

Nobelpriset i fysik 2003

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela 2003 års Nobelpris i fysik
 "för banbrytande insatser inom teorin för supraledare och supravätskor"
 gemensamt till

ALEXEI A. ABRIKOSOV

Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA,

VITALY L. GINZBURG

P.N. Lebedev Physical Institute, Moskva, Ryssland, och

ANTHONY J. LEGGETT

University of Illinois, Urbana, Illinois, USA.

Flöde utan motstånd

Årets Nobelpris i fysik belönar tre forskare som gjort avgörande insatser kring två kvantfysikaliska fenomen: supraledning och suprafluiditet. Supraledande material används t.ex. till magnetkameror för medicinska undersökningar och partikelacceleratorer inom fysiken. Kunskapen om supraflytande vätskor kan ge oss fördjupade insikter om hur materien uppträder i sina lägsta och mest ordnade energitillstånd.

Vid låga temperaturer (några grader ovanför den absoluta nollpunkten) låter vissa metaller elektrisk ström passera utan motstånd. Sådana supraledande material har dessutom egenskapen att de tränger ut magnetiska flöden helt eller delvis. De som tränger ut de magnetiska flödena fullständigt kallas typ I-supraledare och en teori för dem belönades med Nobelpris i fysik 1972. Teorin, vilken bygger på att elektronpar bildas, visade sig dock otillräcklig för att förklara supraledning i de tekniskt mest viktiga materialen. Dessa s.k. typ II-supraledare tillåter supraledning och magnetism att samexistera och förblir supraledande vid höga magnetfält. **Alexei Abrikosov** lyckades teoretiskt förklara detta fenomen. Han utgick från en teori som hade utformats för typ I-supraledare av bl.a. **Vitaly Ginzburg**, men som visade sig så omfattande att den också gick att tillämpa på den nya typen. Trots att teorierna formulerades redan under 50-talet har de fått förnyad aktualitet i och med den snabba utvecklingen av material med helt nya egenskaper. Nu kan materialen göras supraledande vid allt högre temperaturer och starkare magnetfält.

Flytande helium kan bli supraflytande, dvs. viskositeten upphör vid låga temperaturer. Atomerna av den sällsynta isotopen ^3He måste bilda par, likt elektronparen i metalliska supraledare. Det var **Anthony Leggett** som under 70-talet formulerade teorin som förklarar hur ^3He -atomerna växelverkar och ordnas i det supraflytande tillståndet. Nyligen utförda modellstudier visar hur denna ordning övergår i kaos eller turbulens. Detta är ett av den klassiska fysikens olösta problem.

ALEXEI A. ABRIKOSOV, född 1928 (75 år) i Moskva, dåvarande Sovjetunionen (rysk och amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1951 vid Institute for Physical Problems, Moskva. Distinguished Argonne Scientist, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA.
www.msdl.anl.gov/groups/cmt/people/abrikosov.html

VITALY L. GINZBURG, född 1916 (87 år) i Moskva, Ryssland (rysk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1940 vid Universitetet i Moskva. Tidigare ledare för teorigruppen på P.N. Lebedev Physical Institute, Moskva, Ryssland.
www.tamm.lpi.ru/staff/ginzburg.html

ANTHONY J. LEGGETT, född 1938 (65 år) i London, Storbritannien (brittisk och amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1964 vid University of Oxford. Innehavare av MacArthur-professuren vid University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
www.physics.uiuc.edu/People/Faculty/profiles/Leggett

Prissumma: 10 miljoner svenska kronor, som delas lika mellan pristagarna.

Mer information: www.kva.se och www.nobel.se

Kontaktpersoner: Jonas Förare, vetenskapsredaktör, tel. 08-673 95 44, 0703-27 72 00, jonas@kva.se och Eva Krutmeijer, informationschef, tel. 08-673 95 95, 0709-84 66 38, evak@kva.se



Nobelpriset i fysik 2003

Den kvantfysik som styr mikrovärlden uppvisar en hel rad spektakulära effekter som normalt inte förekommer i vår vanliga makrovärld. Det finns dock vissa situationer där kvantfenomen blir synliga. Årets Nobelpris i fysik belönar arbeten rörande två av dessa: supraledning och suprafluiditet. **ALEXEI ABRIKOSOV** och **VITALY GINZBURG** har utvecklat teorier för supraledning och **ANTHONY LEGGETT** har förklarat en typ av suprafluiditet. Både supraledning och suprafluiditet är fenomen som uppträder vid mycket låga temperaturer.

Flöde utan motstånd

En oväntad köldeffekt

När elektricitetens natur började undersökas närmare på 1800-talet stod det klart att metaller och vissa legeringar leder ström genom att elektroner förflyttas mellan atomerna. Det ordnade sätt på vilket elektronerna vandrar leder dock till att atomerna bringas i rörelse och värme alstras. Vid alltför höga strömstyrkor kan värmen bli så stark att ledaren smälter. Dessutom upptäckte man att en elektrisk ström genom en ledare alstrar ett magnetfält, vilket i sin tur genererar ström i motsatt riktning. Elektricitet och magnetism samspelar och kan alltså motverka varandra.

Den holländske fysikern Heike Kammerlingh Onnes gjorde 1911 en märklig upptäckt. Han intresserade sig särskilt för ämnets egenskaper vid låga temperaturer och hade bl.a. lyckats framställa flytande helium med ytterst låg temperatur. När Onnes undersökte den elektriska ledningsförmågan hos kvicksilver visade det sig att när metallen kylde med hjälp av flytande helium till några grader ovanför den absoluta nollpunkten, försvann dess elektriska motstånd. Han gav det namnet *supraledning*. Trots att ingen teoretiskt kunde förklara fenomenet anade man att kunskapen kunde få vidsträckt betydelse i det framväxande och allt mer elektricitetsberoende moderna samhället. Onnes belönades med 1913 års Nobelpris i fysik för sina insatser.

Supraledare av två typer

Det skulle dröja nästan 50 år innan fysikerna John Bardeen, Leon Cooper och Robert Schrieffer (Nobelpris i fysik 1972) kunde presentera en teori (BCS-teorin, byggt på efternamnens initialer) som förklarade fenomenet. Teorin visar att en del av de negativt laddade elektronerna i en supraledare bildar par, s.k. Cooper-par. Dessa elektronpar löper längs attraherande kanaler bildade av de positivt laddade metallatomernas regelbundna struktur i materialet. Genom denna parvisa sammanhållning och interaktion kan strömningen ske jämnt och supraledning uppstå. Man brukar uppfatta de parade elektronerna som ett kondensat, i likhet med vätskedroppar som bildas i en nedkyld gas. Till skillnad från en vanlig vätska är denna "elektronvätska" supraflytande.

Sådana supraledare benämns "typ I". De är metaller och kännetecknas av den s.k. "Meissner-effekten", dvs. att de i supraledande tillstånd aktivt motverkar ett omgivande magnetfält, så länge dettas styrka inte överskrider en viss gräns (fig. 1). Om det omgivande magnetfältet blir för starkt, försvinner den supraledande förmågan.

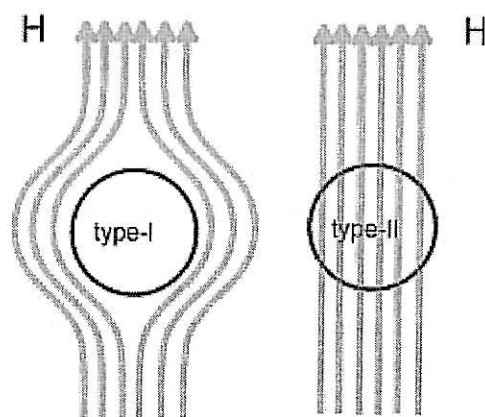


Fig. 1. Supraledare av typ I stöter ut magnetfält (Meissnereffekten). Ökar magnetfältet i styrka förlorar de sin supraledande förmåga. Detta gäller inte supraledare av typ II, vilka klarar av starka magnetfält genom att magnetfältet släpps in.

Men det är känt att det finns supraledare som saknar eller bara uppvisar partiell Meissner-effekt. Det rör sig i allmänhet om legeringar av olika metaller eller föreningar bestående av ickemetaller och koppar. Dessa behåller alltså sin supraledande förmåga även i starka magnetfält. Försöksresultat visar att egenskaperna hos sådana s.k. typ II-supraledare inte kan beskrivas med hjälp av BCS-teorin.

ALEXEI ABRIKOSOV, som arbetade vid Kapitsainstitutet för fysikaliska problem i Moskva, lyckades formulera en ny teori som beskrev fenomenet. Han utgick från en beskrivning av supraledning, i vilken man tar hänsyn till tätheten hos det supraledande kondensatet med hjälp av en ordningsparameter (en vågfunktion). Abrikosov kunde matematiskt visa hur ordningsparametern kan beskriva virvlar och det yttre magnetfältet tränga in i materialet längs kanaler i sådana virvlar (fig. 2).

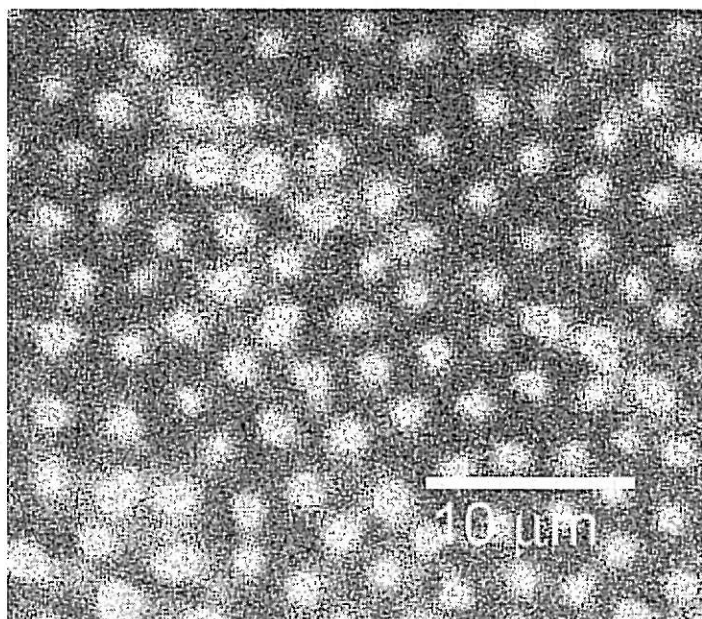


Fig. 2. Bilden visar ett så kallat Abrikosovgitter av virvlar i elektronvätskan i en supraledare typ II. Det är genom virvlarna som magnetfältet går.

Abrikosov kunde dessutom förutsäga i detalj hur antalet virvlar kan växa med ökande magnetfält och hur den supraledande förmågan hos ämnet går förlorad om virvlarnas kärnor överlappar varandra. Beskrivningen innebar ett genombrott för studiet av nya supraledande material och används allmänt i utvecklandet och analysen av nya supraledare och magneter. Uppsatserna från slutet av 1950-talet har citerats allt flitigare de senaste tio åren.

Den teori som Abrikosovs resonemang utgick från formulerades i början av 1950-talet av **VITALY GINZBURG** och Lev Landau (den senare fick Nobelpris i fysik 1962 för andra arbeten, se nedan). Teorin var tänkt att beskriva supraledning och kritiska magnetfältstyrkor hos vid den tiden kända supraledare. Ginzburg och Landau insåg att en ordningsparameter (vågfunktion), som beskrev det supraledande kondensatets täthet i strukturen, måste införas för att samspelet mellan supraledning och magnetism skulle kunna klarläggas. När denna parameter infördes visade det sig att det fanns en brytpunkt då en karaktäristisk storhet antog värdet $1/\sqrt{2}$ (ungefär 0,71) och att det alltså i princip finns två typer av supraledare. För kvicksilver har storheten ett värde på ca. 0,16 och andra då kända supraledare har värden i närheten av detta. Det fanns därför vid den tiden ingen anledning att beakta värden ovanför brytpunkten. Abrikosov kunde knyta ihop teorin genom att visa att supraledare av typ II representerade just sådana värden.

Kunskapen om supraledning har lett till revolutionerande tillämpningar (fig. 3). Nya föreningar med supraledande egenskaper hittas fortlöpande. De senaste decennierna har ett stort antal s.k. högttemperatursupraledare tagits fram. Den första tillverkades av Georg Bednorz och Alex Müller, som belönades med 1987 års Nobelpris i fysik. Alla högttemperatursupraledare är av typ II. Kylningen är en kritisk faktor för supraledarens användbarhet. En viktig gräns går vid 77 K (-196 °C), kokpunkten för flytande kväve, billigare och mer lätthanterligt än flytande helium.

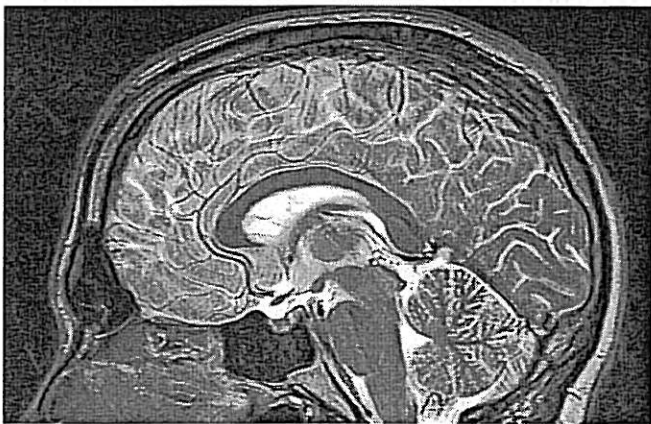


Fig. 3. MRI-bild av en människohjärna. Upplösningen i magnetkameran beror bl.a. av magnetfältets styrka. I dag används starka supraledande magneter som alla är av typ II.

Två fascinerande supravätskor

Den lättaste ädelgasen helium finns i naturen i två former, två isotoper. Den vanliga formen betecknas ^4He , där siffran 4 står för antalet nukleoner i atomkärnan (två protoner och två neutroner). I den ovanliga formen, ^3He , har atomkärnan bara en neutron och den är alltså lättare. I naturligt förekommande helium dominerar den tyngre isotopen över den lättare med en faktor på cirka 10 miljoner. Det är därför först under de senaste 50 åren som man lyckats framställa större mängder ^3He , t.ex. vid kärnkraftverk. Vid normal temperatur skiljer sig de två isotopernas gaser egentligen bara genom sin atomvikt.

Kyler man heliumgas till låga temperaturer, cirka 4 grader över absoluta nollpunkten (-273,15 °C) övergår gasen i vätskeform, den kondenserar. Detta sker på samma sätt som när

vattenånga kondenserar till vatten. Om inte temperaturen är alltför låg har de två isotopernas vätskor liknande egenskaper. Flytande helium har stor användning som kylvätska, till exempel i supraledande magneter. Då används förstås naturligt förekommande helium, det vill säga mest den vanliga och billigare formen av helium, ^4He .

Kyler man nu flytande helium till ännu lägre temperaturer uppstår dramatiska skillnader mellan de två isotopernas vätskor. Då uppträder nämligen kvantfysikaliska effekter vilka gör att vätskorna bland annat förlorar allt sitt motstånd mot inre rörelse, de blir supraflytande. Detta inträffar vid helt olika temperaturer för de två supravätskorna och de uppvisar en hel rad fascinerande egenskaper, t.ex. rinner de fritt ut ur öppningar i de kärl de förvaras i. Effekterna kan bara förklaras med hjälp av kvantfysik.

Historiska upptäckter

Att ^4He blir supraflytande upptäcktes av bl.a. Pyotr Kapitsa redan i slutet av 1930-talet. Fenomenet förklarades nästan omedelbart av den unge teoretikern Lev Landau, som för detta erhöll Nobelpris i fysik 1962. (Kapitsa blev också Nobelpristagare i fysik, men inte förrän 1978.) Övergången från normal vätska till supraflytande vätska, som för ^4He sker cirka 2 grader över absoluta nollpunkten, är ett exempel på en s.k. Bose-Einsteinkondensation, en process som på senare tid också observerats i gaser (jfr Nobelpriset i fysik 2001 till Eric Cornell, Wolfgang Ketterle och Carl Wieman).

För isotopen ^3He upptäcktes övergången till det supraflytande tillståndet först i början av 1970-talet av David Lee, Douglas Osheroff och Robert Richardson (Nobelpris i fysik 1996). En anledning till att upptäckten kom så mycket senare är att övergången sker vid mycket lägre temperatur, cirka 1 000 gånger lägre än för ^4He . Även om ^3He ur kvantfysikalisk synpunkt skiljer sig från ^4He och inte direkt kan genomgå en Bose-Einsteinkondensation var upptäckten inte oväntad. Genom den mikroskopiska teori för supraledning som gavs på 1950-talet (se ovan) av Bardeen, Cooper och Schrieffer fanns en mekanism, bildandet av Cooper-par, som borde kunna efterliknas även i ^3He (fig. 4).

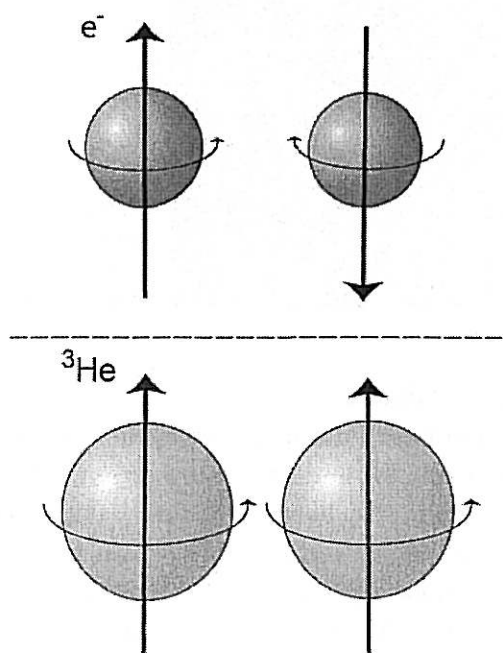


Fig. 4. Den parbildning som sker i supraflytande ^3He skiljer sig från den som sker mellan elektronerna i en supraledare (Cooper-par). Heliumatomernas magnetiska egenskaper samverkar, medan elektronernas motverkar varandra.

Den mångformiga supravätskan

Den teoretiker som först på ett avgörande sätt lyckades förklara den nya supravätskans egenskaper var **ANTHONY LEGGETT**, som under 1970-talet arbetade vid universitetet i Sussex i England. Hans teori hjälpte experimentalisterna att tolka sina mätresultat och gav en ramverk för ett systematiskt klarläggande. Leggetts teori, som först formulerades för supraflytande ^3He , har också kommit till användning inom andra områden, t.ex. partikelfysik och kosmologi.

Genom att supraflytande ^3He består av par av atomer blir dess egenskaper mycket mer komplicerade än för supravätskan ^4He . Speciellt har supravätskans atomer magnetiska egenskaper vilka leder till att vätskan är anisotrop, den har olika egenskaper i olika riktningar. Detta utnyttjades i de experiment i vilka man började studera vätskan omedelbart efter upptäckten. Genom de magnetiska mätningarna påvisades att supravätskan har mycket komplicerade egenskaper och uppvisar en blandning av tre olika så kallade faser. De tre faserna har olika egenskaper och proportionerna i blandningen är beroende av temperatur, tryck och yttre magnetfält (fig. 5).

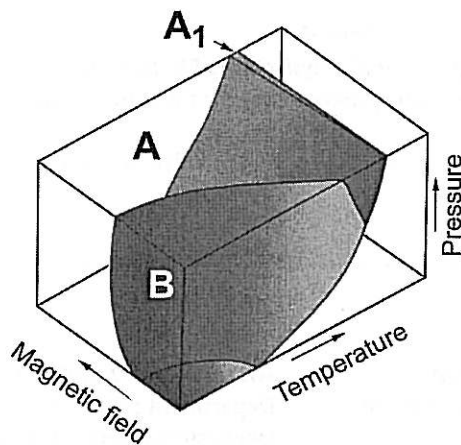


Fig. 5. Supraflytande ^3He kan existera i tre faser benämnda A, A₁ och B. Typen av fas avgörs av, tryck, temperatur och magnetfält enligt figurens s.k. fasdiagram.

Supraflytande ^3He utgör ett redskap som forskarna kan använda i laboratoriet även för att studera andra fenomen. Speciellt har virvelbildningar i supravätskan nyligen använts för att studera hur ordning kan övergå i kaos (fig. 6). Den forskningen kan leda till ökad förståelse av hur turbulens uppstår – ett av den klassiska fysikens sista olösta problem.

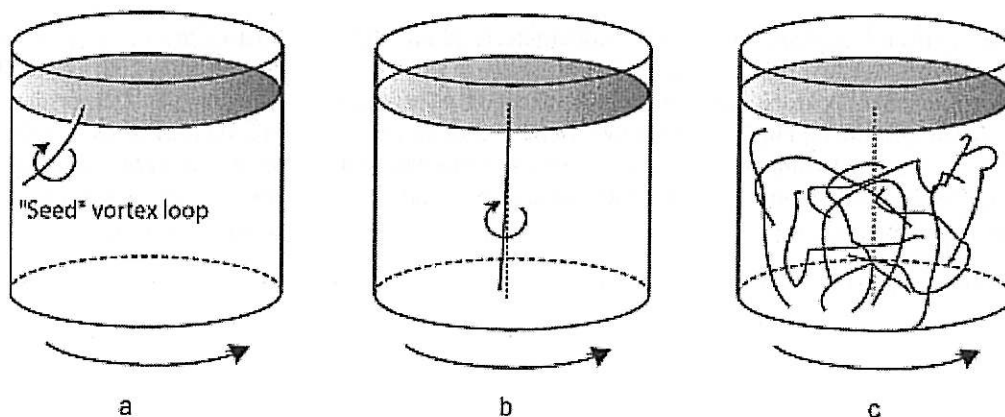


Fig. 6. Det har nyligen visats att om en virvel skapas i en roterande behållare supraflytande ^3He (a) kan resultatet kritiskt bero av temperaturen. Över en kritisk temperatur lägger sig virveln längs rotationsaxeln (b). Under den kritiska temperaturen uppstår ett virrvarr av virvlar (c).

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2003. The Royal Swedish Academy of Sciences:
www.nobel.se/physics/laureates/2003/phyadv03.pdf

Supraledning (på svenska från Chalmers Tekniska högskola):
<http://fy.chalmers.se/tp/F1projekt/1999/Supraledning/Supraledning.html>

Utveckling av partikelacceleratorer vid CERN (med filmer):
<http://acqtstreamer.cern.ch/index.html>

MRI, magnetkamerabilder:
<http://www.scottcamazine.com/photos/brain/>

Rose, J. (1996). "Universum i en droppe", *Forskning och Framsteg* nr 8/96, s. 42–43.

"Kryofysik", Svenska Fysikersamfundets årsbok KOSMOS 1988, band 65: 1988 (flera artiklar om supraledning och supravätskor).

Bishop, D. J., Gammel, P. L. och Huse, D. A. (1993). "Resistance in High-Temperature Superconductors", *Scientific American*, volym 268, s. 24–31.

Pickett, G. (2003). "Suddenly it's chaos", *Nature*, volym 424, sid. 1002–1003.

Abrikosov, Alexei A. (2001), "Die Entdeckung der Typ-II-Supraleitung", *Physikalische Blätter*, s. 61.

Ginzburg, V.L. (1992), "Research on superconductivity (brief history and outlook for the future)", *Superconductivity*, s. 1.

Leggett, A.J. (1995), "Superfluids and Superconductors", *Twentieth Century Physics*, volym II, red. Brown, L.M., Pais, A. och Pippard, B., IOP Publishing, s. 913.

PRISTAGARNA

ALEXEI A. ABRIKOSOV

Materials Science Division
Argonne National Laboratory
Bldg. 223 Room B-229
9700 South Cass Ave.
Argonne, IL 60439
USA

www.msd.anl.gov/groups/cmt/people/abrikosov.html

Rysk och amerikansk medborgare. Född 1928 (75 år) i Moskva, dåvarande Sovjetunionen. Doktorsgrad i fysik 1951 vid Institute for Physical Problems, Moskva. Distinguished Argonne Scientist, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA.

VITALY L. GINZBURG

P.N. Lebedev Physics Institute
Leninskii Pr. 53
117924 Moskva
Ryssland

www.tamm.lpi.ru/staff/ginzburg.html

Rysk medborgare. Född 1916 (87 år) i Moskva, Ryssland. Doktorsgrad i fysik 1940 vid Universitetet i Moskva. Tidigare chef för teori-gruppen på P.N. Lebedev Physical Institute, Moskva, Ryssland.

ANTHONY J. LEGGETT

Department of Physics
University of Illinois at Urbana-Champaign
1110 West Green Street
Urbana, IL 61801-3080
USA

www.physics.uiuc.edu/People/Faculty/profiles/Leggett

Brittisk och amerikansk medborgare. Född 1938 (65 år) i London, Storbritannien. Doktorsgrad i fysik 1964 vid University of Oxford. Innehavare av MacArthur-professuren vid University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.