen  $^7\text{Li}$ , för vilken attraktiva krafter uppträder när två atomer närmar sig varandra, i motsats till fallet för  $^{87}\text{Rb}$  och  $^{23}\text{Na}$ . Gruppen kunde i en publikation 1997 klart visa att ett litet kondensat om ca 1000 atomer kunde erhållas, precis såsom förutses av teorin. Att molnet inte kollapsar i molekyllaggregation under inverkan av de attraktiva krafterna beror på atomernas energifluktuationer i fällan.

Trots att ett mycket stort antal grupper engagerat sig inom fältet har Cornells, Wiemans och Ketterles grupper fortsatt att vara de ledande, och en mängd intressanta nya resultat har

presenterats. JILA-gruppen har således studerat t. ex. kollektiva excitationer och virvelbildningar i kondensat. Ketterles grupp har utvecklat en förbättrad avbildningsmetod för kondensatet, som lämnas opåverkat av mätningen så att denna kan göras upprepade gånger. Man har även observerat magnetfältsberoende resonanser i atomernas inbördes kraftverkan, och dessa påverkar kraftigt kondensatets egenskaper. Vidare har gruppen demonstrerat att en atomlaserstråle kan förstärkas i analogi med en laserstråle. W. D. Phillips grupp vid NIST i Maryland hör också till dem som presenterat fundamentala resultat och bl. a. visat motsvarigheten till den icke-linjära optikens fyrvågsblandning utnyttjande materievågor.

Det experimentella sökandet efter BEC i förtunnade gaser startade tidigt utnyttjande spinn-polariserat väte i Kleppner och Greytaks grupp vid MIT, men det visade sig mycket svårt att uppnå de korrekta förhållandena. Slutligen kunde man dock, mer än tre år efter JILA-gruppens första artikel, publicera BEC-resultat i väte. D. Kleppner har betytt mycket, bl. a. som inspirationskälla, i kapplöpningen mot BEC. BEC har nyligen utvidgats till ytterligare atomslag genom två grupper i Paris, som rapporterat kondensation i metastabila heliumatomer.

## Utblick

Bose-Einsteinkondensation i förtunnade gaser erbjuder synnerligen rika möjligheter till studier av fundamentala kvantmekaniska processer. En mycket omfattande forskningsaktivitet, såväl experimentell som teoretisk, försiggår inom fältet, inkluderande studier av icke-linjära processer och manipulation av ljusutbredningshastigheten. Inflytandet på andra forskningsområden är även stort. Nyligen har JILA-gruppen för  $^{85}\text{Rb}$  demonstrerat möjligheten att med hjälp av de ovan nämnda resonanserna snabbt slå om mellan attraktiva och repulsiva atomkrafter, vilket leder till en supernovaliknande upplösning av kondensatet ("Bose-nova"). Studier av de med BEC relaterade fenomenen för fermioner vid ytterst låga temperaturer genom D. Jin och medarbetare vid JILA ger nya aspekter på de statistiska förhållandena i fysikaliska system, och visar på möjligheterna att i framtiden observera atomär parbildning och supravätskeegenskaper. R. G. Hulets grupp har visat att ett tryck utåt på grund av fermionernas repulsiva natur uppkommer i en degenererad Fermigas av atomer och att förhållanden liknande dem i vita dvärgstjärnor kan simuleras.

BEC-fenomenet i gaser kommer att kunna utnyttjas i olika precisionsmätningar av fundamentala naturfenomen där såväl skarpa resonanser hos väsentligen stillastående atomer som skarpa materiella interferensfransar kan utnyttjas. Omvälvande tillämpningar av BEC inom litografi, nanoteknologi och holografi synes även stå för dörren.

## LÄSTIPS

Länk med pedagogiska animationer, frågor och svar etc.: [www.colorado.edu/physics/2000/bec](http://www.colorado.edu/physics/2000/bec)  
Pristagarnas webbplats, se nedan.

*Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2001*, The Royal Swedish Academy of Sciences  
Internet: <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/phyadv.pdf>

*The Bose-Einstein Condensate* by E.A. Cornell and C.E. Wieman, *Scientific American*, March 1998, p. 26.

*Bose-Einstein Condensation* by Ch. Townsend, W. Ketterle and S. Stringari, *Physics World*, March 1997, p. 29.

*Experimental Studies of Bose-Einstein Condensation* by D.S. Durfee and W. Ketterle, *Optics Express* Vol. 2, p. 299, 1998, also available on Internet <http://epubs.osa.org/opticsexpress> (with animations)

*Bose-Einstein Condensation*, edited by A. Griffin, D.W. Snoke and A. Stringari, Cambridge University Press, 1995.  
Kylning och infångning av neutrala atomer med hjälp av laserljus, av S. Svanberg, *KOSMOS* 1998, sid. 7.

.....

## PRISTAGARNA

### **ERIC A. CORNELL**

JILA  
University of Colorado  
Campus, Box 440  
Boulder  
Colorado 80309-0440  
USA  
<http://jilawww.colorado.edu/bec/>

Master of Science, Stanford University, 1985. Doktor i fysik vid MIT 1990. Forskare vid NIST (National Institute of Standards and Technology), Boulder, sedan 1992. Adjungerad professor vid fysikinstitutionen, University of Colorado, Boulder, sedan 1995.

### **WOLFGANG KETTERLE**

MIT  
Room 26-243  
77 Massachusetts Avenue  
Cambridge  
Massachusetts 02139-4307  
USA  
[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group](http://cua.mit.edu/ketterle_group)

Diplomphysiker, Technische Universität, München, 1982. Doktor i fysik vid Ludwig-Maximilians-Universität, München och Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, 1986. Vid MIT sedan 1990, professor sedan 1997.

### **CARL E. WIEMAN**

JILA and Department of Physics  
University of Colorado  
Campus, Box 440  
Boulder  
Colorado 80309-0440  
USA  
<http://jilawww.colorado.edu/bec/>

Doktorsgrad från Stanford University, 1977. Professor i fysik, University of Colorado, Boulder, sedan 1987.